

พัฒนาแบบจำลองข้าวที่เรียบง่ายสำหรับสภาพการผลิตในทุ่งกุลาร้องไห้

Development of a simplistic rice model for Tung Kula Environment

เกริก ปั่นแห่งเพชร และคณะ

คำนำ

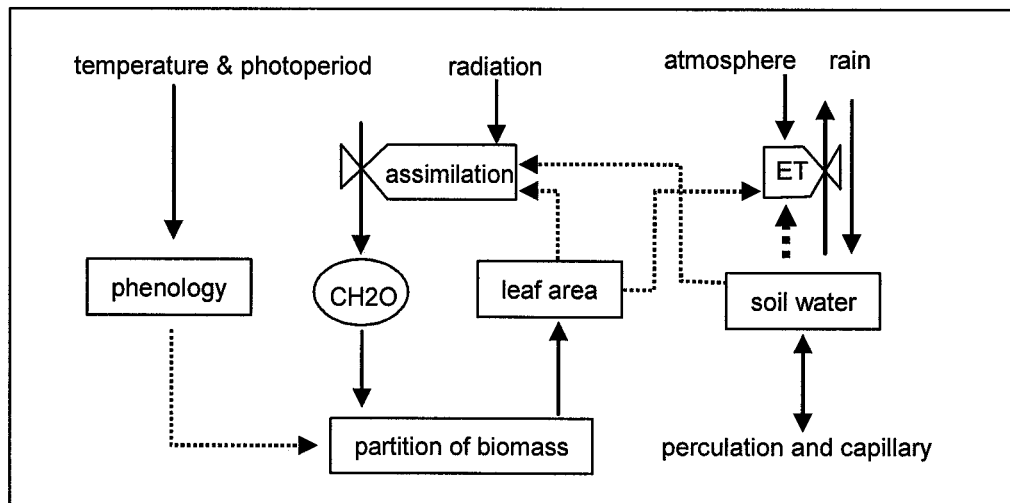
ปัจจุบันแบบจำลองพืชเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบสนับสนุนการตัดสินใจ ช่วยให้สามารถทำการวิเคราะห์การเจริญเติบโตพืชเชิงปริมาณแบบพลวัต และประเมินผลกระทบจากข้อจำกัดหรือเงื่อนไขของกระบวนการผลิต รวมถึงประเมินหาทางเลือกไม่ว่าจะเป็นพื้นที่หรือวิธีการผลิตที่เหมาะสมได้ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นพื้นที่ซึ่งมีสภาพแวดล้อมแปรปรวนสูงทั้งในแง่ของเวลาและของสถานที่ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องใช้แบบจำลองเป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์และสังเคราะห์หาทางเลือกเบื้องต้นของระบบการจัดการพืช และการจัดการทรัพยากรธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพ

แบบจำลองพืชที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน เป็นแบบจำลองที่ถูกพัฒนาให้สามารถใช้ได้กับระบบการผลิตที่หลากหลายทั้งในแง่ของชนิดพืชและสภาพแวดล้อม จึงมีรายละเอียดสูงและซับซ้อน แม้สามารถประยุกต์ใช้ได้ในพื้นที่กว้าง แต่คุณสมบัติดังกล่าวกลับเป็นอุปสรรคต่อการใช้กับระบบการเกษตรในพื้นที่ที่มีข้อมูลจำกัด และเมื่อต้องทำการเชื่อมต่อเพื่อบูรณาการกับระบบประมวลผลหรือเครื่องมืออื่น ๆ เพื่อพัฒนาเป็นระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการวางแผนจัดการทรัพยากร ความซับซ้อนก็ยิ่งเพิ่มทวีคูณและเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพความเป็นจริงที่เป็นอยู่ในเขตพื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้ ดังนั้นแบบจำลองพืชที่เรียบง่ายจึงเป็นทางเลือกที่สำคัญ แม้อาจมีขอบเขตการใช้งานที่เฉพาะเจาะจงกว่า แต่เน้นเฉพาะองค์ประกอบหลักที่มีผลต่อการกำหนดผลผลิต และเป็นระบบที่ต้องการ input ต่ำ ซึ่งทำให้ลดข้อจำกัดดังกล่าวลงได้ นอกจากนี้ความเรียบง่ายของแบบจำลองยังช่วยให้ผู้ที่เกี่ยวข้องในการตัดสินใจที่ไม่ใช่ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะ สามารถทำความเข้าใจได้ง่ายถึงพื้นฐานของความสัมพันธ์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างทรัพยากรธรรมชาติและการผลิตพืช ช่วยให้สามารถวางแผนจัดการทรัพยากรและการผลิตพืชได้ในวงกว้างอย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้นโครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาแบบจำลองพืชที่เรียบง่าย โดยเน้นเฉพาะองค์ประกอบหลัก ๆ ซึ่งมีผลต่อผลผลิตพืช เป็นแบบจำลองแบบเปิดที่ผู้ใช้สามารถศึกษาและปรับแก้ให้เหมาะสมกับความต้องการได้ และเป็นแบบจำลองที่สามารถทำการเชื่อมโยงบูรณาการเข้ากับเครื่องมืออื่น ๆ ในระบบสนับสนุนการตัดสินใจได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เช่น “ระบบเชื่อมโยงทุ่งกุลาร้องไห้เพื่อการผลิตข้าว” ซึ่งเป็นโครงการวิจัยกลางที่ดำเนินการขนานกันไปในกลุ่มเดียวกัน เพื่อใช้สนับสนุนการวางแผนจัดการทรัพยากรเพื่อการผลิตพืชในภาพกว้าง

การพัฒนาและทดสอบแบบจำลอง

แบบจำลองพืชที่ได้พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 4 องค์ประกอบหลักคือ กระบวนการสร้างมวลชีวภาพ การสร้างพื้นที่ใบ การพัฒนาการ และการคายระเหย ความสัมพันธ์ของกระบวนการดังกล่าวในการกำหนดการเจริญเติบโตพืช แสดงเป็นโครงสร้างดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการหลักและความสัมพันธ์ของกระบวนการหลักในแบบจำลองข้าวที่เรียบง่าย

การสังเคราะห์มวลชีวภาพ

พืชต้องใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ S (solar radiation) ในการสร้างมวลชีวภาพและดำรงชีพ ความสามารถของพืชที่จะรับพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นกับดัชนีพื้นที่ใบ L และคุณสมบัติของทรงพุ่ม k จากกฎของ Lambert และ Beer จะบรรยายฟังก์ชันความสัมพันธ์ของลักษณะดังกล่าวได้ดังนี้

$$f = 1 - e^{-kL}$$

เมื่อ f คือสัดส่วนของแสงที่พุ่มใบรับไว้ สำหรับข้าวขาวดอกมะลิ 105 k มีค่าเฉลี่ยตลอดวันประมาณ 0.7 (เกริก ยังไม่ตีพิมพ์) ซึ่งใกล้เคียงกับค่าของพันธุ์ข้าวที่พัฒนาโดย IRRI (Bouman และคณะ, 2001) ศักยภาพของใบที่จะใช้พลังงานแสงที่รับไว้ได้ในการตรึง CO_2 ขึ้นกับคุณสมบัติทางชีวเคมีของพืช Monteith (1969) ได้สรุปความซับซ้อนของกระบวนการดังกล่าวไว้ในรูปแบบที่เรียบง่ายของ radiation use coefficient (ϵ_{RCO_2} $\text{g CO}_2 \text{ MJ}^{-1}$) เพื่อใช้ประเมินการสังเคราะห์แสงของพุ่มใบ การใช้สัมประสิทธิ์ดังกล่าวตั้งอยู่บนข้อมูลที่ว่า อัตราการเจริญเติบโตของกลุ่มพืชมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับพลังงานแสงอาทิตย์ที่กลุ่มพืชรับไว้ได้ ดังนั้นอัตราการสังเคราะห์แสงของพุ่มใบ c_g (gross canopy photosynthesis, $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) จะเท่ากับ

$$c_g = \epsilon_{\text{RCO}_2}(1 - e^{-kL})s$$

ส่วนหนึ่งของคาร์บอนที่พืชตรึงไว้ได้ จะถูกใช้ในการหายใจ เพื่อคงสภาพของเนื้อเยื่อพืช R_m (maintenance respiration) อัตราการหายใจดังกล่าวนอกจากจะเป็นสัดส่วนกับน้ำหนักของพืช c_m (maintenance coefficient) แล้วยังขึ้นกับอุณหภูมิ T ซึ่งบรรยายในรูปของ Q_{10} และอัตราของกิจกรรมทางเมตาโบลิซึมของพืชซึ่งมีค่าประมาณ 10 % ของ c_g (Penning de Vries และคณะ, 1989) ดังนั้น

$$R_m = Q_{10}^{(T - T_{\text{REF}})/10} c_m W + 0.1 c_g$$

เนื่องจาก c_m มีค่าค่อนข้างต่ำ ประมาณ $0.015 \text{ g CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ DW d}^{-1}$ ประกอบกับรายงานการวัดอัตราการหายใจดังกล่าวยังให้ค่าที่มีความแปรปรวนสูง จึงอาจลดทอนให้ R_m ขึ้นกับอัตราของกิจกรรมทางเมตาโบลิซึมของพืชเท่านั้น

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเขียนการสังเคราะห์แสงสุทธิของพุ่มใบ c_n (net canopy photosynthesis $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) ได้ดังนี้

$$c_n = c_g - 0.1 c_g$$

หรือ

$$c_n = 0.9 \epsilon_{\text{RCO}_2}(1.0 - e^{-kL})s$$

การวัดค่า ε_{RCO_2} ภาคสนาม มีวิธีการที่ละเอียดอ่อนซับซ้อน และเครื่องวัด CO_2 มีราคาสูง ดังนั้น ข้อมูลของ ε_{RCO_2} จึงมีค่อนข้างจำกัด และจำเป็นต้องปรับสมการดังกล่าวให้อยู่ในรูปแบบที่ทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ได้จากข้อมูลในรายงานวิจัยที่มีอยู่ทั่วไป หรือสามารถวัดหาเพิ่มเติมได้สะดวก รูปแบบที่เหมาะสมรูปแบบหนึ่งคือ เปลี่ยน c_n ให้อยู่ในหน่วยของมวลชีวภาพ $g\ DW\ m^{-2}\ d^{-1}$ แทนมวลของ CO_2

เมื่อคูณสมการดังกล่าว ด้วยสัดส่วนของมวลโมเลกุลของน้ำตาลต่อมวลโมเลกุลของ CO_2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 30/44 และคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสร้างมวลชีวภาพจากน้ำตาลซึ่งเรียกว่า growth efficiency (g_e) ที่มีค่าโดยประมาณเท่ากับ $0.75\ DW\ g^{-1}\ CH_2O$ (Yoshida, 1981; Penning de Vries และคณะ, 1983) ดังนั้น c_n ที่มีหน่วยในรูปของมวลชีวภาพ $g\ DW\ m^{-2}\ d^{-1}$ จะเท่ากับ

$$\frac{dw}{dt} = c_n = \varepsilon_R (1.0 - e^{-kL})s$$

เมื่อ $\varepsilon_R = 0.614 g_e \varepsilon_{RCO_2}$ และมีหน่วยเป็น $g\ DW\ MJ^{-1}$ intercepted solar radiation

ε_R ก็คือสัมประสิทธิ์บอกถึงมวลชีวภาพของพืชที่เพิ่มขึ้นเมื่อพืชรับแสงไว้ได้ 1 MJ ค่าของ ε_R อาจหาได้ในระยะการเจริญเติบโตที่เรียกว่า linear phase ซึ่งเป็นระยะที่พุ่มใบพืชปกคลุมดินได้ทั่วถึง ภายใต้การจัดการที่พืชสามารถเจริญเติบโตได้เต็มตามศักยภาพ

Jones (1992) ได้ประมาณค่า ε_R ของพืชหลายชนิดและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1.4\ g\ DW\ MJ^{-1}$ intercepted solar radiation ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่รายงานโดย Sheehy (2000) $\varepsilon_R = 1.45\ g\ DW\ MJ^{-1}$ สำหรับพันธุ์ข้าวของ IRRI และ ประภา (2546) $\varepsilon_R = 1.6\ g\ DW\ MJ^{-1}$ สำหรับข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในกระถาง

ภายใต้สภาพน้ำฝนความชื้นดินเป็นปัจจัยจำกัดการเจริญเติบโตพืชที่สำคัญ หากผลกระทบของความชื้นดินต่ออัตราการเจริญเติบโตของพืชคือ $f(\theta)$ อัตราการเจริญเติบโตพืช dw/dt ภายใต้สภาพการปลูกอาศัยน้ำฝนจะเท่ากับ

$$\frac{dw}{dt} = f(\theta) \varepsilon_R (1.0 - e^{-kL})s \quad (1)$$

พื้นที่ใบของพุ่มใบ

มวลชีวภาพที่พืชสร้างขึ้นจะถูกนำไปสร้างองค์ประกอบต่าง ๆ ของพืช สัดส่วนที่นำมาใช้ในการสร้างใบนั้นจะเปลี่ยนแปลงเสมอไม่คงที่ เช่นเดียวกันกับสัดส่วนของพื้นที่ใบต่อมวลชีวภาพของใบ ซึ่งเรียกว่าพื้นที่ใบจำเพาะ (specific leaf area $\text{m}^2 \text{ leaf area g}^{-1} \text{ DW leaf}$) แม้องค์ความรู้เชิงปริมาณของกลไกที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวยังไม่กระจ่างชัด แต่มักพบเสมอว่าอัตราการเจริญเติบโตของอวัยวะต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตนั้นจะสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน และสามารถแสดงได้โดยฟังก์ชัน allometry

$$\frac{1}{y} \frac{dy}{dt} = \beta \frac{1}{x} \frac{dx}{dt}$$

สมการดังกล่าว แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างอัตราการเจริญเติบโตสัมพันธ์ของ y และ x เมื่อบูรณาการจะได้

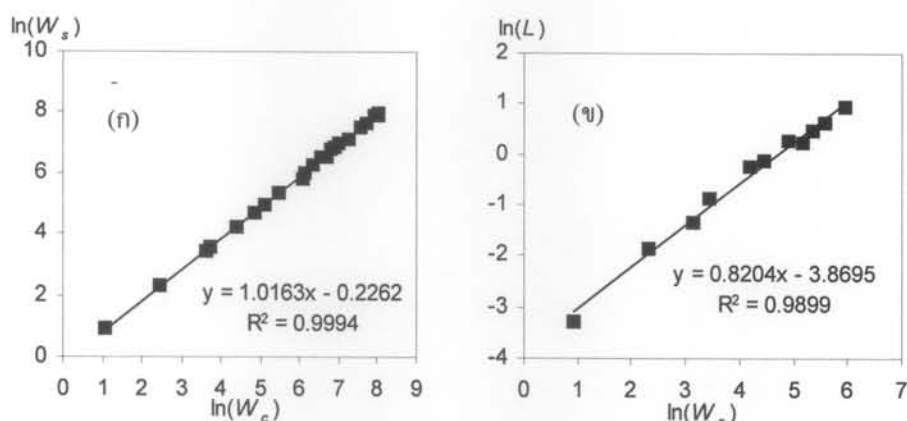
$$\ln y = \beta \ln x + C$$

หรือ

$$y = \alpha x^\beta \quad (2)$$

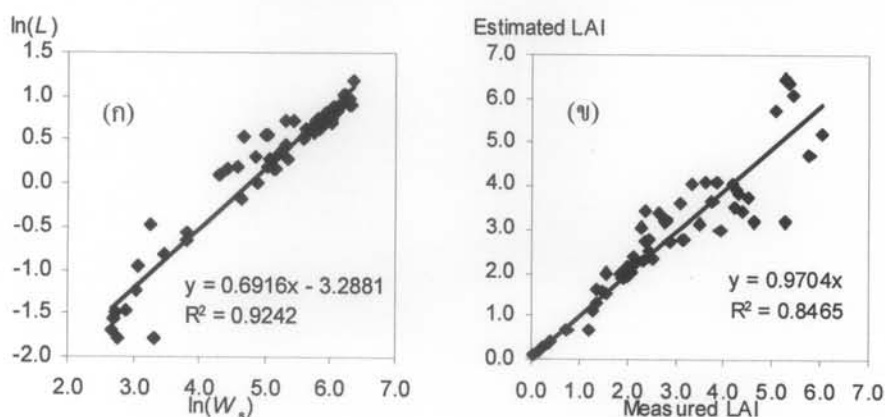
เมื่อ α และ β เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ และ $\alpha = e^C$

ดังนั้นจึงได้ทดสอบความสัมพันธ์การเจริญเติบโตของพืชทั้งต้น w_c กับส่วนเหนือดิน w_s โดยใช้ข้อมูลการเจริญเติบโตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกภายใต้สภาพเรือนทดลองปี 2543 (เกริก และ สนั่น, 2543) และข้าว กข 6 ที่ปลูกภายใต้สภาพเรือนทดลองปี 2534 (Pannangpetch, 1994) ผลการทดสอบชี้ว่าการเจริญเติบโตของลักษณะทั้งสองมีความสัมพันธ์แบบ allometry อย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในภาพที่ 2(ก) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ $\alpha_s = 0.7976$ และ $\beta_s = 1.0163$



ภาพที่ 2 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของ $\ln(W_c)$ และ $\ln(W_s)$ ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 รวมกับข้าว กข6 (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของ $\ln(W_s)$ และ $\ln(L)$ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 รวมกับข้าว กข 6

เมื่อทดสอบความสัมพันธ์การเจริญเติบโตของส่วนเหนือดิน w_s ของพืชกับพื้นที่ใบ L ในช่วงก่อนออกดอก โดยใช้ข้อมูลการเจริญเติบโตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกภายใต้สภาพเรือนทดลอง ปี 2543 (เกริก และ สนั่น, 2543) รวมกับข้อมูลข้าว กข6 ที่ปลูกในสภาพแปลงนา (รักศักดิ์, 2545) พบว่ามีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 2(ข) ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ $\alpha_L = 0.0209$ และ $\beta_L = 0.8204$ ดังนั้นจึงทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองจากข้อมูลการเจริญเติบโตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกภายใต้สภาพแปลงนาเพิ่มเติม ในปี 2549 ที่จังหวัดขอนแก่น



ภาพที่ 3 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของ $\ln(w_s)$ และ $\ln(L)$ ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในนา (ข) เปรียบเทียบผลการประเมิน โดย allometric ฟังก์ชันกับค่าจากการวัดภาคสนาม

ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มีค่าต่างจากเดิมเล็กน้อย คือ $\alpha_L = 0.0373$ และ $\beta_L = 0.6916$ ดังภาพที่ 3(ก) ความแตกต่างดังกล่าวอาจเนื่องมาจาก ภายใต้อสภาพเรือนทดลอง พุ่มใบได้รับแสงจากด้านข้างมากกว่า ภายใต้อสภาพแปลงนา และพืชอาจปรับตัวให้เข้ากับสภาพการณ์ดังกล่าว ได้ทดสอบสมการและค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวโดยใช้ข้อมูลภาคสนามจากแปลงนาที่ อ.ชุมแพ จ.ขอนแก่น, อ.พยัคฆภูมิพิสัย จ.มหาสารคาม, อ.เกษตรวิสัย อ.สุวรรณภูมิ และ อ.โพนทราย จ.ร้อยเอ็ด ผลการเปรียบเทียบพบว่า พื้นที่ใบที่ได้จากการประเมินมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัด ดังแสดงในภาพที่ 3(ข) ดังนั้นจึงใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ภายใต้อสภาพแปลงนານี้ในการจำลองสถานการณ์

เมื่อใบทรงขยายตัวเต็มที่ ก่อนออกดอก ข้าวจะหยุดสร้างใบ จากนั้นพื้นที่ใบที่สามารถสังเคราะห์แสงได้จะเริ่มลดลงเรื่อย ๆ สาเหตุหนึ่งของการสูญเสียพื้นที่ใบเกิดจากการเคลื่อนย้ายไนโตรเจนจากใบไปให้เมล็ด ฉะนั้นจึงบรรยายอัตราการสูญเสียพื้นที่ใบ dL/dt ในช่วงระยะดังกล่าวให้เป็นฟังก์ชันกับอัตราการเจริญเติบโตของเมล็ด

$$\frac{dL}{dt} = -l_c \frac{dw}{dt} \quad (3)$$

l_c คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียพื้นที่ใบ ค่าสัมประสิทธิ์นี้ถูกกำหนดโดยไนโตรเจนจำเพาะของใบ N_L (specific leaf N gN m^{-2} ใบ), สัดส่วนของไนโตรเจนในใบในช่วงออกดอกที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ f_R (remobilizable leaf N), สัดส่วนของไนโตรเจนที่รวงข้าวได้รับจากใบ f_{NL} และสัดส่วนของไนโตรเจนในรวง N_g ($\text{gN g}^{-1}\text{DW}$)

$$l_c = \frac{f_{NL} N_g}{f_R N_L}$$

สำหรับข้าวขาวดอกมะลิ 105 N_L มีค่าเฉลี่ยในช่วงออกดอกประมาณ 1.13 gN m^{-2} (เกริก และ สนั่น, 2543; Shiratsuchi และคณะ, 2006; Kropff และคณะ, 1994) f_R ประเมินจากไนโตรเจนในใบช่วงออกดอกและไนโตรเจนในใบช่วงที่ต้นข้าวแก่ (residual N) สำหรับข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า f_R มีค่าเท่ากับ 0.7 ต่ำกว่าค่าที่รายงานโดย Bouman และ Laar (2006) ประมาณ 10 % สัดส่วนของไนโตรเจนที่เมล็ดได้รับจากใบและลำต้นอาจเปลี่ยนแปลงตามสภาพความอุดมสมบูรณ์ของดิน มีค่า 0.7 ถึง 0.9 (Mae, 1997; Takahashi, Yagi, 2002) และ 0.5 (Sheehy และคณะ, 2004) Sinclair และ Sheehy (1999) ได้กำหนดค่าทั่วไปของสัดส่วนไว้

ประมาณ 0.5 ส่วน N_x ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีค่าประมาณ $0.012 \text{ gN g}^{-1} \text{ DW}$ ใกล้เคียงกับค่าที่รายงานใน Ladha และคณะ (1998) และ Berge และคณะ (1997) จากข้อมูลดังกล่าวจะประเมินได้ว่า I_c มีค่าเท่ากับ $0.0075 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ นั่นคือเมื่อมวลชีวภาพของเมล็ดเพิ่มขึ้น 1 กรัม ในโตรเจนจะถูกเคลื่อนย้ายจากใบและทำให้พื้นที่ใบที่สังเคราะห์แสงลดลง 0.0075 ตารางเมตร

การพัฒนาการ

การจัดระยะการพัฒนาการของข้าวมีหลายรูปแบบ IRRI (2002) ได้แบ่งการพัฒนาการของข้าวออกเป็น 3 ระยะหลัก และ 10 ระยะย่อย ส่วน Counce และคณะ (2000) ได้แบ่งการพัฒนาการออกเป็น 27 ระยะย่อย หากพิจารณาในแง่การเจริญเติบโต การสร้างผลผลิต และการตอบสนองต่ออุณหภูมิและช่วงแสงแล้ว อาจแบ่งได้เป็น 2 ระยะหลัก ระยะที่ 1 เริ่มจากเมล็ดงอกถึงออกดอก สำหรับพืชที่มีการเจริญเติบโตแบบ determinate ในช่วงนี้ พืชจะสร้างใบ ลำต้น ราก และองค์ประกอบผลผลิตต่าง ๆ ซึ่งกำหนดศักยภาพของผลผลิต ระยะที่ 2 เริ่มจากออกดอกถึงสุกแก่ เป็นช่วงการเจริญเติบโตของเมล็ด ซึ่งเป็นระยะที่จะกำหนดว่าจะได้ผลผลิตจริงตามศักยภาพหรือไม่

เนื่องจากข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นข้าวไวแสง เป็นพืชวันสั้น จึงแบ่งระยะหลักที่ 1 ออกเป็น 3 ระยะย่อยคือ ระยะที่ 1.1 เป็นระยะของการพัฒนาทางลำต้นพื้นฐาน (basic vegetative phase) ในช่วงนี้พืชจะไม่ตอบสนองต่อช่วงยาววัน ระยะที่ 1.2 เป็นระยะที่พืชตอบสนองต่อช่วงยาววัน (photoperiod sensitive phase) เมื่อความยาววันต่ำกว่าค่าวิกฤตติดต่อกันเป็นเวลานานพอ จะเหนี่ยวนำให้พืชเปลี่ยนรูปแบบการเจริญเติบโต โดยเริ่มสร้างดอก (panicle initiation) และระยะที่ 1.3 จากเริ่มสร้างดอกถึงออกดอก (panicle development) หลังจากนั้นพืชจะเข้าสู่ในช่วงเต็มเมล็ด (grain development) อาหารที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดถูกส่งไปสร้างเมล็ด

ดังนั้นในแบบจำลองนี้จึงแบ่งการพัฒนาการของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ออกเป็น 4 ระยะคือ ระยะการพัฒนาพื้นฐาน, ระยะการพัฒนาที่ตอบสนองต่อความยาววัน, ระยะการสร้างช่อรวง และระยะเต็มเมล็ด อุณหภูมิจะมีผลต่ออัตราการพัฒนาการในทุก ๆ ระยะ แต่ความยาววันจะมีผลในระยะที่ 2 เท่านั้น ดังนั้นอัตราการพัฒนาการ dp/dt จะเป็นทั้งฟังก์ชันของอุณหภูมิ $f(T)$ และของความยาวแสง $f(P)$

$$\frac{dp}{dt} = \begin{cases} f(T)f(P), & \text{for photosensitive phase} \\ f(T), & \text{for the other 3 phases} \end{cases}$$

อุณหภูมิและการพัฒนาการ

อัตราการพัฒนาการของข้าวจะเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิจนถึงจุด ๆ หนึ่ง หากอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอีกจะทำให้อัตราการพัฒนาการของข้าวลดลง ดังนั้นรูปแบบลักษณะการตอบสนองของข้าวต่ออุณหภูมิจะถูกกำหนดโดยอุณหภูมิต่ำสุด (base temperature T_b), อุณหภูมิสูงสุด (maximum temperature T_x) ที่พืชจะสามารถพัฒนาได้ และอุณหภูมิที่อัตราการพัฒนาการสูงสุด (optimal temperature T_{op}) จากรายงานของ Keisling และคณะ (2007) T_b , T_{op} และ T_x ของข้าวมีค่า 8°C , 37°C และ 41°C และจาก Bouman และคณะ (2001) 8°C , 30°C และ 42°C ค่าดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับพืชอื่นเช่น ข้าวโพดและข้าวสาลี (Ritchie และ NeSmith, 1991) จากการทดลองที่ IRRI พบว่าอุณหภูมิที่พืชมีอัตราการพัฒนาการสูงสุดนั้นจะเป็นช่วงของอุณหภูมิจาก $24-31^{\circ}\text{C}$ และการตอบสนองต่ออุณหภูมิมักมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง (curvilinear) มากกว่าที่จะเป็นเส้นตรงดังแนวคิดของ temperature summation (Yoshida, 1981)

จากข้อมูลดังกล่าวจึงได้ใช้ สมการ polynomial $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$ ซึ่งตัดทอนให้เหลือเพียงสองเทอมสร้างฟังก์ชัน $f(u)$ ของอัตราการพัฒนาการในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ $u = T - T_b$ ซึ่งทำให้สามารถบรรยายรูปแบบการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่ไม่สมมาตรได้

$$f(u) = a_2u^2 - a_nu^n$$

ณ จุด inflection ซึ่ง $df(u)/du = 0$

$$0 = 2a_2u - a_nnu^{n-1} = u(2a_2 - a_nnu^{n-2})$$

ดังนั้นจะพบ inflection ที่ $u = 0$ ซึ่ง $T = T_b$ หรือที่ $u = (2a_2 / a_nn)^{1/(n-2)}$ ซึ่ง $T = T_{op}$ และเรียก u ที่จุดทั้งสองว่า u_0 และ u_{op} เมื่อจัดเรียงสมการที่สองให้อยู่ในรูป $a_2 = a_nnu_{op}^{n-2} / 2$ และแทนที่สัมประสิทธิ์ a_2 ใน $f(u)$ จะได้

$$f(u) = \frac{a_nn}{2}u_{op}^{n-2}u^2 - a_nu^n$$

เมื่อ $u = u_{op}$ ซึ่งทำให้ $f(u)$ มีค่าสูงสุดเป็น $f(u_{op})$

$$f(u_{op}) = \frac{a_nn}{2}u_{op}^{n-2}u_{op}^2 - a_nu_{op}^n$$

เนื่องจากอัตราการพัฒนาสัมพันธ์เท่ากับ $f(u)/f(u_x)$ ดังนั้น

$$\frac{f(u)}{f(u_{op})} = \frac{(n/2)u_{op}^{n-2}u^2 - u^n}{(n/2-1)u_{op}^n}$$

จากลักษณะการตอบสนองของพืช เมื่อ $u=0$ หรือ $u=u_x$ (ซึ่ง $u_x = T_x - T_b$) จะทำให้ $f(u)/f(u_{op}) = 0$ ฉะนั้น

$$0 = \frac{n}{2}u_{op}^{n-2}u_x^2 - u_x^n = (T_x - T_b)^2 \left(\frac{n}{2}(T_{op} - T_b)^{n-2} - (T_x - T_b)^{n-2} \right)$$

และเมื่อหารด้วย $(T_x - T_b)^2$ จะเขียนความสัมพันธ์ของ n กับ T_b , T_{op} และ T_x ได้ดังนี้

$$\frac{n}{2} = \left(\frac{T_x - T_b}{T_{op} - T_b} \right)^{n-2}$$

n เป็น implicit ไม่สามารถแยกให้เป็นตัวแปรที่อิสระได้ จึงต้องหาค่าด้วยวิธีทาง numerical โดยหาค่าของ n ที่เป็น root ของสมการ และ $n \neq 2$ (ซึ่งเป็น trivial solution)

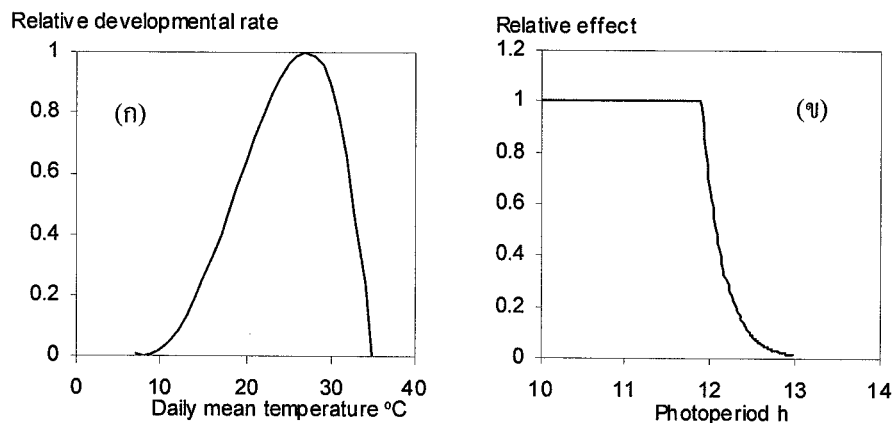
$$\left(\frac{n}{2} \right) - \left(\frac{T_x - T_b}{T_{op} - T_b} \right)^{n-2} = 0$$

ค่าของ T_b , T_{op} และ T_x ที่ใช้แสดงคุณสมบัติของพืชบางชุด อาจทำให้ $n \sim 2$ และก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนที่มีนัยสำคัญต่อการประเมินอัตราการพัฒนาการสัมพันธ์ได้ เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว จึงกำหนดให้ $n = 4$ จากค่าดังกล่าว หาก $T_b = 7^\circ\text{C}$ และ $T_{op} = 31^\circ\text{C}$ จะพบว่า $T_x = 41^\circ\text{C}$ ซึ่งอยู่ในช่วงที่พบโดยทั่วไป นอกจากนี้ยังทำให้รูปแบบของสมการที่ใช้บรรยายอัตราการพัฒนาการสัมพันธ์เรียบง่ายขึ้น และมีรูปแบบเช่นเดียวกับที่ Jones (1992) ได้เสนอไว้

$$\frac{f(u)}{f(u_{op})} = \frac{2(T - T_b)^2(T_o - T_b)^2 - (T - T_b)^4}{(T_o - T_b)^4}$$

กราฟการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสมการนี้ได้แสดงในภาพที่ 4(ก) โดย T_b มีค่าเท่ากับ 8°C และ T_{op} เท่ากับ 27°C ดังที่ได้เสนอโดย Yoshida (1981) และเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการจำลอง การพัฒนาการของข้าวครั้งนี้ ฉะนั้น หาก $f(T_{op})$ คืออัตราการพัฒนาการสูงสุดภายใต้สภาพแวดล้อม ที่เหมาะสม และเป็นคุณสมบัติเฉพาะของพืชแต่ละชนิด

$$f(T) = f(T_{op}) \frac{2(T - T_b)^2 (T_o - T_b)^2 - (T - T_b)^4}{(T_o - T_b)^4} \quad (4)$$



ภาพที่ 4 (ก) กราฟของฟังก์ชันการตอบสนองต่ออุณหภูมิในการพัฒนาการ และ (ข) การตอบสนอง ต่อช่วงกลางวันในการพัฒนาการของข้าวขาวดอกมะลิ 105

สัมประสิทธิ์ $f(T_{op})$

การพัฒนาการของพืชไม่ได้ขึ้นกับเวลาโดยตรง แต่เป็นผลสะสมจากสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะ จากอุณหภูมิและความยาววัน ปัจจุบันยังไม่สามารถกำหนดลักษณะพืช เพื่อใช้แสดงสถานะของการ พัฒนาการในเชิงปริมาณที่ต่อเนื่องได้ ต่างจากการเจริญเติบโต ที่สามารถใช้มวลชีวภาพ ฯลฯ ดังนั้นจึง normalize ให้พืชมีค่าของสถานะการพัฒนา (developmental state) เริ่มจาก 0 เมื่อเมล็ดงอก และ ถึง 1 เมื่อสุกแก่ อัตราการพัฒนาการสูงสุดก็จะเท่ากับส่วนกลับของระยะเวลาของการพัฒนาการภายใต้ อุณหภูมิ T_{op} และสภาพแวดล้อมอื่น ๆ ที่เหมาะสม

$$f(T_{op}) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}$$

เมื่อ Δt_i คือ ระยะเวลา หรือจำนวนวัน ของการพัฒนาการในระยะ i ภายใต้อุณหภูมิและสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการพัฒนาการ ซึ่งจะเป็นระยะเวลาที่สั้นที่สุด ในแบบจำลองนี้ $n = 4$ ดังที่ได้บรรยายไว้ และอัตราการพัฒนาการมีหน่วยเป็น d^{-1} (ต่อวัน)

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ใช้เวลาในการพัฒนาการจากเมล็ดงอกถึงสุกแก่ สั้นที่สุดประมาณ 85 วัน (วรวิทย์, 2537; กรรณิกา และคณะ, 2537) ในแบบจำลองนี้ได้แบ่งการพัฒนาการเป็น 4 ระยะ โดยมีระยะที่ 1 หรือ Δt_1 เท่ากับ 21 วัน, Δt_2 เท่ากับ 7 วัน, Δt_3 เท่ากับ 28 วัน และ Δt_4 ซึ่งเป็นช่วงการเจริญเติบโตของเมล็ด (grain development) เท่ากับ 29 วัน ดังนั้นแบบจำลองนี้ต้องใช้คุณสมบัติพืชเพื่อคำนวณผลของอุณหภูมิต่ออัตราการพัฒนาการคือ T_b , T_{op} , T_x และ Δt_i ของทั้ง 4 ระยะ

ความยาววันและการพัฒนาการ

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นข้าวไวแสง เป็นพืชวันสั้น จะสร้างช่อดอกก็ต่อเมื่อได้รับช่วงแสงที่สั้นกว่าค่าวิกฤติติดต่อกัน เมื่อปลูกปลายเดือนพฤษภาคม จะออกดอกประมาณ กลางเดือนตุลาคม หากเลื่อนวันปลูกให้ช้าลงเป็น กลางเดือนสิงหาคม จะทำให้ช่อดอกช้าลงประมาณ 14 วัน (Fukai, 1999)

ในแบบจำลองนี้ได้บรรยายผลความยาวแสง P ต่อการเหนี่ยวนำให้พืชออกดอก โดยใช้สมการ exponential แทนการใช้สมการเส้นตรง ซึ่งใช้ในแบบจำลอง RLRice (Fukai, 1999) และแบบจำลอง RoDMod (Watkinson และคณะ, 1993) แต่มีรูปแบบที่ง่ายกว่าแบบจำลอง beta (Yin และคณะ, 1997) หรือแบบจำลอง SimRiw (Horie และคณะ, 1992) ฟังก์ชันของความยาวแสง $f(P)$ ในการสร้างดอกมีรูปแบบดังนี้

$$f(P) = \begin{cases} e^{-(P-P_{op})/(P_c-P_{op})} & \text{for } P \geq P_{op} \\ 1 & \text{for } P < P_{op} \end{cases} \quad (5)$$

P คือความยาวแสง P_c คือความยาวแสงวิกฤติ และ P_{op} คือความยาวแสงที่ทำให้พืชสร้างดอกเร็วที่สุด ช่วงแสงที่สั้นกว่านี้จะไม่ทำให้พืชสร้างดอกได้เร็วขึ้นอีก

สำหรับค่า P_c และ P_{op} ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ใช้สำหรับในแบบจำลองนี้คือ 12.15 และ 11.90 ชม. ซึ่งกราฟการตอบสนองแสดงในภาพที่ 4(ข)

อัตราการคายระเหย

สมการของ Penman-Monteith เป็นสมการที่ใช้แพร่หลายในการคำนวณอัตราการคายระเหย ET (mm d^{-1}) และ FAO ได้ปรับใช้สมการดังกล่าวเพื่อประเมินอัตราการคายระเหยในพืชหลายชนิดในพื้นที่ต่าง ๆ สมการดังกล่าวสร้างจากสมดุลพลังงานของพื้นผิว และสามารถแบ่งเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นผลจากพลังงานรังสีสุทธิ R_n radiative term และส่วนที่เป็นผลจากความต่างของความดันไอน้ำในอากาศ e_s กับความดันไอน้ำที่อิ่มตัวที่อุณหภูมิของอากาศ T_z adiabatic term

$$\lambda ET = \frac{\Delta}{\gamma^* + \Delta} (R_n - G) + \frac{\gamma^*}{\gamma^* + \Delta} \frac{\rho c_p}{\gamma(r_a + r_c)} (e_s(T_z) - e_z)$$

λ คือความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ (latent heat of evaporation of water) ในกรณีของการประเมินอัตราการคายระเหยรายวันสามารถอนุมานให้อัตราการถ่ายเทพลังงานสุทธิกับพื้นผิวดิน $G = 0$ และเขียนสมการดังกล่าวในรูปแบบโดยย่อได้

$$\lambda ET = bR_n + a$$

เมื่อ

$$b = \frac{\Delta}{\gamma^* + \Delta} \quad \text{และ} \quad a = \frac{\gamma^*}{\gamma^* + \Delta} \frac{\rho c_p}{(r_a + r_c)\gamma} (e_s(T_z) - e_z)$$

Δ คือ slope ของ saturation vapor curve ซึ่ง $\Delta = 2504e^{(17.27T_z)/(237.2+T_z)} / (237.2 + T_z)^2$ ส่วน γ^* คือ modified psychrometer constant $\gamma^* = \gamma(1 + r_c/r_{ah})$ เมื่อ r_c คือความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของไอน้ำจากพืช และ r_a คือความต้านทานที่ขึ้นกับความเร็วลม

จากความความสัมพันธ์ดังกล่าวหากอุณหภูมิ ความเร็วลมและสภาพความชื้นดินเปลี่ยนแปลงไม่มาก จะทำให้ค่าของ b มีความแปรปรวนต่ำพอที่จะอนุมานให้ใช้ค่าคงที่แทนได้ ในทำนองเดียวกันหากความชื้นอากาศค่อนข้างคงที่ก็จะทำให้ค่า a ไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นอัตราการคายระเหยจะแปรผันเป็นเส้นตรงกับค่าพลังงานรังสีสุทธิ

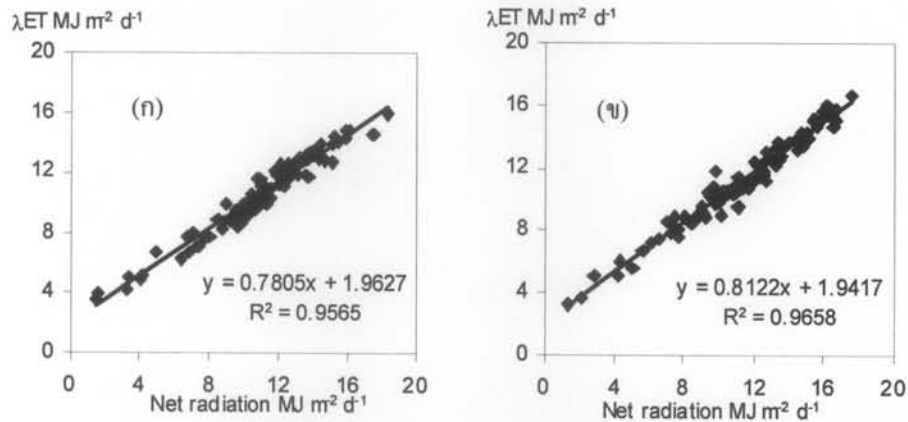
R_n นอกจากจะถูกกำหนดโดยพลังงานรังสีดวงอาทิตย์แล้วยังขึ้นกับความชื้นดินซึ่งมีผลต่อสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว และขึ้นกับอุณหภูมิของพื้นผิวยังมีผลต่อพลังงานสุทธิของ longwave I_n ดังแสดงในสมการ

$$R_n = (1 - \text{albedo})s - I_n$$

หากความชื้นและอุณหภูมิของพื้นผิวเปลี่ยนแปลงไม่มากจะทำให้ค่า I_n ก่อนข้างคงที่ และ R_n จะสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ s

ในกรณีที่สามารถอนุมานให้ a , b และ I_n คงที่ จะทำให้สามารถคำนวณอัตราการคายระเหยได้ โดยใช้ข้อมูลพลังงานรังสีดวงอาทิตย์รายวันเท่านั้น

เพื่อทดสอบสมมุติฐานดังกล่าว จึงวัดพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ s พร้อมกันกับพลังงานรังสีสุทธิ R_n และอัตราการคายระเหย ET โดยวิธี Bowen ratio energy balance ในช่วงของการทำนาปี ในปี 2549 ที่ จ.ขอนแก่น และที่ จ.ร้อยเอ็ด ผลจากการวัดทั้งสองแห่งชี้ว่าสามารถใช้สมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ET และ R_n ได้ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.96 และ 0.97 ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อนในรูปของความร้อนแฝงกับพลังงานรังสีสุทธิ ที่ (ก) จ.ขอนแก่น และที่ (ข) จ.ร้อยเอ็ด

ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเส้นตรงทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันจึงรวมเข้าด้วยกันและใช้ค่าเฉลี่ย

$$\lambda ET = 0.8R_n + 2.0$$

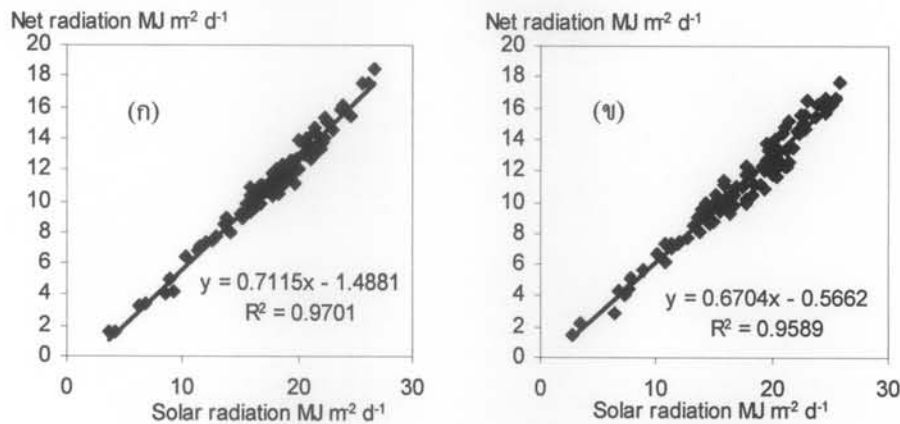
slope ของสมการเส้นตรง $\lambda ET / R_n$ ชี้ว่า 80 % ของพลังงานรังสีสุทธิถูกใช้ในกระบวนการคายระเหย และมีค่าใกล้เคียงกับค่าประเมินจาก

$$b = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)} = 0.78$$

อุณหภูมิที่ใช้ประเมินคืออุณหภูมิช่วงกลางวันเฉลี่ยตลอดช่วงฤดูปลูก 30°C และเมื่อ $r_c/r_a \sim 0$ ซึ่งแนะนำการคายระเหยจากนาที่มีน้ำขังคล้ายกับการคายระเหยจากผิวดินโดยมีผลกระทบจาก r_c น้อย จากค่า intercept $a=2.0$ ของสมการเส้นตรง และจากค่าเฉลี่ยของ R_n จากการวัดซึ่งเท่ากับ $11 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ประเมินได้ว่าผลของความชื้นอากาศและความเร็วลมต่อ λET คิดเป็น 20 % ของรังสีสุทธิ ใกล้เคียงกับค่าประมาณที่ใช้ทั่วไป เช่นในสมการของ Priestley และ Taylor เป็นต้น ดังนั้นสมการที่ใช้ในการประเมินอัตราการคายระเหยภายในแบบจำลองนี้คือ

$$ET = f(\theta) \frac{1}{\lambda} (0.8R_n + 2.0) \quad (6)$$

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง R_n และ s ก็สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้โดยในรูปเส้นตรงเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 6 โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.97 และ 0.96



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ของพลังงานรังสีสุทธิต่อพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ที่ (ก) จ.ขอนแก่น และที่ (ข) จ.ร้อยเอ็ด

ได้เฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเส้นตรงทั้งสองเข้าด้วยกัน เช่นเดียวกับกรณีของ R_n และ ET และในแบบจำลองนี้ได้ใช้สมการ

$$R_n = 0.7s - 1.0 \quad (7)$$

slope ของสมการเส้นตรงชี้ให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ของนาข้าว *albedo* มีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 0.3 สูงกว่าค่าที่ใช้ทั่วไปคือ 0.25 เล็กน้อย แต่เท่ากับค่าประมาณของ earth-atmosphere (Andrews, 2000) ส่วนค่า intercept = -1 มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการประเมินโดยใช้กฎของ Stefan-Boltzman

$$I_n = \varepsilon \sigma (T_c^4 - T_a^4) = 1.0$$

เมื่อ σ คือค่าคงที่ของ Stefan-Boltzman ε emissivity ของพื้นผิวเท่ากับ 0.94 T_a คืออุณหภูมิของพื้นผิวนอกจากการวัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 27°C และ T_c คืออุณหภูมิด้านล่างของเมฆ เมื่อกำหนดให้ต่ำกว่า T_a 2°C (Monteith และ Unsworth, 1990; Jones, 1992)

แม้สัมประสิทธิ์ของสมการทั้งสองเสมือนเป็นค่าเชิง empirical แต่สามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่าของสัมประสิทธิ์ดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับลักษณะแวดล้อมของพื้นที่ ดังนั้นทำให้สามารถประเมินหาสัมประสิทธิ์ทั้ง 4 ดังกล่าวได้จากข้อมูลฟ้าอากาศที่มีอยู่ในพื้นที่

ผลกระทบของความชื้นดิน

การประเมินผลกระทบของความชื้นดินต่ออัตราการเจริญเติบโตและอัตราการคายน้ำ $f(\theta)$ ได้ใช้แนวทางของ FAO (Allen และคณะ, 1998) และระบบติดตามประเมินการเจริญเติบโตพืชของสหภาพยุโรป (Supit และ Goot, 2003) ดังนี้

$$f(\theta) = \frac{\theta_v - \theta_{pw}}{\theta_c - \theta_{pw}} \quad (8)$$

ซึ่งก็คือความชื้นดินที่เป็นประโยชน์เชิงสัมพัทธ์ (relative available soil water) θ_v คือความชื้นดินโดยปริมาตร ณ เวลานั้น ๆ θ_{pw} คือความชื้นดินที่จุดเหี่ยวเฉาถาวร (permanent wilting point) θ_c คือความชื้นดินที่อัตราการเจริญเติบโตและการคายระเหยเริ่มถูกจำกัด (critical water content) ซึ่งในกรณีของข้าวกำหนดให้ θ_c เท่ากับค่าความชื้นดินที่จุดอิมดัว การใช้แนวทางดังกล่าวแทนการใช้ความต้านทานของพุ่มใบและอากาศเหนือพืช (aerodynamic resistance) ที่ใช้อยู่เดิม ทำให้แบบจำลองเรียบง่ายขึ้นและลดทอนข้อมูลนำเข้าที่แบบจำลองต้องใช้

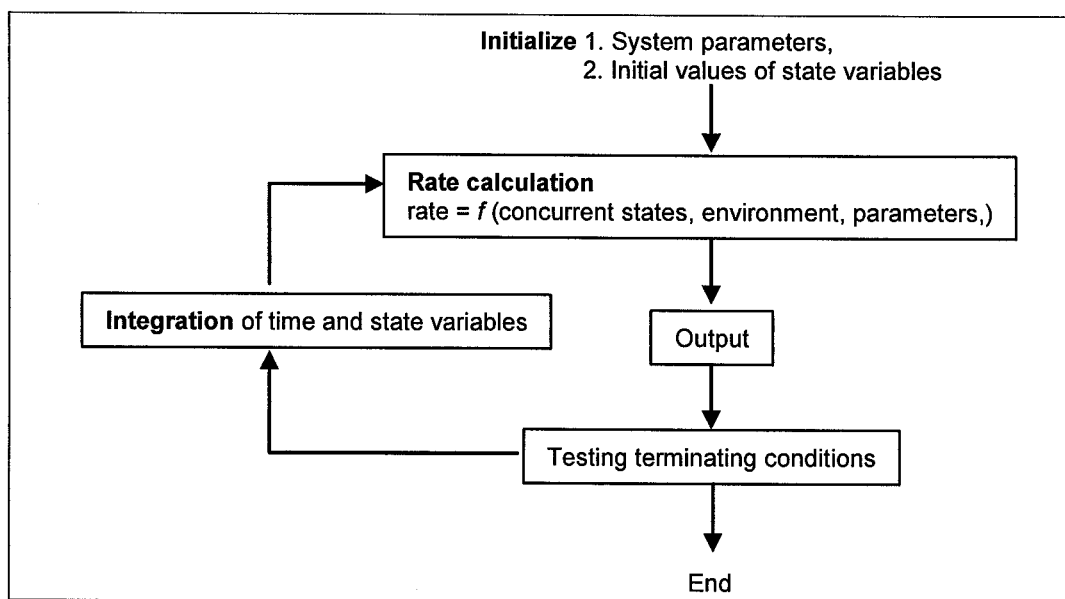
โปรแกรมจำลองการเจริญเติบโตและผลผลิต

จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ได้เขียนคำสั่ง (โปรแกรม) ให้คอมพิวเตอร์ประมวลผลโดยใช้ภาษา Fortran ตามมาตรฐาน Fortran 95 ซึ่งรหัสคำสั่ง (source code) ได้แสดงไว้ในภาคผนวกที่ 1 โครงสร้างของโปรแกรมเป็นแบบแยกส่วน (modular) โดยที่แต่ละกระบวนการที่เป็นองค์ประกอบของแบบจำลองได้ถูกสร้างให้เป็น module แยกเป็นอิสระเพื่อให้สะดวกต่อการศึกษาทำความเข้าใจ ดัดแปลงแก้ไข และเชื่อมต่อกับระบบฐานข้อมูลและระบบการประมวลผลอื่น ๆ การทำงานของแต่ละ module ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักคือ

1. System initialization: กำหนดค่าคุณสมบัติของระบบ (system parameters) และกำหนดค่าสถานะของระบบ ณ เวลาที่เริ่มทำการประเมินผล (initial states)
2. Rate calculation: คำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของสถานะภาพ (states) ต่าง ๆ ของระบบ อัตราการเปลี่ยนแปลงนี้ขึ้นกับคุณสมบัติของระบบ สภาพแวดล้อม เช่น แสงและอุณหภูมิ และสถานะภาพของระบบในขณะนั้น ๆ ซึ่งเป็น feed back ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของตัวระบบเอง ความสัมพันธ์ดังกล่าวถูกบรรยายไว้โดย system ของ simultaneous differential equations ที่เขียนแยกเป็นอิสระไว้ใน module ต่าง ๆ
3. Integration: update เวลา และ integrate หาค่าสถานะภาพของระบบ (system state) ณ เวลาใหม่

ขั้นตอนเหล่านี้เป็นขั้นตอนหลักของการจำลองพลวัตของระบบ system dynamics simulation (Ferrari, 1978; Rowell และ Wormley, 1997) ที่ใช้วิธีการ numerical ในการแก้ปัญหาเชิง Initial Value Problem (IVP) และสามารถแสดงเป็นแผนภาพ (ภาพที่ 7) เช่นเดียวกับที่ Kraalingen (1995) ได้เสนอไว้

เมื่อนำ module เหล่านี้มาประกอบเข้าด้วยกันเพื่อจำลองสถานการณ์การเจริญเติบโตของพืช การทำงานแต่ละขั้นตอนของ module ต่าง ๆ จะต้องเป็นไปอย่างพร้อมเพียงและสอดคล้องซึ่งกันและกัน (module synchronization) จึงได้เขียนชุดคำสั่งกลาง (driver) ที่แยกเป็นอิสระจากแบบจำลองเพื่อควบคุมขั้นตอนการประมวลผล ให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ รหัสคำสั่ง (source code) ของ driver ได้แสดงไว้ในภาคผนวกที่ 2



ภาพที่ 7 ขั้นตอนหลักของการคำนวณของแบบจำลองพีช

นอกจากนี้ driver ยังทำหน้าที่อ่านข้อมูลที่เป็น input ของแบบจำลองซึ่งประกอบด้วย คุณสมบัติพีช ดิน และสภาพฟ้าอากาศรายวัน จัดเก็บไว้ใน file ที่แยกเป็นอิสระจากโปรแกรมแบบจำลอง และทำการจัดเก็บผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองให้อยู่ใน file ที่แยกจากโปรแกรมเช่นกัน ซึ่งรายละเอียดของ file เหล่านี้ได้กล่าวถึงในหัวข้อการเชื่อมโยง

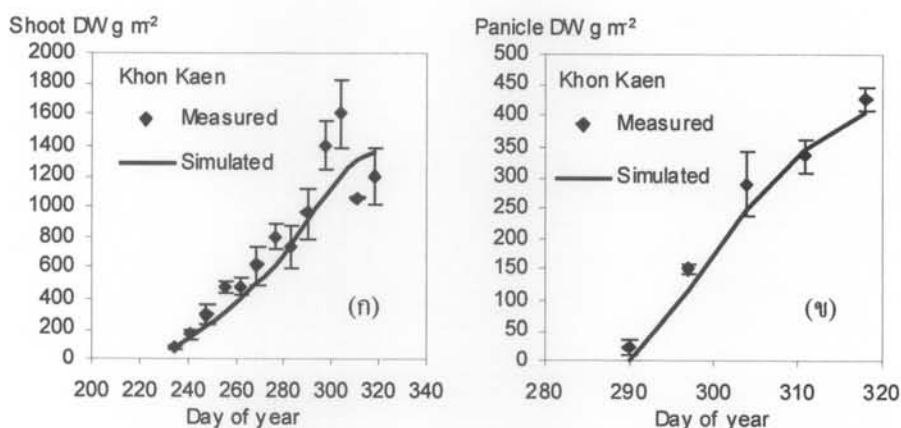
การทำงานของ driver มีขั้นตอนโดยสังเขปดังนี้ เมื่อเริ่มทำการจำลองสถานการณ์ (ขั้นตอนที่ 1) driver จะอ่านวันที่เริ่มทำการจำลองสถานการณ์ พร้อมกับค่าคุณสมบัติของระบบ (system parameters) และภาวะของระบบ ณ เวลาที่เป็นจุดเริ่มต้น (initial states/conditions) จาก input file และส่งผ่านข้อมูลให้กับ module ต่าง ๆ ตามความเหมาะสม จากนั้น (ขั้นตอนที่ 2) driver จะอ่านค่าสภาพแวดล้อมรายวัน (boundary conditions/forcing function) จาก input file และส่งผ่านให้กับ module ที่ต้องใช้ข้อมูลเหล่านี้เพื่อคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลง เมื่อ module คำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงเสร็จจะส่งผลลัพธ์ให้กับ driver ซึ่งจะทำหน้าที่เขียนผลลัพธ์ไปยัง output file และตรวจสอบข้อกำหนดเพื่อยุติการประมวลผล หากสถานการณ์ยังไม่เป็นไปตามข้อกำหนด driver จะปรับเวลา และส่งสัญญาณให้ module ต่าง ๆ ทำการบูรณาการ (integrate) ให้ได้สถานภาพของระบบ ณ เวลาใหม่ จากนั้นจะวนกลับเข้าสู่ขั้นตอนที่ 2 วัฏจักรของขั้นตอนที่ 3 และ 2 จะดำเนินไปจนกระทั่งบรรลุข้อกำหนดสำหรับหยุดการประมวลผล

การตรวจสอบประเมินผลของแบบจำลอง

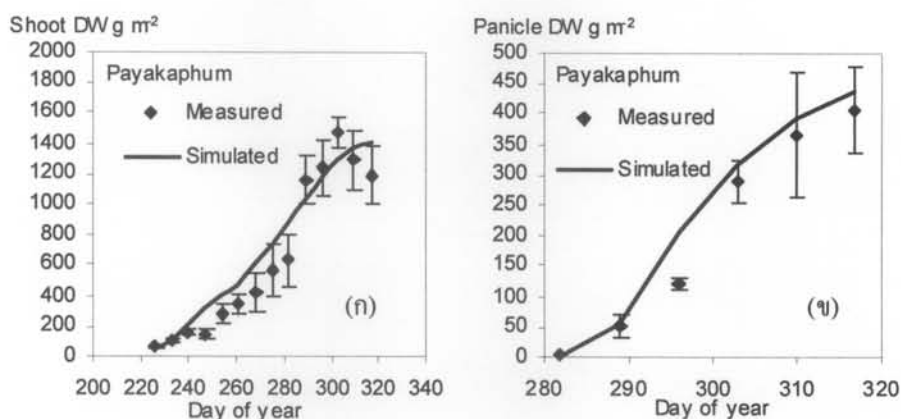
การเจริญเติบโตและผลผลิต

ได้ตรวจสอบแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้น โดยเปรียบเทียบผลการประเมินการเจริญเติบโตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 กับข้อมูลจากการวัดภาคสนามในแปลงนาที่มีการจัดการค่อนข้างดี ในปี 2548 ที่ อ.เมือง จ.ขอนแก่น, อ.พยัคฆภูมิพิสัย จ.มหาสารคาม, อ.เกษตรวิสัย อ.สุวรรณภูมิ และ อ.โพนทราย จ.ร้อยเอ็ด ในการจำลองสถานการณ์ได้ใช้ข้อมูลสภาพฟ้าอากาศ ณ พื้นที่นั้น ๆ ข้อมูลอื่นที่เปลี่ยนแปลงตามพื้นที่คือ วันที่เริ่มทำการประเมินผล, มวลชีวภาพของพืช ณ วันที่เริ่มทำการประเมินผล ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากภาคสนาม และคุณสมบัติดินคือ ความชื้นดินโดยปริมาตรที่จุดอิมตัว และที่ในดินแห้ง (air dry) ส่วนคุณสมบัติพืชไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามสถานที่หรือปี

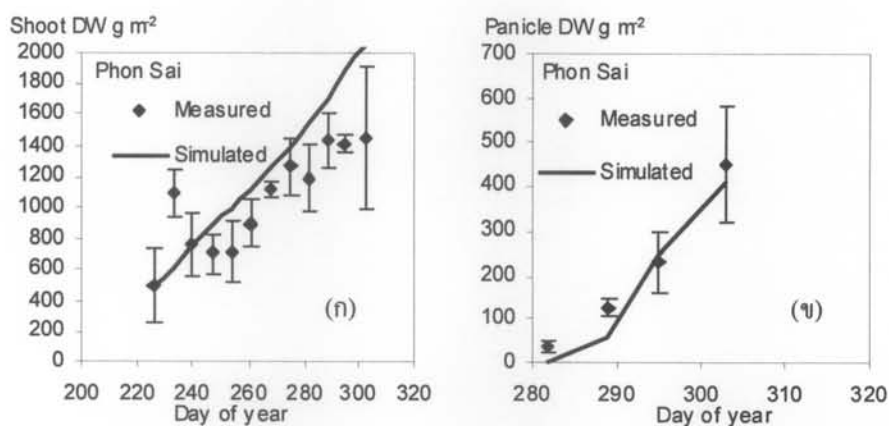
ผลการประเมินการเจริญเติบโตและผลผลิตโดยแบบจำลอง ที่ อ.เมือง จ.ขอนแก่น และที่ อ.พยัคฆภูมิพิสัย จ.มหาสารคาม ซึ่งเป็นนาดี มีความสอดคล้องสูงกับผลจากการวัดภาคสนาม ดังแสดงในภาพที่ 8 (ก) และ 8 (ข) และภาพที่ 9 (ก) และ 9 (ข) แต่เมื่อเปรียบเทียบผลการประเมินภายใต้สภาพนาหว่านพบว่า ความใกล้เคียงของผลการประเมินโดยแบบจำลองกับข้อมูลจากการวัดภาคสนามลดลง แต่ยังอยู่ในเกณฑ์ดี ที่ อ.โพนทราย จ.ร้อยเอ็ด (ภาพที่ 10 (ก) และ 10 (ข))



ภาพที่ 8 การเปรียบเทียบ (ก) การเจริญเติบโต และ (ข) ผลผลิตข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ประเมินโดยแบบจำลองที่เรียบง่าย กับข้อมูลจากการวัดภาคสนาม ปี 2548 ที่ อ.เมือง จ.ขอนแก่น

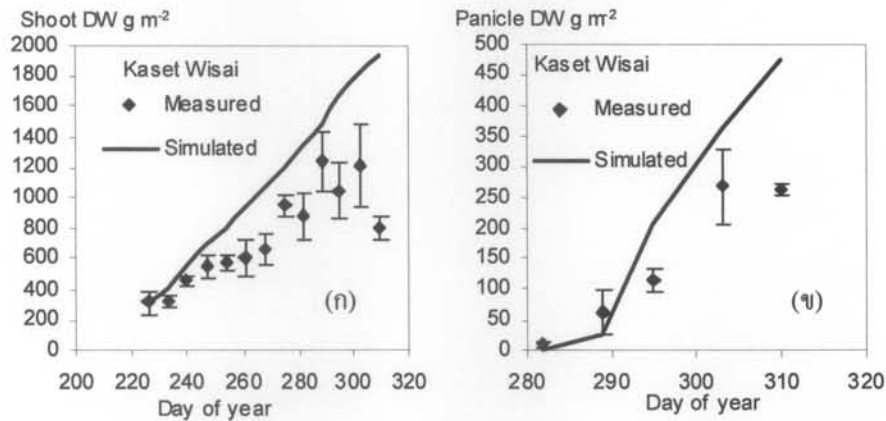


ภาพที่ 9 การเปรียบเทียบ (ก) การเจริญเติบโต และ (ข) ผลผลิตข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ประเมินโดยแบบจำลองที่เรียบง่าย กับข้อมูลจากการวัดภาคสนาม ปี 2548 ที่ อ.พยัคฆภูมิพิสัย จ.มหาสารคาม

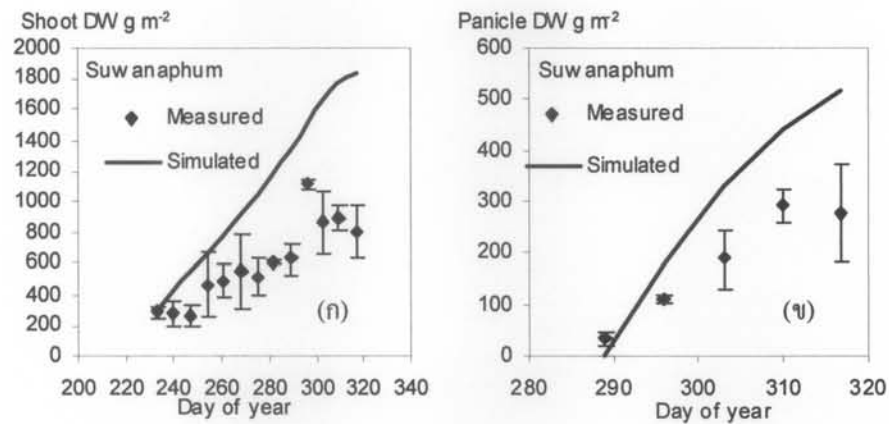


ภาพที่ 10 การเปรียบเทียบ (ก) การเจริญเติบโต และ (ข) ผลผลิตข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ประเมินโดยแบบจำลองที่เรียบง่าย กับข้อมูลจากการวัดภาคสนาม ปี 2548 ที่ อ.โพธิ์ทราย จ.ร้อยเอ็ด

อย่างไรก็ตาม จากการเปรียบเทียบที่ อ.เกษตรวิสัย (ภาพที่ 11 (ก) และ 11 (ข)) และ อ.สุวรรณภูมิ จ.ร้อยเอ็ด (ภาพที่ 12 (ก) และ 12 (ข)) พบว่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น และเห็นได้ชัดโดยเฉพาะที่ อ.สุวรรณภูมิ จ.ร้อยเอ็ด สันนิษฐานว่าอาจมีสาเหตุมาจากวัชพืชหรือความอุดมสมบูรณ์ดิน

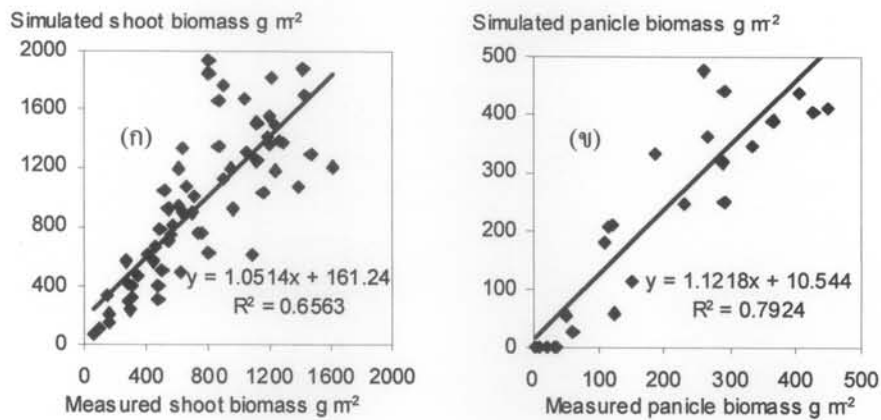


ภาพที่ 11 การเปรียบเทียบ (ก) การเจริญเติบโต และ (ข) ผลผลิตข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ประเมินโดยแบบจำลองที่เรียบง่าย กับข้อมูลจากการวัดภาคสนาม ปี 2548 ที่ อ.เกษตรวิสัย จ.ร้อยเอ็ด



ภาพที่ 12 การเปรียบเทียบ (ก) การเจริญเติบโต และ (ข) ผลผลิตข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ประเมินโดยแบบจำลองที่เรียบง่าย กับข้อมูลจากการวัดภาคสนาม ปี 2548 ที่ อ.สุวรรณภูมิ จ.ร้อยเอ็ด

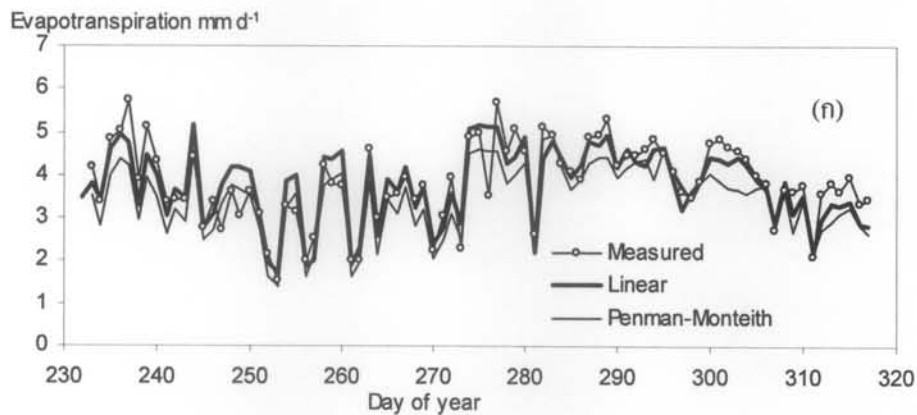
เพื่อตรวจสอบความแม่นยำโดยรวมของการประเมินโดยแบบจำลอง จึงได้ทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ระหว่างค่าประเมินและค่าจากการวัดภาคสนาม จากการเปรียบเทียบพบว่าการประเมินโดยแบบจำลองให้ผลสอดคล้องกับผลจากการวัดภาคสนาม โดยมีค่า coefficient of determination; R^2 เท่ากับ 0.66 สำหรับค่ามวลชีวภาพของส่วนเหนือดิน ดังแสดงในภาพที่ 13 (ก) และเท่ากับ 0.79 สำหรับมวลชีวภาพของรวงดังแสดงในภาพที่ 13 (ข)



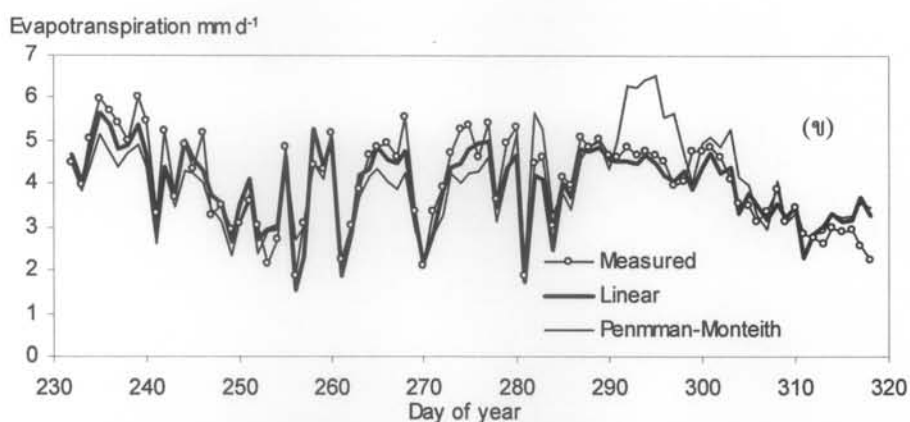
ภาพที่ 13 การเปรียบเทียบผลการจำลอง (ก) มวลชีวภาพของส่วนเหนือดิน และ (ข) มวลชีวภาพของรวงข้าว กับข้อมูลจากการวัดภาคสนาม ปี 2548

อัตราการคายระเหย

ได้ตรวจสอบผลการประเมินอัตราการคายระเหยของแบบจำลองที่เรียบง่าย โดยเปรียบเทียบกับผลจากการวัดภาคสนามในแปลงนาโดยวิธี Bowen Ratio Energy Balance (ดังเสนอรายละเอียดไว้ในรายงานความก้าวหน้าของโครงการครั้งที่ 2 และ 4) ซึ่งได้ทำการวัดที่ อ.เมือง จ.ขอนแก่น และ อ.สุวรรณภูมิ จ.ร้อยเอ็ด ในปี 2548 และที่ อ.ชุมแพ จ.ขอนแก่น และ อ.สุวรรณภูมิ จ.ร้อยเอ็ด ในปี 2549



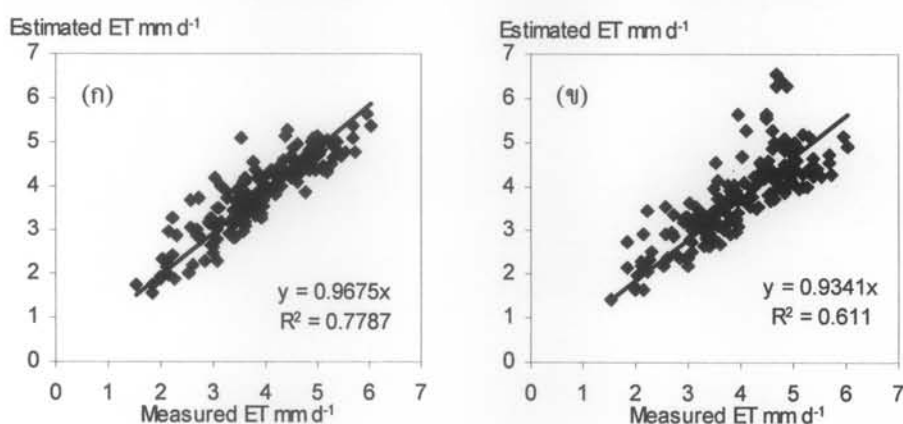
ภาพที่ 14 (ก) การเปรียบเทียบค่าประเมินอัตราการคายระเหยจากแปลงนา โดยสมการเส้นตรงกับค่าจากการวัดภาคสนามโดยวิธี Bowen Ratio Energy Balance และค่าประเมินโดยวิธี Penman-Monteith ที่ อ.เมือง จ.ขอนแก่น ปี 2548



ภาพที่ 14 (ข) การเปรียบเทียบค่าประเมินอัตราการคายระเหยจากแปลงนา โดยสมการเส้นตรงกับค่าจากการวัดภาคสนามโดยวิธี Bowen Ratio Energy Balance และค่าประเมินโดยวิธี Penman-Monteith ที่ อ.สุวรรณภูมิ จ.ร้อยเอ็ด ปี 2548

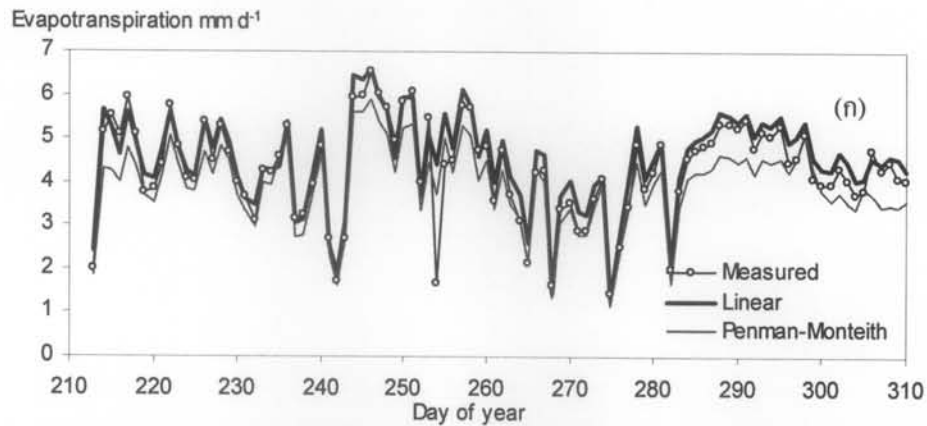
ผลการเปรียบเทียบปี 2548 ซึ่งว่าการประเมินโดยสมการเส้นตรงให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดภาคสนามมากกว่าการประเมินโดยใช้สมการ Penman-Monteith โดยเฉพาะในช่วง เดือนสุดท้ายก่อนเก็บเกี่ยว ทั้งที่ จ.ขอนแก่น (ภาพที่ 14 (ก)) และที่ จ.ร้อยเอ็ด (ภาพที่ 14 (ข))

เมื่อรวมข้อมูลของทั้งสองสถานที่เข้าด้วยกัน เพื่อทดสอบความแม่นยำโดยรวมของการประเมินโดยใช้สมการเส้นตรงและวิธีการของ Penman-Monteith พบว่า R^2 ของการประเมินโดยสมการเส้นตรง (ภาพที่ 15 (ก)) มีค่าสูงกว่าวิธีการของ Penman-Monteith (ภาพที่ 15 (ข))

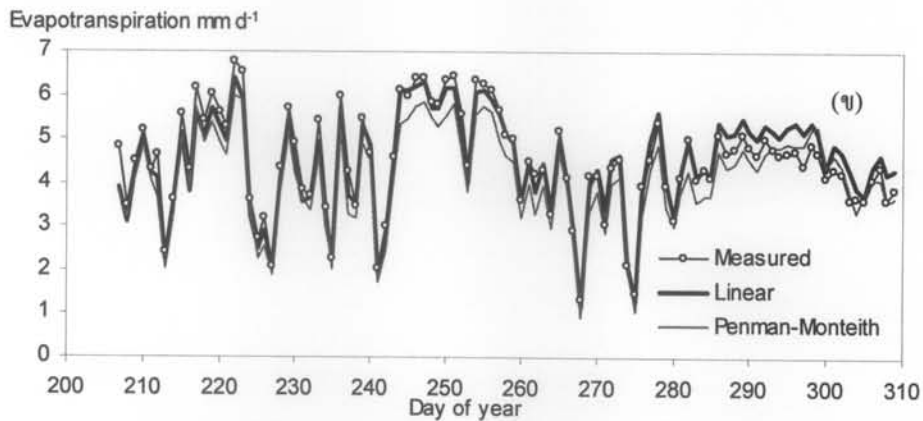


ภาพที่ 15 การเปรียบเทียบผลโดยรวมของการประเมินอัตราการคายระเหยโดย (ก) สมการเส้นตรง และโดย (ข) วิธีการของ Penman-Monteith กับข้อมูลจากการวัดภาคสนามโดยวิธี Bowen Ratio Energy Balance ที่ จ.ขอนแก่น และ จ.ร้อยเอ็ด ปี 2548

อย่างไรก็ตาม ผลการเปรียบเทียบระหว่างการประเมินและค่าที่ได้จากการวัดภาคสนามในปี 2549 ซึ่งว่าที่ อ.ชุมแพ จ.ขอนแก่น ผลการประเมินอัตราการคายระเหยโดยสมการเส้นตรง สอดคล้องกับค่าจากการวัดภาคสนามมากกว่าการใช้วิธีการ Penman-Monteith โดยเฉพาะช่วงปลายฤดูปลูก (ภาพที่ 16 (ก)) แต่ที่ อ.สุวรรณภูมิ จ.ร้อยเอ็ด วิธีการทั้งสองให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน (ภาพที่ 16 (ข))



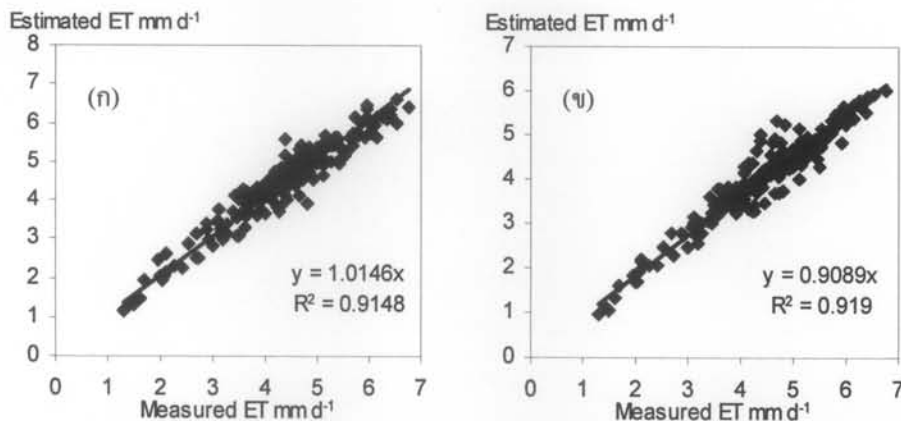
ภาพที่ 16 (ก) การเปรียบเทียบค่าประเมินอัตราการคายระเหยจากแปลงนา โดยสมการเส้นตรง กับค่าจากการวัดภาคสนามโดยวิธี Bowen Ratio Energy Balance และค่าประเมินโดยวิธี Penman-Monteith ที่ อ.ชุมแพ จ.ขอนแก่น ปี 2549



ภาพที่ 16 (ข) การเปรียบเทียบค่าประเมินอัตราการคายระเหยจากแปลงนา โดยสมการเส้นตรง กับค่าจากการวัดภาคสนามโดยวิธี Bowen Ratio Energy Balance และค่าประเมินโดยวิธี Penman-Monteith ที่ อ.สุวรรณภูมิ จ.ร้อยเอ็ด ปี 2549



เมื่อทดสอบความแม่นยำโดยรวมของการประเมินโดยใช้สมการเส้นตรงและวิธีการของ Penman-Monteith เช่นเดียวกับปี 2548 พบว่า R^2 ของการประเมินโดยวิธีทั้ง 2 มีค่าที่สูง ($R^2 = 0.92$) และมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก (ภาพที่ 17 (ก) และ 17 (ข)) จากผลดังกล่าวจึงเสนอแนะว่าหากมีข้อมูลนำเข้าสภาพฟ้าอากาศครบถ้วนก็สามารถใช้วิธีการของ Penman-Monteith FAO ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อมูลเพียงพลังงานแสงอาทิตย์ หรือต้องการวิธีการประเมินที่ง่ายไม่ซับซ้อน ก็สามารถใช้สมการเส้นตรงได้ แต่ควรทำการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ดังที่ได้บรรยายไว้



ภาพที่ 17 การเปรียบเทียบผลโดยรวมของการประเมินอัตราการคายระเหย (ก) โดยสมการเส้นตรง และโดย (ข) วิธีการของ Penman-Monteith กับข้อมูลจากการวัดภาคสนามโดยวิธี Bowen Ratio Energy Balance ที่ จ.ขอนแก่น และ จ.ร้อยเอ็ด ปี 2549

จจ.

SB

191

.R5

๗๗๖๓๗

การประยุกต์ใช้แบบจำลองประเมินการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าว ภายใต้การแข่งขันจากวัชพืช

ระบบการผลิตข้าวในทุ่งกุลาร้องไห้ส่วนใหญ่เป็นนาหว่าน อาศัยน้ำฝน และวัชพืชเป็นปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งของระบบการผลิต จึงได้ทดสอบใช้แบบจำลองที่เรียบง่ายเป็นฐานในการปรับขยายเพื่อใช้ประเมินผลกระทบจากวัชพืช

แนวคิดในการปรับขยายมีสาระที่สำคัญดังนี้ จากข้อมูลที่ต้องนำเข้าคือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของวัชพืชต่อต้นข้าว กำหนดหามวลชีวภาพและพื้นที่ใบของวัชพืช L_w จากนั้นประเมินผลกระทบของวัชพืชต่อการเจริญเติบโตของข้าว โดยมีสมมุติฐานว่าความได้เปรียบในการแข่งขันของวัชพืชนั้นเกิดจากความสามารถในการรับแสงและบังแสง และได้กำหนดให้วัชพืชมีมุมใบที่นอนราบโดยมีค่า extinction coefficient k_w เท่ากับ 1 และมีพื้นที่ใบจำเพาะ ($m^2 g^{-1}$) สูงกว่าข้าว 20 % ผลกระทบของวัชพืชต่อการเจริญเติบโตของข้าวจึงมีลักษณะเป็นพลวัต ขึ้นกับพลังงานแสง คุณลักษณะทั้งของวัชพืชและข้าว และขึ้นกับภาวะของพืชทั้งสอง ซึ่งบรรยายเป็นค่าเชิงสัมพัทธ์ $f(weed)$ ได้ดังนี้

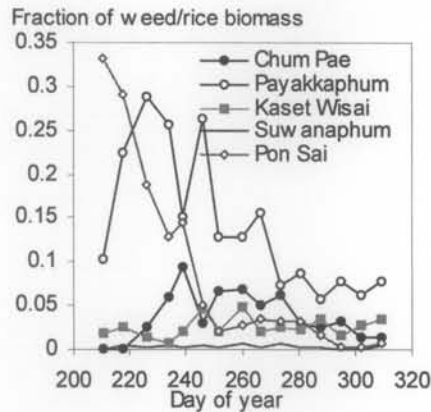
$$f(weed) = e^{-k_w L_w}$$

และอัตราการสร้างมวลชีวภาพของข้าวจะเท่ากับ

$$\frac{dw}{dt} = \varepsilon_R (1.0 - e^{-k_L}) e^{-k_w L_w} s$$

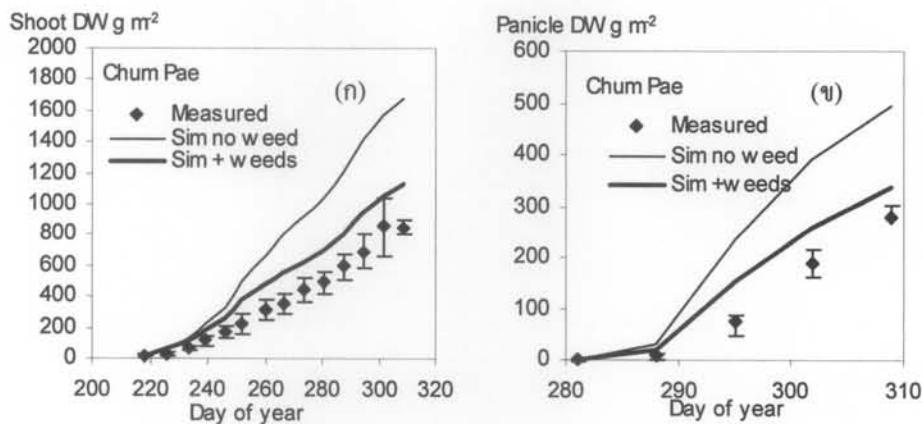
การตรวจสอบผลการประเมินการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าว ภายใต้การแข่งขันจากวัชพืช

ได้ตรวจสอบการประเมินการเจริญเติบโต และผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยแบบจำลองกับข้อมูลจากการวัดภาคสนาม ในแปลงนาที่มีการจัดการที่หลากหลาย ที่ อ.ชุมแพ จ.ขอนแก่น, อ.พยัคฆภูมิพิสัย จ.มหาสารคาม, อ.เกษตรวิสัย อ.สุวรรณภูมิ และ อ.โพนทราย จ.ร้อยเอ็ด ในปี 2549 สัดส่วนของมวลชีวภาพของวัชพืชต่อต้นข้าวในช่วงฤดูปลูก ในแปลงนาเหล่านี้ ซึ่งใช้เป็นข้อมูลนำเข้ามีค่าดังที่ได้แสดงในภาพที่ 18

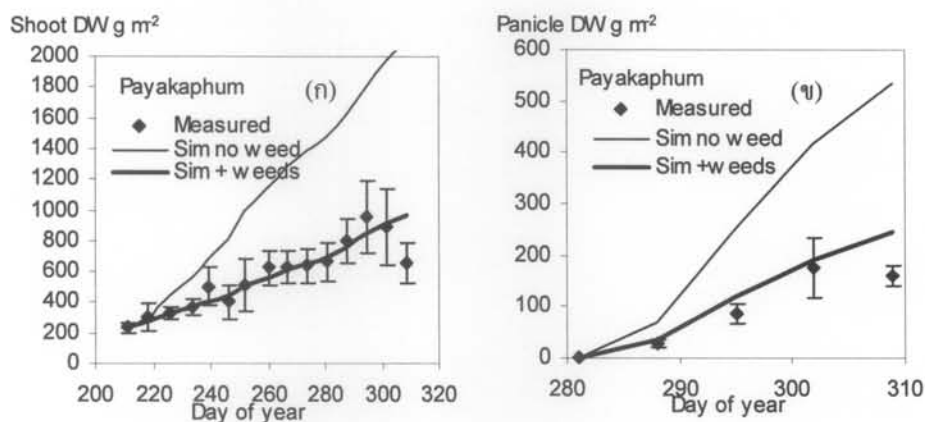


ภาพที่ 18 สัดส่วนโดยน้ำหนักของวัชพืชต่อต้นข้าวในแปลงนา ที่ อ.ชุมแพ จ.ขอนแก่น, อ.พยัคฆภูมิพิสัย จ.มหาสารคาม และ อ.เกษตรวิสัย, อ.สุวรรณภูมิ และ อ.โพนทราย จ.ร้อยเอ็ด ปี 2549

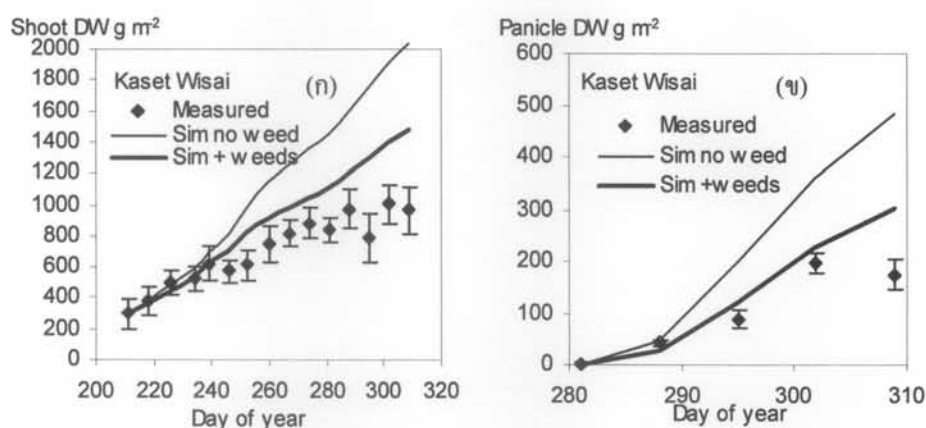
จากการเปรียบเทียบกับข้อมูลภาคสนาม พบว่าการประเมินมวลชีวภาพของส่วนเหนือดินทั้งหมด (shoot dry weight) และน้ำหนักของรวง (panicle dry weight) ของข้าวที่ปลูกที่ อ.ชุมแพ จ.ขอนแก่น (ภาพที่ 19 (ก) และ 19 (ข)), อ.พยัคฆภูมิพิสัย จ.มหาสารคาม (ภาพที่ 20 (ก) และ 20 (ข)) และที่ อ.เกษตรวิสัย จ.ร้อยเอ็ด (ภาพที่ 21 (ก) และ 21 (ข)) มีความสอดคล้องกับข้อมูลภาคสนามค่อนข้างสูง โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.86 สำหรับส่วนเหนือดิน และเท่ากับ 0.92 สำหรับรวงข้าว (ภาพที่ 22 (ก) และ 22 (ข)) ข้อมูลจากการจำลองแนะนำ วัชพืชทำให้ผลผลิตจริงของข้าวลดต่ำกว่าค่าศักยภาพของผลผลิตถึง 30-50 %



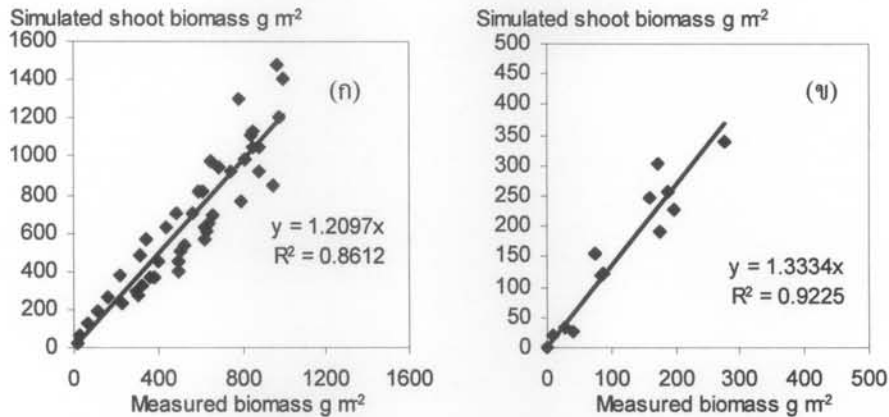
ภาพที่ 19 การเปรียบเทียบ (ก) การเจริญเติบโต และ (ข) ผลผลิตข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ประเมินโดยแบบจำลองที่เปรียบเทียบกับข้อมูลจากการวัดภาคสนามภายใต้การแข่งขันกับวัชพืช ที่ อ.ชุมแพ จ.ขอนแก่น ปี 2549



ภาพที่ 20 การเปรียบเทียบ (ก) การเจริญเติบโต และ (ข) ผลผลิตข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ประเมินโดยแบบจำลองที่เรียบง่ายกับข้อมูลจากการวัดภาคสนามภายใต้การแข่งขันกับวัชพืช ที่ อ.พยุคนภูมิพิสัย จ.มหาสารคาม ปี 2549

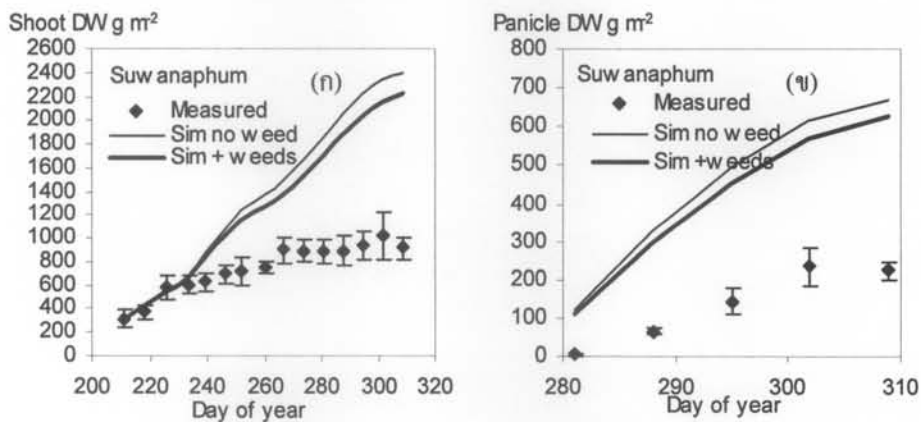


ภาพที่ 21 การเปรียบเทียบ (ก) การเจริญเติบโต และ (ข) ผลผลิตข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ประเมินโดยแบบจำลองที่เรียบง่ายกับข้อมูลจากการวัดภาคสนามภายใต้การแข่งขันกับวัชพืช ที่ อ.เกษตรวิสัย จ.ร้อยเอ็ด ปี 2549



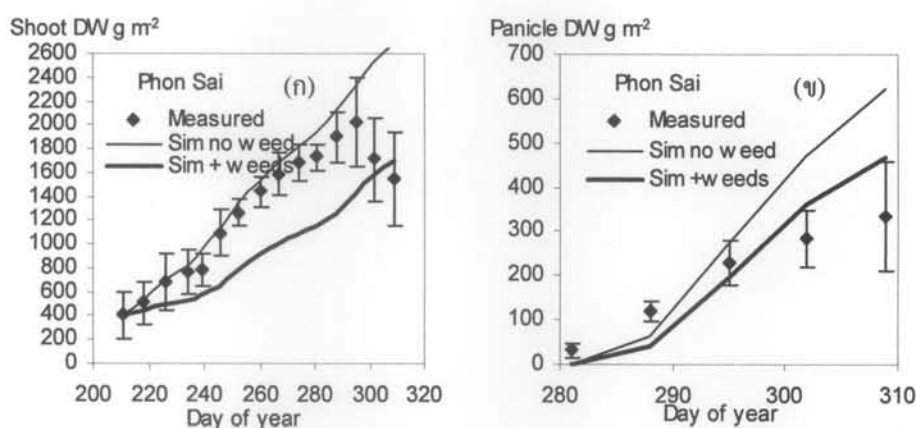
ภาพที่ 22 การเปรียบเทียบผลการจำลอง (ก) มวลชีวภาพส่วนเหนือดิน และ (ข) มวลชีวภาพรวงข้าว กับข้อมูลจากการวัดภาคสนามภายใต้การแข่งขันกับวัชพืช ที่ อ.ชุมแพ จ.ขอนแก่น อ.พยัคฆภูมิพิสัย จ.มหาสารคาม และ อ.เกษตรวิสัย ปี 2549

อย่างไรก็ตามผลการประเมินที่ อ.สุวรรณภูมิ มีความคลาดเคลื่อนสูง (ภาพที่ 23 (ก) และ 23 (ข)) ในพื้นที่นาดังกล่าวมีปริมาณของวัชพืชน้อย ดังแสดงในภาพที่ 18 นอกจากนี้ จากการสังเกต พื้นที่ดังกล่าวมีน้ำบนพื้นผิวดินตลอดช่วงปลูก การเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวควรที่จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าศักยภาพ ดังที่แบบจำลองได้ประเมินไว้ ดังนั้นจึงสันนิษฐานว่าคุณสมบัติทางเคมีของดินในบริเวณนั้นอาจแตกต่างจากพื้นที่อื่น ๆ และเป็นปัจจัยจำกัดที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว ซึ่งอยู่นอกเหนือขอบเขตของข้อกำหนด (assumption) ของแบบจำลองนี้



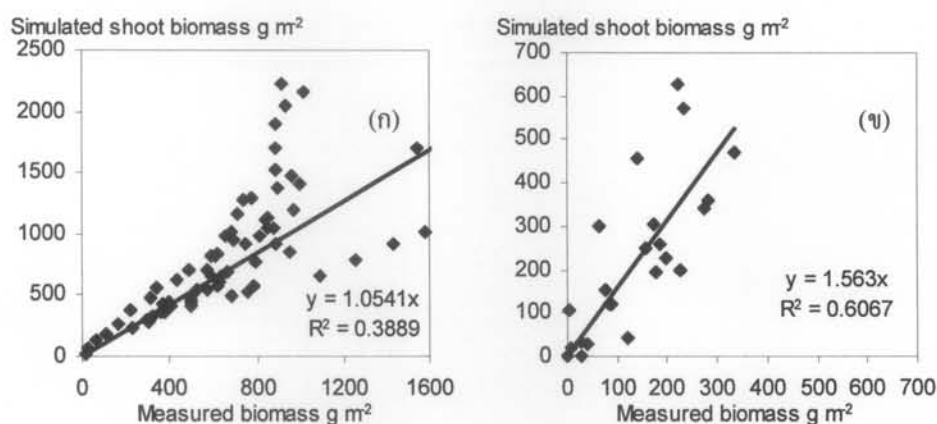
ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบ (ก) การเจริญเติบโต และ (ข) ผลผลิตข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ประเมินโดยแบบจำลองที่เปรียบเทียบกับข้อมูลจากการวัดภาคสนามภายใต้การแข่งขันกับวัชพืช ที่ อ.สุวรรณภูมิ จ.ร้อยเอ็ด ปี 2549

ผลการประเมินที่ อ.โพนทราย มีลักษณะแตกต่างจากแหล่งอื่น ๆ (ภาพที่ 24 (ก) และ 24 (ข)) มวลชีวภาพของส่วนเหนือดินทั้งหมด จากการวัดภาคสนาม มีค่าใกล้เคียงกับศักยภาพของการเจริญเติบโตที่ประเมินโดยแบบจำลอง ทั้ง ๆ ที่สัดส่วนของวัชพืชในช่วงเริ่มแรกของฤดูปลูกค่อนข้างสูง (ภาพที่ 18) จากการสังเกต พบว่าระดับน้ำในแปลงนาปี มีระดับที่ค่อนข้างสูง (0.5-0.8 เมตร) ซึ่งอาจทำให้ต้นข้าวมีการยืดตัวและลดการถูกบังแสงจากวัชพืช ดังนั้นผลกระทบของวัชพืชต่อการเจริญเติบโตของข้าว จึงไม่รุนแรงดังที่กำหนดไว้ในแบบจำลอง นอกจากนี้วัชพืชในสภาพดังกล่าวอาจแตกต่างจากสภาพทั่วไป และอาจไม่แข่งขันกับข้าวรุนแรงเหมือนเช่นกรณีอื่น ๆ



ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบผลการจำลอง (ก) มวลชีวภาพส่วนเหนือดิน และ (ข) มวลชีวภาพรวงข้าว กับข้อมูลจากการวัดภาคสนามภายใต้การแข่งขันกับวัชพืช ที่ อ.โพนทราย จ.ร้อยเอ็ด ปี 2549

เมื่อรวมความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นที่ อ.สุวรรณภูมิ และที่ อ.โพนทราย เข้ากับผลการเปรียบเทียบที่ อ.ชุมแพ อ.พยัคฆภูมิพิสัย และที่ อ.เกษตรวิสัย จะทำให้ความสอดคล้องโดยรวมมีค่าค่อนข้างต่ำ (ภาพที่ 25 (ก) และ 25 (ข)) โดยเฉพาะกรณีของมวลชีวภาพเหนือดินทั้งหมด ซึ่งสมการเส้นตรง $y = 1.054x$ สามารถบรรยายความสัมพันธ์ได้เพียง 39 % เท่านั้น แม้ผลจากการวิเคราะห์ regression จะชี้ว่า ค่า R^2 มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และความสอดคล้องระหว่างการประเมินกับค่าจากการวัดภาคสนามสามารถแสดงในรูปเส้นตรงได้ก็ตาม



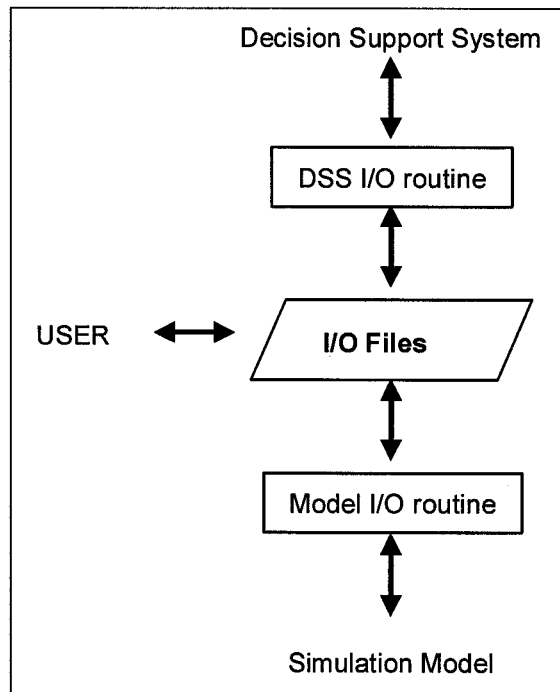
ภาพที่ 25 การเปรียบเทียบผลการจำลอง (ก) มวลชีวภาพส่วนเหนือดิน และ (ข) มวลชีวภาพรากกับข้อมูลจากการวัดภาคสนามภายใต้การแข่งขันกับวัชพืช ที่ อ.ชุมแพ จ.ขอนแก่น, อ.พยัคฆภูมิพิสัย จ.มหาสารคาม, อ.เกษตรวิสัย อ.สุวรรณภูมิ และอ.โพนทราย จ.ร้อยเอ็ด ปี 2549

การทดสอบแบบจำลองทั้งสองปี ได้ชี้ให้เห็นประโยชน์ของการประยุกต์ใช้แบบจำลอง เพื่อช่วยในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ของผลกระทบจากปัจจัยที่เป็นตัวจำกัด จากสมมุติฐานที่ใช้เป็นผู้กำหนด ในรูปของระดับช่องว่างของผลผลิต (yield gap analysis) และได้ข้อมูลที่สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดลำดับความสำคัญของปัญหา และแนวทางการแก้ไขปัญหา

ผลจากการเปรียบเทียบให้ข้อสังเกตว่ามีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงที่ อ.สุวรรณภูมิ ดังนั้นคุณสมบัติของพื้นที่ดังกล่าวควรได้รับการตรวจสอบในรายละเอียด ทั้งในแง่ของคุณสมบัติ และขอบเขตเชิงพื้นที่ของลักษณะดังกล่าว ว่าครอบคลุมพื้นที่เป็นวงกว้างหรือไม่ หากครอบคลุมพื้นที่เป็นวงกว้าง และการตรวจสอบภาคสนามในพื้นที่สนับสนุนผลการประเมินจากการใช้แบบจำลอง การแก้ไขปัญหาดังกล่าวควรได้รับลำดับความสำคัญที่สูง

การเชื่อมโยงกับระบบฐานข้อมูลและระบบประเมินผลอื่น

จากแนวคิดการออกแบบให้ระบบมีโครงสร้างแบบ modular เพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนแก้ไขแต่ละองค์ประกอบได้อย่างอิสระ โดยมีผลกระทบต่อส่วนอื่น ๆ น้อยที่สุด การเชื่อมต่อระหว่างแบบจำลองและระบบฐานข้อมูลกลางจึงใช้ 2 โปรแกรมย่อย (routine) ดังแสดงในภาพที่ 26



ภาพที่ 26 รูปแบบการเชื่อมต่อระหว่างแบบจำลองกับระบบข้อมูลเชิงพื้นที่

ข้อดีของโครงสร้างของการเชื่อมตődังกล่าวมีดังนี้

1. เปิดโอกาสให้ผู้พัฒนาระบบฐานข้อมูลของ DSS สามารถทำการเชื่อมต่อกับแบบจำลองพีชต่าง ๆ ได้หลายแบบจำลอง รวมถึงสามารถนำเข้าข้อมูลการเจริญเติบโตและผลผลิตพืชภาคสนามจากผู้ใช้ได้โดยตรง เพียงแต่ต้องรู้ถึงรูปแบบ (format) และประเภทของ file ที่จะนำเข้าเท่านั้น
2. เปิดโอกาสให้ผู้พัฒนาแบบจำลองสามารถทำการเชื่อมต่อแบบจำลองนั้น ๆ เข้ากับระบบฐานข้อมูลได้หลากหลายฐานข้อมูล เพียงแต่ต้องรู้รูปแบบ และประเภทของ file ที่ได้จากระบบฐานข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองเท่านั้น นอกจากนี้ เนื่องจากแบบจำลองนี้เป็นระบบเปิด (open source) ที่ผู้ใช้สามารถทำการปรับเปลี่ยน หรือเพิ่มเติมกระบวนการที่คาดว่าจะเป็นการ

หลักที่ควบคุมผลผลิตในระบบการผลิตนั้นได้ ดังนั้นรายการข้อมูลนำเข้าเพื่อทำการจำลองสถานการณ์ต้องมีการเปลี่ยนแปลงเสมอ เช่นในกรณีตัวอย่างของการปรับใช้แบบจำลองที่เรียบง่ายในการประเมินผลกระทบจากวัชพืช หรืออย่างเช่นการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของการจัดการหรือลักษณะพืชในกระบวนการ optimization โครงสร้างของการเชื่อมต่อนี้จะเอื้อต่อการทำงานในลักษณะดังกล่าว

3. เปิดโอกาสให้ผู้ใช้สามารถใช้ ระบบฐานข้อมูล หรือแบบจำลอง อย่างใดอย่างหนึ่ง แบบแยกส่วน เป็นอิสระจากกัน (stand alone) ได้

ภายใต้กรอบการวิจัยของโครงการพัฒนาแบบจำลองที่เรียบง่ายนี้ ได้พัฒนาโปรแกรมย่อยเฉพาะส่วนที่เป็น model I/O routine เท่านั้น

ประเภทของ file ที่ใช้ในการเชื่อมต่อได้กำหนดเบื้องต้นให้เป็น ASCII file หรือ text file การใช้ file ประเภทนี้ทำให้สะดวกต่อการตรวจสอบข้อมูลที่ส่งผ่านระหว่างแบบจำลองและระบบฐานข้อมูล นอกจากนี้ยังสะดวกกับผู้ใช้ที่ต้องการเพิ่มเติมรายการของข้อมูลนำเข้า หรือเปลี่ยนแปลงแก้ไขค่าคุณสมบัติของระบบหรือค่าภาวะของระบบที่จุดเริ่มต้น ในปัจจุบันกลุ่มของแบบจำลอง DSSAT (Hoogenboom และคณะ, 2005) ได้ใช้ ASCII file ในการเชื่อมต่อกับ shell ของระบบ เช่นเดียวกับแบบจำลองกลุ่ม School of de Wit (Bouman และคณะ, 1996) เช่น Oryza 2000 ซึ่งก็ใช้ I/O ในรูปของ ASCII file เช่นกัน

ข้อมูลนำเข้าสำหรับแบบจำลองที่เรียบง่ายนี้ประกอบด้วย 2 files คือ file ระบุคุณสมบัติพืช ดิน (system parameters) รวมถึงภาวะระบบ ณ เวลาที่เริ่มทำการประเมินผล (system initial states) ซึ่งกำหนดชื่อว่า rnspec.sys และ file สภาพฟ้าอากาศรายวัน ซึ่งกำหนดให้ชื่อว่า rnspec.wth เพื่อลดความหลากหลายในรูปแบบของ file ที่ระบบฐานข้อมูลจะต้องทำการเชื่อมต่อ จึงสร้าง file rnspec.sys ให้มีรูปแบบเช่นเดียวกับ file ข้อมูลนำเข้าของแบบจำลอง Oryza 2000 (Bouman และคณะ, 2001; Kraalingen, 1995) ซึ่งได้พัฒนาขึ้นโดยสถาบันข้าวนานาชาติและมหาวิทยาลัย Wageningen นอกจากนี้เนื่องจากกลุ่มแบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบจำลองแบบเปิด ดังนั้นหากผู้ใช้ต้องการที่จะนำ module หรือโปรแกรมย่อยส่วนใดส่วนหนึ่งของแบบจำลองในกลุ่มดังกล่าวมาทดลองเชื่อมกับแบบจำลองที่เรียบง่ายก็สามารถทำได้สะดวก ไม่ต้องเสียเวลาในการศึกษาและดัดแปลงรูปแบบของข้อมูลนำเข้าอีก ด้วยเหตุผลเดียวกันนี้จึงกำหนดให้ rnspec.wth มีรูปแบบเช่นเดียวกันกับ file ข้อมูลฟ้าอากาศที่ใช้โดยกลุ่มแบบจำลองดังกล่าว (แต่ไม่ต้องระบุตำแหน่งและระดับความสูงของ

สถานีตรวจวัดนั้น ๆ) ซึ่งมีข้อดีอีกประการหนึ่งคือสามารถดึงข้อมูล (extract) ในรูปแบบดังกล่าวได้จากระบบฐานข้อมูล CLICOM database ที่พัฒนาขึ้นโดย World Meteorological Organization (WMO) และใช้กันแพร่หลายทั่วโลก รวมถึง Food and Agriculture Organization (FAO, 2006) รูปแบบของ file `mspec.sys` ได้แสดงอย่างย่อเพื่อประกอบคำอธิบาย ไว้ในภาพที่ 27 และ file `mspec.wth` ในภาพที่ 28

```
!      time control
      SDATE =32.0,  OUTDEL=7.0

!      Light interception, and photosynthesis
      kc=0.7,  ec=1.5      !gdw/MJsw

!      soil properties
      qs=0.45,  qr=0.04

!      system initial state
      wc = 20.0,  p=0.0
```

ภาพที่ 27 รูปแบบของ file `mspec.sys` ที่ใช้ระบุค่า system parameters และ system initial states

ข้อกำหนดของรูปแบบของ file `runspec.sys` มีสั้น ๆ ดังนี้

1. มีความแตกต่างระหว่างอักษรตัวเล็กและตัวใหญ่
2. ใน file `mspec.sys` จะต้องมีการกำหนดค่าของ SDATE (วันที่เริ่มทำการจำลองสถานการณ์) เสมอ ในตัวอย่างนี้ SDATE =32.0 คือเริ่มทำการจำลองจากวันที่ 1 กุมภาพันธ์
3. การกำหนดค่าต้องระบุค่าเป็นตัวเลขทศนิยม (real) เท่านั้น และสามารถระบุได้มากกว่า 1 ครั้งในแต่ละบรรทัด กัน โดยช่องไฟ เคาะ หรือ เครื่องหมายจุลภาค
4. ข้อกำหนดอื่น ๆ เหมือนกับข้อกำหนดการเขียน source code ภาษา Fortran

file `runspec.sys` จะถูกอ่านเฉพาะในขั้นตอนที่ 1 (system initialization) เท่านั้น module ที่ต้องการใช้ค่าของคุณสมบัติของระบบ เช่น $k = 0.7$ และภาวะระบบ ณ เวลาที่เริ่มทำการ เช่น $wc = 20.0$ จะเรียกใช้ function ของ driver ชื่อ `param` หรือ `incon`ให้อ่านค่าเหล่านี้โดยเขียน statement

$$k = \text{param}('k') \quad \text{และ} \quad wc = \text{incon}('wc')$$

ไว้ในขั้นตอนที่ 1 ใน module ดังกล่าว เมื่อ function ค้นหาใน file `mspec.sys` และพบค่าของ parameter ดังกล่าว ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.7 ก็จะทำการ assign ค่าให้กับตัวแปร k ตามที่ระบุไว้ใน statement

การทำงานของฟังก์ชัน icon และ param จะเหมือนกันและสามารถใช้แทนกันได้ (alias) แต่การใช้ icon จะทำให้แยกแยะได้ง่ายว่าค่าดังกล่าวเป็นค่าของ system initial states ซึ่งอาจจะเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละวัน ต่างจากค่าของ parameter ที่จะไม่เปลี่ยนแปลงในการจำลองสถานการณ์ (simulation run) แต่ละครั้ง หาก driver หาค่าที่ระบุไว้ไม่พบ หรือพบ error อื่น ๆ model driver จะฝากข้อความบอกถึงปัญหาที่พบไว้ใน text file ชื่อ MSG.LOG

! Column	Description	Unit
!* 1	Station number	
!* 2	Year	
!* 3	Day	
!* 4	Solar radiation	MJ m-2 d-1
!* 5	Min temperature	oC
!* 6	Max temperature	oC
!* 7	Relative humidity	%
!* 8	Mean wind speed	m s-1
!* 9	Precipitation	mm d-1
!-----		
381201	2005 1 17.0 10.8 23.5 75.00 1.14 0.0	
381201	2005 2 17.0 9.4 25.4 80.00 0.77 0.0	
381201	2005 3 16.2 11.5 28.8 80.00 0.64 0.0	
.		
.		
381201	2005 365 15.2 18.1 34.2 78.00 0.66 0.0	

ภาพที่ 28 รูปแบบของ file rnspec.with ที่ประกอบด้วยข้อมูลฟ้าอากาศรายวัน เริ่มจากวันที่ 1, 2, 3,... ไปจนถึงวันที่ 365

สภาพฟ้าอากาศซึ่งเป็น independent variable (environment) ของฟังก์ชันคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของสถานะของระบบ จะถูกอ่านจาก file rnspec.with ในขั้นตอนที่ 2 (rate calculation) ของการคำนวณ ทุก ๆ วัน เริ่มจากวันที่ถูกระบุไว้โดยค่าของ SDATE (อักษรตัวใหญ่) ใน file rnspec.sys ซึ่งเป็นค่าของวันในปี (day of year) ในตัวอย่างในภาพที่ 27 การจำลองจะเริ่มจากวันที่ 1 กุมภาพันธ์ เป็นต้นไป

สดมภ์ที่ 1 เป็นรหัสของสถานี สดมภ์ที่ 2 เป็นปี ฯลฯ ดังที่แจ้งไว้ใน comment line ซึ่งเริ่มต้นด้วยเครื่องหมาย ! ดังนั้นหากต้องการเพิ่มข้อความอื่น ๆ ก็สามารถทำได้โดยใช้วิธีการดังกล่าว ค่าของสภาพฟ้าอากาศจะต้องแสดงด้วยตัวเลขทศนิยมเท่านั้น ส่วนรหัสของสถานีตรวจวัด, ปี และวัน ต้องแสดงด้วยตัวเลขจำนวนเต็ม

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองจะถูกเก็บไว้ใน text file ชื่อ output.dat ซึ่งสามารถส่งเข้าโปรแกรม spread sheet เช่น excel เพื่อทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมอื่น ๆ ได้ การสั่งให้ driver เก็บค่าตัวแปร ตัวใดตัวหนึ่งนั้น module ที่ทำการประเมินผลของตัวแปรดังกล่าวจะเรียกใช้ subroutine ชื่อ output ของ driver ผ่าน statement

```
call output ('crop wt', wc)
```

ให้เขียนข้อความ crop wt เป็นชื่อของรายการ (header) ใน output file และเขียนค่าของตัวแปร wc ลงในสคริปต์ที่ตรงกัน เนื่องจาก driver จะเขียนเวลาของการจำลองสถานการณ์ ลงในสคริปต์ที่ 1 เสมอ และ statement ตัวอย่างนี้ถูกเรียกเป็นลำดับที่ 3 ในแบบจำลอง ดังนั้นผลลัพธ์จึงถูกเขียนลงในสคริปต์ที่ 4 ดังแสดงในภาพที่ 29 นอกจากนี้ จะเห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองถูกเก็บเป็นรายสัปดาห์ ตามที่ได้ระบุไว้ว่า OUTPUT =7.0 ใน rnspec.sys หากต้องการเก็บผลลัพธ์เป็นรายวัน ก็ระบุ OUTPUT =1.0

TIME	j	p	crop wt	et
0.0000	226.00	0.45200	570.98	3.2663
7.0000	233.00	0.46716	690.51	3.5100
14.000	240.00	0.49174	861.84	4.0133
21.000	247.00	0.52792	1018.2	3.0192
28.000	254.00	0.58406	1137.8	2.3266
35.000	261.00	0.66948	1281.6	1.2909
42.000	268.00	0.75299	1422.1	3.8757
49.000	275.00	0.83733	1581.2	4.5610
56.000	282.00	0.92163	1752.8	4.5024
63.000	289.00	1.0031	1918.5	3.7531
70.000	296.00	1.2703	2097.2	4.7145
77.000	303.00	1.5428	2249.0	4.0193
84.000	310.00	1.8073	2365.0	3.5153
89.000	315.00	2.0160	2438.4	3.0063
Termination: maturation				

ภาพที่ 29 รูปแบบของ file output.dat ที่ใช้เก็บผลลัพธ์ของการจำลองสถานการณ์

ตัวอย่างของ files rnspec.sys, rnspec.wth และ output.dat ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ได้แสดงไว้ในภาคผนวกที่ 3, 4 และ 5 ต่อจากรหัสคำสั่ง (source code) ของ model และ driver

สรุปผลการศึกษา

แบบจำลองข้าวที่เรียบง่ายที่ได้พัฒนาขึ้นประกอบด้วยสมการหลัก 8 สมการ มีโครงสร้างเป็นแบบ modular เป็นระบบเปิด (open source) ที่ผู้ใช้สามารถศึกษาปรับแก้ได้ เขียนโดยใช้ภาษา Fortran 95 ขั้นตอนการจำลองสถานการณ์เป็นไปตามหลักการของการจำลองระบบแบบพลวัต และอ่านข้อมูลนำเข้าจาก text file ซึ่งประกอบด้วย คุณสมบัติระบบ (system parameter) สถานะระบบ ณ จุดเริ่มต้น (initial state) และ สภาพฟ้าอากาศรายวัน

การตรวจสอบแบบจำลองทั้งในพื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้ และจังหวัดขอนแก่น ชี้ว่าแบบจำลองข้าวที่เรียบง่ายสามารถประเมินการเจริญเติบโต ผลผลิต และการใช้น้ำของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ได้ดี โดยมีค่า coefficient of determination R^2 สูงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อขยายแบบจำลองเพื่อประเมินผลกระทบจากวัชพืช ซึ่งเป็นปัจจัยจำกัดผลผลิตที่สำคัญของระบบนาหวานอาศัยน้ำฝนก็ให้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจ

จากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม ซึ่งชี้ว่าน้ำจะเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่จำกัดยิ่งขึ้น แต่ความต้องการน้ำในการผลิตพืชจะเพิ่มสูงขึ้นจากภาวะโลกร้อน และระบบการผลิตพืชจะต้องลดผลกระทบต่อภาวะเรือนกระจก จำเป็นต้องพัฒนาระบบการผลิตข้าวให้มีประสิทธิภาพการใช้น้ำที่สูง และต้องหลีกเลี่ยงการผลิตแบบน้ำท่วมขัง เพื่อลดทั้งการสูญเสียและการสร้างก๊าซเรือนกระจก ภายใต้สภาพการผลิตดังกล่าว วัชพืชจะเป็นปัจจัยกำหนดผลผลิตที่สำคัญ การประเมินเชิงปริมาณของปฏิกริยาร่วมระหว่าง ระดับน้ำ/ความชื้นดิน และปริมาณวัชพืช ต่อการเจริญเติบโตพืชและการใช้น้ำแบบพลวัต จึงเป็นกระบวนการที่สำคัญในการวางแผนการผลิตและการจัดการพืช ให้เหมาะสมกับเงื่อนไขของพื้นที่และภาวะการณ์โลก ความเรียบง่าย และเป็น module ทำให้แบบจำลองที่เรียบง่ายเหมาะสำหรับใช้เป็นฐานเพื่อเชื่อมรวมองค์ความรู้ ข้อมูล และประยุกต์ใช้วิเคราะห์หาทางเลือกที่เหมาะสม ในการพัฒนาระบบการผลิตข้าวภายใต้สถานการณ์ดังกล่าว อย่างไรก็ดีตาม แม้ผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจสอบที่ผ่านมาจะเป็นที่พอใจ แต่ขอบเขตการทดสอบยังจำกัด จึงควรขยายให้ครอบคลุมสภาพแวดล้อมให้กว้างขึ้น โดยเฉพาะพื้นที่ที่มีปริมาณฝนและดินที่แตกต่างออกไป

คุณสมบัติของแบบจำลองที่เรียบง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นเช่น แบบจำลอง ORYZA 2000 และ CERES-Rice สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 1 สังเกต จำนวนสัมประสิทธิ์ คุณสมบัติระบบของแบบจำลอง CERES-Rice ที่เสนอในตารางที่ 1 เป็นจำนวนที่แบบจำลอง CERES-Rice เปิดให้ผู้ใช้ทำการปรับเปลี่ยนผ่านแฟ้มข้อมูลนำเข้า (.CUL .SPE .SOL file) เท่านั้น

ส่วนคุณสมบัติอื่น ๆ ได้ฝังตัว (embeded) ไว้ในแบบจำลองที่ผู้ใช้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ อย่างเช่นในแบบจำลอง CERES-Maize (Jones และ Kiniry 1986) ค่าสัมประสิทธิ์คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสง (radiation use efficiency และ light extinction coefficient ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5 g DW MJ^{-1} intercepted PAR และ 0.65 ตามลำดับ) ได้ฝังตัวไว้ในแบบจำลอง แต่แบบจำลองอื่นๆ เช่น CROPGRO ซึ่งอยู่ในกลุ่ม DSSAT ด้วยกัน หรือแบบจำลองที่เรียบง่าย ได้กำหนดคุณสมบัติดังกล่าวไว้ใน input file

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของแบบจำลองที่เรียบง่ายกับแบบจำลอง ORYZA 2000 และ CERES-Rice

จำนวนสัมประสิทธิ์	Simplistic Model	ORYZA 2000	CERES-Rice*
การสังเคราะห์แสงสุทธิ	2	9	ไม่มีข้อมูล
การ partition และขยายพื้นที่ใบ	4	12	ไม่มีข้อมูล
การแก่ตัวและสูญเสียพื้นที่ใบ	1	1	ไม่มีข้อมูล
การตอบสนองต่อช่วงแสง ในการพัฒนาการ	2	2	2
การตอบสนองต่ออุณหภูมิ ในการพัฒนา	4	9	4
การประเมินการคายระเหย	2	2	ไม่มีข้อมูล
การประเมินพลังงานรังสีคลื่นยาว	2	3	ไม่มีข้อมูล
ผลความชื้นดินต่อการเจริญเติบโต	3	17	14
องค์ประกอบผลผลิต	ไม่ใช้	2	4
จำนวนข้อมูลสภาพฟ้าอากาศ ขั้นต่ำที่ต้องการ	3	3	3

*จำนวนสัมประสิทธิ์คุณสมบัติที่ระบุไว้ใน input file เท่านั้น ส่วนจำนวนสัมประสิทธิ์คุณสมบัติที่ฝังตัวในแบบจำลองไม่สามารถระบุได้ เนื่องจากเป็นแบบจำลองแบบปิด