



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

วอเตอร์ฟุตพริ้นของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทย

Water footprint of maize in thailand

ทิพย์ปา สุขุมาลชาติ* อดิชัย พรพรมหมินทร์ และสุรชัย ลิปิวัฒนากการ

Thippapa Sukumalchart*, Adichai Pornprommin and Surachai Lipiwattanakam

ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10900

Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand, 10900

Received April 2012

Accepted September 2012

บทคัดย่อ

ประเทศไทยส่งออกน้ำเสมือนในรูปของการค้าขายพืชผลเป็นอันดับ 3 ของโลก คิดเป็นปริมาณน้ำ 47 พันล้าน ลบ.ม./ปี ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปัญหาการขาดแคลนน้ำในประเทศไทยส่วนหนึ่งเกิดจากการส่งออกสินค้าภาคการเกษตร ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เป็น 1 ใน 12 พืชไร่เศรษฐกิจของประเทศไทยมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหารสัตว์ ดังนั้น การศึกษานี้ได้ทำการคำนวณ หาค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยอย่างละเอียดโดยใช้ข้อมูลผลผลิตเป็นรายเดือน ข้อมูลอุณหภูมิมิถุนายา รายวัน และค่าสัมประสิทธิ์พืชของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ทำการศึกษานี้ในประเทศไทย วิธีการคำนวณ วอเตอร์ฟุตพริ้นในการศึกษานี้สามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ 1.หาค่าการคายระเหยของพืช 2.หาค่าความต้องการใช้น้ำของพืชโดยใช้วิธีสมมูลน้ำ ในบริเวณรากพืช 3.หาค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นโดยใช้ข้อมูลผลผลิตและปริมาณการใช้น้ำปุ๋ยเคมี จากผลการศึกษา พบว่า ค่า วอเตอร์ฟุตพริ้นของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เฉลี่ยทั้งประเทศเท่ากับ 1,132 ลบ.ม./ตัน โดยคิดเป็นกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้น 894 ลบ.ม./ตัน และเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้น 237 ลบ.ม./ตัน โดยสาเหตุที่ไม่มีบลูวอเตอร์ฟุตพริ้นเนื่องจากพื้นที่เพาะปลูกส่วนใหญ่ (ร้อยละ 99.2) อยู่นอกเขตพื้นที่ชลประทาน โดยจังหวัดที่ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นรวมสูงที่สุดคือ จังหวัดอุดรธานี 1,368 ลบ.ม./ตัน และจังหวัด ที่มีวอเตอร์ฟุตพริ้นรวมต่ำสุดคือจังหวัดพิจิตร 953 ลบ.ม./ตัน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษานี้กับผลการศึกษาของ Mekonnen และ Hoekstra (2001) พบว่ามีค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นเฉลี่ยทั้งประเทศเกือบเท่ากัน แต่ค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นเฉลี่ยของการศึกษานี้มีค่าสูงกว่า 1 เท่า

คำสำคัญ : วอเตอร์ฟุตพริ้น ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ประเทศไทย

Abstract

Thailand is the third largest net virtual water exporter in relation to crop trade with the volume of 47 billion m³/yr. Thus, one of the reasons of water scarcity in Thailand is possibly due to the export of the agricultural sector. Maize is one of 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 the monthly production statistics, daily Meteorological date 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

*Corresponding author.

Email address: sthippapa@gmail.com

study show that the country-averaged water footprint of maize in Thailand equals to 1,132 m³/ton comprised of 894 m³/ton green and 237 m³/ton grey water footprints. Since maize cultivation is mostly in the rain-fed area (99.2%), the blue water footprint in this study is negligible Udonthani province has the highest water footprint of maize (1,368 m³/ton), while Phichit the lowest (953 m³/ton). Comparing with the results of Mekonnen and Hoekstra (2010), this study shows the similar value of the country-averaged green water footprint of maize. However, the grey water footprint was found to about double of previous study.

Keywords : Water footprint, Maiz, Thailand.

1. บทนำ

สถานการณ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงในบริบทโลก และปัจจัยภายในประเทศ ทั้งเรื่องการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ การเพิ่มขึ้นของประชากร การพัฒนาเศรษฐกิจที่มุ่งการเจริญเติบโตทางอุตสาหกรรมและการบริการ การแข่งขันด้านการค้า และการลงทุน ทำให้มีการใช้ประโยชน์ทรัพยากรธรรมชาติเกินศักยภาพในการรองรับของระบบนิเวศ จากปัญหาขั้นต้นแผนพัฒนาเศรษฐกิจแห่งชาติฉบับที่ 11 (พ.ศ. 2555 – 2559) จึงได้ระบุไว้เป็นแนวทางการพัฒนาและส่งเสริมให้เกิดการใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ คุ่มค่า และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยให้มีการจัดทำข้อมูลการใช้น้ำรวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำภาคการเกษตร และส่งเสริมการปลูกพืชใช้น้ำน้อยในช่วงฤดูแล้ง [1]

แนวคิดเรื่องวอเตอร์ฟุตพริ้น (water footprint) นำเสนอโดย Hoekstra (2003) วอเตอร์ฟุตพริ้นของสินค้า คือ ปริมาณน้ำจืดทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตสินค้า ในกรณีที่เป็นการเพาะปลูกพืช จึงเป็นผลรวมปริมาณน้ำที่ใช้ในทุกขั้นตอนตลอดห่วงโซ่ของการเพาะปลูกนั้น ประกอบด้วยปริมาณน้ำที่ใช้ไปและปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้น วอเตอร์ฟุตพริ้นไม่เพียงแสดงแต่ปริมาณน้ำที่ใช้ไปแต่ยังแสดงให้เห็นถึงสถานที่และเวลาที่เกิดการใช้น้ำ วอเตอร์ฟุตพริ้นสามารถแยกได้เป็น 3 ส่วนคือ บลูวอเตอร์ฟุตพริ้น (blue water footprint) กรีนวอเตอร์ฟุตพริ้น (green water footprint) และเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้น (gray water footprint) แต่ละส่วนมีความหมายดังต่อไปนี้

- บลูวอเตอร์ฟุตพริ้น หมายถึง ปริมาณน้ำที่ถูกนำไปใช้ตลอดห่วงโซ่ของการเพาะปลูก โดยได้น้ำจากชลประทานที่มาจากแหล่งน้ำเก็บกักน้ำทั้งน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน

- กรีนวอเตอร์ฟุตพริ้น หมายถึง ปริมาณน้ำที่ถูกนำไปใช้ตลอดห่วงโซ่เพื่อการเพาะปลูกพืช ซึ่งอยู่ในรูปของความชื้นในดินซึ่งเกิดจากน้ำฝน

- เกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้น หมายถึง ปริมาณน้ำที่ใช้เจือจางของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเพาะปลูก ให้อยู่ในระดับมาตรฐานที่ยอมรับได้

ประเทศไทยส่งออกน้ำเสมือนในรูปของการค้าขายพืชผลเป็นอันดับ 3 ของโลก คิดเป็นปริมาณน้ำ 47 พันล้าน ลบ.ม./ปี [2] และปริมาณน้ำที่ใช้ในการเพาะปลูกพืชแต่ละชนิดรวมกันทั้งโลก พบว่าข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีการใช้น้ำสูงสุดเป็นอันดับ 3 ของโลก เท่ากับ 770 ล้าน ลบ.ม./ปี [3] โดยค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เฉลี่ยทั้งโลก เท่ากับ 1,222 ลบ.ม./ตัน เป็นกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้น 947 ลบ.ม./ตัน บลูวอเตอร์ฟุตพริ้น 81 ลบ.ม./ตัน และ เกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้น 194 ลบ.ม./ตัน และการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ สามารถคิดปริมาณน้ำเท่ากับ 411 พันล้าน ลบ.ม./ปี ซึ่งเป็นอันดับ 2 รองจากหญ้า [4]

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นพืชไร่นาเศรษฐกิจของประเทศไทยที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหารสัตว์ ประมาณ 95 % ของผลผลิตข้าวโพดใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ของประเทศ และมีความต้องการเพิ่มขึ้นทุกปี [5] โดยมีปริมาณและมูลค่าดังตารางที่ 1 แหล่งปลูกข้าวโพดที่สำคัญอยู่ในภาคเหนือซึ่งมีพื้นที่ปลูกเกินกว่าครึ่งของทั้งประเทศ ส่วนที่เหลือกระจายปลูกในทุกภาคของประเทศ ผลผลิตต่อไร่เฉลี่ยแสดงดังรูปที่ 1 การศึกษาหาค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของ [3] ได้ทำการศึกษารายการทั่วโลกเป็นรายจังหวัดโดยใช้ข้อมูลเป็นรายประเทศ เช่น ผลผลิตต่อไร่ใช้ข้อมูลเป็นรายประเทศแล้วกระจายเป็นรายจังหวัด เป็นต้น

ตารางที่ 1 สถิติการส่งออก ผลผลิตต่อไร่และผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เฉลี่ยรายปีทั่วประเทศระหว่างปี พ.ศ. 2548-2552

ปี พ.ศ.	ปริมาณ ส่งออก (กก.)	ผลผลิตต่อไร่(กก./ไร่)		ผลผลิต (ตัน)	
		ในเขต	นอกเขต	ในเขต	นอกเขต
		ชลประทาน	ชลประทาน	ชลประทาน	ชลประทาน
2548	56,945,872	726	594	46,808	3,896,383
2549	249,769,972	729	614	45,102	3,671,130
2550	90,819,645	707	610	58,091	3,832,127
2551	339,503,781	707	634	71,182	4,178,172
2552	841,719,452	712	649	73,140	4,542,979
เฉลี่ย	315,751,744.4	716.2	620.2	58,864.6	4,024,158.2

ที่มา : ระบบรายงานข้อมูล สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร

ดังนั้นในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณหา
วอเตอร์ฟุตพริ้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยระหว่าง
ปีพ.ศ.2548-2552 อย่างละเอียดและเปรียบเทียบกับผลลัพธ์
จากการศึกษาของ [3] โดยจากนี้เป็นต้นไปจะใช้อักษรย่อ
MH

2. วิธีการวิจัย

การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นและปริมาณน้ำที่พืชต้องการ
การสามารถศึกษาโดยละเอียดได้จาก [6] และ [7]

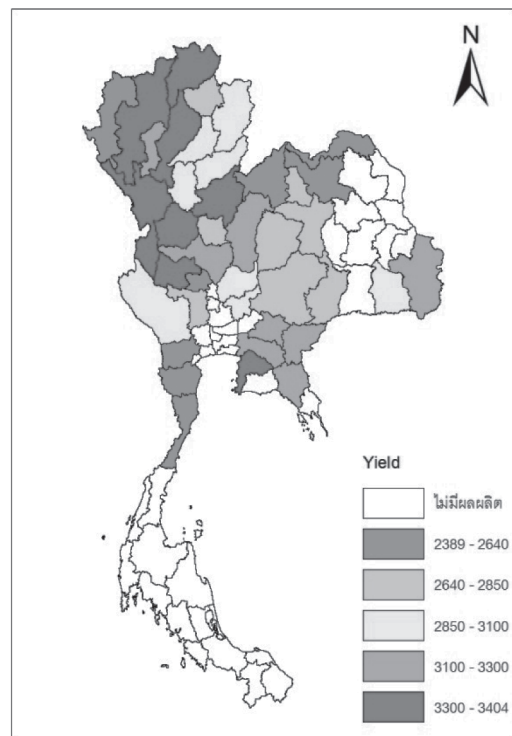
2.1 วิธีการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้น

หน่วยวัดของวอเตอร์ฟุตพริ้นจะขึ้นอยู่กับประเภทของ
อุตสาหกรรมอาจมีหน่วยเป็น ลบ.ม./ชิ้น เป็นต้น วอเตอร์ฟุต
พริ้นรวมในพืช (total water footprint, WF_{total}) คำนวณจาก
ผลรวมของบลูวอเตอร์ฟุตพริ้น (WF_{blue}) กรีนวอเตอร์ฟุตพริ้น
(WF_{green}) และเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้น (WF_{grey}) ดังสมการ

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

โดยบลูและกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นสามารถคำนวณได้
จากปริมาณน้ำที่พืชใช้ (crop water use, CWU) (หน่วย
ลบ.ม./ไร่)หารด้วยปริมาณผลผลิตของพืชนั้น (yield, Y)
(หน่วย ตัน/ไร่) ดังนี้

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



รูปที่ 1 ผลผลิตต่อไร่เฉลี่ยของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เฉลี่ยรายปี
(ตัน/ไร่) ระหว่างปี พ.ศ. 2548-2552 นอกเขตพื้นที่ชลประทาน

ส่วนเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นได้จากปริมาณน้ำที่พื
สารพิษออกจากบริเวณรากพืช ซึ่งสารพิษในที่นี้ พิจารณา
จากปุ๋ยไนโตรเจน ซึ่งมีวิธีคำนวณดังนี้ [8]

$$WF_{grey} = \frac{(\alpha \times AR) / (C_{max} - C_{nat})}{Y} \quad (3)$$

เมื่อ α คือ สัดส่วนของปุ๋ยไนโตรเจนจากการชะละลาย (leaching and runoff) AR คือ อัตราการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในพื้นที่ต่อไร่ มีหน่วยเป็น กก./ไร่ C_{max} คือ ความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้ มีหน่วยเป็น กก./ลบ.ม. C_{nat} คือ ความเข้มข้นของไนโตรเจนในธรรมชาติที่พิจารณา มีหน่วยเป็น กก./ลบ.ม. Y คือ ผลผลิตต่อไร่ มีหน่วยเป็น ตัน/ไร่

โดยในการศึกษานี้ ให้ WF_{total} เท่ากับ WF_{green} บวกกับ WF_{grey} ไม่รวมการคำนวณบลูวอเตอร์ฟุตปริ้นเนื่องจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ส่วนใหญ่ปลูกนอกเขตพื้นที่ชลประทาน (ร้อยละ 99.2) ดังนั้นในการคำนวณวอเตอร์ฟุตปริ้นรายปีจึงไม่พิจารณาในส่วนของพื้นที่ชลประทาน อย่างไรก็ตาม ผลผลิตต่อไร่ในเขตพื้นที่ชลประทานมีค่าสูงกว่านอกเขตพื้นที่ชลประทานประมาณร้อยละ 9.6 จากตารางที่ 1 ยังพบว่า การเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในเขตพื้นที่ชลประทานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ขณะที่การปลูกนอกเขตพื้นที่ชลประทานมีแนวโน้มลดลง และในการศึกษานี้เกรย์วอเตอร์ฟุตปริ้นจะพิจารณาเฉพาะปุ๋ยไนโตรเจน [6] และสมมติให้ C_{nat} เท่ากับศูนย์ α เท่ากับร้อยละ 10 ของอัตราการใช้ปุ๋ยในพื้นที่ต่อไร่ [8] และ C_{max} เท่ากับ 5 กก./ลิตร ตามมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ซึ่งเป็นเกณฑ์กำหนดสูงสุดสำหรับแหล่งน้ำประเภทที่ 3 ของประเทศไทย คือเป็นแหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทั้งจากกิจกรรมบางประเภท ได้แก่ การเกษตร [9]

จากสมการ (2) จะพบว่า ปริมาณน้ำที่พืชใช้ (CWU) เป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณหาวอเตอร์ฟุตปริ้น (WF) การศึกษานี้วิเคราะห์หาวอเตอร์ฟุตปริ้นเป็นรายเดือนซึ่งสามารถแปลงเป็นรายปีโดยการประมาณค่าด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักตามผลผลิตที่ได้รายเดือนโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$WF_{non-irr, year} = \frac{\sum_{j=1}^{12} WF_{non-irr, year} \times Product_j}{\sum_{j=1}^{12} Product_j} \quad (4)$$

เมื่อ j คือเดือนที่ j ที่พิจารณา non-irr คือ นอกเขตพื้นที่ชลประทาน และ Product คือ ปริมาณผลผลิต

2.2 วิธีการคำนวณปริมาณน้ำที่พืชใช้และการคายระเหยของพืช

ปริมาณน้ำที่พืชใช้ทั้งหมด ปริมาณน้ำที่พืชใช้แบบบลูและปริมาณน้ำที่พืชใช้แบบกรีนสามารถคำนวณได้ ดังนี้

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

$$CWU_{green} = factor \times \sum_{d=1}^{lsp} ET_{green} \quad (6)$$

โดย d คือ ลำดับวันที่เพาะปลูก lsp คือ จำนวนวันที่เพาะปลูกทั้งหมด factor เป็นพารามิเตอร์ใช้แปลงหน่วย ในกรณีที่การคายระเหยของพืช (ET) มีหน่วยเป็น มม. และปริมาณน้ำที่พืชใช้ (CWU) มีหน่วยเป็น ลบ.ม./ไร่ จะมีค่าเท่ากับ 1.6 และ I คือ ปริมาณน้ำจากชลประทาน ในกรณีที่พิจารณาการเพาะปลูกนอกเขตชลประทาน อาจมีการให้น้ำในรูปแบบที่ไม่ใช่น้ำฝน เช่น น้ำบาดาล น้ำจากบ่อเก็บกักในพื้นที่เพาะปลูก เป็นต้น แต่เนื่องจากในการศึกษานี้ไม่มีข้อมูลการให้น้ำดังกล่าว จึงสมมติให้ ค่า I, ET_{blue} และ CWU_{blue} เท่ากับศูนย์สำหรับนอกเขตชลประทาน

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

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

โดยที่ ET_o คือ ค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิง (reference crop evapotranspiration, ET_o มีหน่วย มม./วัน)

2.2.1 วิธีการคำนวณค่าการคายระเหยอ้างอิงของพืช

การศึกษานี้ใช้โปรแกรม The ETo Calculator ซึ่งเป็นโปรแกรมที่เขียนขึ้น เพื่อหาค่าการคายระเหยอ้างอิง (ETo) ของพืช โดยขึ้นกับปัจจัยที่มีผลต่อค่า ETo คือ ตัวแปรสภาพภูมิอากาศ และตำแหน่งบนพื้นโลก [10] สมการที่ใช้ในโปรแกรมนี้คือสมการ FAO- Penman - Monteith หรือ FAO No.56 ดังนี้

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (8)$$

เมื่อ ETo คือ ค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิง มีหน่วยเป็น มม./วัน R_n คือ รังสีสุทธิ ณ ระดับความสูงของพืช มีหน่วยเป็น เมกกะจูล์/ตร.ม./วัน G คือ อัตราการนำความร้อนในดิน T คือ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ระดับ 2 เมตรจากพื้นดิน มีหน่วย

เป็น องศาเซลเซียส U_2 คือ ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูง 2 เมตร มีหน่วยเป็น ม./วินาที e_s คือ ค่าความดันไอน้ำอิ่มตัว มีหน่วยเป็น กิโลปาสคาล e_a คือ ความดันไอน้ำจริง มีหน่วยเป็น กิโลปาสคาล Δ คือ ค่าความชันของความดันไอน้ำอิ่มตัวเทียบกับอุณหภูมิ มีหน่วยเป็น กิโลปาสคาล/องศาเซลเซียส γ คือ ค่าคงที่ไซโครเมตริก มีหน่วยเป็น กิโลปาสคาล/องศาเซลเซียส

เนื่องจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่ใช้ในการคำนวณค่า ET_o ของจังหวัดต่างๆ ไม่สมบูรณ์ จึงได้วิเคราะห์ประสิทธิภาพโปรแกรม The ET_o calculator ในการคำนวณหาค่าการคายระเหยอ้างอิง เมื่อข้อมูลไม่ครบถ้วน ผลดังตารางที่ 2

2.2.2 วิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์พืช

K_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์พืช (crop coefficient) ซึ่งช่วงการเจริญเติบโตของพืชนั้นกำหนดให้ค่า K_c มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงจากช่วงเริ่มต้นการเพาะปลูก ($K_{c,ini}$) ถึงช่วงของการเจริญเติบโตเต็มที่ ($K_{c,mid}$) และมีค่าคงที่ไปจนถึงระยะใกล้การเก็บเกี่ยวแล้ว 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.) น้อยกว่าปริมาณน้ำที่มีอยู่ที่ใช้ได้ (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

$$K_s = 1 \text{ กรณี } D_r < RAW \quad (9a)$$

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \text{ กรณี } TAW < D_r < RAW \quad (9b)$$

$$K_s = 0 \text{ กรณี } D_r = TAW \quad (9c)$$

2.3 วิธีการคำนวณสมดุลน้ำในบริเวณรากพืช

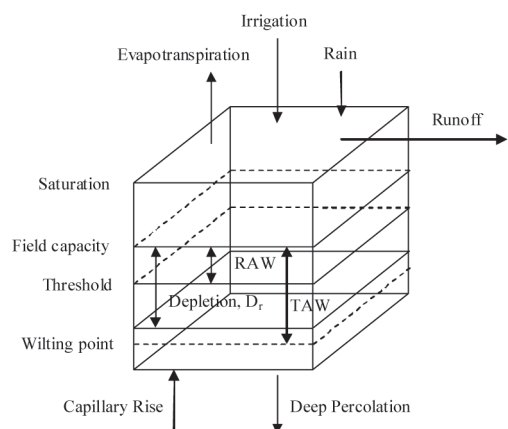
รูปที่ 2 แสดงแนวคิดของสมดุลน้ำในเขตรากพืช โดยที่สมมติให้ดินในเขตรากพืชได้รับน้ำจากฝน (rain) หรือชลประทาน (irrigation) ในปริมาณมากเกินความสามารถการซึมลงดิน จะมีส่วนเกินที่เป็นน้ำท่าผิวดิน (runoff) ไหลบนผิวดิน น้ำในส่วนที่ซึมลงดินจะทำให้ น้ำในเขตรากพืชอยู่

ในระดับความชื้นอิ่มตัว (saturation) ชั่วขณะ และส่วนหนึ่งของน้ำจะซึมลึกลง (deep percolation) ทำให้เหลือน้ำในดินเท่ากับระดับความจุความชื้นสนาม (field capacity) ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในรูปของระดับน้ำ เรียกว่า น้ำที่อยู่ในดินทั้งหมดในเขตรากพืชที่ใช้การได้ (total available soil water in the root zone, TAW) ในบางครั้งหากระดับน้ำใต้ดินอยู่สูงอาจมีผลกระทบของ capillary rise ต่อระดับน้ำในเขตรากพืช น้ำในเขตรากพืชลดลงเนื่องจากการคายระเหย หากน้ำพร่องลงต่ำกว่าระดับน้ำที่มีอยู่ที่ใช้ได้ (RAW) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ความเครียดน้ำ ในสมการ (9)

การคำนวณค่าการพร่องของน้ำในเขตรากพืช ณ วันที่ i ($D_{r,i}$) ซึ่งมีหน่วยเป็น มม. สามารถคำนวณได้จากสมดุลน้ำในเขตรากพืช ดังนี้

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P_i - RO_i) - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (10)$$

โดยที่ P_i คือ ปริมาณฝนในวันที่ i RO_i คือ น้ำท่าในวันที่ i คือ น้ำชลประทานในวันที่ i CR_i คือ capillary rise จากน้ำใต้ดินในวันที่ i $ET_{c,i}$ คือ การคายระเหยในวันที่ i และ DP_i คือ ปริมาณซึมลึกจากเขตรากพืชในวันที่ i ในการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้พิจารณาปริมาณน้ำเพื่อการชลประทาน เนื่องจากพื้นที่ส่วนใหญ่ (ร้อยละ 99) อยู่นอกเขตพื้นที่ชลประทาน



รูปที่ 2 แนวคิดสมดุลน้ำในบริเวณรากพืช

3. พื้นที่ศึกษาและข้อมูล

3.1 พื้นที่ศึกษา

จากข้อมูลสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรพบว่าในประเทศไทยมีการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ทั้งหมด 39 จังหวัด [11] แต่มีข้อมูลสำหรับหา ETo เพื่อคำนวณหาวอเตอร์ฟุตปริ้นได้เพียง 28 จังหวัด ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 84 ของการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ทั่วประเทศ จังหวัดที่สามารถหาวอเตอร์ฟุตปริ้น ได้แก่ ภาคเหนือประกอบไปด้วย เชียงราย เชียงใหม่ พะเยา ลำพูน แพร่ น่าน อุตรดิตถ์ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือประกอบด้วย ขอนแก่น ชัยภูมิ นครราชสีมา เลย หนองคาย อุดรธานี บุกบราซธานี ภาคกลางประกอบด้วย กำแพงเพชร นครสวรรค์ พิจิตร เพชรบูรณ์ ลพบุรี สุพรรณบุรี ภาคตะวันออกประกอบด้วย จันทบุรี ฉะเชิงเทรา ชลบุรี ปราจีนบุรี สระแก้ว ภาคตะวันตกประกอบด้วย ตาก ประจวบคีรีขันธ์ เพชรบุรี (หมายเหตุ จังหวัดที่สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรไม่มีข้อมูลข้าวโพดเลี้ยงสัตว์นั้นคือเป็นจังหวัดที่ไม่มีการปลูก)

3.2 ข้อมูล

3.2.1 ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา

ข้อมูลสภาพภูมิอากาศรายวัน ได้แก่ อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิต่ำสุด ความเร็วลม ระดับความสูง ฝน ชั่วโมงที่มีแสงแดด และ ความชื้นสัมพัทธ์ โดยใช้ข้อมูลจาก [12] เลือกจากสถานีที่ตั้งอยู่ใกล้พื้นที่เพาะปลูกและมีข้อมูลครบมากที่สุด

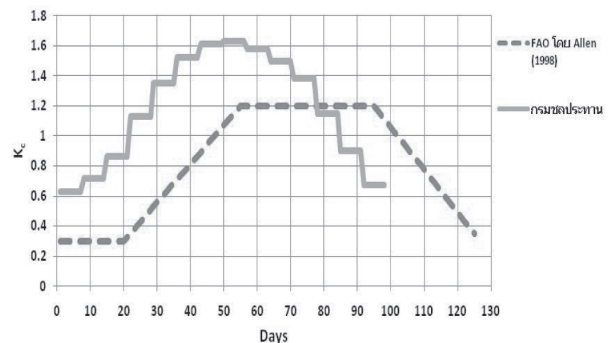
3.2.2 ข้อมูลสัมประสิทธิ์พืช

ในการศึกษานี้ได้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์พืชของกรมชลประทาน [13] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของบัญชาขวัญยืน [14] เนื่องจากการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์พืชในประเทศไทยทำให้ได้ค่าที่ได้นำจะมีความถูกต้องมากกว่าค่าที่แนะนำจาก FAO ซึ่งถูกใช้ในการศึกษา [15] และ MH รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ (K_c) ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของ FAO และกรมชลประทาน ยังพบว่าช่วงเวลาการเพาะปลูกของ FAO (126 วัน) ยาวนานกว่ากรมชลประทาน (100 วัน) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลรวมพื้นที่ได้กราฟของค่าสัมประสิทธิ์พืช ($\sum K_c$) กลับพบว่ากรมชลประทาน (116.41) มีค่าสูงกว่าของ FAO No.56 (103) คิดเป็นร้อยละ 46 ดังนั้นจากผลการประเมินเบื้องต้นทำให้ทราบว่า หากใช้ค่าสัมประสิทธิ์พืชจากกรมชลประทาน จะมีโอกาส

ทำให้ได้ค่าอวอเตอร์ฟุตปริ้นสำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยสูงกว่าการศึกษาที่ผ่านมา

3.2.3 ข้อมูลผลผลิตต่อไร่ของข้าวโพด

ข้อมูลผลผลิตต่อไร่รายปีและข้อมูลผลผลิตของแต่ละจังหวัด เป็นข้อมูลจาก [11] จังหวัดที่มีข้อมูลเฉลี่ยผลผลิตต่อไร่สูงสุด คือ จังหวัดพิจิตร เท่ากับ 683 กก./ไร่ และจังหวัดที่มีค่าผลผลิตต่อไร่ต่ำสุด คือ จังหวัดแม่ฮ่องสอน และจังหวัดเพชรบุรี เท่ากับ 479 กก./ไร่



รูปที่ 3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์พืช (K_c) ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของ [7] และ [13]

3.2.4 ประเภทของดิน

ประเภทของดินสมมติให้เป็นดินประเภทเดียวกันตลอดพื้นที่ทำการศึกษา โดยใช้ข้อมูลคุณสมบัติดิน โดยเลือกดินเป็นประเภทดินร่วน (loam) ตลอดพื้นที่ทำการศึกษา ค่าความยาวรากพืชมากที่สุด (maximum rooting depth, ซม.) เท่ากับ 900 ซม. ความชื้นในดินทั้งหมดที่ใช้การได้ (total available soil moisture) 290 มม. /ม. อัตราน้ำฝนที่ซึมลงสู่ดินสูงสุด (maximum rain infiltration rate, มม. /วัน) เท่ากับ 40 มม. /วัน ค่าเริ่มต้นการซึ่มลึกในดิน (initial soil moisture depletion, %) เท่ากับ 0% และระดับการขาดน้ำ (depletion, %) เท่ากับ 0.2 ตอนเริ่มต้นจนถึงช่วงการเจริญเติบโตและเท่ากับ 0.25 เมื่อช่วงระยะกลาง ในระยะเก็บเกี่ยวเท่ากับ 0.50 [16]

4. ผลการวิจัยและอภิปราย

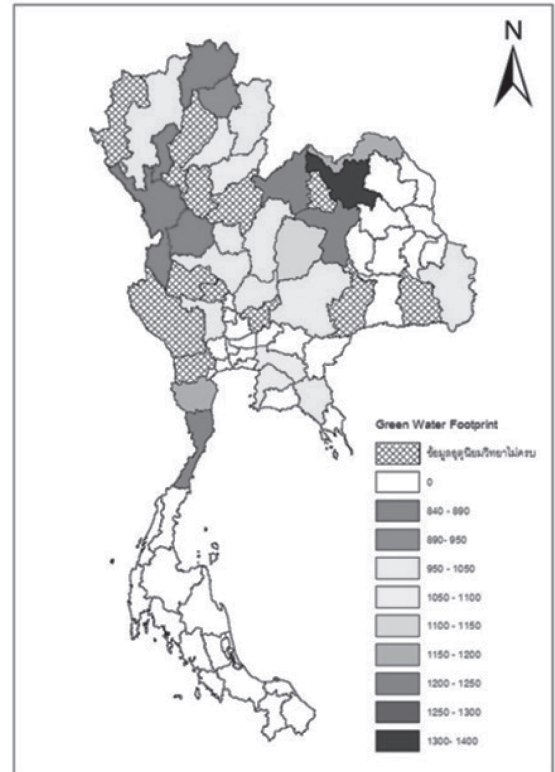
ผลลัพธ์ค่าเฉลี่ยรายปีของกรีนวอเตอร์ฟุตปริ้นในแต่ละจังหวัดแสดงในรูปที่ 4 จากภาพจะเห็นว่ากรีนวอเตอร์ฟุต ปริ้นของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีค่าอยู่ระหว่าง 847 ลบ.ม./ต้น - 1,392 ลบ.ม./ต้น โดยค่าเฉลี่ยวอเตอร์ฟุตปริ้นทั้งประเทศเท่ากับ 1,046 ลบ.ม./ต้น ส่วนที่แรงาคือจังหวัดที่ไม่สามารถ

คำนวณหาอวตอร์ฟุตปริ้นนอกเขตพื้นที่ชลประทานได้เนื่องจากมีข้อมูลอุทกนิยมนิเวศวิทยาไม่สมบูรณ์และจากผลการศึกษา ดังแสดงรูปที่ 4 ยังพบอีกว่าภาคตะวันตกและภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีค่ากรีนวอตอร์ฟุตปริ้นค่อนข้างสูงเนื่องมาจากค่าผลผลิตต่อไร่ต่ำซึ่งเป็นตัวส่วนที่ใช้ในสมการหาค่ากรีนวอตอร์ฟุตปริ้นดังสมการที่ (2) ในขณะที่ภาคกลางและภาคเหนือมีค่ากรีนวอตอร์ฟุตปริ้นต่ำกว่า

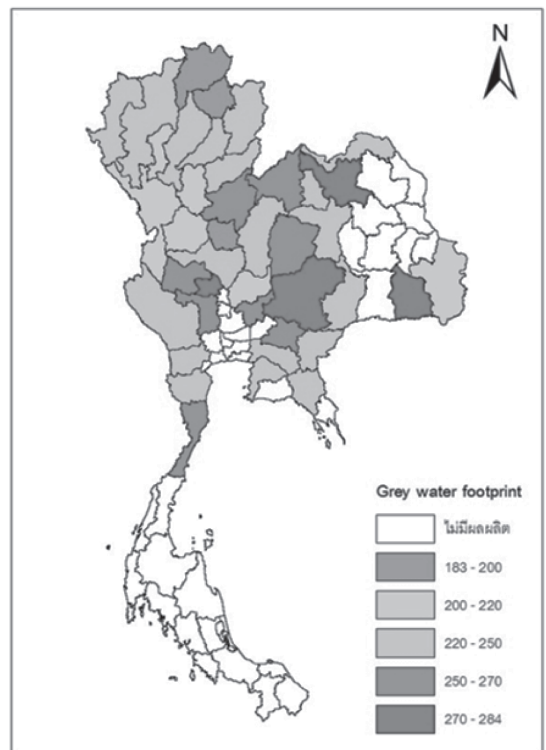
ค่าเฉลี่ยเกรย์วอตอร์ฟุตปริ้นทั่วประเทศของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในรูปที่ 5 มีค่าอยู่ระหว่าง 183-283 ลบ.ม./ตัน และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 237 ลบ.ม./ตัน มีค่าสูงกว่าการศึกษาของ MH ซึ่งเท่ากับ 120 ลบ.ม./ตัน เนื่องจากค่าความเข้มข้นตามมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินและข้อมูลของผลผลิตต่อไร่ใช้ข้อมูลต่างกัน รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบค่าเกรย์วอตอร์ฟุตปริ้นของการศึกษานี้กับการศึกษาของ MH พบว่าค่าของเกรย์วอตอร์ฟุตปริ้นในการศึกษานี้สูงกว่าทั้งหมด และยังพบอีกว่าหากใช้ค่าความเข้มข้นคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินสูงสุดที่ยอมรับได้จาก 5 มก./ล. ซึ่งเป็นค่าตามมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ซึ่งเป็นเกณฑ์กำหนดสูงสุดสำหรับแหล่งน้ำประเภทที่ 3 ของประเทศไทย เป็น 10 มก./ล. ซึ่งเป็นค่าจากการศึกษา MH ค่าเกรย์วอตอร์ฟุตปริ้นที่ได้จะมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน แต่เนื่องจากค่าไนโตรเจนที่ยอมรับให้สูงสู่ม่น้ำ 5 มก./ล. ซึ่งเป็นค่าตามมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ของประเทศไทยดังนั้นค่าเกรย์วอตอร์ฟุตปริ้นจากการศึกษานี้จึงถูกต้องและสอดคล้องกับพื้นที่

จากการเปรียบเทียบค่ากรีนวอตอร์ฟุตปริ้นของจังหวัดต่างๆกับการศึกษาของ MH พบว่าจังหวัดที่มีค่ากรีนวอตอร์ฟุต ปริ้นในการศึกษานี้แต่ไม่มีในการศึกษาของ MH คือ จังหวัดนครราชสีมา และ จังหวัดสระแก้ว ในทางกลับกันพบว่าจังหวัดที่มีค่ากรีนวอตอร์ฟุตปริ้นในการศึกษาของ MH แต่ในการศึกษานี้ขาดได้แก่ จังหวัดแม่ฮ่องสอน ลำปาง สุโขทัย พิษณุโลก บุรีรัมย์ กาญจนบุรี ศรีสะเกษ ชัยนาท ราชบุรี อุทัยธานี นนทบุรี ลพบุรี สระบุรี

รูปที่ 7 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ากรีนวอตอร์ฟุตปริ้นนอกเขตพื้นที่ชลประทานของการศึกษานี้กับของ MH พบว่าค่ากรีนวอตอร์ฟุตปริ้นในการศึกษานี้สูงกว่าการศึกษาของ MH สาเหตุหลักเนื่องมาจาก ค่าสัมประสิทธิ์พืช (K_c) ที่ใช้ในการศึกษานี้มีค่าสูงกว่าของ MH ซึ่งใช้ค่าจาก [7] ทำให้ค่าอวตอร์ฟุตปริ้นของการศึกษานี้สูงกว่าของ MH



รูปที่ 4 กรีนวอตอร์ฟุตปริ้นเฉลี่ยนอกเขตพื้นที่ชลประทาน รายจังหวัดระหว่างปี พ.ศ.2548-2552



รูปที่ 5 เกรย์วอตอร์ฟุตปริ้นเฉลี่ยรายจังหวัดระหว่างปี พ.ศ.2548-2552

ผลผลิตต่อไร่ในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลเป็นรายจังหวัด และรายปีจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรแต่ในการศึกษาของ MH ใช้ข้อมูลผลผลิตต่อไร่เป็นรายประเทศและแปลงเป็นรายจังหวัดโดยใช้ความสัมพันธ์กับความเครียดน้ำโดยประเมินว่าผลผลิตต่อไร่ของพืชได้รับผลกระทบจากความเครียดน้ำ ดังสมการต่อไปนี้

$$(1 - \frac{Y_a}{Y_m}) = K_y (1 - \frac{\sum ET_d(t)}{\sum CWR(t)}) \quad (11)$$

เมื่อ Y_a คือ ผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่ที่เก็บเกี่ยวได้จริง (กิโลกรัม/เฮกเตอร์) Y_m คือ ผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่สูงสุด (กิโลกรัม/เฮกเตอร์) K_y คือ แฟกเตอร์ตอบสนองของผลผลิต (สัมประสิทธิ์ความเครียดน้ำ) ET_d คือ การคายระเหยที่แท้จริงของพืช (มม./ฤดูกาล) CWR คือ ความต้องการน้ำของพืช (มม./ฤดูกาล) ซึ่งเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์พืชคูณกับค่าการคายระเหยพืชอ้างอิง

ส่วนสาเหตุอื่นๆประกอบด้วย

การใช้ข้อมูลในการศึกษาต่างปีกันโดยในการศึกษาของ MH ใช้ข้อมูลฝนและอุณหภูมิตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539-2545 ซึ่งความละเอียดของข้อมูลไม่เท่ากันโดยของ MH ใช้เฉลี่ยรายเดือนแล้วแปลงให้เป็นรายวันโดยใช้โปรแกรมแปลงสภาพภูมิอากาศ CRU-dGen แต่ในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลเป็นรายวันโดยใช้ข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยาตั้งแต่ปี พ.ศ.2548-2552 MH ใช้ค่าน้ำที่อยู่ในดินทั้งหมดในเขตรากพืชที่ใช้การได้ (TAW) จาก ISRIC-WISE ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้ค่าจาก CROPWAT 8.0 สมมติให้ดินเป็นประเภท ดินร่วน (loam) ช่วงการเพาะปลูกแตกต่างกัน ในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลผลผลิตรายเดือนทำให้สามารถแบ่งการเพาะปลูกเป็นรายเดือนได้ ขณะที่การศึกษาของ MH ใช้ข้อมูลผลผลิตรายปี

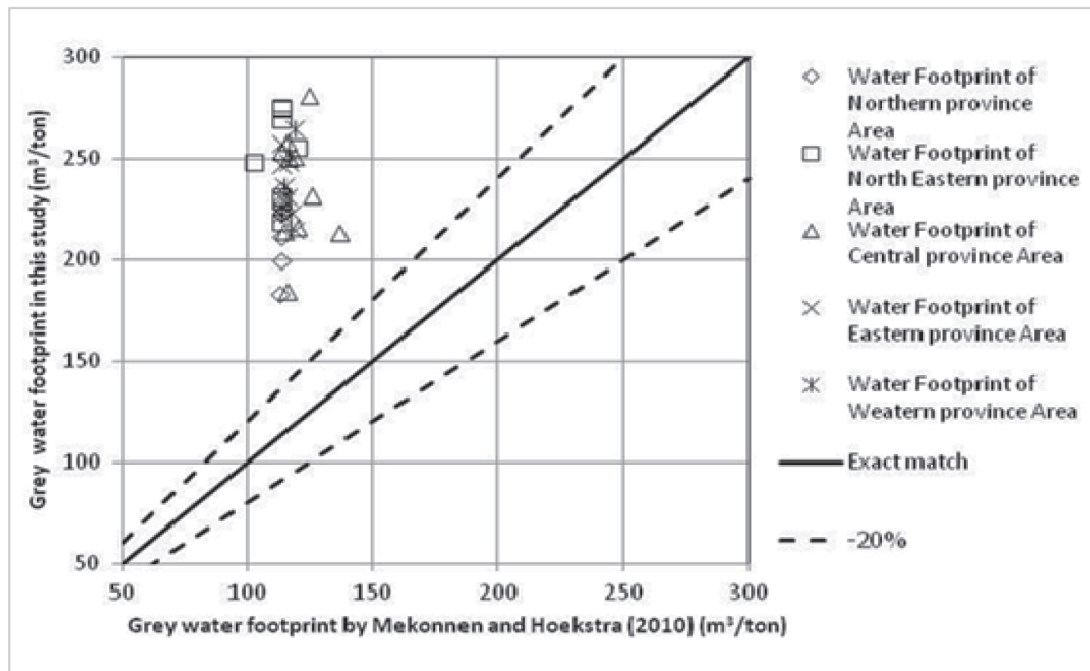
ความแตกต่างการอ้างอิงพื้นที่การคำนวณในการศึกษานี้อ้างอิงจากข้อมูลรายจังหวัดทำให้การคำนวณเป็นแบบรายจังหวัดโดยตรง ส่วนการศึกษาของ MH ใช้แบบจำลองสมมูลน้ำแบบ Grid-base dynamic มีความแม่นยำที่ 5*5 ลิปดา (ละติจูดและลองจิจูด) แล้วนำมาซ้อนทับกับพื้นที่รายจังหวัด

5. สรุป

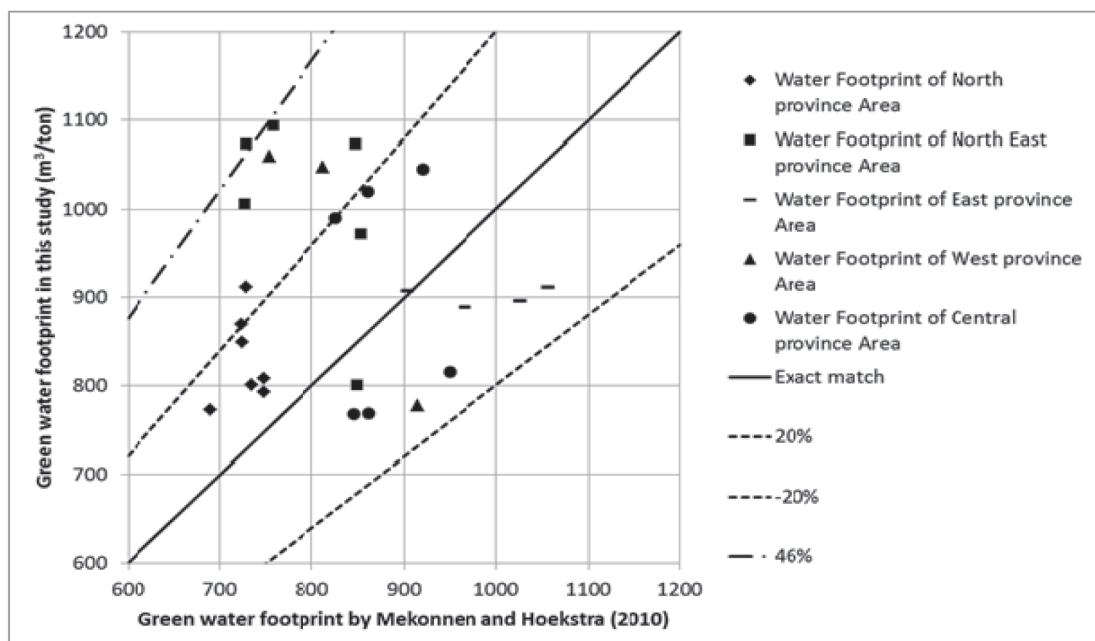
ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นพืชเศรษฐกิจที่จัดอยู่ในกลุ่มพืชที่ผลิตเพื่อใช้ภายในประเทศ มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหารสัตว์ การประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ทำให้เข้าใจถึงปริมาณน้ำที่ถูกใช้ไปตลอดห่วงโซ่กระบวนการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมไปถึงแสดงสถานที่และเวลาการใช้น้ำ ในการศึกษาวิเคราะห์ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รายเดือนทั่วประเทศ ตั้งแต่ปี พ.ศ.2548-2552 และทำการเปรียบเทียบกับการศึกษาของ MH ซึ่งได้ทำการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นทั่วโลกและในประเทศไทยเป็นรายจังหวัด แต่ได้ใช้ข้อมูลที่มีความละเอียดต่ำ เนื่องจากเป็นการศึกษาทั่วโลกดังนั้นในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลที่มีความละเอียดสูงขึ้นโดยใช้ข้อมูล ภูมิอากาศรายวันและผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รายเดือน พบว่าค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นรวมในการศึกษานี้เท่ากับ 1,131 ลบ.ม./ตัน โดยคิดเป็นกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้น 894 ลบ.ม./ตัน และเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้น 237 ลบ.ม./ตัน ซึ่งมีค่าสูงกว่าการศึกษาของ MH เท่ากับ 1,039 ลบ.ม./ตัน เป็นกรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นเท่ากับ 919 ลบ.ม./ตัน และ เกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้น 120 ลบ.ม./ตัน แต่เนื่องจากการศึกษานี้ได้ใช้ค่าและข้อมูลต่างๆ เฉพาะของประเทศไทยดังนั้นค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นของการศึกษานี้จึงเป็นตัวแทนค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่เหมาะสมในประเทศไทย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.บัญชา ขวัญยืน ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปี 2554 โครงการวิจัยเรื่อง แบบจำลองของน้ำเสมือนในประเทศไทย รหัส ก-ช (ค) 63.54 และขอขอบพระคุณสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กรมอุตุนิยมวิทยาและกรมพัฒนาที่ดินที่เอื้อเฟื้อข้อมูล



รูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบการคำนวณค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นของการศึกษานี้กับการศึกษาของ [3]



รูปที่ 7 ผลการเปรียบเทียบการคำนวณค่ากรีนวอเตอร์ฟุตพริ้นนอกเขตพื้นที่ชลประทานของการศึกษานี้กับการศึกษาของ [3]

ตารางที่ 2 ค่าทางสถิติเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าการคายระเหยอ้างอิงระหว่างกรณีข้อมูลกรมอุตุนิยมวิทยาครบถ้วนกับกรณีขาดข้อมูลรูปแบบต่างๆ

กรณีการใช้ข้อมูลคำนวณค่า ET _o	จังหวัดที่มีข้อมูลอยู่ในกรณีดังกล่าว	ประสิทธิภาพของการคำนวณค่า ET _o		
		R ²	EI	Skewness
ข้อมูลครบ	อุดรธานี นครสวรรค์ เชียงราย	1	100	0
ขาดข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ (RH)		0.9924	99.96	0.27812
ขาดข้อมูลความเร็วลมที่ ระดับ 2 เมตร (U ₂)	อุบลราชธานี, พิจิตร	0.9120	99.87	0.190073
ขาดข้อมูลความเร็วลมที่ ระดับ 2 เมตร (U ₂) และ ความชื้นสัมพัทธ์ (RH)		0.9168	99.87	0.199856
ขาดข้อมูลชั่วโมงที่มี แสงแดด (n)	พะเยา เชียงใหม่ ลำพูน แพร่ น่าน อุดรดิตถ์ ตาก เพชรบูรณ์ หนองคาย เลย ขอนแก่น นครราชสีมา กำแพงเพชร ชัยภูมิ สุพรรณบุรี ลพบุรี ปราจีนบุรี สระแก้ว ชลบุรี จันทบุรี เพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์	0.7488	97.18	0.41513
ขาดข้อมูล ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) และ ชั่วโมงที่มีแสงแดด (n)		0.7352	97.06	0.40124
มีแต่ข้อมูลอุณหภูมิ	ฉะเชิงเทรา	0.6549	97.33	0.40813

ตารางที่ 3 ค่ากรีนวอเตอร์ฟุตปริ้นและเกรย์วอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยเป็นรายจังหวัด

จังหวัด	กรีนวอเตอร์ฟุต ปริ้น (ลบ.ม./ตัน)	กรีนวอเตอร์ฟุต ปริ้นของการศึกษา MH (ลบ.ม./ตัน)	เกรย์วอเตอร์ฟุต ปริ้น (ลบ.ม./ตัน)	เกรย์วอเตอร์ฟุต ปริ้นของการศึกษา MH (ลบ.ม./ตัน)
เชียงราย	792	747	183	113
น่าน	869	723	228	114
พะเยา	800	734	199	114
เชียงใหม่	807	747	224	115
แม่ฮ่องสอน	-	885	222	114
แพร่	911	728	234	114
ลำปาง	-	731	226	114
ลำพูน	772	690	211	114
อุดรดิตถ์	849	724	223	114
หนองคาย	1073	847	248	103
อุดรธานี	1094	757	274	114
หนองบัวลำภู	-	-	248	-
เลย	1073	728	269	114

ตารางที่ 3 ค่ากรีนวอเตอร์ฟุตปริ้นและเกรย์วอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยเป็นรายจังหวัด (ต่อ)

จังหวัด	กรีนวอเตอร์ฟุต ปริ้น (ลบ.ม./ตัน)	กรีนวอเตอร์ฟุต ปริ้นของการศึกษา MH (ลบ.ม./ตัน)	เกรย์วอเตอร์ฟุต ปริ้น (ลบ.ม./ตัน)	เกรย์วอเตอร์ฟุต ปริ้นของการศึกษา MH (ลบ.ม./ตัน)
ขอนแก่น	1006	726	229	114
ชัยภูมิ	972	853	255	120
นครราชสีมา	951	-	283	-
บุรีรัมย์	-	702	230	114
ศรีสะเกษ	-	877	275	114
อุบลราชธานี	800	849	218	114
สระแก้ว	831	-	240	-
ปราจีนบุรี	896	1026	264	119
ฉะเชิงเทรา	911	1056	231	116
ชลบุรี	907	903	236	115
จันทบุรี	888	966	222	114
ตาก	777	914	214	119
กาญจนบุรี	-	936	223	118
ราชบุรี	-	860	248	117
เพชรบุรี	1047	812	246	114
ประจวบคีรีขันธ์	1059	753	257	114
พิษณุโลก	-	719	253	114
สุโขทัย	-	723	214	115
เพชรบูรณ์	815	846	248	120
พิจิตร	768	862	184	116
กำแพงเพชร	767	949	215	120
นครสวรรค์	825	1090	231	126
ลพบุรี	860	1125	213	137
ชัยนาท	-	907	281	125
อุทัยธานี	-	1019	258	116
สระบุรี	-	1090	251	119
สุพรรณบุรี	919	1013	250	117
สกลนคร	-	825	-	114
กาฬสินธุ์	-	818	-	114
มหาสารคาม	-	713	-	114
ร้อยเอ็ด	-	840	-	114
สุรินทร์	-	843	-	114
นราธิวาส	-	1263	-	146

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Plan of National Economic and Social Development Board, Strategic Management of Sustainable Natural Resource and Environment in Chapter 8, Office of the National Economic and Social Development Board, 2012-2016;(11):141 (In Thai).
- [2] Hoekstra, A.Y. and P.Q. Hung. Globalisation of water resource: international virtual water flows in relation to crop trade, Elsevier, 2005:45-56
- [3] Mekonnen, M.M. and A. Y. Hoekstra. The green, blue and grey water footprint of crop and derive crop products, Value of Water Research Report Series' of UNESCO-IHE, Report 2010a;(47) (Volume1 Main report)
- [4] Mekonnen, M.M. and A. Y. Hoekstra. The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products, Value of Water Research Report Series of UNESCO-IHE, Report no.48 (Main report), 2010b.p.50.
- [5] Manewan N. Agriculture sector develop maize... How to cultivate with high yield. Journal of Land Development. 2010;47(415): 48 (In Thai).
- [6] Hoekstra, A. Y., A. K. Chapagain, M. M. Aldaya and M. M. Mekonnen.. The Water Footprint Assessment Manual, Setting the global standard, Earthscan, 2011.p.203.
- [7] Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith.Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization, Rome. 1998.
- [8] Mekonnen, M.M. and A. Y. Hoekstra. . The green, blue and grey water footprint of crop and derive crop products, Hydrology and Earth System Sciences, 2011.p.1578-1581
- [9] Department of Industrial Works, The Water Pollution Treatment System. Type of surface water characteristics and the utilization and the quality standard of surface water in Chapter 3, Department of Industrial Works. 2008.p 13-14 (In Thai).
- [10] Raes, D. Calculation procedures. Reference Manual Version 3.1. Food and Agriculture Organization of the United Nations: 2009. P.18-26
- [11] Office of Agricultural Economics,data percentage yields of maize and irrigation of maize, Office of Agricultural Economics. 2005 – 2009. (In Thai).
- [12] Thai Meteorological Department,climatic data (Temperature, wind speed, Elevation, humidity, sunshine hour), Thai Meteorological Department. 2005 – 2010 (In Thai).
- [13] Irrigation Water Management Research Group, Crop Coefficient 40 type of crop, Research and Development, Irrigation Water Management Division Office of Hydrology and Water Management, Royal Irrigation Department (In Thai).
- [14] Kwanyuen B, Cherdchanpipat N, Research and Development of Water Saving Techniques (In Thai).
- [15] Hoekstra, A.Y. and A.K. Chapagain. Water footprints of nations, Water use by people as a function of their consumption pattern, Water Resource Management 21, 2007.p.35-48.
- [16] Example of the use of CROPWAT 8.0. Soil data. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.p.16-17.