

ผลของภาวะเค็มต่อโครงสร้างระบบราก กายวิภาคศาสตร์ และลักษณะบอร์เดอร์เซลล์ของรากในข้าว

*Oryza sativa* L. ที่มีความทนเค็มต่างกัน

นางสาวพลอยไพลิน นิลมานนท์



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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาพฤกษศาสตร์ ภาควิชาพฤกษศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF SALT STRESS ON ROOT SYSTEM ARCHITECTURE, ANATOMY AND ROOT  
BORDER CELL CHARACTERS IN RICE *Oryza sativa* L. WITH DIFFERENT SALT TOLERANCE

Miss Ployphilin Ninmanont



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Botany

Department of Botany

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของภาวะเค็มต่อโครงสร้างระบบราก กายวิภาคศาสตร์  
และลักษณะบอร์เตอร์เซลล์ของรากในข้าว *Oryza sativa*  
L. ที่มีความทนเค็มต่างกัน

โดย

นางสาวพลอยไพลิน นิลมานนท์

สาขาวิชา

พฤกษศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญชลี ใจดี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภจิตรา ชัชวาลย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญชลี ใจดี)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.มานิต คีตอยู่)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ชัชวาล วงศ์ชัย)

พลอยไพลิน นิลมานนท์ : ผลของภาวะเค็มต่อโครงสร้างระบบราก กายวิภาคศาสตร์ และ ลักษณะบอร์เดอร์เซลล์ของรากในข้าว *Oryza sativa* L. ที่มีความทนเค็มต่างกัน (EFFECTS OF SALT STRESS ON ROOT SYSTEM ARCHITECTURE, ANATOMY AND ROOT BORDER CELL CHARACTERS IN RICE *Oryza sativa* L. WITH DIFFERENT SALT TOLERANCE) อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.อัญชลี ใจดี, 132 หน้า.

เมื่อข้าวเผชิญกับภาวะดินเค็ม รากเป็นส่วนแรกที่ได้รับผลกระทบจากความเค็ม ภาวะดังกล่าวก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างระบบรากและลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของราก เพื่อเพิ่มการดูดน้ำและลดการสะสมไอออนเกลือ นอกจากนี้ อาจมีการเปลี่ยนแปลงของบอร์เดอร์เซลล์ของรากในการตอบสนองต่อสภาวะที่มีเกลือสูง เพื่อให้เข้าใจถึงบทบาทของลักษณะต่าง ๆ ดังกล่าวของรากในการทนเค็ม จึงศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างระบบราก ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ และบอร์เดอร์เซลล์ของรากในข้าว (*Oryza sativa* L.) ทั้ง 3 พันธุ์ที่มีความทนเค็มต่างกัน ซึ่งพบว่า โครงสร้างระบบรากไม่มีการเปลี่ยนแปลงในข้าวพันธุ์ Pokkali แต่มีการเปลี่ยนแปลงในข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29 คือ มีการเพิ่มขึ้นของความยาวรากปฐมภูมิและจำนวนรากแขนงในภาวะเค็มที่เวลา 14 วัน อีกทั้งมีการลดลงของจำนวนรากพิเศษในภาวะเค็มที่เวลา 21 วัน นอกจากนี้ เนื้อเยื่อชั้นสตีลิมที่เพิ่มขึ้นในข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29 แต่ไม่เปลี่ยนแปลงในข้าวพันธุ์ Pokkali ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อดีของการเพิ่มเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำในภาวะเค็ม นอกจากนี้ รูปแบบการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากในข้าวพันธุ์ Pokkali มีความแตกต่างจากข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29 จึงเป็นหลักฐานยืนยันว่า มีความแตกต่างที่ระดับภายในชนิดของลักษณะดังกล่าวในข้าว ยิ่งไปกว่านั้น ยังพบว่าการสร้างบอร์เดอร์เซลล์เพิ่มขึ้นในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali ที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นอกจากนี้ ยังเป็นที่น่าสนใจว่ารากข้าวที่หยุดการเจริญเติบโตนั้น ไม่มีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากเกิดขึ้น อีกทั้งพบว่าบอร์เดอร์เซลล์ของรากในข้าวพันธุ์ IR29 มีการสร้างสารเมือกที่ลดลงภายใต้ภาวะเค็ม จากการค้นพบข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การปรับเปลี่ยนการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากมีส่วนช่วยให้ข้าวสามารถเผชิญกับภาวะเค็มได้ ซึ่งแตกต่างจากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างระบบรากและเนื้อเยื่อชั้นสตีลของราก

ภาควิชา พฤษศาสตร์

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา พฤษศาสตร์

ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559

# # 5672035823 : MAJOR BOTANY

KEYWORDS: RICE, ROOT ANATOMY, ROOT BORDER CELLS, ROOT SYSTEM ARCHITECTURE, SALT STRESS

PLOYPHILIN NINMANONT: EFFECTS OF SALT STRESS ON ROOT SYSTEM ARCHITECTURE, ANATOMY AND ROOT BORDER CELL CHARACTERS IN RICE *Oryza sativa* L. WITH DIFFERENT SALT TOLERANCE. ADVISOR: ASST. PROF. ANCHALEE CHAIDEE, Ph.D., 132 pp.

When rice plants expose to the saline soil, roots are the first part that experiences salt stress. This constrained condition modifies root system architecture (RSA) and anatomy to enhance water uptake and reduce salt ion accumulation. Besides, the production of root border cells (RBCs) may be modified to deal with high salt ions. To clarify impacts of these root features in salt tolerance, changes of RSA, anatomy, and RBCs were examined in three rice (*Oryza sativa* L.) cultivars having different salt tolerance. There was no modification of RSA in Pokkali but KDML105 and IR29, with increased primary root length and lateral root numbers under 14-day salt stress and decreased adventitious root numbers under 21-day salt stress. Likewise, an increase of stele area took place in KDML105 and IR29 but not Pokkali, suggesting the disadvantage of increased vascular tissues under salinization. Moreover, the differential pattern of RBCs production in Pokkali, when compared to that of KDML105 and IR29, evidenced intra-species variation of this trait in rice plants. Furthermore, the production of RBCs was enhanced in seedlings of KDML105 and Pokkali exposed to 24-hour salt stress. Interestingly, no production of RBCs was observed in growth-retarded roots and RBCs of IR29 produced less mucilage under salt stress. Taken together, the modification of RBCs production, but not RSA and stele tissues, benefits rice plants experiencing salt stress.

Department: Botany

Student's Signature .....

Field of Study: Botany

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2016

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญชลีใจดี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความกรุณาในการให้คำแนะนำและคำปรึกษาต่าง ๆ สำหรับการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนการสนับสนุนทางด้านการเงินสำหรับจัดซื้ออุปกรณ์ในการศึกษาวิจัย อีกทั้งความเมตตากรุณาและความห่วงใยที่อาจารย์มีให้แก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภจิตรา ชัชวาลย์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.มานิต คีตอยู่ กรรมการภายในมหาวิทยาลัย และดร.ชัชวาล วงศ์ชัย กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความกรุณาในการตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภจิตรา ชัชวาลย์ รองศาสตราจารย์ ดร.มานิต คีตอยู่ ดร.ยุพิน จินตภากร และดร.วรลักษ์ณณ์ เกษตรานันท์ ที่ได้ให้ความกรุณาในการเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ในการทำงานวิจัย ตลอดจนความกรุณาในการให้คำแนะนำต่าง ๆ สำหรับการศึกษาวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณอริวัฒน์ ทิละพรพัฒน์ และคุณชนิตา เจียรจิรพงศ์ เจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบห้องปฏิบัติการกลาง ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความกรุณาในการเอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการทดลองและกรุณาให้ความช่วยเหลือในการศึกษาวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณภัสกร อจินไตยศิลป์ ที่ได้ให้ความกรุณาช่วยเหลือในการตัดตัวอย่างรากข้าว เพื่อทำการศึกษาลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากภายใต้ภาวะปกติและภาวะเค็ม

ขอขอบพระคุณ คุณจักรี เหล็กกล้า และคุณอารติ สันทนา ที่ได้ให้ความกรุณาในการให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษาวิจัย

ขอขอบพระคุณสมาชิกทุก ๆ ท่านในศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านสิ่งแวดล้อมและสรีรวิทยาของพืช รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุก ๆ ท่านในภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความกรุณาช่วยเหลือในการศึกษาวิจัยและการให้คำแนะนำในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ได้ให้ความรักและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา ทั้งยังให้การสนับสนุนตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษาวิจัยด้วย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
ขอบเขตของการวิจัย.....	4
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร.....	5
ปัญหาเดิม.....	5
ผลของภาวะเค็มที่มีต่อสรีรวิทยาของพืช.....	7
ผลของภาวะเค็มที่มีต่อโครงสร้างระบบราก (root system architecture: RSA).....	8
ผลของภาวะเค็มที่มีต่อลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของราก (root anatomy).....	11
บอร์เดอร์เซลล์ของราก (root border cells: RBCs).....	18
บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการทดลอง.....	27
3.1 พืชทดลอง.....	27
3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	27
3.2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาโครงสร้างระบบรากและลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของราก.....	27
3.2.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาลักษณะบอร์เดอร์เซลล์ของราก.....	30
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.3.1 สารเคมีที่ใช้ศึกษาโครงสร้างระบบรากและลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของราก.....	32

3.3.2 สารเคมีที่ใช้ศึกษาลักษณะบอร์เดอร์เซลล์ของราก.....	33
3.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการทดลอง.....	34
3.4.1 ศึกษาผลของภาวะเค็มต่อการเติบโตและลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน.....	34
3.4.2 ศึกษาผลของภาวะเค็มต่อลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน.....	36
3.4.3 ศึกษาผลของภาวะเค็มต่อลักษณะรูปแบบการสร้างความมีชีวิตของบอร์เดอร์เซลล์ของราก และความหนาของสารเมือกที่บอร์เดอร์เซลล์สร้างขึ้นบริเวณปลายรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน.....	37
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	39
3.6 สถานที่ในการทำการทดลอง.....	39
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	40
4.1 การเติบโตและลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับภาวะเค็มในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ.....	40
4.1.1 การเติบโตและลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกันในภาวะปกติ.....	40
4.1.2 การเติบโตและลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน.....	42
4.1.3 การเติบโตและลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน.....	47
4.1.4 การเติบโตและลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน.....	52
4.2 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับภาวะเค็มในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ.....	57
4.2.1 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากข้าวในภาวะปกติและภาวะเค็ม.....	57



4.2.2 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน.....	61
4.2.3 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน.....	69
4.2.4 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน.....	77
4.3 ลักษณะรูปแบบการสร้างความมีชีวิตของบอร์เดอร์เซลล์ของราก และความหนาของสารเมือกที่บอร์เดอร์เซลล์สร้างขึ้นบริเวณปลายรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน .....	85
4.3.1 ลักษณะบอร์เดอร์เซลล์ของราก .....	85
4.3.2 การสร้างบอร์เดอร์เซลล์และสารเมือกในข้าวพันธุ์ KDML105.....	88
4.3.3 การสร้างบอร์เดอร์เซลล์และสารเมือกในข้าวพันธุ์ Pokkali.....	90
4.3.4 การสร้างบอร์เดอร์เซลล์และสารเมือกในข้าวพันธุ์ IR29 .....	92
4.3.5 การสร้างบอร์เดอร์เซลล์และสารเมือกในข้าวพันธุ์ KDML105 เมื่อได้รับภาวะเค็ม.....	94
4.3.6 การสร้างบอร์เดอร์เซลล์และสารเมือกในข้าวพันธุ์ Pokkali เมื่อได้รับภาวะเค็ม.....	96
4.3.7 การสร้างบอร์เดอร์เซลล์และสารเมือกในข้าวพันธุ์ IR29 เมื่อได้รับภาวะเค็ม.....	98
4.4 ผลของภาวะเค็มต่อโครงสร้างระบบราก กายวิภาคศาสตร์ และลักษณะบอร์เดอร์เซลล์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน.....	100
บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง .....	102
5.1 การเติบโตและลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับภาวะเค็มในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ.....	102
5.2 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับภาวะเค็มในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ.....	105
5.3 ลักษณะรูปแบบการสร้างความมีชีวิตของบอร์เดอร์เซลล์ของราก และความหนาของสารเมือกที่บอร์เดอร์เซลล์สร้างขึ้นบริเวณปลายรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน ภายใต้ภาวะปกติและภาวะเค็ม.....	110

รายการอ้างอิง.....	115
ภาคผนวก.....	124
ภาคผนวก ก.....	125
วิธีการเตรียมสารละลายเข้มข้น (stock solution) ของสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland.....	126
วิธีการเตรียมสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland.....	127
ภาคผนวก ข.....	129
วิธีการเตรียมน้ำยาเอฟ เอ เอ (formalin aceto alcohol: FAA).....	130
วิธีการเตรียมสีย้อม 0.1% (w/v) Sudan red 7B.....	130
วิธีการเตรียมสีย้อม 0.02% (w/v) fluorescein diacetate (FDA).....	131
การเตรียมสีย้อม 0.01% (w/v) phenosafranin.....	131
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	132

## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 โครงสร้างระบบรากของพืชใบเลี้ยงคู่ที่มีอายุ 10 วัน (a) และโครงสร้างระบบรากของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่มีอายุ 30 วัน (b) (Pacheco-Villalobos and Hardtke, 2012).....	10
รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงโครงสร้างระบบรากของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว (Orman-Ligeza et al., 2013).....	10
รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงตำแหน่งและส่วนประกอบของชั้นเอพิเดอร์มิสและชั้นคอร์เทกซ์ สัญลักษณ์ (-----) แสดงการลำเลียงแบบซิมพลาสต์ และสัญลักษณ์ (-----) แสดงการลำเลียงแบบอะโพพลาสต์ (Peterson, 1987).....	12
รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงตำแหน่งและส่วนประกอบของชั้นคอร์เทกซ์และชั้นสตีล สัญลักษณ์ (-----) แสดงการลำเลียงแบบซิมพลาสต์ และสัญลักษณ์ (-----) แสดงการลำเลียงแบบอะโพพลาสต์ (Peterson, 1987).....	13
รูปที่ 2.5 การพัฒนาเนื้อเยื่อแรงแรงคิมาในรากของข้าวและข้าวโพด ภายใต้สภาวะที่ดินมีการระบายน้ำได้ดีและสภาวะที่ดินมีน้ำท่วมขัง (Yamauchia et al., 2013).....	13
รูปที่ 2.6 ภาพตัดตามขวางของรากข้าว (รูปซ้าย) และข้าวโพด (รูปขวา) ที่ความยาว 5 เซนติเมตร จากปลายราก (อ้างอิงในหนังสือของ Atwell et al. (1999)).....	14
รูปที่ 2.7 ผลของภาวะเค็มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของราก เมื่อได้รับภาวะเค็มที่ระดับความเข้มข้น 150 มิลลิโมลาร์ (รูป B) และ 250 มิลลิโมลาร์ (รูป C) เปรียบเทียบกับภาวะปกติ (รูป A) ตัวอักษร CP คือ เนื้อเยื่อพารงคิมาในชั้นคอร์เทกซ์ (cortical parenchyma) VC คือ มัดท่อลำเลียง (vascular cylinder) (Céccoli et al., 2011).....	15
รูปที่ 2.8 ลักษณะของแคสพาเรียนสตริฟในเอกโซเดอร์มิส (รูปซ้าย) และเอนโดเดอร์มิส (รูปขวา) ในรากข้าวพันธุ์ Pokkali และ IR20 ที่ความยาวต่าง ๆ (10 20 และ 30 มิลลิเมตร จากปลายราก) ภายใต้ภาวะปกติและภาวะเค็ม หัวลูกศรสีขาวแสดงถึงตำแหน่งของแคสพาเรียนสตริฟในเอกโซเดอร์มิสและเอนโดเดอร์มิส (Krishnamurthy et al., 2009).....	16

รูปที่ 2.9 การสะสมสารซูเบอร์อินที่บริเวณผนังเซลล์ของเอกโซเดอร์มิส (รูปซ้าย) และเอนโดเดอร์มิส (รูปขวา) ในรากข้าวพันธุ์ Pokkali และ IR20 ที่ความยาวต่าง ๆ (20-100 มิลลิเมตร จากปลายราก) ภายใต้ภาวะปกติและภาวะเค็ม หัวลูกศรสีขาวแสดงถึงการสะสมสารซูเบอร์อินที่บริเวณผนังเซลล์ของเอกโซเดอร์มิสและเอนโดเดอร์มิส ตัวอักษร ex คือ เอกโซเดอร์มิส (exodermis) pc คือ เซลล์แพสเสจ (passage cell) และ sl คือ สเกลอเรนจิม่า (sclerenchyma) (Krishnamurthy et al., 2009)..... 17

รูปที่ 2.10 การแยกตัวของบอร์เดอร์เซลล์ออกจากปลายรากของพืชชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ข้าวโพด (รูป A) แตงกวา (รูป B) มะเขือเทศ (รูป C) ผ้าย (รูป D) ถั่วอัลฟัลฟา (รูป E) และ *Arabidopsis thaliana* (รูป F) หลังจากที่มีการแช่ปลายรากในน้ำเป็นเวลา 30 วินาที (Hawes et al., 1998)..... 18

รูปที่ 2.11 ลักษณะบอร์เดอร์เซลล์ที่พบบริเวณปลายรากของถั่วเหลืองในสภาวะที่ปราศจากน้ำ (รูป A) และตำแหน่งของบอร์เดอร์เซลล์ที่อยู่ในสารเมือกภายใต้สภาวะที่ปราศจากน้ำ (รูป B) ตัวอักษร B คือ บอร์เดอร์เซลล์ (border cells) E คือ เซลล์เอพิเดอร์มิส (epidermal cells) M คือ สารเมือก (mucilage) และ RH คือ ขนราก (root hairs) (อ้างอิงในงานวิจัยของ Hawes et al. (1998))..... 19

รูปที่ 2.12 โครงสร้างของหุ้มรากและการเจริญของบอร์เดอร์เซลล์ (อ้างอิงถึงใน Hawes et al. (2003))..... 20

รูปที่ 2.13 กระบวนการอะพอพโทซิสของบอร์เดอร์เซลล์ โดยเซลล์ที่มีชีวิต ตรวจพบดีเอ็นเอที่ติดสีฟ้า ซึ่งเกิดจากการย้อมด้วยสี Hoechst 33342 (รูป A และ C) ส่วนเซลล์ที่กำลังเกิดอะพอพโทซิส ตรวจพบสีเขียวที่เกิดจากการทดสอบด้วยวิธี TUNEL (รูป B และ D) (Wang et al., 1996)..... 21

รูปที่ 2.14 ผลของความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณสูงที่มีต่อการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากในถั่ว (รูป B) หลังจากที่ได้รับภาวะดังกล่าวเป็นเวลา 3 วัน เปรียบเทียบกับภาวะปกติ (รูป A) (Zhao et al., 2000)..... 23

รูปที่ 2.15 การหลั่งสารเมือกของบอร์เดอร์เซลล์ในถั่วพันธุ์ที่ทนต่อความเป็นพิษของอะลูมิเนียม เมื่อได้รับความเป็นพิษของอะลูมิเนียมที่มีความเข้มข้น 100 ไมโครโมลาร์ (รูป b) และ 200 ไมโครโมลาร์ (รูป c) เปรียบเทียบกับภาวะปกติ (รูป a) (Miyasaka and Hawes, 2001)..... 23

รูปที่ 2.16 การเคลื่อนที่ของเชื้อก่อโรคเข้าหาบอร์เดอร์เซลล์ หลังจากที่เราได้รับเชื้อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ลูกศรแสดงถึงตำแหน่งของเชื้อก่อโรค (Gunawardena et al., 2005)..... 24

รูปที่ 2.17 การเคลื่อนที่ของไส้เดือนฝอยเข้าหาปลายรากที่มีบอร์เดอร์เซลล์ (รูป a) โดยบอร์เดอร์เซลล์ทำหน้าที่จับไส้เดือนฝอยไม่ให้เคลื่อนที่ต่อไปได้ (รูป b) และมีการตายของไส้เดือนฝอยเกิดขึ้น (รูป c) (Hawes et al., 2000)..... 24

รูปที่ 2.18 องค์ประกอบภายในเซลล์ของบอร์เดอร์เซลล์ในถั่ว (รูป B และ C) ลูกศรสีดำแสดงตำแหน่งของเวสิเคิลที่อยู่ใกล้กับผนังเซลล์และมีการเชื่อมกับเยื่อหุ้มเซลล์ หัวลูกศรสีขาวแสดงส่วนของกอลจิ คอมเพล็กซ์ และเวสิเคิลจำนวนมากที่อยู่ภายในไซโทพลาซึม ตัวอักษร CW คือ ผนังเซลล์ (cell wall) G คือ กอลจิ คอมเพล็กซ์ (golgi complex) M คือ ไมโทคอนเดรีย (mitochondria) SV คือ เวสิเคิล (secretory vesicles) และ V คือ แวคิวโอล (vacuole) (Cannesan et al., 2011)..... 25

รูปที่ 2.19 ลักษณะของเซลล์ที่คล้ายคลึงกับบอร์เดอร์เซลล์ (รูป A) เปรียบเทียบกับลักษณะของบอร์เดอร์เซลล์ทั่ว ๆ ไป (รูป B) ที่มีการแยกตัวของเซลล์ออกจากปลายราก เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีน้ำ (รูป C) ตัวอักษร BC คือ บอร์เดอร์เซลล์ (border cells) BLC คือ เซลล์ที่คล้ายคลึงกับบอร์เดอร์เซลล์ (border-like cells) และ RC คือ หมวกราก (root cap) (Cannesan et al., 2012)..... 26

รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเติบโตของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ในช่วงเวลาทำการทดลอง..... 40

รูปที่ 4.2 โครงสร้างระบบรากของข้าวพันธุ์ KDML105 ที่มีอายุ 28 วัน..... 41

รูปที่ 4.3 การเติบโตของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน รูป A น้ำหนักสดของราก (กรัม) รูป B น้ำหนักแห้งของราก (กรัม) รูป C น้ำหนักสดของต้น (กรัม) และรูป D น้ำหนักแห้งของต้น (กรัม) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE ..... 43

รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน รูป A ความยาวของรากปฐมภูมิ (เซนติเมตร) รูป B จำนวนของรากแขนงที่รากปฐมภูมิ (ราก) รูป C ความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐมภูมิ รูป D จำนวนของรากพิเศษแรกเกิด (ราก) และรูป E จำนวนของรากพิเศษ (ราก) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE ..... 46

รูปที่ 4.5 การเติบโตของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน รูป A น้ำหนักสดของราก (กรัม) รูป B น้ำหนักแห้งของราก (กรัม) รูป C น้ำหนักสดของต้น (กรัม) และรูป D น้ำหนักแห้งของต้น (กรัม) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test..... 48

รูปที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน รูป A ความยาวของรากปฐมภูมิ (เซนติเมตร) รูป B จำนวนของรากแขนงที่รากปฐมภูมิ (ราก) รูป C ความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐมภูมิ รูป D จำนวนของรากพิเศษแรกเกิด (ราก) และรูป E จำนวนของรากพิเศษ (ราก) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test..... 51

รูปที่ 4.7 การเติบโตของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน รูป A น้ำหนักสดของราก (กรัม) รูป B น้ำหนักแห้งของราก (กรัม) รูป C น้ำหนักสดของต้น (กรัม) และรูป D น้ำหนักแห้งของต้น (กรัม) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test..... 53

รูปที่ 4.8 ลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน รูป A ความยาวของรากปฐมภูมิ (เซนติเมตร) รูป B จำนวนของรากแขนงที่รากปฐมภูมิ (ราก) รูป C ความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐมภูมิ รูป D จำนวนรากพิเศษแรกเกิด (ราก) และรูป E จำนวนรากพิเศษ (ราก) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test..... 56

รูปที่ 4.9 ภาพตัดขวางของรากข้าวที่มีอายุ 28 วัน ที่ความยาวจากปลายราก 10 เซนติเมตร (รูป A) และ 20 เซนติเมตร (รูป B-D) ตัวอักษร ae คือ แอเรนจิม่า (aerenchyma) co คือ ชั้นคอร์เทกซ์ (cortex) en คือ เอนโดเดอร์มิส (endodermis) ep คือ ชั้นเอพิเดอร์มิส (epidermis) ex คือ เอกโซเดอร์มิส (exodermis) lr คือ รากแขนง (lateral root) pc คือ เซลล์แพสเสจ (passage cell) ph คือ เนื้อเยื่อลำเลียงอาหาร (phloem) px คือ เพริไซเคิล (pericycle) rt คือ ขนราก (root hair) sc คือ สเกลอเรนจิม่า (sclerenchyma) st คือ ชั้นสตีล (stele) และ xy คือ เนื้อเยื่อลำเลียงน้ำ (xylem)..... 59

รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางของรากพิเศษที่ความยาวจากปลายราก 10 เซนติเมตร หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 14 และ 21 วัน..... 60

รูปที่ 4.11 ภาพตัดขวางของรากข้าวที่ความยาวจากปลายราก 10 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน รูป A C และ E แสดงรากข้าวในภาวะปกติ รูป B D และ F แสดงรากข้าวในภาวะเค็ม ของข้าวพันธุ์ KDML105 (A และ B) พันธุ์ Pokkali (C และ D) และพันธุ์ IR29 (E และ F)..... 63

รูปที่ 4.12 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกันที่ความยาว 10 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน รูป A ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (ไมโครเมตร) รูป B พื้นที่ของราก (ตารางมิลลิเมตร) รูป C ความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ (ไมโครเมตร) รูป D ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีล (ไมโครเมตร) รูป E พื้นที่ของชั้นสตีล (ตารางมิลลิเมตร) และรูป F พื้นที่สัมผัสของชั้นสตีล (เปอร์เซ็นต์) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Student's t-test..... 64

รูปที่ 4.13 ภาพตัดขวางของรากข้าวที่ความยาวจากปลายราก 20 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน รูป A C และ E แสดงรากข้าวในภาวะปกติ รูป B D และ F แสดงรากข้าวในภาวะเค็ม ของข้าวพันธุ์ KDML105 (A และ B) พันธุ์ Pokkali (C และ D) และพันธุ์ IR29 (E และ F)..... 67

รูปที่ 4.14 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกันที่ความยาว 20 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน รูป A ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (ไมโครเมตร) รูป B พื้นที่ของราก (ตารางมิลลิเมตร) รูป C ความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ (ไมโครเมตร) รูป D ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีล (ไมโครเมตร) รูป E พื้นที่ของชั้นสตีล (ตารางมิลลิเมตร) และรูป F พื้นที่สัมผัสของชั้นสตีล (เปอร์เซ็นต์) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) และ 99% (\*\*) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Student's t-test..... 68

รูปที่ 4.15 ภาพตัดขวางของรากข้าวที่ความยาวจากปลายราก 10 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน รูป A C และ E แสดงรากข้าวในภาวะปกติ รูป B D และ F แสดงรากข้าวในภาวะเค็ม ของข้าวพันธุ์ KDML105 (A และ B) พันธุ์ Pokkali (C และ D) และพันธุ์ IR29 (E และ F)..... 71

รูปที่ 4.16 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกันที่ความยาว 10 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน รูป A ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (ไมโครเมตร) รูป B พื้นที่ของราก (ตารางมิลลิเมตร) รูป C ความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ (ไมโครเมตร) รูป D ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีล (ไมโครเมตร) รูป E พื้นที่ของชั้นสตีล (ตารางมิลลิเมตร) และรูป F พื้นที่สัมผัสของชั้นสตีล (เปอร์เซ็นต์) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (\*) และ 99% (\*\*) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test..... 72

รูปที่ 4.17 ภาพตัดขวางของรากข้าวที่ความยาวจากปลายราก 20 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน รูป A C และ E แสดงรากข้าวในภาวะปกติ รูป B D และ F แสดงรากข้าวในภาวะเค็ม ของข้าวพันธุ์ KDML105 (A และ B) พันธุ์ Pokkali (C และ D) และพันธุ์ IR29 (E และ F)..... 75

รูปที่ 4.18 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกันที่ความยาว 20 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน รูป A ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (ไมโครเมตร) รูป B พื้นที่ของราก (ตารางมิลลิเมตร) รูป C ความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ (ไมโครเมตร) รูป D ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีล (ไมโครเมตร) รูป E พื้นที่ของชั้นสตีล (ตารางมิลลิเมตร) และรูป F พื้นที่สัมผัสของชั้นสตีล (เปอร์เซ็นต์) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (\*) และ 99% (\*\*) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's..... 76

รูปที่ 4.19 ภาพตัดขวางของรากข้าวที่ความยาวจากปลายราก 10 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน รูป A C และ E แสดงรากข้าวในภาวะปกติ รูป B D และ F แสดงรากข้าวในภาวะเค็ม ของข้าวพันธุ์ KDML105 (A และ B) พันธุ์ Pokkali (C และ D) และพันธุ์ IR29 (E และ F)..... 79

รูปที่ 4.20 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกันที่ความยาว 10 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน รูป A ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (ไมโครเมตร) รูป B พื้นที่ของราก (ตารางมิลลิเมตร) รูป C ความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ (ไมโครเมตร) รูป D ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีล (ไมโครเมตร) รูป E พื้นที่ของชั้นสตีล (ตารางมิลลิเมตร) และรูป F พื้นที่สัมผัสของชั้นสตีล (เปอร์เซ็นต์) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (\*) และ 99% (\*\*) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's..... 80



- รูปที่ 4.21 ภาพตัดขวางของรากข้าวที่ความยาวจากปลายราก 20 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน รูป A C และ E แสดงรากข้าวในภาวะปกติ รูป B D และ F แสดงรากข้าวในภาวะเค็ม ของข้าวพันธุ์ KDML105 (A และ B) พันธุ์ Pokkali (C และ D) และพันธุ์ IR29 (E และ F)..... 83
- รูปที่ 4.22 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกันที่ความยาว 20 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน รูป A ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (ไมโครเมตร) รูป B พื้นที่ของราก (ตารางมิลลิเมตร) รูป C ความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ (ไมโครเมตร) รูป D ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีล (ไมโครเมตร) รูป E พื้นที่ของชั้นสตีล (ตารางมิลลิเมตร) และรูป F พื้นที่สัมผัสของชั้นสตีล (เปอร์เซ็นต์) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) และ 99% (\*\*) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's ..... 84
- รูปที่ 4.23 ลักษณะของสารเมือกบริเวณปลายรากและการสร้างสารเมือกของบอร์เดอร์เซลล์แต่ละแบบในข้าวพันธุ์ KDML105 (รูป A) ข้าวพันธุ์ Pokkali (รูป B) และข้าวพันธุ์ IR29 (รูป C) ลักษณะของบอร์เดอร์เซลล์ที่มีรูปร่างกลมหรือรี (รูป D) บอร์เดอร์เซลล์ที่มีรูปร่างยาวและรี (รูป E) และบอร์เดอร์เซลล์ที่มีรูปร่างยาว (รูป F)..... 86
- รูปที่ 4.24 บอร์เดอร์เซลล์ที่มีชีวิต เมื่อย้อมด้วยสี Fluorescein diacetate (FDA) (รูป A) และบอร์เดอร์เซลล์ที่ตาย เมื่อย้อมด้วยสี phenosafranin (รูป B)..... 87
- รูปที่ 4.25 รูปแบบการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากที่ความยาวรากต่าง ๆ ของข้าวพันธุ์ KDML105 ภายใต้ภาวะปกติ แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Dunnett's T3 ..... 89
- รูปที่ 4.26 รูปแบบการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากที่ความยาวรากต่าง ๆ ของข้าวพันธุ์ Pokkali ภายใต้ภาวะปกติ แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE ตัวอักษร NS (not significantly different) แสดงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Dunnett's T3 ..... 91
- รูปที่ 4.27 รูปแบบการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากที่ความยาวรากต่าง ๆ ของข้าวพันธุ์ IR29 ภายใต้ภาวะปกติ แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Dunnett's T3 ..... 93

รูปที่ 4.28 จำนวนบอร์เดอร์เซลล์ของราก (รูป A) และความหนาของสารเมือกที่บอร์เดอร์เซลล์สร้างขึ้น (รูป B) ที่ความยาวรากต่าง ๆ ในข้าวพันธุ์ KDML105 เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) และ 99% (\*\*) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test..... 95

รูปที่ 4.29 จำนวนบอร์เดอร์เซลล์ของราก (รูป A) และความหนาของสารเมือกที่บอร์เดอร์เซลล์สร้างขึ้น (รูป B) ที่ความยาวรากต่าง ๆ ในข้าวพันธุ์ Pokkali เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test..... 97

รูปที่ 4.30 จำนวนบอร์เดอร์เซลล์ของราก (รูป A) และความหนาของสารเมือกที่บอร์เดอร์เซลล์สร้างขึ้น (รูป B) ที่ความยาวรากต่าง ๆ ในข้าวพันธุ์ IR29 เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) และ 99% (\*\*) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test..... 99

รูปที่ 4.31 แผนภาพแสดงผลของภาวะเค็มต่อโครงสร้างระบบราก กายวิภาคศาสตร์ และลักษณะบอร์เดอร์เซลล์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน..... 101

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันภาวะดินเค็มเป็นปัญหาสำคัญของการทำเกษตรกรรมในประเทศไทย โดยเฉพาะพื้นที่บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภูมิภาคดังกล่าวมีพื้นที่ในการเพาะปลูกข้าวมากที่สุดของประเทศ แต่กลับมีอัตราการขยายตัวของผลผลิตต่อไร่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับภูมิภาคอื่น เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากภาวะดินเค็มสูงถึงร้อยละ 29 ของพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมด (กาเจ, 2557; สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557) ปัญหาภาวะดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เกิดจากลักษณะทางธรณีวิทยาที่มีหินเกลือแทรกตัวอยู่ในพื้นที่ ทั้งยังมีการแพร่กระจายของเกลือที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น การสลายตัวของหินเกลือ การแพร่ของน้ำใต้ดินที่เป็นน้ำเค็มขึ้นมาบนผิวดินและเกิดการระเหยของน้ำ ทำให้เกิดการสะสมของเกลือบริเวณผิวดินเป็นจำนวนมาก เป็นต้น รวมถึงการแพร่กระจายของเกลือที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ เช่น การทำนาเกลือสินเธาว์ โดยสูบน้ำเค็มขึ้นมาบนผิวดิน การสร้างอ่างเก็บน้ำบนพื้นที่ที่มีดินเค็ม การใช้น้ำเพื่อการชลประทานอย่างไม่ถูกต้อง การตัดไม้ทำลายป่าเป็นบริเวณกว้าง ทำให้น้ำฝนซึมผ่านลงไปในพื้นที่ดิน ส่งผลให้ระดับของน้ำใต้ดินที่เป็นน้ำเค็มเพิ่มสูงขึ้น และเกิดการแพร่กระจายของน้ำเค็มขึ้นสู่ผิวดิน เป็นต้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2552; ยูวะนิยม, 2547) นิยามของคำว่าดินเค็ม (saline soil) นั้น หมายถึง ดินที่มีปริมาณหรือความเข้มข้นของสารละลายเกลือละลายอยู่ในดินสูงมาก จนส่งผลกระทบต่อการทำงานของเอนไซม์และผลผลิตของพืช ไอออนที่พบในดินเค็มประกอบด้วยไอออนทั้งหมดที่มีประจุบวกและลบ ได้แก่ โซเดียมไอออน ( $\text{Na}^+$ ) คลอไรด์ไอออน ( $\text{Cl}^-$ ) แคลเซียมไอออน ( $\text{Ca}^{2+}$ ) ซัลเฟตไอออน ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) แมกนีเซียมไอออน ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ไบคาร์บอเนตไอออน ( $\text{HCO}_3^-$ ) รวมทั้งโพแทสเซียมไอออน ( $\text{K}^+$ ) และไนเตรตไอออน ( $\text{NO}_3^-$ ) ที่พบได้ในปริมาณน้อย โดยไอออนหลักที่พบมากในดินเค็ม คือ โซเดียมไอออนและคลอไรด์ไอออน มีรายงานว่าดินเค็มมีส่วนประกอบของโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) อยู่มากถึงร้อยละ 50-80 ของเกลือที่ละลายได้ทั้งหมด (Bernstein, 1975; Rengasamy, 2010)

เมื่อพืชได้รับความเครียดจากความเค็ม (salt stress) พืชจะมีการเจริญเติบโตลดลง เนื่องจากความเค็มมีผลทำให้ค่าศักย์ของน้ำในดิน (water potential) ลดลง เกิดความแตกต่างของค่าศักย์ระหว่างน้ำในดินกับภายในเซลล์รากที่ลดลง ทำให้พืชสามารถนำน้ำในดินไปใช้ได้น้อยลงและไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช จึงเกิดภาวะที่พืชขาดน้ำ (water deficit) (Bray, 1997; Everardo et al., 1975; Greenway and Munns, 1980; Munns, 2002; Munns and Tester, 2008) นอกจากนี้ภาวะเค็มยังทำให้เกิดความเครียดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative stress) ขึ้น

ได้ เนื่องจากพืชมีการตอบสนองต่อความเค็มด้วยการปิดปากใบมากขึ้น เพื่อลดการสูญเสียน้ำจากการคายน้ำ ทำให้พืชสามารถตรึงแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จากบรรยากาศได้น้อย ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของปฏิกิริยาแสงและปฏิกิริยาตรึงแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ นำไปสู่การสร้างอนุมูลอิสระ (reactive oxygen species: ROSs) มากขึ้น ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้สามารถทำลายโปรตีนไขมัน และกรดนิวคลีอิก ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์พืช (Chaves et al., 2009; Meloni et al., 2003) อีกทั้งความเค็มยังส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของไอออนภายในเซลล์ (ion imbalance) เนื่องจากปริมาณโซเดียมไอออนและคลอไรด์ไอออนที่มากในดิน ส่งผลให้พืชลดการดูดโพแทสเซียมไอออน แคลเซียมไอออน และไนเตรตไอออนเข้าสู่เซลล์ (Tavakkoli et al., 2011; Wang et al., 2011) ทั้งนี้เมื่อพืชเผชิญกับภาวะเค็มเป็นเวลานาน พืชจะมีการสะสมไอออนของเกลือมากเกินไปจนเกิดความเป็นพิษขึ้นภายในเซลล์ (ion toxicity) โดยมีรายงานว่าความเค็มส่งผลกระทบต่อการทำงานของเอนไซม์บางอย่างที่มีบทบาทสำคัญต่อพืช เช่น มาเลต ดีไฮโดรจีเนส (malate dehydrogenase) ในวัฏจักรเครบส์ (Krebs cycle) กลูโคส-6-ฟอสเฟต ดีไฮโดรจีเนส (glucose-6-phosphate dehydrogenase) ของวิถีเพนโทสฟอสเฟต (pentose phosphate pathway: PPP) เพอร์ออกซิเดส (peroxidase) และเอทีพีเอส (ATPase) เป็นต้น (Flowers, 1972; Katembe et al., 1998) ตลอดจนความเค็มยังส่งผลให้พืชมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยาและกายวิภาคศาสตร์อีกด้วย (Akram et al., 2002; Burssens et al., 2000)

เมื่อพิจารณาถึงสภาวะที่พืชเจริญอยู่ในบริเวณที่มีดินเค็ม จะเห็นได้ว่ารากเป็นส่วนแรกที่ได้รับผลกระทบจากภาวะเค็ม ส่งผลให้พืชเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโครงสร้างระบบราก (root system architecture: RSA) จากการศึกษาก่อนหน้านี้ใน *Arabidopsis thaliana* พบว่าความเค็มมีผลทำให้พืชมีความยาวของรากปฐมภูมิ (primary root) ลดลง แต่ยังคงมีผลการทดลองบางอย่างที่ขัดแย้งกัน โดยงานวิจัยของ Wang et al. (2009) พบว่าความเค็มที่ความเข้มข้นสูง ทำให้พืชมีความยาวของรากแขนง (lateral roots) เพิ่มขึ้น ทั้งยังมีจำนวนของรากพิเศษ (adventitious roots) เพิ่มขึ้นด้วย ส่วนงานวิจัยของ Zolla et al. (2009) กับ Julkowska et al. (2014) พบว่าความเค็มที่ความเข้มข้นสูง ทำให้พืชมีความยาวของรากแขนงลดลง ซึ่งฮอร์โมนที่มีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระบบรากเมื่อพืชได้รับความเครียดจากความเค็ม คือ ออกซิน (auxin) กรดแอบไซซิก (abscisic acid: ABA) และเอทิลีน (ethylene) (Chen et al., 2006; Wang et al., 2009; Zolla et al., 2009) ส่วนผลของภาวะเค็มที่มีต่อลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของรากพืชชนิดต่าง ๆ จากงานวิจัยของ Horie et al. (2012) พบว่ารากข้าว (*Oryza sativa* L.) ที่ได้รับภาวะเค็ม มีจำนวนชั้นคอร์เทกซ์ (cortex layers) ลดลง ทั้งยังมีการสร้างแอเรนจิม่า (aerenchyma) และสเกลอเรนจิม่า (sclerenchyma) ในชั้นคอร์เทกซ์ นอกจากนี้ภาวะเค็มยังมีผลทำ

ให้ขนาดของเนื้อเยื่อพาเรงคิมาในชั้นคอร์เทกซ์ (cortical parenchyma) และขนาดของกลุ่มท่อลำเลียง (vascular cylinder) ของราก Rhodes grass (*Chloris gayana* Kunth) ลดลง (Céccoli et al., 2011) ส่วนงานวิจัยของ Krishnamurthy et al. (2009) ทำการศึกษาในรากข้าว (*Oryza sativa* L.) ที่มีความสามารถในการทนเค็มต่างกัน พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้พันธุ์ทนเค็มมีการพัฒนาแคสพาเรียนสตริป (Casparian strip) ทั้งในเอนโดเดอร์มิส (endodermis) และเอกโซเดอร์มิส (exodermis) เกิดเร็วขึ้น ส่วนพันธุ์ไม่ทนเค็มมีการพัฒนาแคสพาเรียนสตริปในเอนโดเดอร์มิสเกิดเร็วขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ยังมีการสร้างแคสพาเรียนสตริปในเอกโซเดอร์มิสและมีการสะสมซูเบอร์ิน (suberin) ในเอกโซเดอร์มิสและเอนโดเดอร์มิสมากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามรากข้าวบาร์เลย์ (*Hordeum vulgare* L.) ที่มีความสามารถในการทนเค็มเหมือนกัน อาจมีความหนาของเอกโซเดอร์มิสและเอนโดเดอร์มิสต่างกัน (Atabayeva et al., 2013) สำหรับพืชใบเลี้ยงคู่ เช่น ฝ้าย (*Gossypium hirsutum* L.) และมะเขือเทศ (*Lycopersicon esculentum* Mill) มีการศึกษาพบว่าภาวะเค็มมีผลชักนำให้เกิดการสร้างเอกโซเดอร์มิสในชั้นคอร์เทกซ์ ทั้งยังมีการสะสม ซูเบอร์ินมากขึ้นในเอนโดเดอร์มิส ตลอดจนมีการสะสมลิกนิน (lignin) มากขึ้นในเทรเชียร์อิลิเมนต์ (tracheary elements) (Reinhardt and Rost, 1995; Sánchez-Aguayo et al., 2004)

นอกจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระบบรากและลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากแล้วนั้น พืชยังมีบอร์เดอร์เซลล์ของราก (root border cells: RBCs) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ช่วยปกป้องปลายรากพืช (Driouich et al., 2010) บอร์เดอร์เซลล์เป็นเซลล์ที่เจริญมาจากส่วนของหมวกราก (root cap) เป็นเซลล์ที่มีชีวิตและมีลักษณะเฉพาะ มักยึดจับกันอย่างหลวม ๆ เป็นชั้นเดียวบริเวณด้านนอกปลายราก ทำให้เซลล์ดังกล่าวอยู่บริเวณตรงกลางระหว่างรากพืชกับดินที่อยู่รอบ ๆ ราก เมื่อบอร์เดอร์เซลล์อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีน้ำ จะมีการแยกออกจากกันอย่างรวดเร็วภายในเวลา 1-2 นาที (Hawes et al., 1998; Hawes and Lin, 1990) บอร์เดอร์เซลล์ทำหน้าที่หลั่งสารเมือก เพื่อช่วยป้องกันอันตรายจากความเครียดทางกายภาพและชีวภาพ (Cai and Wang and et al., 2011; Iijima et al., 2003) เช่น การปกป้องปลายรากจากเชื้อก่อโรค (pathogen) และการเข้าทำลายของไส้เดือนฝอย (Cannesan et al., 2011; Hawes et al., 2000) การปกป้องปลายรากจากความเป็นพิษของไอออนต่าง ๆ เช่น โซเดียมไอออน เฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) อะลูมิเนียมไอออน ( $Al^{3+}$ ) รวมถึงสภาวะที่มีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงเกินไป (Chen et al., 2008; Qiao, 2011; Xing et al., 2008; Zhao et al., 2000) จากการศึกษาก่อนหน้านี้ในรากของพืชตระกูลถั่ว เมื่อเปรียบเทียบระหว่างรากที่มีและไม่มีบอร์เดอร์เซลล์ พบว่ารากที่มีบอร์เดอร์เซลล์สามารถป้องกันตนเองจากการติดเชื้อก่อโรค การเข้าทำลายของไส้เดือนฝอย และความเป็นพิษของอะลูมิเนียมไอออนได้ดีกว่ารากที่ไม่มีบอร์เดอร์เซลล์ (Cai and Wang and et al., 2011; Hawes et al., 2000) บอร์เดอร์เซลล์ของรากสามารถพบ

ได้ในรากพืชหลายชนิด โดยเฉพาะพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ ได้แก่ ข้าวโพด (*Zea mays* L.) ฝ้าย (*Gossypium hirsutum* L.) ถั่วเหลือง (*Glycine max* (L.) Merrill) ถั่วลันเตา (*Pisum sativum* L.) แตงกวา (*Cucumis sativus* L.) และข้าว (*Oryza sativa* L.) เป็นต้น (Cai and Wang and et al., 2011; Cai and Zhang and et al., 2011; Hawes et al., 2000; Iijima et al., 2004; Qiao et al., 2013; Yu et al., 2009) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า ข้าวสายพันธุ์ที่มีความทนต่อความเป็นพิษของอะลูมิเนียมไอออนต่างกัน จะมีลักษณะของบอร์เตอร์เซลล์ต่างกันด้วย (Cai and Zhang and et al., 2011) อย่างไรก็ตาม ยังคงมีรายงานผลของความเครียดจากความเค็มต่อลักษณะบอร์เตอร์เซลล์ของรากในข้าวไม่มากนัก

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของภาวะเค็มที่มีต่อโครงสร้างระบบราก กายวิภาคศาสตร์ และลักษณะของบอร์เตอร์เซลล์ของรากในข้าว (*Oryza sativa* L.) ที่มีความทนเค็มต่างกัน 3 พันธุ์ คือ ขาวดอกมะลิ 105 (KDML105) ซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของไทย นิยมเพาะปลูกมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เพราะข้าวพันธุ์ดังกล่าวสามารถทนแล้งและทนเค็มได้ (บุญทอง, 2555) Pokkali ซึ่งเป็นพันธุ์มาตรฐานที่ทนเค็ม และ IR29 ซึ่งเป็นพันธุ์มาตรฐานที่ไม่ทนเค็ม (Gregorio and Senadhira, 1993) เพื่อให้ทราบว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระบบรากและลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของราก รวมถึงลักษณะของบอร์เตอร์เซลล์ มีความเกี่ยวข้องกับความสามารถในการทนต่อความเค็มหรือไม่

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลของภาวะเค็มต่อโครงสร้างระบบราก กายวิภาคศาสตร์ และลักษณะบอร์เตอร์เซลล์ของรากในข้าว *Oryza sativa* L. ที่มีความทนเค็มต่างกัน

### ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาผลของภาวะเค็มต่อโครงสร้างระบบรากในข้าว *Oryza sativa* L. ที่มีความทนเค็มต่างกัน
2. ศึกษาผลของภาวะเค็มต่อลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าว *Oryza sativa* L. ที่มีความทนเค็มต่างกัน
3. ศึกษาลักษณะบอร์เตอร์เซลล์ของรากในข้าว *Oryza sativa* L. ที่มีความทนเค็มต่างกัน

## บทที่ 2

### ตรวจเอกสาร

#### ปัญหาดินเค็ม

ปัญหาดินเค็มเป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญที่ส่งผลให้เกิดการเสื่อมโทรมของดิน ซึ่งพบได้ในหลายพื้นที่ทั่วโลก โดยมีรายงานว่า พื้นที่ทั่วโลกที่ได้รับผลกระทบจากภาวะดินเค็มมีมากกว่า 800 ล้านไร่ คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 6 ของพื้นที่ทั่วโลกทั้งหมด ปัญหาดินเค็มนี้มีสาเหตุเกิดจากลักษณะทางธรรมชาติและกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ ยกตัวอย่างเช่น การสะสมเกลือเป็นระยะเวลานานในพื้นที่แห้งแล้ง การสลายตัวของหินเกลือชนิดต่าง ๆ การกระจายตัวของเกลือจากทะเลสู่พื้นดิน โดยการนำพาของลมและฝน ซึ่งในน้ำฝนมีความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ ตั้งแต่ 6 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ไปจนถึง 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม รวมถึงการใช้น้ำจากระบบชลประทานในการทำการเกษตรด้วย (Horie et al., 2012; Munns and Tester, 2008) สำหรับประเทศไทยพบว่า ภาวะดินเค็มเป็นปัญหาสำคัญของการทำเกษตรกรรม โดยเฉพาะพื้นที่บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งภูมิภาคดังกล่าวมีพื้นที่ในการเพาะปลูกข้าวมากที่สุดของประเทศ แต่กลับมีอัตราการขยายตัวของผลผลิตต่อไร่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับภูมิภาคอื่น เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากภาวะดินเค็มสูงถึงร้อยละ 29 ของพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมด (กาเจ, 2557; สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557) ปัญหาภาวะดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เกิดจากลักษณะทางธรณีวิทยาที่มีหินเกลือแทรกตัวอยู่ในพื้นที่ ทั้งยังมีการแพร่กระจายของเกลือที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น การสลายตัวของหินเกลือ การแพร่ของน้ำใต้ดินที่เป็นน้ำเค็มขึ้นมาบนผิวดินและเกิดการระเหยของน้ำ ทำให้เกิดการสะสมของเกลือบริเวณผิวดินเป็นจำนวนมาก เป็นต้น รวมถึงการแพร่กระจายของเกลือที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ เช่น การทำนาเกลือสินเธาว์ โดยสูบน้ำเค็มขึ้นมาบนผิวดิน การสร้างอ่างเก็บน้ำบนพื้นที่ที่มีดินเค็ม การใช้น้ำเพื่อการชลประทานอย่างไม่ถูกต้อง การตัดไม้ทำลายป่าเป็นบริเวณกว้าง ทำให้น้ำฝนซึมผ่านลงไปในชั้นดิน ส่งผลให้ระดับของน้ำใต้ดินที่เป็นน้ำเค็มเพิ่มสูงขึ้น และเกิดการแพร่กระจายของน้ำเค็มขึ้นสู่ผิวดิน เป็นต้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2552; ยูวะนิยม, 2547) ทั้งนี้ ปัญหาดินเค็มเป็นปัญหาสำคัญต่อการเพาะปลูกข้าว เนื่องจากข้าวเป็นพืชที่ไวต่อภาวะเค็ม โดยเฉพาะในช่วงแรกของระยะก่อนการสืบพันธุ์ (vegetative stage) และช่วงหลังของระยะสืบพันธุ์ (reproductive stages) อย่างไรก็ตาม ข้าวเป็นเพียงหนึ่งในพืชไม่กี่ชนิดที่สามารถเจริญเติบโตได้ภายใต้ภาวะเค็ม เนื่องจากข้าวมักมีการเจริญเติบโตในดินที่มีน้ำท่วมขัง ซึ่งสภาพแวดล้อมนี้สามารถช่วยลดความเข้มข้นของเกลือที่ด้านบนผิวดินได้ โดยข้าวจะใช้ระยะเวลาในการเจริญเติบโตจนให้ผลผลิตนานกว่าในภาวะปกติ และผลผลิตที่ได้ยังมีปริมาณและคุณภาพต่ำอีกด้วย (Singh et al., 2009; Thomson et al., 2010)

สำหรับนิยามของคำว่าดินเค็ม (saline soil) นั้น หมายถึง ดินที่มีปริมาณหรือความเข้มข้นของสารละลายเกลือละลายอยู่ในดินสูงมาก จนส่งผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช ไอออนที่พบในดินเค็มประกอบด้วยไอออนทั้งที่มีประจุบวกและลบ ได้แก่ โซเดียมไอออน ( $\text{Na}^+$ ) คลอไรด์ไอออน ( $\text{Cl}^-$ ) แคลเซียมไอออน ( $\text{Ca}^{2+}$ ) ซัลเฟตไอออน ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) แมกนีเซียมไอออน ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ไบคาร์บอเนตไอออน ( $\text{HCO}_3^-$ ) รวมทั้งโพแทสเซียมไอออน ( $\text{K}^+$ ) และไนเตรตไอออน ( $\text{NO}_3^-$ ) ที่พบได้ในปริมาณน้อย โดยไอออนหลักที่พบมากในดินเค็ม คือ โซเดียมไอออนและคลอไรด์ไอออน โดยมีรายงานว่า ในดินเค็มมีส่วนประกอบของโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) อยู่มากถึงร้อยละ 50-80 ของเกลือที่ละลายได้ทั้งหมด (Bernstein, 1975; Rengasamy, 2010) ซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity: ECe) มากกว่าหรือเท่ากับ 4 เดซิซีเมน/เมตร (decisemen/metre: dS/m) หรือเทียบเท่ากับการมีความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ประมาณ 40 มิลลิโมลาร์ (mM) (Munns and Tester, 2008) ทั้งนี้ ดินเค็มยังสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ดินเค็มที่มีความเข้มข้นของโซเดียมไอออนสูง (sodicity) และดินเค็มที่มีความเข้มข้นของไอออนของเกลือทั้งหมดสูง (salinity) เช่น แคลเซียมไอออน แมกนีเซียมไอออน ซัลเฟตไอออน และไอออนของโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งไอออนของเกลือเหล่านี้ นอกจากจะส่งผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตของพืชแล้ว ยังมีผลเสียต่อคุณสมบัติของดินอีกด้วย (Taiz and Zeiger, 2002) นอกจากนี้ ในการจัดจำแนกพืชตามการตอบสนองต่อความเครียดจากความเค็มนั้น สามารถแบ่งพืชออกได้เป็น 2 กลุ่ม ขึ้นอยู่กับความสามารถในการทนเค็มของพืช ได้แก่ พืชดินเค็ม (halophytes) และพืชดินกร่อย (glycophytes) โดยพืชดินเค็มเป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีดินเค็ม ซึ่งพืชชนิดนี้มีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างบางอย่าง เพื่อให้สามารถดำรงชีวิตอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมดังกล่าวได้ ยกตัวอย่างพืชเช่น พืชจำพวกโกกวง ชะคราม และเหงือกปลาหมอ เป็นต้น ส่วนพืชดินกร่อยเป็นพืชที่ไม่มีความสามารถในการทนต่อภาวะเค็มที่ระดับเดียวกันกับพืชดินเค็ม เมื่อพืชดินกร่อยได้รับความเครียดจากความเค็ม ส่งผลให้พืชชนิดนี้มีการเจริญเติบโตลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งส่วนใหญ่พืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจจะมีความไวในการตอบสนองต่อภาวะเค็มแตกต่างกัน โดยมีรายงานว่า ข้าว ข้าวโพด และถั่ว เป็นพืชที่ไวต่อภาวะเค็มมาก ส่วนฝ้ายและข้าวบาร์เลย์มีความไวต่อภาวะเค็มในระดับปานกลาง สำหรับพืชเศรษฐกิจที่มีความสามารถในการทนต่อภาวะเค็มสูง คือ ต้นบิทและอินทผลัม ถึงแม้ว่าพืชทั้งสองชนิดนี้จะเป็นพืชที่ทนเค็ม แต่ความสามารถในการทนเค็มนั้นยังคงน้อยกว่าพืชดินเค็มอยู่มาก โดยเมื่อได้รับภาวะเค็มที่ระดับความเข้มข้นสูงมากกว่า 400 มิลลิโมลาร์ พืชทั้งสองชนิดนี้จะเริ่มมีการเจริญเติบโตที่ลดลงมาก ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่พืชดินเค็มยังสามารถเจริญเติบโตต่อไปได้อย่างปกติ (Atwell et al., 1999; Greenway and Munns, 1980; Taiz and Zeiger, 2002; Thomson et al., 2010)



### ผลของภาวะเค็มที่มีต่อสรีรวิทยาของพืช

เมื่อพืชได้รับความเครียดจากความเค็ม (salt stress) พืชจะมีการเจริญเติบโตลดลง เนื่องจากความเค็มมีผลทำให้ค่าศักย์ของน้ำในดิน (water potential) ลดลง เกิดความแตกต่างของค่าศักย์ระหว่างน้ำในดินกับภายในเซลล์รากที่ลดลง ทำให้พืชสามารถนำน้ำในดินไปใช้ได้น้อยลงและไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช จึงเกิดภาวะที่พืชขาดน้ำ (water deficit) (Bray, 1997; Everardo et al., 1975; Greenway and Munns, 1980; Munns, 2002; Munns and Tester, 2008) นอกจากนี้ภาวะเค็มยังทำให้เกิดความเครียดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative stress) ขึ้นได้ เนื่องจากพืชมีการตอบสนองต่อความเค็มด้วยการปิดปากใบมากขึ้น เพื่อลดการสูญเสียน้ำจากการคายน้ำ ทำให้พืชสามารถตรึงแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จากบรรยากาศได้น้อย ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของปฏิกิริยาแสงและปฏิกิริยาตรึงแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ นำไปสู่การสร้างอนุมูลอิสระ (reactive oxygen species: ROSs) มากขึ้น ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้สามารถทำลายโปรตีนไขมัน และกรดนิวคลีอิก ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์พืช (Chaves et al., 2009; Meloni et al., 2003) อีกทั้งความเค็มยังส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของไอออนภายในเซลล์ (ion imbalance) เนื่องจากปริมาณโซเดียมไอออนและคลอไรด์ไอออนที่มากในดิน ส่งผลให้พืชลดการดูดโพแทสเซียมไอออน แคลเซียมไอออน และไนเตรตไอออนเข้าสู่เซลล์ (Tavakkoli et al., 2011; Wang et al., 2011) ทั้งนี้เมื่อพืชเผชิญกับภาวะเค็มเป็นเวลานาน พืชจะมีการสะสมไอออนของเกลือมากเกินไปจนเกิดความเป็นพิษขึ้นภายในเซลล์ (ion toxicity) โดยมีรายงานว่าความเค็มส่งผลกระทบต่อการทำงานของเอนไซม์บางอย่างที่มีบทบาทสำคัญต่อพืช เช่น มาเลต ดีไฮโดรจีเนส (malate dehydrogenase) ในวัฏจักรเครบส์ (Krebs cycle) กลูโคส-6-ฟอสเฟต ดีไฮโดรจีเนส (glucose-6-phosphate dehydrogenase) ของวิถีเพนโทสฟอสเฟต (pentose phosphate pathway: PPP) เปอร์ออกซิเดส (peroxidase) และเอทีพีเอส (ATPase) เป็นต้น (Flowers, 1972; Katembe et al., 1998) นอกจากนี้ ภาวะเค็มยังมีผลต่อฮอร์โมนต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น ออกซิน (auxin) กรดแอบไซซิก (abscisic acid: ABA) และเอทิลีน (ethylene) ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปเพื่อชดเชยให้พืชมีการเจริญเติบโตและการตอบสนองที่เหมาะสมต่อภาวะเค็ม (Wang et al., 2009; Zolla et al., 2009)

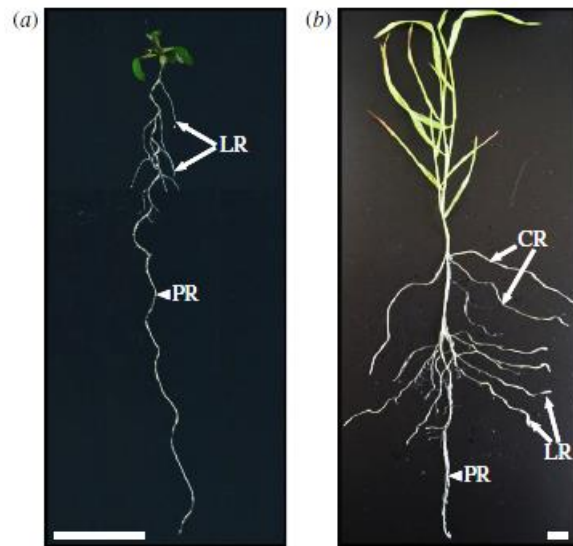
## ผลของภาวะเค็มที่มีต่อโครงสร้างระบบราก (root system architecture: RSA)

โครงสร้างระบบรากถือเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและการดำรงชีวิตของพืช เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุ (Osmont et al., 2007) โดยทั่วไป พืชใบเลี้ยงคู่และพืชใบเลี้ยงเดี่ยวมีโครงสร้างระบบรากแตกต่างกัน (รูปที่ 2.1) รากของพืชใบเลี้ยงคู่ประกอบด้วยรากปฐมภูมิ (primary root) เพียงรากเดียว ซึ่งรากนี้จะมีการแตกแขนงของรากแขนง (lateral roots) เป็นจำนวนมาก ส่วนรากของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวจะมีรากพิเศษ (adventitious roots) ซึ่งเกิดจากส่วนอื่น ๆ ของพืช เช่น ลำต้น (Pacheco-Villalobos and Hardtke, 2012) โดยส่วนใหญ่รากปฐมภูมิของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวมักมีการหยุดการเจริญเติบโต แต่จะมีการเจริญของรากพิเศษขึ้นมาแทนที่รากดังกล่าว (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2550) เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างระบบรากของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวอย่างละเอียด พบว่าเมื่อรากแรกเกิด (radicle) งอกออกจากเมล็ด ซึ่งรากนี้จะเจริญต่อมาเป็นรากปฐมภูมิ หลังจากนั้นเพียงไม่นานก็จะมีการเจริญของรากพิเศษแรกเกิด (seminal roots) เกิดขึ้น ซึ่งรากดังกล่าวเกิดขึ้นมาจากส่วนของของสคิวเทลลาร์ โหนด (scutellar node) ที่เป็นรอยต่อระหว่างส่วนต้นและส่วนราก ดังรูปที่ 2.2 ต่อมาจึงมีการพัฒนาส่วนของรากพิเศษขึ้น ซึ่งรากนี้เกิดจากส่วนข้อ (node) ของลำต้น โดยรากพิเศษทำหน้าที่เป็นรากหลักของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว โดยทั่วไป พืชใบเลี้ยงเดี่ยวจะมีการสร้างรากพิเศษจำนวนแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะทางพันธุกรรม เช่น ข้าวมีการสร้างรากพิเศษได้มากกว่า 100 ราก หลังจาการงอกเพียง 6 สัปดาห์ (Orman-Ligeza et al., 2013) ซึ่งโครงสร้างระบบรากนั้นมีสภาพพลาสติก (plasticity) ที่มีความยืดหยุ่นสูง ทำให้โครงสร้างนี้สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่พืชได้รับ โดยมีส่วนช่วยให้พืชสามารถเจริญเติบโตได้ แม้ว่าพืชต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม (Iijima and Kono, 1991; Malamy, 2005; Osmont et al., 2007)

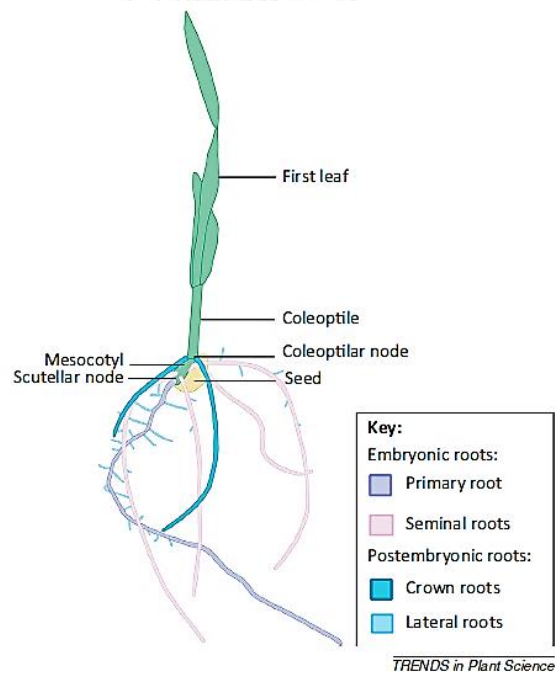
เมื่อพืชเจริญอยู่ในบริเวณที่มีดินเค็ม จะเห็นได้ว่ารากเป็นส่วนแรกที่ได้รับผลกระทบจากภาวะดังกล่าว ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระบบราก สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อโครงสร้างดังกล่าว มีการศึกษามากใน *Arabidopsis thaliana* ซึ่งเป็นพืชใบเลี้ยงคู่ โดยพบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้ความยาวรากปฐมภูมิและความยาวรากแขนงลดลง แต่มีจำนวนรากแขนงเพิ่มขึ้น (Julkowska et al., 2014; Wang et al., 2009; Zolla et al., 2009) ซึ่งฮอร์โมนที่มีบทบาทสำคัญในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงภายใต้ภาวะเค็มนี้ได้แก่ ออกซิน กรดแอบไซซิก และเอทิลีน (Chen et al., 2006; Wang et al., 2009; Zolla et al., 2009) โดยพบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้เกิดการสร้างออกซินมากขึ้น และมีการลำเลียงออกซินที่เปลี่ยนแปลงไปจากภาวะปกติ ทำให้เซลล์เพริไซเคิล (pericycle) เกิดการแบ่งตัวและเจริญไปเป็นรากแขนงมากขึ้น นอกจากนี้ การศึกษาในพืชสายพันธุ์กลาย (mutant) พบว่าถ้าโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายทอดสัญญาณของ กรดแอบไซซิกและเอทิลีนถูกยับยั้ง

จะส่งผลให้รากปฐมภูมิและรากแขนงมีความยาวลดลง แต่มีการสร้างรากแขนงเพิ่มมากขึ้น (Wang et al., 2009; Zolla et al., 2009) อย่างไรก็ตาม ผลของภาวะเค็มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระบบรากของข้าวที่เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวยังมีการศึกษาไม่มากนัก โดยมีเพียงการศึกษาผลของกรดแอบไซซิกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดังกล่าว ซึ่งพบว่ากรดแอบไซซิกมีผลกระตุ้นให้รากข้าวเกิดการสร้างรากแขนงมากขึ้น ทั้งยังมีการสร้างขนรากเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากฮอร์โมนดังกล่าวกระตุ้นให้มีการสะสมแคลเซียมไอออนเพิ่มมากขึ้นในไซโทพลาซึม (cytoplasm) ซึ่งไอออนนี้จะไปจับกับแคลโมดูลิน (calmodulin) และกระตุ้นให้เกิดกระบวนการถ่ายทอดสัญญาณ (signal transduction) ซึ่งนำไปสู่การแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสร้างรากแขนงและขนราก (Chen et al., 2006) นอกจากการเพิ่มจำนวนรากแขนงแล้ว ภาวะเค็มยังมีผลทำให้เกิดการเพิ่มจำนวนของรากพิเศษด้วย (Wang et al., 2009) ทั้งนี้ การเพิ่มจำนวนรากแขนงและรากพิเศษนั้น ช่วยชดเชยการมีความยาวรากที่ลดลง ซึ่งจะช่วยให้รากมีความสามารถในการดูดน้ำเพิ่มมากขึ้นภายใต้ภาวะเค็ม (Zolla et al., 2009)





รูปที่ 2.1 โครงสร้างระบบรากของพืชใบเลี้ยงคู่ที่มีอายุ 10 วัน (a) และโครงสร้างระบบรากของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่มีอายุ 30 วัน (b) (Pacheco-Villalobos and Hardtke, 2012)

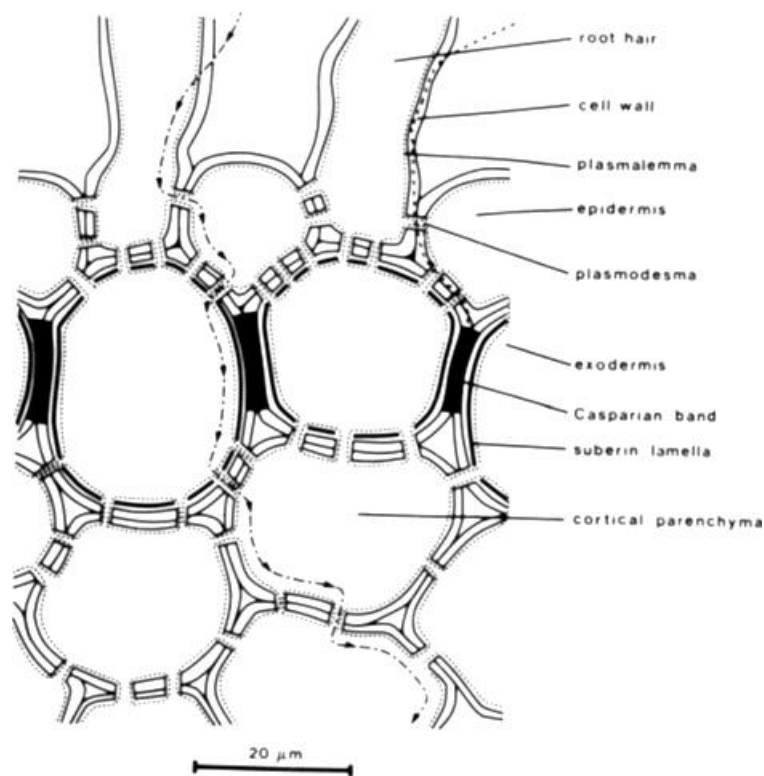


รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงโครงสร้างระบบรากของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว (Orman-Ligeza et al., 2013)

### ผลของภาวะเค็มที่มีต่อลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของราก (root anatomy)

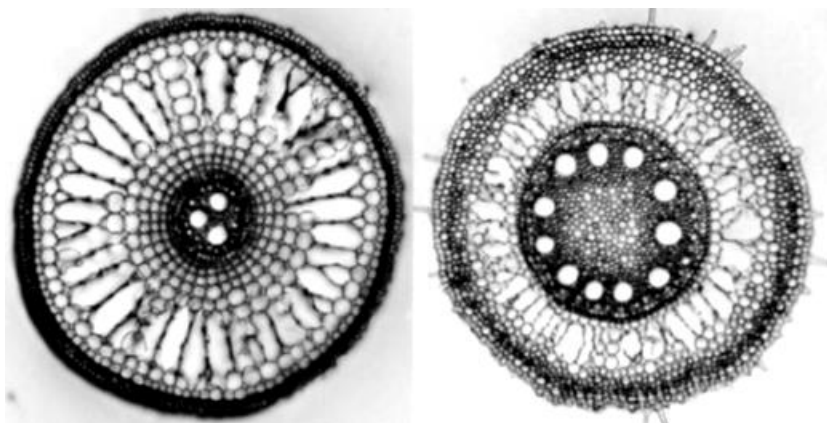
เมื่อพิจารณาถึงลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในภาวะปกติ พบว่าโครงสร้างของรากในแนวรัศมีประกอบด้วยเนื้อเยื่อต่าง ๆ ที่เรียงตัวเป็นชั้น ๆ ซึ่งเนื้อเยื่อแต่ละชั้นจะมีหน้าที่แตกต่างกัน โดยชั้นเอพิเดอร์มิส (epidermis) เป็นเนื้อเยื่อที่อยู่ด้านนอกสุด ประกอบด้วยเซลล์เอพิเดอร์มิสที่เรียงตัวติดกันเป็นชั้นเดียว โครงสร้างดังกล่าวทำหน้าที่ป้องกันอันตรายและเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับราก ทั้งนี้เซลล์เอพิเดอร์มิสบางเซลล์สามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นขนราก (root hairs) ที่สามารถช่วยในการดูดซึมน้ำและแร่ธาตุได้ (รูปที่ 2.3) (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2550) ถัดเข้ามาจะเป็นชั้นคอร์เทกซ์ (cortex) ส่วนใหญ่ประกอบด้วยเซลล์พาราเรงคิมา (parenchyma) ซึ่งทำหน้าที่ต่าง ๆ ได้แก่ การลำเลียงน้ำและแร่ธาตุ การเกิดกระบวนการเมตาบอลิซึมต่าง ๆ ของเซลล์ ทั้งนี้ เซลล์แถวเดียวที่มีการจัดเรียงตัวอยู่ด้านนอกสุดของชั้นคอร์เทกซ์ เรียกว่า เอกโซเดอร์มิส (exodermis) และด้านในสุด คือ เอนโดเดอร์มิส (endodermis) ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวประกอบด้วยเซลล์พาราเรงคิมาที่มีการสะสมสารซูเบอร์อิน (suberin) และ/หรือลิกนิน (lignin) เป็นแถบเล็ก ๆ ที่ผนังเซลล์ด้านที่ตั้งฉากกับผิวเซลล์ (anticlinal walls) เรียกว่า แคสพาเรียนสตรีพ (Casparian strip) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการควบคุมการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุเข้าไปยังชั้นด้านในสุดของราก โดยอาจยับยั้งการลำเลียงน้ำและไอออนบางชนิด (เช่น แคลเซียมไอออน) ที่ลำเลียงแบบอะพอพลาสต์ (apoplast) ในทางตรงกันข้าม แคสพาเรียนสตรีพไม่มีผลต่อการลำเลียงไอออนแบบซิมพลาสต์ (symplast) เช่น การลำเลียงโพแทสเซียมไอออนและฟอสเฟตไอออน ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) อย่างไรก็ตาม ในส่วนของเอนโดเดอร์มิสยังคงมีบางเซลล์ที่ไม่มีการสะสมสารซูเบอร์อินและ/หรือลิกนิน เรียกว่า เซลล์แพสเสจ (passage cell) โดยมักพบอยู่ในแนวเดียวกันกับเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำ (xylem) ทำหน้าที่ช่วยในการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุผ่านเข้าไปยังส่วนของเนื้อเยื่อลำเลียงได้ (รูปที่ 2.3 และ 2.4) (Esau, 1898; Horie et al., 2012; Krishnamurthy et al., 2009; Peterson, 1987; Reinhardt and Rost, 1995; Russell and Clarkson, 1975; สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2550) นอกจากนี้ ยังมีการพบโครงสร้างของสเกลอเรงคิมา (sclerenchyma) ที่อยู่ถัดจากเอกโซเดอร์มิส โครงสร้างดังกล่าวประกอบด้วยเซลล์ที่ตายแล้วและมีผนังเซลล์หนามาก เนื่องจากการสะสมสารลิกนิน โดยเซลล์มักมีการจัดเรียงตัวเป็นแถวเดี่ยวหรือสองแถว ทำหน้าที่เสริมสร้างความแข็งแรงให้กับรากและลดการสูญเสียน้ำ (Horie et al., 2012) เมื่อรากเจริญอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอากาศน้อย เช่น การเจริญเติบโตในน้ำ รากจะมีการสลายเนื้อเยื่อพาราเรงคิมาในชั้นคอร์เทกซ์กลายเป็นเนื้อเยื่อแอเรงคิมา (aerenchyma) เพื่อช่วยในการแพร่แก๊สออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) จากต้นไปสู่ราก (รูปที่ 2.5) (Feldman, 1984; Yamauchia et al., 2013) ส่วนชั้นด้านในสุดของรากเป็นชั้นสตีล (stele) ที่เกี่ยวข้องกับการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุจากรากขึ้นไปสู่ต้น โดยเนื้อเยื่อด้านนอกสุดของชั้นสตีล คือ เพริไซเคิล

(pericycle) ที่สามารถเจริญไปเป็นรากแขนงได้ ถัดเข้ามาจะเป็นส่วนของมัดท่อลำเลียง (vascular cylinder) ประกอบด้วยไซเล็มที่ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำ (รูปที่ 2.4) และโฟลเอ็ม (phloem) ที่ทำหน้าที่ลำเลียงอาหาร บริเวณด้านในสุดหรือบริเวณแกนกลางของรากพืชใบเลี้ยงเดี่ยว อาจพบส่วนของพืธ (pith) ที่ประกอบด้วยเซลล์พาราไคมาเป็นจำนวนมาก (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2550) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงตำแหน่งและส่วนประกอบของชั้นเอพิเดอร์มิสและชั้นคอร์เทกซ์ สัญลักษณ์ (-----) แสดงการลำเลียงแบบซิมพลาสต์ และสัญลักษณ์ (-----) แสดงการลำเลียงแบบอะโพลาสต์ (Peterson, 1987)

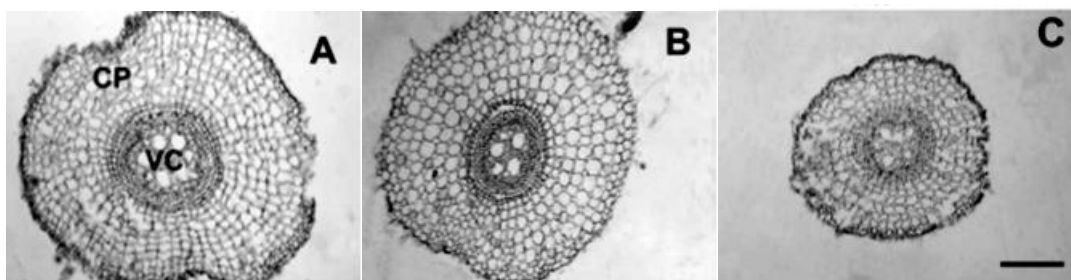




รูปที่ 2.6 ภาพตัดตามขวางของรากข้าว (รูปซ้าย) และข้าวโพด (รูปขวา) ที่ความยาว 5 เซนติเมตร จากปลายราก (อ้างอิงในหนังสือของ Atwell et al. (1999))

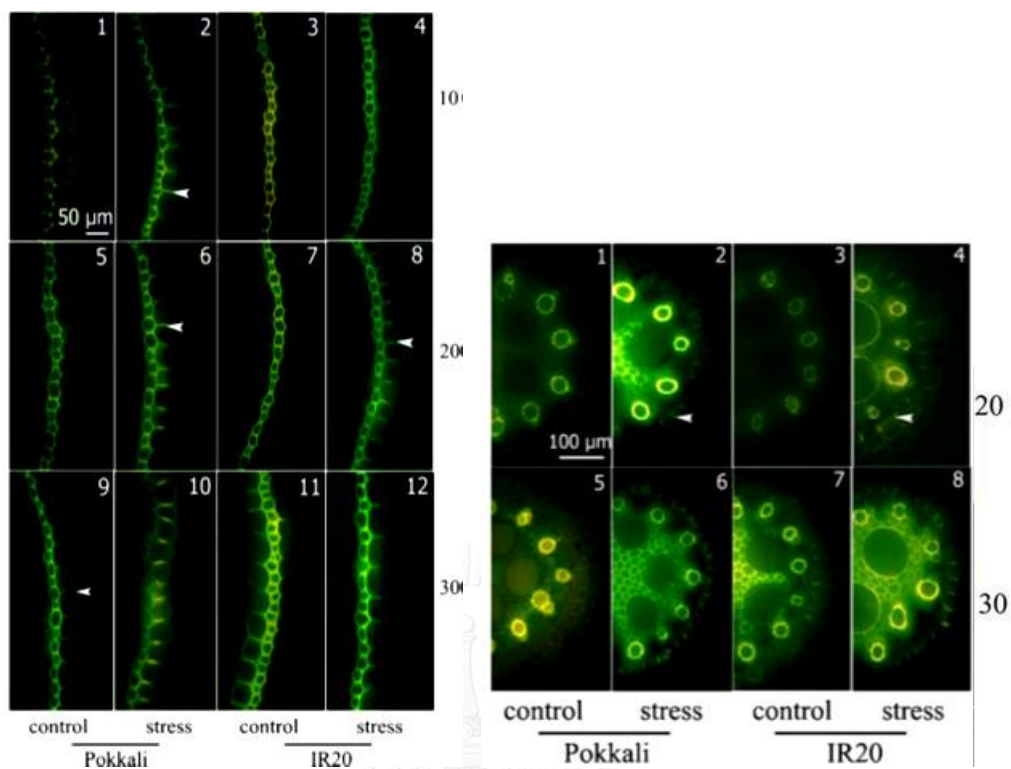
การที่พืชได้รับความเครียดจากความเค็ม มีผลทำให้พืชเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของราก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับความสามารถในการดูดซึมน้ำ และแร่ธาตุของรากภายใต้ภาวะเค็ม (Céccoli et al., 2011) โดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากขึ้นอยู่กับระดับของภาวะเค็มที่พืชได้รับและความสามารถในการทนเค็มของพืช จากการศึกษาก่อนหน้านี้ พบว่าการให้รากของพืชตระกูลหญ้าเผชิญกับภาวะเค็มที่ระดับความเข้มข้น 150 มิลลิโมลาร์ ปรากฏว่ารากมีความยาวลดลง แต่ยังคงมีการเจริญเติบโตทางด้านข้าง ในทางตรงกันข้าม เมื่อพืชต้องเผชิญกับภาวะเค็มที่ระดับความเข้มข้น 250 มิลลิโมลาร์ กลับพบว่าภาวะเค็มมีผลยับยั้งทั้งการเจริญเติบโตด้านความยาวและด้านข้าง ดังรูปที่ 2.7 (Céccoli et al., 2011) เนื่องจากภาวะเค็มมีผลกระทบต่อกระบวนการแบ่งเซลล์ (cell division) และการขยายตัวของเซลล์ (expansion processes) (Kurth et al., 1986; Neumann, 1995; Zidan et al., 1990) ส่งผลให้พืชมีการลดขนาดของเนื้อเยื่อเจริญปลายราก (apical meristems) เนื้อเยื่อชั้นคอร์เท็กซ์ และมัดท่อลำเลียง ทั้งยังมีผลลดพื้นที่ของรากและพื้นที่ของชั้นสตีลอีกด้วย (Akram et al., 2002; Boughalleb et al., 2009; Céccoli et al., 2011)



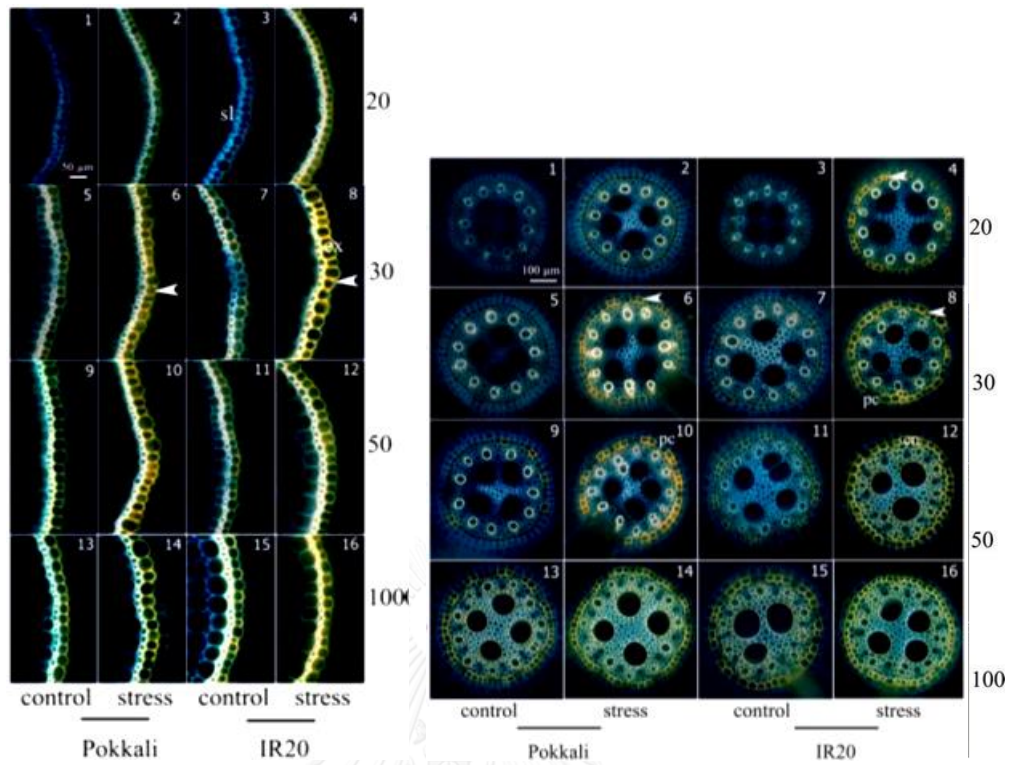


รูปที่ 2.7 ผลของภาวะเค็มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของราก เมื่อได้รับภาวะเค็มที่ระดับความเข้มข้น 150 มิลลิโมลาร์ (รูป B) และ 250 มิลลิโมลาร์ (รูป C) เปรียบเทียบกับภาวะปกติ (รูป A) ตัวอักษร CP คือ เนื้อเยื่อพาราเควอมาในชั้นคอร์เทกซ์ (cortical parenchyma) VC คือ มัดท่อลำเลียง (vascular cylinder) (Céccoli et al., 2011)

นอกจากนี้ ภาวะเค็มยังส่งผลต่อการเจริญของเอกไซเดอร์มิสและเอนโดเดอร์มิส โดยมีรายงานว่า ภาวะดังกล่าวส่งผลให้รากของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวมีการสร้างเอกไซเดอร์มิสและเอนโดเดอร์มิสเร็วขึ้น (Krishnamurthy et al., 2009) ส่วนในพืชใบเลี้ยงคู่ เช่น ฝ้าย ซึ่งในภาวะปกติไม่มีเนื้อเยื่อเอกไซเดอร์มิส แต่เมื่อได้รับภาวะเค็มรากกลับมีการสร้างเอกไซเดอร์มิสในชั้นคอร์เทกซ์เกิดขึ้น ซึ่งโครงสร้างนี้มีส่วนช่วยลดการสูญเสียน้ำของราก (Reinhardt and Rost, 1995) นอกจากนี้ การให้ข้าวเหนียวกับความเครียดจากความเค็ม มีผลเร่งให้รากเกิดการพัฒนารวมของแคสพาเรียนสตรีพในเอกไซเดอร์มิสและเอนโดเดอร์มิส (รูปที่ 2.8) อีกทั้งยังมีการสะสมสารซูเบอร์รินโดยรอบที่บริเวณด้านในผนังเซลล์ของเซลล์เหล่านี้เพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 2.9) ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวทำหน้าที่ขัดขวางการลำเลียงสารแบบอะพลาสต (apoplastic barrier) ส่งผลให้การลำเลียงสารเข้าสู่เนื้อเยื่อลำเลียงจำเป็นต้องลำเลียงผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ (plasma membrane) (Krishnamurthy et al., 2009) ทั้งนี้ ภาวะเค็มยังส่งผลให้มีการสร้างเทรเชอริอิลิเมนต์ (tracheary elements) ที่มีการสะสมสารลิกนินเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งช่วยลดการนำเข้าไอออนของเกลือผ่านเส้นทางอะพลาสตได้ (Reinhardt and Rost, 1995; Sánchez-Aguayo et al., 2004) นอกจากนี้ ภาวะดังกล่าวยังมีผลให้รากมีการสร้างเวสเซล (vessel) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงเป็นจำนวนมาก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้มีผลลดความสามารถในการลำเลียงน้ำภายใต้ภาวะเค็ม ซึ่งอาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ (Boughalleb et al., 2009)



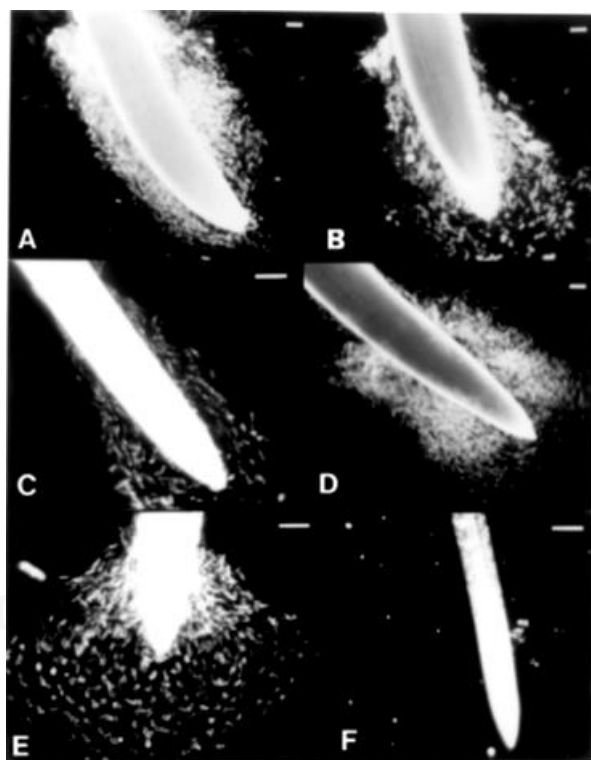
รูปที่ 2.8 ลักษณะของแคสพารีเยนสตริปในเอกโซเดอรัม (รูปซ้าย) และเอนโดเดอรัม (รูปขวา) ในรากข้าวพันธุ์ Pokkali และ IR20 ที่ความยาวต่าง ๆ (10 20 และ 30 มิลลิเมตร จากปลายราก) ภายใต้ภาวะปกติและภาวะเค็ม หัวลูกศรสีขาวแสดงถึงตำแหน่งของแคสพารีเยนสตริปในเอกโซเดอรัมและเอนโดเดอรัม (Krishnamurthy et al., 2009)



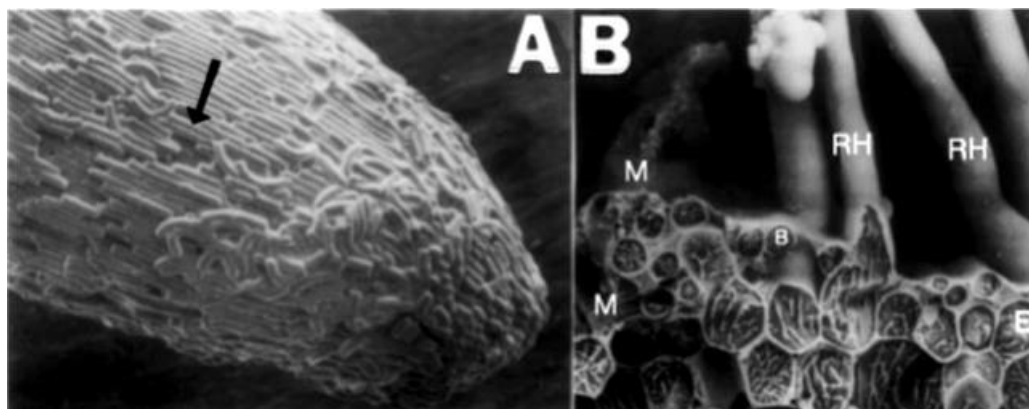
รูปที่ 2.9 การสะสมสารซูเบอร์รินที่บริเวณผนังเซลล์ของเอกโซเดอร์มิส (รูปซ้าย) และเอนโดเดอร์มิส (รูปขวา) ในรากข้าวพันธุ์ Pokkali และ IR20 ที่ความยาวต่าง ๆ (20-100 มิลลิเมตร จากปลายราก) ภายใต้ภาวะปกติและภาวะเค็ม หัวลูกศรสีขาวแสดงถึงการสะสมสารซูเบอร์รินที่บริเวณผนังเซลล์ของเอกโซเดอร์มิสและเอนโดเดอร์มิส ตัวอักษร ex คือ เอกโซเดอร์มิส (exodermis) pc คือ เซลล์แพส เซจ (passage cell) และ sl คือ สเกลอเรนคิมา (sclerenchyma) (Krishnamurthy et al., 2009)

### บอร์เดอร์เซลล์ของราก (root border cells: RBCs)

บอร์เดอร์เซลล์ของราก คือ เซลล์ที่มีชีวิตที่แยกตัวออกจากกันอย่างรวดเร็วภายในเวลา 1-2 นาที เมื่อนำปลายรากไปแช่ในน้ำ ดังรูปที่ 2.10 (Hawes et al., 1998; Hawes and Lin, 1990) ในกรณีที่รากมีการเจริญเติบโตภายใต้สภาวะที่ปราศจากน้ำ บอร์เดอร์เซลล์จะไม่มีหลุดออกจากปลายราก โดยเซลล์ดังกล่าวมีการยึดเกาะติดกับปลายรากอย่างหนาแน่น อีกทั้งบอร์เดอร์เซลล์ยังคงอยู่ภายในสารเมือกที่อยู่ล้อมรอบปลายราก ซึ่งในสภาวะดังกล่าวสารเมือกจะมีลักษณะค่อนข้างแข็ง ดังรูปที่ 2.11 (Hawes et al., 1998)

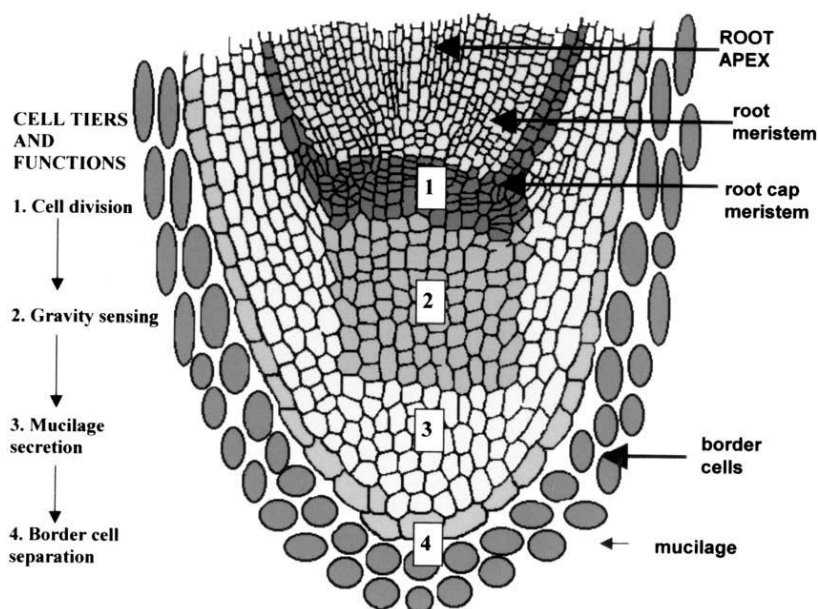


รูปที่ 2.10 การแยกตัวของบอร์เดอร์เซลล์ออกจากปลายรากของพืชชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ข้าวโพด (รูป A) แดงกวา (รูป B) มะเขือเทศ (รูป C) ฝ้าย (รูป D) ถั่วอัลฟัลฟา (รูป E) และ *Arabidopsis thaliana* (รูป F) หลังจากที่มีการแช่ปลายรากในน้ำเป็นเวลา 30 วินาที (Hawes et al., 1998)



รูปที่ 2.11 ลักษณะบอร์เดอร์เซลล์ที่พบบริเวณปลายรากของถั่วเหลืองในสภาวะที่ปราศจากน้ำ (รูป A) และตำแหน่งของบอร์เดอร์เซลล์ที่อยู่ในสารเมือกภายใต้สภาวะที่ปราศจากน้ำ (รูป B) ตัวอักษร B คือ บอร์เดอร์เซลล์ (border cells) E คือ เซลล์เอพิเดอร์มิส (epidermal cells) M คือ สารเมือก (mucilage) และ RH คือ ขนราก (root hairs) (อ้างอิงในงานวิจัยของ Hawes et al. (1998))

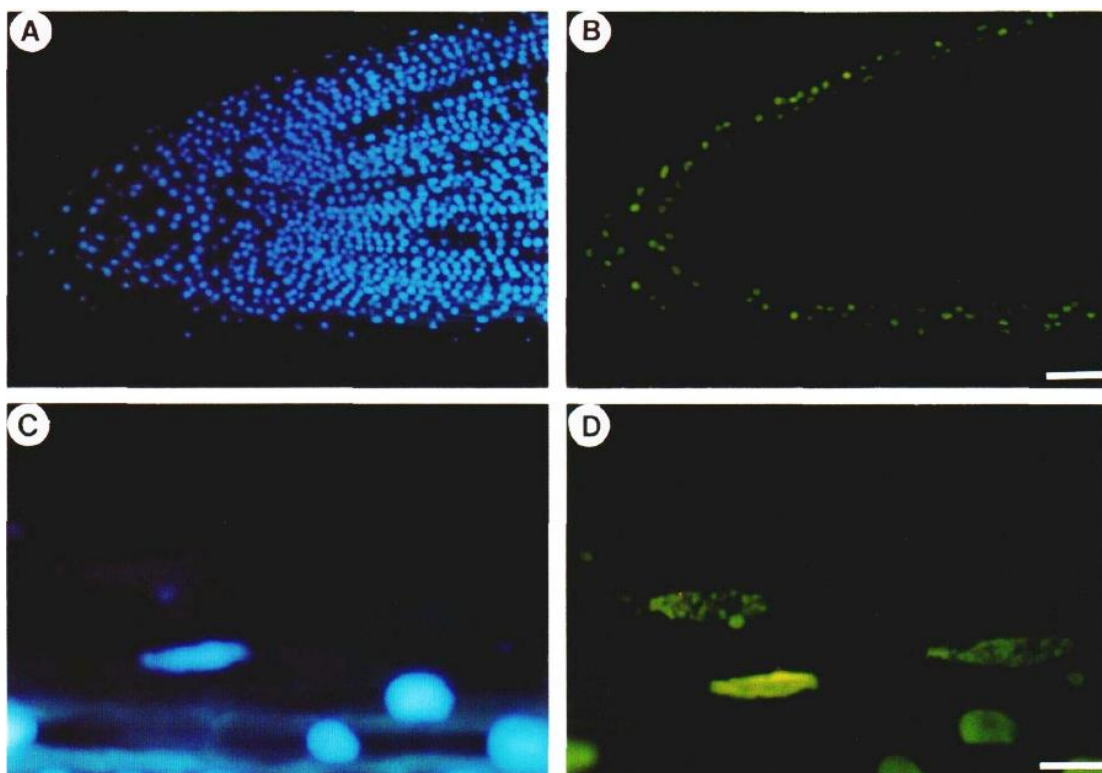
เมื่อพิจารณาถึงการเจริญของบอร์เดอร์เซลล์ จะเห็นได้ว่าเซลล์ดังกล่าวเจริญมาจากส่วนของเนื้อเยื่อเจริญหมวกราก (root cap meristem) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมกระบวนการสร้างหมวกราก (root cap) ทั้งหมด (Hawes et al., 2003; Wen, 2009) โดยกระบวนการแบ่งเซลล์จะเกิดขึ้นในส่วนของเนื้อเยื่อเจริญหมวกราก จากนั้นเซลล์จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เพื่อไปทำหน้าที่เฉพาะต่าง ๆ โดยเซลล์แต่ละเซลล์ที่อยู่ในหมวกรากจะมีหน้าที่แตกต่างกันในแต่ละบริเวณของหมวกราก เช่น เซลล์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity sensing) จะมีการสร้างเม็ดแป้ง (starch synthesis) เกิดขึ้น สำหรับเซลล์บริเวณถัดออกมา จะทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการหลั่งของสารเมือก (mucilage) โดยมีการสร้างกอลจิ คอมเพล็กซ์ (golgi complex) ภายในเซลล์เป็นจำนวนมาก เมื่อกระบวนการข้างต้นเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งตำแหน่งของเซลล์ที่เกิดก่อนเปลี่ยนแปลงมาอยู่ที่บริเวณด้านนอกของหมวกราก หลังจากนั้นหมวกรากจึงมีการหลั่งของเอนไซม์เพกทิน เมทิลเอสเทอเรส (pectin methylesterase: PME) เพื่อทำหน้าที่ย่อยสลายผนังเซลล์ ส่งผลให้บอร์เดอร์เซลล์มีการแยกตัวออกจากส่วนของปลายราก ดังรูปที่ 2.12 (Pan et al., 2002; Stephenson and Hawes, 1994; Wen, 2009; Wen et al., 1999)



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของหมวกรากและการเจริญของบอร์เดอร์เซลล์ (อ้างอิงถึงใน Hawes et al. (2003))

หลังจากที่บอร์เดอร์เซลล์มีการแยกตัวออกจากส่วนของปลายรากแล้ว พืชจะกระตุ้นให้เกิดการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิส (mitosis) ของเนื้อเยื่อเจริญหมวกราก เพื่อทำการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ชุดใหม่ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นภายในระยะเวลา 15 นาที ทั้งนี้ กระบวนการแบ่งตัวของเซลล์จะไม่ถูกกระตุ้น ในขณะที่ปลายรากยังคงมีบอร์เดอร์เซลล์อยู่อย่างเต็มรูปแบบ ในการสร้างเซลล์ชุดใหม่ขึ้นมาแทนที่เซลล์ชุดเดิมนั้น ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่พืชเจริญเติบโตด้วย โดยพืชอาจมีการสร้างเซลล์ชุดใหม่เสร็จสมบูรณ์ได้ภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง หรืออาจเกิดขึ้นอย่างช้าที่สุดเป็นเวลา 7 วัน (Brigham et al., 1998)

โดยทั่วไป บอร์เดอร์เซลล์เป็นเซลล์ที่มีความมีชีวิตสูงมากถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ บอร์เดอร์เซลล์ที่มีอายุมากแล้ว จะมีกระบวนการอะพอพโทซิส (apoptosis) เกิดขึ้น เพื่อทำลายเซลล์ชุดเดิมและกระตุ้นให้เกิดการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ชุดใหม่ (รูปที่ 2.13) นอกจากนี้ การตายของเซลล์แบบอะพอพโทซิส อาจเป็นหนึ่งในกลไกที่พืชใช้ในการตอบสนองต่อสิ่งเร้า โดยการฆ่าตัวตายของเซลล์อาจช่วยให้พืชสามารถปล่อยสารเฉพาะบางอย่างจากบอร์เดอร์เซลล์ไปสู่สิ่งแวดล้อมที่อยู่ล้อมรอบรากได้อย่างรวดเร็ว (Hawes et al., 1998; Hawes and Pueppke, 1986; Wang et al., 1996)

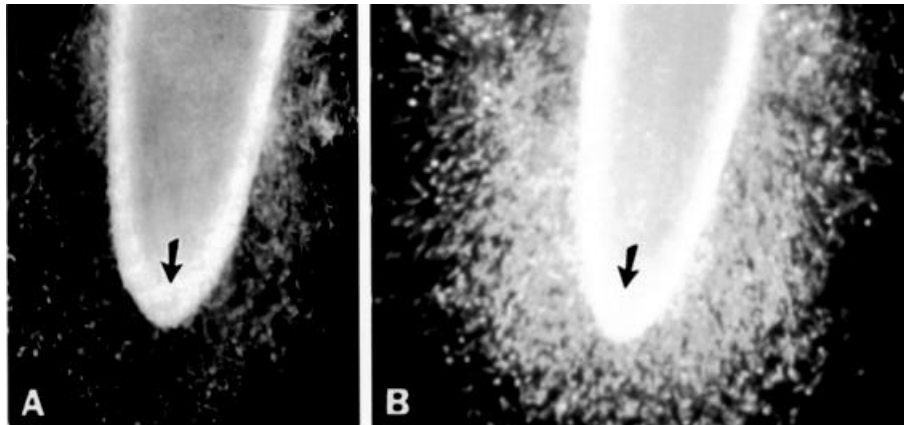


รูปที่ 2.13 กระบวนการอะพอพโทซิสของบอร์เดอร์เซลล์ โดยเซลล์ที่มีชีวิต ตรวจสอบดีเอ็นเอที่ติดสีฟ้า ซึ่งเกิดจากการย้อมด้วยสี Hoechst 33342 (รูป A และ C) ส่วนเซลล์ที่กำลังเกิดอะพอพโทซิส ตรวจสอบสีเขียวที่เกิดจากการทดสอบด้วยวิธี TUNEL (รูป B และ D) (Wang et al., 1996)

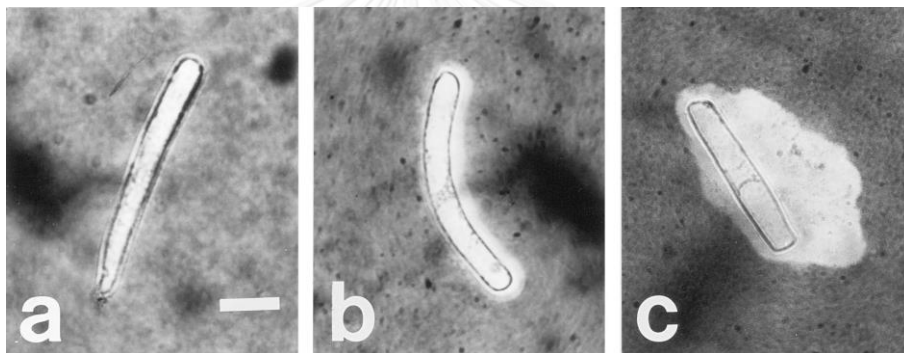
เมื่อพิจารณาถึงหน้าที่ของบอร์เดอร์เซลล์ พบว่าเซลล์ดังกล่าวทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหนึ่งที่ช่วยในการป้องกันอันตรายต่าง ๆ ให้กับปลายรากพืช โดยบอร์เดอร์เซลล์มักมีการยึดจับกันอย่างหลวม ๆ บริเวณด้านบนของปลายราก ทำให้เซลล์ดังกล่าวอยู่บริเวณตรงกลางระหว่างรากพืชกับดินที่อยู่ล้อมรอบราก (Driouich et al., 2010) จากการศึกษาก่อนหน้านี้ พบว่าการมีอยู่ของบอร์เดอร์เซลล์ที่บริเวณปลายราก มีผลทำให้พืชสามารถป้องกันตนเองจากภาวะเครียดต่าง ๆ ได้ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับปลายรากที่ไม่มีบอร์เดอร์เซลล์ล้อมรอบอยู่ (Cai and Wang and et al., 2011; Hawes et al., 2000) โดยเซลล์ดังกล่าวสามารถหลั่งสารเมือกและโปรตีนต่าง ๆ หลายชนิด (Hawes et al., 1998; Wen et al., 2007) ซึ่งสารเหล่านี้มีส่วนช่วยในการปกป้องปลายรากจากความเครียดต่าง ๆ ทั้งทางกายภาพและชีวภาพ (Cai and Wang and et al., 2011; Chen et al., 2008; Pan et al., 2002)

ในการศึกษาก่อนหน้านี้ พบว่าบอร์เดอร์เซลล์มีการสร้างสารเมือกเพิ่มขึ้น เมื่อพืชต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น การให้ปลายรากได้รับความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูง (6 เปอร์เซ็นต์) พบว่ามีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์จำนวนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปลายรากมีความหนาของสารเมือกโดยรวมเพิ่มขึ้นด้วย (รูปที่ 2.14) (Zhao et al., 2000) นอกจากนี้การให้พืชได้รับภาวะเค็ม รวมถึงการได้รับความเค็มเป็นพิษจากอะลูมิเนียมไอออน ส่งผลให้บอร์เดอร์เซลล์แต่ละเซลล์มีความหนาของสารเมือกเพิ่มขึ้น โดยความสามารถในการสร้างสารเมือกของเซลล์นั้น ขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นและระยะเวลาที่เซลล์ได้รับความเค็มชนิดนั้น ๆ (รูปที่ 2.15) ทั้งยังขึ้นอยู่กับความมีชีวิตของบอร์เดอร์เซลล์อีกด้วย (Cai and Zhang and et al., 2011; Miyasaka and Hawes, 2001; Qiao, 2011) สำหรับส่วนประกอบหลักของสารเมือก คือ เพกติน (pectin) ซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่เป็นกรด (acidic polysaccharides) ประเภทเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (heteropolysaccharide) ประกอบด้วยน้ำตาลกรดกาแล็กทูโรนิก ( $\alpha$ -D-galacturonic acid: GalA) เป็นจำนวนมาก โดยน้ำตาลชนิดดังกล่าวจัดอยู่ในกลุ่มของกรดยูโรนิก (uronic acids, acidic sugars) ที่มีหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl groups (-COOH)) ที่มีประจุลบ ดังนั้นเพกตินจึงเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีประจุลบที่สามารถจับกับไอออนที่มีประจุบวกได้ เช่น แคลเซียมไอออน อะลูมิเนียมไอออน เป็นต้น (Cai and Wang and et al., 2011; Taiz and Zeiger, 2002; Western et al., 2000; เอกสมทราเมษฐ์, 2547) ดังนั้น เมื่อเซลล์ได้รับความเค็มจากความเป็นพิษของอะลูมิเนียมไอออน เซลล์จะมีการสร้างสารเมือกเพิ่มขึ้น โดยสารเมือกสามารถจับกับอะลูมิเนียมไอออนที่มีประจุบวกได้ ซึ่งกลไกดังกล่าวสามารถช่วยปกป้องปลายรากจากความเป็นพิษของอะลูมิเนียมไอออนได้ (Cai and Wang and et al., 2011; Cai and Zhang and et al., 2011)





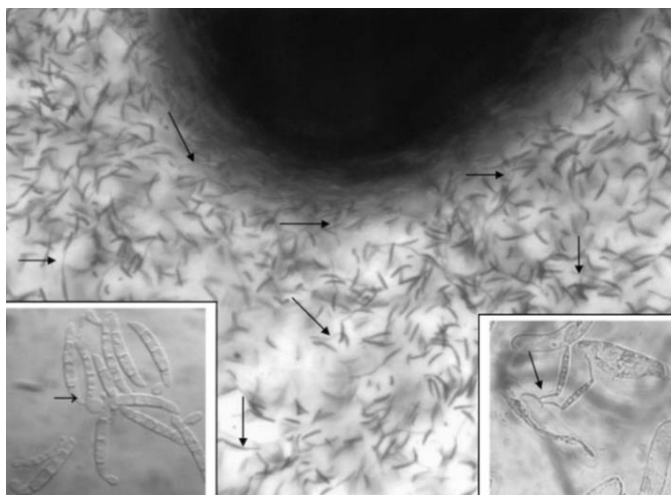
รูปที่ 2.14 ผลของความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณสูงที่มีต่อการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากในถั่ว (รูป B) หลังจากที่ได้รับภาวะดังกล่าวเป็นเวลา 3 วัน เปรียบเทียบกับภาวะปกติ (รูป A) (Zhao et al., 2000)



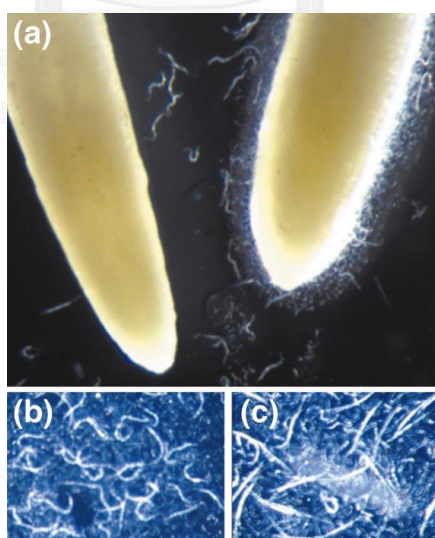
รูปที่ 2.15 การหลังสารเมือกของบอร์เดอร์เซลล์ในถั่วพันธุ์ที่ทนต่อความเป็นพิษของอะลูมิเนียม เมื่อได้รับความเป็นพิษของอะลูมิเนียมที่มีความเข้มข้น 100 ไมโครโมลาร์ (รูป b) และ 200 ไมโครโมลาร์ (รูป c) เปรียบเทียบกับภาวะปกติ (รูป a) (Miyasaka and Hawes, 2001)

นอกจากนี้บอร์เดอร์เซลล์ยังสามารถสร้างสารทุติยภูมิชนิดต่าง ๆ เพื่อยับยั้งการติดเชื้อก่อโรค และการเข้าทำลายของสิ่งมีชีวิตก่อโรค (Gunawardena and Hawes, 2002) ยกตัวอย่างเช่น การสร้างสารพิซาติน (pisatin) ที่เป็นสารไฟโตอะเล็กซิน (phytoalexin) ชนิดหนึ่ง ที่พบได้ในพืชตระกูลถั่ว ทำหน้าที่ต่อต้านการเจริญของเชื้อก่อโรค (pathogen) ส่งผลให้พืชมีความต้านทานต่อเชื้อก่อโรค หลังจาก que พืชได้รับการกระตุ้นจากการเข้าทำลายของเชื้อก่อโรค พืชจะมีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์จำนวนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปลายรากมีปริมาณของสารพิซาตินเพิ่มขึ้นด้วย (Cannesan et al., 2011) อีกทั้งเซลล์ดังกล่าวยังสามารถสร้างโปรตีนอะราบินอกัลแลคแทน (arabinogalactan) ที่เป็นโปรตีโอไกลแคน (proteoglycans) ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีน้ำตาลอะราบินอส (arabinose) และน้ำตาล

กาแล็กโทส (galactose) เป็นส่วนประกอบหลัก เพื่อดึงดูดให้เชื้อก่อโรคเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ ซึ่งถือเป็น การเคลื่อนที่เข้าหาสิ่งกระตุ้น (chemotaxis) จากนั้นเชื้อก่อโรคจะไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปถึงปลาย รากได้ ดังรูปที่ 2.16 (Gunawardena et al., 2005) นอกจากนี้ ยังมีรายงานพบว่าบอร์เดอร์เซลล์มี การหลั่งสารบางอย่างที่ทำให้ไส้เดือนฝอยตายได้ (รูปที่ 2.17) (Hawes et al., 2000)

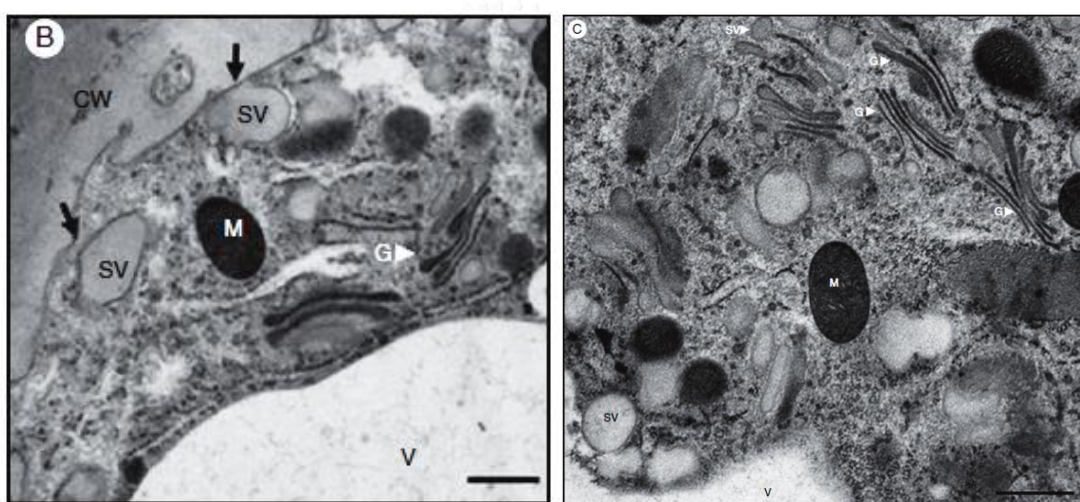


รูปที่ 2.16 การเคลื่อนที่ของเชื้อก่อโรคเข้าหาบอร์เดอร์เซลล์ หลังจากที่ได้รับเชื้อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ลูกศรแสดงถึงตำแหน่งของเชื้อก่อโรค (Gunawardena et al., 2005)



รูปที่ 2.17 การเคลื่อนที่ของไส้เดือนฝอยเข้าหาปลายรากที่มีบอร์เดอร์เซลล์ (รูป a) โดยบอร์เดอร์ เซลล์ทำหน้าที่จับไส้เดือนฝอยไม่ให้เคลื่อนที่ต่อไปได้ (รูป b) และมีการตายของไส้เดือนฝอยเกิดขึ้น (รูป c) (Hawes et al., 2000)

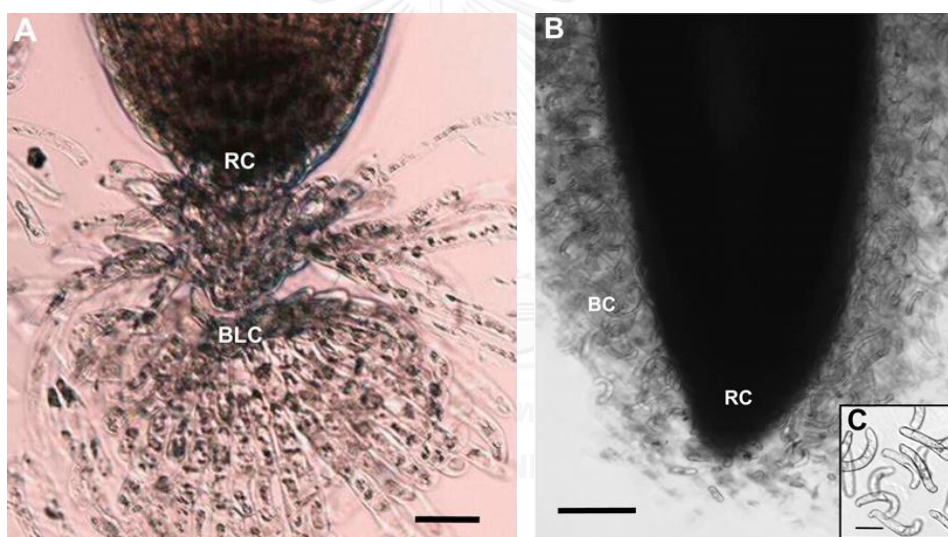
สำหรับการสร้างสารชนิดต่าง ๆ ของบอร์เดอร์เซลล์นั้น เกิดขึ้นที่ส่วนของกอลจิ คอมเพล็กซ์ โดยเซลล์จะมีการขนส่งและปล่อยสารออกไปยังภายนอกเซลล์ผ่านทางเวสิเคิล (vesicle) (Taiz and Zeiger, 2002) เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบภายในเซลล์ของบอร์เดอร์เซลล์ พบว่าเซลล์ดังกล่าวมี กอลจิ คอมเพล็กซ์ และเวสิเคิลที่บรรจุสารต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ ยังมีไมโทคอนเดรีย (mitochondria) ที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการสร้างพลังงานให้กับเซลล์เป็นจำนวนมากอีกด้วย (รูปที่ 2.18) (Cannesan et al., 2011) แสดงว่าเซลล์ดังกล่าวเป็นเซลล์ที่มีกระบวนการเมตาบอลิซึมในการสร้างสารต่าง ๆ สูงมาก ไม่ว่าจะเป็นพอลิแซ็กคาไรด์และไกลโคโปรตีน (glycoproteins) ชนิดต่าง ๆ ด้วย (Vicre´ et al., 2005; Western et al., 2000)



รูปที่ 2.18 องค์ประกอบภายในเซลล์ของบอร์เดอร์เซลล์ในถั่ว (รูป B และ C) ลูกศรสีดำแสดงตำแหน่งของเวสิเคิลที่อยู่ใกล้กับผนังเซลล์และมีการเชื่อมกับเยื่อหุ้มเซลล์ หัวลูกศรสีขาวแสดงส่วนของกอลจิ คอมเพล็กซ์ และเวสิเคิลจำนวนมากที่อยู่ภายในไซโทพลาซึม ตัวอักษร CW คือ ผนังเซลล์ (cell wall) G คือ กอลจิ คอมเพล็กซ์ (golgi complex) M คือ ไมโทคอนเดรีย (mitochondria) SV คือ เวสิเคิล (secretory vesicles) และ V คือ แวกิวโอล (vacuole) (Cannesan et al., 2011)

ทั้งนี้ บอร์เดอร์เซลล์ของรากสามารถพบได้ในพืชหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวหรือพืชใบเลี้ยงคู่ โดยส่วนใหญ่บอร์เดอร์เซลล์ที่พบในพืชใบเลี้ยงเดี่ยวจะมีจำนวนน้อยกว่าบอร์เดอร์เซลล์ที่พบในพืชใบเลี้ยงคู่ ยกตัวอย่างเช่น รากของพืชจำพวกข้าว มีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์จำนวนประมาณ 1400-1600 เซลล์/ราก ส่วนรากของพืชจำพวกถั่วและฝ้าย สามารถสร้างเซลล์ดังกล่าวได้เป็นจำนวนมากถึง 6000 เซลล์/ราก และ 10000 เซลล์/ราก ตามลำดับ (Cai and Zhang and et al., 2011; Hamamoto et al., 2006; Pan et al., 2002) อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า

พืชบางชนิดไม่มีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากเกิดขึ้นบริเวณปลายราก ได้แก่ พืชบางชนิดที่อยู่ในวงศ์ผักกาด (Brassicaceae) และวงศ์ผักโขม (Amaranthaceae) (Arriola et al., 1997) นอกจากนี้พืชบางชนิดยังมีการสร้างเซลล์ที่คล้ายคลึงกับบอร์เดอร์เซลล์ (border-like cells) โดยเซลล์ดังกล่าวจะไม่มีการแยกออกจากกัน เมื่อนำปลายรากไปแช่ในน้ำ ทั้งยังไม่มีการสร้างสารเมือกเกิดขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.19 แต่กลับมีการสร้างโปรตีนอะราบินอกาแล็กแทนและสารกลุ่มเพกตินเป็นจำนวนมาก เพื่อช่วยในการยับยั้งการติดเชื้อก่อโรค โดยเซลล์ดังกล่าวสามารถพบได้ในพืชบางชนิดที่อยู่ในวงศ์ผักกาด เช่น ผักกาดก้านขาว (*Brassica napus*) กะหล่ำดาว (*Brassica oleraceae*) มัสตาร์ด (*Sinapis alba*) และ *Arabidopsis thaliana* เป็นต้น จึงอาจเป็นไปได้ว่า เซลล์ที่คล้ายคลึงกับบอร์เดอร์เซลล์นั้น เป็นลักษณะเฉพาะที่พบได้ในพืชวงศ์ผักกาด (Cannesan et al., 2012; Driouich et al., 2010; Driouich et al., 2007; Vicer´ et al., 2005)



รูปที่ 2.19 ลักษณะของเซลล์ที่คล้ายคลึงกับบอร์เดอร์เซลล์ (รูป A) เปรียบเทียบกับลักษณะของบอร์เดอร์เซลล์ทั่ว ๆ ไป (รูป B) ที่มีการแยกตัวของเซลล์ออกจากปลายราก เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีน้ำ (รูป C) ตัวอักษร BC คือ บอร์เดอร์เซลล์ (border cells) BLC คือ เซลล์ที่คล้ายคลึงกับบอร์เดอร์เซลล์ (border-like cells) และ RC คือ หมวกราก (root cap) (Cannesan et al., 2012)

### บทที่ 3

## วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการทดลอง

### 3.1 พืชทดลอง

เมล็ดข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa* L. cv KDML105) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากกรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ เมล็ดข้าวพันธุ์ Pokkali ที่เป็นพันธุ์มาตรฐานทนเค็ม และ IR29 ที่เป็นพันธุ์มาตรฐานไม่ทนเค็ม ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากนายจักรี เหล็กกล้า และนางสาวฝนทิพย์ หนูทอง

### 3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาโครงสร้างระบบรากและลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของราก

##### ก. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้เพาะปลูกพืช

- กล่องพลาสติกใสขนาด กว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ 12.8 × 12.8 × 4.5

เซนติเมตร

- พลาสติกห่ออาหาร

- น้ำประปา

- ถังน้ำพลาสติกขนาด 2 ลิตร และ 20 ลิตร

- ตะกร้าพลาสติกทรงกลม

- ไม้พาย

- กระบอกลงน้ำพลาสติกขนาด 2 ลิตร

- หลอดหยด (dropper)

- เครื่องวัดค่า pH (pH meter)

- ขวดน้ำกลั่นขนาด 1000 มิลลิลิตร

- ปีกเกอร์พลาสติกมีหูจับขนาด 1000 มิลลิลิตร และ 3000 มิลลิลิตร

- กระบะพลาสติกขนาด กว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ 40 × 32 × 10 เซนติเมตร

- แผ่นโฟม

- ฟองน้ำ

- แผ่นพีวีเจอร์บอร์ด

- กระจกบัวพลาสติกขนาด 10 นิ้ว

ข. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาโครงสร้างระบบบราก

- กล่องกระจกใสขนาด กว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ 20 × 30 × 2 เซนติเมตร และขนาด กว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ 20 × 40 × 2 เซนติเมตร

- กล้องถ่ายรูปดิจิทัล ยี่ห้อ Canon รุ่น PowerShot G11

- ไม้บรรทัด

- ใบมีดโกน

- น้ำประปา

- ถ้วยอะลูมิเนียมขนาด กว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ 75 × 47 × 18 มิลลิเมตร

- เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่งของหน่วยกรัม (balance)

- ซองกระดาษสีน้ำตาลขนาด กว้าง × ยาว เท่ากับ 9.5 × 17.2 เซนติเมตร

- ถาดอะลูมิเนียม

- ตู้อบตัวอย่างพีช (hot air oven)

ค. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของราก

- microcentrifuge tube ขนาด 1.5 มิลลิลิตร
- กล่องใส่ microcentrifuge tube
- ไมโครปิเปตต์ และไมโครปิเปตต์ทิป
- จานหลุมกระเบื้อง
- คีมคีบ (forceps)
- เข็มเย็บเย็บปลายแหลม
- แผ่นสไลด์ และกระจกปิดสไลด์
- พู่กัน
- ใบมีดโกน
- น้ำกลั่น
- น้ำประปา
- หลอดหยด (dropper)
- ปีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร และ 1000 มิลลิลิตร
- ขวดน้ำกลั่นขนาด 1000 มิลลิลิตร
- กระดาษทิชชู
- เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน (microcentrifuge)
- กล้องจุลทรรศน์ใช้แสง (light microscope) ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX51
- กล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบสเตอริโอ (stereo microscope) ยี่ห้อ Olympus รุ่น SZX-9

### 3.2.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาลักษณะบอร์เดอร์เซลล์ของราก

#### ก. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้เพาะปลูกพืช

- หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (autoclave)
- ถาดอะลูมิเนียม
- อะลูมิเนียมฟอยล์
- ถุงพลาสติก
- หนัวยาง
- น้ำกรอง
- ตู้อบลมร้อน (hot air oven)
- ซองกระดาษสีขาวขนาด กว้าง × ยาว เท่ากับ 9.2 × 9.2 เซนติเมตร
- กระจกบดแบบแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร
- ปีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร และ 250 มิลลิลิตร
- เครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer)
- ไมโครปิเปตต์ และไมโครปิเปตต์ทิป
- ขวดเก็บสารละลายขนาด 500 มิลลิลิตร และ 1000 มิลลิลิตร
- กระจกบดพลาสติกขนาด 1 ลิตร
- ปีกเกอร์พลาสติกมีหูจับขนาด 2000 มิลลิลิตร
- เครื่องวัดค่า pH (pH meter)
- ขวดน้ำกลั่นขนาด 1000 มิลลิลิตร
- หลอดหยด (dropper)
- เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่งของหน่วยกรัม (balance)
- ไมโครเวฟ
- ตู้ปลอดเชื้อ (laminar flow cabinet)
- ตะเกียงแอลกอฮอล์ (alcohol burner)



- ไฟแช็ค
- ตะแกรงใส่หลอดทดลอง (test tube rack)
- คีมคีบ (forceps)
- ผ้า
- เพลต
- กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1
- พลาสติกห่ออาหาร

ข. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาลักษณะบอร์เดอร์เซลล์ของราก

- แผ่นยางรองตัด
- แผ่นสไลด์ และกระจกปิดสไลด์
- แผ่นพาราฟิล์ม
- กรรไกร
- คีมคีบ (forceps)
- เข็มเขี่ยเชื้อปลายแหลม
- ใบมีดโกน
- ชี้นั่งนับแบงก์
- ไมโครปิเปตต์ และไมโครปิเปตต์ทิป
- กระดาษทิชชู
- น้ำกลั่น
- ปีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร และ 1000 มิลลิลิตร
- ขวดน้ำกลั่นขนาด 1000 มิลลิลิตร
- PCR tube
- ฮีโมไซโตมิเตอร์ (hemocytometer)
- กล้องจุลทรรศน์ใช้แสง (light microscope) ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX51

### 3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.3.1 สารเคมีที่ใช้ศึกษาโครงสร้างระบบรากและลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของราก

##### ก. สารเคมีที่ใช้เพาะปลูกพืช

- Boric acid ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ )
- Calcium nitrate tetrahydrate ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )
- Copper(II) chloride dihydrate ( $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )
- EDTA disodium salt dihydrate ( $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_8\text{Na}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )
- Hydrochloric acid (HCl)
- Iron(III) chloride hexahydrate ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )
- Magnesium sulfate heptahydrate ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )
- Manganese(II) chloride tetrahydrate ( $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )
- Potassium dihydrogen phosphate ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )
- Potassium nitrate ( $\text{KNO}_3$ )
- Sodium chloride (NaCl)
- Sodium hydroxide (NaOH)
- Sodium molybdate dihydrate ( $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )
- Zinc chloride ( $\text{ZnCl}_2$ )

##### ข. สารเคมีที่ใช้ศึกษาลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของราก

- Ethyl alcohol
- Formalin
- Glacial acetic acid
- Glycerol
- Sudan red 7B (Acros Organics, Germany)

### 3.3.2 สารเคมีที่ใช้ศึกษาลักษณะบอร์เตอร์เซลล์ของราก

#### ก. สารเคมีที่ใช้เพาะปลูกพืช

- Agar powder
- Boric acid ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ )
- Calcium nitrate tetrahydrate ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )
- Commercial bleach
- Copper(II) chloride dihydrate ( $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )
- EDTA disodium salt dihydrate ( $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_8\text{Na}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )
- Ethyl alcohol
- Hydrochloric acid (HCl)
- Iron(III) chloride hexahydrate ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )
- Magnesium sulfate heptahydrate ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )
- Manganese(II) chloride tetrahydrate ( $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )
- Potassium dihydrogen phosphate ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )
- Potassium nitrate ( $\text{KNO}_3$ )
- Sodium chloride (NaCl)
- Sodium hydroxide (NaOH)
- Sodium molybdate dihydrate ( $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )
- Triton X-100
- Zinc chloride ( $\text{ZnCl}_2$ )

ข. สารเคมีที่ใช้ศึกษาลักษณะบอร์เตอร์เซลล์ของราก

- Acetone
- Alcian blue (Sigma-Aldrich, USA)
- Fluorescein diacetate (FDA) (Research Organics, USA)
- HEPES (4-(2-hydroxyethyl)-1-piperazineethanesulfonic acid)
- India ink (Talens, Netherlands)
- Phenosafranin (Sigma-Aldrich, USA)
- Tris (hydroxymethyl) aminomethane (2-Amino-2-(hydroxymethyl)-1,3-propanediol)

### 3.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการทดลอง

3.4.1 ศึกษาผลของภาวะเค็มต่อการเติบโตและลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน

1) ปลูกต้นกล้าของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน 3 พันธุ์ โดยนำเมล็ดข้าวแช่น้ำประปาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเพาะเมล็ดโดยวางบนตะกร้าพลาสติกที่วางซ้อนบนถังที่บรรจุน้ำประปาเป็นเวลา 4 วัน พร้อมหุ้มปากถังด้วยพลาสติกห่ออาหาร เพื่อควบคุมความชื้น ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีการของ Krishnamurthy et al. (2009) จากนั้นย้ายต้นกล้าลงปลูกในกระบะพลาสติกที่บรรจุสารละลายธาตุอาหารสูตร ½ strength Hoagland (Hoagland and Arnon, 1950) ปริมาตร 6 ลิตร จำนวน 24 ต้นต่อกระบะ เมื่อต้นกล้าอายุ 2 สัปดาห์ จึงย้ายลงปลูกในกระถางพลาสติกที่บรรจุสารละลายธาตุอาหารสูตร full strength Hoagland ปริมาตร 3 ลิตร จำนวน 6 ต้นต่อกระถาง

2) เมื่อต้นกล้าอายุ 3 สัปดาห์ จึงให้ได้รับภาวะเค็มที่ระดับความเข้มข้น 60 มิลลิโมลาร์ เป็นเวลา 21 วัน โดยมีชุดทดลอง ดังนี้

ชุดทดลองที่ 1 คือ สารละลายธาตุอาหารสูตร full strength Hoagland (Control)

ชุดทดลองที่ 2 คือ สารละลายธาตุอาหารสูตร full strength Hoagland ที่เติม NaCl ที่ความเข้มข้น 60 มิลลิโมลาร์ (Salt stress)

โดยชุดทดลองทั้งหมดนั้น จะได้รับการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายให้อยู่ในช่วง 5.5-6.5 และยังได้รับการควบคุมค่าการนำไฟฟ้าให้คงที่ โดยการเติมน้ำประปาลงในกระถางปลูก เพื่อให้ปริมาตรของสารละลายอยู่ในระดับเดิมตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง อีกทั้งยังมีการเปลี่ยนสารละลายทุกสัปดาห์ เพื่อควบคุมให้ข้าวได้รับสารละลายธาตุอาหารและระดับเกลือที่สม่ำเสมอตลอดการทดลอง

3) บันทึกผลการเติบโตและลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ทุก 7 วัน พันธุ์ละ 4 ซ้ำ ซ้ำละ 1 ต้น โดยวัดค่าต่าง ๆ ดังนี้

ก. ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้บ่งชี้ถึงการเติบโต

- น้ำหนักสดของราก (root fresh weight)
- น้ำหนักแห้งของราก (root dry weight)
- น้ำหนักสดของต้น (shoot fresh weight)
- น้ำหนักแห้งของต้น (shoot dry weight)

ข. ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงถึงโครงสร้างระบบราก

- ความยาวของรากปฐมภูมิ (primary root length)
- จำนวนของรากแขนง (lateral root number) ที่รากปฐมภูมิ
- ความหนาแน่นของรากแขนง (lateral root density) ที่รากปฐมภูมิ (Wang et al., 2009)
- จำนวนของรากพิเศษแรกเกิด (seminal root number)
- จำนวนของรากพิเศษ (adventitious root number)

ในการนับจำนวนของรากแขนงที่รากปฐมภูมิ ผู้วิจัยได้ใช้การถ่ายภาพโครงสร้างระบบราก นำภาพที่ได้มาแก้ไขด้วยโปรแกรม Image J แล้วจึงทำการนับจำนวนของรากแขนงที่รากปฐมภูมิ ส่วนค่าความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐมภูมิ คำนวณได้จากจำนวนของรากแขนงที่รากปฐมภูมิหารด้วยความยาวของรากปฐมภูมิ

### 3.4.2 ศึกษาผลของภาวะเค็มต่อลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน

1) ปลุกต้นกล้าของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน 3 พันธุ์ ตามวิธีการศึกษาผลของภาวะเค็มต่อการเติบโตและลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกันในข้อ 1) โดยให้ได้รับภาวะเค็มตามวิธีการในข้อ 2)

2) เก็บตัวอย่างรากพิเศษ (adventitious root) ที่มีความยาวมากที่สุดและตัดตัวอย่างรากพิเศษที่ระยะห่างจากปลายราก 10 เซนติเมตร และ 20 เซนติเมตร แล้วนำมาแช่ในสารละลาย formalin aceto alcohol (FAA) (Ruzin, 1999) ปริมาตร 500 ไมโครลิตร

3) นำตัวอย่างรากพิเศษมาทำการตัดชิ้นเนื้อเยื่อตามขวางด้วยเทคนิค free-hand cross section ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบสเตอริโอ จากนั้นนำชิ้นส่วนที่ได้มาทำการย้อมด้วยสี Sudan red 7B เข้มข้น 0.1% (w/v) ปริมาตร 100 ไมโครลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที แล้วนำชิ้นส่วนที่ได้มาส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ใช้แสง (Brundrette et al., 1991; Ruzin, 1999) บันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัล เปรียบเทียบลักษณะกายวิภาคศาสตร์ในรากที่ได้รับและไม่ได้รับภาวะเค็มในข้าวแต่ละพันธุ์ที่มีความยาวต่าง ๆ โดยศึกษาลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (root diameter)
- พื้นที่ของราก (root area)
- ความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ (cortex thickness)
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีล (stele diameter)
- พื้นที่ของชั้นสตีล (stele area)
- พื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีล (relative stele area)

ในการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก ความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีล ผู้วิจัยได้ใช้การถ่ายภาพชิ้นส่วน แล้วนำภาพที่ได้มาวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังกล่าวด้วยโปรแกรม Image J จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาพื้นที่ของรากและพื้นที่ของชั้นสตีล โดยใช้สูตรในการคำนวณหาพื้นที่ของวงกลม ส่วนพื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีล คำนวณได้จาก พื้นที่ของชั้นสตีล  $\times$  100 แล้วนำค่าที่ได้หารด้วยพื้นที่ของราก

3.4.3 ศึกษาผลของภาวะเค็มต่อลักษณะรูปแบบการสร้างและความมีชีวิตของบอร์เตอร์เซลล์ของราก และความหนาของสารเมือกที่บอร์เตอร์เซลล์สร้างขึ้นบริเวณปลายรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน

1) ปลุกต้นกล้าของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน 3 พันธุ์ โดยนำเมล็ดข้าวไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน เพื่อกระตุ้นให้เมล็ดเกิดการงอก แล้วนำเมล็ดแช่ใน commercial bleach 10% ที่เติม Triton X-100 0.005% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นฟอกฆ่าเชื้อด้วย commercial bleach 10% และ commercial bleach 30% ปริมาตรอย่างละ 100 มิลลิลิตร เป็นเวลาอย่างละ 30 นาที ตามลำดับ จากนั้นฟอกเมล็ดด้วยน้ำกรอง ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จำนวน 3-4 ครั้ง ครั้งละ 30 นาที ซึ่งตัดแปลงมาจากวิธีการของ Cai and Zhang and et al. (2011) และ Qiao et al. (2013) ในขณะที่ทำการฟอกเมล็ดนั้นผู้วิจัยได้ทำการวางปีกเกอร์บนเครื่องกวนสารละลายตลอดเวลาที่ทำการทดลอง จากนั้นนำเมล็ดแช่ใน ethyl alcohol 95% เป็นเวลา 60 วินาที แล้วทำการเพาะเมล็ดบนกระดาษกรองบนอาหารวุ้นที่เติมสารละลายธาตุอาหารสูตร ¼ strength Hoagland ในสภาวะปลอดเชื้อและวางไว้ในที่มีดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4-5 วัน หรือจนกระทั่งรากมีความยาวตามที่ต้องการใช้ในการทดลอง (Hamamoto et al., 2006)

2) นำรากปฐมภูมิ (primary root) ของข้าวที่ปลูกในภาวะปกติที่มีความยาวรากตั้งแต่ 0.1-4.0 เซนติเมตร จำนวนความยาวละ 10 ซม. ซ้ำละ 2 ต้น มาศึกษาลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

ก. รูปแบบการสร้างบอร์เตอร์เซลล์ของราก (RBCs production) โดยชะล้างบอร์เตอร์เซลล์ออกจากปลายราก ด้วยการนำปลายรากวางในหยดน้ำกลั่น ปริมาตร 50 ไมโครลิตร ที่อยู่บนแผ่นพาราฟิล์ม จากนั้นใช้เข็มติดปลายรากความยาวประมาณ 0.5 เซนติเมตร จำนวน 2 ราก ทำการเก็บหยดน้ำกลั่นและปลายรากที่ตัดแล้วลงใน PCR tube จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 50 ไมโครลิตร ลงในหลอดอีกครั้งหนึ่ง แช่ปลายรากทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นใช้ไมโครปิเปตต์ชะล้างบอร์เตอร์เซลล์ภายใน PCR tube เป็นเวลา 2-3 นาที หรือจนกว่าเซลล์จะหลุดออกจากปลายรากหมด จากนั้นหยดตัวอย่างปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงบนฮีโมไซโตมิเตอร์ ส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ใช้แสง และนับจำนวนบอร์เตอร์เซลล์ (Cai and Zhang and et al., 2011; Chen et al., 2008) โดยจำนวนบอร์เตอร์เซลล์ที่นับได้ในแต่ละตารางของฮีโมไซโตมิเตอร์นั้น สามารถนำมาคำนวณหาจำนวนบอร์เตอร์เซลล์ต่อราก โดยนำจำนวนบอร์เตอร์เซลล์ที่นับได้หารด้วยจำนวนช่องในตารางของ

ฮีโมไซโตมิเตอร์ จากนั้นนำค่าที่ได้มาเทียบบัญญัติไตรยางศ์ เพื่อคำนวณหาจำนวนบอร์เดอร์เซลล์ต่อราก (เซลล์/ราก)

ข. ตรวจสอบความมีชีวิตของบอร์เดอร์เซลล์ของราก (RBCs viability) โดยชะล้างบอร์เดอร์เซลล์ออกจากปลายรากตามวิธีการในข้อ ก. จากนั้นนำตัวอย่างปริมาตร 10 ไมโครลิตร มาทำการย้อมด้วยสี fluorescein diacetate (FDA, 0.02% (w/v)) ปริมาตร 10 ไมโครลิตร เพื่อตรวจสอบความมีชีวิตของเซลล์ โดยใช้ไมโครปิเปตต์ผสมสีย้อมกับเซลล์ตัวอย่างให้เข้ากัน จากนั้นหยดตัวอย่างปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงบนฮีโมไซโตมิเตอร์ ส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบฟลูออเรสเซนต บันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัล (ดัดแปลงจากวิธีของ Pan et al. (2001); Widholm (1972)) สำหรับการตรวจสอบการตายของเซลล์ ทำได้โดยการนำตัวอย่างปริมาตร 10 ไมโครลิตร มาย้อมด้วยสี phenosafranin เข้มข้น 0.01% (w/v) ปริมาตร 10 ไมโครลิตร จากนั้นใช้ไมโครปิเปตต์ผสมสีย้อมกับเซลล์ตัวอย่างให้เข้ากัน แล้วหยดตัวอย่างปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงบนแผ่นสไลด์และส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Widholm, 1972)

ค. วัดความหนาของสารเมื่อบริเวณรอบบอร์เดอร์เซลล์ โดยชะล้างบอร์เดอร์เซลล์ออกจากปลายรากตามวิธีการในข้อ ก. แล้วนำตัวอย่างปริมาตร 100 ไมโครลิตร มาย้อมด้วยสี India ink ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีการของ Cai and Wang and et al. (2011) จากนั้นใช้ไมโครปิเปตต์ผสมสีย้อมกับเซลล์ตัวอย่างให้เข้ากัน แล้ววางทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นหยดตัวอย่างปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงบนแผ่นสไลด์ แล้ววางทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที ส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ใช้แสง บันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัล ในการวัดความหนาของสารเมื่อบริเวณรอบบอร์เดอร์เซลล์ ผู้วิจัยได้ใช้การถ่ายภาพเซลล์ดังกล่าว แล้วนำภาพที่ได้มาวัดความหนาของสารเมื่อกด้วยโปรแกรม Image J โดยผู้วิจัยได้ทำการเลือกบอร์เดอร์เซลล์อย่างสุ่มทั้งหมด 10 เซลล์ต่อตัวอย่าง ในแต่ละเซลล์จะทำการวัดความหนาของสารเมื่อกทั้งหมด 4 จุด ประกอบด้วย ส่วนหัว ส่วนท้าย ส่วนซ้าย และส่วนขวา

3) สำหรับการทำให้ข้าวได้รับภาวะเค็ม ให้ทำการพอกฆ่าเชื้อและเพาะเมล็ดตามวิธีการในข้อ 1) แล้วเมื่อปลายรากมีความยาว 1.0 เซนติเมตร จึงให้ได้รับภาวะเค็ม โดยย้ายลงในอาหารวุ้นที่มีเกลือที่ระดับความเข้มข้น 60 มิลลิโมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการทดลองตามวิธีการในข้อ 2)



### 3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ในการศึกษาผลของภาวะเค็มต่อการเติบโต ลักษณะโครงสร้างระบบราก และลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน 3 พันธุ์ ให้นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาข้างต้นมาวิเคราะห์ผลของภาวะเค็มต่อค่าวัดการเติบโต ลักษณะโครงสร้างระบบราก และลักษณะกายวิภาคศาสตร์ในข้าวแต่ละพันธุ์ โดยการใช้ Student's t-test เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในข้าวพันธุ์เดียวกันภายใต้สภาวะที่ได้รับและไม่ได้รับภาวะเค็มที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และ 99% ด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics 22

ในการศึกษาลักษณะรูปแบบการสร้างและความมีชีวิตของบอร์เดอร์เซลล์ของราก และความหนาของสารเมือกที่บอร์เดอร์เซลล์สร้างขึ้นบริเวณปลายรากของข้าวในภาวะปกติ ให้นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Dunnett's T3 ส่วนการศึกษาลักษณะรูปแบบการสร้างและความมีชีวิตของบอร์เดอร์เซลล์ของราก และความหนาของสารเมือกที่บอร์เดอร์เซลล์สร้างขึ้นบริเวณปลายรากของข้าวในภาวะเค็ม ให้นำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในข้าวพันธุ์เดียวกันภายใต้สภาวะที่ได้รับและไม่ได้รับภาวะเค็มด้วย Student's t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และ 99% ด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics 22

### 3.6 สถานที่ในการทำการทดลอง

เริ่มต้นไม้ภาควิชาพฤกษศาสตร์ ห้องปฏิบัติการกลางภาควิชาพฤกษศาสตร์ และห้องปฏิบัติการกลางเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

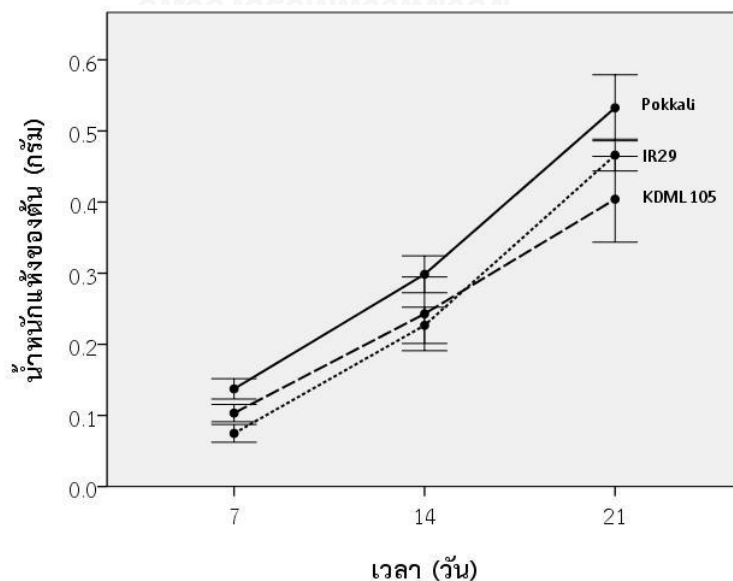
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 การเติบโตและลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับภาวะเค็มในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ

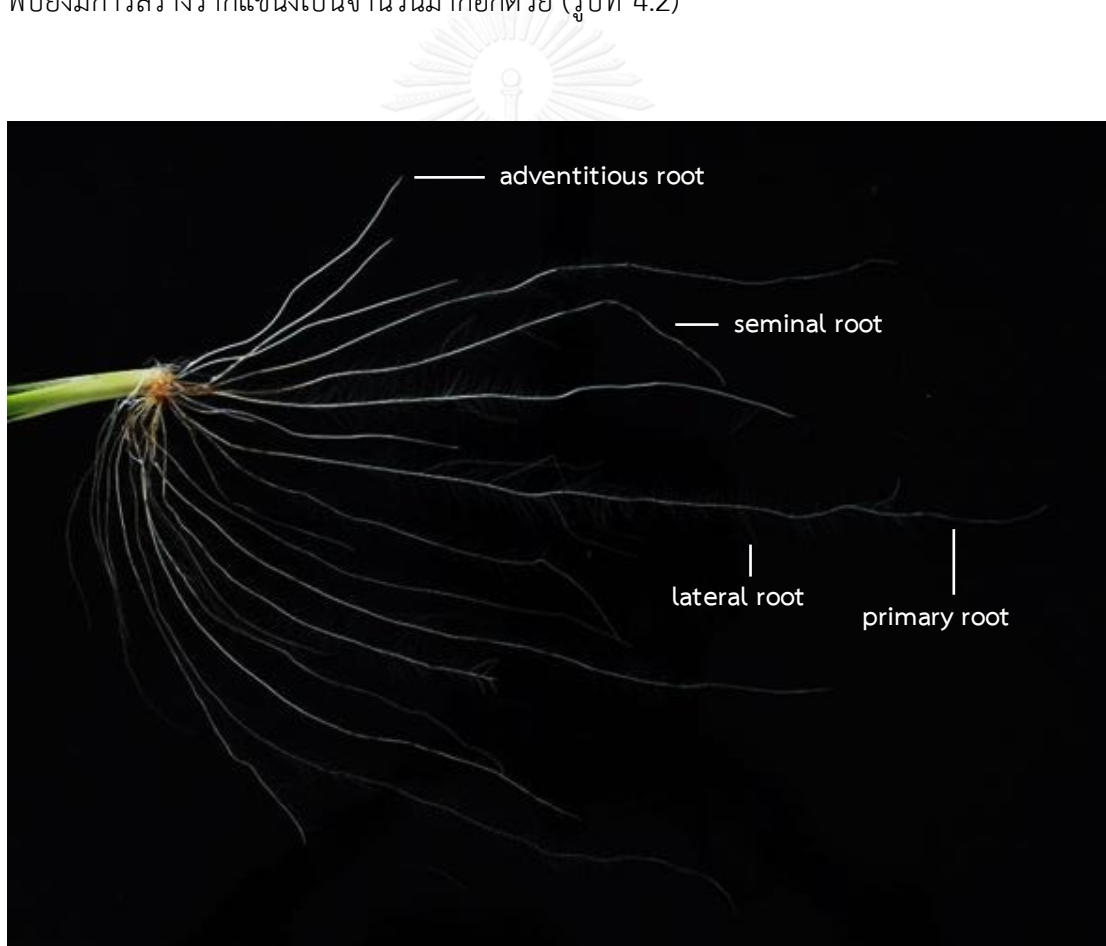
##### 4.1.1 การเติบโตและลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน ในภาวะปกติ

ในการศึกษาการเติบโตของข้าวที่มีความสามารถในการทนเค็มต่างกัน ผู้วิจัยได้นำต้นกล้าที่มีอายุ 21 วัน มาทำการทดลองและวัดการเติบโตด้วยค่าน้ำหนักแห้งของต้น เพื่อตรวจสอบว่าข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีระยะการเติบโตเดียวกันในช่วงระยะเวลาที่ทำการทดลอง (7-21 วัน) ทั้งนี้ พบว่าข้าวแต่ละพันธุ์มีการเพิ่มขึ้นของค่าน้ำหนักแห้งของต้นตามระยะเวลา โดยมีการเติบโตเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential growth) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งข้าวพันธุ์ Pokkali ที่เป็นพันธุ์มาตรฐานทนเค็ม มีอัตราการเติบโตเท่ากับ 0.0283 กรัม/วัน ส่วนข้าวพันธุ์ KDML105 ที่เป็นพืชเศรษฐกิจของไทย พบว่า มีอัตราการเติบโตเท่ากับ 0.0279 กรัม/วัน และข้าวพันธุ์ IR29 ที่เป็นพันธุ์มาตรฐานไม่ทนเค็ม มีอัตราการเติบโตเท่ากับ 0.0215 กรัม/วัน แสดงให้เห็นว่าข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีระยะการเติบโตเดียวกันในช่วงเวลาที่ทำการทดลอง



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเติบโตของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ในช่วงเวลาที่ทำการทดลอง

ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าว พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะโครงสร้างระบบรากเหมือนกัน ซึ่งประกอบด้วยรากปฐมภูมิ รากพิเศษแรกเกิด และรากพิเศษ จากการทดลองพบว่า ในช่วงแรกหลังจากการงอกของรากแรกเกิดที่เจริญต่อมาเป็นรากปฐมภูมินั้น ข้าวจะมีการสร้างรากพิเศษแรกเกิด ซึ่งรากดังกล่าวเกิดจากส่วนของสควิเทลลาร์ โหนด ที่เป็นรอยต่อระหว่างส่วนต้นและส่วนราก โดยข้าวมีจำนวนรากพิเศษแรกเกิดประมาณ 6-11 ราก ยิ่งไปกว่านั้น ข้าวจะมีการสร้างรากพิเศษที่บริเวณส่วนโคนของลำต้นเป็นจำนวนมาก โดยรากดังกล่าวมีจำนวนประมาณ 13-44 ราก ซึ่งรากพิเศษทำหน้าที่เป็นรากหลักของข้าวที่เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว เมื่อพิจารณาถึงการเจริญเติบโตของรากปฐมภูมิในข้าวที่มีอายุ 28 วัน พบว่ารากปฐมภูมิมีการชะลอการเจริญเติบโต โดยรากดังกล่าวมีความยาวประมาณ 20 เซนติเมตร นอกจากนี้ รากข้าวทุกประเภทที่พบยังมีการสร้างรากแขนงเป็นจำนวนมากอีกด้วย (รูปที่ 4.2)

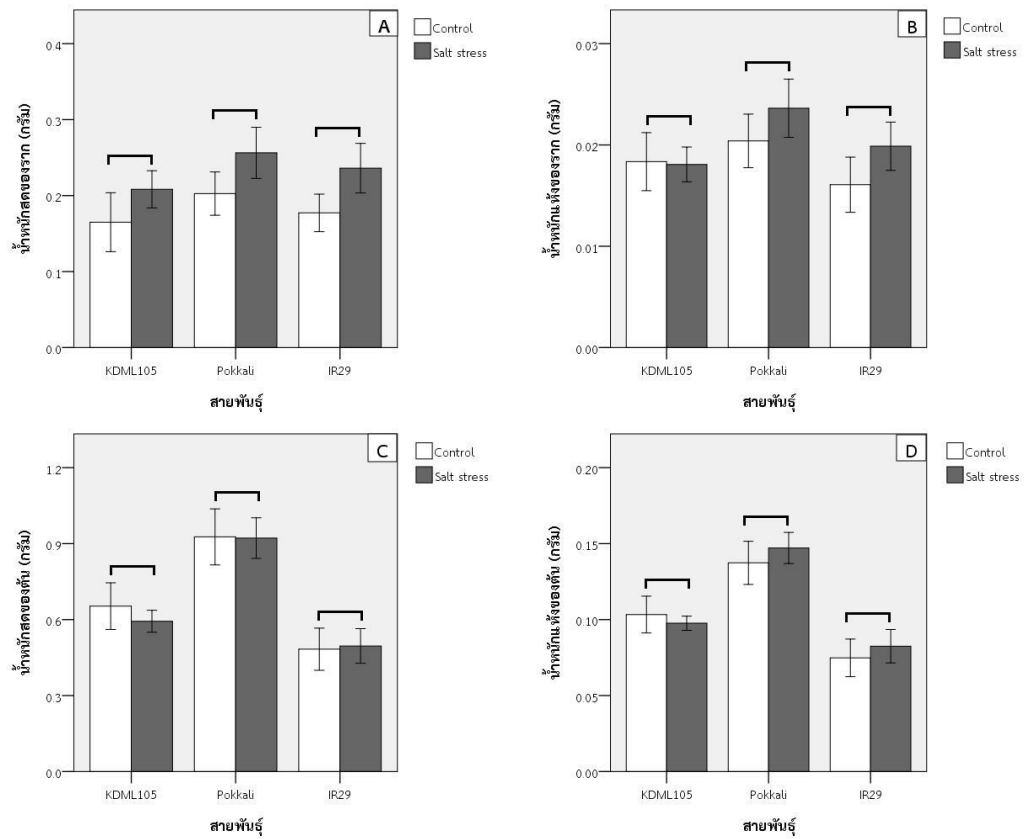


รูปที่ 4.2 โครงสร้างระบบรากของข้าวพันธุ์ KDML105 ที่มีอายุ 28 วัน

4.1.2 การเติบโตและลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน

การที่ข้าวได้รับภาวะเค็มในช่วงระยะเวลาดังกล่าว พบว่าภาวะเค็มไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเติบโตของรากและต้นในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มของลักษณะการเจริญเติบโตของราก พบว่าภาวะเค็มไม่มีผลต่อน้ำหนักสดของรากในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีค่าน้ำหนักสดของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.165 \pm 0.039$  กรัม และ  $0.208 \pm 0.025$  กรัม ตามลำดับ ข้าวพันธุ์ Pokkali มีค่าน้ำหนักสดของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.203 \pm 0.029$  กรัม และ  $0.256 \pm 0.034$  กรัม ตามลำดับ ทั้งยังพบว่าภาวะเค็มมีแนวโน้มเพิ่มน้ำหนักสดของรากในข้าวพันธุ์ IR29 โดยมีค่าน้ำหนักสดของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.177 \pm 0.025$  กรัม และ  $0.236 \pm 0.033$  กรัม ตามลำดับ (รูปที่ 4.3A) สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อน้ำหนักแห้งของรากนั้น พบว่าภาวะเค็มไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้งของราก โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีค่าน้ำหนักแห้งของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.018 \pm 0.003$  กรัม และ  $0.018 \pm 0.002$  กรัม ตามลำดับ ข้าวพันธุ์ Pokkali มีค่าน้ำหนักแห้งของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.020 \pm 0.003$  กรัม และ  $0.024 \pm 0.003$  กรัม ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีค่าน้ำหนักแห้งของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.016 \pm 0.003$  กรัม และ  $0.020 \pm 0.002$  กรัม ตามลำดับ (รูปที่ 4.3B)

เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มของลักษณะการเติบโตของต้นในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่าภาวะเค็มไม่มีผลต่อน้ำหนักสดของต้น โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีค่าน้ำหนักสดของต้นในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.653 \pm 0.092$  กรัม และ  $0.594 \pm 0.043$  กรัม ตามลำดับ ข้าวพันธุ์ Pokkali มีค่าน้ำหนักสดของต้นในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.927 \pm 0.111$  กรัม และ  $0.922 \pm 0.080$  กรัม ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีค่าน้ำหนักสดของต้นในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.483 \pm 0.083$  กรัม และ  $0.496 \pm 0.069$  กรัม ตามลำดับ (รูปที่ 4.3C) สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อน้ำหนักแห้งของต้นนั้น พบว่าภาวะเค็มไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้งของต้น โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีค่าน้ำหนักแห้งของต้นในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.103 \pm 0.012$  กรัม และ  $0.098 \pm 0.005$  กรัม ตามลำดับ ข้าวพันธุ์ Pokkali มีค่าน้ำหนักแห้งของต้นในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.137 \pm 0.014$  กรัม และ  $0.147 \pm 0.010$  กรัม ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีค่าน้ำหนักแห้งของต้นในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.075 \pm 0.012$  กรัม และ  $0.083 \pm 0.011$  กรัม ตามลำดับ (รูปที่ 4.3D)



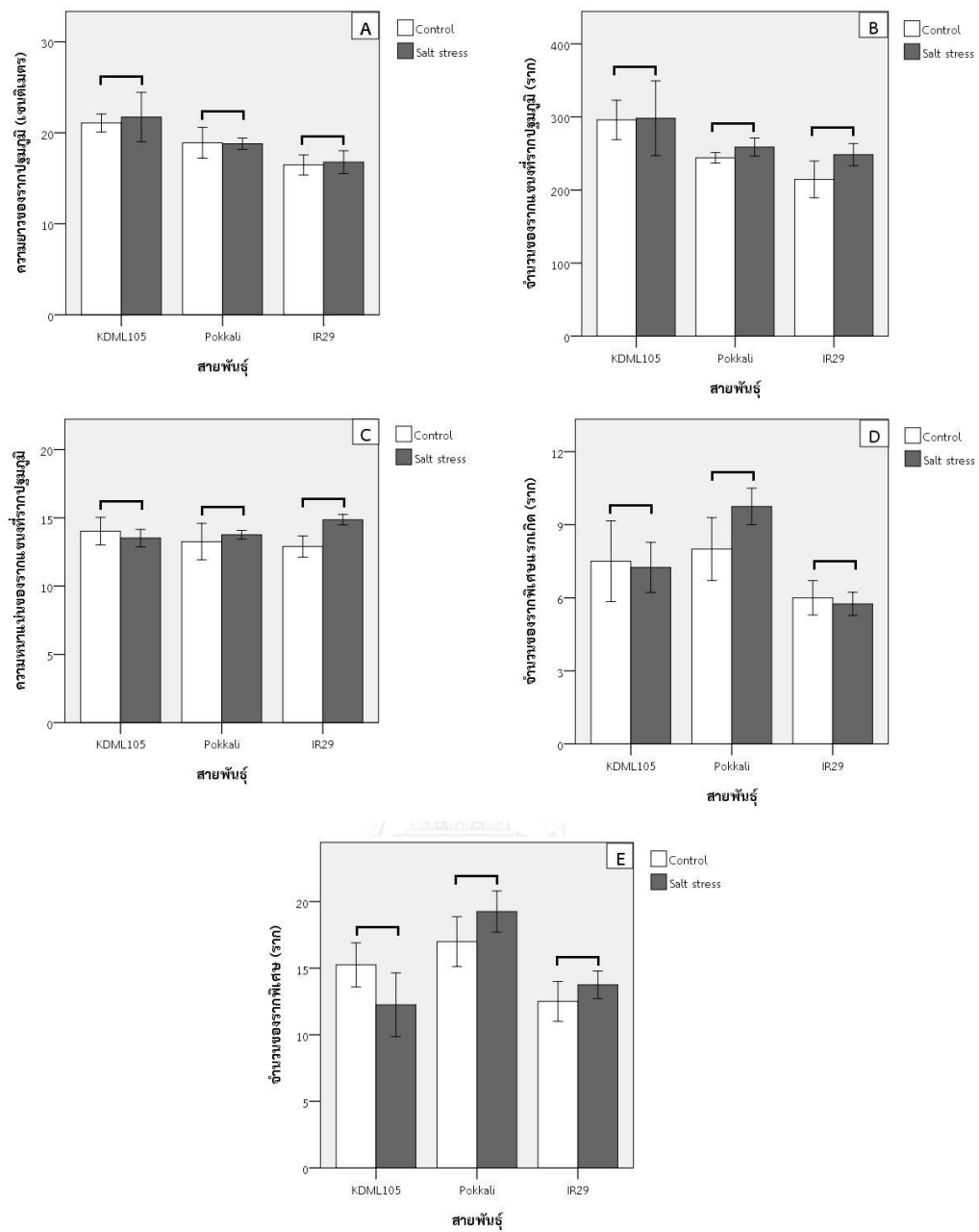
รูปที่ 4.3 การเติบโตของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน รูป A น้ำหนักสัดของราก (กรัม) รูป B น้ำหนักแห้งของราก (กรัม) รูป C น้ำหนักสัดของต้น (กรัม) และรูป D น้ำหนักแห้งของต้น (กรัม) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE

สำหรับผลของภาวะเค็มต่อโครงสร้างระบบรากนั้น พบว่าการให้ภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน ไม่มีผลเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระบบรากในข้าวทุกพันธุ์ที่ทำการทดลอง อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของรากปฐุมภูมิ พบว่าภาวะเค็มไม่มีผลต่อความยาวของรากปฐุมภูมิ โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีค่าความยาวของรากปฐุมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $21.08 \pm 1.00$  เซนติเมตร และ  $21.73 \pm 2.72$  เซนติเมตร ตามลำดับ ข้าวพันธุ์ Pokkali มีค่าความยาวของรากปฐุมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $18.90 \pm 1.69$  เซนติเมตร และ  $18.80 \pm 0.63$  เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีค่าความยาวของรากปฐุมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $16.48 \pm 1.11$  เซนติเมตร และ  $16.78 \pm 1.26$  เซนติเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.4A) สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อจำนวนของรากแขนงที่รากปฐุมภูมินั้น พบว่าภาวะเค็มไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงจำนวนของรากแขนงที่รากปฐุมภูมิ โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีจำนวนของรากแขนงที่รากปฐุมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $296.00 \pm 26.97$  ราก และ  $298.25 \pm 51.03$  ราก ตามลำดับ ข้าวพันธุ์ Pokkali มีจำนวนของรากแขนงที่รากปฐุมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $244.00 \pm 7.25$  ราก และ  $258.75 \pm 12.43$  ราก ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีจำนวนของรากแขนงที่รากปฐุมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $214.50 \pm 25.20$  ราก และ  $248.50 \pm 15.22$  ราก ตามลำดับ (รูปที่ 4.4B) เมื่อคำนวณหาความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐุมภูมิ พบว่าภาวะเค็มไม่มีผลต่อความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐุมภูมิในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีค่าความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐุมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $14.02 \pm 1.00$  และ  $13.52 \pm 0.63$  ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali มีค่าความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐุมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $13.26 \pm 1.34$  และ  $13.76 \pm 0.32$  ตามลำดับ ทั้งยังพบว่าภาวะเค็มมีแนวโน้มเพิ่มความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐุมภูมิในข้าวพันธุ์ IR29 โดยมีค่าความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐุมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $12.90 \pm 0.77$  และ  $14.86 \pm 0.39$  ตามลำดับ (รูปที่ 4.4C)

เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของรากพิเศษในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่าภาวะเค็มไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงจำนวนของรากพิเศษแรกเกิด โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีจำนวนของรากพิเศษแรกเกิดในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $7.50 \pm 1.66$  ราก และ  $7.25 \pm 1.03$  ราก ตามลำดับ ข้าวพันธุ์ Pokkali มีจำนวนของรากพิเศษแรกเกิดในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $8.00 \pm 1.29$  ราก และ  $9.75 \pm 0.75$  ราก ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีจำนวนของรากพิเศษแรกเกิดในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $6.00 \pm 0.71$  ราก และ  $5.75 \pm 0.48$  ราก ตามลำดับ (รูปที่ 4.4D) สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อจำนวนของรากพิเศษนั้น พบว่าภาวะเค็มไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงจำนวนของรากพิเศษด้วยเช่นกัน โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีจำนวนของรากพิเศษในภาวะปกติและ

ภาวะเค็มเท่ากับ  $15.25 \pm 1.65$  ราก และ  $12.25 \pm 2.39$  ราก ตามลำดับ ข้าวพันธุ์ Pokkali มีจำนวนของรากพิเศษในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $17.00 \pm 1.87$  ราก และ  $19.25 \pm 1.55$  ราก ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีจำนวนของรากพิเศษในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $12.50 \pm 1.50$  ราก และ  $13.75 \pm 1.03$  ราก ตามลำดับ (รูปที่ 4.4E)





รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน  
 รูป A ความยาวของรากปฐมภูมิ (เซนติเมตร) รูป B จำนวนของรากแขนงที่รากปฐมภูมิ (ราก) รูป C  
 ความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐมภูมิ รูป D จำนวนของรากพิเศษแรกเกิด (ราก) และรูป E  
 จำนวนของรากพิเศษ (ราก) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE

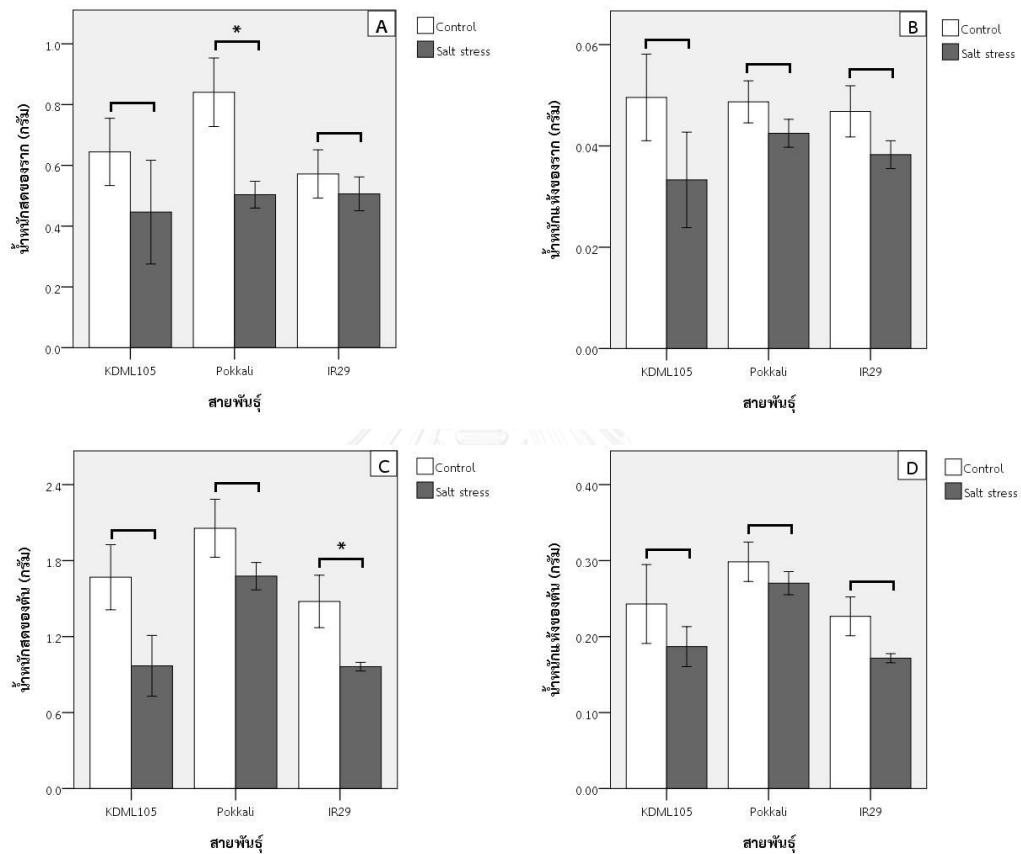


4.1.3 การเติบโตและลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน

เมื่อข้าวได้รับภาวะเค็มตามช่วงเวลาดังกล่าว พบว่าภาวะเค็มมีผลต่อการเติบโตของรากและต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยข้าวแต่ละพันธุ์มีการตอบสนองต่อภาวะเค็มต่างกัน เมื่อพิจารณาผลของภาวะเค็มที่มีต่อการเติบโตของรากในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้น้ำหนักสดของรากในข้าวพันธุ์ Pokkali ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ คิดเป็น 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดยมีค่าน้ำหนักสดของรากในภาวะปกติเท่ากับ  $0.841 \pm 0.113$  กรัม เมื่อได้รับภาวะเค็ม ข้าวพันธุ์ดังกล่าวมีค่าน้ำหนักสดของรากลดลงเหลือ  $0.504 \pm 0.044$  กรัม ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มไม่มีผลต่อน้ำหนักสดของรากในข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29 โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีค่าน้ำหนักสดของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.644 \pm 0.111$  กรัม และ  $0.446 \pm 0.171$  กรัม ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีค่าน้ำหนักสดของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.572 \pm 0.080$  กรัม และ  $0.506 \pm 0.056$  กรัม ตามลำดับ (รูปที่ 4.5A) สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อน้ำหนักแห้งของรากนั้น พบว่าภาวะเค็มไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้งของรากในข้าวทุกสายพันธุ์ โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีค่าน้ำหนักแห้งของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.050 \pm 0.009$  กรัม และ  $0.033 \pm 0.009$  กรัม ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali มีค่าน้ำหนักแห้งของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.049 \pm 0.004$  กรัม และ  $0.043 \pm 0.003$  กรัม ตามลำดับ และข้าวพันธุ์ IR29 มีค่าน้ำหนักแห้งของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.047 \pm 0.005$  กรัม และ  $0.038 \pm 0.003$  กรัม ตามลำดับ ซึ่งข้าวทุกพันธุ์มีแนวโน้มลดค่าน้ำหนักแห้งของรากจากภาวะปกติ แต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (รูปที่ 4.5B)

เมื่อพิจารณาผลของภาวะเค็มที่มีต่อการเติบโตของต้นในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้น้ำหนักสดของต้นในข้าวพันธุ์ IR29 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คิดเป็น 35 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดยมีค่าน้ำหนักสดของต้นในภาวะปกติเท่ากับ  $1.478 \pm 0.207$  กรัม เมื่อได้รับภาวะเค็ม ข้าวพันธุ์นี้มีค่าน้ำหนักสดของต้นลดลงเหลือ  $0.963 \pm 0.338$  กรัม ทั้งยังพบว่าภาวะเค็มไม่มีผลต่อน้ำหนักสดของต้นในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali แต่มีแนวโน้มลดค่าดังกล่าว โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีค่าน้ำหนักสดของต้นในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $1.669 \pm 0.257$  กรัม และ  $0.969 \pm 0.240$  กรัม ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali มีค่าน้ำหนักสดของต้นในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $2.056 \pm 0.229$  กรัม และ  $1.677 \pm 0.108$  กรัม ตามลำดับ (รูปที่ 4.5C) สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อน้ำหนักแห้งของต้นนั้น พบว่าภาวะเค็มไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้งของต้นในข้าวทุกสายพันธุ์ โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีค่าน้ำหนักแห้งของต้นในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.243 \pm 0.052$  กรัม และ  $0.187 \pm 0.026$  กรัม ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali มีค่าน้ำหนักแห้งของ

ต้นในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.298 \pm 0.026$  กรัม และ  $0.270 \pm 0.015$  กรัม ตามลำดับ และข้าวพันธุ์ IR29 มีค่าน้ำหนักแห้งของต้นในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.227 \pm 0.025$  กรัม และ  $0.172 \pm 0.006$  กรัม ตามลำดับ (รูปที่ 4.5D) อย่างไรก็ตาม ภาวะเค็มมีแนวโน้มที่จะลดค่าน้ำหนักแห้งของรากในข้าวพันธุ์ IR29

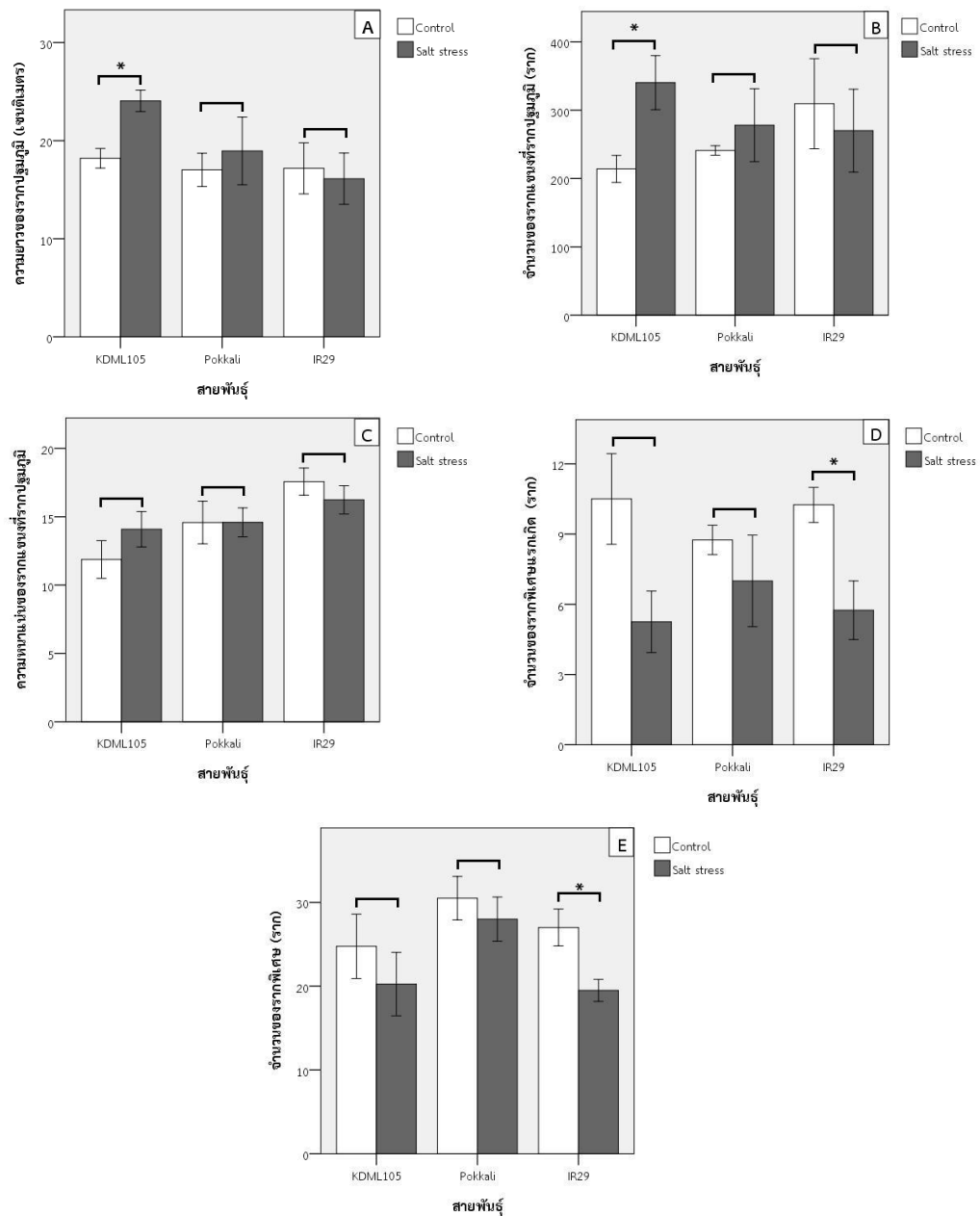


รูปที่ 4.5 การเติบโตของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน รูป A น้ำหนักสดของราก (กรัม) รูป B น้ำหนักแห้งของราก (กรัม) รูป C น้ำหนักสดของต้น (กรัม) และรูป D น้ำหนักแห้งของต้น (กรัม) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระบบรากนั้น พบว่าภาวะเค็มที่ระยะเวลา 14 วัน ส่งผลให้ข้าวมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระบบรากอย่างมีนัยสำคัญ โดยข้าวแต่ละพันธุ์มีการตอบสนองต่อภาวะเค็มต่างกัน ซึ่งจากการทดลองพบว่า ภาวะเค็มมีผลทำให้ความยาวของรากปฐมภูมิในข้าวพันธุ์ KDML105 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คิดเป็น 32 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดยมีค่าความยาวของรากปฐมภูมิในภาวะปกติเท่ากับ  $18.20 \pm 1.00$  เซนติเมตร และเพิ่มขึ้นเป็น  $24.05 \pm 1.09$  เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็ม ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มกลับไม่มีผลต่อความยาวของรากปฐมภูมิในข้าวพันธุ์ Pokkali และ IR29 โดยข้าวพันธุ์ Pokkali มีค่าความยาวของรากปฐมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $17.03 \pm 1.69$  เซนติเมตร และ  $18.95 \pm 3.45$  เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีค่าความยาวของรากปฐมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $17.18 \pm 2.60$  เซนติเมตร และ  $16.13 \pm 2.61$  เซนติเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.6A) สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อจำนวนของรากแขนงที่รากปฐมภูมินั้น พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้จำนวนของรากแขนงที่รากปฐมภูมิในข้าวพันธุ์ KDML105 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ คิดเป็น 59 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดยมีจำนวนของรากแขนงที่รากปฐมภูมิในภาวะปกติเท่ากับ  $214.00 \pm 19.78$  ราก และเพิ่มขึ้นเป็น  $340.25 \pm 39.45$  ราก เมื่อได้รับภาวะเค็ม ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มกลับไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงจำนวนของรากแขนงที่รากปฐมภูมิในข้าวพันธุ์ Pokkali และ IR29 โดยข้าวพันธุ์ Pokkali มีจำนวนของรากแขนงที่รากปฐมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $241.00 \pm 6.94$  ราก และ  $278.00 \pm 53.42$  ราก ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีจำนวนของรากแขนงที่รากปฐมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $309.50 \pm 65.98$  ราก และ  $270.00 \pm 60.66$  ราก ตามลำดับ (รูปที่ 4.6B) เมื่อคำนวณหาความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐมภูมิ พบว่าภาวะเค็มไม่มีผลต่อความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐมภูมิ โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีค่าความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $11.87 \pm 1.38$  และ  $14.09 \pm 1.29$  ตามลำดับ ข้าวพันธุ์ Pokkali มีค่าความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $14.58 \pm 1.56$  และ  $14.60 \pm 1.06$  ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีค่าความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $17.57 \pm 1.00$  และ  $16.24 \pm 1.04$  ตามลำดับ (รูปที่ 4.6C)

เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของรากพิเศษในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้จำนวนของรากพิเศษแรกเกิดในข้าวพันธุ์ IR29 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คิดเป็น 44 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดยมีจำนวนของรากพิเศษแรกเกิดในภาวะปกติเท่ากับ  $10.25 \pm 0.75$  ราก เมื่อได้รับภาวะเค็ม ข้าวพันธุ์ดังกล่าวมีจำนวนของรากพิเศษแรกเกิดลดลงเหลือ  $5.75 \pm 1.25$  ราก ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มไม่มีผลต่อจำนวนของรากพิเศษแรกเกิด

ในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali อย่างมีนัยสำคัญ แต่ภาวะดังกล่าวมีแนวโน้มลดจำนวนของรากพิเศษแรกเกิดเฉพาะในข้าวพันธุ์ KDML105 เท่านั้น โดยมีจำนวนของรากพิเศษแรกเกิดในภาวะปกติ และภาวะเค็มเท่ากับ  $10.50 \pm 1.94$  ราก และ  $5.25 \pm 1.32$  ราก ตามลำดับ ทั้งนี้ ข้าวพันธุ์ Pokkali มีจำนวนของรากพิเศษแรกเกิดเท่ากับ  $8.75 \pm 0.63$  ราก และ  $7.00 \pm 1.96$  ราก ตามลำดับ (รูปที่ 4.6D) สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อจำนวนของรากพิเศษนั้น พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้จำนวนของรากพิเศษในข้าวพันธุ์ IR29 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ คิดเป็น 28 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดยมีจำนวนของรากพิเศษในภาวะปกติเท่ากับ  $27.00 \pm 2.20$  ราก เมื่อได้รับภาวะเค็ม ข้าวพันธุ์ดังกล่าวมีจำนวนของรากพิเศษลดลงเหลือ  $19.50 \pm 1.32$  ราก ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงจำนวนของรากพิเศษในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีจำนวนของรากพิเศษในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $24.75 \pm 3.84$  ราก และ  $20.25 \pm 3.79$  ราก ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali มีจำนวนของรากพิเศษในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $30.50 \pm 2.60$  ราก และ  $28.00 \pm 2.65$  ราก ตามลำดับ (รูปที่ 4.6E)



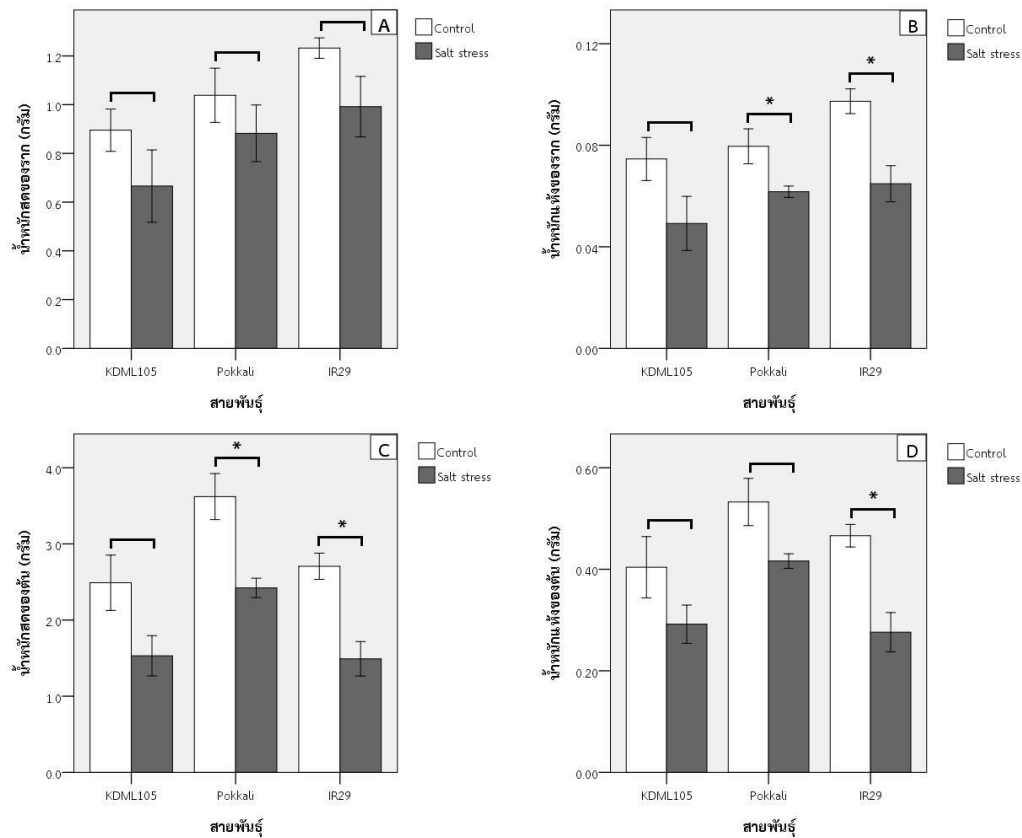
รูปที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน  
 รูป A ความยาวของรากปฐมภูมิ (เซนติเมตร) รูป B จำนวนของรากแขนงที่รากปฐมภูมิ (ราก) รูป C  
 ความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐมภูมิ รูป D จำนวนของรากพิเศษแรกเกิด (ราก) และรูป E  
 จำนวนของรากพิเศษ (ราก) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่าง  
 มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

4.1.4 การเติบโตและลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับ ภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน

การได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน พบว่าข้าวมีการตอบสนองต่อภาวะเค็มแตกต่างจากการ ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน เมื่อพิจารณาผลของภาวะเค็มที่มีต่อการเติบโตของรากในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่าภาวะเค็มไม่มีผลต่อน้ำหนักสดของราก โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีค่าน้ำหนักสดของราก ในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.896 \pm 0.087$  กรัม และ  $0.666 \pm 0.148$  กรัม ตามลำดับ ส่วนข้าว พันธุ์ Pokkali มีค่าน้ำหนักสดของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $1.038 \pm 0.111$  กรัม และ  $0.883 \pm 0.116$  กรัม ตามลำดับ และข้าวพันธุ์ IR29 มีค่าน้ำหนักสดของรากในภาวะปกติและภาวะเค็ม เท่ากับ  $1.232 \pm 0.042$  กรัม และ  $0.992 \pm 0.124$  กรัม ตามลำดับ (รูปที่ 4.7A) สำหรับผลของภาวะเค็ม ที่มีต่อน้ำหนักแห้งของรากนั้น พบว่าน้ำหนักแห้งของรากในข้าวพันธุ์ Pokkali และ IR29 ลดลงอย่างมี นัยสำคัญ คิดเป็น 23 เปอร์เซ็นต์ และ 33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดย ข้าวพันธุ์ Pokkali มีค่าน้ำหนักแห้งของรากในภาวะปกติเท่ากับ  $0.080 \pm 0.007$  กรัม ลดลงเหลือ  $0.062 \pm 0.002$  กรัม ในภาวะเค็ม ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีค่าน้ำหนักแห้งของรากในภาวะปกติเท่ากับ  $0.097 \pm 0.005$  กรัม ลดลงเหลือ  $0.065 \pm 0.007$  กรัม ภายใต้ภาวะเค็ม ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มไม่ มีผลต่อน้ำหนักแห้งของรากในข้าวพันธุ์ KDML105 แต่ภาวะดังกล่าวมีแนวโน้มลดค่าน้ำหนักแห้งของ รากลง โดยมีค่าน้ำหนักแห้งของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.075 \pm 0.009$  กรัม และ  $0.049 \pm 0.011$  กรัม ตามลำดับ (รูปที่ 4.7B)

เมื่อพิจารณาผลของภาวะเค็มที่มีต่อการเติบโตของต้นในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่าภาวะเค็มมีผล ทำให้น้ำหนักสดของต้นในข้าวพันธุ์ Pokkali และ IR29 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คิดเป็น 33 เปอร์เซ็นต์ และ 45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดยมีค่าน้ำหนักสดของต้น ในภาวะปกติเท่ากับ  $3.621 \pm 0.302$  กรัม และ  $2.706 \pm 0.172$  กรัม ตามลำดับ เมื่อได้รับภาวะเค็ม ข้าว ทั้งสองพันธุ์มีค่าน้ำหนักสดของต้นลดลงเหลือ  $2.423 \pm 0.127$  กรัม และ  $1.491 \pm 0.227$  กรัม ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มไม่มีผลต่อน้ำหนักสดของต้นในข้าวพันธุ์ KDML105 แต่พบ แนวโน้มการลดลงของน้ำหนักสดของต้น โดยมีค่าน้ำหนักสดของต้นในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $2.489 \pm 0.363$  กรัม และ  $1.530 \pm 0.264$  กรัม ตามลำดับ (รูปที่ 4.7C) สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อ น้ำหนักแห้งของต้นนั้น พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้น้ำหนักแห้งของต้นในข้าวพันธุ์ IR29 ลดลงอย่างมี นัยสำคัญ คิดเป็น 41 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดยมีค่าน้ำหนักแห้งของต้นในภาวะ ปกติเท่ากับ  $0.466 \pm 0.022$  กรัม เมื่อได้รับภาวะเค็ม ข้าวพันธุ์ดังกล่าวมีค่าน้ำหนักแห้งของต้นลดลง เหลือ  $0.276 \pm 0.039$  กรัม ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้งของต้นในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali แต่พบแนวโน้มการลดลงของน้ำหนักแห้งของต้น โดยข้าวพันธุ์ KDML105

มีค่าน้ำหนักแห้งของต้นในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.404 \pm 0.061$  กรัม และ  $0.292 \pm 0.038$  กรัม ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali มีค่าน้ำหนักแห้งของต้นในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.533 \pm 0.047$  กรัม และ  $0.416 \pm 0.014$  กรัม ตามลำดับ (รูปที่ 4.7D)



รูปที่ 4.7 การเติบโตของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน รูป A น้ำหนักสดของราก (กรัม) รูป B น้ำหนักแห้งของราก (กรัม) รูป C น้ำหนักสดของต้น (กรัม) และรูป D น้ำหนักแห้งของต้น (กรัม) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

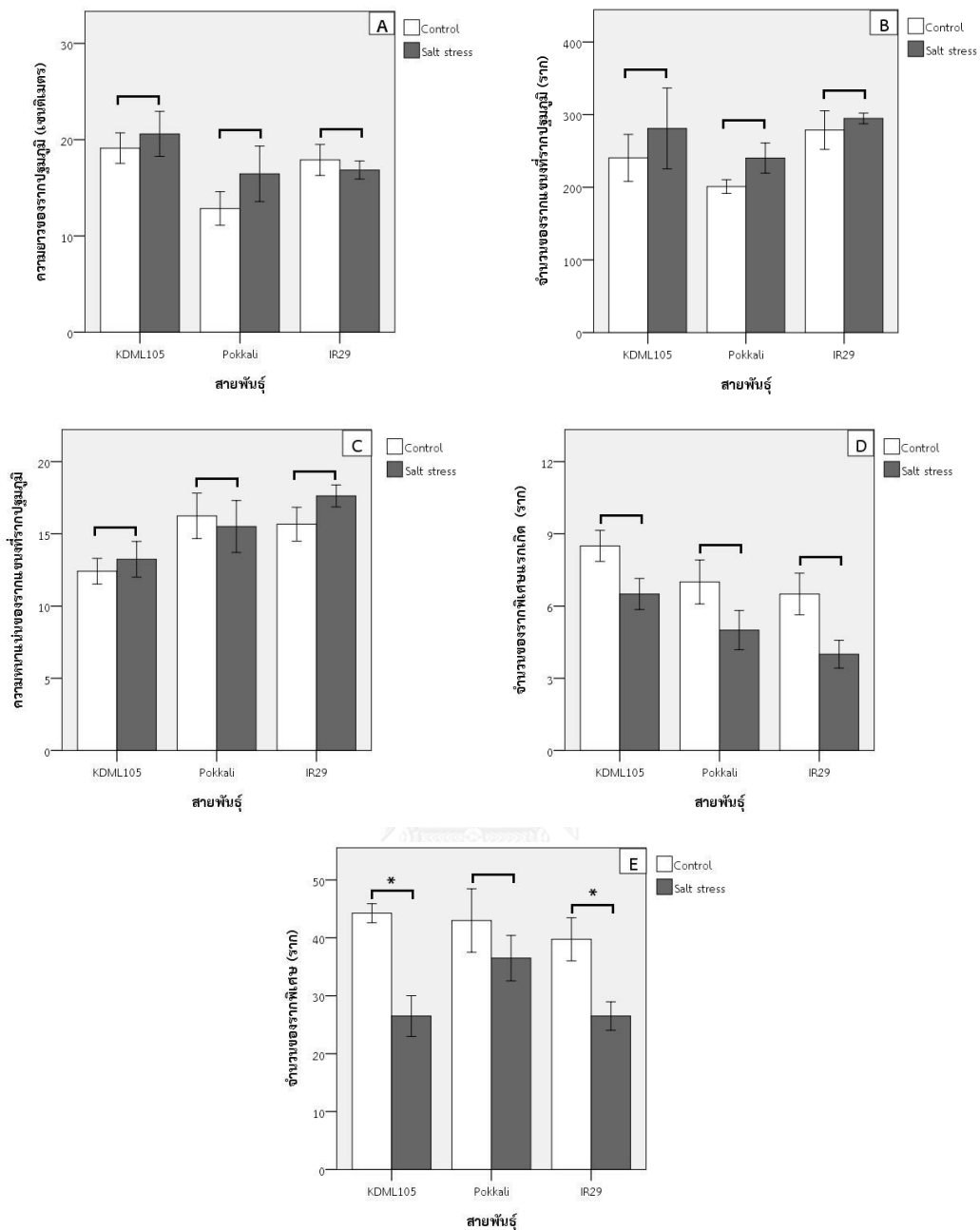
สำหรับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระบบรากนั้น พบว่าข้าวแต่ละพันธุ์มีการตอบสนองต่อภาวะเค็มแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระบบรากในลักษณะที่ต่างจากการได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน ทั้งนี้ ยังพบว่าภาวะเค็มไม่มีผลต่อความยาวของรากปฐมภูมิในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีค่าความยาวของรากปฐมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $19.13 \pm 1.58$  เซนติเมตร และ  $20.60 \pm 2.34$  เซนติเมตร ตามลำดับ ข้าวพันธุ์ Pokkali มีค่าความยาวของรากปฐมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $12.85 \pm 1.75$  เซนติเมตร และ  $16.45 \pm 2.88$  เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีค่าความยาวของรากปฐมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $17.90 \pm 1.61$  เซนติเมตร และ  $16.85 \pm 0.94$  เซนติเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.8A) สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อจำนวนของรากแขนงที่รากปฐมภูมินั้น พบว่าภาวะเค็มไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีจำนวนของรากแขนงที่รากปฐมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $240.50 \pm 32.33$  ราก และ  $281.00 \pm 55.57$  ราก ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali มีจำนวนของรากแขนงที่รากปฐมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $201.00 \pm 9.48$  ราก และ  $240.25 \pm 20.77$  ราก ตามลำดับ และข้าวพันธุ์ IR29 มีจำนวนของรากแขนงที่รากปฐมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $278.75 \pm 26.58$  ราก และ  $294.75 \pm 7.34$  ราก ตามลำดับ (รูปที่ 4.8B) เมื่อคำนวณหาความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐมภูมิ พบว่าภาวะเค็มไม่มีผลต่อความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐมภูมิ โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีค่าความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $12.41 \pm 0.89$  และ  $13.24 \pm 1.24$  ตามลำดับ ข้าวพันธุ์ Pokkali มีค่าความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $16.25 \pm 1.57$  และ  $15.51 \pm 1.80$  ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีค่าความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐมภูมิในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $15.67 \pm 1.17$  และ  $17.63 \pm 0.76$  ตามลำดับ (รูปที่ 4.8C)

เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของรากพิเศษในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่าภาวะเค็มไม่มีผลเปลี่ยนแปลงจำนวนของรากพิเศษแรกเกิด แต่ภาวะดังกล่าวมีแนวโน้มลดจำนวนของรากพิเศษแรกเกิดลง โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีจำนวนของรากพิเศษแรกเกิดในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $8.50 \pm 0.65$  ราก และ  $6.50 \pm 0.65$  ราก ตามลำดับ ข้าวพันธุ์ Pokkali มีจำนวนของรากพิเศษแรกเกิดในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $7.00 \pm 0.91$  ราก และ  $5.00 \pm 0.82$  ราก ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีจำนวนของรากพิเศษแรกเกิดในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $6.50 \pm 0.87$  ราก และ  $4.00 \pm 0.58$  ราก ตามลำดับ (รูปที่ 4.8D) สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อจำนวนของรากพิเศษนั้น พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้จำนวนของรากพิเศษในข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ คิดเป็น 40 เปอร์เซ็นต์ และ 33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดยมีจำนวนของรากพิเศษในภาวะปกติเท่ากับ  $44.25 \pm 1.65$  ราก และ  $39.75 \pm 3.71$  ราก



ตามลำดับ เมื่อได้รับภาวะเค็ม ข้าวทั้งสองพันธุ์ดังกล่าวมีจำนวนของรากพิเศษลดลงเหลือ  $26.50 \pm 3.52$  ราก และ  $26.50 \pm 2.47$  ราก ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มไม่มีผลเปลี่ยนแปลงจำนวนของรากพิเศษในข้าวพันธุ์ Pokkali โดยมีจำนวนของรากพิเศษในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $43.00 \pm 5.48$  ราก และ  $36.50 \pm 3.93$  ราก ตามลำดับ (รูปที่ 4.8E)





รูปที่ 4.8 ลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน  
 รูป A ความยาวของรากปฐุมภูมิ (เซนติเมตร) รูป B จำนวนของรากแขนงที่รากปฐุมภูมิ (ราก) รูป C  
 ความหนาแน่นของรากแขนงที่รากปฐุมภูมิ รูป D จำนวนรากพิเศษแรกเกิด (ราก) และรูป E จำนวน  
 รากพิเศษ (ราก) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ  
 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

## 4.2 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับภาวะเค็มในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ

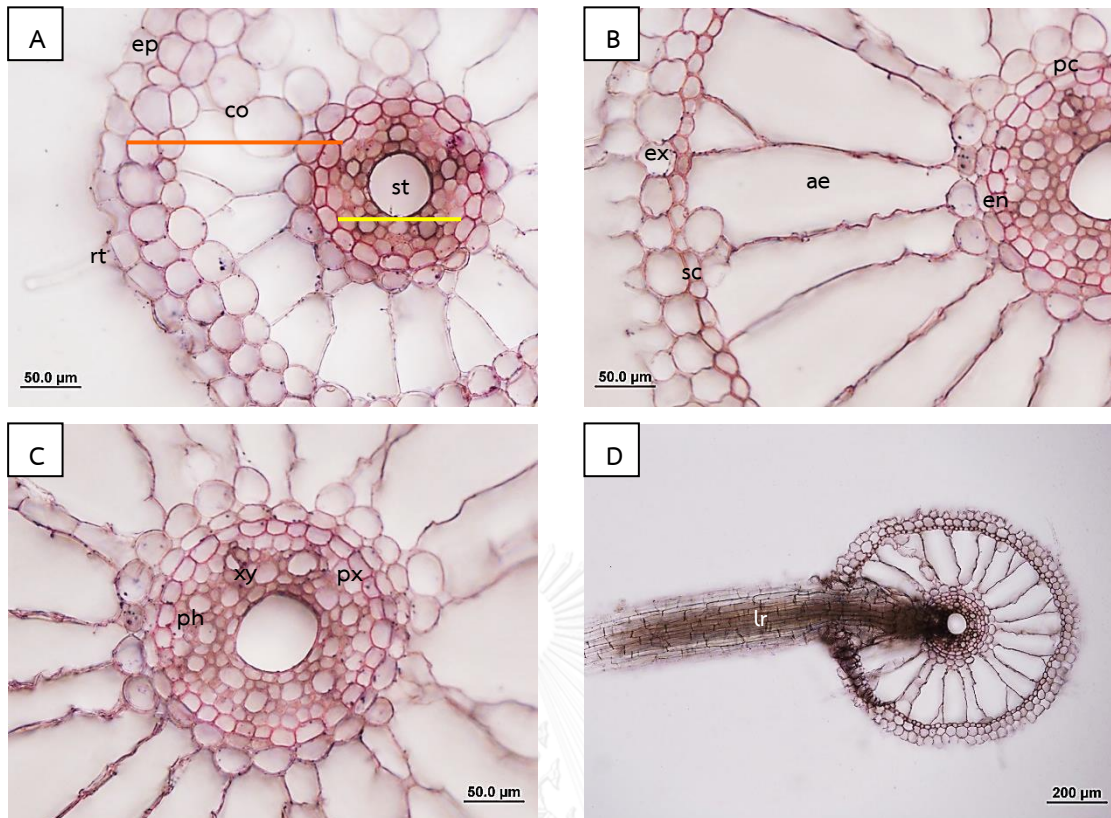
### 4.2.1 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากข้าวในภาวะปกติและภาวะเค็ม

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างของรากข้าวที่เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว โดยการตัดตัวอย่างรากพิเศษตามขวางนั้น พบว่ารากข้าวประกอบด้วยเนื้อเยื่อทั้งหมด 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นเอพิเดอร์มิส ชั้นคอร์เทกซ์ และชั้นสตีล โดยชั้นเอพิเดอร์มิสประกอบด้วยเซลล์ที่จัดเรียงตัวติดกันเพียงชั้นเดียวอยู่ด้านนอกสุดของราก เซลล์ดังกล่าวบางเซลล์สามารถพัฒนาไปเป็นขนรากได้ (รูปที่ 4.9A) ถัดเข้ามาจากชั้นเอพิเดอร์มิส เป็นส่วนของชั้นคอร์เทกซ์ โดยเซลล์ที่เรียงตัวติดกันเป็นแถวเพียงชั้นเดียวบริเวณด้านนอกสุดและด้านในสุดของชั้นดังกล่าว คือ เอกไซเดอร์มิสและเอนโดเดอร์มิส โดยผนังเซลล์ของเซลล์ในเอนโดเดอร์มิสมีการสะสมของสารซูเบอริน ทำให้สามารถติดสีแดงของสีย้อม Sudan red 7B ได้ (รูปที่ 4.9B) ทั้งยังพบว่าเซลล์บางเซลล์ในเอนโดเดอร์มิส ไม่มีการสะสมสารซูเบอรินที่ผนังเซลล์ โดยเซลล์ดังกล่าวเป็นเซลล์ที่มีผนังเซลล์บาง มักพบอยู่ในบริเวณแนวเดียวกันกับท่อลำเลียงน้ำทำหน้าที่ช่วยในการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุผ่านเข้าไปยังส่วนของเนื้อเยื่อท่อลำเลียงได้ เรียกว่า เซลล์แพสเสจ (รูปที่ 4.9B) เมื่อรากมีอายุมากขึ้น พบว่ามีการพัฒนาส่วนของสเกลอเรนจิมบริเวณด้านใต้เอกไซเดอร์มิส เพื่อช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับราก โดยโครงสร้างดังกล่าวประกอบด้วยเซลล์ที่ตายแล้ว คงเหลือไว้แค่เพียงส่วนของผนังเซลล์ที่มีความหนาแน่น เนื่องจากมีการสะสมของสารลิกนิน (รูปที่ 4.9B) เมื่อพิจารณาส่วนของชั้นคอร์เทกซ์ พบว่ารากมีการสลายเนื้อเยื่อพาเรงคิมกลายเป็นเนื้อเยื่อแอเรนจิมจำนวนมาก (รูปที่ 4.9B) ถัดเข้ามาจากชั้นคอร์เทกซ์ เป็นส่วนของชั้นสตีล ซึ่งเป็นชั้นเนื้อเยื่อด้านในสุด ประกอบด้วยเนื้อเยื่อเพริไซเคิลและเนื้อเยื่อลำเลียง ทั้งนี้ เพริไซเคิลเป็นส่วนด้านนอกสุดของชั้นสตีล ประกอบด้วยเซลล์ที่จัดเรียงตัวชั้นเดียวและสามารถเจริญไปเป็นรากแขนงได้ (รูปที่ 4.9C และ D) ในส่วนของมัดท่อลำเลียงประกอบด้วยเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำและเนื้อเยื่อลำเลียงอาหาร โดยเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำมีการจัดเรียงตัวเป็นแหวน ส่วนเนื้อเยื่อลำเลียงอาหารมีการแทรกตัวอยู่ระหว่างแหวนของเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำ (รูปที่ 4.9C) จากการศึกษาลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากที่ความยาวต่าง ๆ ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ไม่พบความแตกต่างของลักษณะดังกล่าวในรากข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน

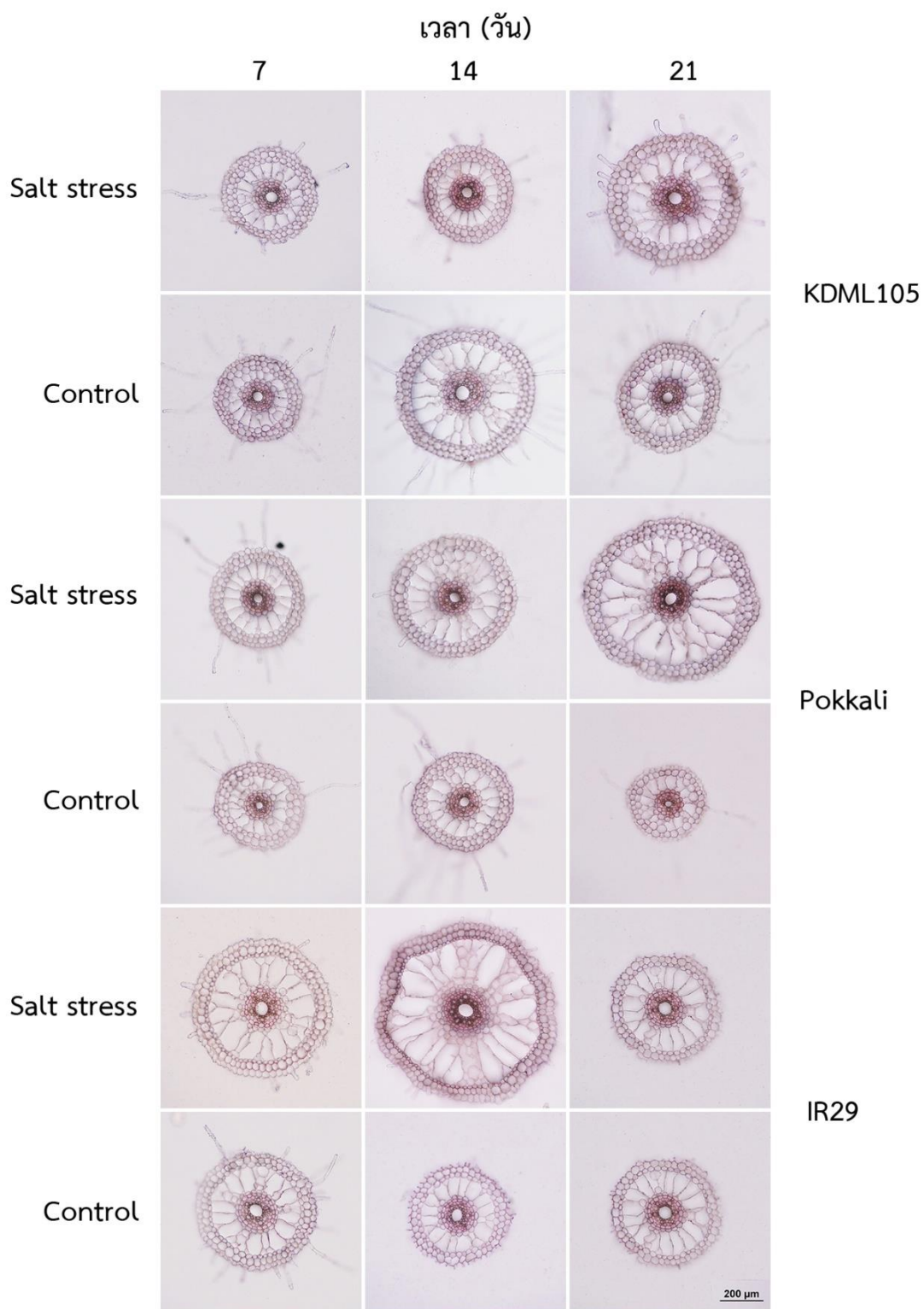
เมื่อเปรียบเทียบภาพตัดขวางของรากพิเศษที่ความยาวจากปลายราก 10 เซนติเมตร ในข้าวแต่ละพันธุ์ภายใต้ภาวะปกติและภาวะเค็มนั้น พบว่าขนาดของชั้นเนื้อเยื่อมีความแปรผันในแต่ละระยะเวลาที่ทำการทดลอง (รูปที่ 4.10) โดยขนาดของชั้นเนื้อเยื่อที่แตกต่างกันนี้บ่งบอกถึงอายุของรากที่แตกต่างกันด้วย ทั้งนี้ ชั้นเนื้อเยื่อที่มีขนาดเล็กจะมีอายุของรากน้อยกว่าชั้นเนื้อเยื่อที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งในภาวะปกติพบว่า ข้าวพันธุ์ Pokkali มีการเจริญเติบโตของรากด้านความยาวมากกว่า

ข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29 โดยมีขึ้นเนื้อเยื่อที่มีขนาดเล็กที่ระยะเวลา 7-21 วัน ส่วนข้าวพันธุ์ KDML105 มีขนาดของขึ้นเนื้อเยื่อที่ใหญ่ขึ้นที่ระยะเวลา 14 วัน แสดงถึงการเจริญเติบโตทางด้านข้างที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนที่ระยะเวลา 21 วัน พบว่าข้าวพันธุ์นี้มีขนาดของขึ้นเนื้อเยื่อใกล้เคียงกันกับที่ 7 วัน สำหรับข้าวพันธุ์ IR29 นั้น จะมีขนาดของขึ้นเนื้อเยื่อใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง ส่วนในภาวะเค็มพบว่า ขึ้นเนื้อเยื่อของรากในข้าวพันธุ์ Pokkali และ KDML105 มีขนาดเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลา 14 วัน และ 21 วัน แสดงถึงการชะลอการเจริญเติบโตของรากด้านความยาว ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 นั้น พบว่าขึ้นเนื้อเยื่อของรากมีขนาดใหญ่ขึ้น ตั้งแต่ที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน และ 14 วัน ซึ่งแตกต่างจากภาวะปกติอย่างเห็นได้ชัดเจน แสดงถึงการยับยั้งการเจริญเติบโตด้านความยาว และมีการเจริญเติบโตทางด้านข้างมากขึ้นภายใต้ภาวะเค็ม อย่างไรก็ตาม รากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน กลับมีขนาดของขึ้นเนื้อเยื่อใกล้เคียงกันกับภาวะปกติ ซึ่งแสดงถึงอายุของรากที่ใกล้เคียงกันด้วย





รูปที่ 4.9 ภาพตัดขวางของรากข้าวที่มีอายุ 28 วัน ที่ความยาวจากปลายราก 10 เซนติเมตร (รูป A) และ 20 เซนติเมตร (รูป B-D) ตัวอักษร ae คือ แอเรนคิมา (aerenchyma) co คือ ชั้นคอร์เทกซ์ (cortex) en คือ เอนโดเดอร์มิส (endodermis) ep คือ ชั้นเอพิเดอร์มิส (epidermis) ex คือ เอกโซเดอร์มิส (exodermis) lr คือ รากแขนง (lateral root) pc คือ เซลล์แพสเสจ (passage cell) ph คือ เนื้อเยื่อลำเลียงอาหาร (phloem) px คือ เพริไซเคิล (pericycle) rt คือ ขนราก (root hair) sc คือ สเกลอเรนคิมา (sclerenchyma) st คือ ชั้นสตีล (stele) และ xy คือ เนื้อเยื่อลำเลียงน้ำ (xylem)



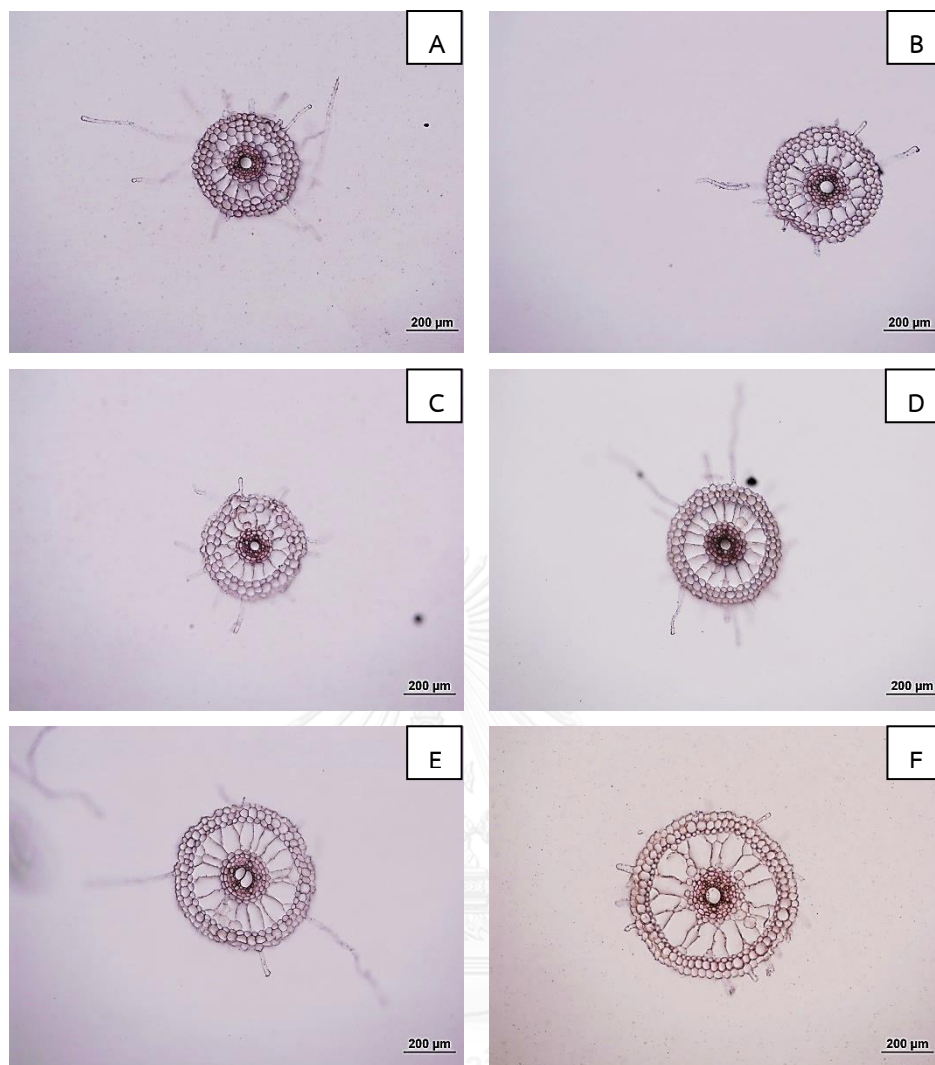
รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางของรากพิเศษที่ความยาวจากปลายราก 10 เซนติเมตร หลังจากที่ถูกแช่ทั้ง 3 พันธุ์ ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 14 และ 21 วัน

4.2.2 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน

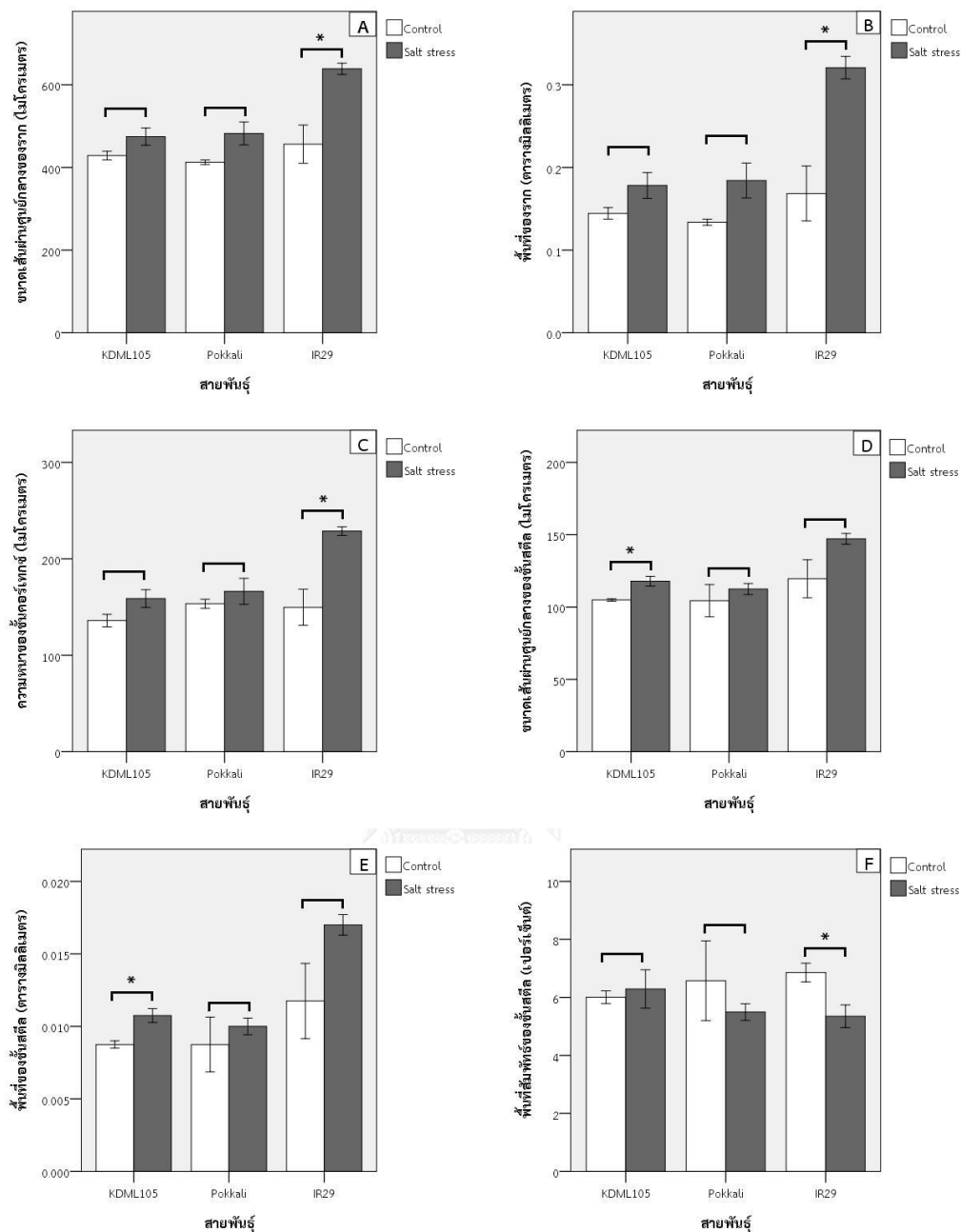
จากการศึกษาลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากที่ความยาวจากปลายราก 10 เซนติเมตร ซึ่งเป็นส่วนของรากที่มีการเจริญเติบโตในช่วงเวลา 7 วัน ที่ได้รับความเครียดจากความเค็ม พบว่าภาวะเค็มมีผลเปลี่ยนแปลงลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากที่แตกต่างกันในข้าวแต่ละพันธุ์ (รูปที่ 4.11) โดยพบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากในข้าวพันธุ์ IR29 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คิดเป็น 40 เปอร์เซ็นต์ และ 90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากในภาวะปกติเท่ากับ  $456.30 \pm 46.34$  ไมโครเมตร และ  $0.169 \pm 0.033$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อได้รับภาวะเค็ม ข้าวพันธุ์ดังกล่าวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากเพิ่มขึ้นเป็น  $638.63 \pm 13.61$  ไมโครเมตร และ  $0.321 \pm 0.014$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali พบแนวโน้มการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของราก โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $428.73 \pm 10.36$  ไมโครเมตร และ  $474.60 \pm 20.95$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ทั้งยังมีพื้นที่ของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.145 \pm 0.007$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.178 \pm 0.016$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $412.80 \pm 5.60$  ไมโครเมตร และ  $482.35 \pm 27.79$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ตลอดจนข้าวพันธุ์ดังกล่าวมีพื้นที่ของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.134 \pm 0.004$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.184 \pm 0.021$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.12A และ B) สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อความหนาของชั้นคอร์เทกซ์นั้น พบว่าความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในข้าวพันธุ์ IR29 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ คิดเป็น 53 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดยมีความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในภาวะปกติเท่ากับ  $149.73 \pm 18.70$  ไมโครเมตร และมีความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในภาวะเค็มเพิ่มขึ้นเป็น  $228.78 \pm 4.52$  ไมโครเมตร ส่วนในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali พบว่าภาวะเค็มมีแนวโน้มเพิ่มความหนาของชั้นคอร์เทกซ์เฉพาะในข้าวพันธุ์ KDML105 เท่านั้น โดยมีความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $135.95 \pm 6.44$  ไมโครเมตร และ  $158.80 \pm 9.16$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้ ข้าวพันธุ์ Pokkali นั้น มีความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากัน โดยมีความหนาเท่ากับ  $153.43 \pm 4.69$  ไมโครเมตร และ  $166.33 \pm 13.49$  ไมโครเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.12C)

เมื่อพิจารณาผลของภาวะเค็มที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ KDML105 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คิดเป็น 12 เปอร์เซ็นต์ และ 22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลในภาวะปกติเท่ากับ  $104.90 \pm 0.83$  ไมโครเมตร และ  $0.009 \pm 0.0003$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อได้รับภาวะเค็ม ข้าวพันธุ์ดังกล่าวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลเพิ่มขึ้นเป็น  $117.83 \pm 3.40$  ไมโครเมตร และ  $0.011 \pm 0.001$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนในข้าวพันธุ์ Pokkali และ IR29 พบว่าภาวะเค็มไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีล แต่ภาวะดังกล่าวกลับมีแนวโน้มเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลเฉพาะในข้าวพันธุ์ IR29 เท่านั้น โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $119.55 \pm 13.10$  ไมโครเมตร และ  $147.13 \pm 3.71$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ทั้งยังมีพื้นที่ของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.012 \pm 0.003$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.017 \pm 0.001$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลเท่ากันทั้งในภาวะปกติและภาวะเค็ม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $104.38 \pm 11.11$  ไมโครเมตร และ  $112.45 \pm 3.79$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ทั้งยังมีพื้นที่ของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.009 \pm 0.002$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.010 \pm 0.001$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.12D และ E) เมื่อคำนวณหาพื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีล พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้พื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ IR29 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีพื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีลในภาวะปกติเท่ากับ  $6.86 \pm 0.32$  เปอร์เซ็นต์ แต่ภาวะเค็มมีผลทำให้พื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีลลดลงเหลือ  $5.35 \pm 0.39$  เปอร์เซ็นต์ ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มกลับไม่มีผลต่อพื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีพื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $6.01 \pm 0.22$  เปอร์เซ็นต์ และ  $6.29 \pm 0.66$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali มีพื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $6.57 \pm 1.38$  เปอร์เซ็นต์ และ  $5.50 \pm 0.29$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รูปที่ 4.12F)





รูปที่ 4.11 ภาพตัดขวางของรากข้าวที่ความยาวจากปลายราก 10 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน รูป A C และ E แสดงรากข้าวในภาวะปกติ รูป B D และ F แสดงรากข้าวในภาวะเค็มของข้าวพันธุ์ KDML105 (A และ B) พันธุ์ Pokkali (C และ D) และพันธุ์ IR29 (E และ F)

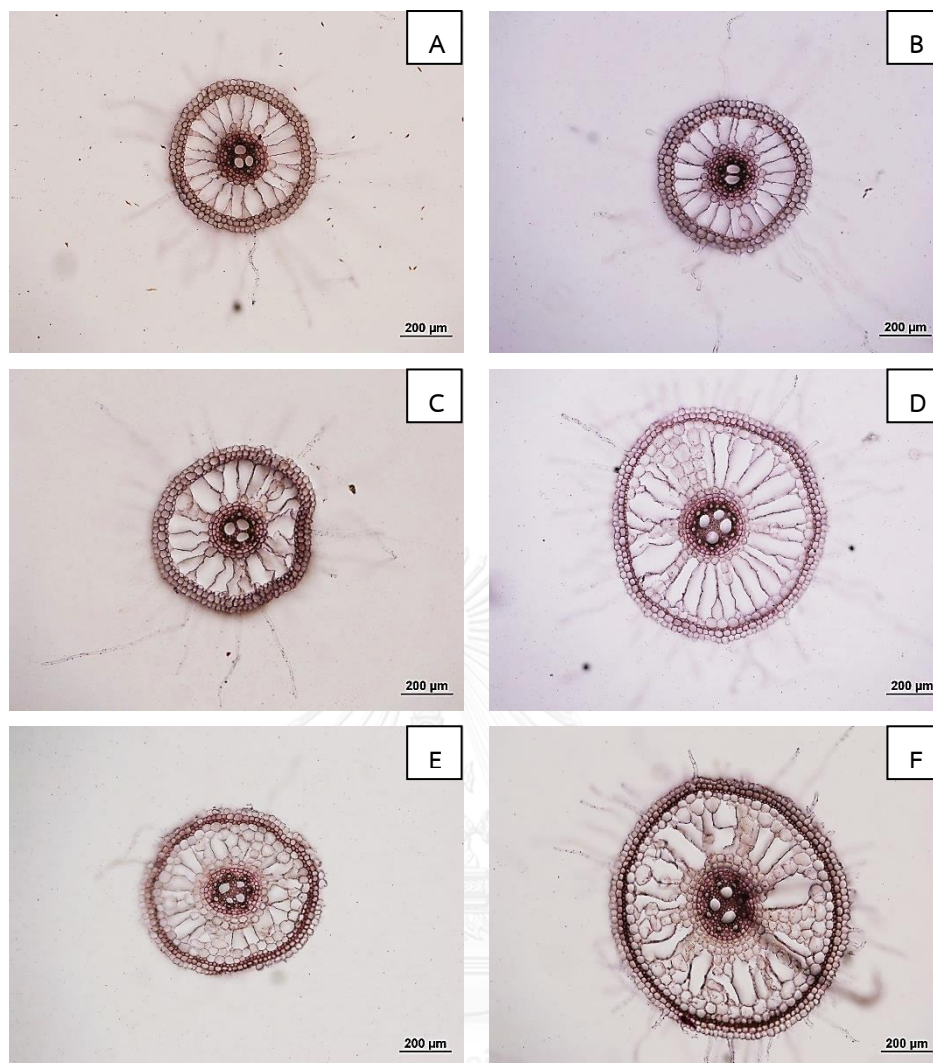


รูปที่ 4.12 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกันที่ความยาว 10 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน รูป A ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (ไมโครเมตร) รูป B พื้นที่ของราก (ตารางมิลลิเมตร) รูป C ความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ (ไมโครเมตร) รูป D ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีล (ไมโครเมตร) รูป E พื้นที่ของชั้นสตีล (ตารางมิลลิเมตร) และรูป F พื้นที่สัมผัสของชั้นสตีล (เปอร์เซ็นต์) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

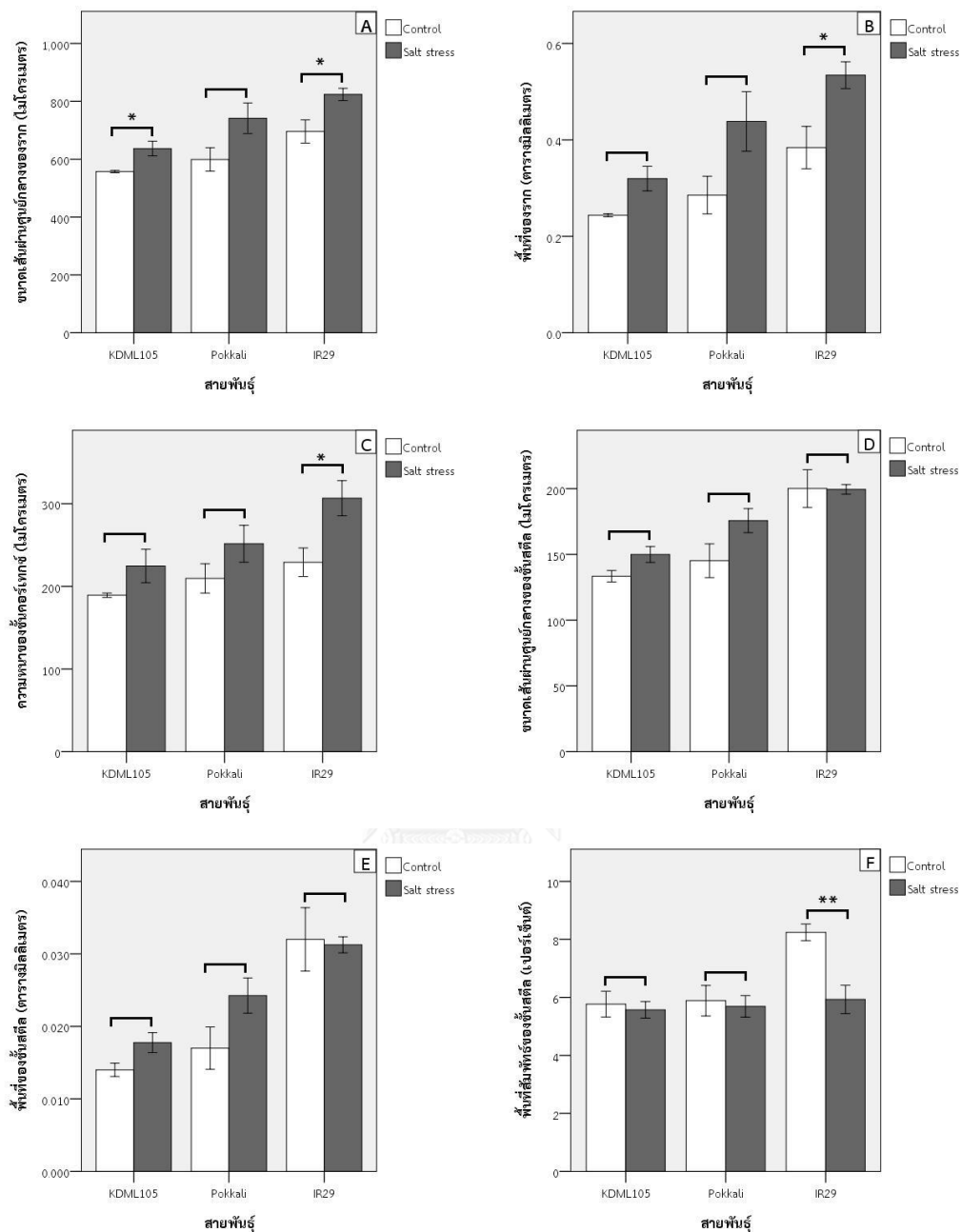
ในการศึกษาผลของภาวะเค็มที่มีต่อลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากข้าวที่ความยาวจากปลายราก 20 เซนติเมตร ซึ่งเป็นบริเวณของรากที่มีการเจริญเติบโตมาเป็นเวลานานก่อนการได้รับภาวะเค็ม และมีอายุที่มากกว่าบริเวณของรากที่ความยาวจากปลายราก 10 เซนติเมตร ซึ่งข้าวแต่ละพันธุ์มีการตอบสนองต่อภาวะเค็มต่างกันและขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ได้รับภาวะเค็ม (รูปที่ 4.13) โดยพบว่าภาวะเค็มที่ระยะเวลา 7 วัน มีผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากในข้าวพันธุ์ IR29 มีค่ามากกว่าในภาวะปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คิดเป็น 18 เปอร์เซ็นต์ และ 39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากในภาวะปกติเท่ากับ  $695.75 \pm 40.17$  ไมโครเมตร และ  $0.384 \pm 0.044$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ และเพิ่มขึ้นเป็น  $823.73 \pm 21.42$  ไมโครเมตร และ  $0.534 \pm 0.028$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ภายใต้ภาวะเค็ม ส่วนในข้าวพันธุ์ KDML105 พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากเพิ่มขึ้น 14 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากในภาวะปกติเท่ากับ  $557.00 \pm 3.81$  ไมโครเมตร แต่ภาวะเค็มมีผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากเพิ่มขึ้นเป็น  $636.70 \pm 25.19$  ไมโครเมตร ส่วนผลที่มีต่อพื้นที่ของรากในข้าวพันธุ์ KDML105 นั้น พบเพียงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นแต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีพื้นที่ของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.244 \pm 0.003$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.320 \pm 0.026$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ ภาวะเค็มไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากในข้าวพันธุ์ Pokkali โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $599.05 \pm 40.69$  ไมโครเมตร และ  $741.40 \pm 52.95$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ทั้งยังมีพื้นที่ของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.286 \pm 0.039$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.438 \pm 0.062$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.14A และ B) สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อความหนาของชั้นคอร์เทกซ์นั้น พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเหมือนกันกับผลของภาวะเค็มที่มีต่อพื้นที่ของราก โดยภาวะเค็มมีผลทำให้ความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในข้าวพันธุ์ IR 29 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ คิดเป็น 34 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดยมีความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในภาวะปกติเท่ากับ  $229.15 \pm 17.26$  ไมโครเมตร และในภาวะเค็มเท่ากับ  $306.70 \pm 21.24$  ไมโครเมตร ส่วนในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali พบว่าภาวะเค็มมีแนวโน้มเพิ่มความหนาของชั้นคอร์เทกซ์แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $189.25 \pm 2.66$  ไมโครเมตร และ  $224.68 \pm 20.15$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali มีความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากัน โดยมีขนาดเท่ากับ  $209.68 \pm 17.68$  ไมโครเมตร และ  $251.50 \pm 22.29$  ไมโครเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.14C)

เมื่อพิจารณาผลของภาวะเค็มที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลที่ความยาวรากระยะ 20 เซนติเมตร ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญภายใต้ภาวะเค็มในข้าวทุกสายพันธุ์ที่ทำการทดลอง แต่ภาวะดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $133.43 \pm 4.36$  ไมโครเมตร และ  $150.00 \pm 6.08$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ทั้งยังมีพื้นที่ของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.014 \pm 0.001$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.018 \pm 0.001$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $145.23 \pm 12.84$  ไมโครเมตร และ  $175.70 \pm 9.16$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ตลอดจนข้าวพันธุ์ดังกล่าวยังมีพื้นที่ของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.017 \pm 0.003$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.024 \pm 0.002$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 นั้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $200.10 \pm 14.38$  ไมโครเมตร และ  $199.48 \pm 3.67$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ทั้งยังมีพื้นที่ของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.032 \pm 0.004$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.031 \pm 0.001$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.14D และ E) จากการเปรียบเทียบค่าพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีล พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้พื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ IR29 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $-39$  เปอร์เซ็นต์) โดยมีพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลในภาวะปกติเท่ากับ  $8.24 \pm 0.29$  เปอร์เซ็นต์ และในภาวะเค็มเท่ากับ  $5.93 \pm 0.49$  เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม ภาวะเค็มไม่มีผลเปลี่ยนแปลงพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali อย่างมีนัยสำคัญ โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $5.77 \pm 0.45$  เปอร์เซ็นต์ และ  $5.57 \pm 0.28$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali มีพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $5.89 \pm 0.53$  เปอร์เซ็นต์ และ  $5.69 \pm 0.37$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รูปที่ 4.14F)

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างรากที่ระยะ 20 เซนติเมตร กับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นที่ระยะ 10 เซนติเมตร พบว่าการได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรากทั้ง 2 ระยะความยาวเหมือนกันในข้าวพันธุ์ IR29 แต่แตกต่างกันในข้าวพันธุ์ KDML105 ซึ่งพบผลของภาวะเค็มเฉพาะที่ความยาว 10 เซนติเมตร ส่วนในข้าวพันธุ์ Pokkali พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังกล่าว ทั้ง 2 ระยะความยาวจากปลายรากที่ทำการศึกษา (รูปที่ 4.13 และ 4.14)



รูปที่ 4.13 ภาพตัดขวางของรากข้าวที่ความยาวจากปลายราก 20 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน รูป A C และ E แสดงรากข้าวในภาวะปกติ รูป B D และ F แสดงรากข้าวในภาวะเค็มของข้าวพันธุ์ KDML105 (A และ B) พันธุ์ Pokkali (C และ D) และพันธุ์ IR29 (E และ F)



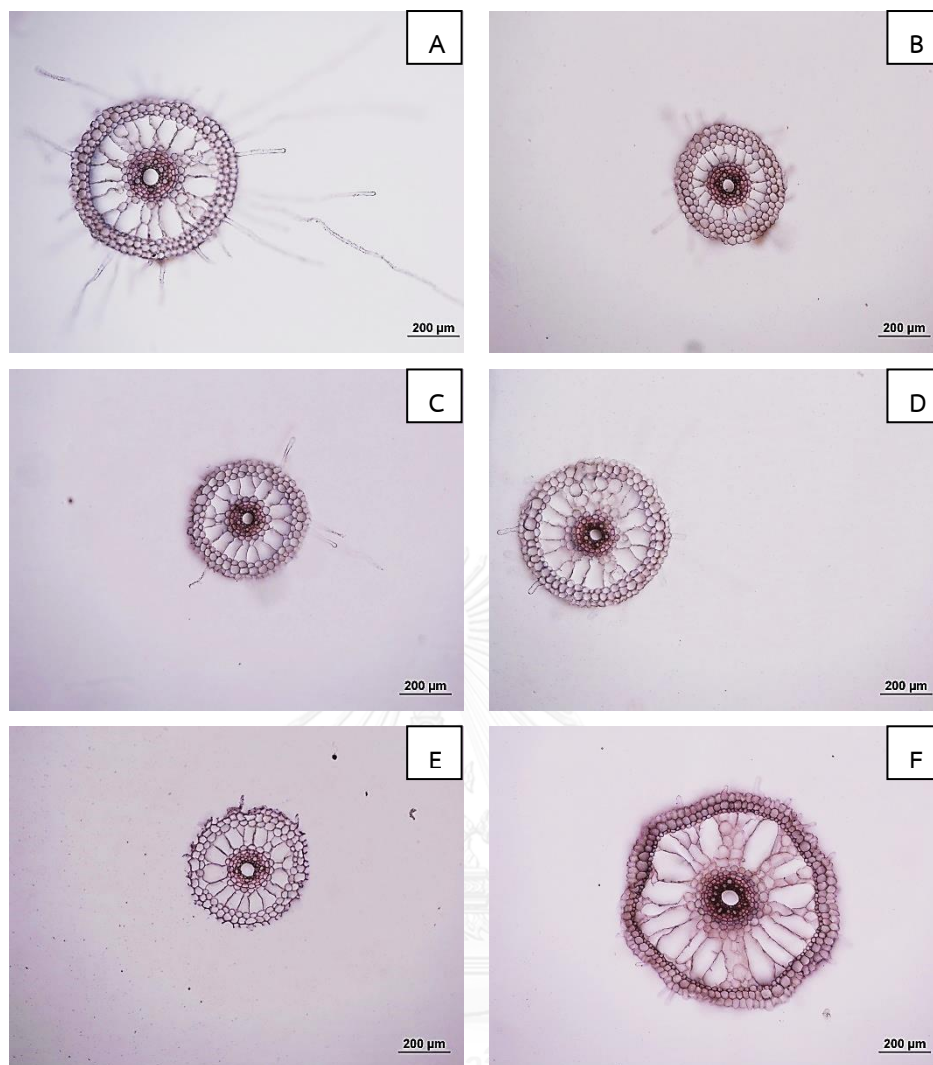
รูปที่ 4.14 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกันที่ความยาว 20 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน รูป A ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (ไมโครเมตร) รูป B พื้นที่ของราก (ตารางมิลลิเมตร) รูป C ความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ (ไมโครเมตร) รูป D ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีล (ไมโครเมตร) รูป E พื้นที่ของชั้นสตีล (ตารางมิลลิเมตร) และรูป F พื้นที่สัมผัสของชั้นสตีล (เปอร์เซ็นต์) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) และ 99% (\*\*) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Student's t-test

4.2.3 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน

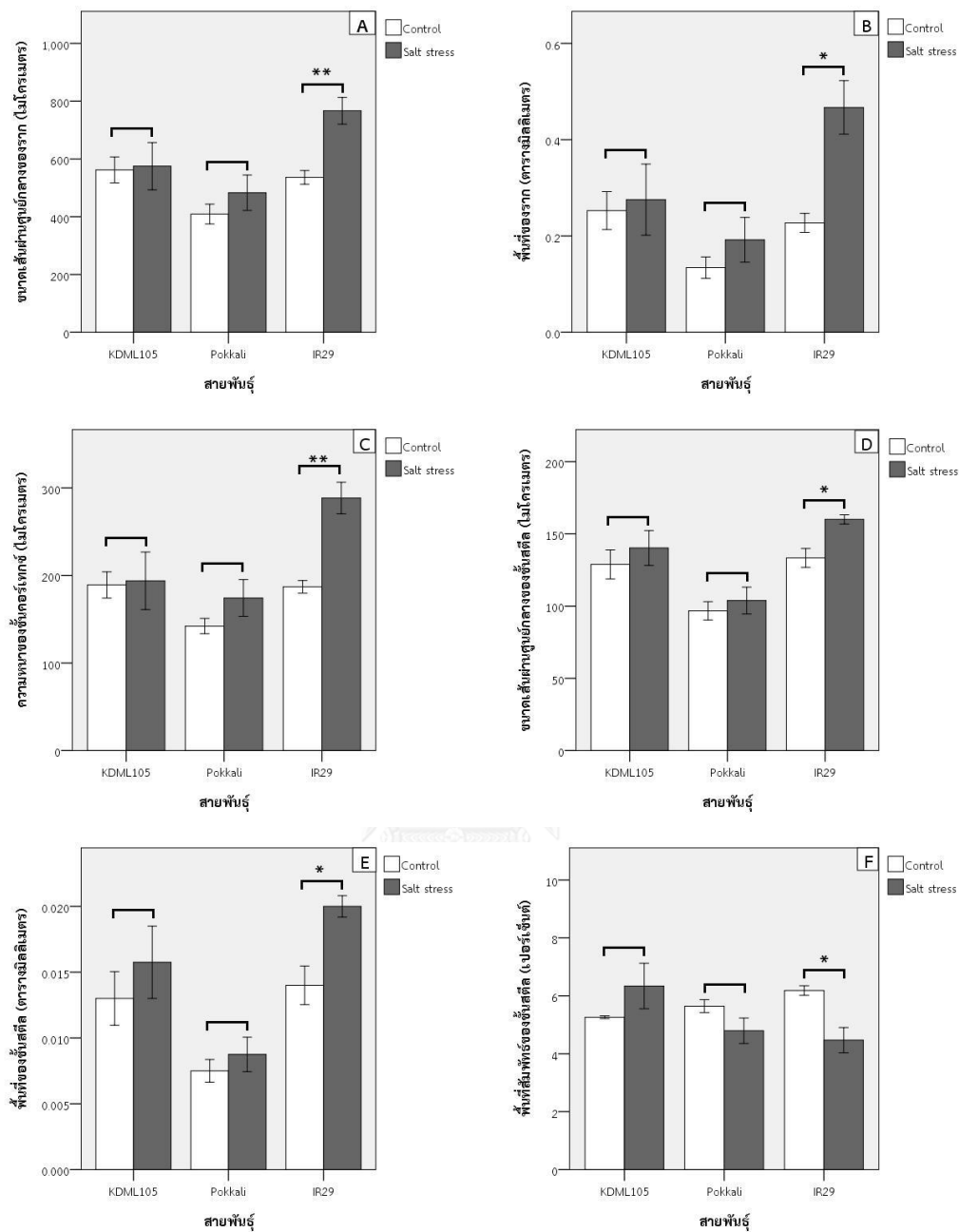
การให้ข้าวได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน มีผลต่อลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากที่ความยาว 10 เซนติเมตร แตกต่างกันในข้าวแต่ละพันธุ์ อีกทั้งยังพบว่ารากข้าวมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ต่างจากการได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน (รูปที่ 4.15 และ 4.16) เมื่อพิจารณาผลของภาวะเค็มที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของราก พบว่าข้าวพันธุ์ IR29 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากในภาวะปกติเท่ากับ  $536.23 \pm 23.79$  ไมโครเมตร และ  $0.227 \pm 0.020$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อได้รับภาวะเค็ม ข้าวพันธุ์ดังกล่าวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากเพิ่มขึ้นเป็น  $766.73 \pm 46.34$  ไมโครเมตร (+43 เปอร์เซ็นต์) และ  $0.467 \pm 0.056$  ตารางมิลลิเมตร (+206 เปอร์เซ็นต์) ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ภาวะเค็มไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $562.08 \pm 44.81$  ไมโครเมตร และ  $574.98 \pm 81.90$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ทั้งยังมีพื้นที่ของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.253 \pm 0.039$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.276 \pm 0.074$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $409.33 \pm 34.35$  ไมโครเมตร และ  $483.00 \pm 61.22$  ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยมีพื้นที่ของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.134 \pm 0.022$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.192 \pm 0.047$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.16A และ B) สำหรับความหนาของชั้นคอร์เทกซ์นั้น พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้ความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในข้าวพันธุ์ IR29 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ คิดเป็น 54 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดยมีความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในภาวะปกติ  $187.00 \pm 7.22$  ไมโครเมตร และในภาวะเค็ม  $288.48 \pm 18.06$  ไมโครเมตร ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มกลับไม่มีผลต่อความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $189.15 \pm 15.01$  ไมโครเมตร และ  $193.90 \pm 32.92$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali มีความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $142.20 \pm 8.78$  ไมโครเมตร และ  $174.30 \pm 20.98$  ไมโครเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.16C)

สำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีล พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้รากของข้าวพันธุ์ IR29 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลมากกว่าในภาวะปกติ โดยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คิดเป็น 20 เปอร์เซ็นต์ และ 43 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลในภาวะปกติเท่ากับ  $133.35 \pm 6.51$  ไมโครเมตร และ  $0.014 \pm 0.002$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นเป็น  $160.05 \pm 3.21$  ไมโครเมตร และ  $0.020 \pm 0.001$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ภายใต้ภาวะเค็ม ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มกลับไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $128.83 \pm 10.06$  ไมโครเมตร และ  $140.25 \pm 12.09$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ทั้งยังมีพื้นที่ของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.013 \pm 0.002$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.016 \pm 0.003$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $96.75 \pm 6.36$  ไมโครเมตร และ  $103.85 \pm 9.31$  ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยมีพื้นที่ของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.008 \pm 0.001$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.009 \pm 0.001$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.16D และ E) สำหรับพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีล พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้พื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ IR29 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน โดยมีพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลในภาวะปกติเท่ากับ  $6.18 \pm 0.17$  เปอร์เซ็นต์ และเมื่อได้รับภาวะเค็มลดลงเหลือ  $4.47 \pm 0.44$  เปอร์เซ็นต์ ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มไม่มีผลเปลี่ยนแปลงพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali อย่างมีนัยสำคัญ โดยพบเพียงแนวโน้มการเพิ่มพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลเฉพาะในข้าวพันธุ์ KDML105 เท่านั้น โดยมีพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $5.26 \pm 0.05$  เปอร์เซ็นต์ และ  $6.34 \pm 0.79$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับข้าวพันธุ์ Pokkali พบว่าภาวะเค็มมีแนวโน้มที่ทำให้พื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลลดลง โดยมีพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $5.65 \pm 0.22$  เปอร์เซ็นต์ และ  $4.80 \pm 0.44$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รูปที่ 4.16F)





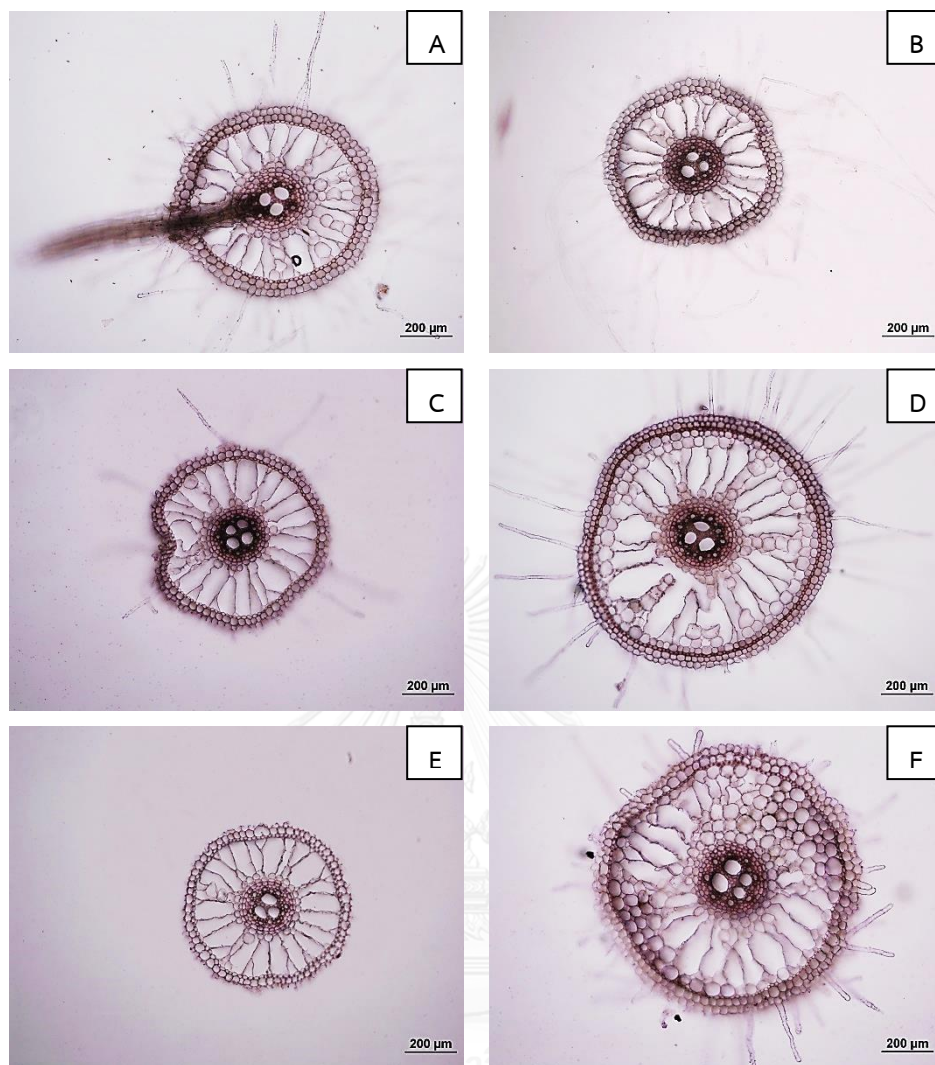
รูปที่ 4.15 ภาพตัดขวางของรากข้าวที่ความยาวจากปลายราก 10 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน รูป A C และ E แสดงรากข้าวในภาวะปกติ รูป B D และ F แสดงรากข้าวในภาวะเค็มของข้าวพันธุ์ KDML105 (A และ B) พันธุ์ Pokkali (C และ D) และพันธุ์ IR29 (E และ F)



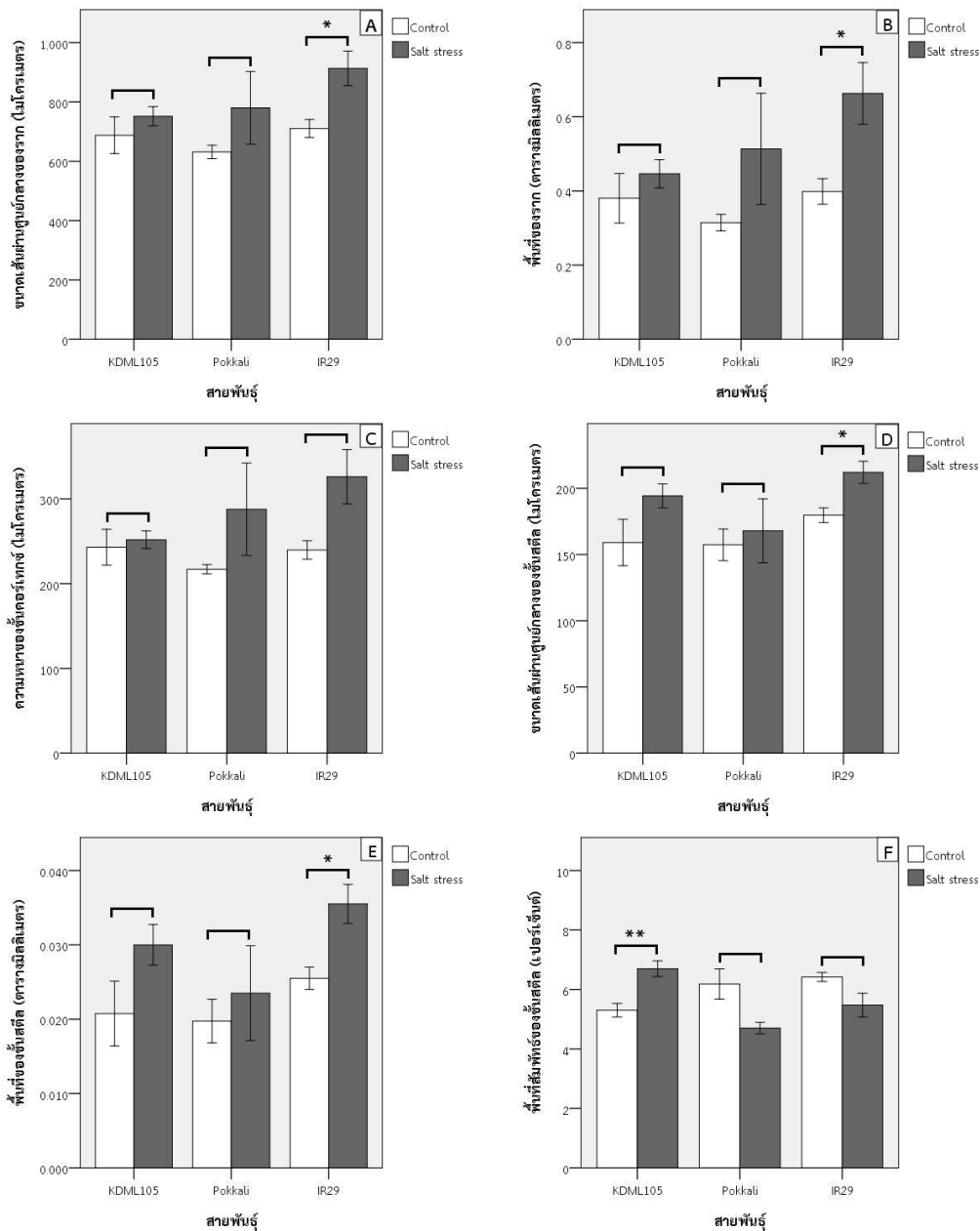
รูปที่ 4.16 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกันที่ความยาว 10 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน รูป A ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (ไมโครเมตร) รูป B พื้นที่ของราก (ตารางมิลลิเมตร) รูป C ความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ (ไมโครเมตร) รูป D ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีล (ไมโครเมตร) รูป E พื้นที่ของชั้นสตีล (ตารางมิลลิเมตร) และรูป F พื้นที่สัมผัสของชั้นสตีล (เปอร์เซ็นต์) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) และ 99% (\*\*) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Student's t-test

สำหรับผลของการได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน ที่มีต่อลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากข้าวที่ความยาว 20 เซนติเมตร พบว่าระยะเวลาการเผชิญกับภาวะเค็มที่นานขึ้น มีผลต่อโครงสร้างกายวิภาคศาสตร์ของรากข้าวในแต่ละพันธุ์คล้ายกับที่ระยะ 10 เซนติเมตร ยกเว้นเพียงบางลักษณะเท่านั้น (รูปที่ 4.17 และ 4.18) โดยในข้าวพันธุ์ IR29 พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากเพิ่มขึ้นจากภาวะปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คิดเป็น 29 เปอร์เซ็นต์ และ 66 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากในภาวะปกติเท่ากับ  $710.45 \pm 30.36$  ไมโครเมตร และ  $0.399 \pm 0.034$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ และเมื่อได้รับภาวะเค็มมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $913.10 \pm 58.45$  ไมโครเมตร และ  $0.663 \pm 0.083$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali อย่างไรก็ตาม ภาวะดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มพื้นที่ของรากเฉพาะในข้าวพันธุ์ Pokkali เท่านั้น โดยมีพื้นที่ของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.315 \pm 0.022$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.514 \pm 0.150$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ในส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากข้าวพันธุ์ Pokkali นั้น มีค่าในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $631.60 \pm 22.81$  ไมโครเมตร และ  $780.20 \pm 122.46$  ไมโครเมตร ตามลำดับ สำหรับข้าวพันธุ์ KDML105 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $687.58 \pm 61.79$  ไมโครเมตร และ  $751.60 \pm 32.34$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ทั้งยังมีพื้นที่ของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.380 \pm 0.067$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.446 \pm 0.038$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.18A และ B) สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อความหนาของชั้นคอร์เทกซ์นั้น พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากภาวะปกติอย่างมีนัยสำคัญในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ อย่างไรก็ตาม ภาวะดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในข้าวพันธุ์ Pokkali และ IR29 โดยข้าวพันธุ์ Pokkali มีความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $217.03 \pm 5.41$  ไมโครเมตร และ  $287.78 \pm 54.53$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $239.70 \pm 10.83$  ไมโครเมตร และ  $326.18 \pm 32.08$  ไมโครเมตร ตามลำดับ สำหรับข้าวพันธุ์ KDML105 พบว่ามีความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $243.03 \pm 21.15$  ไมโครเมตร และ  $251.83 \pm 10.39$  ไมโครเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.18C)

เมื่อพิจารณาผลของภาวะเค็มที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ IR29 เพิ่มขึ้นจากภาวะปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คิดเป็น 18 เปอร์เซ็นต์ และ 39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลในภาวะปกติเท่ากับ  $179.70 \pm 5.57$  ไมโครเมตร และ  $0.026 \pm 0.002$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ และในภาวะเค็มเพิ่มขึ้นเป็น  $212.05 \pm 8.39$  ไมโครเมตร และ  $0.036 \pm 0.003$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งผลที่มีต่อความยาวรากที่ 20 เซนติเมตรนี้สอดคล้องกับที่ความยาว 10 เซนติเมตร ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มไม่มีผลต่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali แต่พบแนวโน้มเพิ่มขึ้นเฉพาะในข้าวพันธุ์ KDML105 โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $159.05 \pm 17.52$  ไมโครเมตร และ  $194.35 \pm 8.99$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ทั้งยังมีพื้นที่ของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.021 \pm 0.004$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.030 \pm 0.003$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $157.33 \pm 11.97$  ไมโครเมตร และ  $167.88 \pm 24.09$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ตลอดจนมีพื้นที่ของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.020 \pm 0.003$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.024 \pm 0.006$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.18D และ E) จากการเปรียบเทียบค่าพื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีล พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้พื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ KDML105 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีพื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีลในภาวะปกติเท่ากับ  $5.30 \pm 0.23$  เปอร์เซ็นต์ เพิ่มขึ้นเป็น  $6.70 \pm 0.26$  เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้รับภาวะเค็ม ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มไม่มีผลต่อพื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ Pokkali และ IR29 อย่างมีนัยสำคัญ แต่ภาวะดังกล่าวกลับมีแนวโน้มทำให้พื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีลลดลงในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยข้าวพันธุ์ Pokkali มีพื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $6.19 \pm 0.51$  เปอร์เซ็นต์ และ  $4.70 \pm 0.19$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีพื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $6.42 \pm 0.15$  เปอร์เซ็นต์ และ  $5.48 \pm 0.40$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รูปที่ 4.18F)



รูปที่ 4.17 ภาพตัดขวางของรากข้าวที่ความยาวจากปลายราก 20 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน รูป A C และ E แสดงรากข้าวในภาวะปกติ รูป B D และ F แสดงรากข้าวในภาวะเค็มของข้าวพันธุ์ KDML105 (A และ B) พันธุ์ Pokkali (C และ D) และพันธุ์ IR29 (E และ F)



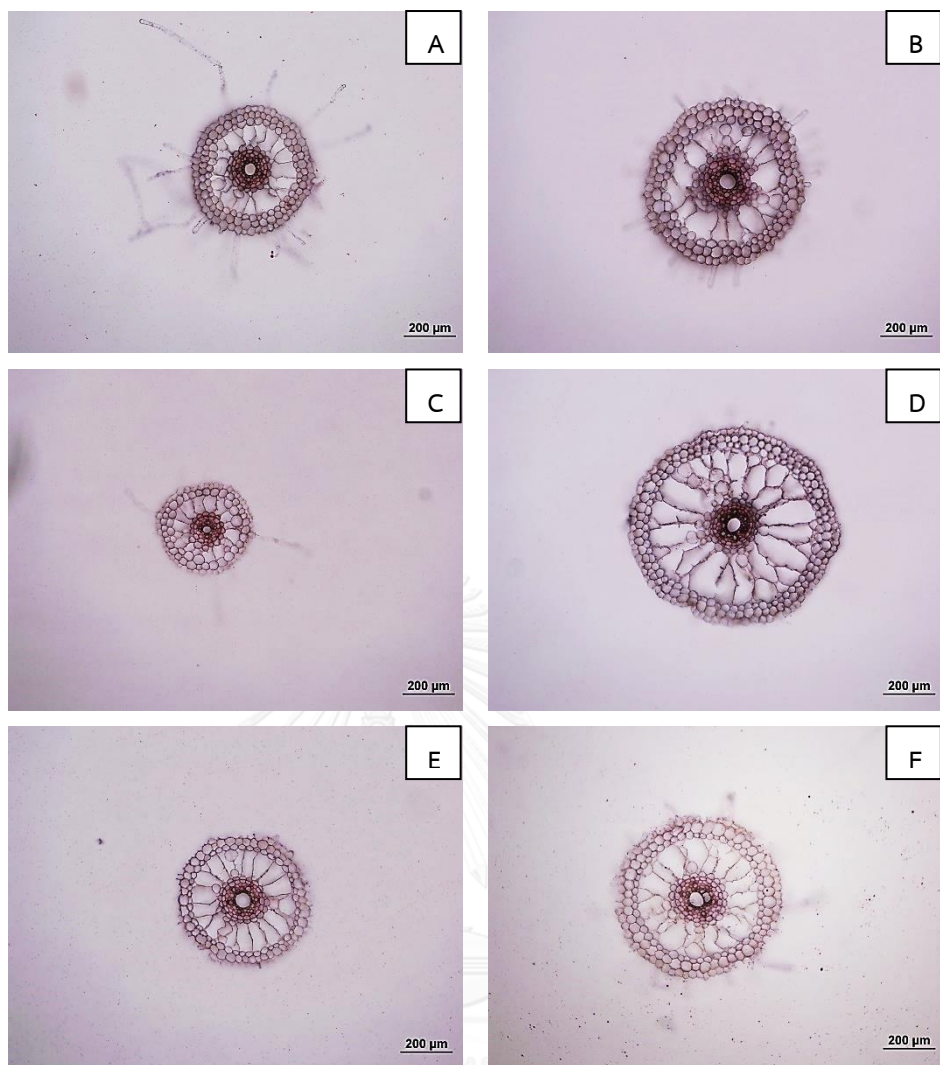
รูปที่ 4.18 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกันที่ความยาว 20 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน รูป A ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (ไมโครเมตร) รูป B พื้นที่ของราก (ตารางมิลลิเมตร) รูป C ความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ (ไมโครเมตร) รูป D ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีล (ไมโครเมตร) รูป E พื้นที่ของชั้นสตีล (ตารางมิลลิเมตร) และรูป F พื้นที่สัมผัสของชั้นสตีล (เปอร์เซ็นต์) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) และ 99% (\*\*) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Student's t-test

4.2.4 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน

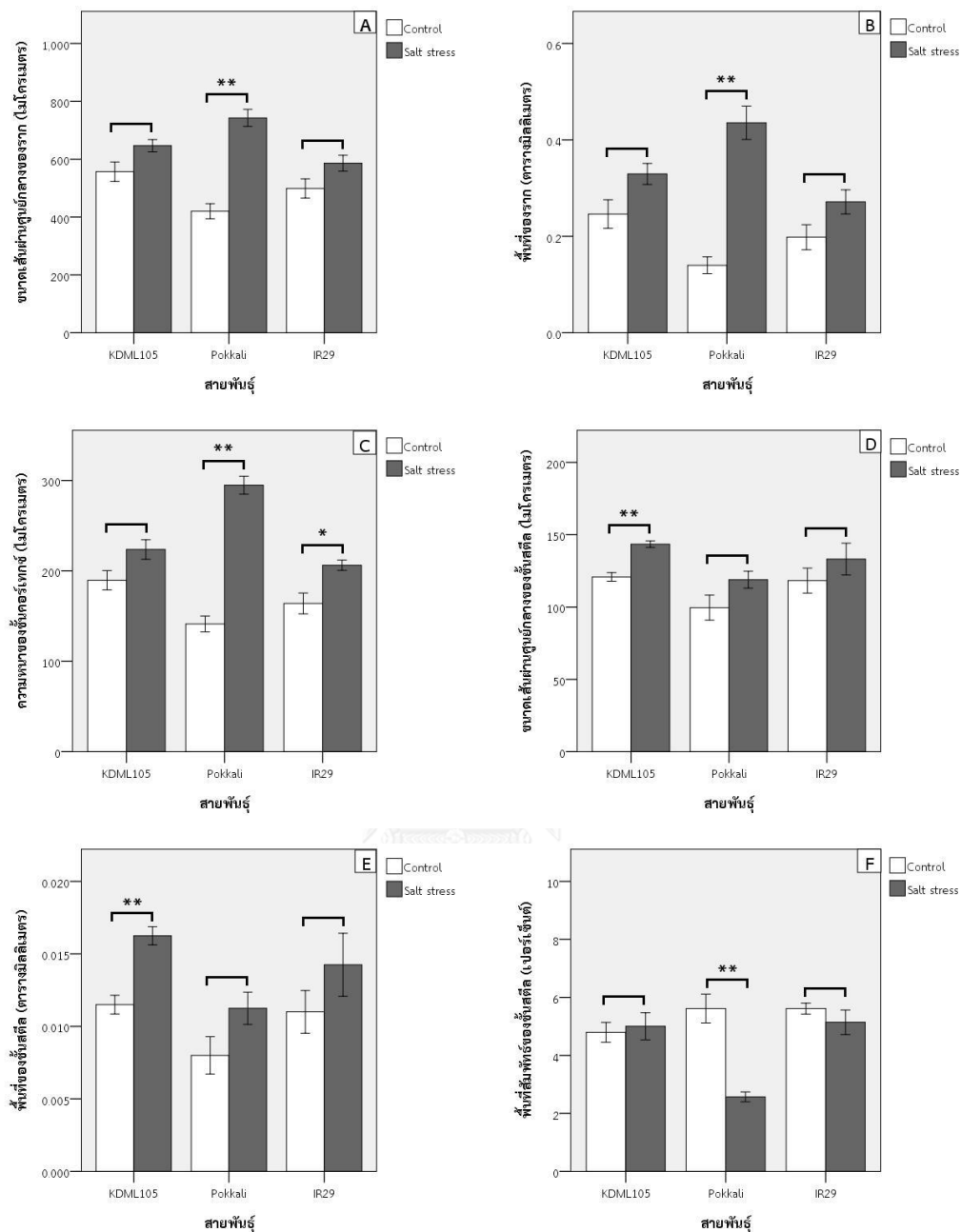
เมื่อข้าวได้รับภาวะเค็มเป็นเวลานานขึ้นถึง 21 วัน พบว่าภาวะเค็มมีผลเปลี่ยนแปลงลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากข้าวที่ความยาวจากปลายราก 10 เซนติเมตร ในข้าวแต่ละพันธุ์แตกต่างกัน ทั้งนี้ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวยังมีความแตกต่างจากการได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน และ 14 วัน (รูปที่ 4.19 และ 4.20) โดยพบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากในข้าวพันธุ์ Pokkali เพิ่มขึ้นจากภาวะปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คิดเป็น 77 เปอร์เซ็นต์ และ 311 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากในภาวะปกติเท่ากับ  $420.13 \pm 26.11$  ไมโครเมตร และ  $0.140 \pm 0.017$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อได้รับภาวะเค็ม ข้าวพันธุ์ดังกล่าวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากเพิ่มขึ้นเป็น  $742.63 \pm 29.60$  ไมโครเมตร และ  $0.436 \pm 0.035$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากในข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29 โดยพบเพียงแนวโน้มการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากในข้าวทั้งสองพันธุ์ ซึ่งข้าวพันธุ์ KDML105 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $556.70 \pm 33.62$  ไมโครเมตร และ  $646.55 \pm 21.38$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ทั้งยังมีพื้นที่ของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.246 \pm 0.030$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.330 \pm 0.022$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $498.85 \pm 33.15$  ไมโครเมตร และ  $586.03 \pm 27.51$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ตลอดจนมีพื้นที่ของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.198 \pm 0.026$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.272 \pm 0.025$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.20A และ B) สำหรับความหนาของชั้นคอร์เทกซ์นั้น พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้ความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในข้าวพันธุ์ Pokkali และ IR29 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ คิดเป็น 209 เปอร์เซ็นต์ และ 26 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดยข้าวทั้งสองพันธุ์นี้มีความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในภาวะปกติเท่ากับ  $141.33 \pm 8.74$  ไมโครเมตร และ  $163.95 \pm 11.52$  ไมโครเมตร ตามลำดับ เมื่อได้รับภาวะเค็ม ข้าวทั้งสองพันธุ์จะมีความหนาของชั้นคอร์เทกซ์เพิ่มขึ้นเป็น  $294.73 \pm 9.98$  ไมโครเมตร และ  $206.20 \pm 5.73$  ไมโครเมตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ภาวะเค็มไม่มีผลต่อความหนาของชั้นคอร์เทกซ์อย่างมีนัยสำคัญในข้าวพันธุ์ KDML105 โดยพบเพียงแนวโน้มการเพิ่มความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ซึ่งในภาวะปกติมีค่าเท่ากับ  $189.60 \pm 10.71$  ไมโครเมตร และในภาวะเค็มมีค่าเท่ากับ  $223.63 \pm 10.80$  ไมโครเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.20C)

สำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีล พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ KDML105 เพิ่มขึ้นจากภาวะปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คิดเป็น 19 เปอร์เซ็นต์ และ 33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้ ข้าวพันธุ์ดังกล่าวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลในภาวะปกติเท่ากับ  $120.85 \pm 2.99$  ไมโครเมตร และ  $0.012 \pm 0.001$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อได้รับภาวะเค็ม ข้าวพันธุ์นี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลเพิ่มขึ้นเป็น  $143.48 \pm 2.26$  ไมโครเมตร และ  $0.016 \pm 0.001$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มไม่มีผลเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ Pokkali และ IR29 โดยพบเพียงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลเฉพาะในข้าวพันธุ์ Pokkali เท่านั้น ทั้งนี้ ข้าวพันธุ์ดังกล่าวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $99.55 \pm 8.65$  ไมโครเมตร และ  $118.93 \pm 5.85$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ทั้งยังมีพื้นที่ของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.008 \pm 0.001$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.011 \pm 0.001$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $118.28 \pm 8.66$  ไมโครเมตร และ  $133.15 \pm 11.01$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ตลอดจนมีพื้นที่ของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.011 \pm 0.002$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.014 \pm 0.002$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.20D และ E) สำหรับพื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีล พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้พื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ Pokkali ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (-54 เปอร์เซ็นต์) โดยมีพื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีลในภาวะปกติเท่ากับ  $5.62 \pm 0.50$  เปอร์เซ็นต์ แต่ภาวะเค็มมีผลทำให้พื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีลลดลงเหลือ  $2.57 \pm 0.17$  เปอร์เซ็นต์ ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มไม่มีผลต่อพื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29 โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีพื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $4.79 \pm 0.34$  เปอร์เซ็นต์ และ  $5.00 \pm 0.47$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีพื้นที่สัมพัทธ์ของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $5.62 \pm 0.19$  เปอร์เซ็นต์ และ  $5.14 \pm 0.42$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รูปที่ 4.20F)





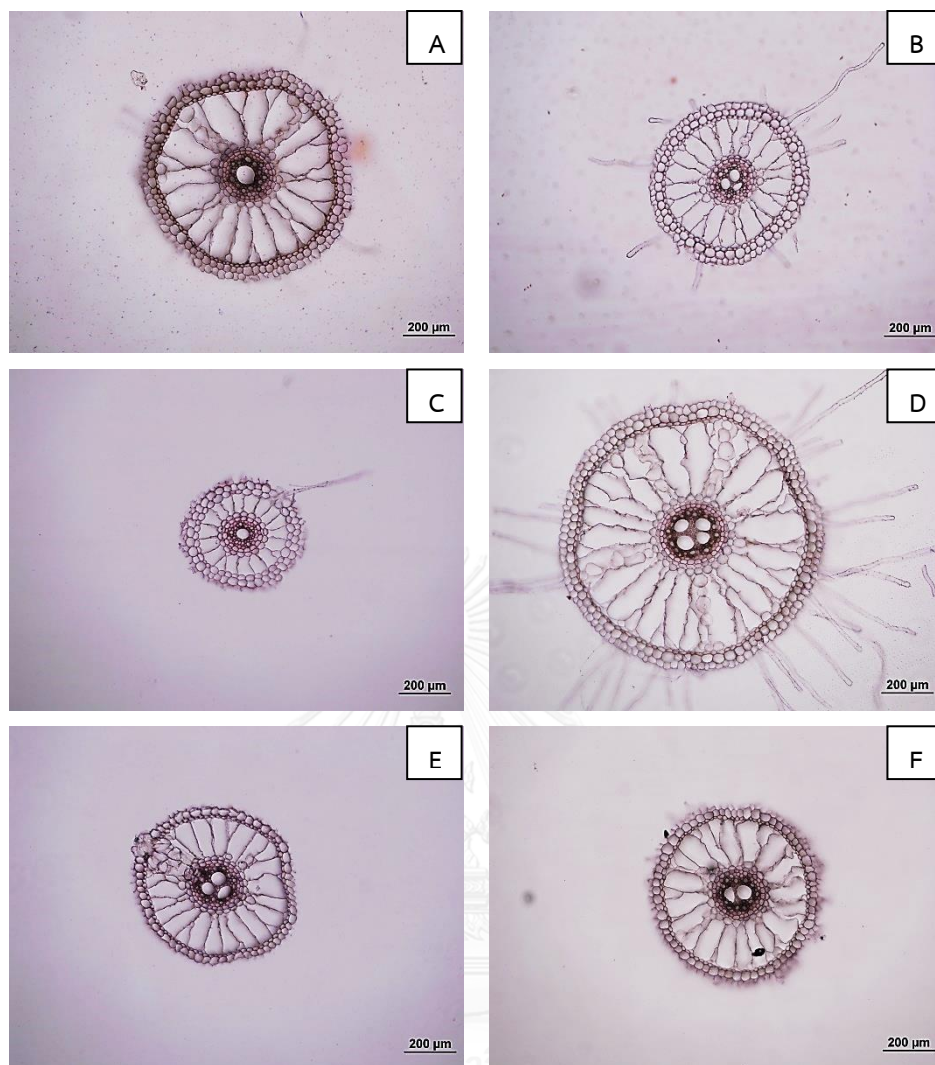
รูปที่ 4.19 ภาพตัดขวางของรากข้าวที่ความยาวจากปลายราก 10 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน รูป A C และ E แสดงรากข้าวในภาวะปกติ รูป B D และ F แสดงรากข้าวในภาวะเค็มของข้าวพันธุ์ KDML105 (A และ B) พันธุ์ Pokkali (C และ D) และพันธุ์ IR29 (E และ F)



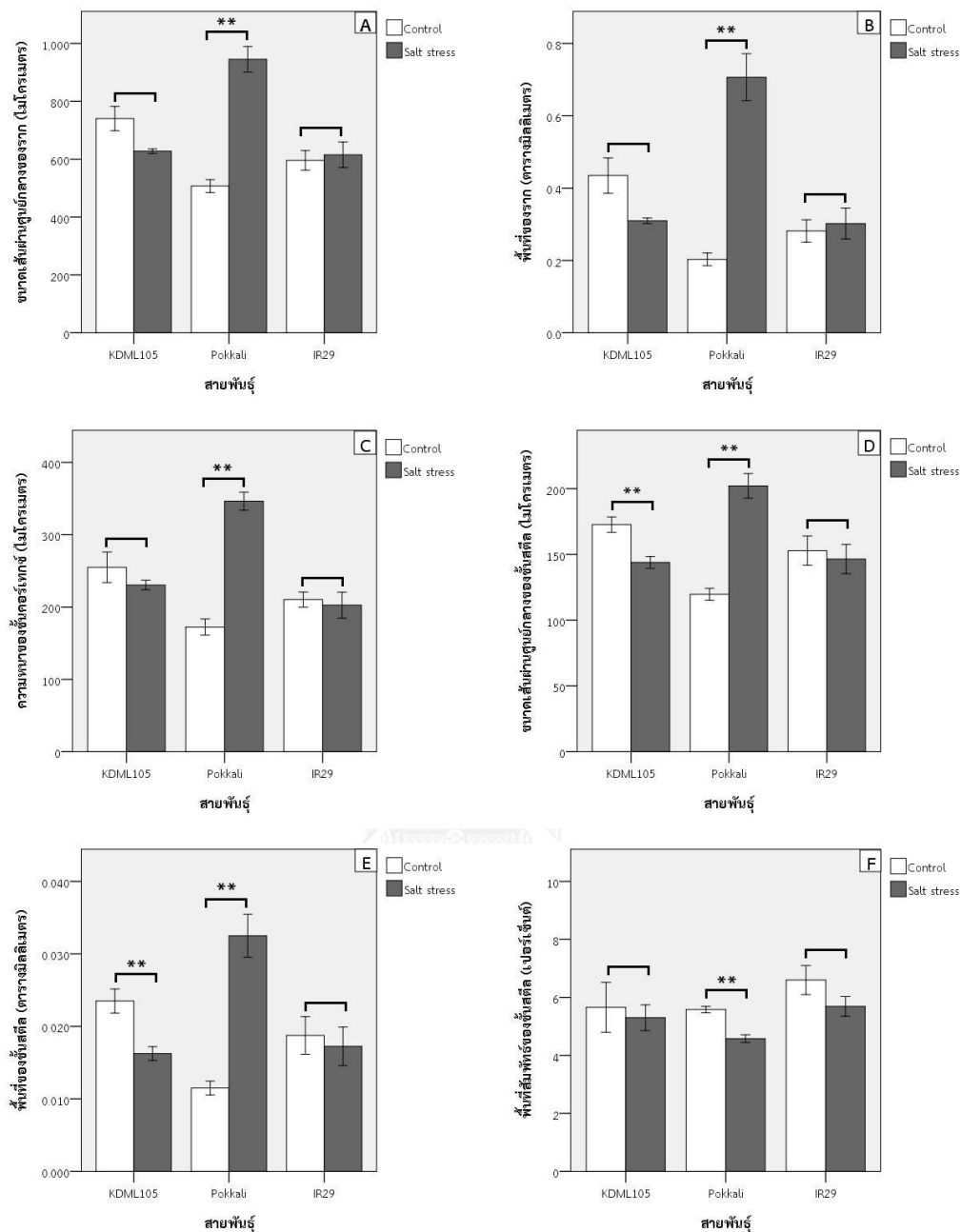
รูปที่ 4.20 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรวงในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกันที่ความยาว 10 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน รูป A ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรวง (ไมโครเมตร) รูป B พื้นที่ของรวง (ตารางมิลลิเมตร) รูป C ความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ (ไมโครเมตร) รูป D ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีล (ไมโครเมตร) รูป E พื้นที่ของชั้นสตีล (ตารางมิลลิเมตร) และรูป F พื้นที่สัมผัสของชั้นสตีล (เปอร์เซ็นต์) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) และ 99% (\*\*) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Student's t-test

สำหรับผลของภาวะเค็มที่ระยะเวลา 21 วัน ที่มีต่อลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากข้าวที่ ความยาว 20 เซนติเมตร พบว่าข้าวแต่ละพันธุ์มีการตอบสนองต่อภาวะเค็มต่างกัน และรากข้าวมีการ เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์แตกต่างจากการได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน และ 14 วัน (รูปที่ 4.21 และ 4.22) เมื่อพิจารณาผลของภาวะเค็มที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของราก พบว่า ภาวะเค็มมีผลทำให้ค่าดังกล่าวในข้าวพันธุ์ Pokkali เพิ่มขึ้นจากภาวะปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คิดเป็น 86 เปอร์เซ็นต์ และ 348 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของ รากในภาวะปกติเท่ากับ  $507.13 \pm 22.28$  ไมโครเมตร และ  $0.203 \pm 0.018$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อได้รับภาวะเค็ม ข้าวพันธุ์ดังกล่าวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากเพิ่มขึ้นเป็น  $945.43 \pm 44.12$  ไมโครเมตร และ  $0.707 \pm 0.065$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม ภาวะ เค็มไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากในข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29 อย่างไรก็ตาม พบเพียงแนวโน้มการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของรากในข้าวพันธุ์ KDML105 โดยมื ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $740.43 \pm 42.05$  ไมโครเมตร และ  $627.78 \pm 8.03$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ทั้งยังมีพื้นที่ของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.435 \pm 0.049$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.310 \pm 0.008$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $595.85 \pm 33.80$  ไมโครเมตร และ  $615.33 \pm 44.11$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ตลอดจนมีพื้นที่ของรากในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.282 \pm 0.031$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.302 \pm 0.043$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.22A และ B) สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อความหนาของชั้นคอร์เทกซ์นั้น พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้ความหนาของ ชั้นคอร์เทกซ์ในข้าวพันธุ์ Pokkali เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ คิดเป็น 201 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบ กับภาวะปกติ โดยมีความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในภาวะปกติเท่ากับ  $172.35 \pm 11.20$  ไมโครเมตร แต่ ภาวะเค็มกลับมีผลทำให้ความหนาของชั้นคอร์เทกซ์เพิ่มขึ้นเป็น  $346.40 \pm 12.49$  ไมโครเมตร ในทาง ตรงกันข้าม ภาวะเค็มไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29 โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $255.00 \pm 21.09$  ไมโครเมตร และ  $230.43 \pm 6.61$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 มีความ หนาของชั้นคอร์เทกซ์ในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $210.35 \pm 10.44$  ไมโครเมตร และ  $202.65 \pm 18.03$  ไมโครเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.22C)

สำหรับผลที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีล พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ KDML105 ลดลงจากภาวะปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คิดเป็น 17 เปอร์เซ็นต์ และ 33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลในภาวะปกติเท่ากับ  $172.65 \pm 5.87$  ไมโครเมตร และ  $0.024 \pm 0.002$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ และในภาวะเค็มลดลงเหลือ  $143.93 \pm 4.55$  ไมโครเมตร และ  $0.016 \pm 0.001$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มกลับมีผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ Pokkali เพิ่มขึ้นจากภาวะปกติอย่างมีนัยสำคัญ คิดเป็น 69 เปอร์เซ็นต์ และ 275 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลในภาวะปกติเท่ากับ  $119.70 \pm 4.53$  ไมโครเมตร และ  $0.012 \pm 0.001$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ และเมื่อได้รับภาวะเค็ม มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $202.13 \pm 9.35$  ไมโครเมตร และ  $0.033 \pm 0.003$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ภาวะเค็มไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ IR29 โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $152.88 \pm 11.14$  ไมโครเมตร และ  $146.48 \pm 11.14$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ทั้งยังมีพื้นที่ของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $0.019 \pm 0.003$  ตารางมิลลิเมตร และ  $0.017 \pm 0.003$  ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.22D และ E) สำหรับการค่าพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีล พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้พื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ Pokkali ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (-18 เปอร์เซ็นต์) จากค่าในภาวะปกติที่เท่ากับ  $5.58 \pm 0.11$  เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้รับภาวะเค็มลดลงเหลือ  $4.58 \pm 0.13$  เปอร์เซ็นต์ ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มไม่มีผลต่อพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29 แต่พบเพียงแนวโน้มการมีพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลที่ลดลงเฉพาะในข้าวพันธุ์ IR29 โดยมีพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $6.60 \pm 0.50$  เปอร์เซ็นต์ และ  $5.69 \pm 0.34$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ KDML105 ภายใต้ภาวะปกติและภาวะเค็มมีขนาดเท่ากับ  $5.66 \pm 0.86$  เปอร์เซ็นต์ และ  $5.30 \pm 0.45$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รูปที่ 4.22F)



รูปที่ 4.21 ภาพตัดขวางของรากข้าวที่ความยาวจากปลายราก 20 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน รูป A C และ E แสดงรากข้าวในภาวะปกติ รูป B D และ F แสดงรากข้าวในภาวะเค็มของข้าวพันธุ์ KDML105 (A และ B) พันธุ์ Pokkali (C และ D) และพันธุ์ IR29 (E และ F)

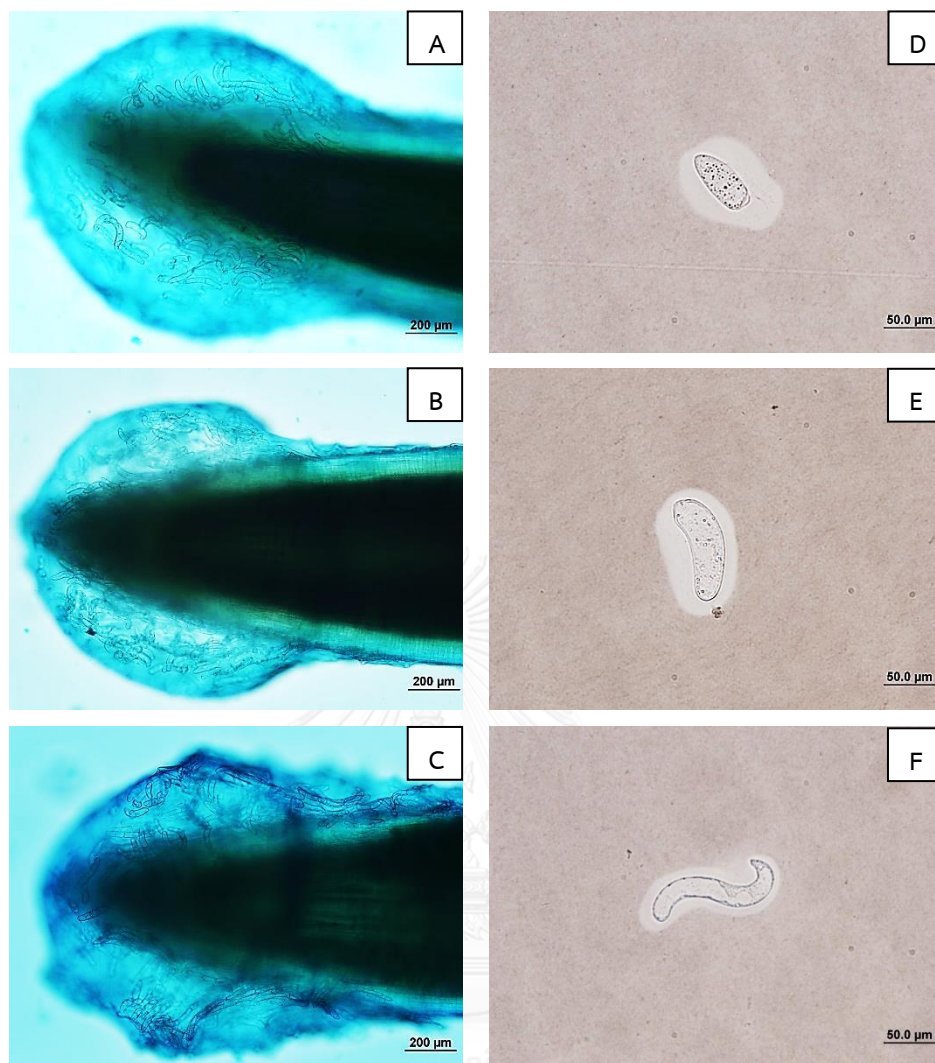


รูปที่ 4.22 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกันที่ความยาว 20 เซนติเมตร เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน รูป A ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (ไมโครเมตร) รูป B พื้นที่ของราก (ตารางมิลลิเมตร) รูป C ความหนาของชั้นคอร์เทกซ์ (ไมโครเมตร) รูป D ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นสตีล (ไมโครเมตร) รูป E พื้นที่ของชั้นสตีล (ตารางมิลลิเมตร) และรูป F พื้นที่สัมผัสของชั้นสตีล (เปอร์เซ็นต์) แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) และ 99% (\*\*) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Student's t-test

### 4.3 ลักษณะรูปแบบการสร้างและควมมีชีวิตของบอร์เตอร์เซลล์ของราก และความหนาของสารเมือกที่บอร์เตอร์เซลล์สร้างขึ้นบริเวณปลายรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน

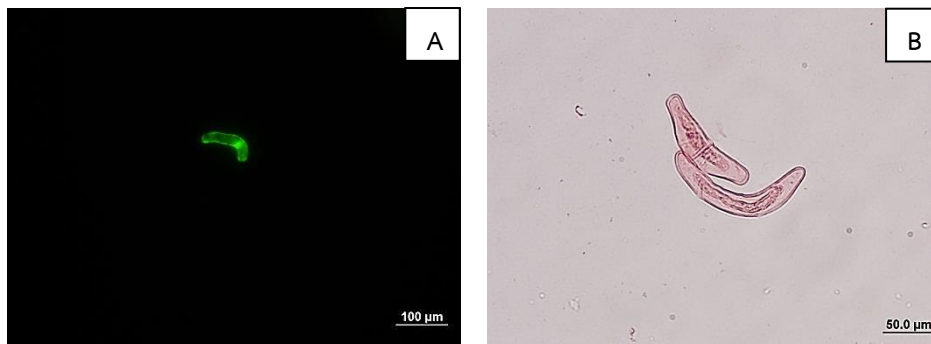
#### 4.3.1 ลักษณะบอร์เตอร์เซลล์ของราก

ข้าวเป็นพืชที่มีการสร้างบอร์เตอร์เซลล์บริเวณปลายราก เซลล์ดังกล่าวสร้างมาจากเนื้อเยื่อเจริญของหมวกราก เมื่อเซลล์เจริญเต็มที่จะมีการแยกตัวออกมาจากเซลล์ผิวของหมวกรากและอยู่กระจายล้อมรอบบริเวณปลายรากเป็นจำนวนมาก โดยบอร์เตอร์เซลล์สามารถสร้างสารเมือกที่ช่วยปกป้องปลายรากจากอันตรายต่าง ๆ (รูปที่ 4.23A B และ C) จากการศึกษาลักษณะบอร์เตอร์เซลล์ที่พบบริเวณปลายรากนั้น พบว่าเซลล์ดังกล่าวมีรูปร่างและขนาดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับอายุของเซลล์ อีกทั้งความสามารถในการผลิตสารเมือกของเซลล์นั้น ขึ้นอยู่กับอายุของเซลล์ด้วย โดยเซลล์ที่มีอายุน้อย มีรูปร่างกลมหรือรีและมีความยาวเท่ากับ  $60.86 \pm 1.65$  ไมโครเมตร เซลล์ที่มีรูปร่างกลมหรือรีนี้สามารถผลิตสารเมือกที่มีความหนามากถึง  $19.02 \pm 1.81$  ไมโครเมตร (รูปที่ 4.23D) เมื่อเซลล์เจริญเติบโตขึ้น พบว่าเซลล์มีรูปร่างยาวและรีโดยมีความยาวเท่ากับ  $88.84 \pm 1.57$  ไมโครเมตร เซลล์ที่มีรูปร่างดังกล่าวสามารถผลิตสารเมือกที่มีความหนา  $11.95 \pm 0.77$  ไมโครเมตร (รูปที่ 4.23E) เมื่อเซลล์มีอายุมากขึ้น เซลล์จะมีรูปร่างที่ยาวมากขึ้นและมีความยาวเท่ากับ  $150.08 \pm 5.85$  ไมโครเมตร เซลล์รูปร่างยาวนี้ผลิตสารเมือกที่มีความหนาเพียง  $9.01 \pm 1.26$  ไมโครเมตร (รูปที่ 4.23F) ทั้งนี้ รูปร่างและขนาดบอร์เตอร์เซลล์ของรากที่พบบริเวณปลายราก มีลักษณะเหมือนกันในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกันทั้ง 3 พันธุ์ เมื่อตรวจสอบควมมีชีวิตของบอร์เตอร์เซลล์ โดยการย้อมด้วยสี Fluorescein diacetate (FDA) และ phenosafranin พบว่าเซลล์ดังกล่าวเป็นเซลล์ที่มีชีวิต อีกทั้งยังพบว่าเมื่อบอร์เตอร์เซลล์มีอายุเพิ่มมากขึ้น จะมีการตายของเซลล์เกิดขึ้นด้วย (รูปที่ 4.24A และ B)



รูปที่ 4.23 ลักษณะของสารเมือกบริเวณปลายรากและการสร้างสารเมือกของบอร์เตอร์เซลล์แต่ละแบบในข้าวพันธุ์ KDML105 (รูป A) ข้าวพันธุ์ Pokkali (รูป B) และข้าวพันธุ์ IR29 (รูป C) ลักษณะของบอร์เตอร์เซลล์ที่มีรูปร่างกลมหรือรี (รูป D) บอร์เตอร์เซลล์ที่มีรูปร่างยาวและรี (รูป E) และบอร์เตอร์เซลล์ที่มีรูปร่างยาว (รูป F)



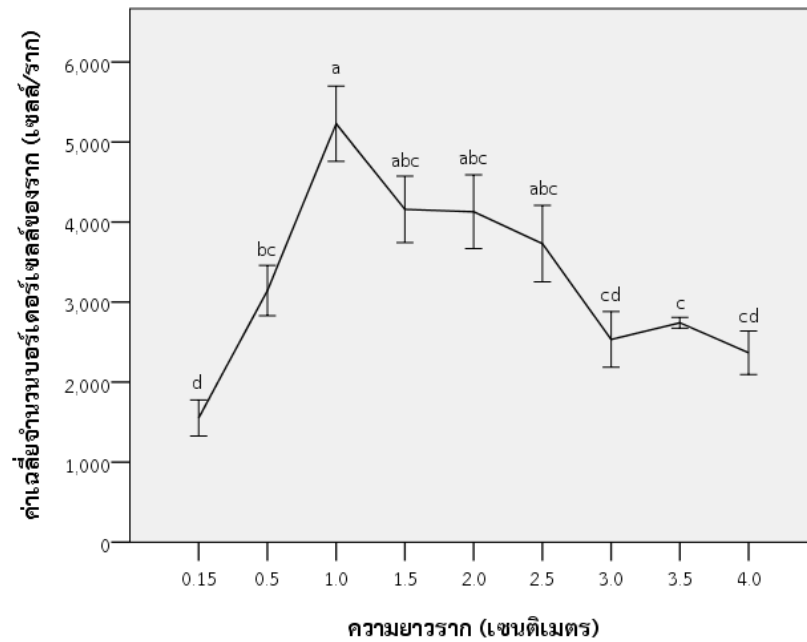


รูปที่ 4.24 บอร์เดอ์เซลล์ที่มีชีวิต เมื่อย้อมด้วยสี Fluorescein diacetate (FDA) (รูป A) และ บอร์เดอ์เซลล์ที่ตาย เมื่อย้อมด้วยสี phenosafranin (รูป B)



#### 4.3.2 การสร้างบอร์เตอร์เซลล์และสารเมือกในข้าวพันธุ์ KDML105

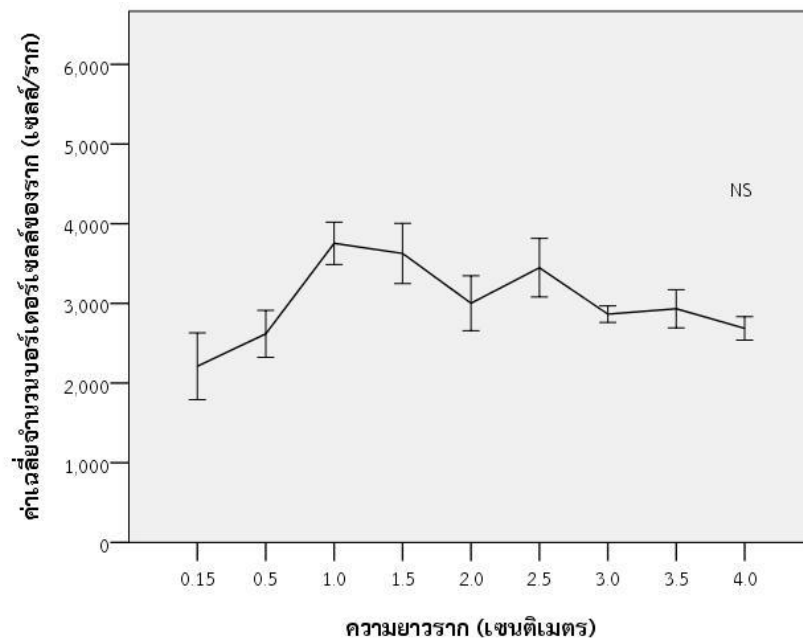
ข้าวพันธุ์ KDML105 มีการสร้างบอร์เตอร์เซลล์ตั้งแต่ระยะแรกที่รากแรกเกิดเจริญออกมาจากเมล็ด โดยพบว่าเมื่อรากแรกเกิดมีความยาว 0.15 เซนติเมตร มีการสร้างบอร์เตอร์เซลล์ที่บริเวณปลายรากเป็นจำนวน  $1552 \pm 225$  เซลล์/ราก เมื่อรากมีความยาวมากขึ้น การสร้างบอร์เตอร์เซลล์ของรากจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ความยาว 0.5 เซนติเมตร มีการสร้างบอร์เตอร์เซลล์เป็นจำนวน  $3144 \pm 314$  เซลล์/ราก ส่วนที่ความยาว 1.0 เซนติเมตร พบว่ามีการสร้างบอร์เตอร์เซลล์สูงที่สุดเป็นจำนวน  $5229 \pm 470$  เซลล์/ราก หลังจากนั้น เมื่อรากมีการเจริญเติบโตมากขึ้น จำนวนบอร์เตอร์เซลล์ของรากกลับลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยรากที่มีความยาว 1.5 เซนติเมตร และ 2.0 เซนติเมตร มีจำนวนบอร์เตอร์เซลล์ใกล้เคียงกัน คือ  $4158 \pm 415$  เซลล์/ ราก และ  $4129 \pm 461$  เซลล์/ราก ตามลำดับ ส่วนรากที่มีความยาว 2.5 เซนติเมตร และ 3.0 เซนติเมตร มีจำนวนบอร์เตอร์เซลล์  $3730 \pm 478$  เซลล์/ราก และ  $2533 \pm 374$  เซลล์/ราก ตามลำดับ เมื่อรากมีความยาว 3.5 เซนติเมตร และ 4.0 เซนติเมตร พบว่ามีจำนวนบอร์เตอร์เซลล์  $2741 \pm 68$  เซลล์/ราก และ  $2367 \pm 272$  เซลล์/ราก ตามลำดับ (รูปที่ 4.25) ในส่วนของความมีชีวิตของบอร์เตอร์เซลล์ พบว่าเซลล์ดังกล่าวมีความมีชีวิตสูงมากถึง 99-100 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ ยังพบว่าเซลล์ที่มีขนาดอยู่ในช่วง 70-100 ไมโครเมตร เป็นเซลล์ที่พบมากที่สุดบริเวณปลายราก โดยบอร์เตอร์เซลล์แต่ละเซลล์ที่มีขนาดในช่วงดังกล่าวนี้สร้างสารเมือกที่มีความหนาเฉลี่ย  $13.56 \pm 0.67$  ไมโครเมตร



รูปที่ 4.25 รูปแบบการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรวงที่ความยาวรวงต่าง ๆ ของข้าวพันธุ์ KDML105 ภายใต้ภาวะปกติ แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Dunnett's T3

#### 4.3.3 การสร้างบอร์เดอร์เซลล์และสารเมือกในข้าวพันธุ์ Pokkali

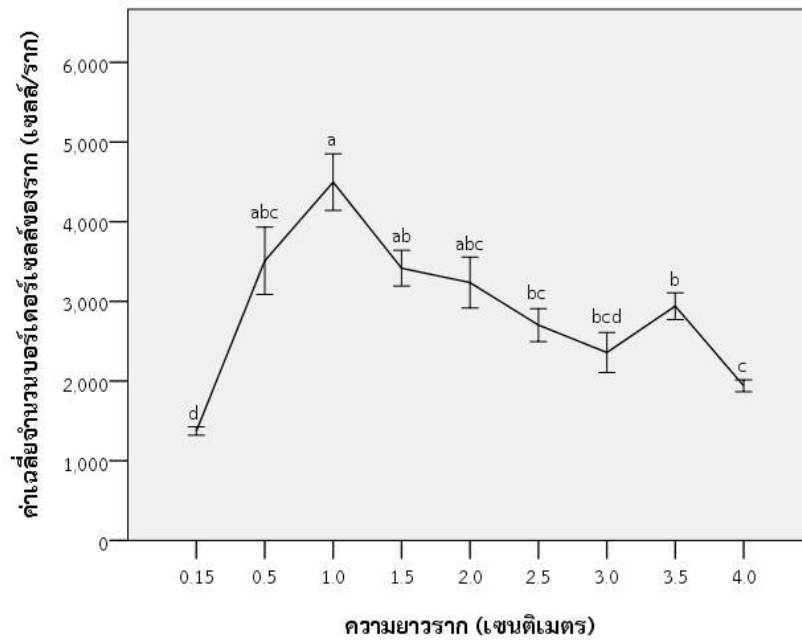
เมื่อเมล็ดของข้าวพันธุ์ Pokkali เริ่มเกิดการงอก พบว่ารากแรกเกิดมีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์เป็นจำนวนมาก โดยเมื่อรากมีความยาว 0.15 เซนติเมตร พบว่ามีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์เป็นจำนวน  $2211 \pm 419$  เซลล์/ราก ทั้งนี้ เมื่อรากมีความยาวมากขึ้น การสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม จำนวนบอร์เดอร์เซลล์ของรากที่ความยาวต่าง ๆ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตลอดความยาวรากที่ทำการศึกษา โดยที่ความยาว 0.5 เซนติเมตร มีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์เป็นจำนวน  $2619 \pm 295$  เซลล์/ราก ส่วนที่ความยาว 1.0 เซนติเมตร พบว่ามีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์สูงที่สุดเป็นจำนวน  $3754 \pm 266$  เซลล์/ราก เมื่อรากมีความยาว 1.5 เซนติเมตร พบว่ามีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์  $3627 \pm 379$  เซลล์/ราก ซึ่งเป็นจำนวนที่ใกล้เคียงกับบอร์เดอร์เซลล์ของรากที่ความยาว 1.0 เซนติเมตร ส่วนที่ความยาว 2.0 เซนติเมตร และ 2.5 เซนติเมตร มีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์เป็นจำนวน  $3002 \pm 345$  เซลล์/ราก และ  $3448 \pm 367$  เซลล์/ราก ตามลำดับ เมื่อรากมีความยาว 3.0 เซนติเมตร และ 3.5 เซนติเมตร พบว่ามีจำนวนบอร์เดอร์เซลล์ที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ  $2865 \pm 104$  เซลล์/ราก และ  $2933 \pm 239$  เซลล์/ราก ตามลำดับ ส่วนที่ความยาว 4.0 เซนติเมตร มีบอร์เดอร์เซลล์เป็นจำนวน  $2686 \pm 148$  เซลล์/ราก (รูปที่ 4.26) เมื่อตรวจสอบความมีชีวิตของบอร์เดอร์เซลล์ พบว่าเซลล์ดังกล่าวมีความมีชีวิตสูงมากถึง 99-100 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่าบอร์เดอร์เซลล์ที่พบมากที่สุดบริเวณปลายรากมีขนาดอยู่ในช่วง 70-100 ไมโครเมตร โดยเซลล์แต่ละเซลล์สามารถสร้างสารเมือกที่มีความหนาเฉลี่ย  $9.56 \pm 0.54$  ไมโครเมตร



รูปที่ 4.26 รูปแบบการสร้างบอร์เตอร์เซลล์ของรากที่ความยาวรากต่าง ๆ ของข้าวพันธุ์ Pokkali ภายใต้ภาวะปกติ แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE ตัวอักษร NS (not significantly different) แสดงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Dunnett's T3

#### 4.3.4 การสร้างบอร์เตอร์เซลล์และสารเมือกในข้าวพันธุ์ IR29

สำหรับรูปแบบการสร้างบอร์เตอร์เซลล์ของข้าวพันธุ์ IR29 พบว่าเมื่อรากเจริญเติบโตจนมีความยาว 0.15 เซนติเมตร รากมีการสร้างบอร์เตอร์เซลล์เป็นจำนวน  $1373 \pm 53$  เซลล์/ราก และมีการสร้างบอร์เตอร์เซลล์เพิ่มขึ้นเมื่อรากมีความยาวมากขึ้น โดยที่ความยาว 0.5 เซนติเมตร มีการสร้างบอร์เตอร์เซลล์เป็นจำนวน  $3510 \pm 423$  เซลล์/ราก ส่วนที่ความยาว 1.0 เซนติเมตร พบว่ามีการสร้างบอร์เตอร์เซลล์สูงสุดเป็นจำนวน  $4497 \pm 355$  เซลล์/ราก หลังจากนั้น เมื่อรากมีการเจริญเติบโตมากขึ้น การสร้างบอร์เตอร์เซลล์ของรากกลับลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ความยาว 1.5 เซนติเมตร และ 2.0 เซนติเมตร มีการสร้างบอร์เตอร์เซลล์จำนวนใกล้เคียงกัน โดยมีจำนวนเท่ากับ  $3417 \pm 224$  เซลล์/ราก และ  $3236 \pm 320$  เซลล์/ราก ตามลำดับ ส่วนที่ความยาว 2.5 เซนติเมตร และ 3.0 เซนติเมตร มีบอร์เตอร์เซลล์จำนวน  $2702 \pm 207$  เซลล์/ราก และ  $2359 \pm 251$  เซลล์/ราก ตามลำดับ เมื่อรากมีความยาว 3.5 เซนติเมตร และ 4.0 เซนติเมตร มีจำนวนบอร์เตอร์เซลล์เท่ากับ  $2940 \pm 168$  เซลล์/ราก และ  $1941 \pm 76$  เซลล์/ราก ตามลำดับ (รูปที่ 4.27) เมื่อตรวจสอบความมีชีวิตของบอร์เตอร์เซลล์ พบว่าเซลล์ดังกล่าวมีความมีชีวิตสูงมากถึง 99-100 เปอร์เซ็นต์ สำหรับความหนาของสารเมือกที่บอร์เตอร์เซลล์สร้างขึ้นนั้น พบว่าเซลล์ที่พบมากที่สุดบริเวณปลายราก ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 70-100 ไมโครเมตร มีการสร้างสารเมือกที่มีความหนาเฉลี่ย  $11.74 \pm 0.62$  ไมโครเมตร

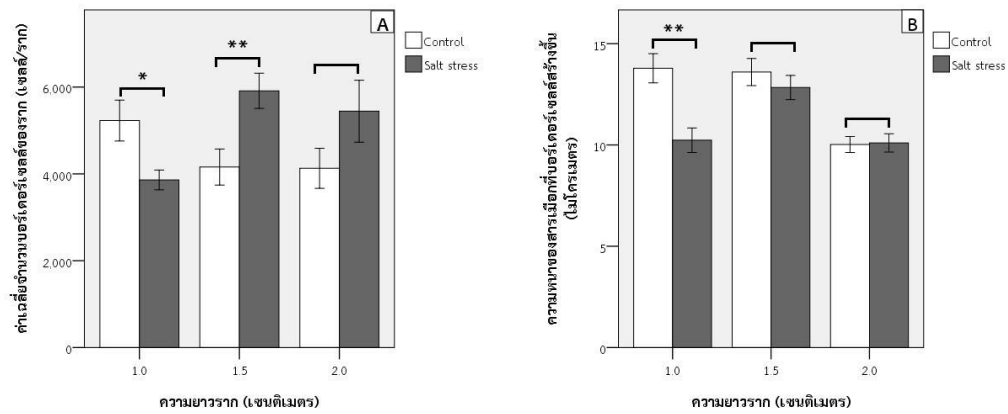


รูปที่ 4.27 รูปแบบการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากที่ความยาวรากต่าง ๆ ของข้าวพันธุ์ IR29 ภายใต้ภาวะปกติ แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Dunnett's T3

#### 4.3.5 การสร้างบอร์เดอร์เซลล์และสารเมือกในข้าวพันธุ์ KDML105 เมื่อได้รับภาวะเค็ม

เมื่อย้ายต้นกล้าที่มีความยาวของรากแรกเกิด 1.0 เซนติเมตร ให้ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่ามีต้นกล้าที่หยุดการเจริญเติบโต 11.8 เปอร์เซ็นต์ และมีต้นกล้าที่สามารถเจริญเติบโตได้ภายใต้ภาวะเค็ม จนกระทั่งรากมีความยาว 1.5 เซนติเมตร และ 2.0 เซนติเมตร คิดเป็น 52.9 เปอร์เซ็นต์ และ 35.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากนั้น พบว่ารูปแบบการสร้างเซลล์ดังกล่าวขึ้นอยู่กับการเจริญเติบโตของรากด้วย โดยรากที่มีความยาว 1.0 เซนติเมตร มีจำนวนบอร์เดอร์เซลล์น้อยกว่าภาวะปกติอย่างมีนัยสำคัญ คิดเป็น 26 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในภาวะปกติมีจำนวนบอร์เดอร์เซลล์  $5229 \pm 470$  เซลล์/ราก เมื่อได้รับภาวะเค็มกลับมีจำนวนบอร์เดอร์เซลล์  $3861 \pm 227$  เซลล์/ราก ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มมีผลทำให้การสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากที่มีความยาว 1.5 เซนติเมตร เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คิดเป็น 42 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดยมีการสร้างเซลล์ดังกล่าวในภาวะปกติเป็นจำนวน  $4158 \pm 416$  เซลล์/ราก และในภาวะเค็มเป็นจำนวน  $5914 \pm 406$  เซลล์/ราก อย่างไรก็ตาม ภาวะเค็มไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากที่มีความยาว 2.0 เซนติเมตร โดยพบเพียงแนวโน้มการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปลายรากที่มีความยาวดังกล่าว มีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ในภาวะปกติและภาวะเค็มเป็นจำนวน  $4129 \pm 461$  เซลล์/ราก และ  $5444 \pm 713$  เซลล์/ราก ตามลำดับ (รูปที่ 4.28A) ในส่วนของความมีชีวิตของบอร์เดอร์เซลล์ พบว่ามีความมีชีวิตสูงมากเช่นเดียวกันกับภาวะปกติ เมื่อตรวจสอบความหนาของสารเมือกที่บอร์เดอร์เซลล์สร้างขึ้นนั้น พบว่าบอร์เดอร์เซลล์ของรากที่มีความยาว 1.0 เซนติเมตร มีการสร้างสารเมือกลดลง 26 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดยมีความหนาของสารเมือกในภาวะปกติ  $13.79 \pm 0.72$  ไมโครเมตร และในภาวะเค็ม  $10.23 \pm 0.60$  ไมโครเมตร ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มไม่มีผลต่อการสร้างสารเมือกของบอร์เดอร์เซลล์จากรากที่มีความยาว 1.5 เซนติเมตร และ 2.0 เซนติเมตร โดยบอร์เดอร์เซลล์จากรากที่มีความยาว 1.5 เซนติเมตร มีความหนาของสารเมือกในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $13.60 \pm 0.67$  ไมโครเมตร และ  $12.84 \pm 0.60$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนบอร์เดอร์เซลล์จากรากที่มีความยาว 2.0 เซนติเมตร มีความหนาของสารเมือกในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $10.02 \pm 0.39$  ไมโครเมตร และ  $10.10 \pm 0.45$  ไมโครเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.28B)

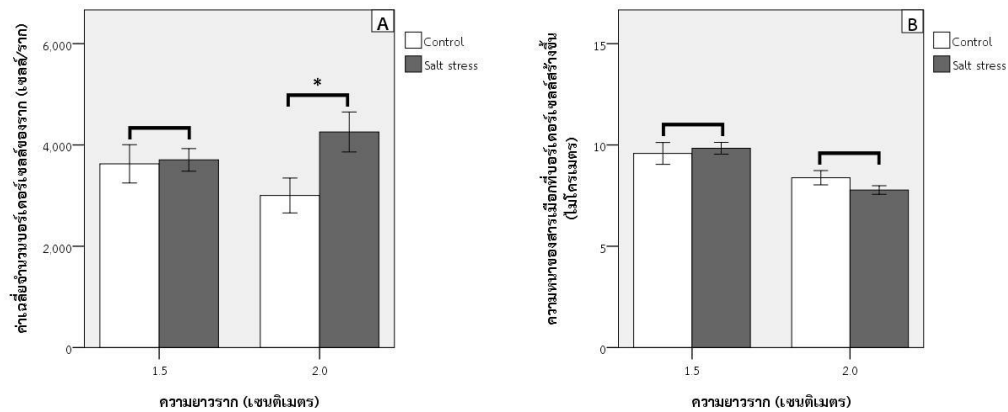




รูปที่ 4.28 จำนวนบอร์เตอร์เซลล์ของราก (รูป A) และความหนาของสารเมือกที่บอร์เตอร์เซลล์สร้างขึ้น (รูป B) ที่ความยาวรากต่าง ๆ ในข้าวพันธุ์ KDML105 เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) และ 99% (\*\*) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

#### 4.3.6 การสร้างบอร์เดอร์เซลล์และสารเมือกในข้าวพันธุ์ Pokkali เมื่อได้รับภาวะเค็ม

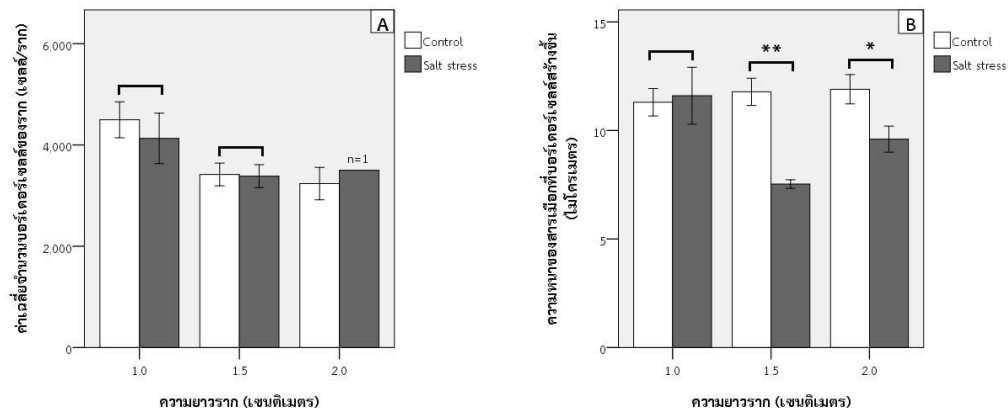
หลังการได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่ารากของข้าวพันธุ์ Pokkali นั้น สามารถเจริญเติบโตได้ภายใต้ภาวะเค็ม จนกระทั่งรากมีความยาว 1.5 เซนติเมตร และ 2.0 เซนติเมตร คิดเป็น 63.2 เปอร์เซ็นต์ และ 36.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับผลของภาวะเค็มต่อการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากนั้น ขึ้นอยู่กับการเจริญเติบโตของรากด้วย สำหรับรากที่มีความยาว 2.0 เซนติเมตร พบว่ามีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์เพิ่มขึ้นมากกว่าภาวะปกติอย่างมีนัยสำคัญ คิดเป็น 42 เปอร์เซ็นต์ โดยมีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ในภาวะปกติเป็นจำนวน  $3002 \pm 345$  เซลล์/ราก และเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นจำนวน  $4256 \pm 395$  เซลล์/ราก ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มกลับไม่มีผลต่อการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากที่มีความยาว 1.5 เซนติเมตร โดยมีจำนวนบอร์เดอร์เซลล์ในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $3627 \pm 379$  เซลล์/ราก และ  $3705 \pm 223$  เซลล์/ราก ตามลำดับ (รูปที่ 4.29A) ส่วนความมีชีวิตของบอร์เดอร์เซลล์ พบว่าเซลล์ดังกล่าวมีความมีชีวิตสูงมากเช่นเดียวกับภาวะปกติ เมื่อพิจารณาถึงความหนาของสารเมือกที่บอร์เดอร์เซลล์สร้างขึ้นนั้น พบว่าภาวะเค็มไม่มีผลต่อการสร้างสารเมือกของบอร์เดอร์เซลล์ที่พบบริเวณปลายรากที่มีความยาว 1.5 เซนติเมตร และ 2.0 เซนติเมตร โดยเซลล์แต่ละเซลล์ที่พบบริเวณปลายรากที่มีความยาว 1.5 เซนติเมตร มีความหนาของสารเมือกในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $9.58 \pm 0.54$  ไมโครเมตร และ  $9.84 \pm 0.29$  ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนบอร์เดอร์เซลล์ที่พบบริเวณปลายรากที่มีความยาว 2.0 เซนติเมตร มีความหนาของสารเมือกในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $8.38 \pm 0.35$  ไมโครเมตร และ  $7.78 \pm 0.21$  ไมโครเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.29B)



รูปที่ 4.29 จำนวนบอร์เดอร์เซลล์ของราก (รูป A) และความหนาของสารเมือกที่บอร์เดอร์เซลล์สร้างขึ้น (รูป B) ที่ความยวรากต่าง ๆ ในข้าวพันธุ์ Pokkali เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Student's t-test

#### 4.3.7 การสร้างบอร์เดอร์เซลล์และสารเมือกในข้าวพันธุ์ IR29 เมื่อได้รับภาวะเค็ม

สำหรับการให้ภาวะเค็มกับต้นกล้าของข้าวพันธุ์ IR29 ที่มีความยาวราก 1.0 เซนติเมตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่ามีต้นกล้าที่หยุดการเจริญเติบโต 25.0 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งยังมีต้นกล้าที่สามารถเจริญเติบโตได้ภายใต้ภาวะเค็ม จนกระทั่งรากมีความยาว 1.5 เซนติเมตร และ 2.0 เซนติเมตร คิดเป็น 61.1 เปอร์เซ็นต์ และ 13.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในส่วนของการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากในข้าวพันธุ์ดังกล่าวนี้ ไม่ได้รับผลจากการได้รับภาวะเค็ม โดยรากที่มีความยาว 1.0 เซนติเมตร มีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ในภาวะปกติและภาวะเค็มเป็นจำนวน  $4497 \pm 355$  เซลล์/ราก และ  $4130 \pm 499$  เซลล์/ราก ตามลำดับ รากที่มีความยาว 1.5 เซนติเมตร มีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ในภาวะปกติและภาวะเค็มเป็นจำนวน  $3417 \pm 224$  เซลล์/ราก และ  $3385 \pm 226$  เซลล์/ราก ตามลำดับ ส่วนรากที่มีความยาว 2.0 เซนติเมตร มีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ในภาวะปกติเป็นจำนวน  $3236 \pm 320$  เซลล์/ราก และในภาวะเค็มเป็นจำนวน 3500 เซลล์ (รูปที่ 4.30A) เมื่อพิจารณาถึงความมีชีวิตของบอร์เดอร์เซลล์ พบว่าเซลล์ดังกล่าวมีความมีชีวิตสูงมากเช่นเดียวกันกับภาวะปกติ เมื่อตรวจสอบความหนาของสารเมือกที่บอร์เดอร์เซลล์สร้างขึ้น พบว่าบอร์เดอร์เซลล์จากรากที่มีความยาว 1.5 เซนติเมตร และ 2.0 เซนติเมตร มีการสร้างสารเมือกลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คิดเป็น 36 เปอร์เซ็นต์ และ 19 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ โดยบอร์เดอร์เซลล์จากรากที่มีความยาว 1.5 เซนติเมตร มีความหนาของสารเมือกในภาวะปกติเท่ากับ  $11.78 \pm 0.63$  ไมโครเมตร ลดลงเหลือ  $7.53 \pm 0.20$  ไมโครเมตร ในภาวะเค็ม สำหรับบอร์เดอร์เซลล์จากรากที่มีความยาว 2.0 เซนติเมตร มีความหนาของสารเมือกในภาวะปกติเท่ากับ  $11.90 \pm 0.67$  ไมโครเมตร และลดลงเหลือ  $9.60 \pm 0.60$  ไมโครเมตร ภายใต้ภาวะเค็ม ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มไม่มีผลต่อการสร้างสารเมือกของบอร์เดอร์เซลล์จากรากที่มีความยาว 1.0 เซนติเมตร โดยพบว่าบอร์เดอร์เซลล์มีความหนาของสารเมือกในภาวะปกติและภาวะเค็มเท่ากับ  $11.30 \pm 0.63$  ไมโครเมตร และ  $11.60 \pm 1.31$  ไมโครเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.30B)



รูปที่ 4.30 จำนวนบอร์เตอร์เซลล์ของราก (รูป A) และความหนาของสารเมือกที่บอร์เตอร์เซลล์สร้างขึ้น (รูป B) ที่ความยาวรากต่าง ๆ ในข้าวพันธุ์ IR29 เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงค่าเฉลี่ย  $\pm$  SE เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (\*) และ 99% (\*\*) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Student's t-test

#### 4.4 ผลของภาวะเค็มต่อโครงสร้างระบบราก กายวิภาคศาสตร์ และลักษณะบอร์เตอร์เซลล์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน

จากการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายใต้ภาวะเค็ม เมื่อพิจารณาถึงลักษณะประจำพันธุ์ร่วมด้วย จะเห็นได้ว่าข้าวพันธุ์ IR29 ที่เป็นพันธุ์มาตรฐานไม่ทนเค็ม มีการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกับลักษณะประจำพันธุ์ คือ มีการเติบโตที่ลดลงทั้งในส่วนต้นและส่วนราก การลดจำนวนของรากพิเศษ การเพิ่มพื้นที่ของรากและพื้นที่ของชั้นสตีล การลดพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีล และการลดความหนาของสารเมือกที่บอร์เตอร์เซลล์สร้างขึ้น โดยไม่มีการเพิ่มจำนวนของเซลล์ดังกล่าวภายใต้ภาวะเค็ม ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali ที่เป็นพันธุ์มาตรฐานทนเค็ม พบว่าภาวะเค็มมีผลลดการเติบโตทั้งในส่วนต้นและส่วนรากด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ไม่พบผลของภาวะเค็มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระบบรากของข้าวพันธุ์ดังกล่าว นอกจากนี้ ภาวะเค็มยังมีผลเพิ่มพื้นที่ของรากและลดพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีล โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของชั้นสตีล ทั้งยังพบว่าการสร้างบอร์เตอร์เซลล์จำนวนเพิ่มมากขึ้นภายใต้ภาวะเค็มด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้สอดคล้องกับลักษณะประจำพันธุ์ของข้าวพันธุ์ดังกล่าว สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อข้าวพันธุ์ KDML105 ที่เป็นข้าวพันธุ์ที่สามารถทนเค็มได้ในระดับหนึ่งนั้น พบว่าข้าวพันธุ์ดังกล่าวมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกันกับข้าวพันธุ์ Pokkali และ IR29 โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีการเพิ่มจำนวนบอร์เตอร์เซลล์เหมือนกันกับข้าวพันธุ์ Pokkali นอกจากนี้ ข้าวพันธุ์ KDML105 ยังมีการลดจำนวนของรากพิเศษเช่นเดียวกับข้าวพันธุ์ IR29 อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าข้าวพันธุ์ KDML105 จะมีการเพิ่มพื้นที่ของชั้นสตีลเหมือนกันกับข้าวพันธุ์ IR29 แต่กลับไม่พบการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลอย่างมีนัยสำคัญภายใต้ภาวะเค็ม จากผลการทดลองข้างต้น แสดงให้เห็นว่าข้าวที่มีความสามารถในการทนเค็มต่างกัน จะมีการตอบสนองต่อภาวะเค็มแตกต่างกันด้วย ขึ้นอยู่กับความสามารถในการทนเค็มของข้าวพันธุ์นั้น ๆ (รูปที่ 4.31)

	KDML105	Pokkali	IR29
การเติบโตของต้นและราก	—	↓	↓
โครงสร้างระบบราก			
จำนวนรากพิเศษ	↓	—	↓
กายวิภาคศาสตร์ของราก			
พื้นที่ของราก	—	↑	↑
พื้นที่ของชั้นสตีล	↑	—	↑
พื้นที่สัมผัสของชั้นสตีล	—	↓	↓
บอร์เดอร์เซลล์ของราก			
จำนวนบอร์เดอร์เซลล์	↑	↑	—
ความหนาของสารเมือก	—	—	↓

หมายเหตุ ลูกศร (↑) หมายถึง เพิ่มขึ้น ลูกศร (↓) หมายถึง ลดลง และสัญลักษณ์ (—) หมายถึง ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ

รูปที่ 4.31 แผนภาพแสดงผลของภาวะเค็มต่อโครงสร้างระบบราก กายวิภาคศาสตร์ และลักษณะบอร์เดอร์เซลล์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน

## บทที่ 5

### สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

#### 5.1 การเติบโตและลักษณะโครงสร้างระบบรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับภาวะเค็มในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ

โดยทั่วไป เมื่อพืชเจริญเติบโตอยู่ภายใต้สภาวะที่ได้รับ ความเครียดจากความเค็ม พืชจะมีการตอบสนองโดยลดการเจริญเติบโตของโครงสร้างส่วนเหนือดินเพื่อลดการใช้น้ำ ซึ่งการลดลงของโครงสร้างนี้มีผลลดพื้นที่ในการเกิดกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชด้วย ทำให้พืชมีพลังงานที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวอย่างจำกัด อย่างไรก็ตาม ภาวะเค็มมีผลเพิ่มการเจริญเติบโตของรากเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดน้ำ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับระดับของความเค็มและระยะเวลาที่พืชได้รับความเครียดด้วย ถ้าพืชได้รับความเค็มที่รุนแรง จะส่งผลให้เกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตทั้งในส่วนต้นและส่วนราก (Munns and Tester, 2008; Taiz and Zeiger, 2002) จากการศึกษาผลของภาวะเค็มที่มีต่อการเติบโตในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่าข้าวแต่ละพันธุ์มีการตอบสนองต่อภาวะเค็มแตกต่างกัน โดยข้าวพันธุ์ IR29 ซึ่งเป็นพันธุ์มาตรฐานไม่ทนเค็ม จะมีการเติบโตของโครงสร้างส่วนเหนือดินลดลงตั้งแต่ที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน อีกทั้งมีผลลดการเติบโตทั้งในส่วนต้นเหนือดินและส่วนรากอย่างชัดเจน หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน สำหรับข้าวพันธุ์ Pokkali นั้น พบว่าภาวะเค็มมีผลลดการเติบโตด้วยเช่นเดียวกัน แต่จะเห็นผลของภาวะเค็มช้ากว่าข้าวพันธุ์ IR29 ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มไม่มีผลต่อการเติบโตทั้งในส่วนต้นเหนือดินและส่วนรากของข้าวพันธุ์ KDML105 ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลของภาวะเค็มไม่สอดคล้องกับความสามารถในการทนเค็มของข้าวเมื่อศึกษาในระยะก่อนการสืบพันธุ์ (vegetative stage) ซึ่งเป็นระยะที่ข้าวรับรู้ถึงการได้รับภาวะเค็มค่อนข้างไว (Thomson et al., 2010) ส่วนการเติบโตของส่วนต้นที่ลดลงในข้าวพันธุ์ Pokkali และ IR29 นั้น อาจมีส่วนช่วยให้ข้าวสามารถเผชิญกับภาวะเค็มได้นานขึ้น (Munns and Tester, 2008) อย่างไรก็ตาม ข้าวทั้งสองพันธุ์นี้กลับไม่มีการเติบโตของรากเพิ่มมากขึ้น เพื่อที่จะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดน้ำ นอกจากนี้ การได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน ไม่ได้ส่งผลให้ข้าวพันธุ์ KDML105 เกิดความเครียดขึ้นจนถึงระดับที่มีการเติบโตที่ลดลงทั้งในส่วนต้นและราก ทั้งนี้ เมื่อปล่อยให้ข้าวได้รับภาวะเค็มยาวนานขึ้น พบว่าภาวะเค็มมีผลลดการเติบโตของข้าวพันธุ์ KDML105 อีกทั้งยังพบการแห้งตายของใบด้วย ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali นั้น ถึงแม้ว่าจะมีการเติบโตที่ลดลง แต่ต้นข้าวยังคงมีลักษณะที่แข็งแรงอย่างเห็นได้ชัดเจน ในทางตรงกันข้าม ข้าวพันธุ์ IR29 กลับมีการตายของต้นกล้าเกิดขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาที่ได้รับภาวะเค็มเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการทนเค็มของข้าวพันธุ์ต่าง ๆ



สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อโครงสร้างระบบรากนั้น พบว่ามีความแตกต่างกันในข้าวแต่ละพันธุ์ด้วยเช่นกัน โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีการเพิ่มความยาวของรากปฐมภูมิและจำนวนของรากแขนง หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน ทั้งยังมีผลลดจำนวนของรากพิเศษลง เมื่อได้รับความเครียดจากความเค็มเป็นเวลา 21 วัน ซึ่งการเพิ่มความยาวของรากปฐมภูมิในข้าวพันธุ์นี้แตกต่างจากใน *Arabidopsis thaliana* ที่มีการลดความยาวของรากดังกล่าวลง ทั้งนี้ ข้าวพันธุ์ KDML105 กลับมีการเพิ่มจำนวนของรากแขนงเช่นเดียวกับใน *A. thaliana* ซึ่งการเพิ่มจำนวนของรากแขนงนั้น มีประโยชน์ต่อพืชในเรื่องของการเพิ่มความสามารถในการดูดน้ำ เพื่อทดแทนการมีความยาวรากที่ลดลงภายใต้ภาวะเค็ม (Wang et al., 2009) อย่างไรก็ตาม ผลของภาวะเค็มที่มีต่อรากปฐมภูมิของข้าวสามารถเห็นได้ชัดเจนที่ระยะเวลา 14 วัน เมื่อได้รับความเครียดจากความเค็มนานขึ้นเป็นเวลา 21 วัน จะไม่พบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างดังกล่าว เนื่องจากมีปัจจัยเรื่องของอายุรากเข้ามาเกี่ยวข้อง ในทางตรงกันข้าม ภาวะเค็มกลับไม่มีผลต่อรากปฐมภูมิของข้าวพันธุ์ IR29 ซึ่งความแตกต่างกันนี้น่าจะเป็นลักษณะทางพันธุกรรมที่แตกต่างกันในข้าวทั้งสองพันธุ์ข้างต้น โดยทั่วไป เป็นที่ทราบกันว่ารากปฐมภูมิไม่ใช่รากหลักของข้าวที่เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ซึ่งส่วนใหญ่มีความเข้าใจว่ารากนี้จะหยุดการเจริญเติบโตลง เมื่อเกิดการสร้างรากพิเศษที่ทำหน้าที่เป็นระบบรากหลักของข้าว (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2550) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้กลับไม่พบผลการทดลองเช่นนั้น เนื่องจากพบการเปลี่ยนแปลงของรากปฐมภูมิภายใต้ภาวะเค็ม แสดงว่ารากปฐมภูมียังมีการเจริญเติบโตอยู่ ถึงแม้ว่าข้าวจะมีการสร้างระบบรากพิเศษเกิดขึ้นแล้วก็ตาม ในส่วนของรากพิเศษนั้น พบว่าภาวะเค็มมีผลลดจำนวนของรากพิเศษลงในข้าวพันธุ์ IR29 และ KDML105 โดยพบการลดลงของรากพิเศษในข้าวพันธุ์ IR29 เกิดขึ้นเร็วกว่าในข้าวพันธุ์ KDML105 ซึ่งการลดลงนี้มีผลเสียต่อข้าว คือ ลดความสามารถในการดูดน้ำลง ในทางตรงกันข้าม ข้าวพันธุ์ Pokkali นั้น ไม่พบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระบบรากตลอดช่วงระยะเวลาที่ทำการศึกษา แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างระบบรากที่ไม่ได้รับผลกระทบจากภาวะเค็มในข้าวพันธุ์นี้ อาจมีส่วนช่วยทำให้ความสามารถในการหาน้ำของข้าวพันธุ์นี้ดีกว่าในข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า โครงสร้างระบบรากของข้าวที่เป็นระบบรากฝอยมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้ภาวะเค็มแตกต่างจากที่รายงานไว้ใน *A. thaliana* (Wang et al., 2009; Zolla et al., 2009) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระบบรากภายใต้ภาวะเค็มทั้งในพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ มีการควบคุมโดยฮอร์โมนหลายชนิดร่วมกัน จากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า ภาวะเค็มมีผลเพิ่มการสร้างออกซินและเปลี่ยนแปลงรูปแบบในการลำเลียงฮอร์โมนดังกล่าว ทำให้เซลล์เพริไซเคลมีออกซินในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งกระตุ้นให้เซลล์เกิดการแบ่งตัวและเจริญไปเป็นรากแขนงมากขึ้นกว่าในภาวะปกติ (Wang et al., 2009; Zolla et al., 2009) นอกจากนี้ เซลล์บริเวณรากที่ได้รับกรด

แอปไซซิคมมากขึ้น จะมีการเปลี่ยนแปลงโดยสร้างรากแขนงและขนรากเพิ่มมากขึ้นด้วย (Chen et al., 2006)

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าภาวะเค็มมีผลลดการเติบโตของข้าวทั้งในส่วนต้นและส่วนราก ซึ่งอาจแตกต่างกันในข้าวแต่ละพันธุ์และขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ได้รับความเครียดจากความเค็ม ทั้งนี้ ภาวะดังกล่าวมีผลเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระบบรากด้วย ซึ่งอาจเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ข้าวแต่ละพันธุ์มีความสามารถในการดูดน้ำแตกต่างกันภายใต้ภาวะเค็ม



## 5.2 ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน เมื่อได้รับภาวะเค็มในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ

จากการศึกษาผลของภาวะเค็มที่มีต่อลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่าภาวะเค็มมีผลเพิ่มพื้นที่ของรากในข้าวทุกพันธุ์ที่ใช้ในการทดลอง ทั้งยังมีการเพิ่มพื้นที่ของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29 อีกด้วย ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ Akram et al. (2002) และ Atabayeva et al. (2013) ที่พบว่าภาวะเค็มมีผลลดพื้นที่ของชั้นคอร์เทกซ์และชั้นสตีลของรากในข้าวบาร์เลย์และข้าวสาลี โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลให้รากมีการลำเลียงน้ำลดลง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ ทั้งนี้ ผลของภาวะเค็มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากขึ้นอยู่กับพันธุกรรมของพืชด้วย นอกจากนี้ การที่พืชตอบสนองต่อภาวะเค็มต่างกัน อาจเนื่องมาจากระดับของความเค็มที่พืชได้รับ สำหรับการทดลองนี้ มีการให้ข้าวได้รับภาวะเค็มที่ระดับความเข้มข้น 60 มิลลิโมลาร์ ส่วนงานวิจัยก่อนหน้านี้ มีการให้ข้าวบาร์เลย์และข้าวสาลีได้รับภาวะเค็มที่ระดับ 100 มิลลิโมลาร์ แสดงว่าการได้รับความเครียดจากความเค็มที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน ส่งผลให้รากมีการตอบสนองต่อภาวะเค็มแตกต่างกันด้วย โดยการให้ภาวะเค็มที่ระดับความเข้มข้นต่ำ พบว่ารากสามารถเจริญเติบโตต่อไปได้ โดยยังคงมีการเจริญเติบโตทางด้านข้าง ถึงแม้ว่าการเจริญเติบโตทางด้านความยาวของรากจะลดลงก็ตาม ในทางตรงกันข้าม การได้รับภาวะเค็มที่ระดับความเข้มข้นสูง มีผลลดการเจริญเติบโตของรากทั้งด้านความยาวและด้านข้าง (Céccoli et al., 2011) โดยทั่วไป ภาวะเค็มมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของรากทางด้านความยาว แต่กลับมีการสร้างรากแขนงเพิ่มมากขึ้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดน้ำเข้าสู่เนื้อเยื่อลำเลียงน้ำโดยตรง (Julkowska et al., 2014; Zolla et al., 2009)

เมื่อพิจารณาถึงการเพิ่มพื้นที่ของรากและพื้นที่ของชั้นสตีลในรากข้าวภายใต้ภาวะเค็ม พบว่าภาวะดังกล่าวมีผลเพิ่มพื้นที่ของรากในข้าวทุกสายพันธุ์อย่างต่อเนื่องตามช่วงระยะเวลาที่ได้รับ ความเครียดจากความเค็ม ในทางตรงกันข้าม ผลของภาวะเค็มที่มีต่อการเพิ่มพื้นที่ของชั้นสตีลสามารถพบได้ในข้าวบางพันธุ์ที่ทำการทดลอง ได้แก่ ข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29 ซึ่งเป็นพันธุ์มาตรฐานไม่ทนเค็ม จากการศึกษาก่อนหน้านี้ พบว่าการให้ข้าวได้รับภาวะแล้ง มีผลทำให้พื้นที่ของชั้นสตีลเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน (Henry et al., 2012) แสดงว่าการขยายขนาดของชั้นสตีลของรากทั้งภายใต้ภาวะเค็มและภาวะแล้งนั้น อาจจะมีผลเพิ่มความสามารถในการลำเลียงน้ำได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของชั้นสตีลภายใต้ภาวะเค็มอาจส่งผลกระทบต่อข้าว เนื่องจากมีปัจจัยเรื่องไอออนของเกลือเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยเมื่อรากมีการลำเลียงน้ำมากขึ้น ส่งผลให้การลำเลียงไอออนของเกลือขึ้นสู่ต้นก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งข้อสังเกตดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาที่พบว่า ข้าวพันธุ์ Pokkali ที่เป็นพันธุ์มาตรฐานทนเค็ม ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของชั้นสตีล หลังจากได้รับภาวะเค็มที่

ช่วงเวลาต่าง ๆ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ของชั้นสตีลต่อพื้นที่ของรากทั้งหมด ปรากฏว่าภาวะเค็มมีผลลดพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ IR29 หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน และ 14 วัน แต่การลดลงของค่าดังกล่าวเกิดขึ้นที่ระยะเวลา 21 วัน ในข้าวพันธุ์ Pokkali อย่างไรก็ตาม ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์นี้ในข้าวพันธุ์ KDML105 ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง ซึ่งการลดลงของพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลในข้าวพันธุ์ Pokkali ที่เป็นพันธุ์มาตรฐานทนเค็มนั้น แตกต่างจากข้าวพันธุ์ IR29 ที่เป็นพันธุ์มาตรฐานไม่ทนเค็ม ซึ่งการลดลงของค่าดังกล่าวในข้าวพันธุ์ Pokkali เกิดจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่รากทั้งหมด โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของชั้นสตีล ในทางตรงกันข้ามข้าวพันธุ์ IR29 นั้น มีการเพิ่มขึ้นของชั้นสตีลเกิดขึ้นด้วย ทั้งนี้ การที่รากมีพื้นที่สัมผัสของชั้นสตีลลดลงภายใต้ภาวะเค็ม อาจมีส่วนช่วยลดการนำไอออนของเกลือขึ้นไปสู่ส่วนต้นเหนือดิน อีกทั้งการมีเนื้อเยื่อชั้นคอร์เทกซ์ในสัดส่วนที่มากกว่าเนื้อเยื่อลำเลียง อาจมีประโยชน์ต่อพืชในการลดการลำเลียงไอออนเกลือและการใช้พลังงาน เนื่องจากเนื้อเยื่อชั้นคอร์เทกซ์ส่วนใหญ่เป็นเนื้อเยื่อแอโรเรซิมาที่มีกระบวนการเมตาบอลิซึมต่ำ จึงมีการใช้พลังงานน้อย ด้วยเหตุนี้ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจึงสอดคล้องกับความสามารถในการทนเค็มของข้าวพันธุ์ Pokkali อย่างไรก็ตาม กลไกดังกล่าวอาจไม่มากเพียงพอที่จะช่วยลดความเครียดจากความเค็มในข้าวพันธุ์ IR29 ได้ ซึ่งในพันธุ์ทนเค็มมักมีกลไกอื่นที่ช่วยให้พืชสามารถทนต่อภาวะเค็มได้ ยกตัวอย่างเช่น ความสามารถในการลดการสะสมไอออนเกลือในไซโทพลาซึม โดยนำไปเก็บสะสมไว้ภายในแวคิวโอล (Flowers et al., 1977; Horie et al., 2012)

สำหรับลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากข้าวทุกพันธุ์ที่ใช้ในการทดลองนั้น พบว่าภายในชั้นคอร์เทกซ์ส่วนใหญ่ประกอบด้วยเนื้อเยื่อแอโรเรซิมา ซึ่งลักษณะดังกล่าวสามารถพบได้ทั้งในภาวะปกติและภาวะเค็ม ดังนั้น การสลายของเนื้อเยื่อพาราเรซิมาในชั้นคอร์เทกซ์ให้กลายเป็นเนื้อเยื่อแอโรเรซิมาไม่ได้เกิดจากภาวะเค็ม ซึ่งการสร้างแอโรเรซิมาในชั้นคอร์เทกซ์ของรากข้าวนั้น เป็นลักษณะที่สามารถพบได้โดยทั่วไป ทั้งการปลูกข้าวในดินที่มีการระบายน้ำได้ดีและการปลูกข้าวแบบไฮโดรพอนิกส์ (hydroponic culture) ที่มีการพ่นอากาศให้กับระบบราก (Gowda et al., 2011) อย่างไรก็ตาม การสร้างแอโรเรซิมาขึ้นอยู่กับความสามารถในการทนต่อสภาพแวดล้อมที่มีน้ำท่วมขังด้วย จากงานวิจัยของ Setter and Waters (2003) และ Thomson et al. (1992) พบว่าข้าวโอ๊ตและข้าวทริทิกาลี (triticale) ที่เป็นข้าวพันธุ์ทนต่อภาวะน้ำท่วมขังสูง จะมีการสร้างแอโรเรซิมามากกว่าในรากข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์ ซึ่งมีความสามารถในการทนต่อภาวะน้ำท่วมขังต่ำ ทั้งยังพบว่ารากข้าวมีความสามารถในการทนต่อภาวะน้ำท่วมขังสูงกว่าข้าวทริทิกาลีอีกด้วย โดยมีการสร้างแอโรเรซิมามากถึงร้อยละ 40-45 ของพื้นที่รากทั้งหมด สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อการสร้างแอโรเรซิมาในรากข้าว มีข้อสังเกตที่พบว่ารากมีการสร้างแอโรเรซิมาบริเวณที่ใกล้กับปลายรากมากขึ้น เมื่อได้รับความเครียด

จากความเค็ม (Krishnamurthy et al., 2009) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้กลับไม่พบความแตกต่างของการสร้างแอสคอร์บิกในชั้นคอร์เทกซ์ของรากทั้งในภาวะปกติและภาวะเค็ม เนื่องจากการทดลองนี้มีการตัดตัวอย่างรากที่ความยาวจากปลายราก 10 เซนติเมตร และ 20 เซนติเมตร ซึ่งรากที่ความยาวดังกล่าวมีการพัฒนาเนื้อเยื่อแอสคอร์บิกที่สมบูรณ์แล้ว โดยเนื้อเยื่อนี้มีประโยชน์ต่อพืชในด้านของการแพร่กระจายแก๊สออกซิเจนจากต้นไปสู่ราก รวมถึงลดการใช้พลังงานของเซลล์ด้วย เนื่องจากเนื้อเยื่อแอสคอร์บิกมีกระบวนการเมตาบอลิซึมต่ำ ส่งผลให้รากสามารถเจริญเติบโตต่อไปได้ภายใต้สภาวะที่ไม่เหมาะสม (Gowda et al., 2011; Yamauchia et al., 2013)

จากงานวิจัยของ Reinhardt and Rost (1995) พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้รากฝายเกิดการพัฒนารวมของเอกโซเดอริสขึ้น ซึ่งแตกต่างจากภาวะปกติที่ไม่พบการพัฒนาโครงสร้างดังกล่าว อีกทั้งยังมีผลเร่งการพัฒนาของเอกโซเดอริสและเอนโดเดอริสในตำแหน่งที่ใกล้กับปลายรากมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้กลับไม่พบการพัฒนาโครงสร้างเหล่านี้เร็วขึ้นภายใต้ภาวะเค็ม เนื่องจากการศึกษาโครงสร้างรากที่ความยาวจากปลายราก 10 เซนติเมตร และ 20 เซนติเมตร อาจเป็นระยะที่ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากภาวะเค็ม ในงานวิจัยของ Krishnamurthy et al. (2009) พบว่าภาวะเค็มมีผลเพิ่มการสะสมสารซูเบอรินที่ผนังเซลล์ของเซลล์ในเอกโซเดอริสและเอนโดเดอริสด้วย โดยข้าวที่มีความสามารถในการทนเค็มต่างกัน จะมีการสะสมสารซูเบอรินในเอกโซเดอริสและเอนโดเดอริสในรากที่มีความยาว 2-10 เซนติเมตร โดยข้าวพันธุ์ไม่ทนเค็มมีการสะสมสารดังกล่าวมากกว่าข้าวพันธุ์ที่ทนต่อความเค็ม อย่างไรก็ตาม จากการสังเกตพบว่าเซลล์ในเอกโซเดอริสมีการสะสมสารซูเบอรินโดยรอบเซลล์เพิ่มมากขึ้นเฉพาะในข้าวพันธุ์ IR29 ที่เผชิญกับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน และ 21 วัน ส่วนข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali กลับไม่มีการสะสมสารดังกล่าวเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลาใด ๆ ในทางตรงกันข้าม ข้าวทุกพันธุ์ที่ใช้ในการทดลองมีการสะสมสารซูเบอรินเพิ่มมากขึ้นที่บริเวณผนังเซลล์ด้านในที่ติดกับชั้นสตีลของเซลล์ในเอนโดเดอริส โดยข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29 มีการสะสมสารดังกล่าวเพิ่มขึ้น หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน จนกระทั่งถึง 21 วัน ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali มีการสะสมสารซูเบอรินเพิ่มขึ้น หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 14 วัน และ 21 วัน แสดงว่าการสะสมสารดังกล่าวเกี่ยวข้องกับความสามารถในการทนเค็มของข้าวด้วย

สำหรับการศึกษาผลของภาวะเค็มที่มีต่อการสร้างแคสพาเรียนสตรีพนั้น จากการทดลองนี้ไม่สามารถสังเกตเห็นส่วนของแคสพาเรียนสตรีพที่มีสารซูเบอรินและ/หรือลิกนินเป็นองค์ประกอบได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้เพราะสีย้อม Sudan red 7B อาจไม่มีความจำเพาะมากเพียงพอที่จะสังเกตเห็นโครงสร้างดังกล่าว เนื่องจากสีย้อมชนิดนี้ใช้ในการตรวจสอบสารซูเบอริน (Brundrette et al., 1991) แต่บริเวณรอบผนังเซลล์มีส่วนของซูเบอริน ลาเมลลา ดังนั้น เมื่อทำการย้อมด้วยสี Sudan red 7B ส่งผลให้ส่วนดังกล่าวเกิดการติดสีย้อมด้วย จึงไม่สามารถสังเกตเห็นส่วนของแคสพาเรียน

สตรีฟได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยของ Krishnamurthy et al. (2009) พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้รากข้าวเกิดการสร้างแคสพาเรียนสตรีฟเร็วขึ้น ทั้งในข้าวพันธุ์ที่ทนและไม่ทนต่อความเค็ม ซึ่งเป็นหลักฐานที่ยืนยันว่า รากข้าวมีการพัฒนาส่วนของแคสพาเรียนสตรีฟเกิดขึ้นด้วย โดยงานวิจัยดังกล่าวมีการใช้สีย้อม berberine-aniline blue ที่มีความจำเพาะต่อการศึกษาส่วนของแคสพาเรียนสตรีฟ เนื่องจากสีย้อมชนิดนี้ช่วยในการชักนำให้เกิดการเรืองแสงของแคสพาเรียนสตรีฟมากขึ้น จึงสามารถสังเกตเห็นโครงสร้างดังกล่าวได้

ทั้งนี้ ภาวะเค็มมีผลเร่งการพัฒนาส่วนของสเกลอเรนคิมาในรากข้าวพันธุ์ Pokkali และ IR29 ซึ่งการพัฒนาโครงสร้างนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการทนเค็มของข้าวด้วย โดยข้าวพันธุ์ IR29 มีการพัฒนาสเกลอเรนคิมา เมื่อได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 7 วัน ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali มีการกระตุ้นให้รากเกิดการพัฒนาโครงสร้างดังกล่าว หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 21 วัน ซึ่งส่วนของสเกลอเรนคิมามีส่วนช่วยในการเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับราก (Horie et al., 2012) การที่พบการพัฒนาโครงสร้างนี้ช้ากว่าในข้าวพันธุ์ Pokkali แสดงให้เห็นว่าข้าวพันธุ์ Pokkali ได้รับผลจากภาวะเค็มช้ากว่าข้าวพันธุ์ IR29 ส่วนในข้าวพันธุ์ KDML105 นั้น ยังไม่สามารถสรุปผลของภาวะเค็มที่มีต่อการพัฒนาของสเกลอเรนคิมาได้ เนื่องจากมีปัจจัยเรื่องอายุของรากเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

สำหรับการศึกษาลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากที่ความยาวต่าง ๆ พบว่าอายุรากมีผลต่อการตอบสนองของรากภายใต้ภาวะเค็ม โดยรากที่มีอายุน้อย (รากที่ความยาว 10 เซนติเมตร) มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะกายวิภาคศาสตร์มากกว่ารากที่มีอายุมาก (รากที่ความยาว 20 เซนติเมตร) อาจเนื่องมาจากรากที่มีอายุมากมีการเจริญเติบโตมาก่อนที่ข้าวจะได้รับผลจากความเค็ม ดังนั้นจึงอาจมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะดังกล่าวน้อยกว่ารากที่มีอายุน้อย ซึ่งข้าวแต่ละพันธุ์มีการตอบสนองต่อภาวะเค็มแตกต่างกัน โดยข้าวพันธุ์ IR29 พบการเปลี่ยนแปลงลักษณะกายวิภาคศาสตร์ทั้งในรากที่มีอายุน้อยและรากที่มีอายุมาก หลังจากที่ได้รับภาวะเค็มเป็นเวลาเพียงแค่ 7 วัน ส่วนในข้าวพันธุ์ Pokkali และ KDML105 พบว่าเมื่อรากเผชิญกับภาวะเค็มเป็นเวลานานถึง 21 วัน ส่งผลให้ลักษณะดังกล่าวทั้งในรากที่มีอายุน้อยและรากที่มีอายุมากเกิดการเปลี่ยนแปลงไป จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ข้าวพันธุ์ IR29 ที่เป็นพันธุ์ไม่ทนเค็มจะได้รับผลของความเครียดจากความเค็มมากกว่าข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali ดังนั้น ผลของภาวะเค็มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะกายวิภาคศาสตร์สอดคล้องกับลักษณะทางพันธุกรรมของข้าวด้วย

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าภาวะเค็มมีผลเปลี่ยนแปลงลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากแตกต่างกันในข้าวที่มีความสามารถในการทนเค็มต่างกัน โดยมีการเพิ่มพื้นที่ของรากทั้งหมดในข้าวทุกพันธุ์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการเพิ่มขึ้นของเนื้อเยื่อแอสคิม่า ทั้งนี้ การเปลี่ยนแปลงลักษณะดังกล่าวของรากในข้าวพันธุ์ทนเค็ม เกิดขึ้นหลังจากที่รากได้รับภาวะเค็มเป็นระยะเวลาสั้น ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการทน

ต่อความเครียดจากความเค็ม นอกจากนี้ การเพิ่มพื้นที่ของชั้นสดีลที่พบในข้าวพันธุ์ที่ค่อนข้างอ่อนแอ ต่อภาวะเค็ม อาจมีผลเชิงลบต่อพืชในเรื่องของการนำไอออนของเกลือเข้าสู่ราก



### 5.3 ลักษณะรูปแบบการสร้างและควมมีชีวิตของบอร์เดอร์เซลล์ของราก และความหนาของสารเมือกที่บอร์เดอร์เซลล์สร้างขึ้นบริเวณปลายรากของข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน ภายใต้ภาวะปกติและภาวะเค็ม

จากการศึกษารูปแบบการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากในข้าวที่มีความสามารถในการทนเค็มต่างกัน พบว่าข้าวทุกพันธุ์ที่ใช้ในการทดลองข้างต้น มีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์เกิดขึ้นตั้งแต่เมื่อมีการงอกของรากออกจากเมล็ด (Cai and Zhang and et al., 2011; Xing et al., 2008) ซึ่งรูปแบบการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ในขณะที่มีการงอกของรากแรกเกิด เป็นรูปแบบที่สามารถพบได้ทั้งในพีชใบเลี้ยงเดี่ยวและพีชใบเลี้ยงคู่ (Cannesan et al., 2011; Chen et al., 2008; Pan et al., 2004; Qiao et al., 2013; Yan et al., 2014) เมื่อรากมีความยาวเพิ่มขึ้น พีชจะมีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์จำนวนเพิ่มขึ้นด้วย จนกระทั่งถึงความยาวรากที่มีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์สูงสุด ซึ่งความยาวที่พบการสร้างเซลล์ดังกล่าวจำนวนสูงสุดนั้น อาจแตกต่างกันในพีชแต่ละชนิด โดยทั่วไป พบว่าความยาวรากที่มีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์จำนวนสูงสุดจะอยู่ในช่วง 2.0-2.5 เซนติเมตร (Cai and Zhang and et al., 2011; Hawes and Lin, 1990; Pan et al., 2002; Qiao et al., 2013; Zhao et al., 2000) จากการทดลองข้างต้น เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่ารูปแบบการสร้างเซลล์ดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องกับความสามารถในการทนเค็มของพีช ซึ่งข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29 มีรูปแบบการสร้างบอร์เดอร์เซลล์คล้ายคลึงกัน โดยหลังจากที่มีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์จำนวนสูงสุดที่ความยาว 1.0 เซนติเมตร ข้าวทั้งสองพันธุ์จะมีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในทางตรงกันข้าม ข้าวพันธุ์ Pokkali กลับมีจำนวนบอร์เดอร์เซลล์ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดความยาวรากที่ทำการทดลอง ทั้งนี้ การที่ข้าวพันธุ์ Pokkali มีรูปแบบการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ต่างจากข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29 อาจเกี่ยวข้องกับความแตกต่างทางพันธุกรรม ซึ่งงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า พีชชนิดเดียวกันมักมีรูปแบบการสร้างเซลล์ดังกล่าวเหมือนกัน (Cai and Zhang and et al., 2011) จึงอาจกล่าวได้ว่า ความแตกต่างของรูปแบบการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ ถือเป็นความแตกต่างที่เกิดขึ้นภายในพีชชนิดเดียวกัน (intraspecies) ซึ่งยังไม่มีผลการรายงานในพีชชนิดนี้มาก่อน

สำหรับรูปแบบการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของราก เกี่ยวข้องกับกระบวนการแบ่งเซลล์ของเนื้อเยื่อเจริญหวมกรากและการผลัดบอร์เดอร์เซลล์ออกจากปลายราก โดยการทำงานของเอนไซม์เพกทิน เมทิลเอสเทอเรส ทั้งนี้ การผลัดบอร์เดอร์เซลล์ออกจากปลายรากมีผลต่อกระบวนการแบ่งเซลล์ของบอร์เดอร์เซลล์ด้วย (Pan et al., 2002; Stephenson and Hawes, 1994; Wen, 2009; Wen et al., 1999) ซึ่งจากการทดลองพบว่า ข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29 มีจำนวนบอร์เดอร์เซลล์ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะจำนวนเซลล์ที่พบบริเวณปลายรากที่ความยาว 1.0 เซนติเมตร



ซึ่งเป็นความยาวรากที่มีการสร้างบอร์เตอร์เซลล์สูงสุด ( $5229 \pm 470$  เซลล์/ราก และ  $4497 \pm 355$  เซลล์/ราก ตามลำดับ) ในทางตรงกันข้าม ข้าวพันธุ์ Pokkali กลับมีจำนวนของบอร์เตอร์เซลล์ที่ความยาวรากดังกล่าวค่อนข้างน้อย ( $3754 \pm 266$  เซลล์/ราก) เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวทั้งสองพันธุ์ข้างต้น จึงอาจเป็นไปได้ว่า ข้าวพันธุ์ Pokkali ซึ่งเป็นพันธุ์มาตรฐานทนเค็ม มีกระบวนการแบ่งตัวของเซลล์และ มีกิจกรรมของเอนไซม์เพกทิน เมทิลเอสเทอเรส น้อยกว่าข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29 ซึ่งเป็นพันธุ์มาตรฐานไม่ทนเค็ม สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าของ Cai and Wang and et al. (2011) ที่พบว่าถั่วเหลืองพันธุ์ที่ทนต่อความเป็นพิษของอะลูมิเนียม จะมีกิจกรรมของเอนไซม์ดังกล่าวน้อยกว่า ถั่วเหลืองพันธุ์ที่ไม่ทนต่อความเป็นพิษของอะลูมิเนียม แสดงว่าการที่พืชมีกิจกรรมของเอนไซม์ดังกล่าวน้อย ส่งผลให้พืชสามารถผลิตบอร์เตอร์เซลล์ออกจากปลายรากได้เป็นจำนวนน้อยลงด้วย

ในส่วนของความยาวรากที่มีการสร้างบอร์เตอร์เซลล์จำนวนสูงสุดของข้าวทุกพันธุ์ที่ใช้ในการทดลองข้างต้นนั้น พบว่ามีการสร้างบอร์เตอร์เซลล์จำนวนสูงสุดที่ความยาว 1.0 เซนติเมตร ซึ่งแตกต่างจากการทดลองของ Cai and Zhang and et al. (2011) และ Xing et al. (2008) ที่พบว่าข้าวมีรูปแบบการสร้างบอร์เตอร์เซลล์จำนวนสูงสุดที่ความยาวในช่วง 2.0-2.5 เซนติเมตร อีกทั้งจำนวนบอร์เตอร์เซลล์ที่พบบริเวณปลายรากข้าวที่ช่วงความยาวต่าง ๆ มีจำนวนน้อยกว่าบอร์เตอร์เซลล์ที่พบในการศึกษาข้างต้นนี้ อาจเป็นไปได้ว่า การเพาะปลูกพืชภายใต้สภาพแวดล้อมที่ต่างกัน มีผลต่อรูปแบบการสร้างและจำนวนของบอร์เตอร์เซลล์ โดยในงานวิจัยนี้ ได้ทำการเพาะปลูกพืชบนอาหารวุ้นที่ผสมธาตุอาหาร ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้า ที่ทำการเพาะปลูกพืชโดยให้รากได้รับความชื้นจากอากาศที่อิมตัวด้วยไอน้ำ (aeroponic culture) และไม่ได้มีการพ่นธาตุอาหารให้กับพืช ภายใต้สภาวะดังกล่าว ข้าวจะมีการสร้างบอร์เตอร์เซลล์สูงสุดเป็นจำนวนประมาณ 1600 เซลล์/ราก จึงอาจเป็นไปได้ว่า การที่พืชได้รับธาตุอาหารในปริมาณที่เหมาะสม ส่งผลให้พืชมีการเจริญเติบโตที่รวดเร็วมากยิ่งขึ้น จึงสามารถพบการสร้างบอร์เตอร์เซลล์จำนวนสูงสุดที่ความยาว 1.0 เซนติเมตร ทั้งยังส่งผลให้รากมีการสร้างบอร์เตอร์เซลล์จำนวนมากขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาถึงความมีชีวิตของบอร์เตอร์เซลล์ที่พบจากการทดลองนี้ ปรากฏว่าเซลล์ดังกล่าวมีความมีชีวิตสูงมาก สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hawes et al. (1998) และ Hawes and Pueppke (1986) ที่กล่าวว่าบอร์เตอร์เซลล์เป็นเซลล์ที่มีความมีชีวิตสูงมากถึง 90 เปอร์เซ็นต์ โดยเซลล์ดังกล่าวสามารถมีชีวิตได้ยืนยาวตราบเท่าที่เซลล์ยังคงได้รับธาตุอาหารในปริมาณที่เหมาะสมและไม่ได้รับภาวะเครียดทั้งทางกายภาพและชีวภาพ แสดงว่าธาตุอาหารมีผลเพิ่มจำนวนการสร้างและลดการตายของบอร์เตอร์เซลล์

หลังจากที่ให้ภาวะเค็มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่ารากข้าวพันธุ์ KDML105 และ IR29 บางส่วนหยุดการเจริญเติบโต (11.8 เปอร์เซ็นต์ และ 25.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) ส่วนรากข้าวพันธุ์ Pokkali สามารถเจริญเติบโตได้ทั้งหมด ทั้งนี้ รากข้าวพันธุ์ KDML105 ที่หยุดการเจริญเติบโตกลับมี

การสร้างบอร์เดอร์เซลล์จำนวนน้อยกว่าภาวะปกติอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งบอร์เดอร์เซลล์แต่ละเซลล์ที่พบยังมีความหนาของสารเมือกน้อยกว่าภาวะปกติอย่างมีนัยสำคัญอีกด้วย อย่างไรก็ตาม ไม่พบว่าภาวะเค็มมีผลทำให้เกิดการตายของบอร์เดอร์เซลล์ในข้าวพันธุ์ KDML105 จึงเป็นไปได้ว่า จำนวนบอร์เดอร์เซลล์ที่ลดลง อาจเกิดจากความผิดพลาดทางเทคนิคในระหว่างการเก็บตัวอย่าง แต่ไม่ได้เกิดจากผลของภาวะเค็มที่มีต่อความมีชีวิตของบอร์เดอร์เซลล์ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาถึงรากข้าวพันธุ์ IR29 ที่หยุดการเจริญเติบโตเช่นเดียวกัน พบว่ามีจำนวนของบอร์เดอร์เซลล์และความหนาของสารเมือกที่เซลล์ดังกล่าวสร้างขึ้นไม่เปลี่ยนแปลงไปจากภาวะปกติ โดยไม่พบการตายของบอร์เดอร์เซลล์ภายใต้ภาวะเค็มด้วยเช่นกัน จึงสนับสนุนว่าการลดลงของบอร์เดอร์เซลล์ในข้าวพันธุ์ KDML105 ไม่ได้เกิดจากภาวะเค็ม นอกจากนี้ ยังไม่พบการตายของบอร์เดอร์เซลล์เกิดขึ้น เมื่อได้รับภาวะเค็มที่ระดับความเข้มข้น 60 มิลลิโมลาร์

ในส่วนของรากข้าวที่สามารถเจริญเติบโตต่อไปได้ภายใต้ภาวะเค็มนั้น พบว่าภาวะดังกล่าวมีผลเปลี่ยนแปลงจำนวนของบอร์เดอร์เซลล์เฉพาะในข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali โดยมีจำนวนของบอร์เดอร์เซลล์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนข้าวพันธุ์ IR29 ซึ่งเป็นมาตรฐานไม่ทนเค็ม กลับไม่พบการสร้างบอร์เดอร์เซลล์เพิ่มขึ้นภายใต้ภาวะเค็มแต่อย่างใด ทั้งนี้ การที่ข้าวพันธุ์ KDML105 และ Pokkali มีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์เพิ่มขึ้นหลังจากที่ได้รับภาวะเค็มนั้น แสดงว่าเซลล์ดังกล่าวอาจมีส่วนช่วยให้ข้าวทั้งสองพันธุ์สามารถทนต่อภาวะเค็มได้ สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่า การให้ปลายรากได้รับความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูง รวมถึงการได้รับความเป็นพิษของอะลูมิเนียมไอออน ส่งผลให้พืชมีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์จำนวนมากขึ้นด้วย (Yu et al., 2009; Zhao et al., 2000) โดยเซลล์ดังกล่าวทำหน้าที่ในการสร้างสารเมือก เพื่อช่วยปกป้องปลายรากจากความเครียดต่าง ๆ ทั้งยังช่วยลดการนำอะลูมิเนียมไอออนเข้าสู่เซลล์อีกด้วย (Cai and Wang and et al., 2011; Cai and Zhang and et al., 2011) ดังนั้น การที่ภาวะเค็มมีผลทำให้ปลายรากข้าวมีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์เพิ่มมากขึ้น จึงอาจเป็นการเพิ่มการสร้างสารเมือกที่มีส่วนช่วยในการลดการนำไอออนของเกลือเข้าสู่เซลล์ได้ เนื่องจากสารเมือกมีโครงสร้างที่มีประจุลบ (Cai and Wang and et al., 2011; Taiz and Zeiger, 2002; Western et al., 2000; เอกสมทราเมษฐ์, 2547) ทำให้สามารถจับกับไอออนชนิดต่าง ๆ ที่มีประจุบวกได้ รวมถึงไอออนของเกลือด้วย อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของเซลล์ดังกล่าวในข้าวทั้งสองพันธุ์กลับพบที่ความยาวรากต่างกัน โดยข้าวพันธุ์ KDML105 พบการเพิ่มขึ้นของเซลล์ที่ความยาว 1.5 เซนติเมตร ส่วนข้าวพันธุ์ Pokkali พบที่ความยาว 2.0 เซนติเมตร โดยข้าวพันธุ์ KDML105 มีจำนวนบอร์เดอร์เซลล์ที่ค่อนข้างสูงกว่าข้าวพันธุ์ Pokkali ทั้งนี้ อาจเป็นไปได้ว่าข้าวพันธุ์ Pokkali ที่เป็นพันธุ์มาตรฐานทนเค็ม อาจมีกลไกอื่นที่ช่วยลดความเครียดจากภาวะเค็ม เช่น การสังเคราะห์สารจำพวกพอลิเอมีน (polyamines) เพิ่มขึ้น โดยสาร

ดังกล่าวทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตและการควบคุมสมดุลของไอออนภายในเซลล์ การสร้างเอนไซม์คะตะเลส (catalase) และเอนไซม์แอสคอร์เบต เเพอร์ออกซิเดส (ascorbate peroxidase) เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant enzymes) เพื่อช่วยลดความเป็นพิษของอนุมูลอิสระภายในเซลล์ เป็นต้น (Demiral and Türkan, 2005; Krishnamurthy and Bhagwat, 1989) แสดงว่าความสามารถในการทนเค็มของข้าว ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการสร้างบอร์เตอร์เซลล์เพียงกลไกเดียวเท่านั้น สำหรับรากข้าวพันธุ์ IR29 ที่สามารถเจริญเติบโตต่อไปได้ภายใต้ภาวะเค็ม จนมีความยาว 2.0 เซนติเมตร จากการทดลองจะเห็นได้ว่า มีเปอร์เซ็นต์การพบตัวอย่างที่ค่อนข้างต่ำมาก จึงทำให้ไม่สามารถสรุปผลได้อย่างชัดเจนว่า ภาวะเค็มมีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของจำนวนบอร์เตอร์เซลล์ในข้าวพันธุ์ดังกล่าวหรือไม่

สำหรับผลของภาวะเค็มที่มีต่อการสร้างสารเมือกของบอร์เตอร์เซลล์แต่ละเซลล์ พบว่าภาวะเค็มลดความสามารถในการสร้างเมือกเฉพาะในข้าวพันธุ์ IR29 เท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการทนเค็มต่ำในข้าวพันธุ์นี้ สำหรับการสร้างสารเมือกของบอร์เตอร์เซลล์นั้น มีความจำเพาะกับภาวะเครียดหรือชนิดของสิ่งเร้าที่พืชได้รับ เช่น การให้พืชได้รับความเครียดจากกรดซินนามิก (cinnamic acid) ส่งผลให้บอร์เตอร์เซลล์มีการสร้างสารเมือกเพิ่มมากขึ้นในพืชตระกูลแตง (Qiao et al., 2013) เช่นเดียวกันกับการได้รับความเป็นพิษของอะลูมิเนียมไอออน ส่งผลให้บอร์เตอร์เซลล์ของพืชตระกูลถั่วมีความหนาของสารเมือกเพิ่มมากขึ้นด้วย (Cai and Wang and et al., 2011) นอกจากนี้ บอร์เตอร์เซลล์ของถั่วจะมีการตอบสนองต่อแบคทีเรียแต่ละชนิดแตกต่างกัน โดยเมื่อได้รับเชื้อ *Agrobacterium tumefaciens* เซลล์มีการสร้างสารเมือกหนามากขึ้น ในทางตรงกันข้าม บอร์เตอร์เซลล์กลับไม่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของสารเมือก เมื่อได้รับเชื้อ *Escherichia coli* (Miyasaka and Hawes, 2001) ส่วนในงานวิจัยนี้กลับพบว่า ภาวะเค็มไม่มีผลทำให้บอร์เตอร์เซลล์แต่ละเซลล์สร้างสารเมือกเพิ่มขึ้นในข้าวทุก ๆ พันธุ์ที่ใช้ในการทดลอง อีกทั้งยังมีผลลดการสร้างสารเมือกในข้าวพันธุ์ IR29 อีกด้วย

เมื่อพิจารณาถึงควมมีชีวิตของบอร์เตอร์เซลล์ในข้าวทุกสายพันธุ์ที่ใช้ในการทดลองข้างต้นนี้ พบว่าการให้ภาวะเค็มที่ระดับความเข้มข้น 60 มิลลิโมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไม่มีผลต่อควมมีชีวิตของบอร์เตอร์เซลล์ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ อาจเนื่องมาจากระดับของภาวะเค็มและระยะเวลาที่ข้าวได้รับภาวะดังกล่าวไม่นานมากนัก ซึ่งมีรายงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่า ควมมีชีวิตของบอร์เตอร์เซลล์จะลดลงเมื่อพืชได้รับภาวะเครียดในระดับสูงเป็นระยะเวลานาน ยกตัวอย่างเช่น ในงานวิจัยของ Cai and Wang and et al. (2011) ที่พบว่า การให้พืชได้รับความเครียดจากความเป็นพิษของอะลูมิเนียมไอออนที่มีความเข้มข้นสูงเป็นช่วงระยะเวลานานนั้น มีผลทำให้ควมมีชีวิตของบอร์เตอร์เซลล์ลดลง

โดยถ้วยพันธุ์ที่ไม่ทนต่อความเป็นพิษของอะลูมิเนียมไอออน มีการตายของบอร์เดอร์เซลล์สูงมากกว่าถ้วยพันธุ์ที่สามารถทนต่อความเป็นพิษของอะลูมิเนียมไอออนได้ เป็นต้น

ดังนั้น จึงอาจสรุปได้ว่ารูปแบบการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ของรากในพืชชนิดเดียวกันแต่ต่างสายพันธุ์กัน จะมีรูปแบบการสร้างบอร์เดอร์เซลล์ที่แตกต่างกันด้วย ขึ้นอยู่กับความสามารถในการทนเค็มของข้าวสายพันธุ์นั้น ๆ ทั้งนี้ ข้าวแต่ละสายพันธุ์ยังมีการตอบสนองต่อภาวะเค็มที่แตกต่างกัน โดยข้าวบางสายพันธุ์มีการสร้างบอร์เดอร์เซลล์เพิ่มมากขึ้น เพื่อเพิ่มความหนาของสารเมือกบริเวณปลายราก ซึ่งสารเมือกมีส่วนช่วยในการป้องกันปลายรากจากความเครียดจากความเค็มได้



## รายการอ้างอิง

- Akram, M., Akhtar, S., Javed, I.-U.-H., Wahid, A. and Rasul, E. 2002. Anatomical attributes of different wheat (*Triticum aestivum*) accessions/varieties to NaCl salinity. International Journal of Agriculture and Biology 4: 166-168.
- Arriola, L., Niemira, B. A. and Safir, G. R. 1997. Border cells and arbuscular mycorrhizae in four Amaranthaceae species. Phytopathology 87: 1240-1242.
- Atabayeva, S., Nurmahanova, A., Minocha, S., Ahmetova, A., Kenzhebayeva, S., Aidosova, S., Nurzhanova, A., Zhardamalieva, A., Asrandina, S., Alybayeva, R. and Li, T. 2013. The effect of salinity on growth and anatomical attributes of barley seedling (*Hordeum vulgare* L.). African Journal of Biotechnology 12: 2366-2377.
- Atwell, B. J., Kriedemann, P. E. and Turnbull, C. G. N. (1999). Plants in action adaptation in nature, performance in cultivation. Melbourne, Australia, Macmillan Education Australia Pty Ltd.
- Bernstein, L. 1975. Effects of salinity and sodicity on plant growth. Annual Review of Phytopathology 13: 295-312.
- Boughalleb, F., Denden, M. and Tiba, B. B. 2009. Anatomical changes induced by increasing NaCl salinity in three fodder shrubs, *Nitraria retusa*, *Atriplex halimus* and *Medicago arborea*. Acta Physiologiae Plantarum 31: 947-960.
- Bray, E. A. 1997. Plant responses to water deficit. Trends in Plant Science 2: 48-54.
- Brigham, L. A., Woo, H.-H., Wen, F. and Hawes, M. C. 1998. Meristem-specific suppression of mitosis and a global switch in gene expression in the root cap of pea by endogenous signals. Plant Physiology 118: 1223-1231.
- Brundrette, M. C., Kendrick, B. and Peterson, C. A. 1991. Efficient lipid staining in plant material with Sudan red 7B or Fluorol yellow 088 in polyethylene glycol-glycerol. Biotechnic and Histochemistry 66: 111-116.
- Burssens, S., Himanen, K., van de Cotte, B., Beeckman, T., Montagu, M. V., Inzé, D. and Verbruggen, N. 2000. Expression of cell cycle regulatory genes and morphological alterations in response to salt stress in *Arabidopsis thaliana*. Planta 211: 632-640.

- Cai, M.-Z., Wang, F.-M., Li, R.-F., Zhang, S.-N., Wang, N. and Xu, G.-D. 2011. Response and tolerance of root border cells to aluminum toxicity in soybean seedlings. Journal of Inorganic Biochemistry 105: 966-971.
- Cai, M.-Z., Zhang, S.-N., Xing, C.-H., Wang, F.-M., Wang, N. and Zhu, L. 2011. Developmental characteristics and aluminum resistance of root border cells in rice seedlings. Plant Science 180: 702-708.
- Cannesan, M. A., Durand, C., Burel, C., Gangneux, C., Lerouge, P., Ishii, T., Laval, K., Follet-Gueye, M.-L., Driouich, A. and Vitré-Gibouin, M. 2012. Effect of arabinogalactan proteins from the root caps of pea and *Brassica napus* on *Aphanomyces euteiches* zoospore chemotaxis and germination. Plant Physiology 159: 1658–1670.
- Cannesan, M. A., Gangneux, C., Lanoue, A., Giron, D., Laval, K., Hawes, M. C., Driouich, A. and Vitré-Gibouin, M. 2011. Association between border cell responses and localized root infection by pathogenic *Aphanomyces euteiches*. Annals of Botany 108: 459-469.
- Céccoli, G., Ramos, J. C., Ortega, L. I., Acosta, J. M. and Perret, M. G. 2011. Salinity induced anatomical and morphological changes in *Chloris gayana* Kunth roots. Biocell 35: 9-17.
- Chaves, M. M., Flexas, J. and Pinheiro, C. 2009. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. Annals of Botany 103: 551-560.
- Chen, C.-W., Yang, Y.-W., Lur, H.-S., Tsai, Y.-G. and Chang, M.-C. 2006. A novel function of abscisic acid in the regulation of rice (*Oryza sativa* L.) root growth and development. Plant and Cell Physiology 47: 1-13.
- Chen, W., Liu, P., Xu, G., Cai, M., Yu, H. and Chen, M. 2008. Effects of Al<sup>3+</sup> on the biological characteristics of cowpea root border cells. Acta Physiologiae Plantarum 30: 303-308.
- Demiral, T. and Türkan, I. 2005. Comparative lipid peroxidation, antioxidant defense systems and proline content in roots of two rice cultivars differing in salt tolerance. Environmental and Experimental Botany 53: 247–257.

- Driouich, A., Durand, C., Cannesan, M.-A., Percoco, G. and Vitré-Gibouin, M. 2010. Border cells versus border-like cells: are they alike? Journal of Experimental Botany 61: 3827-3831.
- Driouich, A., Durand, C. and Vitré-Gibouin, M. 2007. Formation and separation of root border cells. Trends in Plant Science 12: 14-19.
- Esau, K. (1898). Anatomy of seed plants. Singapore, John Wiley & Sons.
- Everardo, A.-N., Stolzy, L. H. and Mehuys, G. R. 1975. Effects of soil osmotic potential produced with two salt species on plant water potential, growth, and grain yield of wheat. Plant and Soil 42: 619-627.
- Feldman, L. J. 1984. Regulation of root development. Annual Review of Plant Physiology 35: 223-242.
- Flowers, T. J. 1972. The effect of sodium chloride on enzyme activity of four halophytic species of Chenopodiaceae. Phytochemistry 11: 1881-1886.
- Flowers, T. J., Troke, P. F. and Yeo, A. R. 1977. The mechanism of salt tolerance in halophytes. Annual Review of Plant Physiology 28: 89-121.
- Gowda, V. R. P., Henry, A., Yamauchi, A., Shashidhar, H. E. and Serraj, R. 2011. Root biology and genetic improvement for drought avoidance in rice. Field Crops Research 122: 1-13.
- Greenway, H. and Munns, R. 1980. Mechanisms of salt tolerance in nonhalophytes. Annual Review of Plant Physiology 31: 149-190.
- Gregorio, G. B. and Senadhira, D. 1993. Genetic analysis of salinity tolerance in rice (*Oryza sativa* L.). Theoretical and Applied Genetics 86: 333-338.
- Gunawardena, U. and Hawes, M. C. 2002. Tissue specific localization of root infection by fungal pathogens: role of root border cells. The American Phytopathological Society 15: 1128-1136.
- Gunawardena, U., Rodriguez, M., Straney, D., Romeo, J. T., VanEtten, H. D. and Hawes, M. C. 2005. Tissue-specific localization of pea root infection by *Nectria haematococca*. mechanisms and consequences. Plant Physiology 137: 1363-1374.

- Hamamoto, L., Hawes, M. C. and Rost, T. L. 2006. The production and release of living root cap border cells is a function of root apical meristem type in dicotyledonous angiosperm plants. Annals of Botany 97: 917-923.
- Hawes, M. C., Bengough, G., Cassab, G. and Ponce, G. 2003. Root caps and rhizosphere. Journal of Plant Growth Regulation 21: 352-367.
- Hawes, M. C., Brigham, L. A., Wen, F., Woo, H. H. and Zhu, Y. 1998. Function of root border cells in plant health: pioneers in the rhizosphere. Annual Review of Phytopathology 36: 311-327.
- Hawes, M. C., Gunawardena, U., Miyasaka, S. and Zhao, X. 2000. The role of root border cells in plant defense. Trends in Plant Science 5: 1360-1385.
- Hawes, M. C. and Lin, H.-J. 1990. Correlation of pectolytic enzyme activity with the programmed release of cells from root caps of pea (*Pisum sativum*). Plant Physiology 94: 1855-1859.
- Hawes, M. C. and Pueppke, S. G. 1986. Sloughed peripheral root cap cells: yield from different species and callus formation from single cells. American Journal of Botany 73: 1466-1473.
- Henry, A., Cal, A. J., Batoto, T. C., Torres, R. O. and Serraj, R. 2012. Root attributes affecting water uptake of rice (*Oryza sativa*) under drought. Journal of Experimental Botany 63: 4751-4763.
- Hoagland, D. R. and Arnon, D. I. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. California Agricultural Experiment Station 347: 1-32.
- Horie, T., Karahara, I. and Katsuhara, M. 2012. Salinity tolerance mechanisms in glycophytes: An overview with the central focus on rice plants. Rice 5: 11-28.
- Iijima, M., Barlow, P. W. and Bengough, A. G. 2003. Root cap structure and cell production rates of maize (*Zea mays*) roots in compacted sand. New Phytologist 160: 127-134.
- Iijima, M., Higuchi, T. and Barlow, P. W. 2004. Contribution of root cap mucilage and presence of an intact root cap in maize (*Zea mays*) to the reduction of soil mechanical impedance. Annals of Botany 94: 473-477.



- Iijima, M. and Kono, Y. 1991. Interspecific differences of the root system structures of four cereal species as affected by soil compaction. Japanese Journal of Crop Science 60: 130-138.
- Julkowska, M. M., Hoefsloot, H. C. J., Mol, S., Feron, R., de Boer, G.-N., Haring, M. A. and Testerink, C. 2014. Capturing Arabidopsis root architecture dynamics with root-fit reveals diversity in responses to salinity. Plant Physiology 166: 1387-1402.
- Katembe, W. J., Ungar, I. A. and Mitchell, J. P. 1998. Effect of salinity on germination and seedling growth of two *Atriplex* species (Chenopodiaceae). Annals of Botany 82: 167-175.
- Krishnamurthy, P., Ranathunge, K., Franke, R., Prakash, H. S., Schreiber, L. and Mathew, M. K. 2009. The role of root apoplastic transport barriers in salt tolerance of rice (*Oryza sativa* L.). Planta 230: 119-134.
- Krishnamurthy, R. and Bhagwat, K. A. 1989. Polyamines as modulators of salt tolerance in rice cultivars. Plant Physiology 91: 500-504.
- Kurth, E., Cramer, G. R., Lauchli, A. and Epstein, E. 1986. Effects of NaCl and CaCl<sub>2</sub> on cell enlargement and cell production in cotton roots. Plant Physiology 82: 1102-1106.
- Malamy, J. E. 2005. Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture. Plant, Cell and Environment 28: 67-77.
- Meloni, D. A., Oliva, M. A., Martinez, C. A. and Cambraia, J. 2003. Photosynthesis and activity of superoxide dismutase, peroxidase and glutathione reductase in cotton under salt stress. Environmental and Experimental Botany 49: 69-76.
- Miyasaka, S. C. and Hawes, M. C. 2001. Possible role of root border cells in detection and avoidance of aluminum toxicity. Plant Physiology 125: 1978-1987.
- Munns, R. 2002. Comparative physiology of salt and water stress. Plant, Cell and Environment 25: 239-250.
- Munns, R. and Tester, M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. Annual Review of Plant Biology 59: 651-681.
- Neumann, P. M. (1995). Inhibition of root growth by salinity stress: Toxicity or an adaptive biophysical response? Proceedings of the Fourth International

- Symposium on Structure and Function of Roots, Stará Lesná, Slovakia, Kluwer Academic Publishers.
- Orman-Ligeza, B., Parizot, B., Gantet, P. P., Beeckman, T., Bennett, M. J. and Draye, X. 2013. Post-embryonic root organogenesis in cereals: branching out from model plants. Trends in Plant Science 18: 459-467.
- Osmont, K. S., Sibout, R. and Hardtke, C. S. 2007. Hidden branches: developments in root system architecture. The Annual Review of Plant Biology 58: 93–113.
- Pacheco-Villalobos, D. and Hardtke, C. S. 2012. Natural genetic variation of root system architecture from *Arabidopsis* to *Brachypodium*: towards adaptive value. Philosophical Transactions of the Royal Society B 367: 1552–1558.
- Pan, J.-W., Ye, D., Wang, L.-L., Hua, J., Zhao, G.-F., Pan, W.-H., Han, N. and Zhu, M.-Y. 2004. Root border cell development is a temperature-insensitive and Al-sensitive process in barley. Plant and Cell Physiology 45: 751-760.
- Pan, J.-W., Zhu, M.-Y. and Chen, H. 2001. Aluminum-induced cell death in root-tip cells of barley. Environmental and Experimental Botany 46: 71-79.
- Pan, J.-W., Zhu, M.-Y., Peng, H.-Z. and Wang, L.-L. 2002. Developmental regulation and biological functions of root border cells in higher plants. Acta Botanica Sinica 44: 1-8.
- Peterson, C. A. (1987). Significance of the exodermis in root function. Third International Symposium on 'Structure and Function of Roots' Nitra, Czechoslovakia, Kluwer Academic Publishers.
- Qiao, Y.-X. 2011. Effects of NaCl on generation of root border cells in cucumber (*Cucumis sativus* L.). Plant Physiology Journal 47: 97-101.
- Qiao, Y.-X., Zhang, Y.-P., Zhang, H.-X., Tian, Y.-Q. and Gao, L.-H. 2013. Developmental characteristics and cinnamic acid resistance of root border cells in cucumber and figleaf gourd seedlings. Journal of Integrative Agriculture 12: 2065-2073.
- Reinhardt, D. H. and Rost, T. L. 1995. Salinity accelerates endodermal development and induces an exodermis in cotton seedling roots. Environmental and Experimental Botany 35: 563-574.
- Rengasamy, P. 2010. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. Functional Plant Biology 37: 613-620.

- Russell, R. S. and Clarkson, D. T. (1975). Ion transport in root systems. Perspectives in experimental biology, University of Cambridge, Pergamon Press, Oxford.
- Ruzin, S. E. (1999). Plant microtechnique and microscopy. New York, Oxford University Press.
- Sánchez-Aguayo, I., Rodríguez-Galán, J. M., García, R., Torreblanca, J. and Pardo, J. M. 2004. Salt stress enhances xylem development and expression of S-adenosyl-L-methionine synthase in lignifying tissues of tomato plants. Planta 220: 278-285.
- Setter, T. L. and Waters, I. 2003. Review of prospects for germplasm improvement for waterlogging tolerance in wheat, barley and oats. Plant Soil 253: 1-34.
- Singh, R. K., Redoña, E. and Refuerzo, L. (2009). Varietal improvement for abiotic stress tolerance in crop plants: special reference to salinity in rice. Dordrecht, The Netherlands, Springer.
- Stephenson, M. B. and Hawes, M. C. 1994. Correlation of pectin methylesterase activity in root caps of pea with root border cell separation. Plant Physiology 106: 739-745.
- Taiz, L. and Zeiger, E. (2002). Plant Physiology, 3rd ed. Sunderland, Sinauer Associates.
- Tavakkoli, E., Fatehi, F., Coventry, S., Rengasamy, P. and McDonald, G. K. 2011. Additive effects of Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> ions on barley growth under salinity stress. Journal of Experimental Botany 62: 2189-2203.
- Thomson, C. J., Colmer, T. D., Watkin, E. L. J. and Greenway, H. 1992. Tolerance of wheat (*Triticum aestivum* cvs. Gameya and Kite) and triticale (*Triticosecale* cv, Muir) to waterlogging. New Phytologist 120: 335-344.
- Thomson, M. J., de Ocampo, M., Egdane, J., Rahman, M. A., Sajise, A. G., Adorada, D. L., Tumimbang-Raiz, E., Blumwald, E., Seraj, Z. I., Singh, R. K., Gregorio, G. B. and Ismail, A. M. 2010. Characterizing the *Saltol* quantitative trait locus for salinity tolerance in rice. Rice 3: 148-160.
- Vicré, M., Santaella, C., Blanchet, S., Gateau, A. and Driouich, A. 2005. Root border-like cells of Arabidopsis. Microscopical characterization and role in the interaction with rhizobacteria. Plant Physiology 138: 998-1008.

- Wang, H., Li, J., Bostock, R. M. and Gilchrist, D. G. 1996. Apoptosis: a functional paradigm for programmed plant cell death induced by a host-selective phytotoxin and invoked during development. The Plant Cell 8: 375-391.
- Wang, H., Wu, Z., Chen, Y., Yang, C. and Shi, D. 2011. Effects of salt and alkali stresses on growth and ion balance in rice (*Oryza sativa* L.). Plant, Soil and Environment 57: 286-294.
- Wang, Y., Li, K. and Li, X. 2009. Auxin redistribution modulates plastic development of root system architecture under salt stress in *Arabidopsis thaliana*. Journal of Plant Physiology 166: 1637-1645.
- Wen, F. (2009). Root border cell development and functions of extracellular proteins and DNA in fungal resistance at the root tip. Doctor of Philosophy, The University of Arizona.
- Wen, F., VanEtten, H. D., Tsaprailis, G. and Hawes, M. C. 2007. Extracellular proteins in pea root tip and border cell exudates. Plant Physiology 143: 773-783.
- Wen, F., Zhu, Y. and Hawes, M. C. 1999. Effect of pectin methylesterase gene expression on pea root development. The Plant Cell 11: 1129-1140.
- Western, T. L., Skinner, D. J. and Haughn, G. W. 2000. Differentiation of mucilage secretory cells of the *Arabidopsis* seed coat. Plant Physiology 122: 345-355.
- Widholm, J. M. 1972. The use of fluorescein diacetate and phenosafranine for determining viability of cultured plant cells. Stain Technology 47: 189-194.
- Xing, C.-H., Zhu, M.-H., Cai, M.-Z., Liu, P., Xu, G.-D. and Wu, S.-H. 2008. Developmental characteristics and response to iron toxicity of root border cells in rice seedlings. Journal of Zhejiang University Science (B) 9: 261-264.
- Yamauchia, T., Shimamura, S., Nakazono, M. and Mochizuki, T. 2013. Aerenchyma formation in crop species: A review. Field Crops Research 152: 8-16.
- Yan, Z., Bo, C., Shibin, G. and Tingzhao, R. 2014. Biological characters of root border cells development in maize (*Zea mays*). Biotechnology 13: 89-98.
- Yu, M., Shen, R., Liu, J., Chen, R., Xu, M., Yang, Y., Xiao, H., Wang, H., Wang, H. and Wang, C. 2009. The role of root border cells in aluminum resistance of pea (*Pisum sativum*) grown in mist culture. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 172: 528-534.

- Zhao, X., Misaghi, I. J. and Hawes, M. C. 2000. Stimulation of border cell production in response to increased carbondioxide levels. Plant Physiology 122: 181-188.
- Zidan, I., Azaizeh, H. and Neumann, P. M. 1990. Does salinity reduce growth in maize root epidermal cells by inhibiting their capacity for cell wall acidification? Plant Physiology 93: 7-11.
- Zolla, G., Heimer, Y. M. and Barak, S. 2009. Mild salinity stimulates a stress-induced morphogenic response in *Arabidopsis thaliana* roots. Journal of Experimental Botany 61: 211-224.
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2552. ทำไมพื้นที่นาข้าวจึงกลายเป็นดินเค็ม. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กาเจ, ด. (18 สิงหาคม 2557). เปิดแผนรุกแก้ปัญหาดินเค็มอีสาน คืนความสุขให้เกษตรกรอย่างยั่งยืน. คม ชัด ลึก (กรอบบ่าย): 12.
- บุญทอง, ส. 2555. สวนหลังบ้าน คนไทย...เพาะปลูกอะไร. พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี: บริษัทสกายบุ๊กส์ จำกัด.
- ยูวะนิยม, อ. (21 สิงหาคม 2547). สาเหตุการเกิดดินเค็มและการแพร่เกลือ. เอกสารประกอบการบรรยายในการประชุมทางวิชาการเรื่อง ดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือ: ปัจจัยธรณีวิทยา เศรษฐกิจสังคม และการจัดการ, โรงแรมเจริญธานีปรี้นเซส, ขอนแก่น.
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (2550). หนังสือเรียนสาระการเรียนรู้พื้นฐานและเพิ่มเติม ชีววิทยา เล่ม 4. สกสศ. ลาดพร้าว, องค์การค้ำของ สกสศ.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2557. สถานการณ์การผลิตข้าว ปี 2557. กรุงเทพฯ: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- เอกสมทราเมษฐ์, ล. (2547). ชีววิทยาของเซลล์ (Cell Biology). กรุงเทพฯ, โอเดียนสโตร์.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิธีการเตรียมสารละลายเข้มข้น (stock solution) ของสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland

สารละลายเข้มข้น (stock solution)	สารเคมีที่ใช้	ปริมาณ	ปริมาตรสุดท้าย
1 M calcium nitrate tetrahydrate	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	236.1 กรัม	1 ลิตร
1 M magnesium sulfate heptahydrate	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	246.5 กรัม	1 ลิตร
1 M potassium dihydrogen phosphate	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	136.09 กรัม	1 ลิตร
1 M potassium nitrate	$\text{KNO}_3$	101.1 กรัม	1 ลิตร
Fe-EDTA (2.5 mg/ml Fe)*	EDTA disodium salt dihydrate ( $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_8\text{Na}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	22.4 กรัม	372 มิลลิลิตร
	iron(III) chloride hexahydrate ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )	13.5 กรัม	728 มิลลิลิตร
micronutrient	boric acid ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ )	2.86 กรัม	1 ลิตร
	copper(II) chloride dihydrate ( $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	0.05 กรัม	
	manganese(II) chloride tetrahydrate ( $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )	1.81 กรัม	
	zinc chloride ( $\text{ZnCl}_2$ )	0.11 กรัม	
	sodium molybdate dihydrate ( $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	0.025 กรัม	

\* การเตรียมสารละลายเข้มข้น Fe-EDTA ให้เทสารละลายทั้งสองผสมกันทีละน้อย และคนให้ละลายในระหว่างการผสมเป็นระยะเวลาหนึ่งจนกระทั่งเป็นเนื้อเดียวกัน



### วิธีการเตรียมสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland

สำหรับการศึกษาการเติบโต ลักษณะโครงสร้างระบบราก และลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของรากในข้าวที่มีความทนเค็มต่างกัน ให้ทำการเตรียมสารละลายธาตุอาหารสูตร full strength Hoagland และ ½ strength Hoagland ปริมาตร 1 ลิตร ด้วยน้ำประปา โดยเติมสารละลายเข้มข้น (stock solution) ดังต่อไปนี้

สารละลายเข้มข้น (stock solution)	ปริมาณ (มิลลิลิตร)	
	full strength Hoagland	½ strength Hoagland
1 M calcium nitrate tetrahydrate (Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O)	5	2.5
1 M potassium nitrate (KNO <sub>3</sub> )	5	2.5
1 M magnesium sulfate heptahydrate (MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O)	2	1
1 M potassium dihydrogen phosphate (KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )	1	0.5
Fe-EDTA (2.5 mg/ml Fe)	2	1
micronutrient	1	0.5

จากนั้นนำสารละลายธาตุอาหารมาปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 5.5-6.5 ด้วยสารละลาย hydrochloric acid (HCl) หรือ sodium hydroxide (NaOH) แล้วจึงปรับปริมาตรของสารละลายธาตุอาหารให้มีปริมาตร 1 ลิตร

สำหรับการให้ภาวะเค็ม ทำได้โดยเติมสารละลายเข้มข้น 1 M sodium chloride (NaCl) ปริมาตร 60 มิลลิลิตร ลงในสารละลายธาตุอาหารข้างต้น จากนั้นปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 5.5-6.5 แล้วจึงปรับปริมาตรของสารละลายธาตุอาหารให้มีปริมาตร 1 ลิตร

ส่วนการศึกษาบอร์เดอร์เซลล์ ให้ทำการเตรียมสารละลายธาตุอาหารสูตร ¼ strength Hoagland ปริมาตร 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น โดยเติมสารละลายเข้มข้น (stock solution) ดังต่อไปนี้

สารละลายเข้มข้น (stock solution)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)
1 M calcium nitrate tetrahydrate ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )	1.25
1 M potassium nitrate ( $\text{KNO}_3$ )	1.25
1 M magnesium sulfate heptahydrate ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )	0.5
1 M potassium dihydrogen phosphate ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )	0.25
Fe-EDTA (2.5 mg/ml Fe)	0.5
micronutrient	0.25

จากนั้นนำสารละลายธาตุอาหารมาปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 5.5-6.5 ด้วยสารละลาย hydrochloric acid (HCl) หรือ sodium hydroxide (NaOH) แล้วจึงเติมผงวุ้น (agar powder) ปริมาณ 10 กรัม จากนั้นจึงปรับปริมาตรของสารละลายธาตุอาหารให้มีปริมาตร 1 ลิตร

สำหรับการให้ภาวะเค็ม ทำได้โดยเติมสารละลายเข้มข้น 1 M sodium chloride (NaCl) ปริมาตร 60 มิลลิลิตร ลงในสารละลายธาตุอาหารข้างต้น แล้วจึงทำการปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 5.5-6.5 จากนั้นเติมผงวุ้นปริมาณ 10 กรัม และปรับปริมาตรของสารละลายธาตุอาหารเป็น 1 ลิตร



ภาคผนวก ข

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### วิธีการเตรียมน้ำยาเอฟ เอ เอ (formalin aceto alcohol: FAA)

#### ส่วนผสม

ethyl alcohol 95%	50	มิลลิลิตร
glacial acetic acid	5	มิลลิลิตร
formalin 37%	10	มิลลิลิตร
น้ำกลั่น	35	มิลลิลิตร

### วิธีการเตรียมสีย้อม 0.1% (w/v) Sudan red 7B

ในการเตรียมสีย้อม Sudan red 7B เข้มข้น 0.1% (w/v) ให้นำสีย้อม Sudan red 7B ปริมาณ 0.01 กรัม ละลายใน ethyl alcohol 95% ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ที่มีการผสมกับ glycerol ปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำสีย้อมที่ได้มาทำการปั่นเหวี่ยงตกตะกอนด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน (microcentrifuge) ที่ความเร็ว 1300 rpm เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นให้ทำการดูดสารละลายส่วนใสเพื่อนำมาใช้ในการย้อมตัวอย่าง สารละลายดังกล่าวสามารถนำมาใช้ซ้ำได้อีก โดยการเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส

วิธีการเตรียมสีย้อม 0.02% (w/v) fluorescein diacetate (FDA)

ในการเตรียมสารละลายเข้มข้นของสีย้อม FDA ให้นำสีย้อม FDA ปริมาณ 0.0050 กรัม ละลายใน acetone ปริมาตร 1 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายเข้มข้นของสีย้อม FDA มาเจือจางให้มีความเข้มข้น 0.02% (w/v) FDA ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ HEPES-Tris (pH 7.2) ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ซึ่งสีย้อม FDA เป็นสารที่มีความไวต่อแสง ดังนั้น จึงควรเก็บไว้ในภาชนะที่ทึบแสง ทั้งนี้ สีย้อมดังกล่าวสามารถเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานหลายเดือนได้

การเตรียมสีย้อม 0.01% (w/v) phenosafranin

ในการเตรียมสารละลายเข้มข้น (stock solution) ของสีย้อม phenosafranin ให้นำสีย้อม phenosafranin ปริมาณ 0.01 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 1 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายเข้มข้นของสีย้อม phenosafranin ปริมาตร 100 ไมโครลิตร มาเจือจางให้มีความเข้มข้น 0.01% (w/v) phenosafranin สีย้อมดังกล่าวสามารถนำมาใช้ซ้ำได้อีก โดยการเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพลอยไพลิน นิลมานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 1 ธันวาคม พ.ศ.2533 สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 2) จากภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

### การนำเสนอผลงาน

นำเสนอผลงานวิชาการภาคินิทรรศน์ในหัวข้อเรื่อง ผลของภาวะเค็มต่อโครงสร้างระบบรากของข้าว *Oryza sativa* L. ที่มีความทนเค็มต่างกัน ในการประชุมวิชาการพฤกษศาสตร์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10 ระหว่างวันที่ 16-18 มิถุนายน 2559 ณ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ และ อาคารเรียนรวม 5 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

### การตีพิมพ์บทความ

พลอยไพลิน นิลมานนท์ และ อัญชลี ใจดี. 2559. ผลของภาวะเค็มต่อโครงสร้างระบบรากของข้าว *Oryza sativa* L. ที่มีความทนเค็มต่างกัน. ใน เอกสารประกอบการประชุมวิชาการพฤกษศาสตร์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10, หน้า 172-179. 16-18 มิถุนายน 2559 ณ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ และ อาคารเรียนรวม 5 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.