

แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการเติบโตของต้นข้าวระยะกล้าภายใต้ความเครียดจากเกลือ



นายสุลักษณ์ ชัยขรรค์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาคณิตศาสตร์ประยุกต์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการ  
คอมพิวเตอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

MATHEMATICAL MODEL FOR RICE GROWTH AT SEEDLING STAGE UNDER SALT  
STRESS



Mr. Suluk Chaikhan

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Applied Mathematics and  
Computational Science

Department of Mathematics and Computer Science  
Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการเติบโตของต้นข้าว
	ระยะกล้าภายใต้ความเครียดจากเกลือ
โดย	นายสุลักษณ์ ชัยขรรค์
สาขาวิชา	คณิตศาสตร์ประยุกต์และวิทยาการคอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. เพชรอาภา บุญเสริม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ สุชาดา ศิริพันธ์

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คำรณ เมฆฉาย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร. เพชรอาภา บุญเสริม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ สุชาดา ศิริพันธ์)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. กิติพร พลายมาศ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. พูนพิภพ เกษมทรัพย์)

สัญลักษณ์ ชัยขรรค์ : แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการเติบโตของต้นข้าวระยะกล้าภายใต้ความเครียดจากเกลือ. (MATHEMATICAL MODEL FOR RICE GROWTH AT SEEDLING STAGE UNDER SALT STRESS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. เพชรอรภา บุญเสริม, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. สุชาดา ศิริพันธุ์, 44 หน้า.

ปัญหาสภาวะดินเค็ม มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของข้าว โดยเห็นได้ชัดเจนในระยะกล้า การศึกษาผลกระทบของความเค็มกระทำโดยใช้ค่าของการนำไฟฟ้า (EC) ที่วัดจากสารละลาย Asher ที่มีส่วนผสมของเกลือในระดับต่างกันคือ 2 6 10 และ 14 dS/m สำหรับใช้ในการทดลองปลูกข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 จากนั้นทำการเก็บข้อมูลมวลชีวภาพ และปริมาณการสะสมโซเดียมภายในเซลล์เป็นระยะเวลา 11 วัน พบว่ามวลชีวภาพลดลง แต่ปริมาณโซเดียมไอออนที่สะสมภายในเซลล์เพิ่มขึ้น นำข้อมูลดังกล่าวมาสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่อธิบายพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของปริมาณโซเดียมไอออนในเซลล์ และการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพในระยะกล้าที่มีรูปแบบเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ แบบจำลองที่ได้สามารถใช้ประเมินผลที่อาจเกิดขึ้นกับกล้าถ้ามีสภาวะความเค็มเกิดขึ้นได้โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5%



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา	คณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา	คณิตศาสตร์ประยุกต์และวิทยาการคณนา	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....
ปีการศึกษา	2556	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

# # 5472142023 : MAJOR APPLIED MATHEMATICS AND COMPUTATIONAL SCIENCE

KEYWORDS: RICE / SALT TOLERANT / MATHEMATICAL MODEL

SULUK CHAIKHAN: MATHEMATICAL MODEL FOR RICE GROWTH AT SEEDLING STAGE UNDER SALT STRESS. ADVISOR: PETARPA BOONSERM, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. SUCHADA SIRIPANT, 44 pp.

Soil salinity is one of the abiotic stresses that cause reduced rice growth and development, especially in their seedling stage when they are particularly susceptible to salinity level. The treatments in this study were application of four levels of electrical conductivity (EC), including 2, 6, 10 and 14 dS/m, on Pathumthani 1 rice seedlings, as part of the Asher's solution. Dry weight and percentage of sodium ion within cells were measured during the span of 11 days after treatment with varying salinity levels. The results of this study showed that an increase in electrical conductivity decreased rice dry weights, whereas sodium ion accumulations slightly increased. A mathematical model was presented to describe plant response under salt stress, using differential equation in contracted model, at relative error of less than 5%.



Department: Mathematics and Computer  
Science

Field of Study: Applied Mathematics and  
Computational Science

Academic Year: 2013

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ด้วยความกรุณาช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ ดร.เพชรอาภา บุญเสริม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ สุชาติ ศิริพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้ คำแนะนำและความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ตลอดระยะเวลาการทำวิจัย รวมทั้งช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น จึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ สาขา คณิตศาสตร์ประยุกต์และวิทยาการคณนา ที่ได้ถ่ายทอดความรู้อย่างเต็มที่ รวมทั้งเสียสละเวลาให้คำแนะนำแก่ผู้ทำวิจัย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คำรณ เมฆฉาย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.กิติพร พลายมาศ และ รองศาสตราจารย์ ดร.พูนพิภพ เกษมทรัพย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจสอบและให้คำแนะนำแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. วิสุทธิ์ วีรสาร ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำและความช่วยเหลืออย่างยิ่งในการทำการทดลอง นิสิตและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์และเคมีของดินเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนในการจัดซื้อเครื่องมือวิทยาศาสตร์สำหรับการทดลองโดยวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยต่างๆ

ขอขอบคุณ ทุกคนในครอบครัว ที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจและสนับสนุนในด้านต่างๆอย่างดีตลอดมาจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ เพื่อนร่วมรุ่น และพี่ๆ น้องๆ สาขาวิทยาการคณนาและศูนย์วิจัย AVIC ทุกคนสำหรับกำลังใจ คำปรึกษาและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ตลอดการทำงานวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	1
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 งานวิจัยทางพฤกษศาสตร์ที่ศึกษาผลของความเค็มต่อการเจริญเติบโตของพืช.....	3
2.2 งานวิจัยที่ศึกษาตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการตอบสนองของพืชต่อภาวะเครียดทาง กายภาพ.....	4
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	6
3.1 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC).....	6
3.2 วางแผนการทดลองแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design).....	6
3.3 ระบบไฮโดรโปนิคส์ (Hydroponics system).....	7
3.4 สรีรวิทยาและข้อมูลจำเพาะของต้นข้าว (Rice Physiology and Specification).....	8
3.4.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของต้นข้าว.....	8
3.4.1.1 ราก (Root).....	8
3.4.1.2 ลำต้น (Culm).....	8
3.4.1.3 ใบ (Leaf).....	9
3.4.1.4 ช่อดอก (Inflorescence, panicle).....	9
3.4.1.5 ดอกข้าว (Spikelet).....	9

3.4.1.6 เมล็ดข้าว (Rice fruit, Rice grain, Rice seed).....	10
3.5 การเคลื่อนที่ของเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้าออกเซลล์.....	11
3.6 สาเหตุที่ภาวะเครียดจากเกลือมีผลกระทบต่อพืช.....	12
3.6.1 การเกิดความเครียดออสโมติก (Osmotic stress).....	12
3.6.2 ความเป็นพิษของโซเดียมไอออน (Sodium ion toxicity).....	12
3.7 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis).....	12
3.7.1 Levenberg-Marquart method.....	13
3.8 การทดสอบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง.....	15
บทที่ 4 การสร้างแบบจำลอง.....	16
4.1 การออกแบบการทดลองและเก็บข้อมูล.....	16
4.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์.....	16
4.1.2 วิธีการทดลอง และ การเก็บข้อมูล.....	17
4.2 แบบจำลอง.....	19
4.2.1 แบบจำลองการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ภายในต้นข้าว.....	19
4.2.2 แบบจำลองการเติบโตของต้นข้าวระยะกล้าภายใต้ความเครียดจากเกลือ.....	24
4.2.2.1 ความเครียดที่เกิดจาก Osmotic stress.....	24
4.2.2.2 ความเครียดที่เกิดจาก Toxicity of sodium ion.....	24
บทที่ 5 ผลวิจัย สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	31
5.1 เปรียบเทียบแบบผลของข้อมูลและแบบจำลอง.....	31
5.1.1 แบบจำลองการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ภายในต้นข้าวในระยะกล้า.....	31
5.1.2 แบบจำลองการเจริญเติบโตของต้นข้าว.....	35
5.2 สรุปผลงานวิจัย.....	38
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	38
รายการอ้างอิง.....	39
ภาคผนวก.....	42
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	44



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	การจำแนกระดับความเค็มที่มีผลต่อพืช (FAO, 1976).....6
3.2	ความเข้มข้นเฉลี่ยของธาตุอาหารในเนื้อเยื่อพืช (Wild and Jones, 1988).....7
4.1	Modified standard evaluation score (SES) of visual salt injury at seedling stage. ....18
4.2	แสดงค่าพารามิเตอร์ $a_i$ , $b_i$ และ $c_i$ ที่ขึ้นอยู่กับค่า EC ที่ต้นข้าวได้รับ.....24
5.1	แสดงผลเฉลยของแบบจำลองการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ภายใน ต้นข้าวในระยะกล้า.....31
5.2	แสดงค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของปริมาณการสะสมของโซเดียมไอออนที่ EC=12dS/m.....34
5.3	แสดงแบบจำลองการเติบโตของต้นข้าวภายใต้ความเค็มที่ระดับต่างๆ.....35
5.4	แสดงค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของปริมาณการเติบโตของต้นข้าว ที่ EC=12 dS/m.....38

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
3.1 การลำเลียงโซเดียมไอออนเข้าออกเซลล์โดยผ่านโปรตีนขนส่ง.....	11
4.1 แสดงลักษณะของต้นข้าวก่อนได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์.....	18
4.2 แสดงลักษณะของต้นข้าวหลังได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์.....	19
4.3 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณการสะสมโซเดียมไอออน ภายในข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ในระยะกล้า.....	20
4.4 แสดงความสัมพันธ์ของคะแนนความเสียหายของ ข้าวจากความเค็มกับเวลา.....	20
4.5 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาที่พืชแสดงความเสียหาย ทางด้านสรีระอย่างชัดเจนกับค่า EC.....	22
4.6 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์โซเดียมไอออนที่สะสม ณ เวลาเริ่มต้นกับค่า EC.....	22
4.7 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักแห้ง กับ กำลังสองของเวลา.....	25
4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ $a_j$ ที่ขึ้นอยู่กับค่า EC ที่ต้นข้าวได้รับ.....	26
4.9 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาที่พืชเริ่มได้รับความเสียหาย เทียบกับ EC.....	27
4.10 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองในระยะ Osmotic stress เทียบกับข้อมูลน้ำหนักแห้งจากการทดลอง.....	28
5.1 แสดงปริมาณการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในต้นข้าว ที่ค่า EC = 2 dS/m ในระยะกล้า.....	31
5.2 แสดงปริมาณการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในต้นข้าว ที่ค่า EC = 6 dS/m ในระยะกล้า.....	31
5.3 แสดงปริมาณการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในต้นข้าว ที่ค่า EC = 10 dS/m ในระยะกล้า.....	33
5.4 แสดงปริมาณการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในต้นข้าว ที่ค่า EC = 14 dS/m ในระยะกล้า.....	33

ภาพที่	หน้า
5.5    แสดงปริมาณการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในต้นข้าว ที่ค่า EC =12 dS/m ในระยะกล้า.....	34
5.6    แสดงการเติบโตของต้นข้าวที่ค่า EC =2 dS/m ในระยะกล้า.....	35
5.7    แสดงการเติบโตของต้นข้าวที่ค่า EC =6 dS/m ในระยะกล้า.....	36
5.8    แสดงการเติบโตของต้นข้าวที่ค่า EC =10 dS/m ในระยะกล้า.....	36
5.9    แสดงการเติบโตของต้นข้าวที่ค่า EC =14 dS/m ในระยะกล้า.....	37
5.10   แสดงการเติบโตของต้นข้าวที่ค่า EC =12 dS/m ในระยะกล้า.....	37



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ดินเค็ม (Saline soil) คือ ดินที่มีเกลือละลายอยู่ในสารละลายดินมากเกินไปจนเกิดสภาวะที่เป็นพิษต่อพืช ปัญหาดังกล่าวเป็นหนึ่งในปัญหาหลักที่สำคัญของเกษตรกรในประเทศไทยโดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวมักเป็นที่ลุ่มต่ำ เกลือที่ดินชั้นบนจะถูกน้ำฝนชะล้างไปในดินชั้นล่าง และเกลือจะกลับชั้นมาปรากฏที่ผิวดินใหม่ในช่วงแล้ง โดยละลายอยู่ในน้ำที่ระเหยขึ้นมาตามช่องว่างของชั้นดินแล้วตกผลึกค้างอยู่บนผิวดิน [4] พืชที่ปลูกในดินดังกล่าวจะมีการเจริญเติบโต และผลผลิตลดน้อยลง เนื่องจากรากไม่สามารถดูดน้ำได้สะดวก

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่ประสบกับปัญหาดินเค็ม ผลกระทบจากสภาวะดังกล่าวคือ ข้าวมีปลายใบสีขาว บางใบแห้งเป็นแถบ มักพบในใบแก่ก่อน อัตราการเจริญเติบโตของใบ และรวมถึงการเปิดของปากใบลดน้อยลง ต้นข้าวหยุดการเจริญเติบโต และอาจส่งผลให้ข้าวขาดฟอสฟอรัส สังกะสี เหล็ก หรือโบรอน ทำให้ผลผลิตลดลงในที่สุด [5] เนื่องจากปริมาณโซเดียมและคลอไรด์ไอออนที่มีความเข้มข้นสูงส่งผลให้การแบ่งเซลล์และการขยายตัวของเซลล์ถูกยับยั้ง เยื่อหุ้มเซลล์เกิดความเสียหาย เกิดภาวะความเป็นพิษภายในเซลล์ ยับยั้งการสังเคราะห์แสง และส่งผลให้เกิดสภาวะขาดธาตุ ([9], [23]) งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมการสะสมปริมาณโซเดียมคลอไรด์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการอธิบายการเจริญเติบโตของต้นข้าวภายใต้ความเค็มในระยะกล้า

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่อธิบายการเจริญเติบโตของต้นข้าวในระยะกล้าที่ได้รับผลกระทบจากความเค็มของเกลือโซเดียมคลอไรด์

#### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาพฤติกรรมการเจริญเติบโตของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ในระยะกล้า
- 1.3.2 ศึกษาผลกระทบจากความเค็มที่ได้รับเกิดจากเกลือโซเดียมคลอไรด์โดยศึกษาค่าการนำไฟฟ้า (EC) ในช่วง 2-14 dS/m
- 1.3.3 ต้นข้าวได้รับสารอาหารจากสารละลายสูตร Asher ด้วยกระบวนการไฮโดรโปนิกส์
- 1.3.4 การเจริญเติบโตของข้าวใช้ค่าน้ำหนักแห้งของต้นและรากในการศึกษาพฤติกรรม

1.3.5 การวัดปริมาณโซเดียมไอออนที่สะสมภายในเซลล์ ใช้วิธีการเตรียมตัวอย่างพืชในรูปสารละลาย และวิเคราะห์โซเดียมไอออนด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

#### 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาปัญหา และผลกระทบของเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ส่งผลกับการเจริญเติบโตของต้นข้าว

1.4.2 ศึกษาทฤษฎีเพื่อออกแบบการทดลอง

1.4.3 ทดลอง และเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของต้นข้าว

1.4.4 วิเคราะห์ข้อมูล และตรวจสอบความถูกต้อง

1.4.5 สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการเจริญเติบโตของต้นข้าว จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

1.4.6 ทดสอบ และปรับปรุงแบบจำลองคณิตศาสตร์

1.4.7 สรุปผล เขียนรายงาน และจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายการเจริญเติบโตของต้นข้าวในระยะกล้า ที่ได้รับผลกระทบจากความเครียดของเกลือโซเดียมคลอไรด์ในปริมาณที่แตกต่างกันได้

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ แบ่งออกเป็น 5 บท โดยบทที่ 2 จะกล่าวถึง เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง บทที่ 3 จะกล่าวถึง ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน บทที่ 4 จะกล่าวถึง การสร้างแบบจำลองการเจริญเติบโตของต้นข้าวที่ได้รับผลกระทบจากความเครียดของเกลือโซเดียมคลอไรด์ และบทสุดท้ายจะกล่าวถึง ผลการวิจัย ผลสรุป และข้อเสนอแนะของงานวิจัย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันปัญหาดินที่ไม่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกได้ส่งผลกระทบต่อเกษตรกรทั่วโลกเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะปัญหาด้านดินเค็ม นักพฤกษศาสตร์จึงสนใจที่จะศึกษาผลกระทบ และการเปลี่ยนแปลงของพืชทั้งด้านสรีรวิทยา และชีววิทยาโมเลกุลที่เกิดจากความเครียดดังกล่าว

ข้าว (*Oryzasativa*.L) เป็นธัญพืชที่ให้พลังงานหลักของประชากรส่วนใหญ่ของโลก โดยเฉพาะประชากรของประเทศในแถบเอเชีย นอกจากนี้ข้าวยังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย ปัญหาดินเค็มเป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญที่ส่งผลให้ข้าวมีการเจริญเติบโตลดน้อยลง รวมถึงได้ผลผลิต ปริมาณน้อย และคุณภาพต่ำ ด้วยเหตุนี้ประเด็นดังกล่าวจึงเป็นที่สนใจในการศึกษาทั้งในด้าน พฤกษศาสตร์ และการสร้างแบบจำลอง

เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองการเจริญเติบโตของข้าวในระยะต้นกล้า ที่ได้รับผลกระทบจากความเครียดที่เกิดจากความเค็ม ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

- งานวิจัยทางพฤกษศาสตร์ที่ศึกษาผลของความเค็มต่อการเจริญเติบโตของพืช
- งานวิจัยที่ศึกษาตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการตอบสนองของพืชต่อภาวะเครียดทางกายภาพ

#### 2.1 งานวิจัยทางพฤกษศาสตร์ที่ศึกษาผลของความเค็มต่อการเจริญเติบโตของพืช

ในปี 2002 Michael G. Pitman และ André Läuchli [17] กล่าวว่า ปัญหาความเค็ม เป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลให้ผลผลิตทางการเกษตรถูกจำกัด ซึ่งปัญหาดังกล่าวส่งผลให้ผลผลิตลดลง รวมถึงเงินที่ใช้ในการลงทุนจะสูญเสียไปกับการแก้ปัญหาดังกล่าวอีกด้วย

ระดับความเสียหายของพืชเมื่อได้รับผลกระทบจากความเค็มขึ้นอยู่กับปัจจัยเหล่านี้ไม่ว่าจะเป็น ชนิด ลักษณะทางพันธุกรรม อายุ ค่าการนำไฟฟ้า (LAUCHLI AND GRATTAN, 2007 [16])

ในปี 2007 J. Corbishley และ D. Pearce [10] กล่าวว่า ทั่วโลกต่างประสบกับปัญหาดินเค็ม ซึ่งมีพื้นที่มากกว่า 3% ของพื้นที่ทั้งโลก โดยคิดเป็นพื้นที่ 4 ล้านตารางกิโลเมตร ไม่ว่าจะเป็นประเทศออสเตรเลีย ปากีสถาน และประเทศไทย สำหรับประเทศไทยนั้นถูกจัดอันดับให้มีความเค็มคิดเป็น 0.2% ของพื้นที่ที่ได้ผลกระทบจากเกลือ ซึ่งอยู่ในอันดับที่ 45 ของโลก

ในปี 2007 S. Cha-Um และคณะ [18] ได้ศึกษาผลกระทบของเกลือโซเดียมคลอไรด์กับข้าวหอมของไทยได้แก่ ปทุมธานี 1 หอมจันทร์ และ หอมมะลิ ในระยะกล้าโดยทำการศึกษาโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 0 85 171 256 342 และ 427 mM เป็นระยะเวลา 5 วัน จากนั้นทำการเก็บข้อมูล พบว่าข้าวมีการสะสมปริมาณ โซเดียมไอออนเพิ่มขึ้น ในขณะที่การสะสมของโพแทสเซียมลดน้อยลง ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวสังเกตได้อย่างชัดเจนในช่วงที่มีความเข้มข้นของโซเดียม

คลอไรด์อยู่ที่ 342-427 mM นอกจากนี้คณะวิจัยยังสังเกตพบการสะสมของโซเดียมไอออนบริเวณทั้งใบ และรากอีกด้วย

ในปี 2010 S. CHA-UM และคณะ [19] ได้ศึกษาผลกระทบของโซเดียมคลอไรด์กับข้าวเป็นระยะเวลา 7 วัน โดยเก็บค่าทางชีวเคมี สรีรวิทยา และสัณฐานวิทยาของพืชพบว่าความเค็มส่งผลให้ปริมาณ คลอโรฟิลล์-เอ คลอโรฟิลล์-บี และแคโรทีนอยด์ ลดน้อยลง ค่าดังกล่าวแปรผันกับอัตราการเจริญเติบโต และขนาดของใบข้าว นอกจากนี้ยังตรวจพบว่าการสะสมของโปรตีนที่บริเวณใบ และรากเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

ในปี 2011 A. Salam และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ค่าการนำไฟฟ้า (0 10 15 และ 20 ds/m) ของข้าวที่มีลักษณะทางพันธุกรรมที่แตกต่างกัน 48 สายพันธุ์ ในระยะกล้า โดยทำการทดลองในสารละลายธาตุอาหาร Hoagland พบว่าความเค็มส่งผลให้ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง ความยาวราก และความสูงของต้น ลดน้อยลง

## 2.2 งานวิจัยที่ศึกษาตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการตอบสนองของพืชต่อภาวะเครียดทางกายภาพ

ในปี 2009 K. Siringam และคณะ [14] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโซเดียมไอออน กับลักษณะการเปลี่ยนแปลงภายนอกของข้าวในระยะกล้า เป็นระยะเวลา 4 วัน โดยเก็บข้อมูลดังนี้ คลอโรฟิลล์-เอ คลอโรฟิลล์-บี แคโรทีนอยด์ ประสิทธิภาพของควอนตัมของระบบแสง 2 ประสิทธิภาพการใช้แสง 2 สูงสุด และน้ำหนักแห้ง ผลจากการทดลอง เมื่อโซเดียมไอออนเข้าสู่เนื้อเยื่อของรากพบว่าข้าวปทุมธานี 1 มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ปริมาณโซเดียมไอออนจะสะสมอยู่ที่บริเวณใบ ทำให้ ความต่างศักย์ของน้ำลดลง ส่งผลให้เมดูลัสเสื่อมสภาพและคลอโรฟิลล์-เอ เรืองแสงน้อยลง จากเหตุการณ์ดังกล่าวทำให้การเจริญเติบโตลดน้อยลง และใช้วิธีการทางสถิติของ Duncan's New Multiple Range Test ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.01$  และ  $0.05$ )

ในปี 2013 S. Sohrabikertabad และคณะ [22] ได้ศึกษาผลกระทบของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่ออัตราการงอกของเมล็ดในที่มีที่อุณหภูมิแตกต่างกันดังนี้ 25 30 35 และ 40 องศาเซลเซียส และได้ศึกษาผลกระทบของความเครียดดังกล่าวในระยะกล้าอีกด้วย โดยทำการเก็บข้อมูลดังนี้ เปอร์เซ็นต์ และอัตราการงอกของเมล็ด ปริมาณโซเดียมในต้น น้ำหนักราก และใบ และนำข้อมูลของอัตราการงอกของเมล็ด มาอธิบายด้วยแบบจำลองโลจิสติกส์

$$G(\%) = \frac{G_{\max}}{[1 + (\frac{X}{X_{50}})^{\text{Grate}}]}$$

เมื่อ

G(%)	คือ การงอก (%) ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ x
G <sub>max</sub>	คือ การงอกของเมล็ดสูงสุด (%)
X <sub>50</sub>	คือ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ 50% ของค่าสูงสุด
Grate	คือ ความชัดของ X <sub>50</sub>

และใช้การวิเคราะห์ one-way ANOVA และ Duncan's test มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



### บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน

#### 3.1 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC)

ดินเค็ม (Saline soil) คือ ดินที่มีปริมาณเกลือที่ละลายอยู่ในสารละลายดินมากเกินไป ซึ่งเป็นหนึ่งในปัญหาหลักที่สำคัญของเกษตรกรในประเทศไทย พืชที่ปลูกในดินดังกล่าว จะมีการเจริญเติบโต และผลผลิตลดน้อยลง ภาวะเค็มสามารถพิจารณาได้จากค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity หรือ EC) ของดิน โดยในดินเค็มจะมีค่าการนำไฟฟ้าของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำมากกว่า 2 เดซิซีเมนต่อเมตร (dS/m) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าการนำไฟฟ้าในระดับต่างๆจะส่งผลกระทบต่อพืชแตกต่างกัน ดังตารางที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าดังกล่าวคือ conductivity meter

ตารางที่ 3.1 การจำแนกระดับความเค็มที่มีผลต่อพืช (FAO, 1976 [21])

ค่าการนำไฟฟ้า (dS/m)	ระดับความเค็ม	ผลกระทบของความเค็มต่อพืช
น้อยกว่า 2	ไม่เค็ม	ไม่มีผลกระทบต่อพืช
2-4	เค็มน้อย	มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชไม่ทนเค็ม
4-8	เค็มปานกลาง	มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิด
8-16	เค็มมาก	เฉพาะพืชทนเค็มเท่านั้นจึงเจริญเติบโตให้ผลผลิตได้
มากกว่า 16	เค็มจัด	เฉพาะพืชทนเค็มจัดจึงเจริญเติบโตให้ผลผลิตได้

#### 3.2 วางแผนการทดลองแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design)

วางแผนการทดลองแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ เป็นหนึ่งในการออกแบบการทดลองทางชีววิทยา โดยมีการดำเนินการ 2 ขั้นตอนดังนี้ (McClave & Sincich, 2003 [13] และ ชารารัตน์ ศุภศิริ, 2554 [1])

- 3.2.1 ทำการจัดหน่วยทดลองที่มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน และได้รับผลกระทบของปัจจัยอื่นรวมกันเป็นบล็อกจำนวน  $b$  บล็อกซึ่ง  $b$  เป็นจำนวนนับที่มากกว่า 1 ซึ่งแต่ละบล็อกต้องมีจำนวนหน่วยทดลองเท่ากับ  $k$  หรือพหุคูณของ  $k$  เมื่อ  $k$  เป็นจำนวนทริตเมนต์
- 3.2.2 สุ่มทริตเมนต์ให้กับหน่วยทดลองภายในแต่ละบล็อกโดยแต่ละบล็อกจะต้องประกอบไปด้วยทุกทริตเมนต์ ทริตเมนต์ละเท่าๆกัน ซึ่งจำนวนตัวอย่างผลการทดลองทั้งหมดมีค่าเท่ากับ  $bk$

### 3.3 ระบบไฮโดรโปนิคส์ (Hydroponics system)

ไฮโดรโปนิคส์ (Hydroponics) หรือการปลูกพืชไร้ดิน มีที่มาจากคำว่า Hydros และ ponos ซึ่งแปลว่าการปลูกพืชในน้ำ ซึ่งระบบปลูกดังกล่าวกำลังเป็นที่นิยมในปัจจุบัน เนื่องจากผลผลิตที่ได้ปลอดภัยจากสารเคมีที่ปนเปื้อนในดิน ไม่ต้องเผชิญกับปัญหาดินไม่เหมาะสม และไม่จำเป็นต้องใช้พื้นที่มากในการปลูกอีกด้วย โดยรากของพืชจะแช่อยู่ในสารละลายธาตุอาหารโดยตรง ร่วมกับการให้ออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอต่อการผลิตพลังงานในการดูดซึมธาตุอาหาร และการดำเนินกิจกรรมของเซลล์

ธาตุอาหารเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเจริญเติบโตของพืช ปัจจุบันมีการจำแนกธาตุอาหารออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ โดยใช้ปริมาณที่ปรากฏในเนื้อเยื่อพืชเป็นเกณฑ์ ดังตารางที่ 3.2 โดยแบ่งได้ดังนี้ กลุ่มที่ 1 คือ มหาสารอาหาร (macronutrients) เป็นธาตุที่พืชต้องการในปริมาณมาก หรือว่าเป็นธาตุที่พบอยู่ในเนื้อเยื่อของพืชในปริมาณมาก (0.2% ถึง 4% โดยน้ำหนักแห้ง) ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) กำมะถัน (S) แมกนีเซียม (Mg) และซิลิกอน (Si) กลุ่มที่ 2 คือ จุลสารอาหาร เป็นธาตุที่มีอยู่ในเนื้อเยื่อของพืชในปริมาณน้อยมีหน่วยเป็นหน่วย ppm โดยมีปริมาณอยู่ในช่วงตั้งแต่ 5 ถึง 200 ppm หรือ น้อยกว่า 0.02% โดยน้ำหนักแห้ง ได้แก่ โบรอน (B) คลอรีน (Cl) แมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) โมลิบดีนัม (Mo) นิกเกิล (Ni) เซเลเนียม (Se) และโซเดียม (Na) ดังนั้นการให้สารละลายธาตุอาหารที่เหมาะสมจึงส่งผลให้พืชมีการเจริญเติบโต และให้ผลผลิตที่ดีมีคุณภาพ

ตารางที่ 3.2 ความเข้มข้นเฉลี่ยของธาตุอาหารในเนื้อเยื่อพืช (Wild and Jones, 1988 [24])

ธาตุอาหาร	ความเข้มข้น (mmol/kg น้ำหนักแห้ง)	ความเข้มข้น (โดยน้ำหนักแห้ง)
ไฮโดรเจน	600,000	6.0%
คาร์บอน	40,000	45.0%
ออกซิเจน	30,000	45.0%
ไนโตรเจน	1,000	1.5%
โพแทสเซียม	250	1.0%
แคลเซียม	125	0.5%
แมกนีเซียม	80	0.2%
ฟอสฟอรัส	60	0.2%
กำมะถัน	30	0.1%
คลอรีน	3.0	100 mg/kg

ธาตุอาหาร	ความเข้มข้น (mmol/kg น้ำหนักแห้ง)	ความเข้มข้น (โดยน้ำหนักแห้ง)
โบรอน	2.0	20 mg/kg
เหล็ก	2.0	100 mg/kg
แมงกานีส	1.0	50 mg/kg
สังกะสี	0.3	20 mg/kg
ทองแดง	0.1	6 mg/kg
โมลิบดีนัม	0.001	0.1 mg/kg

### 3.4 สรีรวิทยาและข้อมูลจำเพาะของต้นข้าว (Rice Physiology and Specification)

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความต้องการในการบริโภคอย่างมาก โดยเฉพาะชาวเอเชียรับประทานข้าวเป็นอาหารหลัก และยังเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจที่ทำรายได้ให้แก่ประเทศไทยอย่างมาก

#### 3.4.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของต้นข้าว

##### 3.4.1.1 ราก (Root)

รากข้าวเป็นระบบรากฝอย (fibrous root system) รากอันแรกเจริญมาจาก radicle ซึ่งถูกเรียกว่า primary seminal root รากนี้จะทำหน้าที่เป็นรากชั่วคราว และ ยังมีรากชั่วคราวอีก 2-3 ราก ที่เรียกว่า secondary seminal roots ซึ่งจะพัฒนาไปเป็น lateral roots รากชั่วคราวเหล่านี้จะเน่าเปื่อย และสลายไป ซึ่งจะถูกแทนที่ด้วยระบบรากชุดที่สอง (adventitious roots) ซึ่งเกิดจากส่วนของข้อของลำต้นที่อยู่ใต้ดิน

รากพิเศษ (adventitious roots) แต่ละรากจะมีการแตกแขนงออกไปเริ่มจาก primary root เป็น secondary root และ tertiary root ตามลำดับ และในสภาพที่มีน้ำขัง รากอาจแตกแขนงออกไปได้ถึง 6 ลำดับ

ลักษณะพิเศษของรากข้าวคือ มีช่องอากาศขนาดใหญ่ในราก ที่เติบโตเต็มที่แล้ว เรียกว่า lysigenous intercellular space ซึ่งจะเชื่อมต่อกับช่อง อากาศภายในลำต้นและใบ ทำให้อากาศถูกส่งผ่านจากยอดมาสู่รากได้

##### 3.4.1.2 ลำต้น (Culm)

ลำต้นของข้าวประกอบด้วยข้อ (node) ซึ่งเป็นที่เกิดของใบ ตา และปล้อง (internode) ตาของข้าวอาจจะเจริญเป็นแขนง (tiller) nodal septum ซึ่งเป็นเยื่อ

เยื่อที่อยู่ภายในข้อจะแบ่งปล้องออกจากกัน ปล้องที่เจริญเติบโตเต็มที่แล้วจะกลวง ความยาวของปล้องในแต่ละตำแหน่งจะมีความแตกต่างกัน โดยปล้องที่อยู่ส่วนบน จะยาวกว่าปล้องที่อยู่ส่วนล่าง

แขนง (tiller) มีการแตกแบบสลับข้างกัน (alternate pattern) โดยจะแตกออกจากลำต้นหลัก (main culm) แขนงที่แตกจากลำต้นหลักจะถูกเรียกว่า primary tiller ซึ่งจะเริ่มเกิดจากข้อที่อยู่ล่างสุดก่อน จากนั้น primary tiller จะแตกแขนงออกไปเป็น secondary tiller และแขนงที่แตกจาก secondary tiller จะถูกเรียกว่า tertiary tiller

### 3.4.1.3 ใบ (Leaf)

ใบของข้าวประกอบด้วยกาบใบ (sheath) เป็นส่วนที่จะหุ้มส่วนของลำต้นไว้ และแผ่นใบ (blade) จะอยู่ต่อจากส่วนของกาบใบ ซึ่งมีขนาดของรูปร่าง สี และขนใบแตกต่างกันตามลักษณะประจำพันธุ์ ใบที่เป็นใบยอดสุดที่ถัดมาจากรวงเรียกว่า ใบธง (flag leaf) ใบธงจะมีรูปร่าง ขนาด และ มุมใบ ที่แตกต่างจากใบอื่น

ผิวใบส่วนบนจะมีเส้นเล็กๆจำนวนมาก โดยที่เส้นใบมีลักษณะขนานกัน (parallel veins) และเส้นที่ใหญ่ที่สุดอยู่แนวกลางของผิวใบด้านล่างคือ เส้นกลางใบ (midrib)

หูใบ หรือ เขี้ยวใบ (auricles) มีลักษณะเป็นระยางที่มีขนรูปร่างคล้ายเคียว ติดอยู่กับฐานของแผ่นใบทั้ง 2 ขอบ บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นใบและกาบใบจะเป็นแถบสีขาวซึ่งเรียกว่า collar หรือ junctura และที่รอยต่อนี้จะมีเยื่อบางๆ ที่เรียกว่า เยื่อกันฝน (ligule)

### 3.4.1.4 ช่อดอก (Inflorescence, panicle)

ช่อดอกหรือรวงจะเกิดอยู่บริเวณเหนือสุดปล้องสุดท้ายของลำต้น ซึ่งปล้องดังกล่าวนี้เรียกว่า uppermost internode และข้อที่เป็นฐานของช่อดอกเรียกว่า panicle base ในส่วนของแกนกลางช่อดอกเรียกว่า panicle axis หรือ rachis ช่อดอกข้าวจะมีการแตกแขนงแบบ racemose โดยที่แต่ละข้อ ของแกนกลางของช่อดอกจะแตกแขนงออกเป็น primary branch และ primary branch และแตกแขนง ออกเป็น secondary branch

### 3.4.1.5 ดอกข้าว (Spikelet)

ดอกข้าว (spikelet) มีขนาดเล็กเกิดอยู่บนก้านดอก (pedicel) ปลายของก้านดอกจะพองเป็นปมมูนซึ่งเป็นเปลือกนอก (glume) ที่แท้จริงของ spikelet เรียกปมมูนดังกล่าวว่า rudimentary glumes

Spikelet ของพืชในสกุล *Oryza* จะประกอบด้วยดอกย่อย (floret) 3 ดอกย่อย ซึ่งดอกย่อย 2 ดอกจะไม่เจริญ Spikelet หนึ่ง ๆ จะมีแกนเล็ก ๆ ที่ต่อจากก้านดอก เรียกว่า rachilla บน rachilla จะมี 1 ดอกย่อยเกิดอยู่ระหว่างกลีบรองดอก (bracts) 2 ชั้น กลีบรองชั้นล่าง 1 คู่ มีจะขนาดสั้นกว่ากลีบรองชั้นบน กลีบรองชั้นล่างนี้เป็นดอกย่อยที่ไม่เจริญเรียกว่า sterile

Sterile lemma จะสั้นกว่า lemma และ palea โดยมีความยาวไม่ถึง 1 ใน 3 ของ lemma และ palea lemma จะเป็นกลีบรองที่แข็งมีขนาดใหญ่กว่า palea และครอบ palea ไว้บางส่วน ปลายแหลมที่บริเวณยอดของ lemma และ palea จะถูกเรียกว่า apiculi

หนวดข้าว หรือหางข้าว (awn) เป็นขนที่เกิดจากการยืดขยายจากเส้น (nerve) กลางของ lemma

ดอกประกอบด้วย stamen 6 อัน pistil และ lodicules stamen จะมีอับเรณู (anther) ที่มีลักษณะเป็นพู่สองพู่อยู่บนก้านอับเรณู (filament) pistil ประกอบด้วย stigma styles และรังไข่ (ovary) stigma มีลักษณะเป็นพู่ (plumose) บนส่วนปลายของก้าน styles ที่มี ปลายแยกออกเป็น 2 แฉก

Lodicules เป็นส่วนเล็ก ๆ ที่ฐานของรังไข่มีลักษณะเป็นรูปไข่ มีอยู่ 1 คู่ ในขณะดอกบาน lodicules จะเต่ง ทำให้ lemma และ palea กางออก อับเรณูจะหลุดออกจากก้านชูเกสรตัวผู้ พร้อม ๆ กับการบานของดอก เมื่ออับเรณูแตกออกและโปรยละอองเกสรแล้วดอกข้าวจะหุบกลับ ข้าวจึงเป็นพืชผสมตัวเอง (self pollinated crop)

#### 3.4.1.6 เมล็ดข้าว (*Rice fruit, Rice grain, Rice seed*)

เมล็ดข้าวเป็นผลชนิด caryopsis ซึ่งจะมีเมล็ด (seed) ติดกับผนังรังไข่ที่สุกแล้ว (pericarp) เมล็ดข้าวประกอบด้วยรังไข่ที่สุกแล้วพร้อมทั้งมี lemma palea rachilla sterile lemmas และหนวดข้าว (ถ้ามี) ติดอยู่ ส่วนที่เป็นเปลือกคือ lemma palea sterile lemma rachilla และหนวดข้าว รวมเรียกว่า แกลบ (hull หรือ husk)

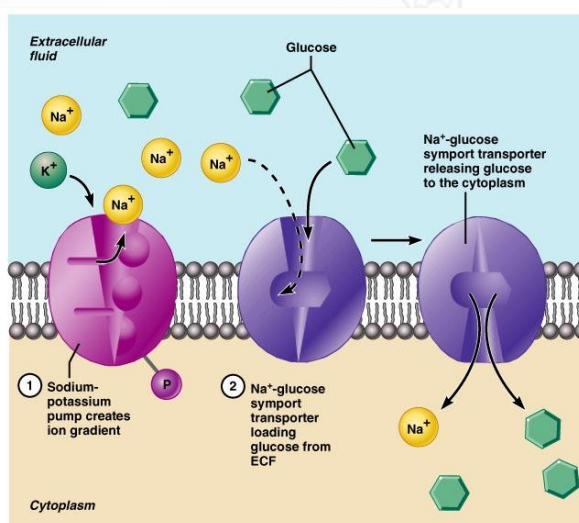
เมล็ดข้าวที่แยกส่วนแกลบออกเรียกว่า caryopsis หรือ ข้าวกล้อง (brown rice) ชั้นนอกสุดของข้าวกล้องคือชั้นของ pericarp ซึ่งแบ่งย่อยออกได้เป็น 3 ชั้นคือ epicarp, mesocarp และ endocarp ถัดจาก pericarp เข้ามาจะเป็นชั้นของ tegmen หรือ seed coat ถัดจาก tegmen เข้ามาจะเป็นชั้นของ aleurone layer aleurone layer จะเป็นเยื่อชั้นในสุดที่ ห่อหุ้ม endosperm และ คัพภะ (embryo)

คัพภะ ซึ่งอยู่ทางด้านล่างของเมล็ดทางด้าน lemma จะประกอบด้วยส่วนที่จะเจริญเป็นต้นเรียกว่า plumule และส่วนที่จะเจริญเป็นรากเรียกว่า radicle Plumule จะถูกหุ้มด้วย coleoptile และ radicle จะมี coleorhiza ห่อหุ้ม ซึ่งองค์ประกอบทั้ง 4 นี้ รวมเรียกว่า embryonic axis ซึ่งจะถูกยึดทางด้านในโดย scutellum (cotyledon) ซึ่งอยู่ติดกับ endosperm ส่วนของ coleoptile จะถูกล้อมรอบด้วย scutellum และ epiblast ซึ่งเป็นท่อส่งน้ำส่งอาหารที่เชื่อมติดกับด้านข้างของ scutellum

Endosperm เป็นส่วนที่ประกอบด้วยแป้งเป็นส่วนใหญ่อยู่ปะปนกับโปรตีน นอกจากนี้อาจพบน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ไขมัน เยื่อใย และสารอินทรีย์ อีกด้วย [2]

### 3.5 การเคลื่อนที่ของเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้าออกเซลล์

โซเดียมไอออนถูกลำเลียงเข้าสู่เซลล์โดยผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ (plasma membrane) ซึ่งทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน โปรตีนขนส่ง (transport proteins) เป็นหนึ่งในองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ที่ทำหน้าที่ขนส่งสารเข้าออกเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์ส่วนในของเซลล์พืชมีประจุทางไฟฟ้าเป็นลบ (ประมาณ  $-120$  ถึง  $-200$  mV) ในขณะที่โซเดียมไอออนมีประจุเป็นบวก ดังนั้นหากพืชอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีสารละลายเกลือปริมาณมาก โซเดียมไอออนส่วนใหญ่จะเข้าสู่เซลล์แบบไม่ใช้พลังงาน (passive transport) สำหรับในภาวะปกติโซเดียมไอออนจะเข้าออกเซลล์โดยผ่านทางโปรตีนขนส่ง เช่น Potassium Channels เป็นต้น ซึ่งจำเป็นต้องใช้พลังงานในการขนส่ง (active transport) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การลำเลียงโซเดียมไอออนเข้าออกเซลล์โดยผ่านโปรตีนขนส่ง

### 3.6 สาเหตุที่ภาวะเครียดจากเกลือมีผลกระทบต่อพืช

เมื่อพืชเจริญเติบโตในพื้นที่ที่มีเกลือละลายอยู่มาก หรือพืชได้รับเกลือมากกว่าระดับปกติ พืชจะตอบสนองคล้ายกับการขาดน้ำ ทำให้การเจริญเติบโตลดลง ต้นแคระแกร็น ขนาด และจำนวนใบลดลง ผลกระทบดังกล่าวเกิดมาจากสาเหตุหลักๆ ดังนี้

#### 3.6.1 การเกิดความเครียดออสโมติก (Osmotic stress)

ในภาวะปกติค่าศักย์ออสโมซิส (Osmotic potential) ของสารละลายภายในเซลล์พืชจะมีค่าต่ำกว่าของสารละลายภายนอก ราก ทำให้พืชสามารถดูดน้ำจากภายนอกได้ เนื่องจากน้ำจะไหลจากบริเวณที่มีความต่างศักย์สูง (เกลือเจือจาง) ไปสู่บริเวณที่มีความต่างศักย์ต่ำกว่า (เกลือเข้มข้น) แต่เมื่อพืชอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของสารละลายเกลือสูง ทำให้ค่าศักย์ออสโมซิสของสารละลายภายนอกต่ำกว่าภายในเซลล์พืช ส่งผลให้พืชไม่สามารถดูดน้ำได้ตามปกติ พืชจึงเริ่มแสดงอาการเหี่ยวเนื่องจากการขาดน้ำ หลังจากนั้นพืชจะมีการปรับค่าออสโมติกของรากให้ต่ำกว่าสารละลายภายนอก เช่น การขับไอออนของเกลือเข้าไปสะสมไว้ในแวคิวโอล (vacuole) และการสร้างสารออสโมต์ไลต์เพื่อปรับค่าศักย์ออสโมซิส เป็นต้น เพื่อให้พืชสามารถดูดน้ำไปใช้ประโยชน์ได้ (Levitt, 1972 [11]; Shalhevet, 1993 [12]; Hopkins, 1995 [8])

#### 3.6.2 ความเป็นพิษของโซเดียมไอออน (Sodium ion toxicity)

เมื่อพืชได้รับโซเดียมไอออนปริมาณมาก จะส่งต่อกระบวนการเมตาบอลิซึม (metabolism) ภายในพืช เนื่องจากความเป็นพิษดังกล่าวจะเข้าไปทำลายโครงสร้างของโปรตีน และยับยั้งการทำงานของน้ำย่อย ส่งผลต่อกระบวนการต่างๆ ภายในพืช เช่น กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง การหายใจระดับเซลล์ รวมถึงความสามารถในการเป็นเยื่อเลือกผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ เป็นต้น จึงเป็นเหตุให้พืชมีการเจริญเติบโตลดลง ลักษณะภายนอกที่สังเกตได้ชัดเจนคือขอบใบและปลายใบจะไหม้ ซึ่งจะแสดงอาการที่ใบแก่ก่อน ขณะที่ใบอ่อนจะมีการไหม้เพียงเล็กน้อย และหากพืชยังคงดูดโซเดียมไอออน ก็อาจทำให้พืชตายได้ในที่สุด (Fitter and Hay, 1987 [6]; Taiz and Zeiger, 1998 [15])

### 3.7 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis)

เนื่องจากแบบจำลองนี้ใช้ข้อมูลจากการทดลองทางชีววิทยาจึงเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ประเภท คือ EC เป็นตัวแปรอิสระ (independent variable) และการเจริญเติบโตของต้นข้าวรวมทั้งปริมาณการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ภายในต้นข้าวเป็นตัวแปรตาม (dependent variable) โดยที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองจะขึ้นอยู่กับพิจารณากราฟของข้อมูล ซึ่งอาจมีความยากง่ายแตกต่างกันตามความเหมาะสมของ

ปัญหา และสมมติฐานที่ตั้งไว้ข้างต้น ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยของ Levenberg-Marquart ของเพื่อหาค่าของค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบได้

### 3.7.1 Levenberg-Marquart method

Levenberg-Marquart เป็นวิธีที่ใช้หาค่าพารามิเตอร์ของสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น โดยหาสมการที่แทนข้อมูล  $n$  ตัว  $(x_i, y_i)$ ;  $i = 1, 2, \dots, n$  และมีพารามิเตอร์ที่ต้องการหา  $m$  ตัว คือ  $a_j$ ;  $j = 1, 2, \dots, m$  เพื่อหาสมการถดถอยที่แทนความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ  $\vec{X}$  และตัวแปรตาม  $\vec{y}$  สังเกตว่าเมื่อแทนค่าพารามิเตอร์  $\vec{a} = (a_1, a_2, \dots, a_m)^T$  ใน  $\vec{y} = \vec{y}(\vec{x}; \vec{a})$  เมื่อ  $\vec{a}$  คือพารามิเตอร์ของสมการถดถอยแล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูล  $y_i$  จะเกิดความคลาดเคลื่อน  $d$  ที่  $x_i$  ดังนี้

$$d(x_i) = y_i - \hat{y}_i(x_i, \vec{a})$$

จากนั้นหาสมการถดถอยจากการหาค่าความคลาดเคลื่อน  $E$  ที่เกิดจากข้อมูล  $n$  ตัว ตามรูปแบบดังนี้

$$E(\vec{a}) = \sum_{i=1}^n [d(x_i)]^2$$

$$E(\vec{a}) = \sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}_i(x_i, \vec{a})]^2$$

โดยที่  $y_i$  คือ ตัวแปรตามที่ได้จากข้อมูลตัวที่  $i$

$x_i$  คือ ตัวแปรอิสระที่ได้จากข้อมูลตัวที่  $i$

$\hat{y}_i$  คือ ตัวแปรตามที่ได้จากสมการถดถอย โดยมีพารามิเตอร์เป็น  $\vec{a}$

กำหนดฟังก์ชันความคลาดเคลื่อน  $E(\vec{a}^k)$  และเขียนในรูปการกระจายของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับสอง ดังนี้

$$\begin{aligned} E(\vec{a}^{k+1}) &= E(\vec{a}^k) + \nabla E(\vec{a}^k)^T \cdot (\vec{a}^{k+1} - \vec{a}^k) \\ &\quad + \frac{1}{2} (\vec{a}^{k+1} - \vec{a}^k)^T \nabla^2 E(\vec{a}^k) (\vec{a}^{k+1} - \vec{a}^k) \quad (3.1) \end{aligned}$$

โดยที่

$$\nabla E(\vec{a}^k)^T = \left[ \frac{\partial E(\vec{a}^k)}{\partial a_1} \quad \frac{\partial E(\vec{a}^k)}{\partial a_2} \quad \dots \quad \frac{\partial E(\vec{a}^k)}{\partial a_m} \right]^T$$



$$\nabla^2 E(\vec{a}^k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E(\vec{a}^k)}{\partial a_1 \partial a_1} & \frac{\partial^2 E(\vec{a}^k)}{\partial a_1 \partial a_2} & \cdots & \frac{\partial^2 E(\vec{a}^k)}{\partial a_1 \partial a_m} \\ \frac{\partial^2 E(\vec{a}^k)}{\partial a_2 \partial a_1} & \frac{\partial^2 E(\vec{a}^k)}{\partial a_2 \partial a_2} & \cdots & \frac{\partial^2 E(\vec{a}^k)}{\partial a_2 \partial a_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 E(\vec{a}^k)}{\partial a_m \partial a_1} & \frac{\partial^2 E(\vec{a}^k)}{\partial a_m \partial a_2} & \cdots & \frac{\partial^2 E(\vec{a}^k)}{\partial a_m \partial a_m} \end{bmatrix}$$

สมการ (3.1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเกรเดียนต์เวกเตอร์ (Gradient vector)  $\mathbf{g}$  และเฮสเซียนเมทริกซ์ (Hessian matrix)  $\mathbf{H}$  ดังนี้

$$E(\vec{a}^{k+1}) = E(\vec{a}^k) + \mathbf{g} \cdot (\vec{a}^{k+1} - \vec{a}^k) + \frac{1}{2} (\vec{a}^{k+1} - \vec{a}^k)^T \mathbf{H} (\vec{a}^{k+1} - \vec{a}^k)$$

โดยที่

$$\mathbf{g} = \nabla E(\vec{a}^k)^T$$

$$\mathbf{H} = \nabla^2 E(\vec{a}^k)$$

การหาค่าพารามิเตอร์  $\vec{a}$  ที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อน  $E(\vec{a}^k)$  น้อยที่สุด สามารถทำได้โดยการหาอนุพันธ์เทียบกับ  $\vec{a}^k$  ดังนี้

$$\frac{\partial E(\vec{a}^{k+1})}{\partial \vec{a}^k} = \frac{\partial}{\partial \vec{a}^k} \left( E(\vec{a}^k) + \mathbf{g} \cdot (\vec{a}^{k+1} - \vec{a}^k) + \frac{1}{2} (\vec{a}^{k+1} - \vec{a}^k)^T \mathbf{H} (\vec{a}^{k+1} - \vec{a}^k) \right)$$

นั่นคือ

$$0 = \frac{\partial E(\vec{a}^k)}{\partial \vec{a}^k} - \mathbf{g} - \mathbf{H}(\vec{a}^{k+1} - \vec{a}^k)$$

จากนั้นหาค่าต่ำสุด โดยให้  $\frac{\partial E(\vec{a}^k)}{\partial \vec{a}^k} = 0$  จะได้

$$0 = \mathbf{g} + \mathbf{H}(\vec{a}^{k+1} - \vec{a}^k)$$

ดังนั้น

$$\vec{a}^{k+1} = \vec{a}^k - \mathbf{H}^{-1} \mathbf{g} \quad (3.2)$$

เมื่อพิจารณา  $\mathbf{H}^{-1} \mathbf{g}$  ในสมการ (3.2) พบว่า  $\mathbf{H}^{-1} \mathbf{g}$  คือ ขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์  $\mathbf{a}$  ในแต่ละรอบของการทำซ้ำ (increment) ซึ่งวิธีของ Levenberg-Marquart จะเปลี่ยนพจน์ของ  $\mathbf{H}^{-1} \mathbf{g}$  เป็น  $(\mathbf{H} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{g}$  เพื่อลดจำนวน

รอบในการทำซ้ำ ซึ่งค่า  $\lambda$  ขึ้นอยู่กับค่าความคลาดเคลื่อน  $E(\bar{a}^k)$  โดยที่เมื่อค่า  $\lambda$  มาก จะทำให้ขนาดการเปลี่ยนแปลงน้อย และเมื่อค่า  $\lambda$  น้อย จะทำให้ขนาดการเปลี่ยนแปลงมาก ทำให้สมการ (3.2) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\bar{a}^{k+1} = \bar{a}^k - (H + \lambda I)^{-1}g$$

โดยที่

$\bar{a}^{k+1}$  คือ ค่าพารามิเตอร์ในรอบการทำซ้ำที่  $k + 1$

$\bar{a}^k$  คือ ค่าพารามิเตอร์ในรอบการทำซ้ำที่  $k$

### 3.8 การทดสอบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

งานวิจัยนี้พิจารณาค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative error) ในการวัดความผิดพลาดของแบบจำลอง

$$\text{ความคลาดเคลื่อน (\%)} = \frac{|\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง} - \text{ค่าที่ได้จากแบบจำลอง}|}{\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง}} \times 100$$

ค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สามารถอธิบายความแตกต่างของข้อมูลและแบบจำลองในรูปแบบของอัตราส่วนร้อยละ

## บทที่ 4

### การสร้างแบบจำลอง

#### 4.1 การออกแบบการทดลองและเก็บข้อมูล

##### 4.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์

1. เมล็ดข้าวสาลีพันธุ์ปทุมธานี 1
2. กระจกพลาสติกทึบแสงท่อพอยด์ขนาด 12 นิ้ว เพื่อลดความร้อนของสารละลาย
3. ตระกร้าสำหรับวางเมล็ดข้าวเพื่อวางบนกระถางที่ใสในการเพาะปลูก
4. ทรายหยาบและเม็ดดินเผา(Hydro clay) สำหรับวางบนตระกร้า เพื่อเป็นที่ยึดของต้นกล้า
5. สารละลายธาตุอาหารสูตร Modified Hoagland (Asher) ซึ่งมีส่วนผสมของสารเคมีดังนี้

##### 5.1 ปริมาณสารเคมีที่เป็นธาตุอาหารหลักและรองของพืช ประกอบด้วย

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	47.2 กรัม
$\text{KNO}_3$	20.2 กรัม
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	2.72 กรัม
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	20.58 กรัม

นำไปละลายน้ำปริมาตร 50 ลิตร

##### 5.2 ปริมาณสารเคมีที่ใช้เป็นจุลธาตุอาหารของพืช ประกอบด้วย

ส่วนที่ 1  $\text{Fe-EDTA}$  84.3 กรัม

ละลายน้ำ 1 ลิตร

ส่วนที่ 2  $\text{H}_3\text{BO}_3$  2.86 กรัม

$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  4.22 กรัม

ละลายน้ำ 1 ลิตร

ส่วนที่ 3  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  2.30 กรัม

$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.52 กรัม

$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  0.04 กรัม

ละลายน้ำ 1 ลิตร

ตวงจุลธาตุจากแต่ละส่วน โดยใช้ Cylinder มาส่วนละ 40 มิลลิลิตร แล้วนำไปผสมน้ำปริมาตร 50 ลิตร ปรับความเป็นกรด-ด่างด้วย  $H_2SO_4$  ให้ได้มี pH ประมาณ 5.5-6.0

#### 4.1.2 วิธีการทดลอง และการเก็บข้อมูล

1. เตรียมสารละลายธาตุอาหารสูตร Modified Hoagland (Asher)
2. ปรับระดับความเค็มเป็น 4 ระดับ คือ 2, 6, 10 และ 14 dS/m ด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
3. นำเมล็ดข้าวสาลีพันธุ์ปทุมธานี 1 วางบนกระดาษที่มึกระดาศที่ขู่ จากนั้นนำกระดาษดังกล่าววางบนกระดาษที่บรรจุน้ำ โดยให้เมล็ดสัมผัสน้ำเพียงเล็กน้อย เป็นระยะเวลา 1 วัน
4. นำกระดาษที่มีเมล็ดข้าวในข้อที่ 3 ย้ายวางลงบนกระดาษที่บรรจุ  $\frac{1}{2}$  สารละลายธาตุอาหารเป็นเวลา 3 วัน ตั้งไว้ในร่ม แล้วย้ายลงสารละลายธาตุอาหารปกติ 3 วัน ตั้งไว้กลางแจ้ง ณ อาคารวิจัยและตรวจสอบอัญมณี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ควบคุมการทดลองโดยเลือกใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design) จำนวน 4 ซ้ำ ซ้ำละ 4 ต้น
5. นำกระดาษที่มีต้นกล้าจากข้อที่ 4 ย้ายวางลงบนกระดาษที่บรรจุสารละลายธาตุอาหารที่ถูกปรับระดับความเค็มที่ค่าต่างๆ ตามข้อที่ 2 โดยให้รากของต้นกล้าอยู่ในสารละลายธาตุอาหาร กระดาษทั้งหมดในเรือนเพาะปลูกที่ได้รับแสงอย่างเพียงพอ
6. ทำการตรวจสอบดูปริมาณสารละลายธาตุอาหารทุกวัน หากพบว่าปริมาณสารละลายธาตุอาหารลดลง ควรเติมน้ำเพื่อรักษาระดับความเค็มให้คงที่
7. เปลี่ยนสารละลายธาตุอาหารทุกๆ 7 วัน โดยทำการทดลองเป็นระยะเวลา 11 วัน
8. ทำการบันทึกข้อมูลทุกๆ 2 วัน โดยเก็บค่าการให้คะแนนความเสียหายของข้าวจากความเค็ม [20] ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าดังตารางที่ 4.1 และเก็บตัวอย่างพืชมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน ทำการเปลี่ยนสารละลายธาตุอาหารทุกๆ 7 วัน

ตารางที่ 4.1 Modified standard evaluation score (SES) of visual salt injury at seedling stage.

คะแนน	การสังเกต
1	การเจริญเติบโตปกติ ใบยังไม่แสดงอาการผิดปกติ
3	การเจริญเติบโตใกล้เคียงปกติ ใบ 1-3 เกิดสีขาว หรือ ม้วนที่ปลายใบ
5	การเจริญเติบโตชะลอลง ใบส่วนใหญ่ม้วน ใบ 1-3 ใบ ยังมีการยืดออก
7	ไม่มีการเจริญเติบโต ใบส่วนใหญ่แห้ง ต้นบางต้นใกล้ตาย
9	ต้นทุกต้นตายหรือใกล้ตาย

9. การวัดปริมาณโซเดียมไอออนที่สะสมภายในเซลล์ โดยใช้วิธีการเตรียมตัวอย่างพืชในรูปสารละลายโดยวิธีการของ ประโสด ธรรมเขต [3] และวิเคราะห์โซเดียมไอออนด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer
10. นำข้อมูลดังกล่าวมาศึกษาและสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของต้นข้าวก่อนได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์



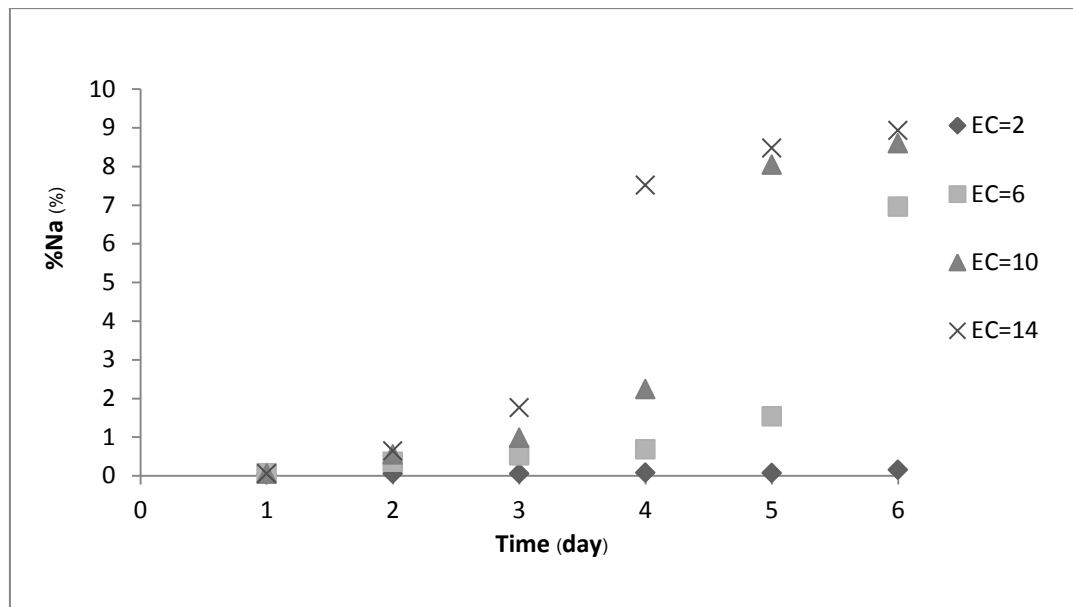
รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของต้นข้าวหลังได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์

## 4.2 แบบจำลอง

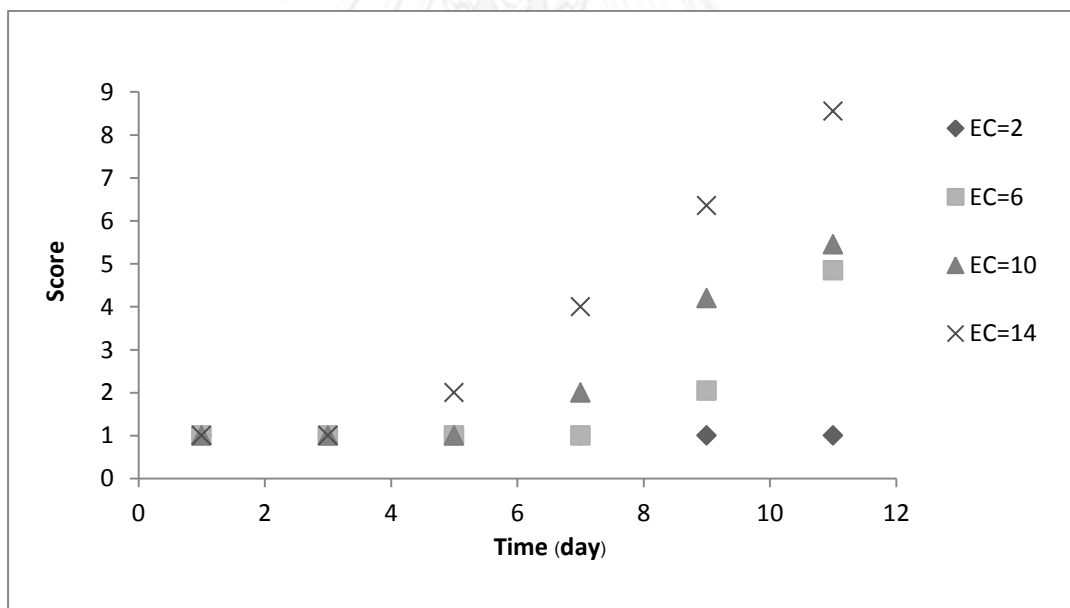
ในงานวิจัยเล่มนี้ประกอบไปด้วยแบบจำลองการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ภายในต้นข้าว และแบบจำลองการเจริญเติบโตของต้นข้าวภายใต้ความเครียดจากเกลือ แบบจำลองที่ได้พิจารณาจากความสัมพันธ์ของพฤติกรรมที่ต้นข้าวแสดงออก และเกิดขึ้นจริงซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีในบทที่ 3 ซึ่งอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลง และผลกระทบที่เกิดขึ้น

### 4.2.1 แบบจำลองการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ภายในต้นข้าว

ระดับความเสียหายของต้นข้าวภายใต้ความเค็มขึ้นอยู่กับค่าการนำไฟฟ้า ซึ่งแสดงถึงปริมาณโซเดียมไอออนในสารละลายธาตุอาหาร ถ้าค่าดังกล่าวมีค่ามากจะส่งผลให้โซเดียมไอออนสามารถเข้าสู่เซลล์ได้มากขึ้นจนเซลล์เกิดความเสียหาย ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวจะขึ้นกับเวลาดังกราฟที่ 4.3 ความเป็นพิษดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อข้าวเช่น ใบม้วน ใบไหม้ และใบเหลือง เป็นต้น คะแนนค่าความเสียหาย (score) เทียบกับเวลาแสดงดังกราฟที่ 4.4



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณการสะสมโซเดียมไอออนภายในข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ในระยะกล้า



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของคะแนนความเสียหายของข้าวจากความเค็มกับเวลา

จากการสังเกตกราฟที่ 4.3 พบว่า ต้นข้าวที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า EC 14 dS/m มีอัตราการเปลี่ยนแปลงการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์แบ่งออกเป็น 3 ระยะ ดังนี้

ระยะที่ 1 ช่วงวันที่ 1-5 พบว่าอัตราการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย  
 ระยะที่ 2 ช่วงวันที่ 5-7 พบว่าอัตราการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มอย่างรวดเร็ว

ระยะที่ 3 ช่วงวันที่ 7-11 พบว่าอัตราการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์มีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงจากทั้ง 3 ระยะมีลักษณะของพฤติกรรมที่คล้ายกับแบบจำลองโลจิสติกส์จึงเลือกใช้แบบจำลองดังกล่าวในการอธิบายพฤติกรรมการสะสมของโซเดียมคลอไรด์ในต้นข้าว ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

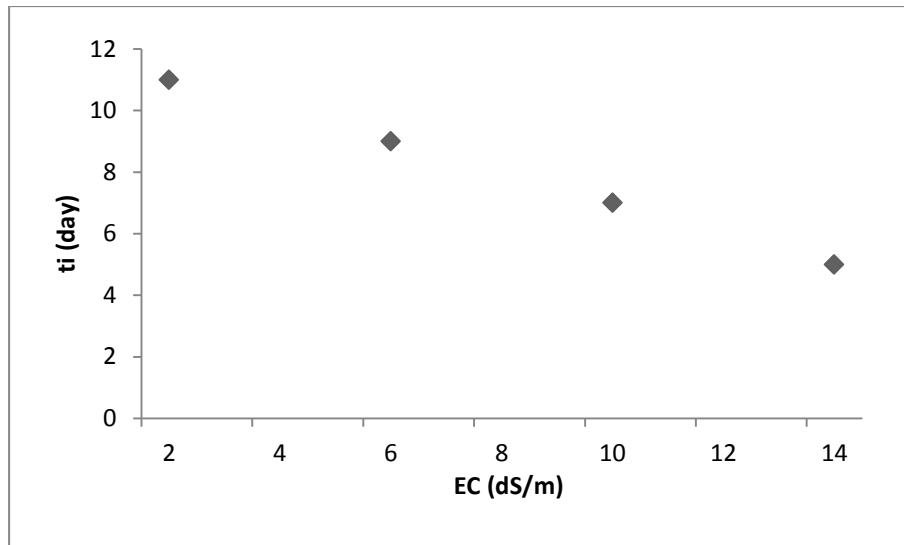
$$\%Na(t) = \frac{\%Na_{max}}{1 + \left(\frac{\%Na_{max}}{\%Na_0} - 1\right)e^{-r_i(t-t_i)}}$$

เมื่อ

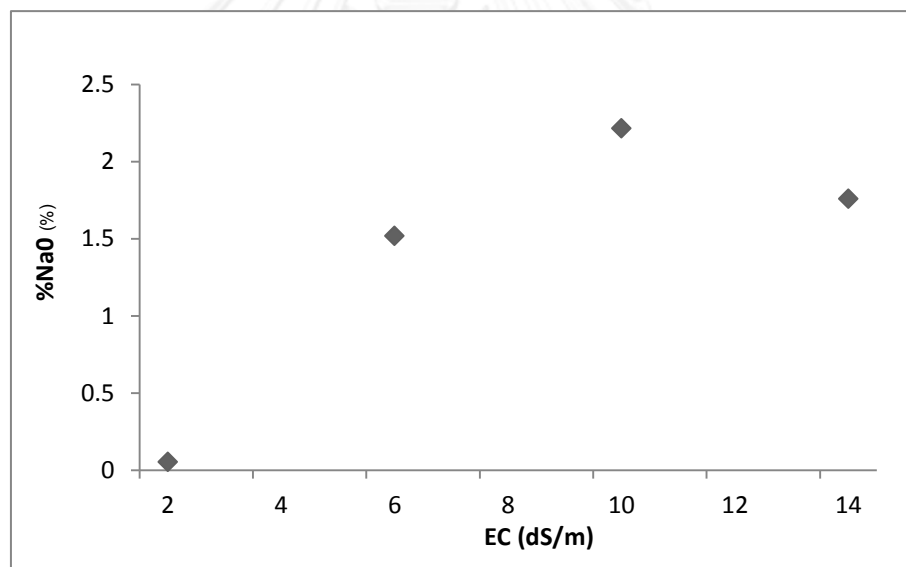
t	คือ เวลาใดๆ ข้าวเริ่มได้รับความเครียด (วัน)
t <sub>i</sub>	คือ เวลาที่พืชแสดงความเสียหายทางด้านสรีระอย่างชัดเจน (วัน) ที่ EC i dS/m
%Na <sub>0</sub>	คือ เปอร์เซ็นต์โซเดียมไอออนที่สะสม ณ เวลาเริ่มต้น
%Na <sub>max</sub>	คือ เปอร์เซ็นต์โซเดียมไอออนที่สะสมมากที่สุด
%Na(t)	คือ เปอร์เซ็นต์โซเดียมไอออน ณ เวลาใดๆ
r <sub>i</sub>	คือ อัตราการสะสมเปอร์เซ็นต์โซเดียมไอออนขึ้นกับเวลาที่ EC = i dS/m (ต่อวัน)

สำหรับการทดลองในค่า EC อื่นๆ พบว่าต้นข้าวมีพฤติกรรมที่สอดคล้องเช่นเดียวกับ EC 14 dS/m แต่เนื่องจากในระยะแรก ต้นข้าวมีการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในปริมาณน้อยซึ่งมีผลกระทบกับเซลล์ได้ไม่มากพอที่จะทำให้เซลล์เกิดความเสียหาย จึงส่งผลให้ช่วงเวลาของระยะที่ 1 มีค่าเพิ่มมากขึ้นดังนั้นแบบจำลองโลจิสติกส์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมดังกล่าวจะใช้วันและปริมาณโซเดียมไอออนเริ่มต้นที่แตกต่างกันจากข้อมูล score ของ EC 2 6 10 และ 14 dS/m พบว่าวันที่ต้นข้าวเกิดความเสียหายอย่างชัดเจน คือวันที่ 11 9 7 และ 5 ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณโซเดียมเริ่มต้นที่แตกต่างกันแสดงดังกราฟที่ 4.5 และ 4.6





รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาที่พืชแสดงความเสียหายทางด้านสรีระอย่างชัดเจนกับค่า EC



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์โซเดียมไอออนที่สะสม ณ เวลาเริ่มต้นกับค่า EC

จากกราฟ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของ  $t_i$  เทียบกับ EC พบว่ามีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น

$$t_i = -0.5EC + 12$$

เมื่อ EC คือ ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายธาตุอาหารซึ่งอยู่ในช่วง 2-14 dS/m

ความสัมพันธ์ของ  $\%Na_0$  เทียบกับ  $EC$  พบว่ามีความสัมพันธ์แบบสมการกำลังสาม ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\%Na_0 = -0.001004361979167EC^3 - 0.005936328125000EC^2 + 0.465948697916667EC - 0.847023187500001 \quad (4.1)$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ (4.1) สามารถหาได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย ตามวิธีการของ Levenberg-Marquart

พิจารณาค่า  $\%Na_{max}$  โดยคำนวณจากค่าเฉลี่ย  $\%Na_{max}$  ของแต่ละ  $EC$  ที่มีคะแนนความเสียหายมากกว่า 8.1 ซึ่งประชากรส่วนใหญ่ในการทดลองตายที่คะแนนความเสียหายดังกล่าว คิดเป็น 90% ของคะแนนค่าความเสียหายสูงสุดคือ 9 ดังนั้น ค่าเฉลี่ย  $\%Na_{max}$  ที่คำนวณได้คือ 8.780604 %

พิจารณาค่าอัตราการสะสมเปอร์เซ็นต์โซเดียมไอออน ( $r$ ) โดยกำหนดให้

$$\alpha = \frac{\%Na_{max}}{\%Na(t)} - 1 \text{ คือ จำนวนเท่าที่ข้าวสามารถดูดซึมเกลือโซเดียมคลอไรด์ได้เพิ่มขึ้น ณ เวลา } t$$

$$\beta = \frac{\%Na_{max}}{\%Na_0} - 1 \text{ คือ จำนวนเท่าที่ข้าวสามารถดูดซึมเกลือโซเดียมคลอไรด์ได้เพิ่มขึ้น ณ เวลา } t_0$$

ดังนั้น สัดส่วนของ  $\frac{\alpha}{\beta}$  คือ ความสามารถที่ข้าวดูดซึมเกลือโซเดียมคลอไรด์ โดยพิจารณาค่า  $r$  ในรูปแบบดังนี้

$$r = -\frac{\ln\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)}{t - t_i}$$

จากนั้นนำค่ามาศึกษาพฤติกรรม พบว่าค่า  $r$  ณ เวลาใดๆมีลักษณะคล้ายกับสมการพหุนามกำลังสอง

$$r_i(t) = a_i t^2 + b_i t + c_i$$

และใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย ตามวิธีการของ Levenberg-Marquart ในการหาค่าของสัมประสิทธิ์ ซึ่งมีค่าดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์  $a_i$ ,  $b_i$  และ  $c_i$  ที่ขึ้นอยู่กับค่า EC ที่ต้นข้าวได้รับ

EC (dS/m)	$a_i$	$b_i$	$c_i$
2	1.72712E-08	-2.1712E-08	4.84091E-07
6	0.018529	-0.13311	0.499553
10	0.039222	-0.26833	0.855048
14	0.06548	-0.40469	1.196122

#### 4.2.2 แบบจำลองการเติบโตของต้นข้าวระยะกล้าภายใต้ความเครียดจากเกลือ

เกลือโซเดียมคลอไรด์ส่งผลให้ต้นข้าวเกิดสภาวะเครียดโดยแบ่งออกเป็น 2 ระยะ คือ

##### 4.2.2.1 ความเครียดที่เกิดจาก Osmotic stress

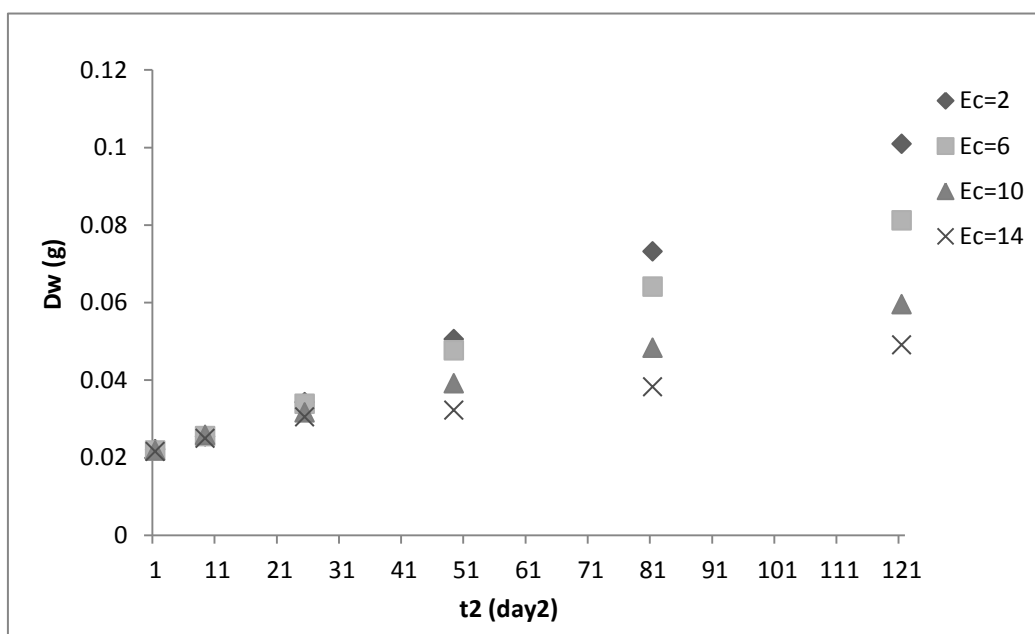
ค่า EC แสดงถึงปริมาณโซเดียมไอออนที่ละลายอยู่ในสารละลายธาตุอาหาร ถ้าสารละลายมีค่า EC สูงจะส่งผลให้ค่าศักย์ออสโมซิส (Osmotic potential,  $\Psi_{\pi}$ ) ในสารละลายลดลง ซึ่งค่าดังกล่าวส่งผลให้ค่าชลศักย์หรือพลังงานอิสระของน้ำ (water potential,  $\Psi_w$ ) ในสารละลายธาตุอาหารมีค่าลดลงต่ำกว่าเดิม จากเหตุการณ์ดังกล่าวทำให้รากมีการดูดซึมน้ำได้น้อยลง เนื่องจากน้ำจะแพร่จากบริเวณที่มี ค่าชลศักย์สูงไปสู่บริเวณที่มี ค่าชลศักย์ต่ำ โดยทั่วไปในเซลล์พืชมีน้ำเป็นองค์ประกอบคิดเป็น 95% ขององค์ประกอบทั้งหมดของเซลล์ และเซลล์พืชต้องการน้ำเพื่อใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึม การรักษารูปร่างของเซลล์ และการควบคุมอุณหภูมิของภายในต้นให้คงที่ ฯลฯ ดังนั้นเมื่อพืชได้รับผลกระทบจากความเค็ม พืชจะมีกลไกเพื่อการลดค่า ค่าชลศักย์ในเซลล์รากให้ต่ำกว่าค่าชลศักย์ในสารละลายธาตุอาหารโดยมีการสร้างสารออสโมติก(Osmotic compound) เพื่อลดค่าศักย์ออสโมซิสลง ในซึ่งการผลิตสารเหล่านี้จำเป็นต้องใช้พลังงาน ดังนั้น พลังงานส่วนหนึ่งจึงสูญเสียไป จึงทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวจะมีผลกระทบไม่รุนแรงมากนัก สำหรับงานวิจัยเล่มนี้จะพิจารณาการเจริญเติบโตของต้นข้าวจากน้ำหนักแห้ง

##### 4.2.2.2 ความเครียดที่เกิดจาก Toxicity of sodium ion

ในระยะที่สองปริมาณโซเดียมไอออนที่ถูกสะสมอยู่ในต้นข้าวมีปริมาณมากเกินกว่าที่ต้นข้าวจะสามารถจัดการได้ ปริมาณโซเดียมไอออนที่สะสมอยู่นี้จะทำลายโปรตีนบริเวณต่างๆโดยเฉพาะในเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้ความสามารถของเยื่อเลือกผ่าน (cell membrane) ลดน้อยลง ดังนั้นโซเดียมไอออนจะเข้าสู่ภายในเซลล์

ได้มากขึ้น นอกจากนี้โปรตีนที่เป็นองค์ประกอบภายในของเซลล์ก็จะถูกทำลายไปด้วย ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะทำให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และกระบวนการหายใจระดับเซลล์ลดน้อยลง ความรุนแรงดังกล่าวอาจทำให้การเจริญเติบโตของข้าวหยุดชะงักและอาจตายได้

นำข้อมูลน้ำหนักแห้งของต้นข้าวเทียบกับเวลากำลึงสองมาวาดกราฟซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักแห้ง กับกำลึงสองของเวลา

เนื่องจากสภาวะเครียดถูกแบ่งออกเป็น 2 ระยะ จึงแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ระยะตามสภาวะความเครียดที่เกิดขึ้นโดยใช้ SCORE เป็นเกณฑ์ในการแบ่ง จากการทดลองพบว่าต้นข้าวที่ EC=2 dS/m ได้รับผลกระทบจาก Osmotic stress แต่ไม่ได้รับผลกระทบจาก toxicity of sodium ion ซึ่ง กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงและ สำหรับ EC อื่นๆ ในระยะแรกที่ได้รับผลกระทบจาก Osmotic stress จะส่งผลกระทบต่อน้ำหนักแห้งเพียงเล็กน้อยจึงมีลักษณะของกราฟเป็นเส้นตรงเช่นเดียวกัน จึงใช้รูปแบบความสัมพันธ์ของสมการพาราโบลาในการอธิบายพฤติกรรมซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$Dw = a_j(t - t_j)^2 + Dw_0$$

เมื่อ

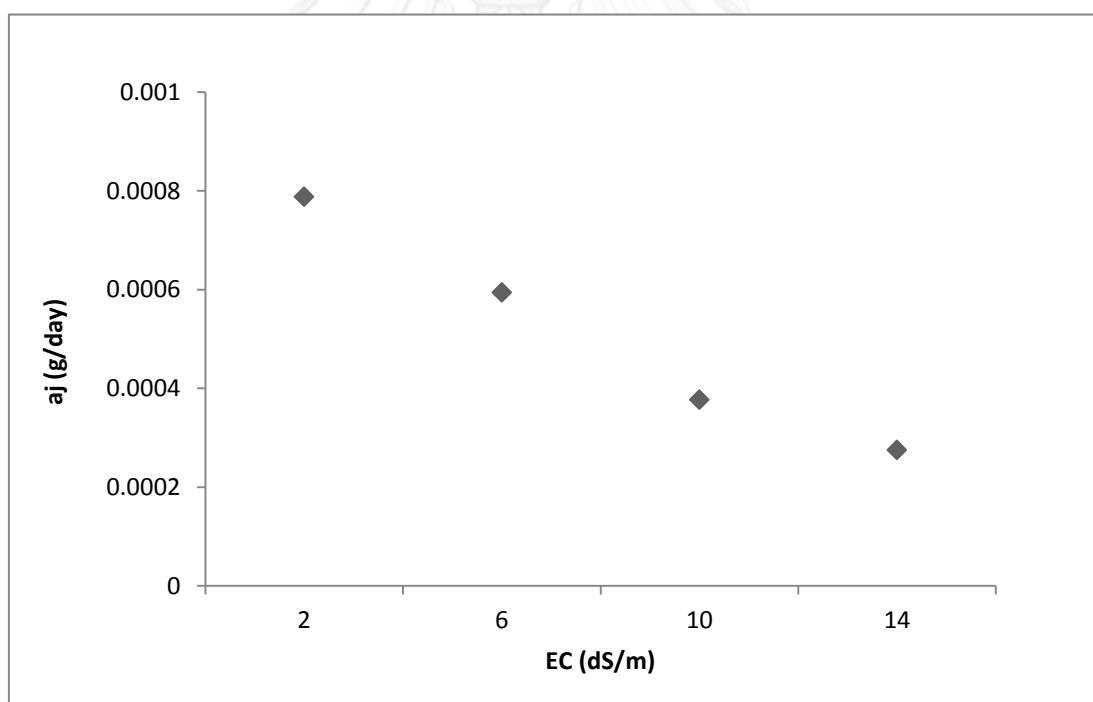
$Dw$  คือ น้ำหนักแห้ง ณ เวลาใดๆ (g)

$Dw_0$  คือ น้ำหนักแห้ง ณ เวลาเริ่มต้น (g)

- $t$  คือ เวลาใดๆ ที่ข้าวเริ่มได้รับความเครียด (วัน)
- $t_j$  คือ เวลาที่บ่งบอกถึงวันที่พืชเริ่มได้รับผลจาก toxicity (วัน)
- $a_j$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของการเจริญเติบโตของต้นข้าว ( $\text{g}/\text{วัน}^2$ )

จาก score สามารถบ่งบอกถึง วันที่พืชแสดงความเสียหายทางด้านสรีระอย่างชัดเจน ( $t_j$ ) ของ EC = 2 6 10 และ 14 ซึ่งตรงกับวันที่ 11 9 7 และ 5 ตามลำดับ จึงใช้วันเหล่านี้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) ในการอธิบายเหตุการณ์ความเครียดในระยะ Osmotic stress และเป็นจุดเริ่มในการอธิบายความเครียดในระยะ Toxicity of sodium ion ในวันดังกล่าว น้ำหนักได้รับผลกระทบด้วยเช่นกัน

พิจารณาค่า  $a_j$  จากผลต่างของน้ำหนักแห้งเทียบกับช่วงเวลาที่ได้รับผลกระทบแบบ ยกกำลังสองนำค่าที่ได้วาดกราฟเทียบกับ EC แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์  $a_j$  ที่ขึ้นอยู่กับค่า EC ที่ต้นข้าวได้รับ

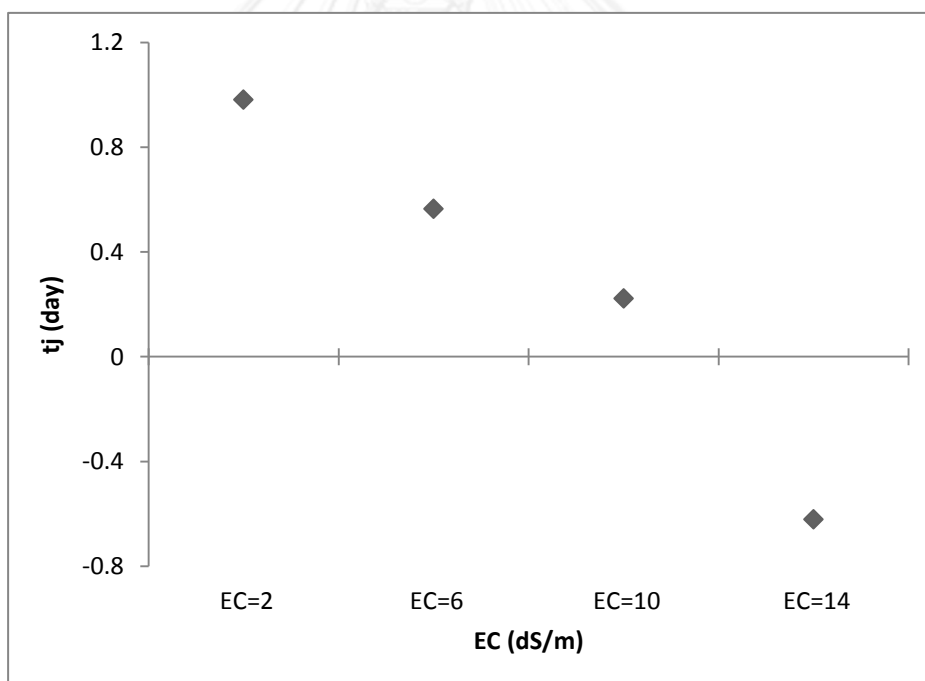
จากกราฟ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นสมการกำลังสาม

$$a_j = 0.001(0.000361492187499EC^3 - 0.007229515624973EC^2 - 0.009492718750179EC + 0.833136562500289) \quad (4.2)$$

เมื่อ EC อยู่ในช่วง [2,14]

พิจารณาค่า  $Dw_0$  โดยคำนวณจากค่าเฉลี่ยของ Dw ของ EC = 2 6 10 และ 14 dS/m ณ เวลาเริ่มต้น ซึ่งค่าที่คำนวณได้คือ 0.021833

พิจารณาค่า  $t_j$  อธิบายถึงเวลาที่บ่งบอกถึงวันที่พืชเริ่มได้รับผลจาก toxicity ดังนั้นจึงคำนวณจากเงื่อนไขค่าขอบ โดยพิจารณาวันที่ต้นข้าวได้รับผลกระทบอย่างชัดเจนจาก score ซึ่งในแต่ละ EC จะมีค่าขอบที่ต่างกันจากนั้นนำมาแก้หาค่า  $t_j$  ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาที่พืชเริ่มได้รับความเสียหายเทียบกับ EC

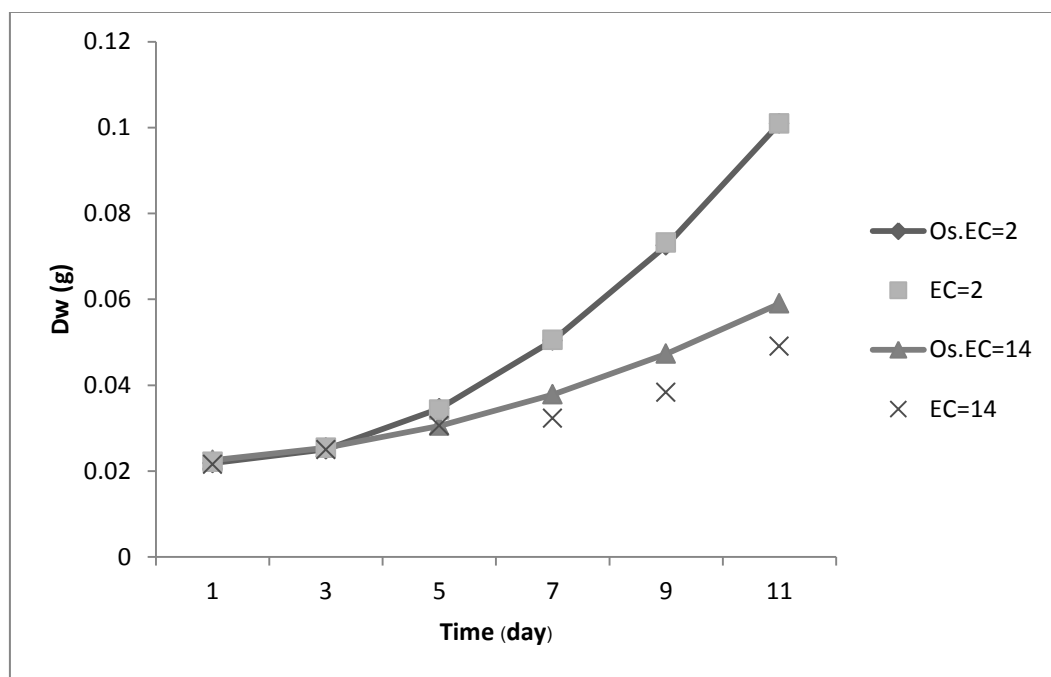
จากกราฟ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของ  $t_j$  กับ EC พบว่ามีความสัมพันธ์แบบสมการกำลังสามดังนี้

$$t_j = -0.00149453125EC^3 + 0.0291984375EC^2 - 0.259871875EC + 1.39600625 \quad (4.3)$$

เมื่อ EC อยู่ในช่วง [2,14]

โดยทั้งสมการที่ (4.2) และ (4.3) ใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย ตามวิธีการของ Levenberg-Marquart ในการหาค่าสัมประสิทธิ์

พิจารณาข้อมูลจากผลของแบบจำลองในระยะ Osmotic stress กับข้อมูลจริงของน้ำหนักแห้ง ของ EC=2 และ 10 dS/m แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองในระยะ Osmotic stress เทียบกับข้อมูลน้ำหนักแห้งจากการทดลอง

จากรูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง และข้อมูลจริงของน้ำหนัก พบว่าที่ EC= 2 และ 10 dS/m แบบจำลองพาราโบลาสสามารถอธิบายพฤติกรรมการเจริญเติบโตของต้นข้าวที่เกิด Osmotic stress ได้ดี แต่ยังไม่สามารถอธิบายการเจริญเติบโตที่ได้รับผลกระทบจาก Toxicity of sodium ion ดังนั้นจึงนำผลต่างของแบบจำลองพาราโบลากับข้อมูลจริงของน้ำหนักแห้ง มาใช้เป็นข้อมูลในการอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์คือ

แบบจำลองของน้ำหนักแห้ง = แบบจำลองผลกระทบจาก Osmotic stress

- แบบจำลองของต้นข้าวที่ได้รับผลกระทบจาก toxicity

พบว่าความสัมพันธ์ของแบบจำลองในระยะที่ต้นข้าวได้รับผลกระทบจาก toxicity of sodium ion มีลักษณะเป็นเอ็กโพเนนเชียลฟังก์ชันซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\text{tox.} = a_1 e^{\left(\frac{\%Na(t) - \%Na^*}{\%Na_{\max}} m\right)}$$

เมื่อ

<b>tox.</b>	คือ ปริมาณน้ำหนักแห้งที่ได้รับผลกระทบจาก toxicity of sodium ion (g)
<b>a<sub>1</sub></b>	คือ ค่า boundary condition ของ EC=14 dS/m ณ วันสุดท้าย ที่ทำการทดลอง(g)
<b>%Na(t)</b>	คือ เปอร์เซ็นต์โซเดียมไอออนที่สะสม ณ เวลาใดๆ (%)
<b>%Na*</b>	คือ เปอร์เซ็นต์โซเดียมไอออนที่เริ่มส่งผลกระทบกับพืช (%)
<b>%Na<sub>max</sub></b>	คือ เปอร์เซ็นต์โซเดียมไอออนที่สะสมมากที่สุด (%)
<b>m</b>	คือ ความรุนแรงของผลกระทบโดยขึ้นอยู่กับค่าของ EC

พิจารณาค่า %Na\* จาก %Na ของวันที่ข้าวเริ่มแสดงความเสียหาย โดยใช้ค่า %Na ต่ำสุดจากทุก EC ซึ่งค่า %Na\* คือ 1.518019 %

พิจารณาค่า %Na<sub>max</sub> โดยใช้ค่า %Na<sub>max</sub> คือ 8.780604% ในทำนองเดียวกันกับแบบจำลองของ %Na

พิจารณาค่า m จาก

$$m = \ln\left(\frac{EC}{2}\right) + 1$$

เนื่องจากค่า m แสดงถึงความรุนแรงของจาก Toxicity of sodium ion กับน้ำหนักแห้งที่เกิดขึ้น ใน EC เริ่มต้น ( EC=2 dS/m) จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ EC มีค่าเพิ่มขึ้น ความรุนแรง m จะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าจาก EC เริ่มต้น ใน EC= 2 6 10 และ 14 dS/m มีค่า m คือ 1 2.098612 2.609438 และ 2.94591 ตามลำดับ

พิจารณาค่า a<sub>1</sub> เป็นเงื่อนไขขอบ(boundary condition) ณ วันสุดท้ายของ EC=14 dS/m เนื่องจากวัน และ EC ดังกล่าวมีความแตกต่างทางด้านข้อมูลมากที่สุดเมื่อเทียบกับ วันและ EC ที่ทำการทดลอง ซึ่งค่า a<sub>1</sub> ที่ได้เป็นค่าคงที่มีค่าคือ 0.000868

พิจารณา  $\left(\frac{\%Na(t)-\%Na^*}{\%Na_{max}}\right)$  มีลักษณะคล้ายกับตัวส่งสัญญาณเตือนความเป็น Toxicity of sodium ion



หาก  $\%Na(t)$  มีค่าน้อยกว่า  $\%Na$  จะส่งผลให้ลักษณะของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลจะเข้าใกล้ 0 และ  $\%Na(t)$  มีค่ามากกว่า  $\%Na$  จะส่งผลให้ลักษณะของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลมีค่าเพิ่มมากขึ้น



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## บทที่ 5

### ผลวิจัย สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 เปรียบเทียบแบบผลของข้อมูลและแบบจำลอง

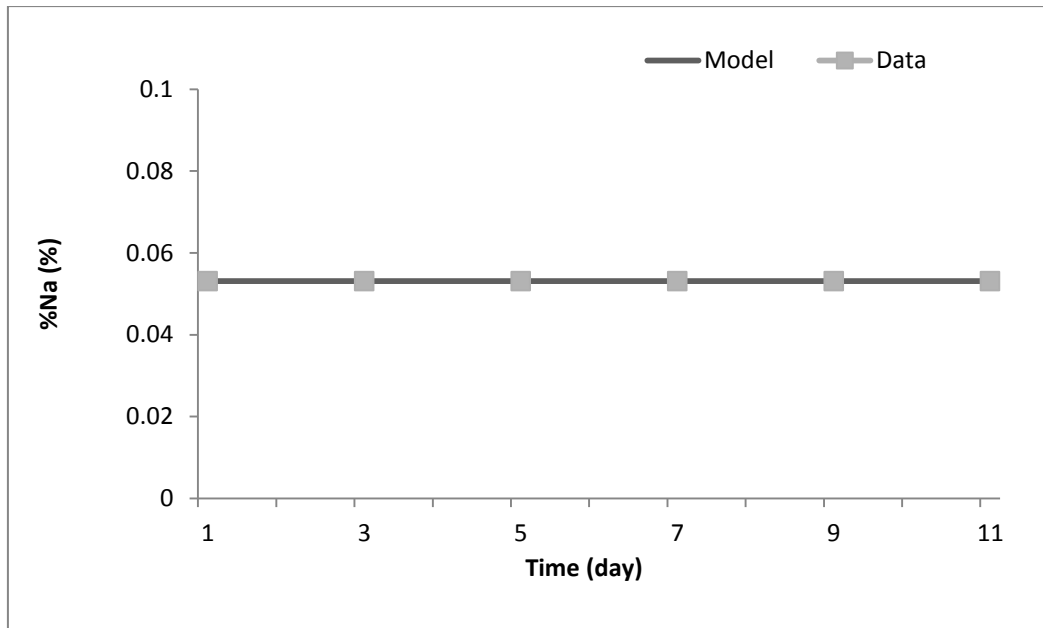
##### 5.1.1 แบบจำลองการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ภายในต้นข้าวในระยะกล้า

พิจารณาตัวแปรต่างๆของการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ภายในต้นข้าวในระยะกล้าตามบทที่ 4 ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปริมาณ EC ที่ใช้ในการทดลองซึ่งมีผลเฉลยดังตารางที่ 5.1

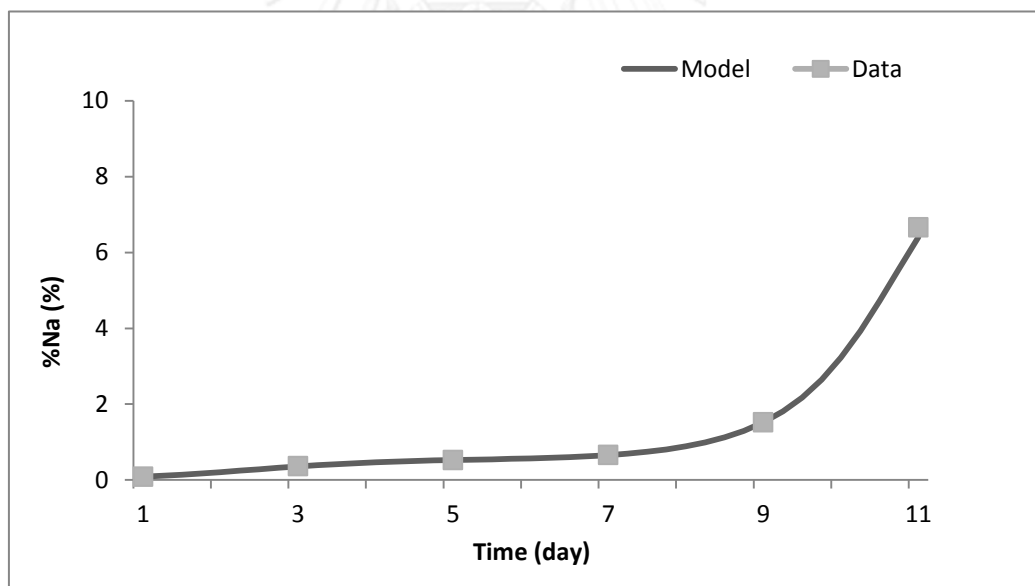
ตารางที่ 5.1 แสดงผลเฉลยของแบบจำลองการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ภายในต้นข้าวในระยะกล้า

EC	%Na
2	$\%Na_2(t) = \frac{8.78060400}{1 + \left(\frac{8.78060400}{0.053094}\right) e^{-r_2(t-11)}}$ $r_2 = 1.72712 \times 10^{-8}t^2 - 2.1712 \times 10^{-8}t + 4.84091 \times 10^{-7}$
6	$\%Na_6(t) = \frac{8.78060400}{1 + \left(\frac{8.78060400}{1.518019}\right) e^{-r_6(t-9)}}$ $r_6 = 0.018529t^2 - 0.13311t + 0.499553$
10	$\%Na_{10}(t) = \frac{8.78060400}{1 + \left(\frac{8.78060400}{2.214469}\right) e^{-r_{10}(t-7)}}$ $r_{10} = 0.039222t^2 - 0.26833t + 0.855048$
14	$\%Na_{14}(t) = \frac{8.78060400}{1 + \left(\frac{8.78060400}{1.756769}\right) e^{-r_{14}(t-5)}}$ $r_{14} = 0.06548t^2 - 0.40469t + 1.196122$

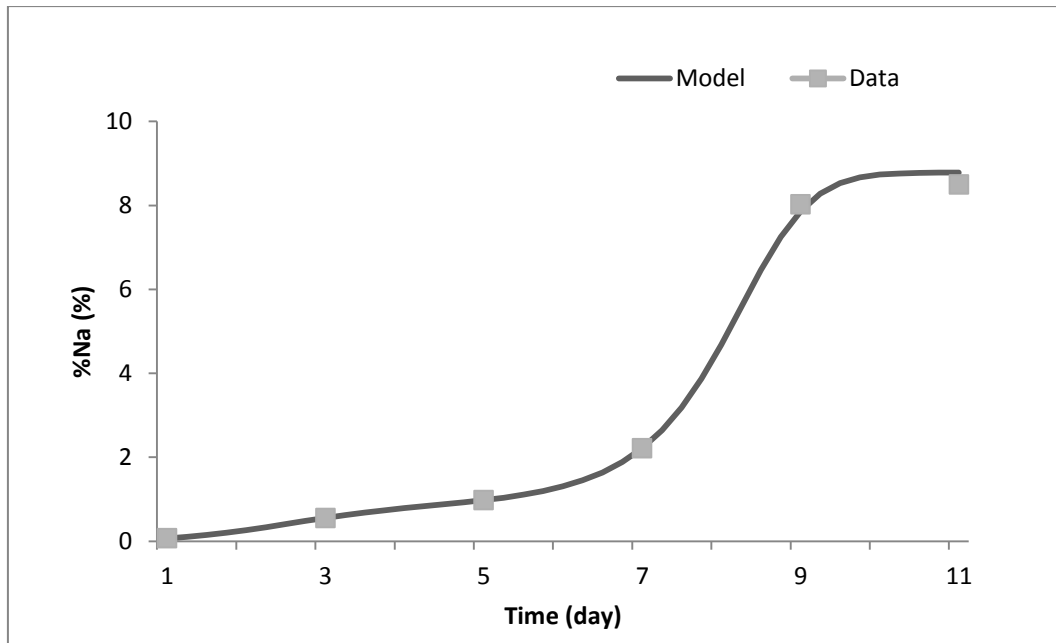
นำข้อมูลจากการทดลองมาวาดกราฟเปรียบเทียบกับแบบจำลองการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ภายในต้นข้าวในระยะกล้าเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของพฤติกรรม



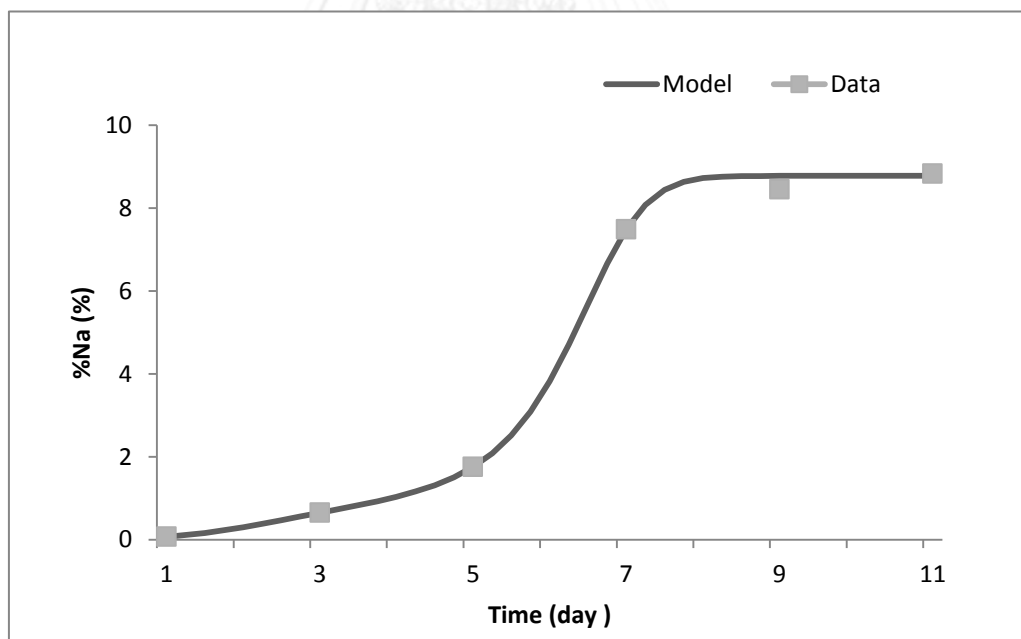
รูปที่ 5.1 แสดงปริมาณการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในต้นข้าวที่ค่า EC = 2 dS/m ในระยะกล้า



รูปที่ 5.2 แสดงปริมาณการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในต้นข้าวที่ค่า EC = 6 dS/m ในระยะกล้า

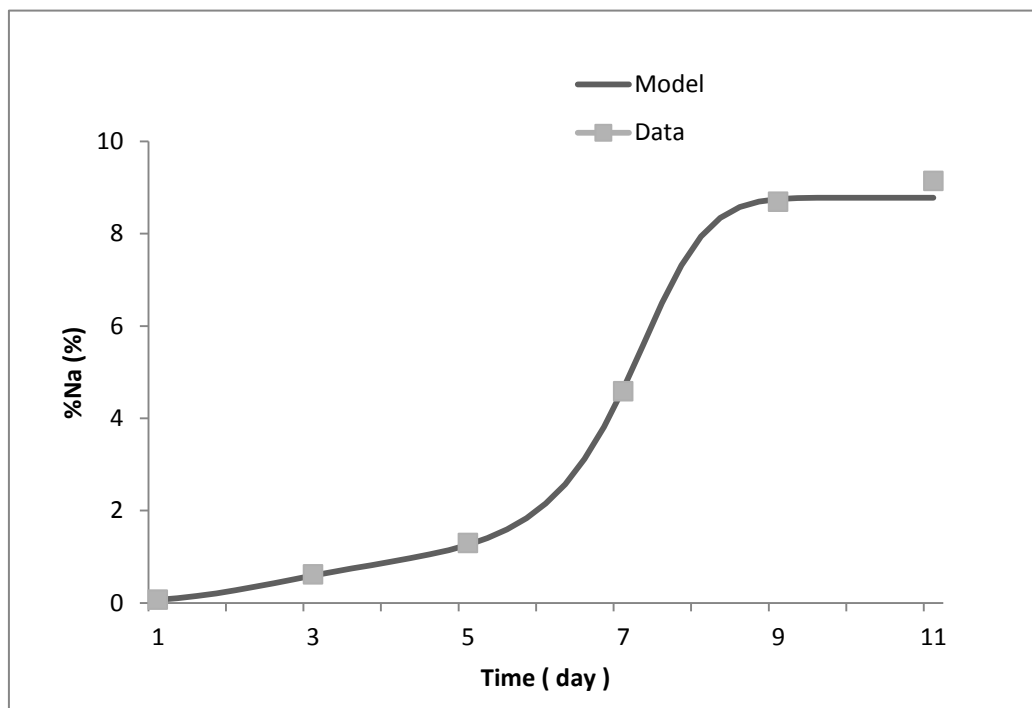


รูปที่ 5.3 แสดงปริมาณการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในต้นข้าวที่ค่า EC = 10 dS/m ในระยะกล้า



รูปที่ 5.4 แสดงปริมาณการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในต้นข้าวที่ค่า EC = 14 dS/m ในระยะกล้า

นำแบบจำลองที่ได้มาทดสอบกับชุดข้อมูลที่ได้รับผลกระทบจากค่า EC = 12 dS/m และทำการเปรียบเทียบข้อมูลดังกล่าวกับแบบจำลองซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงปริมาณการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในต้นข้าวที่ค่า EC = 12 dS/m ในระยะกล้า

ตรวจสอบค่าความผิดพลาดโดยใช้ค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ซึ่งแสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของปริมาณการสะสมของโซเดียมไอออนที่ EC=12 dS/m

ระยะเวลา	ปริมาณโซเดียมไอออนจากการทดลอง (%)	ปริมาณโซเดียมไอออนจากแบบจำลอง (%)	ค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (%)
1	0.045765	0.064099	2.161791
3	0.616255	0.591217	3.544266
5	1.306777	1.261208	0.142460
7	4.612902	4.640888	1.321225
9	8.713375	8.747223	0.530759
11	9.243375	8.780604	3.950190

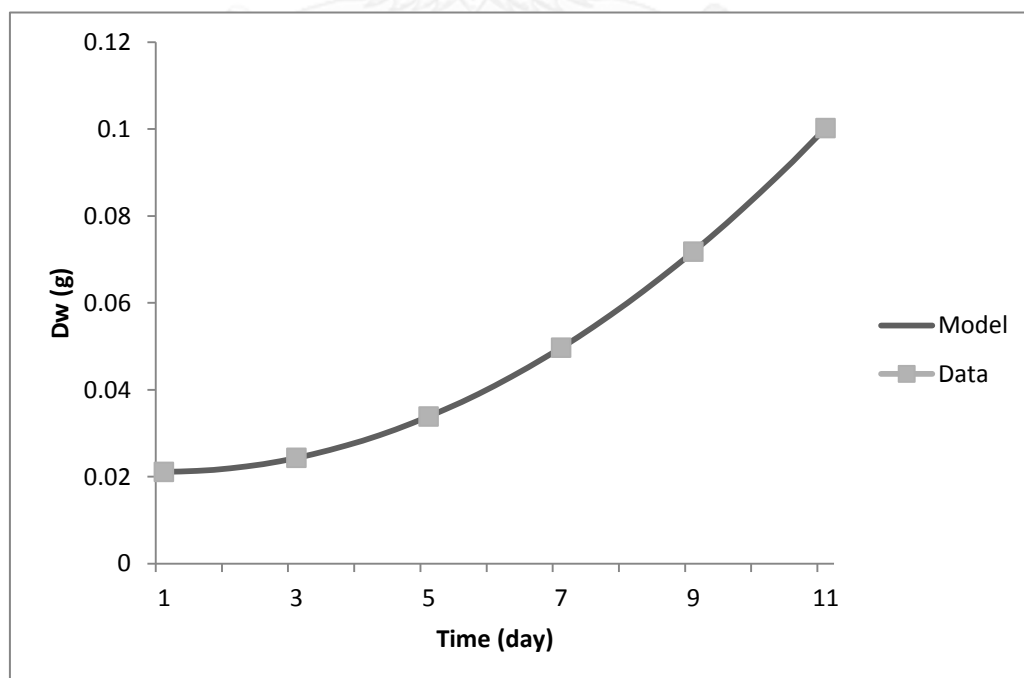
ผลจากการเปรียบเทียบปริมาณการสะสมของโซเดียมไอออนที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่ามีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ไม่เกิน 4.5%

### 5.1.2 แบบจำลองการเจริญเติบโตของต้นข้าว

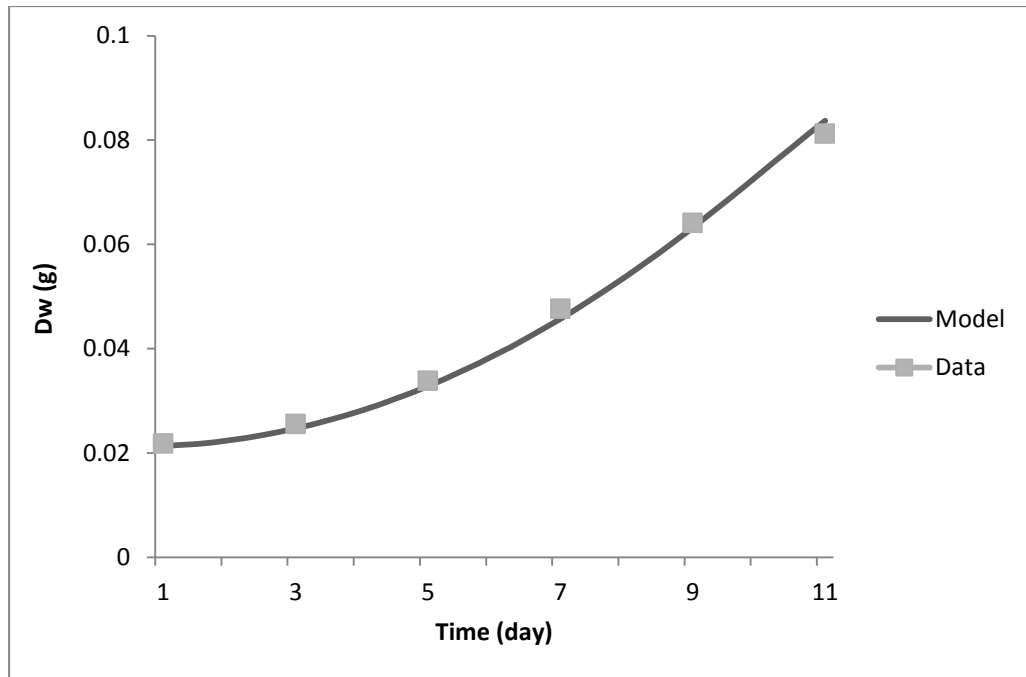
ตารางที่ 5.3 แสดงแบบจำลองการเติบโตของต้นข้าวภายใต้ความเค็มที่ระดับต่างๆ

EC	DW
2	$Dw = 0.000788(t - 0.9811)^2 + 0.021833 - 0.000868e^{\left(\frac{\%Na(t)-1.518019}{8.780604}1\right)}$
6	$Dw = 0.000594(t - 0.5651)^2 + 0.021833 - 0.000868e^{\left(\frac{\%Na(t)-1.518019}{8.780604}2.098612\right)}$
10	$Dw = 0.000377(t - 0.2226)^2 + 0.021833 - 0.000868e^{\left(\frac{\%Na(t)-1.518019}{8.780604}2.609438\right)}$
14	$Dw = 0.000275(t + 0.6203)^2 + 0.021833 - 0.000868e^{\left(\frac{\%Na(t)-1.518019}{8.780604}2.94591\right)}$

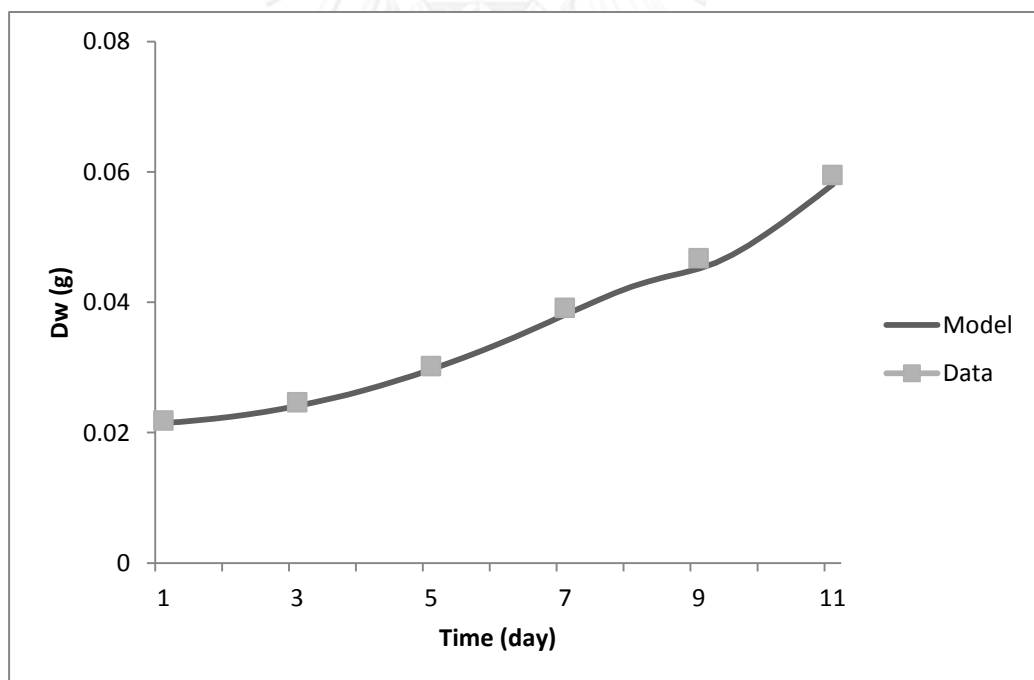
นำข้อมูลจากการทดลองมาวาดกราฟและเปรียบเทียบข้อมูลกับแบบจำลองของการเติบโตของต้นข้าวเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของพฤติกรรมที่เกิดขึ้น



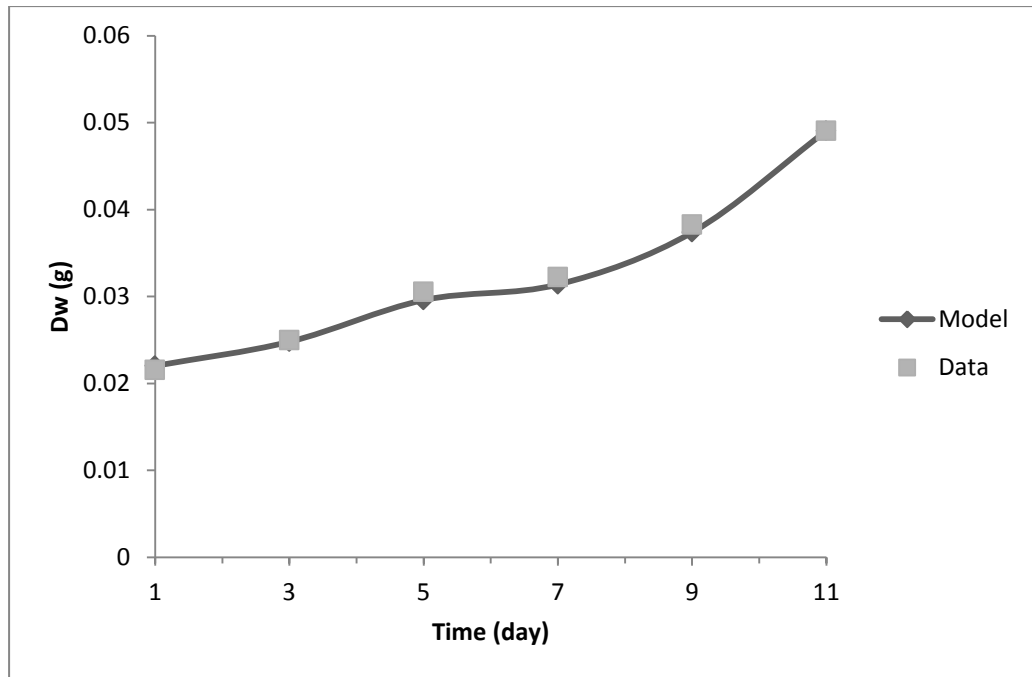
รูปที่ 5.6 แสดงการเติบโตของต้นข้าวที่ค่า EC = 2 dS/m ในระยะกล้า



รูปที่ 5.7 แสดงการเติบโตของต้นข้าวที่ค่า EC =6 dS/m ในระยะกล้า

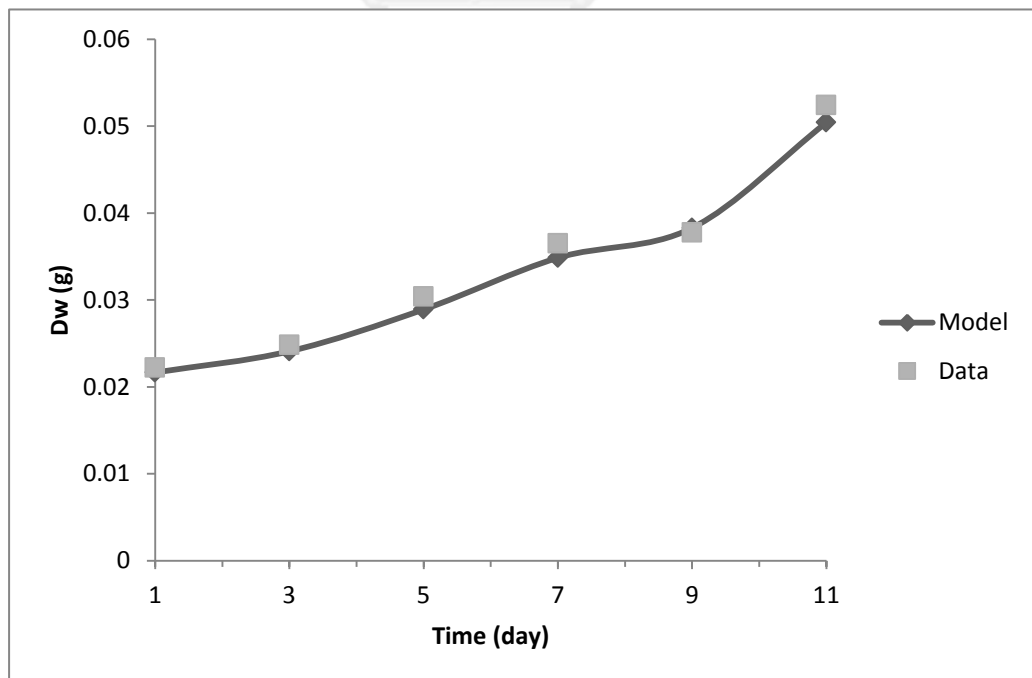


รูปที่ 5.8 แสดงการเติบโตของต้นข้าวที่ค่า EC =10 dS/m ในระยะกล้า



รูปที่ 5.9 แสดงการเติบโตของต้นข้าวที่ค่า EC =14 dS/m ในระยะกล้า

นำแบบจำลองที่ได้มาทดสอบกับชุดข้อมูลที่ได้รับผลกระทบจากค่า EC =12 dS/m และทำการเปรียบเทียบข้อมูลดังกล่าวกับแบบจำลองซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงการเติบโตของต้นข้าวที่ค่า EC =12 dS/m ในระยะกล้า



### ตรวจสอบค่าความผิดพลาดโดยใช้ค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของปริมาณการเติบโตของต้นข้าวที่ EC= 12 dS/m

ระยะเวลา	น้ำหนักแห้งของข้าว จากการทดลอง (g)	น้ำหนักแห้งของข้าว จากแบบจำลอง (g)	ค่าคลาดเคลื่อน สัมพัทธ์ (%)
1	0.022213	0.021653	2.52697
3	0.024839	0.024097	3.02679
5	0.030525	0.028911	4.87639
7	0.032244	0.034757	4.52706
9	0.038263	0.038264	1.387603
11	0.049063	0.050407	3.81488

## 5.2 สรุปผลงานวิจัย

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของการสะสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ภายในต้นข้าว และการเติบโตของต้นข้าวระยะกล้าภายใต้ความเครียดจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ โดยใช้ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ในระบบปลูกไฮโดรโปนิกส์ และใช้สารละลายธาตุอาหารสูตร Asher ในการทดลอง ซึ่งแบบจำลองทั้งสองมีค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดไม่เกิน 5% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถทำนายและอธิบายพฤติกรรมดังกล่าวได้อย่างแม่นยำ จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า เมื่อค่า EC เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณการสะสมของเกลือโซเดียมคลอไรด์ในต้นข้าวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์มีปริมาณมากเกินกว่าที่พืชจะสามารถจัดการได้จะส่งผลให้การเจริญเติบโตหยุดชะงัก หรือตายได้ แบบจำลองนี้สามารถปรับใช้กับข้าวสายพันธุ์อื่นได้ โดยพิจารณาจากข้อมูลการปลูกข้าวในสารละลาย

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยพบว่าการศึกษาสามารถพัฒนาต่อไปได้ โดยศึกษาต่อในระยะดอกข้าวบาน หรือระยะออกดอก โดยพิจารณาผลผลิตเป็นจำนวนเมล็ดข้าว ความสมบูรณ์ของเมล็ด หรือน้ำหนัก และปรับปรุงโมเดลโดยอาจจะพิจารณาจากค่าการสังเคราะห์ด้วยแสง และอาจควบคุมผลกระทบจากปัจจัยอื่นเช่น อุณหภูมิ ปริมาณแสง และความชื้น เป็นต้น ทำให้แบบจำลองสามารถอธิบายผลกระทบของเกลือโซเดียมคลอไรด์ได้ครบทั้งระยะการเจริญเติบโต

## รายการอ้างอิง

- [1] ชารรัตน์ ศุภศิริ. เอกสารประกอบการอบรมรายวิชาการระเบียบวิธีวิจัยและรายวิชาโครงการ. ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2554
- [2] ปฏิบัติการเรื่อง ข้าว. สืบค้นเมื่อ 15 มีนาคม 2556 จาก <http://e-book.ram.edu/e-book/>.
- [3] ประโสด ธรรมเขต. การวิเคราะห์ตัวอย่างพืช ปุ๋ย และสารปรับปรุงดิน, กองวิเคราะห์ดิน, กรมพัฒนาที่ดิน, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ, 2540: 50.
- [4] พื้นที่ดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. กรมทรัพยากรธรณี. สืบค้นเมื่อ 4 มกราคม 2556 จาก [http://www.dmr.go.th/download/Alkaline\\_soil/doc3.pdf](http://www.dmr.go.th/download/Alkaline_soil/doc3.pdf).
- [5] องค์ความรู้เรื่องข้าว. การปลูก ดูแลรักษา และใช้ปุ๋ยในนาข้าว. สืบค้นเมื่อ 4 มกราคม 2556 จาก <http://www.brrd.in.th/rkb/management/index.php-file=content.php&id=5.htm>.
- [6] A.H. Fitter. and R.K.M. Hay. Environmental Physiology of Plant. Academic Press, London, 1987.
- [7] A. Salam et al. Sodium Chloride Tolerance In Rice (*Oryza sativa* L.) At Early Seedling Growth: Genotypic Variability, Identification And Selection. Pak. J. Bot. Vol 43, No. 6 (2011): 2701-2705.
- [8] G.W. Hopkins. Introduction to Plant Physiology. John Wiley & Sons Inc., New York, 1995.
- [9] H. Greenway. and R. Munns. Mechanisms of salt tolerance in nonhalophytes. Ann, Rev, Plant Physiol, Vol. 31 (1980): 149-90.
- [10] J. Corbishley, and D. Pearce. Growing trees on salt-affected land. ACIAR Impact Assessment Series Report 51 (2007).
- [11] J. Levitt. Responses of plants to environmental stresses. Academic Press. (1972): 698.
- [12] J. Shalhevet. Plants under salt and water stress. In L. Fowden, T. Mansfield and J. Stoddart, eds. Plant Adaptation to Environmental Stress. Chapman & Hall, Inc., London, (1993): 133-154.
- [13] J. T. McClave and T.Sincich. Statistics 9th ed.. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, (2003).

- [14] K. Siringam et al. Salt tolerance enhancement in indica rice (*Oryza sativa* L. spp. indica) seedlings using exogenous sucrose supplementation. *POJ* Vol 5 No. 1 (2012): 52-59.
- [15] L. Taiz and E. Zeiger. *Plant Physiology*. Sinauer Associates, Inc., Sunderland, 1998.
- [16] M.A. Jenks et al. *Advances in Molecular Breeding Toward Drought and Salt Tolerant Crops*. Springer (2007): 1-32.
- [17] M. G. Pitman and A. Läuchli. *Global Impact Of Salinity And Agricultural Ecosystems*. Kluwer Academic Publishers. (2002).
- [18] S. Cha-Um et al. An Effective Defensive Response in Thai Aromatic Rice Varieties (*Oryza sativa* L. spp. indica) to Salinity. *J. Crop Sci. Biotech.* Vol 10 No. 4 (2007) : 257-264.
- [19] S. Cha-Um et al. Effect Of Mannitol- And Salt-Induced Iso-Osmotic Stress On Proline Accumulation, Photosynthetic Abilities And Growth Characters Of Rice Cultivars (*Oryza Sativa* L. SPP. INDICA). *Pak. J. Bot.* Vol 42 No. 2 (2010): 927-941.
- [20] Rice Knowledge Bank. Stress and disease tolerance. Available 10 January 2014 from: [http://www.knowledgebank.irri.org/ricebreedingcourse/Breeding\\_for\\_salt\\_tolerance.htm](http://www.knowledgebank.irri.org/ricebreedingcourse/Breeding_for_salt_tolerance.htm) .
- [21] Saline Soils And Their Management. Available 10 March 2014 from: <http://www.fao.org/docrep/x5871e/x5871e04.htm>
- [22] S. Sohrabikertabad. Effect of desiccation and salinity stress on seed germination and initial plant growth of *Cucumis melo*. *Planta daninha* Vol 31 No. 4 (2013).
- [23] T.J. Flowers. P.F. Troke. and A.R. Yeo. The mechanism of salt tolerance in halophytes, *Annu, Rev, Plant Physiol*, Vol.28 (1977): 89-121.
- [24] Wild A. and Jones L.H.P. .Mineral nutrition of crop plants. In: *Russell's Soil Conditions & Plant Growth*, 11th edition, Wild, A. ed. Longman Scientific & Technical, England, (1988): 69-112.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ภาคผนวก

### ข้อมูลข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1

ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ได้จากการผสมพันธุ์ระหว่างสายพันธุ์ข้าว BKNA6-18-3-2 (พันธุ์แม่) กับสายพันธุ์ PTT8506-86-3-2-1 ที่ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี เมื่อฤดูนาปรัง ปี พ.ศ. 2533 ซึ่ง กรมวิชาการเกษตรพิจารณาให้เป็นพันธุ์รับรองโดยใช้ชื่อ พันธุ์ปทุมธานี 1 ในปี พ.ศ. 2543

#### ลักษณะประจำพันธุ์

1. เป็นข้าวหอมไม่ไวต่อช่วงแสง ปลูกได้ทั้งฤดูนาปีและนาปรัง อายุการเก็บเกี่ยวขนาดำ 113-126 วัน นานาหว่านน้ำตม 104-114 วัน
2. ต้นสูงประมาณ 104-133 เซนติเมตร
3. ทรงกอตั้ง
4. ใบสีเขียวมีขน ใบแก่ช้ำ กาบใบและปล้องสีเขียว ใบธงยาว ตั้งตรงปานกลาง
5. คอรวงสั้น รวงอยู่ใต้ใบธง
6. เปลือกเมล็ดสีฟาง มีขน มีหาง กลีบรองดอกสีฟาง
7. เมล็ดข้าวเปลือก เกลี้ยยาว 10.52 มิลลิเมตร กว้าง 2.47 มิลลิเมตร และหนา 1.95 มิลลิเมตร
8. เมล็ดข้าวกล้อง เกลี้ยยาว 7.60 มิลลิเมตร กว้าง 2.17 มิลลิเมตร และหนา 1.72 มิลลิเมตร
9. ระยะพักตัวของเมล็ด 3-4 สัปดาห์

#### ลักษณะเด่น

1. เป็นข้าวเจ้าหอมไม่ไวต่อช่วงแสง
2. คุณภาพเมล็ดคล้ายพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ข้าวสุกนุ่มเหนียว มีกลิ่นหอม
3. ต้านทานเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล
4. ต้านทานเพลี้ยกระโดดหลังขาว
5. ต้านทานโรคไหม้
6. ต้านทานโรคของใบแห้ง
7. ให้ผลผลิตเฉลี่ย 650-774 กิโลกรัมต่อไร่

ตารางแสดงข้อมูลปริมาณโซเดียมในต้นข้าวที่ได้รับค่า EC ที่แตกต่างกัน

วัน	EC=2	EC=6	EC=10	EC=14
1	0.053094	0.082732	0.068709	0.07072
3	0.053094	0.362694	0.553375	0.648694
5	0.053094	0.518019	0.979625	1.756769
7	0.053094	0.657344	2.214469	7.48931
9	0.053094	1.518019	8.025519	8.45647
11	0.053094	6.656719	8.49654	8.831208

ตารางแสดงข้อมูลน้ำหนักแห้งของต้นข้าวที่ได้รับค่า EC ที่แตกต่างกัน

วัน	EC=2	EC=6	EC=10	EC=14
1	0.022131	0.021806	0.02185	0.021544
3	0.025419	0.025538	0.024644	0.024969
5	0.0343	0.033844	0.030194	0.030525
7	0.050544	0.04765	0.0391375	0.032244
9	0.0732	0.064094	0.046738	0.038263
11	0.100944	0.081206	0.059525	0.049063

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุลักษณ์ ชัยขรรค์ เกิดวันที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปี พ.ศ. 2553 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาคณิตศาสตร์ ประยุกต์และวิทยาการคณนา ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2554



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**