



วอเตอร์พุตพรีนธ์ของข้าวนาสวน (*Oryza sativa* L.) และข้าวโพด
(*Zea mays* L.) ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง
อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน

โดย

นายวีรฉัตร ฉัตรปัญญาเจริญ

ดุขฎีนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปรัชญาดุขฎีบัณฑิต (การจัดการสิ่งแวดลอม)
ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดลอม
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

วอเตอร์พุตพรีนซ์ของข้าวนาสวัน (*Oryza sativa* L.) และข้าวโพด
(*Zea mays* L.) ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง
อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน

โดย

นายวีรฉัตร ฉัตรปัญญาเจริญ



คุณูปนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (การจัดการสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



The Water Footprint of Paddy Rice (*Oryza sativa* L.) and Maize
(*Zea mays* L.) in Lower Huay Nam Yao 1 Sub Watershed
Tha Wang Pha District, Nan Province

BY

MR. WERACHAT CHATPANYACHAROEN



A DISSERTATION SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY (ENVIRONMENTAL MANAGEMENT)
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL SCIENCE
FACULTY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2015
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ดุษฎีนิพนธ์

ของ

นายวีรฉัตร ฉัตรปัญญาเจริญ

เรื่อง

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวน (*Oryza sativa* L.) และข้าวโพด (*Zea mays* L.) ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย
ห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (การจัดการสิ่งแวดล้อม)

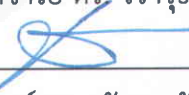
เมื่อ วันที่ 29 เมษายน พ.ศ. 2559

ประธานกรรมการสอบดุษฎีนิพนธ์



(รองศาสตราจารย์ ดร. วราวุธ เสือดี)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาดุษฎีนิพนธ์หลัก



(รองศาสตราจารย์ ดร. ญัณฐา หังสพฤกษ์)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาดุษฎีนิพนธ์ร่วม



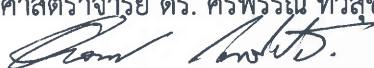
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต อนุรักษ์)

กรรมการสอบดุษฎีนิพนธ์



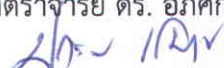
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริพรรณ ทวีสุข)

กรรมการสอบดุษฎีนิพนธ์



(รองศาสตราจารย์ ดร. อภิศักดิ์ โพธิ์ปิ่น)

คณบดี



(รองศาสตราจารย์ ปกรณ์ เสริมสุข)

หัวข้อคุณสมบัติ	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวน (<i>Oryza sativa</i> L.) และข้าวโพด (<i>Zea mays</i> L.) ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน
ชื่อผู้เขียน	นายวีรณัฏฐ์ ฉัตรปัญญาเจริญ
ชื่อปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	การจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาคุณสมบัติ	รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฏฐา หังสพฤกษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาคุณสมบัติร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต อนุรักษ์
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

การศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนและข้าวโพด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน มีวัตถุประสงค์เพื่อหาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนและข้าวโพดในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน และเปรียบเทียบวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนและข้าวโพด รวมถึงเสนอแนวทางการจัดการทรัพยากรน้ำในการปลูกข้าวนาสวนและข้าวโพดจากวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ โดยแบ่งเป็น วอเตอร์ฟุตพริ้นท์รวม (WF_{total}) วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว (WF_{green}) วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน (WF_{blue}) และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา (WF_{gray}) โปรแกรมที่ใช้คำนวณการใช้น้ำของพืชจริง คือ CROPWAT 8.0, WAPF และ CWR-RID สำหรับเป็นข้อมูลคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ต่อผลผลิตเก็บเกี่ยวพบว่า วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวนาสวน CROPWAT 8.0 มีค่า WF_{total} , WF_{green} , WF_{blue} และ WF_{gray} เท่ากับ 1,638.79, 1,470.33, 167.67 และ 0.79 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ตามลำดับ WAPF มีค่าเท่ากับ 2,286.16, 1,752.23, 533.13 และ 0.79 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ตามลำดับ และ CWR-RID มีค่าเท่ากับ 1,391.92, 1,269.20, 121.93 และ 0.79 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ตามลำดับ

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวโพด CROPWAT 8.0 มีค่า WF_{total} , WF_{green} , WF_{blue} และ WF_{gray} เท่ากับ 826.56, 767.75, 57.75 และ 1.06 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ตามลำดับ และ CWR-RID มีค่าเท่ากับ 1,097.09, 991.13, 104.90 และ 1.06 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ตามลำดับ

WF จากโปรแกรมทั้ง 3 ขึ้นกับข้อมูลและวิธีการประมวลผล โดย CROPWAT 8.0 สามารถนำเข้าข้อมูลและปรับวิธีการประมวลผลได้ มีการใช้อย่างแพร่หลาย ในขณะที่ WAPF พัฒนาเฉพาะพื้นที่และนำเข้าข้อมูลได้บางส่วน CWR-RID ไม่สามารถนำเข้าข้อมูลใหม่ สำหรับ WF ข้าวของประเทศไทยมีค่า 1,485.00 - 3,592.00 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ผลการศึกษาพบว่าอยู่ในช่วงของ WF ข้าวของประเทศไทย สำหรับข้าวโพดในประเทศไทยมี WF เท่ากับ 982.00 - 1,123 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน จากผลการศึกษาพบว่าอยู่ในช่วงดังกล่าว

ปริมาณการใช้น้ำของข้าวนาสวนและข้าวโพด พบว่ามีความแตกต่างกันตามระยะเวลาของการเจริญเติบโตและยังพบว่า การปลูกข้าวนาสวน สัปดาห์ที่ 1 ถึง สัปดาห์ที่ 8 มีค่าเฉลี่ยปริมาณฝนใช้การสูงกว่าค่าเฉลี่ยปริมาณการใช้น้ำของพืช 99.29 มิลลิเมตร ขณะที่สัปดาห์ที่ 8 ถึง สัปดาห์ที่ 12 ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณฝนใช้การน้อยกว่าปริมาณน้ำที่พืชต้องการ (วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน) ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำที่พืชต้องเพิ่ม 97.83 มิลลิเมตร สำหรับการปลูกข้าวโพด ตั้งแต่ในสัปดาห์ที่ 1 ถึง สัปดาห์ที่ 7 มีค่าเฉลี่ยปริมาณฝนใช้การสูงกว่าค่าเฉลี่ยปริมาณการใช้น้ำของพืช 143.00 มิลลิเมตร หลังจากนั้นปริมาณฝนใช้การจะลดน้อยกว่าปริมาณน้ำที่พืชต้องการ (วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน) ใน สัปดาห์ที่ 8 ถึง สัปดาห์ที่ 13 แต่พืชต้องการน้ำเพิ่มเฉลี่ย 30.68 มิลลิเมตร ดังนั้นต้องมีการเก็บน้ำไว้ในดินให้อยู่ในรูปของความชื้นซึ่งมีหลายวิธีตั้งแต่ก่อนการเพาะปลูก เช่น ลดการเผาตอซัง โดยใช้วิธีการไถกลบ ตอซัง 15 วันก่อนการเพาะปลูกเพื่อเป็นการเพิ่มอินทรีย์วัตถุให้กับดิน วิธีดังกล่าวเกษตรกรปลูกข้าวนาสวนและข้าวโพดสามารถนำไปใช้ได้ก่อนการเพาะปลูก และจากการศึกษายังพบว่าคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีของพื้นที่ปลูกข้าวนาสวนและข้าวโพด พบว่าปริมาณฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสสูงในระยะที่ 2 คือระยะการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์ ดังนั้น เพื่อลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการเจริญงอกงามพืชที่เกิดจากปริมาณฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา) จึงควรเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำและการดูดซึมของพืช

คำสำคัญ: วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ การจัดการทรัพยากรน้ำ ข้าวนาสวน ข้าวโพด CROPWAT, WAPF, CWR-RID

Dissertation Title	THE WATER FOOTPRINT OF PADDY RICE (<i>Oryza sativa</i> L.) AND MAIZE (<i>Zea mays</i> L.) IN LOWER HUAY NAM YAO 1 SUB WATERSHED THA WANG PHA DISTRICT, NAN PROVINCE
Author	Mr. Werachat Chatpanyacharoen
Degree	Doctor of Philosophy
Major Field/Faculty/University	Environmental Management Science and Technology Thammasat University
Dissertation Advisor	Associate Professor Natha Hungspreug, Ph.D.
Dissertation Co-Advisor	Assistant Professor Bundit Anurugsa, Ph.D.
Academic Year	2015

ABSTRACT

This study was aimed to evaluate water requirement for rice and maize plantation at Tha Wang Pha district, Nan Province. The software for calculated crop water use of this study was CROPWAT, WAPF and CWR-RID. The output used to input data for calculated WF. The result of WF_{green} rice was calculated by CROPWAT 8.0 software equal $1470.33 \text{ m}^3/\text{ton}$ WF_{blue} value equal to $167.67 \text{ m}^3/\text{ton}$ and WF_{gray} of rice equal to $0.79 \text{ m}^3/\text{ton}$. The total WF of rice calculated was $1,638.79 \text{ m}^3/\text{ton}$. For the WAPF software WF_{green} rice was equal $1,800.80 \text{ m}^3/\text{ton}$ WF_{blue} value equal to $418.60 \text{ m}^3/\text{ton}$ and WF_{gray} of rice equal to $0.79 \text{ m}^3/\text{ton}$ and the total WF equal $2,220.19 \text{ m}^3/\text{ton}$. And the CWR-RID software WF_{green} rice was equal $1,334.09 \text{ m}^3/\text{ton}$ WF_{blue} value equal to $71.43 \text{ m}^3/\text{ton}$ and WF_{gray} of rice equal to $0.79 \text{ m}^3/\text{ton}$ and the total WF equal $1,406.32 \text{ m}^3/\text{ton}$.

For the maize WF_{green} calculated by CROPWAT 8.0 software equal $767.75 \text{ m}^3/\text{ton}$ WF_{blue} value equal to $57.75 \text{ m}^3/\text{ton}$ and WF_{gray} of rice equal to $1.06 \text{ m}^3/\text{ton}$. The total WF of rice calculated was $826.56 \text{ m}^3/\text{ton}$. For the CWR-RID software WF_{green}

rice was equal $991.13 \text{ m}^3/\text{ton}$ WF_{blue} value equal to $104.90 \text{ m}^3/\text{ton}$ and WF_{gray} of rice equal to $1.06 \text{ m}^3/\text{ton}$ and the total WF equal $1,097.09 \text{ m}^3/\text{ton}$.

The WF of three programs depends on input data. CROPWAT 8.0 used general and can improved data but WAPF and CWR-RID base on study area and cannot improve. The WF of rice from research had $1,485.00 - 3,592.00 \text{ m}^3/\text{ton}$ and maize had $982.00 - 1,123.00 \text{ m}^3/\text{ton}$ for the result of study that found on the range of research value.

For the crop water used between rice and maize had difference by significant 0.05. Over there the result in rice case that found in first week to eighth week have average effective rainfall higher than average crop water used 99.29 mm . and less than average crop water used on nights to twelfth weeks then rice needed water 97.83 mm (blue water footprint). For the maize average effective rain fall more than average crop water used on first week to seventh week that have 143.00 mm and less than average crop water used on eighth week to thirteenth week that have 30.63 mm (blue water footprint). So the famer will keep the water in the soil form moisture because the maize will used its in effective rain fall less than crop water used case. The method for keep the water in soil form moisture such as fresh rice or maize straw. This method will reduce green house gas and smoke. For the result of the study water physical and chemical quality of rice and maize crop that found phosphate-phosphorus higher in stage 2 so the self water for dilute the west water the farmer apply the method used fertilize such bury fertilize. Finally the effect of method can reduce pollution and water resource management to efficient.

Keywords: Water Footprint, water resource management, rice, maize, CROPWAT, WAPF, CWR-RID

กิตติกรรมประกาศ

ดุขณินพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและการชี้แนะที่เป็นประโยชน์จากคณะกรรมการสอบดุขณินพนธ์ ผู้ศึกษาขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วรารุช เสือดี ประธานกรรมการสอบดุขณินพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริพรรณ ทวีสุข กรรมการสอบดุขณินพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. อภิศักดิ์ โพธิ์ปั่น กรรมการสอบดุขณินพนธ์ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ให้ความกรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบและเป็นที่ปรึกษาดุขณินพนธ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รองศาสตราจารย์ ดร. ญัฐฐา หังสพฤกษ์ กรรมการสอบและอาจารย์ที่ปรึกษาดุขณินพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต อนุรักษ์ กรรมการสอบและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมดุขณินพนธ์ ที่คอยแนะนำ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ และชี้แนะให้คำปรึกษา รวมถึง อาจารย์ ดร.ศิริพงศ์ หังสพฤกษ์ ที่คอยแนะนำด้านวิชาการตลอดมา ผู้ศึกษาขอกราบขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ในมิตรภาพ ความรู้ ความเข้าใจ ข้อคิด คำแนะนำดีๆ และกำลังใจในการศึกษา

ท้ายสุดจะมีวันนี้ไม่ได้หากขาดท่านเหล่านี้ ผู้ศึกษาขอกราบขอบพระคุณผู้เป็นกำลังใจ แรงใจ และสนับสนุนตลอดเวลาการศึกษา ทั้งจากคุณแม่ผู้ล่งลับ คุณพ่อ ขอขอบพระคุณพี่ชาย และ ภรรยาที่แสนดี หากผลการศึกษานี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้ศึกษาขอน้อมรับไว้เพื่อปรับปรุง แก้ไขในการศึกษาครั้งต่อไป

นายวีรฉัตร ฉัตรปัญญาเจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญตาราง	(10)
สารบัญภาพ	(15)
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	(16)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (water footprint)	4
2.1.1 ประเภทของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์	5
2.1.2 ปัจจัยการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สำหรับการปลูกพืช	6

2.2 โปรแกรมที่ใช้คำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืช	9
2.2.1 CROPWAT 8.0	9
2.2.2 CWR-RID	12
2.2.3 WAPF	13
2.3 การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์	14
2.4 สภาพทั่วไปพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง	17
2.4.1 ลักษณะภูมิประเทศ	17
2.4.2 ลักษณะภูมิอากาศและอุตุนิยมวิทยา	19
2.4.3 ลักษณะทางกายภาพของดิน	21
2.4.4 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของแหล่งน้ำ	21
2.5 ข้าวนาสวน	24
2.5.1 ระยะการเจริญเติบโตของข้าวนาสวน	26
2.5.2 ขั้นตอนและวิธีการปลูกข้าวนาสวน	27
2.6 ข้าวโพด	29
2.6.1 ระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพด	30
2.6.2 ขั้นตอนและวิธีการปลูกข้าวโพด	31
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
 บทที่ 3 วิธีการศึกษา	 41
3.1 วิธีการศึกษา	41
3.1.1 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว (green water footprint)	41
3.1.2 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน (blue water footprint)	41
3.1.3 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา (gray water footprint)	41
3.2 การรวบรวมข้อมูล	44
3.2.1 การรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ	44
3.2.2 การรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิ	44
3.3 โปรแกรมที่ใช้คำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชจริง	50
3.4 คำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์	54

บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล	56
4.1 ผลการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวนาสวน	56
4.1.1 ผลการศึกษาปัจจัยข้อมูลนำเข้าโปรแกรม CROPWAT 8.0 สำหรับข้าวนาสวน	56
4.1.2 ผลการศึกษาปัจจัยข้อมูลนำเข้าโปรแกรม WAPF สำหรับข้าวนาสวน	63
4.1.3 ผลการศึกษาปัจจัยข้อมูลนำเข้าโปรแกรม CWR-RID สำหรับข้าวนาสวน	65
4.1.4 ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวนาสวน พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน	67
4.2 ผลการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวน	73
4.2.1 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว (WF_{green})	73
4.2.2 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน (WF_{blue})	75
4.2.5 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา (WF_{gray})	80
4.3 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวน	82
4.4 ผลการศึกษาปัจจัยข้อมูลนำเข้าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวโพด	85
4.4.1 ผลการศึกษาปัจจัยข้อมูลนำเข้าโปรแกรม CROPWAT 8.0 สำหรับข้าวโพด	85
4.4.2 ผลการศึกษาปัจจัยข้อมูลนำเข้าโปรแกรม CWR-RID สำหรับข้าวโพด	91
4.4.3 ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวโพด พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน	93
4.5 ผลการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด	98
4.5.1 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว (WF_{green}) ของข้าวโพด	98
4.5.2 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน (WF_{blue}) ของข้าวโพด	99
4.5.5 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา (WF_{gray}) ของข้าวโพด	103
4.6 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด	105
4.7 เปรียบเทียบปริมาณความต้องการใช้น้ำของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวน กับวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด	107
4.7.1 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวน	109
4.7.2 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด	112

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	114
5.1 สรุปผลการศึกษา	114
5.1.1 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์	114
5.1.2 เปรียบเทียบปริมาณความต้องการใช้น้ำของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของ ข้าวนาสวนกับวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด	115
5.1.3 คุณภาพน้ำทางด้านกายภาพและเคมี	116
5.2 ข้อเสนอแนะ	119
รายการอ้างอิง	120
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การเก็บข้อมูลภาคสนาม	128
ภาคผนวก ข คู่มือการใช้โปรแกรม CROPWAT 8.0	144
ประวัติผู้เขียน	157

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 อุณหภูมิต่ำสุด อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส) รายเดือน ปี พ.ศ. 2556 อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน	19
2.2 ปริมาณฝนรายเดือน (มิลลิเมตร) รายเดือน ปี พ.ศ. 2552-2556 อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน	20
2.3 ผลผลิตข้าวนาสวน อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน ปี พ.ศ. 2552-2556	24
2.4 ผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน ปี พ.ศ. 2552-2556	30
3.1 สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ ตำบล และพิกัดภูมิศาสตร์ของจุดเก็บตัวอย่างน้ำ พื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน	47
3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำของการศึกษา	50
4.1 สภาพภูมิอากาศและการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0) รายเดือน สถานีอุตุวิทยมนาน	57
4.2 ปริมาณฝนใช้การ ปริมาณฝน รายเดือน สถานีอุตุวิทยมนาน	58
4.3 ปัจจัยปลูกข้าวนาสวนแต่ระยะการเจริญเติบโต ฐานข้อมูลของโปรแกรม CROPWAT 8.0 กรกฎาคม – พฤศจิกายน พ.ศ. 2556	59
4.4 ปัจจัยข้อมูลดินเหนียว ฐานข้อมูลในโปรแกรม CROPWAT 8.0	60
4.5 ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, ปริมาณฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง ของข้าวนาสวน รายสัปดาห์ จากโปรแกรม CROPWAT 8.0	62
4.6 ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, ปริมาณฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง ของข้าวนาสวน รายสัปดาห์ จากโปรแกรม WAPF	64
4.7 ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, ปริมาณฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง ของข้าวนาสวน รายสัปดาห์ จากโปรแกรม CWR-RID	66
4.8 คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวนาสวนจุดเก็บตัวอย่างน้ำ และจุดควบคุม ครั้งที่ 1 จำนวน 7 พารามิเตอร์ (ระยะการเจริญเติบโตทางต้นและใบ) ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน วันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2556	68

- 4.9 คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวนาสวนจุดเก็บตัวอย่างน้ำ และจุดควบคุม ครั้งที่ 2 จำนวน 7 พารามิเตอร์ (ระยะการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์) กลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน วันที่ 16 กันยายน พ.ศ. 2556 70
- 4.10 คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวนาสวนจุดเก็บตัวอย่างน้ำ และจุดควบคุม ครั้งที่ 3 จำนวน 7 พารามิเตอร์ (ระยะการเจริญเติบโตด้านเมล็ด) กลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน วันที่ 22 ตุลาคม พ.ศ. 2556 71
- 4.11 คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวนาสวนจุดเก็บตัวอย่างน้ำ และจุดควบคุม ครั้งที่ 4 จำนวน 7 พารามิเตอร์ (ระยะการเก็บเกี่ยว) กลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน วันที่ 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 73
- 4.12 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง, ปริมาณน้ำที่พืชใช้ ผลผลิตพืช (Y) จากโปรแกรม CROPWAT 8.0 ของข้าวนาสวน 74
- 4.13 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง, ปริมาณน้ำที่พืชใช้ ผลผลิตพืช (Y) จากโปรแกรม WAPF ของข้าวนาสวน 74
- 4.14 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง, ปริมาณน้ำที่พืชใช้ ผลผลิตพืช (Y) จากโปรแกรม CWR-RID ของข้าวนาสวน 75
- 4.15 ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, ปริมาณฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม ของข้าวนาสวนรายสัปดาห์ รายสัปดาห์จากโปรแกรม CROPWAT 8.0 76
- 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, ปริมาณฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม ของข้าวนาสวนรายสัปดาห์ รายสัปดาห์จากโปรแกรม WAPF 77
- 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, ปริมาณฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม ของข้าวนาสวนรายสัปดาห์ จากโปรแกรม CWR-RID 78
- 4.18 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง, ปริมาณน้ำที่พืชใช้, ผลผลิตพืช ของข้าวนาสวน จากโปรแกรม CROPWAT 8.0 78

4.19	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง, ปริมาณน้ำที่พืชใช้, ผลผลิตพืช ของข้าวนาสวน จากโปรแกรม WAPF	79
4.20	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง, ปริมาณน้ำที่พืชใช้, ผลผลิตพืช ของข้าวนาสวน จากโปรแกรม CWR-RID	79
4.21	แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนเตรท-ไนโตรเจน และฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ที่พบในแหล่งน้ำ ตัวอย่าง จุดอ้างอิง (RS00) ณ สถานีบ้านแหวน 1 จำนวน 3 พารามิเตอร์ จากระยะเวลาการเก็บข้อมูล 4 ครั้ง เดือน กรกฎาคม – พฤศจิกายน พ.ศ. 2556	80
4.22	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา, ธาตุอาหารที่ก่อกมลพิษ, อัตราการใช้ธาตุอาหาร, สัดส่วนของธาตุอาหารจากการชะละลาย, ความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ยอมรับได้, ความเข้มข้นธาตุอาหารที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ในการปลูกข้าวนาสวน พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอน้ำขุ่น จังหวัดน่าน	82
4.23	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา ของข้าวนาสวน คำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชจริง โดยโปรแกรม CROPWAT 8.0	83
4.24	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา ของข้าวนาสวน คำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชจริง โดยโปรแกรม WAPF	83
4.25	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา ของข้าวนาสวน คำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชจริง โดยโปรแกรม CWR-RID	84
4.26	สภาพภูมิอากาศและการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0) รายเดือน สถานีอุตุณิยมนวิทยานาน	86
4.27	ปริมาณฝนใช้การ ปริมาณฝน รายเดือน สถานีอุตุณิยมนวิทยานาน ปี พ.ศ.2543	87
4.28	ปัจจัยปลูกข้าวโพดแต่ระยะการเจริญเติบโต จากฐานข้อมูลในโปรแกรม CROPWAT 8.0 กรกฎาคม – พฤศจิกายน พ.ศ. 2556	88
4.29	ปัจจัยข้อมูลดินเหนียว จากฐานข้อมูลในโปรแกรม CROPWAT 8.0	89
4.30	ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, ปริมาณฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง ของข้าวโพด รายสัปดาห์ จากโปรแกรม CROPWAT 8.0	90
4.31	ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, ปริมาณฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง ของข้าวโพด รายสัปดาห์ จากโปรแกรม CWR-RID	92

- 4.32 คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวโพดจุดเก็บตัวอย่างน้ำและจุดควบคุม 94
ครั้งที่ 1 จำนวน 7 พารามิเตอร์ (ระยะการเจริญเติบโตทางต้นและใบ)
ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอน้ำขุ่น จังหวัดน่าน
วันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2556
- 4.33 คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวโพดจุดเก็บตัวอย่างน้ำและจุดควบคุม 95
ครั้งที่ 2 จำนวน 7 พารามิเตอร์ (ระยะการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์)
ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอน้ำขุ่น จังหวัดน่าน
วันที่ 16 กันยายน พ.ศ. 2556
- 4.34 คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวโพดจุดเก็บตัวอย่างน้ำและจุดควบคุม 96
ครั้งที่ 3 จำนวน 7 พารามิเตอร์ (ระยะการเจริญเติบโตด้านเมล็ด)
ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอน้ำขุ่น จังหวัดน่าน
วันที่ 22 ตุลาคม พ.ศ. 2556
- 4.35 คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวโพดจุดเก็บตัวอย่างน้ำและจุดควบคุม 98
ครั้งที่ 4 จำนวน 7 พารามิเตอร์ (ระยะการเก็บเกี่ยว)
ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอน้ำขุ่น จังหวัดน่าน
วันที่ 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2556
- 4.36 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง, ปริมาณน้ำที่พืชใช้ 99
ผลผลิตพืช ของข้าวโพด จากโปรแกรม CROPWAT 8.0
- 4.37 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง, ปริมาณน้ำที่พืชใช้ 99
ผลผลิตพืช ของข้าวโพด จากโปรแกรม CWR-RID
- 4.38 ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, 100
ปริมาณฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม ของข้าวโพด รายสัปดาห์
จากโปรแกรม CROPWAT 8.0
- 4.39 ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, 101
ปริมาณฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม ของข้าวโพด รายสัปดาห์
จากโปรแกรม CWR-RID
- 4.40 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน, ปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม, ปริมาณน้ำที่พืชใช้, 102
ผลผลิตพืช ของข้าวโพด จากโปรแกรม CROPWAT 8.0
- 4.41 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน, ปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม, ปริมาณน้ำที่พืชใช้, 102
ผลผลิตพืช ของข้าวโพด จากโปรแกรม CWR-RID

4.42 แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนเตรท-ไนโตรเจน และฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส เฉลี่ยในแหล่งน้ำ	103
ตัวอย่าง จุดอ้างอิง (RS00) ณ สถานีบ้านแหวน 1 จำนวน 3 พารามิเตอร์	
ระยะเวลาการเก็บข้อมูล 4 ครั้ง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน เดือน กรกฎาคม –	
พฤศจิกายน	
4.43 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา, ธาตุอาหารที่ก่อมลพิษ, อัตราการใช้ธาตุอาหาร, สัดส่วนของ	105
ธาตุอาหารจากการชะละลาย, ความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ยอมรับได้, ความเข้มข้น	
ธาตุอาหารที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ในการปลูกข้าวโพด พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1	
ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน	
4.44 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน	106
วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาของข้าวโพด จากโปรแกรม CROPWAT 8.0	
4.45 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน	106
วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาของข้าวโพด จากโปรแกรม CWR-RID	
4.46 ปริมาณความต้องการใช้น้ำจากวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวนาสวนกับวอเตอร์ฟุตพริ้นท์	107
ข้าวโพดแต่ละโปรแกรม	
4.47 แสดงวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวนาสวนกับงานวิจัยอื่น	108
4.48 แสดงวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวโพดกับงานวิจัยอื่น	109

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน พ.ศ. 2555	18
2.2 ปริมาณฝนรายเดือน (มิลลิเมตร) พ.ศ. 2552-2556 ของอำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน	20
3.1 ผังการศึกษาอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนและข้าวโพด	42
3.2 ผังการคำนวณอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนและข้าวโพด	43
พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน	
3.3 แผนที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำ ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน	46
3.4 ลักษณะพื้นที่ของจุดเก็บตัวอย่างน้ำ ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา	48
จังหวัดน่าน วันที่ 27 กรกฎาคม-16 พฤศจิกายน 2556	
3.5 ผังกระบวนการทำงานของโปรแกรม CROPWAT 8.0	51
3.6 ผังกระบวนการทำงานของโปรแกรม CWR-RID	52
3.7 ผังกระบวนการทำงานของโปรแกรม WAPF	53
4.1 ปริมาณการใช้น้ำของข้าวนาสวนกับปริมาณฝนใช้การจากโปรแกรม CROPWAT 8.0	110
4.2 อวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวนาสวนโดยโปรแกรม CROPWAT 8.0	111
4.3 ปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพดกับปริมาณฝนใช้การจากโปรแกรม CROPWAT 8.0	112
4.4 อวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวโพดโดยโปรแกรม CROPWAT 8.0	113

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์/คำย่อ

คำจำกัดความ/คำเต็ม

AR	อัตราการใช้น้ำในพื้นที่ต่อไร่
C_{max}	ความเข้มข้นสูงสุดของสารพิษที่ยอมรับได้
C_{nat}	ความเข้มข้นสารพิษในธรรมชาติที่พิจารณา
CWU_{blue}	ปริมาณการใช้น้ำของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน
CWU_{green}	ปริมาณการใช้น้ำของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว
WF_{blue}	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน
WF_{gray}	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา
WF_{green}	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว
WF	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สำหรับการปลูกพืช

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวนาสวนและข้าวโพดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย โดยประเทศไทยมีผลผลิตรวมของข้าวสารอยู่ในอันดับที่ 6 ของเอเชีย (1) ในขณะที่ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ประเทศไทยมีผลผลิตอยู่ในอันดับที่ 3 ของอาเซียน (2) การปลูกข้าวนาสวนในอำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน ส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์เพื่อการบริโภค โดยมีพื้นที่เพียงร้อยละ 33 ของพื้นที่ทางการเกษตรที่มีอยู่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ถือครองทางการเกษตร ผลผลิตที่ได้อยู่ในเกณฑ์ต่ำจึงไม่เพียงพอต่อการบริโภค โดยมีผลผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 521 กิโลกรัมต่อไร่ ทำให้ต้องมีการนำข้าวจากพื้นที่ใกล้เคียง และมีปริมาณการใช้น้ำในการปลูกข้าวนาสวนตลอดระยะเวลาการเพาะปลูกจะใช้น้ำ 1,200 – 2,000 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ (3) ข้าวโพดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากในปี พ.ศ. 2549/2550 พื้นที่เพาะปลูก 360,161 ไร่ เป็น 798,460 ไร่ ในปี พ.ศ. 2553/2554 โดยการเพาะปลูกในพื้นที่อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย จากพื้นที่เพาะปลูก 23,723 ไร่ ในปี พ.ศ. 2549/2550 เพิ่มขึ้นเป็น 66,325 ไร่ ในปี พ.ศ. 2554/2555 (4) โดยข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีการใช้น้ำตลอดระยะเวลาการเพาะปลูกทั้งสิ้น 800 – 900 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ (5)

วอเตอร์พุตพรีนซ์เป็นเครื่องมือชี้วัดการใช้น้ำจิตในการอุปโภคและบริโภค ทั้งภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ในด้านเกษตรกรรมมีการนำมาใช้สำหรับชี้วัดการใช้น้ำในการเพาะปลูกพืช ข้าวนาสวนและข้าวโพดเป็นพืชที่ใช้น้ำสำหรับการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน จากผลผลิตข้าวนาสวนที่ผ่านกระบวนการต่างๆ จนกระทั่งเป็นข้าวสวย 1 กิโลกรัมจะมีค่าวอเตอร์พุตพรีนซ์เฉลี่ยเท่ากับ 2,497 ลิตรต่อกิโลกรัม โดยแบ่งเป็นวอเตอร์พุตพรีนซ์สีเขียว 68 เปอร์เซ็นต์ วอเตอร์พุตพรีนซ์สีน้ำเงิน 20 เปอร์เซ็นต์ และวอเตอร์พุตพรีนซ์สีเทา 11 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ข้าวโพด มีค่าวอเตอร์พุตพรีนซ์เฉลี่ยเท่ากับ 1,222 ลิตรต่อกิโลกรัม โดยแบ่งเป็นวอเตอร์พุตพรีนซ์สีเขียว 77.7 เปอร์เซ็นต์ วอเตอร์พุตพรีนซ์สีน้ำเงิน 7 เปอร์เซ็นต์ และวอเตอร์พุตพรีนซ์สีเทา 16 เปอร์เซ็นต์ (6)

ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง เป็นลุ่มน้ำย่อยของแม่น้ำน่านโดยมีพื้นที่ลุ่มน้ำครอบคลุมอำเภอท่าวังผา ลักษณะภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นภูเขาสูงที่ระดับ 1,000 เมตรจากระดับทะเลปานกลาง ยังเป็นต้นกำเนิดของแม่น้ำยาวโดยมีลำน้ำย่อยสายสำคัญ ได้แก่ น้ำยาว น้ำยอด และน้ำริม ลักษณะพื้นที่ทางตอนบนและตอนกลางเป็นภูเขาสูงลาดชันและลดหลั่น ส่วนทางตอนล่างเป็นพื้นที่เกษตรกรรม (7) ซึ่งเป็นพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาสวนและข้าวโพด โดยข้าวนาสวนจะปลูกในพื้นที่

ราบ ส่วนข้าวโพดจะปลูกในพื้นที่ลาดชันและพื้นที่ราบบางส่วน การเพาะปลูกอาศัยน้ำฝนเป็นหลัก ดังนั้นเพื่อเป็นการจัดการทรัพยากรน้ำ การศึกษาอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (water footprint, WF) ของข้าวนาสวนและข้าวโพดเป็นการศึกษาเพื่อสร้างความตระหนักเรื่องการใช้ทรัพยากรน้ำที่จะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ รวมถึงการจัดการทรัพยากรน้ำเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เป็นดัชนีหรือตัวชี้วัดสำคัญที่ได้ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อประเมินถึงความคุ้มค่าของทรัพยากรน้ำที่ต้องสูญเสียไปกับกิจกรรมต่างๆ และเป็นการสะท้อนเพื่อให้เกิดความตระหนักในการใช้ทรัพยากรน้ำและยังเป็นดัชนีชี้วัดที่บ่งบอกถึงปริมาณของน้ำในแหล่งธรรมชาติและปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่างๆ อีกทั้งยังเป็นตัวชี้วัดการใช้ทรัพยากรน้ำที่เป็นอยู่่าถูกใช้ไปในทิศทางใด และเป็นแนวทางในการกำหนดมาตรการในการอนุรักษ์ทรัพยากรน้ำในพื้นที่ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว (green water footprint, WF_{green}) อวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน (blue water footprint, WF_{blue}) และอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา (gray water footprint, WF_{gray}) ของข้าวนาสวน (*Oryza sativa* L.) และข้าวโพด (*Zea mays* L.) ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดน่าน

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบปริมาณความต้องการใช้น้ำจากอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนและข้าวโพดในแต่ละระยะการเจริญเติบโต

1.2.3 เพื่อเสนอแนวทางในการจัดการทรัพยากรน้ำสำหรับข้าวนาสวนและข้าวโพด จากอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนและอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

อวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนและอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพดมีความแตกต่างกัน

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 ศึกษาอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนและข้าวโพดพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดน่าน

1.4.2 ศึกษาปริมาณการใช้น้ำของพืชจริงของข้าวนาสวนและข้าวโพดจากโปรแกรม CROPWAT 8.0, WAPF และ CWR-RID

1.4.3 ศึกษาอัตรารีดฟุ้งที่สืบทอดจากคุณภาพน้ำที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทางกายภาพและเคมี คือ ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)

1.4.4 ศึกษาการเพาะปลูกข้าวนาสวนและข้าวโพด ในช่วงเดือนกรกฎาคม ถึง เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2556

1.4.5 ผลผลิตข้าวนาสวนที่ใช้สำหรับการศึกษา คือ ข้าวเปลือก พันธุ์ กข. 105

1.4.6 ผลผลิตข้าวโพดที่ใช้สำหรับการศึกษา คือ ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบปริมาณความต้องการใช้ทรัพยากรน้ำจากอัตรารีดฟุ้งของข้าวนาสวนและข้าวโพด ของพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดน่าน

1.5.2 ทราบคุณภาพน้ำที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำทางกายภาพและเคมี คือ ไนเตรท-ไนโตรเจน ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) และฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) ของข้าวนาสวนและข้าวโพด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดน่าน

1.5.3 ทราบแนวทางการใช้อัตรารีดฟุ้งเพื่อจัดการทรัพยากรน้ำสำหรับข้าวนาสวนและข้าวโพด

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (Water Footprint)

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ คือตัวชี้วัดการใช้น้ำจืดของผู้ผลิตหรือผู้บริโภค ซึ่งจะไม่พิจารณาแต่เฉพาะการใช้น้ำในการผลิตหรือการบริโภคในทางตรงอย่างเดียว แต่จะพิจารณาการใช้น้ำในทางอ้อมด้วย (8) โดยคำนวณปริมาณการใช้น้ำจากผลรวมของทุกขั้นตอนตลอดห่วงโซ่ของการผลิตสินค้าและบริการหรือการเพาะปลูกพืช ทั้งนี้ค่าของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ถือเป็นค่าชี้วัดที่ชัดเจนเพราะนอกจากจะแสดงปริมาณการใช้น้ำและปริมาณน้ำเสียที่ปล่อยออกมาจากการผลิตหรือการเพาะปลูก ยังแสดงสถานที่และระยะเวลาที่เกิดการใช้น้ำอีกด้วย (9) ดังวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในระหว่างปี ค.ศ. 1997-2001 พบว่า วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของโลกเท่ากับ 1,243 ลูกบาศก์เมตรต่อคนต่อปี โดยคิดเป็นสัดส่วนต่อจำนวนประชากร ประเทศที่มีวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สูงสุด คือ สหรัฐอเมริกา เท่ากับ 2,485 ลูกบาศก์เมตรต่อคนต่อปี ส่วนประเทศไทยมีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เท่ากับ 2,223 ลูกบาศก์เมตรต่อคนต่อปี (10,11)

แนวความคิดเรื่องวอเตอร์ฟุตพริ้นท์นั้นเริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 2002 โดยศาสตราจารย์ Arjen Y. Hoekstra แห่งประเทศเนเธอร์แลนด์ และกำลังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์นั้น นอกจากทำให้เห็นภาพปริมาณการใช้น้ำที่ซ่อนเร้นอยู่ในการผลิตสินค้าได้อย่างชัดเจนมากขึ้นแล้ว ยังสามารถนำมาประเมินผลกระทบที่เกิดจากการผลิตและการค้าต่อการใช้ทรัพยากรน้ำได้อีกด้วย ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจปัญหาการขาดแคลนน้ำ และมลภาวะทางน้ำได้ดียิ่งขึ้น รวมทั้งนำไปสู่วิธีแก้ไขปัญหาก็เชื่อมโยงกับกระบวนการผลิตสินค้าและบริการทั้งระบบ ซึ่งทำให้มองเห็นภาพรวมของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในระดับโลกอย่างแท้จริง และสามารถนำข้อมูลที่ได้มาจัดการทรัพยากรน้ำให้เกิดประโยชน์และประสิทธิภาพสูงสุด การนำวอเตอร์ฟุตพริ้นท์มาใช้ในการหาปริมาณการใช้น้ำได้ทำอย่างกว้างขวางในเกือบทุกสินค้าและบริการหรือแม้แต่การเพาะปลูกพืช เช่น ในการผลิตข้าว 1 กิโลกรัม จะต้องใช้น้ำทั้งหมด 3,400 ลิตร เนื้อวัว 1 กิโลกรัม ใช้น้ำทั้งสิ้น 15,500 ลิตร หรือแม้กระทั่งการผลิตแฮมเบอร์เกอร์ 1 ชิ้นใช้น้ำทั้งสิ้น 2,400 ลิตร เป็นต้น (12)

2.1.1 ประเภทของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ทั้งหมดสามารถแยกออกเป็น 3 ส่วน คือ วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน (blue water footprint) วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว (green water footprint) และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา (gray water footprint) โดยแต่ละส่วนมีที่มาแตกต่างกันออกไป ดังนี้ (8, 11, 13)

2.1.1.1 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน

คือ ตัวชี้วัดของน้ำที่ใช้แล้วหมดไป ได้แก่ น้ำผิวดิน หรือน้ำจืดผิวดิน ที่เรียกว่า น้ำสีน้ำเงิน เจือปนของการใช้แล้วหมดไปจะมีทั้งหมด 4 กรณี

- การระเหยของน้ำผิวดิน หรือแหล่งน้ำจืดผิวดิน
- น้ำผิวดิน หรือแหล่งน้ำจืดผิวดิน ที่ใช้เป็นส่วนหนึ่งของการผลิต
- น้ำผิวดินหรือแหล่งน้ำจืดผิวดินที่ถูกใช้ไปในการผลิต ที่ไม่สามารถกลับไปสู่แหล่งน้ำ เช่น แหล่งกักเก็บน้ำ
- น้ำผิวดินหรือจากแหล่งน้ำจืดผิวดินที่ถูกใช้ไปและไม่สามารถกลับกลายสภาพเป็นน้ำผิวดินหรือน้ำจืดในแหล่งน้ำเหมือนในเวลาเดิม เช่น ในฤดูฝน

ซึ่งการระเหยของน้ำจากแหล่งน้ำจืดผิวดิน หรือน้ำผิวดิน เป็นสิ่งที่เกิดขึ้นทั่วๆ ไปของการใช้แล้วหมดไปในการใช้น้ำผิวดิน หรือแหล่งน้ำจืดผิวดิน ต่างจาก 3 กรณีที่สัมพันธ์กับการผลิต

2.1.1.2 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว

คือ ตัวชี้วัดจากการใช้น้ำของมนุษย์ หรือที่เรียกว่า น้ำสีเขียว ที่เกิดมาจากน้ำหยาดฟ้าตกลงสู่พื้นดิน ไม่ใช่ น้ำท่า หรือน้ำบนผิวดิน ซึ่งจะถูกลบในช่องว่างของดิน น้ำสีเขียวจะช่วยให้พืชเจริญเติบโต หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นปริมาณน้ำที่พืชใช้จริงที่มาจากฝนและถูกนำไปใช้เพาะปลูกผลิตพืชผลทางการเกษตร

2.1.1.3 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา

คือ ตัวชี้วัดของระดับของมลพิษในน้ำจืดที่เกิดจากกระบวนการผลิต ซึ่งจะบอกถึง ปริมาณน้ำจืดที่ต้องการใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดมลพิษขึ้นจากกระบวนการผลิตสินค้าและบริการหรือเพาะปลูก ซึ่งคำนวณจากปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นและค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้สำหรับแต่ละประเภทของมลพิษที่เกิดขึ้น ผลที่ได้จะเป็นปริมาณน้ำใช้ในการบำบัดน้ำเสียให้เป็นน้ำดีตามค่ามาตรฐาน

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์จึงมีทั้งปริมาณน้ำที่ใช้โดยตรงและโดยอ้อม และปริมาณน้ำที่ใช้ดังกล่าวต่างก็ประกอบด้ววอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของน้ำทั้ง 3 ประเภท ทั้งนี้ วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวเป็นปริมาณน้ำที่ใช้กระบวนการผลิตสินค้าและบริการหรือเพาะปลูก ส่วน

วอเตอร์พวพรีนส์ทีหาเป็นปริมาณน้ำที่ใช้ในการเจือจางน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตสินค้าและบริการหรือเพาะปลูกให้ได้ตามมาตรฐาน

2.1.2 ปัจจัยการคำนวณวอเตอร์พวพรีนส์สำหรับการปลูกพืช

การคำนวณวอเตอร์พวพรีนส์มีปัจจัยข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.1.2.1 ปริมาณการใช้น้ำของพืช

ปริมาณการใช้น้ำของพืชหรือการคายระเหยน้ำของพืช (consumptive use or crop evapotranspiration, ET_c) หมายถึง ปริมาณน้ำที่พืชต้องการใช้จริง รวมถึงปริมาณน้ำที่สูญเสียไปจากแปลงปลูกโดยกระบวนการคายน้ำของพืชและการระเหย ซึ่งมีหน่วยเป็นความลึกของน้ำต่อหน่วยเวลา หรือปริมาตรของน้ำต่อหน่วยเวลาต่อหน่วยพื้นที่ เช่น มิลลิเมตรต่อวัน ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ต่อวัน หรือลูกบาศก์เมตรต่อเฮกแตร์ต่อวัน เป็นต้น ซึ่งการใช้น้ำของพืชนั้นจะประกอบด้วย ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์พืช (crop coefficient, K_c) ตามช่วงระยะของการเจริญเติบโตหรือตลอดการเพาะปลูก และข้อมูลค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (reference crop evapotranspiration, ET_0) ตามช่วงระยะของการเจริญเติบโต ทั้งนี้สิ่งสำคัญที่สุดของการนำค่าสัมประสิทธิ์พืชไปใช้งานอย่างถูกต้องคือจะต้องรู้ว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์พืชที่ได้จากวิธีการใด เพื่อจะนำค่าการใช้น้ำอ้างอิงของพืชของวิธีการเดียวกันนั้นมาใช้เพื่อให้ได้ค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชที่ต้องการ (14)

2.1.2.2 วิธีการหาค่าการใช้น้ำของพืช (crop evapotranspiration, ET)

การหาค่าการใช้น้ำของพืชมีวิธีการดำเนินการ (15) ดังนี้

(1) การหาค่าการใช้น้ำของพืชโดยวิธีการตรวจวัด

การหาโดยวิธีการตรวจวัดจากการใช้น้ำของพืช ขึ้นอยู่กับความละเอียดถูกต้องของข้อมูลที่ต้องการ ค่าใช้จ่าย ชนิดของพืช และองค์ประกอบอื่นๆ โดยวิธีการที่ใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านเกษตรชลประทาน ได้แก่ การวัดจากถังวัดการใช้น้ำของพืช (lysimeter tank) การวัดการใช้น้ำของพืชโดยวิธีนี้ ถ้าจะเปรียบเทียบก็เหมือนการใช้กระถางต้นไม้ขนาดใหญ่ที่ปลูกพืชที่ต้องการวัดค่าการใช้น้ำ แล้วนำไปตั้งอยู่ท่ามกลางพื้นที่ที่ปลูกพืชชนิดเดียวกัน โดยกำหนดให้มีสภาพแวดล้อมทั้งภายในและภายนอกกระถางคล้ายคลึงกับสภาพที่เป็นจริงมากที่สุด โดยมีอุปกรณ์สำหรับวัดปริมาณน้ำที่สูญเสียไปภายในกระถาง เพื่อจะได้นำมาคำนวณการใช้น้ำของพืชในระยะเวลาต่างๆ ได้ โดยมีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อวัน การศึกษาจากค่าความชื้นในดิน วิธีนี้เหมาะสำหรับดินที่มีเนื้อดินสม่ำเสมอตลอดความลึก และระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าระดับผิวดินมาก วิธีการวัดโดยการหาจำนวนความชื้นในดินก่อนและหลังให้น้ำแก่พืชทุกครั้ง และการศึกษาจากแปลงทดลอง การหาค่าการใช้น้ำของพืชจากแปลงทดลองนั้น แปลงทดลองควรมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าระดับผิวดินอย่างน้อย 25 เมตร ซึ่งจะทำให้เชื่อได้ว่าพืชไม่สามารถดูดน้ำใต้ดินมาใช้ได้ จากนั้นทดลองโดยให้น้ำแก่พืชในปริมาณที่ต่างๆ กันแล้ววัดผลผลิตที่ได้รับ ซึ่งปรากฏว่าพืชทุกชนิดที่ทดลองจะให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นเมื่อ

ให้น้ำเพิ่มขึ้น จนถึงระดับหนึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำที่ให้แก่แล้ว จะทำให้ผลผลิตลดลง จึงใช้ค่าปริมาณน้ำที่จุดเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงผลผลิตจากที่เพิ่มขึ้นเป็นลดลงนั้นเป็นปริมาณการใช้น้ำของพืชชนิดนั้นๆ

2.1.2.3 วิธีการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0)

การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงนั้น สามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งไม่ว่าจะเป็นวิธีใดก็ตามสุดท้ายผลลัพธ์ที่ได้จะต้องเป็น ค่าการใช้น้ำของพืชอ้างอิงที่มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงค่าความเป็นจริงมากที่สุด และสามารถนำไปใช้งานได้จริง โดยสูตรและวิธีการคิดคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงที่ปัจจุบันนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ วิธีของ Penman-Monteith (15, 16) สมการของ Penman ได้เสนอไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1948 โดย Penman ได้พัฒนาสมการโดยการผสมผสานวิธีการคำนวณการระเหยของน้ำตามหลักสมดุลพลังงานที่พื้นผิว (surface energy balance) เข้ากับวิธีการคำนวณการระเหยของน้ำตามหลักการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) สมการดั้งเดิมของ Penman นั้นพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณการระเหยของน้ำจากผิวน้ำ

สมการของ Penman มีการปรับปรุงตลอดช่วงเวลา 60 ปีที่ผ่านมา โดยพัฒนาเป็นสมการของ Penman-Monteith ในปี ค.ศ. 1956 ซึ่งเป็นการพัฒนาจากสมการของ Penman ของปี ค.ศ. 1948 (14) ข้อมูลที่ต้องการของสมการ Penman-Monteith (15)

- (1) พิกัดภูมิศาสตร์ (เส้นรุ้ง, เส้นแวง, ความสูงจากระดับทะเลปานกลาง)
- (2) อุณหภูมิของอากาศ
 - อุณหภูมิสูงสุด/ต่ำสุดเฉลี่ย/อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)
- (3) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ
 - ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (ร้อยละ)
- (4) ความเร็วลมที่ระดับความสูง 2 เมตร จากผิวดิน
 - ความเร็วลมผิวดินเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที)
- (5) ชั่วโมงแสงแดดเฉลี่ย (ชั่วโมงต่อวัน)
- (6) การระเหยของน้ำจากอ่างวัดการระเหยแบบ Class A pan
 - ค่าระเหยของน้ำเฉลี่ย (มิลลิเมตรต่อวัน)

การคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง มีรูปสมการดังสมการที่ 2.12

$$ET_0 = \frac{[0.480\Delta(Rn-G) + \gamma \left\{ \frac{900}{T+273} \right\} U_2 (e_s - e_a)]}{\Delta + \gamma(1+0.34U_2)} \quad (2.12)$$

เมื่อ ET_0 = การใช้น้ำของพืชอ้างอิง (มิลลิเมตรต่อวัน)

Rn = รังสีสุทธิที่ต้นพืชได้รับ (เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน)

G	= flux ค่าความร้อนของพื้นดิน (เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน)
T	= อุณหภูมิของอากาศเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)
U_2	= ความเร็วลมที่ระดับความสูงจากพื้นดิน 2 เมตร (เมตรต่อวินาที)
e_s	= ความดันไอน้ำอิ่มตัว (กิโลปาสกาล)
e_a	= ความดันไอน้ำ (กิโลปาสกาล)
Δ	= ความลาดเทของเส้น curve แรงดันไอน้ำ (กิโลปาสกาลต่อองศาเซลเซียส)
γ	= ค่าคงที่ของ psychrometric (กิโลปาสกาลต่อองศาเซลเซียส)
$(e_s - e_a)$	= ค่าความต่างของแรงดันไอน้ำ (กิโลปาสกาล)
900	= factor ปรับแก้

2.1.2.4 ค่าสัมประสิทธิ์พืช (crop coefficient, K_c) (17)

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์พืช คำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้น้ำของพืชที่ได้จากการทดลองในพืชแต่ละชนิดและแต่ละพื้นที่เพาะปลูก โดยอาจใช้วิธี การวัดจากถังวัดการใช้น้ำของพืช (lysimeter tank) การศึกษาจากค่าความชื้นในดินหรือการศึกษาจากแปลงทดลองกับปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง โดยใช้สูตรหรือวิธีการคำนวณที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น Penman Monteith, Modified Penman เป็นต้น ดังสมการที่ 2.13

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (2.13)$$

เมื่อ	K_c	= ค่าสัมประสิทธิ์พืช
	ET_c	= ปริมาณการใช้น้ำของพืช (มิลลิเมตรต่อวัน)
	ET_0	= ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (มิลลิเมตรต่อวัน)

โดยปกติการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง หรือปริมาณการใช้น้ำของพืชเกี่ยวข้องกับการคายน้ำและการระเหยน้ำ โดยการคายน้ำจะเกี่ยวข้องกับพืชมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่ชัดเจนนอกจากสภาพภูมิอากาศของแสงสว่าง อุณหภูมิ ความชื้น ลม ความดันบรรยากาศโดยรอบ และโครงสร้างของพืช เช่น ความสูง ทรงพุ่ม และลักษณะของใบ ที่จะเกี่ยวข้องกับการคายน้ำกลับเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ

การระเหยน้ำนอกจากการระเหยจากแหล่งน้ำแล้ว ดินเป็นอีกแหล่งของการระเหยน้ำและเป็นแหล่งสำคัญสำหรับการกักเก็บน้ำไว้เพื่อการเจริญเติบโตของพืชโดยปกติ และ

ระเหยน้ำสู่บรรยากาศ ความสามารถในการกักเก็บน้ำจะขึ้นอยู่กับปัจจัย คือ ลักษณะสมบัติโครงสร้างของดินแต่ละชนิด เช่น ดินที่มีเนื้อละเอียดจะมีความสามารถในการกักเก็บน้ำได้สูงกว่าดินที่มีลักษณะเนื้อดินหยาบ ซึ่งมีเหตุมาจากดินที่มีเนื้อละเอียดจะมีรูพรุนขนาดเล็ก (micropores) ทำให้เกิดแรงดึงดูดสูงจึงสามารถกักเก็บน้ำได้ดี นอกจากคุณสมบัติของดินแล้วความชื้นของดินมีผลต่อการซึมของน้ำในดินด้วย ในดินที่แห้งการซึมของน้ำจะเกิดขึ้นในอัตราที่สูงมาก ซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดของโลกและแรงดึงดูดภายในเม็ดดิน สารคอลลอยด์ต่างๆ ที่ผสมเป็นเม็ดดินจะพองตัวออกไปอุดรูดินเมื่อดินเริ่มเปียกและถ้ามีปริมาณน้ำมากขึ้น ก็ยิ่งจะทำให้ความสามารถการซึมของน้ำลงสู่ดินลดลงเรื่อยๆ แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินที่เป็นตัวกำหนดการซึมของน้ำลงสู่ดินและแปรผันตามฤดู เช่น ในฤดูร้อนความชื้นจะต่ำ แต่ความชื้นจะสูงในฤดูฝนและต้นฤดูหนาว นอกจากปริมาณน้ำที่มากจะทำให้การซึมผ่านน้ำของดินลดลง การใช้ที่ดินก็เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความแน่นทึบของผิวดินได้ และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดิน ที่มีผลต่อการซึมของน้ำลงสู่ดินหรือการกักเก็บน้ำของดิน (18)

2.1.2.5 ปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_c)

การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชหรือปริมาณความต้องการน้ำของพืช คำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์พืชกับผลการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (9) ดังสมการที่ 2.14

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (2.14)$$

เมื่อ	ET_c	= ปริมาณการใช้น้ำของพืช (มิลลิเมตรต่อวัน)
	K_c	= ค่าสัมประสิทธิ์พืช
	ET_0	= ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (มิลลิเมตรต่อวัน)

2.2 โปรแกรมที่ใช้คำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืช

2.2.1 CROPWAT 8.0

โปรแกรม CROPWAT 8.0 เป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจที่พัฒนาโดยหน่วยพัฒนาน้ำและดินขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) (19) ใช้สำหรับประมาณค่าการใช้น้ำของพืชและจัดการตารางการให้น้ำในการเพาะปลูก โดยใช้วิธีการคำนวณค่าการระเหยน้ำของพืชด้วยสมการ Penman-Monteith ซึ่งในการคำนวณหาการใช้น้ำของพืช (crop water requirement) ต้องมีการนำเข้าข้อมูลสภาพภูมิอากาศจากฐานข้อมูล CLIMWAT (20) ได้แก่ ค่าการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0)

ปริมาณฝนรวม ปริมาณฝนใช้การ อุณหภูมิ พลังงานแสงอาทิตย์ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ แร่ลงม รูปแบบการปลูกพืช โดยในการคำนวณต้องเพิ่มเติมข้อมูลนำเข้า ได้แก่ ชนิดของดิน ซึ่งประกอบด้วยค่าปริมาณน้ำที่เป็นประโยชน์ทั้งหมด ความลึกของรากพืช อัตราการซึมลงในดินของน้ำฝน รวมถึงข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์พืชที่ได้จากการศึกษาของ Allen (21)

ผลการคำนวณของโปรแกรม CROPWAT 8.0 จะแสดงถึงการใช้ น้ำของพืชเป็นช่วงระยะตามที่ต้องการหรือตลอดฤดูการปลูกพืช และสามารถกำหนดรอบการให้น้ำที่ไม่กระทบต่อผลผลิตและกำหนดตารางการให้น้ำเป็นอัตรา มิลลิเมตร ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ หรือ ลูกบาศก์เมตรต่อเฮกแตร์ต่อวัน ในแต่ละรอบการให้น้ำ ซึ่งเกษตรกรจะนำไปกำหนดการจัดการน้ำในพื้นที่เพาะปลูก (20) การคำนวณหาการใช้ น้ำของพืช CROPWAT 8.0 ต้องการข้อมูลพื้นฐานในการประมวลผล คือ สภาพภูมิอากาศและลักษณะของพืช โดยข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับพืชจะเป็นข้อมูลที่ถูกกำหนดไว้ในโปรแกรม และจากโปรแกรม CLIMWAT ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติที่รวบรวมข้อมูลสภาพภูมิอากาศจาก 5,000 สถานีทั่วโลก ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1971-2000

ข้อมูลนำเข้าในโปรแกรม CROPWAT 8.0 มีดังนี้

(1) ปริมาณการใช้น้ำอ้างอิงของพืช คำนวณโดยใช้ สมการ Penman-Montieth โดยอาศัยข้อมูลภูมิอากาศ ได้แก่ อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ช่วงแสงแดด และความเร็วลม

(2) ปริมาณฝนรายเดือน เพื่อกำหนดฝนใช้การ

(3) รูปแบบการปลูกพืช ได้แก่ วันที่เพาะปลูก ค่าสัมประสิทธิ์พืช โดยค่าสัมประสิทธิ์พืช จะพิจารณาตามความชื้นของดินที่มีความชื้น มากกว่าหรือน้อยกว่าร้อยละ 18 ในกรณีที่ค่า Kc มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าดินมีความชื้นมากกว่าร้อยละ 18 แต่ถ้าในกรณีที่ค่า Kc มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าดินมีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 18 โดยความชื้นมีปัจจัยมาจากระยะเวลาและฤดูกาล นอกจากนี้ ยังต้องการข้อมูลที่สำคัญในระบบการปลูกพืช คือ ระยะการเจริญเติบโต ความยาวราก สัดส่วนน้ำที่พืชใช้ได้ พื้นที่ปลูก โดยข้อมูลเหล่านี้ถูกกำหนดโดยโปรแกรมเบื้องต้น ผู้ใช้สามารถปรับเปลี่ยนชุดข้อมูลตามพืชที่เพาะปลูกในพื้นที่นั้นๆ

(4) ข้อมูลประเภทของดิน โดยข้อมูลประเภทของดินจะเป็นตัวกำหนดการซึมผ่านน้ำในชั้นดิน รวมถึงค่าความชื้นในดินทั้งหมด ค่าเริ่มต้นในการสูญเสีย น้ำจากดินโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าความชื้นในดินทั้งหมด

การคำนวณการใช้ น้ำของพืช ข้อมูลน้ำฝนรายเดือนที่ถูกนำเข้าโปรแกรม จะถูกนำไปคำนวณให้อยู่ในรูปข้อมูลรายวัน โดยโปรแกรมจะคำนวณ 2 ขั้นตอน คือ ในขั้นแรก ข้อมูลน้ำฝนรายเดือนจะถูกแปลงให้ข้อมูลมีลักษณะที่กระจายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยใช้วิธี polynomial curve ที่เป็นการปรับเปลี่ยนโดยผู้ใช้ ในการศึกษาครั้งนี้ข้อมูลน้ำฝนรายเดือนจะถูกแปลงให้ข้อมูลมี

ลักษณะที่กระจายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยโปรแกรม CROPWAT 8.0 ขั้นตอนต่อมาโปรแกรมจะคำนวณให้ฝนตกเฉลี่ยเดือนละ 6 ครั้งในทุกๆ 5 วัน

การคำนวณปริมาณฝนใช้การ (effective rainfall, P_{eff}) โปรแกรม CROPWAT 8.0 กำหนดให้มีการคำนวณ 4 วิธี โดยสามารถปรับเปลี่ยนได้ คือ

- (1) Fixed percentage
- (2) Dependable rainfall (FAO/AGLW formula)
- (3) Empirical formular
- (4) USDA Soil Conservation Service

โดยโปรแกรมจะกำหนดให้ใช้วิธี USDA Soil Conservation Service โดยวิธีนี้จะคำนวณปริมาณฝนใช้การจากปริมาณฝนใน 2 กรณี คือ (22)

- (1) กรณีที่คำนวณฝนใช้การเป็นรายเดือน

กรณีที่ข้อมูลปริมาณฝนเป็นรายเดือน (P_{month}) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 250 มิลลิเมตรต่อเดือน ดังสมการ 2.15

$$P_{eff} = P_{month} * (125 - 0.2 * P_{month}) / 125 \quad (2.15)$$

กรณีที่ข้อมูลปริมาณฝน (P_{month}) มากกว่า 250 มิลลิเมตรต่อเดือน ดังสมการ 2.16

$$P_{eff} = 125 + 0.1 * P_{month} \quad (2.16)$$

เมื่อ P_{eff} = ปริมาณฝนใช้การรายเดือน (มิลลิเมตรต่อเดือน)

P_{month} = ปริมาณฝนรายเดือน (มิลลิเมตรต่อเดือน)

- (2) กรณีที่คำนวณข้อมูลปริมาณฝนใช้การเป็นระยะ (decade)

กรณีข้อมูลปริมาณฝนเป็นระยะ (P_{dec}) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 250/3 มิลลิเมตรต่อเดือน ดังสมการ 2.17

$$P_{eff}(dec) = P_{dec} * (125 - 0.6 * P_{dec}) / 125 \quad (2.17)$$

กรณีข้อมูลปริมาณฝนเป็นระยะ (Pdec) มากกว่า 250/3 มิลลิเมตรต่อเดือน ดังสมการ 2.18

$$P_{\text{eff}}(\text{dec}) = (125 / 3) + 0.1 * P_{\text{dec}} \quad (2.18)$$

เมื่อ $P_{\text{eff}}(\text{dec})$ = ปริมาณฝนใช้การเป็นระยะ (มิลลิเมตรต่อเดือน)
 P_{dec} = ปริมาณฝนเป็นระยะ (มิลลิเมตรต่อเดือน)

2.2.2 CWR-RID

โปรแกรม CWR-RID เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ช่วยให้การคำนวณการใช้น้ำของพืชต่างๆ ที่ปลูกในเขตชลประทาน พัฒนาโดยกรมชลประทาน (17) เพื่อนำไปใช้วางแผนการส่งน้ำในช่วงฤดูกาลการเพาะปลูกให้สอดคล้องกับปริมาณน้ำต้นทุน หรือพื้นที่เพาะปลูก โดยใช้ข้อมูลเบื้องต้น ได้แก่ ข้อมูลพื้นฐานของโครงการชลประทาน ชนิดของพืช พื้นที่และช่วงเวลาปลูกหรือตามการวางแผนการส่งน้ำ เป็นต้น การคำนวณความต้องการน้ำของพืชจะใช้ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์พืช (crop coefficient, Kc) ของพืชและข้อมูลปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (reference crop evapotranspiration, ET₀) รายเดือนที่ได้จากวิธีการ Penman-Monteith นำมาคำนวณ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าความลึกของน้ำที่พืชต้องการหรือที่ต้องส่งให้กับพืช มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อระยะเวลาหรือคิดเป็นปริมาณน้ำทั้งหมดมีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะแสดงอยู่ในรูปของกระดานคำนวณ (microsoft excel sheet) ซึ่งสามารถนำข้อมูลนี้ไปประยุกต์ใช้งานในการจัดสรรน้ำหรือวางแผนการใช้น้ำต่อไปได้สะดวก (17)

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรม CWR-RID ประกอบด้วย

- (1) ข้อมูลที่มีอยู่ในส่วนของตัวโปรแกรม CWR-RID
 - ค่าสัมประสิทธิ์พืช (crop coefficient, Kc) ที่ได้จากการทดลอง
 - ค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET₀) โดย Penman-Monteith
- (2) ข้อมูลภายนอกที่ต้องการเพิ่ม
 - ข้อมูลพื้นที่เพาะปลูก (ไร่)
 - ช่วงเวลาการเพาะปลูก (เดือนที่ปลูก)

โปรแกรม CWR-RID สามารถนำมาคำนวณหาการใช้น้ำของพืชได้ 21 ชนิด โดยจะอยู่ในกลุ่มของข้าว พืชไร่ และพืชเศรษฐกิจหลักที่ปลูกในพื้นที่ชลประทาน แต่ผู้ใช้สามารถคำนวณกลุ่มพืชที่ไม่อยู่ในตัวกำหนดของโปรแกรม โดยประมาณค่าการใช้น้ำของพืชจากกลุ่มพืชเดียวกัน ค่าการใช้น้ำของพืชที่คำนวณได้จากโปรแกรม CWR-RID จะเป็นปริมาณการใช้น้ำสุทธิในพื้นที่เพาะปลูก โดยยังไม่ได้หักค่าน้ำฝนใช้การ (effective rainfall)

2.2.3 WAPF

โปรแกรมคำนวณความต้องการน้ำเพื่อการปลูกข้าว (water allocation in paddy field, WAPF) พัฒนาโดยกรมชลประทาน (23) เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ช่วยให้การคำนวณความต้องการน้ำของการเพาะปลูกข้าว เพื่อนำไปใช้วางแผนการส่งน้ำในช่วงฤดูกาลเพาะปลูกให้สอดคล้องกับปริมาณน้ำในพื้นที่เพาะปลูก

การคำนวณความต้องการน้ำของข้าวจะใช้ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์พืช (crop coefficient, K_c) ของข้าวทั้งแบบนาดำและนาหว่านน้ำตาม รวมทั้งข้อมูลปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (reference crop evapotranspiration, ET_0) รายเดือนหรือรายสัปดาห์ที่ได้จากวิธีการของ Penman-Monteith นำมาคำนวณ ซึ่งผลการคำนวณที่ได้จะเป็นปริมาณน้ำที่นาข้าวต้องการใช้ในการเพาะปลูกตั้งแต่เริ่มเตรียมแปลงปลูก/ตกกล้า จนกระทั่งหยุดส่งน้ำเพื่อเก็บเกี่ยวผลผลิต มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร การแสดงผลการคำนวณจะแสดงอยู่ในรูปของกระดาษคำนวณ (microsoft excel sheet) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการเตรียมข้อมูลเพื่อจัดสรรน้ำหรือวางแผนการใช้น้ำต่อไปได้อย่างสะดวก (21)

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรม WAPF ประกอบด้วย

(1) ข้อมูลที่มีอยู่ในส่วนของตัวโปรแกรม WAPF

- ค่าสัมประสิทธิ์พืช (K_c) กลุ่มข้อมูลพืชเศรษฐกิจที่ได้จากการทดลองโดย

กรมชลประทาน

- ค่าการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0) โดยสูตรของวิธี Penman-Monteith

- ปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือน/จังหวัด

- วิธีการประมาณค่าฝนใช้การ

(2) ข้อมูลภายนอกที่ต้องการเพิ่ม

- ข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกข้าว ได้แก่ ในเขตจังหวัด

- ข้อมูลชนิดพันธุ์ข้าว/วิธีการเพาะปลูก (นาดำ)

- ข้อมูลการเตรียมแปลงเพาะปลูกและตกกล้า ประกอบด้วยระยะเวลาการเตรียมแปลงกล้า, ระยะเวลาเลี้ยงกล้า, พื้นที่ในการตกกล้า และปริมาณน้ำที่ใช้ในการเตรียมแปลงกล้าและเพื่อเลี้ยงกล้า

- ข้อมูลการเตรียมแปลงสำหรับนาดำ ประกอบด้วย ระยะเวลาการเตรียมแปลงนาดำ และปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อการเตรียมแปลง

- ข้อมูลคุณสมบัติของดินที่ประกอบด้วยลักษณะของเนื้อดินและอัตราการซึมของน้ำผ่านเนื้อดิน

- ข้อมูลจำนวนพื้นที่เพาะปลูกข้าว

การคำนวณฝนใช้การในโปรแกรม WAPF มีวิธีการคำนวณ 4 วิธี คือ วิธีของกองอุทกวิทยากรมชลประทาน วิธีของ ECI (Engineering Consultant Inc.) วิธี Acres (Acres International Ltd.) และวิธี USDA (U.S. Department of Agriculture's Conservation Service) โดยผู้ใช้สามารถเลือกวิธีให้สอดคล้องกับการทำงาน โดยโปรแกรมจะกำหนดให้ใช้วิธีของกองอุทกวิทยา กรมชลประทาน

2.3 การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์

การคำนวณหาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์จะมีหน่วยวัดขึ้นอยู่กับประเภทของสินค้าหรือผลผลิตหรือบริการ เช่น ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ลูกบาศก์เมตรต่อชิ้น เป็นต้น วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สำหรับการปลูกพืช (total water footprint, WF) คำนวณจากผลรวมของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน (blue water footprint, WF_{blue}) วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว (green water footprint, WF_{green}) วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา (gray water footprint, WF_{gray}) ดังสมการ 2.3 (8)

$$WF = WF_{blue} + WF_{green} + WF_{gray} \quad (2.3)$$

เมื่อ WF = วอเตอร์ฟุตพริ้นท์รวมในพืช (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)

WF_{blue} = วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)

WF_{green} = วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)

WF_{gray} = วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินและวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวนั้น คำนวณจากปริมาณน้ำที่พืชใช้ (crop water use, CWU)หารด้วยผลผลิตของพืช (yield, Y) ดังสมการ 2.4 และ 2.5 (8)

$$WF_{green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad (2.4)$$

$$WF_{blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad (2.5)$$

เมื่อ WF_{blue} = วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)

WF_{green} = วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)

CWU_{green} = ปริมาณน้ำสีเขียวพืชที่พืชใช้ (ลูกบาศก์เมตรต่อเฮกแตร์)

CWU_{blue} = ปริมาณน้ำสีน้ำเงินที่พืชใช้ (ลูกบาศก์เมตรต่อเฮกแตร์)

Y = ผลผลิตของพืช (ตันต่อไร่)

CWU_{green} และ CWU_{blue} คำนวณมาจาก สมการที่ 2.6 และ 2.7

$$CWU_{green} = 10 \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{green} \quad (2.6)$$

$$CWU_{blue} = 10 \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{blue} \quad (2.7)$$

เมื่อ l_{gp} = ระยะการเจริญเติบโตของพืช (วัน)

ET_{green} = ปริมาณการใช้น้ำสีเขียวของพืชจริง (มิลลิเมตรต่อวัน)

ET_{blue} = ปริมาณการใช้น้ำสีน้ำเงินของพืชจริง (มิลลิเมตรต่อวัน)

ET_{green} หาได้จากสมการที่ 2.8

$$ET_{green} = \min (ET_c, P_{eff}) \quad (2.8)$$

และ

ET_{blue} หาได้จากสมการที่ 2.9

$$ET_{blue} = \max (0, ET_c - P_{eff}) \quad (2.9)$$

เมื่อ ET_c = ปริมาณการใช้น้ำของพืช (มิลลิเมตรต่อวัน)

P_{eff} = ปริมาณฝนใช้การ (มิลลิเมตรต่อวัน)

P_{eff} จะมีค่าเป็นบวกก็ต่อเมื่อปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_c) มีค่ามากกว่าปริมาณฝนใช้การ (P_{eff}) โดยปริมาณฝนใช้การ (P_{eff}) จะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณฝนในแต่ละระยะการเจริญเติบโตของพืช

ปริมาณการใช้น้ำของพืชคำนวณจากสมการที่ 2.10

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (2.10)$$

เมื่อ ET_c = ปริมาณการใช้น้ำของพืช (มิลลิเมตรต่อวัน)

K_c = ค่าสัมประสิทธิ์พืช

ET_0 = ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (มิลลิเมตรต่อวัน)

ปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_c) จะเป็นค่าคงที่ ที่เปลี่ยนแปลงเป็นช่วงๆ ตามระยะการศึกษา เช่น รายวัน รายสัปดาห์ หรือ รายเดือน

ส่วนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาคำนวณจากปริมาณน้ำที่เจือปนด้วยสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะจากการเพาะปลูก (8) ดังสมการ 2.11

$$WF_{grey} = \frac{(\alpha \times AR) / (C_{max} - C_{nat})}{Y} \quad (2.11)$$

เมื่อ α = สัดส่วนของน้ำท่าจากการชะละลายสาร
(leaching runoff fraction)

AR = อัตราการใช้สารในพื้นที่ต่อไร่ (กิโลกรัมต่อไร่)

C_{max} = ความเข้มข้นสูงสุดของสารพิษที่ยอมรับได้
(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

C_{nat} = ความเข้มข้นสารพิษในธรรมชาติที่พิจารณา
(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

Y = ผลผลิตพืช (ตันต่อไร่)

ปริมาณการใช้น้ำของพืชหรือการคายระเหยเป็นกระบวนการร่วมกันระหว่างการระเหยน้ำ หมายถึง การสูญเสียจากผิวน้ำหรือจากผิวดินโดยตรง กับการคายน้ำของพืช ที่เกิดจากการที่ปากใบของต้นไม้เปิดขึ้น รวมถึงไอน้ำซึ่งอยู่ในช่องว่างภายในใบก็จะแผ่กระจายออกสู่บรรยากาศในสภาพที่กลายเป็นไอ (18)

ปัจจัยที่ควบคุมปริมาณการใช้น้ำของพืชหรือการคายระเหย ได้แก่ การเคลื่อนที่ของความชื้นในดิน การถ่ายเทความชื้นผ่านปากใบ และขีดความสามารถในการรับการระเหยของ

บรรยากาศ แต่ปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือความชื้นในดิน ในกรณีที่ความชื้นในดินมีให้กับพืชเต็มที่ตลอดเวลา ปริมาณการคายน้ำและการระเหยที่เกิดขึ้นจะเรียกว่า การคายระเหยสูงสุด ถ้าหากความชื้นหรือน้ำที่ให้กับดินน้อยกว่าการคายระเหยสูงสุด น้ำจะถูกดึงออกจากดินจนความชื้นลดลงเรื่อยๆ ในกรณีนี้จะเรียกว่า การคายระเหยจริง อัตราการคายน้ำของพืชจะลดต่ำลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดอับเฉา การคายระเหยจริงจะหยุด (24)

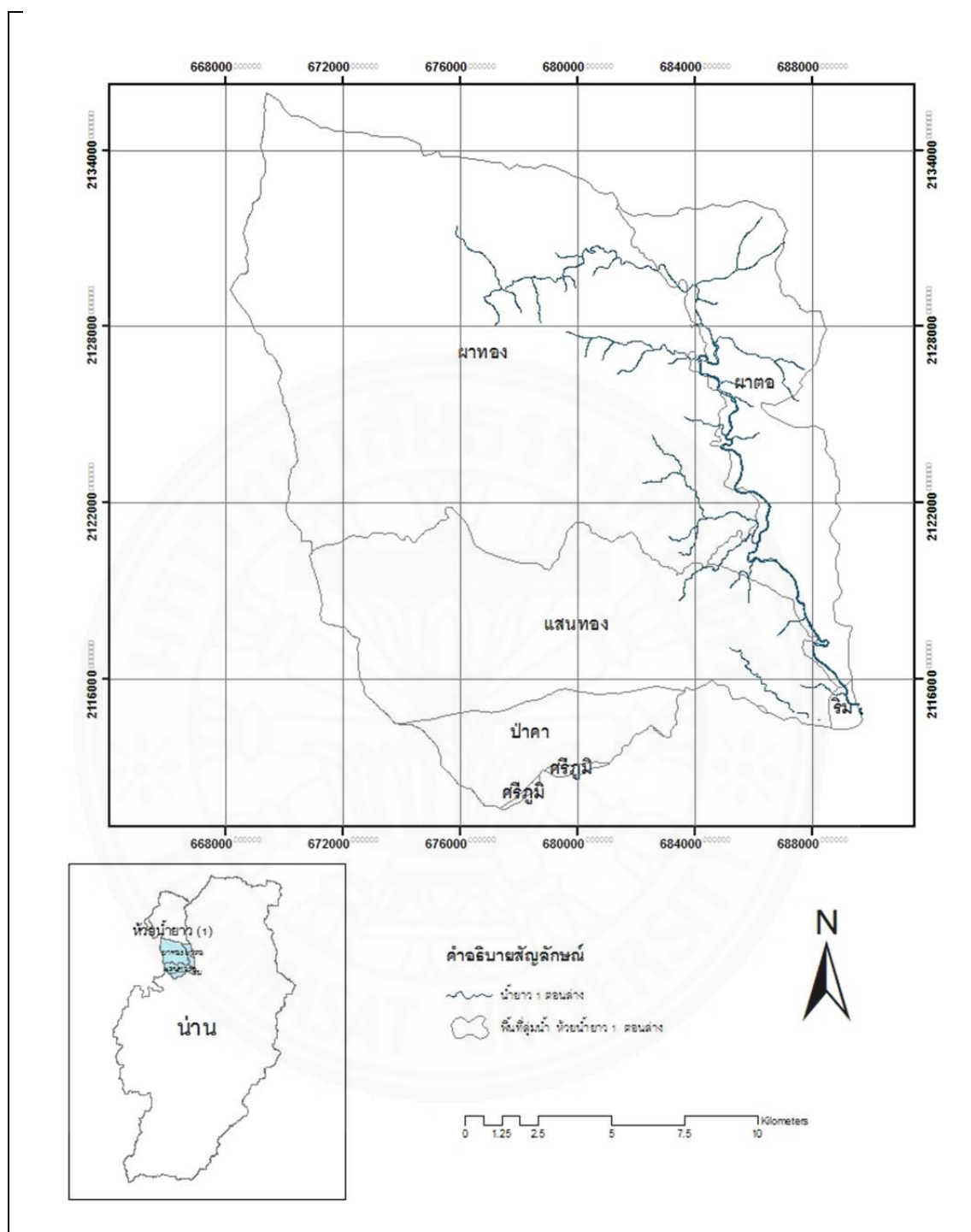
2.4 สภาพทั่วไปพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง

2.4.1 ลักษณะภูมิประเทศ

พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน มีพื้นที่ลุ่มน้ำ 339.7 ตารางกิโลเมตร จากพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยน้ำยาว 1 ทั้งหมด 862.3 ตารางกิโลเมตร (7) มีพื้นที่ปลูกข้าวนาสวน 10,555 ไร่ หรือ 16.88 ตารางกิโลเมตร พื้นที่ปลูกข้าวโพด 8,059 ไร่ หรือ 12.89 ตารางกิโลเมตร ผลผลิตข้าวเปลือกในปี 2555/2556 อยู่ที่ 0.48 ตันต่อไร่ และผลผลิตข้าวโพด 0.64 ตันต่อไร่ (25) ครอบคลุมพื้นที่ 6 ตำบล ได้แก่ ตำบลผาทอง ตำบลผาตอ ตำบลแสนทอง ตำบลลิ่ม ตำบลป่าคา และตำบลศรีภูมิ ดังภาพที่ 2.1 โดยมีลักษณะภูมิประเทศดังนี้

ทิศเหนือ	ติดกับ	อำเภอสองแคว จังหวัดน่าน
ทิศใต้	ติดกับ	อำเภอเมือง จังหวัดน่าน และอำเภอสันติสุข จังหวัดน่าน
ทางทิศตะวันออก	ติดกับ	อำเภอเชียงกลาง จังหวัดน่าน
ทิศตะวันตก	ติดกับ	อำเภอปง จังหวัดพะเยา

ซึ่งลักษณะภูมิประเทศในอำเภอท่าวังผาส่วนใหญ่มีสภาพพื้นที่เป็นลูกคลื่น ความลาดชันเกิน 30 องศา โดยมีพื้นที่ลูกคลื่นลอนลาดตามลุ่มน้ำ โดยจะเป็นที่ราบแคบๆ ระหว่างหุบเขาตามแนวยาวของลุ่มน้ำ



ภาพที่ 2.1 พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน พ.ศ. 2555^{26,27}

2.4.2 ลักษณะภูมิอากาศและอุตุนิยมวิทยา

ลักษณะภูมิอากาศในอำเภอท่าวังผา จะได้รับลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ในช่วงเดือน พฤษภาคม ถึงเดือน กันยายน ซึ่งจะทำให้ฝนตกชุก และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ระหว่างเดือน ตุลาคม ถึงเดือน กุมภาพันธ์ ซึ่งเป็นในช่วงของฤดูหนาว ส่วนในฤดูร้อนจะได้รับลมมรสุมตะวันออกเฉียงใต้ ทำให้มีสภาพอากาศที่ร้อน (28)

ใน ปี พ.ศ. 2556 อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน มีข้อมูลอุณหภูมิ โดยจัดเก็บ ณ สถานีอุตุนิยมวิทยา (ตารางที่ 2.1)

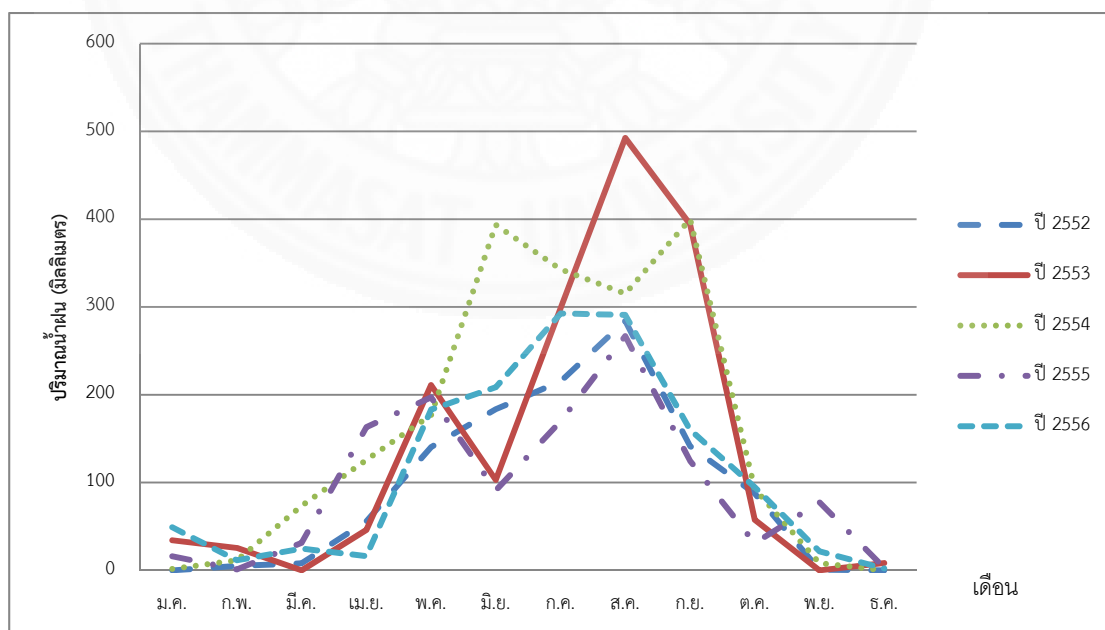
ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิต่ำสุด อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส) รายเดือน ปี พ.ศ. 2556 อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน^[29]

เดือน	อุณหภูมิต่ำสุด (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส)
มกราคม	12.5	33.1
กุมภาพันธ์	14.0	35.8
มีนาคม	13.8	39.0
เมษายน	20.4	40.2
พฤษภาคม	21.0	40.3
มิถุนายน	22.5	36.8
กรกฎาคม	22.6	36.3
สิงหาคม	22.5	35.5
กันยายน	19.0	35.5
ตุลาคม	21.9	31.3
พฤศจิกายน	17.7	29.9
ธันวาคม	13.0	28.1
เฉลี่ย	18.40	35.15

ข้อมูลปริมาณฝนรายเดือน ของอำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน ปี พ.ศ. 2552-2556 จากกรมอุตุนิยมวิทยา (29) โดยเดือนที่มีค่าปริมาณฝนต่ำสุดในปี พ.ศ. 2556 คือ เดือนธันวาคม มีค่าเท่ากับ 2.2 มิลลิเมตร และเดือนที่มีค่าปริมาณฝนสูงสุดคือ เดือนกรกฎาคม มีค่าเท่ากับ 292.6 มิลลิเมตร และปริมาณฝนทั้งปีมีค่าเท่ากับ 1,355.5 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงข้อมูล ดังตารางที่ 2.2 และภาพที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณฝนรายเดือน (มิลลิเมตร) รายเดือน ปี พ.ศ. 2552-2556 อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน^[29]

ปี	ปริมาณฝน (มิลลิเมตร)											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2552	0.0	5.1	7.9	56.0	140.3	183.5	215.3	284.0	141.4	87.5	0.6	0.0
2553	34.2	25.5	0.0	46.1	211.1	102.9	298.5	492.6	394.2	57.5	0.0	8.4
2554	1.5	11.5	73.4	125.7	177.0	393.6	342.9	315.1	400.0	92.8	8.2	0.0
2555	16.0	1.1	31.3	163.2	197.1	91.1	169.6	266.8	124.6	30.7	77.7	2.8
2556	49.0	11.5	24.7	16.2	183.2	208.6	292.6	291.0	160.1	94.8	21.6	2.2



ภาพที่ 2.2 ปริมาณฝนรายเดือน (มิลลิเมตร) พ.ศ. 2552-2556 ของอำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน^[29]

2.4.3 ลักษณะทางกายภาพของดิน

ลักษณะทางกายภาพของทรัพยากรดินในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอน้ำขุ่น จังหวัดน่าน ตามคุณสมบัติของดินและการแพร่กระจายตามภูมิสัณฐาน แบ่งได้เป็น 2 ชุดหลักๆ คือ (30)

2.4.3.1 ดินเกิดจากตะกอนลำน้ำค่อนข้างใหม่ (semi-recent alluvium) และ สันดินริมน้ำ (levee)

ดินเหล่านี้พบได้เป็นบริเวณไม่กว้าง โดยกระจายอยู่ทั่วไปในบริเวณพื้นที่ราบและค่อนข้างราบรวมทั้งบริเวณริมฝั่งแม่น้ำ การแพร่กระจายของดินตะกอนลำน้ำค่อนข้างเก่าจะพบปะปนอยู่กับดินตะกอนลำน้ำใหม่ ซึ่งดินตะกอนที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะมีระดับสูงกว่าที่ราบน้ำท่วมถึง โดยมีลักษณะของดินที่ระบายน้ำค่อนข้างเร็วจนถึงค่อนข้างดี เหมาะกับการใช้ประโยชน์ในการเพาะปลูก

2.4.3.2 ดินเกิดจากตะกอนลำน้ำเก่า (old alluvium)

ซึ่งดินเหล่านี้เกิดจากการทับถมในลำน้ำเป็นเวลานาน โดยมีสภาพทางภูมิสัณฐานเป็นลานตะพักลำน้ำขั้นบันไดระดับต่ำ (low terrace) ระดับกลาง (middle terrace) และระดับสูง (high terrace) พบกระจายทั่วไปในพื้นที่ระดับกลางและสูงของพื้นที่ลุ่มน้ำที่มีลักษณะภูมิประเทศเป็นลูกคลื่นลอนลาดระหว่างเทือกเขา ได้แก่ บริเวณท้องที่อำเภอน้ำขุ่น ลักษณะดินจะเป็นดินที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันมากทั้งความลึก เนื้อดิน ความลาดชัน และการระบายน้ำ เหมาะกับการทำเกษตร ได้แก่ นาข้าว พืชไร่ เป็นต้น

จากคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน ที่จำแนกโดยกรมพัฒนาที่ดิน (30) ในพื้นที่ลุ่มน้ำน่านทั้งหมด แต่จากการศึกษาพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอน้ำขุ่น จังหวัดน่าน เกี่ยวข้องกับหน่วยดินที่ 7 ชุดดินที่ 49 มีลักษณะเป็นดินเหนียว ดินมีสีน้ำตาล เหลืองหรือแดง เกิดจากวัตถุต้นกำเนิดของดินพวกตะกอนลำน้ำ หรือเกิดจากการสลายตัวผุพังของดินหลายชนิด ที่มีเนื้อละเอียดพบบริเวณที่ตอนที่เป็นลูกคลื่นจนถึงเนินเขา มีความลาดชันประมาณ 3-25 เปอร์เซ็นต์ เป็นดินลึก มีการระบายน้ำดี มีความอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติค่อนข้างต่ำ pH ประมาณ 4.5-5.5

2.4.4 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของแหล่งน้ำ

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำในพื้นที่ที่มีความเหมาะสมควรจะเป็นกลาง ซึ่งทำให้สิ่งมีชีวิต เช่น พืชและสัตว์สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ และเป็นกลางสำหรับธาตุอาหาร เพราะเป็นตัวทำละลายที่ดีที่สุดตัวหนึ่ง (31)

2.4.4.1 อุณหภูมิของน้ำ (temperature)

อุณหภูมิของน้ำจะมีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาเคมี มีผลต่อการลดลงของปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (32) อุณหภูมิที่สูงขึ้นมักจะทำให้พืชของสารประเภทต่างๆ เช่น ยากำจัดศัตรูพืชและโลหะหนักมีความรุนแรงมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะช่วยเร่งให้มีการดูดซึมและการแพร่กระจายของสารพิษได้เร็วขึ้น (33)

2.4.4.2 ความเป็นกรด-เบส (pH)

ความเป็นกรด-เบส มาจากคำว่า positive potential of the hydrogen ions ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย คือ ค่าลบของ logarithm ของความเข้มข้นของ H^+ หรือ $pH = -\log[H^+]$ สิ่งที่ยึดบอกความเป็นกรดคือ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) และสิ่งที่ยึดบอกความเป็นเบสคือ ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ค่า pH ไม่ได้บอกถึงค่าความเป็นกรด-เบสรวมของสารละลายนั้นๆ แต่บอกถึงความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน ณ เวลานั้น สารละลายที่มี pH เท่ากัน อาจมีความเป็นกรด-เบสต่างกัน (34)

2.4.4.3 การนำไฟฟ้า (conductivity)

การนำไฟฟ้า คือ ความสามารถของน้ำที่ให้กระแสไฟฟ้าผ่านสื่อำไฟฟ้าในน้ำ คือ ไอออนของสารประกอบอนินทรีย์ เช่น กรดอินทรีย์ ต่าง และเกลือ ทั้งนี้ การนำไฟฟ้าของน้ำขึ้นอยู่กับความเข้มข้นชนิดของไอออนที่อยู่ในน้ำ และอุณหภูมิที่ทำการวัด ค่ากรด-เบส และเกลืออนินทรีย์ เช่น HCl , Na_2CO_3 และ $NaCl$ เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเพราะแตกตัวให้อิออนบวกและลบ การนำไฟฟ้าไม่ได้เป็นค่าเฉพาะของไอออนตัวใดตัวหนึ่ง แต่เป็นค่ารวมของไอออนทั้งหมดในน้ำ (34) การนำไฟฟ้านี้ไม่ได้บอกให้ทราบถึงชนิดของสารในน้ำ บอกแต่เพียงว่ามีการเพิ่มหรือลดลงของไอออนที่ละลายในน้ำเท่านั้น กล่าวคือ ถ้าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ก็แสดงว่าสารที่แตกตัวได้ในน้ำเพิ่มขึ้น

2.4.4.4 ออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen)

ออกซิเจนละลายน้ำ คือ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ โดยออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ ทั้งพืชและสัตว์ (35) ทั้งนี้แบคทีเรียที่เป็นสารอินทรีย์ในน้ำต้องการออกซิเจน (aerobic bacteria) ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ การใช้ออกซิเจนของแบคทีเรียนี้จะทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลง ดังนั้นในน้ำที่สะอาดจะมีออกซิเจนละลายน้ำสูง และน้ำเสียจะมีออกซิเจนละลายน้ำต่ำ มาตรฐานของน้ำที่มีคุณภาพดีโดยทั่วไปจะมีออกซิเจนละลายน้ำประมาณ 5-8 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำเสียจะมีออกซิเจนละลายน้ำต่ำกว่า 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ออกซิเจนละลายน้ำมีความสำคัญในการบ่งบอกว่าแหล่งน้ำนั้นมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอต่อการใช้ของสิ่งมีชีวิตหรือไม่ (36)

2.4.4.5 แอมโมเนีย-ไนโตรเจน

แอมโมเนีย-ไนโตรเจน เป็นตัวแปรคุณภาพน้ำตัวแปรหนึ่งที่มีปรากฏอยู่ในเอกสารเกี่ยวกับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเสมอ นอกจากนี้แอมโมเนีย-ไนโตรเจนยังเป็นตัวแปรหนึ่งที่มาตรฐานคุณภาพน้ำประเภทต่างๆ ได้กำหนดค่าไว้เป็นเกณฑ์อ้างอิง โดยกรมควบคุมมลพิษได้กำหนดความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) ในมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภทที่ 2 (ใช้ประโยชน์เพื่อการประมง การอนุรักษ์สัตว์น้ำ) สูงสุดไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (37)

2.4.4.6 ไนเตรท-ไนโตรเจน

สารประกอบไนโตรเจนที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ คือ ไนเตรท ซึ่งโดยมากแล้วไนเตรทจะถูกใช้มากกว่าในรูปอื่นๆ ไนโตรเจนที่ถูกตรึงแล้วจะถูกนำมาสร้างกรดอะมิโนและโปรตีน เมื่อพืชและจุลินทรีย์บางชนิดเข้าย่อยสลายกลายเป็นกรดอะมิโน และถูกเปลี่ยนเป็นไนเตรทเนื่องจากมีพืชบางชนิดเท่านั้นที่มีจุลินทรีย์ที่สามารถตรึงไนโตรเจนอยู่ด้วย ดังนั้น ส่วนใหญ่พืชจึงต้องการไนโตรเจนในรูปของไนเตรทเท่านั้น และปริมาณสารประกอบไนโตรเจนชนิดต่างๆ สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นถึงภาวะเน่าเสียของน้ำที่เกิดขึ้นด้วย โดยถ้ามีปริมาณไนเตรทสูง แสดงว่าแหล่งน้ำนั้นได้รับสิ่งสกปรกมานานจนสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนเปลี่ยนเป็นไนเตรทแล้ว และไม่มีอันตรายต่อสัตว์น้ำ ในมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภทที่ 2 (ใช้ประโยชน์เพื่อการประมง การอนุรักษ์สัตว์น้ำ) สูงสุดไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (38)

2.4.4.7 ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส

ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสเป็นส่วนหนึ่งขององค์ประกอบของดินโดยทั่วไป และเป็นธาตุที่มีปริมาณเป็นอันดับ 11 ในโลก ซึ่งเป็นสิ่งที่พืชไม่สามารถนำมาใช้ได้ นอกจากสารประกอบฟอสเฟตนั้นสลายตัวเสียก่อน เพื่อให้ส่วนประกอบของฟอสฟอรัสหลุดออกมา ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำธรรมชาติมีอยู่เป็นจำนวนน้อย ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะพบอยู่ในรูปของฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสในน้ำประมาณร้อยละ 70 มาจากการใช้ปุ๋ยในการเกษตร และปริมาณร้อยละ 16 มาจากผงซักฟอกที่ใช้ในบ้านเรือน คนทั่วไปอาจคิดว่าฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ ส่วนใหญ่มาจากปุ๋ยฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสที่ชาวสวนรดน้ำต้นไม้ แต่ที่จริงแล้วฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสไม่เหมือนไนเตรท-ไนโตรเจนเพราะไม่ละลายน้ำ ทำให้ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสที่ยังคงอยู่ในรูปปุ๋ยจึงมีส่วนน้อยที่หายไป ปริมาณการไหลลงสู่แหล่งน้ำของฟอสเฟตมีผลกระทบต่อระบบนิเวศที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ ยูโทรฟิเคชัน ซึ่งการไหลลงสู่แหล่งน้ำอาจเกิดได้จากมลพิษที่มีแหล่งกำเนิดที่แน่นอน (point source pollution) และจากแหล่งกำเนิดมลพิษที่ไม่แน่นอน (non-point source pollution) ในมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภทที่ 2 (ใช้ประโยชน์เพื่อการประมง การอนุรักษ์สัตว์น้ำ) สูงสุดไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร (31)

2.5 ข้าวนาสวน

พื้นที่ที่เป็นนาข้าวในจังหวัดน่าน พบกระจายทั่วไปทุกอำเภอ ในบริเวณที่ราบลุ่มและในที่ราบหุบเขา โดยพื้นที่ในการปลูกข้าวนาสวน ซึ่งมีเนื้อที่โดยประมาณมากกว่าครึ่งหนึ่งของพื้นที่นาบนพื้นราบ พบกระจายอยู่ในอำเภอที่มีสภาพทางภูมิศาสตร์เป็นภูเขา และพบมากที่สุด ในเขตอำเภอท่าวังผา คิดเป็นร้อยละ 16.9 ของพื้นที่ปลูกข้าวนาสวนทั้งหมด (39)

การปลูกข้าวนาสวนในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน เกษตรกรส่วนใหญ่ใช้พันธุ์ข้าว กข.6 มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Oryza sativa* L. ชื่อสามัญว่า ข้าว และชื่อพันธุ์กลาย คือ กข.6 (RD 6) โดยมีชื่อพันธุ์เดิมว่า ข้าวเจ้าขาวดอกมะลิ 105 (KDML 105) ซึ่งขึ้นทะเบียนในปี พ.ศ. 2520 และเป็นพันธุ์ข้าวไวต่อแสง โดยมีลักษณะเด่นที่สำคัญ คือ เป็นสายพันธุ์ข้าวเหนียว นุ่ม มีกลิ่นหอม ทนแล้ง ให้ผลผลิตเฉลี่ยสูงประมาณ 600 กิโลกรัมต่อไร่ จึงเป็นที่นิยมในการปลูกทั้งในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (40) ซึ่งผลผลิตข้าวนาสวน อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน ปี พ.ศ. 2556 จากเนื้อที่เพาะปลูก 35,619 ไร่ เนื้อที่เก็บเกี่ยวผลผลิต 29,757 ไร่ ทำให้ได้รับผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้ 14,283.86 ตัน โดยผลผลิตเฉลี่ยเท่ากับ 0.48 ตันต่อ (ตารางที่ 2.3)

ตารางที่ 2.3 ผลผลิตข้าวนาสวน อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน ปี พ.ศ. 2552-2556^[4]

ปี พ.ศ.	เนื้อที่เพาะปลูก (ไร่)	เนื้อที่เก็บเกี่ยวผลผลิต (ไร่)	ผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้ (ตัน)	ผลผลิตต่อ เนื้อที่ เพาะปลูก (ตัน/ไร่)	ผลผลิตต่อ เนื้อที่ เก็บเกี่ยว (ตัน/ไร่)
2552	26,333	26,333	16,085	0.61	0.61
2553	24,684	23,090	14,620	0.59	0.63
2554	32,975	32,975	20,288	0.61	0.61
2555	46,306	42,052	25,203	0.54	0.59
2556	35,619	29,757	14,283	0.40	0.48

การปลูกข้าวนาสวนสภาพพื้นที่ที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโต ดังนั้นเพื่อให้การเพาะปลูกได้ผลผลิตและเติบโตได้ดี จึงต้องอาศัยปัจจัยทางภูมิศาสตร์และอุตุนิยมิวิทยาต่อไปนี้ (41)

(1) ความสูงของพื้นที่

ข้าวนาสวนขึ้นได้ตั้งแต่ระดับพื้นราบถึงที่ระดับความสูง 1,500 เมตร จากระดับทะเลปานกลางและสามารถเจริญเติบโตทั้งในที่ดอน และที่ลุ่มที่มีระดับน้ำตั้งแต่ 0.05-0.50 เมตร (42)

(2) ลักษณะดิน

ข้าวนาสวนขึ้นได้ในดินเกือบทุกชนิดยกเว้นดินทราย ส่วนใหญ่ชอบขึ้นในดินเหนียวและเหนียวร่วน มีความเป็นกรด-เบส (pH) ตั้งแต่ 3-10 สามารถขึ้นได้แม้กระทั่งในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ

(3) ปริมาณการใช้น้ำ

ปริมาณการใช้น้ำในการปลูกข้าวนาสวน มีการใช้น้ำตั้งแต่ 875-2,000 มิลลิเมตรต่อปี แต่ควรมีการกระจายฝนที่ดี ในพื้นที่ที่ไม่ได้รับน้ำชลประทานหรือที่เรียกว่านาฝน ซึ่งส่วนใหญ่จะปลูกข้าวนาสวนได้ในนาปีเท่านั้น และการตอบสนองต่อการใช้น้ำยังขึ้นอยู่กับพันธุ์และช่วงของการเจริญเติบโต ในช่วงการเตรียมดินนั้นควรมีน้ำประมาณ 150-200 มิลลิเมตร ช่วงที่เป็นต้นกล้าต้องการน้ำประมาณ 250-400 มิลลิเมตร จนถึงต้นกล้าอายุ 30-40 วัน ส่วนในช่วงปักดำจนกระทั่งเก็บเกี่ยวนั้นควรมีน้ำอยู่ในระหว่าง 800-1,200 มิลลิเมตร

(4) แสง

ปริมาณแสงมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโต โดยที่ข้าวนาสวนจะใช้แสงอาทิตย์ในกระบวนการสังเคราะห์แสง และช่วงเวลาสั้นยาวของกลางวันกลางคืนยังมีผลต่อการเจริญทางสืบพันธุ์ของข้าวไวแสง ความเข้มของแสงในฤดูฝนซึ่งมีเมฆหมอกมากนั้นจะน้อยกว่าความเข้มแสงในฤดูร้อน ผลผลิตข้าวนาสวนส่วนใหญ่จึงน้อยกว่าเมื่อปลูกในฤดูฝน เช่น จากรายงานพบว่าข้าวนาสวนที่ปลูกในฤดูฝนจะให้ผลผลิตประมาณ 0.94 ตันต่อไร่ แต่ถ้านำพันธุ์เดียวกันไปปลูกในหน้าร้อนหรือหน้าแล้งจะได้ผลผลิตสูงถึง 1.09 ตันต่อไร่ (ใช้พันธุ์ กข.11, กข.7 และ กข.1) ซึ่งแสงมีความจำเป็นมากในช่วงของการเริ่มสร้างดอกจนกระทั่ง 10 วันก่อนเมล็ดแก่ (41)

(5) อุณหภูมิ

ได้มีการศึกษาพบว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของข้าวนาสวน และการให้ผลผลิตพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ในระหว่าง 25-33 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ต่ำเกินไปหรือสูงเกินไป (ต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า 35 องศาเซลเซียส) จะมีผลต่อการงอกของเมล็ด การยืดของใบ การแตกกอ การสร้างดอกอ่อน การผสมเกสร เป็นต้น เช่น พบว่าอุณหภูมิที่สูง

เกินไปและต่ำเกินไปช่วงที่มีการออกดอกจะทำให้ดอกข้าวเป็นหมัน ซึ่งจะส่งผลทำให้ได้ผลผลิตต่ำกว่าปกติ เป็นต้น

(6) ความชื้นสัมพัทธ์

อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศ ต่อการเจริญเติบโตของข้าวนาสวน นั้นมักจะไม่ชัดเจน เพราะจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณความเข้มแสงและอุณหภูมิในเชิงที่กลับกันคือ เมื่อความเข้มของแสงมากและอุณหภูมิสูงมักทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ อุณหภูมิเย็นในเวลากลางคืน ทำให้เกิดน้ำค้างสูง จะมีผลต่อการพัฒนาของเชื้อโรคของข้าวบางชนิด เช่น โรคใบไหม้ได้เหมาะสมยิ่งขึ้น เป็นต้น

(7) ลมที่พัดถ่ายเทอยู่ตลอดเวลา

ลมอ่อนที่พัดถ่ายเทอยู่ตลอดเวลา (ความเร็วประมาณ 0.75-2.25 กิโลเมตรต่อวินาที) จะช่วยให้มีการถ่ายเทก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงได้ดี ทำให้ข้าวนาสวนสามารถสังเคราะห์แสงได้มากยิ่งขึ้น แต่ถ้าลมแรงจะมีผลโดยตรงทำให้ต้นข้าวหักล้ม เกิดความเสียหายแก่ผลผลิตได้

2.5.1 ระยะการเจริญเติบโตของข้าวนาสวน

การเจริญเติบโตของข้าวนาสวนโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็นระยะต่างๆ ได้ดังนี้

2.5.1.1 การเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ (vegetative growth) โดยมี 2 ระยะคือ

(1) ระยะต้นกล้า (seedling stage) เป็นระยะจากข้าวงอกจนกระทั่งถึงข้าวแตกกอ ใช้ระยะเวลาประมาณ 20 วัน (ขึ้นอยู่กับพันธุ์) สิ้นสุดระยะนี้ต้นข้าวจะมีใบประมาณ 5-6 ใบ

(2) ระยะแตกกอ (tillering stage) นับจากข้าวเริ่มแตกกอดังกล่าวจนถึงข้าวเริ่มสร้างช่อดอกอ่อน (panicle initiation) ใช้เวลาประมาณ 30-50 วันหลังจากระยะต้นกล้า ซึ่งขึ้นอยู่กับการตอบสนองต่อช่วงแสงของพันธุ์ข้าว

2.5.1.2 การเจริญเติบโตทางด้านการสืบพันธุ์ (reproductive growth) เริ่มจากข้าวเริ่มสร้างช่อดอกอ่อน ผ่านระยะตั้งท้อง (booting stage) จนถึงโผล่ช่อดอกและผสมเกสร (heading, flowering, fertilization) โดยจะใช้ระยะเวลาช่วงนี้ประมาณ 30-35 วัน

2.5.1.3 การพัฒนาการของเมล็ด (grain development) ได้แก่ ระยะภายหลังการผสมเกสร ซึ่งรังไข่ที่ได้รับการผสมจะเจริญเติบโต อาหารที่ได้รับการสังเคราะห์แสงจะถูกสะสมในเมล็ดเป็นลำดับ ในหลายแห่งจึงเรียกระยะนี้ว่าระยะสะสมในเมล็ด (grain filling period) ในระยะแรกจะอยู่ในระยะน้ำนม (milky) เปลี่ยนเป็นแป้งอ่อน (dough) จนกระทั่งเมล็ดสุก (ripening) เป็นแป้งแข็ง

2.5.1.4 ระยะสุกแก่หรือเก็บเกี่ยว (harvest maturity) จะใช้เวลาการพัฒนารวมของเมล็ดทั้งหมดประมาณ 25-30 วัน

ดังนั้นเมื่อรวมระยะต่างๆ แล้ว ข้าวนาสวนจะมีอายุในระหว่าง 110-120 วัน สำหรับข้าวนาสวนไม่ไวแสงและประมาณ 120-140 วันสำหรับข้าวนาสวนไวแสง (42)

2.5.2 ขั้นตอนและวิธีการปลูกข้าวนาสวน

ลักษณะการปลูกข้าวนาสวนในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง ตำบลท่าวังผา จังหวัดน่าน ในช่วงเดือน กรกฎาคม ถึง เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 จะเป็นลักษณะของนาดำโดยอาศัยน้ำฝน พันธุ์ข้าวที่ใช้เป็นพันธุ์ข้าวไวต่อแสง การปลูกข้าวนาสวนในลักษณะของนาดำ มีรายละเอียดดังนี้

2.5.2.1 การเตรียมพื้นที่ในลักษณะนาดำ

การทำนาดำต้องมีการเตรียมพื้นที่เรียกว่าไถ ซึ่งมี 3 ขั้นตอน คือ การไถตะ การไถแปร และการไถคราด โดยการไถตะจะเป็นการทำลายวัชพืชและพลิกหน้าดินเพื่อให้หน้าดินสัมผัสออกซิเจนและตากดินไว้ประมาณ 1 สัปดาห์ การไถแปรเป็นการตัดดินจากการไถตะให้ก้อนเล็กลงและวัชพืชหลุดออกจากดิน และให้หน้าดินคลุกดินกับวัชพืชต่างๆ ที่มีอยู่ หลังจากนั้นจะขังน้ำเพื่อปรับสภาพของดิน และจะไถคราด สำหรับการไถคราดมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดวัชพืชออกจากดินและทำให้หน้าดินเรียบสม่ำเสมอ (43)

2.5.2.2 การเตรียมกล้า

การเตรียมกล้าหรือการตกกล้า เป็นการนำเมล็ดไปหว่านในหังอกเกิดต้นอ่อนและเจริญเติบโตเป็นต้นกล้า เพื่อนำไปปักดำ การเตรียมกล้ามี 3 วิธีคือ การตกกล้าในดินเปียก การตกกล้าในดินแห้ง และการตกกล้าแบบตาปก (43) ซึ่งสามารถอธิบายแต่ละวิธีในการเตรียมกล้าได้ดังนี้

(1) การตกกล้าในดินเปียก

การตกกล้าในดินเปียก ปัจจัยที่สำคัญคือพื้นที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ของดินดีเป็นพิเศษสามารถป้องกันนกและหนูที่จะเข้าทำลายต้นกล้าได้เป็นอย่างดี และมีน้ำพอเพียงกับการใช้ การเตรียมดินก็มีการไถตะ ไถแปร และไถคราด ดังได้กล่าวมาแล้ว แต่ต้องยกเป็นแปลงสูงกว่าระดับน้ำในผิวนาน้ำนั้นประมาณ 3-5 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อให้เมล็ดที่หว่านลงไปจมน้ำและดินนั้นเปียกชุ่มอยู่เสมอด้วย โดยแบ่งออกเป็นแปลงย่อยขนาดกว้าง 50 เซนติเมตร และมีความยาวขนานไปกับทิศทางลม ระหว่างแปลงเว้นช่องว่างไว้สำหรับเดินประมาณ 30 เซนติเมตร โดยใช้เมล็ดพันธุ์ที่สมบูรณ์ นำเอาเมล็ดที่ต้องการตกกล้าใส่ถุงผ้าไปแช่ในน้ำนาน 12-24 ชั่วโมง แล้วเอาขึ้นมาวางไว้บนแผ่นกระดานในที่ที่มีลมถ่ายเทได้สะดวก และเอาผ้าหรือกระสอบเปียกน้ำคลุมไว้นาน 36-48 ชั่วโมง ซึ่งเรียกว่าการหุ้ม หลังจากที่ได้หุ้มเมล็ดไว้ครบ 36-48 ชั่วโมงแล้ว เมล็ดข้าวก็จะงอก จึงเอาไปหว่าน

ลงบนแปลงกล้าที่ได้เตรียมไว้ ก่อนที่จะหว่านเมล็ดลงบนแปลงกล้า ควรใส่ปุ๋ยพวกที่ให้ธาตุไนโตรเจน และฟอสฟอรัสเสียก่อน และใช้ไม้กระดานลูบแปลงเพื่อกลบปุ๋ยลงไปดิน หากดินตื้นอยู่แล้วก็ไม่จำเป็นต้องใส่ปุ๋ย ปกติใช้เมล็ดพันธุ์จำนวน 40-50 กิโลกรัมต่อเนื้อที่แปลงกล้าหนึ่งไร่ เมื่อต้นกล้ามีอายุครบ 25-30 วัน นับจากวันหว่านเมล็ด ต้นกล้าก็จะมีขนาดโตพอที่จะถอนเอาไปปักดำได้

(2) การตกกล้าในดินแห้ง

การตกกล้าในดินแห้ง ในกรณีที่ขานาไม่มีน้ำเพียงพอสำหรับการตกกล้า ในดินเปียก ขานาอาจทำการตกกล้าบนที่ดินซึ่งไม่มีน้ำขัง โดยเอาเมล็ดพันธุ์ที่สมบูรณ์ที่ยังไม่ได้เพาะ ให้งอก ไปโรยไว้ในแถวที่เปิดเป็นร่องเล็กๆ ขนาดแถวยาวประมาณ 1 เมตร จำนวนหลายแถว แล้วกลบด้วยดินเพื่อป้องกันนกและหนู หลังจากนั้นก็รดน้ำแบบรดน้ำผักวันละ 2 ครั้ง เมล็ดก็จะงอกขึ้นมาเป็นต้นกล้าเหมือนกับการตกกล้าในดินเปียก ปกติใช้เมล็ดพันธุ์จำนวน 7-10 กรัมต่อหนึ่งแถวที่มีความยาว 1 เมตร และแถวห่างกันประมาณ 10 เซนติเมตร หลังจากโรยเมล็ดและกลบดินแล้ว ควรหว่านปุ๋ยพวกที่ให้ธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสลงไปด้วย

(3) การตกกล้าแบบดาป

การตกกล้าแบบดาป ขั้นแรกทำการเตรียมพื้นที่ดินเหมือนกับการตกกล้าในดินเปียก แล้วยกแปลงสูงกว่าระดับน้ำ 5-10 เซนติเมตร หรือใช้พื้นที่ดอนเรียบหรือเป็นพื้นคอนกรีตก็ได้ แล้วใช้กาบของต้นกล้วยต่อกันเป็นกรอบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 1 เมตร และยาวประมาณ 1.5 เมตร ต่อจากนั้นเอาใบกล้วยที่ไม่มีก้านกลางวางเรียงเพื่อปูเป็นพื้นที่ในกรอบนั้น ให้เอาด้านล่างของใบหงายขึ้นและไม่ให้มีรอยแตกของใบ เพราะฉะนั้นใบกล้วยที่ปูพื้นนั้นจะต้องวางซ้อนกันเป็นทอดๆ แล้วเอาเมล็ดพันธุ์ที่สมบูรณ์ ซึ่งได้เพาะให้งอกแต่ยังไม่มีรากโผล่ออกมาโรยลงไปกรอบที่เตรียมไว้นี้ ใช้เมล็ดพันธุ์หนัก 3 กิโลกรัมต่อเนื้อที่ 1 ตารางเมตร ดังนั้นเมล็ดพันธุ์ที่โรยลงไปกรอบจะซ้อนกันเป็น 2-3 ชั้น หลังจากโรยเมล็ดแล้วจะต้องใช้บัวรดน้ำชนิดรูเล็กมาก รดลงในกรอบที่โรยเมล็ดนี้วันละ 2-3 ครั้ง ในที่สุดเมล็ดก็จะงอกและเจริญเติบโตขึ้นมาเป็นต้นกล้า ข้อสำคัญในการตกกล้าแบบนี้ คือ ต้องไม่ให้น้ำท่วมแปลงกล้า ต้นกล้าแบบนี้อายุประมาณ 10-14 วัน ก็พร้อมที่จะปักดำได้หรือจะเอาไปปักดำออกหลายๆ ต้น ซึ่งเรียกว่า ชิมต้นกล้า เพื่อให้ได้ต้นกล้าที่แข็งแรงโตสำหรับปักดำจริงๆ ซึ่งนิยมทำกันมากในภาคเหนือของประเทศไทย การที่จะเอาต้นกล้าไปปักดำไม่จำเป็นต้องถอนต้นกล้าเหมือนกับวิธีอื่นๆ เพราะรากของต้นกล้าเกาะกันแน่นระหว่างต้นและรากก็ไม่ได้ทะลุใบกล้วยลงไปดิน ฉะนั้นขานาจึงม้วนใบกล้วยแบบม้วนเสื้อ โดยมีต้นกล้าอยู่ภายในการม้วนก็ควรม้วนหลวมๆ แล้วขนไปยังแปลงนาที่จะปักดำ

2.5.2.3 การปักดำ

การปักดำ เมื่อต้นกล้ามีอายุประมาณ 25-30 วัน จากการตกกล้าในดินเปียกหรือการตกกล้าในดินแห้ง ก็จะใช้พืดพืดที่จะถอนเอาไปปักดำได้ สำหรับต้นกล้าที่ได้มาจากการตกกล้าแบบตาปักนั้น จะต้องมียุอายุประมาณ 20 วัน จึงเอาไปปักดำได้ เพราะต้นกล้าขนาด 10-14 วันนั้น อาจมีขนาดเล็กเกินไปที่จะใช้ปักดำในพื้นที่นาของเรา ขั้นแรกให้ถอนต้นกล้าขึ้นมาจากแปลงแล้วมัดรวมกันเป็นมัดๆ ถ้าต้นกล้าสูงมากก็ให้ตัดปลายใบทิ้งสำหรับต้นกล้าที่ได้มาจากการตกกล้าในดินเปียก จะต้องสลัดเอาดินโคลนที่รากออกเสียด้วย แล้วเอาไปปักดำในพื้นที่นาที่ได้เตรียมไว้ พื้นที่นาที่ใช้ปักดำควรมีน้ำขังอยู่ประมาณ 5-10 เซนติเมตร เพราะต้นข้าวอาจถูกลมพัดจนพับลงได้ในเมื่อนานนั้นไม่มีน้ำอยู่เลย ถ้าระดับน้ำในนานั้นลึกมาก ต้นข้าวที่ปักดำอาจจมน้ำในระยะแรก และทำให้ต้นข้าวจะต้องยึดต้นมากกว่าปกติ จนมีผลให้แตกกออ่อน การปักดำที่จะให้ได้ผลผลิตสูง จะต้องปักดำให้เป็นแถวเป็นแนวและมีระยะห่างระหว่างกอมากพอสมควร โดยทั่วไปแล้วการปักดำมักใช้ต้นกล้าจำนวน 3-4 ต้นต่อกอ ระยะปลูกหรือปักดำ 25x25 เซนติเมตร ระหว่างกอและระหว่างแถว (44)

2.5.2.4 การใส่ปุ๋ย

ข้าวนาสวนไผ่ต่อช่วงแสงนั้น สามารถใส่ปุ๋ยสูตรต่างๆ เช่น 15-15-15, 16-20-0, 18-22-0, 20-20-0 หรือ 18-46-0 อัตรา 20-35 กิโลกรัมต่อไร่ และปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) อัตรา 10 กิโลกรัมต่อไร่ หรือปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต (21-0-0) อัตรา 20 กิโลกรัมต่อไร่

2.6 ข้าวโพด

ข้าวโพด (corn หรือ maize) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Zea mays* L. เป็นพืชไร่ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่ง (45) ในอดีตการเกษตรในจังหวัดน่านเป็นการปลูกพืชเลี้ยงสัตว์เพื่อบริโภคในครัวเรือนต่อมาเกษตรกรได้หันมาปลูกพืชเชิงเดี่ยว ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนชนิดพืชตามการส่งเสริมของภาครัฐและตลาดเมื่อข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เริ่มเข้ามาแทนที่อย่างชัดเจน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524 และกระจายตัวอย่างรวดเร็วมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 รวมพื้นที่กว่า 7 แสนไร่ โดยพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ส่วนใหญ่อยู่บริเวณพื้นที่ลาดชันและขยายตัวสู่พื้นที่สูง สำหรับการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดน่านมี 2 ลักษณะ ได้แก่ ข้าวโพดนาหรือข้าวโพดดอน ปลูกในพื้นที่ลุ่มและที่ดอน อาศัยน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติและเหมืองฝายได้เกือบตลอดปี จึงปลูกได้ปีละ 1-2 ครั้ง และข้าวโพดดอนปลูกในพื้นที่ลาดชันและพื้นที่สูง อาศัยน้ำฝน จึงปลูกได้ปีละครั้ง การปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีการใช้สารเคมีต่อปีสูงที่สุดในกลุ่มพืชไร่และสูงกว่าพืชสวน โดยมีการเผาวัชพืชเตรียมพื้นที่เพาะปลูกในช่วงหน้าแล้งทำให้เกิดควันและฝุ่นในอากาศอย่างมาก (46) อย่างไรก็ตามถ้าพื้นที่ใดมีน้ำเพียงพอจะสามารถปลูกข้าวโพดได้ตลอดปี ปัจจุบันเกษตรกรนอกเขตชลประทานจะนิยมปลูกกันในช่วงต้นฤดูฝน คือระหว่าง

เดือนเมษายนถึงเดือนพฤษภาคม ช่วงปลายฤดูฝนระหว่างเดือนกรกฎาคมถึงเดือนสิงหาคม การปลูกในช่วงต้นฤดูฝนจะได้รับผลผลิตดีกว่าปลูกปลายฤดูฝน เพราะจะมีปริมาณฝนพอเหมาะ การใช้น้ำของข้าวโพดในระยะการเจริญเติบโตต่างๆ ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ ความแตกต่างของช่วงแสงและสภาพภูมิอากาศ อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำที่จะทำให้ได้ผลผลิตสูงสุดของการปลูกข้าวโพดอยู่ระหว่าง 500–800 มิลลิเมตร (47)

ข้าวโพดที่ได้รับความนิยมในการปลูกในอำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน ส่วนใหญ่เป็นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยมีพื้นที่เพาะปลูกอยู่ตามที่ราบเชิงเขา และบนพื้นที่เขาที่มีความลาดชัน โดยมีพื้นที่เพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในปี พ.ศ. 2556 จำนวน 55,380 ไร่ มีผลผลิต 31,844 ตัน จากเนื้อที่เก็บเกี่ยว 49,757 ไร่ คิดเป็นผลผลิตเฉลี่ย 0.64 ตันต่อไร่ ซึ่งพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่นิยมปลูกในพื้นที่คือ พันธุ์ลูกผสมปิด แปซิฟิก 328 โดยมีอายุเก็บเกี่ยวอยู่ที่ 100–110 วัน ให้ผลผลิตประมาณ 900–1,500 กิโลกรัมต่อไร่ (ตารางที่ 2.4)

ตารางที่ 2.4 ผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน ปี พ.ศ. 2552-2556^[4]

ปี พ.ศ.	เนื้อที่เพาะปลูก (ไร่)	เนื้อที่เก็บเกี่ยวผลผลิต (ไร่)	ผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้ (ตัน)	ผลผลิตต่อ เนื้อที่ เพาะปลูก (ตัน/ไร่)	ผลผลิตต่อ เนื้อที่ เก็บเกี่ยว (ตัน/ไร่)
2552	16,510	16,510	13,207	0.79	0.79
2553	50,310	43,836	33,151	0.65	0.75
2554	66,325	66,325	52,366	0.78	0.78
2555	96,365	77,432	57,877	0.60	0.74
2556	55,380	49,757	31,844	0.57	0.64

2.6.1 ระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพด

การจำแนกระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดตามช่วงการเจริญเติบโต สามารถแบ่งออก ได้ดังนี้

2.6.1.1 ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ (vegetative stage) เป็นระยะเริ่มตั้งแต่ที่ coleoptiles โผล่พ้นดินจนถึงระยะออกดอกตัวผู้ระยะนี้ใช้เวลาประมาณ 45-55 วัน ซึ่งขึ้นอยู่กับพันธุ์กรรมของข้าวโพดและสภาพแวดล้อมโดยเฉพาะอุณหภูมิ

2.6.1.2 ระยะออกดอก (flowering stage) เป็นระยะตั้งแต่ดอกตัวผู้บานจนถึงระยะที่ไหมไผ่พ้นกาบหุ้มฝัก ตลอดจนระยะผสมเกสรใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 5-15 วัน

2.6.1.3 ระยะการสะสมน้ำหนักเมล็ด (grain filling) เป็นระยะที่เมล็ดมีการสะสมแป้งในเมล็ดจนถึงระยะที่เมล็ดหยุดการพัฒนาใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 35-45 วัน ระยะนี้แบ่งได้ 2 ระยะคือ

(1) ราคาน้ำนม (early milk และ late milk stage)

(2) ระยะแป้งอ่อน (dough stage)

2.6.1.4 ระยะการสุกแก่ทางสรีระ (physiological maturity) เป็นระยะที่มีชั้นเนื้อเยื่อสีดำ (black layer) ปรากฏที่ส่วนโคนของเมล็ดการสะสมน้ำหนักแห้งจะสิ้นสุดลงเป็นระยะที่ข้าวโพดมีน้ำหนักแห้งสูงสุด

2.6.1.5 ระยะสุกแก่เก็บเกี่ยว (harvest maturity) เป็นระยะที่ต้นและใบของข้าวโพดรวมทั้งกาบหุ้มฝักแห้ง ฝักคลายตัวจากกาบหุ้มเมล็ดมีการลดความชื้นอย่างต่อเนื่องตามสภาพอุณหภูมิและความชื้นของบรรยากาศ (48) หลังจากได้รับการผสมเกสรแล้วรังไข่จะเจริญกลายเป็นเมล็ดอ่อนและเมล็ดแก่พร้อมที่จะเก็บเกี่ยวได้ภายในประมาณ 45 วันหลังการผสมเกสร (49)

2.6.2 ขั้นตอนและวิธีการปลูกข้าวโพด

การปลูกข้าวโพดในพื้นที่อำเภอนาทม จังหวัดน่าน ควรปลูกในฤดูฝน ซึ่งสามารถปลูกได้ทั้งต้นฤดูฝนและปลายฤดูฝน โดยมีขั้นตอนและวิธีการปลูกข้าวโพด ดังนี้

2.6.2.1 การเตรียมดิน ทำให้ดินมีความร่วนซุยและระบายน้ำได้ดี ช่วยให้รากข้าวโพดหาอาหารได้ไกล ทำให้เมล็ดข้าวโพดงอกได้ดี ซึ่งควรไถอย่างน้อย 2 ครั้ง คือ

(1) ไถตะ เป็นการไถครั้งแรกด้วยผาน 3 หรือผาน 4 ควรไถให้ลึกประมาณ 30 เซนติเมตรเพื่อพลิกหน้าดิน ช่วยให้ระบายน้ำได้ดีขึ้น และช่วยในการกำจัดวัชพืชและเศษซากพืชต่างๆ ในดินทำความสะอาดแปลงไปด้วยในตัว หลังจากไถตะเสร็จแล้ว ควรตากดินไว้ระยะหนึ่ง

(2) ไถแปร ควรไถด้วยผาน 7 เพื่อย่อยดินก้อนใหญ่ให้แตกและร่วนซุยมากยิ่งขึ้นถ้ามีความจำเป็น อาจมีการพรวนซ้ำ เพื่อให้ดินละเอียดเหมาะแก่การปลูกข้าวโพด

2.6.2.2 วิธีการปลูก หลังจากไถแปรแล้ว ต้องรอให้ฝนตกอย่างน้อย 20 มิลลิเมตร ดินจะมีความชื้น ให้ทำการขักร่องซึ่งอาจใช้วัว-ควายหรือรถไถก็ได้ โดยขักร่องให้มีระยะระหว่างร่อง 75 เซนติเมตร แล้วใช้คนหยอดเมล็ดลงในร่องให้มีระยะระหว่างหลุม 25 เซนติเมตร แล้วกลบดินหนา 4-5 เซนติเมตร โดยใช้เมล็ด 1 เมล็ดต่อหลุม ใช้เมล็ดพันธุ์ 3 กิโลกรัมต่อไร่

2.6.2.3 การใส่ปุ๋ย ควรใส่รองก้นหลุมหรือโรยเป็นแถวแล้วกลบพร้อมปลูก หรือหยอดปุ๋ยที่ก้นหลุมแล้วกลบดินบางๆ ก่อนหยอดเมล็ด ไม่ควรให้ปุ๋ยสัมผัสกับเมล็ดโดยตรง เพราะอาจทำให้เมล็ดเน่าได้การใส่ปุ๋ยรองพื้นอาจใช้สูตร 16-20-0, 15-15-15, 20-20-0 หรือสูตรอื่นๆ ตามความ

เหมาะสม โดยปุ๋ยรองพื้นควรใส่อัตราประมาณ 25-30 กิโลกรัมต่อไร่ และปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) โรยข้างต้นในอัตรา 20-25 กิโลกรัมต่อไร่ ใส่ขณะดินมีความชื้น (50)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวอเตอร์พุตพรีนซ์เริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2536 โดย Professor Tony Allan และมีการนำมาศึกษาอย่างจริงจังในปี พ.ศ. 2545 โดย Professor Arjen Hoekstra ที่มุ่งเน้นศึกษาการใช้ น้ำในทุกภาคส่วน ทั้งการผลิต การบริโภค และภาคเกษตรกรรม อย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะการ เชื่อมโยงภาคเกษตรไปสู่ภาคอุตสาหกรรมพลังงาน ปัจจุบันมีการศึกษาวอเตอร์พุตพรีนซ์กับการผลิต พลังงานในประเทศไทย ดังกรณีที่ ชินาธิปกรณ พงศ์ภิญโญภาพ (13) ทำการศึกษาวอเตอร์พุตพรีนซ์ ของกระบวนการผลิตเอทานอลจากการเพาะปลูกมันสำปะหลังในประเทศไทย โดยศึกษาจาก แผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี (พ.ศ. 2551-2565) ของกระทรวงพลังงานซึ่งเป็นการประเมิน ปริมาณการใช้น้ำตลอดห่วงโซ่การผลิต หรือวอเตอร์พุตพรีนซ์ของกระบวนการผลิตเอทานอลจากมัน สำปะหลัง และคาดการณ์ปริมาณการใช้น้ำและปริมาณการใช้พื้นที่เพาะปลูกมันสำปะหลังตาม แผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี ผลการศึกษาพบว่า วอเตอร์พุตพรีนซ์ของกระบวนการผลิต เอทานอลจากมันสำปะหลังในปี พ.ศ. 2551 มีค่าเท่ากับ 0.267 กิโลลูกบาศก์เมตรต่อปีหรือคิดเป็น ร้อยละ 0.03 ของปริมาณน้ำทั้งประเทศ โดยแบ่งเป็น วอเตอร์พุตพรีนซ์สีเขียว 0.185 กิโลลูกบาศก์ เมตรต่อปี และวอเตอร์พุตพรีนซ์สีน้ำเงิน 0.082 กิโลลูกบาศก์เมตรต่อปี ตามแผนพัฒนาพลังงาน ทดแทนจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นทุกปี โดยจะต้องใช้น้ำ 2.605 กิโลลูกบาศก์เมตร หรือเพิ่มขึ้นเกือบ 10 เท่า เมื่อสิ้นสุดแผนในปี พ.ศ. 2565 แต่หากมีการพัฒนาเพิ่มผลผลิตของมันสำปะหลังจาก 3.4 ตันต่อ ไร่ เป็น 8.0 ตันต่อไร่ จะส่งผลให้ปริมาณการใช้น้ำลดลงร้อยละ 57.4 ในแต่ละปี โดยจะใช้น้ำ 1.110 กิโลลูกบาศก์เมตร หรือเพิ่มขึ้น 4 เท่า เมื่อสิ้นสุดแผนพัฒนาพลังงานทดแทนในปี พ.ศ. 2565 ดังนั้น อาจนำแนวความคิดการเพิ่มผลผลิตต่อไร่ในพื้นที่เพาะปลูกเท่าเดิมเป็นปัจจัยในการจัดการทรัพยากรน้ำได้

นอกจากนี้ยังมีการศึกษากับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่เป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย โดย ทิพย์ภา สุขุมลชาติ (51) ได้ศึกษาวอเตอร์พุตพรีนซ์ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทย ซึ่งเป็นพืช เศรษฐกิจในประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลผลผลิตเป็นรายเดือน ข้อมูลอุตุณิยมวิทยารายวัน และค่า สัมประสิทธิ์พืชของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ทำการศึกษานในประเทศไทย ทั้งนี้ได้ดำเนินการแบ่งวิธีการ คำนวณวอเตอร์พุตพรีนซ์ออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1) หาค่าการคายระเหยของพืช 2) หาค่าการใช้น้ำ ของพืชโดยใช้วิธีสมมูลน้ำในบริเวณรากพืช และ 3) หาค่าวอเตอร์พุตพรีนซ์โดยใช้ข้อมูลผลผลิตและ ปริมาณการใช้น้ำปุ๋ยเคมี จากผลการศึกษาพบว่า ค่าวอเตอร์พุตพรีนซ์ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์นอกเขต พื้นที่ชลประทานเฉลี่ยทั้งประเทศเท่ากับ 1,123 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน คิดเป็นวอเตอร์พุตพรีนซ์

สีเขียวกว่า 899 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และวอเตอร์พุตพรีนส์สีเทา 230 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ในการศึกษาไม่รวมวอเตอร์พุตพรีนส์ในเขตพื้นที่ชลประทาน (วอเตอร์พุตพรีนส์สีน้ำเงิน) เนื่องจากพื้นที่เพาะปลูกส่วนใหญ่อยู่นอกเขตพื้นที่ชลประทาน ผลการศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Hoesksta และ Hung พบว่าประเทศไทยมีค่าเฉลี่ยวอเตอร์พุตพรีนส์สีเขียวกว่า เนื่องจากความแตกต่างในเรื่องของข้อมูลผลผลิตต่อไร่ และข้อมูลอุทกนิยามวิทยาที่แตกต่างกัน ดังนั้นอาจนำผลการศึกษาในส่วนของวอเตอร์พุตพรีนส์สีเขียวกวอเตอร์พุตพรีนส์สีเทาสำหรับข้าวโพด ซึ่งมีพื้นที่เพาะปลูกในประเทศไทยมาเป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับการศึกษาในครั้งนี้

การศึกษาวอเตอร์พุตพรีนส์ที่มีโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ความต้องการน้ำของพืชที่พัฒนาโดยองค์กรที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศและต่างประเทศ โปรแกรม CROPWAT เป็นอีกโปรแกรมหนึ่งที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายทั้งในประเทศและต่างประเทศด้วยเหตุผลที่สามารถปรับเปลี่ยนข้อมูลที่เป็นปัจจัยในการศึกษา เช่น ข้อมูลอุทกนิยามวิทยา ข้อมูลปริมาณฝน ข้อมูลดิน หรือข้อมูลการเพาะปลูก เป็นต้น ในประเทศไทยมีการนำโปรแกรม CROPWAT เข้ามาใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ความต้องการน้ำของพืช จากกรณีศึกษาที่ นิมนานรติ เกตุเดชา (52) ศึกษาการประเมินวอเตอร์พุตพรีนส์ผลิตภัณฑ์ไม้ยางพาราแปรรูป: กรณีศึกษา: จังหวัดนครศรีธรรมราชและจังหวัดจันทบุรี ซึ่งแบ่งการศึกษาเป็น 2 กระบวนการหลัก คือกระบวนการเพาะปลูกยางพาราและกระบวนการแปรรูปในอุตสาหกรรม ซึ่งการศึกษาจะพิจารณาผลผลิตการเพาะปลูกเป็น 2 กรณี คือ น้ำยางสดเพียงอย่างเดียว และน้ำยางสดร่วมกับไม้ยางสดด้วยวิธีปันส่วนเชิงปริมาณและเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยวิธีการศึกษาจะใช้โปรแกรม CROPWAT 8.0 และโปรแกรม SimaPro 7.3 เพื่อคำนวณหาวอเตอร์พุตพรีนส์จากผลการศึกษากรณีพิจารณาน้ำยางสดเป็นผลผลิตจากการเพาะปลูกยางพาราเพียงอย่างเดียวพบว่าวอเตอร์พุตพรีนส์น้ำยางพาราสดในปี พ.ศ. 2528-2535 ของนครศรีธรรมราชเท่ากับ 3,861 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และของจันทบุรีเท่ากับ 3,676 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และจากกรณีพิจารณาวอเตอร์พุตพรีนส์ไม้ยางพาราสดซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากการปลูกยางพารา พบว่าวอเตอร์พุตพรีนส์ของน้ำยางพาราสดมีค่าน้อยลงเมื่อคำนวณวอเตอร์พุตพรีนส์น้ำยางสดด้วยวิธีปันส่วนเชิงปริมาณ คือ จังหวัดนครศรีธรรมราชเท่ากับ 931 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และจันทบุรีเท่ากับ 1,023 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน หากใช้วิธีปันส่วนเชิงเศรษฐศาสตร์จะทำให้วอเตอร์พุตพรีนส์น้ำยางสดมีค่ามากกว่าวอเตอร์พุตพรีนส์ไม้ยางพาราสดและค่าวอเตอร์พุตพรีนส์น้ำยางสดด้วยวิธีการปันส่วนเชิงเศรษฐศาสตร์ คือ จังหวัดนครศรีธรรมราช มีค่าวอเตอร์พุตพรีนส์เท่ากับ 3,313 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และจันทบุรีมีวอเตอร์พุตพรีนส์เท่ากับ 4,049 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โดยจะใกล้เคียงกับค่าวอเตอร์พุตพรีนส์ที่เลือกพิจารณาจากผลผลิตของการเพาะปลูกยางพาราเป็นน้ำยางสดเพียงอย่างเดียว เนื่องจากราคาของน้ำยางพาราสดสูงกว่าไม้ยางพาราสด โดยปัจจัยที่ทำให้วอเตอร์พุตพรีนส์มีค่าน้อยกว่าคือ ปริมาณฝนผลผลิต ปริมาณปุ๋ยที่ใช้ และค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา จากการศึกษาสามารถนำรูปแบบ

ของข้อมูลที่ใช้กับโปรแกรม CROPWAT 8.0 เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการนำเข้าสู่ข้อมูลในการศึกษาสำหรับข้าวนาสวนและข้าวโพด

ในต่างประเทศการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ มีการศึกษาอย่างกว้างขวางมาเป็นระยะเวลานานทั้งในรูปของน้ำเสมือน และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ เพื่อนำมากำหนดเป็นมาตรการในการใช้น้ำที่มองถึงต้นทุนโดย Aldaya (53, 54) ศึกษา น้ำเสมือน (virtual water) ซึ่งเป็นปริมาณของน้ำที่ใช้ในการผลิตสินค้าหรือบริการเพื่อการส่งออก และต้นทุนค่าเสียโอกาสของน้ำ โดยการวิจัยมุ่งเน้นศึกษาในเรื่องศักยภาพสำหรับการประหยัดน้ำ ซึ่งส่วนน้อยนักที่จะมองถึงต้นทุนค่าเสียโอกาสของน้ำ โดยในการศึกษาเป็นการประเมินวิกฤตและกลยุทธ์ที่สำคัญของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว (น้ำในดินที่เกิดจากน้ำฝน, green water footprint) ที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับการค้าระหว่างประเทศ นอกจากนี้ยังมีต้นทุนค่าเสียโอกาสที่ต่ำกว่าในการใช้วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวสำหรับการผลิตของพืชที่มีผลกระทบภายนอกเชิงลบน้อยมากต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับการใช้วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน (การชลประทานที่มีน้ำแยกจากพื้นดินหรือพื้นผิวน้ำ, blue water footprint) การศึกษาครั้งนี้ยืนยันถึงกลไกของน้ำเสมือน (วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวและวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน) ที่มีผลต่อการค้าทั้งในด้านต้นทุนของสินค้าที่มาจากการบริหารจัดการทั้งแหล่งน้ำและผลผลิต นอกจากนี้ Aldaya (55) ได้ศึกษาในเรื่องของการใช้น้ำสำหรับชาวอิตาลีในการผลิตพาสต้าและพืชไร่โดยใช้วิธีวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ตลอดสายการผลิต พบว่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวสาลีดูรัม เท่ากับ 1,574 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของแป้งจากข้าวสาลีดูรัม เท่ากับ 1,924 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของขนมปัง เท่ากับ 786 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของแป้งขนมปัง เท่ากับ 961 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของอุตสาหกรรมมะเขือเทศ เท่ากับ 114 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของซอสจากมะเขือเทศ เท่ากับ 380 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โดยความแตกต่างของการผลิตพาสต้าและพืชไร่ทั้ง 2 ประเภทขึ้นอยู่กับการบริหารจัดการน้ำในกระบวนการผลิตข้าวสาลี การปลูกมะเขือเทศ การเลี้ยงโคนม การทำขนมปัง การทำน้ำซุบ ซึ่งทุกขบวนการอาจจะไม่ได้ถูกควบคุมอย่างเต็มที่โดยการศึกษาดังกล่าวนี้จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นและจะมีผลต่อการกำหนดแผนการพัฒนาด้านนโยบายอาหาร การชลประทานในระดับเศรษฐกิจและการค้าระหว่างประเทศ

นอกจากการศึกษาความสัมพันธ์ใช้ทรัพยากรน้ำในด้านเศรษฐกิจแล้ว ยังได้มีการศึกษาถึงการจัดการทรัพยากรน้ำที่เป็นเหตุแห่งความขัดแย้งในพื้นที่แห้งแล้ง ซึ่งจากการศึกษาพบว่าความขัดแย้งที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ไม่ได้เกิดจากการขาดแคลนน้ำในลักษณะทางกายภาพ แต่ส่วนใหญ่จะเกิดจากการบริหารจัดการน้ำที่ไม่ดีพอ ซึ่งแนวคิดน้ำเสมือน (ปริมาณน้ำที่แฝงในสินค้าและบริการจากกระบวนการผลิตที่ผู้บริโภคนำไปใช้) กับวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (ปริมาณน้ำที่ใช้ทั้งทางตรงและทางอ้อมสำหรับการผลิตและการบริโภค) สามารถสนับสนุนในการกำหนดกรอบหรือรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการบริหารจัดการน้ำ โดยสามารถบอกถึงรูปแบบการผลิตและวิธีการตัดสินใจ และ Bulsink

(56) นำวอเตอร์พุตพรีนท์มาทำการศึกษาพืชในหลายชนิด โดยทำการศึกษาวอเตอร์พุตพรีนท์ของ อินโดนีเซีย สำหรับการกำหนดความสัมพันธ์ของผู้บริโภคกับการเพาะปลูกพืช 10 ชนิด ในปี ค.ศ. 2000-2004 ได้แก่ ข้าว ข้าวโพด มันสำปะหลัง ถั่วเหลือง ถั่ว มะพร้าว ปาล์ม กล้วย กาแฟ และโกโก้ โดยข้าวมีค่าวอเตอร์พุตพรีนท์เท่ากับ 3,473 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ข้าวโพดโดยค่าวอเตอร์พุตพรีนท์เท่ากับ 2,483 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน มันสำปะหลังมีค่าวอเตอร์พุตพรีนท์เท่ากับ 514 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ถั่วเหลืองมีค่าวอเตอร์พุตพรีนท์เท่ากับ 1,958 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ถั่วมีค่าวอเตอร์พุตพรีนท์เท่ากับ 3,124 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน มะพร้าวมีค่าวอเตอร์พุตพรีนท์เท่ากับ 2,896 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ปาล์มมีค่าวอเตอร์พุตพรีนท์เท่ากับ 853 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน กล้วยมีค่าวอเตอร์พุตพรีนท์เท่ากับ 875 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน กาแฟมีค่าวอเตอร์พุตพรีนท์เท่ากับ 22,907 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และโกโก้มีค่าวอเตอร์พุตพรีนท์เท่ากับ 9,414 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โดยพืชส่วนใหญ่อาศัยน้ำฝนในการเพาะปลูกเป็นหลัก วอเตอร์พุตพรีนท์เฉลี่ยของการปลูกพืชในอินโดนีเซียเท่ากับ 1,131 ลูกบาศก์เมตรต่อตันต่อปี โดยเมือง Java Timur มีค่าต่ำสุดคือ 859 ลูกบาศก์เมตรต่อตันต่อปี สูงสุดที่เมือง Kalimantan Tengah เท่ากับ 1,895 ลูกบาศก์เมตรต่อตันต่อปี ปัจจัยในการพิจารณาอวอเตอร์พุตพรีนท์คือ ปริมาณของการบริโภค รูปแบบการบริโภค ภูมิอากาศและรูปแบบของเกษตรกรรม ในการศึกษาสมมติให้รูปแบบการบริโภคไม่แตกต่างกันในแต่ละท้องถิ่น แต่จะต่างกันโดยภูมิอากาศ รูปแบบของเกษตรกรรมและการบริโภค วอเตอร์พุตพรีนท์ต่อตันสูงที่สุดมาจากข้าวและเป็นเหตุผลจากอัตราการบริโภคที่สูงและมีสัมพันธ์กับวอเตอร์พุตพรีนท์ของข้าว จากการศึกษานี้จะเห็นได้ว่าการศึกษาวอเตอร์พุตพรีนท์ของข้าวและข้าวโพด ซึ่งสามารถนำผลที่ได้จากการวิจัยมาเปรียบเทียบกับการศึกษาในครั้งนี้ เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงถึงความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากการเพาะปลูกข้าวและข้าวโพด

มาตรการที่ได้จากวอเตอร์พุตพรีนท์ยังส่งผลต่อระบบการค้าของนานาชาติ ที่มุ่งเน้นการประหยัดทรัพยากรน้ำซึ่ง Chapagain (9, 57, 58) ศึกษาการประหยัดทรัพยากรน้ำไปถึงการค้าของโลก พบว่าในหลายประเทศได้มีมาตรการประหยัดทรัพยากรน้ำโดยนำเข้าสินค้าที่มีการผลิตโดยใช้ปริมาณน้ำมากและส่งออกสินค้าที่มีการใช้ปริมาณน้ำที่น้อยกว่า จากรายงานการศึกษาแสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำรวมในการนำเข้าสินค้าเกษตรเข้าจากต่างประเทศถ้าเทียบกับปริมาณน้ำในการใช้สำหรับการผลิตในประเทศเท่ากับ 1,605 กิกะลูกบาศก์เมตรต่อปี อย่างไรก็ตามถ้าคิดเป็นปริมาณผลผลิตอย่างเดียวจะเท่ากับ 1,253 กิกะลูกบาศก์เมตรต่อปี ในการส่งออกไปยังต่างประเทศซึ่งจะประหยัดทรัพยากรน้ำได้ถึง 352 กิกะลูกบาศก์เมตรต่อปี และในหลายประเทศ เช่น กานา, บราซิล ได้ใช้ทรัพยากรวอเตอร์พุตพรีนท์สีเขียวสำหรับการผลิตและการเพาะปลูกเพื่อส่งออกโดยไม่ให้ความสำคัญกับประหยัดทรัพยากรน้ำ ซึ่งมีผลต่อทางเศรษฐกิจ รวมถึงประเทศไทยที่เกี่ยวข้องกับการส่งออกข้าว โดยค่าใช้จ่ายต้นทุนจะอยู่ที่ทรัพยากรวอเตอร์พุตพรีนท์สีน้ำเงิน ดังนั้นสัดส่วนการนำเข้าผลิตภัณฑ์ที่

มีอัตราส่วนที่ค่อนข้างสูงของทรัพยากรวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว เป็นทรัพยากรวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินจะช่วยประหยัดทรัพยากร วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินที่มีต้นทุนค่าเสียโอกาสสูงกว่าทรัพยากรวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว นอกจากนี้การศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (water footprint) ของการผลิตฝ้าย โดยการประเมินผลกระทบในการผลิตฝ้ายที่เชื่อมโยงกับทรัพยากรน้ำ และมุ่งเน้นความแตกต่าง 3 ประเภทของผลกระทบได้รับความสนใจในการศึกษา คือ การระเหยและการซึมลงดินของฝนสำหรับการเจริญเติบโตของฝ้าย (วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว), น้ำผิวดินจากแหล่งชลประทาน (วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน) และมลพิษทางน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิต และสุดท้ายคือผลกระทบและปริมาณน้ำที่จะทำให้เกิดแหล่งกำเนิดมลพิษเจือจาง (วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา) โดยศึกษาในปี ค.ศ. 1997-2001 ทำให้รู้ว่าการบริโภคทั่วโลกของผลิตภัณฑ์ฝ้ายอยู่ที่ 256 กิกะลูกบาศก์เมตรต่อปี โดยแบ่งเป็น วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน 42 เพอร์เซ็นต์, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว 39 เพอร์เซ็นต์ และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา (ที่ทำให้เจือจาง) 19 เพอร์เซ็นต์ ประมาณ 84 เพอร์เซ็นต์ของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการใช้ฝ้ายในกลุ่ม EU 25 ประเทศคืออยู่นอกยุโรป ประเทศที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดคือประเทศอินเดียและอุเบกิสถานเพราะไม่มีมาตรการกำหนดราคาน้ำหรือวิธีการของถ่ายทอดข่าวสารของการผลิต โดยผู้บริโภคฝ้ายมีความรับผิดชอบน้อยมากกับผลกระทบที่เกิดจากการใช้ทรัพยากรน้ำในการผลิต

นอกจากนี้การปรับปรุงวิธีการเพาะปลูกที่พิจารณาจากผลของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ ที่เชื่อมกับการบริโภคในระดับชาติกับทรัพยากรน้ำระดับท้องถิ่น กรณีศึกษา การปลูกมะเขือเทศประเทศสเปน โดยจะศึกษาระยะการเจริญเติบโตของพืชทั้งในระบบเปิดและระบบปิดต่างฤดูกาลในประเทศสเปน การศึกษานี้ได้เปรียบเทียบวิธีการทางนิเวศวิทยากับวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ พบว่าในกลุ่มสหภาพยุโรปบริโภคมะเขือเทศ 957,000 ตัน มีค่าการระเหย 71 ไมโครลูกบาศก์เมตรต่อปี ของปริมาณน้ำ และมีความต้องการปริมาณน้ำ 7 ไมโครลูกบาศก์เมตรต่อปีของน้ำที่ใช้ในการเจือจางมลพิษทางในเตรที่ที่เกิดขึ้นในสเปน แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะประเทศสเปน พบว่ามีค่าการระเหย 297 ไมโครลูกบาศก์เมตรต่อปีและน้ำสำหรับเจือจางมลพิษ 29 ไมโครลูกบาศก์เมตรต่อปี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศของแต่ละท้องถิ่น สถานะของทรัพยากรน้ำ และปริมาณผลผลิตของมะเขือเทศรวมถึงระบบการผลิต ซึ่งมีผลต่อการบริโภคมะเขือเทศของกลุ่มสหภาพยุโรป จากการศึกษานี้จะเห็นได้ว่าวิธีการเพาะปลูกมีผลต่อวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่เกิดขึ้นในระยะการเจริญเติบโตของพืช และการเพาะปลูกยังส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ดังที่ Bocchiola (59) ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศกับการเพาะปลูกข้าวโพด และที่มีความสัมพันธ์กับวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ พื้นที่ศึกษาทางตอนเหนือของอิตาลี โดยใช้แบบจำลอง CropSyst ระหว่างปี ค.ศ. 2001-2010 ผลที่ได้อยู่ในรูปของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวและวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินของข้าวโพด กับค่าการคายระเหยระหว่างการผลิตภายใต้ 3 เงื่อนไข คือ 1) ไม่ใช้ระบบชลประทาน 2) กำหนดการให้น้ำ

เองตามระยะวันเพาะปลูก และ 3) ให้น้ำอัตโนมัติตามการใช้ของข้าวโพด ผลการศึกษาที่ได้จะพิจารณาตามเงื่อนไขทั้ง 3 และเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงทางสภาพภูมิอากาศที่กำหนด และผลกระทบต่อการปลูกข้าวโพดกับวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ ปัจจัยสภาพภูมิอากาศที่พิจารณา ได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณฝน และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ ประมวลผลโดยแบบจำลอง GCM (Global Circulation models) โดยมีการปรับปรุงปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการศึกษาให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด เช่น ปัจจัยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ การลดลงของปริมาณฝน หรือ ผลผลิตข้าวโพดที่ลดลง เป็นต้น ผลจากการศึกษาจะเป็นการประเมินผลกระทบที่เกิดกับสภาวะภูมิอากาศจากการปลูกข้าวโพด โดยอาศัยวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เป็นองค์ประกอบในการศึกษา และเป็นการประเมินการใช้น้ำในการปลูกข้าวโพด นอกจากนี้ Mekonnen (60) ยังได้ศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการผลิตพืชโดยวิธีการแบ่งพื้นที่และพืช ระหว่างปี ค.ศ. 1996-2005 โดยแบ่งศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของพืช 126 แปลงเพาะปลูกออกเป็นขนาด 5×5 เอเคอร์ และหาสมมูลน้ำและเงื่อนไขของสภาพภูมิอากาศที่ใช้ในแต่ละแปลงตามระยะเวลาในแต่ละวัน ผลผลิตของน้ำที่เกิดขึ้นจากการเพาะปลูกจะได้รับการประมาณการโดยใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในแต่ละแปลง ปริมาณการใช้น้ำของพืชคำนวณจากแบบจำลอง CROPWAT ผลการศึกษาพบว่า วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการปลูกพืชตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1996-2005 เท่ากับ 7,404 ลูกบาศก์เมตรต่อปี (แบ่งเป็น วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว 78 เปอร์เซ็นต์ วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน 12 เปอร์เซ็นต์ และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา 10 เปอร์เซ็นต์) ปริมาณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์แบ่งตามพืชหลัก ข้าวเท่ากับ 992 กิกะลูกบาศก์เมตรต่อปี ข้าวสาลีเท่ากับ 1,087 กิกะลูกบาศก์เมตรต่อปีและข้าวโพดเท่ากับ 770 กิกะลูกบาศก์เมตรต่อปี จากการศึกษาเห็นได้ว่า วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในการเพาะปลูกข้าวสาลีมีค่ามากกว่าข้าวและข้าวโพดตามลำดับ อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาจากข้าวและข้าวโพด จะเห็นได้ว่า วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวมีค่ามากกว่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด ซึ่งสามารถนำมาเป็นข้อมูลอ้างอิงในการศึกษาครั้งนี้

จะเห็นได้ว่าเครื่องมือที่ใช้สำหรับการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์มีส่วนช่วยให้ข้อมูลมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น แต่ขนาดของพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่มีความจำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ เทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกล ได้เข้ามามีส่วนช่วยในการศึกษาสำหรับพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่ Romaguera (61) ได้ทำการศึกษาศักยภาพการใช้เทคนิคการรับรู้จากระยะไกลสำหรับประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์จากการเพาะปลูกข้าวสาลี โดยใช้ข้อมูลการประมาณการใช้น้ำของพืช ข้อมูลน้ำฝน ข้อมูลแหล่งกักเก็บน้ำ ข้อมูลน้ำท่า และข้อมูลการใช้ที่ดินสำหรับเป็นตัวแปรในการศึกษา เทคนิคการรับรู้จากระยะไกลใช้ข้อมูลที่ได้จากดาวเทียม Meteosat 9 และประมาณการน้ำฝนโดย Climatic Prediction Center Morphing Technique, CMORPH ซึ่งผลการศึกษาเป็นการมุ่งเน้นที่จะนำเสนอเครื่องมือสำหรับการ

ประมาณการวอเตอร์ฟุตพริ้นท์โดยผลการศึกษาจะแสดงเป็นแผนที่แหล่งน้ำ ที่จะประเมินการใช้น้ำ สีเขียวและน้ำสีน้ำเงิน

ในด้านผลกระทบทางอุทกวิทยาและการศึกษาระดับลุ่มน้ำ Babel (62) ศึกษาผลกระทบทางอุทกวิทยาของการผลิตพลังงานชีวมวล กรณีศึกษา ลุ่มน้ำคลองพร้าว ประเทศไทย โดยใช้อวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ประมาณการเพาะปลูกพืชพลังงานเพื่อดูประสิทธิภาพในการใช้น้ำมากที่สุดของพืช ซึ่งพืชประกอบด้วยปาล์ม มันสำปะหลัง และอ้อย ผลการศึกษาพบว่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของปาล์มมีค่าเท่ากับ 177 ลูกบาศก์เมตรต่อกิกะจูล วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของมันสำปะหลังมีค่าเท่ากับ 103 ลูกบาศก์เมตรต่อกิกะจูล และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของอ้อยมีค่าเท่ากับ 140 ลูกบาศก์เมตรต่อกิกะจูล จะเห็นได้ว่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของปาล์มมีค่าสูงกว่ามันสำปะหลังและอ้อย และการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินสำหรับการเพาะปลูกพืชพลังงานมีผลต่อคุณภาพน้ำซึ่งจะส่งผลในด้านลบ โดยที่ Zeng (63) ศึกษาประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในระดับลุ่มน้ำ กรณีศึกษา ลุ่มน้ำ Heihe ทางตะวันตกเฉียงเหนือของจีน ในปี ค.ศ. 2004-2006 โดยศึกษาเฉพาะวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินและกับพืช 12 ชนิด ใช้แบบจำลอง CROPWAT เพื่อหาการใช้น้ำ ผลการศึกษาพบว่าเกษตรกรรมมีการใช้น้ำถึง 96 เปอร์เซ็นต์ของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์และอีก 4 เปอร์เซ็นต์เป็นในส่วนของอุตสาหกรรมและอื่นๆ โดยมีค่าของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินเท่ากับ 811 ล้านลูกบาศก์เมตร หรือเท่ากับ 46 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาอื่น

สำหรับการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวในประเทศไทย มาณพ (64) ได้ศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวหอมมะลิอินทรีย์ในพื้นที่จังหวัดสุรินทร์ ซึ่งเป็นภาคเกษตรกรรมหนึ่งของไทยที่มีการใช้น้ำในการเพาะปลูกจำนวนมาก โดยทำการศึกษาวัดข้าวหอมมะลิอินทรีย์ตั้งแต่การเตรียมแปลงเพาะปลูกจนถึงการเก็บเกี่ยวโดยใช้ข้อมูลฤดูการเพาะปลูกปี พ.ศ. 2552-2553 โดยพื้นที่เพาะปลูกเป็นพื้นที่นอกเขตชลประทานและลักษณะการทำนาเป็นนาหว่าน โดยมีผลผลิตเฉลี่ยที่ 376 กิโลกรัมต่อไร่ จากผลการศึกษาพบว่ามีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เท่ากับ 2,897 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โดยแยกเป็นวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว 2,277 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา 621 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ในการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้ศึกษาในส่วนของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน นอกจากนี้ ณรงค์ศักดิ์ (65) ยังได้ศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวเช่นกัน แต่ศึกษาในวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการปลูกข้าวแบบนาเปียกสลับแห้ง โดยใช้ค่า maximum rain infiltration rate ที่ดีที่สุด ผลการศึกษาพบว่า วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของนาดำมีค่าเท่ากับ 2,075.7 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ในขณะที่นาเปียกสลับแห้งมีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เท่ากับ 1,358.2 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โดยการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดลองในแปลงนาจริงของสถานีวิจัยทดลองการบริหารจัดการน้ำด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่ ซึ่งวิธีดังกล่าวจะใช้น้ำควบคุมระดับน้ำในแปลงนา โดยพบว่าสามารถลดการใช้น้ำและยังเป็นการเพิ่มผลผลิตของข้าวมากขึ้นอีกด้วย

Gheewala (66) ศึกษาอัตราการพุทพรีนซ์และผลกระทบจากการใช้น้ำของพืชที่ใช้ในการเป็นอาหารและพลังงานในประเทศไทย ศึกษาจากพืชทั้งหมด 10 ชนิด ในลุ่มน้ำแต่ละภาค ได้แก่ ภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคใต้ ทำการศึกษาปี ค.ศ. 2011 พบว่าปัจจัยที่สำคัญสำหรับอัตราการพุทพรีนซ์ของพืชคือผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้ ซึ่งจะเป็นปัจจัยในการลดอัตราการพุทพรีนซ์ที่เกิดขึ้น อัตราการพุทพรีนซ์ศึกษาเฉพาะอัตราการพุทพรีนซ์ที่สีเขียวและอัตราการพุทพรีนซ์ที่สีน้ำเงิน จากการศึกษาพบว่าอัตราการพุทพรีนซ์ของข้าวนาปีเฉลี่ย 2,005 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน อัตราการพุทพรีนซ์ของข้าวนาปรังเฉลี่ย 1,487 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ในขณะที่อัตราการพุทพรีนซ์ของข้าวโพดเฉลี่ย 982 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ในจำนวนพืชที่ศึกษาทั้งหมด 10 ชนิด พบว่าถั่วเขียวมีค่าอัตราการพุทพรีนซ์เฉลี่ยสูงที่สุดคือ 2,980 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และพืชที่มีอัตราการพุทพรีนซ์เฉลี่ยน้อยที่สุดคือ อ้อย มีอัตราการพุทพรีนซ์เฉลี่ยเท่ากับ 160 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน จากการศึกษาที่พบว่าจำนวนผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้เป็นปัจจัยสำคัญในการลดอัตราการพุทพรีนซ์ สามารถทำได้โดยการเพิ่มผลผลิตจากการพัฒนาวิธีการเพาะปลูก การใช้ปุ๋ยอินทรีย์ การจัดเตรียมพื้นที่เพาะปลูกโดยการแบ่งเขต ซึ่งจะเป็นวิธีที่ลดอัตราการพุทพรีนซ์และการใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ เช่นเดียวกับ Marano (67) ศึกษาอัตราการพุทพรีนซ์ของข้าวใน 2 พื้นที่คือ Santa Fe และ Entre Rios ในประเทศอาร์เจนตินา โดยพิจารณาการใช้น้ำของพืชทั้งการใช้น้ำของพืชสีเขียวที่จะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราการพุทพรีนซ์ที่สีเขียวและการใช้น้ำของพืชสีน้ำเงินที่จะเป็นปัจจัยในการกำหนดอัตราการพุทพรีนซ์ที่สีน้ำเงิน สำหรับอัตราการพุทพรีนซ์ที่สีเทาไม่ได้ทำการศึกษา โดยการใช้ของพืชจะใช้แบบจำลองสมดุลน้ำของข้าว (RWM) ที่ขึ้นกับน้ำในแหล่งน้ำ จำนวนฝนรายวัน การคายระเหยของพืช และปัจจัยข้อมูลดินที่ใช้ในการเพาะปลูก ทำการศึกษาเป็นช่วงระยะเวลา คือ ปี ค.ศ. 2009/2010, 2010/2011, 2011/2012 และปี ค.ศ. 2012/2013 จากการศึกษาพบว่า Enter Rios มีอัตราการพุทพรีนซ์ของข้าวเท่ากับ 987 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โดยแบ่งเป็น อัตราการพุทพรีนซ์ที่สีเขียว 44 เปอร์เซ็นต์ และอัตราการพุทพรีนซ์ที่สีน้ำเงิน 56 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Santa Fe มีอัตราการพุทพรีนซ์ของข้าวเท่ากับ 846 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน แบ่งเป็นอัตราการพุทพรีนซ์ที่สีเขียว 36 เปอร์เซ็นต์และอัตราการพุทพรีนซ์ที่สีน้ำเงิน 64 เปอร์เซ็นต์ และยังพบว่าแบบจำลองสมดุลน้ำของข้าวจะคำนวณการใช้น้ำของพืช โดยแสดงถึงความแตกต่างของน้ำสีน้ำเงินจากน้ำสีเขียวและปัจจัยอื่นๆ ของการคำนวณสมดุลน้ำ ที่จะใช้หาอัตราการพุทพรีนซ์ของข้าวได้

Shrestha (68) ศึกษาอัตราการพุทพรีนซ์ที่สีเขียว สีน้ำเงิน และสีเทา ของการเพาะปลูกพืชหลักในเนปาล โดยศึกษาในพื้นที่ 75 ตำบล 5 พื้นที่พัฒนาและ 3 ลักษณะพื้นที่ อัตราการพุทพรีนซ์ที่สีน้ำเงินและอัตราการพุทพรีนซ์ที่สีเขียวคำนวณโดยใช้แบบจำลองสมดุลน้ำ ในขณะที่อัตราการพุทพรีนซ์ที่สีเทาได้จากการต้องการปริมาณน้ำจืดสำหรับเจือจางมลพิษจากไนโตรเจนในระดับที่ยอมรับได้ โดยอัตราการพุทพรีนซ์จะพิจารณาจากความแตกต่างของพืช สถานที่เพาะปลูกในแต่ละตำบล การ

พัฒนาการเพาะปลูกและลักษณะพื้นที่การเพาะปลูก และนำผลวอเตอร์พุตพรีนซ์ของมันฝรั่งและข้าวสาลีที่คำนวณได้ในพื้นที่เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้จากประเทศอื่นๆ วอเตอร์พุตพรีนซ์ของข้าว ข้าวโพดและข้าวสาลี มีค่ามากที่สุด ในลักษณะพื้นที่ที่เป็นภูเขา ในขณะที่ ข้าวฟ่าง พืชน้ำมัน และข้าวบาร์เลย์ มีค่าวอเตอร์พุตพรีนซ์น้อยที่สุดในลักษณะพื้นที่ที่เป็นภูเขาเช่นกัน จากผลการศึกษาพบว่า ค่าเฉลี่ยของวอเตอร์พุตพรีนซ์สีเขียว น้ำเงิน และเทา จากพืชหลัก 9 ชนิดใน 75 ตำบล วอเตอร์พุตพรีนซ์สีเขียวมีสัดส่วนถึง 50 เปอร์เซ็นต์ของวอเตอร์พุตพรีนซ์ทั้งหมด ในขณะที่วอเตอร์พุตพรีนซ์สีน้ำเงินคือ 30 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือเป็นสัดส่วนของวอเตอร์พุตพรีนซ์สีเทา โดยวอเตอร์พุตพรีนซ์ของข้าวเท่ากับ 3,483 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์พุตพรีนซ์ของข้าวโพดอยู่ที่ 2,846 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โดยปัจจัยที่ทำให้วอเตอร์พุตพรีนซ์สูงมาจากรูปแบบการเพาะปลูกที่มีการใช้ฝนเป็นจำนวนมาก และมีผลผลิตในการเพาะปลูกที่ต่ำโดยมีสาเหตุมาจากศัตรูพืช รวมถึงขาดแคลนระบบชลประทานที่ดี นอกจากนี้ การศึกษาของวอเตอร์พุตพรีนซ์ของข้าวโพด ยังได้มีการศึกษาในประเทศจีน โดย Sun (69) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาของวอเตอร์พุตพรีนซ์ของผลผลิตข้าวโพดในปักกิ่ง จากปี ค.ศ. 1978 ถึง 2008 จากการศึกษาพบว่า วอเตอร์พุตพรีนซ์ของข้าวโพดเท่ากับ 1,031 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โดย 56 เปอร์เซ็นต์ เป็นวอเตอร์พุตพรีนซ์สีเขียว 25 เปอร์เซ็นต์เป็นวอเตอร์พุตพรีนซ์สีน้ำเงินและ อีก 19 เปอร์เซ็นต์ เป็นวอเตอร์พุตพรีนซ์สีเทา โดยศึกษาทั้งสภาพอากาศอุ่น และสภาพอากาศที่แห้ง และพบว่าความต้องการน้ำของข้าวโพดและความต้องการน้ำชลประทานเพิ่มขึ้น 0.52 มิลลิเมตร และ 2.86 มิลลิเมตร ถ้าพิจารณาแนวโน้มระหว่างปี ค.ศ. 1978-2008 ของวอเตอร์พุตพรีนซ์สีเขียวพบว่า มีแนวโน้มลดลง 10.90 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์พุตพรีนซ์สีน้ำเงินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 4.18 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และวอเตอร์พุตพรีนซ์สีเทามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 4.66 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวกับอุณหภูมิ ความเร็วลม การใช้ปุ๋ยเคมีและรูปแบบการเพาะปลูก เป็นตัวแปรที่สำคัญ

Yoo (70) ศึกษาการประมาณวอเตอร์พุตพรีนซ์ของการปลูกข้าวในเกาหลีใต้ ระหว่างปี ค.ศ. 2004-2009 โดยพิจารณาจากความแตกต่างของการใช้น้ำที่อธิบายโดยสีเขียว สีน้ำเงินและสีเทา พบว่าวอเตอร์พุตพรีนซ์ของข้าวเท่ากับ 844.5 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โดยมีวอเตอร์พุตพรีนซ์สีเขียว 294.5 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์พุตพรีนซ์สีน้ำเงิน 501.6 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และวอเตอร์พุตพรีนซ์สีเทาเท่ากับ 48.4 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

3.1 วิธีการศึกษา

การศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนและข้าวโพดในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอน้ำหนาว จังหวัดน่าน เป็นการศึกษาการใช้น้ำในการปลูกข้าวนาสวนและข้าวโพด จะเริ่มจากการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของข้าวนาสวนและข้าวโพด และปริมาณการใช้น้ำมาเทียบกับปริมาณฝนใช้การในพื้นที่ศึกษา เพื่อพิจารณาถึงปริมาณการใช้น้ำจริงของข้าวนาสวนและข้าวโพด จากผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้ เครื่องมือที่ใช้ในการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของข้าวนาสวนและข้าวโพด ใช้โปรแกรม CROPWAT 8.0 โปรแกรม CWR-RID และ โปรแกรม WAPF หลังจากนั้นจะนำปริมาณการใช้น้ำจริงของข้าวนาสวนและข้าวโพดมาคำนวณหาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนและข้าวโพด ต่อผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้ตามลำดับ ในการศึกษาจะศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนและข้าวโพดประกอบด้วย 3 ส่วน คือ วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา

3.1.1 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว

ในการหาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว จะคำนวณหาจากปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง ซึ่งได้จากการเปรียบเทียบปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_c) กับ ปริมาณฝนใช้การ (P_{eff}) โดยปริมาณการใช้น้ำของพืชจะเป็นผลคูณระหว่างค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิง (ET_o) กับค่าสัมประสิทธิ์พืช (K_c)

3.1.2 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินสำหรับข้าวนาสวนและข้าวโพดจะคำนวณจากปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม โดยเปรียบเทียบปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_c) กับปริมาณฝนใช้การ (P_{eff}) ซึ่งจะพิจารณาจากกรณีที่ปริมาณฝนใช้การน้อยกว่าปริมาณการใช้น้ำของพืช

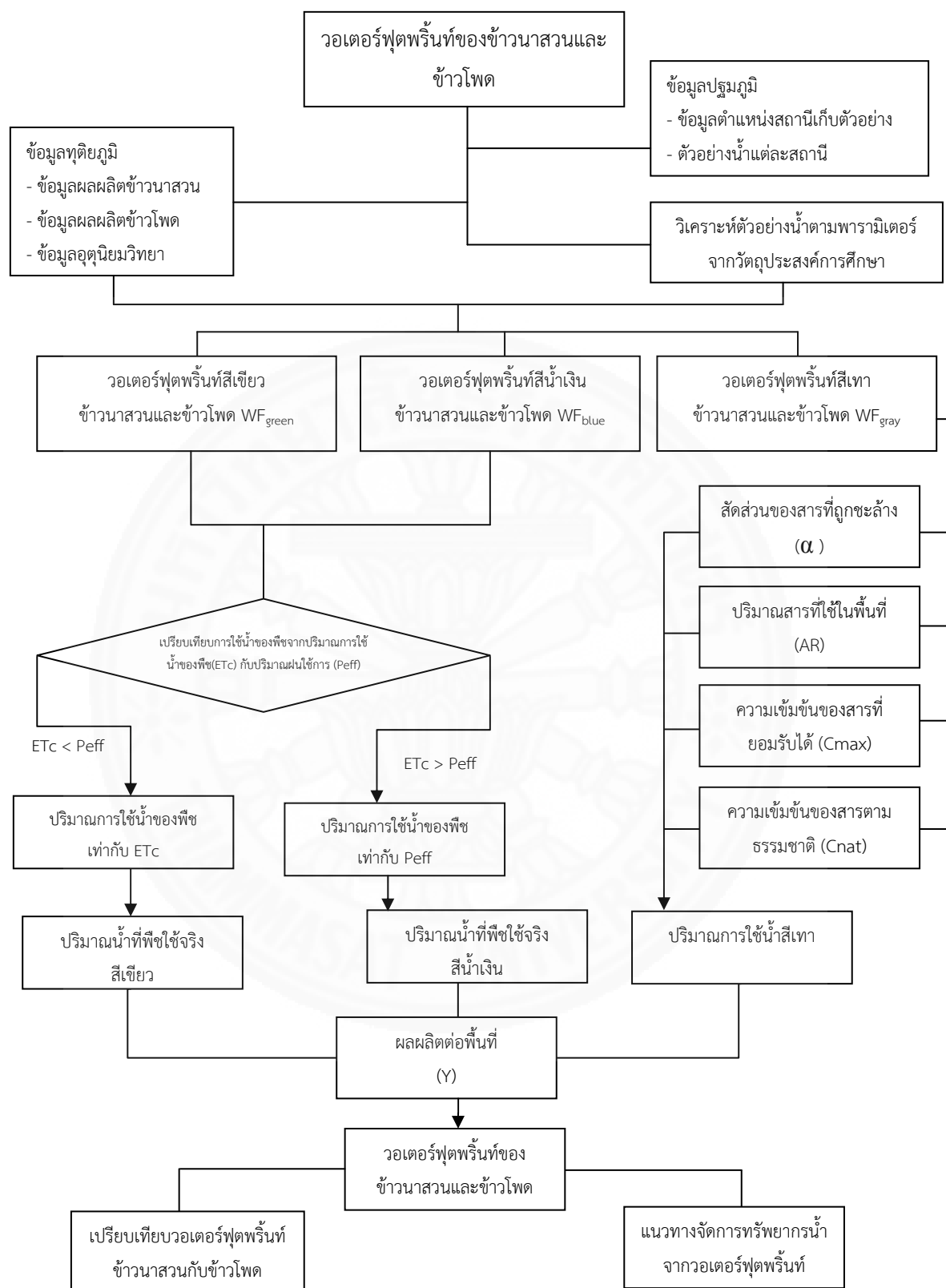
3.1.3 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา

ปริมาณปุ๋ยที่ใช้ในการเพาะปลูกที่ลงสู่แหล่งน้ำเป็นข้อมูลสำคัญในการหาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา โดยคำนึงถึงอัตราการใช้ปุ๋ยต่อพื้นที่ สัดส่วนที่ถูกชะล้างลงแหล่งน้ำ ค่ามาตรฐานของมลพิษที่ตรวจวัดที่ยอมรับได้ในแหล่งน้ำธรรมชาติ รวมถึงความเข้มข้นของปุ๋ยในแหล่งน้ำธรรมชาติที่ตรวจวิเคราะห์จากการเก็บน้ำในแหล่งน้ำตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ทางกายภาพและเคมี

ซึ่งสามารถแสดงผังการศึกษาและผังการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนและข้าวโพดได้ดังภาพที่ 3.1 และภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.1 ผังการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนและข้าวโพด



ภาพที่ 3.2 ผังการคำนวณวอเตอร์พุทพรีนธ์ของข้าวนาสวนและข้าวโพด พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

3.2 การรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของพืชจากทั้ง 3 โปรแกรม มาจาก 2 ทาง คือ ข้อมูลที่ถูกรวบรวมอยู่ในฐานข้อมูลของโปรแกรมนั้นๆ กับข้อมูลที่รวบรวมโดยผู้ศึกษา การรวบรวมข้อมูลโดยผู้ศึกษา แบ่งเป็นการรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิที่ใช้ในการศึกษาจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและข้อมูลปฐมภูมิ ที่เก็บในพื้นที่ศึกษาสำหรับเป็นข้อมูลนำเข้าในการคำนวณเพื่อหาอัตรการคายน้ำของข้าวนาสวนและข้าวโพด สามารถอธิบายการศึกษาในแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

3.2.1 การรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ

ข้อมูลทุติยภูมิที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ ประกอบด้วย

(1) ข้อมูลการเพาะปลูกและผลผลิตข้าวนาสวนและข้าวโพด

ข้อมูลการเพาะปลูกและผลผลิตข้าวนาสวนที่เป็นข้าวเปลือกและข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เป็นข้อมูลสถิติผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้ในพื้นที่อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน จากสำนักงานเกษตรอำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน ปี พ.ศ. 2556

(2) ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา

เป็นข้อมูลอุตุนิยมวิทยาได้จากโปรแกรม CLIMWAT ที่พัฒนาโดยองค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ เป็นข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ.2514-2543 ประมวลผลในปี พ.ศ. 2556 ที่กำหนดไว้ในโปรแกรม CLIMWAT คือสถานีตรวจวัดอากาศน่าน

3.2.2 การรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิ

3.2.2.1 สำรวจพื้นที่ศึกษา

สำรวจพื้นที่ที่มีการเพาะปลูกข้าวนาสวนและข้าวโพด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน (ภาพที่ 3.2) เป็นพื้นที่เพาะปลูกนอกเขตชลประทาน เพื่อกำหนดสถานีเก็บตัวอย่างน้ำ ซึ่งการกำหนดสถานีเก็บตัวอย่างน้ำนั้น จะกำหนดโดยอ้างอิงตามลักษณะพื้นที่การเพาะปลูกข้าวนาสวนและข้าวโพดที่มีการระบายน้ำลงสู่ลำน้ำธรรมชาติ ทั้งนี้ได้กำหนดสถานีเก็บตัวอย่างน้ำทั้งหมด 8 สถานี กระจายตามบริเวณที่มีการเพาะปลูกข้าวนาสวนและข้าวโพดภายในพื้นที่ศึกษา โดยอาศัยเกณฑ์ในการเลือกพื้นที่ คือ ความปลอดภัยและการเข้าถึงสถานที่ในการเก็บตัวอย่าง ในแต่ละสถานีเก็บตัวอย่างจะถูกระบุด้วยตำแหน่งด้วยเครื่องบอกพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม ใช้ระบบพิกัดกริด (Universal Transverse Mercator, UTM) zone 47 และใช้หมุดหลักฐานอ้างอิง WGS 1984 เป็น datum

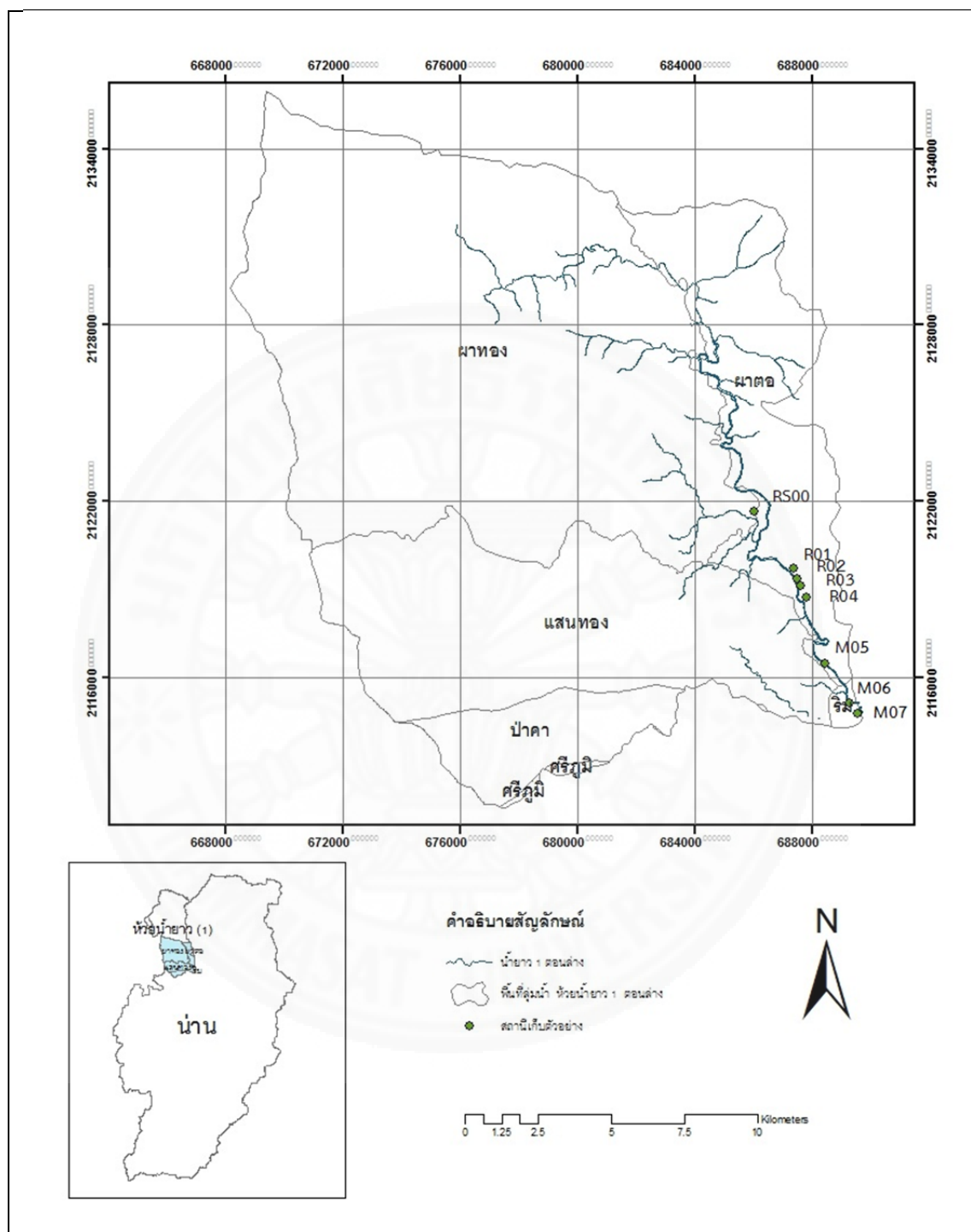
การศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนและข้าวโพด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน โดยการกำหนดสถานีเก็บตัวอย่างเพื่อเป็น

ตัวแทนพื้นที่การเพาะปลูกข้าวนาสวนและข้าวโพดในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอนาทอง จังหวัดนครราชสีมา ตามมาตรฐานการเก็บตัวอย่างน้ำสำหรับการตรวจวัดคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมี (34) (ภาพที่ 3.3 และตารางที่ 3.1)

การเก็บตัวอย่างน้ำในพื้นที่ตัวอย่างของแปลงการเพาะปลูกข้าวนาสวนและข้าวโพด ใช้วิธีการเก็บแบบจ้วง ทั้งหมด 4 ครั้ง ครั้งละ 3 ข้ำ ตั้งแต่เดือน กรกฎาคม ถึง เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2556 แบ่งตามระยะการเจริญเติบโตของการเพาะปลูกข้าวนาสวนและข้าวโพดเป็น 4 ระยะ ได้แก่ ระยะที่ 1 ระยะการเจริญเติบโตทางต้นและใบ ระยะที่ 2 ระยะการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์ ระยะที่ 3 ระยะการเจริญเติบโตด้านเมล็ด และระยะที่ 4 ระยะการเก็บเกี่ยว ซึ่งการเก็บตัวอย่างน้ำในพื้นที่ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

- 1) สถานีอ้างอิง จำนวน 1 สถานี ได้แก่ บ้านแห่น 1 (RS00)
- 2) พื้นที่เพาะปลูกข้าวนาสวน จำนวน 4 สถานี ได้แก่ นา-R01, นา-R02, นา-R03 และนา-R04
- 3) พื้นที่เพาะปลูกข้าวโพด จำนวน 3 สถานี ได้แก่ บ้านนาหนอง 1 (M05), บ้านนาเตา (M06) และสะพานใหม่ (M07)

ทั้งนี้สามารถลักษณะพื้นที่และสภาพแวดล้อมของสถานีเก็บตัวอย่างน้ำจำนวน 8 สถานี (ภาพที่ 3.4)



ภาพที่ 3.3 แผนที่สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ กลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอน้ำยาว จังหวัดน่าน

ตารางที่ 3.1 สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ ตำบล และพิกัดภูมิศาสตร์ของสถานีเก็บตัวอย่างน้ำ พื้นที่
ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ชื่อ	ตำบล	จุดพิกัด UTM	
			X	Y
RS00	บ้านแหน 1	ผาตอ	0686049	2121624
R01	นา-R01	ผาตอ	0687369	2119686
R02	นา-R02	ผาตอ	0687499	2119351
R03	นา-R03	ผาตอ	0687607	2119126
R04	นา-R04	ผาตอ	0687818	2118731
M05	บ้านนาหนูน 1	แสนทอง	0688437	2116456
M06	บ้านนาเตา	ริม	0689278	2115094
M07	สะพานใหม่	ริม	0689564	2114750

หมายเหตุ RS – reference station

R – rice

M – maize

UTM – Universal Transverse Mercator

X, Y – จุดพิกัดทางแนวราบ



สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ R500
(X: 686049, Y: 2121624)



สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ R01
(X: 687369, Y: 2119686)



สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ R02
(X: 687499, Y: 2119351)



สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ R03
(X: 687607, Y: 2119126)



สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ R04
(X: 687818, Y: 2118731)



สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ M05
(X: 688437, Y: 2116456)



สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ M06
(X: 689278, Y: 2115094)



สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ M07
(X: 689564, Y: 2114750)

ภาพที่ 3.4 ลักษณะพื้นที่ของสถานีเก็บตัวอย่างน้ำ ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอดำรงวิทยะ
จังหวัดน่าน วันที่ 27 กรกฎาคม-16 พฤศจิกายน 2556

3.2.2.2 การเก็บตัวอย่างน้ำ (72)

การเก็บรวบรวมข้อมูลคุณภาพน้ำ ทั้งทางด้านกายภาพและด้านคุณภาพน้ำ ตัวอย่างน้ำที่เก็บและวิเคราะห์ทันทีในภาคสนามคือ ความเป็นกรด-เบส (pH) ออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen: DO) การนำไฟฟ้า (conductivity) และอุณหภูมิของน้ำ (temperature) ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) ไนเตรท-ไนโตรเจน ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) และฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) โดยวิธีการเก็บตัวอย่างน้ำจะเก็บที่กึ่งกลางความกว้างและความลึกของลำน้ำในแต่ละสถานี โดยใช้วิธีเก็บแบบจ้วง (grab sampling) การเก็บรักษาตัวอย่างน้ำเพื่อนำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

ไนเตรท-ไนโตรเจน ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) เก็บตัวอย่างน้ำในพื้นที่ศึกษาโดยใช้ขวดชนิดโพลีเอทิลีน (polyethylene) โดยมีปริมาตร 500 มิลลิลิตร จำนวน 3 ขวด และทำการปรับสภาพตัวอย่างน้ำให้เป็นกรดโดยเติมกรดกำมะถันเข้มข้น และเก็บรักษาตัวอย่างน้ำที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (71)

แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) เก็บตัวอย่างน้ำในพื้นที่ศึกษาโดยใช้ขวดชนิดโพลีเอทิลีน โดยมีปริมาตร 500 มิลลิลิตร จำนวน 3 ขวด และทำการปรับสภาพตัวอย่างน้ำให้เป็นกรดโดยเติมกรดกำมะถันเข้มข้น และเก็บรักษาตัวอย่างน้ำที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (71)

ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) เก็บตัวอย่างน้ำในพื้นที่ศึกษาโดยใช้ขวดแก้วที่มีปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยเก็บจำนวน 3 ขวด และทำการเติมกรดไฮโดรคลอริก 0.5 มิลลิกรัม เพื่อรักษาตัวอย่างน้ำและเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (71)

3.2.2.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

นำตัวอย่างน้ำที่เก็บในพื้นที่ศึกษาไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในห้องปฏิบัติการตามวิธีสำหรับตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ (ตารางที่ 3.2) โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐานตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน (80)

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ^[71] ของการศึกษา

พารามิเตอร์	หน่วย	เครื่องมือ/วิธีวิเคราะห์
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	Thermometer
ความเป็นกรด-เบส	-	pH Meter
การนำไฟฟ้า	ไมโครซีเมนต์	EC Meter
ออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen: DO)	มิลลิกรัมต่อลิตร	<i>Azide Modification of Iodometric Method</i>
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (NH ₃ -N)	มิลลิกรัมต่อลิตร	Ammonia Nesslerization Method
ไนเตรท-ไนโตรเจน (NO ₃ ⁻ -N)	มิลลิกรัมต่อลิตร	Cadmium Reduction Method
ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (PO ₄ ³⁻ -P)	มิลลิกรัมต่อลิตร	Ascorbic Method

หมายเหตุ; การวิเคราะห์อ้างอิงจาก American Public Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, 2005

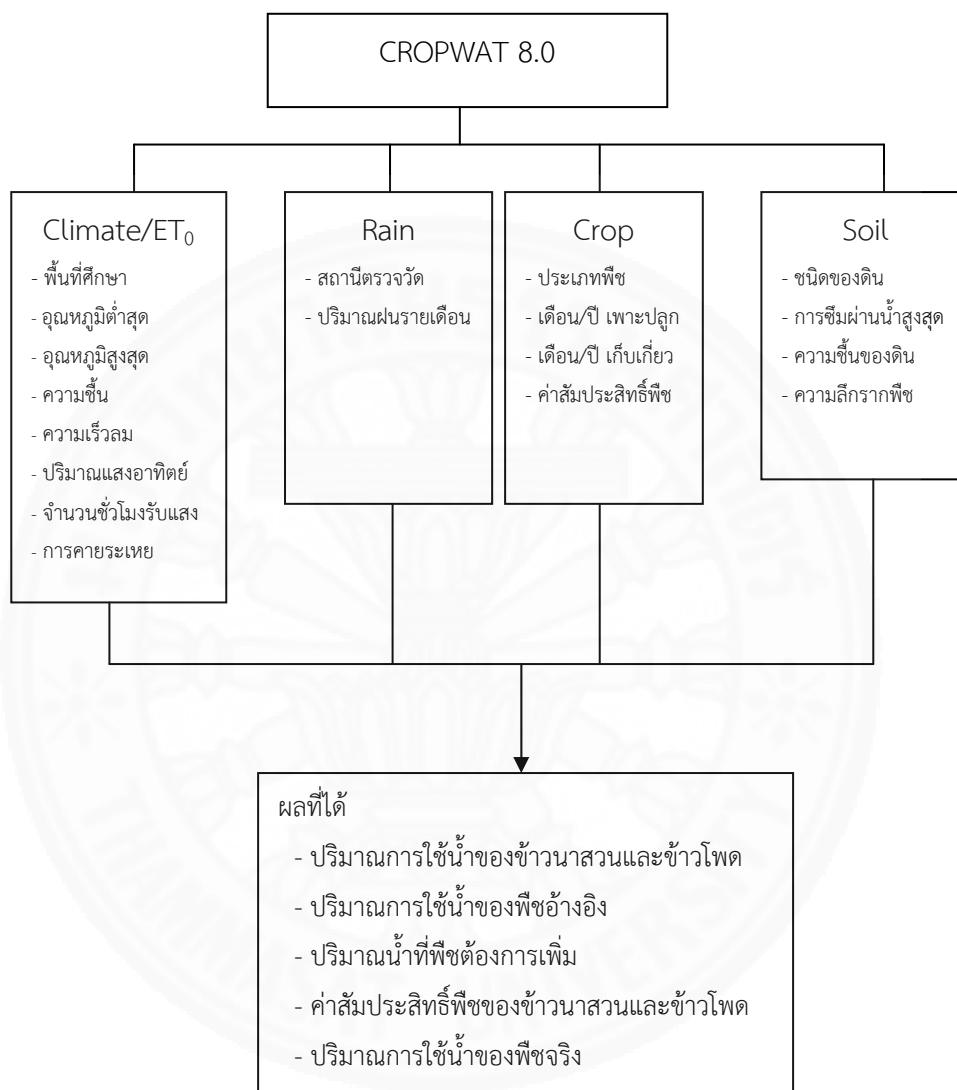
3.3 โปรแกรมที่ใช้คำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชจริง

การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนและข้าวโพด จะใช้โปรแกรม 3 โปรแกรมในการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชจริง เพื่อเป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับการหาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนและข้าวโพดต่อผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้ โดยใช้โปรแกรmdังนี้

(1) โปรแกรม CROPWAT 8.0

ข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรม CROPWAT 8.0 ประกอบด้วย 2 ส่วนดังที่ได้กล่าวคือ ข้อมูลที่มีอยู่ในฐานข้อมูลของโปรแกรม และข้อมูลที่ต้องนำเข้าโดยผู้ศึกษา ข้อมูลอุตุณิยมิวิทยาได้มาจากฐานข้อมูลขององค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ โดยใช้โปรแกรม CLIMWAT ประมวลผลฐานข้อมูลที่เกิดขึ้นรวบรวมในช่วงเวลาปี ค.ศ. 1971-2000 (20) เพื่อนำเข้าสู่โปรแกรม CROPWAT 8.0 โดยเลือกที่สถานีอุตุณิยมิวิทยาน่าน ข้อมูลข้าวนาสวนและข้าวโพด และข้อมูลดิน ซึ่งผลที่ได้จากโปรแกรมคือ ปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_c) ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_o) จาก

วิธีการของ Penman-Montieth และค่าสัมประสิทธิ์พืชของข้าวนาสวนและข้าวโพด (K_c) โดยโปรแกรม CROPWAT 8.0 มีผังกระบวนการทำงานดังภาพที่ 3.5

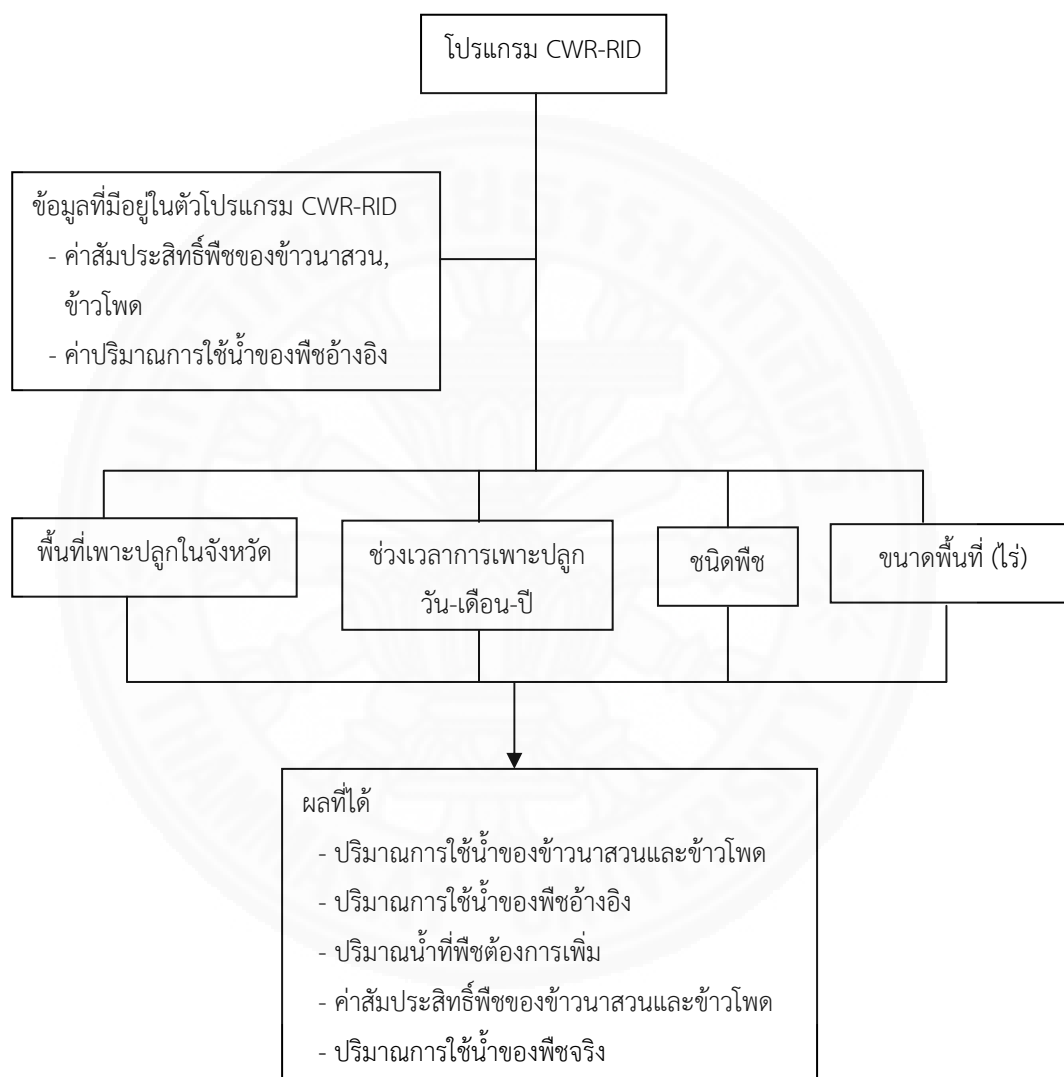


ภาพที่ 3.5 ผังกระบวนการทำงานของโปรแกรม CROPWAT 8.0

(2) โปรแกรม CWR-RID (23)

ข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรม CWR-RID ได้มาจากการสำรวจพื้นที่ของพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ประกอบด้วย ข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาสวนและข้าวโพด และข้อมูลช่วงเวลาการเพาะปลูกข้าวนาสวนและข้าวโพด ซึ่งผลที่ได้จากโปรแกรมคือ ปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_c) ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0) จากวิธีการของ Penman-Montieth และค่าสัมประสิทธิ์พืช (K_c) ของข้าวนาสวนและข้าวโพด ขั้นตอนในการประมวลผลจะเริ่ม

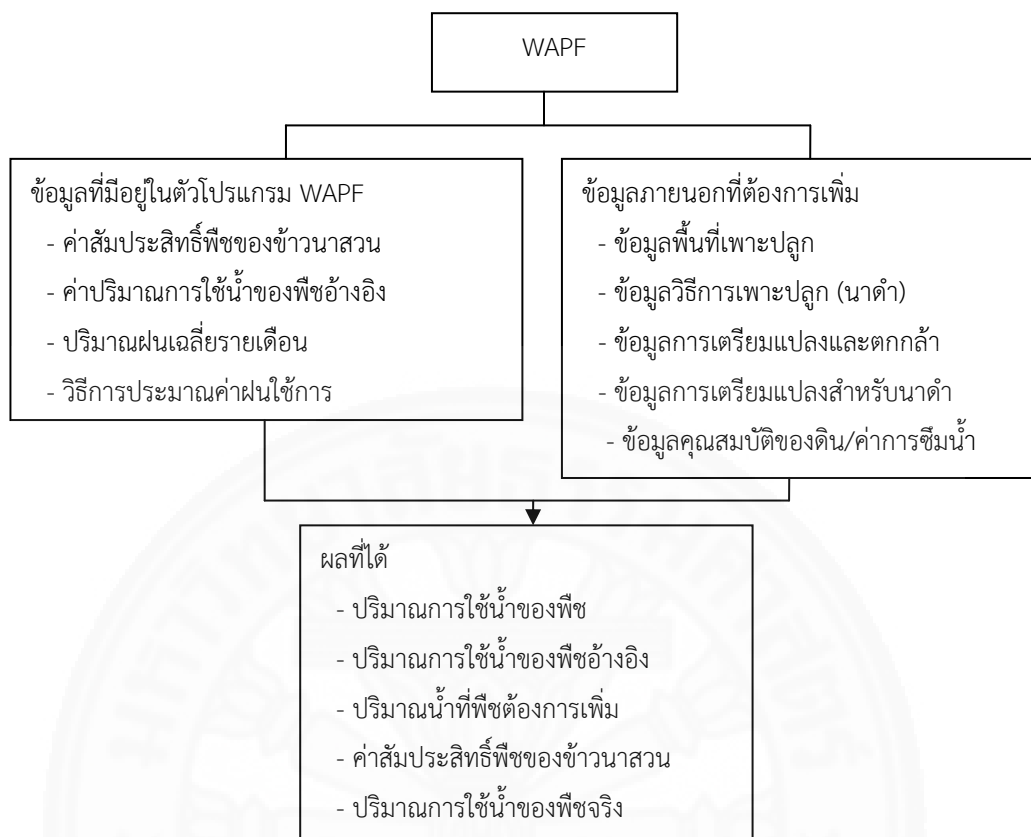
จากการบันทึกข้อมูลพื้นที่เพาะปลูก ชนิดพืชที่ทำการเพาะปลูก จำนวนพื้นที่ มีหน่วยเป็น ไร่ และ วัน/เดือน/ปี ที่เริ่มเพาะปลูก หลังจากการประมวลผลข้อมูลที่ได้จะปรากฏอยู่ในลักษณะของเวิร์คชีต (worksheet) ในโปรแกรม Microsoft Excel โดยโปรแกรม CWR-RID มีผังกระบวนการทำงานดัง ภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ผังกระบวนการทำงานของโปรแกรม CWR-RID

(3) โปรแกรม WAPF (23)

WAPF เป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยกรมชลประทาน สำหรับบริหารจัดการน้ำในการเกษตร โดยกำหนดข้อมูลนำเข้าสำหรับการประมวลผล ดังนี้ ข้อมูลพื้นที่เพาะปลูก ได้แก่ จังหวัดที่ปลูกข้าว สำนักชลประทาน โครงการชลประทาน และฝ่ายส่งน้ำและบำรุงรักษา และชนิดพันธุ์ข้าวที่ปลูก ข้อมูลของการเตรียมพื้นที่เพาะปลูก เริ่มตั้งแต่การเตรียมแปลงกล้าและตกกล้า เช่น ระยะเวลาเตรียมแปลงกล้า ระยะเวลาเลี้ยงกล้า ปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อการเตรียมแปลงและเลี้ยงกล้า ในการเตรียมแปลงนา แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ นาดำ และนาหว่านน้ำตม ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาในลักษณะของนาดำ ดังนั้นข้อมูลที่สำคัญในการเตรียมแปลงนาดำ ได้แก่ ระยะเวลาเตรียมแปลงนา และปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อเตรียมแปลงนา นอกจากนี้ ยังต้องอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติดิน ได้แก่ ชนิดของเนื้อดิน และอัตราการรั่วซึมในแปลงนา (มิลลิเมตรต่อวัน) สิ่งที่เขาได้ไม่ได้ในการประมวลผลคือ ระยะเวลาการปลูก WAPF ต้องการวันเดือนปี ของการเพาะปลูกตั้งแต่เริ่มเตรียมแปลง ข้อมูลต่อมาคือปริมาณฝน โดยสามารถเลือกใช้ข้อมูลที่มีอยู่ในฐานข้อมูลของโปรแกรม หรือ กำหนดได้เองจากผู้ใช้ เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาณฝนใช้การ โดยวิธีของ U.S.Department of Agriculture's Conservation Service (USDA SCS) กล่าวโดยสรุปข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรม WAPF ประกอบด้วยข้อมูลที่มีอยู่ในตัวโปรแกรม WAPF ได้มาจากกรมชลประทาน คือ ค่าสัมประสิทธิ์พืชของข้าวนาสวน (Kc) ค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0) โดยสูตร Penman-Monteith ปริมาณฝนเฉลี่ยรายเดือน และวิธีการประมาณค่าฝนใช้การ และข้อมูลภายนอกที่ต้องการเพิ่ม ได้มาจากสำนักงานเกษตรอำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน คือ ข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาสวน ข้อมูลวิธีการเพาะปลูก (นาดำ) ข้อมูลการเตรียมแปลงและตกกล้า ข้อมูลการเตรียมแปลงสำหรับนาดำ ข้อมูลวิธีการจัดกลุ่มพื้นที่สำหรับการเตรียมแปลง และข้อมูลคุณสมบัติของดิน ซึ่งผลที่ได้จากโปรแกรมคือ ปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_c) ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0) และค่าสัมประสิทธิ์พืชของข้าวนาสวน (Kc) โดยโปรแกรม WAPF มีผังกระบวนการทำงานดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ผังกระบวนการทำงานของโปรแกรม WAPF

3.4 คำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ คำนวณจากผลรวมของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินและวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา ดังนี้

3.4.1 การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว

การหาค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวของข้าวนาสวนและข้าวโพด พื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่านนั้น สามารถคำนวณจากปริมาณการใช้น้ำของจริง ข้าวนาสวนและข้าวโพดหารด้วยผลผลิตของข้าวนาสวนและข้าวโพด (8) โดยที่ข้อมูลปริมาณน้ำที่ใช้ในการเพาะปลูก ประกอบด้วย ปริมาณการใช้น้ำของข้าวนาสวนและข้าวโพด (ET_c) ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_o) และค่าสัมประสิทธิ์พีช (K_c) ของข้าวนาสวนและข้าวโพด

3.4.2 การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินของข้าวนาสวนและข้าวโพดพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครสวรรค์ ในการศึกษาคั้งนี้จะพิจารณาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินของข้าวนาสวนและข้าวโพด โดยจะคำนวณจากปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม โดยเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่พืชต้องการกับปริมาณฝนใช้การ (8)

3.4.3 การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว

การหาค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวของข้าวนาสวนและข้าวโพดนั้น เพื่อหาปริมาณน้ำที่ใช้ในการเจือจางน้ำที่มีสารก่อให้เกิดมลภาวะให้เข้าสู่ตามมาตรฐาน โดยคำนวณจากข้อมูลปริมาณน้ำที่เจือปนด้วยสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะจากการเพาะปลูกข้าวนาสวนและข้าวโพดหารด้วยผลผลิตของข้าวนาสวนและข้าวโพด (8) โดยข้อมูลปริมาณน้ำที่เจือปนสารนั้นได้จากการเก็บตัวอย่างน้ำจากพื้นที่ศึกษาและนำมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในห้องปฏิบัติการตามตารางที่ 3.2

บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

4.1 ผลการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวนาสวน

4.1.1 ผลการศึกษาปัจจัยข้อมูลนำเข้าโปรแกรม CROPWAT 8.0 สำหรับข้าวนาสวน

การศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวของข้าวนาสวน มีวัตถุประสงค์ในการหาปริมาณน้ำที่ข้าวนาสวนใช้จริงในการเพาะปลูก จากการเปรียบเทียบปริมาณการใช้น้ำของข้าวนาสวน (ET_c) กับปริมาณฝนใช้การ (P_{eff}) ค่า ET_c คำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์พืชที่ได้จากการศึกษาของ Allen (16) คูณกับปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0) จากโปรแกรม CROPWAT 8.0 โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจากโปรแกรม CLIMWAT ที่เป็นข้อมูลเฉลี่ย 30 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2514-2543 จากสถานีอุตุนิยมวิทยาน่าน การคำนวณฝนใช้การของ CROPWAT 8.0 ใช้วิธีของ USDA (19) โดยมีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

4.1.1.1 สภาพภูมิอากาศและการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (climate/ ET_0)

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการศึกษาสภาพภูมิอากาศ และการใช้น้ำของพืชอ้างอิงถูกรวบรวมโดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งประชาชาติ และประมวลผลโดยโปรแกรม CLIMWAT โดยเลือกสถานตรวจวัดสภาพภูมิอากาศน่าน ซึ่งในฐานข้อมูลเป็น location 92 ที่ความสูง 201 เมตร ละจิจูด 18.76 องศาเหนือ ลองจิจูด 100.76 องศาตะวันออก ข้อมูลประกอบด้วย อุณหภูมิต่ำสุด อุณหภูมิสูงสุด ความชื้น ความเร็วลม จำนวนชั่วโมงรับแสงแดด ปริมาณแสงแดด และการใช้น้ำของพืชอ้างอิง เป็นระยะเวลา 12 เดือน ตั้งแต่ เดือน มกราคม ถึง เดือน ธันวาคม เป็นข้อมูลข้อมูลเฉลี่ย 30 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2514-2543 ประมวลผลในปี พ.ศ.2556 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิต่ำเท่ากับ 20.2 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิสูง เท่ากับ 32.4 องศาเซลเซียส ความชื้นมีค่าสูงสุดในเดือน สิงหาคม เท่ากับ 85 เปอร์เซ็นต์ และต่ำสุดในเดือนมีนาคม เท่ากับ 65 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเฉลี่ยความชื้นเท่ากับ 77 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วลมมีค่าสูงสุดในช่วงเดือน เมษายน ถึงเดือน สิงหาคม ที่ความเร็ว 69 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วลมต่ำสุดในเดือน ธันวาคม ที่ 35 เมตรต่อวินาที โดยมีความเร็วลมเฉลี่ยที่ 56 เมตรต่อวินาที ชั่วโมงการรับแสงแดด มีจำนวนชั่วโมงรับแสงแดด สูงสุดในเดือน มีนาคม 8.7 ชั่วโมง และต่ำสุดในเดือน สิงหาคม 3.6 ชั่วโมง มีค่าเฉลี่ยของจำนวนชั่วโมงรับแสงแดด เท่ากับ 6.3 ชั่วโมง ปริมาณแสงแดดที่ได้รับต่อวัน มีปริมาณสูงสุดในเดือน มีนาคม 21.5

เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน น้อยสุดในเดือน สิงหาคม 15.0 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดย
มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 17.4 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (ตารางที่ 4.1)

การศึกษาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0) ใช้โปรแกรม CROPWAT
8.0 คำนวณโดยใช้สมการ Penman-Monteith สมการ 2.12 ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณการใช้น้ำ
ของพืชอ้างอิงในเดือน เมษายน 4.86 มิลลิเมตรต่อวัน ซึ่งมีค่าสูงสุด และต่ำสุดในเดือน ธันวาคม 2.59
มิลลิเมตรต่อวัน โดยคำนวณจากข้อมูลเฉลี่ย 30 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2514-2543 ปัจจัยที่ทำให้ปริมาณ
การใช้น้ำของพืชอ้างอิงในเดือนเมษายนมีค่าสูงสุด เนื่องมาจากอิทธิพลของ ลม ความชื้น และ
อุณหภูมิ ที่สูงในช่วงเดือนดังกล่าว ซึ่งต่างจากในช่วงเดือน ธันวาคม ที่ปัจจัยดังกล่าว มีค่าน้อยกว่าทำ
ให้ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงมีค่าน้อยเท่ากับ 2.59 มิลลิเมตรต่อวัน (ตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.1 สภาพภูมิอากาศและการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0) รายเดือนสถานีอุตุนิยมวิทยาน่าน⁽¹⁴⁾

เดือน	อุณหภูมิ ต่ำ (องศา เซลเซียส)	อุณหภูมิ สูง (องศา เซลเซียส)	ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	ความเร็ว ลม (เมตรต่อ วินาที)	ระยะเวลา รับแสง (ชั่วโมง)	ความเข้ม รังสี (เมกะจูลต่อ ลูกบาศก์ เมตรต่อวัน)	การใช้น้ำ ของพืช อ้างอิง ET_0 (มิลลิเมตร ต่อวัน)
มกราคม	13.4	29.8	76	43	8.1	17.1	2.88
กุมภาพันธ์	15.1	32.7	70	52	8.5	19.4	3.59
มีนาคม	18.3	35.3	65	61	8.7	21.5	4.43
เมษายน	22.0	36.5	66	69	7.8	21.4	4.86
พฤษภาคม	23.6	34.6	76	69	5.9	18.7	4.33
มิถุนายน	24.1	32.9	80	69	4.2	16.1	3.75
กรกฎาคม	23.8	31.9	82	69	3.7	15.3	3.49
สิงหาคม	23.7	31.7	85	69	3.6	15.0	3.36
กันยายน	23.3	32.2	84	52	4.9	16.2	3.53
ตุลาคม	21.8	32.0	83	43	6.9	17.6	3.62
พฤศจิกายน	18.6	30.6	81	43	6.9	15.9	3.08
ธันวาคม	14.3	29.0	79	35	6.8	14.9	2.59
เฉลี่ย	20.2	32.4	77	56	6.3	17.4	3.63

4.1.1.2 ปริมาณฝนใช้การ (P_{eff}) และปริมาณฝน

ข้อมูลปริมาณฝนนั้น นำมาจากการเก็บรวบรวมขององค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ ประมวลผลโดยโปรแกรม CLIMWAT ที่มีสถานีเก็บรวบรวม 5,000 สถานีทั่วโลก รวมถึงประเทศไทย นำมาคำนวณหาฝนใช้การ ($Eff.rain$, P_{eff}) โดยวิธีของ USDA (8) เลือกโดยผู้ศึกษา และโปรแกรมจะทำการคำนวณอัตโนมัติโดยเงื่อนไขการเลือกใช้ขึ้นกับปริมาณฝนมากกว่า 250 มิลลิเมตร หรือ น้อยกว่า 250 มิลลิเมตร ผลการศึกษาพบว่าปริมาณฝนรวม เท่ากับ 1,263.00 มิลลิเมตร และปริมาณฝนใช้การ เท่ากับ 902.70 มิลลิเมตร (ตารางที่ 4.2)

ตารางที่ 4.2 ปริมาณฝนใช้การและปริมาณฝน รายเดือน สถานีอุตุนิยมวิทยาน่าน ปี พ.ศ. 2543⁽²⁰⁾

เดือน	ปริมาณฝน (มิลลิเมตรต่อเดือน)	ฝนใช้การ (P_{eff}) (มิลลิเมตรต่อเดือน)
มกราคม	8.00	7.90
กุมภาพันธ์	14.00	13.70
มีนาคม	27.00	25.80
เมษายน	103.00	86.00
พฤษภาคม	175.00	126.00
มิถุนายน	156.00	117.10
กรกฎาคม	207.00	138.40
สิงหาคม	248.00	149.60
กันยายน	205.00	137.80
ตุลาคม	95.00	80.60
พฤศจิกายน	19.00	18.40
ธันวาคม	6.00	5.90
รวม	1,263.00	902.70

หมายเหตุ คำนวณฝนใช้การ (P_{eff}) ด้วยวิธีของ USDA

4.1.1.3 ปัจจัยพืชเพาะปลูก ข้าวนาสวน

ข้าวนาสวนเป็นพืชที่ใช้ในการศึกษาอเวอรต์พุดพรีนซ์ ปลูกในลักษณะนาดำ มีปัจจัยการปลูกข้าวนาสวนทั้ง 4 ระยะ คือ การเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ การเจริญเติบโตทางด้านการสืบพันธุ์ การพัฒนาการของเมล็ด ระยะสุกแก่หรือเก็บเกี่ยว มีดังต่อไปนี้ คือ ประเภทพืช วันเริ่มปลูก วันเก็บเกี่ยว ค่าสัมประสิทธิ์พืช ระยะการเจริญเติบโต ความลึกของราก วิฤตการขาดน้ำ และค่าปรับเพื่อหาค่าการตอบสนองการผลิต แสดงโดยเริ่มเพาะปลูกใน เดือน กรกฎาคม เก็บเกี่ยวในเดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 (ตารางที่ 4.3)

ตารางที่ 4.3 ปัจจัยปลูกข้าวนาสวนแต่ละระยะการเจริญเติบโต ในฐานข้อมูลของโปรแกรม CROPWAT 8.0 กรกฎาคม – พฤศจิกายน พ.ศ. 2556⁽¹⁹⁾

ปัจจัยปลูกข้าวนาสวน	ระยะการเจริญเติบโต			
	ระยะที่ 1	ระยะที่ 2	ระยะที่ 3	ระยะที่ 4
จำนวนวัน	20	30	40	30
ค่าสัมประสิทธิ์พืช	1.10	-	1.20	1.05
รากลึก	0.10	-	0.60	0.60
วิฤตการขาดน้ำ	0.20	-	0.20	0.20
ค่าปรับเพื่อหาค่าการตอบสนองการผลิต	1.00	1.09	1.32	0.50
ความสูง	-	-	1.00	-

หมายเหตุ. สัญลักษณ์ – ไม่มีข้อมูล

ระยะที่ 1 การเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ (vegetative growth)

ระยะที่ 2 การเจริญเติบโตทางด้านการสืบพันธุ์ (reproductive growth)

ระยะที่ 3 การพัฒนาการของเมล็ด (grain development)

ระยะที่ 4 ระยะสุกแก่หรือเก็บเกี่ยว (harvest maturity)

4.1.1.4 ปัจจัยข้อมูลดิน

ดินส่วนใหญ่ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน เป็นดินตะกอนลำนํ้าที่เกิดจากการทับถมเป็นเวลานาน ลักษณะเป็นดินเหนียว เกิดจากวัตถุดิบกำเนิด ตะกอนลำนํ้า การนำเข้าสู่ข้อมูลดิน CROPWAT 8.0 (19) ต้องการข้อมูลพื้นฐานของดินในพื้นที่ศึกษา ได้แก่ ความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ทั้งหมด อัตราการซึมของน้ำผ่านดินสูงสุด รากพืชลึกสูงสุด และความชื้นดินลดลงเริ่มต้น สำหรับการศึกษานี้ มีการปลูกพืชคือข้าวนาสวน เป็นตัวอย่างในการศึกษา ดังนั้นจำเป็นต้องมีข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับลักษณะการปลูกข้าวนาสวนที่เกี่ยวข้องกับดิน ได้แก่ อัตราการซึมของน้ำของดิน จุดวิกฤตลดลงของน้ำในแหล่งอย่างรวดเร็ว น้ำที่เป็นประโยชน์สำหรับการเจริญเติบโตของ และความลึกของน้ำ โดยมีปัจจัยลักษณะดินทั่วไปพบว่า ลักษณะดินเป็นดินเหนียว มีความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ทั้งหมด 200 มิลลิเมตรต่อเมตรดิน ทำให้มีอัตราการซึมน้ำผ่านดินสูงสุดที่ 30 มิลลิเมตรต่อวัน ความชื้นของดินที่เป็นประโยชน์เริ่มต้น 100 มิลลิเมตรต่อเมตร สำหรับข้อมูลดินที่เกี่ยวข้องกับการปลูกข้าวนาสวน ได้แก่ ความลึกของน้ำสูงสุด 100 มิลลิเมตร อัตราการสูญเสียในแปลงนาจาก การระเหยและการซึม เป็นต้น โดยข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลที่อยู่ในฐานข้อมูลที่ถูกรวบรวมไว้โดยผู้พัฒนาโปรแกรมและฐานข้อมูล (ตารางที่ 4.4)

ตารางที่ 4.4 ปัจจัยข้อมูลดินเหนียว จากฐานข้อมูลโปรแกรม CROPWAT 8.0⁽¹⁹⁾

ปัจจัยข้อมูลดิน	ค่าที่วัดได้	หน่วย
ความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ทั้งหมด	200	มิลลิเมตรต่อเมตร
อัตราการซึมของน้ำผ่านดินสูงสุด	30	มิลลิเมตรต่อวัน
รากพืชลึกสูงสุด	900	เซนติเมตร
ความชื้นดินลดลงเริ่มต้น	50	เปอร์เซ็นต์
ความชื้นของดินที่เป็นประโยชน์เริ่มต้น	100	มิลลิเมตรต่อเมตร
อัตราการซึมของน้ำของดิน	10	เปอร์เซ็นต์
จุดวิกฤตลดลงของน้ำในแหล่งอย่างรวดเร็ว	0.60	สัดส่วน
น้ำที่เป็นประโยชน์สำหรับการเจริญเติบโตของพืช	5	มิลลิเมตร
ความลึกของน้ำสูงสุด	100	มิลลิเมตร

4.1.1.5 ปริมาณการใช้น้ำของพืช⁽¹⁹⁾ (ET_0)

ผลการศึกษาพบว่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0) ตลอดระยะเวลาเจริญเติบโต 13 สัปดาห์ จากโปรแกรม CROPWAT 8.0 เท่ากับ 449.17 มิลลิเมตร โดยในสัปดาห์ที่ 13 มีปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงน้อยที่สุด เท่ากับ 19.60 มิลลิเมตรต่อสัปดาห์ ซึ่งสอดคล้องกับการเจริญเติบโตของข้าวนาสวนที่อยู่ในระยะการเก็บเกี่ยว การเจริญเติบโตลดลง ปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_c) ตลอดระยะเวลาเจริญเติบโตรวมเท่ากับ 491.40 มิลลิเมตร โดยมีปริมาณฝนใช้การ (P_{eff}) ตลอดระยะเวลาเจริญเติบโตรวมเท่ากับ 512.80 มิลลิเมตร ดังนั้นปริมาณน้ำที่พืช (ข้าวนาสวน) ใช้จริง (ET_{green}) รวมตลอดระยะเวลาเจริญเติบโตเท่ากับ 441.10 มิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปริมาณน้ำที่พืชใช้พืชใช้จริง (ET_{green}) ขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_c) และปริมาณฝนใช้การ (P_{eff}) ในสัปดาห์ที่ 1 ถึง สัปดาห์ที่ 9 ของการปลูกข้าวนาสวน ปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_c) ในการปลูกข้าวนาสวนมีอัตราการใช้น้ำน้อยกว่าปริมาณฝนใช้การ (P_{eff}) ดังนั้นในช่วงเวลาดังกล่าวจึงไม่ประสบปัญหาการขาดน้ำ จนกระทั่งเข้าสู่สัปดาห์ที่ 10 ถึงสัปดาห์ที่ 13 ปริมาณฝนใช้การ (P_{eff}) มีปริมาณน้อยกว่าปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_c) ซึ่งเป็นช่วงปลายฤดูฝน แต่ข้าวนาสวนยังสามารถเจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้ เพราะดินเก็บน้ำในลักษณะความชื้นในดิน จากนั้นเริ่มเข้าสู่ปลายระยะการสร้างเมล็ดและเข้าสู่ระยะการเก็บเกี่ยว

ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง (ET_{green}) (ข้าวนาสวน) ต่อการเพาะปลูก ปริมาณฝนใช้การ (P_{eff}) และปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_c) ที่ใช้ในการปลูกข้าวนาสวนสำหรับปีดังกล่าวในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน (ตารางที่ 4.5)

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, ปริมาณ
ฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง ของข้าวนาสวนรายสัปดาห์ จากโปรแกรม CROPWAT 8.0

สัปดาห์	ค่าสัมประสิทธิ์พืช, Kc	ปริมาณการใช้น้ำของ พืชอ้างอิง, ET ₀ (mm)	ปริมาณการ ใช้น้ำของพืช, ET _c (mm)	ปริมาณ ฝนใช้การ, P _{eff} (mm)	ปริมาณน้ำ ที่พืชใช้จริง, ET _{green} (mm)
1	1.07	35.79	38.30	44.10	38.30
2	1.10	34.91	38.40	46.60	38.40
3	1.10	37.91	41.70	47.70	41.70
4	1.10	34.18	37.60	49.30	37.60
5	1.11	33.69	37.40	50.90	37.40
6	1.12	37.50	42.00	49.20	42.00
7	1.12	34.73	38.90	48.60	38.90
8	1.12	35.27	39.50	48.00	39.50
9	1.12	35.63	39.90	41.00	39.90
10	1.12	35.80	40.10	33.30	33.30
11	1.08	36.20	39.10	27.10	27.10
12	1.03	37.96	39.10	20.10	20.10
13	0.99	19.60	19.40	6.90	6.90
รวม		449.17	491.40	512.80	441.10

4.1.2 ผลการศึกษาปัจจัยข้อมูลนำเข้าโปรแกรม WAPF สำหรับข้าวนาสวน

โปรแกรม WAPF เป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยกรมชลประทาน โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา เป็นค่าเฉลี่ยปี พ.ศ. 2546-2550 จากสถานีอุตุนิยมวิทยาน่าน ข้อมูลดินที่ประกอบด้วยชนิดของเนื้อดินที่แบ่งเป็นดินเหนียว ดินร่วนปนดินเหนียว ดินร่วน และดินร่วนปนทราย ในพื้นที่ศึกษามีลักษณะเนื้อดินเป็นดินเหนียว และอัตราการซึมน้ำลงในดินของแปลงนา (มิลลิเมตรต่อวัน) ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์พืชที่ได้จากการทดลองของกรมชลประทานในกลุ่มพืชเศรษฐกิจ ข้อมูลพืชและระยะการเจริญเติบโตที่รวบรวมโดยกรมชลประทานอยู่ในโปรแกรม ในการคำนวณปริมาณน้ำที่ข้าวนาสวนใช้จริง กำหนดวันเพาะปลูกในวันที่ 10 กรกฎาคม 2556 โปรแกรมคำนวณสัปดาห์เริ่มการเพาะปลูกจนถึงระยะเก็บเกี่ยวรวมทั้งสิ้น 14 สัปดาห์ ผลการศึกษาพบว่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0) ตลอดระยะการเจริญเติบโตรวมเท่ากับ 562.66 มิลลิเมตร ปริมาณการใช้น้ำ (ET_c) ตลอดระยะการเจริญเติบโตรวมเท่ากับ 682.22 มิลลิเมตร โดยมีปริมาณฝนใช้การ (P_{eff}) ตลอดระยะการเจริญเติบโตรวมเท่ากับ 632.61 มิลลิเมตร ดังนั้นปริมาณน้ำที่พืช (ข้าวนาสวน) ใช้จริง (ET_{green}) รวมตลอดระยะการเจริญเติบโตที่คำนวณจากโปรแกรม WAPF เท่ากับ 525.67 มิลลิเมตร (ตารางที่ 4.6)

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, ปริมาณ
ฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง ของข้าวนาสวนรายสัปดาห์ จากโปรแกรม WAPF

สัปดาห์	ค่าสัมประสิทธิ์พืช, K_c	ปริมาณการใช้น้ำ ของพืชอ้างอิง, ET_0 (mm)	ปริมาณการ ใช้น้ำของพืช, ET_c (mm)	ปริมาณ ฝนใช้การ, P_{eff} (mm)	ปริมาณน้ำ ที่พืชใช้จริง, ET_{green} (mm)
1	0.72	40.208	28.95	58.23	28.95
2	1.03	40.204	41.41	49.12	41.41
3	1.07	40.206	43.02	63.09	43.02
4	1.12	41.268	46.22	64.64	46.22
5	1.29	42.674	55.05	73.19	55.05
6	1.38	42.674	58.89	69.30	58.89
7	1.45	42.669	61.87	64.78	61.87
8	1.50	42.367	63.55	66.94	66.94
9	1.48	40.547	60.01	29.45	29.45
10	1.42	40.542	57.57	27.66	27.66
11	1.34	40.545	54.33	25.34	25.34
12	1.23	40.545	49.87	20.78	20.78
13	0.94	35.181	33.07	13.28	13.28
14	0.86	33.035	28.41	6.81	6.81
รวม		562.66	682.22	632.61	525.67

4.1.3 ผลการศึกษาปัจจัยข้อมูลน้ำเข้าโปรแกรม CWR-RID สำหรับข้าวนาสวน

การศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวของข้าวนาสวน พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอบางบาล จังหวัดนนทบุรี โดยการศึกษาปริมาณการใช้น้ำของข้าวนาสวนจากโปรแกรม CWR-RID ที่พัฒนาโดยกรมชลประทานนี้ มุ่งเน้นไปที่ปริมาณใช้น้ำของข้าวนาสวน โดยการเปรียบเทียบปริมาณการใช้น้ำของพืชกับปริมาณฝนใช้การ ในส่วนของข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์พืช กรมชลประทานได้ทดลองจากกลุ่มพืชเศรษฐกิจ โปรแกรม CWR-RID ไม่ถูกกำหนดให้คำนวณระยะการเตรียมกล้าและพื้นที่เพาะปลูก ซึ่งโปรแกรม CWR-RID จะเริ่มคำนวณในวันที่เริ่มปักดำกล้าเป็นวันแรกของการเพาะปลูก ในโปรแกรม CWR-RID ไม่มีข้อมูลปริมาณฝนใช้การ ดังนั้น ผู้ศึกษาได้คำนวณปริมาณฝนใช้การโดยใช้ข้อมูลปริมาณฝนเฉลี่ยของกรมอุตุนิยมวิทยาที่อำเภอบางบาล จังหวัดนนทบุรี ระหว่างเดือน กรกฎาคม ถึงเดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 มาคำนวณปริมาณฝนใช้การ โดยวิธีของ USDA ที่คำนวณเป็นระยะ (decade) และปริมาณฝนไม่เกิน 250 มิลลิเมตร (8) ผลการศึกษาพบว่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0) ตลอดระยะการเจริญเติบโตรวมเท่ากับ 337.14 มิลลิเมตร ปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_c) ตลอดระยะการเจริญเติบโตรวมเท่ากับ 417.34 มิลลิเมตร โดยมีปริมาณฝนใช้การ (P_{eff}) ตลอดระยะการเจริญเติบโตรวมเท่ากับ 495.39 มิลลิเมตร ดังนั้น ปริมาณน้ำที่พืช (ข้าวนาสวน) ใช้จริง (ET_{green}) รวมตลอดระยะการเจริญเติบโตที่คำนวณจากโปรแกรม CWR-RID เท่ากับ 625.80 มิลลิเมตร ใช้ระยะเวลาในการปลูกข้าวนาสวนทั้งสิ้น 13 สัปดาห์ ปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_c) และปริมาณฝนใช้การ (P_{eff}) สอดคล้องกับ CROPWAT 8.0 และ WAPF ที่ระยะเวลาในสัปดาห์ที่ 9 ถึงสัปดาห์ที่ 13 ปริมาณฝนใช้การ (P_{eff}) น้อยกว่าปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_c) ยกเว้นสัปดาห์ที่ 12 ในการปลูกข้าวนาสวน (ตารางที่ 4.7)

ตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, ปริมาณฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชใช้ ของข้าวนาสวนรายสัปดาห์ จากโปรแกรม CWR-RID

สัปดาห์	ค่าสัมประสิทธิ์พืช, K_c	ปริมาณการใช้น้ำ ของพืชอ้างอิง, ET_0 (mm)	ปริมาณการ ใช้น้ำของพืช, ET_c (mm)	ปริมาณฝน ใช้การ, P_{eff} (mm)	ปริมาณน้ำ ที่พืชใช้จริง, ET_{green} (mm)
1	1.03	26.30	27.09	58.23	27.09
2	1.07	26.29	28.14	49.12	28.14
3	1.12	26.31	29.47	63.09	29.47
4	1.29	25.29	32.62	64.64	32.62
5	1.38	25.11	34.65	73.19	34.65
6	1.45	25.15	36.47	69.30	36.47
7	1.50	25.11	37.66	64.78	37.66
8	1.48	25.78	38.15	66.94	38.15
9	1.42	26.67	37.87	29.45	29.45
10	1.34	26.69	35.77	27.66	27.66
11	1.23	26.69	32.83	25.34	25.34
12	0.94	26.44	24.85	20.78	20.78
13	0.86	25.31	21.77	13.28	13.28
รวม		337.14	417.34	625.80	380.76

4.1.4 ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวนาสวน พื้นที่ ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน

การศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาของข้าวนาสวน ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน เกี่ยวข้องกับปัจจัยการใช้ปุ๋ยเคมีในการปลูกข้าวนาสวนที่เป็นตัวสร้างมลพิษในแหล่งน้ำของพื้นที่เพาะปลูก ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง ดังนั้นจึงมีการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อนำมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมี และกำหนดเป็นพารามิเตอร์ดังนี้ สัดส่วนของธาตุอาหารจากการชะละลาย (leaching runoff fraction) อัตราการใช้ธาตุอาหารในพื้นที่ต่อไร่ (กิโลกรัมต่อไร่) ความเข้มข้นสูงสุดของธาตุอาหารที่ยอมรับได้ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ความเข้มข้นธาตุอาหารในธรรมชาติที่พิจารณา (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และปริมาณผลผลิตของพืช (ตันต่อไร่) เพื่อกำหนดหาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา ดังสมการที่ 2.11 ดังนี้

(1) คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวนาสวนจากสถานีเก็บตัวอย่างน้ำและสถานีอ้างอิง ครั้งที่ 1 (ระยะการเจริญเติบโตทางต้นและใบ)

ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวนาสวน พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน ครั้งที่ 1 (ระยะการเจริญเติบโตทางต้นและใบ) สถานีอ้างอิง 1 สถานี และจำนวน 4 สถานีเก็บตัวอย่าง ได้แก่ สถานีอ้างอิง RS00 สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ R01 (นา R01) สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ R02 (นา R02) สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ R03 (นา R03) และสถานีเก็บตัวอย่างน้ำ R04 (นา R04) พบว่า อุณหภูมิของน้ำในสถานีอ้างอิงเท่ากับ 26.83 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเท่ากับ 30.30 องศาเซลเซียส อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 25-33 องศาเซลเซียส (80) ความเป็นกรด-เบสในสถานีอ้างอิงเท่ากับ 6.55 และมีค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-เบสในสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 7.11 อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 5.00-9.00 การนำไฟฟ้าในสถานีอ้างอิงเท่ากับ 189.73 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าเฉลี่ยการนำไฟฟ้าในสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 140.90 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 150.00-500.00 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ออกซิเจนละลายน้ำ ในสถานีอ้างอิงเท่ากับ 7.26 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเฉลี่ยออกซิเจนละลายน้ำในสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 8.73 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 6.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าแอมโมเนีย-ไนโตรเจนของสถานีอ้างอิงเท่ากับ 0.37 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยค่าเฉลี่ยแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 10.72 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคือ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเพราะมีการใช้ปุ๋ยตั้งแต่การเตรียมแปลงการเพาะปลูก ค่าไนเตรท-ไนโตรเจนของสถานีอ้างอิงเท่ากับ 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเฉลี่ยไนเตรท-ไนโตรเจนในสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคือ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสของสถานีอ้างอิงเท่ากับ 0.022 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ค่าเฉลี่ยฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสของสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 10.65 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคือ 0.7-1.0

มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากปุ๋ยที่ใช้มีส่วนผสมของฟอสฟอรัส ทำให้ปริมาณฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสที่ทำการตรวจวัดได้มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานและสูงกว่าสถานีอ้างอิง (ตารางที่ 4.8)

ตารางที่ 4.8 คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวนาสวนจากสถานีเก็บตัวอย่างน้ำและสถานีอ้างอิง ครั้งที่ 1 จำนวน 7 พารามิเตอร์ (ระยะการเจริญเติบโตทางต้นและใบ) กลุ่มน้ำย่อย ห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอบางบาล จังหวัดน่าน วันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2556

พารามิเตอร์ ทางกายภาพและเคมี	สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ ข้าวนาสวน				
	RS00 (สถานีอ้างอิง)	R01 (นา R01)	R02 (นา R02)	R03 (นา R03)	R04 (นา R04)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	26.83	27.73	30.90	31.87	30.73
ความเป็นกรด-เบส	6.55	7.18	7.06	6.98	7.22
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	189.73	192.33	120.54	129.99	120.76
ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	7.26	8.36	8.23	8.45	9.88
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.37	16.61	9.98	8.32	8.00
ไนเตรท-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.10	0.29	0.04	0.05	0.05
ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.022	10.89	10.34	10.87	10.50

(2) คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวนาสวนจากสถานีเก็บตัวอย่างน้ำและสถานีอ้างอิง ครั้งที่ 2 (ระยะการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์)

ผลการศึกษาคคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวนาสวน พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน ครั้งที่ 2 (ระยะการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์) สถานีอ้างอิง 1 สถานี และสถานีเก็บตัวอย่างจำนวน จำนวน 4 ได้แก่ สถานีอ้างอิง RS00 สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ R01 (นา R01) สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ R02 (นา R02) สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ R03 (นา R03) และสถานีเก็บตัวอย่างน้ำ R04 (นา R04) พบว่า ค่าอุณหภูมิที่สถานีอ้างอิงเท่ากับ 25.90 องศาเซลเซียส ในขณะที่ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิในสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 32.73 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 25.00-33.00 องศาเซลเซียส (80) ค่าความเป็นกรด-เบสของสถานีอ้างอิงเท่ากับ 7.17 โดยค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-เบสของสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 7.73 อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 5.00-9.00 การนำไฟฟ้าของสถานีอ้างอิงเท่ากับ 151.40 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าเฉลี่ยการนำไฟฟ้าในสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 123.30 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 150-500 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ออกซิเจนละลายน้ำ ในสถานีอ้างอิงเท่ากับ 7.51 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเฉลี่ยออกซิเจนละลายน้ำในสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 8.68 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 6.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าแอมโมเนีย-ไนโตรเจนของสถานีอ้างอิงเท่ากับ 0.48 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเฉลี่ยแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 7.73 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคือ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีสาเหตุมาจากเกษตรกรเริ่มมีการใช้ปุ๋ยในการปลูกข้าวนาสวนเพื่อเร่งการเจริญเติบโตเข้าสู่ระยะเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์ ค่าไนเตรท-ไนโตรเจนของสถานีอ้างอิงเท่ากับ 0.09 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเฉลี่ยไนเตรท-ไนโตรเจนในสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคือ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.019 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ค่าเฉลี่ยฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสของสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 10.90 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคือ 0.7-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากปุ๋ยที่ใช้มีส่วนผสมของฟอสฟอรัส ทำให้ปริมาณฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสที่ตรวจวัดได้มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานและสูงกว่าสถานีอ้างอิง (ตารางที่ 4.9)

ตารางที่ 4.9 คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวนาสวนจากสถานีเก็บตัวอย่างน้ำและสถานีอ้างอิง ครั้งที่ 2 จำนวน 7 พารามิเตอร์ (ระยะการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์) ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน วันที่ 16 กันยายน พ.ศ. 2556

พารามิเตอร์ทางกายภาพและเคมี	สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ ข้าวนาสวน				
	RS00 (สถานีอ้างอิง)	R01 (นา R01)	R02 (นา R02)	R03 (นา R03)	R04 (นา R04)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25.90	32.07	33.60	29.23	36.03
ความเป็นกรด-เบส	7.17	7.76	7.13	7.39	8.64
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	151.40	123.73	126.77	119.57	123.13
ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	7.51	8.94	8.99	6.72	10.07
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.48	6.53	10.92	5.47	8.40
ไนเตรท-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.09	0.06	0.04	0.03	0.04
ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.019	10.92	10.93	10.88	10.88

(3) คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวนาสวนจากสถานีเก็บตัวอย่างน้ำและสถานีอ้างอิง ครั้งที่ 3 (ระยะการเจริญเติบโตด้านเมล็ด)

ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวนาสวน พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน ครั้งที่ 3 (ระยะการเจริญเติบโตด้านเมล็ด) สถานีอ้างอิง 1 สถานี และสถานีเก็บตัวอย่างน้ำจำนวน จำนวน 4 สถานีอ้างอิง RS00 สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ R01 (นา R01) สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ R02 (นา R02) สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ R03 (นา R03) และสถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ R04 (นา R04) พบว่า ที่สถานีอ้างอิงค่าอุณหภูมิเท่ากับ 26.17 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิในสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 28.08 องศาเซลเซียส อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 25-33 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-เบสของสถานีอ้างอิงเท่ากับ 8.35 ค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-เบสของสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 8.80 อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 5.0-9.0 การนำไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ในสถานีอ้างอิงเท่ากับ 188.47 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าเฉลี่ยการนำไฟฟ้าของสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 172.36 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 150.00-500.00 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ออกซิเจนละลายน้ำ สถานีอ้างอิงเท่ากับ 7.55 มิลลิกรัม

ต่อลิตร ค่าเฉลี่ยออกซิเจนละลายน้ำของสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 8.28 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 6.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในสถานีอ้างอิงเท่ากับ 0.36 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเฉลี่ยแอมโมเนีย-ไนโตรเจนของสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 5.93 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคือ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีสาเหตุมาจากเริ่มมีการใช้ปุ๋ยในการปลูกข้าวนาสวน เพื่อเร่งการเจริญเติบโตด้านเมล็ด ค่าไนเตรท-ไนโตรเจนของสถานีอ้างอิงเท่ากับ 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเฉลี่ยไนเตรท-ไนโตรเจนของสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคือ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสของสถานีอ้างอิงเท่ากับ 0.021 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ค่าเฉลี่ยฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสของสถานีเก็บตัวอย่างเท่ากับ 10.39 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคือ 0.7-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากปุ๋ยที่ใช้มีส่วนผสมของฟอสฟอรัสที่จำเป็นต่อการเร่งดอก ทำให้ปริมาณฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสที่ตรวจวัดได้มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานและสูงกว่าสถานีอ้างอิงในการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งนี้ในสถานีเก็บตัวอย่าง R01 และ R02 มีน้ำน้อยมากไม่สามารถเก็บตัวอย่างได้อาจเนื่องจากฝนทิ้งช่วง (ตารางที่ 4.10)

ตารางที่ 4.10 คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวนาสวนจากสถานีเก็บตัวอย่างน้ำและสถานีอ้างอิง ครั้งที่ 3 จำนวน 7 พารามิเตอร์ (ระยะการเจริญเติบโตด้านเมล็ด) ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอบางบาล จังหวัดนนทบุรี วันที่ 22 ตุลาคม พ.ศ. 2556

พารามิเตอร์ ทางกายภาพและเคมี	สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ ข้าวนาสวน				
	RS00 (สถานี อ้างอิง)	R01 (นา R01)	R02 (นา R02)	R03 (นา R03)	R04 (นา R04)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	26.17	NA	NA	27.87	28.30
ความเป็นกรด-เบส	8.35	NA	NA	8.06	9.54
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	188.47	NA	NA	160.73	184.00
ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	7.55	NA	NA	7.09	9.47
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.36	NA	NA	4.57	7.30
ไนเตรท-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.07	NA	NA	0.04	0.06
ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.021	NA	NA	10.33	10.45

หมายเหตุ NA คือ ไม่มีน้ำในพื้นที่ศึกษาสำหรับเก็บมาวิเคราะห์

(4) คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวนาสวนจากสถานีเก็บตัวอย่างน้ำและสถานีอ้างอิง ครั้งที่ 4 (ระยะการเก็บเกี่ยว)

ผลการศึกษาคคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวนาสวน พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดนครราชสีมา ครั้งที่ 4 (ระยะการเก็บเกี่ยว) จำนวน 4 สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ และสถานีอ้างอิง 1 สถานี ได้แก่ สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ R01 (นา 1148-R01) สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ R02 (นา 1148-R02) สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ R03 (นา 1148-R03) สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ R04 (นา 1148-R04) และสถานีอ้างอิง (RS00) พบว่า ในช่วงเวลาดังกล่าวไม่มีปริมาณน้ำสำหรับการเก็บเพื่อนำมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมี ในขณะที่ที่สถานีอ้างอิงค่าอุณหภูมิเท่ากับ 29.37 องศาเซลเซียส อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 25.00-33.00 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-เบสของสถานีอ้างอิงเท่ากับ 8.09 อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 5.0-9.0 การนำไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ในสถานีอ้างอิงเท่ากับ 176.38 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 150-500 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ออกซิเจนละลายน้ำ สถานีอ้างอิงเท่ากับ 7.19 มิลลิกรัมต่อลิตร มากกว่าเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 6.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในสถานีอ้างอิงเท่ากับ 0.38 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ในค่ามาตรฐานคือ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าไนเตรท-ไนโตรเจนของสถานีอ้างอิงเท่ากับ 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคือ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสของสถานีอ้างอิงเท่ากับ 0.024 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าอยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 0.7-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร การเก็บตัวอย่างน้ำในระยะที่ 4 ในสถานีเก็บตัวอย่างน้ำไม่มีปริมาณน้ำเพราะมีการปล่อยน้ำเพื่อเตรียมเข้าสู่ระยะการเก็บเกี่ยวผลผลิต (ตารางที่ 4.11)

ตารางที่ 4.11 คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวนาสวนจากสถานีเก็บตัวอย่างน้ำและสถานีอ้างอิง ครั้งที่ 4 จำนวน 7 พารามิเตอร์ (ระยะเก็บเกี่ยว) กลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดน่าน วันที่ 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2556

พารามิเตอร์ ทางกายภาพและเคมี	สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ ข้าวนาสวน				
	RS00 (สถานีอ้างอิง)	R01 (นา R01)	R02 (นา R02)	R03 (นา R03)	R04 (นา R04)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	29.37	NA	NA	NA	NA
ความเป็นกรด-เบส	8.09	NA	NA	NA	NA
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	176.38	NA	NA	NA	NA
ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	7.19	NA	NA	NA	NA
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.38	NA	NA	NA	NA
ไนเตรท-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.06	NA	NA	NA	NA
ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.024	NA	NA	NA	NA

หมายเหตุ NA คือ ไม่มีน้ำในพื้นที่ศึกษาสำหรับเก็บมาวิเคราะห์

4.2 ผลการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวน

4.2.1 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว (WF_{green})

การคำนวณหาปริมาณน้ำที่ข้าวนาสวนใช้จริง โดยอาศัยค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0) และค่าสัมประสิทธิ์พืช (K_c) ในการคำนวณปริมาณการใช้น้ำพืช (ET_c) ในแต่ละสัปดาห์ ซึ่งจะนำมาเป็นผลรวมแล้วนำมาเปรียบเทียบกับหน่วยผลผลิตของข้าวนาสวนในพื้นที่ ซึ่งผลผลิตข้าวนาสวนในพื้นที่กลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดน่าน พ.ศ. 2556 มีผลผลิตเฉลี่ยเท่ากับ 0.48 ตันต่อไร่ (4) ผลการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวและวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน โปรแกรม CROPWAT 8.0 คำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว มีค่าเท่ากับ 1,470.33 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โปรแกรม WAPF คำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว โดยผลการคำนวณค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว มีค่าเท่ากับ 1,752.23 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และโปรแกรม CWR-RID คำนวณ

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว โดยผลการคำนวณค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว มีค่าเท่ากับ 1,269.20 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน (ตารางที่ 4.8)

ผลการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวที่คำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชจริงจาก โปรแกรม WAPF ที่พัฒนาโดยกรมชลประทาน โปรแกรม CROPWAT 8.0 ที่พัฒนาโดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ ข้อมูลนำเข้าสำหรับประมวลผลรวบรวมโดยหน่วยงานผู้พัฒนาโปรแกรมและโปรแกรม CWR-RID โดยข้อมูลฝนที่นำเข้าโปรแกรม CROPWAT 8.0 จะเป็นข้อมูลเฉลี่ยของสถานีตรวจวัดที่ถูกกำหนดโดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ คือ สถานีอุตุนิคมวิทยานวนในจังหวัดน่านที่ได้จากการรวบรวมและคำนวณโดยโปรแกรม CLIMWAT ในรอบ 30 ปี คือตั้งแต่ปี พ.ศ. 2513–2543 รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์พืชของข้าวนาสวนที่ไม่ได้ระบุถึงพันธุ์ข้าว (ตารางที่ 4.12 ถึง ตาราง 4.14)

ตารางที่ 4.12 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง, ปริมาณน้ำที่พืชใช้ และผลผลิตพืช จากโปรแกรม CROPWAT 8.0 ของข้าวนาสวน

โปรแกรม	ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง (ET_{green}) (มิลลิเมตรต่อฤดูการเพาะปลูก)	ปริมาณน้ำที่พืชใช้ (CWU_{green}) (ลูกบาศก์เมตรต่อไร่)	ผลผลิตพืช (Y) (ตันต่อไร่)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ สีเขียว (WF_{green}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)
CROPWAT 8.0	441.10	705.76	0.48	1,470.33

ตารางที่ 4.13 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง, ปริมาณน้ำที่พืชใช้ และผลผลิตพืช จากโปรแกรม WAPF ของข้าวนาสวน

โปรแกรม	ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง (ET_{green}) (มิลลิเมตรต่อฤดูการเพาะปลูก)	ปริมาณน้ำที่พืชใช้ (CWU_{green}) (ลูกบาศก์เมตรต่อไร่)	ผลผลิตพืช (Y) (ตันต่อไร่)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ สีเขียว (WF_{green}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)
WAPF	525.67	841.07	0.48	1,752.23

ตารางที่ 4.14 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง, ปริมาณน้ำที่พืชใช้ และผลผลิตพืช จากโปรแกรม CWR-RID ของข้าวนาสวน

โปรแกรม	ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง (ET_{green}) (มิลลิเมตรต่อฤดูการเพาะปลูก)	ปริมาณน้ำที่พืชใช้ (CWU_{green}) (ลูกบาศก์เมตรต่อไร่)	ผลผลิตพืช (Y) (ตันต่อไร่)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ สีเขียว (WF_{green}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)
CWR-RID	400.23	640.36	0.48	1,269.20

4.2.2 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน (WF_{blue})

การศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินของข้าวนาสวน พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอนาทม จังหวัดน่าน จะใช้ข้อมูลปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม โดยเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่พืชต้องการกับปริมาณฝนใช้การ โดยหาจากผลต่างระหว่างปริมาณการใช้น้ำของพืชกับปริมาณฝนใช้การในสัปดาห์ที่ 10 ถึงสัปดาห์ที่ 13 สำหรับโปรแกรม CROPWAT 8.0 สัปดาห์ที่ 9 ถึงสัปดาห์ที่ 14 สำหรับโปรแกรม WAPF และ สัปดาห์ที่ 9 ถึงสัปดาห์ที่ 13 สำหรับโปรแกรม CWR-RID เพราะในช่วงระยะเวลาดังกล่าวปริมาณฝนใช้การน้อยกว่าปริมาณการใช้น้ำของพืช ดังนั้นปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม (วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน) จากผลการศึกษาโดยโปรแกรม CROPWAT 8.0 พบว่าปริมาณการน้ำที่พืชต้องการเพิ่มในระยะเวลา 4 สัปดาห์เท่ากับ 50.30 มิลลิเมตร (ตารางที่ 4.15) สำหรับโปรแกรม WAPF ปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่มในระยะเวลา 6 สัปดาห์ เท่ากับ 159.94 มิลลิเมตร (ตารางที่ 4.16) และโปรแกรม CWR-RID คำนวณปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่มระยะเวลา 5 สัปดาห์ เท่ากับ 36.58 มิลลิเมตร (ตารางที่ 4.17) การศึกษาปริมาณน้ำที่พืชต้องการมีความแตกต่างกันในแต่ละโปรแกรมอันเนื่องมาจากความแตกต่างของปริมาณน้ำอ้างอิงของพืช ปริมาณน้ำที่พืชต้องการ ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริงและปริมาณฝนใช้การ

ผลการศึกษาด้วยโปรแกรม CROPWAT 8.0 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน มีค่าเท่ากับ 167.67 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โปรแกรม WAPF วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน มีค่าเท่ากับ 418.60 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และโปรแกรม CWR-RID วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินมีค่าเท่ากับ 71.43 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน จากผลการศึกษาพบว่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินที่คำนวณจากโปรแกรม CWR-RID มีค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม WAPF และ CROPWAT 8.0 เนื่องมาจากข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาความแตกต่างกันในระยะเวลาในการเพาะปลูกที่ต่างกัน (ตารางที่ 4.15 ถึงตารางที่ 4.16)

ตารางที่ 4.15 ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, ปริมาณฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม ของข้าวนาสวนรายสัปดาห์ จากโปรแกรม CROPWAT 8.0

สัปดาห์	ค่าสัมประสิทธิ์พืช, K_c	ปริมาณการใช้น้ำ ของพืชอ้างอิง, ET_0 (mm)	ปริมาณการใช้น้ำของพืช, ET_c (mm)	ปริมาณฝน ใช้การ, P_{eff} (mm)	ปริมาณน้ำที่พืช ต้องการเพิ่ม, ET_{blue} (mm)
10	1.12	35.80	40.10	33.30	6.80
11	1.08	36.20	39.10	27.10	12.00
12	1.03	37.96	39.10	20.10	19.00
13	0.99	19.60	19.40	6.90	12.50
รวม		44.12	47.70	82.00	50.30

หมายเหตุ คำนวณเฉพาะสัปดาห์ที่ 10 ถึงสัปดาห์ที่ 13 เนื่องจากปริมาณฝนใช้การในช่วงดังกล่าว น้อยกว่าปริมาณการใช้น้ำของพืช

ตารางที่ 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, ปริมาณฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม ของข้าวนาสวนรายสัปดาห์ จากโปรแกรม WAPF

สัปดาห์	ค่าสัมประสิทธิ์พืช, K_c	ปริมาณการใช้น้ำ ของพืชอ้างอิง, ET_0 (mm)	ปริมาณการใช้น้ำ ของพืช, ET_c (mm)	ปริมาณฝน ใช้การ, P_{eff} (mm)	ปริมาณน้ำที่พืช ต้องการเพิ่ม, ET_{blue} (mm)
9	1.48	40.547	60.01	29.45	30.56
10	1.42	40.542	57.57	27.66	29.91
11	1.34	40.545	54.33	25.34	28.99
12	1.23	40.545	49.87	20.78	29.09
13	0.94	35.181	33.07	13.28	19.79
14	0.86	33.035	28.41	6.81	21.60
รวม		189.84	283.26	123.32	159.94

หมายเหตุ คำนวณเฉพาะสัปดาห์ที่ 9 ถึงสัปดาห์ที่ 14 เนื่องจากปริมาณฝนใช้การในช่วงดังกล่าวน้อยกว่าปริมาณการใช้น้ำของพืช

ตารางที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, ปริมาณฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม ของข้าวนาสวนรายสัปดาห์ จากโปรแกรม CWR-RID

สัปดาห์	ค่าสัมประสิทธิ์พืช, K_c	ปริมาณการใช้น้ำ ของพืชอ้างอิง, ET_0 (mm)	ปริมาณการใช้ น้ำของพืช, ET_c (mm)	ปริมาณฝน ใช้การ, P_{eff} (mm)	ปริมาณน้ำที่พืช ต้องการเพิ่ม, ET_{blue} (mm)
9	1.42	26.67	37.87	29.45	8.42
10	1.34	26.69	35.77	27.66	8.11
11	1.23	26.69	32.83	25.34	7.49
12	0.94	26.44	24.85	20.78	4.07
13	0.86	25.31	21.77	13.28	8.49
รวม		131.81	153.09	116.51	36.58

หมายเหตุ คำนวณเฉพาะสัปดาห์ที่ 9 ถึงสัปดาห์ที่ 13 เนื่องจากปริมาณฝนใช้การในช่วงดังกล่าวน้อยกว่าปริมาณการใช้น้ำของพืช

ตารางที่ 4.18 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง, ปริมาณน้ำที่พืชใช้, ผลผลิตพืช ของข้าวนาสวน จากโปรแกรม CROPWAT 8.0

โปรแกรม	ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง (ET_{blue}) (มิลลิเมตรต่อการเพาะปลูก)	ปริมาณน้ำที่พืชใช้ (CWU_{blue}) (ลูกบาศก์เมตรต่อไร่)	ผลผลิตพืช (Y) (ตันต่อไร่)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ สีน้ำเงิน (WF_{blue}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)
CROPWAT 8.0	50.30	80.48	0.48	167.67

ตารางที่ 4.19 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง, ปริมาณน้ำที่พืชใช้, ผลผลิตพืช ของ ข้าวนาสวน จากโปรแกรม WAPF

โปรแกรม	ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง (ET_{blue}) (มิลลิเมตรต่อการเพาะปลูก)	ปริมาณน้ำที่พืชใช้ (CWU_{blue}) (ลูกบาศก์เมตรต่อไร่)	ผลผลิตพืช (Y) (ตันต่อไร่)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ สีน้ำเงิน (WF_{blue}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)
WAPF	159.94	255.90	0.48	533.13

ตารางที่ 4.20 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง, ปริมาณน้ำที่พืชใช้, ผลผลิตพืช ของ ข้าวนาสวน จากโปรแกรม CWR-RID

โปรแกรม	ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง (ET_{blue}) (มิลลิเมตรต่อการเพาะปลูก)	ปริมาณน้ำที่พืชใช้ (CWU_{blue}) (ลูกบาศก์เมตรต่อไร่)	ผลผลิตพืช (Y) (ตันต่อไร่)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ สีน้ำเงิน (WF_{blue}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)
CWR-RID	36.58	58.53	0.48	121.93

ผลการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการปลูกข้าวนาสวน ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดน่าน แบ่งผลการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางด้านกายภาพและเคมี จากตัวอย่างน้ำที่เก็บจากแหล่งน้ำตัวอย่างในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดน่าน เพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา ได้แก่ ปริมาณฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส, ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจน, ปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจน, อุณหภูมิ, ความเป็นกรด-เบส, ออกซิเจนละลายน้ำ, การนำไฟฟ้า เป็นต้น และผลการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการปลูกข้าวนาสวน ในลักษณะความต้องการใช้น้ำโดยจะศึกษา วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน ส่วนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา เกี่ยวข้องกับผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีที่ได้รับจากการใช้ปุ๋ยในพื้นที่ปลูกข้าวนาสวนที่อยู่ในรูปของปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจน และปริมาณฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ โดยพิจารณาปริมาณน้ำที่ใช้ในการเจือจาง ปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจน และปริมาณฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำให้ได้ตามค่ามาตรฐานน้ำผิวดิน (73)

4.2.5 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา (WF_{gray})

การศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา เป็นการหาปริมาณการใช้น้ำของที่จะใช้ในการเจือจางสารที่เกิดขึ้นธาตุอาหารจากการใช้ปุ๋ยปลูกข้าวนาสวน โดยในการศึกษาครั้งนี้จะศึกษามลพิษที่เกิดจากการใช้ปุ๋ยในการเพิ่มผลผลิต ซึ่งปริมาณปุ๋ยตกค้างที่ใช้ในการปลูกข้าวนาสวนจะตรวจวัดจากแหล่งน้ำตัวอย่าง ที่เป็นตัวแทนแหล่งน้ำในพื้นที่การปลูกข้าวนาสวน ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน จำนวน 4 สถานีตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมี คือ แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนเตรท-ไนโตรเจน และฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส จากการเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำที่เป็นตัวแทนของพื้นที่ปลูกข้าวนาสวน ประกอบด้วยแหล่งน้ำที่เป็นสถานีอ้างอิง จำนวน 1 สถานี เป็นเวลา 4 ครั้ง และแหล่งน้ำที่เป็นตัวแทนของพื้นที่ปลูกข้าวนาสวน จำนวน 4 สถานี เป็นเวลา 4 ครั้ง เพื่อเป็นตัวแทนระยะการเจริญเติบโต พบว่าในสถานีอ้างอิง แอมโมเนีย-ไนโตรเจนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.39 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนเตรท-ไนโตรเจน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.021 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการเก็บตัวอย่างน้ำจะทำการเก็บ ตั้งแต่เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2556 ถึง เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 เพื่อนำมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมี (ตารางที่ 4.21)

ตารางที่ 4.21 แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนเตรท-ไนโตรเจน และฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ที่พบในแหล่งน้ำตัวอย่าง สถานีอ้างอิง (RS00) ณ สถานีบ้านแหวน 1 จำนวน 3 พารามิเตอร์ จากระยะเวลาการเก็บข้อมูล 4 ครั้ง เดือน กรกฎาคม – พฤศจิกายน พ.ศ. 2556

พารามิเตอร์ทางกายภาพและเคมี	ระยะเวลาการเก็บข้อมูล				เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.37	0.48	0.36	0.38	0.39
ไนเตรท-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.10	0.09	0.07	0.06	0.08
ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.022	0.019	0.021	0.024	0.021

หมายเหตุ ครั้งที่ 1 (ระยะการเจริญเติบโตทางต้นและใบ) วันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2556

ครั้งที่ 2 (ระยะการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์) วันที่ 16 กันยายน พ.ศ. 2556

ครั้งที่ 3 (ระยะการเจริญเติบโตด้านเมล็ด) วันที่ 22 ตุลาคม พ.ศ. 2556

ครั้งที่ 4 (ระยะการเก็บเกี่ยว) วันที่ 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2556

จากผลการศึกษาปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนเตรท-ไนโตรเจน และ ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานของปริมาณปุ๋ยที่ลงสู่แหล่งน้ำไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณการใช้ปุ๋ยทั้งหมดต่อพื้นที่ โดยปุ๋ยที่ใช้สูตร 16-20-0 พบว่าปริมาณการใช้ปุ๋ยที่มีใน อัตราส่วน 35 กิโลกรัมต่อไร่ จากผลการคำนวณสัดส่วนการใช้ปุ๋ยพบว่า ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจน เท่ากับ 0.00018 ตันต่อไร่ ปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจน 0.0049 ตันต่อไร่ และฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส เท่ากับ 0.00749 ตันต่อไร่ การศึกษาครั้งนี้ใช้ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำขององค์การอาหารและ การเกษตรแห่งสหประชาชาติเป็นค่าอ้างอิง (73) ของความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ยอมรับได้ โดย แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไม่เกิน 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนเตรท-ไนโตรเจน ไม่เกิน 10.00 มิลลิกรัมต่อ ลิตร และฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ไม่เกิน 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ตรวจวัดได้ จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่างที่เก็บในพื้นที่เพาะปลูกโดยทำการวิเคราะห์ทางกายภาพและเคมี เพื่อหาแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนเตรท-ไนโตรเจน และฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส โดยปริมาณออกซิเจน ฟุตพริ้นท์สีเทาของข้าวนาสวนเมื่อเทียบกับผลผลิตข้าวนาสวนต่อไร่ เท่ากับ 0.48 ตันต่อไร่ พ.ศ. 2556 ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอน้ำขุ่น จังหวัดน่าน พบว่าฟอสเฟต- ฟอสฟอรัส มีค่าออกซิเจนฟุตพริ้นท์สีเทาส่งสุดเท่ากับ 0.79 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ซึ่งสูงกว่า แอมโมเนีย- ไนโตรเจน และ ไนเตรท-ไนโตรเจน ดังนั้นการศึกษานี้ได้ทำการเลือกที่จะลดมลพิษที่เกิดจาก ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสเป็นหลักเพราะเมื่อปริมาณฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำลด แอมโมเนีย- ไนโตรเจน และไนเตรท-ไนโตรเจน ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำจะลดลงด้วยตามปริมาณน้ำที่ใช้ในการเจือจาง ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำให้เข้าสู่ค่ามาตรฐาน (ตารางที่ 4.22) ปัจจัยดังกล่าวจะเป็นข้อมูลน้ำ เข้าสำหรับคำนวณออกซิเจนฟุตพริ้นท์สีเทา

ตารางที่ 4.22 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา, ธาตุอาหารที่ก่อกมลพิษ, อัตราการใช้ธาตุอาหาร, สัดส่วนของธาตุอาหารจากการชะละลาย, ความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ยอมรับได้, ความเข้มข้นธาตุอาหารที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ในการปลูกข้าวนาสวน พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอบางบาล จังหวัดน่าน

ธาตุอาหารที่ก่อกมลพิษ (ปุ๋ย 16-20-0)	อัตราการใช้ธาตุอาหาร (ตันต่อไร่)	สัดส่วนของธาตุอาหารจากการชะละลาย (10%)	ความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ยอมรับได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นธาตุอาหารที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา (WF _{gray}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)
แอมโมเนีย - ไนโตรเจน	0.00499	0.1	5.00	0.39	0.23
ไนเตรท - ไนโตรเจน	0.00018	0.1	10.00	0.08	0.0037
ฟอสเฟต - ฟอสฟอรัส	0.00749	0.1	2.00	0.021	0.79

หมายเหตุ ผลผลิตของข้าวนาสวน 0.48 ตันต่อไร่

4.3 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวน

จากการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวน โดยใช้วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวร่วมกับวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา ทำให้ทราบปริมาณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวน ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอบางบาล จังหวัดน่าน โดยวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่คำนวณด้วยโปรแกรม CROPWAT 8.0 มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวของข้าวนาสวน เท่ากับ 1,470.33 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินของข้าวนาสวน เท่ากับ 167.67 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และมีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาของข้าวนาสวน เท่ากับ 0.79 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ดังนั้น ปริมาณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวน มีค่าเท่ากับ 1,638.79 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่คำนวณด้วยโปรแกรม WAPF มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวของข้าวนาสวน เท่ากับ 1,752.23 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินของข้าวนาสวน เท่ากับ 533.13 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และมีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาของข้าวนาสวน เท่ากับ 0.79 ลูกบาศก์

เมตรต่อตัน ดังนั้น ปริมาณวอเตอร์ฟุตพรีนธ์ของข้าวนาสวน มีค่าเท่ากับ 2,286.16 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน

วอเตอร์ฟุตพรีนธ์ที่คำนวณด้วยโปรแกรม CWR-RID มีค่าวอเตอร์ฟุตพรีนธ์สีเขียวของข้าวนาสวน เท่ากับ 1,269.20 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ ฟุตพรีนธ์สีน้ำเงินของข้าวนาสวน เท่ากับ 121.93 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และมีค่าวอเตอร์ฟุตพรีนธ์สีเทาของข้าวนาสวน เท่ากับ 0.79 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ดังนั้น ปริมาณวอเตอร์ฟุตพรีนธ์ของข้าวนาสวน มีค่าเท่ากับ 1,391.92 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน (ตารางที่ 4.23 ถึงตารางที่ 4.25)

ตารางที่ 4.23 วอเตอร์ฟุตพรีนธ์, วอเตอร์ฟุตพรีนธ์สีเขียว, วอเตอร์ฟุตพรีนธ์สีน้ำเงิน, วอเตอร์ฟุตพรีนธ์สีเทา ของข้าวนาสวน จากโปรแกรม CROPWAT 8.0

โปรแกรม	วอเตอร์ฟุตพรีนธ์ สีเขียว (WF _{green}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)	วอเตอร์ฟุตพรีนธ์ สีน้ำเงิน(WF _{blue}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)	วอเตอร์ฟุตพรีนธ์ สีเทา (WF _{gray}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)	วอเตอร์ฟุตพรีนธ์ (WF) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)
CROPWAT 8.0	1,470.33	167.67	0.79	1,638.79

ตารางที่ 4.24 วอเตอร์ฟุตพรีนธ์, วอเตอร์ฟุตพรีนธ์สีเขียว, วอเตอร์ฟุตพรีนธ์สีน้ำเงิน, วอเตอร์ฟุตพรีนธ์สีเทา ของข้าวนาสวน จากโปรแกรม WAPF

โปรแกรม	วอเตอร์ฟุตพรีนธ์ สีเขียว (WF _{green}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)	วอเตอร์ฟุตพรีนธ์ สีน้ำเงิน(WF _{blue}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)	วอเตอร์ฟุตพรีนธ์ สีเทา (WF _{gray}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)	วอเตอร์ฟุตพรีนธ์ (WF) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)
WAPF	1,752.23	533.13	0.79	2,286.16

ตารางที่ 4.25 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา ของข้าวนาสวัน จากโปรแกรม CWR-RID

โปรแกรม	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ สีเขียว (WF _{green}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ สีน้ำเงิน(WF _{blue}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ สีเทา (WF _{gray}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (WF) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)
CWR-RID	1,269.20	121.93	0.79	1,391.92

จากผลการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่ของข้าวนาสวันที่คำนวณได้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษา (64) ซึ่งเป็นการปลูกข้าวในประเทศไทยเหมือนกัน พบว่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวันจากการศึกษามีค่าน้อยกว่า อาจสืบเนื่องมาจากพันธุ์ข้าวที่ใช้มีความแตกต่างกัน และวิธีการปลูกที่ต่างกันคือระหว่างนาดำกับนาหว่านรวมถึงการใช้ปุ๋ยในปริมาณและจำนวนครั้งหรือสูตรปุ๋ยที่แตกต่างกัน ถ้าเปรียบเทียบกับวิธีการปลูกแบบนาเปียกสลับแห้ง (65) พบว่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่มีค่าใกล้เคียงกัน และถ้าทำการเปรียบเทียบกับผลการปลูกข้าวในประเทศอื่นๆ พบว่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวันที่ศึกษาได้มีค่ามากกว่าการศึกษาของ Marano (67) ที่ศึกษาในประเทศอาเจนตินา ที่ควบคุมการใช้น้ำในการปลูกข้าว แต่มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวันใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Gheewala (66) ที่ทำการศึกษาพืชที่ใช้เป็นพลังงานและอาหารในประเทศไทยและจากผลการศึกษาพบว่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา มีผลเท่ากันทั้ง 3 วิธี สืบเนื่องจากใช้ข้อมูลจริงที่เกี่ยวกับการใช้ปุ๋ยในการปลูกข้าวนาสวัน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการตกค้างของธาตุอาหารในแหล่งน้ำซึ่งจะก่อให้เกิดมลพิษต่อไปในอนาคตถ้ามีในปริมาณที่มากโดยเก็บรวบรวมในพื้นที่ศึกษา ณ เวลาจริง และทำการวิเคราะห์ตามวิธีการในตารางที่ 3.2 สำหรับวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน โปรแกรม CROPWAT 8.0 มีค่าแตกต่างจาก WAPF และ CWR-RID เพราะคำนวณระยะเวลาในการเตรียมแปลงแตกต่างกันและจำนวนสัปดาห์ในการเพาะปลูกต่างกัน และจากวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่ศึกษาได้และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาทั้งในและต่างประเทศพบว่าเกษตรกรมีการใช้น้ำในการเพาะปลูกข้าวนาสวันอยู่ในระดับที่ปกติเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาอื่นๆ แต่ความแตกต่างที่พบ อาจมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น พันธุ์ข้าว วิธีการเพาะปลูก รูปแบบการใช้น้ำ และการใช้ปุ๋ย

4.4 ผลการศึกษาปัจจัยข้อมูลนำเข้าคอมพิวเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวโพด

4.4.1 ผลการศึกษาปัจจัยข้อมูลนำเข้าโปรแกรม CROPWAT 8.0 สำหรับข้าวโพด

ผลการศึกษาคอมพิวเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด จะศึกษาจากปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0) หรือของข้าวโพด โดย CROPWAT 8.0 ใช้สมการ Penman-Monteith ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง คือเดือนเมษายน 4.86 มิลลิเมตรต่อวัน ซึ่งมีค่าสูงสุด และต่ำสุดในเดือนธันวาคม 2.59 มิลลิเมตรต่อวัน (ตารางที่ 4.26) ปัจจัยที่ทำให้ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงในเดือน เมษายนมีค่าสูงสุด เนื่องจากอิทธิพลของลม ความชื้น และอุณหภูมิ ที่สูงในช่วงเดือนดังกล่าว ซึ่งต่างจากในช่วงเดือน ธันวาคม ที่ปัจจัยดังกล่าว มีค่าต่ำ ซึ่งทำให้ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงมีค่าน้อย ข้อมูลสภาพภูมิอากาศและการใช้น้ำของพืชอ้างอิงของข้าวโพดมีความเหมือนกับข้อมูลสภาพภูมิอากาศ และการใช้น้ำของพืชอ้างอิงของข้าวนาสวนเพราะเป็นพื้นที่เดียวกัน และเป็นข้อมูลพื้นที่สถานีตรวจวัดตำแหน่งเดียวกัน

4.4.1.1 สภาพภูมิอากาศและการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (climate/ ET_0) ของข้าวโพด

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการศึกษาสภาพภูมิอากาศ และการใช้น้ำของพืชอ้างอิง รวบรวมโดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งประชาชาติ จากโปรแกรม CLIMWAT โดยทำการเลือกสถานอุตุนิยมวิทยาน่าน ซึ่งในฐานะข้อมูลระบบเป็น location 92 ที่ความสูง 201 เมตร ละติจูด 18.76 องศาเหนือ ลองจิจูด 100.76 องศาตะวันออก เป็นข้อมูลเฉลี่ย 30 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2514-2543 จากสถานีอุตุนิยมวิทยาน่าน ข้อมูลประกอบด้วย อุณหภูมิต่ำสุด อุณหภูมิสูงสุด ความชื้น ความเร็วลม จำนวนชั่วโมงรับแสงแดด ปริมาณแสงแดด และการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0) เป็นระยะเวลา 12 เดือน ตั้งแต่ เดือน มกราคม ถึง เดือน ธันวาคม ประมวลผลในปี พ.ศ. 2556 (ตารางที่ 4.26)

ตารางที่ 4.26 สภาพภูมิอากาศและการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0) รายเดือนสถานีอุตุนิยมวิทยานาน⁽²⁰⁾

เดือน	อุณหภูมิ ต่ำ (องศา เซลเซียส)	อุณหภูมิ สูง (องศา เซลเซียส)	ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	ความเร็ว ลม (เมตรต่อ วินาที)	ระยะเวลา รับแสง (ชั่วโมง)	ความเข้ม รังสี (เมกะจูลต่อ ลูกบาศก์ เมตรต่อวัน)	การใช้น้ำ ของพืช อ้างอิง ET_0 (มิลลิเมตร ต่อวัน)
มกราคม	13.4	29.8	76	43	8.1	17.1	2.88
กุมภาพันธ์	15.1	32.7	70	52	8.5	19.4	3.59
มีนาคม	18.3	35.3	65	61	8.7	21.5	4.43
เมษายน	22.0	36.5	66	69	7.8	21.4	4.86
พฤษภาคม	23.6	34.6	76	69	5.9	18.7	4.33
มิถุนายน	24.1	32.9	80	69	4.2	16.1	3.75
กรกฎาคม	23.8	31.9	82	69	3.7	15.3	3.49
สิงหาคม	23.7	31.7	85	69	3.6	15.0	3.36
กันยายน	23.3	32.2	84	52	4.9	16.2	3.53
ตุลาคม	21.8	32.0	83	43	6.9	17.6	3.62
พฤศจิกายน	18.6	30.6	81	43	6.9	15.9	3.08
ธันวาคม	14.3	29.0	79	35	6.8	14.9	2.59
เฉลี่ย	20.2	32.4	77	56	6.3	17.4	3.63

4.4.1.2 ปริมาณฝนใช้การ (P_{eff}) และปริมาณฝน

ข้อมูลปริมาณฝนนั้น นำมาจากการเก็บรวบรวมขององค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ ประมวลผลโดยโปรแกรม CLIMWAT ที่มีสถานีเก็บรวบรวม 5,000 สถานีทั่วโลก รวมถึงประเทศไทย เป็นข้อมูลเฉลี่ย 30 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2514-2543 จากสถานีอุตุนิยมวิทยานาน นำมาคำนวณหาฝนใช้การ (P_{eff}) โดยวิธีของ USDA (8) โดยมี เงื่อนไขการเลือกใช้ ขึ้นกับปริมาณฝนมากกว่า 250 มิลลิเมตร หรือ น้อยกว่า 250 มิลลิเมตร ผลการศึกษาปริมาณฝนรวม เท่ากับ 1,263 มิลลิเมตร และปริมาณฝนใช้การ เท่ากับ 902.7 มิลลิเมตร (ตารางที่ 4.27)

ตารางที่ 4.27 ปริมาณฝนใช้การและปริมาณฝน⁽²⁰⁾ รายเดือน สถานีอุตุนิยมวิทยาน่าน

เดือน	ปริมาณฝน (มิลลิเมตรต่อเดือน)	ฝนใช้การ (P_{eff}) (มิลลิเมตรต่อเดือน)
มกราคม	8.00	7.90
กุมภาพันธ์	14.00	13.70
มีนาคม	27.00	25.80
เมษายน	103.00	86.00
พฤษภาคม	175.00	126.00
มิถุนายน	156.00	117.10
กรกฎาคม	207.00	138.40
สิงหาคม	248.00	149.60
กันยายน	205.00	137.80
ตุลาคม	95.00	80.60
พฤศจิกายน	19.00	18.40
ธันวาคม	6.00	5.90
รวม	1,263.00	902.70

หมายเหตุ: คำนวณฝนใช้การ (P_{eff}) ด้วยวิธีของ USDA

4.4.1.3 ปัจจัยพืชเพาะปลูก (Crop) ข้าวโพด

ข้าวโพดเป็นพืชอีกชนิดที่ใช้ในการศึกษาอเวอรพุ่มพุ่มมี 4 ระยะ คือ การเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ การเจริญเติบโตทางด้านการสืบพันธุ์ การพัฒนาการของเมล็ด ระยะสุกแก่หรือเก็บเกี่ยว ดังต่อไปนี้ คือ ประเภทพืช วันเริ่มปลูก วันเก็บเกี่ยว ค่าสัมประสิทธิ์พืช ระยะการเจริญเติบโต ความลึกของราก วิฤตการขาดน้ำ และ ค่าปรับเพื่อหาค่าการตอบสนอง ผลผลิต (ตารางที่ 4.28)

ตารางที่ 4.28 ปัจจัยปลูกข้าวโพดแต่ละระยะการเจริญเติบโต จากฐานข้อมูลในโปรแกรม CROPWAT 8.0 เดือน กรกฎาคม – พฤศจิกายน พ.ศ. 2556⁽¹⁹⁾

ปัจจัยปลูกข้าวโพด	ระยะการเจริญเติบโต			
	ระยะที่ 1	ระยะที่ 2	ระยะที่ 3	ระยะที่ 4
จำนวนวัน	20	35	40	30
ค่าสัมประสิทธิ์พืช	0.30	-	1.20	0.35
รากลึก	0.30	-	1.0	-
วิกฤตการขาดน้ำ	0.55	-	0.55	0.80
ค่าปรับเพื่อหาค่าการตอบสนองของผลผลิต	0.40	0.40	1.30	0.50
ความสูงข้าวโพด	-	-	2.0	-

หมายเหตุ. สัญลักษณ์ – ไม่มีข้อมูล

ระยะที่ 1 การเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ (vegetative growth)

ระยะที่ 2 การเจริญเติบโตทางด้านการสืบพันธุ์ (reproductive growth)

ระยะที่ 3 การพัฒนาการของเมล็ด (grain development)

ระยะที่ 4 ระยะสุกแก่หรือเก็บเกี่ยว (harvest maturity)

4.4.1.4 ปัจจัยข้อมูลดิน

ดินส่วนใหญ่ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน เป็นดินตะกอนลำนํ้าที่เกิดจากการทับถมเป็นเวลานาน ลักษณะเป็นดินเหนียว เกิดจากวัตถุต้นกำเนิด ตะกอนลำนํ้า ข้อมูลปัจจัยดินที่จำเป็นในการคำนวณด้วย ได้แก่ ความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ทั้งหมด อัตราการซึมของน้ำผ่านดินสูงสุด รากพืชลึกสูงสุด และ ความชื้นดินลดลงเริ่มต้น ดินที่ใช้สำหรับการ ศึกษาครั้งนี้ มีการปลูกพืชข้าวโพดเป็นตัวอย่างในการศึกษา ดังนั้นจำเป็นต้องมีข้อมูลเพิ่มเติม เกี่ยวกับลักษณะการข้าวโพดที่เกี่ยวข้องกับดิน ได้แก่ อัตราการซึมของน้ำของดิน จุดวิกฤตลดลงของน้ำใน แหล่งอย่างรวดเร็ว น้ำที่เป็นประโยชน์สำหรับการเจริญเติบโตของพืช และความลึกของน้ำสูงสุด โดยมีปัจจัยลักษณะดินทั่วไปพบว่า ลักษณะดินเป็นดินเหนียว มีความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ทั้งหมด 200 มิลลิเมตรต่อเมตร ทำให้มีอัตราการซึมของน้ำผ่านดินสูงสุด 30 มิลลิเมตรต่อวัน ความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ทั้งหมด 200 มิลลิเมตรต่อเมตร ความชื้นของดินที่เป็นประโยชน์เริ่มต้น 100 มิลลิเมตร ต่อเมตร เป็นต้น โดยข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลที่อยู่ในฐานข้อมูลถูกรวบรวมโดยผู้พัฒนาโปรแกรมและ ฐานข้อมูล (ตารางที่ 4.29)

ตารางที่ 4.29 ปัจจัยข้อมูลดินเหนียว จากฐานข้อมูลในโปรแกรม CROPWAT 8.0⁽¹⁹⁾

ปัจจัยข้อมูลดิน	ค่าที่วัดได้	หน่วย
ความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ทั้งหมด	200.0	มิลลิเมตรต่อเมตร
อัตราการซึมของน้ำผ่านดินสูงสุด	30	มิลลิเมตรต่อวัน
รากพืชลึกสูงสุด	900	เซนติเมตร
ความชื้นดินลดลงเริ่มต้น	50	เปอร์เซ็นต์
ความชื้นของดินที่เป็นประโยชน์เริ่มต้น	100.0	มิลลิเมตรต่อเมตร
อัตราการซึมน้ำของดิน	10	เปอร์เซ็นต์
จุดวิกฤตลดลงของน้ำในแหล่งอย่างรวดเร็ว	0.60	มิลลิเมตรต่อวัน
น้ำที่เป็นประโยชน์สำหรับการเจริญเติบโตของพืช	5	มิลลิเมตร
ความลึกของน้ำสูงสุด	100	มิลลิเมตร

ข้าวโพดเป็นพืชตัวอย่างอีกประเภทที่ศึกษาอวอเตอร์พุตพรีนธ์ โดยศึกษาลักษณะเดียวกับอวอเตอร์พุตพรีนธ์ของข้าวนาสวน ซึ่งแยกเป็นการศึกษาอวอเตอร์พุตพรีนธ์สีเขียวของข้าวโพด อวอเตอร์พุตพรีนธ์สีน้ำเงิน และอวอเตอร์พุตพรีนธ์สีเทาของข้าวโพด โดยช่วงเวลาการศึกษาข้าวโพดอาศัยน้ำฝนในการเพาะปลูกเป็นหลัก ปัจจัยที่ศึกษาอวอเตอร์พุตพรีนธ์ของข้าวโพด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอลำปาง จังหวัดน่าน ได้ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้ คือ ปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพด (ET_c) ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0) และค่าสัมประสิทธิ์พืชของข้าวโพด (K_c) ในการคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ใช้วิธีของ Panman Montieth (8) โดยมีระยะเวลาในการปลูกเฉลี่ย 100–120 วัน การคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพด (ET_c) ใช้โปรแกรม CROPWAT 8.0 (19) ขององค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ และโปรแกรม CWR-RID (23) ของกรมชลประทาน ในขณะที่โปรแกรม WAPF ไม่มีการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพด ดังนั้นในการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพดจึงใช้โปรแกรม CROPWAT 8.0 และ CWR-RID เท่านั้น

4.4.1.5 ปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_0)

โปรแกรม CROPWAT 8.0 คำนวณปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพด จากค่าสัมประสิทธิ์พืชจากการศึกษาของ Allen (15) และข้อมูลปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงถูกรวบรวมจากองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติและประมวลผลโดยโปรแกรม CLIMWAT โดยข้อมูลรวบรวมจากจากสถานีอุตุนิยมวิทยาน่าน ซึ่งเป็นข้อมูลเฉลี่ย 30 ปี ในปี พ.ศ. 2513-2543 ผลการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพดโดยโปรแกรม CROPWAT 8.0 ผลการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0) ตลอดระยะการเจริญเติบโตรวมทั้งหมด 14 สัปดาห์ เท่ากับ 433.46

มิลลิเมตร ปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_c) ตลอดระยะเวลาการเจริญเติบโตรวมเท่ากับ 336.50 มิลลิเมตร โดยมีปริมาณฝนใช้การ (P_{eff}) ตลอดระยะเวลาการเจริญเติบโตรวมเท่ากับ 478.10 มิลลิเมตร ดังนั้น ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง (ET_{green}) รวมตลอดระยะเวลาการเจริญเติบโตเท่ากับ 307.10 มิลลิเมตร (ตารางที่ 4.30)

ตาราง 4.30 ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, ปริมาณฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง ของข้าวโพดรายสัปดาห์ จากโปรแกรม CROPWAT 8.0

สัปดาห์	ค่าสัมประสิทธิ์พืช, K_c	ปริมาณการใช้น้ำ ของพืชอ้างอิง, ET_0 (mm)	ปริมาณการ ใช้น้ำของพืช, ET_c (mm)	ปริมาณ ฝนใช้การ, P_{eff} (mm)	ปริมาณน้ำ ที่พืชใช้จริง, ET_{green} (mm)
1	0.30	3.67	1.10	4.40	1.10
2	0.30	35.00	10.50	46.60	10.50
3	0.31	37.42	11.60	47.70	11.60
4	0.47	34.26	16.10	49.30	16.10
5	0.70	33.71	23.60	50.90	23.60
6	0.94	37.66	35.40	49.20	35.40
7	1.10	34.73	38.20	48.60	38.20
8	1.10	35.36	38.90	48.00	38.90
9	1.10	35.73	39.30	41.00	39.30
10	1.10	36.00	39.60	33.30	33.30
11	1.01	36.34	36.70	27.10	27.10
12	0.75	38.00	28.50	20.10	20.10
13	0.49	32.45	15.90	11.50	11.50
14	0.35	3.14	1.10	0.40	0.40
รวม		433.46	336.50	478.10	307.10

4.4.2 ผลการศึกษาปัจจัยข้อมูลนำเข้าโปรแกรม CWR-RID สำหรับข้าวโพด

โปรแกรม CWR-RID เป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยกรมชลประทานที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของพืชรวมถึงข้าวโพด ข้อมูลปริมาณฝนใช้การที่ใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับปริมาณการใช้น้ำ เป็นข้อมูลปริมาณฝนในปี พ.ศ. 2556 ช่วงเดือน กรกฎาคม ถึง พฤศจิกายน จากกรมอุตุนิยมวิทยา ค่าสัมประสิทธิ์พืชได้จากการทดลองของกรมชลประทานในการทดลองกลุ่มพืชเศรษฐกิจ ระยะการปลูกข้าวโพดใช้เวลา 14 สัปดาห์ ผลการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_0) เท่ากับ 362.53 มิลลิเมตร ปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_c) เท่ากับ 430.57 มิลลิเมตร โดยมีปริมาณฝนใช้การ (P_{eff}) เท่ากับ 514.54 มิลลิเมตร ดังนั้นปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง (ET_{green}) ที่คำนวณโดยโปรแกรม CWR-RID รวมตลอดระยะเวลาเจริญเติบโตเท่ากับ 398.60 มิลลิเมตร (ตารางที่ 4.31)

ตารางที่ 4.31 ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, ปริมาณ
ฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง รายสัปดาห์ จากโปรแกรม CWR-RID

สัปดาห์	ค่าสัมประสิทธิ์พืช, Kc	ปริมาณการใช้น้ำ ของพืชอ้างอิง, ET ₀ (mm)	ปริมาณการ ใช้น้ำของพืช, ET _c (mm)	ปริมาณฝน ใช้การ, P _{eff} (mm)	ปริมาณน้ำ ที่พืชใช้จริง, ET _{green} (mm)
1	0.63	26.32	16.59	45.12	16.59
2	0.72	26.32	18.97	45.12	18.97
3	0.86	26.32	22.61	45.12	22.61
4	1.13	25.27	28.56	45.00	28.56
5	1.35	25.13	33.95	44.98	33.95
6	1.52	25.13	38.22	44.98	38.22
7	1.61	25.13	40.46	44.98	40.46
8	1.63	25.76	42.00	39.79	39.79
9	1.58	26.67	42.14	30.66	30.66
10	1.50	26.67	39.97	30.66	30.66
11	1.38	26.67	36.82	30.66	30.66
12	1.15	26.46	30.45	29.17	29.17
13	0.90	25.34	22.82	19.15	19.15
14	0.67	25.34	27.01	19.15	19.15
รวม		362.53	440.57	514.54	398.60

4.4.3 ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวโพด พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน

การศึกษาหาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาของข้าวโพดเกี่ยวข้องกับปัจจัยการใช้ปุ๋ยเคมีที่เป็นตัวสร้างมลพิษในแหล่งน้ำของพื้นที่เพาะปลูก ดังนั้นจึงมีการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อนำมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมี ดังนี้

(1) คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวโพดจากสถานีเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 (ระยะการเจริญเติบโตทางต้นและใบ)

ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวโพด พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน ครั้งที่ 1 (ระยะการเจริญเติบโตทางต้นและใบ) จำนวน 3 สถานีเก็บตัวอย่าง ได้แก่ สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ M05 (บ้านนาหนูน 1) สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ M06 (บ้านนาเตา) และสถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ M07 (สะพานใหม่) พบว่า ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเท่ากับ 27.77 องศาเซลเซียส อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 25.00-33.00 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7.18 อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 5.00-9.00 ค่าเฉลี่ยการนำไฟฟ้าเท่ากับ 194.15 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 150.00-500.00 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าเฉลี่ยออกซิเจนละลายน้ำเท่ากับ 6.91 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 6.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเฉลี่ยแอมโมเนีย-ไนโตรเจนเท่ากับ 13.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคือ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเพราะมีการใช้ปุ๋ยตั้งแต่การเตรียมแปลงการเพาะปลูก ค่าเฉลี่ยไนเตรท-ไนโตรเจนเท่ากับ 0.18 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคือ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าเฉลี่ยฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสเท่ากับ 10.90 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคือ 0.7-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากปุ๋ยที่ใช้มีส่วนผสมของฟอสฟอรัส ทำให้ปริมาณฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสที่ตรวจวัดได้มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานและสูงกว่าสถานีอ้างอิง (ตารางที่ 4.32)

ตารางที่ 4.32 คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวโพดจากสถานีเก็บตัวอย่างน้ำ ครั้งที่ 1 จำนวน 7 พารามิเตอร์ (ระยะการเจริญเติบโตทางต้นและใบ) ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดน่าน วันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2556

พารามิเตอร์ ทางกายภาพและเคมี	สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ ข้าวโพด			
	RS00 (สถานีอ้างอิง)	M05 (บ้านนาหนูน 1)	M06 (บ้านนาเตา)	M07 (สะพานใหม่)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	26.83	27.73	27.77	27.83
ความเป็นกรด-เบส	6.55	7.09	7.04	7.43
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	189.73	193.33	194.50	194.63
ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	7.26	6.91	6.95	6.88
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.37	14.25	12.06	12.71
ไนเตรท-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.10	0.02	0.22	0.30
ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.022	10.89	10.92	10.90

(2) คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวโพดจากสถานีเก็บตัวอย่างน้ำ ครั้งที่ 2 (ระยะการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์)

จากการศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวโพด พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดน่าน ครั้งที่ 2 (ระยะการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์) จำนวน 3 สถานีเก็บตัวอย่าง ได้แก่ สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ M05 (บ้านนาหนูน 1) สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ M06 (บ้านนาเตา) และสถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ M07 พบว่า ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเท่ากับ 27.29 องศาเซลเซียส อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 25.00-33.00 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7.36 อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 5.00-9.00 ค่าเฉลี่ยการนำไฟฟ้าเท่ากับ 131.96 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 150.00-500.00 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าเฉลี่ยออกซิเจนละลายน้ำเท่ากับ 7.34 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 6.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเฉลี่ยแอมโมเนีย-ไนโตรเจนเท่ากับ 10.08 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคือ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยอาจมีสาเหตุมาจากเริ่มมีการใช้ปุ๋ยในการปลูกข้าวโพดเพื่อเร่งการเจริญเติบโตเข้าสู่ระยะเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์ ค่าเฉลี่ยไนเตรท-ไนโตรเจนเท่ากับ 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ใน

เกณฑ์มาตรฐานคือ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าเฉลี่ยฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสเท่ากับ 10.92 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคือ 0.7 - 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากปุ๋ยที่ใช้ในการเพาะปลูกมีฟอสฟอรัสเป็นส่วนผสมดังนั้นจึงทำให้ปริมาณฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสที่ตรวจวัดได้ในแหล่งน้ำมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน (80) (ตารางที่ 4.33)

ตารางที่ 4.33 คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวโพดจากสถานีเก็บตัวอย่างน้ำ ครั้งที่ 2 จำนวน 7 พารามิเตอร์ (ระยะการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์) ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดน่าน วันที่ 16 กันยายน พ.ศ. 2556

พารามิเตอร์ ทางกายภาพและเคมี	สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ ข้าวโพด			
	RS00 (สถานีอ้างอิง)	M05 (บ้านนาหนูน 1)	M06 (บ้านนาเตา)	M07 (สะพานใหม่)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25.90	27.00	27.40	27.47
ความเป็นกรด-เบส	7.17	7.33	7.40	7.36
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	151.40	123.03	143.87	129.00
ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	7.51	7.37	7.33	7.34
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.48	10.27	10.80	9.19
ไนเตรท-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.09	0.17	0.09	0.11
ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.019	10.89	10.93	10.96

(3) คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวโพดจากสถานีเก็บตัวอย่างน้ำ ครั้งที่ 3 (ระยะการเจริญเติบโตด้านเมล็ด)

ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวโพด พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดน่าน ครั้งที่ 3 (ระยะการเจริญเติบโตด้านเมล็ด) จำนวน 3 สถานีเก็บตัวอย่าง ได้แก่ สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ M05 (บ้านนาหนูน 1) สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ M06 (บ้านนาเตา) และสถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ M07 พบว่า ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเท่ากับ 28.10 องศาเซลเซียส อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 25.00-33.00 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 9.18 อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 5.00-9.00 ค่าเฉลี่ยการนำไฟฟ้าเท่ากับ 190.45

ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 150.00-500.00 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าเฉลี่ยออกซิเจนละลายน้ำเท่ากับ 7.55 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 6.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเฉลี่ยแอมโมเนีย-ไนโตรเจนเท่ากับ 9.96 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคือ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีสาเหตุมาจากเริ่มมีการใช้ปุ๋ยในการปลูกข้าวโพดเพื่อเร่งการเจริญเติบโตของดอก ค่าเฉลี่ย ไนเตรท-ไนโตรเจนเท่ากับ 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคือ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าเฉลี่ยฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสเท่ากับ 10.68 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคือ 0.7-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากปุ๋ยที่ใช้มีส่วนผสมของฟอสฟอรัสในการเร่งการเจริญเติบโตของดอก ทำให้ปริมาณฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสที่ตรวจวัดได้ในแหล่งน้ำของพื้นที่ปลูกข้าวโพดมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานและสูงกว่าสถานีอ้างอิง (ตารางที่ 4.34)

ตารางที่ 4.34 คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวโพดจากสถานีเก็บตัวอย่างน้ำ ครั้งที่ 3 จำนวน 7 พารามิเตอร์ (ระยะการเจริญเติบโตด้านเมล็ด) ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอบำรุง จังหวัดน่าน วันที่ 22 ตุลาคม พ.ศ. 2556

พารามิเตอร์ ทางกายภาพและเคมี	สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ ข้าวโพด			
	RS00 (สถานีอ้างอิง)	M05 (บ้านนาหนูน 1)	M06 (บ้านนาเตา)	M07 (สะพานใหม่)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	26.17	28.00	28.77	27.53
ความเป็นกรด-เบส	8.35	8.99	9.04	9.51
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	188.47	191.47	188.23	191.67
ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	7.55	7.99	7.27	7.39
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.36	10.55	10.32	9.02
ไนเตรท-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.07	0.09	0.03	0.07
ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.021	10.45	10.78	10.83

(4) คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวโพดจากสถานีเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 4 (ระยะการเก็บเกี่ยว)

ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวโพด พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดนครราชสีมา ครั้งที่ 4 (ระยะการเก็บเกี่ยว) จำนวน 3 สถานีเก็บตัวอย่าง ได้แก่ สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ M05 (บ้านนาหนอง 1) สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ M06 (บ้านนาเตา) และสถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ M07 พบว่า ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเท่ากับ 28.68 องศาเซลเซียส อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 25.00-33.00 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 9.06 อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 5.00-9.00 ค่าเฉลี่ยการนำไฟฟ้าเท่ากับ 194.54 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 150.00-500.00 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าเฉลี่ยออกซิเจนละลายน้ำเท่ากับ 7.73 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานคือ 6.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเฉลี่ยแอมโมเนีย-ไนโตรเจนเท่ากับ 10.3 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคือ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีสาเหตุมาจากเริ่มมีการใช้ปุ๋ยในการปลูกข้าวโพดเพื่อเร่งการเจริญเติบโตของดอก ค่าเฉลี่ยไนเตรท-ไนโตรเจนเท่ากับ 0.13 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคือ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าเฉลี่ยฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสเท่ากับ 10.21 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคือ 0.7-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากปุ๋ยที่ใช้มีส่วนผสมของฟอสฟอรัสในการเร่งการเจริญเติบโตของดอก ทำให้ปริมาณฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสที่ตรวจวัดได้มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานและสูงกว่าสถานีอ้างอิง (ตารางที่ 4.35)

ตารางที่ 4.35 คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในพื้นที่ปลูกข้าวโพดจากสถานีเก็บตัวอย่างน้ำ ครั้งที่ 4 จำนวน 7 พารามิเตอร์ (ระยะการเก็บเกี่ยว) ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัด น่าน วันที่ 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2556

พารามิเตอร์ ทางกายภาพและเคมี	สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ ข้าวโพด			
	RS00 (สถานีอ้างอิง)	M05 (บ้านนาหุน 1)	M06 (บ้านนาเตา)	M07 (สะพานใหม่)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	29.37	29.30	27.86	28.88
ความเป็นกรด-เบส	8.09	8.01	9.18	9.99
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	176.38	193.76	190.83	199.03
ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	7.19	7.45	7.98	7.76
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.38	10.59	10.19	10.12
ไนเตรท-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.06	0.05	0.11	0.25
ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.024	10.31	10.11	10.21

4.5 ผลการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด

4.5.1 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว (WF_{green}) ของข้าวโพด

การศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวของข้าวโพด มีวิธีการเดียวกับการคำนวณหา วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวของข้าวโพด โดยอาศัยข้อมูลที่เป็นองค์ประกอบจากปริมาณการใช้น้ำของพืช อ้างอิง (ET_0) ปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพด (ET_c) และค่าสัมประสิทธิ์พืช (K_c) และนำมาหา ความสัมพันธ์กับปริมาณการผลิตในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัด น่าน ที่มีผลผลิตเฉลี่ยในปี พ.ศ. 2556 เท่ากับ 0.64 ตันต่อไร่

ผลการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน จาก พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ถูกกำหนดขึ้นดังตารางที่ 4.28 โปรแกรม CROPWAT 8.0 คำนวณวอเตอร์ ฟุตพริ้นท์สีเขียว มีค่าเท่ากับ 767.75 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โปรแกรม CWR-RID คำนวณวอเตอร์ ฟุตพริ้นท์สีเขียวคำนวณตามสมการ 2.4 ผลการคำนวณค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว มีค่าเท่ากับ 991.13 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน (ตารางที่ 4.36 ถึงตารางที่ 4.37)

ตารางที่ 4.36 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง, ปริมาณน้ำที่พืชใช้, ผลผลิตพืช ของ ข้าวโพด จากโปรแกรม CROPWAT 8.0

โปรแกรม	ปริมาณน้ำที่ พืชใช้จริง (ET_{green}) (มิลลิเมตรต่อการ เพาะปลูก)	ปริมาณน้ำที่พืชใช้ (CWU_{green}) (ลูกบาศก์เมตรต่อไร่)	ผลผลิตพืช (Y) (ตันต่อไร่)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ สีเขียว (WF_{green}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)
CROPWAT 8.0	307.10	491.36	0.64	767.75

ตารางที่ 4.37 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว, ปริมาณน้ำที่พืชใช้จริง, ปริมาณน้ำที่พืชใช้, ผลผลิตพืช ของ ข้าวโพด จากโปรแกรม CWR-RID

โปรแกรม	ปริมาณน้ำที่ พืชใช้จริง (ET_{green}) (มิลลิเมตรต่อการ เพาะปลูก)	ปริมาณน้ำที่พืชใช้ (CWU_{green}) (ลูกบาศก์เมตรต่อไร่)	ผลผลิตพืช (Y) (ตันต่อไร่)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ สีเขียว (WF_{green}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)
CWR-RID	398.60	634.32	0.64	991.13

4.5.2 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน (WF_{blue}) ของข้าวโพด

ผลการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินของข้าวโพด จะคำนวณจากปริมาณน้ำที่ใช้ในการเตรียมพื้นที่เพาะปลูกและปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่มในระยะเวลาที่ปริมาณฝนใช้การไม่เพียงพอ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่พืชต้องการ โดยจะเกิดขึ้นในช่วงปลายฤดูฝน ซึ่งอยู่ในระยะที่พืชมีการเจริญเติบโตทางผลผลิตและระยะการเก็บเกี่ยว ปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่มส่วนใหญ่สำหรับการปลูกข้าวโพดจะได้อมาจากปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บอยู่ในดินในรูปของความชื้นในดิน ซึ่งจะสะสมมากในช่วงที่มีฝนตกและน้ำฝนไหลซึมลงดิน

ผลการศึกษาปริมาณการใช้น้ำสีน้ำเงินของข้าวโพดโดยใช้โปรแกรม CROPWAT 8.0 เริ่มคำนวณปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่มในสัปดาห์ที่ 11 ถึง สัปดาห์ที่ 14 จากระยะการปลูกข้าวโพดทั้งสิ้นของโปรแกรม CROPWAT 8.0 คือ 14 สัปดาห์ ตลอดระยะเวลา 4 สัปดาห์สำหรับการ

คำนวณหาปริมาณการใช้น้ำสิ้นน้ำเงิน พบว่าในช่วงระยะเวลาดังกล่าวปริมาณฝนใช้การน้อยกว่าปริมาณน้ำที่พืชต้องการโดย ปริมาณน้ำที่พืชต้องการมีทั้งสิ้น 82.20 มิลลิเมตร แต่ปริมาณฝนใช้การที่มีอยู่เท่ากับ 68.10 มิลลิเมตร ดังนั้นปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม เท่ากับ 23.10 มิลลิเมตร (ตารางที่ 4.38)

ตาราง 4.38 ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, ปริมาณฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม ของข้าวโพดรายสัปดาห์ จากโปรแกรม CROPWAT 8.0

สัปดาห์ที่	ค่าสัมประสิทธิ์พืช, Kc	ปริมาณการใช้น้ำ ของพืชอ้างอิง, ET ₀ (mm)	ปริมาณการ ใช้น้ำของพืช, ET _c (mm)	ปริมาณฝน ใช้การ, P _{eff} (mm)	ปริมาณน้ำที่พืช ต้องการเพิ่ม, ET _{blue} (mm)
11	1.01	36.34	36.70	27.10	9.60
12	0.75	38.00	28.50	20.10	8.40
13	0.49	32.45	15.90	11.50	4.40
14	0.35	3.14	1.10	0.40	0.70
รวม		109.93	82.20	68.10	23.10

หมายเหตุ คำนวณเฉพาะสัปดาห์ที่ 11 ถึงสัปดาห์ที่ 14 เพราะปริมาณฝนใช้การน้อยกว่าปริมาณการใช้น้ำของพืช

ผลการศึกษาปริมาณการใช้น้ำสิ้นน้ำเงินของข้าวโพดโดยโปรแกรม CWR-RID ที่พัฒนาโดยกรมชลประทาน โดยมีระยะการปลูกข้าวโพดทั้งสิ้น 14 สัปดาห์ ในสัปดาห์ที่ 8 ถึงสัปดาห์ที่ 14 เข้าสู่ระยะที่ปริมาณน้ำที่พืชต้องการมากกว่าปริมาณฝนใช้การ ซึ่งมีจำนวนสัปดาห์ปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่มมากกว่าการคำนวณโดยโปรแกรม CROPWAT 8.0 3 สัปดาห์ โดยปริมาณน้ำที่พืชต้องการเท่ากับ 241.21 มิลลิเมตร ตลอดระยะเวลา 7 สัปดาห์ แต่มีปริมาณฝนใช้การได้เพียง 199.24 มิลลิเมตร ดังนั้นปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่มสำหรับการเจริญเติบโตของผลผลิต คือ 41.97 มิลลิเมตร (ตารางที่ 4.39) ความแตกต่างจากการคำนวณของปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม จากการคำนวณโดยโปรแกรม CROPWAT 8.0 กับโปรแกรม CWR-RID อาจจะเป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์พืช ที่จะ

ส่งผลให้ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง และปริมาณน้ำที่พืชต้องการแตกต่างกันจากการคำนวณ รวมถึงข้อมูลปริมาณฝนที่จะนำมาคำนวณปริมาณฝนใช้การเป็นข้อมูลต่างช่วงเวลา

ตาราง 4.39 ค่าสัมประสิทธิ์พืช, ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง, ปริมาณการใช้น้ำของพืช, ปริมาณฝนใช้การ, ปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม ของข้าวโพดรายสัปดาห์ จากโปรแกรม CWR-RID

สัปดาห์	ค่าสัมประสิทธิ์พืช, Kc	ปริมาณการใช้น้ำ ของพืชอ้างอิง, ET ₀ (mm)	ปริมาณการ ใช้น้ำของพืช, ET _c (mm)	ปริมาณฝน ใช้การ, P _{eff} (mm)	ปริมาณน้ำที่พืช ต้องการเพิ่ม, ET _{blue} (mm)
8	1.63	25.76	42.00	39.79	2.21
9	1.58	26.67	42.14	30.66	11.48
10	1.50	26.67	39.97	30.66	9.31
11	1.38	26.67	36.82	30.66	6.16
12	1.15	26.46	30.45	29.17	1.28
13	0.90	25.34	22.82	19.15	3.67
14	0.67	25.34	27.01	19.15	7.86
รวม		182.91	241.21	199.24	41.97

หมายเหตุ: คำนวณเฉพาะสัปดาห์ที่ 8 ถึงสัปดาห์ที่ 14 เพราะปริมาณฝนใช้การน้อยกว่าปริมาณการใช้น้ำของพืช

จากการคำนวณปริมาณการใช้น้ำสิ้นน้ำเงินของข้าวโพดทั้ง 2 โปรแกรม นำผลรวมของปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม (ET_{blue}) มาคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืช (CWU_{blue}) และหารด้วยผลผลิตพืช (Y) จะได้วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สิ้นน้ำเงิน มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรต่อตัน จากวิธีดังกล่าว พบว่าการคำนวณ วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สิ้นน้ำเงิน ด้วยโปรแกรม CROPWAT 8.0 มีค่าเท่ากับ 57.75 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน จากปัจจัยปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม (ET_{blue}) 23.10 มิลลิเมตร ปริมาณน้ำที่พืชใช้ 36.96 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ ภายได้ผลผลิตของพืช 0.64 ตันต่อไร่ ส่วนการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สิ้นน้ำเงิน ด้วยโปรแกรม CWR-RID มีค่าเท่ากับ 104.90 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน จากปัจจัย

ปริมาณน้ำที่พืชต้องการ 41.96 มิลลิเมตร ปริมาณน้ำที่พืชใช้ 67.14 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ ภายใต้ผลผลิตของพืช 0.64 ตันต่อไร่

ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น ถึงความแตกต่างของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินที่คำนวณได้จากทั้ง 2 โปรแกรม ที่มีค่าแตกต่างกันโดยมีปัจจัยในเรื่องของปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม เป็นปัจจัยหลัก ซึ่งเป็นผลมาจากข้อมูลนำเข้าสำหรับการคำนวณ ไม่ว่าจะเป็นค่าสัมประสิทธิ์พืช ปริมาณฝน ข้อมูลการซึมซับน้ำของดิน ซึ่งข้อมูลดังกล่าวเป็นปัจจัยพื้นฐานในการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชแสดง (ตารางที่ 4.40 ถึงตารางที่ 4.41)

ตารางที่ 4.40 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน, ปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม, ปริมาณน้ำที่พืชใช้, ผลผลิตพืชของข้าวโพด จากโปรแกรม CROPWAT 8.0

โปรแกรม	ปริมาณน้ำที่พืช ต้องการเพิ่ม (ET_{blue}) (มิลลิเมตรต่อฤดูการเพาะปลูก)	ปริมาณน้ำที่พืชใช้ (CWU_{blue}) (ลูกบาศก์เมตรต่อไร่)	ผลผลิตพืช (Y) (ตันต่อไร่)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ สีน้ำเงิน (WF_{blue}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)
CROPWAT 8.0	23.10	36.96	0.64	57.75

ตารางที่ 4.41 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน, ปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม, ปริมาณน้ำที่พืชใช้, ผลผลิตพืชของข้าวโพด จากโปรแกรม CWR-RID

โปรแกรม	ปริมาณน้ำที่พืช ต้องการเพิ่ม (ET_{blue}) (มิลลิเมตรต่อฤดูการเพาะปลูก)	ปริมาณน้ำที่พืชใช้ (CWU_{blue}) (ลูกบาศก์เมตรต่อไร่)	ผลผลิตพืช (Y) (ตันต่อไร่)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ สีน้ำเงิน (WF_{blue}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)
CWR-RID	41.96	67.14	0.64	104.90

4.5.5 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา (WF_{gray}) ของข้าวโพด

ผลการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา เป็นการหาปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพด ที่อยู่ในรูปของปริมาณน้ำที่จะใช้ในการเจือจางมลพิษที่เกิดขึ้นจากการใช้ปุ๋ย จากปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนเตรท-ไนโตรเจน และฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส จากแหล่งน้ำตัวอย่างในพื้นที่เพาะปลูก ที่ได้จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมี เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานน้ำผิวดิน โดยปริมาณปุ๋ยที่ลงสู่แหล่งน้ำไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ (8) ของปริมาณการใช้ปุ๋ยทั้งหมดต่อพื้นที่ พบว่าในพื้นที่เพาะปลูกข้าวโพดมีการใช้ปุ๋ยสูตร 16-20-0 จากสูตรปุ๋ยดังกล่าวเมื่อเทียบปริมาณในอัตราส่วนร้อยละพบว่า มีไนโตรเจนทั้งหมด 16 กิโลกรัม ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 20 กิโลกรัม และโพแทสเซียมที่ละลายน้ำได้ 0 กิโลกรัม ในพื้นที่ศึกษามีการใช้ปุ๋ยในอัตราส่วน 50 กิโลกรัมต่อไร่

จากการเก็บตัวอย่างน้ำที่สถานีอ้างอิง เพื่อนำมาเป็นความเข้มข้นธาตุอาหารที่มีอยู่ตามธรรมชาติโดยทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมี คือ ช่วงเดือน กรกฎาคม ถึง พฤศจิกายน พบว่า ปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจน เฉลี่ยเท่ากับ 0.39 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจน เฉลี่ยเท่ากับ 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส เฉลี่ยเท่ากับ 0.021 มิลลิกรัมต่อลิตร (ตารางที่ 4.42)

ตารางที่ 4.42 แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนเตรท-ไนโตรเจน และฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส เฉลี่ยในแหล่งน้ำตัวอย่าง สถานีอ้างอิง (RS00) ณ สถานีบ้านแหวน 1 จำนวน 3 พารามิเตอร์ ระยะเวลาการเก็บข้อมูล 4 ครั้ง พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอน้ำขุ่น จังหวัดน่าน เดือน กรกฎาคม – พฤศจิกายน

พารามิเตอร์ทางกายภาพและเคมี	ระยะเวลาการเก็บข้อมูล				เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.37	0.48	0.36	0.38	0.39
ไนเตรท-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.10	0.09	0.07	0.06	0.08
ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.022	0.019	0.021	0.024	0.021

หมายเหตุ ครั้งที่ 1 (ระยะการเจริญเติบโตทางต้นและใบ) วันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2556

ครั้งที่ 2 (ระยะการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์) วันที่ 16 กันยายน พ.ศ. 2556

ครั้งที่ 3 (ระยะการเจริญเติบโตด้านเมล็ด) วันที่ 22 ตุลาคม พ.ศ. 2556

ครั้งที่ 4 (ระยะการเก็บเกี่ยว) วันที่ 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2556

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนเตรท-ไนโตรเจน และ ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานของปริมาณปุ๋ยที่ลงสู่แหล่งน้ำไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ (8) ของปริมาณการใช้ปุ๋ยทั้งหมดต่อพื้นที่ โดยปุ๋ยที่ใช้สูตร 16-20-0 พบว่าปริมาณการใช้ปุ๋ยที่มีใน อัตราส่วน 50 กิโลกรัมต่อไร่ จากผลการคำนวณสัดส่วนการใช้ปุ๋ยพบว่า ปริมาณไนเตรท-ไนโตรเจน เท่ากับ 0.00002 ตันต่อไร่ ปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจน 0.00686 ตันต่อไร่ และฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส เท่ากับ 0.013 ตันต่อไร่ การศึกษาครั้งนี้ใช้ค่ามาตรฐานน้ำผิวดินเป็นค่าอ้างอิงของความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ยอมรับได้ (73) โดยแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไม่เกิน 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนเตรท-ไนโตรเจน ไม่เกิน 10.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ไม่เกิน 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ตรวจวัดได้จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่างที่เก็บในพื้นที่ เพาะปลูกโดยวิเคราะห์ทางกายภาพและเคมีเพื่อหา แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนเตรท-ไนโตรเจน และ ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส โดยปริมาณวอเตอร์พืชรินท์สีเทาของข้าวโพดเมื่อเทียบกับผลผลิตต่อไร่ เท่ากับ 0.64 ตันต่อไร่ พ.ศ. 2556 ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอน้ำขุ่น จังหวัดน่าน มีค่า วอเตอร์พืชรินท์สีเทาเท่ากับ 1.06 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน (ตารางที่ 4.43)

จากตารางที่ 4.43 ค่าวอเตอร์พืชรินท์สีเทา พบว่าปริมาณวอเตอร์พืชรินท์สีเทาของข้าวโพดในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอน้ำขุ่น จังหวัดน่าน มีค่าเท่ากับ 1.06 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน น้อยกว่าการศึกษาของทิพย์ภา ศักขาวอเตอร์พืชรินท์ของข้าวโพด เลี้ยงสัตว์ โดยมีวอเตอร์พืชรินท์สีเทาเฉลี่ยอยู่ที่ 125-283 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน (74) และน้อยกว่า การศึกษาของ Mekonnen and Hoekstra (75) เฉลี่ยอยู่ที่ 120 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน จาก ผลการศึกษาที่ทำให้ค่าวอเตอร์พืชรินท์สีเทาน้อยเป็นผลมาจากฤดูกาลและลักษณะการให้น้ำในพื้นที่ เพาะปลูก โดยช่วงระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างน้ำในพื้นที่การเพาะปลูกข้าวโพดของผู้วิจัยอยู่ในช่วง ฤดูฝน ทำให้อาจเกิดการชะล้างและไม่ใช้พื้นที่ชลประทาน รวมถึงการเลือกใช้ความเข้มข้นของธาตุ อาหารอาหารที่ตกค้างในแหล่งน้ำที่จะก่อให้เกิดมลพิษในที่นี้คือ ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ซึ่งต่างจากการ ศึกษาของนักวิจัยอื่นที่จะเลือกใช้ไนโตรเจน

ตารางที่ 4.43 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา, ธาตุอาหารที่ก่อกมลพิษ, อัตราการใช้ธาตุอาหาร, สัดส่วนของธาตุอาหารจากการชะละลาย, ความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ยอมรับได้, ความเข้มข้นธาตุอาหารที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ในการปลูกข้าวโพด พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดน่าน

ธาตุอาหารที่ก่อกมลพิษ (ปุ๋ย 16-20-0)	อัตราการใช้ธาตุอาหาร (ตันต่อไร่)	สัดส่วนของธาตุอาหารจากการชะละลาย (10%)	ความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ยอมรับได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นธาตุอาหารที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา (WF _{gray}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	0.0068	0.1	5.00	0.39	0.23
ไนเตรท-ไนโตรเจน	0.00002	0.1	10.00	0.08	0.00032
ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส	0.013	0.1	2.00	0.021	1.06

หมายเหตุ ผลผลิตข้าวโพดเท่ากับ 0.64 ตันต่อไร่

4.6 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด

จากการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพดโดยใช้วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา พบว่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดน่าน ที่คำนวณด้วยโปรแกรม CROPWAT 8.0 มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวของข้าวโพด เท่ากับ 767.75 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินของข้าวโพด เท่ากับ 57.75 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาของข้าวโพด เท่ากับ 1.06 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ดังนั้นปริมาณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด มีค่าเท่ากับ 826.56 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่คำนวณด้วยโปรแกรม CWR-RID มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวของข้าวโพด เท่ากับ 991.13 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินของข้าวโพด เท่ากับ 104.90 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และ วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาของข้าวโพด เท่ากับ 1.06 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน

ดังนั้นปริมาณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพดมีค่าเท่ากับ 1,097.09 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน (ตารางที่ 4.44 ถึงตารางที่ 4.45)

ตารางที่ 4.44 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาของข้าวโพด จากโปรแกรม CROPWAT 8.0

โปรแกรม	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ สีเขียว (WF _{green}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ สีน้ำเงิน(WF _{blue}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ สีเทา (WF _{gray}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (WF) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)
CROPWAT 8.0	767.75	57.75	1.06	826.56

ตารางที่ 4.45 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน, วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาของข้าวโพด จากโปรแกรม CWR-RID

โปรแกรม	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ สีเขียว (WF _{green}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ สีน้ำเงิน(WF _{blue}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ สีเทา (WF _{gray}) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (WF) (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)
CWR-RID	991.13	104.90	1.06	1,097.09

การศึกษานี้พบว่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่คำนวณด้วยโปรแกรม CROPWAT 8.0 มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว (WF_{green}) และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน (WF_{blue}) เท่ากับ 767.75 และ 57.75 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่คำนวณด้วยโปรแกรม CWR-RID มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวและวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน (WF_{blue}) เท่ากับ 991.13 และ 104.90 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โดยอาจมีสาเหตุมาจากความแตกต่างของชุดข้อมูลที่ใช้ที่ประกอบด้วยระยะเวลาการจัดเก็บข้อมูล ที่ประกอบด้วย สภาพภูมิอากาศ ข้อมูลพืช และข้อมูลดิน โดยโปรแกรม CWR-RID ใช้ชุดข้อมูลที่จัดเก็บในระยะเวลาที่ใกล้เคียงกับการศึกษา แต่มีวิธีการคำนวณปริมาณการใช้น้ำอ้างอิงของพืชเหมือนกันโดยใช้วิธี Panman-Monteith นอกจากนั้น วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาของ CROPWAT 8.0

และ CWR-RID มีค่าเท่ากัน เนื่องจากใช้ข้อมูลที่ใช้ศึกษาเก็บรวบรวมจากพื้นที่ศึกษาซึ่งได้แก่ ปริมาณการเกิดมลพิษจากการใช้ปุ๋ยในการเพาะปลูก

4.7 ปริมาณความต้องการใช้น้ำของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนกับวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด

จากตารางที่ 4.46 แสดงปริมาณความต้องการใช้น้ำจากวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนกับวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด ข้าวนาสวนใช้โปรแกรม 3 โปรแกรม คือ CROPWAT 8.0, WAPF และ CWR-RID ในขณะที่ข้าวโพดใช้เพียงโปรแกรม 2 โปรแกรม คือ CROPWAT 8.0 และ CWR-RID เพราะ WAPF ไม่มีการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพด สำหรับข้าวนาสวน WAPF มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์มากที่สุด คือ 2,286.16 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โปรแกรม CROPWAT 8.0 มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ 1,638.79 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และ โปรแกรม CWR-RID มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ 1,391.92 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โดยปัจจัยที่ทำให้วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของแต่ละโปรแกรมมีค่าไม่เท่ากัน คือข้อมูลปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET_c) ข้อมูลปริมาณการใช้พืชอ้างอิง (ET_0) และปริมาณฝนใช้การ วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวโพด จากโปรแกรม CROPWAT 8.0 มีผลการคำนวณ คือ 826.56 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ในขณะที่ CWR-RID มี วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด เท่ากับ 1,097.09 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน (ตารางที่ 4.46)

ตารางที่ 4.46 ปริมาณความต้องการใช้น้ำจากวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนกับวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพดแต่ละโปรแกรม

โปรแกรม	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวนาสวน (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)				วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวโพด (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)			
	WF _{green}	WF _{blue}	WF _{gray}	WF _{total}	WF _{green}	WF _{blue}	WF _{gray}	WF _{total}
CROPWAT 8.0	1,470.33	167.67	0.79	1,638.79	767.75	57.75	1.06	826.56
WAPF	1,752.23	533.13	0.79	2,286.16	NA	NA	NA	NA
CWR-RID	1,269.20	121.93	0.79	1,391.92	991.13	104.90	1.06	1,097.09

หมายเหตุ NA คือ โปรแกรมไม่มีพืชข้าวโพดสำหรับประมวลผล

เมื่อทำการเปรียบเทียบวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวนาสวนกับงานวิจัยอื่นที่ศึกษาในประเทศไทย พบว่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่คำนวณด้วยโปรแกรม CWR-RID มีค่าน้อยที่สุด ในขณะที่โปรแกรม CROPWAT 8.0 และ WAPF อยู่ในเกณฑ์การวิจัย โดยมีหลายตัวปัจจัยที่ทำให้วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ต่างกัน เช่น ปัจจัยข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์พืช ปริมาณการใช้น้ำอ้างอิงของพืช ปริมาณการใช้น้ำของพืช พันธุ์ข้าว ระยะเวลาการเพาะปลูก และปริมาณฝนที่ใช้ในการคำนวณปริมาณฝนใช้การ (ตารางที่ 4.47)

ตารางที่ 4.47 แสดงวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวนาสวนกับงานวิจัยอื่น

งานวิจัย	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวนาสวน (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)
ผู้วิจัย	
- CROPWAT 8.0	1,638.79
- WAPF	2,286.16
- CWR-RID	1,391.92
Gheewala SH. <i>et al</i> (77)	1,485.00
Chapagain <i>et al</i> (78)	1,617.00
พรเทพ (79)	3,592.00

สำหรับวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวโพดโปรแกรม CROPWAT 8.0 มีค่าน้อยกว่างานวิจัยอื่น ในขณะที่วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่คำนวณโดยโปรแกรม CWR-RID อยู่ในเกณฑ์งานวิจัย อาจเนื่องมาจากวิธีการในการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่คิดเฉพาะวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวและวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา ไม่รวมวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน อีกทั้งข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์พืช ปริมาณการใช้น้ำอ้างอิงของพืช ปริมาณการใช้น้ำของพืช พันธุ์ข้าวโพด ระยะเวลาการเพาะปลูก ปริมาณฝนที่ใช้ในการคำนวณปริมาณฝนใช้การ และธาตุอาหารที่ก่อกมลพิษในการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.48)

ตารางที่ 4.48 แสดงวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวโพดกับงานวิจัยอื่น

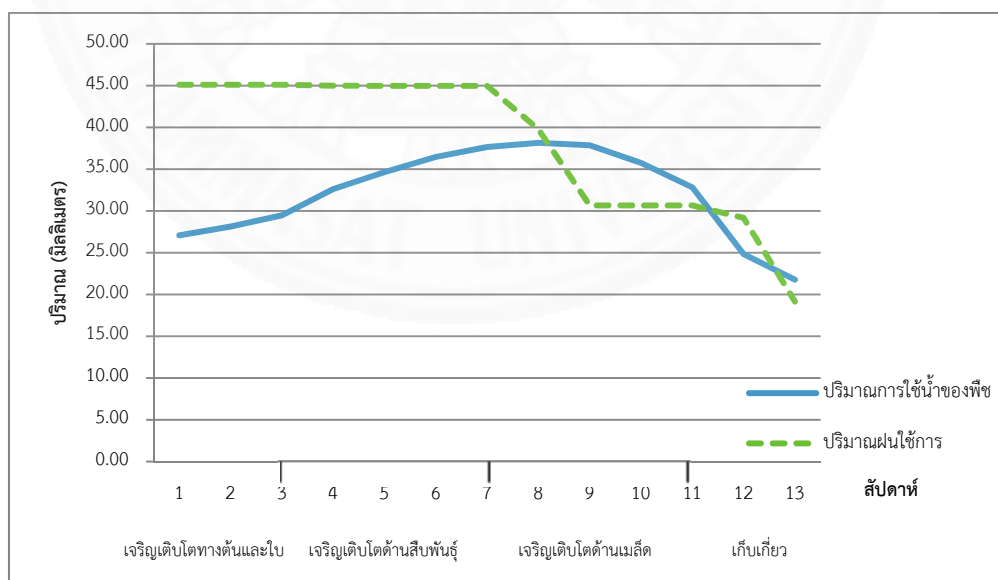
งานวิจัย	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวโพด (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)
ผู้วิจัย	
- CROPWAT 8.0	826.50
- CWR-RID	1,097.09
Gheewala SH. <i>et al</i> (77)	982.00
ทิพย์ปภา (74)	1,123

4.7.1 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวน

ผลการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนที่ประกอบด้วย วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา จากโปรแกรม CROPWAT 8.0 โปรแกรม WAPF และโปรแกรม CWR-RID ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการคำนวณโดยวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวและวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน คิดจากปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ค่าปริมาณการใช้น้ำของพืช และค่าสัมประสิทธิ์พืช ในการศึกษาครั้งนี้คิดจากสมการ Panman-Montieth ส่วนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาของข้าวนาสวนจากการศึกษาจะขึ้นอยู่กับมลพิษที่จะก่อให้เกิดปัญหาในแหล่งน้ำ ซึ่งก็คือ ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ที่เป็นส่วนผสมของปุ๋ยเคมีในการเกษตร และเป็นองค์ประกอบสำคัญในการเพาะปลูก ปริมาณที่ใส่ปุ๋ยและการดูดซึมไปใช้ของข้าวนาสวนมีผลต่อปริมาณการตกค้างในแหล่งน้ำ จากภาพที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าในระยะที่ 1 คือระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบปริมาณการใช้น้ำของพืชมีค่าต่ำกว่าปริมาณฝนใช้การ ดังนั้นปริมาณการใช้น้ำในระยะดังกล่าวเมื่อเทียบกับปริมาณฝนใช้การมีปริมาณน้ำสำหรับการเจริญเติบโตเพียงพอ เมื่อเข้าสู่ระยะที่ 2 คือระยะการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์ ปริมาณการใช้น้ำของพืชเริ่มสูงขึ้นในปลายระยะที่ 2 ซึ่งตรงกันข้ามกับปริมาณฝนใช้การที่มีปริมาณลดลง ดังนั้นในระยะการเจริญเติบโตดังกล่าวในช่วงท้ายจำเป็นต้องมีน้ำสำหรับชดเชยเพื่อการเจริญเติบโตของพืช โดยการกักเก็บน้ำส่วนเกินไว้ในแปลงนาโดยอาศัยภูมิปัญญาท้องถิ่นที่ทำคันนาสำหรับกักเก็บน้ำ และความชื้นในดิน จนถึงระยะที่ 3 คือระยะการเจริญเติบโตด้านเมล็ด ในระยะสุดท้ายคือระยะที่ 4 เป็นระยะการเก็บเกี่ยว ปริมาณการใช้น้ำของพืชยังต้องการอยู่แต่ปริมาณฝนใช้การเริ่มลดลง ดังนั้นในระยะดังกล่าว น้ำที่ถูกกักเก็บไว้ในแปลงนาในรูปของความชื้นที่อยู่ในดินพืชสามารถนำน้ำดังกล่าวมาชดเชยปริมาณฝนใช้การที่มีปริมาณน้อยกว่าปริมาณน้ำที่พืชต้องการ และในภาพที่ 4.2 ปริมาณของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนที่คำนวณด้วยโปรแกรม CROPWAT 8.0 ให้ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เท่ากับ 1,638.79 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โดยมีวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวเท่ากับ

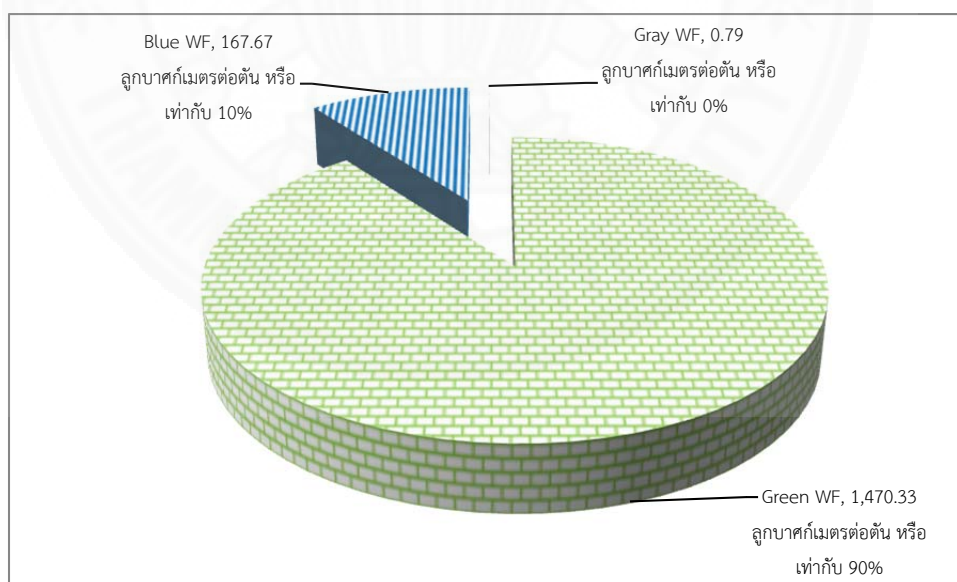
1,470.33 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน หรือ 95 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณวอเตอร์พุตพรีนที่ทั้งหมด วอเตอร์พุตพรีนที่สิ้นน้ำเงินเท่ากับ 167.67 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ส่วนวอเตอร์พุตพรีนที่สืเทาจากการคำนวณพบว่ามืค่าเท่ากับ 0.79 ลูกบาศก์เมตรต่อตันดังภาพที่ 4.1 ที่แสดงการเปรียบเทียบของปริมาณการใช้น้ำของข้าวนาสวนกับปริมาณฝนใช้การ และภาพที่ 4.2 แสดงสัดส่วนวอเตอร์พุตพรีนที่ของข้าวนาสวนจากโปรแกรม CROPWAT 8.0

จากผลการศึกษาวอเตอร์พุตพรีนที่ของข้าวนาสวนในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน ที่คำนวณจากโปรแกรม CWR-RID เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Mekonnen and Hoekstra (75) ที่มีค่าเฉลี่ยวอเตอร์พุตพรีนที่ของข้าวทั้ง 13 ประเทศในปี ค.ศ. 2000-2004 เท่ากับ 638 - 2874 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โดยประเทศที่มีค่าวอเตอร์พุตพรีนที่ของข้าวสูงสุด คือ ปากีสถาน และประเทศที่มีค่าวอเตอร์พุตพรีนที่ของข้าวน้อยที่สุด คือ เวียดนาม อาจเนื่องมาจากพันธุ์ข้าวที่จะส่งผลกระทบต่อปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง และปริมาณการใช้น้ำของพืช อีกปัจจัยคือ ปริมาณฝนใช้การในพื้นที่ และเปรียบเทียบกับผลการศึกษาวอเตอร์พุตพรีนที่ของข้าวหอมมะลิอินทรีย์ในพื้นที่จังหวัดสุรินทร์ ที่มีค่าวอเตอร์พุตพรีนที่เท่ากับ 2,897 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน (76) ดังนั้นจากผลการศึกษาพบว่าวอเตอร์พุตพรีนที่ของข้าวนาสวนในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน อยู่ในเกณฑ์ค่าเฉลี่ย เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาดังกล่าว



ภาพที่ 4.1 ปริมาณการใช้น้ำของข้าวนาสวนกับปริมาณฝนใช้การจากโปรแกรม CROPWAT 8.0

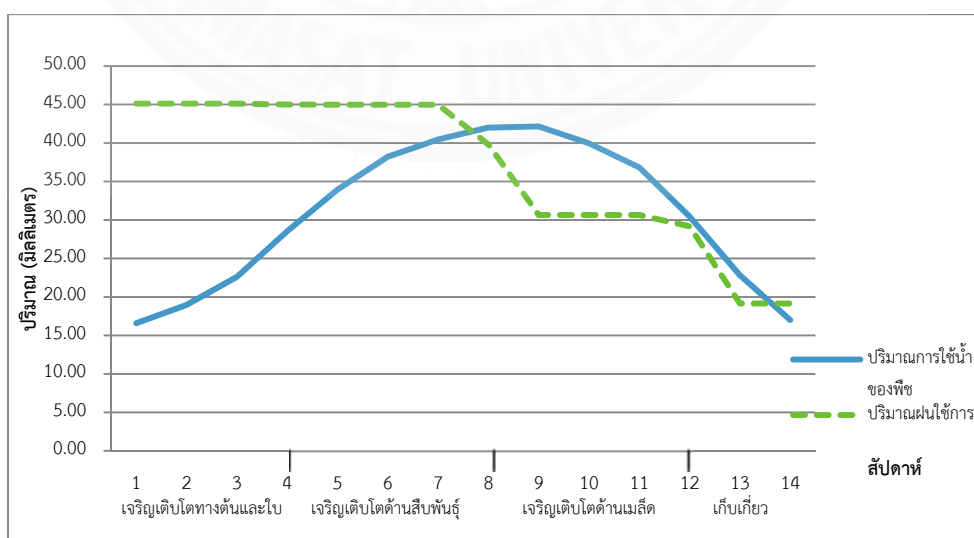
จากภาพที่ 4.1 ยังสามารถอธิบายถึงการเจริญเติบโตของข้าวนาสวนที่พิจารณาจากปริมาณการใช้น้ำของพืช กับปริมาณฝนใช้การ โดยปริมาณฝนใช้การในระยะเวลาเจริญเติบโตทางต้นและใบ รวมถึงระยะเจริญเติบโตด้านสืบพันธุ์ มีปริมาณมากกว่าปริมาณการใช้น้ำของพืช ซึ่งตรงกับความเป็นจริงในการทำนา เพราะในระยะดังกล่าว เกษตรกรจะมีการกักเก็บน้ำฝนที่ตกลงมาให้ขังในแปลงนา ซึ่งลักษณะโดยทั่วไปพื้นที่แปลงนามีคันดินล้อมรอบสำหรับการกักเก็บน้ำฝนที่ความสูงประมาณ 50 เซนติเมตรอยู่แล้ว วิธีการดังกล่าวเป็นภูมิปัญญาที่สั่งสมมาในการทำนาสำหรับพื้นที่ลุ่มและควรเก็บไว้ในดินในรูปของความชื้นในดินไว้ใช้ในตอนปลายฤดูฝนซึ่งฝนตกน้อยจะส่งผลให้ฝนใช้การลดลงแต่ข้าวนาสวนยังต้องการน้ำสำหรับการเจริญเติบโต ถ้าพิจารณาจากกราฟจะเห็นได้จากในระยะเวลาเจริญเติบโตด้านเมล็ด ปริมาณฝนใช้การเริ่มลดลงเนื่องจากปริมาณฝนที่ลดลง แต่ปริมาณการใช้น้ำของพืชยังคงสูงขึ้นและเริ่มลดลงจนถึงสัปดาห์ที่ 11 ในระยะดังกล่าวนี้เอง ข้าวนาสวนได้ใช้น้ำที่ขังในแปลงนาที่ได้กักเก็บไว้ตั้งแต่ระยะที่ 1 และ ระยะที่ 2 ที่มีปริมาณฝนใช้การมากกว่าปริมาณการใช้น้ำของพืช ถ้าขาดการขังน้ำในแปลงนาและความชื้นในดินอาจจะทำให้ผลผลิตข้าวนาสวนได้ในปริมาณที่ลดลง และอาจทำให้ต้นข้าวนาสวนตาย จากเหตุผลดังกล่าว อาจจะพิจารณาได้ว่า น้ำที่ขังในแปลงนาและความชื้นในดินเมื่อเปรียบเทียบกับวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ก็จะเป็นวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินอีกแหล่ง



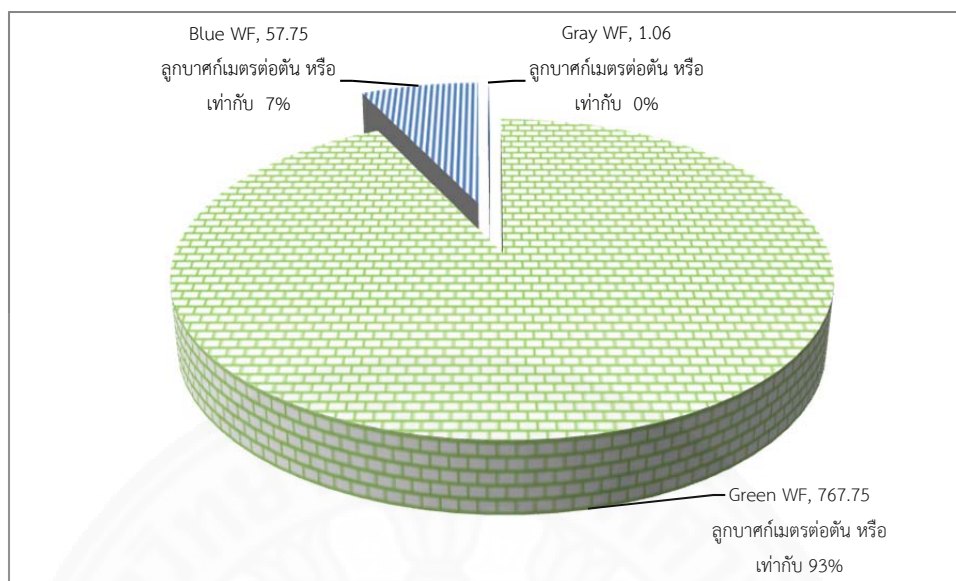
ภาพที่ 4.2 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวนาสวนโดยโปรแกรม CROPWAT 8.0

4.7.2 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด

ผลการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด จากโปรแกรม CROPWAT 8.0 และโปรแกรม CWR-RID โดยมีระยะในการปลูกข้าวโพดเท่ากันคือ 14 สัปดาห์ โปรแกรม CROPWAT 8.0 คำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวของข้าวโพด ได้เท่ากับ 767.75 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน โดยมีวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินเท่ากับ 57.75 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ส่วนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาจากการคำนวณพบว่ามีความเท่ากับ 1.06 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ในภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบปริมาณฝนใช้การกับปริมาณการใช้น้ำของพืชในแต่ละระยะการเจริญเติบโต สังเกตได้ว่าในระยะที่ 1 คือระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ มีปริมาณฝนใช้การที่มากพอสำหรับปริมาณการใช้น้ำของพืช ซึ่งปริมาณการใช้น้ำของพืชเริ่มสูงขึ้นจากระยะที่ 1 จนถึงระยะที่ 2 คือระยะการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์ และสูงสุดในระยะดังกล่าว ดังนั้นในช่วงที่มีปริมาณฝนใช้การมีปริมาณมากกว่าปริมาณน้ำที่พืชต้องการ จำเป็นต้องมีการเก็บน้ำส่วนเกินให้อยู่ในรูปของความชื้นในดินให้มากที่สุด ซึ่งจะทำให้โดยการเพิ่มอินทรีย์วัตถุให้กับดินโดยการไถกลบตอซังและลดการเผาตอซัง ในสัปดาห์ที่ 9-10 เมื่อเข้าสู่ระยะที่ 3 คือระยะด้านเมล็ดจะเห็นได้ว่าปริมาณการใช้น้ำของพืชมีปริมาณที่มากกว่าปริมาณฝนใช้การตั้งแต่สัปดาห์ที่ 6 ของระยะที่ 2 จนถึงระยะที่ 4 คือระยะเก็บเกี่ยวในสัปดาห์ที่ 14 ในระยะดังกล่าว พืชยังคงมีความต้องการน้ำสำหรับการเจริญเติบโตทางผลผลิต ดังนั้นพืชจะนำน้ำที่อยู่ในรูปความชื้นในดินที่ถูกเก็บไว้มาใช้ในระยะการเจริญเติบโตดังกล่าว สำหรับโปรแกรม CWR-RID พบว่าจำนวนเปอร์เซ็นต์ของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวมีค่าเท่ากับ 49 เปอร์เซ็นต์ หรือ 991.13 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน มีวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน 104.9 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ ฟุตพริ้นท์สีเทา 1.06 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.3 ปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพดกับปริมาณฝนใช้การจากโปรแกรม CROPWAT 8.0



ภาพที่ 4.4 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวโพดโดยโปรแกรม CROPWAT 8.0

จากการเปรียบเทียบปริมาณการใช้น้ำของพืชระหว่างข้าวนาสวนและข้าวโพด จะเห็นได้ว่าปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่กลางระยะที่ 1 คือระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ จนถึงระยะที่ 2 คือระยะการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์ ซึ่งต่างกับข้าวนาสวน ซึ่งจะค่อยๆ เพิ่ม และจะสูงขึ้นในระยะที่ 2 ในอัตราที่น้อยกว่าข้าวโพด แต่ทั้งข้าวนาสวนและข้าวโพดมีปริมาณการใช้น้ำของพืชเริ่มลดลงตั้งแต่สัปดาห์ที่ 9 หรือปลายระยะที่ 2 แต่ปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพดลดลงในอัตราที่มากกว่าข้าวนาสวนเมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4.1 และ ภาพที่ 4.3 ดังนั้นเพื่อเป็นการบริหารทรัพยากรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพในระยะที่ 1 ของข้าวนาสวนและข้าวโพด ควรมีการกักเก็บปริมาณน้ำฝนไว้ในปริมาณที่เพียงพอ (ขังไว้ในแปลงนา) และความชื้นในดินเพื่อการเจริญเติบโตและปริมาณการใช้น้ำในระยะที่ 3 และระยะที่ 4 โดยเฉพาะการเพาะปลูกข้าวโพด ซึ่งจะขาดแคลนน้ำมากในปลายระยะที่ 2 ถึงต้นระยะที่ 3 หรือช่วงสัปดาห์ที่ 8 ถึงสัปดาห์ที่ 12 ในส่วนปริมาณการใช้น้ำของข้าวนาสวนจะมีการขาดแคลนน้ำในสัปดาห์ที่ 8 ถึงสัปดาห์ที่ 11 หรือปลายระยะที่ 2 ถึงกลางระยะที่ 3 ซึ่งเป็นระยะที่สำคัญสำหรับการเจริญเติบโตทางด้านเมล็ด

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์

5.1.1.1 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวน

การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวน โดยใช้วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวร่วมกับวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา โดยคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชและปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม ด้วยโปรแกรม CROPWAT 8.0 ขององค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ จากระยะเวลาการเพาะปลูก 13 สัปดาห์ และโปรแกรม WAPF จากระยะเวลาการเพาะปลูก 14 สัปดาห์ และโปรแกรม CWR-RID ของกรมชลประทาน จากระยะเวลาการเพาะปลูก 13 สัปดาห์ ทำให้ทราบปริมาณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวน ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอดำรงวิทยารัษฎา จังหวัดน่าน โดยวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่คำนวณด้วยโปรแกรม CROPWAT 8.0 มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวของข้าวนาสวน เท่ากับ 1,470.33 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินของข้าวนาสวน เท่ากับ 167.67 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และมีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาของข้าวนาสวน เท่ากับ 0.79 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ดังนั้น ปริมาณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวน มีค่าเท่ากับ 1,638.79 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่คำนวณด้วยโปรแกรม WAPF มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวของข้าวนาสวน เท่ากับ 1,752.23 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินของข้าวนาสวน เท่ากับ 533.13 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และมีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาของข้าวนาสวน เท่ากับ 0.79 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ดังนั้น วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวน มีค่าเท่ากับ 2,286.16 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่คำนวณด้วยโปรแกรม CWR-RID มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวของข้าวนาสวน เท่ากับ 1,269.20 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินของข้าวนาสวน เท่ากับ 121.93 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และมีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาของข้าวนาสวน เท่ากับ 0.79 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ดังนั้น วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวน มีค่าเท่ากับ 1,391.92 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน

5.1.1.2 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด

ผลการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพดโดยใช้โปรแกรม CROPWAT 8.0 จากระยะเวลาการเพาะปลูก 14 สัปดาห์ กับโปรแกรม CWR-RID จากระยะเวลาการเพาะปลูก 14 สัปดาห์ซึ่งโปรแกรม WAPF ไม่มีการคำนวณสำหรับการเพาะปลูกข้าวโพด ทำให้ทราบปริมาณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน โดยวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่คำนวณด้วยโปรแกรม CROPWAT 8.0 มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวของข้าวโพด เท่ากับ 767.75 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินของข้าวโพด เท่ากับ 57.75 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และมีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาของข้าวโพด เท่ากับ 1.06 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ดังนั้น วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพด มีค่าเท่ากับ 826.56 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่คำนวณด้วยโปรแกรม CWR-RID มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวของข้าวโพดเท่ากับ 991.13 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินของข้าวโพด เท่ากับ 104.90 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และมีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทาของข้าวโพด เท่ากับ 1.06 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ดังนั้น ปริมาณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพดมีค่าเท่ากับ 1,097.09 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน

5.1.2 ปริมาณความต้องการใช้น้ำจากวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวนาสวนกับวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ข้าวโพด

5.1.2.1 ปริมาณการใช้น้ำของข้าวนาสวน

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวนาสวนจำเป็นต้องรู้ปริมาณการใช้น้ำเบื้องต้น ดังนี้ ปริมาณการใช้น้ำของพืชมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 2.88–6.55 มิลลิเมตรต่อสัปดาห์ ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 3.52–7.27 มิลลิเมตรต่อสัปดาห์ ค่าสัมประสิทธิ์พืชมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.69–1.48 โดยมีวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว 1,470.33 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน 167.67 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา 0.79 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน

5.1.2.2 ปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพด

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพดจำเป็นต้องรู้ปริมาณการใช้น้ำเบื้องต้น ดังนี้ ปริมาณการใช้น้ำของพืชมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.22–1.54 มิลลิเมตรต่อสัปดาห์ ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.44–1.14 มิลลิเมตรต่อสัปดาห์ ค่าสัมประสิทธิ์พืชมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.63–1.63 โดยมีวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว 767.75 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน 57.75 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา 1.06 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน

5.1.3 คุณภาพน้ำทางด้านกายภาพและเคมี

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางด้านกายภาพและเคมีของน้ำตัวอย่าง ในแหล่งน้ำของพื้นที่ปลูกข้าวนาสวนและข้าวโพด กลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน จำนวน 4 ครั้งตามระยะการเจริญเติบโตของพืช ดังนี้

5.1.3.1 สถานีอ้างอิง (สถานีที่ RS00)

คุณภาพน้ำทางด้านกายภาพและเคมีของสถานีอ้างอิง (สถานีที่ RS00) ทั้ง 4 ครั้ง ในพื้นที่กลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน เก็บตัวอย่างระหว่างเดือน กรกฎาคม – พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 พบว่า อุณหภูมิมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 25.90-29.37 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด-เบสมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 6.55-8.35 การนำไฟฟ้ามีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 151.40-189.73 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ออกซิเจนละลายน้ำมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 7.19-7.55 มิลลิกรัมต่อลิตร แอมโมเนีย-ไนโตรเจนมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.49-0.84 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนเตรท-ไนโตรเจนมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.06-0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.53-0.89 มิลลิกรัมต่อลิตร

5.1.3.2 ระยะที่ 1 ระยะการเจริญเติบโตทางต้นและใบ ช่วงเวลา 0-35 วันของการปลูกข้าวนาสวน, ช่วงเวลา 0-39 วันของการปลูกข้าวโพด

(1) ข้าวนาสวน

คุณภาพน้ำทางด้านกายภาพและเคมีของการปลูกข้าวนาสวน ในพื้นที่กลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน เก็บตัวอย่างระหว่างเดือน กรกฎาคม – พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 พบว่า อุณหภูมิมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 27.73-31.87 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด-เบสมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 6.98-7.22 การนำไฟฟ้ามีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 120.54-192.33 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ออกซิเจนละลายน้ำมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 8.28-9.88 มิลลิกรัมต่อลิตร แอมโมเนีย-ไนโตรเจนมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 8.00-16.61 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนเตรท-ไนโตรเจนมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.04-0.29 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 10.34-10.89 มิลลิกรัมต่อลิตร

(2) ข้าวโพด

คุณภาพน้ำทางด้านกายภาพและเคมีของการปลูกข้าวโพด ในพื้นที่กลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน เก็บตัวอย่างระหว่างเดือน กรกฎาคม – พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 พบว่า อุณหภูมิมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 27.73-27.83 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด-เบสมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 7.04-7.43 การนำไฟฟ้ามีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 193.33-194.63 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ออกซิเจนละลายน้ำมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 6.88-6.95 มิลลิกรัมต่อลิตร แอมโมเนีย-ไนโตรเจนมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 12.06-14.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนเตรท-ไนโตรเจนมีค่าพิสัย

อยู่ในช่วง 0.02–0.30 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 10.89–10.92 มิลลิกรัมต่อลิตร

5.1.3.3 ระยะที่ 2 ระยะการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์ ช่วงเวลา 36-57 วันของการปลูกข้าวนาสวน, ช่วงเวลา 40-60 วันของการปลูกข้าวโพด

(1) ข้าวนาสวน

คุณภาพน้ำทางด้านกายภาพและเคมีของการปลูกข้าวนาสวน ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน เก็บตัวอย่างระหว่างเดือน กรกฎาคม – พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 พบว่า อุณหภูมิมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 29.23–36.03 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด-เบสมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 7.13–8.64 การนำไฟฟ้ามีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 119.57–126.77 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ออกซิเจนละลายน้ำมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 6.72–10.07 มิลลิกรัมต่อลิตร แอมโมเนีย-ไนโตรเจนมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 5.47–10.92 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนเตรท-ไนโตรเจนมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.03–0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 10.88–10.92 มิลลิกรัมต่อลิตร

(2) ข้าวโพด

คุณภาพน้ำทางด้านกายภาพและเคมีของการปลูกข้าวโพด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน เก็บตัวอย่างระหว่างเดือน กรกฎาคม – พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 พบว่า อุณหภูมิมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 27.00–27.47 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด-เบสมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 7.33–7.40 การนำไฟฟ้ามีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 123.03–143.87 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ออกซิเจนละลายน้ำมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 7.33–7.37 มิลลิกรัมต่อลิตร แอมโมเนีย-ไนโตรเจนมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 9.19–10.80 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนเตรท-ไนโตรเจนมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.09–0.17 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 10.89–10.96 มิลลิกรัมต่อลิตร

5.1.3.4 ระยะที่ 3 การเจริญเติบโตด้านเมล็ด ช่วงเวลา 58-93 วันของการปลูกข้าวนาสวน, ช่วงเวลา 61-105 วันของการปลูกข้าวโพด

(1) ข้าวนาสวน

คุณภาพน้ำทางด้านกายภาพและเคมีของการปลูกข้าวนาสวน ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน เก็บตัวอย่างระหว่างเดือน กรกฎาคม – พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 พบว่า อุณหภูมิมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 27.87–28.30 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด-เบสมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 8.06–9.54 การนำไฟฟ้ามีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 160.73–184.00 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ออกซิเจนละลายน้ำมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 7.09–9.47 มิลลิกรัมต่อลิตร แอมโมเนีย-ไนโตรเจนมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 4.57–7.30 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนเตรท-ไนโตรเจนมีค่าพิสัยอยู่

ในช่วง 0.04–0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 10.33–10.45 มิลลิกรัมต่อลิตร

(2) ข้าวโพด

คุณภาพน้ำทางด้านกายภาพและเคมีของการปลูกข้าวโพด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน เก็บตัวอย่างระหว่างเดือน กรกฎาคม – พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 พบว่า อุณหภูมิมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 27.53–28.77 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด-เบสมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 8.99–9.51 การนำไฟฟ้ามีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 188.23–191.67 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ออกซิเจนละลายน้ำมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 7.27–7.99 มิลลิกรัมต่อลิตร แอมโมเนีย-ไนโตรเจนมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 9.02–10.32 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนเตรท-ไนโตรเจนมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.03–0.09 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 10.45–10.83 มิลลิกรัมต่อลิตร

5.1.3.5 ระยะที่ 4 ระยะการเก็บเกี่ยว ช่วงเวลา 94–120 วันของการปลูกข้าวนาสวน, ช่วงเวลา 106–115 วันของการปลูกข้าวโพด

(1) ข้าวนาสวน

คุณภาพน้ำทางด้านกายภาพและเคมีของการปลูกข้าวนาสวน ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน เก็บตัวอย่างระหว่างเดือน กรกฎาคม – พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 พบว่า อุณหภูมิไม่สามารถตรวจวัดได้ ความเป็นกรด-เบส ไม่สามารถตรวจวัดได้ การนำไฟฟ้าไม่สามารถตรวจวัดได้ ออกซิเจนละลายน้ำไม่สามารถตรวจวัดได้ แอมโมเนีย-ไนโตรเจนไม่สามารถตรวจวัดได้ ไนเตรท-ไนโตรเจนไม่สามารถตรวจวัดได้ ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสไม่สามารถตรวจวัดได้ เนื่องจากไม่มีปริมาณน้ำในพื้นที่เก็บตัวอย่าง

(2) ข้าวโพด

คุณภาพน้ำทางด้านกายภาพและเคมีของการปลูกข้าวโพด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน เก็บตัวอย่างระหว่างเดือน กรกฎาคม – พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 พบว่า อุณหภูมิมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 27.86–29.30 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด-เบสมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 8.01–9.99 การนำไฟฟ้ามีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 190.83–199.03 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ออกซิเจนละลายน้ำมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 7.45–7.98 มิลลิกรัมต่อลิตร แอมโมเนีย-ไนโตรเจนมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.12–0.59 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนเตรท-ไนโตรเจนมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.05–0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.11–0.31 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลการศึกษาการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีทั้ง 4 ระยะของ ข้าวนาสวนและข้าวโพด ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน สามารถนำมาเป็นข้อมูลสำหรับการคำนวณหาอัตราการพุทพรีนที่สีเทา โดยพิจารณาได้จากปุ๋ยเคมีที่อยู่ในรูปของ แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนเตรท-ไนโตรเจน และฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากการศึกษาจะรู้ปริมาณการใช้น้ำของพืช ปริมาณฝนใช้การและปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม แต่ระยะการเจริญเติบโต สำหรับการปลูกข้าวนาสวน สัปดาห์ที่ 1 ถึง สัปดาห์ที่ 8 มีค่าเฉลี่ยปริมาณฝนใช้การสูงกว่าค่าเฉลี่ยปริมาณการใช้น้ำของพืช 99.29 มิลลิเมตร ขณะที่สัปดาห์ที่ 8 ถึง สัปดาห์ที่ 12 ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณฝนใช้การน้อยกว่าปริมาณน้ำที่พืชต้องการ (วอเตอร์พุทพรีนที่สีน้ำเงิน) ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำที่พืชต้องการเพิ่ม 97.83 มิลลิเมตร สำหรับการปลูกข้าวโพด ตั้งแต่ในสัปดาห์ที่ 1 ถึง สัปดาห์ที่ 7 มีค่าเฉลี่ยปริมาณฝนใช้การสูงกว่าค่าเฉลี่ยปริมาณการใช้น้ำของพืช 143.00 มิลลิเมตร หลังจากนั้นปริมาณฝนใช้การจะลดน้อยกว่าปริมาณน้ำที่พืชต้องการ (วอเตอร์พุทพรีนที่สีน้ำเงิน) ในสัปดาห์ที่ 8 ถึง สัปดาห์ที่ 13 แต่พืชต้องการน้ำเพิ่มเฉลี่ย 30.68 มิลลิเมตร ดังนั้นต้องมีการเก็บน้ำไว้ในดินให้อยู่ในรูปของความชื้นซึ่งมีหลายวิธีตั้งแต่ก่อนการเพาะปลูก เช่น ลดการเผาตอซัง โดยใช้วิธีการไถกลบตอซัง 15 วันก่อนการเพาะปลูกเพื่อเป็นการเพิ่มอินทรีย์วัตถุให้กับดิน วิธีดังกล่าวเกษตรกรปลูกข้าวและข้าวโพดสามารถนำไปใช้ได้ก่อนการเพาะปลูก

5.2.2 ผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในแหล่งน้ำตัวอย่าง ของการปลูกข้าวนาสวนและข้าวโพด พบว่าคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีของพื้นที่ปลูกข้าวนาสวนและข้าวโพด ปริมาณฟอสเฟต-ฟอสฟอรัสจะสูงในระยะที่ 2 คือระยะการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์ เช่นกัน ดังนั้น เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนการใส่ปุ๋ย เกษตรกรควรปรับเปลี่ยนวิธีการใส่ปุ๋ย เพื่อเป็นการใช้ปุ๋ยอย่างมีประสิทธิภาพและลดมลภาวะทางน้ำที่เกิดจากการใช้ปุ๋ย

5.2.3 โปรแกรม CROPWAT 8.0 เป็นโปรแกรมที่คำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของพืชที่มีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนข้อมูลนำเข้าที่เป็นปัจจัยการประมวลผล แต่ผู้ใช้ควรใช้ข้อมูลที่เป็นปัจจุบันและกำหนดปัจจัยการคำนวณให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น การกำหนดวิธีการคำนวณปริมาณฝนใช้การ (P_{eff}) เป็นต้น

รายการอ้างอิง

1. สถานการณ์การผลิตและการตลาดข้าวของโลก ปีการผลิต 2555/2556 ณ เดือนกันยายน 2555 [อินเทอร์เน็ต], กรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์; [สืบค้นเมื่อวันที่ 1 ธันวาคม 2558]. จาก http://www.ricethailand.go.th/home/images/rice_situation/Sep12.pdf
2. ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ สถานการณ์การผลิต และการตลาดข้าวโพดเลี้ยงสัตว์โลก [อินเทอร์เน็ต], กองแผนงาน กรมส่งเสริมการเกษตร; 2556. [สืบค้นเมื่อวันที่ 29 พฤศจิกายน 2558]. จาก <http://www.plan.doe.go.th/project/planhome.asp>
3. ศูนย์วิจัยข้าวแพร่ สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.การจัดการเขตศักยภาพการผลิตข้าว จังหวัดน่าน; 2551.
4. ข้อมูลพืชเศรษฐกิจจังหวัดน่าน [อินเทอร์เน็ต], น่าน: สำนักงานเกษตรจังหวัดน่าน; 2554. [สืบค้นเมื่อวันที่ 10 กรกฎาคม 2556]. จาก: <http://www.nan.doe.go.th>
5. ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ [อินเทอร์เน็ต], กลุ่มสื่อส่งเสริมการเกษตร สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี กรมส่งเสริมการเกษตร; 2553. [สืบค้นเมื่อวันที่ 18 พฤศจิกายน 2558]. จาก <http://agrimedia.agritech.doe.go.th/book/book-rice/RB%20037.pdf>
6. Product water footprint [internet], Product gallery Water footprint [สืบค้นเมื่อวันที่ 1 ธันวาคม 2558]. จาก <http://waterfootprint.org/en/resources/interactive-tools/product-gallery/>
7. ขวเลิศ นวลโคกสูง, กิตตินันท์ วรอนวัฒนากุล, พันธ์ ขำเกลี้ยง, จันทรเรือง พลายละมูล. แผนการใช้ที่ดินลุ่มน้ำสาขา แม่น้ำน่านตอนบน ห้วยน้ำยาว(1) แม่น้ำน่านส่วนที่ 2 น้ำยาว(2) น้ำสมุน แม่น้ำน่านส่วนที่ 3 น้ำเสา น้ำว่า น้ำแหง แม่น้ำน่านส่วนที่ 4 น้ำปาด น้ำตรอน แม่น้ำแควน้อย น้ำภาค แม่น้ำวังทอง และแม่น้ำน่านตอนล่าง. [กรุงเทพฯ]: ส่วนวางแผนการใช้ที่ดิน 1 สำนักสำรวจดิน และวางแผนการใช้ที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์; 2546.
8. Hoekstra AY., Chapagain AK., Aldaya MM., Mekonnen MM. The Water footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard. Earthscan London.Washington, DC. 2011
9. Chapagain AK., Hoekstra AY., Savenije HG., Gautam R. 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. 2006; (60):186–203.

10. ปัญหาน้ำ-ปัญหาโลก: Water Footprint2 [อินเทอร์เน็ต]: อังคณา สุวรรณภูมิ กองบรรณาธิการจดหมายข่าวผลิใบ กรมวิชาการเกษตร; 2554. [สืบค้นเมื่อวันที่ 21 กันยายน 2556]. จาก: http://carbonfootprintthailand.blogspot.com/2011_07_01_archive.html
11. Water Footprint : รอยย่ำของน้ำ [อินเทอร์เน็ต]: อังคณา สุวรรณภูมิ กองบรรณาธิการจดหมายข่าวผลิใบ กรมวิชาการเกษตร; 2554. [สืบค้นเมื่อวันที่ 21 กันยายน 2556]. จาก: <https://sites.google.com/site/icgreensave/home/waterfootprint>
12. Water Footprint [อินเทอร์เน็ต]: สำนักงานที่ปรึกษาการเกษตรต่างประเทศ ประจำสหภาพยุโรป สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร; 2556. [สืบค้นเมื่อวันที่ 21 กันยายน 2556]. จาก : www.oae.go.th/download/climate_change/water_footprint.pdf
13. ชินาธิปกรณ พงศ์ภิญโญภาพ, อารังรัตน์ มุ่งเจริญ. วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของกระบวนการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังในประเทศไทย. วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ม.ค.-มี.ค. 2554;24(70).
14. กิรติ ลีวัจนกุล. อุทกวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 3. [ปทุมธานี]: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรังสิต; 2552.
15. ชีระพล ตั้งสมบุญ. เอกสารประกอบการบรรยายหลักสูตรการปรับปรุงระบบการจัดการน้ำด้านเกษตรชลประทาน เรื่องการใช้น้ำของพืช. กลุ่มงานวิจัยการใช้น้ำชลประทาน ส่วนการใช้น้ำชลประทาน สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ; 2549.
16. Allen RG, Pruitt WO, Wright JL, Howell TA, Ventura F, Snyder R, et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. Agricultural water management. 2006 April-22-2005; (81):1-22.
17. กรมชลประทาน. คู่มือการบริหารจัดการน้ำ: เล่มที่ 7/16 คู่มือการคำนวณการใช้น้ำของพืช (Consumptive Use หรือ Evapotranspiration). [กรุงเทพฯ]: กรม; 2554.
18. เกษม จันทร์แก้ว. หลักการจัดการลุ่มน้ำ. [กรุงเทพฯ]: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2551.
19. Fao.org.: FAO water: Software CROPWAT 8.0 [internet]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2015 [cited 2017 Dec 1]. Available from: http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html
20. Fao.org.: FAO water: Climate 2.0 for CROPWAT [internet]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2015 [cited 2017 Dec 1]. Available from: http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_climwat.html

21. Allen RG., Pereira LS., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy; 1988.
22. CROPWAT 8.0. Electronic Publishing Policy and Support Branch, Information Division, FAO; 2009.
23. ส่วนการใช้น้ำชลประทาน. โปรแกรม WAPF โปรแกรม CWR-RID [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา กรมชลประทาน; [สืบค้นเมื่อวันที่ 3 ก.ย. 2557]. จาก: http://water.rid.go.th/hwm/cropwater/iwmd/index_th.htm
24. สุรจิต ภูภักดี. เอกสารประกอบการสอนส่วนปฏิบัติการ วิชา 1201469 ระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการให้น้ำชลประทานในระบบฟาร์มเกษตรกร CropWat for Windows Version 4.2. ภาควิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, [อุบลราชธานี]; 2549
25. พื้นที่เกษตรจังหวัดน่าน [อินเทอร์เน็ต], น่าน: สำนักงานเกษตรจังหวัดน่าน; 2555. [สืบค้นเมื่อวันที่ 10 กรกฎาคม 2556]. จาก: <http://www.nan.doe.go.th>
26. กลุ่มวิจัยและพัฒนาการบรรเทาภาวะโลกร้อน; ข้อมูลขอบเขตการปกครอง อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน [ซีดีรอม]. [กรุงเทพฯ]: กรมพัฒนาที่ดิน, สำนักวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน;; 2555.
27. สำนักวิจัยพัฒนาและอุทกวิทยา. ขอบเขตลุ่มน้ำ [ซีดีรอม]. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรมทรัพยากรน้ำ; 2555.
28. พระมนตรี ศาลใจ. อิทธิพลของการปลูกข้าวโพดแบบต่างๆ ต่อสมบัติและการชะล้างพังทลายของดิน อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต]. [ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2553.
29. กรมอุตุนิยมวิทยา. ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน [ซีดีรอม]. [สมุทรปราการ]: กรมอุตุนิยมวิทยา, สำนักพัฒนาอุตุนิยมวิทยา, กลุ่มภูมิอากาศ, งานบริการข้อมูล; 2556.
30. อุดม พนมเรืองศักดิ์, แผนการใช้ที่ดินลุ่มน้ำหลัก: ลุ่มน้ำแม่น้ำน่าน. [กรุงเทพฯ]: ส่วนวางแผนการใช้ที่ดิน 1 สำนักสำรวจดินและวางแผนการใช้ที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์; 2541.
31. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต, แหล่งน้ำและปัญหาหาลพิษ. พิมพ์ครั้งที่8. [กรุงเทพฯ]: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543.
32. สมเจตน์ แจ้งโพธิ์. นิเวศวิทยา. [ลพบุรี]: ศูนย์การพิมพ์วิทยาลัยครูเทพสตรี. 2525.

33. พันธูชา สืบวงศ์. ดัชนีคุณภาพน้ำ (WQI) ที่ระบายจากนาข้าว: กรณีศึกษา โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาคลองเพรียว-เสาไห้ จังหวัดสระบุรีและจังหวัดพระนครศรีอยุธยา [วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต]. [ปทุมธานี]: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2552.
34. กรรณิการ์ สิริสิงห์. เคมีของน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 2. [กรุงเทพฯ]: บริษัท ประยูรวงศ์ จำกัด; 2525.
35. สำนักงานปลัดกระทรวง กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 6 นนทบุรี. [นนทบุรี]: สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 6 นนทบุรี; 2553.
36. มหาวิทยาลัยมหิดล. นิเวศวิทยาและสิ่งแวดล้อม. [นครปฐม]; 2554.
37. นิคม ละอองศิริวงศ์, คมนัน ศิลปาจารย์ และลักขณา ละอองศิริวงศ์. แอมโมเนียกับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. [กรุงเทพฯ]: สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง สำนักวิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่ง; 2555.
38. ไมตรี ดวงสวัสดิ์, จารุวรรณ สมศิริ. คุณสมบัติของน้ำและวิธีการวิเคราะห์สำหรับการวิจัยทางการประมง. [กรุงเทพฯ]: สถาบันประมงน้ำจืดแห่งชาติ กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์; 2528.
39. ศูนย์วิจัยข้าวแพร่ สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. การจัดการเขตศักยภาพการผลิตข้าว จังหวัดน่าน; 2551.
40. ผลิใบ. พันธุ์พืชขึ้นทะเบียนและพันธุ์พืชรับรอง. จดหมายข่าวผลิใบ. ต.ค. 2545;5(9):7.
41. ปริมาณการใช้น้ำของข้าว [อินเทอร์เน็ต], กรุงเทพฯ: กรมชลประทาน; 2557. [สืบค้นเมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2557]. จาก: http://www.rid.go.th/attach_branch/qrice.html
42. พันธุ์ข้าวไทย [อินเทอร์เน็ต], ชลบุรี: สาขาสารสนเทศศึกษา คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา; 2554. [สืบค้นเมื่อวันที่ 27 สิงหาคม 2556]. จาก: <http://thairicebuu.wordpress.com/>
43. ประพาส วีระแพทย์. ความรู้เรื่องข้าว. [กรุงเทพฯ]: สำนักตัดพันธุ์ด้านเทคโนโลยีข้าว กองการข้าว กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2553.
44. องค์ความรู้เรื่องข้าว (Rice Knowledge Bank) [อินเทอร์เน็ต], กรุงเทพฯ: สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว; 2553. [สืบค้นเมื่อวันที่ 1 กันยายน 2556]. จาก: <http://www.brrd.in.th/rkb/management/index.php-file=content.php&id=1.htm>
45. กรมพัฒนาที่ดิน. วิเคราะห์คุณภาพที่ดินตามปัจจัยคุณภาพที่ดินตามความต้องการของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ 13 ปัจจัย ตามหลักการของ FAO. [กรุงเทพฯ]: กรมพัฒนาที่ดิน; 2554.
46. สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. ภาพอนาคตและนโยบายการเกษตรจังหวัดน่าน. [นนทบุรี]; 2011.

47. ปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ [อินเทอร์เน็ต], กรุงเทพฯ: กรมชลประทาน; 2557. [สืบค้นเมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2557]. จาก: http://www.rid.go.th/attach_branch/qcorn.html
48. ระยะเวลาเจริญเติบโตและการพัฒนาข้าวโพด [อินเทอร์เน็ต]: วชิรินทร์ ชื่นสุวรรณ; 2543. [สืบค้นเมื่อวันที่ 27 ตุลาคม 2556]. จาก: http://www.baanjommyut.com/library_3/extension-2/corn/01.html
49. ณรงค์ศักดิ์ เสนาณรงค์. เอกสารวิชาการ การปลูกพืชไร่ สถาบันวิจัยพืชไร่ กรมวิชาการ เกษตร. [กรุงเทพฯ]: โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว กรุงเทพฯ; 2540.
50. สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี กรมส่งเสริมการเกษตร, กลุ่มส่งเสริมการเกษตร. ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์. [กรุงเทพฯ]: ฝ่ายโรงพิมพ์ สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี กรมส่งเสริมการเกษตร; 2553.
51. ทิพย์ปภา สุขุมลชาติ, อติชัย พรพรมหมินทร์ และสุรัชย์ ลิปิวัฒนาการ. วอเตอร์ฟุตพริ้นของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทย. *KKU ENGINEERING JOURNAL*. 2013; 40 (1):67-68.
52. นิมนานรดี เกตุเดชา. การประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ผลิตภัณฑ์ไม้ยางพาราแปรรูป: กรณีศึกษา : จังหวัดนครศรีธรรมราชและจังหวัดจันทบุรี. [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ]. [ปทุมธานี]. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2556.
53. Aldaya MM., Allan JA., Hoekstra AY. Strategic importance of green water in international crop trade. *Ecological Economics*. 2010; (69): 887–894.
54. Aldaya MM., Garrido A., Llamas MR., Ortega CV., Novo P., Casado RR. Water footprint and virtual water trade in Spain. A. Garrido and M.R. Llamas (eds.), *Water policy in Spain*, CRC Press, Leiden, The Netherlands. 2010:49-59.
55. Aldaya MM., Hoekstra AY. The water needed for Italians to eat pasta and pizza. *Agricultural Systems*. 2010; (103):351–360.
56. Bulsink F., Hoekstra AY., Booij MJ. The water footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crop products. *Hydrol. Earth Syst. Sci*. 2010; (14):119–128.
57. Chapagain AK., Hoekstra AY., Savenije HG. Water saving through international trade of agricultural products. *Hydrol. Earth Syst. Sci*. 2006; (10):455–468.
58. Chapagain AK., Orr S. An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources: a case of Spanish tomatoes. *Journal of Environmental Management*. 2009; (90):1219-1228.

59. Bocchiola D., Nana E., Soncin A. Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy. *Agricultural Water Management*. 2013; (116):50–61.
60. Mekonnen MM., Hoekstra AY. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011; (15):1577–1600.
61. Romaguera M., Hoekstra AY., Su Z., Krol MS., Salama MS. Potential of Using Reomet Sensing Techniques for Global Assessment of Water Footprint of Crops. *Remote Sens.* 2010; (2):1177-1196.
62. Babel MS., Shrestha B., Perret SR. Hydrological impact of biofuel production: A case study of the Khlong Phlo Watershed in Thailand. *Agricultural Water Management*. 2011; (101):8-26.
63. Zeng Z., Liu J., Koenenman PH., Zarate E., Hoekstra AY. Assessing water footprint at river basin level: a case study for Heihe River Basin in northwest China. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012; (16):2771-2781, 2012.
64. มานพ พรหมดี, อติชัย พรพรหมินทร์, สุรัชย์ ลิปิวัฒนาการ. วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวหอมมะลิอินทรีย์ในพื้นที่จังหวัดสุรินทร์. 9th THAICID National symposium; 2014 June 1-2; Nontaburi, Thailand
65. ณรงค์ศักดิ์ ชัยคงสถิตย์, อติชัย พรพรหมินทร์, สุรัชย์ ลิปิวัฒนาการ. วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการปลูกข้าวแบบนาเปียกสลับแห้ง. 9th THAICID National symposium; 2014 June 1-2; Nontaburi, Thailand
66. Gheewala SH., Silatertruksa T., Nilsalab P., Mungkung R., Perret SR., Chaiyawannakarn N. Water footprint and impact of water consumption for food, feed, fuel crops production in Thailand. *Water*. 2014; (6): 1698-1718, 2014.
67. Marano RP., Filippi RA. Water footprint in paddy rice systems. Its determination in the provinces of Santa Fe and Entre Rico, Argentina. *Ecological Indicators*. 2015; (56): 229-236. 2015.
68. Shrestha S., Pandey VP. Green blue and grey water footprint of primary crops production in Nepal. *Water Resource Management*. 2013; (27): 5223-5243. 2013.
69. Sun SK., Wu PT., Wang YB., Zhao XN. Temporal variability of water footprint for maize production the case of Beijing from 1978 to 2008. *Water Resource Management*. 2013; (27): 2447-2463. 2013.

70. Yoo SH., Choi JY., Lee SH., Kim T. Estimating water footprint of paddy rice in Korea. Paddy Water Environment. 2014; (12): 43-54. 2014.
71. American Public Association, American Water Works Association and Water Environment Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water. [United States of American]: American Public Health Association inc.: 2005.
72. กรมควบคุมมลพิษ. คู่มือติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมอย่างง่าย. [กรุงเทพมหานคร]: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม; 2547.
73. Ayers RS., Westcot DW. WATER QUALITY FOR ARGICULTURE. FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 29 Rev.1. FAO Corporate Document Repository. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 1985
74. ทิพย์ภา สุขุมลชาติ. วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของพืชไร่เศรษฐกิจในประเทศไทย กรณีศึกษา วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ]. [กรุงเทพมหานคร]: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2555.
75. Mekonnen MM., Hoekstra AY., 2010. The green, blue and gray water footprint of crop and derive crop product. UNESCO-IHE Institute for Water Education, the Netherlands.
76. มาณพ พรหมดี, อติชัย พรพรหมินทร์ และสุรัชย์ สิริวัฒนาการ. วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวหอมมะลิอินทรีย์ในพื้นที่จังหวัดสุรินทร์. บทความวิชาการ ด้านการชลประทานและการระบายน้ำ 9th THAICID NATIONAL SYMPOSIUM: กรมชลประทาน 2557; 1-15.
77. Gheewala SH., Silalertruksa T., Nilsalab P., Mungkung R., Perret SR, Chaiwawannakarn N. Water footprint and impact of water consumption for food, feed, fuel crops production in Thailand. 2014 June; 6: 1698-1718.
78. Chapapain AK., Hoekstra AY. The green blue and gray water footprint of rice from both a production and consumption perspective. Value of water research report series 2010; (40), UNESCO-IHE, Delft, Netherlands,
79. พรเทพ แก้วเชื้อ. การพัฒนารอยเท้าน้ำ (water footprint) ในประเทศไทย. วิศวกรรมลาดกระบัง 2556;30(2):13-18.
80. ไทย.กฎหมาย, พระราชบัญญัติ ฯลฯ. พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ.2535: คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ; 2535.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
การเก็บข้อมูลภาคสนาม

1. การเก็บข้อมูลในภาคสนามครั้งที่ 1

การจัดเก็บข้อมูลภาคสนามครั้งที่ 1 (ระยะที่ 1 ระยะการเจริญเติบโตทางต้นและใบ ช่วงเวลา 0-35 วันของการเพาะปลูกข้าวนาสวน, ช่วงเวลา 0-39 วันของการเพาะปลูกข้าวโพด) จัดเก็บในวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2556 ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยห้วยน้ำยาว 1 ตอนล่าง อำเภอดำรงวิทยารัษฎา จังหวัดน่าน ดังนี้

1.1 อุณหภูมิ (temperature)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	27.73	-
R02 (นา R02)	30.90	-
R03 (นา R03)	31.87	-
R04 (นา R04)	30.73	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	27.73
M06 (บ้านนาเตา)	-	27.77
M07 (สะพานใหม่)	-	27.83

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแหวน 1) อุณหภูมิ 26.83 องศาเซลเซียส

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

1.2 ความเป็นกรด-เบส (pH)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ความเป็นกรด - เบส (pH)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา -R01)	7.18	-
R02 (นา R02)	7.06	-
R03 (นา R03)	6.98	-
R04 (นา R04)	7.22	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	7.09
M06 (บ้านนาเตา)	-	7.04
M07 (สะพานใหม่)	-	7.43

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแห่น 1) ความเป็นกรด - เบส (pH) 6.55

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

1.3 ค่าการนำไฟฟ้า (conductivity)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	192.33	-
R02 (นา R02)	120.54	-
R03 (นา R03)	129.99	-
R04 (นา R04)	120.76	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	193.33
M06 (บ้านนาเตา)	-	194.50
M07 (สะพานใหม่)	-	194.63

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแห่น 1) ค่าการนำไฟฟ้า 189.73 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

1.4 ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen, DO)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	8.36	-
R02 (นา R02)	8.23	-
R03 (นา R03)	8.45	-
R04 (นา R04)	9.88	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	6.91
M06 (บ้านนาเตา)	-	6.95
M07 (สะพานใหม่)	-	6.88

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแหน 1) ค่าออกซิเจนละลายน้ำ 7.26 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

1.5 แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (ammonia nitrogen, $\text{NH}_3\text{-N}$)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	16.61	-
R02 (นา R02)	9.98	-
R03 (นา R03)	8.32	-
R04 (นา R04)	8.00	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	14.25
M06 (บ้านนาเตา)	-	12.06
M07 (สะพานใหม่)	-	12.71

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแหน 1) แอมโมเนีย-ไนโตรเจน 0.37 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

1.6 ไนเตรท-ไนโตรเจน (nitrate nitrogen, NO_3^- -N)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ไนเตรท-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	0.29	-
R02 (นา R02)	0.04	-
R03 (นา R03)	0.05	-
R04 (นา R04)	0.05	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	0.02
M06 (บ้านนาเตา)	-	0.22
M07 (สะพานใหม่)	-	0.30

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแหวน 1) ไนเตรท-ไนโตรเจน 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

1.7 ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (phosphate, PO_4^{3-} -P)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	10.89	-
R02 (นา R02)	10.34	-
R03 (นา R03)	10.87	-
R04 (นา R04)	10.50	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	10.89
M06 (บ้านนาเตา)	-	10.92
M07 (สะพานใหม่)	-	10.90

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแหวน 1) ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส 0.022 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

2. การเก็บข้อมูลในภาคสนามครั้งที่ 2

การเก็บข้อมูลภาคสนามครั้งที่ 2 (ระยะที่ 2 ระยะการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์ ช่วงเวลา 36-57 วันของการเพาะปลูกข้าวนาสวน, ช่วงเวลา 40-60 วันของการเพาะปลูกข้าวโพด) จัดเก็บในวันที่ 16 กันยายน พ.ศ. 2556 โดยห่างจากการเก็บข้อมูลครั้งแรกเป็นเวลา 45 วัน ดังนี้

2.1 อุณหภูมิ (temperature)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	32.07	-
R02 (นา R02)	33.60	-
R03 (นา R03)	29.23	-
R04 (นา R04)	36.03	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	27.00
M06 (บ้านนาเตา)	-	27.40
M07 (สะพานใหม่)	-	27.47

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแห่น 1) อุณหภูมิ 25.90 องศาเซลเซียส

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

2.2 ความเป็นกรด-เบส (pH)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ความเป็นกรด - เบส (pH)	
	ข้าวนาสวัน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	7.76	-
R02 (นา R02)	7.13	-
R03 (นา R03)	7.39	-
R04 (นา R04)	8.64	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	7.33
M06 (บ้านนาเตา)	-	7.40
M07 (สะพานใหม่)	-	7.36

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแห่น 1) ความเป็นกรด - เบส (pH) 7.17

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

2.3 ค่าการนำไฟฟ้า (conductivity)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	
	ข้าวนาสวัน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	123.73	-
R02 (นา R02)	126.77	-
R03 (นา R03)	119.57	-
R04 (นา R04)	123.13	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	123.03
M06 (บ้านนาเตา)	-	143.87
M07 (สะพานใหม่)	-	129.00

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแห่น 1) ค่าการนำไฟฟ้า 151.40 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

2.4 ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen, DO)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ช่วงนาสวน	ช่วงโพด
R01 (นา R01)	8.94	-
R02 (นา R02)	8.99	-
R03 (นา R03)	6.72	-
R04 (นา R04)	10.07	-
M05 (บ้านนาหนู 1)	-	7.37
M06 (บ้านนาเตา)	-	7.33
M07 (สะพานใหม่)	-	7.34

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแหวน 1) ค่าออกซิเจนละลายน้ำ 7.51 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

2.5 แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (ammonia nitrogen, $\text{NH}_3\text{-N}$)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ช่วงนาสวน	ช่วงโพด
R01 (นา R01)	6.53	-
R02 (นา R02)	10.92	-
R03 (นา R03)	5.47	-
R04 (นา R04)	8.40	-
M05 (บ้านนาหนู 1)	-	10.27
M06 (บ้านนาเตา)	-	10.80
M07 (สะพานใหม่)	-	9.19

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแหวน 1) แอมโมเนีย-ไนโตรเจน 0.48 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

2.6 ไนเตรท-ไนโตรเจน (nitrate nitrogen, NO_3^- -N)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ไนเตรท-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	0.06	-
R02 (นา R02)	0.04	-
R03 (นา R03)	0.03	-
R04 (นา R04)	0.04	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	0.17
M06 (บ้านนาเตา)	-	0.09
M07 (สะพานใหม่)	-	0.11

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแหน 1) ไนเตรท-ไนโตรเจน 0.09 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

2.7 ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (phosphate, PO_4^{3-} -P)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	10.92	-
R02 (นา R02)	10.93	-
R03 (นา R03)	10.88	-
R04 (นา R04)	10.88	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	10.89
M06 (บ้านนาเตา)	-	10.93
M07 (สะพานใหม่)	-	10.96

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแหน 1) ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส 0.019 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

3. การเก็บข้อมูลในภาคสนามครั้งที่ 3

การเก็บข้อมูลภาคสนามครั้งที่ 3 (ระยะที่ 3 การเจริญเติบโตด้านเมล็ด ช่วงเวลา 58-93 วันของการเพาะปลูกข้าวนาสวน, ช่วงเวลา 61-105 วันของการเพาะปลูกข้าวโพด) จัดเก็บในวันที่ 22 ตุลาคม พ.ศ. 2556 โดยห่างจากการเก็บข้อมูลครั้งแรกเป็นเวลา 81 วัน และห่างจากการเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 เป็นเวลา 36 วัน ดังนี้

3.1 อุณหภูมิ (temperature)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	ไม่มีน้ำ	-
R02 (นา R02)	ไม่มีน้ำ	-
R03 (นา R03)	27.87	-
R04 (นา R04)	28.30	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	28.00
M06 (บ้านนาเตา)	-	28.77
M07 (สะพานใหม่)	-	27.53

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแห่น 1) อุณหภูมิ 26.17 องศาเซลเซียส

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

3.2 ความเป็นกรด-เบส (pH)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ความเป็นกรด-เบส (pH)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	ไม่มีน้ำ	-
R02 (นา R02)	ไม่มีน้ำ	-
R03 (นา -R03)	8.06	-
R04 (นา R04)	9.54	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	8.99
M06 (บ้านนาเตา)	-	9.04
M07 (สะพานใหม่)	-	9.51

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแห่น 1) ความเป็นกรด-เบส (pH) 8.35

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

3.3 ค่าการนำไฟฟ้า (conductivity)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	ไม่มีน้ำ	-
R02 (นา R02)	ไม่มีน้ำ	-
R03 (นา R03)	160.73	-
R04 (นา R04)	184.00	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	191.47
M06 (บ้านนาเตา)	-	188.23
M07 (สะพานใหม่)	-	191.67

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแห่น 1) ค่าการนำไฟฟ้า 188.47 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

3.4 ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen, DO)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	ไม่มีน้ำ	-
R02 (นา R02)	ไม่มีน้ำ	-
R03 (นา R03)	7.09	-
R04 (นา R04)	9.47	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	7.99
M06 (บ้านนาเตา)	-	7.27
M07 (สะพานใหม่)	-	7.39

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแหน 1) ค่าออกซิเจนละลายน้ำ 7.55 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

3.5 แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (ammonia nitrogen, $\text{NH}_3\text{-N}$)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	ไม่มีน้ำ	-
R02 (นา R02)	ไม่มีน้ำ	-
R03 (นา R03)	4.57	-
R04 (นา R04)	7.30	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	10.55
M06 (บ้านนาเตา)	-	10.32
M07 (สะพานใหม่)	-	9.02

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแหน 1) แอมโมเนีย-ไนโตรเจน 0.36 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

3.6 ไนเตรท-ไนโตรเจน (nitrate nitrogen, NO_3^- -N)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ไนเตรท-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	ไม่มีน้ำ	-
R02 (นา R02)	ไม่มีน้ำ	-
R03 (นา R03)	0.04	-
R04 (นา R04)	0.06	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	0.09
M06 (บ้านนาเตา)	-	0.03
M07 (สะพานใหม่)	-	0.07

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแหวน 1) ไนเตรท-ไนโตรเจน 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

3.7 ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (phosphate, PO_4^{3-} -P)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	ไม่มีน้ำ	-
R02 (นา R02)	ไม่มีน้ำ	-
R03 (นา R03)	10.33	-
R04 (นา R04)	10.45	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	10.45
M06 (บ้านนาเตา)	-	10.78
M07 (สะพานใหม่)	-	10.83

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแหวน 1) ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส 0.021 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

4. การเก็บข้อมูลในภาคสนามครั้งที่ 4

การเก็บตัวอย่างน้ำของพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาสวนและพื้นที่เพาะปลูกข้าวโพด ครั้งที่ 4 (ระยะที่ 4 ระยะการเก็บเกี่ยว ช่วงเวลา 94-120 วันของการเพาะปลูกข้าวนาสวน, ช่วงเวลา 106-115 วันของการเพาะปลูกข้าวโพด) จัดเก็บในวันที่ 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 ห่างจากการเก็บข้อมูลครั้งที่ 1 เป็นเวลา 111 วัน ห่างจากการเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 เป็นเวลา 58 วัน และห่างจากการเก็บข้อมูลครั้งที่ 3 เป็นเวลา 20 วัน ดังนี้

4.1 อุณหภูมิ (temperature)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	ไม่มีน้ำ	-
R02 (นา R02)	ไม่มีน้ำ	-
R03 (นา R03)	ไม่มีน้ำ	-
R04 (นา R04)	ไม่มีน้ำ	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	29.30
M06 (บ้านนาเตา)	-	27.86
M07 (สะพานใหม่)	-	28.88

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแห่น 1) อุณหภูมิ 29.37 องศาเซลเซียส

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

4.2 ความเป็นกรด-เบส (pH)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ความเป็นกรด-เบส (pH)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	ไม่มีน้ำ	-
R02 (นา R02)	ไม่มีน้ำ	-
R03 (นา R03)	ไม่มีน้ำ	-
R04 (นา R04)	ไม่มีน้ำ	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	8.01
M06 (บ้านนาเตา)	-	9.18
M07 (สะพานใหม่)	-	9.99

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแห่น 1) ความเป็นกรด-เบส (pH) 8.09

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

4.3 ค่าการนำไฟฟ้า (conductivity)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	ไม่มีน้ำ	-
R02 (นา R02)	ไม่มีน้ำ	-
R03 (นา R03)	ไม่มีน้ำ	-
R04 (นา R04)	ไม่มีน้ำ	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	193.76
M06 (บ้านนาเตา)	-	190.83
M07 (สะพานใหม่)	-	199.03

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแห่น 1) ค่าการนำไฟฟ้า 176.38 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

4.4 ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen, DO)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	ไม่มีน้ำ	-
R02 (นา R02)	ไม่มีน้ำ	-
R03 (นา R03)	ไม่มีน้ำ	-
R04 (นา R04)	ไม่มีน้ำ	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	7.45
M06 (บ้านนาเตา)	-	7.98
M07 (สะพานใหม่)	-	7.76

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแหน 1) ค่าออกซิเจนละลายน้ำ 7.19 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

4.5 แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (ammonia nitrogen, $\text{NH}_3\text{-N}$)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	ไม่มีน้ำ	-
R02 (นา R02)	ไม่มีน้ำ	-
R03 (นา R03)	ไม่มีน้ำ	-
R04 (นา R04)	ไม่มีน้ำ	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	0.59
M06 (บ้านนาเตา)	-	0.19
M07 (สะพานใหม่)	-	0.12

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแหน 1) แอมโมเนีย-ไนโตรเจน 0.38 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

4.6 ไนเตรท-ไนโตรเจน (nitrate nitrogen, NO_3^- -N)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ไนเตรท-ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	ไม่มีน้ำ	-
R02 (นา R02)	ไม่มีน้ำ	-
R03 (นา R03)	ไม่มีน้ำ	-
R04 (นา R04)	ไม่มีน้ำ	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	0.05
M06 (บ้านนาเตา)	-	0.11
M07 (สะพานใหม่)	-	0.25

หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแหน 1) ไนเตรท-ไนโตรเจน 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

4.7 ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (phosphate, PO_4^{3-} -P)

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำ	ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ข้าวนาสวน	ข้าวโพด
R01 (นา R01)	ไม่มีน้ำ	-
R02 (นา R02)	ไม่มีน้ำ	-
R03 (นา R03)	ไม่มีน้ำ	-
R04 (นา R04)	ไม่มีน้ำ	-
M05 (บ้านนาหนูน 1)	-	0.31
M06 (บ้านนาเตา)	-	0.11
M07 (สะพานใหม่)	-	0.21

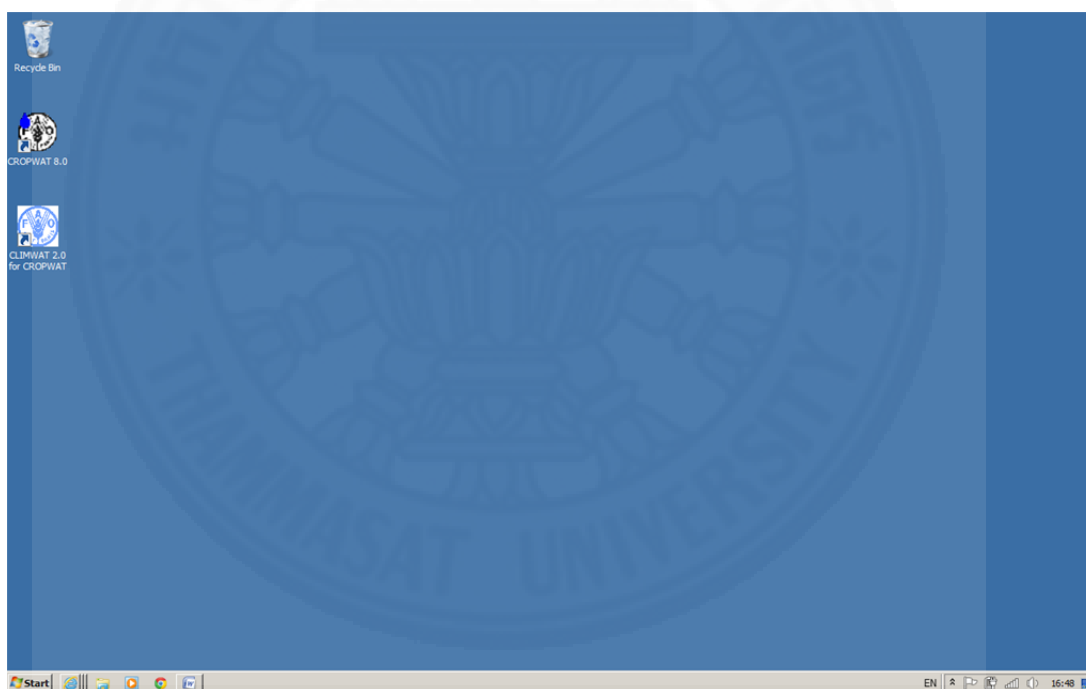
หมายเหตุ 1. สถานีเก็บตัวอย่างน้ำที่ RS00 (บ้านแหน 1) ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส 0.024 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. - คือ ไม่มีการเก็บตัวอย่างน้ำ

ภาคผนวก ข

การประมวลผลข้อมูลโดย CROPWAT 8.0

CROPWAT 8.0 เป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) ใช้สำหรับคำนวณความต้องการน้ำของพืช หรือ กำหนดการให้น้ำแก่พืชในระบบชลประทาน โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้จะเป็นโปรแกรมในลักษณะไม่หวังผลกำไรทางธุรกิจหรือประเภทเป็นโปรแกรมในลักษณะบริการฟรี (freeware) สามารถดาวน์โหลดได้ที่ http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html ในเวอร์ชันที่ 8.0 เป็นการพัฒนาโปรแกรมให้สามารถใช้ได้กับระบบปฏิบัติการวินโดวส์ (windows operating system) เมื่อดาวน์โหลด และทำการติดตั้งจะได้ไอคอน ดังรูป



ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับโปรแกรม CROPWAT 8.0

1. ข้อมูลภูมิอากาศ (climate) และ ค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิง (reference crop evapotranspiration, ET_0) โดยข้อมูลดังกล่าวมีหน่วยงานที่รวบรวมจัดเก็บทั้งในประเทศและต่างประเทศ ข้อแตกต่างจากแหล่งรวบรวมดังกล่าว ในกรณีที่เป็นข้อมูลที่ถูกรวบรวมในประเทศจะเป็นข้อมูล ณ ปัจจุบันและใกล้เคียงกับวัตถุประสงค์การศึกษา ซึ่งต่างจากข้อมูลที่รวบรวมจาก

ต่างประเทศจะเป็นข้อมูลเฉลี่ยในรอบการจัดเก็บข้อมูล เช่น ข้อมูลเฉลี่ย 30 ปี ที่ได้จากโปรแกรม CLIMWAT ที่ได้รวบรวมจากสถานีตรวจวัดทั่วโลก 5,000 สถานี

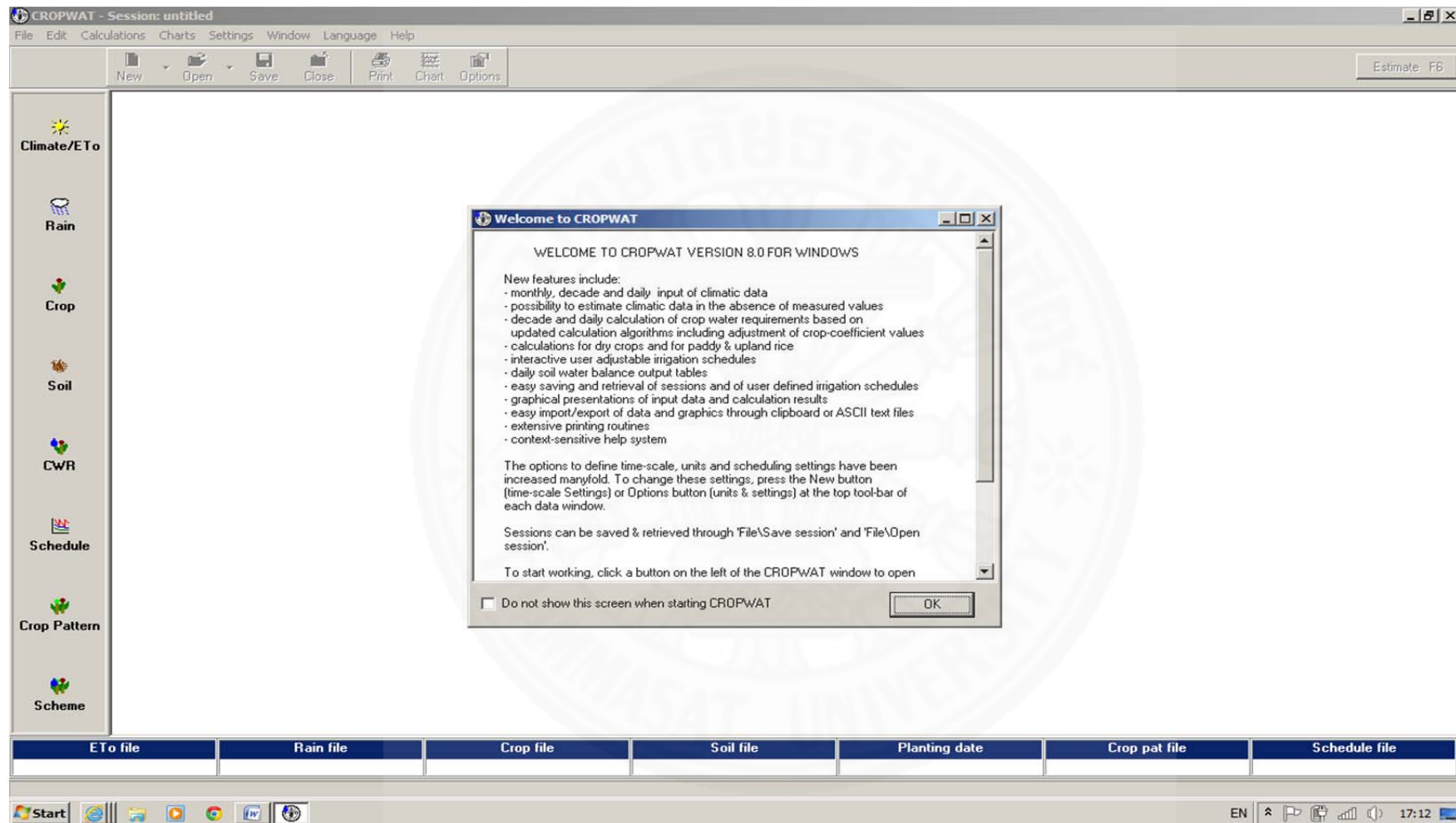
2. ข้อมูลฝน (rain) เป็นอีกชุดข้อมูลที่มีการรวบรวมโดยหน่วยงานระดับชาติ เช่น กรมอุตุนิยมวิทยา, กรมชลประทาน หรือแม้แต่ในแหล่งของต่างประเทศ โดยจะมีหน่วยเป็น รายวัน รายเดือน หรือรายปี ขึ้นอยู่กับความต้องการใช้ชุดข้อมูลนั้นๆ ตามวัตถุประสงค์

3. ข้อมูลการเพาะปลูกพืช (crop) ข้อมูลพืชในโปรแกรม CROPWAT 8.0 ถูกรวบรวมจากแหล่งต่างๆ ทั่วโลกและถูกกำหนดเป็นข้อมูลสำหรับใช้อ้างอิงในการประเมินผลเบื้องต้น ชุดข้อมูลดังกล่าวผู้ใช้สามารถปรับเปลี่ยนตามพันธุ์พืชที่ศึกษาในแต่ละพื้นที่นั้นๆ

4. ข้อมูลดิน (soil) เป็นชุดข้อมูลที่ถูกรวบรวมตามมาตรฐานของชุดดินนั้นๆ ที่มีอยู่ทั่วโลกเช่นเดียวกัน ผู้ใช้สามารถปรับเปลี่ยนข้อมูลดินได้ตามสภาพพื้นที่ศึกษาเพื่อให้เหมาะสมกับการศึกษานั้นๆ

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม CROPWAT 8.0

1. เปิดโปรแกรม CROPWAT 8.0 ในด้านซ้ายมือของโปรแกรมจะประกอบด้วย เมนูข้อมูลนำเข้าและให้ประมวลผล ได้แก่ Climate/ETo, Rain, Crop, Soil, CWR, Schedule, Crop pattern และ Scheme



2. นำเข้าข้อมูลภูมิอากาศในการศึกษาได้ใช้ข้อมูลภูมิอากาศที่รวบรวมจากโปรแกรม CLIMWAT ที่สถานีตรวจวัดนาน โดยรายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม CLIMWAT จะประกอบด้วย country, station, altitude (m), latitude และ longitude ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานของสถานีตรวจวัดที่ถูกรวบรวมโดย FAO เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับโปรแกรม CLIMWAT ในรายละเอียดของข้อมูลจะประกอบด้วย เดือน, min temp, max temp, humidity, win, sun, rad และ ET_0 โดยค่า ET_0 จะถูกคำนวณจากข้อมูลดังกล่าวด้วยวิธี Panman Montieith มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อวัน (mm/day)

การคำนวณหา climate/ ET_0



CROPWAT - Session: untitled

File Edit Calculations Charts Settings Window Language Help

New Open Save Close Print Chart Options Estimate F6

Climate/ETo

Rain

Crop

Soil

CWR

Schedule

Crop Pattern

Scheme

Monthly ETo Penman-Monteith - E:\TU-ENVI-PHD\My_CLIMWAT_Files\NAN.pen

Country Location 92 Station NAN

Altitude 201 m. Latitude 18.76 °N Longitude 100.76 °E

Month	Min Temp °C	Max Temp °C	Humidity %	Wind km/day	Sun hours	Rad MJ/m ² /day	ETo mm/day
January	13.4	29.8	76	43	8.1	17.1	2.88
February	15.1	32.7	70	52	8.5	19.4	3.59
March	18.3	35.3	65	61	8.7	21.5	4.43
April	22.0	36.5	66	69	7.8	21.4	4.86
May	23.6	34.6	76	69	5.9	18.7	4.33
June	24.1	32.9	80	69	4.2	16.1	3.75
July	23.8	31.9	82	69	3.7	15.3	3.49
August	23.7	31.7	85	69	3.6	15.0	3.36
September	23.3	32.2	84	52	4.9	16.2	3.53
October	21.8	32.0	83	43	6.9	17.6	3.62
November	18.6	30.6	81	43	6.9	15.9	3.08
December	14.3	29.0	79	35	6.8	14.9	2.59
Average	20.2	32.4	77	56	6.3	17.4	3.63

ETo file nan.pen

Rain file

Crop file

Soil file

Planting date

Crop pat file

Schedule file

Start

EN 17:11

3. นำเข้าข้อมูลฝน โดยข้อมูลฝนจะเป็นข้อมูลที่รวบรวมได้จากโปรแกรม CLIMWAT ซึ่งเป็นข้อมูลรายเดือน (monthly rainfall) ซึ่งโปรแกรมจะแสดงค่า effective rainfall ที่ได้จากการคำนวณ ตามที่เลือกไว้ในโปรแกรม ค่าที่กำหนดไว้คือ ใช้วิธี USDA S.C. Method



CROPWAT - Session: untitled

File Edit Calculations Charts Settings Window Language Help

New Open Save Close Print Chart Options

Climate/ETo

Rain

Crop

Soil

CWR

Schedule

Crop Pattern

Scheme

Monthly ETo Penman-Mon

Country Location 92

Altitude 201 m.

Month	Min Tem
	°C
January	13.4
February	15.1
March	18.3
April	22.0
May	23.6
June	24.1
July	23.8
August	23.7
September	23.3
October	21.8
November	18.6
December	14.3
Average	20.2

Monthly rain - E:\TU-ENVI-PHD\My_CLIMWAT_Files\NAN.cli

Station NAN Eff. rain method **USDA S.C. Method**

	Rain	Eff rain
	mm	mm
January	8.0	7.9
February	14.0	13.7
March	27.0	25.8
April	103.0	86.0
May	175.0	126.0
June	156.0	117.1
July	207.0	138.4
August	248.0	149.6
September	205.0	137.8
October	95.0	80.6
November	19.0	18.4
December	6.0	5.9
Total	1263.0	907.2

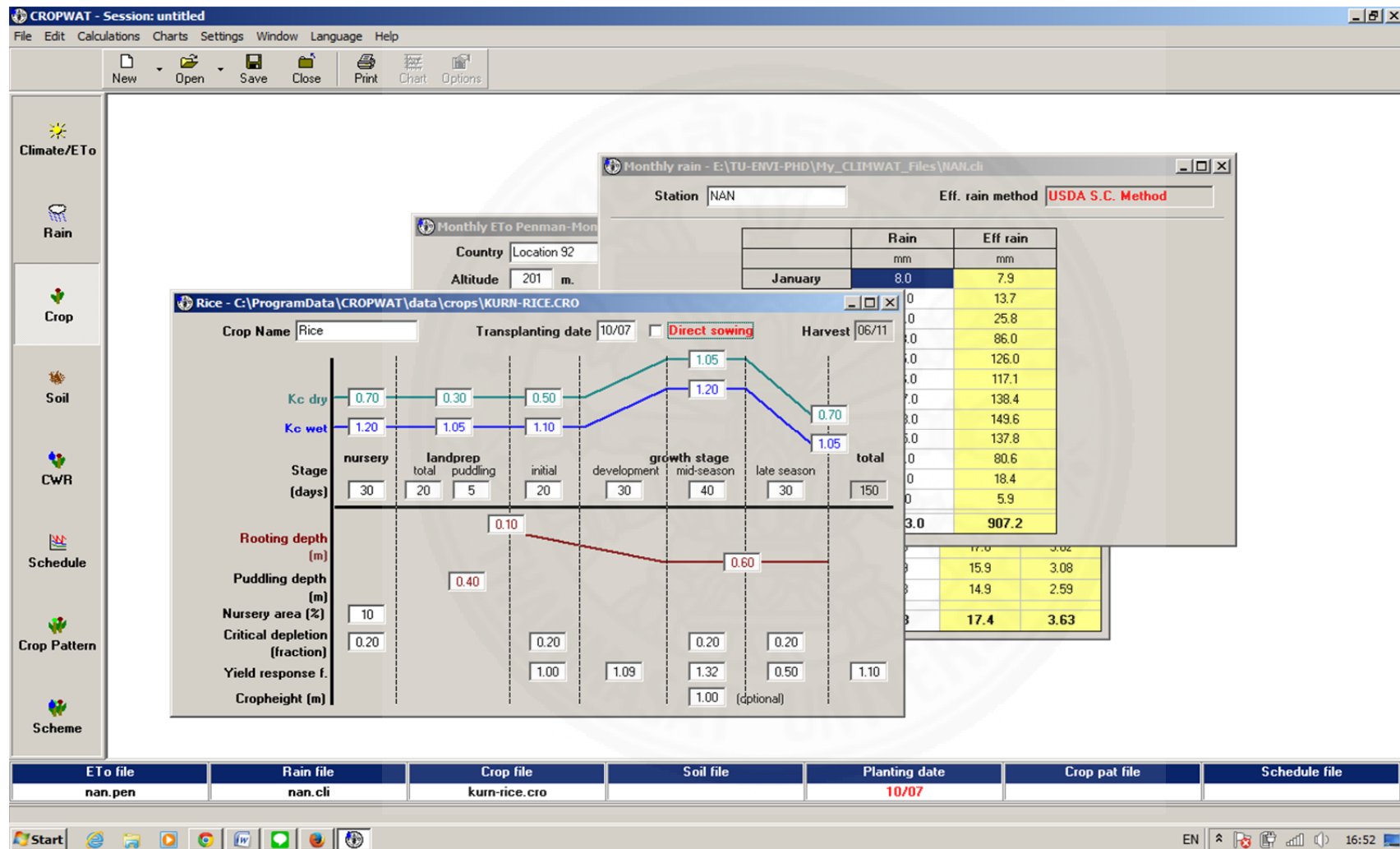
Month	Min Tem	Max Tem	Wind	Humid	Rain	Eff rain	ETo
January	13.4	32.0	83	43	8.0	7.9	3.62
February	15.1	30.6	81	43	14.0	13.7	3.08
March	18.3	29.0	79	35	27.0	25.8	2.59
April	22.0	23.6	77	56	103.0	86.0	6.3
May	23.6	24.1	77	56	175.0	126.0	17.4
June	24.1	23.8	77	56	156.0	117.1	17.4
July	23.8	23.7	77	56	207.0	138.4	17.4
August	23.7	23.3	77	56	248.0	149.6	17.4
September	23.3	21.8	77	56	205.0	137.8	17.4
October	21.8	18.6	77	56	95.0	80.6	17.4
November	18.6	14.3	77	56	19.0	18.4	17.4
December	14.3	13.4	77	56	6.0	5.9	17.4
Average	20.2	32.4	77	56	6.3	17.4	3.63

ETo file nan.pen Rain file nan.cli Crop file Soil file Planting date Crop pat file Schedule file

Start 16:46

4. นำเข้าข้อมูลพืช ในการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาข้าวนาสวนและข้าวโพด โดยเลือกชุดข้อมูลข้าวนาสวนและข้าวโพดที่กำหนดไว้โดย FAO ผู้ใช้สามารถกำหนดวันที่เริ่มเพาะปลูก ซึ่งข้อมูลที่ได้จะถูกแบ่งเป็นระยะการปลูกรวมถึงการกำหนดค่า Kc ในแต่ละระยะการปลูกให้ด้วย





5. นำเข้าข้อมูลดิน ที่ถูกกำหนด โดยการรวบรวมข้อมูลจาก FAO ที่กำหนดชุดดินไว้ ใน การศึกษาได้เลือกชุดดินเหนียว (black clay soil) ซึ่งสอดคล้องกับพื้นที่ศึกษา ข้อมูลแสดงในการ เลือกผู้ใช้สามารถปรับเปลี่ยนให้ตรงกับพื้นที่ศึกษาได้



CROPWAT - Session: untitled

File Edit Calculations Charts Settings Window Language Help

New Open Save Close Print Chart Options

Climate/ETo

Rain

Crop

Soil

CWR

Schedule

Crop Pattern

Scheme

Monthly ETo Penman-Mon

Country Location 92

Altitude 201 m.

Monthly rain - E:\TU-ENVI-PHD\My_CLIMWAT_Files\NAN.cli

Station NAN Eff. rain method **USDA S.C. Method**

	Rain	Eff rain
	mm	mm
January	8.0	7.9
	0	13.7
	0	25.8

Rice - C:\ProgramData\CROPWAT\data\crops\KURN-RICE.CRO

Crop Name Rice Transplanting date

	nursery	landprep	initial
Kc dry	0.70	0.30	0.50
Kc wet	1.20	1.05	1.10
Stage (days)	30	20	5
Rooting depth (m)			0.10
Puddling depth (m)		0.40	
Nursery area (%)	10		
Critical depletion (fraction)	0.20		0.20
Yield response f.			1.00
Cropheight (m)			

Soil - C:\ProgramData\CROPWAT\data\soils\BLACK CLAY SOIL.SOI

Soil name BLACK CLAY SOIL

General soil data

Total available soil moisture (FC - WP)	200.0	mm/meter
Maximum rain infiltration rate	30	mm/day
Maximum rooting depth	900	centimeters
Initial soil moisture depletion (as % TAM)	50	%
Initial available soil moisture	100.0	mm/meter

Additional soil data for rice calculations

Drainable porosity (SAT - FC)	10	%
Critical depletion for puddle cracking	0.60	fraction
Maximum Percolation rate after puddling	3.1	mm/day
Water availability at planting	5	mm WD
Maximum waterdepth	120	mm

ETo file	Rain file	Crop file	Soil file	Planting date	Crop pat file	Schedule file
nan.pen	nan.cli	kurn-rice.cro	black clay soil.soi	10/07		

Start

EN 16:54

6. คำนวนความต้องการใช้น้ำของพืช (crop water requirement, CWR) ข้อมูลที่ได้จะเป็นข้อมูลความต้องการใช้น้ำของการปลูกข้าวในช่วงเพาะปลูกที่กำหนด และถูกแบ่งเป็นช่วงตั้งแต่เดือนที่เริ่มเพาะปลูกถึงเดือนที่เก็บเกี่ยว ในการแบ่งระยะการเจริญเติบโตจะแบ่งตั้งแต่ระยะการเตรียมแปลงเพาะปลูก การปักดำ ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น ระยะการเจริญเติบโตทางดอก ระยะการออกรวง และระยะการเก็บเกี่ยว ความต้องการน้ำของข้าวรายวัน และรายคาบการเพาะปลูก รวมถึงฝนใช้การ



CROPWAT - Session: untitled

File Edit Calculations Charts Settings Window Language Help

New Open Save Close Print Chart Options

Climate/ETo

Rain

Crop

Soil

CWR

Schedule

Crop Pattern

Scheme

Crop Water Requirements

ETo station: NAN Crop: Rice

Rain station: NAN Planting date: 10/07

Month	Decade	Stage	Kc	ETc	ETc	Eff rain	Irr. Req.
			coeff	mm/day	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Jun	1	Nurs	1.20	0.47	0.5	3.9	0.5
Jun	2	Nurs/LPr	1.19	0.81	8.1	37.6	90.5
Jun	3	Nurs/LPr	1.06	3.91	39.1	40.5	0.0
Jul	1	Init	1.07	3.83	38.3	44.1	90.0
Jul	2	Init	1.10	3.84	38.4	46.6	0.0
Jul	3	Deve	1.10	3.79	41.7	47.7	0.0
Aug	1	Deve	1.10	3.76	37.6	49.3	0.0
Aug	2	Deve	1.11	3.74	37.4	50.9	0.0
Aug	3	Mid	1.12	3.82	42.0	49.2	0.0
Sep	1	Mid	1.12	3.89	38.9	48.6	0.0
Sep	2	Mid	1.12	3.95	39.5	48.0	0.0
Sep	3	Mid	1.12	3.99	39.9	41.0	0.0
Oct	1	Late	1.12	4.01	40.1	33.3	6.8
Oct	2	Late	1.08	3.91	39.1	27.1	12.1
Oct	3	Late	1.03	3.55	39.1	20.1	19.0
Nov	1	Late	0.99	3.24	19.4	6.9	13.7
					539.0	594.8	232.5

Crop Name: Rice

Kc dry: 0

Kc wet: 1

Stage (days):

Rooting depth (m):

Puddling depth (m):

Nursery area (%):

Critical depletion (fraction): 0

Yield response f.:

Cropheight (m):

ETo file: nan.pen

Rain file: nan.cli

Crop file: kurn-rice.cro

Soil file: black clay soil soi

Planting date: 10/07

Crop pat file:

Schedule file:

Start

E:\TU-ENVI-PHD\My_CLIMWAT_Files\NAN.cli

EN

16:56

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายวีรฉัตร ฉัตรปัญญาเจริญ
วันเดือนปีเกิด	1 กรกฎาคม 2513
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2534: บริหารธุรกิจบัณฑิต (คอมพิวเตอร์ธุรกิจ) มหาวิทยาลัยสยาม ปีการศึกษา 2540: บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต (ระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการ) มหาวิทยาลัยสยาม
ตำแหน่ง	อาจารย์ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ทุนการศึกษา	ปีงบประมาณ 2556: ทุนสนับสนุนการวิจัยประเภทวิจัย ทั่วไปสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา กองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผลงานทางวิชาการ

1. วีรฉัตร ฉัตรปัญญาเจริญ และณัฏฐา หังสพฤกษ์. การประเมินค่าภาระบรรทุกของเสียที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงประชากรและพื้นที่เกษตรกรรมในพื้นที่ลุ่มน้ำน่าน. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36. 26-28 ต.ค. 2553;(36):226.
2. วีรฉัตร ฉัตรปัญญาเจริญ และณัฏฐา หังสพฤกษ์. ศึกษาปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมบางประการที่มีผลต่อภาวะภัยแล้ง พื้นที่ลุ่มน้ำน่าน จังหวัดน่าน. การประชุมวิชาการ 6th THAICID NATIONAL SYMPOSIUM. 2554.