บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

แบบจำลองและการจำลองระบบ

การจำลองระบบได้นำมาใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมมานานมากกว่า 30 ปี หลังจากนั้น นักชีววิทยา และนักวิจัยทางด้านการเกษตรจึงได้นำแบบจำลองมาปรับใช้ให้เข้ากับงานของตน (de Wit, 1982) ในการเข้าใจเกี่ยวกับแบบจำลอง และการจำลองระบบนั้น จำเป็นต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับความหมายของ ระบบ (system) แบบจำลอง (model) และ การจำลองระบบ (simulation) (Jongkaewwattana, 1995)

ระบบ (system) คือ ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบหรือตัวแปรต่างๆ ไม่ว่าสัมพันธ์กันในทางตรงหรือทางอ้อมก็ตาม ซึ่งอยู่ภายใต้กรอบหรือขอบเขตที่กำหนดหรือขอบเขตที่ศึกษา ซึ่งองค์ประกอบเหล่านั้น มีหน้าที่และการทำงานเฉพาะในอย่างใดอย่างหนึ่ง

แบบจำลอง (model) เป็นการจำลองหรือลอกเลียนแบบระบบใดระบบหนึ่ง มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับระบบที่ศึกษาได้ง่ายและสะดวกกว่าต้องศึกษาจากระบบจริง แบบจำลองโดยทั่วไป แบ่งออกได้ 2 แบบ ได้แก่ แบบจำลองทางกายภาพ (physical model) เป็นแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อจำลองวัตถุสิ่งของ เช่น แบบจำลองบ้าน แบบจำลองรถยนต์ และแบบจำลองเครื่องบิน เป็นต้น แบบจำลองทางสัญลักษณ์ (symbolic model) เป็นแบบจำลองที่แสดงถึงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบของรูปแบบต่างๆในรูปแบบของสมการ หรือแผนภาพ แบบจำลองทางสัญลักษณ์ ยังแบ่งออกเป็น แบบจำลองเชิงคุณภาพ (qualitative model) เป็นแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่างๆภายในระบบ แต่ไม่มีการคำนวณค่าต่างๆ เช่น แผนภาพ หรือ flow diagram ส่วนแบบจำลองทางสัญลักษณ์ ที่สามารถคำนวณค่าความสัมพันธ์ขององค์ประกอบภายในระบบ และยังคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงล่วงหน้าได้ คือ แบบจำลองเชิงปริมาณ (quantitative model) แบบจำลองการเจริญเติบโตของพืชที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันเป็นแบบจำลองเชิงคุณภาพ ชนิด mechanistic model (ศักดิ์ดา, 2536) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถแสดงถึงกลไกของระบบและสามารถวิเคราะห์ถึงเหตุและผลที่เกิดขึ้นในระบบได้

การจำลองระบบ (simulation) คือ การสร้างหรือนำแบบจำลอง (model) ไปใช้ในการลอกเลียนแบบระบบที่ต้องการศึกษา (Jintrawet *et al.*, 1990) ทั้งนี้เพื่อศึกษาหรือทำนายการเปลี่ยนแปลงของระบบ เมื่อมีผลกระทบมาจากปัจจัยภายนอก (exogenous variables) ซึ่งในปัจจุบันการศึกษา

ระบบ หรือการจำลองระบบด้วยแบบจำลอง ได้ถูกนำไปใช้กับงานในหลายด้าน เช่น การเกษตร วิทยาศาสตร์กายภาพ สังคมวิทยา และด้านเศรษฐศาสตร์ (Jongkaewwattana, 1995) การทำงานจำเป็นต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ในการประมวลผล เนื่องจากระบบที่ทำการจำลองมีความสลับซับซ้อน มีตัวแปร และปัจจัยมากมายที่มีผลต่อระบบ อีกทั้งคอมพิวเตอร์ยังสามารถทำการประมวลผลซ้ำได้หลายครั้ง และแสดงผลการจำลองออกมาในเวลาอันรวดเร็ว

ขั้นตอนการจำลองระบบ

Dent and Blackie (1979) ได้เสนอ วิธีการจำลองระบบไว้ 6 ขั้นตอน โดยขั้นตอนตั้งแต่ 1-5 เป็นขั้นตอนของการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการจำลองระบบที่ต้องการศึกษา ส่วนขั้นตอนที่ 6 เป็นขั้นตอนของการนำแบบจำลองไปใช้ในการจำลองระบบ ซึ่งรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนประกอบไปด้วย

1. กำหนดวัตถุประสงค์ (define of the system and statement of objectives) เป็นการทำความเข้าใจถึงระบบที่เป็นเป้าหมาย (understanding of a system) และเรียนรู้ถึงปัญหาที่เกิดขึ้น (problem definition) ซึ่งสองประการนี้นำไปสู่การกำหนดวัตถุประสงค์ ซึ่งในการกำหนดวัตถุประสงค์เปรียบเสมือนขอบเขตของระบบ (System boundary) ที่ทำการศึกษา

2. การรวบรวม คัดเลือก และวิเคราะห์ข้อมูล (analysis of data) ระบบหนึ่งๆที่ต้องการศึกษาประกอบไปด้วยข้อมูลต่างๆมากมายที่มีผลต่อระบบนั้นๆ ในการวิเคราะห์ระบบจึงควรคัดเลือกข้อมูลที่มีผลกับตัวแปรภายในระบบ และตัดข้อมูลที่ไม่มีความสำคัญออก เพื่อไม่ให้เป็นการเสียเวลาและสับสนในการเลือกใช้ข้อมูล ซึ่งที่มาข้อมูลอาจมาจากการสัมภาษณ์ การทดลอง ค้นคว้าจากงานทดลองอื่น หรืออาจต้องสมมติขึ้นเองหากไม่สามารถจากแหล่งอื่นได้แต่ต้องอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ตั้งไว้

3. การสร้างแบบจำลองขึ้นมาเพื่อทำการจำลองระบบ (model construction) แต่ก่อนถึงขั้นการสร้างแบบจำลอง ผู้สร้างแบบจำลองต้องเขียน causal loop diagram และ flow diagram ขึ้นมาก่อนเพื่อแสดงความสัมพันธ์ในเชิงปริมาณ ระหว่างตัวแปรต่างๆจากนั้นจึงเปลี่ยน diagram นั้นให้เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ เช่น DYNAMO, ACSL, CSMP, FORTRAN, BASIC เพื่อสามารถจำลองระบบผ่านทางคอมพิวเตอร์ได้

4.การทดสอบแบบจำลอง (validation of the model) แบบจำลองที่เสร็จแล้ว ต้องทำการทดสอบความถูกต้องในการจำลองระบบของแบบจำลอง โดยการนำแบบจำลองมาทำการจำลองหลายๆครั้ง โดยข้อมูลที่มีอยู่แล้ว แต่ข้อมูลนั้นต้องเป็นข้อมูลที่ไม่ได้นำมาสร้างในแบบจำลอง เพื่อ

ดูผลของการจำลองที่แสดงออกมา หากผลที่ได้ยังไม่เป็นที่พอใจ ก็ต้องมีการปรับค่า (calibration) หรือหาข้อมูลมาประกอบเพิ่มเติม

5. การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง (sensitivity analysis) โดยทดสอบความอ่อนไหวของแบบจำลองต่อสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เนื่องจากในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันตัวแปรบางตัวอาจมีผลต่อระบบสูงขึ้นหรือลดลงก็ได้และเมื่อตัวแปรนั้นๆมีค่าเปลี่ยนไปย่อมทำให้การคำนวณในแบบจำลองมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งตัวแปรบางค่าภายในแบบจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงไปอาจทำให้การจำลองจากแบบจำลองผิดผลาดได้

6. การนำแบบจำลองไปใช้งาน (application of the model) หลังจากผ่านการทดสอบความถูกต้อง และความอ่อนไหวของแบบจำลองแล้ว ก็สามารถนำแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นไปทำการจำลองระบบตามที่ได้ตั้งวัตถุประสงค์ในขั้นตอนแรกของการสร้างแบบจำลอง

แบบจำลองการเจริญเติบโตของพืช (Crop Model)

การจำลองระบบพืชด้วยแบบจำลอง เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถศึกษาถึงผลกระทบของสิ่งแวดล้อม ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาการของพืชปลูก (Jongkaewwattana *et al.*, 1993) โดย Penning de Vries (1982) ได้จำแนกระบบการเจริญเติบโตของพืช ออกเป็น 4 ระดับ ตามปัจจัยจำกัด (limiting factor) ต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการจำลองการเจริญเติบโตของพืช ประกอบไปด้วย

ระดับการผลิตพืชขั้นที่ 1 เป็นระดับการผลิตพืชขั้นสูงสุด ซึ่งกระบวนการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืชได้รับปัจจัยการผลิตด้านการจัดการอย่างพอเพียง ทั้งน้ำและธาตุอาหาร โดยที่มีสภาพแวดล้อมเป็นตัวจำกัด คือ พลังงานแสงอาทิตย์และอุณหภูมิ

ระดับการผลิตพืชขั้นที่ 2 เป็นระดับการผลิตที่มีน้ำ เป็นปัจจัยจำกัด เพิ่มขึ้นจากระดับการผลิตขั้นที่ 1

ระดับการผลิตพืชขั้นที่ 3 ระดับการผลิตนี้ เพิ่มเติมจากระดับการผลิตระดับขั้นที่ 2 โดยมีไนโตรเจนเป็นปัจจัยจำกัด

ระดับการผลิตพืชขั้นที่ 4 ระดับการผลิตพืชที่มีธาตุอาหาร ศัตรูพืช และอื่นๆ เป็นปัจจัยจำกัด เพิ่มจากระดับการผลิตพืชขั้นที่ 1-3

Jones *et al.*, (1989) ได้กล่าวถึง แบบจำลองการเจริญเติบโตของพืชว่า มีการสร้างและพัฒนาโปรแกรมแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ที่สามารถใช้ทำนายผลของปัจจัยทางด้าน ดิน ภูมิอากาศ และการจัดการต่างๆ ที่มีต่อการเจริญเติบโต และการให้ผลผลิตของพืช อย่างต่อเนื่องเป็น

เวลานานกว่า 20 ปี ในปัจจุบัน แบบจำลองได้มีการสร้างขึ้นมากมายกับพืชหลายชนิด เช่น แบบจำลองการเจริญเติบโตของข้าวโพด CERES-Maize (Jones and Kiniry, 1986) แบบจำลองการเจริญเติบโตของถั่วเหลือง SOYGRO (Wilkerson *et al.*, 1983) แบบจำลองการเจริญเติบโตถั่วลิสง PNUTGRO (Boote *et al.*,1987) แบบจำลองการเจริญเติบโตของข้าวสาลี CERES-Wheat (Ritchie and Otter, 1984) และแบบจำลองการเจริญเติบโตของมันสัมปะหลัง GUMCAS (Matthews and Hunt, 1994) เป็นต้น แบบจำลองของพืชหลายชนิด ถูกรวบรวมไว้ในระบบสนับสนุนการตัดสินใจเพื่อการเกษตร (DSSAT 3.5) โดยแบ่งเป็นกลุ่มพืช ได้แก่ พืชอาหาร พืชตระกูลถั่ว พืชหัว และพืชอื่นๆ (Tsuji *et al.*, 1994)

แบบจำลอง CERES-Rice

แบบจำลอง CERES-Rice เป็นแบบจำลองการเจริญเติบโตและพัฒนาการของข้าวพันธุ์ต่างๆ ภายใต้สภาพภูมิอากาศและชุดดินเฉพาะแห่ง โดย Ritchie *et al.* (1986) ทำการดัดแปลงมาจากแบบจำลอง CERES-Maize และ CERES-Wheat เขียนด้วยภาษา FORTRAN 77 และได้มีการแก้ไขโดยคณะนักวิจัยของ International Fertilizer Development Center (IFDC) เพื่อให้แบบจำลองใช้ได้กับข้าวที่ปลูกด้วยต้นกล้า (Godwin and Singh, 1989) จากนั้น ทำการทดสอบและแก้ไขอีกครั้ง โดยคณะนักวิทยาศาสตร์ ของ International Benchmark Site Network for Agrotechnology Transfer (IBSNAT) และได้รับการบรรจุอยู่ในระบบสนับสนุนการตัดสินใจเพื่อการเกษตร (Decision Support System for Agrotechnology Transfer : DSSAT) และพัฒนาแบบจำลองมาอย่างต่อเนื่องจนปัจจุบันเป็นเวอร์ชั่น DSSAT 3.5 ซึ่งได้รวบรวมแบบจำลองไว้หลายแบบจำลอง โดยแบ่งเป็นกลุ่มพืช ได้แก่ พืชอาหาร พืชตระกูลถั่ว พืชหัว และพืชอื่นๆ (Tsuji *et al.*, 1994) แบบจำลอง CERES-Rice จัดอยู่ในกลุ่มพืชอาหาร เช่นเดียวกับ แบบจำลองข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ข้าวบาร์เลย์ และมิลเลท ภายในแบบจำลองประกอบไปด้วยระบบหลักๆ คือ ระบบการพัฒนาและการสะสมน้ำหนักของ ใบ ต้น เมล็ด และราก ระบบสมดุลของน้ำ (water balance) และการใช้น้ำของพืช รวมทั้งระบบการส่งถ่ายธาตุไนโตรเจนในดินและในต้นพืช (ศักดิ์ดา และคณะ, 2540) ในการทำงานต้องนำเข้าข้อมูลสภาพอากาศรายวัน ข้อมูลดิน ข้อมูลการจัดการ (Jones *et al.*, 1989) และข้อมูลพันธุกรรม (Hunt *et al.*, 1989) เพื่อให้แบบจำลองนำไปประมวลผลรวมกับระบบต่างๆ ในแบบจำลอง จากนั้นแบบจำลอง แสดงผลการจำลอง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขบวนการจำลองของแบบจำลอง CERES-Rice

INPUT	PROCESS	OUTPUT
<u>ข้อมูลที่สามารถควบคุมได้</u> - พันธุ์ข้าว - ระยะปลูก - วันปลูก - วันและปริมาณการให้น้ำ - วันและปริมาณการใส่ปุ๋ย N - ชนิดของปุ๋ย N - ค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม	- การเจริญเติบโตของพืช - ขั้นตอนการพัฒนาการ - พัฒนาการของพืช - สมดุลของน้ำในดิน - สมดุลไนโตรเจนในดิน	- ผลผลิตเมล็ด - องค์ประกอบผลผลิต - น้ำหนักแห้งส่วนเหนือดิน - วันที่มีขั้นตอนการพัฒนาการเปลี่ยน - การเปลี่ยนแปลงพัฒนาการ - ความถี่ของวันคำนวณ - องค์ประกอบสมดุลของน้ำในดิน - ความหนาแน่นของราก - สภาพเมื่อไนโตรเจนและน้ำเป็นปัจจัยจำกัด
<u>ข้อมูลที่ไม่สามารถควบคุมได้</u> - ข้อมูลอากาศทุกวัน - ช่วงแสง - คุณสมบัติและสภาพของดินก่อนการทดลอง		

ที่มา: Ritchie *et al.* (1986)

หลักการจำลองของแบบจำลอง CERES-Rice

แบบจำลอง CERES มีหลักการพื้นฐานการจำลอง โดยกำหนดให้น้ำหนักแห้งมวลรวมของพืช (B_T) ขึ้นอยู่กับอัตราการสะสมน้ำหนักแห้งเฉลี่ย (g) กับ ระยะเวลาการเจริญเติบโตของพืช(d) (Ritchie *et al.*, 1998) ดังสมการที่ 1

$$B_T = g \times d \qquad (1)$$

ในการจำลองผลผลิต แบบจำลองใช้หลักการคำนวณจากความสามารถในการส่งถ่ายสารสังเคราะห์ (assimilate partitioning) ไปยังเมล็ด โดยกำหนดว่า พืชที่เจริญภายใต้การจัดการและสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาการ จะมีความสามารถในการแบ่งปันสารสังเคราะห์ไปยังเมล็ด มากกว่า 0.5 แต่ถ้าการจัดการและสภาพภูมิอากาศไม่เหมาะสมความสามารถดังกล่าวจะลดลงตามลำดับ จนมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.0 (Ritchie *et al.*, 1998)

จิรวัฒน์ (2544) ได้กล่าวถึง หลักการสร้างแบบจำลองตระกูล CERES ว่าประกอบไปด้วยการจำลองกระบวนการหลัก 2 กระบวนการ คือการเจริญเติบโต (growth) และพัฒนาการ (development) โดยการเจริญเติบโตเป็นการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของส่วนต้น ใบ และรวง และการพัฒนาการเป็นกระบวนการที่วัดโดยระยะการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาพืช ซึ่งมีสองลักษณะแตกต่างกัน คือ phasic development ที่เป็นการเปลี่ยนแปลงระยะการเจริญเติบโต ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการถ่ายเทสารสังเคราะห์ (biomass partitioning) เป็นหลัก และ morphological development ที่หมายถึง การเริ่มและสิ้นสุดของการพัฒนาของส่วนต่างๆ ของพืช โดยแบบจำลอง CERES-Rice จะบอกผลการจำลองพัฒนาการลักษณะนี้เป็น จำนวนใบ จำนวนหน่อ และจำนวนเมล็ด (Ritchie *et al.*, 1998)

แบบจำลอง CERES-Rice มีรูปแบบ mechanistic model ที่เป็น dynamic simulation โดยมีการกำหนดตัวแปรปริมาณ (level variable) หมายถึง ตัวแปรที่มีการสะสมเพิ่มขึ้นหรือลดลงแต่ละวัน ทั้งที่วัดเป็นปริมาณได้ ได้แก่ น้ำหนักต้น ใบ และเมล็ด ปริมาณไนโตรเจนในพืช ปริมาณน้ำฯลฯ หรือที่มีการกำหนดปริมาณการให้ ได้แก่ระยะพัฒนาการ และตัวแปรปริมาณต่อวัน ที่สัมพันธ์กับตัวแปรขยาย (auxiliary variable) ที่อธิบายตัวแปรอื่น ได้แก่ ความเครียดน้ำ และไนโตรเจน และตัวแปรข้อมูลนำเข้าที่ได้แก่ อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด

การจำลองการพัฒนาการ การเจริญเติบโต และผลผลิต ของแบบจำลอง CERES-Rice

การจำลองการพัฒนาการ

แบบจำลอง CERES-Rice ตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับเกี่ยวกับการพัฒนาการของข้าวในแต่ละระยะว่า ข้าวจะมีการพัฒนาการเมื่อข้าวเจริญอยู่ระหว่าง อุณหภูมิ 14 ถึง 32 ^{o}C และการพัฒนาการของข้าวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสะสม (GDD) (Ritchie *et al.*, 1998) ซึ่งทฤษฎีนี้ Rameur ได้กล่าวไว้เป็นบุคคลแรก ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1735 โดยมีการคำนวณ ดังสมการที่ 2

$$t_d = \sum_{i=1}^{n} (\overline{T}_a - T_b) \qquad (2)$$

เมื่อ t_d คือ อุณหภูมิสะสม (^{o}C)

$\overline{T}_a$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยแต่ละวัน

T_b คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้พืชเจริญได้ตามปกติ (สำหรับการจำลองในแบบจำลอง CERES-Rice มีค่าเท่ากับ 9)

นอกจากนั้นแบบจำลองยังมีข้อกำหนดที่เป็นรายละเอียดอีกว่า ถ้าอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดของวันใดอยู่ระหว่างช่วง 14-32^{o}C แบบจำลองคำนวณอุณหภูมิสะสมรายวันตามสมการปกติข้างต้น แต่ถ้าวันใดมีอุณหภูมิต่ำสุดที่ต่ำกว่า 14 ^{o}C หรืออุณหภูมิสูงสุดสูงกว่า 32 ^{o}C ก็จะแบ่งเวลาของวันนั้นๆ เป็น 8 ช่วง ช่วงละ 3 ชั่วโมง เพื่อหาอุณหภูมิสะสมของ 3 ชั่วโมงนั้น และนำมารวมกันเป็นอุณหภูมิสะสมของวันนั้น โดยถ้าช่วงในที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่า 9 ^{o}C หรือสูงกว่า 42 ^{o}C อุณหภูมิสะสมจะเท่ากับ 0 ^{o}C คือ การเจริญเติบโตของข้าวจะหยุด ถ้าช่วงไหนมีอุณหภูมิระหว่าง 33 ^{o}C - 42 ^{o}C หรือระหว่าง 9^{o}C - 14^{o}C ค่าอุณหภูมิสะสมจะน้อยลงจากปกติ (จิรวัฒน์, 2544)

ในแบบจำลอง CERES-Rice แบ่งการพัฒนาการของข้าวออกเป็น 9 ระยะ (ตารางที่ 2) โดยระยะการเจริญเติบโตตั้งแต่ 1 ถึง 5 เป็นการเจริญเติบโตในส่วนต่างๆ ของข้าว ราก ใบ ลำต้น รวงและเมล็ด ซึ่งในแต่ละระยะจะมีส่วนของข้าวที่เจริญแตกต่างกัน ระยะที่ 6 เป็นระยะสุกแก่ทางสรีระ ส่วนระยะที่ 7 ถึง 9 เป็นระยะของการพัฒนาเมล็ดไปเป็นต้นกล้า

ตารางที่ 2 การกำหนดระยะการพัฒนาการของข้าวในแบบจำลอง CERES-Rice

ระยะ	การพัฒนาการ	ส่วนที่เจริญของพืช
1	งอก ถึง สิ้นสุดระยะ juvenile	ราก และใบ
2	สิ้นสุดระยะ juvenile ถึง แทงช่อดอก	ราก ใบ และต้น
3	แทงช่อดอก ถึงออกดอก	ราก ใบ ต้น และรวง
4	ออกดอก ถึง เริ่มสร้างเมล็ด	ราก ต้น และรวง
5	เริ่มสร้างเมล็ด ถึง เมล็ดเต็ม	เมล็ด
6	เมล็ดเต็ม ถึง สุกแก่ทางสรีระ	-
7	เตรียมดิน ถึง ปลูก	-
8	ปลูก ถึง งอก	เมล็ด
9	งอก ถึง โผล่พ้นผิวดิน	ราก

ที่มา: ดัดแปลงจาก Ritchie *et al.* (1998)

จากการกำหนดระยะพัฒนาการของข้าวในตารางที่ 2 แบบจำลอง CERES-Rice มีรายละเอียดของการคำนวณในแต่ละระยะเวลาที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

ระยะที่ 7 (P7) : ที่เป็นระยะเวลาก่อนปลูก แบบจำลองจะมีการจำลองการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบไนโตรเจนและน้ำในดิน ที่ส่งผลต่อผลผลิตข้าว ซึ่งขึ้นอยู่กับการกำหนดวันเริ่มจำลอง (start simulation date) โดยผู้ใช้

ระยะที่ 8 (P8) : ระยะตั้งแต่เริ่มเพาะเมล็ดจนถึงรากงอก ที่แบบจำลองกำหนดว่า

$$P8 = 150.0*EXP(-0.055*TEMPM) \quad (3)$$

เมื่อ TEMPM คือ อุณหภูมิเฉลี่ยวันที่เพาะเมล็ด (อุณหภูมิสูงสุด+อุณหภูมิต่ำสุด)*0.5

<u>หมายเหตุ</u> ระยะที่ 8 นี้กำหนดว่า อุณหภูมิที่เมล็ดข้าวงอกได้อยู่ระหว่าง 15-42 ^{o}C และอุณหภูมิสะสมต้องไม่น้อยกว่า 28 ^{o}C และไม่เกิน 80 ^{o}C

ระยะที่ 9 (P9) : ตั้งแต่รากงอกจนถึงใบโผล่พ้นผิวดิน แบบจำลองกำหนดให้ขึ้นอยู่กับความลึกของเมล็ดที่ปลูกอย่างเดียว

$$P9 = 10.0*SDEPTH + 20.0 \quad (4)$$

เมื่อ SDEPTH คือ ความลึกของเมล็ดที่ปลูก (เซ็นติเมตร)

ในกรณีที่เป็นข้าวปลูกแบบปักดำ แบบจำลอง CERES-Rice กำหนดให้วันปลูกเป็นวันปักดำ การคำนวณค่า P8 และ P9 เป็นไปในทำนองเดียวกับการปลูกโดยตรง แต่ค่า P8 ใช้อุณหภูมิเฉลี่ยที่กล้าเจริญเติบโต (ATEMP) แทนอุณหภูมิเฉลี่ย TEMPM และค่า P9 คำนวณจากค่าความลึกของเมล็ดขณะที่ตกกล้า

ระยะที่ 1 (P1) : เป็นระยะเวลาตั้งแต่ใบโผล่พ้นผิวดิน (emergence) จนสิ้นสุดระยะ juvenile ซึ่งระยะP1 นี้ กำหนดให้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมค่าหนึ่ง และถ้าเป็นการปลูกด้วยวิธีปักดำจะกำหนดว่าการปักดำทำให้ ระยะที่ 1 ยืดระยะเวลานานกว่าปลูกโดยไม่ย้ายกล้าปักดำ

$$TPHEN = P1 + 25.0 + 0.4 * (CUMDTT - P8 - P9) \quad (5)$$

เมื่อ CUMDTT คือ ค่าอุณหภูมิสะสมของกล้าตั้งแต่งอกจนถึงปักดำ

$$CUMDTT = (ATEMP-TBASE)*(TAGE-1.0) \quad (6)$$

เมื่อ ATEMP คือ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยขณะที่กล้าเจริญเติบโต

TAGE คือ อายุกล้า, วัน

TBASE = 9 ^{o}C

ระยะที่ 2 (P2) : เป็นระยะตั้งแต่สิ้นสุดระยะ juvenile ถึงกำเนิดช่อดอก (panicle initiation) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามความไวต่อช่วงแสง (photoperiod sensitivity) ของข้าวแต่ละพันธุ์ โดยแบบจำลอง CERES-Rice กำหนดให้ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมสองค่า คือ P2R ที่เป็นสัมประสิทธิ์การชะลอการกำเนิดช่อดอก และค่า P2O ความยาววันวิกฤติ (critical daylength) มีหน่วยเป็นชั่วโมง ซึ่งในการจำลองการเกิดรวงของแบบจำลองขึ้นกำหนดให้ขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การเกิดรวง (RATEIN) โดยกำหนดเงื่อนไขว่า

ถ้าข้าวเจริญผ่านระยะ P1 และความยาววันของวันนั้น (HRLT) น้อยกว่าหรือเท่ากับ P2O

$$RATEIN = 1/136\ ^{o}Cd \quad (7)$$

แต่ถ้าข้าวเจริญผ่านระยะ P1 และความยาววัน (HRLT) มากกว่า P2O

$$RATEIN = 1.0/(136.0+P2R*(HRLT-P2O)) \quad (8)$$

นอกจากนั้นมีเงื่อนไขอีกว่าจะเกิดรวงได้ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิกลางคืน (TN) ขณะที่เกิดดอกต้องมากกว่า 15 ^{o}C อย่างน้อย 2 วันติดต่อกัน โดยที่

$$TN = (0.25*TMAX)+(0.75*TMIN) \quad (9)$$

ระยะที่3 (P3) : ตั้งแต่กำเนิดช่อดอกถึงสิ้นสุดการเจริญของใบ ซึ่งมีสมมติฐานว่าระยะนี้ไม่มีความแตกต่างกันระหว่างพันธุ์ โดยกำหนดให้

$$P3 = 5.75 * PHINT+0.135*SUMDTT \quad (10)$$

เมื่อ PHINT คือระยะเวลาระหว่างการกำเนิดใบ (Phyllocron interval) เท่ากับ 83 ^{o}Cd

SUMDTT คือ อุณหภูมิสะสมตั้งแต่สิ้นสุดระยะ P2

ระยะที่ 4 (P4) : ระยะเวลาตั้งแต่สิ้นสุดการเจริญเติบโตของใบถึงเริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ดซึ่งสมมติฐานว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างพันธุ์ โดยกำหนดให้ เท่ากับ 150 ^{o}Cd

ระยะที่ 5 (P5) : ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ดจนถึงสุกแก่ของรวงแม่ และของหน่อ ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมค่าหนึ่ง เป็นระยะที่น้ำหนักเมล็ดมีค่าสูงสุด

ระยะที่ 6 (P6) : เป็นระยะจากสุกแก่จนถึงเก็บเกี่ยว ซึ่งจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตจากวันสุดท้ายของระยะที่ 5

การจำลองการเจริญเติบโต

แบบจำลอง CERES-Rice ได้นำหลักการของประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสง (radiation use efficiency) จำลองการเจริญเติบโตหรือการสะสมน้ำหนักรวมของข้าวทั้งต้น และใช้หลักการถ่ายเทสารสังเคราะห์ (assimilate partitioning) และหลักของ source/sink สำหรับการคำนวณการแบ่งสารสังเคราะห์ไปยังส่วนต้น ใบ รวง เมล็ด และราก ตามระยะพัฒนาการ และใช้หลัก Law of Minimum ของปัจจัยจำกัดการเจริญเติบโต ที่ได้แก่น้ำ ไนโตรเจน และอุณหภูมิ เพื่อลดการเจริญเติบโตจากระดับที่ไม่มีข้อจัดของปัจจัยดังกล่าว

พลังแสงอาทิตย์ (solar radiation, MJ / m^2) แบบจำลอง CERES-Rice ได้กำหนดให้ 50 เปอร์เซ็นต์เป็นพลังงานแสงที่พืชสังเคราะห์แสงได้ (photosynthetically active radiation, PAR) ซึ่งเป็นพลังงานแสงส่วนที่มีความยาวคลื่น 400-700 nm ซึ่งเป็นค่าพลังงานแสงที่พืชสังเคราะห์แสงและเปลี่ยนไปเป็นน้ำหนักแห้งได้สูงสุด (potential dry matter or organic carbon assimilation, PCARB) (กรัม/ต้น) โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นน้ำหนัก และความหนาแน่นของประชากรพืช และพื้นที่ใบ อาศัยกฎ Beer's Law และ radiation use efficiency (Singh *et al.*, 1989) อ้างโดย (จิรวัฒน์, 2544) ดังสมการ

```
PCARB = 6.85*PAR**0.65/PLANTS**0.975*(1-AMAX1(EXP(-0.625*LAI) ,
        EXP(-0.92*EXP(-0.65*ROWSPC)*LAI)))                    (11)
```

เมื่อ PCARB = อัตราการสะสมน้ำหนักแห้งสูงสุดต่อต้นต่อวัน

PAR = พลังงานแสงที่พืชใช้ได้

PLANTS = จำนวนต้นต่อตารางเมตร

LAI = ดัชนีพื้นที่ใบ

ROWSPC = ระยะระหว่างแถว

จิรวัฒน์ (2544) ได้กล่าวถึง การจำลองการเจริญเติบโตในระยะแรก (vegetative phase) ว่าการเจริญเติบโตของต้นข้าวเป็นแบบที่ sink เป็นตัวจำกัด การคำนวณพื้นที่ใบจากจำนวนใบที่เกิดตามระยะการเจริญ อาศัยจากความสัมพันธ์ของจำนวนใบกับอุณหภูมิสะสม โดยที่การเกิดหน่อเป็นไปในทำนองเดียวกับการเกิดใบ มีการจำลองการเกิดใบและพื้นที่ใบของหน่อแยกออกจากของต้นแม่ เพื่อที่ใช้ระบบการให้ความสำคัญในการถ่ายเทสารอาหาร ซึ่งมีประโยชน์ในการจำลองการแตกหน่อที่ชดเชยให้ได้ความหนาแน่นของรวงต่อพื้นที่สูง กรณีที่ความหนาแน่นของต้นข้าวที่ต่ำ อีกทั้ง

แบบจำลองยังกำหนดให้การย้ายกล้าปักดำ มีผลกระทบในการลดอัตราการเพิ่มของพื้นที่ใบนาน 14 วันหลังปักดำ โดยผลกระทบลดลงเรื่อยๆ จนหมดเมื่อถึงวันที่ 14 หลังปักดำ โดยผลกระทบของการปักดำในวันนั้นๆ ก็ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดในวันนั้นๆ ด้วย ยิ่งถ้าอุณหภูมิสูง ผลกระทบของการปักดำก็ยิ่งมากขึ้น

แบบจำลองมีการจำลองการเจริญเติบโตของส่วนที่เป็นหน่อข้าว (tiller) ควบคู่ไปกับการเจริญเติบโตของต้นแม่ (main culm) ของข้าวตั้งแต่ระยะที่ 1 (P1) และมีการจำลองความหนาแน่นของหน่อที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การแตกกอ (tillering coefficient, G3) โดยศักยภาพของจำนวนหน่อต่อต้น (PTILNO) ขึ้นอยู่กับจำนวนใบของต้นแม่ (XN) และ G3 ดังสมการ

PTILNO = (-0.10+1.655*(XN-4.0)-0.376*(XN-4.0)**2+0.0758*(XN-4.0)**3)*G3 (12)

การจำลองการตายของใบ (leaf senescence) แบบจำลอง CERES-Rice มีสมมติฐานว่าการตายของใบจะเกิดขึ้นถ้าประชากรและพื้นที่ใบหนาแน่นมาก และพื้นที่ใบของใบที่ต่ำที่สุดถูกบังแสง หรือมีการขาดน้ำ และไนโตรเจน ในระดับหนึ่ง

การจำลองผลผลิต

Yoshida (1981) กล่าวว่า น้ำหนัก 1000 เมล็ดของข้าวมีค่าคงที่ และเป็นลักษณะที่ถูกกำหนดโดยพันธุกรรม ซึ่งจะมีความแตกต่างกันแต่ละเมล็ด แต่เมื่อคิดค่าเฉลี่ยจะมีค่าคงที่ ในแบบจำลอง CERES-Rice น้ำหนักเมล็ดต่อต้นถูกกำหนดโดยอัตราและระยะเวลาการสะสมน้ำหนักเมล็ดภายใต้สภาพที่เหมาะสม ซึ่งจะเป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม G2 (potential single grain weight) โดยอัตราการเจริญเติบโตของเมล็ดจะผันแปรไปตามพันธุ์และชนิดของข้าว ซึ่งขนาดของเมล็ดข้าวแบ่งออกได้เป็นสามขนาด คือ ยาว ปานกลาง และสั้น อีกทั้งแบบจำลองยังกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม G1 (potential spikelet) สัมพันธ์กับตัวแปรอัตราการการสะสมน้ำหนักเมล็ด (RGFIL) ด้วย ซึ่งกำหนดเงื่อนไขว่า

ถ้า G1 $\geq$ 50 แล้ว RGFIL = G2/P5 (13)

ระยะเวลาการสะสมน้ำหนักเมล็ดขึ้นอยู่กับขนาดสูงสุดของ sink (potential sink size) สัมประสิทธิ์พันธุกรรม G2 (potential single grain weight) อุณหภูมิสะสม และข้อจำกัดของน้ำ ไนโตรเจนและอุณหภูมิ (จิรวัฒน์, 2544)

แบบจำลอง SIMRIW

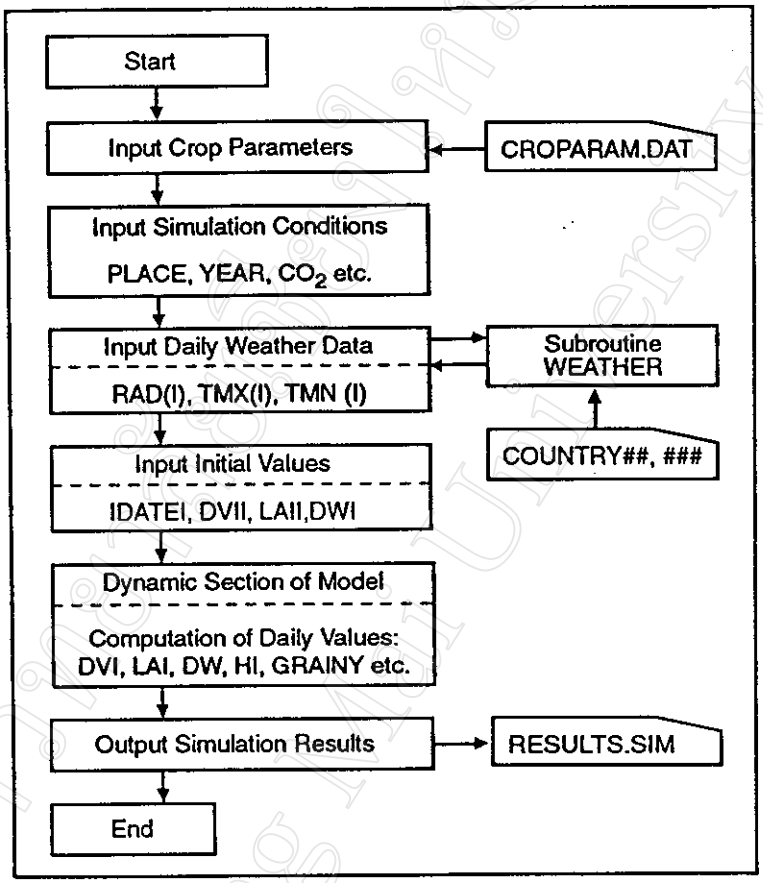
SIMRIW (Simulation Model for Rice-Weather relations) พัฒนาโดยทีมงานของ Professor Takeshi Horie จากมหาวิทยาลัย Kyoto เขียนขึ้นด้วยภาษา FORTRAN เป็นแบบจำลองที่มีขบวนการทำงานไม่ซับซ้อนในการจำลองผลของสภาพภูมิอากาศกับการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของข้าวในเขตอาศัยน้ำจากการชลประทาน แบบจำลองนี้สร้างโดยอาศัยความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะทางสรีรวิทยาและลักษณะทางกายภาพของการเจริญเติบโตของข้าว ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม หาค่าได้ง่ายจากงานทดลองในแปลง แบบจำลองนี้จึงสามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลายสภาพแวดล้อม และยังสามารถหาศักยภาพในการให้ผลผลิตของข้าวในแต่ละพื้นที่ภายใต้สภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกันได้เป็นอย่างดี อีกทั้งแบบจำลองสามารถคำนวณผลผลิตที่ได้จริงจากแปลงเกษตรกร โดยแบบจำลองใช้ค่า technological coefficient มาคำนวณร่วม กับ ศักยภาพในการให้ผลผลิตของข้าวพันธุ์นั้นๆ ซึ่งค่า technological coefficient นี้เป็นค่าที่บอกถึงระดับความสามารถในการจัดการในแต่ละพื้นที่ เช่น การใส่ปุ๋ย การให้น้ำ คุณสมบัติของดิน วัชพืชและการจัดการเกี่ยวกับโรคและแมลง ซึ่งพื้นที่หนึ่งๆ มีการจัดการที่แตกต่างกัน (Horie, 1987)

ขบวนการในการจำลองของแบบจำลอง SIMRIW

Horie *et al.* (1995) อธิบายถึง ขบวนการในการทำงานของแบบจำลอง SIMRIW ว่า นอกจากแบบจำลองต้องใช้สมการทางสรีรวิทยา มาเขียนเป็นภาษา FORTRAN เพื่ออธิบายถึงการเจริญเติบโต พัฒนาการ และการสร้างผลผลิตของข้าวแล้ว แบบจำลองยังต้องการข้อมูลอากาศรายวันและข้อมูลสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม เพื่อใช้ในการประมวลผล (ภาพที่ 1)

ข้อมูลอากาศรายวัน ประกอบด้วย ข้อมูลละติจูด (latitude) ลองติจูด (longitude) ความสูงจากระดับน้ำทะเล และข้อมูลอากาศรายวัน ได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิต่ำสุด(^{o}C) อุณหภูมิสูงสุด(^{o}C) ปริมาณน้ำฝน (mm) และพลังงานแสง (MJ m^{-2} d^{-1})

ในการทำงานของแบบจำลอง ต้องทำการกำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆ เพื่อให้แบบจำลองประมวลผล เช่น ชื่อพันธุ์ ปริมาณ CO_2 ชื่อสถานที่ วันปลูก น้ำหนักแห้งเริ่มต้น และค่า Technical coefficient เป็นต้น จากนั้นแบบจำลองทำการประมวลผล และแสดงผลการจำลองออกมาใน ฐานข้อมูลชื่อ RESULTS.SIM ซึ่งประกอบไปด้วย ผลด้านการพัฒนาการ การเจริญเติบโต และผลผลิตของข้าว



ภาพที่ 1 ขบวนการในการจำลองของแบบจำลอง SIMRIW (Horie *et al.*, 1995)

ข้อมูลสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม ในแบบจำลอง SIMRIW ถูกรวบรวมเก็บอยู่ในฐานข้อมูล CROPPARA.DAT ค่าต่างๆ เหล่านี้มีความจำเพาะเจาะจงในแต่ละพันธุ์ ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม สามารถใช้โปรแกรม Pararice ที่ถูกพัฒนาโดย Horie และ Nakagawa (1986) ในการคำนวณหาได้ ซึ่งประกอบด้วยชุดข้อมูลต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ชุดข้อมูลค่าการพัฒนาการในระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ (phenology parameters: vegetative phase)
2. ชุดข้อมูลค่าการพัฒนาการในระยะการเจริญเติบโตด้านการผลิตดอกและรวง (phenology parameters: reproductive phase)
3. ค่าสัมประสิทธิ์การรับแสง (light extinction coefficient)
4. ค่าประสิทธิ์ภาพการใช้พลังงานแสง (radiation use efficiency)
5. ดัชนีเก็บเกี่ยวสูงสุด (maximum harvest index)

6. อุณหภูมิวิกฤตที่ทำให้พืชตาย (critical crop death temperature)

7. ชุดข้อมูลค่าการพัฒนาพื้นที่ใบ (leaf area production parameters)

8. ชุดข้อมูลอธิบายความเย็นที่มีผลต่อการเป็นหมันของข้าว (parameters describing cool temperature effect on spikelet fertility)

หลักการจำลองของแบบจำลอง SIMRIW

แบบจำลอง SIMRIW มีขบวนการในการจำลองศักยภาพในการให้ผลผลิตและการเจริญเติบโตของข้าวในเขตชลประทาน ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ พลังงานแสง และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ โดยอาศัยหลักพื้นฐานเกี่ยวกับการให้ผลผลิตของพืช (Y_G, g/m^{-2}) ขึ้นอยู่กับน้ำหนักแห้งมวลรวม (W_T, g m^{-2}) และดัชนีเก็บเกี่ยว (h) ดังสมการที่ 14

$$Y_G = hW_t \qquad (14)$$

ภายในแบบจำลองยังแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแห้งมวลรวมข้าว ขึ้นอยู่กับแสงส่วนที่เป็นประโยชน์ต่อการสังเคราะห์แสงของพืช (photosynthetically active radiation หรือ PAR) ที่ทรงพุ่มของข้าวได้รับ ซึ่ง Horie and Sakuratani (1985) ได้กำหนดความสัมพันธ์ของพลังงานแสงกับน้ำหนักแห้งมวลรวม เป็นสมการเพื่อใช้ในการประมวลผลภายในแบบจำลอง SIMRIW ดังนี้

$$dW_t/dt = C_s I_s \qquad (15)$$

เมื่อ C_s คือ ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นน้ำหนักแห้งมวลรวม (g dry matter MJ^{-1})

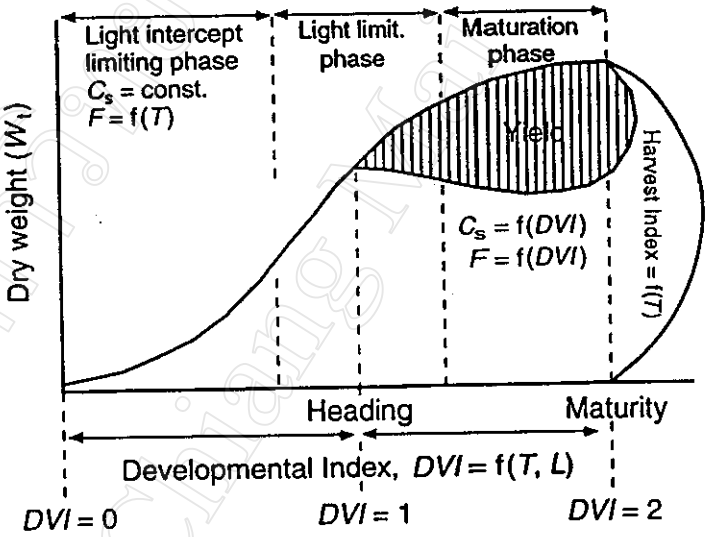
I_s คือ พลังงานแสงที่ได้รับต่อหนึ่งหน่วยเวลา (MJ m^{-2} d^{-1})

จากสมการที่ 15 สามารถนำมาเขียนได้อีกรูปแบบหนึ่ง เพื่ออธิบายถึงการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งในแต่ละวัน (ΔW_t) ได้ดังนี้

$$\Delta W_t = C_s S_s \qquad (16)$$

เมื่อ S_s คือ พลังงานแสงที่ได้รับทั้งหมดแต่ละวัน (MJ m^{-2} d^{-1})

Horie *et al.* (1992) แสดงให้เห็นถึงขบวนการในการเจริญเติบโต การพัฒนาการ และการสร้างผลผลิตของข้าวในแบบจำลอง SIMRIW โดยสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างการสะสมน้ำหนักแห้งกับ ดัชนีการพัฒนาการ(DVI) (ภาพที่ 2) ซึ่งดัชนีการพัฒนาการ สามารถใช้วัดการพัฒนาการในแต่ละระยะการเจริญเติบโต และในแต่ละวันได้ ขึ้นอยู่กับ ช่วงแสง(h) ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นน้ำหนักแห้งมวลรวม(C_s) และพลังงานแสงที่ได้รับทั้งหมดแต่ละวัน(S_s) เป็นตัวแปรของปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการพัฒนาการและและการสะสมน้ำหนักแห้งในแต่ละระยะ



ภาพที่ 2 หลักการจำลองขบวนการเจริญเติบโต การพัฒนาการ และสร้างผลผลิตข้าว ของแบบจำลอง SIMRIW (Horie *et al.*, 1992)

การจำลองการพัฒนาการ การเจริญเติบโต และผลผลิต ของแบบจำลอง SIMRIW

การจำลองการพัฒนาการ

ขบวนการในการพัฒนาการของข้าว ในระยะต่างๆ เช่น ระยะเริ่มสร้างช่อดอก ระยะตั้งท้อง ระยะออกรวง ระยะออกดอก และระยะสุกแก่ ได้รับอิทธิพลของสภาพแวดล้อมและพันธุกรรมเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งในแบบจำลอง SIMRIW ได้อธิบาย โดยใช้ค่า ดัชนีการพัฒนาการ (DVI) (ภาพที่ 3)

ซึ่งกำหนดว่า ที่ระยะงอก มีค่า DVI เท่ากับ 0.0 และเมื่อข้าวมีการพัฒนาการจนถึงระยะออกรวง มีค่า DVI เท่ากับ 1.0 และสุดท้ายเมื่อข้าวสุกแก่ ค่า DVI เท่ากับ 2.0 ดังนั้น การพัฒนาการของข้าวในหนึ่งฤดูปลูกมีค่า DVI อยู่ในช่วง 0.0 จนถึง 2.0

ค่า DVI นี้สามารถคำนวณได้จาก ผลรวมของอัตราการพัฒนาการ (DVR) ในช่วงเวลาหนึ่ง ดังสมการที่ 17

$$DVI_t = \sum_{i=0}^{i=t} DVR_i \qquad (17)$$

เมื่อ DVI_t คือ ดัชนีการพัฒนาการที่ t วัน

DVR_i คือ อัตราการพัฒนาการตั้งแต่งอก จนถึง วันที่ i

Horie and Nakagawa (1990) ได้กล่าวว่า ช่วงแสงและอุณหภูมิ เป็นปัจจัยหลักของสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อค่า DVR ซึ่งในข้าวค่า DVR ตั้งแต่งอกจนถึงระยะออกรวง ถูกกำหนดโดยความยาววัน (L) และอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละวัน (T) ซึ่งสามารถกำหนดความสัมพันธ์ ดังกล่าวเป็นสมการได้ ดังสมการที่ 18

$$\begin{aligned}
&DVI \le DVI^* && DVR = 1 / [G_V\{1.0 + \exp[-A\,(T - T_h)]\}] \\
\text{ถ้า}\quad &DVI > DVI^* \text{ และ} L \le L_C && DVR = \{1 - \exp[B\,(L - L_C)]\} / G_V\{1.0 + \exp[-A\,(T - T_h)] \qquad (18) \\
\text{ถ้า}\quad &DVI > DVI^* \text{ และ} L > L_C && DVR = 0
\end{aligned}$$

เมื่อ DVI^* คือ ค่า DVI ที่ข้าวมีการตอบสนองต่อช่วงแสง

L_C คือ ช่วงแสงวิกฤติที่กระตุ้นให้ข้าวสร้างรวง

T_h คือ อุณหภูมิที่ DVR เป็นครึ่งหนึ่งของ DVR สูงสุด

G_V คือ จำนวนวันที่น้อยที่สุดที่ข้าวพันธุ์นั้นออกรวง ภายใต้การจัดการที่เหมาะสม

A, B คือ ค่าคงที่

ค่าต่างๆ ในสมการที่ 18 มีความแตกต่างกันตามพันธุ์ โดยทั่วไป พันธุ์หนักมีค่า G_V สูง และในพันธุ์ที่ไวต่อช่วงแสง มีค่า B สูง แต่ L_C ต่ำ ซึ่งค่าต่างๆ เหล่านี้ สามารถหาได้โดยใช้วิธี "simplex method" ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีลักษณะของความสัมพันธ์ แบบไม่เป็นเส้นตรง (Horie and Nakagawa, 1990)

ภายในแบบจำลองยังได้นำปริมาณความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ในบรรยากาศ ที่มีผลต่อการพัฒนาการของข้าว มาประมวลผลในแบบจำลอง ดังสมการที่ 19

$$G_V = G[1 - 0.000114 (C_a - 350.0)] \qquad (19)$$

เมื่อ C_a คือ ปริมาณความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ (ppm) ขณะที่ข้าวเจริญเติบโต

G คือ ค่า G_V ที่ $C_a = 350.0$

หลังจากระยะข้าวออกรวงจนถึงระยะสุกแก่ สมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการพัฒนาการ (DVR) ของข้าวเปลี่ยนแปลงจากเดิม ที่ใช้ในการคำนวณตั้งแต่งอกจนถึงระยะข้าวออกรวง เนื่องจากค่า DVI ในช่วงนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 (ภาพที่ 3) ซึ่งมีรูปแบบของสมการ ดังสมการที่ 20

$$DVR = \{1 - \exp[-K_r (T - T_{cr})]\} / G_r \qquad (20)$$

เมื่อ G_r คือ จำนวนวันที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการสะสมน้ำหนักเมล็ด ภายใต้การจัดการที่เหมาะสม

K_r, T_{cr} คือ ค่าคงที่

การจำลองการเจริญเติบโต

ในแบบจำลอง SIMRIW ได้กำหนดว่า พลังงานแสงที่พืชได้รับในแต่ละวัน(S_s) มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับดัชนีพื้นที่ใบ (F) โครงสร้างและลักษณะทรงพุ่ม ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ ดังนี้

$$S_s = S_0 \{1 - r - (1 - r_0) \exp[- (1 - m) kF]\} \qquad (21)$$

เมื่อ S_0 คือ พลังงานแสงในแต่ละวัน (MJ m^{-2} d^{-1})

r, r_0 คือ ค่าการสะท้อนของแสงจากทรงพุ่ม และจากดิน

m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของแสง

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่องผ่านของแสงในทรงพุ่ม

การสะท้อนของแสงจากทรงพุ่ม(r) สามารถหาได้จากสมการที่ 22

$$r = r_f - (r_f - r_0) \exp (-F / 2) \qquad (22)$$

เมื่อ r_f คือ ค่าการสะท้อนของแสงเมื่อผิวหน้าดินปกคลุมไปด้วยพืช

จากสมการ 16 ที่ได้บอกถึง การสะสมน้ำหนักแห้งของข้าวในแต่ละวัน ว่าขึ้นอยู่กับ ค่า S_s หรือค่า พลังงานแสงที่ได้รับทั้งหมดแต่ละวัน คูณกับ ค่า C_s หรือ ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นน้ำหนักแห้งมวลรวม Horie and Sakuratani (1985) กล่าวว่า ค่า C_s ของข้าวคงที่ตั้งแต่ระยะงอกจนกระทั่งถึงช่วงกลางในระยะการสะสมน้ำหนักเมล็ด หลังจากนั้น ลดลงตามลำดับจนที่ระยะสุกแก่ ค่า C_s เท่ากับ 0 จากแบบแผนดังกล่าวนี้ สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบของสมการได้ ดังนี้

$$\text{ถ้า} \quad \begin{cases} 0.0 < DVI < 1.0 & C_0 = C \\ 1.0 \leq DVI < 2.0 & C_0 = C(1+B) / \{1+B \exp [(DVI-1) / t]\} \end{cases} \qquad (23)$$

เมื่อ C_0 คือ ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานแสง ที่ 330 ppm CO_2 (g MJ^{-1})

C, B, t คือ ค่าคงที่

ผลของความเข้มข้นของ CO_2 ในบรรยากาศมีผลต่อค่า C_S ซึ่งสามารถแสดงการตอบสนองของค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานแสงในข้าวต่อความเข้มข้นของ CO_2 ในรูปแบบของสมการ ดังสมการที่ 24

$$C_S = C_0 \{1 + R_m(C_a - 330) / [(C_a - 330) + K_c] \quad (24)$$

เมื่อ R_m คือ ค่า asypmptotic limit ของการตอบสนองต่อปริมาณ CO_2

K_c คือ ค่าคงที่ (ppm)

ในแบบจำลอง SIMRIW กำหนดให้มีการจัดการอย่างเหมาะสม หรือ การจัดการด้านน้ำและธาตุอาหารไม่เป็นปัจจัยจำกัด การแผ่ขยายของพื้นที่ใบข้าวจึงถูกควบคุมโดยสภาพแวดล้อม ซึ่งปัจจัยหลักอย่างหนึ่งคือ อุณหภูมิ แบบจำลองจึงแสดงความสัมพันธ์ ดังกล่าวออกมาในรูปแบบของสมการ (สมการที่ 25) โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเพิ่มขึ้นของดัชนีพื้นที่ใบ(F) ต่อหนึ่งหน่วยเวลา กับอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละวัน(T) สำหรับช่วงเวลาก่อนที่ข้าวออกรวง

$$1/F \times dF/dt = A\{1 - \exp[-K_f(T - T_{cf})]\} [1 - (F/F_{as})^h] \quad (25)$$

เมื่อ A คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของดัชนีพื้นที่ใบสูงสุด ($m^2\ m^{-2}$) ภายใต้การจัดการที่เหมาะสม (ปราศจากปัจจัยจำกัด)

T_{cf} คือ อุณหภูมิต่ำสุด(^oC) สำหรับการพัฒนาของ LAI

F_{as} คือ ค่า asypmptotic ของดัชนีพื้นที่ใบ เมื่อ อุณหภูมิไม่เป็นปัจจัยจำกัด

K_f, h คือ ค่าคงที่

ในสภาพการปลูกจริง ค่า LAI มีค่าสูงสุด เมื่อข้าวเข้าสู่ระยะออกรวง หลังจากนั้น ในระหว่างการสะสมน้ำหนักเมล็ด ค่า LAI ลดลง ตามลำดับ เนื่องจากใบแก่และเหี่ยวแห้ง (senescence) อย่างไรก็ตาม ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเร่งหรือยืดระยะเวลาของการแก่และเหี่ยวแห้งของใบ มีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง และยากต่อการอธิบายในทางสรีระ แบบจำลองจึงได้กำหนดค่า LAI ในระหว่างระยะออกรวงจนถึงระยะสุกแก่เป็นค่าคงที่

การจำลองการสร้างผลผลิต

ถ้าดัชนีเก็บเกี่ยวมีค่าคงที่ ความสัมพันธ์ของน้ำหนักแห้งพืชทั้งต้นกับผลผลิตข้าว จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง (Horie, 1990) อย่างไรก็ตาม ดัชนีเก็บเกี่ยวเป็นลักษณะทางพันธุกรรม ซึ่งผันแปรตามสภาพแวดล้อม เช่น ถ้าข้าวได้รับความหนาวเย็นมาก ในช่วงกำลังตั้งท้องจนถึงระยะออกรวง ดัชนีเก็บเกี่ยว(h) จะลดลง ซึ่งมีสาเหตุมาจากความหนาวเย็นมีผลทำให้ความเป็นหมัน(γ) สูงขึ้น ในแบบจำลอง SIMRIW ได้คำนึงถึงผลของความหนาวเย็นที่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและการสร้างผลผลิตของข้าว โดยมีสมการในการคำนวณดังสมการที่ 26

$$h = h_m(1 - \gamma) \{1- \exp [-K_h(DVI - 1.22)]\} \qquad (26)$$

เมื่อ h_m คือ ดัชนีเก็บเกี่ยวสูงสุด ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ไม่มีปัจจัยจำกัด

K_h คือ ค่าคงที่

นอกจากอุณหภูมิต่ำจะส่งผลต่อการสร้างผลผลิตในข้าวแล้ว ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปก็ส่งผลต่อขบวนการสร้างผลผลิตของข้าวด้วยเช่นกัน โดยถ้าข้าวได้รับอุณหภูมิสูงในระยะผสมเกสร จะไปมีผลต่อเกสรตัวผู้ของข้าว ทำให้ข้าวผสมไม่ติดเมล็ด ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ ได้ดังสมการที่ 27

$$1 - \gamma = 1 - 1 / \{1 + \exp [-0.853 (T_M - 36.6)]\} \qquad (27)$$

เมื่อ T_M คือ อุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละวันสูงสุด ในระหว่างการออกดอก

การสิ้นสุดการประมวลผลของแบบจำลอง SIMRIW จะสิ้นสุดลง เมื่อค่า DVI มีค่าเท่ากับ 2.0 ซึ่งเป็นระยะสุกแก่ หรือ เมื่อข้าวได้รับอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติสำหรับการเจริญเติบโตเป็นเวลานานติดต่อกันเป็นสามวัน

แบบจำลอง CERES-Rice และ SIMRIW เป็นแบบจำลองการเจริญเติบโตของข้าว ที่ได้ถูกสร้างขึ้นมาโดยอาศัยหลักทางสรีระของพืชเช่นเดียวกันในการคำนวณการเจริญเติบโตและพัฒนาการของข้าว แต่แบบจำลองทั้งสองถูกสร้างขึ้นมาโดยผู้สร้างที่แตกต่างกันจึงทำให้มีองค์ประกอบของการจำลองที่ต่างกัน ทั้งในเรื่องของ วัตถุประสงค์ ข้อมูลนำเข้า และการใช้งาน ซึ่งสามารถสรุปความแตกต่างของขบวนการในการจำลองของแบบจำลองทั้งสองได้ดัง ตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบขบวนการในการจำลองของแบบจำลอง CERES-Rice และ SIMRIW

ความแตกต่าง	แบบจำลอง CERES-Rice	แบบจำลอง SIMRIW
ขอบเขต	จำลองผลผลิตข้าวในนาน้ำฝนและในนาชลประทาน ต่อปัจจัยการผลิตในระดับที่แตกต่างกัน	จำลองศักยภาพของผลผลิตที่ตอบสนองต่อภูมิอากาศ สำหรับข้าวที่ให้น้ำชลประทาน
ข้อมูลนำเข้า	พันธุ์ข้าว พลังงานแสง อุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุด น้ำฝน ข้อมูลชุดดิน น้ำ ไนโตรเจน ค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม และการจัดการ เช่น วันปลูก ระยะปลูก วันและปริมาณการใส่ปุ๋ย N วันและปริมาณการให้น้ำ เป็นต้น	พันธุ์ข้าว พลังงานแสง อุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุด น้ำฝน ค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม และปริมาณ CO_2
ผลการจำลอง	OVERVIEW.OUT เป็นข้อมูลที่สรุปผลการจำลองของแบบจำลอง GROWTH.OUT เป็นการบอกถึงการสะสมน้ำหนักแห้งในส่วนต่างๆ ของข้าวตั้งแต่ปลูกจนถึงเก็บเกี่ยว WATER.OUT บอกถึงการใช้น้ำของพืช NITROGEN.OUT แสดงการเปลี่ยนแปลงของไนโตรเจน	ผลด้านการพัฒนาการ การเจริญเติบโต ผลผลิต และเปอร์เซ็นต์เมล็ดลีบ
การคลอบคลุมถึงปัจจัยในการผลิตพืช	พันธุ์ สภาพภูมิอากาศ ไนโตรเจน น้ำ และการจัดการ	พันธุ์ สภาพภูมิอากาศ และCO_2
ลักษณะเด่น	จำลองระยะพัฒนาการ 9 ระยะ จำลองสมดุลน้ำและสมดุลไนโตรเจน มีการจำลองการเจริญของราก ต้น ใบ และรวง	มีค่า Technological coefficient ทำให้แบบจำลองไม่ยุ่งยากในการจำลองการจัดการ

สภาพภูมิอากาศกับการเจริญเติบโต และผลผลิตข้าว

พลังงาน และช่วงแสง

ข้าวต้องการพลังงานแสงแตกต่างกันตามระยะการเจริญ ถ้าข้าวได้รับพลังงานแสงน้อยในระยะการเจริญทางลำต้นและใบ (vegetative stage) จะมีผลกระทบต่อการผลผลิตและองค์ประกอบของผลผลิตไม่มากนัก แต่ถ้าได้รับพลังงานแสงน้อยในระยะการแพร่พันธุ์ (reproductive stage) แล้วจะทำให้ผลผลิตลดลงเป็นอย่างมาก (เฉลิมพล, 2542) De Datta (1981) ได้พบว่า จุดวิกฤตที่ข้าวจะต้องได้รับพลังงานแสงอย่างเพียงพอ อยู่ในระยะกำเนิดช่อรวง (panicle initiation) จนถึงก่อนระยะสุกแก่ 10 วัน หรือประมาณ 45 วันก่อนเก็บเกี่ยว ฉะนั้นถ้าน้ำไม่เป็นปัจจัยจำกัดในการเจริญเติบโต ข้าวที่ปลูกในฤดูร้อน จะให้ผลผลิตสูงกว่าข้าวที่ปลูกในฤดูฝน เนื่องจากในฤดูร้อนข้าวได้รับพลังงานแสงในช่วงระยะวิกฤตได้อย่างเต็มที่

ข้าวโดยทั่วไปเป็นพืชวันสั้น (short-day plant) และตอบสนองต่อช่วงแสง ดังนั้นวันยาวจะมีผลทำให้การออกดอกของข้าวล่าช้าออกไป ซึ่งจะมีผลกระทบอย่างมากกับการปลูกข้าวพันธุ์ไวแสงในเขตอาศัยน้ำฝน เช่นในประเทศไทย เนื่องจากการปลูกต้องรอฝน จึงทำให้บางครั้งวันปักดำเลยจากวันปลูกที่เหมาะสม ส่งผลให้ข้าวมีอายุการเจริญทางลำต้นและใบสั้นกว่าปกติ และมีผลผลิตต่ำ สำหรับวันปลูกที่เหมาะสมของจังหวัดเชียงใหม่ อยู่ประมาณเดือนมิถุนายน-พฤษภาคม ซึ่งจะทำให้ข้าวออกดอกในต้นเดือนตุลาคม รวมเวลาการเจริญเติบโตจนออกรวงประมาณ 120-130 วัน ซึ่งเป็นระยะเวลาที่จำเป็นสำหรับต้นข้าวที่จะให้ผลผลิตสูง ปัจจุบันนักปรับปรุงพันธุ์นิยมปรับปรุงพันธุ์ข้าวให้ไม่ไวต่อช่วงแสง เนื่องจากจะไม่มีข้อจำกัดด้านฤดูกาลเพาะปลูกหรือท้องที่ที่ปลูก ทำให้ผลงานของนักปรับปรุงพันธุ์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้กว้างกว่า ดังนั้นข้าวที่จัดว่าเป็น ข้าวพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูง ในปัจจุบันจึงมีแนวโน้มเป็นพันธุ์ข้าวไม่ไวต่อช่วงแสง

อุณหภูมิ

De Datta (1981) ได้กล่าวถึง อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต และให้ผลผลิตของข้าวในแต่ระยะแตกต่างกัน อีกทั้งยังมีอุณหภูมิวิกฤตที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงของการเจริญเติบโต เช่น ในระยะงอกอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 18-40 °C เมื่อถึงระยะแตกกออุณหภูมิที่เหมาะสมจะเปลี่ยนไปอยู่ในช่วง 25-31 °C แต่ที่ระยะออกดอกอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่ 30-33 °C และในระยะสุกแก่อุณหภูมิที่เหมาะสมจะเท่ากับ 20-29 °C

นอกจากช่วงแสงที่มีอิทธิพลต่อการออกดอกของข้าวแล้ว อุณหภูมิก็มีผลต่อการออกดอกเช่นเดียวกัน (Fukai, 1999) โดยทั่วไปแล้วหลังจากข้าวกำเนิดรวง (panicle initiation) ได้ประมาณ 30-35 วัน ข้าวจะออกดอก แต่ถ้าได้รับอุณหภูมิต่ำจะทำให้การออกดอกของข้าวล่าช้าออกไป และ

ในทางกลับกันอุณหภูมิสูงจะเร่งให้ข้าวออกดอกเร็วขึ้น (Vergara and Chang, 1985) Takahashi (1984) กล่าวว่าอุณหภูมิต่ำจะมีผลต่อการออกดอกของข้าวอินดิกามากกว่าข้าวจาโปนิกา นอกจากนั้นแล้ว การที่ข้าวได้รับอุณหภูมิสูงหรือต่ำเกินไปในระยะการผสมเกสรจะทำให้ข้าวมีเมล็ดลีบเพิ่มขึ้น (De Datta, 1981) โดยจะไปมีผลต่อการแบ่งเซลล์ของละอองเรณู (Nishiyama, 1984) Yoshida (1981) กล่าวว่า อุณหภูมิที่ลดต่ำลงเหลือ 15-20 ^{o}C จะมีผลทำให้การแบ่งตัวของเซลล์สืบพันธุ์ในระยะ microspore ลดลง ซึ่งระยะที่อ่อนไหวมากที่สุดต่ออุณหภูมิต่ำของข้าวจะอยู่ระหว่าง 7-14 วันก่อนระยะผสมเกสรแต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวด้วย De Datta (1981) กล่าวว่า เปอร์เซ็นต์การผสมเกสรของข้าวจะลดลงเหลือ 75% ถ้าข้าวได้รับอุณหภูมิ 35 ^{o}C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ลดลงเป็น 55% เมื่อได้รับอุณหภูมิ 38 ^{o}C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และลดลงเหลือ 15% ที่อุณหภูมิ 41 ^{o}C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในส่วนของการเจริญเติบโตของข้าว อุณหภูมิต่ำจะทำให้ต้นข้าวแคระแกรน มีการเจริญเติบโตและสะสมน้ำหนักแห้งน้อย ส่งเสริมการแตกกอ ความสูงของข้าวลดลง อัตราการยืดตัวของปล้องข้าวจะลดลง (Morishima, 1984) ส่วนอุณหภูมิสูง มีผลทำให้ปลายใบมีสีซีด เป็นแผลไหม้ การแตกกอ และความสูงลดลง การสะสมน้ำหนักเมล็ดลดลง (Yoshida, 1981)

น้ำ

น้ำเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมากปัจจัยหนึ่งต่อการเจริญเติบโต และมีส่วนสำคัญเกี่ยวกับการเพิ่มขึ้น หรือลดลงของผลผลิตข้าวในประเทศไทย โดยบทบาทของน้ำที่มีต่อข้าวแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ บทบาทที่มีต่อข้าวโดยตรงต่อต้นข้าว เช่น ช่วยการงอก เป็นวัตถุดิบในขบวนการสร้างอาหารจากการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) และเป็นส่วนประกอบของเซลล์และเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ของข้าว เป็นต้น และบทบาทของน้ำที่มีต่อการปลูกข้าว ข้าวเป็นพืชที่มีความต้องการใช้น้ำมากกว่าพืชเศรษฐกิจชนิดอื่นมาก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วข้าวต้องการน้ำ ตั้งแต่ระยะปักดำจนถึงระยะสุกแก่ ประมาณ 800-1200 มิลลิเมตร หรือประมาณ 6-10 มิลิเมตรต่อวัน (De Datta, 1981) อีกทั้งน้ำยังมีส่วนช่วยในการเตรียมดิน และการป้องกันกำจัดวัชพืช (อัมมาร และ วิโรจน์, 2533)