

## การปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยจากเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการบริหารจัดการน้ำชลประทานโดยเว็บไซต์ IrriSAT : กรณีศึกษาพื้นที่เพาะปลูกอ้อยในเขตชลประทานแม่กลองใหญ่

ธนศ สัมฤทธิ์นรพงศ์ และ จุติเทพ วงษ์เพชร\*

ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 1403 6278 อีเมล: fengjitv@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.12.011

รับเมื่อ 23 มกราคม 2563 แก้ไขเมื่อ 15 พฤษภาคม 2563 ตอรับเมื่อ 18 พฤษภาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 16 ธันวาคม 2563

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

เครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการบริหารจัดการน้ำชลประทานซึ่งให้บริการผ่านเว็บไซต์ IrriSAT สามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ( $K_c$ ) จากการประเมินค่าดัชนีพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index; NDVI) ผ่านกระบวนการแปลภาพถ่ายดาวเทียม โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาแนวทางสมการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้พืชจาก IrriSAT เพื่อให้สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกในการประยุกต์ใช้แบบจำลองกำหนดการให้น้ำอ้อย (Sugar Cane Irrigation Scheduling Model; SCIS Model) สำหรับคำนวณกำหนดการให้น้ำอ้อยในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ จากการสอบเทียบและทวนสอบดำเนินการในแปลงเพาะปลูกที่ทราบปฏิทินเพาะปลูกจริง มีอายุของอ้อยและปฏิทินเพาะปลูกที่แตกต่างกัน จากผลการศึกษาพบว่า สมการที่ใช้สำหรับการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยในพื้นที่การศึกษา ( $K_{c\_Adj}$ ) คือ  $K_{c\_Adj} = 1.4847K_{c\_IrriSAT}$  การตรวจพิสูจน์ความแม่นยำของสมการปรับแก้พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยหลังการปรับแก้มีความน่าเชื่อถือสูง จากการประเมินจากค่าความสัมพันธ์ทางสถิติซึ่งประกอบด้วย สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ความแม่นยำของการคาดคะเน ( $NSE$ ) รากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง ( $RMSE$ ) ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย ( $ARE$ ) และร้อยละความเอนเอียงของการประมาณ ( $PBIAS$ ) โดยมีค่าความสัมพันธ์ทางสถิติสำหรับแปลงเพาะปลูกที่ใช้ในการสอบเทียบเท่ากับ 0.92, 0.91, 0.11, 14.54, 0.61 ตามลำดับ และสำหรับการทวนสอบเท่ากับ 0.91, 0.89, 0.12, 36.90, 7.09 ตามลำดับ ดังนั้น สมการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยจากเทคโนโลยีภาพถ่ายดาวเทียมที่มีความแม่นยำสูง และช่วยอำนวยความสะดวกในการคำนวณกำหนดการให้น้ำ ปริมาณน้ำที่ต้องการในพื้นที่เพาะปลูกภายในโครงการชลประทานแม่กลองใหญ่

**คำสำคัญ:** สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช อ้อย IrriSAT

การอ้างอิงบทความ: ธนศ สัมฤทธิ์นรพงศ์ และ จุติเทพ วงษ์เพชร, “การปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยจากเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการบริหารจัดการน้ำชลประทานโดยเว็บไซต์ IrriSAT : กรณีศึกษาพื้นที่เพาะปลูกอ้อยในเขตชลประทานแม่กลองใหญ่,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 31, ฉบับที่ 2, หน้า 179-190, เม.ย.-มิ.ย. 2564.



## Adjustment of Crop Coefficient of Sugarcane from Decision Support Tool to Assist Irrigators with Irrigation Water Management by IrriSAT: Case Study in Cropping Area of the Greater Maeklong Irrigation Scheme

Tanet Samritnorapong and Jutitep Vongphet\*

Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 09 1403 6278, E-mail: fengjitv@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.12.011

Received 23 January 2020; Revised 15 May 2020; Accepted 18 May 2020; Published online: 16 December 2020

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

A decision support website to assist irrigators with irrigation water management, namely IrriSAT, the crop coefficient ( $K_c$ ) was estimated from the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) which were interpreted from satellite imagery. The objective of this study was to develop the equation which adjusts  $K_c$  IrriSAT values which were consistent with sugarcane's irrigation coefficient in the Greater Maeklong Irrigation Project. The first step was to apply the Sugar Cane Irrigation Scheduling; SCIS model to calculate irrigation schedule for sugarcane in the area. The calibration and verification processes assess the accuracy of the adjusted equation by comparing sugarcane's coefficient with the planned cropping pattern, which was computed by the equation ( $K_{c\_Adj.}$ ), with the different plots and different cropping calendars. The study revealed that the adjusted equation for sugar cane irrigation coefficient was  $K_{c\_Adj.} = 1.4847K_{c\_IrriSAT}$ . The calculation results on crop's coefficient ( $K_{c\_Adj.}$ ) were acceptable with high reliability. From a coefficient of determination ( $R^2$ ), Nash-Sutcliffe Efficiency ( $NSE$ ), Root Mean Square Error ( $RMSE$ ), Average Relative Error ( $ARE$ ), and Percent Bias ( $PBIAS$ ), the calibration plots were 0.92, 0.91, 0.11, 14.54, 0.61, respectively while the verification results were 0.91, 0.89, 0.12, 36.90, and 7.09 respectively. Therefore, the adjusted equation could compute sugarcane's coefficient by considering satellite technologies with high precision. It also could facilitate us to calculate the irrigation schedule for sugarcane cultivation and irrigation water requirement in the Greater Maeklong Irrigation Scheme.

**Keywords:** Crop Coefficient, Sugarcane, IrriSAT

Please cite this article as: T. Samritnorapong and J. Vongphet, "Adjustment of crop coefficient of sugarcane from decision support tool to assist irrigators with irrigation water management by IrriSAT: Case study in cropping area of the Greater Maeklong Irrigation scheme," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 2, pp. 179–190, Apr.–Jun. 2021 (in Thai).

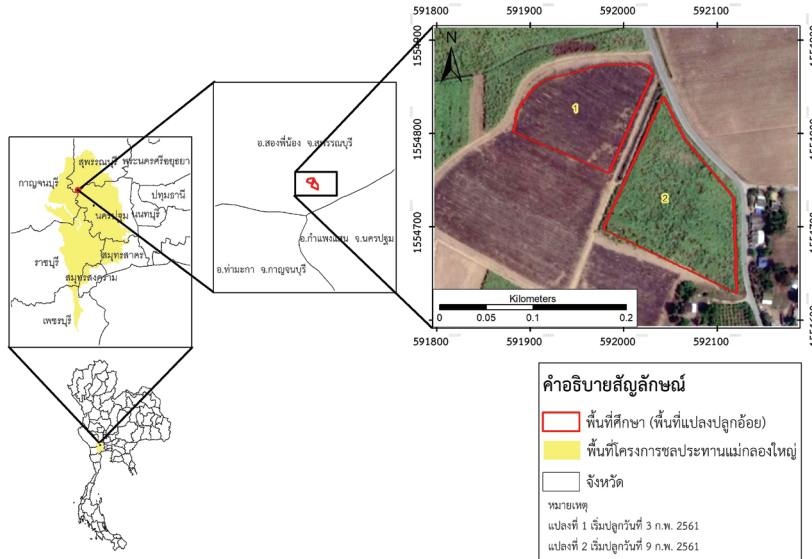
## 1. บทนำ

ความต้องการใช้น้ำมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นทั่วโลก และความต้องการน้ำเพื่อเกษตรกรรมจำเป็นต้องมีการใช้น้ำที่มีอยู่อย่างจำกัดให้มีคุณค่ามากที่สุด [1], [2] หนึ่งในวิธีที่เป็นไปได้คือการปรับปรุงประสิทธิภาพเพื่อการชลประทาน ด้วยการใช้อินโฟร์เมชันที่มีความแม่นยำและถูกต้องสำหรับการคำนวณปริมาณน้ำชลประทาน [3] โดยปริมาณการใช้น้ำของพืชเป็นปัจจัยที่กำหนดปริมาณน้ำให้และช่วงเวลาที่เหมาะสม โดยปัจจุบันการใช้น้ำสำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่มีความซับซ้อนของชนิดพืชและช่วงเวลาในการเพาะปลูก ทำให้มีการคาดการณ์ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Crop Coefficient;  $K_c$ ) ในพื้นที่ขนาดใหญ่คลาดเคลื่อน ซึ่งส่งผลต่อการส่งน้ำที่ไม่ตรงตามความต้องการ สำหรับความต้องการน้ำเพื่อเกษตรกรรมมีร้อยละ 90 ของปริมาณการใช้น้ำทั้งประเทศ [4] หากสามารถส่งน้ำได้ที่มีอยู่ตรงตามความต้องการจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและการบริหารจัดการน้ำซึ่งนำมาสู่การพัฒนางานวิจัยนี้

ปัจจุบันอ้อยถูกกำหนดเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่สำคัญของประเทศและยังมีพื้นที่เพาะปลูกเป็นจำนวนมากในประเทศไทย ดังนั้นอ้อยจึงมีความจำเป็นต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก [5] ช่วงเวลาในการเริ่มเพาะปลูกมีความแตกต่างกันถูกกำหนดด้วยช่วงเวลาของการเปิดรับจากโรงงานผลิตน้ำตาลซึ่งอยู่ในช่วงพฤศจิกายน-เมษายน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ยาวนานทำให้เกิดปัญหาสำหรับการคาดการณ์ในการส่งน้ำชลประทานให้กับพื้นที่เพาะปลูกอ้อยขนาดใหญ่ เช่น พื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ มีแผนการส่งน้ำเริ่มต้นฤดูการเพาะปลูกในเดือนมกราคมสอดคล้องกับความต้องการน้ำของอ้อยในพื้นที่โครงการที่มีอยู่ร้อยละ 43 ของพื้นที่เพาะปลูกในโครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ และในโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพนมทวน สองพี่น้อง และบางเลน ที่มีพื้นที่เพาะปลูกอ้อยมากกว่าร้อยละ 70 ของพื้นที่โครงการ [6] แต่การเพาะปลูกอ้อยในพื้นที่ที่มีความหลากหลายของช่วงเวลา ไม่สามารถทำปฏิทินการเพาะปลูกที่แน่นอนได้ ดังนั้นการแปลผลด้วยภาพถ่ายดาวเทียมจึงเป็นเครื่องมือสนับสนุนให้สามารถสำรวจและติดตามใกล้เคียงกับเวลาปัจจุบันเพื่อคาดการณ์ในการส่งน้ำชลประทานที่เหมาะสม

ความก้าวหน้าทางด้านการสำรวจระยะไกลด้วยภาพถ่ายดาวเทียม (Satellite Remote Sensing) ในปัจจุบันมีความสามารถในการใช้ภาพถ่ายดาวเทียมเป็นเครื่องมือที่สามารถสำรวจและติดตามค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ( $K_c$ ) ซึ่งมีข้อดีในการสำรวจข้อมูลในพื้นที่ขนาดใหญ่ที่มีความหลากหลายของพืช และมีปฏิทินการเพาะปลูกที่ซับซ้อน เครื่องมือที่ใช้สำรวจและติดตามค่า  $K_c$  ที่มีความสะดวกในการใช้งานและมีงานวิจัยรองรับคือ IrrisAT ซึ่งการสำรวจและติดตามค่า  $K_c$  ถูกกำหนดการแปรผลจากความสัมพันธ์ของดัชนีพืชพรรณแบบผลต่างนอร์มอลไลซ์ (Normalized Difference Vegetation Index;  $NDVI$ ) โดย IrrisAT เปิดให้บริการผ่านทางเว็บไซต์ [www.irrisat-cloud.appspot.com](http://www.irrisat-cloud.appspot.com) ด้วยการประมวลผลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 7 และ Landsat 8 เป็นหลัก ที่ความละเอียด  $30 \times 30$  เมตร ระยะเวลา 8-16 วัน จากงานวิจัยพบว่า ค่า  $NDVI$  มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ  $K_c$  ส่วนใหญ่ได้กำหนดความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_c$  กับ  $NDVI$  เป็นสมการเส้นตรง [7] โดย  $NDVI$  เป็นดัชนีที่ใช้มากที่สุด เนื่องจากมีความแปรผันตามคลอโรฟิลล์ ซึ่งสามารถแปลผลได้ง่าย รวดเร็ว และตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ [8] ในกระบวนการประมวลผลภาพจากภาพถ่ายดาวเทียมอาจมีความผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนของข้อมูล (Data Error) สัญญาณที่รบกวน (Noise) และความบิดเบี้ยวเชิงเรขาคณิต โดยเกิดขึ้นในกระบวนการถ่ายภาพ การบันทึกข้อมูลสัญญาณ การสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การส่งสัญญาณ และการโคจรของดาวเทียม จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการปรับแก้ค่า [9]

แบบจำลองกำหนดการให้น้ำอ้อย (Sugar Cane Irrigation Schedule Model; SCIS Model) พัฒนาขึ้นเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจให้น้ำแก้อ้อยโดยการคำนวณความชื้นในดินซึ่งพิจารณาจากความต้องการน้ำของอ้อย ฝนใช้การรวมถึงคุณสมบัติของดิน [10] ซึ่งแบบจำลองสามารถพัฒนาสำหรับการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่โครงการ แต่เนื่องจากข้อจำกัดของปฏิทินเพาะปลูกที่มีความไม่แน่นอนอาจทำให้การคำนวณของแบบจำลองสำหรับการบริหารจัดการน้ำคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ดังนั้น การพัฒนาวิธีการ



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษา

สำรวจและติดตามปฏิทินเพาะปลูก รวมถึงการคาดการณ์ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ( $K_c$ ) ในพื้นที่ที่มีความสำคัญงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพื่อปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชจากระบบติดตามการใช้น้ำบนเว็บไซต์ IrrisAT ( $K_{IrrisAT}$ ) ซึ่งประมาณการจากการแปลงค่าดัชนีพืชพรรณ ( $NDVI$ ) โดยการแปลงภาพถ่ายดาวเทียมในพื้นที่เขตกิ่งแห่งแล้ง เพื่อให้ความสอดคล้องต่อค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยที่พัฒนาโดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations; FAO) ในพื้นที่แปลงเพาะปลูกอ้อยที่ทราบปฏิทินเพาะปลูกแน่นอน ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกในการประยุกต์ใช้แบบจำลองกำหนดการให้น้ำอ้อย SCIS เพื่อคำนวณกำหนดการให้น้ำอ้อยและประเมินปริมาณน้ำชลประทานสำหรับพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่

### 1.1 พื้นที่ศึกษา

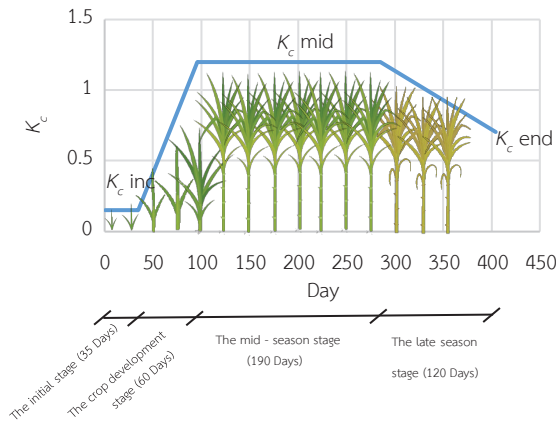
พื้นที่ศึกษาคือพื้นที่แปลงเพาะปลูกอ้อยจำนวน 2 แปลงพื้นที่รวมทั้งหมด 16.5 ไร่ ตั้งอยู่ที่อำเภอสองพี่น้อง จังหวัดสุพรรณบุรี พิกัด UTM 592120E 1555415N ซึ่งเป็นแปลงเพาะปลูกในพื้นที่ส่งน้ำของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา

พนมทวนโดยเป็นส่วนหนึ่งของโครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ แสดงดังรูปที่ 1 สำหรับแปลงเพาะปลูกที่ 1 เริ่มเพาะปลูกในวันที่ 3 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 และเก็บเกี่ยวผลผลิตในวันที่ 30 มกราคม พ.ศ. 2562 ระยะเวลาเพาะปลูก 362 วัน ในขณะที่แปลงที่ 2 เริ่มเพาะปลูกในวันที่ 9 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 เก็บเกี่ยวผลผลิตในวันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2562 ระยะเวลาเพาะปลูก 392 วัน โดยทั้ง 2 แปลงเป็นอ้อยปลูกใหม่ พันธุ์ขอนแก่น 2 พื้นที่ 6.8 และ 9.7 ไร่ ตามลำดับ มีลักษณะการให้น้ำตามความชื้นดินที่เหมาะสมด้วยการประเมินโดยเกษตรกร โดยกำหนดการให้น้ำมีลักษณะเป็นการให้น้ำในช่วงระยะเวลา 15–30 วัน/ครั้ง เนื่องจากรูปแบบการส่งน้ำในพื้นที่เป็นการส่งน้ำแบบรอบเวร มีการกำจัดวัชพืชด้วยยาฆ่าหญ้าและการใช้แรงงานเพื่อให้แปลงเพาะปลูกไร้วัชพืชอย่างสม่ำเสมอ

### 1.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1) สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Crop Coefficient;  $K_c$ ) สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ( $K_c$ ) คือ ค่าคงที่จากอัตราส่วนของปริมาณการใช้น้ำของพืชชนิดต่างๆ (Crop Evapotranspiration;  $ET_c$ ) เทียบกับปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (Reference Crop Evapotranspiration;  $ET_o$ )

ธเนศ สัมฤทธิ์นรพงศ์ และ จุติเทพ วงษ์เพ็ชร, “การปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยจากเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการบริหารจัดการน้ำชลประทานโดยเว็บไซต์ IrrisAT : กรณีศึกษาพื้นที่เพาะปลูกอ้อยในเขตชลประทานแม่กลองใหญ่.”



รูปที่ 2 สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยโดย FAO (ที่มา: FAO No.56)

ในช่วงเวลาเดียวกัน มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1) ซึ่งมีปัจจัยที่พืชชนิดต่างๆ มีความแตกต่างจากพืชอ้างอิง 4 ปัจจัย คือ 1) ความสูงของต้นพืช 2) การสะท้อนของพื้นผิว (Albedo) 3) สภาพความต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำของพืช และ 4) สภาพการระเหยน้ำจากดินโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการระเหยจากผิวดินเปล่า [11]

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (1)$$

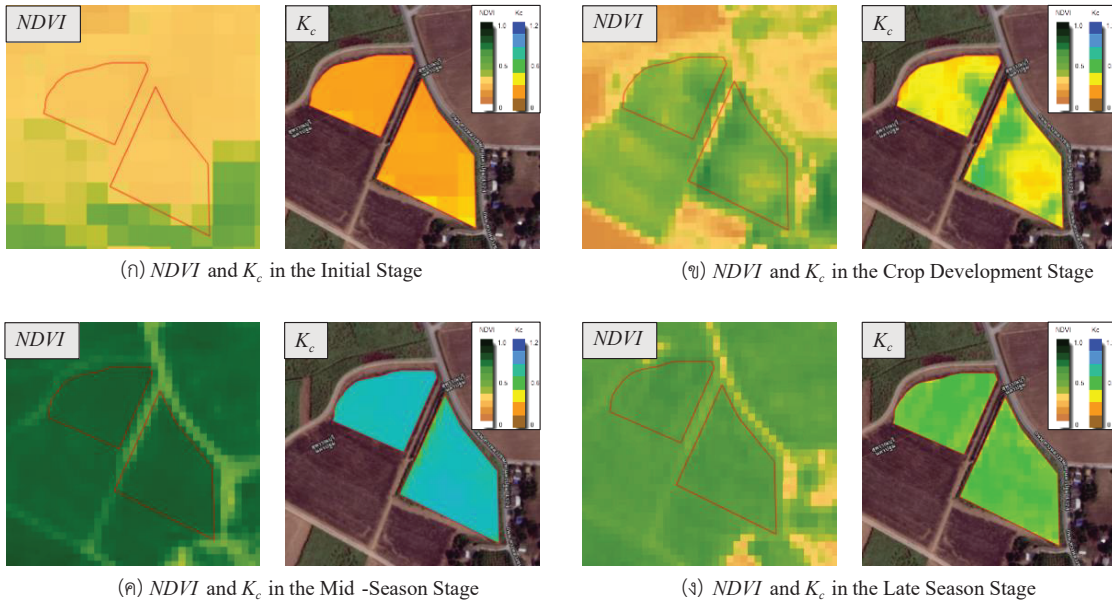
สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ( $K_c$ ) ซึ่งดำเนินการพัฒนาโดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations; FAO) แบ่งตามขั้นของการเจริญเติบโตออกเป็น 4 ระยะคือ 1) ช่วงตั้งตัวของพืช (The Initial Stage) 2) ช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้น (The Crop Development Stage) 3) ช่วงกลางของการเพาะปลูก (The Mid-Season Stage) และ 4) ช่วงปลายของการเพาะปลูก (The Late Season Stage) โดยที่  $K_c$  สำหรับอ้อยจำแนกเป็น 3 ช่วง คือ  $K_c$  ini ในช่วงตั้งตัวของพืช  $K_c$  mid ในช่วงกลางของการเพาะปลูก และ  $K_c$  end ในวันสุดท้ายก่อนเก็บเกี่ยว มีค่าเท่ากับ 0.15, 1.2 และ 0.7 ตามลำดับ ซึ่งในช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้นและช่วงปลายของการเพาะปลูก ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยเชิงเส้นของ  $K_c$  ini กับ  $K_c$  mid

และ  $K_c$  mid กับ  $K_c$  end ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 2 [12] โดยระยะเวลาของขั้นของการเจริญเติบโตของอ้อยถูกจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ อ้อยใหม่ (Virgin) และอ้อยต่อ (Ratoon) ซึ่งถูกแบ่งออกตามถิ่นที่อยู่ 3 พื้นที่ คือ เขตละติจูดต่ำ (Low Latitudes) เขตร้อน (Tropics) และฮาวาย (Hawaii, USA) ซึ่งช่วงเวลาในแต่ละขั้นจะมีความแตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 1 สำหรับพื้นที่ศึกษาอยู่ในเขตละติจูด 14.06° N อยู่ระหว่างเส้นศูนย์สูตรกับ Tropic of Cancer (23.5° N) ซึ่งอยู่ในเขตละติจูดต่ำ และพันธุ์อ้อยในพื้นที่ศึกษาเป็นพันธุ์ขอนแก่น 2 อายุเก็บเกี่ยว 12 เดือน ทั้งพื้นที่ศึกษา และช่วงเวลาในการเจริญเติบโตสอดคล้องกับอ้อยใหม่ในเขตละติจูดต่ำ ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยสำหรับอ้อยใหม่ ในพื้นที่ละติจูดต่ำเป็นค่าอ้างอิง (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ระยะเวลาในแต่ละขั้นการเจริญเติบโตของอ้อยจากการศึกษาโดย FAO

Sugarcane		Time (Day)				
		Init. (Lini)	Dev. (Ldev)	Mid (Lmid)	Late (LLate)	Total
Virgin	Low Latitudes	35	60	190	120	405
	Tropics	50	70	220	140	480
	Hawaii, USA	75	105	330	210	720
Ratoon	Low Latitudes	25	70	135	50	280
	Tropics	30	50	180	60	320
	Hawaii, USA	35	105	210	70	420

2) สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ( $K_c$ ) โดย IrriSAT  
IrriSAT คือ ระบบติดตามการใช้น้ำของพืชบนเว็บไซต์ โดยใช้ข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียมเพื่อหาค่าดัชนีพืชพรรณ (Vegetation Index) ซึ่งค่าดัชนีพืชพรรณมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ( $K_c$ ) ในการแปลภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับหาค่าดัชนีพืชพรรณ ด้วยวิธี



รูปที่ 3 ค่า NDVI และ  $K_c$  ในแต่ละช่วงการเจริญเติบโต

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) มีตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3 โดยการใช้หลักความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างของร้อยละการสะท้อนของคลื่นรังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น (Near infrared; NIR) กับช่วงคลื่นที่ตามองเห็นสีแดง (Red; R) และเทียบสัดส่วนกับผลรวมของร้อยละการสะท้อนของคลื่นรังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น (NIR) กับช่วงคลื่นที่ตามองเห็นสีแดง (R) เพื่อปรับค่าให้อยู่ในลักษณะการกระจายแบบปกติ [13] ตามสมการที่ (2) โดยค่า NDVI มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง -1 ถึง 1 เมื่อมีพืชปกคลุมมาก ค่าการสะท้อนคลื่นรังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นจะมากกว่าช่วงคลื่นที่ตามองเห็นสีแดงค่า NDVI จะมีค่าเป็นบวก เมื่อพืชปกคลุมพื้นดินน้อยหรือไม่มีพืชปกคลุมค่าการสะท้อนของคลื่นรังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นและคลื่นที่ตามองเห็นสีแดงจะมีค่าใกล้เคียงกันทำให้ค่า NDVI ใกล้เคียงหรือเท่ากับ 0 และเมื่อเป็นกรณีผิวน้ำการสะท้อนของคลื่นที่ตามองเห็นสีแดงจะมากกว่าคลื่นอินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นเนื่องจากช่วงคลื่นอินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นมีความยาวคลื่นมากกว่าคลื่นที่ตามองเห็นสีแดงทำให้ช่วงคลื่นอินฟราเรดสะท้อนจากผิวน้ำได้น้อยกว่าทำให้ค่า NDVI มีค่าเป็นลบ [14]

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \tag{2}$$

โดยระบบติดตามการใช้น้ำของพืชบนเว็บไซต์ IrrisAT ดำเนินการประมาณค่า  $K_c$  จากความสัมพันธ์ที่มีต่อค่า NDVI สำหรับพืชในพื้นที่เขตภูมิอากาศกึ่งแห้งแล้งแสดงดังสมการที่ (3) [15] และ [16]

$$K_c = 1.37NDVI - 0.086 \tag{3}$$

3) การปรับแก้และการตรวจพิสูจน์ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อย

กระบวนการปรับแก้และตรวจพิสูจน์ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อย ( $K_c$ ) ดำเนินการเพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูลที่น่าไปใช้ โดยการสอบเทียบเป็นการนำข้อมูล  $K_c$  จาก IrrisAT ที่ปรับแก้ค่าเปรียบเทียบกับ  $K_c$  จาก FAO โดยอ้างอิงอายุของอ้อยตามปฏิทินการเพาะปลูกในพื้นที่ศึกษา ซึ่งการตรวจพิสูจน์ความแม่นยำของสมการปรับแก้ประเมินจากค่าความสัมพันธ์ทางสถิติซึ่งประกอบด้วย

ธนศ สัมฤทธิ์ธีรพงศ์ และ จุติเทพ วงษ์เพชร, “การปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยจากเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการบริหารจัดการน้ำชลประทานโดยเว็บไซต์ IrrisAT : กรณีศึกษาพื้นที่เพาะปลูกอ้อยในเขตชลประทานแม่กลองใหญ่.”

3.1) ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (Coefficient of Determination;  $R^2$ ) เป็นตัวบ่งชี้ความสัมพันธ์ของข้อมูลจากการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น (Liner Regression) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งหากมีค่าใกล้ 1 หมายถึง ตัวแปรอิสระสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้มาก หากมีค่าใกล้ 0 หมายถึงข้อมูลมีความสัมพันธ์แบบตัวแปรอิสระสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้น้อย คำนวณได้ดังสมการที่ (3)

$$R^2 = \left( \frac{COV(O, P)}{\sqrt{VAR(O) VAR(P)}} \right)^2 \quad (3)$$

3.2) รากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Root Mean Square Error;  $RMSE$ ) เป็นค่าวัดความคลาดเคลื่อนของการคาดคะเนกับข้อมูลจริง คำนวณได้ดังสมการที่ (4)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (4)$$

3.3) ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย (Average Relative Error;  $ARE$ ) เป็นค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างจากการคาดคะเนกับค่าจริง ถ้าหากมีค่าใกล้ 0 หมายถึงค่าจากการคาดคะเนมีความคลาดเคลื่อนน้อย คำนวณได้ดังสมการที่ (5)

$$ARE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \quad (5)$$

3.4) ร้อยละความเอนเอียงของการประมาณ (Percent Bias;  $PBIAS$ ) เป็นดัชนีที่วัดแนวโน้มโดยเฉลี่ยของข้อมูลจากร้อยละของความแตกต่างระหว่างค่าจริงกับค่าจากการคาดคะเน ถ้าหากมีค่าเข้าใกล้ 0 หมายถึงการคาดคะเนค่ามีความน่าเชื่อถือ ถ้ามีค่าเป็นบวก หมายถึงค่าจากการคาดคะเนมีค่าต่ำกว่าค่าจริง คำนวณได้ดังสมการที่ (6)

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (6)$$

3.5) Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) เป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ของความแปรปรวนระหว่างค่าจากการคาดคะเนกับค่าจริง เมื่อเทียบกับความแตกต่างระหว่างค่าจริงกับค่าเฉลี่ย นิยมใช้ในการคาดคะเนความแม่นยำหรือประสิทธิภาพของการคาดคะเน คำนวณได้ดังสมการ (7)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

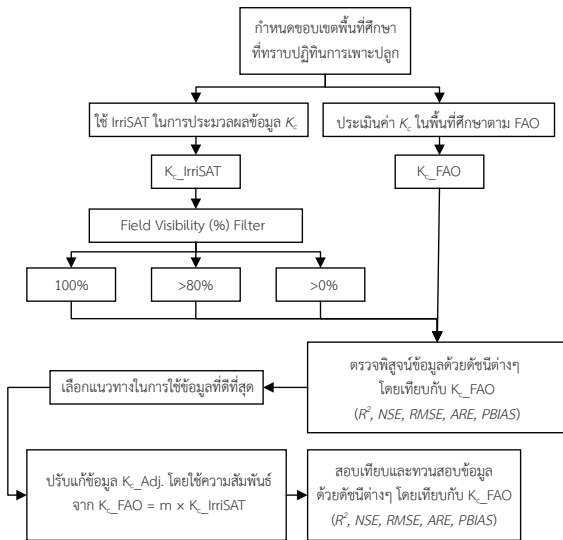
โดยที่  $O_i$  คือ ค่า  $K_c$  ตามปฏิทินเพาะปลูก  $P_i$  คือ ค่า  $K_c$  จาก IrrisAT  $\bar{O}$  และ  $\bar{P}$  คือ ค่าเฉลี่ยของค่า  $K_c$  ตามปฏิทินเพาะปลูก และ  $K_c$  จาก IrrisAT ตามลำดับ  $n$  คือ จำนวนข้อมูล  $COV(O, P)$  คือ ความแปรปรวนระหว่างค่า  $K_c$  ตามปฏิทินเพาะปลูก และค่า  $K_c$  จาก IrrisAT และ  $VAR$  คือ ความแปรปรวนของข้อมูล

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยจากระบบติดตามการใช้น้ำของพืชบนเว็บไซต์ IrrisAT ดำเนินการโดยเลือกพื้นที่ตัวอย่างของแปลงเพาะปลูกที่สามารถระบุปฏิทินเพาะปลูกได้อย่างแน่นอน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $K_c$  จาก IrrisAT ( $K_c$  IrrisAT) กับค่า  $K_c$  จาก FAO ซึ่งพิจารณาตามอายุของอ้อยในแปลงเพาะปลูกในพื้นที่ตัวอย่าง ( $K_c$  FAO) แสดงดังรูปที่ 4 โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการปรับแก้ดังต่อไปนี้

### 2.1 การคัดเลือกแนวทางการใช้ข้อมูลที่ดีที่สุดจากร้อยละทัศนวิสัยของดาวเทียมในพื้นที่

การประเมินค่า  $K_c$  โดย IrrisAT มีกระบวนการประเมินค่า  $K_c$  โดยใช้ภาพถ่ายทางดาวเทียมแปลผลเป็นค่า  $NDVI$  และใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $NDVI$  และ  $K_c$  เพื่อคำนวณค่า  $K_c$  จากการแปลภาพถ่ายดาวเทียม แต่การแปลผลจากภาพถ่ายดาวเทียมอาจมีความผิดพลาดเนื่องจากทัศนวิสัยของดาวเทียมในพื้นที่ จึงทำการตรวจสอบพิสูจน์ข้อมูลที่ทำให้



รูปที่ 4 ขั้นตอนในการศึกษา

ความสัมพันธ์ของข้อมูลสูงสุดและความผิดพลาดของข้อมูลต่ำที่สุดโดยการตรวจพิสูจน์ข้อมูลเพื่อด้วยค่าความสัมพันธ์ทางสถิติ ซึ่งประกอบด้วย 1)  $R^2$ , 2)  $RMSE$ , 3)  $ARE$ , 4)  $PBIAS$  และ 5)  $NSE$  ซึ่งค่าความสัมพันธ์ทางสถิติดังกล่าวเป็นการเปรียบเทียบระหว่างค่า  $K_c$  IrrisAT กับค่า  $K_c$  FAO โดยข้อมูล  $K_c$  จาก IrrisAT ( $K_c$  IrrisAT) สามารถจัดกลุ่มเพื่อตรวจพิสูจน์ข้อมูลจำแนกตามร้อยละทัศนวิสัยของดาวเทียมในพื้นที่ (Field Visibility) ซึ่งประกอบด้วย 1) ร้อยละทัศนวิสัยของดาวเทียมในพื้นที่ (Field Visibility) ร้อยละ 100 2) ร้อยละทัศนวิสัยของดาวเทียมในพื้นที่ (Field Visibility) มากกว่าร้อยละ 80 และ 3) ร้อยละทัศนวิสัยของดาวเทียมในพื้นที่ (Field Visibility) ทุกช่วงทัศนวิสัย

### 2.2 การปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชจากระบบติดตามการใช้น้ำบนเว็บไซต์ IrrisAT

สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ( $K_c$ ) จากการแปลงผลโดย IrrisAT เป็นค่า  $K_c$  ในพื้นที่เขตภูมิอากาศกึ่งแห้งแล้ง ดังนั้นจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ของข้อมูลเพื่อปรับแก้ค่า  $K_c$  ให้สามารถใช้ในพื้นที่เพาะปลูกในพื้นที่ชลประทานแม่กลองใหญ่ได้อย่างเหมาะสม โดยเลือกข้อมูลจากแปลงเพาะปลูกที่ 1

เพื่อดำเนินการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Regression Analysis) โดยกำหนดให้  $K_c$  IrrisAT เป็นตัวแปรอิสระ (Independent Variable) และ  $K_c$  FAO เป็นตัวแปรตาม (Dependent Variable) ซึ่งแปรผันไปตามตัวแปรอิสระมีค่าต่ำที่สุดที่เป็นไปได้เท่ากับ 0 เนื่องจากค่า  $K_c$  มีค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้เท่ากับ 0 (สำหรับพื้นที่ดินเปล่า หรือ Bare soil)

### 2.3 การสอบเทียบและการทวนสอบ

การสอบเทียบและทวนสอบดำเนินการในแปลงเพาะปลูกที่มีอายุของอ้อยและปฏิทินเพาะปลูกที่แตกต่างกัน โดยแบ่งออกเป็น 2 พื้นที่ คือ แปลงเพาะปลูกที่ 1 สำหรับการสอบเทียบและแปลงเพาะปลูกที่ 2 สำหรับการทวนสอบเพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ที่นำมาปรับแก้ข้อมูลให้สามารถใช้สอบเทียบข้อมูลแปลงที่ 1 ระหว่าง  $K_c$  Adj กับ  $K_c$  FAO ด้วยดัชนีต่างๆ คือ  $R$ ,  $RMSE$ ,  $ARE$ ,  $PBIAS$ ,  $NSE$  และนำความสัมพันธ์จากพื้นที่แปลงที่ 1 ปรับแก้ค่า  $K_c$  IrrisAT ในพื้นที่แปลงที่ 2 ทำการทวนสอบอีกครั้ง ด้วยดัชนีเดียวกัน

### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 3.1 การตรวจพิสูจน์ค่า $K_c$ IrrisAT สำหรับแต่ละช่วงของร้อยละทัศนวิสัยของดาวเทียมในพื้นที่

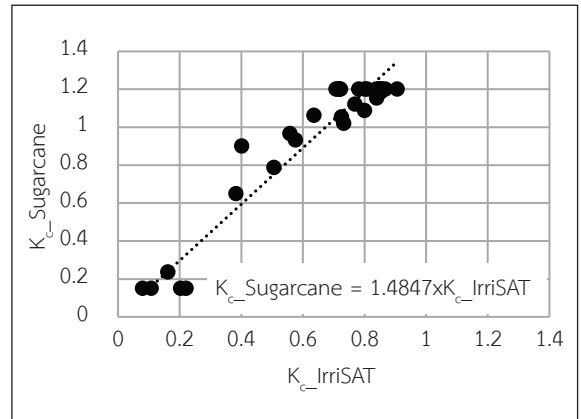
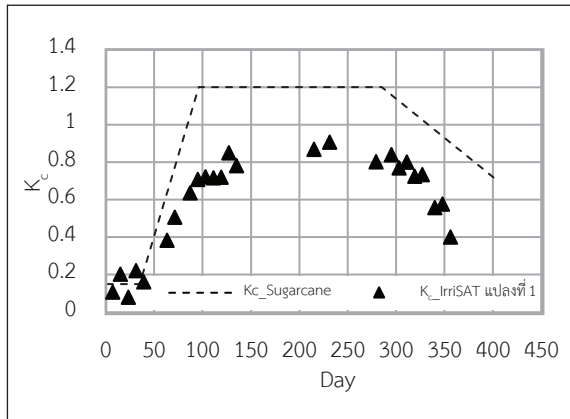
จากการตรวจพิสูจน์ข้อมูลพบว่า ช่วงของร้อยละ 100 ทัศนวิสัยของดาวเทียมในพื้นที่ทำให้ข้อมูลที่ได้มีความสัมพันธ์ของข้อมูลสูงสุด (ตารางที่ 2) โดยมีค่า  $R^2$  และ  $NSE$  สูงสุดเท่ากับ 0.91 และ 0.00 ตามลำดับ ความคลาดเคลื่อนและความเอนเอียงของข้อมูลมีค่าต่ำที่สุด โดยมีค่า  $RMSE$   $ARE$  และ  $PBIAS$  เท่ากับ 0.36 35.78 และ 34.43 ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกใช้ช่วงของร้อยละ 100 ทัศนวิสัยของดาวเทียมในพื้นที่ สำหรับการสร้างความสัมพันธ์ในการปรับแก้ข้อมูล

#### 3.2 ผลการพัฒนาสมการปรับแก้

มีความสัมพันธ์ดังสมการ  $K_c$  FAO = 1.4847 x  $K_c$  IrrisAT แสดงดังรูปที่ 5 (ข) สำหรับแปลงเพาะปลูกที่ 1 มีการตรวจพิสูจน์ข้อมูลพบว่า มีค่า  $R^2$ ,  $NSE$ ,  $RMSE$ ,  $ARE$  และ  $PBIAS$  เท่ากับ 0.92, 0.06, 0.35, 34.69 และ 33.06 ตามลำดับ

ธเนศ สัมฤทธิ์นรินทร์ และ จุติเทพ วงษ์เพชร, “การปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยจากเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการบริหารจัดการน้ำชลประทานโดยเว็บไซต์ IrrisAT : กรณีศึกษาพื้นที่เพาะปลูกอ้อยในเขตชลประทานแม่กลองใหญ่.”





(ก)  $K_c$  จาก IrrisAT เทียบกับ FAO

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $K_c$  IrrisAT กับ  $K_c$  FAO แปลงที่ 1

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_c$  IrrisAT กับ  $K_c$  FAO

ตารางที่ 3 ผลการสอบเทียบและการทวนสอบ

Indicators	แปลงที่ 1		แปลงที่ 2	
	$K_c$ IrrisAT	$K_c$ Adj*	$K_c$ IrrisAT	$K_c$ Adj**
$R^2$	0.92	0.92	0.91	0.91
$NSE$	0.06	0.91	-0.06	0.89
$RMSE$	0.35	0.11	0.37	0.12
$ARE$	34.69	14.54	85.53	36.90
$PBIAS$	33.06	0.61	169.38	7.09

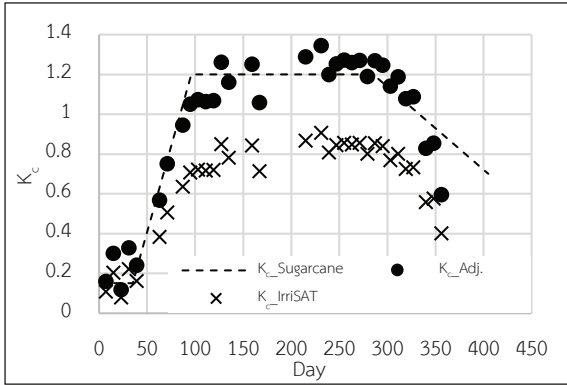
โดยที่ \* คือการสอบเทียบ และ \*\* คือการทวนสอบ

### 3.3 ผลการตรวจพิสูจน์ความแม่นยำของสมการปรับแก้

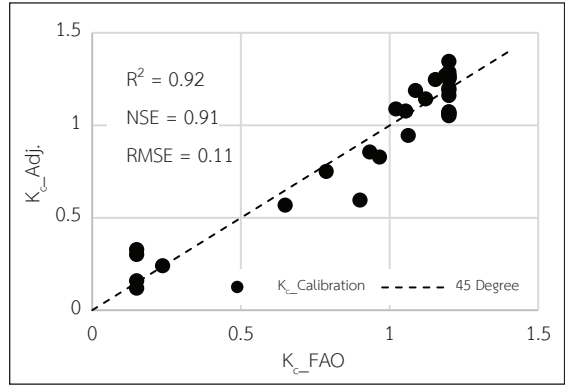
เมื่อปรับแก้ข้อมูลและสอบเทียบข้อมูล จากตารางที่ 3 พบว่าค่า  $R^2$ ,  $NSE$ ,  $RMSE$ ,  $ARE$  และ  $PBIAS$  เท่ากับ 0.92, 0.91, 0.11, 14.54 และ 0.61 ตามลำดับ เนื่องจากค่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_c$  จาก IrrisAT กับค่า  $K_c$  ของอ้อยจาก FAO มีความสัมพันธ์สูง แต่ค่า  $K_c$  จาก IrrisAT ส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า ส่งผลให้ค่า  $NSE$  ต่ำ และ  $RMSE$ ,  $ARE$  รวมถึง  $PBIAS$  มีค่าสูง ดังนั้นเมื่อสอบเทียบข้อมูลทำให้ความสัมพันธ์ของข้อมูลคงเดิม แต่ความแม่นยำของข้อมูลสูงขึ้นส่งผลให้  $NSE$  สูงขึ้น รวมถึงความคลาดเคลื่อนและความเอนเอียงของข้อมูลลดลงส่งผลให้  $RMSE$ ,  $ARE$  และ  $PBIAS$  ลดลง

การทวนสอบข้อมูลโดยใช้พื้นที่แปลงเพาะปลูกที่ 2 มี

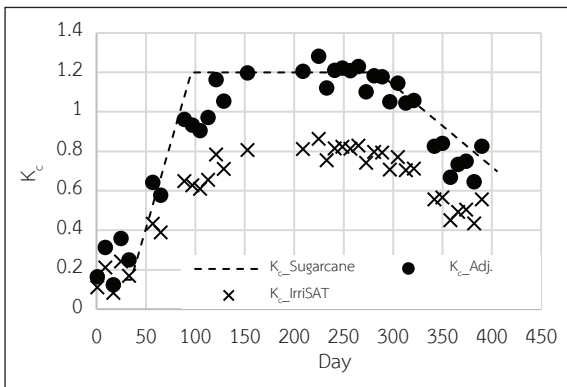
การตรวจพิสูจน์ข้อมูลพบว่า มีค่า  $R^2$ ,  $NSE$ ,  $RMSE$ ,  $ARE$  และ  $PBIAS$  เท่ากับ 0.91, -0.06, 0.37, 85.53 และ 169.38 เมื่อปรับแก้ข้อมูลและทวนสอบข้อมูลพบว่า ค่า  $R^2$ ,  $NSE$ ,  $RMSE$ ,  $ARE$  และ  $PBIAS$  เท่ากับ 0.91, 0.89, 0.12, 36.90 และ 7.09 ตามลำดับ โดยที่ความแปรปรวนลดลงของค่า  $K_c$  จาก IrrisAT หลังจากการปรับแก้เนื่องจากค่า  $NSE$  สูงขึ้น รวมถึงความคลาดเคลื่อนและความเอนเอียงของข้อมูลลดลงเนื่องจาก  $RMSE$ ,  $ARE$  และ  $PBIAS$  ลดลงจากการทวนสอบพบว่า มีแนวโน้มของความแปรปรวนความคลาดเคลื่อนและความเอนเอียงของข้อมูลลดลงสอดคล้องเช่นเดียวกับการสอบเทียบ มีผลแสดงดังรูปที่ 6 (ก) ถึงรูปที่ 6 (ง)



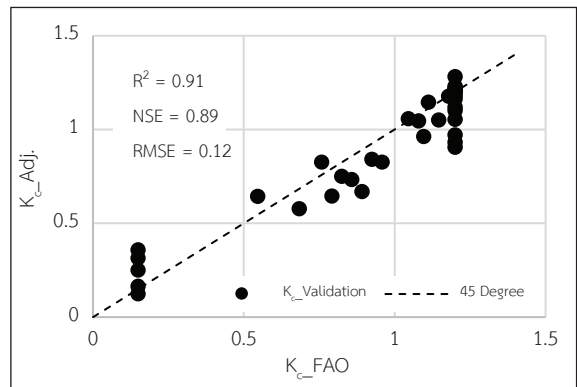
(ก)  $K_c$ \_Adj. กรณีสอบเทียบ



(ข) ความสัมพันธ์  $K_c$ \_Adj. กรณีสอบเทียบ



(ค)  $K_c$ \_Adj. กรณีทวนสอบ



(ง) ความสัมพันธ์  $K_c$ \_Adj. กรณีทวนสอบ

รูปที่ 6 การสอบเทียบและการทวนสอบ

4. สรุป

กระบวนการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชจากระบบติดตามการใช้น้ำบนเว็บไซต์ IrriSAT ซึ่งเป็นค่าที่ประมาณการจากการแปลงค่าดัชนีพืชพรรณ (NDVI) โดยการแปลงภาพถ่ายดาวเทียมในพื้นที่เขตกิ่งแห้งแล้งสามารถส่งผลให้ค่าดังกล่าวมีความสอดคล้องต่อค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยที่พัฒนาโดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) สำหรับพื้นที่แปลงเพาะปลูกอ้อยที่ทราบปฏิทินเพาะปลูกแน่นอนในเขตพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ได้อย่างเหมาะสม โดยสมการที่ใช้สำหรับการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยในพื้นที่การศึกษา คือ  $K_c$ \_Adj. = 1.4847 $K_c$ \_IrriSAT จากการ

พิจารณาค่าความสัมพันธ์ทางสถิติในกระบวนการสอบเทียบและทวนสอบซึ่งดำเนินการในแปลงเพาะปลูกที่มีปฏิทินการเพาะปลูกที่แตกต่างกันพบว่า สมการปรับแก้ที่พัฒนาขึ้นจากกระบวนการนี้มีความแม่นยำสูงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการคำนวณกำหนดการให้น้ำและปริมาณน้ำชลประทานสำหรับการเพาะปลูกอ้อยในพื้นที่การเพาะปลูกในเขตชลประทานแม่กลองใหญ่ต่อไป

อย่างไรก็ตาม แต่การประยุกต์ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยจากสมการปรับแก้เพื่อคำนวณกำหนดการให้น้ำและปริมาณน้ำชลประทานสำหรับพื้นที่โครงการชลประทานจำเป็นต้องประมาณค่าที่ขาดหายหรือคลาดเคลื่อนเนื่องจากทัศนวิสัยของพื้นที่ รวมถึงการประมาณค่าสำหรับช่วงเวลา

ธเนศ สัมฤทธิ์นรินทร์ และ จุติเทพ วงษ์เพ็ชร, “การปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยจากเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการบริหารจัดการน้ำชลประทานโดยเว็บไซต์ IrriSAT : กรณีศึกษาพื้นที่ที่เพาะปลูกอ้อยในเขตชลประทานแม่กลองใหญ่.”

ที่ขาดหายเนื่องจากการโคจรของดาวเทียม เพื่อให้สามารถประเมินความต้องการน้ำสำหรับพื้นที่แปลงเพาะปลูกและโครงการชลประทานแบบใกล้เคียงกับเวลาจริง ซึ่งจะทำให้การบริหารจัดการน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และได้รับการสนับสนุนและส่งเสริมการทำวิจัยจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ภายใต้โครงการการพัฒนาแอปพลิเคชันบนมือถือเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในการให้น้ำแก่เกษตรกรในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Wada, M. I. E. de Graaf, and H. L. P. van Beek, "High-resolution modeling of human and climate impacts on global water resources," *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 735–763, 2016.
- [2] X. Qin, F. Glenn, M. K. Dan, and P. Gary, "A theoretical economic model of the demand for irrigation water," *Agricultural Water Management*, vol. 225, 2019.
- [3] T. Garnett, M. C. Appleby, A. Balmford, I. J. Bateman, T. G. Benton, P. Bloomer, B. Burlingame, M. Dawkins, L. Dolan, D. Fraser, M. Herrero, I. Hoffmann, P. Smith, P. K. Thornton, C. Toulmin, S. J. Vermeulen, and H. C. J. Godfray, "Sustainable intensification in agriculture: Premises and policies," *Science*, vol. 341, pp. 33–34, 2013.
- [4] S. Koontanakulvong, P. Doungmanee, and P. Ruangrassamee, "The concept of water resources security - Thailand and the international," Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2013 (in Thai).
- [5] Ministry of Industry, *The Ministry of Industry's Strategic Plan 2017 – 2021*. Ministry of Industry, Bangkok, 2016 (in Thai).
- [6] Royal Irrigation Department, *Water Allocation and Cultivation Plans 2016*. Royal Irrigation Department, Bangkok, 2015 (in Thai).
- [7] C. Alfonso, C. Isidro O. Anna D. Guido, and M. Massimo, "Remote sensing for crop water management: From ET modelling to services for the end users," *Sensors*, vol. 17, no. 5, pp. 1104–1129, 2017.
- [8] A. R. Formaggio and I. del A. Sanches, *Sensoriamento Remoto em Agricultura*. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.
- [9] P. Laotrakul. (2015, November). *Visual Interpretation*. GISTDA, Thailand [Online]. Available: <https://www.gistda.or.th/main/th/node/997>
- [10] T. Samritnorapong, J. Vongphet, R. Yoosamran, and P. Sopaphun, "Development of sugar cane irrigation schedule model," in *Proceedings TSAE Conference*, 2018, vol.19, pp. 350–356.
- [11] E. Kositsakulchai, *Crop Evapotranspiration Theory and Applications*. Nakhon Pathom: Kasetsart Textbook Publishing Center, 2014 (in Thai).
- [12] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. Rome, Italy: United Nations FAO, 1998.
- [13] C. Tucker, "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation," *Remote Sensing of Environment*, vol. 8, no. 2, pp. 127–150, 1979.



- [14] Z. Li and D. Tan. "A modified perpendicular drought index in NIR Red reflectance space," in *Proceedings IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2014, pp. 1–6.
- [15] T. J. Trout and L. F. Johnson. "Estimating crop water use from remotely sensed NDVI, Crop Models and Reference ET," in *Proceedings USCID Fourth International Conference*, 2007, pp. 275–285.
- [16] J. Hornbuckle, J. Vleeshouwer, C. Ballester, J. Montgomery, R. Hoogers, and R. Bridgart. "IrrisAT technical reference," in *Proceedings Irrigation Australia International Conference*, 2016, pp. 1–17.