การประเมินศักยภาพของแบบจำลองการเจริญเติบโตของมันสำปะหลัง CSM-CSCRP-Cassava

Evaluation of the potential of the CSM-CSCRP-Cassava model

โยธิน หินทอง[1] และ ปรเมศ บรรเทิง[1,2*]

Yotin Hinthong[1] and Poramate Banterng[1,2*]

บทคัดย่อ: การประยุกต์ใช้แบบจำลองการเจริญเติบโตของมันสำปะหลัง (CSM-CSCRP-Cassava) เพื่อศึกษาเทคโนโลยีการผลิตมันสำปะหลังที่เหมาะสมเฉพาะพื้นที่ เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยเพิ่มผลผลิตมันสำปะหลังได้ อย่างไรก็ตามก่อนที่จะนำแบบจำลองไปใช้ จำเป็นจะต้องทำการประเมินศักยภาพของแบบจำลองเสียก่อน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของแบบจำลอง CSM-CSCRP-Cassava ดำเนินการโดยปลูกมันสำปะหลังพันธุ์ระยอง 9 เกษตรศาสตร์ 50 และพันธุ์ห้วยบง 80 ที่คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ใน 3 วันปลูก คือ วันที่ 27 พฤศจิกายน 2552 (ต้นฤดูแล้ง) วันที่ 3 เมษายน 2553 (ปลายฤดูแล้ง) และวันที่ 10 กรกฎาคม 2553 (กลางฤดูฝน) วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block (RCB) จำนวน 3 ซ้ำ ขนาดพื้นที่แปลงย่อย 180 ตร.ม. ระยะปลูก 1 ม. x 1 ม. บันทึกข้อมูลดิน ข้อมูลอากาศ ข้อมูลการจัดการ และข้อมูลพืช ในแต่ละวันปลูกทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของมันสำปะหลังทั้ง 3 พันธุ์ ด้วยแบบจำลอง CSM-CSCRP-Cassava โดยใช้ข้อมูลของวันปลูกต้นฤดูแล้งและปลายฤดูแล้ง ซึ่งผลจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม ชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจำลองอายุแตกกิ่งระดับแรกและอายุแตกกิ่งระดับที่สองได้ค่อนข้างดี ทั้ง 2 วันปลูก และสามารถจำลองน้ำหนักแห้งรวม น้ำหนักแห้งต้น น้ำหนักแห้งหัว และน้ำหนักแห้งใบได้ดี สำหรับการประเมินศักยภาพของแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลจากวันปลูกกลางฤดูฝน พบว่า แบบจำลองสามารถจำลองน้ำหนักแห้งรวมและน้ำหนักแห้งหัวได้ดีมาก และสามารถจำลองน้ำหนักแห้งต้นและน้ำหนักแห้งใบได้ในระดับพอใช้ ชี้ให้เห็นว่าแบบจำลอง CSM-CSCRP-Cassava เป็นเครื่องมือทางเลือกอีกชนิดหนึ่ง ที่สามารถใช้ช่วยสนับสนุนการตัดสินใจทางการเกษตรภายใต้สภาพแวดล้อมในประเทศไทยได้

คำสำคัญ: การเจริญเติบโตของพืช, พลังงานทดแทน, พัฒนาการของพืช, พืชเศรษฐกิจ, ระบบสนับสนุนการตัดสินใจ

ABSTRACT: The application of crop growth simulation model for cassava (CSM-CSCRP-Cassava) to determine the suitable technologies for cassava production in a particular area is an alternative means to increasing cassava productivity. However, before using the model, it is necessary to evaluate its potential capability first. The objective of this study was to evaluate the potential of the CSM-CSCRP-Cassava model. Three cassava cultivars (Rayong 9, Kasetsart 50 and Huay Bong 80) were grown on 27 November 2009 (early dry season), 3 April 2010 (late dry season) and 10 July 2010 (mid-rainy season) at the Faculty of Agriculture, Khon Kaen University. A randomized complete block (RCB) design with three replications was used. Plot size was 180 m^2 and plant spacing was 1 m × 1 m. Data

[1] ภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002
Department of Plant Science and Agricultural Resources, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002

[2] ศูนย์วิจัยปรับปรุงพันธุ์พืชเพื่อการเกษตรที่ยั่งยืน คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002
Plant Breeding Research Center for Sustainable Agriculture, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002

* Corresponding author: bporam@kku.ac.th

were recorded on soil, weather, management and plant characteristics for each planting date. The genetic coefficients of the three cassava cultivars were determined using the experimental data from the early and the late dry seasons. The results from genetic coefficient determination showed that the CSM-CSCRP-Cassava model could simulate days to primary branching for both planting dates reasonably well. The model also provided good simulations of total dry weight, stem dry weight, root dry weight and leaf dry weight. For the results of model evaluation using the experimental data from the mid-rainy season, the model provided good simulations for total and root dry weights, and gave fair simulations for stem and leaf dry weights. These results indicated that the CSM-CSCRP-Cassava model could be an alternative tool for decision making in agriculture under the environments of Thailand.
Keywords: crop growth, renewable energy, crop development, economic crop, decision support system

บทนำ

มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอันดับ 4 ของประเทศไทย รองจากยางพารา ข้าว และอ้อย มีมูลค่าการส่งออกประมาณ 60,000 ล้านบาทต่อปี มีพื้นที่ปลูกประมาณ 7 ล้านไร่ สามารถปลูกได้ในหลายสภาพพื้นที่ของประเทศ โดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นแหล่งผลิตที่สำคัญที่สุด อย่างไรก็ตาม ผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ของมันสำปะหลังยังค่อนข้างต่ำ ประมาณ 3 ตันต่อไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2553) การเลือกใช้เทคโนโลยีการผลิตที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มผลผลิตต่อพื้นที่ เช่น การเลือกพันธุ์ที่สามารถปรับตัวได้ดีต่อสภาพแวดล้อมและให้ผลผลิตสูงในท้องที่ การเลือกวันปลูก การให้น้ำ และการเลือกใช้ปุ๋ยที่เหมาะสมต่อพื้นที่ เป็นต้น การศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีการผลิตที่เหมาะสมเฉพาะพื้นที่ จะให้ข้อมูลที่สำคัญต่อการให้คำแนะนำแก่เกษตรกรผู้ปลูกมันสำปะหลังในแต่ละพื้นที่ (วินัย และคณะ, 2543) อย่างไรก็ตาม การศึกษาในลักษณะดังกล่าว ต้องอาศัยการทดลองหลายๆ การทดลอง ซึ่งสิ้นเปลืองเวลา ทรัพยากร และงบประมาณ (Banterng et al., 2004)

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืช เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยสนับสนุนการตัดสินใจทางการเกษตร แบบจำลองการเจริญเติบโตจะแสดงระบบการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืชในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถตอบสนองต่อปัจจัยสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพืช (Jame and Cutforth, 1996; Tsuji et al., 1998; Jones et al., 2003; Miao et al., 2006; Anothai et al., 2008) และมีตัวอย่างการประยุกต์ใช้แบบจำลองการเจริญเติบโตของพืชเพื่อช่วยกำหนดเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการผลิตพืชหลายชนิด เช่น Soler et al. (2007a, b) ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง CSM-CERES-Maize เพื่อศึกษาวันปลูกข้าวโพดที่เหมาะสมในประเทศบราซิล Banterng et al. (2010) ได้ใช้แบบจำลอง CSM-CROPGRO-Soybean เพื่อศึกษาการจัดการที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถั่วเหลืองในประเทศไทย และ Ahmad et al. (2012) ใช้แบบจำลอง CSM-CERES-Rice สำหรับศึกษาความหนาแน่นของประชากรและปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตข้าวในปากีสถาน เป็นต้น ดังนั้นแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืช จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยให้ข้อมูลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในการเลือกใช้เทคโนโลยีการผลิตที่เหมาะสมเฉพาะพื้นที่

แบบจำลองการเจริญเติบโตของมันสำปะหลัง (CSM-CSCRP-Cassava) เป็นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยกลุ่มของนักวิทยาศาสตร์ และได้บรรจุไว้ในโปรแกรมระบบสนับสนุนการตัดสินใจเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีทางการเกษตร (Decision Support System for Agrotechnology Transfer; DSSAT) ร่วมกับแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืชอีกหลายชนิด (Hoogenboom et al., 2004; Hoogenboom et al., 2010) แบบจำลองการเจริญเติบโตของมันสำปะหลังสามารถจำลองพัฒนาการและการเจริญเติบโตของมันสำปะหลัง และแสดงออกถึงความสัมพันธ์ของขบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นในพืช เช่น การสังเคราะห์แสง การหายใจ การคายน้ำ การปันส่วนของอาหารที่สร้าง

ขึ้น เป็นต้น ในการจำลองสถานการณ์การเจริญเติบโตจะใช้ข้อมูลตัวป้อนซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลดิน ข้อมูลอากาศ ข้อมูลการจัดการ ข้อมูลพืช และข้อมูลลักษณะประจำพันธุ์ หรือค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม (genetic coefficients) (Boote et al., 1998; Banterng et al., 2004; Anothai et al., 2008)

โดยทั่วไปแล้ว ก่อนที่จะนำแบบจำลอง CSM-CSCRP-Cassava มาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยสนับสนุนการตัดสินใจทางการเกษตร จะต้องทำการประเมินศักยภาพของแบบจำลองเสียก่อน จนถึงปัจจุบัน การประเมินศักยภาพของแบบจำลอง CSM-CSCRP-Cassava ภายใต้สภาพการเพาะปลูกมันสำปะหลังในเขตร้อน โดยเฉพาะในประเทศไทยยังมีน้อย สุกิจ และ ปิ่นแก้ว (2542) ทำการประเมินแบบจำลอง ในการจำลองสถานการณ์การเจริญเติบโตของมันสำปะหลัง 4 พันธุ์ คือ พันธุ์ระยอง 1 ระยอง 5 ระยอง 90 และพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 โดยใช้แบบจำลอง CSM-CSCRP-Cassava ที่อยู่ใน DSSAT v3.5 แต่ปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาแบบจำลอง CSM-CSCRP-Cassava ต่อเนื่องขึ้นไปอีก และบรรจุไว้ใน DSSAT v4.5 ดังนั้น การศึกษานี้จึงได้ทำการประเมินศักยภาพของ แบบจำลอง CSM-CSCRP-Cassava ใน DSSAT v4.5 เพื่อเพิ่มหลักฐานการประเมินแบบจำลองในเขตร้อน และเพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนศักยภาพของแบบจำลอง CSM-CSCRP-Cassava ก่อนการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้เทคโนโลยีการผลิตมันสำปะหลังที่เหมาะสมเฉพาะพื้นที่

วิธีการศึกษา

ในการประเมินแบบจำลอง CSM-CSCRP-Cassava ต้องใช้ ข้อมูลดิน ข้อมูลอากาศ ข้อมูลการจัดการ ค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของมันสำปะหลัง และข้อมูลพืช เป็นข้อมูลตัวป้อนให้กับแบบจำลอง (IBSNAT, 1988; Boote et al., 1998) เนื่องจากยังไม่มีค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของมันสำปะหลัง ดังนั้นในการศึกษานี้ จึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกคือการทดลองเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม และส่วนที่สองคือ การทดลองเพื่อประเมินศักยภาพของแบบจำลอง

1. การทดลองเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของมันสำปะหลัง 3 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ระยอง 9 เกษตรศาสตร์ 50 และพันธุ์ห้วยบง 80 ซึ่งเป็นมันสำปะหลังพันธุ์แนะนำ ที่ให้ผลผลิตหัวสดและมีเปอร์เซ็นต์แป้งสูง เหมาะกับการใช้ในอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง และเป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล (Table 1) ทำโดยการปลูกมันสำปะหลังใน 2 วันปลูก คือ 27 พฤศจิกายน 2552 (ต้นฤดูแล้ง) และ 3 เมษายน 2553 (ปลายฤดูแล้ง) ที่แปลงทดลองหมวดพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งตั้งอยู่ที่เส้นรุ้งที่ 16° 26' เหนือ เส้นแวงที่ 102° 50' ตะวันออก พื้นที่สูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 210 ม. วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block (RCB) มี 3 ซ้ำ

ก่อนปลูกทำการเก็บข้อมูลดิน โดยสุ่มเก็บตัวอย่างดินทั้งหมด 2 จุด ในแปลงทดลอง ที่ 7 ระดับความลึก คือ 0-15, 15-30, 30-45, 45-60, 60-75, 75-90 และ 90-105 ซม. ดินที่เก็บจากระดับความลึกเดียวกันจากทั้ง 2 จุด นำมารวมกัน และนำไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของดิน ซึ่งคุณสมบัติทางเคมีของดิน ประกอบด้วย (1) ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (2) ความเป็นกรด-ด่างของดิน (3) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (4) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (5) โพแทสเซียมที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (6) ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน ส่วนคุณสมบัติทางกายภาพของดิน ประกอบด้วย (1) เปอร์เซ็นต์ของทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว (2) ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของดิน นอกจากนั้น ยังวัดความหนาแน่นรวมของดินและความชื้นดิน โดยการเจาะเก็บตัวอย่างดิน 2 จุด ในแต่ละระดับความลึกใส่ในกระป๋องเก็บตัวอย่างดิน (soil core)

เตรียมดินก่อนปลูกโดยการไถดะ ไถแปร และไถพรวน อย่างละ 1 ครั้ง ตากดินไว้ 1-2 สัปดาห์ เพื่อกำจัดโรค แมลง และวัชพืช หลังจากนั้นไถยกร่องระยะห่าง 1 ม. เตรียมท่อนพันธุ์ขนาด 15-20 ซม. ปลูกมันสำปะหลังโดยใช้ระยะปลูก 1 ม. x 1 ม. หลุมละ 1 ต้น ขนาดพื้นที่แปลงย่อย 180 ตร.ม. จำนวนต้นทั้งหมด 180 ต้นต่อแปลงย่อย ทำการกำจัดวัชพืช 2 ครั้ง ด้วยวิธีการเขตกรรม โดยครั้งแรกเมื่อมันสำปะหลังอายุประมาณ 30-45 วัน พร้อมทั้งใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กก./ไร่ และเมื่ออายุประมาณ 60-75 วัน กำจัดวัชพืชครั้งที่ 2 พร้อมทั้งใส่ปุ๋ยสูตร 46-0-0 และ 0-0-60 อย่างละ 15 กก./ไร่ โดยวิธีขุดเป็นจุดหรือหลุมข้างต้น ให้น้ำด้วยระบบมินิสปริงเกลอร์ทุกสัปดาห์ เว้นแต่ในสัปดาห์ที่ดินมีความชื้นเพียงพอ

รวบรวมข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่อยู่ใกล้แปลงทดลอง คือ ศูนย์วิจัยพืชไร่ขอนแก่น ซึ่งประกอบด้วย ความเข้มแสงรายวัน (เมก.จ./ตร.ม.) อุณหภูมิต่ำสุดและอุณหภูมิสูงสุดรายวัน (°ซ.) และปริมาณน้ำฝนในแต่ละวัน (มม.) บันทึกข้อมูลการจัดการ ประกอบด้วย ชื่อพันธุ์ วันปลูก ระยะปลูก ความลึกและวิธีการปลูก วันงอก ความหนาแน่นของประชากรพืชต่อตารางเมตร วันที่และปริมาณการให้น้ำและปุ๋ยไนโตรเจน และวันเก็บเกี่ยวผลผลิต นอกจากนั้นยังทำการบันทึกข้อมูลทางด้านพัฒนาการของมันสำปะหลัง ได้แก่ อายุแตกกิ่งระดับที่ 1 และ 2 และบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโต ได้แก่ น้ำหนักแห้งของส่วนต่างๆ ได้แก่ ต้น ใบ หัว และน้ำหนักแห้งรวม โดยเก็บตัวอย่างมันสำปะหลัง ครั้งละ 4 ต้น/แปลงย่อย ในพื้นที่ 4 ตารางเมตร เก็บตัวอย่างครั้งแรกเมื่ออายุครบ 1 เดือน และเก็บตัวอย่างทุกเดือนจนถึงอายุ 12 เดือน

สำหรับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม (model calibration) แบบจำลองการเจริญเติบโต CSM-CSCRP-Cassava มีค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมที่บรรจุไว้ในไฟล์ CSCRP045.CUL ทั้งหมด 16 ลักษณะ (Table 2) แบ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของลักษณะด้านพัฒนาการ (development coefficients) 5 ลักษณะ และค่าสัมประสิทธิ์ด้านการเจริญเติบโต (growth coefficients) 11 ลักษณะ ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของมันสำปะหลังนั้น ค่าที่ได้จากการทดลองจริงไม่สามารถนำมาเป็นค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมได้โดยตรง แต่ต้องทำการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลอง CSM-CSCRP-Cassava โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของมันสำปะหลังพันธุ์ Mcol-1684 ที่มีอยู่ในแบบจำลอง เป็นค่าเริ่มต้น ร่วมกับข้อมูลดิน ข้อมูลอากาศ และข้อมูลการจัดการจากการทดลองในวันปลูกต้นฤดูแล้งและวันปลูกปลายฤดูแล้ง และหลังจากจำลองสถานการณ์แล้ว นำผลที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบกับค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองของทั้งสองวันปลูก จากนั้นปรับค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมที่ละตัว แล้วจำลองสถานการณ์ใหม่ และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าสังเกตที่ได้จากการทดลอง ทำซ้ำเช่นนี้จนกว่าค่าที่ได้จากการจำลอง จะใกล้เคียงและสอดคล้องกับค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองมากที่สุด นอกจากนั้นยังทำการปรับค่าตัวแปรที่เกี่ยวกับความอุดมสมบูรณ์ของดินในแบบจำลอง เพื่อชดเชยคุณสมบัติของดินบางประการที่แบบจำลองไม่สามารถจำลองสถานการณ์ได้ (Banterng et al., 2010)

การปรับค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมของพืชโดยทั่วไป จะเริ่มปรับตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับลักษณะพัฒนาการก่อน คือ อายุวันแตกกิ่งที่ระดับต่างๆ ได้แก่ P1L, P2L, P4L และ P5L คือ อายุการแตกกิ่งระดับที่ 1, 2, 4 และ 5 ตามลำดับ (Table 2) โดยปรับค่าตัวแปรที่ทำให้ผลต่างระหว่างค่าจำลองสถานการณ์และค่าสังเกตจากการทดลองจริงของอายุการแตกกิ่งมีค่าน้อยที่สุด จากนั้นจึงเริ่มปรับค่าของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโต โดยเริ่มปรับที่ตัวแปร PARUE ในไฟล์ชื่อ CSCRP045.ECO ก่อน จากนั้นปรับค่าตัวแปร LA1S, LAXS และ LAXND ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของใบ พร้อมทั้งปรับตัวแปร LAWS และ LLIFA ที่มีผลต่อผลผลิต และตัวแปร STFR ที่มีผลต่อน้ำหนักแห้งต้นและใบ นอกจากนี้ ยังได้ปรับตัวแปร PHINT ซึ่งมีผลต่อน้ำหนักแห้งรวมและน้ำหนักแห้งต้น (Table 2)

การพิจารณาความสอดคล้องของค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าสังเกตจริงจากแปลงทดลอง ของลักษณะด้านการเจริญเติบโต ใช้ค่าทางสถิติ ประกอบด้วยค่า index of agreement (d) ที่เสนอโดย Willmott (1982) และค่า Normalized Root Mean Square Error (RMSEn) ที่เสนอโดย Loague and Green (1991) โดยที่ d มีค่าระหว่าง 0-1 ซึ่งค่า d ที่ใกล้เคียง 1 และค่า RMSEn ต่ำสุด เป็นค่าที่บ่งชี้ว่าค่าสังเกตจริงจากแปลงทดลองและค่าจำลองมีความสอดคล้องกัน ค่าสถิติดังกล่าวคำนวณได้ดังนี้

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} \left(|S'_i| + |O'_i| \right)^2} \right], \quad 0 \le d \le 1 \qquad [1]$$

เมื่อ n = จำนวนค่าสังเกตจริงจากแปลงทดลอง S_i = ค่าจำลอง (simulated value) O_i = ค่าสังเกตจริงจากแปลงทดลอง (observed value) S'_i = ค่าจำลอง - ค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตจริงจากแปลงทดลอง และ O'_i = ค่าสังเกตจริงจากแปลงทดลอง - ค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตจริงจากแปลงทดลอง

$$\text{Root Mean Square Error (RMSE)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (S_i - O_i)^2}{n}} \qquad [2]$$

เมื่อ n = จำนวนค่าสังเกตจริงจากแปลงทดลอง, S_i = ค่าทำนาย (simulated value), O_i = ค่าสังเกตจริงจากแปลงทดลอง (observed value)

$$\text{RMSEn} = \frac{\text{RMSE} * 100}{\bar{O}} \qquad [3]$$

เมื่อ $\bar{O}$ = ค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตจริงจากแปลงทดลอง

2. การทดลองเพื่อประเมินแบบจำลอง

ปลูกมันสำปะหลัง พันธุ์ระยอง 9 เกษตรศาสตร์ 50 และพันธุ์ห้วยบง 80 ที่หมวดพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น วันที่ 10 กรกฎาคม 2553 (กลางฤดูฝน) วางแผนการทดลองแบบ RCB มี 3 ซ้ำ ทำการเก็บตัวอย่างดินก่อนปลูก ดำเนินการปลูกและดูแลรักษา รวมถึงบันทึกข้อมูลเช่นเดียวกับการทดลองเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม

ทำการจำลองสถานการณ์การเจริญเติบโตของมันสำปะหลังทั้ง 3 พันธุ์ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมที่ได้จากการทดลองในข้อ 1 เป็นข้อมูลตัวป้อนให้กับแบบจำลอง ร่วมกับข้อมูลดิน ข้อมูลอากาศ และข้อมูลการจัดการ ที่รวบรวมได้จากวันปลูกกลางฤดูฝน และก่อนจำลองสถานการณ์ ยังทำการปรับค่าตัวแปรที่เกี่ยวกับความอุดมสมบูรณ์ของดินในแบบจำลอง (Banterng et al., 2010) จากนั้นพิจารณาความสอดคล้องระหว่างผลที่ได้จากการปลูกทดสอบจริงและผลที่ได้จากแบบจำลอง สำหรับลักษณะพัฒนาการพิจารณาจากผลต่างของข้อมูลทั้ง 2 แหล่ง และสำหรับลักษณะด้านการเจริญเติบโตพิจารณาจากค่า d-index และค่า RMSEn

ผลการศึกษา

จากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของมันสำปะหลัง 3 พันธุ์ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากงานทดลองใน 2 วันปลูก คือ วันปลูกต้นฤดูแล้ง และวันปลูกปลายฤดูแล้ง ภายใต้สภาพแวดล้อมของจังหวัดขอนแก่น โดยใช้แบบจำลองการเจริญเติบโต CSM-CSCRP-Cassava พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของมันสำปะหลัง 3 พันธุ์ที่ได้ มีความแตกต่างกันในหลายลักษณะ (**Table 2**) แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองสามารถจำแนกลักษณะที่ต่างกันของแต่ละพันธุ์ได้ ในด้านความสอดคล้องของค่าจำลองและค่าสังเกตจริงจากการทดลอง พบว่า ความแตกต่างระหว่างค่าจำลองสถานการณ์กับค่าสังเกตจริงจากการทดลองของอายุแตกกิ่งระดับแรก ในวันปลูกต้นฤดูแล้งและวันปลูกปลายฤดูแล้ง สำหรับพันธุ์ระยอง 9 เท่ากับ 18 และ 19 วัน ตามลำดับ (**Table 3**) สำหรับพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 เท่ากับ 23 และ 22 วัน ตามลำดับ และสำหรับพันธุ์ห้วยบง 80 เท่ากับ 28 และ 26 วัน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอายุแตกกิ่งระดับที่สอง พบว่าค่าจำลองสถานการณ์และค่าสังเกตจริงจากการ

ทดลองของพันธุ์ระยอง 9 ไม่แตกต่างกัน ทั้ง 2 วันปลูก ทั้งนี้เนื่องจากไม่พบการแตกกิ่งในระดับที่สองของพันธุ์ระยอง 9 ตลอดช่วงอายุ 12 เดือน ซึ่งเป็นลักษณะประจำพันธุ์ของพันธุ์นี้ ส่วนความแตกต่างระหว่างค่าจำลองสถานการณ์กับค่าสังเกตจริงจากการทดลองจริง ในวันปลูกต้นฤดูแล้งและวันปลูกปลายฤดูแล้งของพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 เท่ากับ 25 วัน ทั้ง 2 วันปลูก และของพันธุ์ห้วยบง 80 มีค่าเท่ากับ 13 และ 12 วัน ตามลำดับ

สำหรับความสอดคล้องระหว่างค่าจำลองสถานการณ์และค่าสังเกตจริงจากการทดลองของลักษณะการเจริญเติบโต พบว่า ค่าสังเกตจริงจากการทดลอง มีความแปรปรวนค่อนข้างมากโดยเฉพาะในวันปลูกปลายฤดูแล้ง ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของความอุดมสมบูรณ์ของดินในแต่ละซ้ำ และแบบจำลองสามารถจำลองน้ำหนักแห้งรวม น้ำหนักแห้งต้น และน้ำหนักแห้งหัว ของมันสำปะหลัง 3 พันธุ์ ในทั้ง 2 วันปลูก ได้ดี (**Figure 1** และ **Figure 2**) ดังจะเห็นได้จากในวันปลูกต้นฤดูแล้ง น้ำหนักแห้งรวม น้ำหนักแห้งต้น และน้ำหนักแห้งหัว มีค่า RMSEn อยู่ระหว่าง 23.04-25.95%, 27.19-31.85% และ 24.57-26.90% ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 24.45%, 28.81% และ 26.01% ตามลำดับ และมีค่า d-index อยู่ระหว่าง 0.983-0.986, 0.969-0.975 และ 0.968-0.978 ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.985, 0.972 และ 0.974 ตามลำดับ ส่วนวันปลูกปลายฤดูแล้ง น้ำหนักแห้งรวม น้ำหนักแห้งต้น และน้ำหนักแห้งหัว มีค่า RMSEn อยู่ระหว่าง 9.58-15.30%, 22.76-28.89% และ 8.69-16.10% ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.88%, 26.36% และ 11.21% ตามลำดับ และมีค่า d-index อยู่ระหว่าง 0.991-0.996, 0.954-0.972 และ 0.966-0.989 ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.994, 0.962 และ 0.981 ตามลำดับ (**Table 4**) ในส่วนของน้ำหนักแห้งใบ พบว่า แบบจำลองสามารถจำลองได้ในระดับพอใช้ ในทั้ง 2 ฤดู โดยมีค่า RMSEn สำหรับวันปลูกต้นฤดูแล้งอยู่ระหว่าง 56.73-87.30% ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 72.74 ส่วนค่า d-index อยู่ระหว่าง 0.572-0.729 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.632 ส่วนวันปลูกปลายฤดูแล้งมีค่า RMSEn อยู่ระหว่าง 72.4-97.97% ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 85.39 ส่วนค่า d-index อยู่ระหว่าง 0.571-0.681 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.615 (**Table 4**)

สำหรับผลจากการประเมินศักยภาพของแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลจากวันปลูกกลางฤดูฝน พบว่า ค่าจำลองอายุแตกกิ่งระดับแรกของมันสำปะหลังพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 และพันธุ์ห้วยบง 80 มีค่าใกล้เคียงกับค่าสังเกตจริงจากการทดลอง โดยมีความแตกต่างเท่ากับ 1 และ 5 วัน ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ระยอง 9 มีค่าจำลองอายุแตกกิ่งระดับแรกแตกต่างกับค่าสังเกตจริงจากการทดลองค่อนข้างมาก โดยมีความแตกต่างเท่ากับ 40 วัน ส่วนอายุแตกกิ่งระดับที่สอง พบว่า พันธุ์ระยอง 9 ไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าจำลองสถานการณ์กับค่าสังเกตจริงจากการทดลอง เนื่องจากไม่พบการแตกกิ่งในระดับที่สองทั้งจากการทดลองจริงและการจำลองสถานการณ์ ส่วนพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 และพันธุ์ห้วยบง 80 มีค่าความแตกต่างระหว่างค่าจำลองสถานการณ์กับค่าสังเกตจริงจากการทดลองของอายุแตกกิ่งระดับที่สองเท่ากับ 28 และ 25 วัน ตามลำดับ (**Table 5**)

จากการประเมินแบบจำลอง โดยการพิจารณาความสอดคล้องระหว่างค่าจำลองสถานการณ์กับค่าสังเกตจริงจากการทดลองของลักษณะด้านการเจริญเติบโต พบว่า แบบจำลองสามารถจำลองน้ำหนักแห้งหัวและน้ำหนักแห้งรวมของมันสำปะหลังทั้ง 3 พันธุ์ ในวันปลูกกลางฤดูฝนได้ดี (**Figure 3**) โดยมีค่า RMSEn สำหรับน้ำหนักแห้งหัวและน้ำหนักแห้งรวมอยู่ระหว่าง 19.19-23.88% และ 18.52-35.18% ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 20.86% และ 26.75% ตามลำดับ ส่วนค่า d-index อยู่ระหว่าง 0.973-0.983 และ 0.964-0.989 ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.978 และ 0.977 ตามลำดับ (**Table 6**)

สำหรับการประเมินความสอดคล้องระหว่างค่าจำลองสถานการณ์กับค่าสังเกตจริงจากการทดลองของน้ำหนักแห้งต้นและน้ำหนักแห้งใบ พบว่า แบบจำลองสามารถจำลองลักษณะดังกล่าวได้ในระดับ

พอใช้ โดยมีค่า RMSEn สำหรับน้ำหนักแห้งต้นและน้ำหนักแห้งใบ อยู่ระหว่าง 91.28-108.03% และ 86.81-118.86% ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 101.62% และ 97.52% ตามลำดับ ส่วนค่า d-index อยู่ระหว่าง 0.802-0.841 และ 0.550-0.652 ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.818 และ 0.593 ตามลำดับ (Table 6) จะเห็นได้ว่า น้ำหนักแห้งต้นและน้ำหนักแห้งใบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ของมันสำปะหลังทุกพันธุ์ มีค่าสูงกว่าค่าสังเกตจริงจากการทดลอง เนื่องจากมันสำปะหลังที่ปลูกกลางฤดูฝนจะได้รับอิทธิพลของฤดูแล้ง ในช่วงอายุ 4-7 เดือน ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนและอุณหภูมิต่ำ ทำให้ลำต้นเตี้ยและจำนวนใบน้อยจากการทิ้งใบเมื่อเข้าสู่ช่วงฤดูแล้ง ทำให้การเจริญเติบโตทางลำต้นและใบน้อยกว่าในวันปลูกต้นฤดูแล้งและวันปลูกปลายฤดูแล้ง ซึ่งข้อมูลที่ได้จากทั้ง 2 วันปลูก เป็นชุดข้อมูลที่นำมาใช้ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม นอกจากนี้ แบบจำลอง CSM-CSCRP-Cassava ยังไม่มีความสามารถในการตอบสนองต่อความเสียหายจากการทำลายของโรคและแมลง แต่ในบางช่วงของการเจริญเติบโต มีโรคและแมลงศัตรูเข้าทำลาย โดยเฉพาะการระบาดของเพลี้ยแป้งมันสำปะหลังและไรแดง ถึงแม้ว่าในการทดลองได้มีการควบคุมและกำจัดศัตรูพืช แต่ยังควบคุมได้ไม่ดีพอ

โดยรวม ผลจากการประเมินศักยภาพของแบบจำลอง CSM-CSCRP-Cassava ชี้ให้เห็นว่า แบบจำลองสามารถที่จะจำลองการเจริญเติบโตของมันสำปะหลัง 3 พันธุ์ ได้ดี จึงน่าจะเป็นเครื่องมือทางเลือกสำหรับช่วยสนับสนุนการตัดสินใจเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการผลิตมันสำปะหลังในประเทศไทยได้ ดังเช่นตัวอย่างของการประยุกต์ใช้แบบจำลองการเจริญเติบโตของพืชในงานลักษณะนี้ ที่มีแล้วในหลายพืช (Soler et al., 2007a, b; Banterng et al., 2010; Ahmad et al., 2012)

สรุป

ผลจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของมันสำปะหลัง 3 พันธุ์ โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองใน 2 วันปลูก คือ ต้นฤดูแล้งและปลายฤดูแล้ง พบว่า แบบจำลอง CSM-CSCRP-Cassava สามารถจำลองอายุแตกกิ่งระดับแรกและอายุแตกกิ่งระดับที่สองได้ค่อนข้างดี ในทั้ง 2 วันปลูก และแบบจำลองสามารถจำลองน้ำหนักแห้งรวม ต้น หัว และน้ำหนักแห้งใบได้ดีมาก ในทั้ง 2 วันปลูก

ผลจากการประเมินศักยภาพของแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลจากวันปลูกกลางฤดูฝน และค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมที่ประมาณได้จากวันปลูกต้นฤดูแล้งและปลายฤดูแล้ง พบว่า แบบจำลองสามารถจำลองน้ำหนักแห้งรวมและน้ำหนักแห้งหัวได้ดีมาก และสามารถจำลองน้ำหนักแห้งต้นและน้ำหนักแห้งใบได้ในระดับพอใช้ ดังนั้น แบบจำลอง CSM-CSCRP-Cassava จึงน่าจะเป็นเครื่องมือทางเลือกอีกชนิดหนึ่ง ที่จะใช้ช่วยสนับสนุนการตัดสินใจทางการเกษตรภายใต้สภาพแวดล้อมในประเทศไทยได้

Table 1 Cassava cultivars used in this study.

Cultivar	Source
Rayong 9	Mahasarakham Agricultural Research and Development Center, Thailand
Kasetsart 50	National Corn and Sorghum Research Center, Thailand
Huay Bong 80	The Thai Tapioca Development Institute, Thailand

Table 2 Genetic coefficients of 3 cassava cultivars.

Cultivar trait	Abbreviation	Unit	Cultivar name		
			Rayong 9	Kasetsart 50	Huay Bong 80
Phenology parameters					
1. Photoperiod sensitivity for phase n.	PPSn	Percent drop for 10h pp.change	0	0	0
2. Duration of phase 1	P1L	Leaf number	276	191	140
3. Duration of phase 2	P2L	Leaf number	0	54	82
4. Duration of phase 4	P4L	Leaf number	20	20	20
5. Duration of phase 5	P5L	Leaf number	200	200	200
Growth parameters					
6. Storage root number per unit canopy weight at initiation	SR#W	no./g	0.25	0.25	0.25
7. Storage root fraction of assimilate used for non-root growth	SRFR	no.	0.25	0.25	0.25
8. Area/leaf of the first leaves when growing without stress.	LA1S	cm^2	250	300	200
9. Area/leaf multiplied by branch number at maximum area/leaf	LAXS	cm^2	1700	1950	1600
10. Node number at which maximum area/leaf reached	LAXND	no.	120	150	80
11. End of cycle area/leaf multiplied by branch number	LAFS	cm^2	30	30	30
12. Node number at which the end of cycle area/leaf reached	LAFND	no.	150	150	150
13. Leaf area/weight ratio when crop growing without stress	LAWS	cm^2/g	195	210	200
14. Interval between leaf tip appearances for first leaves	PHINT	Degree Celsius/d	16	17	17
15. Leaf life, from full expansion to start senescence	LLIFA	Phyllocrons	15	14	15
16. Stem fraction of assimilate destined for canopy growth	STFR	no.	0.27	0.32	0.29

Table 3 The different between simulated and observed values for duration of developmental stages obtained from model calibration for 3 cassava cultivars in the both early dry season in 2009 and late dry season in 2010.

Cultivars and branching	Simulation - Observation (Days after planting)	
	Early dry season in 2009	Late dry season in 2010
Rayong 9		
1st branching date	18	-19
2nd branching date	0	0
Kasetsart 50		
1st branching date	-23	22
2nd branching date	-25	25
Huay Bong 80		
1st branching date	28	-26
2nd branching date	13	-12

Table 4 The values for RMSEn (%) and d-index obtained from model calibration for 3 cassava cultivars in the both early dry season in 2009 and late dry season in 2010.

Crop characteristic	Early dry season				Late dry season			
	RMSEn (%)		d-index		RMSEn (%)		d-index	
(kg/ha)	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average
Total dry weight	23.04-25.95	24.45	0.983-0.986	0.985	9.58-15.30	11.88	0.991-0.996	0.994
Stem dry weight	27.19-31.85	28.81	0.969-0.975	0.972	22.76-28.89	26.36	0.954-0.972	0.962
Leaf dry weight	56.73-87.30	72.74	0.572-0.729	0.632	72.40-97.97	85.39	0.571-0.681	0.615
Storage root dry weight	24.57-26.90	26.01	0.968-0.978	0.974	8.69-16.10	11.21	0.966-0.989	0.981

Table 5 The different between simulated and observed values for duration of developmental stages obtained from model evaluation for 3 cassava cultivars in mid-rainy season in 2010.

Cultivars and branching	Simulation - Observation
	(Days after planting)
Rayong 9	
1st branching date	40
2nd branching date	0
Kasetsart 50	
1st branching date	-1
2nd branching date	28
Huay Bong 80	
1st branching date	5
2nd branching date	25

Table 6 The values for RMSEn (%) and d-index obtained from model evaluation for 3 cassava cultivars in mid-rainy season in 2010.

Crop characteristic	RMSEn (%)		d-index	
(kg/ha)	Range	Average	Range	Average
Total dry weight	18.52-35.18	26.75	0.964-0.989	0.977
Stem dry weight	91.28-108.03	101.62	0.802-0.841	0.818
Leaf dry weight	86.81-118.86	97.52	0.550-0.652	0.593
Storage root dry weight	19.19-23.88	20.86	0.973-0.983	0.978

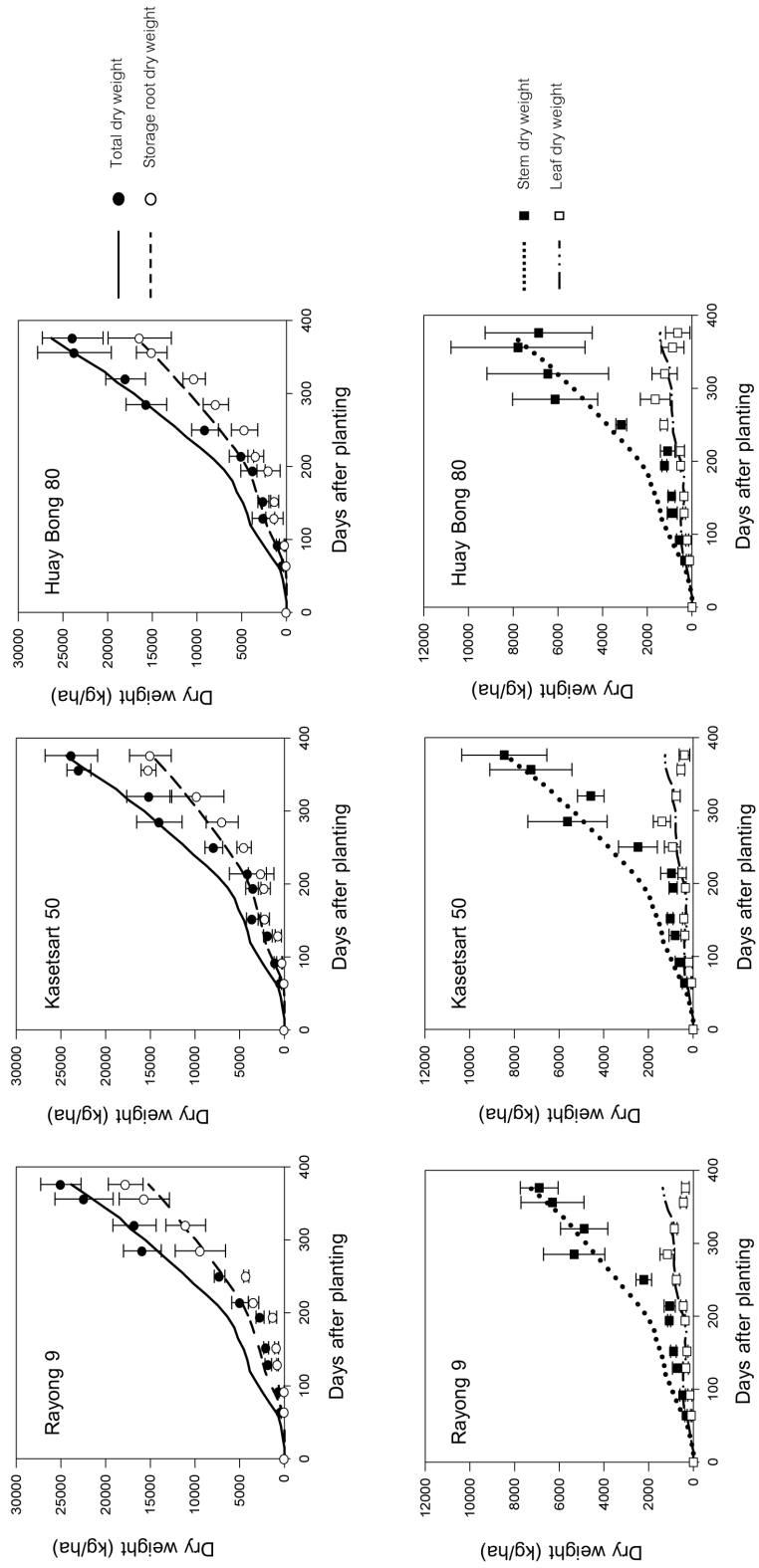

Figure 1 Comparison of simulated (lines) and observed (symbols) values for total, stem, leaf and storage root dry weights obtained from model calibration for 3 cassava cultivars in early dry season in 2009.

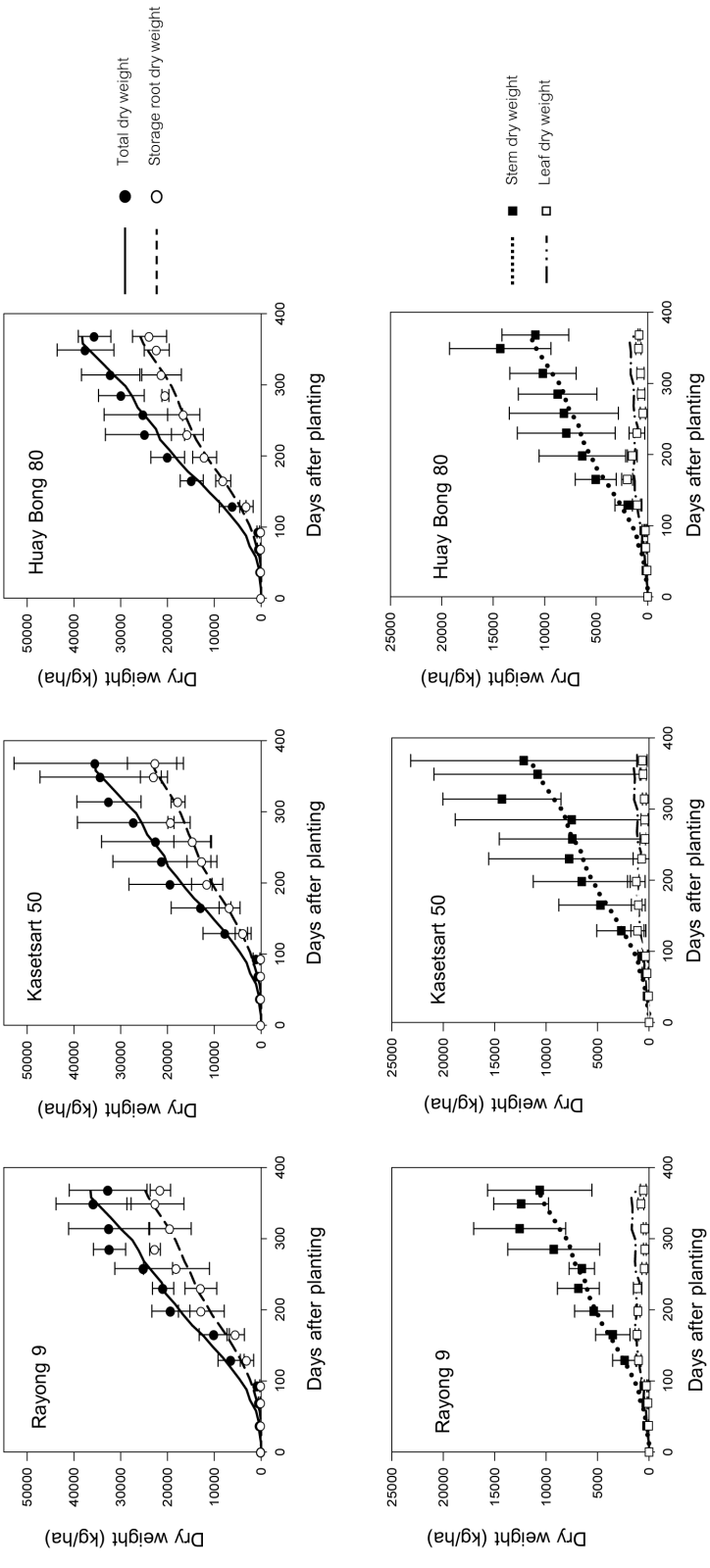

Figure 2 Comparison of simulated (lines) and observed (symbols) values for total, stem, leaf and storage root dry weights obtained from model calibration for 3 cassava cultivars in late dry season in 2010.

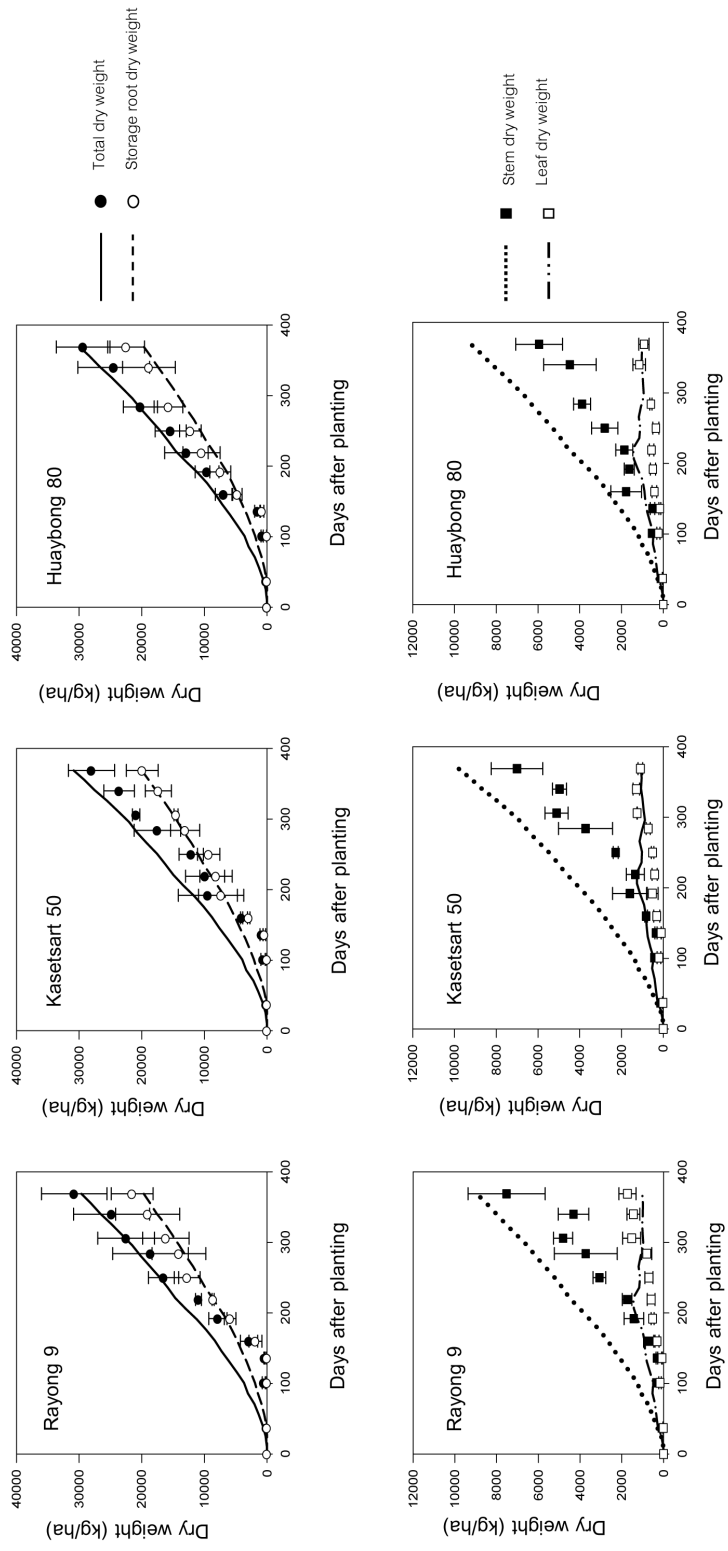

Figure 3 Comparison of simulated (lines) and observed (symbols) values for total, stem, leaf and storage root dry weights obtained from model evaluation for 3 cassava cultivars in mid-rainy season in 2010.

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยปรับปรุงพันธุ์พืชเพื่อการเกษตรที่ยั่งยืน คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนทุนในการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

วินัย ศรวัต, เพียงเพ็ญ ศรวัต และสุกิจ รัตนศรีวงษ์. 2543. การเจริญเติบโตและพัฒนาการของมันสำปะหลังพันธุ์แนะนำ 4 พันธุ์. สถาบันวิจัยพืชไร่ กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สุกิจ รัตนศรีวงษ์ และปิ่นแก้ว ค้อชากุล. 2542. การเจริญเติบโตและพัฒนาการของมันสำปะหลังพันธุ์แนะนำ 4 พันธุ์ ในช่วงปลายฤดูฝน. สถาบันวิจัยพืชไร่ กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2553. ข้อมูลพื้นฐานเศรษฐกิจการเกษตร ปี 2553. เอกสารสถิติการเกษตรเลขที่ 416. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

Ahmad, S., A. Ahmad, C.M. Tojo Soler, H. Ali, M. Zia-Ul-Haq, J. Anothai, A. Hussain, G. Hoogenboom, and M. Hasanuzzaman. 2012. Application of the CSM-CERES-Rice model for evaluation of plant density and nitrogen management of fine transplanted rice for an irrigated semiarid environment. Precis Agric. 13: 200-218.

Anothai, J., A. Patanothai, S. Jogloy, K. Pannangpetch, K.J. Boote, and G. Hoogenboom. 2008. A sequential approach for determining the cultivar coefficients of peanut lines using end of season data of crop performance trials. Field Crops Res. 108: 169-178.

Banterng, P., A. Patanothai, K. Pannangpetch, S. Jogloy, and G. Hoogenboom. 2004. Determination and evaluation of genetic coefficients of peanut lines for breeding applications. Eur. J. Agron. 21: 297-310.

Banterng, P., G. Hoogenboom, A. Patannothai, P. Singh, S.P. Wani, P. Pathak, S. Tongpoonpol, S. Atichart, P. Srihaban, S. Buranaviriyakul, A. Jintrawet, and T.C. Nguyen. 2010. Application of the cropping system model (CSM)-CROPGRO-Soybean for determining optimum management strategies for soybean in tropical environments. J Agron Crop Sci. 196: 231-242.

Boote, K.J., J.W. Jones, and G. Hoogenboom. 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO MODEL. In: Peart, R.M., Curry, R.B. (Eds.), Agricultural Systems Modeling and Simulation. Marcel Dekker, New York, pp. 651-692.

Hoogenboom, G., J.W. Jones, P.W. Wilkens, C.H. Porter, K.J. Boote, L.A. Hunt, U. Singh, J.L. Lizaso, J.W. White, O. Uryasev, F.S. Royce, R. Ogoshi, A.J. Gijsman, and G.Y. Tsuji. 2010. Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version (DSSAT) 4.5 [CD-ROM]. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.

Hoogenboom, G., J.W. Jones, P.W. Wilken, C.H. Porter, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, K.J. Boote, U. Singh, O. Uryasev, W. T. Bowen, A.J. Gijsman, A. du Toit, J.W. White, and G.Y. Tsuji. 2004. Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0 [CD-ROM]. University of Hawaii Honolulu, Hawaii.

IBSNAT. 1988. Technical Report 1: Experimental design and data collection procedure for IBSNAT (Internation Benchmark Site Network for Agrotechnology Transfer Project). The minimum data sets for systems analysis and crop simulation, 3th ed, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.

Jame, Y.W., and H.W. Cutforth. 1996. Crop growth models for decision support systems. Can. J. Plant Sci. 76: 9-19.

Jones, J.W., G. Hoogenboom, C.H. Porter, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, P.W. Wilkens, U. Singh, A.J. Gijsman, and J.L. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. Eur. J. Agron. 18: 235-265.

Loangue, K., and R.F. Green. 1991. Statistic and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. J. Contam. Hydrol. 7: 51-73.

Miao, Y., D.J. Mulla, W.D. Batchelor, J.O. Paz, P.C. Robert, and M. Wiebers. 2006. Evaluating management zone optimal nitrogen rates with a crop growth model. Agron. J. 98: 545-553.

Soler, C.M.T., G. Hoogenboom, P.C. Sentelhas, and A.P. Duarte. 2007a. Growth analysis of maize grown off-season in a subtropical environment under rainfed and irrigated conditions. J Agron Crop Sci. 193: 247-261.

Soler, C.M.T., P.C. Sentelhas, and G. Hoogenboom. 2007b. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. Eur J Agron. 27: 165-177.

Tsuji, G.Y., G. Hoogenboom, and P.K. Thornton. 1998. Understanding Options for Agricultural Production. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

Willmott, C.T. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bull. Amer. Meteor. Soc. 63: 1309-1313.