บทนำ

เป็นระยะเวลามากกว่า 40 ปี แล้วที่แบบจำลองการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิดได้ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อใช้เป็นเครื่องมือช่วยสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการวิจัยทางการเกษตร หลักการทำงานของแบบจำลอง คือการประมวลความสัมพันธ์ระหว่างระบบการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืชกับสภาพแวดล้อมภายนอก เช่น อุณหภูมิ ความเข้มแสง ความชื้น และความอุดมสมบูรณ์ของดิน ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ ภายใต้การทำงานของระบบคอมพิวเตอร์ (Penning de Vries *et al*., 1993) โดยแบบจำลองเหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับงานทางด้านการปรับปรุงพันธุ์พืช เช่น การกำหนดลักษณะของพืชที่มีศักยภาพในการให้ผลผลิตสูง การทำความเข้าใจเกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมกับสภาพแวดล้อม และการจำลองผลผลิตของสายพันธุ์ในหลายสภาพแวดล้อมเพื่อการคัดเลือกพันธุ์ เป็นต้น (Aggarwal *et al*., 1995; White, 1998; White and Hoogenboom, 1996) นอกจากนี้แล้วยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการประเมินความเสี่ยงในการผลิตภายใต้สภาพอากาศที่มีความแปรปรวน การประเมินผลผลิตของพืชในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน และการศึกษาหาระยะปลูกและการจัดการที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร (Egli and Bruening, 1992; Meinke *et al*., 1993; Aggarwal and Kalra, 1994; Meinke and Hammer, 1995) ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบันแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืชได้มีการปรับปรุงและพัฒนามาอย่างต่อเนื่องทำให้มีความก้าวหน้าไปมาก พร้อมทั้งองค์ความรู้เกี่ยวกับการตอบสนองทางด้านสรีรวิทยาและชีวเคมีของพืชต่อการจัดการและสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันมีเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งหนึ่งในแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืชที่มีนักวิจัยจากทั่วโลกนำไปใช้กันอย่างกว้างขวางไม่ต่ำกว่า 20 ปี (Jones *et al*., 2003) คือ โปรแกรมสำเร็จรูปที่เรียกว่า “ระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการถ่ายทอดเทคโนโลยีทางการเกษตร (Decision Support System for Agrotechnology Transfer; DSSAT)” ที่มีการบรรจุแบบจำลองของพืชต่าง ๆ ไว้ถึง 16 ชนิด เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ทานตะวัน ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ข้าวสาลี และข้าว เป็นต้น โดยพื้นฐานแล้วแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืชเหล่านี้ จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลตัวป้อนที่สำคัญ ประกอบด้วย ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของพืช ข้อมูลดิน ข้อมูลสภาพภูมิอากาศรายวัน และข้อมูลการจัดการ (Jones *et al*., 1994)

แบบจำลองการเจริญเติบโตของข้าว (CERES-Rice model) เป็นแบบจำลองหนึ่งที่ถูกบรรจุไว้ในโปรแกรม DSSAT (Hoogenboom *et al*., 2004) แบบจำลองดังกล่าวสามารถจำลองความสมดุลของคาร์บอน น้ำ และไนโตรเจน แบบจำลองได้อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นในต้นพืช เช่น พัฒนาการของพืช การสังเคราะห์แสง การหายใจ การใช้น้ำ การเจริญเติบโต และการปันส่วนของอาหารที่ถูกสร้างขึ้น กับปัจจัยสภาพแวดล้อม เช่น ความเข้มแสง ความเป็นประโยชน์ของน้ำในดิน และอุณหภูมิรายวัน นอกจากนี้แล้ว แบบจำลองยังใช้ลักษณะจำเพาะพันธุ์ของข้าวแต่ละพันธุ์ เพื่อจำลองการเจริญเติบโตและพัฒนาการรายวัน ที่ตอบสนองต่อสภาพอากาศ ดิน และการจัดการที่แตกต่าง

กัน ซึ่งลักษณะจำเพาะพันธุ์ดังกล่าว โดยทั่วไปเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม (genetic coefficients; GCs)

ปัจจุบันมีกลุ่มนักวิจัยได้ทำการทดสอบและนำแบบจำลอง CERES-Rice มาใช้เป็นเครื่องมือช่วยสนับสนุนการตัดสินใจทางการเกษตรอย่างแพร่หลาย เช่น นำมาใช้เพื่อศึกษาการตอบสนองของข้าวต่อการจัดการ และเงื่อนไขของสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เป็นต้น (Pinnschmidt *et al*., 1990; Godwin *et al*., 1990; Singh and Thornton, 1992; Jintrawat, 1995; Mahmood, 1998; Boonjung, 2000) แบบจำลอง CERES-Rice ได้เปิดโอกาสในการที่จะนำมาใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการศึกษาวิจัยได้สะดวกยิ่งขึ้น โดยเฉพาะหากมีข้อมูลตัวป้อนที่ครบถ้วนและสมบูรณ์ แบบจำลองก็จะให้ค่าประมาณผลผลิตของพืชใกล้เคียงกับผลผลิตจริง (Lansigan, 1998; Heinemann *et al*., 2002; Jagtap and Jones, 2002) ซึ่งหากแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืชสามารถนำมาใช้ช่วยในงานวิจัยทางด้านการเกษตรได้อย่างเต็มประสิทธิภาพก็จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับนักวิจัย โดยเฉพาะการลดระยะเวลา แรงงาน และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานวิจัย แต่อย่างไรก็ตาม การประเมินศักยภาพของแบบจำลองว่ามีความสามารถในการทำนายได้แม่นยำมากน้อยแค่ไหนเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญ (Jones *et al.,* 2003) ก่อนที่แบบจำลองจะได้รับการยอมรับและนำไปใช้จริงต่อไป ซึ่งสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ ที่แบบจำลองสามารถทำนายได้กับข้อมูลจริงที่เก็บจากแปลงทดลอง โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติเป็นตัวบ่งชี้ถึงความแม่นยำ เป็นที่ทราบกันทั่วไปว่าการแสดงออกของพืชจะขึ้นอยู่กับปัจจัยภายในต้นพืช สภาพแวดล้อมภายนอก (สภาพภูมิอากาศ และสภาพดิน) และการจัดการ (วันปลูก ระยะปลูก อัตราเมล็ดพันธุ์ เป็นต้น) ดังนั้นเมื่อสภาพแวดล้อมและการจัดการเปลี่ยนแปลงไป ก็จะส่งผลทำให้การเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพืชเปลี่ยนแปลงไปได้เช่นกัน การประเมินศักยภาพของแบบจำลองจึงควรทำหลายสภาพแวดล้อม หรือหลายสภาพการจัดการ เพื่อให้ได้ผลการจำลองที่น่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริงต่อไป

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อทดสอบความแม่นยำของแบบจำลอง CERES-Rice ในการประเมินการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว 2 พันธุ์ ภายใต้สภาพการปลูกด้วยอัตราเมล็ดพันธุ์ที่แตกต่างกัน

การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองการเจริญเติบโตของพืช (crop simulation model) หมายถึง การแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงระบบการเจริญเติบโต ระบบพัฒนาการ ตลอดจนการทำนายผลผลิตของพืช โดยการรวบรวมเอาข้อมูลพื้นฐาน (input) ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพืช มาคำนวณในรูปของสมการต่อเนื่องทางคณิตศาสตร์ และแสดงผลลัพธ์ (output) ในรูปของตัวเลข โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Penning de Vries *et al*., 1989; Sinclair and Seligman, 1996; Monteith, 1996; Graves *et al*., 2002) ซึ่งเป็นสิ่งที่สร้างขึ้นเพื่อลอกเลียนแบบระบบพืช เช่น ระบบการเจริญเติบโตและระบบพัฒนาการของพืช ในปัจจุบันมีกลุ่มนักวิจัยได้นำเอาแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืช มาใช้เป็นเครื่องมือที่ช่วยสนับสนุนการตัดสินใจทางการเกษตรกันอย่างแพร่หลายในหลายวัตถุประสงค์

แบบจำลองการเจริญเติบโตของพืช สามารถนำมาช่วยสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรม สรีรวิทยา และสภาพแวดล้อม (Boote *et al*., 1996) ซึ่ง Matthew (2002) รวบรวมและรายงานการศึกษาวิจัยที่มีการนำแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืชไปใช้ประโยชน์ด้านการจัดการพืชหลายแนวทางด้วยกัน เช่น การจัดการหน้าดิน การตอบสนองของพืชต่อวันปลูก ต่อการจัดการน้ำ ต่อการจัดการธาตุอาหาร ต่อการจัดการโรคและแมลง ต่อการจัดการวัชพืช การเก็บเกี่ยว และการวิเคราะห์ช่องว่างของผลผลิต เป็นต้น

แบบจำลองการเจริญเติบโตของข้าว (CERES-Rice model) เป็นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยกลุ่มนักวิจัยจากประเทศสหรัฐอเมริกา ร่วมกับการพัฒนาแบบจำลองของพืชอีกหลายชนิด เช่น ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโพด ข้าวฟ่าง มันฝรั่ง ทานตะวัน อ้อย ถั่วเหลือง ถั่วลิสง เป็นต้น (Hoogenboom *et al*., 2004) ซึ่งปัจจุบัน DSSAT ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาถึง version 4 ที่สะดวกในการใช้งานมากขึ้น โครงสร้างของ DSSAT ประกอบด้วยโปรแกรมหลัก (main program) ซึ่งทำหน้าที่ในการประสานระหว่างแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืช ฐานข้อมูลอากาศ ฐานข้อมูลดิน ฐานข้อมูลพืช และฐานข้อมูลระบบการจัดการพืช โดยหน่วยที่ทำหน้าที่เชื่อมโยงองค์ประกอบดังกล่าวเรียกว่า Land Unit Module (Jones *et al*., 2003) ระบบการจัดการที่ผู้ใช้สามารถกำหนดให้แบบจำลอง CERES-Rice ในการจำลองการเจริญเติบโตของข้าว ประกอบด้วย การกำหนดวันปลูก พันธุ์พืช วันเก็บเกี่ยว การจัดการน้ำ และการจัดการปุ๋ย เป็นต้น ส่วนที่นับว่ามีความสำคัญต่อกระบวนการจำลองการเจริญเติบโตมากที่สุดส่วนหนึ่งคือ ข้อมูลนำเข้าที่จัดว่าเป็นข้อมูลขับเคลื่อน (driven variable) หมายถึงตัวแปรต่าง ๆ ทั้งภายในและภายนอกต้นพืชที่มีผลทำให้พืชในแบบจำลองสามารถเจริญเติบโตได้เปรียบเสมือนพืชในสภาพจริง ได้แก่ ข้อมูลสภาพอากาศ ข้อมูลดิน ข้อมูลการจัดการ และข้อมูลพืช

ข้อมูลอากาศที่จำเป็นสำหรับการจำลองสถานการณ์ ประกอบด้วย ข้อมูลอากาศรายวันของพลังงานแสงอาทิตย์ (เมกาจูล/ตารางเมตร) อุณหภูมิอากาศต่ำสุดและสูงสุด (องศาเซลเซียส) และปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตร) ข้อมูลอากาศรายวันที่นำมาจำลองสถานการณ์ อย่างน้อยควรครอบคลุม

ตลอดอายุของข้าว ข้อมูลที่ใช้อาจเริ่มตั้งแต่วันปลูก หรือก่อนวันปลูกสำหรับกรณีที่ต้องการจำลองสมดุลย์ของน้ำและไนโตรเจนก่อนการปลูก

ข้อมูลดินที่แสดงคุณสมบัติทางด้านเคมี และทางด้านกายภาพของดินในแต่ละระดับชั้นความลึกที่ครอบคลุมการเจริญเติบโตของรากพืชโดยส่วนใหญ่ ประกอบด้วย สีของดิน ความสามารถในการระบายน้ำ ความหนาแน่นของดิน (bulk density) คุณลักษณะของเนื้อดิน (เปอร์เซ็นต์ sand, silt และ clay) ปริมาณอินทรียวัตถุ (organic matter) ความเป็นกรดและด่างของดิน และ CEC (cations exchange capacity) ของดิน นอกจากนี้ยังรวมถึงความชันของพื้นที่ ข้อมูลแสดงคุณสมบัติของดินเหล่านี้ บางลักษณะนำไปใช้ในการคำนวณคุณสมบัติของดินลักษณะอื่นๆ ด้วยโปรแกรมคำนวณคุณสมบัติของดินใน DSSAT ตัวอย่างเช่น ใช้ข้อมูลความหนาแน่นของดิน ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน และเปอร์เซ็นต์ sand, silt และ clay เพื่อคำนวณปริมาณน้ำที่อิ่มตัว (saturated water content, SAT) ปริมาณน้ำสูงสุดที่มีการระบาย (drained upper limit of soil water content, DUL) หรือความชื้นระดับสนาม (field capacity) และ ปริมาณน้ำต่ำสุดที่พืชนำไปใช้ (lower limit of plant extractable water, LL) หรือจุดเหี่ยวถาวร (permanent wilting point) เป็นต้น แบบจำลองสามารถจำลองสถานการณ์ได้หากมีข้อมูลดินทั้งหมดที่กล่าวมา อย่างไรก็ตามหากต้องการผลลัพธ์จากการจำลองสถานการณ์ที่มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น ควรมีข้อมูลก่อนการปลูกพืชเพิ่มเติม ซึ่งประกอบด้วย ความชื้นของดิน ความเป็นกรดเป็นด่างของดิน ปริมาณของ NO_3^- และ NH_4^+ และปริมาณของอินทรีย์คาร์บอนที่เป็นประโยชน์ในแต่ละระดับชั้นความลึกของดิน นอกจากนี้หากต้องการจำลองสมดุลย์ของไนโตรเจนทั้งในดินและพืช ประเภทและปริมาณของซากพืชที่ทิ้งไว้ในแปลงก่อนการปลูกก็จำเป็นต้องใช้เช่นกัน

สำหรับข้อมูลการจัดการ ประกอบด้วย วันปลูก ระยะปลูก ความลึกของการปลูก วันงอก ความหนาแน่นของประชากรพืชต่อตารางเมตร และวันเก็บเกี่ยวผลผลิต ในกรณีของการจำลองการเจริญเติบโตของพืชภายใต้การจัดการน้ำ รายละเอียดของวันที่และปริมาณของการให้น้ำก็มีความสำคัญ ปัจจุบันแบบจำลอง CERES-Rice สามารถจำลองสมดุลย์ของไนโตรเจนในพืชและดิน และจำลองการตอบสนองของข้าวต่อการจัดการปุ๋ยไนโตรเจนที่แตกต่างกันได้ ดังนั้นหากต้องการจำลองการเจริญเติบโตของข้าวภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว จำเป็นต้องมีข้อมูลเพิ่มเติมคือ ประเภทของปุ๋ยไนโตรเจน จำนวนครั้งและปริมาณการให้ปุ๋ย วิธีการให้ และระดับความลึกของการให้ปุ๋ย เป็นต้น

แบบจำลอง CERES-Rice ต้องการข้อมูลแสดงลักษณะจำเพาะของข้าวแต่ละพันธุ์ หรือค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม (genetic coefficients; GCs) เพื่ออธิบายการเจริญเติบโต และพัฒนาการที่แตกต่างกันของข้าวแต่ละพันธุ์ ซึ่งโดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของข้าวแต่ละพันธุ์ ได้จากการทดลองปลูกข้าวพันธุ์นั้นในเรือนทดลองที่มีการควบคุมสภาพแวดล้อม หากไม่มีโรงเรือนควบคุมสภาพแวดล้อม สามารถคำนวณค่าดังกล่าวได้ (model calibration) โดยอาศัยข้อมูลจากการปลูกข้าวพันธุ์นั้นในหลายฤดูหรือหลายสภาพแวดล้อม

สำหรับผลลัพธ์ (output) ที่ได้จากแบบจำลอง CERES-Rice ประกอบด้วยระยะพัฒนาการทางลำต้นและใบ ระยะพัฒนาการเกี่ยวกับการสะสมน้ำหนักเมล็ด จนกระทั่งถึงระยะสุกแก่ รวมไปถึงการจำลองการเจริญเติบโตรายวันของผลผลิต และองค์ประกอบผลผลิต เช่น ผลผลิต น้ำหนักเมล็ด จำนวนเมล็ดต่อตารางเมตร จำนวนรวงต่อตารางเมตร ดัชนีพื้นที่ใบสูงสุด (leaf area index, LAI) น้ำหนักแห้งต้นและใบขณะสุกแก่ ดัชนีเก็บเกี่ยว (harvest index, HI) และจำนวนใบต่อหน่อ เป็นต้น (Hoogenboom *et al*., 2004)

ในปัจจุบัน ได้มีการประเมินศักยภาพในการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิด สำหรับแบบจำลอง CERES-Rice นั้นพบว่า ผู้พัฒนาแบบจำลองและผู้ที่นำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ได้ทำการประเมินศักยภาพของแบบจำลองดังกล่าวภายใต้เงื่อนไขและสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น

การใช้แบบจำลอง CERES-Rice ในการประเมินระยะพัฒนาการของข้าว Alociljha and Ritchie (1991) เปรียบเทียบระยะพัฒนาการของข้าวจำนวน 3 พันธุ์ ปลูกในประเทศฟิลิปปินส์ จำนวน 6 งานทดลอง พบว่าแบบจำลอง CERES-Rice สามารถทำนายระยะพัฒนาการของข้าวได้อย่างแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่บันทึกจริงในแปลงทดลอง Tongyai (1994) พบว่าแบบจำลอง CERES-Rice สามารถทำนายวันสุกแก่ทางสรีรวิทยาสูงกว่าข้อมูลจริงตั้งแต่ 8 -16 วัน Jintrawat (1995) ทำการประเมินศักยภาพของแบบจำลอง CERES-Rice (v.2) สำหรับข้าวพันธุ์ไวแสงและไม่ไวแสง โดยทำการปลูกข้าวในระยะเวลา 2 ปี จำนวน 6 สถานที่ พบว่าสำหรับข้าวพันธุ์ไวแสงแบบจำลองสามารถทำนายระยะพัฒนาการได้อย่างแม่นยำ แต่สำหรับพันธุ์ไม่ไวแสง แบบจำลองทำนายวันที่ช่อรวงโผล่ (heading) ได้ต่ำกว่าข้อมูลจริง โดยเฉพาะวันปลูกต้น ๆ Boonjung (2000) พบว่าแบบจำลอง CERES-Rice ทำนายวันสุกแก่ของข้าวหอมมะลิ 105 ซึ่งเป็นข้าวพันธุ์ไวแสง ปลูกใน 6 สภาพแวดล้อม ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยได้อย่างแม่นยำ แต่อย่างไรก็ตามการทำนายจำนวนวันกำเนิดช่อดอกได้สูงกว่าข้อมูลจริงเล็กน้อย

การใช้แบบจำลอง CERES-Rice ในการประเมินผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิต เช่น Godwin *et al*. (1990) เปรียบเทียบผลผลิตเมล็ดและมวลชีวภาพของข้าวที่ปลูกในหลายสภาพแวดล้อมในประเทศฟิลิปปินส์ พบว่าโดยส่วนใหญ่มีความสอดคล้องกันระหว่างผลที่ได้จากการจำลองและข้อมูลที่ได้จากแปลงจริง Tongyai (1994) พบว่า CERES-Rice ทำนายผลผลิตเมล็ดได้สูงกว่าข้อมูลจริง 0.2-0.4 ตัน/เฮกตาร์ (4.5–9%) และทำนายมวลชีวภาพได้ต่ำกว่าข้อมูลจริง 0.8-1.0 ตัน/เฮกตาร์ (10-12%) ในขณะที่ Jintrawat (1995) พบว่า CERES-Rice สามารถนำนาย น้ำหนักเมล็ด จำนวนเมล็ด และผลผลิตเมล็ดของข้าวทั้งพันธุ์ไวแสงและไม่ไวแสงได้ค่อนข้างดี Boonjung (2000) รายงานว่า CERES-Rice ทำนายผลผลิตของข้าวหอมมะลิ 105 ได้ดี

นอกจากที่กล่าวมาแล้วแบบจำลอง CERES-Rice ยังสามารถนำมาใช้ประเมินลักษณะทางสรีรวิทยาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพืช (Meyer *et al*., 1994; Mall and Aggarwal, 2002)

และการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณธาตุไนโตรเจนในต้นพืชและในดิน (Godwin *et al*., 1990; Meyer *et al*., 1994; Timsina *et al*., 1998) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าแบบจำลอง CERES-Rice จะแสดงให้เห็นว่าสามารถนำมาใช้ทำนายการเจริญเติบโต ผลผลิต และองค์ประกอบผลผลิตของข้าวได้ค่อนข้างดีในแถบเอเชีย ดังตัวอย่างการศึกษาที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น แต่ก็ไม่ได้หมายความว่า เมื่อนำไปศึกษากับแหล่งอื่น ๆ แล้วจะให้ผลเหมือนกัน (Timsina and Humphreys, 2003) ดังนั้นการประเมินศักยภาพของแบบจำลองจึงควรทำให้ครอบคลุมแหล่งปลูกที่สำคัญ โดยการทดสอบในหลายสภาพแวดล้อม ที่มีความแตกต่างกันทางด้านสภาพภูมิอากาศ สภาพดิน หรือแม้กระทั่งสภาพการจัดการด้านต่าง ๆ เพื่อให้ได้ผลที่มีความน่าเชื่อถือและได้รับการยอมรับ เพื่อการนำไปใช้ประโยชน์จริงต่อไป แบบจำลอง CERES-Rice เปิดโอกาสหรือเพิ่มทางเลือกให้กับผู้ใช้เพื่อประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือช่วยสนับสนุนการตัดสินใจทางการเกษตร

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมแปลงปลูก

การเตรียมแปลงสำหรับนาหว่านน้ำตม เริ่มการเตรียมดินโดยการไถดะ 1 ครั้ง หลังจากนั้นปล่อยทิ้งไว้ระยะหนึ่งเพื่อล่อให้เมล็ดข้าวและวัชพืชงอก แล้วคราดเพื่อกำจัดวัชพืช และปรับพื้นที่ให้สม่ำเสมอก่อนทำการหว่านข้าว แบ่งพื้นที่ออกเป็นแปลงย่อยขนาด 3 x 3 เมตร จำนวน 24 แปลง เว้นระยะระหว่างแปลงย่อย 75 เซนติเมตร และระยะระหว่างซ้ำ 1 เมตร โดยใช้ไม้ไผ่ปักทำเป็นหลักของแต่ละแปลง แล้วนำเชือกมาผูกกับหลักไม้ไผ่ เพื่อช่วยให้เห็นขอบเขตของแต่ละแปลงย่อยได้ชัดเจน

การปลูกและการดูแลรักษา

วางแผนการทดลองแบบ Split plot in Randomized Complete Block Design มีจำนวน 4 ซ้ำ โดยกำหนดให้มีปัจจัยในการศึกษาประกอบด้วย

Main plot ได้แก่ พันธุ์ข้าวจำนวน 2 พันธุ์

1. พันธุ์ชัยนาท 1
2. พันธุ์สุพรรณบุรี 60

Sub plot ได้แก่ อัตราเมล็ดพันธุ์ที่ใช้จำนวน 3 อัตรา

1. อัตรา 5 กิโลกรัมต่อไร่
2. อัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่
3. อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่

เตรียมเมล็ดพันธุ์ข้าวโดยการขอความอนุเคราะห์เมล็ดพันธุ์ข้าวทั้งสองชนิดจากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความงอกสูงกว่าร้อยละ 80 ก่อนการหว่านนำเมล็ดพันธุ์ข้าวของแต่ละกรรมวิธีใส่ถุงผ้าจำนวน 24 ถุงแช่น้ำเป็นเวลา 1 คืน และหุ้มทิ้งไว้อีก 2 วันรดน้ำเช้า-เย็น เพื่อกระตุ้นให้เมล็ดข้าวงอก จากนั้นนำเมล็ดข้าวมาหว่านลงแปลงในวันที่ 2 มกราคม 2552 หลังหว่านเสร็จระบายน้ำออกจากแปลง เมื่อข้าวได้อายุ 15 วันใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 16-20-0 ในอัตรา 30 กิโลกรัมต่อไร่ พร้อมกับการกำจัดวัชพืชโดยวิธีการถอน เมื่อข้าวได้อายุ 30 และ 60 วัน ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 46-0-0 ในอัตรา 7 กิโลกรัมต่อไร่ ในช่วงของการปลูกข้าวพบว่าแปลงข้าวมีหนอนกอระบาด จึงต้องมีการฉีดพ่นสารเคมีเพื่อป้องกันกำจัด โดยใช้สารคาร์โบซัลแฟน (2,3-dihydro-2,2-dimethylbenzofuran-7-yl(dibutylaminothio) methylcarbamate) ในอัตรา 80 ซีซีต่อน้ำ 20 ลิตร ตลอดฤดูปลูกมีการควบคุมระดับน้ำในแปลงไม่ให้แห้ง และเมื่อข้าวถึงอายุเก็บเกี่ยวจึงปล่อยน้ำออกจากแปลงเพื่อสะดวกในการเก็บเกี่ยวในวันที่ 22 เมษายน 2552

การบันทึกข้อมูล

มีการบันทึกทั้งข้อมูลด้านพัฒนาการ การเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว ตลอดจนข้อมูลทางด้านการจัดการ และข้อมูลสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

สำหรับข้อมูลด้านพัฒนาการ การเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว บันทึกตามแบบฟอร์มของ IBSNAT (1988) คือ ข้อมูลด้านพัฒนาการประกอบด้วย วันงอก วันแตกกอสูงสุด วันกำเนิดช่อดอก วันออกดอก และวันเก็บเกี่ยว ส่วนข้อมูลด้านการเจริญเติบโตได้ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างจำนวน 3 ครั้ง คือ ระยะข้าวแตกกอสูงสุด ระยะกำเนิดช่อดอก วันออกดอก และระยะเก็บเกี่ยว

สำหรับระยะแตกกอสูงสุดและระยะกำเนิดช่อดอก ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างแปลงละ 2 กอ จากนั้นนำกอข้าวไปล้างน้ำให้สะอาด วัดความสูงของข้าวจากโคนต้นถึงปลายใบ แล้วตัดส่วนของรากทิ้งไป นับจำนวนหน่อต่อกอ จากนั้นแยกส่วนของใบและต้นใส่ถุงกระดาษแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เมื่อแห้งนำมาชั่งเพื่อบันทึกข้อมูลน้ำหนักแห้ง

ระยะเก็บเกี่ยว ขั้นแรกสุ่มเก็บข้อมูลในพื้นที่ 1 ตารางเมตร นับจำนวนกอข้าวทั้งหมดจากนั้นสุ่มเก็บตัวอย่างข้าวจำนวน 2 กอจากพื้นที่ 1 ตารางเมตร นำไปล้างทำความสะอาด วัดความสูงจากโคนต้นถึงปลายใบ ตัดส่วนรากทิ้งไป นับจำนวนหน่อต่อกอ จำนวนรวงต่อกอ จำนวนเมล็ดดีและเมล็ดลีบต่อรวง แล้วแยกส่วนของใบ ต้น และรวง ใส่ถุงกระดาษ นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เมื่อแห้งนำมาชั่งเพื่อบันทึกข้อมูลน้ำหนักแห้ง

การเก็บบันทึกข้อมูลอื่น ๆ ที่จำเป็นสำหรับแบบจำลองโดยก่อนการปลูกข้าวทำการเก็บตัวอย่างดิน 1 จุด ที่ระดับความลึก 0-15 และ 15-30 เซนติเมตร เพื่อนำไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินซึ่งประกอบด้วย สีของดิน ความสามารถในการระบายน้ำ ความหนาแน่นของดิน (bulk density) คุณลักษณะของเนื้อดิน (เปอร์เซ็นต์ sand, silt และ clay) ปริมาณอินทรียวัตถุ (organic matter) ความเป็นกรดและด่างของดิน และ CEC (cations exchange capacity) ของดิน

ข้อมูลการดูแลจัดการที่ต้องทำการจดบันทึกประกอบด้วย วันปลูก ความลึกของการปลูก วันงอก ความหนาแน่นของประชากรพืชต่อตารางเมตร วันที่และปริมาณการให้น้ำและปุ๋ยไนโตรเจน วันที่ฉีดพ่นสารเคมีและปริมาณการใช้ และวันเก็บเกี่ยว

สำหรับข้อมูลอากาศรายวันซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์ (เมกาจูล/ตารางเมตร) อุณหภูมิอากาศต่ำสุดและสูงสุด (องศาเซลเซียส) และปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตร) ตลอดช่วงฤดูปลูกจากโดยใช้ข้อมูลจากสถานีอากาศสนามบินสุวรรณภูมิ ซึ่งอยู่ใกล้แปลงปลูกข้าวมากที่สุด โดยขอความอนุเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวจาก กรมอุตุนิยมวิทยา สถานที่ตั้ง 4353 ถนนสุขุมวิท แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพมหานคร 10260

การจำลองการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว

ใช้แบบจำลอง CERES-Rice ทำการจำลองการปลูกข้าวเหมือนกับการปลูกจริงในแปลงทดลอง โดยจำลองการปลูกข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 และชัยนาท 1 ซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมอยู่แล้ว แต่ละพันธุ์จำลองการปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 5, 25 และ 50 กิโลกรัม/ไร่ โดยอาศัยข้อมูลตัวป้อน ซึ่งประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของข้าวแต่ละพันธุ์ ข้อมูลอากาศรายวัน ข้อมูลดิน และข้อมูลการจัดการ ที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น เพื่อทำการจำลองการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวภายใต้เงื่อนไขเหมือนกับสภาพแปลงปลูกจริง

การวิเคราะห์ข้อมูล

พิจารณาความสอดคล้องระหว่างการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวที่ได้จากการจำลองและจากการสังเกตจริงจากแปลงทดลองด้วยค่าทางสถิติ เช่น root mean square error (RMSE) และ index of agreement (d- statistic) ซึ่งมีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$RMSE = \left[1/N \sum (Si-Oi)^2 \right]^{0.5}$$

เมื่อ N คือ จำนวนของค่าสังเกต

Si คือ ค่าที่ได้จากการจำลองของการวัดครั้งที่ i

Oi คือ ค่าที่ได้จากการสังเกตของการวัดครั้งที่ i

$$d\text{- statistic} = 1- \left[\sum (Si -Oi)^2 / \sum (|Si'|+|Oi'|)^2\right] ; 0<d<1$$

เมื่อ Si คือ ค่าที่ได้จากการจำลองของการวัดครั้งที่ i

Oi คือ ค่าที่ได้จากการสังเกตของการวัดครั้งที่ i

Si′ คือ Si- ค่าเฉลี่ยของ O และ Oi′ คือ Oi - ค่าเฉลี่ยของ O

และทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of variance) ทั้งข้อมูลที่ได้จากการจำลองและจากการสังเกตจริงในแปลงทดลองตามแผนการทดลองทางสถิติที่วางไว้ โดยใช้โปรแกรม M-STATC เพื่อช่วยในการประเมินความสอดคล้องอีกทางหนึ่งด้วย

ผลการทดลอง

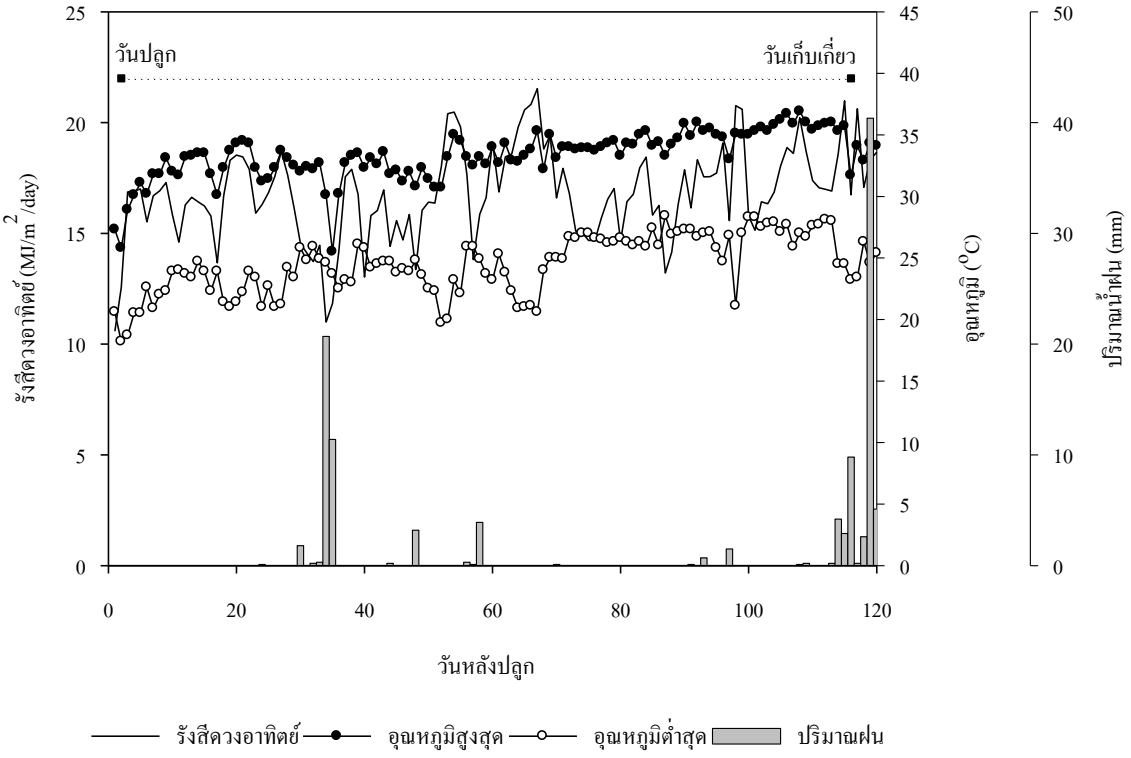
1. สภาพอากาศ

สภาพอากาศในช่วงของการทำงานทดลองในแปลงปลูกแบบนาหว่านน้ำตม ในวันที่ทำการหว่านข้าวลงในแปลง (2 มกราคม 2552) พบว่ามีอุณหภูมิต่ำมากโดยมีอุณหภูมิต่ำสุดเท่ากับ 18.2 ^{o}C และอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 25.8 ^{o}C และในระยะ 5 วัน หลังจากช่วงปลูกยังคงมีสภาพอากาศค่อนข้างเย็นอย่างต่อเนื่อง โดยมีอุณหภูมิต่ำสุดอยู่ระหว่าง 18-22 ^{o}C และอุณหภูมิสูงสุดอยู่ระหว่าง 25-31 ^{o}C หลังจากนั้นอุณหภูมิจึงจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในระยะเวลาหนึ่ง แต่พบว่าตั้งแต่ช่วงเดือนมกราคมไปจนถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์มีสภาพอากาศค่อนข้างเย็น ก่อนที่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งค่อนข้างคงที่ในช่วงประมาณปลายเดือนมีนาคมถึงเมษายน สำหรับปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ตั้งแต่วันปลูกไปจนถึงวันเก็บเกี่ยวมีค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ต่ำสุดที่พบเท่ากับ 12.5 MJ/m^2/day และมีปริมาณสูงสุดเท่ากับ 20.8 MJ/m^2/day และมีปริมาณฝนตกตลอดช่วงเพาะปลูกรวมเท่ากับ 75.8 mm (ภาพที่ 1)

2. ลักษณะเนื้อดินและคุณสมบัติทางเคมีของดิน

ในการทดลองนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างดินจากแปลงทดลองที่ 2 ระดับความลึก คือ 0-15 และ 15-30 เซนติเมตร ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินพบว่า ที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร เนื้อดินมีลักษณะเป็นดินร่วนปนเหนียว มีความเป็นกรดเล็กน้อยค่า pH ประมาณ 5.23 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่ากับ 31.01 me/100g ปริมาณอินทรียวัตถุประมาณ 1.97 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total N) เท่ากับ 0.19 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณแอมโมเนียม (NH^{+}_{4}) และปริมาณไนเตรต (NO^{-}_{3}) เท่ากับ 60.40 และ 14.21 mg/kg ตามลำดับ ปริมาณโปแตสเซียมและปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้เท่ากับ 356.49 และ 1,846.66 ppm ตามลำดับ (ตารางที่ 1)

สำหรับที่ระดับความลึก 15-30 เซนติเมตร ผลการวิเคราะห์พบว่า มีลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนปนเหนียว และยังคงมีความเป็นกรดเล็กน้อยค่า pH ประมาณ 5.22 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกลดลงเหลือเท่ากับ 29.73 me/100g ที่ระดับความลึกนี้พบว่ามีปริมาณอินทรียวัตถุลดลงเหลือประมาณ 1.79 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ Total N ไม่มีการเปลี่ยนแปลงยังคงมีค่าเท่ากับ 0.19 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณแอมโมเนียม (NH^{+}_{4}) และปริมาณไนเตรต (NO^{-}_{3}) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยมีค่าประมาณ 63.95 และ 21.32 mg/kg ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณโปแตสเซียมและปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น มีค่าเท่ากับ 353.49 และ 1,892.22 ppm ตามลำดับ (ตารางที่ 1)



ภาพที่ 1 สภาพอากาศช่วงเพาะปลูกข้าวตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเมษายน 2552

ตารางที่ 1 ลักษณะเนื้อดิน และคุณสมบัติทางเคมีของดินในแปลงทดลอง

คุณสมบัติ	ระดับความลึก (เซนติเมตร)	
	0-15	15-30
1. ลักษณะเนื้อดิน		
% Sand	9.09	8.35
% Silt	45.07	44.97
% Clay	45.84	46.68
Textural class	Silty Clay	Silty Clay
2. คุณสมบัติทางเคมี		
pH (1:1)	5.23	5.22
CEC (me/100g)	31.01	29.73
Organic matter (%)	1.97	1.79
Total N (%)	0.19	0.19
NH^{+}_{4} (mg/kg)	60.40	63.95
NO^{-}_{3} (mg/kg)	14.21	21.32
Exchangeable K (ppm)	356.49	353.49
Exchangeable Ca (ppm)	1,846.66	1,892.22

หมายเหตุ

pH	โดยวิธี Std. Glass electrode
Organic mater	โดยวิธี Walkley and Black
Total N	โดยวิธี Microkjeldahl method
NH^{+}_{4} , NO^{-}_{3}	โดยวิธี KCl extraction, Distillation
Exchangeable K, Ca	โดยวิธี NH_4OAc extraction, Atomic spectroscopy
CEC	โดยวิธี NH_4OAc pH 7.0
Soil texture	โดยวิธี Pipette method

3. ผลการศึกษาในแปลงทดลองฤดูนาปรังปี 2552 (ระหว่างเดือนมกราคม-เมษายน)

วันแตกกอสูงสุด

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ พบว่าอายุถึงวันแตกกอสูงสุดของข้าวไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยทั้งพันธุ์ชัยนาท 1 และสุพรรณบุรี 60 มีอายุถึงวันแตกกอเฉลี่ยประมาณ 38 วัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างข้าวที่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์แตกต่างกันนั้น พบว่าอัตราเมล็ดพันธุ์ไม่มีผลต่ออายุการแตกกอของข้าว โดยไม่ว่าจะหว่านโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ต่ำหรือสูง ข้าวจะมีอายุการแตกกอเฉลี่ยเท่า ๆ กัน คือประมาณ 38 วัน และไม่พบว่ามีปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์กับอัตราเมล็ดพันธุ์ที่ใช้ (ตารางที่ 2)

วันกำเนิดช่อดอก

ผลการวิเคราะห์พบว่าอายุวันกำเนิดช่อดอกของข้าวทั้งสองพันธุ์ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และสุพรรณบุรี 60 มีอายุวันกำเนิดช่อดอกเฉลี่ยประมาณ 68 วัน ในทำนองเดียวกันอายุวันกำเนิดช่อดอกของข้าวที่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์แตกต่างกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ อย่างไรก็ตามมีแนวโน้มว่าหากใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ต่ำข้าวจะออกดอกช้าลงเล็กน้อย โดยที่อัตราเมล็ดพันธุ์ 5 กก./ไร่ ข้าวมีอายุวันกำเนิดช่อดอกเฉลี่ยประมาณ 69 วัน แต่เมื่อเพิ่มอัตราเมล็ดพันธุ์สูงขึ้นเป็น 25 และ 50 กก./ไร่ ข้าวจะมีอายุวันกำเนิดช่อดอกเฉลี่ยประมาณ 67 วัน ซึ่งเร็วขึ้นเป็นเวลา 2 วัน สำหรับปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์กับอัตราเมล็ดพันธุ์พบว่าการตอบสนองของข้าวในเรื่องอายุวันกำเนิดช่อดอกไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 2)

วันเก็บเกี่ยว

เนื่องจากมีความจำเป็นต้องเก็บเกี่ยวข้าวในวันเดียวกันทั้งหมด เพราะเกิดโรคและแมลงเข้าทำลาย ทำให้แปลงข้าวเกิดความเสียหายค่อนข้างมาก แม้ว่าจะพยายามฉีดสารเคมีป้องกันและกำจัดอย่างเต็มที่ จึงทำให้ไม่สามารถรอบันทึกอายุวันสุกแก่ทางสรีรวิทยาของข้าวได้ ดังนั้นทุกกรรมวิธีจึงจำเป็นต้องมีการเก็บเกี่ยวพร้อมกัน เมื่อข้าวมีอายุได้ประมาณ 112 วัน (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของวันแตกกอสูงสุด วันกำเนิดช่อดอก และวันเก็บเกี่ยว

		ระยะพัฒนาการ		
	สิ่งทดลอง	แตกกอสูงสุด	กำเนิดช่อดอก	เก็บเกี่ยว
พันธุ์	ชัยนาท 1	38.2	67.8	112
	สุพรรณบุรี 60	38.5	68.0	112
อัตราเมล็ดพันธุ์	5 กก./ไร่	38.6	69.0	112
	25 กก./ไร่	38.3	67.4	112
	50 กก./ไร่	38.1	67.4	112
F-test (พันธุ์)		ns	ns	-
F-test (อัตราเมล็ดพันธุ์)		ns	ns	-
F-test (พันธุ์ x อัตราเมล็ดพันธุ์)		ns	ns	-
C.V. (a) % (พันธุ์)		7.12	3.82	-
C.V. (b) % (อัตราเมล็ดพันธุ์)		5.37	3.42	-

ns = ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ผลผลิต

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ตารางที่ 3) พบว่าผลผลิตของข้าวทั้งสองพันธุ์ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ให้ผลผลิตเฉลี่ย 402 กก./ไร่ ซึ่งน้อยกว่าพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ให้ผลผลิตเฉลี่ย 562 กก./ไร่ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการหว่านโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ที่แตกต่างกันพบว่าผลผลิตของข้าวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่พบว่าการหว่านโดยใช้อัตราเมล็ด 25 กก./ไร่ ข้าวจะให้ผลผลิตสูงสุดเท่ากับ 592 กก./ไร่ รองลงมาคือการหว่านด้วยอัตรา 5 กก./ไร่ ให้ผลผลิตเท่ากับ 430 กก./ไร่ และอัตราเมล็ด 50 กก./ไร่ จะทำให้ได้ผลผลิตเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 423 กก./ไร่ เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์และอัตราเมล็ดพันธุ์ที่ใช้ในการหว่าน พบว่า แม้การตอบสนองของผลผลิตจะไม่มีความแตกต่างทางสถิติ แต่ก็มีก็เปลี่ยนแปลงบ้างเล็กน้อยโดยพบว่าในการปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ต่ำเพียง 5 กก./ไร่ นั้น การตอบสนองของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ให้ผลผลิตสูงกว่าพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ประมาณ 59 กก./ไร่ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อมีการหว่านโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์เพิ่มขึ้นเป็น 25-50 กก./ไร่ ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 จะให้ผลผลิตสูงกว่าพันธุ์ชัยนาท 1 โดยที่อัตราเมล็ดพันธุ์ 25 และ 50 กก./ไร่ ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 จะให้ผลผลิตสูงกว่าพันธุ์ชัยนาท 1 เท่ากับ 376 และ 164 กก./ไร่ ตามลำดับ (ภาพที่ 2)

น้ำหนักแห้งรวม

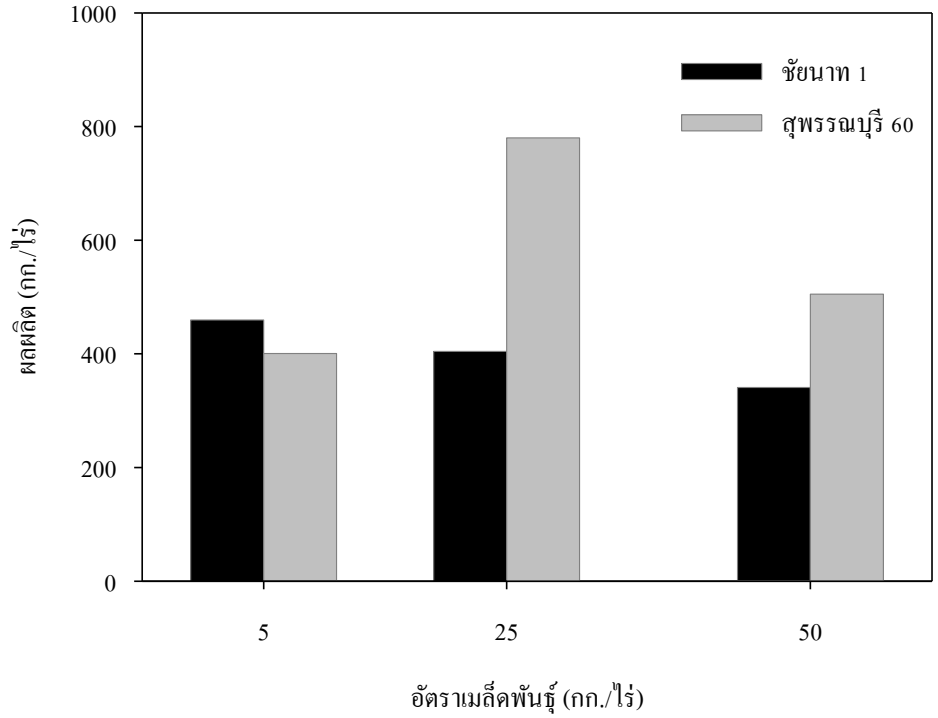
จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าน้ำหนักแห้งรวมของข้าวทั้งสองพันธุ์มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ให้น้ำหนักแห้งรวมเท่ากับ 686 กก./ไร่ ซึ่งสูงกว่าพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ให้น้ำหนักแห้งรวมเพียง 494 กก./ไร่ แต่พบว่าการหว่านโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้งรวมของข้าว แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการหว่านโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ไม่ต่ำหรือสูงเกินไปจะทำให้ข้าวมีน้ำหนักแห้งรวมสูงขึ้น สำหรับอัตราเมล็ดพันธุ์ 5, 25 และ 50 กก./ไร่ ข้าวให้ค่าน้ำหนักแห้งรวมเท่ากับ 553, 702 และ 515 กก./ไร่ ตามลำดับ

สำหรับการตอบสนองของพันธุ์ทั้งสองพันธุ์ต่ออัตราเมล็ดที่ใช้หว่านไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่พบว่าการหว่านโดยใช้เมล็ดพันธุ์ในอัตรา 5 กก./ไร่ ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ให้น้ำหนักแห้งรวมสูงกว่าพันธุ์สุพรรณบุรี 60 แต่เมื่อเพิ่มอัตราเมล็ดพันธุ์ที่ใช้ปลูกสูงขึ้นกลับพบว่าพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ให้น้ำหนักแห้งรวมสูงกว่าพันธุ์ชัยนาท 1 โดยการหว่านที่อัตราเมล็ดพันธุ์ 25 กก./ไร่ พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ให้น้ำหนักแห้งรวมเท่ากับ 916 กก./ไร่ ในขณะที่พันธุ์ชัยนาท 1 ให้น้ำหนักแห้งรวมเท่ากับ 489 กก./ไร่ และเมื่อมีการหว่านโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์เพิ่มสูงขึ้นเป็น 50 กก./ไร่ พบว่าน้ำหนักแห้งโดยรวมของทั้งสองพันธุ์จะลดลง แต่อย่างไรก็ตามพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ยังคงให้น้ำหนักแห้งรวมสูงกว่าพันธุ์ชัยนาท 1 โดยพันธุ์สุพรรณบุรี 60 มีค่าน้ำหนักแห้งรวมเท่ากับ 608 กก./ไร่ และพันธุ์ชัยนาท 1 มีค่าเท่ากับ 572 กก./ไร่ (ภาพที่ 3)

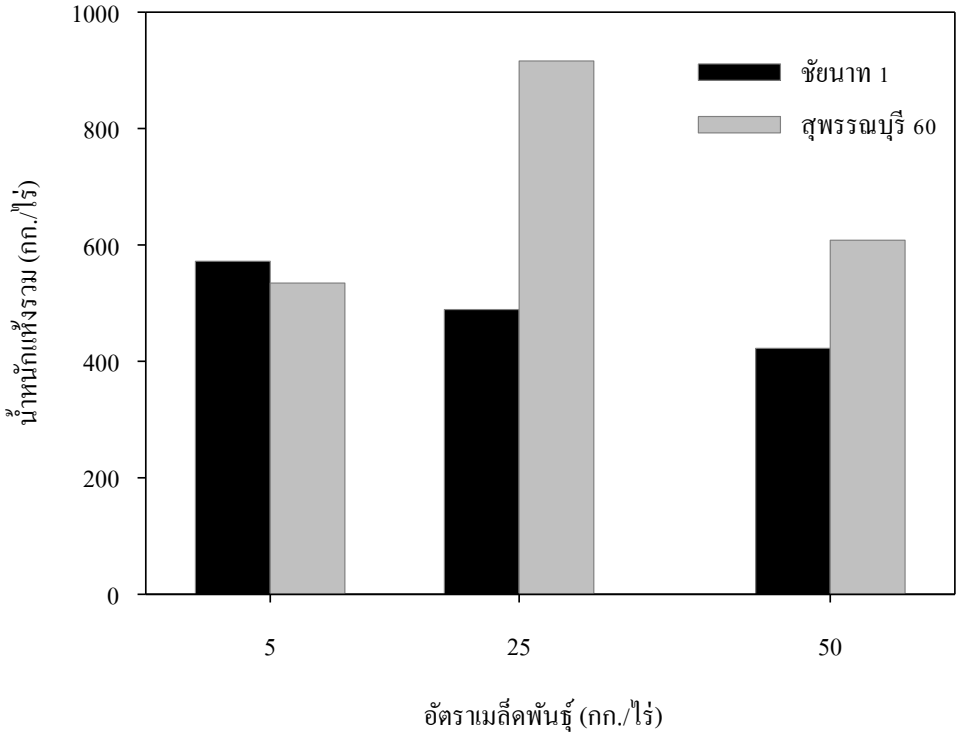
ตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของการเจริญเติบโตและผลผลิตที่ระยะเก็บเกี่ยว

	สิ่งทดลอง	ผลผลิต (กก./ไร่)	น้ำหนักแห้งรวม (กก./ไร่)	น้ำหนัก 1000 เมล็ด (กรัม)	จำนวนเมล็ดดี/กอ
พันธุ์	ชัยนาท 1	402	494	22.8	325
	สุพรรณบุรี 60	562	686	23.7	338
อัตราเมล็ดพันธุ์	5 กก./ไร่	430	553	22.8	324
	25 กก./ไร่	592	702	22.3	291
	50 กก./ไร่	423	515	24.6	381
F-test (พันธุ์)		ns	*	ns	ns
F-test (อัตราเมล็ดพันธุ์)		ns	ns	ns	ns
F-test (พันธุ์ x อัตราเมล็ดพันธุ์)		ns	ns	ns	ns
C.V. (a) % (พันธุ์)		27.5	24.1	18.5	12.3
C.V. (b) % (อัตราเมล็ดพันธุ์)		44.8	36.4	16.6	27.7

ns = ไม่แตกต่างกันทางสถิติ, * = แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %



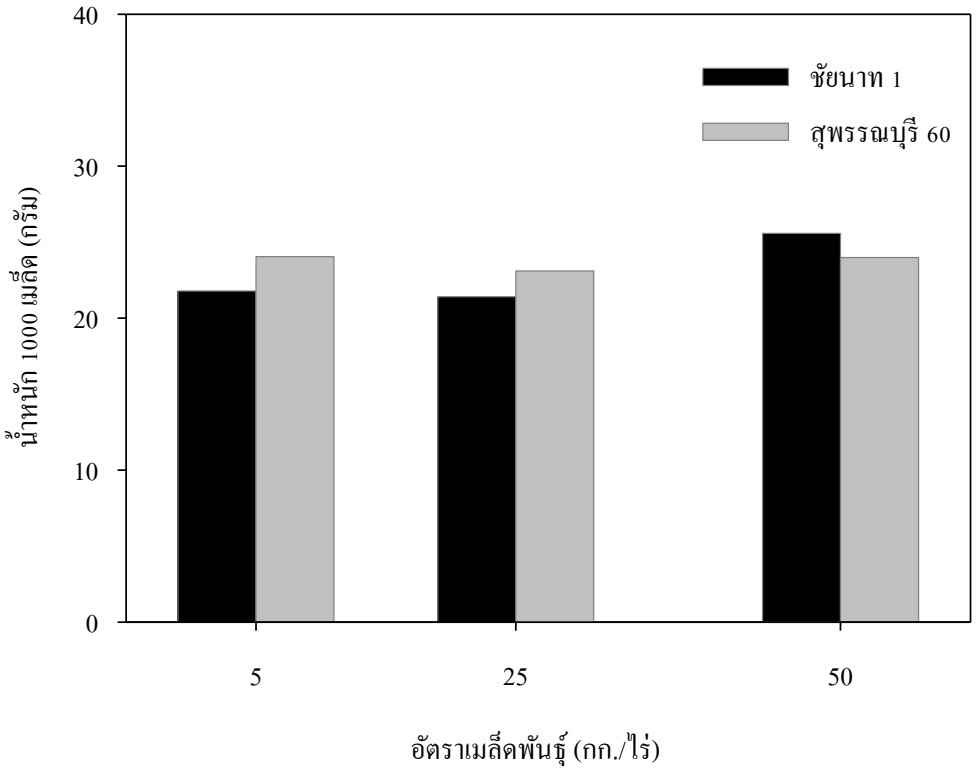
ภาพที่ 2 การตอบสนองของผลผลิตของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และสุพรรณบุรี 60 ต่ออัตราการหว่านเมล็ดพันธุ์ที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 3 การตอบสนองของน้ำหนักแห้งรวมของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และสุพรรณบุรี 60 ต่ออัตราการหว่านเมล็ดพันธุ์ที่แตกต่างกัน

น้ำหนัก 1000 เมล็ด

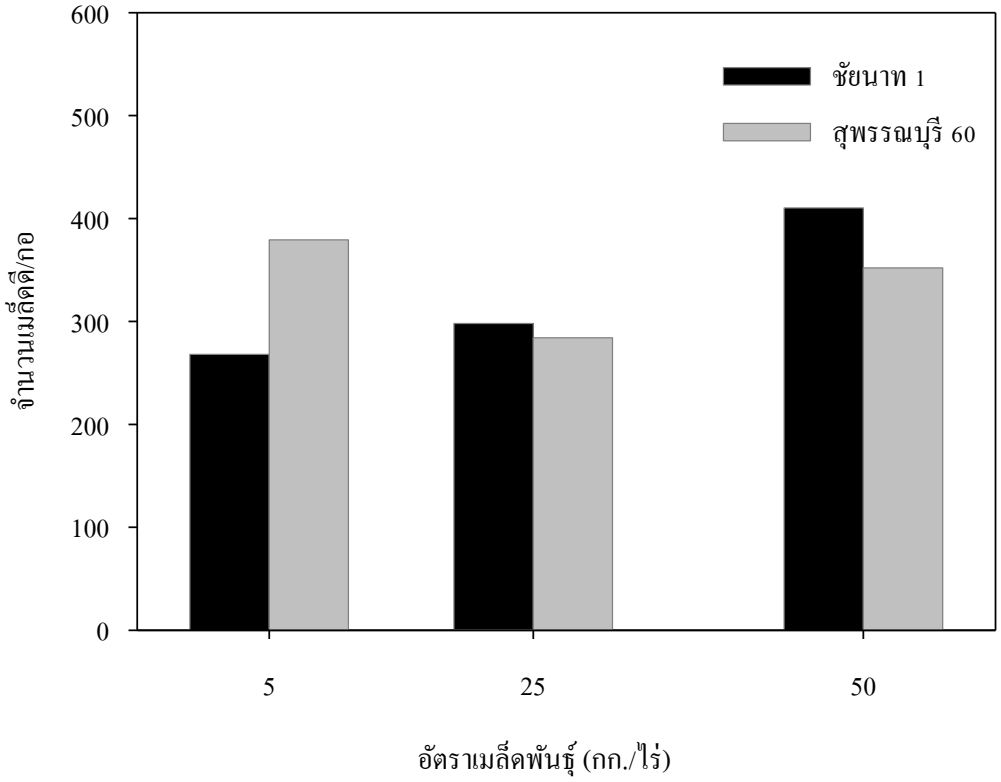
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของน้ำหนัก 1000 เมล็ด ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าน้ำหนักเมล็ดของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และสุพรรณบุรี 60 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยน้ำหนักเมล็ดของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 หนัก 22.8 กรัม พันธุ์สุพรรณบุรี 60 หนัก 23.7 กรัม สำหรับน้ำหนักเมล็ดที่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ที่แตกต่างกัน พบว่ามีน้ำหนักเมล็ดไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) ซึ่งมีน้ำหนักเฉลี่ยการปลูกด้วยอัตราเมล็ด 50 กก./ไร่ มีผลทำให้น้ำหนักเมล็ดสูงที่สุดเท่ากับ 24.6 กรัม การปลูกด้วยอัตราเมล็ดพันธุ์ 25 กก./ไร่ มีผลทำให้ได้น้ำหนักเมล็ดต่ำที่สุดเท่ากับ 22.3 กรัม ผลการวิเคราะห์การตอบสนองน้ำหนัก 1000 เมล็ดของข้าวทั้งสองพันธุ์พบว่าการปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ 5 และ 25 กก./ไร่ ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ให้น้ำหนักเมล็ดสูงกว่าพันธุ์ชัยนาท 1 เล็กน้อย แต่เมื่อใช้อัตราเมล็ดพันธุ์เพิ่มขึ้นเป็น 50 กก./ไร่ พบว่าข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ให้น้ำหนักเมล็ดต่ำกว่าพันธุ์ชัยนาท 1 เพียงเล็กน้อย (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 4 การตอบสนองของน้ำหนัก 1000 เมล็ดของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และสุพรรณบุรี 60 ต่ออัตราการหว่านเมล็ดพันธุ์ที่แตกต่างกัน

จำนวนเมล็ดดีต่อกอ

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าข้าวทั้งสองพันธุ์มีจำนวนเมล็ดดีต่อกอไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) ซึ่งจำนวนเมล็ดดีต่อกอของข้าวทั้งสองพันธุ์แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยพันธุ์ชัยนาท 1 มีจำนวน 325 เมล็ดต่อรวง และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 มีจำนวน 338 เมล็ดต่อรวง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างจำนวนเมล็ดดีต่อกอของข้าวที่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดแตกต่างกัน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยการปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดเท่ากับ 25 กก./ไร่ มีจำนวน 291 เมล็ดต่อรวงซึ่งน้อยที่สุด และการปลูกโดยใช้เมล็ดพันธุ์ในอัตรา 5 และ 50 กก./ไร่ มีจำนวนเมล็ดเท่ากับ 324 และ 381 เมล็ดต่อรวง ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบการตอบสนองของจำนวนเมล็ดดีต่อกอของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และสุพรรณบุรี 60 ต่ออัตราการหว่านเมล็ดอัตราพันธุ์ที่แตกต่างกัน พบว่าการตอบสนองไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่พบว่าการปลูกที่อัตราเมล็ด 5 กก./ไร่ ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 จะมีจำนวนเมล็ดดีเท่ากับ 268 เมล็ดต่อรวง ซึ่งต่ำกว่าพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่มีจำนวน 379 เมล็ดต่อรวง และเมื่ออัตราเมล็ดพันธุ์ที่ใช้ปลูกเพิ่มสูงขึ้นเป็น 25 กก./ไร่ จำนวนเมล็ดดีต่อกอของพันธุ์ชัยนาท 1 มากกว่าพันธุ์สุพรรณบุรี 60 เพียง 14 เมล็ดเท่านั้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราเมล็ดพันธุ์สูงขึ้นเป็น 50 กก./ไร่ พบว่าจำนวนเมล็ดดีต่อกอของพันธุ์ชัยนาท 1 สูงกว่าพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ถึง 58 เมล็ด (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 5 การตอบสนองของจำนวนเมล็ดดีต่อกอของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และสุพรรณบุรี 60 ต่ออัตราการหว่านเมล็ดพันธุ์ที่แตกต่างกัน

4. ผลการจำลองการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว

วันออกดอก

การประเมินระยะพัฒนาการของข้าวในแง่ของอายุวันออกดอกของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และสุพรรณบุรี 60 ที่ปลูกด้วยอัตราเมล็ดพันธุ์ที่แตกต่างกัน พบว่าแบบจำลองสามารถประเมินอายุวันออกดอกเฉลี่ยของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ได้แตกต่างจากอายุวันออกดอกที่จดบันทึกจริงในแปลงทดลองคิดเป็นร้อยละ 2.8 โดยอายุวันออกดอกของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์เท่ากับ 5, 25 และ 50 กก./ไร่ ที่แบบจำลองสามารถประเมินได้มีค่าเท่ากับ 89, 90 และ 90 วันตามลำดับ ซึ่งเร็วกว่าอายุวันออกดอกที่จดบันทึกได้จากแปลงทดลองจริงประมาณ 6, 1 และ 1 วัน ตามลำดับ สำหรับผลการจำลองอายุวันออกดอกของข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 พบว่า แบบจำลองสามารถประเมินอายุวันออกดอกของข้าวได้แตกต่างจากค่าสังเกตจริงในแปลงทดลองจริงคิดเป็นร้อยละ 4.3 โดยวันออกดอกของข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์เท่ากับ 5, 25 และ 50 กก./ไร่ ที่แบบจำลองประเมินได้มีค่าเท่ากับ 88 วัน ที่ทุกอัตราเมล็ดพันธุ์ ในขณะที่อายุวันออกดอกที่จดบันทึกได้จากแปลงทดลองจริงมีค่าเท่ากับ 92, 91 และ 93 วัน ตามลำดับ ซึ่งแบบจำลองสามารถทำนายอายุวันออกดอกได้เร็วกว่าค่าสังเกตจริงเท่ากับ 4, 3 และ 5 ตามลำดับ (ตารางที่ 4)

วันเก็บเกี่ยว

การประเมินอายุเก็บเกี่ยวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และสุพรรณบุรี 60 ที่ปลูกด้วยอัตราเมล็ดพันธุ์ที่แตกต่างกัน คือ 5, 25 และ 50 กก./ไร่ พบว่าแบบจำลองสามารถประเมินอายุเก็บเกี่ยวของข้าวทั้งสองพันธุ์ได้ค่อนข้างแม่นยำ โดนเฉพาะพันธุ์ชัยนาท 1 แบบจำลองสามารถประเมินวันเก็บเกี่ยวของข้าวที่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ 5, 25 และ 50 กก./ไร่ ได้ตรงกับวันเก็บเกี่ยวจริงในแปลงทดลอง คือ 112 วัน ที่ทุกอัตราเมล็ดพันธุ์ ในขณะที่ผลการประเมินอายุวันเก็บเกี่ยวของพันธุ์สุพรรณบุรี 60 นั้นพบว่าแบบจำลองประเมินได้แตกต่างจากอายุเก็บเกี่ยวจริงคิดเป็นร้อยละ 2.7 โดยแบบจำลองประเมินอายุวันเก็บเกี่ยวของข้าวที่ทุกอัตราเมล็ดพันธุ์เฉลี่ยเท่ากับ 115 วัน ซึ่งช้ากว่าอายุวันเก็บเกี่ยวจริงในแปลงทดลองประมาณ 3 วัน ที่ทุกอัตราเมล็ดพันธุ์ โดยค่าสังเกตจริงของอายุวันเก็บเกี่ยวในแปลงทดลองที่ทุกอัตราเมล็ดพันธุ์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 112 วัน (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 อายุถึงวันออกดอกและวันเก็บเกี่ยวของข้าวระหว่างค่าที่ได้จากการสังเกตจริง (Observed data, O) และจากการจำลองสถานการณ์ (Simulated data, S)

กรรมวิธี	วันออกดอก (วัน)			วันเก็บเกี่ยว (วัน)		
	S	O	(S-O) x100/O	S	O	(S-O)x100/O
ชัยนาท 1 x อัตราเมล็ด 5 กก./ไร่	89	95	-6.3	111	112	-0.9
ชัยนาท 1 x อัตราเมล็ด 25 กก./ไร่	90	91	-1.1	112	112	0.0
ชัยนาท 1 x อัตราเมล็ด 50 กก./ไร่	90	91	-1.1	112	112	0.0
ค่าเฉลี่ย	*90*	*92*	*-2.8*	*112*	*112*	*-0.3*
สุพรรณบุรี 60 x อัตราเมล็ด 5 กก./ไร่	88	92	-4.3	115	112	2.7
สุพรรณบุรี 60 x อัตราเมล็ด 25 กก./ไร่	88	91	-3.3	115	112	2.7
สุพรรณบุรี 60 x อัตราเมล็ด 50 กก./ไร่	88	93	-5.4	115	112	2.7
ค่าเฉลี่ย	*88*	*92*	*-4.3*	*115*	*112*	2.7
F-test		ns			-	
C.V. %		3.42			-	

ns = ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ตารางที่ 5 ค่า RMSE (กก./เฮกตาร์) และค่า d-statistic ของน้ำหนักแห้งและผลผลิตระหว่างค่าที่ได้จากการสังเกตจริง (Observed data, O) และจากการจำลองสถานการณ์ (Simulated data, S)

กรรมวิธี	น้ำหนักแห้งต้น		น้ำหนักแห้งใบ		น้ำหนักแห้งรวม		ผลผลิต†	
	RMSE‡	d-statistic	RMSE‡	d-statistic	RMSE‡	d-statistic	RMSE‡	d-statistic
ชัยนาท 1 x อัตราเมล็ด 5 กก./ไร่	205	0.85	164	0.74	102	0.99	1,020	-
ชัยนาท 1 x อัตราเมล็ด 25 กก./ไร่	186	0.84	217	0.47	246	0.99	580	-
ชัยนาท 1 x อัตราเมล็ด 50 กก./ไร่	196	0.81	200	0.55	200	0.99	216	-
ค่าเฉลี่ย	*196*	*0.83*	*194*	*0.59*	*183*	*0.99*	*605*	-
สุพรรณบุรี 60 x อัตราเมล็ด 5 กก./ไร่	177	0.92	192	0.69	443	0.98	244	-
สุพรรณบุรี 60 x อัตราเมล็ด 25 กก./ไร่	158	0.94	197	0.70	1,241	0.93	2,644	-
สุพรรณบุรี 60 x อัตราเมล็ด 50 กก./ไร่	276	0.75	184	0.73	95	0.99	943	-
ค่าเฉลี่ย	*204*	*0.87*	*191*	*0.71*	*593*	*0.97*	*1,277*	-

† = เก็บตัวอย่างเพียง 1 ครั้ง ที่ระยะเก็บเกี่ยวจึงไม่สามารถวัดค่า d-stat ได้

‡ = ค่า RMSE มีหน่วยเป็น กก./เฮกตาร์

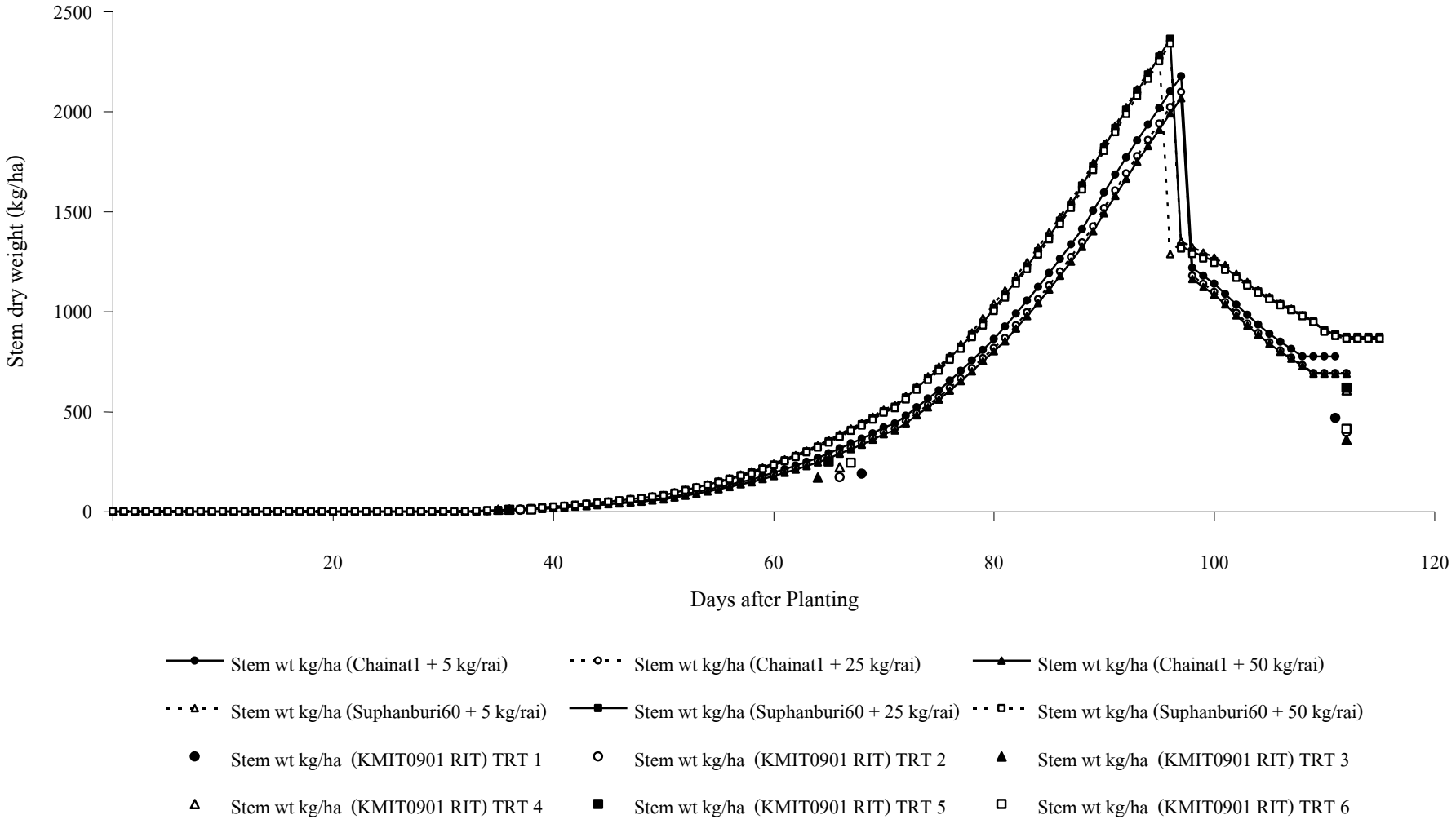
น้ำหนักแห้งต้น

ผลการจำลองน้ำหนักแห้งต้นของข้าว พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายน้ำหนักแห้งต้นของข้าวได้ค่อนข้างดี โดยแบบจำลองสามารถทำนายน้ำหนักแห้งต้นเฉลี่ยของพันธุ์ชัยนาท 1 ได้ใกล้เคียงกับค่าสังเกตจริง มีค่า RMSE เท่ากับ 196 กก./เฮกตาร์ และค่า d-stat เท่ากับ 0.83 เมื่อเปรียบเทียบผลการทำนายน้ำหนักแห้งต้นของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ 5, 25 และ 50 กก./ไร่ พบว่ามีค่า RMSE เท่ากับ 205, 186 และ 196 กก.เฮกตาร์ ตามลำดับ และมีค่า d-stat เท่ากับ 0.85, 0.84 และ 0.81 ตามลำดับ สำหรับผลการทำนายน้ำหนักแห้งต้นของข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับค่าสังเกตจริงแม่นยำน้อยกว่าพันธุ์ชัยนาท 1 โดยความแตกต่างระหว่างน้ำหนักแห้งต้นเฉลี่ยของข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ประเมินได้จากแบบจำลองและค่าสังเกตจริง มีค่า RMSE เท่ากับ 204 กก./เฮกตาร์ และมีค่า d-stat เท่ากับ 0.87 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการทำนายน้ำหนักแห้งต้นของข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ 5, 25 และ 50 กก./ไร่ มีค่า RMSE เท่ากับ 177, 158 และ 276 กก./เฮกตาร์ ตามลำดับ และมีค่า d-stat เท่ากับ 0.92, 0.94 และ 0.75 ตามลำดับ (ตารางที่ 5)

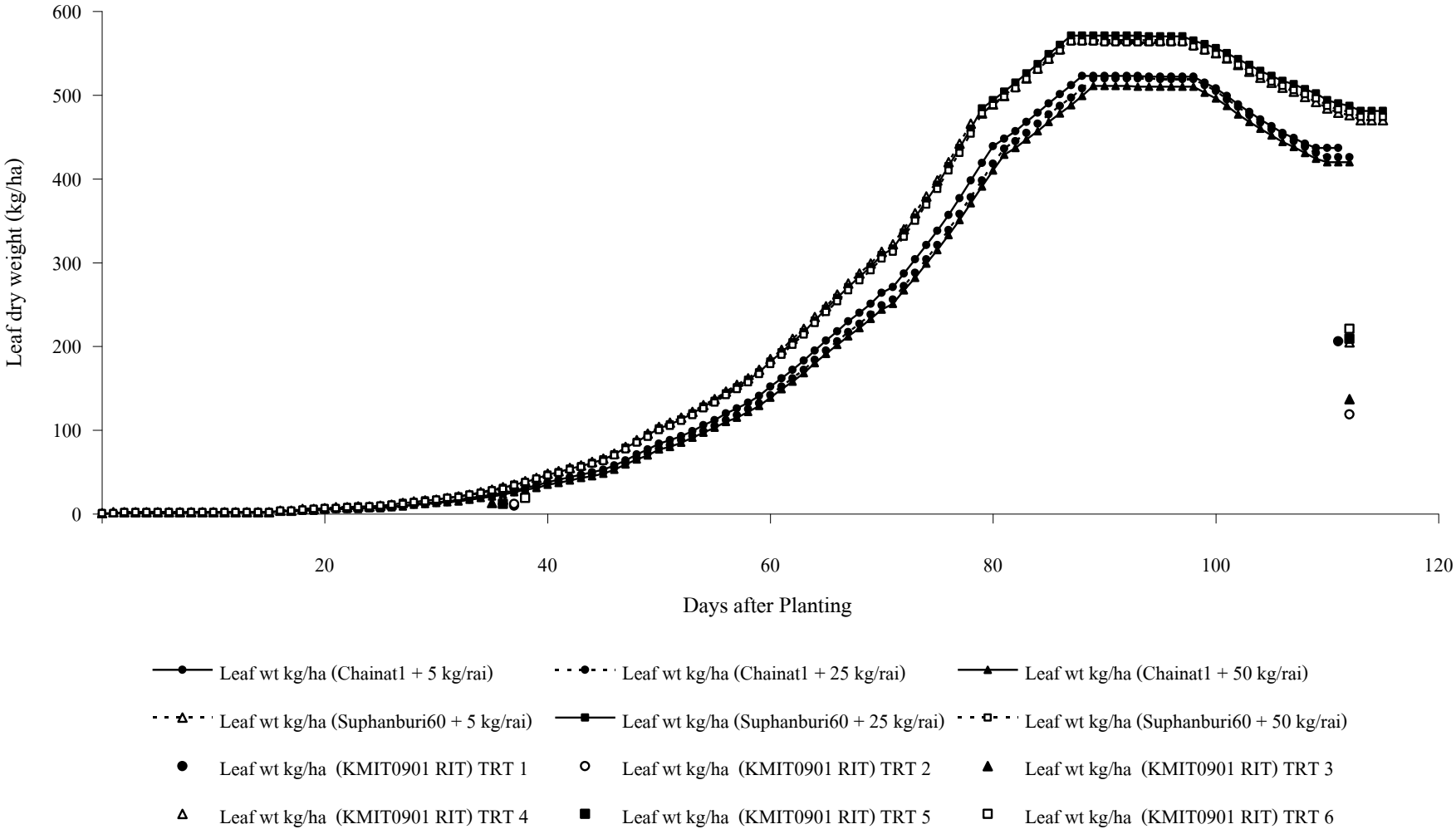
โดยภาพรวมของการเปรียบเทียบน้ำหนักแห้งต้นของข้าวทั้งสองพันธุ์ที่ประเมินได้จากแบบจำลองกับค่าสังเกตจริง พบว่าน้ำหนักแห้งต้นที่ประเมินได้จากแบบจำลองสูงกว่าค่าสังเกตจริงในแปลงทดลองเล็กน้อย (ภาพที่ 6)

น้ำหนักแห้งใบ

การเปรียบเทียบน้ำหนักแห้งใบของข้าวที่ประเมินได้จากแบบจำลองและค่าสังเกตจริงในแปลงทดลอง พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายน้ำหนักแห้งใบของข้าวทั้งสองพันธุ์ได้สูงกว่าค่าสังเกตจริงในแปลงทดลองค่อนข้างมาก (ภาพที่ 7) ซึ่งจะเห็นว่าแบบจำลองยังประเมินน้ำหนักแห้งใบของข้าวทั้งสองพันธุ์ได้ไม่ดีนัก โดยแบบจำลองสามารถทำนายน้ำหนักแห้งใบเฉลี่ยของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 มีค่า RMSE และ d-stat เท่ากับ 194 กก./เฮกตาร์ และ 0.59 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายน้ำหนักแห้งใบของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ 5, 25 และ 50 กก./ไร่ พบว่ามีค่า RMSE เท่ากับ 164, 217 และ 200 กก./เฮกตาร์ ตามลำดับ และมีค่า d-stat เท่ากับ 0.74, 0.47 และ 0.55 ตามลำดับ สำหรับผลการทำนายน้ำหนักแห้งใบเฉลี่ยของข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 มีค่า RMSE และ d-stat เท่ากับ 191 กก./เฮกตาร์ และ 0.71 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายน้ำหนักแห้งใบของข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ 5, 25 และ 50 กก./ไร่ พบว่ามีค่า RMSE เท่ากับ 192, 197 และ 184 กก./เฮกตาร์ ตามลำดับ และมีค่า d-stat เท่ากับ 0.69, 0.70 และ 0.73 ตามลำดับ (ตารางที่ 5)



ภาพที่ 6 เปรียบเทียบน้ำหนักแห้งต้นระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง (กราฟเส้น) และค่าสังเกตจริงในแปลงทดลอง (กราฟจุด) ของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และสุพรรณบุรี 60 ที่ปลูกด้วยอัตราเมล็ดที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 7 เปรียบเทียบน้ำหนักแห้งใบระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง (กราฟเส้น) และค่าสังเกตจริงในแปลงทดลอง (กราฟจุด) ของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และสุพรรณบุรี 60 ที่ปลูกด้วยอัตราเมล็ดที่แตกต่างกัน

น้ำหนักแห้งรวม

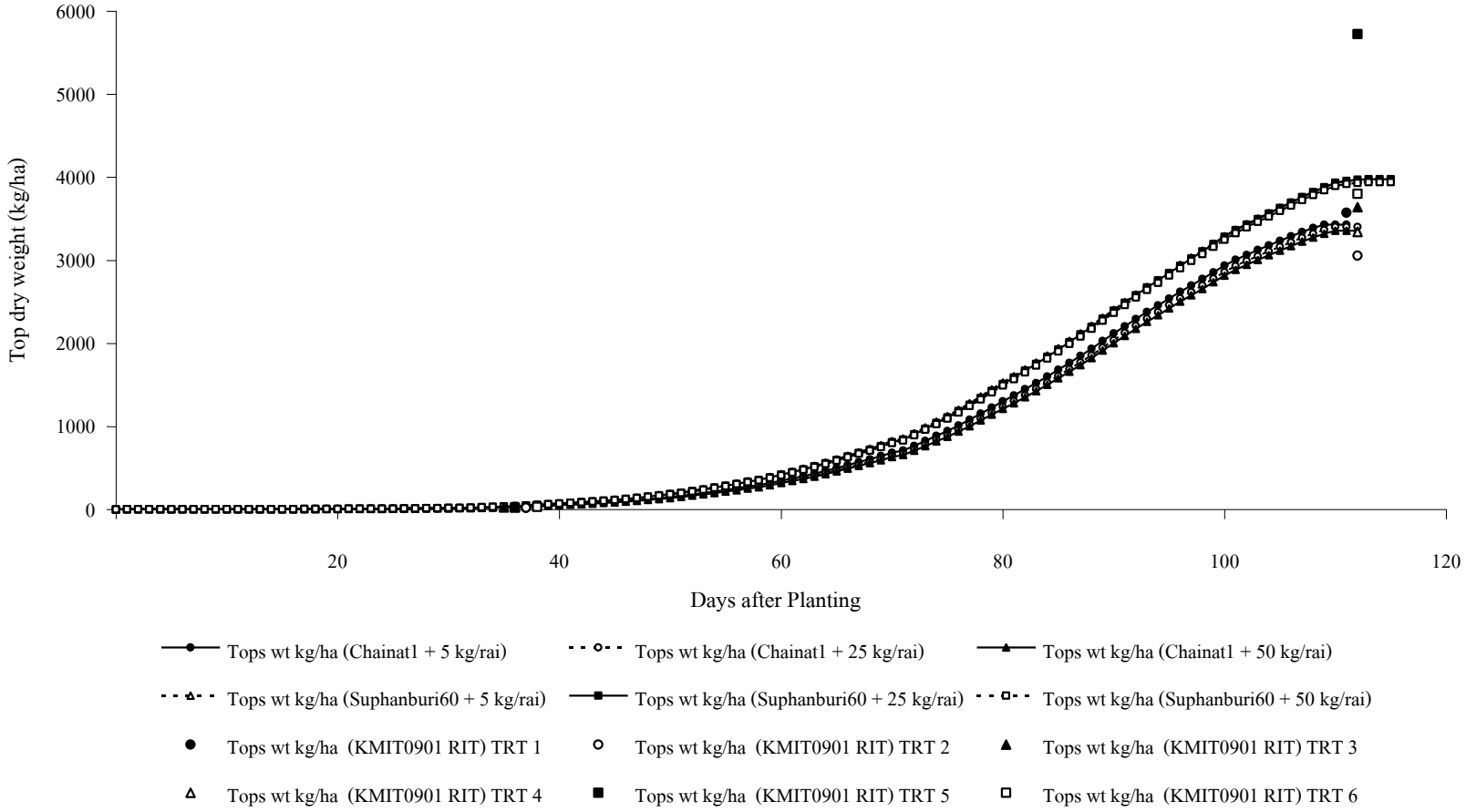
ผลการจำลองน้ำหนักแห้งรวมของข้าวพบว่า แบบจำลองสามารถทำนายน้ำหนักแห้งของข้าวได้ค่อนข้างดี โดยเฉพาะพันธุ์ชัยนาท 1 พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายน้ำหนักแห้งรวมเฉลี่ยได้ใกล้เคียงกับค่าสังเกตจริง มีค่า RMSE เท่ากับ 183 กก./เฮกตาร์ และค่า d-stat เท่ากับ 0.99 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายน้ำหนักแห้งรวมของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ 5, 25 และ 50 กก./ไร่ มีค่า RMSE เท่ากับ 102, 246 และ 200 กก.เฮกตาร์ ตามลำดับ และมีค่า d-stat เท่ากับ 0.99 เท่ากันที่ทุกอัตราเมล็ดพันธุ์ และสำหรับผลการทำนายน้ำหนักแห้งรวมของข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายได้ใกล้เคียงน้อยกว่าพันธุ์ชัยนาท 1 โดยความแตกต่างระหว่างน้ำหนักแห้งรวมเฉลี่ยที่ประเมินได้จากแบบจำลองและค่าสังเกตจริงจากแปลงทดลองมีค่า RMSE เท่ากับ 593 กก./เฮกตาร์ และมีค่า d-stat เท่ากับ 0.97 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายน้ำหนักแห้งรวมของข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ 5, 25 และ 50 กก./ไร่ มีค่า RMSE เท่ากับ 443, 1241 และ 95 กก./เฮกตาร์ ตามลำดับ และมีค่า d-stat เท่ากับ 0.98, 0.93 และ 0.99 ตามลำดับ (ตารางที่ 5)

โดยภาพรวมของการเปรียบเทียบน้ำหนักแห้งรวมของข้าวทั้งสองพันธุ์ที่ประเมินได้จากแบบจำลองกับค่าสังเกตจริง พบว่าแบบจำลองสามารถประเมินน้ำหนักแห้งรวมในช่วงแรกของการเจริญเติบโตได้ใกล้เคียงกับค่าสังเกตจริงได้ดี แต่ที่ระยะเก็บเกี่ยวแบบจำลองสามารถทำนายน้ำหนักแห้งรวมของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ได้ใกล้เคียงกับค่าสังเกตจริงมากกว่าพันธุ์สุพรรณบุรี 60 (ภาพที่ 8)

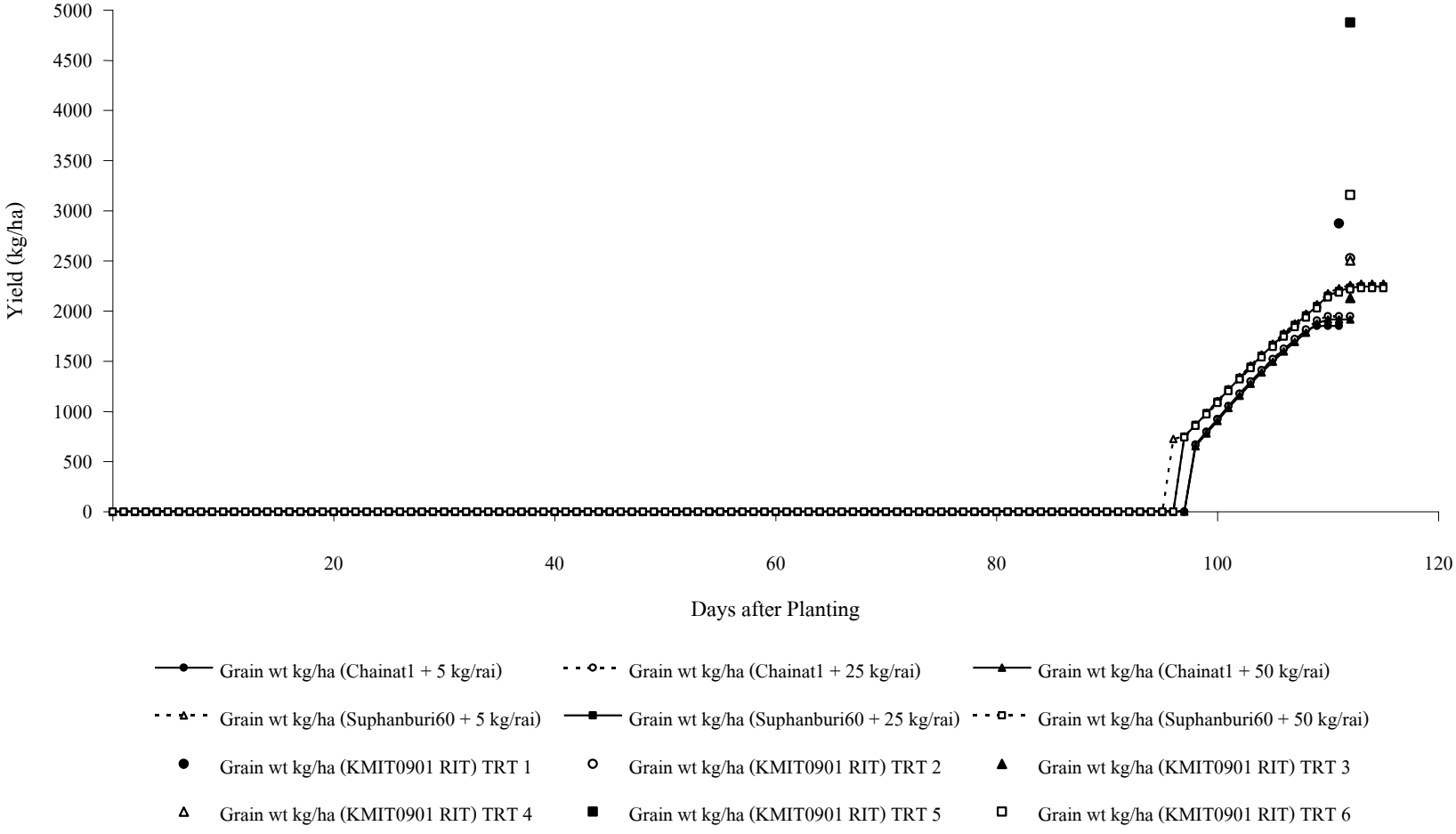
ผลผลิต

การประเมินผลผลิตของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และสุพรรณบุรี 60 พบว่าแบบจำลองสามารถประเมินผลผลิตของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ได้ไม่ดีนัก โดยมีค่า RMSE เฉลี่ยเท่ากับ 605 และ 1,277 กก./เฮกตาร์ สำหรับข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และสุพรรณบุรี 60 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าแบบจำลองสามารถประเมินผลผลิตของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ได้ดีกว่าพันธุ์สุพรรรบุรี 60 เมื่อเปรียบเทียบผลการประเมินข้าวพันธุ์เดียวกันแต่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์แตกต่างกัน พบว่าในข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 แบบจำลองสามารถประเมินผลผลิตของข้าวที่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ 50 กก./ไร่ ได้ใกล้เคียงกับค่าสังเกตจริงมากที่สุด โดยมีค่า RMSE เท่ากับ 216 กก./เฮกตาร์ รองลงมาคือการปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ 25 และ 5 กก./ไร่ มีค่า RMSE เท่ากับ 580 และ 1,020 กก./เฮกตาร์ ตามลำดับ ในขณะที่ผลการประเมินของพันธุ์สุพรรณบุรี 60 พบว่าแบบจำลองสามารถประเมินผลผลิตของข้าวที่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ 5 กก./ไร่ ได้ใกล้เคียงมากที่สุด โดยมีค่า RMSE เท่ากับ 244 กก./เฮกตาร์ รองลงมาคือการปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ 50 และ 25 กก./ไร่ มีค่า RMSE เท่ากับ 943 และ 2,644 กก./เฮกตาร์ ตามลำดับ (ตารางที่ 5)

สำหรับการเปรียบเทียบผลผลิตของข้าวทั้งสองพันธุ์โดยภาพรวมระหว่างผลผลิตที่ประเมินได้จากแบบจำลองการเจริญเติบโตของข้าวกับค่าสังเกตจริง พบว่าแบบจำลองสามารถประเมินผลผลิตของข้าวทั้งสองพันธุ์ได้ต่ำกว่าผลผลิตที่วัดได้จริงจากแปลงทดลอง (ภาพที่ 9)



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบน้ำหนักแห้งรวมระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง (กราฟเส้น) และค่าสังเกตจริงในแปลงทดลอง (กราฟจุด) ของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และสุพรรณบุรี 60 ที่ปลูกด้วยอัตราเมล็ดที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 9 เปรียบเทียบผลผลิตระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง (กราฟเส้น) และค่าสังเกตจริงในแปลงทดลอง (กราฟจุด) ของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และสุพรรณบุรี 60 ที่ปลูกด้วยอัตราเมล็ดที่แตกต่างกัน

วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการตรวจสอบสภาพอากาศพบว่า ในวันที่ทำการหว่านข้าวลงในแปลงนั้น มีสภาพอากาศหนาวเย็นมาก (วันที่ 2 มกราคม 2552) โดยมีอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 18.2 และ 25.8 ^{o}C ตามลำดับ และยังคงมีอุณหภูมิเย็นต่อเนื่องไปอีกเป็นระยะเวลาประมาณ 5 วัน โดยมีอุณหภูมิต่ำสุดอยู่ระหว่าง 18-22 ^{o}C และอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 25-31 ^{o}C จึงทำให้ข้าวที่หว่านลงในแปลงงอกช้ามาก โดยใช้เวลาในการงอกนานกว่า 5 วัน ส่งผลให้ข้าวมีอายุวันแตกกอและอายุวันกำเนิดช่อดอกยืดออกไปเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากมีความจำเป็นต้องเก็บเกี่ยวข้าวในวันเดียวกันทั้งหมด เพราะเกิดโรคและแมลงเข้าทำลายอย่างมาก จึงทำให้ไม่สามารถรอบันทึกอายุวันสุกแก่ทางสรีรวิทยาของข้าวได้ ดังนั้นทุกกรรมวิธีจึงจำเป็นต้องมีการเก็บเกี่ยวพร้อมกัน เมื่อข้าวมีอายุได้ประมาณ 112 วัน ซึ่งอาจมีผลต่อความสามารถในการทำนายของแบบจำลอง เนื่องจากต้องมีการกำหนดค่าสังเกตของวันสุกแก่ทางสรีรวิทยาให้กับแบบจำลองเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ทำนายได้

ผลการเปรียบเทียบผลผลิตของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และสุพรรณบุรี 60 พบว่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยข้าวพันธุ์ใดพันธุ์หนึ่งที่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ที่แตกต่างกันจะให้ผลผลิตไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ De Datta (1981) ที่รายงานไว้ว่าข้าวพันธุ์หนึ่งไม่ว่าจะปลูกโดยวิธีใดมีแน้วโน้มในการให้ผลผลิตคล้าย ๆ กัน ถ้าได้รับการดูแลปฏิบัติดูแลรักษาที่เหมือนกัน แต่อย่างไรก็ตามพบว่า และเมื่อมีการหว่านข้าวที่อัตราเมล็ดพันธุ์ไม่ต่ำและสูงเกินไปจะทำให้ได้ผลผลิตสูงขึ้น

ในการศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าแบบจำลอง CERES-Rice มีความสามารถที่จะนำมาใช้ในการจำลองพัฒนาการและการให้ผลผลิตของข้าวได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ทั้งนี้จะเห็นได้จากแบบจำลองสามารถทำนายอายุวันออกดอกและวันเก็บเกี่ยวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และสุพรรณบุรี 60 ที่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ที่แตกต่างกันได้ค่อนข้างดี ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Alociljha and Ritchie (1991) ที่ได้รายงานไว้ว่า แบบจำลอง CERES-Rice สามารถทำนายระยะพัฒนาการของข้าวจำนวน 3 พันธุ์ ที่ปลูกในประเทศฟิลิปปินส์ จำนวน 6 งานทดลองได้อย่างแม่นยำ และการศึกษาของ Boonjung (2000) ที่ได้รายงานไว้ว่าแบบจำลอง CERES-Rice สามารถทำนายวันสุกแก่ของข้าวหอมมะลิ 105 ซึ่งเป็นข้าวพันธุ์ไวแสง ปลูกใน 6 สภาพแวดล้อมในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยได้อย่างแม่นยำ แต่อย่างไรก็ตามผลการศึกษาของเขาชี้ให้เห็นว่า แบบจำลองสามารถทำนายจำนวนวันกำเนิดช่อดอกได้สูงกว่าข้อมูลจริงเล็กน้อย

แบบจำลองสามารถทำนายผลผลิตของข้าวทั้งสองพันธุ์ที่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ที่แตกต่างกันได้ต่ำกว่าผลผลิตจริงในแปลงทดลอง แต่การศึกษาอื่น ๆ กลับพบว่าแบบจำลองสามารถทำนายผลผลิตของข้าวได้สูงกว่าค่าสังเกตจริง เช่น Tongyai (1994) พบว่าแบบจำลอง CERES-Rice สามารถทำนายผลผลิตเมล็ดของข้าวได้สูงกว่าข้อมูลจริง 0.2-0.4 ตัน/เฮกตาร์ (4.5–9%) และทำนายมวลชีวภาพได้ต่ำกว่าข้อมูลจริง 0.8-1.0 ตัน/เฮกตาร์ (10-12%) ในขณะที่ Jintrawat (1995) รายงานว่าแบบจำลอง

CERES-Rice สามารถนำนาย น้ำหนักเมล็ด จำนวนเมล็ด และผลผลิตเมล็ดของข้าวทั้งพันธุ์ไวแสงและไม่ไวแสงได้ค่อนข้างดี และ Boonjung (2000) ก็ได้รายงานว่าแบบจำลอง CERES-Rice สามารถทำนายผลผลิตของข้าวหอมมะลิ 105 ได้ดี เช่นกัน อย่างไรก็ตามเนื่องมาจากข้อมูลผลผลิตที่ได้จากการสังเกตจริงในการศึกษาครั้งนี้นั้นมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปัจจัยหลายประการโดยเฉพาะปัจจัยทางสภาพแวดล้อม เช่น การระบาดของโรคและแมลงในช่วงท้ายของการเจริญเติบโตก่อนที่ข้าวถึงระยะสุกแก่ทางสรีรวิทยา ซึ่ง เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลผลิตในแปลงทดลองได้ ซึ่งชี้ให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าแบบจำลองสามารถทำนายน้ำหนักแห้งต้นและน้ำหนักแห้งใบของข้าวทั้งสองพันธุ์ที่ปลูกโดยใช้อัตราเมล็ดพันธุ์แตกต่างกันมีค่าสูงน้ำหนักแห้งต้นและน้ำหนักแห้งใบที่มีการจดบันทึกจริงในแปลงทดลอง ซึ่งสาเหตุสำคัญเนื่องมาการระบาดของโรคและแมลงในแปลงทดลองทำให้ต้นและใบของข้าวเกิดความเสียหายอย่างหนัก

สรุปผลการทดลอง

แบบจำลอง CERES-Rice สามารถนำมาใช้ในการประเมินระยะพัฒนาการและผลผลิตของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และสุพรรณบุรี 60 ที่ปลูกภายใต้สภาพการจัดการในเรื่องของอัตราเมล็ดพันธุ์ที่ใช้ในการหว่านได้ผลการประเมินที่ค่อนข้างแม่นยำสำหรับอายุวันออกดอกและอายุเก็บเกี่ยว แต่อย่างไรก็ตามพบว่าความสามารถในการทำนายของแบบจำลอง CERES-Rice สำหรับลักษณะการเจริญเติบโต แบบจำลองสามารถทำนายน้ำหนักแห้งรวมได้ค่อนข้างดี แต่ทำนายน้ำหนักแห้งต้น น้ำหนักแห้งใบ และผลผลิตของข้าว ได้ไม่ดีนัก แต่ก็อยู่ในระดับที่น่าพอใจ อย่างไรก็ตามการที่จะนำเอาแบบจำลอง CERES-Rice มาประยุกต์ใช้ในระบบการผลิตข้าว เพื่อเป็นเครื่องมือในการสนับสนุนการตัดสินใจนั้น ผู้ใช้งานต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับข้อดีและข้อจำกัดของแบบจำลอง และตระหนักไว้เสมอว่า อย่างไรเสียแบบจำลองก็เป็นสิ่งที่คิดค้นขึ้นมาเพื่อเลียนแบบระบบจริง ซึ่งแบบจำลองอาจยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความสามารถในการนำไปใช้งานในบางสภาพการณ์ โดยเฉพาะปัจจัยทางสภาพแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมได้ด้วยแบบจำลอง เช่น การระบาดของโรคและแมลง การระบาดของวัชพืช และธาตุอาหารอื่น ๆ นอกเหนือจากไนโตรเจนที่แบบจำลองยังไม่สามารถจำลองสถานการณ์ได้ นอกจากนี้การประยุกต์ใช้แบบจำลองในการประเมินสภาพการจัดการแปลงปลูก เช่น การกำหนดอัตราเมล็ดพันธุ์ที่ใช้ในการหว่าน อาจจะต้องคำนึงถึงความถูกต้องของข้อมูลนำเข้า ทั้งนี้เพื่อให้ผลการทำนายมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นนี้ล้วนส่งผลต่อความสามารถในการทำงานของแบบจำลองในการประเมินพัฒนาการและผลผลิตของข้าวทั้งสิ้น

บรรณานุกรม

Aggarwal, P.K. and N. Kalra. 1994. Analyzing the limitation set by climatic factors genotype, and water and nitrogen availability on productivity of wheat: II. Climatically potential yields and management strategies. Field Crops Res. 36: 161-166.

Aggarwal, P.K., R.B. Matthews and M.J. Kropff. 1995. Opportunities for the application of systems approaches in plant breeding. *In* P.K. Aggarwal, R.B. Matthews, M.J. Kropff and H.H. van Larr (eds), SARP Research Proceeding, pp. 135-144. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines.

Alociljha, E.C. and J.T. Ritchie. 1991. A model for the phenology of rice. *In* Hodges, T. (ed.), Predicting Crop Phenology, pp. 181-189. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

Boonjung, H. 2000. Climate variability and rice production in rainfed rice area in northeast Thailand: risk analysis and management applications. http://www.earthscape.org/rmain/rsites/clch.html pp. 202-205.

Boote, K.J., J.W. Jones, and N.B. Pickering. 1996. Potential uses and limitations of crop models. Agron. J. 88: 704-716.

De Datta, S.K. 1981. Principles and Practices of Rice Production. John Wiley & Sons, Inc., NY. 618 p.

Egli, D.B. and W. Bruening. 1992. Planting date and soybean yield: evaluation of environmental effect with a crop simulation model. SOYGRO. Agric. For. Meterorol. 62: 19-29.

Godwin, D.C., U. Singh, R.J. Buresh, and S.K. De Datta. 1990. Modelling N dynamics in relation to rice growth and yield. *In* Transactions of the 14th Int. Cong. Soil Sci., Kyoto, Japan. Int. Soc. Soil Sci., Japan, pp. 320-325.

Graves, A.R., T. Hess, R.B. Matthews., W. Stephens., and T. Middleton. 2002. Crop simulation model as tools in computer laboratory and classroom-based education. J. Nat. Resour. Life Sci. Educ. 31: 48-54.

Heinemann, A.B., G. Hoogenboom, and B. Chojnicki. 2002. The impact of potential errors in rainfall observation on the simulation of crop growth, development and yield. Ecological Modeling. 157: 1-21.

Hoogenboom, G., J.W. Jones, P.W. Wilkens, C.H. Porter, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, K.J. Boote, U. Singh, O. Uryasev, W.T. Bowen, A.J. Gijsman, A.S. 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 (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer Project). 1988. Technical Report 1. Experimental design and data collection procedure for IBSNAT. The minimum data sets for system analysis and crop simulation, 3rd Edition. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.

Jagtap, S.S., and J.W. Jones. 2002. Adaptation and evaluation of the CROPGRO-soybean model to predict regional yield and production. Agriculture, Ecosystems and Environment. 93: 73-85.

Jintrawat, A. 1995. A decision support system for rapid assessment of lowland rice-based cropping alternatives in Thailand. Agric. Syst. 47: 245-258.

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.T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. Europ. J. Agron. 18: 235-265.

Jones, J.W., L.A. Hunt, G. Hoogenboom, D.C. Godwin, U. Singh, G.Y. Tsuji, N.B. Pickering, P.K. Thornton, W.T. Bowen, K.J. Boote, and J.T. Ritchie. 1994. Input and output files, pp. 1-93. *In* Tsuji, G.Y., G. Uehava, and S. Balas. (eds.), DSSAT v3. Vol. 2-1. University of Hawaii Honolulu, Hawaii.

Lansigan, F.P. 1998. Minimum data and information requirements for estimating yield gap in crop production systems. The Asian Federation for Information Technology in Agriculture. 151-160.

Mahmood, R. 1998. Air temperature variations and rice productivity in Bangladesh: a comparative study of the performance of the yield and the CERES-Rice models. Ecological Modelling. 106: 201-212.

Mall, R.K., and P.K., Aggarwal. 2002. Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India. I. Evaluation of impact assessment models. Climate Change. 52: 315-330.

Matthews, R. 2002. Crop management. *In* Matthews, R., and W. Stephens (eds.), Crop-Soil Simulation Models Applications in Developing Countries, pp. 29-53. . CABI Publishing, CABI Publishing, New York.

Meinke, H., G.L. Hammer and S.C. Chapman. 1993. A sunflower simulation model. II. Simulating production risks in variable subtropical environment. Agron. J. 85: 735-742.

Meinke, H. and G.L. Hammer. 1995. A peanut simulation model : II. Assessing regional production potential. Agron. J. 87: 1093-1099.

Meyer, W.S., R.J.G. White, D.J. Smith, and B.D. Baer. 1994. Monitoring a rice crop to validate the CERES Rice model. CSIRO Technical Memorandum 94/13. September 1994, 26 p.

Monteith, J.L. 1996. The Quest for balance in crop modeling. Agron. J. 88: 695-697.

Penning de Vries, F. P. Teng, and K. Metselaar (eds.). 1993. Systems approaches for agricultural development. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

Penning de Vries, F.W.T., D.M. Jansen, H.F.M. ten Berge and A. Bakema. 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops, 271 p.

Pinnschmidt, H.O., P.S. Teng, J.E. Yuen, and A., Djurle. 1990. Coupling pest effects to the IBSNAT CERES crop model for rice. Phytopathology. 80: 997.

Sinclair, T.R. and N.G. Seligman. 1996. Crop modeling: From infancy to maturity. Agron. J. 88: 698-704.

Singh, U. and P.K. Thornton. 1992. Using crop simulation models for sustainability and environmental quality assessment. Outlook on Agriculture. 21: 209-218.

Timsina, J and E. Humphreys. 2003. Performance and application of CERES and SWAGMAN Destiny models for rice-wheat cropping systems in Asia and Australia: a review. CSIRO Land and Water Technical Report 16/03. CSIRO Land and Water, Griffith, NSW 2680, Australia, 57 p.

Timsina, J., U. Singh, M. Badaruddin, and C. Meisner. 1998. Cultivar, nitrogen, and moisture effects on a rice wheat sequence: experimentation and simulation. Agron. J. 90: 119-130.

Tongyai, C. 1994. Impact of climate change on simulated rice production in Thailand. *In* Rosenzweig, C, Iglesias, A (eds.), Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modelling Study. US Environmental Protection Agency. EPA 230-B-94-003, Washington DC.

White, J.W. 1998. Modeling and crop improvement. *In* Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (eds.). Understanding Options for Agricultural Production, pp. 179-188.. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.

White, J.W. and G. Hoogenboom. 1996. Simulating effects of genes for physiological traits in a process-oriented crop model. Agron. J. 88: 416-422.

ภาคผนวก

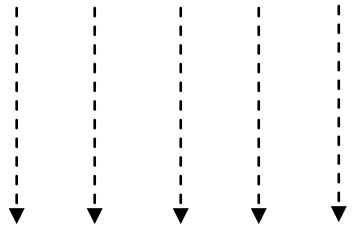
ภาคผนวกที่ 1 ไฟล์ข้อมูลดินจากแปลงทดลอง

```
*SOILS: General DSSAT Soil Input File
! DSSAT v4.0; 08/31/2005
!
! Standard Soil Profiles
!
! The following generic information was developed by A.J. Gijsman:
!
! - BD was estimated as BD = 100 / (SOM% / 0.224 + (100 - SOM%) / mineral BD)
!   (Adams, 1973; Rawls and Brakensiek, 1985).
! - LL and DUL are according to Saxton et al., 1986.
! - SAT was taken as a fraction of porosity (Dalgliesh and Foale, 1998):
!   0.93 for soil classes S, SL and LS; 0.95 for soil classes L, SIL, SI,
!   SCL and SC; and 0.97 for soil classes C, CL, SIC and SICL.
!   For this, porosity was estimated as: POR = 1 - BD / APD (in which APD
!   is the adjusted particle density, i.e. corrected for SOM; Baumer and Rice, 1988).
! - The ranges of LL and DUL values were calculated by stepping through the
!   complete texture triangle in steps of 1% sand, 1% silt and 1% clay (>5000
!   combinations), but with the texture limitations that Saxton set for his method
!   taken into consideration. For SAT, these limitations do not hold, as this was
!   based on POR and not on Saxton. See Gijsman et al., 2002.
! - The root growth distribution function SRGF was was calculated as:
!   SRGF = 1 * EXP(-0.02 * LAYER_CENTER); SRGF was set 1 for LAYER_BOTTOM <= 15.
!
! SOIL CLASS       BD               LL              DUL              SAT
! ========== =============     =============     =============     =============
!   C        1.129 - 1.512     0.220 - 0.346     0.330 - 0.467     0.413 - 0.488
!   CL       1.243 - 1.502     0.156 - 0.218     0.282 - 0.374     0.417 - 0.512
!   L        1.245 - 1.483     0.083 - 0.156     0.222 - 0.312     0.415 - 0.501
!   LS       1.353 - 1.629     0.059 - 0.110     0.137 - 0.185     0.355 - 0.416
!   S        1.446 - 1.574     0.055 - 0.085     0.123 - 0.158     0.374 - 0.400
!   SC       1.501 - 1.593     0.195 - 0.294     0.276 - 0.389     0.376 - 0.409
!   SCL      1.475 - 1.636     0.132 - 0.191     0.213 - 0.304     0.360 - 0.418
!   SI       0.978 - 1.464     0.096 - 0.099     0.299 - 0.307     0.442 - 0.488
!   SIC      1.307 - 1.446     0.224 - 0.326     0.379 - 0.456     0.455 - 0.489
!   SICL     1.248 - 1.464     0.155 - 0.219     0.324 - 0.392     0.448 - 0.511
!   SIL      0.968 - 1.464     0.082 - 0.152     0.240 - 0.333     0.439 - 0.547
!   SL       1.142 - 1.647     0.066 - 0.133     0.164 - 0.243     0.348 - 0.499
!
!============================================================================================================
! Start of Generic soil profiles
!============================================================================================================
!
! The 12 Generic soils for SOIL.SOL, as estimated by Arjan Gijsman:
!
! - LL, DUL are according to the Nearest Neighbor method (Jagtap et al, 2004)
! - Ksat at -99
! - BD according to Gijsman et al (2002)
! - SAT based on the APSRU manual (Dalgliesh and Foale, 1998); i.e. 93-97% of porosity
!   depending on the soil type) in which porosity is according to Baumer and Rice (1988).
!
! References
! Adams W.A. 1973. The effect of organic matter on the bulk and true densities of some
!   uncultivated podzolic soils. J. Soil Science 24, 10-17.
! Baumer O.W. and Rice J.W. 1988. Methods to predict soil input data for DRAINMOD.
!   Am. Soc. Agr. Eng. Paper 88-2564
! Dalgliesh, N.P., and M.A. Foale. 1998. Soil Matters - monitoring soil water and nitrogen
!   in dryland farming. CSIRO, Agricultural Production Systems Research Unit,
!   Toowoomba, Queensland, Australia. 122 pp.
! Gijsman A.J., Jagtap S.S., Jones J.W. 2002. Wading through a swamp of complete confusion:
!   how to choose a method for estimating soil water retention parameters for crop models.
!   European Journal of Agronomy, 18: 75-105.
! Jagtap S.S., Lal U., Jones J.W., Gijsman A.J., Ritchie J.T. 2004. A dynamic nearest-neighbor
!   method for estimating soil water parameters. Transactions of ASAE 47: 1437-1444
! Rawls W.J. and Brakensiek D.L. 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic
!   modeling. In: Jones, E.B. and Ward, T.J. (Eds.), Proc. Symp. Watershed Management
!   in the Eighties. April 30-May 1, 1985, Denver, CO. Am. Soc. Civil Eng.,
!   New York, NY. pp.293-299.
! Saxton K.E., Rawls W.J., Romberger J.S., Papendick R.I. 1986. Estimating generalized soil-water
!   characteristics from texture. Soil Sci. Soc. Am. J. 50, 1031-1036
!
!============================================================================================================

*BK00002008  KMIT        SIC     130 Bangkok series
@SITE        COUNTRY          LAT     LONG SCS FAMILY
 KMITL       Thailand       13.400 100.400 -99
@ SCOM  SALB  SLU1  SLDR  SLRO  SLNF  SLPF  SMHB  SMPX  SMKE
    BL  0.09   6.0  0.40  73.0  1.00  1.00 IB001 IB001 IB001
@  SLB  SLMH  SLLL  SDUL  SSAT  SRGF  SSKS  SBDM  SLOC  SLCL  SLSI  SLCF  SLNI  SLHW  SLHB  SCEC  SADC
    15   -99 0.228 0.385 0.481 1.000  0.09  1.19  1.97  45.8  45.1   9.1 0.190   5.2   -99  31.0   -99
    30   -99 0.228 0.385 0.481 1.000  0.09  1.21  1.79  46.7  45.0   8.4 0.190   5.2   -99  29.7   -99
```

ภาคผนวกที่ 2 ไฟล์ข้อมูลสภาพอากาศปี ค.ศ. 2009

```
*WEATHER  DATA :Suvarnbhum airport
@ INSI      LAT     LONG  ELEV   TAV   AMP REFHT WNDHT
 -99.0   13.410  100.460   1.0  33.3   5.0 -99.0 -99.0
@DATE  SRAD  TMAX  TMIN  RAIN
09001  9.68  28.3  23.6   0.0
09002 11.79  28.9  22.3   0.0
09003 16.10  30.0  19.0   0.0
09004 17.63  31.3  19.6   0.0
09005 17.56  32.0  20.9   0.0
09006 17.41  32.1  20.6   0.0
09007 17.55  32.0  20.2   0.0
09008 17.13  30.7  19.8   0.0
09009 15.31  28.4  20.2   0.0
09010 12.87  25.3  17.3   0.0
09011 16.86  25.9  14.2   0.0
09012 18.18  27.2  14.2   0.0
09013 18.00  26.9  15.0   0.0
09014 17.27  26.6  16.9   0.0
09015 17.63  27.0  14.6   0.0
09016 18.31  27.8  15.2   0.0
09017 18.40  28.7  16.0   0.0
09018 18.76  30.5  15.9   0.0
09019 18.75  31.2  18.0   0.0
09020 18.57  31.5  18.5   0.0
09021 18.47  32.4  20.8   0.0
09022 17.75  32.0  21.2   0.0
09023 18.34  33.0  20.5   0.0
09024 17.89  32.1  21.5   0.0
09025 15.70  31.4  24.5   0.0
09026 17.05  32.8  21.6   0.0
09027 16.55  32.1  24.3   0.0
09028 15.95  32.7  24.0   0.0
09029 16.61  33.5  24.7   0.0
09030 16.02  33.0  24.2   0.0
09031 15.75  32.3  23.8   0.0
09032 15.01  31.8  24.4   0.0
09033 16.75  33.2  23.7   0.0
09034 16.58  33.2  24.8   0.0
09035 15.49  32.4  24.0   0.0
```



```
09328 18.05  30.6  18.8   0.0
09329 18.19  32.0  19.4   0.0
09330 18.17  32.9  20.5   0.0
09331 17.68  32.7  21.6   0.0
09332 17.58  33.5  22.4   0.0
09333 17.42  33.6  22.4   0.0
09334 16.76  31.9  21.2   0.0
```

ภาคผนวกที่ 3 ไฟล์ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของข้าว

```
*RICE GENOTYPE COEFFICIENTS: RICER040 MODEL
!
! COEFF       DEFINITIONS
! ========    ===========
! VAR#        Identification code or number for a specific cultivar.
! VAR-NAME    Name of cultivar.
! ECO#        Ecotype code for this cultivar points to the Ecotype in the ECO
!             file (currently not used).
! P1          Time period (expressed as growing degree days [GDD] in ºC above
!             a base temperature of 9ºC) from seedling emergence during which
!             the rice plant is not responsive to changes in photoperiod. This
!             period is also referred to as the basic vegetative phase of the
!             plant.
! P20         Critical photoperiod or the longest day length (in hours) at
!             which the development occurs at a maximum rate. At values higher
!             than P20 developmental rate is slowed, hence there is delay due
!             to longer day lengths.
! P2R         Extent to which phasic development leading to panicle initiation
!             is delayed (expressed as GDD in ºC) for each hour increase in
!             photoperiod above P20.
! P5          Time period in GDD ºC) from beginning of grain filling (3 to
!             4 days after flowering) to physiological maturity with a base
!             temperature of 9ºC.
! G1          Potential spikelet number coefficient as estimated from the
!             number of spikelets per g of main culm dry weight (less lead
!             blades and sheaths plus spikes) at anthesis. A typical value
!             is 55.
! G2          Single grain weight (g) under ideal growing conditions, i.e.
!             nonlimiting light, water, nutrients, and absence of pests
!             and diseases.
! G3          Tillering coefficient (scaler value) relative to IR64 cultivar
!             under ideal conditions. A higher tillering cultivar would have
!             coefficient greater than 1.0.
! G4          Temperature tolerance coefficient. Usually 1.0 for varieties
!             grown in normal environments. G4 for japonica type rice growing
!             in a warmer environment would be 1.0 or greater. Likewise, the
!             G4 value for indica type rice in very cool environments or
!             season would be less than 1.0.
!
@VAR#  VAR-NAME.........   ECO#    P1   P2R    P5   P2O    G1    G2    G3    G4
!                                   1     2     3     4     5     6     7     8
TR0003 SUPANBURI 60     IB0001 540.0 154.7 497.0  11.9  77.7 .0280  1.00  1.03
TR0004 CHAINAT 1        IB0001 570.0 122.8 334.8  11.9  63.1 .0278  1.00  1.00
```

ภาคผนวกที่ 4 ไฟล์ข้อมูลการจัดการ (File X)

```
*EXP.DETAILS: KMIT0901RI DIFFERENT SEED RATE IN RICE

*GENERAL
@PEOPLE
suwanna
@ADDRESS
KMTIL
@SITE
Bangkok, Thailand
@ PAREA  PRNO  PLEN  PLDR  PLSP  PLAY HAREA  HRNO  HLEN  HARM.........
    -99   -99   -99   -99   -99   -99     0   -99     0   -99

*TREATMENTS                        -------------FACTOR LEVELS------------
@N R O C TNAME..................... CU FL SA IC MP MI MF MR MC MT ME MH SM
 1 1 1 0 Chainat1 + 5 kg/rai        1  1  1  1  1  1  1  0  0  0  0  0  1
 2 1 1 0 Chainat1 + 25 kg/rai       1  1  1  1  2  1  1  0  0  0  0  0  1
 3 1 1 0 Chainat1 + 50 kg/rai       1  1  1  1  3  1  1  0  0  0  0  0  1
 4 1 1 0 Suphanburi60 + 5 kg/rai    2  1  1  1  4  1  1  0  0  0  0  0  1
 5 1 1 0 Suphanburi60 + 25 kg/rai   2  1  1  1  5  1  1  0  0  0  0  0  1
 6 1 1 0 Suphanburi60 + 50 kg/rai   2  1  1  1  6  1  1  0  0  0  0  0  1

*CULTIVARS
@C CR INGENO CNAME
 1 RI TR0004 CHAINAT 1
 2 RI TR0003 SUPANBURI 60

*FIELDS
@L ID_FIELD WSTA....  FLSA  FLOB  FLDT  FLDD  FLDS  FLST SLTX  SLDP  ID_SOIL    FLNAME
 1 KMIT0001 KMIT0901     0     0 DR001   -99   -99 00000 SC      51  BK00002009 -99
@L ............XCRD ............YCRD .....ELEV ..............AREA .SLEN .FLWR .SLAS
 1               0               0         0                 0     0     0     0

*SOIL ANALYSIS
@A SADAT  SMHB  SMPX  SMKE  SANAME
 1 09001 SA011   -99 SA015  -99
@A  SABL  SADM  SAOC  SANI SAPHW SAPHB  SAPX  SAKE
 1    15   1.2  1.97   .19   5.2   -99   -99   -99
 1    30   1.2  1.79   .19   5.2   -99   -99   -99

*INITIAL CONDITIONS
@C   PCR ICDAT  ICRT  ICND  ICRN  ICRE  ICWD ICRES ICREN ICREP ICRIP ICRID ICNAME
 1    RI 09001   100   -99     1     1   -99   -99   -99   -99   100    15 -99
@C  ICBL  SH2O  SNH4  SNO3
 1    15  .385    .1    .1
 1    30  .385    .1    .1

*PLANTING DETAILS
@P PDATE EDATE  PPOP  PPOE  PLME  PLDS  PLRS  PLRD  PLDP  PLWT  PAGE  PENV  PLPH  SPRL
PLNAME
 1 09002   -99    47    47     P     U     1   -99     1   -99   -99   -99   -99   -99
 2 09002   -99    44    44     P     U     1   -99     1   -99   -99   -99   -99   -99
 3 09002   -99    43    43     P     U     1   -99     1   -99   -99   -99   -99   -99
 4 09002   -99    59    59     P     U     1   -99     1   -99   -99   -99   -99   -99
 5 09002   -99    58    58     P     U     1   -99     1   -99   -99   -99   -99   -99
 6 09002   -99    57    57     P     U     1   -99     1   -99   -99   -99   -99   -99

*IRRIGATION AND WATER MANAGEMENT
@I  EFIR  IDEP  ITHR  IEPT  IOFF  IAME  IAMT IRNAME
 1   .85    30    50   100 GS000 IR006    10 -99
@I IDATE  IROP IRVAL
 1 09007 IR006    50
 1 09017 IR006    50
 1 09027 IR006    50
 1 09037 IR006    50
 1 09047 IR006    50
 1 09057 IR006    50
 1 09067 IR006    50
 1 09077 IR006    50
 1 09087 IR006    50
 1 09097 IR006    50
```

```
*FERTILIZERS (INORGANIC)
@F FDATE  FMCD  FACD  FDEP  FAMN  FAMP  FAMK  FAMC  FAMO  FOCD FERNAME
 1 09012 FE012 AP012     1    99   124   -99   -99   -99   -99 -99
 1 09046 FE005 AP012     1    66   -99   -99   -99   -99   -99 -99
 1 09062 FE005 AP012     1    66   -99   -99   -99   -99   -99 -99

*SIMULATION CONTROLS
@N GENERAL     NYERS NREPS START SDATE RSEED SNAME....................
 1 GE              1     1     S 09002  2150 DEFAULT SIMULATION CONTROL
@N OPTIONS     WATER NITRO SYMBI PHOSP POTAS DISES  CHEM  TILL
 1 OP              Y     Y     Y     N     N     N     N     N
@N METHODS     WTHER INCON LIGHT EVAPO INFIL PHOTO HYDRO NSWIT MESOM
 1 ME              M     M     E     R     R     C     R     1     G
@N MANAGEMENT  PLANT IRRIG FERTI RESID HARVS
 1 MA              R     R     R     N     M
@N OUTPUTS     FNAME OVVEW SUMRY FROPT GROUT CAOUT WAOUT NIOUT MIOUT DIOUT  LONG CHOUT
OPOUT
 1 OU              N     Y     Y     1     Y     N     Y     Y     N     N     Y     N

@  AUTOMATIC MANAGEMENT
@N PLANTING    PFRST PLAST PH2OL PH2OU PH2OD PSTMX PSTMN
 1 PL          09001 09001    40   100    30    40    10
@N IRRIGATION  IMDEP ITHRL ITHRU IROFF IMETH IRAMT IREFF
 1 IR             50    50   100 IB000 IR003    50     1
@N NITROGEN    NMDEP NMTHR NAMNT NCODE NAOFF
 1 NI              1    50    25 FE012 GS000
@N RESIDUES    RIPCN RTIME RIDEP
 1 RE            100     1    20
@N HARVEST     HFRST HLAST HPCNP HPCNR
 1 HA              0 09112   100     0
```

ภาคผนวกที่ 5 ไฟล์ข้อมูลงานทดลอง (File T)

```
*EXP.DATA (T): KMIT0901RI DIFFERENT SEED RATE IN RICE

! File last edited on day 08/28/2003 at 3:51:27 PM
!
!
@TRNO   DATE  T#AD  LAID  RWAD  SWAD  GWAD  LWAD  CWAD  HIAD  GWGD
     1 09039   233   -99   -99     9   -99    10    19   -99   -99
     1 09070   183   -99   -99   189   -99   -99   -99   -99   -99
     1 09113   190   -99   -99   468  2872   206  3574  0.80    22
     2 09039   183   -99   -99    10   -99    12    21   -99   -99
     2 09068   189   -99   -99   172   -99   -99   -99   -99   -99
     2 09114   240   -99   -99   397  2527   119  3056  0.83    27
     3 09037   263   -99   -99    10   -99    13    23   -99   -99
     3 09066   201   -99   -99   171   -99   -99   -99   -99   -99
     3 09114   249   -99   -99   359  2131   137  3639  0.81    26
     4 09038   311   -99   -99    11   -99    17    28   -99   -99
     4 09068   227   -99   -99   222   -99   -99   -99   -99   -99
     4 09114   310   -99   -99   607  2503   205  3341  0.75    24
     5 09038   279   -99   -99     9   -99    12    21   -99   -99
     5 09067   289   -99   -99   250   -99   -99   -99   -99   -99
     5 09114   286   -99   -99   619  4876   209  5725  0.85    23
     6 09040   235   -99   -99    10   -99    19    29   -99   -99
     6 09069   221   -99   -99   244   -99   -99   -99   -99   -99
     6 09114   379   -99   -99   413  3157   221  3800  0.83    24
```

ภาคผนวกที่ 6 ไฟล์ข้อมูลงานทดลอง (File A)

```
*EXP.DATA (A): KMIT0901RI DIFFERENT SEED RATE IN RICE

! File last edited on day 08/28/2003 at 3:50:49 PM
!
@TRNO   HWAM  HWUM  H#AM  H#UM  LAIX  CWAM  BWAH  IDAT  ADAT  MDAT
     1  2872 0.022   -99   268   -99  3574   -99   070   097   114
     2  2527 0.027   -99   298   -99  3056   -99   068   093   114
     3  2131 0.026   -99   410   -99  2639   -99   066   093   114
     4  2503 0.024   -99   379   -99  3341   -99   068   094   114
     5  4876 0.023   -99   284   -99  5725   -99   067   093   114
     6  3157 0.024   -99   352   -99  3800   -99   069   095   114
```

ภาคผนวกที่ 7 ผลการจำลองการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว (Overview output file)

```
*SIMULATION OVERVIEW FILE

*DSSAT Cropping System Model Ver. 4.0.2.000              Apr 07, 2011; 11:34:33

*RUN   1        : Chainat1 + 5 kg/rai
 MODEL          : RICER040 - RICE
 EXPERIMENT     : KMIT0901 RI KMIT0801RI DIFFERENT SEED RATE IN RICE
 TREATMENT  1   : Chainat1 + 5 kg/rai

 CROP           : RICE           CULTIVAR : CHAINAT 1        ECOTYPE :IB0001
 STARTING DATE  : JAN  2 2009
 PLANTING DATE  : JAN  2 2009    PLANTS/m2 : 47.0     ROW SPACING :   1.cm
 WEATHER        : KMIT   2009
 SOIL           : BK00002009     TEXTURE : SC    - Bangkok series
 SOIL INITIAL C : DEPTH: 30cm EXTR. H2O: 47.1mm  NO3:  0.4kg/ha  NH4:  0.4kg/ha
 WATER BALANCE  : IRRIGATE ON REPORTED DATE(S)
 IRRIGATION     :      500 mm IN    10 APPLICATIONS
 NITROGEN BAL.  : SOIL-N & N-UPTAKE SIMULATION; NO N-FIXATION
 N-FERTILIZER   :      231 kg/ha IN     3 APPLICATIONS
 RESIDUE/MANURE : INITIAL :     0 kg/ha ;       0 kg/ha IN     0 APPLICATIONS
 ENVIRONM. OPT. : DAYL=    0.00  SRAD=    0.00  TMAX=    0.00  TMIN=    0.00
                  RAIN=    0.00  CO2 = R330.00  DEW =    0.00  WIND=    0.00
 SIMULATION OPT : WATER   :Y  NITROGEN:Y  N-FIX:N  PHOSPH :N  PESTS  :N
                  PHOTO   :C  ET      :R  INFIL:R  HYDROL :R  SOM    :G
 MANAGEMENT OPT : PLANTING:R  IRRIG   :R  FERT :R  RESIDUE:N  HARVEST:M  WTH:M

*SUMMARY OF SOIL AND GENETIC INPUT PARAMETERS

   SOIL LOWER UPPER   SAT  EXTR  INIT   ROOT   BULK     pH    NO3    NH4    ORG
  DEPTH LIMIT LIMIT    SW    SW    SW   DIST   DENS                          C
   cm   cm3/cm3    cm3/cm3    cm3/cm3         g/cm3          ugN/g  ugN/g     %
-------------------------------------------------------------------------------
  0-  5 0.228 0.385 0.481 0.157 0.385   1.00   1.20   5.20   0.10   0.10   1.97
  5- 15 0.228 0.385 0.481 0.157 0.385   1.00   1.20   5.20   0.10   0.10   1.97
 15- 30 0.228 0.385 0.481 0.157 0.385   1.00   1.20   5.20   0.10   0.10   1.79

TOT- 30   6.8  11.5  14.4   4.7  11.5  <--cm   -  kg/ha-->    0.4    0.4  67680
SOIL ALBEDO    : 0.09      EVAPORATION LIMIT :26.00         MIN. FACTOR  : 1.00
RUNOFF CURVE # :73.00      DRAINAGE RATE     : 0.05         FERT. FACTOR : 1.00

 RICE       CULTIVAR :TR0004-CHAINAT 1          ECOTYPE :IB0001
 P1     : 570.0  P2R    : 122.8  P5     : 334.8  P2O    :  11.9
 G1     :  63.1  G2     :0.0278  G3     :  1.00  G4     :  1.00


*SIMULATED CROP AND SOIL STATUS AT MAIN DEVELOPMENT STAGES

 RUN NO.     1     Chainat1 + 5 kg/rai

        CROP GROWTH   BIOMASS         LEAF   CROP N     STRESS
   DATE  AGE STAGE      kg/ha    LAI   NUM  kg/ha  %   H2O    N
 ------  --- ---------- -----  -----  ----  ---  ---  ----  ----
  2 JAN    0 Prgerm Sow     0   0.00   0.0    0  0.0  0.00  0.00
  2 JAN    0 Start Sim      0   0.00   0.0    0  0.0  0.00  0.00
  3 JAN    1 Emergence      2   0.00   1.0    0  2.5  0.00  0.00
  5 FEB   34 End Juveni    24   0.03   9.0    1  3.2  0.23  0.38
 22 FEB   51 Pan Init     165   0.14  11.0    5  3.0  0.02  0.07
  1 APR   89 Heading     2028   0.88  15.0   34  1.7  0.00  0.00
 10 APR   98 Beg Gr Fil  2777   0.83  15.0   35  1.3  0.00  0.00
 21 APR  109 End Mn Fil  3431   0.74  15.0   35  1.0  0.00  0.00
 22 APR  110 End Ti Fil  3431   0.74  15.0   35  1.0  0.00  0.00
 23 APR  111 Maturity    3431   0.74  15.0   35  1.0  0.61  0.00
 23 APR  111 Harvest     3431   0.74  15.0   35  1.0  0.00  0.00
```

*MAIN GROWTH AND DEVELOPMENT VARIABLES

@ VARIABLE	SIMULATED	MEASURED
Panicle Initiation day (dap)	51	68
Anthesis day (dap)	89	95
Physiological maturity day (dap)	111	112
Yield at harvest maturity (kg [dm]/	1852	2872
Unit wt at maturity (g [dm]/unit)	0.0278	0.022
Number at maturity (no/m2)	6662	-99
Pod number (no/m2)	83.12	-99
Leaf area index, maximum	0.88	-99
Tops weight at anthesis (kg [dm]/ha	1936	-99
Tops N at anthesis (kg/ha)	33	-99
Tops weight at maturity (kg [dm]/ha	3431	3574
By-product produced (stalk) at matu	1579	-99
Harvest index at maturity	0.540	-99
Leaf number per stem at maturity	15	-99
Grain N at maturity (kg/ha)	17	-99
Tops N at maturity (kg/ha)	35	-99
Stem N at maturity (kg/ha)	18	-99
Grain N at maturity (%)	0.92	-99

*ENVIRONMENTAL AND STRESS FACTORS

Development Phase	Time Span days	Environment: Average Temp Max ºC	Average Temp Min ºC	Average Solar Rad MJ/m2	Average Photop [day] hr	Cumulative Rain mm	Cumulative Evapo Trans mm	Stress (0=Min, 1=Max Stress): Water Photo synth	Water Growth	Nitrogen Photo synth	Nitrogen Growth
Emergence-End Juvenile	33	30.6	20.1	16.9	11.32	0.0	81.8	0.164	0.229	0.480	0.377
End Juvenil-Panicl Init	17	34.2	23.6	18.0	11.54	0.0	48.5	0.000	0.019	0.140	0.074
Panicl Init-End Lf Grow	38	34.3	26.2	16.2	11.86	11.2	135.0	0.000	0.000	0.000	0.000
End Lf Grth-Beg Grn Fil	9	35.3	25.0	19.7	12.16	26.0	51.0	0.000	0.000	0.000	0.000
Grain Filling Phase	12	35.9	26.8	18.6	12.29	22.7	54.6	0.000	0.000	0.000	0.000

Rice YIELD : 1852 kg/ha [Dry weight]

****