การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการจัดการต่อผลผลิตข้าวโดยใช้แบบจำลอง CERES-Rice 3.5

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาการใช้แบบจำลอง CERES-Rice 3.5 ในการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการจัดการที่ได้แก่ การให้ปุ๋ยไนโตรเจน การให้น้ำ วิธีการปลูก และอัตราเมล็ดพันธุ์ ที่มีต่อผลผลิตข้าว โดยทำงานทดลองในแปลงปลูก 2 การทดลอง คืองานศึกษาอิทธิพลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจน และสภาพการให้น้ำกับข้าว 2 พันธุ์ คือขาวดอกมะลิ 105 และ ชัยนาท 1 และการทดสอบอิทธิพลของวิธีการปลูกแบบปักดำ กับหว่านน้ำตมที่ใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ต่างๆ กัน ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 และ ชัยนาท 1 สุพรรณบุรี 60 และข้าวญี่ปุ่นก.วก.1 (ซาซานิชิกิ) ที่แปลงทดลอง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2541-2542

แบบจำลอง CERES Rice 3.5 มีระบบประเมินความเครียดจากการขาดน้ำ และไนโตรเจนที่มีบทบาทในการจำกัดผลผลิต แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ร่วมกันของอิทธิพลการให้น้ำและปุ๋ยไนโตรเจน ปุ๋ยไนโตรเจนมีผลต่อพื้นที่ใบ และมีผลต่อศักยภาพการคายน้ำ และความเครียดน้ำที่ระยะต่างๆ ของการเจริญเติบโต ขณะเดียวกันความเป็นประโยชน์ไนโตรเจนในดินและระดับความเครียดการขาดไนโตรเจนขึ้นอยู่กับสภาพน้ำในดินอย่างมาก การตอบสนองต่ออัตราปุ๋ยไนโตรเจนจากการจำลองมีรูปแบบเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงทำนองเดียวกับผลที่วัดได้จริง แบบจำลองคำนวณสมดุลไนโตรเจน โดยเน้นที่ การสลายอินทรียวัตถุในดิน ให้ไนโตรเจน การสูญเสียแอมโมเนียในสภาพน้ำขัง และอ่อนไหวอย่างมากต่อวันที่ให้น้ำและให้ปุ๋ยไนโตรเจน แต่แบบจำลองไม่มีกลไกแสดงความแตกต่างระหว่างพันธุกรรมในการตอบสนองต่อไนโตรเจน ได้แก่ ความต้านทานการหักล้ม หรือประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของทรงพุ่ม และยังไม่แสดงการตอบสนองต่อวิธีการไถเตรียมดินหรือวิธีการใส่ปุ๋ย แต่ตอบสนองต่อชนิดของปุ๋ยไนโตรเจนที่ใส่

แบบจำลองสามารถจำลองอิทธิพลของการปักดำและการปลูกด้วยเมล็ดที่งอกแล้วแบบนาหว่านน้ำตมต่อระยะพัฒนาการและผลผลิตได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง โดยที่การปลูกแบบปักดำยืดอายุการเกิดรวง ตามอายุกล้าที่ใช้ โดยที่ผลผลิตที่ได้จากการปักดำไม่แตกต่างกับที่หว่านด้วยอัตราเมล็ดพันธุ์ระดับต่ำ และการจำลองผลของอัตราเมล็ดพันธุ์สอดคล้องในทางเดียวกันกับค่าที่วัดได้จริง และแสดงการปรับชดเชยการสร้างผลผลิตข้าว กับความหนาแน่นประชากรโดยมีระบบจำลองการแตกกอและผลของการบังแสงที่ประชากรหนาแน่นมากๆ รวมถึงความจำกัดของไนโตรเจนในดิน แม้ว่าแบบจำลองประเมินค่าความหนาแน่นการแตกกอในระดับสูงมากเกินไป แต่ไม่มีผลต่อการคำนวณผลผลิต ที่คำนวณจากฐานต่อต้น

Effects of Management Factors on Rice Yield :
Systems Analysis with CERES-Rice 3.5 Model

ABSTRACT

The present study aimed to investigate the use of CERES-Rice model to study the effects of management factors(nitrogen fertilizer rate, irrigation, planting methods and seeding rates) on rice growth and yield. Two field experiments: 1) Effects of nitrogen fertilizer rates with or without irrigation on 2 rice varieties: Khao Dawk Mali 105 and Chanat-1; and 2) Comparison of 2 planting methods: transplanting and pre-germinated rice seeding with different seeding rates , of 4 rice varieties: Khao Dawk Mali 105, Suphanburi 60, Chainat-1 and DOA1 (Sasanishiki) were conducted at Chiang Mai University during 1998-1999 and simulated with CERES-Rice 3.5.

Simulating nitrogen fertilizer rates and irrigation effect confirmed strong interactions of irrigation and nitrogen fertilizer. The simulated yields were increased with diminishing rate as increasing nitrogen fertilizer rates,. agreed with the observed data. Nitrogen and water stress are key limitations of simulated yield. No water stress effect in rainfed field was found but existed in simulation results due to better soil-water control. . Low amount of rain water though not dry enough to build simulated water stress but often causes more nitrogen stress. Nitrogen involved LAI and root development, determining water stress at different stages. Meanwhile, soil water has a great impact on soil nitrogen availability and nitrogen stress. The nitrogen submodel gives emphasis on mineralization of soil organic matter and volatilization loss when flooded. However, several conditions were not yet included in model, for examples lodging of tall or leafy plants when excessive nitrogen supply , submergence effect, drought or submerged tolerance coefficients.

The model performed well in simulation of transplanting shock effect on delaying panicle initiation Simulated yield of different seeding rates showed no significantly difference agreed with observed yield. Although number of tiller is too high , but it has no effect on yields due to yield calculating from components of grain weight, grain number per plant and plant density

คำนำ

แบบจำลอง CERES-Rice เป็นแบบจำลองการเจริญเติบโตของข้าวแบบจำลองหนึ่งที่มีการพัฒนาขึ้นพร้อมๆ กับแบบจำลองพืชไร่สำคัญหลายชนิดภายใต้โครงการ IBSNAT (International Benchmark Sites Network of Agrotechnology Transfer) โดยที่มีวัตถุประสงค์ที่จะใช้แนวทางการวิเคราะห์เชิงระบบและการจำลองระบบ (systems analysis and simulation) กับปัญหาต่าง ที่เกิดขึ้นกับเกษตรกรที่มีทรัพยากรจำกัดในเขตร้อนและเขตกึ่งร้อน (Uehara and Tsuji, 1998) โดยแบบจำลองถูกออกแบบให้มีระบบที่สามารถจำลองระบบสมดุลน้ำ และสมดุลไนโตรเจน และสามารถปรับใช้กับสภาพภูมิอากาศ ดิน การจัดการ และลักษณะทางพันธุกรรมที่แตกต่างกันได้ (Singh *et al.*, 1998)

ปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดเวลาในการทำการเกษตรที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ การตัดสินใจที่เกี่ยวกับวิธีการจัดการของเกษตรกรเอง ตามวิธีที่เคยปฏิบัติต่อๆ กันมา หรือใช้การลองผิดลองถูกเอง หรือไม่สามารถทำตามคำแนะนำต่าง ๆ ของนักวิชาการได้ Arnon (1989) สำรวจการยอมรับและการใช้เทคโนโลยีของเกษตรในประเทศต่างๆ และพบตรงกันว่าประเทศที่กำลังพัฒนานั้นได้รับผลจากการพัฒนาเทคโนโลยีวิธีการจัดการการผลิตทางเกษตรน้อยมาก เนื่องจากมีข้อจำกัด และความเสี่ยงมากในการใช้ปัจจัยการผลิต โดยเฉพาะในสภาพนาน้ำฝนที่มีความไม่แน่นอน และสภาพเกษตรกรยากจน มีปัจจัยการผลิตที่จำกัด และราคาผลผลิตก็มีความแปรปรวนด้วย

การให้น้ำเป็นปัจจัยการจัดการที่สำคัญอย่างยิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการปลูกข้าว เนื่องจากข้าวเป็นพืชที่จัดอยู่ในประเภท semiaquatic จึงต้องการน้ำมากกว่าพืชอื่นๆ และด้วยเหตุผลทางด้านการจัดการที่ต้องการให้มีน้ำขังในแปลงเพื่อควบคุมวัชพืช ความต้องการน้ำของในแปลงปลูกข้าวที่มีอายุสุกแก่ 90-120 วัน ตั้งแต่ปักดำจนถึงเก็บเกี่ยวอยู่ระหว่าง 800-1,200 มม. ขึ้นอยู่กับ ความต้องการในการระเหย (evaporative demand) ลักษณะดิน และความลึกของน้ำที่ต้องการให้ขัง (De Datta, 1981) การทำนาของประเทศไทยส่วนใหญ่หรือประมาณ 85เปอร์เซ็นต์ เป็นพื้นที่อาศัยน้ำฝน และเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ผลผลิตข้าวเฉลี่ยของประเทศต่ำ และมีความแปรปรวนไม่แน่นอน จากสถิติการทำนาของประเทศไทยในรอบหนึ่งร้อยยี่สิบปีนั้นพบว่าผลผลิตข้าวเสียหายจากความแห้งแล้งเกิดสภาพแล้งประมาณถึง 60 ปี (บริบูรณ์, 2537)

การขาดน้ำมีผลต่อข้าวทุกระยะการเจริญ ได้แก่การลดการเจริญของใบและการแตกกอ ชะลอการออกดอก การเป็นหมันของดอกย่อย (spikelet sterility) และการสะสมน้ำหนักเมล็ดไม่สมบูรณ์ (Yoshida, 1981) โดยระยะที่อ่อนไหวที่สุดต่อความเครียดน้ำคือระยะ 20 วันก่อนออกดอกถึง 10 วัน

หลังออกดอก (Matsushima, 1962 อ้างโดย De Datta, 1981) ปริมาณน้ำในดินมีผลต่อธาตุอาหาร นอกจากนั้นสภาพการมีน้ำขังในแปลงมีผลต่อกระบวนการทางชีวเคมีของดิน ที่ส่งผลต่อการใช้ประโยชน์หรือความเป็นพิษของธาตุอาหารหลายชนิด (De Datta, 1981) ระดับน้ำที่ขังยังมีผลต่ออัตราการแตกกอด้วย (Kupranchanakul, 1981)

การให้ปุ๋ยไนโตรเจนก็เป็นวิธีการจัดการวิธีการหนึ่งที่จำเป็นในการปลูกข้าว การใช้ปุ๋ยในโตรเจนกับข้าวในทวีปเอเชียเพิ่มขึ้นจาก 5 ล้านตันใน ปี 2513 เป็น 35 ล้านตันในปี 2533 (von Uexkull, 1993) ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารในดินที่สำคัญที่สุดต่อการเจริญเติบโตของพืช และเป็นธาตุอาหารที่มีอยู่ในข้าวในปริมาณสูง โดยข้าวต้องมีไนโตรเจนอย่างเพียงพอโดยเฉพาะในช่วงการแตกหน่อ หน้าที่สำคัญของไนโตรเจนในข้าวได้แก่ เพิ่มการเจริญเติบโต และจำนวนหน่อ เพิ่มขนาดใบและเมล็ด เพิ่มจำนวนดอกย่อย/รวง เพิ่มจำนวนเมล็ดดี (filled grain) /รวง และ เพิ่มปริมาณโปรตีนในเมล็ด (De Datta, 1981) อิทธิพลของไนโตรเจนต่อข้าวมีความสัมพันธ์กับสภาพน้ำในดิน โดยเกี่ยวข้องกับความเป็นประโยชน์ และการสูญเสียของไนโตรเจนในระบบ (Godwin and Singh,1998)

การใช้ไนโตรเจน มีปัญหาในเรื่องประสิทธิภาพการใช้ เนื่องจากสูญเสียไปได้ง่าย และการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนมากเกินไป อาจทำให้ข้าวเสียหายได้ เนื่องจากการเฝือใบ หรือการหักล้ม หรือการอ่อนแอต่อโรคไหม้ (Blast) และอาจทำให้เกิดสารปนเปื้อนในน้ำที่ออกจากแปลงนา (Bowen and Baethgen, 1998) ปัญหาของการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนกับข้าวของไทยนั้น ได้แก่ การเป็นปัจจัยที่มีต้นทุนสูง แต่มีประสิทธิภาพต่ำ โดยเฉพาะกับสภาพนาอาศัยน้ำฝน ที่ไม่สามารถใส่ปุ๋ยได้ตามเวลาและอัตราที่นักวิชาการแนะนำได้ (อัมมาร และวิโรจน์ , 2533)

การเลือกวิธีการปลูกข้าว และความหนาแน่นของต้นข้าว ก็เป็นอีกตัวแปรหนึ่งของการจัดการที่สำคัญ และสัมพันธ์กับสภาพการให้น้ำและสภาพความอุดมสมบูรณ์ของดินอย่างมาก ข้าวมีการแตกกอชดเชยความหนาแน่นของประชากร และมีวิธีการปลูกได้หลายวิธี โดยอาจปลูกด้วยเมล็ดโดยตรง โดยการหว่านหรือหยอด ด้วยเมล็ดที่ยังไม่งอก หรือที่งอกแล้ว และการปักดำ และด้วยอัตราประชากรที่ปลูกต่างๆ กัน วิธีการปักดำเป็นวิธีที่ใช้เป็นส่วนใหญ่ในการทำนาของประเทศไทยและเป็นวิธีควบคุมวัชพืชในนาข้าวที่ดี (บริบูรณ์ 2537) แต่การปักดำทำให้เกิดการชะงักการเจริญเติบโตในช่วงเวลาหนึ่ง เนื่องจากการกระทบกระเทือนของกล้าที่ถอนมาปักดำ อย่างไรก็ตามมีรายงานว่าวิธีการปลูกข้าวแบบปักดำกับการหว่านที่อัตราเมล็ดต่างๆ ให้การให้ศักยภาพผลผลิตใกล้เคียงกัน (Matsubayashi *et al.*, 1965; De Datta, 1981; Torres *et al.*, 1994) แต่ในสภาพควบคุมน้ำ และควบคุมวัชพืชได้ดี การปลูกแบบหว่านน้ำตมด้วยอัตราเมล็ดพันธุ์ที่เหมาะสม ให้ผลผลิตที่ดีกว่าวิธีการปักดำ (De Datta, 1981; บริบูรณ์, 2537)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะใช้แบบจำลอง CERES-Rice 3.5 เป็นเครื่องมือวิจัยเชิงระบบ (Singh *et al.*, 1998) ในการจำลองอิทธิพลของปัจจัยการจัดการที่สำคัญ ๆ ได้แก่ อัตราปุ๋ยไนโตรเจน การให้น้ำ และวิธีการปลูกแบบปักดำ กับแบบหว่านน้ำตมที่อัตราเมล็ดพันธุ์ต่างๆ กัน โดยวิเคราะห์จากการเปรียบเทียบผลจากแปลงทดลอง กับผลจากการจำลอง และศึกษาการแปลผลลัพธ์ต่างๆ ที่ได้จากแบบจำลอง เป็นการศึกษาเชิงระบบที่พิจารณาการตอบสนองทั้งระบบการสร้างผลผลิต ทั้งทิศทางและปริมาณ เพื่อเป็นการขยายความรู้และความเข้าใจในบทบาทของปัจจัยการจัดการที่สำคัญๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพเงื่อนไขการเจริญเติบโตทั้งระบบ โดยเฉพาะกับระบบการปลูกข้าวของไทยด้วยพันธุ์ข้าวที่ปลูกในพื้นที่นาภาคเหนือของประเทศไทย และเพื่อเข้าใจการใช้ และการทำงานของแบบจำลอง ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยการจัดการ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการปรับใช้ และพัฒนาแบบจำลอง CERES-Rice ต่อไป

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

กลไกการทำงานของแบบจำลอง CERES-Rice กับปัจจัยการจัดการ : ปุ๋ยไนโตรเจน การให้น้ำ วิธีการปลูก และอัตราเมล็ดพันธุ์

แบบจำลอง CERES- Rice ประกอบด้วยโครงสร้างระบบต่างๆ ที่สำคัญในกระบวนการสร้างผลผลิต ได้แก่ ระบบจำลองระยะพัฒนาการที่กำหนดระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา และระบบการเจริญเติบโตหรือสะสมน้ำหนักส่วนต่างๆ ของข้าวแต่ละระยะพัฒนาการ (ดูรายละเอียดที่เสนอใน จิรวัฒน์ (2544)) ที่เชื่อมโยงกับระบบสมดุลน้ำและไนโตรเจน ที่เป็นปัจจัยจำกัดการเจริญเติบโต ที่เชื่อมโยงกับตัวแปรการจัดการการให้น้ำ และให้ปุ๋ยไนโตรเจน และยังมีระบบจำลองอิทธิพลการปักดำ ที่งานวิจัยนี้ได้นำเสนอ โดยมีวิธีการจำลองที่แสดงเป็นสมมติฐานและสมการของการจำลองดังต่อไปนี้

1. การจำลองสมดุลน้ำ (water balance subroutine)

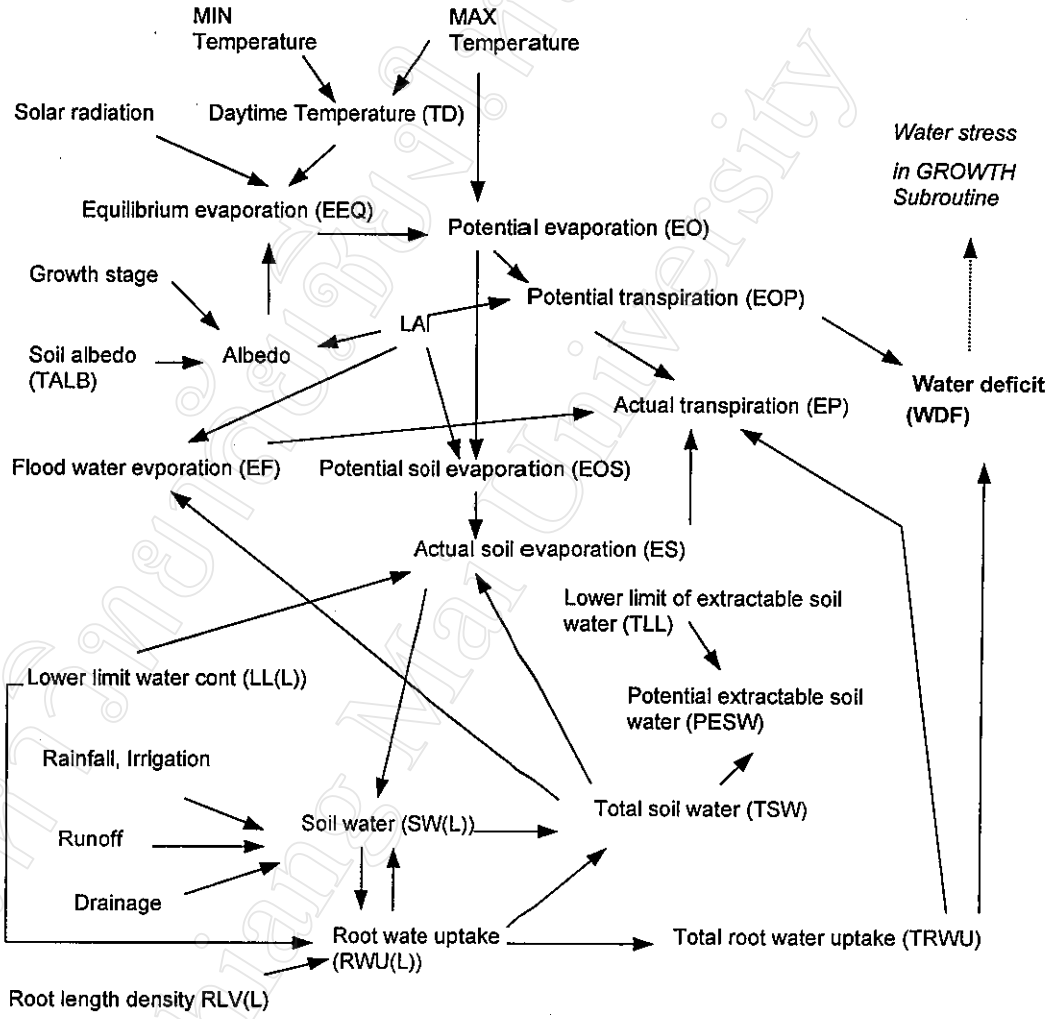
การจำลองอิทธิพลของสภาพการให้น้ำ ของแบบจำลอง CERES-Rice เกี่ยวข้องกับระบบการจำลองสมดุลของน้ำ ที่จะประเมินการลดลงของผลผลิตข้าวเนื่องจากความเครียดจากการขาดน้ำ (water deficit stress) ที่หมายถึงความต้องการน้ำของพืชมากกว่าน้ำที่พืชจะดึงไปใช้ได้ ซึ่งมีผลทำให้อัตราการเพิ่มของพื้นที่ใบลดลง เร่งอัตราการตายของใบ และหน่อ และมีผลให้จำนวนเมล็ดดีต่อต้นลดลง (Ritchie, 1998)

ค่าความเครียดจากการขาดน้ำ ที่เป็นผลลัพธ์ขั้นสุดท้ายตามวัตถุประสงค์ของแบบจำลองสมดุลน้ำ กำหนดจากตัวแปรในระบบสมดุลน้ำจำนวนมากหลายขั้นตอนดังสรุปจากสมการในส่วนคำนวณสมดุลน้ำของ CERES-Rice 3.5 (Singh *et al.*, 1998) และ แบบจำลองสมดุลน้ำสำหรับ CERES ทั่วๆ ไป (Ritchie, 1998) ได้เป็นภาพรวมขององค์ประกอบสมดุลน้ำที่เชื่อมโยงกันดังแสดงในภาพ 1

ค่าความเครียดน้ำ วัดจากตัวแปรการขาดน้ำ (water deficit factor, WDF) ที่คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างศักยภาพการดูดน้ำหรือปริมาณการดูดน้ำของรากทั้งหมด (total root water uptake, TRWU) ต่อศักยภาพการคายน้ำ (potential transpiration, EOP)

$$WDF = TRWU / EOP \quad (1)$$

ความเครียดก็จะมากขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนนี้ โดยความเครียดแบบที่ 1 (SWFAC) มีผลกระทบต่อปากใบ ทำให้การสังเคราะห์แสงลดลง ถ้า WDF ลดน้อยกว่า 1.0 และความเครียดแบบที่ 2 (TURFAC) คือความเครียดจากการขาดน้ำระดับที่มีผลต่อความเต่งของเซล (turgor



ภาพ 1 ความสัมพันธ์ตัวแปรสำคัญๆ ในระบบสมดุลน้ำ และตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ
สัมประสิทธิ์การขาดน้ำใน CERES-Rice 3.5

pressure) ที่กระทบต่อกระบวนการทางสรีรวิทยา โดยลดการเจริญเติบโตของใบ ต้น จะเกิดขึ้นถ้าค่า WDF เริ่มลดต่ำกว่า 1.5 โดยที่

$$TURFAC = 0.67*WDF \quad (2)$$

น้ำที่รากดูดได้ทั้งหมด (potential or total root water uptake, TRWU) เป็นผลรวมของศักยภาพการดูดน้ำแต่ละชั้น (root water uptake, RWU(L)) ที่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นความยาวราก (root length density, RLV(L)) น้ำในดิน(soil water, SW(L)) และ ขีดจำกัดน้ำที่ดูดใช้ได้ (lower limit water content, LL(L)) ของแต่ละชั้นดิน(L) และความลึกของแต่ละชั้นดิน

ค่าน้ำในดินที่รากดูดได้สูงสุด (potential extracable soil water) คำนวณจากปริมาณน้ำทั้งหมด (total soil water, TSW) และระดับต่ำสุดของน้ำในดินที่พืชดูดใช้ได้ (lower limit of plant extractable soil water, TLL)

ปริมาณน้ำในชั้นดิน (soil water, SW(L)) หาได้จากปริมาณน้ำที่มีอยู่เดิมรวมกับปริมาณน้ำฝน และน้ำชลประทาน และหักออกด้วยปริมาณน้ำที่หายไปจากชั้นดินนั้นโดยการระเหย (evaporation) การดูดของราก (root water uptake) การซึมลงไปด้านล่าง (drainage หรือ percolation) ที่ขึ้นกับระดับ field saturation และ drained upper limit ของชั้นนั้นๆ และ จากน้ำไหลออกด้านบนผิวดิน (runoff) ที่คำนวณจากการดัดแปลงวิธีการ USDA Soil Conservation Service (SCS) curve number method (Ritchie, 1998) หรือควบคุมด้วยความสูงของคันนา

การระเหยทั้งหมดในพื้นที่ปลูกรายวันเป็นผลรวมของ การระเหยจากน้ำที่ท่วมขัง (flood water evaporation) ถ้ามีน้ำขัง และการระเหยจากผิวดิน (soil evaporation) ถ้าไม่มีน้ำขัง และการคายน้ำจากต้นข้าว (plant transpiration) (Singh *et al.*, 1998)

การระเหยจากแปลงปลูกทั้งหมดคำนวณจากศักยภาพการระเหย (potential evaporation, EO) ซึ่งขึ้นอยู่กับ อัตราการระเหยสมดุล (equilibrium evaporation rate, EEQ) ที่คำนวณโดยสมการที่ดัดแปลงจากสมการที่เสนอโดย Priestley-Taylor (1972) (อ้างโดย Ritchie, 1988) โดยที่มีสมมติฐานว่า ศักยภาพการระเหยน้ำเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานแสง :

$$EEQ = SOLRAD \times (4.88 \times 10\text{-}3 - 4.37 \times 10\text{-}3 \times ALBEDO) \times (TD+29) \quad (3)$$

โดยที่ SOLRAD คือ พลังงานแสงอาทิตย์รายวัน มีหน่วยเป็น MJ/ตร.ม./วัน

ALBEDO คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนพลังงานของพื้นที่ปลูก ขึ้นอยู่กับระยะเวลาการเจริญของพืช, ค่า Albedo ของดินหรือน้ำ และดัชนีพื้นที่ใบ

TD คือ อุณหภูมิเฉลี่ยกลางวัน $= 0.6 \times TEMPMX + 0.4 \times TEMTMN$

$$EO = EEQ \times ((1-TEMPMX-TEMPTH) \times .05 + 1.1) \quad (4)$$

โดยที่ TEMPMX = อุณหภูมิสูงสุด รายวัน

TEMPTH = 32.0 (สำหรับทุกพืช)

ศักยภาพการระเหยจากผิวดิน(potential soil evaporation, EOS) ขึ้นอยู่กับ EO และพื้นที่ใบ และ จำกัดการระเหยจริงจากผิวดิน (soil evaporation, ES) ที่ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่มีอยู่จริงที่ผิวดิน โดยที่มีการคำนวณการซึมขึ้น (upward flow) ของน้ำจากดินชั้นล่างไปสู่ดินชั้นบนด้วย (Ritchie, 1998)

ถ้าแปลงมีน้ำขัง จะมีการระเหยจากผิวน้ำ (flood evaporation, EF) แทนจากผิวดิน โดยขึ้นอยู่กับ EO และพื้นที่ใบ (Singh *et al.*, 1998) โดยมีเงื่อนไขว่า

ถ้า LAI ≤ 0.85 EF = EO*(1.0-0.45*LAI)

ถ้า LAI > 0.85 EF = EO/1.1*EXP(-0.60*LAI) (5)

การคายน้ำของพืชที่แท้จริง (transpiration หรือ plant evaporation, EP) ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่รากดูดได้ทั้งหมด (TRWU)และศักยภาพการคายน้ำของพืช (potential transpiration หรือ potential plant evaporation, EOP) ซึ่ง EOP ขึ้นอยู่กับศักยภาพการระเหยจากพื้นที่ปลูก (potential evaporation, EO) และพื้นที่ใบ (LAI) :

ถ้า LAI < 3 แล้ว EOP = (EO*(1.0-EXP(-LAI))*TRATIO)

ถ้า LAI ≥ 3 แล้ว EOP = EO*TRATIO (6)

โดย TRATIO คือค่าอัตราส่วนที่ปรับตามค่าตามความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งถ้าความเข้มข้นเท่ากับ 330 ppm ตามปกติ อัตราส่วนนี้ก็จะเท่ากับ 1.0

กรณีที่มีน้ำขัง ถ้าค่า EOP ที่คำนวณได้นี้รวมกับการระเหยจากผิวน้ำที่ขังในนา (EF) แล้วมากกว่า EO แล้ว กำหนดให้ EP = EO-EF หรือถ้าไม่มีน้ำขัง ก็คิดจากค่าการระเหยจากผิวดิน (ES) แทนจาก EF โดยที่ EP ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่รากพืชดูดได้ทั้งหมด (TRWU) และถ้า EOP น้อยกว่า TRWU แสดงว่ามีน้ำในดินเพียงพอ EP ก็จะเท่ากับ EOP แต่ถ้า EOP มากกว่า TRWU แล้ว EP ก็จะเท่ากับ TRWU

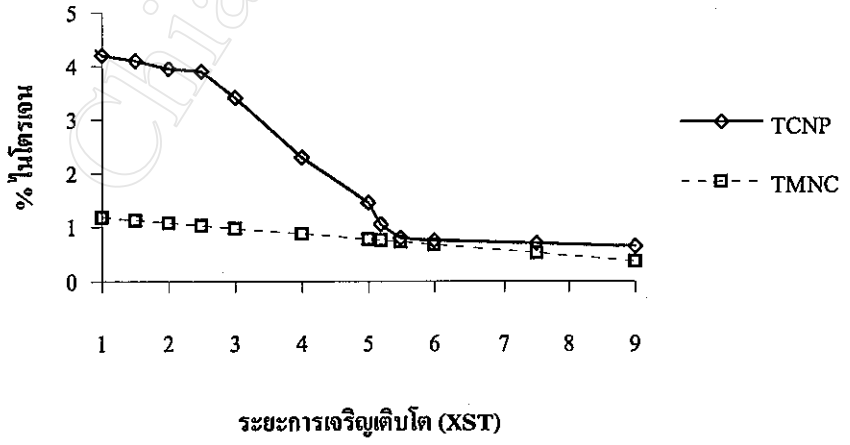
สำหรับการดูดน้ำของรากข้าวนั้น แบบจำลอง CERES-Rice มีการจำลองการเจริญเติบโตของรากที่สัมพันธ์กับการใช้น้ำ และความเครียดน้ำของข้าว โดยจำลองความหนาแน่นของความยาวราก (root length density) ของแต่ละชั้นดิน เพื่อบ่งชี้ศักยภาพของอัตราการดูดซึม (potential uptake rates) ความลึกของรากจะเพิ่มขึ้นทุกๆวัน เป็นสัดส่วนกับอัตราการเจริญเติบโตของต้นข้าว การแบ่งสารสังเคราะห์ไปสร้างรากเป็นอัตราส่วนคงที่ของการสร้างสารสังเคราะห์ และถูกจำกัดโดยน้ำ

ในดิน โดย sink ของราก นั้นไม่จำกัด และไม่มีการกำหนดการเจริญของรากสูงสุด (Ritchie *et al.*, 1998)

2. การจำลองสมดุลไนโตรเจน (nitrogen balance model)

แบบจำลองสมดุลไนโตรเจนที่อยู่ภายใต้แบบจำลอง CERES –Rice มีหน้าที่ประเมินระดับความเครียดเนื่องจากการขาดไนโตรเจนของข้าว ที่มีผลกระทบต่อข้าวต่างกันตามกระบวนการทางสรีรวิทยา โดยมีผลกระทบต่อการสังเคราะห์แสง การเจริญเติบโตที่มีการขยายขนาดใบ การแก่ของใบ และการถ่ายเทสารสังเคราะห์ และปริมาณไนโตรเจนในเมล็ด โดยทั่วไปเมื่อพืชเริ่มขาดไนโตรเจน การเพิ่มพื้นที่ใบจะถูกระทบรุนแรงกว่า การสังเคราะห์แสง (Jones *et al.*, 1988)

ความเครียดเนื่องจากการขาดไนโตรเจนได้จากความแตกต่างระหว่างความต้องการไนโตรเจน (crop nitrogen demand) กับปริมาณไนโตรเจนที่พืชจะนำไปใช้ได้ (availble nitrogen) โดยที่ความต้องการไนโตรเจนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นวิกฤติของไนโตรเจน (critcal N concentration, TCNP) ที่เป็นความเข้มข้นระดับต่ำสุดที่การเจริญเติบโตสูงสุดจะเกิดขึ้น และความเข้มข้นต่ำสุด (minimum N concentration, TMNC) ที่เป็นความเข้มข้นไนโตรเจนระดับต่ำที่สุดที่การเจริญเติบโตเกิดขึ้นได้ (Godwin and Singh, 1998) ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนวิกฤติ และเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนต่ำสุด กับระยะการเจริญเติบโต ได้บรรจุไว้ในโปรแกรม CERES-Rice 3.5 (ภาพ 2)



ภาพ 2 เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนที่ความเข้มข้นวิกฤติ (TCNP) และ ที่ความเข้มข้นต่ำสุด (TMNC) ได้จากสมการแบบจำลอง CERES-Rice 3.5 (Singh *et al.*, 1988)

N factor (NFAC) เป็นดัชนีบอกระดับการขาดไนโตรเจน (N deficiency) ซึ่งใช้ในการจำลองอิทธิพลของการขาดไนโตรเจนต่อกระบวนการเจริญเติบโต คำนวณได้จาก

$$NFAC=1.0-(TCNP-TANC)/(TCNP-TMNC) \quad (7)$$

โดยที่ TANC คือความเข้มข้นไนโตรเจนที่มีอยู่ในต้นข้าว(actual N concentration)

TCNP คือความเข้มข้นวิกฤติ

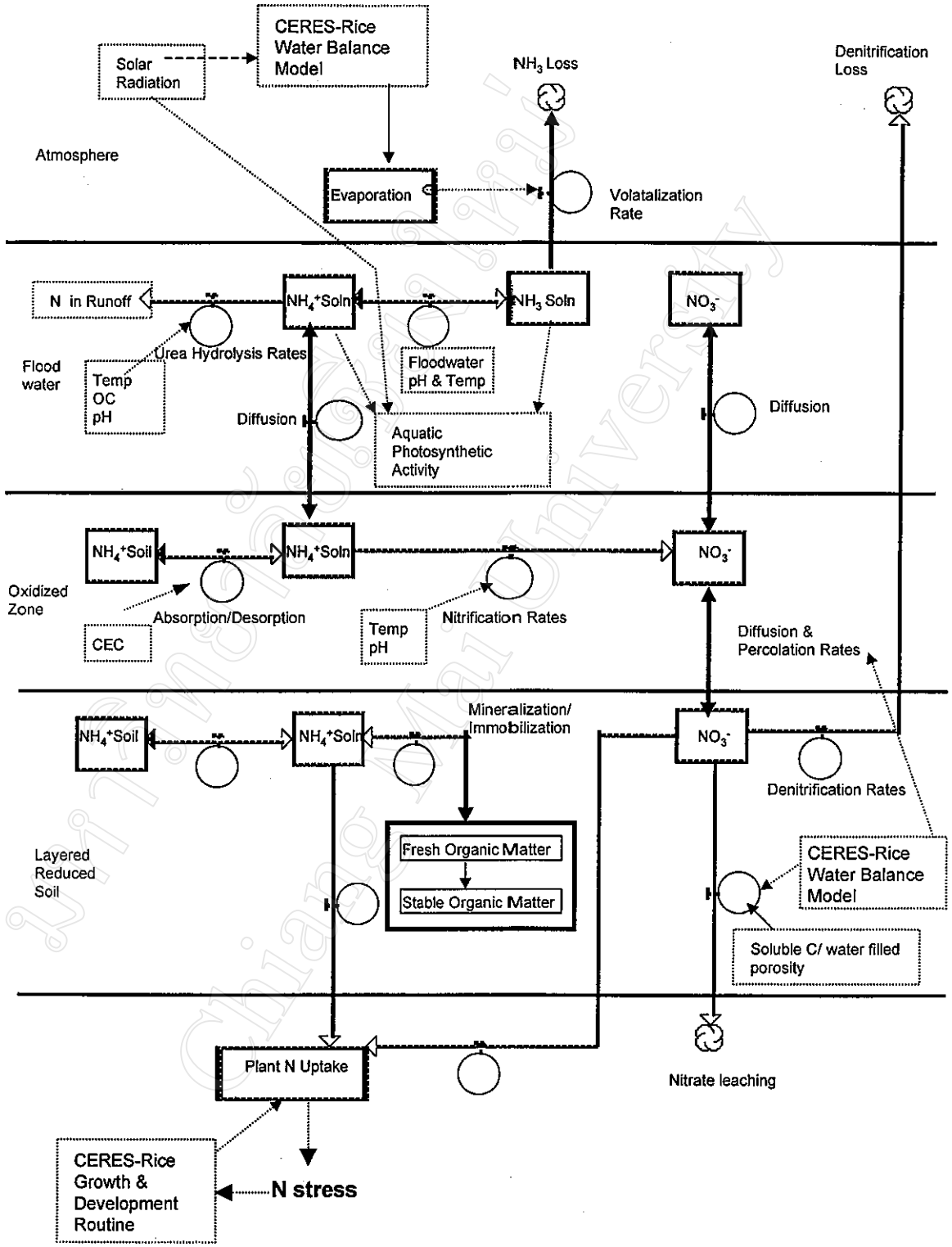
TMNC คือความเข้มข้นต่ำสุด

แบบจำลองไนโตรเจนของ CERES-Rice คำนวณไนโตรเจนในต้นข้าวที่ระยะต่างๆ จากสมดุลไนโตรเจนที่ประกอบด้วยกระบวนการต่าง ๆ (ตาราง 1) ตามสภาพการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ขึ้นอยู่กับสภาพทางเคมีของชั้นดินที่น้ำท่วมขังกับชั้นบรรยากาศ ได้แก่ ชั้น Layered reduced soil ชั้น oxidized zone ชั้นน้ำท่วมขัง (flood water) และชั้นบรรยากาศ (Godwin and Singh, 1998) (ภาพ 3)

การจำลองสมดุลไนโตรเจนสัมพันธ์และขึ้นอยู่กับการจำลองสมดุลน้ำในดิน ได้แก่ การเกิดปฏิกริยาทางเคมีต่างๆ ที่เกิดในสภาพน้ำขัง ที่จำกัดการแลกเปลี่ยนออกซิเจนกับชั้นดิน และสร้างสภาพแวดล้อมสำหรับจุลินทรีย์หลายชนิดบริเวณรอยต่อของดินกับบรรยากาศ รวมถึงการที่น้ำในดินมีผลต่อ การเคลื่อนย้ายไนโตรเจน โดยการแพร่กระจาย (diffusion) และการเจริญของพืชที่เกี่ยวกับการดูดซึมไนโตรเจนไปใช้ในส่วนต่าง ๆ (ภาพ 3) (Godwin and Singh, 1998)

ตาราง 1 กระบวนการในแบบจำลอง CERES-N และปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง (ดัดแปลงจาก Bowen and Baethgen, 1998)

กระบวนการ ที่จำลอง	ปัจจัยหลักที่มีผลต่อกระบวนการ
Mineralization/immobilization	ดิน อุณหภูมิ น้ำในดิน อัตราส่วน C/N
Nitrification	อุณหภูมิดิน น้ำในดิน pH ดิน ความเข้มข้น NH_4^+
Denitrification	อุณหภูมิดิน น้ำในดิน pH ดิน คาร์บอนของดิน
NO_3^- leaching	การระบายน้ำ
NH_3 volatilization	อุณหภูมิดิน pH ดิน การระเหยจากพื้นผิว ความเข้มข้นNH_3
Urea hydrolysis	อุณหภูมิดิน น้ำในดิน pH ดิน และ คาร์บอนในดิน
Uptake	น้ำในดิน inorganic N ความต้องการของพืช ความหนาแน่นความยาวราก



ภาพ 3 แผนภาพแบบจำลองไนโตรเจน (ระบบข้าวนา) (ดัดแปลงจากGodwin and Singh, 1998)

ในระบบการจำลองของ CERES-Rice ข้าวได้รับไนโตรเจนจากอินทรียวัตถุ (organic N) โดยกระบวนการ mineralization ที่ให้ NH_4^+-N ที่เป็น microbial mineralization ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความชื้น pH และ ความเข้มข้นของเกลือ (Houng, 1980) และจากกระบวนการ nitrification ที่เกิดในสภาพน้ำไม่ขังที่ให้ NO_3^- จากไนโตรเจนที่ตกค้าง (initial residue N) และที่เป็นแอมโมเนียมและไนเตรตอิออน จาก ยูเรียของดิน (soil urea) และ จาก Algal N จากปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ (organic added N)

การสูญเสียไนโตรเจนนั้น ประกอบด้วย การชะล้างไปกับน้ำลงใต้ชั้นราก (leached NO_3^-) การสูญเสียไปกับในน้ำที่ไหลออกไปจากแปลง (runoff) และจากกระบวนการ denitrification และ การระเหยไปในรูปก๊าซแอมโมเนีย (ammonia volatilization)

กระบวนการ denitrification เกิดในสภาพดินขาดอากาศ (anarobic) ที่จุลินทรีย์ในดินสามารถออกซิไดซ์ สารคาร์โบไฮเดรต เป็น CO_2 และ H_2O โดยใช้ไนเตรต เป็นตัวรับอีเล็กตรอน และเปลี่ยนเป็นไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และ ก๊าซไนโตรเจน (N_2) ดังสมการ: (Mikkelsen *et al.*,1993)

$$5(CH_2O)+4NO_3^-+4H^+ \longrightarrow 2N_2+5CO_2+7H_2O \qquad (8)$$

การสูญเสียไนโตรเจนในรูปก๊าซแอมโมเนีย (ammonia volatilization) เกิดขึ้นในสภาพน้ำขัง โดยเฉพาะเมื่อ pH สูง และเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของความดัน (partial pressure) ระหว่างน้ำกับอากาศ โดยสมการ (9) (Mikkelsen *et al.*,1993)

$$NH4+ \longleftrightarrow NH_3(aq) + H^+ \rightarrow NH_3(air) \qquad (9)$$

ในแบบจำลองนั้น มีตัวแปรนำเข้าทั้งทางดิน ภูมิอากาศ และการจัดการที่เกี่ยวข้องกับสมดุลไนโตรเจน ปฏิกิริยา nitrification urea hydrolysis และ volatilization สัมพันธ์กับ ตัวแปรอุณหภูมิดินและน้ำที่สัมพันธ์กับตัวแปรนำเข้าที่ได้แก่อุณหภูมิอากาศ และ pH และค่า CEC ในชั้นดินที่สัมพันธ์กับ ammonium diffusion ในกระบวนการ absorption/desorption ในชั้น oxidized zone (ภาพ 3)

นอกจากนั้นยังมีตัวแปรนำเข้าอื่นที่มีผลต่อความเป็นประโยชน์และการใช้ไนโตรเจนของข้าวที่ได้แก่ ความหนาแน่นรวมของดิน (bulk density) ที่ใช้คำนวณความเข้มข้นของไนโตรเจนในดิน และคำนวณผลการทำเทือก (puddling) ต่อความหนาแน่นรวมที่มีผลจริง (effective bulk density) และข้อมูลวันใส่ปุ๋ย ชนิด ปริมาณของไนโตรเจน ความลึกและระดับหรือวิธีของการใส่ (degree of incorporation) แต่แบบจำลองไม่ได้จำลองการระเหยของ แอมโมเนียมในสภาพดินไร่

3. การจำลองอิทธิพลปักดำกับหว่านน้ำตม

แบบจำลอง CERES-Rice 3.5 มีระบบที่การจำลองอิทธิพลการปักดำ ที่จำลองผลของการปักดำต่อระยะพัฒนาการและการเจริญเติบโต โดยผลกระทบของการปักดำต่อระยะพัฒนาการนั้นคือการยืดค่า P1 ที่เป็นค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม ที่เป็นระยะเวลาตั้งแต่ใบโผล่พ้นดิน (emergence) จนถึงสิ้นสุดระยะ Juvenile ซึ่งการปักดำทำให้ค่า P1 ยืดระยะเวลาเป็นค่า TPHEN โดยสมการ :

$$TPHEN = P1 + 25.0 + 0.4*SUMDTT \quad (10)$$

โดยที่ P1 คือสัมประสิทธิ์พัฒนาการ P1 ของข้าวแต่ละพันธุ์

$$SUMDTT = (ATEMP-TBASE)*(TAGE-1.0) - P8 - P9 \quad (11)$$

โดยที่ ATEMP คืออุณหภูมิเฉลี่ยขณะที่กล้าเจริญเติบโต

TBASE = 9.0

TAGE คืออายุกล้า (วัน)

P8 คือ ระยะตั้งแต่เริ่มเพาะเมล็ดจนถึงรากงอก :

$$P8 = 150.0*EXP(-0.055*TEMPM) \quad (12)$$

โดยที่ TEMPM คือ อุณหภูมิเฉลี่ยวันที่เพาะเมล็ด :

$$TEMPM = (\text{อุณหภูมิสูงสุด} + \text{อุณหภูมิต่ำสุด})*0.5 \quad (13)$$

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

P9 คือระยะตั้งแต่รากงอกจนถึงใบโผล่พ้นผิวดิน แบบจำลองกำหนดให้ขึ้นอยู่ความลึกเมล็ดที่ปลูกอย่างเดียว

$$P9 = 10.0*SDEPTH + 20.0 \quad (14)$$

โดยที่ SDEPTH คือความลึกของเมล็ดที่ปลูก (ซม.)

4. การจำลองอิทธิพลของความหนาแน่นประชากร

แบบจำลองมีตัวแปรจำนวนความหนาแน่นประชากรข้าว (PLANTS) เป็นข้อมูลนำเข้าในการจัดการ ที่สำคัญ เนื่องจาก โดยพื้นฐานการคำนวณองค์ประกอบต่างๆ ของพืชในแบบจำลองเริ่มคำนวณจากฐานต่อ 1 ต้น ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นหน่วยต่อพื้นที่ ภายหลัง ตัวอย่างเช่น

ดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) :

LAI = (MPLA+TPLA)*PLANTS*0.0001 (15)

โดย MPLA และ TPLA คือพื้นที่ใบของต้นแม่ และหน่อ ตามลำดับ

น้ำหนักรวมทั้งต้น (TOTWT)

TOTWT = (BIOMAS+RTWT)*PLANTS*10.0 (16)

โดยที่ BIOMASS คือรวมส่วนที่เหนือดิน

RTWT คือน้ำหนักรากต่อพื้นที่ :

ความต้องการไนโตรเจนต่อพื้นที่ (ANDEM):

ANDEM = NDEM*PLANTS*10.0 (17)

จำนวนเมล็ด/ตร.ม.

GPSM = GRNWT / SKERWT*PLANTS (18)

ผลผลิต/เฮกตาร์:

DYIELD = GRNWT*10.0*PLANTS (19)

นอกจากนั้น ความหนาแน่นประชากร (PLANTS) มีส่วนในการคำนวณค่า การสังเคราะห์แสงศักยภาพ มีหน่วยเป็นน้ำหนัก/ต้น/วัน (PCARB) จากสมการ :

PCARB = 6.85*PAR**0.65/PLANTS**0.975*(1-AMAX1(Y1,Y2)) (20)

โดยที่ PAR = 0.5*SRAD (SRAD คือ พลังงานแสงอาทิตย์)

Y1 = EXP(-0.625*LAI)

Y2 = EXP(-TL*LAI)

TL = 0.92*EXP(-0.65*ROWSPC) (ROWSPC คือระยะห่างระหว่างแถว)

วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาประกอบด้วยงานวิจัยสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นการทดลองในแปลงปลูก และส่วนที่เป็นการจำลองงานทดลองในแปลงปลูก

1. การทดลองในแปลงปลูก (Field experiments)

1.1 การตอบสนองของข้าว 2 พันธุ์ ต่อระดับปุ๋ยไนโตรเจนและสภาพการให้น้ำ

วางแผนการทดลองแบบ Split-split plot จำนวน 3 ซ้ำ โดยมี main plot คือการจัดการน้ำแบบอาศัยน้ำฝน กับให้น้ำชลประทาน ซึ่งควบคุมให้มีระดับน้ำสูง 5-10 ซม. เหนือผิวดินตลอดฤดูปลูก subplot เป็นพันธุ์ข้าว 2 พันธุ์คือ ขาวดอกมะลิ 105 และ ชัยนาท 1 และ sub-subplot เป็น อัตราปุ๋ยไนโตรเจน 4 ระดับคือ 0, 45, 90 และ 135 กก.N/เฮกตาร์ สำหรับงานทดลองในปี 2541 และอัตราปุ๋ยไนโตรเจน 4 ระดับคือ 0, 70, 140 และ 210 กก.N/เฮกตาร์ สำหรับปี 2542 โดยการใส่ไนโตรเจนทำโดยแบ่งใส่สองครั้งเท่ากัน คือครั้งแรกใช้ปุ๋ยในรูปแอมโมเนียซัลเฟต ใส่ผสมกับดินก่อนปักดำ ร่วมกับปุ๋ยฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม 50 กก.P_2O_5 และ K_2O/เฮกตาร์ตามลำดับ และใส่ครั้งที่สองระยะเกิดรวงโดยใช้ไนโตรเจนในรูปยูเรียและใส่โดยวิธีการหว่าน

แปลงทดลองมีขนาดแปลงย่อย 4 x 8 เมตร ทำการปลูกโดยวิธีปักดำที่ระยะระหว่างกอ 25x25 ซม. ใช้กล้า 3 ต้น/กอ และมีการควบคุมโรค แมลง และวัชพืชอย่างเหมาะสม สถานที่ทำการทดลองคือสถานีวิจัยและศูนย์ฝึกอบรมการเกษตรแม่เหียะ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

1.2 การตอบสนองของข้าว 4 พันธุ์ต่อวิธีการปลูก และอัตราเมล็ดพันธุ์

วางแผนการทดลองแบบ Split plot จำนวน 3 ซ้ำ กำหนดให้ main plot เป็นพันธุ์ข้าว 4 พันธุ์ที่ได้แก่ ขาวดอกมะลิ 105 สุพรรณบุรี 60 ชัยนาท 1 และ ก.วก. 1 และ subplot มี 4 ระดับเป็นวิธีการปลูกแบบปักดำ (ระยะปลูก 25 x 25 ซม. กล้า 3 ต้น/กอ) และการปลูกแบบหว่านน้ำตมที่ใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ 62.5, 125 และ 187.5 กก./เฮกตาร์ สำหรับการทดลองในปี 2541 และอัตราเมล็ดพันธุ์ 31.25, 125.0 และ 281.25 กก./เฮกตาร์ สำหรับการทดลองในปี 2542 โดยมีการจัดการน้ำปุ๋ย และการจัดการอื่นๆ อย่างเหมาะสม ดำเนินการทดลองที่แปลงทดลองของศูนย์วิจัยเพื่อเพิ่มผลผลิตทางเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยในปีแรกหว่านเมล็ดข้าวงอกเมื่อวันที่ 24 กรกฎาคม 2541 และปักดำเมื่อวันที่ 18 สิงหาคม 2541 ในปีที่สอง หว่านเมล็ดข้าวงอกเมื่อ

10 สิงหาคม 2542 และปักดำเมื่อ 6 กันยายน 2542 โดยมีขนาดแปลงย่อยเท่ากับ 4 x 6 เมตร ใช้กล้าอายุ 30 วันเท่ากันทั้งสองปีที่ทำการทดลอง ยกเว้นข้าว ก.วก.1 ที่ใช้อายุกล้า 20 วัน

1.3 การบันทึกข้อมูล

การบันทึกข้อมูล ทำตามแบบ IBSNAT (1988) โดยการบันทึกระยะพัฒนาการ (phenological development) ที่ได้แก่ วันเกิดรวง วันออกดอก50 เปอร์เซ็นต์ และวันสุกแก่ 80 เปอร์เซ็นต์ และวัดข้อมูลการเจริญเติบโต ผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิต ที่ได้แก่การเปลี่ยนแปลง น้ำหนักต้น น้ำหนักใบ น้ำหนักรวง โดยสุ่มวัดจากต้นข้าวจำนวน 2 กอทุก ๆ สองสัปดาห์ตั้งแต่ปลูกจนถึงสุกแก่ น้ำหนักเมล็ดดี จำนวนหน่อ และ จำนวนรวง/ตร.ม. เปอร์เซ็นต์เมล็ดดีและเมล็ดลีบ ขณะสุกแก่

การบันทึกข้อมูลสภาพแวดล้อมงานทดลอง ได้แก่ข้อมูลชุดดิน และวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในดิน และอินทรียวัตถุในดินก่อนปลูก และข้อมูลภูมิอากาศรายวันได้แก่พลังงานแสงอาทิตย์ (solar radiation) อุณหภูมิอากาศสูงสุดและต่ำสุด และปริมาณน้ำฝน ที่วัดและบันทึกโดยเครื่องวัดภูมิอากาศอัตโนมัติ (data logger) รวมถึงการบันทึกสภาพการเจริญเติบโตของข้าว ได้แก่ อาการผิดปกติ เช่นการขาดน้ำ หรือน้ำท่วม การถูกทำลายโดย โรคแมลง และศัตรูข้าวอื่นๆ เช่นนก หรือการหักล้ม เป็นต้น

2. การจำลองงานทดลองในแปลงปลูกด้วย CERES-Rice 3.5

การจำลองงานทดลองในแปลง โดยมีการเตรียมไฟล์ และมีขั้นตอนต่าง ๆ ในการจำลอง CERES-Rice 3.5 ใน DSSAT 3.5 ดังต่อไปนี้

1) การสร้างไฟล์รายละเอียดของการทดลอง (Experiment Details File, FILEX) ที่บรรจุข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ ที่ต้องการจำลอง และรวมถึงรหัส สถานีวัดข้อมูลอากาศ รหัสชุดดิน และรหัสพันธุ์ข้าว ที่ใช้จำลอง ซึ่งจะเชื่อมโยงไปยังไฟล์ข้อมูลนำเข้า ที่เตรียมไว้ ได้แก่ ไฟล์ที่บันทึกข้อมูลอากาศขณะที่ทำการทดลอง (*.WTH) และไฟล์ข้อมูลดินที่ชื่อ SOIL.SOL ที่บรรจุชุดดินของแปลงที่ทำการทดลอง และไฟล์ข้อมูลทางพันธุกรรม ใช้รูปแบบการสร้าง FILEX ตามที่ระบุใน DSSAT3.0 Vol.2-1 (Jones *et al.*, 1994) และ DSSAT 3.5 (Hoogenboom *et al.*,1999)

การจำลองการวิธีให้น้ำชลประทาน ที่เป็นปัจจัยการจัดการในการทดลองที่ 1 กำหนดในการจัดการน้ำของ FILEX ให้เป็น Automatic Irrigation ที่แบบจำลองจะกำหนดให้น้ำในแต่ละวัน

ในปริมาณที่รวมกับปริมาณน้ำฝนในแต่ละวันแล้วทำให้ค่าการระเหยทั้งหมด (total evaporation) เท่ากับศักยภาพการระเหย (potential evaporation, ET) โดยกำหนดให้มีความลึกน้ำ (flood depth) 5 ซม. และความสูงของคันนา (bund height) เท่ากับ 10 ซม.

2) การเตรียมชื่อพันธุ์และค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของพันธุ์ข้าวที่ใช้ทำการทดลองในไฟล์สัมประสิทธิ์พันธุกรรมของข้าว (Genotype Coefficient File) ที่บรรจุอยู่ใน DSSAT3.5 สำหรับแบบจำลอง RICER980 คือ RICER980.CUL โดยใช้สัมประสิทธิ์พันธุกรรมของข้าวที่รายงานโดย จิรวัฒน์ (2544)

3) เตรียมข้อมูลนำเข้า อื่นๆ ที่ได้แก่ ไฟล์ข้อมูลภูมิอากาศในช่วงเวลาทีทำการทดลอง ข้อมูลชุดดินที่ทำการทดลองที่บรรจุใน Soil.sol โดยดึงชื่อชุดดินที่ต้องการจากระบบ DLDSIS ที่บรรจุชุดดินประเทศไทย ที่ได้ติดตั้งในระบบ DSSAT และอาจมีการปรับข้อมูลชุดดินด้วยข้อมูลเปอร์เซ็นต์อินทรียวัตถุในดิน ข้อมูลไนโตรเจนในดินก่อนปลูกที่วิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ และบรรจุใน FILEX โดยมีรูปแบบข้อมูลตาม DSSAT3.0 Vol.2-1 (Jones *et al.*, 1994) และ DSSAT3.5 (Hoogenboom *et al.*,1999)

4) เปรียบเทียบผลการจำลอง รูปแบบการตอบสนอง เงื่อนไข และข้อจำกัดของการใช้แบบจำลอง สำหรับแต่ละปัจจัยที่ศึกษา โดยตรวจสอบผลลัพธ์การจำลองที่บันทึกอยู่ในไฟล์ต่างๆ ที่ได้แก่ OVERVIEW.OUT GROWTH.OUT WATER.OUT WBAL.OUT NITROGEN.OUT และ NBAL.OUT

การทดสอบแบบจำลองกับตัวแปรต่างๆ นอกเหนือจากที่มีในงานทดลองแปลงปลูก

ทำการทดสอบแบบจำลองด้วยการทดสอบสมการที่ได้จาก ตัวโปรแกรม (source code) ที่เป็นภาษาฟอร์แทรน (FOTRAN) ในแบบจำลองโดยตรง และด้วยการทดสอบผ่านทางแบบจำลองด้วยการสร้าง FILEX ใหม่หรือเพิ่มเติมระดับปัจจัยในFILEX ที่ใช้จำลองงานทดลอง ได้แก่ ทดสอบตัวแปรการจัดการที่เกี่ยวข้องกับการจัดการน้ำ ปุ๋ยไนโตรเจน วิธีการปลูกและอัตราเมล็ดพันธุ์ เพื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับผลที่วัดได้จากการจำลองงานทดลองปลูกจริง

ผลการศึกษา

1. ผลการทดลองและการจำลองการให้น้ำและไนโตรเจน

การศึกษาอิทธิพลของสภาพการให้น้ำ และระดับปุ๋ยไนโตรเจน ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว ศึกษาจากงานทดลองระดับปุ๋ยไนโตรเจนต่างๆ (0, 45, 90, และ 135 กก.N/เฮกตาร์ ในปี 2541 และ 0,70, 140, และ 210 กก.N/เฮกตาร์ ในปี 2542) ในสภาพอาศัยน้ำฝนและให้น้ำชลประทาน กับการตอบสนองของข้าวสองพันธุ์ (ขาวดอกมะลิ105 และชัยนาท 1) สามารถวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยการให้น้ำและการให้ปุ๋ยไนโตรเจน ได้ดังนี้

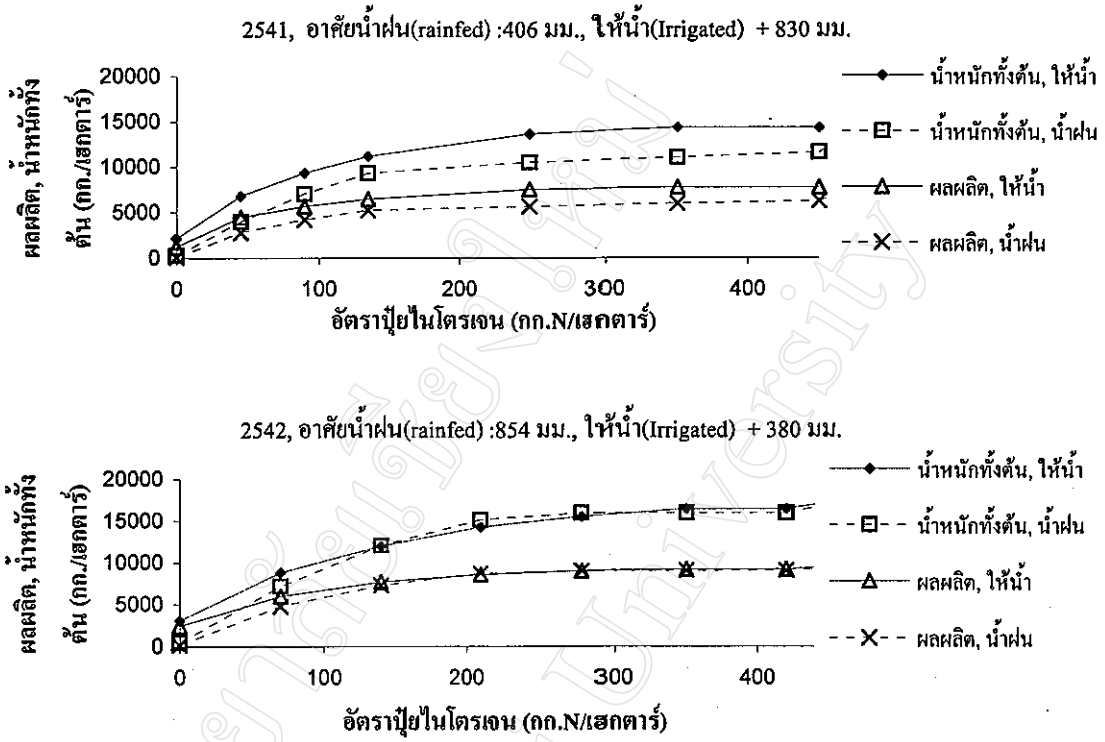
1.1 การให้น้ำ

การเปรียบเทียบผลผลิตการจำลองระหว่างแปลงอาศัยน้ำฝนกับแปลงที่ให้น้ำ ตามสภาพการทดลองที่กำหนด พบว่าในปี 2541 ผลผลิตในแปลงที่ให้น้ำชลประทานมีมากกว่าแปลงที่อาศัยน้ำฝนทุกระดับปุ๋ยไนโตรเจน แสดงให้เห็นว่าปริมาณฝนในฤดูปลูกในปี 2541 ที่มีปริมาณน้ำฝน 406 มม.นั้นเป็นระดับที่ไม่เพียงพอ (ภาพ 4) โดยต้องให้ปริมาณน้ำที่ให้เท่ากับ 830 มม. ขณะที่ในปี 2542 ผลผลิตระหว่างแปลงให้น้ำกับแปลงอาศัยน้ำฝนนั้นไม่แตกต่างกันมากนัก ปริมาณน้ำฝนที่ข้าวได้รับน้ำฝนที่มีปริมาณฝน 850 มม นั้นน่าจะเพียงพอสำหรับการเจริญเติบโต (ภาพ 4) โดยอาจไม่จำเป็นต้องมีการให้น้ำเพิ่ม

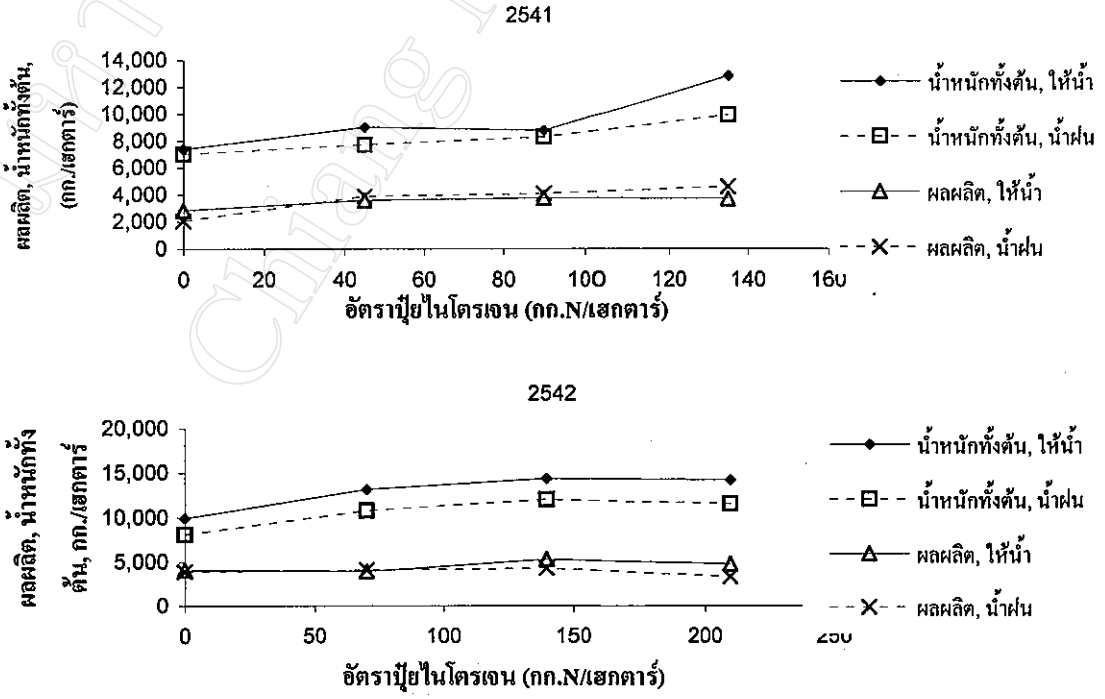
อย่างไรก็ตาม พบว่าในปี 2541 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างผลผลิต และน้ำหนักทั้งต้นที่วัดได้จริงจากแปลงทดลอง ของแปลงที่ให้น้ำชลประทาน และที่อาศัยน้ำฝน (ภาพ 5 และตารางภาคผนวก 1) ข้าวที่ปลูกในแปลงที่อาศัยน้ำฝนที่มีปริมาณฝนเพียง 406 มม. ที่ไม่น่าจะพอสำหรับการเจริญของข้าว ดังผลที่ได้จากแบบจำลอง กลับให้ผลผลิตไม่แตกต่างกับข้าวที่ให้น้ำเต็มที่ (ปริมาณน้ำฝนที่ข้าวควรจะได้ อยู่ในช่วง 800-1,000 มม. (De Datta, 1981)) เป็นเพราะการควบคุมสภาพแปลงทดลองไม่ดีพอ ทำให้ได้แปลงที่กำหนดให้อาศัยน้ำฝนอย่างเดียวได้รับน้ำที่รั่วซึมจากแปลงที่กำหนดให้น้ำชลประทาน

ขณะที่ในปี 2542 มีการควบคุมน้ำระหว่างแปลงดีขึ้น แต่ปริมาณน้ำฝนในฤดูปลูกสูงถึง 850 มม. ซึ่งมากพอจนทำให้ผลผลิตที่วัดได้จากแปลงอาศัยน้ำฝนไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากค่าที่วัดได้ในแปลงที่ให้น้ำชลประทาน แม้ว่าน้ำหนักทั้งต้นที่วัดได้จะต่ำกว่าเล็กน้อยในแปลงอาศัยน้ำฝน (ภาพ 5 และตารางภาคผนวก 1) ซึ่ง สอดคล้องกับผลการจำลอง (ภาพ 4)

การวิเคราะห์ทางสถิติของผลการทดลองจากแปลงทดลอง แม้ว่าไม่แสดงอิทธิพลของสภาพการให้น้ำแต่ผลผลิต แต่แสดงความแตกต่างของผลผลิตอย่างนัยสำคัญจากอิทธิพลร่วมหรือ



ภาพ 4 ผลผลิตและน้ำหนักทั้งต้น(ค่าจำลอง)แปลงน้ำฝนกับแปลงให้น้ำ ที่อัตราปุ๋ยไนโตรเจนต่างๆ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ม.เชียงใหม่ 2541-42

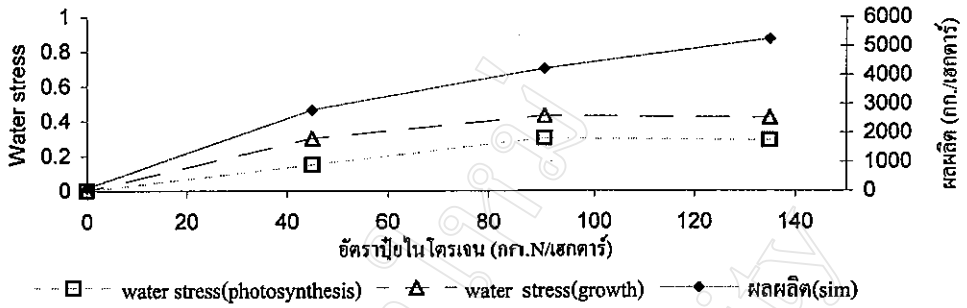


ภาพ 5 ผลผลิตและน้ำหนักทั้งต้น (ค่าสังเกต) แปลงน้ำฝนกับแปลงให้น้ำ ที่อัตราปุ๋ยไนโตรเจนต่างๆ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ม.เชียงใหม่ ปี 2541-42

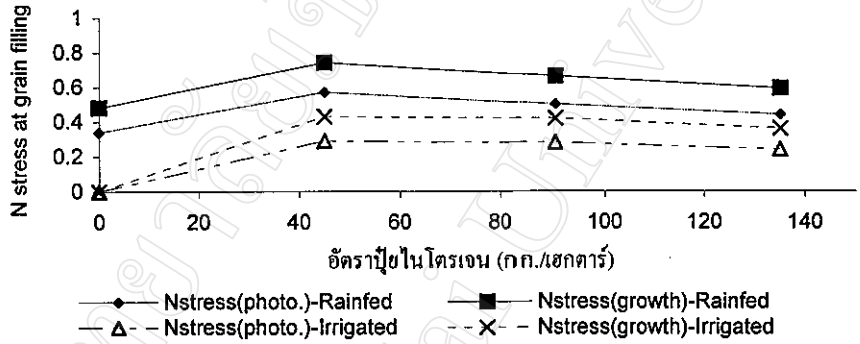
ปฏิกิริยาสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างสภาพการให้น้ำ พันธุ์และอัตราปุ๋ยในโตรเจน ทั้งในปี 2541 และ 2542 (ตารางภาคผนวก 1) และในปี 2542 พบว่ามีความแตกต่างระหว่างน้ำหนักทั้งต้นและจำนวนรวง/ตร.ม. ของแปลงที่ให้น้ำชลประทานกับแปลงที่ไม่ให้น้ำ (ตารางภาคผนวก 1) และ พบว่าเปอร์เซ็นต์เมล็ดลีบของข้าวที่ปลูกในสภาพอาศัยน้ำฝนมีแนวโน้มที่จะน้อยกว่าข้าวที่ปลูกโดยการให้น้ำชลประทาน โดยจำนวนรวงก็น้อยกว่า ขณะที่จำนวนดอกย่อย/รวงและน้ำหนัก 100 เมล็ด ไม่แตกต่างกัน (ตารางภาคผนวก 2 และ 3) เป็นไปได้ว่าข้าวที่ได้รับน้ำชลประทานให้การแตกกอ และให้จำนวนดอกย่อย/พื้นที่มากกว่า จึงมีการแข่งขันของการสะสมอาหารไปยังเมล็ดมากกว่า ทำให้โอกาสการเกิดเมล็ดลีบจะมีมาก เนื่องจาก source ที่จำกัด (Matsushima, 1970)

การวิเคราะห์อิทธิพลการให้น้ำต่อผลผลิตด้วยการใช้แบบจำลองนั้น ไม่ได้วิเคราะห์จากความแตกต่างขององค์ประกอบผลผลิต อย่างข้างต้น แต่ทำได้โดยการตรวจสอบค่าความเครียดทั้งจากการขาดน้ำ (water stress) และการขาดไนโตรเจน (nitrogen stress) ของแต่ละระยะการเจริญเติบโตที่แสดงในไฟล์สรุปผล OVERVIEW.OUT และไฟล์การเจริญเติบโตรายวัน GROWTH.OUT ซึ่งความเครียดจากทั้งสองปัจจัยยังแบ่งออกเป็น 2 ระดับคือความเครียดที่กระทบต่อการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) และความเครียดที่กระทบต่อการเจริญเติบโต (growth) ดังได้อธิบายในสมการ 1 และ 2 พบว่าในปี 2541 ปริมาณน้ำฝน 406 มม. และมีความแตกต่างของผลผลิตจากการจำลองระหว่างแปลงที่ให้น้ำชลประทานกับแปลงอาศัยน้ำฝน ข้าวมีความเครียดน้ำเกิดขึ้น โดยสัมประสิทธิ์ความเครียดน้ำ (water stress) > 0 เป็นความเครียดที่มีผลต่อการสังเคราะห์แสงและมีผลต่อการเจริญเติบโต เฉพาะระยะสะสมน้ำหนักเมล็ดเท่านั้น โดยความเครียดน้ำที่ระยะนี้ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราปุ๋ยไนโตรเจน เช่นเดียวกับผลผลิต (ภาพ 6) และยังพบว่า ความเครียดไนโตรเจน (N stress) ในระยะสะสมน้ำหนักเมล็ดทั้งความเครียดไนโตรเจนต่อการสังเคราะห์แสงและความเครียดต่อการเจริญเติบโต ของแปลงอาศัยน้ำฝนมีมากกว่าแปลงให้น้ำ ทุกอัตราปุ๋ยไนโตรเจน (ภาพ 7)

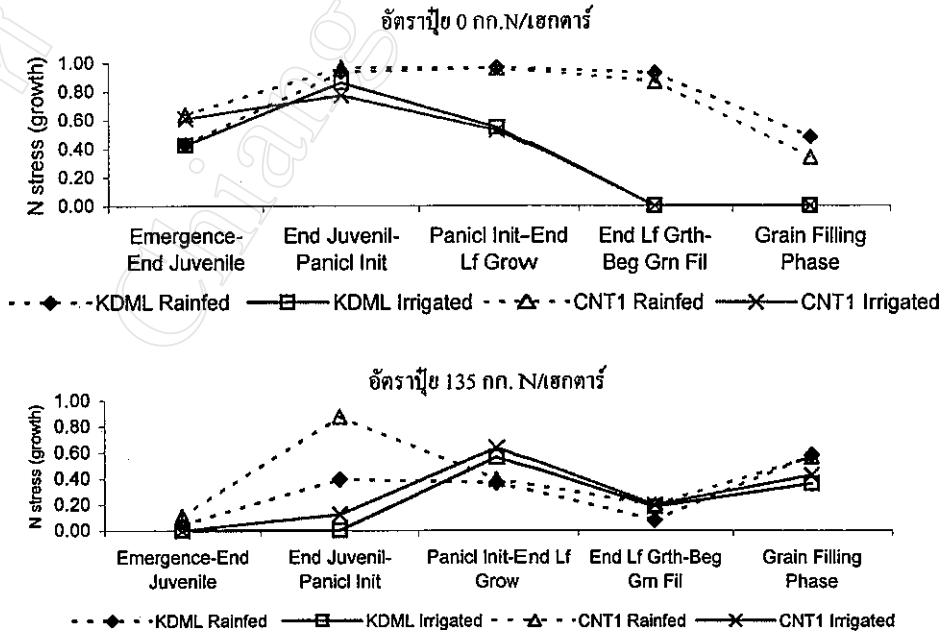
การศึกษาความเครียดไนโตรเจนของข้าวขาวดอกมะลิ 105 และชัยนาท 1 ระหว่างแปลงที่ให้น้ำชลประทานกับที่อาศัยน้ำฝนแต่ละระยะการเจริญเติบโต จากผลการจำลอง (ภาพ 8) พบว่า ที่ระดับปุ๋ย 0 กก.N/เฮกตาร์ ข้าวที่อาศัยน้ำฝนมีความเครียดไนโตรเจนจนถึงระดับเกือบถึงสูงสุด (1.0) เป็นระยะเวลายาวนานจนถึงระยะเริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ด ทำให้แทบไม่ได้ผลผลิตเลย (ภาพ 4) และการใช้น้ำในช่วงหลังจึงน้อย ความเครียดจึงลดลง ขณะที่ข้าวในแปลงให้น้ำมีความเครียดน้ำสูงในระยะแรกเช่นกันแต่ความเครียดลดลงเร็วกว่า ก่อนระยะเกิดรวง (PI) แสดงให้เห็นว่า การให้น้ำมีผลต่อปริมาณไนโตรเจนในดินที่พืชจะใช้ประโยชน์ได้ ขณะที่การใช้ปุ๋ยอัตรา 135 กก.N/เฮกตาร์ ทำให้ข้าวในแปลงอาศัยน้ำฝนมีความเครียดในระยะก่อนเกิดรวง (PI) มากกว่าข้าวในแปลงชล



ภาพ 6 ความเครียดน้ำระยะสะสมน้ำหนักเมล็ดจากการจำลองปลูกข้าวขาวดอกมะลิ ที่อัตราปุ๋ย N ต่างๆ สภาพอาศัยน้ำฝน(406 มม.) ม.เชียงใหม่ 2541



ภาพ 7 ความเครียดไนโตรเจนระยะสะสมน้ำหนักเมล็ด ข้าวขาวดอกมะลิ 105 อัตราปุ๋ย N ต่างๆ ระหว่างแปลงอาศัยน้ำฝน และให้น้ำชลประทาน ม.เชียงใหม่ 2541



ภาพ 8 ความเครียดไนโตรเจนที่ระยะต่างๆ ระหว่างแปลงอาศัยน้ำฝนและให้น้ำ, ข้าว 2 พันธุ์ ที่ระดับปุ๋ย 0 กก.N/เฮกตาร์ และ 135 กก.N/เฮกตาร์ ม.เชียงใหม่ 2541

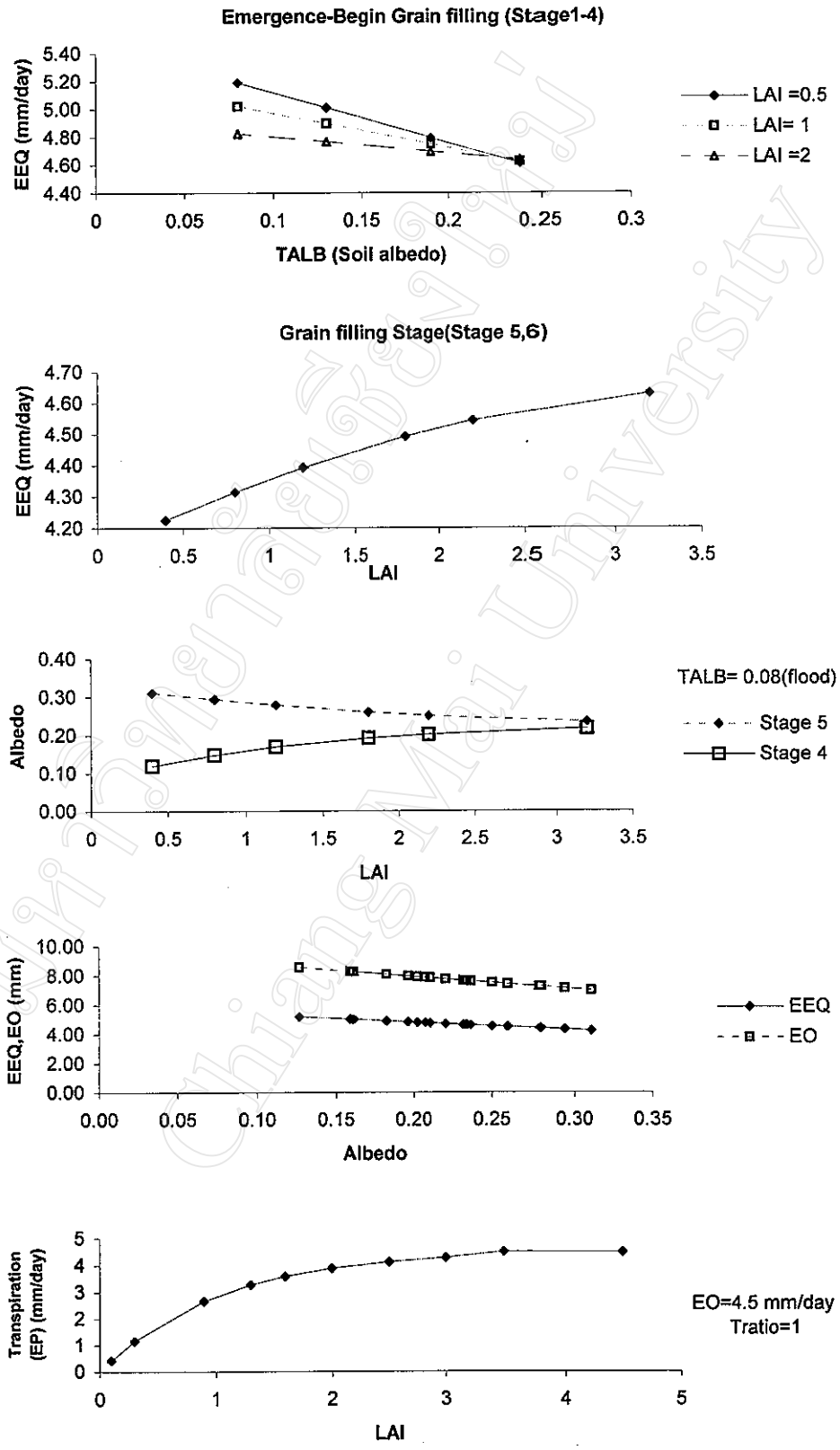
ประทานมาก และความเครียดลดลงใกล้เคียงกันกับข้าวที่ให้น้ำในระยะหลังๆ เนื่องจากความเครียดไนโตรเจนในระยะแรกทำให้ข้าวนาน้ำฝนชะงักการเจริญเติบโตอย่างมาก การสะสมน้ำหนักมีน้อยมาก ความต้องการไนโตรเจนในระยะหลังจึงน้อย (ภาพ 8)

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้น แสดงให้เห็นว่าผลผลิตของแปลงที่อาศัยน้ำฝนที่ต่ำกว่าแปลงที่ให้น้ำชลประทานนั้นเป็นผลจากทั้งความเครียดจากการขาดน้ำและจากความเครียดไนโตรเจนร่วมกัน ที่แม้ว่าบางระยะการเจริญเติบโต แบบจำลองจะไม่แสดงผลว่ามีความเครียดจากการขาดน้ำก็ตาม ซึ่งจะได้วิเคราะห์ถึงอิทธิพลของน้ำต่อความเป็นประโยชน์และการสูญเสียของไนโตรเจนในหัวข้อการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนต่อไป

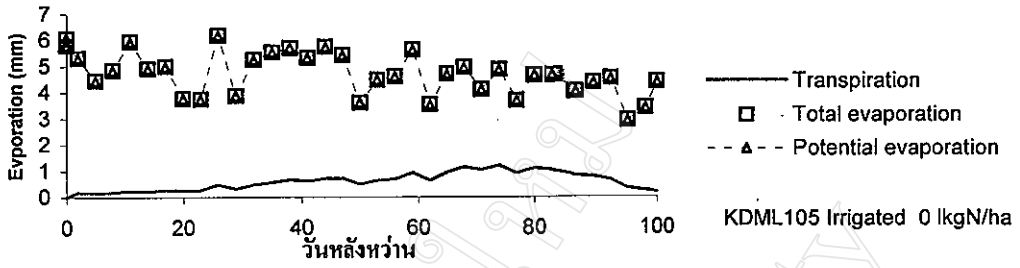
การศึกษาองค์ประกอบของความเครียดน้ำ จากสมการแบบจำลองสมดุลน้ำ และภาพความสัมพันธ์ในระบบสมดุลน้ำ(ภาพ 1) นั้น ทำให้เห็นภาพความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสมดุลน้ำต่าง ๆ (ภาพ 9) โดย ค่าศักยภาพการระเหย (potential evaporation, EO) ที่เป็นปัจจัยสำคัญกำหนดความเครียดน้ำนั้น จะแปรผันตามค่าการระเหยสมดุล (equilibrium evaporation, EEQ) ที่สัมพันธ์กับระยะการเจริญเติบโต พลังงานแสง อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด ค่า albedo (การสะท้อน) รวมของพื้นที่ปลูก ซึ่งขึ้นอยู่กับ albedo ของพื้นดินหรือน้ำ (TALB) และพื้นที่ใบ โดยค่า albedo ที่มากขึ้น ทำให้ค่า EEQ และ EO ที่ลดลง โดยในระยะตั้งแต่เมล็ดงอกถึงเริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ด ค่า EEQ จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ใบและ TALB โดยที่ TALB ต่ำๆ จากสภาพน้ำขังที่ค่า albedo เท่ากับ 0.08 นั้น เมื่อพื้นที่ใบมากขึ้นทำให้ albedo มากขึ้น ทำให้ศักยภาพการระเหยลดลง จนถึงระยะที่ TALB เท่ากับ 0.18 ที่พื้นที่ใบไม่มีผลต่อ EEQ แต่ในระยะสะสมเมล็ด EEQ จะขึ้นอยู่กับค่าพื้นที่ใบเท่านั้น และพื้นที่ใบมากขึ้นทำให้ albedo ลดลง จึงให้ EEQ และ EO มากขึ้น (ภาพ 9) และเกิดความเครียดน้ำมากขึ้น หากน้ำในดินมีจำกัด ซึ่งความสัมพันธ์เหล่านี้สามารถอธิบายการที่อัตราปุ๋ยไนโตรเจนเพิ่มขึ้น จะเพิ่มพื้นที่ใบ และเพิ่มความเครียดน้ำระยะสะสมน้ำหนักเมล็ดในภาพ 6

การศึกษาองค์ประกอบการระเหยน้ำที่จำลองได้จากไฟล์สมดุลน้ำรายวัน WATER.OUT นั้นยังแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดน้ำ กับองค์ประกอบในสมดุลน้ำอย่างชัดเจนมากขึ้น โดยที่ในแปลงที่ให้แบบจำลองให้น้ำแบบอัตโนมัตินั้นแบบจำลองจะให้น้ำที่ทำให้ค่าการระเหยทั้งหมดในแปลง (total evaporation, ET) เท่ากับการระเหยที่ระดับสูงสุดหรือศักยภาพการระเหย (EO) ที่เปลี่ยนไปแต่ละวันตามสภาพภูมิอากาศเป็นหลัก (ภาพ 10) ซึ่งค่า EO ของแปลงปกติจะเท่ากัน เว้นแต่มีความแตกต่างของพื้นที่ใบมาก เช่นเนื่องจากปุ๋ยไนโตรเจน ค่า EO ของแปลงที่พื้นที่ใบต่ำจะสูงกว่า (ภาพ 11) ดังความสัมพันธ์ในภาพ 9

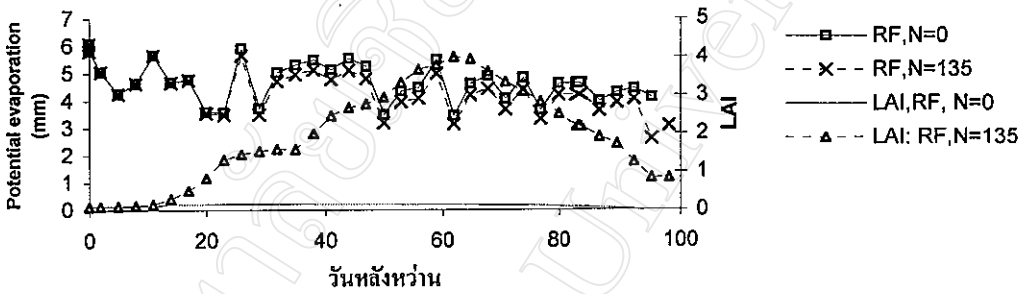
ในสภาพนาน้ำฝนนั้น ช่วงที่น้ำในดินมีน้อย ค่าการระเหยทั้งหมดตามความเป็นจริง ของแปลงที่ให้น้ำฝนนั้นมักจะต่ำกว่าค่าการระเหยศักยภาพ โดยการศึกษา WATER.OUT ของการปลูก



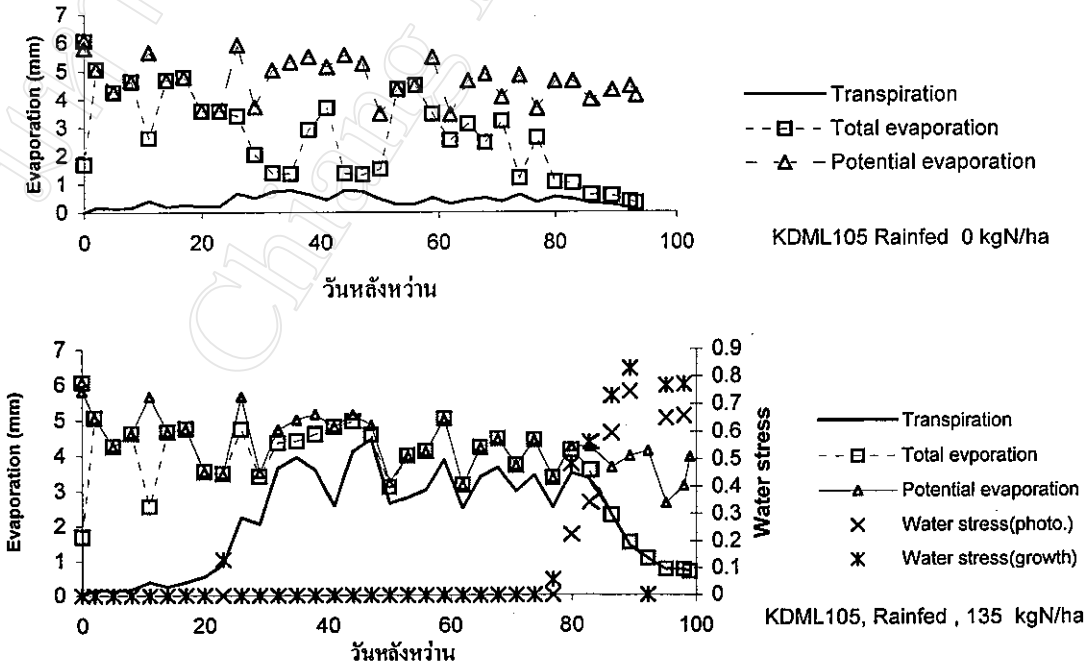
ภาพ 9 ความสัมพันธ์ของดัชนีพื้นที่ใบ (LAI), ค่าalbedo พื้นดินหรือน้ำที่ปลูก (TALB), ค่า albedo ทั้งหมด กับ Equilibrium evaporation (EEQ), Potential evaporation (EO) และ Transpiration(EP)



ภาพ 10 องค์ประกอบสมดุลน้ำ จากการจำลองปลูกข้าวไม่ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน สภาพให้น้ำ ม.เชียงใหม่ 2541



ภาพ 11 การระเหยศักยภาพ และพื้นที่ใบที่จำลองได้ ระหว่างแปลงที่ใส่ปุ๋ย 0 กก.N และ 135 กก.N/เฮกตาร์ ของข้าวในแปลงอาศัยน้ำฝน ม.เชียงใหม่ 2541



ภาพ 12 องค์ประกอบสมดุลน้ำ และความเครียดน้ำ จากการจำลองปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อัตราปุ๋ยไนโตรเจน 0 และ135 กก.N/เฮกตาร์ ในสภาพอาศัยน้ำฝน ม.เชียงใหม่ 2541

ร่วมกับข้อมูลความเครียดน้ำรายวันจาก GROWTH.OUT ข้าวที่อาศัยน้ำฝนที่ไม่ให้ปุ๋ยไนโตรเจน จะมีการคายน้ำ (transpiration, EP) น้อยมาก เนื่องจากพืชเจริญเติบโตต่ำมาก จึงไม่พบความเครียดน้ำ แต่ในแปลงน้ำฝนที่ให้ปุ๋ย 135 กก.N/เฮกตาร์ เกิดความเครียดน้ำในระยะสะสมน้ำหนักเมล็ด เนื่องจากการเจริญเติบโตทางใบมากทำให้การระเหยจากต้นข้าวหรือการคายน้ำเท่ากับการระเหยทั้งหมด และอยู่ต่ำกว่าการะเหยศักยภาพมากถึงระดับที่ข้าวเกิดความเครียดจากการขาดน้ำ (ภาพ 12)

โดยสรุป การศึกษาอิทธิพลการให้น้ำ หรือการขาดน้ำโดยแบบจำลอง ต่อผลผลิต สามารถศึกษาจากค่าความเครียดน้ำ และความเครียดไนโตรเจนที่จำกัดการเจริญเติบโต ในแต่ละระยะของการเจริญเติบโต ซึ่งสาเหตุของความเครียดน้ำนั้น ก็สามารถศึกษาได้จากองค์ประกอบการระเหย ในผลแสดงสมดุลน้ำได้ โดยเปรียบเทียบผลของความเครียดนั้น ๆ หรือองค์ประกอบการระเหยกับสภาพที่ให้น้ำที่ไม่มีความเครียดของน้ำ ในทางเขตกรรม ความเข้าใจในข้อมูลเหล่านี้จะช่วยในการตัดสินใจกำหนดวันปลูกพืชให้สอดคล้องกับสภาพน้ำฝน หรือกำหนดระยะเวลาและปริมาณการให้น้ำ หรือแม้แต่การให้ปุ๋ยที่สัมพันธ์กับการให้น้ำ ในแต่ละระยะการเจริญเติบโต และแต่ละสภาพแวดล้อม ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

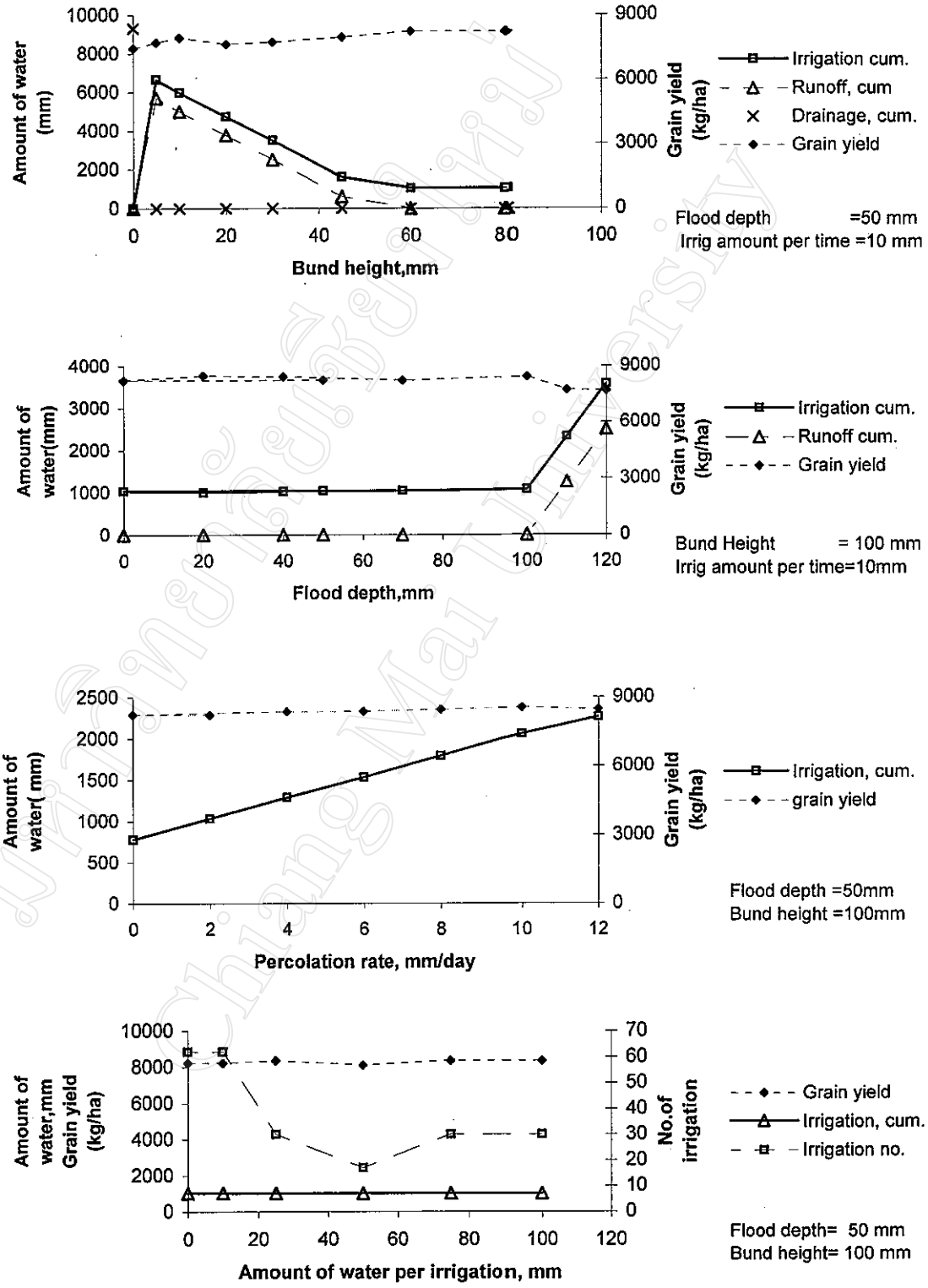
การทดสอบอิทธิพลตัวแปรด้านการจัดการน้ำต่าง ๆ ที่เป็นตัวแปรนำเข้าของแบบจำลอง

การใช้แบบจำลองในการจำลองการให้น้ำในนานั้น พบว่ามีตัวแปรการจัดการน้ำหลายตัวแปร ที่สัมพันธ์กับวิธี ปริมาณการให้น้ำ และผลผลิต) ซึ่งได้ทำการทดสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้กับผลผลิต และปริมาณน้ำที่ให้แบบอัตโนมัติ ดังนี้ (ภาพ 13)

ความสูงคันนา (bund height) และ ระดับน้ำที่ให้ท่วมขังแปลง (flood depth) มีความสัมพันธ์กันในการกำหนดการให้น้ำแบบอัตโนมัติ โดย ความสูงคันนาเป็นตัวควบคุมระดับน้ำขัง ซึ่งถ้ากำหนดความลึกของ Flood Depth มากกว่าความสูงของคันแล้ว น้ำจะล้นเป็น runoff โดยทั้ง ความสูงคันนา และ Flood Depth มีผลต่อการปริมาณน้ำทั้งหมดที่ให้ แต่ไม่มีผลมากต่อผลผลิตข้าว

อัตราการซึมลงในแนวดิ่งของน้ำต่อวัน (percolation rate) มีผลทำให้ปริมาณน้ำที่ให้ต่างกัน แต่มีผลต่อผลผลิตน้อยมากเช่นกัน ในขณะที่ปริมาณน้ำต่อครั้งของการให้น้ำ (automatic irrigation, IAMT) ไม่มีผลต่อปริมาณน้ำทั้งหมดที่ให้ และไม่ทำให้ผลผลิตต่างกัน นอกจากทำให้จำนวนครั้งให้น้ำต่างกัน

สำหรับตัวแปรนำเข้าอื่นๆ ที่ได้แก่ วิธีการให้น้ำ (IAME หรือ IROP) การทำเทือก (Puddling) และตัวแปรความลึกของน้ำแบบ Management Depth (IDEP หรือ IMDEP) จากการทดสอบ พบว่าไม่มีผลต่อปริมาณน้ำที่ให้ และไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิต (ภาพ 13)



ภาพ 13 การจำลองอิทธิพลตัวแปรที่เกี่ยวกับการให้น้ำแบบอัตโนมัติ กับผลผลิตข้าวขาวดอกมะลิ105 และ ปริมาณน้ำที่ให้ และที่สูญเสีย (จำลองโดยไม่มีปริมาณน้ำฝน ม.เชียงใหม่ 2542)

ในการจำลองอิทธิพลเวลาการให้น้ำ พบว่าวันที่เริ่มให้น้ำและวันให้ปุ๋ยไนโตรเจนจะสัมพันธ์กันและมีผลต่อผลผลิตอย่างมาก โดยจะเกี่ยวกับปริมาณการสูญเสียไนโตรแจนไปทางการระเหยของแอมโมเนียม (ammonia volatalization) ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อการใช้ปุ๋ยไนโตรเจน

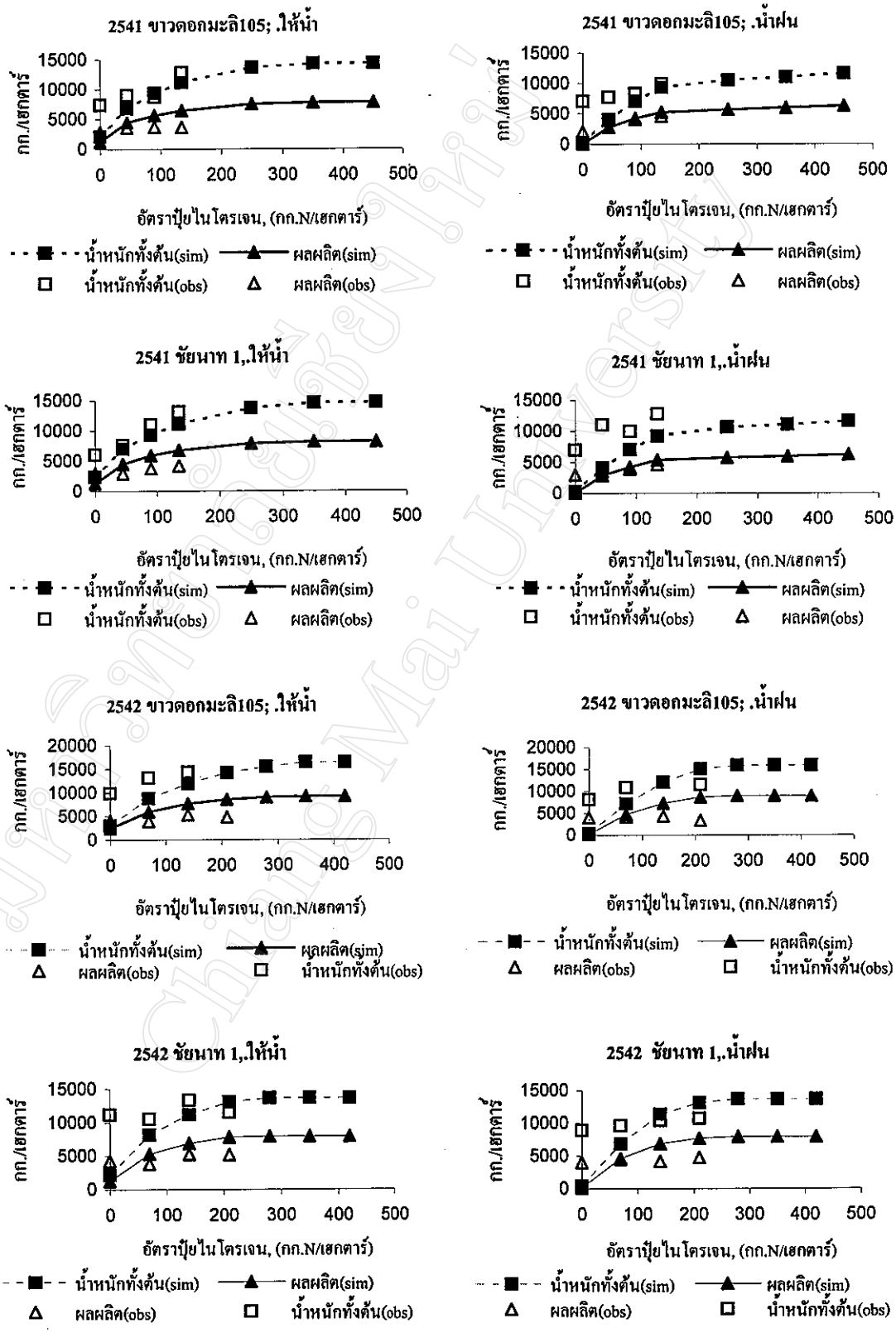
อย่างไรก็ตาม การศึกษาเรื่องการจำลองการให้น้ำนี้ แม้ว่าแบบจำลองจะมีการจำลองรายละเอียดการจัดการให้น้ำ และความเครียดน้ำมากพอสมควร แต่ยังพบว่าแบบจำลองไม่ได้ครอบคลุมถึงลักษณะพันธุกรรมความทนแล้ง ซึ่งสัมพันธ์กับพัฒนาการของรากที่ต่างกันระหว่างพันธุ์ดังที่รายงานโดย นิวัฒน์ และสมบัติ (2540) และ Pantuwan *et al.* (1995) หรือความทนต่อน้ำท่วมหรืออิทธิพลน้ำท่วมที่ทำให้ข้าวจมน้ำ (submerged) ซึ่งพบได้ในสภาพนาน้ำฝน และทำให้เกิดความเสียหายต่อผลผลิตได้มาก ซึ่งอาจต้องอาศัยข้อมูลนำเข้าทางพันธุกรรมที่เกี่ยวกับความทนหรือความสามารถปรับตัวกับสภาพน้ำท่วม หรือการจำลองความสูงของข้าวกับระดับความลึกของน้ำ ด้วย

1.2 การให้ปุ๋ยไนโตรเจน

ผลการจำลองอิทธิพลของระดับปุ๋ยไนโตรเจนต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตจากงานทดลองระดับปุ๋ยไนโตรเจนและสภาพการให้น้ำกับข้าวขาวดอกมะลิ 105 และชัยนาท 1 ในปี 2541 และ 2542 โดยการจำลองให้ปุ๋ยโนโตรเจนอัตราสูงขึ้นกว่าระดับที่ทำการทดลอง และทดสอบจำลองโดยไม่จำลองระบบไนโตรเจนและน้ำ พบว่าแบบจำลองให้ค่าน้ำหนักรวมทั้งต้น และผลผลิตข้าวทั้งสองพันธุ์ เพิ่มขึ้นตามอัตราปุ๋ยไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ทั้งสภาพให้น้ำและอาศัยน้ำฝน ในปี 2541 และ2542 โดยมีแนวโน้มการตอบสนองในแนวเดียวกับผลที่วัดได้จากการทดลอง (ภาพ 14)

ผลผลิตที่วัดได้จริงส่วนใหญ่ต่ำกว่าผลผลิตที่ได้จากการจำลอง เป็นไปตามสมมติฐานที่ว่าผลผลิตที่วัดจริงได้รับอิทธิพลจากปัจจัยอย่างอื่นที่ไม่ได้ครอบคลุมโดยแบบจำลอง ยกเว้นที่ระดับปุ๋ยไนโตรเจนเท่ากับศูนย์ โดยเฉพาะในสภาพนาอาศัยน้ำฝน ที่ผลผลิตจากการจำลองต่ำกว่าผลผลิตที่วัดได้ (ภาพ 14) ซึ่งอาจจะเป็นเพราะมีการควบคุมสภาพแปลงปลูกที่ยังไม่ดีพอ ทำให้น้ำที่มีปุ๋ยไนโตรเจนซึมผ่านหรือท่วมคันนาจากแปลงข้างเคียง แปลงที่ไม่ได้ให้ปุ๋ยไนโตรเจนจึงมีโอกาสได้รับปุ๋ยไนโตรเจน

ปริมาณน้ำหนักทั้งต้นที่วัดได้จริงสูงกว่าหรือใกล้เคียงกับค่าจำลอง แม้ว่ามีทิศทางการตอบสนองต่อปุ๋ยเป็นไปในรูปแบบเดียวกัน (ภาพ 14) แสดงให้เห็นว่ามีการจำลองการสะสมน้ำหนักต้น



ภาพ 14 ค่าจำลอง (sim)และค่าสังเกต(obs) ของผลผลิต และน้ำหนักทั้งต้น ของการทดลองอัตราปุ๋ยไนโตรเจน และการให้น้ำ ของข้าว 2พันธุ์ ม.เชียงใหม่ 2541-2542

และใบได้น้อยกว่าที่ได้จริง และคำนวณดัชนีเก็บเกี่ยวไว้สูงกว่าค่าที่วัดได้จริง ซึ่งน่าเป็นความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณการเจริญเติบโตของต้นและใบ และสัดส่วนการถ่ายสารสังเคราะห์ของแบบจำลอง หรือความคลาดเคลื่อนของข้อมูลนำเข้า (จิรวัฒน์, 2544)

การตอบสนองของผลผลิตและน้ำหนักทั้งต้นที่วัดได้จริง ต่อ อัตราปุ๋ยไนโตรเจน ใกล้เคียงกับที่ได้จากแบบจำลองในช่วงที่ระดับปุ๋ยไนโตรเจน 0-90 กก.N /เฮกตาร์ โดยผลผลิตและน้ำหนักทั้งต้นที่วัดได้จริง เพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง แต่ยังพบว่ามีการตอบสนองที่ต่างกันระหว่างพันธุ์ข้าว โดยผลผลิตของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ลดลงเมื่อใช้ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงกว่า 90 กก.N/เฮกตาร์ แม้ว่าน้ำหนักรวมทั้งต้นมากขึ้น ขณะที่ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ยังให้น้ำหนักต้นและผลผลิตที่สูงขึ้นได้อีก (ภาพ 14) และพบว่าในปี 2542 อัตราปุ๋ยไนโตรเจนสูงขึ้นมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์เมล็ดลีบมากขึ้น และน้ำหนัก 100 เมล็ดลดลง โดยเฉพาะในข้าวขาวดอกมะลิ 105 (ตารางภาคผนวก 1 และ 3) ทั้งอาจเนื่องมาจากสภาพเฝือใบเกิดมีการบังแสงของใบมากเกินไป และการหักล้มของต้นที่ได้รับปุ๋ยในอัตราสูง เนื่องจากลำต้นที่สูงจึงง่ายต่อการหักล้ม ในระยะสะสมน้ำหนักเมล็ด เป็นผลให้การสะสมน้ำหนักเมล็ดไม่สมบูรณ์ ในทางตรงกันข้าม พันธุ์ชัยนาท 1 ซึ่งเป็นพันธุ์ผสมที่ปรับปรุงให้มีศักยภาพผลผลิตสูง ตอบสนองต่อปุ๋ยไนโตรเจนในอัตราสูง มีต้นเตี้ยกว่า และทนต่อการหักล้มมากกว่า และประสิทธิภาพการให้ผลผลิตสูงกว่า ผลผลิตจึงไม่ลดลงเมื่อได้รับไนโตรเจนอัตราสูง เหมือนข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่เป็นพันธุ์พื้นเมือง ซึ่งแบบจำลอง CERES-Rice 3.5 ไม่ได้ครอบคลุม การเกิดการหักล้มของต้นข้าว และความแตกต่างระหว่างพันธุ์ในประสิทธิภาพการรับแสง จึงไม่แสดงอิทธิพลทางลบของไนโตรเจนอัตราสูงต่อผลผลิตในลักษณะนี้

การจำลองเพื่อหาอัตราปุ๋ยไนโตรเจนที่ให้ผลผลิตระดับสูงสุดของข้าวทั้งสองพันธุ์ พบว่าอยู่ที่ ผลผลิตข้าวที่จำลองได้อยู่ในระดับสูงสุดที่อัตราปุ๋ยไนโตรเจน 250-280 กก.N/เฮกตาร์ ทั้งสภาพให้น้ำและอาศัยน้ำฝน ในขณะที่ผลจากการทดลองจริงนั้นอัตราปุ๋ยไนโตรเจนที่ให้ผลผลิตสูงสุดสำหรับข้าวดอกมะลิ 105 และ ชัยนาท 1 อยู่ในอัตราเดียวกันคือ 140 กก.N/เฮกตาร์ในปี 2542

สาเหตุที่การตอบสนองต่อไนโตรเจนการทดลองจริงต่ำกว่าการจำลอง น่าจะมีหลายสาเหตุที่ ได้แก่ อาจมีข้อจำกัดของธาตุอื่นๆ ที่ไม่มีการจำลองที่ต้องมีปริมาณมากพอและสมดุลกับอัตราปุ๋ยไนโตรเจน (Takenaga, 1995) หรือประสิทธิภาพลดลงของไนโตรเจนเนื่องจากการสูญหายไป หรือเปลี่ยนสภาพไปจนทำให้พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ หรือ การเกิดสภาพเฝือใบ จากการหักล้ม การเกิดโรคไหม้ และจากสภาพแวดล้อมอื่นๆ ที่แบบจำลองไม่ได้ครอบคลุม

การตรวจสอบค่าความเครียดจากการขาดไนโตรเจนทำนองเดียวกับที่กล่าวในหัวข้อการให้น้ำ พบว่าทั้งสภาพให้น้ำและอาศัยน้ำฝน ความเครียดไนโตรเจนระยะสะสมน้ำหนักเมล็ดต่ำสุดเมื่อ

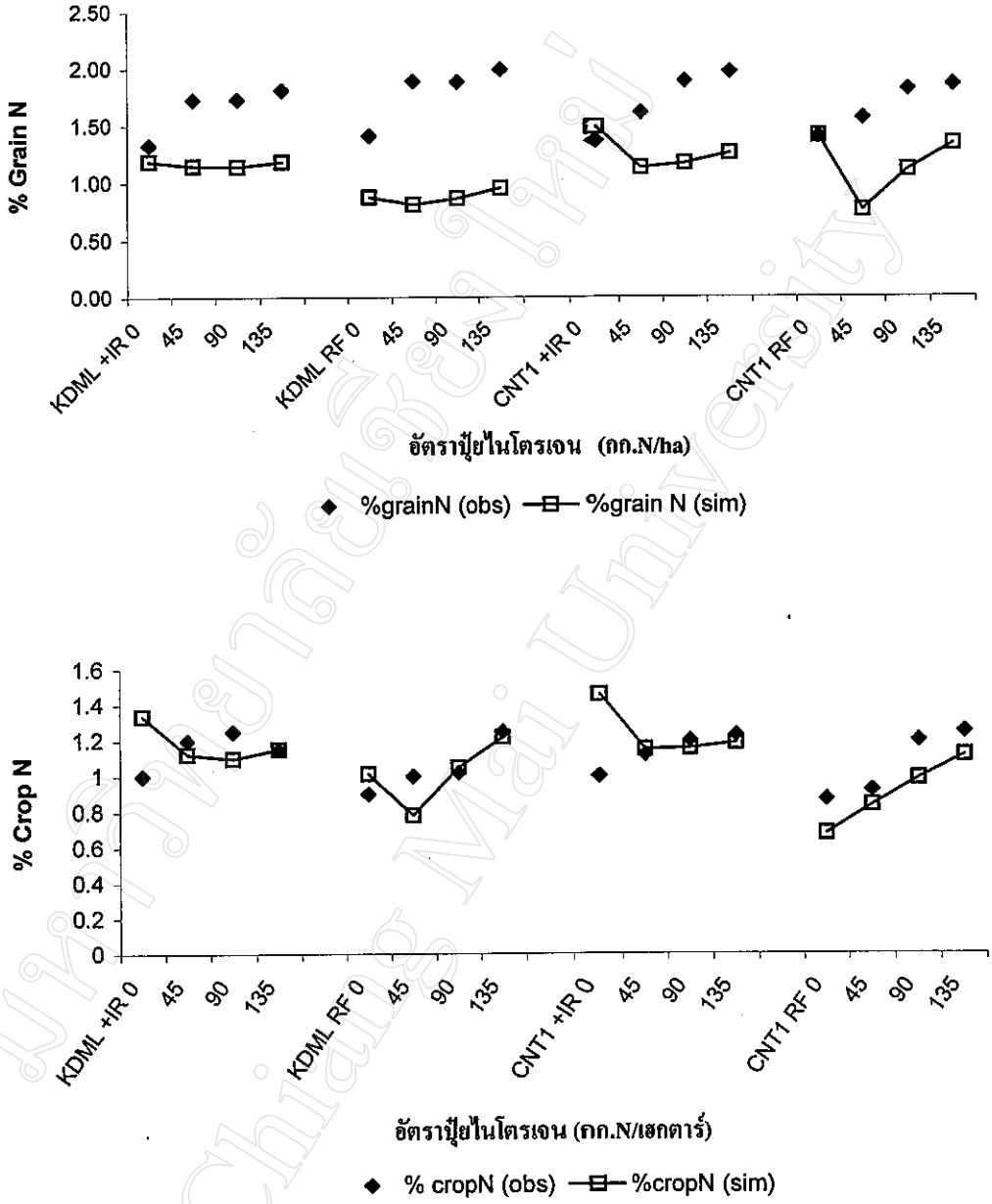
ไม่ได้ให้ปุ๋ย และสูงสุดที่ระดับปุ๋ย 45 กก.N /เฮกตาร์ และลดลงเมื่ออัตราปุ๋ยไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ตรงข้ามกับการเพิ่มของผลผลิต และความเครียดน้ำ (ภาพ 6 และ 7)

ความเครียดไนโตรเจนแต่ละระยะการเจริญเติบโต แตกต่างกันตามสภาพการให้น้ำและอัตราปุ๋ยไนโตรเจน (ภาพ 8) ที่ระดับปุ๋ย 135 กก.N/เฮกตาร์ ในสภาพอาศัยน้ำฝน พบว่าความเครียดไนโตรเจนสูงสุดอยู่ในระยะก่อนเกิดรวง สอดคล้องกับการที่เป็นระยะที่มีการใช้ไนโตรเจนสูงสุด (De Datta, 1981) ซึ่งเป็นระยะก่อนให้ปุ๋ยครั้งที่สองที่ให้ในระยะเกิดรวง ขณะที่ในสภาพให้น้ำ มีความเครียดไนโตรเจนสูงสุดที่ระยะ หลังเกิดรวง (ภาพ 8)

ระดับปุ๋ยไนโตรเจนมีผลต่อความเครียดจากการขาดน้ำของข้าวในแปลงอาศัยน้ำฝน เนื่องจากปุ๋ยไนโตรเจนเพิ่มพื้นที่ใบ ทำให้การคายน้ำเพิ่มมากขึ้นจนถึงระดับที่ทำให้เกิดความเครียดน้ำเนื่องจากสภาพน้ำในดินจำกัด ดังได้อธิบายมาแล้วในสมการสมดุลน้ำหัวข้อก่อนหน้านี้ (ภาพ 6)

ปริมาณน้ำในดินมีผลต่อการใช้ไนโตรเจนของข้าวอย่างมาก จากไฟล์แสดงผลสมดุลไนโตรเจนทั้งฤดูปลูกในไฟล์ NBAL.OUT (ตาราง 2) ที่ได้จากการจำลองการทดลองอัตราปุ๋ยไนโตรเจนกับสภาพการให้น้ำในปี 2542 . พบว่าปริมาณของไนโตรเจนที่ข้าวดูดซึม (N uptake) เพิ่มขึ้นตามอัตราปุ๋ยไนโตรเจนที่ใส่ โดยที่ระดับปุ๋ย 0 กก.N ในสภาพให้น้ำชลประทานมีการดูดซึมไนโตรเจนได้ถึง 56 กก.N/เฮกตาร์ ซึ่งเกือบทั้งหมดเป็นผลจากขบวนการสลายตัวของอินทรียวัตถุในดิน (mineralization) ขณะที่ข้าวที่อาศัยน้ำฝนอย่างเดียว ดูดซึมไนโตรเจนน้อยมาก (4.7 กก.N/เฮกตาร์) และการจำลองแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างไนโตรเจนที่หายไปกับน้ำล้น (runoff) ของแปลงที่ให้น้ำมีมากขึ้นตามอัตราปุ๋ยไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่แปลงนาอาศัยน้ำฝนไม่มีการสูญเสียลักษณะนี้เนื่องจากไม่มีปริมาณน้ำล้น (runoff) และพบว่าแปลงที่ให้น้ำมีการสูญเสียไนโตรเจนไปเป็นแอมโมเนีย (ammonia volatilization) มากขึ้นตามอัตราปุ๋ยที่เพิ่มขึ้นด้วย แต่การสูญเสียทาง denitrification และการชะล้าง (leaching) มีน้อยมากทั้งสองสภาพการให้น้ำ ทำให้อัตราการสูญเสียไนโตรเจนทั้งหมดของแปลงที่ให้น้ำมากกว่าแปลงอาศัยน้ำฝน (ตาราง 2)

การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนของข้าวทั้งต้นและเมล็ดข้าวเปลือก ระหว่างผลการจำลองและค่าที่วิเคราะห์ได้จริงพบว่า เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนของข้าวทั้งต้นที่จำลองได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง แต่เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนเมล็ดที่วัดได้จริงสูงกว่าที่ได้จากการจำลองค่อนข้างมาก (ภาพ 15) เป็นไปได้ว่าค่าที่ได้จากการจำลองมาจากไนโตรเจนที่ดูดซึมทั้งหมดหารด้วยน้ำหนักผลผลิต เนื่องจากผลผลิตที่จำลองได้มากกว่าค่าจริงค่อนข้างมาก ขณะที่ไนโตรเจนที่ดูดซึมทั้งต้นใกล้เคียง จึงทำให้เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนเมล็ดที่จำลองได้จึงต่ำ



ภาพ 15 เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนของเมล็ด (grain N) และของทั้งต้น(cropN) ระหว่างค่าจำลอง(sim) กับค่าจริง(obs) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 (KDML) และ ชัยนาท 1 (CNT1) ที่ให้น้ำ(+IR) และอาศัยน้ำฝน (RF) ที่ให้ปุ๋ยไนโตรเจน 4 อัตรา : 0, 45, 90 และ 135 กก.N/เฮกตาร์ ม.เชียงใหม่ 2541

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

ตาราง 2 สมดุลไนโตรเจน จากไฟล์ NBAL.OUT เปรียบเทียบระหว่างแปลงที่ให้น้ำและแปลงอาศัยน้ำฝน จากการจำลองปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105 กับปุ๋ยไนโตรเจน 5 ระดับ ม.เชียงใหม่ 2542

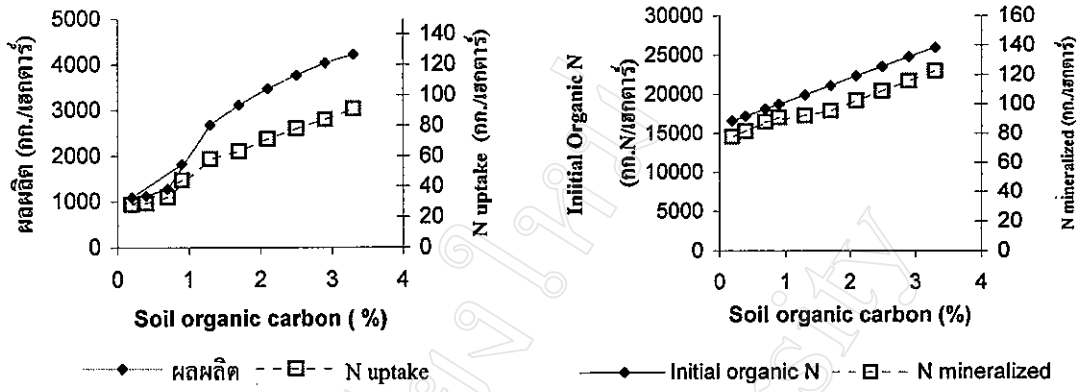
	initial condition	Irrigated N fertilizer rate, kg N/ha					Rianfed N fertilizer rate, kg N/ha				
	kgN/ha	0	70	140	210	300	0	70	140	210	300
Soil Organic N	18707	18606	18616	18615	18615	18611	18683	18681	18678	18675	18657
Initial Residue N	0.01	0.16	1.07	1.14	2.39	3.38	0.01	0.01	0.16	1.37	4.2
Soil NO3	1.85	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	2.11	3.34	4.76	6.29	8.63
Soil NH4	1.85	48.43	28.79	26.21	27.7	35.96	22.82	22.49	23.73	23.59	47.06
Soil UREA	0	0	0.22	0.81	1.2	1.72	0	0	0	0	0
Algal N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Leached NO3	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.04	0.07	0.53
N Denitrified	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0.1
Ammonia loss	0	0	10.21	15.08	25.05	44.03	0	6.53	9.76	17.66	30.33
Runoff N	0	0.06	11.76	31.06	49.06	69.8	0	0	0	0	0
Flood N	0	0.01	0.21	0.73	1.09	1.57	0	0	0	0	0
Seedling N Gain	0	-1.73	-1.73	-1.73	-1.73	-1.73	-1.73	-1.73	-1.73	-1.73	-1.73
Fertilizer N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Organic Added N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N Uptake From Soil	0	56.1	112.82	160.66	199.46	244.03	4.72	70	136.19	199.25	264.71
Total N	18711	18711	18781	18851	18921	19011	18711	18781	18851	18921	19011
Seed N At Planting	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N2 Fixed	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

การทดสอบตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับวิธีการให้ปุ๋ยไนโตรเจนของแบบจำลอง

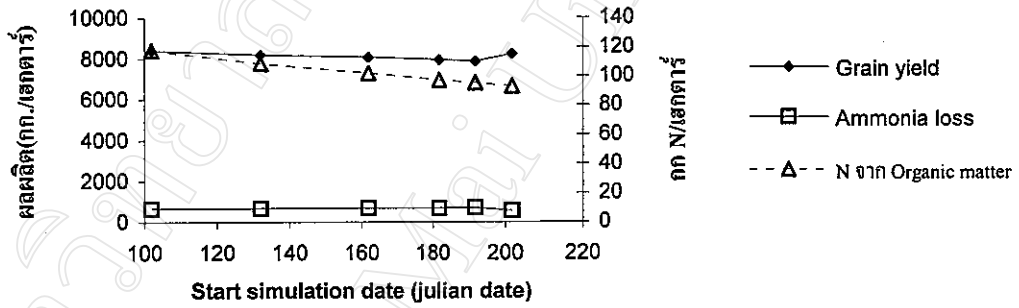
การศึกษาอิทธิพลตัวแปรคุณสมบัติของดินที่เกี่ยวข้องกับระบบสมดุลไนโตรเจน (ตาราง 1 และภาพ 3) แสดงให้เห็นว่าตัวแปร เปอร์เซ็นต์คาร์บอนในรูปอินทรียสารในดิน (% soil organic carbon) ของดินชั้นบนมีอิทธิพลต่อผลผลิตมาก เนื่องจากเป็นแหล่งที่ให้ไนโตรเจนโดยการสลายตัวของอินทรียวัตถุ (mineralization) โดยปริมาณไนโตรเจนในอินทรียสารก่อนปลูก (initial organic nitrogen) เพิ่มขึ้นตามปริมาณคาร์บอนในอินทรียสารในดิน (%soil organic carbon) และให้ปริมาณไนโตรเจนกับข้าวมากขึ้นและทำให้ผลผลิตข้าวที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน เพิ่มขึ้น (ภาพ 16)

ในแบบจำลอง ปริมาณไนโตรเจนที่ข้าวได้จากการ mineralization ยังขึ้นอยู่กับการกำหนดวันเริ่มการจำลอง (start of simulation date) ของผู้ใช้แบบจำลองด้วย โดยระยะเวลาการจำลองยิ่งนานขึ้น การสลายตัวปลดปล่อยไนโตรเจนของอินทรียวัตถุก็มากขึ้น ดังภาพ 17 แสดงผลของวันที่เริ่มทำการจำลองกับผลผลิตและปริมาณไนโตรเจนที่สลายจากอินทรียวัตถุถึงวันสุกแก่

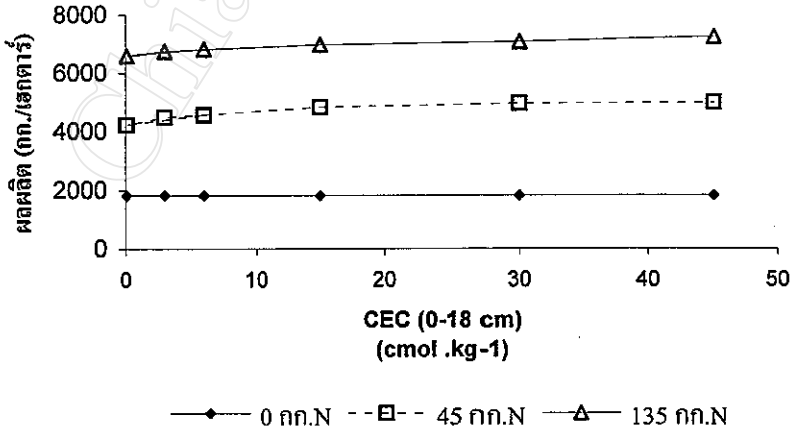
ค่า Cation Exchange Capacity (CEC) ที่เป็นตัวแปรหนึ่ง ที่สัมพันธ์กับการดูดซับและปลดปล่อยแอมโมเนียมอิออนของดินนั้น (ภาพ 3) พบว่ามีอิทธิพลต่อผลผลิตน้อยกว่าคาร์บอนที่เป็นอินทรีสารที่อยู่ในดินมาก ผลผลิตจากการจำลองของข้าวที่ให้ปุ๋ยไนโตรเจนจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ



ภาพ 16 ผลการจำลองแสดงอิทธิพลของค่า soil organic carbon ในดินชั้นบน 0-18 ซม ในดินชุดสะตึก ต่อผลผลิต ปริมาณไนโตรเจนในต้น ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ม.เชียงใหม่ 2541 และ ปริมาณ organic N และ mineralized N ในดิน (จากสมการแบบจำลอง)



ภาพ 17 ผลของวันเริ่มต้นจำลอง กับการสลายให้ไนโตรเจนของอินทรียวัตถุ และผลผลิตข้าว จากการจำลองปลูก ขาวดอกมะลิ105 สภาพชลประทาน, หว่าน 21 กค41(Julian date 202)



ภาพ 18 อิทธิพลของตัวแปร CEC ดินชั้นบน และอัตราปุ๋ยไนโตรเจนต่อผลผลิตข้าวจากการจำลองในสภาพนาชลประทาน ม.เชียงใหม่ 2541

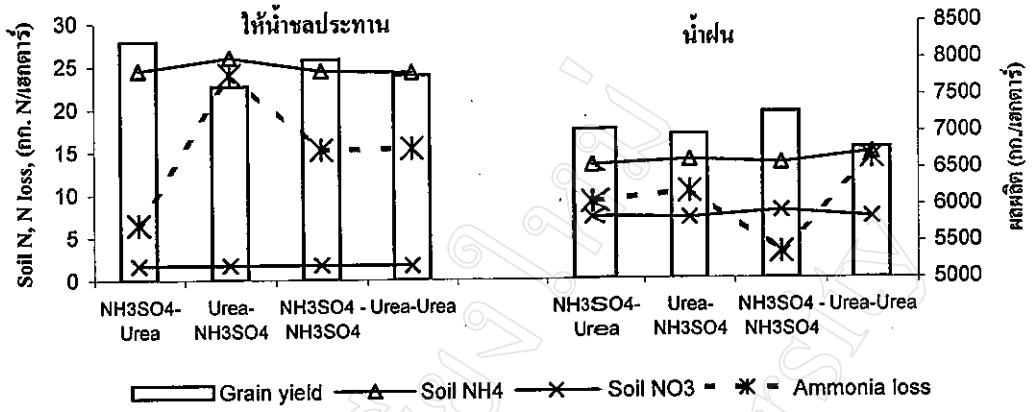
CEC ของดินชั้นบนเพิ่มขึ้น ขณะที่ผลผลิตของข้าวที่ไม่ได้รับปุ๋ยไนโตรเจน จะไม่เปลี่ยนแปลงตาม CEC (ภาพ 18)

การจำลองอิทธิพลตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวกับการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนใน CERES-Rice3.5 ต่อผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ในสภาพ Automatic Irrigation และอัตราปุ๋ยไนโตรเจน 90 กก./เฮกตาร์ แสดงถึงระดับอิทธิพลและความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

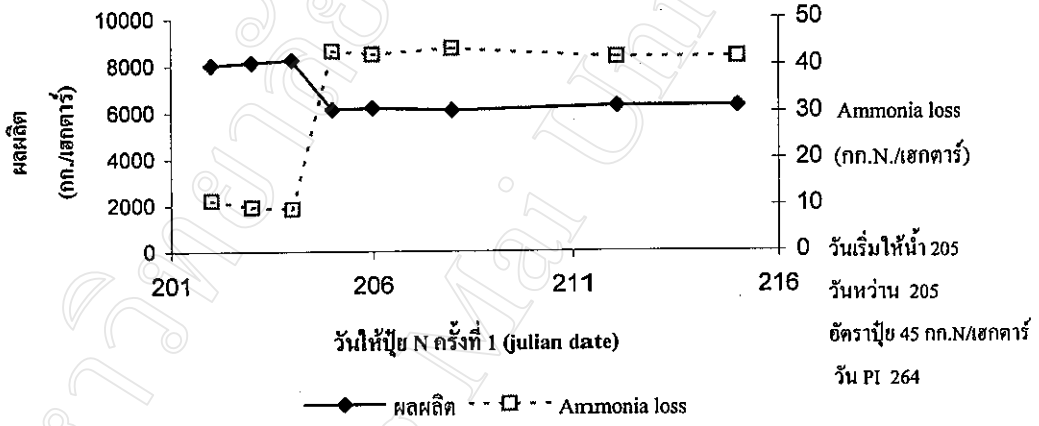
ชนิดปุ๋ย (Fertilizer material, FMCD) มีผลต่อผลผลิตข้าว โดยสัมพันธ์กับสภาพการให้น้ำและลำดับการใส่ ซึ่งมีผลปริมาณไนโตรเจนที่สูญเสียไปเป็นก๊าซแอมโมเนีย การใช้ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตใส่รองพื้นและหว่านยูเรียในช่วงเกิดรวง (PI) ซึ่งเป็นแบบที่ใช้ในการทดลองในแปลงจริง ๆ ให้ผลผลิตข้าวที่จำลองได้สูงสุดทั้งในสภาพให้น้ำชลประทาน ขณะที่ถ้าสลับให้ยูเรียรองพื้น แล้วหว่านด้วยแอมโมเนียมซัลเฟตช่วง PI ให้ผลผลิตต่ำสุด เนื่องจากมีการสูญเสียไนโตรเจนไปเป็นก๊าซแอมโมเนียทางกระบวนการ volatilization มากที่สุด ในขณะที่สภาพอาศัยน้ำฝนการใช้แอมโมเนียมซัลเฟตอย่างเดียวสำหรับการให้ปุ๋ยทั้งสองครั้งให้ผลผลิตสูงสุด ขณะที่ปุ๋ยยูเรียให้ผลผลิตต่ำสุด เนื่องจากมี volatalization เป็น แอมโมเนีย สูงสุด (ภาพ 19) ซึ่งสอดคล้องกับที่อธิบายโดย Mikkelsen *el al.* (1978) ว่าปุ๋ยยูเรียมีโอกาสสูญเสียมากกว่า เนื่องจากการถูก hydrolized ในดินเป็น ammonium carbonate ผ่านทาง urease enzyme activity ซึ่งอาจทำให้ pH ดินสูงขึ้น

วันที่ใส่ปุ๋ยครั้งแรกและวันที่เริ่มให้น้ำนั้นมีผลต่อผลผลิตและการสูญเสียไปเป็นก๊าซแอมโมเนีย ที่จำลองได้อย่างมาก การเริ่มให้น้ำวันเดียวกับวันใส่ปุ๋ยครั้งแรกทำให้ไนโตรเจนสูญเสียเป็นแอมโมเนียมากกว่าการใส่ปุ๋ยก่อนเริ่มให้น้ำ ซึ่งผลผลิตการจำลองได้ของวันใส่ปุ๋ยต่างกันก็แตกต่างกัน หมายถึงมีการสูญเสียแอมโมเนียจำนวนมากทันทีที่ใส่ปุ๋ยในสภาพดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (ภาพ 20) ขณะการจำลองผลของวันให้ปุ๋ยไนโตรเจนครั้งที่สอง ในช่วงเกิดรวง (PI) ในกรณีนี้ไม่ทำให้ผลผลิตจากการจำลองแตกต่างกัน แม้ว่าจะให้ก่อนหรือหลังวัน PI ถึง 15 วัน (ภาพ 21)

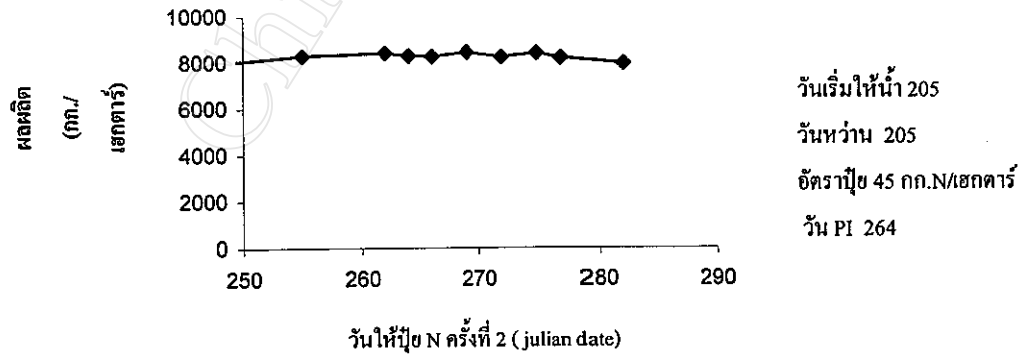
สำหรับวิธีการจัดการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอื่นๆ เช่น วิธีการใส่ปุ๋ย การไถกลบปุ๋ย (incorporation) และการใส่ในระดับลึก (deep placement)ให้ปุ๋ยอยู่ใน reduced zone ของดินที่ถูกน้ำท่วม การเพิ่มความลึกของน้ำ และการใช้สารที่ยับยั้งหรือชะลอ hydrolysis ได้แก่ Phosphorodiamidate (PDD) การใช้ Urea supergranules (USG) (Mikkelsen *el al.*, 1978) นั้น จากการทดสอบแบบจำลองพบว่า ผลผลิตไม่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงวิธีการจัดการใส่ปุ๋ยเหล่านี้



ภาพ 19 ผลการจำลองผลของชนิดปุ๋ย และลำดับการใส่ กับผลผลิตและปริมาณไนโตรเจนที่ได้หรือสูญเสีย



ภาพ 20 การจำลองผลของวันให้ปุ๋ย N ครั้งแรก ที่สัมพันธ์กับวันเริ่มให้น้ำ และการสูญเสียไนโตรเจน



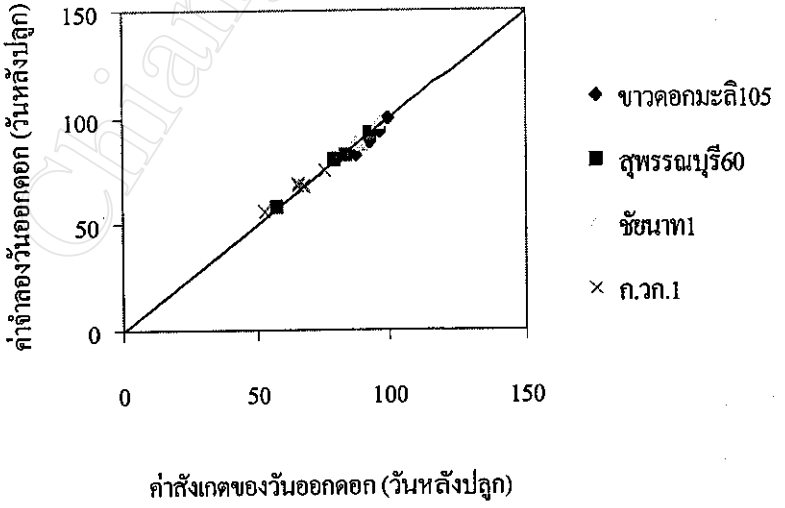
ภาพ 21 การจำลองอิทธิพลของ ระยะเวลาในการใส่ปุ๋ย N ครั้งที่ 2 กับผลผลิตข้าวในสภาพให้น้ำ เชียงใหม่ 2542

2. การศึกษาและการจำลองวิธีการปลูกแบบปักดำ และหว่านน้ำตมที่อัตราเมล็ดพันธุ์ระดับต่าง ๆ

ผลการศึกษาจากงานทดลองเปรียบเทียบวิธีการ ปลูกวิธีหว่านน้ำตม และวิธีปักดำของข้าว 4 พันธุ์ (ขาวดอกมะลิ 105 สุพรรณบุรี 60 ชัยนาท 1 และ ก.วก. 1) ด้วยอัตราเมล็ด 62.5, 125, 187.5 กก./เฮกตาร์ในปี 2541 และ 31.25, 125 และ 281.25 กก./เฮกตาร์ ในปี 2542 ด้วยสัมประสิทธิ์พันธุกรรมที่ประเมินได้จากงานทดลอง 12 วันปลูก(ที่ปลูกด้วยวิธีปักดำ) (ยกเว้น พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ที่ประเมินจากการทดลองวิธีการปลูกในปี 2541) โดยแบ่งเป็นวิเคราะห์วิธีการปลูก และอิทธิพลอัตราเมล็ดพันธุ์ ได้ดังนี้

2.1 อิทธิพลของวิธีการปลูกแบบปักดำ และหว่านน้ำตม

การเปรียบเทียบค่าจำลองและค่าสังเกตของวันออกดอก ของข้าวที่ปลูกด้วยวิธีปักดำและหว่านน้ำตม แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจำลองระยะพัฒนาการได้ใกล้เคียงกับค่าสังเกต (ภาพ 22) โดยพบว่า ข้าวชัยนาท 1 สุพรรณบุรี60 และก.วก.1 ที่ไม่ไวต่อช่วงแสง ที่ปลูกโดยวิธีปักดำจะมีอายุสุกแก่ยาวกว่าที่ปลูกด้วยวิธีหว่านน้ำตมประมาณ 5-10 วัน หรือ 100-200 °Cd ทั้งสองปีที่ทำการทดลอง สอดคล้องกับที่ De Datta (1980) ประมาณว่าการปักดำจะชะลออายุข้าวช้าไปประมาณ 7 วัน ขึ้นอยู่กับสภาพการช้ำของรากขณะถอนกล้า จากสมการจำลองวิธีปักดำ พบว่าระยะเวลาการชะลอการเจริญนี้ อยู่ในช่วง 20-195 °Cd ขึ้นอยู่กับอายุกล้าที่ปักดำ



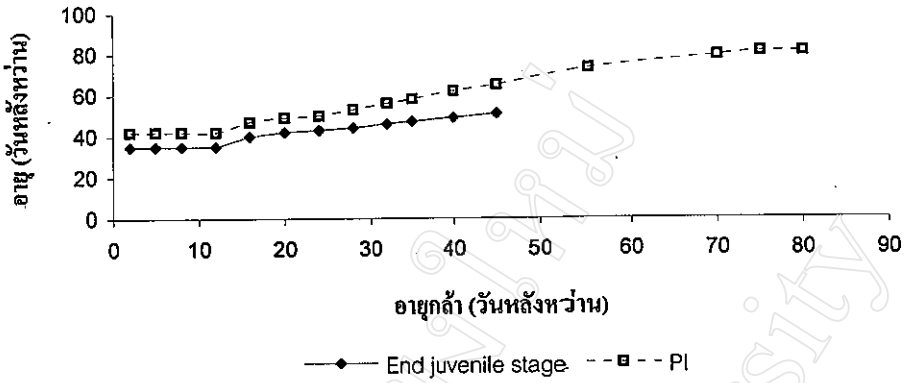
ภาพ 22 กราฟ 1:1 เปรียบเทียบค่าสังเกตกับค่าจำลอง ของวันออกดอก
การทดลองวิธีปลูกและอัตราเมล็ด ม.เชียงใหม่ 2541-2542

ความคลาดเคลื่อนของการจำลองอิทธิพลการปักดำ นอกจากจะขึ้นอยู่กับสมการแบบจำลองที่ใช้ปรับระยะการเจริญ ความคลาดเคลื่อนของการใช้ทฤษฎีอุณหภูมิสะสม เนื่องจากอุณหภูมิการเจริญของกล้า แบบจำลองใช้อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผู้ใช้กำหนดเพียงค่าเดียวสำหรับประมาณอุณหภูมิสะสมขณะเป็นกล้า (สมการ 11)

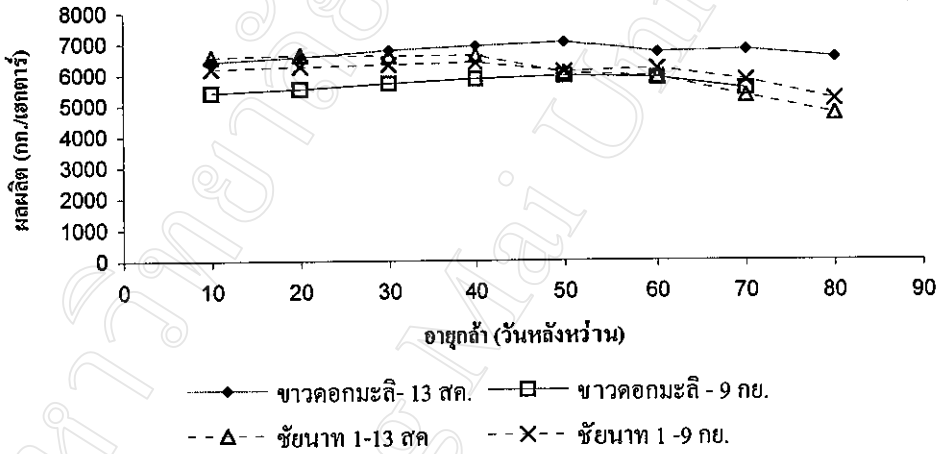
การจำลองผลของอายุกล้านั้น ไม่ได้ทำงานทดลองเปรียบเทียบเฉพาะ แต่สามารถวิเคราะห์จากสมการของแบบจำลอง การทดลองจำลอง และเปรียบเทียบกับงานที่เกี่ยวข้องได้

การจำลองอายุกล้าต่างๆ ที่ใช้ปักดำของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปักดำ 9 กย.2542 พบว่าอายุกล้าที่ไม่เกิน 18 วันเมื่อนำมาปักดำ ให้อายุที่สิ้นสุดระยะ basic vegetative phase และวันเกิดรวง (วันหลังตกกล้า) เท่า ๆ กันคือ 32 วันและ 41 วันหลังตกกล้า ตามลำดับ แต่เมื่อใช้อายุกล้าที่มากกว่า 18 วัน อายุระยะทั้งสองก็จะยาวขึ้น แม้ว่าอายุกล้าจะเลยระยะjuvenile แล้วก็ตาม (ภาพ 23)

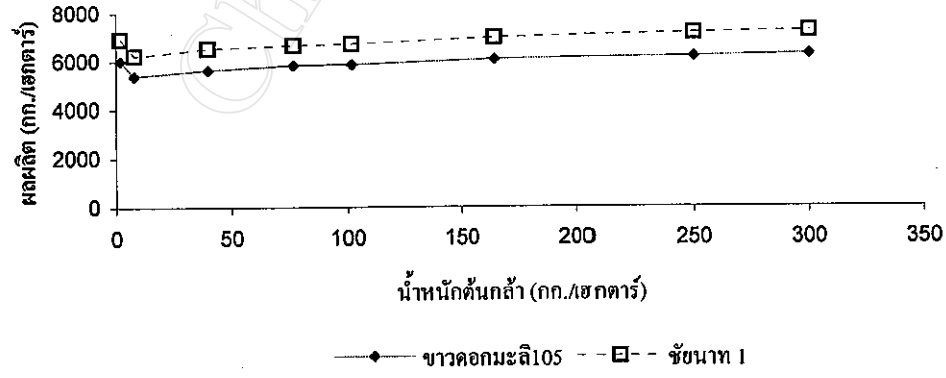
การจำลองผลกระทบของอายุกล้าต่อผลผลิตนั้นพบว่าขึ้นอยู่กับวันตกกล้า และพันธุ์ โดยแสดงให้เห็นว่าอายุกล้ามากขึ้นทำให้ผลผลิตจากการจำลองมากขึ้น (ภาพ 24) ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากน้ำหนักกล้าที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอายุกล้ามากขึ้น โดยการจำลองผลของน้ำหนักต้นกล้าที่ใช้ปักดำมากขึ้นโดยที่อายุกล้าอายุ 25 วันเท่ากัน พบว่าให้ผลผลิตมากขึ้นเล็กน้อย (ภาพ 25) และพบว่าผลผลิตลดลงเมื่อใช้กล้าอายุเกิน 50 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกเดือนสิงหาคม 2542 มีความทนทานต่อการปักดำ มากกว่าที่ปลูกในเดือนกันยายน และข้าวชัยนาท 1 ทั้งสองวันปลูก มีอัตราการลดลงของผลผลิตเมื่อใช้กล้าที่มีอายุมากกว่า 40 วันและลดลงเร็วกว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 (ภาพ 24) อธิบายได้ว่าการใช้กล้าอายุมากในข้าวที่ไม่ไวต่อช่วงแสงหรือข้าวที่ไวต่อช่วงแสงแต่ปักดำในสภาพวันสั้น กล้าข้าวเจริญเติบโตเลยระยะเกิดรวงแล้วก่อนที่จะปักดำ ขณะที่ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นข้าวไวต่อช่วงแสง ถ้าปลูกในช่วงวันยาวมีระยะก่อนถึงวันเกิดรวงนานกว่า จึงได้รับผลกระทบกับการใช้อายุกล้าที่แก่น้อยกว่า สอดคล้องกับที่ วิทยา และคณะ (2523) และ Gines *et al.* (1985) อธิบายว่าข้าวพันธุ์พื้นเมืองมีความทนต่อการปักดำด้วยอายุกล้ามากดีกว่าพันธุ์สมัยใหม่ ซึ่งความทนต่อการปักดำด้วยกล้าที่อายุมากๆ นั้นจะสัมพันธ์กับอายุของข้าว โดยข้าวอายุสั้นจะมีความทนทานน้อยกว่าข้าวอายุยาว (Mckill *et al.*, 1996) และสามารถใช้อธิบายความแตกต่างของผลการทดลองที่คล้ายกันสองการทดลองที่ เจิมและคณะ (2522) (อ้างโดยชุติวัฒน์ และคณะ(2538)) รายงานว่ากล้าข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อายุ 30 และ 45 วันให้ผลผลิตไม่ต่างกัน ขณะที่ชุติวัฒน์ และคณะ(2538) รายงานว่ากล้าขาวดอกมะลิที่อายุ 45 และ 60 วันให้ผลผลิตที่ต่ำกว่าที่ใช้กล้าอายุ 30 วันประมาณ 5-6 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการทดลองหลังนั้นข้าวมีระยะ vegetative phase สั้นกว่า



ภาพ 23 ผลการจำลองอิทธิพลอายุกล้ากับวันสิ้นสุดระยะ juvenile และ วันกำเนิดช่อดอก (PI) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 ที่ปักดำ 9 กย. 2542 ม.เชียงใหม่



ภาพ 24 ผลการจำลองอิทธิพลของอายุกล้า ต่อผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ105 และ ชัยนาท 1 ที่ ปักดำ 13 สค.2542 และ 9 กย.2542 ม.เชียงใหม่



ภาพ 25 ผลการจำลอง อิทธิพลของน้ำหนักต้นกล้า(อายุ 25 วัน) ต่อผลผลิตของขาวดอกมะลิ105 และชัยนาท 1 ปักดำ 15 สค. 2542 ม.เชียงใหม่

การเปรียบเทียบผลผลิตจากการจำลองของวิธีการปักดำกับวิธีการหว่านน้ำตม พบว่าผลผลิตจากการจำลองที่ได้จากการปักดำที่ใช้ความหนาแน่น 48 ต้น/ตร.ม. มีแนวโน้มที่น้อยกว่าการหว่านน้ำตม ที่มีอัตราประชากรสูงกว่า (ภาพ 26) อย่างไรก็ตาม ผลจากวิเคราะห์ทางสถิติของการทดลองปลูกจริง พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างการปักดำกับการหว่านน้ำตมด้วยอัตราเมล็ดที่ต่างกัน ทั้งในปี 2541 และ 2542 (ตารางภาคผนวก 4) ซึ่งสอดคล้องกับหลายงานทดลองที่รายงานว่าวิธีการปลูกต่างๆ ไม่ทำให้ผลผลิตต่างกันมากนักถ้าปัจจัยอื่นไม่เป็นข้อจำกัด (De Datta ,1981) ขณะที่ Torres *et al.* (1994) รายงานว่าแม้การปักดำจะชะลออายุการเจริญของข้าว และทำให้ข้าวมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำในช่วงแรกๆ แต่เมื่อข้าวที่ปักดำฟื้นตัวแล้วจะมีพื้นที่ใบจำนวนหน่อ และใบที่มากกว่าปลูกด้วยเมล็ดโดยตรง และยังพบว่าที่ระยะออกดอกจำนวนหน่อจะลดลงใกล้เคียงกันสำหรับทุกวิธีการปลูกและการใช้อายุกล้าที่ต่าง กัน

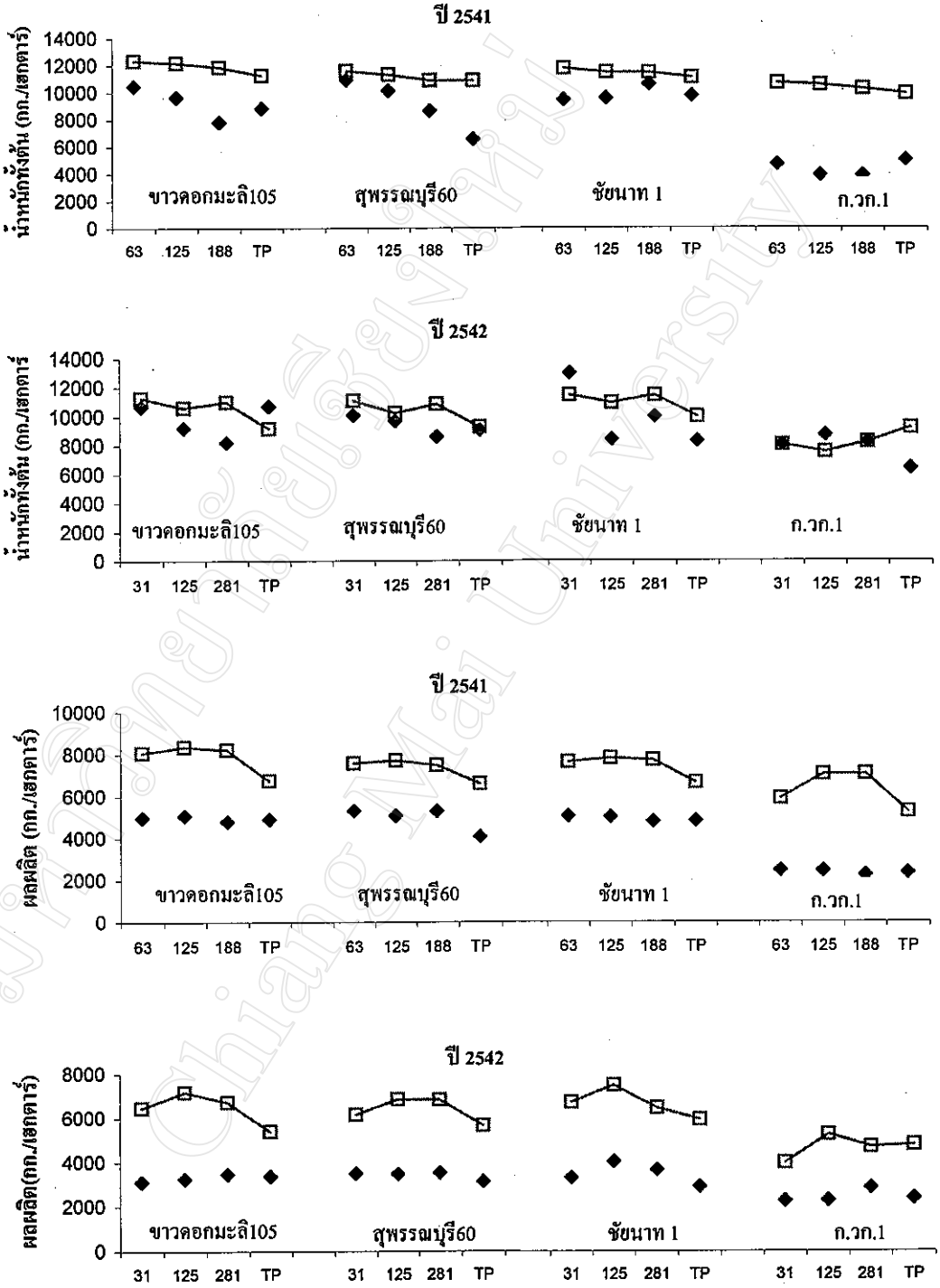
การศึกษาสมการแบบจำลองอิทธิพลการปักดำนั้นพบว่า แบบจำลองนั้นจำลองผลกระทบจากการปักดำต่อผลผลิต โดยกำหนดให้มีค่าสัมประสิทธิ์ transplanting shock ที่ลดอัตราการสะสมน้ำหนักหลังปักดำเป็นเวลา 14 วัน โดยอัตราการลดลงนี้มีความสัมพันธ์กับอายุกล้าที่ปักดำ

ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าน้ำหนักทั้งต้นของข้าวที่ปลูกแบบปักดำในหลาย ๆ กรณีจะต่ำกว่าน้ำหนักที่ได้จากการหว่าน แต่ผลผลิตที่ได้อยู่ในระดับใกล้เคียงกัน ทำนองเดียวกับผลการทดลองในแปลง และยังพบว่าจำนวนเมล็ดดี/รวงที่วัดได้จริงของข้าวที่ปลูกแบบปักดำจะมีมากกว่าจำนวนเมล็ด/รวงของข้าวที่ปลูกโดยการหว่าน และจำนวนเมล็ดดี/รวงลดลงเมื่อใช้อัตราเมล็ดพันธุ์เพิ่มขึ้น (ตารางภาคผนวก 4,5 และ 6) การเพิ่มจำนวนเมล็ด/รวงจึงเป็นการชดเชยที่จำนวนรวง/ตร.ม.น้อยกว่า (Matsushima, 1970)

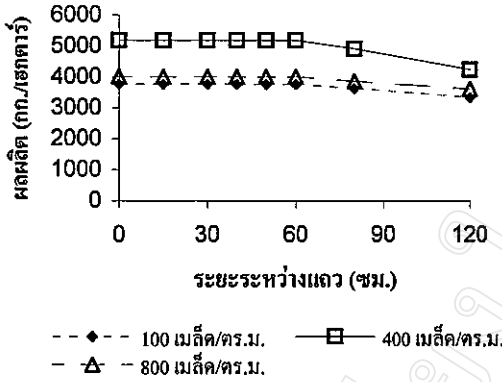
ผลผลิตที่วัดจริงจากแปลงนาหว่านน้อยกว่าผลผลิตที่ได้จากการจำลองมาก โดยการสังเกตพบว่าข้าวนาหว่านเสียหายจากการหักล้มมากกว่าที่ปักดำ อาจเป็นเพราะการปลูกแบบปักดำมีพื้นที่ระหว่างกอข้าวมากกว่า และปักดำลึกมากกว่าหว่านเมล็ด มีการเกิดรากใหม่ และรากเจริญเติบโตและยึดดินได้ดีกว่า ทำให้ต้านทานต่อการหักล้มมากกว่า ขณะที่แบบจำลองไม่มีกลไกจำลองความเสียหายจากการหักล้ม หรือความลึกในการปักดำ

การทดสอบตัวแปรนำเข้าที่เกี่ยวกับวิธีการปลูกแบบปักดำ

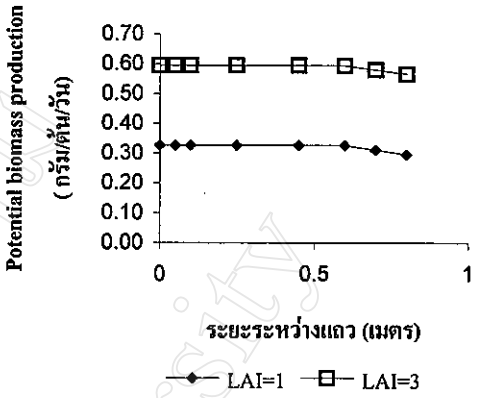
ระยะระหว่างแถว (ROWSPC) ที่เป็นตัวแปรหนึ่งในสมการการสังเคราะห์แสง พบว่าที่ความหนาแน่นประชากรเท่ากัน ระยะระหว่างแถวไม่มีอิทธิพลต่อการสร้างน้ำหนักสูงสุดต่อต้น (ภาพ 27 ก) หรือต่อผลผลิต(ภาพ 27 ข) ถ้าระยะระหว่างแถวไม่เกิน 60 ซม. แสดงว่า ความแตกต่างระหว่างอัตราเมล็ดพันธุ์ หรือจำนวนกอหรือต้น/ตร.ม. ไม่ใช่ผลของระยะระหว่างแถว การ



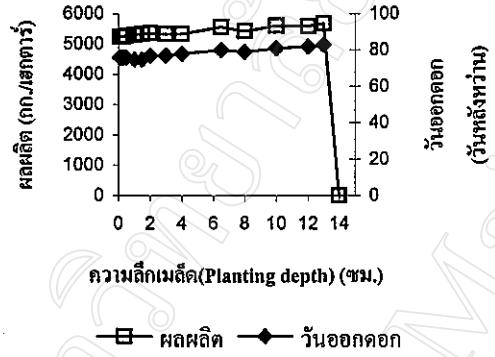
ภาพ 26 น้ำหนักทั้งต้นและผลผลิต ค่าสังเกต(obs)กับค่าจำลอง(sim) ของการหว่านน้ำตมที่อัตราเมล็ดพันธุ์ต่าง ๆ และการปักดำที่ 48 ต้น/ตร.ม. ม.เชียงใหม่ 2541-42



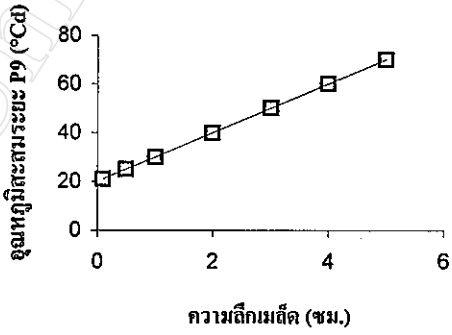
ภาพ 27 ก. ระยะระหว่างแถว และอัตราเมล็ด กับผลผลิต(จำลอง)
ข้าวขาวดอกมะลิ105 หว่าน 15 สค 41 ม.เชียงใหม่



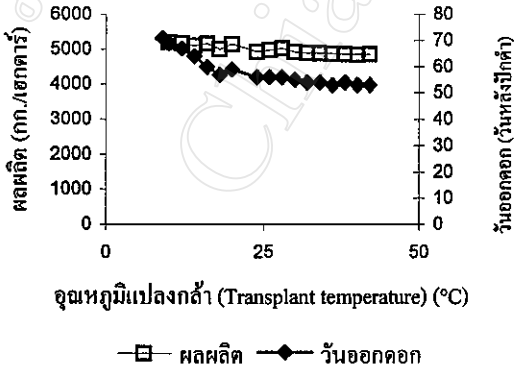
ภาพ 27 ข ระยะระหว่างแถวกับการสังเคราะห์แสงสูงสุด
ที่ LAI ต่างกัน (จากสมการแบบจำลอง)



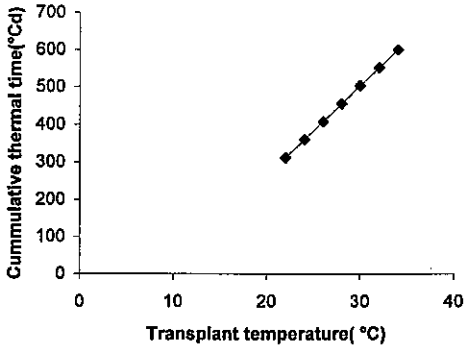
ภาพ 28 ก ความลึกเมล็ดปลูก กับผลผลิต วันออกดอก(การจำลอง)
ข้าวขาวดอกมะลิ105 หว่าน 15 สค 41 ม.เชียงใหม่



ภาพ 28 ข ความลึกเมล็ดกับอุณหภูมิสะสม ที่
ระยะ P9 (germination-emergence)



ภาพ 29 ก. อุณหภูมิแปลงกล้า กับผลผลิต วันออกดอก (การจำลอง)
ข้าวขาวดอกมะลิ105 ปักดำ 15 สค 41 ม.เชียงใหม่



ภาพ 29 ข. อุณหภูมิแปลงกล้ากับอุณหภูมิสะสม
ของข้าวระยะเป็นกล้า

กำหนดระยะระหว่างแถวในแบบจำลองที่ต่ำกว่า 60 ซม. จึงไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญ

ความลึกของเมล็ดที่ปลูก (PDEPTH) มีอิทธิพลต่อผลผลิตไม่มากนัก โดยจะผลผลิตจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามอายุข้าวถ้าความลึกมากขึ้น (ภาพ 28 ก) ซึ่งถ้าความลึกเกิน 13 ซม. แบบจำลองจะรายงานว่า เมล็ดจะงอกไม่ได้เนื่องจากสารอาหารในเมล็ด (seed metabolite) หมดก่อนที่จะงอกพ้นดิน ซึ่งในกรณีที่ปลูกแบบปักดำ ตัวแปร PDEPTH หมายถึงความลึกเมล็ดที่ตกกล้าที่ใช้ในการคำนวณอายุกล้าระยะปลูกจนเมล็ดงอก (P9)(ภาพ 28 ข) ไม่ใช่ความลึกที่ปักดำ ซึ่งมีผลต่อการแตกกอ (De Datta, 1981)

อุณหภูมิเฉลี่ยที่สูงขึ้นในช่วงการเจริญของต้นกล้า (ATEMP) ทำให้ผลผลิตลดลง ขณะที่อายุสุกแก่หลังปักดำก็ลดลงด้วย (ภาพ 29 ก) เนื่องจากตัวแปรนำเข้านี้จะใช้ในการคำนวณอายุกล้าข้าวเป็นอุณหภูมิสะสม อุณหภูมิ ATEMP ที่สูงขึ้นหมายถึงอายุกล้าที่เป็นอุณหภูมิสะสมที่มากขึ้น (ภาพ 29 ข) ซึ่งจะทำให้อายุที่เหลือหลังปักดำสั้นลง และผลผลิตก็จะลดลง ทำนองเดียวกับความสัมพันธ์อายุกล้ากับผลผลิต

2.2 อิทธิพลของอัตราเมล็ดพันธุ์ (seeding rate)

การจำลองอิทธิพลของอัตราเมล็ดพันธุ์ทั้งในปี 2541 และ 2542 พบว่า ผลผลิตจากการจำลองการหว่านด้วยอัตราเมล็ดพันธุ์ต่าง ๆ ตั้งแต่ 31.25 ถึง 281.25 กก./เฮกตาร์ ใกล้เคียงกัน โดยอัตราเมล็ดพันธุ์ที่ให้ผลผลิตจากการจำลองสูงสุดของข้าวทั้งสี่พันธุ์ (ขาวดอกมะลิ 105 สุพรรณบุรี 60 ชัยนาท 1 และ ก.วก. 1) อยู่ที่ 125-187 กก./เฮกตาร์ หรือที่ประมาณ 400-600 เมล็ด/ตร.ม. (ภาพ 26) โดยค่าผลผลิตที่วัดได้จริงส่วนใหญ่ น้อยกว่าค่าที่ได้จากการจำลองมาก (ภาพ 26) แต่ก็มีทิศทางตอบสนองต่ออัตราเมล็ดเป็นไปในทำนองเดียวกัน ทั้งในปี 2541 และ 2542 ขณะที่น้ำหนักรวมทั้งต้นที่จำลองได้กับที่วัดได้จริงใกล้เคียงกันและมีการตอบสนองทำนองเดียวกันเป็นส่วนใหญ่ คืออัตราเมล็ดพันธุ์มากขึ้นทำให้น้ำหนักรวมทั้งต้นลดน้อยลง (ภาพ 26) ซึ่งน่าจะเป็นเพราะมีการแข่งขันกันมากขึ้นในประชากรที่หนาแน่นมาก และมีการชดเชยด้วยการแตกกอในประชากรที่น้อย

การวิเคราะห์ทางสถิติของผลผลิตของข้าวที่หว่านด้วยอัตราเมล็ดพันธุ์ต่าง ๆ กัน จากแปลงทดลองพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ของข้าวทั้ง 4 พันธุ์ ทั้งสองปี (ตารางภาคผนวก 4) ขณะที่น้ำหนักทั้งต้น และความหนาแน่นรวง ไม่แตกต่างกันในปี 2541 ที่ใช้เมล็ดพันธุ์อัตรา 62.5, 12.5 และ 187.5 กก./เฮกตาร์ แต่แตกต่างกันในปี 2542 ที่ใช้เมล็ดพันธุ์อัตรา 31.25, 125

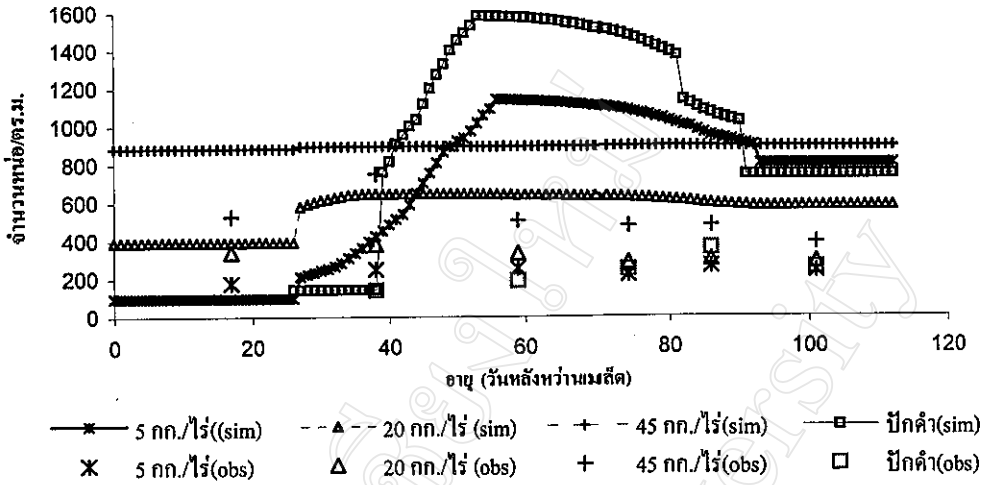
และ 281.25 กก./เฮกตาร์ สอดคล้องกับที่รายงานโดย De Datta (1981) และ สุเทพ และคณะ (2537) และสังเกตพบว่ามีอัตราการตายของต้นและหน่อสูงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉพาะในแปลงที่มีอัตราเมล็ดพันธุ์สูง

ผลการจำลองการแตกกอของข้าวที่ได้รับปุ๋ย 90 กก.N/เฮกตาร์ ตามงานทดลองในปี 2542 (ภาพ 30) แสดงให้เห็นว่า การปลูกด้วยอัตราประชากรต่ำ ที่ได้แก่ การใช้เมล็ดหว่านในอัตรา 31.25 กก./เฮกตาร์ และการปักดำที่ใช้กล้า 48 ต้น/ตร.ม. ความหนาแน่นของหน่อเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง 40-60 วันหลังปลูก และลดลงอย่างรวดเร็วในระยะสะสมน้ำหนักเมล็ด ขณะที่การใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ 281.25 กก./เฮกตาร์ ที่ให้ความหนาแน่นต้นเท่ากับจำนวนหน่อ 900 หน่อ/ตร.ม. ตลอดฤดูปลูก (ภาพ 30) แตกต่างจากข้อมูลที่วัดจริง ที่อัตราเมล็ดพันธุ์ที่สูงขึ้นมีการแตกกอสูงขึ้นตามลำดับ และให้ค่าความหนาแน่นของหน่อต่ำกว่าค่าจากการจำลองอย่างมากทุกๆ อัตราเมล็ดพันธุ์ (ภาพ 30) โดยในการปลูกจริงมีการตายของต้นข้าวตั้งแต่ระยะแรกๆ มาก ในทุกอัตราเมล็ดพันธุ์ ขณะที่การจำลองไม่มีการตายของต้นเลย การลดลงของจำนวนหน่อหลังเกิดรวงจากการจำลองนั้น พบว่าไม่เกิดจากข้อจำกัดของไนโตรเจนเท่านั้น แต่ยังมีข้อจำกัดของการสร้างผลผลิตที่จำกัดโดยการบังแสงกันของใบที่มากเกินไปอีกด้วย

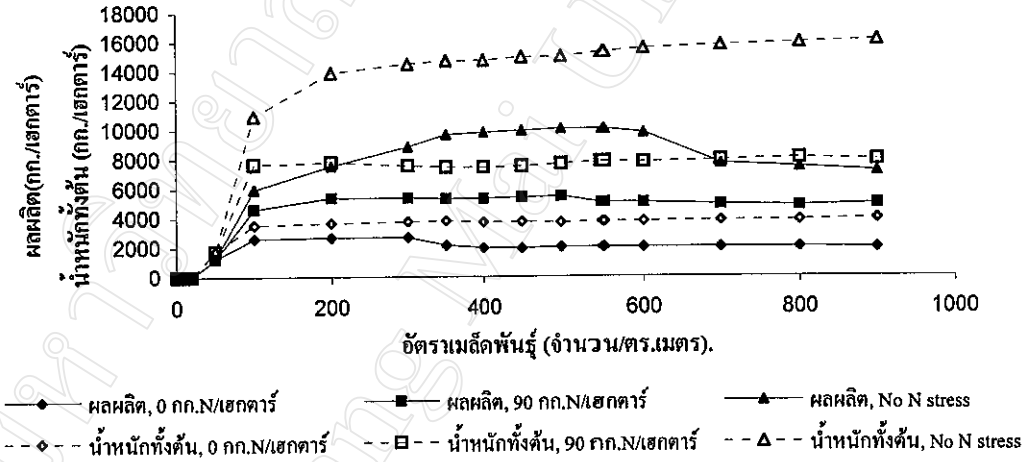
การจำลองการปลูกด้วยวิธีการหว่านน้ำตมของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อัตราเมล็ดพันธุ์ตั้งแต่ 5-900 เมล็ด/ตร.ม. ที่ระดับปุ๋ยไนโตรเจนต่างกัน พบว่ารูปแบบการตอบสนองของผลผลิตหรือน้ำหนักแห้งใกล้เคียงกันที่ระดับปุ๋ยไนโตรเจนต่างกัน ใกล้เคียงกัน (ภาพ 31) โดยที่อัตราเมล็ดพันธุ์ 5 –100 เมล็ด/ตร.ม. ผลผลิตและน้ำหนักทั้งต้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราเมล็ดพันธุ์ แสดงถึงการไม่มีข้อจำกัดของความหนาแน่นในช่วงนี้ ขณะที่การใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ที่เกิน 100 เมล็ด/ตร.ม. น้ำหนักทั้งต้นไม่เพิ่ม และอัตราเพิ่มผลผลิตเริ่มลดลง แสดงให้เห็นอิทธิพลทางลบของความหนาแน่น โดยกรณีที่ไม่จำลองระบบไนโตรเจนและน้ำ อัตราเมล็ดพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูงสุดอยู่ที่ 400-600 เมล็ด/ตร.ม. (ภาพ 31) ใกล้เคียงกับที่ Huey (1984) (อ้างโดย Miller and Hill (1988)) รายงานว่าอัตราเมล็ดพันธุ์ข้าวทำให้ผลผลิตสูงสุดอยู่ที่ 430-645 เมล็ด/ตร.ม. หรือที่ 50-168 กก./เฮกตาร์ ขึ้นอยู่กับวันปลูก วิธีการปลูก การให้น้ำ พันธุ์ และระดับไนโตรเจน

กรณีที่ไม่จำลองระบบไนโตรเจนและน้ำ คือไม่มีข้อจำกัดของไนโตรเจนและน้ำ อัตราเมล็ดพันธุ์ที่เพิ่มสูงกว่า 600 เมล็ด/ตร.ม. ให้ผลผลิตลดลง โดยที่น้ำหนักรวมทั้งต้นจะไม่ลดลงเมื่อใช้อัตราเมล็ดที่สูงขึ้นเหมือนกับผลผลิต (ภาพ 31) แสดงถึงว่ามีการจำลองความเครียดจากการบังแสงของความหนาแน่นที่มากเกินไป จนทำให้ผลผลิตจากการจำลองลดลงเมื่อใช้อัตราเมล็ดสูง

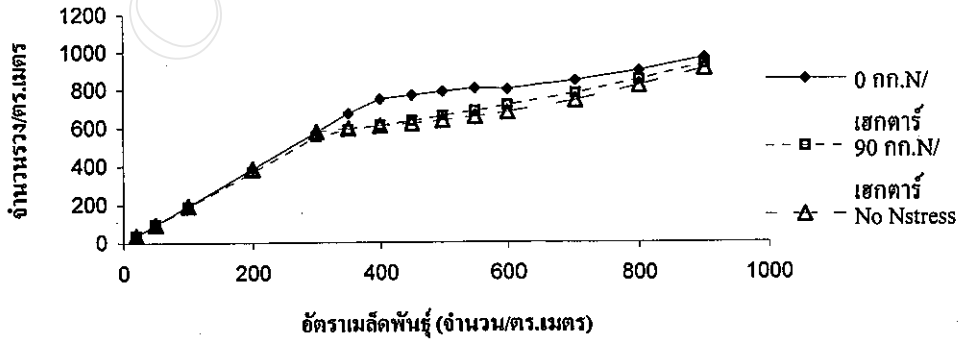
ค่าความหนาแน่นของรวงทั้งสามระดับปุ๋ยไนโตรเจน 0, 90 กก.N/เฮกตาร์ และ No N-stress ที่จำลองได้ เพิ่มขึ้นตามอัตราเมล็ดพันธุ์ที่ใช้ และไม่แตกต่างกันในช่วงที่ใช้อัตราเมล็ดพันธุ์ต่ำกว่า



ภาพ 30 เปรียบเทียบจำนวนหน่อ/ตร.ม. ของข้าวขาวดอกมะลิ105 ระหว่างค่าจำลอง(sim) ด้วย CERES-Rice3.5 (G3= 1.0) กับค่าสังเกต (obs) วิธีหว่านน้ำตมที่อัตราเมล็ด ต่างๆ และปักดำ ม.เชียงใหม่ 2542



ภาพ 31 ผลผลิตและ น้ำหนักทั้งต้น จากการจำลองการปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105 ด้วยวิธีหว่านน้ำตม ด้วยอัตราเมล็ดต่างๆ ที่อัตราปุ๋ยไนโตรเจนระดับต่างๆ ม.เชียงใหม่ วันปลูก10 สค.2542



ภาพ 32 ความหนาแน่นรวง จากการจำลองการปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105 ด้วยวิธีหว่านน้ำตม ด้วยอัตราเมล็ดต่างๆ ที่ระดับไนโตรเจนระดับต่างๆ ม.เชียงใหม่ วันปลูก 10 สค.2542

300 เมล็ด/ตร.ม. (ภาพ 32) และยังพบว่าเมื่ออัตราเมล็ดมากขึ้นแปลงที่ไม่ให้ปุ๋ยไนโตรเจนให้ความหนาแน่นรวงมากกว่าแปลงที่ให้ปุ๋ยไนโตรเจน หรือที่ไม่มีความเครียดไนโตรเจนเลย เพียงเล็กน้อย ยืนยันให้เห็นว่าในแบบจำลองนี้ จำนวนรวง/ตร.ม.ไม่น่าจะมีผลต่อผลผลิต และไม่ได้สะท้อนระดับการเจริญเติบโต ทั้ง ๆ ที่ความหนาแน่นของหน่อหรือรวงน่าที่จะจะแปรผันตามสิ่งแวดล้อมหรือปุ๋ยไนโตรเจนมาก (Miller and Hill, 1988) ซึ่งการศึกษาสมการแบบจำลองที่เกี่ยวกับการแตกกอพบว่าแบบจำลองคำนวณผลผลิตจากผลผลิตต้นหลักรวมกับผลผลิตจากหน่อทั้งหมด ไม่ได้คำนวณจากจำนวนของแต่ละหน่อ ดังนั้นจำนวนหน่อของแบบจำลองจึงไม่สัมพันธ์กับผลผลิตต่อพื้นที่ และไม่มีการจำลองเปอร์เซ็นต์ของหน่อที่มีรวง โดยการคำนวณผลผลิตต่อพื้นที่ขึ้นอยู่กับจำนวนเมล็ดดี/ต้นกับจำนวนต้น/ตร.ม. (จิรวัฒน์, 2544)

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

สรุป

การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยการจัดการที่ได้แก่ การให้ปุ๋ยไนโตรเจน การให้น้ำ วิธีการปลูก และอัตราเมล็ดพันธุ์ ด้วยการใช้แบบจำลองการเจริญเติบโตของข้าว CERES-Rice 3.5 จะทำให้สามารถนำแบบจำลองไปใช้ประโยชน์ในงานวิจัยและพัฒนาการผลิตข้าวอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการศึกษาโครงสร้างและสมการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในแบบจำลอง และการทดสอบการจำลองงานทดลองที่ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการจัดการสำคัญที่ได้แก่ การให้น้ำ และปุ๋ยไนโตรเจน วิธีการปลูก และอัตราเมล็ดพันธุ์ ทำให้สามารถวิเคราะห์เป็นภาพรวมของระบบที่มีความเชื่อมโยงขององค์ประกอบต่างๆ ที่สัมพันธ์กับปัจจัยการจัดการที่ศึกษา และกระบวนการต่างๆ ที่นำไปสู่ระบบการเจริญเติบโตและการสร้างผลผลิตข้าว

การวิเคราะห์ผลจากแบบจำลอง สามารถใช้รายละเอียดที่เกิดขึ้นการจำลองจำนวนมาก ที่ได้แก่การวิเคราะห์องค์ประกอบผลผลิต ระยะพัฒนาการ ระดับความเครียดในแต่ละระยะพัฒนาการที่จำกัดการเจริญเติบโต และการเปลี่ยนแปลงของ องค์ประกอบสมดุลน้ำและไนโตรเจน

การแสดงค่าความเครียดน้ำและไนโตรเจนในแต่ละระยะการเจริญของแบบจำลอง อธิบายการลดลงของผลผลิตจากค่าศักยภาพได้อย่างดี และแสดงความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันของอิทธิพลน้ำและไนโตรเจน ต่อผลผลิต โดยไนโตรเจนเพิ่มพื้นที่ใบ ซึ่งมีผลต่อศักยภาพการคายน้ำ และมีผลต่อการเจริญเติบโตของรากที่ดูดน้ำด้วย และน้ำมีผลต่อความเครียดไนโตรเจนหลายทาง ได้แก่ ปริมาณความเป็นประโยชน์ไนโตรเจนในดิน และ การสูญเสียไนโตรเจนจากระบบไปกับน้ำ หรือจากปฏิกิริยาน้ำขัง

แบบจำลองแสดงการตอบสนองต่ออิทธิพลของระดับไนโตรเจนที่สัมพันธ์กับสภาพของน้ำในดินได้มากเช่นเดียวกับผลที่วัดได้จริง โดยสามารถวิเคราะห์จากองค์ประกอบของการได้รับและสูญเสียไนโตรเจนในระบบ เช่น การสลายให้ไนโตรเจนของอินทรียวัตถุ การสูญเสียแอมโมเนียในสภาพน้ำขัง แต่ไม่ตอบสนองวิธีการไถเตรียมดินหรือวิธีการใส่ปุ๋ย

การจำลองการให้น้ำ แสดงให้เห็นความคลาดเคลื่อนจากการควบคุมน้ำและไนโตรเจนของงานทดลองจริงที่มีการรั่วซึมระหว่างแปลง แสดงถึงความสามารถในการใช้แบบจำลองในการทดสอบปัจจัยการจัดการ ที่ควบคุมได้ดีกว่าสภาพแปลงทดลอง

แบบจำลองสามารถจำลองอิทธิพลของการปักดำต่อพัฒนาการและผลผลิต รวมถึงอิทธิพลของอัตราเมล็ดพันธุ์หรือความหนาแน่นประชากร ซึ่งสอดคล้องกันกับค่าที่วัดได้จากการทดลอง

จริง แม้ว่าแบบจำลองให้อัตราการแตกกอที่คลาดเคลื่อนและไม่สามารถปรับด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแตกกอได้อย่างเหมาะสม แต่พบว่าการคำนวณจำนวนการแตกหน่อไม่สัมพันธ์กับการทำนายผลผลิต

ความถูกต้อง และความละเอียดของข้อมูลนำเข้า เป็นองค์ประกอบสำคัญของความถูกต้องแม่นยำในการจำลองอิทธิพลปัจจัยการจัดการ โดยเฉพาะรายละเอียดวิธีและเงื่อนไขในการปลูก การจัดการในการให้น้ำ และ การให้ปุ๋ยไนโตรเจน ที่มีการให้ปุ๋ยชนิดอื่นอย่างเพียงพอ ข้อมูลชุดดิน ปริมาณคาร์บอนจากสารอินทรีย์และไนโตรเจนในดินก่อนปลูก ข้อมูลภูมิอากาศ ซึ่งทุกปัจจัยสามารถมีผลต่อกระบวนการจำลองการเจริญเติบโต และผลผลิต อย่างมาก

การใช้แบบจำลองกับปัจจัยการจัดการในการปลูกข้าว แม้ว่าเป็นการประหยัดเวลา กำลังคน ค่าใช้จ่ายอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับการทำการทดลองปลูกจริง แต่ไม่ใช่การทดแทนการวิจัยด้วยงานทดลองปลูกจริง เพราะแบบจำลองมีข้อจำกัดตามขีดความสามารถของแบบจำลองที่ประกอบด้วย สมมติฐานและทฤษฎีซึ่งอาจยังไม่สมบูรณ์ หรือไม่สามารถครอบคลุมทุกปัจจัย ที่มีจำนวนมาก เกี่ยวพันกันซับซ้อนและแปรปรวน รวมถึงความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่นำเข้าในแบบจำลองด้วย แต่แบบจำลองสามารถช่วยอธิบายข้อมูลที่เกิดขึ้นจริง และขยายความรู้จากงานวิจัย และสามารถเชื่อมโยงความรู้ และการใช้ประโยชน์ของทฤษฎี และความรู้จากงานวิจัยที่ผ่านมา ร่วมกับความรู้จากผลการทดลองที่ปลูกจริง โดยที่ความแตกต่างระหว่างสภาพเกิดขึ้นจริงในแปลงปลูกกันผลจากการจำลองระบบของแบบจำลอง บ่งชี้ถึงความแตกต่างระหว่างข้อเท็จจริงกับทฤษฎี ซึ่งจะนำไปสู่การกำหนดเป็นเงื่อนไข ทฤษฎีและความรู้ใหม่ เพื่อการพัฒนางานวิจัยและพัฒนา

ความสามารถในการอธิบายแนวโน้มการตอบสนองการเจริญเติบโตทั้งทางทิศทางและปริมาณของแบบจำลองที่ปรับใช้ได้อย่างถูกต้อง สามารถนำไปใช้คาดคะเนผลผลิตที่ควรจะเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการใช้การจัดการต่างๆในระบบการผลิตทางการเกษตร ที่มักจะมีหลากหลายรูปแบบและมีผลกระทบที่ซับซ้อนและแปรปรวน ถือว่าเป็นเครื่องมือช่วยการตัดสินใจทางการจัดการอย่างมีเหตุผลตามหลักวิทยาศาสตร์ และอย่างเป็นระบบ

เอกสารอ้างอิง

จิรวัฒน์ เวชแพศย์ 2544 วิเคราะห์การใช้แบบจำลอง CERES-Rice 3.5 เพื่อศึกษาอิทธิพลของภูมิอากาศและพันธุกรรมที่มีต่อผลผลิตข้าว *ใน* การใช้วิธีวิจัยเชิงระบบเพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยต่อผลผลิตและคุณภาพการสีของข้าว วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

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

นิวัฒน์ นภีรงค์ และสมบัติ รุจาคม. 2540. การตอบสนองของรากต่อการใส่ปุ๋ยไนโตรเจน และปริมาณน้ำที่ได้รับในข้าวขาวดอกมะลิ 105. วารสารเกษตร 13(3) : 235-247 (2540)

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

สุเทพ นุชสวาท เล็ก จันทร์เกษม ประภา ทองเสน อานันต์ ผลวัฒนะ วิญญู วงศ์อุบล และ บุญโฮม ชำนาญกุล. 2537. อัตราเมล็ดพันธุ์ที่เหมาะสมสำหรับการปลูกข้าวญี่ปุ่นโดยวิธีหว่านน้ำตม. เอกสารประกอบการสัมมนาทางวิชาการเรื่องข้าวและธัญพืชเมืองหนาวครั้งที่ 6. ศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลก. 8-9 มีนาคม 2537

อัมมาร สยามวาลา และ วิโรจน์ ณ ระนอง.2533. ประมวลความรู้เรื่องข้าว สถาบันวิจัยเพื่อพัฒนาประเทศไทย. กรุงเทพฯ. 436 หน้า.

Arnon, I. 1989. Agricultural Research and Technology Tranfer. Elsevier Applied Science Publisheres Ltd. England. 825 pp.

Bowen W.T. and W.E. Baethgen.1988. Simulation as a tool for improving nitrogen management. G.Y. Tsuji et al.(eds): Understanding Option for Agricultural Production, 189-204.

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

Fischer, K.S. and Cordova, V.G. 1998. Impact of IRRI on rice science and production. Edited by P.Pingali and M.Hossain. 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, P.O.Box 933, Manila, Philippines. P 27-50.

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

Godwin D.C. and U. Singh. 1998. Nitrogen balance and crop response to nitrogen in upland and lowland cropping systems. G.Y.Tsuji et al. (eds): Understanding Option for Agricultural Production, 55-77.

Huang, K. 1980.Mineralization of soil organic matter. In Increasing Nitrogen Efficiency for Rice Cultivation. Food and Fertilizer Technology Center. Taiwan, Republic of China. p 39-53

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 Suuport System for Rapid Appraisal of Rice-Based Agricultural Innovations. Ph.D.Dissertation. University of Hawaii .

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.

Kupranchanakul, T. 1981. Factors affecting tillering ability and yield performance of rice cultivars at different water levels. Ph.D. Dissertation. University of the philippines at Los Banos.

Matsushima, S. 1970. Crop Science in Rice. Fuji Publ. Co. Ltd., Tokyo, 367p

Matsubayashi, M., R.Ito, T.Takase, T.Nomoto, and N.Yamada. 1965. Theory and Practice of Growing Rice. Fuji Publishing Co.Ltd. Tokyo. .502 pp.

Mckill, D.J., W.R.Coffman, D.P.Garrity. 1996. Rainfed lowland rice improvement. International Rice Research Institute, P.O. Box933, Manila, Philippines.242p.

Mikkelsen, D.S., G.R. Jayaweera, and D.E.Rolston. 1995. Nitrogen fertilization practices of lowland rice culture. Nitrogen Ferilization in the Environment. Sydney, New South Wales, Australia. P.p.171-223

Miller, C. Baird and J.E. Hill. 1988. The effect of plant density on tiller, phytomass, yield component, and yield development of continuoulsly flooded, direct seeded rice. University of California, Davis.

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

Pantuwan, G. P.K.Sharma. and K.T.Ingram. 1995.Rice root growth in relation to soil physical characteristics and variety. Ingram K T ,ed. Rainfed lowland rice – agricultural research for high-rish environments. International Rice Research Institute, P.O.Box 933, Manila 1099, Philippines. pp.69-78.

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

Ritchie,J.T.,B.C.Alocilja, V.,Singh, and G. Vehara. 1986. IBSNAT/CERES Rice Model grotechnology 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. 1998. Soil water balance and plant water stress. . G.Y.Tsuji et al. (eds): Understanding Option for Agricultural Production, 41-54.

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

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]. International Fertilizer Development Research Center.

Takenaga, H. 1995. Nutrient Absorption in Relation to Environmental Factors. In Matsuo, T., K. Kumazawa, R. Ishii, K. Ishihara, and H. Hirata ed. Science of the Rice Plant. Vol. 2 Physiology. Food and Agriculture Policy Research Center, Tokyo, Japan. p 278-310

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 simulatioin 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; Los Banos: 33-40.

Uehara, G and G.Y.Tsuji. 1998. Overview of IBSNAT. G.Y. Tsuji et. Al. (eds.): Understanding options for agricultural production, 1-7 . Kluwer Academic Publishers

Von Uexktill, H.R. 1993. Aspects of Fertilizer Use in Modern, High-Yield Rice Culture. International Potash Institute. Switzerland.85 p

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

ตารางภาคผนวก 1 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวน การทดลองอัตราปุ๋ยไนโตรเจนและการให้น้ำ ม.เชียงใหม่ 2541-2542

ปี: 2541

ตัวแปร	I	V	I*V	N	V*N	I*V*N	ค่าเฉลี่ย	%CV
ผลผลิต	ns	ns	ns	**	*	*	3581.9	11.2
นน.รวมทั้งต้น	ns	ns	ns	**	ns	ns	9347.3	16.3
ดัชนีเก็บเกี่ยว	ns	ns	ns	ns	*	ns	0.3984	20.0
รวงต่อตร.ม.	ns	*	ns	**	ns	ns	198.2	12.6
ดอกย่อยต่อรวง	ns	**	ns	ns	ns	ns	81.716	10.5
เปอร์เซ็นต์เมล็ดลีบ	ns	ns	ns	ns	**	ns	15.514	23.4
นน.100 เมล็ด	ns	*	ns	**	ns	ns	2.6582	3.9
%N ทั้งต้น	ns	ns	ns	**	ns	ns	1.103	10.9
%N ข้าวเปลือก	*	ns	*	**	ns	*	1.624	7.3

ปี 2542

ตัวแปร	I	V	I*V	N	V*N	I*V*N	ค่าเฉลี่ย	%CV
ผลผลิต	ns	ns	ns	**	*	**	4356.7	8.8
นน.รวมทั้งต้น	*	ns	ns	**	ns	ns	11291	12.7
ดัชนีเก็บเกี่ยว	ns	ns	ns	**	**	*	0.3944	10.3
รวง ต่อ ตร.ม.	*	ns	ns	**	ns	**	280.21	14.2
ดอกย่อยต่อรวง	ns	*	ns	ns	ns	*	76.082	14.2
เปอร์เซ็นต์เมล็ดลีบ	ns	ns	ns	**	*	ns	22.728	27.2
นน.100 เมล็ด	ns	**	ns	**	**	ns	2.74	2.3
%N ข้าวเปลือก	ns	ns	ns	**	ns	ns	1.7035	13.0

หมายเหตุ :

I การให้น้ำ (น้ำชลประทาน, น้ำฝน)

V พันธุ์ (ขาวดอกมะลิ105 , ชัยนาท1)

N อัตราปุ๋ยไนโตรเจน (ปี 2541: 0,45,90,135 กก.N/เฮกตาร์ , ปี 2542 : 0,70,140,210 กก.N/เฮกตาร์)

* มีนัยสำคัญที่ระดับ .05

** มีนัยสำคัญที่ระดับ .01

ns ไม่มีนัยสำคัญ

ตารางภาคผนวก 2 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย การทดลองระดับปุ๋ยไนโตรเจน สภาพการให้น้ำ และพันธุ์ข้าว ม.เชียงใหม่ 2541

I	ผลผลิตกก/ha	นนทั้งต้น(กก/ha)	HI	รวง/ตร.ม.	ดอกย่อย/รวง	%เมล็ดลีบ	นน.100เมล็ด	%Nเมล็ด	%N ทั้งต้น
1	3,462	9,477	0.39	206	81.2	19.4	2.64	1.68	1.16
2	3,702	9,218	0.41	190	82.2	11.6	2.67	1.57	1.05
5%LSD	692	1,455	0.03	57	11.0	15.4	0.04	0.04	0.23

V	ผลผลิตกก/ha	นนทั้งต้น(กก/ha)	HI	รวง/ตร.ม.	ดอกย่อย/รวง	%เมล็ดลีบ	นน.100เมล็ด	%Nเมล็ด	%N ทั้งต้น
1	3,553	8,862	0.41	186	88.8	16.6	2.60	1.64	1.11
2	3,611	9,833	0.39	211	74.6	14.5	2.71	1.60	1.10
5%LSD	461	1,639	0.07	21	5.8	2.4	0.12	0.09	0.10

I	V	ผลผลิตกก/ha	นนทั้งต้น(กก/ha)	HI	รวง/ตร.ม.	ดอกย่อย/รวง	%เมล็ดลีบ	นน.100เมล็ด	%Nเมล็ด	%N ทั้งต้น
1	1	3,458	9,492	0.38	195	88.1	21.4	2.60	1.74	1.18
1	2	3,465	9,462	0.39	218	74.4	17.4	2.68	1.61	1.14
2	1	3,648	8,232	0.44	176	89.6	11.7	2.60	1.54	1.04
2	2	3,756	10,204	0.38	204	74.8	11.5	2.75	1.60	1.06
5%LSD		652	2,317	0.10	30	8.2	3.4	0.17	0.13	0.13

N	ผลผลิตกก/ha	นนทั้งต้น(กก/ha)	HI	รวง/ตร.ม.	ดอกย่อย/รวง	%เมล็ดลีบ	นน.100เมล็ด	%Nเมล็ด	%N ทั้งต้น
1	2,716	6,873	0.40	164	79.1	15.4	2.58	1.46	0.97
2	3,469	8,857	0.41	195	81.7	16.4	2.65	1.59	1.06
3	3,871	9,502	0.42	207	83.3	15.0	2.69	1.69	1.17
4	4,271	12,157	0.36	226	82.8	15.2	2.71	1.75	1.22
5%LSD	339	1,283	0.07	21	7.2	3.1	0.08	0.10	0.10

V	N	ผลผลิตกก/ha	นนทั้งต้น(กก/ha)	HI	รวง/ตร.ม.	ดอกย่อย/รวง	%เมล็ดลีบ	นน.100เมล็ด	%Nเมล็ด	%N ทั้งต้น
1	1	2,465	7,220	0.35	151	81.6	18.8	2.55	1.49	1.00
1	2	3,721	8,355	0.46	186	92.3	15.5	2.60	1.65	1.10
1	3	3,899	8,519	0.46	192	90.8	14.1	2.63	1.70	1.13
1	4	4,128	11,352	0.37	213	90.6	17.9	2.62	1.73	1.20
2	1	2,968	6,526	0.46	177	76.6	12.0	2.62	1.43	0.94
2	2	3,217	9,359	0.36	205	71.0	17.3	2.69	1.54	1.02
2	3	3,844	10,484	0.38	223	75.7	16.0	2.74	1.68	1.20
2	4	4,414	12,963	0.35	238	75.0	12.5	2.81	1.77	1.24
5%LSD		479	1,814	0.10	30	10.2	4.3	0.12	0.13	0.13

I	V	N	ผลผลิตกก/ha	นนทั้งต้น(กก/ha)	HI	รวง/ตร.ม.	ดอกย่อย/รวง	%เมล็ดลีบ	นน.100เมล็ด	%Nเมล็ด	%N ทั้งต้น
1	1	1	2,854	7,403	0.40	183	83.9	24.9	2.55	1.54	1.10
1	1	2	3,567	9,008	0.40	196	88.5	19.2	2.58	1.76	1.20
1	1	3	3,724	8,763	0.43	195	90.4	18.5	2.65	1.86	1.25
1	1	4	3,688	12,792	0.29	206	89.7	23.1	2.61	1.82	1.15
1	2	1	2,972	6,042	0.49	182	81.1	13.5	2.57	1.47	1.00
1	2	2	2,917	7,675	0.39	205	70.8	23.3	2.68	1.44	1.12
1	2	3	3,781	11,011	0.35	239	73.8	18.3	2.67	1.63	1.20
1	2	4	4,191	13,122	0.33	245	71.6	14.7	2.80	1.91	1.23
2	1	1	2,075	7,037	0.29	119	79.3	12.8	2.54	1.43	0.90
2	1	2	3,875	7,703	0.52	176	96.2	11.9	2.62	1.53	1.00
2	1	3	4,073	8,276	0.49	189	91.2	9.6	2.62	1.54	1.02
2	1	4	4,568	9,912	0.46	221	91.5	12.6	2.62	1.64	1.25
2	2	1	2,964	7,010	0.43	172	72.1	10.5	2.66	1.40	0.87
2	2	2	3,516	11,043	0.33	205	71.3	11.3	2.70	1.64	0.92
2	2	3	3,907	9,957	0.40	207	77.7	13.7	2.81	1.72	1.20
2	2	4	4,637	12,804	0.36	232	78.3	10.4	2.81	1.63	1.25
5%LSD			678	2,565	0.13	42	14.4	6.1	0.16	0.19	0.19

หมายเหตุ

I1 = ให้น้ำชลประทาน, I2= อาศัยน้ำฝน N 1 = 0 กก N/ha, N2 = 45 กก N/ha, N3 = 90 กก.N/ha, N4 = 135 กก.N/ha

V1 = ขาวดอกมะลิ105 , V2 = ชัยนาท 1

ตารางภาคผนวก 3 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย การทดลองระดับปุ๋ยไนโตรเจน สภาพการให้น้ำ และพันธุ์ข้าว ม.เชียงใหม่ 2542

I	ผลผลิตกก/ha	นนทั้งต้น(กก/ha)	HI	รวง/ตร.ม.	ดอกย่อย/รวง	%เมล็ดลีบ	นน.100เมล็ด	%Nเมล็ด
1	4,580	12,291	0.38	274	81.7	24.0	2.75	1.68
2	4,133	10,292	0.41	245	79.2	21.5	2.73	1.73
5%LSD	675	1,725	0.09	2	13.4	5.6	0.12	0.09

V	ผลผลิตกก/ha	นนทั้งต้น(กก/ha)	HI	รวง/ตร.ม.	ดอกย่อย/รวง	%เมล็ดลีบ	นน.100เมล็ด	%Nเมล็ด
1	4,237	11,790	0.37	254	85.9	26.0	2.64	1.72
2	4,477	10,793	0.42	264	75.0	19.5	2.84	1.68
5%LSD	1,050	1,829	0.08	23	8.3 1	11.4883	0.45	0.15

I	V	ผลผลิตกก/ha	นนทั้งต้น(กก/ha)	HI	รวง/ตร.ม.	ดอกย่อย/รวง	%เมล็ดลีบ	นน.100เมล็ด	%Nเมล็ด
1	1	4,528	12,934	0.36	266	90.3	27.5	2.63	1.65
1	2	4,633	11,648	0.40	281	73.1	20.4	2.86	1.71
2	1	3,946	10,645	0.38	242	81.6	24.4	2.65	1.80
2	2	4,320	9,939	0.44	248	76.9	18.6	2.82	1.66
5%LSD		1,485	2,587	0.11	32	11.7	16.2	0.06	0.21

N	ผลผลิตกก/ha	นนทั้งต้น(กก/ha)	HI	รวง/ตร.ม.	ดอกย่อย/รวง	%เมล็ดลีบ	นน.100เมล็ด	%Nเมล็ด
1	4,089	9,551	0.43	240	77.6	18.0	2.70	1.38
2	4,100	11,035	0.38	244	78.2	20.9	2.75	1.70
3	4,717	12,551	0.38	271	81.9	23.9	2.81	1.83
4	4,520	12,028	0.38	282	84.2	28.1	2.70	1.91
5%LSD	324	1,213	0.34	22	7.3	5.2	0.04	0.19

V	N	ผลผลิตกก/ha	นนทั้งต้น(กก/ha)	HI	รวง/ตร.ม.	ดอกย่อย/รวง	%เมล็ดลีบ	นน.100เมล็ด	%Nเมล็ด
1	1	4,039	9,030	0.45	241	79.3	19.2	2.63	1.37
1	2	4,041	12,007	0.35	257	80.4	24.8	2.61	1.81
1	3	4,802	13,212	0.37	272	86.2	24.4	2.73	1.81
1	4	4,065	12,909	0.32	247	97.9	35.5	2.57	1.90
2	1	4,140	10,072	0.42	240	76.0	16.8	2.76	1.39
2	2	4,160	10,062	0.42	230	75.9	16.9	2.88	1.59
2	3	4,632	11,891	0.39	270	77.6	23.4	2.89	1.85
2	4	4,975	11,146	0.45	318	70.5	20.7	2.83	1.91
5%LSD		459	1,715	0.05	31	10.3	7.4	0.06	0.26

I	V	N	ผลผลิตกก/ha	นนทั้งต้น(กก/ha)	HI	รวง/ตร.ม.	ดอกย่อย/รวง	%เมล็ดลีบ	นน.100เมล็ด	%Nเมล็ด
1	1	1	4,104	9,933	0.41	235	85.5	22.1	2.62	1.33
1	1	2	3,941	13,194	0.30	263	81.7	28.7	2.60	1.73
1	1	3	5,291	14,373	0.38	295	89.6	25.4	2.70	1.73
1	1	4	4,776	14,234	0.34	271	104.2	33.8	2.59	1.81
1	2	1	4,245	11,205	0.38	251	77.4	20.0	2.77	1.37
1	2	2	3,822	10,490	0.37	229	68.9	16.3	2.89	1.61
1	2	3	5,252	13,326	0.39	298	74.8	19.0	2.92	1.89
1	2	4	5,213	11,569	0.45	346	71.4	26.3	2.88	1.97
2	1	1	3,974	8,127	0.49	246	73.0	16.2	2.65	1.41
2	1	2	4,140	10,820	0.39	252	79.2	20.9	2.62	1.89
2	1	3	4,314	12,050	0.36	248	82.8	23.4	2.77	1.88
2	1	4	3,355	11,585	0.30	223	91.5	37.3	2.55	1.99
2	2	1	4,034	8,939	0.45	229	74.5	13.7	2.75	1.40
2	2	2	4,499	9,635	0.47	230	82.8	17.6	2.87	1.56
2	2	3	4,011	10,456	0.39	242	80.5	27.9	2.86	1.82
2	2	4	4,737	10,724	0.44	289	69.6	15.2	2.79	1.85
5%LSD			649	2,425	0.07	44	14.6	10.4	0.08	0.37

หมายเหตุ

I1 = ให้น้ำชลประทาน, I2= อาศัยน้ำฝน N 1 = 0 กก N/ha, N2 = 70 กก. N/ha, N3 = 140 กก.N/ha, N4 = 210 กก.N/ha

V1 = ขาวดอกมะลิ105 , V2 = ชัยนาท 1

ตารางภาคผนวก 4 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวน การทดลองเปรียบเทียบวิธีการปลูก และอัตราเมล็ดพันธุ์ ข้าว 4 พันธุ์ ม.เชียงใหม่ 2541 -42

ปี 2541

ตัวแปร	V	S	V*S	ค่าเฉลี่ย	%CV
ผลผลิต	**	ns	ns	4299.6	8.5
นน.ทั้งต้น	**	ns	ns	10146	21.4
ดัชนีเก็บเกี่ยว	ns	ns	*	0.43621	12.3
หน่อ/ตร.ม.	ns	ns	ns	369.97	12.5
รวง/ตร.ม.	ns	ns	ns	319.37	11.3
ดอกย่อย/รวง	**	ns	ns	57.151	9
% เมล็ดลีบ	**	ns	ns	15.984	23.7
นน.100เมล็ด	**	ns	ns	2.8058	1.3

ปี 2542

ตัวแปร	V	S	V*S	ค่าเฉลี่ย	%CV
ผลผลิต	**	ns	ns	3152.6	18.9
นน.ทั้งต้น	ns	*	ns	11531	17.2
ดัชนีเก็บเกี่ยว	ns	ns	ns	0.28335	24.8
หน่อ/ตร.ม.	*	**	**	372.4	15.5
รวง/ตร.ม.	*	**	*	358.19	16.2
ดอกย่อย/รวง	**	**	ns	43.397	15.3
% เมล็ดลีบ	ns	ns	ns	19.616	25
นน.100เมล็ด	**	ns	**	2.8458	2.8

หมายเหตุ

V พันธุ์ข้าว 4 พันธุ์: ขาวดอกมะลิ105 สุพรรณบุรี 60 ชัยนาท 1 และก.วก.1

S อัตราเมล็ดพันธุ์ : 10, 20 และ 30 กก./ไร่ ในปี 2541 และ 5, 20, 45 กก./ไร่ ในปี 2542

* มีนัยสำคัญที่ระดับ .05

** มีนัยสำคัญที่ระดับ .01

ns ไม่มีนัยสำคัญ

ตารางภาคผนวก 5 ค่าเฉลี่ย ผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิต การทดลองเปรียบเทียบวิธีปลูก และอัตราเมล็ดพันธุ์ ม.เชียงใหม่ 2541

V	พันธุ์	ผลผลิต(กก/ha)	นนทั้งต้น(กก/ha)	HI	หน่อ/ตร.ม.	รวง/ตร.ม.	ดอกย่อย/รวง	%เมล็ดลีบ	นน.100เมล็ด
1	KDML105	4944	11505	0.44	361	311	67.4	9.987	2.633
2	Supan60	4948	11363	0.45	356	311	65.0	15.174	2.901
3	Chainat1	4935	12286	0.41	390	337	61.8	16.246	2.867
4	DOA1	2371	5429	0.44	372	319	34.3	22.529	2.822
5%LSD		588	1797	0.03	49	44	6.3	4.527	0.030

S	อัตราเมล็ดพันธุ์	ผลผลิต(กก/ha)	นนทั้งต้น(กก/ha)	HI	หน่อ/ตร.ม.	รวง/ตร.ม.	ดอกย่อย/รวง	%เมล็ดลีบ	นน.100เมล็ด
1	10 kg/rai	4454	11114	0.41	377	334	57.6	17.799	2.806
2	20 kg/rai	4410	10379	0.45	385	324	57.3	16.396	2.828
3	30 kg/rai	4286	9667	0.45	375	325	55.4	15.609	2.798
4	transplant	4049	9423	0.43	342	295	58.3	14.131	2.792
5%LSD		308	1831	0.05	39	30	4.3	3.187	0.032

V	S	ผลผลิต(กก/ha)	นนทั้งต้น(กก/ha)	HI	หน่อ/ตร.ม.	รวง/ตร.ม.	ดอกย่อย/รวง	%เมล็ดลีบ	นน.100เมล็ด
1	1	4980	13098	0.38	370	333	65.2	11.396	2.597
1	2	5079	12067	0.43	388	326	65.6	10.935	2.647
1	3	4803	9790	0.49	350	297	67.7	9.041	2.637
1	4	4914	11065	0.46	338	286	71.3	8.576	2.650
2	1	5317	13694	0.39	370	326	68.7	17.348	2.879
2	2	5081	12680	0.43	365	308	66.6	15.047	2.920
2	3	5305	10855	0.49	405	356	59.3	14.029	2.923
2	4	4091	8223	0.50	285	254	65.4	14.270	2.883
3	1	5062	11812	0.44	371	334	62.1	15.740	2.903
3	2	5028	11932	0.43	424	340	63.4	19.098	2.900
3	3	4802	13222	0.36	408	362	58.5	18.610	2.833
3	4	4846	12179	0.40	359	311	63.4	11.534	2.833
4	1	2458	5853	0.43	398	343	34.4	26.712	2.846
4	2	2452	4837	0.51	364	321	33.7	20.505	2.845
4	3	2232	4801	0.47	337	284	36.2	20.755	2.797
4	4	2343	6225	0.38	388	328	33.1	22.143	2.800
5%LSD		615	3662	0.09	78	61	8.6	6.375	0.064

หมายเหตุ

V1 ขาวดอกมะลิ105 V2 สุพรรรณบุรี60 V3 ชัยนาท 1 V4 ก.วก.1

S1 หว่านอัตราเมล็ด 10 กก./ไร่, S2 หว่าน อัตราเมล็ด 20 กก./ไร่ , S3 หว่านอัตราเมล็ด 30 กก./ไร่, S4 ปักดำ 48 ต้น/ตร.ม.

ตารางภาคผนวก 6 ค่าเฉลี่ย ผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิต การทดลองเปรียบเทียบวิธีปลูก และอัตราเมล็ดพันธุ์ ม.เชียงใหม่2542

V	V	ผลผลิต(กก/ha)	นนทั้งต้น(กก/ha)	HI	หน่อ/ตร.ม.	รวง/ตร.ม.	ดอกย่อย/รวง	%เมล็ดลีบ	นน.100เมล็ด
1	KDML105	3297	12151	0.28	315	291	55.5	17.666	2.595
2	Supan60	3403	11728	0.30	339	330	47.4	20.308	3.011
3	Chainat1	3469	12420	0.29	450	441	38.3	20.076	2.935
4	DOA1	2441	9827	0.26	385	372	32.4	20.413	2.842
5%LSD		446	2659	0.09	79	82	6.7	5.115	0.089

S	S	ผลผลิต(กก/ha)	นนทั้งต้น(กก/ha)	HI	หน่อ/ตร.ม.	รวง/ตร.ม.	ดอกย่อย/รวง	%เมล็ดลีบ	นน.100เมล็ด
1	5kg/rai	3040	13081	0.24	368	348	40.5	20.311	2.854
2	20kg/rai	3257	11262	0.30	428	416	35.8	18.062	2.828
3	45kg/rai	3374	10974	0.31	473	458	34.4	21.039	2.885
4	Transplant	2939	10808	0.28	220	211	63.0	19.052	2.816
5%LSD		502	1676	0.06	49	49	5.6	4.135	0.066

V	S	ผลผลิต(กก/ha)	นนทั้งต้น(กก/ha)	HI	หน่อ/ตร.ม.	รวง/ตร.ม.	ดอกย่อย/รวง	%เมล็ดลีบ	นน.100เมล็ด
1	1	3110	13369	0.23	346	294	48.0	15.539	2.594
1	2	3252	11518	0.30	316	299	51.0	16.889	2.587
1	3	3459	10285	0.34	370	353	46.8	19.099	2.650
1	4	3366	13430	0.26	229	216	76.1	19.138	2.549
2	1	3494	12636	0.28	305	300	51.8	26.062	3.025
2	2	3464	12136	0.29	406	402	35.1	16.831	2.986
2	3	3529	10784	0.33	446	431	34.1	18.299	2.973
2	4	3126	11354	0.31	198	187	68.6	20.038	3.061
3	1	3302	16243	0.21	505	497	27.9	19.546	3.008
3	2	4031	10508	0.39	550	537	32.5	17.055	2.914
3	3	3649	12509	0.30	518	506	31.7	22.413	3.065
3	4	2893	10421	0.28	228	222	61.1	21.289	2.752
4	1	2255	10074	0.23	314	302	34.3	20.095	2.788
4	2	2280	10887	0.22	440	424	24.4	21.473	2.825
4	3	2859	10320	0.28	559	543	24.9	24.344	2.852
4	4	2372	8026	0.30	227	218	46.1	15.742	2.902
5%LSD		1005	3352	0.12	97	98	11.2	8.270	0.133

หมายเหตุ

V1 ขาวดอกมะลิ105 V2 สุพรรรณบุรี60 V3 ชัยนาท 1 V4 ก.วก.1

S1 หว่านอัตราเมล็ด 5 กก./ไร่, S2 หว่าน อัตราเมล็ด 20 กก./ไร่ , S3 หว่านอัตราเมล็ด 45 กก./ไร่, S4 ปักดำ 48 ต้น/ตร.ม.