

ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านการเติบโตและสรีรวิทยา
ของต้นกล้าข้าว (*Oryza sativa* L.)

ธีระรัตน์ อุบลรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาชีววิทยาศึกษา
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
มิถุนายน 2561
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา


คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ ชีระรัตน์ อุบลรัตน์ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยาศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์


.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ดร.วาสนี พงษ์ประยูร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



.....ประธาน
(ดร.อติกร ปัญญา)


.....กรรมการ
(ดร.วาสนี พงษ์ประยูร)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ พระประเสริฐ)


.....กรรมการ
(ดร.สลิล ชันโรจน์)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยาศึกษาของมหาวิทยาลัยบูรพา


.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกวิฐ ศรีสุข)

วันที่ 14 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2561

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ดร.วาสนิ พงษ์ประยูร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษาในการทำงานวิจัย แนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วน เข้าใจและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.อดิกร ปัญญา ที่กรุณาสละเวลามาเป็นประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้แนวทาง ข้อเสนอแนะ ในการปรับแก้วิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุภูมิ พระประเสริฐ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และดร.สลิลา ชื่นโรจน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ผู้แทนคณบดีคณะวิทยาศาสตร์ ที่เสนอแนะ วิจารณ์ผลงาน และให้ความกระจ่างในจุดที่ผู้วิจัยบกพร่องในการเรียบเรียงวิทยานิพนธ์ ตลอดจนคณาจารย์ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และเทคนิคในการปฏิบัติการ ทำให้ผลการศึกษามีความถูกต้องแม่นยำ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้รับความอนุเคราะห์จากเพื่อนบัณฑิตศึกษา และนิสิตในห้องปฏิบัติการที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีในการเก็บรวบรวมข้อมูลการทดลองที่ใช้ในการวิจัยและทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยบูรพา และสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) โครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สควค.) ที่สนับสนุนเงินทุนส่วนหนึ่งในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจ เข้าใจและสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

คุณประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตเวทิตาคุณแก่ บุปผารัตน์ คณาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบนานเท่านานนี้

ธีระรัตน์ อุบลรัตน์

56920143: สาขาวิชา: ชีววิทยาศึกษา; วท.ม. (ชีววิทยาศึกษา)

คำสำคัญ: ข้าว/ ภาวะเครียดจากความเค็ม/ การตอบสนองด้านสรีรวิทยา

ธีระรัตน์ อุบลรัตน์: ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อการเปลี่ยนแปลงทางการเติบโตและสรีรวิทยาของต้นกล้าข้าว (*Oryza sativa* L.) (THE EFFECTS OF SODIUM CHLORIDE TO GROWTH AND PHYSIOLOGICAL CHANGES OF RICE (*Oryza sativa* L.) SEEDLINGS) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: วาสิณี พงษ์ประยูร, Ph.D. 85 หน้า. ปี พ.ศ. 2561.

ความเค็มจัดเป็นภาวะเครียดจากปัจจัยทางกายภาพและเป็นสาเหตุทำให้การเติบโตและผลผลิตของข้าวลดลง โดยเฉพาะข้าวเป็นพืชที่อ่อนแอต่อความเค็ม เนื่องจากความหลากหลายของสายพันธุ์ข้าวของไทยนับได้ว่าเป็นความหลากหลายทางพันธุกรรมที่ให้ฐานข้อมูลของเชื้อเมล็ดพันธุ์ โดยการคัดเลือกสายพันธุ์ทนเค็มด้วยการคัดเลือกทางสรีรวิทยา วัตถุประสงค์ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เพื่อศึกษาการตอบสนองทางสรีรวิทยาที่ระดับความเค็ม 2 (กลุ่มควบคุม), 4, 6, 8 หรือ 10 เดซิซิเมนต่อเมตร (dS m^{-1}) ที่ระยะเวลา 0, 7, 14 และ 21 วัน ในข้าว 4 พันธุ์ ได้แก่ ขาวดอกมะลิ 105 กข31 กข 41 และสุพรรณบุรี 1) เก็บข้อมูลการเติบโต ปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องในการสังเคราะห์ด้วยแสง ปริมาณ โพรตีน และปริมาณโปรตีนในใบข้าว จากการทดลองพบว่า ต้นกล้าข้าวมีการเติบโตและปริมาณรงควัตถุลดลง เมื่อความเข้มข้นของเกลือสูงขึ้นและระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น โดยเฉพาะข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น 6, 8 หรือ 10 dS m^{-1} เป็นเวลา 21 วัน มีอาการใบเหลืองไหม้และตาย ในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} เป็นเวลา 21 วัน มีการเติบโตน้อยที่สุดเปรียบเทียบกับข้าวสายพันธุ์อื่น อย่างไรก็ตามข้าวพันธุ์ กข41 ยังสามารถเติบโตได้มากกว่าข้าวพันธุ์อื่น นอกจากนี้พบว่าความเค็มสามารถชักนำให้มีการสะสมโปรตีนเพิ่มมากขึ้นในข้าวทั้ง 4 พันธุ์ ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และ กข31 ที่ได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} เป็นเวลา 14 และ 21 วันตามลำดับ ซึ่งให้เห็นว่าข้อมูลการเจริญเติบโตในข้าวพันธุ์ กข41 สามารถเติบโตต่อไปได้ในขณะที่ข้าวสายพันธุ์อื่นมีการเติบโตน้อยลงเมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์เป็นระยะเวลา 21 วัน เป็นไปได้ว่าข้าวพันธุ์ กข41 จัดเป็นข้าวพันธุ์ทนเค็ม

56920143: MAJOR: BIOLOGY EDUCATION; M.Sc. (BIOLOGY EDUCATION)

KETWORDS: RICE/ SALT STRESS/ GROWTH AND PHYSIOLOGICAL RESPONSE

TEERERAT U-BONRAT: THE EFFECTS OF SODIUM CHLORIDE TO GROWTH AND PHYSIOLOGICAL CHANGES OF RICE (*Oryza sativa* L.) SEEDLINGS. ADVISORY COMMITTEE: WASINEE PONGPRAYOON, Ph.D. 85 P. 2018.

Salinity is a member of abiotic stresses and caused a decrease in growth and plant production, especially in rice as a salt susceptible species. As a wide genetic resources of Thai rice varieties/cultivars could generate the germplasm database by physiological screening salt tolerant cultivars. The objective in this study was to investigate the physiological responses to salt stress at 2 (control; WP nutrient solution), 4, 6, 8 or 10 dS m⁻¹ for 0, 7, 14 and 21 day in 4 rice cultivars including Khao Dawk Mali 105 (KDML 105), RD31, RD41 and Suphan Buri 1. Growth parameters, photosynthetic pigment contents, free proline and protein contents were quantified in rice leaves. Results indicated that rice seedlings growth and photosynthetic pigments showed a decrease during a higher concentrations and longer exposition of NaCl treatments in all rice cultivars. Especially, KDML 105 under NaCl treatment at 6, 8 or 10 dS m⁻¹ for 21 days leading to leaf chlorosis, burn and died. Suphan Buri 1 during salt stress condition at 10 dS m⁻¹ for 21 days showed the lowest growth when compared to a control. However, RD41 rice was maintained growth better than other cultivars. In addition, salt stress induced gradually increase in proline accumulation in all 4 cultivars at different time intervals, especially in KDML 105 and RD31 under 10 dS m⁻¹ for 14 and 21 day, respectively. The result indicates that overall growth parameters in RD41 was remained while those in others rice cultivars were decreases during NaCl treatments on day 21 and could be efficiently used for identification of salt tolerant rice.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฌ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
สมมติฐานของงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	4
ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
สถานที่ดำเนินการวิจัย.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
ข้าว.....	5
ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของข้าว.....	5
การจำแนกประเภทของข้าว.....	7
พันธุ์ข้าวที่ใช้ในการทดลอง.....	8
ดินเค็มและผลของภาวะเครียดจากความเค็มต่อพืช.....	10
ดินเค็มและประเภทของดินเค็ม.....	10
ผลของภาวะเครียดจากความเค็มต่อพืช.....	11
กลไกการทนเค็มของพืช.....	17
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	23
พืชที่ใช้ทดลอง.....	23
วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	23
วิธีดำเนินการทดลอง.....	25

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
วิธีการประเมินผลและสังเคราะห์ข้อมูล.....	29
4 ผลการวิจัย.....	30
ผลของภาวะเครียดจากระดับความเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ และระยะเวลาที่มีต่อการเติบโตของข้าว 4 พันธุ์.....	30
ผลของภาวะเครียดจากระดับความเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ และระยะเวลาที่มีต่อทางสรีรวิทยาในข้าว 4 พันธุ์.....	33
5 อภิปรายและสรุปผลการวิจัย.....	51
อภิปรายผลการวิจัย.....	51
สรุปผลการวิจัย.....	54
ข้อเสนอแนะ.....	54
บรรณานุกรม.....	56
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก.....	67
ภาคผนวก ข.....	69
ภาคผนวก ค.....	71
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 การแบ่งประเภทดินเค็มและผลกระทบต่อพืช.....	10
3-1 ชุดการทดลองและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (Electrical conductivity; EC).....	26
3-2 แสดงค่า Standard evaluated score (SES) ของข้าวที่ได้รับภาวะเครียด จากความเค็มในระยะต้นกล้า.....	27
ก-1 การเตรียมสารละลายธาตุอาหารสูตร WP No.2.....	68
ค-1 การเจริญเติบโต และข้อมูลทางสรีรวิทยาของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เมื่อได้รับโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 4, 6, 8 หรือ 10 dS m ⁻¹ เป็นระยะเวลา 7, 14 และ 21 วัน เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (2 dS m ⁻¹).....	77
ค-2 การเจริญเติบโต และข้อมูลทางสรีรวิทยาของข้าวพันธุ์ กข31 เมื่อได้รับโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 4, 6, 8 หรือ 10 dS m ⁻¹ เป็นระยะเวลา 7, 14 และ 21 วัน เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (2 dS m ⁻¹).....	79
ค-3 การเจริญเติบโต และข้อมูลทางสรีรวิทยาของข้าวพันธุ์ กข41 เมื่อได้รับโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 4, 6, 8 หรือ 10 dS m ⁻¹ เป็นระยะเวลา 7, 14 และ 21 วัน เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (2 dS m ⁻¹).....	81
ค-4 การเจริญเติบโต และข้อมูลทางสรีรวิทยาของข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 เมื่อได้รับโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 4, 6, 8 หรือ 10 dS m ⁻¹ เป็นระยะเวลา 7, 14 และ 21 วัน เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (2 dS m ⁻¹).....	83

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งในพืชทนเค็มหลายชนิดที่ปลูกในสารละลายเกลือและในทรายที่มีสารละลายเกลือเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 3 สัปดาห์.....	12
2-2 ลักษณะการตอบสนองด้านการเติบโตส่วนปลายยอดของพืช 2 ระยะที่มีลักษณะทนเค็มและไม่ทนเค็มในระดับเกลือที่เป็นพิษในใบ.....	12
2-3 กระบวนการทำงานทางชีวเคมีที่เกี่ยวข้องกับพืชทนเค็ม และทนแล้ง.....	18
4-1 ค่า standard evaluate score (SES) ของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation).....	35
4-2 จำนวนกอดต่อดันของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation).....	36
4-3 จำนวนใบต่อดันของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation).....	37
4-4 ความสูงต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation).....	38
4-5 ความยาวใบของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation).....	39
4-6 ความกว้างใบของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation).....	40
4-7 น้ำหนักสดต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation).....	41

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
4-8	น้ำหนักแห้งต้นของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็ม ที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation).....	42
4-9	ความยาวรากของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็ม ที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation).....	43
4-10	น้ำหนักสดรากของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็ม ที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation).....	44
4-11	น้ำหนักแห้งรากของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็ม ที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation).....	45
4-12	ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็ม ที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation).....	46
4-13	ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็ม ที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation).....	47
4-14	ปริมาณแคโรทีนอยด์ของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็ม ที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation).....	48
4-15	ปริมาณโปรตีนของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็ม ที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation).....	49
4-16	ปริมาณโปรตีนของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็ม ที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation).....	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ข-1 กราฟมาตรฐาน (standard curve) ของโพรสลิน (ก) และ โปรตีน (ข).....	70
ค-1 ต้นข้าวที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหาร WP No. 2 ร่วมกับเกลือ โซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 หรือ 10 dS m ⁻¹ ในข้าวพันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง).....	72
ค-2 ต้นข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียด จากความเค็มที่ระยะเวลา 0, 7, 14 และ 21 วัน.....	73
ค-3 ต้นข้าวพันธุ์ กข31 ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็ม ที่ระยะเวลา 0, 7, 14 และ 21 วัน.....	74
ค-4 ต้นข้าวพันธุ์ กข41 ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็ม ที่ระยะเวลา 0, 7, 14 และ 21 วัน.....	75
ค-5 ต้นข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียด จากความเค็มที่ระยะเวลา 0, 7, 14 และ 21 วัน.....	76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ภาวะเครียดจากความเค็มส่งผลกระทบต่อพืชทั้งในระดับเซลล์ กระบวนการต่าง ๆ การเติบโต รวมทั้งปริมาณของผลผลิต (Bray, 1993) เนื่องจากการเกิด osmotic stress ทำให้พืชดูดน้ำไปใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ได้น้อยลง การดึงน้ำที่มีอยู่ในดินเข้าสู่ต้นพืชต้องอาศัยความแตกต่างของค่าศักย์ศักย์ (water potential) ระหว่างดินและพืชเป็นหลัก ในภาวะเค็มค่าศักย์ศักย์ในดินลดลงมาก (Meloni, Oliva, Ruiz, & Martinez, 2001; Taiz & Zeiger, 2006) พืชจึงไม่สามารถนำน้ำเข้าไปใช้ได้ จึงทำให้การเติบโตของพืชลดลง (Nguyen, Babu, & Blum, 1997) นอกจากนี้ ภาวะเค็มยังทำให้เกิดความไม่สมดุลกันของไอออนของเกลือภายในเซลล์พืชที่มีการสะสมมากเกินไปทำให้เกิดความเป็นพิษ (ion toxicity) ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมต่าง ๆ ภายในเซลล์ (Munns, James, & Lauchli, 2006) และภาวะเค็มยังทำให้เกิดความไม่สมดุลของธาตุอาหาร ระดับความเป็นกรดเบสของดินที่เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลต่อการดูดซึมธาตุอาหารบางชนิด ทำให้พืชเกิดการขาดธาตุอาหารหรือเกิดความเป็นพิษได้ ซึ่งมีผลต่อการเติบโตและผลผลิตของพืชที่ลดลง (อรุณี ยูวะนิยม, 2547) มีการศึกษาเกี่ยวกับผลของความเค็มที่มีต่อการเติบโตของพืชหลายชนิด เช่น ข้าวโพด (*Zea mays* L.) ข้าวฟ่าง (*Sorghum bicolor* L.) ข้าวสาลี (*Triticum aestivum* L.) (Maas, Poss, & Hoffman, 1986) เมล่อน (*Cucumis melo* L.) (Botia, Navarro, & Cerda, 2005) ผักปวยเล้งนิวซีแลนด์ (*Tetragonia tetragonioides* Pall) ผักสลัด red orach (*Atriplex hortensis* L.) (Wilson, Lesch, & Grieve, 2000) และถั่วดินเตา (*Pisum sativum* L.) (Maas & Poss, 1989) พบว่ามีการลดการขยายขนาดของใบ น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งส่วนต้นและราก โดยเฉพาะการศึกษาผลของความเค็มต่อการเติบโตของข้าวในระยะต้นกล้า ที่ส่งผลให้อัตราการเติบโตของเมล็ดข้าว น้ำหนักสด น้ำหนักแห้งของต้นและราก จำนวนใบ จำนวนกอ จำนวนรวง น้ำหนักเมล็ด พื้นที่ใบ ความหนาแน่นของปากใบ และปริมาณน้ำในใบ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Khatun & Flowers, 1995; Lutts, Kinet, & Bouharmon, 1995; Mohammad, Shibli, Ajouni, & Nimri, 1998; Sultana, Ikeda, & Itoh, 1999; Romeroaranda, Soria, & Cuartero, 2001; Shereen et al., 2007; Amirjani, 2010; Lee et al., 2011)

ความเค็มมีผลต่อกระบวนการต่าง ๆ เช่น การสังเคราะห์โปรตีน (protein synthesis) การเผาผลาญไขมัน (lipid metabolism) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช (photosynthesis) จากการศึกษาพบว่าพืชที่ได้รับความเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มีอัตรา

การสังเคราะห์ด้วยแสงต่ำกว่าในพืชในภาวะปกติ เนื่องจากเกิด oxidative stress (Parida & Das, 2005; Chaves, Flexas, & Pinheiro, 2009) ทั้งนี้เกิดจากในใบพืชมีปริมาณของคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ลดลงภายใต้ภาวะเค็ม (Kennedy & De Fillippis, 1999) ความเค็มไปลดการถ่ายทอดอิเล็กตรอน (electron transport chain) ในระบบแสงที่สอง (Photosystem II) (Lu & Vonshak, 1999) และยังทำให้ประสิทธิภาพการใช้น้ำ และการทำงานของเอนไซม์ Rubisco ลดลง (Zhu & Meinzer, 1999) ซึ่งพบว่าในภาวะเค็มมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง การคายน้ำ ค่าความหนาแน่นของปากใบ (stomatal density) และค่าการชักนำการเปิดของปากใบ (stomatal conductance) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ (Zheng et al., 2009; Li et al., 2012; Huang et al., 2012) และยังทำให้ประสิทธิภาพการใช้น้ำในพืชลดลง (Zhu & Meinzer, 1999)

พืชมีกลไกในการตอบสนองต่อภาวะเครียดจากความเค็มเพื่อให้คงรักษายาบทบาทและหน้าที่ของระบบต่าง ๆ การสะสมสาร osmolytes หรือ compatible solute เพื่อปรับค่าชลศภายในเซลล์ ทำให้พืชยังคงสามารถดูดน้ำมาใช้ในการดำรงชีวิตได้ (Taiz & Zeiger, 1998) ซึ่งเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ไม่รบกวนปฏิกิริยาทางชีวเคมีภายในเซลล์ ช่วยรักษาสภาพโปรตีนและโครงสร้างของเซลล์ และไม่เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์พืช เช่น sorbitol (Ahmad, Larher, & Stewart, 1979) mannitol (Tarczynski, Jensen, & Bohnert, 1993) กรดอะมิโนต่าง ๆ เช่น proline (Greenway & Munns, 1980; Lutts, Kinet, & Bouharmont, 1996a; Iyer & Caplan, 1998; Lutts, Majerus, & Kinet, 1999), glycine betaine (Sakamoto & Murata, 2002) และ putrescine (Chen & Kao, 1993) การสะสมโพรลีนเป็นกระบวนการที่ได้รับการยอมรับว่ามีความสำคัญในการปรับตัวของพืช เมื่อได้รับความเครียดที่เกิดจากความเค็มหรือภาวะแล้ง (Strizhov et al., 1997) โดยการปรับค่าแรงดันออสโมติก (osmotic adjustment) และปริมาณไอออน (Lutts et al., 1996a) พบข้าวพันธุ์ที่ไม่ทนเค็มมีโพรลีนสะสมสูงกว่าข้าวพันธุ์ทนเค็มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Lutts et al., 1996a) Pongprayoon, Chu-um, Pichakum, and Kirdmanee (2008) ศึกษาปริมาณโพรลีนและเปอร์เซ็นต์ความเขียวในใบข้าวหอมพันธุ์ไทย เมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0, 171, 342, 512 และ 684 มิลลิโมลาร์ เป็นเวลา 4 วัน พบว่าเมื่อข้าวได้รับความเค็มส่งผลให้มีการสะสมโพรลีนเพิ่มมากขึ้นตามระดับความเข้มข้นของเกลือที่เพิ่มสูงขึ้น แบ่งข้าวได้ 3 กลุ่มตามระดับการสะสมโพรลีน สูง กลางและต่ำ โดยข้าวที่จัดอยู่ในกลุ่มที่มีการสะสมโพรลีนสูงและปานกลางมีเปอร์เซ็นต์พื้นที่ใบเขียวสูงกว่าข้าวกลุ่มที่มีปริมาณโพรลีนต่ำ ซึ่งให้เห็นว่าการสะสมโพรลีนในข้าวหอมพันธุ์ไทยขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นและระยะเวลาที่ข้าวได้รับความเค็มจากเกลือ

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้น จะเห็นได้ว่าปัญหาภาวะเครียดจากความเค็มนั้นมีผลกระทบต่อ

พืชที่มีลักษณะอ่อนแอต่อความเค็ม (glycophyte หรือ non-halophytes) เช่น ข้าว (*Oryza sativa* L.) แก่นตะวัน (*Helianthus tuberosus* L.) และข้าวสาลี (*Triticum aestivum* L.) (Li et al., 2012; Huang et al., 2012; Zheng et al., 2009) โดยเฉพาะในข้าว ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย มีการเพาะปลูกในพื้นที่ที่มีสภาพดินเค็มเป็นส่วนใหญ่ เช่น บริเวณทุ่งกุลาร้องไห้ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 2 ล้านไร่ (อมร อินราเวช, 2554) รวมทั้งพื้นที่ทำนาอื่น ๆ ที่เกษตรกรใช้ปลูกข้าวหลายพันธุ์ที่เป็นพันธุ์แนะนำส่งเสริม เช่น กข1 กข6 กข7 กข8 กข15 กข31 กข41 สุพรรณบุรี 1 และข้าวดอกมะลิ 105 (KDML105) เป็นต้น ทั้งนี้ข้าวพันธุ์ KDML105 เป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย แต่พื้นที่บริเวณดังกล่าวให้ผลผลิตข้าวโดยเฉลี่ยต่อปีต่ำ (กรมการค้าต่างประเทศ, 2553)

ดังนั้นงานวิจัยในครั้งมีเป้าหมายในการศึกษาทางด้านการเติบโตและสรีรวิทยาบางประการของข้าวที่ได้รับความเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ โดยวัดค่าการเติบโต ปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ปริมาณโปรตีนและโปรตีน ในข้าวพันธุ์แนะนำส่งเสริมให้เกษตรกรเพาะปลูกจำนวน 4 พันธุ์ ได้แก่ ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 กข31 กข41 และสุพรรณบุรี 1 ซึ่งผลจากการวิจัยครั้งนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการปรับปรุงพันธุ์ข้าวให้มีความสามารถในการทนต่อภาวะเครียดที่เกิดจากความเค็มและเป็นแนวทางในการคัดเลือกพันธุ์ข้าวทนเค็มให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นตลอดจนการพัฒนาพันธุ์ข้าวต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาระดับความเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ต้นข้าวสามารถเติบโตได้
2. เพื่อศึกษาระยะเวลาที่ต้นข้าวสามารถเติบโต เมื่อได้รับความเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์
3. เพื่อศึกษาการตอบสนองทางด้านสรีรวิทยาบางประการของข้าวเมื่อได้รับความเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1. ความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์สูง และช่วงระยะเวลายาวนาน ส่งผลให้ข้าวมีการเติบโต ปริมาณรงควัตถุ โปรตีน และโปรตีนลดลง
2. ข้าวแต่ละพันธุ์มีการตอบสนองทางด้านสรีรวิทยา เมื่อได้รับภาวะเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่แตกต่างกัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

สามารถช่วยคัดเลือกพันธุ์ข้าวที่เหมาะสม เพื่อใช้ปลูกในภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม จากความเค็ม ตลอดจนเพื่อช่วยพัฒนาวิธีการคัดเลือกพันธุ์ข้าวทนเค็มให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและเป็นแนวทางในการปรับปรุงพันธุ์ข้าว ให้ได้ผลผลิตสูง ตลอดจนส่งเสริมให้เกษตรกรนำพันธุ์ข้าวไปเพาะปลูกในพื้นที่ดินเค็มต่อไป

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ข้าวที่ใช้ในการทดลองจำนวน 4 พันธุ์ ได้แก่ ขาวดอกมะลิ 105 กข31 กข41 และ สุพรรณบุรี 1
2. วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) โดยปลูกข้าวพันธุ์ละ 4 ซ้ำ เพื่อศึกษาด้านการเติบโต ได้แก่ จำนวนกอต่อต้น จำนวนใบต่อต้น ความยาวของกาบใบที่มีสีเขียว ความกว้างใบ ความสูงต้น น้ำหนักสดต้นและราก น้ำหนักแห้งต้นและราก ค่า standard evaluate score (SES)
3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงด้านสรีรวิทยาและชีวเคมีบางประการ ได้แก่ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และแคโรทีนอยด์ ปริมาณ โปรตีนและโปรตีน เมื่อข้าวเติบโตในระยะต้นกล้าอายุ 1 เดือน จะได้รับภาวะเค็มจากเกลือ โซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 หรือ 10 เดซิซีเมนต่อเมตร (dS m^{-1}) และเก็บผลการทดลองหลังจากข้าวได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 0, 7, 14 และ 21 วัน

1.6 สถานที่ดำเนินการวิจัย

1. ห้องปฏิบัติการสรีรวิทยาของพืช (BS 3111) ชั้น 3 อาคารวิทยาศาสตร์ชีวภาพ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
2. ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งแวดล้อมและสรีรวิทยาของพืช (BS 2104/2) ชั้น 2 อาคารวิทยาศาสตร์ชีวภาพ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
3. เรือนเพาะชำ อาคารวิทยาศาสตร์ชีวภาพ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าว

ข้าว (*Oryza sativa* L.) เป็นธัญพืชที่มนุษย์เพาะปลูกมานานกว่า 11,500 ปี และในปัจจุบันข้าวเป็นแหล่งอาหารกลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่สำคัญของประชากรมนุษย์ (Wu et al., 2004) ในประเทศไทยมีหลักฐานการเพาะปลูกข้าวมานานไม่ต่ำกว่า 5,000 ปี มีการคัดเลือกและปรับปรุงพันธุ์ข้าวให้สอดคล้องกับสภาพการเพาะปลูก การผสมพันธุ์ข้ามระหว่างข้าวที่ปลูกกับวัชพืชที่เกี่ยวข้อง เกิดข้าวพื้นเมืองหลายสายพันธุ์ที่สามารถให้ผลผลิตสูง สามารถปลูกได้ตลอดปี ก่อให้เกิดพันธุ์ข้าวปลูกที่เรียกว่าข้าวลูกผสมกว่า 120,000 สายพันธุ์ (มูลนิธิข้าวไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2549)

พืชกลุ่มข้าวจัดอยู่ในวงศ์ Poaceae พบประมาณ 23 ชนิด แบ่งเป็นข้าวป่า 21 ชนิดมีลักษณะโครโมโซมเป็นแบบ tetraploid และข้าวปลูก 2 ชนิดมีลักษณะโครโมโซม เป็นแบบ diploid ได้แก่ *O. glaberrima* Steud. เป็นข้าวที่ปลูกในแถบตะวันตกของทวีปแอฟริกา และ *O. sativa* L. เป็นข้าวที่ปลูกในแถบเอเชียและมีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูง (Vaughan, 1994) สำหรับพันธุ์ข้าวในประเทศไทยจัดเป็น *O. sativa* L. มีการจัดจำแนกทางอนุกรมวิธาน ดังนี้

Class : Liliopsida

Order : Poales

Family : Poaceae

Tribe : Oryzeae

Genus : *Oryza*

Species : *Oryza sativa* L.

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของข้าว

ลักษณะของข้าวแบ่งออกเป็นลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตและลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการสืบพันธุ์ดังนี้ (Chang & Bardenas, 1976; Yoshida, 1981)

2.1.1.1 ลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโต

2.1.1.1.1 ระบบราก (root system) ข้าวมีระบบรากเป็นรากฝอย (fibrous root system) เมื่อนำเมล็ดข้าวมาเพาะจะเกิดรากปฐมภูมิ (primary root) เรียกว่า รากแรกเกิด (seminal

root) งอกออกมาจากส่วน radical รากทำหน้าที่รองรับและพยุงส่วนต่าง ๆ และมีรากทุติยภูมิ (secondary root) หรือรากเสริม (adventitious root) บริเวณส่วนของข้อที่มีอายุมากในทิศทางขนานกับผิวดิน และมีการแตกแขนงของรากอย่างอิสระ

2.1.1.1.2 ลำต้น (stem) ลำต้นของข้าวลักษณะเรียกว่า clum มีลักษณะทรงกลม ซึ่งประกอบไปด้วยข้อ (node) และปล้อง (internode) ปล้องของข้าวจะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกภายในกลวง ลำต้นข้าวในระยะการเจริญเติบโตจะมีส่วนของกาบใบหุ้มไว้ ในสภาพแวดล้อมในการปลูกเหมาะสม ต้นข้าวจะมีการแตกหน่อหรือเรียกว่า แตกกอ (tillering) ซึ่งกอข้าวจะประกอบด้วยลำต้นหลัก (main clum) และหน่อ (tiller)

2.1.1.1.3 ใบ (leaf) ลักษณะเป็นใบเดี่ยว (simple leaf) มีลักษณะเป็นแผ่นแบนบางค่อนข้างยาวรูปหอก ใบของข้าวประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ 4 ส่วน คือ

กาบใบ (leaf sheath) เป็นส่วนที่อยู่ล่างสุดของใบ เจริญออกมาจากข้อทำหน้าที่หุ้มดาและข้อของลำต้น ช่วยสะสมอาหารไว้สำหรับรวงข้าวและช่วยเสริมความแข็งแรงของลำต้น

แผ่นใบ (leaf blade) เป็นส่วนของใบที่ขยายออกต่อจากกาบใบ มีลักษณะเรียวยาว เป็นรูปหอก

เยื่อกั้นน้ำ หรือลิ้นใบ (ligule) จะอยู่ที่รอยต่อระหว่างแผ่นใบและกาบใบมีลักษณะเป็นเยื่อบาง ๆ

เขี้ยวใบ (auricle) เกิดที่ฐานของแผ่นใบ มีลักษณะเป็นขน รูปร่างโค้งคล้ายเคียวติดอยู่ข้างละอันของข้อต่อใบ

2.1.1.2 ลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการขยายพันธุ์

2.1.1.2.1 รวงข้าว (Inflorescence, panicle) หรือช่อดอกเกิดอยู่เหนือปล้องสุดท้ายของลำต้น (uppermost internode) ข้อที่เป็นฐานของช่อดอกเรียกว่า panicle base แกนกลางช่อดอกเรียกว่า panicle axis หรือ rachis ช่อดอกข้าวจะแตกแขนงแบบ racemose โดยที่แต่ละข้อของแกนกลางช่อดอกจะแตกแขนงออกเป็น primary branch และ primary branch แตกแขนงออกเป็น secondary branch โดยทั่วไป primary branch ที่ฐานของช่อดอกจะมีเพียงกิ่งเดียว แต่ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เหมาะสม เช่น มีแสงแดดจ้า มีความอุดมสมบูรณ์ของดินดี อาจจะมี primary branch จากฐานของช่อดอกได้ 2-3 กิ่งในระยะเวลา 2-3 วันหลังการเริ่มกำเนิดช่อดอก (panicle initiation) ช่อดอกจะมีขนาดยาวประมาณ 1 มิลลิเมตร

2.1.1.2.2 ดอกข้าว (spikelet) จัดเป็นดอกสมบูรณ์เพศ มีลักษณะเป็นช่อ ซึ่งเรียกว่า panicle และจะโผล่ออกมาจากปล้องที่อยู่บนสุดของต้นข้าว ซึ่งแต่ละดอกประกอบด้วยกลีบดอก

ใหญ่และกลีบดอกเล็ก เปลือกประกบกัน ที่ผิวกลีบดอกทั้ง 2 ชนิดอาจมีขนหรือไม่มีขนก็ได้ ภายในดอก มีเกสรตัวผู้ (stamen) และเกสรตัวเมีย (pistil)

2.1.1.2.3 เมล็ด (seed) ประกอบด้วยส่วนที่เป็นแป้ง (endosperm) และคัพภะ (embryo) ซึ่งถูกห่อหุ้มไว้ด้วยเยื่อหุ้มชั้นนอก (pericarp) เยื่อหุ้มชั้นกลาง (tegmen) และเยื่อหุ้มชั้นใน (aleurone) เมล็ดข้าวจะถูกพัฒนาขึ้นมาหลังจากผสมพันธุ์ระหว่างเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้และเพศเมีย โดยที่รังไข่จะกลายเป็นแป้ง และส่วนของไข่ก็จะกลายเป็นคัพภะ เราเรียกส่วนของเมล็ดข้าวที่ถูกห่อหุ้มด้วยกลีบดอกใหญ่และกลีบดอกเล็กว่า เมล็ดข้าวเปลือก

2.1.2 การจำแนกประเภทของข้าว

พันธุ์ข้าวปลูกอาจแบ่งประเภทข้าวได้ตามเกณฑ์ต่อไปนี้

2.1.2.1 จำแนกตามความแตกต่างทางสภาพพื้นที่และภูมิอากาศของแหล่งปลูกข้าว แบ่งได้เป็น 3 ชนิด (Chang et al., 1976) ได้แก่

2.1.2.1.1 อินดิกา (indica) เป็นข้าวต้นสูง เมล็ดยาวเรียวยาว เจริญเติบโตได้ดีในบริเวณเขตร้อน เช่น ศรีลังกา หมู่เกาะต่าง ๆ กลุ่มน้ำ แอ่งซีเกียงของจีน ไทย และอินเดีย เป็นต้น

2.1.2.1.2 จาปอนิกา (japonica) เป็นข้าวต้นเตี้ย เมล็ดสั้นป้อม เจริญเติบโตได้ดีในเขตอบอุ่น เช่น ประเทศจีนตอนเหนือและตะวันออก ญี่ปุ่น เกาหลี รัสเซีย อเมริกาใต้ เป็นต้น

2.1.2.1.3 จาวานิกา (javanica) เป็นข้าวต้นสูง เมล็ดใหญ่ป้อม สันนิษฐานว่าเกิดขึ้นจากการคัดเลือกพันธุ์มาจากข้าวกลุ่มอินดิกา พบปลูกในประเทศอินโดนีเซียเท่านั้น

2.1.2.2 จำแนกตามชนิดเนื้อแป้งในเมล็ดข้าว

แบ่งได้ 2 ชนิด (เอกสงวน ชูวิสิฐกุล, 2544) ได้แก่

2.1.2.2.1 ข้าวเหนียว (glutinous rice หรือ waxy rice) เมล็ดข้าวสารจะมีสีขาวขุ่น เมื่อนึ่งแล้วจะได้ข้าวสุกที่จับตัวติดกันแน่นและมีลักษณะใส ประกอบด้วยแป้งชนิดอะมิโลเพคติน (Amylopectin) เป็นส่วนใหญ่ มีแป้งอะมิโลส (Amylose) อยู่เพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย

2.1.2.2.2 ข้าวเจ้า (non glutinous rice) เมล็ดข้าวสารจะมีสีขาวใส เมื่อนึ่งหรือหุงแล้วข้าวสุกมีสีขาวขุ่นและร่วนกว่าข้าวเหนียว ข้าวเจ้ามีแป้งอะมิโลสอยู่ประมาณ 7-33 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือเป็นอะมิโลเพคติน

2.1.2.3 จำแนกตามความไวต่อช่วงแสง

2.1.2.3.1 ข้าวไวแสง (photoperiod sensitive rice) เป็นข้าวที่มีกำหนดการออกดอกที่แน่นอน หรือถ้าคลาดเคลื่อนก็เพียงเล็กน้อย แม้จะปลูกในเวลาต่าง ๆ ข้าวไวแสง จัดเป็นพืชวันสั้นจะออกดอกในเวลาทีกลางวันสั้นกว่ากลางคืน ข้าวประเภทนี้ใช้ปลูกในฤดูนาปี

2.1.2.3.2 ข้าวไม่ไวแสง (photoperiod insensitive rice) เป็นข้าวที่ออกดอกตามอายุ จึงปลูกได้ตลอดปี ข้าวประเภทนี้มีอายุตั้งแต่ประมาณ 110-150 วัน ใช้ปลูกในนาปรัง ในประเทศไทยส่วนมากได้จากการผสมพันธุ์ข้าวไทยกับข้าวต่างประเทศ เช่น ฟิลิปปินส์ อินเดีย และ อินโดนีเซีย เช่น ข้าว กข1 กข2 กข3 กข7 และ กข 9 เป็นต้น

2.1.3 พันธุ์ข้าวที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองใช้พันธุ์ข้าวที่ได้รับการรับรองจากกองวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว โดยแต่ละสายพันธุ์มีคุณลักษณะประจำพันธุ์ที่แตกต่างกันออกไปดังนี้ (พินิจ จันทร, 2555)

2.1.3.1 ข้าวดอกมะลิ 105 (Khao Dawk Mali 105; KDML 105)

ประเภท เป็นพันธุ์พื้นเมืองรวบรวมจาก อ. บางคล้า จ. ฉะเชิงเทราข้าวเจ้านาสวน ไร่ต่อช่วงแสง ปลูกนาปี

การรับรองพันธุ์ เป็นพันธุ์รับรองเมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2502

ลักษณะทั่วไป ต้นสูง 140 เซนติเมตร ลำต้นสีเขียวจาง ใบเรียวยาวสีเขียวอ่อนข้างแคบ ฟางอ่อน ใบธงทำมุมกับคอรวง เมล็ดรูปร่างเรียวยาว ข้าวเปลือกสีฟาง ระยะพักตัวของเมล็ด 8 สัปดาห์ ปริมาณแป้งอะมิโลส 12-17% ผลผลิตประมาณ 499 กิโลกรัมต่อไร่

ลักษณะเด่น ทนแล้ง ปลูกเป็นข้าวไร่ได้ ทนต่อสภาพดินเค็มและดินเปรี้ยว เมล็ดข้าวสารใส ข้าวสุกมีกลิ่นหอมและอ่อนนุ่ม

ลักษณะด้อย ไม่ต้านทานโรคใบสีส้ม โรคขอบใบแห้ง โรคไหม้และโรคใบหงิก ไม่ต้านทานเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล เพลี้ยจักจั่นสีเขียวและหนอนกอ

พื้นที่แนะนำ ปลูกได้ทุกภาคโดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือตอนบน จะให้คุณภาพข้าวดี

2.1.3.2 กข31 หรือปทุมธานี 80 (RD31, Pathum Thani 80)

ประเภท ข้าวเจ้าไม่ไวแสง ได้จากการผสมพันธุ์ระหว่าง สายพันธุ์ SPR85163-5-1-1-2 กับสายพันธุ์ IR54017-131-1-3-2 ที่ศูนย์วิจัยข้าวสุพรรณบุรี

การรับรองพันธุ์ เป็นพันธุ์รับรองเมื่อวันที่ 6 มีนาคม 2550

ลักษณะทั่วไป สูงเฉลี่ย 117 เซนติเมตร ทรงกอตั้ง ต้นแข็ง ไม่ล้มง่าย อายุเก็บเกี่ยว 118 วัน เมื่อปลูกโดยวิธีปักดำ และ 111 วันเมื่อปลูกด้วยวิธีหว่านน้ำตาม คุณภาพเมล็ดทางกายภาพ สม่ำเสมอให้ผลผลิตมากกว่าพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ระยะพักตัวประมาณ 5 สัปดาห์ ปริมาณแป้งอะมิโลส 27.3-29.8 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีกลิ่นหอม ผลผลิตเฉลี่ย 745 กิโลกรัมต่อไร่

ลักษณะเด่น ด้านทานต่อเพลี้ยกระโดดหลังขาว ก่อนข้างด้านทานต่อเพลี้ยกระโดด
สีน้ำตาล โรคขอบใบแห้ง โรคใบจุดสีน้ำตาล และโรคเมล็ดด่าง

ลักษณะด้อย ไม่ต้านทานต่อโรคไหม้ โรคใบหงิก และโรคใบสีส้ม

พื้นที่แนะนำ นาชลประทานภาคกลาง

2.1.3.3 กข41 (RD41)

ประเภท เป็นข้าวเจ้า ไม่ไวแสง ได้จากการผสม 3 ทางระหว่าง ลูกผสมชั่วที่ 1 ของ
CNT85059-27-1-3-2 และสุพรรณบุรี 60 นำไปผสมพันธุ์กับ RP217-635-8

การรับรองพันธุ์ เป็นพันธุ์รับรองเมื่อวันที่ 17 กันยายน 2552

ลักษณะทั่วไป ต้นสูงประมาณ 95-116 เซนติเมตร อายุเก็บเกี่ยว 125 – 130 วัน ทรงกอ
ตั้ง ลำต้นแข็งแรง ผลผลิตสูง ให้ผลผลิตเฉลี่ย 894 กิโลกรัมต่อไร่ คุณภาพเมล็ดทางกายภาพดีเมล็ด
ยาวเรียวยาว ท้องไข่น้อย ระยะพักตัวประมาณ 4 สัปดาห์ ปริมาณแป้งอะมิโลส 16.84 เปอร์เซ็นต์

ลักษณะเด่น ให้ผลผลิตสูงกว่าสุพรรณบุรี 1 (806 กิโลกรัมต่อไร่) และชัชวาล 1 (812
กิโลกรัมต่อไร่) ก่อนข้างด้านทานเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล และโรคไหม้

ลักษณะด้อย ไม่ต้านทานต่อโรคขอบใบแห้ง ไม่ควรใส่ปุ๋ยในโตรเจนในระดับสูง
เกินไปจะทำให้เกิดโรครุนแรง

พื้นที่แนะนำ พื้นที่นาชลประทานภาคเหนือตอนล่าง

2.1.3.4 สุพรรณบุรี 1 (Suphan Buri 1)

ประเภท เป็นข้าวเจ้านาสวน ไม่ไวต่อช่วงแสง ได้จากการผสมพันธุ์ระหว่างลูกผสม
ชั่วที่ 1 ของ IR25393-57-2-3 / กข23 // IR27316-96-3-2-2 และลูกผสมชั่วที่ 1 ของ SPRLR77205-3-
2-1-1 / SPRLR79134-51-2-2 ที่สถานีทดลองข้าวสุพรรณบุรี เมื่อปี พ.ศ. 2528

การรับรองพันธุ์ วันที่ 28 ตุลาคม พ.ศ. 2537

ลักษณะทั่วไป ต้นสูงประมาณ 125 เซนติเมตร อายุเก็บเกี่ยวประมาณ 120 วัน
ทรงกอตั้ง ต้นแข็งแรงไม่ล้ม ใบสีเขียวเข้ม มีขน กาบใบและปล้องสีเขียวใบธงยาวค่อนข้างตั้งตรง
คอรวงยาว ลักษณะรวงค่อนข้างแน่น ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 22 วัน ปริมาณอะมิโลส 29 %
ผลผลิตประมาณ 806 กิโลกรัมต่อไร่

ลักษณะเด่น เมล็ดข้าวสารใส คุณภาพการขัดสีดี ข้าวสุกมีกลิ่นหอมและอ่อนนุ่ม
ผลผลิตสูง ตอบสนองต่อการใช้ปุ๋ย ด้านทานโรคไหม้ โรคขอบใบแห้ง และด้านทานโรคใบหงิก
และโรคใบสีส้ม ในสภาพธรรมชาติต้านทานเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล และเพลี้ยกระโดดหลังขาว

ลักษณะด้อย ไม่ต้านทานต่อเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาลและโรคไหม้

พื้นที่แนะนำ นาชลประทาน ในภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก

2.2 ดินเค็ม และผลของภาวะเครียดจากความเค็มต่อพืช

2.2.1 ดินเค็มและประเภทของดินเค็ม

ดินเค็ม หมายถึง ดินที่มีปริมาณเกลือที่ละลายน้ำได้อยู่ในดินมากเกินไปจนเป็นอันตรายต่อพืช ทำให้การเจริญและผลผลิตลดลง ความเค็มของดินวัดได้จากการนำไฟฟ้าของสารละลายดินที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส หากสูงกว่า 2 มิลลิโหมห์ต่อเซนติเมตร (mmhos cm^{-1}) หรือ 2 เดซิซีเมนต่อเมตร (dS m^{-1}) จัดเป็นดินเค็ม (อรุณี ยูวะนิยม, 2540) และสามารถแบ่งได้เป็น ดินเค็มน้อย ดินเค็มปานกลาง ดินเค็มมาก และดินเค็มจัด (Ghosh, Ali, & Saikat, 2016) ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 การแบ่งประเภทดินเค็มและผลกระทบต่อพืช (Ghosh et al., 2016)

ประเภทของดิน	การนำไฟฟ้า (dS m^{-1})	ความเข้มข้นของเกลือ (ร้อยละน้ำหนักต่อปริมาตร)	ผลกระทบต่อพืช
ไม่เค็ม	<2	0.12	ไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช
เค็มน้อย	2 - 4	0.12 - 0.25	ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชที่อ่อนแอต่อความเค็ม
เค็มปานกลาง	4 - 8	0.25 - 0.5	ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิด
เค็มมาก	8 - 16	0.5 - 1.0	พืชทนเค็มเท่านั้นที่สามารถเจริญเติบโตได้
เค็มจัด	>16	>1.0	เฉพาะพืชทนเค็มจัดจึงเจริญเติบโตได้

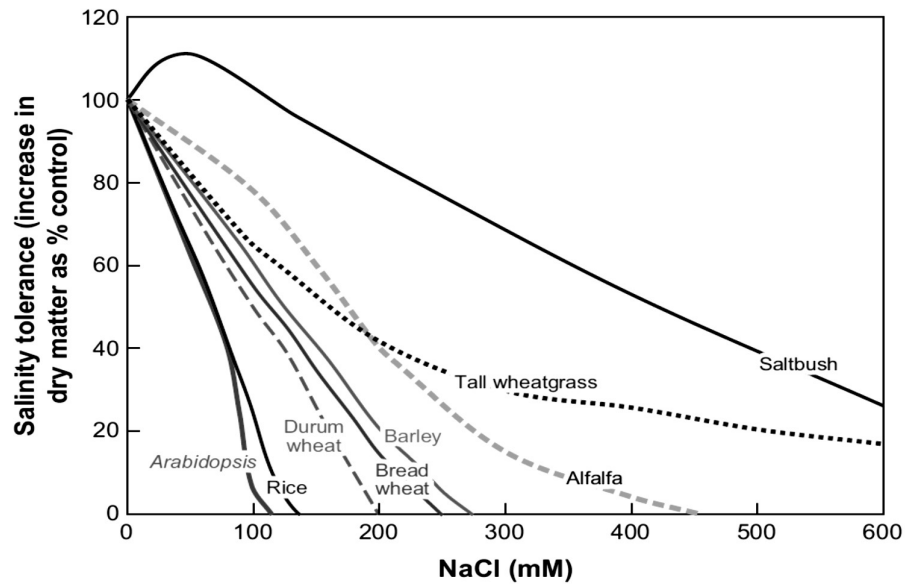
เกลือส่วนใหญ่ที่พบในดินเค็มเป็นไอออนของ คลอไรด์ (Cl^-) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) โซเดียม (Na^+) แคลเซียม (Ca^{2+}) หรือ แมกนีเซียม (Mg^{2+}) แต่ไอออนที่พบมากและส่งผลต่อการเจริญและผลผลิตของพืชมากกว่าไอออนชนิดอื่น ๆ คือ Na^+ และ Cl^- (Bemstein, 1964) ในประเทศไทย ดินเค็ม แบ่งตามองค์ประกอบของเกลือเป็น 3 บริเวณ คือ ดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ดินเค็มในภาคกลางและ ดินเค็มชายทะเล โดยเกลือในดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและดินเค็มชายทะเลมีองค์ประกอบหลักเป็นเกลือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

แต่ดินเค็มชายทะเลจะมีเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) มากกว่า ส่วนดินเค็มในภาคกลางสามารถพบเกลือชนิดอื่นนอกจากโซเดียมคลอไรด์ เช่น เกลือซัลเฟต คลอไรด์ ไบคาร์บอเนต หรือคาร์บอเนตของแมกนีเซียม แคลเซียม และโซเดียม (อรุณี ยูวะนิยม, 2540)

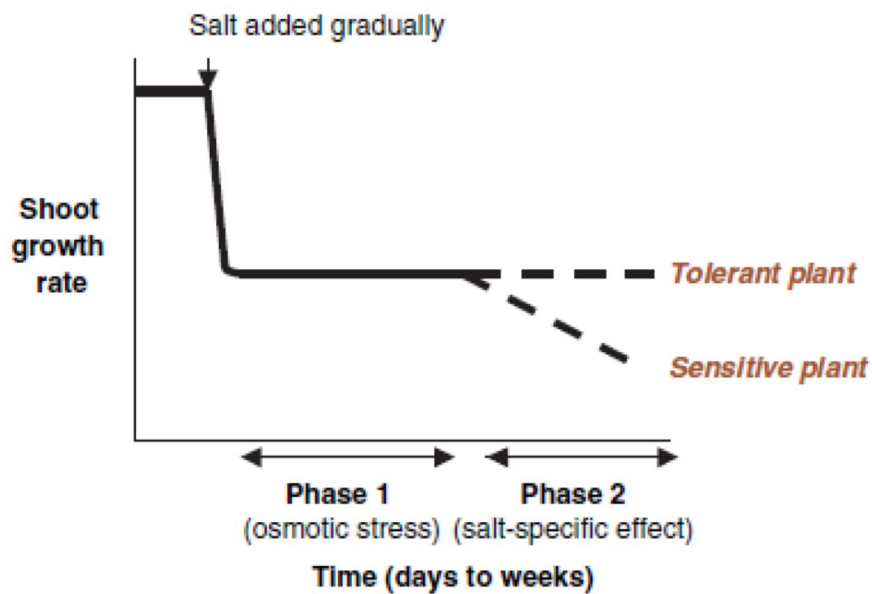
2.2.2 ผลของภาวะเครียดจากความเค็มต่อพืช

พืชที่เพาะปลูกในดินเค็มจะเกิดภาวะเครียดจากการขาดน้ำ (water stress) และภาวะเครียดจากไอออนของเกลือ (ionic stress) เมื่อพืชได้รับภาวะเค็มเป็นเวลานาน ทำให้มีการสะสมไอออนของเกลือปริมาณมากส่งผลให้เกิดความเป็นพิษภายในต้นพืช และการเปลี่ยนแปลงกระบวนการเมแทบอลิซึม (metabolism) ต่าง ๆ (Zhu, 2003) การลดลงค่าศักย์ (water potential) การไม่สมดุลของไอออนภายใน (ionic imbalances) และการสะสมไอออนที่เป็นพิษ (ion toxicity) ต่อพืช การตอบสนองและการปรับตัวของพืชต่อภาวะเค็มนั้นมีความแตกต่างกันตามชนิดพืช พันธุ์พืช และระยะการเจริญเติบโตของพืช (Munns & Tester, 2008) จากการศึกษาของ Aslam, Qureshi and Ahmed (1993) และ Colmer, Munns, and Flowers (2005) พบว่าพืชกลุ่มข้าวมีความสามารถในการทนต่อความเค็มแตกต่างกัน โดยที่ข้าวบาร์เลย์ (*Hordeum vulgare* L.) จัดว่ามีความทนต่อความเค็มมากที่สุด ข้าวสาลี (*Triticum aestivum* L.) เป็นพืชที่ไม่ทนเค็มปานกลาง และข้าว (*O. sativa* L.) เป็นพืชที่ไม่ทนเค็มมากที่สุด (ภาพที่ 2-1)

ผลของภาวะเค็มในช่วงแรกทำให้พืชมีการสูญเสียน้ำ ทำให้เซลล์หดตัว พืชอาจฟื้นตัวได้ในเวลาต่อมา แต่การแบ่งเซลล์และการยึดตัวของเซลล์จะลดลงอย่างต่อเนื่อง และหากได้รับภาวะความเค็มเป็นระยะเวลาอันยาวนานจะมีผลต่อการพัฒนาราก และแสดงความเสียหายที่เกิดจากปริมาณไอออนเกลือที่สะสมภายในเซลล์ จากรายงานของ Munns and Tester (2008) สามารถแบ่งระยะการตอบสนองต่อความเค็มของพืชออกเป็น 2 ระยะ คือ ระยะที่ 1 (Osmotic phase) และ ระยะที่ 2 (Ion-specific phase or Ionic phase) (ภาพที่ 2-2)



ภาพที่ 2-1 การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งในพืชทนเค็มหลายชนิดที่ปลูกในสารละลายเกลือและในทรายที่มีสารละลายเกลือ เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 3 สัปดาห์ (Munns & Tester, 2008)



ภาพที่ 2-2 ลักษณะการตอบสนองด้านการเติบโตส่วนปลายยอดของพืช 2 ระยะ ที่มีลักษณะทนเค็มและไม่ทนเค็มในระดับเกลือที่เป็นพิษในใบ (Munns & Tester, 2008)

ระยะที่ 1 (Osmotic phase) พืชจะมีการเจริญเติบโตลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากได้รับความเค็ม ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) รอบบริเวณราก ทำให้รากพืชสามารถดูดน้ำได้น้อยลง การสร้างใบใหม่และการพัฒนาของใบข้างในในข้าวบาร์เลย์ พบว่ามีพื้นที่ใบ ความกว้างใบ จำนวนใบ และจำนวนกอลดลง มีลักษณะคล้ายกับภาวะเครียดจากการขาดน้ำ water stress (Mumms, 2002) ซึ่งขึ้นกับความแตกต่างกันของชนิดพืช โดยที่ใบพืชและการเจริญเติบโตของพืชจะเริ่มฟื้นตัวกลับมาเมื่อระยะเวลาผ่านไป ซึ่งขึ้นกับชนิดของพืชและความเข้มข้นบริเวณรอบ ๆ รากของพืช

ระยะที่ 2 (Ion-specific phase) เมื่อพืชได้รับภาวะเค็มเป็นระยะเวลานานเกินสัปดาห์ พืชจะสะสมไอออนที่เป็นพิษของเกลือ เช่น Na^+ ภายในแวคิวโอล (vacuole) ของเซลล์ในใบแก่หรือใบที่แก่เต็มที่แล้ว ทำให้ใบแห้งและตายลง ส่งผลให้พื้นที่ใบที่ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง หากใบพืชที่ตายมีจำนวนมากกว่าใบพืชที่เกิดขึ้นใหม่ ผลผลิตจากอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชนั้นจะไม่เพียงพอต่อความต้องการของใบเกิดใหม่ ทำให้พืชลดการเจริญเติบโตลง พืชที่สามารถอยู่รอดในภาวะเค็มอาจตัดสินใจตายของใบแก่และการเกิดใหม่ของใบพืช หากใบพืชที่เกิดขึ้นใหม่มีมากกว่าใบแก่ที่ตายลง จะมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงที่เพียงพอต่อการอยู่รอดต่อไปจนถึงระยะออกดอกได้

Flowers, Troke, and Yeo (1997) ได้ทำการจัดกลุ่มพืชตามความสามารถในการทนเค็ม โดยจำแนกได้ 2 กลุ่ม คือ พืชทนเค็ม (halophyte) คือพืชที่มีการเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ที่มีความเค็มสูง เช่น พืชที่อยู่ในวงศ์ Tamaricaceae, Zygophyllaceae, Potamogetonaceae, Rhizophoraceae และ Frankeniaceae เป็นต้น และ พืชไม่ทนเค็ม (non-halophyte หรือ glycophyte) คือพืชที่แสดงอาการผิดปกติและมีการเจริญเติบโตที่ลดลงเนื่องจากในพื้นที่นั้นมีเกลือสูงกว่า 0.01 เปอร์เซ็นต์ เช่น พืชในวงศ์ Rosaceae, Araceae, Ericaceae และ Orchidaceae เป็นต้น โดยที่พืชแต่ละกลุ่มจะมีการตอบสนองต่อภาวะความเค็มที่แตกต่างกันทั้งในด้านการเติบโต ปริมาณรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง รวมทั้งปริมาณสารที่ผลิตขึ้นเพื่อรักษาค่าแรงดันออสโมติกภายในเซลล์ เช่น การสะสมของโพรลีนที่แตกต่างกัน

2.2.2.1 ผลของภาวะเครียดจากความเค็มต่อการเติบโตของพืช

ความเค็มมีผลยับยั้งการเติบโต ทำให้ผลผลิต และคุณภาพของพืชลดลง เนื่องมาจากการเกิด osmotic stress ความเป็นพิษของธาตุบางชนิด (ion toxicity) และความไม่สมดุลของธาตุอาหาร (Bernstein, 1964; อรุณี ยูวะนิยม, 2547)

2.2.2.1.1 การเกิด osmotic stress ในดินเค็มจะมีปริมาณไอออนต่าง ๆ สูงกว่าดินทั่วไปทำให้ค่าออสโมติกบริเวณรอบรากเพิ่มขึ้น และค่าซลคัลก็ลดลง รากพืชดูดน้ำได้ลดลง พืชบน

พื้นที่ดินเค็มจึงต้องใช้พลังงานเพื่อดึงน้ำและธาตุอาหารมาใช้ในการเจริญเติบโตมากขึ้น หากปรับตัวไม่ได้เซลล์พืชจะมีการขาดน้ำ ส่งผลกระทบต่อการงอก และการเจริญเติบโต พืชที่อยู่ในระยะต้นกล้าหากได้รับภาวะเค็ม ระยะแรกส่งผลให้สูญเสียแรงดันเต่ง (turgor) ของเซลล์ และอัตราการยืดตัวของเซลล์ลดลง (Fricke & Peters, 2002; Passioura & Munns, 2000) การเจริญเติบโตของใบและพื้นที่ใบลดลง เซลล์ของใบพืชมีการสูญเสียน้ำ เช่น ถั่วเหลือง (*Glycine max* L.) พันธุ์ SJ.5 มีพื้นที่ใบลดลงจากภาวะปกติ 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้รับความเข้มข้นเกลือ โซเดียมคลอไรด์ระดับ 80 มิลลิโมลลาร์เป็นเวลา 10 วัน (อัญชลี ใจดี, 2543) นอกจากนี้การลดลงของแรงดันเต่งยังให้ผลในลักษณะเดียวกันกับความเครียดจากภาวะแล้ง (drought stress) ซึ่งมีผลกระตุ้นการทำงานของฮอร์โมนแอบไซซิก (abscisic acid; ABA) ที่มีบทบาทสำคัญในการส่งสัญญาณภายในเซลล์ทั้งส่วนเมล็ด รากและลำต้นเพื่อควบคุมระยะพัก การเจริญเติบโต และรวมถึงการชักนำการเปิดปากใบ (stomatal conductance) ที่ส่งผลต่อการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์และการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช การทดลองในข้าวบาร์เลย์ (*Hordeum vulgare* L. cv. Golf) ที่ได้รับความเค็ม พบว่าปริมาณฮอร์โมน ABA เพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ขณะที่ใบพืชยังคงมีอัตราการเจริญเติบโตลดลง ทั้งนี้ฮอร์โมน ABA ยังยับยั้งการทำงานของฮอร์โมนจิบเบอเรลลิน (Gibberellins: GAs) ทำให้ความยาวต้นลดลง (Fricke, Akhiyarova, Veselov, & Kudoyarova, 2004)

2.2.2.1.2 ความเป็นพิษของธาตุบางชนิด (ion toxicity) เนื่องจากดินเค็มส่งผลให้พืชรับไอออนบางชนิดเข้าไปสะสมมากเกินไปจนเกิดความไม่สมดุลของธาตุอาหารพืช ทำให้พืชไม่สามารถเจริญเติบโตได้ตามปกติ เช่น ปริมาณโซเดียมไอออนและคลอไรด์ไอออนที่มากเกินไปส่งผลต่อปริมาณแคลเซียม โพแทสเซียมและแมกนีเซียมภายในเซลล์ทำให้การสร้างเซลล์ใหม่ การขนส่งเคลื่อนย้ายคาร์โบไฮเดรตถูกรบกวน เกิดอาการใบไหม้ ซึ่งส่งผลต่อการเติบโตของพืช (Hardter, 1992)

2.2.2.1.3 ความไม่สมดุลของธาตุอาหาร กรณีที่ดินเค็มมีไอออนของธาตุอื่นมาเกี่ยวข้องจะทำให้ระดับความเป็นกรดเบสของดินเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลต่อการดูดซึมธาตุอาหารบางชนิด เช่น ที่ระดับความเป็นกรดเบสมากกว่า 7 ธาตุอาหารกลุ่มเหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง และ โคบอลท์ จะอยู่ในรูปที่พืชดูดซึมหรือนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อยลงทำให้เกิดการขาดธาตุอาหาร หรือเกิดความเป็นพิษได้ ซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชที่ลดลง (อรุณี ยูวะนิยม, 2547)

จากรายงานการวิจัยแสดงให้เห็นว่าผลของภาวะเครียดจากความเค็มส่งผลต่อพืชในระยะต้นกล้า (seedling stage) ที่มีการเติบโตทางลำต้น (vegetative growth) ทำให้พืชมีการเติบโตลดลง เช่น ข้าวโพด (*Zea mays* L.) ข้าวฟ่าง (*Sorghum bicolor* L.) และข้าวสาลี (*Triticum aestivum*

L.) (Maas et al., 1986) เมล่อน (*Cucumis melo* L.) (Botia et al., 2005) ผักปวยเล้งนิวซีแลนด์ (*Tetragonia tetragonioides* Pall) และผักสลัดชนิด red orach (*Atriplex hortensis* L.) (Wilson et al., 2000) และถั่วลันเตา (*Pisum sativum* L.) (Maas & Poss, 1989) ความเค็มยังส่งผลให้ข้าวมีการเกิดของใบใหม่ อัตราการเติบโตของเมล็ดข้าว และน้ำหนักแห้งลดลงอย่างชัดเจน (Sultana et al., 1999) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shereen et al. (2007) พบว่าน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งของส่วนต้นและรากในข้าวทุกพันธุ์ที่ทดลอง มีค่าลดลงทางสถิติ เมื่อข้าวได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 50 ถึง 75 มิลลิโมลลาร์ นอกจากนี้เมื่อพืชที่ได้รับความเค็มในระดับที่รุนแรงเพิ่มมากขึ้นจะไปยับยั้งการเติบโตส่วนต้นในระยะสืบพันธุ์ (reproductive stage) จนถึงระยะออกดอก (flowering stage) โดยที่ภาวะความเครียดจากความเค็มทำให้ข้าวมีจำนวนกอ จำนวนรวง และน้ำหนักเมล็ดลดลง (Khatun & Flowers, 1995; Lutts et al., 1995)

2.2.2.2 ผลของภาวะเครียดจากความเค็มต่อปริมาณรงควัตถุที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

ภาวะเค็มมีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช (photosynthetic process) เมื่อพืชได้รับภาวะเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) พบอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดต่ำกว่าในภาวะปกติ โดยพืชที่มีลักษณะอ่อนแอต่อความเค็ม ที่เรียกว่า glycophyte หรือ non-halophytes เช่น ข้าว (*O. sativa* L.) แก่นตะวัน (*Helianthus tuberosus* L.) และข้าวสาลี (*Triticum aestivum* L.) พบอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลงเมื่อได้รับภาวะเครียดจากความเค็ม (Li et al., 2012; Huang et al., 2012; Zheng et al., 2009) สาเหตุที่อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลงเกิดจากหลายปัจจัย เช่น การสูญเสียน้ำของเซลล์เมมเบรน การลดลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องมาจากการปิดของปากใบ ความเป็นพิษของเกลือ (Iyengar & Reddy, 1996) และความเครียดจากการเกิดออกซิเดชัน (oxidative stress) (Parida & Das, 2005; Chaves et al., 2009) ทำให้พืชเกิดการเสื่อมของเซลล์มากขึ้น การเปลี่ยนแปลงของการทำงานในไซโตพลาสซึม ทำให้ใบพืชมีปริมาณของคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ลดลงภายใต้ภาวะเครียดจากความเค็ม (Kennedy & De Fillippis, 1999) นอกจากนี้การสะสมไอออนของเกลือที่เกิดจากความเค็มส่งผลต่อการลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบพืช โดยไปเร่งการทำงานของเอนไซม์ chlorophyllase (Reddy & Vora, 1986; Yeo & Flowers, 1983) อย่างไรก็ตาม กระบวนการย่อยสลายของคลอโรฟิลล์สามารถเปลี่ยนรูปคลอโรฟิลล์ บี ไปเป็นคลอโรฟิลล์ เอ จึงทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของพืชบางชนิดเพิ่มสูงขึ้นได้เมื่ออยู่ในภาวะเค็ม (Eckardt, 2009) โดยพืชที่ทนเค็มจะมีปริมาณคลอโรฟิลล์เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่พืชไม่ทนเค็มจะมีปริมาณคลอโรฟิลล์ลดน้อยลง (Khan et al., 2009) ซึ่งการสะสมของปริมาณคลอโรฟิลล์สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดการทนเค็มของพืชหลายชนิด ได้แก่ ข้าว (*O. sativa* L.) ข้าวสาลี

(*Triticum aestivum* L.) ถั่วลันเตา (*Pisum sativum* L.) และเมลอน (*Cucumis melo* L.)

(Chunthaburee, Dongsansuk, Sanitchon, Pattanagul, & Theerakulpisut, 2015; Arfan, Athar, & Ashraf, 2007; Noreen, Ashraf, & Akram, 2010; Romero, Belakbir, Ragala, & Ruiz, 1997)

2.2.2.3 ผลของภาวะเครียดจากความเค็มต่อปริมาณ โพรลีน (proline) และ โปรตีน (protein)

โพรลีนเป็นกรดอะมิโนชนิดหนึ่ง สร้างมาจากกรดกลูตามิก (glutamic) สามารถช่วยปรับค่าแรงดัน osmotic ในเซลล์พืชเมื่อได้รับความเค็ม การที่พืชสะสมปริมาณ โพรลีนเพิ่มมากขึ้น เพื่อเป็นแหล่งของสารละลายสำหรับช่วยปรับสภาพออสโมติกในเซลล์ และช่วยรักษาการทำงานของเอนไซม์ให้เป็นปกติ เนื่องจากโพรลีนช่วยทำให้โมเลกุลของน้ำรวมกับโปรตีนได้ดีขึ้น เป็นการรักษาสภาพการขาดน้ำ (hydration) ของโปรตีน (Solomon, Beer, Waisel, Jones, & Paleg, 1994) และยังช่วยรักษาโครงสร้างของเซลล์ให้เป็นปกติ (Van Rensburg, Krüger, & Krüger, 1993) การสะสมของโพรลีนมาจาก 3 สาเหตุหลัก ได้แก่

2.2.2.3.1 เมื่อพืชได้รับความเครียดทำให้การสร้าง glutamyl - γ - semialdehyde เกิดขึ้นได้ดี แต่ยับยั้งกระบวนการที่เปลี่ยน glutamate ไปเป็น 2-oxoglutarate จึงเป็นการส่งเสริมกระบวนการสร้าง delta-pyrroline-5-carboxylate (P5C) เพิ่มขึ้น (Bogges, Aspinall, & Paleg, 1976) เมื่อพืชมีปริมาณ P5C สูง ส่งผลให้มีการสร้างโพรลีนเพิ่มมากขึ้น

2.2.2.3.2 เมื่อพืชอยู่ในภาวะเครียดกระบวนการ proline oxidation จะถูกยับยั้ง ส่งผลให้โพรลีนถูกเปลี่ยนไปเป็น glutamate ซ้ำลง (Bogges & Stewart, 1976)

2.2.2.3.3 ภาวะเครียด ทำให้กระบวนการสร้างโปรตีนซ้ำลง ทำให้โพรลีนถูกนำไปใช้น้อยลง เกิดการสะสมโพรลีนเพิ่มมากขึ้น (Hanson & Tully, 1979)

การสะสมโพรลีนจึงเป็นกระบวนการที่ได้รับการยอมรับว่ามีความสำคัญในการปรับตัวของพืชได้รับความเครียดที่เกิดจากความเค็มและแล้ง (Strizhov et al., 1997) โดยการปรับค่าแรงดันออสโมติก (osmotic adjustment) และปริมาณไอออน (Lutts, Kinet, & Bouharmon, 1996b) จากการศึกษาของ Lutts et al. (1996a) รายงานว่าเมื่อปลูกข้าวพันธุ์ I Kong Pao (IKP) ซึ่งเป็นข้าวพันธุ์ไม่ทนเค็ม เปรียบเทียบกับข้าวพันธุ์ทนเค็ม คือข้าวพันธุ์ Nona Bokra ในสารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้นเกลือ โซเดียมคลอไรด์ 50 และ 100 มิลลิโมลลาร์ ตรวจวัดปริมาณโพรลีน ในวันที่ 3 และ 10 ภายหลังจากได้รับภาวะความเครียดจากความเค็ม พบว่าข้าวพันธุ์ที่ไม่ทนเค็มมีปริมาณโพรลีนสูงกว่าข้าวพันธุ์ทนเค็มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ พบว่าในข้าวเจ้ามีการสะสมโพรลีนมากที่สุดที่ใบอ่อนเมื่อได้รับภาวะเครียดรุนแรง หลังจากการงอกเป็นเวลา 37 วัน (Lutts et al., 1999) ข้าวบาร์เลย์ (*Hordeum vulgare* L.) เมื่ออยู่ในภาวะขาดน้ำแสดง

อาการใบเหี่ยว พบมีการสร้างโพรลีนจากกรดกลูตามิก เพิ่มจากภาวะปกติ 40 เท่า นอกจากนี้ พบว่า ปริมาณคาร์โบไฮเดรตเป็นอีกปัจจัยในการควบคุมการสร้างโพรลีน โดยเมื่อปริมาณคาร์โบไฮเดรต ในใบลดลง พืชจะมีการสร้าง glutamine aspartate และ organic acid อื่น ๆ ทดแทน (Stewart & Larher, 1980) ในขณะที่กระบวนการ proline oxidation และกระบวนการสังเคราะห์โพรลีนถูก ยับยั้ง ทำให้มีการสะสมโพรลีนเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณ โพรลีนภายในเซลล์จะลดลง (Sangeeta & Vrunda, 2014; Lee et al., 2013) เช่น ในการศึกษาของ Lutt et al. (1996) ที่พบว่ามีการลดลงของ ปริมาณ โพรลีนในใบข้าวที่อยู่ในสารละลายอาหารที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ 50 มิลลิโมลลาร์ เป็น เวลา 2 วัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Kong-ngern et al. (2005) ที่ศึกษาการแยกชนิดโพรลีนที่ สกัดจากข้าวด้วยกระแสไฟฟ้า (one-dimensional SDS-PAGE; 1DE และ two-dimensional PAGE; 2DE) พบว่าข้าวในภาวะเครียดจากความเค็มมีปริมาณ โพรลีนหลายชนิดลดลง

2.2.3 กลไกในการทนเค็มของพืช

พืชมีกลไกในการตอบสนองต่อภาวะเครียดจากความเค็มหลายวิธี ได้แก่

2.2.3.1 กลไกการหลีกเลี่ยง (avoidance mechanism)

เป็นการควบคุมระดับของไอออนที่ไปรบกวน ion homeostasis หรือหลีกเลี่ยงการ สะสมเกลือใน cytoplasm โดยนำไปสะสมที่แวคิวโอล (vacuole) หรือขับออกนอกเซลล์ (Zhu, 2003) นอกจากนี้ การสร้างต่อมเกลือ (salt gland) เพื่อกำจัดเกลือส่วนเกิน รวมไปถึงการอวบน้ำ (succulence) โดยการเพิ่มปริมาณน้ำภายในเซลล์เพื่อทำให้ความเข้มข้นของสารละลายภายในเซลล์ ลดลง (Greenway & Munns, 1980)

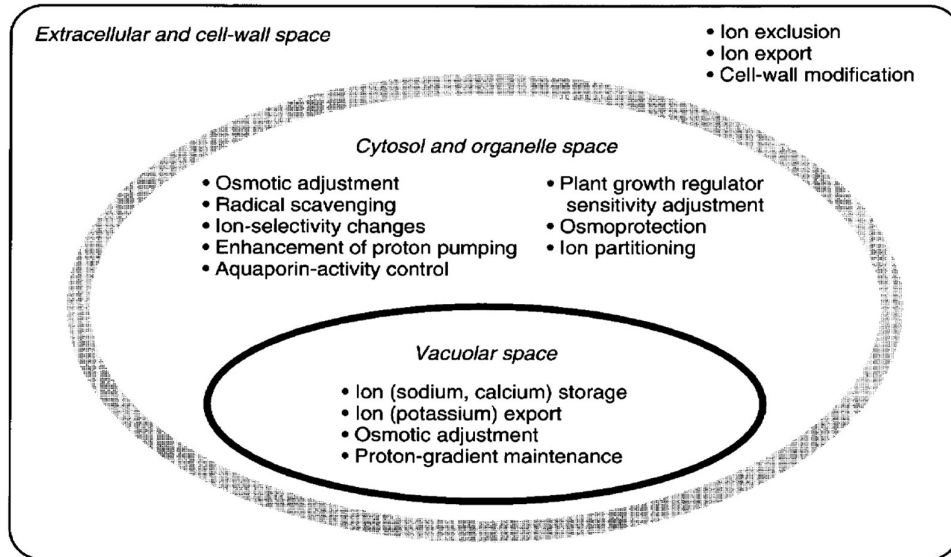
2.2.3.2 กลไกการดูดซึมและการเคลื่อนย้าย (absorption and translocation)

พืชจะดูดเกลือเข้ามาสะสมในรากหรือลำต้นเพื่อป้องกันไม่ให้เกลือเข้าไปสะสมที่ใบ หรือยอด หรือมีการดูดโซเดียมกลับออกจากท่อน้ำ (reabsorption) และ การเคลื่อนย้ายออก (retranslocation) จากพืชสู่สารละลายดิน (Yeo et al., 1987)

2.2.3.3 กลไกการทน (tolerant mechanism)

พืชมีการปรับกลไกทางด้านชีวเคมีเพื่อต้านทานต่อภาวะเค็ม (ภาพที่ 3) เช่น การ เลือกสะสมของไอออน ควบคุมการดูด ไอออนโดยรากและการส่งผ่านไอออนในใบพืช การแบ่ง ไอออนภายในเซลล์หรือภายในต้นพืชทั้งหมด การสังเคราะห์สารละลายโดยสะสมสารจำพวก osmoprotectant ส่วนใหญ่นั้นเป็นสารจำพวก polyol หรือ nitrogen dipole และสาร metabolite ได้แก่ sorbitol (Ahmad et al., 1979) และ mannitol (Tarczynski et al., 1993) กรดอะมิโนต่าง ๆ เช่น proline (Greenway & Munns, 1980; Lutts et al., 1996; Iyer & Caplan, 1998; Lutts et al., 1999),

glycine betaine (Sakamoto & Murata, 2002) , putrescine (Chen & Kao, 1993) และ ion ต่าง ๆ เช่น Na^+ , Cl^- , K^+ , NO_3^- และ Mg_2^+ (Lutts et al., 1996; Cheeseman, 1988; Rodriguez, Roberts, Jordan, & Drew, 1997) เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้จัดเป็น compatible solute หรือ สาร osmolyte เพื่อเป็นการรักษา ค่าชดสัคย์ ภายในเซลล์ให้ต่ำลงด้วยการสะสมสาร metabolite บางชนิด



ภาพที่ 2-3 กระบวนการทำงานทางชีวเคมีที่เกี่ยวข้องกับพืชทนเค็ม และทนแล้ง (Bohnert & Jensen, 1996)

จากการศึกษาพบว่าเมื่อพืชบางกลุ่มได้รับภาวะเครียดจะมีการสร้างและการสะสมสารบางตัวหรือไอออนบางชนิด โดยสารเหล่านี้จะทำให้ความเข้มข้นภายในเซลล์พืชสูงขึ้น เพื่อปรับค่าชดสัคย์ภายในเซลล์ ทำให้พืชยังคงสามารถดูดน้ำมาใช้ในการดำรงชีวิตได้ (Taiz & Zeiger, 1998) โดยพืชแต่ละชนิดจะมีการปรับตัวแตกต่างกันไป ทำให้ความสามารถในการทนต่อภาวะเครียดนั้นแตกต่างกัน เมื่อพืชอยู่ภายใต้ความเค็ม โดยการสร้างสารเหล่านี้จะไม่รบกวนปฏิกิริยาทางชีวเคมีภายในเซลล์ ช่วยรักษาสภาพโปรตีนและโครงสร้างของเซลล์ เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก และไม่เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์พืชเอง นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของฮอร์โมน abscisic acid (ABA) และไซโทไคนิน (cytokinins) ก็เป็นอีกกลไกหนึ่งที่พืชใช้เพื่อทนต่อภาวะเค็ม โดยเฉพาะฮอร์โมน ABA จะลดความรุนแรงของเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีต่อการเจริญเติบโต และการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช (Popova, Stoinova, & Maslenkova, 1995) รวมถึงไปกระตุ้นการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการทนเค็ม โดยฮอร์โมน ABA จะเป็นตัวส่งสัญญาณ (signal transduction) (Davies,

Kudoyarova, & Hartung, 2005; Parida & Das, 2005) รวมทั้งอาจมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การสร้างสารเคลือบใบทำให้ใบที่เกิดใหม่มีความหนามากขึ้น การลดพื้นที่ใบ และการลดความหนาแน่นของปากใบเพื่อลดการสูญเสียน้ำ (Kosma et al., 2009; Romeroaranda et al., 2001)

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวข้องกับผลของภาวะเครียดจากความเค็มต่อการเติบโต สรีรวิทยา และชีวเคมีของข้าว ได้แก่

Cha-um, Vejchasarn, and Kirdmanee (2007) ศึกษาภาวะเครียดจากความเค็มในข้าวหอม 3 พันธุ์ ได้แก่ ปทุมธานี 1 ขาวดอกมะลิ และหอมจัน เมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0, 85, 171, 256, 342, และ 427 มิลลิโมลลาร์ เป็นเวลา 5 วัน พบการสะสมโซเดียมไอออนเพิ่มสูงขึ้น โดยมีสัมพันธ์กับค่าแรงดันออสโมติกที่เพิ่มขึ้นและปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ลดลง อย่างไรก็ตามข้าวพันธุ์หอมจันแสดงลักษณะที่ทนเค็ม โดยที่สามารถรักษาค่าแรงดันออสโมติกภายในใบและรวบรวมทั้งปริมาณคลอโรฟิลล์ เมื่อได้รับความเข้มข้นของเกลือโซเดียมเพิ่มสูงขึ้น

Pongprayoon et al. (2008) ศึกษาปริมาณ โพรตีนและเปอร์เซ็นต์ความเขียวในใบข้าวหอมสายพันธุ์ไทยจำนวน 11 พันธุ์ เมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0, 171, 342, 512 และ 684 มิลลิโมลลาร์ เป็นเวลา 4 วัน พบว่าเมื่อข้าวได้รับความเค็มส่งผลให้มีการสะสมโพรตีนเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของเกลือที่สูงขึ้น จัดแบ่งข้าวหอมพันธุ์ไทยได้เป็น 3 กลุ่มตามระดับการสะสมของปริมาณโพรตีน ได้แก่ กลุ่มที่มีปริมาณโพรตีนสูง ปานกลางและต่ำ และพบความสัมพันธ์ระหว่างใบที่มีสีเขียวและปริมาณโพรตีนที่สะสม โดยในกลุ่มที่มีการสะสมโพรตีนในระดับสูง และปานกลางมีเปอร์เซ็นต์พื้นที่ใบเขียวสูงกว่าข้าวกลุ่มที่มีการสะสมโพรตีนต่ำ ซึ่งให้เห็นว่าการสะสมโพรตีนในข้าวหอมพันธุ์ไทยขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นและระยะเวลาที่ข้าวได้รับความเค็ม

Cha-um and Kirdmanee (2009) ศึกษาการเติบโต และปริมาณน้ำในใบ ภายใต้ภาวะเครียดจากความเค็มในข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ข้าวพันธุ์เหลืองอนันต์ และข้าวพันธุ์ Pokkali พบว่าความเค็มส่งผลต่อความสูงต้น และปริมาณน้ำในใบลดลง แต่มีความยาวรากเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะในข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และเหลืองอนันต์

Haq, Akhtar, Nawaz, and Ahmad (2009) ศึกษาข้าวจำนวน 7 พันธุ์ ได้แก่ Moroberekan, Co39, Azucena, Bala, IR64, Kalinga-III และ Nipponbare เมื่อข้าวได้รับความเค็มเป็นเวลา 21 และ 42 วัน พบว่า มีการลดลงของน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งน้อยที่สุดในข้าวพันธุ์ Co39 แสดงถึงความสามารถในการทนต่อภาวะเครียดจากความเค็มมากที่สุด มีผลตรงกันข้ามกับข้าวพันธุ์

Azucena ที่พบการลดลงของน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งมากที่สุด นอกจากนี้มีการนำค่า salinity damage score มาใช้เพื่อช่วยในการคัดเลือกข้าวพันธุ์ทนเค็ม

Amirjani (2010) ศึกษาในข้าวพันธุ์ Tarom Azmoon เมื่อได้รับเกลือ โซเดียมคลอไรด์ ตั้งแต่ 0 – 200 มิลลิโมลลาร์ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าภาวะเค็มส่งผลทำให้ข้าวพันธุ์นี้มีน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งส่วนต้นลดลง เนื่องมาจากการปิดของปากใบ ทำให้พืชได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ ลดลง และภาวะเค็มยังส่งผลต่อปริมาณน้ำในใบ ค่าแรงดันออสโมติก ปริมาตรคงตัวที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง ปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ละลายในน้ำ และปริมาณโปรตีนอีกด้วย

Summart, Thanonkeo, Panichajakul, Prathepha, and McManus (2010) ศึกษาผลของภาวะเครียดจากความเค็มในแคลลัสของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีการเติมเกลือ โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 250 มิลลิโมลลาร์ร่วมกับอาหารเพาะเลี้ยง พบว่าทั้งน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และปริมาณน้ำในเซลล์ของแคลลัสลดลง ภายหลังจากที่ได้รับเกลือเป็นเวลา 6 วัน แต่พบปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 2-3 เท่า

Lee et al. (2011) ศึกษาภาวะเครียดจากความเค็มในข้าวพันธุ์ Dalseongaengmi-44 และ Dongjin พบว่าความยาวลำต้นและปริมาณน้ำส่วนต้นของข้าวพันธุ์ Dalseongaengmi-44 ลดลงมากกว่าข้าวพันธุ์ Dongjin

Yamamoto, Sawada, Shim, Usui, and Fujihara (2011) ศึกษาในข้าวพันธุ์ NERICA ซึ่งเป็นข้าวพันธุ์ใหม่ที่ทนเค็มในทวีปแอฟริกา เกิดจากการผสมระหว่าง *Oryza sativa* L. และ *Oryza glaberrima* Steud. และข้าวพันธุ์ Nipponbare (*Oryza sativa* L. cv. Nipponbare) ที่ไม่ทนต่อความเค็ม เมื่อได้รับเกลือ โซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลลาร์ เป็นเวลา 3 วัน พบว่าข้าวพันธุ์ NERICA มีน้ำหนักสดมากกว่าข้าวพันธุ์ Nipponbare แต่พบปริมาณโปรตีนและกรดอะมิโนน้อยกว่าข้าวพันธุ์ Nipponbare

Movafegh, Jadid, and Kiabi (2012) ศึกษาผลของภาวะความเครียดจากความเค็มในข้าวบาร์เลย์ (*Hordeum vulgare* L.) จำนวน 3 พันธุ์ ได้แก่ Jonoob Reyhan และ Nosrat เมื่อได้รับ โซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0, 50, 150 และ 250 มิลลิโมลลาร์ เป็นเวลา 7 วัน พบว่าข้าวมีการเติบโตลดลงตามระดับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ ความสูงต้น ความยาวราก น้ำหนักแห้งส่วนต้นและราก รวมทั้งปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง แต่พบปริมาณโปรตีนและน้ำตาลทั้งในส่วนต้นและรากเพิ่มมากขึ้นตามระดับความเข้มข้นเกลือ โซเดียมคลอไรด์ โดยที่ข้าวบาร์เลย์พันธุ์ Nosrat มีปริมาณโปรตีนและน้ำตาลสูงที่สุด แต่การเติบโตและปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลงมากที่สุด ซึ่งให้เห็นว่าการตอบสนองต่อภาวะเครียดจากความเค็มของข้าวบาร์เลย์ผ่านกลไกการสร้างหรือสะสมโปรตีน

Lee et al. (2013) ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ การเติบโต อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง และปริมาณรงควัตถุในข้าวพันธุ์ Pokkali และ IR29 เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น 100 มิลลิโมลลาร์ เป็นเวลา 7 วัน พบว่ามีน้ำหนักราก น้ำหนักแห้ง ส่วนต้น และรากลดลง โดยที่ข้าวพันธุ์ IR29 แสดงอาการผิดปกติ ใบเหี่ยวและซีดเหลือง ภายใน 48 ชั่วโมง และต้นบางส่วนตาย นอกจากนี้ พบว่ามีการลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์และโปรตีนทั้งในใบและราก แต่มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคโรทีนอยด์ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวพันธุ์ Pokkali ไม่พบอาการผิดปกติอย่างเด่นชัดตลอดการทดลอง และไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ และแคโรทีนอยด์ อีกทั้งปริมาณโปรตีนในใบและรากมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

Artadana and Supaibulwatana (2014) ศึกษาภาวะเครียดจากความเค็มที่มีผลต่อสรีรวิทยา และผลผลิตในข้าวพันธุ์ KDML 105 และสายพันธุ์กลายจำนวน 3 พันธุ์ ได้แก่ MT4, MT5 และ MT6 ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ 150 มิลลิโมลลาร์ เป็นเวลา 15 วัน พบว่าข้าวพันธุ์ MT5 และ MT6 มีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (net photosynthetic rate : NPR) ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี แคโรทีนอยด์ และน้ำหนักรากต่อต้นลดลงน้อยกว่าข้าวพันธุ์ KDML 105 แต่ภาวะเค็มไม่ส่งผลกระทบต่อจำนวนดอกต่อต้น

Ghaffaria, Gharechahib, Nakhodaa, and Salekdehc (2014) เปรียบเทียบการตอบสนองต่อความเค็มของข้าวพันธุ์ IR64 ที่เป็นพันธุ์กลายทนเค็ม (tolerant mutant line; S-730-1) และสายพันธุ์กลายไม่ทนเค็ม (sensitive mutant line; 167-1-3) พบค่า standard evaluated score (SES) ของข้าวที่ได้รับความเค็มมีค่าสูงขึ้น แต่ความยาวราก ความสูงต้น น้ำหนักราก น้ำหนักแห้ง ส่วนต้น และรากลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับความเค็ม

Sangeeta and Vrunda (2014) ศึกษาการตอบสนองต่อภาวะเครียดจากความเค็มของข้าวจำนวน 3 พันธุ์ ได้แก่ ข้าวลูกผสมพันธุ์ทนเค็ม (Jaya) ไม่ทนเค็ม (Jyoti) และข้าวพื้นเมืองพันธุ์ทนเค็ม (Korgut) เมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้น 50, 100 และ 150 มิลลิโมลลาร์ พบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณรงควัตถุ โปรตีน และโพรลีน ของข้าวที่ได้รับภาวะเครียดจากความเค็ม โดยที่ข้าวพันธุ์ Jyoti มีการปรับตัวและมีปริมาณโพรลีนเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าข้าวพันธุ์ Jaya หลังจากได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 150 มิลลิโมลลาร์ อย่างไรก็ตามข้าวพื้นเมืองพันธุ์ทนเค็ม มีความทนต่อภาวะเครียดจากความเค็มมากกว่าข้าวลูกผสมทั้งสองพันธุ์

Chunthaburee et al. (2015) ศึกษาการเติบโต สรีรวิทยา และชีวเคมีในภาวะเครียดจากความเค็มของข้าว 12 พันธุ์ ที่ได้รับความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์ 100 มิลลิโมลลาร์ เป็นเวลา 14 วัน พบว่าข้าวที่ทดสอบทุกสายพันธุ์มีการเติบโตและปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง แต่มีปริมาณโพรลีน แอนโทไซยานิน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ในระบบ

แอนติออกซิแดนซ์เพิ่มขึ้น รวมทั้งสามารถแบ่งข้าวออกเป็น 4 กลุ่ม โดยกลุ่มข้าวที่ทนเค็มได้ดี ได้แก่ ข้าวพันธุ์ Pokkali และข้าวพันธุ์ Niewdam Gs.No.00621 ส่วนข้าวที่ทนเค็มได้น้อย ได้แก่ ข้าวพันธุ์ IR29 และ ข้าวพันธุ์ KDML105 ซึ่งข้าวพันธุ์ที่ทนเค็มพบว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ คลอโรฟิลล์และโพรตีนเพียงเล็กน้อย

Yu, Zhang, and Ma (2015) ศึกษาข้าวสาทิพันธุ์ดั้งเดิม และข้าวสาทิที่ได้รับการถ่ายทอด ยีน *SbPIP1* ซึ่งเป็นยีนที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านน้ำ (aquaporin) ที่อยู่บนพลาสมาเมมเบรนจากต้น ยูคาลิปตัส โดยที่พืชได้รับเกลือที่มีความเข้มข้น 250 มิลลิโมลลาร์ เป็นเวลา 3 วัน พบว่าข้าวสาทิที่ได้รับยีน *SbPIP1* มีการเติบโตลดลง แต่มีการสะสมโพรตีนเพิ่มมากขึ้น และไม่พบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโปรตีน แสดงว่ายีน *SbPIP1* นี้สามารถกระตุ้นให้มีการสร้างโพรตีนเพิ่มมากขึ้น ทำให้พืชทนต่อภาวะเครียดจากความเค็มได้ดีขึ้น แต่ไม่มีผลต่อการสังเคราะห์โปรตีน

Nounjan, Siangliw, Toojinda, Chadchawan and Theerakulpisut (2016) ศึกษาข้าวที่ได้รับการแทนที่บางส่วนบนโครโมโซมที่ 8 ได้แก่ข้าวพันธุ์ CSSL8-94 และข้าวพันธุ์ CSSL8-116 ซึ่งมีพื้นฐานทางพันธุกรรมคล้ายกับข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (KDML 105) เมื่อได้รับเกลือ โซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 150 มิลลิโมลลาร์ เป็นเวลา 7 วัน พบว่าข้าวทั้งสองพันธุ์มีปริมาณ คลอโรฟิลล์ลดลง ขณะที่ปริมาณโพรตีนเพิ่มขึ้น โดยที่ข้าวพันธุ์ CSSL8-116 มีน้ำหนักแห้งลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวพันธุ์ CSSL8-94 นอกจากนี้ พบว่ามีการสะสมของ ปริมาณโพรตีนในข้าวพันธุ์ CSSL8-116 มากกว่า CSSL8-94

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 พืชที่ใช้ทดลอง

ข้าว (*Oryza sativa* L.) จำนวน 4 พันธุ์ ได้รับการอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยข้าว จังหวัดสุพรรณบุรี ได้แก่

ข้าวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa* L. cv. Khao Dawk Mali 105)

กข31 (*Oryza sativa* L. cv. RD31)

กข41 (*Oryza sativa* L. cv. RD41)

และ สุพรรณบุรี 1 (*Oryza sativa* L. cv. Suphan Buri 1)

3.2 อุปกรณ์และสารเคมี

3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเพาะปลูกต้นข้าว

- กระบะพลาสติก
- จานเพาะเมล็ด
- ทราย
- ปุ๋ย
- สารละลายธาตุอาหารสูตรดัดแปลง WP No. 2 (Vajrabhaya and Vajrabhaya, 1991)
- กระบอกตวง 1000 มิลลิลิตร
- ถังน้ำพลาสติกขนาด 6 ลิตร
- ขวดแก้วปากกว้าง ขนาด 300 มิลลิลิตร

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาภาวะเครียดจากความเค็ม

- โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการเติบโตของต้นข้าว

- อลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminum foil)
- เครื่องชั่งสารทศนิยม 4 ตำแหน่งของหน่วยกรัม (RC2105, sartorius)
- ไม้บรรทัด
- ตู้อบความร้อน (Hot air oven)
- ชองกระดาษหนังสือพิมพ์

- ปากกาเคมี (Permanent pen)

3.2.4 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบข้าว

- เครื่องชั่งสารทศนิยม 2 ตำแหน่งของหน่วยกรัม (ED3202S, Sartorius)
- หลอดทดลองพร้อมตระแกรงวางหลอดทดลอง
- เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer; LibraS11 Biochrom, England)
- อลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminum Foil)
- คิวเวตแก้ว (Glass Cuvette)
- ไมโครปิเปต (Micropipette) ขนาด 100 และ 1000 ไมโครลิตร (Gilson, German)
- แผ่นพาราฟิล์ม
- อะซิโตน ความเข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์
- ตู้เย็นอุณหภูมิตั้งที่ 4 องศาเซลเซียส

3.2.5 อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการวัดปริมาณโปรตีน

- ตู้แช่ -20 องศาเซลเซียส
- โกร่ง
- ซ้อนตักสาร
- หลอดทดลองขนาด 1.5 มิลลิลิตร
- หลอดทดลองขนาด 10 มิลลิลิตร
- ไมโครปิเปต (Micropipette) ขนาด 100 และ 1000 ไมโครลิตร (Gilson, German)
- เครื่องปั่นเหวี่ยง
- เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer; LibraS11 Biochrom, England)
- ไนโตรเจนเหลว
- กรดซัลโฟซาลิซิลิก (Sulfosalicylic acid) ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์
- นินไฮดริน (Ninhydrin)
- กรดอะซิติก (Glacial acetic acid)
- กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)
- โทลูอีน (Toluene)
- โปรตีน (Proline)

3.2.6 อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการวัดปริมาณโปรตีน

- ตู้แช่ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส
- โกร่ง

- ซ้อนดักสาร
- หลอดทดลองขนาด 1.5 มิลลิลิตร
- หลอดทดลองขนาด 10 มิลลิลิตร
- ไมโคร โดปิเปต (Micropipette) ขนาด 100 และ 1000 ไมโครลิตร (Gilson, German)
- เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)
- เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)
- ไนโตรเจนเหลว
- สารละลาย Sodium dodecyl sulphate (SDS) ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ และ 0.5 เปอร์เซ็นต์
- สารละลายรีเอเจนต์ A (Reagent A solution; 5 mL 0.2% CuSO_4 + 0.4% tartaric acid, 5mL 20% Na_2CO_3 , 20 mL 0.8N NaOH และ 20 mL 5% SDS)
- สารละลายรีเอเจนต์ B (Reagent B solution; 10 mL Folin–Ciocalteu reagent และ 50 mL H_2O)
- สารละลายโปรตีนมาตรฐาน (Bovine serum albumin : BSA)

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

ดำเนินการศึกษาตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้

3.3.1 การศึกษาระดับความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์และระยะเวลาที่ต้นข้าวสามารถเติบโตได้ภายใต้ภาวะเครียดจากความเค็ม

3.3.1.1 วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) จำนวน 4 ซ้ำ ซ้ำละ 4 ต้น เพื่อศึกษาด้านการเติบโต การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา ของข้าวอายุ 1 เดือน เมื่อได้รับภาวะเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 หรือ 10 dS m^{-1} และเก็บผลการทดลองหลังจากได้รับภาวะเค็มเป็นเวลา 0, 7, 14 และ 21 วัน

3.3.1.2 เตรียมต้นกล้าข้าว โดยมีวิธีการดังนี้

- 1) เพาะเมล็ดข้าวทั้ง 4 พันธุ์ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- 2) นำเมล็ดไปหว่านบนทราย เพาะเลี้ยงเป็นเวลา 2 สัปดาห์
- 3) คัดเลือกต้นข้าวที่มีขนาดเท่ากัน เพื่อย้ายปลูกลงในขวดแก้วที่มีสารละลายธาตุอาหารสูตรตัดแปลง WP No. 2 (WP No. 2) (Vajrabhaya & Vajrabhaya, 1991) เพาะเลี้ยงเป็นเวลา 2 สัปดาห์ ในโรงเรือนที่ได้รับความเข้มแสงโดยเฉลี่ยเท่ากับ 510 ไมโครโมลต่อตารางเมตร วินาที

ควบคุมระดับของสารละลายธาตุอาหาร โดยการเติมน้ำให้ระดับสารละลายเท่ากับตอนเริ่มต้นการทดลองทุกวัน และเปลี่ยนสารละลายธาตุอาหารทุกสัปดาห์

4) ย้ายต้นกล้าข้าวอายุ 30 วัน ลงขวดแก้วโดยมีชุดการทดลองวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายตามตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ชุดการทดลองและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (Electrical conductivity; EC)

ชุดการทดลอง	EC (dS m ⁻¹)
ชุดการทดลองที่ 1 ต้นข้าวที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหาร WP No. 2 ไม่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ เป็นชุดควบคุม	2
ชุดการทดลองที่ 2 ต้นข้าวที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหาร WP No. 2 ร่วมกับ เกลือโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 17 มิลลิโมลาร์	4
ชุดการทดลองที่ 3 ต้นข้าวที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหาร WP No. 2 ร่วมกับ เกลือโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 34 มิลลิโมลาร์	6
ชุดการทดลองที่ 4 ต้นข้าวที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหาร WP No. 2 ร่วมกับ เกลือโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 51 มิลลิโมลาร์	8
ชุดการทดลองที่ 5 ต้นข้าวที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหาร WP No. 2 ร่วมกับ เกลือโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 68 มิลลิโมลาร์	10

3.3.1.3 วัดข้อมูลต่าง ๆ เมื่อต้นข้าวได้รับความแล้ง เป็นเวลา 0, 7, 14 และ 21 วัน ในแต่ละชุดการทดลอง

3.3.2 การศึกษาภาวะเครียดจากระดับความเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์และระยะเวลาที่มีต่อการเติบโตของข้าว 4 พันธุ์

3.3.2.1 ให้ค่า standard evaluate score (SES) เมื่อข้าวได้รับความเสียหายจากความเค็มตามหลักการของ International Rice Research Institute (IRRI) (Glenn, Gregorio, & Rhulyx, 1997) โดยให้คะแนนตามความเสียหายของต้นข้าวเมื่อได้รับภาวะเค็ม มีคะแนน 1, 3, 5, 7 และ 9 เช่น ให้คะแนนเท่ากับ 1 เมื่อต้นข้าวปกติหรือไม่ได้รับความเสียหายจากความเค็ม ดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 แสดงค่า Standard evaluated score (SES) ของข้าวที่ได้รับภาวะเครียดจากความเค็มในระยะต้นกล้า (Glenn et al., 1997; Barua, De Ocampo, Egdane, Ismail, & Mondal, 2015)

คะแนน	ลักษณะที่ได้จากการสังเกต	ความทนต่อความเค็ม
1	Normal growth, no leaf symptoms.	Highly tolerant
3	Nearly normal growth, but leaf tips or few leaves whitish and rolled.	Tolerant
5	Growth severely retarded; most leaves rolled; only few are elongating.	Moderately tolerant
7	Complete cessation of growth; some plants dying.	Susceptible
9	Almost all plants dead or dying.	Highly susceptible

3.3.2.2 วัดการเติบโต โดยค่าข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ จำนวนกอดต่อต้น ความยาว ความกว้างใบ (ใบแก่ที่อายุน้อยที่สุดและเจริญเต็มที่) ความสูงต้น จำนวนใบทั้งหมดต่อต้น น้ำหนักสดต้นและราก และน้ำหนักแห้งต้นและราก

3.3.3 การศึกษาภาวะเครียดจากระดับความเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์และระยะเวลาที่มีต่อค่าทางสรีรวิทยาของข้าว 4 พันธุ์

3.3.3.1 หาปริมาณของคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และแคโรทีนอยด์ (photosynthetic pigments) ด้วยวิธีของ Lichtenthaler (1987) และ Shabala, Shabala, Martynenko, Babourina, and Newman (1998) โดยมีขั้นตอน ดังนี้

- 1) ชั่งใบข้าวน้ำหนักประมาณ 0.10 – 0.20 กรัม แล้วตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ นำมาใส่ในหลอดทดลอง
- 2) เติมอะซิโตน จำนวน 5 มิลลิลิตร หุ้มด้วยกระดาษฟอยด์ เก็บไว้ในตู้เย็น 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3) กรองสารละลายที่สกัดได้ด้วยกระดาษกรอง วัดปริมาณ คลอโรฟิลล์ เอ และบี ที่ความยาวคลื่น 662 และ 644 นาโนเมตร และปริมาณแคโรทีนอยด์ที่ความยาวคลื่น 470 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) โดยใช้อะซิโตนความเข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์ เป็นตัวเปรียบเทียบ (blank)

4) หาปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และแคโรทีนอยด์ ดังสมการ

$$[\text{คลอโรฟิลล์ เอ}] = 9.784 D_{662} - 0.99 D_{644}$$

$$[\text{คลอโรฟิลล์ บี}] = 21.42 D_{644} - 4.65 D_{662}$$

$$[\text{แคโรทีนอยด์}] = (1000 D_{470} - 1.90[\text{คลอโรฟิลล์ เอ}] - 63.14[\text{คลอโรฟิลล์ บี}])/214$$

เมื่อ D_i คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น i

3.3.3.2 หาปริมาณโพรลีน (proline content) วิธีของ Bates, Waldren, and Teare (1973) โดยมีขั้นตอน ดังนี้

- 1) ชั่งใบข้าว น้ำหนัก 0.5 กรัม บดให้ละเอียดด้วยไนโตรเจนเหลว
- 2) ผสมกับสารละลายซัลโฟซาลิซิลิก ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร
- 3) นำไปปั่นที่ความเร็วรอบ 13,000 rpm 15 นาที นำส่วนใสที่ได้ ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมระหว่างนินไฮดริน (ninhydrin) และสารละลายผสมระหว่างกรดอะซิติกเข้มข้นกับกรดฟอสฟอริก (ninhydrin 1.25 มิลลิกรัมใน glacial acetic acid 30 มิลลิลิตร และ H_3PO_4 ความเข้มข้น 6 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร) ในปริมาตรที่เท่ากัน
- 4) นำไปต้มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและหยุดปฏิกิริยาในน้ำแข็ง เติมน้ำ toluene ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง จนเกิดการแยกชั้น นำสารในชั้น toluene มาวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่ 520 นาโนเมตรด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) โดยใช้ toluene เป็นตัวเปรียบเทียบ (blank)
- 5) เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน (standard curve) ของโพรลีนและคำนวณความเข้มข้นของโพรลีน ที่สกัดได้จากตัวอย่างใบข้าว

3.3.3.3 หาปริมาณโปรตีนรวม (total protein) วิธีของ Lowry, Rosebrough, Farr, and Randall (1951) โดยมีขั้นตอน ดังนี้

- 1) ชั่งใบข้าว 0.10 – 0.20 กรัม บดให้ละเอียดด้วยไนโตรเจนเหลว ในสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ไว้ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 2) นำไปปั่นที่ความเร็วรอบ 13,000 rpm 15 นาที นำส่วนใสมาตรวจหาปริมาณโปรตีนรวมที่สกัดได้ โดยทำปฏิกิริยากับสารละลายรีเอเจนต์ A (5 mL 0.2% CuSO₄ + 0.4% tartaric acid, 5 mL 20% Na₂CO₃, 20 mL 0.8N NaOH และ 20 mL 5% SDS) ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที และใส่สารละลายรีเอเจนต์ B (10 mL Folin–Ciocalteu reagent และ 50 ml H₂O) ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที
- 3) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน (standard curve) ของสารละลายโปรตีนมาตรฐาน (Bovine serum albumin : BSA) และคำนวณความเข้มข้นของโปรตีนรวม (total protein) ที่สกัดได้จากตัวอย่างใบข้าว

3.4 วิธีการประเมินผล / สังเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ Analysis of Variance (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้ โดยวิธี Tukey ด้วยโปรแกรมทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($p < 0.05$)

บทที่ 4

ผลการวิจัย

จากการดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมทางสถิติในข้าว 4 พันธุ์ ได้แก่ ขาวดอกมะลิ 105 กข31 กข41 และสุพรรณบุรี 1 ที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหาร WP No. 2 (2 dS m^{-1}) เป็นชุดควบคุมเปรียบเทียบกับชุดทดลองที่ปลูกภายใต้ภาวะเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 4, 6, 8 หรือ 10 dS m^{-1} เก็บข้อมูลการเติบโต และค่าทางสรีรวิทยาในวันที่ 0, 7, 14 และ 21 ได้ผลการทดลอง ดังนี้

4.1 ผลของภาวะเครียดจากระดับความเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์และระยะเวลาที่มีต่อการเติบโตของข้าว 4 พันธุ์

4.1.1 ค่า Standard evaluation score (SES)

เมื่อระยะเวลาและระดับความเข้มข้นจากเกลือ โซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ข้าวมีค่า SES เพิ่มมากขึ้น โดยที่ชุดควบคุม (WP No. 2)ของข้าวทั้ง 4 พันธุ์มีค่า SES เท่ากับวันที่เริ่มต้นการทดลอง ($SES = 1$) ในวันที่ 14 ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีค่า SES เฉลี่ยมากที่สุด คือ 4.5 เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} และในวันที่ 21 ต้นข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิได้รับความเสียหายมากและตาย เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น 6, 8 หรือ 10 dS m^{-1} ทำให้ไม่สามารถเก็บข้อมูลการเติบโตและค่าทางสรีรวิทยาในตลอดการทดลองได้ และในข้าวพันธุ์ กข31 กข41 และสุพรรณบุรี 1 มีค่า SES เฉลี่ยมากที่สุด 5.5, 4.0 และ 5.0 ตามลำดับ เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} ในวันที่ 21 (ภาพที่ 4-1)

4.1.2 จำนวนกอดต่อต้น

ไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติของจำนวนกอดต่อต้นในข้าวทั้ง 4 พันธุ์ ในภาวะปกติ และได้รับภาวะเครียดจากเกลือ ในวันที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน โดยข้าวทุกพันธุ์มีจำนวนกอดต่อต้นเท่ากับ 1 (ภาพที่ 4-2)

4.1.3 จำนวนใบต่อต้น

เมื่อระยะเวลาและความเข้มข้นจากเกลือ โซเดียมคลอไรด์เพิ่มสูงขึ้น พบว่าข้าวทั้ง 4 พันธุ์มีจำนวนใบต่อต้นลดลง โดยเฉพาะในวันที่ 21 ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น

10 dS m⁻¹ มีจำนวนใบต่อต้นลดลงเป็น 0.3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม แต่ไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติในข้าวพันธุ์ กข31 และ กข41 (ภาพที่ 4-3)

4.1.4 ความสูงต้น

ในวันที่ 14 พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของความสูงต้นในข้าวพันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105 และสุพรรณบุรี 1 เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m⁻¹ ทำให้ความสูงต้นลดลง 0.2 และ 0.3 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 4-4ก และ ภาพที่ 4-4ง) ขณะที่ข้าวพันธุ์ กข31 และ กข41 พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในวันที่ 21 เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m⁻¹ ข้าวทั้งสองพันธุ์มีความสูงต้นลดลง 0.3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 4-4ข และภาพที่ 4-4ค)

4.1.5 ความยาวใบ

ในวันที่ 14 พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของความยาวใบในข้าวพันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105 และสุพรรณบุรี 1 เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m⁻¹ ทำให้ความยาวใบลดลง 0.3 และ 0.2 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 4-5ก และภาพที่ 4-5ง) แต่ข้าวพันธุ์ กข31 มีความยาวใบลดลงในวันที่ 21 เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้นตั้งแต่ 8 dS m⁻¹ นอกจากนี้ในข้าวพันธุ์ กข 41 ไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติของความยาวใบตลอดระยะเวลาการทดลอง (ภาพที่ 4-5ค)

4.1.6 ความกว้างใบ

ในวันที่ 7 พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของความกว้างใบในข้าวพันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105 และ กข31 เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m⁻¹ ทำให้ความกว้างใบลดลง 0.3 และ 0.2 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 4-6ก และภาพที่ 4-6ข) แต่ข้าวพันธุ์ สุพรรณบุรี 1 พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของความกว้างใบในวันที่ 14 เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m⁻¹ (ภาพที่ 4-6ง) ขณะที่ไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติของความกว้างใบตลอดระยะเวลาการทดลองในข้าวพันธุ์ กข41 (ภาพที่ 4-6ค)

4.1.7 น้ำหนักสดต้น

ในวันที่ 14 พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของน้ำหนักสดต้นในข้าวพันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105 กข31 และสุพรรณบุรี 1 เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m⁻¹ มีน้ำหนักสดต้น

ลดลง 0.6, 0.4 และ 0.6 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 4-7ก, ภาพที่ 4-7ข และ ภาพที่ 4-7ง) ขณะที่ข้าวพันธุ์ กข41 ไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 4-7ค)

4.1.8 น้ำหนักแห้งต้น

ในวันที่ 14 เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีน้ำหนักแห้งต้นลดลงเป็น 0.6 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 4-8ก) ขณะที่ข้าวพันธุ์ กข31 และสุพรรณบุรี 1 พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในวันที่ 21 เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} พบน้ำหนักแห้งลดลง เป็น 0.5, 0.7 และ 0.7 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 4-8ข)

4.1.9 ความยาวราก

ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของความยาวรากในข้าวทั้ง 4 พันธุ์ ทั้งในชุดควบคุมและชุดทดลองที่ได้รับความเค็ม ตลอดระยะเวลาการทดลอง 21 วัน (ภาพที่ 4-9)

4.1.10 น้ำหนักสตราก

ในวันที่ 7 ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และ กข31 เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} มีน้ำหนักสตรากลดลงเป็น 0.5 และ 0.7 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม และในวันที่ 21 ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} มีน้ำหนักสตราก ลดลง 0.75 เท่า เมื่อเทียบกับชุดควบคุม แต่ข้าวพันธุ์ กข 41 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของน้ำหนักสตรากเมื่อเทียบกับชุดควบคุม

4.1.11 น้ำหนักแห้งราก

ในวันที่ 7 ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ได้รับเกลือทุกความเข้มข้นมีน้ำหนักแห้งรากลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ขณะที่ในวันที่ 21 เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 มีน้ำหนักแห้งราก 0.01405 กรัม ลดลง 0.8 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม แต่ข้าวพันธุ์ กข31 และ กข41 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของน้ำหนักแห้งรากเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 4-11)

4.2 ผลของภาวะเครียดจากระดับความเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์และระยะเวลาที่มีต่อทางสรีรวิทยาในข้าว 4 พันธุ์

4.2.1 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ

ข้าวทั้ง 4 พันธุ์ที่ได้รับความเค็มมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ลดลงในระยะเวลาที่แตกต่างกัน โดยพบว่า ในวันที่ 7 ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่ได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ 145 ไมโครกรัมต่อกรัม ลดลง 0.3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 4-12ก) และในวันที่ 14 ข้าวพันธุ์ กข31 ที่ได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ 142 ไมโครกรัมต่อกรัม ลดลงเป็น 0.3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 4-12ข) แต่ในวันที่ 21 ข้าวพันธุ์ กข41 และสุพรรณบุรี 1 ที่ได้รับเกลือความเข้มข้นเกลือ 10 dS m^{-1} มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ 132 และ 124 ไมโครกรัมต่อกรัม ลดลง 0.4 และ 0.5 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 4-12)

4.2.2 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี

ในวันที่ 7 พบว่า ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่ได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี 63 ไมโครกรัมต่อกรัม ลดลง 0.3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 4-13ก) และในวันที่ 21 ข้าวพันธุ์ กข41 และสุพรรณบุรี 1 ที่ได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี 62 และ 57 ไมโครกรัมต่อกรัม ลดลง 0.4 และ 0.5 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมตามลำดับ (ภาพที่ 4-13ค และภาพที่ 4-13ง) แต่ข้าวพันธุ์ กข31 ที่ได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ตลอดระยะเวลาการทดลอง (ภาพที่ 4-13ข)

4.2.3 ปริมาณแคโรทีนอยด์

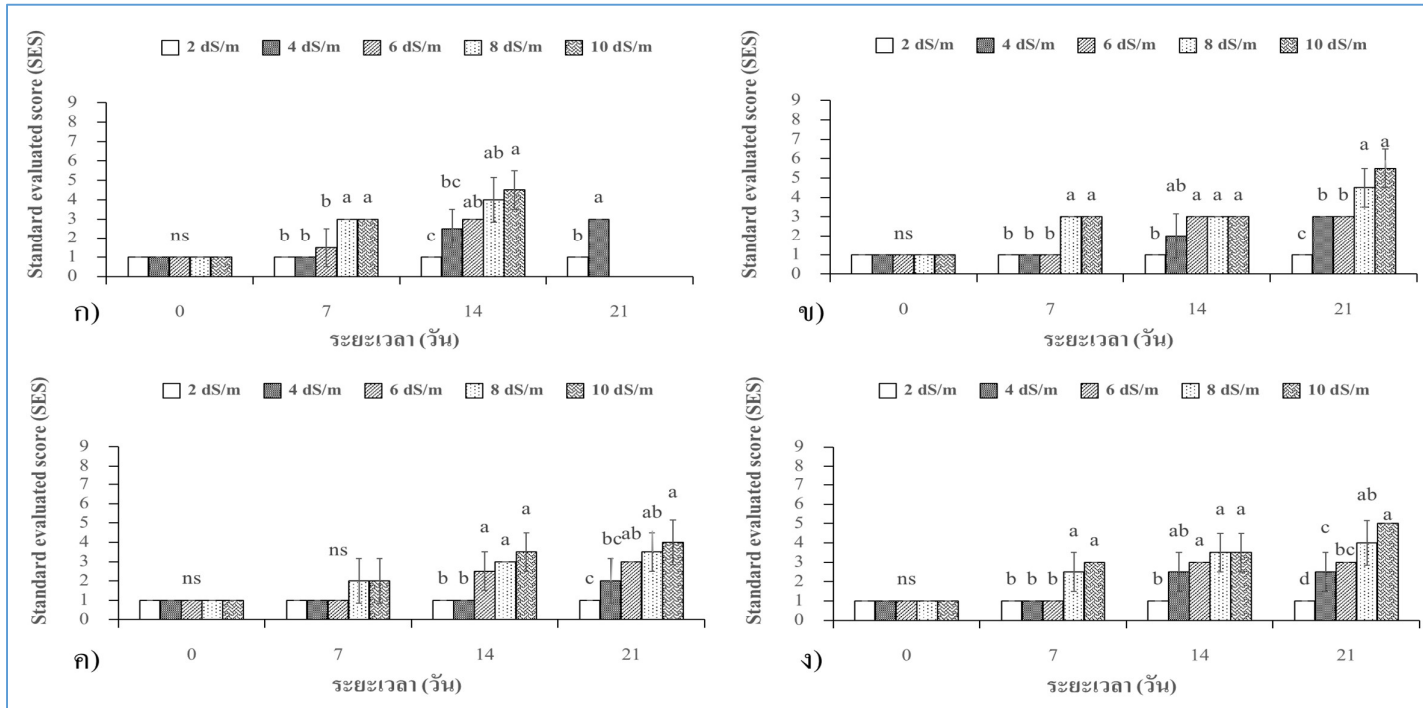
ในวันที่ 14 ข้าวพันธุ์ กข31 ที่ได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} มีปริมาณแคโรทีนอยด์ 39 ไมโครกรัมต่อกรัม ลดลง 0.3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 4-14ข) และในวันที่ 21 ข้าวพันธุ์ กข41 และสุพรรณบุรี 1 ที่ได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} มีปริมาณแคโรทีนอยด์ 41 และ 36 ไมโครกรัมต่อกรัม ลดลง 0.3 และ 0.4 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมตามลำดับ (ภาพที่ 4-14ค และภาพที่ 4-14ง) แต่ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของปริมาณแคโรทีนอยด์ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ตลอดระยะเวลาการทดลอง (ภาพที่ 4-14ก)

4.2.4 ปริมาณโพรลิน

ข้าวทั้ง 4 พันธุ์ ที่ได้รับความเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ มีปริมาณโพรลินเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน พบว่า ในวันที่ 7 ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ที่ได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} มีปริมาณโพรลิน 457 ไมโครกรัมต่อกรัม เพิ่มขึ้น 1 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 4-15 ง) ในวันที่ 14 ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} มีปริมาณโพรลิน 712 ไมโครกรัมต่อกรัม เพิ่มขึ้น 1 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 4-15 ก) และในวันที่ 21 ข้าวพันธุ์ กข31 และ กข41 ที่ได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} มีปริมาณโพรลิน 605 และ 424 ไมโครกรัมต่อกรัม เพิ่มขึ้น 4 และ 3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมตามลำดับ (ภาพที่ 4-15 ข และภาพที่ 4-15 ค)

4.2.5 ปริมาณโปรตีน

ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 กข31 และสุพรรณบุรี 1 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของปริมาณ โปรตีน เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ตลอดระยะเวลาการทดลอง แต่ข้าวพันธุ์กข41 ที่ได้รับเกลือความเข้มข้น 10 dS m^{-1} เป็นระยะเวลา 14 วัน มีปริมาณโปรตีน 2 มิลลิกรัมต่อกรัม ลดลง 0.3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 4-16)

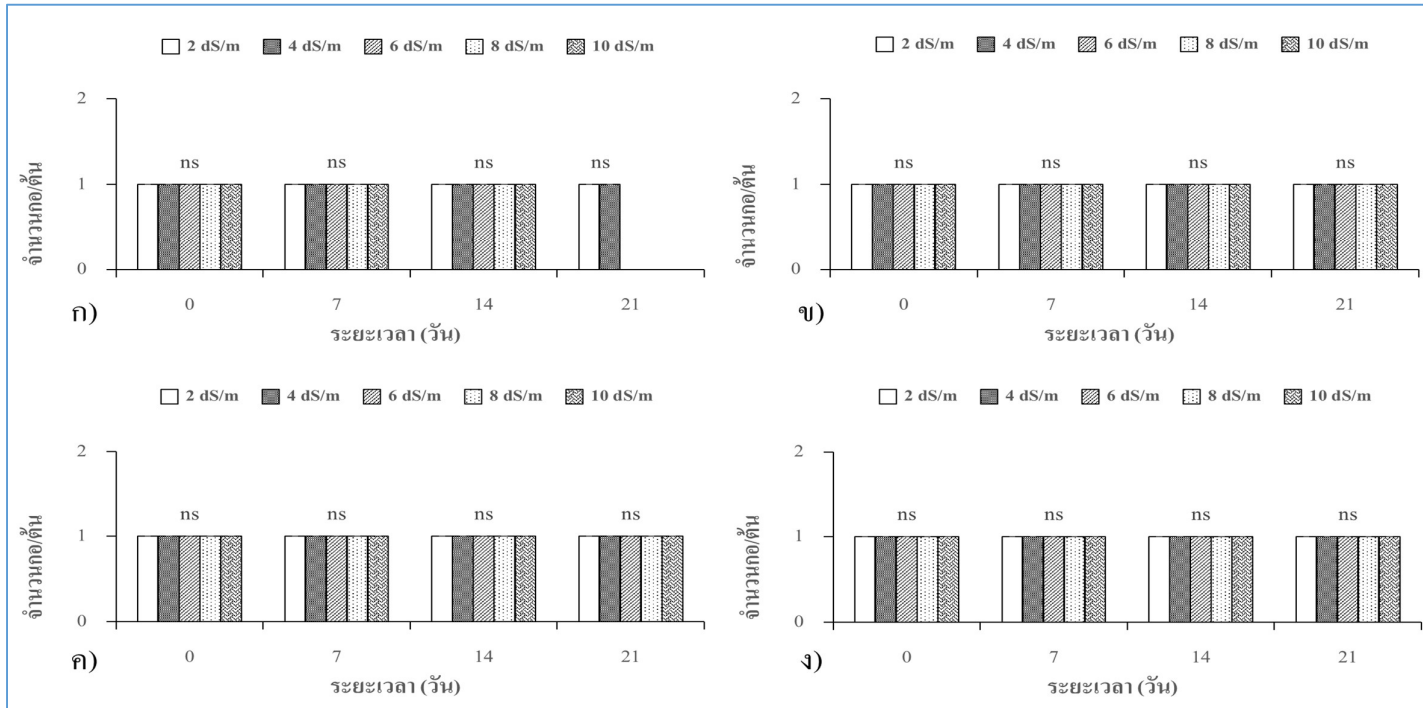


ภาพที่ 4-1 ค่า standard evaluate score (SES) ของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation)

หมายเหตุ วันที่ 21 ในภาพ ก ต้นข้าวตายเมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ 6, 8 และ 10 dS m⁻¹

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Tukey (p < 0.05)

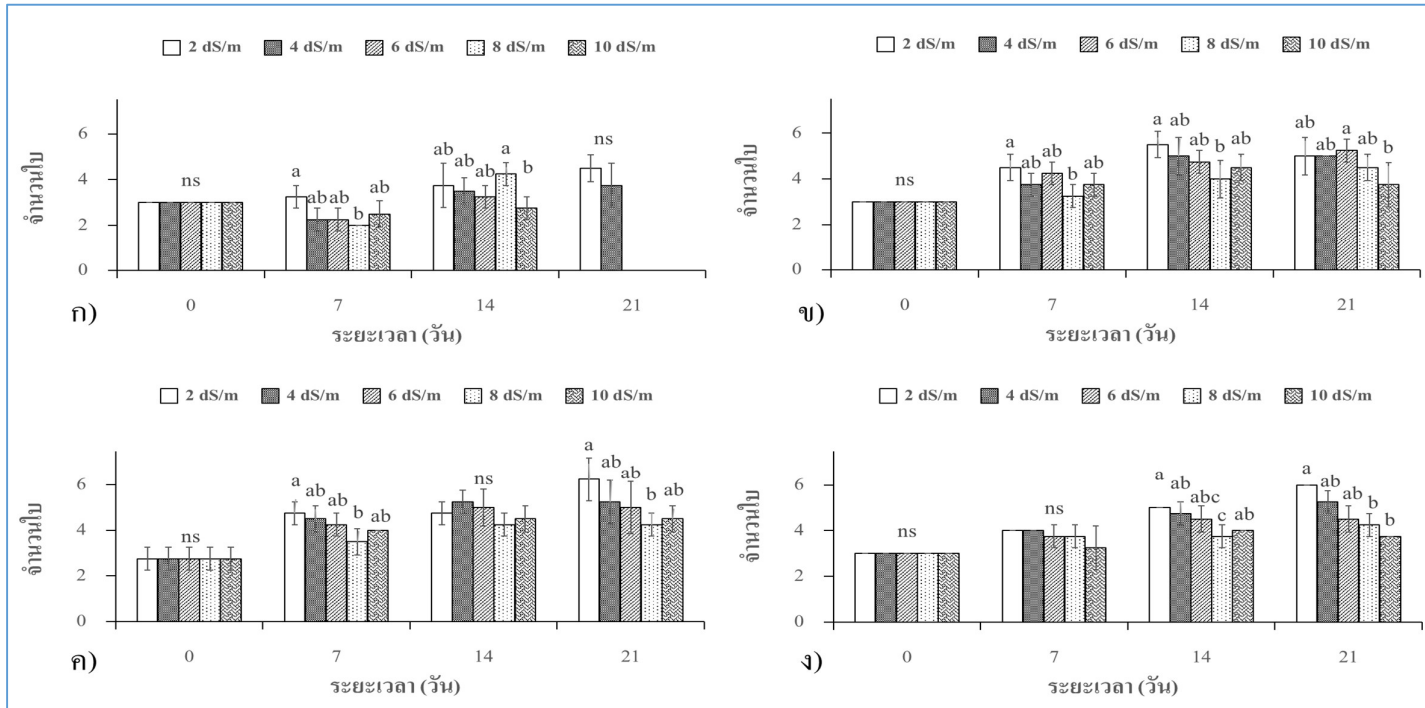


ภาพที่ 4-2 จำนวนกอตต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation)

หมายเหตุ วันที่ 21 ในภาพ ก ต้นข้าวตายเมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ 6, 8 และ 10 dS m⁻¹

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Tukey (p < 0.05)

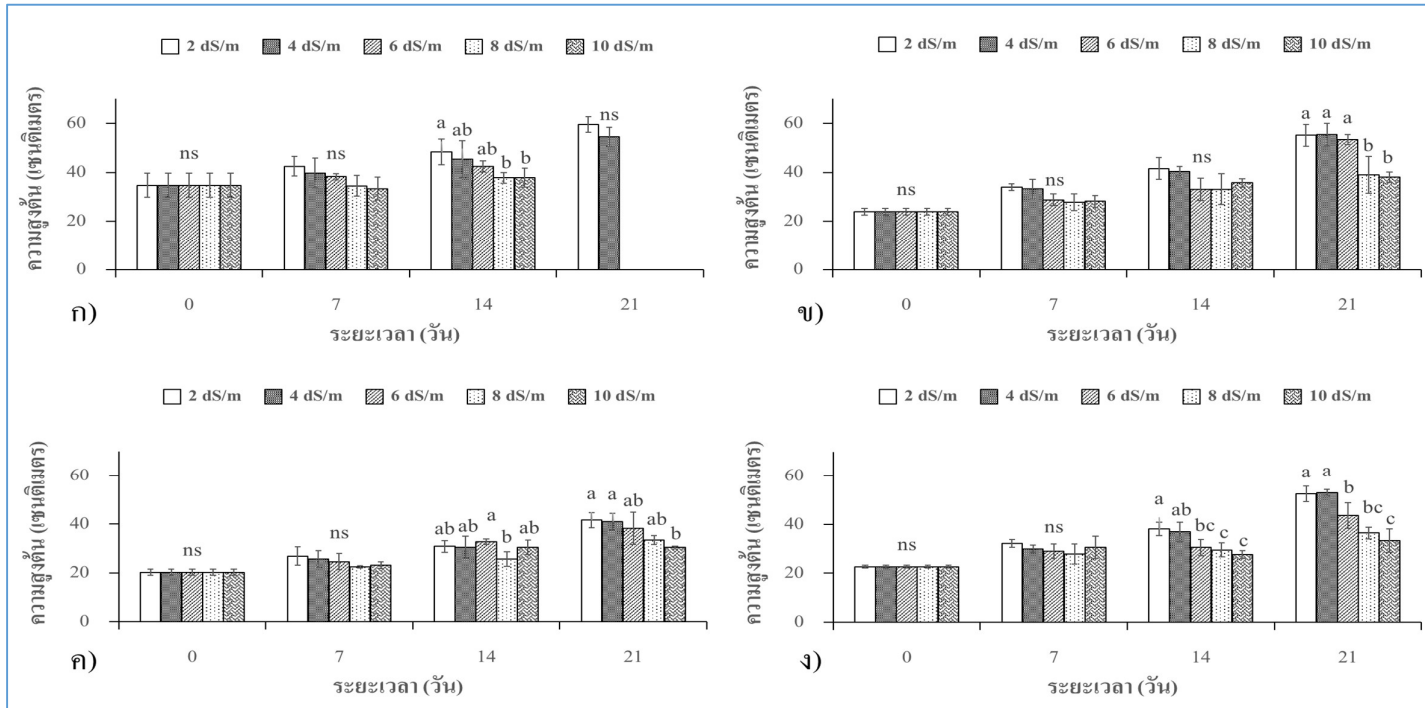


ภาพที่ 4-3 จำนวนใบต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation)

หมายเหตุ วันที่ 21 ในภาพ ก ต้นข้าวตายเมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ 6, 8 และ 10 dS m⁻¹

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Tukey (p < 0.05)

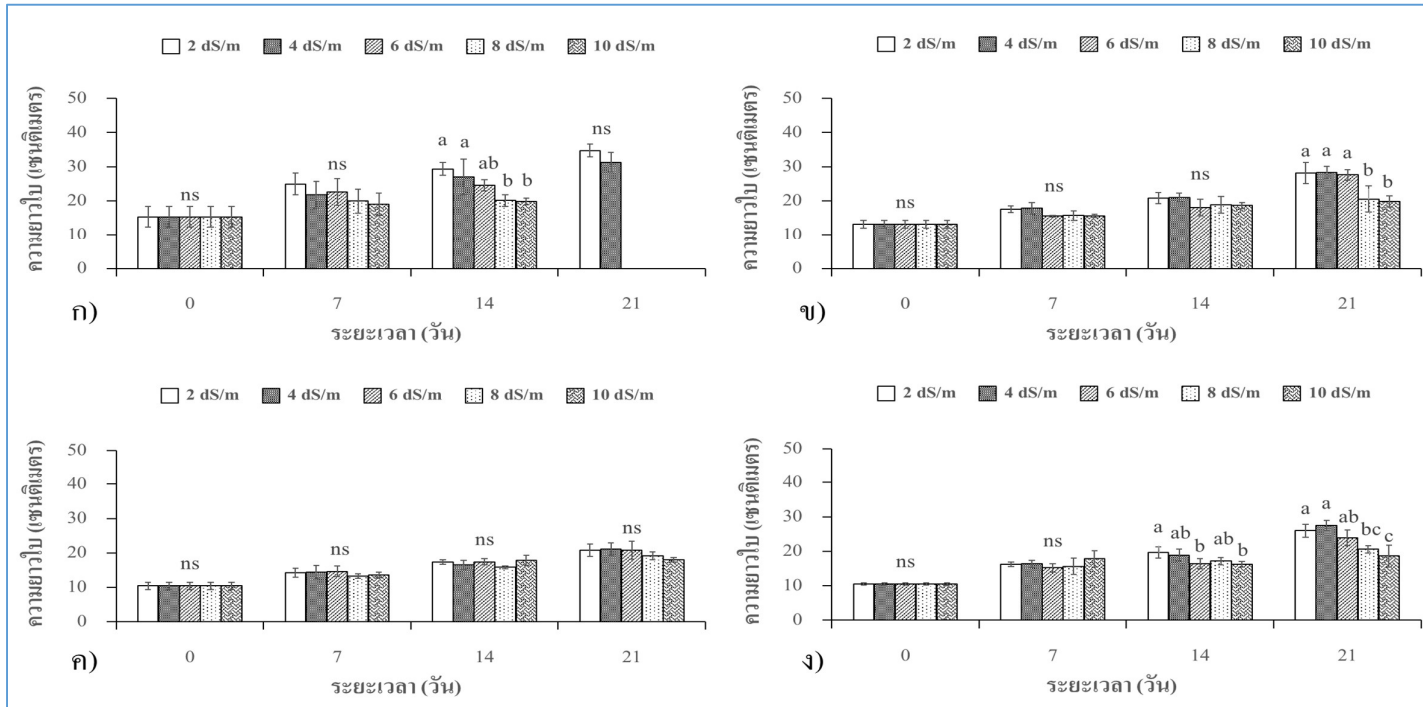


ภาพที่ 4-4 ความสูงต้นของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation)

หมายเหตุ วันที่ 21 ในภาพ ก ต้นข้าวตายเมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ 6, 8 และ 10 dS m⁻¹

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Tukey (p < 0.05)

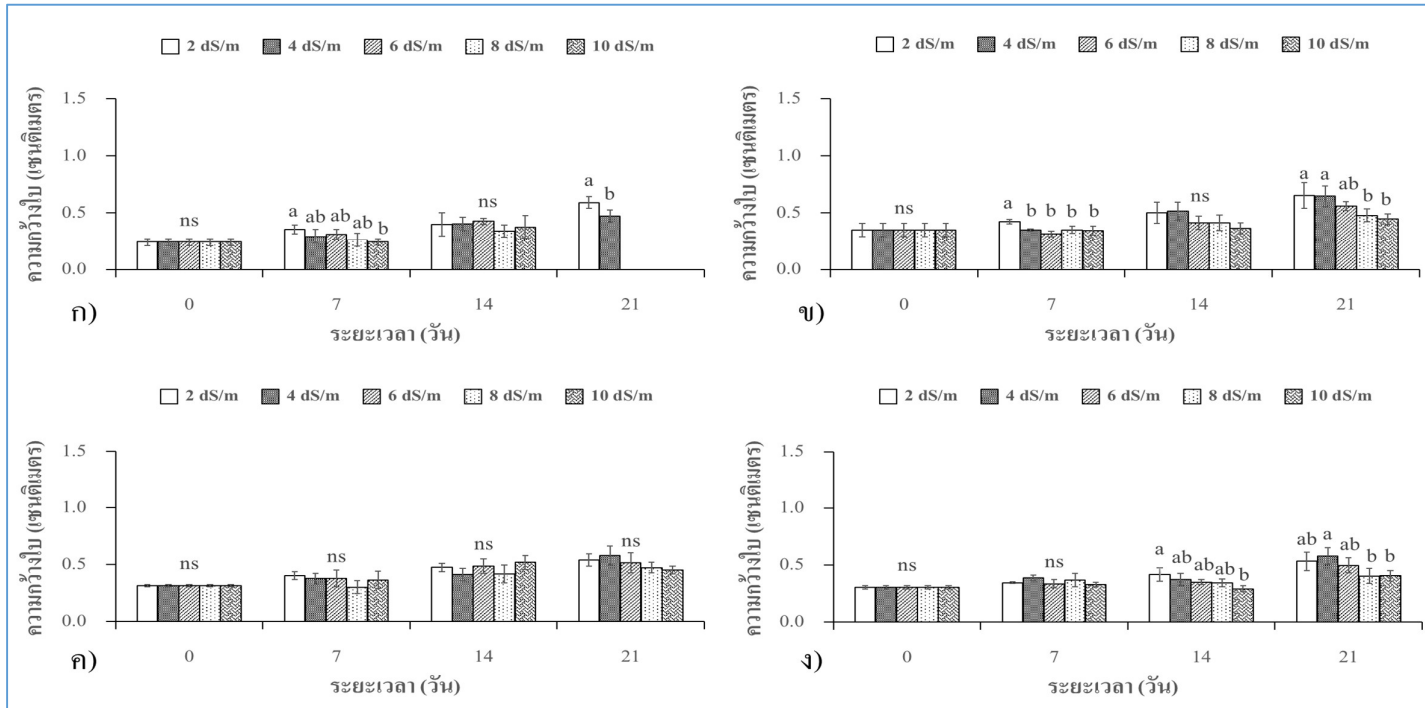


ภาพที่ 4-5 ความยาวใบของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation)

หมายเหตุ วันที่ 21 ในภาพ ก ต้นข้าวตายเมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ 6, 8 และ 10 dS m⁻¹

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Tukey (p < 0.05)

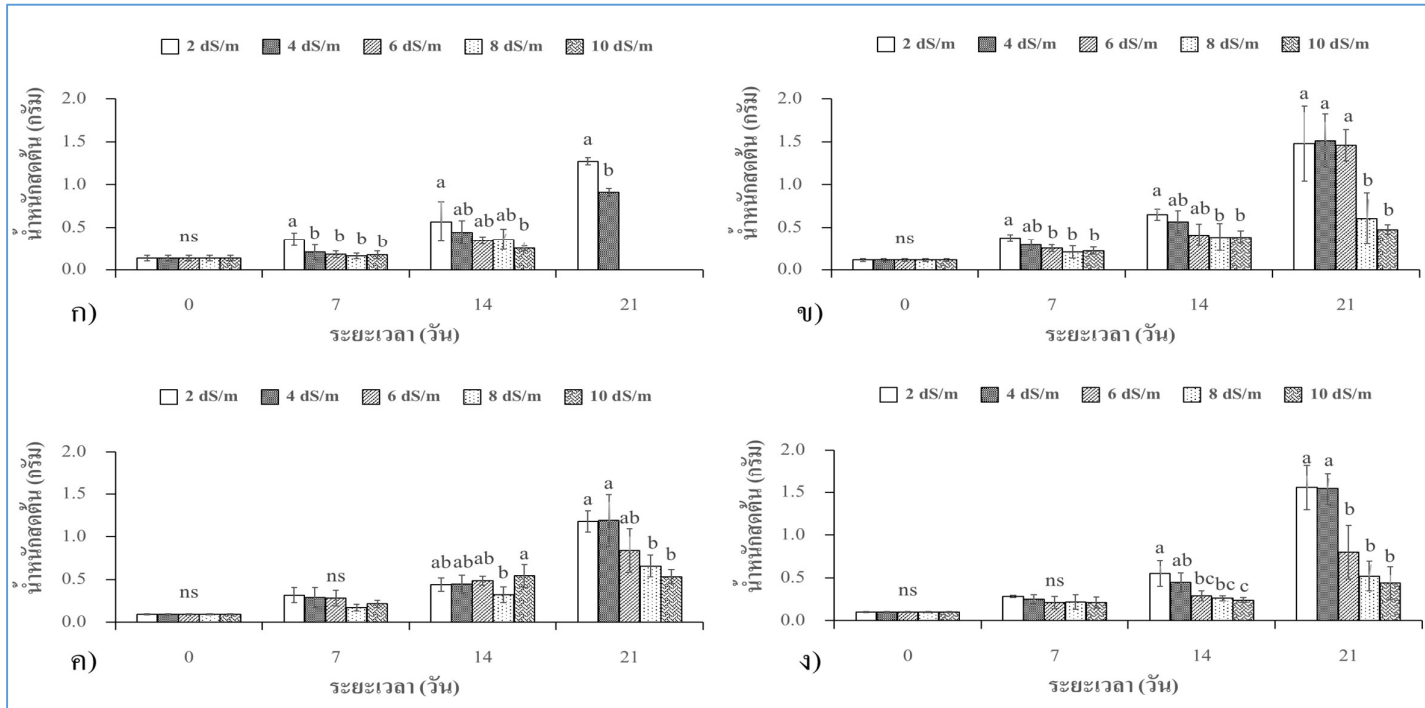


ภาพที่ 4-6 ความกว้างใบของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation)

หมายเหตุ วันที่ 21 ในภาพ ก ต้นข้าวตายเมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ 6, 8 และ 10 dS m⁻¹

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Tukey (p < 0.05)

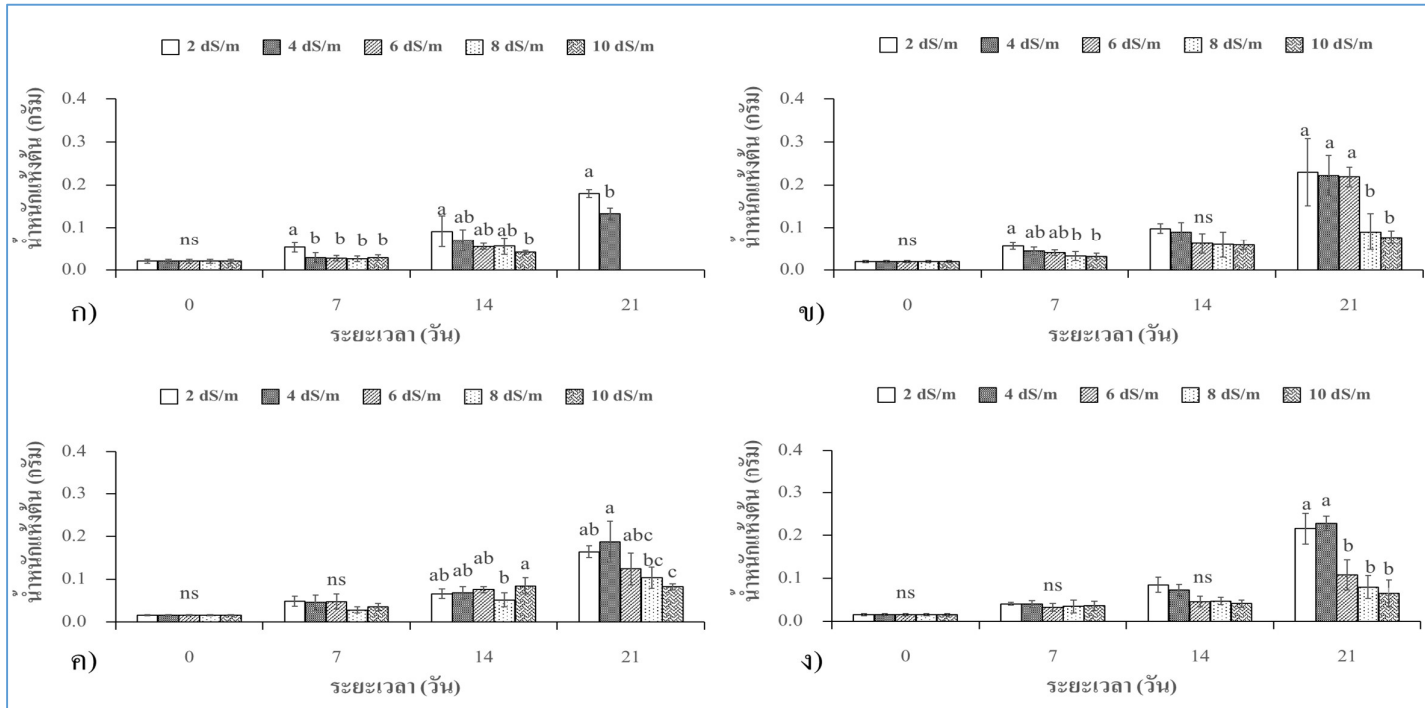


ภาพที่ 4-7 น้ำหนักสดต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation)

หมายเหตุ วันที่ 21 ในภาพ ก ต้นข้าวตายเมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ 6, 8 และ 10 dS m⁻¹

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Tukey (p < 0.05)

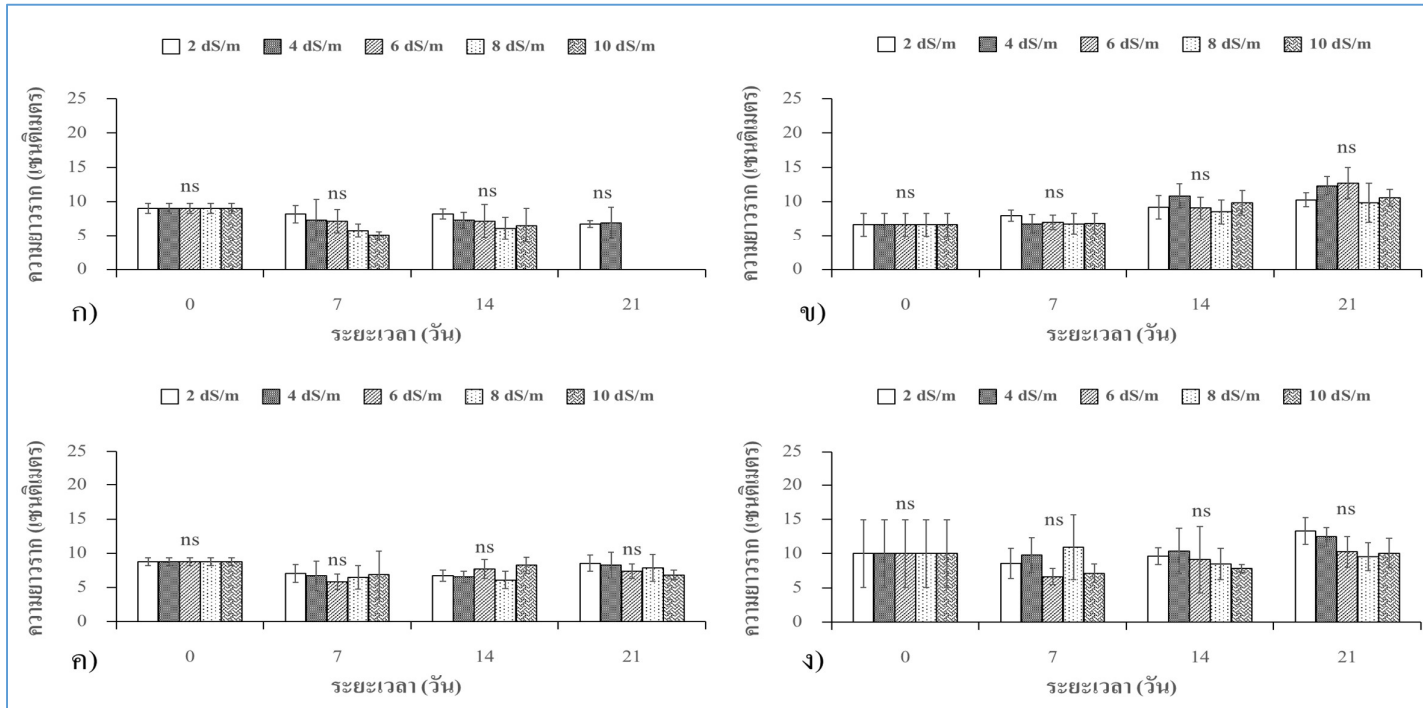


ภาพที่ 4-8 น้ำหนักแห้งต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation)

หมายเหตุ วันที่ 21 ในภาพ ก ต้นข้าวตายเมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ 6, 8 และ 10 dS m⁻¹

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Tukey (p < 0.05)

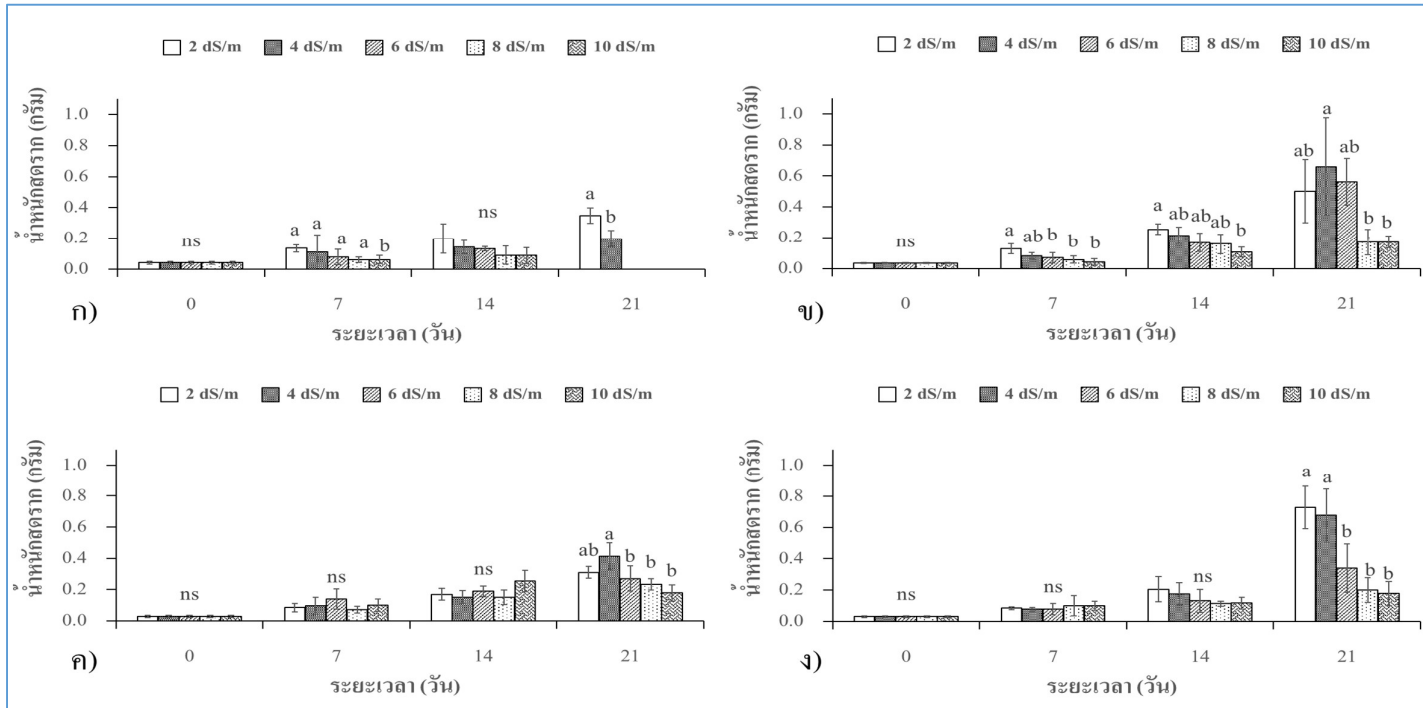


ภาพที่ 4-9 ความยาวรากของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation)

หมายเหตุ วันที่ 21 ในภาพ ก ต้นข้าวตายเมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ 6, 8 และ 10 dS m⁻¹

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Tukey (p < 0.05)

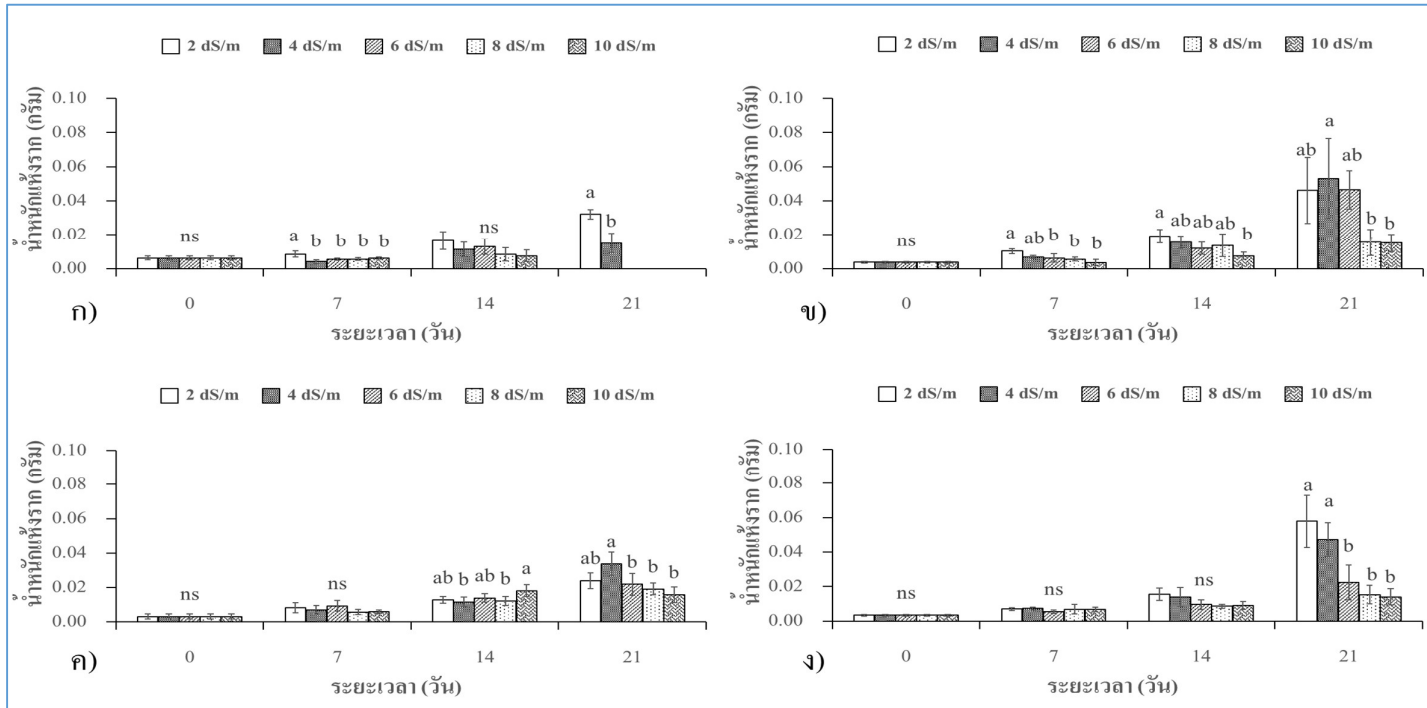


ภาพที่ 4-10 น้ำหนักสดรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation)

หมายเหตุ วันที่ 21 ในภาพ ก ต้นข้าวตายเมื่อได้รับเกลือ โซเดียมคลอไรด์ที่ 6, 8 และ 10 dS m⁻¹

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Tukey (p < 0.05)

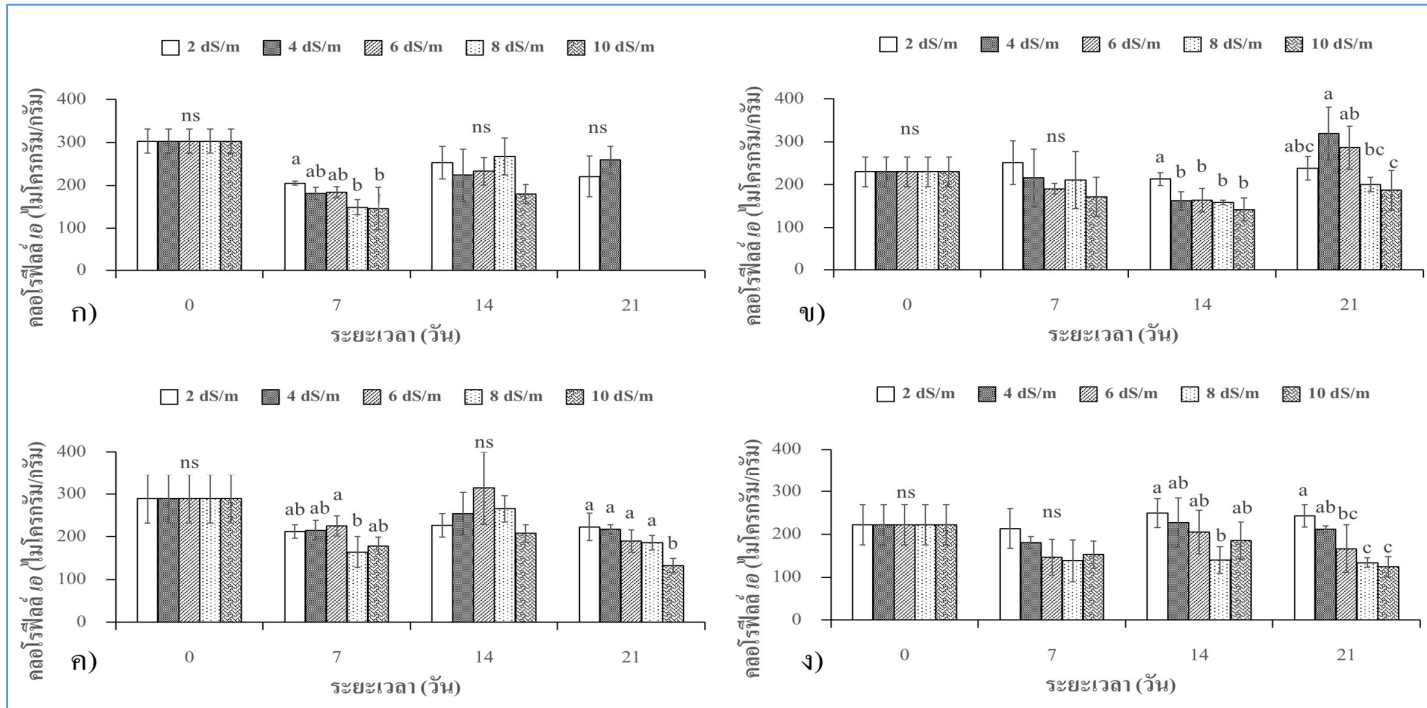


ภาพที่ 4-11 น้ำหนักแห้งรากของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation)

หมายเหตุ วันที่ 21 ในภาพ ก ต้นข้าวตายเมื่อได้รับเกลือ โซเดียมคลอไรด์ที่ 6, 8 และ 10 dS m⁻¹

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Tukey (p < 0.05)

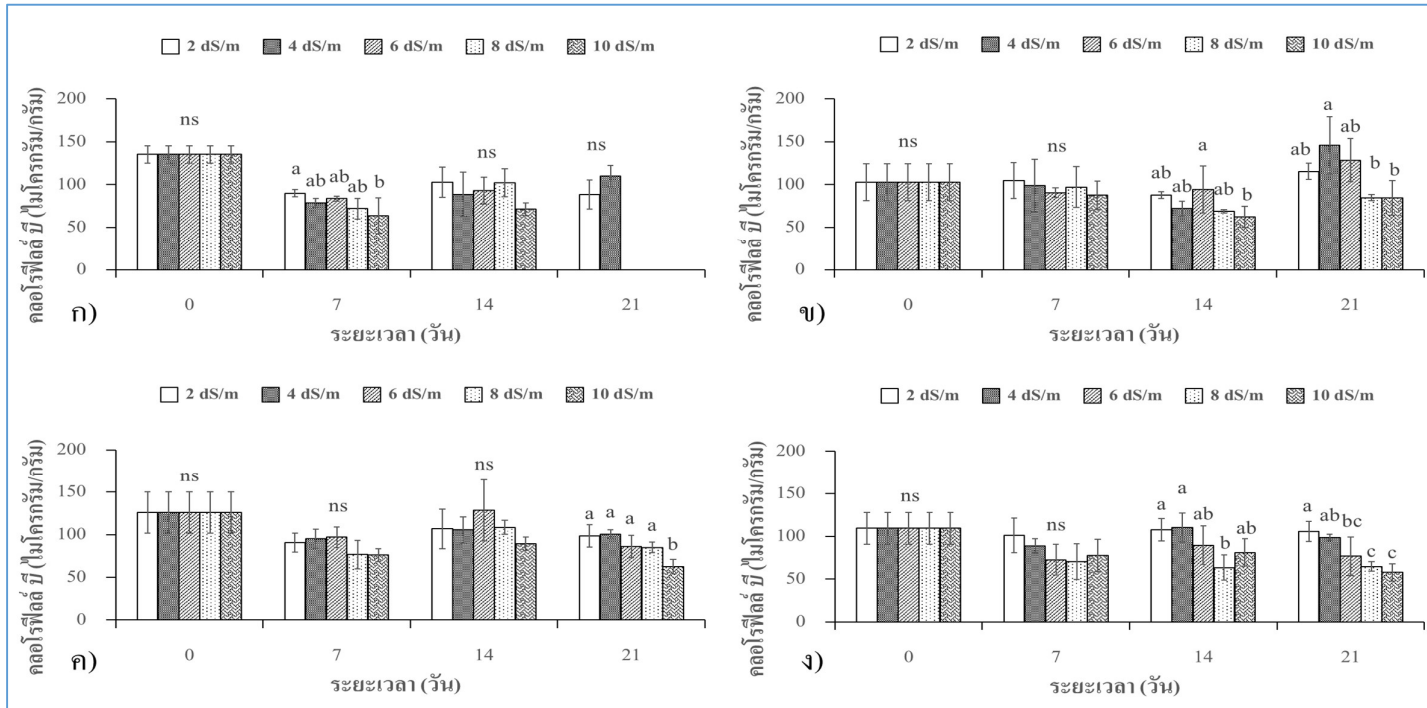


ภาพที่ 4-12 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation)

หมายเหตุ วันที่ 21 ในภาพ ก ต้นข้าวตายเมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ 6, 8 และ 10 dS m⁻¹

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Tukey (p < 0.05)

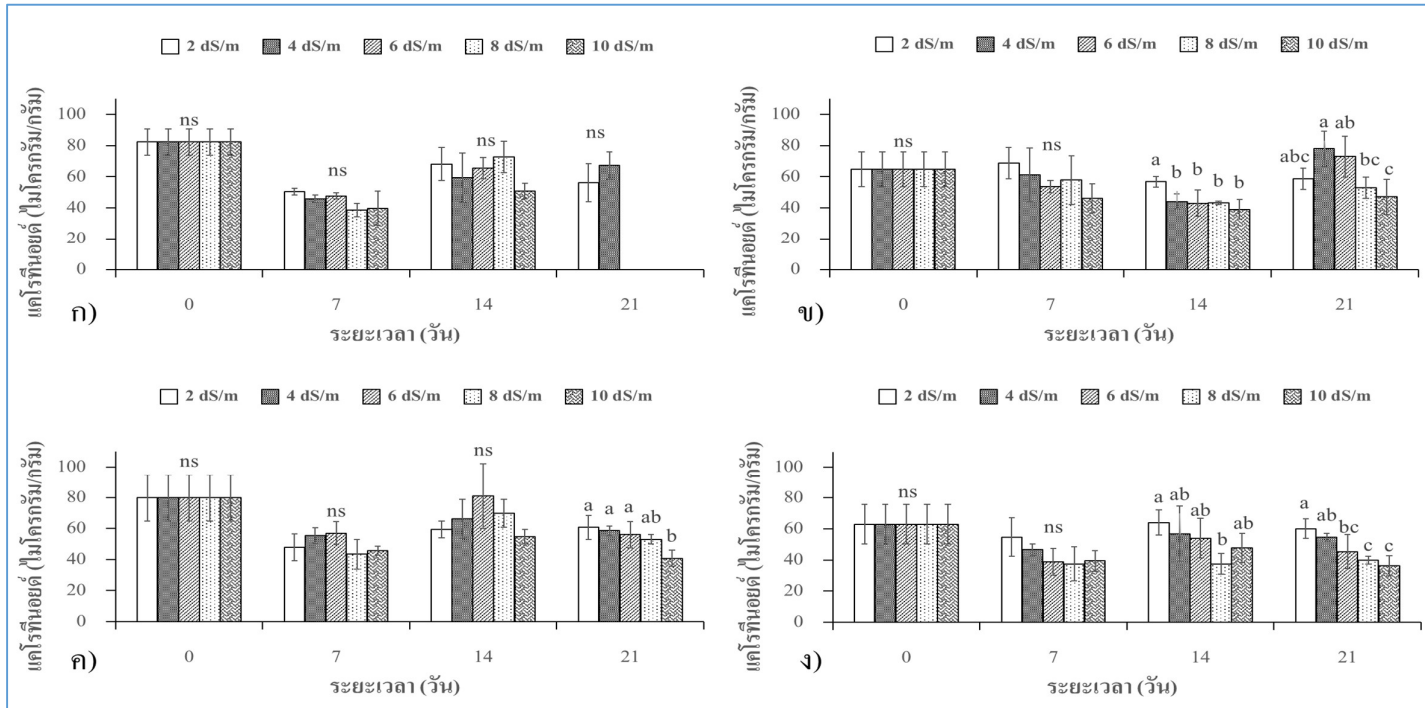


ภาพที่ 4-13 ปริมาณคลอโรฟิลล์ *บี* ของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation)

หมายเหตุ วันที่ 21 ในภาพ ก ต้นข้าวตายเมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ 6, 8 และ 10 dS m⁻¹

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Tukey (p < 0.05)

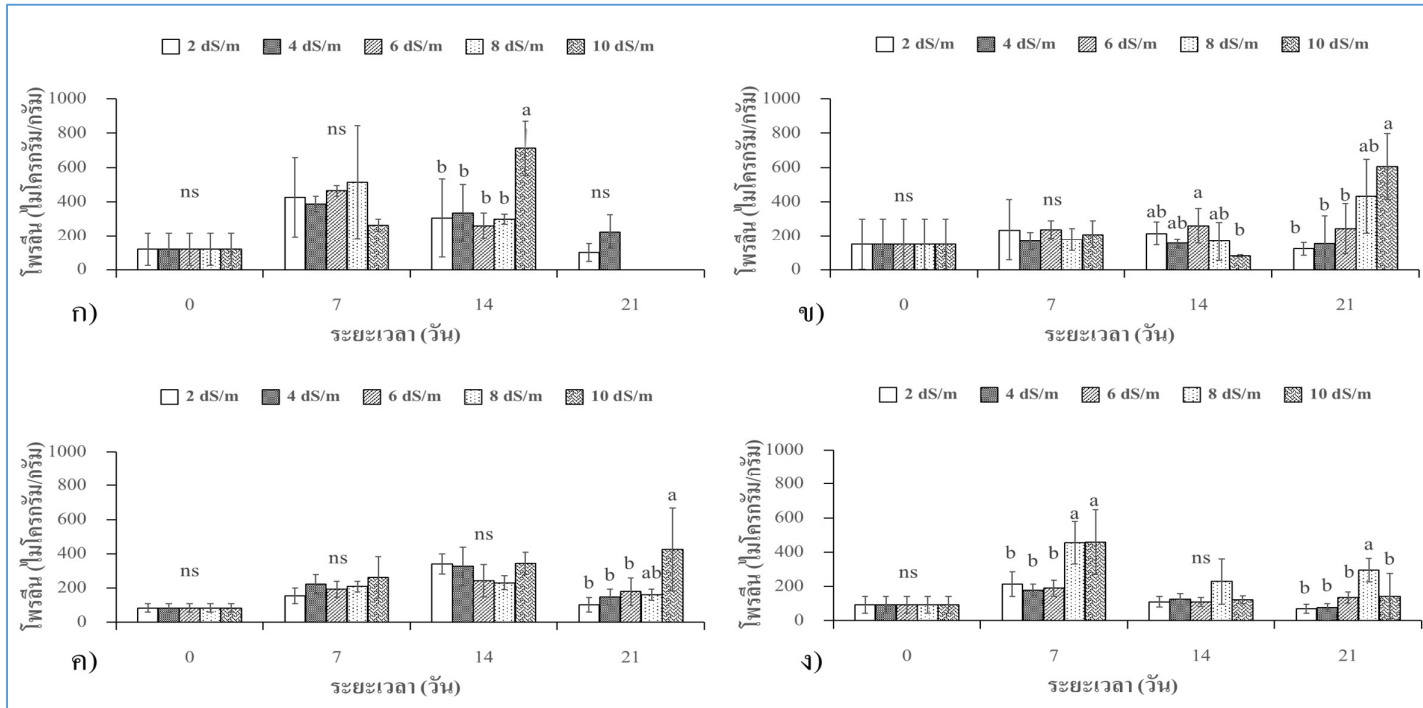


ภาพที่ 4-14 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation)

หมายเหตุ วันที่ 21 ในภาพ ก ต้นข้าวตายเมื่อได้รับเกลือ โซเดียมคลอไรด์ที่ 6, 8 และ 10 dS m⁻¹

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Tukey (p < 0.05)

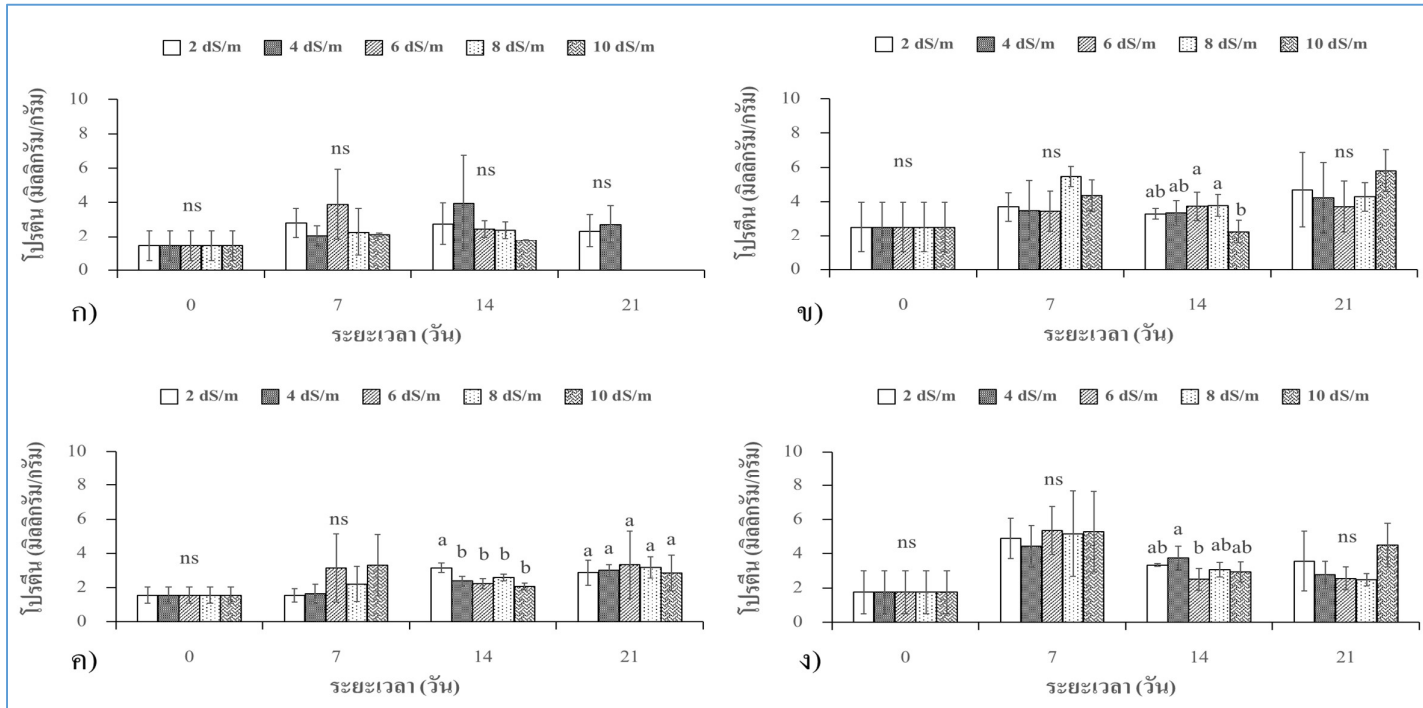


ภาพที่ 4-15 ปริมาณ โปรตีนของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation)

หมายเหตุ วันที่ 21 ในภาพ ก ต้นข้าวตายเมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ 6, 8 และ 10 dS m⁻¹

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Tukey (p < 0.05)



ภาพที่ 4-16 ปริมาณ โปรตีนของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง) ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ 0, 7, 14 และ 21 วัน (mean±standard deviation)

หมายเหตุ วันที่ 21 ในภาพ ก ต้นข้าวตายเมื่อได้รับเกลือ โซเดียมคลอไรด์ที่ 6, 8 และ 10 dS m⁻¹

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Tukey (p < 0.05)

บทที่ 5

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

5.1 อภิปรายผลการวิจัย

5.1.1 ผลของภาวะเครียดจากระดับความเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์และระยะเวลาที่มีต่อการเติบโตของข้าว 4 พันธุ์

ภายใต้ภาวะเค็มข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 กข31 และสุพรรณบุรี 1 มีค่า SES ระดับ 3 คะแนน เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น 8 หรือ 10 dS m⁻¹ ในวันที่ 7 (ภาพที่ 4-1) และเฉพาะข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และสุพรรณบุรี 1 มีค่า SES คะแนนสูงกว่า 3 คะแนน ภายหลังจากได้รับเกลือความเข้มข้น 6, 8 หรือ 10 dS m⁻¹ ในวันที่ 14 หลังจากเริ่มต้นการทดลอง (ภาพที่ 4-1ก และภาพที่ 4-1ง) และพบการตายของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น 6, 8 หรือ 10 dS m⁻¹ ในวันที่ 21 ขณะที่ข้าวพันธุ์อื่น มีค่า SES ที่สูงขึ้นแต่ยังสามารถเติบโตต่อไปได้ ค่า SES เป็นค่าชี้วัดเมื่อข้าวได้รับความเสียหายจากความเค็มตามหลักการของ International Rice Research Institute (IRRI) (Glenn et al., 1997) โดยให้คะแนนตามความเสียหายของต้นข้าวเมื่อได้รับภาวะเค็ม มีคะแนน 1, 3, 5, 7 และ 9 จากการศึกษาของ Ghaffaria et al. (2014) ได้เปรียบเทียบการตอบสนองต่อความเค็มของข้าวพันธุ์ IR64 ที่เป็นพันธุ์กลายทนเค็ม (tolerant mutant line; S-730-1) และสายพันธุ์กลายไม่ทนเค็ม (sensitive mutant line; 167-1-3) พบค่า SES ของข้าวที่ได้รับภาวะเค็มมีค่าสูงขึ้น แต่ความยาวราก ความสูงต้น น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง ส่วนต้นและรากลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับความเค็ม Chunthaburee et al. (2016) ศึกษาข้าว 12 พันธุ์โดยใช้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางด้านสรีรวิทยาและชีวเคมี ในการจัดกลุ่มข้าวที่เป็นข้าวขาวและข้าวดำ เมื่อให้ได้รับเกลือความเข้มข้น 100 mM NaCl พบว่า ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีค่า SES เท่ากับ 5 ภายหลังจากได้รับเกลือเป็นเวลา 14 วัน นอกจากนี้มีการนำค่า salinity damage score มาใช้เพื่อช่วยในการคัดเลือกข้าวพันธุ์ทนเค็ม (Haq et al., 2009)

ระดับความเค็มจากเกลือ โซเดียมคลอไรด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 มีการลดลงของจำนวนใบต่อต้น ความสูงต้น ความยาวใบ ความกว้างใบ ความยาวราก น้ำหนักแห้งและน้ำหนักสดส่วนต้นและราก ในอัตราส่วนที่มากกว่าข้าวพันธุ์อื่น โดยเฉพาะข้าวพันธุ์ กข41 ที่มีอัตราการลดลงของการเติบโตดังกล่าวน้อยกว่า แสดงให้เห็นว่า ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 สามารถทนต่อภาวะเค็มได้น้อยที่สุด ในขณะที่ข้าวพันธุ์ กข41 สามารถทนต่อภาวะเค็มได้ดีกว่าข้าวพันธุ์อื่นที่นำมาทดลอง ซึ่งความเค็มนี้มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช (Takemura et al., 2000) และพืชจะมี

การตอบสนองต่อความเค็มโดยจะมีการลดการขยายขนาดของใบรวมไปถึงการลดลงของน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของ ใบ ลำต้น ราก เห็นได้จากต้นข้าวระยะต้นกล้า (seedling) จะมีน้ำหนักสดต้นและรากลดลงมากเมื่อให้เกลือ โซเดียมคลอไรด์ NaCl ที่ความเข้มข้น 200 mM (Sultana et al., 1999) นอกจากนี้ยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายวิภาคในพืช เช่น ใบฝรั่งมีปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง มะเขือเทศ (*Lycopersicon esculentum*) มีจำนวนใบ พื้นที่ใบ และความหนาแน่นของปากใบลดลง (Mohammad et al., 1998; Romeroaranda et al., 2001) และต้นฝ้าย (*Gossypium hirsutum*) ที่มีจำนวนใบและความยาวรากลดลง (Meloni et al., 2001) การจำกัดพื้นที่ใบไม่ว่าจะเป็นความยาวหรือความกว้างใบ เป็นกลไกที่พืชตอบสนองเมื่อพืชอยู่ภายใต้ osmotic stress เมื่อปริมาณน้ำในเนื้อเยื่อพืชลดลง เซลล์จะหดตัวและผนังเซลล์คลายตัว ทำให้ปริมาตรของเซลล์ลดลงและเซลล์สูญเสียความเต่ง เมื่อเซลล์สูญเสียน้ำมากขึ้นและเซลล์หดตัวมากขึ้น สารละลายในเซลล์จะเข้มข้นขึ้น เยื่อหุ้มเซลล์จะหนาขึ้นและแน่นขึ้นเนื่องจากเซลล์มีพื้นที่ผิวลดลงกว่าเดิม การขยายของเซลล์เป็นกระบวนการที่ใช้ความเต่งเป็นแรงผลักดัน จึงเป็นกระบวนการที่ไวต่อภาวะ osmotic stress มากที่สุด

ความเค็มมีผลต่อกระบวนการต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช (photosynthesis) จากการศึกษาพบว่าพืชที่อยู่ในภาวะเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงต่ำกว่าในพืชในภาวะปกติ เนื่องจากเกิด oxidative stress (Parida & Das, 2005; Chaves et al., 2009) ทั้งนี้เกิดจากในใบพืชมีปริมาณของคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ลดลงภายใต้ภาวะเค็ม (Kennedy & De Fillippis, 1999) ผลกระทบของความเค็มที่เห็นได้จากพืชที่มีลักษณะอ่อนแอต่อภาวะเค็ม (glycophyte หรือ non-halophytes) เช่น ข้าว (*O. sativa* L.) แถ่นตะวัน (*Helianthus tuberosus*) และข้าวสาลี (*Triticum aestivum*) ซึ่งพบว่าในภาวะเค็ม พืชมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ (Li et al., 2012; Huang et al., 2012; Zheng et al., 2009) พืชมีกลไกในที่ลดการสูญเสียน้ำโดยการควบคุมการเปิดและปิดของปากใบ เมื่อดันพืชขาดน้ำและมีการเปลี่ยนแปลงทาง metabolism เป็นกลไกทำให้ปากใบปิด โดยการลดลงของสารที่เป็นตัวถูกละลาย ในเซลล์คุมปากใบทำให้เซลล์สูญเสียน้ำและความเต่งลดลง ปากใบจึงปิด จากรายงานของ Amirjani (2010) ศึกษาในข้าวพันธุ์ Tarom Azmoon เมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ ตั้งแต่ 0 – 200 มิลลิโมลลาร์ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าภาวะเค็มส่งผลทำให้ข้าวพันธุ์นี้มีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งส่วนต้นลดลง เนื่องมาจากการปิดของปากใบ ทำให้พืชได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง และภาวะเค็มยังส่งผลต่อปริมาณน้ำในใบ ค่าแรงดันออสโมติก ปริมาณรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง

5.1.2 ผลของภาวะเครียดจากระดับความเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์และระยะเวลาที่มีต่อทางสรีรวิทยาในข้าว 4 พันธุ์

ภายใต้ภาวะเค็มในวันที่ 21 ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 มีการลดลงปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และแคโรทีนอยด์มากกว่าในข้าวพันธุ์อื่น ทำให้การเติบโตของข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ลดลงไปด้วย ซึ่งการที่รงควัตถุในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงมีปริมาณลดลง อาจเนื่องมาจากความเป็นพิษของเกลือ (Iyengar & Reddy, 1996) และความเครียดเนื่องจากการเกิดออกซิเดชัน (Parida & Das, 2005; Chaves et al., 2009) ทำให้พืชเกิดการเสื่อมของเซลล์และมีการเปลี่ยนแปลงการทำงานภายในไซโตพลาสซึม ทำให้ใบพืชมีปริมาณของคลอโรฟิลล์ และแคโรทีนอยด์ลดลง ภายใต้ภาวะเครียดจากความเค็ม (Kennedy & De Fillippis, 1999) นอกจากนี้การสะสมไอออนของเกลือที่เกิดจากความเค็มส่งผลต่อการลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบพืช โดยเร่งการทำงานของเอนไซม์ chlorophyllase (Reddy & Vora, 1986; Yeo & Flowers, 1983) อย่างไรก็ตาม กระบวนการย่อยสลายของคลอโรฟิลล์สามารถเปลี่ยนรูปคลอโรฟิลล์ บี ไปเป็นคลอโรฟิลล์ เอ จึงทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของพืชบางชนิดเพิ่มสูงขึ้นได้เมื่ออยู่ในภาวะเค็ม (Eckardt, 2009) โดยพืชที่ทนเค็มจะมีปริมาณคลอโรฟิลล์เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่พืชไม่ทนเค็มจะมีปริมาณคลอโรฟิลล์ลดน้อยลง (Khan et al., 2009) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วข้าวจัดเป็นพืชที่ไม่ทนเค็ม เมื่อได้รับภาวะเค็มจะทำให้ข้าวมีปริมาณรงควัตถุลดลง ดังเช่นการศึกษาของ Cha-um et al. (2007) ศึกษาภาวะเครียดจากความเค็มในข้าวหอม 3 พันธุ์ และ Chunthaburee et al. (2015) ศึกษาการเติบโต สรีรวิทยา และชีวเคมีในภาวะเครียดจากความเค็มของข้าว 12 พันธุ์ ที่พบการลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์

ในภาวะเค็มทำให้ค่าชลศักย์ในดินต่ำลง พืชจะดูดซึมน้ำไปใช้ได้น้อยลง พืชหลายชนิดมีความสามารถในการสะสมตัวถูกละลายเพื่อปรับค่าชลศักย์ในพืชให้ต่ำลงโดยไม่ทำให้ความเต่งของเซลล์ลดลง ซึ่งวิธีการนี้ เรียกว่า การปรับค่าชลศักย์โดยการสะสมตัวถูกละลาย (osmotic adjustment) การสะสมโพรตีนเป็นกระบวนการที่ได้รับการยอมรับว่ามีความสำคัญในการปรับตัวของพืชเมื่อได้รับความเครียดที่เกิดจากความเค็มและแล้ง (Strizhov et al., 1997) จากการทดลองข้าวทุกพันธุ์มีปริมาณโพรตีนเพิ่มมากขึ้นเมื่อได้รับภาวะเค็ม แต่มีช่วงเวลาในการสร้างที่แตกต่างกัน โดยข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 มีปริมาณโพรตีนสูงขึ้นในวันที่ 7 แต่หลังจากนั้นกลับมีปริมาณโพรตีนลดลง สอดคล้องกับการเติบโตที่ลดลง ขณะที่ข้าวพันธุ์ กข31 และ กข41 มีปริมาณโพรตีนเพิ่มสูงขึ้นมากที่สุดในวันที่ 21 และสามารถเติบโตต่อไปได้ในทุกระดับความเข้มข้นเกลือ จึงเป็นไปได้ว่าการสร้างและสะสมโพรตีนให้มีปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการทนต่อภาวะเค็ม โดยเฉพาะเมื่อข้าวได้รับความเค็มในช่วงระยะที่ยาวนาน จากรายงานของ Pongprayoon et al. (2008) พบว่าเมื่อข้าวได้รับความเค็มส่งผลให้มีการสะสมโพรตีนเพิ่มมากขึ้นตามระดับความเข้มข้น

ของเกลือที่สูงขึ้น และสามารถจัดแบ่งข้าวหอมพันธุ์ไทยได้เป็น 3 กลุ่มตามระดับการสะสมของปริมาณโปรตีน ได้แก่ กลุ่มที่มีปริมาณโปรตีนสูง ปานกลางและต่ำ และพบความสัมพันธ์ระหว่างใบที่มีสีเขียวและปริมาณโปรตีนที่สะสม โดยในกลุ่มที่มีการสะสมโปรตีนในระดับสูง และปานกลางมีเปอร์เซ็นต์พื้นที่ใบเขียวสูงกว่าข้าวกลุ่มที่มีการสะสมโปรตีนต่ำ

นอกจากนี้ ภาวะเค็มยังส่งผลต่อปริมาณโปรตีน จากการทดลองพบว่าในข้าวพันธุ์ กข41 มีปริมาณโปรตีนลดลงในวันที่ 14 (ภาพที่ 4-16ค) ก่อนมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณโปรตีนในวันที่ 21 (ภาพที่ 4-15ค) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากภาวะเค็มส่งผลให้กระบวนการสร้างโปรตีนเกิดได้ช้าลง ทำให้โปรตีนถูกนำไปใช้น้อยลง และเกิดการสะสมโปรตีนเพิ่มมากขึ้น (Hanson & Tully, 1979) จากการศึกษาของ Lutt et al. (1996b) พบว่ามีการลดลงของปริมาณโปรตีนในใบข้าวที่อยู่ในสารละลายอาหารที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ 50 มิลลิโมลลาร์ เป็นเวลา 2 วัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Kong-ngern et al. (2005) ที่ศึกษาการแยกชนิดโปรตีนที่สกัดจากข้าวด้วยกระแสไฟฟ้า (one-dimensional SDS-PAGE; 1DE และ two-dimensional PAGE; 2DE) พบว่าข้าวเมื่อได้รับภาวะเค็มจากความเค็มมีปริมาณโปรตีนหลายชนิดลดลง

5.2 สรุปผลการวิจัย

1. ความเข้มข้นเกลือที่สูงขึ้น และระยะเวลาที่ยาวนานทำให้ข้าวเติบโตได้ลดลง โดยข้าวทั้ง 4 พันธุ์ สามารถเติบโตได้เมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้น 4 dS m^{-1} และมีการตายของต้นข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น $6-10 \text{ dS m}^{-1}$ ที่ระยะเวลา 21 วัน
2. ข้าวทั้ง 4 พันธุ์ที่ยังคงเติบโตได้ เมื่อได้รับภาวะเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ ที่ 7 และ 14 วัน แต่ในวันที่ 21 มีการตายของต้นข้าวขาวดอกมะลิ 105
3. ข้าว 4 พันธุ์มีการลดลงของปริมาณรงควัตถุในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน และข้าวพันธุ์ กข41 มีปริมาณโปรตีนลดลงก่อนที่จะมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณโปรตีน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของโปรตีนในข้าวแต่ละพันธุ์มีช่วงเวลาที่แตกต่างกัน

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาเพิ่มเติมในข้าวพันธุ์อื่น เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการปรับปรุงสายพันธุ์ข้าวในพื้นที่ดินเค็มหรือเสี่ยงต่อการรุกของน้ำทะเล
2. ศึกษาการตอบสนองต่อภาวะเค็มของข้าวในระยะอื่น ๆ โดยเปรียบเทียบกับข้าวพันธุ์ทนเค็มและไม่ทนเค็มที่ได้รับการยอมรับ

3. ศึกษาเพิ่มเติมในด้านชีวเคมี สรีรวิทยา รวมทั้งชีววิทยาระดับโมเลกุลเพื่อเข้าใจกลไกการตอบสนองต่อภาวะเครียดในข้าว และพืชเศรษฐกิจอื่น ๆ

บรรณานุกรม

- กรมการค้าต่างประเทศ. (2553). ปริมาณการส่งออกข้าวของไทย ปี 2550-2553. วันที่ค้นข้อมูล 2 ธันวาคม 2553, เข้าถึงได้จาก [http://www.dft.moc.go.th/level4Frame.asp?sPage=the_files/\\$\\$8/level4/Yc46.htm&level4=21](http://www.dft.moc.go.th/level4Frame.asp?sPage=the_files/$$8/level4/Yc46.htm&level4=21)
- พินิจ จันทร. (2555). 100 พันธุ์ข้าวไทย อาหารสู่...ครัวโลก. กรุงเทพฯ: ปัญญาชน.
- มูลนิธิข้าวไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2549). จุดกำเนิดและประวัติข้าวไทย. วันที่ค้นข้อมูล 27 มีนาคม 2558, เข้าถึงได้จาก http://www.thairice.org/html/aboutrice/about_rice1.htm
- อัญชลี ใจดี. (2543). บทบาทของแอบไซซิกจากภายนอกต่อการปรับตัวทางสรีรวิทยาบางประการในถั่วเหลือง *Glycine max (L.) Merrill* พันธุ์ สจ.5 และ มข.35 ที่ปลูกในภาวะเค็ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาพฤกษศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อมร อินทราเวช. (2554). เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีของดินในพื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้. เอกสารขอประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง นักวิชาการเกษตรเชี่ยวชาญ, สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 4, กรมพัฒนาที่ดิน, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- อรุณี ยูวะนิยม. (2540). ดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. กรุงเทพฯ: กองอนุรักษ์ดินและน้ำ กรมพัฒนาที่ดิน.
- อรุณี ยูวะนิยม. (2547). การจัดการแก้ไขปัญหาดินเค็ม เอกสารวิชาการของกลุ่มวิจัยและพัฒนาการจัดการดินเค็ม. กรุงเทพฯ: สำนักวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน.
- เอกสงวน ชูวิสิฐกุล. (2544). เทคโนโลยีการผลิตข้าวพันธุ์ดี. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร.
- Ahmad, I., Larher, F., & Stewart, G.R. (1979). Sorbitol, a compatible osmotic solute in *Plantago maritima*. *New Phytologist*, 82, 671-678.
- Amirjani, Mohammad Reza. (2010). Effect of NaCl on some physiological parameters of rice. *European Journal of Biomedical and Pharmaceutical Sciences*, 3(1), 6-16.
- Arfan, M., Athar, H.R., & Ashraf, M. (2007). Does exogenous application of salicylic acid through the rooting medium modulate growth and photosynthetic capacity in differently adapted spring wheat cultivars under salt stress?. *Journal of Plant Physiology*, 164, 685-694.

- Artadana, I.B.M., & Supaibulwatana, Kanyaratt. (2014). Phenotypic responses of Thai jasmine rice (*Oryza sativa* L. KDML105) and its mutants to sodium chloride stress. In 2nd *Asean Plus Three Graduate Research Congress* (pp. 47-48). Bangkok: Faculty of Graduate Studies Mahidol University and Council of the Graduate studies Administrators of public and Autonomous University.
- Aslam, M., Qureshi, R.H., & Ahmed, N. (1993). A rapid screening technique for salt tolerance in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant and Soil*, 150, 99-107.
- Bates, L.S., Waldren, R.P., & Teare, I.D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205–207.
- Barua, R., De Ocampo, M., Egdane, J., Ismail, A.M., & Mondal, S. (2015). Phenotyping rice (*Oryza sativa* L.) genotypes for physiological traits associated with tolerance of salinity at seedling stage. *Scientia Agriculturae*, 12(3), 156-162.
- Bernstein, L. (1964). Salt tolerance of plants. *Agricultural Information Bulletin*, 283, 3-23.
- Bogges, S.F., & Stewart, C.R. (1976). Contribution of arginine to proline accumulation in water stressed barley leaves. *Plant Physiology*, 58, 796-797.
- Bogges, S.F., Aspinall, D., & Paleg, L.G. (1976). Stress metabolism. IX. The significance of end-product inhibition of proline biosynthesis and of compartmentation in relation to stress-induced proline accumulation. *Australian Journal of Plant Physiology*, 3, 513-525.
- Botia, P., Navarro, J.M., & Cerda, A. V. M. (2005). Yield and fruit quality of two melon cultivars irrigated with saline water at different stages of development. *European Journal of Agronomy*, 23, 243-253.
- Bradford, M.M. (1976). A rapid sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72, 248-254.
- Chang, T.T., & Bardenas, E.A. (1976). The morphology and varietal characteristics of the rice plant. *IRRI Technical Bulletin*, 4, 1-40.
- Cha-um, S., & Kirdmanee, C. (2009). Effect of salt stress on proline accumulation, photosynthetic ability and growth character in two maize cultivars. *Pakistan Journal of Botany*, 41(1), 87-98.

- Cha-um, S., Vejchasarn, P., & Kirdmanee, C. (2007). An effective defensive response in Thai aromatic rice varieties (*Oryza sativa* L. spp. *indica*) to Salinity. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, *10*(4), 257-264.
- Chaves, M.M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, *103*, 551-560.
- Cheeseman J.M. (1988). Mechanisms of salinity tolerance in plants. *Plant Physiology*, *87*, 547-550.
- Chen, C.T., & Kao, C.H. (1993). Osmotic stress and water stress have opposite effects on putrescine and proline production in exise rice leaves. *Plant Growth Regulation*, *13*, 197-202.
- Chunthaburee, S., Dongsansuk, A., Sanitchon, J., Pattanagul, W., & Theerakulpisut, P. (2015). Physiological and biochemical parameters for evaluation and clustering of rice cultivars differing in salt tolerance at seedling stage. *Saudi Journal of Biological Sciences*. doi: 10.1016/j.sjbs.2015.05.013
- Colmer, TD., Munns, R., & Flowers, TJ. (2005). Improving salt tolerance of wheat and barley: future prospects. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, *45*, 1425-1443.
- Davies, W.J., Kudoyarova, G., & Hartung, W. (2005). Long-distance ABA signaling and Its relation to other signaling pathways in the detection of soil drying and the mediation of the plant's response to drought. *Journal of Plant Growth Regulation*, *24*, 285-295.
- Eckardt, N.A. (2009). A new chlorophyll degradation pathway. *Plant Cell*, *21*, 700.
- Fricke, W., & Peters, W.S. (2002). The biophysics of leaf growth in salt-stressed barley. A study at the cell level. *Plant Physiology*, *129*, 374-388.
- Fricke, W., Akhiyarova, G., Veselov, D., & Kudoyarova, G. (2004). Rapid and tissue-specific changes in ABA and in growth rate in response to salinity in barley leaves. *Journal of Experimental Botany*, *55*(399), 1115-1123.
- Flowers, T.J., Troke, P.F., & Yeo, A.R. (1997). The mechanism of salt tolerance in halophytes. *Annual Review of Plant Physiology*, *28*, 89-121.
- Ghaffaria, A., Gharechahib, J., Nakhodaa, B., & Salekdehc, G.H. (2014). Physiology and proteome responses of two contrasting rice mutants and their wild type parent under salt stress conditions at the vegetative stage. *Journal of Plant Physiology*, *171*, 31- 44.

- Ghosh, B., Ali, Md. N., & Saikat, G. (2016). Response of Rice under Salinity Stress: A Review Update. *Rice Research*, 4, 167. doi: 10.4172/2375-4338.1000167
- Glenn, B., Gregorio, D.S., & Rhulyx, D.M. (1997). Screening rice for salinity tolerance. Plant Breeding, Genetics, and Biochemistry Division. *IRRI Discussion paper series*, 22, 1-30.
- Greenway, H., & Munns, R. (1980). Mechanisms of salt tolerance in non-halophytes. *Annual Review of Plant Physiology*, 31, 149-190.
- Hanson, A.D., & Tully, R.E. (1979). Light stimulation of proline synthesis in water-stressed barley leaves. *Planta*, 145(1), 45-51. doi: 10.1007/BF00379926
- Haq, T.U., Akhtar, J., Nawaz, S., & Ahmad, R. (2009). Morpho-physiological response of rice (*Oryza sativa* L.) varieties to salinity stress. *Pakistan Journal of Botany*, 41(6), 2943-2956.
- Hardter, R. (1992). Fertilization on salt affected soils with special reference to potassium. In *Proceeding of the International Symposium on Strategies for Utilizing Salt Affected Lands* (pp. 206-219). Bangkok: Funny Publishing.
- Huang, Z., Long, X., Wang, L., Kang, J., Zhang, Z., Zed, R., & Liu, Z. (2012). Growth, photosynthesis and H⁺-ATPase activity in two Jerusalem artichoke varieties under NaCl induced stress. *Process Biochemistry*, 47, 591-596.
- Iyengar, E.R.R., & Reddy, M.P. (1996). Photosynthesis in highly salt tolerant plants In M. Pesserkali (Ed.), *Handbook of photosynthesis* (pp. 897-909). USA: Marshal Dekar, Baten Rose.
- Iyer, S., & Caplan, A. (1998). Products of proline catabolism can induce osmotically regulated genes in rice. *Plant Physiology*, 116, 203-211.
- Kennedy, B.F., & Fillippis, D.L. (1999). Physiological and oxidative response to NaCl of the salt tolerant *Grevillea ilicifolia* and the salt sensitive *Grevillea arenaria*. *Journal of Plant Physiology*, 155, 746-754.
- Khan, H.A., Pervez, M.A., Ayub, C.M., Ziaf, K., Balal, R.M., Shahid, M.A., & Akhtar, N. (2009). Hormonal priming alleviates salt stress in hot pepper (*Capsicum annuum* L.). *Soil and Environmental*, 28, 130-135.

- Khatun, S., & Flowers, T.J. (1995). Effects of salinity on seed set in rice. *Plant Cell Environmental and Experimental Botany*, 18, 61-67.
- Kong-ngern, K., Daduang, S., Wongkham, C., Bunnag, S., Kosittrakuna, M., & Theerakulpisuta, P. (2005). Protein profiles in response to salt stress in leaf sheaths of rice seedlings. *Science Asia*, 31, 403-408.
- Kosma, D.K., Bourdenx, B., Bernard, A., Parsons, E.P., Lu, S., Joubert, J., & Jenks, M.A. (2009). The impact of water deficiency on leaf cuticle lipids of Arabidopsis. *Plant Physiology*, 151, 1918-1929.
- Lee, D.G., Park, K.W., An, Y.J., Sohn, Y.G., Ha, J.K., Kim, H.Y., Bae, D.W., Lee, K.H., Kang, N.J., Lee, B.H., Kang, K.Y., & Lee, J.J. (2011). Proteomics analysis of salt-induced leaf proteins in two rice germplasms with different salt sensitivity. *Canadian Journal of Plant Sciences*, 91, 337-349. doi:10.4141/CJPS10022
- Lee, M.H., Cho, E.J., Wi, S.G., Bae, H., Kim, J.E., Cho, Y.J., Lee, S., Kim, J.H., & Chung, B.Y. (2013). Divergences in morphological changes and antioxidant responses in salt-tolerant and salt-sensitive rice seedlings after salt stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 70, 325-335.
- Li, X., Bua, N., Li, Y., Maa, L., Xin, S., & Zhang, L. (2012). Growth, photosynthesis and antioxidant responses of endophyte infected and non-infected rice under lead stress conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 213, 55-61.
- Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350-382.
- Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L., & Randall, R. J. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. *The Journal of Biological Chemistry*, 193(1), 265-275.
- Lu, C.M., & Vonshak, A. (1999). Characterization of PSII photochemistry in salt adapted cells of cyanobacterium *Spirulina platensis*. *New Phytologist*, 141, 231-239.
- Lutts, S., Kinet, J.M., & Bouharmont, J. (1995). Changes in plant response to NaCl during development of rice (*Oryza sativa* L.) varieties differing in salinity resistance. *Journal of Experimental Botany*, 46, 1843-1852.

- Lutts, S., Kinet, J.M., & Bouharmont, J. (1996a). Effect of salt stress on growth, mineral nutrition and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Plant Growth Regulation*, *19*, 207-218.
- Lutts, S., Kinet, J.M., & Bouharmont, J. (1996b). NaCl-induced Senescence in Leaves of Rice (*Oryza sativa* L.) Cultivars Differing in Salinity Resistance. *Annals of Botany*, *78*, 389-398.
- Lutts, S., Majerus, V., & Kinet, J.M. (1999). NaCl effects on proline metabolism in rice (*Oryza sativa*) seedlings. *Physiologia Plantarum*, *105*, 1399-3054.
- Maas, E.V., & Poss, J.A. (1989). Salt sensitivity of cowpea at various growth stages. *Irrigation Science*, *10*, 313-320.
- Maas, E.V., Poss, J.A., & Hoffman, G.J. (1986). Salinity sensitivity of sorghum at three growth stages. *Irrigation Science*, *7*, 1-11.
- Meloni, D.A., Oliva, M.A., Ruiz, H.A., & Martinez, C.A. (2001). Contribution of proline and inorganic solutes to osmotic adjustment in cotton under salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, *24*, 599–612.
- Mohammad, M., Shibli, R., Ajouni, M., & Nimri, L. (1998). Tomato root and shoot responses to salt stress under different levels of phosphorus nutrition. *Journal of Plant Nutrition*, *21*, 1667–1680.
- Movafegh, S., Jadid, R.R., & Kiabi, S. (2012). Effect of salinity stress on chlorophyll content, proline, water soluble carbohydrate, germination, growth and dry weight of three seedling barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, *8*(4), 157-168.
- Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell Environment*, *25*, 239-250.
- Munns, R., James, R.A., & Lauchli, A. (2006). Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *Journal of Experimental Botany*, *57*, 1025–1043.
- Munns, R., & Tester, S. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, *59*, 651-681.
- Nguyen, H. T., Babu, R. C., & Blum, A. (1997). Breeding for drought resistance in rice: Physiology and molecular genetics considerations. *Crop Science*, *37*, 1426-1443.

- Noreen, Z., Ashraf, M., & Akram, N.A. (2010). Salt-induced modulation in some key gas exchange characteristics and ionic relations in pea (*Pisum sativum* L.) and their use as selection criteria. *Crop and Pasture Science*, *61*, 369-378.
- Nounjan, N., Siangliw, J.L., Toojinda, T., Chadchawan, S., & Theerakulpisut, P. (2016). Salt-responsive mechanisms in chromosome segment substitution lines of rice (*Oryza sativa* L. cv. KDML105). *Plant Physiology and Biochemistry*, *103*, 96-105.
- Parida, A.K., & Das, A.B. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *60*, 324-349.
- Passioura, J.B., & Munns, R. (2000). Rapid environmental changes that affect leaf water Status induce transient surges or pauses in leaf expansion rate. *Australian Journal of Plant Physiology*, *27*, 941-948.
- Pongprayoon, W., Chu-um, S., Pichakum, A., & Kirdmancee, C. (2008). Proline profiles in aromatic cultivars photoautotrophically grown in responses to salt stress. *International Journal of Botany*, *4*(3), 276-282.
- Popova, L.P., Stoinova, Z.G., & Maslenkova, L.T. (1995). Involvement of abscisic acid in photosynthetic process in *Hordeum vulgare* L. during salinity stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, *14*, 211-218.
- Reddy, M.P., & Vora, A.B. (1986). Changes in pigment composition, Hill reaction activity and saccharides metabolism in bajra (*Pennisetum typhoides* S&H) leaves under NaCl salinity. *Photosynthetica*, *20*, 50-55.
- Rodriguez, H.G., Roberts, J., Jordan, W.R., & Drew, M.C. (1997). Growth, Water Relations, and Accumulation of Organic and Inorganic Solutes in Roots of Maize Seedlings during Salt Stress. *Plant Physiology*, *113*(3), 881-893.
- Romero, L., Belakbir, A., Ragala, L., & Ruiz, J.M. (1997). Response of plant yield and leaf pigments to saline conditions: effectiveness of different rootstocks in melon plants (*Cucumis melo* L.). *Journal Plant Nutrition Soil Science*, *43*, 855-862.
- Romeroaranda, R., Soria, T., & Cuartero, J. (2001). Tomato plant-water uptake and plant-water relationships under saline growth conditions. *Plant Science*, *160*, 265-272.
- Sakamoto, A., & Murata, N. (2002). The role of glycine betaine in the protection of plants from stress: clues from transgenic plants. *Plant, Cell & Environment*, *25*, 163-171.

- Sangeeta, S., & Vrunda, V. (2014). Physiological and biochemical changes in salinity sensitive rice varieties grown in Khazan fields of Goa. *International Journal of Recent Scientific Research*, 5(2), 336-341.
- Shabala, S.N., Shabala, S.I., Martynenko, A.I., Babourina, O., & Newman, I.A. (1998). Salinity effect on bioelectric activity, growth, Na⁺ accumulation and chlorophyll fluorescence of maize leaves: a comparative survey and prospects for screening. *Australian Journal of Plant Physiology*, 25, 609-616.
- Shereen, A., Ansari, R.U., Yasmin, S., Raza, S., Mumtaz, S., Khan, M.A., & Mujtaba, S.M. (2007). Physiological responses of rice (*Oryza sativa* L.) to saline stress. *Pakistan Journal of Botany*, 39, 2527-2534.
- Solomon, A., Beer, S., Waisel, Y., Jones, G. P., & Paleg, L. G. (1994). Effects of NaCl on the carboxylating activity of Rubisco from *Tamarix jordanis* in the presence and absence of proline-related compatible solutes. *Physiologia Plantarum*, 90, 198-204.
- Stewart, C.R., & Larher, F. (1980). Accumulation of amino acids and related compounds in relation to environmental stress. In B.J. Miflin (Ed.), *The Biochemistry of Plants: a comprehensive treatise* (pp. 609-635). New York: Academic Press.
- Strizhov, N., Abraham, E., Okresz, L., Blickling, S., Zilberstein, A., Schell, J., Koncz, C., & Szabados, L. (1997). Differential expression of two P5CS genes controlling proline accumulation during salt-stress requires ABA and is regulated by ABA1, ABI1 and AXR2 in Arabidopsis. *The Plant Journal*, 12, 557-569.
- Sultana, N., Ikeda, T., & Itoh, R. (1999). Effect of NaCl salinity on photosynthesis and dry matter accumulation in developing rice grains. *Environmental and Experimental Botany*, 42, 211-220.
- Summart, J., Thanonkeo, P., Panichajakul, S., Prathepha, P., & McManus, M. T. (2010). Effect of salt stress on growth, inorganic ion and proline accumulation in Thai aromatic rice, Khao Dawk Mali 105, callus culture. *African Journal of Biotechnology*, 9(2), 145-152.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (1998). *Plant Physiology* (2nd ed.). Massachusetts: Sinaure Associate.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). *Plant Physiology* (4th ed.). Massachusetts: Sinaure Associate.

- Takemura, T., Hanagata, N., Sugihara, K., Baba, S., Karube, I., & Dubinsky, Z. (2000). Physiological and biochemical responses to salt stress in the mangrove, *Bruguiera gymnorrhiza*. *Aquatic Botany*, *68*, 15-28.
- Tarczynski, M.C., Jensen, R.G., & Bohnert, H.J. (1993). Stress protection of transgenic tobacco by production of the osmolyte mannitol. *Science*, *259*, 508-510.
- Vajrabhaya, M., & Vajrabhaya, T. (1991). Somaclonal variation of salt tolerance in rice. In Y.P.S Bajaj (Ed.), *Biotechnology in Agriculture and Forestry 14* (pp. 368-382). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Van Rensburg, L., Krüger, G.H.J., & Krüger, H. (1993). Proline accumulation as drought-tolerance selection criterion : its relationship to membrane integrity and chloroplast ultrastructure in *Nicotiana tabacum* L. *Journal of Plant Physiology*, *141*, 188-194.
- Vaughan, P. R. (1994). Assumption, prediction and reality in geotechnical engineering. *Geotechnique*, *44*(4), 573-609. doi:10.1680/geot.1994.44.4.573
- Wilson, C., Lesch, S.M., & Grieve, C.M. (2000). Growth stage modulates salinity tolerance of New Zealand spinach (*Tetragonia tetragonioides*, Pall) and Red Orach (*Atriplex hortensis* L.). *Annals of Botany*, *85*, 501-509.
- Wu, C.J., Cheng, Z.Q., Huang, X.Q., Yin, S.H., Cao, K.M., & Sun, C.R. (2004). Genetic diversity among and within population of *Oryza granulate* from Yunnan of China revealed by RAPD and ISSR marker: implications for conservation of the endangered species. *Plant Science*, *167*, 35-42.
- Yamamoto, A., Sawada, H., Shim, IS., Usui, K., & Fujihara, S. (2011). Effect of salt stress on physiological response and leaf polyamine content in NERICA rice seedlings. *Plant Soil and Environment*, *57*(12), 571-576.
- Yeo, A.R., & Flowers, T.J. (1983). Varietal differences in the toxicity of sodium ions in rice leaves. *Journal of Plant Physiology*, *59*, 189-195.
- Yoshida, S. (1981). *Fundamentals of rice crop science*. Los Banos, Laguna, Philippines: The International Rice Research Institute.
- Yu, G. H., Zhang, X., & Ma, H. X. (2015). Changes in the Physiological Parameters of *SbPIP1*-Transformed Wheat Plants under Salt Stress. Hindawi. *International Journal of Genomics*. doi: 10.1155/ 2015/384356

- Zheng, C., Jiang, D., Liu, F., Dai, T., Jing, Q., & Cao, W. (2009). Effects of salt and water logging stresses and their combination on leaf photosynthesis, chloroplast ATP synthesis, and antioxidant capacity in wheat. *Plant Science*, *176*, 575-582.
- Zhu, J., & Meinzer, C. F. (1999). Efficiency of C₄ photosynthesis in *Atriplex lentiformis* under salinity stress. *Australian Journal of Plant Physiology*, *26*, 79-86.
- Zhu, J.K. (2003). Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Current Opinion in Plant Biology*, *6*, 441-445.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การเตรียมสาร

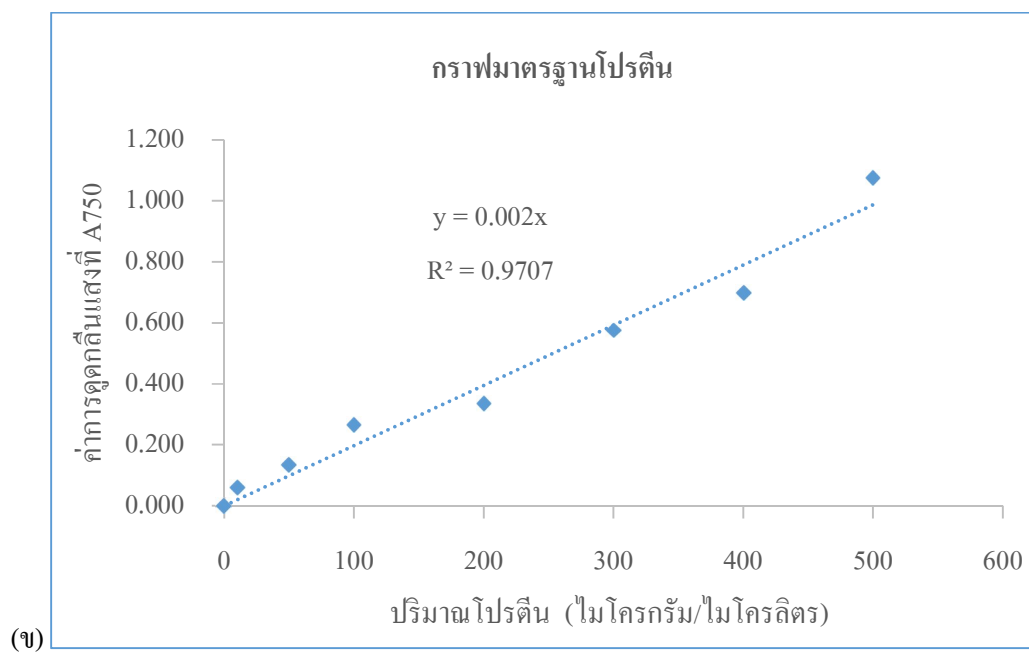
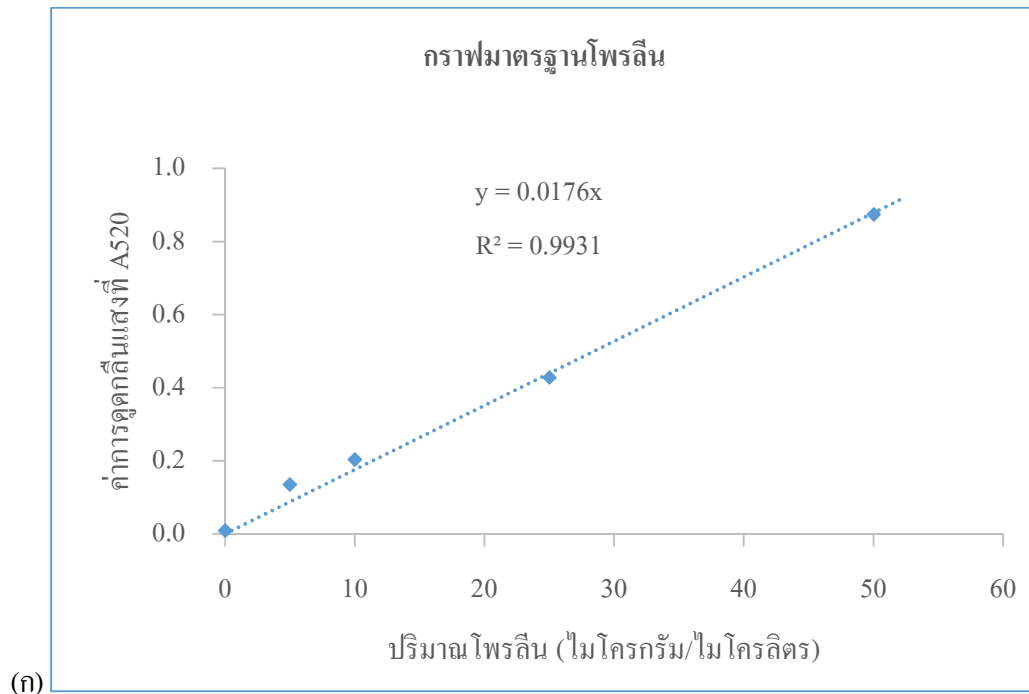
ตารางภาคผนวก ก-1 การเตรียมสารละลายธาตุอาหารสูตร WP No.2 (Vajrabhaya and Vajrabhaya, 1991)

Chemicals	Content(mg/l)
Macroelements:	
Potassium nitrate (KNO ₃)	580
Calcium sulfate(CaSO ₄)	500
Magnesium sulfate (MgSO ₄ .7H ₂ O)	450
Triple superphosphate	250
Ammonium sulfate ((NH ₄) ₂ SO ₄)	100
Microelements:	
Di-sodium ethylene diamine tetraacetate (Na ₂ EDTA)	160
Ferrous sulfate (FeSO ₄ .7H ₂ O)	120
Manganese sulfate (MnSO ₄ .H ₂ O)	15
Boric acid (H ₃ BO ₃)	5
Zinc sulfate (ZnSO ₄ .7H ₂ O)	1.5
Potassium iodide (KI)	1.0
Sodium molybdate (Na ₂ MoO ₄ . 2H ₂ O)	0.1
Copper sulfate(CuSO ₄ . 5H ₂ O)	0.05
Cobalt chloride (CoCl ₂ . 6H ₂ O)	0.05

หมายเหตุ การเตรียมน้ำเหล็ก FeSO₄ stock (30 g/l)

1. Na₂EDTA 40 g + FeSO₄.7H₂O 30 g
2. ละลาย Na₂EDTA 40 g ในน้ำกลั่น 500 ml
3. ละลาย FeSO₄.7H₂O 30 g ในน้ำกลั่น 500 ml ตั้งบน hot plate 70-90 °C
4. เติมสารละลาย Na₂EDTA ลงในสารละลาย FeSO₄.7H₂O ผสมโดยใช้ Magnetic stirrer ที่อุณหภูมิต่ำ เป็นเวลา 3-4 ชั่วโมง จนกระทั่งสารละลายใส

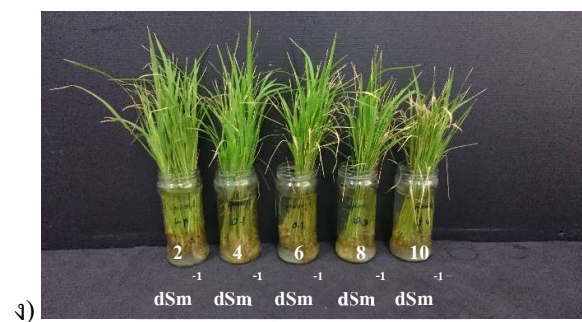
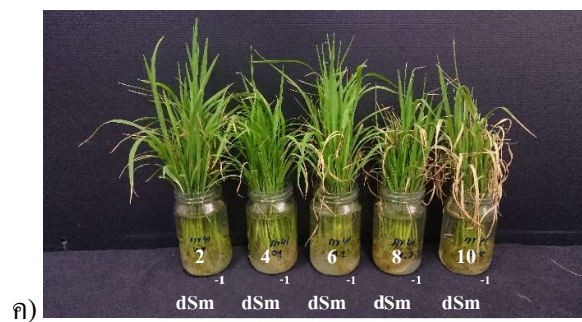
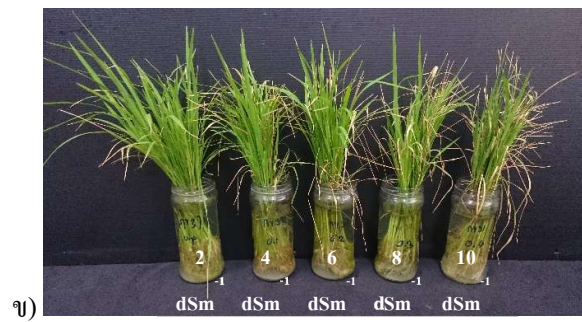
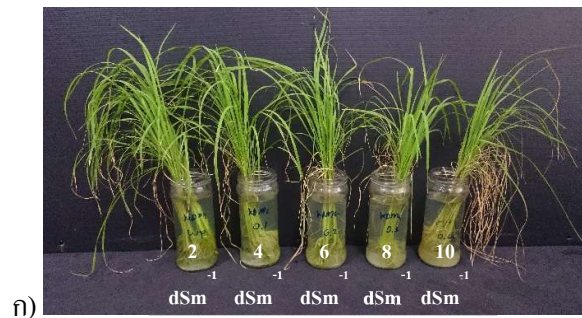
ภาคผนวก ข
กราฟมาตรฐาน



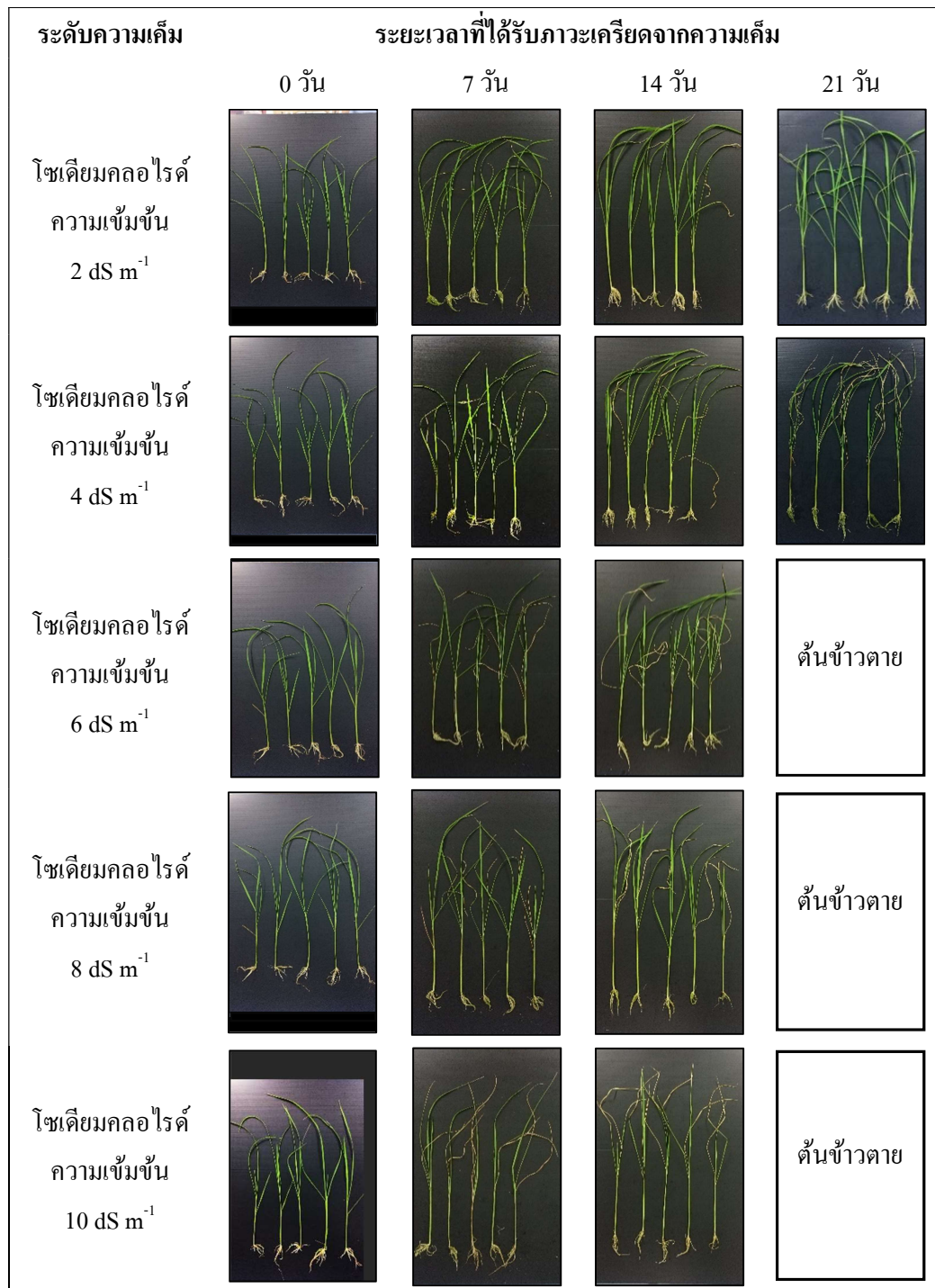
ภาพภาคผนวก ข-1 กราฟมาตรฐาน (standard curve) ของโพรีลิน (ก) และ โปรตีน (ข)

ภาคผนวก ค

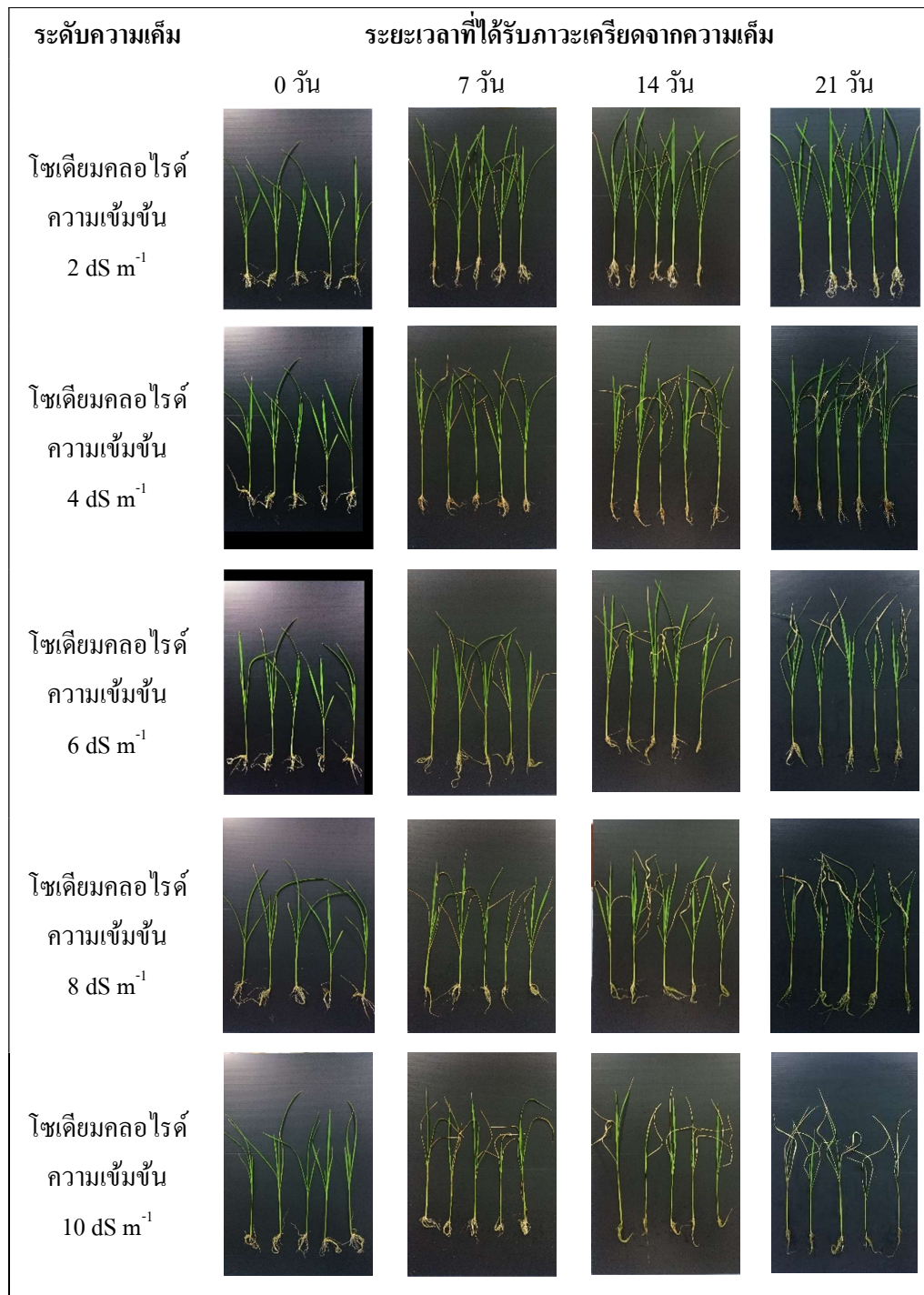
ภาพและตารางแสดงผลการทดลองเพิ่มเติม



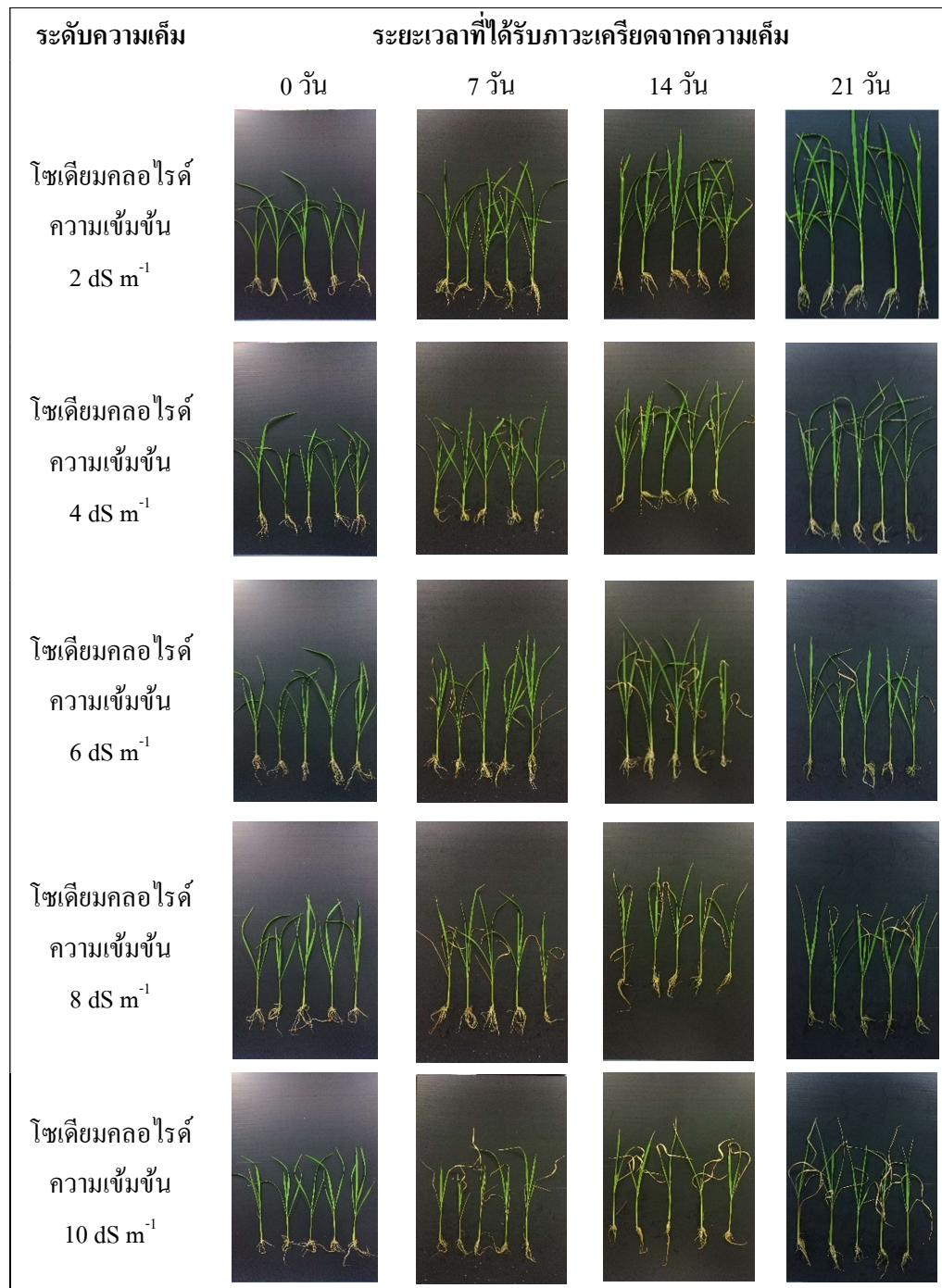
ภาพภาคผนวก ค-1 ต้นข้าวที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหาร WP No. 2 ร่วมกับเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 หรือ 10 dS m⁻¹ ในข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) กข31 (ข) กข41 (ค) สุพรรณบุรี 1 (ง)



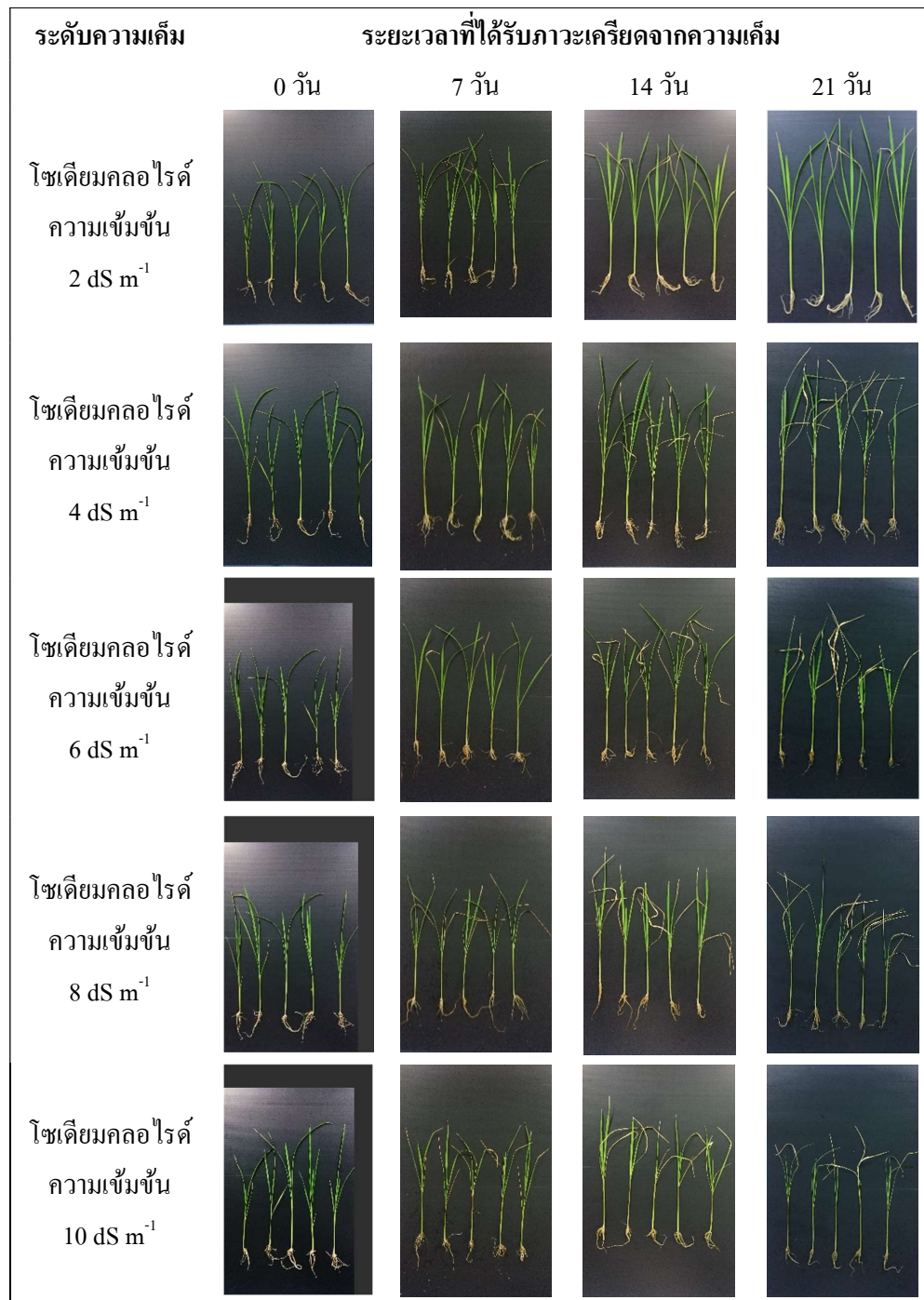
ภาพภาคผนวก ก-2 แสดงต้นข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็มที่ระยะเวลา 0, 7, 14 และ 21 วัน



ภาพภาคผนวก ค-3 ต้นข้าวพันธุ์ กข31 ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็ม
ที่ระยะเวลา 0, 7, 14 และ 21 วัน



ภาพภาคผนวก ค-4 ต้นข้าวพันธุ์ กข41 ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็ม
ที่ระยะเวลา 0, 7, 14 และ 21 วัน



ภาพภาคผนวก ก-5 ต้นข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ในภาวะปกติและได้รับภาวะเครียดจากความเค็ม
ที่ระยะเวลา 0, 7, 14 และ 21 วัน

ตารางภาคผนวก ค-1 การเจริญเติบโต และข้อมูลทางสรีรวิทยาของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เมื่อได้รับโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 4, 6, 8 หรือ 10 dS m⁻¹ เป็นระยะเวลา 7, 14 และ 21 วัน เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (2 dS m⁻¹)

ค่าที่ศึกษา	ระยะเวลา 7 วัน				ระยะเวลา 14 วัน				ระยะเวลา 21 วัน			
	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹
SES	0	0	+	+	0	+	+	+	+	<-----ต้นข้าวตาย----->		
จำนวนก่อดต้น	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<-----ต้นข้าวตาย----->		
จำนวนใบต่อต้น	0	0	-	0	0	0	0	0	0	<-----ต้นข้าวตาย----->		
ความสูงต้น	0	0	0	0	0	0	-	-	0	<-----ต้นข้าวตาย----->		
ยาวใบ	0	0	0	0	0	0	-	-	0	<-----ต้นข้าวตาย----->		
กว้างใบ	0	0	0	-	0	0	0	0	-	<-----ต้นข้าวตาย----->		
น้ำหนักสดต้น	-	-	-	-	0	0	0	-	-	<-----ต้นข้าวตาย----->		
น้ำหนักแห้งต้น	-	-	-	-	0	0	0	-	-	<-----ต้นข้าวตาย----->		
ความยาวราก	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<-----ต้นข้าวตาย----->		
น้ำหนักสดราก	0	0	0	-	0	0	0	0	-	<-----ต้นข้าวตาย----->		
น้ำหนักแห้งราก	-	-	-	-	0	0	0	0	-	<-----ต้นข้าวตาย----->		

หมายเหตุ 0 หมายถึง ค่าที่ศึกษาไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

+ หมายถึง ค่าที่ศึกษาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

- หมายถึง ค่าที่ศึกษาลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

ค่าที่ศึกษา	ระยะเวลา 7 วัน				ระยะเวลา 14 วัน				ระยะเวลา 21 วัน			
	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹
คลอโรฟิลล์ เอ	0	0	-	-	0	0	0	0	0	<-----ต้นข้าวตาย----->		
คลอโรฟิลล์ บี	0	0	0	-	0	0	0	0	0	<-----ต้นข้าวตาย----->		
แคโรทีนอยด์	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<-----ต้นข้าวตาย----->		
โพรลีน	0	0	0	0	0	0	0	+	0	<-----ต้นข้าวตาย----->		
โปรตีน	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<-----ต้นข้าวตาย----->		

หมายเหตุ 0 หมายถึง ค่าที่ศึกษาไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

+ หมายถึง ค่าที่ศึกษาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

- หมายถึง ค่าที่ศึกษาลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

ตารางภาคผนวก ค-2 การเจริญเติบโต และข้อมูลทางสรีรวิทยาของข้าวพันธุ์ กข31 เมื่อได้รับโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 4, 6, 8 หรือ 10 dS m⁻¹ เป็นระยะเวลา 7, 14 และ 21 วัน เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (2 dS m⁻¹)

ค่าที่ศึกษา	ระยะเวลา 7 วัน				ระยะเวลา 14 วัน				ระยะเวลา 21 วัน			
	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹
SES	0	0	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+
จำนวนกอดต้น	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
จำนวนใบต่อต้น	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0
ความสูงต้น	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
ยาวใบ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
กว้างใบ	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-
น้ำหนักสดต้น	0	-	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-
น้ำหนักแห้งต้น	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-
ความยาวราก	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
น้ำหนักสดราก	0	-	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0
น้ำหนักแห้งราก	0	-	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0

หมายเหตุ 0 หมายถึง ค่าที่ศึกษาไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

+ หมายถึง ค่าที่ศึกษาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

- หมายถึง ค่าที่ศึกษาลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

ตารางภาคผนวก ก-2 (ต่อ)

ค่าที่ศึกษา	ระยะเวลา 7 วัน				ระยะเวลา 14 วัน				ระยะเวลา 21 วัน			
	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹
คลอโรฟิลล์ เอ	0	0	0	0	-	-	-	-	0	0	0	0
คลอโรฟิลล์ บี	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
แคโรทีนอยด์	0	0	0	0	-	-	-	-	0	0	0	0
โพรตีน	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+
โปรตีน	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หมายเหตุ 0 หมายถึง ค่าที่ศึกษาไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

+ หมายถึง ค่าที่ศึกษาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

- หมายถึง ค่าที่ศึกษาลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

ตารางภาคผนวก ค-3 การเจริญเติบโต และข้อมูลทางสรีรวิทยาของข้าวพันธุ์ กข41 เมื่อได้รับโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 4, 6, 8 หรือ 10 dS m⁻¹ เป็นระยะเวลา 7, 14 และ 21 วัน เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (2 dS m⁻¹)

ค่าที่ศึกษา	ระยะเวลา 7 วัน				ระยะเวลา 14 วัน				ระยะเวลา 21 วัน			
	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹
SES	0	0	0	0	0	+	+	+	0	+	+	+
จำนวนกอดต้น	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
จำนวนใบต่อต้น	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	-	0
ความสูงต้น	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
ยาวใบ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
กว้างใบ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
น้ำหนักสดต้น	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
น้ำหนักแห้งต้น	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
ความยาวราก	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
น้ำหนักสดราก	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
น้ำหนักแห้งราก	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หมายเหตุ 0 หมายถึง ค่าที่ศึกษาไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม
 + หมายถึง ค่าที่ศึกษาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม
 - หมายถึง ค่าที่ศึกษาลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

ตารางภาคผนวก ก-3 (ต่อ)

ค่าที่ศึกษา	ระยะเวลา 7 วัน				ระยะเวลา 14 วัน				ระยะเวลา 21 วัน			
	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹
คลอโรฟิลล์ เอ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
คลอโรฟิลล์ บี	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
แคโรทีนอยด์	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
โพรตีน	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+
โปรตีน	0	0	0	0	-	-	-	-	0	0	0	0

หมายเหตุ 0 หมายถึง ค่าที่ศึกษาไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

+ หมายถึง ค่าที่ศึกษาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

- หมายถึง ค่าที่ศึกษาลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

ตารางภาคผนวก ค-4 การเจริญเติบโต และข้อมูลทางสรีรวิทยาของข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 เมื่อได้รับ โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 4, 6, 8 หรือ 10 dS m⁻¹ เป็นระยะเวลา 7, 14 และ 21 วัน เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (2 dS m⁻¹)

ค่าที่ศึกษา	ระยะเวลา 7 วัน				ระยะเวลา 14 วัน				ระยะเวลา 21 วัน			
	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹
SES	0	0	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+
จำนวนกอดต้น	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
จำนวนใบต่อต้น	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	-	-
ความสูงต้น	0	0	0	0	0	-	-	-	0	-	-	-
ยาวใบ	0	0	0	0	0	-	0	-	0	0	-	-
กว้างใบ	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0
น้ำหนักสดต้น	0	0	0	0	0	-	-	-	0	-	-	-
น้ำหนักแห้งต้น	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-
ความยาวราก	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
น้ำหนักสดราก	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-
น้ำหนักแห้งราก	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-

หมายเหตุ 0 หมายถึง ค่าที่ศึกษาไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

+ หมายถึง ค่าที่ศึกษาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

- หมายถึง ค่าที่ศึกษาลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

ตารางภาคผนวก ก-4 (ต่อ)

ค่าที่ศึกษา	ระยะเวลา 7 วัน				ระยะเวลา 14 วัน				ระยะเวลา 21 วัน			
	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹	4 dS m ⁻¹	6 dS m ⁻¹	8 dS m ⁻¹	10 dS m ⁻¹
คลอโรฟิลล์ เอ	0	0	0	0	0	0	0	-	0	-	-	-
คลอโรฟิลล์ บี	0	0	0	0	0	0	0	-	0	-	-	-
แคโรทีนอยด์	0	0	0	0	0	0	0	-	0	-	-	-
โพรตีน	0	0	+	+	0	0	0	0	0	0	+	0
โปรตีน	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หมายเหตุ 0 หมายถึง ค่าที่ศึกษาไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

+ หมายถึง ค่าที่ศึกษาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

- หมายถึง ค่าที่ศึกษาลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม