บทที่ 2
การตรวจเอกสาร

1. ความหมายของแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืช

แบบจำลอง (model) หมายถึงสิ่งที่ลอกเลียนแบบหรือจำลองระบบใดระบบหนึ่ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ ให้ผู้ศึกษาได้เข้าใจและเรียนรู้ถึงภาพรวมของระบบได้ง่ายกว่าการดูหรือศึกษาจากระบบจริง แบบจำลองพืช (crop model) หมายถึงสิ่งที่สร้างขึ้นเพื่อลอกเลียนระบบพืช โดยรวมข้อมูลพื้นฐานของกระบวนการเจริญเติบโตของพืชและความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ พลังงานรังสีดวงอาทิตย์ ความชื้นรวมถึงความอุดมสมบูรณ์ของดินกับองค์ประกอบของระบบพืช เช่น ระบบการเจริญเติบโตและระบบการพัฒนาการของพืชไว้ด้วยกัน ในปัจจุบันมีกลุ่มนักวิจัยได้นำแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืช มาเป็นเครื่องมือที่ช่วยสนับสนุนการตัดสินใจทางการเกษตรอย่างแพร่หลาย เช่น การประเมินกลยุทธ์ในการจัดการเพื่อลดความเสี่ยง การวิเคราะห์ระบบการปลูกพืชในระยะยาวในแง่การให้ผลผลิต การประเมินศักยภาพของผลผลิตพืช การเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารในดิน การกำหนดวันปลูกและการจัดการที่เหมาะสม (Egli and Bruening, 1992; Meinke et al., 1993; Aggawal and Kalra, 1994; Meinke and Hammer, 1995)

2. แบบจำลองการเจริญเติบโตของถั่วลิสง (CSM-CROPGRO-Peanut)

แบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut เป็นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยกลุ่มของนักวิจัยจากหลายสาขาวิชาในมหาวิทยาลัยฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา แบบจำลองดังกล่าวรวมทั้งจำลองพืชอีกหลายชนิดเช่น แบบจำลองการเจริญเติบโตของถั่วเหลือง ข้าวโพด มันสำปะหลัง อ้อย ข้าวบาร์เลย์ เป็นต้น ได้ถูกบรรจุอยู่ในโปรแกรมระบบสนับสนุนการตัดสินใจเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีทางการเกษตร (Decision Support System for Agrotechnology Transfer, DSSAT) (Hoogenboom, et al., 1992; Hoogenboom et al., 2004) โปรแกรมดังกล่าวประกอบด้วยส่วนของระบบการจัดการข้อมูล การวิเคราะห์ประมวลผลและส่วนของการแสดงผล ซึ่งการวิเคราะห์และประมวลผลของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ ดำเนินการโดยอาศัยแบบจำลองและการจำลองสถานการณ์ (modeling and simulation) IBSNAT (1988)

แบบจำลองการเจริญเติบโตของถั่วลิสง ถูกพัฒนาขึ้นมาจากสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายพัฒนาการด้านการเจริญเติบโตทาง ลำต้น กิ่ง ใบ (vegetative development) และพัฒนาการทางด้านการสืบพันธุ์ (reproductive davelopment) สมดุลคาร์บอนของถั่วลิสง (carbon balance) โดยจะอธิบายถึงอัตราการสังเคราะห์แสงรายวัน และอัตราการสังเคราะห์แสงรวมตลอดอายุของถั่วลิสง สมดุลของไนโตรเจนและการดูดซึมไนโตรเจน (nitrogen balance and nitrogen uptake)

สมดุลของน้ำในดิน (water balance) ซึ่งเป็นการอธิบายเกี่ยวกับการไหลของน้ำและการดูดซึมน้ำของชั้นดินในแต่ละชั้น (Hoogenboom et al., 1992) ในส่วนของสมดุลคาร์บอนนั้น จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ ส่วนของคาร์บอนที่ใช้ในการเจริญเติบโต ส่วนของคาร์บอนที่ใช้ในการรักษาสภาพ และส่วนของคาร์บอนที่สูญเสียไปสำหรับการหายใจ สำหรับการปันส่วนอาหาร (partitioning) ในช่วง vegatative และ reproductive สัดส่วนของการปันส่วนนี้จะมีระยะพัฒนาการเป็นตัวกำหนดให้เกิดการเปลี่ยนสัดส่วนดังกล่าว

3. ข้อมูลตัวป้อนสำหรับแบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าแบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut เป็นแบบจำลองที่อธิบายการเจริญเติบโตของพืชที่ตอบสนองต่อสภาพแวดล้อม เช่น สภาพฟ้าอากาศ ความอุดมสมบูรณ์ของดิน สภาพการจัดการของแต่ละพื้นที่และลักษณะประจำของถั่วลิสงแต่ละพันธุ์ ดังนั้นชุดของข้อมูลตัวป้อนที่จำเป็นในการจำลองสถานการณ์ได้แก่ ข้อมูลอากาศ ข้อมูลชุดดิน ข้อมูลการจัดการและข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของถั่วลิสงแต่ละพันธุ์ ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดของข้อมูลตัวป้อนได้ดังต่อไปนี้

3.1 ข้อมูลฟ้าอากาศ (weather)

ข้อมูลอากาศที่จำเป็นสำหรับการจำลองสถานการณ์โดยแบบจำลอง ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตร) พลังงานรังสีดวงอาทิตย์ (MJ/m^2/วัน) อุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิต่ำสุด (องศาเซลเซียส) ข้อมูลฟ้าอากาศนี้ต้องมีการเก็บให้ครอบคลุมมากที่สุด อย่างน้อยให้ตลอดอายุการเจริญเติบโตของถั่วลิสงที่ทำการศึกษาอยู่ ณ ช่วงเวลานั้น

3.2 ข้อมูลดิน (soil)

ข้อมูลดินเป็นข้อมูลที่แสดงถึงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของชุดดิน ในแต่ละชั้นโดยให้ครอบคลุมการเจริญของรากพืชที่ต้องการศึกษา ซึ่งข้อมูลทางด้านกายภาพของดินได้แก่ เปอร์เซ็นต์ของ sand silt และ clay ความสามารถในการระบายน้ำ ความหนาแน่นของดิน (bulk density) รวมถึงความแตกต่างเกี่ยวกับโครงสร้างของชั้นดินในแต่ละระดับความลึก ซึ่งข้อมูลทางกายภาพของดินนี้จะมีประโยชน์ในการคำนวณหาการเคลื่อนย้ายของน้ำใต้ดินว่ามีรูปแบบการเคลื่อนย้ายอย่างไร ส่วนข้อมูลทางเคมีของดินนั้นประกอบด้วย ปริมาณอินทรียวัตถุ (organic matter) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินและค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (cations exchange capacity; CEC) อีกทั้งสามารถใช้ข้อมูลที่กล่าวมาทั้งหมดนี้เพื่อคำนวณข้อมูลอื่น ๆ ที่ใช้สำหรับแบบจำลอง เช่น ปริมาณน้ำที่อิ่มตัว (saturated water content; SAT) ปริมาณน้ำสูงสุดที่มีการระบาย (drained upper limit of soil water content;

DUL) หรือความชื้นระดับสนาม (field capacity) และปริมาณน้ำต่ำที่สุดที่พืชนำไปใช้ (lower limit of plant extractable water; LL) หรือจุดเหี่ยวถาวร (permanent wilting point) เป็นต้น

3.3 ข้อมูลการจัดการพืช (management)

ในทุกงานทดลองนั้นการจัดการเป็นส่วนที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง เพราะจะมีผลต่อผลผลิตของพืช ข้อมูลการจัดการที่จำเป็นสำหรับป้อนแก่แบบจำลองในกลุ่ม DSSAT นั้น ประกอบด้วย วันปลูก ระยะปลูก ความลึกของการปลูก วันงอก ความหนาแน่นของประชากรพืชต่อตารางเมตร และวันเก็บเกี่ยวผลผลิต ในกรณีการจำลองการเจริญเติบโตของพืชภายใต้การจัดการน้ำ รายละเอียดของวันที่และปริมาณการให้น้ำก็มีความสำคัญมากเช่นกัน นอกจากนี้ในปัจจุบันแบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut สามารถจำลองสมดุลของไนโตรเจนในพืชและดิน และจำลองการตอบสนองของถั่วลิสงต่อการจัดการปุ๋ยไนโตรเจนที่แตกต่างกันได้ ดังนั้นหากต้องการจำลองการเจริญเติบโตของถั่วลิสงภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว จำเป็นต้องมีข้อมูลเพิ่มเติมคือ ประเภทของปุ๋ยไนโตรเจน จำนวนครั้งและปริมาณการให้ปุ๋ย วิธีการให้และระดับความลึกของการให้ปุ๋ย เป็นต้น

3.4 ข้อมูลแสดงลักษณะจำเพาะพันธุ์ (genetic coefficients)

ข้อมูลแสดงลักษณะจำเพาะของถั่วลิสงแต่ละพันธุ์ หรือค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม เป็นข้อมูลพื้นฐานหนึ่ง ที่มีความจำเป็นต่อการจำลองสถานการณ์โดยแบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut เพื่ออธิบายการตอบสนองของถั่วลิสงต่อสภาพแวดล้อม ทั้งทางด้านการพัฒนาการและด้านการเจริญเติบโต ถั่วลิสงแต่ละพันธุ์จะมีค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมที่แตกต่างกันไป ซึ่งค่าดังกล่าวได้มาจากการทดลองภายใต้สภาพเรือนทดลองที่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมได้ หรือหากไม่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมได้จะต้องทำการประเมินจากข้อมูลของการปลูกถั่วลิสงในหลายๆ สภาพแวดล้อม (Boote et al., 1989; Hoogenboom et al., 1999) ค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมที่ใช้ในแบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut นั้นมีทั้งหมด 15 ลักษณะดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมที่ใช้สำหรับแบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut

ลักษณะ- ช่วงพัฒนาการที่กำหนด	สัญลักษณ์	หน่วย
ค่าวันวิกฤตวันสั้น	CSDL	ชั่วโมง
ลักษณะความชันของพัฒนาการที่ตอบสนองต่อวันสั้น	PPSEN	1/ ชั่วโมง
ระยะเวลางอกถึงออกดอกแรก (VE-R1)	EMFL	Photothermal day
ระยะเวลาออกดอกแรกถึงเกิดเข็มแรก (R1-R2)	FLSH	"
ระยะเวลาจากออกดอกแรกถึงเริ่มสร้างเมล็ด (R1-R5)	FLSD	"
ระยะเวลาจากเริ่มสร้างเมล็ดถึงระยะสุกแก่ทางสรีระวิทยา	SDPM	"
ระยะเวลาจากออกดอกแรกถึงระยะที่มีพื้นที่ใบรวมสูงสุด	FLLF	"
ระยะเวลาในการสร้างเมล็ด	SFDUR	"
ระยะเวลาในการสร้างฝัก	PODUR	"
อัตราการสังเคราะห์แสงสูงสุด	LFMAX	-
พื้นที่ใบจำเพาะ (specific leaf area ; SLA)	SLAVR	cm^2 / g
ขนาดใบที่สามารถขยายได้สูงสุด	SIZIF	cm^2
น้ำหนักเมล็ด	WTPSD	g
จำนวนเมล็ดต่อฝัก	SDPDV	no.
การกระจายน้ำหนักแห้งไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืช	XERT	-

ในการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของถั่วลิสง สามารถประเมินได้จากข้อมูลซึ่งได้มาจากการปลูกในหลายวันปลูกหรือการปลูกในหลายสภาพแวดล้อม ข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ประกอบด้วย ข้อมูลดิน ข้อมูลการจัดการ ข้อมูลสภาพอากาศรายวัน ข้อมูลพืชและค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมเริ่มต้น นอกจากนี้ International Benchmark Site Network for Agrotechnology Tranfer (IBSNAT) (1988) ได้กำหนดลักษณะเกี่ยวกับการเจริญเติบโตที่ต้องวัดเพื่อใช้ในการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม โดยได้กำหนดระยะการเก็บเกี่ยวพืชเพื่อวัดน้ำหนักแห้งออกเป็นช่วงๆ สำหรับถั่วลิสงได้กำหนดให้มีการเก็บเกี่ยว 3 ครั้ง กล่าวคือครั้งแรกที่ระยะ V4 หรือระยะที่ 50 % ของประชากรถั่วลิสงที่ลำต้นหลักมี 4 ข้อ ครั้งที่สองที่ระยะ R4 คือระยะที่ฝักแรกพัฒนาเต็มที่ หรือระยะที่ 50 % ของประชากรถั่วลิสงที่มีฝักแรกขยายเต็มที่ ครั้งที่ 3 ที่ระยะ R6 คือเมล็ดแรกขยายเต็มฝัก หรือ 50 % ของประชากรถั่วลิสงมีเมล็ดสะสมอาหารเต็มฝักแรก (ฝักสด) ส่วนการเก็บเกี่ยวผลผลิต ทำเมื่อถั่วลิสงอยู่ในระยะ R8 คือ 67-75 % ของฝัก ถั่วลิสงที่มีเปลือกด้านในฝักเป็นสีน้ำตาล ในส่วนของการเจริญเติบโตของถั่วลิสงการเก็บตัวอย่างจะเก็บทั้งต้น (ยกเว้นส่วนราก) นำตัวอย่างพืชมาแยกเป็นส่วนต้น ใบ และ ฝัก นำไปอบที่อุณหภูมิ

70 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ แล้วชั่งน้ำหนักหลังอบ นำค่าข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าต่าง ๆ เหล่านี้คือน้ำหนักแห้งรวม น้ำหนักแห้งต้น น้ำหนักหนักใบ น้ำหนักแห้งฝัก น้ำหนักแห้งเมล็ด และน้ำหนัก 100 เมล็ด

ส่วนข้อมูลด้านการพัฒนาการ IBSNAT (1988) กำหนดระยะพัฒนาการในการเก็บข้อมูลของถั่วลิสงโดยได้อ้างระยะพัฒนาการตาม Boote (1982) คือ

VE คือ วันที่ 50 % ของประชากรถั่วลิสงมีใบเลี้ยงโผล่พ้นดิน
V4 คือ วันที่ 50 % ของประชากรบนลำต้นหลักมีข้อเจริญเติบโต 4 ข้อ
R1 คือ วันที่ 50 % ของประชากรออกดอกแรก
R2 คือ วันที่ 50 % ของประชากรสร้างเข็มแรก
R3 คือ วันที่ 50 % ของประชากรมีฝักแรกมีขนาดเป็นสองเท่าของเข็ม
R4 คือ วันที่ 50 % ของประชากรมีฝักแรกพัฒนาเต็มที่
R6 คือ วันที่ 50 % ของประชากรมีเมล็ดพัฒนาเต็มฝักแรก
R7 คือ วันที่ 50 % ของประชากรเริ่มสุกแก่
R8 คือ วันที่ 67-75 % ของประชากรสุกแก่เก็บเกี่ยว

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมของลักษณะต่าง ๆ ไม่ได้ใช้ค่าจากการสังเกตจากแปลงทดลองมาเป็นค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมโดยตรง แต่จะใช้ค่าที่ได้จากการทดลองเป็นค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมเริ่มต้นป้อนให้กับแบบจำลองร่วมกับข้อมูลดิน ข้อมูลภูมิอากาศและข้อมูลการจัดการ ทำการจำลองลักษณะต่าง ๆ ทั้งลักษณะทางด้านพัฒนาการและทางด้านการเจริญเติบโต แล้วนำผลที่ได้จากการจำลองไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดลองจริง หากค่าที่ได้จากการจำลองยังแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองจริงมาก จะต้องปรับค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมเริ่มต้นแต่ละตัว แล้วจำลองลักษณะใหม่และเปรียบเทียบผลอีก ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าค่าที่ได้จากการจำลองจะใกล้เคียงกับค่าสังเกตมากที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมที่ใช้ในการจำลองครั้งสุดท้ายจึงจะเป็นค่าประมาณของสัมประสิทธิ์พันธุกรรมของลักษณะต่าง ๆ เหล่านั้น (Hoogenbroom, 1999) กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า การปรับค่าแบบจำลอง (model calibration)

Banterng et al. (2004) ประเมินค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมสำหรับถั่วลิสง 2 ประเภท ได้แก่ 12 สายพันธุ์ในกลุ่มถั่วลิสงเมล็ดโตและอีก 14 สายพันธุ์ ในกลุ่มถั่วลิสงเมล็ดเล็ก ซึ่งทำการปลูกถั่วลิสงภายใต้ฤดูปลูกที่เป็นต้นฝนปี ค.ศ. 1999 และฤดูแล้งของปี ค.ศ. 2000 เก็บข้อมูลด้านพัฒนาการและการเจริญเติบโตของถั่วลิสง ข้อมูลดิน ข้อมูลฟ้าอากาศและข้อมูลการจัดการพืช เป็นข้อมูลตัวป้อน เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมตามวิธีมาตรฐาน ผลจากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมให้ค่าการจำลองการเจริญเติบโตและพัฒนาการใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการสังเกตจริงเกือบทุกลักษณะสำหรับถั่วลิสง

สุกัญญา (2547) ทำการประเมินค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมของสายพันธุ์ถั่วลิสงโดยใช้แบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut เพื่อใช้ในงานปรับปรุงพันธุ์ โดยทดลองกับถั่วลิสง 6 พันธุ์/สายพันธุ์ ทำการปลูกทดสอบเดือนละ 1 ครั้ง ในช่วงเดือนธันวาคมปี 2543 ถึงกรกฎาคมปี 2544 รวมทั้งหมด 8 วันปลูก ที่แปลงทดลองศูนย์วิจัยพืชไร่ จังหวัดขอนแก่น ทำการบันทึกข้อมูลที่จำเป็นสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์ประจำพันธุ์ของถั่วลิสงสำหรับใช้กับแบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut ได้แก่ ข้อมูลลักษณะพัฒนาการและการเจริญเติบโตของพืช คุณสมบัติต่างๆ ของชุดดิน สภาพภูมิอากาศ และการจัดการพืช นำข้อมูลที่ได้จากการปลูกทดสอบแต่ละวันปลูกมาประมาณค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมของถั่วลิสงแต่ละพันธุ์ ผลจากการปรับค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่ประมาณได้ในแต่ละวันปลูก ให้ค่าทำนายลักษณะทางด้านพัฒนาการและด้านการเจริญเติบโตใกล้เคียงกับค่าสังเกตจริงในทุกพันธุ์และทุกวันปลูก

การประเมินค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมพืช ที่ทำการทดลองในสภาพควบคุมนั้นมีความยุ่งยากและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย แรงงานและเวลา ดังนั้น Mavromatis et al. (2001) ได้เสนอการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของพืช โดยใช้ข้อมูลพืชบางลักษณะที่ได้จากการปลูกเปรียบเทียบพันธุ์ในหลายสถานที่ ข้อมูลดังกล่าว ได้แก่ อายุออกดอก อายุสุกแก่เก็บเกี่ยว ขนาดเมล็ดและผลผลิตเมล็ด ซึ่งรวบรวมได้จากแปลงทดลองที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ในช่วงปี ค.ศ. 1987-1996 ในการทดลองดังกล่าวมีการศึกษาการเจริญเติบโตของถั่วเหลือง 11 สายพันธุ์ 5 สถานีทดลอง คัดเลือกการทดลองที่มีข้อมูลสมบูรณ์ที่สุด รวมทั้งหมด 393 ชุด ทำการจำลองสถานการณ์โดยใช้แบบจำลอง CROPGRO-Soybean นำเข้าข้อมูลตัวป้อน ได้แก่ ข้อมูลภูมิอากาศรายวัน ข้อมูลการจัดการพืช ข้อมูลสัมประสิทธิ์พันธุกรรมพืชเริ่มต้นและข้อมูลชุดดินที่ได้ทำการปรับปรุงใหม่ แต่เนื่องจากในการทดลองมีชุดดินหลายชุดและมีความหลากหลายทำให้ยากในการประเมิน จึงได้เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์อีกตัวหนึ่งคือ modifying soil fertility factor (SLPF) โดยกำหนดช่วง 0-1 เป็นค่าคงที่สำหรับแต่ละสถานที่ ซึ่งเป็นผลมาจากความอุดมสมบูรณ์ของดินที่แตกต่างกัน โดยเริ่มต้นที่ 0.8 ไปจนเข้าใกล้ 1.0 เพื่อให้ค่าที่ได้จากการจำลองมีความใกล้เคียงกับค่าจากการสังเกตจริงมากที่สุด

4. ผลลัพธ์ (out put) จากการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut

แบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut จำลองช่วงระยะเวลาของพัฒนาการทางลำต้นและฝักของถั่วลิสง โดยเริ่มตั้งแต่ถั่วลิสงงอกจนถึงระยะสุกแก่ทางสรีรวิทยา รวมถึงการจำลองการเจริญเติบโตรายวันขององค์ประกอบต้นพืช เช่น ใบ ลำต้น ฝักและราก พร้อมทั้งคำนวณดัชนีพื้นที่ใบ (leaf area index, LAI) และพื้นที่ใบจำเพาะ (specific leaf area, SLA) นอกจากนี้แบบจำลองยังจำลองสัดส่วนของไนโตรเจนในทรงพุ่ม ผลผลิตสุดท้าย องค์ประกอบผลผลิตและการชะล้าง เป็นต้น (Hoogenboom et al., 1992; Singh et al., 1994a)

จำลองสัดส่วนของไนโตรเจนในทรงพุ่ม ผลผลิตสุดท้าย องค์ประกอบผลผลิตและการชะล้าง เป็นต้น (Hoogenboom et al., 1992; Singh et al., 1994a)

5. วิธีการประเมินความสอดคล้องระหว่างข้อมูลที่ได้จากการจำลองและข้อมูลที่ได้จากการสังเกตจริง

สำหรับการประเมินความสอดคล้องระหว่างค่าที่ได้จากการจำลองและค่าที่ได้จากการสังเกตจริง ลักษณะทางพัฒนาการจะประเมินจากผลต่างที่เป็นจำนวนวัน ในแต่ละระยะของพัฒนาการของพืช ส่วนลักษณะด้านการเจริญเติบโตจะวัดเป็นน้ำหนักแห้งที่ระยะต่าง ๆ ของการเจริญเติบโต จะใช้ค่าทางสถิติเป็นเกณฑ์ ค่าสถิติที่นิยมใช้เป็นเกณฑ์ในการวัดความแตกต่างระหว่างการใช้แบบจำลองและการทดลองจริงได้แก่ Root mean square error (RMSE) (Willmolt, 1982 อ้างถึงใน สมเจตต์, 2544) และ Agreement index (d) (Yang et al., 2000) โดยในระยะแรก ๆ วิธีการที่ใช้ส่วนใหญ่ได้แก่การใช้ค่า RMSE เป็นเกณฑ์ พิจารณาผลถ้าค่า RSME ต่ำแสดงว่าผลการจำลองใกล้เคียงกับค่าสังเกตจริง แต่ค่า RMSE มีหน่วยตามลักษณะที่วัด จึงยากที่จะตัดสินว่าค่าที่ประเมินได้อยู่ในเกณฑ์ต่ำหรือสูง จึงได้มีการเสนอให้ใช้ค่าสถิติตัวอื่น คือ Agreement index (d) หรือค่า d-statistic ซึ่งค่าสถิติดังกล่าวนี้ สามารถประเมินความความสอดคล้องได้ง่ายขึ้น เนื่องจากค่าสถิติดังกล่าวจะอยู่ระหว่าง 0-1 โดยค่าใกล้เคียงกับ 1 แสดงว่าค่าจากการจำลองใกล้เคียงกับค่าการสังเกตจริงจากแปลงทดลอง สูตรในการคำนวณค่า RMSE และ ค่า d-statistic มีดังต่อไปนี้

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

เมื่อ N คือ จำนวนของค่าสังเกต
Si คือ ค่าที่ได้จากการจำลองของการวัดครั้งที่ i
Oi คือ ค่าที่ได้จากการสังเกตของการวัดครั้งที่ i

2) Agreement index (d) หรือค่า d- statistic

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

เมื่อ Si คือ ค่าที่ได้จากการจำลองของการวัดครั้งที่ i
Oi คือ ค่าที่ได้จากการสังเกตของการวัดครั้งที่ i
Si' คือ Si ลบค่าเฉลี่ยของ S
Oi' คือ Oi ลบค่าเฉลี่ยของ O

6. การประยุกต์ใช้แบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut เพื่อการศึกษาการตอบสนองของถั่วลิสงต่อสภาวะที่แตกต่างกัน

เนื่องจากแบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut สามารถจำลองการตอบสนองของถั่วลิสงได้ดีในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย จึงมีนักวิจัยนำแบบจำลองดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาดังนี้

6.1 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut เพื่อจำลองการตอบสนองของถั่วลิสงต่อ วันปลูก ฤดูปลูกและการให้น้ำ

ทักษิณา (2543) ได้ศึกษาศักยภาพของแบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut ในการจำลองผลผลิตของถั่วลิสงเมื่อกำหนดวันปลูกที่แตกต่างกัน ทำการศึกษาโดยปลูกถั่วลิสงพันธุ์ขอนแก่น 5 ในฤดูแล้ง 2539 ฤดูฝน 2539 และฤดูแล้ง 2540 และทำการจำลองการเจริญเติบโตของถั่วลิสงพันธุ์ดังกล่าวด้วยแบบจำลอง ผลการทดลองพบว่าช่วง 80 วันแรกของฤดูแล้งปี 2539 และฤดูแล้งปี 2540 แบบจำลองสามารถจำลองผลผลิตของน้ำหนักแห้งต้นและใบได้ใกล้เคียงกับค่าสังเกตจริง แต่ในช่วงหลังในสภาพที่ปลูกจริงมีการสูญเสียใบเนื่องจากการร่วงหล่น ในขณะที่แบบจำลองยังคงรักษาระดับของใบเดิมอยู่ ทำให้เกิดความแตกต่างกันมากระหว่างผลที่ได้จากการจำลองและผลที่ได้จากการสังเกตจริง ในส่วนของน้ำหนักเมล็ด แบบจำลองสามารถจำลองได้ใกล้เคียงความจริงมาก แต่ฤดูแล้ง 2540 แบบจำลองจะหยุดการคำนวณเร็วกว่าฤดูแล้ง 2539 ทั้งนี้ผู้ศึกษาให้ข้อเสนอแนะว่า เป็นเพราะอาจมีการป้อนข้อมูลตัวป้อนที่ผิดพลาดไปบ้างทำให้การคำนวณหยุดคำนวณเร็ว ส่วนในฤดูฝน 2539 พบว่าในการทดลองจริงน้ำหนักใบถั่วลิสงลดลงตั้งแต่อายุ 50 วัน เพราะมีการสูญเสียใบเนื่องจากโรคราสนิมและใบจุด ขณะที่ค่าประมาณการณ์จากแบบจำลองยังคงรักษาระดับของน้ำหนักใบจนถึงวันเก็บเกี่ยว อีกทั้งน้ำแห้งหนักต้นจากค่าสังเกตจริงไม่เพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าประมาณการณ์จากแบบจำลองมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักแห้งที่ได้จากแบบจำลองต่างจากค่าที่ได้จากการสังเกตจริงมาก และการสูญเสียใบไปก่อนที่จะมีการพัฒนาฝักนั้นมีผลทำให้น้ำหนักเมล็ดที่ได้จากแปลงทดสอบจริงมีค่าต่ำมาก ในกรณีนี้ค่าจากการประมาณการณ์โดยแบบจำลองให้ผลผลิตเมล็ดได้ต่างจากความจริงค่อนข้างมาก

Singh et al. (1994a) ทำการประเมินแบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut ในการจำลองการตอบสนองของถั่วลิสงพันธุ์ Robut 33-1 ต่อวันปลูก ฤดูปลูก และการให้น้ำที่แตกต่างกัน ซึ่งผลจากการประเมินพบว่าความแตกต่างระหว่างผลจากการจำลองสถานการณ์และจากทดลองจริง สำหรับน้ำหนักแห้งรวม ผลผลิตแห้งฝักและเมล็ด คิดเป็นร้อยละ 15 ของผลที่ได้จากการทดลองจริงและพบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($r = 0.90$) ระหว่างผลผลิตที่ได้จากการจำลองสถานการณ์และผลผลิตที่ได้จากการทดลองจริง

Craufurd et al. (2006) ทำการประเมินความสามารถของแบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut ในการจำลองผลผลิต การติดเชื้อ *Aspergillus flavus* และความชื้นในดินที่เหลืออยู่ ในสภาพการให้น้ำที่แตกต่างกัน โดยศึกษาในถั่วลิสงพันธุ์ JL24 ที่ปลูกภายใต้การให้น้ำที่แตกต่างกัน ได้แก่ ให้น้ำทุก ๆ 7, 14 และ 21 วัน ให้น้ำตลอดอายุปลูกและปลูกภายใต้การอาศัยน้ำฝน ทำการทดลองระหว่างปี 1991-1994 รวมทั้งหมด 40 สภาพแวดล้อม ผลจากการทดลองพบว่า แบบจำลองสามารถให้ค่าจำลองผลการตอบสนองของถั่วลิสงต่อการให้น้ำแบบต่าง ๆ ได้ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการสังเกตจริง สำหรับผลผลิตฝักมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการสังเกตจริงเท่ากับ 0.64 (r = 0.64) ความสัมพันธ์ของการจำลองการติดเชื้อ A. *flavus* กับค่าสังเกตจริงเท่ากับ 0.62 (r = 0.62) และความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจริงกับข้อมูลจากการจำลองสำหรับความชื้นที่เหลืออยู่ในดิน มีค่าความสัมพันธ์เท่ากับ 0.54 (r = 0.54) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (*P<0.01*) ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า แบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut มีความสามารถในการจำลองสิ่งที่เกิดขึ้น ภายใต้การจัดการน้ำระดับต่าง ๆ ที่ต้องการศึกษาได้

6.2 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut เพื่อจำลองหาระยะปลูกและจำนวนประชากรที่เหมาะสม

สำหรับการประเมินศักยภาพของแบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut ในการจำลองการตอบสนองของถั่วลิสงต่อระยะปลูกและจำนวนประชากรที่เหมาะสมนั้น Singh et al. (1994b) ทำการศึกษากับถั่วลิสงพันธุ์ Robut 33-1 โดยทดลองในประเทศอินเดีย ซึ่งมีการจัดการระยะปลูกระหว่างแถว 3 ระยะคือ 20, 30 และ 60 เซนติเมตร และจำนวนประชากรต่อพื้นที่ 3 ระดับ คือ 10, 20 และ 40 ต้นต่อตารางเมตร ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถทำนายวันออกดอก วันสร้างเข็มแรก ฝักแรกและเมล็ดแรกได้ใกล้เคียงจากการปลูกทดสอบในสภาพจริง ค่าความต่างของวันมากที่สุดเท่ากับ 4 วัน และค่าความสัมพันธ์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (r = 0.61)

6.3 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut ในการประเมินความดีเด่นของสายพันธุ์ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

Banterng et al. (2004) ประเมินศักยภาพของแบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut ในการทำนายการแสดงออกของสายพันธุ์ถั่วลิสงภายใต้สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ประเมินโดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองปลูกเปรียบเทียบพันธุ์ภายในถั่วลิสงกลุ่มเมล็ดโต 11 สายพันธุ์กับพันธุ์ตรวจสอบ 1 สายพันธุ์ และกลุ่มเมล็ดเล็ก 11 สายพันธุ์กับพันธุ์ตรวจสอบ 3 สายพันธุ์ ผลการประเมินพบว่า ลำดับที่ของสายพันธุ์เรียงตามผลผลิตเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองจริงและจากการจำลองสถานการณ์ได้ลำดับไม่เหมือนกัน แต่อย่างไรก็ตามในกลุ่มเมล็ดโต 6 สายพันธุ์แรกที่ผลผลิตสูงซึ่งคัดเลือกได้จากการ

ทดลองเป็น 6 สายพันธุ์แรกที่ประเมินได้ด้วยแบบจำลอง ส่วนถั่วลิสงกลุ่มเมล็ดเล็กพบว่าทั้งผลที่ได้จากการทดลองจริงและผลที่ได้จากการจำลองสามารถคัดเลือกได้ 5 สายพันธุ์จาก 7 สายพันธุ์แรกที่ให้ผลผลิตสูงสุด

6.4 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut เพื่อจำลองการตอบสนองของถั่วลิสงในด้านการให้ผลผลิตต่อสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

Kaur and Hundal (1999) ใช้แบบจำลอง PNUTGRO ประเมินพัฒนาการ การเจริญเติบโตและผลผลิตของถั่วลิสงในประเทศอินเดีย พบว่าแบบจำลองให้ค่าจำลองวันออกดอกที่มีความแตกต่างจากข้อมูลที่ทำการสังเกตจริง อยู่ระหว่าง -3 ถึง +3 วัน จำลองวันแทงเข็มโดยมีความแตกต่างจากข้อมูลจริงอยู่ระหว่าง -3 ถึง +2 วัน และให้ค่าจำลองวันสุกแก่เก็บเกี่ยวที่มีความแตกต่างจากข้อมูลที่สังเกตจริงอยู่ระหว่าง -4 ถึง +2 วัน สำหรับลักษณะทางด้านการเจริญเติบโตพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองและข้อมูลที่ได้จากการสังเกตจริงสำหรับดัชนีพื้นที่ใบเท่ากับ 0.86 (R^2=0.86) ผลผลิตฝักแห้ง เท่ากับ 0.89 (R^2=0.89) และ ผลผลิตเมล็ดแห้ง เท่ากับ 0.85 (R^2=0.85) ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าแบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut สามารถจำลองผลผลิตถั่วลิสงภายใต้สภาพดังกล่าวได้ดี

Gilbert et al. (2002) ได้ประเมินแบบจำลอง PNUTGRO ในการจำลองผลผลิตของถั่วลิสงในสภาพไร่ของเกษตรกรในรัฐฟลอริดา จำนวน 15 แปลงในปี 1990 และ 1991 ผลการประเมินพบว่าความถูกต้องของการประมาณผลผลิตของแบบจำลองดังกล่าว ขึ้นอยู่กับสถานที่และปีที่ประเมิน โดยแบบจำลองสามารถจำลองผลผลิตของแปลงและปีที่มีสภาพแวดล้อมเหมาะสมได้ถูกต้องมากกว่าแปลงที่ได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ เช่น โรคและแมลง เป็นต้น ซึ่งนักวิจัยสรุปว่าการปรับปรุงสมการ โดยเพิ่มสมการของความเสียหายที่เกิดจากการเข้าทำลายของโรคและแมลงในแบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut จะช่วยให้แบบจำลองสามารถจำลองผลผลิตในสภาพไร่นาได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

Naab et al. (2004) ใช้แบบจำลอง CROPGRO-Peanut จำลองผลผลิตของถั่วลิสงที่ได้รับปัจจัยจำกัดจากปริมาณน้ำฝน ความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำ การทำลายของโรคและแมลง รวมทั้งการจัดการที่ไม่เหมาะสมในเขต Guinean Savana ของ Ghana พบว่าแบบจำลองนี้สามารถใช้จำลองผลผลิตเมื่อได้รับปัจจัยที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตอย่างเพียงพอ และจำลองผลผลิตที่ลดลงจากข้อจำกัดต่างๆ ในพื้นที่นี้ได้อย่างถูกต้อง

6.5 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut เพื่อวิเคราะห์ช่องว่างของผลผลิตของถั่วลิสง

ปรีชา (2548) ทำการวิเคราะห์ช่องว่างของผลผลิตถั่วลิสง (yield gap) โดยการใช้แบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut เป็นเครื่องมือในการศึกษา โดยศึกษาในพื้นที่ผลิตถั่วลิสง

ของเกษตรกรบ้านหนองแวงเดิดและบ้านเกษตรสมบูรณ์ ตำบลน้ำพ่น อำเภอหนองวัวซอ จังหวัดอุดรธานี ทำการสำรวจพื้นที่เบื้องต้นเพื่อทำความเข้าใจกับระบบการปลูกพืชและวิธีการปฏิบัติของเกษตรกร พบว่า การผลิตถั่วลิสงฤดูแล้ง เป็นการปลูกในที่นาโดยมีการชลประทาน ในดิน 2 ชุด ขณะที่การผลิตถั่วลิสงฤดูฝนปลูกบนที่ดอนโดยอาศัยน้ำฝน ในดิน 3 ชุด แบ่งพื้นที่ปลูกถั่วลิสงเป็น 5 เขตการผลิต ตามความแตกต่างของชุดดินและฤดูปลูก ในแต่ละเขตการผลิต ทำการสุ่มเก็บผลผลิตน้ำหนักแห้งรวมและผลผลิตฝักจำนวน 9 แปลง พื้นที่เก็บเกี่ยว 4 แถว ยาว 4 เมตร จำนวน 4 ซ้ำ ผลผลิตเฉลี่ยจาก 9 แปลง ใช้เป็นผลผลิตของเกษตรกร (actual yield) สำหรับเขตการผลิตนั้น ทำการจำลองการเจริญเติบโตของถั่วลิสง 6 พันธุ์ ใน 9 วันปลูก และ 10 อัตราปลูก โดยใช้ข้อมูลดินและข้อมูลภูมิอากาศที่เก็บในแต่ละพื้นที่ และค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของถั่วลิสงจากการศึกษาอื่นที่ได้หาไว้แล้ว ผลการศึกษาพบว่า ช่องว่างของผลผลิตที่ได้จากแบบจำลองและผลผลิตที่ได้จากแปลงเกษตรกรมีค่าค่อนข้างมาก เฉลี่ย 2489 กก./เฮกตาร์ สำหรับฤดูฝน และ 1357 กก./เฮกตาร์สำหรับฤดูแล้ง และพบว่าในแต่ละเขตการผลิตมีความแตกต่างของผลผลิตระหว่างแปลงเกษตรกรสูง จากการสังเกตแปลงปลูกของเกษตรกร พบว่าสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดช่องว่างของผลผลิตของถั่วลิสงในฤดูแล้งได้แก่การขาดน้ำ ขณะที่การมีน้ำขังเนื่องจากการเตรียมดินไม่ดีเป็นข้อจำกัดที่สำคัญในฤดูฝน การวิเคราะห์ความอ่อนไหวโดยใช้แบบจำลองชี้ให้เห็นว่า การใช้พันธุ์ วันปลูก และอัตราปลูก ที่ไม่เหมาะสม ก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดช่องว่างของผลผลิตในทั้ง 2 ฤดู และทำให้ผลผลิตลดลง 29 % สำหรับฤดูแล้ง และ 21 % สำหรับฤดูฝน

จากการศึกษาถึงความสำคัญของน้ำที่มีผลต่อการตอบสนองของถั่วลิสงในลักษณะต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าในการศึกษาแต่ละกรณีมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก อีกทั้งต้องลงทุนสูงมากสำหรับการศึกษาแต่ละครั้ง ดั้งนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้ทำการศึกษาจึงได้เล็งเห็นถึงความจำเป็นของการนำเครื่องมือช่วยสนับสนุนการตัดสินใจทางการเกษตร ได้แก่ แบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut มาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการศึกษาการตอบสนองของถั่วลิสงด้านการให้ผลผลิตในสภาพขาดน้ำ รวมถึงนำมาใช้เป็นเครื่องมือในศึกษาถึงช่วงระยะการเจริญเติบโตที่จะเกิดการขาดน้ำ ระดับความรุนแรงและความยาวนานของการขาดน้ำในถั่วลิสงสำหรับพื้นที่ผลิตที่สำคัญ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่บ่งชี้ลักษณะการขาดน้ำของถั่วลิสงในแต่ละพื้นที่ว่ามีลักษณะเป็นเช่นใด ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคัดเลือกถั่วลิสงพันธุ์ทนแล้ง การกำหนดวันปลูกที่เหมาะสม รวมถึงการจัดการน้ำสำหรับแต่ละพื้นที่ปลูกให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการศึกษาครั้งนี้จึงถูกกำหนดขึ้นมา 2 วัตถุประสงค์ ได้แก่ 1) เพื่อประเมินศักยภาพของแบบจำลอง CSM-CROPGRO-Peanut ในการจำลองการตอบสนองของถั่วลิสง 7 พันธุ์ ภายใต้สภาวะการได้รับปริมาณน้ำที่แตกต่างกัน 3 ระดับ และ 2) เพื่อประยุกต์ใช้แบบจำลอง CSM-CROGRO-Peanut ในการอธิบายลักษณะเครียดจากการขาดน้ำของถั่วลิสงในพื้นที่ผลิตที่แตกต่างกัน