การจำลองระบบของปัจจัยก่อนเก็บเกี่ยวที่มีผลต่อคุณภาพการสีของข้าว

บทคัดย่อ

การจำลองระบบที่ประเมินคุณภาพการสีข้าวจากปัจจัยก่อนเก็บเกี่ยว ใช้การรวบรวมและเชื่อมโยงข้อมูลและความรู้ที่ได้จากการวิจัยที่เกี่ยวข้อง นำมาสร้างเป็นชุดสมการแบบจำลองที่เขียนโดยใช้โปรแกรม STELLA Research 5.1.1 ที่เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับสร้างแบบจำลองแบบ dynamic simulation ที่มีการกำหนดการเปลี่ยนแปลงตัวแปรเป็นรายวัน ที่ใช้ข้อมูลนำเข้าร่วมกับแบบจำลองการเจริญเติบโตCERES-Rice 3.5 รวมถึงข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้จาก CERES-Rice 3.5 และออกแบบให้สามารถปรับใช้กับพันธุ์ต่างๆ กัน โดยมีสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม

การจำลองระบบประกอบด้วย กระบวนการสองส่วนที่แบ่งโดยระยะสุกแก่ คือ 1) การประมาณคุณภาพการสีตั้งแต่เริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ดจนถึงระยะสุกแก่ โดยการคำนวณเปอร์เซ็นต์ข้าวสาร จากข้อมูลผลลัพธ์จากแบบจำลอง CERES-Rice 3.5 ที่ได้แก่น้ำหนักเมล็ด ระยะเวลาสะสมน้ำหนักเมล็ด และการทำนายเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว จากเปอร์เซ็นต์ข้าวสาร ที่มีโอกาสหักเนื่องจากการเกิดท้องไข่และการร้าวของเมล็ดเนื่องจากจากสภาพภูมิอากาศ ที่ได้แก่อุณหภูมิ และพันธุกรรม โดยเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวขณะสุกแก่ยังกำหนดให้สัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในเมล็ด และระยะเวลาระบายน้ำด้วย และ 2) การประเมินคุณภาพการสีหลังสุกแก่ โดยการประมาณเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวที่ลดลงตามอัตราเร็วการดูดความชื้นของเมล็ด โดยที่สัมพันธ์กับความชื้นเมล็ดที่ลดลงจากการระเหยที่สัมพันธ์กับพลังงานแสงและอุณหภูมิ และการดูดความชื้นที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ และความชื้นตั้งต้นและลักษณะทางพันธุกรรมที่เกี่ยวข้องกับสมดุลความชื้น และสัมพันธ์กับโอกาสของการหักเนื่องจากความเครียดของความชื้น

การทดสอบแบบจำลองคุณภาพการสีที่ผ่านการปรับค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม กับปัจจัยต่าง ๆ กับงานทดลองที่ดำเนินการที่แปลงทดลองมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ระหว่างปี 2540-2542 สามารถประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวสาร และเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว รวมถึงเปอร์เซ็นต์ความชื้นเมล็ด ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาเก็บเกี่ยว ได้สอดคล้องกับค่าจริงเป็นส่วนใหญ่ แสดงความถูกต้องของสมมติฐานสำคัญๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง ความคลาดเคลื่อนของการจำลองเกิดได้จากหลายสาเหตุ ได้แก่ข้อจำกัดและความคลาดเคลื่อนของการจำลอง ของ CERES-Rice3.5 การขาดข้อมูลความสัมพันธ์ที่ชัดเจนขององค์ประกอบที่ทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวลดลงในระยะก่อนสุกแก่ รวมถึงการที่ไม่ได้จำลองสมดุลความชื้นเมล็ดที่เปลี่ยนแปลงภายในรอบวัน

Systems Simulation of Pre-harvest Factors Affecting Rice Milling Quality

ABSTRACT

Systems simulation of the pre-harvest factors affecting rice milling quality started from analyzing information obtained from the relevant research works and using dynamic simulation modeling approach to construct a model predicting rice milling quality based on several factors before harvesting time using STELLA Research 5.1.1. The model was designed to use some output data obtained from simulation of CERES-Rice 3.5, a rice growth simulation model, and needed climatic data with same set of variables as used in CERES-Rice and allow calibration of certain genetic coefficients of milling quality as well.

The model consists of two major systems seperated by maturity stage that are : 1) estimation of percent milled rice from the start of grain filling to maturity based on grain growth data obtained from CERES-Rice simulation results and prediction of percent head rice from the maturity level effect and proportion of defected grains as cracked grain and chalky grain 2) estimation of head rice reduction after maturity due to crack accumulation caused by moisture absorbtion during night time with high RH or when subjected to rain while losing grain moisture through evaporation during daytime.

The model was developed and calibrated for milling quality genetic coefficients with the milling quality data from the 4 rice varieties KDML105, Niew Sanpatong, Chainat-1 and DOA-1(Sasanishiki) with 12 planting date experiments conducted at Chiang Mai 1997-1998.

The model with calibrated coefficients was then validated against the observation data of the nitrogen fertilizer rate experiments, drainage time experiment, and transplant vs pre-germinated seeding with different seeding rate experiment conducted at Chiang Mai during 1999. The simulated pattern of changes of head rice and moisture was agree to the observed data. However, the errors of simulation were explained by the errors of CERES-Rice 3.5 simulated outputs especially under temperature stress condtion, and by the error of determination of head rice by maturity due to chalkiness, immatured grain and cracked grains.. .

คำนำ

คุณภาพการสีของข้าว (rice milling quality) เป็นคุณภาพอย่างหนึ่งที่สำคัญในการกำหนดราคาของผลผลิตข้าว ที่วัดด้วยตัวแปร 2 ตัวคือ เปอร์เซ็นต์ข้าวสาร (percent milled rice) ต่อข้าวเปลือกโดยน้ำหนัก และเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว (percent head rice) ที่หมายถึงเปอร์เซ็นต์ของเมล็ดข้าวสารที่มีความยาวอย่างน้อย 3 ใน 4 ของข้าวสารเต็มเมล็ด (IRRI, 1992) โดยทั่วไปข้าวหักที่ไม่ได้มาตรฐานตามขนาดต้นข้าวจะมีราคาประมาณเพียงครึ่งหนึ่งหรือน้อยกว่าราคาของข้าวเต็มเมล็ดหรือต้นข้าว จากจำนวนข้าวเปลือกที่ประเทศไทยผลิตได้ปีละประมาณ 20-22 ล้านตันนั้น เป็นข้าวที่มีคุณภาพการสีต่ำมากกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ (กรมวิชาการเกษตร, 2539) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้ข้าวเป็นสินค้าที่มีปัญหาทางการตลาดอยู่เทบทุกปี และให้ผลตอบแทนที่ต่ำ กับเกษตรกรผู้ผลิต

ข้าวสาร เป็นส่วน endosperm ที่เหลือจาก การกระเทาะเอาส่วนแกลบ (husk หรือ hull) ออกจากข้าวเปลือก (rough rice) ได้เป็น ข้าวกล้อง (brown rice) หรือส่วน caryopsis ที่มีสัดส่วน 72- 84เปอร์เซ็นต์ (Juliano and Bechtel, 1985; Yoshida, 1981) และการขัดผิวข้าวกล้อง ที่รวมถึง endosperm บางส่วน และ embryo ออกไปเป็นส่วนที่เรียกว่ารำ (bran และ polish) มีประมาณ 7-10 เปอร์เซ็นต์ ของข้าวเปลือก จะได้เมล็ดข้าวสารที่มีผิวเรียบ สีขาว (waxy whtie) ที่มีสัดส่วน 89-94 เปอร์เซ็นต์ ของข้าวกล้อง ประกอบด้วยเม็ดแป้งส่วนใหญ่ (Juliano and Bechtel, 1985)

ปัจจัยที่กำหนดเปอร์เซ็นต์ข้าวสาร คือความสมบูรณ์ อัตราเร็ว และระยะเวลาการสะสมน้ำหนักเมล็ด ที่ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม ที่ได้แก่ อุณหภูมิ และความเข้มแสง (Yoshida and Hara, 1977; Ahmed *et al.*,1990) อาหารในเมล็ดข้าวสารนั้นเกือบทั้งหมดมาจากสารที่สร้างโดยใบ ที่สร้างภายหลังจากออกดอก (Tsunoda and Takahashi, 1984) ซึ่งขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ของการสร้างลำต้นและใบตั้งแต่ระยะเริ่มต้นด้วย (Yoshida, 1981)

เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว สัมพันธ์กับโอกาสแตกหักเมล็ดข้าวสาร มีความสัมพันธ์กับขนาด และรูปร่างของเมล็ด (IRRI, 1992; Juliano and Bechtel., Mattews *et al.* ,1970; Goodman and Rao, 1985) ความเป็นท้องไข่ (chalkiness) หรือลักษณะขุ่นขาวในเมล็ดที่เกิดจากการที่แป้งจับตัวกันไม่แน่นในเอ็นโดสเปิร์ม โดยขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาของพันธุกรรมและสิ่งแวดล้อม (เครือวัลย์ และคณะ 2538; Yoshida and Hara, 1977; Bangwaek, 1994) และการเกิดรอยร้าว(fissure) ของเมล็ดข้าวกล้องจากความเครียดจากความแตกต่างของความชื้นภายในเมล็ดกับความชื้นภายนอก ขณะที่เมล็ดสุกแก่

และความชื้นเมล็ดลดลง (Kunze,1985; ไมตรี 2541) ซึ่งขึ้นอยู่กับพันธุกรรมที่สัมพันธ์กับขนาดและลักษณะการดูดและคายน้ำของเมล็ด

การหักของข้าวที่เกิดจากการเกิดรอยร้าวเนื่องจากความเครียดความชื้นสัมพันธ์กับระยะเวลาเก็บเกี่ยว และระดับความชื้นเมล็ด (Huysmans,1965; Seetanun and De Datta,1973; กิติยาและคณะ ,2539; เครือวัลย์และคณะ, 2528) ซึ่งสัมพันธ์กับกับระดับความไม่สม่ำเสมอการสุกแก่ของเมล็ด (non-uniformity) ที่หมายถึงการที่ประชากรเมล็ดข้าวในแปลงมีระยะพัฒนาการที่ต่างกัน ทำให้ที่เวลาหนึ่งๆ จะมีทั้งข้าวเมล็ดที่ยังอ่อนความชื้นสูง และสะสมน้ำหนักยังไม่เต็มที่ และมีเมล็ดที่สุกแก่ก่อน จะมีความชื้นต่ำ และมีการดูดความชื้นกลับ จนทำให้เกิดรอยร้าว และทำให้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวลดลง (Kunze,1985, Jongkaewwattana *et al.*, 1993, Steffe *et al.*,1980; Siebenmorgen, 1994)

การศึกษาอิทธิพลของปุ๋ยไนโตรเจนต่อเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวพบว่า เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสัมพันธ์เชิงบวกกับระดับปุ๋ยไนโตรเจน (บุญลักษณ์ และคณะ, 2517; Nangju และ De Datta,1970; Seetanun and De Datta ,1973; และ Sajawan *et al.*,1990; Jongkaewwattana,1990) และมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาการระบายน้ำออกจากแปลงก่อนเก็บเกี่ยว (De Datta , 1981; วิวัฒน์ และคณะ, 2531 Jongkaewwattana,1990; Steffe *et al.*, 1980)

หลายงานวิจัยได้สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ (mathematic model) ที่เกี่ยวข้องกับการทำนายเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว โดยส่วนใหญ่เป็นการจำลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลังการเก็บเกี่ยว และเน้นไปในทางใช้หลักการทาง thermodynamics ที่อธิบายความสัมพันธ์ที่เกี่ยวกับความชื้นเมล็ด กับความชื้นอากาศเป็นหลัก และส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองแบบ empirical model ที่ไม่ได้อธิบายกระบวนการเปลี่ยนแปลง และไม่ได้แยกปัจจัยสิ่งแวดล้อมและพันธุกรรมออกจากตัวแบบจำลอง เช่น แบบจำลองทำนายอัตราการหักของเมล็ดข้าวเนื่องจากการดูดความชื้น (Siebenmorgen and Jindal, 1986) หรือแบบจำลองทำนายเปอร์เซ็นต์ข้าวสารและต้นข้าวจากค่าศักยภาพและปริมาณฝน (Lu *et al.*, 1992) หรือแบบจำลองแบบ finite element model ที่จำลองกระบวนการแบบ coupled diffusion ของความร้อนและความชื้นเมล็ดที่ทำให้เกิดการขยายและการหดตัวภายในเมล็ดโดย Lague and Jenkins (1991) หรือการจำลองความชื้นเมล็ดหลังสุกแก่ที่ใช้หลักสมดุลย์พลังงาน Penman-Monteith equation (Monteith and Unsworth, 1991) ที่เสนอ Real *et al.* (1997)

เนื่องจากคุณภาพการสี เป็นผลจากกระบวนการและอิทธิพลของปัจจัยก่อนเก็บเกี่ยวจำนวนมาก ที่สัมพันธ์กับทั้งกระบวนการทางสรีรวิทยาของพืชและทางกลศาสตร์ ตั้งแต่ระยะก่อนเก็บเกี่ยว งานวิจัยนี้จึงได้ใช้แนวทางเชิงระบบ (systems approach) ที่เป็นวิธีศึกษาการรวมกลุ่มขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่ทำงานร่วมกันเพื่อวัตถุประสงค์เดียวกัน (Forrester, 1972) โดยการสร้างแบบ

จำลองที่อธิบายกระบวนการของปัจจัยต่างๆ ที่ร่วมกันกำหนดคุณภาพการสี เพื่อทำนายคุณภาพการสี ทั้งที่เป็นเปอร์เซ็นต์ข้าวสารและเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว จากปัจจัยก่อนเก็บเกี่ยว ด้วยโปรแกรม STELLA Research 5.1.1 (High Performance Systems, Inc., 1997a) ที่เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับสร้างแบบจำลองแบบ dynamic simulationโดยการรวบรวมทฤษฎี สมมติฐาน และความรู้ที่เกี่ยวข้อง สร้างเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อจำลองการทำงานและทำนายปรากฏการณ์ของระบบ และใช้ชุดสมการการจำลองแบบ Mechanistic Model ที่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงระดับตัวแปรในระบบในแต่ละเวลา (France. and Thornley, 1984) และอาศัยแนวคิดการจัดทำแบบจำลอง CERES ในการสร้างแบบจำลองให้ใช้ได้กับข้อมูลพื้นฐานที่มีอยู่จำกัด (minimum data set) และ ความเป็นสากล (global implication) คือตัวแบบจำลองเป็นอิสระจาก สถานที่ เวลา และระบบการจัดการ (Jone *et al.*, 1998) และออกแบบให้ใช้ข้อมูลนำเข้าบางส่วนจากผลลัพธ์การจำลองจากแบบจำลอง CERES-Rice 3.5 ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีรายละเอียดครอบคลุมปัจจัยต่างๆ มาก และเป็นแบบจำลองผลผลิตข้าวที่ปรับใช้ได้กับพันธุ์ข้าวต่าง ๆ ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลายทั้งทั้งสภาพชลประทานและอาศัยน้ำฝน (Singh *et al.*, 1998)

การศึกษาเชิงระบบกับปัจจัยก่อนเก็บเกี่ยวต่อคุณภาพการสีด้วยการพัฒนาและสร้างแบบจำลองทำนายคุณภาพการสี จะสามารถเพิ่มความเข้าใจกระบวนการกำหนดคุณภาพการสีได้ดีขึ้น เป็นการทดสอบและศึกษาทฤษฎีและสมมติฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง และเป็นแนวทางพัฒนางานวิจัยและการจัดการที่เกี่ยวกับการพัฒนาคุณภาพการสีข้าว โดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจในระบบการปลูกข้าว และการลำดับความสำคัญของการแก้ปัญหาของคุณภาพการสีของข้าวที่ในสภาพเงื่อนไขปัจจัยการผลิตรูปแบบต่าง ๆ และน่าจะเป็นแนวทางพัฒนาระบบที่เชื่อมโยงการปลูก การจัดการหลังการเก็บเกี่ยว และการตลาดของข้าว อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีการสร้างแบบจำลองคุณภาพการสี

โครงสร้างและกรอบของการสร้างแบบจำลองคุณภาพการสี

แบบจำลองคุณภาพการสี อยู่ภายใต้โครงสร้างหลักที่ออกแบบให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์การจำลอง คือ การใช้ข้อมูลระยะพัฒนาการ การสะสมน้ำหนักเมล็ด และเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนที่ได้จากการจำลองการปลูกด้วยแบบจำลอง CERES-Rice 3.5 ใน DSSAT 3.5 และการใช้ข้อมูลนำเข้าภูมิอากาศตัวแปรเดียวกันกับที่ใช้ใน CERES-Rice 3.5 และกำหนดให้มีค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม (genetic coefficients) หลายค่า ที่ควบคุมคุณภาพการสี ทำนองเดียวกับที่ใช้ใน CERES-Rice 3.5 (Jones *et al.*, 1998) (ภาพ 1)

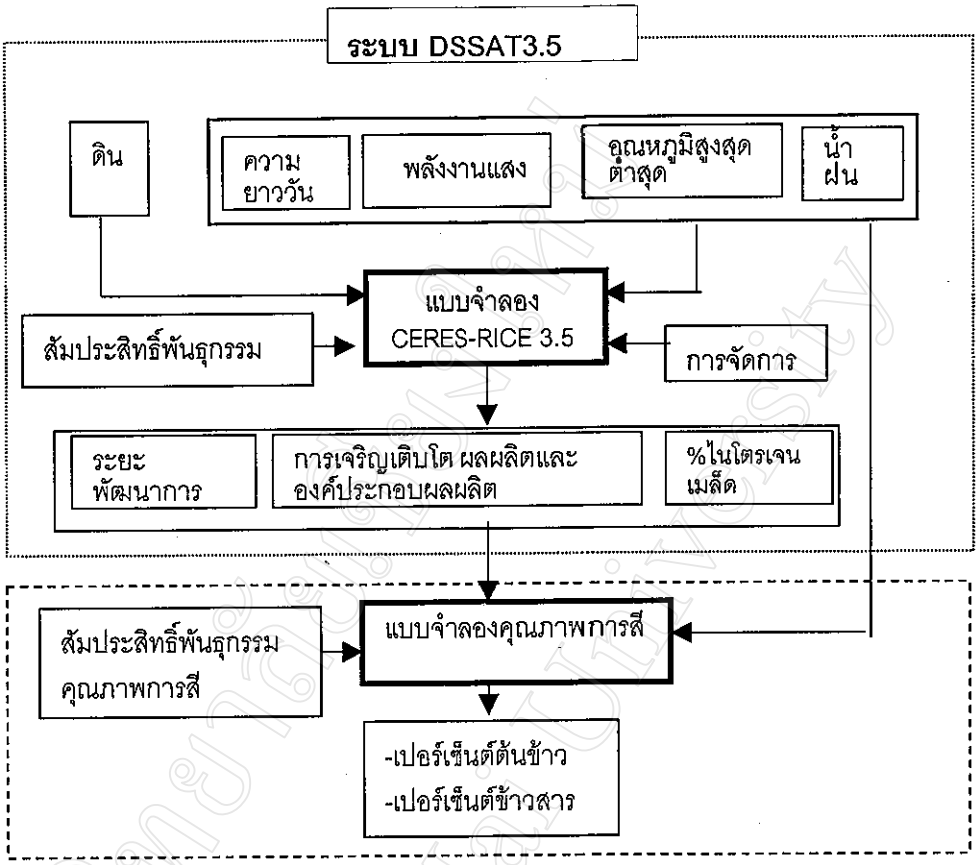
ขั้นตอนการสร้างและพัฒนาแบบจำลอง

ขั้นตอนการสร้างและพัฒนาแบบจำลองคุณภาพการสี ดำเนินการตามขั้นตอนหลักของการสร้างแบบจำลอง 2 ขั้นตอน ที่เสนอโดย Dent and Blackie (1979) และ Richarson and Pugh III (1981) คือ 1) การสร้างแบบจำลองที่ประกอบด้วย การกำหนดวัตถุประสงค์ เตรียมข้อมูล สมมติฐานและกรอบที่สนใจ การสร้างแบบจำลอง และ 2) การทดสอบความถูกต้องและใช้ได้ (model validation) หรือ การประเมิน (evaluation) รวมถึงการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (sensitivity analysis)

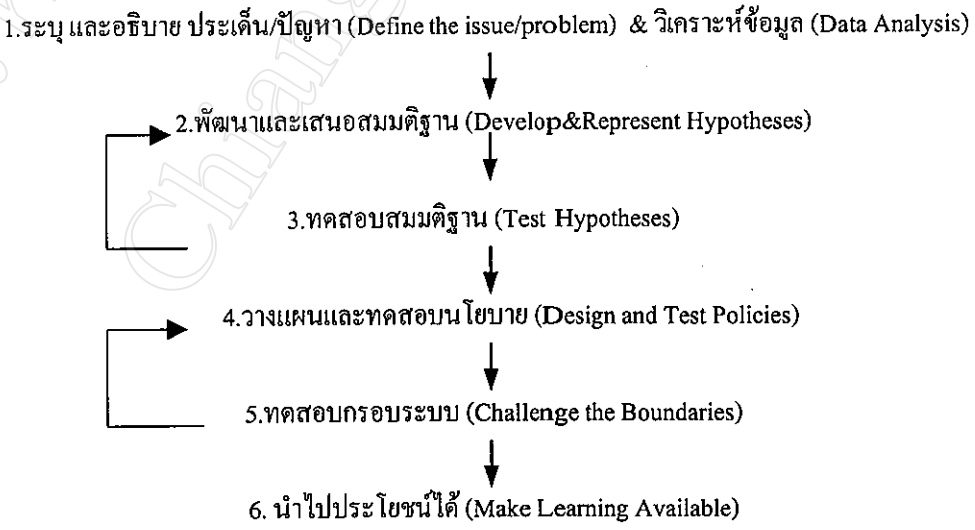
การศึกษาครั้งนี้อาศัยวิธีการรายละเอียดตามวิธีการที่เสนอสำหรับการสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรม STELLA Research 5.1.1 (High Performance Systems, 1997 b) ดังนี้ (ภาพ 2)

1) การกำหนดประเด็น ปัญหา (problem /issue identification) กำหนดว่าจะจำลองอะไรและเพื่อแก้ปัญหาอะไรอย่างชัดเจน เป็นการสร้างความเข้าใจวัตถุประสงค์เรื่องที่จะจำลองและแปลวัตถุประสงค์เป็นรูปแบบของพฤติกรรมอ้างอิง (reference behaviour pattern) ที่เป็นภาพการเปลี่ยนแปลงสิ่งที่สนใจ และรวมถึงการกำหนดกรอบของระบบ (system boundary) ที่ได้แก่ กำหนดชนิดและระดับปัจจัยต่างๆ ที่เลือกมาศึกษาในเบื้องต้น ซึ่งในที่นี้เป็นใช้ผลการวิเคราะห์ภาพรวมอิทธิพลของปัจจัยก่อนเก็บเกี่ยว ต่อคุณภาพการสีที่เสนอใน จิรวัฒน์ (2544 ค) เป็นหลัก ร่วมกับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยสิ่งแวดล้อมและพันธุกรรมกับกระบวนการที่กำหนดเปอร์เซ็นต์ข้าวสารและเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวก่อนสุกแก่ และหลังสุกแก่

2) การสร้างและนำเสนอสมมติฐาน (development and representation of hypotheses) หมายถึงนำผลการวิเคราะห์ข้อมูลมานำเสนอด้วยสมมติฐานสร้างแบบจำลองที่ทำงานได้ (simulatable) โดยประกอบด้วยโครงสร้างหลักคือ feedback structure และอาจมีส่วนที่จำลอง subsystems structure ภายในระบบหลักด้วย (Forrester, 1972)



ภาพ 1 โครงสร้างหลักในการวางแผนสร้างแบบจำลองคุณภาพการสีที่เชื่อมโยงกับ CERES-Rice



ภาพ 2 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองด้วย STELLA Research 5.1.1 (High Performance Systems, 1997b)

วิธีการในขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง และนำเสนอสมมติฐานในงานวิจัยนี้ อาศัยหลักการใช้ข้อมูลที่จำเป็นต้องมี (minimum data set) แบบที่ใช้ในระบบ DSSAT (Jones *et al.,* 1998) และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ตามสมมติฐานหรือข้อสรุปที่ได้จากงานทดลอง หรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แล้วจึงกำหนดและแยกชนิดของตัวแปร ในระบบ เป็นไปตามหลักการและเทคนิคที่เสนอโดย Forrester (1972) และ โดยโปรแกรม STELLA Research 5.1.1 (High Performance Systems, 1997 b) ที่ประกอบด้วย ตัวแปรสามประเภท คือ 1) level variable หรือ state variable ที่เป็นตัวแปรที่มีระดับการสะสมที่ระยะเวลาหนึ่ง ๆ (t) ที่เป็นผลรวมของการไหลของข้อมูลที่เป็นปริมาณ 2) rate variable ที่เป็นอัตราการเพิ่มหรือลดการสะสมของ level variable ต่อระยะเวลา (dt) และ 3) auxiliary variable เป็นตัวแปรขยายที่เกี่ยวข้องกับ rate variable และ level variable ที่มีความสัมพันธ์หลัก ดังตัวอย่างสมการต่อไปนี้

level variable A (t) = level variableA (t - dt) + (rate variableA) * dt (1)

rate variableA = F(level variableA, rate varialbleB, auxiliary varialble A,...) (2)

auxiliary variable A = F(auxiliary variable B,, และ/หรือ level variable B,C...) (3)

และยังมีตัวแปรนำเข้าที่กำหนดโดยผู้ใช้ หรือตัวแปรสัมประสิทธิ์ ที่ใช้สัญลักษณ์แบบเดียวกับ auxiliary variable ได้แก่ข้อมูลภูมิอากาศ ข้อมูลการเจริญเติบโตของเมล็ดที่ได้จาก CERES-Rice 3.5 หรือสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมที่เกี่ยวกับคุณภาพการสี

3) ทดสอบสมมติฐาน (testing hypotheses) ที่ประกอบด้วย การทดสอบความผิดพลาดทางการคำนวณ หรือทางตรรก (mechanical mistake test) การทดสอบความแข็งแกร่ง (robustness test) เมื่อจำลองด้วยสถานการณ์ที่เบี่ยงเบนไปมาก ๆ และ การทดสอบรูปแบบพฤติกรรมอ้างอิง (reference behaviour pattern test) หรือความสามารถที่จะจำลองให้ได้รูปแบบพฤติกรรมตอบสนองที่ตั้งไว้ ซึ่งผลการทดสอบในข้อนี้ย้อนกับไปพัฒนาการสร้างและนำเสนอสมมติฐาน ในข้อ 2)

4) วางแผนและทดสอบนโยบาย (policy design and test) ซึ่งประกอบด้วยการทดสอบความถูกต้องของทฤษฎีหรือนโยบาย (policy/theory test) โดยการใช้แบบจำลอง และการทดสอบความอ่อนไหว (sensitivity and scenario test) เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องในการอธิบายบทบาทของตัวแปรต่างๆ ของแบบจำลอง

5) ทดสอบกรอบของแบบจำลอง (challenging the boudaries) โดยที่กรอบนั้นประกอบด้วย extensive boudary คือกรอบที่บอกว่ามีการครอบคลุมได้กว้างแค่ไหน และ intensive boudary ที่กำหนดว่าสิ่งที่กำหนดไว้ในแบบจำลองนั้นเป็นตัวแทนได้ดีพอแค่ไหน และจากขั้นตอนนี้มีกระบวนการย้อนกลับเพื่อไปปรับปรุงขั้นตอนวางแผนและทดสอบนโยบายใหม่

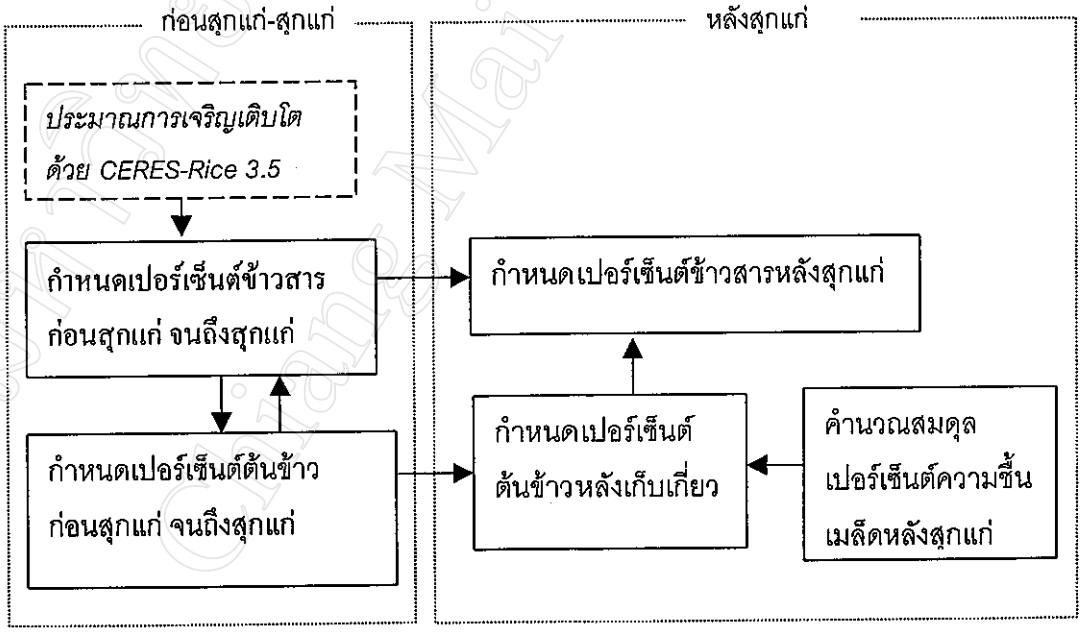
ในงานวิจัยนี้ ขั้นตอนการทดสอบและพัฒนาแบบจำลองตั้งแต่ 3 ถึง 5 คือขั้นตอนการประเมินหาค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรม ที่เหมาะสม และปรับใช้ผลการจำลองให้สอดคล้องกับค่าที่วัดได้จริงของการทดลอง 12 วันปลูกของข้าว 4 พันธุ์ (จิรวัฒน์ 2544 ก และ ค) เพื่อนำผลจากการจำลองเป็นข้อมูลนำเข้าส่วนหนึ่งของแบบจำลองคุณภาพการสี และจำลองระบบคุณภาพการสีนั้นพร้อมๆ กับปรับค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม เพื่อให้ได้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าทีวัดได้จริง และนำแบบจำลองนี้มาทดสอบกับข้อมูลการทดลองอื่น ที่ได้แก่ การทดสอบอัตราปุ๋ยไนโตรเจนและสภาพการให้น้ำ การทดลองเปรียบเทียบวิธีการปลูกข้าวแบบปักดำกับแบบหว่านน้ำตมที่อัตราเมล็ดพันธุ์ต่างๆ และการทดสอบอิทธิพลของระยะเวลาระบายน้ำ (จิรวัฒน์ 2544 ข และ ค) เพื่อปรับปรุงและทดสอบเพื่อหาข้อคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

แบบจำลองคุณภาพการสี

1. กระบวนการหลักของการจำลอง

จากโครงสร้างตามวัตถุประสงค์แบบจำลองคุณภาพการสี (ภาพ 1) และผลการสร้างและพัฒนาแบบจำลอง ได้สรุปกระบวนการหลักของการจำลองเพื่อทำนายคุณภาพการสี (ภาพ 3) ที่เริ่มจากการจำลองการเจริญเติบโตด้วย CERES-Rice 3.5 (Singh *et al.*, 1988) แล้วนำผลลัพธ์ใช้ในกระบวนการที่กำหนดเปอร์เซ็นต์ข้าวสารก่อนสุกแก่ จากเปอร์เซ็นต์ข้าวสารก่อนสุกแก่กำหนดเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวจากเปอร์เซ็นต์ข้าวสารแต่ละวัน จากค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวที่ระยะสุกแก่ เป็นข้อมูลนำเข้ากระบวนการทำนายเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวที่เกิดจากหักของข้าวหลังสุกแก่ จากเงื่อนไขความเครียดของสมดุลความชื้นเมล็ดที่จำลองโดยกระบวนการเปลี่ยนแปลงความชื้นเมล็ด และจากอัตราการลดลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวแต่ละวันหลังสุกแก่ กำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวสารหลังสุกแก่ที่ลดลงจากเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวที่ระยะสุกแก่



ภาพ 3 โครงสร้างของกระบวนการหลักของแบบจำลองคุณภาพการสี

2. สมการที่ใช้ในแบบจำลอง

ผลจากการสร้างสมการจำลองแต่ละขั้นตอนหลักโดยกำหนดรายละเอียดเป็นสมการความสัมพันธ์จาก ข้อมูล หรือสมมติฐาน (hypothesis) หรือที่เป็นข้อสมมติ (assumption) ของความ

สัมพันธ์และเงื่อนไขของตัวแปรต่างๆ จากงานทดลองและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยยึดข้อจำกัดของข้อมูลพื้นฐานที่มีอยู่ คือข้อมูลที่ได้จาก CERES-Rice 3.5 สร้างเป็นแบบจำลองคุณภาพการสีด้วยโปรแกรมสร้างแบบจำลอง STELLA Research 5.1.1 (High Performance Systems, 1997 a) ที่มีช่วงเวลาการคำนวณ (time step) ค่าของแต่ละตัวแปรเท่ากับ 1 วัน เช่นเดียวกับ CERES-Rice 3.5 โดยแบบจำลองคุณภาพการสีนี้ ประกอบด้วยไฟล์ 2 ไฟล์ที่อิสระจากกัน ได้แก่ 1)ไฟล์การจำลองการกำหนดคุณภาพการสีก่อนระยะสุกแก่จนถึงสุกแก่ (ภาพ 4) และ 2)ไฟล์การจำลองการกำหนดคุณภาพการสีหลังระยะสุกแก่ (ภาพ 5) โดยมีรายละเอียดของสมการแบบจำลอง ที่ผ่านการทดสอบและปรับปรุงตามที่เสนอในวิธีการสร้างแบบจำลอง STELLA Research แล้ว ดังนี้

2.1 คุณภาพการสีก่อนเก็บเกี่ยว

2.1 1 เปอร์เซ็นต์ข้าวสารก่อนสุกแก่

การจำลองคุณภาพการสีระยะนี้เริ่มการจำลองที่ระยะเริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ด และสิ้นสุดเมื่อถึงระยะสุกแก่ ที่กำหนดโดยผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วย CERES-Rice 3.5 (ที่จำลองตั้งแต่ปลูก)

เปอร์เซ็นต์ข้าวสาร (percent_milled_rice) กำหนดให้เป็น auxiliary variable ที่หาได้จากน้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือกแต่ละวัน (grain_weight) กับน้ำหนักแกลบ (husk_weight) และน้ำหนักรำ (bran_weight) แต่ละวัน โดยที่

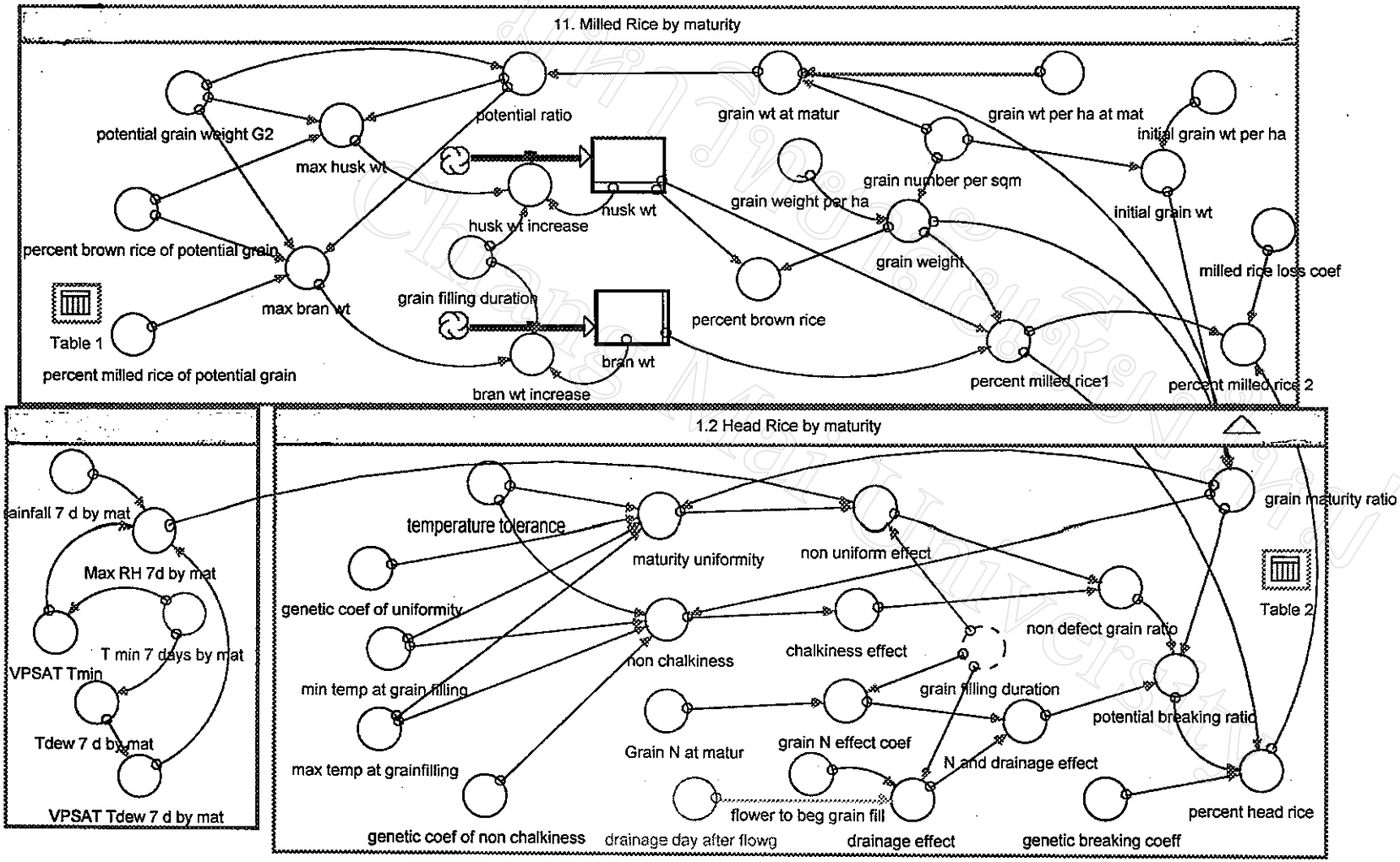
percent_milled_rice = (grain_weight-husk_weight-bran_weight)/grain_weight*100 (4)

โดยที่ grain_weight คือน้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าวเปลือก 100 เมล็ด (กรัม) ที่สะสมแต่ละวันจนถึงสุกแก่ หาได้จากน้ำหนักเมล็ดที่มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อเฮกตาร์แต่ละวัน และจำนวนเมล็ดต่อตารางเมตร จากการจำลองด้วย CERES-Rice 3.5 ที่บันทึกในไฟล์ GROWTH.OUT

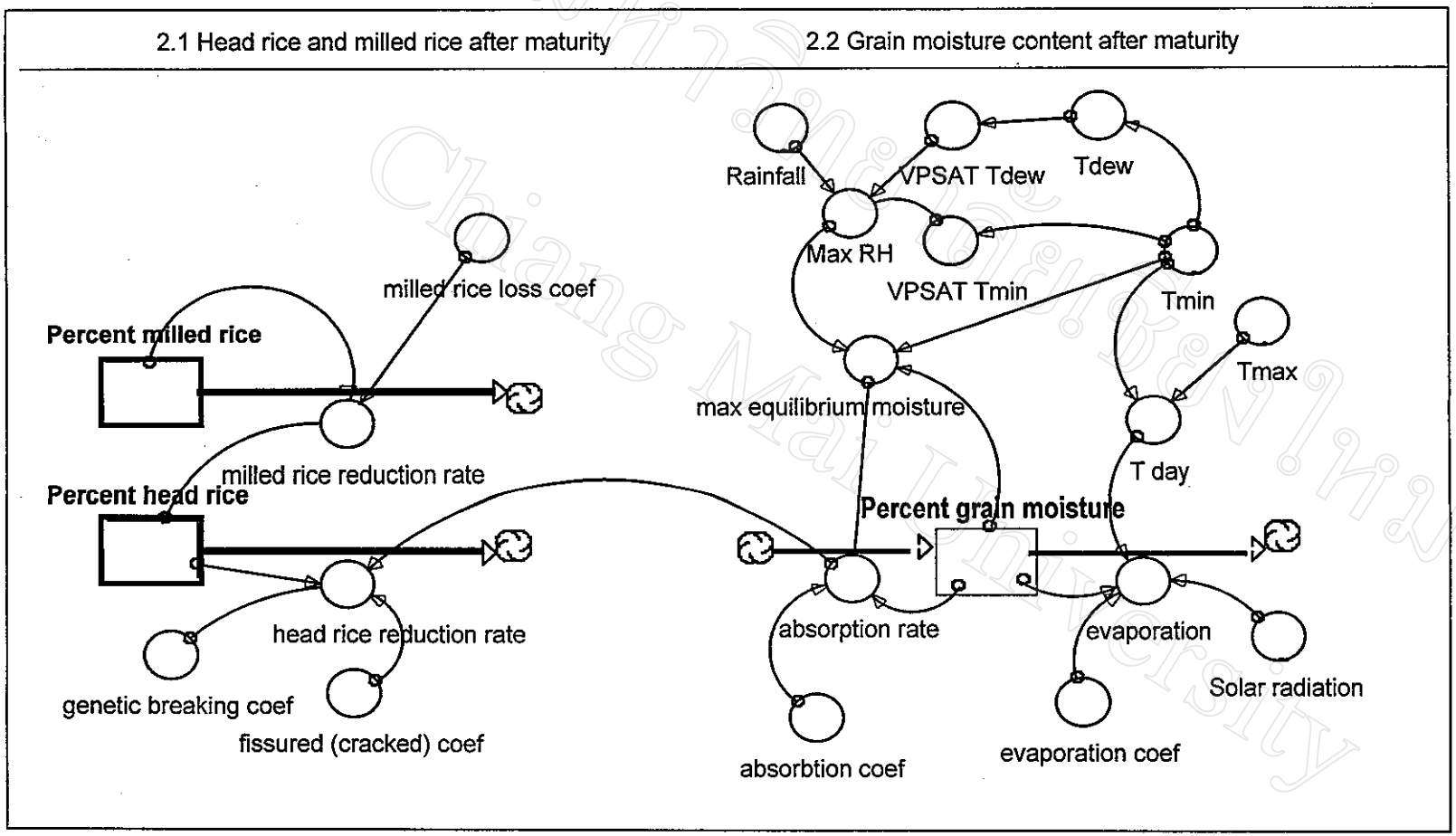
น้ำหนักแกลบ (husk_weight) กำหนดให้เป็น level variable โดยน้ำหนักแกลบ ที่วันที่ t ขึ้นอยู่กับ น้ำหนักแกลบในวันที่ t-1 และอัตราการเพิ่มน้ำหนักแกลบ (husk_wt_increase) :

husk_weight(t) = husk_weight(t - dt) + (husk_wt_increase) * dt (5)

โดยอัตราการเพิ่มน้ำหนักแกลบ (husk_wt_increase) กำหนดให้ขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างน้ำหนักแกลบกับค่าน้ำหนักแกลบสูงสุดในสภาพการปลูกที่กำหนดจะมีได้ (max_husk_weight) และระยะเวลาสะสมน้ำหนักแกลบ (grain_filling_duration) หารด้วยสอง เนื่องจากอัตราการสะสมน้ำหนักแกลบเร็วกว่าน้ำหนักรวมของทั้งเมล็ดประมาณสองเท่า (Seo and



ภาพ 4 แผนภาพแบบจำลองคุณภาพการสีก่อนสุกแก่จนถึงสุกแก่ ที่เขียนด้วย STELLA Research 5.1.1



ภาพ 5 แผนภาพแบบจำลองคุณภาพการสีหลังสุกแก่ ที่เขียนด้วย STELLA Research 5.1.1

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

Ota, 1981) โดย grain_filling_duration ได้จากการจำลองด้วย CERES-Rice ในไฟล์ OVERVIEW.OUT

husk_wt_increase = (max_husk_weight-husk_weight)/((grain_filling_duration)/2) (6)

โดยค่าน้ำหนักแกลบสูงสุด (max_husk_weight) ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์พันธุกรรมที่เป็นค่าศักยภาพน้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือก (potential_grain_weight) หรือเท่ากับค่า G2 ที่เป็นสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของ CERES-Rice 3.5 และค่าศักยภาพของเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้อง (potential_percent_brown_rice) ที่หาได้จากข้อมูลเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องสูงสุดของพันธุ์นั้นๆ จากการทดลอง และอัตราส่วนความสมบูรณ์ของการเจริญ (potential_ratio) ที่วัดจากน้ำหนักเมล็ด 100 เมล็ดสูงสุดที่ได้จากการจำลองด้วย CERES-Rice หารด้วยศักยภาพน้ำหนัก 100 เมล็ด ของพันธุ์นั้นๆ

max_husk_weight = (potential_grain_weight_G2-
(potential_percent_brown_rice/100*potential_grain_weight_G2))
*potential_ratio (7)

โดยอัตราส่วนของศักยภาพ (potential_ratio) แสดงถึงระดับของความสมบูรณ์ของเมล็ดที่จำลองได้กับค่าศักยภาพของพันธุ์

potential_ratio = grain_wt_at_matur/potential_grain_weight_G2 (8)

น้ำหนักตั้งต้นของแกลบ (INIT husk_wt) กำหนดให้เท่ากับน้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือกตั้งต้นตั้งแต่เริ่มสะสมน้ำหนัก (initial_grain_wt) (Seo and Ota1981 ; Juliano and Bechtel, 1985) ที่หาได้จาก GROTWH.OUT แต่กำหนดไว้ว่าไม่เกินน้ำหนักแกลบสูงสุด (max_husk_wt)

INIT husk_wt = min(initial_grain_wt, max_husk_wt) (9)

น้ำหนักของรำ (bran_weight) หรือ ส่วนผิวข้าวกล้องที่จะกลายเป็นรำ ก็ทำนายได้ทำนองเดียวกับการทำนายน้ำหนักแกลบ

bran_weight(t) = bran_weight(t - dt) + (bran_wt_increase) * dt (10)

โดยที่

bran_wt_increase = (max_bran_weight- bran_weight)/(grain_filling_duration) (11)

และ น้ำหนักรำสูงสุด (max_bran_weight) ในสภาพการปลูกที่กำหนดขึ้นอยู่กับทั้งค่าสัมประสิทธิ์ศักยภาพเปอร์เซ็นต์ข้าวสาร (potential_percent_milled_rice) และ ค่าศักยภาพเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้อง (potential_percent_brown_rice)

max_bran_weight = (potential_percent_brown_rice-
potential_percent_milled_rice)/100*potential_grain_weight_G2*potential_ratio (12)

น้ำหนักรำที่เริ่มต้น (INIT bran_weight) เท่ากับน้ำหนักข้าวเปลือกตั้งต้นหักออกด้วยน้ำหนักแกลบ แต่ไม่เกินน้ำหนักรำสูงสุด ซึ่งมีค่าได้ตั้งแต่ 0 จนถึงน้ำหนักรำสูงสุด

INIT bran_weight = min(initial_grain_wt-husk_wt, max_bran_wt) (13)

น้ำหนักข้าวเปลือกแต่ละวันได้จากการจำลองด้วย CERES-Rice 3.5 ที่ได้จากผลลัพธ์น้ำหนักเมล็ดต่อตารางเมตร และจำนวนเมล็ดต่อตารางเมตร ในไฟล์ GROWTH.OUT และดัดแปลงหน่วยให้เป็นน้ำหนักที่เป็นกรัมต่อ 100 เมล็ด และเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวที่ได้นี้กำหนดให้เป็น percent_milled_rice_1 จากค่าน้ำหนักแกลบและน้ำหนักรำแต่ละวันแล้ว เปอร์เซ็นต์ข้าวสารวันหนึ่งๆ โดย

percent_milled_rice_1 = (grain_weight-husk_weight-bran_weight)/grain_weight*100
(14)

ซึ่งเปอร์เซ็นต์ข้าวสารที่ได้นี้อาจจะลดลงได้เป็น percent_milled_rice_2 โดยขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวก่อนสุกแก่ที่ทำนายได้ (percent_head_rice) ในหัวข้อต่อไป (2.1.2) เนื่องจากเมื่อมีเมล็ดข้าวหัก จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับการขัดสีหน้าตัดตรงรอยหักด้วย ทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวสารลดลงได้ ซึ่งกำหนดให้การลดลงนี้ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์พันธุกรรม milled_rice_loss_coef ด้วย โดย

percent_milled_rice_2 = percent_milled_rice1-
((percent_milled_rice1-percent_head_rice)*milled_rice_loss_coef)
(15)

2.1.2 เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวก่อนสุกแก่

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบที่กำหนดเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว (percent_head_rice) ก่อนการสุกแก่ แสดงด้วยการหักออกจากเปอร์เซ็นต์ข้าวสาร (percent_milled_rice) จากสัดส่วนการแตกหักเนื่อง

จากสัดส่วนเมล็ดที่มีลักษณะที่มีโอกาสแตกมาก (potential_breaking_ratio) กับสัมประสิทธิ์การแตกหักของแต่ละพันธุ์ (genetic_breaking_coef)

```
percent_head_rice = (percent_milled_rice1-
                    (potential_breaking_ratio*percent_milled_rice1*
                    genetic_breaking_coef))                    (16)
```

สัดส่วนข้าวสารที่มีโอกาสแตกหักสูง (potential_breaking_ratio) ขึ้นอยู่ค่าระหว่างเมล็ดที่ไม่มีความบกพร่องเนื่องจากเป็นท้องไข่หรือมีรอยร้าว (non_defect_grain_ratio) กับระดับความแก่ของเมล็ด (grain_maturity_ratio) (จิรวัฒน์, 2544 ค) ว่าตัวแปรไหนเป็นอยู่ในระดับที่เป็นข้อจำกัดมากกว่ากัน ตามกฎ law of minimum และ ปรับด้วยสัมประสิทธิ์อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์ในโตรเจนในเมล็ดและระยะเวลาการระบายน้ำ (N_and_drainage_effect) ที่มีผลร่วมกันในการเพิ่มหรือลดโอกาสแตกหักร่วมกับอิทธิพลของท้องไข่และเมล็ดร้าว (จิรวัฒน์, 2544 ค; Jongkaewwattana, 1990)

```
potential_breaking_ratio = 1-(min(non_defect_grain_ratio,
                            grain_maturity_ratio)*N_and_drainage_effect)   (17)
```

ระดับการสุกแก่ (grain_maturity_ratio) กำหนดจากน้ำหนักเมล็ดขณะนั้น(grain_weight) กับน้ำหนักเมล็ดตั้งต้น (initial_grain_wt) และน้ำหนักเมล็ดตอนสุกแก่ (grain_wt_at_matur) :

```
grain_maturity_ratio = (grain_weight-initial_grain_wt)/
                       (grain_wt_at_matur-initial_grain_wt)            (18)
```

สัดส่วนเมล็ดที่ไม่ผิดปกติ (non_defect_grain_ratio) ได้จากการสัดส่วนของเมล็ดที่ไม่เป็นเมล็ดที่เป็นท้องไข่ (chalkiness_effect) และที่ไม่เป็นเมล็ดร้าวที่สมมติฐานว่าเป็นเมล็ดที่สุกแก่ก่อนเนื่องจากผลของความไม่สม่ำเสอม (non_uniform_effect) โดยค่าต่ำสุดคือ 0

```
non_defect_grain_ratio = max((1-chalkiness_effect-non_uniform_effect),0)   (19)
```

ผลของการเป็นท้องไข่ (chalkiness_effect) คือข้าวทั้งหมดหักด้วยส่วนที่ไม่เป็นท้องไข่ non_chalkiness

chalkiness_effect = (1-non_chalkiness) (20)

ซึ่ง ส่วนที่ไม่เป็นท้องไข่ (non_chalkiness) กำหนดให้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขอุณหภูมิสูงสุดหรือต่ำสุดระยะสะสมน้ำหนักเมล็ด (จิรวัฒน์, 2544 ค) โดยปกติ non_chalkiness จะเท่ากับสัมประสิทธิ์การไม่เป็นท้องไข่ (genetic_coef_of_non_chalkiness) แต่ถ้า อุณหภูมิสูงสุดมากกว่า 35 °C หรืออุณหภูมิต่ำสุดน้อยกว่า 18 °C ค่า ส่วนที่ไม่เป็นท้องไข่จะลดลงเหลือเท่ากับ

genetic_coef_of_non_chalkiness*0.8 (21)

ซึ่งระดับ อุณหภูมิสูงสุดหรือต่ำสุดนี้ อาจปรับลงหรือเพิ่มได้โดย สัมประสิทธิ์ความทนอุณหภูมิหรือ (temperature_tolerance) ทำนองเดียวกับที่ใช้ใน CERES-Rice 3.5 (จิรวัฒน์ 2544 ก)

non_chalkiness = if(max_temp_at_grainfilling>35/temperature_tolerance)or
(min_temp_at_grain_filling<18/temperature_tolerance)then
(genetic_coef_of_non_chalkiness*grain_maturity_ratio*0.8)else
((genetic_coef_of_non_chalkiness)*(grain_maturity_ratio)) (22)

ขณะที่ผลของความไม่สม่ำเสมอ (non_uniform_effect) จะขึ้นอยู่กับระดับความไม่สม่ำเสมอและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนสุกแก่ 7 วัน Max_RH_7d_by_mat

non_uniform_effect = if(Time=grain_filling_duration)
then (if(Max_RH_7d_by_mat>90)
then(1- (maturity_uniformity*0.95))
else(1- maturity_uniformity))
else((1-maturity_uniformity)) (23)

ค่าความชื้นสัมพัทธ์ Max_RH_7d_by_mat คำนวณจาก อุณหภูมิต่ำสุด 7 วันก่อนสุกแก่ T_min_7_days_by_mat โดยดัดแปลงจากสมการที่ใช้ในแบบจำลอง CERES-Rice 3.5 (Singh *et al.*, 1998) ดังนี้

Max_RH_7d_by_mat = (VPSAT_Tdew_7_d_by_mat/VPSAT_Tmin*100) (24)

โดยที่

VPSAT_Tdew_7_d_by_mat = 610.78*EXP(17.269*Tdew_7_d_by_mat/
(Tdew_7_d_by_mat+237.3)) (25)

VPSAT_Tmin = 610.78*EXP(17.269*T_min_7_days_by_mat/
(T_min_7_days_by_mat+237.30)) (26)

Tdew_7_d_by_mat = T_min_7_days_by_mat-2 (27)

โดยที่กำหนดเงื่อนไขว่า ถ้ามีปริมาณฝนที่ตกภายใน 7 วันก่อนสุกแก่ (rainfall_7_d_by_mat) มากกว่า 2 มม. ก็ให้ RH = 100เปอร์เซ็นต์ ทำนองเดียวผลการศึกษาโดย Siebenmorgen and Jindal (1986) และ Lu *et al.* (1992)

ความสม่ำเสมอการสุกแก่ (maturity_uniformity) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดช่วงสะสมน้ำหนักเมล็ด (จิรวัฒน์ 2544 ก และค) และสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของความสม่ำเสมอ (genetic_coef_of_uniformity) ทำนองเดียวกับท้องไข่

maturity_uniformity =
(if(max_temp_at_grainfilling>35/temperature_tolerance)
or(min_temp_at_grain_filling<18/temperature_tolerance)
then(genetic_coef_of_uniformity*.8)
else(genetic_coef_of_uniformity))*grain_maturity_ratio (28)

ผลกระทบของไนโตรเจนและการระบายน้ำ (N_and_drainage_effect) กำหนดให้เท่ากับอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลมากกว่า ระหว่างผลของเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในเมล็ด (grain_N_effect_coef) และผลของระยะเวลาการระบายน้ำ (drainage_effect) โดย law of minimum เช่นกัน

N_and_drainage_effect = min(grain_N_effect_coef, drainage_effect) (29)

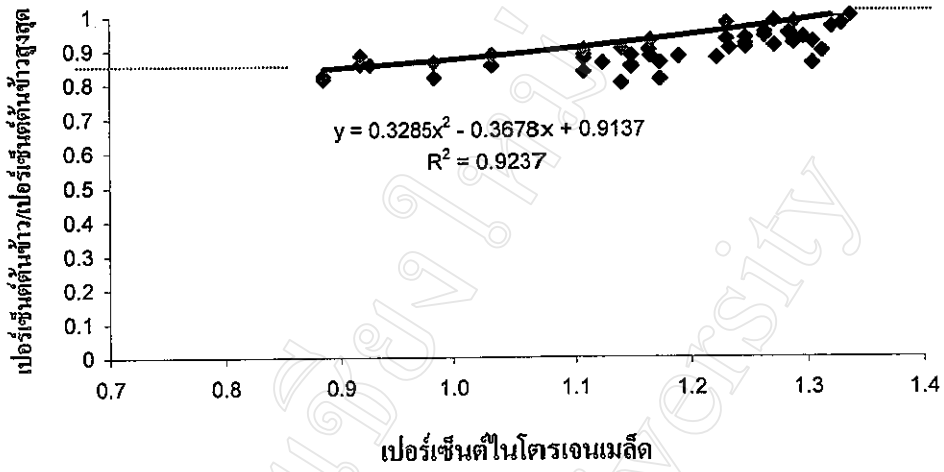
ผลของเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนเมล็ดต่อเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว (grain_N_effect_coef) ได้จากเส้นสมการถดถอยที่ลากผ่านจุดสูงสุดของค่าอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว/เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสูงสุด กับเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในเมล็ด จากการทดลองอิทธิพลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจนต่อคุณภาพการสีข้าว ปี 2541-2542 (จิรวัฒน์ 2544 ค) แสดงดังในภาพ 6 และสามารถกำหนดเป็นสมการ (30) โดยกำหนดให้มีผลเมื่อข้าวอยู่ในระยะสุกแก่เท่านั้น เนื่องจากไนโตรเจนมีผลที่สัมพันธ์กับหักของข้าวจากการร้าวและท้องไข่ ระยะสุกแก่ (ตติยะ, 2539) ดังสมการต่อไปนี้

```
grain_N_effect_coef = if(time=grain_filling_duration)
                      then(if( Grain_N_at_matur<1.2)
                      then(0.328*Grain_N_at_matur^2 -
                      0.368*Grain_N_at_matur+0.914 ) else(1))
                      else(1)                                    (30)
```

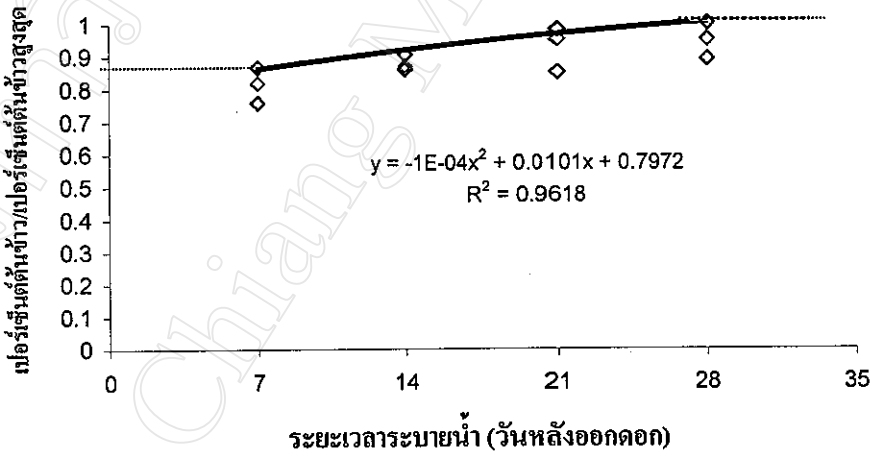
ส่วนอิทธิพลของระยะเวลาการระบายน้ำ (drainage_effect) ต่อเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวนั้น พบความสัมพันธ์ที่ว่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวขณะสุกแก่ลดลงเมื่อระยะเวลาการระบายน้ำหลังออกดอกสั้นลง (จิรวัฒน์ 2544 ค; Jongkaewwattana, 1990) โดยความสัมพันธ์ของเส้นที่ลากผ่านจุดที่สูงสุดของอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว/เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสูงสุด ในแต่ละระยะเวลาการระบายน้ำ (ภาพ 7) ทำให้ได้สมการเงื่อนไขที่จะมีผลเมื่ออยู่ในระยะสุกแก่ และจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาระบายน้ำหลังออกดอก (drainage_day_ after_flowg) ที่เป็นข้อมูลที่ผู้ใช้กำหนด โดยเป็นสมการดังนี้

```
drainage_effect = if(time=grain_filling_duration)
                  then(if (drainage_day_after_flowg
                  <flower_to_beg_grain_fill+grain_filling_duration )
                  then (-0.0001*drainage_day_after_flowg^2+0.0101*
                  drainage_day_after_flowg +0.7972)
                  else (1)) else(1)                              (31)
```

โดยที่ flower_to_beg_grain_fill หรือวันออกดอกถึงเริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ด และ grain_filling_duration หรือระยะเวลาสะสมน้ำหนักเมล็ด เป็นข้อมูลจาก OVERVIEW.OUT ที่ได้จากการใช้ CERES-Rice 3.5



ภาพ 6 ความสัมพันธ์เปอร์เซ็นต์ในโตรเจนในเมล็ดกับเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว ที่ใช้กำหนดสัมประสิทธิ์อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์ในโตรเจนเมล็ด โดยใช้ข้อมูลจาก จิรวัฒน์ (2544 ค)



ภาพ 7 ความสัมพันธ์ระยะเวลาระบายน้ำ กับเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว ที่ใช้กำหนดค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลของระยะเวลาระบายน้ำ โดยใช้ข้อมูลจาก จิรวัฒน์ (2544 ค)

2.2 คุณภาพการสีหลังสุกแก่

การประเมินคุณภาพการสีหลังสุกแก่ เริ่มจากการคำนวณสมดุลความชื้นเมล็ดที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวหลังสุกแก่

2.2.1 เปอร์เซ็นต์ความชื้นเมล็ดหลังสุกแก่

กำหนดให้ความชื้นเมล็ดเป็น level variable โดยมีทั้งกระบวนการดูดและคายความชื้นจากเมล็ด ซึ่งความชื้นเมล็ดตั้งต้นเป็นข้อมูลนำเข้าที่ได้จากงานทดลอง โดยเป็นความชื้นขณะที่สุกแก่ทางสรีรวิทยา ซึ่งกำหนดเวลาสุกแก่ตามผลลัพธ์การจำลองด้วย CERES-Rice 3.5

การเปลี่ยนแปลงความชื้นเมล็ดขณะนั้นเป็นผลจากสภาพอากาศเท่านั้น ตัวแปรอากาศที่นำเข้าคือ ความเข้มแสง อุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุด และปริมาณฝน จะเป็นค่าสุทธิของการระเหยน้ำจากเมล็ด และการดูดความชื้นจากอากาศของเมล็ด

grain_moisture(t) = grain_moisture(t - dt) + (absorption_rate - evaporation) * dt (32)

อัตราการสูญเสียความชื้นจากเมล็ด คืออัตราการระเหยน้ำ (evaporation) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ radiation balance โดยดัดแปลงจากสมการการศักยภาพการคายน้ำของพืชที่ใช้ในแบบจำลองตระกูล CERES ที่เสนอโดย Jones and Kiniry (1986) โดยกำหนดสมมติฐานว่าการระเหยเกิดในเวลากลางวัน โดยขึ้นอยู่กับพลังงานแสงอาทิตย์ (SRAD) อุณหภูมิเฉลี่ยในเวลากลางวัน (T_day) ความชื้นเมล็ด (grain_moisture) และสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมที่เกี่ยวกับการระเหยน้ำจากเมล็ด (evapo_coef) ที่แสดงถึงมีความแตกต่างทางพันธุกรรมในการระเหยน้ำ (Namuco and Ingram, 1996) ดังนี้

evaporation = grain_moisture/100*SRAD*(T_day+29)*evapo_coef (33)

โดย อุณหภูมิกลางวัน T_day ขณะมีการระเหย หาได้จาก (Jones *et al.*, 1986)

T_day = 0.60*Tmax+0.40*Tmin (34)

อัตราการดูดความชื้นของเมล็ด (absorption_rate) นั้นมีสมมติฐานว่าเกิดขึ้นเฉพาะในตอนกลางคืน ที่สมมติฐานว่าไม่มีการระเหยน้ำ โดยอัตราการดูดความชื้นขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างระหว่างความชื้นเมล็ด (grain_moisture) ขณะนั้น กับค่าความชื้นสมดุลที่มีค่าสูงสุด (max_

equilibrium_moiture) และค่าสัมประสิทธิ์การดูดความชื้น (absorbtion_coefficient) ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์พันธุกรรม ตัวหนึ่ง

absorption_rate = (max_equilibrium_moiture-grain_moisture)*absorbtion_coefficient (35)

โดยที่ ค่าความชื้นสมดุลสูงสุด (max_equilibrium_moiture) คำนวณได้จากสมการความชื้นเมล็ดที่สมดุลกับบรรยากาศที่เสนอโดย Banaszek and Siebenmorgen (1990) :

max_equilibrium_moiture = 0.127*grain_moisture+20.633*Max_RH/100-0.0298*Tmin-2.589 (36)

โดยที่ ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด Max_RH ในวันนั้นๆ กำหนดโดยสมการ:

Max_RH = If(Rainfall<2) then (VPSAT_Tdew/VPSAT_Tmin*100)else(100) (37)

หมายถึงว่า
ถ้าวันใดมีค่าปริมาณฝนน้อยกว่า 2 มม. ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด

Max_RH =VPSAT_Tdew/VPSAT_Tmin*100 (38)

VPSAT_Tdew = 610.78*EXP(17.269*Tdew/(Tdew+237.3)) (39)

VPSAT_Tmin = 610.78*EXP(17.269*Tmin/(Tmin+237.30)) (40)

Tdew = Tmin-2 (41)

โดย Tmin คืออุณหภูมิต่ำสุด ในวันนั้นๆ

แต่ถ้ามีฝนตั้งแต่ 2 มม.ขึ้นไป (ที่น่าจะมีระดับมากเพียงพอที่ทำให้ข้าวเปียกเป็นเวลานานจนเกิดดูดซึมน้ำเข้าในเมล็ด) จะกำหนดให้ RH max วันนั้นเท่ากับ 100เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับ ที่รายงานโดย Siebenmorgen and Jindal (1986)

ความชื้นเมล็ดตั้งต้น เป็นค่าความชื้นขณะสุกแก่ ที่เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับผู้ใช้ จากข้อมูลการทดลอง หรืออาจประมาณได้เท่ากับ 22เปอร์เซ็นต์ (จิรวัฒน์, 2544 ค)

2.2.2 เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวหลังสุกแก่

เปอร์เซ็นต์ข้าวในส่วนนี้เป็นตัวแปร level variable ที่มีการเปลี่ยนแปลงในทางลดลงตามระยะเวลาหลังสุกแก่ จากสมมติฐานที่ว่า ค่าตั้งต้นของตัวแปรนี้คือค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสูงสุดขณะสุกแก่ ที่ได้จากการจำลองในส่วนก่อนและที่ระยะสุกแก่ หลังจากสุกแก่เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวลดลงเมื่อความชื้นเมล็ดลดต่ำ จนมีการดูดความชื้นกลับเมื่อความชื้นสูงสุดในรอบวันเข้าไปทำให้เมล็ดเกิดรอยร้าว และเป็นข้าวหักเมื่อผ่านการสี (Kunze, 1985) โดยอัตราการหักของข้าวนี้สัมพันธ์กับอัตราการดูดความชื้น และค่าสัมประสิทธิ์การหัก ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมอีกค่าหนึ่ง ที่ได้จากการประเมินกับค่างานทดลองสำหรับแต่ละพันธุ์ ซึ่งกำหนดเป็นสมการเงื่อนไข:

head_rice(t) = head_rice(t - dt) + (- head_rice_reduction_rate) * dt (42)

head_rice_reduction_rate = absorption_rate*head_rice*genetic_breaking_coefficient (43)

2.2.3 เปอร์เซ็นต์ข้าวสารหลังสุกแก่

เปอร์เซ็นต์ข้าวสารหลังสุกแก่นั้นกำหนดให้ลดลงตามสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวสารhead_rice/milled_rice ที่ลดลง ด้วยเหตุผลทำนองเดียวกับเปอร์เซ็นต์ข้าวสารในกระบวนการก่อนสุกแก่ ที่ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การลดลงของข้าวสาร milled_rice_loss_coef ด้วย ดังสมการ

milled_rice(t) = milled_rice(t - dt) + (- milled_rice_reduction_rate) * dt (44)

milled_rice_reduction_rate = ((milled_rice-head_rice)/milled_rice)*milled_rice_loss_coef (45)

3 . การกำหนดข้อมูลนำเข้าในแบบจำลอง

การกำหนดข้อมูลที่นำเข้าในแบบจำลอง ที่เป็นขั้นตอนที่ดำเนินการพร้อมๆ กับการสร้างสมการแบบจำลอง ได้แก่ข้อมูลที่ไม่ใช่สัมประสิทธิ์ และข้อมูลที่เป็นสัมประสิทธิ์ที่เกิดขึ้นเมื่อทำการทดสอบปรับกับแบบจำลอง ดังนี้

3.1 ข้อมูลนำเข้า ที่ไม่ใช่สัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม

1. ข้อมูลระยะพัฒนาการ เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วย CERES-Rice 3.5 ใน DSSAT3.5 คือ วันออกดอก และวันสุกแก่ ระยะเวลาตั้งแต่ออกดอก ถึงเริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ด ระยะเวลาสะสมน้ำหนักเมล็ด

2. น้ำหนักเมล็ดรายวันตั้งแต่เริ่มสะสมน้ำหนัก จำนวนเมล็ดขณะสุกแก่ และเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วย CERES-Rice 3.5 เช่นกัน

3 ข้อมูลอากาศรายวัน ได้แก่พลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิต่ำสุด และสูงสุด ปริมาณน้ำฝน ทำนองเดียวกับที่ใช้ใน CERES-Rice 3.5 ข้อมูลอากาศนี้ที่ใช้กับแบบจำลองคุณภาพการสีโดยตรง คือข้อมูลอุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุด ตั้งแต่ระยะตั้งแต่สะสมน้ำหนักเมล็ด ถึงเก็บเกี่ยว หลังสุกแก่ สำหรับข้อมูลอากาศก่อนสุกแก่ ใช้ผ่านทาง CERES-Rice 3.5 และใช้โดยตรงกับแบบจำลองคุณ-ภาพการสี

4. ข้อมูลดิน เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับการจำลองใน CERES-Rice 3.5 ทั้งหมด

5. ระยะเวลาการระบายน้ำ ซึ่งกำหนดโดยผู้ใช้ ที่นำเข้าในแบบจำลองคุณภาพการสีโดยตรง แต่ข้อมูลการจัดการอื่น ๆ เช่น การปลูก การให้ปุ๋ย การให้น้ำ เป็นข้อมูลที่นำเข้า CERES-Rice 3.5

6 ความชื้นเมล็ดขณะสุกแก่ เป็นข้อมูลนำเข้าในส่วนทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นเมล็ด หลังสุกแก่ ที่ได้จากการทดลอง หรือการประมาณ อยู่ในช่วง 22เปอร์เซ็นต์ แต่อาจจะจัดเป็นค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม และปรับค่าตามค่าที่วัดได้จริงแต่ละพันธุ์

สรุปตัวแปรข้อมูลนำเข้าที่ไม่ใช่ค่าทางพันธุกรรม และที่มาของค่านั้นๆ แสดงใน ตาราง 1

ตาราง 1 ข้อมูลนำเข้า (ที่ไม่ใช่สัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม) ที่ใช้ในแบบจำลองคุณภาพการสี

ข้อมูลนำเข้า	แหล่งของข้อมูล
1.1 เปอร์เซ็นต์ข้าวสารก่อนสุกแก่	
น้ำหนักเมล็ดรายวัน	CERES-Rice: Growth.out
น้ำหนักเมล็ดวันแรก	CERES-Rice :Growth.out
น้ำหนักเมล็ดวันสุดท้าย	CERES-Rice :Growth.out
ระยะเวลาสะสมน้ำหนักเมล็ด	CERES-Rice: Overview.out

ตาราง 1 (ต่อ)

ข้อมูลนำเข้า	แหล่งของข้อมูล
1.2 เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวก่อนสุกแก่	
เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน	CERES-Rice :Overview.out
อุณหภูมิต่ำสุดสูงสุดระยะสะสมน้ำหนักเมล็ด	CERES-Rice :Overview.out
ปริมาณฝนตกก่อนสุกแก่ 7 วัน	สถานีตรวจอากาศอัตโนมัติ Data logger
อุณหภูมิต่ำสุดก่อนสุกแก่ 7 วัน	สถานีตรวจอากาศอัตโนมัติ Data logger
ระยะเวลาสะสมน้ำหนักเมล็ด	CERES-Rice: Overview.out
ระยะเวลาตั้งแต่ออกดอกจนเริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ด	CERES-Rice: Overview.out
ระยะเวลาระบายน้ำ	ข้อมูลการจัดการ ผู้ใช้กำหนด
2.1 เปอร์เซ็นต์ความชื้น เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว และเปอร์เซ็นต์ข้าวสารหลังสุกแก่	
เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวระยะสุกแก่	แบบจำลอง ต้นข้าวก่อนสุกแก่ 1.2
เปอร์เซ็นต์ข้าวสารระยะสุกแก่	แบบจำลอง ข้าวสารก่อนสุกแก่ 1.1
พลังงานแสง, อุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุด, ปริมาณน้ำฝน	สถานีตรวจอากาศอัตโนมัติ Data logger
ความชื้นเมล็ดขณะสุกแก่	ผู้ใช้กำหนด

3.2 สัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม

ค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมในแบบจำลองคุณภาพการสี บางตัวเป็นค่าที่เป็นค่าเดียวกับสัมประสิทธิ์ใน CERES-Rice ได้แก่ น้ำหนัก 1 เมล็ดที่เป็นค่าศักยภาพ (potential single grain weight) หรือค่า G2 หรือค่าสัมประสิทธิ์ความทนอุณหภูมิ ที่ตรงกับค่า G4 ที่อยู่ใน Genetic Coefficient File ใน DSSAT 3.5

ค่าสัมประสิทธิ์ เปอร์เซ็นต์ข้าวกล้อง และเปอร์เซ็นต์ข้าวสารสูงสุด ประมาณจากข้อมูลเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องและเปอร์เซ็นต์ข้าวสารสูงสุด ในสภาพที่น้ำหนัก 1 เมล็ดเท่ากับน้ำหนักเมล็ดสูงสุดของพันธุ์นั้นๆ (G2) โดยในที่นี้ใช้ค่าที่รายงานโดย จิรวัฒน์ (2544 ก) แล้วทดลองจำลอง และปรับค่าให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวสารที่จำลองได้ ให้เท่ากับหรือมากกว่าค่าที่วัดได้จริง ในทุกๆ วันปลูก

ค่าสัมประสิทธิ์พันธุกรรมอื่นๆ เป็นการหาโดยวิธีประมาณและทดสอบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ ที่สัมพันธ์กัน มากที่สุด เช่นสัมประสิทธิ์ท้องไข่ ทีมีค่า 0-1 ก็ทดสอบกับค่าท้องไข่ที่วัดได้จริง หรือสัมประสิทธิ์การแตกหักจากการสี การทดสอบกับค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวเลยเป็นต้น ดังมีรายละเอียดสรุปใน ตาราง 2

ตาราง 2 สัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมของแบบจำลองคุณภาพการสี

สัมประสิทธิ์พันธุกรรม	คำอธิบาย
1.1 เปอร์เซ็นต์ข้าวสารก่อนและที่สุกแก่	
น้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือกสูงสุด	น้ำหนักแห้งสูงสุดข้าวเปลือก มีหน่วยเป็นกรัมต่อ 100 เมล็ด เท่ากับค่าสัมประสิทธิ์ G2 ใน CERES-Rice
เปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องสูงสุด	ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องสูงสุดของพันธุ์นั้น ประมาณได้จากค่าสูงสุดที่ได้จากการทดลอง
เปอร์เซ็นต์ข้าวสารสูงสุด	ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวสารสูงสุดของพันธุ์นั้น ประมาณได้จากค่าสูงสุดที่วัดได้จากการทดลอง
1.2 เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวก่อนและที่สุกแก่	
สัมประสิทธิ์ความทนต่ออุณหภูมิ	คล้ายกับค่า G4 ที่ใช้ใน CERES-Rice 3.5 มีค่าตั้งแต่ 0.5-1.5 โดยค่ายิ่งมากยิ่งแสดงความทนต่ออุณหภูมิต่ำ ค่ายิ่งน้อยแสดงความทนต่ออุณหภูมิสูง สัมพันธ์กับการเกิดท้องไข่และความไม่สม่ำเสมอของการสุกแก่
สัมประสิทธิ์ท้องไข่	แสดงระดับความเป็นท้องไข่ในสภาพปกติ (0-1)
สัมประสิทธิ์ความไม่สม่ำเสมอของการสุกแก่ของเมล็ด	แสดงระดับความไม่สม่ำเสมอในสภาพปกติ (0-1)
สัมประสิทธิ์การแตกหักจากการสี	สัมประสิทธิ์แสดงความง่ายต่อการหักเมื่อสี (0-1) และ ใช้ในการคำนวณเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวหลังสุกแก่ด้วย
2. 1 เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว เปอร์เซ็นต์ความชื้นหลังสุกแก่	
สัมประสิทธิ์การดูดความชื้น	แสดงศักยภาพอัตราการดูดความชื้นเมล็ด มีค่าตั้งแต่ 0-1
สัมประสิทธิ์การระเหยของเมล็ด	แสดงศักยภาพอัตราการระเหยน้ำจากเมล็ดข้าวเปลือก มีค่าตั้งแต่ 0-1
2.2 เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว และเปอร์เซ็นต์ข้าวสารหลังสุกแก่	
สัมประสิทธิ์การร้าวของข้าวเนื่องจากการดูดความชื้น	แสดงความยากง่ายในการเกิดรอยร้าวของเมล็ดเนื่องจากความเครียดความชื้นมีค่า 0-1
สัมประสิทธิ์การลดลงของเปอร์เซ็นต์ข้าวสารจากเมล็ดหัก	ระดับการ ลดลงของข้าวสารเนื่องจากอัตราการหักของข้าว

การปรับค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมคุณภาพ การสี ข้าว

การปรับค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรม ทำโดยการทดสอบการจำลองด้วยค่าสัมประสิทธิ์ที่นำเข้า ที่มีทั้งสัมประสิทธิ์ที่มีการประมาณ แบบมีหลักเกณฑ์ในการกำหนด และแบบที่ใช้วิธีทดลองประมาณในกรอบที่กำหนด ตามนิยามในตาราง 2 ซึ่งได้ทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพการสีของข้าว 4 พันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105 เหนียวสันป่าตอง ชัยนาท 1 และ ก.วก.1 โดยเทียบกับค่าที่วัดได้จริงที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์นั้นๆ จากการทดลอง 12 วันปลูก ของข้าว 4 พันธุ์นี้ (จิรวัฒน์ 2544 ค) โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่ทดสอบกับข้าว 4 พันธุ์ แสดงในตาราง 3 ซึ่งใช้ในการทดสอบแบบจำลองต่อไป

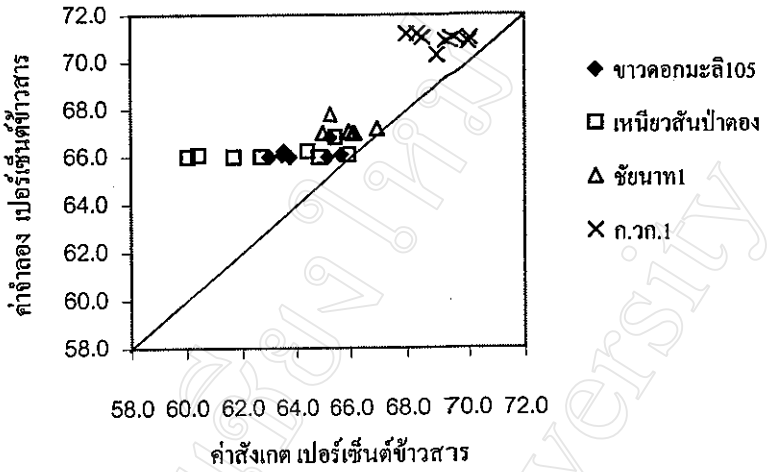
ตาราง 3 ค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมแบบจำลองคุณภาพการสีของข้าว4 พันธุ์ที่ปรับได้

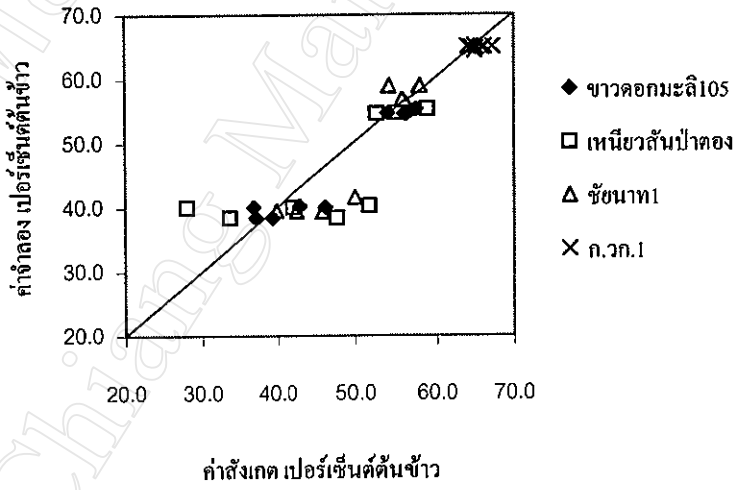
พันธุ์	นน 100 เมล็ด	% ข้าวกล้อง	% ข้าวสาร	ข้าวสารหายจากข้าวหัก	ความทนอุณหภูมิ	การเกิดท้องไข่	ความสม่ำเสมอ	การหักจากสี	การร้าว	การดูดความชื้น	การระเหย
ขาวดอกมะลิ105	2.38	77	66	0.2	1.0	0.9	0.9	0.5	0.05	0.1	0.08
เหนียวสันป่าตอง	2.43	77	66	0.2	1.0	0.9	0.9	0.5	0.05	0.1	.008
ชัยนาท1	2.58	78	67	0.2	1.0	0.9	0.9	0.5	0.05	0.1	.008
ก.วก.1	2.49	81	71	0.2	1.2	0.9	0.9	0.2	0.2	0.1	.008

4.1 การทดสอบแบบจำลองกับข้อมูลงานทดลอง

4.1 การทดสอบงานทดลอง 12 วันปลูก

การทดสอบแบบจำลองด้วยค่าสัมประสิทธิ์ที่ปรับได้ ดังแสดงในตารางที่ กับงานทดลอง 12 วันปลูก ของข้าว 4 พันธุ์ โดยเลือกจำลอง 8 วันปลูก มิถุนายน 40- มกราคม 41 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง จำลองเปอร์เซ็นต์ข้าวสารที่ระยะสุกแก่ได้มากกว่าค่าที่วัดได้ทุกวันปลูก โดยสามารถจำลองค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวสารระหว่างพันธุ์ ไปในทิศทางเดียวกับค่าที่วัดได้ พอสมควร แต่ยังไม่สามารถจำลองค่าใกล้เคียง สำหรับวันปลูกที่เปอร์เซ็นต์ข้าวสารที่วัดได้ต่ำกว่าปกติ (ภาพ 8) ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลอง CERES-Rice 3.5 ไม่สามารถจำลองให้ได้ค่าน้ำหนักเมล็ดที่ระยะสุกแก่ที่ต่ำใกล้เคียงกับค่าที่ได้จริง (จิรวัฒน์, 2544 ก) แม้ในสภาพที่การเจริญเติบโตต่ำมากเช่นในวันปลูกที่มีอุณหภูมิขณะสะสมน้ำหนักเมล็ดต่ำหรือสูงเกินไป ที่พบว่าน้ำหนักเมล็ด 1 เมล็ดไม่ลดต่ำจากค่าศักยภาพ จึงทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวสารไม่ลดลง





ภาพ 8 กราฟ 1:1 ระหว่างค่าจำลองและค่าสังเกตของเปอร์เซ็นต์ข้าวสาร และต้นข้าวขณะสุกแก่ ข้าว 4 พันธุ์ ที่ปักดำ มิย.40 -มค.41

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

การจำลองเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวที่ระยะสุกแก่นั้น พบว่าแบบจำลองสามารถจำลองค่านี้ได้ใกล้เคียงกับค่าจริง เป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นข้าวพันธุ์เหนียวสันป่าตอง ที่ค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวที่วัดได้มีความแปรปรวนมากกว่าพันธุ์อื่น อาจเนื่องจากการอ่อนไหวต่ออุณหภูมิมากกว่าพันธุ์อื่น ๆ โดยที่แบบจำลองไม่สามารถจำลองได้ในระดับที่ใกล้เคียงพอ (ภาพ 8)

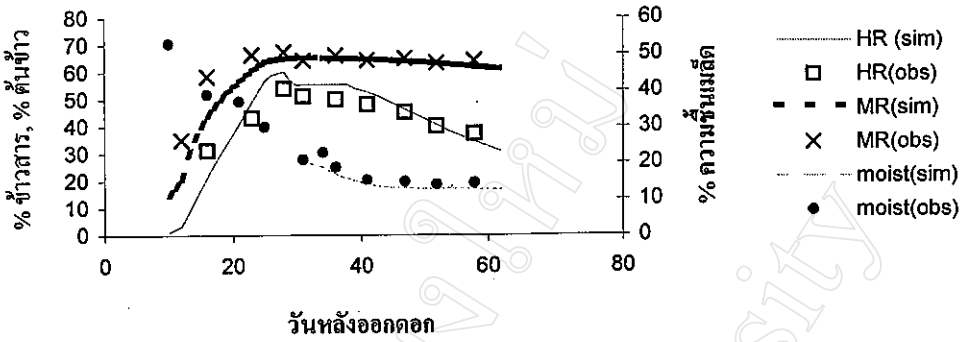
การจำลองทั้งเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว และข้าวสารตั้งแต่เริ่มสะสมน้ำหนักเมล็ดจนถึงสุกแก่และหลังสุกแก่ประมาณ 30 วัน โดย เลือกทดสอบ 3 วันปลูก 21 มิถุนายน 40 25 กันยายน 40 และ23 มกราคม 41 ของข้าว 3 พันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105 ชัยนาท 1 และก.วก.1 แสดงให้เห็นว่า ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ข้าวสารใกล้เคียงกันกับที่วัดได้สำหรับข้าวทุกพันธุ์ และการจำลองเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว และเปอร์เซ็นต์ความชื้น ก็มีค่าใกล้เคียงและมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง ด้วย (ภาพ 9 –ภาพ 11)

4.2 การทดสอบกับงานทดลองระดับปุ๋ยไนโตรเจน และการให้น้ำ

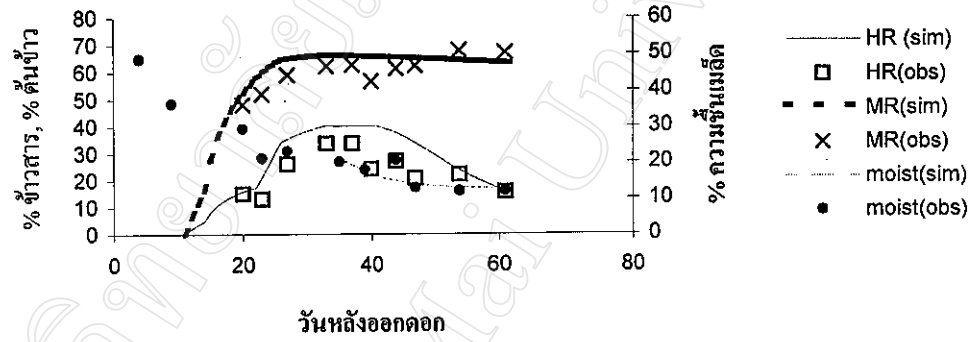
จากการเปรียบเทียบค่าคุณภาพการสีที่จำลองกับค่าที่วัดได้ ของการทดลองระดับปุ๋ยไนโตรเจน 0,70,140 และ 210 กก.N/เฮกตาร์ กับการให้น้ำชลประทานและอาศัยน้ำฝน กับข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และชัยนาท 1 ในปี 2542 (ภาพ 12) พบว่า แบบจำลอง จำลองเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวและเปอร์เซ็นต์ข้าวสารขณะสุกแก่ ของข้าวชัยนาท 1 ดีกว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยเฉพาะที่ระดับไนโตรเจนสูง อธิบายได้ว่า ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีข้อจำกัดการตอบสนองต่อไนโตรเจนระดับสูง ที่มีการหักล้ม และมีเมล็ดลีบมาก โดยที่แบบจำลอง CERES-Rice 3.5 ไม่ได้ครอบคลุมถึง (จิรวัฒน์, 2544 ข) และการหักล้มทำให้รวงข้าวบางส่วนแช่น้ำ จึงมีเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวต่ำกว่าที่จำลองมาก เพราะแบบจำลองคุณภาพการสีนี้ ก็ไม่ได้ครอบคลุมถึงปรากฏการณ์นี้ด้วย นอกจากนั้นผลการจำลองคุณภาพการสียังขึ้นอยู่กับค่าเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนเมล็ดที่ได้จาก CERES-Rice 3.5 ที่มีที่ประมาณค่านี้ต่ำกว่าที่วัดได้จริงมาก เป็นส่วนใหญ่ (จิรวัฒน์, 2544 ข)

4.3 การทดสอบกับการทดลองระยะเวลาระบายน้ำ

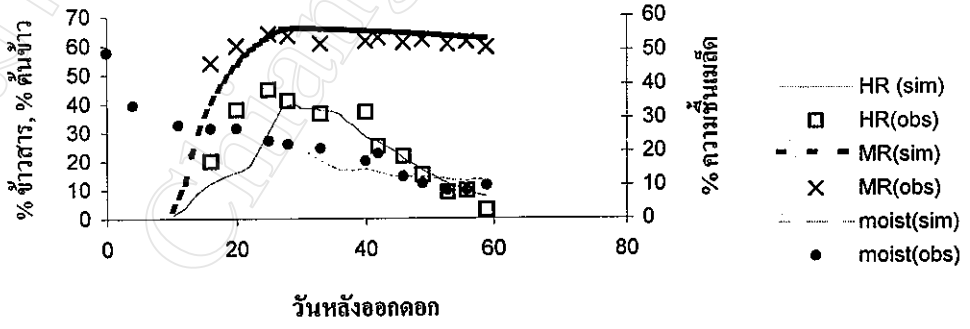
การทดสอบแบบจำลองคุณภาพการสีกับข้อมูลการทดลองระยะเวลาระบายน้ำ ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 และชัยนาท 1 ในปี 2540 (จิรวัฒน์ 2544 ค) พบว่า แบบจำลองประมาณเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว ได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง โดยเฉพาะพันธุ์ชัยนาท 1 จำลองได้ใกล้เคียงกว่าพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 เล็กน้อย สำหรับการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวสารนั้น แบบจำลองจำลองได้แนวโน้มทางเดียวกันกับค่าที่วัดได้จริง ทั้งสองพันธุ์ (ภาพ 13)



ปักดำ 21 มิย.40

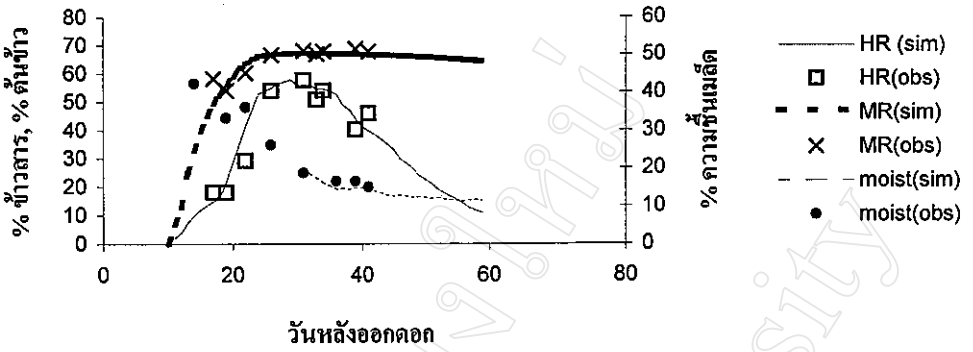


ปักดำ 26 กย.40

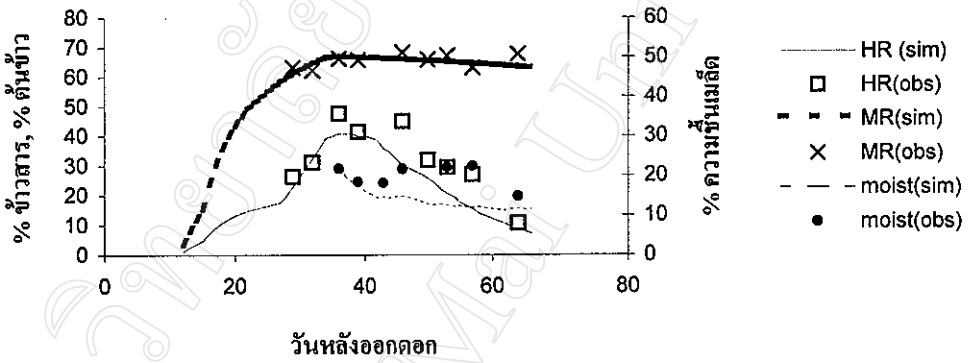


ปักดำ 23 มค.41

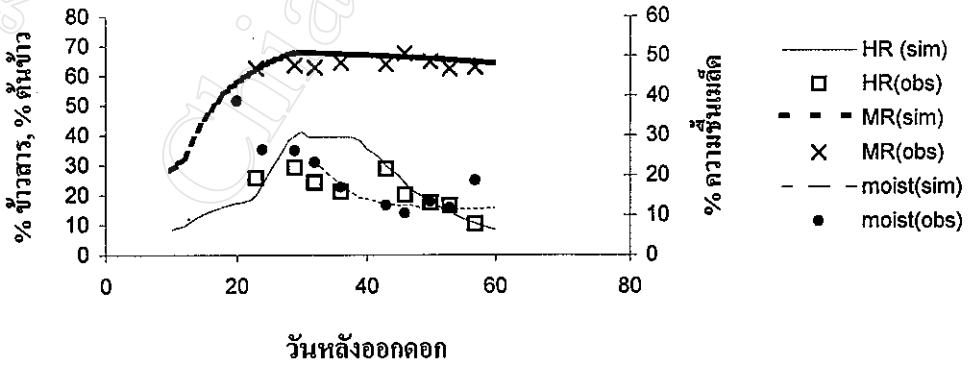
ภาพ 9 ค่าจำลอง(sim) และค่าที่วัดได้ (obs) ของ%ต้นข้าว(HR) %ข้าวสาร(MR), % และ%ความชื้น(moist) กับระยะเวลาหลังออกดอก ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 จากงานทดลอง 12 วันปลูก (จิรวัฒน์ 2544 ก) (ค่าจำลอง ของ% ความชื้น มีเฉพาะหลังสุกแก่)



ปักดำ 21 มิย.40

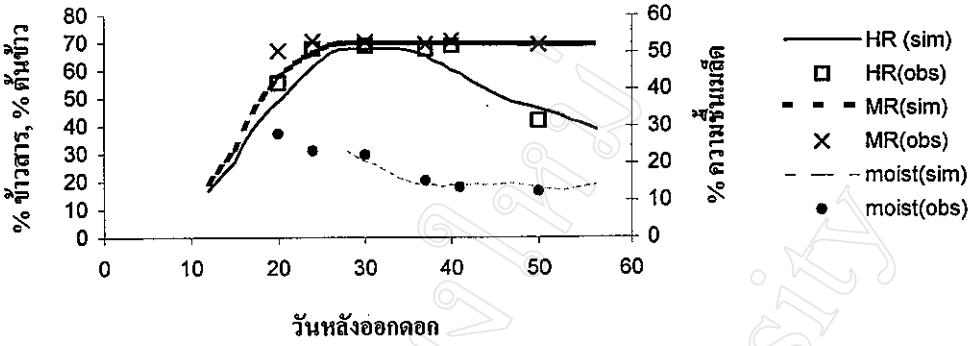


ปักดำ 26 กย. 40

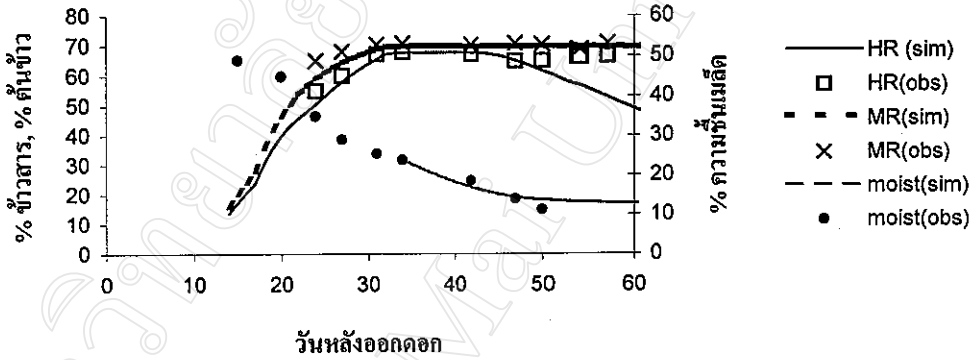


ปักดำ 23 มค.41

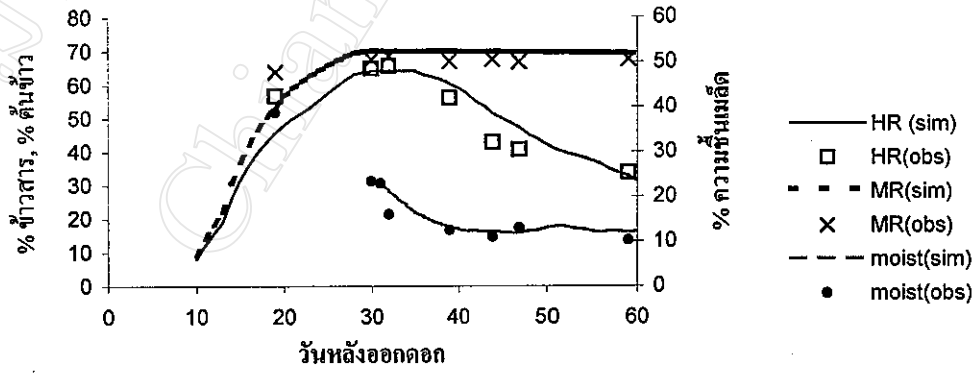
ภาพ 10 ค่าจำลอง(sim) และค่าที่วัดได้ (obs) ของ%ต้นข้าว(HR) %ข้าวสาร(MR), % และ%ความชื้น(moist) กับระยะเวลาหลังออกดอก ของข้าวชัยนาท 1 จากงานทดลอง 12 วันปลูก (จิรวัฒน์ 2544 ก)
(ค่าจำลอง ของ% ความชื้น มีเฉพาะหลังสุกแก่)



ปักดำ 21 มิย.40

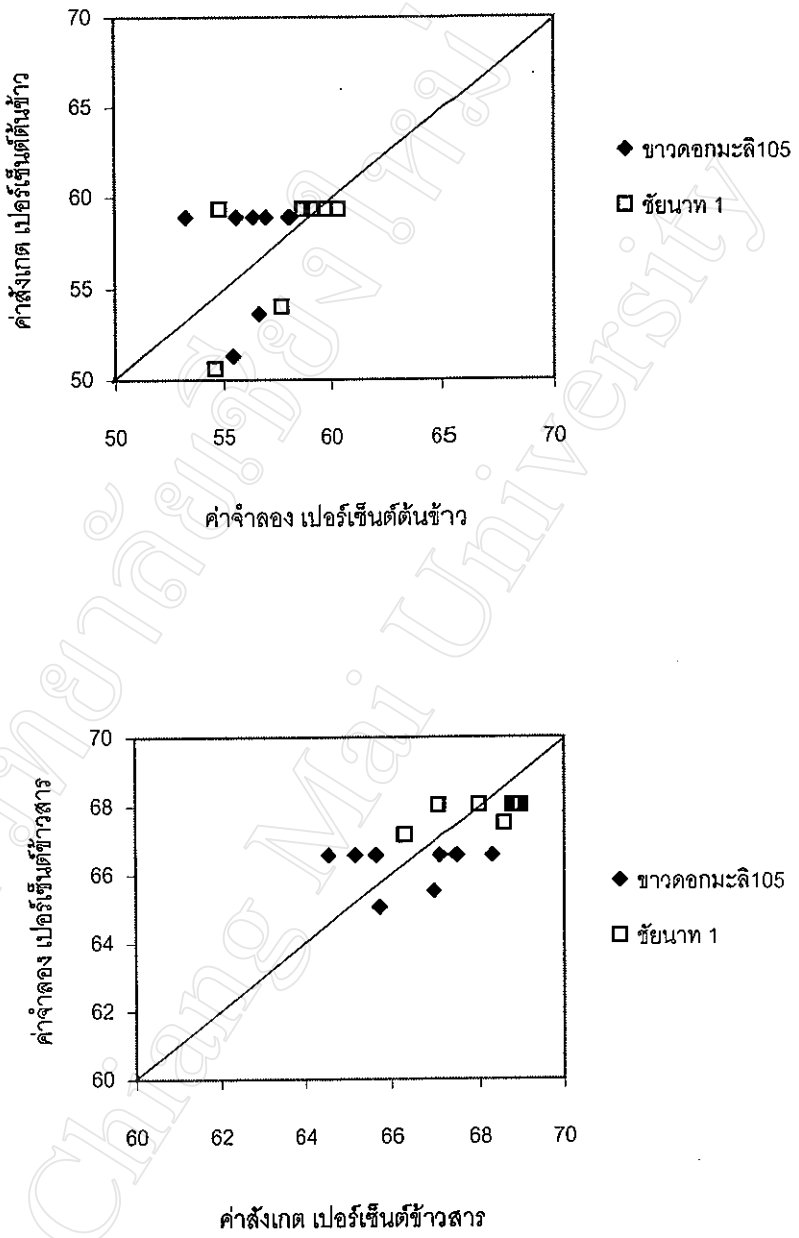


ปักดำ 25 กย.40



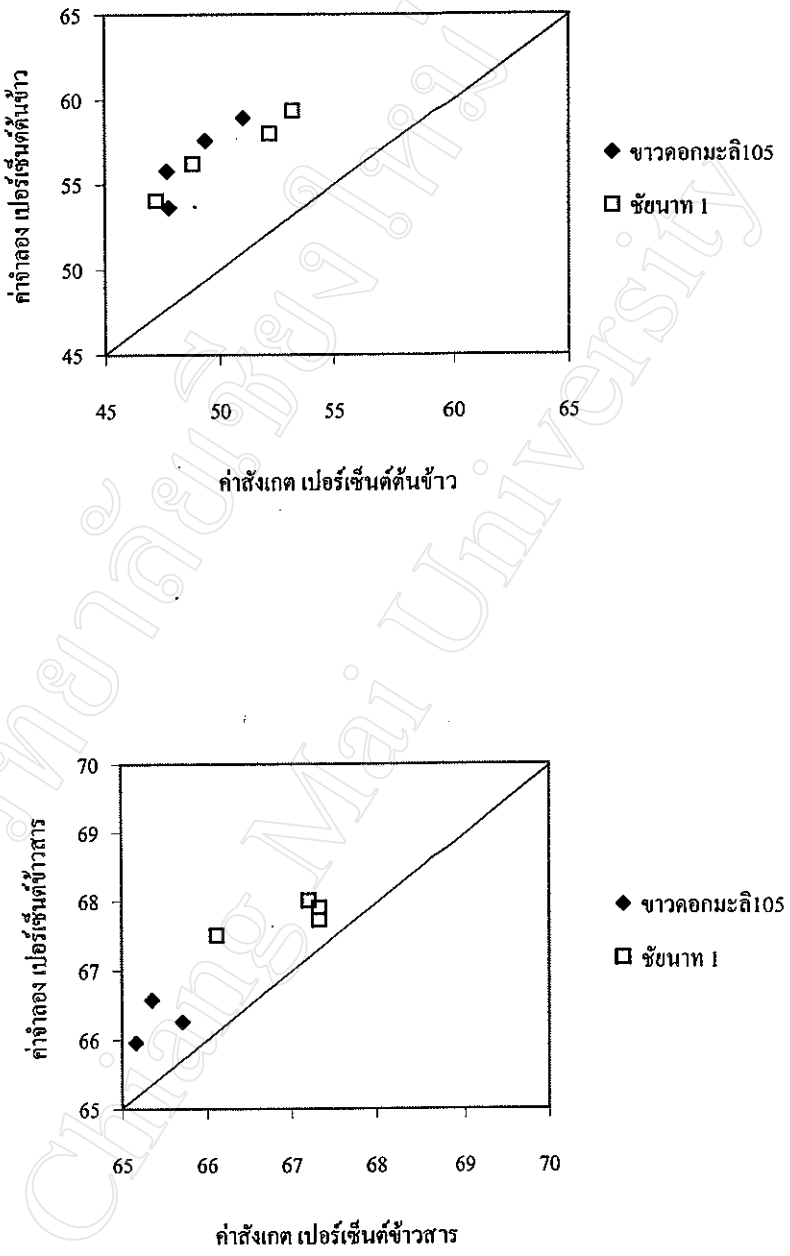
ปักดำ 23 มค.41

ภาพ 11 ค่าจำลอง(sim) และค่าที่วัดได้ (obs) ของ%ต้นข้าว(HR) %ข้าวสาร(MR), % และ%ความชื้น(moist) กับระยะเวลาหลังออกดอก ของข้าวญี่ปุ่น ก.วก.1 จากงานทดลอง 12 วันปลูก (จิรวัฒน์ 2544 ก) (ค่าจำลอง ของ% ความชื้น มีเฉพาะหลังสุกแก่)



ภาพ 12 กราฟ 1:1 ระหว่างค่าสังเกตและค่าจำลองเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวและข้าวสาร จากการทดสอบกับงานทดลองอัตราปุ๋ยไนโตรเจน และสภาพการให้น้ำ (จิรวัฒน์, 2544 ค)

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University



ภาพ 13 กราฟ 1:1 ระหว่างค่าสังเกต และค่าจำลองเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวและข้าวสาร การทดลองระยะเวลาระบายน้ำ (จิรวัฒน์, 2544 ค)

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

4.4 การทดสอบกับงานทดลองเปรียบเทียบวิธีการปลูก และอัตราเมล็ดพันธุ์

การเปรียบเทียบค่าจำลองกับค่าที่วัดได้จริงของการทดลองเปรียบเทียบการปลูกแบบปักดำกับการหว่านน้ำตมที่อัตราเมล็ดพันธุ์ 5, 20 และ 45 กก.ต่อไร่ ของข้าว ขาวดอกมะลิ 105 ชัยนาท 1 และ ก.วก.1 ในปี 2542 (จิรวัฒน์, 2544 ข) พบว่าค่าที่จำลองได้ใกล้เคียงกับที่วัดได้ ระหว่างพันธุ์ทั้งสามพันธุ์ ที่มีแนวโน้มที่ต่างกันชัดเจน และค่าจำลองระหว่างอัตราเมล็ดพันธุ์ต่างกัน หรือระหว่างการปักดำกับการหว่าน ก็ไม่ต่างกัน ทำนองเดียวกับค่าที่วัดได้จริงด้วย (ภาพ 14)

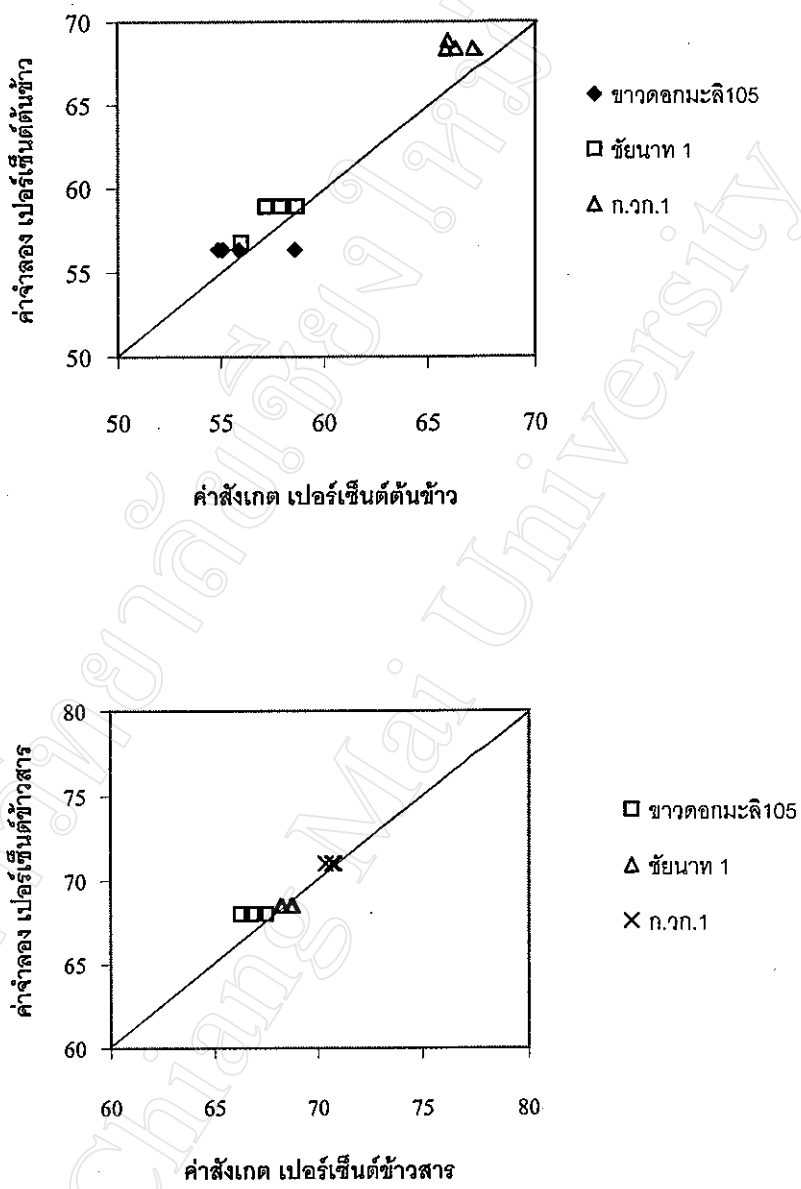
5. ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

5.1 เปอร์เซ็นต์ข้าวสาร

ความคลาดเคลื่อนของการจำลองเปอร์เซ็นต์ข้าวสารส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับผลลัพธ์ของการจำลองด้วย CERES-Rice 3.5 ที่ให้น้ำหนักเมล็ดสูงสุดต่อหนึ่งเมล็ด ที่มักจะสูงกว่าค่าที่วัดได้จริง เนื่องจากแบบจำลองยังไม่ครอบคลุมข้อจำกัดอย่างอื่นนอกเหนือจากไนโตรเจนและน้ำ และการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมยังไม่ดีพอ (จิรวัฒน์, 2544 ก) โอกาสคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์เปอร์เซ็นต์ข้าวสาร หรือข้าวกล้อง ที่ได้จากข้อมูลการทดลอง ที่อาจหรือมักจะไม่ใช่ค่าของเมล็ดที่เจริญตามศักยภาพที่แท้จริง หรือความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณค่าน้ำหนักแกลบหรือน้ำหนักรำตั้งต้น หรืออัตราการสะสมน้ำหนักของแต่ละส่วน ที่ยังไม่มีข้อมูลการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ของการเจริญเติบโตของส่วนต่างๆ ข้าวแต่ละพันธุ์ เนื่องจากต้องใช้การวัดที่ละเอียดมาก ในสภาพที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอย่างดี

5.2 เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวก่อนสุกแก่

เนื่องจากมีตัวแปรจำนวนมากที่เกี่ยวข้อง และได้พยายามรวมปัจจัยต่าง ๆ ในการพิจารณาจำนวนมาก โดยมีสมมติฐาน และสัมประสิทธิ์ที่มาก ความคลาดเคลื่อนจึงมีโอกาสเกิดได้มาก เช่น การทำนายความเป็นท้องไข่ ความไม่สม่ำเสมอของการสุกแก่ ที่ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของอุณหภูมิ แต่ความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองไม่ชัดเจนเนื่องจากมีปัจจัยแวดล้อมเกี่ยวข้องหลายอย่างที่สัมพันธ์กับพันธุกรรมด้วย สมการการทำนายตัวแปรนี้จึงไม่มีข้อมูลละเอียดพอที่จะสร้างการทำนายได้ละเอียดและแม่นยำ กับสภาพแวดล้อม และพันธุ์ที่หลากหลาย รวมถึงอิทธิพลของ



ภาพ 14 กราฟ 1:1 ระหว่างค่าจำลองกับค่าสังเกต ของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว และข้าวสาร จากงาการทดลอง วิธีการปลูกปักดำ กับหว่านน้ำตมที่อัตราเมล็ดพันธุ์ต่างๆ เชียงใหม่ 2541-42 (จิรวัฒน์ 2544 ข)

ไนโตรเจนและการระบายน้ำ ที่มีปฏิกิริยาร่วมกัน และเกี่ยวพันกับ โอกาสการแตกหักจากท้องไข่ หรือความไม่สม่ำเสมอของเมล็ด ด้วย

การประมาณเปอร์เซ็นต์ท้องไข่ที่สัมพันธ์กับพันธุกรรมและสิ่งแวดล้อมคืออุณหภูมิ ที่ยังไม่ชัดเจนเรื่องระดับความสัมพันธ์ และระดับอุณหภูมิวิกฤติ และความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ท้องไข่กับการหักก็ยังไม่ชัดเจน ซึ่งอาจขึ้นอยู่กับสัดส่วนของท้องไข่ในเมล็ด และ ตำแหน่งท้องไข่ ด้วย และอาจจะมีผลจากการร้าวร่วมกัน

5.3 เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวหลังสุกแก่

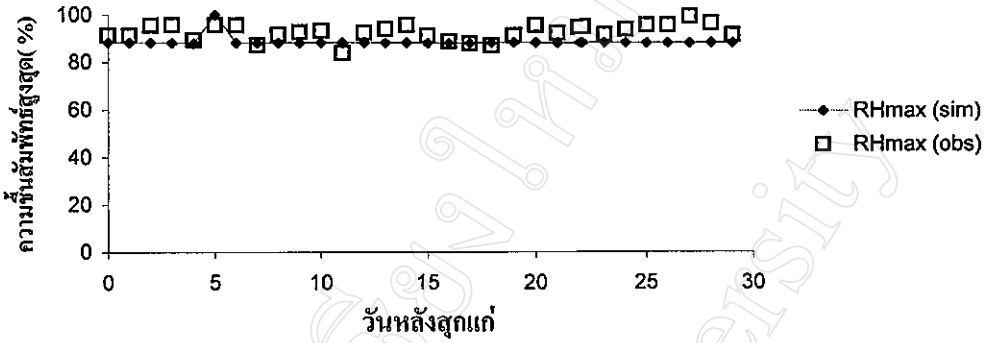
ความคลาดเคลื่อนหลักๆ ได้แก่การทำนายความชื้นเมล็ด และผลของความเครียดความชื้นต่อการหักของข้าว ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

การกำหนดความชื้นตั้งต้น เป็นข้อมูลนำเข้า ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมอากาศขณะนั้น และขึ้นอยู่กับพันธุ์ด้วย และ มีปัจจัยความไม่สม่ำเสมอมาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งแบบจำลองไม่ได้ครอบคลุม การทำนายความชื้นสัมพัทธ์อากาศ โดยการคำนวณจากอุณหภูมิต่ำสุด ที่ใช้ประมาณค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ซึ่งมีโอกาสคลาดเคลื่อนกับค่าจริงได้มาก และไม่ค่อยผันแปรเหมือนค่าจริง แม้ว่าจะให้ระดับค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน (ภาพ 15)

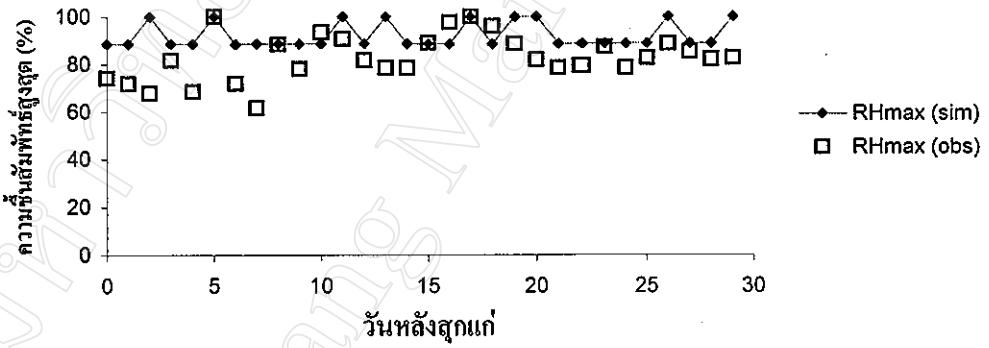
การทำนายอิทธิพลของฝน จากข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวัน ฝนที่ตกติดต่อกัน กับฝนที่ตกห่างกัน ในหนึ่งวัน ฝนที่ตกติดต่อกันมีผลต่อการดูดความชื้นเมล็ดมากกว่า ฝนที่ตกไม่หนาแน่น มีโอกาสระเหยก่อนที่จะซึมเข้าในเมล็ดน้อยกว่า เนื่องจากระเหยก่อน ฝนที่ตกกลางวัน เมล็ดเปียก มีโอกาสแห้งง่ายกว่า

ความคลาดเคลื่อน เรื่องของ time step ที่การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยภูมิอากาศ มีความผันแปรในรอบวันที่ มีผลต่อการดูดคายความชื้นเมล็ด และเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว ซึ่งข้อมูลและการจำลองรายวันอาจจะหยาบไป ที่จะตรวจสอบพบอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงในรอบวัน

สมการการการดูดความชื้นได้จากการทดลองวัดจากเมล็ดในภาพกอง ไม่ใช่จากเมล็ดที่อยู่เป็นรวง ที่มีการกระจายระหว่างเมล็ด แต่ละเมล็ดไม่สัมผัสกัน ควรต้องวัดได้ขณะอยู่ในแปลง การระเหยจึงขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเมล็ดในรวงด้วย ถ้าหนาแน่นมาก มีโอกาสบังกันมาก เมล็ดด้านนอกน่าจะระเหยเร็วกว่าและดูดความชื้นเร็วกว่า โดนฝนมากกว่า สัมผัสกับการเปลี่ยนแปลงอากาศมากกว่า นอกจากนั้นความเร็วลม ที่มีผลต่อการระเหย ไม่สามารถประมาณได้ และไม่ได้นำมาใช้ในการคำนวณ ยกเว้นจะใช้การคำนวณแบบ Penman-Monteith Equation (Monteith and Unsworth, 1991) ที่เสนอ Real *et al.* (1997)



19 พย.40 -18 ธค.40



2 พค. 41 -2 มิย.41

ภาพ 15 ค่าจำลอง(sim) และค่าที่วัดได้ (obs) ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด (RHmax) ม.เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

สรุป และข้อเสนอแนะ

แบบจำลองคุณภาพการสี เขียนขึ้นโดยโปรแกรม STELLA Research 5.1.1 ที่เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการจำลองระบบแบบ dynamic system เพื่อจำลองระบบการประเมินคุณภาพการสีจากปัจจัยการผลิตก่อนเก็บเกี่ยว โดยมีข้อสมมติว่าไม่มีอิทธิพลจากปัจจัยหลังเก็บเกี่ยว และออกแบบให้สามารถปรับใช้กับสภาพแวดล้อม การจัดการ และพันธุ์ที่ต่างกัน ประกอบด้วยกระบวนการจำลอง 2 ระยะ คือ การจำลองระยะก่อนสุกแก่จนถึงสุกแก่ และการจำลองระยะหลังสุกแก่

ในระยะก่อนสุกแก่จนถึงสุกแก่การหาค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวสารใช้ข้อมูลผลลัพธ์จากการใช้แบบจำลองการเจริญเติบโตของข้าว CERES-Rice 3.5 ที่ได้แก่น้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือกต่อหนึ่งเมล็ด และระยะเวลาสะสมน้ำหนักเมล็ด การประมาณเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวก่อนสุกแก่จนถึงสุกแก่จากเปอร์เซ็นต์ข้าวสาร โดยสัมพันธ์กับระดับการสุกแก่ การเกิดท้องไข่ และการเกิดเมล็ดร้าวเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของการสุกแก่ ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิขณะสะสมน้ำหนักเมล็ดและความทนต่ออุณหภูมิของแต่ละพันธุ์ เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนเมล็ดที่ได้จากการจำลองด้วย CERES-Rice 3.5 ระยะเวลาระบายน้ำ

ส่วนในระยะหลังสุกแก่ การประมาณการลดลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว ขึ้นอยู่กับอัตราการหักที่ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์พันธุกรรมการเกิดรอยร้าว และการหักจากการสีและความเร็วการดูดความชื้นเมล็ดจากบรรยากาศ โดยคำนวณจากระบบความชื้นสมดุลของเมล็ดกับอากาศรอบเมล็ด โดยที่ความชื้นเมล็ดลดลงนั้นสัมพันธ์กับพลังงานแสงและอุณหภูมิ และการดูดความชื้นกลับสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ความชื้นเมล็ดขณะนั้นๆ

ความถูกต้องของการจำลองส่วนหนึ่งอยู่ที่การปรับค่าสัมประสิทธิ์ทางพันธุกรรมเพื่อให้ค่าจำลองสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จริง และทำการทดสอบค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จริงในงานทดลองอื่น ซึ่งแบบจำลองสามารถประเมินเปอร์เซ็นต์ความชื้น เปอร์เซ็นต์ข้าวสาร และเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว ที่มีแนวโน้มสอดคล้องกัน แสดงว่าสมมติฐานที่ใช้ในแบบจำลองน่าจะสอดคล้องกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริง

แบบจำลองสามารถพัฒนาต่อไปเพื่อลดความคลาดเคลื่อนการจำลอง โดยพัฒนาความรู้และรายละเอียดของปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในระบบ ได้แก่ปัจจัยอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงความชื้นซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงในรอบวัน หรือเป็นรายชั่วโมง รูปแบบความแตกต่างระหว่างการ

สุกแก่เมล็ด การเกิดท้องไข่ ที่เป็นผลของสิ่งแวดล้อมต่างๆ ร่วมกับบทบาทของพันธุกรรม หรือความรู้เกี่ยวกับบทบาทของธาตุอาหารหรือสารอื่นๆ ที่สัมพันธ์กับคุณภาพการสี ความแม่นยำ และถูกต้องของแบบจำลองนี้ส่วนสำคัญยังขึ้นอยู่กับข้อจำกัดและความแม่นยำการจำลองของ CERES-Rice 3.5 ด้วย

นอกจากนั้นแบบจำลองอาจสามารถเขียนใหม่ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เป็นโปรแกรมแบบ General Purpose Programming Language เช่น FORTRAN ดังที่ใช้ใน CERES-Rice 3.5 ที่แม้ว่าจะมีความยุ่งยากในการเขียนมากกว่า แต่มีประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นกว่าโปรแกรม STELLA Research 5.1.1 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อให้มีการจัดการข้อมูลนำเข้าและข้อมูลผลลัพธ์ เพื่อความสะดวก และรวดเร็วในการใช้และการทดสอบ ตลอดจนการปรับปรุงแก้ไข และนำไปใช้ประโยชน์เพื่องานวิจัยและพัฒนาในวงกว้าง

การจำลองระบบ ที่ได้รับการพัฒนาและทดสอบอย่างกว้างขวาง เป็นการสร้าง และขยายความรู้ความเข้าใจในอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อคุณภาพการสี ที่เป็นภาพรวม ที่บอกได้ทั้งทิศทางและขนาดของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพการสี และสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการวางแผนการวิจัยและการจัดการเพื่อพัฒนาทั้งผลผลิตและคุณภาพการสีอย่างเป็นระบบ เช่นการปรับปรุงพันธุ์ การเลือกใช้พันธุ์ การตัดสินใจเลือกระยะเวลาและสถานที่ที่ปลูก และการจัดการปุ๋ยและน้ำที่เหมาะสม หรือระยะเวลาการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม เพื่อนำไปสู่การสร้างโอกาสให้มีผลตอบแทนและประสิทธิภาพการปลูก และการตลาดของข้าวที่ดีขึ้น