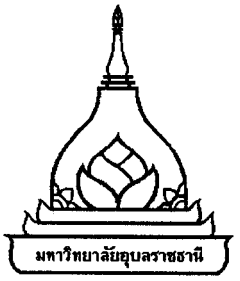
อิทธิพลของซิลิกอนและโซเดียมคลอไรด์ต่ออัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงและการเจริญเติบโตของข้าว (*Oryza sativa* L.)

ฉันทนา พรมจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
พ.ศ. 2549

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



EFFECT OF SILICON AND SODIUM CHLORIDE ON PHOTOSYNTHETIC RATE AND GROWTH OF RICE (*Oryza sativa* L.)

CHANTANA PHROMCHAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS

FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE

MAJOR IN AGRICULTURE FACULTY OF AGRICULTURE

UBON RAJATHANEE UNIVERSITY

YEAR 2006

COPYRIGHT OF UBON RAJATHANEE UNIVERSITY

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์

เรื่อง อิทธิพลของซิลิกอนและโซเดียมคลอไรด์ต่ออัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงและการเจริญเติบโตของข้าว (*Oryza sativa* L.)

ผู้วิจัย นางสาวฉันทนา พรมจันทร์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒน์ ธีระพงษ์ธนากร)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพิมล สุริยภัทร)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานัส ลอศิริกุล)

.....กรรมการ
(ดร.บรรยง ทุมแสน)

.....คณบดี
(รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรพงษ์ วัฒนกูล)

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รับรองแล้ว

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุทิศ อินทร์ประสิทธิ์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
ปฏิบัติราชการแทนอธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2549

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรพงษ์ วัฒนากูล คณบดี คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่กรุณาอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำการวิจัยด้วยดีจนงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒน์ ธีระพงษ์ธนากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ประจำวิชาหลายวิชา ที่กรุณาให้ความรู้ทางวิชาการ วิธีการดำเนินการวิจัย การเป็นนักวิจัยที่ดี ตลอดจนช่วยสนับสนุนเงินทุนในการศึกษาวิจัย ให้คำปรึกษาและคำชี้แนะในการแก้ไขปัญหาตลอดระยะเวลาการทำวิจัยด้วยความเอาใจใส่ และตรวจแก้วิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พรพิมล สุริยภัทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้คำปรึกษา เสนอแนะข้อบกพร่อง และข้อผิดพลาด ช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานัส ลอศิริกุล กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้คำปรึกษา เสนอแนะข้อบกพร่อง และข้อผิดพลาด ช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.บรรยง ทุมแสน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ช่วยให้คำปรึกษาเสนอแนะ ตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวัฒน์ เวชแพศย์ อาจารย์ผู้สอนวิชาสถิติเพื่อการวิจัย ที่ให้ความรู้ทางวิชาการ การเป็นนักวิจัยที่ดี การเก็บข้อมูล วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ตลอดจนการให้คำปรึกษา ตรวจแก้เค้าโครงวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาวดี แก้วระหัน อาจารย์ผู้สอนวิชาธาตุอาหารพืช ที่ให้ความรู้ในด้านวิชาการ ให้คำแนะนำวิธีการวิเคราะห์ธาตุอาหารพืช การเป็นนักวิจัยที่ดีตลอดจนช่วยสนับสนุนเงินทุนในการศึกษาวิจัยให้เสร็จสมบูรณ์ ครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกรียงไกร โชประการ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติ วงส์พิเชษฐ คณาจารย์ที่ช่วยให้ความรู้ด้านวิชาการ การจับประเด็นที่ชัดเจน การเป็นนักวิจัยที่ดี ตลอดจนให้คำปรึกษา และคำแนะนำ ที่มีประโยชน์ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วสุ อมฤตสุทธิ์ หัวหน้าสำนักงานไร่ฝึกทดลองและห้องปฏิบัติการกลาง คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ช่วยสนับสนุนการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ และให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

ขอกราบของพระคุณ นางสาวดวงจันทร์ เกษบุตร พี่นักศึกษาปริญญาโท ที่ช่วยให้คำปรึกษา แนะนำ ตลอดจนให้กำลังใจด้วยดีตลอดมาจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ นางสาวภัทรภร ทัศพงษ์ พี่นักวิจัย โครงการวิจัยพืชอาหารสัตว์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ช่วยสอนวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ จนทำให้ข้าพเจ้าสามารถนำไปใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ น้องนักศึกษาปริญญาตรี อันได้แก่ นางสาววิชิรา ศรีอุ่น และนางสาวนิวรรณพร เข็มทอง ที่ทุ่มเทให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูลในห้องปฏิบัติการ และให้กำลังใจในการทำวิจัยด้วยดีตลอดมา

สุดท้าย ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ครอบครัวของข้าพเจ้าสำหรับกำลังใจและช่วยสนับสนุนเงินทุนในการศึกษาด้วยดีตลอดมา

(นางสาวฉันทนา พรมจันทร์)
ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : อิทธิพลของซิลิกอนและโซเดียมคลอไรด์ต่ออัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงและการเจริญเติบโตของข้าว (*Oryza sativa* L.)

โดย : ฉันทนา พรมจันทร์

ชื่อปริญญา : ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา : เกษตรศาสตร์

ประธานกรรมการที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒน์ ธีระพงษ์ธนากร

ศัพท์สำคัญ : ซิลิกอน โซเดียมคลอไรด์ ข้าว สรีรวิทยา

การทดลองครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงและการเจริญเติบโตของข้าวภายใต้สภาวะที่ได้รับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โดยจัดการทดลองแบบ Factorial in Completely Randomized Design (CRD) จำนวน 3 ซ้ำ ประกอบด้วย 3 ปัจจัย คือ ปัจจัยที่ 1 พันธุ์ข้าว 2 พันธุ์ คือ ขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ปัจจัยที่ 2 ระดับ NaCl 3 ระดับ คือ 0, 50 และ 100 mM และปัจจัยที่ 3 ระดับ SiO_2 2 ระดับ คือ 0 และ 10 mM จากการศึกษา พบว่า ข้าวได้รับ NaCl 50 mM เป็นเวลา 3 ชม ถึง 28 วัน อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง อัตราการคายน้ำ ค่าการนำที่ปากใบ และปริมาณ CO_2 ใน substomatal ลดลง 10-25, 4-44, 8-54 และ 7-16 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อได้รับ NaCl 14 วันขึ้นไป พบพื้นที่ใบ น้ำหนักแห้งใบ กาบใบ และราก ลดลง 33-57, 26-47, 5-31 และ 38-61 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปริมาณไอออนในเนื้อเยื่อ พบว่า NaCl ทำให้ปริมาณ K^+ และซิลิก้า ในใบและกาบใบลดลง ขณะที่ปริมาณ Na^+ พบเกิดขึ้นในทิศทางตรงข้ามกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพันธุ์ พบว่า ในสภาพที่ได้รับเกลือ ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่า กข6 เนื่องจากมีปริมาณ Na ในใบและกาบในต่ำกว่าพันธุ์ กข6 สำหรับการให้ SiO_2 ในสภาพที่ได้รับเกลือเปรียบเทียบกับสภาพที่ได้รับเกลืออย่างเดียว พบว่า อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง และปริมาณ CO_2 ใน substomatal เพิ่มขึ้นเล็กน้อย น้ำหนักแห้งใบ และกาบใบเพิ่มขึ้น 1-7 และ 2-10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อัตราส่วน K/Na ในใบและกาบใบของข้าวสูงกว่าสภาพที่ได้รับ NaCl อย่างเดียว ผลดังกล่าวสรุปได้ว่า การให้ซิลิกอนในสภาวะที่ได้รับเกลือสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตและลักษณะทางสรีรวิทยาของข้าว โดยเพิ่มการดูด K^+ และยับยั้งการดูด Na^+ ในข้าว ดังนั้นจึงช่วยบรรเทาความเป็นพิษของเกลือที่มีต่อข้าวและเพิ่มความสามารถในการทนต่อเกลือให้ดีขึ้น

ABSTRACT

TITLE : EFFECT OF SILICON AND SODIUM CHLORIDE ON PHOTOSYNTHETIC RATE AND GROWTH OF RICE (*Oryza sativa* L.)

BY : CHANTANA PHROMCHAN

DEGREE : MASTER OF SCIENCE (AGRICULTURE)

MAJOR : PLANT SCIENCE

CHAIR : ASSOC. PROF. SUWAT TERAPONGTANAKORN, Ph.D.

KEYWORDS : SILICON / SODIUM CHLORIDE / RICE / PHYSIOLOGY

This experiment was conducted to investigate photosynthetic rate and growth of rice under silicon dioxide (SiO_2) and sodium chloride (NaCl) treatments. The 2x3x2 factors factorial in Completely Randomized Design (CRD) with three replication were used in this study. Two rice cultivars KDML105 and RD6 were factor A, three NaCl concentration 0, 50 and 100 mM were factor B and two SiO_2 concentration 0 and 10 mM were factor C respectively. The photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and CO_2 in substomatal of rice found significantly decreased 10-25, 4-44, 8-54 and 7-16 percentage respectively during 3 hrs to 28 days after treated 50 mM NaCl. At 14 days after 50 mM NaCl treatment, leaf area, leaf, leaf sheath and root dry weight of rice found decreased 33-57, 26-47, 5-31 and 38-61 percentage respectively. The K^+ and silica content in leaf and leaf sheath were decreased with NaCl treatment but Na^+ content found the opposite direction. KDML105 was growth rate higher than RD6 because Na^+ content in leaf and leaf sheaf lower than RD6. For SiO_2xNaCl interaction found, photosynthetic rate and CO_2 in substomatal were slight increased, leaf and leaf sheath dry weight were increased 1-7 and 2-10 percentage respectively. The K/Na selectivity in leaf and leaf sheath of all cultivars found higher than NaCl treatments. In conclusions, the silicon could improved growth and physiology of rice by enhance the uptake K^+ and inhibit the uptake of Na^+ under salt stress condition thus mitigating the toxicity of salt on rice and increasing the salt tolerance of plants.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	**ก**
บทคัดย่อภาษาไทย	**ค**
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	**ง**
สารบัญ	**จ**
สารบัญตาราง	**ญ**
สารบัญภาพ	**ฐ**
คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ	**ฒ**
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญในการทำวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย	2
1.3 สมมติฐานในการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	2
2 การตรวจเอกสาร	
2.1 ดินเค็ม	3
2.1.1 การจำแนกพื้นที่ดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	4
2.1.1.1 พื้นที่ดินเค็มจัด	4
2.1.1.2 พื้นที่ดินเค็มปานกลาง	4
2.1.1.3 พื้นที่ดินเค็มน้อย	4
2.1.1.4 พื้นที่ที่มีศักยภาพในการแพร่กระจายของดินเค็ม	4
2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทนเค็มของพืช	4
2.1.3 กลไกการทนเค็มของพืช	5
2.1.4 ผลของความเค็มที่มีต่อพืช	6
2.1.4.1 ผลของความเค็มต่อความสัมพันธ์น้ำ (water relation)	6
2.1.4.2 ผลของความเค็มเนื่องจากการเป็นพิษของไอออน (ions toxicity)	7

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.4.3 ผลของความเค็มต่อความไม่สมดุลของธาตุอาหารในพืช	8
2.1.5 ผลของเกลือต่อลักษณะทางสรีรวิทยาพืช	9
2.1.5.1 ผลของเกลือต่ออัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthetic rate)	10
2.1.5.2 ผลของเกลือต่อการหายใจ (respiration)	12
2.1.5.3 ผลของเกลือต่อความต้านทานภายในเซลล์พืช (resistance of plant cell)	13
2.1.5.4 ผลของเกลือต่ออัตราการคายน้ำ (transpiration rate)	13
2.1.6 ผลของความเค็มต่อการเจริญเติบโตของข้าว	13
2.1.7 กลไกการทนเค็มและการปรับตัวของข้าวเมื่อได้รับเกลือ	16
2.2 ซิลิกอน	18
2.2.1 ซิลิกอนในดิน	18
2.2.2 ซิลิกอนในพืช	19
2.2.2.1 การสะสมและการลำเลียงในพืช	19
2.2.2.2 บทบาทของซิลิกอนในเมแทบอลิซึมของพืช	21
2.2.3 ซิลิกอนกับธาตุอาหารพืช	21
2.2.4 บทบาทของซิลิกอนในด้านเป็นธาตุเสริมประโยชน์ต่อพืช	22
2.2.5 บทบาทของซิลิกอนต่อลักษณะทางสรีรวิทยา	24
2.2.6 บทบาทของซิลิกอนต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตในพืช	24
2.2.7 บทบาทของซิลิกอนต่อการทนเค็มของพืช	25
2.3 ลักษณะทั่วไปของพันธุ์ข้าวที่ใช้ในการศึกษา	28
2.3.1 ข้าวขาวดอกมะลิ105	28
2.3.2 ข้าว กข6	29
3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 การเตรียมต้นกล้า การปลูกข้าวในสารละลายอาหาร การเติมซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1 การเตรียมต้นกล้า	31
3.1.2 การปลูกข้าวในสารละลายอาหาร	31
3.1.3 การเติมซิลิกอนไดออกไซด์	31
3.1.4 การเติมโซเดียมคลอไรด์	31
3.2 วิธีการศึกษา แผนการทดลอง และการบันทึกผล	31
3.2.1 ศึกษาหาระดับความเข้มข้นของซิลิกอนที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของข้าว	31
3.2.1.1 การวางแผนการทดลองและวิธีการทดลอง	31
3.2.1.2 การบันทึกผลการทดลอง	32
3.2.1.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	32
3.2.2 การศึกษาอิทธิพลของซิลิกอนและโซเดียมคลอไรด์ต่ออัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงและการเจริญเติบโตของข้าว	32
3.2.2.1 การวางแผนการทดลองและวิธีการทดลอง	32
3.2.2.2 การบันทึกผลการทดลอง	33
3.2.2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	34
3.3 ระยะเวลาทำวิจัย	34
3.4 สถานที่ทำวิจัย	34
4 ผลการศึกษา	
4.1 ระดับซิลิกอนที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของข้าว	35
4.2 ผลของซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์ต่อลักษณะทางสรีรวิทยาของข้าว	36
4.2.1 อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง (A)	36
4.2.2 อัตราการคายน้ำ (E)	39
4.2.3 ค่าการนำที่ปากใบ (Gs)	41
4.2.4 ปริมาณ CO_2 ใน subtomatal (Ci)	43
4.3 ผลของซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์ต่อการเจริญเติบโตของข้าว	46
4.3.1 น้ำหนักแห้งใบ (leaf dry weight)	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 น้ำหนักแห้งกาบใบ (leaf sheath dry weight)	48
4.3.3 น้ำหนักแห้งราก (root dry weight)	50
4.3.4 พื้นที่ใบ (leaf area)	52
4.3.5 การแตกกอ	53
4.4 ผลการวิเคราะห์การเจริญเติบโตของข้าวหลังได้รับซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์	55
4.4.1 อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักแห้งรากต่อต้น (root-shoot ratio; C)	55
4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งใบกับพื้นที่ใบ (Specific Leaf Weight; SLW)	56
4.4.3 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative Growth Rate; RGR)	58
4.4.4 อัตราการสะสมน้ำหนักแห้งสุทธิ (Net Assimilation Rate; NAR)	60
4.5 ผลของซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์ต่อปริมาณการสะสมซิลิก้า โพแทสเซียม และโซเดียมในเนื้อเยื่อข้าว	64
4.5.1 ปริมาณซิลิก้าในใบ (silica uptake in leaf)	64
4.5.2 ปริมาณซิลิก้าในกาบใบ (silica uptake in leaf sheath)	65
4.5.3 ปริมาณซิลิก้าในราก (silica uptake in root)	67
4.5.4 ปริมาณโพแทสเซียมในใบ (K uptake in leaf)	69
4.5.5 ปริมาณโพแทสเซียมในกาบใบ (K uptake in leaf sheath)	71
4.5.6 ปริมาณโพแทสเซียมในราก (K uptake in root)	73
4.5.7 ปริมาณโซเดียมในใบ (Na uptake in leaf)	75
4.5.8 ปริมาณโซเดียมในกาบใบ (Na uptake in leaf sheath)	77
4.5.9 ปริมาณโซเดียมในราก (Na uptake in root)	80
4.5.10 อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมต่อโซเดียมในใบ (K/Na ratio in leaf)	81
4.5.11 อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมต่อโซเดียมในกาบใบ (K/Na ratio in leaf sheath)	83

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.12 อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมต่อโซเดียมในราก (K/Na ratio in root)	85
5 อภิปรายผลการทดลอง	
5.1 ผลของซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์ต่อลักษณะทางสรีรวิทยาของข้าว	96
5.1.1 อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง	96
5.1.2 อัตราการคายน้ำ	97
5.1.3 ค่าการนำที่ปากใบ และปริมาณ CO_2 ใน substomatal	98
5.2 ผลของซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์ต่อการเจริญเติบโตของข้าว	100
5.2.1 น้ำหนักแห้งใบ กาบใบ และราก	100
5.2.2 พื้นที่ใบกับความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งใบต่อพื้นที่ใบ (SLW)	102
5.2.3 อัตราการสะสมน้ำหนักแห้งสุทธิและอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์	103
5.3 ผลของซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์ต่อปริมาณการสะสมไอออนในเนื้อเยื่อพืช	105
5.3.1 ปริมาณ Na, K และ silica ที่สะสมในใบ กาบใบ และราก	105
6 สรุป	**109**
เอกสารอ้างอิง	**110**
ภาคผนวก	
ก การเตรียมสารและวิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารในพืช	120
ข ภาพผลการทดลอง	125
ประวัติผู้วิจัย	**126**

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่		
1	น้ำหนักแห้งใบ กาบใบ และรากของข้าวทั้งสองพันธุ์ เฉลี่ยตลอดการทดลองที่ได้รับ SiO_2 0, 5, 10, 15 และ 20 mM	35
2	อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง (A) อัตราการคายน้ำ (E) ค่าการนำที่ปากใบ (Gs) และ ปริมาณ CO_2 ใน substomatal (Ci) ของข้าวทั้งสองพันธุ์ เฉลี่ยตลอดการทดลองเมื่อได้รับ SiO_2 0, 5, 10, 15 และ 20 mM	36
3	อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง ($\mu mol.m^{-2}s^{-1}$) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ถึง 28 วัน	38
4	อัตราการคายน้ำ ($mmol.m^{-2}s^{-1}$) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ถึง 28 วัน	40
5	ค่าการนำที่ปากใบ ($mol.m^{-2}s^{-1}$) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ถึง 28 วัน	42
6	ปริมาณ CO_2 ใน substomatal (vpm) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ถึง 28 วัน	45
7	น้ำหนักแห้งใบ (กรัม/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1-28 วัน	47
8	น้ำหนักแห้งกาบใบ (กรัม/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1-28 วัน	49
9	น้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1-28 วัน	51
10	พื้นที่ใบ ($ซม^2$) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1-28 วัน	54
11	อัตราส่วนน้ำหนักแห้งรากต่อน้ำหนักแห้งส่วนต้นของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1-28 วัน	57
12	อัตราส่วนน้ำหนักแห้งใบต่อพื้นที่ใบ ($มก/ซม^2$) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1-28 วัน	59

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
13	อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (กรัม/กรัม-วัน) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1-28 วัน	61
14	อัตราการสะสมน้ำหนักแห้งสุทธิ (กรัม/ซม^2-วัน) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1-28 วัน	63
15	ปริมาณซิลิก้าในใบ (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6)หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน	66
16	ปริมาณซิลิก้าในกาบใบ (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน	68
17	ปริมาณซิลิก้าในราก (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา1, 14 และ 28 วัน	70
18	ปริมาณโพแทสเซียมในใบ (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน	72
19	ปริมาณโพแทสเซียมในกาบใบ (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน	74
20	ปริมาณโพแทสเซียมในราก (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน	76
21	ปริมาณโซเดียมในใบ (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน	78
22	ปริมาณโซเดียมในกาบใบ (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน	79
23	ปริมาณโซเดียมในราก (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน	82
24	อัตราส่วนของโพแทสเซียมต่อโซเดียมในใบของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน	84

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณซิลิกอนในสารละลายดิน	19
2	อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง ($\mu mol.m^{-2}s^{-1}$) อัตราการคายน้ำ ($mmol.m^{-2}s^{-1}$) ค่าการนำที่ปากใบ ($mol.m^{-2}s^{-1}$) และปริมาณ CO_2 ใน substomatal (vpm) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ถึง 28 วัน	89
3	น้ำหนักแห้งส่วนใบ กาบใบ และราก (กรัม/ต้น) ของข้าว ขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับเกลือซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1-28 วัน	90
4	พื้นที่ใบ ($ซม^2$) จำนวนหน่อต่อกอ น้ำหนักแห้งรากต่อน้ำหนักแห้งส่วนต้น (root/shoot ratio) และน้ำหนักแห้งใบต่อพื้นที่ใบ ($มก/ซม^2$) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์ เป็นเวลา 1-28 วัน	91
5	อัตราการสะสมน้ำหนักแห้งสุทธิ ($มก/วัน.ซม^2$) และอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (กรัม/วัน) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1-28 วัน	92
6	ปริมาณการสะสมซิลิก้าในใบ กาบใบ และราก (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1-28 วัน	93
7	ปริมาณการสะสมโพแทสเซียมในใบ กาบใบ และราก (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1-28 วัน	94
8	ปริมาณการสะสมโซเดียมในใบ กาบใบ และ ราก (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1-28 วัน	95
9	สภาพเรือนทดลองและการวางกระถางในเรือนทดลอง	125

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่		
10	เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) ในสภาพที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM กับสภาพที่ได้รับ NaCl 50 และ100 mM ร่วมกับ Si 10 mM	125

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
25	อัตราส่วนของโพแทสเซียมต่อโซเดียมในกาบใบ ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน	87
26	อัตราส่วนของโพแทสเซียมต่อโซเดียมในราก ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน	88
27	น้ำหนักสารและสารเคมีที่ต้องใช้ในการเตรียมสารละลายอาหารเข้มข้น (Stock solution) ปริมาตร 1 ลิตร	121
28	ปริมาตรของสารละลาย SiO_2 เข้มข้น 1 M ที่ต้องใช้ต่อสารละลายอาหาร 2.5 ลิตร ตามความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 1	121
29	ปริมาตรของสารละลาย NaCl เข้มข้น 1 M ที่ต้องใช้ต่อสารละลายอาหาร 2.5 ลิตร ตามความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 2	122

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

กก	กิโลกรัม
ชม	ชั่วโมง
ซม	เซนติเมตร
ซม^2	ตารางเซนติเมตร
มก	มิลลิกรัม
มม	มิลลิเมตร
มล	มิลลิลิตร
A	photosynthetic rate
AR	Analytical grade
ATP	adenosine triphosphate
C	Coefficient
°C	องศาเซลเซียส
Ci	ปริมาณ CO_2 ใน substomatal
cm^3	ตารางเซนติเมตร
CRD	Completely Randomized Design
dS/m	เดซิซีเมนต่อเมตร
E	transpiration rate
EC	Electrical conductivity
ESP	exchange sodium percentage
Fv/Fm	The maximal quantum yield of photochemical at phtosystem II
Gs	stomatal conductance to water vapour
KDML105	ข้าวขาวดอกมะลิ105
kg/ha	กิโลกรัมต่อเฮกตาร์
LA	leaf area
LSD	least significant difference
M	โมลาร์
mg	มิลลิกรัม
mM	มิลลิโมล

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

mg/dm^3	มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร
mg/l	มิลลิกรัมต่อลิตร
µM	ไมโครโมล
$\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$	ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที
mmho/cm	มิลลิโมห์ต่อเซนติเมตร
$mmol\ m^{-2}s^{-1}$	มิลลิโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที
$mol\ m^{-2}s^{-1}$	โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที
MSBLAST	Mass Spectrometry BLAST
mS/cm	มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร
NADPH	nicotinamide adenine dinucleotide phosphate
NAR	net assimilation rate
nM	นาโนเมตร
PBFI	potassium-binding benzofuran isophthalate
ppm	parts per million
RGR	relative growth rate
RD6	ข้าว กข6
SBFI	sodium-binding benzofuran isophthalate
SLW	specific leaf weight
S/m	ซีเมนต่อเมตร
vpm	volumes per million
WUE	water use efficiency
%	เปอร์เซ็นต์

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญในการทำวิจัย

ข้าว (*Oryza sativa* L.) จัดเป็นพืชที่ทนเค็มได้ปานกลาง สามารถปลูกได้ในพื้นที่เค็มน้อยจนถึงปานกลาง อย่างไรก็ตามพันธุ์ข้าวแต่ละพันธุ์ตอบสนองต่อเกลือแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระยะการเจริญเติบโต ระยะเวลาที่ได้รับเกลือ ความเข้มข้นของเกลือในดิน และลักษณะประจำพันธุ์ของข้าวแต่ละพันธุ์ สำหรับความเสียหายเมื่อพืชได้รับเกลือ Greenway และ Munns (1980) รายงานว่าเกลือมีผลต่อการลดการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบ 3 ประการคือ ความสัมพันธ์ของน้ำ (water relation) ความจำเพาะของไอออนที่พืชได้รับ (specific ions effects) และการลดการลำเลียงของสารละลายภายในต้นพืช (reduced transport of solute) จากผลดังกล่าวนี้ทำให้ข้าวที่ได้รับเกลือต้องมีการปรับกลไกทางสรีระโดยการลดค่าการนำที่ปากใบ (stomatal conductance) (Flower *et al.*, 1985) ส่งผลกระทบต่อการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ทางปากใบเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ตลอดจนการระเหยของน้ำทางปากใบข้าวลดลง (Yeo *et al.*, 1999)

การศึกษากลไกการปรับตัวให้ทนต่อสภาวะที่ได้รับความเครียดเกลือโดยการเสริมธาตุซิลิกอนในรูปของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ให้ข้าวในระยะต้นกล้า เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ช่วยลดการซึมผ่านของโซเดียมไอออนเข้าสู่รากของข้าวได้ และยังส่งผลให้ค่าการนำที่ปากใบ อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้น ขณะที่อัตราการคายน้ำของข้าวก็ลดลงด้วย (Ahmad *et al.*, 1992; Yeo *et al.*, 1999) กลไกการปรับตัวของข้าวดังกล่าวเป็นกลไกหนึ่งที่ช่วยให้ข้าวสามารถเจริญเติบโตในสภาวะที่ได้รับความเครียดได้ ดังนั้นการศึกษาผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์และซิลิกอนต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสรีรวิทยาของข้าวในระยะต้นกล้าจึงเป็นการหาโอกาสเพื่อปรับปรุงต้นกล้าข้าวให้สามารถทนต่อความเค็มได้ โดยอาศัยลักษณะทางสรีรวิทยา การสะสมไอออน ตลอดจนอัตราการเจริญเติบโตที่เปลี่ยนแปลงไปในข้าวพันธุ์ไทย 2 พันธุ์ ซึ่งเป็นพันธุ์ที่เกษตรกรในภาคอีสานนิยมปลูก คือ ข้าวพันธุ์เจ้าขาวดอกมะลิ105 และพันธุ์ข้าวเหนียว กข6 โดยแบ่งการศึกษาเป็น 2 ตอน ตอนที่ 1 ศึกษาอิทธิพลของซิลิกอนและระดับซิลิกอนที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการปรับตัวทางสรีรวิทยาบางประการของข้าว จนได้ระดับซิลิกอนที่เหมาะสมจึงนำมาใช้ในการศึกษาตอนที่ 2 ซึ่งศึกษาอิทธิพลของซิลิกอนและโซเดียมคลอไรด์ต่อลักษณะทางสรีรวิทยาบางประการและการเจริญเติบโตของข้าว

1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย

1.2.1 เพื่อหาระดับของซิลิกอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของข้าวในระยะต้นกล้าถึงระยะแตกกอ

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์ต่อการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงทางด้านสรีรวิทยาบางประการ ตลอดจนการเลือกดูดธาตุอาหารของข้าวในระยะต้นกล้าถึงระยะแตกกอ

1.3 สมมติฐานในการวิจัย

1.3.1 เมื่อข้าวได้รับโซเดียมคลอไรด์ ลักษณะทางสรีรวิทยาเปลี่ยนแปลงไปและการเติบโตลดลง

1.3.2 เมื่อข้าวได้รับซิลิกอนไดออกไซด์ในสภาวะที่ได้รับความเครียดเกลือ ข้าวมีการปรับตัวทางสรีรวิทยาและการเจริญเติบโตที่ดีขึ้น

1.3.3 ความแตกต่างระหว่างพันธุ์มีการตอบสนองต่อซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาลักษณะการเจริญเติบโต ลักษณะทางสรีรวิทยาบางประการ ปริมาณการสะสมธาตุโพแตสเซียม โซเดียม และซิลิก้าในข้าวระยะต้นกล้าถึงระยะแตกกอ หลังจากได้รับซิลิกอนไดออกไซด์และเกลือโซเดียมคลอไรด์ 1, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.5.1 การศึกษาอิทธิพลของซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์ต่อการปรับตัวทางด้านสรีรวิทยาและการเติบโตของข้าว สามารถนำมาใช้เป็นความรู้พื้นฐานในการคัดเลือกพันธุ์ข้าวทนเค็ม นอกจากนี้ปฏิสัมพันธ์ร่วม (interaction) ระหว่างปัจจัยดังกล่าว อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับความสามารถทนเค็มของข้าวได้

1.5.2 การศึกษานี้สามารถใช้เป็นความรู้พื้นฐาน เพื่อประยุกต์ใช้ในการจัดการเรื่องธาตุอาหารให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของข้าว เมื่อปลูกในพื้นที่ดินเค็ม

1.5.3 เทคนิคการศึกษาด้านสรีรวิทยาของพืช สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาสำหรับนักศึกษาและผู้ที่สนใจเพื่อมาประยุกต์ใช้เชิงงานทดลองด้านสรีรวิทยาพืชได้

บทที่ 2
การตรวจเอกสาร

2.1 ดินเค็ม

ดินเค็ม (saline soil) เป็นดินที่มีปริมาณเกลือที่ละลายอยู่ในสารละลายดินมากเกินไป จนก่อให้เกิดความเสียหายต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตพืช เกลือในดินเป็นสารประกอบระหว่างอนุภาคที่มีประจุบวกได้แก่ โซเดียม แมกนีเซียม กับอนุภาคที่ประจุลบ เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต ไบคาร์บอเนต และไนเตรท เช่น เกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แคลเซียมซัลเฟต (Ca_2SO_4) แมกนีเซียมไบคาร์บอเนต ($Mg(HCO_3)_2$) และโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) (สุวัฒน์, 2544) เกลือเหล่านี้เมื่อละลายอยู่ในสารละลายดินจะส่งผลให้ค่า pH ของดินแตกต่างกัน อาจเป็นกลาง เป็นกรดอ่อน หรือเป็นด่างอ่อนก็ได้ ดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นเกลือโซเดียมคลอไรด์ แต่ดินเค็มชายทะเลมีแมกนีเซียมในรูปคลอไรด์และซัลเฟตมากกว่า (เพิ่มพูน, 2527)

การวัดระดับความเค็มของดินมีหลายวิธี แต่ที่นิยมทั่วไปมักใช้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายในดิน (Electrical Conductivity; EC) มีหน่วยเป็นโมห์ต่อเซนติเมตร (mho/cm) หรือในระบบสากลใช้เป็นหน่วย ซีเมน (siemen) ต่อเมตร (S/m) หรือ เดซิซีเมน (decisiemen) ต่อเมตร (dS/m) โดยที่ 1 ซีเมน เท่ากับ 1 โมห์ (mho) ดังนั้น 1 ซีเมนต่อเมตร เท่ากับ 10 มิลลิโมห์ต่อเซนติเมตร (mmho/cm) การวัดค่าการนำไฟฟ้าทำได้โดยการวัดน้ำที่สกัดจากดินที่ทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งมีลักษณะคล้ายดินโคลนแฉะ ที่อุณหภูมิ 25 °C ถ้าค่าสูงกว่า 2 มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร (mS/cm) ให้จัดว่าเป็นดินเค็ม (ยงยุทธ, 2543) หรืออาจใช้ค่าเปอร์เซ็นต์โซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน (exchange sodium percentage; ESP) เป็นค่าวัดความเค็มของดิน

ค่าการนำไฟฟ้าของเกลือที่ละลายน้ำ วัดได้จากเครื่อง electrical conductivity meter ซึ่งสามารถแปรค่าที่วัดได้ ดังนี้ (อรุณี, 2550)

น้ำ 1 dS/m = 1 mS/cm = 1,000 µS/cm =1,000 µmho/cm = 640 mg/l = 640 ppm

10,000 ppm = 1 เปอร์เซ็นต์

2.1.1 การจำแนกพื้นที่ดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (อาทิตย์า, 2543; กรมพัฒนาที่ดิน อ้างใน สุวัฒน์, 2544)

2.1.1.1 พื้นที่ดินเค็มจัด ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ว่างเปล่าไม่มีการเกษตร ดินมีค่าการนำ-ไฟฟ้ามากกว่า 16 เดซิซีเมนต่อเมตร บริเวณผิวดินมีเกลือจับตัวมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด มีพื้นที่ทั้งหมดประมาณ 1.5 ล้านไร่ พืชที่ขึ้นได้มักเป็นวัชพืชที่ทนเค็มได้ดี เช่น หญ้าแห้วหมู หญ้าชันอากาศ หญ้านวลน้อย เป็นต้น

2.1.1.2 พื้นที่ดินเค็มปานกลาง เป็นพื้นที่ลุ่มที่ได้รับเกลือรุนแรงปานกลาง ในฤดูแล้งความเค็มของดินอยู่ระหว่าง 8-16 เดซิซีเมนต่อเมตร พบคราบเกลือบนผิวดิน 10-50 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ ส่วนใหญ่เป็นนาข้าวแต่ต้นข้าวมักตายเป็นจำนวนมากตั้งแต่ระยะต้นกล้า ส่วนต้นที่รอดตายก็ให้ผลผลิตต่ำมาก มีพื้นที่ประมาณ 3.7 ล้านไร่

2.1.1.3 พื้นที่ดินเค็มน้อย เป็นพื้นที่ลุ่มที่มีเกลือสะสมอยู่เล็กน้อย ไม่พบคราบเกลือตามผิวดิน หรือถ้าพบก็มีไม่มากประมาณ 1-10 เปอร์เซ็นต์ ของพื้นที่ ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 4-8 เดซิซีเมนต่อเมตร แหล่งน้ำมักจะเค็มด้วย ส่วนใหญ่เป็นนาข้าวที่ให้ผลผลิตต่ำกว่าปกติ มีพืชอื่นขึ้นประปราย มีพื้นที่ประมาณ 12.6 ล้านไร่

2.1.1.4 พื้นที่ที่มีศักยภาพในการแพร่กระจายของดินเค็ม ส่วนใหญ่อยู่ในบริเวณที่สูงเป็นเนิน ค่าการนำไฟฟ้าของดินอยู่ในช่วง 2-4 เดซิซีเมนต่อเมตร ที่ผิวดินไม่พบคราบเกลือแต่ในชั้นดินลึกลงไปไม่มากจะมีชั้นหินทรายและหินดินดานที่มีเกลือเป็นองค์ประกอบ เมื่อชั้นหินที่มีเกลือสลายตัวจะถูกน้ำชะล้างไปทำให้เกิดการแพร่กระจายตัวของเกลือไปสู่บริเวณที่ราบลุ่มซึ่งส่วนใหญ่เป็นนาข้าว จนกลายเป็นพื้นที่ดินเค็มเพิ่มขึ้น พื้นที่ลักษณะนี้มีประมาณ 19.4 ล้านไร่

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทนเค็มของพืช (สุวัฒน์, 2544)

2.1.2.1 ชนิดของพืช

1) พืชไม่ชอบเกลือ (non-halophyte หรือ glycophyte) เป็นพืชที่มีถิ่นอาศัยในพื้นที่ทั่วไป ตัวอย่างเช่น กลุ่มพืชไร่ ไม้ผล ไม้ดอกไม้ประดับ พืชผัก ตลอดจนไม้ยืนต้นหลายชนิด พืชพวกนี้สามารถจำแนกได้ตามความสามารถในการเจริญเติบโตและการปรับตัวได้ ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือแตกต่างกัน แบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ พืชไม่ทนเค็ม (salt-sensitive species) พืชทนเค็มปานกลาง (moderately-tolerant species) และพืชทนเค็ม (salt-tolerant species)

2) พืชชอบเกลือ (halophyte) เป็นพืชที่มีถิ่นอาศัยในพื้นที่ดินเค็มที่มีเกลือในปริมาณสูง โดยเฉพาะพื้นที่ในแถบชายทะเลและป่าชายเลน ชนิดพืชที่พบได้แก่ แสม โกงกาง เป็นต้น

2.1.2.2 ระยะการเจริญเติบโตของพืช โดยทั่วไประยะที่พืชได้รับความเสียหายจากเกลือและทำให้เกิดผลเสียหายต่อการเจริญเติบโตและผลผลิต คือ ระยะต้นกล้า (seedling) และระยะผสมเกสร (fertilization)

2.1.2.3 ชนิดของเกลือที่พืชได้รับ อาจเป็นเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แคลเซียมซัลเฟต (Ca_2SO_4) แมกนีเซียมไบคาร์บอเนต ($Mg(HCO_3)_2$) และโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ทั้งนี้หากพิจารณาจากปริมาณเกลือที่ละลายได้ในน้ำ 1 ลิตร พบว่า Na_2SO_4 มี ปริมาณเกลือมากที่สุด รองลงมา คือ $NaHCO_3$ Ca_2SO_4 NaCl และ $Mg(HCO_3)_2$ ตามลำดับ (อรุณี, 2550)

2.1.2.4 ระดับความเค็มที่พืชได้รับ พืชแต่ละชนิดมีความสามารถในการทนเค็มได้แตกต่างกัน ทั้งนี้อาจพิจารณาจากระดับความเข้มข้นของเกลือวิกฤต (critical concentration of salt) ที่มีผลเสียหายต่อการเจริญเติบโตของพืช

2.1.2.5 ระยะเวลาที่พืชได้รับเกลือ อาจจำแนกเป็นการได้รับเกลือในช่วงเวลาสั้น (short-term) เป็นวัน หรือสัปดาห์ หรือช่วงเวลาที่ยาวนาน (long-term) อาจเป็นหลายสัปดาห์ เดือน หรือตลอดชีพจักร (life cycle) ของพืช โดยเฉพาะพืชที่ได้รับเกลือเป็นเวลานานจะได้รับความเสียหายต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตได้มากกว่า

2.1.2.6 ฤดูกาล มีผลทางอ้อมในการทำให้เกิดความเข้มข้นของเกลือหรือความเจือจางของเกลือที่พืชได้รับ ตัวอย่างเช่น ในฤดูแล้ง พืชที่ปลูกได้รับความเสียหายมากกว่าฤดูฝน เนื่องจากในสภาวะที่พืชขาดน้ำหรือกระทบแล้ง ความเข้มข้นของเกลือในสารละลายดินมีมากขึ้น เพราะเกลือในชั้นใต้ดินสามารถระเหยขึ้นสู่ชั้นหน้าดิน พืชที่ปลูกในฤดูแล้งหรือในระยะที่ฝนทิ้งช่วงจึงได้รับความเสียหายมากกว่าการปลูกในฤดูฝน

2.1.3 กลไกการทนเค็มของพืช

สมศรี (2539) รายงานว่าพืชที่ขึ้นได้ในดินเค็มต้องมีกลไกบางอย่างเพื่อบรรเทาความเป็นพิษของเกลืออาจแบ่งได้ 3 ลักษณะใหญ่ๆ คือ การไม่ดูดเกลือเข้าไป การดูดเกลือเข้าไปสะสมเอาไว้ และการคายเกลือออกมา (salt excretion) พืชที่จัดอยู่ในลักษณะแรกที่ไม่ดูดเกลือเข้าไปหรือการหลีกเลี่ยงความเค็มหรือหนีความเค็ม พืชจะพยามปรับตัวเองให้เข้ากับสภาพดินเค็ม ได้แก่ การปรับระบบโครงสร้างของรากให้แผ่กระจายไปยังจุดที่เค็มน้อยกว่า หรือปรับตัวให้ออกดอกช้าหรือเร็วกว่าปกติในขณะที่ดินมีความเค็มลดลงเพื่อหนีช่วงที่ดินเค็มจัด หรืออาจจะมีการฟื้นตัวอย่างรวดเร็วเมื่อความเค็มลดลง สำหรับพืชทนเค็มลักษณะที่สองที่ดูดเกลือเข้าไป เมื่อดูดเกลือเข้าไปอาจจะนำไปสะสมอยู่ในส่วนที่ไม่เป็นอันตรายต่อพืช เช่น สะสมในแวคิวโอล (vacuole) หรือเพิ่มความหนาของใบและการสร้างสารเคลือบใบ มีกลไกอวบน้ำเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำในเซลล์เพื่อให้ความ

เข้มข้นของเกลือลดลง หรือเพิ่มความเครียดที่ปากใบเพื่อให้การคายน้ำน้อยลง นอกจากนี้ยังมีการเลือกดูดธาตุโพแทสเซียมเข้าไปมากขึ้นหรือดูดโซเดียมน้อยลง มีการขนย้ายธาตุโซเดียมจากใบอ่อนไปยังใบแก่ หรือสามารถสะสมธาตุโซเดียมไว้ตามลำต้นและรากแทนการสะสมที่ใบ ส่วนพืชลักษณะที่สามจะมีต่อมเกลือเพื่อสะสมเกลือไว้ ลักษณะดังกล่าวเป็นกลไกของพืชที่สามารถปรับตัวเองให้เข้ากับสภาพความเค็มเพื่อความอยู่รอด โดยพืชชนิดหนึ่งๆ อาจจะมีลักษณะเดียวหรือมีหลายลักษณะรวมกันก็ได้

จากการรวบรวมการศึกษาปริมาณการสะสมโซเดียมในพืชที่ปลูกในพื้นที่ดินเค็ม มีรายงานว่า ถั่วลิสงมีการสะสมโซเดียมมากในราก รองลงมาคือ ต้น และ ใบ ตามลำดับ ในส้มพบการสะสมในส่วนรากมากกว่าต้น เช่นเดียวกับอาโวกาโด พบการสะสมในส่วนของรากมากกว่าต้นเช่นกัน (Heimann and Ratner, 1963; Jones and Peason, 1952; Martin and Bingham, 1954 อ้างใน อาทิตย์ยา, 2543) จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าธรรมชาติของพืชเมื่อได้รับโซเดียมในปริมาณมากจนเกินไปจะมีการดูดธาตุโซเดียมไปสะสมไว้ที่รากในปริมาณที่สูง ส่วนที่ใบมีการสะสมอยู่น้อย เนื่องจากใบเป็นส่วนที่สร้างอาหารโดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

2.1.4 ผลของความเค็มที่มีต่อพืช

2.1.4.1 ผลของความเค็มต่อความสัมพันธ์น้ำ (water relation)

ในสภาวะที่พืชได้รับความเครียดเกลือในพื้นที่ดินเค็ม ปริมาณเกลือที่ละลายออกมาทำให้ค่าศักย์ของน้ำในสารละลายดินต่ำกว่าปกติ ดังนั้นจึงเป็นอุปสรรคต่อกิจกรรมภายในต้นพืช อาทิเช่น กระบวนการลำเลียงน้ำและธาตุอาหารของพืช การรักษาความเต่งภายในเซลล์ ตลอดจนการยืดตัวของเซลล์ (cell elongation)

Seaman (2004) รายงานว่าพืชส่วนใหญ่ที่ได้รับความเสียหายจากดินเค็ม สาเหตุหลักมาจากผลกระทบที่เกิดกับลักษณะทางสรีรวิทยาหลายๆ ลักษณะพร้อมกัน เนื่องมาจากความสามารถในการดูดน้ำมาใช้ลดลง เพราะพืชต้องใช้พลังงานมากกว่าปกติเพื่อดูดน้ำและธาตุอาหารมาใช้ในการเจริญเติบโต เกลือในดินทำให้น้ำในดินมีแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) เพิ่มขึ้นและความต่างศักย์ของน้ำ (water potential) ลดลง เป็นสาเหตุให้การเจริญเติบโตลดลงอย่างรวดเร็ว และยังชักนำให้กระบวนการเมแทบอลิซึมในพืชเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งอาการที่ปรากฏมักคล้ายกับอาการพืชขาดน้ำ

Netondo และคณะ (2004a) ทดสอบการตอบสนองต่อเกลือโซเดียม คลอไรด์ในข้าวฟ่าง 2 พันธุ์ คือ Serena และ Seredo โดยศึกษาการเจริญเติบโต ความสัมพันธ์น้ำ (water relation) และการสะสมไอออนในเนื้อเยื่อ พบว่า เกลือทำให้อัตราการเจริญเติบโตของข้าวฟ่างทั้งสองพันธุ์ลดลง โดยพันธุ์ Seredo มีน้ำหนักแห้งสูงกว่าพันธุ์ Serena การเจริญเติบโตที่ลดลงนี้มี

ความสัมพันธ์กับ ศักย์ของน้ำ (water potential) และศักย์ออสโมติก (osmotic potential) ที่ลดลง พร้อมกับความดันออสโมติก (osmotic pressure) ที่เพิ่มขึ้น เมื่อข้าวฟ่างได้รับความเครียดเกลือ ที่ความเข้มข้น NaCl 150 mM ขึ้นไป ทำให้การสะสม Na^+ ในเนื้อเยื่อเพิ่มขึ้น ซึ่งความเป็นพิษของไอออนดังกล่าวอาจเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้การเจริญเติบโตของข้าวฟ่างทั้งสองพันธุ์ลดลง

2.1.4.2 ผลของความเค็มเนื่องจากการเป็นพิษของไอออน (ions toxicity)

ดินเค็มมักพบไอออนของเกลือ ละลายอยู่ในสารละลายดินในปริมาณที่มาก ซึ่งไอออนดังกล่าวไม่เป็นประโยชน์โดยตรงต่อพืชโดยเฉพาะพืชกลุ่มที่ไม่ทนเค็ม (glycophyte) ดังนั้นหากพืชได้รับเกลือเข้าสู่ต้นพืชในปริมาณมากย่อมเกิดความเป็นพิษต่ออวัยวะที่พืชนำธาตุเหล่านี้ไปสะสมไว้ โดยส่วนใหญ่พืชจะแสดงอาการขอบใบไหม้ และลุกลามเข้าเส้นกลางใบในที่สุด ไอออนของเกลือที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของพืชได้แก่ Na^+, Mg^{+2}, Cl^-, CO_3^{-2} และ SO_4^{-2} (อรุณี, 2550)

โซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้พืชตรึง CO_2 ลดลง และการสังเคราะห์โปรตีนลดลง โซเดียมที่สะสมมากในใบ มีผลทำให้ใบไหม้ เนื้อเยื่อขอบใบตาย ในสภาพอากาศร้อนและแห้งจะแสดงความเสียหายอย่างรวดเร็ว อาการเป็นพิษเกิดที่ใบแก่ก่อน เริ่มที่ปลายใบ ขอบใบ แล้วลามมาที่เส้นกลางใบ นอกจากนี้การมีโซเดียมสะสมปริมาณมากทำให้พืชเกิดอาการขาดแคลเซียม โพแทสเซียมและแมกนีเซียมด้วย (อรุณี, 2550)

รัชดา (2544) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของหญ้าปากควายที่เพาะเลี้ยงในหลอดทดลองเติมเกลือ NaCl 0.125, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 และ 4.0 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 6 สัปดาห์ พบว่า ปริมาณ Na^+ ที่ส่วนยอดและปริมาณ Cl^- ในใบแก่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับเกลือที่ความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป ส่วนที่ราก Na^+ และ Cl^- เพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป ขณะที่ปริมาณ K^+ ทั้งในส่วนยอดและรากลดลง อย่างไรก็ตามพืชสามารถรักษาระดับปริมาณ K^+ ให้ใกล้เคียงกันเมื่อได้รับเกลือ 1.0-2.0 เปอร์เซ็นต์ ส่วนปริมาณ Ca^{+2} ทั้งส่วนยอดและรากเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับเกลือ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ค่า osmolality ของสารละลายเซลล์จากส่วนยอดเพิ่มขึ้นซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณ Na^+ และ Cl^- ที่เพิ่มขึ้น เมื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ proline และ glycine betaine จากส่วนยอด และค่า osmolality ของสารละลายที่สกัดจากใบ พบว่า เมื่อได้รับเกลือ 0.125-2.0 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 10 วัน ปริมาณ proline และ glycine betaine เพิ่มขึ้น จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า การทนเค็มของหญ้าปากควายอาจอาศัยการปรับค่า osmotic potential โดยสะสม Na^+ และ Cl^- ไว้ในส่วนยอด มี proline และ glycine betaine เป็นตัวถูกละลายที่สะสมในไซโตพลาสซึม นอกจากนี้ก็มีการขับไอออนบางส่วนออกทางต่อมเกลือ และมีการสะสม Cl^- ปริมาณมากไว้ที่ใบแก่

Halperin และ Lynch (2003) ศึกษาอิทธิพลของความเค็มต่อการสะสม Na^+ และ K^+ ในไซโตพลาสซึม ของขนราก *Arabidopsis thalina* โดยวิธี Fluorescent dyes SBFI และ PBFI โดยให้ NaCl ทางราก ที่ระดับความเข้มข้น 0, 30, 60 และ 90 mM ร่วมกับการให้ Ca ที่ระดับ 0.5, 2.0 และ 5.0 mM พบว่า การสะสม Na^+ ในไซโตพลาสซึมเพิ่มขึ้น ขณะที่การสะสม K^+ ลดลงตามความเข้มข้นของ NaCl ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นของ NaCl 90 mM ทำให้การสะสม K^+ ลดลงต่ำสุด การให้ Ca ที่ความเข้มข้น 5.0 mM ทำให้การสะสม Na^+ และ K^+ ในไซโตพลาสซึมลดลง ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการให้ Ca ช่วยลดความเข้มข้นของ Na^+ ในเซลล์พืชได้

2.1.4.3 ผลของความเค็มต่อความไม่สมดุลของธาตุอาหารในพืช

ในดินที่มีเกลือละลายอยู่ในปริมาณมากบ่อยครั้งที่พืชจะแสดงอาการขาดธาตุอาหารที่จำเป็น ทั้งนี้เนื่องจากไอออนของเกลือที่มีอยู่มากในสารละลายดินทำให้สมดุลของธาตุอาหารพืชสูญเสียไปเนื่องจากภาวะปฏิปักษ์ (antagonism) ระหว่างไอออนที่เป็นสาเหตุของดินเค็มกับไอออนที่เป็นธาตุอาหารพืช (สมศรี, 2539) นอกจากนี้ในดินเค็มที่มี pH สูง ทำให้ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารบางตัวลดลง เกิดผลเสียต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น ระดับ pH ระหว่าง 6-7 ฟอสเฟตอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช แต่ที่ระดับ pH มากกว่า 7 ธาตุอาหารพวกเหล็ก แมงกานีส ทองแดง สังกะสี และโคบอลท์ อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์แก่พืชได้น้อย (อรุณี, 2550) ซึ่งโดยทั่วไปค่า pH ที่เหมาะสมต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชอยู่ในช่วง 5.5-6.5 (สุวัฒน์, 2544)

Khan และคณะ (2000) ศึกษาอิทธิพลของเกลือต่อการเจริญเติบโต ความสัมพันธ์น้ำ ปริมาณ glycine betaine และการสะสมไอออนใน *Atriplex griffithii* พันธุ์ Stocksii ซึ่งเป็นพืชที่อยู่ในกลุ่ม halophyte โดยปลูกในกระถางรดด้วย NaCl ที่ความเข้มข้น 0, 90, 180 และ 360 mM เก็บข้อมูลหลังจากให้ NaCl 30, 60 และ 90 วัน พบว่า น้ำหนักแห้งรวมลดลงเมื่อได้รับ NaCl 360 mM ส่วนที่ความเข้มข้น 90 mM พบการเจริญและความหนาแน่นของรากเพิ่มขึ้น ศักย์น้ำและศักย์ออสโมติกในต้นเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นและระยะเวลาที่ได้รับ ปริมาณ Na^+ และ Cl^- ทั้งในต้นและรากลดลงตามความเข้มข้นของ NaCl ที่เพิ่มขึ้น Ca^{+2}, K^+ และ Mg^{+2} ในต้นและรากลดลง ความเข้มข้นของ glycine betaine ในรากต่ำ ส่วนในต้นเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaCl ที่เพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นชัดเจนที่ความเข้มข้น NaCl 360 mM

Turan และ Sezen (2006) รายงานว่า ในสภาวะที่พืชได้รับเกลือ พืชมักแสดงอาการขาดธาตุอาหารเนื่องจากการแข่งขันกันระหว่างไอออนของเกลือกับธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ ตัวอย่างเช่น ธาตุ P, Ca และ K โดยเกลือมีผลไปลดความเป็นประโยชน์ในดิน ลดการขนส่งและการเคลื่อนย้ายไปยังส่วนต่างๆ ของต้นพืช ส่วน Cl^- มีอิทธิพลไปลดการดูด NO_3^- ซึ่งความ

เข้มข้นของ Na^+ และ Cl^- ที่สูงขึ้นในสารละลายดินนี้อาจจะมีผลไปลดกิจกรรมของไอออนในสารละลายดิน โดยเพิ่มอัตราส่วน Na^+/Ca^{+2}, Na^+/K^+, Ca^{+2}/Mg^{+2} และ Cl^-/NO_3^- ซึ่งเกลืออาจจะมีผลต่อปฏิสัมพันธ์ที่มีความซับซ้อนที่ส่งผลให้กระบวนการเมแทบอลิซึมของพืชผิดปกติ หรือเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดความเสียหายในพืชได้

เกลือมีผลทำให้ลักษณะทางสรีรวิทยาพืชเปลี่ยนแปลงไปโดยการเปลี่ยนสถานะของน้ำและไอออนภายในเซลล์ (Hasegawa *et al.*, 2000; Kashem *et al.*, 2000 อ้างใน Turan and Sezen, 2006) ภาวะขาดความสมดุลระหว่างไอออนภายในเซลล์สาเหตุหลักเนื่องจากการสะสม Na^+ และ Cl^- ที่มากเกินไป มีผลไปลดการดูดและการเคลื่อนย้ายธาตุอาหารบางตัว เช่น K^+, Ca^{+2} และ Mn^{+2} (Lutts *et al.*, 1999) Hasegawa และคณะ (2000) สันนิษฐานว่า Ca^{+2} น่าจะเป็นธาตุที่ช่วยส่งเสริมให้มีการเลือกดูด K^+/Na^+ มากขึ้น ซึ่งจากการศึกษาของ Pessaraki,1991 อ้างใน Turan และ Sezen (2006) ในสภาพแปลงในพืชไร่และผัก รายงานว่ายังไม่มีหลักฐานที่ยืนยันว่า การให้ปุ๋ย N ในพื้นที่ดินเค็มที่ขาด N จะสามารถส่งเสริมให้การเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตดีขึ้น เช่นเดียวกับการให้ P ก็ไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าช่วยให้พืชทนเค็มได้ดีขึ้น สำหรับธาตุโพแทสเซียม Khatun และ Flowers (1995) รายงานว่าเป็นธาตุหลักที่มีบทบาทต่อกระบวนการควบคุมออสโมติกในพืช (osmoregulation) กระบวนการสังเคราะห์โปรตีน การรักษาความเต่งภายในเซลล์ และกระตุ้นกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ดังนั้นพืชที่สามารถรักษาระดับความเข้มข้นของ K^+ ไว้ในเนื้อเยื่อของใบอ่อนหรือใบกำลังเจริญได้ น่าจะเป็นกลไกที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการทนเค็มของพืชนั้น ซึ่งการใช้สารปรับปรุงดินที่มี Ca^{+2} เป็นองค์ประกอบลงไปในดินเค็มเป็นแนวทางที่สำคัญอย่างหนึ่งในการควบคุมความเป็นพิษของไอออน โดยเฉพาะในพืชที่ไวต่อ Na^+ และ Cl^-

นอกจากนี้ ดินเค็มยังมีผลต่อการยับยั้งการดูดและการเคลื่อนย้ายจุลธาตุบางชนิด ขณะที่ธาตุบางชนิด เช่น Fe, Mn, Zn และ Cu กลับเพิ่มขึ้น (Alam, 1994) Carbonell และคณะ, 1998 อ้างใน Turan และ Sezen (2006) รายงานในพืชตระกูลถั่วที่ปลูกในสภาพดินเค็ม พบว่าความเข้มข้นของ Cl^- และ Mn^{+2} สูงในราก Cl^-, Fe^{+2} และ Mn^{+2} สูงในใบ และพบ Cl^- และ Fe^{+2} สูงในฝัก ซึ่งความเค็มหรือเกลือที่มีผลกระทบต่อธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชนี้เป็นสาเหตุหนึ่งที่ปรากฏขึ้นในเวลาเดียวกันกับความผิดปกติทางสรีรวิทยาของพืช ซึ่งจะกระทบต่อผลผลิตและคุณภาพผลผลิตของพืช โดยความรุนแรงที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับระดับความเค็มที่เพิ่มขึ้น ชนิดของเกลือ ชนิดของพืช ชนิดของธาตุอาหารและปัจจัยสภาพแวดล้อมอื่น ๆ

2.1.5 ผลของเกลือต่อลักษณะทางสรีรวิทยาพืช

Colmer และคณะ (1995) ศึกษาในข้าวสาลี 2 สายพันธุ์ คือพันธุ์ทนเค็มที่ปรับปรุงจากการผสมระหว่างพันธุ์ Chines Spring กับ *Phopyrum elongatum* (Host) และพันธุ์อ่อนแอ

Chinese Spring โดยทดสอบในแผ่นใบ (leaf blade) ที่มีอายุแตกต่างกัน ปลูกในสารละลายอาหารที่ไม่ให้เกลือ (1.25 mM Na^+) และสภาพที่ให้เกลือ (200 mM Na^+) เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของไอออน การสะสมสารอินทรีย์ (organic solute) และศักย์ออสโมติก (osmotic potential) พบว่า การตอบสนองของใบต่อความเครียดเกลือขึ้นกับอายุของใบและตำแหน่งของใบ ระดับของ Na^+ และ proline สูงในใบแก่ และค่อยๆ ลดลงในใบอ่อน ระดับ glycine betaine และ asparagine สูงในใบอ่อน ศักย์ออสโมติกลดลงในทั้ง 2 พันธุ์ เกลือชักนำให้ ศักย์ออสโมติกค่อยๆ ลดลงในใบอ่อนของพันธุ์ Chinese Spring ซึ่งมีอิทธิพลมาจากการสะสม Na^+ มากและปริมาณ asparagine ที่ต่ำ ส่วนพันธุ์ทนเค็มมีอิทธิมาจาก glycine betaine ปริมาณ K^+, Na^+, และ asparagine ส่วนในใบอ่อนพบปริมาณ proline เพียงเล็กน้อย และในใบแก่พบว่าปริมาณ Na^+ เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ศักย์ออสโมติกลดลง ดังนั้น พันธุ์ทนเค็มสามารถทนได้ดี เพราะสามารถรักษาระดับ Na^+ ให้ต่ำ ขณะเดียวกันก็รักษาระดับ K^+ ให้สูง และมีการสะสม glycine betaine ในเนื้อเยื่อใบอ่อนนั่นเอง ขณะที่พันธุ์ Chinese spring มีประสิทธิภาพดังกล่าวต่ำกว่า

กันยารัตน์ (2546) ศึกษาลักษณะทางสรีรวิทยาของข้าวในระยะต้นกล้าอายุ 14 วัน พันธุ์สุพรรณบุรี 2 แดงดอกกก และ ปทุมธานี 60 ปลูกในสารละลายอาหารที่มีความเข้มข้นของ NaCl 0, 100, 150 และ 200 mM พบว่า ที่ระดับ NaCl 100 mM ขึ้นไป ค่าศักย์ออสโมติกในต้นและรากในข้าวทุกพันธุ์ลดลงตามความเข้มข้นของเกลือและระยะเวลาที่ได้รับ การสะสม proline เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือและระยะเวลาที่ได้รับเพิ่มขึ้น ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 2 สะสมปริมาณ proline ในใบมากกว่าพันธุ์แดงดอกกก และปทุมธานี 60 ตามลำดับ และปริมาณ proline ในต้นสูงกว่าในรากในข้าวทุกพันธุ์ ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ และบี ในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 2 และแดงดอกกกเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความเครียดเกลือในช่วงแรกและลดลงในช่วงที่ได้รับเป็นเวลา 120 ชั่วโมง ในขณะที่พันธุ์ปทุมธานี 60 ซึ่งเป็นพันธุ์อ่อนแอมีปริมาณคลอโรฟิลล์เอและบีเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและเริ่มลดลงในช่วงที่ 72 ชั่วโมงขึ้นไป ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 2 สามารถรักษาปริมาณคลอโรฟิลล์รวมให้สูงกว่าพันธุ์อื่น อัตราส่วนของปริมาณคลอโรฟิลล์เอต่อบี มีการเปลี่ยนแปลงน้อยยกเว้นที่ความเข้มข้น NaCl 200 mM เมื่อได้รับเป็นเวลา 72 และ 120 ชั่วโมง อัตราส่วนของปริมาณคลอโรฟิลล์เอต่อบีลดลงตามความเข้มข้นของเกลือที่เพิ่มขึ้นในข้าวทุกพันธุ์

2.1.5.1 ผลของเกลือต่ออัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthetic rate)

ความเครียดเกลือมีผลไปลดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งเกิดขึ้นใน 2 ช่วง คือ ช่วงปฏิกิริยาแสง (light reaction) โดยเกลือทำให้พืชลดการถ่ายทอดอิเลคตรอนทั้งในช่วง cyclic และ non-cyclic จึงทำให้พืชสร้างสารพลังงานสูง (ATP, NADPH) ลดลง และช่วงปฏิกิริยามืด (dark reaction) เกลือมีผลไปลดการสร้างคาร์โบไฮเดรตและสารประกอบต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการ

เมแทบอลิซึม ตลอดจนการเจริญเติบโต การให้ผลผลิต และองค์ประกอบผลผลิตพืชลดลงด้วย (สุวัฒน์, 2544)

Chartzoulakis (1994) ศึกษาอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง ความสัมพันธ์น้ำ การเจริญเติบโตของใบแตงกวาที่ได้รับ NaCl 0-190 mM พบว่า ที่ความเข้มข้นของ NaCl ต่ำกว่า 8.5 mM ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของแตงกวา แต่พบความแตกต่างที่ความเข้มข้น 25, 120 และ 190 mM โดยทำให้ปากใบปิด และอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ศักย์น้ำ ศักย์ออสโมติก และศักย์ความเต่ง (turgor potential) ลดลง เมื่อความเข้มข้นของ NaCl เพิ่มขึ้น การกางของใบและขนาดของใบค่อยๆ ลดลง ที่ความเข้มข้น 50, 120 และ 190 mM ทำให้อัตราการเจริญเติบโตลดลง 22, 49 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าเกลือทำให้อัตราการเจริญเติบโตลดลง ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องจากอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงต่อหน่วยพื้นที่ใบลดลง

Tiwari และคณะ (1997) ศึกษาอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของข้าวพันธุ์อ่อนแอ IR 29 และ IR 8 พันธุ์ทนเค็ม Nana Brokra และ Pokkali ที่ปลูกในสารละลายอาหารที่เติม NaCl 0, 50, 100, 150 และ 200 mM เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ศึกษาระบบแสง 1 (photosystem I) ระบบแสง 2 (photosystem II) ในคลอโรพลาสต์ และศึกษาการเรืองแสงของคลอโรฟิลล์ (chlorophyll fluorescent transient) โดยใช้ช่วงแสง 688 nm พบว่า ความเข้มข้นของ NaCl 50 mM ขึ้นไป ทำให้ระบบแสง 1 และระบบแสง 2 ของข้าวทั้ง 4 พันธุ์ ลดลง ที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM ขึ้นไป โดยเฉพาะพันธุ์อ่อนแอมีระบบแสง 1 และระบบแสง 2 ลดลงมากกว่าพันธุ์ทนเค็ม ทั้งในพันธุ์ทนเค็มและพันธุ์อ่อนแอระบบแสง 2 ได้รับผลกระทบจากเกลือมากกว่าระบบแสง 1 การเรืองแสงของคลอโรฟิลล์ลดลงตามความเข้มข้นของ NaCl ที่เพิ่มขึ้น โดยพันธุ์อ่อนแอลดลงมากกว่าพันธุ์ทนเค็ม และพันธุ์อ่อนแอมีการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลงมากกว่าพันธุ์ทนเค็มเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม

Liska และคณะ (2004) ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงและการสร้างพลังงานใน Dunaliella ซึ่งจัดเป็นพืชพวก halophyte และมีอวัยวะที่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ โดยวิเคราะห์หา protomic ซึ่งเชื่อว่าเป็นตัวที่ชักนำให้ Dunaliella สังเคราะห์โปรตีนที่มีหน้าที่ควบคุมเอ็นไซม์ในวัฏจักร Calvin cycle ในกระบวนการสังเคราะห์แป้ง กระบวนการผลิตพลังงานและกระบวนการทำให้เสื่อมในใบพืช โดยให้ NaCl 2 ระดับ คือ 0.5 M (control) และ 3 M ผลการศึกษาพบว่า ในสภาพที่ Dunaliella ได้รับ NaCl 3 M ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้น และจากการวิเคราะห์หาโปรตีนโดยวิธี Mass Spectrometry BLAST (MS BLAST) พบโปรตีนที่ Dunaliella สังเคราะห์ขึ้น 76 ตัว ซึ่งชี้ให้เห็นว่าในสภาพที่ Dunaliella ได้รับเกลือสูงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงที่เพิ่มขึ้นน่าจะมีความเกี่ยวข้องกับความสามารถในการ

สังเคราะห์โปรตีน ซึ่งเป็นลักษณะพิเศษของ Dunaliella ที่ต่างจากพืชทั่วไป ดังนั้นการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนที่ Dunaliella สังเคราะห์ขึ้นกับอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจที่ควรศึกษาและเรียนรู้กันต่อไป

Netondo และคณะ (2004b) ศึกษาอิทธิพลของเกลือต่อลักษณะทางสรีรวิทยาและการเจริญเติบโตในข้าวฟ่าง 2 สายพันธุ์ คือ พันธุ์ Serena และ Seredo ที่ระดับ NaCl 0, 50, 100, 200 และ 250 mM พบว่า ที่ระดับ NaCl 50 mM ขึ้นไป ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของข้าวฟ่างทั้ง 2 พันธุ์ลดลง โดยเกี่ยวข้องกับปริมาณคลอโรฟิลล์ ปริมาณ CO_2 สุทธิ ค่าการนำที่ปากใบและอัตราการคายน้ำ ซึ่งจากงานทดลองนี้พบว่า ที่ระดับเกลือเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าเหล่านี้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง โดยในภาพรวมแล้วเกลือทำให้ลักษณะทางสรีรวิทยาของข้าวฟ่างทั้ง 2 พันธุ์ลดลงประมาณ 75-94 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพของ PSII (Fv/Fm) ลดลง 9 และ 10 เปอร์เซ็นต์ และอัตราการถ่ายทอดอิเล็กตรอนลดลง 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ ในพันธุ์ Serena และ Seredo ตามลำดับ ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า เกลือมีผลไปลดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงต่อหน่วยพื้นที่ใบ ซึ่งผลทางอ้อมมาจากปากใบพืชปิด และพื้นที่ใบลดลงรบกวนกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงโดยตรง

2.1.5.2 ผลของเกลือต่อการหายใจ (respiration)

พืชที่ได้รับความเครียดเกลือมีการหายใจลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการขาดสารพลังงานสูง (ATP, NADPH) และคาร์โบไฮเดรตที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยาแสงและปฏิกิริยามืด ในการศึกษาผลของเกลือต่อกระบวนการหายใจนี้ Yeo และ Flowers, 1984 อ้างใน สุวัฒน์ (2544) ทดลองในข้าวพันธุ์ IR2153 พบว่าสภาพที่ข้าวได้รับเกลือและมีการสะสมเกลือในลำต้นมากขึ้นนั้น ทำให้พืชมีการสร้างคาร์โบไฮเดรต (CH_2O) และอัตราการหายใจลดลง สำหรับผลของเกลือต่อการหายใจนั้นมีความแตกต่างกันตามชนิดของพืช โดยพบว่า เกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้น 170-340 mM สามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชทนเค็ม (halophyte) ในขณะที่การเจริญเติบโตของพืชไม่ทนเค็ม (non-halophyte หรือ glycophyte) ถูกยับยั้งเมื่อได้รับเกลือที่ความเข้มข้นดังกล่าว อย่างไรก็ตามอัตราการเจริญเติบโตและการหายใจของพืชทั้งสองชนิดนี้สามารถถูกยับยั้งลงเมื่อพืชได้รับเกลือเพิ่มขึ้น (Flowers, 1972 อ้างใน สุวัฒน์, 2544) ซึ่งจากผลดังกล่าวนี้ชี้ให้เห็นว่าเกลือมีผลต่อการลดกระบวนการหายใจของพืช โดยทำให้ปริมาณพลังงาน ATP หรือ สาร intermediates ชนิดต่างๆ จากกระบวนการหายใจมีไม่เพียงพอต่อกระบวนการสังเคราะห์สารหลายชนิด เช่น กระบวนสังเคราะห์โปรตีน หรืออาจเป็นปัจจัยสำคัญต่อการสร้างสารประกอบ polysaccharides ชนิดต่างๆ โดยเฉพาะองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของเซลล์ในขณะที่พืชมีการแบ่งตัวและขยายตัวของเซลล์เกิดขึ้น (เกริก และคณะ, 2531)

2.1.5.3 ผลของเกลือต่อความต้านทานภายในเซลล์พืช (resistance of plant cells)

ความต้านทานที่เกิดขึ้นเมื่อพืชได้รับเกลือเกิดขึ้น 2 ชั้น คือ ความต้านทานต่อการแพร่ที่ปากใบ (stoma resistance) โดยเป็นตัวกั้น CO_2 ในบรรยากาศให้แพร่เข้าสู่ปากใบได้น้อยลง และชั้นที่สองคือความต้านทานที่ชั้นมีโซฟิลล์ (mesophyll resistance) เป็นชั้นที่กั้น CO_2 ในช่องว่างปากใบที่จะแพร่เข้าสู่ชั้นมีโซฟิลล์ ทำให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง (Lawson *et al.*, 2002) ซึ่งความต้านทานภายในเซลล์พืชนี้มีความสัมพันธ์ทางลบกับค่าการนำที่ปากใบ (stomata conductance) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพในการนำ CO_2 เข้าไปยังชั้นมีโซฟิลล์ได้มากน้อยเพียงใด โดยปกติแล้วพืชที่ได้รับเกลือพบว่าค่าการนำที่ปากใบมีแนวโน้มลดลง จากการศึกษาของ Yeo และคณะ (1999) พบว่าเมื่อข้าวได้รับเกลือค่าการนำที่ปากใบของข้าวพันธุ์ IR36 (พันธุ์อ่อนแอต่อเกลือ) มีค่าลดลงมากกว่าพันธุ์ CSR10 และพันธุ์ GR4 (พันธุ์ทนเค็มและทนเค็มปานกลางตามลำดับ) นอกจากนี้ สุวัฒน์ และคณะ (2537) ยังพบว่าข้าวพันธุ์พอคคาลีมีค่าการนำที่ปากใบสูงกว่าข้าวดอที่ได้รับเกลือที่ระดับความเข้มข้นเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าข้าวแต่ละสายพันธุ์มีความสามารถในการนำ CO_2 มาใช้ได้แตกต่างกันในสภาวะที่ได้รับความเครียดเกลือ

2.1.5.4 ผลของเกลือต่ออัตราการคายน้ำ (transpiration rate)

ความเครียดเกลือทำให้อัตราการคายน้ำของพืชลดลง เป็นกลไกหนึ่งในการปรับตัวของพืชในสภาวะที่พืชได้รับเกลือ เนื่องจากค่าความต้านทานต่อการแพร่ที่ปากใบเพิ่มขึ้น (Yeo *et al.*, 1985) ซึ่งอัตราการคายน้ำมีความสัมพันธ์กันในทางลบ กับความต้านทานต่อการแพร่ที่ปากใบ พืชแต่ละชนิดนั้นมีความสามารถในการปรับตัวได้แตกต่างกัน ในสภาวะที่ได้รับเกลือพืชชนิดใดที่มีอัตราการคายน้ำเป็นปกติถือได้ว่าเป็นพืชที่ปรับตัวได้ดี ส่วนชนิดที่มีอัตราการคายน้ำต่ำแสดงว่าความต้านทานต่อการแพร่ที่ปากใบมีค่าสูง ซึ่งจะส่งผลให้ CO_2 แพร่เข้าสู่ชั้นมีโซฟิลล์ได้น้อยลง สุวัฒน์ และคณะ (2537) ได้ศึกษาในข้าวพันธุ์พอคคาลีและพันธุ์ข้าวดอ โดยให้เกลือที่ระดับความเข้มข้น 0, 30, 60, 90 และ 120 mM NaCl พบว่า เมื่อข้าวได้รับเกลืออัตราการคายน้ำลดลง 14-38 เปอร์เซ็นต์ โดยข้าวพันธุ์พอคคาลีมีอัตราการคายน้ำลดลงต่ำกว่าพันธุ์ข้าวดอ 12-25 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับ NaCl 60 mM สำหรับข้าวฟ่าง Netondo และคณะ (2004b) ได้ศึกษาที่ระดับความเข้มข้นของ NaCl 0, 50, 100, 200 และ 250 mM ผลที่ได้เกิดขึ้นในทำนองเดียวกันคือ เมื่อข้าวฟ่างได้ NaCl 50 mM ขึ้นไป อัตราการคายน้ำลดลง 75-94 เปอร์เซ็นต์

2.1.6 ผลของความเค็มต่อการเจริญเติบโตของข้าว

ข้าวที่ปลูกหรือขึ้นในดินเค็มโดยมากมักพบการตายเป็นหย่อมๆ ลำต้นแคระแกร็น การเจริญเติบโตไม่สม่ำเสมอ อาการที่พบ คือ ใบพืชมีขนาดเล็กลง มีใบเขียวเข้มกว่าปกติ ใบหนาหรือมีอาการอวบน้ำ ในกรอบกระด้าง ใบไหม้จากปลายใบมายังโคนใบ และเกิดขึ้นในใบแก่ก่อนใบ

อ่อน (สมศรี, 2539) อาการที่แสดงออกเหล่านี้ส่วนใหญ่ล้วนเป็นผลมาจากความเค็มที่มีต่อลักษณะทางสรีรวิทยาหลายลักษณะพร้อมกัน และยังชักนำให้เมแทบอลิซึมของพืชเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากเกลือไปขัดขวางการดูดน้ำมาใช้ของพืช เป็นสาเหตุให้การเจริญเติบโตลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งการตอบสนองต่อเกลือของพืชเกิดขึ้น 3 ระดับที่แตกต่างกัน คือ ระดับเซลล์ ระดับเนื้อเยื่อ และระดับต้นพืช จากการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยสามารถสรุปผลของเกลือที่มีต่อข้าวได้ดังนี้

2.1.6.1 อาการขาดน้ำ สาเหตุมาจากเกลือทำให้ศักย์น้ำในสารละลายดินลดลง ทำให้ข้าวดูดน้ำมาใช้ได้ยาก ซึ่งจากการศึกษาของ Flowers และคณะ (1991) ที่ศึกษาในผนังเซลล์ของรากข้าวพันธุ์ Amber และ IR 2153-26-3-5-2 โดยให้ NaCl 50 mM พบว่า ใบข้าวแสดงอาการขาดน้ำ และมีการสะสมไอออนจึงทำให้ค่าศักย์ของน้ำลดลง และหลังจากได้รับเกลือ 2-3 วัน ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่วัดได้ในอะโพพลาสต์ (apoplast) ของใบสูงถึง 600 mM แสดงให้เห็นว่าเซลล์ของใบกำลังได้รับความเสียหายจากการขาดน้ำ ซึ่งการสะสมเกลือที่ช่องว่างระหว่างเซลล์และผนังเซลล์อาจเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลให้พืชเกิดการสูญเสียน้ำ

Song และ Fujiyama (1998) ศึกษาผลของโซเดียมในข้าวพันธุ์ Yamabiko อายุ 9 วัน ให้ NaCl โดยการฉีดพ่นทางใบ เปรียบเทียบกับการให้ทางราก ความเข้มข้นที่ใช้ คือ 40, 60, 80, 100 และ 120 mM พบว่า ทุกระดับความเข้มข้นของ NaCl การให้โดยการฉีดพ่นทางใบ พบการสะสม Na^+ ในส่วนต้นสูงกว่าการให้ทางราก และการให้ทางรากยับยั้งการขนส่ง K^+ จากรากไปยังส่วนต้นมากกว่าการให้โดยการฉีดพ่นทางใบ การให้ทางรากพบการดูด Na^+ เกิดขึ้นพร้อมกับการคายน้ำ การดูดน้ำของข้าวสัมพันธ์กับ osmotic absorption ปริมาณ cation ที่เพิ่มขึ้นในเนื้อเยื่อข้าวชักนำให้เกิดความแตกต่างของค่า osmotic potential ระหว่างส่วนต้นและรากเพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะส่งเสริมให้การดูดน้ำของข้าวเพิ่มขึ้น ดังนั้นหากข้าวสามารถรักษาระดับ cation ที่เป็นประโยชน์ไว้ในเนื้อเยื่อส่วนต้นให้มากน่าจะช่วยเพิ่มความเต่งของเซลล์ได้ เช่นเดียวกับ

2.1.6.2 การเสื่อมของใบข้าวเร็วกว่าปกติ เนื่องจากส่งเสริมให้ข้าวสร้างสาร malondiadehyde ซึ่งเป็นสารที่เร่งกระบวนการเสื่อมในใบข้าวเร็วขึ้น จากการศึกษาของ Lutts และคณะ (1996) ที่ศึกษาบทบาทของโซเดียมคลอไรด์ต่อความเสื่อมของใบข้าว (*Oryza sativa* L.) โดยทดลองในข้าวพันธุ์ทนเค็มและไม่ทนเค็ม พบว่า หลังข้าวได้รับ NaCl เป็นเวลา 14 วันขึ้นไป ใบข้าวมีอาการเสื่อมเร็วกว่าปกติ โดยมีผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์และโปรตีนลดลง ในทางตรงกันข้ามกลับช่วยส่งเสริมให้ความสามารถในการซึมผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ (membrane permeability) และการสังเคราะห์สาร malondialdehyde เพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยเร่งกระบวนการเสื่อมในใบข้าว โดยในพันธุ์อ่อนแอต่อเกลือกระบวนการนี้เกิดขึ้นทั้งในใบอ่อนและใบแก่ ขณะที่พันธุ์ทนเค็มพบมากเฉพาะในใบแก่

2.1.6.3 ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารบางชนิดลดลง จากการศึกษาของ Zafar และคณะ (2004) ที่ทดลองในข้าว 2 พันธุ์ เพื่อหาความแตกต่างของการเจริญเติบโตและการดูดซึมไอออนระหว่างพันธุ์ Basmati-370 (พันธุ์อ่อนแอ) และพันธุ์ IR6 (พันธุ์ทนเค็ม) ที่ระดับความเค็ม 2 ระดับ คือ 4.0 dS/m (control) และ 10.0 dS/m พบว่า ระดับความเค็มที่สูงทำให้อัตราการเจริญเติบโตในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ลดลง โดยพันธุ์ IR6 ลดลง 20-30 เปอร์เซ็นต์ พันธุ์ Basmati-370 ลดลง 70 เปอร์เซ็นต์ การทดลองนี้ยังชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของระดับความเค็มมีความสัมพันธ์กับปริมาณการเพิ่มขึ้นของ Na^+ และ Cl^- และสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตที่ลดลงในพันธุ์ Basmati-370 ขณะที่ปริมาณ K^+, Ca^{+2}, N และ P ลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่งในพันธุ์ IR6

2.1.6.4 การเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาและกายวิภาควิทยา คือ ขนาดของ stele และ vessel ลดลง ความหนาของเซลล์ mesophyll, bundle sheath และ vascular bundle ลดลง (อรัญญา และคณะ, 2538) และจากการศึกษาของอาทิตย์ยา (2543) ในข้าวพันธุ์ แดงดอกกก ลูกแดง เหลืองตาโม ขาวหมากแขก พอคคาลี ขาวดอกมะลิ105 น้ำสะกุย 19 และ สุพรรณบุรี 2 ที่ให้ NaCl 0, 50, 100 และ 150 mM พบว่า การกระจายตัวของเซลล์คุมปากใบจะขนานไปกับเส้นใบ ขนาดของเซลล์คุมปากใบที่ผิวใบด้านบนและด้านล่างเล็กลงในทุกพันธุ์ ความหนาแน่นของเซลล์คุมปากใบด้านบนและด้านล่างใบเพิ่มขึ้นในพันธุ์ ขาวดอกมะลิ105 และขาวหมากแขก ขณะที่พันธุ์ลูกแดง พบว่าความหนาแน่นของเซลล์คุมปากใบด้านบนและด้านล่างใบลดลง ส่วนพันธุ์เหลืองตาโม และแดงดอกกก พบความหนาแน่นของเซลล์คุมปากใบเพิ่มขึ้นเฉพาะด้านบน ขณะที่ด้านล่างลดลง ซึ่งเกิดขึ้นในทางตรงข้ามกับพันธุ์ น้ำสะกุย 19 มีความหนาแน่นของเซลล์คุมปากใบด้านล่างเพิ่มขึ้นและด้านบนลดลง ที่ความเข้มข้น NaCl 50 mM ขึ้นไป ทำให้ความหนาของใบเพิ่มขึ้นในพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 พอคคาลี และเหลืองตาโม และลดลงในพันธุ์แดงดอกกก และสุพรรณบุรี 2 ขนาดเซลล์ม้วน (bulliform cell) มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อได้รับ NaCl 50 mM ขึ้นไป คือ พันธุ์ขาวดอกมะลิ105 พอคคาลี และขนาดลดลงในพันธุ์ลูกแดง ที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM ทำให้การพัฒนาของเส้นกลางใบช้ากว่าปกติ ผิวใบมีเซลล์ที่ถูกทำลาย มีเซลล์หลั่งเกิดขึ้นมากและใบแก่เร็วกว่าปกติ

2.1.6.5 ความผิดปกติทางสรีรวิทยา เช่น ปริมาณคลอโรฟิลล์เอและบีลดลง ซึ่งส่งผลให้ข้าวมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง สุวัฒน์ และคณะ (2537) ศึกษาอิทธิพลของโซเดียมคลอไรด์ที่มีต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงและปริมาณคลอโรฟิลล์ในข้าว โดยทดลองในข้าวพันธุ์พอคคาลี (พันธุ์ทนเค็มมาตรฐาน) และพันธุ์ข้าวดอในระยะต้นกล้าซึ่งปลูกในสารละลายอาหารที่ให้โซเดียมคลอไรด์ 5 ระดับ คือ 0, 30, 60, 90 และ 120 mM พบว่า เกลือมีผลทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของข้าวลดลง 26-50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งข้าวดอมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงต่ำกว่าข้าวพันธุ์พอคคาลี 15-22 เปอร์เซ็นต์ และมีผลทำให้การสร้างน้ำหนักแห้งส่วนต้นและรากของข้าว

ลดลง โดยข้าวพันธุ์พอคคาลีมีอัตราการสร้างน้ำหนักแห้งสูงกว่าข้าวดอ 40-50 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอและบีในข้าวลดลงอีกด้วย ทั้งนี้ผลจากการศึกษาดังกล่าวนี้อาจเนื่องมาจากข้าวพันธุ์พอคคาลีมีความสามารถในการเพิ่มพื้นที่ใบ ประสิทธิภาพในการใช้น้ำ (WUE) และมี specific leaf weight สูงกว่าพันธุ์ข้าวดอ เช่นเดียวกับ Tiwari และคณะ (1997) ก็พบว่า เกลือทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของข้าวลดลง โดยทำให้ระบบแสง 1(photosystem I) ระบบแสง 2 (photosystem II) ของพันธุ์อ่อนแอลดลงมากกว่าพันธุ์ทนเค็ม

2.1.6.6 การเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวลดลง Alam และคณะ (2004) ศึกษาผลกระทบของความเค็มต่อการเจริญเติบโตของข้าว 10 พันธุ์ โดยใช้ระดับความเค็ม 3 ระดับ คือ 4.5, 8.5 และ 12.5 dS/m เก็บข้อมูลหลังจากได้รับความเครียดเกลือ 6 สัปดาห์ พบว่า การเจริญเติบโตของข้าวลดลงตั้งแต่ที่ระดับความเค็มต่ำสุด (4.5 dS/m) และการเจริญเติบโตถูกยับยั้งทันทีที่ระดับความเค็มสูงสุด (12.5 dS/m) อาการที่ปรากฏส่วนใหญ่เกิดที่ใบแก่ โดยพบว่าข้าวทั้ง 10 พันธุ์มีความทนทานต่อความเค็มแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะประจำพันธุ์ ระดับความเข้มข้นของเกลือในดินและระยะการเจริญเติบโต ส่วน Zeng และ Shannon (2000) ศึกษาอิทธิพลของเกลือที่มีต่อผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตของข้าว ที่ระดับความหนาแน่นในการปลูกแตกต่างกัน คือ 400 600 และ 720 เมล็ด/ตารางเมตร โดยให้เกลือ (NaCl : $CaCl_2$ อัตรา 5 : 1) ที่ระดับความเค็ม 1.0, 3.9 และ 6.5 dS/m พบว่า ที่ระดับความเค็ม 3.9 dS/m ขึ้นไป ทำให้ผลผลิตเมล็ด จำนวนต้นที่รอดตาย น้ำหนักเมล็ดต่อต้น น้ำหนักเมล็ดต่อรวง และจำนวนระแง้ต่อรวงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และค่าเหล่านี้ลดลงต่ำสุดที่ระดับความเค็ม 6.5 dS/m ระดับความหนาแน่นในการปลูก 720 เมล็ด/ตารางเมตร ทำให้จำนวนเมล็ดเต็มและดัชนีเก็บเกี่ยวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าน้ำหนักเมล็ดต่อต้นภายใต้สภาวะความเค็มนี้ขึ้นกับอัตราความหนาแน่นของต้นข้าว การปลูกในอัตราที่หนาแน่นมากเกินไปมักเกิดการแข่งขันกันในการดูดน้ำและธาตุอาหาร ทั้งในต้นเดียวกันและระหว่างต้น ดังนั้นในสภาวะความเครียดเกลือการเพิ่มน้ำหนักเมล็ดต่อรวงน่าจะเป็นการช่วยเพิ่มผลผลิตได้มากกว่าการเพิ่มความหนาแน่นของต้นข้าว ซึ่งสรุปได้ว่า ผลผลิตที่สูญหายไปนั้นไม่สามารถชดเชยได้จากการเพิ่มความหนาแน่นของต้นพืช

2.1.7 กลไกการทนเค็มและการปรับตัวของข้าวเมื่อได้รับเกลือ

2.1.7.1 เลือกดูดโพแทสเซียมเข้าไปในเซลล์ได้มาก แทนการดูดโซเดียม Lee และคณะ (2003) ศึกษาปริมาณ Na^+ และ K^+ ในระยะต้นกล้าอายุ 14 วัน ของข้าวทนเค็ม 10 สายพันธุ์ในกลุ่ม Indica และ Japonica ภายใต้สภาพที่ไม่ให้เกลือและให้เกลือในสารละลายอาหาร โดยให้ความเค็มของสารละลายที่ระดับ 6.0 dS/m เป็นเวลา 4 วัน หลังจากนั้นเพิ่มระดับความเค็มเป็น 12.0 dS/m เป็นเวลา 14 วัน พบว่า การเจริญเติบโตของข้าวทนเค็มทั้ง 2 กลุ่มลดลงเมื่อระดับความเค็มเพิ่มขึ้น

โดยข้าวกลุ่ม Indica มีการเจริญเติบโตต่ำกว่ากลุ่ม Japonica ข้าวทนเค็มกลุ่ม Indica ดูด Na^+ ได้ต่ำกว่ากลุ่ม Japonica ขณะเดียวกันปริมาณการดูด K^+ สูง และระดับ Na^+/K^+ ในต้นต่ำกว่ากลุ่ม Japonica ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าข้าวทนเค็มกลุ่ม Indica มีความสามารถทนเค็มได้ดีกว่ากลุ่ม Japonica นอกจากนี้ Kader และ Lidberg (2005) ศึกษาการสะสม Na^+ และ K^+ ใน protoplast ของข้าวพันธุ์พอคคาลี (พันธุ์ทนเค็มมาตรฐาน) และพันธุ์ BRRI Dhan 29 (พันธุ์อ่อนแอ) ในสภาพที่ได้รับ NaCl 5-50 mM พบว่า ข้าวพอคคาลีมีการสะสม Na^+ ใน cytoplasm ต่ำกว่าพันธุ์ BRRI Dhan 29 ในพันธุ์พอคคาลีการดูด K^+ เป็นแบบ selective channel ซึ่งไม่ได้ส่งเสริมให้ Na^+ มากับช่องทางดังกล่าว ส่วน Colmer และคณะ (1995) ก็พบว่า ข้าวสาลีพันธุ์ Amphiploid ทนเค็มได้ดี เพราะสามารถรักษาระดับ Na^+ ให้ต่ำ ขณะเดียวกันก็รักษาระดับ K^+ ให้สูง

2.1.7.2 สร้างสาร glycine betaine และ asparagines ได้มากในใบอ่อน ขณะเดียวกันก็สร้างสาร proline และสะสม Na^+ ในใบแก่แทนการสะสมในใบอ่อน ดังงานของ Colmer และคณะ (1995) ที่ศึกษาในข้าวสาลี 2 สายพันธุ์ คือพันธุ์ทนเค็ และพันธุ์อ่อนแอ โดยทดสอบในแผ่นใบ (leaf blade) ที่มีอายุแตกต่างกัน ปลูกในสารละลายอาหารที่ไม่ให้เกลือ (1.25 mM Na^+) และสภาพที่ให้เกลือ (200 mM Na^+) เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของไอออน การสะสมสารอินทรีย์ (organic solute) และศักย์ออสโมติก (osmotic potential) พบว่า การตอบสนองของใบต่อความเครียดเกลือขึ้นกับอายุของใบและตำแหน่งของใบ ระดับของ Na^+ และ proline สูงในใบแก่ และค่อยๆ ลดลงในใบอ่อน ระดับ glycine betaine และ asparagine สูงในใบอ่อน ศักย์ออสโมติกลดลงในทั้ง 2 พันธุ์ เกลือชักนำให้ ศักย์ออสโมติกค่อยๆ ลดลงในใบอ่อนของพันธุ์อ้อนแอซึ่งมีอิทธิพลมาจากการสะสม Na^+ มากและปริมาณ asparagine ที่ต่ำ

2.1.7.3 เก็บ Na^+ ไว้ใน vacuole เพื่อป้องกันความเป็นพิษของ Na^+ และเป็นการปรับแรงดันออสโมติกใน cytoplasm ของเซลล์ จากการทดลองของ Kader และ Lidberg (2005) พบว่า เมื่อสกัด protoplast จากใบข้าวพอคคาลีที่ได้รับ NaCl 5-50 mM พบ Na^+ สะสมอยู่ภายนอกเซลล์ ดังนั้น protoplast ของข้าวพอคคาลีจึงน่าจะมีกลไกบางอย่างในการขับ Na^+ ออกจากไซโตพลาซึม และเก็บไว้ใน vacuole แทน

2.1.7.4 ปรับตัวทางสัณฐานวิทยา โดยการสร้าง silica knop ซึ่งอาจเป็นกลไกในการเพิ่มความเด่งภายในเซลล์ โดย silica มีบทบาทเคลือบที่ผิวใบจะช่วยลดอัตราการคายน้ำได้ ซึ่งจากการทดลองของอรัญญา และคณะ (2538) พบว่า NaCl ที่ความเข้มข้น 60 mM ขึ้นไป ทำให้ข้าวพอคคาลีและขาวดอกมะลิ105 มีจำนวน silica knop เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพที่ไม่ได้รับ NaCl

2.1.7.5 เพิ่มประสิทธิภาพในการตรึง CO_2 โดยการเพิ่มค่าการนำที่ปากใบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ด้วยแสง ทั้งนี้กลไกการปรับตัวดังกล่าวพบเฉพาะในข้าวพันธุ์ทนเค็มได้ดีเท่านั้น (สุวัฒน์ และคณะ, 2537; Yeo *et al.*, 1999)

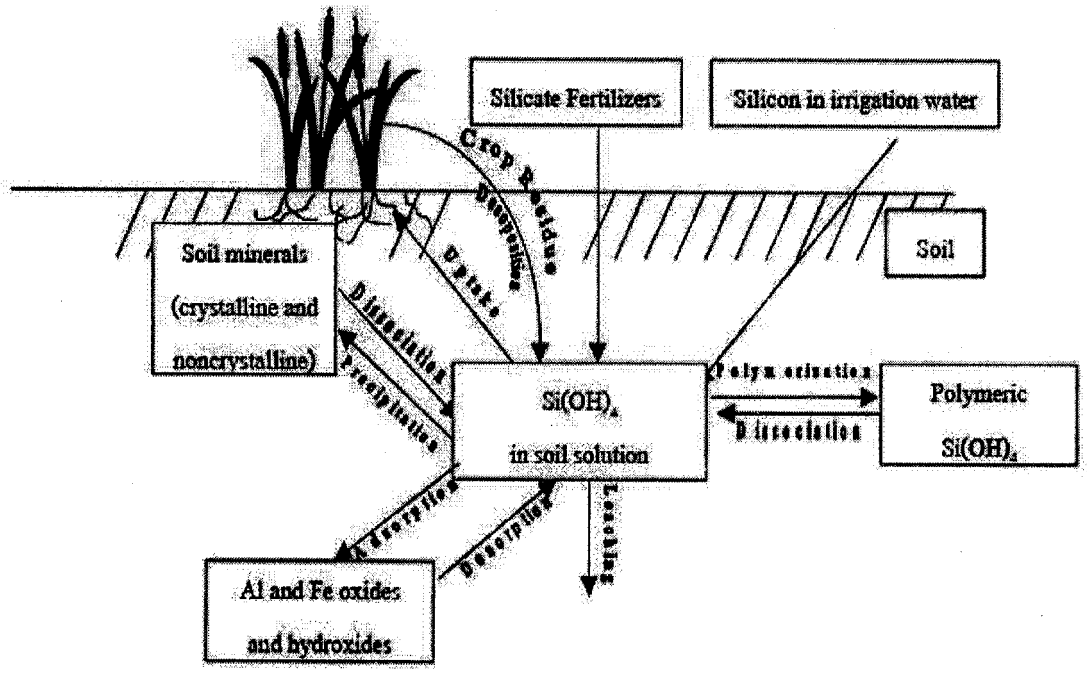
2.1.7.6 ลดอัตราการคายน้ำ เพื่อลดการสูญเสียน้ำ โดยในสภาพที่ได้รับเกลือพันธุ์ทนเค็มมีอัตราการคายน้ำต่ำกว่าพันธุ์อ่อนแอ (สุวัฒน์ และคณะ, 2537)

2.2 ซิลิกอน (Silicon)

ซิลิกอน เป็นธาตุที่พบมากเป็นอันดับสองรองจากออกซิเจน พบในเปลือกโลกประมาณ 28 เปอร์เซ็นต์ ส่วนใหญ่ปรากฏอยู่ในรูปซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งพบได้ในทรายหรือ silica (Clesceni, 1998 อ้างใน ศิริวรรณ, 2545) ดิน หิน แร่ธาตุ และน้ำ โดย Kobayashi, 1960 อ้างใน Savant และคณะ (1999) รายงานว่า ในน้ำฝนมีซิลิกอนประมาณ 0.2 mg/dm^3 น้ำทะเล 30 mg/dm^3 น้ำบ่อในอินเดีย 2.4-3.2 mg/dm^3 น้ำเขื่อนในอินเดีย 5.6 mg/dm^3 และ น้ำบริสุทธิ์ 20 nM Si (Werner and Roth, 1983 อ้างใน Savant *et al.*, 1999)

2.2.1 ซิลิกอนในดิน

แม้ซิลิกอนจะเป็นธาตุที่พบมากบนเปลือกโลก แต่ปริมาณที่ละลายได้ในสารละลายดินมีเพียงเล็กน้อย เพราะมักอยู่ในรูปอิสระ หรือเป็นส่วนประกอบของสารตัวอื่นเสมอ รูปของซิลิกอนที่ละลายในสารละลายดินส่วนมากอยู่ในรูปของกรดโมโนซิลิซิก (monosilicic acid; $Si(OH)_4$) สภาพที่ละลายได้ของกรดนี้ที่ 25 °C ประมาณ 2 mM หรือ 56 mg Si/L. ความเข้มข้นในสารละลายดินโดยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 14-20 mg Si/L. (ยงยุทธ, 2543) ดินทั่วไปพบกรดซิลิซิกในสารละลายดินประมาณ 0.1-0.6 mM (Epstein, 1994) ความเข้มข้นในสารละลายดินอาจลดลงเนื่องจากสาเหตุ 2 ประการ คือ pH ของดินที่สูงกว่า 7 และการเกิดเซสควิออกไซด์ (sesquioxide คือ ออกไซด์จาก Fe และ Al) ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการดูดซับแอนไอออนสูง พบมากในดินเขตร้อน นอกจากนี้ความเป็นประโยชน์ของซิลิกอนจะมากหรือน้อยยังขึ้นอยู่กับปริมาณอินทรียวัตถุในดิน โดยดินที่มีอินทรียวัตถุสูงพบความเข้มข้นของกรดนี้ประมาณ 14-20 mg Si/L. (Park, 1979 อ้างใน Akbar and Ponnamperuma, 1982) ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณซิลิกอนในสารละลายดินแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณซิลิกอนในสารละลายดิน
ที่มา : Savant และคณะ, 1997 อ้างใน จุฑารัตน์ (2546)

2.2.2 ซิลิกอนในพืช

2.2.2.1 การสะสมและการลำเลียงในพืช

ซิลิกอนเป็นธาตุเพียงชนิดเดียวที่พืชได้รับในปริมาณมากจะไม่ส่งผลเสียต่อพืช เนื่องจากมีคุณสมบัติเฉพาะในการแยกออก (dissociation) โดยใช้กลไกทางสรีรวิทยาและการเปลี่ยนเป็นสารประกอบอื่น (polymerization) Ma และคณะ (2001) ได้ศึกษาการสะสมซิลิกอนในพืชจำนวน 500 ชนิด ทำให้สามารถแบ่งพืชออกเป็น 3 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มที่สะสมซิลิกอนสูง 2) กลุ่มสะสมซิลิกอนปานกลาง และ 3) กลุ่มที่ไม่สะสมซิลิกอน ซึ่งพืชส่วนใหญ่ที่สะสมซิลิกอนในปริมาณที่มากอยู่ในกลุ่มพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ส่วนพืชที่สะสมปานกลางและน้อยพบในพืชใบเลี้ยงคู่ ซึ่งการดูดและการลำเลียงซิลิกอนของพืชแต่ละกลุ่มนั้นมีความแตกต่างกัน Richmond และ Sussman (2003) ให้ความคิดเห็นเพิ่มเติมว่า 1)พืชกลุ่มที่สะสมซิลิกอนสูงนั้นมีระบบการดูดธาตุซิลิกอนแบบเลือกดูด (active process) 2) กลุ่มที่สะสมปานกลางมีระบบการดูดแบบไม่เลือกดูด (passive process) และ 3) กลุ่มที่ไม่สะสมซิลิกอนมีระบบการขับซิลิกอนออก (ejective process)

ยงยุทธ (2543) ได้สรุปไว้ว่าพืชชั้นสูงดูดซิลิกอนจากดินมามากน้อยได้แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งพืชออกได้ 3 กลุ่ม เช่นเดียวกับงานทดลองของ Ma และคณะ (2001) โดยพิจารณาจากความเข้มข้นของซิลิกอนในส่วนเหนือดิน (%SiO_2 คิดจากน้ำหนักแห้ง) ดังนี้ 1) พืช

ที่สะสมซิลิกอนสูง ส่วนใหญ่เป็นพืชในวงศ์ Cyperaceae เช่น *Equisetum arvens* และพืชในวงศ์ Gramineae ที่อยู่ในน้ำขัง เช่น ข้าวมี $SiO_2$10-15 เปอร์เซ็นต์ 2) พืชที่มีซิลิกอนปานกลาง เป็นพืชวงศ์ Gramineae ที่อยู่ในดินไร่ เช่น อ้อย ธัญพืช และพืชใบเลี้ยงคู่บางชนิดมี SiO_2 1-3 เปอร์เซ็นต์ และ 3) พืชที่มีซิลิกอนต่ำ ส่วนมากเป็นพืชใบเลี้ยงคู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพืชตระกูลถั่วมี SiO_2น้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์

นอกจากนี้ยังอาจแบ่งพืชออกเป็น 2 กลุ่ม คือ พืชสะสมซิลิกอน(silicon accumulators) กับพืชไม่สะสมซิลิกอน (silicon nonaccumulators) โดยถือเกณฑ์ดังนี้ 1) พืชสะสมซิลิกอน ดูดซิลิกอนได้มากกว่าที่มีในสารละลาย แสดงว่ากลไกการดูดเป็นแบบ active 2) พืชไม่สะสมซิลิกอน ดูดซิลิกอนเท่ากับหรือน้อยกว่าที่มากับน้ำที่พืชดูดได้ คือ ปริมาณธาตุที่ละลายน้ำและสะสมในพืชสัดส่วนเดียวกันกับที่พืชดูดมาใช้ สำหรับข้าวไม่ว่าซิลิกอนในสารละลายภายนอกจะต่ำหรือสูงก็สะสมได้มาก แสดงว่ากลไกการดูดธาตุนี้ส่วนหนึ่งเป็นแบบ active (ยงยุทธ, 2543)

เมื่อพืชดูดซึมซิลิกอนจากดิน ซิลิกอนจะเคลื่อนย้ายจากรากพืชสู่ส่วนเหนือดินทางไซเลม (xylem) และสะสมในผนังของไซเลม ช่วยให้ไซเลมแข็งแรงและไม่ยุบตัวขณะพืชมีการคายน้ำสูง ส่วนปริมาณการสะสมของซิลิกอนในแต่ละส่วนขึ้นอยู่กับอัตราการคายน้ำของส่วนนั้นๆ และการสะสมจะเพิ่มมากขึ้นตามอายุของพืช ซึ่งการดูด การเคลื่อนย้าย และการสะสมไอออนของพืชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ดังนี้ (ศิริวรรณ, 2545)

(1) ถั่วเหลือง เป็นพืชที่ไม่สะสมซิลิกอน เมื่อความเข้มข้นของธาตุนี้ในสารละลายอาหารสูง การดูดและการเคลื่อนย้ายเข้าสู่ xylem vessel ไม่ได้เพิ่มเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นดังกล่าว แสดงว่ามีกลไกบางอย่างที่ขับซิลิกอนออกจากราก (ejective)

(2) ข้าวสาลี อัตราการดูดซิลิกอนของรากมีความสัมพันธ์กับอัตราการคายน้ำ ดังนั้นจึงอาจใช้ค่าความเข้มข้นของธาตุนี้ในส่วนเหนือดินเป็นพารามิเตอร์สำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชได้ทางหนึ่ง อย่างไรก็ตามต้องตระหนักด้วยว่าอัตราการดูดซิลิกอนของพืชก็มีความแตกต่างกัน

(3) พืชสะสมซิลิกอน เช่น ข้าว และพืชอื่นๆ มีอัตราการดูดธาตุนี้ที่สัมพันธ์กับเมแทบอลิซึมของรากแต่ไม่เกี่ยวข้องกับอัตราการคายน้ำ สำหรับการเคลื่อนย้ายไอออนในรากข้าวฟ่างใช้วิถีอะโพพลาสต์ (apoplast pathway) และสะสมใน apoplast ของ cortex และ endodermis โดย endodermis ทำหน้าที่กักซิลิกอนเอาไว้และสะสมมากเป็นพิเศษที่ผนังเซลล์ด้านในส่วนปลายรากมีธาตุนี้มากกว่าโคนราก ซึ่งเชื่อว่าการสะสมซิลิกอนในผนัง endodermis อาจเป็นกลไกป้องกันเชื้อโรคไม่ให้เข้าไปในส่วนของรากพืช

พืชส่วนใหญ่สะสมซิลิกอนในรูปซิลิก้าเจล (silica gel) ที่มีโครงสร้างเป็นแบบซิลิก้าอสัณฐาน (hydrated amorphous silica หรือ $SiO_2.nH_2O$) โดยพืชดูดซิลิกอนในรูปของกรดซิลิซิกจากสารละลายดิน และถูกส่งไปยังลำต้นทางท่อลำเลียงน้ำ (xylem) ซึ่งเชื่อว่าซิลิกอนถูกลำเลียงไปกับน้ำตามกระแสการการคายน้ำ (transpiration stream) เมื่อถึงจุดสิ้นสุดของการลำเลียงน้ำเกิดการระเหยของน้ำกรดซิลิซิกจะกลายเป็นสารที่อิ่มตัวเปลี่ยนให้อยู่ในรูป hydrated silica ซึ่งจะตกตะกอนเป็นซิลิกาเจล โดยพบการสะสมบริเวณด้านนอกสุดของผนังเซลล์ชั้นผิวใบทั้งด้านบนและล่าง ใบประดับ (bracts) กาบใบ (leaf sheath) ขนหรือไตรโคม (trichomes) และเซลล์ม้วนหรือเซลล์ยนต์ของใบ (bulliform cells) (Ma and Takahashi, 2002)

2.2.2.2 บทบาทของซิลิกอนในเมแทบอลิซึมของพืช

ซิลิกอนเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับไดอะตอมซึ่งเป็นพืชเซลล์เดียวและพืชชนิด silicophile species เช่น *Equisetum arvens* และพืชตระกูลหญ้าที่อาศัยในที่น้ำขัง ข้าวเมื่อขาดธาตุนี้มีการเจริญต่ำผลผลิตลดลงมาก ใบเหี่ยวง่ายและเนื้อเยื่อบางส่วนตาย แต่ข้าวยังสามารถเจริญเติบโตให้ผลผลิตได้ ซิลิกอนจึงไม่จัดว่าเป็นธาตุอาหารที่จำเป็น เป็นเพียงธาตุเสริมประโยชน์สำหรับข้าวเท่านั้น (ยงยุทธ, 2543) อย่างไรก็ตามข้าวต้องการธาตุนี้ในช่วงการเจริญทางลำต้นเพียงเล็กน้อย แต่ต้องการปริมาณมากขึ้นในช่วงเจริญพันธุ์ก่อนข้าวตั้งท้องซิลิกอนจะเคลื่อนย้ายไปสะสมในใบธง หากขาดแคลนในช่วงนี้ดอกข้าวจะไม่สมบูรณ์ (Ma, 1989 อ้างใน ศิริวรรณ, 2545)

อ้อยเป็นพืชอีกชนิดหนึ่งที่ตอบสนองดีมากเมื่อได้รับซิลิกอน กล่าวคือ ใบอ้อยปกติที่ปลูกในไร่ควรมี Si 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห้ง แต่ถ้ามี Si เพียง 0.25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห้ง ทำให้ผลผลิตลดลงครึ่งหนึ่ง เนื่องจากใบที่รับแสงเต็มที่จะมีรอยด่างทั่วไป แต่อ้อยที่ปลูกในเรือนทดลองต้องการซิลิกอนเพียงเล็กน้อย ข้อมูลทั้งสองส่วนไม่อาจพิสูจน์ได้ว่าธาตุนี้จำเป็นสำหรับอ้อย (Anderson, 1991) สำหรับพืชอื่น เช่น มะเขือเทศ แตงกวา ถั่วเหลือง และสตรอเบอรี่ ก็มีผู้รายงานว่าต้องการซิลิกอน หากขาดธาตุนี้จะแสดงอาการผิดปกติ เช่น ผลผลิตลดลง ใบที่แตกใหม่มีรูปทรงบิดเบี้ยวและเหี่ยวง่าย ละอองเรณูไม่งอกและไม่ติดผล (ศิริวรรณ, 2545)

2.2.3 ซิลิกอนกับธาตุอาหารพืช

Williams และ Vlamis, 1957 อ้างใน Epstein (1999) รายงานว่าซิลิกอนมีบทบาทสำคัญช่วยให้ความเป็นพิษจาก Mn^{+2} ในพืชลดลง ซึ่งได้ทดลองในข้าวบาร์เล่ย์ ให้ซิลิกอน 0.36 mM Si พบว่า ความเข้มข้นของ Mn^{+2} ในใบข้าวบาร์เล่ย์ลดลง และในต้นที่ไม่ให้ซิลิกอนพบว่าเกิดจุดที่ใบสาเหตุมาจากความเป็นพิษของ Mn^{+2} ซึ่งมักเกิดกับพืชตระกูลหญ้าที่ปลูกในพื้นที่ที่มี Mn สูง

Marschner และคณะ (1990) ศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างซิลิกอน (Si) กับฟอสฟอรัส (P) ในแตงกวา ร่วมกับการให้สังกะสี (Zn) ที่ต่ำ (0.1 μM Zn) และให้ P สูง (0.23-2.3 mM) เมื่อเวลา

ผ่านไปพบว่าต้นที่ไม่ให้ Si แสดงอาการขาด Zn ซึ่งมีสาเหตุมาจากในสภาพดังกล่าวมีปริมาณฟอสเฟตมากเกินไป แต่มีสังกะสีน้อย ขณะที่ต้นที่ให้ Si พบว่า ปริมาณ Zn และ P ในต้นมีความสมดุลกัน ซึ่งเชื่อว่าซิลิกอนช่วยแก้ไขสภาพดังกล่าว ขณะเดียวกันก็ช่วยให้สังกะสีมีบทบาททางสรีระมากกว่าเดิม ซึ่งการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า Si มีส่วนช่วยให้ปริมาณการดูด Zn และ P เกิดความสมดุลในพืช

Ma และ Takahashi (1990) เปรียบเทียบอัตราการดูด P ระหว่างต้นข้าวที่ให้ Si (1.66 mM H_2SiO_4) กับต้นที่ไม่ให้ Si โดยระดับฟอสฟอรัสที่ให้ คือ 0.014, 0.21 และ 0.70 mM KH_2PO_4 พบว่า ส่วนต้นของข้าวที่ได้รับ Si พบ organic P เป็นครึ่งหนึ่งของ Si ที่พืชดูดไปใช้ และความเข้มข้นของเหล็ก (Fe) และแมงกานีส (Mn) ในต้นที่ได้รับ Si มีค่าต่ำมาก ซึ่ง Ma และ Takahashi (1993) ได้ศึกษาเรื่องนี้ต่อ พบว่า Si ในสารละลายอาหารมีผลไปลดการดูด Ca^{+2} ในข้าว แต่ความเข้มข้นของ Ca^{+2} ในสารละลายอาหารกลับไม่ทำให้การดูด Si ในข้าวแตกต่างกัน

Whang และคณะ (1998) ศึกษาความแตกต่างของการสร้างและสะสมซิลิก้าที่ผิวใบพืชวงศ์ Poaceae กลุ่ม *Orysa* 17 สายพันธุ์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดบริเวณเส้นกลางใบ เส้นใบย่อย และบริเวณขอบใบ พบว่าบริเวณเส้นกลางใบของข้าวแต่ละพันธุ์มีกลุ่มผลึกซิลิก้า (silica body) ที่มีรูปร่างแตกต่างกัน จึงใช้บริเวณดังกล่าวจำแนกพันธุ์ข้าวต่างๆ ออกเป็น 11 กลุ่มโดยพิจารณาจากขนาด และรูปร่างของซิลิก้า เนื่องจากเก็บตัวอย่างมาจากคนละพื้นที่พวกเขาจึงไม่สรุปว่าการแยกกลุ่มจะมีความถูกต้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เพราะว่าแต่ละพื้นที่ที่เก็บตัวอย่างอาจมีปริมาณซิลิกอนและความเค็มหรือค่าการนำไฟฟ้าในดินแตกต่างกัน ซึ่งน่าจะเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้มีการสะสมซิลิก้าในข้าวแต่ละพันธุ์แตกต่างกัน

2.2.4 บทบาทของซิลิกอนในด้านเป็นธาตุเสริมประโยชน์ต่อพืช

2.2.4.1 ช่วยให้ใบข้าวตั้งชัน ลดการหักล้ม ปกติข้าวที่ได้รับปุ๋ยไนโตรเจนในอัตราสูง ใบข้าวส่วนปลายมีแนวโน้มที่จะโค้งลงบังแสงกันเอง ลำต้นอ่อนและหักล้มง่าย เมื่อข้าวได้รับซิลิกอนเพียงพอจะเกิดการเคลื่อนย้ายมาสะสมที่ผนังเซลล์ชั้นผิวนอกของใบ แผ่นใบทำให้แผ่นใบแข็งและตั้งชั้นรับแสงได้ดี ช่วยให้ข้าวมีลำต้นแข็งแรงขึ้นและล้มน้อยลง (Mauad *et al.*, 2003) นอกจากนี้พืชบางชนิด เช่น แตงกวายังมีปริมาณคลอโรฟิลล์สูงขึ้น และยืดอายุใบทำให้ร่วงหล่นช้าลง (Adatia and Besford, 1986 อ้างใน ศิริวรรณ, 2545)

2.2.4.2 ป้องกันการเข้าทำลายของเชื้อโรคและแมลงเข้าไปในรากและใบ เกิดจากซิลิกอนที่สะสมบริเวณชั้น epidermis ของผนังเซลล์ ทำให้ผนังเซลล์แข็งแรงและหนาขึ้น ซึ่งจะช่วยป้องกันโรคบางชนิดไม่ให้ล่วงล้ำเข้าไปในเซลล์ และช่วยลดปัญหาแมลงกัดกิน

Kim และคณะ (2002) พบว่าข้าวพันธุ์ Jinmi ที่อ่อนแอต่อโรคไหม้ เมื่อได้รับซิลิกอนที่ความเข้มข้น 50 ppm ขึ้นไป ทำให้ชั้นผนังเซลล์ของใบข้าวหนาเพิ่มขึ้น 35.58-66.54 เปอร์เซ็นต์ เมื่อสำรวจโรคใบไหม้ของข้าวพบว่าเปอร์เซ็นต์การเกิดโรคและความรุนแรงของโรคลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลนี้แสดงให้เห็นว่า ซิลิกอนส่งเสริมให้ผนังเซลล์ของใบข้าวหนาขึ้น ซึ่งน่าจะมีความเกี่ยวข้องในการช่วยส่งเสริมให้ข้าวทนต่อโรคใบไหม้ได้

Rodrigues และคณะ (2001) ทดลองให้ซิลิกอนในรูป calcium silicate 22 เปอร์เซ็นต์ในข้าวพันธุ์ต้านทาน ต้านทานปานกลาง และอ่อนแอต่อโรคใบไหม้ ศึกษาปริมาณการสะสมซิลิกอน เปอร์เซ็นต์การติดเชื้อเปรียบเทียบกับสภาพที่ไม่ได้รับซิลิกอน พบว่า ข้าวที่ได้รับซิลิกอนมีปริมาณซิลิกอนในเนื้อเยื่อประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ และเปอร์เซ็นต์ของโรคไหม้ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพันธุ์ต้านทานลดลงมากกว่า (42-82%) รองลงมาคือพันธุ์ต้านทานปานกลาง (28-41%) และพันธุ์ที่อ่อนแอต่อโรคไหม้ (17-26%) ตามลำดับ

Diamin และคณะ, 1967 อ้างใน ศิริวรรณ (2545) รายงานว่า พืชที่มีซิลิกอนสูงเมื่อหนอนเจาะลำต้นเข้าทำลายจะทำให้ฟันของตัวอ่อนหนอนเจาะลำต้นสึกหรอ

2.2.4.3 ป้องกันความเป็นพิษของเหล็ก อลูมินัม และแมงกานีส

เมื่อถั่วได้รับแมงกานีส 5.0 μM การให้ซิลิกอนจะช่วยป้องกันไม่ให้แมงกานีสเป็นพิษต่อพืช แต่ถ้าได้รับแมงกานีสสูงขึ้น (10 μM) ซิลิกอนจะช่วยลดความเป็นพิษของแมงกานีสลงได้บางส่วน โดยบทบาทของซิลิกอนที่แท้จริง คือ ช่วยให้พืชทนต่อแมงกานีสได้ดีขึ้น เนื่องจากในสภาพดังกล่าวพืชยังดูดแมงกานีสได้มากเพียงแต่ซิลิกอนช่วยให้แมงกานีสกระจายในใบอย่างทั่วถึงไม่สะสมบริเวณใดบริเวณหนึ่งมากเกินไป แต่ถ้าพืชไม่ได้รับซิลิกอนจะพบแมงกานีสสะสมอยู่ในใบบางบริเวณมากจนเป็นพิษและเกิดจุดสีน้ำตาลหรือเนโครซีส (necrosis) (Host and Marschner, 1978 อ้างใน ศิริวรรณ, 2545)

Hara และคณะ (1999) ทดลองปลูกข้าวในสารละลาย โดยการใส่อลูมินัมและใส่อลูมินัมร่วมกับซิลิกอน 2 ระดับ คือ อัตราต่ำ (0.5 mM Si) และอัตราสูง (21.7 mM Si) ผลการศึกษาพบว่า การยืดขยายของเนื้อเยื่อบริเวณรากข้าวลดลงเมื่อมีการใส่อลูมินัมอย่างเดียวเทียบกับการใส่อลูมินัมร่วมกับซิลิกอน การใส่ซิลิกอนลดความเป็นพิษของอลูมินัม โดยไม่พบความเป็นพิษของ อลูมินัมบริเวณเนื้อเยื่อรากข้าว โดยเฉพาะเมื่อมีการใส่อลูมินัมร่วมกับซิลิกอนในอัตราสูง ความเข้มข้นของ monomer aluminum ในสารละลายที่ใช้ปลูกข้าวลดลง 65-75 เปอร์เซ็นต์ หลังให้ซิลิกอนในอัตราสูงเป็นเวลา 54 ชั่วโมง และปริมาณอลูมินัมในยอดและรากข้าวต่ำกว่าสภาพที่ใส่อลูมินัมอย่างเดียว เนื่องจากอลูมินัมในสารละลายและในเนื้อเยื่อพืชถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ aluminum silicate complex ซึ่งเป็นพิษน้อยกว่าในรูปของ monomer aluminum

2.2.4.4 ซิลิกอนช่วยปลดปล่อยฟอสเฟตที่ถูกตรึงในดิน ให้เป็นประโยชน์กับพืชได้มากขึ้น (Epstein, 1994)

2.2.4.5 ซิลิกอนช่วยป้องกันและบรรเทาความเครียดที่เกิดจากเกลือในข้าวได้ ซึ่งจากการทดลองให้ ซิลิกอนในข้าวที่ปลูกในสภาพที่ได้รับเกลือ สามารถลดการดูดไอออนของโซเดียม (Na^+) ที่เป็นสาเหตุให้เกิดความเครียดเกลือในข้าวให้น้อยลง (บุญเทียม และคณะ, 2546; พิกุล, 2546; Agarie *et al.*, 1996; Marschner, 1995; Yoe, 1998)

2.2.5 บทบาทของซิลิกอนต่อลักษณะทางสรีรวิทยา

พืชที่สะสมซิลิกอนนอกจากจะช่วยให้พืชแข็งแรงและเสริมประโยชน์ในด้านอื่นๆ แล้ว ยังพบว่าซิลิกอนมีผลไปลดอัตราการคายน้ำของใบ ค่าการนำที่ผิวใบ (cuticular conductance) ในพืชที่ขาดซิลิกอนจะมีค่าเหล่านี้สูงกว่าพืชที่ได้รับซิลิกอน (Agarie *et al.*, 1998) การสะสมซิลิกอนในชั้น epidermis จัดว่าเป็นปัจจัยหลักที่ช่วยลดการระเหยของน้ำผ่านทางผิวใบ อย่างไรก็ตาม ซิลิกอนมีบทบาทลดการคายน้ำผ่านทางรูปากใบเช่นเดียวกับการลดการระเหยน้ำทางผิวใบ (Agarie *et al.*, 1998) สำหรับในข้าว พบว่า ข้าวที่ไม่ได้รับซิลิกอนปากใบของข้าวมีการตอบสนองช้าลงและตอบสนองต่อแสงสีน้ำเงินแตกต่างกันระหว่างข้าวที่ได้รับและไม่ได้รับซิลิกอน (Agarie *et al.*, 1999) Ueno และ Agarie (2005) พบว่า ผนังเซลล์ของปากใบข้าวที่ได้รับซิลิกอนจะปรากฏชั้น (layer) ของซิลิก้า 2 ชั้น ซึ่งข้าวที่ไม่ได้รับจะไม่พบชั้นนี้เลย นอกจากนี้ยังพบการสะสมซิลิกอนภายใน subsidiary cell ด้านนอกและด้านในของเซลล์ที่อยู่ติดกับปากใบ (periclina cell) การค้นพบนี้บอกให้ทราบว่ากลไกการควบคุมการปิดเปิดปากใบน่าจะมีสาเหตุมาจากการสะสมของซิลิกอนที่บริเวณปากใบด้วย

2.2.6 บทบาทของซิลิกอนต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตในพืช

Hossain และคณะ (2001) ศึกษาผลการใส่ซิลิกอนในรูป calcium silicate แกลบ และแกลบบด ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวที่ปลูกในดินร่วนเหนียว และดินร่วนปนทราย ร่วมกับการใส่ปุ๋ยเคมี NPK แบ่งการทดลองเป็น 2 สภาพ คือ สภาพที่ใส่สารเร่งการย่อยสลาย (biodecomposer) กับสภาพที่ไม่ใส่สารเร่ง พบว่า การใส่ซิลิกอนทั้งในรูป calcium silicate แกลบ และแกลบบด ทำให้จำนวนเมล็ดข้าว น้ำหนักเมล็ดเฉลี่ย และผลผลิตรวมของข้าวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพที่ได้รับปุ๋ยเคมีอย่างเดียว การใส่แกลบร่วมกับปุ๋ยเคมี ทำให้การแตกกอของข้าว ปริมาณไนโตรเจนและซิลิกอนทั้งหมดในข้าวเพิ่มขึ้นมากกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีอย่างเดียว ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้นเมื่อบดแกลบก่อนใส่และผลผลิตสูงสุดเมื่อบดแกลบร่วมกับการเติมสารเร่งการย่อยสลาย โดยดินร่วนเหนียวให้ผลผลิตมากกว่าดินร่วนปนทราย

Inanaga และคณะ, 2002 อ้างใน จุฑารัตน์ (2546) รายงานว่าซิลิกอนช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของข้าว การใส่ซิลิกอนช่วยลดการเกิดเมล็ดลีบของข้าว ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ IRRI (2006) ที่กล่าวถึงการใส่ซิลิกอนช่วยเพิ่มจำนวนรวงและเมล็ดดีต่อรวง

รัตนชาติ (2544) รายงานว่าการใส่ฟอสฟอรัสร่วมกับซิลิกอนให้กับข้าวที่ปลูกในดินกรดจัด ชุดดินรังสิต ส่งเสริมให้ข้าวตอบสนองต่อปุ๋ยฟอสฟอรัสได้มากขึ้น ผลผลิตน้ำหนักเมล็ด จำนวนเมล็ดทั้งหมดของข้าวเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์เมล็ดลีบของข้าวลดลงมากกว่าที่ได้รับการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเพียงอย่างเดียวอย่างเด่นชัด

ประมุข (2546) ศึกษาการใส่ซิลิกอนร่วมกับปุ๋ยเคมีในดินชุดดินรังสิตกรดจัดโดยใช้ข้าวพันธุ์ปทุมธานี และสุพรรณบุรี การศึกษา พบว่า การใส่ซิลิกอนในรูปแคลเซียมซิลิเกตและในรูปแกลบร่วมกับปุ๋ยเคมี NPK ข้าวทั้งสองพันธุ์มีการเจริญเติบโต การให้ผลผลิตเมล็ด และการดูดธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม จำนวนเมล็ดทั้งหมดของข้าวเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์เมล็ดลีบลดลง ผลผลิตเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้นสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมี NPK เพียงอย่างเดียว การเจริญเติบโต ผลผลิตเมล็ด และการดูดธาตุอาหารของข้าวทั้งสองพันธุ์ที่ได้รับซิลิกอนในรูปแคลเซียมซิลิเกตร่วมกับปุ๋ยเคมี NPK สูงกว่าที่ได้รับการใส่ซิลิกอนในรูปของแกลบร่วมกับปุ๋ยเคมี NPK ดังนั้นการใส่ซิลิกอนทั้งในรูปแคลเซียมซิลิเกต และในรูปแกลบช่วยเพิ่มปริมาณซิลิกอนที่เป็นประโยชน์ ในดินชุดดินรังสิตกรดจัด ประสิทธิภาพของแคลเซียมซิลิเกตในการเพิ่มปริมาณซิลิกอนที่เป็นประโยชน์ในชุดดินรังสิตกรดจัดสูงกว่าแกลบ

จุฑารัตน์ (2546) ศึกษาผลของซิลิกอนต่อผลผลิตและการดูดธาตุอาหารของข้าวและข้าวโพดที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัด ชุดดินองครักษ์ ใช้ซิลิกอนในรูปแคลเซียมซิลิเกต และแกลบ จากการศึกษาพบว่าการใส่ซิลิกอนในรูปของแคลเซียมซิลิเกตและแกลบให้กับข้าวและข้าวโพด มีผลทำให้การเจริญเติบโต การให้ผลผลิต และการดูดธาตุอาหารไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และซิลิกอนเพิ่มขึ้นมากกว่าข้าวและข้าวโพดที่ไม่ได้รับการใส่ซิลิกอนเลย การใส่ซิลิกอนทำให้จำนวนเมล็ดทั้งหมดของข้าวเพิ่มขึ้นและเปอร์เซ็นต์เมล็ดลีบของข้าวลดลง ส่งผลให้ผลผลิตเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้นมากกว่าข้าวที่ไม่ได้รับการใส่ซิลิกอน การใส่ซิลิกอนทั้งในรูปแคลเซียมซิลิเกตและในรูปของแกลบส่งเสริมให้ข้าวและข้าวโพดที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัด ชุดดินองครักษ์ ตอบสนองต่อปุ๋ยเคมีไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมมากขึ้น

2.2.7 บทบาทของซิลิกอนต่อการทนเค็มของพืช

Matoh และคณะ (1986) ได้ทดลองในข้าว ส่วน Ahmad และคณะ (1992) ได้ทดลองในข้าวสาลี โดยการให้ซิลิกอนในสารละลายอาหารที่ใช้ปลูกร่วมกับการให้เกลือโซเดียมคลอไรด์ พบว่า พืชทั้งสองชนิดเมื่อได้รับซิลิกอนร่วมด้วย ความเข้มข้นของโซเดียมในเนื้อเยื่อพืช

ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับต้นที่ได้รับเกลือเพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าซิลิกอนสามารถลดการดูดโซเดียมเข้าสู่เนื้อเยื่อพืชได้ สำหรับการปลูกในดิน Bradbury และ Admad, 1990 อ้างใน Epstein (1994) ได้ทดลองปลูก *Prosopis juliflora* ในกระถางรดด้วยเกลือโซเดียมคลอไรด์ 260 mM NaCl ร่วมกับซิลิกอน 0.46 mM ในรูปของ Na_2SiO_3 พบว่า พืชได้รับผลกระทบจากเกลือน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับต้นที่ได้รับเกลือเพียงอย่างเดียว

Liang และคณะ (1996) ศึกษาในข้าวบาร์เลย์พันธุ์อ่อนแอ (Kepin No 7) และ พันธุ์ทนเค็ม (Jian 4) ในสภาพที่ได้รับ NaCl 120 mM เปรียบเทียบกับสภาพที่ได้รับ NaCl 120 mM ร่วมกับ Si 1.0 mM พบว่า สภาพที่ได้รับ NaCl ร่วมกับซิลิกอน น้ำหนักแห้งผลผลิตเพิ่มขึ้น 18 และ 15.2 เปอร์เซ็นต์ ในพันธุ์ Kepin No 7 และ Jian 4 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพที่ได้รับ NaCl อย่างเดียว อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิเพิ่มขึ้น และเปอร์เซ็นต์การเกิด electrolytic leakage ลดลงในทั้งสองพันธุ์เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพที่ได้รับ NaCl อย่างเดียว ซึ่งเชื่อว่าซิลิกอนน่าจะมีบทบาทในการลดการซึมผ่านของเกลือผ่านทางผนังเซลล์ของราก และช่วยเพิ่มการดูด K^+ และยับยั้งการดูด Na^+ ทำให้ความสามารถในการทนเค็มของพืชเพิ่มขึ้น เมื่อศึกษาผลของซิลิกอนต่อปริมาณการดูดไอออนในรากของข้าวบาร์เลย์ทั้ง 2 พันธุ์ พบว่า สภาพที่ได้รับ NaCl ทำให้ Cl^- และ Na^+ ที่ผิวราก cortical cell และ stellar cell ของทั้งสองพันธุ์เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันปริมาณ K^+ ในบริเวณดังกล่าวกลับมีค่าต่ำลงในทั้ง 2 พันธุ์ ส่วนสภาพที่ได้รับ NaCl ร่วมกับซิลิกอน พบการสะสม Cl^- และ Na^+ ที่บริเวณดังกล่าวลดลง ขณะที่ปริมาณ K^+ กลับมีค่าเพิ่มขึ้น (Liang and Ding, 2002) ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า สภาพที่ได้รับความเครียดเกลือซิลิกอนทำให้การดูด Na^+ ลดลง และส่งเสริมให้การดูด K^+ เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากซิลิกอนชักนำให้มีการเปลี่ยนแปลงการดูดไอออนและทำให้เกิดการกระจายของจุลธาตุในเนื้อเยื่อพืชไม่ให้สะสมมากที่บางจุด ซึ่งจะทำให้เกิดความเป็นพิษของไอออนได้

Yeo และคณะ (1999) ทดลองให้โซเดียมคลอไรด์ 50 mM ร่วมกับซิลิกอน 0.98 mM ในรูปของ $NaSiO_2$ พบว่า เกลือทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของข้าวลดลง การให้ซิลิกอนร่วมด้วยช่วยให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของข้าวเพิ่มขึ้น เป็นผลมากจากการลดลงของโซเดียมไอออนในเนื้อเยื่อของข้าว ซึ่งอาจมาจากสาเหตุ 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 การให้ซิลิกอนช่วยให้ค่าการนำที่ปากใบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการคายน้ำของข้าวลดลงโดยไม่เกี่ยวข้องกับการดูดโซเดียม ส่วนกรณีที่ 2 ซิลิกอนไปลดการขนส่งโซเดียมใน apoplastic โดยซิลิกอนไปขัดขวางปริมาณน้ำที่ไหลผ่านทาง apoplast ซึ่งเป็นทางที่นำโซเดียมไอออนมาด้วย สรุปได้ว่า การให้ซิลิกอนในข้าวช่วยให้ข้าวมีค่าการนำที่ปากใบ และอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้น ในสภาพที่ได้รับเกลือ (แต่ในสภาพปกติซิลิกอนอาจไม่สามารถช่วยได้)

Savvas และคณะ (2002) ศึกษาอิทธิพลของซิลิกอนต่อคุณภาพดอกเยอบิร่า ที่ปลูกในสารละลายอาหารที่มีค่า EC 1.2 และ 3.2 dS/m พบว่า EC 3.2 dS/m ทำให้ จำนวนดอกต่อต้น และน้ำหนักเฉลี่ยของดอก ลดลง 12 และ 6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่า EC 1.2 dS/m ที่ค่า EC 3.2 dS/m การให้ซิลิกอน 1.25 mM ร่วมด้วย ทำให้ดอกชั้นที่ 1 เพิ่มขึ้นพอๆ กับความหนาแน่นของดอกที่เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของ Ca^{+2} ในใบเพิ่มขึ้น ส่วน Zn^{+2} และ Cu^{+2} ลดลงเล็กน้อย ผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าในสภาพดินเค็ม การให้ซิลิกอนสามารถเพิ่มคุณภาพดอกเยอบิร่าได้ นอกจากนี้ยังเพิ่มความเป็นประโยชน์ของ Ca และลดความเป็นพิษของ Zn และ Cu

นอกจากนี้ Liang และคณะ (2003) ยังได้ศึกษาอิทธิพลของซิลิกอนต่อการเปลี่ยนแปลงกิจกรรมของเอนไซม์ที่ยับยั้งกระบวนการ oxidation (antioxidant enzyme) และปริมาณ lipid peroxidation ในรากข้าวบาร์เลย์ทั้ง 2 พันธุ์ พบว่า กิจกรรมของเอนไซม์ superoxide dismutase, peroxidase, catalase และ glutathione reductase ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับ NaCl 4 วันขึ้นไป เมื่อได้รับซิลิกอนร่วมด้วย พบว่า กิจกรรมของเอนไซม์เหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพที่ได้รับเกลืออย่างเดียว โดยกิจกรรมของเอนไซม์ antioxidant และความเข้มข้นของ glutathine เปลี่ยนแปลงพร้อมกับ malodiadehyde ในพันธุ์ Jian 4 กิจกรรมของเอนไซม์ antioxidant และความเข้มข้นของ glutathine สูง ขณะที่ความเข้มข้นของ malodiadehyde และการรั่วไหลของอิเล็กตรอน (electrolytic leakage) ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับพันธุ์ Kepin No 7 ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า ซิลิกอนส่งเสริมให้ข้าวบาร์เล่ย์ทนเค็มได้ โดยซิลิกอนมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการช่วยให้ผนังเซลล์มีความสมบูรณ์และแข็งแรง

Trivedi และคณะ (2004) ศึกษาบทบาทของซิลิกอนต่อการเจริญเติบโตและการดูดไอออนในข้าวสาลีระยะต้นกล้าในสภาพที่ได้รับความเครียดเกลือ พบว่า เกลือทำให้ความยาวของต้นและราก ปริมาณคลอโรฟิลล์ น้ำตาล แป้ง และปริมาณ K^+ ในต้นลดลง โดยพันธุ์ GW-1 (พันธุ์ทนเค็ม) ลดลงน้อยกว่าพันธุ์ KRL 1-4 (พันธุ์อ่อนแอ) ขณะที่ปริมาณ Na^+ กลับมีค่าเพิ่มขึ้นในทั้งสองพันธุ์ การให้ซิลิกอนในสภาพที่ได้รับความเครียดเกลือมีส่วนช่วยให้การเจริญเติบโตของข้าวสาลีทั้งสองพันธุ์เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการลดลงของ Na^+ ในต้น ซึ่งส่งผลให้ ปริมาณคลอโรฟิลล์ น้ำตาล และแป้งเพิ่มขึ้นด้วย

Zhu และคณะ (2004) ศึกษาบทบาทของซิลิกอนต่อกิจกรรมของเอนไซม์ antioxidant ของใบแตงกวาที่ได้รับ NaCl 0 และ 50 mM เปรียบเทียบกับสภาพที่ได้รับ NaCl 0 และ 50 mM ร่วมกับ Si 1.0 mM พบว่า สภาพที่ได้รับ NaCl ร่วมกับ Si ทำให้ การรั่วไหลของอิเล็กตรอน H_2O_2 และปริมาณ thiobarbituric acid substance ลดลง กิจกรรมของเอนไซม์ superoxide dismutase, guaiacol peroxidase, ascorbate peroxidase, dehydroascorbate reductase และ glutathione reductase

เพิ่มขึ้น ซึ่งจะช่วยป้องกันความเสียหายของผนังรากพืชในสภาวะที่ได้รับเกลือได้ ดังนั้น ซิลิกอนจึงเป็นธาตุที่ช่วยบรรเทาความเป็นพิษจากเกลือและส่งเสริมการเจริญเติบโตในแตงกวาได้ โดยมีบทบาทเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงเมแทบอลิซึมและกระบวนการทางสรีรวิทยาในพืช

Gong และคณะ (2006) รายงานว่า NaCl ลดการเจริญเติบโตของข้าวในระยะต้นกล้าสืบเนื่องมาจากความเข้มข้นของ Na^+ และ Cl^- ในใบที่มากเกินไป โดยที่ซิลิกอนช่วยลดการขนส่งไอออนมากับน้ำ (transpiration bypass flow) และช่วยให้ Na^+ ใน xylem sap ลดลง NaCl ที่ความเข้มข้น 50 mM ทำให้การเจริญเติบโตของต้น และรากข้าวลดลง การให้ silicate 3 mM ร่วมด้วย ทำให้การเจริญเติบโตของต้นข้าวเพิ่มขึ้น ขณะที่การเจริญเติบโตของรากไม่แตกต่างจากสภาพที่ได้รับ NaCl อย่างเดียว ซึ่งเชื่อว่าการเจริญเติบโตของต้นที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจาก silicate ช่วยลดลงความเข้มข้นของ Na^+ ในต้นข้าว อัตราการขนส่ง Na^+ จากรากไปยังต้นลดลงเมื่อได้รับ silicate ร่วมกับ NaCl แต่ไม่มีผลต่อการขนส่ง K^+ นอกจากนี้ silicate ยังมีบทบาทลดการลำเลียงน้ำผ่านทาง apoplast ในรากข้าว (ลดจาก 4.2 เป็น 0.8%) ขณะเดียวกันความเข้มข้นของ Na^+ ใน xylem sap ก็ลดลงด้วย เนื่องมาจากการลดการไหลเวียนไปกับน้ำอย่างต่อเนื่อง (ลดจาก 6.2 เป็น 2.8 mM Na^+) จากรายงานดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการให้ซิลิกอน ทำให้การดูด Na^+ ในต้นกล้าข้าวลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการลดการขนส่ง Na^+ ผ่านทาง apoplast ของรากข้าวนั่นเอง

2.3 ลักษณะทั่วไปของพันธุ์ข้าวที่ใช้ในการศึกษา

ข้าว (*Oryza sativa* L.) จัดเป็นพืชที่ทนเค็มได้ปานกลางสามารถปลูกได้ในพื้นที่ดินเค็มน้อยจนถึงเค็มปานกลาง (EC ประมาณ 2-8 dS/m) อย่างไรก็ตามพันธุ์ข้าวแต่ละพันธุ์ก็มีการตอบสนองต่อเกลือแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับระยะการเจริญเติบโต ระยะเวลาที่ข้าวได้รับ ความเข้มข้นของเกลือในดิน และลักษณะประจำพันธุ์ของข้าวแต่ละพันธุ์ สำหรับพันธุ์ข้าวที่ทำการศึกษามีลักษณะเด่นและด้อยประจำพันธุ์ ดังนี้

2.3.1 ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2550)

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นข้าวเจ้าไวต่อช่วงแสง เก็บเกี่ยวประมาณวันที่ 25 พฤศจิกายน ปลูกได้ทั่วทุกภาคของประเทศไทยในพื้นที่นาน้ำฝนที่มีระดับน้ำไม่เกิน 80 เซนติเมตรในฤดูนาปี แต่คุณภาพข้าวสุกจะนุ่มและมีกลิ่นหอมมากที่สุดเมื่อปลูกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ประวัติพันธุ์ มีรายงานการพบครั้งแรกในนาเกษตรกร ชื่อนายจรูญ ตันทวุฒิ ท้องที่ตำบลแหลมประดู่ อำเภอพนัสนิคม จังหวัดชลบุรี ตั้งแต่ปี 2488 ต่อมาได้แบ่งเมล็ดไปปลูกที่ท่าทองหลาง อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา จนกระทั่งในช่วงระหว่างปี 2493-2510 กรมการข้าวใน

นายสุนทร สีหะเนิน พนักงานข้าวอำเภอในขณะนั้นได้รวบรวมรวงข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิจากอำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา จำนวน 199 รวง ไปปลูกคัดเลือกพันธุ์บริสุทธิ์ที่สถานีทดลองข้าวโคกสำโรง เมื่อปี พ.ศ. 2498 หลังจากนั้นในปี พ.ศ. 2500 นำไปปลูกเปรียบเทียบผลผลิตที่สถานีทดลองข้าวโคกสำโรง และนาเกษตรกรภาคเหนือ ภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่าข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 4-2-105 (ตัวเลข 4 หมายถึง ท้องถิ่นที่เก็บรวบรวมคืออำเภอบางคล้า 2 หมายถึง เลขประจำพันธุ์คือพันธุ์ข้าวที่ 2 และ 105 หมายถึง รวงที่ 105) ให้ผลผลิตสูง เมล็ดข้าวนุ่มมีกลิ่นหอม สามารถปรับตัวในสภาพพื้นที่ต่างๆ ได้ดี คณะกรรมการพิจารณาพันธุ์ได้มีมติให้เป็นพันธุ์ส่งเสริมออกขยายพันธุ์ได้ชื่อพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 เมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2502

ลักษณะประจำพันธุ์ เป็นข้าวต้นสูง มีความสูงเฉลี่ย 140 ซม. กอตั้ง ปล้อง กาบใบและใบมีสีเขียว มีขนบนใบ มุมของยอดแผ่นใบนอน ข้อต่อระหว่างใบและกาบใบสีเขียวอ่อน ลิ้นในรูปร่างแหลมมี 2 ยอด สีขาว หูใบสีเขียวอ่อน ปลายยอดดอกสีฟาง กลีบรองดอกสีฟาง ยอดเกสรตัวเมียสีขาว ต้นข้าวอ่อนล้มง่าย รวงข้าวค่อนข้างยาวแน่น คอรวงยาว ระแง้ถี่ ก้านรวงอ่อน เมล็ดข้าวเปลือกยาว 10.4 มม กว้าง 2.5 มม และหนา 1.9 มม เปลือกจมูกและยอดเมล็ดสีฟางมีขนที่เปลือกเมล็ด กลีบรองดอกสั้น เมล็ดข้าวกล้องรูปร่างเรียว ยาว 7.5 มม กว้าง 2.5 มม หนา 1.2 มม ใบธงตั้งตรง ใบแก่ช้าปานกลาง ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 8 สัปดาห์ ผลผลิตเฉลี่ย 515 กก/ไร่ น้ำหนักข้าวเปลือก 1,000 เมล็ด ประมาณ 27.7 กรัม

ลักษณะเด่น เป็นข้าวเจ้าที่มีคุณภาพดีมาก รูปร่างเรียวยาวได้มาตรฐานข้าวชั้นหนึ่ง ข้าวสารเรียวยาว เมล็ดข้าวใส แข็งแรง คุณภาพในการขัดสีดี มีกลิ่นหอมโดยเฉพาะข้าวใหม่ ท้องไข่น้อย เมื่อหุงสุกอ่อนนุ่ม อายุค่อนข้างเบาเก็บเกี่ยวได้เร็ว มีความทนทานต่อดินเค็ม ดินเปรี้ยว และทนแล้งได้ดีพอสมควร ปลูกในพื้นที่ดอนและสภาพข้าวไร่ได้

ข้อจำกัด น้ำหนักเมล็ดเบา ลำต้นค่อนข้างอ่อนล้มง่าย ไม่ต้านทานต่อโรคขอบใบไหม้ โรคใบสีส้ม โรคใบจุดสีน้ำตาล ไม่ต้านทานแมลงบั่ว เพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล เพลี้ยจักจั่นสีเขียว และหนอนกอ

2.3.2 ข้าว กข 6 (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2550)

ข้าวพันธุ์ กข 6 เป็นพันธุ์ข้าวเหนียวหอม ไวต่อช่วงแสง เก็บเกี่ยวประมาณวันที่ 21 พฤศจิกายน ปลูกมากในพื้นที่นาน้ำฝนในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ

ประวัติพันธุ์ เป็นพันธุ์ข้าวเหนียวที่ได้รับการปรับปรุงพันธุ์ข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยใช้รังสีแกมมาที่ 20 กิโลแรด อาบเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ105 แล้วนำมาปลูกคัดเลือกที่สถานีทดลองข้าวบางเขนและสถานีทดลองข้าวพิมาย จากการคัดเลือกได้ข้าวเหนียวหลายสายพันธุ์ข้าวชั่วที่ 2 นำไปปลูกคัดเลือกจนได้สายพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูง คือ สายพันธุ์ KDML

105'65G2U-68-254 เป็นสายพันธุ์ที่นับว่าเป็นข้าวพันธุ์ดีพันธุ์แรกของประเทศไทย ที่ค้นคว้าได้โดยใช้วิธีชักนำพันธุ์พืชที่เปลี่ยนกรรมพันธุ์โดยใช้รังสี ซึ่งคณะกรรมการพิจารณาพันธุ์ข้าวได้มีมติให้ออกใช้ขยายพันธุ์ได้ เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2520 ให้ชื่อว่า กข6

ลักษณะประจำพันธุ์ เป็นข้าวต้นสูง ความสูงประมาณ 150 ซม. ทรงกอตั้ง แตกกอดี ลำต้นแข็งแรงปานกลาง ปล้อง กาบใบและใบสีเขียว มีขนบนใบ มุมของยอดแผ่นใบตก ข้อต่อระหว่างใบและกาบใบสีเขียวอ่อน ใบธงค่อนข้างนอน ลิ้นใบรูปร่างแหลมมี 2 ยอด หูใบสีเขียวอ่อน ปลายยอดดอกสีฟาง กลีบของดอกสีฟาง ยอดเกสรตัวเมียสีขาว รวงยาวแน่น ระแง้ค่อนข้างถี่ คอรวงยาว เมล็ดข้าวเปลือกสีน้ำตาล ปลายยอดเมล็ดสีฟาง มีขนบนเมล็ด กลีบรองดอกสั้น เมล็ดข้าวกล้องรูปร่างเรียว ยาว 7.2 มม กว้าง 2.3 มม หนา 1.8 มม ข้าวสุกนึ่งนุ่ม หอม ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 5 สัปดาห์ ผลผลิตเฉลี่ยประมาณ 670 กก/ไร่ น้ำหนักข้าวเปลือก 1,000 เมล็ด ประมาณ 27.0 กรัม

ลักษณะเด่น ให้ผลผลิตค่อนข้างมีเสถียรภาพในสภาพแวดล้อมต่างๆ ทนแล้งได้ดี คุณภาพหุงต้มดี นุ่ม มีกลิ่นหอม คุณภาพการสีดี ลำต้นแข็งแรงปานกลาง ต้านทานต่อโรคใบจุดสีน้ำตาลและโรคไหม้

ข้อจำกัด ไม่ต้านทานต่อโรคขอบใบแห้ง เพลี้ยกระโดดสีน้ำตาลและแมลงบั่ว

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมต้นกล้าข้าว การปลูกข้าวในสารละลายอาหาร การเติมซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์

3.1.1 การเตรียมต้นกล้าข้าว

การเพาะเมล็ดข้าว คัดเมล็ดข้าวที่สมบูรณ์พันธุ์ละ 200 เมล็ด แช่ในน้ำกรอง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาห่อด้วยผ้าเก็บไว้ในที่ร่มและชื้นเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อเมล็ดเริ่มงอก นำไปเพาะในจาน Petri dish ที่รองด้วยกระดาษเพาะเมล็ด จำนวน 100 เมล็ดต่อจาน ให้เมล็ดข้าวงอกและเจริญเติบโตเป็นต้นกล้า ในขณะเพาะเมล็ดต้องรักษาความชื้นให้น้ำท่วมขังใน Petri dish และให้ได้รับแสง เมื่อต้นกล้าอายุ 10 วัน จึงนำไปปลูกในสารละลายอาหาร

3.1.2 การปลูกข้าวในสารละลายอาหาร

ใช้ต้นกล้าข้าวอายุ 10 วัน (มีใบจริงประมาณ 3 ใบ) ย้ายปลูกลงในกระถางพลาสติก ซึ่งบรรจุสารละลายอาหารตามวิธีการของ Limpinuntana (1978) จำนวน 2.5 ลิตร ปักดำข้าว 10 ต้นต่อกระถาง ปรับ pH ของสารละลายให้ได้ 5.8 และเปลี่ยนสารละลายอาหารทุก 7 วัน

3.1.3 การเติมซิลิกอนไดออกไซด์

ใส่ซิลิกอนไดออกไซด์ตามความเข้มข้นตามตำรับการทดลองหลังย้ายต้นกล้าปลูกในสารละลายอาหารได้ 7 วัน โดยการผสมกับสารละลายอาหารที่เตรียมไว้

3.1.4 การเติมโซเดียมคลอไรด์

หลังจากให้ซิลิกอนไดออกไซด์ 7 วัน เมื่อข้าวเริ่มตั้งตัวได้ จึงเริ่มใส่โซเดียมคลอไรด์ตามตำรับการทดลอง ซึ่งสารละลายที่เติม NaCl ให้ได้ความเข้มข้น 50 และ 100 mM ค่า EC ที่วัดได้ เท่ากับ 5.6 และ 10.2 dS/m ตามลำดับ

3.2 วิธีการศึกษา แผนการทดลอง และการบันทึกผล

3.2.1 ศึกษาหาระดับความเข้มข้นของซิลิกอนที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของข้าว

3.2.1.1 การวางแผนการทดลองและวิธีการทดลอง

การทดลองจัดการทดลองแบบ Factorial in Completely Randomized Design (CRD) จำนวน3 ซ้ำ ประกอบด้วย 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยที่ 1 พันธุ์ข้าว 2 พันธุ์ คือ ขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ปัจจัยที่ 2 ความเข้มข้นของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) 5 ระดับ คือ 0, 5, 10, 15 และ 20 มิลลิโมล (mM) ตามลำดับ

3.2.1.2 การบันทึกผลการทดลอง

บันทึกข้อมูลหลังจากข้าวได้รับซิลิกอนเป็นเวลา 7, 14, 21 และ 28 วัน ข้อมูลที่บันทึกมีประกอบด้วย

1) ข้อมูลด้านสรีรวิทยาพืช วัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของข้าว โดยใช้ Portable Photosynthetic system model LCA4 ADC วัดในช่วงเวลา 10.00-12.00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่พืชมีการสังเคราะห์ด้วยแสงสูง ข้อมูลที่ศึกษาประกอบด้วย อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง ($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$) อัตราการคายน้ำ ($mmol\ m^{-2}s^{-1}$) ค่าการนำที่ปากใบ ($mol\ m^{-2}s^{-1}$) และปริมาณ CO_2 ใน substomatal (vpm) สภาพอากาศในช่วงที่วัด อุณหภูมิในเรือนทดลอง 34.8-35.2°C ความชื้นสัมพัทธ์ 54.9-56.3 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มแสง 443-528 $\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$

2) ข้อมูลด้านการเจริญเติบโต โดยชั่งน้ำหนักแห้งใบ (leaf) กาบใบ (leaf sheath) และราก (root) นับจำนวนหน่อต่อต้น วัดพื้นที่ใบข้าว ด้วยเครื่องมือวัดพื้นที่ใบ (Leaf area meter) LI-COR รุ่น LI-3000A

3.2.1.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (Analysis of variance) ตามการจัดการทดลอง Factorial in Completely Randomized Design (CRD) เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างตำรับการทดลองโดยใช้ค่า Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (Gomez and Gomez, 1984)

3.2.2 ศึกษาอิทธิพลของซิลิกอนและโซเดียมคลอไรด์ต่ออัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงและการเจริญเติบโตของข้าว

3.2.2.1 การวางแผนการทดลองและวิธีการทดลอง

จัดการทดลองแบบ Factorial in Completely Randomized Design (CRD) จำนวน 3 ซ้ำ ประกอบด้วย 3 ปัจจัย คือ ปัจจัยที่ 1 พันธุ์ข้าว 2 พันธุ์ คือ ขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ปัจจัยที่ 2 ความเข้มข้นของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) 2 ระดับ คือ 0 และ 10 มิลลิโมล ปัจจัยที่ 3 ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 3 ระดับ คือ 0, 50 และ 100 มิลลิโมล

3.2.2.2 การบันทึกผลการทดลอง

บันทึกข้อมูลหลังข้าวได้รับโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 1, 7, 14, 21 และ 28 วัน ข้อมูลที่บันทึกประกอบด้วย

1) ข้อมูลด้านสรีรวิทยาพืช วัดอัตราการสังเคราะห์แสงของข้าว โดยใช้ Portable Photosynthetic system model LCA4 ADC สำหรับเวลาที่ศึกษาคือ 10.00-12.00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่พืชมีการสังเคราะห์ด้วยแสงสูง ข้อมูลที่ศึกษาประกอบด้วย อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง ($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$) อัตราการคายน้ำ ($mmol\ m^{-2}s^{-1}$) ค่าการนำที่ปากใบ ($mol\ m^{-2}s^{-1}$) และปริมาณ CO_2 ใน substoma (vpm) สภาพอากาศในช่วงที่วัด อุณหภูมิในเรือนทดลอง 35.8-36.2°C ความชื้นสัมพัทธ์ 48.3-49.7เปอร์เซ็นต์ ความเข้มแสง 879-912 $\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$

2) ข้อมูลด้านการเจริญเติบโต โดยชั่งน้ำหนักแห้งใบ (leaf) กาบใบ (leaf sheath) และราก (root) นับจำนวนหน่อต่อกอ วัดพื้นที่ใบข้าว ด้วยเครื่องมือวัดพื้นที่ใบ (leaf area meter) LI-COR รุ่น LI-3000A

3) ข้อมูลด้านธาตุอาหาร เก็บตัวอย่างพืชหลังจากได้รับโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน เพื่อวิเคราะห์หาธาตุ โพแทสเซียม (K) โซเดียม (Na) และ ซิลิก้า

- วิเคราะห์ปริมาณการดูดธาตุ โดยแยกส่วนของใบ ลำต้น (รวมกาบใบ) และราก นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วนำมาบด นำไปย่อยโดยใช้กรดไนตริก (HNO_3) กรดกำมะถัน (H_2SO_4) และ เปอร์คลอริก ($HClO_4$) อัตรา 5:1: 2 แล้วนำไปวิเคราะห์หาโพแทสเซียมและโซเดียมโดยใช้เครื่อง Flame photometer

- วิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ซิลิก้า ในส่วนของใบ ลำต้น และรากของข้าว ตามวิธีการของ Yoshida และคณะ (1976)

4) วิเคราะห์การเจริญเติบโตพืช ประกอบด้วย

- ความสัมพันธ์ระหว่างรากกับต้น(root-shoot relation) เพื่อหาลักษณะการกระจายน้ำหนักแห้งของพืช โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient; C)) ที่ได้จากการวัดน้ำหนักแห้งของรากต่อน้ำหนักแห้งต้น (นิมิตร อ้างใน นิชากร, 2545)

$$C = \frac{\text{Root dry weight}}{\text{Shoot dry weight}}$$

- Specific Leaf Weight (SLW) เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งของใบกับพื้นที่ใบ

$$SLW = \frac{\text{น้ำหนักแห้งใบพืช (mg)}}{\text{พื้นที่ใบ (cm}^2\text{)}}$$

- อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative Growth Rate; RGR) วัดจากอัตราการเพิ่มน้ำหนักแห้งของพืชจากการเก็บเกี่ยว 2 ครั้ง ในช่วงเวลาที่แตกต่างกันซึ่งน้ำหนักแห้งของพืชจะแปลงเป็นค่า $\log_e$

$$RGR = \frac{\log_e W_2 - \log_e W_1}{T_2 - T_1}$$

- อัตราการสะสมน้ำหนักแห้งสุทธิ (Net Assimilation Rate; NAR) เป็นการประเมินจากอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิของพืชทั้งในช่วงมีแสงและไม่มีแสง ซึ่งเป็นการวัดความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใบกับน้ำหนักแห้งทั้งต้นในช่วงเวลาที่เก็บเกี่ยวตามสูตร

$$NAR = \frac{(W_2-W_1)}{(T_2 - T_1)} \times \frac{(\log_e LA_2 - \log_e LA_1)}{(LA_2 - LA_1)}$$

W_1 และ W_2 คือ น้ำหนักแห้งของพืชจากการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 และ 2

T_1 และ T_2 คือ ระยะเวลาจากการเก็บเกี่ยวพืชครั้งที่ 1 และ 2

LA_1 และ LA_2 คือ พื้นที่ใบจากการเก็บเกี่ยวพืชครั้งที่ 1 และ 2

3.2.2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (Analysis of variance) ตามการจัดการทดลอง Factorial in Completely Randomized Design (CRD) เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างตำรับการทดลองโดยใช้ค่า Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (Gomez and Gomez, 1984)

3.3 ระยะเวลาทำวิจัย

มิถุนายน 2548 ถึง พฤษภาคม 2549

3.4 สถานที่ทำวิจัย

เรือนทดลองสำนักงานไร่ฝึก ห้องปฏิบัติการธาตุอาหารพืช คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

บทที่ 4
ผลการศึกษา

4.1 ระดับซิลิกอนที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของข้าว

จากการศึกษาผลของซิลิกอนต่อการเจริญเติบโตและการปรับตัวทางสรีรวิทยาของข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 พบว่า การให้ SiO_2 ที่ความเข้มข้น 0, 5, 10, 15 และ 20 mM ทำให้น้ำหนักแห้งใบ กาบใบ และราก ของข้าวเพิ่มขึ้น โดยเริ่มเพิ่มขึ้นที่ระดับ 10 mM ขึ้นไป และเมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งของข้าวที่ระดับ 10, 15 และ 20 mM พบว่าการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งที่ระดับ SiO_2 ทั้ง 3 ระดับไม่มีความแตกต่างกัน เมื่อสังเกตการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งยังพบว่า โดยเฉลี่ยตลอดการทดลอง ที่ระดับ SiO_2 10 mM ทำให้น้ำหนักแห้งทั้งใบ กาบใบ และรากเพิ่มขึ้นสูงสุด (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 น้ำหนักแห้งใบ กาบใบ และรากของข้าวทั้งสองพันธุ์ เฉลี่ยตลอดการทดลองที่ได้รับ SiO_2 0, 5, 10, 15 และ 20 mM

SiO_2 (mM)	น้ำหนักแห้งใบ (กรัม/ต้น)	น้ำหนักแห้งกาบใบ (กรัม/ต้น)	น้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น)
0	0.719 **(100)**	0.681 **(100)**	0.418 **(100)**
5	0.725 **(101)**	0.662 **(97)**	0.401 **(96)**
10	0.828 **(115)**	0.782 **(115)**	0.483 **(115)**
15	0.778 **(108)**	0.736 **(108)**	0.406 **(97)**
20	0.795 **(111)**	0.643 **(95)**	0.401 **(96)**
$LSD_{0.05}$	0.086	0.085	0.874

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลด เทียบกับสภาพควบคุม

สำหรับอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง (A) และอัตราการคายน้ำ (E) โดยเฉลี่ยตลอดการทดลอง การให้ SiO_2 5, 10, 15 และ 20 mM ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง 17, 3, 11 และ 21 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อัตราการคายน้ำลดลง 4, 7, 14 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ขณะที่ค่าการนำที่ปากใบ (Gs) พบว่า SiO_2 ที่ความเข้มข้น 10 และ 20

mM ทำให้ค่าการนำที่ปากใบของข้าวเพิ่มขึ้น 20 และ 3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม สำหรับ CO_2 ใน substomatal (Ci) พบว่า SiO_2 ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 20 mM ทำให้ CO_2 ใน substomatal เพิ่มขึ้น 1, 3 และ 1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง (A) อัตราการคายน้ำ (E) ค่าการนำที่ปากใบ (Gs) และปริมาณ CO_2 ใน substomatal (Ci) ของข้าวทั้งสองพันธุ์ เฉลี่ยตลอดการทดลองเมื่อได้รับ SiO_2 0, 5, 10, 15 และ 20 mM

SiO_2 (mM)	A ($\mu mol.m^{-2}s^{-1}$)	E ($mmol.m^{-2}s^{-1}$)	Gs ($mol.m^{-2}s^{-1}$)	Ci (vpm)
0	12.031 **(100)**	3.286 **(100)**	0.290 **(100)**	175.53 **(100)**
5	9.981 **(83)**	3.158 **(96)**	0.239 **(82)**	177.60 **(101)**
10	11.662 **(97)**	3.056 **(93)**	0.346 **(120)**	181.31 **(103)**
15	10.767 **(89)**	2.830 **(86)**	0.287 **(99)**	173.56 **(99)**
20	9.473 **(79)**	2.767 **(85)**	0.297 **(103)**	177.05 **(101)**
$LSD_{0.05}$	1.163	0.283	0.044	15.695

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลด เทียบกับสภาพควบคุม

จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ที่ระดับ SiO_2 10 mM เป็นระดับที่ทำให้ข้าวทั้งสองพันธุ์มีการเจริญเติบโตสูงสุด และเป็นระดับที่ทำให้ข้าวตอบสนองทางสรีรวิทยาดีที่สุด

4.2 ผลของซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์ต่อลักษณะทางสรีรวิทยาของข้าว

4.2.1 อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง (A)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 1, 14 ,21 และ 28 วัน พบว่า มีผลทำให้ A มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยช่วงที่ได้รับ NaCl 50 mM เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า A เพิ่มขึ้น 5 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ 100 mM มีผลทำให้ A ลดลง 19 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อได้รับ NaCl เป็นเวลา 1 วันขึ้นไป พบว่า ที่ความเข้มข้น NaCl 50 mM ไม่มีผลทำให้ A มีความแตกต่างจากสภาพควบคุม แต่เมื่อได้รับที่ความเข้มข้น 100 mM จึงพบว่า A ลดลง 19 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อข้าวได้รับ NaCl เป็นเวลา 14-28 วัน พบว่า A มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยที่ความเข้มข้น NaCl

50 mM ทำให้ A ลดลงประมาณ 19-30 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ 100 mM ลดลงประมาณ 32-43 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่า NaCl มีผลทำให้ A ของข้าวลดลง โดยที่ความเข้มข้น NaCl 50 mM ทำให้ A ลดลงหลังได้รับเป็นเวลา 14 วันขึ้นไป ขณะที่ 100 mM ทำให้ A ลดลงตั้งแต่ 3 ชั่วโมงแรกที่ได้รับ NaCl (ตารางที่ 3)

เมื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่าง พันธุ์ข้าวกับ ระดับความเข้มข้นของ NaCl ต่ออัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง พบว่า ช่วงที่ได้รับ NaCl 3 ชั่วโมง ถึง 7 วัน A ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่เมื่อได้รับ NaCl เป็นเวลา 14-28 วัน พบว่า A ของข้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยที่ความเข้มข้น NaCl 50 และ 100 mM ทำให้ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 มี A ลดลงประมาณ 13-21 และ 26-39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี A ลดลง 17-41 และ 24-51 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 3)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว กับ SiO_2 พบว่า มีผลทำให้ A มีความแตกต่างกันทางสถิติ หลังข้าวที่ได้รับ NaCl เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 21 และ 28 วัน โดยสภาพที่ได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 3 ชั่วโมง ข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ลดลง 13 และ 3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl เป็นเวลา 21-28 วัน พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี A เพิ่มขึ้น 9-24 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 มี A ลดลง 3-29 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 3)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl กับ SiO_2 พบว่า A มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหลังข้าวได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 3 ชั่วโมง 14 และ 21 วัน โดยช่วง 3 ชั่วโมงแรกที่ข้าวได้รับ NaCl 50 mM ร่วมกับ SiO_2 ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 มี A เพิ่มขึ้น 5 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 มี A ใกล้เคียงกับสภาพควบคุม ส่วนที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วย พบว่า A ของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ลดลง 27 และ 33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อได้รับ NaCl เป็นเวลา 14-21 วัน พบว่า ที่ความเข้มข้น NaCl 50 และ 100 mM เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วย ทั้งข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 มี A ลดลง 16-30 และ 12-43 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพันธุ์ กข6 มี A ลดลง 30-56 และ 37-67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 3, ภาพที่ 2A)

ตารางที่ 3 อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง ($\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ถึง 28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	ระยะเวลาที่ได้รับ NaCl					
			3 ชั่วโมง	1 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
	0		5.91 (100)	7.63 (100)	11.77 (100)	13.16 (100)	11.51 (100)	12.99 (100)
	50		6.23 (105)	7.56 (99)	10.62 (90)	10.63 (81)	8.05 (70)	9.77 (75)
	100		4.81 (81)	6.18 (81)	9.48 (81)	8.91 (68)	6.88 (60)	7.44 (57)
	$LSD_{0.05}$		0.577	0.743	NS	1.012	0.772	0.988
KDML105	0		5.40 (100)	7.82 (100)	10.59 (100)	14.69 (100)	9.66 (100)	9.76 (100)
	50		6.35 (118)	8.19 (105)	9.92 (91)	11.57 (79)	8.28 (86)	8.68 (87)
	100		4.93 (91)	6.95 (89)	9.30 (85)	9.00 (61)	7.19 (74)	6.69 (67)
RD6	0		6.42 (100)	7.44 (100)	12.61 (100)	11.62 (100)	13.36 (100)	16.02 (100)
	50		6.10 (95)	6.92 (93)	11.33 (90)	9.69 (83)	7.83 (59)	10.85 (68)
	100		4.70 (73)	5.41 (73)	9.66 (77)	8.83 (76)	6.56 (49)	8.18 (51)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS	1.431	1.092	1.397
KDML105		0	5.94 (100)	7.78 (100)	9.48 (100)	12.34 (100)	8.02 (100)	7.55 (100)
		10	5.18 (87)	7.53 (97)	10.62 (112)	11.16 (90)	8.73 (109)	9.35 (124)
RD6		0	5.83 (100)	6.90 (100)	11.49 (100)	10.84 (100)	10.82 (100)	11.85 (100)
		10	5.66 (97)	6.28 (91)	10.92 (95)	9.25 (85)	7.67 (71)	11.52 (97)
	$LSD_{0.05}$		0.666	NS	NS	NS	0.892	1.141
KDML105	0	0	6.09 (100)	8.50 (100)	10.84 (100)	15.17 (100)	9.63 (100)	9.85 (100)
		10	4.72 (77)	7.14 (84)	11.02 (102)	14.22 (94)	9.69 (101)	10.11 (103)
	50	0	6.33 (104)	8.13 (96)	8.93 (82)	12.56 (83)	8.48 (88)	7.63 (71)
		10	6.37 (105)	8.25 (97)	10.91 (101)	10.58 (70)	8.07 (84)	9.73 (79)
	100	0	5.40 (89)	6.71 (79)	8.68 (80)	9.30 (61)	5.95 (62)	5.18 (52)
		10	4.45 (73)	7.19 (85)	9.92 (92)	8.70 (57)	8.43 (88)	8.21 (62)
RD6	0	0	6.13 (100)	7.76 (100)	13.36 (100)	14.00 (100)	16.38 (100)	16.29 (100)
		10	6.72 (110)	7.11 (92)	11.87 (89)	9.23 (66)	10.33 (63)	15.76 (97)
	50	0	6.03 (98)	7.54 (97)	12.47 (93)	9.62 (69)	8.44 (52)	10.82 (66)
		10	6.17 (101)	6.30 (81)	10.18 (76)	9.76 (70)	7.21 (44)	10.89 (67)
	100	0	5.32 (87)	5.39 (69)	8.63 (65)	8.89 (64)	7.65 (47)	8.46 (52)
		10	4.08 (67)	5.42 (70)	10.70 (80)	8.77 (63)	5.48 (33)	7.90 (48)
	$LSD_{0.05}$		1.153	NS	NS	2.023	1.545	NS

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4.2.2 อัตราการคายน้ำ (E)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พบว่า E ของข้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตลอดการทดลอง โดยช่วงที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 1- 7 วัน พบว่า A ลดลง 8-11 และ 36-37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อได้รับเป็นเวลา 14-21 วัน พบว่า E ลดลง 39-44 และ 47-48 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อได้รับ NaCl เป็นเวลา 28 วัน พบว่า E ของข้าวลดลง 22 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่า E ของข้าวลดลงตามความเข้มข้นของ NaCl ที่เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวกับ ระดับความเข้มข้นของ NaCl พบว่า E มีความแตกต่างกันทางสถิติหลังข้าวได้รับ NaCl เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และ 28 วัน โดยช่วงที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 มี E ลดลง 6 และ 49 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพันธุ์ กข6 มี E ลดลง 2 และ 66 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl เป็นเวลา 1-21 วัน พบแนวโน้มว่า E ของข้าวทั้งสองพันธุ์ลดลงตามความเข้มข้นของ NaCl ที่เพิ่มขึ้น และ E มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติหลังได้รับ NaCl เป็นเวลา 28 วัน โดยที่ความเข้มข้น NaCl 50 และ 100 mM ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 มี E ลดลง 28 และ 62 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี E ลดลง 13 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลที่ได้นี้ชี้ให้เห็นว่าสภาพที่ข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นพบว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 มี E ลดลงมากกว่าพันธุ์ กข6 (ตารางที่ 4)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวกับ SiO_2 พบความแตกต่างทางสถิติเฉพาะช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 7 วัน โดยในสภาพที่ได้รับ SiO_2ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มี E ลดลง 4 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพที่ไม่ได้รับ SiO_2 ซึ่งเมื่อข้าวได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 1-7 วัน พบแนวโน้มว่า E ของข้าวขาวดอกมะลิ105 เพิ่มขึ้น 1-5 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 กลับมีค่าลดลง 1-10 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสภาพที่ข้าวได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 14-28 วัน พบแนวโน้มว่าทั้งข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มี E ลดลง 4-16 และ 9-15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 4)

เมื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่า E มีความแตกต่างกันทางสถิติเฉพาะช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 3 ชั่วโมงแรก โดยสภาพที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 พบว่า E ของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 ลดลง 9 และ 49 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี E ลดลง 26 และ62 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl เป็นเวลา 1-28 วัน พบว่า E ของข้าวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่พบแนวโน้มว่า ช่วงเวลาดังกล่าวเมื่อข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 ข้าวขาวดอกมะลิ105

ตารางที่ 4 อัตราการคายน้ำ (mmol $m^{-2}s^{-1}$) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ถึง 28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl	SiO_2	ระยะเวลาที่ได้รับ NaCl					
	(mM)	(mM)	3 ชั่วโมง	1 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
	0		2.57 (100)	2.16 (100)	3.59 (100)	3.56 (100)	3.27 (100)	2.76 (100)
	50		2.46 (96)	1.98 (92)	3.19 (89)	2.18 (61)	1.84 (56)	2.16 (78)
	100		1.12 (44)	1.37 (64)	2.26 (63)	1.86 (52)	1.73 (53)	1.31 (47)
	$LSD_{0.05}$		0.127	0.243	0.614	0.467	0.378	0.313
KDML105	0		2.78 (100)	2.51 (100)	3.55 (100)	4.14 (100)	3.69 (100)	3.16 (100)
	50		2.61 (94)	2.43 (97)	3.40 (96)	2.54 (61)	2.06 (56)	2.26 (72)
	100		1.43 (51)	1.66 (66)	2.12 (60)	2.03 (49)	1.89 (51)	1.19 (38)
RD6	0		2.36 (100)	1.81 (100)	3.64 (100)	2.98 (100)	2.85 (100)	2.35 (100)
	50		2.32 (98)	1.55 (86)	2.97 (82)	1.81 (61)	1.62 (57)	2.06 (87)
	100		0.81 (34)	1.08 (60)	2.39 (66)	1.70 (57)	1.57 (55)	1.42 (60)
	$LSD_{0.05}$		0.179	NS	NS	NS	NS	0.443
KDML105		0	2.31 (100)	2.15 (100)	3.01 (100)	3.12 (100)	2.60 (100)	2.40 (100)
		10	2.23 (96)	2.25 (105)	3.04 (101)	2.69 (86)	2.49 (96)	2.01 (84)
RD6		0	1.98 (100)	1.49 (100)	3.15 (100)	2.27 (100)	2.18 (100)	2.04 (100)
		10	1.68 (85)	1.47 (99)	3.85 (90)	2.05 (90)	1.85 (85)	1.85 (91)
	$LSD_{0.05}$		0.146	NS	NS	NS	NS	NS
KDML105	0	0	2.75 (100)	2.56 (100)	3.71 (100)	4.56 (100)	3.77 (100)	3.67 (100)
		10	2.80 (102)	2.46 (96)	3.39 (91)	3.73 (82)	3.60 (95)	2.64 (72)
	50	0	2.72 (99)	2.38 (93)	3.24 (87)	2.90 (64)	2.02 (54)	2.46 (67)
		10	2.49 (91)	2.47 (97)	3.57 (96)	2.19 (48)	2.10 (56)	2.07 (56)
	100	0	1.47 (53)	1.50 (59)	2.07 (56)	1.90 (42)	2.01 (53)	1.05 (29)
		10	1.39 (50)	1.83 (71)	2.17 (59)	2.15 (47)	1.78 (47)	1.33 (36)
RD6	0	0	2.69 (100)	1.97 (100)	4.02 (100)	3.10 (100)	3.02 (100)	2.57 (100)
		10	2.03 (75)	1.65 (83)	3.26 (81)	2.86 (92)	2.68 (89)	2.14 (83)
	50	0	2.64 (98)	1.54 (78)	3.42 (85)	1.88 (61)	1.80 (60)	2.24 (87)
		10	2.00 (74)	1.55 (79)	2.53 (63)	1.73 (56)	1.44 (48)	1.87 (73)
	100	0	0.60 (22)	0.95 (48)	2.02 (50)	1.84 (60)	1.70 (56)	1.29 (50)
		10	1.02 (38)	1.22 (62)	2.76 (69)	1.55 (50)	1.44 (48)	1.55 (60)
	$LSD_{0.05}$		0.254	NS	NS	NS	NS	NS

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

มี E ลดลง 3-52 และ 29-64 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี E ลดลง 21-52 และ 31-52 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ในช่วง 7 วันแรกที่ข้าวได้รับ NaCl ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีแนวโน้มมี E ลดลงน้อยกว่าพันธุ์ กข6 แต่เมื่อได้รับเป็นเวลา 14 วันขึ้นไปกลับพบแนวโน้มว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 มี E ลดลงมากกว่าพันธุ์ กข6 (ตารางที่ 4, ภาพที่ 2B)

4.2.3 ค่าการนำที่ปากใบ (Gs)

เมื่อข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พบว่า Gs ของข้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตลอดการทดลอง โดย Gs ลดลงตามความเข้มข้นของ NaCl ที่เพิ่มขึ้น และลดลงต่ำสุดหลังได้รับ NaCl 28 วัน โดยที่ความเข้มข้น NaCl 50 และ 100 mM ข้าวมี Gs ลดลง 54 และ 76 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 5)

เมื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวกับ ระดับความเข้มข้นของ NaCl พบว่า Gs ของข้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 7-14 และ 28 วัน โดยช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 7-14 วัน ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 มี Gs ลดลง 29-53 และ 71-78 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี Gs ลดลง 28-33 และ 50-60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ส่วนช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 28 วัน พบว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 มี Gs ลดลง 58 และ 79 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี Gs ลดลง 48 และ 64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 5)

เมื่อเปรียบเทียบในข้าวทั้งสองพันธุ์ที่ได้รับ SiO_2 พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหลังข้าวได้รับ NaCl 3 ชั่วโมง และ ช่วงที่ได้รับ 7-28 วัน โดยสภาพที่ได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 3 ชั่วโมง ค่า Gs ของข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ลดลง 5 และ 31 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 7 วัน ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 มี Gs ลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 เพิ่มขึ้น 29 เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 14 วัน พบว่า Gs ของข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ลดลง 29 และ 5 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แต่เมื่อได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 21 วัน Gs ของข้าวทั้งสองพันธุ์เกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามกับช่วงที่ได้รับ 7 วัน และเมื่อได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 28 วัน พบว่า Gs ในข้าวทั้งสองพันธุ์มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มี Gs ลดลง 38 และ 21 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 ค่าการนำที่ปากใบ (mol $m^{-2}s^{-1}$) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ถึง 28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	ระยะเวลาที่ได้รับ NaCl					
			3 ชั่วโมง	1 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
	0		0.207 (100)	0.074 (100)	0.249 (100)	0.239 (100)	0.164 (100)	0.156 (100)
	50		0.190 (92)	0.076 (102)	0.178 (71)	0.130 (54)	0.078 (47)	0.073 (46)
	100		0.054 (26)	0.044 (60)	0.084 (34)	0.077 (32)	0.053 (32)	0.043 (27)
	$LSD_{0.05}$		0.019	0.020	0.023	0.015	0.094	0.014
KDML105	0		0.218 (100)	0.095 (100)	0.279 (100)	0.305 (100)	0.156 (100)	0.179 (100)
	50		0.190 (87)	0.097 (102)	0.197 (71)	0.142 (47)	0.072 (46)	0.075 (42)
	100		0.069 (31)	0.055 (63)	0.080 (29)	0.067 (22)	0.047 (30)	0.037 (21)
RD6	0		0.197 (100)	0.054 (100)	0.220 (100)	0.174 (100)	0.173 (100)	0.134 (100)
	50		0.190 (97)	0.055 (103)	0.159 (72)	0.117 (67)	0.083 (48)	0.070 (52)
	100		0.040 (20)	0.034 (63)	0.087 (40)	0.087 (50)	0.060 (35)	0.049 (36)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	0.032	0.021	NS	0.016
KDML105		0	0.163 (100)	0.081 (100)	0.218 (100)	0.200 (100)	0.088 (100)	0.120 (100)
		10	0.154 (94)	0.083 (102)	0.152 (70)	0.142 (71)	0.095 (107)	0.074 (62)
RD6		0	0.169 (100)	0.051 (100)	0.136 (100)	0.129 (100)	0.124 (100)	0.094 (100)
		10	0.116 (69)	0.043 (84)	0.175 (129)	0.122 (95)	0.086 (69)	0.074 (79)
	$LSD_{0.05}$		0.022	NS	0.026	0.017	0.109	0.013
KDML105	0	0	0.213 (100)	0.100 (100)	0.360 (100)	0.340 (100)	0.125 (100)	0.245 (100)
		10	0.223 (105)	0.090 (90)	0.197 (55)	0.270 (79)	0.187 (150)	0.113 (46)
	50	0	0.207 (97)	0.097 (97)	0.217 (60)	0.197 (58)	0.087 (70)	0.077 (31)
		10	0.173 (81)	0.097 (97)	0.177 (49)	0.087 (26)	0.057 (46)	0.073 (30)
	100	0	0.070 (33)	0.047 (47)	0.077 (21)	0.063 (19)	0.053 (42)	0.037 (15)
		10	0.067 (31)	0.063 (63)	0.083 (23)	0.070 (21)	0.084 (32)	0.037 (15)
RD6	0	0	0.243 (100)	0.067 (100)	0.180 (100)	0.157 (100)	0.215 (100)	0.137 (100)
		10	0.150 (62)	0.040 (60)	0.260 (144)	0.190 (121)	0.130 (60)	0.130 (95)
	50	0	0.230 (95)	0.060 (90)	0.160 (89)	0.127 (81)	0.093 (43)	0.095 (69)
		10	0.150 (62)	0.050 (75)	0.157 (87)	0.107 (68)	0.073 (34)	0.045 (33)
	100	0	0.033 (14)	0.027 (40)	0.067 (37)	0.103 (66)	0.065 (30)	0.050 (36)
		10	0.047 (19)	0.040 (60)	0.077 (59)	0.070 (45)	0.055 (26)	0.047 (34)
	$LSD_{0.05}$		0.039	NS	0.045	0.029	0.019	0.023

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่า Gs ของข้าวมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 3 ชั่วโมง และช่วงที่ได้รับ 7-28 วัน โดยในช่วง 3 ชั่วโมงแรกที่ข้าวได้รับ NaCl 50 mM ร่วมกับ SiO_2 พบว่า Gs ของข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ลดลง 19 และ 38 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วย Gs ของข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ลดลง 68 และ 81 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อได้รับ NaCl 50 mM ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 7-14 วัน ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มี Gs ลดลง 51-74 และ 13-32 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วย ข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มี Gs ลดลง 77-79 และ 41-55 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 21-28 วัน พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี Gs ลดลง 54-70 และ 68-85 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี Gs ลดลง 66-67 และ 66-74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าช่วง 3 ชั่วโมงแรกที่ข้าวได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี Gs ลดลงน้อยกว่าพันธุ์ กข6 แต่เมื่อได้รับ NaCl เป็นเวลา 7 วันขึ้นไป การให้ SiO_2 ร่วมด้วยกลับพบว่า Gs ของข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่าลดลงมากกว่าพันธุ์ กข6 (ตารางที่ 5, ภาพที่ 2C)

4.2.4 ปริมาณ CO_2 ใน substomatal (Ci)

เมื่อข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พบว่า Ci มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติตลอดการทดลอง โดยข้าวที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 3 ชั่วโมงถึง 7 วัน พบว่า Ci ของข้าวลดลง 7-16 และ 36-38 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อได้รับเป็นเวลา 14-28 วัน Ci ของข้าวลดลง 13-16 และ 31-44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าสภาพที่ข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณ Ci ของข้าวลดลง (ตารางที่ 6)

เมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างพันธุ์เมื่อได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเดียวกัน พบว่า ทำให้ปริมาณ Ci ของข้าวมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตลอดการทดลอง โดยช่วง 3 ชั่วโมงที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ Ci ลดลง 7 และ 31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี Ci ลดลง 6 และ 46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่เมื่อได้รับ NaCl 1 วัน พบว่า ที่ 50 และ 100 mM NaCl ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี Ci ลดลง 9 และ 45 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 กลับมี Ci เพิ่มขึ้น 27 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของ NaCl 50 mM และลดลด 25 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้น 100 mM และเมื่อได้รับเป็นเวลา 7-28 วัน พบว่า ที่ความเข้มข้นของ NaCl 50 และ 100 mM ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี Ci ลดลง 17-24 และ 34-49 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วน

พันธุ์ กข6 มี Ci ลดลง 7-16 และ 27-42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 6)

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสภาพที่ได้รับ SiO_2 ในข้าวทั้งสองพันธุ์ พบว่าสภาพที่ข้าวได้รับ SiO_2 มีผลทำให้ปริมาณ Ci ของข้าวมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 3 ชั่วโมง ถึง 21 วัน และช่วงที่ได้รับ NaCl 21-28 วัน โดยสภาพที่ได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 3 ชั่วโมง ถึง 1 วัน ปริมาณ Ci ของข้าวขาวดอกมะลิ105 เพิ่มขึ้น 6-19 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 มีค่าลดลง 5-48 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสภาพที่ได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 7 วัน พบว่าปริมาณ Ci ของข้าวขาวดอกมะลิ105 ลดลง 9 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 เพิ่มขึ้น 24 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อข้าวได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 21 วัน พบว่า ปริมาณ Ci ของข้าวทั้งสองพันธุ์ลดลง 5 เปอร์เซ็นต์เท่ากัน และเมื่อได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 28 วัน พบว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 มี Ci ลดลง 8 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 กลับมี Ci เพิ่มขึ้นถึง 68 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าสภาพที่ข้าวได้รับ SiO_2 มีผลทำให้ปริมาณ Ci ของข้าวทั้งสองพันธุ์ลดลง (ตารางที่ 6)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่า ปริมาณ Ci ของข้าวทั้งสองพันธุ์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตลอดการทดลอง โดยช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 3 ชั่วโมงถึง 1 วัน พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ Ci ลดลง 4-8 และ 22-26 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี Ci ลดลง 25-57 และ 37-39 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อได้รับเป็นเวลา 14-21 วัน พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณ Ci ลดลง 26-29 และ 33-40 ส่วนพันธุ์ กข6 มี Ci ลดลง 15-16 และ 36-39 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อได้รับเป็นเวลา 28 วัน พบว่า NaCl 50 mM เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วย ข้าวข้าวดอกมะลิ105 มีปริมาณ Ci ลดลง 13 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 ปริมาณ Ci กลับเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ 100 mM เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วย ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ Ci ลดลงถึง 58 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 เพิ่มขึ้น 11 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ซึ่งผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่า สภาพที่ข้าวได้รับ NaCl เมื่อได้รับ SiO_2ร่วมด้วย สามารถช่วยให้ Ci ของข้าวเพิ่มขึ้นในบางช่วงเท่านั้น (ตารางที่ 6, ภาพที่ 2D)

ตารางที่ 6 ปริมาณ CO_2 ใน substomatal (vpm) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ถึง 28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	ระยะเวลาที่ได้รับ NaCl					
			3 ชั่วโมง	1 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
	0		246.3 (100)	114.0 (100)	188.2 (100)	208.2 (100)	224.3 (100)	103.0 (100)
	50		229.2 (93)	117.5 (103)	157.3 (84)	177.9 (85)	188.7 (84)	89.9 (87)
	100		152.8 (62)	70.43 (62)	120.2 (64)	122.9 (59)	154.8 (69)	57.7 (56)
	$LSD_{0.05}$		11.449	10.291	11.593	19.744	19.251	12.620
KDML105	0		260.4 (100)	153.1 (100)	216.2 (100)	250.1 (100)	258.0 (100)	120.3 (100)
	50		241.3 (93)	139.8 (91)	164.7 (76)	216.3 (86)	213.8 (83)	99.9 (83)
	100		180.5 (69)	84.9 (55)	126.6 (59)	127.4 (51)	171.5 (66)	65.7 (55)
RD6	0		232.2 (100)	74.9 (100)	160.3 (100)	166.2 (100)	190.5 (100)	85.7 (100)
	50		217.1 (94)	95.2 (127)	149.9 (93)	139.4 (84)	163.5 (86)	79.9 (93)
	100		125.0 (54)	55.9 (75)	113.9 (71)	118.4 (71)	138.1 (73)	49.8 (58)
	$LSD_{0.05}$		16.192	14.553	16.396	27.922	27.225	17.847
KDML105		0	220.9 (100)	115.2 (100)	176.8 (100)	202.1 (100)	220.4 (100)	99.2 (100)
		10	233.9 (106)	136.7 (119)	161.5 (91)	193.8 (96)	208.5 (95)	91.3 (92)
RD6		0	196.7 (100)	99.2 (100)	126.2 (100)	148.5 (100)	167.9 (100)	53.6 (100)
		10	186.2 (95)	51.5 (52)	156.6 (124)	134.2 (90)	160.2 (95)	90.0 (162)
	$LSD_{0.05}$		13.220	11.882	13.387	NS	22.229	14.572
KDML105	0	0	256.1 (100)	148.9 (100)	248.1 (100)	260.6 (100)	263.9 (100)	113.3 (100)
		10	264.7 (103)	157.3 (106)	184.3 (74)	239.6 (92)	252.1 (96)	127.3 (112)
	50	0	245.9 (96)	136.4 (92)	153.8 (62)	247.0 (95)	231.6 (88)	101.1 (89)
		10	236.8 (92)	143.3 (96)	175.6 (71)	185.7 (71)	196.0 (74)	98.7 (87)
	100	0	160.7 (63)	60.3 (41)	128.4 (52)	98.8 (38)	165.7 (63)	83.3 (74)
		10	200.4 (78)	109.5 (74)	124.7 (50)	156.1 (60)	177.2 (67)	48.0 (42)
RD6	0	0	249.2 (100)	122.2 (100)	142.2 (100)	154.4 (100)	207.7 (100)	74.7 (100)
		10	215.2 (86)	27.7 (23)	178.5 (126)	178.1 (115)	173.2 (83)	96.7 (129)
	50	0	248.5 (100)	118.3 (97)	134.9 (95)	148.3 (96)	151.6 (73)	70.0 (94)
		10	185.8 (75)	52.2 (43)	164.9 (116)	130.6 (85)	175.5 (84)	89.8 (120)
	100	0	92.5 (37)	37.1 (30)	101.5 (71)	142.8 (92)	144.3 (69)	15.9 (21)
		10	157.6 (63)	74.8 (61)	126.4 (89)	94.0 (61)	131.9 (64)	83.6 (112)
	$LSD_{0.05}$		22.898	20.581	23.187	39.488	38.501	25.239

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลด เทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4.3 ผลของซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์ต่อการเจริญเติบโตของข้าว

4.3.1 น้ำหนักแห้งใบ (leaf dry weight)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พบการลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หลังจากข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 14-28 วัน โดยข้าวมีน้ำหนักแห้งใบลดลง 24-47 และ 43-64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ซึ่งผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่า NaCl มีผลทำให้น้ำหนักแห้งใบของข้าวลดลง โดยลดลงตามความเข้มข้นและระยะเวลาที่ได้รับ NaCl (ตารางที่ 7)

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ในสภาพที่ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเดียวกัน พบว่าน้ำหนักแห้งใบของข้าวทั้งสองพันธุ์ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติตลอดการทดลองแม้จะได้รับเป็นเวลานานถึง 28 วันก็ตาม แต่พบแนวโน้มว่าในช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 50 mM เป็นเวลา 7-28 วันขึ้นไป ข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มีน้ำหนักแห้งใบลดลง 13-41 และ 10-52 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้นNaCl 100 mM ข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มีน้ำหนักแห้งใบลดลง 25-59 และ 13-69 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ซึ่งจากการทดลองครั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบการลดลงของน้ำหนักแห้งใบของข้าวทั้งสองพันธุ์ พบว่า ข้าวพันธุ์ กข6 มีน้ำหนักแห้งใบลดลงมากกว่าพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 เมื่อเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นเดียวกัน (ตารางที่ 7)

เมื่อพิจารณาสภาพที่ข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ SiO_2 พบว่า สภาพดังกล่าวไม่มีผลทำให้ น้ำหนักแห้งใบของข้าวทั้งสองพันธุ์ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตลอดการทดลอง แม้จะได้รับ NaCl นานถึง 28 วันก็ตาม แต่พบแนวโน้มว่าสภาพที่ได้รับ SiO_2 มีผลทำให้ น้ำหนักแห้งใบ ของข้าวเพิ่มขึ้น โดยช่วงที่ได้รับ NaCl 1-28 วัน สภาพที่ได้รับ SiO_2 ข้าวขาวดอกมะลิ105 และกข6 มีน้ำหนักแห้งใบเพิ่มขึ้น 2-35 และ 3-22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่า SiO_2 มีผลทำให้ข้าวมี น้ำหนักแห้งใบเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 7)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่า น้ำหนักแห้งใบของข้าวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติตลอดการทดลอง แต่พบแนวโน้มว่าช่วงที่ได้รับ NaCl 50 mM ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 1 และ 7 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีน้ำหนักแห้งใบเพิ่มขึ้น 23 และ 14 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ขณะที่พันธุ์ กข6 มีน้ำหนักแห้งใบเพิ่มขึ้นเฉพาะช่วงที่ได้รับ NaCl 1 วันเท่านั้น และน้ำหนักแห้งใบลดลง 14 เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้รับเป็นเวลา 7 วัน ส่วนที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วย พบว่า ช่วง 1 วันหลังที่ได้รับ NaCl ข้าวทั้งสองพันธุ์มีน้ำหนักแห้งใบเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน แต่เมื่อได้รับ NaCl 100 mM เป็นเวลา 7 วัน พบว่า น้ำหนักแห้งใบ ของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ลดลง 10 และ 4 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนในช่วงที่

ตารางที่ 7 น้ำหนักแห้งใบ (กรัม/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1-28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	ระยะเวลาที่ได้รับ NaCl (วัน)				
			1	7	14	21	28
	0		0.196 (100)	0.461 (100)	0.900 (100)	1.206 (100)	1.732 (100)
	50		0.189 (97)	0.403 (88)	0.670 (74)	0.912 (76)	0.926 (53)
	100		0.186 (95)	0.371 (75)	0.515 (57)	0.607 (50)	0.626 (36)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	0.092	0.163	0.244
KDML105	0		0.184 (100)	0.461 (100)	0.881 (100)	1.180 (100)	1.739 (100)
	50		0.188 (102)	0.399 (87)	0.629 (71)	0.929 (79)	1.023 (59)
	100		0.174 (95)	0.348 (75)	0.559 (63)	0.751 (64)	0.710 (41)
RD6	0		0.207 (100)	0.453 (100)	0.919 (100)	1.233 (100)	1.725 (100)
	50		0.190 (92)	0.407 (90)	0.710 (77)	0.894 (73)	0.829 (48)
	100		0.198 (96)	0.395 (87)	0.472 (51)	0.464 (38)	0.542 (31)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS	NS	NS
KDML105		0	0.155 (100)	0.360 (100)	0.682 (100)	1.021 (100)	1.065 (100)
		10	0.209 (135)	0.445 (123)	0.697 (102)	0.885 (87)	1.249 (117)
RD6		0	0.179 (100)	0.413 (100)	0.657 (100)	0.883 (100)	0.938 (100)
		10	0.218 (122)	0.424 (103)	0.743 (113)	0.844 (96)	1.126 (120)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS	NS	NS
KDML105	0	0	0.177 (100)	0.396 (100)	0.846 (100)	1.435 (100)	1.541 (100)
		10	0.191 (108)	0.526 (133)	0.915 (108)	0.924 (64)	1.936 (126)
	50	0	0.157 (89)	0.345 (87)	0.668 (79)	0.958 (67)	1.073 (70)
		10	0.218 (123)	0.453 (114)	0.590 (70)	0.900 (63)	0.972 (63)
	100	0	0.131 (74)	0.340 (86)	0.531 (63)	0.671 (47)	0.581 (38)
		10	0.217 (123)	0.356 (90)	0.586 (69)	0.831 (58)	0.838 (54)
RD6	0	0	0.182 (100)	0.448 (100)	0.881 (100)	1.404 (100)	1.470 (100)
		10	0.232 (127)	0.458 (102)	0.956 (109)	1.062 (76)	1.980 (135)
	50	0	0.180 (99)	0.430 (96)	0.662 (75)	0.800 (57)	0.780 (53)
		10	0.200 (110)	0.384 (86)	0.758 (86)	0.988 (70)	0.877 (60)
	100	0	0.174 (96)	0.360 (80)	0.428 (49)	0.444 (32)	0.563 (38)
		10	0.222 (122)	0.429 (96)	0.516 (59)	0.483 (34)	0.521 (35)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS	NS	NS

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ได้รับ NaCl 14-28 วัน พบแนวโน้มว่าที่ความเข้มข้น NaCl 50 mM เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วยข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มีน้ำหนักแห้งใบลดลง 30-37 และ 14-40 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ความเข้มข้น 100 mM เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วย น้ำหนักแห้งใบลดลง 31-46 และ 41-65 เปอร์เซ็นต์ ในพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 7, ภาพที่ 3A)

4.3.2 น้ำหนักแห้งกาบใบ (leaf sheath dry weight)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พบว่า ช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 1-14 วัน น้ำหนักแห้งกาบใบของข้าวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่พบแนวโน้มว่าช่วง 1 วันหลังได้รับ NaCl 100 mM มีผลทำให้ น้ำหนักแห้งกาบใบของข้าวเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 21-28 วัน พบว่าช่วงเวลาดังกล่าวมีผลทำให้น้ำหนักแห้งกาบใบของข้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิต โดยลดลง 5-30 และ 20-48 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุมผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า NaCl มีผลทำให้น้ำหนักแห้งกาบใบของข้าวลดลง (ตารางที่ 8)

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพันธุ์ข้าวที่ได้รับ NaCl ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน พบว่าน้ำหนักแห้งกาบใบของข้าวทั้งสองพันธุ์ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติตลอดการทดลอง แม้จะได้รับ NaCl เป็นเวลานานถึง 28 วันก็ตาม แต่พบแนวโน้มว่าช่วงที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 1 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีน้ำหนักแห้งกาบใบเพิ่มขึ้น 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ขณะที่พันธุ์ กข6 มีน้ำหนักแห้งกาบใบลดลง 6 และ 2 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อได้รับ NaCl เป็นเวลา 7-28 วัน พบแนวโน้มว่าข้าวทั้งสองพันธุ์มีน้ำหนักแห้งกาบใบลดลงตามความเข้มข้นและระยะเวลาที่ข้าวได้รับ NaCl โดยที่ความเข้มข้น NaCl 50 และ 100 mM ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีน้ำหนักแห้งกาบใบลดลง 2-22 และ13-62 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มีน้ำหนักแห้งกาบใบลดลง 4-38 และ 7-44 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 8)

เมื่อพิจารณาสภาพที่ข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ SiO_2 พบว่า สภาพที่ข้าวได้รับ SiO_2 ไม่มีผลทำให้น้ำหนักแห้งกาบใบของข้าวมีความแตกต่างกันทางสถิติตลอดการทดลอง แต่พบแนวโน้มว่า ช่วงที่ได้รับ NaCl 1 วันแรก สภาพที่ได้รับ SiO_2 ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มีน้ำหนักแห้งกาบใบเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน และเมื่อได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 7 วันขึ้นไป พบแนวโน้มว่าสภาพดังกล่าวสามารถช่วยส่งเสริมให้ข้าวทั้งสองพันธุ์มีน้ำหนักแห้งกาบใบเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะช่วงที่ได้รับ NaCl 28 วัน พบแนวโน้มว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 และกข6 มีน้ำหนักแห้งกาบใบเพิ่มขึ้น 18 และ 24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม(ตารางที่ 8)

ตารางที่ 8 น้ำหนักแห้งกาบใบ (กรัม/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1-28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	ระยะเวลาที่ได้รับ NaCl (วัน)				
			1	7	14	21	28
	0		0.110 (100)	0.350 (100)	0.934 (100)	1.508 (100)	2.454 (100)
	50		0.110 (100)	0.340 (97)	0.887 (95)	1.538 (102)	1.705 (69)
	100		0.115 (104)	0.316 (90)	0.818 (88)	1.206 (80)	1.276 (52)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS	0.263	0.335
KDML105	0		0.101 (100)	0.353 (100)	0.904 (100)	1.417 (100)	2.422 (100)
	50		0.108 (107)	0.347 (98)	0.823 (91)	1.531 (108)	1.881 (78)
	100		0.113 (112)	0.308 (87)	0.741 (82)	1.278 (90)	1.168 (48)
RD6	0		0.120 (100)	0.348 (100)	0.965 (100)	1.600 (100)	2.487 (100)
	50		0.113 (94)	0.334 (96)	0.951 (98)	1.544 (97)	1.529 (61)
	100		0.117 (98)	0.325 (93)	0.895 (93)	1.134 (71)	1.384 (56)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS	NS	NS
KDML105		0	0.098 (100)	0.301 (100)	0.824 (100)	1.482 (100)	1.672 (100)
		10	0.116 (119)	0.370 (123)	0.820 (99)	1.335 (90)	1.975 (118)
RD6		0	0.107 (100)	0.338 (100)	0.887 (100)	1.429 (100)	1.608 (100)
		10	0.126 (118)	0.333 (98)	0.986 (111)	1.422 (100)	1.992 (124)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS	NS	NS
KDML105	0	0	0.106 (100)	0.305 (100)	0.904 (100)	1.709 (100)	2.205 (100)
		10	0.095 (90)	0.400 (131)	0.903 (100)	1.125 (66)	2.638 (120)
	50	0	0.094 (89)	0.301 (99)	0.903 (100)	1.575 (92)	1.897 (86)
		10	0.122 (115)	0.392 (129)	0.742 (82)	1.487 (87)	1.864 (85)
	100	0	0.093 (88)	0.296 (97)	0.666 (74)	1.162 (68)	0.914 (41)
		10	0.132 (125)	0.319 (105)	0.815 (90)	1.394 (82)	1.422 (64)
RD6	0	0	0.108 (100)	0.354 (100)	0.907 (100)	1.784 (100)	2.034 (100)
		10	0.131 (121)	0.342 (97)	1.023 (113)	1.415 (79)	2.939 (144)
	50	0	0.109 (101)	0.337 (95)	0.893 (98)	1.464 (82)	1.436 (71)
		10	0.116 (107)	0.330 (93)	1.008 (111)	1.624 (91)	1.622 (80)
	100	0	0.103 (95)	0.324 (92)	0.861 (95)	1.039 (58)	1.353 (67)
		10	0.131 (121)	0.326 (92)	0.928 (102)	1.228 (69)	1.415 (70)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS	NS	NS

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่า น้ำหนักแห้งกาบใบไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติตลอดการทดลอง แม้ได้รับ NaCl เป็นเวลานานถึง 28 วันก็ตาม แต่อย่างไรก็ตามการทดลองครั้งนี้พบแนวโน้มว่าช่วงที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 1 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีน้ำหนักแห้งกาบใบเพิ่มขึ้น 15 และ 25 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มีน้ำหนักแห้งกาบใบเพิ่มขึ้น 7 และ 21 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แต่เมื่อได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 7 วัน พบแนวโน้มว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 มีน้ำหนักแห้งกาบใบเพิ่มขึ้น 29 และ 5 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ขณะที่พันธุ์ กข6 มีน้ำหนักแห้งกาบใบลดลง 7 และ 8 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งเมื่อได้รับ NaCl 14 วัน ผลที่ได้กลับเกิดขึ้นในทางตรงกันข้ามกับช่วงที่ได้รับ NaCl 7 วัน และเมื่อได้รับ NaCl เป็นเวลา 21-28 วัน พบแนวโน้มว่าน้ำหนักแห้งกาบใบของข้าวทั้งสองพันธุ์มีค่าลดลง โดยสภาพที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 NaCl ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีน้ำหนักแห้งกาบใบลดลง 13-15 และ 8-36 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มีน้ำหนักแห้งกาบใบลดลง 9-20 และ 30-31 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 8, ภาพที่ 3B)

4.3.3 น้ำหนักแห้งราก (root dry weight)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พบว่า ช่วงที่ได้รับ 1 วันแรก น้ำหนักแห้งรากของข้าวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งเมื่อได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 7-28 วัน จึงพบน้ำหนักแห้งรากลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยลดลง 6-61 และ 29-82 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่า น้ำหนักแห้งราก ของข้าวลดลงตามความเข้มข้นของ NaCl ที่เพิ่มขึ้น และลดลงตามระยะเวลาที่ข้าวได้รับ NaCl (ตารางที่ 9)

เมื่อเปรียบเทียบสภาพที่ข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเดียวกัน พบว่าน้ำหนักแห้งรากของข้าวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติตลอดการทดลอง แม้ข้าวได้รับ NaCl เป็นเวลานานถึง 28 วันก็ตาม แต่พบแนวโน้มว่าน้ำหนักแห้งรากของข้าวทั้งสองพันธุ์เริ่มลดลงตั้งแต่ 1 วันแรกที่ข้าวได้รับ NaCl และลดลงต่ำสุดในช่วงที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 28 วัน โดยข้าวขาวดอกมะลิ105 มีน้ำหนักแห้งรากลดลง 55 และ 82 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 ลดลง 66 และ 81 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลนี้แสดงให้เห็นว่า ที่ความเข้มข้นของ NaCl 50 mM ข้าวพันธุ์ กข6 มีน้ำหนักแห้งรากลดลงมากกว่าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ขณะที่ 100 mM ข้าวทั้งสองพันธุ์มี น้ำหนักแห้งรากลดลงใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 9)

ตารางที่ 9 น้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1-28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	ระยะเวลาที่ได้รับ NaCl (วัน)				
			1	7	14	21	28
	0		0.076 (100)	0.225 (100)	0.645 (100)	0.999 (100)	1.516 (100)
	50		0.070 (91)	0.210 (94)	0.402 (62)	0.609 (61)	0.598 (39)
	100		0.071 (93)	0.160 (71)	0.241 (37)	0.303 (30)	0.273 (18)
	$LSD_{0.05}$		NS	0.033	0.064	0.142	0.131
KDML105	0		0.078 (100)	0.224 (100)	0.666 (100)	0.985 (100)	1.618 (100)
	50		0.072 (93)	0.202 (90)	0.370 (56)	0.609 (62)	0.720 (44)
	100		0.069 (98)	0.150 (67)	0.230 (35)	0.345 (35)	0.284 (18)
RD6	0		0.075 (100)	0.226 (100)	0.624 (100)	1.014 (100)	1.414 (100)
	50		0.068 (90)	0.219 (97)	0.434 (70)	0.609 (60)	0.475 (34)
	100		0.074 (98)	0.170 (75)	0.253 (40)	0.261 (26)	0.262 (19)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS	NS	NS
KDML105		0	0.068 (100)	0.175 (100)	0.456 (100)	0.733 (100)	0.795 (100)
		10	0.077 (113)	0.209 (119)	0.388 (85)	0.559 (76)	0.953 (120)
RD6		0	0.074 (100)	0.215 (100)	0.456 (100)	0.663 (100)	0.687 (100)
		10	0.070 (95)	0.194 (91)	0.442 (103)	0.592 (89)	0.747 (109)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS	NS	NS
KDML105	0	0	0.076 (100)	0.195 (100)	0.646 (100)	1.182 (100)	1.434 (100)
		10	0.079 (104)	0.252 (129)	0.644 (100)	0.787 (67)	1.802 (126)
	50	0	0.067 (88)	0.173 (89)	0.435 (66)	0.686 (58)	0.707 (49)
		10	0.077 (101)	0.231 (118)	0.295 (44)	0.532 (45)	0.733 (51)
	100	0	0.062 (82)	0.157 (81)	0.244 (36)	0.332 (28)	0.244 (17)
		10	0.075 (99)	0.143 (73)	0.216 (32)	0.358 (30)	0.323 (23)
RD6	0	0	0.079 (100)	0.240 (100)	0.614 (100)	1.155 (100)	1.290 (100)
		10	0.071 (90)	0.211 (88)	0.633 (103)	0.872 (75)	1.537 (119)
	50	0	0.072 (91)	0.226 (94)	0.424 (69)	0.569 (49)	0.491 (38)
		10	0.071 (80)	0.211 (88)	0.443 (72)	0.648 (56)	0.459 (36)
	100	0	0.063 (90)	0.178 (74)	0.255 (42)	0.265 (23)	0.279 (22)
		10	0.076 (96)	0.161 (67)	0.250 (41)	0.257 (22)	0.244 (19)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS	NS	NS

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาสภาพที่ข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ SiO_2 พบว่า สภาพดังกล่าว ไม่มีผลทำให้น้ำหนักแห้งรากของข้าวทั้งสองพันธุ์แตกต่างกันทางสถิติตลอดการทดลอง แม้ได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl นานถึง 28 วันก็ตาม แต่พบแนวโน้มว่า สภาพที่ข้าวได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 1-7 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีการตอบสนองได้ดีกว่าพันธุ์ กข6 โดยข้าวขาวดอกมะลิ105 มีน้ำหนักแห้งรากเพิ่มขึ้น 13-19 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 กลับมีน้ำหนักแห้งรากลดลง 5-9 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสภาพที่ได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 14 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 กลับมีน้ำหนักแห้งรากลดลง 15 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 มีค่าเพิ่มขึ้น 3 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 28 วัน พบว่า ขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มีน้ำหนักแห้งรากเพิ่มขึ้น 20 และ 9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 9)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl กับ SiO_2 พบว่า สภาพดังกล่าวไม่มีผลทำให้น้ำหนักแห้งรากของข้าวมีความแตกต่างกันทางสถิติตลอดการทดลอง แต่พบแนวโน้มว่าช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 50 mM ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 1-7 วัน น้ำหนักแห้งรากของข้าวขาวดอกมะลิ105 เพิ่มขึ้น 1-18 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 ลดลงถึง 12-20 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วย ของข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มีน้ำหนักแห้งรากลดลง 1-27 และ 4-33 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อได้รับ NaCl 50 mM ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 14-28 วัน พบแนวโน้มว่า ข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มีน้ำหนักแห้งรากลดลง 49-56 และ 28-64 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วย น้ำหนักแห้งรากของข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ลดลง 68-77 และ 59-81 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าสภาพที่ข้าวได้รับ NaCl การให้ SiO_2 ร่วมด้วยมีแนวโน้มว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 มี น้ำหนักแห้งรากเพิ่มขึ้นมากกว่าพันธุ์ กข6 (ตารางที่ 9, ภาพที่ 3C)

4.3.4 พื้นที่ใบ (leaf area)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พบว่า ช่วงที่ได้รับ 1-7 วัน พื้นที่ใบของข้าวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และเมื่อได้รับ NaCl 14-28 วัน จึงพบว่า พื้นที่ใบของข้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยที่ความเข้มข้น NaCl 50 และ 100 mM ทำให้พื้นที่ใบของข้าวลดลง 33-57 และ 50-78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า พื้นที่ใบ ของข้าวลดลงตามความเข้มของ NaCl ที่เพิ่มขึ้น และลดลงตามระยะเวลาที่ข้าวได้รับ NaCl (ตารางที่ 10)

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพันธุ์ข้าวที่ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเดียวกัน พบว่าช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 1-21 วัน ปัจจัยดังกล่าวไม่มีผลทำให้พื้นที่ใบของข้าวมี

ความแตกต่างกันทางสถิติ แต่พบแนวโน้มว่าเมื่อได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นมีผลทำให้พื้นที่ใบของข้าวทั้งสองพันธุ์ลดลง และเมื่อได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 28 วัน พบว่าพื้นที่ใบของข้าวทั้งสองพันธุ์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยข้าวขาวดอกมะลิ105 มีพื้นที่ใบลดลง 46 และ 78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มีพื้นที่ใบลดลง 67 และ 79 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลนี้ชี้ให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นของ NaCl เดียวกันข้าวพันธุ์ กข6 มีพื้นที่ใบลดลงมากกว่าขาวดอกมะลิ105 (ตารางที่ 10)

เมื่อเปรียบเทียบข้าวทั้งสองพันธุ์ในสภาพที่ได้รับ SiO_2 พบว่า สภาพดังกล่าวในช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 1-28 วัน พื้นที่ใบของข้าวทั้งสองพันธุ์ไม่มีความแตกต่างทางสถิติจากสภาพที่ไม่ได้รับ SiO_2 แต่พบแนวโน้มว่า สภาพที่ได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 1-7 วัน พื้นที่ใบของข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่พันธุ์ กข6 สภาพได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 7 วัน พบว่าพื้นที่ใบเริ่มมีค่าลดลง และ เมื่อได้รับ NaCl 28 วัน จึงพบว่าสภาพดังกล่าวทำให้พื้นที่ใบของข้าวมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยข้าวขาวดอกมะลิ105 มีพื้นที่ใบเพิ่มขึ้นถึง 24 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 พื้นที่ใบไม่มีความแตกต่างจากสภาพควบคุม (ตารางที่ 10)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่า ช่วงที่ได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 1-21 วัน พื้นที่ใบของข้าวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งเมื่อได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 28 วัน จึงพบว่าพื้นที่ใบของข้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 มีพื้นที่ใบลดลง 42 และ 65 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มีพื้นที่ใบลดลง 65 และ 79 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสภาพที่ข้าวได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 ข้าวพันธุ์ กข6 มีพื้นที่ใบลดลงมากกว่าขาวดอกมะลิ105 (ตารางที่ 10, ภาพที่ 4A)

4.3.5 การแตกกอ

สภาพที่ข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นพบว่า ช่วง 1-21 วันหลังข้าวได้รับ NaCl จำนวนหน่อของข้าวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่พบแนวโน้มว่า เมื่อได้รับ NaCl 7 วันขึ้นไป จำนวนหน่อของข้าวลดลงตามความเข้มข้นของ NaCl ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อได้รับ NaCl 28 วัน พบว่า จำนวนหน่อของข้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยที่ความเข้มข้น NaCl 50 และ 100 mM ข้าวมีจำนวนหน่อลดลง 34 และ 47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า NaCl มีผลทำให้การแตกกอของข้าวลดลง ซึ่งปรากฏชัดเจนหลังได้รับ NaCl เป็นเวลา 28 วันขึ้นไป (ข้อมูลไม่ได้แสดง)

ตารางที่ 10 พื้นที่ใบ (ซม^2) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1-28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	ระยะเวลาที่ได้รับ NaCl (วัน)				
			1	7	14	21	28
	0		61.51 (100)	138.86 (100)	252.29 (100)	319.80 (100)	326.97 (100)
	50		54.87 (89)	127.22 (92)	168.64 (67)	180.62 (56)	140.20 (43)
	100		61.64 (100)	113.32 (82)	124.67 (50)	121.98 (38)	70.50 (22)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	24.492	33.995	15.714
KDML105	0		58.30 (100)	135.77 (100)	258.06 (100)	337.01 (100)	310.13 (100)
	50		49.51 (85)	128.99 (95)	156.38 (61)	186.38 (55)	166.25 (54)
	100		60.77 (104)	103.11 (87)	136.48 (53)	156.04 (46)	68.74 (22)
RD6	0		64.71 (100)	141.94 (100)	246.51 (100)	302.59 (100)	343.81 (100)
	50		60.22 (93)	125.45 (88)	180.91 (73)	174.86 (58)	114.14 (33)
	100		62.51 (97)	123.52 (87)	113.45 (46)	87.93 (29)	72.25 (21)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS	NS	22.223
KDML105		0	49.91 (100)	114.07 (100)	183.10 (100)	230.73 (100)	161.99 (100)
		10	62.48 (125)	131.18 (115)	184.17 (101)	222.23 (96)	201.42 (124)
RD6		0	59.43 (100)	138.47 (100)	175.92 (100)	206.08 (100)	177.21 (100)
		10	65.53 (110)	122.14 (88)	184.67 (105)	170.54 (83)	176.27 (99)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS	NS	18.145
KDML105	0	0	58.11 (100)	123.59 (100)	238.68 (100)	350.69 (100)	248.55 (100)
		10	58.49 (101)	147.95 (120)	277.43 (116)	323.33 (92)	371.70 (150)
	50	0	33.51 (58)	120.15 (97)	173.74 (73)	196.37 (85)	187.56 (75)
		10	65.52 (113)	137.85 (112)	139.01 (58)	176.40 (50)	144.93 (58)
	100	0	58.11 (100)	98.48 (80)	136.88 (57)	145.12 (41)	49.85 (20)
		10	63.43 (109)	107.74 (87)	136.07 (57)	166.96 (48)	87.64 (35)
RD6	0	0	58.16 (100)	146.85 (100)	238.07 (100)	361.44 (100)	354.84 (100)
		10	71.27 (123)	137.04 (93)	254.96 (107)	243.74 (67)	332.78 (94)
	50	0	60.27 (104)	135.06 (93)	177.38 (75)	168.48 (47)	105.92 (30)
		10	60.17 (103)	115.83 (79)	184.45 (77)	181.25 (50)	122.37 (34)
	100	0	59.86 (103)	133.49 (91)	112.31 (47)	88.31 (24)	70.86 (20)
		10	65.15 (112)	113.56 (77)	114.60 (48)	87.54 (24)	73.64 (21)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS	NS	31.428

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวกับระดับความเข้มข้นของ NaCl พบว่าจำนวนหน่อของข้าวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติตลอดการทดลอง แม้จะได้รับ NaCl เป็นเวลานานถึง 28 วันก็ตาม แต่จากการทดลองพบแนวโน้มว่าช่วงที่ได้รับ NaCl 28 วัน ข้าวทั้งสองพันธุ์มีจำนวนหน่อลดลงตามความเข้มข้นของ NaCl ที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวกับ SiO_2 พบว่าจำนวนหน่อของข้าวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติตลอดการทดลอง แต่พบแนวโน้มว่าสภาพที่ข้าวได้รับ SiO_2 จำนวนหน่อมากกว่าสภาพควบคุม

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้น NaCl กับ SiO_2 พบว่าปัจจัยดังกล่าวไม่มีผลทำให้จำนวนหน่อของข้าวแตกต่างกันทางสถิติ แม้จะได้รับเป็นเวลานานถึง 28 วันก็ตาม แต่พบแนวโน้มว่า ข้าวที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 28 วัน ทำให้จำนวนหน่อของข้าวลดลงต่ำสุด โดย ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีจำนวนหน่อลดลง 31 และ 44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มีจำนวนหน่อลดลง 21 และ 36 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ภาพที่ 4B)

4.4 ผลการวิเคราะห์การเจริญเติบโตของข้าวหลังได้รับซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์

4.4.1 อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักแห้งรากต่อต้น (root-shoot ratio; C)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พบว่ามีผลทำให้ C ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหลังข้าวได้รับ NaCl 7 วันขึ้น โดยช่วงที่ได้รับ NaCl 50 mM เป็นเวลา 7 วัน C ของข้าวเพิ่มขึ้น 2 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM ค่า C ของข้าวลดลง 19 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 14-28 วัน พบว่า C ของข้าวลดลง 31-33 และ 50-56 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า NaCl มีผลทำให้ข้าวมีการพัฒนาส่วนต้นมากกว่าส่วนราก โดยที่ความเข้มข้น 50 mM ปรากฏการลดลงหลังได้รับ 14 วันขึ้นไป ส่วนที่ความเข้มข้น 100 mM พบการลดลงตั้งแต่ช่วงที่ได้รับ 7 วันแรก (ตารางที่ 11)

เมื่อเปรียบเทียบข้าวทั้งสองพันธุ์ในสภาพที่ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเดียวกัน พบว่า C ของข้าวทั้งสองพันธุ์ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติตลอดการทดลอง แต่พบแนวโน้มว่า C ในข้าวทั้งสองพันธุ์ลดลงชัดเจนหลังได้รับ NaCl เป็นเวลา 14 วันขึ้นไป โดยช่วงที่ได้รับ NaCl 50 mM เป็นเวลา 14-28 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มี C ลดลง 29-31 และ 34-35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้น 100 mM ข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มี C ลดลง 47-57 และ 53-56 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 11)

เมื่อเปรียบเทียบสภาพที่ข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ SiO_2 พบว่า C ของข้าวทั้งสองพันธุ์ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติตลอดการทดลอง แต่พบแนวโน้มว่าสภาพที่ข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ SiO_2 มีผลทำให้ C ลดลง โดยข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ที่ได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 1-7 วัน มี C ลดลง 7-20 และ 3-15 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ช่วงที่ได้รับ NaCl 14-21 วัน มี C ลดลง 6-12 และ 8-16 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และช่วงที่ได้รับ NaCl 28 วัน ข้าวทั้งสองพันธุ์มี C ลดลงเพียง 3 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสภาพที่ข้าวได้รับ SiO_2 ไม่มีผลทำให้C ของข้าวลดลง (ตารางที่ 11)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่า C ของข้าวมีความแตกต่างกันทางสถิติเฉพาะช่วงที่ได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 1 และ 14 วัน โดยพบว่าสภาพที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 1 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี C ลดลง 22 และ 15 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 ลดลง 16 และ 20 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อได้รับเป็นเวลา 14 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี C ลดลง 6 และ 27 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพันธุ์ กข6 พบว่า สภาพที่ได้รับ NaCl 50 mM ร่วมกับ SiO_2 มีผลทำให้ C เพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อได้รับ NaCl 100 mM ร่วมกับ SiO_2 จึงพบว่า C ค่าลดลง 33 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อได้รับเป็นเวลา 21-28 วัน พบแนวโน้มว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 มี C ลดลง 29-32 และ 59-60 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพันธุ์ กข6 มี C ลดลง 34-42 และ 57-58 เปอร์เซ็นต์ สภาพที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 11, ภาพที่ 4C)

4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งใบกับพื้นที่ใบ (Specific Leaf Weight; SLW)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พบว่ามีผลทำให้ SLW ของข้าวมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติหลังได้รับ NaCl 14 วันขึ้นไป โดยช่วงที่ได้รับ NaCl 14-28 วัน SLW ของข้าวเพิ่มขึ้น 15-25 และ 19-57 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้น NaCl 50 และ 100 mM ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า NaCl มีผลทำให้ความหนาของใบข้าวเพิ่มขึ้น โดยปรากฏชัดเจนหลังข้าวได้รับ NaCl เป็นเวลา 14 วันขึ้นไป (ตารางที่ 12)

เมื่อเปรียบเทียบสภาพที่ข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเดียวกัน พบว่าช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 1-21 วัน SLW ของข้าวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และเมื่อได้รับ NaCl 28 วัน จึงพบว่า SLW มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยที่ความเข้มข้น NaCl 50 และ 100 mM ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี SLW เพิ่มขึ้น 27 และ 30 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี SLW เพิ่มขึ้น 1 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 12)

เมื่อเปรียบเทียบข้าวทั้งสองพันธุ์ในสภาพที่ข้าวได้รับ SiO_2 พบว่า สภาพดังกล่าวมีผลทำให้ SLW ของข้าวทั้งสองพันธุ์แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเฉพาะสภาพที่ได้รับ SiO_2

ตารางที่ 11 อัตราส่วนน้ำหนักแห้งรากต่อน้ำหนักแห้งส่วนต้นของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1-28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	ช่วงที่ได้รับ NaCl (วัน)				
			1	7	14	21	28
	0		0.246 (100)	0.281 (100)	0.364 (100)	0.370 (100)	0.333 (100)
	50		0.235 (96)	0.286 (102)	0.245 (67)	0.248 (67)	0.229 (69)
	100		0.245 (100)	0.228 (81)	0.182 (50)	0.168 (45)	0.146 (44)
	$LSD_{0.05}$		NS	0.040	0.017	0.021	0.022
KDML105	0		0.226 (100)	0.283 (100)	0.354 (100)	0.358 (100)	0.318 (100)
	50		0.224 (99)	0.278 (98)	0.245 (69)	0.251 (70)	0.227 (71)
	100		0.237 (105)	0.228 (81)	0.186 (53)	0.165 (46)	0.137 (43)
RD6	0		0.266 (100)	0.280 (100)	0.374 (100)	0.381 (100)	0.349 (100)
	50		0.247 (93)	0.295 (106)	0.246 (66)	0.246 (65)	0.231 (66)
	100		0.254 (95)	0.227 (81)	0.178 (47)	0.172 (45)	0.154 (44)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS	NS	NS
KDML105		0	0.254 (100)	0.272 (100)	0.279 (100)	0.265 (100)	0.231 (100)
		10	0.204 (80)	0.253 (93)	0.245 (88)	0.250 (94)	0.224 (97)
RD6		0	0.276 (100)	0.271 (100)	0.289 (100)	0.277 (100)	0.248 (100)
		10	0.235 (85)	0.264 (97)	0.242 (84)	0.255 (92)	0.241 (97)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS	NS	NS
KDML105	0	0	0.254 (100)	0.292 (100)	0.386 (100)	0.363 (100)	0.322 (100)
		10	0.198 (78)	0.273 (93)	0.322 (83)	0.353 (97)	0.315 (98)
	50	0	0.248 (98)	0.281 (96)	0.252 (65)	0.253 (70)	0.226 (70)
		10	0.199 (78)	0.274 (94)	0.238 (62)	0.248 (68)	0.229 (71)
	100	0	0.259 (102)	0.243 (83)	0.198 (51)	0.179 (49)	0.147 (46)
		10	0.215 (85)	0.213 (73)	0.174 (45)	0.150 (41)	0.128 (41)
RD6	0	0	0.269 (100)	0.300 (100)	0.338 (100)	0.377 (100)	0.342 (100)
		10	0.263 (98)	0.259 (86)	0.360 (93)	0.385 (102)	0.355 (104)
	50	0	0.266 (99)	0.260 (87)	0.276 (71)	0.272 (72)	0.238 (70)
		10	0.227 (84)	0.330 (110)	0.215 (55)	0.220 (58)	0.224 (66)
	100	0	0.292 (109)	0.252 (84)	0.203 (52)	0.182 (48)	0.165 (48)
		10	0.215 (80)	0.202 (67)	0.152 (39)	0.161 (43)	0.143 (42)
	$LSD_{0.05}$		0.032	NS	0.034	NS	NS

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ในช่วงที่ได้รับ NaCl 14 วัน โดยข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มี SLW เพิ่มขึ้น 14 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 12)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลทำให้ SLW ของข้าวทั้งสองพันธุ์แตกต่างกันทางสถิติเฉพาะช่วงที่ได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 7 วัน โดยพบว่าสภาพที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี SLW เพิ่มขึ้น 14 เปอร์เซ็นต์เท่ากันทั้งสองระดับความเข้มข้น ส่วนพันธุ์ กข6 มี SLW เพิ่มขึ้น 8 และ 25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าสภาพที่ข้าวได้รับ NaCl 50 mM ร่วมกับ SiO_2 ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีแนวโน้มมีความหนาของใบเพิ่มขึ้นมากกว่าพันธุ์ กข6 ส่วนที่ความเข้มข้น 100 mM เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วยกลับพบว่า ข้าวพันธุ์ กข6 มีแนวโน้มมีความหนาของใบเพิ่มขึ้นมากกว่าพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 (ตารางที่ 12, ภาพที่ 4D)

4.4.3 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative Growth Rate; RGR)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ RGR ของข้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่งตลอดการทดลอง โดยช่วงที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM สัปดาห์ที่ 1 RGR ของข้าวลดลง 22 และ 44 เปอร์เซ็นต์ สัปดาห์ที่ 2 RGR ลดลง 39 และ 63 เปอร์เซ็นต์ สัปดาห์ที่ 3 RGR ลดลง 41 และ 63 เปอร์เซ็นต์ และช่วงสัปดาห์ที่ 4 พบว่า ที่ความเข้มข้น NaCl 50 mM RGR ของข้าวลดลงถึง 68 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM ทำให้ข้าวตาย 10 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า RGR ของข้าวลดลงตามความเข้มข้นและระยะเวลาที่ข้าวได้รับ NaCl (ตารางที่ 13)

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างข้าวทั้งสองพันธุ์ในสภาพที่ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเดียวกัน พบว่า RGR ของข้าวทั้งสองพันธุ์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งตลอดการทดลอง โดยช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl สัปดาห์แรก ที่ความเข้มข้น NaCl 50 และ 100 mM ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี RGR ลดลง 28 และ 57 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ขณะที่พันธุ์ กข6 มี RGR ลดลง 16 และ 30 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อได้รับ NaCl สัปดาห์ที่ 2 พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี RGR ลดลง 63 และ 68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี RGR ลดลง 42 และ 57 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อได้รับ NaCl สัปดาห์ที่ 3 พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี RGR ลดลง 39 และ 65 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี RGR ลดลง 44 และ 60 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อได้รับนานถึงสัปดาห์ที่ 4 พบว่าที่ความเข้มข้น NaCl 50 mM ทำให้ RGR ของข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ลดลง 53 และ 64 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ขณะที่ความเข้มข้น 100 mM ทำให้ข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ไม่มีการเจริญเติบโตพร้อมกับเกิดการตายของเนื้อเยื่อบางส่วน 8 และ 13 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 13)

ตารางที่ 12 อัตราส่วนน้ำหนักแห้งใบต่อพื้นที่ใบ (มก/ซม^2) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1-28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	ช่วงที่ได้รับ NaCl (วัน)				
			1	7	14	21	28
	0		3.128 (100)	3.222 (100)	3.475 (100)	4.055 (100)	5.778 (100)
	50		3.222 (103)	3.269 (101)	3.982 (115)	5.070 (125)	6.536 (113)
	100		3.165 (101)	3.347 (104)	4.134 (119)	5.049 (125)	9.071 (157)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	0.182	0.345	1.453
KDML105	0		3.099 (100)	3.244 (100)	3.512 (100)	4.104 (100)	5.353 (100)
	50		3.175 (102)	3.292 (101)	3.917 (112)	5.115 (125)	6.824 (127)
	100		3.243 (105)	3.401 (105)	4.156 (118)	5.295 (129)	6.986 (130)
RD6	0		3.158 (100)	3.200 (100)	3.439 (100)	4.007 (100)	6.203 (100)
	50		3.270 (104)	3.247 (101)	4.047 (118)	5.024 (125)	6.248 (101)
	100		3.087 (98)	3.293 (103)	4.113 (120)	4.804 (120)	11.156 (180)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS	NS	2.055
KDML105		0	3.007 (100)	3.227 (100)	3.606 (100)	4.564 (100)	6.045 (100)
		10	3.337 (111)	3.397 (105)	4.117 (114)	5.112 (112)	6.729 (111)
RD6		0	2.983 (100)	3.001 (100)	3.765 (100)	4.564 (100)	8.467 (100)
		10	3.359 (113)	3.492 (116)	3.967 (105)	4.686 (103)	7.271 (86)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	0.211	NS	NS
KDML105	0	0	2.947 (100)	2.900 (100)	3.283 (100)	3.864 (100)	4.751 (100)
		10	3.250 (110)	3.588 (124)	3.741 (114)	4.343 (112)	5.955 (125)
	50	0	3.002 (102)	3.282 (113)	3.724 (113)	4.752 (123)	6.502 (137)
		10	3.347 (114)	3.301 (114)	4.109 (125)	5.478 (142)	7.145 (150)
	100	0	3.072 (104)	3.500 (121)	3.810 (116)	5.076 (131)	6.883 (145)
		10	3.414 (116)	3.302 (114)	4.501 (137)	5.514 (143)	7.088 (149)
RD6	0	0	3.046 (100)	3.047 (100)	3.558 (100)	4.093 (100)	7.202 (100)
		10	3.269 (107)	3.352 (110)	3.319 (93)	3.921 (96)	5.203 (72)
	50	0	3.147 (103)	3.190 (105)	3.860 (108)	4.890 (119)	5.720 (79)
		10	3.392 (111)	3.304 (108)	4.234 (119)	5.158 (126)	6.776 (94)
	100	0	2.757 (91)	2.766 (91)	3.878 (109)	4.629 (113)	12.479 (173)
		10	3.417 (112)	3.820 (125)	4.348 (122)	4.978 (122)	9.833 (137)
	$LSD_{0.05}$		NS	0.481	NS	NS	NS

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เมื่อเปรียบเทียบสภาพที่ข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ SiO_2 พบว่ามีผลทำให้ RGR ของข้าวทั้งสองพันธุ์แตกต่างกันในช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl สัปดาห์ที่ 1, 2 และ 4 โดยสภาพที่ได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl สัปดาห์ที่ 1 ข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มี RGR เพิ่มขึ้น 17 และ 7 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ สภาพที่ได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl สัปดาห์ที่ 2 ข้าวขาวดอกมะลิ105 และกข6 มี RGR เพิ่มขึ้น 17 และ 34 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl สัปดาห์ที่ 4 ข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มี RGR เพิ่มขึ้น 24 และ 67 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 13)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่าช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 สัปดาห์ที่ 1 ไม่มีผลทำให้ RGR ของข้าวทั้งสองพันธุ์มีความแตกต่างกันทางสถิติ และเมื่อได้รับเป็นเวลา 2 สัปดาห์ขึ้นไป จึงพบว่า RGR ของข้าวทั้งสองพันธุ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 สัปดาห์ที่ 2 ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี RGR ลดลง 19 และ 67 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี RGR ลดลง 18 และ 44 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ช่วงที่ได้รับสัปดาห์ที่ 3 ข้าวขาวดอกมะลิ 105 มี RGR ลดลง 43 และ 54 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี RGR ลดลง 34 และ 61 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และช่วงที่ได้รับสัปดาห์ที่ 4 ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี RGR ลดลง 55 และ 94 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี RGR ลดลง 57 และ 92 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 13, ภาพที่ 5B)

4.4.4 อัตราการสะสมน้ำหนักแห้งสุทธิ (Net Assimilation Rate; NAR)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ NAR ของข้าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติตลอดการทดลองโดยช่วงที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM สัปดาห์แรกข้าวมี NAR ลดลง 21 และ 33 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อได้รับ NaCl สัปดาห์ที่ 2 พบว่า NAR ของข้าวลดลง 31 และ 53 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อได้รับที่ได้รับ NaCl สัปดาห์ที่ 3 พบว่า NAR ของข้าวลดลง 27 และ 37 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และช่วงที่ได้รับ NaCl สัปดาห์ที่ 4 พบว่าที่ความเข้มข้น 50 mM ข้าวมี NAR ลดลง 92 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ความเข้มข้น 100 mM พบว่าข้าวไม่มีการเจริญเติบโตพร้อมกับมีเนื้อเยื่อบางส่วนตาย 27 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม แสดงให้เห็นว่า NAR ของข้าวลดลงตามความเข้มข้นและระยะเวลาที่ข้าวได้รับ NaCl ซึ่งเมื่อได้รับนาน 28 วัน ทำให้เกิดการตายของต้นข้าวโดยเฉพาะที่ความเข้มข้น 100 mM (ตารางที่ 14)

ตารางที่ 13 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (กรัม/กรัม-วัน) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1-28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	ช่วงที่ได้รับ NaCl (วัน) 1-7	7-14	14-21	21-28
	0		0.148 (100)	0.147 (100)	0.085 (100)	0.067 (100)
	50		0.116 (78)	0.090 (61)	0.050 (59)	0.028 (42)
	100		0.083 (56)	0.055 (37)	0.032 (37)	-0.007 (-10)
	$LSD_{0.05}$		0.011	0.012	0.006	0.006
KDML105	0		0.145 (100)	0.155 (100)	0.084 (100)	0.069 (100)
	50		0.105 (72)	0.100 (64)	0.052 (61)	0.032 (47)
	100		0.062 (43)	0.050 (32)	0.030 (35)	-0.006 (-8)
RD6	0		0.150 (100)	0.139 (100)	0.086 (100)	0.066 (100)
	50		0.127 (84)	0.081 (58)	0.048 (56)	0.024 (36)
	100		0.105 (70)	0.060 (43)	0.034 (40)	-0.009 (-13)
	$LSD_{0.05}$		0.016	0.017	0.008	0.009
KDML105		0	0.096 (100)	0.094 (100)	0.051 (100)	0.028 (100)
		10	0.112 (107)	0.109 (117)	0.059 (117)	0.035 (124)
RD6		0	0.123 (100)	0.080 (100)	0.053 (100)	0.020 (100)
		10	0.131 (107)	0.107 (134)	0.058 (109)	0.034 (167)
	$LSD_{0.05}$		0.013	0.014	NS	0.007
KDML105	0	0	0.123 (100)	0.135 (100)	0.082 (100)	0.065 (100)
		10	0.167 (136)	0.175 (130)	0.086 (105)	0.072 (111)
	50	0	0.104 (85)	0.090 (67)	0.047 (57)	0.035 (54)
		10	0.106 (86)	0.109 (81)	0.056 (68)	0.029 (45)
	100	0	0.060 (49)	0.056 (41)	0.023 (28)	-0.015 (-23)
		10	0.064 (52)	0.044 (33)	0.036 (44)	0.004 (6)
RD6	0	0	0.145 (100)	0.110 (100)	0.082 (100)	0.061 (100)
		10	0.155 (107)	0.168 (153)	0.089 (109)	0.071 (116)
	50	0	0.121 (83)	0.072 (65)	0.042 (51)	0.022 (36)
		10	0.132 (91)	0.090 (82)	0.054 (66)	0.026 (43)
	100	0	0.103 (71)	0.057 (52)	0.036 (44)	-0.022 (-36)
		10	0.106 (73)	0.062 (56)	0.032 (39)	0.005 (8)
	$LSD_{0.05}$		NS	0.023	0.012	0.013

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างข้าวทั้งสองพันธุ์ในสภาพที่ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเดียวกัน พบว่า NAR ของข้าวมีความแตกต่างกันทางสถิติเฉพาะช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl สัปดาห์ที่ 1, 2 และ 4 โดยช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM 1-2 สัปดาห์ ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี NAR ลดลง 8-22 และ 42-47 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี NAR ลดลง 32-40 และ 25-60 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อได้รับ NaCl สัปดาห์ที่ 4 พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ105 ไม่มีการเจริญเติบโตพร้อมเกิดการตายของเนื้อเยื่อบางส่วน 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 ที่ความเข้มข้น 50 mM ทำให้ NAR ลดลง 68 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ความเข้มข้น 100 mM พบว่าข้าว กข6 ไม่มีการเจริญเติบโตพร้อมกับเกิดการตาย 40 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 14)

เมื่อเปรียบเทียบสภาพที่ข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ SiO_2 พบว่ามีผลทำให้ NAR ของข้าวทั้งสองพันธุ์แตกต่างกันทางสถิติช่วงที่ได้รับ NaCl สัปดาห์ที่ 1 และ 3 โดยสภาพที่ได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl สัปดาห์ที่ 1 ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี NAR เพิ่มขึ้น 13 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 มี NAR ลดลง 13 เปอร์เซ็นต์ และช่วงที่ได้รับ NaCl สัปดาห์ที่ 3 ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี NAR ลดลง 16 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 มี NAR เพิ่มขึ้น 9 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 14)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลทำให้ NAR ของข้าวทั้งสองพันธุ์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติเฉพาะช่วงที่ได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 สัปดาห์ที่ 2 และ 4 โดยช่วงสัปดาห์ที่ 2 ที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี NAR ลดลง 9 และ 42 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี NAR ลดลง 47 และ 52 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และสัปดาห์ที่ 4 ที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี NAR ลดลง 86 และ 87 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 พบว่า สภาพที่ได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 มี NAR ลดลง71 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วยกลับทำให้ข้าวตายถึง 28 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 14, ภาพที่ 5A)

ตารางที่ 14 อัตราการสะสมน้ำหนักแห้งสุทธิ (กรัม/ซม^2-วัน) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1-28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	ช่วงที่ได้รับ NaCl (วัน)			
			1-7	7-14	14-21	21-28
	0		1.191 (100)	1.194 (100)	0.844 (100)	0.224 (100)
	50		0.938 (79)	0.819 (69)	0.616 (73)	0.040 (18)
	100		0.801 (67)	0.556 (47)	0.533 (63)	-0.060 (-27)
	$LSD_{0.05}$		0.158	0.133	0.095	0.063
KDML105	0		1.050 (100)	1.172 (100)	0.735 (100)	0.212 (100)
	50		0.967 (92)	0.909 (78)	0.539 (73)	-0.018 (- 8)
	100		0.604 (58)	0.623 (53)	0.411 (56)	-0.025 (-12)
RD6	0		1.333 (100)	1.217 (100)	0.953 (100)	0.236 (100)
	50		0.909 (68)	0.730 (60)	0.692 (73)	0.098 (42)
	100		0.997 (75)	0.490 (40)	0.655 (69)	-0.095 (-40)
	$LSD_{0.05}$		0.221	0.188	NS	0.089
KDML105		0	0.820 (100)	0.841 (100)	0.609 (100)	0.042 (100)
		10	0.927 (113)	0.961 (114)	0.514 (84)	0.071 (168)
RD6		0	1.152 (100)	0.807 (100)	0.734 (100)	0.111 (100)
		10	1.007 (87)	0.817 (101)	0.799 (109)	0.049 (44)
	$LSD_{0.05}$		0.181	NS	0.110	NS
KDML105	0	0	1.018 (100)	1.101 (100)	0.849 (100)	0.291 (100)
		10	1.082 (106)	1.242 (113)	0.620 (73)	0.132 (45)
	50	0	0.995 (98)	0.813 (74)	0.465 (55)	-0.076 (-26)
		10	0.939 (92)	1.005 (91)	0.613 (72)	0.041 (14)
	100	0	0.448 (44)	0.609 (55)	0.514 (61)	-0.089 (-31)
		10	0.760 (75)	0.636 (58)	0.308 (36)	0.039 (13)
RD6	0	0	1.438 (100)	1.049 (100)	0.933 (100)	0.328 (100)
		10	1.227 (85)	1.384 (132)	0.972 (104)	0.144 (44)
	50	0	1.011 (70)	0.900 (86)	0.665 (71)	0.102 (31)
		10	0.807 (56)	0.559 (53)	0.719 (77)	0.094 (29)
	100	0	1.008 (70)	0.472 (45)	0.605 (65)	-0.098 (-30)
		10	0.986 (69)	0.507 (48)	0.705 (76)	-0.091 (-28)
	$LSD_{0.05}$		NS	0.266	NS	0.126

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์เพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4.5 ผลของซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์ต่อปริมาณการสะสมซิลิก้า โพแทสเซียม และโซเดียม ในเนื้อเยื่อข้าว

4.5.1 ปริมาณการสะสมซิลิก้าในใบ (silica uptake in leaf)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พบว่า ซิลิก้าในใบของข้าวมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติตลอดการทดลอง โดยช่วงที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 1 วัน ซิลิก้าในใบเพิ่มขึ้น 34 และ 85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อได้รับเป็นเวลา 14 วัน ซิลิก้าในใบลดลง 22 และ 29 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อได้รับเป็นเวลา 28 วัน พบว่า ซิลิก้าในใบของข้าวลดลง 25 และ 29 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าซิลิก้าในใบข้าวลดลงตามความเข้มข้นของ NaCl ที่เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 15)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวกับระดับความเข้มข้นของ NaCl พบว่า ช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 1 วัน ซิลิก้าในใบของข้าวทั้งสองพันธุ์ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่พบแนวโน้มว่าข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 มีซิลิก้าในใบเพิ่มขึ้น 60 และ 107 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มีซิลิก้าในใบเพิ่มขึ้น 14 และ 69 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 14 วัน พบว่า ซิลิก้าในใบของข้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 มีซิลิก้าในใบลดลง 27 และ 11 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพันธุ์ กข6 มีซิลิก้าในใบลดลง 16 และ 47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อได้รับ 28 วัน พบว่า ของข้าวขาวดอกมะลิ105 ที่ความเข้มข้น NaCl 50 mM ทำให้ซิลิก้าในใบลดลง 1 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ 100 mM NaCl ทำให้ซิลิก้าในใบเพิ่มขึ้น 7 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพันธุ์ กข6 ที่ความเข้มข้น NaCl 50 และ 100 mM ทำให้ ซิลิก้าในใบลดลง 41 และ 55 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 15)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวกับ SiO_2 พบว่าสภาพดังกล่าวไม่มีผลทำให้ ซิลิก้าในใบในข้าวมีความแตกต่างกันทางสถิติในช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 1 และ 21 วัน แต่ในช่วงที่ได้รับ NaCl 28 วัน พบซิลิก้าในใบข้าวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการให้ SiO_2 ทำให้ซิลิก้าในใบข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 เพิ่มขึ้นประมาณ 12 และ 8 เท่าตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 15)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl กับ SiO_2 พบว่า ช่วงที่ได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 1 วัน ซิลิก้าในใบของข้าวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่เมื่อได้รับเป็นเวลา 14-28 วัน จึงพบ ซิลิก้าในใบของข้าวมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยช่วงที่ได้รับ NaCl 50 mM ร่วมกับ SiO_2 ข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มีซิลิก้าในใบเพิ่มขึ้นประมาณ 8-12 และ 4-16 เท่า ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM เมื่อได้รับ SiO_2

ร่วมด้วย ข้าวมีซิลิก้าในใบเพิ่มขึ้น 9-16 และ 3-10 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสภาพที่ข้าวได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีซิลิก้าในใบเพิ่มขึ้นมากกว่าพันธุ์ กข6 (ตารางที่ 15, ภาพที่ 6A)

4.5.2 ปริมาณซิลิก้าในกาบใบ (Silica uptake in leaf sheath)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พบว่าช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 1 และ 28 วัน มีผลทำให้ซิลิก้าในกาบใบของข้าวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 1 วัน ซิลิก้าในกาบใบของข้าวเพิ่มขึ้น 16 และ 75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อได้รับเป็นเวลา 28 วัน ซิลิก้าในกาบใบของข้าวลดลง 19 และ 14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลนี้แสดงให้เห็นว่า NaCl มีผลทำให้ซิลิก้าในกาบใบของข้าวลดลง (ตารางที่ 16)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว กับระดับความเข้มข้นของ NaCl พบว่าช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 1 และ 28 วัน ซิลิก้าในกาบใบมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งในสภาพที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 1 วัน พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีซิลิก้าในกาบใบเพิ่มขึ้นประมาณ 0.7 และ 1.7 เท่า ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 ที่ความเข้มข้น NaCl 50 mM ซิลิก้าในกาบใบลดลง 10 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ 100 mM กลับพบว่าซิลิก้าในกาบใบเพิ่มขึ้น 24 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อได้รับเป็นเวลา 28 วัน ของข้าวขาวดอกมะลิ105 มีซิลิก้าในกาบใบเพิ่มขึ้น 9 และ 8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 กลับมีค่าลดลง 37 และ 28 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ซึ่งผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่า NaCl มีผลทำให้ซิลิก้าในกาบใบในข้าวเพิ่มขึ้น โดยข้าวขาวดอกมะลิ105 มีอัตราการเพิ่มขึ้นมากกว่าพันธุ์ กข6 (ตารางที่ 16)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว กับ SiO_2 พบว่า สภาพที่ได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 1 และ 28 วัน ซิลิก้าในกาบใบของข้าวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่พบแนวโน้มว่าสภาพได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 1 วันแรก ข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มีซิลิก้าในกาบใบเพิ่มขึ้น 8 และ 5 เท่าตามลำดับ ซึ่งเมื่อได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 14 วัน พบว่าซิลิก้าในกาบใบของข้าวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และ กข6 เพิ่มขึ้น 10 และ 11 เท่าตามลำดับ และเมื่อได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 28 วัน ผลที่ได้มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกับช่วงที่ได้รับ NaCl 14 วัน (ตารางที่ 16)

ตารางที่ 15 ปริมาณซิลิก้าในใบ (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	Si (มก/ต้น)		
			1	14	28
	0		5.41 (100)	54.73 (100)	43.33 (100)
	50		7.25 (134)	42.72 (78)	32.35 (75)
	100		10.02 (185)	38.87 (71)	30.53 (70)
	$LSD_{0.05}$		1.306	5.324	4.190
KDML105	0		4.71 (100)	53.94 (100)	35.05 (100)
	50		7.52 (160)	39.11 (72)	34.54 (99)
	100		9.74 (207)	48.19 (89)	37.62 (107)
RD6	0		6.12 (100)	55.51 (100)	51.60 (100)
	50		6.99 (114)	45.34 (83)	30.17 (58)
	100		10.31 (169)	29.56 (53)	23.43 (45)
	$LSD_{0.05}$		NS	7.530	5.925
KDML105		0	0.88 (100)	5.05 (100)	5.62 (100)
		10	13.76 (1561)	89.11 (1764)	65.85 (1172)
RD6		0	1.50 (100)	4.76 (100)	7.80 (100)
		10	14.11 (942)	82.84 (1739)	62.34 (800)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS
KDML105	0	0	0.98 (100)	5.88 (100)	8.46 (100)
		10	8.43 (856)	102.01 (1735)	61.64 (729)
	50	0	0.75 (76)	4.75 (85)	5.18 (61)
		10	14.29 (1451)	73.46 (1249)	63.90 (755)
	100	0	0.91 (92)	4.52 (77)	3.22 (38)
		10	18.56 (1885)	91.87 (1562)	72.01 (851)
RD6	0	0	1.60 (100)	5.60 (100)	13.22 (100)
		10	10.63 (663)	105.43 (1884)	89.99 (681)
	50	0	1.26 (79)	4.95 (88)	5.63 (43)
		10	12.72 (793)	87.72 (1567)	54.71 (414)
	100	0	1.63 (101)	3.74 (67)	5.54 (34)
		10	18.99 (1184)	55.38 (989)	42.32 (320)
	$LSD_{0.05}$		NS	10.649	8.380

หายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพ ควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่า ช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 1-14 วัน ซิลิก้าในกาบใบของข้าวมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยช่วง 1 วันแรก ที่ 50 mM ข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มีซิลิก้าในกาบใบเพิ่มขึ้น 10 และ 3 เท่า ตามลำดับ ส่วนที่ 100 mM มีซิลิก้าในกาบใบเพิ่มขึ้น 17 และ 5 เท่า ตามลำดับ ส่วนช่วงที่ได้รับเป็นเวลา 14 วัน พบว่า ที่ 50 mM ข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มีซิลิก้าในกาบใบเพิ่มขึ้น 10 และ 12 เท่า ตามลำดับ ส่วนที่ 100 mM ซิลิก้าในกาบใบเพิ่มขึ้น 13 และ 11 เท่า ตามลำดับ และเมื่อได้รับเป็นเวลา 28 วัน พบว่าซิลิก้าในกาบใบของข้าวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิต แต่พบแนวโน้มว่าผลที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 14 วัน (ตารางที่ 16, ภาพที่ 6B)

4.5.3 ปริมาณซิลิก้าในราก (Silica uptake in root)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พบว่า ซิลิก้าในรากมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตลอดการทดลอง โดยในช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM 1 วันแรก ซิลิก้าในรากของข้าวเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaCl และเมื่อได้รับเป็นเวลา 14-28 วัน ซิลิก้าในรากเริ่มมีค่าลดลง โดยลดลง 14-27 และ 31-41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ซึ่งจากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าซิลิก้าในรากลดลงตามความเข้มข้นของ NaCl และปรากฏเมื่อข้าวได้รับ NaCl เป็นเวลา 14 วันขึ้นไป (ตารางที่ 17)

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างข้าวทั้งสองพันธุ์ในสภาพที่ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเดียวกัน พบว่าซิลิก้าในรากมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 1 และ 28 วัน ส่วนในช่วงที่ได้รับ 14 วัน พบว่าข้าวทั้งสองพันธุ์มีซิลิก้าในรากไม่แตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งจากการทดลองในช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM 1 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีซิลิก้าในรากเพิ่มขึ้นประมาณ 2 และ 3 เท่า ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 เพิ่มขึ้นประมาณ 2 และ 5 เท่า ตามลำดับ และเมื่อได้รับเป็นเวลา 14-28 วัน พบว่า ซิลิก้าในรากของข้าวทั้งสองพันธุ์มีค่าลดลง โดยช่วงที่ได้รับ 28 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีซิลิก้าในรากลดลง 12 และ 42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มีซิลิก้าในรากลดลง 21 และ 41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม เมื่อเปรียบเทียบในข้าวทั้งสองพันธุ์ ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่า ที่ความเข้มข้น NaCl 50 mM ข้าวพันธุ์ กข6 มีซิลิก้าในรากลดลงมากกว่าพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 ส่วนที่ความเข้มข้น 100 mM ข้าวทั้งสองพันธุ์มีซิลิก้าในรากไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 17)

ตารางที่ 16 ปริมาณซิลิก้าในกาบใบ (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	Si (มก/ต้น) 1	14	28
	0		1.51 (100)	26.72 (100)	34.07 (100)
	50		1.74 (116)	28.91 (108)	27.58 (81)
	100		2.63 (175)	29.80 (112)	29.44 (86)
	$LSD_{0.05}$		0.326	NS	4.019
KDML105	0		1.04 (100)	24.51 (100)	26.50 (100)
	50		1.71 (165)	22.57 (92)	28.80 (109)
	100		2.83 (272)	27.33 (112)	28.70 (108)
RD6	0		1.97 (100)	28.95 (100)	41.65 (100)
	50		1.77 (90)	35.24 (122)	26.37 (63)
	100		2.44 (124)	32.27 (111)	30.17 (72)
	$LSD_{0.05}$		0.461	NS	5.684
KDML105		0	0.41 (100)	4.50 (100)	5.48 (100)
		10	3.31 (799)	45.11 (1003)	50.52 (921)
RD6		0	0.75 (100)	5.33 (100)	12.24 (100)
		10	3.37 (452)	58.98 (1108)	53.22 (435)
	$LSD_{0.05}$		NS	5.839	NS
KDML105	0	0	0.30 (100)	3.79 (100)	4.05 (100)
		10	1.78 (601)	45.21 (1193)	48.95 (1210)
	50	0	0.35 (116)	5.82 (153)	7.05 (174)
		10	3.08 (1038)	39.33 (1038)	50.55 (1249)
	100	0	0.60 (202)	3.88 (102)	5.36 (132)
		10	5.06 (1702)	50.78 (1340)	52.05 (1286)
RD6	0	0	0.83 (100)	5.29 (100)	19.27 (100)
		10	3.11 (373)	52.60 (994)	64.02 (332)
	50	0	0.70 (84)	5.47 (103)	9.30 (48)
		10	2.84 (341)	65.01 (1229)	43.43 (225)
	100	0	0.70 (85)	5.21 (98)	8.14 (42)
		10	4.17 (501)	59.33 (1121)	52.20 (271)
	$LSD_{0.05}$		0.653	8.258	NS

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เมื่อข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ SiO_2 พบว่าสภาพดังกล่าวไม่มีผลทำให้ซิลิก้าในรากของข้าวทั้งสองพันธุ์แตกต่างกันทางสถิติในช่วงที่ได้รับ NaCl 1-14 วันแรก แต่เมื่อได้รับ NaCl เป็นเวลา 28 วันจึงพบว่าสภาพที่ได้รับ SiO_2 มีผลทำให้ซิลิก้าในรากของข้าวทั้งสองพันธุ์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยส่งผลให้ซิลิก้าในรากของข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 เพิ่มขึ้น 2.5 และ 2.7 เท่า ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลนี้แสดงให้เห็นว่าสภาพที่ข้าวได้รับ SiO_2 ข้าวพันธุ์ กข6 มีซิลิก้าในรากสะสมเพิ่มขึ้นมากกว่าพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 (ตารางที่ 17)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่าช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 1 วันแรก ซิลิก้าในรากของข้าวไม่มีความแตกต่างทางสถิต แต่เมื่อได้รับเป็นเวลา 14-28 วัน พบว่ามีผลทำให้ซิลิก้าในรากมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 14 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีซิลิก้าในราก เพิ่มขึ้น 1 และ 43 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ขณะที่พันธุ์ กข6 ที่ความเข้มข้น NaCl 50 mM เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วย มีซิลิก้าในรากลดลง 2 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ 100 mM เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วย กลับมีซิลิก้าในรากเพิ่มขึ้น 2 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 28 วัน พบว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 มีซิลิก้าในรากเพิ่มขึ้น 77 และ 18 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มีซิลิก้าในรากเพิ่มขึ้น 46 และ 90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 17, ภาพที่ 6C)

4.5.4 การสะสมโพแทสเซียมในใบ (K uptake in leaf)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พบว่า K ในใบข้าวมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหลังจากได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 14 และ 28 วัน โดยช่วงที่ได้รับ 14 วัน K ในใบข้าวลดลง 19 และ 34 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนช่วงที่ได้รับ 28 วัน K ในใบข้าวลดลง 48 และ 62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า K ในใบของข้าวลดลงตามความเข้มข้นและระยะเวลาที่ข้าวได้รับ NaCl (ตารางที่ 18)

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างข้าวขาวดอกมะลิ105 และพันธุ์ กข6 ในสภาพที่ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเดียวกัน พบว่า สภาพดังกล่าวมีผลทำให้ K ในใบข้าวแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเฉพาะในช่วงที่ได้รับ NaCl 14 วัน โดยที่ความเข้มข้น NaCl 50 และ 100 mM ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี K ในใบลดลง 21 และ 26 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี K ในใบลดลง 17 และ 42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนในช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 1 และ 28 วัน พบแนวโน้มเช่นเดียวกับช่วงที่ได้รับ NaCl 14 วัน แต่ในช่วงที่ได้รับ 28 วัน K ในใบข้าวมีแนวโน้มลดลงต่ำสุดในทั้งสองพันธุ์ ซึ่งพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 ลดลง 54 และ 57 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพันธุ์ กข6 ลดลง 54 และ 67 เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 18)

ตารางที่ 17 ปริมาณซิลิก้าในราก (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	Si (มก/ต้น) 1	14	28
	0		0.20 (100)	4.27 (100)	4.28 (100)
	50		0.34 (174)	2.98 (70)	3.28 (77)
	100		0.70 (357)	3.12 (73)	2.83 (66)
	$LSD_{0.05}$		0.068	0.474	0.562
KDML105	0		0.24 (100)	3.41 (100)	5.25 (100)
	50		0.43 (183)	1.91 (56)	4.59 (88)
	100		0.67 (282)	2.29 (67)	3.05 (58)
RD6	0		0.16 (100)	5.14 (100)	3.32 (100)
	50		0.26 (162)	4.06 (79)	1.97 (59)
	100		0.74 (469)	3.95 (77)	2.61 (79)
	$LSD_{0.05}$		0.096	NS	0.794
KDML105		0	0.24 (100)	1.61 (100)	2.46 (100)
		10	0.65 (266)	3.46 (215)	6.13 (249)
RD6		0	0.20 (100)	3.60 (100)	1.41 (100)
		10	0.57 (280)	5.15 (143)	3.86 (275)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	0.649
KDML105	0	0	0.20 (100)	2.48 (100)	4.06 (100)
		10	0.27 (131)	4.33 (175)	6.44 (159)
	50	0	0.19 (93)	1.31 (53)	2.02 (50)
		10	0.67 (329)	2.51 (101)	7.17 (177)
	100	0	0.33 (164)	1.04 (42)	1.31 (32)
		10	1.00 (489)	3.55 (143)	4.80 (118)
RD6	0	0	0.10 (100)	5.22 (100)	2.10 (100)
		10	0.21 (206)	5.06 (97)	4.54 (216)
	50	0	0.13 (124)	3.01 (58)	0.88 (42)
		10	0.38 (372)	5.10 (98)	3.06 (146)
	100	0	0.37 (363)	2.58 (50)	1.24 (59)
		10	1.10 (1070)	5.31 (102)	3.98 (190)
	$LSD_{0.05}$		NS	0.949	1.123

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เมื่อศึกษาสภาพที่ได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ทำการศึกษาไม่พบความแตกต่างของ K ในใบของข้าวทั้งสองพันธุ์ แต่พบแนวโน้มว่าในสภาพที่ได้รับ SiO_2 ข้าวทั้งสองพันธุ์มี K ในใบเพิ่มขึ้น โดยข้าวขาวดอกมะลิ105 มี K ในใบเพิ่มขึ้นมากกว่าพันธุ์ กข6 (ตารางที่ 18)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่า K ในใบข้าว มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเฉพาะช่วง 1 วันแรกที่ได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 โดยที่ความเข้มข้น NaCl 50 mM เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วย ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี K ในใบเพิ่มขึ้น 15 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 กลับมี K ในใบลดลง 7 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วย พบว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มี K ในใบลดลง 2 และ 9 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อข้าวได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 14-28 วัน พบว่า K ในใบข้าวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่พบแนวโน้มว่าสภาพที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 K ในใบของข้าวขาวดอกมะลิ105 ลดลง 21-41 และ 16-44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 ลดลง 6-52 และ 32-67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าสภาพที่ข้าวได้รับ NaCl เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วยข้าวมีแนวโน้มมี K ในใบเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 18, ภาพที่ 7A)

4.5.5 ปริมาณโพแทสเซียมในกาบใบ (K uptake in leaf sheath)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พบว่าปริมาณการสะสม K ในกาบใบลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตลอดการทดลอง โดยเมื่อข้าวได้รับ NaCl 1, 14 และ 28 วัน ที่ความเข้มข้น NaCl 50 mM ปริมาณการสะสม K ในกาบใบลดลง 15, 11 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM ปริมาณการสะสม K ในกาบใบลดลง 16, 31 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปริมาณการสะสม K ในกาบใบลดลงตามความเข้มข้นและระยะเวลาที่ได้รับ NaCl (ตารางที่ 19)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวกับระดับความเข้มข้นของ NaCl พบว่าปริมาณการสะสม K ในกาบใบมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเฉพาะช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 14 วัน โดยข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณการสะสม K ในกาบใบลดลง 24 และ 41 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 เมื่อได้รับ NaCl 50 mM ปริมาณการสะสม K ในกาบใบเพิ่มขึ้น 4 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ 100 mM กลับมีค่าลดลง 19 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ส่วนช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl เป็นเวลา 28 วัน พบแนวโน้มว่าข้าวพันธุ์ กข6 มีปริมาณ K ในกาบใบลดลงมากกว่าพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 (ตารางที่ 19)

ตารางที่ 18 ปริมาณโพแทสเซียมในใบ (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	K (มก/ต้น)		
			1	14	28
	0		7.44 (100)	16.23 (100)	29.45 (100)
	50		6.81 (91)	13.14 (81)	15.19 (52)
	100		6.40 (86)	10.72 (66)	11.23 (38)
	$LSD_{0.05}$		NS	1.173	2.638
KDML105	0		6.94 (100)	16.45 (100)	29.48 (100)
	50		6.55 (94)	12.94 (79)	16.89 (46)
	100		6.26 (90)	12.12 (74)	12.74 (43)
RD6	0		7.95 (100)	16.02 (100)	29.48 (100)
	50		7.07 (89)	13.35 (83)	13.49 (46)
	100		6.53 (82)	9.31 (58)	9.73 (33)
	$LSD_{0.05}$		NS	1.659	NS
KDML105		0	6.11 (100)	13.50 (100)	18.35 (100)
		10	7.06 (116)	14.17 (105)	21.05 (115)
RD6		0	7.03 (100)	12.08 (100)	17.19 (100)
		10	7.34 (104)	13.70 (113)	17.91 (104)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS
KDML105	0	0	6.48 (100)	15.41 (100)	27.11 (100)
		10	7.40 (114)	17.49 (113)	31.84 (117)
	50	0	5.66 (87)	13.75 (89)	17.73 (65)
		10	7.43 (115)	12.13 (79)	16.04 (59)
	100	0	6.17 (95)	11.35 (74)	10.20 (38)
		10	6.35 (98)	12.89 (84)	15.27 (56)
RD6	0	0	7.28 (100)	14.52 (100)	27.58 (100)
		10	8.62 (118)	17.52 (121)	31.28 (113)
	50	0	7.36 (101)	13.02 (90)	13.63 (49)
		10	6.78 (93)	13.68 (94)	13.36 (48)
	100	0	6.45 (89)	8.71 (60)	10.37 (38)
		10	6.61 (91)	9.91 (68)	9.09 (33)
	$LSD_{0.05}$		1.676	NS	NS

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เมื่อเปรียบเทียบสภาพที่ข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ SiO_2 พบว่าปริมาณการสะสม K ในกาบใบมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเฉพาะในช่วงที่ได้รับ NaCl 14 วัน ซึ่งในสภาพดังกล่าวข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ K ในกาบใบลดลง 11 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 กลับมีค่าเพิ่มขึ้น 9 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 28 วัน พบแนวโน้มว่าทั้งข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มีปริมาณ K ในกาบใบเพิ่มขึ้น 40 และ 22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 19)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่าปัจจัยดังกล่าวไม่มีผลทำให้ปริมาณการสะสม K ในกาบใบแตกต่างกันทางสถิติตลอดการทดลอง แต่พบแนวโน้มว่าสภาพที่ข้าวได้รับ NaCl 50 mM ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ K ในกาบใบลดลง 12, 39 และ 12 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ขณะที่พันธุ์ กข6 พบ K ในกาบใบลดลง 10 เปอร์เซ็นต์ในช่วงที่ได้รับวันแรก และเพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ในช่วง 14 วัน และกลับลดลง 32 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงที่ได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 28 วัน ส่วนที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วย เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ K ในกาบใบลดลง 18, 45 และ 33 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 มีปริมาณ K ในกาบใบเพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงที่ได้รับวันแรก และลดลง 11 และ 52 เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้รับเป็นเวลา NaCl ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 14 และ 28 วัน ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 19, ภาพที่ 7B)

4.5.6 ปริมาณโพแทสเซียมในราก (K uptake in root)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พบว่า ปริมาณ K ในรากของข้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตลอดการทดลอง โดยเมื่อข้าวได้รับ NaCl 50 mM เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน ปริมาณการสะสม K ในรากลดลง 30, 33 และ 47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM ปริมาณการสะสม K ในรากลดลง 18, 57 และ 78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 20)

เมื่อเปรียบเทียบข้าวทั้งสองพันธุ์ในสภาพที่ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเดียวกัน พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของปริมาณ K ในรากของข้าวทั้งสองพันธุ์เฉพาะในช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 14 วัน โดยข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณการสะสม K ในรากลดลง 41 และ 59 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มีปริมาณ K ในรากลดลง 24 และ 54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อข้าวได้รับเป็นเวลา 28 วัน พบแนวโน้มว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณ K ในรากลดลง 48 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 ลดลง 46 และ 77 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 20)

ตารางที่ 19 ปริมาณโพแทสเซียมในกาบใบ (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	K (มก//ต้น)		
			1	14	28
	0		6.96 (100)	18.61 (100)	38.02 (100)
	50		5.90 (85)	16.60 (89)	22.96 (60)
	100		6.00 (86)	12.82 (69)	15.36 (40)
	$LSD_{0.05}$		0.879	1.938	3.150
KDML105	0		6.57 (100)	19.88 (100)	37.98 (100)
	50		5.66 (86)	15.13 (76)	25.36 (67)
	100		5.51 (84)	11.66 (59)	15.38 (40)
RD6	0		7.35 (100)	17.33 (100)	38.98 (100)
	50		6.13 (83)	18.06 (104)	20.55 (54)
	100		6.48 (84)	13.98 (81)	15.35 (40)
	$LSD_{0.05}$		NS	2.741	NS
KDML105		0	5.82 (100)	16.69 (100)	21.90 (100)
		10	6.00 (103)	14.42 (89)	30.58 (140)
RD6		0	6.19 (100)	15.77 (100)	22.19 (100)
		10	7.12 (115)	17.15 (109)	27.11 (122)
	$LSD_{0.05}$		NS	2.238	NS
KDML105	0	0	6.99 (100)	22.86 (100)	28.81 (100)
		10	6.15 (88)	16.91 (74)	47.15 (164)
	50	0	5.18 (74)	16.35 (72)	25.33 (88)
		10	6.14 (88)	13.91 (61)	25.39 (88)
	100	0	5.30 (76)	10.87 (48)	11.56 (40)
		10	5.72 (82)	12.46 (55)	19.19 (67)
RD6	0	0	6.68 (100)	16.06 (100)	32.49 (100)
		10	8.03 (120)	18.60 (116)	43.61 (134)
	50	0	6.23 (93)	17.53 (109)	18.89 (58)
		10	6.03 (90)	18.60 (116)	22.22 (68)
	100	0	5.64 (85)	13.72 (85)	15.50 (47)
		10	7.32 (110)	14.24 (89)	15.50 (48)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เมื่อเปรียบเทียบสภาพที่ได้รับ SiO_2 ในข้าวทั้งสองพันธุ์ พบความแตกต่างของปริมาณ K ในรากของข้าวเฉพาะช่วงที่ได้รับ NaCl 1 วัน โดยพบว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ K ในรากเพิ่มขึ้น 1 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 ลดลงถึง 20 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 14 วัน ปริมาณ K ในรากของข้าวขาวดอกมะลิ105 ไม่แตกต่างจากสภาพที่ไม่ได้รับ SiO_2 ขณะที่พันธุ์ กข6 เมื่อได้รับ SiO_2 พบ K ในรากเพิ่มขึ้น 4 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ได้รับ NaCl 28 วัน สภาพดังกล่าวมีแนวโน้มทำให้ปริมาณ K ในรากของข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 เพิ่มขึ้น 23 และ 8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 20)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่าช่วงที่ได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 1 และ 14 วัน ปัจจัยดังกล่าวไม่มีผลทำให้ปริมาณ K ในรากของข้าวมีความแตกต่างกันทางสถิติ และเมื่อได้รับเป็นเวลา 28 วัน จึงพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยสภาพที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ K ในรากลดลง 39 และ 73 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มีปริมาณ K ในรากลดลง 35 และ 67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 20, ภาพที่ 7C)

4.5.7 ปริมาณโซเดียมในใบ (Na uptake in leaf)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ปริมาณการสะสม Na ในใบของข้าวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตลอดการทดลอง โดยหลังจากได้รับ NaCl 50 mM เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน ปริมาณ Na ในใบข้าวเพิ่มขึ้นประมาณ 2.4, 2.6 และ 2.2 เท่าของสภาพควบคุม ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM ปริมาณ Na ในใบเพิ่มขึ้นประมาณ 2.3, 2.5 และ 2.1 เท่าของสภาพควบคุม ตามลำดับ ผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าสภาพที่ข้าวได้รับ NaCl มีผลทำให้ปริมาณ Na ในใบข้าวเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 21)

เมื่อเปรียบเทียบข้าวทั้งสองพันธุ์ในสภาพที่ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเดียวกัน พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของปริมาณ Na ในใบข้าวหลังข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 14 และ 28 วัน แต่อย่างไรก็ตามในช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 1 วัน พบแนวโน้มว่าสภาพที่ข้าวได้รับ NaCl มีผลทำให้ปริมาณ Na ในใบเพิ่มขึ้น โดยข้าวพันธุ์ กข6 มีแนวโน้มมีปริมาณ Na ในใบเพิ่มขึ้นมากกว่าพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 ส่วนในช่วงที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 14 วัน พบว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ Na ในใบเพิ่มขึ้นประมาณ 2.1 และ 2.5 เท่า ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มีปริมาณ Na ในใบเพิ่มขึ้นประมาณ 3.2 และ 2.5 เท่า และเมื่อได้รับ NaCl เป็นเวลา 28 วัน พบว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ Na ในใบเพิ่มขึ้นประมาณ 2.5 และ 2.4 เท่า ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มีปริมาณ Na ในใบเพิ่มขึ้นประมาณ 1.9 และ 1.6 เท่า ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 21)

ตารางที่ 20 ปริมาณโพแทสเซียมในราก (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	K (มก/ต้น)		
			1	14	28
	0		3.27 (100)	8.08 (100)	14.53 (100)
	50		2.29 (70)	5.44 (67)	7.69 (53)
	100		2.69 (82)	3.49 (43)	3.14 (22)
	$LSD_{0.05}$		0.385	0.554	1.359
KDML105	0		3.03 (100)	8.59 (100)	15.22 (100)
	50		2.28 (75)	5.11 (59)	7.91 (52)
	100		2.44 (81)	3.49 (41)	3.08 (20)
RD6	0		3.51 (100)	7.59 (100)	13.83 (100)
	50		2.31 (66)	5.75 (76)	7.48 (54)
	100		2.94 (84)	3.49 (46)	3.20 (23)
	$LSD_{0.05}$		NS	0.783	NS
KDML105		0	2.56 (100)	5.76 (100)	7.83 (100)
		10	2.60 (101)	5.71 (99)	9.64 (123)
RD6		0	3.24 (100)	5.48 (100)	7.85 (100)
		10	2.60 (80)	5.72 (104)	8.49 (108)
	$LSD_{0.05}$		0.445	NS	NS
KDML105	0	0	3.00 (100)	7.91 (100)	12.12 (100)
		10	3.05 (102)	9.28 (117)	18.31 (151)
	50	0	2.19 (73)	5.68 (72)	8.48 (70)
		10	2.36 (79)	4.55 (57)	7.34 (61)
	100	0	2.49 (83)	3.67 (46)	2.89 (24)
		10	2.38 (79)	3.31 (42)	3.27 (27)
RD6	0	0	3.87 (100)	7.33 (100)	11.89 (100)
		10	3.15 (81)	7.79 (106)	15.78 (133)
	50	0	2.81 (73)	5.48 (75)	7.76 (65)
		10	1.81 (47)	6.03 (82)	7.20 (68)
	100	0	3.04 (79)	3.63 (50)	3.91 (33)
		10	2.85 (74)	3.35 (46)	2.49 (21)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	2.718

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เมื่อเปรียบเทียบสภาพที่ได้รับ SiO_2 ในข้าวทั้งสองพันธุ์ พบว่าสภาพดังกล่าวมีผลทำให้ปริมาณ Na ในใบของข้าวทั้งสองพันธุ์แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเฉพาะในช่วงที่ได้รับ NaCl เป็นเวลา 14 วัน เมื่อได้รับ SiO_2 ข้าวข้าวดอกมะลิ105 มี Na ในใบเพิ่มขึ้น 18 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 มี Na ในใบลดลง 8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 21)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่าช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 1 และ 14 วัน ปริมาณ Na ในใบของข้าวมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยสภาพที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 1 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ Na ในใบเพิ่มขึ้นประมาณ 2.3และ 1.8 เท่า ตามลำดับ ส่วนช่วงที่ได้รับ 14 วัน เพิ่มขึ้นประมาณ 2.4 และ 3.5 เท่า ตามลำดับ ขณะที่พันธุ์ กข6 พบว่าช่วงที่ได้รับ 1 วัน ปริมาณ Na ในใบเพิ่มขึ้นประมาณ 4.2 และ 4.5 เท่า ส่วนช่วงที่ได้รับ 14 วัน ปริมาณ Na ในใบเพิ่มขึ้นประมาณ 3.4 และ 2.5 เท่า ตามลำดับ และเมื่อได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 28 วัน พบแนวโน้มว่าปริมาณ Na ในใบเพิ่มขึ้นในทั้งสองพันธุ์ โดยพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่าพันธุ์ กข6 (ตารางที่ 21, ภาพที่ 8A)

4.5.8 ปริมาณโซเดียมในกาบใบ (Na uptake in leaf sheath)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ปริมาณ Na ในกาบใบข้าวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตลอดการทดลอง โดยสภาพที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 1 วัน ปริมาณ Na ในกาบใบข้าวเพิ่มขึ้นประมาณ 3.2 และ 3.8 เท่าตามลำดับ ช่วงที่ได้รับ 14 วัน ปริมาณ Na ในกาบใบข้าวเพิ่มขึ้นประมาณ 1.6 และ 1.5 เท่าตามลำดับ และเมื่อได้รับเป็นเวลา 28 วัน Na ในกาบใบข้าวเพิ่มขึ้นประมาณ 1.8 และ 1.4 เท่า ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าช่วงวันแรกที่ได้รับ NaCl และการสะสม Na ในกาบใบลดลงตามระยะเวลาที่ได้รับ NaCl (ตารางที่ 22)

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างข้าวทั้งสองพันธุ์ในสภาพที่ได้รับ NaCl ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน พบว่าช่วงที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 1 และ 14 วัน ปริมาณ Na ในกาบใบของข้าวทั้งสองพันธุ์ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่พบแนวโน้มว่าปริมาณ Na ในกาบใบของข้าวทั้งสองพันธุ์เพิ่มขึ้น โดยข้าวพันธุ์ กข6 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่าพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และเมื่อได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 28 วัน จึงพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ Na ในกาบใบเพิ่มขึ้นประมาณ 2.1 และ 1.3 เท่าตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มีปริมาณ Na ในกาบใบเพิ่มขึ้นประมาณ 1.6 และ 1.5 เท่าตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 22)

ตารางที่ 21 ปริมาณโซเดียมในใบ (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	Na (มก/ต้น)		
			1	14	28
	0		0.56 (100)	1.58 (100)	4.70 (100)
	50		0.64 (236)	4.05 (257)	10.48 (223)
	100		0.63 (234)	3.93 (249)	9.64 (205)
	$LSD_{0.05}$		0.052	0.258	1.103
KDML105	0		0.34 (100)	1.89 (100)	4.94 (100)
	50		0.69 (204)	4.04 (214)	12.34 (250)
	100		0.65 (193)	4.73 (249)	12.02 (244)
RD6	0		0.20 (100)	1.26 (100)	4.46 (100)
	50		0.59 (289)	4.06 (322)	8.61 (193)
	100		0.62 (302)	3.14 (249)	7.25 (162)
	$LSD_{0.05}$		NS	0.365	1.560
KDML105		0	0.58 (100)	3.26 (100)	10.10 (100)
		10	0.55 (94)	3.85 (118)	9.43 (93)
RD6		0	0.50 (100)	2.93 (100)	6.65 (100)
		10	0.44 (87)	2.70 (92)	6.90 (104)
	$LSD_{0.05}$		NS	0.298	NS
KDML105	0	0	0.49 (100)	1.57 (100)	2.55 (100)
		10	0.36 (117)	2.22 (141)	7.33 (288)
	50	0	0.68 (216)	4.25 (271)	13.38 (525)
		10	0.71 (227)	3.84 (244)	11.30 (444)
	100	0	0.74 (238)	3.95 (252)	14.37 (564)
		10	0.56 (180)	5.50 (350)	9.67 (380)
RD6	0	0	0.12 (100)	1.16 (100)	3.01 (100)
		10	0.29 (249)	1.36 (118)	5.92 (197)
	50	0	0.69 (581)	4.21 (364)	8.68 (288)
		10	0.49 (417)	3.90 (337)	8.55 (284)
	100	0	0.70 (595)	3.43 (296)	2.27 (275)
		10	0.53 (451)	2.84 (245)	6.23 (207)
	$LSD_{0.05}$		0.102	0.516	NS

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 22 ปริมาณโซเดียมในกาบใบ (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	Na (มก/ต้น)		
			1	14	28
	0		0.54 (100)	7.20 (100)	20.87 (100)
	50		1.70 (317)	11.16 (155)	38.05 (182)
	100		2.04 (379)	10.48 (146)	29.35 (141)
	$LSD_{0.05}$		0.207	1.329	3.454
KDML105	0		0.59 (100)	6.77 (100)	21.11 (100)
	50		1.73 (292)	10.08 (149)	44.02 (209)
	100		2.03 (343)	9.37 (138)	27.16 (129)
RD6	0		0.48 (100)	7.62 (100)	20.63 (100)
	50		1.68 (348)	12.25 (161)	32.07 (155)
	100		2.04 (424)	11.59 (152)	31.54 (153)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	4.885
KDML105		0	1.34 (100)	8.25 (100)	27.11 (100)
		10	1.56 (117)	9.24 (112)	34.42 (127)
RD6		0	1.41 (100)	10.40 (100)	24.38 (100)
		10	1.39 (98)	10.57 (102)	31.78 (130)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS
KDML105	0	0	0.49 (100)	6.06 (100)	12.98 (100)
		10	0.70 (144)	7.48 (123)	29.23 (225)
	50	0	1.55 (319)	10.82 (178)	46.66 (359)
		10	1.91 (391)	9.34 (154)	41.38 (319)
	100	0	1.98 (406)	7.86 (130)	21.68 (167)
		10	2.09 (429)	10.88 (179)	32.64 (251)
RD6	0	0	0.37 (100)	6.33 (100)	17.39 (100)
		10	0.60 (163)	8.92 (141)	23.86 (137)
	50	0	1.78 (487)	12.48 (197)	32.60 (187)
		10	1.57 (429)	12.02 (190)	31.54 (181)
	100	0	2.09 (570)	12.39 (196)	23.13 (133)
		10	1.99 (546)	10.79 (170)	39.95 (230)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เมื่อเปรียบเทียบสภาพที่ข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ SiO_2 พบว่า สภาพดังกล่าวไม่มีผลทำให้ปริมาณ Na ในกาบใบของข้าวทั้งสองพันธุ์แตกต่างกันทางสถิติ แต่พบแนวโน้มว่าช่วงที่ได้รับ NaCl 1 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ Na ในกาบใบเพิ่มขึ้น 17 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 กลับมีค่าลดลง 2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 14 วัน ปริมาณ Na ในกาบใบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มีปริมาณ Na ในกาบใบเพิ่มขึ้น 12 และ 2 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 28 วัน ปริมาณ Na ในกาบใบเพิ่มขึ้น 27 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ในพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 22)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่าปัจจัยดังกล่าวไม่มีผลทำให้ปริมาณ Na ในกาบใบของข้าวทั้งสอพันธุ์แตกต่างกันทางสถิติตลอดการทดลอง แต่พบแนวโน้มว่าในช่วงที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 1 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ Na ในกาบใบเพิ่มขึ้นประมาณ 3.9 และ 4.3 เท่าตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มีปริมาณ Na ในกาบใบเพิ่มขึ้น 4.3 และ 5.5 เท่าตามลำดับ เมื่อได้รับเป็นเวลา 14 วัน พบว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ Na ในกาบใบเพิ่มขึ้น 1.5 และ 1.8 เท่าตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มีปริมาณ Na ในกาบใบเพิ่มขึ้นประมาณ 1.9 และ 1.7 เท่าตามลำดับ และเมื่อได้รับเป็นเวลา 28 วัน พบว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ Na ในกาบใบเพิ่มขึ้นประมาณ 3.2 และ 2.5 เท่าตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มีปริมาณ Na ในกาบใบเพิ่มขึ้นประมาณ 1.8 และ 2.3 เท่าตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 22, ภาพที่ 8B)

4.5.9 ปริมาณโซเดียมในราก (Na uptake in root)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณการสะสม Na ในรากของข้าวมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตลอดการทดลอง โดยที่ระดับความเข้มข้นของ NaCl 50 mM ปริมาณการสะสม Na ในรากข้าวเพิ่มขึ้นประมาณ 3.8, 1.1 และ 1.2 เท่า ส่วนที่ 100 mM NaCl ปริมาณ Na ในรากข้าวเพิ่มขึ้น 5.8 เท่าในช่วงที่ได้รับวันแรก และลดลง 16 และ 40 เปอร์เซ็นต์ หลังได้รับ NaCl 14 และ 28 วัน ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า Na ในรากเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaCl และเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงในช่วงแรก (ตารางที่ 23)

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างข้าวทั้งสองพันธุ์ในสภาพที่ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเดียวกัน พบปริมาณ Na ในรากแตกต่างกันในช่วงที่ได้รับ NaCl เป็นเวลา14 วันขึ้นไป โดยช่วงที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM 14 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ Na ในรากลดลง 1 และ 28 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 พบว่าที่ความเข้มข้น NaCl 50 mM ปริมาณ Na ในรากเพิ่มขึ้น 27

เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ความเข้มข้น 100 mM กลับลดลง 1 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อได้รับ NaCl 50 mM เป็นเวลา 28 วัน พบว่า ทั้งพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มีปริมาณ Na ในรากเพิ่มขึ้น 9 และ 30 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM ปริมาณ Na ในรากกลับมีค่าลดลง 40 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 23)

เมื่อเปรียบเทียบสภาพที่ได้รับ SiO_2 ในข้าวทั้งสองพันธุ์ พบว่าสภาพดังกล่าวไม่มีผลทำให้ปริมาณ Na ในรากของข้าวทั้งสองพันธุ์แตกต่างกันในช่วงที่ได้รับ NaCl 1 และ 14 วัน แต่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติช่วงที่ได้รับ NaCl 28 วัน โดยข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มีปริมาณ Na ในรากเพิ่มขึ้น 8 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 23)

เมื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่าปัจจัยดังกล่าวไม่มีผลทำให้ปริมาณ Na ในรากของข้าวทั้งสองพันธุ์แตกต่างกันทางสถิติในช่วงที่ได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 1 และ 14 วัน แต่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญหลังได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 28 วัน โดยช่วงเวลาดังกล่าวพบว่า สภาพที่ได้รับ NaCl 50 mM ร่วมกับ SiO_2 ข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มีปริมาณ Na ในรากเพิ่มขึ้น 29 และ 106 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วย ปริมาณ Na ในรากของข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ลดลง 48 และ 13 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 23, ภาพที่ 8C)

4.5.10 อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมต่อโซเดียมในใบ (K/Na ratio in leaf)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พบว่ามีผลทำให้ K/Na ในใบข้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติตลอดการทดลอง โดยเมื่อข้าวได้รับ NaCl 50 mM เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน มีผลทำให้ K/Na ในใบข้าวลดลง 67, 70 และ 78 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM ทำให้ K/Na ในใบข้าวลดลง 65, 74 และ 82 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า K/Na ในใบข้าวลดลงตามความเข้มข้นและระยะเวลาที่ข้าวได้รับ NaCl (ตารางที่ 24)

เมื่อเปรียบเทียบสภาพที่ข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเดียวกัน พบว่า K/Na ในใบของข้าวทั้งสองพันธุ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติในช่วงที่ได้รับ NaCl 1 และ 14 วัน โดยช่วงที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 1 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี K/Na ในใบลดลง 73 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี K/Na ในใบลดลง 54 และ 52 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อได้รับ NaCl เป็นเวลา 14 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี K/Na ในใบลดลง 74 และ 76 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับส่วนพันธุ์ กข6 ลดลง 64 และ 71 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 24)

ตารางที่ 23 ปริมาณโซเดียมในราก (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	Na (มก/ต้น)		
			1	14	28
	0		0.29 (100)	6.33 (100)	12.26 (100)
	50		1.10 (384)	7.08 (112)	14.63 (119)
	100		1.66 (577)	5.32 (84)	7.35 (60)
	$LSD_{0.05}$		0.124	0.611	1.371
KDML105	0		0.59 (100)	6.87 (100)	12.29 (100)
	50		1.09 (371)	6.82 (99)	13.38 (109)
	100		1.62 (553)	4.92 (72)	4.95 (40)
RD6	0		0.28 (100)	5.79 (100)	12.24 (100)
	50		1.12 (397)	7.34 (127)	15.88 (130)
	100		1.69 (601)	5.71 (99)	9.76 (80)
	$LSD_{0.05}$		NS	0.865	1.940
KDML105		0	0.97 (100)	5.94 (100)	9.79 (100)
		10	1.04 (107)	6.47 (109)	10.62 (108)
RD6		0	1.02 (100)	5.86 (100)	10.99 (100)
		10	1.04 (101)	6.70 (114)	14.25 (130)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	1.584
KDML105	0	0	0.21 (100)	5.82 (100)	8.97 (100)
		10	0.38 (185)	7.93 (136)	15.62 (174)
	50	0	1.02 (496)	7.03 (121)	15.17 (169)
		10	1.16 (562)	6.62 (114)	11.58 (129)
	100	0	1.68 (815)	4.98 (86)	5.24 (58)
		10	1.57 (762)	4.85 (83)	4.66 (52)
RD6	0	0	0.25 (100)	5.22 (100)	9.45 (100)
		10	0.32 (128)	6.36 (122)	15.02 (159)
	50	0	1.18 (472)	6.87 (132)	12.26 (130)
		10	1.07 (432)	7.81 (150)	19.49 (206)
	100	0	1.65 (670)	5.50 (105)	11.27 (119)
		10	1.73 (700)	5.92 (113)	8.24 (87)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	2.743

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เมื่อเปรียบเทียบสภาพที่ข้าวได้รับ SiO_2 ในข้าวทั้งสองพันธุ์ พบว่าสภาพดังกล่าวมีผลทำให้ K/Na ในใบข้าวทั้งสองพันธุ์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติตลอดการทดลอง โดยสภาพที่ได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl 1 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี K/Na ในใบลดลง 25 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 มีค่าเพิ่มขึ้น 13 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อได้รับ NaCl 14 วัน พบว่าสภาพดังกล่าวข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 มี K/Na ในใบเพิ่มขึ้น 7 และ 16 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และช่วงที่ได้รับ NaCl 28 วัน กลับพบว่า K/Na ในใบลดลง 17 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 24)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่ามีผลทำให้ K/Na ในใบข้าวแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติในช่วงที่ได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 1 และ 28 วัน ขณะช่วงที่ได้รับเป็นเวลา 14 วัน พบว่าปัจจัยดังกล่าวไม่มีผลทำให้ K/Na ในใบของข้าวแตกต่างกันทางสถิติ โดยช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 1 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี K/Na ในใบลดลง 78 และ 71 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี K/Na ในใบลดลง 49 และ 45 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และช่วงที่ได้รับเป็นเวลา 28 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี K/Na ในใบลดลง 78 และ 82 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี K/Na ในใบลดลง 85 และ 83 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 24)

4.5.11 อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมต่อโซเดียมในกาบใบ (K/Na in leaf sheath)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พบว่ามีผลทำให้ K/Na ในกาบใบข้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติตลอดการทดลอง โดยช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 50 mM เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน K/Na ในกาบใบข้าวลดลง 75, 44 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM มีผลทำให้ K/Na ในกาบใบข้าวลดลง 79, 53 และ 71 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า K/Na ในกาบใบข้าวลดลงตามความเข้มข้นของ NaCl (ตารางที่ 25)

เมื่อเปรียบเทียบสภาพที่ข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเดียวกัน พบ K/Na ในกาบใบของข้าวทั้งสองพันธุ์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติตลอดการทดลอง โดยสภาพที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 1 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี K/Na ในกาบใบลดลง 77 และ 80 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 ลดลง 72 และ 77 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อได้รับ NaCl เป็นเวลา 14 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี K/Na ในกาบใบลดลง 35 และ 47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 ลดลง 50 และ 58 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อได้รับ NaCl เป็นเวลา 28 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี K/Na ในกาบใบลดลง 69 และ 68 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพันธุ์ กข6 ลดลง 71 และ 74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 25)

ตารางที่ 24 อัตราส่วนของโพแทสเซียมต่อโซเดียมในใบ ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	ระยะเวลาที่ได้รับ NaCl (วัน)		
			1	14	28
	0		33.21 (100)	10.72 (100)	6.92 (100)
	50		10.86 (33)	3.25 (30)	1.52 (22)
	100		11.71 (35)	2.81 (26)	1.25 (18)
	$LSD_{0.05}$		1.653	0.396	0.203
KDML105	0		45.93 (100)	12.58 (100)	7.00 (100)
	50		12.30 (27)	3.30 (26)	1.68 (24)
	100		13.61 (30)	3.02 (24)	1.35 (19)
RD6	0		20.49 (100)	8.85 (100)	6.84 (100)
	50		9.42 (46)	3.20 (36)	1.37 (20)
	100		9.18 (48)	2.61 (29)	1.15 (17)
	$LSD_{0.05}$		2.338	0.560	NS
KDML105		0	27.43 (100)	6.08 (100)	3.65 (100)
		10	20.46 (75)	6.52 (107)	3.03 (83)
RD6		0	12.45 (100)	5.31 (100)	3.79 (100)
		10	14.03 (113)	4.46 (84)	2.45 (65)
	$LSD_{0.05}$		1.909	0.458	0.234
KDML105	0	0	62.37 (100)	12.60 (100)	8.15 (100)
		10	29.53 (47)	12.56 (100)	5.84 (72)
	50	0	10.77 (17)	3.09 (24)	1.57 (19)
		10	13.82 (22)	3.50 (28)	1.79 (22)
	100	0	9.16 (15)	2.55 (20)	1.24 (15)
		10	18.05 (29)	3.48 (28)	1.46 (18)
RD6	0	0	20.72 (100)	9.82 (100)	9.33 (100)
		10	20.27 (98)	7.88 (80)	4.36 (47)
	50	0	8.36 (40)	3.23 (33)	1.33 (14)
		10	10.48 (51)	3.16 (32)	1.42 (15)
	100	0	8.28 (40)	2.87 (28)	0.71 (8)
		10	11.34 (55)	2.34 (24)	1.58 (17)
	$LSD_{0.05}$		3.306	0.792	0.406

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เมื่อเปรียบเทียบสภาพที่ข้าวได้รับ SiO_2 ในข้าวทั้งสองพันธุ์ พบว่าสภาพดังกล่าวมีผลทำให้ K/Na ในกาบใบข้าวทั้งสองพันธุ์แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตลอดการทดลอง โดยในข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 สภาพที่ได้รับ SiO_2 ในช่วงที่ได้รับ NaCl เป็นเวลา 1 วัน มี K/Na ในกาบใบ ลดลง 14 และ 28 เปอร์เซ็นต์ ช่วงที่ได้รับ NaCl 14 วัน K/Na ในกาบใบลดลง 1 และ 27 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อได้รับ NaCl 28 วัน K/Na ในกาบใบลดลง 15 และ 24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 25)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบ K/Na ในกาบใบข้าวมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตลอดการทดลอง โดยสภาพที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 1 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี K/Na ในกาบใบลดลง 79 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี K/Na ในกาบใบลดลง 78 และ 81 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อได้รับเป็นเวลา 14 วัน ทำให้ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี K/Na ในกาบใบลดลง 38 และ 48 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี K/Na ในกาบใบลดลง 60 และ 69 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อได้รับเป็นเวลา 28 วัน พบว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 มี K/Na ในกาบใบลดลง 70 และ 77 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 ลดลง 76 และ 77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 25)

4.5.12 อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมต่อโซเดียมในราก (K/Na in root)

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พบว่ามีผลทำให้ K/Na ในรากข้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติตลอดการทดลอง โดยช่วงที่ได้รับ NaCl 50 mM เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน ข้าวมี K/Na ในรากลดลง 83, 40 และ 61 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM ทำให้ K/Na ในรากข้าวลดลง 87, 49 และ 55 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม จากผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า K/Na ในรากข้าวลดลงตามความเข้มข้นของ NaCl ที่เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 26)

เมื่อเปรียบเทียบสภาพที่ข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเดียวกัน พบว่ามีผลทำให้ K/Na ในรากข้าวทั้งสองพันธุ์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติตลอดการทดลอง โดยช่วงที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 1 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี K/Na ในรากลดลง 84 และ 86 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 ลดลง 82 และ 87 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ช่วงที่ได้รับ NaCl 14 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี K/Na ในรากลดลง 40 และ 53 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 ลดลง 41 และ 44 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อได้รับ NaCl เป็นเวลา 28 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี K/Na ในรากลดลง 64 และ 71 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 ลดลง 58 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 26)

เมื่อเปรียบเทียบสภาพที่ข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ SiO_2 พบว่าสภาพดังกล่าวไม่มีผลทำให้ K/Na ในรากของข้าวทั้งสองพันธุ์มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่พบแนวโน้มว่าสภาพที่ข้าวได้รับ SiO_2 มีผลทำให้ K/Na ในรากข้าวลดลงในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพันธุ์ กข6 มีแนวโน้มลดลงมากกว่าพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 (ตารางที่ 26)

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ระดับความเข้มข้นของ NaCl และ SiO_2 พบว่าช่วงที่ได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 เป็นเวลา 1 และ 14 วัน ไม่มีผลทำให้ K/Na ในรากข้าวทั้งสองพันธุ์มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่เมื่อได้รับเป็นเวลา 28 วัน จึงพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติของ K/Na ในรากข้าว โดยสภาพที่ข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ SiO_2 ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี K/Na ในรากลดลง 64 และ 74 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มี K/Na ในรากลดลง 69 และ 37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม (ตารางที่ 26)

ตารางที่ 25 อัตราส่วนของโพแทสเซียมต่อโซเดียมในกาบใบ ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105)และกข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน

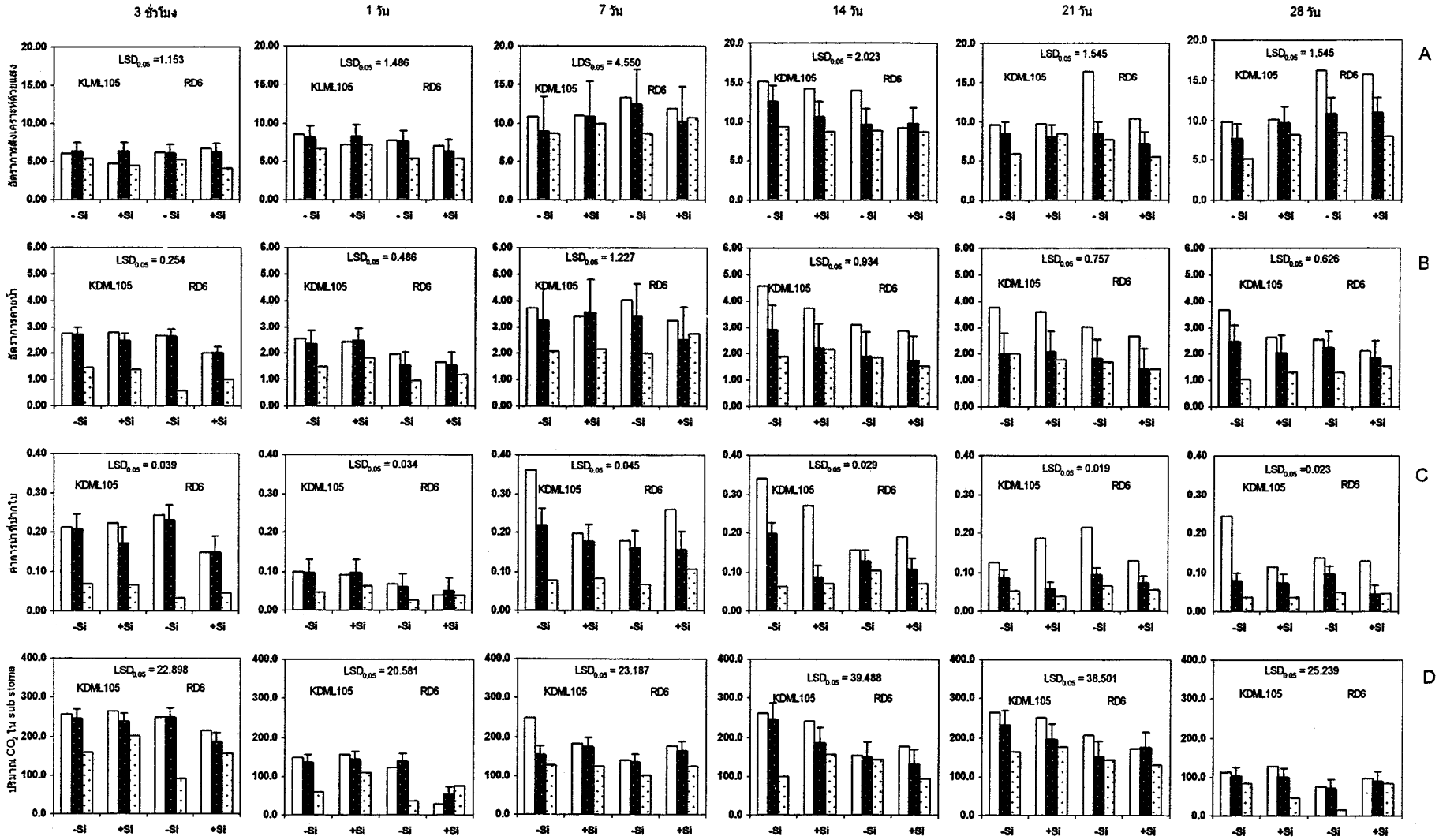
พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	ระยะเวลาที่ได้รับ NaCl (วัน)		
			1	14	28
	0		13.74 (100)	2.66 (100)	2.01 (100)
	50		3.48 (25)	1.50 (56)	0.59 (30)
	100		2.95 (21)	1.24 (47)	0.58 (29)
	$LSD_{0.05}$		0.412	0.083	0.057
KDML105	0		15.89 (100)	2.31 (100)	1.99 (100)
	50		3.67 (23)	1.50 (65)	0.61 (31)
	100		3.20 (20)	1.22 (53)	0.63 (32)
RD6	0		11.59 (100)	3.01 (100)	2.03 (100)
	50		3.29 (28)	1.50 (50)	0.58 (29)
	100		2.71 (23)	1.27 (42)	0.52 (26)
	$LSD_{0.05}$		0.582	0.117	0.081
KDML105		0	8.14 (100)	1.69 (100)	1.16 (100)
		10	7.03 (86)	1.66 (99)	0.99 (85)
RD6		0	6.83 (100)	2.22 (100)	1.19 (100)
		10	4.89 (65)	1.63 (73)	0.90 (76)
	$LSD_{0.05}$		0.475	0.095	0.066
KDML105	0	0	18.21 (100)	2.53 (100)	2.12 (100)
		10	13.57 (74)	2.09 (83)	1.85 (87)
	50	0	3.49 (19)	1.41 (56)	0.58 (27)
		10	3.85 (21)	1.58 (62)	0.64 (30)
	100	0	2.72 (15)	1.12 (44)	0.78 (37)
		10	3.67 (20)	1.31 (52)	0.48 (23)
RD6	0	0	14.46 (100)	3.77 (100)	2.56 (100)
		10	8.71 (60)	2.26 (60)	1.50 (59)
	50	0	3.35 (23)	1.51 (40)	0.55 (21)
		10	3.23 (22)	1.49 (40)	0.61 (24)
	100	0	2.68 (18)	1.39 (37)	0.46 (18)
		10	2.74 (19)	1.15 (31)	0.59 (23)
	$LSD_{0.05}$		0.823	0.165	0.114

หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

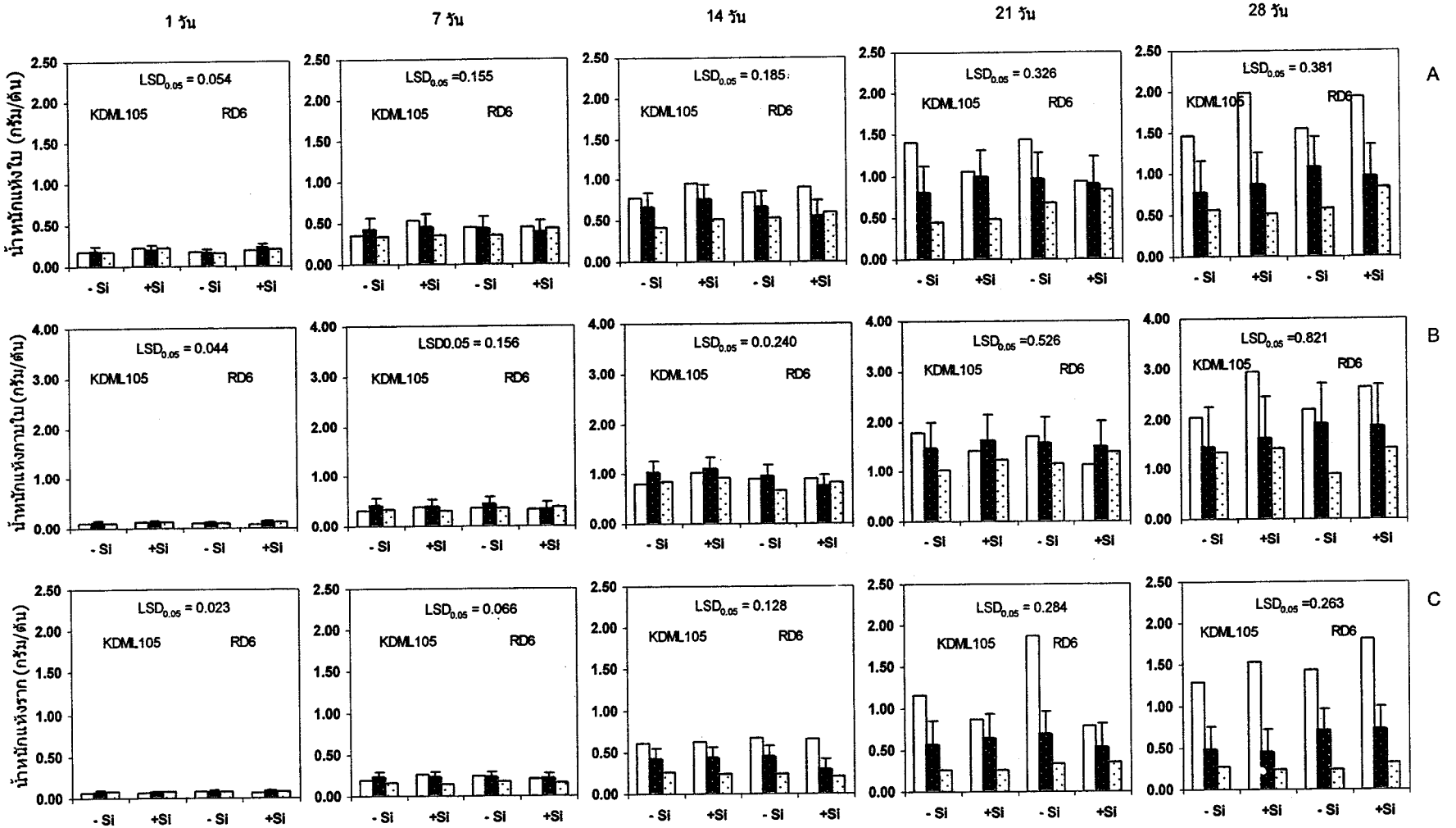
ตารางที่ 26 อัตราส่วนของโพแทสเซียมต่อโซเดียมในราก ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับ SiO_2 และ NaCl เป็นเวลา 1, 14 และ 28 วัน

พันธุ์ข้าว	NaCl (mM)	SiO_2 (mM)	ระยะเวลาที่ได้รับ NaCl (วัน)		
			1	14	28
	0		12.14 (100)	1.29 (100)	1.13 (100)
	50		2.08 (17)	0.77 (60)	0.45 (39)
	100		1.62 (13)	0.66 (51)	0.51 (45)
	$LSD_{0.05}$		0.401	0.033	0.049
KDML105	0		12.86 (100)	1.31 (100)	1.10 (100)
	50		2.06 (16)	0.79 (60)	0.40 (36)
	100		1.74 (14)	0.61 (47)	0.32 (29)
RD6	0		11.43 (100)	1.26 (100)	1.17 (100)
	50		2.11 (18)	0.75 (59)	0.49 (42)
	100		1.50 (13)	0.71 (56)	0.70 (60)
	$LSD_{0.05}$		0.567	0.047	0.069
KDML105		0	6.66 (100)	0.96 (100)	0.63 (100)
		10	4.44 (67)	0.85 (89)	0.59 (92)
RD6		0	6.16 (100)	0.97 (100)	0.82 (100)
		10	3.86 (63)	0.85 (87)	0.76 (92)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	NS
KDML105	0	0	15.74 (100)	1.40 (100)	1.15 (100)
		10	9.97 (63)	1.22 (87)	1.05 (92)
	50	0	2.41 (15)	0.80 (57)	0.39 (34)
		10	1.70 (11)	0.77 (55)	0.41 (36)
	100	0	1.84 (12)	0.66 (47)	0.35 (30)
		10	1.65 (10)	0.56 (40)	0.30 (26)
RD6	0	0	14.85 (100)	1.36 (100)	1.35 (100)
		10	8.01 (54)	1.17 (86)	0.99 (73)
	50	0	2.15 (14)	0.81 (60)	0.56 (41)
		10	2.06 (14)	0.69 (51)	0.43 (31)
	100	0	1.49 (10)	0.74 (54)	0.55 (41)
		10	1.51 (10)	0.68 (50)	0.86 (63)
	$LSD_{0.05}$		NS	NS	0.078

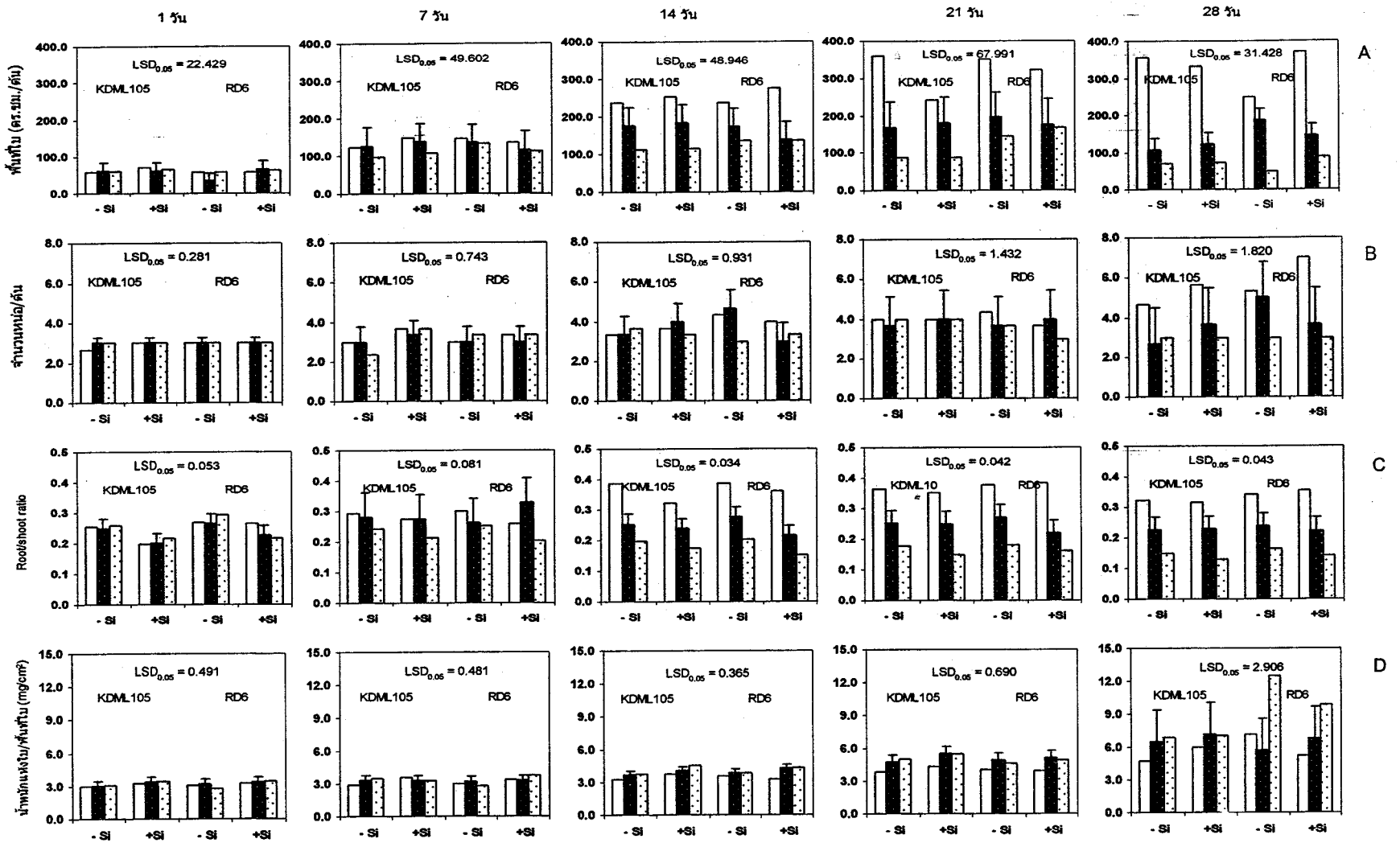
หมายเหตุ เลขในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มหรือลดเทียบกับสภาพควบคุม, NS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



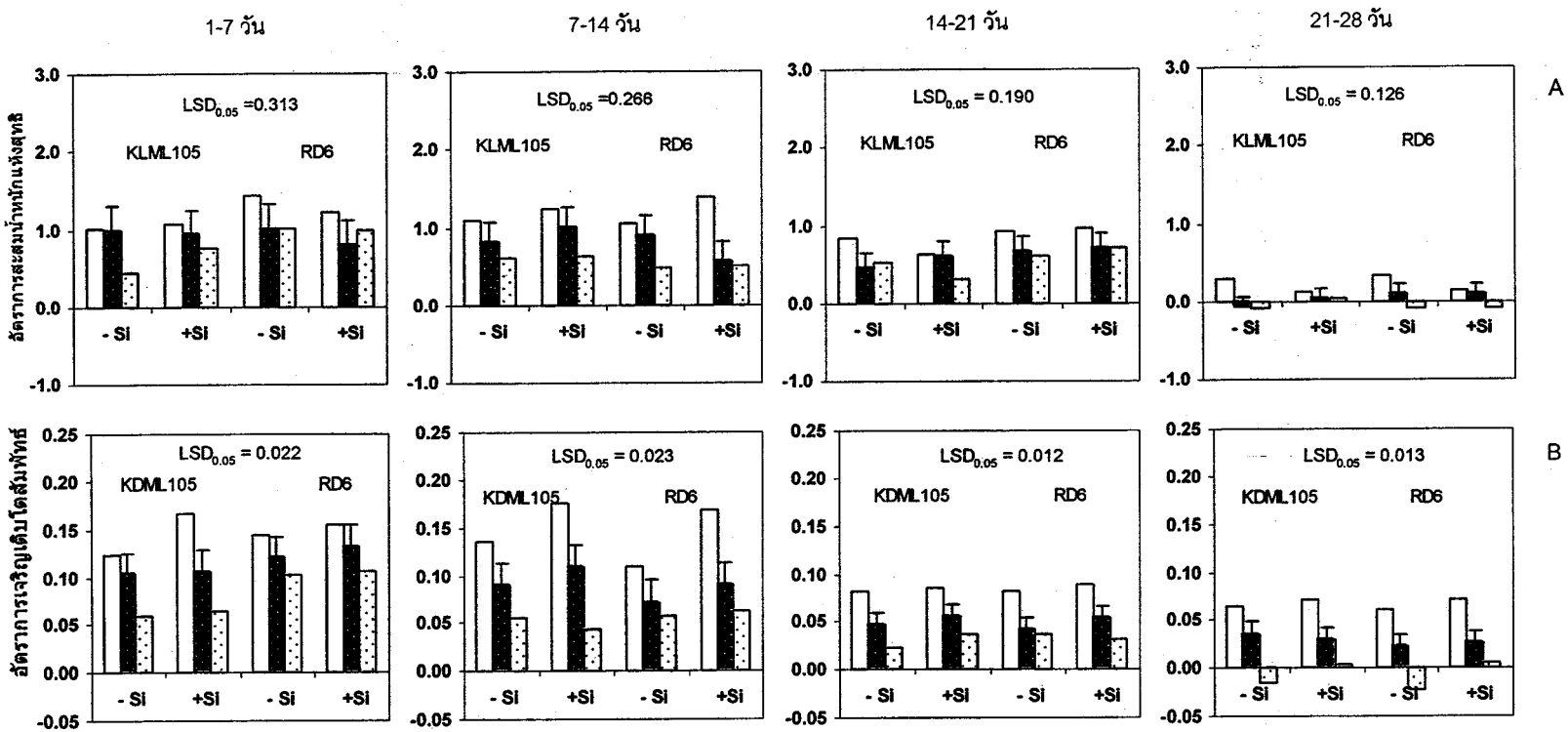
ภาพที่ 2 อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง (A; $\mu mol.m^{-2}s^{-1}$) อัตราการคายน้ำ (B; $mmol.m^{-2}s^{-1}$) ค่าการนำที่ปากใบ (C; $mol.m^{-2}s^{-1}$) และปริมาณ CO_2 ใน substomatal (D; vpm) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ถึง 28 วัน (□ 0 mM NaCl ■ 50 mM NaCl ⊡ 100 mM NaCl)



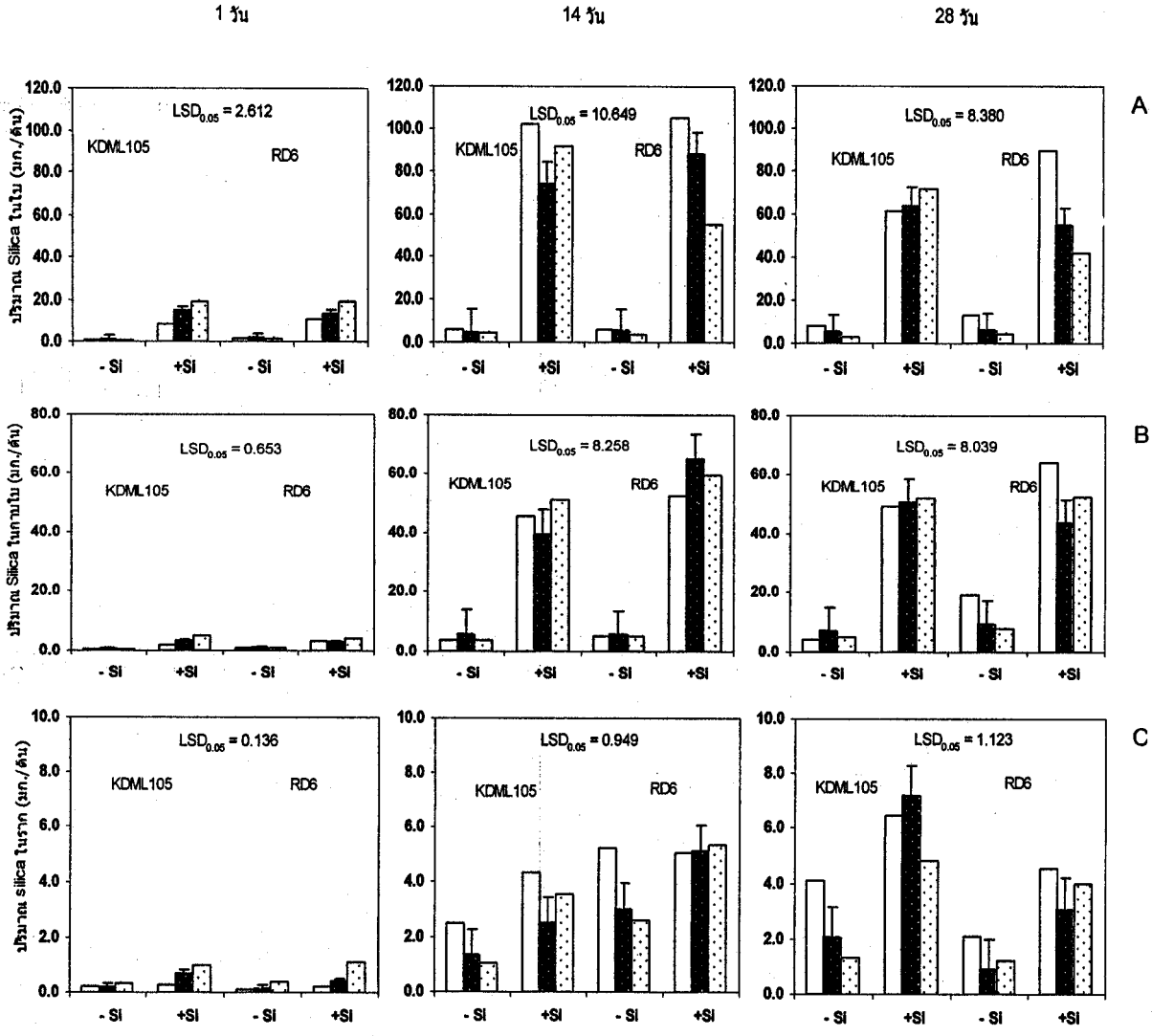
ภาพที่ 3 น้ำหนักแห้งส่วนใบ (A) กาบใบ (B) และราก (C) (กรัม/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1-28 วัน (□ 0 mM NaCl ■ 50 mM NaCl ⊡ 100 mM NaCl)



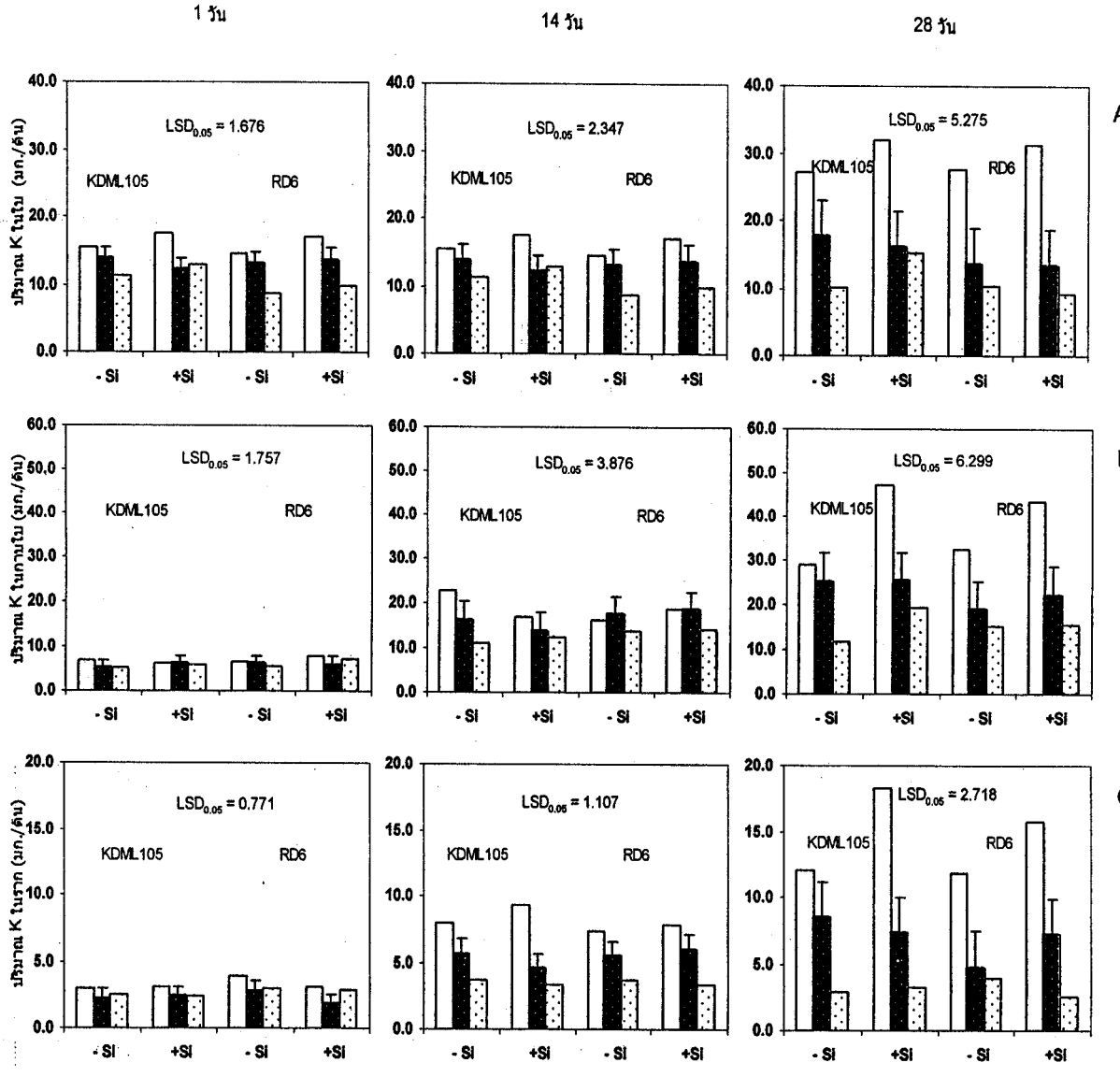
ภาพที่ 4 พื้นที่ใบ (ซม^2) จำนวนหน่อต่อกอ น้ำหนักแห้งรากต่อน้ำหนักแห้งส่วนต้น (root/shoot ratio) และน้ำหนักแห้งใบต่อพื้นที่ใบ (มก/ซม^2) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1-28 วัน (□ 0 mM NaCl ■ 50 mM NaCl ⊡ 100 mM NaCl)



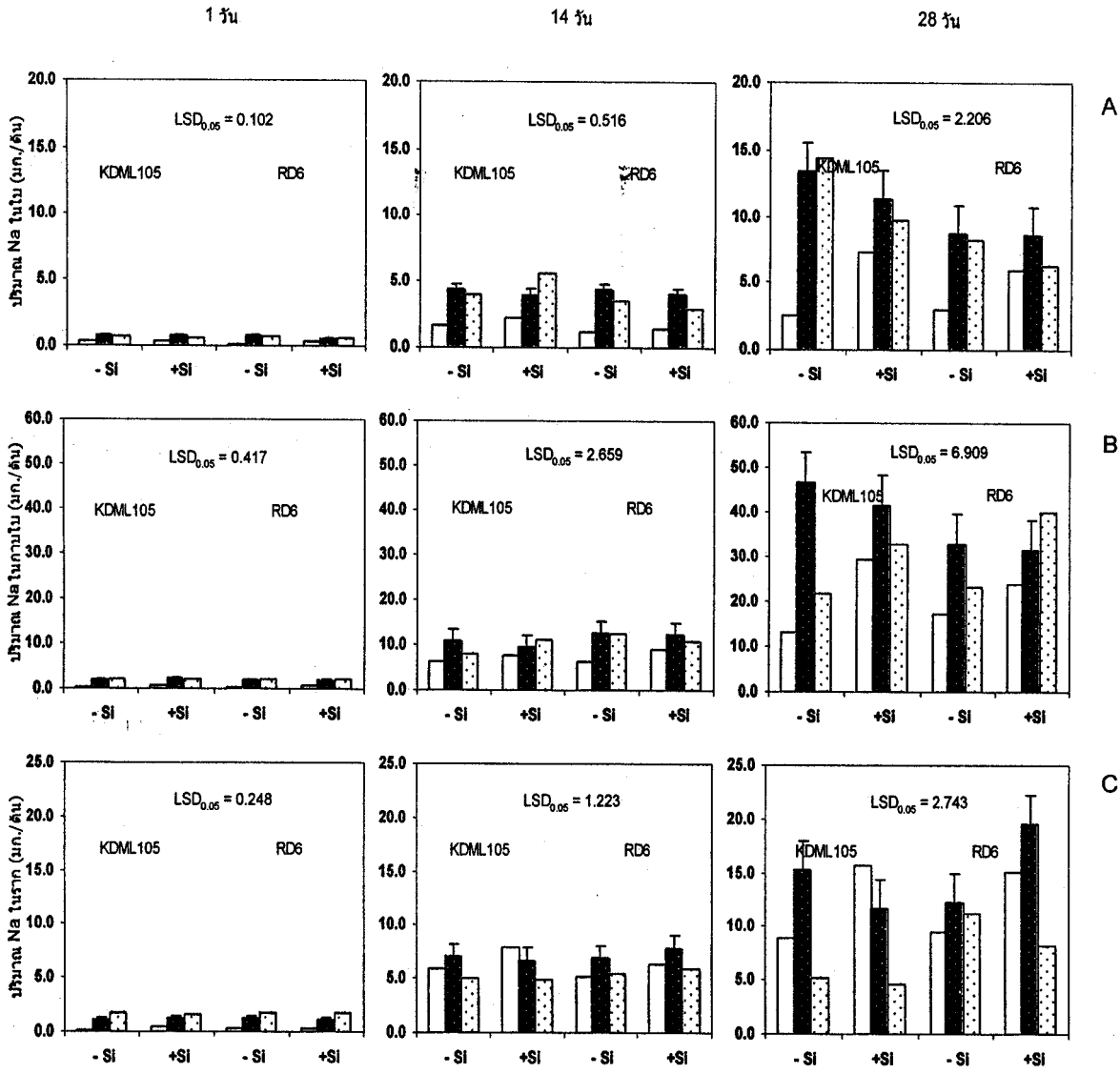
ภาพที่ 5 อัตราการสะสมน้ำหนักแห้งสุทธิ (มก/วัน.ซม^2) และอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (กรัม/วัน) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และกข6(RD6) หลังได้รับซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1-28 วัน (□ 0 mM NaCl ■ 50 mM NaCl ⊡ 100 mM NaCl)



ภาพที่ 6 ปริมาณการสะสมซิลิก้าในใบ (A) กาบใบ (B) และราก (C) (มก/ต้น)ของข้าวขาวดอกมะลิ-105 (KDML105) และกข6 (RD6) หลังได้รับซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1-28 วัน (☐ 0 mM NaCl ■ 50 mM NaCl ⊡ 100 mM NaCl)



ภาพที่ 7 ปริมาณการสะสมโพแทสเซียมในใบ (A) กาบใบ (B) และราก (C) (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และกข6 (RD6) หลังได้รับซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1-28 วัน (□ 0 mM NaCl ■ 50 mM NaCl ⊡ 100 mM NaCl)



ภาพที่ 8 ปริมาณการสะสมโซเดียมในใบ (A) กาบใบ (B) และ ราก (C) (มก/ต้น) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ กข6 (RD6) หลังได้รับซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1-28 วัน (□ 0 mM NaCl ■ 50 mM NaCl ⊡ 100 mM NaCl)

บทที่ 5
อภิปรายผลการทดลอง

5.1 ผลของซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์ต่อลักษณะทางสรีรวิทยาของข้าว

5.1.1 อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้น 50 mM ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของข้าวลดลงหลังได้รับ 14 วันขึ้นไป ขณะที่ความเข้มข้น 100 mM พบการลดลงตั้งแต่ 3 ชั่วโมงแรกที่ได้รับ แสดงให้เห็นว่าเกลือมีอิทธิพลต่อกระบวนการทางสรีรวิทยาของพืชทันทีเมื่อได้รับที่ความเข้มข้น NaCl ที่สูง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างข้าวขาวดอกมะลิ105 และ กข6 พบว่า NaCl ทำให้ข้าวพันธุ์ กข6 มีแนวโน้มมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลงมากกว่าพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 Chartzoulakis (1994) ศึกษาในแตงกวา พบว่า แตงกวาที่ได้รับ NaCl 25 mM ขึ้นไป ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง สาเหตุมาจากสภาพที่แตงกวาได้รับเกลือ ทำให้ศักย์น้ำ (water potential) ศักย์ออสโมติก (osmotic potential) และความเต่งของใบลดลง ส่งเสริมให้ปากใบพืชปิด และพื้นที่ใบลดลง ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการนำ CO_2 มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง นอกจากนี้ Netondo และคณะ (2004b) ศึกษาในข้าวฟ่างก็ได้ผลเช่นเดียวกัน คือ เกลือมีผลทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง ที่เป็นผลมาจากค่าการนำที่ปากใบที่ลดลง สุวัฒน์ (2544) รายงานว่าเกลือทำให้พืชลดการถ่ายทอดอิเลคตรอนในปฏิกิริยาแสง (light reaction) ทั้งช่วง cyclic และ non-cyclic จึงทำให้พืชสร้างสารพลังงานสูง (ATP, NADPH) ลดลง และในช่วงปฏิกิริยามืด (dark reaction) โดยเกลือมีผลไปลดการสร้างคาร์โบไฮเดรตและสารประกอบต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึม ซึ่งมีผลต่อการลดลงของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงโดยตรง การลดลงของอัตราสังเคราะห์ด้วยแสงของข้าวทั้งสองพันธุ์ที่มีความแตกต่างกันในการทดลองครั้งนี้ แสดงให้เห็นว่าข้าวมีความสามารถในการปรับตัวได้ต่างกันเมื่อได้รับเกลือ Tiwari และคณะ (1997) ทดสอบในข้าวพันธุ์ทนเค็มและอ่อนแอ พบว่าพันธุ์ที่อ่อนแอมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงต่ำกว่าพันธุ์ทนเค็มเมื่ออยู่ในสภาพที่ได้รับเกลือ เช่นเดียวกับ สุวัฒน์ และคณะ (2537) ที่พบว่าข้าวทนเค็มได้ดี เช่น พันธุ์พอคคาลี มีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ในสภาพที่ได้รับเกลือ ขณะที่ข้าวดอ กลับมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง ซึ่งผลงานวิจัยเหล่านี้มีส่วนสนับสนุนในการนำอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงมาประเมินความสามารถในการทนเค็มของข้าวได้

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 พบว่า อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของข้าวทั้งสองพันธุ์มีค่าเพิ่มขึ้นจากสภาพที่ได้รับ NaCl อย่างเดียวเฉพาะบางช่วงของการทดลองเท่านั้น โดยช่วงที่ได้รับ NaCl 50 mM ตั้งแต่ 3 ชั่วโมง ถึง7 วัน เมื่อได้รับ SiO_2 ร่วมด้วย ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้น 1-19 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพที่ได้รับ NaCl อย่างเดียว ขณะที่พันธุ์ กข6 พบว่าการให้ SiO_2 ช่วยให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้นเฉพาะในช่วง 3 ชั่วโมงแรกที่ได้รับ NaCl จากผลดังกล่าวแสดงว่าซิลิกอนมีบทบาททำให้ข้าวปรับตัวทางสรีรวิทยาได้ดีขึ้นในช่วงที่ได้รับเกลือในระยะเวลาสั้น ทั้งนี้ Yeo และคณะ (1999) พบว่า ซิลิกอนมีบทบาทต่อการลดลงของโซเดียมไอออนในเนื้อเยื่อของข้าว ซึ่งมาจากสาเหตุ 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ซิลิกอนไปลดการขนส่งโซเดียมใน apoplast โดยซิลิกอนไปควบคุมปริมาณน้ำที่ไหลผ่านทาง apoplast ซึ่งเป็นทางที่นำโซเดียมไอออนมาด้วย กรณีที่ 2 ซิลิกอนจับกับ Na^+ กลายเป็นสารประกอบตัวใดตัวหนึ่งซึ่งพืชไม่สามารถดูดเข้าไปในรากได้ ซึ่งเป็นผลโดยตรงที่มีส่วนช่วยให้ข้าวมีค่าการนำที่ปากใบ และอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้นในสภาพที่ได้รับเกลือ ส่วนผลทางอ้อมซิลิกอนช่วยให้ใบข้าวตั้งชัน ลดการหักล้ม เนื่องจากการสะสมของซิลิกอนจะพบที่ผนังเซลล์ชั้นผิวนอกของใบ ทำให้แผ่นใบแข็งและตั้งชันจึงรับแสงได้ดี และช่วยให้ข้าวมีลำต้นแข็งแรงขึ้นและล้มน้อยลง (Mauad *et al.*, 2003) นอกจากนี้พืชบางชนิด เช่น แตงกวายังมีปริมาณคลอโรฟิลล์สูงขึ้น ซึ่งน่าจะมีส่วนช่วยส่งเสริมให้พืชมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้นด้วย (Adatia and Besford, 1986 อ้างใน ศิริวรรณ, 2545) ซึ่งจากการทดลองครั้งนี้ พบว่าข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 มีแนวโน้มปรับตัวในสภาพที่ได้รับซิลิกอนร่วมกับเกลือได้ดีว่าพันธุ์ กข6

5.1.2 อัตราการคายน้ำ

เมื่อข้าวได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ทำให้อัตราการคายน้ำของข้าวลดลง ตั้งแต่ 3 ชั่วโมงแรกที่ข้าวได้รับ โดยพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 มีแนวโน้มอัตราการคายน้ำสูงกว่าพันธุ์ กข6 ในช่วงที่ได้รับ NaCl ตั้งแต่ 3 ชั่วโมง ถึง 7 วัน แต่เมื่อได้รับ NaCl 14 วันขึ้นไป กลับพบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีแนวโน้มมีอัตราการคายน้ำต่ำกว่าพันธุ์ กข6 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เกลือมีส่วนเกี่ยวข้องกับการดูดน้ำของพืช โดยทำให้ค่าศักย์ของน้ำในสารละลายต่ำกว่าปกติ ดังนั้นจึงเป็นอุปสรรคต่อกิจกรรมภายในต้นพืช อาทิเช่น กระบวนการลำเลียงน้ำและธาตุอาหารของพืช การรักษาความเต่งภายในเซลล์ ตลอดจนการยืดตัวของเซลล์ ซึ่งอัตราการคายน้ำที่ลดลงนี้เป็นกลไกอย่างหนึ่งในการชะลอการสูญเสียน้ำในสภาพที่ได้รับเกลือ เนื่องจากสภาพที่ได้รับเกลือ ศักย์ของน้ำ (water potential) ศักย์ออสโมติก (osmotic potential) ความดันออสโมติก (osmotic pressure) และความสัมพันธ์น้ำ (water relation) จะค่อยๆ ลดลง เป็นผลให้พืชดูดน้ำมาใช้ได้น้อยลง (Netondo *et al.*, 2004a) ซึ่งพืชที่ได้รับเกลือส่วนใหญ่อาการเริ่มแรกมักแสดงอาการขาดน้ำ Seaman

(2004) รายงานว่า รายงานว่าพืชส่วนใหญ่ที่ได้รับความเสียหายจากดินเค็มสาเหตุหลักมาจากผลกระทบที่เกิดกับลักษณะทางสรีรวิทยาหลายลักษณะพร้อมกัน ซึ่งอาการเริ่มแรก คือ ความสามารถในการดูดน้ำมาใช้ลดลง เป็นสาเหตุให้การเจริญเติบโตลดลงอย่างรวดเร็ว และยังชักนำให้กระบวนการเมแทบอลิซึมในพืชเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งอาการที่ปรากฏมักคล้ายกับอาการพืชขาดน้ำ นอกจากนี้การที่ข้าวได้รับเกลือมีการสะสมของ Na^+ ที่ใบทำให้พืชมีการสร้างกรดแอบไซซิค (ABA) ซึ่งเป็นส่วนที่ช่วยควบคุมการปิด-เปิดของปากใบ จึงมีผลต่ออัตราการคายน้ำที่ลดลง (Yeo *et al.*, 1985) นอกจากนี้ สุวัฒน์ (2537) พบว่า เกลือมีผลทำให้อัตราการคายน้ำของข้าวลดลง โดยข้าวพันธุ์พอคคาลี (พันธุ์ทนเค็มมาตรฐาน) มีอัตราการคายน้ำสูงกว่าข้าวดอ (พันธุ์พื้นเมือง) ทั้งนี้สันนิษฐานว่า ข้าวที่ทนเค็มน่าจะมีการเคลื่อนย้ายไอออนของเกลือไปสะสมที่ส่วนต้นต่ำกว่าพันธุ์ที่ไม่ทนเค็มหรือทนเค็มปานกลาง จากผลการทดลองครั้งนี้ จึงสันนิษฐานได้ว่า ช่วง 7 วันแรกที่ได้รับเกลือ ข้าวขาวดอกมะลิ105 สามารถทนได้ดีกว่า กข6 แต่เมื่อได้รับเกลือ 14 วันขึ้น ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ทนได้น้อยกว่าพันธุ์ กข6

เมื่อข้าวได้รับ NaCl ร่วมกับซิลิกอน พบว่าทำให้อัตราการคายน้ำเพิ่มขึ้นจากสภาพที่ได้รับ NaCl เล็กน้อย โดยเฉพาะช่วงที่ได้รับ NaCl 7 วัน การให้ซิลิกอนร่วมด้วย ช่วยให้อัตราการคายน้ำของพันธุ์ขาวดอกมะลิ105เพิ่มขึ้นจากสภาพที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM อย่างเดียว 3 และ 12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนพันธุ์ กข6 มีอัตราการคายน้ำเพิ่มขึ้น 1 และ 14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้จากการศึกษาของ Ueno และ Agarie (2005) พบว่า ผนังเซลล์ปากใบของข้าวที่ได้รับซิลิกอนปรากฏชั้น (layer) ของซิลิก้า 2 ชั้น ซึ่งข้าวที่ไม่ได้รับจะไม่พบชั้นนี้ และพบการสะสมซิลิกอนภายใน subsidiary cell ด้านนอกและด้านในของเซลล์ที่อยู่ติดกับปากใบ (periclina cell) การค้นพบนี้เชื่อว่ากลไกการเปลี่ยนแปลงการควบคุมการปิดเปิดปากใบมีสาเหตุมาจากการสะสมของซิลิกอนที่บริเวณปากใบนี้ ผลการทดลองนี้สนับสนุนข้อสันนิษฐานที่ว่าซิลิกอนมีบทบาทในการควบคุมการสูญเสียน้ำทางปากใบได้จริง ซึ่งข้าวแต่ละพันธุ์นั้นมีการปรับตัวในสภาพที่ได้รับซิลิกอนแตกต่างกัน ดังเช่นการทดลองครั้งนี้ พบว่า อัตราการคายน้ำของข้าวขาวดอกมะลิ105 สูงกว่า กข6 เมื่ออยู่ในสภาพที่ได้รับซิลิกอนร่วมกับ NaCl จึงสันนิษฐานได้ว่า ข้าวขาวดอกมะลิ105 น่าจะปรับตัวในสภาพดังกล่าวได้ดีกว่าพันธุ์ กข6

5.1.3 ค่าการนำที่ปากใบ และปริมาณ CO_2 ใน substomatal

ค่าการนำที่ปากใบเป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพในการนำ CO_2 เข้าไปใน substomatal ซึ่งค่าการนำที่ปากใบลดลงเมื่อค่าความต้านทานที่ปากใบเพิ่มขึ้น จากการทดลองครั้งนี้ พบว่า สภาพที่ข้าวได้รับ NaCl ค่าการนำที่ปากใบของข้าวเริ่มลดลงพร้อมกับการลดลงของ CO_2 ใน substomatal ตั้งแต่ 3 ชั่วโมงแรก และลดลงต่ำสุดในช่วงที่ได้รับ 28 วัน โดยเฉลี่ยตลอดการทดลอง

ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่าการนำที่ปากใบและ CO_2 ใน substomatal สูงกว่า กข6 เมื่อได้รับ NaCl ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเกลือมีผลต่อลักษณะทางสรีรวิทยาแม้จะได้รับช่วงระยะเวลาสั้น ซึ่งความเข้มข้นและระยะเวลาที่ได้รับเพิ่มขึ้นยิ่งมีผลทำให้ลักษณะทางสรีรวิทยาผิดปกติมากขึ้น ซึ่งสาเหตุหลักมาจาก เกลือทำให้ความต้านทานภายใน stomata และความต้านทานในชั้น mesophyll เพิ่มขึ้น การนำ CO_2 เข้ามายังชั้น mesophyll จึงลดลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลงด้วย จากการรายงานของ Boyer, 1965 อ้างใน สุวัฒน์ (2544) เกลือส่งผลให้เกิดความต้านทานต่อการแพร่ของ CO_2 ลดลง โดยเขาพบว่า ฝ้ายที่ได้รับเกลือค่าการนำที่ปากใบจะลดลงมากถึง 70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับต้นที่ไม่ได้รับเกลือ ส่วน Netondo และคณะ (2004b) ก็ได้ผลเช่นเดียวกัน คือ ที่ความเข้มข้นของ NaCl 50 mM ขึ้นไปมีผลทำให้ข้าวฟ่างมีค่าการนำที่ปากใบลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในตรึง CO_2 ค่อยๆ ลดลงและลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเข้มข้น NaCl 200 mM ขึ้นไป นอกจากนี้ สุวัฒน์ และคณะ (2537) ศึกษาในข้าวพันธุ์พอคคาลี ซึ่งจัดเป็นพันธุ์ข้าวทนเค็มมาตรฐาน และข้าวดอ ซึ่งเป็นพันธุ์พื้นเมืองที่ปลูกในภาคอีสาน พบว่า ค่าการนำที่ปากใบของข้าวพันธุ์พอคคาลี สูงกว่าพันธุ์ข้าวดอ เมื่ออยู่ในสภาพที่ได้รับ NaCl ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน การทดลองครั้งนี้ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่าการนำที่ปากใบสูงกว่า กข6 ดังนั้นข้าวขาวดอกมะลิ105 จึงน่าจะมีความสามารถในการทนเค็มได้ดีกว่าด้วย

อย่างไรก็ตาม เมื่อข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ NaCl ร่วมกับ SiO_2 พบว่า ที่ระดับ NaCl 50 mM การให้ซิลิกอนไม่ได้ช่วยให้ข้าวทั้งสองพันธุ์มีค่าการนำที่ปากใบเพิ่มขึ้น ขณะที่ระดับ 100 mM เมื่อให้ซิลิกอนร่วมด้วยทำให้ค่าการนำที่ปากใบเพิ่มขึ้นจากสภาพที่ได้รับ NaCl อย่างเดียวเล็กน้อย โดยเฉพาะช่วงที่ได้รับ NaCl 1-7 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่าการนำที่ปากใบเพิ่มขึ้น 3-16 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพันธุ์ กข6 เพิ่มขึ้น 20-22 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพที่ได้รับ NaCl อย่างเดียว เมื่อสังเกตปริมาณ CO_2 ใน substomatal พบว่า การให้ซิลิกอนช่วยให้ CO_2 ใน substomatal เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นกัน โดยเฉพาะในช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl วันแรก ทั้งนี้ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าซิลิกอนมีส่วนช่วยให้ค่าความต้านทานที่ปากใบลดลง ค่าการนำที่ปากใบเพิ่มขึ้น ทำให้ CO_2 สามารถแพร่เข้าสู่ปากใบได้มากยิ่งขึ้น ช่วยให้ข้าวที่ได้รับเกลือที่ระดับความเข้มข้นที่สูงปรับตัวได้ดีกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ และข้าว กข6 ปรับตัวในสภาพที่ได้รับเกลือร่วมกับซิลิกอนได้ดีกว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 ซึ่ง Yeo และคณะ (1999) เชื่อว่าซิลิกอนมีบทบาทขัดขวางปริมาณน้ำที่ไหลผ่านทาง apoplast ซึ่งเป็นทางที่นำโซเดียมไอออนมาด้วย

จากการทดลองครั้งนี้จะเห็นได้ว่าสภาพที่ข้าวได้รับ NaCl อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง ค่าการนำที่ปากใบ อัตราการคายน้ำและปริมาณ CO_2 ใน substomatal ของข้าวลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาดังกล่าวนี้เกิดจากอิทธิพลของเกลือที่มีในสารละลายมาก เชื่อว่ามีผลไป

ขัดขวางการดูดน้ำของข้าว โดยเกี่ยวข้องกับ ความสัมพันธ์น้ำ ศักย์ของน้ำ และศักย์ออสโมติก ดังนั้น ลักษณะที่แสดงออกของข้าวเมื่อได้รับเกลือมักแสดงอาการคล้ายพืชขาดน้ำ ซึ่งพืชจำเป็นต้องมีการปรับตัวด้านสัณฐานวิทยาและกายวิภาคเพื่อลดการสูญเสียน้ำ โดยการปรับขนาดของปากใบให้เล็กและมีจำนวนปากใบน้อยลง (อาทิติ์ยา, 2543) ขณะเดียวกันความต้านทานที่ปากใบเพิ่มขึ้น และค่าการนำที่ปากใบลดลง ขัดขวางปริมาณ CO_2 ที่จะแพร่เข้ามาในปากใบ กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงจึงเกิดขึ้นน้อยลงด้วย และการสะสมของซิลิกอนที่เซลล์ปากใบน่าจะมีส่วนช่วยให้เซลล์ปากใบเต่งเกิดกลไกควบคุมการปิดเปิดปากใบให้ดีขึ้น (Ueno and Agarie, 2005) รวมทั้งลดความต้านทานที่ปากใบ เพื่อช่วยให้ CO_2 แพร่เข้าสู่ปากใบได้มากขึ้น ซึ่งในงานทดลองครั้งนี้พบว่าการให้ซิลิกอนช่วยให้ค่าการนำที่ปากใบ CO_2 ใน substomatal อัตราการคายน้ำ และอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพที่ได้รับเกลืออย่างเดียว

5.2 ผลของซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์ต่อการเจริญเติบโตของข้าว

5.2.1 น้ำหนักแห้งใบ กาบใบ และราก

ผลการศึกษา พบว่า NaCl 50 mM ขึ้นไป ทำให้น้ำหนักแห้งใบ กาบใบ และรากของข้าวลดลง โดยน้ำหนักแห้งใบลดลงหลังได้รับ 14 วันขึ้นไป ส่วนน้ำหนักแห้งกาบใบลดลงหลังได้รับ 21 วันขึ้นไป และน้ำหนักแห้งรากลดลงหลังได้รับ 7 วันขึ้นไป ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ารากของข้าวเป็นส่วนที่ได้รับความเสียหายก่อนส่วนอื่น ต่อมาความเสียหายจะเกิดขึ้นที่ใบ และกาบใบตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นเพราะรากที่สัมผัสกับสารละลายที่มีไอออนของเกลือโดยตรง รวมทั้งการสะสม Na^+ พบที่รากสูงกว่าส่วนอื่น Netondo และคณะ (2004a) รายงานว่าเกลือทำให้ ศักย์น้ำ (water potential) ศักย์ออสโมติก (osmotic potential) ลดลง ซึ่งจะเป็นอุปสรรคต่อกิจกรรมภายในต้นพืช อาทิเช่น กระบวนการลำเลียงน้ำและธาตุอาหาร การรักษาความเต่งภายในเซลล์ ตลอดจนการยืดและการขยายตัวของเซลล์ Seaman (2004) รายงานว่าพืชส่วนใหญ่ที่ได้รับความเสียหายจากดินเค็มสาเหตุหลักมาจากผลกระทบที่เกิดกับลักษณะทางสรีรวิทยาหลายลักษณะพร้อมกัน ซึ่งอาการเริ่มแรก คือ ความสามารถในการดูดน้ำมาใช้ลดลง เป็นสาเหตุให้การเจริญเติบโตลดลงอย่างรวดเร็ว Flowers และคณะ (1991) ศึกษาในข้าวโดยให้ NaCl 50 mM พบว่า ใบข้าวแสดงอาการขาดน้ำและมีการสะสมไอออนเพื่อลดค่าศักย์ของน้ำ หลังจากได้รับเกลือ 2-3 วัน ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่วัดได้ในอะโพพลาสต์ (apoplast) ของใบสูงถึง 600 mM ในขณะที่รากมีความเข้มข้นของเกลือในอะโพพลาสต์เพียง 50 mM แสดงให้เห็นว่าเซลล์ของใบกำลังได้รับความเสียหายจากการขาดน้ำ ขณะที่การทดลองครั้งนี้กลับพบว่าที่ได้รับ NaCl 50 -100 mM เมื่อได้รับเป็นเวลา 28 วัน ทำให้น้ำหนักแห้งใบ กาบใบ และราก ลดลง 47-64 , 31-48 และ 56-82 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งผล

ดังกล่าวยังชี้ให้เห็นว่าเกลือทำความเสียหายต่อรากมากที่สุด รองลงมาคือ ใบ และ กาบใบตามลำดับ ส่วนสุวัฒน์ และคณะ (2537) ได้ศึกษาในข้าวพันธุ์พอคคาลี (พันธุ์ทนเค็มมาตรฐาน) และข้าวดอ (พันธุ์พื้นเมือง) ที่ได้รับ NaCl 0, 30, 60, 90 และ 120 mM พบว่า ข้าวพันธุ์พอคคาลีมีอัตราการสร้างน้ำหนักแห้งสูงกว่าข้าวดอ 40-50 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลมาจากพันธุ์พอคคาลีมีประสิทธิภาพในการเพิ่มพื้นที่ใบ และมีประสิทธิภาพในการใช้น้ำดีกว่าพันธุ์ข้าวดอ ซึ่งทำให้พันธุ์พอคคาลีมีความสามารถในการทนเค็มได้ดี สำหรับการทดลองครั้งนี้ พบเพียงแนวโน้มว่าหลังข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ NaCl 14 วันขึ้นไป ข้าว กข6 มีน้ำหนักแห้งใบลดลงมากกว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 ประมาณ 7-10 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่การลดลงของน้ำหนักแห้งกาบใบและรากของข้าวทั้งสองพันธุ์แทบไม่แตกต่างกัน ดังนั้นข้าวขาวดอกมะลิ105 จึงน่าจะมีความสามารถในการทนเค็มได้ดีกว่าพันธุ์ กข6

Lutts และคณะ (1996) ศึกษาปริมาณสาร malondialdehyde ซึ่งเป็นสารที่มีผลเร่งให้ใบพืชเสื่อมเร็วกว่าปกติ ศึกษาในข้าวพันธุ์ที่ทนและอ่อนแอต่อเกลือ พบว่า พันธุ์ทนเค็มพบ พบสารนี้เฉพาะในใบแก่ ขณะที่พันธุ์อ่อนแอพบทั้งในใบอ่อนและใบแก่ ในการทดลองครั้งนี้ ข้าวพันธุ์ กข6 มีน้ำหนักแห้งใบลดลงมากกว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 จึงน่าจะเป็นไปได้ว่าข้าว กข6 อาจจะมีการสังเคราะห์สาร malondialdehyde สูงกว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 นอกจากนี้ Zafar และคณะ (2004) ได้ศึกษาการเจริญเติบโตของข้าวพันธุ์อ่อนแอ Basmati-370 และพันธุ์ทนเค็ม IR6 ที่ระดับความเค็ม 4.0 และ 10.0 dS/m พบว่า ที่ระดับความเค็ม 10.0 dS/m ข้าวพันธุ์ Basmati-370 มีการเจริญเติบโตลดลง 70 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ IR6 มีการเจริญเติบโตลดลงเพียง 20-30 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้ข้าวขาวดอกมะลิ105 จึงน่าจะมีความสามารถทนเค็มได้ดีกว่าข้าว กข6 เล็กน้อย สังเกตจากน้ำหนักแห้งส่วนใบที่สูงกว่าพันธุ์ กข6 เมื่อได้รับเกลือที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

เมื่อพิจารณาสภาพที่ข้าวทั้งสองพันธุ์ได้รับ NaCl ร่วมกับซิลิกอน พบว่า การให้ซิลิกอนในสภาพที่ได้รับ NaCl มีส่วนช่วยให้น้ำหนักแห้งใบ และกาบใบของข้าวขาวดอกมะลิ105 เพิ่มขึ้น 14-29 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงที่ได้รับ NaCl 1-14 วัน และลดลงเมื่อได้รับ NaCl 21 วันขึ้นไป ขณะที่พันธุ์ กข6 สูงกว่าสภาพควบคุม 7-10 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงที่ได้รับ NaCl 1-7 วันและลดลงหลังได้รับ NaCl 14 ขึ้นไป ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ซิลิกอนช่วยให้ข้าวทนต่อเกลือได้นานยิ่งขึ้นและยังช่วยให้การเจริญเติบโตสูงกว่าสภาพควบคุมในช่วง 14 และ 7 วันแรกในพันธุ์ ขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ตามลำดับ และเมื่อได้รับ NaCl เป็นเวลาหลังจากที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าการให้ซิลิกอนช่วยให้ลดความเสียหายที่เกิดจากเกลือให้น้อยลง สังเกตจากน้ำหนักแห้งใบ กาบใบ และรากสูงกว่าสภาพที่ได้รับเกลืออย่างเดียว โดยเฉพาะพันธุ์ ขาวดอกมะลิ105 มีแนวโน้มปรับตัวในสภาพที่ได้รับซิลิกอนร่วมกับเกลือได้ดีกว่าพันธุ์ กข6 ดังนั้นในช่วงที่ข้าวได้รับเกลือเป็นเวลานาน การให้ซิลิกอนมีส่วนช่วยบรรเทาความเสียที่เกิดขึ้นในใบ กาบใบ และรากได้เพียงบางส่วนเท่านั้น

5.2.2 พื้นที่ใบกับความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งใบต่อพื้นที่ใบ (SLW)

NaCl ทำให้พื้นที่ใบของข้าวลดลง โดยลดลงตามความเข้มข้นและระยะเวลาที่ได้รับ ลดลงต่ำสุดเมื่อได้รับ NaCl เป็นเวลา 28 วัน โดยข้าวขาวดอกมะลิ105 พื้นที่ใบลดลง 46 และ 78 เปอร์เซ็นต์ ส่วน กข6 ลดลง 67 และ 79 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับ NaCl 50 และ 100 mM ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวสอดคล้องกับการลดลงของน้ำหนักแห้งใบ และเกิดขึ้นพร้อมกันกับการเพิ่มขึ้นของ SLW ซึ่งสภาพที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM เป็นเวลา 28 วัน ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี SLW เพิ่มขึ้น 27 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพันธุ์ กข6 เพิ่มขึ้น 1 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม การเพิ่มขึ้นของ SLW แสดงให้เห็นว่าความหนาหรือความเต่งของเซลล์เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับผลงานของสุวัฒน์ และคณะ (2537) พบว่าประสิทธิภาพในการเพิ่มพื้นที่ใบ การสร้างน้ำหนักแห้ง และ SLW ของข้าวพันธุ์พอคคาลีสูงกว่าข้าวดอ เมื่ออยู่ในสภาพที่ได้รับ NaCl ที่ความเข้มข้นเดียวกัน สำหรับการทดลองครั้งนี้ พบว่า ที่ความเข้มข้น NaCl 50 mM พื้นที่ใบของข้าวขาวดอกมะลิ105 ได้รับความเสียหายน้อยกว่า และมี SLW สูงกว่าพันธุ์ กข6 แสดงว่าที่ความเข้มข้น NaCl 50 mM ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงต่อหน่วยพื้นที่ใบ และความหนาของใบต่ำกว่าพันธุ์ กข6 ส่วนที่ความเข้มข้น 100 mM พบว่าพื้นที่ใบของข้าวทั้งสองพันธุ์ไม่แตกต่างกัน ขณะที่ SLW ของข้าว กข6 มีค่าสูงกว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 แสดงว่าข้าว กข6 มีความหนาของใบสูงกว่าพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 ชี้ให้เห็นว่าในสภาพดังกล่าวข้าวพันธุ์ กข6 สามารถรักษาความเต่งภายในใบได้ดีกว่าพันธุ์ขาวดอกมะลิ105

สำหรับให้ซิลิกอนร่วมกับเกลือ พบว่า การให้ซิลิกอนในช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 1-7 วัน ช่วยให้พื้นที่ใบของข้าวขาวดอกมะลิ105 เพิ่มขึ้นสูงกว่าสภาพควบคุม ขณะที่พันธุ์ กข6 เพิ่มขึ้นเฉพาะในช่วงที่ได้รับ NaCl วันแรกเท่านั้น ส่วนในช่วงที่ได้รับ NaCl 14 วันขึ้นไป พบว่า ที่ระดับ NaCl 50 mM การให้ซิลิกอนไม่ได้ช่วยให้พื้นที่ใบของข้าวขาวดอกมะลิ105 เพิ่มขึ้น ขณะที่พันธุ์ กข6 กลับช่วยให้พื้นที่ใบสูงกว่าสภาพที่ได้รับ NaCl อย่างเดียว 3-4 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ระดับ 100 mM การให้ซิลิกอนทำให้พื้นที่ใบของข้าวขาวดอกมะลิ105 สูงกว่าสภาพที่ได้รับ NaCl อย่างเดียว 7-15 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 สูงกว่าสภาพที่ได้รับ NaCl เพียง 1 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น และเมื่อพิจารณาค่า SLW พบว่า โดยเฉลี่ยตลอดการทดลองข้าว กข6 มีค่า SLW สูงกว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 แสดงให้เห็นว่าการให้ซิลิกอนช่วยให้พื้นที่ใบของข้าวเพิ่มขึ้นเฉพาะช่วงที่ข้าวได้รับเกลือระยะสั้นเท่านั้น เมื่อได้รับเป็นเวลานานขึ้น ซิลิกอนช่วยได้เพียงเล็กน้อย และข้าวทั้งสองพันธุ์มีการตอบสนองต่อซิลิกอนต่างกัน โดยข้าวขาวดอกมะลิ105 ปรับตัวได้ดีในช่วง 1-7 วันแรกที่ได้รับเกลือโดยการเพิ่มพื้นที่ใบ หรือเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ด้วยแสง ขณะที่พันธุ์ กข6 ปรับตัวได้ดีกว่าพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 ในช่วงที่ได้รับเกลือ 14 วันขึ้นไป โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นต่ำ

5.2.3 อัตราการสะสมน้ำหนักแห้งสุทธิ และอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์

จากการศึกษาอัตราการสะสมน้ำหนักแห้งสุทธิ (Net Assimilation Rate; NAR) พบการลดลงตั้งแต่ 1-7 วันแรกที่ได้รับ NaCl โดยเฉพาะที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM ทำให้ NAR ลดลงถึง 31 เปอร์เซ็นต์ และช่วงที่ได้รับ NaCl 21-28 วัน พบว่าข้าวหยุดการสร้างน้ำหนักแห้งพร้อมกับเกิดการตายของเนื้อเยื่อบางส่วน ทำให้ NAR ที่มีค่าติดลบถึง 27 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการลดลงของ NAR สอดคล้องกับพื้นที่ใบ และอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อข้าวได้รับ NaCl ซึ่งจะมีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของข้าว และเมื่อพิจารณาอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative Growth Rate; RGR) เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการเจริญเติบโต พบว่า NaCl 50 mM ขึ้นไป ทำให้ RGR ของข้าวลดลงตั้งแต่ 1-7 วันแรกเช่นกัน และเมื่อได้รับ NaCl ในช่วง 21-28 วัน พบว่า ที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM ทำให้ RGR ติดลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าช่วงเวลาดังกล่าวข้าวไม่มีการเจริญเติบโตและยังพบการตายของเนื้อเยื่อบางส่วน จาก NAR และ RGR ที่ลดลงนี้ชี้ให้เห็นว่าเกลือมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของข้าว โดยจำกัดการเจริญเติบโตและการสะสมน้ำหนักแห้งของข้าว สาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยา (อรัญญา และคณะ, 2538) และลักษณะทางสรีรวิทยา (สุวัฒน์ และคณะ, 2537) ที่ถูกรบกวนโดยเกลือ โดยการลดลงของพื้นที่ใบเป็นตัวจำกัดประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ด้วยแสง ส่งผลให้การสะสมน้ำหนักแห้งของข้าวลดลง ซึ่งเมื่อระยะเวลาในการได้รับเพิ่มขึ้น พบว่าข้าวไม่สามารถทนต่อเกลือได้จึงทำให้เกิดการตายของต้นพืชในบางส่วน โดยเฉพาะที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM ข้าวได้รับความเสียหายมากกว่าที่ 50 mM เมื่อเปรียบเทียบ NAR ระหว่างพันธุ์ข้าว พบว่า ช่วง 1-14 วัน ที่ข้าวได้รับ NaCl ข้าวพันธุ์ กข6 มี NAR ลดลงมากกว่าพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 18-24 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อข้าวได้รับ NaCl ในช่วง 21-28 วัน พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น NaCl 50 mM ข้าวขาวดอกมะลิ105 หยุดการสะสมน้ำหนักแห้งพร้อมเกิดการตาย 8-12 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พันธุ์ กข6 หยุดการสะสมน้ำหนักแห้งที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM พร้อมกับเกิดการตายถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ที่ความเข้มข้นของเกลือที่สูงถึง 100 mM ข้าวทั้งสองพันธุ์ไม่สามารถทนต่อระดับความเค็มนี้ได้ เช่นเดียวกับ RGR ระหว่าง พบว่า ช่วง 1-7 วัน ที่ได้รับ NaCl ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีแนวโน้มมี RGR ลดลงมากกว่าพันธุ์ กข6 แต่เมื่อได้รับ NaCl 7-14 วันขึ้นไป กลับพบว่า ข้าวพันธุ์ กข6 ได้รับผลกระทบมากกว่าพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และที่ความเข้มข้น NaCl 100 mM ช่วงที่ได้รับ 21-28 วัน พบว่าข้าวทั้งสองพันธุ์หยุดการเจริญเติบและเกิดการตายของเนื้อเยื่อบางส่วน โดยข้าวพันธุ์ กข6 ได้รับผลกระทบมากกว่าพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ อาทิติ์ยา (2543) พบว่าในช่วงแรกที่ข้าวได้รับ NaCl 50 mM ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบข้าวเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อได้รับ 100 mM ซึ่งผลดังกล่าวเป็นการจำกัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของข้าวส่งผลให้การเจริญเติบโตลดลงด้วย

Zafar และคณะ (2004) แสดงให้เห็นว่าที่ระดับความเค็มที่สูง (10 dS/m) ทำให้อัตราการเจริญเติบโตของข้าวทั้งพันธุ์อ่อนแอและพันธุ์ทนเค็มลดลง เช่นเดียวกับ Alam และคณะ (2004) ที่พบว่าที่ระดับความเค็ม 12.5 dS/m ทำให้ใบแก่ของข้าวเกิดการตาย ซึ่งการทดลองครั้งนี้ก็พบว่าที่ระดับ NaCl 100 mM ในช่วงเวลาที่ได้รับ 3 สัปดาห์ขึ้นไป ส่งผลให้ข้าวตายในบางส่วนเช่นกัน เป็นแนวทางในการสนับสนุนข้อสันนิษฐานที่ว่าความสามารถในการทนเค็มของข้าวขึ้นอยู่กับระดับความเค็ม และระยะเวลาที่ข้าวได้รับเกลือ จาก RGR และ NAR ของข้าวทั้งสองพันธุ์ที่ลดลงต่างกันนี้ สามารถนำมาประเมินได้ว่าสภาพดังกล่าวข้าวขาวดอกมะลิ105 น่าจะมีประสิทธิภาพในการทนต่อเกลือได้ดีกว่าพันธุ์ กข6 และจากผลการทดลองในช่วงสัปดาห์แรกซึ่งเป็นระยะก่อนข้าวแตกกอ พบว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 มีแนวโน้มมี RGR ลดลงมากกว่าพันธุ์ กข6 ดังนั้นระยะอ่อนแอต่อเกลือในพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 น่าจะเป็นระยะก่อนแตกกอ ขณะที่พันธุ์ กข6 ในช่วงเวลาดังกล่าวกลับพบว่ามีความสามารถในการทนต่อเกลือได้ดีกว่าพันธุ์ขาวดอกมะลิ105

การให้ซิลิกอนร่วมกับ NaCl พบว่า ช่วยให้ข้าวมี NAR เพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจากสภาพที่ได้รับ NaCl อย่างเดียว 3-17 และ 2-3 เปอร์เซ็นต์ ในพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และ กข6 ตามลำดับ เช่นเดียวกับ RGR ที่เพิ่มขึ้นจากสภาพที่ได้รับ NaCl อย่างเดียว ซึ่งพบความแตกต่างชัดเจนในช่วงที่ข้าวได้รับ NaCl 7-14 วันขึ้นไป ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ซิลิกอนมีบทบาทช่วยบรรเทาความเสียหายที่เกิดจากเกลือได้ ซึ่งผลทางตรงเชื่อว่า ซิลิกอนมีบทบาทในการลดความเป็นพิษของ Na^+ โดยควบคุมการซึมผ่านของ Na^+ ทาง apoplast (Gong *et al.*, 2006; Liang *et al.*, 1996; Trivedi *et al.*, 2004; Yeo *et al.*, 1999) และลดการเกิด electrolytic leakage บริเวณรากพืชซึ่งจะช่วยควบคุมการรั่วไหลของ Na^+ เข้าสู่รากพืชได้ (Liang *et al.*, 1996; Liang *et al.*, 2003) ผลทางอ้อม คือ ซิลิกอนมีบทบาทด้านเสริมประโยชน์ ช่วยให้ใบข้าวตั้งชัน ไม่ทำให้เกิดการบังแสงระหว่างต้นและในทรงพุ่มเดียวกัน ช่วยปรับสมดุลของธาตุอาหารบางตัว ซึ่งน่าจะมีส่วนช่วยสนับสนุนให้ข้าวมีการเจริญเติบโตที่ดีขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะความเครียดเกลือนี้ ซึ่งจากทดลองครั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพันธุ์ข้าว จะเห็นได้ว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 มีแนวโน้มตอบสนองต่อการให้ซิลิกอนในสภาวะที่ได้รับเกลือได้ดีกว่าพันธุ์ กข6

5.3 ผลของซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคลอไรด์ต่อปริมาณการสะสมไอออนในเนื้อเยื่อพืช

5.3.1 ปริมาณ Na, K และ silica ที่สะสมในใบ กาบใบ และราก

เมื่อข้าวได้รับ NaCl 50 mM ขึ้นไป ทำให้ปริมาณ Na^+ ในใบ กาบใบ และรากของข้าวเพิ่มขึ้น สะสมมากที่ราก รองลงมาคือ กาบใบ และใบ ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณ K^+ ทั้งในใบ กาบใบ และรากของข้าวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า

เกลือ ทำให้การสะสม Na^+ ในเนื้อเยื่อข้าวเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในราก ดังนั้นความเสียหายที่พบจึงเกิดขึ้นที่รากก่อนผลที่ได้สอดคล้องกับน้ำหนักแห้งรากที่ลดลงมากกว่าส่วนอื่น ปริมาณ Na^+ ที่มากในรากส่งผลให้ K^+ ในรากลดลงมากเช่นกัน Halperin และ Lynch (2003) ศึกษาใน *Arabidopsis thalina* ที่ระดับ NaCl 0, 30, 60 และ 90 mM พบว่า ความเข้มข้นของ NaCl 30 mM ขึ้นไป ทำให้ความเข้มข้นของ Na^+ ใน cytoplasm เพิ่มขึ้น ขณะที่ความเข้มข้นของ K^+ กลับมีค่าลดลง ดังนั้นการที่มีปริมาณ Na^+ ในเนื้อเยื่อพืชมากเชื่อว่าน่าจะมีผลไปขัดขวางการดูดและการลำเลียง K^+ เข้าสู่ต้นพืช หรือเกิดจากการแข่งขันกันระหว่างไอออนของ Na^+ และ K^+ นั่นเอง

เมื่อพิจารณาอัตราส่วน K/Na จากการทดลองครั้งนี้ พบว่า NaCl เพิ่มขึ้นทำให้ K/Na ทั้งในใบ กาบใบ และรากลดลง โดยในช่วงที่ได้รับ NaCl 1 วันแรก รากมี K/Na ลดลงต่ำสุด 83·87 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อได้รับ NaCl 14 วันขึ้นไป พบว่า K/Na ในใบลดลงต่ำสุด รองลงมาคือ กาบใบ และราก ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ในช่วงระยะเวลาสั้นที่ข้าวได้รับเกลือ ปริมาณการสะสม Na^+ พบมากที่ราก แต่เมื่อได้รับเป็นเวลานานน่าจะเกิดการลำเลียง Na^+ ไปยังส่วนต่างๆ ของพืช ทำให้ K/Na ในใบ และกาบใบเริ่มมีค่าลดลง หรืออีกนัยหนึ่ง Na^+ ทำให้การดูด K^+ ลดลง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และ กข6 พบว่า โดยเฉลี่ยตลอดการทดลอง ที่ระดับ NaCl 50 mM ขึ้นไป ทำให้ข้าว กข6 มีปริมาณ Na^+ ในใบ และกาบใบ เพิ่มขึ้นมากกว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 ส่วนในรากพบว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ Na^+ มากกว่า ข้าว กข 6 สอดคล้องกับความเสียหายในส่วนต้นของข้าวขาวดอกมะลิ105 น้อยกว่าพันธุ์ กข6 ซึ่งปริมาณ Na^+ ในรากที่มากกว่าส่วนอื่น เชื่อว่าเป็นธรรมชาติของพืชเมื่อได้รับ NaCl ในปริมาณที่มาก จะสะสมในรากมากกว่า ต้น และใบ ซึ่งมีรายงานในส้ม ถั่วลิสง และอาโวกาโด ที่ปลูกในพื้นที่ดินเค็ม พบการสะสม Na^+ ในรากมากกว่าส่วนต้นเช่นกัน (Heimann and Ratner, 1965; Jones and Peeason, 1952; Martin และ Bingham, 1954 อ้างใน อาทิตย์า, 2543) จากผลที่ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ Na^+ ในรากสูงกว่า กข6 ขณะที่ปริมาณ Na^+ ในใบและกาบใบ ต่ำกว่า กข6 ข้าวขาวดอกมะลิ105 จึงน่าจะมีประสิทธิภาพในการขัดขวาง Na^+ ที่จะถูกลำเลียงไปยังส่วนต้นได้ดีกว่าข้าว กข6 Lee และคณะ (2003) ศึกษาปริมาณ Na^+ ในข้าวทนเค็มกลุ่ม Indica และ Japonica ในระยะต้นกล้าอายุ 14 วัน โดยให้ความเค็ม 6.0 dS/m ขึ้นไป พบว่า ข้าวทนเค็มกลุ่ม Indica มีความสามารถในการขัดขวางการดูด Na^+ ได้ดีกว่าข้าวทนเค็มกลุ่ม Japonica ซึ่งพวกเขาได้สรุปว่า ข้าวทนเค็มกลุ่ม Indica มีความสามารถในการทนเค็มได้ดีกว่ากลุ่ม Japonica เช่นเดียวกับการทดลองครั้งนี้ ข้าวขาวดอกมะลิ105 มี Na^+ ในใบ และกาบใบต่ำกว่าพันธุ์ กข6 จึงน่าจะมีความสามารถในการทนเค็มได้ดีกว่าข้าว กข6 ด้วย

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ K^+ ในข้าวทั้งสองพันธุ์เมื่อได้รับ NaCl พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณ K^+ ในใบ และกาบใบ สูงกว่าพันธุ์ กข6 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 มีกลไกการเลือกดูด K^+ ดีกว่า พันธุ์ กข6 ซึ่งเมื่อพิจารณาอัตราส่วน K/Na พบว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 มี K/Na ในใบ และกาบใบสูงกว่าข้าว กข6 ขณะที่ในรากข้าว กข6 กลับมี K/Na สูงกว่า ข้าวขาวดอกมะลิ105 Kader และคณะ (2005) พบว่า ข้าวพันธุ์ทนเค็ม (พอคคาลี) มีปริมาณ Na^+ ใน cytoplasm ต่ำกว่าพันธุ์อ่อนแอ (BRRI Dhan 29) เนื่องจากช่องทางการเลือกดูด K^+ (K^+-selective channel) ไม่ใช่ช่องทางการนำ Na^+ มาด้วย และพบ Na^+ อยู่ภายนอกเซลล์จำนวนมาก ดังนั้นจึงเชื่อว่าพันธุ์ที่ทนเค็มน่าจะมีกลไกการขับ Na^+ ออกจาก cytoplasm และนำไปสะสมไว้ใน vacuole แทน สำหรับ Khatun และ Flowers (1995) รายงานว่า K เป็นธาตุที่มีบทบาทต่อกระบวนการควบคุมออสโมติก กระบวนการสังเคราะห์โปรตีน การรักษาความเต่งภายในเซลล์ และกระตุ้นกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ดังนั้นพืชที่สามารถรักษาระดับ K^+ ไว้ในเนื้อเยื่อใบอ่อนหรือใบกำลังเจริญได้ น่าจะเป็นกลไกที่เกี่ยวข้องกับความสามารถทนเค็มของพืชนั้น ส่วน Lee และคณะ (2003) พบว่า ข้าวทนเค็มกลุ่ม Indica มีกลไกการขัดขวาง Na^+ ได้ดีกว่าข้าวทนเค็มกลุ่ม Japonica มีปริมาณ K^+ ในต้นสูงกว่า และระดับ Na/K ในต้นให้มีค่าต่ำกว่าข้าวทนเค็มกลุ่ม Japonica ในสภาพที่ได้รับความเค็มที่ระดับเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้าวทนเค็มกลุ่ม Indica ทนเค็มได้ดีกว่ากลุ่ม Japonica จากผลที่ได้ดังกล่าวเมื่อนำมาพิจารณากับการทดลองครั้งนี้ ข้าวขาวดอกมะลิ105 จึงน่าจะเป็นพันธุ์ที่สามารถทนเค็มได้ดีกว่าข้าว กข6

สำหรับการสะสม silica ในเนื้อเยื่อของข้าว พบว่า NaCl ทำให้การสะสม silica ในใบ และรากเพิ่มขึ้นในช่วง 1 วันแรกที่ได้รับ NaCl และลดลงหลังได้รับ 14 วันขึ้นไป ส่วน silica ในกาบใบ พบว่า เพิ่มขึ้นในช่วงที่ได้รับ NaCl 1 และ 14 วัน NaCl และลดลงหลังได้รับ 28 วัน ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเกลือทำให้ปริมาณการสะสม silica ลดลง โดยใบได้รับผลกระทบมากที่สุด รองลงมาคือ รากและต้น ตามลำดับ การสะสม silica พบมากในใบ รองลงมาคือ กาบใบ และราก ตามลำดับ จากการทดลองของ Yeo และคณะ (1999) พบว่า การให้ซิลิกอนทำให้การดูด Na^+ ในต้นข้าวลดลง ซึ่งพวกเขาสันนิษฐานว่าซิลิกอนอาจไปจับกับโมเลกุลของ Na^+ ในสารละลายกลายเป็นสารประกอบที่พืชไม่สามารถดูดเข้าสู่ต้นพืชได้ ซึ่งการลดลงของปริมาณ silica ทั้งในใบ กาบใบ และรากลดลงนั้นอาจเป็นเพราะสาเหตุดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และ กข6 พบว่า NaCl ทำให้การสะสม silica ในใบ และรากของข้าวขาวดอกมะลิ105 ลดลงมากกว่าพันธุ์ กข6 และปริมาณ Na^+ ในใบ และรากของข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่าน้อยกว่าข้าว กข6 จริง ดังนั้นข้อสันนิษฐานดังกล่าวจึงน่าจะเป็นจริงด้วย

เมื่อพิจารณาสภาพที่ข้าวได้รับ NaCl ร่วมกับซิลิกอน พบว่า การให้ซิลิกอน ทำให้การสะสม silica ในใบ กาบใบ และราก เพิ่มขึ้น 9-17, 6-10 และ 2-3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพควบคุม ปริมาณ Na^+ ในใบ และกาบใบลดลง 1-2 และ 0.5-1 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพที่ได้รับ NaCl อย่างเดียว ส่วนในราก พบว่าการให้ซิลิกอนทำให้ปริมาณ Na^+ ลดลงเพียงเล็กน้อย ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ซิลิกอนมีบทบาทในการช่วยลดการดูด Na^+ ของต้นข้าว Matoh และคณะ (1986) ทดลองในข้าว ส่วน Ahmad และคณะ (1992) ทดลองในข้าวสาลี พบว่า การให้ซิลิกอนในสารละลายที่ใช้ปลูกร่วมกับการให้เกลือ NaCl พบว่า พืชทั้ง 2 ชนิด มี ความเข้มข้นของ Na^+ ในเนื้อเยื่อพืชลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพที่ได้รับ NaCl อย่างเดียว สำหรับ Yeo และคณะ (1999) ทดลองให้ NaCl 50 mM ร่วมกับซิลิกอน 0.98 mM $NaSiO_2$ ในข้าว พบว่า ข้าวที่ได้รับซิลิกอนร่วมกับ NaCl มี Na^+ ในต้นลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพที่ได้รับ NaCl อย่างเดียว ซึ่งพวกเขาสันนิษฐานว่าผลดังกล่าวเกิดจาก 1) ซิลิกอนช่วยลดการลำเลียงน้ำผ่านทาง apoplast ซึ่งจะช่วยลดการลำเลียง Na^+ ที่มากับน้ำในเส้นทางดังกล่าว 2) ซิลิกอนอาจไปจับกับโมเลกุลของ Na^+ กลายเป็นสารประกอบตัวใดตัวหนึ่งที่พืชไม่สามารถดูดเข้าสู่ต้นพืชได้ ส่วน Liang และคณะ (1996) เชื่อว่าซิลิกอนมีบทบาทในการลดการซึมผ่านของ Na^+ ทางผนังราก ช่วยลดการเกิด electrolytic leakage ในรากพืช ซึ่งจะช่วยลดการรั่วไหลของของธาตุอาการออกจากเซลล์พืชได้ จากการทดลองครั้งนี้ พบว่า การให้ซิลิกอนทำให้ปริมาณ Na^+ ในรากข้าวลดลงจากสภาพที่ได้รับเกลืออย่างเดียวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นข้อสันนิษฐานเหล่านี้น่าจะเป็นกลไกที่เกิดขึ้นในระหว่างการลำเลียงจากรากไปยังส่วนต้นด้วย โดยขัดขวางการลำเลียง Na^+ จากรากไปยังส่วนต้น ทำให้ Na^+ ทั้งในใบ และกาบใบของข้าวลดลงเมื่อได้รับซิลิกอนร่วมด้วย

เมื่อพิจารณาปริมาณ K^+ ในเนื้อเยื่อพืช ในสภาพที่ได้รับ NaCl ร่วมกับซิลิกอน พบว่า การให้ซิลิกอนในช่วงที่ได้รับ NaCl 1 วันแรก ช่วยให้ปริมาณ K^+ ในใบ และกาบใบเพิ่มขึ้น 10-28 และ 6-14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพที่ได้รับ NaCl อย่างเดียว ขณะที่ราก พบ K^+ เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า สภาพที่ได้รับเกลือ การให้ซิลิกอนมีส่วนช่วยให้การดูด K^+ ในส่วนต้นของข้าวดีขึ้น Liang และ Ding (2002) ศึกษาในข้าวบาร์เลย์ที่ได้รับ NaCl 120 mM ร่วมกับซิลิกอน 1.0 mM พบว่า การให้ซิลิกอนทำให้ความเข้มข้นของ Na^+ ใน cortical cell และ stellar cell ลดลง พร้อมกับการเพิ่มขึ้นของ K^+ ด้วย ดังนั้นจึงน่าจะเป็นไปได้ว่าซิลิกอนมีบทบาทในการส่งเสริมให้ข้าวมีกลไกการเลือกดูด Na^+ และ K^+ ได้ดีขึ้น การทดลองครั้งนี้ เมื่อพิจารณาอัตรา K/Na พบว่า การให้ซิลิกอนช่วยให้ K/Na ในใบ และกาบใบ เพิ่มขึ้น โดยข้าวขาวดอกมะลิ105 พบการเพิ่มขึ้นชัดเจนกว่าพันธุ์ กข6 ดังนั้นการให้ซิลิกอนในสภาพที่ข้าวได้รับเกลือ ข้าวขาวดอกมะลิ105 จึงน่าจะมีความสามารถในการปรับตัวให้ทนต่อความเค็มได้ดีกว่าพันธุ์

กข6 โดยพิจารณาจาก ปริมาณ Na^+ ในใบ กาบใบ ที่มีค่าต่ำกว่าพันธุ์ กข6 ประกอบกับ K^+ ในใบ กาบใบ และราก มีค่าสูงกว่าพันธุ์ กข6 ดังเช่นงานทดลองของ Liang และ Ding (2002) ที่ศึกษาผลของซิลิกอนต่อการดูดไอออนของข้าวบาร์เลย์พันธุ์อ่อนแอ (Kepin No 7) และพันธุ์ทนเค็ม (Jian 4) พบว่า สภาพที่ให้ซิลิกอนร่วมกับเกลือ ความเข้มข้นของ Na^+ ใน cortical cell และ stellar cell บริเวณผิวรากลดลง โดยพันธุ์ทนเค็มลดลงมากกว่าพันธุ์อ่อนแอ ขณะที่ K^+ กลับมีค่าเพิ่มขึ้น โดยพันธุ์ทนเค็มเพิ่มขึ้นมากกว่าพันธ์อ่อนแอ

บทที่ 6
สรุป

6.1 อิทธิพลของซิลิกอนต่อลักษณะทางสรีรวิทยาและการเจริญเติบโตของข้าวในระยะต้นกล้าถึงแตกกอ

ซิลิกอนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสรีรวิทยาของข้าวทั้งสองพันธุ์ คือ ที่ความเข้มข้น $SiO_2$10 mM ขึ้นไป มีแนวโน้มทำให้ อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง อัตราการคายน้ำ ค่าการนำที่ปากใบ และ CO_2 ใน substomatal เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ น้ำหนักแห้งใบ กาบใบ และรากของข้าวเพิ่มขึ้นด้วย ระดับซิลิกอนที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของข้าวในระยะต้นกล้าถึงระยะแตกกอ คือ 10 mM

6.2 อิทธิพลของซิลิกอนและโซเดียมคลอไรด์ต่ออัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงและอัตราการเจริญเติบโตของข้าวในระยะต้นกล้าถึงระยะแตกกอ

6.2.1 ผลต่อลักษณะทางสรีรวิทยาและการเจริญเติบโตของข้าว

NaCl ที่ความเข้มข้น 50 mM ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง อัตราการคายน้ำ ค่าการนำที่ปากใบ และ CO_2 ใน substomatal ในข้าวทั้งสองพันธุ์ลดลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตของข้าวลดลง ส่วนที่ได้รับความเสียหายมากที่สุด คือ ราก ตามด้วย กาบใบ และ ใบ ตามลำดับ การ SiO_2 10 mM ร่วมกับ NaCl ช่วยให้ข้าวปรับตัวทางสรีรวิทยาดีขึ้น คือ อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง และปริมาณ CO_2 ใน substomatal เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ข้าวมีการเจริญเติบโตดีขึ้นเมื่อเทียบกับสภาพที่ได้รับ NaCl เพียงอย่างเดียว

6.2.2 ผลต่อการสะสมไอออนในเนื้อเยื่อ

NaCl ทำให้ปริมาณ Na^+ ในเนื้อเยื่อข้าวเพิ่มขึ้น พบมากที่ราก ตามด้วย กาบใบ และใบ ตามลำดับ ขณะที่ K^+ และซิลิก้า ในเนื้อเยื่อกลับมีค่าลดลง การให้ SiO_2 ร่วมด้วย ช่วยให้อัตราส่วนระหว่าง K/Na ในเนื้อเยื่อพืชเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าข้าวมีการปรับตัวในการเลือกดูดธาตุ K ได้ดีขึ้น

6.2.3 ความแตกต่างระหว่างพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และกข6

ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีแนวโน้มปรับตัวให้ทนต่อ NaCl ได้ดีกว่าพันธุ์ กข6 และปรับตัวให้ทนเค็มได้ดีเมื่อได้รับ SiO_2 10 mM ร่วมด้วย

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมการเกษตร. 2550. ข้าวพันธุ์ส่งเสริม. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. http://seedcenter03. doae.go.th/about2/ver1.html. กุมภาพันธ์ 18, 2550.

กันยารัตน์ สอนสุภาพ. 2546. ผลของความเครียดน้ำและเกลือต่อลักษณะทางสรีรวิทยาของต้นอ่อนข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยา : มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

เกริก ปั้นเหน่งเพ็ชร และคณะ. 2531. รายงานการสัมมนาการปลูกพืชในดินเลวในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. ศูนย์ศึกษาค้นคว้าและพัฒนาเกษตรกรรมภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. หน้า 406-415.

จุฑารัตน์ คำนึงกิจ. 2546. ผลของซิลิกอนที่มีต่อผลผลิตและการดูดใช้ธาตุอาหารของข้าวและข้าวโพดที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัด ชุดดินองครักษ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ : มหาวิทยาเกษตรศาสตร์.

นิชากร สิงสุพรรณ์. 2545. การใช้ลักษณะทางสรีรวิทยาพืชบางประการในการคัดเลือกพันธุ์ข้าวทนเค็ม. ปัญหาพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเกษตรศาสตร์ : มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

บุญเทียม เลิศศุภวิทย์นภา, แก้ว อุดมศิริชาคร และนพมาศ นามแดง. 2546. การศึกษาลักษณะการทนเกลือของข้าวที่ได้รับซิลิกอนและผลต่อลักษณะทางกายวิภาคและสรีรวิทยา. รายงานการวิจัย คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

ประมุข ถิ่นใหญ่. 2546. ผลของการใส่ซิลิกอนร่วมกับปุ๋ยเคมีต่อผลผลิตและการดูดใช้ธาตุอาหารของข้าวสองพันธุ์ที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัด ชุดดินรังสิตกรดจัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พิกุล ม้าวิเศษ. 2546. อิทธิพลของซิลิกอนต่อการทนเค็มของข้าวขาวดอกมะลิ 105. ปัญหาพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเกษตรศาสตร์ : มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

เพิ่มพูน กีรติกสิกร. 2527. ดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย. คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2543. ธาตุอาหารพืช. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 361-387.

รัชดา ไชยเจริญ. 2544. การคัดเลือกหญ้าปากควายทนเค็มในหลอดทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพฤกษศาสตร์ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

รัตนชาติ ช่วยบุดดา. 2544. อิทธิพลของฟอสฟอรัสและซิลิกอนต่อผลผลิตและการดูดดึงธาตุอาหารของข้าวและข้าวโพดที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิริวรรณ โพธิ์พรม. 2545. การสกัด Silica bodies จากพืชโดยใช้เอนไซม์และวิธีทางกายภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษา : มหาวิทยาศิลปากร.

สมศรี อรุณินท์. 2539. พืชทนเค็ม. ใน : ดินเค็มในประเทศไทย. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. หน้า 113-137.

สุวัฒน์ ธีระพงษ์ธนากร, แก้ว อุดมศิริชาคร และบุญเทียม เลิศศุภวิทย์นภา. 2537. อิทธิพลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่มีต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงและปริมาณคลอโรฟิลล์ในข้าว. รายงานการวิจัย คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

สุวัฒน์ ธีระพงษ์ธนากร. 2544. สรีรวิทยาพืชในสภาวะความเครียดเกลือ. เอกสารประกอบการสอนวิชา สรีรวิทยาการผลิตพืชไร่ ภาควิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

อรัญญา พิมพ์มงคล, สุวัฒน์ ธีระพงษ์ธนากร และ แก้ว อุดมศิริชาคร. 2538. การศึกษาเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาและกายวิภาคของข้าวพันธุ์ทนเค็มกับพันธุ์ไม่ทนเค็ม. รายงานการวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

อรุณี ยูวะนิยม. 2550. การจัดการแก้ไขปัญหาดินเค็ม. เอกสารเผยแพร่ กรมพัฒนาที่ดิน. http://www.ldd.go.th/Lddwebsite/web_ord/Techical/pdf/P_technical03001.pdf. เมษายน 10, 2550.

อาทิตย์ยา ฉิมรักแก้ว. 2543. สรีรวิทยาและกายภาคศาสตร์ของข้าวทนเค็ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยา : มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

Agarie, S. and et al. 1996. Function of silica bodies in the epidermal system of rice (*Oryza sativa* L.): testing the hypothesis. J. Exp. Bot. 47: 655-660.

Agarie, S. and et al. 1998. Effect of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.) monitored by electrolyte leakage. Plant Prod. Sci. 1: 96-103.

Agarie, S. and et al. 1999. Effects of silicon on stomatal blue-light response in rice (*Oryza sativa* L.). Plant Prod. Sci. 2(4): 232-234.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Ahmad, R., Zaheer, S. H. and Ismail, S., 1992. Role of silicon in salt tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.). Plant Sci. 85: 43-50.

Akbar, M. and Ponnamperuma, F.N. 1982. Saline soils of Southeast Asia as potential rice land. IRRI (ed).Rice Reserch Strategies for the Future. Jonh Wiley & Sons Inc. p 265-282.

Alam, S. M. 1994. Nutrient by plants under stress conditions. In: Pessarakli, M(Ed), Handbook of Plant and Crop Stress. Marcel Dekker, New York. p 227-246.

Alam, M. Z. and et al. 2004. Effect of salinity on growth of some modern rice cultivars. J. Agron. 3(1): 1-10.

Anderson, D. L. 1991. Soil and leaf nutrition interactions following application of calcium silicate slag to sugarcane. Fert. Res. 30: 9-18.

Chartzoulakis, K. S. 1994. Photosynthesis, water relation and leaf growth of cucumber exposed to salt stress. Scientia Hort. 59(11): 27-35.

Colmer, T. D., Epstein, E. and Dvorak, J. 1995. Differential solute regulation in leaf blades of various ages in salt-sensitive wheat and a salt-tolerant wheat x *Lophopyrum elongatum* (host) a love amphiploid. Plant Physiol. 108: 1715-1724.

Epstein, E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology. Proc Natl Acard Sic. USA. 91: 11-17.

Epstein, E. 1999. Silicon. Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 50: 641-664.

Flowers, T.J. and et al. 1985. The effect of salinity on the ultrastructure and photosynthesis of two varieties of rice: further evidence for a cellular component of salt resistance. New Phytol. 100: 37-43.

Flowers, T. J., Hajibagheri, M. A. and Yeo, A. R. 1991. Ion accumulation in the cell walls of rice plants growing under saline conditions evidence for the Oerti hypothesis. Plant Cell Environ. 14(3): 119-125.

Gomez, K. A. and Gomez, A. A. 1984. Statistical Procedures for Agricultural Research. Jonh Wiley & Sons. Inc.

Gong, H. J., Randall, D. P. and Flowers, T. J. 2006. Silicon deposition in the root reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by reducing bypass flow. Plant Cell Environ. 29(10): 1970-1979.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Greenway, H. and Munns, R. 1980. Mechannism of salt tolerance in nonhalophytes. Ann. Rev. Plant Physiol. 31: 149-190.

Halperin, S. J. and Lynch, J. P. 2003. Effect of salinity on cytosolic Na^+ and K^+ in root hairs of *Arabidopsis thaliana* in vivo measurement using the fluorescence dyes SBFI and PBFI. J. Exp. Bot. 54(390): 2035-2043.

Hara, T., Gu, M. H. and Kayama, H. 1999. Amelioration effect of silicon in aluminum injury in the rice plant. Soil Sci. Plant Nutri. 45(4): 929-936.

Hasegawa, P. and et al. 2000. Plant celluler and moleculer responses to high salinity. Ann. Rev. Plant Mol. Biol. 51: 463-499.

Hossain, K. A., Horiuchi, T. and Miyagawa, S. 2001. Effect of silicate materials on growth and grain yield of rice plants grown in clay loam and sandy loam soil. J. Plant Nutri. 24(1): 1-13.

International Rice Research Institute (IRRI). 2006. Silicon Difficiency. http//www.knowledgebank.Irri.Org/ricedoctor_mx/Fact_Sheets/DeficienciesToxicities /silicon.htm. January 24, 2006.

Kader. M. A. and Lindberg, S. 2005. Uptake of sodium in protoplasts of salt-sensitive and salt-tolerant cultivars of rice, *Oryza sativa* L. determined by the fluorescent dry SBFI. J. Exp. Bot. 56(422): 3149-3158.

Khan, M. A., Ungar, I. A. and Showalter, A. M. 2000. Effect of salinity on growth, water relations and ion accumulation of subtropical perennial halophyte *Atriplex griffithii* var. stocksii. Ann. Bot. 85: 225-232.

Khatun, S. and Flowers, T. J. 1995. Effects of salinity on seed set in rice. Plant Cell and Environ. 18(1): 61-67.

Kim, S. G. and et al. 2002. Silicon-induced cell wall fortification of rice leaves a possible cellular mechanism of enhanced host resistance to blast. Phytopathology. 92(10): 1095-1103.

Lee, K. S. and et al. 2003. Salinity tolerance of japonica and indica rice (*Oryza sativa* L.) at the seedling stage. Planta. 216: 1043-1046.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Liang, Y. and et al. 1996. Effect of silicon on salinity tolerance of two barley cultivars. J. Plant Bot. 19(1): 173-183.

Liang, Y. and Ding, R. 2002. Influence of silicon on microdistribution of mineral ions in roots of salt-stressed barley as associated with salt tolerance in plants. Science in China. Series C, Life science. 45(3): 298-308.

Liang, Y. and et al. 2003. Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). J. Plant Physiol.

Limpinuntana, V. 1978. Physiological aspects of adaptation of rice (*Oryza sativa* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.) to low O_2 concentration in the root environment. Ph. D. Thesis. University of Western Australia, Australia.

Liska, A. J. and et al. 2004. Enhanced photosynthesis and redox energy production contribute to salinity tolerance in *Dunaliella* as revealed by homology-based proteomic. Plant Physiol. 136: 2806-2817.

Lutts, S., Kinet, J. M. and Bouharmont, J. 1996. NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. Ann. of Bot. 78: 389-398.

Lutts, S., Majerus, V. and Kinet, J. M. 1999. NaCl effects on proline metabolism in rice (*Oryza sativa* L.) seedling. Physiol. Plant. 105(3): 450-458.

Ma, J. F. and Takahashi, E. 1990. Effect of silicon on the growth and phosphorus uptake of rice. Plant Soil. 126: 115-119.

Ma, J. F., and et al. 2001. Role of root hairs and lateral roots in silicon uptake by rice. Plant Physiol. 127: 1773-1780.

Ma, J. F. and Takahashi, E. 2002. Soil fertilizer and plant silicon research in Japan. Elsemer Science, Amsterdam.

Marschner, H. and et al. 1990. Growth enhancement by silicon in cucumber (*Cucumis sativus*) plants depends on imbalance in phosphorus and zinc supply. Plant Soil. 124(2): 211-219.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Marschner, H. 1994. Mineral nutrition of higher plants. San Diego: Academic Press.

Matoh, T., Kairumee, P. and Takahashi, E. 1986. Salt-induced damage to rice plants and alleviation effect of silicate. Soil Sci. Plant Nutri. 32: 295-304.

Mauad, M. and et al. 2003. Nitrogen and silicon fertilization of uptake rice. Scientia Agricola. 60: 761-765.

Netondo, G. W., Onyango, J. C. and Beck, E. 2004a. Sorghum and salinity: I response of growth, water relation, and ion accumulation to NaCl salinity. Crop Sci. 44: 797-805.

Netondo, G. W., Onyango, J. C. and Beck, E. 2004b. Sorghum and salinity: II gas exchange and chlorophyll fluorescence of sorghum under salt tolerance. Crop Sci. 44: 806-811.

Richmond, K. E. and Sussman, M. 2003. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient. Current Opinion in Plant Biol. 6: 268-272.

Rodrigues, F. A. and et al. 2001. Effect of silicon and host resistance on sheath blight development in rice. Plant Disease. 85(8): 827-832.

Savant, N. K. and et al. 1999. Silicon Nutrition and sugarcane production: A Review. J. Plant Nutri. 22(2): 1853-1903.

Savvas, D. and et al. 2002. Effect of silicon and nutrient-induced salinity on yield, flower quality and nutrient uptake of gerbera grown in a closed hydroponic system. J. Appl. Bot. 76(5-6): 153-158.

Seaman, J. 2004. Mechanisms of salt tolerance in halophytes: can crop plants resistance to salinity be improved?. http://www.shef.ac.uk/aps/mbiolsci/jeni/dissertation.pdf. Jun 25, 2004.

Song, J. Q. and Fujiyama, H. 1998. Importance of Na content and water status for growth in Na-salinized rice and tomato plant. Soil Sci. Plant Nutri. 44(2): 197-208.

Tiwari, B. S., Bose, A. and Ghosh, B. 1997. Photosynthesis in rice under a salt stress. Photosynthetica. 34(2): 308-306.

Trivedi, H. B. and et al. 2004. Influence of silicon on growth and salt uptake in wheat under salinity. Indian J. Plant Physiol. 9(4): 360-366.

Turan, M. and Sezen, Y. 2006. Effect of salt stress on plant nutrition uptake. www.toprak.org.tr/isd/cab37.htm. February 3, 2006.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Ueno, O. and Agarie, S. 2005. Silica deposition in cell wall of the stomatal apparatus of rice leaves. Plant Prod. Sci. 8(1): 71-73.

Whang, S. S., Kim, K. and Hess, M. W. 1998. Variation of silica bodies in leaf epidermal long cells within and among seventeen species of *Oryza* (Poaceas). Am. J. Bot. 85(4): 461-466.

Yeo, A. R. and et al. 1985. The use of ^{14}C-ethane diol as a quantitative tracer for the transpirational volume flow of water and on investigation of the effects of salinity open transpiration, net sodium accumulation and endogenous ABA in individual leaves of *Oryza sativa L.* J. Exp. Bot. 36: 1099-1109.

Yeo, A. R. 1998. Molecular biology of salt tolerance in the context of whole plant. J. Exp. Bot. 49: 915-929.

Yeo, A. R. and et al. 1999. Silicon reduces sodium uptake in rice *Oryza sativa* L. in saline conditions and this accounted for by a reduction in the transpirational bypass flow. Plant Cell Environ. 22: 559-565.

Yoshida, S. and et al. 1976. Laboratory manual for physiological studies of rice. 3rd ed. Int. Rice Res. Inst.

Zafar S. and et al. 2004. Variation in growth and ion uptake in salt torelant and sensitive rice cultivars under NaCl salinity. Asian J. Plant Sci. 3(2): 156-158.

Zeng, L. and Shannon, M. C. 2000. Effect of salinity on grain yield and yield components of rice at different seedling densities. Agro. J. 92: 418-423.

Zheng, S. L. and Yan, X. L. 1996. Distribution of Na^+/Cl^- in the roots of different rice genotype under salt stress. J. of South China Agricultural University. 17(4): 24-28.

Zhu, Z. and et al. 2004. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). Plant Sci. 167: 527-533.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การเตรียมสารและวิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารในพืช

ภาคผนวก ก การเตรียมสาร และวิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารในพืช

1. การเตรียมสารละลายอาหาร

1.1 การเตรียมสารละลายอาหารมาตรฐาน

1.1.1 การเตรียมสารละลายอาหารเข้มข้น (Stock solution)

1.1.1.1 เตรียมสารละลายอาหารเข้มข้นแยกเป็น 4 ขวด (ตารางผนวกที่ 1)

1.1.1.2 ชั่งสารเคมีแต่ละชนิดตามตารางผนวกที่1 ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

1.1.1.3 ละลายสารด้วยน้ำกลั่นหรือน้ำกรอง ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ใน volumetric flask เขย่าให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วเทลงขวด

1.1.1.4 สำหรับสารละลายอาหารเข้มข้นขวดที่ 3 (Fe-NaEDTA) ต้องเก็บในขวดสีชา แล้วเก็บไว้ในที่มืด เพื่อไม่ให้เกิดการตกตะกอนของสาร

1.1.1.5 สารเคมีที่ใช้ตามตารางผนวก ก1 เป็นสารเคมี Analytical grade (AR)

1.1.2 การเตรียมสารละลายอาหารสำหรับปลูกข้าวในกระถาง

1.1.2.1 ใช้น้ำกรอง 15 ลิตร เติมสารละลายอาการเข้มข้นทั้ง 4 ขวด ขวดละ 50 มล. แล้วคนให้เข้ากัน ใช้เป็นสารละลายอาหารสำหรับปลูกข้าว

1.1.2.2 ปรับ pH ของสารละลายอาหาร ตามข้อ 1.1.2.1 ให้ได้ 6.8 แล้วบรรจุลงในกระถางพลาสติก กระถางละ 2.5 ลิตร

1.2 การเตรียมสารละลาย SiO_2 เข้มข้น 1 M (Stock solution)

1.2.1 เตรียมจาก $Na_2Si_3O_7$ ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุล 242.23 กรัม มี SiO_2 อยู่ 3 M ดังสมการ

$$Na_2Si_3O_7 + H_2O \longrightarrow 2NaOH + 3SiO_2$$

1.2.2 ต้องการ SiO_2 เข้มข้น 1 M ชั่ง $Na_2Si_3O_7$ 60.08 กรัม ละลายน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร ใน volumetric flask

1.2.2 การเตรียม SiO_2 ตามความเข้มข้น 5, 10, 15 และ 20 mM ตามตำรับการทดลองตอนที่ 1 ใช้ปริมาตร SiO_2 เข้มข้น 1 M ตามตารางผนวกที่ 2

ตารางที่ 27 น้ำหนักสารและสารเคมีที่ต้องใช้ในการเตรียมสารละลายอาหารเข้มข้น (Stock solution) ปริมาตร 1 ลิตร

ขวดที่	สารเคมี	น้ำหนักสาร (กรัม)
1	KNO_3	30.333
	$Ca(NO_3)_24H_2O$	47.230
2	$NH_4H_2PO_4$	11.502
	$MgSO_47H_2O$	12.324
	NaCl	16.577
3	Fe-NaEDTA	7.887
4	$MnCl_24H_2O$	0.432
	H_3BO_3	0.342
	$NaMoO_42H_2O$	0.0075
	$ZnSO_47H_2O$	0.0264
	$CuSO_45H_2O$	0.0117

ตารางที่ 28 ปริมาตรของสารละลาย SiO_2 เข้มข้น 1 M ที่ต้องใช้ต่อสารละลายอาหาร 2.5 ลิตร ตามความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 1

ความเข้มข้นของ SiO_2 (mM)	ปริมาตร SiO_2 เข้มข้น1 M (มล.)
5	12.5
10	25.0
15	37.5
20	50.0

1.3 การเตรียมสารละลาย NaCl เข้มข้น 1 M (Stock solution)

ชั่ง NaCl 58.4 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร ใน volumetric flask

1.3.1 การเตรียม NaCl ที่ความเข้มข้น 50 และ 100 mM ตามตำรับการทดลองในตอนที่ 2 เตรียมจาก สารละลาย NaCl เข้มข้น 1 M ตามตารางผนวกที่ 3

ตารางที่ 29 ปริมาตรของสารละลาย NaCl เข้มข้น 1 M ที่ต้องใช้ต่อสารละลายอาหาร 2.5 ลิตร ตามความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 2

ความเข้มข้น NaCl (mM)	ปริมาตรที่ใช้ (มล.)
50	125
100	250

2. การวิเคราะห์หาปริมาณซิลิก้า โซเดียม และ โพแทสเซียมในเนื้อเยื่อข้าว

2.1 การวิเคราะห์หา crude silica

2.1.1 การเตรียมตัวอย่างข้าว

2.1.1.1 เก็บตัวอย่างข้าว แยกส่วนใบ กาบใบ และราก

2.1.1.2 อบตัวอย่างข้าวที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

2.1.1.3 บดตัวอย่างที่อบแล้วให้ละเอียดผ่านตระแกรง 0.5 มม

2.1.2 การย่อยตัวอย่างพืช

2.2.3.1 เตรียม acid mixture โดยผสมกรดไนตริก (HNO_3 AR) 750 มล กรดกำมะถัน (H_2SO_4 AR) 150 มล และเปอร์คลอริก ($HClO_4$ 60-62%) 300 มล

2.2.3.1 ใส่ตัวอย่างข้าวที่บดแล้ว 1.000 กรัม ใน Kjealdahl flask แล้วย่อยเนื้อเยื่อข้าวด้วย acid mixture 10 มล เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ใน fumehood แล้วค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิในการย่อยตามลำดับดังนี้ 100 °C 1 ชม 150 °C 1 ชม และ 190 °C 1 ชม จนเนื้อเยื่อพืชใน mixture มีลักษณะใสแล้วปล่อยให้เย็นลง 30 นาที (สำหรับ Blank ให้เติมสารและปฏิบัติเหมือนกันแต่ไม่ใส่ตัวอย่างพืช)

2.2.3.1 เติม HCl เข้มข้น 0.14 N 25 มล ลงใน flask กรองด้วยกระดาษกรอง (Whatman No. 44) และเติมน้ำกลั่น 25 มล ลงใน flask แล้วกรองด้วยกระดาษกรองแผ่นเดิม สารละลายที่กรองได้เก็บไว้วิเคราะห์หาปริมาณ Na และ K ในเนื้อเยื่อต่อไป

2.2.3.1 นำกระดาษกรองที่ได้ไปอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 80°C จนกระดาษกรองแห้ง

2.2.3.1 นำกระดาษกรองที่แห้งแล้วไปเผาในเตาเผาด้วยอุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 5 ชม

2.2.3.1 นำเถ้าที่ได้จากการเผาใส่ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 2 ชม ก่อนชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่ได้จะเป็นน้ำหนักโดยประมาณของ crude silica ต่อน้ำหนักแห้งของเนื้อเยื่อพืช 1 กรัม (กระดาษกรองที่ใช้เป็นชนิดไม่มีเถ้า)

2.2.3.1 วิธีการคำนวณน้ำหนักของ crude silica

$$\% \text{ silica} = \frac{\text{น้ำหนักของ crude silica (กรัม) x 100}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างพืช}}$$

2.2 การวิเคราะห์หาโพแทสเซียมและโซเดียมในเนื้อเยื่อข้าว

2.2.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม 1000 ppm

2.2.1.1 ชั่ง KCl AR 1.9068 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 600 มล. ปรับปริมาตรสุดท้ายใน volumetric flask ให้เป็น 1000 มล

2.2.1.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม

เตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเข้มข้น 0, 40, 80, 120, 160, 200 และ 240 ppm โดยดูดสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม 500 ppm 0, 8, 16, 24, 32, 40 และ 48 มล ลงใน volumetric flask ขนาด 50 มล. ปรับปริมาตรด้วยสารลาย Blank (ข้อ 2.1.2.2) ให้ได้ปริมาตร 100 มล

2.2.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียม 1000 ppm

2.2.2.1 ชั่ง NaCl (AR) 2.5420 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 600 มล ปรับปริมาตรสุดท้ายใน volumetric flask ให้เป็น 1000 มล

2.2.2.2 เตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียมเข้มข้น 0, 30, 60, 90, 120 และ 150 ppm โดยดูดสารละลายมาตรฐานโซเดียม 500 ppm 0, 6, 12, 18, 24 และ 30 มล ลงใน volumetric flask ขนาด 50 มล. ปรับปริมาตรด้วยสารลาย Blank (ข้อ 2.1.2.2) ให้ได้ปริมาตร 50 มล

2.2.3 การวิเคราะห์หาปริมาณโพแทสเซียมและโซเดียม

2.2.3.1 นำสารละลายตัวอย่างที่กรองแล้ว ตามข้อ 2.1.2.3 มาวัดหาปริมาณโพแทสเซียมและโซเดียม ด้วยเครื่อง Flame Photometer โดยค่าที่อ่านได้จากสารละลายตัวอย่างจะนำมาเทียบกับค่าของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมและโซเดียมที่เตรียมไว้

2.2.3.1 วิธีการคำนวณ

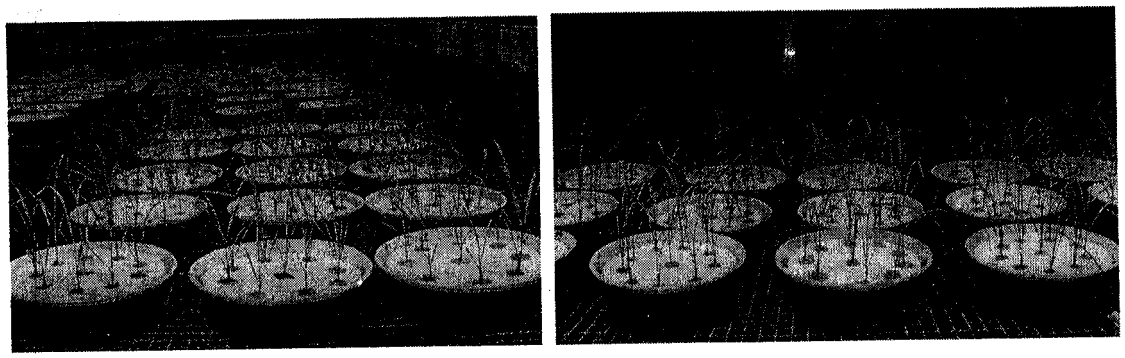
$$\text{K หรือ Na (\%)} = \frac{\text{(ppm ของตัวอย่าง - ppm ของ blank) x 100}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง x 10,000}}$$

$$\text{K หรือ Na (มก/ต้น)} = \frac{\text{\% K หรือ Na x น้ำหนักแห้งส่วนต้น (มก)}}{100}$$

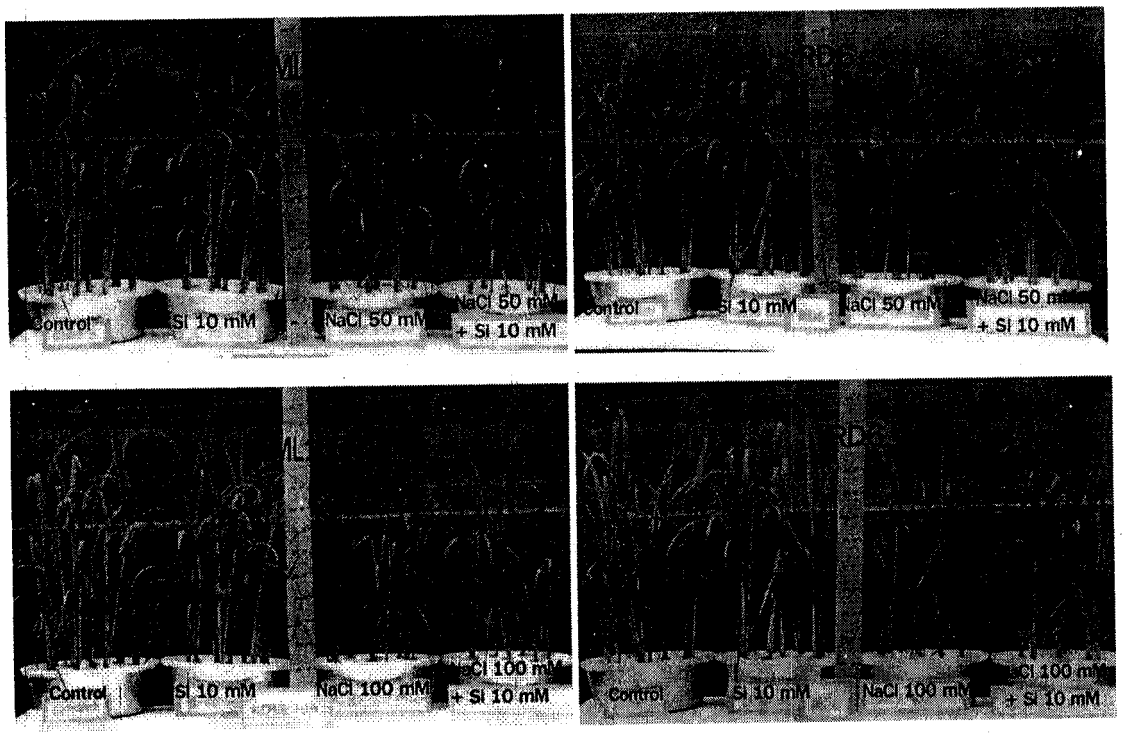
ภาคผนวก ข

ภาพงานทดลอง

ภาคผนวก ข ภาพงานทดลอง



ภาพที่ 9 สภาพเรือนทดลองและการวางกระถางในเรือนทดลอง



ภาพที่ 10 เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของข้าวขาวดอกมะลิ105 (KDML105) และ ข้าว กข6 (RD6) ในสภาพที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM กับสภาพที่ได้รับ NaCl 50 และ 100 mM ร่วมกับ Si 10 mM

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ นางสาวฉันทนา พรมจันทร์

ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เกษตรศาสตร์) สาขาพืชไร่ จากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี พ.ศ. 2545

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2545-2546 ทำงานในตำแหน่งนักวิชาการเกษตร บริษัท ดวงตะวันเพชร จำกัด จ.สมุทรปราการ

พ.ศ. 2547 ทำงานเป็นผู้ช่วยวิจัยโครงการวิจัยการศึกษาน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดจากกระบวนการชำแหละและแปรรูปเนื้อสัตว์ที่มีต่อระบบเกษตรกรรมจังหวัดอุบลราชธานี

พ.ศ. 2548 ทำงานเป็นผู้ช่วยวิจัยโครงการวิจัยศูนย์ศึกษาและถ่ายทอดเทคโนโลยีด้านเกษตรอินทรีย์ในแถบอีสานตอนล่าง

พ.ศ. 2549 ทำงานเป็นผู้ช่วยวิจัยโครงการวิจัยการศึกษาวิจัยศักยภาพในการจัดตั้งศูนย์จำหน่ายและแสดงสินค้าหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์อินโดจีน

ผลงานวิชาการ ฉันทนา พรมจันทร์ และสุวัฒน์ ธีระพงษ์ธนากร. 2549. อิทธิพลของโซเดียมคลอไรด์และซิลิกอนต่อลักษณะทางสรีรวิทยา การเติบโต การดูดโพแทสเซียมและโซเดียมของข้าวขาวดอกมะลิ105. ใน รวมบทคัดย่อการประชุมวิชาการ ม.อบ.วิจัย ครั้งที่ 1 น. 208-209. กองส่งเสริมการวิจัยบริการวิชาการและศิลปวัฒนธรรม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี