

การปรับเทียบและประเมินสมรรถนะแบบจำลอง SWAT สำหรับการจำลองผลผลิต และการใช้น้ำของข้าวในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่

Calibration and Performance Evaluation of SWAT Model on Rice Yield and Evapotranspiration Simulation in the Greater Mae Klong Irrigation Project Area

ณรงค์ศักดิ์ พิมใจใส¹ และ เอกสิทธิ์ โขสิตสกุลชัย^{1*}

Narongsak Phimchaisai¹ and Ekasit Kositsakulchai^{1}*

Received 29 September 2022, Revised 30 March 2023, Accepted 31 March 2023

ABSTRACT

This paper aims to calibrate the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model and to evaluate model performance on irrigated rice yield and evapotranspiration estimation in the Greater Mae Klong Irrigation Project area. Crop parameters were calibrated using rice phenological data and the yield collected from the experimental plot at the Irrigation Water Management Experiment Station 9 (Tha Muang) in Kanchana Buri province, and the simulated results were compared with those from DSSAT model. From the observation of the phenological development, rice was grown under the potential production system. Neither water nor nutrient stresses occurred during the growing season. It revealed that SWAT performances on rice cropping simulation, yield estimation, and evapotranspiration calculation were satisfactory, after having calibrated crop parameters and set appropriate initial conditions. The SWAT results were comparable to those from the experimental plot (%RMSE =21.6%, d=0.984) and from the DSSAT simulation. Moreover, SWAT modeling environment has spatial data utilities for conducting large scale simulation. However, further studies are essential to properly represent the lowland paddy field and to develop novel algorithms for more reasonably simulating the ponding rice cropping.

Keywords: Rice, Cropping system modeling, Yield, Evapotranspiration

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับเทียบและประเมินศักยภาพของแบบจำลอง SWAT สำหรับการจำลองการปลูกข้าว เพื่อประมาณปริมาณผลผลิตและการใช้น้ำของข้าวชลประทานในพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ การจัดทำแบบจำลองได้ปรับเทียบพารามิเตอร์ข้าวเทียบกับข้อมูลจากแปลงทดลองที่สถานีทดลองการใช้น้ำชลประทานที่ 9 (ท่าม่วง) และจำลองเปรียบเทียบกับแบบจำลอง DSSAT การปลูกข้าวเพื่อเก็บตัวอย่างการเติบโต

¹ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Sean, Kasetsart University, Kamphaeng Sean Nakhon Pathom, 73140, Thailand.

* Corresponding author: Tel: 0-3435-1897, E-mail address: ekasit.k@ku.th

และผลผลิตข้าวในแปลงทดลองเป็นระบบการปลูกพืชให้ได้ผลผลิตตามศักยภาพ ข้าวได้รับน้ำและธาตุอาหารตามความต้องการ การจำลองระบบการปลูกข้าวด้วย SWAT และ DSSAT กำหนดสภาพการเพาะปลูกแบบเดียวกับการทดลอง ผลการศึกษา พบว่า แบบจำลอง SWAT เมื่อปรับเทียบพารามิเตอร์พืชและกำหนดค่าตั้งต้นที่เหมาะสมมีความสามารถในการจำลองการปลูกข้าว การประมาณค่าผลผลิต และปริมาณการใช้น้ำใกล้เคียงกับผลทั้งจากแปลงทดลอง (%RMSE =21.6%, $d=0.984$) และจาก DSSAT อนึ่ง แบบจำลอง SWAT มีเครื่องมือสำหรับเตรียมข้อมูลเชิงพื้นที่ช่วยสำหรับการจำลองในพื้นที่ขนาดใหญ่ ถึงกระนั้น งานศึกษาวิจัยเพื่อกำหนดรูปแบบการจำลองที่เหมาะสมรวมถึงการพัฒนากระบวนการวิธีเฉพาะสำหรับข้าวนาสวนที่ปลูกแบบขังน้ำ ยังเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้สามารถจำลองให้สอดคล้องกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: ข้าว การจำลองระบบการเพาะปลูก ผลผลิต การใช้น้ำของพืช

คำนำ

ข้าวเป็นพืชที่มีความสำคัญของไทยทั้งด้านเศรษฐกิจและด้านสังคม (Chinsuwan *et al.*, 2002) โดยเป็นอาหารหลักของคนไทยนับแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ในช่วงที่ผ่านมา ผลผลิตข้าวมีปริมาณส่งออกเป็นอันดับที่ 2 ของการส่งออกสินค้าเกษตรและผลิตภัณฑ์ โดยมีมูลค่าการส่งออกกว่า สองแสนล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562)

ข้อมูลปริมาณผลผลิตและการใช้น้ำของข้าวเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการวางแผนการผลิตและการบริหารจัดการน้ำ การใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อประมาณผลผลิตและการใช้น้ำเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับการยอมรับกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจาก แบบจำลองสามารถประมาณผลผลิตในสภาพแวดล้อมต่างกันได้ซึ่งช่วยให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (Bannayan *et al.*, 2007) ผลจากการจำลองสถานการณ์เป็นข้อมูลสำคัญที่ช่วยลดความเสี่ยงในการตัดสินใจการผลิตทางการเกษตร โดยสามารถทดสอบการปรับรูปแบบการเพาะปลูกตามสถานการณ์ต่าง ๆ ได้ อีกทั้ง ในปัจจุบันเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องส่งผลให้แบบจำลองมีสมรรถนะสูงขึ้นสามารถจำลองกระบวนการที่ซับซ้อนในพื้นที่ขนาดใหญ่

ในประเทศไทยมีรายงานการใช้งานแบบจำลองคอมพิวเตอร์กับระบบการปลูกข้าวตั้งแต่ปี พ.ศ. 2534 (Pannangpetch *et al.*, 1991) อาทิ DSSAT-CERES-Rice (Cheyglinted *et al.*, 2001;

เอกพันธ์ และเอกสิทธิ์, 2562), ORYZA2000 (Wikampapraham & Kositsakulchai, 2010; รัฐรัชชัย, 2552), SWAP (เอกสิทธิ์และคณะ, 2550) และ AquaCrop (Akumaga *et al.*, 2017; นนท์ธิดาและเอกสิทธิ์, 2563) โดยชุดแบบจำลอง DSSAT สำหรับข้าว (CERES-Rice) ได้มีงานศึกษาทดสอบและปรับเทียบพารามิเตอร์สำหรับข้าวไทยจำนวนมากครอบคลุมสายพันธุ์หลักที่นิยมปลูกในประเทศไทย (จิรวรรณและคณะ, 2543; Mankeb, 1993; เมธีและคณะ, 2543; สุนทรและอรรถชัย, 2547; อรรถชัยและคณะ, 2547)

แบบจำลอง Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Neitsch *et al.*, 2011) เป็นแบบจำลองทางอุทกวิทยา-เกษตรในระดับลุ่มน้ำที่มีเครื่องมือจัดการข้อมูลภูมิสารสนเทศสำหรับการจำลองพื้นที่ขนาดใหญ่และสามารถจำลองระบบการปลูกพืชได้ (Arnold *et al.*, 2012; Gassman *et al.*, 2014) จากรายงานการใช้งาน SWAT ส่วนใหญ่เป็นการวิเคราะห์ทางอุทกวิทยา (Kakarndee & Kositsakulchai, 2020; Kositsakulchai *et al.*, 2021; Sakaguchi *et al.*, 2014; Xie & Cui, 2011) หรือ การประเมินสมดุลน้ำในพื้นที่นาข้าว (Gassman *et al.*, 2021; Sakaguchi, 2014; ณรงค์ศักดิ์และเอกสิทธิ์, 2563) รายงานการใช้งาน SWAT สำหรับการจำลองระบบการเพาะปลูกมีจำกัดและยังไม่มีการศึกษาเพื่อปรับพารามิเตอร์ของพืชให้สอดคล้องกับข้าวที่ปลูกในประเทศไทย

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับเทียบและประเมินสมรรถนะของแบบจำลอง SWAT สำหรับการ

จำลองการปลูกข้าว เพื่อประมาณปริมาณผลผลิตและการใช้น้ำของข้าว โดยการปรับเทียบพารามิเตอร์ข้าว ใช้ชุดข้อมูลการปลูกข้าวในแปลงทดลองของศูนย์วิจัยการใช้น้ำชลประทานที่ 9 (ท่าม่วง) ในเขตโครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ ซึ่งเคยใช้ปรับเทียบและประเมินแบบจำลอง SWAT (เอกสิทธิ์และคณะ, 2550) และแบบจำลอง ORYZA2000 (รัฐรัชชัย, 2552). และเปรียบเทียบสมรรถนะการจำลองกับแบบจำลอง DSSAT

อุปกรณ์และวิธีการ

การจำลองระบบการผลิตพืช

ระบบการผลิตพืชสำหรับแบบจำลองระบบการเพาะปลูกอาจแบ่งเป็น 4 ระดับ (Penning de Vries & Van Laar, 1982; เอกสิทธิ์ และคณะ, 2550) ได้แก่ (1) ระบบการผลิตพืชเต็มศักยภาพเป็นแบบจำลองระบบที่กระบวนการเติบโตและพัฒนาการของพืชได้รับปัจจัยการผลิตอย่างเต็มที่ที่กล่าวคือ มีปริมาณน้ำและธาตุอาหารตามความต้องการ (2) ระบบการผลิตพืชที่น้ำเป็นข้อจำกัด อัตราการเติบโตของพืชอาจถูกจำกัดด้วยน้ำในบางช่วงเวลา อย่างไรก็ตามพืชสามารถมีอัตราการเติบโตเต็มศักยภาพได้เหมือนในระบบแรกถ้าหากมีปริมาณน้ำเพียงพอต่อความต้องการ (3) ระบบการผลิตพืชที่ไนโตรเจนเป็นข้อจำกัด (4) ระบบการผลิตพืชที่ธาตุอาหารอื่นศัตรูพืช และปัจจัยทางสังคมเป็นข้อจำกัด

แบบจำลองระบบการเพาะปลูก

แบบจำลอง SWAT (Neitsch *et al.*, 2011) พัฒนาโดย USDA-Agricultural Research Service โดยการจำลองระบบการเพาะปลูกใช้กระบวนการจำลองตามแบบจำลอง EPIC (Neitsch *et al.*, 2011) ซึ่งถูกไปใช้ในศึกษาผลกระทบการเกษตร ใช้ประเมินการใช้น้ำและธาตุอาหารในเขตรากพืช การคายน้ำ และผลผลิตของพืช

แบบจำลอง "DSSAT" (Hoogenboom *et al.*, 2017; Jones *et al.*, 2003) เป็นชุดแบบจำลองประกอบด้วยโมดูลสำหรับจำลองพืชมากกว่า 25

ชนิด โดย CERES-Rice (Sing *et al.*, 1993) เป็นโมดูลสำหรับข้าว แบบจำลอง CERES พัฒนาขึ้นสำหรับการจำลองกลุ่มธัญพืช ในการจำลองระยะเวลาการเติบโต อัตราการเติบโตและปริมาณชีวมวลแบ่งตามส่วนของพืช (Hoogenboom *et al.*, 2020; Ritchie *et al.*, 1998)

การประมาณปริมาณผลผลิตข้าว

แบบจำลอง SWAT และ DSSAT มีหลักการคำนวณชีวมวลคล้ายกัน คือใช้ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานรังสีแสงอาทิตย์กับปริมาณชีวมวลของพืช พืชรับพลังงานรังสีแสงอาทิตย์จากใบและนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Neitsch *et al.*, 2011) ปริมาณชีวมวลของพืชรวม (total plant biomass [ΔBIO] หน่วยเป็น kg/ha) คำนวณจาก $\Delta BIO = RUE \times H_{phosyn}$ โดย RUE คือ ประสิทธิภาพการใช้พลังงานรังสีแสงอาทิตย์ (radiation-use efficiency) หน่วยเป็น g/MJ โดยมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของพืช (รังสรรค์, 2538) ส่วน H_{phosyn} คือ ปริมาณพลังงานรังสีแสงอาทิตย์รายวันสำหรับการสังเคราะห์ด้วยแสง (MJ/m^2) คำนวณจาก $H_{phosyn} = 0.5H_{day}(1 - \exp(-k_L LAI))$ โดย H_{day} คือ ปริมาณแสงอาทิตย์ทั้งหมด (MJ/m^2), k_L คือ extinction coefficient, LAI คือ ดัชนีพื้นที่ใบ (m^2/m^2)

ส่วนการประมาณค่าปริมาณผลผลิต (yield) แบบจำลองทั้งสองใช้วิธีการคำนวณต่างกันโดย SWAT ประมาณผลผลิตจากค่า harvest index (HI) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างผลผลิตกับปริมาณชีวมวล (Donald & Hamblin, 1976) ส่วน DSSAT-CERES ประมาณปริมาณผลผลิตจากผลคูณของจำนวนเมล็ดข้าวกับน้ำหนักเมล็ดในช่วงที่สุกแก่ทางสรีรวิทยา (Ritchie *et al.*, 1998)

การปลูกข้าวในแปลงทดลอง

การปลูกข้าวเพื่อเก็บข้อมูลดำเนินการที่สถานีทดลองการใช้น้ำชลประทานที่ 9 (ท่าม่วง) หรือเดิมคือ ศูนย์สาธิตการใช้น้ำชลประทานแม่กลอง (Figure 1) ส่วนการใช้น้ำชลประทาน กรมชลประทาน ตั้งอยู่ที่ ต.บ้านใหม่ อ.ท่าม่วง จ.กาญจนบุรี (latitude

13°54'51"N, longitude 99°37'40"E) และทำการเก็บข้อมูลในแปลงทดลอง ดังนี้

ข้อมูลอุตุ นิยมวิทยา เก็บข้อมูลรายวันครอบคลุมช่วงการปลูกข้าวระหว่าง 1 มกราคม–31 กรกฎาคม 2549 ประกอบด้วย อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด ความเร็วลม รังสีแสงอาทิตย์และฝน ดัง Figure 2 เนื่องจาก ในแปลงทดลองไม่มีการตรวจวัดความชื้นสัมพัทธ์จึงใช้อุณหภูมิต่ำสุดประมาณค่าปริมาณความชื้นตามแนวทางของ FAO56 (Allen *et al.*, 1998) อีกส่วนหนึ่งเก็บข้อมูลสถิติรายเดือนของสถานีอุตุ นิยมวิทยาจากอุตุจันบุรี ระหว่าง ปี พ.ศ.2494–พ.ศ. 2560) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการของ SWAT

ข้อมูลดิน ได้ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างดินที่ความลึก 0 cm–30 cm การรวบรวมแบ่งข้อมูลออกเป็นสองส่วน คือ ข้อมูลทางกายภาพและข้อมูลทางศาสตร์ โดยข้อมูลทางกายภาพรวบรวมจากผลวิเคราะห์สมบัติดินจากแปลงทดลอง ประกอบด้วย สัดส่วนของอนุภาคดิน อินทรีย์วัตถุ และความหนาแน่นรวม ส่วนข้อมูลสมบัติทางศาสตร์รวบรวมจาก water retention function (Yingjajaval, 1993) และผลการคำนวณคุณสมบัติจาก pedotranfer fuctions

การปลูกข้าวในแปลงทดลองขนาด 20×20 m² มีการติดตั้งถังวัดการใช้น้ำของข้าว (rice lysimeter)

ทำการหว่านข้าววันที่ 9 มีนาคม 2549 เก็บเกี่ยววันที่12 กรกฎาคม (day after planting (DAP) 125) ใช้ข้าวพันธุ์สุพรรณ 1 ปลูกด้วยการหว่านน้ำตามปริมาณเมล็ดพันธุ์ 25 kg/rai เริ่มให้น้ำหลังหว่านข้าว 20 วัน (DAP20) มีการตรวจสอบระดับน้ำและเติมน้ำให้ซึ่งในแปลง 10 cm ทุกวันพร้อมวัดปริมาณน้ำเข้าแปลงด้วย cut-throat flume และหยุดให้น้ำก่อนการเก็บเกี่ยว 20 วัน (DAP105) มีการให้ปุ๋ยเคมี 2 ครั้ง สูตร 16-20-0 อัตรา 30 kg/rai เมื่อข้าวอายุ 21 วัน (DAP21) และ สูตร 46-0-0 อัตรา 20 kg/rai 48 วัน (DAP48)

การเก็บตัวอย่างเพื่อบันทึกการเติบโตและพัฒนาการของข้าวดำเนินการทุก 7 วัน โดยสุ่มในแปลง 5 ตัวอย่าง เริ่มเก็บเมื่อข้าวอายุ 20 วัน (DAP20) จนถึงวันเก็บเกี่ยว บันทึกข้อมูลความสูงข้าวและน้ำหนัก (ลำต้น ใบ และรวง) ทั้งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง โดยน้ำหนักแห้งได้หลังจากอบที่อุณหภูมิ 85°C ระยะเวลา 48 h

ข้อมูลผลผลิตข้าวต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ได้จากการเก็บเกี่ยวในบล็อกขนาด 1×1 m² จำนวน 4 บล็อก โดยบันทึก ความสูงข้าว จำนวนกอ จำนวนรวง น้ำหนักผลผลิต และ น้ำหนักต่อ 100 เมล็ด

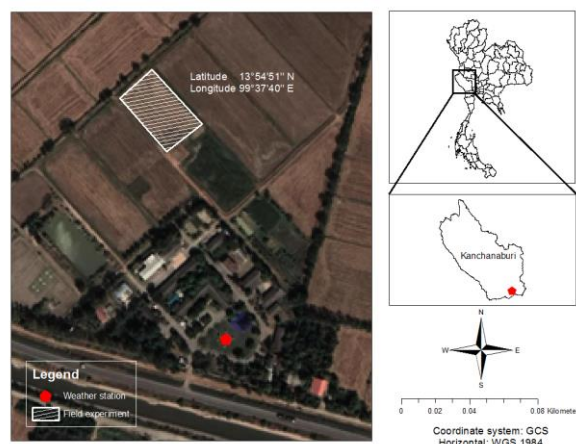


Figure 1 Field experiment plot located at Irrigation Water Management Experiment Station 9 (Tha Muang), Kanchana Buri

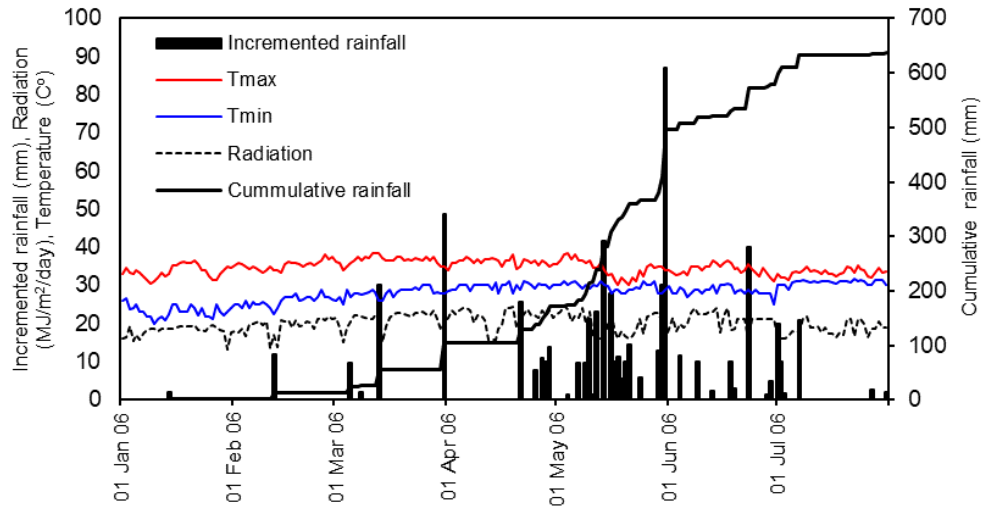


Figure 2 Daily meteorological data at experimental plot (Kanchana Buri) during rice growing period (January 2006–July 2006)

การจัดทำแบบจำลอง DSSAT

การจำลองใช้แบบจำลอง DSSAT version 4.7.0 (Hoogenboom *et al.*, 2017) โดยเตรียม นำเข้าข้อมูลที่รวบรวม (อุตุนิยมวิทยารายวัน, สมบัติดิน, การจัดการ) ข้อมูลพารามิเตอร์ตั้งต้น ของข้าวใช้ข้อมูลของข้าวพันธุ์สุพรรณ 60 ที่ถูก ปรับเทียบแล้วและบันทึกในฐานะข้อมูลพืชของ DSSAT (Cheyglinted *et al.*, 2001; Mankeb, 1993) การจำลองกำหนดระบบการผลิตพืชเป็น ระบบที่มีน้ำเป็นข้อจำกัด (ระดับที่ 2) กิจกรรมการ เพาะปลูกได้กำหนดให้ตรงกับกิจกรรมของแปลง ทดลอง (วันที่เพาะปลูก วันที่เก็บเกี่ยว และการ จัดการแปลง) การปลูกข้าวใช้การหว่านน้ำตม และ การให้น้ำชลประทานกำหนดให้มีน้ำขัง 10 cm ตลอดช่วงการเพาะปลูก และหยุดให้น้ำก่อนเก็บ เกียว 20 วัน

การจัดทำแบบจำลอง SWAT

การจำลองใช้แบบจำลอง SWAT2012 ข้อมูลนำเข้าเป็นข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายวันและ พารามิเตอร์รายเดือน และสมบัติดิน ข้อมูลพืชตั้งต้น ใช้พารามิเตอร์ข้าวในฐานะข้อมูล SWAT (Table 1) เนื่องจาก SWAT ไม่สามารถจำลองระบบการผลิต พืชโดยแบ่งระบบเป็นระดับต่าง ๆ ได้ ดังนั้นการ จำลองระบบเพาะปลูกข้าวโดย SWAT จึงเป็น

ระบบการผลิตพืชซึ่งมีทั้งน้ำและธาตุอาหารเป็น ข้อจำกัด (ระดับที่ 4)

การกำหนดกิจกรรมการเพาะปลูก (วันที่ เพาะปลูก วันที่เก็บเกี่ยว) ได้กำหนดให้ตรงกับ กิจกรรมของแปลงทดลอง การกำหนดวันใช้ รูปแบบ heat units ซึ่งใช้ค่าอุณหภูมิสะสม โดย รายละเอียดการคำนวณได้จากคู่มือใช้งาน SWAT (Neitsch *et al.*, 2011) การปรับเทียบพารามิเตอร์ พืชต้องทำในระบบการผลิตเต็มศักยภาพ กล่าวคือ พืชไม่มีภาวะเครียดจากการขาดน้ำหรือธาตุอาหาร การให้น้ำเต็มตามความต้องการพืชในการจำลอง ด้วย SWAT กำหนดโดยการให้น้ำโดยรักษา ความชื้นในดินให้ไม่น้อยกว่าความชื้นชลประทาน (field capacity) ตลอดการเพาะปลูก และให้ปุ๋ย (46-0-0) เต็มตามความต้องการของข้าวตลอดการ จำลอง

ตัวชี้วัดสมรรถนะแบบจำลอง

ดัชนีทางสถิติสำหรับวัดสมรรถนะ แบบจำลอง (model performance indicator) ประกอบด้วย index of agreement (d-value) (Willmott, 1982) ตามสมการที่ 1 และ percent root mean square error (%RMSE) (Khakbaz *et al.*, 2012; Wallach & Goffinet, 1987, 1989) ตาม สมการที่ 2

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i'| + |O_i'|)^2} \quad (1)$$

โดยที่ O_i คือ ผลการตรวจวัด, P_i คือ ผลการประมาณค่าจากแบบจำลอง, $P_i' = P_i - \bar{O}$, and $O_i' = O_i - \bar{O}$ (\bar{O} คือ ค่าเฉลี่ยของผลการตรวจวัด).

$$\%RMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (2)$$

โดยที่ O_i คือ ผลการตรวจวัด, P_i คือ ผลการประมาณค่าจากแบบจำลอง, \bar{O} คือ ค่าเฉลี่ยของผลการตรวจวัด, และ n คือ จำนวนของผลการตรวจวัด $RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2\right)^{0.5}$

ผลการศึกษา

การเจริญเติบโตและผลผลิตข้าว

น้ำหนักแห้งของชีวมวล (biomass) นับจากวันเริ่มปลูก (day after planting) แสดงใน Figure 3 ส่วน Figure 4 แสดงปริมาณผลผลิต (yield) ในรูปของน้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าว (dry grain) จุดสีด้าเป็นค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง เส้นสีแดงเป็นผลการจำลองของ DSSAT ส่วนเส้นสีน้ำเงินเป็นผลการจำลองจาก SWAT โดยปริมาณผลผลิตของ SWAT (Figure 4) คำนวณเมื่อวันเก็บเกี่ยวเท่านั้น

จาก Figure 3 พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณชีวมวลจากตัวอย่างตั้งเริ่มปลูก (DAP0) จนถึงวันออกดอก (anthesis) เป็น DAP84 ข้าวมีการเติบโตที่เพิ่มขึ้นสม่ำเสมอ ชีวมวลมีอัตราการเพิ่มสูงขึ้น ข้าวเริ่มออกรวงและมีการสะสมอาหารของรวงทำให้ค่าน้ำหนักส่วนผลผลิตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (Figure 4) และวันสุกแก่ทางสรีรวิทยา (physiological maturity) เป็น DAP110 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วย DSSAT และ SWAT พบว่า DSSAT ให้ผลอายุข้าว ทุกช่วงการเจริญเติบโตช้ากว่าผลการตรวจจากแปลงทดลอง โดยมีวันออกดอกนานกว่า 12 วัน (DAP93) และวันสุกแก่ทางสรีรวิทยานานกว่า 11 วัน (DAP122)

ส่วนแบบจำลอง SWAT ให้ผลอายุช่วงสุกแก่ทางสรีรวิทยา เพียงข้อมูลเดียว และมีอายุนานกว่าผลการตรวจวัด 15 วัน (DAP125)

แบบจำลอง DSSAT ซึ่งใช้ค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นเป็นข้าวสุพรรณบุรี 60 ให้ผลการจำลองสอดคล้องและใกล้เคียงกับข้อมูลจากแปลงทดลอง (%RMSE = 23.6%, d = 0.982) ส่วนแบบจำลอง SWAT มีการปรับเทียบพารามิเตอร์ โดยผลการปรับเทียบแสดงใน Table 1 โดยสมรรถนะของ SWAT ดีกว่า DSSAT เล็กน้อย (%RMSE = 21.6%, d = 0.984)

ใน Table 1 แสดงพารามิเตอร์พีชที่ใช้โดย SWAT ประกอบด้วย ค่าพารามิเตอร์ตั้งต้น (initial parameters) และพารามิเตอร์ที่ปรับเทียบ (calibrated parameters) ผลการปรับเทียบมีดังนี้

พารามิเตอร์ BIO_E เป็น radiation use efficiency (RUE) ในการปรับเทียบได้ทำการประเมินทบทวนค่าจากผลการศึกษาของ CERES (Ritchie *et al.*, 1998) ที่แนะนำค่า RUE ของข้าวอยู่ที่ 26-40 MJ/m²/d และผลการศึกษา RUE ของข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 90 วิหว่านน้ำตมได้แนะนำค่าอยู่ที่ 27.7 MJ/m²/d (รังสรรค์, 2538) จากผลการศึกษาข้างต้นจึงได้ทำการทดสอบ RUE ช่วงระหว่าง 22-40 MJ/m²/d (Table 2) พบว่า ค่า RUE ที่เหมาะสมคือ 30 MJ/m²/d ซึ่งให้ค่า %RMSE เท่ากับ 21.6 % และค่า d เท่ากับ 0.984

ค่าอุณหภูมิฐานของข้าว (T_BASE) ปรับจาก 10°C เป็น 9°C โดยใช้เท่ากับแบบจำลอง DSSAT ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อเจริญเติบโตของข้าว (T_OPT) ได้ปรับเพิ่มเป็น 30°C เพื่อให้เหมาะสมกับพืชในเขตร้อนและอุณหภูมิอากาศของประเทศไทย หากค่านี้ต่ำเกินไปจะทำให้พืชเติบโตช้าลงเมื่ออุณหภูมิอากาศสูง

พารามิเตอร์ Heat unit to maturity (HEAT UNITS) มีค่าเท่ากับ 2,902°C ซึ่งคำนวณจากผลต่างสะสมระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันกับอุณหภูมิฐาน (T_BASE) ตั้งแต่วันปลูกจนถึงวันสุก

แก่ทางสรีระวิทยา ความยาวรากสูงสุดของพืช (RDMX) ปรับค่าเป็น 0.3 m พิจารณาจากความลึกการไถพรวน ความสูงของต้นข้าวเมื่อโตเต็มที่ (CHTMX) ปรับค่าเป็น 1.25 m ตามผลจากการเก็บ

ตัวอย่างในแปลงทดลอง และดัชนีการเก็บเกี่ยวสูงสุด (HVSTI) ปรับค่าเป็น 0.75 เนื่องจากในสภาพแวดล้อมที่ปลูกจริงมีปัจจัยลดทอนทำให้ค่าดัชนีการเก็บเกี่ยวจริงมีค่าลดลง

Table 1 SWAT Parameters for rice

Parameter	Description	Unit	Initial value	Calibrated value
BIO_E	Radiation use efficiency	MJ/m ² /d	22	30
T_BASE	Base or minimum temperature of growth	°C	10	9
T_OPT	Optimal temperature of growth	°C	25	30
HEAT UNITS	Heat unit to maturity	°C	1,797	2,902
RDMX	Maximum rooting depth for plant	m	0.9	0.3
CHTMX	Maximum canopy height	m	0.8	1.25
HVSTI	Harvest index for optimal growing condition	fraction	0.5	0.75

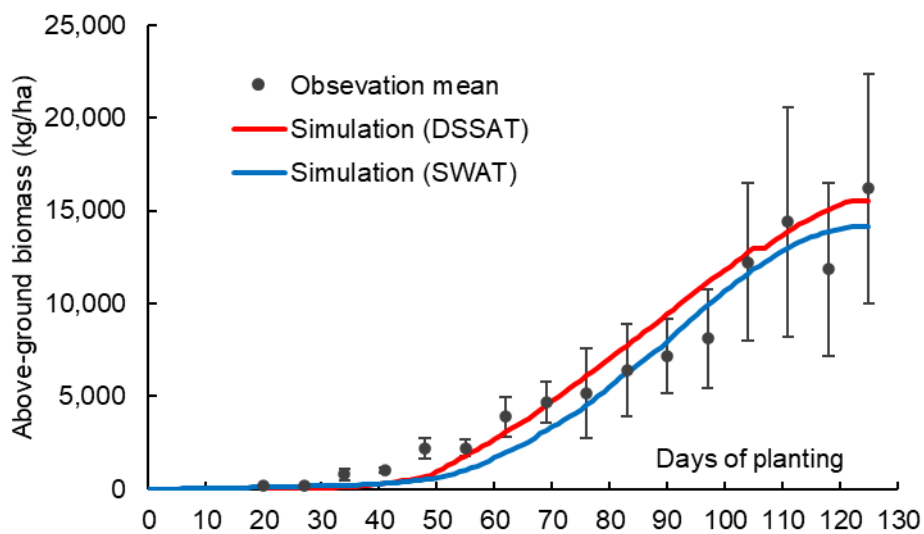


Figure 3 Above-ground biomass of rice from day after planting: mean of samples (black dot) and standard deviation (upper and lower cap), DSSAT estimation (full red line), SWAT estimation (full blue line)

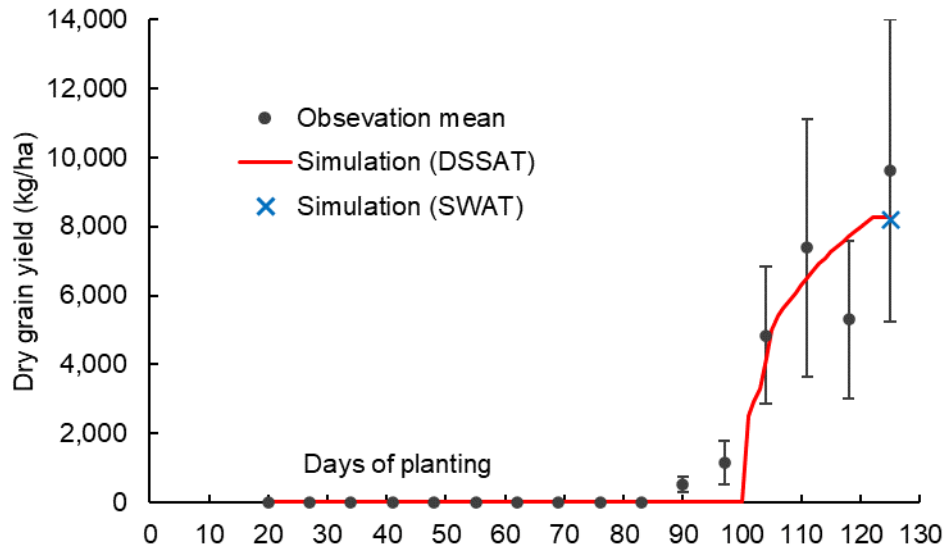


Figure 4 Dry grain yield of rice from day after planting: mean of samples (black dot) and standard deviation (upper and lower cap), DSSAT estimation (full red line), and SWAT estimation (blue rectangle)

Table 2 SWAT model performance on simulation under different values of radiation-use efficiency (BIO_E): the percentage of RMSE (%RMSE) and the index of agreement (d)

BIO_E (MJ/m ² /d)	%RMSE	d
22	43.0	0.917
26	29.7	0.965
30	21.6	0.984
35	26.9	0.978
40	43.0	0.953

ชีวมวลและผลผลิต

ใน Table 3 แสดงองค์ประกอบของผลผลิตเมื่อเก็บเกี่ยว ประกอบด้วย ชีวมวลส่วนเหนือดิน (dry above-ground biomass) ผลผลิตข้าวในรูปเมล็ดแห้ง (dry grain yield) และดัชนีเก็บเกี่ยว (harvest index) จากการเก็บตัวอย่างเป็นต้นได้ชีวมวลส่วนเหนือดิน 16,197.2 kg/ha (2,591.5 kg/rai) ผลผลิตข้าว 9,630.2 kg/ha (1,540.8 kg/rai) และดัชนีเก็บเกี่ยว 59.5 ส่วนจากการเก็บผลผลิตเป็นบล็อกขนาด 1 m² จำนวน 4 บล็อกได้ค่าเฉลี่ยผลผลิตข้าว 7,362.5 kg/ha (1,178.0 kg/rai) ซึ่งต่ำกว่าผลผลิตจากการเก็บตัวอย่างต้นข้าว

การเปรียบเทียบชีวมวลและผลผลิตเมื่อเก็บเกี่ยวจากการจำลอง พบว่า แบบจำลองทั้งสองให้ผลลัพธ์ต่ำกว่าองค์ประกอบผลผลิตที่เก็บตัวอย่างเป็นต้นข้าวเล็กน้อย โดย DSSAT จำลองชีวมวลต่ำกว่า -4.2% ผลผลิตต่ำกว่า -14.1% ดัชนีเก็บเกี่ยวต่ำกว่า -10.4% ส่วน SWAT ให้ชีวมวลต่ำกว่า -12.7% ผลผลิตต่ำกว่า -15.0% ดัชนีเก็บเกี่ยวต่ำกว่า -2.5% แต่เมื่อเทียบผลผลิตกับค่าเฉลี่ยจากการเก็บเป็นบล็อก เนื่องจากเป็นข้อมูลกลุ่มตัวอย่างขนาดใหญ่ทำให้ข้อมูลมีความคลาดเคลื่อนน้อยลง จึงพบว่า แบบจำลองทั้งสองให้ผลลัพธ์สูงกว่าเล็กน้อย โดย DSSAT สูงกว่า +12.4 % ส่วน

SWAT สูงกว่า +11.2 % ในกรณีนี้ SWAT มีสมรรถนะในการประมาณค่าผลผลิตข้าวดีกว่า DSSAT เล็กน้อย เมื่อนำผลการจำลองชีวมวลและผลผลิตข้าวเปรียบเทียบกับงานศึกษาที่ผ่านมาซึ่งใช้แบบจำลอง SWAP ในการจำลองระบบปลูกข้าว จากข้อมูลชุดเดียวกัน (เอกสิทธิ์ และคณะ, 2550) พบว่า SWAP ประมาณค่าชีวมวล 18,890 kg/ha

(3,022.4 kg/rai) และผลผลิตข้าว 7,643 kg/ha (1,222.9 kg/rai) จึงเห็นได้ว่าเมื่อปรับเทียบพารามิเตอร์พืชแล้ว SWAT มีสมรรถนะในการจำลองระบบการปลูกข้าวและประมาณค่าผลผลิตข้าวใกล้เคียงกับแบบจำลองอื่นที่มีการศึกษามาก่อนหน้า

Table 3 Harvested yield components from the experimental plot and simulations (DSSAT and SWAT)

Yield component (unit)	Experiment	DSSAT	SWAT
Dry above-ground biomass (kg/ha)	16,197.2	15,523.0 (-4.2%)	14,133.0 (-12.7%)
Dry grain yield (kg/ha)	9,630.2 ^{1/} (7,362.5) ^{2/}	8,274.0 (-14.1%) (+12.4%)	8,189.8 (-15.0%) (+11.2%)
Harvest index (%)	59.5	53.3 (-10.4%)	57.9 (-2.5%)

Note 1/ Dry grain yield estimated from sampling.

2/ Dry grain yield harvested from 4 blocks of 1 m².

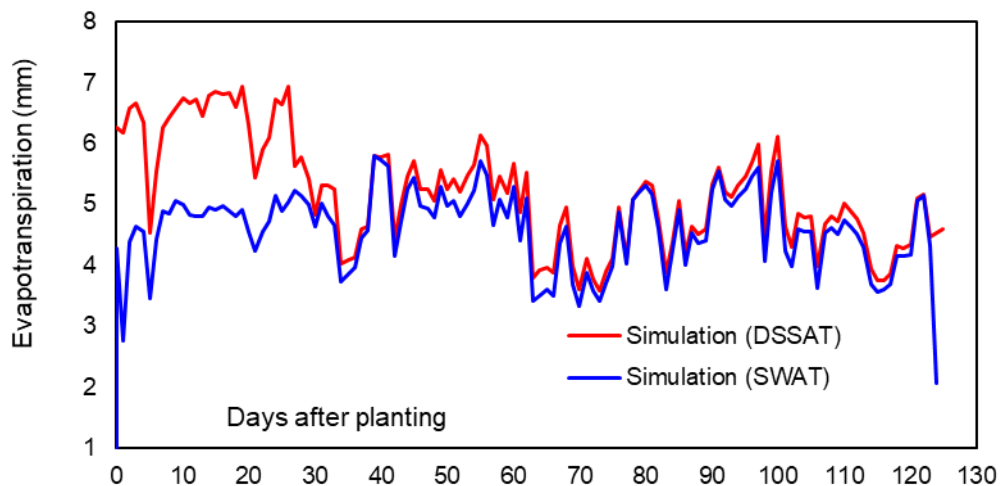


Figure 5 Rice evapotranspiration (ET) from the day after planting estimated by DSSAT (red full line) and SWAT (blue full line)

ปริมาณการใช้น้ำ

ใน Figure 5 แสดงการใช้น้ำของข้าวนับจากวันเริ่มปลูกที่คำนวณด้วย DSSAT (เส้นทึบสีแดง) และ SWAT (เส้นทึบสีน้ำเงิน) พบว่า ปริมาณการใช้น้ำ (ET) จาก DSSAT มีค่าสูงกว่า SWAT ในช่วง 30 วันแรกนับจากวันเริ่มปลูก (DAP0-DAP30) หลังจาก DAP30 แบบจำลองทั้งสองประมาณค่า ET สอดคล้องกัน ความแตกต่างของ

ET ในช่วงแรกเกิดจากสภาพพื้นผิวของแบบจำลองทั้งสองต่างกัน DSSAT สามารถจำลองการให้น้ำชลประทานโดยขังในแปลงได้จึงทำให้มีการระเหยน้ำจากผิวน้ำในปริมาณสูงในช่วงแรกในขณะที่ข้าวยังไม่ขึ้นมาปกคลุม ส่วน SWAT จำลองการให้น้ำชลประทานโดยรักษาปริมาณน้ำในดินไว้ที่ความชื้นชลประทาน จึงทำให้มีการระเหยน้ำจากผิวดินในปริมาณที่ต่ำกว่า

ปริมาณการใช้น้ำของข้าว (rice evapotranspiration) ตลอดฤดูเพาะปลูกคำนวณจาก DSSAT เท่ากับ 659.5 mm และ SWAT เท่ากับ 590.9 mm ซึ่ง DSSAT ประเมินค่าสูงกว่าจากสภาพพื้นผิวที่ต่างกันในช่วงแรก เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์สมดุลน้ำของถึงวัดการใช้น้ำของข้าวซึ่งเท่ากับ 640 mm (รัฐชัย, 2552) จึงเห็นได้ว่าแบบจำลองทั้งสองให้ผลคำนวณปริมาณการใช้น้ำของข้าวสอดคล้องกับข้อมูลตรวจวัด โดย DSSAT ให้ผลการคำนวณมากกว่าผลการตรวจวัด 3.0% ซึ่งใกล้เคียงมากกว่าผลของ SWAT (น้อยกว่า -7.7%) เมื่อเปรียบเทียบกับงานศึกษาที่ผ่านมาซึ่งเป็นการจำลองระบบปลูกข้าวจากข้อมูลชุดเดียวกัน พบว่า SWAP ประเมินค่าการใช้น้ำของข้าว เท่ากับ 566.7 mm (เอกสิทธิ์ และคณะ, 2550) ส่วน ORYZA เท่ากับ 520 mm (รัฐชัย, 2552) จึงเห็นได้ว่า SWAT มีสมรรถนะในการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของข้าวได้ใกล้เคียงกับแบบจำลองอื่นที่มีการศึกษามาก่อนหน้า แต่ยังมีข้อจำกัดในการจำลองการให้น้ำชลประทานในแปลงนาแบบน้ำนอง

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ผลจากแปลงทดลองโดยเก็บตัวอย่างต้นข้าวได้ผลผลิต 9,630.2 kg/ha (1,540.8 kg/rai) ส่วนการเก็บข้อมูลทั้งบล็อกขนาด 1 m² ได้ผลผลิตเฉลี่ย 7,362.5 kg/ha (1,178.0 kg/rai) การใช้น้ำตลอดช่วงเพาะปลูก 640 mm

แบบจำลอง SWAT เมื่อปรับเทียบพารามิเตอร์พีชและกำหนดค่าตั้งต้นที่เหมาะสมมีสมรรถนะในการจำลองระบบการปลูกข้าว การประมาณค่าผลผลิต และปริมาณการใช้น้ำใกล้เคียงกับผลจากแปลงทดลองและแบบจำลอง DSSAT นอกจากนี้ SWAT มีเครื่องมือจัดการข้อมูลภูมิสารสนเทศสำหรับการจำลองพื้นที่ขนาดใหญ่ ถึงกระนั้น การประยุกต์ SWAT สำหรับการจำลองการปลูกข้าวนาสวน (lowland rice) ยังมีข้อจำกัดใน

การจำลองน้ำขังในแปลง ยังต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อกำหนดการจำลองที่เหมาะสมรวมถึงการพัฒนาโปรแกรมสำหรับการปลูกข้าวนาสวน

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และคณะผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงานที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลสำหรับงานวิจัยนี้ประกอบด้วย กรมอุตุนิยมวิทยา กรมพัฒนาที่ดิน กรมชลประทาน และขอขอบคุณกลุ่มผู้พัฒนาโปรแกรม SWAT และ DSSAT ที่มอบลิขสิทธิ์ซอฟต์แวร์สำหรับการศึกษานี้

เอกสารอ้างอิง

จิรวุฒิน เวชแพศน์, ศักดา จงแก้ววัฒนา, อานันท์ ผลวัฒนะ. (2543). การประเมินค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของข้าวสำหรับแบบจำลอง CERES-Rice. ใน *โครงการระบบสนับสนุนการตัดสินใจการผลิตพืช: ข้าวในภาคเหนือ* (น. 141-165). กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.

ณรงค์ศักดิ์ พิมใจใส, เอกสิทธิ์ โสมสิตสกุลชัย. (2563). การประเมินแบบจำลอง SWAT สำหรับวิเคราะห์สมดุลน้ำในนาข้าวพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่. *การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 21. นครราชสีมา.*

นนท์ธิดา เป็ล่งวุฒิกไร, เอกสิทธิ์ โสมสิตสกุลชัย. (2563). การประยุกต์แบบจำลอง AquaCrop ในการจำลองการปลูกข้าวพันธุ์ กข 43 ภายใต้ระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินที่ต่างกัน. *การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 21. นครราชสีมา.*

- เมธี เอกะสิงห์, สศกต์ดำ จงแก้ววัฒนา, อรรถชัย จินตะเวช, ถาวร อ่อนประไพ, พนมศักดิ์ พรหมบุญมย์, จุไรพร แก้วทิพย์, & อานันท์ ผลวัฒน์. (2543). *โครงการระบบสนับสนุนการตัดสินใจการผลิตพืช ข้าวในภาคเหนือ* (รายงานการวิจัย). กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).
- รังสรรค์ อาภาคัพภะกุล. (2538). ประสิทธิภาพการใช้รังสีดวงอาทิตย์ของข้าวภายใต้แบบการทำนาและสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสงขลานครินทร์*, 17(1), 23-33.
- รัฐชัย สายรวมญาติ. (2552). *การวิเคราะห์การใช้น้ำและการรั่วซึมผ่านดินในนาข้าวโดยใช้ถังวัดการใช้น้ำของพืชและแบบจำลอง ORYZA*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2562). *สถิติการค้าสินค้าเกษตรไทยกับต่างประเทศ 2562*. กรุงเทพฯ: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร.
- สุนทร บุรณะวิริยะกุล, อรรถชัย จินตะเวช. (2547). *ฐานข้อมูลข้าวกับการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ของพันธุ์สำหรับแบบจำลอง CERES-Rice*. (รายงานการวิจัย). กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- อรรถชัย จินตะเวช, สุนทร บุรณะวิริยะกุล, ก้อนทอง พวงประโคน, วินัย ศรีวัต และวันทนา เลิศศิริวรกุล. (2547). *ระบบสนับสนุนการตัดสินใจผลผลิตพืชระดับท้องถิ่น: ท้องทุ่งไทย 1.0*. (รายงานการวิจัย). กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- เอกพันธ์ มาเลิศ, เอกสิทธิ์ โสมิตสกุลชัย. (2562). *การประเมินผลของความแปรปรวนภูมิอากาศต่อศักยภาพผลผลิตของข้าวนาสวน ในจังหวัดชัยนาทด้วยแบบจำลอง DSSAT-CERES*. *การประชุมวิชาการด้านการชลประทานและการระบายน้ำแห่งชาติ ครั้งที่ 12*. นนทบุรี: กรมชลประทาน.
- เอกสิทธิ์ โสมิตสกุลชัย, ชาญณรงค์ ตั้งคณาทรัพย์, บัญชา ขวัญยืน, ปราโมทย์ สฤณีจันทร์, พีระศักดิ์ ศรีนิเวศน์, ศุภกิจ ตันวิบูลศักดิ์, ศิริรัตน์ ภูทองสุข, มานัส กองแก้ว, พันธุ์ชัย บุญเพ็ญ, ศรชัย ลีทริภักษ์. (2550). *แบบจำลองการเจริญเติบโตของพืชสำหรับการประเมินผลผลิตและการใช้น้ำของพืชในพื้นที่ชลประทาน: โครงการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำในการเพาะปลูก*. นครปฐม: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.
- Akumaga, U., Tarhule, A., & Yusuf, A. A. (2017). Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 225-234. doi: 10.1016/j.agrformet.2016.08.011.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nation.

- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., van Griensven, A., van Liew, M. W., Kannan, N., & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508. doi: 10.13031/2013.42256.
- Bannayan, M., Kobayashi, K., Marashi, H., & Hoogenboom, G. (2007). Gene-based modelling for rice: An opportunity to enhance the simulation of rice growth and development? *Journal of theoretical biology*, 249(3), 593-605. doi.org/10.1016/j.jtbi.2007.08.022.
- Cheyglinted, S., Ranamukhaarachchi, S., & Singh, G. (2001). Assessment of the CERES-Rice model for rice production in the Central Plain of Thailand. *The Journal of Agricultural Science*, 137(3), 289-298. doi: 10.1017/S0021859601001319.
- Chinsuwan, W., Choun-udom, S., & Phayom, W. (2002). Rice Harvest Losses Assessment. *TSAE Journal*, 9(1), 14-19.
- Donald, C. M., & Hamblin, J. (1976). The Biological Yield and Harvest Index of Cereals as Agronomic and Plant Breeding Criteria. *Advances in Agronomy*, 28, 361-405. doi: 10.1016/S0065-2113(08)60559-3
- Gassman, P. W., Jeong, J., Boulange, J., Narasimhan, B., Kato, T., Somura, H., Watanabe, H., Eguchi, S., Cui, Y., Sakaguchi, A., Hoang Tu, L., Jiang, R., Kim, Jeffrey G. Arnold, M.-K., & Ouyang, W. (2021). Simulation of rice paddy systems in SWAT: A review of previous applications and proposed SWAT+ rice paddy module. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(6), 1-24.
- Gassman, P. W., Sadeghi, A. M., & Srinivasan, R. (2014). Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights. *Journal of Environmental Quality*, 43(1), 1-8. doi: 10.2134/jeq2013.11.0466.
- Hoogenboom, G., Porter, C. H., Shelia, V., Boote, K. J., Singh, U., White, J. W., Hunt, L. A., Ogoshi, R., Lizaso, J. I., Koo, J., Asseng, S., Singels, A., Moreno, L. P., & Jones, J. W. (2017). *Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7*. Florida: DSSAT Foundation.
- Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Shelia, V., Wilkens, P. W., Singh, U., White, J. W., Asseng, S., Lizaso, J. I., Moreno, L. P., Pavan, W., Ogoshi, R., Hunt, L. A., Tsuji, G. Y., & Jones, J. W. (2020). The DSSAT crop modeling ecosystem. In K. J. Boote (Ed.), *Advances in crop modelling for a sustainable agriculture* (pp. 173-216). United Kingdom: Burleigh Dodds.

- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18 (3–4), 235-265. doi: 10.1016/S1161-0301(02)00107-7.
- Kakarndee, I., Kositsakulchai, E. (2020). Comparison between SWAT and SWAT+ for simulating streamflow in a paddy field dominated basin, northeast Thailand. *Proceedings of E3S Web of Conferences (The 13th Thai Society of Agricultural Engineering International Conference)*, 187. doi: 10.1051/e3sconf/202018706002.
- Kositsakulchai, E., Phankamolsil, Y., & Yodjaroen, S. (2021). Future runoff projections based on land change using integrated Markov-Cellular Automata model and Soil Water Assessment Tool in Lam Pachi Basin, Thailand. *Agriculture and Natural Resources*, 55(5), 807-816. doi: 10.34044/j.anres.2021.55.5.11
- Khakbaz, B., Imam, B., Hsu, K., & Sorooshian, S. (2012). From lumped to distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 418- 419, 61- 77. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.02.021
- Mankeb Panya. (1993). *Calibration of genetic coefficients of paddy rice (Oryza sativa L.) for validation of the ceres-rice model in Northern Thailand* (Master's thesis). Chiang Mai: Chiang Mai University.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil & Water Assessment Tool. Theoretical Documentation Version 2009*. Texas: Texas A&M University.
- Pannangpetch, K., Laohasiriwong, S., & Vorasoot, N. (1991). Determination of physiological characteristics to simulate growth of rice variety RD6. In F. W. T. Penning de Vries, H. H. van Laar, & M. J. Kropff (Eds.), *Simulation Systems Analysis for Rice Production (SARP)* (pp. 102- 108) . Natherlands: Centre for Agricultural Publishing and Documentation.
- Penning de Vries, F. W., & Van Laar, H. (1982). *Simulation of plant growth and crop production*. Natherlands: Centre for Agricultural Publishing and Documentation.
- Ritchie, J. T., Singh, U., Godwin, D. C., & Bowen, W. T. (1998). Cereal growth, development and yield. In G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom, & P. K. Thornton (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production* (pp. 79-98). Netherlands: Springer Nature
- Sakaguchi, A., Eguchi, S., & Kasuya, M. (2014). Examination of the water balance of irrigated paddy fields in SWAT 2009 using the curve number procedure and the pothole module. *Soil Science and Plant Nutrition*, 60(4) , 551- 564. doi: 10.1080/00380768.2014.919834

- Sakaguchi, A., Eguchi, S., Kato, T., Kasuya, M., Ono, K., Miyata, A., & Tase, N. (2014). Development and evaluation of a paddy module for improving hydrological simulation in SWAT. *Agricultural Water Management*, 137, 116- 122. doi: 10.1016/j.agwat.2014.01.009
- Singh, U., Ritchie, J. T., & Godwin, D. C. (1993). *A user's guide to CERES Rice-V2.10, Simulation Manual IFDC-SM-4*. United State: International Fertilizer Development Center (IFDC).
- Wallach, D., & Goffinet, B. (1987). Mean squared error of prediction in models for studying ecological and agronomic systems. *Biometrics*, 43(3) . 561- 573. Doi: 10.2307/2531995.
- Wallach, D., & Goffinet, B. (1989). Mean squared error of prediction as a criterion for evaluating and comparing system models. *Ecological Modelling*, 44(3-4) , 299- 306. doi: 10.1016/0304-3800(89)90035-5.
- Wikampapraharn, C., & Kositsakulchai, E. (2010). Evaluation of ORYZA2000 and CERES-Rice models under potential growth condition in the Central Plain of Thailand. *Thai Journal of Agricultural Science*, 43, 17-29.
- Willmott, C. J. (1982) . Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309- 1313. doi: 10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2
- Xie, X., & Cui, Y. (2011). Development and test of SWAT for modeling hydrological processes in irrigation districts with paddy rice. *Journal of Hydrology*, 396(1- 2) , 61- 71. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.10.032.