บทนำ

การวิจัยเชิงระบบ เป็นการวิจัยที่มุ่งไปที่ความเชื่อมโยงกันขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีการทำงานร่วมกันเพื่อวัตถุประสงค์ร่วมกัน และเน้นไปที่กระบวนการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทางในระบบ เป็นรูปแบบในการวิจัยอย่างหนึ่งที่จะทำให้เข้าใจกระบวนการที่มีปัจจัยเกี่ยวข้องมาก ซับซ้อน และแปรปรวน และสามารถปรับใช้ผลการวิจัยกับระบบที่ใหญ่ขึ้นหรือเล็กลง และในสภาพแวดล้อมที่ต่างๆ กัน สร้างความเข้าใจพื้นฐานในการศึกษาปัญหาที่มีความเกี่ยวข้องซึ่งกันและกันในการผลิตทางเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศกำลังพัฒนาที่ทรัพยากรทั้งในกระบวนการผลิตและการวิจัยและพัฒนามีจำกัด ทำให้สามารถผนวก ความรู้ต่าง ๆ ที่อยู่อย่างกระจัดกระจาย ให้เข้ากับข้อเท็จจริง และทำให้สามารถนำความรู้ไปใช้ประโยชน์ในการผลิตที่แท้จริง

งานวิจัยนี้ได้ใช้แนวทางวิจัยเชิงระบบนี้เพื่อศึกษาปัญหาและหาแนวทางพัฒนาการปลูกข้าวที่เป็นพืชอาหารหลักและเป็นสินค้าเกษตรที่สำคัญ เป็นพืชที่มีผู้เกี่ยวข้อง มีพื้นที่ปลูก มากที่สุดทั่วทั้งประเทศไทย ขณะที่ผู้ปลูกข้าวส่วนใหญ่เป็นเกษตรกรรายย่อย และยากจน สภาพพื้นที่ปลูกส่วนใหญ่ต้องอาศัยน้ำฝน ที่มีความแปรปรวนสูง และหลายแห่งมีดินที่เป็นปัญหา ทำให้รูปแบบของการผลิตข้าวมีทั้งความหลากหลาย และมีปัญหามากมาย ไม่ว่าจะเป็นด้านปัจจัยการผลิต และสภาพแวดล้อมในการผลิต รวมถึงปัญหาการตลาดสำหรับผลผลิตข้าว ที่สัมพันธ์กับทั้งปริมาณและคุณภาพของผลผลิต

ผลผลิตในรูปของปริมาณข้าวเปลือกนั้นแม้ว่าจะเป็นเป้าหมายหลักของการปลูกข้าวของเกษตรกร แต่ในการผลิตข้าวเป็นการค้านั้น คุณภาพการสีถือว่าเป็นตัวแปรสำคัญที่สุดในการกำหนดราคาข้าวทั้งตลาดในประเทศไทยและในตลาดโลก และศักยภาพของคุณภาพการสีนั้นถูกควบคุมด้วยปัจจัยการผลิตตั้งแต่ในระดับแปลงก่อนการเก็บเกี่ยว คุณภาพการสีที่ต่ำเป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้การผลิตข้าวโดยรวมยังเป็นระบบการผลิตที่มีประสิทธิภาพและผลตอบแทนต่ำ และมีปัญหาทางการตลาดอยู่ตลอดมา

ปัญหาการปลูกข้าว ผ่านการศึกษาวิจัยและพัฒนาความรู้และเทคโนโลยีอย่างหลากหลายมาเป็นเวลานาน แต่ส่วนใหญ่เป็นกระบวนการแบบแยกส่วน ที่มุ่งแก้ปัญหาเฉพาะอย่าง และความรู้และเทคโนโลยีจำนวนมากที่สร้างขึ้น เกษตรกรไม่ได้นำไปใช้ หรือไม่สามารถแก้ปัญหาในสภาพจริงได้ การศึกษาวิจัยระบบการผลิตที่เชื่อมโยงไปที่ทั้งปริมาณและคุณภาพของผลผลิตจึงน่าจะเป็นแนวทางที่เป็นประโยชน์สำหรับการพัฒนาระบบการผลิตข้าวของไทยทั้งระบบ

งานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายเพื่อศึกษา และเชื่อมโยงกระบวนการสำคัญต่างๆ ที่นำไปสู่การสร้างผลผลิตของคุณภาพการสีของข้าว โดยมีกรอบของการวิจัยอยู่ที่ระบบการผลิตก่อนการเก็บเกี่ยว โดยเฉพาะกับพันธุ์ข้าวที่ปลูกในพื้นที่นาภาคเหนือของไทย โดยงานวิจัยนี้ประกอบด้วยงานสองส่วน คือ ส่วนแรกที่วิเคราะห์การใช้แบบจำลอง CERES-Rice 3.5 ภายใต้ระบบสนับสนุนการตัดสินใจ DSSAT 3.5 ในการประเมินอิทธิพลปัจจัยที่สำคัญๆ ต่อกระบวนการสร้างผลผลิตของข้าวและส่วนที่สองคือการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยก่อนเก็บเกี่ยวต่อคุณภาพการสี ที่ประกอบด้วยการวิเคราะห์ภาพรวมของอิทธิพลและความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีต่อคุณภาพการสี และการสร้างแบบจำลองประเมินอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ก่อนเก็บเกี่ยวทีมีต่อคุณภาพการสี ด้วยโปรแกรม STELLA Research 5.1.1 โดยเชื่อมต่อข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วย CERES-Rice 3.5 ที่ทำการศึกษาในส่วนที่หนึ่ง ทำให้เป็นระบบที่ต่อเนื่องกัน ที่อธิบายอิทธิพลของปัจจัยการผลิตที่มีต่อทั้งการสร้างผลผลิต และการกำหนดคุณภาพการสี ของข้าว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

วิเคราะห์การใช้แบบจำลอง CERES-Rice 3.5 เพื่อศึกษาอิทธิพลของภูมิอากาศและพันธุกรรมที่มีต่อผลผลิตข้าว

บทคัดย่อ

CERES-Rice เป็นแบบจำลองการเจริญเติบโตของข้าวที่ออกแบบให้สามารถจำลองได้ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย มีส่วนที่จำลองสมดุลน้ำ และไนโตรเจน และมีระบบที่ให้ผู้ใช้สามารถปรับข้อมูลทางพันธุกรรมได้ งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อหาวิธีการใช้แบบจำลอง CERES-Rice 3.5 ให้สามารถทำนายระยะพัฒนาการได้อย่างแม่นยำ และประเมินการตอบสนองของผลผลิตต่อปัจจัยสภาพแวดล้อมและพันธุกรรมได้อย่างเหมาะสม รวมถึงการศึกษาถึงข้อจำกัดและเงื่อนไขการใช้แบบจำลองเพื่อเป็นแนวทางการปรับใช้และพัฒนาแบบจำลองต่อไป การศึกษาโครงสร้างและกลไกการทำงานของแบบจำลอง โดยเฉพาะกลไกการปรับสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของแบบจำลอง และการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนแบบจำลอง ดำเนินการโดยจำลองเปรียบเทียบอิทธิพลของวันปลูก 12 วันปลูกที่ห่างกัน 1 เดือน ของข้าว 4 พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เหนียวสันป่าตอง ชัยนาท 1 และข้าวญี่ปุ่น ก.วก.1 (ซาซานิชิกิ) ที่แปลงทดลอง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ. 2540-2541

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพแบบจำลอง CERES-Rice 3.5 ขึ้นอยู่กับความเข้าใจและเทคนิคการปรับค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมทั้งระยะพัฒนาการและการเจริญเติบโต โดยพบว่าการปรับค่าเหล่านี้ต้องประเมินค่าสัมประสิทธิ์พัฒนาการร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์ความทนต่ออุณหภูมิ G4 ด้วย และควรใช้สัมประสิทธิ์ความไวต่อช่วงแสงที่แตกต่างกันสำหรับข้าวไวต่อช่วงแสงมากเช่น ข้าวขาวดอกมะลิ 105 หรือเหนียวสันป่าตอง เมื่อใช้กับวันปลูกที่แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าควรปรับเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์จำนวนดอกย่อยสูงสุด G1 และสัมประสิทธิ์น้ำหนักเมล็ดสูงสุด G2 เพื่อให้ผลการจำลองได้ค่าผลผลิตที่ไม่ต่ำกว่าสภาพที่ให้ผลผลิตสูงที่สุด ความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองระยะพัฒนาการและการเจริญเติบโตส่วนหนึ่งเนื่องมาจากสมมติฐานแบบจำลอง เช่น ทฤษฎีอุณหภูมิสะสม ระดับอุณหภูมิที่จำกัดการเจริญ ความแตกต่างในความสามารถในการใช้แสง และไม่สามารถปรับตามค่าเจริญเติบโตที่แท้จริงได้ และการที่แบบจำลองไม่ครอบคลุมสภาพการหักล้มเนื่องจากการเจริญเติบโตทางต้นและใบมากเกินไป เป็นต้น ความคลาดเคลื่อนอีกส่วนหนึ่งมีสาเหตุจากความถูกต้องของข้อมูลนำเข้าในแบบจำลอง และอาจเกิดจากการที่ผู้ใช้ขาดความเข้าใจในแบบจำลองอย่างดีพอ

An Analysis of CERES-Rice 3.5 Model Use to Study the Effects of Climatic and Genetic Factors on Rice Yield

ABSTRACT

CERES-Rice is a rice growth simulation model designed for using in various environments with water and nitrogen balance subsystems, and allowing certain genetic information inputs. In this study, techniques of genetic coefficient calibration was explored to enable CERES-Rice 3.5 to predict the rice phenological events precisely and reasonably simulate growth and yield responding to the environment and genetic factors. Also, emphasis was placed on the limitations and conditions of model application to be a guideline for model use and development. These processed were based on examining the model structure and some related equations in the model together with conducting a field experiment of which 4 rice varieties : Khao Dawk Mali 105, Niew Sanpatong, Chainat-1 and DOA1 (Sasanishiki) were grown on 12 planting dates of 1-month interval at Chiang Mai University during 1997-1998.

The efficiency and validity of CERES-Rice model was shown to be depended on the understanding and the techniques of development and growth genetic coefficient estimation. The temperature tolerance coefficient (G4), a growth coefficient should be included in development coefficient calibration process. The photoperiod sensitive coefficient (P2R) for the strongly photoperiod sensitive varieties as Khao Dawk Mali 105 or Niew Sanpatong should be assigned with different values for different planting dates. The well-calibrated development coefficients that gave the precise prediction of development stages were used to calibrate the growth genetic coefficients expecting to predict yields at least equal to yields obtained in the optimum growth condition. Only two growth coefficients, potential spikelet (G1) and potential single grain weight (G2) were suggested be included in growth coefficient calibration and only G1 is found sensitive to yield determination.

The errors occurred from simulation with CERES-Rice 3.5 depended on several aspects , for examples accuracy of its thermal time theory used in phenological development and law of limitation on growth conditions concerning temperature, no genetic coefficient for light use efficiency or lodging resistance, underestimation of leaf and stem growth and not able to calibrate, and not covering non-uniformity of maturity under stress conditions. In addition the user's errors caused by lack of the model understanding and by input data are also significant.

คำนำ

แบบจำลอง (simulation model) เป็นสิ่งที่สร้างขึ้นเพื่อเลียนแบบการทำงานของระบบที่มีอยู่จริง ประกอบด้วยทฤษฎีหรือสมมติฐานต่างๆ ที่เชื่อมโยงกันไปสู่เป้าหมายร่วมกัน การใช้แบบจำลอง เป็นเทคโนโลยีข้อมูลข่าวสาร (Information Technology, IT) รูปแบบหนึ่งที่เป็นเครื่องมือช่วยในการวิจัยและพัฒนาที่ยึดแนวทางเชิงระบบ (systems approach)

แบบจำลองพืช (crop simulation model) โดยทั่วไปหมายถึงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ประกอบด้วยชุดสมการ ที่สามารถจำลองระบบการเจริญเติบโตของพืช มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณผลผลิตหรือการตอบสนองอื่นๆ ของพืชจากข้อมูลนำเข้า (input data) ที่กำหนด โดยสามารถอธิบายบทบาทและความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิต ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ (Penning de Vries *et al.*, 1989)

ในปัจจุบันความนิยมในการใช้แนวทางวิจัยเชิงระบบกับการผลิตพืชโดยเฉพาะการใช้แบบจำลองพืชมีมากขึ้น ภายใต้แนวทางการพัฒนาเกษตรแบบยั่งยืน (Fischer and Cordova, 1988) ตามการพัฒนาทฤษฎีและข้อมูลงานวิจัยทางเกษตรที่เกิดขึ้นอย่างมากมาย และพร้อม ๆ การพัฒนาอย่างมากและอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และข้อมูลข่าวสาร แต่ขณะที่การใช้แบบจำลองก็ยังไม่ได้รับการยอมรับหรือเชื่อมั่นจากนักวิชาการและผู้ใช้จำนวนหนึ่ง โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา ที่สภาพปลูกจริงมีปัจจัยที่จำกัดการผลิตจำนวนมากและมีความแปรปรวน เนื่องจากการขาดความเข้าใจในแบบจำลองที่ใช้ดีพอ และผู้ใช้ส่วนใหญ่มุ่งหวังเฉพาะค่าผลผลิตที่คำนวณได้จากแบบจำลอง แต่ขีดความสามารถของแบบจำลองยังถูกจำกัดด้วยสมมติฐานที่ยังไม่ได้รับการพิสูจน์ และทฤษฎีซึ่งอาจยังไม่สมบูรณ์ รวมถึงมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่นำเข้าในแบบจำลองด้วย จึงทำให้ผลผลิตที่ได้จากแบบจำลองจึงอาจจะมีความคลาดเคลื่อนมากเกินไปกว่าที่จะยอมรับแบบจำลองได้ (Mutsaers and Wang, 1999) แม้ว่าการใช้แบบจำลองจะเป็นการประหยัดเวลา และประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่าการทำการทดลองปลูกจริงมาก และสามารถตอบสนองวัตถุประสงค์อื่นที่ไม่ใช่การทำนายค่าผลผลิตเท่านั้น ซึ่งได้แก่ การศึกษาสมมติฐานต่างๆ ในระบบการสร้างผลผลิตอย่างเป็นภาพรวม การดูแนวโน้มการตอบสนองของปัจจัยต่างๆ ในการผลิต ทั้งทิศทางและปริมาณ ของกระบวนการในระบบ เป็นต้น

แบบจำลองพืชที่ได้มีการพัฒนาขึ้นมานั้น มีทั้งแบบจำลองที่ปรับใช้กับพืชได้หลายชนิด ได้แก่ MACROS (Penning de Vries *et al.*,1989) หรือเป็นแบบจำลองเฉพาะสำหรับพืชชนิดหนึ่ง ๆ ข้าวเป็นพืชชนิดหนึ่งที่ได้มีการใช้ข้อมูลงานวิจัยงานศึกษาที่มีจำนวนมากพัฒนาเป็นแบบจำลองที่มีโครงสร้าง เงื่อนไข และ รายละเอียด ต่างๆ กันหลายแบบจำลอง (ตาราง 1) (Kropff *et al.*,1994a)

และผ่านการทดสอบและปรับใช้ในหลายรูปแบบเช่นการทดสอบศักยภาพของผลผลิตข้าว หรือทดสอบผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ (Kropff *et al.*,1994)

ตาราง 1 เปรียบเทียบแบบจำลองทำนายผลผลิตข้าวบางแบบจำลองกับ CERES-Rice

แบบจำลอง	วัตถุประสงค์	ข้อมูลนำเข้า	ลักษณะเด่น	อ้างอิง
CERES-Rice (CERES = Crop Environment Resource Synthesis)	จำลองผลผลิตในระบบนาน้ำฝนและนาชลประทาน และข้าวไร่	พลังงานแสง อุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุด น้ำฝน แลทติจูด ข้อมูลพันธุกรรม ข้อมูลชุดดิน น้ำ ไนโตรเจน การจัดการอื่นๆ	ระยะพัฒนาการ 9 ระยะ สัมประสิทธิ์ทางพันธุ-กรรม จำลองสมดุลน้ำ สมดุลไนโตรเจน มีการจำลองการเจริญของราก ต้น ใบ และรวงผลของการปักดำ การแตกกอ	Singh *et al.* (1998)
ORYZA	จำลองผลผลิตข้าวอินดิกา ในระบบนาชลประทาน	พลังงานแสง อุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุด ไนโตรเจน	CO_2 assimilation และการหายใจ , transplanting shock	Kropff *et al.* (1994 b)
SIMRIW' (Simulation Model for Rice-Weather relations)	จำลองศักยภาพผลผลิตที่ตอบสนองสภาพภูมิอากาศ สำหรับข้าวที่ให้น้ำชลประทาน เขตอบอุ่น	พลังงานแสง อุณหภูมิ ระดับน้ำ ปุ๋ย ไนโตรเจน	โครงสร้างไม่ซับซ้อน มี radiation conversion efficiency coefficient มี technological coefficient	Horie (*1994*)
TRYM (Temperate Rice Yield Model)	จำลองผลผลิตของข้าวจาโปนิกา	ไนโตรเจน การแผ่รังสี และอุณหภูมิต่ำ ค่า N uptake ที่ PI	ทำนาย N response กับข้อมูลอากาศระยะยาว	William *et al.*(1994)

แบบจำลอง CERES-Rice เป็นแบบจำลองการเจริญเติบโตของข้าวแบบจำลองหนึ่งที่มีการพัฒนาร่วมกับพืชสำคัญหลายชนิดมาตั้งแต่ปี 1982 (Uehara and Tsuji, 1998) เป็นแบบจำลองหนึ่งในตระกูล CERES ที่เป็นแบบจำลองของธัญพืชหลักสำคัญของโลกที่ได้แก่ ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าว

บาร์เลย์ ข้าวฟ่าง มิลเลท และข้าว (Ritchie *et al.* , 1998) CERES-Rice เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่บรรจุในระบบสนับสนุนการตัดสินใจ DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) ที่พัฒนาโดยโครงการ IBSNAT (The International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer) (Uehara and Tsuji, 1998) แบบจำลอง CERES-Rice ออกแบบขึ้นเพื่อให้สามารถจำลองการเจริญเติบโตของข้าวตั้งแต่ปลูกถึงสุกแก่ โดยที่มีระบบสมดุลน้ำ และไนโตรเจน และใช้ได้กับสภาพภูมิอากาศ ดิน การจัดการ และลักษณะทางพันธุกรรมต่างๆ (Jones *et al.*, 1998) และมีงานศึกษาเพื่อปรับใช้หรือทดสอบแบบจำลองนี้ในประเทศไทยหลายงาน ที่แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง CERES-Rice สามารถปรับใช้ได้กับสภาพการการปลูกข้าวนาน้ำฝนและชลประทานของไทย (Jintrawet, 1991) แต่พบว่ายังมีความคลาดเคลื่อน ในการทำนายผลผลิต และการแตกกอที่มากเกินไป (Jongkaewwattana *et al.*, 1993) รวมถึงมีปัญหาการปรับค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของแบบจำลอง (สุนทร และเมธี, 2535) แต่ยังไม่มีงานวิจัยที่รายงานการศึกษาที่วิเคราะห์สาเหตุความคลาดเคลื่อนหรือเงื่อนไขการใช้แบบจำลองโดยตรง

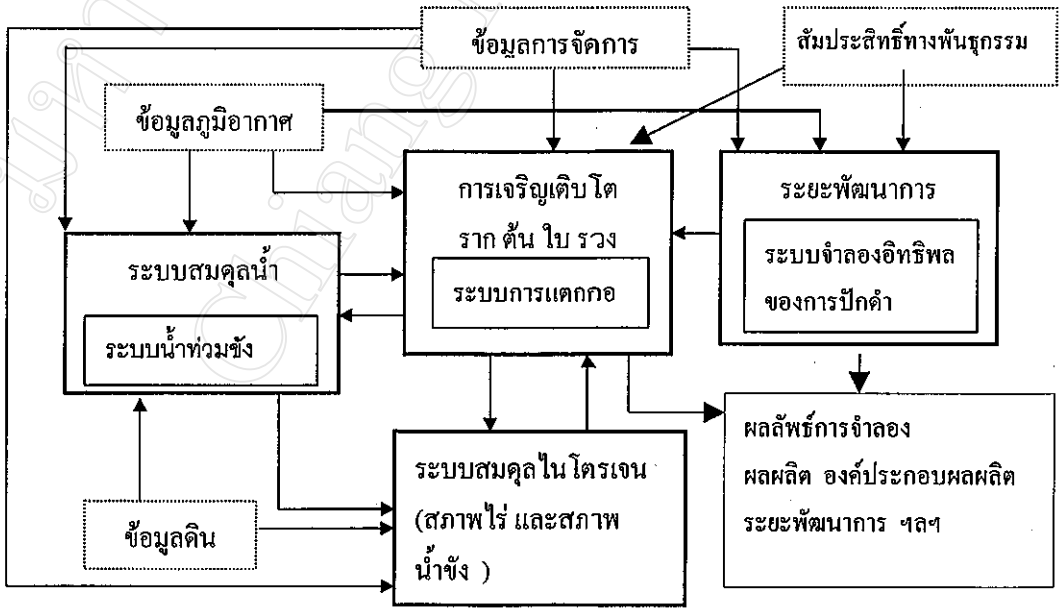
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะหาเทคนิคและแนวทางในการใช้แบบจำลอง CERES-Rice 3.5 เพื่อให้สามารถจำลองกระบวนการเจริญเติบโตได้ใกล้เคียงหรือสอดคล้องกับค่าจริงมากที่สุด โดยที่รวมถึงการศึกษาสภาพเงื่อนไข และข้อจำกัดของแบบจำลอง ด้วยการวิเคราะห์ขั้นตอนการใช้แบบจำลอง วิธีการจำลอง และผลการจำลองงานทดลองในแปลงปลูกกับผลที่วัดได้จริง ร่วมกับการศึกษาการทำงาน และสมการสำคัญๆ ในแบบจำลอง และเพื่อให้สามารถใช้แบบจำลองให้เป็นเครื่องมือที่สามารถใช้ในการศึกษาและวิจัย หรือปรับใช้ในการกระบวนการตัดสินใจในระบบการผลิตข้าวโดยเฉพาะในกรณีการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยภูมิอากาศและพันธุกรรม กับข้าวที่มีลักษณะพันธุกรรมต่าง ๆ กัน ที่ปลูกในพื้นที่นาภาคเหนือของประเทศไทย อย่างถูกต้องเหมาะสม และมีประสิทธิภาพ

แบบจำลอง CERES-Rice

1. โครงสร้างแบบจำลอง

แบบจำลอง CERES-Rice 3.5 เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถจำลองกระบวนการต่างที่สำคัญคือ การจำลองระยะพัฒนาการ (development stage) และการจำลองการเจริญเติบโต (growth) ที่สัมพันธ์กับการจำลองสมดุลน้ำ และไนโตรเจน (ภาพ 1) และมีการกำหนดตัวแปรนำเข้าที่จำเป็นต้องมี (minimum data set) เพื่อให้สามารถใช้แบบจำลองได้ตามวัตถุประสงค์ (Hunt and Boote, 1998) โดยที่จำแนกเป็น ข้อมูลทางกายภาพได้แก่ ข้อมูลภูมิอากาศรายวัน และข้อมูลชุดดิน (ตาราง 2) และข้อมูลพันธุกรรม ในรูปสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม (ตาราง 3) และส่วนที่เป็นข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง ที่สำคัญได้แก่ ผลผลิต และระยะพัฒนาการ (ภาพ 1)

เนื่องจากข้าวมีลักษณะบางอย่างที่แตกต่างจากพืชไร่ชนิดอื่น ๆ CERES-Rice 3.5 จึงมีส่วนที่เพิ่มเติมจากแบบจำลอง CERES ของพืชไร่อื่น ๆ คือ มีระบบที่จำลองอิทธิพลการปักดำ (transplant shock effect) การแตกหน่อ (tillering) และระบบสมดุลน้ำและสมดุลไนโตรเจนในสภาพน้ำขัง (floodwater effect) (ภาพ 1)



ภาพ 1 โครงสร้างหลักของกระบวนการจำลอง ข้อมูลนำเข้า และผลลัพธ์ ของแบบจำลอง CERES-Rice 3.5

ตาราง 2 ข้อมูลนำเข้าที่สำคัญใน CERES-Rice 3.5 (ดัดแปลงจาก Jones *et al.*, 1994)

ประเภทข้อมูล	ตัวแปร
ดิน	ชุดดินและคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีแต่ละชั้นดิน ปริมาณไนโตรเจนในดินก่อนปลูก อัตราการซึมลงด้านล่าง (percolation rate)
พื้นที่	เส้นรุ้ง (latitude) ความลาดชัน
ภูมิอากาศ	พลังงานการแผ่รังสี อุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุด ปริมาณน้ำฝน (สามารถใช้ข้อมูลความเร็วลม และ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ด้วย)
การจัดการ	วิธีการปลูก วันปลูก ความหนาแน่น ระยะปลูก ความลึกเมล็ด อายุกล้า อุณหภูมิเฉลี่ยที่กล้าเจริญ วิธีปักดำ ปริมาณและวันที่ให้น้ำ ความสูงคันนา วิธี,ชนิด,อัตราและวันที่ให้ปุ๋ยไนโตรเจน
พันธุกรรม	ตัวแปรทางพันธุกรรม ที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม ในตาราง 3

ตาราง 3 สัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม ใน CERES-Rice 3.5 (Singh *et al.*, 1998)

สัมประสิทธิ์ระยะพัฒนาการ (development coefficients)	
P1	ระยะเวลา (growing degree days, °Cd) ที่เกินจาก base temperature ที่เท่ากับ 9 °Cd ตั้งแต่ระยะงอก จนถึงระยะสิ้นสุดการเจริญพื้นฐาน (basic vegetative phase)
P20	ค่าความยาววันวิกฤติ (critical photoperiod) หรือระยะเวลาความยาววันที่ยาวที่สุด (ชั่วโมง) ซึ่งมีพัฒนาการของการเกิดรวงในอัตราสูงสุด
P2R	สัมประสิทธิ์ระยะเวลาที่มีการชะลอระยะกำเนิดช่อดอก (panicle initiation, PI) (°Cd)
P5	ระยะเวลา (growing degree days, °Cd) ตั้งแต่เริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ด (grain filling) จนสุกแก่ทางสรีรวิทยา (physiological maturity) ที่มี base temperature เท่ากับ 9 °C
สัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต (growth coefficients)	
G1	ดอกย่อยสูงสุด (potential spikelet) คือจำนวนดอกย่อยต่อน้ำหนักแห้งของต้นแม่ (main culm) 1 กรัม (โดยที่ไม่รวมแผ่นใบและกาบใบและ spikes) ที่ระยะ anthesis ค่า typical value คือ 55
G2	น้ำหนักเมล็ดสูงสุดหนึ่งเมล็ด (potential single grain weight) มีหน่วยเป็นกรัม
G3	ค่าสัมประสิทธิ์การแตกกอ (tillering coefficient (scalar value)) โดยเทียบกับระดับการแตกกอของพันธุ์ IR64 ภายใต้สภาพไม่มีข้อจำกัดของสภาพแวดล้อมที่กำหนดให้เท่ากับ 1.0
G4	สัมประสิทธิ์ความทนอุณหภูมิ (temperature tolerance). ปกติเท่ากับ 1.0 สำหรับพันธุ์ที่ปลูกในสภาพปกติ. สำหรับข้าวตระกูล japonica ที่ปลูกในสภาพร้อนจะเท่ากับหรือมากกว่า 1.0 .และค่า G4 สำหรับข้าวตระกูล indica ในสภาพอากาศเย็นมากจะน้อยกว่า 1.0

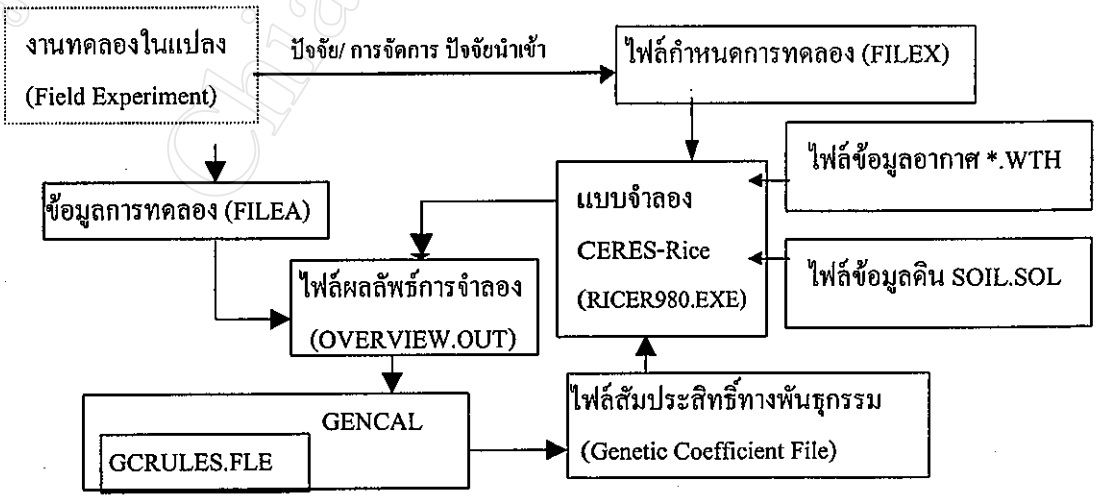
2. ขั้นตอนการใช้แบบจำลอง

เนื่องจากแบบจำลอง CERES 3.5 บรรจุในระบบ DSSAT 3.5 เพื่อเพิ่มความสะดวกและถูกต้องในการใช้แบบจำลอง รวมถึงเพิ่มความสามารถในการแปลผลและแสดงผลการจำลอง ขั้นตอนในการใช้แบบจำลอง CERES-Rice3.5 นั้นจึงกำหนดในกรอบของ DSSAT 3.5 ที่สามารถสรุปได้จากคู่มือการใช้ DSSAT 3.0 Vol.2 –1 (Jones *et al.*, 1994) ดังนี้

1. เตรียมข้อมูลนำเข้าทางกายภาพ ที่ได้แก่ข้อมูลภูมิอากาศรายวัน และ ข้อมูลชุดดิน ในระยะเวลา สถานที่ และสภาพที่ต้องการจำลอง ตามแบบฟอร์มกำหนดในคู่มือ DSSAT 3.0

2. เตรียมข้อมูลนำเข้าที่เป็นวิธีการจัดการต่างๆ โดยกำหนดให้บรรจุในไฟล์รายละเอียดข้อมูลการทดลอง (Experiment Detail File, FILEX) ที่รวมถึง ชื่อและรหัสสถานีอากาศ ชื่อและรหัสพันธุ์ข้าว ชื่อชุดดิน หรืออาจมีเงื่อนไขสภาพแวดล้อมเพิ่มเติมเช่นค่าวิเคราะห์ดินก่อนปลูก รวมถึงการกำหนดรูปแบบและรายละเอียดในการจำลอง ตามแบบที่กำหนดใน คู่มือ DSSAT 3.0

3. เตรียมข้อมูลทางพันธุกรรม หรือค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมสำหรับพันธุ์ข้าวที่ยังไม่บรรจุในไฟล์ที่เก็บค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม ชื่อ RICER980.CUL หรืออาจมีบรรจุอยู่แล้วแต่ต้องการปรับค่าใหม่ การปรับหาค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมสามารถใช้โปรแกรม GENCALC ที่มีไฟล์ข้อบังคับการปรับค่าชื่อ GCRULE.FLE ช่วยในการปรับ ซึ่งต้องมีการประมาณค่าตั้งต้นของสัมประสิทธิ์พันธุกรรม และการเตรียมไฟล์ต่างๆ ที่จะใช้ในการจำลองดังกล่าวมาข้างต้น ได้แก่ FILEX และ ไฟล์ข้อมูลดิน(SOIL.SOL) และอากาศ (*.WTH) รวมถึงเตรียมไฟล์ค่าเฉลี่ยข้อมูลงานทดลอง (FILEA) เพื่อนำมาเป็นหลักในการปรับให้ค่าจำลองกับค่าสังเกตที่แสดงเปรียบเทียบกันในไฟล์ผลลัพธ์ (OVERVIEW.OUT) ให้ได้ใกล้เคียงกัน (Hunt and Pararajasingham , 1994) (ภาพ 2)



ภาพ 2 โครงสร้างของไฟล์ที่เกี่ยวข้องในการปรับหาค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม

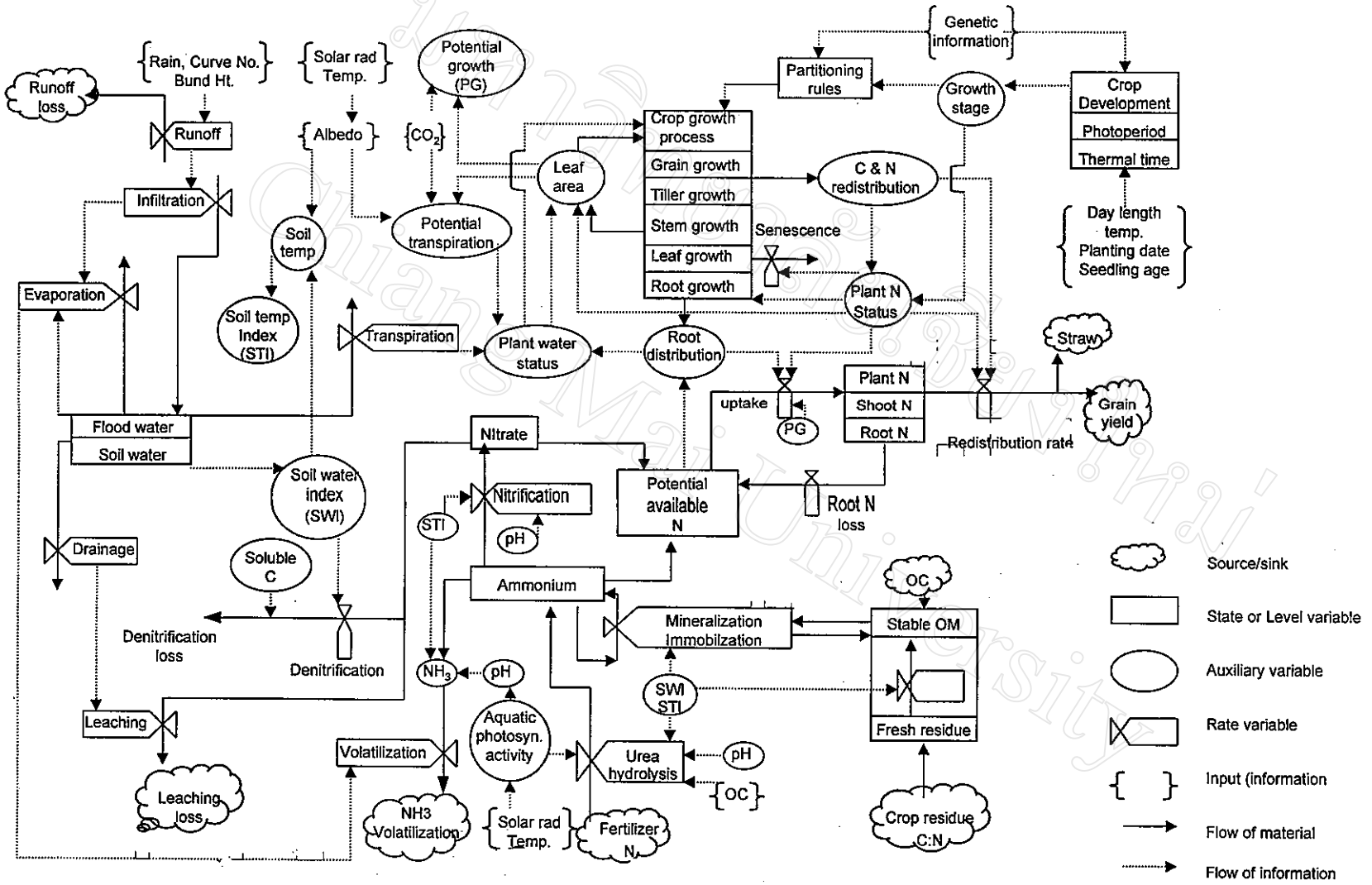
4. เมื่อได้ค่าที่สัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมที่ปรับแล้ว ยังควรต้องผ่านขั้นตอนทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (model validation) โดยใช้สัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมที่ได้ในการจำลองงานทดลองอื่นที่ไม่ใช่งานทดลองที่ใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ (Dent and Blackie, 1979) ซึ่งถ้าการทดสอบในขั้นตอนนี้ให้ผลเป็นที่พอใจ ก็สามารถนำแบบจำลองและค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมของพันธุ์นั้น ๆ ไปใช้ตามวัตถุประสงค์ของผู้ใช้ต่อไป

3. หลักการ ทฤษฎีและสมมติฐาน ของแบบจำลอง

หลักการสร้างแบบจำลองตระกูล CERES คือการจำลองกระบวนการหลัก 2 กระบวนการ คือการเจริญเติบโต (growth) และ พัฒนาการ (development) โดยการเจริญเติบโตเป็นการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของส่วนต้น ใบ และรวง และพัฒนาการเป็นกระบวนการที่วัดโดยระยะการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาพืช (development stage) ซึ่งมีสองลักษณะที่แตกต่างกันคือ phasic development ที่เป็นการเปลี่ยนแปลงระยะการเจริญเติบโต ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการถ่ายเทสารสังเคราะห์ (biomass partitioning) เป็นหลัก และ morphological development ที่หมายถึงการเริ่มและสิ้นสุดของการพัฒนาของส่วนต่าง ๆ ของพืช โดยแบบจำลอง CERES-Rice จะบอกผลการจำลองพัฒนาการลักษณะนี้เป็น จำนวนใบ จำนวนหน่อ และจำนวนเมล็ด (Ritchie *et al.*, 1998)

โดยอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลจากงานทดลองกับธัญพืชหลายชนิด Ritchie (1991) ได้สรุปเปรียบเทียบระดับของอิทธิพลของปัจจัยสิ่งแวดล้อมภูมิอากาศที่สำคัญ พันธุกรรม รวมถึงการขาดน้ำและไนโตรเจน ต่อการเจริญเติบโตและพัฒนาการ ทั้งในระดับและรูปแบบที่ต่างกัน (ตาราง 4) และข้อมูลนี้ใช้เป็นความรู้พื้นฐาน ในการจำลองกระบวนการต่างๆ ของแบบจำลองตระกูล CERES

แบบจำลอง CERES-Rice มีรูปแบบ mechanistic model ที่เป็น dynamic simulation โดยมีการกำหนดตัวแปรปริมาณ (level variable) หมายถึงตัวแปรที่มีการสะสมเพิ่มขึ้นหรือลดลงแต่ละวัน ทั้งที่วัดเป็นปริมาณได้ ได้แก่ น้ำหนักต้น ใบ และเมล็ด ปริมาณไนโตรเจนในพืช ปริมาณน้ำ ฯลฯ หรือที่มีการกำหนดปริมาณให้ ได้แก่ ระยะพัฒนาการ และตัวแปรอัตราเร็วการเปลี่ยนแปลงปริมาณ (rate variable) ที่มีหน่วยเป็นหน่วยของตัวแปรปริมาณต่อวัน ที่สัมพันธ์กับตัวแปรขยาย (auxilary variable) ที่อธิบายตัวแปรอื่นได้แก่ ความเครียดน้ำและไนโตรเจน และตัวแปรข้อมูลนำเข้า ที่ได้แก่ อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด ดังที่แสดงเป็นสัญลักษณ์ที่เสนอโดย Forrester (1972) ในภาพ 3 โดยพัฒนาจากกระบวนการหลักในภาพ 1 และเป็นแผนภาพที่ใช้พัฒนาให้เป็นแบบจำลองที่ทำงานได้จริงในรูปโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน (FORTRAN) (Singh *et al.*, 1998)



ภาพ 3 แผนภาพแบบจำลอง CERES-Rice ที่ใช้สัญลักษณ์ตาม Forrester (1971) (ดัดแปลงจาก Singh, 1994)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

ตาราง 4 ปัจจัยการเจริญเติบโตและพัฒนาการ และความอ่อนไหว (sensitivity) ของปัจจัยต่อความเครียดของพืช ที่ใช้เป็นหลักการสร้างแบบจำลอง CERES (Ritchie *et al.*, 1998)

	การเจริญเติบโต(growth)		พัฒนาการ(development)	
	มวล (mass)	การขยายขนาด (Expansion)	ระยะเวลา (Phasic)	ทางสัณฐานวิทยา (Morphological)
ปัจจัยสิ่งแวดล้อมหลัก	พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar radiation)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ ความยาววัน	อุณหภูมิ
ระดับความแปรปรวนระหว่างพันธุ์	ต่ำ	ต่ำ	สูง	ต่ำ
ความอ่อนไหวต่อการขาดน้ำของพืช	ต่ำ – ปากใบ ปานกลาง – ใบเหี่ยวและม้วน	สูง – ระยะเจริญทางต้นและใบ ต่ำ – ระยะสะสมน้ำหนักเมล็ด	ต่ำ – ชะลอระยะเจริญทางต้นและใบ	ต่ำ
ความอ่อนไหวต่อการขาดไนโตรเจน	ต่ำ	สูง	ต่ำ	ต่ำ- ต้นแม่ สูง- หน่อ

3.1 การจำลองระยะพัฒนาการ

การจำลองระยะพัฒนาการใช้คำนวณเวลาเป็นอุณหภูมิสะสมรายวัน (daily thermal time) ที่มีหน่วยเป็น growing degree day หรือ °Cd โดยเป็นการบอกระยะเวลาเป็นอุณหภูมิสะสมของแต่ละวันซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วของกระบวนการทางชีวเคมีของพืช มากกว่าเวลาที่มีหน่วยเป็นวัน

อุณหภูมิสะสม = (อุณหภูมิสูงสุด + อุณหภูมิต่ำสุด)/2 – base temperature ของแต่ละวัน (1)

โดยที่ base temperature หมายถึงอุณหภูมิต่ำสุดที่พืชจะเจริญเติบโตได้ (Ritchie and Nesmith, 1991) ซึ่งใน CERES-RICE 3.5 กำหนดให้เท่ากับ 9 °C

นอกจากนั้นแบบจำลองยังมีข้อกำหนดที่เป็นรายละเอียดอีกว่า ถ้าอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดของวันใดอยู่ระหว่างช่วง 14 – 32 °C แบบจำลองคำนวณอุณหภูมิสะสมรายวันตามสมการปกติข้างต้น แต่ถ้าวันใดมีอุณหภูมิต่ำสุดที่ต่ำกว่า 14 °C หรืออุณหภูมิสูงสุดที่สูงกว่า 32 °C ก็จะแบ่งเวลา

ของวันนั้นเป็น 8 ช่วงช่วงละ 3 ชม. เพื่อหาค่าอุณหภูมิสะสมของเวลาของช่วง 3 ชม.นั้น โดยถ้าช่วงไหนมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่า 9 ° C หรือสูงกว่า 42 ° C อุณหภูมิสะสมจะเท่ากับ 0 °Cd คือการเจริญจะหยุด ถ้าช่วงไหนมีอุณหภูมิระหว่าง 33 °C- 42 °C หรือระหว่าง 9 °C- 14.0 °C ค่าอุณหภูมิสะสมจะน้อยลงจากปกติ ด้วยสัมประสิทธิ์ตัวหนึ่ง อุณหภูมิสะสมของวันนั้นคือการรวมค่าอุณหภูมิสะสมทั้ง 8 ช่วงๆ ละ 3 ชม.ในวันนั้น (Jones and Kiniry, 1986; Singh *et al.*, 1998)

แบบจำลองใช้ทฤษฎีที่สำคัญว่าข้าวทุกพันธุ์เป็นพืชวันสั้น (short day plant) ที่การเกิดรวงมีความไวต่อช่วงแสงหรือความยาววัน ซึ่งเป็นกลไกการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมอย่างหนึ่ง ซึ่ง การเกิดรวงนั้นสัมพันธ์กับทั้งอุณหภูมิและความยาววัน

แบบจำลอง CERES-Rice แบ่งระยะพัฒนาการในการจำลองออกเป็น 9 ระยะ ที่สอดคล้องกับระยะการเจริญเติบโตข้าวที่เสนอโดย Vergara and Chang (1985) และเป็นตัวกำหนด ส่วนของข้าวที่ แบบจำลองจะทำการจำลอง การเจริญเติบโต ดังแสดงใน ตาราง 5

ตาราง 5 ระยะการเจริญเติบโตในแบบจำลอง CERES-Rice (ดัดแปลงจาก Ritchie *et al.*, 1998)

ระยะ	พัฒนาการ นิยามตาม CERES-Rice	ระยะการเจริญ (Vergara and Chang, 1985)	ส่วนของข้าวที่จำลองการเจริญเติบโต
7	ก่อนเพาะเมล็ด (falllow- sowing)	(Fallow/land prepartion)	-(ไนโตรเจนและน้ำ)
8	เพาะเมล็ด (sowing) ถึงรากงอก (germination)	(Seed soaking)	- เมล็ด
9	รากงอกถึงใบโผล่พ้นดิน (emergence)	Basic vegetative	ราก
1	โผล่พ้นดินถึงสิ้นสุดระยะ juvenile	Basic vegetative	ใบ, ราก
2	สิ้นสุดระยะ juvenile ถึงกำเนิดช่อดอก (panicle initiation, PI)	Photoperiod sensitivity phase	ใบ, ต้น, ราก
3	กำเนิดช่อดอก ถึงสิ้นสุดการเจริญของใบ/ออกดอก	Reproductive	ใบ, ต้น, ราก,รวง
4	สิ้นสุดการเจริญของใบ / ออกดอก ถึงเริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ด	Reproductive	ต้น, รวง, ราก
5	เริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ดถึงสุกแก่ทางสรีรวิทยา	Ripening	เมล็ด, ราก
6	สุกแก่ทางสรีรวิทยา ถึง เก็บเกี่ยว	-	-

จากนิยามระยะพัฒนาการในตาราง 5 แบบจำลองมีการคำนวณระยะเวลาแต่ละระยะดังนี้

ระยะที่ 7 (P7) ที่เป็นระยะเวลาก่อนปลูก แม้ว่ายังไม่มีข้าวปลูก แต่เป็นระยะที่มีการจำลองการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบไนโตรเจนและน้ำในดิน ที่จะมีผลต่อผลผลิตของข้าว ขึ้นอยู่กับการกำหนดวันเริ่มจำลอง (start simulation date) โดยผู้ใช้

ระยะที่ 8 (P8) ระยะตั้งแต่เริ่มเพาะเมล็ดจนถึงรากงอก ที่แบบจำลองกำหนดว่า

$$P8 = 150.0*EXP(-0.055*TEMPM) \quad (2)$$

โดยที่ TEMPM คือ อุณหภูมิเฉลี่ยวันที่เพาะเมล็ด = (อุณหภูมิสูงสุด + อุณหภูมิต่ำสุด)*0.5

และระยะที่ 8 นี้จะกำหนดไว้ให้ไม่น้อยกว่า 28 °Cd และไม่เกิน 80 °Cd และอุณหภูมิที่เมล็ดข้าวงอกได้อยู่ระหว่าง 15-42 °C

ระยะที่ 9 (P9) ตั้งแต่รากงอกจนถึงใบโผล่พ้นผิวดิน แบบจำลองกำหนดให้ขึ้นอยู่กับความลึกเมล็ดที่ปลูกอย่างเดียว

$$P9 = 10.0*SDEPTH + 20.0 \quad (3)$$

โดยที่ SDEPTH คือความลึกของเมล็ดที่ปลูก (เซ็นติเมตร)

ในกรณีที่เป็นการปลูกแบบปักดำ CERES-Rice 3.5 ที่กำหนดให้วันปลูกเป็นวันปักดำ และไม่ได้จำลองช่วงเป็นต้นกล้า การคำนวณค่า P8 และ P9 เป็นไปทำนองเดียวกับการปลูกโดยตรง แต่ค่า P8 ใช้อุณหภูมิเฉลี่ยที่กล้าเจริญเติบโต (ATEMP) แทนอุณหภูมิเฉลี่ย TEMPM และค่า P9 คำนวณจากค่าความลึกของเมล็ดขณะที่ตกกล้า

ระยะที่ 1 (P1) ที่เป็นระยะเวลาตั้งแต่ใบโผล่พ้นดิน(emergence) จนถึงสิ้นสุดระยะ Juvenile ที่เป็นค่าทางพันธุกรรม และถ้าเป็นการปลูกด้วยวิธีการปักดำ จะกำหนดว่าการปักดำทำให้ระยะที่ 1 ยืดระยะเวลานานกว่าปลูกโดยไม่ย้ายกล้าปักดำ จาก P1 เป็น TPHEN

$$TPHEN = P1 + 25.0 + 0.4* (CUMDTT - P8 - P9) \quad (4)$$

โดยที่ CUMDTT คือค่าอุณหภูมิสะสม (CUMDTT) ของกล้าตั้งแต่งอกจนถึงปักดำ

$$CUMDTT = (ATEMP-TBASE)*(TAGE-1.0) \quad (5)$$

โดยที่ ATEMP คืออุณหภูมิเฉลี่ยขณะที่กล้าเจริญเติบโต

TAGE คืออายุกล้า, วัน

TBASE = 9.0 °C

ระยะที่ 2 (P2) ที่เป็นระยะตั้งแต่สิ้นสุด Juvenile ถึง กำเนิดช่อดอก (panicle initiation, PI) เปลี่ยนแปลงไปตามความไวต่อช่วงแสง (photoperiod sensitivity) ของข้าวแต่ละพันธุ์ โดยแบบจำลอง CERES-Rice 3.5 กำหนดให้ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมทางพัฒนาการสองค่า คือ P2R ที่เป็นสัมประสิทธิ์การชะลอการกำเนิดช่อดอก มีหน่วยเป็น °Cd แสดงความไวต่อช่วงแสง และค่า P2O ความยาววันวิกฤติ (critical daylength) มีหน่วยเป็นชั่วโมง หมายถึงความยาววันที่ยาวที่สุด ที่มีการเกิดรวงได้เร็วที่สุด

ค่าความยาววันที่ใช้ใน CERES-Rice 3.5 หมายถึงช่วงระยะเวลาที่ดวงอาทิตย์ยังอยู่ในระดับสูงว่าระดับ 6 ° ใต้แนวระนาบ (+civil twilight) โดยแสงในช่วงนั้นยังมีความเข้มแสงเพียงพอที่จะชักนำให้เกิดหรือไม่เกิดรวงได้ (Vergara and Chang, 1985) โดยค่าความยาววันหนึ่งๆ นี้ขึ้นอยู่กับระดับเส้นรุ้ง (latitude) ของพื้นที่นั้น

การเกิดรวงของแบบจำลองขึ้นอยู่กับอัตราเร็วการเกิดรวง ที่ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การเกิดรวง (RATEIN)โดย กำหนดเงื่อนไขว่า

ถ้าข้าวเจริญผ่านระยะ P1 และความยาววันของวันนั้น (HRLT) น้อยกว่าหรือเท่ากับ P2O

$$RATEIN = 1/136 \ ^{\circ}Cd \quad (6)$$

แต่ถ้าข้าวเจริญผ่านระยะ P1 และความยาววัน (HRLT) มากกว่า P2O

$$RATEIN = 1.0/(136.0+P2R*(HRLT-P2O)) \quad (7)$$

นอกจากนั้นมีเงื่อนไขอีกว่าจะเกิดรวงได้ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิกลางคืน (TN) ขณะที่เกิดดอกต้องมากกว่า 15 °C อย่างน้อย 2 วันติดต่อกัน โดยที่

$$TN = (0.25*TMAX)+(0.75*TMIN) \quad (8)$$

ระยะที่ 3 (P3) ตั้งแต่กำเนิดช่อดอกถึงสิ้นสุดการเจริญของใบ ซึ่งมีสมมติฐานว่าระยะนี้ไม่มีความแตกต่างกันระหว่างพันธุ์ โดยกำหนดให้

$$P3 = 5.75*PHINT+0.135*SUMDTT \quad (9)$$

โดยที่ PHINT คือระยะเวลาระหว่างการเกิดใบ (phyllocron interval)= 83 °Cd

SUMDTT คือ อุณหภูมิสะสมตั้งแต่สิ้นสุดระยะ P2

ระยะที่ 4 (P4) ระยะเวลาตั้งแต่สิ้นสุดการเจริญของใบถึงเริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ดซึ่งสมมติฐานว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างพันธุ์ โดยกำหนดให้เท่ากับ 150 °Cd

ระยะที่ 5 (P5) ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ดจนถึงสุกแก่ของรวงแม่ และของหน่อเป็นสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมตัวหนึ่ง เป็นระยะที่น้ำหนักเมล็ดมีค่าสูงสุด โดยระยะนี้ในทางปฏิบัติของการเก็บข้อมูล กำหนดว่าเป็นระยะที่ 80 เปอร์เซ็นต์ ของเมล็ดในแปลงสุกแก่หรือมีสีน้ำตาล (Ogoshi *et al.*, 1999)

ระยะที่ 6 (P6) คือระยะจากสุกแก่ถึงเก็บเกี่ยว ไม่มีการเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตจากวันสุดท้ายของระยะที่ 5 ที่ถ้าไม่กำหนดวันเก็บเกี่ยวโดยผู้ใช้ แบบจำลองจะกำหนดให้ระยะนี้เป็น 1 วัน ซึ่งหลังจากเก็บเกี่ยว ก็จะเข้าระยะที่ 7

3.2 การจำลองการเจริญเติบโตและผลผลิต

การจำลองการเจริญเติบโตของแบบจำลอง CERES-Rice 3.5 นั้นยึดหลักการตามการจัดลำดับระบบการผลิตพืช (crop production systems) ตามลำดับตามข้อจำกัดการเจริญเติบโตที่เสนอโดย Wit and Penning de Vries (1982) อ้างโดย Penning de Vries *et al.* (1989) ที่จัดระดับชั้นของระบบการผลิตเพื่อใช้ในการจำลองพืชโดยยึดหลักของ Law of Minimum ที่เสนอโดย Carl S. Sprengel(1830) และ Justus von Liebig (1840) (อ้างโดย ยงยุทธ, 2543) ที่อธิบายว่า ปัจจัยที่พืชขาดมากที่สุดจะเป็นปัจจัยจำกัดการเจริญเติบโต โดย CERES Rice 3.5 ใช้การจำลองตามระบบการผลิต 3 ระดับคือ ระบบการผลิตระดับศักยภาพที่การเจริญเติบโตขึ้นอยู่กับพันธุกรรม และภูมิอากาศ (อุณหภูมิ และพลังงานแสง) ระบบการผลิตที่มีน้ำจำกัด และระบบการผลิตที่มีไนโตรเจนจำกัด (Penning de Vries *et al.*, 1989)

กระบวนการหลักที่ใช้ในการจำลองการเจริญเติบโตของ CERES-Rice 3.5 คือการสังเคราะห์แสง กับสมดุลคาร์บอน การคายน้ำกับสมดุลน้ำ และการใช้ไนโตรเจนกับสมดุลไนโตรเจน (ภาพ 1 และ 3)

CERES-Rice3.5 ใช้หลักประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสง (radiation use efficiency) จำลองการเจริญเติบโตหรือสะสมน้ำหนักรวมของข้าวทั้งต้น และใช้หลักการถ่ายเทสารสังเคราะห์ (assimilate partitioning) และหลักของ source/sink สำหรับการคำนวณการแบ่งสารสังเคราะห์ไปยังส่วนต้น ใบ รวง เมล็ด และราก ตามระยะพัฒนาการ (ตาราง 5) และใช้หลัก Law of Minimum

ของปัจจัยจำกัดการเจริญเติบโต ที่ได้แก่น้ำและไนโตรเจนและอุณหภูมิ เพื่อลดการเจริญเติบโตจากระดับที่ไม่มีข้อจำกัดของปัจจัยดังกล่าว

CERES-Rice 3.5 กำหนดให้ 50 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานแสงอาทิตย์ (solar radiation, MJ/ตร.ม.)ที่เป็นข้อมูลนำเข้า เป็นพลังงานแสงที่พืชใช้สังเคราะห์แสงได้ (photosynthetically active radiation, PAR) ซึ่งเป็นพลังงานแสงส่วนที่มีความยาวคลื่น 400-700 nm ซึ่งเป็นค่าประมาณที่เสนอโดย Monteith (1972) อ้างโดย Yoshida (1981) สำหรับทั้งในพื้นที่เขตร้อนและเขตอบอุ่น และ ค่าพลังงานแสงที่พืชสังเคราะห์ได้นี้เปลี่ยนเป็นน้ำหนักแห้งที่สังเคราะห์ได้สูงสุด (potential dry matter or organic carbon assimilation, PCARB) (กรัม/ต้น) โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นน้ำหนัก และความหนาแน่นของประชากรพืช และพื้นที่ใบ อาศัยกฎ Beer's Law และ radiation use efficiency (Singh, 1989) ดังสมการ

```
PCARB  = 6.85*PAR**0.65/ PLANTS**0.975*(1-AMAX1(EXP(-0.625*LAI),
                EXP(-0.92*EXP(-0.65*ROWSPC)*LAI)))                    (10)
```

โดยที่ PCARB = อัตราการสะสมน้ำหนักแห้งสูงสุดต่อต้นต่อวัน

PAR = พลังงานแสงที่พืชใช้สังเคราะห์แสงได้

PLANTS = จำนวนต้นต่อตารางเมตร

LAI = ดัชนีพื้นที่ใบ

ROWSPC = ระยะระหว่างแถว

การพัฒนาของพื้นที่ใบคำนวณจาก จำนวนใบ และข้อจำกัดของอุณหภูมิ น้ำและไนโตรเจน โดยการจำนวนใบขึ้นอยู่กับระยะพัฒนาการและข้อจำกัดของอุณหภูมิ

แบบจำลองจำลองการแบ่งสารสังเคราะห์ไปสร้างเป็นส่วนต่างๆ ของข้าวได้แก่ ต้น ใบ รวง เมล็ด และราก ซึ่งมีการแยกส่วนที่เป็นหน่อ (tiller) กับต้นแม่ (main culm) ด้วย โดยอาศัยความสัมพันธ์หลักระหว่าง sink-source และส่วนของพืชที่จะเจริญในแต่ละระยะการเจริญ

ในระยะแรกของการเจริญเติบโต (vegetative phase) การเจริญเติบโตของต้นข้าวเป็นแบบที่ sink เป็นตัวจำกัด การคำนวณพื้นที่ใบจากจำนวนใบที่เกิดตามระยะการเจริญ จากความสัมพันธ์ของจำนวนใบกับอุณหภูมิสะสม โดยที่การเกิดหน่อเป็นไปในทำนองเดียวกับการเกิดใบ มีการจำลองการเกิดใบและพื้นที่ใบของหน่อแยกจากของต้นแม่ เพื่อที่ใช้ระบบการให้ความสำคัญ (priority system) ในการถ่ายเทสารอาหาร ซึ่งมีประโยชน์ในการจำลองการแตกหน่อที่ชดเชยให้ได้ความหนาแน่นของรวงต่อพื้นที่สูง กรณีที่ความหนาแน่นของต้นข้าวที่ต่ำ

แบบจำลองกำหนดให้การย้ายกล้าปักดำ มีผลกระทบในการลดอัตราการเพิ่มของพื้นที่ใบนาน 14 วันหลังจากปักดำ โดยผลกระทบลดลงเรื่อยๆ จนหมดเมื่อถึงวันที่ 14 หลังปักดำ โดยผลกระทบของการปักดำในวันนั้น ๆ ก็ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในวันนั้นๆ ด้วย ยิ่งถ้าอุณหภูมิสูง ผลกระทบของการปักดำ ก็ยิ่งมีมากขึ้น

แบบจำลองมีการจำลองการเจริญเติบโตของส่วนที่เป็นหน่อข้าว (tiller) ควบคู่ไปกับการเจริญเติบโตของต้นแม่ (main culm) ของข้าวตั้งแต่ระยะที่ 1 และมีการจำลองความหนาแน่นของหน่อที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การแตกกอ (tillering coefficient) G3 (ตาราง 3) โดยศักยภาพของจำนวนหน่อต่อต้น (PTILNO) ขึ้นอยู่กับจำนวนใบของต้นแม่ (XN) และ G3 ดังสมการ

PTILNO = (-0.10+1.655*(XN-4.0)-0.376*(XN-4.0)**2+0.0758*(XN-4.0)**3)*G3 (11)

นอกจากนั้นสัมประสิทธิ์การแตกกอ G3 นั้นยังเกี่ยวข้องกับผลผลิตโดยที่ไม่เกี่ยวกับจำนวนหน่อ ใน GROSUB Routine ด้วย โดยเป็นตัวกำหนดค่าตัวแปรการเจริญเติบโต (growth factor, GRF) ที่เป็นตัวลดการสะสมน้ำหนักทั้งต้นแม่ และหน่อ ซึ่งถ้า G3 ลดจะทำให้ค่า GRF จะลดลง และผลผลิตจะมากขึ้น

CERES-Rice 3.5 มีระบบการจำลองการตายของใบ (leaf senescence) โดยสมมติฐานว่าการตายของใบจะเกิดถ้าประชากรและพื้นที่ใบหนาแน่นมาก และพื้นทีใบของใบที่ต่ำทีสุดถูกบังแสง หรือมีการขาดน้ำและไนโตรเจนถึงระดับหนึ่ง

หลังจากที่ใบเจริญจนถึงระยะหนึ่ง ต้นก็จะเริ่มเจริญและกลายเป็น sink หลักสำหรับสารสังเคราะห์ คือเมื่อมีการยืดปล้องของต้นข้าว (stem elongation) เกิดขึ้นเมื่อมีการเกิดรวง หรือเมื่อใบหยุดการเจริญ ต้นจะเป็นส่วนที่เป็นหลักในการสะสมสารสังเคราะห์เพื่อใช้ในการสะสมน้ำหนักเมล็ด

เมื่อเมล็ดเริ่มมีการสะสมน้ำหนัก การสะสมน้ำหนักต้นก็จะหยุด เนื่องจากเมล็ดกลายเป็น sink หลักสำหรับสารสังเคราะห์ และสารสังเคราะห์ที่สะสมในต้นก็จะถูกดึงมาใช้ในวันที่การสร้างน้ำหนักไม่เพียงพอสำหรับการเจริญของเมล็ด โดยมีการกำหนดน้ำหนักต้นต่ำสุดถ้าสารสังเคราะห์จากต้นถูกเคลื่อนย้ายไปจนหมดด้วย

อัตราการสะสมน้ำหนักเมล็ดคำนวณการสะสมรายวันโดยกระบวนการ source-sink-reserves โดยความจุหรือขนาดของ sink คำนวณบนพื้นฐานของอุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิ์ G2 (potential single grain weight) ส่วนที่เป็น source ของการสะสมน้ำหนักเป็นการสร้างน้ำหนักแห้งในแต่ละวันรวมกับสารสังเคราะห์ที่เก็บสะสมไว้ (stored assimilates) ในส่วนต้น ส่วนที่เป็นสารสังเคราะห์ที่เก็บไว้นี้จะถูกใช้หมดไปเมื่อน้ำหนักต้นลดลงต่ำสุดจนเหลือส่วนที่เป็นโครงสร้างของต้น (structural หรือ minimum stem weight)

CERES-Rice 3.5 คำนวณผลผลิตจากจำนวนเมล็ดต่อต้นกับน้ำหนักเมล็ดเฉลี่ยที่ระยะสุกแก่ทางสรีรวิทยา และจากจำนวนต้นต่อพื้นที่ จำนวนเมล็ดต่อต้นคำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุ-กรรมการเจริญเติบโต G1 (potential spikelet) ที่เป็นจำนวนดอกย่อย (spikelet) ต่อน้ำหนักต้นแม่ (main culm) 1 กรัม และน้ำหนักรวมต้นข้าวส่วนเหนือดินในช่วง anthesis และจำนวนเมล็ดดีต่อต้น (grain per plant) จะเท่ากับจำนวนดอกย่อยคูณด้วยค่าความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิต่ำหรือสูง หรือความเครียดจากน้ำหรือไนโตรเจนที่ทำให้เกิดเปอร์เซ็นต์เมล็ดลีบมากขึ้น

จำนวนเมล็ดต่อต้นสัมพันธ์กับ ค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม G4 (temperature tolerant) ที่แบบจำลองแนะนำให้ใช้ค่ามากกว่า 1.0 สำหรับพันธุ์ที่มีความทนทานต่ออุณหภูมิต่ำ และน้อยกว่า 1.0 ถ้าเป็นพันธุ์ที่มีความทนทานต่ออุณหภูมิสูง จำนวนเมล็ดดีต่อต้นขึ้นอยู่กับ G4 ที่สัมพันธ์กับความเครียดอุณหภูมิทั้งอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ และสัมพันธ์กับน้ำหนักเมล็ดต่อต้น

น้ำหนักเมล็ดต่อต้นเป็นผลจากอัตราการเจริญเติบโตของเมล็ดในสภาพที่เหมาะสม แบบจำลองกำหนดให้ G1 สัมพันธ์กับตัวแปรอัตราการสะสมน้ำหนักเมล็ด (RGFIL) ด้วย โดยกำหนดเงื่อนไขไว้ว่า

ถ้า G1 $\geq$ 50 แล้ว RGFIL= G2/P5 (12)

ระยะเวลาการสะสมน้ำหนักเมล็ดขึ้นอยู่กับขนาดสูงสุดของ sink (potential sink size) สัมประสิทธิ์พันธุกรรม G2 อุณหภูมิสะสม และข้อจำกัดของน้ำและไนโตรเจนและอุณหภูมิ

แบบจำลองมีระบบจำลองไนโตรเจนและน้ำ โดยใช้หลักว่าทั้งสองปัจจัยนี้ถ้าอยู่ในสภาพที่มีจำกัด จะทำให้เกิดความเครียด และลดอัตราการเจริญเติบโตจากระดับศักยภาพ ซึ่งเป็นระดับการผลิตที่สอง และสาม ที่นิยามโดย Wit and Penning de Vries (1982) อ้างโดย Penning de Vries *et al.* (1989) ดังกล่าวมาแล้ว โดยรายละเอียดสมการการจำลองระบบสมดุลน้ำ และไนโตรเจนของ CERES-Rice 3.5 และการทดสอบทั้งสองระบบนี้ เสนอใน จิรวัฒน์ (2544)

วิธีการศึกษา

จากวัตถุประสงค์การวิจัย และการศึกษาโครงสร้าง หลักการใช้ และสมการแบบจำลองดังที่กล่าวมาแล้ว แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพและความแม่นยำการใช้แบบจำลอง CERES-Rice 3.5 ขึ้นอยู่กับการปรับค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม เนื่องจากเป็นค่าตัวแปรชุดเดียวที่แบบจำลองยอมให้ปรับได้ตามพันธุ์ที่ใช้ และขึ้นอยู่กับความเข้าใจในข้อจำกัดของแบบจำลองต่าง ๆ ดังนั้นขั้นตอนหลักของการวิเคราะห์วิธีการใช้แบบจำลอง CERES-Rice 3.5 นี้จึงประกอบด้วยการศึกษาวิธีการปรับหาค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม (genetic coefficient calibration) ร่วมกับการศึกษากระบวนการจำลอง ด้วยการตรวจสอบความอ่อนไหวและความถูกต้อง (sensitivity test and validation) ที่ทดสอบปัจจัยภูมิอากาศ และพันธุกรรม และทำการตรวจสอบและวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนเงื่อนไขและข้อจำกัดต่างๆ ของการใช้แบบจำลอง CERES-Rice 3.5

1. การศึกษาวิธีการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม

ดำเนินการโดย ทำการทดลองในแปลงปลูก และจำลองงานทดลองแปลงปลูก พร้อมๆ กับปรับค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม ให้สอดคล้องกับงานทดลองแปลงปลูก

1.1 การทดลองในแปลงปลูก (field experiment) : การเจริญเติบโตของข้าว 4 พันธุ์ 12 วันปลูก

ทำการทดลองโดยวางแผนแบบ Split plot 3 ซ้ำ กำหนดให้วันปลูก (ปักดำ) เป็น Main plot 12 วันปลูก ระยะห่างกันหนึ่งเดือน และพันธุ์ข้าว 4 พันธุ์เป็น Subplot ได้แก่ ขาวดอกมะลิ 105 เหนียวสันป่าตอง ชัยนาท 1 และ ข้าวญี่ปุ่นก.วก. 1 (ซาซานิชิกิ) ขนาดแปลงทดลองย่อย 4.5 x 6.0 เมตร ทำการทดลองที่ แปลงทดลองศูนย์วิจัยเพิ่มผลผลิตทางเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เริ่มปักดำข้าวสำหรับวันปลูกที่ 1 เมื่อวันที่ 24 มิถุนายน 2540 และปักดำครั้งสุดท้ายหรือวันปลูกที่ 12 เมื่อวันที่ 24 พฤษภาคม 2541 ใช้อายุกล้า 24-30 วัน ระยะปักดำ 25 x 25 ซม. จำนวนกล้า 3 ต้นต่อกอ ยกเว้น ก.วก.1 ที่ใช้กล้า 5 ต้นต่อกอ (วันที่ปักดำและตกกล้าของแต่ละวันปลูกแต่ละพันธุ์ แสดงในตารางภาคผนวก 1)

การจัดการหรือดูแลรักษาให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับข้าวแต่ละพันธุ์ ควบคุมระดับน้ำขังในแปลงให้สูงประมาณ 5-10 ซม.ตลอดฤดูปลูก. ใส่ปุ๋ยตามคำแนะนำของกองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร (2539) โดยหว่านปุ๋ยสูตร 16-16-8 อัตรา 25 กก./ไร่ ขณะเตรียมแปลงก่อนปักดำสำหรับข้าวทุกพันธุ์ และหว่านปุ๋ยยูเรียอัตรา 5 กก. ต่อไร่ สำหรับข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และ

เหนียวสันป่าตอง และ 10 กก.ต่อไร่ สำหรับข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และ ก.วก. 1 ที่ระยะกำเนิดช่อดอก และป้องกันความเสียหายจากศัตรูพืช และจากการหักล้ม อย่างเต็มที่ ตลอดฤดูปลูก

การบันทึกข้อมูลของต้นข้าวจากการทดลองตามแบบ IBSNAT(1988) ได้แก่การบันทึกระยะพัฒนาการ ที่ได้แก่ วันกำเนิดช่อดอกของต้นแม่ วันออกดอก 50 เปอร์เซ็นต์ และวันสุกแก่ 80 เปอร์เซ็นต์ และวัดข้อมูลการเจริญเติบโต ผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิต ที่ได้แก่การเปลี่ยนแปลง น้ำหนักต้น น้ำหนักใบ น้ำหนักรวง โดยสุ่มวัดจากต้นข้าวจำนวน 2 กอทุก ๆ สองสัปดาห์ตั้งแต่ปลูกจนถึงสุกแก่ น้ำหนักเมล็ดดี จำนวนหน่อ และ จำนวนรวง/ตร.ม. เปอร์เซ็นต์เมล็ดดีและเมล็ดลีบ ขณะสุกแก่ และ วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในต้น ใบ เมล็ด ที่ระยะสุกแก่

การบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวกับสภาพแวดล้อมงานทดลอง ได้แก่ข้อมูลชุดดินที่ปลูก และวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในดิน และอินทรียวัตถุในดินก่อนปลูก โดยชุดดินที่ปลูกคือสันทราย (ตารางภาคผนวก 2) และข้อมูลภูมิอากาศรายวันได้แก่พลังงานแสงอาทิตย์ (solar radiation) อุณหภูมิอากาศสูงสุดและต่ำสุด และปริมาณน้ำฝน ที่วัดและบันทึกโดยเครื่องวัดภูมิอากาศอัตโนมัติ (data logger) (ภาพภาคผนวก 1) รวมถึงการบันทึกสภาพการเจริญเติบโตของข้าว ได้แก่ อาการผิดปกติ เช่นการขาดน้ำ หรือน้ำท่วม การถูกทำลายโดย โรคแมลง และศัตรูข้าวอื่นๆ เช่นนก หรือการหักล้ม เป็นต้น

1.2. การจำลองงานทดลองในแปลงปลูกด้วย CERES-Rice 3.5 และปรับค่าสัมประสิทธิ์ด้วยโปรแกรม GENCALC

จำลองงานทดลอง 12 วันปลูกของข้าว 4 พันธุ์ เพื่อประเมินค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมของข้าวทั้ง 4 พันธุ์ที่ศึกษา สำหรับแต่ละวันปลูก โดยมีการเตรียมไฟล์ และขั้นตอนต่าง ๆ ในการจำลอง CERES-Rice 3.5 ใน DSSAT 3.5 ดังต่อไปนี้

1) การสร้างไฟล์รายละเอียดของการทดลอง (Experiment Details File, FILEX) ที่บรรจุข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ การทดลอง และรวมถึงรหัสชุดดิน รหัสสถานีวัดข้อมูลอากาศ และรหัสพันธุ์ข้าว ที่ใช้จำลอง ซึ่งจะเชื่อมโยงไปยังไฟล์ข้อมูลนำเข้าที่เป็นข้อมูลทางกายภาพที่ต้องเตรียมได้แก่ ไฟล์ข้อมูลดินที่ชื่อ SOIL.SOL ที่บรรจุชุดดินของแปลงที่ทำการทดลอง เรียกชุดดินแปลงทดลองจากไฟล์ในระบบ DLDSIS ที่บรรจุฐานข้อมูลชุดดินของประเทศไทย ที่บรรจุใน DSSAT 3.5 และปรับด้วยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการจริง (ตารางภาคผนวก 2) ไฟล์ข้อมูลอากาศขณะที่ทำการทดลอง (<Filename>.WTH) (ตารางภาคผนวก 3) และไฟล์ข้อมูลทางพันธุกรรม ใช้รูปแบบการสร้าง FILEX ตามที่ระบุใน DSSAT 3.0 Vol.2-1 (Jones *et al.*, 1994) และที่เพิ่มเติมแก้ไขใน DSSAT 3 Vol.4 (Hoogenboom *et al.*,1999)

2) การสร้างไฟล์ค่าเฉลี่ยจากงานทดลอง (Average value of experiment performance data file, FILEA) ที่เป็นไฟล์ที่เก็บข้อมูลค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดจริงจากงานทดลอง สร้างตามแบบและรายละเอียดใน DSSAT3.0 Vol.2-1 (Jones *et al.*, 1994)

3) การเตรียมชื่อพันธุ์และค่าประมาณของสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของพันธุ์ข้าวที่ใช้ทำการทดลอง เพื่อเป็นค่าตั้งต้นของพันธุ์นั้น ๆ ในไฟล์ สัมประสิทธิ์พันธุกรรมของข้าว (Genotype Coefficient File) ที่บรรจุอยู่ใน DSSAT3.5 สำหรับแบบจำลอง RICER980 คือ RICER980.CUL

4) การปรับค่าสัมประสิทธิ์พัฒนาการและการเจริญเติบโตของข้าว 4 พันธุ์แต่ละวันปลูกให้สอดคล้องกับค่าที่วัดได้จริง โดยใช้โปรแกรม GENCALC3.5 ใน DSSAT3.5 ตามขั้นตอนที่เสนอโดย Hunt *et al.* (1994) (ภาพ 2)

นอกจากนั้นยังมีการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมกับระยะพัฒนาการหรือผลผลิต โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ในแบบจำลอง หรือในสมการแบบจำลอง เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการปรับค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรม

2. การทดสอบแบบจำลองด้วยค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม และวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน

โดยอาศัยผลการจำลองงานทดลองใน 1.2 ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองที่บันทึกอยู่ในไฟล์ต่าง OVERVIEW.OUT และ GROWTH.OUT กับค่าที่วัดได้จริง หรือข้อสังเกตจากการทดลองแปลงปลูก (1.1) วิเคราะห์สาเหตุของความคลาดเคลื่อน โดยอ้างอิงกับสมการของแบบจำลองและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นเงื่อนไข หรือข้อจำกัดของการใช้แบบจำลอง สำหรับปัจจัยที่ศึกษา

ผลการศึกษา และวิจารณ์

ผลการศึกษาวิเคราะห์การใช้แบบจำลองนี้ประกอบด้วยการวิเคราะห์การประเมินค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมทั้ง 8 ตัว ที่แบ่งเป็นสัมประสิทธิ์พัฒนาการและสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต และการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนผลการจำลอง และเงื่อนไขข้อจำกัดของแบบจำลอง

1 วิเคราะห์วิธีการประเมินค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรม

1.1 สัมประสิทธิ์ระยะพัฒนาการ (development coefficients)

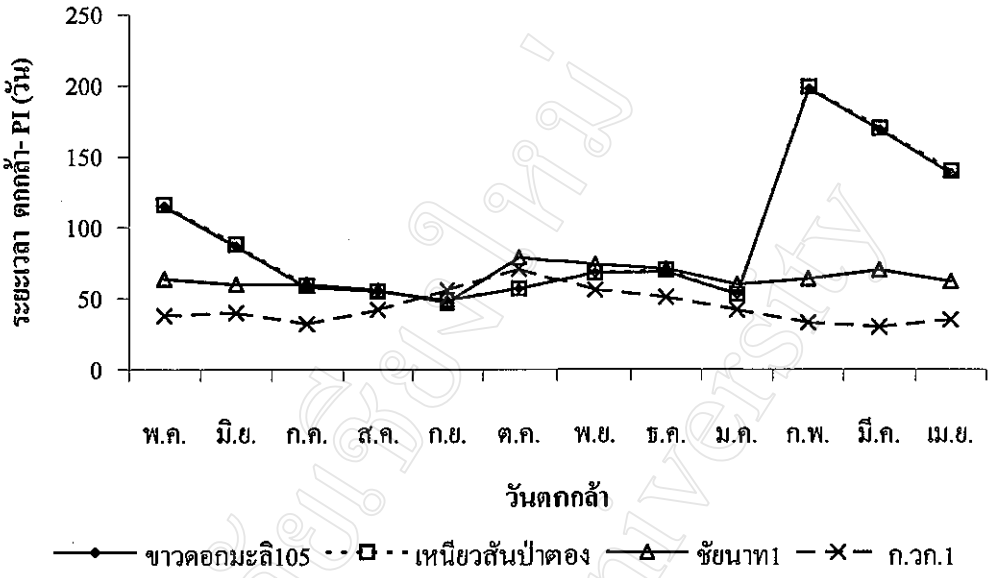
1.1.1 ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ และการประมาณค่าตั้งต้นก่อนปรับด้วย GENCALC

สัมประสิทธิ์ที่กำหนดระยะพัฒนาการ ตามนิยามในตาราง 3 ประกอบด้วย P1 P2O และ P2R ที่กำหนดวันกำเนิดช่อดอก และสัมประสิทธิ์ P5 ที่กำหนดวันสุกแก่ และจากการทดสอบยังพบว่าทุกระยะยังขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ G4 โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์ และการประมาณค่าแต่ละค่าก่อนที่จะทำการปรับกับค่าการทดลองดังต่อไปนี้

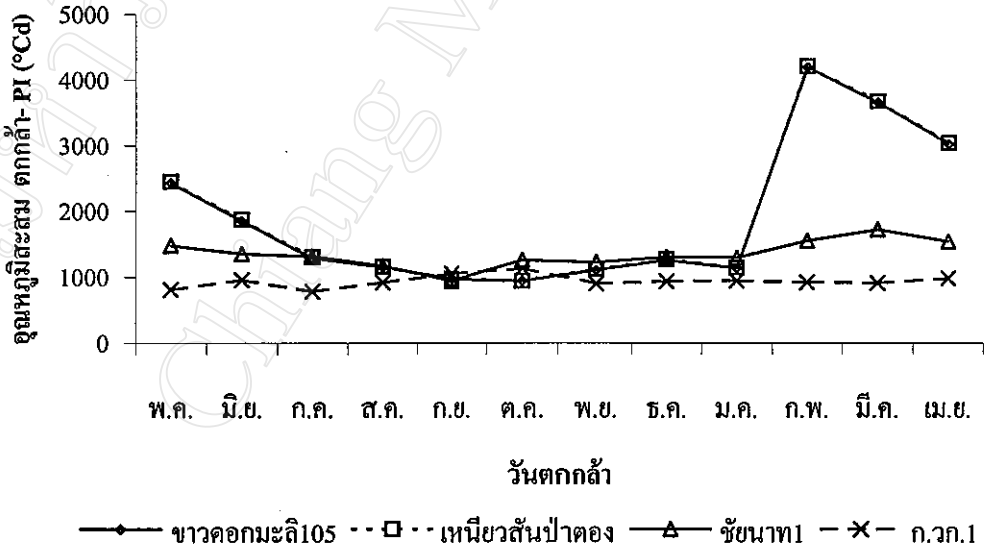
สัมประสิทธิ์พันธุกรรม P1 (basic vegetative phase)

ค่า P1 ที่ เป็นระยะ basic vegetative phase นั้นตามนิยามคือตั้งแต่เมล็ดงอกพ้นดินถึงสิ้นสุดการระยะ juvenile ซึ่งเห็นได้ว่าไม่สามารถกำหนดหรือประมาณค่านี้ได้โดยตรงจากการสังเกตในงานทดลอง เนื่องจากวันสิ้นสุดระยะ juvenile นี้ไม่สามารถสังเกตได้ชัดเจนเหมือนกันกับการสังเกตวันกำเนิดช่อดอก วันออกดอก หรือ วันสุกแก่ และการใช้โปรแกรม GENCALC 3.5 ช่วยในการประเมินค่าสัมประสิทธิ์นั้น เป็นการปรับค่า P1 ร่วมกับ P2R และ P2O ไปพร้อมๆ กัน โดยเปรียบเทียบกับวันออกดอกที่สังเกตได้

อย่างไรก็ตาม สามารถประมาณค่า P1 เพื่อเป็นค่าตั้งต้นก่อนที่จะทำการปรับโดยโปรแกรม GENCALC 3.5 ได้จากเวลาที่เมล็ดงอกถึงวันที่กำเนิดช่อดอก (PI) ของวันปลูกที่อายุสั้นที่สุดจากวันปลูกทั้ง 12 วันปลูกในรอบปีของพันธุ์นั้นๆ (ภาพ 4) ที่น่าจะเป็นวันปลูกที่ข้าวมีระยะเวลาที่กำเนิดช่อดอกใกล้เคียงกับระยะสิ้นสุด juvenile มากที่สุด เพราะน่าจะมีระยะที่ชะลอการเกิดรวง (photoperiod sensitive phase) สั้นที่สุด (Vergara and Chang, 1985) โดย จากระยะเวลาที่มีหน่วยเป็นวัน และจากข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดรายวันของแปลงที่ทดลอง สามารถคำนวณหาค่าอุณหภูมิสะสมแต่ละวันปลูก (ภาพ 5) แต่ต้องหักออกด้วยระยะที่การเจริญชะงักเนื่องจากการปักดำ



ภาพ 4 ระยะเวลา (วัน) ตั้งแต่ตกกล้าจนถึงกำเนิดช่อดอก (PI) ของข้าว 4 พันธุ์ 12 วันปลูก 2540-41



ภาพ 5 อุณหภูมิสะสม(°Cd) ตั้งแต่ตกกล้าถึงกำเนิดช่อดอก(PI)ของข้าว 4 พันธุ์ 12 วันปลูก 2540-41
(อุณหภูมิสะสม = ผลรวมของ ((Tmax+Tmin)/2 -9.0))

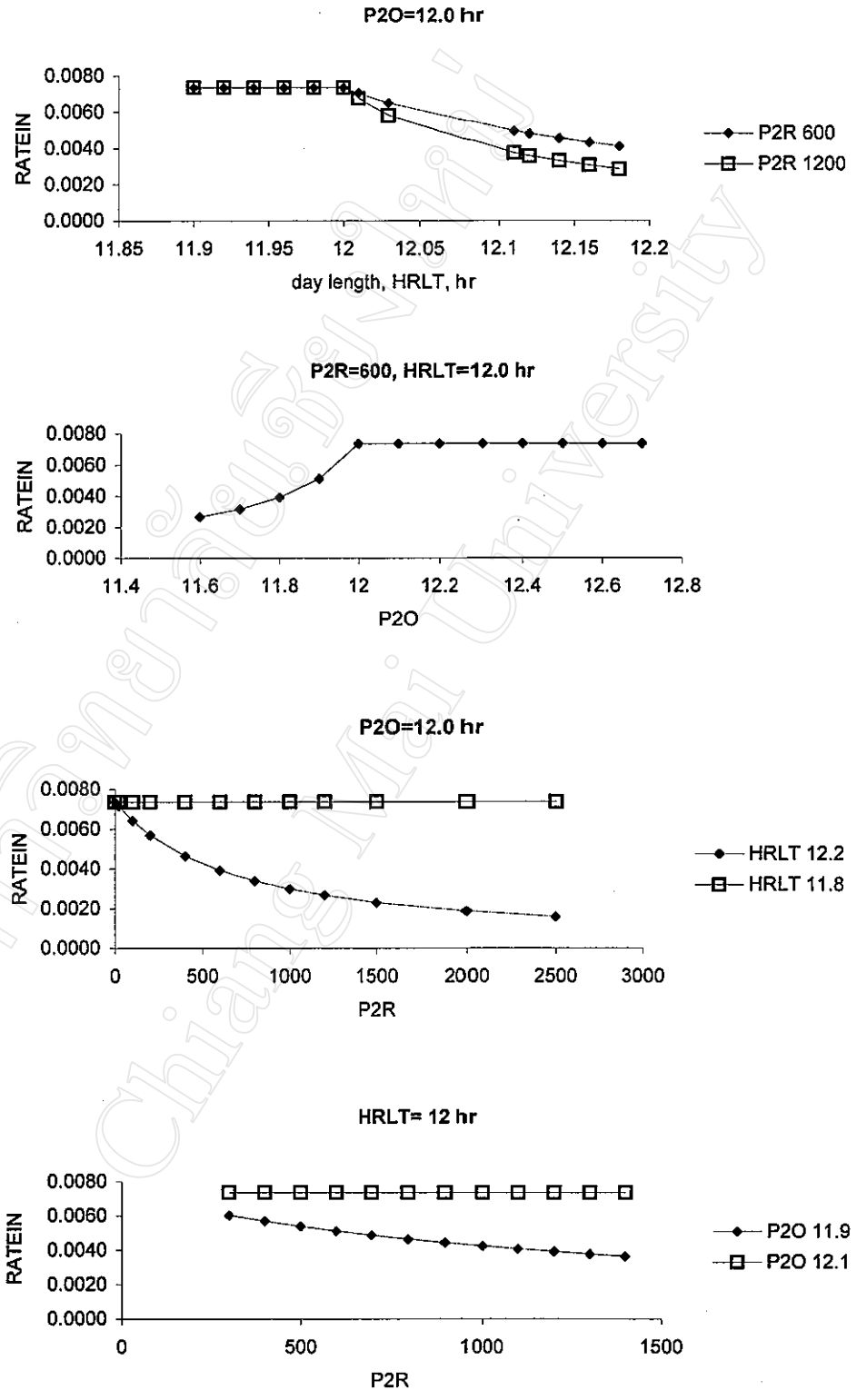
ที่แบบจำลองให้มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 195 °Cd เพื่อให้ได้ค่า P1 ตามสมมติฐานของแบบจำลอง จึงได้ค่าประมาณของ P1 สำหรับ ขาวดอกมะลิ 105 เหนียวสันป่าตอง ชัยนาท 1 และก.วก.1 ได้เท่ากับ 580, 580, 800 และ 540 ตามลำดับ

สัมประสิทธิ์พันธุกรรม P2O (critical photoperiod) และ P2R (photoperiod sensitivity)

P2O และ P2R และความยาววัน มีความสัมพันธ์กัน ในการกำหนดอัตราเร็วการกำเนิดช่อดอก (rate of floral initiation, RATIN) โดยการศึกษาสมการในแบบจำลอง แสดงให้เห็นว่าเมื่อความยาววันน้อยกว่า P2O อัตราเร็วการเกิดรวงจะสูงสุด และเป็นค่าคงที่เท่ากันสำหรับ P2R ทุกค่า และเมื่อความยาววันเกิน P2O ค่า P2R ที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราเร็วการเกิดรวงลดลง (ภาพ 6)

ค่าตั้งต้นของสัมประสิทธิ์ความยาววันวิกฤติ P2O ของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และเหนียวสันป่าตอง ประมาณได้จากศึกษาความสัมพันธ์วันที่กำเนิดช่อดอก (PI) ที่สังเกตได้จริง กับค่าความยาววันที่คำนวณโดย CERES-Rice ที่บันทึกไว้ในไฟล์ผลลัพธ์สมดุลน้ำรายวัน WATER.OUT พบว่า ทั้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และเหนียวสันป่าตอง ที่ปลูก(ตกกล้า) ตั้งแต่เดือนปลายกุมภาพันธ์ถึงปลายกรกฎาคม จะเกิดรวงในต้นแม่ (main culm) ประมาณวันที่ 19-23 กันยายน ซึ่งมีความยาววันประมาณ 12 ชั่วโมง และเมื่อข้าวสองพันธุ์นี้ปลูกในเดือนกันยายนถึงมกราคม ซึ่งวันที่ข้าวมีอายุที่เกิดรวงได้นั้นมีความยาววันต่ำกว่า 12 ชั่วโมง จึงเกิดรวงภายใน 40-50 วัน หรือประมาณ 500-700 °Cd หลังปลูก ส่วนข้าวที่ปลูกปลายเดือนมกราคม ที่ต้นแม่ และหน่อ (tiller) รุ่นแรกๆ 2-3 หน่อ มีอายุผ่านระยะ basic vegetative phase จึงพร้อมที่จะเกิดรวงในวันที่ 17-21 มีนาคม ที่มีความยาววันประมาณ 12.0 ชั่วโมง อีกเช่นกัน แต่อยู่ในระยะเวลาที่ความยาววันกำลังยาวเพิ่มขึ้นมากกว่า 12 ชั่วโมง ส่วนหน่อที่เกิดหลังจากนั้นอายุยังไม่ถึงระยะ basic vegetatvie phaseไม่สามารถเกิดรวงขณะนั้นและเจริญเติบโตต่อไปในระยะ photoperiod sensitive phase จนถึงวันที่ 18-22 กันยายนที่ความยาววันกำลังสั้นลงต่ำกว่า 12 ชั่วโมง ซึ่งการที่หน่อภายในต้นเดียวกันเกิดรวงไม่พร้อมกันนี้แสดงว่าการตอบสนองต่อช่วงแสงนี้ไม่ถ่ายทอดระหว่างหน่อภายในต้นเดียวกัน (Vergara และ Chang , 1985) และแสดงให้เห็นชัดเจนว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 และเหนียวสันป่าตองมีความไวต่อช่วงแสงมาก (strongly photoperiod sensitive) โดยมีความยาววันวิกฤติประมาณ 11.9-12.0 ชั่วโมง สอดคล้องกับที่ศึกษาโดย Pushpavesa and Jackson (1979) และอานันต์ และคณะ (2536)

เนื่องจากแบบจำลอง CERES-Rice 3.5 จำลองการเกิดรวงที่ใช้ระบบความยาววันที่รวมระยะเวลาดวงอาทิตย์ขึ้นถึงดวงอาทิตย์ตกกับระยะเวลาที่เรียกว่าช่วง civil twilight ที่เป็นช่วงเวลาที่ดวงอาทิตย์อยู่ต่ำกว่าแนวระนาบ 0- 6 องศา เนื่องจากยังมีพลังงานแสงในระดับที่มีผลต่อการเกิด



ภาพ 6 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ P2R (photoperiod sensitivity) และ P2O(critical photoperiod) ความยาววัน (daylength,HRLT) กับ อัตราเร็วการเกิดรวง (RATIN) จากสมการ (6) และ (7)

รวง (Vergara and Chang, 1985) ซึ่งเท่ากับระยะเวลา 0.8 ชั่วโมง จึงกำหนดให้ค่าตั้งต้นของสัมประสิทธิ์ความยาววันวิกฤติ (P2O) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 และเหนียวสันป่าตอง เท่ากับ 12.7 ชั่วโมง

สำหรับข้าวชัยนาท 1 และข้าว ก.วก.1 มีจำนวนวันตั้งแต่ปลูกจนถึงกำเนิดช่อดอกไม่แตกต่างกันมากนักจากการปลูกทั้ง 12 วันปลูก (ภาพ 4) และระยะเวลาเป็นอุณหภูมิสะสมถึงวันกำเนิดช่อดอกก็ใกล้เคียงกันเกือบทุกวันปลูก (ภาพ 5) ไม่แสดงการตอบสนองต่อความยาววันในรอบปีชัดเจน หรือไม่ไวต่อช่วงแสง (photoperiod insensitive) การกำหนดค่าความยาววันวิกฤติ จึงอาจจะกำหนดค่าใดก็ได้ เพราะถ้าใช้ค่า P2R ที่แสดงความไวต่อช่วงแสงที่ต่ำมาก ๆ เช่นน้อยกว่า 100 ค่า P2O ก็จะมีอิทธิพลในการกำหนดวันกำเนิดช่อดอกน้อย (ภาพ 6) ค่า P2O ของชัยนาท 1 จึงกำหนดให้เท่ากับ ค่า P2O เท่ากับ 13 ชั่วโมง และ สำหรับ ก.วก.1 เนื่องจากเป็นข้าวญี่ปุ่นที่มาจากเขตอบอุ่นที่มีความยาววันสูงสุดมากกว่าเขตร้อนจึงกำหนดให้มีความยาววันวิกฤติ 13.5

P2R ที่เป็นสัมประสิทธิ์บอกระดับความไวต่อช่วงแสงของข้าวแต่ละพันธุ์ นั้นไม่สามารถกำหนดค่าได้โดยตรงจากข้อมูลงานทดลองอย่าง P1 และ P2O และเนื่องจากวันกำเนิดช่อดอก (PI) กำหนดโดยค่า P1 P2O และ P2R ดังนั้นจึงถือว่า P2R เป็นค่าตัวแปรที่เหลือตัวเดียวที่หาได้ในลักษณะการแก้สมการกำหนดวันกำเนิดช่อดอก โดยที่ทราบค่า P1, P2O และวันกำเนิดช่อดอกแล้ว อย่างไรก็ตามจากการทดสอบในเบื้องต้นค่านี้สามารถประมาณค่าตั้งต้นอยู่ที่ 200 °Cd สำหรับพันธุ์ที่ไม่ไวต่อช่วงแสง และ 600 °Cd สำหรับพันธุ์ที่ไวต่อช่วงแสง

สัมประสิทธิ์พันธุกรรม P 5 (ระยะเวลาสะสมน้ำหนักเมล็ด)

ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ P5 ที่เป็นระยะที่เริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ดจนถึงระยะเวลาสิ้นสุดสะสมน้ำหนักหรือเป็นวันสุกแก่ทางสรีรวิทยา (phsiological maturity) ที่มีแบบจำลองถือว่ามีการสะสมน้ำหนักเมล็ดสูงสุด ระยะเวลาสะสมน้ำหนักเมล็ดนี้จึงกำหนดค่าตั้งต้นไม่ได้โดยตรงเช่นกัน เนื่องจากวันเริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ดจริงๆ นั้นสังเกตได้ยาก จึงต้องใช้ระยะเวลาตั้งแต่ออกดอก 50 เปอร์เซ็นต์ ถึงสุกแก่ 80 เปอร์เซ็นต์ ที่สังเกตได้ง่ายกว่าเป็นหลัก โดยประมาณจากอุณหภูมิสะสมตั้งแต่ออกดอกถึงสุกแก่ของวันปลูกที่มีค่านี้สั้นที่สุด หักออกด้วยระยะเวลาตั้งแต่ออกดอกถึงสะสมน้ำหนักเมล็ดที่แบบจำลองกำหนดให้เท่ากับ 150 °Cd ทุกพันธุ์ จากข้อมูลการสังเกตในแปลงปลูก ค่าตั้งต้นของ P5 ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 เหนียวสันป่าตอง ชัยนาท 1 และ ก.วก.1 ประมาณได้เท่ากับ 390, 390, 400 และ 420 °Cd ตามลำดับ

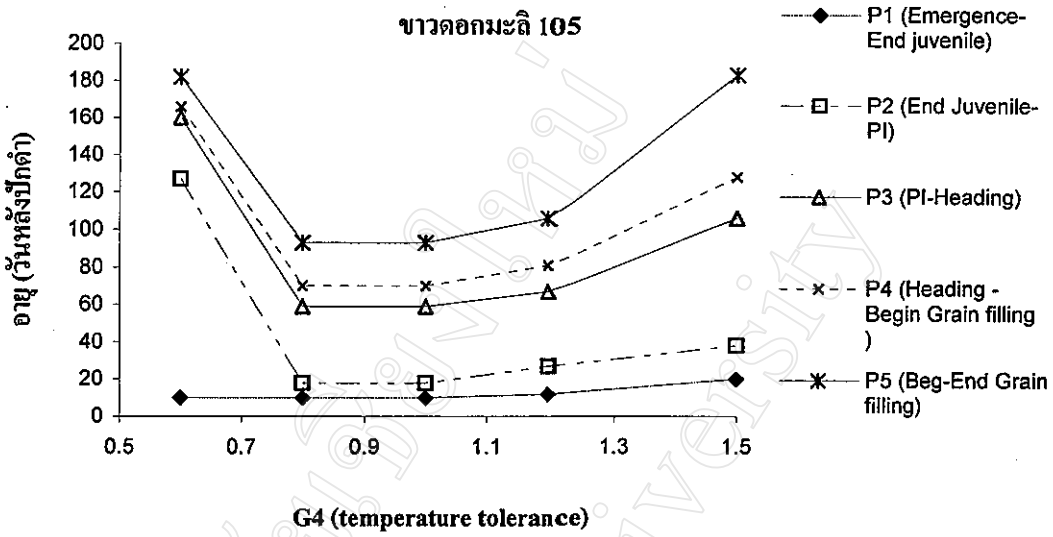
สัมประสิทธิ์พันธุกรรม G4 (temperature tolerance)

แม้ว่าสัมประสิทธิ์ G4 นี้จะจัดอยู่ในสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต ที่แบบจำลองกำหนดให้ปรับได้ตามความทนต่ออุณหภูมิสูงหรือต่ำและสภาพอุณหภูมิขณะปลูก (ตาราง 3) แต่เมื่อทดสอบ G4 กับการจำลองการเจริญเติบโตข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า G4 มีผลต่อระยะพัฒนาการของข้าวในทุกระยะรวมถึงระยะ basic vegetative phase โดยมีอิทธิพลแตกต่างกันระหว่างวันปลูก (ภาพ 7) ค่า G4 ที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มที่จะทำให้ระยะพัฒนาการที่ยาวนานขึ้นในทุกระยะการเจริญ โดยเฉพาะที่ G4 มากกว่า 1.0 ขณะที่ G4 ที่ต่ำกว่า 0.8 ให้ค่าระยะพัฒนาการที่เพิ่มขึ้นเบี่ยงเบนจากค่าอื่นไปมาก การทดสอบผลของค่า G4 3 ค่า 0.8, 1.0 และ 1.2 กับวันออกดอกของข้าวขาวดอกมะลิ 105 และ ก.วก.1 ทั้ง 12 วันปลูก ก็ให้ผลทำนองเดียวกันคือ G4 ที่มาก ยืดอายุออกดอกของวันปลูกส่วนใหญ่ ยกเว้นที่วันปลูกเดือนปลายเดือนตุลาคมและพฤศจิกายน ค่า G4 ที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อระยะพัฒนาการ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิระยะนั้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตตามสมมติฐานของแบบจำลองมากที่สุด (ภาพ 8)

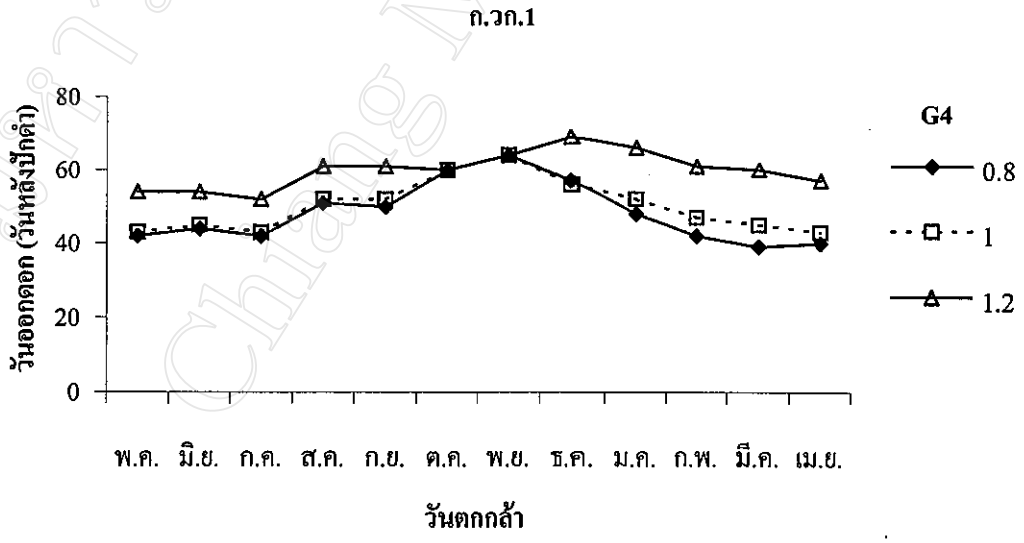
ดังนั้นการประเมินค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมระยะพัฒนาการ ควรที่จะต้องประเมินค่าสัมประสิทธิ์ G4 พร้อมๆ กันด้วย โดยประมาณ G4 ได้จากสภาพทนอุณหภูมิของแต่ละพันธุ์จากข้อมูลงานทดลองร่วมกับรายงานวิจัยอื่นๆ ได้แก่ ข้าวพันธุ์ ก.วก.1 เป็นข้าวญี่ปุ่นมีความเหมาะสมกับอากาศเย็น ไม่ทนต่ออากาศร้อน (จำนงค์, 2531; อานันต์ และคณะ, 2536; วิไล และคณะ, 2538) จึงประมาณค่า G4 ให้เท่ากับ 1.2 แต่พันธุ์ชัยนาท 1 เป็นพันธุ์ที่แนะนำสำหรับปลูกในภาคเหนือตอนล่างและภาคกลาง (วาสนาและทัศนีย์, 2537) น่าที่จะไม่เหมาะสมกับสภาพอุณหภูมิที่ต่ำกว่าของภาคเหนือตอนบนอย่างสภาพทำการทดลอง จึงกำหนดให้ ค่า G4 เท่ากับ 0.8 ในช่วงที่ปลูกในฤดูฝนถึงต้นฤดูหนาว และให้เท่ากับ 1.0 ในช่วงอื่นๆ สำหรับพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และ เหนียวสันป่าตอง นั้นมีการเจริญเติบโตที่ไม่ดี และมีอายุเกิดรวงช้าในช่วงอุณหภูมิต่ำ (อานันต์ และคณะ, 2535) จึงกำหนดให้ G4 เท่ากับ 0.8 ในช่วงอุณหภูมิต่ำ และเท่ากับ 1.0 ในช่วงอุณหภูมิปกติ

1.1.2 การปรับค่าสัมประสิทธิ์ที่กำหนดระยะพัฒนาการกับงานทดลอง 12 วันปลูกด้วย GENCALC

ผลการปรับค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม P1 P2O P2R และ P5 ร่วมกับสัมประสิทธิ์ G4 ที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดระยะพัฒนาการ ของข้าว 4 พันธุ์ที่ทำการศึกษาทั้ง 12 วันปลูกโดยใช้ GENCALC3.5 ช่วยในการปรับ เพื่อให้ได้ค่าจำลองของวันกำเนิดช่อดอก และวันออกดอกใกล้กับ



ภาพ 7 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ G4 (temperature tolerance) กับระยะเวลาการเจริญเติบโตแต่ละระยะ ที่จำลองได้ ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ตกกล้า 29 ต.ค.40.



ภาพ 8 วันออกดอกที่จำลองได้ของข้าว ก.วก.1 ทั้ง 12 วันปลูก โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ G4 ต่าง ๆ กัน ม.เชียงใหม่ 2540-2541

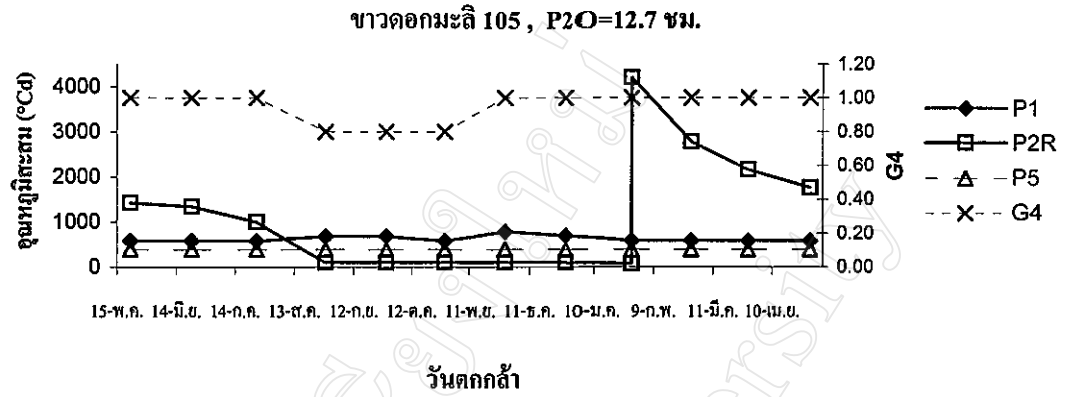
วันที่บันทึกจากงานทดลอง ให้ใกล้เคียงมากที่สุด (ภาพ 9) และจัดกลุ่มวันปลูกที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมใกล้เคียงกัน บรรจุในไฟล์สัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม (ตาราง 6) ที่แสดงให้เห็นว่าค่า P1 ของข้าวแต่ละพันธุ์ มีความใกล้เคียงกันระหว่างวันปลูกอย่างที่ควรจะเป็น ยกเว้นบางวันปลูกซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำ ที่ P1 มีค่ามากกว่าวันปลูกอื่นๆ แม้ว่าจะได้ปรับค่า G4 แล้ว

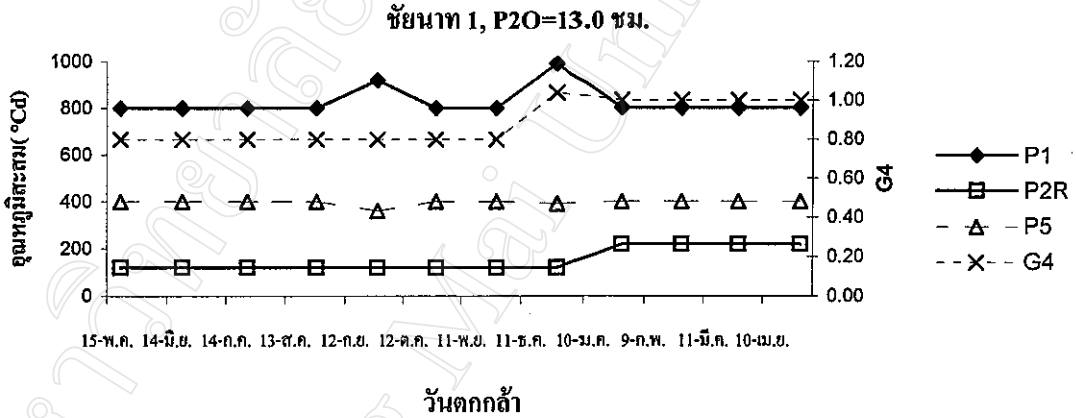
ตาราง 6 สัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของข้าว 4 พันธุ์ที่ศึกษาการประเมินได้ ที่บรรจุในไฟล์สัมประสิทธิ์พันธุกรรม RICER980.CUL เพื่อใช้กับแบบจำลอง CERES-Rice 3.5

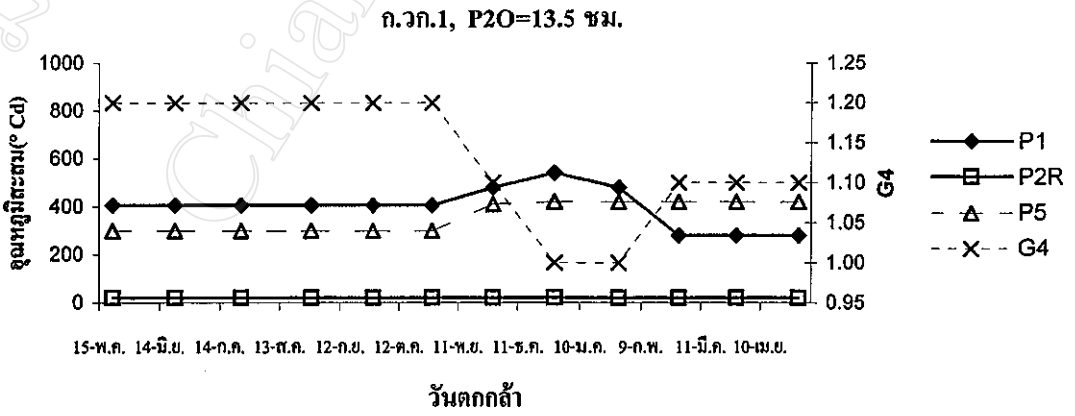
@VAR# VRNAME.....	P1 [1/]	P2R	P5	P2O	G1	G2	G3	G4
ขาวดอกมะลิ 105								
TR0101 KDML105-Jan29- [2/]	580.0	4200.0	390.0	12.7	75.0	.0238	1.00	1.00
TR0201 KDML105-Feb28-	580.0	2778.0	390.0	12.7	75.0	.0238	1.00	1.00
TR0301 KDML105-Mar29-	580.0	2154.0	390.0	12.7	75.0	.0238	1.00	1.00
TR0401 KDML105-Apr29-	580.0	1763.0	390.0	12.8	75.0	.0238	1.00	1.00
TR0501 KDML105-May22-	580.0	1420.0	390.0	12.7	75.0	.0238	1.00	1.00
TR0601 KDML105-Jun22-	580.0	1344.0	390.0	12.7	75.0	.0238	1.00	1.00
TR0701 KDML105-Jul25-	580.0	1000.0	390.0	12.7	75.0	.0238	1.00	1.00
TR0801 KDML105-A29S29-	680.0	100.0	390.0	12.7	75.0	.0238	1.00	0.80
TR0901 KDML105-Oct29-	580.0	100.0	390.0	12.7	75.0	.0238	1.00	0.80
TR1001 KDML105-N29D29-	780.0	100.0	390.0	12.7	75.0	.0238	1.00	1.00
เหนียวสันป่าตอง								
TR0102 NSPT-Jan29-	580.0	4200.0	390.0	12.7	78.0	.0243	1.00	1.00
TR0202 NSPT-Feb28-	580.0	2778.0	390.0	12.7	78.0	.0243	1.00	1.00
TR0302 NSPT-Mar29-	580.0	2154.0	390.0	12.7	78.0	.0243	1.00	1.00
TR0402 NSPT-Apr29-	580.0	1763.0	390.0	12.7	78.0	.0243	1.00	1.00
TR0502 NSPT-May22-	580.0	1440.0	390.0	12.7	78.0	.0243	1.00	1.00
TR0602 NSPT-Jun22-	580.0	1344.0	390.0	12.7	78.0	.0243	1.00	1.00
TR0702 NSPT-Jul25-	580.0	1030.0	390.0	12.7	78.0	.0243	1.00	1.00
TR0802 NSPT-A29-S29-	680.0	100.0	390.0	12.7	78.0	.0243	1.00	0.80
TR0902 NSPT-Oct29-	680.0	100.0	390.0	12.7	78.0	.0243	1.00	0.80
TR1002 NSPT-N29-D29-	780.0	100.0	390.0	12.7	78.0	.0243	1.00	1.00
ชัยนาท 1								
TR0103 CNT-May-Aug,Oct-Nov	800.0	120.0	400.0	13.0	72.0	.0258	1.00	0.80
TR0203 CNT-1-Sep-	920.0	120.0	360.0	13.0	72.0	.0258	1.00	0.80
TR0303 CNT-1-Dec	990.0	120.0	390.0	13.0	72.0	.0258	1.00	1.04
TR0403 CNT1-Jan-Apr	800 0	220.0	400.0	13.0	72.0	.0258	1.00	1.00
ก.วก.1								
TR0104 DOA-1-May-Aug	300.0	20.0	300.0	13.5	62.0	.0249	1.00	1.20
TR0204 DOA-1-Sep-Oct	407.0	20.0	300.0	13.5	62.0	.0249	1.00	1.20
TR0304 DOA-1-Nov	480.0	20.0	410.0	13.5	62.0	.0249	1.00	1.10
TR0404 DOA-1-Dec	540.0	20.0	420.0	13.5	62.0	.0249	1.00	1.00
TR0504 DOA-1-Jan	480.0	20.0	420.0	13.5	62.0	.0249	1.00	1.00
TR0604 DOA-1-Feb-Apr	280.0	20.0	420.0	13.5	62.0	.0249	1.00	1.10

1/ สัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของข้าว ที่อธิบายในตาราง 3

2/ รหัส และชื่อพันธุ์ข้าว โดย เดือน(และวันที่) ที่อยู่หลังชื่อพันธุ์ หมายถึง ให้ใช้ชุดพันธุกรรมแถวนั้นกับข้าวที่ตกกล้าประมาณวันที่หรือเดือนนั้นๆ







ภาพ 9 ค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม P1, P2O,P2R, P5 และG4 :ขาวดอกมะลิ 105 ชัยนาท 1 และ ก.วก.1 ที่ปรับ เพื่อให้ได้ค่าจำลองตรงกับค่าสังเกตของการทดลอง 12 วันปลูก ม.เชียงใหม่ 2540-41

ค่าความยาววันวิกฤติ P2O ที่ประมาณไว้นั้นพบว่าใช้ได้กับทุกวันปลูกและทุกพันธุ์ (ตาราง 6) ในขณะที่ ค่า P2R ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 และเหนียวสันป่าตอง ที่ได้มีความแตกต่างระหว่างวันปลูกมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์ตัวอื่น ทำให้ต้องแบ่งกลุ่มวันปลูกที่มีสัมประสิทธิ์ใกล้เคียงกันหลายกลุ่ม คือมีตั้งแต่ เป็นค่าอะไรก็ได้ เพราะไม่ตอบสนองต่อวันกำเนิดช่อดอก สำหรับวันปลูก (ตกกล้า)ในช่วง 29 สิงหาคมถึง 29 ธันวาคม เนื่องจากอยู่ในช่วงที่ความยาววันสั้นกว่าความยาววันวิกฤติ จนถึง 4200 °Cd สำหรับวันปลูก 29 มกราคม ขณะที่ค่า P2R ของ ชัยนาท 1 และก.วก.1 คำนวณได้เท่ากับ 120 °Cd และ 20°Cd ทุกวันปลูก ตามลำดับ (ตาราง 6)

การปรับค่า P5 ด้วยค่าที่ประมาณนี้กับค่าที่วัดได้จริงของวันสุกแก่ของการทดลองข้าว 12 วันปลูก ด้วย GENCALC 3.5 แสดงให้เห็นว่าค่า P5 ค่อนข้างตรงกับค่าที่ประมาณในทุก ๆ วันปลูก (ตาราง 6) ซึ่งเป็นระยะเวลาประมาณ 15-27 วัน ใกล้เคียงกับที่รายงานโดย Yoshida (1981)

1.2 สัมประสิทธิ์พันธุกรรม การเจริญเติบโต

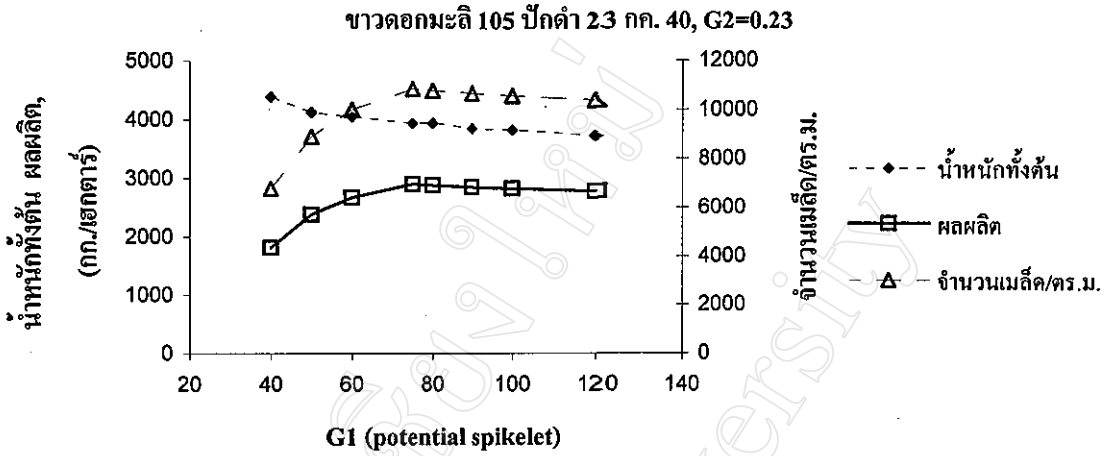
1.2.1 การทดสอบความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต และการประมาณค่าตั้งต้น

สัมประสิทธิ์พันธุกรรม G1 (Potential spikelet)

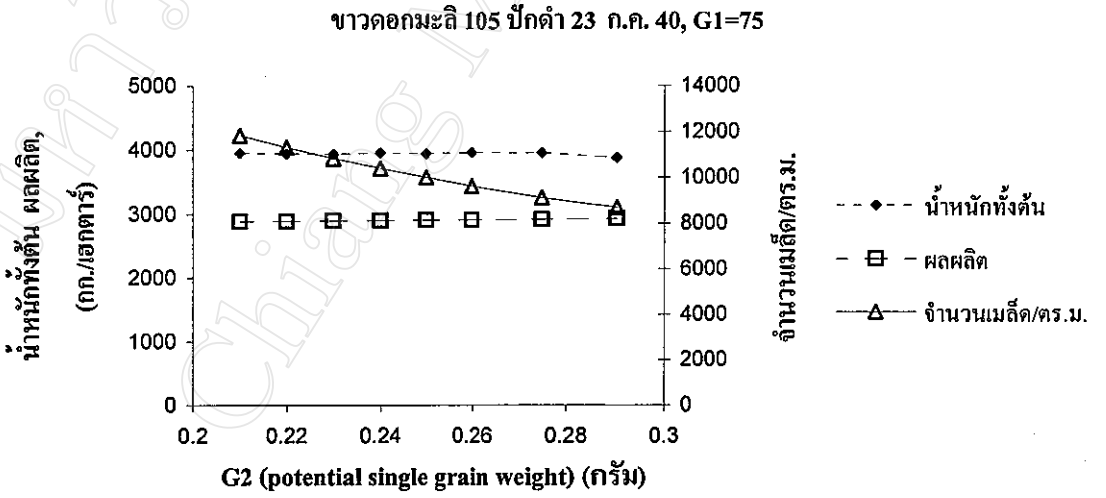
ค่า G1 ที่แบบจำลองกำหนดให้เป็นจำนวนดอกย่อย (spikelet) ต่อน้ำหนักแห้งของต้นแม่ (main cum) 1 กรัมที่ระยะ anthesis ซึ่งในทางปฏิบัติวัดได้ยาก แบบจำลองจึงกำหนดค่าต้นแบบของ G1 ไว้ที่ 55 (ตาราง 3) การทดสอบแบบจำลอง CERES-Rice 3.5 ด้วย ค่า G1 ที่ต่างกันกับข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปักดำเดือนกรกฎาคม 2541 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของ G1 ในช่วงที่ G1 น้อยกว่า 75 ทำให้ผลผลิต และจำนวนเมล็ด/ตร.เมตร เพิ่มขึ้นมาก แต่ทำให้น้ำหนักรวมทั้งต้นลดลง แต่ค่า G1 ที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 75 นั้นไม่มีผลต่อผลผลิต จำนวนเมล็ด/ตร.เมตร และน้ำหนักรวมทั้งต้นมากนัก (ภาพ 10) โดยการศึกษาสมการแบบจำลองก็พบว่า G1 สัมพันธ์กับอัตราเร็วการสะสมน้ำหนักเมล็ดที่ขึ้นอยู่กับค่า G2 และ P5 ด้วย

สัมประสิทธิ์พันธุกรรม G2 (Potential single grain weight)

ค่าสัมประสิทธิ์ G2 สามารถกำหนดได้โดยได้จากค่าน้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าวเปลือกสูงสุดของแต่ละพันธุ์ เป็นค่าศักยภาพเฉพาะพันธุ์ที่จำกัดโดยขนาดของเปลือกหุ้ม (Yoshida, 1981) จากข้อมูลน้ำหนัก 100 เมล็ด ที่ความชื้น 0 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองทั้ง 3 การทดลอง สามารถกำหนด



ภาพ 10 ผลของค่าสัมประสิทธิ์ G1 (potential spikelet) กับ ค่าจำลองของ น้ำหนักทั้งต้น ผลผลิต และจำนวนเมล็ด/ตร.ม. ของข้าวขาวดอกมะลิ105 ปักดำ 23 ก.ค.2540 ม.เชียงใหม่



ภาพ 11 ผลของค่าสัมประสิทธิ์ G2 (potential single grain weight) กับ ค่าจำลองของ น้ำหนักทั้งต้น ผลผลิต และจำนวนเมล็ด/ ตร.เมตร ของข้าวขาวดอกมะลิ105 ปักดำ 23 ก.ค.40 ม.เชียงใหม่

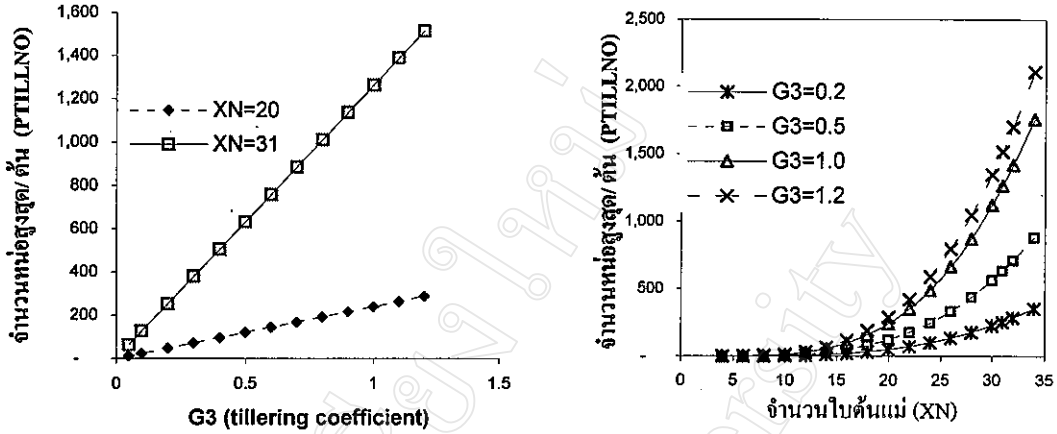
ค่าตั้งต้นของ G2 ของข้าว 4 พันธุ์ ได้แก่ ขาวดอกมะลิ 105 เหนียวสันป่าตอง ชัยนาท 1 และ ก.วก.1 ได้เท่ากับ 0.238, 0.243, 0.258, และ 0.249 ตามลำดับ

การทดสอบการตอบสนองของผลผลิตต่อค่าสัมประสิทธิ์ G2 พบว่า การเปลี่ยนแปลง G2 มีผลต่อผลผลิตหรือน้ำหนักรวมทั้งต้นน้อย เมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์ตัวอื่นๆ เนื่องจากแบบจำลองให้ความสำคัญกับการกำหนดน้ำหนักต่อหนึ่งเมล็ดที่เป็นลักษณะทางพันธุกรรมที่ชัดเจนก่อน และใช้หลักข้อจำกัดของ source-sink ที่มีการชดเชยด้วยจำนวนเมล็ดต่อตารางเมตรที่เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางทางตรงกันข้าม กับ G2 (ภาพ 11)

สัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม G3 (tillering coefficient)

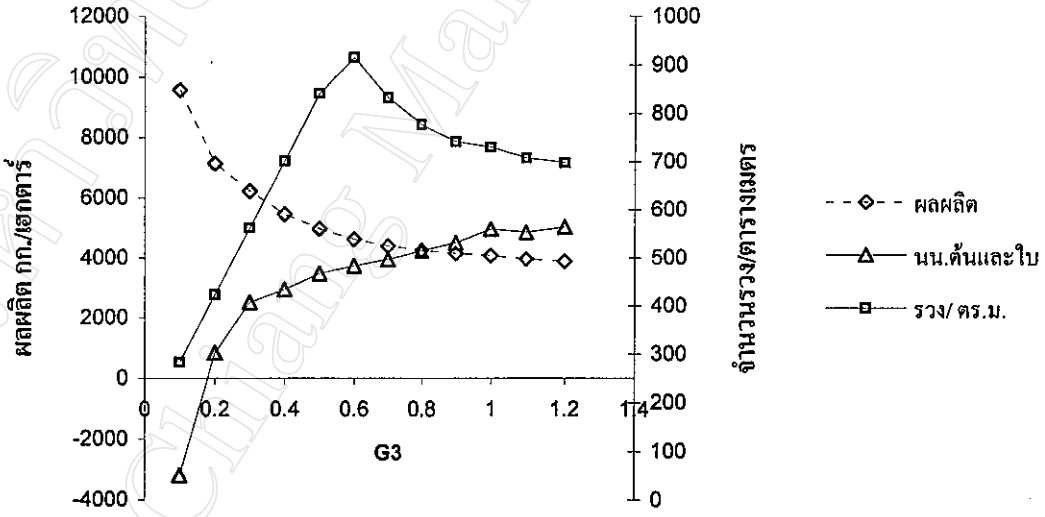
สัมประสิทธิ์ G3 กำหนดให้เป็นค่าที่เปรียบเทียบกับศักยภาพการแตกกอของข้าว IR64 ที่กำหนดให้เท่ากับ 1.0 ซึ่งอาจกำหนดได้จากข้อมูลการแตกกอสูงสุดของแต่ละพันธุ์ ที่พบว่า ข้าวพันธุ์ ก.วก.1 ให้จำนวนรวง/ตร.เมตรสูงสุดที่ 400 รวง ขณะที่ชัยนาท 1 ให้รวง/ตร.เมตรสูงสุดที่ 340 รวง และ ขาวดอกมะลิ 105 กับเหนียวสันป่าตองให้ค่าการแตกกอประมาณ 250 หน่อ/ตร.เมตร (ตารางภาคผนวก 1) จึงอาจกำหนดให้ ค่าประมาณของสัมประสิทธิ์ G3 ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 เหนียวสันป่าตอง ชัยนาท 1 และก.วก.1 เท่ากับ 0.6, 0.6, 1.0 และ 1.1 ตามลำดับ

การศึกษาความสัมพันธ์ของ G3 กับอัตราการแตกกอสูงสุดจากสมการในแบบจำลอง พบว่าจำนวนหน่อเพิ่มขึ้นตามค่า G3 อย่างเป็นเส้นตรง โดยขึ้นอยู่กับจำนวนใบของต้นแม่ด้วย (ภาพ 12) อย่างไรก็ตาม การทดสอบความสัมพันธ์ของค่า G3 กับผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่านอกจากค่า G3 มีผลต่ออัตราการแตกกอแล้ว ยังทำให้ผลผลิตเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก การลดค่า G3 ในระดับต่ำ ทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น ขณะที่น้ำหนักฟางลดลงจนมีค่าติดลบ (ภาพ 13) แสดงถึงว่าน่าจะมีความผิดพลาดของการคำนวณของแบบจำลอง และเมื่อตรวจสอบสมการของแบบจำลอง พบว่า G3 ไม่ได้ควบคุมอัตราการแตกกออย่างเดียว แต่อยู่ในสมการการคำนวณผลผลิตหลายสมการที่ไม่เกี่ยวกับการแตกกอ แต่ขณะเดียวกันการตรวจสอบสมการในโปรแกรมย่อย Tiller Subroutine ของ CERES-Rice 3.5 พบว่าจำนวนหน่อต่อต้นไม่สัมพันธ์โดยตรงกับผลผลิตและไม่ได้ใช้ในการคำนวณผลผลิตต่อต้นแต่อย่างใด โดยแบบจำลองคำนวณจำนวนเมล็ดต่อต้นแม่ และต่อหน่อทั้งหมดโดยรวมของต้นหนึ่ง โดยที่ไม่สัมพันธ์กับจำนวนหน่อต่อต้น และไม่มีการคำนวณจำนวนเมล็ดของแต่ละหน่อ แต่อย่างใด ดังนั้นจึงไม่ควรปรับ G3 เพื่อให้จำนวนหน่อใกล้เคียงกับค่าจริง และควรกำหนดให้ค่าของ G3 เท่ากับ 1.0 สำหรับทุกพันธุ์



ภาพ 12 ความสัมพันธ์ของ G3 และจำนวนใบต้นแม่ (XN) กับจำนวนหน่อสูงสุดต่อต้น (PTILLNO)

จากสมการ PTILLNO = (-0.10+1.655*(XN-4.0)-0.376*(XN-4.0)**2 +0.0758*(XN-4.0)**3)*G3



ภาพ 13 ผลของค่าสัมประสิทธิการแตกกอ G3 ต่อ จำนวนหน่อสูงสุด/ต้น น้ำหนักต้นและใบ และผลผลิตข้าว

จากการจำลอง ปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105 วันปักดำ 21 มิย.40 ม.เชียงใหม่

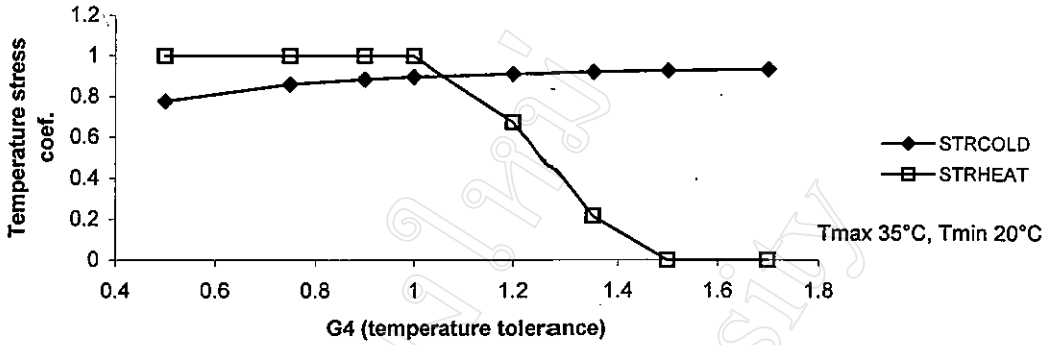
สัมประสิทธิ์พันธุกรรม G4 (temperature tolerance)

สัมประสิทธิ์ G4 ที่แบบจำลองแนะนำให้กำหนด G4 สำหรับข้าวตระกูลจาโปนิกาที่ปลูกในสภาพอากาศร้อนจะเท่ากับหรือมากกว่า 1.0 .และค่า G4 สำหรับข้าวอินดิกา ในสภาพอากาศเย็นมากจะน้อยกว่า 1.0 (ตาราง 3) แสดงว่า G4 อาจไม่ใช่ค่าที่คงที่สำหรับแต่ละพันธุ์ แต่เปลี่ยนได้ตามสภาพอุณหภูมิที่ปลูกด้วย จากการศึกษาสมการในแบบจำลองพบว่า ค่า G4 นี้จะมีบทบาทในการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิวิกฤติ (critical temperature)ในแบบจำลองหลายระยะการเจริญ โดยถ้าค่า G4 มากกว่า 1.0 ระดับอุณหภูมิวิกฤติก็จะลดลง แสดงถึงความทนต่ออุณหภูมิต่ำมากขึ้น แต่ความทนต่ออุณหภูมิสูงก็ลดลงด้วย

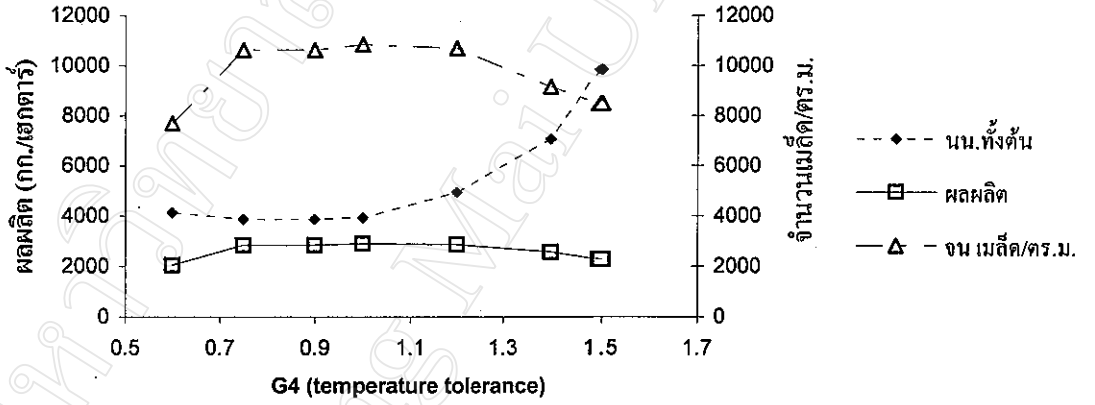
ค่า G4 เป็นค่าที่จำกัดจำนวนเมล็ดดีต่อตารางเมตรที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิสูงและต่ำหลังการเกิดรวง จากการทดสอบสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเครียดอุณหภูมิที่กระทบต่อจำนวนเมล็ดต่อต้น กับค่า G4 ที่สมมติให้ปลูกในช่วงอุณหภูมิสูงสุด 35 °C และต่ำสุดที่ 20° C พบว่าค่า G4 ที่มากกว่า 1.0 ทำให้ค่าความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิสูงมากขึ้น (ค่าสัมประสิทธิ์ลดลงหมายถึงความเครียดมากขึ้น) แต่เครียดเนื่องจากอุณหภูมิต่ำลดลง ขณะที่เมื่อลดค่า G4 ที่ต่ำกว่า 1.0 จะไม่มีความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิสูงเลย (สัมประสิทธิ์เท่ากับ 1.0) (ภาพ 14)

การจำลองการปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปักดำปลายเดือนกรกฎาคม 2541 ที่อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในช่วงฤดูปลูกอยู่ที่ 35 °C และ 20 °C โดยปรับค่า G4 พบว่า ค่า G4 ที่เพิ่มมากกว่า 1.0 ถึง 1.5 ทำให้น้ำหนักรวมทั้งต้นมากขึ้นมาก ขณะที่จำนวนเมล็ด/ตารางเมตรลดลง และทำให้ผลผลิตลดลงเล็กน้อย (ภาพ 15) เนื่องจากการเพิ่มของระยะเวลาออกดอกและสุกแก่ ตามค่า G4 ที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับการที่น้ำหนักรวมทั้งต้นที่เพิ่มขึ้น (ภาพ 16) แต่ผลผลิตข้าวจากการจำลองที่ลดลงนี้แสดงว่าถูกจำกัดโดยจำนวนเมล็ด/ตารางเมตรที่ลดลงเนื่องจาก G4 ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความเครียดต่อระดับอุณหภูมิสูง (ประมาณ 35 °C) นั้นเกิดขึ้นมาก สอดคล้องกับที่จำลองจากสมการโดยตรงในภาพ 14

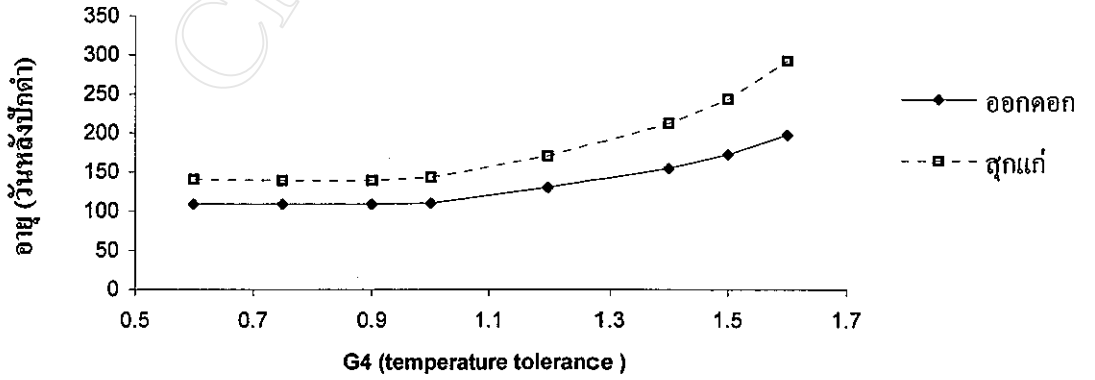
การทดสอบค่า G4 ที่พบว่าสามารถกำหนดระยะพัฒนาการดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อสัมประสิทธิ์ระยะพัฒนาการ แสดงให้เห็นว่า G4 เป็นค่าที่ควรจะปรับตั้งแต่การปรับสัมประสิทธิ์พัฒนาการ และไม่ควรจะปรับเปลี่ยนอีกในการปรับสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต เพราะจะทำให้ระยะพัฒนาการคลาดเคลื่อนไปอีก นอกจากจะทดสอบแล้วว่าการปรับ G4 ในสภาพที่ปลูกนั้นไม่ทำให้ระยะพัฒนาการเปลี่ยน



ภาพ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า G4 กับ temperature stress coef. ที่กำหนดจำนวนเมล็ดดีต่อต้น จากสมการในแบบจำลอง โดยTmax = 35 °C, Tmin=20 °C (0 =max.stress 1= min.stress; STRCOLD = ความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ, STRHEAT= ความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิสูง)



ภาพ 15 ความสัมพันธ์ของ ค่า G4 (temperature tolerance) กับ ผลผลิต และจำนวนเมล็ด/ตารางเมตร ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ตกกล้า 22 มิย.40 ม.เชียงใหม่



ภาพ 16 ความสัมพันธ์ของ ค่า G4 (temperature tolerance) ต่อ อายุออกดอก และสุกแก่ ของ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ตกกล้า 22 มิย.40 ม.เชียงใหม่

1.2.2 การปรับสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต

การใช้ GENCALC 3.5 ช่วยปรับหาค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมการเจริญเติบโต (โดยกำหนดสัมประสิทธิ์ทางพัฒนาการที่ปรับดีแล้ว) กับข้อมูลผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตของงานทดลอง 12 วันปลูกของข้าว 4 พันธุ์ (ตาราง 6) ในขั้นแรกนั้นพบว่าค่า G1 มีความแปรปรวนระหว่างวันปลูกและพันธุ์มากที่สุดแปรผันไปตามค่าผลผลิต รองลงมาคือค่า G2 ที่จะปรับลดลงเมื่อผลผลิตอยู่ในระดับต่ำมาก ๆ แต่โดยที่หลักการปรับสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต ต่างจากการปรับสัมประสิทธิ์ทางพัฒนาการ คือ การปรับค่าสัมประสิทธิ์ทางพัฒนาการต้องการปรับให้ตรงกับค่าที่สังเกตได้จริงที่สุด แต่การปรับสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตมีเป้าหมายคือการปรับให้ได้ค่าผลผลิตหรือองค์ประกอบผลผลิตที่อย่างน้อยเท่ากับวันปลูกที่ให้ผลผลิตมากที่สุด เนื่องจากมีสมมติฐานว่าการเจริญเติบโตและผลผลิตถูกจำกัดด้วยปัจจัยอีกหลายอย่างที่แบบจำลองยังไม่ได้ครอบคลุมถึง ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แต่ละพันธุ์ จึงเลือกเฉลี่ยเฉพาะวันปลูกที่มีผลผลิตอยู่ในระดับสูงเท่านั้น ซึ่งมีเพียงค่า G1 เท่านั้นที่เป็นค่าที่ได้จากการปรับใหม่ เพราะ ค่า G2 จะตรงกับค่าที่กำหนดไว้ก่อน ส่วนค่า G3 กำหนดให้เท่ากับ 1.0 และ G4 กำหนดให้เท่ากับค่าที่ใช้ปรับร่วมกับสัมประสิทธิ์พัฒนาการ (ตาราง 6)

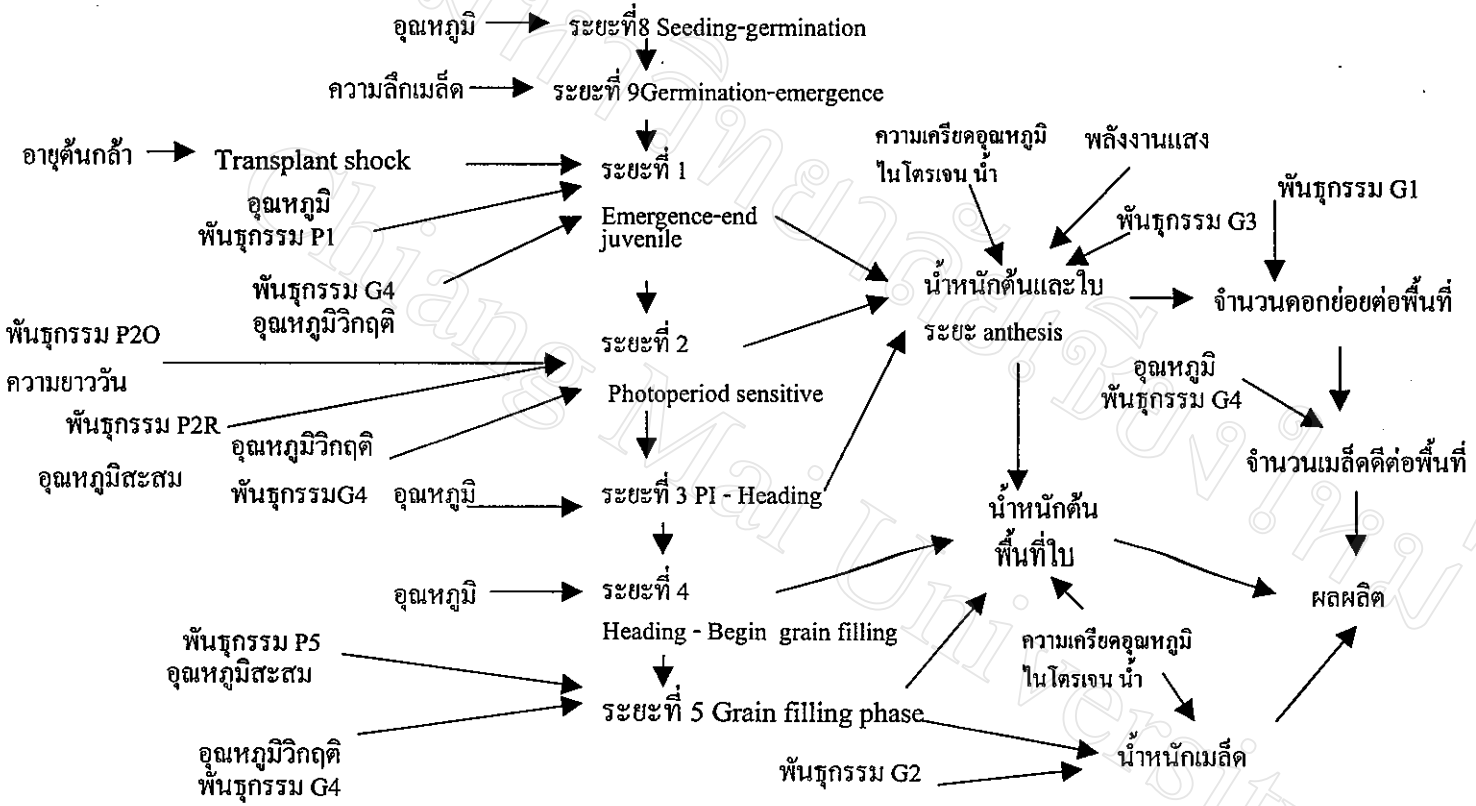
ผลการศึกษาวิเคราะห์และประเมินค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมข้างต้น สามารถเชื่อมโยงเป็นภาพรวมของความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม ปัจจัยสิ่งแวดล้อม กับกระบวนการกำหนดระยะพัฒนาการและการเจริญเติบโตและสร้างผลผลิต ดังภาพ 17 และสรุปเป็นเทคนิคขั้นตอนการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ทั้งการเจริญเติบโตและพัฒนาการของข้าวดังแสดงในภาพ 18

2. การทดสอบแบบจำลอง และวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการจำลอง

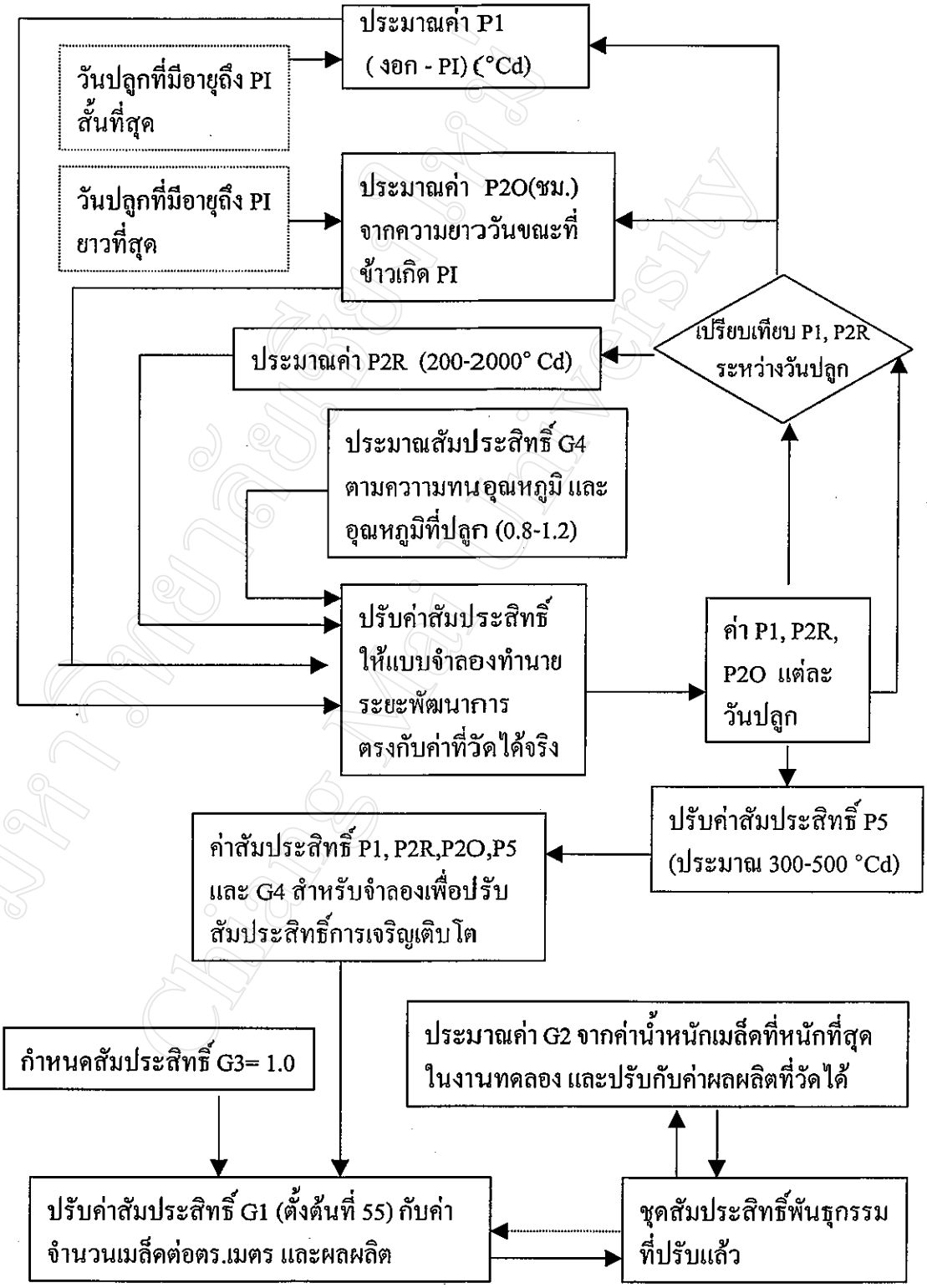
ค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมที่ประเมินได้ของข้าวแต่ละพันธุ์ที่ได้ในตารางที่ 6 เมื่อนำกลับมาจำลองงานทดลอง 12 วันปลูก เพื่อวิเคราะห์หาความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการจำลอง อิทธิพลของวันปลูก ที่หมายถึงภูมิอากาศในรอบปี กับลักษณะพันธุกรรม

2.1 การจำลองระยะพัฒนาการ

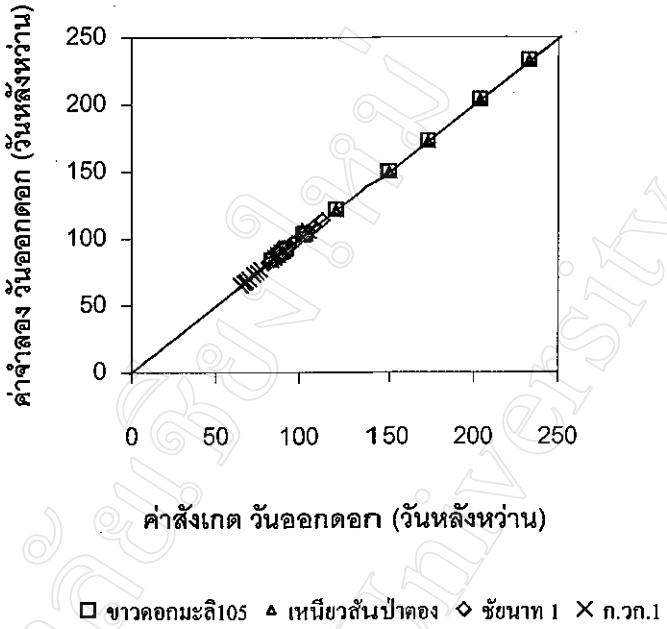
การจำลองระยะพัฒนาการ ด้วยสัมประสิทธิ์ ตามพันธุ์และวันปลูกในตารางที่ 6 กับงานทดลอง 12 ปลูก แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทำนายระยะออกดอก ได้ตรงกับค่าที่สังเกตได้จริง (ภาพ 19) เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการปรับค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมระยะพัฒนาการ ที่ต้องการปรับให้ตรงกับค่าจริงมากที่สุด ซึ่งการที่ต้องใช้สัมประสิทธิ์พันธุกรรมที่แตกต่างกัน

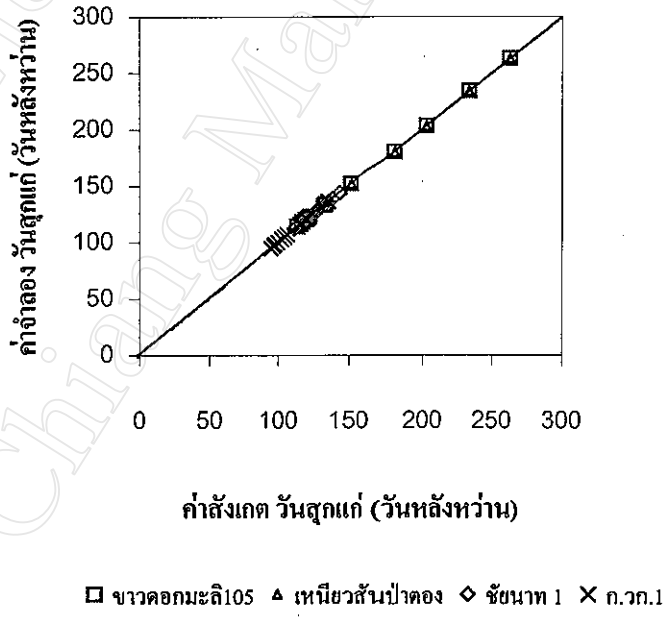


ภาพ 17 โครงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการกำหนดระยะพัฒนาการ กับกระบวนการเจริญเติบโตและกำหนดผลผลิต ที่ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์พันธุกรรม และปัจจัยสภาพแวดล้อม ของแบบจำลอง CERES-Rice 3.5



ภาพ 18 เทคนิคการหาค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมข้าว ใน CERES-Rice 3.5 จากงานทดลอง 12 วันปลูก





ภาพ 19 กราฟ 1:1 ของค่าสังเกตและค่าจำลอง ของวันออกดอก และ วันสุกแก่ ของข้าว 4 พันธุ์ 12 วันปลูก ม.เชียงใหม่ 2540-2541

สำหรับวันปลูกที่ต่างกัน เพื่อจะให้จำลองระยะพัฒนาการตรงกับค่าสังเกตนั้น แสดงให้เห็นได้ว่ามีความคลาดเคลื่อนในการจำลอง เนื่องจากตามวัตถุประสงค์ของแบบจำลองแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์ของพันธุ์เดียวกันควรที่จะเหมือนกันไม่ว่าปลูกวันใด ปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองในกรณีนี้ วิเคราะห์ได้จากปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.1.1 อุณหภูมิ

ผลการปรับค่า P1 ที่เป็นระยะ basic vegetative phase ให้ตรงกับค่าจริงของแต่ละวันปลูก (ภาพ 8 และ ตาราง 6) แสดงให้เห็นค่า P1 ที่เบี่ยงเบนไปในบางวันปลูกของข้าวทุกพันธุ์ ค่า P1 ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 และเหนียวสันป่าตองที่ปลูกในช่วงปลายเดือนพฤศจิกายนถึงปลายเดือนธันวาคม จะมากกว่าวันปลูกส่วนใหญ่ถึง 200°Cd ที่อุณหภูมิต่ำที่สุดในรอบปี (ภาพภาคผนวก 1) และการสังเกตในแปลงก็พบการชะงักการเจริญเติบโตหลังปักดำอย่างชัดเจนในช่วงวันปลูกนี้ จึงน่าจะเป็นเพราะสภาพอุณหภูมิต่ำระดับนี้มีผลต่อการจำกัดการเจริญเติบโตของข้าวสองพันธุ์นี้มากเกินไป จนแบบจำลองอาจไม่ครอบคลุมผลกระทบนี้ได้ โดยมีสมมติฐานหลายประการ ได้แก่ ค่า base temperature ที่ CERES-Rice 3.5 กำหนดให้เท่ากับ 9 °Cd สำหรับทุกพันธุ์ และทุกระยะการเจริญ อาจจะต่ำเกินไปสำหรับข้าวบางพันธุ์ หรือบางระยะการเจริญเติบโต ซึ่งรายงานของ Asakuma (1958) อ้างโดย Yoshida (1981) พบว่า ค่า base temperature ของข้าวญี่ปุ่นมีตั้งแต่ 9 ถึง 18 °C หรือการที่ CERES-Rice 3.5 กำหนดว่าช่วงอุณหภูมิที่มีสัมพันธ์กับอัตราการเจริญอย่างเป็นเส้นตรง (linear relationship) คือ ระหว่าง 14.0-32.0 °C สำหรับข้าวทุกพันธุ์ทุกระยะพัฒนาการ ซึ่งน่าจะเป็นช่วงที่กว้างเกินไป และมีความแตกต่างทางพันธุกรรม Yoshida (1981) พบว่าความสัมพันธ์ของอุณหภูมิสะสมกับพัฒนาการของข้าวเป็นเส้นโค้ง (curvilinear relationship) และอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 22 °C มีแนวโน้มที่จะชะลอพัฒนาการได้มากกว่าอุณหภูมิสูงกว่า 27 °C

ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากปัจจัยอุณหภูมิอีกลักษณะหนึ่ง คือความคลาดเคลื่อนของข้อมูลนำเข้าในแบบจำลอง ที่เป็นความแตกต่างของอุณหภูมิในแปลงปลูกจริง ๆ กับข้อมูลที่นำเข้าที่ได้จากการวัดที่สถานีตรวจอากาศ ซึ่งมีความแตกต่างโดยเฉพาะระหว่างอุณหภูมิของแปลงที่มีน้ำขังหรือในทรงพุ่ม กับอุณหภูมิอากาศที่วัดในที่สถานีวัดอากาศ

2.1.2 ความไวต่อช่วงแสง

ผลการปรับหาค่า P2R เพื่อให้คำนวณวันออกดอกตรงกับค่าจริง ดังแสดงในภาพ 8 และตาราง 6 พบว่า CERES-Rice 3.5 ไม่สามารถทำนายวันกำเนิดช่อดอกของข้าวที่ไวต่อช่วงแสงมาก

(strongly photoperiod sensitive) หรือข้าวพันธุ์ที่มีการตอบสนองแบบ absolute response (Vergara and Chang, 1985) อย่าง ขาวดอกมะลิ105 หรือเหนียวสันป่าตอง ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ P2R เพียงค่าเดียวสำหรับทุกๆ วันปลูก อย่างที่ควรจะเป็น แสดงให้เห็นว่าสมการที่คำนวณวันกำเนิดช่อดอกของ CERES-Rice 3.5 น่าจะใช้ได้สำหรับข้าวพันธุ์ที่ไวต่อช่วงแสงน้อยถึงปานกลาง หรือแบบ quantitative response (Vergara and Chang, 1985) (ซึ่งไม่มีพันธุ์ลักษณะนี้ในงานทดลอง) เนื่องจากสมการจะคำนวณให้ข้าวทุกพันธุ์เกิดรวงได้ แม้ว่าไม่อยู่ในระยะเวลาที่วันสั้นกว่าความยาววิกฤติ แต่ความเป็นจริงพบว่าอัตราการเกิดรวงสำหรับข้าวไวต่อช่วงแสงมากนั้นเท่ากับศูนย์ ถ้ายังไม่อยู่ในช่วงวันที่สั้นกว่าความยาววันวิกฤติไม่ว่าจะข้าวจะมีอายุเท่าใด โดย Vergara and Chang (1985) พบว่าข้าวพันธุ์ที่เป็น absolute response ที่ไม่ออกดอกเมื่อความยาววันยาวกว่าความยาววันวิกฤติแม้อายุมากกว่า 200 วัน มีสัดส่วนถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ของข้าวจำนวน 450 พันธุ์ที่ศึกษา ดังนั้นในกรณีข้าวไวต่อช่วงแสงมากนี้ควรที่จะต้องใช้ค่า P2R ที่แตกต่างกัน โดย ค่า P2R ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 และเหนียวสันป่าตองจะเพิ่มมากขึ้น ตามระยะห่างระหว่างวันสิ้นสุดระยะ juvenile และวันกำเนิดช่อดอก (ภาพ 8 และตาราง 6)

นอกจากนั้น ความคลาดเคลื่อนการจำลองวันกำเนิดช่อดอกนี้ อาจเกิดจากการกำหนดค่า P2O (ความยาววันวิกฤติ) หรือ ค่าความยาววันแต่ละวันที่คำนวณโดยแบบจำลอง เนื่องจาก ค่าความยาววันที่คำนวณจาก Latitude ของแปลงทดลอง และวันที่ในรอบปี (ตารางภาคผนวก 1) แต่ค่าความยาววันจริงอาจจะมีคลาดเคลื่อนในแต่ปี จากการเปลี่ยนมุมของแกนโลกเพียงเล็กน้อยในแต่ละปี (Oldeman and Frere, 1982) หรือ ความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากสมมติฐานที่ว่าความยาววันที่มีผลต่อการเกิดรวงของข้าว เป็นความยาววันที่รวมเวลาที่ดวงอาทิตย์อยู่ต่ำกว่าแนวระนาบ 6 องศา โดยที่เพิ่มจากความยาววันที่เป็นช่วงเวลาดวงอาทิตย์ขึ้นและตกอีกประมาณ 48 นาที เนื่องจากสมมติฐานว่าระดับพลังงานแสงในช่วงนี้ยังมีผลต่อการเกิดรวง สอดคล้องกับที่มีหลายรายงานพบว่า พลังงานแสงในระดับต่ำนั้นมีผลต่อการเกิดรวง แต่ไม่มีรายงานที่ระบุชัดเจนว่าพลังงานแสงระดับใดที่มีผลต่อการเกิดรวงของข้าว เนื่องจากมีความแตกต่างตามช่วงความยาวคลื่นแสง และพันธุกรรม (Vergara and Chang, 1985)

2.1.3 ผลกระทบของการปักดำ (transplant shock)

เนื่องจากค่า P1 เป็นค่าที่กำหนดไว้สำหรับข้าวที่ปลูกด้วยเมล็ดโดยตรง แต่งานทดลองที่ใช้ปรับค่าสัมประสิทธิ์ ใช้วิธีปลูกแบบปักดำ . ซึ่งแบบจำลองมีส่วนที่จำลองผลของการปักดำต่อระยะ P1 โดยกำหนดให้ระยะเวลาการชะลอการเจริญเนื่องจากปักดำ อยู่ในช่วง 20-195 °Cd ขึ้นอยู่กับอายุกล้าที่ปักดำที่แปลงเป็นอุณหภูมิสะสมโดยหาได้การประมาณจากอุณหภูมิเฉลี่ยแปลงกล้าที่ผู้ใช้

นำเข้าเองเพียงค่าเดียว และแบบจำลองไม่ได้จำลองความแตกต่างระหว่างวิธีตกกล้า การใช้ปุ๋ยไนโตรเจนกับกล้า ที่ Torress *et al.*(1994) พบว่ามีผลต่อการชะลอการปักดำ และไม่ครอบคลุมความทนทานต่อการปักดำ ที่เป็นลักษณะพันธุกรรม (Mckill *et al.*, 1996) และการฟื้นตัวของกล้านั้นยังขึ้นอยู่วิธีการปฏิบัติที่ได้แก่ความชำของต้นและรากจากการปักดำด้วย (De Datta, 1981)

2.1.4 การกำหนดระยะกำเนิดช่อดอกถึงออกดอก (P3) และระยะออกดอกถึงเริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ด (P4)

เนื่องจากระยะพัฒนาการตั้งแต่กำเนิดช่อดอกถึงออกดอกและออกดอกถึงเริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ดนั้น แบบจำลองกำหนดให้เหมือนกันทุกพันธุ์ คือไม่กำหนดด้วยสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม ซึ่งจากผลการตรวจสอบระยะพัฒนาการในช่วงกำเนิดช่อดอกถึงออกดอกจากการจำลองและการสังเกตระยะเวลาหลังกำเนิดช่อดอกถึงออกดอก 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าอุณหภูมิสะสมใกล้เคียงกันระหว่างพันธุ์ และวันปลูก (450-580 °Cd หรือประมาณ 35-45 วัน) สอดคล้องกับสมมติฐานแบบจำลอง และที่รายงานโดย Yoshida (1981) และ Vergara and Chang (1985)

อย่างไรก็ตาม ระยะกำเนิดช่อดอกถึงออกดอก (P3) นั้น แบบจำลองกำหนดให้ขึ้นอยู่กับ ค่าระยะเวลาระหว่างการเกิดใบ (phyllocron interval) ที่กำหนดให้เท่ากับ 83 °Cd ขณะที่ Yoshida (1981) พบว่าระยะการพัฒนายาวกว่าคือ 100 °Cd .ในระยะก่อนเกิดตาดอก และประมาณ 170 °Cd หลังจากนั้น และรายงายว่าการโผล่ของรวงของข้าวจาโปนิกาเร็วและสมบูรณ์กว่าในข้าวอินดิกา และอุณหภูมิต่ำทำให้การโผล่ของรวงไม่สมบูรณ์ สอดคล้องกับที่สังเกตได้ในแปลงสำหรับวันปลูกในฤดูหนาวของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่การโผล่ของรวงช้า และไม่สม่ำเสมอ

สำหรับระยะออกดอก ถึงเริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ดซึ่ง CERES-Rice 3.5 กำหนดให้เท่ากับ 150 °Cd สำหรับทุกพันธุ์และสภาพแวดล้อม แต่มีรายงานว่า ความยาววันน่าจะมีผลต่อระยะพัฒนารวงจนถึงระยะผสมเกสรด้วย (Vergara and Chang, 1985) ซึ่งการตรวจสอบระยะนี้ในแปลงทดลองโดยการสังเกตวันเริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ดตามนิยามทำได้ยาก เนื่องจากสังเกตได้ไม่ชัดเจนเท่ากับวันออกดอก จึงไม่มีข้อมูลการทดลองเปรียบเทียบกับค่าจำลอง

2.1.5 สภาพการเกิดรวง และการสุกแก่ของเมล็ดที่ไม่สม่ำเสมอ

ความคลาดเคลื่อนในลักษณะนี้คือการไม่สามารถกำหนดวันออกดอก 50 เปอร์เซ็นต์หรือสุกแก่ 80 เปอร์เซ็นต์ ได้แน่นอน อย่างสภาพปกติ โดยพบว่าบางวันปลูกมีช่วงห่างตั้งแต่ออกดอกแรกถึงสุดท้ายมากถึง 25-60 วัน ในสภาพการเจริญเติบโตตามปกติทั่วไปนั้นข้าวที่เป็นพืชแบบ

determinate ที่การเจริญทางต้นและใบจะหยุดเมื่อการเจริญทางการสืบพันธุ์เกิดขึ้น แม้ว่าจะมีความแตกต่างระหว่างหน่อของข้าวและรวงที่เกิดขึ้นเป็นลำดับ ตามการพัฒนาการของใบ แต่ปกติแล้วข้าวมีวันที่กำเนิดช่อดอกห่างกัน 7-14 วัน (Yoshida, 1981) และพัฒนาจนถึงวันออกดอกที่กำหนดจากวันที่ 50เปอร์เซ็นต์ ของหน่อมีรวงโผล่พ้นขึ้นมาแล้ว (IBSNAT,1988)

ความไม่สม่ำเสมอของพัฒนาการเกิดหน่อและรวงต่าง ๆ กันหลายระยะ ซึ่งคล้ายกับเป็นการเจริญแบบ indeterminate เป็นสภาพที่ Tanaka (1976) เรียกว่าเป็น vegetative phase - reproductive phase overlapped ที่การแตกกอยังเกิดขึ้นหลังได้อีกหลังจากที่ต้นแม่เกิดรวงแล้ว นอกจากนั้น Yoshida (1981) พบว่าภายในข้าวต้นเดียวกัน หน่อบางหน่อมีการออกดอกก่อนต้นแม่ (main culm) และอุณหภูมิต่ำทำให้การโผล่ของรวงไม่สมบูรณ์ ความไม่สม่ำเสมอนี้อาจเกิดเนื่องจากสาเหตุหลายประการ เช่นสภาพแวดล้อม ธาตุอาหาร หรือพันธุกรรม (Tanaka, 1976)

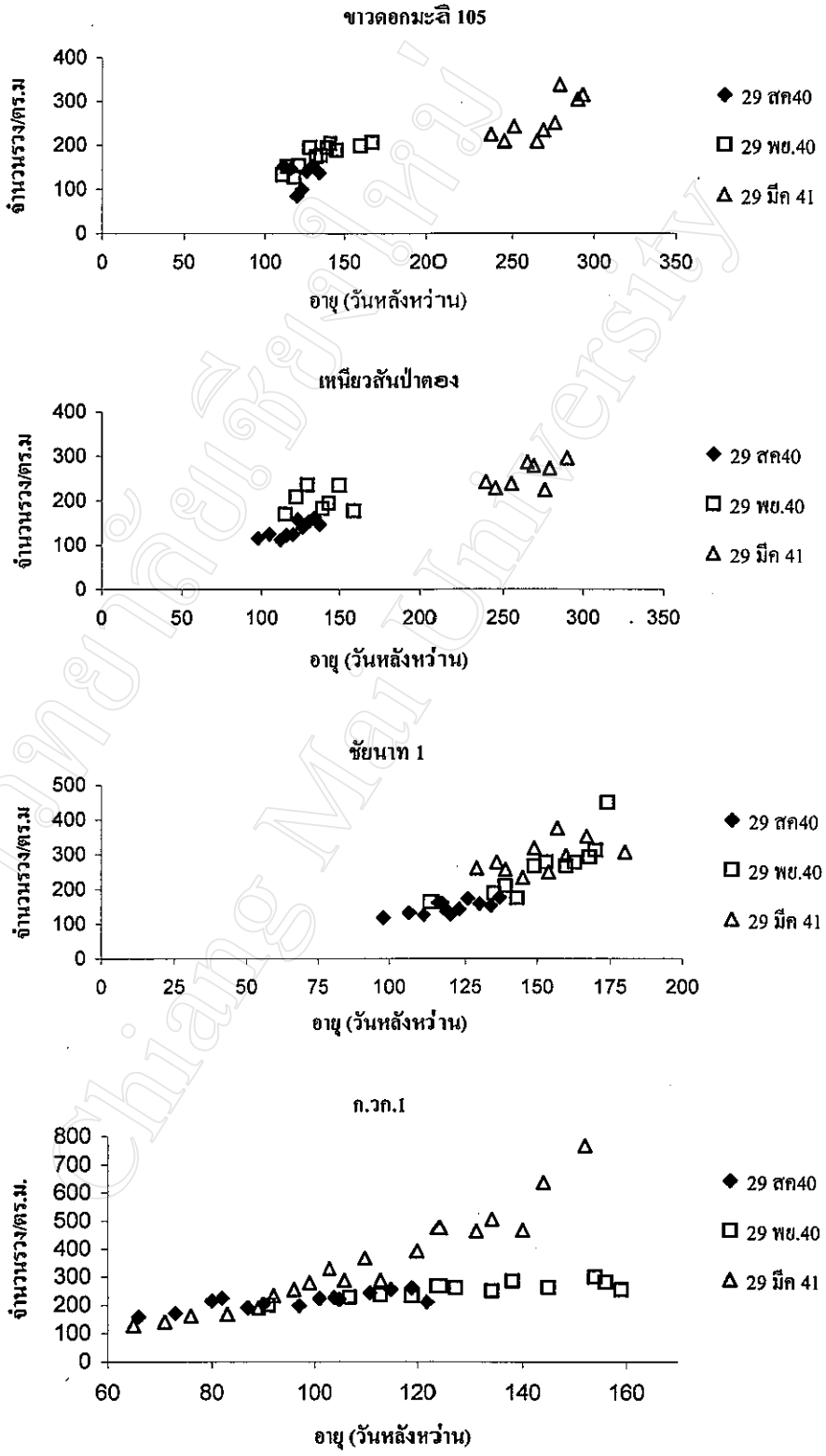
จากการทดลองสังเกตพบว่าข้าวแต่ละพันธุ์แสดงระดับความไม่สม่ำเสมอของการสุกแก่จากเงื่อนไขสภาพแวดล้อมโดยเฉพาะอุณหภูมิที่ต่างกัน ดังแสดงด้วยการเปรียบเทียบค่าจำนวนรวง/ตารางเมตรที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่วันออกดอกของต้นแม่ ของข้าวทั้ง 4 พันธุ์ ของ 3 วันปลูก (ภาพ 20)

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และเหนียวสันป่าตอง มีรูปแบบการตอบสนองที่คล้ายกัน โดยข้าวที่ตกกล้าปลายพฤศจิกายน หรือที่ปลูกในฤดูหนาว ที่อยู่ในระยะเวลาที่อุณหภูมิต่ำสุดต่ำกว่า 20°C มีการออกดอกเป็นสองช่วง ใหญ่ ๆ คือในระยะแรกที่รวงแม่และรวงที่เกิดก่อน สามารถเกิดรวงและสร้างเมล็ดและสุกแก่ ในระยะเวลาใกล้เคียงกัน ในขณะที่หน่อชุดหลังอยู่ในระยะออกดอก เป็นเพราะการชะลอการเกิดรวงของหน่อรุ่นหลังในช่วงอุณหภูมิต่ำสุดต่ำกว่า 20 °C เมื่อพ้นช่วงที่อุณหภูมิต่ำนั้นแล้ว หน่อเหล่านั้นจึงสามารถเจริญและเกิดรวงได้ โดยเฉพาะข้าวเหนียวสันป่าตอง พบว่ามีอาการใบเหลืองแดงและมีการแตกกอน้อยมากในช่วง 7-20 วันหลังปักดำ

ข้าวชัยนาท 1 มีความไม่สม่ำเสมอของการออกรวงทั้งสภาพอุณหภูมิสูงหรือต่ำ โดยมีการทะยอยออกรวงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากรวงแรกถึงรวงสุดท้ายเป็นเวลา 20-50 วัน ทั้งในวันปลูกช่วงอุณหภูมิต่ำ และช่วงอุณหภูมิสูง

ข้าวก.วก.1 มีความสม่ำเสมอในสภาพอุณหภูมิต่ำมากว่าสภาพอุณหภูมิสูง โดยข้าวที่ปลูกในช่วงเดือนมีนาคมถึงสิงหาคมที่อุณหภูมิสูงมีระยะเวลาการออกรวงแรกถึงรวงสุดท้ายที่ห่างกันมาก สภาพอุณหภูมิที่สูงข้าวจะมีการเจริญเติบโตเร็ว ต้นแม่และหน่อแรกๆ จะเกิดรวงภายในเวลาเพียง 12 –15 วันหลังปักดำ (กล้าอายุ 16-20 วัน) ขณะที่ยังมีการแตกหน่อใหม่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ มีระยะเวลาการออกรวงแรกไปจนถึงออกรวงสุดท้าย เป็นระยะเวลานานกว่า 30 วัน

ผลการศึกษาพบว่าระยะเวลาการโผล่ของรวงตั้งแต่รวงแรกถึงออกรวง สุดท้าย ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 เหนียวสันป่าตอง และชัยนาท 1 สัมพันธ์กับระดับอุณหภูมิต่ำสุดในช่วงกำเนิดช่อ



ภาพ 20 การเปลี่ยนแปลงจำนวนรวง/ตร.ม. ที่ 3 วันปลูก ของข้าว 4 พันธุ์ ม.เชียงใหม่ 2540-2541

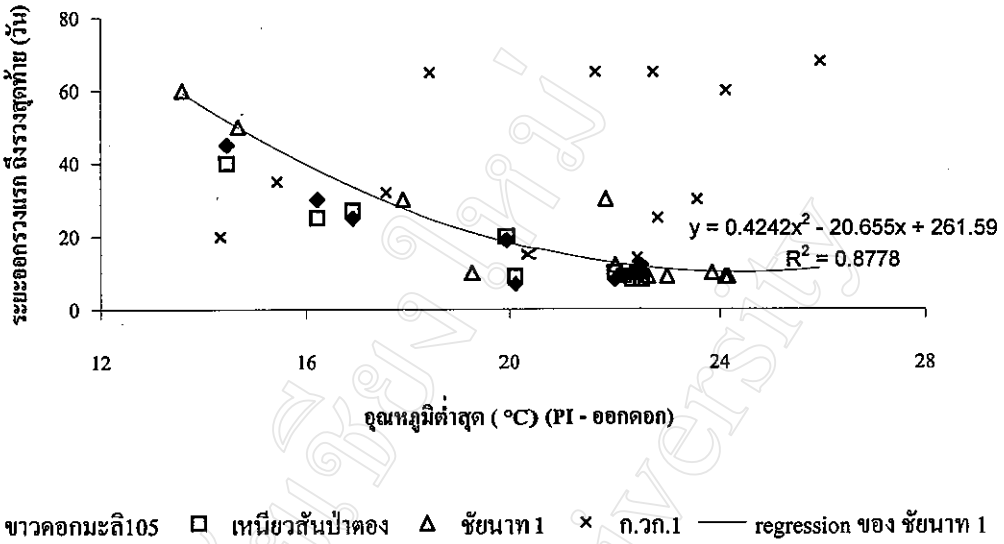
ดอก ถึงออกดอก ขณะที่ ก.วก.1 มีระยะเวลาออกรวงนานกว่าพันธุ์อื่นๆ และไม่สัมพันธ์กับระดับอุณหภูมิต่ำสุด (ภาพ 21)

นอกจากนั้นสำหรับข้าวขาวดอกมะลิ 105 และเหนียวสันป่าตอง พบว่ามีสภาพออกดอกไม่พร้อมกันเนื่องจาก อิทธิพลความยาววันด้วย โดยพบว่าข้าวทั้งสองพันธุ์นี้ที่ตกกล้า 29 มกราคม มีการออกดอกภายในต้นเดียวกันเป็นสองช่วงที่ห่างกันนานกว่า 6 เดือน โดยมีการออกดอกของต้นแม่ (main culm) ในเดือนเมษายน และหน่อรุ่นแรกๆ เนื่องจากมีอายุผ่านระยะ vegetative phase ก่อนในปลายกุมภาพันธ์ เมื่ออยู่ในสภาพวันสั้นกว่า 12 ชั่วโมงจึงเกิดรวงได้ก่อนขณะที่หน่อรุ่นหลังๆ ที่ยังไม่ผ่านระยะนี้จึงเจริญเติบโตต่อไปและจะไม่เกิดรวงเมื่อผ่าน vegetative phase เนื่องจากวันเริ่มยาวกว่า 12 ชั่วโมง จนจะเกิดรวงจากหน่อรุ่นหลังๆ ได้ในปลายเดือนกันยายนที่ความยาววันเริ่มสั้นลงกว่า 12 ชั่วโมง ทำนองกับที่รายงานโดย อานันท์ และคณะ (2539) ดังแสดงให้เห็นในภาพ 22 ที่ข้าวขาวดอกมะลิที่วันปลูก 28 มกราคมนี้ แบบจำลองสามารถจำลองได้เฉพาะการออกรวงของต้นแม่เพียงครั้งเดียว (ถ้าใช้ P2R 100) แต่ในสภาพจริงมีการออกดอกถึงสองครั้ง ดังกล่าวมาข้างต้น (ภาพ 22)

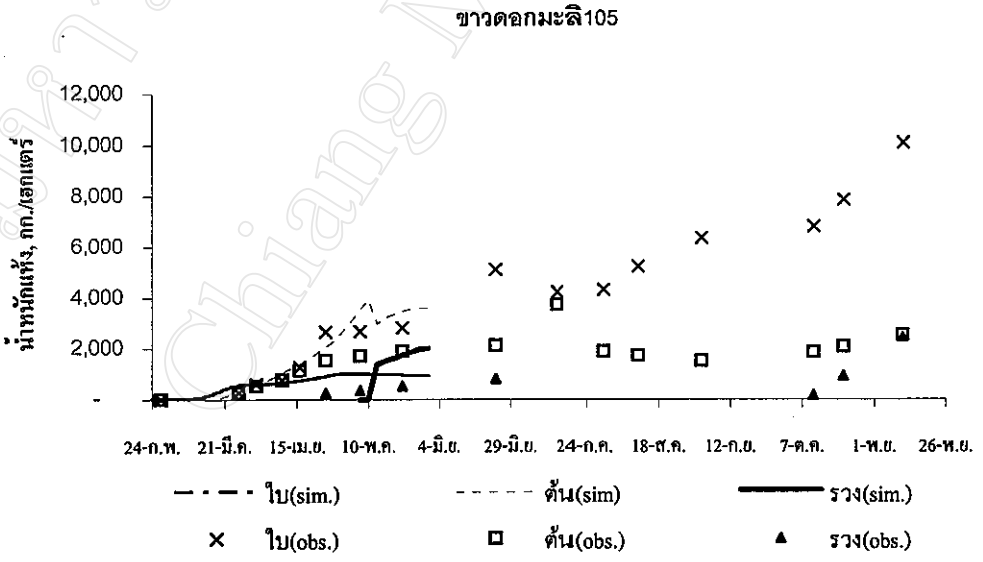
2.2 การจำลองการเจริญเติบโตและสร้างผลผลิต

ผลการทำนายผลผลิต เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ ของงาน 12 วันปลูก แสดงให้เห็นว่าทุกจุดในกราฟอยู่ต่ำกว่าเส้น 1:1 หมายถึง ผลผลิตที่จำลองได้มากกว่าผลผลิตที่วัดจริงทุกวันปลูก ซึ่งแต่ละวันปลูกมีความแตกต่างจากค่าที่วัดได้ ในระดับที่ต่างกัน (ภาพ 23) ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์การประเมินค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมการเจริญเติบโตที่ต้องการให้ผลผลิตที่จำลองได้อย่างน้อยที่สุดต้องไม่ต่ำกว่าผลผลิตที่ได้จากวันปลูกที่ให้ผลผลิตดีที่สุด เนื่องจากยังมีปัจจัยจำกัดผลผลิตอีกมากที่แบบจำลองยังไม่ครอบคลุมถึง

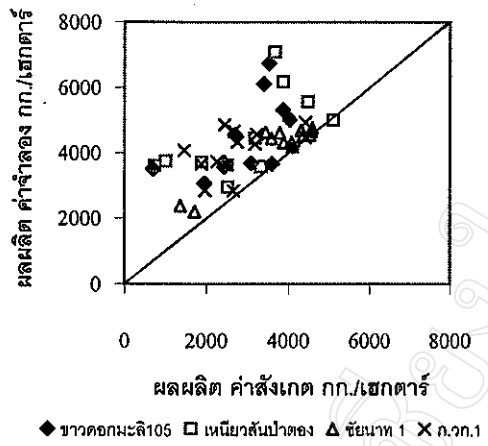
เมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบการสะสมน้ำหนักของส่วนต้น ใบ และรวงของต้นข้าวตลอดฤดูปลูก พบว่า น้ำหนักแห้งของส่วนต้น ใบ และรวง ที่ได้จากการจำลอง มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาไปในทิศทางคล้ายกันกับผลที่ได้จากการปลูกจริง แต่พบว่ามีหลายวันปลูกที่ค่าน้ำหนักต้นที่ได้จากการสังเกตมากกว่าค่าที่ได้จากการจำลอง แม้ว่าผลผลิตจะสอดคล้องกัน (ภาพ 24) ทำนองเดียวกับที่รายงานโดย Jongkaewwattana *et al.*.(1993) เป็นไปได้ว่าเกิดจากความคลาดเคลื่อนของการคำนวณการสะสมน้ำหนักของใบหรือต้นของแบบจำลอง หรือจากความคลาดเคลื่อนของข้อมูลนำเข้าที่สัมพันธ์กับอัตราการสะสมน้ำหนักใบหรือต้น ได้แก่ระดับของไนโตรเจน และแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของการจำลองอย่างหนึ่ง ที่สามารถปรับสัมประสิทธิ์พันธุกรรมการ



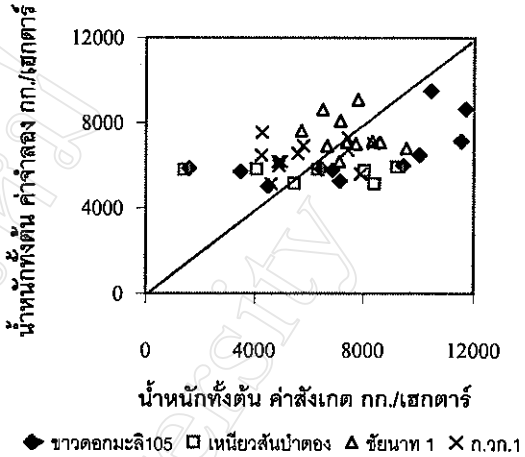
ภาพ 21 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่ำสุดช่วง PI ถึงออกดอก กับระยะเวลาการโผล่ของรวง การทดลอง 12 วันปลูก ข้าว 4 พันธุ์ ม.เชียงใหม่ 2540-41



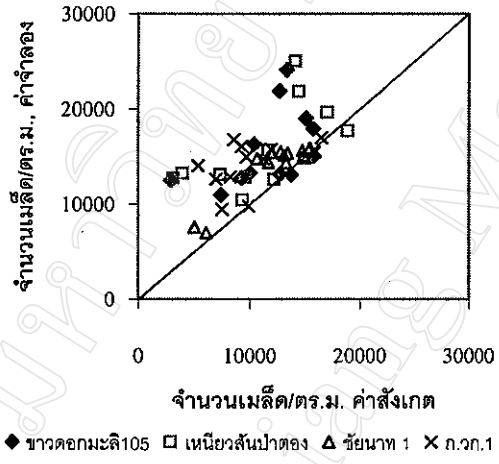
ภาพ 22 เปรียบเทียบการเจริญเติบโต ส่วน ต้น ใบ และรวง ที่เป็นค่าจำลอง (sim) และค่าสังเกต (obs) ที่มีการออกดอก 2 ช่วง ของข้าวขาวดอกมะลิ105 ที่ ปักดำ 24 ก.พ..41 ม.เชียงใหม่



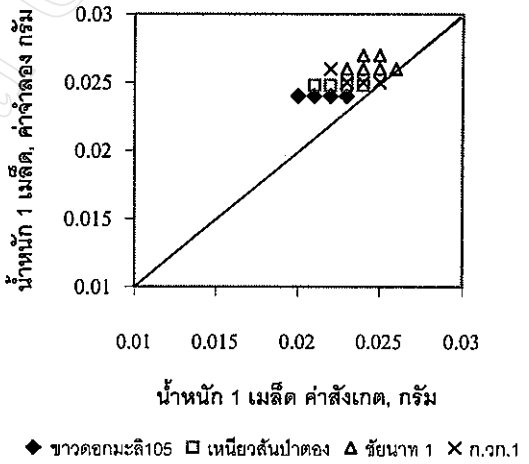
1 .ผลผลิต



2. น้ำหนักทั้งต้น



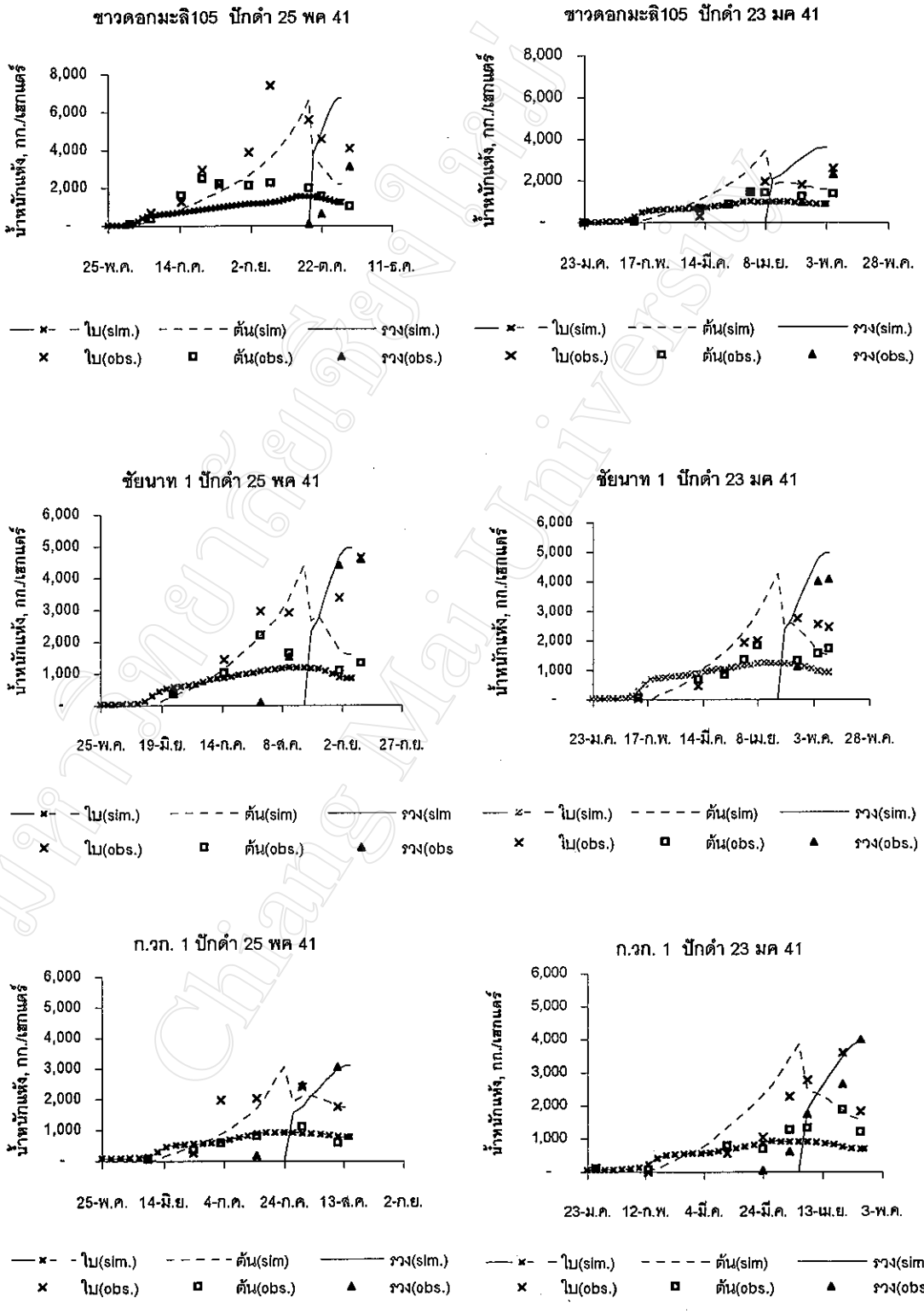
3. จำนวนเมล็ด/ตร.ม.



4. น้ำหนัก 1 เมล็ด

ภาพ 23 กราฟ 1:1 ของค่าสังเกตและค่าจำลอง ของ ผลผลิต น้ำหนักทั้งต้น จำนวนเมล็ด/ตร.ม. และน้ำหนัก 1 เมล็ด ของข้าว 4 พันธุ์ 12 วันปลูก ม.เชียงใหม่ 2540-41

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University



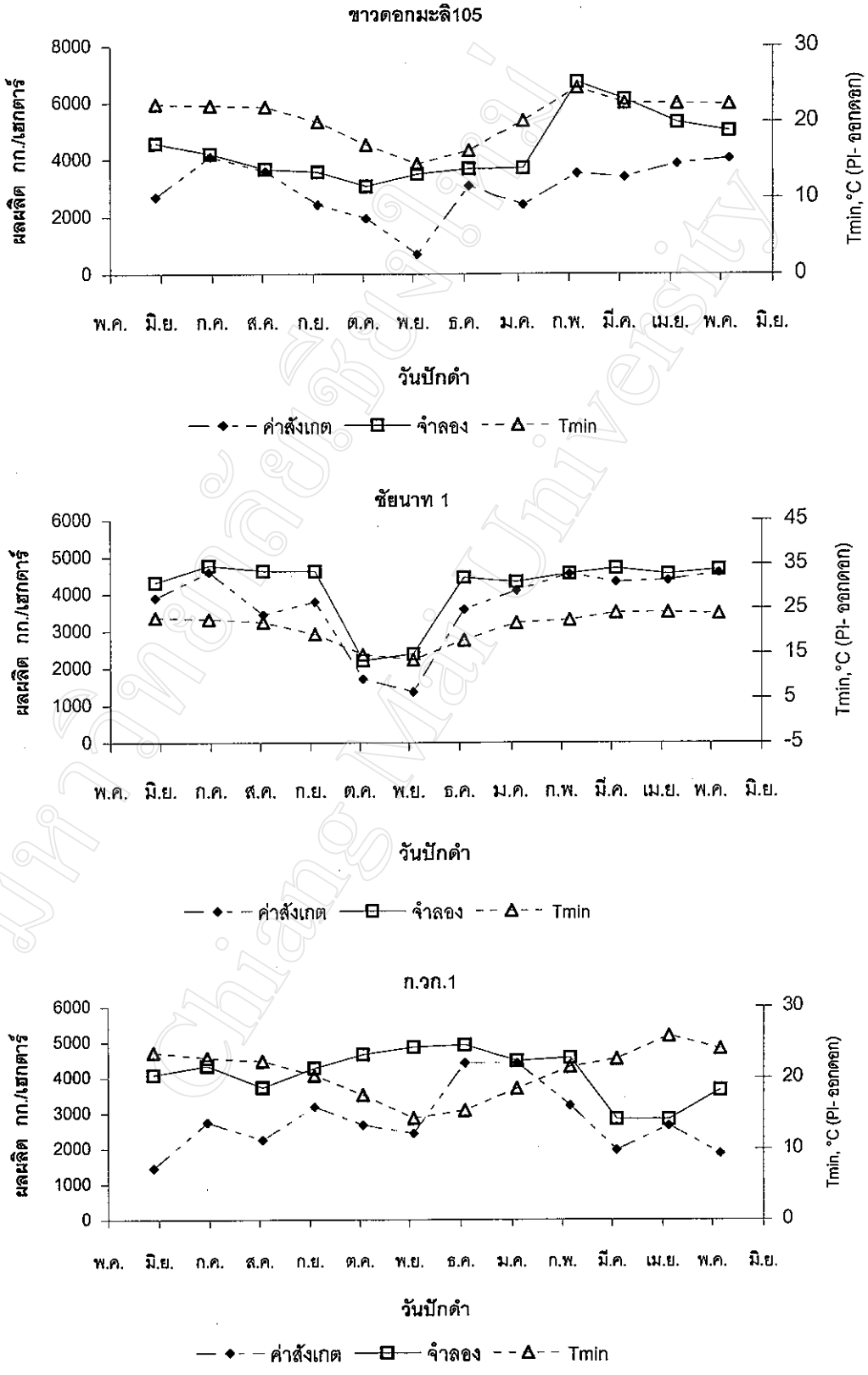
ภาพ 24 เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของ ต้น ใบ และราก ที่เป็นค่าสังเกต(obs.) และค่าจำลอง(sim.) ของขาวดอกมะลิ105 ชัยนาท 1 และก.วก.1 ที่ปักดำ 23 ม.ค.41 และ 25 พค. 41 ม.เชียงใหม่

เจริญเติบโตที่ยึดเฉพาะค่าผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิต แต่ไม่สามารถปรับค่าสะสมน้ำหนักทั้งต้นหรือเฉพาะส่วนต้นหรือใบได้

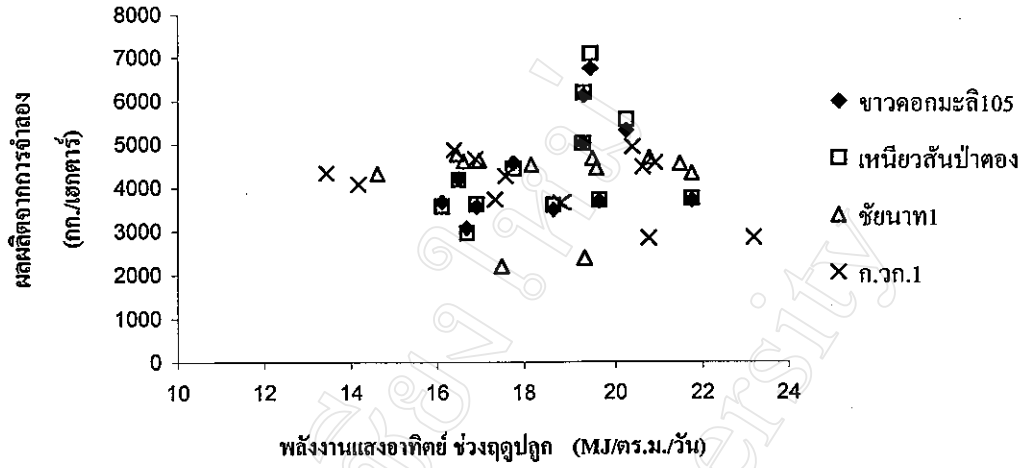
อุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดรายวันนั้นมีอิทธิพลในทางจำกัดการเจริญเติบโตและผลผลิตเป็นปัจจัยจำกัดการเจริญเติบโตปัจจัยหนึ่งในแบบจำลอง ซึ่งจากผลการทดลอง 12 วันปลูก ข้าว 3 พันธุ์ (ขาวดอกมะลิ 105 เหนียวสันป่าตอง และ ชัยนาท 1) มีผลผลิตต่ำในวันปลูกที่อยู่ในช่วงที่ปลูกปลายตุลาคม ที่อุณหภูมิต่ำสุดต่ำกว่าช่วงอื่นๆ และแสดงการตอบสนองที่อ่อนไหวกับวันปลูกมาก สอดคล้องกับที่รายงานโดย เดชาและคณะ (2539) ขณะที่ข้าวพันธุ์ ก.วก.1 มีผลผลิตต่ำเมื่อปลูกตั้งแต่มีนาคมถึงสิงหาคม ในช่วงอุณหภูมิสูง ทำนองเดียวกับที่รายงานโดย จำนง (2533) ซึ่งแม้ว่าจะทำการจำลองโดยพยายามกำหนดค่า G4 ให้เป็นไปผลการตอบสนองดังกล่าว แต่ไม่สามารถจำลองให้ได้ผลผลิตต่ำใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง (ภาพ 25) ทั้งนี้เป็นไปในทำนองเดียวกับการจำลองระยะพัฒนาการที่อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบบจำลองมีช่วงกว้างเกินไปสำหรับข้าวที่ทดสอบ หรืออุณหภูมิต่ำที่จำกัดการเจริญนั้นอยู่ต่ำเกินไป นอกจากนั้นการปรับค่า G4 มากเกินไปจะกระทบต่อระยะพัฒนาการจนคลาดเคลื่อนมากเกินไป ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

ปัจจัยพลังงานแสงที่มีอิทธิพลต่อการสะสมน้ำหนักต้นและสร้างผลผลิตของข้าวตามทฤษฎี แต่ในงานทดลองไม่สามารถแยกวิเคราะห์อิทธิพลปัจจัยนี้กับผลผลิตได้ชัดเจน ซึ่งไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงเฉลี่ยในฤดูปลูกกับผลผลิตของข้าวทั้ง 4 พันธุ์ทั้ง 12 วันปลูก (ภาพ 26) เหมือนปัจจัยจำกัดการเจริญเติบโต เช่น อุณหภูมิ และระดับพลังแสงในรอบปีมีความแปรปรวนระหว่างวันมาก แต่มีค่าเฉลี่ยรายเดือนที่ไม่แตกต่างกันมาก (ภาพภาคผนวก 1)

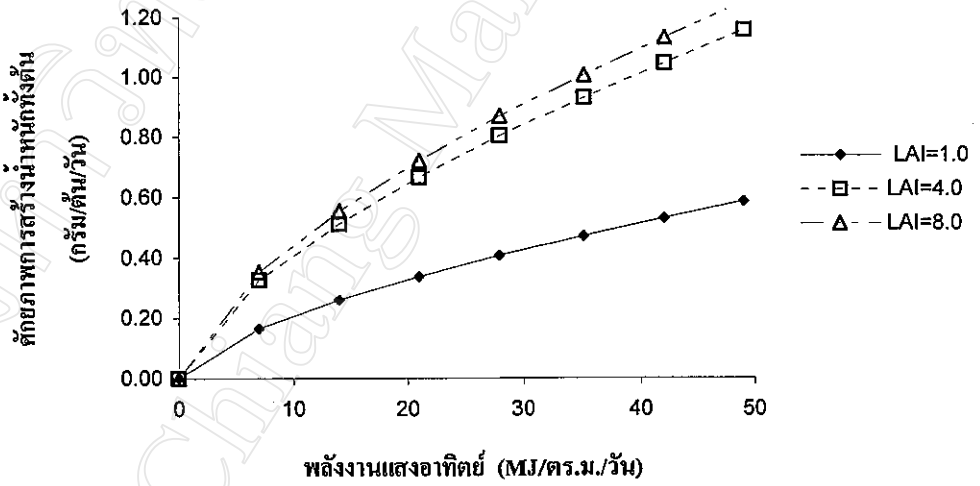
จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์ กับปริมาณน้ำหนักทั้งต้นที่สร้างได้ต่อวันจากสมการของแบบจำลอง CERES-Rice 3.5 แสดงให้เห็นว่าอัตราการสร้างน้ำหนักแห้งต้นข้าวต่อต้นต่อวัน เพิ่มขึ้นตามพลังงานแสง อย่างเป็นเส้นตรง และเพิ่มตามพื้นที่ใบ (ภาพ 27) โดยไม่พบว่ามีการตอบสนองแบบ light saturation ที่มีระดับจำกัดของระดับพลังงานแสงที่ระดับความเข้มแสงมากๆ ที่การเพิ่มขึ้นจากระดับนั้นไม่ทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงสุทธิเพิ่มขึ้น (Yoshida, 1981) และแบบจำลองไม่มีสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตแสดงความแตกต่างระหว่างพันธุ์ในการสังเคราะห์แสงและสะสมน้ำหนัก จึงไม่สามารถปรับให้การทำนายศักยภาพการสะสมน้ำหนักสอดคล้องกับค่าที่วัดได้อย่างการปรับผลผลิต จึงทำให้ได้ค่าจำลองของน้ำหนักทั้งต้นบางกรณีต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริง ซึ่งมีงานวิจัยรายงานว่า มุมใบที่รับแสง และจำนวนใบสูงสุดเป็นลักษณะทางพันธุกรรม ที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุดต่างกัน (Cock and Yoshida, 1973 อ้างโดย Yoshida, 1981) นอกจากนั้นพลังงานแสงที่ระยะการเจริญเติบโตต่าง ๆ กันของข้าวมีผลต่อผลผลิตข้าวต่างกัน โดยระยะที่เริ่มสร้างรวงเป็นระยะวิกฤติที่สุดที่แสงมีผลต่อจำนวนดอก



ภาพ 25 เปรียบเทียบผลผลิตระหว่างค่าสังเกตกับค่าจำลอง กับอุณหภูมิต่ำสุด(Tmin) ช่วง PI-ออกดอก ของข้าวขาวดอกมะลิ105 ชัยนาท 1 และ ก.วก.1 12 วันปลูก ม.เชียงใหม่ 2540-41



ภาพ 26 พลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยในฤดูปลูก(MJ/ตร.ม./วัน) กับผลผลิตจากการจำลองของข้าว 4 พันธุ์ 12 วันปลูก ม.เชียงใหม่ 2540-41



ภาพ 27 พลังงานแสงอาทิตย์ และ ศักยภาพการสร้างน้ำหนักแห้ง (กรัม/ต้น/วัน) จากสมการ (10) ที่ดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) ต่างๆ กัน ที่ความหนาแน่น 48 ต้น/ตร.ม.ระยะปลูก 25x25 ซม.

ย่อย (spikelet) และในช่วงสุกแก่ พลังงานแสงมีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมล็ดลีบ ส่วนในระยะ vegetative phase พลังงานแสงมีอิทธิพลต่อผลผลิตน้อยกว่าระยะอื่นๆ (Matsushima, 1957; Yoshida, 1981)

ความคลาดเคลื่อนการประมาณค่าผลผลิตจากการจำลองส่วนหนึ่งนั้นอธิบายได้ว่า ยังมีลักษณะพันธุกรรมอื่นๆ นอกจากที่เป็นสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมอีกจำนวนมากที่มีอิทธิพลต่อผลผลิต จากผลการทดลองงานทดลอง 12 วันปลูกพบว่า มีความแตกต่างในการทนต่อการหักล้ม (lodging resistance) ระหว่างพันธุ์ที่ศึกษา ซึ่งเป็นสภาพที่ควบคุมได้ยาก โดยที่ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และเหนียวสันป่าตอง ที่มีอัตราการหักล้มมากกว่าพันธุ์ชัยนาท 1 และ ก.วก.1 อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในกรณีที่ปลูกต้นฤดูฝนที่ข้าวที่ไวต่อช่วงแสงทั้งสองมีอายุนานกว่าวันปลูกในช่วงวันสั้น เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ผลผลิตที่วัดได้จริงน้อยกว่าที่จำลองได้ ลักษณะความต้านทานการหักล้มนี้เป็นลักษณะทางพันธุกรรมสัมพันธ์กับความสูง และการยืดของปล้องโคนต้น และ ความแข็งแรงของต้น (culm strength) และ ความต้านทานการงอ (bending resistance) ที่มีปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้ไนโตรเจนด้วย (Yoshida, 1981; Mckill *et al.*, 1996)

นอกจากนั้นยังมีลักษณะพันธุกรรมอื่นที่มีผลต่อผลิตที่ไม่ได้ศึกษาในงานทดลองนี้ได้แก่ ความทนแล้ง (drought resistance) ทนน้ำท่วม (submergence tolerance) หรือความทนต่อการปักดำ (tolerance for delayed transplanting) เป็นลักษณะทางพันธุกรรม ที่มีผลต่อการจำกัดของผลผลิตในสภาพแวดล้อมที่จำกัดโดยเฉพาะสภาพข้าวนาน้ำฝน (Mckill *et al.*, 1996)

นอกจากนั้นความคลาดเคลื่อนของผลผลิต หรือแม้แต่ของระยะพัฒนาการที่ได้จากแบบจำลอง ยังขึ้นอยู่กับค่าข้อมูลนำเข้าในแบบจำลอง นอกเหนือจากข้อมูลสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลดิน ที่มีความแปรปรวนในพื้นที่แปลงปลูก ข้อมูลอากาศ ที่มีช่องว่างความแตกต่างระหว่างข้อมูลภูมิอากาศในแปลงปลูกจริงกับข้อมูลสถานีตรวจอากาศ หรือข้อมูลการจัดการ โดยเฉพาะการให้ปุ๋ย ที่มีความแตกต่างได้มากในพื้นที่ปลูก และมีความคลาดเคลื่อนปริมาณปุ๋ยที่อาจเกิดจากการสูญหายของปุ๋ยที่ให้ หรือเนื่องจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับศัตรูพืช และวัชพืช ที่ไม่ได้ครอบคลุมในแบบจำลองนี้ ซึ่งท้ายที่สุดความคลาดเคลื่อนอาจอยู่ที่การวัดค่าจริงจากแปลงปลูกเองที่เป็นผลจากการสุ่ม หรือ การได้ข้อมูลที่ไม่ใช่ตัวแทนที่แท้จริงของปัจจัยที่กำหนดให้ หรือจากการควบคุมการทดลองไม่ดีพอจนสภาพแวดล้อมที่ปลูกไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์

สรุป

การวิเคราะห์การใช้แบบจำลองการเจริญเติบโตของข้าว CERES-Rice 3.5 ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถนำแบบจำลองไปใช้ประโยชน์ในงานวิจัยและพัฒนาการผลิตข้าวอย่างถูกต้องเหมาะสมนี้ ประกอบด้วยการศึกษาโครงสร้างแบบจำลอง การศึกษาการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม ที่เป็นขั้นตอนจำเป็นก่อนนำแบบจำลองไปใช้ และเป็นวิธีการเดียวที่แบบจำลองให้ผู้ใช้สามารถปรับค่าการจำลองให้สอดคล้องกับค่าที่วัดได้จริง และการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนจากทดสอบการจำลองงานทดลองที่ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยพันธุกรรมและ ภูมิอากาศ

การศึกษาโครงสร้างแบบจำลอง และสมการสำคัญต่าง ๆ ในแบบจำลองที่สัมพันธ์กับระยะพัฒนาการและผลผลิต และการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรม ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้เป็นภาพรวมความสัมพันธ์ขององค์ประกอบสำคัญ ๆ จากทั้งระบบของแบบจำลอง ที่ประกอบด้วยกระบวนการจำลองระยะพัฒนาการ และ การจำลองการเจริญเติบโตตามระยะพัฒนา

CERES-Rice 3.5 มีการจำลองที่ครอบคลุมปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ได้แก่ปัจจัยภูมิอากาศ ที่ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสูงสุดต่ำสุด และปริมาณน้ำฝน ปัจจัยพันธุกรรมเฉพาะที่เกี่ยวกับสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม 8 ค่า รวมถึง สมดุลน้ำ และไนโตรเจน ส่วนปัจจัยที่อยู่นอกกรอบของระบบแบบจำลองได้แก่ ศัตรูพืช และธาตุอาหารอื่น ๆ นอกเหนือจากไนโตรเจน รวมถึง การหักล้มความทนแล้ง หรือการถูกน้ำท่วม ฯลฯ ซึ่งมีส่วนทำให้ผลผลิตจริงน้อยกว่าค่าที่ได้จากการจำลอง

การศึกษาโครงสร้าง และกรอบการทำงานของแบบจำลอง ร่วมกับการทดสอบการจำลองกับงานทดลองที่ปลูกข้าว 4 พันธุ์ (ขาวดอกมะลิ 105 เหนียวสันป่าตอง ชัยนาท 1 และ ก.วก.1) 12 วันปลูก สามารถสรุปเป็นขั้นตอนและเทคนิคการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของข้าว (ภาพ 18) โดยเริ่มจากการวางแผนการปลูกในสภาพแวดล้อมได้แก่ ภูมิอากาศที่มีความแตกต่างกัน และปรับค่าสัมประสิทธิ์ที่กำหนดระยะพัฒนาการ ซึ่งรวมถึงสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตความทนต่ออุณหภูมิ G4 ให้ได้ระยะพัฒนาการที่ตรงกับค่าสังเกตจากงานทดลองจริงมากที่สุด และจากสัมประสิทธิ์พัฒนาการดังกล่าวนำมาใช้เพื่อปรับหาค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตเพื่อให้ค่าผลผลิตที่ได้จากจำลองสอดคล้องกับค่าผลผลิตที่วัดได้ของการทดลองในสภาพที่การเจริญเติบโตที่อยู่ในระดับดีที่สุด โดยพบว่ามีเพียงค่าสัมประสิทธิ์ G1 (potential spikelet) ที่เป็นสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต เพียงค่าเดียวที่มีอิทธิพลต่อผลผลิตและสามารถปรับให้จำลองการสร้างผลผลิตที่สอดคล้องกับค่าสังเกต

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรม ร่วมกับการจำลองอิทธิพลปัจจัยทางพันธุกรรมและภูมิอากาศ จากการทดลอง 12 วันปลูก พบว่าแบบจำลองจำลองระยะพัฒนาการของข้าวที่ไม่ไวต่อช่วงแสงได้ดี แต่มีข้อจำกัดในการทำนายระยะพัฒนาการของข้าวที่ไวต่อช่วงแสงมาก แต่ก็สามารถปรับใช้ได้ โดยการกำหนดเงื่อนไขการใช้สัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมที่เกี่ยวข้องไว้ด้วย ผู้ใช้ที่ต้องการใช้แบบจำลองประมาณค่าระยะพัฒนาได้ใกล้เคียงมากที่สุด เพื่อให้ผลผลิตที่สอดคล้องกับความเป็นจริง ควรที่จะต้องเลือกใช้ชุดค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมสำหรับเงื่อนไขวันปลูกหรือสภาพภูมิอากาศนั้นๆ ด้วย

เทคนิคการปรับค่าสัมประสิทธิ์สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้อีก ได้แก่การปลูกพันธุ์กับสภาพภูมิอากาศที่ไม่เป็นข้อจำกัดของพันธุ์นั้นมากเกินไป หรือควรใช้วิธีการปลูกด้วยเมล็ดโดยตรงเพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนจากอิทธิพลของการปักดำ เป็นต้น

ความคลาดเคลื่อนในการจำลองจากค่าที่วัดได้จริงเกิดได้จาก ความคลาดเคลื่อนของทฤษฎีและสมมติฐานที่ใช้ในแบบจำลอง ที่ได้แก่การกำหนดระดับอุณหภูมิที่เหมาะสม หรือการที่แบบจำลองไม่ได้ครอบคลุมถึงพัฒนาการที่ไม่สม่ำเสมออย่างมากของรวงภายในต้นเนื่องจากสภาพอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสม จากอิทธิพลของปัจจัยอื่นที่อยู่นอกกรอบของแบบจำลอง ที่ได้แก่โรค และแมลง จากความคลาดเคลื่อนของข้อมูลนำเข้า ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลชุดดิน คาร์บอนจากอินทรียสาร และไนโตรเจน ข้อมูลภูมิอากาศ หรือข้อมูลการจัดการ และ จากความคลาดเคลื่อนของการจัดการหรือจากข้อมูลงานทดลองที่ใช้เปรียบเทียบกับการจำลอง

การใช้แบบจำลอง ไม่ได้เป็นการทดแทนงานทดลองปลูกจริง แต่สามารถขยายคำอธิบายข้อมูลที่วัดได้ และสามารถเชื่อมโยงความรู้ และการใช้ประโยชน์ของทฤษฎี และความรู้จากงานวิจัยที่ผ่านมา ร่วมกับความรู้จากผลการทดลองที่ปลูกจริง สามารถอธิบายแนวโน้มของความสัมพันธ์ และผลลัพธ์อย่างมีหลักวิชาการ โดยที่ความแตกต่างระหว่างสภาพที่เกิดขึ้นจริงในแปลงปลูกกับผลจากการจำลองระบบของแบบจำลอง บ่งชี้ถึงความแตกต่างระหว่างข้อเท็จจริงกับทฤษฎี ซึ่งจะนำไปสู่เงื่อนไขของการนำทฤษฎีและความรู้ต่าง ๆ ไปใช้ในสภาพจริง เพื่อพัฒนาระบบงานวิจัยให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ประการสำคัญ งานวิจัยชี้ให้เห็นว่า ก่อนที่จะนำแบบจำลองใด ๆ ไปใช้งานนั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาการทำงานของแบบจำลองให้เข้าใจอย่างดีพอ เพื่อให้สามารถใช้แบบจำลองได้ถูกต้องและเหมาะสมตามวัตถุประสงค์และขอบเขตของแบบจำลองนั้น

เอกสารอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. 2539. คำแนะนำปุ๋ยข้าวและธัญพืชเมืองหนาว. กลุ่มงานวิจัยความอุดมสมบูรณ์ของดินและปุ๋ยข้าวและธัญพืชเมืองหนาว กองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร

จิรวัฒน์ เวชแพศย์ 2544. การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการจัดการต่อผลผลิตข้าวโดยใช้แบบจำลอง CERES-Rice 3.5 *ใน* การใช้วิธีวิจัยเชิงระบบวิเคราะห์อิทธิพลปัจจัยต่อผลผลิตและคุณภาพการสี วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

จำนงค์ พูลสวัสดิ์. 2533. ข้าวญี่ปุ่นในประเทศไทย. หนังสือพิมพ์กสิกร ปีที่ 63 ฉบับที่ 1 มกราคม-กุมภาพันธ์ 2533. หน้า 11-16.

บริบูรณ์ สมฤทธิ์ 2537. ข้าวไทย: ปัญหาและการปรับปรุงพันธุ์. เอกสารวิชาการ สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร. 123 หน้า

ยงยุทธ โอสถสภา. 2543. ธาตุอาหารพืช. คณะเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ. 422 หน้า

วาสนา วรมิศร์ และ ทัศนีย์ สงวนสัจ. 2537. พันธุ์ข้าวจ้าวชัยนาท 1 พันธุ์ข้าวรับรองพันธุ์ใหม่. วารสารวิชาการเกษตร วารสารวิชาการเกษตร ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม-สิงหาคม 2537 หน้า 81-93.

วิไล ปาละวิสุทธ์ ดวงอร อริยพฤกษ์ จิตติชัย อนาวงษ์ และ พรสุรี กาญจนา. 2538. อิทธิพลของวันปลูกต่อผลผลิตและคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ข้าวญี่ปุ่น. วารสารวิชาการเกษตร ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม-สิงหาคม 2538. หน้า 102-109.

สุวิตร บุษปะเวศ และเสน่ห์ ฤกษ์วรี. 2516. การศึกษาปฏิกิริยาต่อช่วงแสงของข้าวพันธุ์ดีที่ปลูกต่างเวลา. น.86-95. รายงานผลการค้นคว้าวิจัยปี 2516. กองการข้าวและกองแผนงาน. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ.

สุนทร บูรณะวิริยะกูล และเมธี เอกะสิงห์. 2535. การทดสอบแบบจำลอง CERES-Rice สำหรับผลผลิตข้าวในสภาพของเชียงใหม่. Agricultural Technical Report. No.18. คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

อานันท์ ผลวัฒนะ สุเทพ นุชสวาท ประภา ทองเสน วิญญู วงศ์อุบล และบุญโฮม ชำนาญกุล. 2535. การเจริญเติบโตและดัชนีการเก็บเกี่ยวของข้าวหอมที่ปลูกในช่วงแสงต่างๆ กัน. เอกสารประกอบการสัมมนาทางวิชาการเรื่องข้าวและธัญพืชเมืองหนาวครั้งที่ 4. ศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลก 13-14 กุมภาพันธ์ 2535. น. 181-192.

อานันท์ ผลวัฒนะ, วิญญู วงศ์อุบล, ประภา ทองเสน, สุเทพ นุชสวาท, 2536 . การตอบสนองในด้านการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว Japonica บางพันธุ์ต่อสภาพแวดล้อมในเขตศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลก. รายงานการสัมมนาเรื่องการพัฒนาข้าวและธัญพืชเมืองหนาวครั้งที่ 5. ศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลก สถาบันวิจัยข้าว

Bouman, B.A.M., F.W.T. Penning de Vries, J.J.M. Riethoven, M.J.Kropff and M.C.S. Wopereis. 1993. Application of simulation and system analysis in rice-cropping optimization. SARP Research Proceedings : Agroecology of Rice Based Cropping Systems. International Rice Research Institute. p.1-15.

De Datta, S.K.. 1981. Principles and Practices of Rice Production. A Wiley-Interscience Publication. John Wiley & Sons, Inc. Printed in Singapore. 619pp.

Dent, J.B. and M.J.Blackie. 1979. Systems simulation in agriculture. Applied Science Pub.Ltd. London.180 pp.

Fischer, K.S. and V.G.Cordova. 1998. Impact of IRRI on rice science and production. *In* Impact of Rice Research. Proceeding of the International Conference on the Impact of Rice Research, 3-5 Jun 1996, Bangkok, Thailand. Thailand Development Research Institute, Bangkok, Thailand, and International Rice Research Institute, Manila, Philippines. p 27-50.

Forrester, J.W. 1972. Principles of Systems. Second Edition. MIT Press.

France, J and J.H.M. Thornley. 1984. Mathematics Models in Agriculutre: A quantitative Approach to Problems in Agriculture and Related Sciences. Butterworths & Co (Publishers)Ltd.

Hoogenboom, G., J.W.Jones, P.W. Wilkens, W.D. Batchelor, W.T.Bowen, L.A. Hunt, N.B. Pickering, U.Singh, D.C. Godwin, B. Baer, K.J. Boote, J.T.Ritchie, and J.W. White.

1994. DSSAT Version 3 Volume 2-2 Crop models. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii. pp 95-244.

Hoogenboom, G., P.K.Wilkens, P.K.Thornton, J.W. Jones, L.A. Hunt, D.T.Imamura.. 1999. DSSAT v3.5 Volume 4-1 Crop models. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii. pp 1-36..

Horie, T. 1994. A model for simulating rice growth and yield based on aerial environments. GCTE Rice Ecosystems Workshop. International Rice Research Institute. Philippines.

Hunt, L.A. and S. Pararajasingham. 1994. GENCALC: Genotype Coefficient Calculator USER'S GUIDE Version 3.0. Department of Crop Science, University of Guelph. Publication No. LAH-01-94. Crop Simulation Series No.3

Hunt, L.A. and K.J.Boote. 1998. Data for model operation, calibration, and evaluation. G.Y.Tsuji *et al.*.(eds): Understanding Options for Agricultural Production, p.9-39.

IBSNAT. 1988. Experimental Design and Data Collection Procedures for IBSNAT. IBSNAT Technical Report 1, Third Edition, Revised 1988. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer. University of Hawaii, Honolulu.

Jintrawet, A. 1991. A Decision Support System for Rapid Appraisal of Rice-Based Agricultural Innovations. Ph.D. Dissertation. University of Hawaii .

Jones, C.A. and Kiniry, J.R.1986. editors CERES-Maize : A simulation model of maize growth and development. Texas A&M University Press.

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. DSSAT version 3. Volume 2-1 Input and output files. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii. 94 pp.

Jones, J.W. G.Y.Tsuji, G.Hoogenboom, L.A.Hunt, P.K.Thornton, P.W.Wilkens, D.T.Imamura, W.T.Bowen and U.Singh. 1998. Decision support system for agrotechnology transfer:

DSSAT v3. G.Y. Tsuji *et al.*. (eds) Understanding options for agricultural production 157-177.

Jongkaewwattana, S. 1990. A Comprehensive Study of Factors Influencing Rice (*Oryza sativa*) Milling Quality. Ph.D. Dissertation. Department of Agronomy and Range Science. College of Agricultural and Environmental Sciences. University of California at Davis.

Jongkaewwattana, S. ,A. Jintrawet, P.Mankeb, and C.Sangchayoswat.1993. A decision support system for resources optimization in rice production in the North and Northeastern Thailand. Low-Input Sustainable Crop Production Systems in Asia (1993) 325-346, KCCS, Korea.pp.325-345.

Kropff, M.J., R.L.Williams, T.Horie, J.F.Angus, U.Singh, H.G. Centeno and K.G.Cassman. 1994.a Predicting yield potential of rice in different environments. Paper presented at the Symposium "Temperate Rice -Achievements and Potential" , 21-24 February 1994; Yanco, NSW, Australia

Kropff, M.J., H.H. van Laar, R.B. Matthews and H.F.M. ten Berge. 1994.b ORYZA1 An ecophysiological model for irrigated rice production. International Rice Research Institute. Philippines. 100 p.

Mckill, D.J., W.R.Coffman and D.P.Garrity. 1996. Rainfed Lowland Rice Improvement. International Rice Research Institute, P.O. Box933, Manila, Philippines.242 p.

Mutsaers, H.J.W. Mutsaers and Z.Wang. 1999. Are simulation models ready for agricultural research in developing countries. Agron. J. 91:1-4.

Ogoshi, R.M., B.G. Cagauan, Jr., and G.Y. Tsuji. 1999. Field and Laboratory Methods for the Collection of the Minimum Data Set. DSSAT3 Volume 4-8 Edited by G. Hoogenboom, Paul W. Wilkens and G.Y. Tshuji. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer. International Consortium for Agricultural Systems Application. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii. 217-286.

Oldeman, D.R. and N. Frere. 1982. A Study of the Agroclimatology of the Humid Tropics of Southeast Asia. Technical Report. FAO, Rome. 229 pp.

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. International Rice Research Institute. Philippines.

Ritchie,J.T., B.C.Alocilja, V.Singh and G. Vehara. 1986. IBSNAT/CERES Rice Model agrotechnology Transfer, Newsletter of the International Benchmark Site Network for Agrotechnology Transfer (IBSNAT) Project and The Soil Management Support Services (SMSS), 3:1-5.

Ritchie, J.T. and D.S.Nesmith. 1991. Temperature and Crop Development. Hank and Ritchie (eds.) Modeling Plant and Soil Systems- Agronomy Monograph no.31 : 5-27.

Ritchie, J.T. 1993. Genetic specific data for crop modeling. Systems Approaches for Agricultural Development, F.W.T. Penning de Vries *et al.*. (eds.). 77-93.

Ritchie, J.T. , U.Singh, D.C. Godwin and W.T. Bowen. 1998. Cereal growth, development and yield. . G.Y.Tsuji *et al.* (eds): Understanding Option for Agricultural Production, 79-98.

Singh, U. 1994. CERES-Rice. GCTE Rice Ecosystems Workshop. International Rice Research Institute. Philippines.

Singh, U., D.C. Godwin, J.T.Ritchie, W.T. Bowen, P.W.Wilkens, B.Baer, G. Hoogenboom and L.A. Hunt. 1998. CERES-RICE 3.5 (98.0) [RICER980 Program file in FORTRAN]. International Fertilizer Development Research Center.

Tanaka, A. 1976. Comparisons of rice growth in different environments. Proceedings of the Symposium on Climate and Rice. International Rice Research Institute. p.429-448

Torres, R.O., S.P. Liboon, S.P., M.J. Kropff, M.R. Exconde, E.C. Alocilja and K.G.Cassman. 1994. Transplant shock in rice. The development, testing and application of crop models simulating the potential production of rice: proceedings of the 'International workshop on the simulation of potential production in rice' held at Kumbakonam, Tamil Nadu, India, 25-28 January 1993/ R.B. Matthews (*et al.*)eds. Wageningen : Research Institute for Agrobiology and Soil Fertility; Wageningen : Department of Theoretical Production Ecology; Philippines: 33-40.

Uehara, G. and G.Y.Tsuji. 1998. Overview of IBSNA.T. G.Y. Tsuji et. Al. (eds.): Understanding Options for Agricultural Production, 1-7 . Kluwer Academic Publishers.

Vergara, B.S. and T.T.Chang. 1985. The flowering response of the rice plant to photoperiod: a review of the literature. Fourth Edition. . The International Rice Research Institute. Philippines.

Williams, R.L., C.O. Durkin and M. Stapper.1994. A simple model of rice response to N fertliser and its subsequent use as a decision support systems. International Rice Research Institute. Philippines.

Yoshida, S. 1981. Fundamentals of rice crop science. International Rice Research Institute, Philippines. 269 pp.

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

ตารางภาคผนวก 1 วันหว่านกล้า วันปักดำ วันกำเนิดช่อดอก(PI) วันออกดอกและวันสุกแก่ ผลผลิต และองค์ประกอบผลผลิตของข้าว 4 พันธุ์ 12 วันปลูก 2540-41 ม.เชียงใหม่

พันธุ์ข้าว	Tr	หว่านกล้า	ปักดำ	อายุ	PI	วันออกดอก	อายุออกดอก		วันสุกแก่	อายุสุกแก่		ระยะ	ผลผลิต	นน.รวม	นน. 1	จน.เมล็ด รวง/		เวลาออกดอก(วัน)
							Das	DAP		Das	DAP	สุกแก่	กก/Ha	กก/Ha	เมล็ด(ก)	/ ตร.ม.	ตร.ม.	1% ถึง 100%
ขาวดอกมะลิ	P1	22 พ.ค. 40	21 มิ.ย. 40	30	14 ก.ย. 40	19-ต.ค.-40	150	120	20-พ.ย.-40	182	152	32	2699	12565	0.022	10408	149	10
105	P2	22 มิ.ย. 40	23 ก.ค. 40	31	17 ก.ย. 40	22-ต.ค.-40	122	91	25-พ.ย.-40	156	125	34	4103	11823	0.022	15842	140	9
	P3	25 ก.ค. 40	25 ส.ค. 40	31	21 ก.ย. 40	26-ต.ค.-40	93	62	27-พ.ย.-40	125	94	32	3597	8931	0.022	13763	156	8
	P4	29 ส.ค. 40	25 ก.ย. 40	27	23 ต.ค. 40	27-พ.ย.-40	90	63	30-ธ.ค.-40	123	96	33	2424	5614	0.022	9275	125	19
	P5	29 ก.ย. 40	24 ต.ค. 40	25	22 พ.ย. 40	27-ธ.ค.-40	89	64	3-ก.พ.-41	127	102	38	1950	4341	0.023	7423	188	25
	P6	29 ต.ค. 40	24 พ.ย. 40	26	27 ธ.ค. 40	31-ม.ค.-41	94	68	6-มี.ค.-41	128	102	34	693	1995	0.02	2949	188	45
	P7	29 พ.ย. 40	24 ธ.ค. 40	25	11 ก.พ. 41	18-มี.ค.-41	109	84	21-เม.ย.-41	143	118	34	3085	8069	0.021	12747	226	30
	P8	29 ธ.ค. 40	23 ม.ค. 41	25	12 มี.ค. 41	16-เม.ย.-41	108	83	15-พ.ค.-41	137	112	29	2418	8583	0.021	10018	252	7
	* P9	29 ม.ค. 41	24 ก.พ. 41	26	24 มี.ค. 41	28-เม.ย.-41	89	63	2-มิ.ย.-41	124	98	35						175
	* P9	29 ม.ค. 41	24 ก.พ. 41	26	15 ก.ย. 41	20-ต.ค.-41	264	238	20-พ.ย.-41	295	269	31	3525	13065	0.023	13367	232	175
	P10	28 ก.พ. 41	24 มี.ค. 41	24	15 ก.ย. 41	20-ต.ค.-41	234	210	20-พ.ย.-41	265	241	31	3400	14628	0.023	12733	210	10
	P11	29 มี.ค. 41	24 เม.ย. 41	26	15 ก.ย. 41	20-ต.ค.-41	205	179	20-พ.ย.-41	236	210	31	3867	15930	0.022	15125	297	12
	P12	29 เม.ย. 41	25 พ.ค. 41	26	15 ก.ย. 41	20-ต.ค.-41	174	148	20-พ.ย.-41	205	179	31	4044	14417	0.022	15778	224	10
เหนียวสันป่าตอง	P1	22 พ.ค. 40	21 มิ.ย. 40	30	16 ก.ย. 40	21-ต.ค.-40	152	122	21-พ.ย.-40	183	153	31	3189	17283	0.024	11667	128	8
	P2	22 มิ.ย. 40	23 ก.ค. 40	31	18 ก.ย. 40	23-ต.ค.-40	123	92	26-พ.ย.-40	157	126	34	4105	11532	0.023	15074	108	9
	P3	25 ก.ค. 40	25 ส.ค. 40	31	23 ก.ย. 40	28-ต.ค.-40	95	64	28-พ.ย.-40	126	95	31	3328	10505	0.023	12221	165	10
	P4	29 ส.ค. 40	25 ก.ย. 40	27	24 ต.ค. 40	28-พ.ย.-40	91	64	29-ธ.ค.-40	122	95	31	2504	6804	0.022	9607	178	20
	P5	29 ก.ย. 40	24 ต.ค. 40	25	22 พ.ย. 40	27-ธ.ค.-40	89	64	3-ก.พ.-41	127	102	38	2518	5069	0.023	9349	259	27
	P6	29 ต.ค. 40	24 พ.ย. 40	26	23 ธ.ค. 40	27-ม.ค.-41	90	64	6-มี.ค.-41	128	102	38	749	1789	0.021	3119	179	40
	P7	29 พ.ย. 40	24 ธ.ค. 40	25	11 ก.พ. 41	18-มี.ค.-41	109	84	22-เม.ย.-41	144	119	35	1885	7897	0.022	7372	223	25
	P8	29 ธ.ค. 40	23 ม.ค. 41	25	14 มี.ค. 41	18-เม.ย.-41	110	85	19-พ.ค.-41	141	116	31	1004	10048	0.022	3968	184	9
	* P9	29 ม.ค. 41	24 ก.พ. 41	26	24 มี.ค. 41	28-เม.ย.-41	89	63	5-มิ.ย.-41	127	101	38						180
	* P9	29 ม.ค. 41	24 ก.พ. 41	26	16 ก.ย. 41	21-ต.ค.-41	265	239	21-พ.ย.-41	296	270	31	3670	15466	0.022	14153	224	180
	P10	28 ก.พ. 41	24 มี.ค. 41	24	16 ก.ย. 41	21-ต.ค.-41	235	211	22-พ.ย.-41	267	243	32	3874	19091	0.023	14474	197	8
	P11	29 มี.ค. 41	24 เม.ย. 41	26	16 ก.ย. 41	21-ต.ค.-41	206	180	22-พ.ย.-41	238	212	32	4487	21334	0.023	17060	270	8
	P12	29 เม.ย. 41	25 พ.ค. 41	26	16 ก.ย. 41	21-ต.ค.-41	175	149	22-พ.ย.-41	207	181	32	5109	16221	0.023	18900	241	10
ชัยนาท 1	P1	22 พ.ค. 40	21 มิ.ย. 40	30	25 ก.ค. 40	29-ส.ค.-40	99	69	27-ก.ย.-40	128	98	29	3887	8694	0.025	13310	219	9
	P2	22 มิ.ย. 40	23 ก.ค. 40	31	21 ส.ค. 40	25-ก.ย.-40	95	64	25-ต.ค.-40	125	94	30	4588	10753	0.026	15467	169	9
	P3	25 ก.ค. 40	25 ส.ค. 40	31	25 ก.ย. 40	30-ต.ค.-40	97	66	30-พ.ย.-40	128	97	31	3440	8328	0.025	12056	151	12
	P4	29 ส.ค. 40	25 ก.ย. 40	27	30 ต.ค. 40	4-ธ.ค.-40	97	70	8-ม.ค.-41	132	105	35	3787	9229	0.024	13461	220	10
	P5	29 ก.ย. 40	24 ต.ค. 40	25	16 ธ.ค. 40	20-ม.ค.-41	113	88	21-ก.พ.-41	145	120	32	1713	9746	0.024	6111	229	50
	P6	29 ต.ค. 40	24 พ.ย. 40	26	16 ม.ค. 41	20-ก.พ.-41	114	88	31-มี.ค.-41	153	127	39	1363	8132	0.025	11530	342	60
	P7	29 พ.ย. 40	24 ธ.ค. 40	25	20 ก.พ. 41	27-มี.ค.-41	118	93	22-เม.ย.-41	144	119	26	3583	7146	0.023	13354	285	30
	P8	29 ธ.ค. 40	23 ม.ค. 41	25	24 มี.ค. 41	28-เม.ย.-41	120	95	29-พ.ค.-41	151	126	31	4080	8949	0.024	14625	250	30
	P9	29 ม.ค. 41	24 ก.พ. 41	26	31 มี.ค. 41	5-พ.ค.-41	96	70	2-มิ.ย.-41	124	98	28	4538	9653	0.024	16421	242	10
	P10	28 ก.พ. 41	24 มี.ค. 41	24	1 พ.ค. 41	5-มิ.ย.-41	97	73	5-ก.ค.-41	127	103	30	4318	9636	0.025	14788	260	9
	P11	29 มี.ค. 41	24 เม.ย. 41	26	7 มิ.ย. 41	12-ก.ค.-41	105	79	10-ส.ค.-41	134	108	29	4368	11957	0.025	14924	250	9
	P12	29 เม.ย. 41	25 พ.ค. 41	26	3 ก.ค. 41	7-ส.ค.-41	100	74	5-ก.ย.-41	129	103	29	4770	10410	0.026	16005	220	10
ก.วก.1	P1	29 พ.ค. 40	21 มิ.ย. 40	23	6 ก.ค. 40	10-ส.ค.-40	73	50	10-ก.ย.-40	104	81	31	1458	6101	0.023	5367	281	30
	P2	1 ก.ค. 40	23 ก.ค. 40	22	10 ส.ค. 40	14-ก.ย.-40	75	53	14-ต.ค.-40	105	83	30	2748	6078	0.024	9721	272	25
	P3	9 ส.ค. 40	25 ส.ค. 40	16	10 ก.ย. 40	15-ต.ค.-40	67	51	16-พ.ย.-40	99	83	32	2258	5297	0.023	8282	163	14
	P4	10 ก.ย. 40	25 ก.ย. 40	15	22 ต.ค. 40	26-พ.ย.-40	77	62	27-ธ.ค.-40	108	93	31	3184	6972	0.024	11265	208	15
	P5	3 ต.ค. 40	24 ต.ค. 40	21	23 พ.ย. 40	28-ธ.ค.-40	86	65	7-ก.พ.-41	127	106	41	2673	7231	0.025	9302	257	32
	P6	4 พ.ย. 40	24 พ.ย. 40	20	1 ม.ค. 41	5-ก.พ.-41	93	73	10-มี.ค.-41	126	106	33	2441	5321	0.024	8584	228	20
	P7	4 ธ.ค. 40	24 ธ.ค. 40	20	29 ม.ค. 41	5-มี.ค.-41	91	71	8-เม.ย.-41	125	105	34	4422	9297	0.023	16520	280	35
	P8	5 ม.ค. 41	23 ม.ค. 41	18	25 ก.พ. 41	1-เม.ย.-41	86	68	2-พ.ค.-41	117	99	31	4417	10454	0.024	15907	300	65
	P9	5 ก.พ. 41	24 ก.พ. 41	19	19 มี.ค. 41	23-เม.ย.-41	77	58	23-พ.ค.-41	107	88	30	3226	9291	0.023	11947	261	65
	P10	5 มี.ค. 41	24 มี.ค. 41	19	10 เม.ย. 41	15-พ.ค.-41	71	52	19-มิ.ย.-41	106	87	35	1969	6200	0.022	7553	243	65
	P11	5 เม.ย. 41	24 เม.ย. 41	19	5 พ.ค. 41	9-มิ.ย.-41	65	46	13-ก.ค.-41	99	80	34	2659	9877	0.023	9908	402	68
	P12	5 พ.ค. 41	25 พ.ค. 41	20	9 มิ.ย. 41	14-ก.ค.-41	70	50	14-ส.ค.-41	101	81	31	1877	5750	0.023	6976	334	60

* วันปลูกนี้สำหรับข้าวขาวดอกมะลิ105 และเหนียวสันป่าตอง รวงต้นแม่ออกรวงก่อนในเดือนมีค. และรวงที่เกิดหลังที่เป็นส่วนใหญ่ออกในเดือน ต.ค.

ตารางภาคผนวก 2 ข้อมูลดิน (ชุดดินสันทราย) ที่บรรจุในไฟล์ SOIL.SOL สำหรับการจำลองการทดลอง 12 วันปลูก ม.เชียงใหม่ 2540-41

```
*IB00630003  SCS          -99     120  San Sai Series-MCC
@SITE        COUNTRY          LAT     LONG SCS FAMILY
 MCC-CMI     THAILAND      -99.000  -99.000 AQUIC USTIFLUVENTS
@ SCOM  SALB  SLU1  SLDR  SLRO  SLNF  SLPF  SMHB  SMPX  SMKE
 BN     0.13  10.3  0.20    76  1.00  1.00 IB001 IB001 IB001
@  SLB SLMH   SLLL  SDUL  SSAT  SRGF  SSKS  SBDM  SLOC  SLCL  SLSI  SLCF  SLNI  SLHW  SLHB  SCEC
     5 A1    0.162 0.301 0.398  1.00 -99.0  1.41  4.62  28.5  61.5 -99.0  0.08   5.7   4.8  49.8
    17 A2    0.174 0.312 0.395  1.00 -99.0  1.42  2.05  31.0  61.0 -99.0  0.08   5.2   4.2  34.2
    60 AC    0.165 0.301 0.404  0.50 -99.0  1.39  0.49  29.0  56.5 -99.0   -99   5.2   3.8  17.5
    90 C1    0.141 0.276 0.409  0.20 -99.0  1.37  0.37  23.5  56.0 -99.0   -99   5.4   3.9  16.1
   120 C2    0.189 0.329 0.387  0.20 -99.0  1.44  0.55  34.5  63.5 -99.0   -99   5.4   4.1  24.1
```

หมายเหตุ

```
LAT      Latitude, degrees (decimals;+ve north)
LONG     Longitude, degrees (decimals;+ve east)
SALB     Albedo, fraction
SBDM     Bulk density, moist, g cm-3
SCEC     Cation exchange capacity, cmol kg-1
SCSFAM   Family, SCS system
SDUL     Upper limit, drained, cm3 cm-3
SITE     Site name
SLCF     Coarse fraction (>2 mm), %
SLCL     Clay (<0.002 mm), %
SLDR     Drainage rate, fraction day-1
SLHB     pH in buffer
SLHW     pH in water
SLLL     Lower limit, cm3 cm-3
SLMH     Master horizon
SLNF     Mineralization factor, 0 to 1 scale
SLNI     Total nitrogen, %
SLOC     Organic carbon, %
SLPF     Photosynthesis factor, 0 to 1 scale
SLRO     Runoff curve no. (Soil Conservation Service)
SLSI     Silt (0.05 to 0.002 mm), %
SMHB     pH in buffer determination method, code
SMKE     Potassium determination method, code
SMPX     Phosphorus determination code
SRGF     Root growth factor, soil only, 0.0 to 1.0
SSAT     Upper limit, saturated, cm3 cm-3
SSKS     Sat. hydraulic conductivity, macropore, cm h-1
```

ตารางภาคผนวก 3 ส่วนหนึ่งของไฟล์ข้อมูลอากาศ (CMMC9701.WTH) ในการจำลองการทดลอง 12 วันปลูก ม.เชียงใหม่ 2540-41

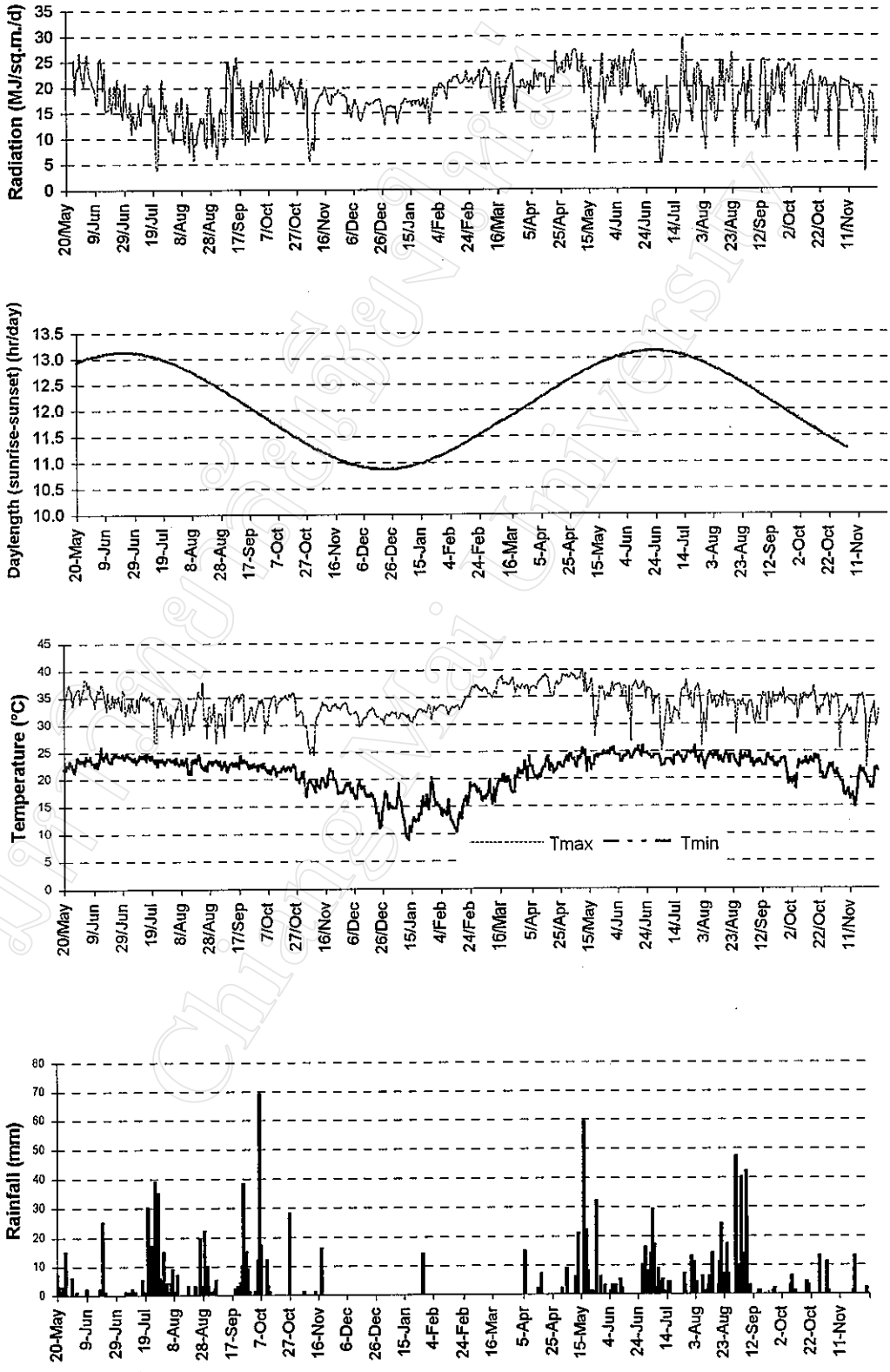
```
*WEATHER : MCC.CMU.CHIANGMAI

@ INSI      LAT     LONG  ELEV   TAV  TAMP REFHT WNDHT
  CMMC   18.780   98.950   330  25.0   3.0     2     2

@DATE  SRAD  TMAX  TMIN  RAIN
97001  13.9  28.7  12.4   0.0
97002  15.2  29.4  12.2   0.0
97003  14.8  29.2  13.1   0.0
97004  15.5  29.5  12.5   0.0
.....
```

หมายเหตุ

```
RAIN     Rainfall, mm
DATE     Date, year + days from Jan. 1
ELEV     Elevation, m
INSI     Institute and site code
LAT      Latitude, degrees (decimals)
LONG     Longitude, degrees (decimals)
RAIN     Daily rainfall (incl.snow), mm day-1
REFHT    Reference height for weather measurements, m
SRAD     Daily solar radiation, MJ m-2 day-1
TAMP     Temperature amplitude, monthly averages, C
TAV      Temperature average for whole year, C
TMAX     Daily temperature maximum, C
TMIN     Daily temperature minimum, C
```



ภาพภาคผนวก 1 ตัวแปรภูมิอากาศรายวัน ม.เชียงใหม่ (18.78 , 98.95) มิ.ย. 40- พ.ย.41

(ทุกค่าบันทึกจาก Data Logger ยกเว้นความยาววัน(Daylength) ที่คำนวณโดยCERES-Rice)