



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)

ปริญญา

วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของพืชไร่เศรษฐกิจในประเทศไทย กรณีศึกษา วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของ
ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

Water Footprint of Economic Field Crops in Thailand Case Study Water Footprint of
Maize

นามผู้วิจัย นางสาวทิพย์ปภา สุขุมลชาติ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อติชัย พรพรหมินทร์, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นภาพร เปี่ยมสง่า, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..... เดือน..... พ.ศ.....

สิงสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของพืชไร่เศรษฐกิจในประเทศไทย
กรณีศึกษา วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

Water Footprint of Economic Field Crops in Thailand
Case Study Water Footprint of Maize

โดย

นางสาวทิพย์ปภา สุขุมลชาติ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)

พ.ศ. ๒๕๕๕

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทิพย์ภา สุขมาลชาติ 2555: วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของพืชไร่เศรษฐกิจในประเทศไทย กรณีศึกษา
วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรม
ทรัพยากรน้ำ) สาขาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์อดิษฐ์ พรพรหมินทร์, D.Eng. 100 หน้า

จากการศึกษาของ Hoekstra และ Hung (2548) พบว่า ประเทศไทยส่งออกน้ำเสมือนในรูปของการ
ค้าขายพืชผลเป็นอันดับ 3 ของโลก คิดเป็นปริมาณน้ำ 47,000 ล้าน ลบ.ม./ปี และรองศาสตราจารย์ ดร. สุจริต
และคณะ (2550) ได้รายงานไว้ว่า ปริมาณการใช้น้ำของประเทศไทยในภาพรวมปี พ.ศ. 2550 มีค่าประมาณ
51,1493 ล้าน ลบ.ม. แบ่งเป็นการใช้น้ำเพื่อการเกษตรคิดเป็นร้อยละ 91 ซึ่งเป็นส่วนที่มีปริมาณความต้องการ
ใช้น้ำสูงที่สุดของประเทศไทย ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็น 1 ใน 12 พืชไร่เศรษฐกิจของประเทศไทย มีความสำคัญ
ต่ออุตสาหกรรมอาหารสัตว์ ดังนั้น การศึกษานี้ได้ทำการคำนวณหาค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพดเลี้ยง
สัตว์ในประเทศไทยอย่างละเอียดโดยใช้ข้อมูลผลผลิตเป็นรายเดือน ข้อมูลอุณหภูมิตามรายวัน และค่า
สัมประสิทธิ์พืชของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ทำการศึกษานี้ในประเทศไทย วิธีการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ใน
การศึกษานี้แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ 1. คำนวณค่าการคายระเหยของพืช 2. ประเมินค่าความต้องการใช้น้ำของ
พืช ใช้วิธีสมมูลน้ำในบริเวณรากพืช 3. คำนวณค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ ใช้ข้อมูลผลผลิตและปริมาณการใช้น้ำ
ปุ๋ยเคมี จากผลการศึกษา พบว่าค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์นอกเขตพื้นที่ชลประทานเฉลี่ยทั้ง
ประเทศเท่ากับ 1,123 ลบ.ม./ตัน คิดเป็นกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ 899 ลบ.ม./ตัน และเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์
230 ลบ.ม./ตัน โดยสาเหตุที่ไม่รวมการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในเขตพื้นที่ชลประทาน เนื่องจากพื้นที่
เพาะปลูกส่วนใหญ่ (ร้อยละ 99.2) อยู่นอกเขตพื้นที่ชลประทาน เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษานี้กับผล
การศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2010) พบว่ามีค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เฉลี่ยทั้งประเทศใน
การศึกษานี้สูงกว่าการศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra เนื่องจากความละเอียดของข้อมูลผลผลิต ผลผลิต
ต่อไร่ และข้อมูลอุณหภูมิตามรายวัน ที่มีความแตกต่างกัน และค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์เฉลี่ยของการศึกษานี้มีค่า
สูงกว่า 2 เท่า เนื่องจากมาตรฐานความเข้มข้นไนโตรเจนสูงสุดที่ยอมรับให้ลงสู่แหล่งน้ำได้ การศึกษานี้มีค่า
ต่ำกว่าจากการศึกษาที่ใช้ของ Mekonnen และ Hoekstra ดังนั้นค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่ได้จากการศึกษานี้มี
ความถูกต้องและเหมาะสมสำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทย

Thippapa Sukumalchart 2012: Water Footprint of Economic Field Crops in Thailand
Case Study Water Footprint of Maize. Master of Engineering (Water Resources
Engineering), Major Field: Water Resources Engineering, Department of Water
Resources Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Adichai Pronpromin,
D.Eng. 100 pages.

From the study of Hoekstra and Hung (2005), Thailand is the world third largest net virtual water exporter in relation to crop trade with the volume of 47 billion m³/yr. The water is used for agriculture sector, which accounts for 91 percent of the demand for water. It is highest part in Thailand. Maize is one of the twelve economic field crops of Thailand, which is essential to the stock feed industry. In this study, water footprint of maize in Thailand was calculated in details by using monthly production statistics, daily meteorological data and crop coefficient experimented in Thailand. There are 3 steps in the computation as follows: 1. Calculate the maize evapotranspiration 2. Evaluate the crop water use by the soil water balance method in root zone 3. With the crop yield and fertilization data, water footprint is calculated. The results of this study show that the country-averaged water footprint of maize in rain-fed area equals to 1,123 m³/ton comprised of 899 m³/ton green and 230 m³/ton grey water footprints. Since maize cultivation is mostly in the rain-fed area (99.2%), the water footprint in irrigated area is not comprised. Comparing with the results of Mekonnen and Hoekstra (2010), this study shows the higher value of country-average green water footprint of maize. Because of the data detail of product, yield and meteorological are different. However, the country-average grey water footprint was found to be about double of the Mekonnen and Hoekstra (2010), due to the high concentration of nitrogen to water are considered in this study lower than in Mekonnen and Hoekstra study. Thus, it can conclude that the water footprint for maize from this study accurate and suitable for maize in Thailand.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร.วรรณดี ไทยสยาม ประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิษฐ์ พรพรหมินทร์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา วิชาเอก ดร.อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกสถาบัน ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและ ตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์กระทั่งแล้วเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรัชย์ ลิปิวิวัฒนาการ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรม ทรัพยากรน้ำ รองศาสตราจารย์ ดร.ปัญญา ขวัญยืน คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน ที่ให้ คำแนะนำ ให้ข้อคิด กรมอุตุนิยมวิทยา ฝ่ายงานบริการข้อมูล กลุ่มภูมิอากาศ สำนักพัฒนา อุตุนิยมวิทยา และสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ฝ่ายบริการข้อมูล ที่ให้ข้อมูลต่างๆ ที่ใช้ประกอบ การศึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

จากประสบการณ์ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ทำให้ผู้วิจัยได้เรียนรู้ถึงประโยชน์จากการ ทำงาน ที่จำเป็นต้องอาศัยความร่วมมือจากบุคคลหลายฝ่าย จึงจะประสบความสำเร็จด้วยดี ความสำเร็จและคุณค่าของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ บิดา มารดา และคุณยาย ซึ่งส่งเสริมให้ การศึกษา ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความสามารถ และประสบผลสำเร็จในการศึกษาถึงขั้นนี้ได้

ทิพย์ปภา สุขุมาลชาติ

สิงหาคม 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	38
อุปกรณ์	38
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	71
สรุปและข้อเสนอแนะ	94
สรุป	94
ข้อเสนอแนะ	95
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	97
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	100

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สามอันดับแรกของประเทศที่ส่งออกและนำเข้าน้ำเสมือนเฉพาะการค้าขายพืชผลระหว่างปี พ.ศ.2538-2548 (คัดแปลงจาก Hoekstra และ Hong, 2005)	2
2	สถิติการส่งออก เนื้อที่เพาะปลูก เนื้อที่เก็บเกี่ยว ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่	17
3	จังหวัดที่ข้อมูลขาดหายแบ่งตามกรณี	39
4	สถิติผลผลิตต่อไร่ ผลผลิต และการใส่ปุ๋ยเคมีของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รายจังหวัดระหว่างปี พ.ศ. 2548-2552	41
5	ค่าความชื้นในดินทั้งหมดที่ใช้การได้ (Total available soil moisture, มม./ม.) เป็นรายจังหวัด	45
6	ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุด ความชื้นสัมพัทธ์ ชั่วโมงที่มีแสงแดด ความเร็วลม ฝนและค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิง ตั้งแต่วันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ. 2548 ถึง 15 สิงหาคม พ.ศ. 2548 เป็นรายวัน	54
7	คุณสมบัติพืช ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	60
8	ค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์พืช และค่าการคายระเหยของพืช	63
9	ค่าทางสถิติเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าการคายระเหยอ้างอิงระหว่างกรณีข้อมูลครบถ้วนกับกรณีขาดข้อมูลบางส่วน จากข้อมูลของสถานีอุตุนิยมวิทยาที่มีข้อมูลครบถ้วน โดยที่ n คือ ชั่วโมงที่มีแสงแดด RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ U_2 คือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ 2 เมตร	71
10	เปรียบเทียบค่าการคายระเหยของพืช ค่าปริมาณการใช้น้ำของพืช ค่าผลผลิตต่อไร่ และค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของจังหวัดตากและจังหวัดอุดรราชธานีของการหาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในเดือนกันยายน ปี พ.ศ. 2548	74
11	ค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์นอกเขตพื้นที่ชลประทานรายจังหวัดระหว่างปี พ.ศ. 2548-2552	78

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
12	ค่าวอเตอร์ฟุตพรีนทีในเขตพื้นที่ชลประทานรายจังหวัดตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 - 2552	80
13	ค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพรีนนอกเขตพื้นที่ชลประทานรายจังหวัดระหว่างปี พ.ศ. 2548-2552	82
14	ค่าเฉลี่ยวอเตอร์ฟุตพรีนทีนอกเขตพื้นที่ชลประทาน(กรีนวอเตอร์ฟุตพรีนที และเกรย์วอเตอร์ฟุตพรีนที) และวอเตอร์ฟุตพรีนทีรวมของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 -2552 เป็นรายจังหวัดในการศึกษานี้กับการศึกษาของ MH	86
15	ค่าวอเตอร์ฟุตพรีนทีของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยในการศึกษานี้และประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้จากการศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2010)	91
16	ปริมาณและมูลค่าการส่งออกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 – 2552/53 มีหน่วย ปริมาณ : ตัน , มูลค่า : บาท	93

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1	สัดส่วนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์รวมของการผลิตพืชทั้งโลกในปี พ.ศ. 2539 – 2548 (ค.ศ. 1996 - 2005)
2	ความหมายของบลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์
3	ความหมายของกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์
4	ความหมายของกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์
5	ขั้นตอนการคำนวณหาการไหลน้ำเสมือนทั้งโลก
6	หน้าต่างหน้าแรกของโปรแกรม The ETo calculator
7	หน้าต่างเมนูหลักของแบบจำลอง The ETo calculator
8	ข้อมูลสถานที่ที่มีการบันทึกไว้ แบบจำลอง The ETo calculator
9	Create menu สามารถกรอกข้อมูลรายละเอียดสถานที่ที่ต้องการสร้างแบบจำลอง The ETo calculator
10	ประเภทไฟล์ที่สามารถนำเข้าแบบจำลอง The ETo calculator
11	กำหนดขอบเขตค่าสุด สูงสุด สำหรับข้อมูลอุณหภูมิตามแบบจำลอง The ETo calculator
12	เส้นโค้งปกติ
13	เส้นโค้งความถี่เบ้ซ้าย
14	เส้นโค้งความถี่เบ้ขวา
15	ตัวอย่าง R2 เข้าใกล้ 1 หรือเท่ากับ 1
16	R2 เท่ากับ 0
17	พื้นที่เพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รายจังหวัด
18	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์พืช (Kc) ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของ FAO No.56
19	ขั้นตอนในการคำนวณกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์และบลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ ของแบบจำลอง CROPWAT
20	ขั้นตอนในการคำนวณเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์
21	แนวคิดของสมดุลน้ำในเขตรากพืช

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	ค่าการพร่องน้ำ ปริมาณน้ำทั้งหมดที่ใช้การได้ และปริมาณน้ำที่ใช้การได้ในเขตรากพืช จังหวัดนครสวรรค์ ช่วงเวลาการเพาะปลูกตั้งแต่ 10 พฤษภาคม ถึง 15 สิงหาคม ปี พ.ศ. 2548	62
23	กรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ และผลผลิตรวมทั้งในเขตและนอกเขตพื้นที่ชลประทานรายเดือนของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ จังหวัดนครสวรรค์ ช่วงปีผลผลิต 2548-2552 (ค.ศ. 2005 – 2009)	68
24	กรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เฉลี่ยนอกเขตพื้นที่ชลประทานรายจังหวัดระหว่างปี พ.ศ. 2548 - 2552	75
25	ตัวอย่างผลผลิตรายเดือนและค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของจังหวัดตาก ปี พ.ศ. 2548 – 2552	76
26	ตัวอย่างค่าปริมาณการใช้น้ำของพืช ค่าการระบายของพืช กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดน้ำเท่ากับ 1 และค่าผลผลิตรายเดือน จังหวัดตาก ปี พ.ศ. 2548 – 2552	76
27	ตัวอย่างผลผลิตรายเดือนและค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของจังหวัดอุดรราชธานี ปี พ.ศ. 2548 – 2552	77
28	ตัวอย่างค่าปริมาณการใช้น้ำของพืช ค่าการระบายของพืช กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดน้ำเท่ากับ 1 และค่าผลผลิตรายเดือน จังหวัดอุดรราชธานี ปี พ.ศ. 2548 - 2552	77
29	กรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เฉลี่ยนอกเขตพื้นที่ชลประทานรายจังหวัดระหว่างปี พ.ศ. 2548 - 2552	84
30	ผลการเปรียบเทียบการคำนวณค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นนอกเขตพื้นที่ชลประทานของการศึกษานี้กับการศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2010)	89
31	ผลการเปรียบเทียบค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการศึกษานี้กับการศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2010)	91

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AR	=	อัตราการใช้น้ำในพื้นที่ต่อไร่
CR	=	Capillary Rise
CWU	=	ความต้องการใช้น้ำของพืช (Crop Water Use)
C _{max}	=	ความเข้มข้นมากที่สุดที่ยอมรับได้ (Maximum Concentration)
C _{nat}	=	ความเข้มข้นมลพิษในธรรมชาติที่พิจารณา (Natural Concentration)
D	=	การพร่องของน้ำในเขตรากพืช (Depletion)
ET _o	=	การคายระเหยของพืชอ้างอิง (Reference Crop Evapotranspiration)
ET _c	=	การคายระเหยของพืช (Crop Evapotranspiration)
I	=	การส่งน้ำจากชลประทาน (Water Irrigation)
K _c	=	สัมประสิทธิ์พืช (Crop Coefficient)
K _s	=	สัมประสิทธิ์ความเครียดน้ำ (Water Stress Coefficient)
MH	=	Mekonnen and Hoekstra 2010
P	=	น้ำฝน (Precipitation)
WF	=	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (Water Footprint)
WF _{total}	=	วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ทั้งหมด (Total Water Footprint)
WF _{green}	=	กรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (Green Water Footprint)
WF _{blue}	=	บลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (Blue Water Footprint)
WF _{grey}	=	เกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (Grey Water Footprint)
RAW	=	น้ำที่มีอยู่ในดินที่ใช้งานได้ (Readily Available Water)
RO	=	น้ำท่าผิวดิน (Run off)
TAWC	=	น้ำทั้งหมดที่ใช้งานได้ในพื้นที่เขตรากพืช (Total Available Soil Water Capacity in The Root Zone)
Y	=	ผลผลิตต่อไร่ (Yield)
α	=	สัดส่วนการชะลาย (Leaching Runoff)

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของพืชไร่เศรษฐกิจในประเทศไทย กรณีศึกษา วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของ ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

Water Footprint of Economic Filed Crops in Thailand Case Study Water

Footprint of Maize

คำนำ

ในหลายๆภูมิภาคทั่วโลกทรัพยากรน้ำและมลพิษทางน้ำกลายเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจ (Cheng Liu *et al.*, 2011) เนื่องจากน้ำจัดเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด เนื่องจากพื้นที่ผิวโลกกว่าร้อยละ 71 จะปกคลุมไปด้วยน้ำ แต่เป็นน้ำจืดร้อยละ 1.75 ที่ถูกเก็บกักไว้ในรูปของหิมะและน้ำแข็ง เหลือน้ำที่สามารถใช้ได้ไม่ถึงร้อยละ 1 ซึ่งถูกแบ่งไปใช้งานในภาคเกษตรกรรม ร้อยละ 70 ภาคอุตสาหกรรม ร้อยละ 22 และภาคครัวเรือน ร้อยละ 8 (ชินาธิปกรณ์และธำรงรัตน์, 2554) ซึ่งสถานการณ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทยได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงในบริบทโลก และปัจจัยภายในประเทศ ทั้งเรื่องการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ การเพิ่มขึ้นของประชากร การพัฒนาเศรษฐกิจที่มุ่งการเจริญเติบโต การแข่งขันทางการค้า และการลงทุน ทำให้มีการใช้ประโยชน์ทรัพยากรธรรมชาติเกินศักยภาพในการรองรับของระบบนิเวศน์ จากปัญหาดังนั้นแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 11 (พ.ศ. 2555 – 2559) จึงได้ระบุไว้เป็นแนวทางการพัฒนาและส่งเสริมให้เกิดการใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ คุ่มค่า และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยให้มีการจัดทำข้อมูลการใช้น้ำ (Water Footprint) รวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำภาคการเกษตร และส่งเสริมการปลูกพืชใช้น้ำน้อยในช่วงฤดูแล้ง (แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 11 ปี พ.ศ. 2555-2559)

หลักการและแนวคิดเรื่องวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (Water Footprint) ถูกนำเสนอโดย Hoekstra (2003) วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้หลายหลากมิติ เช่น วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของคน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของประเทศ วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของกระบวนการผลิต เป็นต้น แนวคิดดังกล่าวสามารถมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผลจากการนำเข้าและส่งออกสินค้าที่มีการใช้น้ำ (วอเตอร์ฟุตพริ้นท์) ในกระบวนการผลิต และสามารถวิเคราะห์หาปริมาณการไหลของปริมาณน้ำระหว่างพื้นที่ เรียกว่า Virtual water จากการศึกษาของ Hoekstra and Hung (2005) เกี่ยวกับการไหลของน้ำ

เสมือน (virtual water flows) ระหว่างประเทศเฉพาะการค้าขายพืชผล ระหว่างปี 2538 – 2542 พบว่า ประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกอันดับที่สามของโลก (ตารางที่ 1) คิดเป็นปริมาณน้ำ 47 พันล้าน ลบ.ม./ปี (ประมาณความจุของเขื่อนภูมิพล 3.5 เท่า) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำที่สามารถใช้ได้ (available water) ในประเทศเราได้ถูกส่งออกไปยังต่างประเทศในรูปของน้ำเสมือนในรูปแบบสินค้าทางการเกษตร และได้สร้างความกดดันเพิ่มขึ้นต่อการใช้ทรัพยากรน้ำในประเทศไทย

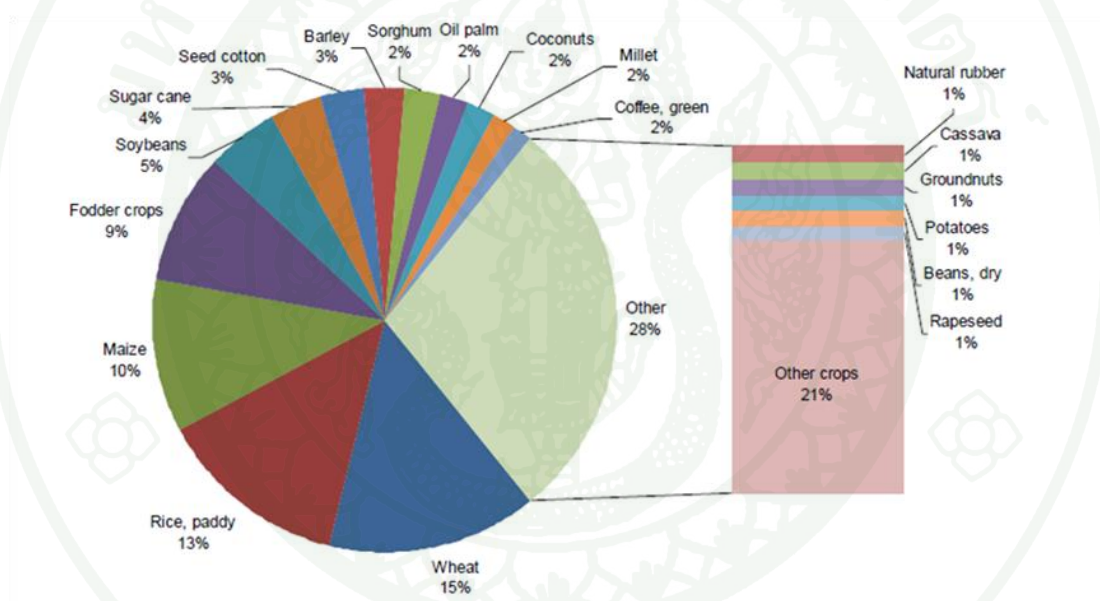
ตารางที่ 1 สามอันดับแรกของประเทศที่ส่งออกและนำเข้าน้ำเสมือนเฉพาะการค้าขายพืชผล
ระหว่างปี พ.ศ.2538-2548 (ดัดแปลงจาก Hoekstra และ Hong, 2005)

ประเทศส่งออก	ปริมาณส่งออกสุทธิ (10 ⁹ ลบ.ม. ต่อปี)	ประเทศนำเข้า	ปริมาณนำเข้าสุทธิ (10 ⁹ ลบ.ม. ต่อปี)
อเมริกา	152	ญี่ปุ่น	59
แคนาดา	55	เนเธอร์แลนด์	30
ไทย	47	เกาหลีใต้	23

ส่วนผลรวมค่าอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสินค้าพืชในช่วงปี พ.ศ. 2538 – 2548 เท่ากับ 7,404 พันล้าน ลบ.ม. / ปี ที่มากที่สุดในโลก 3 อันดับแรก ได้แก่ ข้าวสาลี เท่ากับ 1,087 พันล้าน ลบ.ม./ปี รองลงมาคือ ข้าว เท่ากับ 992 ล้าน ลบ.ม./ปี และข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เท่ากับ 770 ล้าน ลบ.ม./ปี แสดงดังภาพที่ 1 และการบริโภคข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เมื่อคิดเป็นรายปีต้องใช้น้ำเป็นปริมาณ 550 พันล้าน ลบ.ม. ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 8 ของน้ำทั้งโลกที่ใช้ในการผลิตพืช (Mekonnen และ Hoekstra, 2011) แนวคิดอื่น ๆ ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับแนวคิดเรื่องอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ เช่น รอยเท้าทางนิเวศน์วิทยา (Ecological Footprint) และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ซึ่ง (Carbon Footprint) ซึ่งรอยเท้าทางนิเวศน์วิทยาจะวัดปริมาณความต้องการใช้พื้นที่ตอบสนองกิจกรรมของมนุษย์ต่อโลก มีหน่วยเป็นพื้นที่ต่อคน ส่วนคาร์บอนฟุตพริ้นท์จะวัดปริมาณของกรีนเฮาส์แก๊ส (GHGs) ที่ผลิตปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา มีหน่วยเป็นตัน

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นพืชไร่เศรษฐกิจของประเทศไทย ที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหารสัตว์ ประมาณ ร้อยละ 95 ของผลผลิตทั้งหมดใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ของประเทศ และมีความต้องการเพิ่มขึ้นทุกปี (นงคราญ, 2553) โดยมีแหล่งผลิตที่สำคัญคือ จังหวัดเพชรบูรณ์

นครราชสีมา ตาก น่าน เลย เชียงราย นครสวรรค์ ลพบุรี พิษณุโลก พะเยา สระแก้ว สระบุรี และ อุทัยธานี ส่วนใหญ่ปลูกนอกเขตพื้นที่ชลประทานร้อยละ 99 ปัจจุบันความต้องการข้าวโพดเลี้ยง สัตว์เพื่ออุตสาหกรรมภายในประเทศเพิ่มมากขึ้นตามการขยายตัวของอุตสาหกรรมเลี้ยงสัตว์ รัฐบาลจึงจำเป็นในการนำเข้าข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในบางช่วงเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการใช้ใน แต่ละปี เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อระบบการค้าข้าวโพดภายในประเทศ การนำเข้าจะนำเข้าจาก ประเทศลาวและกัมพูชา ส่วนการส่งออกมีแนวโน้มลดลงเนื่องจาก ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของประเทศ ไทยมีคุณภาพต่ำ ความชื้นสูง เพราะผลผลิตส่วนใหญ่ร้อยละ 80 ออกสู่ตลาดมากในช่วงฤดูฝน อีก ทั้งราคาสูงกว่าราคาตลาดโลก ซึ่งการส่งออกส่วนใหญ่จะส่งไปยังประเทศที่อยู่ในเอเชียด้วยกัน ได้แก่ มาเลเซีย เวียดนาม อินโดนีเซีย ใต้หวัน (ธุรกิจอาหารสัตว์, 2554)



ภาพที่ 1 สัดส่วนออร์พุตพรีนทั้งหมดของการผลิตพืชทั่วโลกในปี พ.ศ. 2539 – 2548 (ค.ศ. 1996-2005)

ที่มา: M.M. Mekonnen and Hoekstra (2011)

วัตถุประสงค์

การวิจัยครั้งนี้ มุ่งเน้นการหาค่าอวอเตอร์พุตพรีนธ์ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทย เพื่อช่วยในการบริหารจัดการน้ำเพื่อการเกษตร โดยมีวัตถุประสงค์หลักของการวิจัยครั้งนี้ ดังนี้

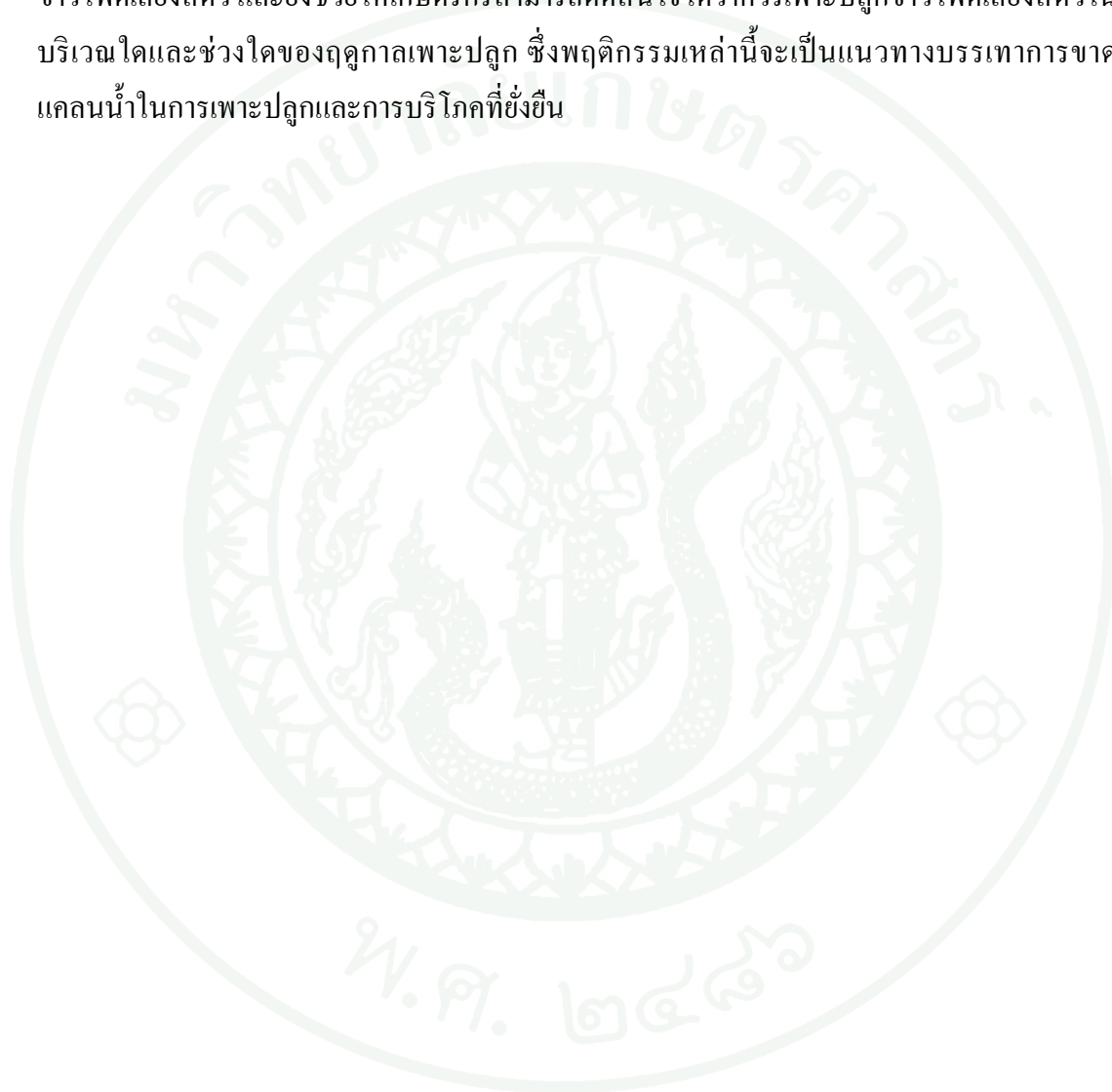
1. เพื่อคำนวณหากรีนวอเตอร์พุตพรีนธ์ บลูวอเตอร์พุตพรีนธ์ และเกรย์วอเตอร์พุตพรีนธ์รายเดือนของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อย่างละเอียดในประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 – 2552
2. เพื่อเปรียบเทียบค่ากรีนวอเตอร์พุตพรีนธ์ บลูวอเตอร์พุตพรีนธ์ และเกรย์วอเตอร์พุตพรีนธ์ ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รายเดือนในการศึกษานี้เปรียบเทียบกับค่าจากการศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2010) ซึ่งทำการศึกษาตั้งแต่ปี พ.ศ.2539 – 2548 ทุกประเทศทั่วโลก เป็นรายจังหวัด และศึกษาพืช 126 ชนิด

ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาเฉพาะข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ซึ่งเป็นหนึ่งในพืชไร่เศรษฐกิจโดยใช้ข้อมูลผลผลิตรายเดือน ผลผลิตต่อไร่รายปี และการใช้ปุ๋ยเคมีรายปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 - 2552
2. พื้นที่ทำการศึกษา ประเทศไทย
3. ข้อมูลอุณหภูมิต่ำรายวันตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 – 2553
4. ใช้ข้อมูลน้ำทั้งหมดที่ใช้การได้ในดิน (Total Available Water Capacity, TAWC) จาก ISRIC-WISE (Batjes, 2006)
5. ใช้ข้อมูลประเภทของดิน ค่าความยาวรากพืช และอัตราการซึมลงดินของน้ำฝนมากที่สุดจากโปรแกรม CROPWAT 8.0

ประโยชน์ที่ได้รับ

การมีข้อมูลที่ถูกต้องของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์จะช่วยให้ผู้บริโภคเข้าใจและตระหนักถึงความสำคัญของการใช้น้ำในการผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์และแหล่งที่มาของการใช้น้ำเพื่อการผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และยังช่วยให้เกษตรกรสามารถตัดสินใจได้ว่าควรเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในบริเวณใดและช่วงใดของฤดูกาลเพาะปลูก ซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้จะเป็นแนวทางบรรเทาการขาดแคลนน้ำในการเพาะปลูกและการบริโภคที่ยั่งยืน

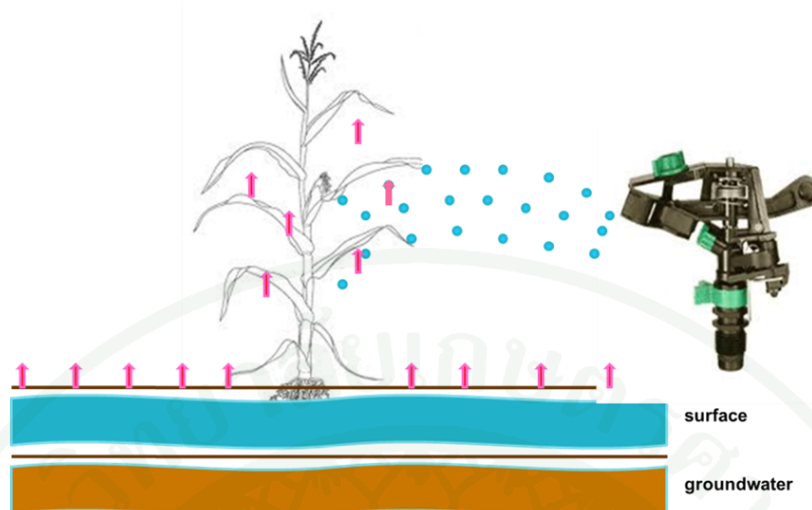


การตรวจเอกสาร

นิยามและความหมายวอเตอร์ฟุตพริ้นท์

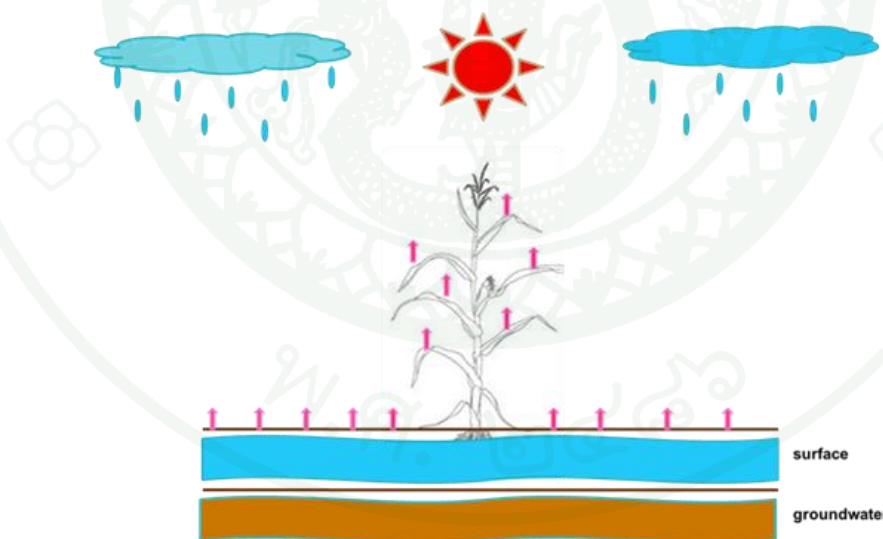
แนวคิดเรื่องวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (water footprint) ถูกนำเสนอโดย Hoekstra (2003) โดยหลักการ วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ คือ ค่าชี้วัดของปริมาณน้ำจืดที่ใช้ของผู้บริโภคหรือผู้ผลิตไม่ว่าจะเป็นทางตรง หรือทางอ้อม ดังนั้น วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสินค้าหรือบริการจึงเป็นปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตสินค้าและบริการทั้งทางตรงและทางอ้อมโดยคำนวณปริมาณน้ำจากผลรวมของทุกขั้นตอนตลอดห่วงโซ่ของการผลิตสินค้าและบริการนั้น ปริมาณน้ำที่ใช้สามารถวัดได้จากปริมาณน้ำที่ใช้ไปและปริมาณน้ำเสียที่ปล่อยออกมา ทำให้วอเตอร์ฟุตพริ้นท์เป็นค่าชี้วัดที่ชัดเจน เพราะไม่เพียงแต่แสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำที่ใช้และปริมาณน้ำเสียที่ปล่อยออกมาเท่านั้นยังแสดงให้เห็นถึงสถานที่และระยะเวลาที่เกิดการใช้ น้ำ หน่วยของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ทางการเกษตรมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรต่อตันแต่ทางหากเป็นหน่วยวัดทางอุตสาหกรรมอาจเป็นลูกบาศก์เมตรต่อชิ้น วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ทางการเกษตร แยกได้เป็น 3 ส่วนบลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (blue water footprint) กรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (green water footprint) เกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (gray water footprint) แต่ละส่วนมีความหมายดังต่อไปนี้

- บลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ หมายถึง ปริมาณน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติทั้งแหล่งน้ำผิวดิน เช่น อ่างเก็บน้ำ น้ำในแม่น้ำ ทะเลสาบ และแหล่งน้ำใต้ดิน ได้แก่ น้ำบาดาล ที่ถูกพืชนำไปใช้ตลอดห่วงโซ่ของการผลิตสินค้า



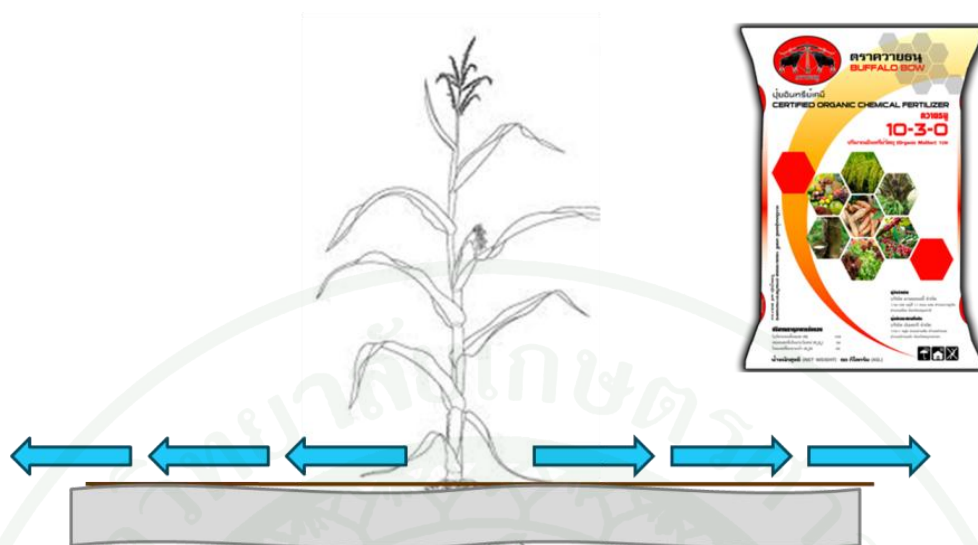
ภาพที่ 2 ความหมายของบลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์

- กรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ หมายถึง ปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาซึมลงพื้นดิน ซึ่งอยู่ในรูปของความชื้นในดิน แล้วถูกพืชนำไปใช้เพื่อการผลิตสินค้า



ภาพที่ 3 ความหมายของกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์

- เกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ หมายถึง ปริมาณน้ำดีที่ใช้ในการเจือจางสารพิษที่เกิดจากกระบวนการผลิตสินค้าหรือบริการให้เป็นค่าที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน



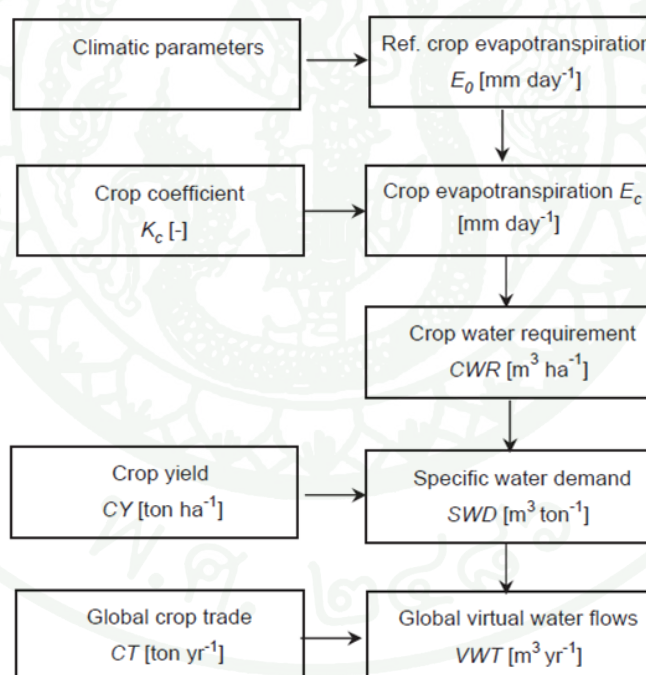
ภาพที่ 4 ความหมายของกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์กับประเทศไทย

จินาธิปกรณ์ และ ชำรงรัตน์ (2554) ได้ทำการประเมินปริมาณการใช้น้ำตลอดห่วงโซ่ หรือ วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของกระบวนการผลิตเอทานอล จากมันสำปะหลังในประเทศไทย ทำการ คำนวณ ปริมาณการใช้น้ำ และปริมาณพื้นที่เพาะปลูก ตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี โดยมีขั้นตอนการคำนวณ 4 ขั้นตอน คือ การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการผลิตเอทานอลโดยใช้วิธี แบบละเอียด (Bottom-up approach) จะคำนวณจากข้อมูลการใช้วัตถุดิบในกระบวนการผลิต โดยการคำนวณหาปริมาณน้ำที่ใช้ตลอดห่วงโซ่ของกระบวนการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังตาม ความต้องการของประเทศ ขั้นตอนที่สองคือการคำนวณปริมาณน้ำเสมือน สีเขียว สีน้ำเงิน และสี เทาของการผลิตเอทานอล โดยงานวิจัยนี้มีสมมติฐานว่าปริมาณน้ำชลประทานที่ให้มีความพอดีกับ ปริมาณความต้องการใช้น้ำของมันสำปะหลัง จึงทำให้ไม่มีปริมาณน้ำเสียเกิดขึ้น ส่งผลให้น้ำเสมือน สีเทามีค่าเท่ากับศูนย์ ขั้นตอนสามคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของมันสำปะหลัง โดยใช้ ความสัมพันธ์ของปริมาณการใช้น้ำของพืช ปริมาณฝนใช้การ และปริมาณน้ำชลประทาน นำข้อมูล การศึกษาของ สมบูรณ์ พรหมเสน (2547) ที่ได้ทำการตรวจวัดการคายระเหยของมันสำปะหลัง อำเภอบรรี จังหวัดนครราชสีมา มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณ ขั้นตอนสุดท้ายคือการคำนวณหา สัดส่วนผลิตภัณฑ์ จากผลการศึกษาพบว่า วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของกระบวนการผลิตเอทานอล จากมัน สำปะหลังในปี 2551 มีค่าเท่ากับ 0.267 กิโลลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 0.03 ของ

ปริมาณน้ำทั้งประเทศ โดยแบ่งเป็นวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เขียว 0.185 กิโลลูกบาศก์เมตรต่อปี และ วอเตอร์ฟุตพริ้นท์น้ำเงิน 0.082 กิโลลูกบาศก์เมตรต่อปี สำหรับปริมาณการใช้น้ำ ตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนฯ จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นทุกปี โดยจะต้องใช้น้ำถึง 2.605 กิโลลูกบาศก์เมตร หรือ เพิ่มขึ้นถึงเกือบ 10 เท่า เมื่อสิ้นสุดแผนฯ ในปี 2565 แต่หากมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มผลผลิตของมันสำปะหลังจาก 3.4 เป็น 8.0 ตันต่อไร่ จะส่งผลให้ปริมาณการใช้น้ำลดลงร้อยละ 57.4 ในแต่ละปี โดยจะต้องใช้น้ำ 1.110 กิโลลูกบาศก์เมตร หรือ เพิ่มขึ้นเพียง 4 เท่า เมื่อสิ้นสุดแผนฯ ในปี 2565

A.Y. Hoekstra and P.Q. Hung (2005) ได้ทำการศึกษาหาปริมาณน้ำเสมือนที่เชื่อมโยงระหว่างประเทศปี พ.ศ. 2538 – 2542 (ค.ศ.1995-1999) เพื่อดูการเชื่อมโยงการขายพืช และวิเคราะห์สมดุลของน้ำเสมือนแต่ละประเทศซึ่งมีการเชื่อมโยงกับความต้องการน้ำและน้ำที่ใช้การได้ ขั้นตอนการคำนวณดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการคำนวณหาการไหลน้ำเสมือนทั้งโลก

ที่มา: A.Y. Hoekstra and P.Q. Hung (2005)

จากการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำในโลกทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตของพืชประมาณ 5,400 พันล้าน ลบ.ม./ปี หมายความว่า 13% ของน้ำในโลกถูกใช้ไปเพื่อการผลิตพืชเพื่อการส่งออก (ในรูปน้ำเสมือน) ประเทศที่มีน้ำเสมือนส่งออกมากที่สุดคือ สหรัฐอเมริกา ประเทศไทยส่งออกมากที่สุดเป็นอันดับ 3

M.M. Mekonnen and A.Y. Hoekstra (2010) ได้ทำการศึกษา กรีน บลู และเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ระดับพื้นที่ในช่วงปี 1996 – 2005 ได้ทำการศึกษาพืชทั้งหมด 146 ชนิด ที่ 5*5 ลิปดา (ละติจูดและลองจิจูด) ซึ่งหนึ่งในพืชที่ใช้ในการศึกษานี้คือ ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ การศึกษานี้ได้ใช้แบบจำลองสมดุลน้ำแบบ Grid-base dynamic เพื่อคำนวณหาความต้องการใช้น้ำของพืชเป็นรายวัน ซึ่งแบบจำลองนี้จะนำเอาข้อมูลสมดุลน้ำ ในดินรายวัน เงื่อนไขของภูมิอากาศ และข้อมูลน้ำเสียที่เกิดจากการใช้ปุ๋ยในโตรเจนเพื่อการเพาะปลูกพืช มาคำนวณแต่ละGrid ในการศึกษาที่ใช้แบบจำลองสมดุลน้ำเพื่อคำนวณหาความต้องการใช้น้ำของพืชที่ทำการเพาะปลูกทั่วโลกเป็นหลัก 126 ชนิดและที่เหลืออีก 20 ชนิดเป็นพืชที่เพาะปลูกบางประเทศ จะใช้แบบจำลอง CROPWAT ในการประเมินความต้องการใช้น้ำของพืช ข้อมูลผลผลิตต่อไร่ที่ใช้จะเป็นรายปีของแต่ละประเทศและทำการเฉลี่ยให้เท่ากันทั่วประเทศของแต่ละประเทศ ดังสมการที่ (1)

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{\sum ET_a[t]}{\sum CWR[t]}\right) \quad (1)$$

โดย Y_a = ผลผลิตต่อไร่ที่เก็บเกี่ยวได้จริงซึ่งได้จากแต่ละGrid cell จะเป็นค่าเฉลี่ยของทั้งประเทศ มีหน่วยเป็น (กิโลกรัม/เฮกเตอร์)
 Y_m = ผลผลิตต่อไร่มากที่สุด มีหน่วยเป็น (กิโลกรัม/เฮกเตอร์) ซึ่งได้มาจากการใช้แบบจำลอง Grid-base dynamic ที่ 5*5 ลิปดา ข้อมูลที่ได้จะเป็นรายปีและเป็นรายประเทศ และนำข้อมูลที่ได้มาคูณกับ factor 1.2
 K_y = ค่าระยะเวลาการเจริญเติบโตเริ่มต้นและระยะเวลาการเจริญเติบโตเต็มที่
 ET_a = การคายระเหยที่แท้จริงของพืช มีหน่วยเป็น (มม./ฤดูกาล)
 CWR = ความต้องการใช้น้ำของพืชในหน่วย มม. /ฤดูกาล ซึ่งเท่ากับค่า สัมประสิทธิ์พืชคูณกับค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิง

ในการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์นี้จะรวมค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์แป้ง เหล้า และเชื้อเพลิงชีวภาพ จากการศึกษพบว่าค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เฉลี่ยทั้งโลกต่อตันของพืชที่สำคัญเพิ่มขึ้นจากพืชที่สามารถเปลี่ยนเป็นน้ำตาลได้ ประมาณ 200 ลบ.ม./ตัน อย่างไรก็ตามวอเตอร์ฟุตพริ้นท์มีค่าที่ผันแปรตาม

ชนิดของพืชและความแตกต่างกันของแต่ละภูมิภาคที่มีการผลิต วอเตอร์พุตพันธุ์พืชในช่วงเวลาการผลิตปี พ.ศ. 2539 – 2548 (ค.ศ. 1996-2005) ทั้งหมดเท่ากับ 7,404 พันล้าน ลบ.ม. / ปี ที่มากที่สุดในโลก 3 อันดับแรก ได้แก่ ข้าวสาลี เท่ากับ 1,087 พันล้าน ลบ.ม./ปี รองลงมาคือ ข้าว เท่ากับ 992 ล้าน ลบ.ม./ปี และข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เท่ากับ 770 ล้าน ลบ.ม./ปี

พืชไร่เศรษฐกิจ

ประเทศไทยโดยสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรได้กำหนดพืชไร่เศรษฐกิจ 12 ชนิด ได้แก่ ฝ้าย อ้อย มันสำปะหลัง ดอกทานตะวัน สับปะรด ปอ ข้าวฟ่าง ถั่วลิสง ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ข้าว ถั่วเหลือง ถั่วเขียว ซึ่งในการศึกษานี้จะศึกษาเฉพาะข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นพืชไร่เศรษฐกิจของประเทศไทย ที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหารสัตว์ ประมาณ 95 % ของผลผลิตทั้งหมดใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ของประเทศ และมีความต้องการเพิ่มขึ้นทุกปี นคราญ (2553)

จากวารสารธุรกิจอาหารสัตว์ (2554) ระบุว่า ปัจจุบันความต้องการข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เพื่ออุตสาหกรรมภายในประเทศเพิ่มมากขึ้นตามการขยายตัวของอุตสาหกรรมเลี้ยงสัตว์ รัฐบาลจึงจำเป็นในการนำเข้าข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในบางช่วงเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการใช้ในแต่ละปี เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อระบบการค้าข้าวโพดภายในประเทศ การนำเข้าจะนำเข้าจากประเทศลาว และกัมพูชา ส่วนการส่งออกมีแนวโน้มลดลงเนื่องจาก ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของประเทศไทยมีคุณภาพต่ำ ความชื้นสูง เพราะผลผลิตส่วนใหญ่ร้อยละ 80 ออกสู่ตลาดมากในช่วงฤดูฝน อีกทั้งราคาสูงกว่าราคาตลาดโลก ซึ่งการส่งออกส่วนใหญ่จะส่งไปยังประเทศที่อยู่ในเอเชียด้วยกัน ได้แก่ มาเลเซีย เวียดนาม อินโดนีเซีย และไต้หวัน

1. แหล่งผลิตที่สำคัญ

จังหวัดเพชรบูรณ์ นครราชสีมา ดาก น่าน เลย เชียงราย นครสวรรค์ ลพบุรี พิษณุโลก
พะเยา สระแก้ว สระบุรี อุทัยธานี (ธุรกิจอาหารสัตว์, 2554)

2. ฤดูกาลเพาะปลูก

ข้าวโพดสามารถปลูกได้ 2 ครั้งใน 1 ปี คือ

- ครั้งที่ 1 ช่วงต้นฤดูฝน จะเริ่มเพาะปลูกในช่วงปลายเดือนมีนาคมถึงพฤษภาคม และเก็บเกี่ยวในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคม
- ครั้งที่ 2 ช่วงปลายฤดูฝน จะเริ่มเพาะปลูกในช่วงกรกฎาคมถึงสิงหาคมและเก็บเกี่ยวในช่วงตุลาคมถึงพฤศจิกายน

ข้อสังเกต

1. ถ้าเลื่อนฤดูปลูกข้าวโพดให้ล่าช้ากว่าปกติ เพื่อปล่อยให้ข้าวโพดแห้งในแปลงและเก็บเกี่ยวในช่วงที่ไม่มีฝนตกแล้ว โดยทำการปลูกข้าวโพดในช่วงกลางเดือนมิถุนายนถึงปลายเดือนกรกฎาคมหรือปลูกข้าวโพดเป็นพืชที่สองหลังพืชอายุสั้นอื่น ๆ เช่น ถั่วเขียวหรือถั่วเหลืองพันธุ์อายุสั้น แล้วเก็บเกี่ยวข้าวโพดหลังจากฝักแห้งสนิท วิธีการนี้อาจจะทำให้ผลผลิตของข้าวโพดต่ำกว่าการปลูกในช่วงต้นฤดูฝน แต่การเลื่อนฤดูปลูกนอกจากจะช่วยลดการเกิดสารอะฟลาทอกซินในข้าวโพดได้เป็นอย่างดีแล้ว ยังช่วยลดความเสี่ยงจากฝนทิ้งช่วงในระยะที่ข้าวโพดออกดอกและติดฝักอีกด้วย

2. การปลูกข้าวโพดในนาในช่วงฤดูแล้ง จะสามารถผลิตข้าวโพดให้ปลอดสารอะฟลาทอกซินได้ เพราะเกษตรกรไม่ต้องเร่งเก็บเกี่ยว สามารถปล่อยให้ข้าวโพดให้แห้งในแปลงได้ และเมื่อสหกรณ์หรือพ่อค้าคนกลางรับซื้อข้าวโพดไปแล้ว มีแสงแดดเพียงพอต่อการลดความชื้นให้ลงอยู่ในระดับที่ปลอดภัยได้ทันเวลา (กรมวิชาการเกษตร, 2552)

3. ชนิดและอัตราปุ๋ยที่ควรใช้

3.1 ดินเหนียวสีดำ ถ้ามีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงกว่า 10 ส่วนในล้านส่วน ให้ปุ๋ยเคมีสูตร 21-0-0 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ หรือสูตร 46-0-0 อัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ โดยโรยแฉะข้างหลังปลูก 20-25 วัน ถ้ามีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำกว่า 10 ส่วนในล้านส่วน ให้ปุ๋ยเคมีสูตร 20-20-0 อัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ หรือสูตร 16-20-0 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ รองก้นร่องพร้อมปลูก และให้ปุ๋ยสูตร 46-0-0 อัตรา 10 กิโลกรัมต่อไร่ หรือสูตร 21-0-0 อัตรา 20 กิโลกรัมต่อไร่ โรยข้างแฉะหลังปลูก 20-25 วันแล้วพรวนดินกลับ

3.2 ดินเหนียวสีแดง ดินเหนียวสีน้ำตาล หรือดินร่วนสีน้ำตาล ให้ปุ๋ยเคมีสูตร 16-20-0 หรือ 16-16-8 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ รองก้นร่องพร้อมปลูก และให้ปุ๋ยเคมีสูตร 21-0-0 อัตรา 30 กิโลกรัมต่อไร่ หรือสูตร 46-0-0 อัตรา 10 กิโลกรัมต่อไร่ โรยข้างแฉะหลังปลูก 20-25 วัน แล้วพรวนดินกลับ

3.3 ดินร่วน หรือดินร่วนทราย ให้ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-8 หรือสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ รองก้นร่องพร้อมปลูก และปุ๋ยเคมีสูตร 21-0-0 อัตรา 30 กิโลกรัมต่อไร่ โรยข้างแฉะหลังปลูก 20-25 วัน แล้วพรวนดินกลับ (นงคราญ, 2553)

4. การแปรรูปและการใช้ประโยชน์

ข้าวโพดสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นอาหารมนุษย์หรืออาหารสัตว์ เนื่องจากเมล็ดข้าวโพดมีองค์ประกอบที่สำคัญหลายชนิด ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และวิตามิน ส่วนสำคัญของเมล็ดข้าวโพดคือ ต้นอ่อน (germ) แป้ง และ เปลือก (hull) ข้าวโพดสามารถนำไปแปรรูปได้หลายประการดังนี้ ชูติมา (2547)

4.1 เป็นอาหารมนุษย์

4.2 เป็นอาหารสัตว์

4.2.1 เมล็ด สามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์

4.2.2 หญ้าหมัก ส่วนของลำต้นสามารถนำมาทำเป็นอาหารสัตว์ประเภทหญ้าหมักสำหรับวัวนม

4.3 ใช้ในอุตสาหกรรมแป้ง เป็นการแยกแป้งออกจากเมล็ดในอุตสาหกรรมทำได้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีบดแห้ง (dry milling) และวิธีบดเปียก (wet milling)

4.3.1 วิธีบดแห้ง เป็นวิธีที่บดข้าวโพดโดยไม่ต้องนำเมล็ดไปแช่น้ำก่อน วิธีการนี้จะได้ พง กาก และแป้ง รวมทั้งไขมันและกากที่ใช้เป็นอาหารสัตว์

4.3.2 วิธีบดเปียก เป็นวิธีบดโดยนำเมล็ดไปแช่น้ำ (soaking) จะได้แป้งข้าวโพด และ โปรตีนจากข้าวโพดซึ่งสามารถนำไปทำสบู่ น้ำมันทำอาหารเลี้ยงสัตว์ กาว เป็นต้น

4.4 ใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิง

แหล่งเชื้อเพลิงใหม่ที่มนุษย์เริ่มนำมาใช้คือ เอทานอล โดยนำมาใช้เป็นส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงในอัตราต่ำร้อยละ 5 – 10 หรือในอัตราสูงร้อยละ 85 เอทานอลทำให้เครื่องยนต์เผาไหม้ได้ดี มีคาร์บอนมอนนอกไซด์น้อย มีควันน้อย ข้าวโพดสามารถนำมาทำเอทานอลได้โดยบดเมล็ดให้ละเอียดเป็นแป้ง เติมน้ำเพื่อเปลี่ยนน้ำตาล แล้วหมักน้ำตาลที่ได้ด้วยยีสต์เพื่อเปลี่ยนเป็นน้ำตาลเป็นเอทานอลและคาร์บอนไดออกไซด์

4.5 ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันข้าวโพด

4.6 ใช้ประโยชน์จากขังข้าวโพด

สามารถทำเป็นก้อนเชื้อเพลิงสำหรับหุงต้มอาหารหรือบดเป็นส่วนผสมของอาหาร และมีการนำขังข้าวโพดมาผลิตก๊าซชีวภาพ

4.7 ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

สามารถนำมาใช้ทอผ้า ทอพรหม หรือทำวัสดุประเภทพลาสติก

4.8 ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มน้ำ

โดยนำเอาข้าวโพดคั่ว (corn grit) โปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองและแป้งถั่วเหลือง นำมาผ่านขั้นตอนการทำให้ร้อนและสุกแล้วลดความชื้น นำมาปรุงแต่งกลิ่น รส และเสริมคุณค่าทางอาหารด้วยการผสมกับวัตถุดิบอื่นใช้ร่วมกับน้ำร้อนแล้วบริโภคได้ทันที

5. สถานการณ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ปี 2553

สำนักงานวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร ได้ระบุไว้ในวราสาร สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้มปี 2554 ไว้ว่า

5.1 สถานการณ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของโลก

5.1.1 การผลิต

การผลิตปี 2548/49 – 2552/2553 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 699.41 ล้านตันในปี 2548/49 เป็น 831.64 ล้านตัน ในปี 2552/53 หรือเพิ่มขึ้นในอัตราเฉลี่ยร้อยละ 4.23 ต่อปี โดยสหรัฐอเมริกาเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ของโลกได้ผลิตเพิ่มขึ้นจาก 282.26 ล้านตัน ในปี 2548/49 เป็น 333.01 ล้านตัน ในปี 2552/53 เพิ่มขึ้นอัตราเฉลี่ยร้อยละ 4.80 ต่อปีผลผลิตของโลกในปี 2552/53 เพิ่มขึ้นจาก 797.77 ล้านตัน ในปี 2551/52 ร้อยละ 1.99 โดยสหรัฐอเมริกาเพิ่มขึ้นจากปี 2551/52 ร้อยละ 8.42

5.1.2 การตลาด

(1) ความต้องการใช้ ในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมอาหารสัตว์

อุตสาหกรรมเอทานอลและเมล็ดพันธุ์ ปี 2548/49 – 2552/2553 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 706.52 ล้านตัน ในปี 2548/49 เป็น 813.68 ล้านตัน ในปี 2552/53 หรือเพิ่มขึ้นอัตราเฉลี่ยร้อยละ 3.59 ต่อปี โดยสหรัฐอเมริกามีความต้องการใช้เพิ่มขึ้นจาก 232.02 ล้านตัน ในปี 2548/49 เป็น 281.89 ล้านตัน ในปี 2552/53 หรือเพิ่มขึ้นอัตราเฉลี่ยร้อยละ 5.19 ต่อปี

(2) การส่งออก/นำเข้า ปี2548/49 – 2552/53 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 82.72 ล้านตัน ในปี 2548/49 เป็น 92.51 ล้านตัน ในปี 2552/53 หรือเพิ่มในอัตราเฉลี่ย 1.39 ต่อปี ขณะที่ สหรัฐอเมริกาผู้ส่งออกอันดับหนึ่งของโลกส่งออกได้ลดลงในอัตราเฉลี่ยร้อยละ 3.50 ต่อปี

(3) ราคาปี2548/49 - 2552/53 ราคาตลาดชิคาโกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากตันละ 82.68 ดอลลาร์สหรัฐต่อตัน (3,257 บาท) ในปี2548/49 เป็นต้นละ 141.27 ดอลลาร์สหรัฐต่อตัน (4,725 บาท) ทั้งนี้เป็นผลจากราคาน้ำมันในตลาดโลกเพิ่มสูงขึ้น หลายประเทศจึงหันมาผลิตพลังงานชีวภาพ (เอทานอล) เพิ่มขึ้น โดยสหรัฐอเมริกาใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในการผลิตเอทานอลเพิ่มขึ้นในอัตราเฉลี่ยร้อยละ 2.51 ต่อปี แต่ในปี 2552/53 ราคาได้ลดลงเนื่องจากภาวะเศรษฐกิจซบเซาและผลผลิตธัญพืช เช่น ข้าวสาลีเพิ่มขึ้น

5.2 สถานการณ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของประเทศไทย

5.2.1 การผลิต

เนื้อที่ปลูกระหว่างปี 2548/49-2552/53 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 6.62 ล้านไร่ ในปีพ.ศ. 2548/49 เป็น 7.09 ล้านไร่ ในปี พ.ศ. 2552/2553 ผลผลิตต่อไร่เพิ่มขึ้นจาก 595 กิโลกรัม ในปี 2548/49 เป็น 650 กิโลกรัม ในปี 2552/53 และทำให้ผลผลิตรวมเพิ่มขึ้นจาก 3.9 ล้านตัน ในปี 2548/49 เป็น 4.6 ล้านตัน ในปี 2552/53 (ตารางที่ 2) เนื่องจากสภาพดินฟ้าอากาศเอื้ออำนวยต่อการเพาะปลูก

5.2.2 การตลาด

ความต้องการใช้ปี 2548/49-2552/53 ความต้องการใช้ในประเทศปี 2548/49 มี 3.57 ล้านตัน เพิ่มขึ้นเป็น 4.21 ล้านตันในปี 2552/53 หรือเพิ่มขึ้นในอัตราเฉลี่ยร้อยละ 3.46 ต่อปี เนื่องจากจีนมีปัญหาเรื่องสารเมลานินปนเปื้อนในน้ำมัน ทำให้ต่างประเทศไม่มั่นใจคุณภาพอาหารของจีน ซึ่งจีนอาจนำสารปนเปื้อนมาสูตรอาหารสัตว์เพื่อลดต้นทุนการผลิต ประกอบกับไทยได้โควตานำเข้าไก่ปรุงสุกจากสหภาพยุโรปเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในอุตสาหกรรมไก่เพิ่มขึ้น

ความต้องการใช้ในประเทศปี 2552/53 เพิ่มขึ้นจาก 3.89 ล้านตันของปี 2551/52 ร้อยละ 8.23 เนื่องจากโรงงานอาหารสัตว์ที่ใช้มันสำปะหลังในสูตรอาหารสัตว์บางส่วน ต้องปรับเปลี่ยนมาใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เช่นเดิม ซึ่งเป็นผลมาจากมันสำปะหลังเกิดเพลี้ยระบาดและได้รับความเสียหายและได้รับความเสียหายทำให้ราคาเพิ่มขึ้นมาก

5.2.3 การส่งออก

ปี 2548/49-2552/53 การส่งออกปี 2548/49 มี 0.10 ล้านตันเพิ่มขึ้นเป็น 1.00 ล้านตัน ในปี 2552/53 หรือเพิ่มขึ้นอัตราเฉลี่ยร้อยละ 70.62 ต่อปีเนื่องจากการส่งออกบางส่วนเป็นการระบายสต็อกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ตามโครงการโรงรับจำนำของรัฐบาลและไทยได้เปรียบในเรื่องระยะทางการขนส่งรวมทั้งมีการนำเข้าราคาถูกจากประเทศเพื่อนบ้าน เช่น ลาวและกัมพูชา เพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ ทำให้มีปริมาณข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มากและส่งออกได้มากขึ้น

ตารางที่ 2 สถิติการส่งออก เนื้อที่เพาะปลูก เนื้อที่เก็บเกี่ยว ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่

ปี พ.ศ.	ปริมาณ ส่งออก (ตัน)	เนื้อที่ เพาะปลูก (ไร่)	เนื้อที่ เก็บเกี่ยว (ไร่)	ผลผลิตต่อไร่ (กก./ไร่)		ผลผลิต (ตัน)	
				ในเขต ชลประทาน	นอกเขต ชลประทาน	ในเขต ชลประทาน	นอกเขต ชลประทาน
2548	56,946	6,626,484	6,435,592	726	594	46,808	3,896,383
2549	56,946	6,040,008	5,871,337	729	614	45,102	3,671,130
2550	56,946	6,364,005	6,187,449	707	610	58,091	3,832,127
2551	56,946	6,691,807	6,517,662	707	634	71,182	4,178,172
2552	56,946	7,098,872	6,905,436	712	649	73,140	4,542,979

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ปี พ.ศ.2552

5.2.4 ราคา

มีแนวโน้มสูงขึ้นทุกตลาด ตามภาวะราคาตลาดโลกและราคาน้ำมันดิบที่

สูงขึ้นสามารถสรุปราคาตามตลาดต่างๆ ได้ดังนี้

(1) ราคาที่เกษตรกรขายได้ ปี 2548/49 – 2552/53 เฉลี่ยกิโลกรัมละ 4.97 บาท เพิ่มขึ้นเป็นกิโลกรัมละ 6.79 บาท ในปี 2552/53 หรือเพิ่มขึ้นในอัตราเฉลี่ยร้อยละ 7.91 ต่อปี

(2) ราคาขายส่งในตลาดกรุงเทพฯ ราคาโรงงานอาหารสัตว์รับซื้อ ปี 2548/49 – 2552/53 เฉลี่ยกิโลกรัมละ 5.68 บาท เพิ่มขึ้นเป็นกิโลกรัมละ 6.62 บาท ในปี 2552/53 หรือเพิ่มขึ้นในอัตราเฉลี่ยร้อยละ 4.57 ต่อปี

(3) ราคาส่งออก ปี 2548/49 เฉลี่ยตันละ 150.91 ดอลลาร์สหรัฐต่อตัน (5,984 บาท) เพิ่มขึ้นเป็นตันละ 242.50 ดอลลาร์สหรัฐต่อตัน (6,841 บาท) ในปี 2548/49 หรือเพิ่มขึ้นในอัตราเฉลี่ยร้อยละ 4.04 ต่อปี

แบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

แบบจำลอง The ETo Calculator

1. รายละเอียดทั่วไป

ในการศึกษานี้ใช้โปรแกรม The ETo Calculator ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ถูกเขียนโดย Dirk Raes (2009) หลักการคือเพื่อศึกษาหาค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิง (ETo) ของพืช โดยขึ้นกับปัจจัยที่มีผลต่อค่า ETo คือ ตัวแปรสภาพภูมิอากาศ โปรแกรมนี้จะไม่พิจารณาคุณลักษณะของพืชและดิน สมการที่โปรแกรมนี้ใช้คือ สมการ FAO Penman-Monteith (The ETo Calculator, 2009)

2. ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลอง

เมนูหลักจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังภาพที่ 7

2.1 การจัดการฐานข้อมูล ซึ่งในส่วนนี้จะประกอบไปด้วย

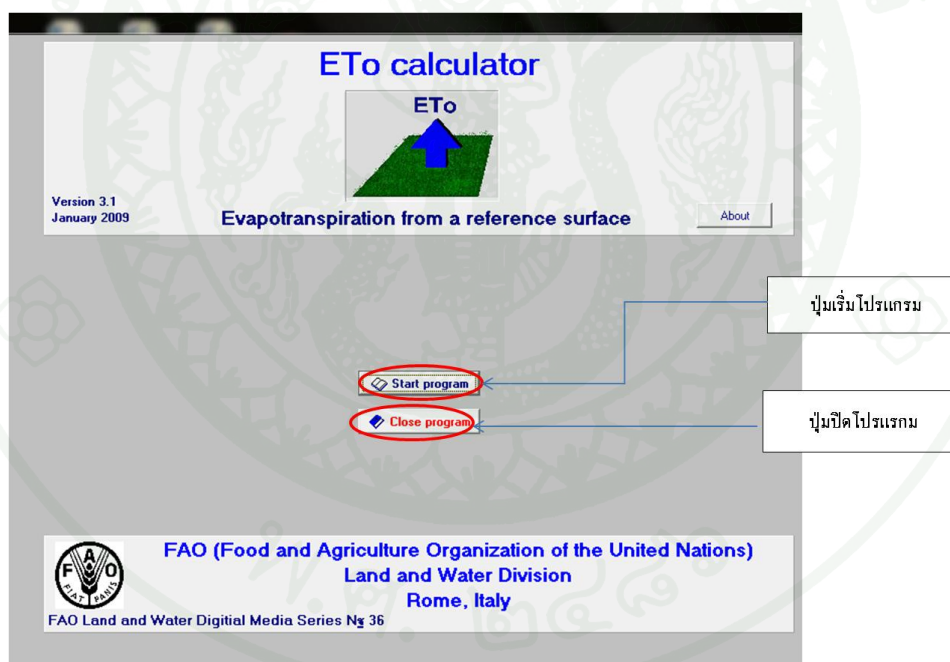
2.1.1 Select a data file ซึ่งจะสามารถเลือกข้อมูลสภาพภูมิอากาศจากสถานี

ตรวจวัด ที่ได้มีการเก็บไว้ ดังภาพที่ 8

2.1.2 Create a new file เพื่อสร้างข้อมูลใหม่ ดังภาพที่ 9 ผู้ใช้สามารถระบุรายละเอียดต่างๆดังนี้

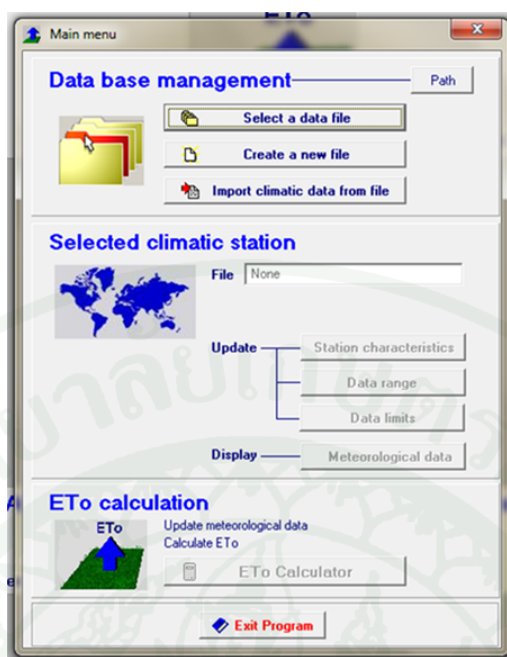
2.1.2.1 ชื่อไฟล์

2.1.2.2 ข้อมูลของสถานีตรวจวัดภูมิอากาศ (ชื่อและประเทศของสถานีตรวจวัดอากาศ) ละติจูด (เหนือ หรือ ใต้) ลองจิจูด (ตะวันตก หรือ ตะวันออก) ความสูงของสถานีตรวจวัดเหนือระดับน้ำทะเล และรายละเอียดของสถานที่ (ข้อมูลจะถูกใช้เมื่อมีการขาดหายของข้อมูลสภาพภูมิอากาศ)



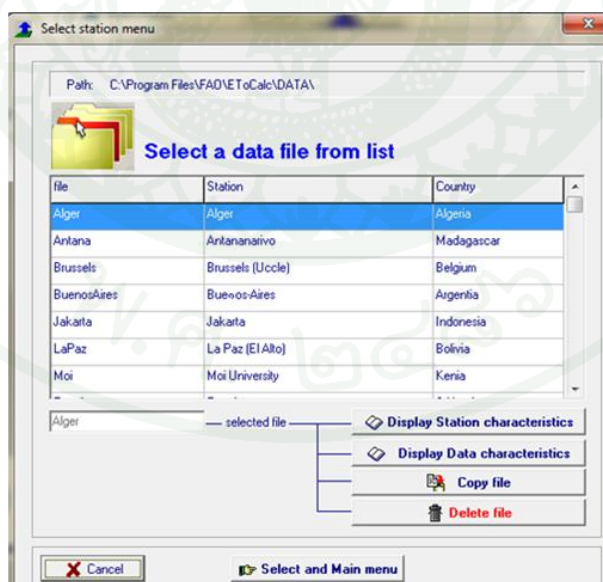
ภาพที่ 6 หน้าต่างหน้าแรกของโปรแกรม The ETo calculator

ที่มา: โปรแกรม The ETo calculator



ภาพที่ 7 หน้าต่างเมนูหลักของแบบจำลอง The ETo calculator

ที่มา: โปรแกรม The ETo calculator



ภาพที่ 8 ข้อมูลสถานีที่มีการบันทึกไว้แบบจำลอง The ETo calculator

ที่มา: โปรแกรม The ETo calculator

ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา (ประเภทของข้อมูล รายวัน รายสิบวัน หรือ รายเดือน) และช่วงเวลา (จากวันที่เท่าไรถึงวันที่เท่าไร) ถ้าข้อมูลอุตุนิยมวิทยาประกอบด้วยค่าเฉลี่ยของหลายๆปี ข้อมูลไม่ควรจะเชื่อมโยงเฉพาะเจาะจงรายปีและปีก็จะไม่สามารถถูกระบุได้ ถ้าไฟล์ใหม่ถูกสร้างขึ้นสำเร็จจะถูกเก็บไว้ในแฟ้ม (ในส่วนของ Path ในเมนูหลัก)

2.1.3 ผู้ใช้สามารถนำเข้าข้อมูลสภาพภูมิอากาศได้โดยเลือกปุ่ม Import climatic data from file ดังภาพที่ 7 คือการนำเข้าของข้อมูลแบบไฟล์ตัวอักษรสามารถนำเข้าโปรแกรมได้โดยซอฟต์แวร์ โปรแกรมสามารถรองรับไฟล์ตัวอักษรสภาพภูมิอากาศของรายวัน รายสิบวัน หรือรายเดือน ที่ถูกสร้างโดยผู้ใช้หรือ ไฟล์ข้อมูลรายเดือนที่นำมาจากซอฟต์แวร์ FAO Clim 2.0 และ CLIMWAT 2.0 ดังภาพที่ 10 ซึ่งในส่วนของการนำเข้าข้อมูลประกอบด้วย 5 ส่วน ซึ่งผู้ใช้สามารถระบุ

2.1.3.1 ประเภทไฟล์: ประเภทของไฟล์ที่ต้องการนำเข้า ซึ่งมีความแตกต่างกัน
ดังนี้

- (1) รูปแบบอิสระของไฟล์ตัวอักษร นามสกุลใช้ CXT
- (2) ไฟล์ FAO Clim 2.0 นามสกุลไฟล์ใช้ DAT
- (3) ไฟล์ CLIMWAT นามสกุลไฟล์ใช้ PEN

2.1.3.2 สถานีตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ เป็นการระบุของคุณลักษณะ
ของสถานีตรวจวัดอากาศนั้นๆ

2.1.3.3 ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ประเภทของข้อมูลและช่วงเวลาของข้อมูล

2.1.3.4 ตัวแปรสภาพภูมิอากาศ

2.1.3.5 รายงานสถานะ เป็นการบอกว่าข้อมูลใดหายไปบ้าง ผู้ใช้สามารถ

ระบุชื่อของไฟล์ที่ประกอบด้วยลักษณะของสถานีและข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่นำเข้า ถ้าทุกอย่างระบุอย่างสมบูรณ์ ข้อมูลก็จะสามารถนำเข้าได้โดยปุ่ม Import

2.2 การเลือกสถานีตรวจวัดภูมิอากาศ ในส่วนนี้ชื่อของไฟล์ที่ถูกเลือกชื่อสถานีตรวจวัดและประเทศจะแสดงให้เห็น ผู้ใช้สามารถอัปเดตคุณลักษณะของสถานี โดยให้ข้อมูลมีความกว้างหรือสั้นลง รวมทั้งปรับเปลี่ยนข้อจำกัดและตรวจสอบข้อมูลสภาพภูมิอากาศที่ใช้ได้

2.3 การคำนวณค่าการคายระเหยอ้างอิงของพืช

ชื่อไฟล์ที่ต้องการสร้าง

ชื่อสถานี

ชื่อประเทศ

แปลงหน่วยค่าพิกัดตำแหน่งสถานี

ประเภทข้อมูล

ช่วงเวลาที่ต้องการเริ่มต้นและสิ้นสุดการคำนวณ

บริเวณชายฝั่ง

บริเวณตั้งภายใน

พื้นที่แห้งแล้ง

พื้นที่กึ่งร้อนชื้น

ลมในพื้นที่(เบา)

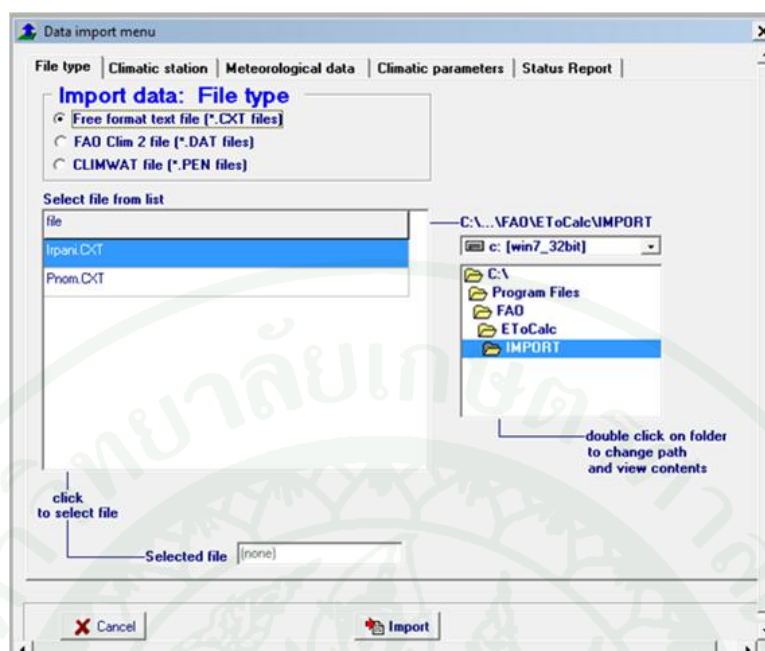
ลมปานกลาง

ลมแรง

ภาพที่ 9 Create menu สามารถกรอกข้อมูลรายละเอียดสถานีที่ต้องการสร้างแบบจำลอง

The ETo calculator

ที่มา: โปรแกรม The ETo calculator



ภาพที่ 10 ประเภทไฟล์ที่สามารถนำเข้าแบบจำลอง The ETo calculator

ที่มา: โปรแกรม The ETo calculator

3. ขอบเขตข้อมูล

กำหนดขอบเขตต่ำสุด สูงสุด สำหรับข้อมูลอุตุนิยมวิทยาภาพที่ 11 ผู้ใช้สามารถกำหนดเองได้แต่ก็จะมีข้อควรใช้สำหรับตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

3.1. ขอบเขตสำหรับอุณหภูมิของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์และความดันไอถูกเชื่อมโยงกัน การเปลี่ยนขอบเขตสำหรับหนึ่งตัวแปรจะทำให้เปลี่ยนขอบเขตสำหรับตัวแปรสภาพภูมิอากาศที่เชื่อมโยงด้วย

สำหรับขอบเขตต่ำสุด

$$e_a \geq e^o(T_{min}) \frac{RH_{min}}{100} \quad (2)$$

สำหรับขอบเขตสูงสุด

$$e_a \leq e^o(T_{max}) \quad (3)$$

โดย e_a = ความดันไอจริง (kPa)

$e^o(T_{min})$ = ความดันไอมวลที่อุณหภูมิต่ำสุดของวัน (kPa)

$e^o(T_{max})$ = ความดันไอมวลที่อุณหภูมิสูงสุดของวัน (kPa)

RH_{min} = ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุด (%)

ภาพที่ 11 กำหนดขอบเขตต่ำสุด สูงสุด สำหรับข้อมูลอุตุนิยมวิทยา แบบจำลองThe ETo calculator

ที่มา: โปรแกรม The ETo calculator

4. การคำนวณของแบบจำลอง

การคำนวณหาการคายระเหยอ้างอิงของแบบจำลองนี้ได้ใช้สมการ FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) ดังนี้

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (4)$$

โดย ET_o = ค่าการคายระเหยอ้างอิงของพืช มีหน่วยเป็น มม./วัน
 R_n = รังสีสุทธิ ณ ระดับความสูงของพืช มีหน่วยเป็น เมกกะจูลล์/ตร.ม./วัน
 G = อัตราการเคลื่อนย้ายพลังงานความร้อนในดิน
 T = อุณหภูมิเฉลี่ยที่ระดับ 2 เมตรจากพื้นดิน มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส
 U_2 = ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูง 2 เมตร มีหน่วยเป็น ม./วินาที
 e_s = ความดันบรรยากาศ ณ จุดไอน้ำอิ่มตัว มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล
 e_a = ความดันไอน้ำอิ่มตัว มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล
 Δ = โค้งความชันของความดันไอน้ำอิ่มตัว มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล/องศาเซลเซียส
 γ = ค่าคงที่ไซโครโครเมตริก มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล/องศาเซลเซียส

โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1. ตัวแปรบรรยากาศ

4.1.1. ความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure; P) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของบรรยากาศต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนผิวโลก

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (5)$$

โดย P = ความดันบรรยากาศ มีหน่วยเป็น กิโลปาสคา
 Z = ระดับความสูงสถานีเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง มีหน่วยเป็นเมตร

4.1.2. ค่าคงที่ไซโครเมตริก (Psychrometric constant; γ)

$$\gamma = \frac{C_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.664742 \times 10^3 P \quad (6)$$

โดย γ = ค่าคงที่ไซโครเมตริก มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล/องศาเซลเซียส
 P = ความดันบรรยากาศ กิโลปาสกาล
 λ = ความร้อนแฝงของการกลายเปลี่ยนไอน้ำ เป็นค่าคงที่เท่ากับ 2.45 เมกะจูล/กิโลกรัม
 C_p = ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ 1013×10^{-3} เมกะจูล/กิโลกรัม/องศาเซลเซียส

4.2. อุณหภูมิอากาศ (Air Temperature)

4.2.1. อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย (Mean air temperature; T_{mean})

$$T_{\text{mean}} = \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} \quad (7)$$

โดย T_{mean} = อุณหภูมิเฉลี่ย มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส
 T_{max} = อุณหภูมิสูงสุด มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส
 T_{min} = อุณหภูมิต่ำสุด มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

กฎการคำนวณ

- ถ้ามีข้อมูลค่า T_{max} และ T_{min} ค่า T_{mean} สามารถคำนวณจากสมการที่(6)
- ถ้ามีแต่ค่า T_{mean} และ T_{max} หรือ T_{min} หายไปสามารถคำนวณได้จากการจัดสมการที่ (6)

ใหม่

- ถ้าค่า T_{max} หรือ T_{min} เป็นค่าที่ขาดหายไปจะไม่สามารถคำนวณหาค่าการคายระเหยของ

พืชอ้างอิง

- ถ้าไม่มีข้อมูลอุณหภูมิค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิงจะไม่สามารถคำนวณได้

4.3. ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (Air humidity)

4.3.1. ความดันไออิ่มตัวเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิอากาศ (Saturation vapour

pressure as a function of air temperature; $e^o(T)$)

$$e^o(T) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27T}{T+237.3} \right] \quad (8)$$

โดย $e^o(T)$ = ความดันไอลิ่มตัวที่อุณหภูมิอากาศ T มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล

T = อุณหภูมิอากาศ มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

$\exp[...]$ = 2.7183 (base of natural logarithm)

4.3.2. ค่าความดันไอลิ่มตัวเฉลี่ยสำหรับรายวัน 10 วัน หรือ เดือน (Mean saturation vapour pressure for a day, 10-day, or month; e_s)

ค่าความดันไอลิ่มตัวเฉลี่ยสำหรับรายวัน 10 วันหรือเดือน สามารถคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยระหว่างค่าความดันไอลิ่มตัวที่ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิสูงสุดรายวันและอุณหภูมิต่ำสุดรายวันสำหรับช่วงเวลานั้น

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2} \quad (9)$$

โดย e_s = ความดันไอลิ่มตัว มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล

$e^o(T_{max})$ = ความดันไอลิ่มตัวที่อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดรายวัน มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล

$e^o(T_{min})$ = ความดันไอลิ่มตัวที่อุณหภูมิต่ำสุดรายวัน มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล

4.3.3. โค้งความลาดชันของความดันไอลิ่มตัว (Slope of saturation vapour pressure curve; Δ)

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27T}{T+237.3} \right) \right]}{(T+237.3)^2} \quad (10)$$

โดย Δ = โค้งความลาดชันของความดันไอลิ่มตัวที่อุณหภูมิ T มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล/องศาเซลเซียส

T = อุณหภูมิอากาศ มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส
 $\exp [..] = 2.7183$ (base of natural logarithm)

4.3.4. ความดันไอลิ่มตัวจริงคำนวณจากข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ (Actual vapour pressure (e_a) derived from relative humidity data)

$$e_a = e^o(T_{mean}) \frac{RH_{mean}}{100} \quad (11)$$

โดย e_a = ความดันไอลิ่มตัวจริง มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล
 $e^o(T_{mean})$ = ความดันไอลิ่มตัวที่อุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน มีหน่วยเป็น กิโล ปาสกาล
 RH_{mean} = ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ มีหน่วยเป็น %

ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ ค่าความดันไอลิ่มตัวจริงสามารถคำนวณได้จากการสมมติใช้ข้อมูลอุณหภูมิต่ำสุดแทนค่าอุณหภูมิน้ำค้างเฉลี่ย (T_{dew}) ได้ดังสมการนี้

$$e_a = e^o(T_{dew}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{dew}}{T_{dew} + 237.3} \right] \quad (12)$$

เมื่อ e_a = ความดันไอลิ่มตัวจริง มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล
 T_{dew} = อุณหภูมิน้ำค้าง มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

4.4. รังสี (Radiation)

4.4.1. รังสีจากนอกโลก (Extraterrestrial radiation; R_a)

รังสีจากนอกโลกสำหรับแต่ละวันของปีและสำหรับความแตกต่างละติจูดสามารถคำนวณได้จากแสงที่ส่องจากดวงอาทิตย์ ความลาดเอียงของแสงดวงอาทิตย์และเวลาของปีดังสมการ

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (13)$$

โดย	R_a	= รังสีจากนอกโลก มีหน่วยเป็น เมกะจูลล์/ม. ² /วัน
	G_{sc}	= แสงแดดจากดวงอาทิตย์ เท่ากับ 0.0820 มีหน่วยเป็น เมกะจูลล์/ม. ² /นาที
	d_r	= ระยะทางแสงที่เดินทางไป-กลับ ระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์
	ω_s	= มุมองศาชั่วโมงที่พระอาทิตย์ตก มีหน่วยเป็น เรเดียน
	φ	= ละติจูด มีหน่วยเป็น เรเดียน
	δ	= ความลาดเอียงของแสง มีหน่วยเป็น เรเดียน

ละติจูดแสดงในรูปเรเดียนเป็นบวกสำหรับซีกโลกภาคเหนือและลบสำหรับซีกโลกภาคใต้ การแปลงค่าจากเลขทศนิยมเป็นองศาโดย

$$[Radians] = \frac{\pi}{180} [decimal\ degree] \quad (14)$$

ระยะทางแสงที่เดินทางไป-กลับ ระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (d_r) และความลาดเอียงของแสง δ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (13) และ (14)

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (15)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (16)$$

โดย J = จำนวนของวันในปีระหว่าง 1 (1 มกราคม) และ 365 หรือ 366 (31 ธันวาคม)
มุมองศาที่พระอาทิตย์ตก ω_s สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (17)

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad (17)$$

4.4.2. ชั่วโมงที่มีแสงแดด (Daylight hours; N)

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (18)$$

โดย ω_s = มุมชั่วโมงดวงอาทิตย์ตกในหน่วยองศา ในสมการที่ (17)

4.4.3. รังสีดวงอาทิตย์ (Solar radiation; R_s)

ถ้ารังสีดวงอาทิตย์ไม่ได้ทำการวัด สามารถคำนวณได้ด้วยสูตรอังสตรอม ซึ่งเกี่ยวข้องกับรังสีดวงอาทิตย์ถึงรังสีจากนอกโลกและเกี่ยวข้องกับชั่วโมงที่มีแสงแดด

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (19)$$

โดย R_s = แสงอาทิตย์ หรือ รังสีคลื่นสั้น มีหน่วยเป็น เมกะจูลล์/ม.²/วัน
 n = ชั่วโมงที่มีแสงแดดจริง มีหน่วยเป็น ชั่วโมง
 N = ชั่วโมงที่มีแสงแดดมากที่สุดที่จะเป็นไปได้ หรือ ชั่วโมงที่มีแสงแดดรายวัน มีหน่วยเป็น ชั่วโมง
 n/N = ความสัมพันธ์ชั่วโมงที่มีแสงแดด
 R_a = รังสีจากนอกโลก มีหน่วยเป็น เมกะจูลล์/ม.²/วัน
 a_s = ค่าการลดทอนคงที่ แสดงออกในส่วนของรังสีนอกโลกที่มาถึงโลกในวันที่เมฆปกคลุมมาก ($n=0$)
 a_s+b_s = ส่วนของรังสีนอกโลกที่มาถึงโลกในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส ($n=N$)

4.4.4. รังสีดวงอาทิตย์ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส (Clear-sky solar radiation; R_{so})

กรณีที่ต้องการเปลี่ยนระดับความสูงสถานี

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} Z) R_a \quad (20)$$

โดย R_{so} = รังสีดวงอาทิตย์ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส มีหน่วยเป็น เมกะจูลล์/ม.²/วัน
 Z = ระดับความสูงสถานีเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง มีหน่วยเป็น เมตร
 R_a = รังสีจากนอกโลก มีหน่วยเป็น เมกะจูลล์/ม.²/วัน

กรณีที่ไม่มี การเปลี่ยนระดับความสูงสถานีและมีการวัดค่า a_s และ b_s

$$R_{so} = (a_s + b_s) R_a \quad (21)$$

โดย $a_s + b_s$ = ส่วนของรังสีนอกโลกที่มาถึงโลกในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส ($n = N$)

4.4.5. การแผ่รังสีคลื่นสั้นสุทธิ (Net solar or net shortwave radiation; R_{ns})

ได้ผลลัพธ์จากความสมดุลระหว่างรังสีที่เข้ามาและสะท้อนกลับออกไป

คำนวณได้จาก

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (22)$$

โดย R_{ns} = รังสีคลื่นสั้นสุทธิ มีหน่วยเป็น เมกะจูลล์/ม.²/วัน
 α = สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพืชปกคลุมดินสำหรับพืชอ้างอิง ไม่มีหน่วย
 R_s = รังสีดวงอาทิตย์ที่เข้ามา มีหน่วยเป็น เมกะจูลล์/ม.²/วัน

4.4.6. รังสีคลื่นยาวสุทธิ (Net long wave radiation; R_{nl})

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (23)$$

โดย R_{nl} = รังสีคลื่นยาวสุทธิ มีหน่วยเป็น เมกะจูลล์/ม.²/วัน
 σ = ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzman เท่ากับ 4.903×10^{-9} มีหน่วยเป็น เมกะจูลล์/กก.⁴/ม.²/วัน

$T_{max,K}$ = อุณหภูมิสูงสุดในช่วง 24 ชั่วโมง ($K = +273.6^\circ C$)

$T_{min,K}$ = อุณหภูมิต่ำสุดในช่วง 24 ชั่วโมง ($K = +273.6^\circ C$)

e_a = ความดันไอน้ำจริง มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล

R_s/R_{so} = ความสัมพันธ์ของคลื่นรังสีสั้นสุทธิ ต้องมีค่า ≤ 1.0

R_s = วัดได้หรือคำนวณรังสีดวงอาทิตย์ได้จากสมการที่ (18)

R_{so} = คำนวณรังสีในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสได้จากสมการที่ (19)

4.4.7. รังสีสุทธิ (Net radiation; R_n)

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (24)$$

กฎการคำนวณ

- ถ้าข้อมูลแสงแดดหรือ รังสีขาดหายไป หรือ ตัวแปรบางตัวขาดหายไปที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณรังสี สามารถคำนวณได้จาก
- ถ้าข้อมูลรังสีสุทธิขาดหายไปให้คำนวณจากสมการ (24)
- ถ้าข้อมูลรังสีสุทธิและรังสีดวงอาทิตย์ขาดหายไปสามารถคำนวณได้จากสมการ (19) หรือสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (25) ถ้ามีข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิต่ำสุด

$$R_s = k_{Rs} \sqrt{(T_{max} - T_{min}) R_a} \quad (25)$$

โดย k_{Rs} = ค่าปรับแก้ มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}^{-0.5}$

4.5. ความเร็วลม (Wind speed)

สถานีวัดความเร็วลมแต่ละสถานีมีความสูงแตกต่างกัน ซึ่งความสูงมาตรฐานของสถานีวัดความเร็วลม เท่ากับ 2 เมตร ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแก้ดังสมการต่อไปนี้

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8Z - 5.42)} \quad (25)$$

โดย u_2 = ความเร็วลมที่ความสูง 2 เมตร เหนือระดับพื้นดิน มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที
 u_z = อัตราความเร็วลมที่วัดได้ที่ระดับความสูง z เมตร จากพื้นดิน มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที
 z = ความสูงที่ใช้การตรวจวัดเหนือระดับพื้นดิน มีหน่วยเป็น เมตร

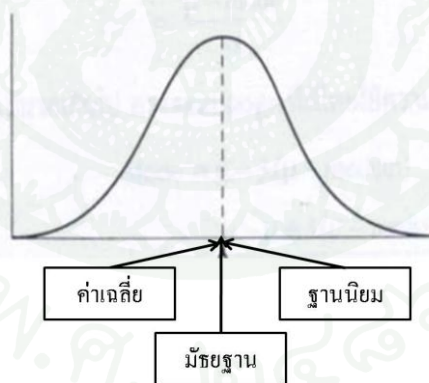
สถิติที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

เนื่องจากข้อมูลอุณหภูมิตัวอย่างไม่ครบถ้วน ดังนั้นจึงทำการหาแนวโน้มของความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น โดยนำข้อมูลของสถานีที่มีข้อมูลอุณหภูมิตัวอย่างครบถ้วนสมบูรณ์ มาหาค่า ETo โดยใช้แบบจำลอง The ETo calculator และทดลองทำการตัดข้อมูลบางส่วน เช่น ชั่วโมงที่มีแสงแดด (n) ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ความเร็วลม (U2) เป็นต้น แล้วจึงทำการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น โดยใช้ค่าทางสถิติ ดังนี้ ค่า R2 ค่า EI และค่า Skewness โดยทั้ง 3 ค่า มีนิยามดังต่อไปนี้ตามทฤษฎีของ อำนาจและคณะ(2555)

1. ค่าความเบ้ หรือ Skewness คือ ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลไม่สมมาตรทำให้เส้นโค้งความถี่ของข้อมูลเบ้ สามารถแบ่งลักษณะการเบ้ของข้อมูลได้ 3 แบบ

1.1 เส้นโค้งปกติ (Normal curve) คือ การกระจายตัวของข้อมูลมีความสมมาตร (symmetric) แล้ว ค่าเฉลี่ย = ค่ามัธยฐาน = ค่าฐานนิยม (Mean = Median = Mode) แสดงดังภาพที่

12

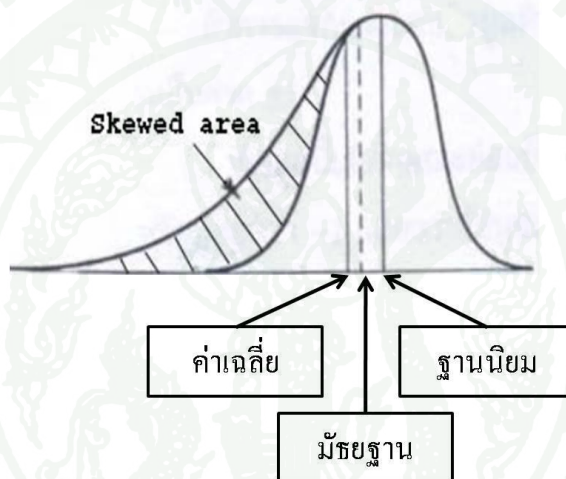


ภาพที่ 12 เส้นโค้งปกติ

ที่มา: ศศ.อำนาจและคณะ (2555)

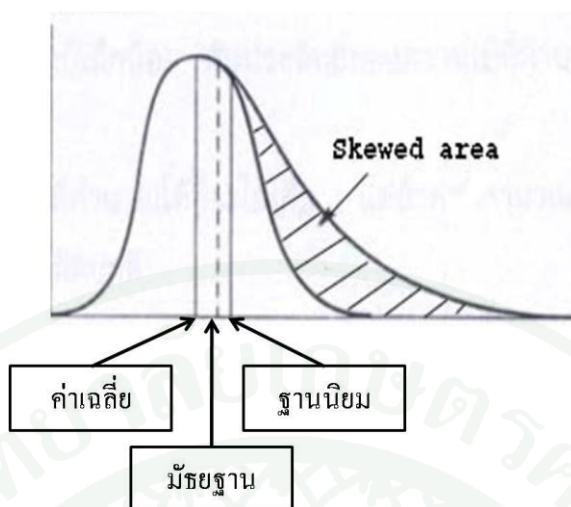
1.2 เส้นโค้งความถี่เบ้ซ้าย หรือเบ้ลบ (Skewed to the left หรือ negative skew) แล้ว
ค่าเฉลี่ย < ค่ามัธยฐาน < ค่าฐานนิยม (Mean < Median < Mode) แสดงว่าข้อมูลส่วนใหญ่มีค่าสูงดัง
ภาพที่ 13

1.3 เส้นโค้งความถี่เบ้ขวา หรือเบ้บวก (Skewed to the right หรือ positive skew) แล้ว
ค่าฐานนิยม < ค่ามัธยฐาน < ค่าเฉลี่ย (Mode < Median < Mean) แสดงว่าข้อมูลส่วนใหญ่มีค่าต่ำดัง
ภาพที่ 14



ภาพที่ 13 เส้นโค้งความถี่เบ้ซ้าย

ที่มา: ผศ.อำนาจและคณะ (2555)



ภาพที่ 14 เส้นโค้งความถี่เบ้ขวา

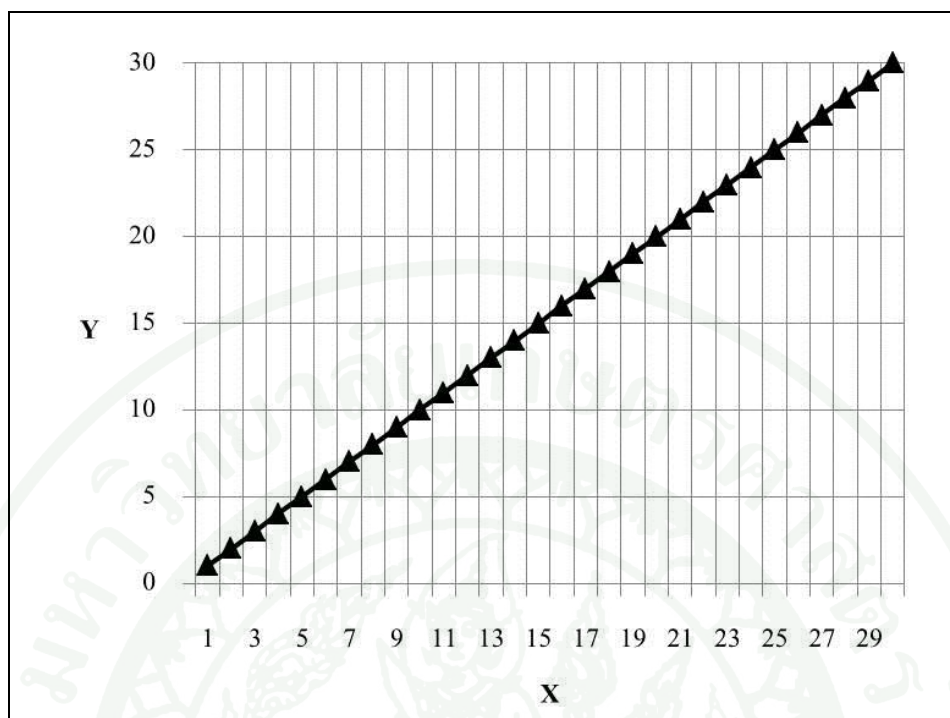
ที่มา: ผศ.อำนาจและคณะ (2555)

สูตรการคำนวณค่าความเบ้ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$skewness = \left(\frac{n}{(n-1)(n-2)} \right) \sum \left(\frac{x_i - \bar{x}}{SD} \right)^3 \quad (26)$$

โดย n = จำนวนข้อมูล
 X_i = ค่าข้อมูล
 $\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยของข้อมูล
 SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2. สัมประสิทธิ์ของการกำหนด (R^2 หรือ The Coefficient of Determination) คือ พารามิเตอร์ที่แสดงถึงความเข้ากันได้ของข้อมูล 2 ชุด ค่า R^2 จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยที่ 0 แสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์ใดระหว่างข้อมูลค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิงที่ได้จากแบบจำลองและค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิงที่ได้จากการวัดจริง และ 1 แสดงว่าข้อมูลค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิงที่ได้จากแบบจำลองและค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิงที่ได้จากการวัดจริง มีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ ภาพที่ 15 ตัวอย่าง R^2 เข้าใกล้ 1 หรือเท่ากับ 1 ตัวแปรทุกตัวจะอยู่บนเส้นถดถอย



ภาพที่ 15 ตัวอย่าง R^2 เข้าใกล้ 1 หรือเท่ากับ 1

เมื่อ R^2 เท่ากับ 0 ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยการถดถอย ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 R^2 เท่ากับ 0

สมการในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การกำหนด หรือ R^2 สามารถคำนวณได้จาก

$$R = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (27)$$

โดย X_i = ค่าจากแบบจำลอง
 $\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยจากแบบจำลอง
 Y_i = ค่าจากการตรวจวัด
 $\bar{Y}$ = ค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัดจริง

3. ค่าดัชนีประสิทธิภาพ (Efficiency Index, EI) เป็นตัวแปรทางสถิติที่แสดงระดับความสัมพันธ์ (Degree of Association) ระหว่างค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิงที่ได้จากแบบจำลอง และค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิงที่ได้จากการวัดจริง ค่าที่ยอมรับได้ควรมีค่าเข้าใกล้ 100 เปอเซ็นต์ สามารถคำนวณได้จาก

$$EI = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}\right) \times 100 \quad (28)$$

โดย X_i = ค่าจากแบบจำลอง
 $\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยจากแบบจำลอง
 Y_i = ค่าจากการตรวจวัดจริง

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ และเครื่องพิมพ์ 1 ชุด
2. โปรแกรม Microsoft excel, Microsoft word, CROPWAT 8.0, Arc GIS 9.3, The ETo calculator

วิธีการ

พื้นที่ทำการศึกษา

ในการศึกษานี้เราสนใจพื้นที่เพาะปลูกหลักของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยดังแสดงในภาพที่ 17 ประกอบด้วย 40 จังหวัด แต่สามารถหาค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ได้เพียง 28 จังหวัดเนื่องจากขาดข้อมูลสภาพภูมิอากาศที่สำคัญ ทำให้โปรแกรม The ETo calculator ไม่สามารถหาค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิง ได้ตามสมการที่ (4) จังหวัดที่สามารถหาค่า วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ ได้แก่

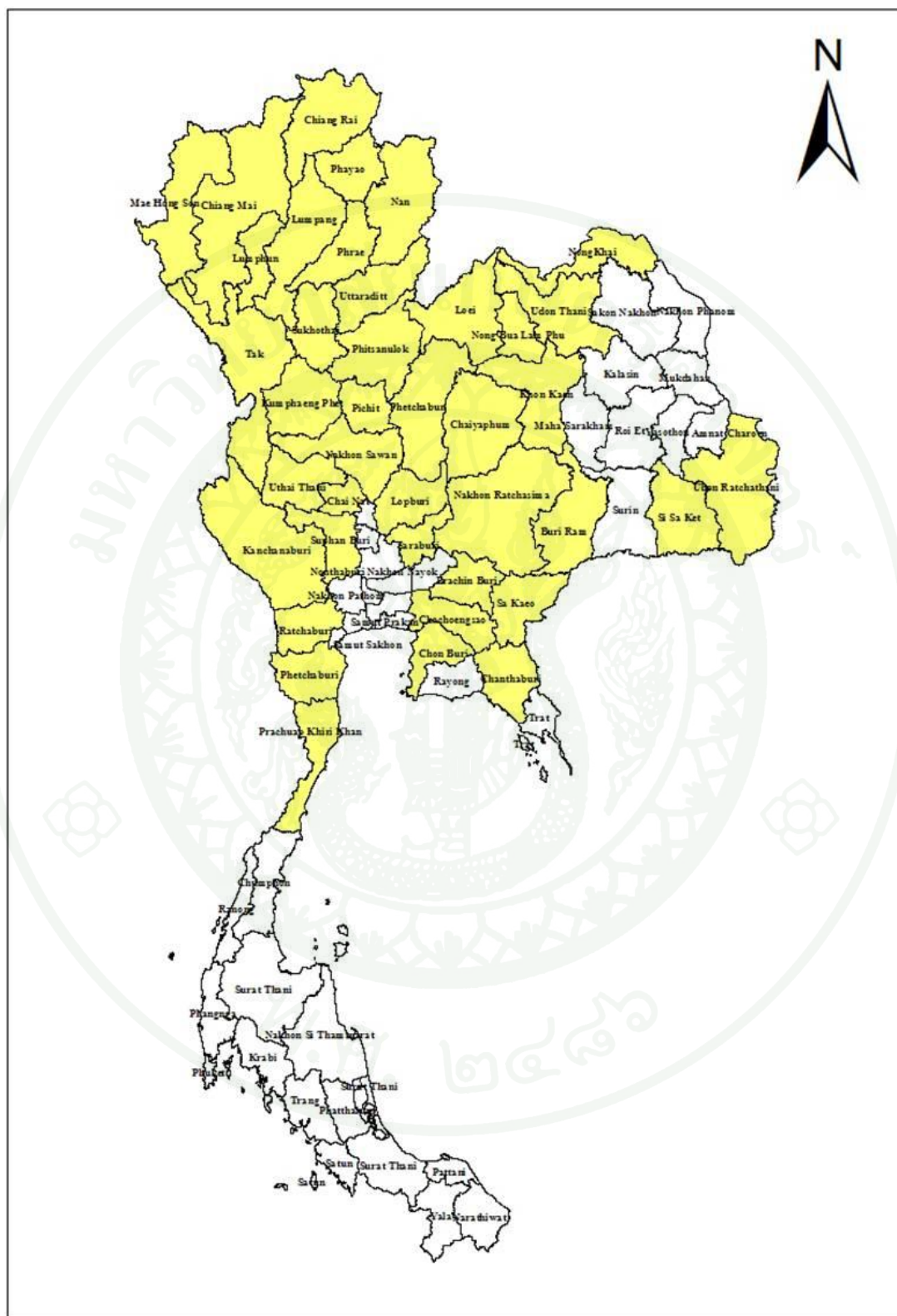
- ภาคเหนือ เชียงราย เชียงใหม่ พะเยา ลำพูน แพร่ น่าน อุตรดิตถ์
- ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ประกอบด้วย ขอนแก่น ชัยภูมิ นครราชสีมา เลย หนองคาย อุดรราชธานี อุบลราชธานี
- ภาคกลาง ประกอบด้วย กำแพงเพชร นครสวรรค์ พิจิตร เพชรบูรณ์ ลพบุรี สุพรรณบุรี
- ภาคตะวันออกประกอบด้วย จันทบุรี ระยองตรา ชลบุรี ปราจีนบุรี สระแก้ว
- ภาคตะวันตกประกอบด้วย ตาก ประจวบคีรีขันธ์ เพชรบุรี

อย่างไรก็ตามจังหวัดเหล่านี้ยังขาดข้อมูลอุตุนิยมวิทยาซึ่งแต่ละจังหวัดขาดข้อมูลแตกต่างกัน จากการที่ขาดข้อมูลอุตุนิยมวิทยาบางกรณีนั้นจะส่งผลให้แบบจำลอง The ETo calculator มีค่าทางสถิติแตกต่างกัน โดยในตารางที่ 3 ได้ทำการแบ่งจังหวัดที่ข้อมูลขาดหายออกเป็นกรณีต่างๆ

ตารางที่ 3 จังหวัดที่ข้อมูลขาดหายแบ่งตามกรณี

กรณี	จังหวัด
ข้อมูลครบ	อุดรราชธานี นครสวรรค์ เชียงราย
ขาด U_2	อุบลราชธานี, พิจิตร
ขาด n	พะเยา เชียงใหม่ ลำพูน แพร่ น่าน อุดรดิตถ์ ตาก เพชรบูรณ์ หนองคาย เลย ขอนแก่น นครราชสีมา กำแพงเพชร ชัยภูมิ สุพรรณบุรี ลพบุรี ปราจีนบุรี สระแก้ว ชลบุรี จันทบุรี เพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์
มีแต่อุณหภูมิ	ยะลา สงขลา

หมายเหตุ จังหวัดที่สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรไม่มีข้อมูลข้าวโพดเลี้ยงสัตว์นั้นคือเป็นจังหวัดที่ไม่มีการเพาะปลูก



ภาพที่ 17 พื้นที่เพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รายจังหวัด

ข้อมูลผลผลิตต่อไร่ของพืชและการใส่ปุ๋ยเคมี

ข้อมูลผลผลิตต่อไร่รายปีและข้อมูลผลผลิตของแต่ละจังหวัด ใช้ข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 – 2552 ตารางที่ 4 แสดงค่าผลผลิตต่อไร่และผลผลิตรายจังหวัดเฉลี่ยระหว่างปี พ.ศ. 2548 – 2552 พบว่า จังหวัดพิจิตรมีผลผลิตต่อไร่สูงที่สุดเท่ากับ 683 กก./ไร่ ขณะที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน มีผลผลิตต่อไร่ต่ำที่สุดเท่ากับ 479 กก./ไร่ โดยค่าเฉลี่ยทั้งประเทศเท่ากับ 624 กก./ไร่ อย่างไรก็ตาม พบว่า จังหวัดเพชรบูรณ์มีผลผลิตมากที่สุดเท่ากับ 654,807 ตัน ขณะที่จังหวัดบุรีรัมย์ มีผลผลิตน้อยที่สุดเท่ากับ 278 ตัน

ตารางที่ 4 สถิติผลผลิตต่อไร่ ผลผลิต และการใส่ปุ๋ยเคมีของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รายจังหวัดระหว่างปี พ.ศ. 2548-2552

จังหวัด	ผลผลิต (ตัน)	ผลผลิตต่อไร่ (กก.)		เนื้อที่ใส่ ปุ๋ย (ไร่)	ปุ๋ยเคมี	
		ในเขตพื้นที่ ชลประทาน	นอกเขต พื้นที่ ชลประทาน		ปริมาณ ปุ๋ยที่ใช้ (ตัน)	ปริมาณ ปุ๋ยเคมีที่ ใช้ต่อไร่ (กก./ไร่)
ภาคเหนือ						
เชียงราย	260,245	708	658	374,682	13,246	35
เชียงใหม่	67,214	761	677	77,295	3,422	44
พะเยา	146,450	731	668	203,314	7,777	39
แพร่	76,640	593	575	114,122	4,417	39
น่าน	220,394	702	616	315,696	13,087	40
อุตรดิตถ์	62,316	664	620	78,931	3,075	40
สุโขทัย	46,171	670	592	76,395	2,845	37
พิษณุโลก	172,448	720	662	244,790	11,854	49
พิจิตร	31,911	769	683	45,580	1,646	36
ตาก	313,758	750	653	468,269	19,235	41
ลำปาง	40,348	728	670	52,048	2,301	44
ลำพูน	52,477	746	662	65,639	2,711	41

ตารางที่ 4 (ต่อ)

จังหวัด	ผลผลิต (ตัน)	ผลผลิตต่อไร่ (กก.)		เนื้อที่ได้ ปุ๋ย (ไร่)	ปุ๋ยเคมี	
		ในเขตพื้นที่ ชลประทาน	นอกเขต พื้นที่ ชลประทาน		ปริมาณ ปุ๋ยที่ใช้ (ตัน)	ปริมาณ ปุ๋ยเคมีที่ ใช้ต่อไร่ (กก./ไร่)
ภาคเหนือ						
แม่ฮ่องสอน	2,827	346	479	4,624	157	31
เพชรบูรณ์	654,807	714	655	986,933	46,486	47
กำแพงเพชร	124,993	763	681	180,462	7,726	43
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ						
ขอนแก่น	3,989	356	549	6,745	241	37
ชัยภูมิ	65,601	611	535	115,119	4,550	40
เลย	254,436	642	523	419,521	17,466	41
หนองบัวลำภู	32,075	644	533	57,729	2,325	40
อุดรราชธานี	9,850	616	489	19,965	775	39
หนองคาย	1,846	341	508	3,516	127	37
อุบลราชธานี	10,590	680	659	16,209	679	42
ศรีสะเกษ	43,764	706	619	69,211	3,421	49
บุรีรัมย์	278	355	570	479	18	38
นครราชสีมา	428,153	684	556	766,433	34,903	45
ภาคกลาง						
นครสวรรค์	261,939	726	655	418,452	18,438	44
อุทัยธานี	135,987	770	669	209,005	10,471	50
ลพบุรี	246,696	694	596	419,521	15,402	37
สระบุรี	104,330	723	621	161,288	7,268	45
ชัยนาท	7,691	640	528	14,361	615	43

ตารางที่ 4 (ต่อ)

จังหวัด	ผลผลิต (ตัน)	ผลผลิตต่อไร่ (กก.)		เนื้อที่ได้ ปุ๋ย (ไร่)	ปุ๋ยเคมี	
		ในเขตพื้นที่ ชลประทาน	นอกเขต พื้นที่ ชลประทาน		ปริมาณ ปุ๋ยที่ใช้ (ตัน)	ปริมาณ ปุ๋ยเคมี ที่ใช้ต่อ ไร่(กก./ ไร่)
ภาคตะวันออก						
จันทบุรี	21,414	714	631	33,619	1,366	41
ชลบุรี	833	259	581	1,411	57	40
ปราจีนบุรี	7,205	407	635	14,412	727	49
สระแก้ว	143,855	738	650	215,787	9,764	45
ฉะเชิงเทรา	9,770	735	628	15,467	647	42
ภาคตะวันตก						
กาญจนบุรี	49,521	369	582	83,097	3,145	38
ราชบุรี	3,705	350	490	6,273	220	35
เพชรบุรี	1,426	341	479	2,368	84	34
ประจวบคีรีขันธ์	1,141	343	496	1,975	73	37
สุพรรณบุรี	34,439	603	539	63,923	2,474	39

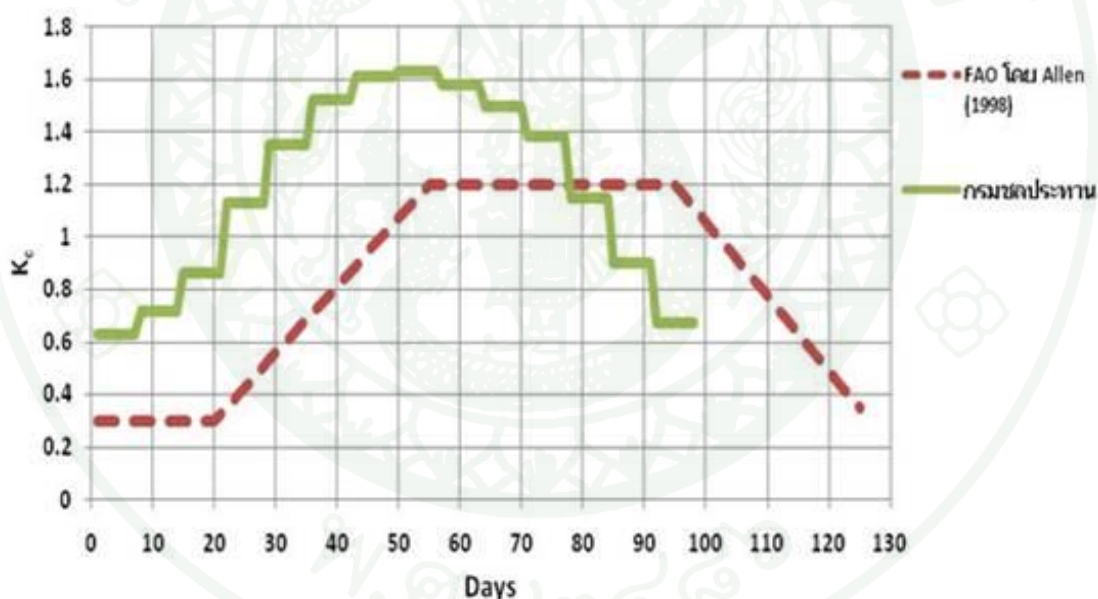
ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ปีพ.ศ.2548-2552

ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ

ข้อมูลสภาพภูมิอากาศเป็นรายวัน ได้แก่ อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิต่ำสุด ความเร็วลม ระดับความสูงสถานีจากพื้นผิวดิน ฝน ชั่วโมงที่มีแสงแดด และ ความชื้นสัมพัทธ์ โดยใช้ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา ตั้งแต่ปี พ.ศ.2548-2553 และเลือกจากสถานีที่ตั้งอยู่ภายในจังหวัดที่พิจารณาและมีข้อมูลครบถ้วนมากที่สุด

ข้อมูลการใช้น้ำของพืช

ในการศึกษานี้ได้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์พืชจากกรมชลประทานเนื่องจากการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์พืชในประเทศไทยซึ่งเป็นค่าที่มีความเหมาะสมมากกว่าค่าที่แนะนำในรายงาน FAO No. 56 ที่เป็นค่าทั่วไป รูปที่ 18 ได้ทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์พืช (K_c) ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของรายงาน FAO No.56 และกรมชลประทาน พบว่า ช่วงการเพาะปลูกของกรมชลประทาน (98 วัน) สั้นกว่าของรายงาน FAO No.56 (126 วัน) อย่างไรก็ตาม พบว่า ผลรวมค่าสัมประสิทธิ์พืชของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของกรมชลประทานเท่ากับ 116.41 สูงกว่าค่าที่แนะนำในรายงาน FAO No.56 ร้อยละ 46 จากผลการประเมินเบื้องต้นทำให้ทราบว่า หากใช้ค่ากรมชลประทานมีแนวโน้มทำให้ได้ค่าอัตรารุณสำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยสูงกว่าการศึกษาของ Hoekstra and Chapagain (2007) และ Mekonnen และ Hoekstra (2010) ที่ใช้ในคำรายงาน FAO No.56



ภาพที่ 18 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์พืช (K_c) ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของ FAO No.56

ที่มา: Allen et al. (1998) และ กรมชลประทาน (2555)

ประเภทดิน

ประเภทของดิน ได้ใช้ข้อมูลจาก Batjes, Niels H. (2006) สำหรับการหาความชื้นในดินทั้งหมดที่ใช้การได้ (total available soil moisture, มม. /ม.) รายจังหวัดดังตารางที่ 5 และสำหรับตัวแปรอื่นๆ ได้ใช้ ข้อมูลจาก CROPWAT 8.0 โดยเลือกดินเป็นประเภทดินร่วน (loam) ซึ่งจะได้ ค่าความยาวรากพืชมากที่สุด (maximum rooting depth, ซม.) เท่ากับ 900 ซม. อัตราน้ำฝนที่ซึมลงสู่ดินสูงสุด (maximum rain infiltration rate, มม. /วัน) เท่ากับ 40 มม. /วัน ค่าเริ่มต้นการซึมลึกในดิน (initial soil moisture depletion, %) เท่ากับ 0% และระดับการขาดน้ำ (depletion, %) เท่ากับ 0.2 ตอนเริ่มต้นจนถึงช่วงการเจริญเติบโตและเท่ากับ 0.25 เมื่อช่วงระยะกลาง ในระยะเก็บเกี่ยวเท่ากับ 0.50

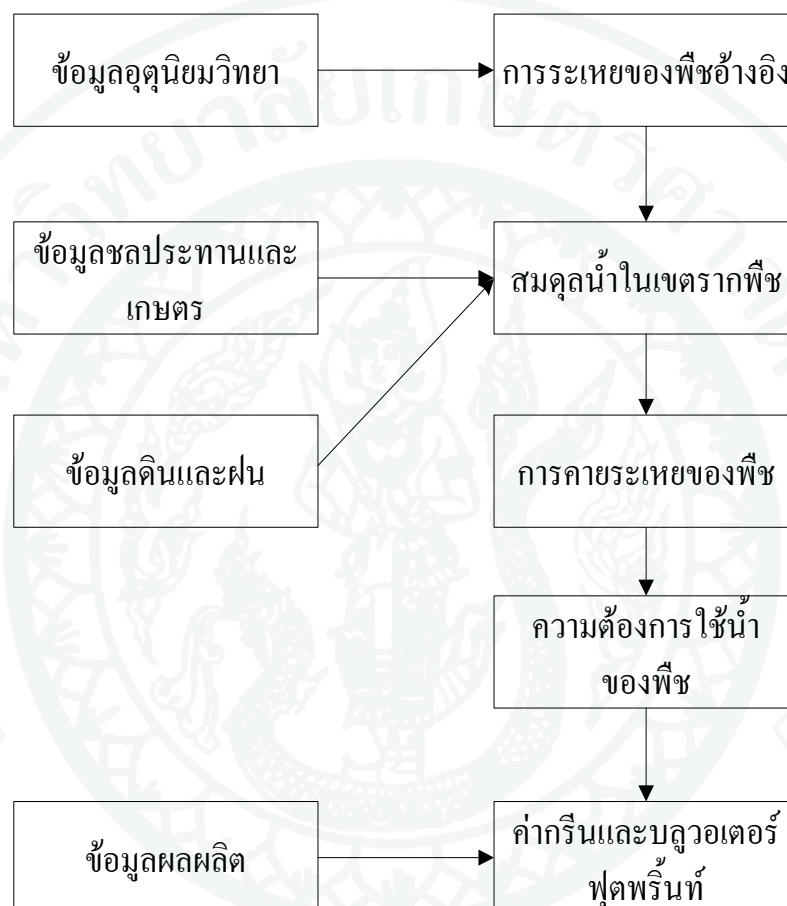
ตารางที่ 5 ค่าความชื้นในดินทั้งหมดที่ใช้การได้ (Total available soil moisture, มม./ม.) เป็นรายจังหวัด

จังหวัด	TAW (mm. /m.)	จังหวัด	TAW (mm. /m.)	จังหวัด	TAW (mm. /m.)
กำแพงเพชร	127	นครสวรรค์	123	ลำพูน	115
ขอนแก่น	159	น่าน	97	เลย	94
จันทบุรี	104	ประจวบคีรีขันธ์	106	สระแก้ว	87
ฉะเชิงเทรา	112	ปราจีนบุรี	119	สุพรรณบุรี	139
ชลบุรี	108	พะเยา	127	หนองคาย	122
ชัยภูมิ	123	พิจิตร	165	อุดรราชธานี	138
เขียงราย	115	เพชรบุรี	117	อุดรดิศล์	104
เขียงใหม่	106	เพชรบูรณ์	96	อุบลราชธานี	146
ตาก	100	แพร่	104		
นครราชสีมา	127	ลพบุรี	97		

ที่มา: Batjes, Niels H. (2006)

ขั้นตอนในการคำนวณกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์และบลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์

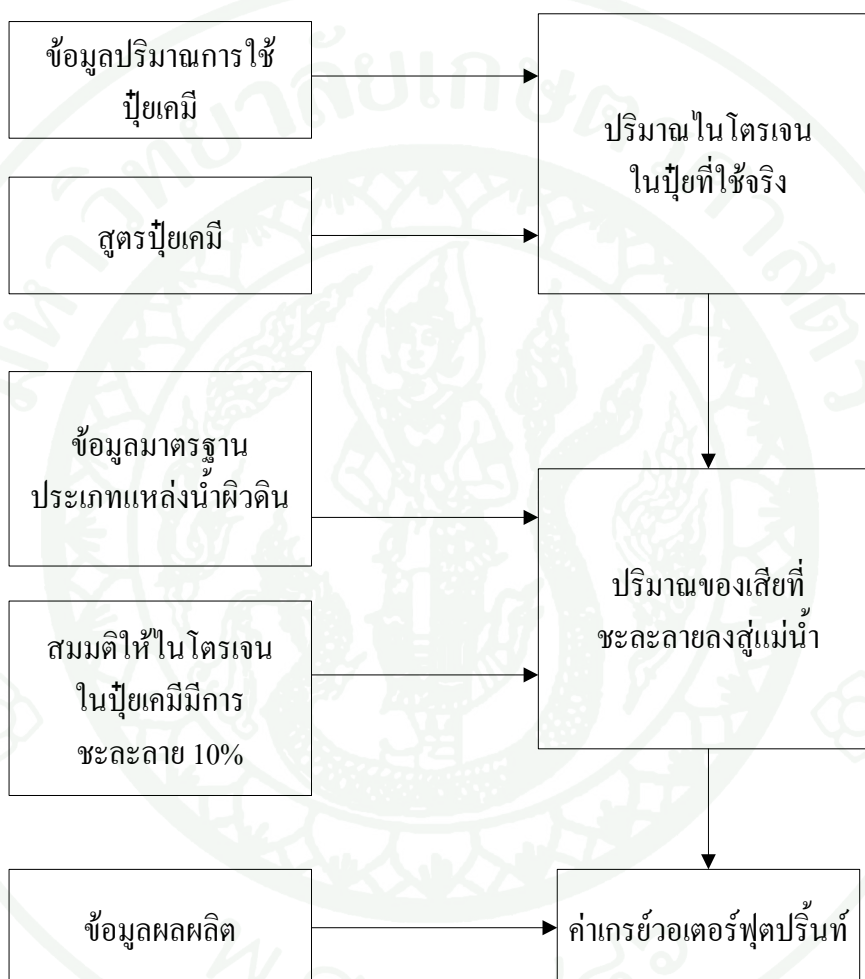
ในการศึกษานี้จะคำนวณกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์และบลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์รายจังหวัด โดยมีขั้นตอนในการคำนวณดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ขั้นตอนในการคำนวณกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์และบลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ ของแบบจำลอง CROPWAT

ขั้นตอนในการคำนวณกรวยอเตอร์ฟุตพรีนท์

ในการศึกษานี้จะทำการคำนวณหากรวยอเตอร์ฟุตพรีนท์เป็นรายจังหวัด โดยมีขั้นตอนในการคำนวณดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ขั้นตอนในการคำนวณกรวยอเตอร์ฟุตพรีนท์

1. วิธีการคำนวณปริมาณน้ำที่พืชใช้และการคายระเหยของพืช

1.1 ปริมาณน้ำที่พืชใช้

ปริมาณน้ำที่พืชใช้ทั้งหมด ปริมาณน้ำที่พืชใช้แบบบิลูวอเตอร์พุตพรีนัทและปริมาณน้ำที่พืชใช้แบบกรีนวอเตอร์พุตพรีนัทสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$CWU_{total} = \sum_{d=1}^{lgp} ET_c \quad (29)$$

$$CWU_{blue} = \sum_{d=1}^{lgp} ET_{blue} = \sum_{d=1}^{lgp} I \quad (30)$$

$$CWU_{green} = \sum_{d=1}^{lgp} ET_{green} \quad (31)$$

โดย CWU = ความต้องการใช้น้ำของพืช มีหน่วยเป็น ลบ.ม.
 d = ลำดับวันที่เพาะปลูก
 lgp = จำนวนวันที่เพาะปลูกทั้งหมด
 I = ปริมาณน้ำจากชลประทาน

ในกรณีที่พิจารณาการเพาะปลูกนอกเขตชลประทาน อาจมีการให้น้ำในรูปแบบที่ไม่ใช่น้ำฝน เช่น น้ำบาดาล น้ำจากบ่อเก็บกักในพื้นที่เพาะปลูก เป็นต้น แต่เนื่องจากในการศึกษานี้ไม่มีข้อมูลการให้น้ำดังกล่าว จึงสมมติให้ ค่า I, ET_{blue} และ CWU_{blue} จะเท่ากับศูนย์สำหรับนอกเขตชลประทาน

1.2 การคายระเหยของพืช

ค่าการคายระเหยของพืช (Crop evapotranspiration, ET_c , มม. /วัน) คำนวณจาก

$$ET_c = K_s K_c ET_o \quad (32)$$

โดย E_{To} = ค่าการคายระเหยของพืช อ้างอิง (Reference Crop Evapotranspiration, E_{To} มี หน่วย มม./วัน)

K_s = สัมประสิทธิ์ความเครียดน้ำ (Water stress coefficient)

K_c = สัมประสิทธิ์พืช (Crop coefficient)

ในการศึกษานี้จะคำนวณค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิงจากการใช้โปรแกรม The E_{To} Calculator เป็นโปรแกรมที่ถูกเขียนขึ้นโดย Dirk R. (2009) หลักการคือเพื่อศึกษาหาค่าการคายระเหยของพืช อ้างอิง (E_{To}) โดยขึ้นกับปัจจัยที่มีผลต่อค่า E_{To} คือ ตัวแปรสภาพภูมิอากาศ โปรแกรมนี้จะไม่พิจารณาคุณลักษณะของพืชและดิน และสมการที่ใช้ในโปรแกรมนี้ใช้คือสมการ FAO Penman – Monteith ดังแสดงในสมการที่ (4)

2. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์พืชและสมมูลน้ำในเขตรากพืช

2.1 วิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์พืช

K_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์พืช (Crop Coefficient) ซึ่งช่วงการเจริญเติบโตของพืชนั้น กำหนดให้ค่า K_c มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงจากช่วงเริ่มต้นการเพาะปลูก ($K_{c,ini}$) ถึงช่วงกลางของการเพาะปลูก ($K_{c,mid}$) และมีค่าคงที่ไปจนถึงระยะสุดท้ายของการเพาะปลูกและกำหนดให้ค่า K_c ลดลงเป็นเส้นตรงจาก $K_{c,mid}$ ไปจนถึง $K_{c,end}$ และ K_s คือ สัมประสิทธิ์ความเครียดน้ำ (Water Stress) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ในกรณีที่น้ำในดินในเขตรากพืชมีค่าการพร่อง (depletion, D_r มีหน่วย มม.) น้อยกว่าปริมาณน้ำที่มีอยู่ที่ใช้การได้ (readily available soil water in the root zone, RAW มีหน่วย มม.) จะได้ว่า $K_s = 1$ ในกรณีที่ $D_r > RAW$ จะได้ว่า K_s ลดลงเชิงเส้นตรง และถ้า D_r มีค่าเท่ากับน้ำที่อยู่ในดินทั้งหมดในเขตรากพืชที่ใช้การได้ (total available soil water in the root zone, TAW มีหน่วย มม.) จะได้ว่า $K_s = 0$ ดังสมการ

$$\text{กรณี } D_r < RAW ; K_s = 1 \quad (33a)$$

$$\text{กรณี } TAW < D_r < RAW ; K_s = \frac{TAW - D_r}{(1-p)TAW} \quad (33b)$$

$$\text{กรณี } D_r = TAW ; K_s = 0 \quad (33c)$$

ซึ่งค่า K_s , TAW และ RAW หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$TAW = (\theta_{FC} - \theta_{WP})Z_r \quad (34)$$

โดย θ_{FC} = สัดส่วนปริมาณน้ำในดินที่ความจุความชื้นสนาม มีหน่วยเป็น $\text{ม.}^3/\text{ม.}^3$

θ_{WP} = สัดส่วนปริมาณน้ำในดินที่จุดเหี่ยวเฉา มีหน่วยเป็น $\text{ม.}^3/\text{ม.}^3$

Z_r = ความลึกรากพืช มีหน่วยเป็น เมตร

$$RAW = pTAW \quad (35)$$

โดย p = ค่าเฉลี่ยของน้ำทั้งหมดที่ใช้การได้ในเขตรากพืชที่มีการพร่องจากบริเวณเขตรากพืชก่อนที่จะเกิดความเครียด มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{(1-p)TAW} \quad (36)$$

โดย K_s = ค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดน้ำ มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1

2.2 วิธีการคำนวณสมดุลน้ำในเขตรากพืช

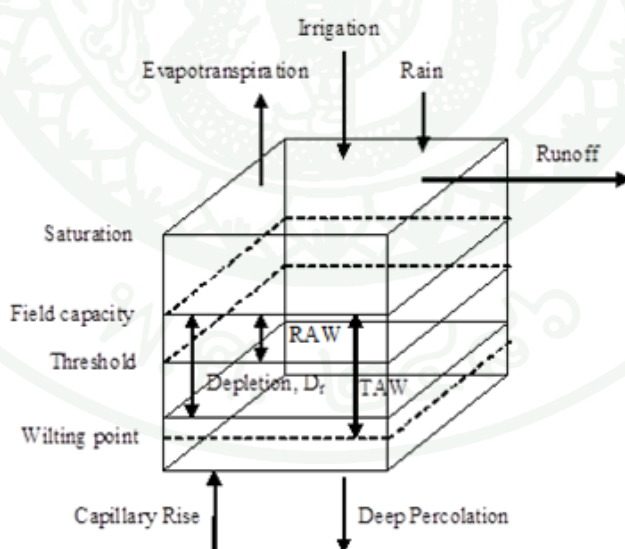
ภาพที่ 21 แสดงแนวคิดของสมดุลน้ำในเขตรากพืช โดยที่สมมติให้ดินในเขตรากพืชได้รับน้ำจากฝน (rain) หรือชลประทาน (irrigation) ในปริมาณมากเกินความสามารถการซึมลงดิน จะมีส่วนเกินที่เป็นน้ำท่าผิวดิน (runoff) ไหลบนผิวดิน น้ำในส่วนที่ซึมลงดินจะทำให้น้ำในเขตรากพืชอยู่ในระดับความชื้นอิ่มตัว (saturation) ชั่วขณะ และส่วนหนึ่งของน้ำจะซึมลึกลง (deep percolation) ทำให้เหลือน้ำในดินเท่ากับระดับความจุความชื้นสนาม (field capacity) ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในรูปของระดับน้ำ เรียกว่า น้ำที่อยู่ในดินทั้งหมดในเขตรากพืชที่ใช้การได้ (total available soil water in the root zone, TAW) ในบางครั้งหากระดับน้ำใต้ดินอยู่สูงอาจมีผลกระทบของ capillary rise ต่อระดับน้ำในเขตรากพืช น้ำในเขตรากพืชสามารถลดลงเนื่องจากการคายระเหย หากน้ำพร่องลงต่ำกว่าระดับน้ำที่มีอยู่ที่ใช้การได้ (RAW) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ความเครียดน้ำ ดังกล่าวในหัวข้อที่ผ่านมาในสมการ (33a) – (33c)

การคำนวณค่าการพร่องของน้ำในเขตรากพืช ณ วันที่ i ($D_{r,i}$) ซึ่งมีหน่วยเป็น มม. สามารถคำนวณได้จากสมการน้ำในเขตรากพืช ดังสมการนี้

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P_i - RO_i) - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (37)$$

โดย $D_{r,i-1}$ = ค่าการพร่องน้ำในเขตรากพืช ณ วันที่ $i-1$
 P_i = น้ำฝนในวันที่ i
 RO_i = น้ำท่าผิวดินในวันที่ i
 I = ความลึกน้ำชลประทานที่ซึมลงดินในวันที่ i
 CR_i = capillary rise จากน้ำใต้ดินในวันที่ i
 $ET_{c,i}$ = การคายระเหยของพืชในวันที่ i
 DP_i = น้ำที่สูญเสียออกจากเขตรากพืชโดยการซึมลึกในวันที่ i

ในการศึกษานี้ยังไม่ได้พิจารณาการสูญเสียน้ำชลประทานจากการส่งน้ำ หากพิจารณาในส่วนนี้ บลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์จะมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 21 แนวคิดของสมดุลน้ำในเขตรากพืช

ที่มา: Allen et al. (1998)

3. วิธีการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์

หน่วยวัดของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์จะขึ้นอยู่กับประเภทของสินค้าที่พิจารณา โดยทั่วไปมักใช้ปริมาณน้ำต่อน้ำหนัก สำหรับผลผลิตทางการเกษตร โดยวอเตอร์ฟุตพริ้นท์รวมของพืช (total water footprint, WF_{total}) เท่ากับผลรวมของบลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (WF_{blue}) กรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (WF_{green}) และเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (WF_{grey}) ดังแสดงในสมการ

$$WF_{total} = WF_{blue} + WF_{green} + WF_{grey} \quad (38)$$

โดยที่ บลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์และกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สามารถคำนวณได้จากปริมาณน้ำที่พืชใช้ (CWU) หารด้วยผลผลิตต่อพื้นที่เพาะปลูกของพืชนั้นๆ (Y) ขณะที่เกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์จะคำนวณหาปริมาณน้ำที่ใช้ในการเจือจางสารพิษให้ได้ตามมาตรฐานที่ยอมรับได้ ดังแสดงในสมการ

$$(WF_{total}, WF_{blue}, WF_{green}) = \frac{(CWU_{total}, CWU_{blue}, CWU_{green})}{Y} \quad (39)$$

$$WF_{grey} = \frac{(\alpha \times AR) / (C_{max} - C_{nat})}{Y} \quad (40)$$

โดย	Y	= ผลผลิตต่อไร่ มีหน่วยเป็น กก./ไร่
	α	= สัดส่วนการชะละลาย (Leaching Runoff)
	AR	= อัตราการใช้ปุ๋ยในพื้นที่ต่อไร่ มีหน่วยเป็น กก./ไร่
	C_{max}	= ความเข้มข้นมากที่สุดที่ยอมรับได้ มีหน่วยเป็น กก./ลบ.ม.
	C_{nat}	= ความเข้มข้นมลพิษในธรรมชาติที่พิจารณา มีหน่วยเป็น กก./ลบ.ม.

การศึกษานี้ให้ WF_{total} เท่ากับ WF_{green} บวกกับ WF_{grey} ไม่รวมการคำนวณบลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เนื่องจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ส่วนใหญ่อยู่นอกเขตพื้นที่ชลประทาน (ร้อยละ 99.2) ดังนั้นในการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์รายปีจึงไม่พิจารณาในส่วนของพื้นที่ และในการศึกษานี้ เกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์จะพิจารณาเฉพาะปุ๋ยไนโตรเจน โดยสมมติให้ C_{nat} เท่ากับศูนย์ α เท่ากับร้อยละ 10 ของอัตราการใช้ปุ๋ยในพื้นที่ต่อไร่ Mekonnen และ Hoekstra (2011) และ C_{max} เท่ากับ 5 มก./ลิตร

ตามมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน หนังสือระบบบำบัดมลพิษน้ำ กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2551) ซึ่งเป็นเกณฑ์กำหนดสูงสุดสำหรับแหล่งน้ำประเภทที่ 3 คือเป็นแหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท ได้แก่ การเกษตร

จากสมการ (39) จะพบว่า ปริมาณน้ำที่พืชใช้ (CWU) เป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณหา วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (WF) การศึกษานี้วิเคราะห์ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เป็นรายเดือนซึ่งสามารถแปลงเป็นรายปีโดยการประมาณค่าด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักตามผลผลิตที่ได้รายเดือนโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$WF_{year} = WF_{non-irr, year} \quad (41)$$

$$WF_{non-irr, year} = \frac{\sum_{j=1}^{12} WF_{non-irr, j} \times Product_j}{\sum_{j=1}^{12} Product_j} \quad (42)$$

โดย j = เดือนที่ j ที่พิจารณา
non-irr = นอกเขตพื้นที่ชลประทาน
Productj = ปริมาณผลผลิตของเดือนที่ j

4. ตัวอย่างการคำนวณกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์และเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์

4.1 ตัวอย่างการคำนวณกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์

ในตัวอย่างนี้ได้ยกตัวอย่างการคำนวณขั้นตอนการหากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2548 ของจังหวัดนครสวรรค์ โดยค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิงได้ใช้แบบจำลอง The ETo Calculator ในการคำนวณ ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

4.1.1 ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา

- 1) ความสูงสถานีเหนือระดับทะเลปานกลาง (Altitude) 34 เมตร
- 2) ความเร็วลมวัดที่ระดับความสูง 14.00 เมตร

3) ละติจูด (Latitude) 45 48 N ลองจิจูด (Longitude) 100 10 E

4) ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุด ความชื้นสัมพัทธ์ ชั่วโมงที่มีแสงแดด
ความเร็วลม ฝน และค่าการคายระเหยอ้างอิงของพืชแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุด ความชื้นสัมพัทธ์ ชั่วโมงที่มีแสงแดด ความเร็วลมและ
ค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิง ตั้งแต่วันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ. 2548 ถึง 15 สิงหาคม
พ.ศ. 2548 เป็นรายวัน

วันที่	อุณหภูมิ สูงสุด (องศา เซลเซียส)	อุณหภูมิ ต่ำสุด (องศา เซลเซียส)	ความชื้น สัมพัทธ์ เฉลี่ย	ชั่วโมงที่มี แสงแดด (ชั่วโมง)	ความเร็ว ลม (น็อต)	ฝน (มม./วัน)	ค่าการ คาย ระเหย ของพืช อ้างอิง (มม./วัน)
10/5/2005	39.3	26.0	61.0	11.0	2.5	0.0	6.3
11/5/2005	39.2	27.9	61.0	8.9	4.1	0.0	6.2
12/5/2005	39.0	27.3	61.0	10.5	3.6	0.0	6.5
13/5/2005	38.0	26.6	71.0	5.9	0.0	0.0	4.1
14/5/2005	36.7	27.4	69.0	4.3	2.0	0.7	4.1
15/5/2005	38.6	26.0	72.0	7.9	1.4	0.0	5.0
16/5/2005	37.1	26.7	74.0	6.5	2.0	3.3	4.7
17/5/2005	38.4	26.5	72.0	8.6	2.1	5.2	5.4
18/5/2005	38.0	24.5	78.0	8.3	2.5	15.7	5.2
19/5/2005	37.2	25.6	78.0	7.1	2.4	0.0	4.8
20/5/2005	36.0	24.2	81.0	5.5	3.0	6.6	4.3
21/5/2005	32.0	25.2	92.0	2.1	1.3	2.1	2.9
22/5/2005	35.2	25.2	78.0	7.6	1.0	0.3	4.6

ตารางที่ 6 (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ สูงสุด (องศา เซลเซียส)	อุณหภูมิ ต่ำสุด (องศา เซลเซียส)	ความชื้น สัมพัทธ์ เฉลี่ย	ชั่วโมงที่ มี แสงแดด (ชั่วโมง)	ความเร็ว ลม (น็อต)	ฝน (มม./วัน)	ค่าการ คาย ระเหย ของพืช อ้างอิง (มม./วัน)
23/5/2005	35.4	27.0	70.0	4.2	3.5	0.0	4.3
24/5/2005	37.5	27.4	67.0	9.1	3.9	0.0	5.9
25/5/2005	37.4	24.2	76.0	8.2	1.3	3.4	4.9
26/5/2005	37.3	25.1	73.0	10.9	2.0	0.0	5.9
27/5/2005	38.4	27.2	64.0	11.0	1.5	0.0	5.9
28/5/2005	38.9	27.5	62.0	10.8	1.8	0.0	6.0
29/5/2005	39.5	27.3	61.0	10.2	1.5	0.0	5.8
30/5/2005	37.0	27.0	77.0	6.5	3.5	1.3	4.9
31/5/2005	36.5	26.2	80.0	6.2	3.0	0.4	4.6
1/6/2005	36.6	25.9	71.0	9.8	5.0	0.0	6.0
2/6/2005	36.4	27.0	67.0	6.1	5.9	0.0	5.4
3/6/2005	36.4	27.0	63.0	5.9	5.1	0.0	5.3
4/6/2005	37.7	26.9	68.0	8.2	4.0	0.0	5.7
5/6/2005	37.5	25.4	75.0	8.8	2.1	37.9	5.3
6/6/2005	36.3	26.1	74.0	10.0	0.8	0.0	5.4
7/6/2005	34.6	26.0	77.0	1.9	1.0	2.5	3.0
8/6/2005	35.9	25.7	80.0	6.9	0.8	0.6	4.5
9/6/2005	35.2	26.2	77.0	6.1	5.0	7.7	4.8
10/6/2005	32.7	26.4	76.0	1.7	5.9	0.0	3.6
11/6/2005	34.8	27.2	72.0	5.6	5.1	0.0	4.8

ตารางที่ 6 (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ สูงสุด (องศา เซลเซียส)	อุณหภูมิ ต่ำสุด (องศา เซลเซียส)	ความชื้น สัมพัทธ์ เฉลี่ย	ชั่วโมงที่ มี แสงแดด (ชั่วโมง)	ความเร็ว ลม (น็อต)	ฝน (มม./วัน)	ค่าการ คาย ระเหย ของพืช อ้างอิง (มม./วัน)
12/6/2005	35.0	25.5	77.0	5.0	4.1	19.0	4.3
13/6/2005	34.6	25.0	79.0	6.9	4.3	30.7	4.7
14/6/2005	33.8	24.5	88.0	1.2	2.5	16.7	2.8
15/6/2005	34.4	25.6	85.0	2.8	1.0	0.0	3.2
16/6/2005	34.8	24.5	79.0	5.8	3.8	2.6	4.4
17/6/2005	34.4	25.8	80.0	6.1	3.9	0.0	4.5
18/6/2005	34.8	26.9	74.0	4.8	5.3	0.0	4.5
19/6/2005	35.3	26.5	71.0	8.9	4.1	0.0	5.5
20/6/2005	35.2	27.5	73.0	7.7	3.4	0.0	5.1
21/6/2005	36.3	25.6	76.0	8.1	2.1	0.0	5.0
22/6/2005	34.4	25.3	78.0	0.0	1.3	0.0	2.5
23/6/2005	35.8	27.7	77.0	1.2	1.0	8.0	2.9
24/6/2005	33.8	24.5	84.0	0.7	2.4	9.3	2.7
25/6/2005	33.7	24.8	80.0	2.3	1.3	0.0	3.1
26/6/2005	36.3	26.6	67.0	7.1	2.8	0.0	5.0
27/6/2005	36.6	27.1	70.0	6.7	2.0	0.3	4.7
28/6/2005	35.2	24.9	80.0	3.5	1.5	7.0	3.5
29/6/2005	32.2	24.7	83.0	0.4	0.6	0.0	2.4
30/6/2005	35.3	25.2	78.0	4.1	0.8	13.5	3.6
1/7/2005	34.7	24.0	74.0	3.3	0.5	0.0	3.2

ตารางที่ 6 (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ สูงสุด (องศา เซลเซียส)	อุณหภูมิ ต่ำสุด (องศา เซลเซียส)	ความชื้น สัมพัทธ์ เฉลี่ย	ชั่วโมงที่ มี แสงแดด (ชั่วโมง)	ความเร็ว ลม (น็อต)	ฝน (มม./วัน)	ค่าการ คาย ระเหย ของพืช อ้างอิง (มม./วัน)
2/7/2005	35.0	26.3	68.0	2.5	0.5	0.3	3.1
3/7/2005	34.8	25.2	77.0	4.4	0.0	0.0	3.5
4/7/2005	35.2	23.8	83.0	4.3	1.9	27.9	3.7
5/7/2005	33.6	25.1	84.0	4.4	1.6	0.0	3.7
6/7/2005	33.5	25.3	81.0	3.6	0.0	0.5	3.3
7/7/2005	35.3	25.0	76.0	9.9	2.0	1.5	5.4
8/7/2005	34.3	24.8	77.0	3.6	1.3	0.0	3.5
9/7/2005	34.6	25.5	78.0	4.4	1.6	8.3	3.8
10/7/2005	35.4	25.3	75.0	7.9	0.3	0.0	4.6
11/7/2005	35.0	26.3	80.0	8.3	0.6	14.7	4.8
12/7/2005	32.6	23.5	83.0	2.0	1.3	14.4	2.9
13/7/2005	29.0	24.2	94.0	0.0	0.3	3.6	2.2
14/7/2005	31.5	24.4	89.0	1.4	0.5	0.0	2.6
15/7/2005	35.5	23.3	83.0	9.2	0.4	30.1	5.0
16/7/2005	35.6	23.9	78.0	11.0	0.9	0.0	5.5
17/7/2005	36.3	25.2	75.0	10.2	0.9	0.0	5.4
18/7/2005	37.0	26.3	75.0	10.4	0.4	5.2	5.5
19/7/2005	36.0	26.5	78.0	7.5	0.9	0.5	4.7
20/7/2005	35.7	25.3	80.0	8.1	1.4	3.2	4.8
21/7/2005	34.5	26.0	79.0	5.2	1.8	3.3	4.0

ตารางที่ 6 (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ สูงสุด (องศา เซลเซียส)	อุณหภูมิ ต่ำสุด (องศา เซลเซียส)	ความชื้น สัมพัทธ์ เฉลี่ย	ชั่วโมงที่ มี แสงแดด (ชั่วโมง)	ความเร็ว ลม (น็อต)	ฝน (มม./วัน)	ค่าการ คาย ระเหย ของพืช อ้างอิง (มม./วัน)
22/7/2005	33.3	24.1	84.0	2.8	2.5	43.5	3.3
23/7/2005	32.7	24.5	78.0	4.7	5.0	0.4	4.1
24/7/2005	30.8	24.7	84.0	0.7	4.4	0.6	2.8
25/7/2005	31.6	24.9	85.0	0.6	3.1	4.8	2.6
26/7/2005	31.2	24.5	85.0	1.6	0.9	0.3	2.7
27/7/2005	33.9	24.7	88.0	1.7	0.6	1.2	2.8
28/7/2005	34.0	25.5	75.0	3.3	1.0	0.0	3.4
29/7/2005	34.7	25.8	74.0	7.0	2.5	0.0	4.7
30/7/2005	33.2	26.1	76.0	1.4	2.3	0.0	3.0
31/7/2005	34.4	26.4	69.0	2.3	5.1	0.0	4.0
1/8/2005	31.5	24.5	78.0	0.1	6.4	0.1	3.1
2/8/2005	33.4	25.0	77.0	3.4	5.4	0.4	3.9
3/8/2005	34.6	25.2	75.0	5.7	2.8	4.5	4.3
4/8/2005	33.2	25.2	77.0	0.2	1.0	0.0	2.5
5/8/2005	30.0	25.8	82.0	0.1	0.4	5.2	2.3
6/8/2005	32.7	24.0	79.0	0.3	1.5	0.0	2.5
7/8/2005	33.3	26.2	71.0	2.3	2.5	0.0	3.4
8/8/2005	33.3	26.7	70.0	0.1	1.5	0.0	2.6
9/8/2005	34.1	25.5	67.0	2.6	3.4	0.0	3.8
10/8/2005	34.8	26.2	67.0	1.8	2.0	0.0	3.3

ตารางที่ 6 (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ สูงสุด (องศา เซลเซียส)	อุณหภูมิ ต่ำสุด (องศา เซลเซียส)	ความชื้น สัมพัทธ์ เฉลี่ย	ชั่วโมงที่ มี แสงแดด (ชั่วโมง)	ความเร็ว ลม (น็อต)	ฝน (มม./วัน)	ค่าการ คาย ระเหย ของพืช อ้างอิง (มม./วัน)
11/8/2005	33.7	26.3	71.0	2.7	2.9	0.3	3.6
12/8/2005	33.9	26.3	76.0	1.6	6.0	0.2	3.7
13/8/2005	33.0	25.2	74.0	2.3	7.9	4.2	4.1
14/8/2005	33.3	23.9	77.0	3.7	6.4	0.0	4.1
15/8/2005	33.8	25.8	73.0	4.5	4.6	0.3	4.3

4.1.2 ข้อมูลดิน

- 1) น้ำในดินทั้งหมดที่ใช้การได้ในเขตรากพืช เท่ากับ 122.9757 มม./ม.
- 2) อัตราการซึมผ่านของน้ำสูงสุด 40 มม./วัน
- 3) ความยาวรากพืชสูงสุด 900 ซม.

4.1.3 ข้อมูลพืช แสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 คุณสมบัติพืช ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

คุณสมบัติของพืช	Irrigated	Non-irrigated	Unit
Kc (initial)	0.86	0.86	
Kc (mid-season)	1.63	1.63	
Kc (late season)	0.16	0.16	day
Stage (initial)	16	16	day
Stage (development)	43	43	day
Stage (mid-season)	74	74	day
Stage (late season)	98	98	m
Rooting depth (initial)	0.1	0.1	m
Rooting depth (mid-season)	0.8	0.8	
p (initial)	0.2	0.2	
p (mid-season)	0.25	0.25	
p (late season)	0.5	0.5	

4.1.4 ตัวอย่างการคำนวณสมดุลน้ำในเขตรากพืช ในที่นี้จะทำการคำนวณวันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ. 2548

- คำนวณหาน้ำทั้งหมดที่ใช้การได้ (Total available water; TAW)

$$TAW = (\theta_{FC} - \theta_{WP})Z_r$$

จาก

$$TAW = 122.9757 * 0.1$$

แทนค่า

$$TAW = 12.30 \text{ มม.}$$

จะได้

- คำนวณหาน้ำพร้อมใช้การ (Readily available water; RAW)

$$RAW = pTAW$$

จาก

$$RAW = 0.2 * 12.30$$

แทนค่า

$$RAW = 2.46 \text{ มม.}$$

จะได้

-คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดน้ำ (Water stress; K_s)

จาก
$$K_s = \frac{TAW - D_r}{(1-p)TAW}$$

ต้องทำการหาค่า D_r ก่อนจาก สมมติให้ $D_{r,i,start}$ เท่ากับ 0

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

แทนค่า

$$D_{r,i} = 0 - (0 - 0) - 0 - 0 + (0.63 \times 6.3) + 0$$

$$D_{r,i} = 3.97$$

แทนค่าการพร่องน้ำที่ได้ลงในสมการ K_s จะได้

$$K_s = \frac{12.30 - 3.97}{(1 - 0.2) \times 12.30}$$

$$K_s \approx 1$$

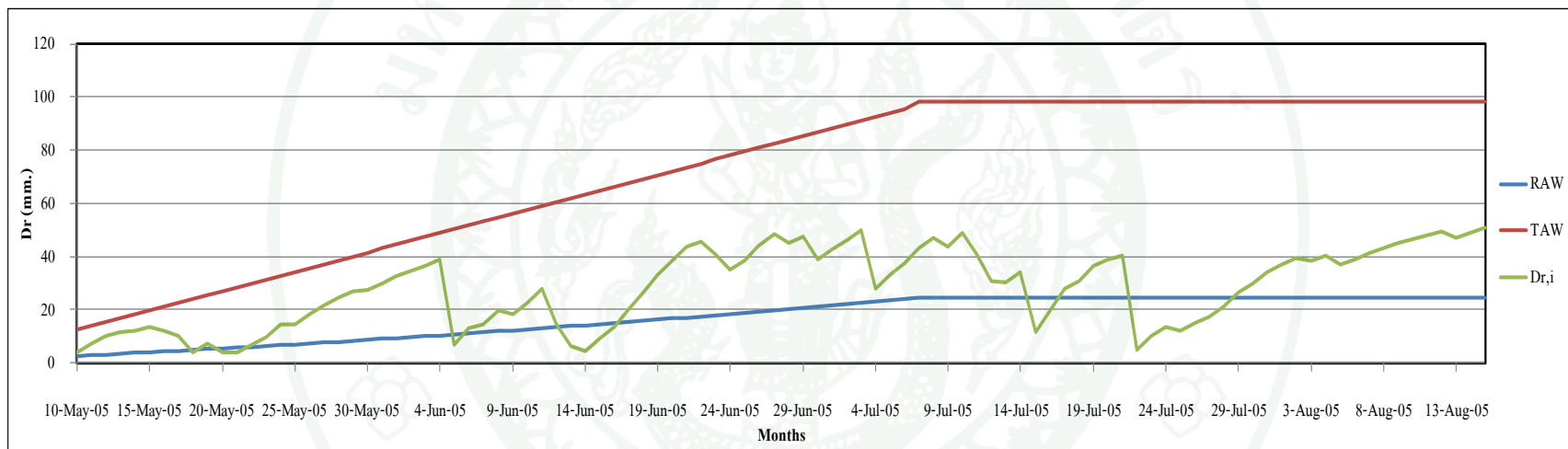
หลังจากนั้นทำการแทนค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดน้ำที่ได้ลงในสมการที่ 32

จะได้

$$ET_c = 1 \times 0.63 \times 6.3$$

$$ET_c = 3.97 \text{ มม./วัน}$$

ผลลัพธ์ค่าการคายระเหยของพืชแสดงดังตารางที่ 8 และจากการศึกษาต้องการทราบความสัมพันธ์ของค่าการพร่องน้ำในเขตรากพืช ปริมาณน้ำทั้งหมดที่ใช้การได้ในเขตรากพืช และปริมาณน้ำที่สามารถใช้การได้ในเขตรากพืช จังหวัดนครสวรรค์ ตั้งแต่ วันที่ 10 พฤษภาคม ถึง 15 สิงหาคม พ.ศ. 2548 พบว่าค่าการพร่องน้ำในเขตรากพืชมีค่าสูงกว่าปริมาณน้ำที่สามารถใช้การได้ในเขตรากพืช ทำให้เกิดสัมประสิทธิ์ความเครียดน้ำ



ภาพที่ 22 ค่าการพร่องน้ำ ปริมาณน้ำทั้งหมดที่ใช้การได้ และปริมาณน้ำที่ใช้การได้ในเขตรากพืช จังหวัดนครสวรรค์ ช่วงเวลาการเพาะปลูกตั้งแต่ 10 พฤษภาคม ถึง 15 สิงหาคม ปี พ.ศ. 2548

ตารางที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์พืช และค่าการคายระเหยของพืช

Growing date	Day	K_s	K_c	ET_c
1	10-May-05	1	0.63	3.97
2	11-May-05	1	0.63	3.91
3	12-May-05	1	0.63	4.1
4	13-May-05	1	0.63	2.58
5	14-May-05	1	0.63	2.58
6	15-May-05	1	0.63	3.15
7	16-May-05	1	0.63	2.96
8	17-May-05	1	0.72	3.89
9	18-May-05	1	0.72	3.74
10	19-May-05	1	0.72	3.46
11	20-May-05	1	0.72	3.1
12	21-May-05	1	0.72	2.09
13	22-May-05	1	0.72	3.31
14	23-May-05	1	0.72	3.1
15	24-May-05	1	0.86	5.07
16	25-May-05	1	0.86	4.21
17	26-May-05	1	0.86	5.07
18	27-May-05	1	0.86	5.07
19	28-May-05	1	0.86	5.16
20	29-May-05	1	0.86	4.99
21	30-May-05	1	0.86	4.21
22	31-May-05	1	1.13	5.2
23	1-Jun-05	1	1.13	6.78
24	2-Jun-05	1	1.13	6.1
25	3-Jun-05	1	1.13	5.99
26	4-Jun-05	1	1.13	6.44
27	5-Jun-05	1	1.13	5.99

ตารางที่ 8 (ต่อ)

Growing date	Day	K_s	K_c	ET_c
28	6-Jun-05	1	1.13	6.1
29	7-Jun-05	1	1.35	4.05
30	8-Jun-05	1	1.35	6.08
31	9-Jun-05	1	1.35	6.48
32	10-Jun-05	1	1.35	4.86
33	11-Jun-05	1	1.35	6.48
34	12-Jun-05	1	1.35	5.81
35	13-Jun-05	1	1.35	6.35
36	14-Jun-05	1	1.52	4.26
37	15-Jun-05	1	1.52	4.86
38	16-Jun-05	1	1.52	6.69
39	17-Jun-05	1	1.52	6.84
40	18-Jun-05	1	1.52	6.84
41	19-Jun-05	1	1.52	8.36
42	20-Jun-05	1	1.52	7.75
43	21-Jun-05	1	1.61	8.05
44	22-Jun-05	1	1.61	4.03
45	23-Jun-05	1	1.61	4.67
46	24-Jun-05	1	1.61	4.35
47	25-Jun-05	1	1.61	4.99
48	26-Jun-05	1	1.61	8.05
49	27-Jun-05	1	1.61	7.57
50	28-Jun-05	1	1.63	5.71
51	29-Jun-05	1	1.63	3.91
52	30-Jun-05	1	1.63	5.87
53	1-Jul-05	1	1.63	5.22

ตารางที่ 8 (ต่อ)

Growing date	Day	K _s	K _c	ET _c
54	2-Jul-05	1	1.63	5.05
55	3-Jul-05	1	1.63	5.71
56	4-Jul-05	1	1.63	6.03
57	5-Jul-05	1	1.58	5.85
58	6-Jul-05	1	1.58	5.21
59	7-Jul-05	1	1.58	8.53
60	8-Jul-05	1	1.58	5.53
61	9-Jul-05	1	1.58	6
62	10-Jul-05	1	1.58	7.27
63	11-Jul-05	1	1.58	7.58
64	12-Jul-05	1	1.5	4.35
65	13-Jul-05	1	1.5	3.3
66	14-Jul-05	1	1.5	3.9
67	15-Jul-05	1	1.5	7.5
68	16-Jul-05	1	1.5	8.25
69	17-Jul-05	1	1.5	8.1
70	18-Jul-05	1	1.5	8.25
71	19-Jul-05	1	1.38	6.49
72	20-Jul-05	1	1.38	6.62
73	21-Jul-05	1	1.38	5.52
74	22-Jul-05	1	1.38	4.55
75	23-Jul-05	1	1.38	5.66
76	24-Jul-05	1	1.38	3.86
77	25-Jul-05	1	1.38	3.59
78	26-Jul-05	1	1.15	3.11
79	27-Jul-05	1	1.15	3.22

ตารางที่ 8 (ต่อ)

Growing date	Day	K_s	K_c	ET_c
80	28-Jul-05	1	1.15	3.91
81	29-Jul-05	1	1.15	5.41
82	30-Jul-05	1	1.15	3.45
83	31-Jul-05	1	1.15	4.6
84	1-Aug-05	1	1.15	3.57
85	2-Aug-05	1	0.9	3.51
86	3-Aug-05	1	0.9	3.87
87	4-Aug-05	1	0.9	2.25
88	5-Aug-05	1	0.9	2.07
89	6-Aug-05	1	0.9	2.25
90	7-Aug-05	1	0.9	3.06
91	8-Aug-05	1	0.9	2.34
92	9-Aug-05	1	0.67	2.55
93	10-Aug-05	1	0.67	2.21
94	11-Aug-05	1	0.67	2.41
95	12-Aug-05	1	0.67	2.48
96	13-Aug-05	1	0.67	2.75
97	14-Aug-05	1	0.67	2.75
98	15-Aug-05	1	0.67	2.88

4.1.5 คำนวณกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของเดือน สิงหาคม พ.ศ. 2548

- ค่า $\sum ET_{green}$ จะเท่ากับ 389.60 มม./วัน

- นำค่า $\sum ET_{green}$ ที่ได้แทนค่าลงในสมการที่ (31) เพื่อหาความต้องการใช้น้ำของพืชจะได้

$$CWU_{green} = \frac{389.60}{100} \times 100 \times 100$$

$$CWU_{green} = 3,896 \text{ ม.}^3$$

-นำค่า CWU_{green} ที่ได้ และมีค่าผลผลิตต่อไร่ 3.903 ตัน/เฮกแตร์ แทนค่าลงในสมการที่ (36) ดังนั้นจะได้ค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2548

$$WF_{green} = \frac{CWU_{green}}{Y}$$

$$WF_{green} = \frac{3,896}{3.903}$$

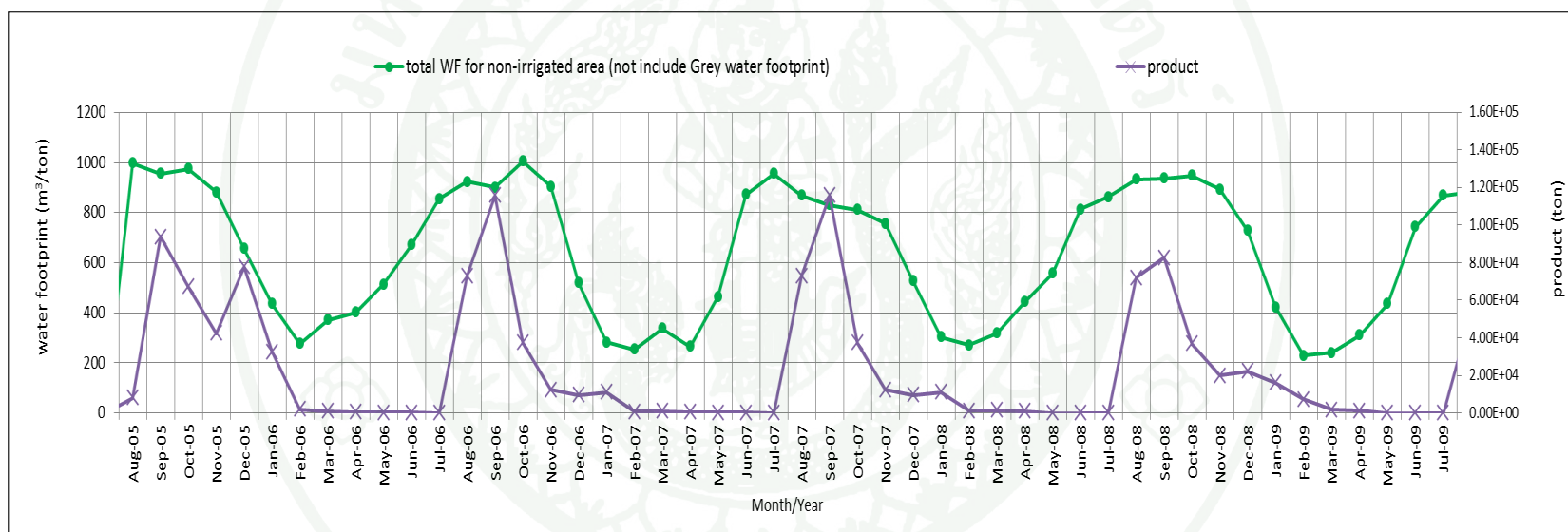
$$WF_{green} = 998.301 \text{ ลบ.ม./ตัน}$$

4.1.6 ตัวอย่างกราฟแสดงกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของจังหวัดนครสวรรค์ ระหว่างปี พ.ศ. 2548-2552

4.2 ตัวอย่างการคำนวณกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ กรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของจังหวัดกำแพงเพชร

- สูตรปุ๋ยที่ใช้ 15-15-15 อัตราส่วน 50 กิโลกรัม/ไร่ จนถึงวันที่ 20-25 เปลี่ยนสูตรมาใช้ 21-0-0 อัตราส่วน 30 กิโลกรัม/ไร่
- จากสูตรปุ๋ยแปลได้ว่า ในปุ๋ย 100 กิโลกรัมมีไนโตรเจน 15 กิโลกรัมโดยน้ำหนัก
- ความเข้มข้นมากที่สุดที่ยอมให้ 5 มิลลิกรัม/ลิตร
- ข้อมูลปริมาณปุ๋ยที่ใช้ เช่น จังหวัดนครสวรรค์ 2548 มีข้อมูลพื้นที่ 515,116 ไร่ ปริมาณปุ๋ยที่ใช้ 22,074 ตัน ดังนั้นปริมาณปุ๋ยที่ใช้เท่ากับ 42.85 กก./ไร่ และมีผลผลิต 625 กิโลกรัม/ไร่



ภาพที่ 23 กรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ และผลผลิตรวมทั้งในเขตและนอกเขตพื้นที่ชลประทานรายเดือนของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ จังหวัดนครสวรรค์ ช่วงปี
ผลผลิต 2548-2552 (ค.ศ. 2005 – 2009)

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

- เมื่อ α = สัดส่วนการชะละลาย ในที่นี้สมมติให้เท่ากับ 10% ของ AR
 AR = อัตราการใช้ปุ๋ยในพื้นที่ต่อไร่ มีหน่วยเป็น กก./ไร่
 C_{max} = ความเข้มข้นมากที่สุดที่ยอมรับได้ มีหน่วยเป็น กก./ลบ.ม.
 C_{nat} = ความเข้มข้นมลพิษในธรรมชาติที่พิจารณา มีหน่วยเป็น กก./ลบ.ม. ในที่นี้สมมติให้เท่ากับ 0
 Y = ผลผลิตต่อไร่ มีหน่วยเป็น ตัน/ไร่
 ดังนั้นทราบค่า C_{max} , C_{nat} , Y แต่ไม่ทราบค่า AR ซึ่งสามารถหาได้โดย

1. นำปริมาณปุ๋ยที่ใช้จริงคูณกับน้ำหนักปุ๋ยต่อไร่สูตร 15-15-15 หาดด้วย น้ำหนักปุ๋ยทั้งสองสูตรที่ใส่ทั้งหมด

$$42.85 \times \left(\frac{50}{50 + 30} \right) = 26.78 \text{ กิโลกรัมต่อไร่ จะได้เป็นปริมาณปุ๋ยจริงที่ใช้ของสูตร 15-15-15 ต่อไร่}$$

$$42.85 \times \left(\frac{30}{50 + 30} \right) = 16.07 \text{ กิโลกรัมต่อไร่ จะได้เป็นปริมาณปุ๋ยจริงที่ใช้ของสูตร 21-0-0 ต่อไร่}$$

2. ต้องการทราบว่า มีไนโตรเจน (ไนโตรเจน) เท่าไหร่ในปุ๋ยสูตร 15-15-15 คำนวณได้จากปริมาณปุ๋ยจริงที่ใช้

$$26.78 \times \frac{15}{100} = 4.02 \text{ กิโลกรัมไนโตรเจน (ไนโตรเจน)}$$

เช่นเดียวกับสูตร 21-0-0 คำนวณได้จาก ปริมาณปุ๋ยที่ใช้จริง

$$16.07 \times \frac{21}{100} = 3.37 \text{ กิโลกรัมไนโตรเจน (ไนโตรเจน)}$$

3. หลังจากที่เราทราบค่าไนเตรทแล้วนำค่าไนเตรทที่ได้จากทั้งสองสูตรมารวมกัน จะได้เท่ากับ 7.39 กิโลกรัมไนเตรท ซึ่งเป็นค่าของไนเตรทของจังหวัดนครสวรรค์ ปีพ.ศ. 2548

4. จากนั้นทำการคำนวณหา Leaching runoff ซึ่งเป็น 10 % ของ AR จะได้เท่ากับ 0.739

5. เนื่องจากเราได้ค่าที่ต้องการครบหมดแล้วทำการแทนค่าลงในสูตร

$$WF_{grey} = \frac{(0.1 * 7.39) / (0.005 - 0)}{0.625} = 236.67 \text{ ลบ.ม./ตัน}$$

ดังนั้นค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของจังหวัดนครสวรรค์ ปีพ.ศ. 2548 เท่ากับ 237 ลบ.ม./ตัน

ผลและวิจารณ์

1. ผลการคำนวณค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิง

เนื่องจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาไม่ครบถ้วนดังแสดงในตารางที่ 3 ดังนั้นจึงทำการหาแนวโน้มของความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น โดยนำข้อมูลของสถานีที่มีข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่ครบถ้วนสมบูรณ์ (ในที่นี้ใช้ข้อมูลจากสถานีนครสวรรค์) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 – 2553 มาหาค่า ETo และทดลองทำการตัดข้อมูลบางส่วน เช่น ชั่วโมงที่มีแสงแดด (n) ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ความเร็วลม (U_2) เป็นต้น แล้วจึงทำการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น โดยใช้ค่าทางสถิติ ดังนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) และค่าดัชนีวัดประสิทธิภาพ (Efficiency Index, EI) และค่าความเบ้ (Skewness) ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าทางสถิติเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าการคายระเหยอ้างอิงระหว่างกรณีข้อมูล

ครบถ้วนกับกรณีขาดข้อมูลบางส่วน จากข้อมูลของสถานีอุตุนิยมวิทยาที่มีข้อมูล

ครบถ้วน โดยที่ n คือ ชั่วโมงที่มีแสงแดด RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ U_2 คือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ 2 เมตร

กรณีการใช้ข้อมูลคำนวณ ค่า ETo	จังหวัดที่มีข้อมูลอยู่ใน กรณีดังกล่าว	ประสิทธิภาพของการคำนวณค่า ETo		
		R^2	EI	skewness
ข้อมูลครบ	อุดรราชธานี นครสวรรค์ เชียงราย	1	100	0
ขาดข้อมูลความชื้น สัมพัทธ์ (RH)		0.9924	99.96	0.27812
ขาดข้อมูลความเร็วลมที่ ระดับ 2 เมตร (U_2)	อุบลราชธานี, พิจิตร	0.9120	99.87	0.190073

ตารางที่ 9 (ต่อ)

กรณีการใช้ข้อมูลคำนวณ ค่า ETo	จังหวัดที่มีข้อมูลอยู่ใน กรณีดังกล่าว	ประสิทธิภาพของการคำนวณค่า ETo		
		R ²	EI	skewness
ขาดข้อมูลความเร็วลมที่ ระดับ 2 เมตร (U ₂)และ ความชื้นสัมพัทธ์ (RH)		0.9168	99.87	0.199856
ขาดข้อมูลชั่วโมงที่มี แสงแดด (n)	พะเยา เชียงใหม่ ลำพูน แพร่ น่าน อุดตรดิตถ์ ตาก เพชรบูรณ์ หนองคาย เลย ขอนแก่น นครราชสีมา กำแพงเพชร ชัยภูมิ สุพรรณบุรี ลพบุรี ปราจีนบุรี สระแก้ว ชลบุรี จันทบุรี เพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์	0.7488	97.18	0.41513
ขาดข้อมูล ความชื้น สัมพัทธ์ (RH)และชั่วโมง ที่มีแสงแดด (n)		0.7352	97.06	0.40124
มีแต่ข้อมูลอุณหภูมิ	ฉะเชิงเทรา	0.6549	97.33	0.40813

จากผลการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่เกิดขึ้นดังตารางที่ 9 พบว่า

1.1 กรณีที่มีข้อมูลครบโปรแกรมนี้จะมี R² เท่ากับ 1 EI เท่ากับ 100

1.2 โดยทั่วไปค่า R² ที่ยอมให้อย่างน้อย 0.75 และหากสูงกว่า 0.90 ถือว่ามีความแม่นยำมาก (Haaland, 1998 และ Hu, 1999) พบว่า ในกรณีส่วนใหญ่จะมีค่า R² มากกว่า 0.75 ยกเว้นกรณี ขาด RH และ n และกรณีมีแต่อุณหภูมิ ซึ่งพบว่า เฉพาะจังหวัดฉะเชิงเทราจะมีปัญหาในการคำนวณ เนื่องจากมีข้อมูลอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว

1.3 สำหรับค่า EI พบว่าทุกกรณีมีค่าใกล้เคียง 100 แสดงให้เห็นว่ากรณีข้อมูลขาดหายมีความสัมพันธ์กับกรณีข้อมูลครบถ้วนเป็นอย่างดี

1.4 เมื่อขาดข้อมูลเพิ่มมากขึ้น ค่า R^2 จะลดลง พร้อมกับค่า EI ก็ลดลงเช่นเดียวกัน ดังนั้นค่า E_{To} ที่คำนวณได้สำหรับกรณีขาดข้อมูลบางส่วนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

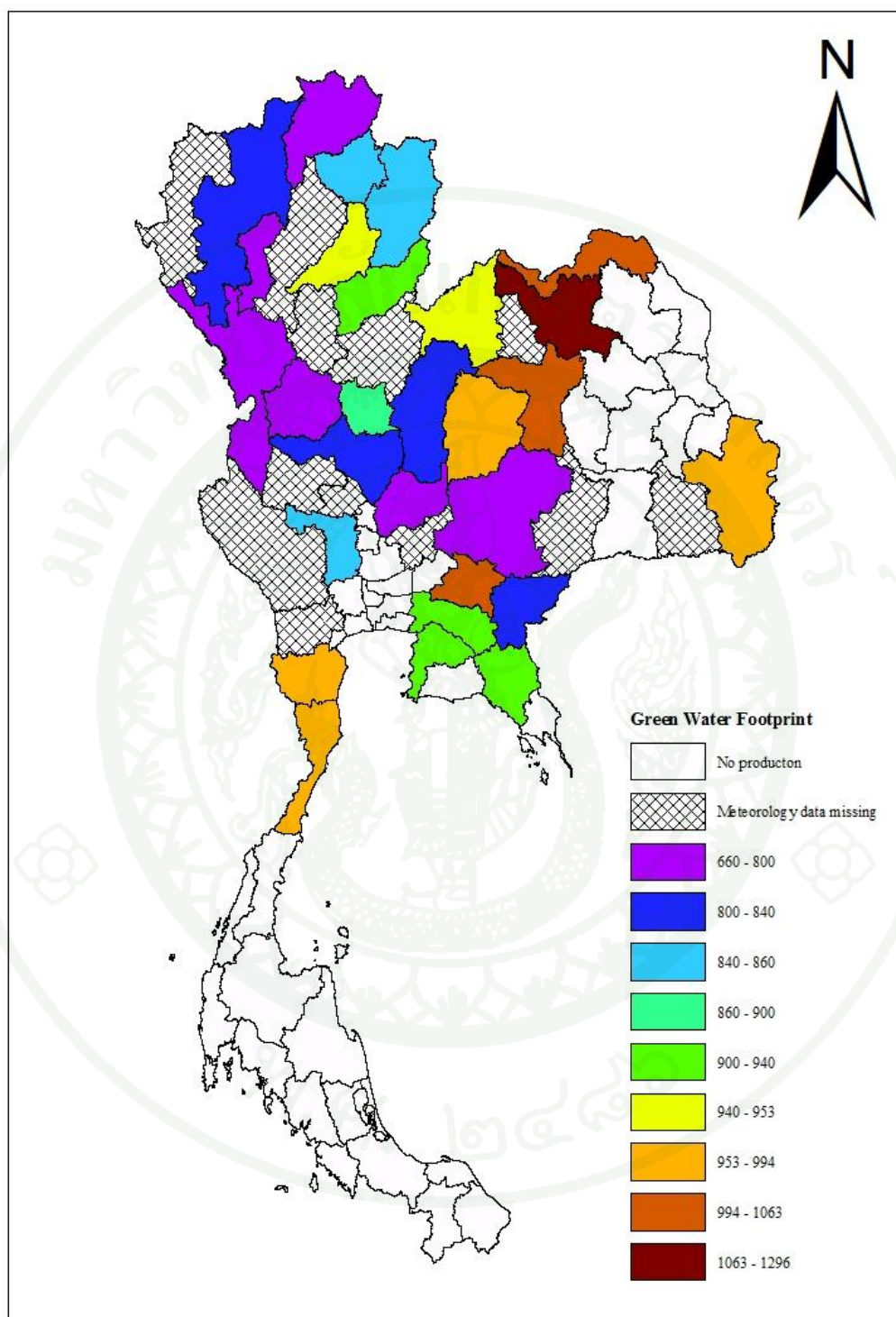
2. ผลการคำนวณหาอัตราร่วงพรุนที่นอกเขตพื้นที่ชลประทาน

การคำนวณหาอัตราร่วงพรุนที่นอกเขตชลประทานไม่คิดบลอว์เออร์พรุนท์เนื่องจากไม่มีข้อมูลการใช้แหล่งน้ำ เช่น น้ำผิวดินและน้ำใต้ดินนอกเขตพื้นที่ชลประทานของกรมชลประทาน แต่อย่างไรก็ตามเชื่อว่าอาจมีการใช้น้ำบาดาลหรือน้ำผิวดินในบางส่วนของพื้นที่การเพาะปลูก ซึ่งอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ ผลลัพธ์ค่าเฉลี่ยรายปีของกรีนวอเตอร์พรุนท์ในแต่ละจังหวัดแสดงในภาพที่ 24 และค่ากรีนวอเตอร์พรุนท์ที่นอกเขตพื้นที่ชลประทานรายจังหวัดระหว่างปี พ.ศ.2548-2552 แสดงในตารางที่ 11 จะเห็นว่า ค่ากรีนวอเตอร์พรุนท์ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีค่าอยู่ระหว่าง 660 ลบ.ม./ตัน – 1,296 ลบ.ม./ตัน โดยค่าเฉลี่ยกรีนวอเตอร์พรุนท์ทั้งประเทศเท่ากับ 899 ลบ.ม./ตัน ส่วนพื้นที่ที่แรเงา คือ จังหวัดที่ไม่สามารถคำนวณหาอัตราร่วงพรุนที่นอกเขตพื้นที่ชลประทานได้ เนื่องจากมีข้อมูลอุณหภูมิต่ำไม่สมบูรณ์ และจากรูปยังพบอีกว่าภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีค่ากรีนวอเตอร์พรุนท์ค่อนข้างสูงเนื่องมาจากค่าผลผลิตต่อไร่ต่ำ (ตารางที่ 4) ซึ่งเป็นตัวส่วนที่ใช้ในสมการหาค่ากรีนวอเตอร์พรุนท์ดังสมการที่ (39) ในขณะที่ภาคกลางและภาคเหนือมีค่ากรีนวอเตอร์พรุนท์ต่ำกว่า ยกเว้นจังหวัดแม่ฮ่องสอนไม่สามารถคำนวณหากรีนวอเตอร์พรุนท์ได้ โดยจังหวัดที่ค่ากรีนวอเตอร์พรุนท์สูงที่สุดคือ จังหวัดอุดรราชธานี มีค่าเท่ากับ 1,296 ลบ.ม./ตัน และจังหวัดที่มีกรีนวอเตอร์พรุนท์ต่ำสุดคือ จังหวัดตาก มีค่าเท่ากับ 660 ลบ.ม./ตัน จึงได้ทำการเปรียบเทียบค่าการคายระเหยของพืช ค่าปริมาณการใช้น้ำของพืช ค่าผลผลิตต่อไร่ และค่ากรีนวอเตอร์พรุนท์ของจังหวัดตากและจังหวัดอุดรราชธานี ของการหาอัตราร่วงพรุนที่นอกเขตชลประทานในเดือนกันยายน ปี พ.ศ. 2548 เพื่อหาสาเหตุหลักที่ทำให้กรีนวอเตอร์พรุนท์ทั้งจังหวัดอุดรราชธานีสูงกว่าจังหวัดตากทั้งที่จังหวัดตากเป็นจังหวัดที่มีฝนตกน้อย ในตารางที่ 10 เปรียบเทียบ พบว่า ปริมาณการใช้น้ำของพืชจังหวัดอุดรราชธานีสูงกว่า 2 เท่า และค่าผลผลิตต่อไร่ที่เป็นตัวส่วนในสมการที่ (39) ของจังหวัดตากมีค่าต่ำกว่าจังหวัดอุดรราชธานี 1 เท่า

จากภาพที่ 25-28 พบว่าการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในช่วงปลายฤดูฝนคือ เดือน กรกฎาคมถึงเดือนสิงหาคม และเก็บเกี่ยวช่วงกันยายนเป็นช่วงผลผลิตออกมาที่สูงและมีค่าอวอเตอร์พุตพรีนที่สูงเช่นกัน ซึ่งสามารถบอกได้ว่าเกษตรกรได้ใช้น้ำอย่างเต็มประสิทธิภาพในการเพาะปลูกข้าวโพดเพื่อให้ได้ผลผลิตสูงสุด ตรงกันข้ามในช่วงเดือนพฤษภาคมของทุกปีมีค่าอวอเตอร์พุตพรีนที่ต่ำแต่ผลผลิตต่ำนั้น เป็นเพราะช่วงที่มีการเพาะปลูกเป็นฤดูร้อนทำให้มีค่าปริมาณการใช้น้ำสูงกว่าช่วงอื่นๆของปีซึ่งส่งผลให้ค่าอวอเตอร์พุตพรีนที่สูงตาม ข้อสังเกต จังหวัดอุดรราชธานีถึงจะเป็นเกษตรน้ำฝนแต่ขาดการดูแลเอาใจใส่ ผลผลิตต่อไร่จึงต่ำกว่าเมื่อเทียบกับจังหวัดตากซึ่งเป็นแหล่งเพาะปลูกที่สำคัญของประเทศ จึงมีการดูแลเอาใจใส่มากกว่าทำให้ได้ผลผลิตต่อไร่สูงเป็นอันดับ 3 ของประเทศแสดงในตารางที่ 4 แต่ค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชนอกเขตพื้นที่ชลประทานจังหวัดตากต่ำมาก ซึ่งอาจมีการใช้น้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติที่ไม่ได้น้ำจากในเขตพื้นที่ชลประทาน

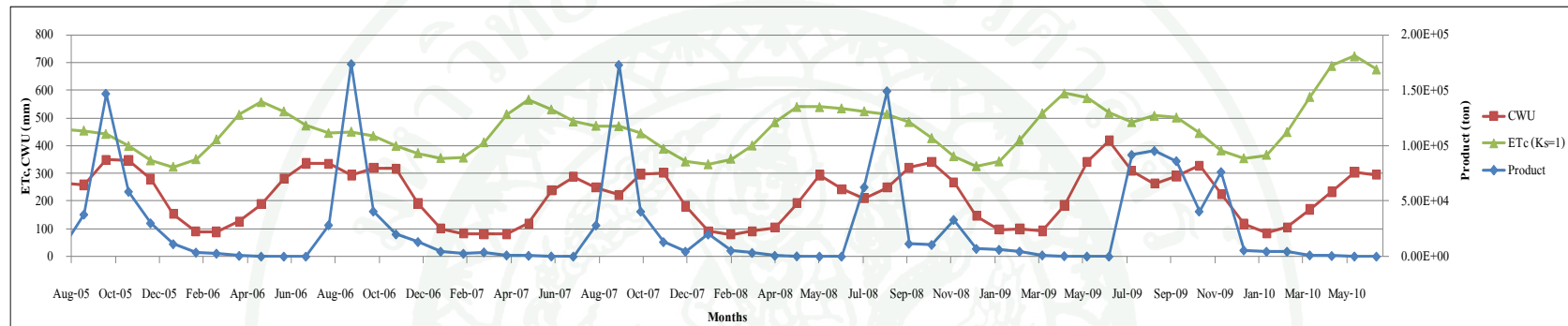
ตารางที่ 10 เปรียบเทียบค่าการคายระเหยของพืช ค่าปริมาณการใช้น้ำของพืช ค่าผลผลิตต่อไร่ และค่ากรีนวอเตอร์พุตพรีนของจังหวัดตากและจังหวัดอุดรราชธานี ของการหาวอเตอร์พุตพรีนในเดือนกันยายน ปี พ.ศ. 2548

จังหวัด	$\sum ET_c$ (มม./ช่วงการ เพาะปลูก)	CWU (มม./ช่วงการ เพาะปลูก)	Product (ตัน)	Y (ตัน/ไร่)	WF _{green} (ลบ.ม./ตัน)
อุดรราชธานี	438	432	37,890	568	1,444
ตาก	454	258	5,563	808	678
MAX	51 (%)	63 (%)	87 (%)	59 (%)	68 (%)
MIN	49 (%)	37 (%)	13 (%)	41 (%)	32 (%)

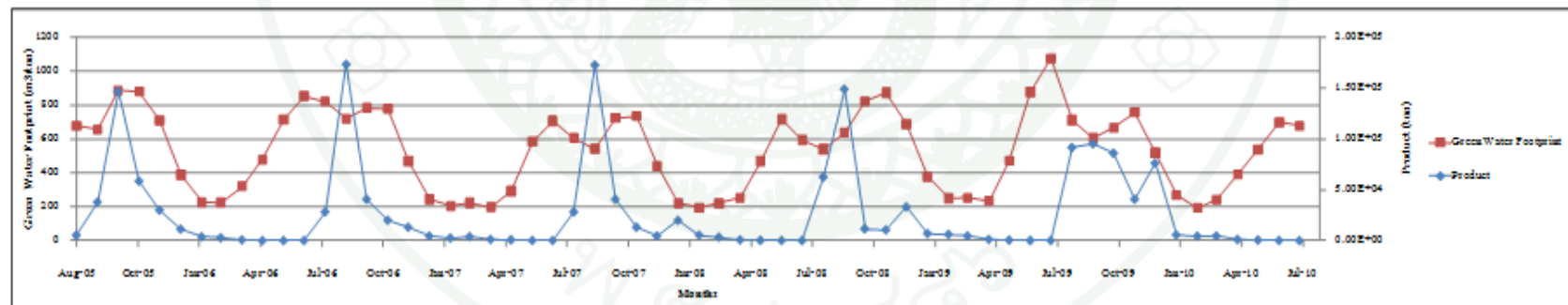


ภาพที่ 24 กรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เฉลี่ยนอกเขตพื้นที่ชลประทานรายจังหวัดระหว่างปี

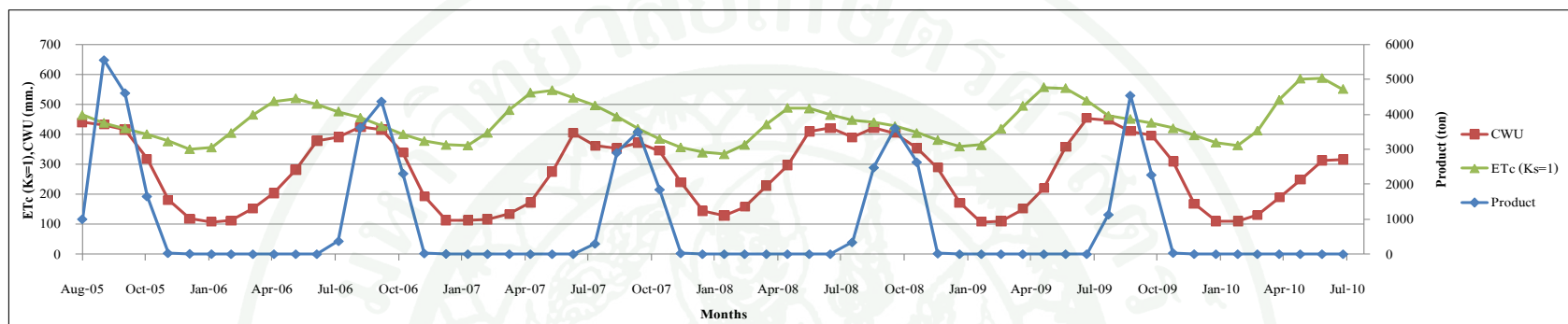
พ.ศ.2548-2552



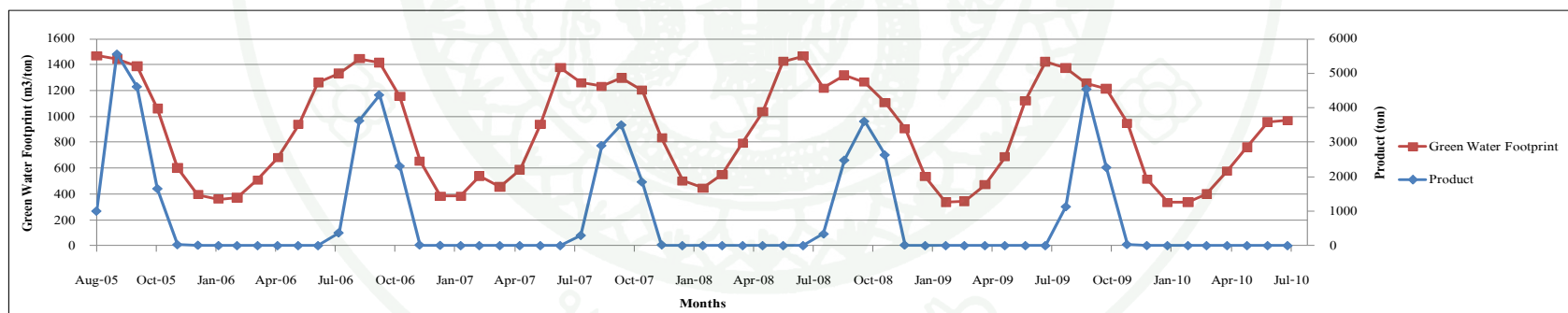
ภาพที่ 25 ตัวอย่างผลผลิตรายเดือนและค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของจังหวัดตาก ปี พ.ศ. 2548 – 2552



ภาพที่ 26 ตัวอย่างค่าปริมาณการใช้น้ำของพืช ค่าการระบายของพืช กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดน้ำเท่ากับ 1 และค่าผลผลิตรายเดือน จังหวัดตาก



ภาพที่ 27 ตัวอย่างผลผลิตรายเดือนและค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของจังหวัดอุดรราชธานี ปี พ.ศ. 2548 – 2552



ภาพที่ 28 ตัวอย่างค่าปริมาณการใช้น้ำของพืช ค่าการระบายของพืช กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดน้ำเท่ากับ 1 และค่าผลผลิตรายเดือน จังหวัดอุดรราชธานี ปีพ.ศ. 2548 - 2552

ตารางที่ 11 ค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์นอกเขตพื้นที่ชลประทานรายจังหวัดระหว่างปี พ.ศ.2548-2552

จังหวัด	ค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์รายปี (ลบ.ม./ตัน)				
	2548	2549	2550	2551	2552
ภาคเหนือ					
เชียงราย	706.6	630.1	702.7	601.7	575.5
เชียงใหม่	689.6	591.3	594.5	590.5	573.6
พะเยา	658.5	622	597.8	633.7	584.7
ลำพูน	643.5	587.6	553.6	562.6	534.1
แพร่	708.1	700.5	680.4	680.8	631.8
น่าน	706.5	612.3	665.6	584	606.3
อุตรดิตถ์	682.4	627.1	587.6	634.8	647.2
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ					
ขอนแก่น	847.3	826.5	862.9	824.1	781.3
ชัยภูมิ	737.2	720.4	819.5	723.3	775.1
นครราชสีมา	817.5	674	771.4	769.7	650
เลย					
หนองคาย	758.7	723.6	817.5	766.7	627
อุดรราชธานี	900.5	812.4	946.6	889	804.5
อุบลราชธานี	873.3	889.1	1003.8	894.2	803.7
	670.3	667.3	664.4	674.3	619.1
ภาคกลาง					
กำแพงเพชร	640.5	589.6	603.4	655.1	610.4
นครสวรรค์	666.1	640	613.5	640.9	584.7
พิจิตร	728.2	629.5	732.5	659.2	644.1
เพชรบูรณ์	635.6	596.5	590.9	647.3	544.3
ลพบุรี	653.5	604.9	545	625	542.2
สุพรรณบุรี	918.4	750.9	694.2	608.4	533.6

ตารางที่ 11 (ต่อ)

จังหวัด	ค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์รายปี (ลบ.ม./ตัน)				
	2548	2549	2550	2551	2552
ภาคตะวันออก					
จันทบุรี	728	737	703	787	712
ฉะเชิงเทรา	765	745	700	760	685
ชลบุรี	784	683	613	715	676
ปราจีนบุรี	804	707	706	679	681
สระแก้ว	626	618	613	613	583
ภาคตะวันตก					
ตาก	585	502	477	592	523
ประจวบคีรีขันธ์	940	819	912	597	561
เพชรบุรี	883	822	832	653	650

3. ผลการคำนวณหาค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในเขตพื้นที่ชลประทาน

ในการคำนวณนอกเขตพื้นที่ชลประทานไม่คำนึงถึงค่าบลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ แต่ในเขตพื้นที่ชลประทานจะคำนึงถึงค่าบลูและกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ ผลลัพธ์ของค่าเฉลี่ยวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในเขตพื้นที่ชลประทานทั่วประเทศรายจังหวัดแสดงในตารางที่ 12 และผลลัพธ์ของค่าเฉลี่ยวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในเขตพื้นที่ชลประทานทั่วประเทศเท่ากับ 925 ลบ.ม./ตัน สาเหตุที่ทำให้ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในเขตพื้นที่ชลประทานสูงกว่านอกเขตพื้นที่ชลประทานส่วนหนึ่งมาจากมีค่าบลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เพิ่มขึ้น แต่นอกเขตพื้นที่ชลประทานไม่ได้คิดบลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ อีกสาเหตุหนึ่งเกิดจากสมมติฐานในการคำนวณในการศึกษานี้ว่าในเขตพื้นที่ชลประทานมีการให้น้ำเพียงพอต่อความต้องการใช้น้ำของพืชทำให้ไม่เกิดสัมประสิทธิ์ความเครียดน้ำ แต่ในความเป็นจริงอาจเกิดความเครียดน้ำบ้างในบางช่วงเวลาของการเพาะปลูกทั้งนี้ผู้วิจัยเห็นว่าการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในเขตพื้นที่ชลประทานอาจไม่คุ้มค่าในการลงทุนเพราะค่าผลผลิตต่อไร่ในเขตพื้นที่ชลประทานเพิ่มขึ้นเพียง 10 % เมื่อเทียบกับนอกเขตพื้นที่ชลประทานดังตารางที่ 4

ตารางที่ 12 ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในเขตพื้นที่ชลประทานรายจังหวัดตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 -2552

จังหวัด		ค่าบวลวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เฉลี่ยรายจังหวัด (ลบ.ม./ตัน)
ภาคเหนือ		
	เชียงราย	894
	เชียงใหม่	994
	พะเยา	923
	ลำพูน	906
	แพร่	986
	น่าน	979
	อุตรดิตถ์	1,032
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ		
	ขอนแก่น	793
	ชัยภูมิ	1,124
	นครราชสีมา	1,053
	เลย	1,099
	หนองคาย	743
	อุดรราชธานี	1,151
	อุบลราชธานี	1,039
ภาคกลาง		
	กำแพงเพชร	865
	นครสวรรค์	1,037
	พิจิตร	824
	เพชรบูรณ์	978
	ลพบุรี	1,021
	สุพรรณบุรี	1,160

ตารางที่ 12 (ต่อ)

จังหวัด	ค่าบวอเตอร์ฟุตพรีนที่เฉลี่ยรายจังหวัด (ลบ.ม./ตัน)	
ภาคตะวันออก		
	จันทบุรี	946
	ฉะเชิงเทรา	951
	ชลบุรี	956
	ปราจีนบุรี	653
	สระแก้ว	939
ภาคตะวันตก		
	ตาก	951
	ประจวบคีรีขันธ์	726
	เพชรบุรี	757

4. ผลการคำนวณหาค่าเกรยวอเตอร์ฟุตพรีนที่นอกเขตพื้นที่ชลประทาน

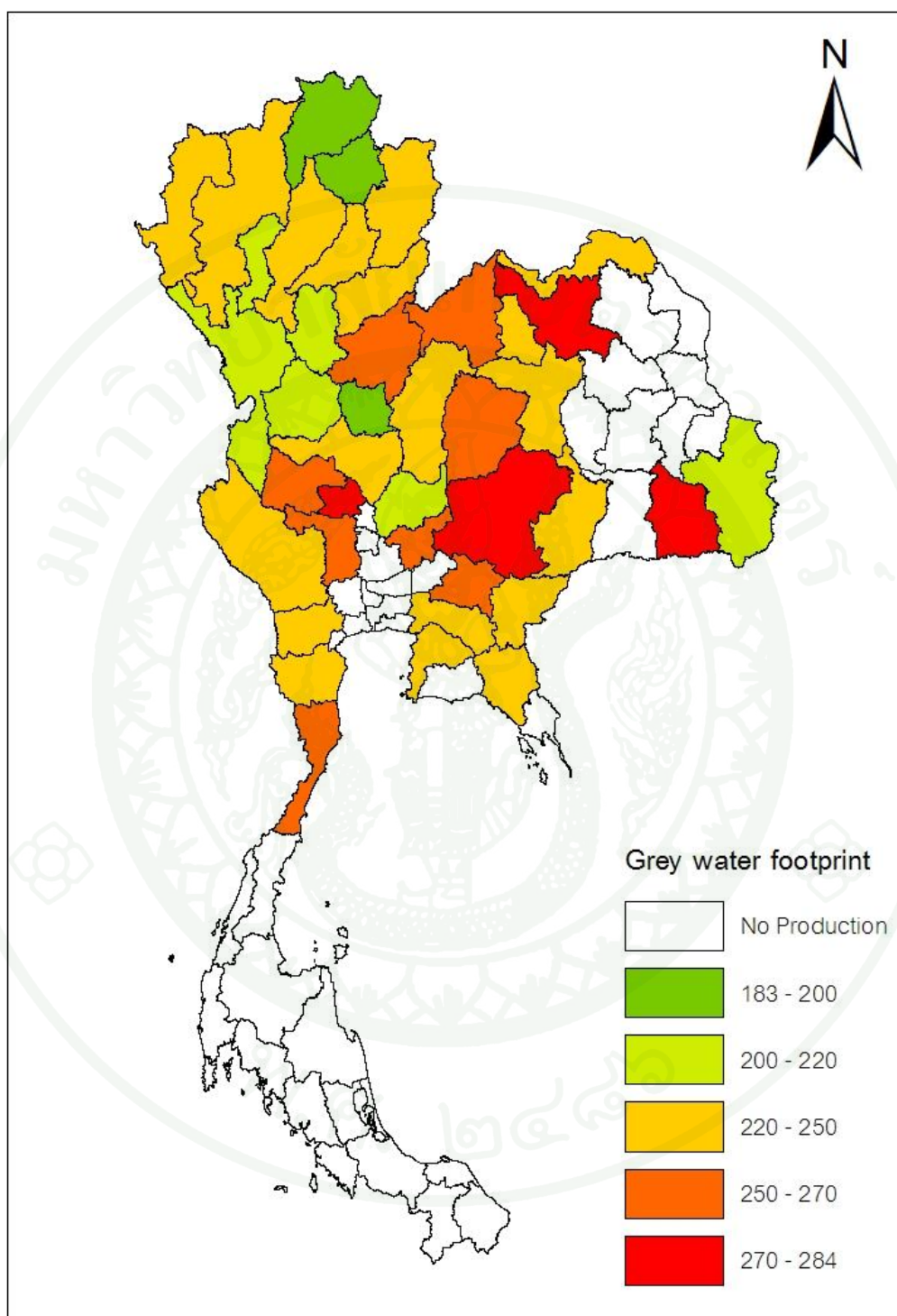
เนื่องจากผลผลิตส่วนใหญ่ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ปลูกนอกเขตพื้นที่ชลประทานการศึกษานี้จึงสนใจเฉพาะการใช้ปุ๋ยเคมีนอกเขตพื้นที่ชลประทานเท่านั้น พบว่าค่าเฉลี่ยเกรยวอเตอร์ฟุตพรีนที่นอกเขตพื้นที่ชลประทานทั่วประเทศของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในภาพที่ 29 มีค่าอยู่ระหว่าง 125-283 ลบ.ม./ตัน และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 230 ลบ.ม./ตัน มีค่าสูงกว่าการศึกษาของ Mekonnen and Hoekstra (2010) ซึ่งเท่ากับ 120 ลบ.ม./ตัน จังหวัดที่ค่าเกรยวอเตอร์ฟุตพรีนที่สูงที่สุดคือ จังหวัดนครราชสีมา มีค่าเท่ากับ 284 ลบ.ม./ตัน และจังหวัดที่มีเกรยวอเตอร์ฟุตพรีนที่ต่ำสุดคือ จังหวัดสุพรรณบุรี มีค่าเท่ากับ 125 ลบ.ม./ตัน โดยสาเหตุหลักที่ทำให้เกรยวอเตอร์ฟุตพรีนที่สูง คือ มีผลผลิตต่อไร่ต่ำ แต่มีการใช้ปุ๋ยเคมีต่อไร่สูง ซึ่งการใช้ปุ๋ยเคมีมาก อาจทำให้เกิดความไม่สมดุลของธาตุอาหารในดินและสูญเสียน้ำเพื่อบำบัดน้ำเสียให้เป็นค่าที่มาตรฐานยอมรับได้

ตารางที่ 13 ค่าเกรยวอเตอร์พุตพรีนที่นอกเขตพื้นที่ชลประทานรายจังหวัดระหว่างปี พ.ศ.2548-2552

จังหวัด	ค่าเกรยวอเตอร์พุตพรีนที่รายปี (ลบ.ม./ตัน)				
	2548	2549	2550	2551	2552
ภาคเหนือ					
เชียงราย	173	187	168	150	238
เชียงใหม่	219	212	222	237	234
พะเยา	195	232	184	177	210
แพร่	252	258	208	223	230
น่าน	231	225	230	223	235
อุตรดิตถ์	246	253	184	213	220
สุโขทัย	182	243	179	222	244
พิษณุโลก	269	291	250	238	222
พิจิตร	175	157	160	202	228
ตาก	234	193	230	209	207
ลำปาง	231	243	225	218	215
ลำพูน	179	223	218	198	240
แม่ฮ่องสอน	187	187	242	221	275
เพชรบูรณ์	233	266	251	240	251
กำแพงเพชร	226	231	224	195	204
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ					
ขอนแก่น	206	217	223	222	280
ชัยภูมิ	266	263	238	245	266
เลย	255	300	265	238	290
หนองบัวลำภู	268	333	271	232	220
อุดรราชธานี	265	333	278	251	245
หนองคาย	241	244	242	245	269
อุบลราชธานี	257	249	158	226	205
ศรีสะเกษ	298	238	300	278	263

ตารางที่ 13 (ต่อ)

จังหวัด	ค่าเฉลี่ยมอเตอร์ฟุตบอลพื้นที่รายปี (ลบ.ม./ตัน)				
	2548	2549	2550	2551	2552
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ					
บุรีรัมย์	239	265	192	218	241
นครราชสีมา	314	300	308	232	264
ภาคกลาง					
นครสวรรค์	237	237	229	227	229
อุทัยธานี	264	273	257	250	247
ลพบุรี	223	197	210	189	249
สระบุรี	282	252	260	233	229
ชัยนาท	313	326	285	240	244
ภาคตะวันออก					
จันทบุรี	217	212	220	231	232
ชลบุรี	250	230	225	218	259
ปราจีนบุรี	142	157	135	108	119
สระแก้ว	255	208	240	259	242
ฉะเชิงเทรา	256	262	183	225	230
ภาคตะวันตก					
กาญจนบุรี	222	199	184	273	239
ราชบุรี	239	245	253	221	283
เพชรบุรี	245	239	255	213	281
ประจวบคีรีขันธ์	256	237	253	259	283
สุพรรณบุรี	141	120	125	117	124



ภาพที่ 29 เกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์เฉลี่ยนอกเขตพื้นที่ชลประทานรายจังหวัดระหว่างปี

พ.ศ.2548-2552

5. ค่าเฉลี่ยวอเตอร์ฟุตพริ้นท์นอกเขตพื้นที่ชลประทานรายจังหวัด ผลรวมค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในการศึกษานี้ และค่าเฉลี่ยวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการศึกษา Mekonnen และ Hoekstra (2010)

ค่าเฉลี่ยวอเตอร์ฟุตพริ้นท์นอกเขตพื้นที่ชลประทาน(กรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์และเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์) และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์รวมของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 - 2552 เป็นรายจังหวัด สาเหตุที่ไม่สามารถคำนวณกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ได้ครบ 40 จังหวัด เนื่องจากข้อมูลอุณหภูมิมหาวิทยาลัยไม่ครบถ้วน แบบจำลอง The ETo calculator จึงไม่สามารถคำนวณหาค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิงได้ตามสมการที่ (4)

ส่วนสาเหตุที่ทำให้ค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในการศึกษานี้มีค่าสูงกว่าการศึกษาของ MH เหตุผลสำคัญเนื่องจากค่าผลผลิตต่อไร่รายจังหวัดและของประเทศไทยจากข้อมูลสถิติจริงมีค่าต่ำกว่าสมมติฐานที่ใช้ใน MH แต่จากการคำนวณย้อนกลับโดยใช้สมการเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์เพื่อหาว่าค่าผลผลิตต่อไร่ที่ใช้จริงในการศึกษา MH พบว่ามีค่าสูงกว่าของ FAO No. 56 ที่ MH ระบุไว้ 1.4 เท่าของค่าผลผลิตต่อไร่ที่ใช้ในการศึกษา MH จึงได้ทำการปรับแก้เพื่อให้เท่ากับค่าใน FAO No.56 ซึ่งส่งผลทำให้ค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการศึกษา MH มีค่าสูงกว่าในการศึกษานี้

ตารางที่ 14 ค่าเฉลี่ยวอเตอร์ฟุตบอลพื้นที่นอกเขตพื้นที่ชลประทาน(กรีนวอเตอร์ฟุตบอลและเกรย์วอเตอร์ฟุตบอล) และวอเตอร์ฟุตบอลรวมของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 -2552 เป็นรายจังหวัดในการศึกษานี้กับการศึกษาของ MH

จังหวัด	กรีนวอเตอร์ฟุตบอลพื้นที่ (ลบ.ม./ตัน)	เกรย์วอเตอร์ฟุตบอลพื้นที่ (ลบ.ม./ตัน)	ผลรวมวอเตอร์ฟุตบอลพื้นที่ (ลบ.ม./ตัน)	กรีนวอเตอร์ฟุตบอลพื้นที่ของการศึกษา MH (ลบ.ม./ตัน)	เกรย์วอเตอร์ฟุตบอลพื้นที่ของการศึกษา MH (ลบ.ม./ตัน)	ผลรวมวอเตอร์ฟุตบอลพื้นที่ของการศึกษา MH (ลบ.ม./ตัน)
ภาคเหนือ						
เชียงราย	643	183	826	747	113	860
เชียงใหม่	608	224	832	747	115	862
พะเยา	619	199	818	734	114	848
แพร่	680	234	914	728	114	842
น่าน	635	228	863	723	114	837
อุตรดิตถ์	636	223	859	724	114	838
สุโขทัย	-	214	-	723	115	838
พิษณุโลก	-	253	-	719	114	833
พิจิตร	679	184	863	862	116	978
ตาก	536	214	750	914	119	1033
ลำปาง	-	226	-	731	114	845
ลำพูน	576	211	787	690	114	804
แม่ฮ่องสอน	-	222	-	885	114	999
เพชรบูรณ์	603	248	851	846	120	966
กำแพงเพชร	620	215	835	949	120	1069

ตารางที่ 14 (ต่อ)

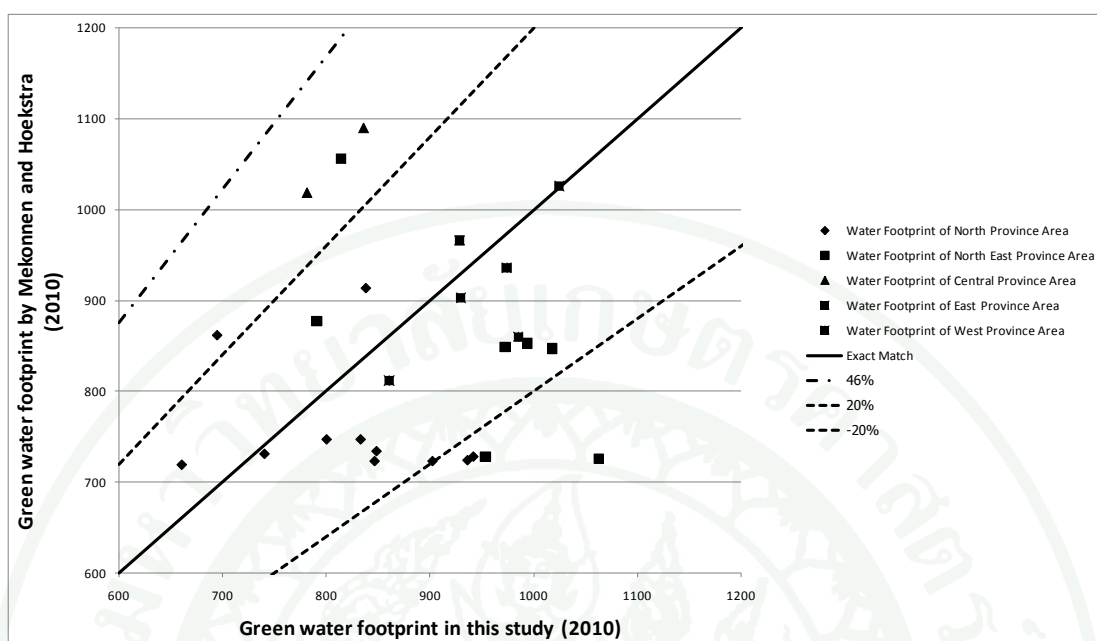
จังหวัด	กรีนวอ	เกรย์วอ	ผลรวม	กรีนวอ	เกรย์วอ	ผลรวม
	เตอร์	เตอร์	วอเตอร์	เตอร์	เตอร์	วอเตอร์
	ฟุต	ฟุต	ฟุต	ฟุต	ฟุต	ฟุต
	พรีนท์	พรีนท์	พรีนท์	พรีนท์	พรีนท์	พรีนท์
	(ลบ.ม./	(ลบ.ม./	(ลบ.ม./	ของ	ของ	ของ
	ตัน)	ตัน)	ตัน)	การศึกษา	การศึกษา	การศึกษา
				MH	MH	MH
				(ลบ.ม./	(ลบ.ม./	(ลบ.ม./
				ตัน)	ตัน)	ตัน)
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ						
ขอนแก่น	828	229	1057	726	114	840
ชัยภูมิ	755	255	1010	853	120	973
เลย	739	269	1008	728	114	842
หนองบัวลำภู	-	248	-	-	-	-
อุดรราชธานี	893	274	1167	757	114	871
หนองคาย	871	248	1119	847	103	950
อุบลราชธานี	659	218	877	849	114	963
ศรีสะเกษ	-	275	-	877	114	991
บุรีรัมย์	-	230	-	702	114	816
นครราชสีมา	737	283	1020	-	-	-
ภาคกลาง						
นครสวรรค์	629	231	860	1090	126	1216
อุทัยธานี	-	258	-	1019	116	1135
ลพบุรี	594	213	807	1125	137	1262
สระบุรี	-	251	-	1090	119	1209
ชัยนาท	-	281	-	907	125	1032

ตารางที่ 14 (ต่อ)

จังหวัด	กรีนวอ เตอร์ฟุต พรีนัท (ลบ.ม./ ตัน)	เกรย์วอ เตอร์ฟุต พรีนัท (ลบ.ม./ ตัน)	ผลรวม วอเตอร์ ฟุต พรีนัท (ลบ.ม./ ตัน)	กรีนวอ เตอร์ฟุต พรีนัท ของ การศึกษา MH (ลบ.ม./ ตัน)	เกรย์วอ เตอร์ฟุต พรีนัท ของ การศึกษา MH (ลบ.ม./ ตัน)	ผลรวม วอเตอร์ ฟุต พรีนัท ของ การศึกษา MH (ลบ.ม./ ตัน)
ภาคตะวันออก						
จันทบุรี	734	222	956	966	114	1080
ชลบุรี	694	236	930	903	115	1018
ปราจีนบุรี	716	132	980	1026	119	1145
สระแก้ว	611	240	851	-	-	-
ฉะเชิงเทรา	731	231	962	1056	116	1172
ภาคตะวันตก						
กาญจนบุรี	-	223	-	936	118	1054
ราชบุรี	-	248	-	860	117	977
เพชรบุรี	768	246	1014	812	114	926
ประจวบคีรีขันธ์	766	257	1023	753	114	867
สุพรรณบุรี	701	125	951	1013	117	1130

6. ผลการเปรียบเทียบค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพรีนัทกับการศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2010)

ภาพที่ 30 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพรีนัทนอกเขตพื้นที่ชลประทานของการศึกษานี้กับของ Mekonnen and Hoekstra (2010) พบว่าค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพรีนัทในการศึกษานี้ต่ำกว่าการศึกษาของ Mekonnen and Hoekstra (2010)



ภาพที่ 30 ผลการเปรียบเทียบการคำนวณค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์นอกเขตพื้นที่ชลประทานของ การศึกษานี้กับการศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2010)

จากผลการคำนวณและเปรียบเทียบค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในการศึกษานี้พบว่ามีค่าต่ำกว่าจาก การศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2010) สาเหตุหลักเนื่องมาจาก

ค่าผลผลิตต่อไร่รายจังหวัดของประเทศไทยจากข้อมูลสถิติจริงมีค่าต่ำกว่าสมมติฐานที่ใช้ใน MH ซึ่งจากการทำการคำนวณย้อนกลับโดยใช้สมการการคำนวณเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในการหาเพื่อ หาค่าผลผลิตต่อไร่จริงที่ MH ใช้ในการศึกษา พบว่ามีค่าสูงกว่าของ FAONo. 56 ที่ MH ระบุไว้ 1.4 เท่าของค่าผลผลิตต่อไร่ที่ใช้ในการศึกษาได้ทำการปรับแก้เพื่อให้เท่ากับค่าใน FAO No.56 จึงทำให้ ค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการศึกษา MH มีค่าสูงกว่าในการศึกษานี้ส่วนสาเหตุอื่นๆประกอบ ได้แก่

การใช้ข้อมูลในการศึกษาต่างปีกันโดยในการศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2010) ใช้ข้อมูล ฝนและอุณหภูมิตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539-2545 ซึ่งความละเอียดของข้อมูลไม่เท่ากันโดยของ Mekonnen และ Hoekstra (2010) ใช้เฉลี่ยรายเดือนแล้วแปลงให้เป็นรายวันโดยใช้โปรแกรมแปลงสภาพ ภูมิอากาศ CRU-dGen แต่ในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลเป็นรายวันโดยใช้ข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา

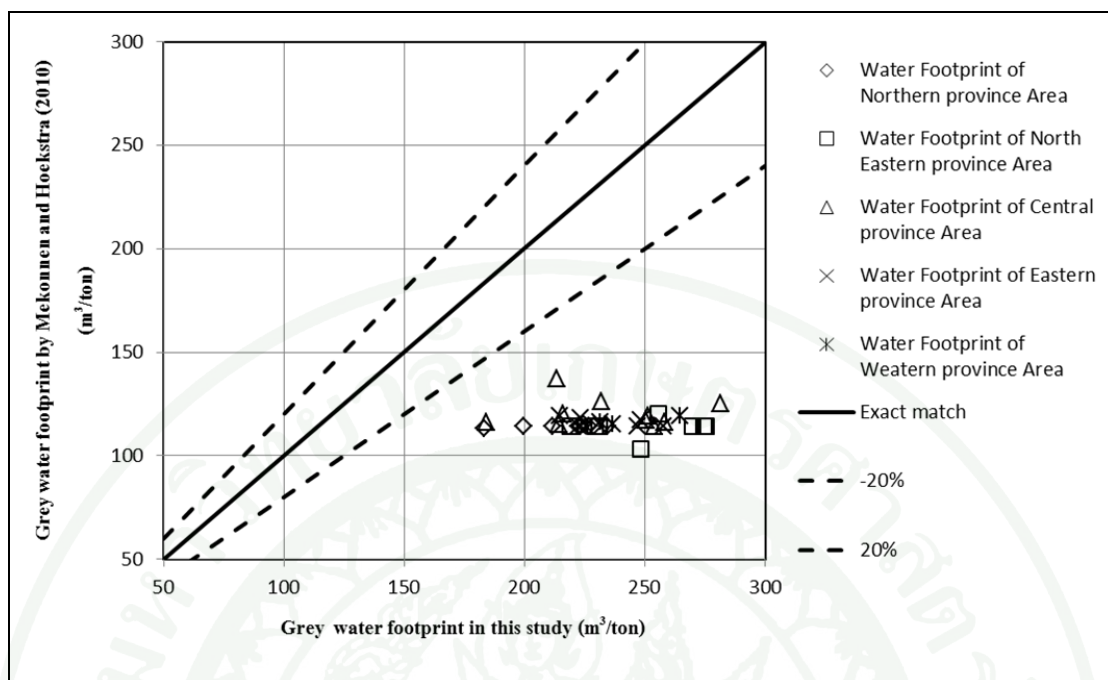
ตั้งแต่ปี พ.ศ.2548-2552 ช่วงการเพาะปลูกแตกต่างกัน ในการศึกษาที่ใช้ข้อมูลผลผลิตรายเดือนทำให้สามารถแบ่งการเพาะปลูกเป็นรายเดือนได้ขณะที่การศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2010) ใช้ข้อมูลผลผลิตรายปี

ความแตกต่างการอ้างอิงพื้นที่การคำนวณในการศึกษานี้อ้างอิงจากข้อมูลรายจังหวัดทำให้การคำนวณเป็นแบบรายจังหวัดโดยตรง ส่วนการศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2010) ใช้แบบจำลองสมดุลน้ำแบบ Grid-base dynamic มีความแม่นยำที่ 5*5 ลิปดา แล้วนำมาซ้อนทับกับพื้นที่รายจังหวัด

7. ผลการเปรียบเทียบค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์กับการศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2010)

ภาพที่ 31 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการศึกษานี้กับการศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2010) พบว่า ค่าของเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในการศึกษานี้สูงกว่าทั้งหมด และยังพบว่าค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์รายจังหวัดของการศึกษา Mekonnen และ Hoekstra (2010) มีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากข้อมูลที่ใช้เป็นรายประเทศ ขณะที่การศึกษานี้ ข้อมูลการใส่ปุ๋ยเป็นรายจังหวัดทำให้สามารถให้รายละเอียดค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์รายจังหวัดที่มีความถูกต้องมากขึ้น

ผลจากการคำนวณค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ พบว่าค่าของเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในการศึกษานี้สูงกว่าทั้งหมด เนื่องจากค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนตามมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินและข้อมูลของผลผลิตต่อไร่ใช้ข้อมูลต่างกัน โดยในการศึกษานี้ ใช้ C_{max} เท่ากับ 5 มก./ลิตร ขณะที่ การศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2010) ใช้ค่า C_{max} เท่ากับ 10 มก./ลิตร ทำให้ค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่ได้มีค่าสูงกว่า Mekonnen และ Hoekstra (2010) 1 เท่า หากใช้ค่าความเข้มข้นคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินสูงสุดที่ยอมรับได้เท่ากับ 10 มก./ลิตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของการศึกษา Mekonnen และ Hoekstra (2010) ค่าเฉลี่ยเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่ได้จะมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม พบว่า ค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์รายจังหวัดของการศึกษา Mekonnen และ Hoekstra (2010) มีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากข้อมูลที่ใช้เป็นรายประเทศ ขณะที่การศึกษานี้ ข้อมูลการใส่ปุ๋ยและผลผลิตต่อไร่เป็นรายจังหวัดทำให้สามารถให้รายละเอียดค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์รายจังหวัดที่มีความถูกต้องมากขึ้น



ภาพที่ 31 ผลการเปรียบเทียบค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการศึกษานี้กับการศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2010)

8. ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยและประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ผลจากการศึกษาเมื่อนำมาเปรียบค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์กับประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ดังตารางที่ 15 พบว่ามีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ประเทศไทยมีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากใช้ข้อมูลผลผลิตต่อไร่และวิธีการศึกษาที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 15 ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยในการศึกษานี้และประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้จากการศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2010)

ประเทศ	กรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (ลบ.ม./ตัน)	บลูวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (ลบ.ม./ตัน)	เกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (ลบ.ม./ตัน)	รวมวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (ลบ.ม./ตัน)
พระราชอาณาจักรกัมพูชา	3,838	28	-	3,866

ตารางที่ 15 (ต่อ)

ประเทศ	กรีนวอเตอร์ ฟุตพรีนท์ (ลบ.ม./ตัน)	บลูวอเตอร์ ฟุตพรีนท์ (ลบ.ม./ตัน)	เกรย์วอเตอร์ ฟุตพรีนท์ (ลบ.ม./ตัน)	รวมวอเตอร์ ฟุตพรีนท์ (ลบ.ม./ตัน)
สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว	3,471	-	23	3,494
สาธารณรัฐสหภาพ เมียนมาร์	960	-	36	996
สาธารณรัฐสังคมนิยมเวียดนาม	1,275	488	-	1,763
เนการาบุรูไนดารุสซาลาม	-	-	-	-
มาเลเซีย	2,363	-	244	2,607
สาธารณรัฐอินโดนีเซีย	1,368	327	36	1,731
สาธารณรัฐสิงคโปร์	-	-	-	-
สาธารณรัฐฟิลิปปินส์	1,986	-	164	2,150
ราชอาณาจักรไทย(MH)	919	-	120	1,039
ราชอาณาจักรไทย (การศึกษานี้)	899	-	230	1,129
สาธารณรัฐประชาธิปไตยติมอร์-เลสเต	2,543	-	-	2,543

9. ราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ทางเศรษฐศาสตร์

วิเคราะห์ราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าค่าเฉลี่ยรายปีราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (หน่วย บาท/ตัน) ส่วนด้วยวอเตอร์ฟุตพรีนท์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (ลบ.ม./ตัน) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 - 2552/53 เท่ากับ 6.11 บาท/ลบ.ม.

ตารางที่ 16 ปริมาณและมูลค่าข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 – 2552/53 มีหน่วย ปริมาณ : ตัน , มูลค่า : บาท

เดือน Month	2548		2549		2550		2551		2552	
	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า
	Quantity	Value	Quantity	Value	Quantity	Value	Quantity	Value	Quantity	Value
สิงหาคม	5,721,837	34,418,465	2,457,640	14,362,301	15,830,700	108,109,766	46,640,140	518,896,483	70,374,840	466,374,711
กันยายน	4,695,600	27,496,171	16,748,672	96,076,409	6,370,110	45,099,434	43,994,001	456,848,316	134,782,960	820,124,668
ตุลาคม	3,647,332	22,260,938	29,189,442	174,013,910	14,612,500	109,192,992	61,733,170	505,358,854	177,517,362	1,063,916,511
พฤศจิกายน	3,458,109	20,348,680	30,285,204	191,138,794	3,388,000	27,212,259	45,525,490	378,314,471	171,435,900	1,017,705,359
ธันวาคม	4,156,060	25,333,370	92,220,000	610,514,154	6,644,000	52,615,720	20,513,000	140,687,165	64,099,110	427,304,839
มกราคม	6,931,460	6,931,460	32,883,384	222,763,425	13,019,000	108,456,808	32,113,000	223,320,797	76,398,590	507,987,240
กุมภาพันธ์	14,763,164	14,763,164	9,129,384	63,640,740	2,110,000	18,663,771	45,665,640	283,439,518	54,738,400	379,139,583
มีนาคม	16,989,552	16,989,552	129,567	1,271,553	6,559,640	57,059,714	19,065,640	124,025,730	84,494,320	597,428,246
เมษายน	25,123,977	25,123,977	0	0	44,000	480,695	7,100,000	46,233,578	41,854,692	303,392,881
พฤษภาคม	2,611,376	2,611,376	1,700,000	12,055,555	0	0	20,150,000	133,224,710	32,459,084	244,355,754
มิถุนายน	10,947,573	10,947,573	66,000	619,517	5,631,640	47,896,616	26,200,000	181,855,747	20,451,555	122,848,593
กรกฎาคม	1,501,912	1,501,912	66,000	642,278	93,733,700	932,854,217	73,215,000	538,968,511	2,145,009	16,390,524

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร พ.ศ.2548 – 2552/53

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาของ Hoekstra และ Hung (2548) พบว่าในปี พ.ศ.2538 - 2542 ประเทศไทยส่งออกน้ำเสมือนในรูปของการค้าขายพืชผลเป็นอันดับ 3 ของโลก คิดเป็นปริมาณน้ำ 47,000 ล้าน ลบ.ม./ปี โดย รองศาสตราจารย์ ดร. สุจิตต์และคณะ (2550) ได้รายงานไว้ว่าปริมาณการใช้น้ำของประเทศไทยในภาพรวมปี 2550 มีค่าประมาณ 51,1493 ล้าน ลบ.ม. แบ่งเป็นการใช้น้ำเพื่อการเกษตรคิดเป็นร้อยละ 91 ซึ่งเป็นส่วนที่มีปริมาณความต้องการใช้น้ำสูงที่สุดของประเทศไทย จึงจำเป็นต้องมีมาตรการในการประเมินการใช้น้ำ เพื่อนำไปสู่การใช้น้ำอันจะเกิดประสิทธิผลสูงสุด การศึกษานี้จึงได้นำเอาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ซึ่งเป็น 1 ใน 12 พืชไรเศรษฐกิจของประเทศไทยมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหารสัตว์มาทำการศึกษา โดยเสนอหลักการวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ให้เป็นหนึ่งในมาตรการในการประเมินประสิทธิภาพการใช้น้ำวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (Water Footprint) กำลังเป็นแนวคิดที่ได้รับความสนใจมากขึ้น ตามการเปลี่ยนแปลงของสภาวะอากาศโลกปัจจุบันเนื่องจากแนวความคิดดังกล่าว สามารถสะท้อนให้เห็นถึงปริมาณการใช้น้ำที่ซ่อนเร้นอยู่ในกระบวนการต่างๆ ของการผลิตสินค้าได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังสามารถนำปริมาณการใช้น้ำที่เกิดขึ้นมาประเมินถึงผลกระทบที่เกิดจากการผลิตสินค้า ต่อสภาพแวดล้อมของแต่ละพื้นที่ได้อีกด้วย ซึ่งจะนำไปสู่การวางแผนปรับปรุงวิธีการใช้น้ำอย่างเป็นระบบ มีเกณฑ์ชี้วัดที่ชัดเจน สำหรับประเทศไทยได้ตระหนักถึงแนวคิดเรื่องวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ และในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 11 พ.ศ. 2555 – 2559 ยุทธศาสตร์การจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ได้วางแนวทางการพัฒนาและส่งเสริมให้เกิดการใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ คุ่มค่า และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยให้มีการจัดทำข้อมูลการใช้น้ำ (Water Footprint)

ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ในการหาค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นรายเดือนทั่วประเทศ ตั้งแต่ปี พ.ศ.2548 – 2552 และทำการเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2010) ซึ่งได้ทำการศึกษาทั่วโลกและในประเทศไทยเป็นรายจังหวัด แต่ได้ใช้ข้อมูลที่มีความละเอียดต่ำ เช่น ผลผลิตต่อไร่ สำหรับในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลที่มีความละเอียดสูงขึ้น โดยใช้ข้อมูลอุตุณิยมวิทยารายวันและผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รายเดือน

ผลการศึกษาพบว่าค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์รวมเท่ากับ 1,129 ลบ.ม./ตัน คิดเฉพาะนอกเขตพื้นที่ชลประทานเนื่องจากผลผลิตร้อยละ 99 อยู่นอกเขตพื้นที่ชลประทาน พบว่ามีค่าสูงกว่าผลการศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2010) ที่มีค่าเท่ากับ 1,039 ลบ.ม./ตัน โดยค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เฉลี่ยในการศึกษานี้ต่ำกว่า เหตุผลสำคัญเนื่องจากค่าผลผลิตต่อไร่รายจังหวัดของประเทศไทยจากข้อมูลสถิติจริงมีค่าต่ำกว่าสมมติฐานที่ใช้ใน MH ซึ่งจากการทำการคำนวณย้อนกลับโดยใช้สมการการคำนวณเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในการหาเพื่อหาค่าผลผลิตต่อไร่จริงที่ MH ใช้ในการศึกษา พบว่ามีค่าสูงกว่าของ FAO No. 56 ที่ MH ระบุไว้ 1.4 เท่าของค่าผลผลิตต่อไร่ที่ใช้ในการศึกษาได้ทำการปรับแก้เพื่อให้เท่ากับค่าใน FAO No.56 จึงทำให้ค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการศึกษา MH มีค่าสูงกว่าในการศึกษานี้ อย่างไรก็ตาม ค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์เฉลี่ยในการศึกษานี้มีค่าสูงกว่าประมาณ 1 เท่า เหตุผลสำคัญเนื่องจาก ค่าความเข้มข้นคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินสูงสุดที่ยอมรับได้ของประเทศไทยสูงกว่าค่าที่ Mekonnen และ Hoekstra (2010) ใช้ 1 เท่า ดังนั้นการศึกษานี้มีความสอดคล้องกับการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของประเทศไทยมากกว่าและสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ผลกระทบจากการเพาะปลูกได้

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย

1. ภาครัฐควรปรับกระบวนการทัศน์การพัฒนาและขับเคลื่อนนโยบายเกษตรกรรมของประเทศสู่เศรษฐกิจวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ต่ำ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ใช้ทรัพยากรน้ำอย่างเป็นธรรม มีประสิทธิภาพ และยั่งยืนซึ่งจะนำไปสู่ความมั่นคงทางอาหารต่อไป
2. ภาครัฐบาลควรสนับสนุนให้มีการระบุข้อมูลวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (water footprint) บนฉลากสินค้าเพื่อช่วยกระตุ้นให้ผู้บริโภคตระหนักถึงความสำคัญของการใช้น้ำในการผลิตสินค้าแต่ละชนิด และช่วยลดการกีดกันทางการค้า
3. ภาครัฐควรจัดทำข้อมูลวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ภาคการเกษตรของพืชแต่ละชนิด โดยเฉพาะพืชเศรษฐกิจที่ทำการส่งออก เพื่อพัฒนาและส่งเสริมให้เกิดการใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ กลุ่มค่าและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
4. ลดกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ โดยการเพิ่มผลผลิตต่อไร่ โดยเพิ่มศักยภาพเทคโนโลยีการ

เพาะปลูก เช่น ผสมสายพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ทนต่อโรคได้ดีมากขึ้นการใช้วัสดุต่างๆคลุมดิน เช่น ฟางข้าว เพื่อลดการคายระเหยจากผิวดิน

5. ลดเกรี้ยวเตอร์ฟุตพรีนท์ ใช้ปุ๋ยหมักชีวภาพและหาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการใส่ปุ๋ยพร้อมทั้งคิดหาเทคนิคในการใส่ปุ๋ยเพื่อให้ตรงกับความต้องการของพืช

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรศึกษาหาอวอเตอร์ฟุตพรีนท์ไบโอเอทานอลของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ตามแผนพลังงานทดแทน 15 ปี (พ.ศ. 2551-2565) ที่ได้เลือกให้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นพืชที่จะทำการศึกษาวิจัยเพื่อเป็นพลังงานทดแทน

2. ควรคำนวณหาอวอเตอร์ฟุตพรีนท์โดยใช้ข้อมูลปฐมภูมิจากการเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนามระดับภูมิภาคและระดับประเทศ ของพืชชนิดอื่น โดยเฉพาะค่าผลผลิตต่อไร่ควรใช้ข้อมูลเป็นรายเดือนและทำการเปรียบเทียบค่าอวอเตอร์ฟุตพรีนท์ที่ได้กับการศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2010)

3. ควรศึกษาค่าอวอเตอร์ฟุตพรีนท์นอกเขตพื้นที่ชลประทาน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ฝ่ายเผยแพร่การใช้น้ำชลประทาน. 2555. ค่าสัมประสิทธิ์พีชโดยวิธี Penman-Montieth (Crop coefficient (Kc) of Penman-Montieth. ส่วนการใช้น้ำชลประทาน สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา.

ชุมพล ชีวะประภานนท์. 2551. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. ครั้งที่ 4. เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม โรงงาน, กรมโรงงานอุตสาหกรรม.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2550. แผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี พ.ศ. 2551-2565. แผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี (พ.ศ. 2551 – 2565). แหล่งที่มา: http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=6737:-15-2551-2565&catid=146:hot-issue&Itemid=133&lang=th, 20 กรกฎาคม 2555.

อำนาจ วังจัน และ พรรณี บุญสยา. 2555. สถิติทั่วไป (General Statistic). ครั้งที่ 11. บริษัท เอส.อาร์.พรีนติ้งแมสโปรดักส์, โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศรีปทุม กรุงเทพฯ.

สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ สำนักงานกฤษฎามนตรี. 2554. แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 11 ปี (พ.ศ. 2555 – 2559). แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 11 ปี. แหล่งที่มา: <http://www.nesdb.go.th/Default.aspx?tabid=395>, 20 2555.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2552. ข้อมูลพื้นฐานเศรษฐกิจการเกษตร 2552. เอกสารเผยแพร่. แหล่งที่มา: http://www.oae.go.th/main.php?filename=journal_all, 20 กรกฎาคม 2550.

สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร. 2553. สถานการณ์สินค้าการเกษตรที่สำคัญและแนวโน้มปี 2554. เอกสารเผยแพร่. แหล่งที่มา: http://www.oae.go.th/main.php?filename=journal_all, 20 กรกฎาคม 2555.

สมาคมผู้ผลิตอาหารสัตว์ไทย. 2554. ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์. วารสารธุรกิจอาหารสัตว์ 28 (139): 16-26.

นงคราญ มณีวรรณ. 2553. เกษตรพัฒนา ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ปลูกอย่างไรให้ได้ผลผลิตสูง. วารสารพัฒนาที่ดิน 47 (415): 48-55.

จินาธิปกรณ์ พงศ์กัญญ์ภาพ และ ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ. 2554. วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของกระบวนการผลิตเอทานอลมันสำปะหลังในประเทศไทย. วิศวกรรมสาร มก (75): 41-52.

ชุติมา คชวัฒน์. 2547. เอกสารวิชาการ ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ลำดับที่ 11/2547. 95 - 98.

สุจิต คุณธนกุลวงศ์. 2555. สถานการณ์น้ำในประเทศไทยปี 2550. หน่วยปฏิบัติการวิจัยระบบการจัดการแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

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

Batjes NH. 2006. **ISRIC - WISE derive soil properties on a 5 by 5 arc-minutes global grid (version 1.0).** ISRIC - World Soil Information, Wageningen.

Dirk Raes. 2009. **The ETO Calculator Reference Manual version 3.1.** Food and Agriculture Organization of the United Nations, Italy.

FAO. 2009. **Example of the use of CROPWAT 8.0. 2006.** Food and Agriculture Organization, Rome.

Hoekstra, A.Y. and P.Q. Hung. 2005. Globalisation of water resource: international virtual water flows in relation to crop trade. **Global Environmental Change** 1 (15): 45-56.

Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A.K. 2007. Water footprints of nations, Water use by people as a function of their consumption pattern. **Water Resources Management** 21 (1): 35-48.

Hoekstra A.Y., A.K. Chapagain, M.M. Aldaya and M.M. Mekonnen. 2011. **The Water Footprint Assessment Manual, Setting the Global Standard.** 1 ed. Earthscan, London.

Mekonnen, M.M. and A. Y. Hoekstra. 2010. **The green, blue and grey water footprint of crop and derive crop products.** UNESCO-IHE Institute for Water Education, the Netherlands.

Mekonnen, M.M. and A. Y. Hoekstra. 2011. The green, blue and grey water footprint of crop and derive crop products. **Hydrology and Earth System Sciences** 15: 1577-1600.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวทิพย์ปภา สุขุมลชาติ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 13 ตุลาคม 2530
สถานที่เกิด	กรุงเทพ
ประวัติการศึกษา	วศ.ทน. (ทรัพยากรน้ำ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ.2553)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	อยู่ระหว่างการศึกษาต่อปริญญาโท สาขาบริหาร
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-