

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ซิลิคอน (Silicon)

1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับซิลิคอน

ซิลิคอนเป็นธาตุเคมีในตารางธาตุที่มีสัญลักษณ์ Si และเลขอะตอม 14 เป็นธาตุกึ่งโลหะแบบเตตระวาเลนต์ (คือมีวาเลนซ์เป็น 4) เป็นธาตุที่มีมากในเปลือกโลก (Earth's crust) เป็นอันดับสอง (ร้อยละ 27.72 โดยน้ำหนัก) รองจากธาตุออกซิเจน (O) ซึ่งมีมากที่สุด ถึงร้อยละ 46.6 โดยน้ำหนัก ซิลิคอนที่พบในธรรมชาติทั่วไป ไม่พบอยู่ในรูปอิสระ แต่จะอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ ซึ่งพบได้ในทรายหรือซิลิกา (silica) คือพบอยู่ในรูป ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งพบได้ในดิน หิน แร่ธาตุต่างๆ และในน้ำทะเล นอกจากนี้ยังพบในรูปของสารประกอบซิลิเกต (silicate) เช่น กรดซิลิซิก (Silicic acid) และสารประกอบซิลิเกต (silicate compound) ซึ่งมีหน่วยโครงสร้างเป็นรูปทรงสี่หน้า (SiO_4 tetrahedral) ซิลิคอนเป็นอะตอมกลาง และล้อมด้วยออกซิเจน 4 อะตอม เป็น SiO_4 ซึ่งมีอะตอมของออกซิเจน เป็นตัวเชื่อมต่อกับออกซิเจน เป็นตัวเชื่อมต่อกับตัวซิลิคอนที่อยู่ใน SiO_4 ที่อยู่ใกล้เคียงกันซึ่งโครงสร้างนี้อาจเกิดเป็นอิสระ หรือเป็นกลุ่ม เป็นลูกโซ่ หรือเป็นแผ่น โดยมีธาตุโลหะชนิดอื่นๆ รวมอยู่ด้วย สมบัติทั่วไปของธาตุซิลิคอน แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติโดยทั่วไปของธาตุซิลิคอน

คุณสมบัติ	
เลขอะตอม	14 เป็นธาตุตัวที่ 2 ของหมู่ IVA ใน ตารางธาตุ จัดเป็นธาตุกึ่งโลหะ
น้ำหนักอะตอม (amu)	28.086
รัศมีอะตอม (pm)	117
ความหนาแน่น (g/m ³)	242
จุดหลอมเหลว (°C)	1420
จุดเดือด (°C)	2380
โครงสร้างอิเล็กตรอน	[Ne] 3s ² 3p ²
เลขออกซิเดชันสามัญ	+4
ไอโซโทปที่เสถียร	²⁸ Si(92.21%) ²⁹ Si(4.70%)
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	³⁰ Si(3.09%) 1.8

แม้ว่าซิลิคอนจะไม่จัดว่าเป็นธาตุอาหารที่จำเป็น (Essential element) ต่อพืช แต่พืชทุกชนิดที่ปลูกในดิน จะมีธาตุซิลิคอนเป็นองค์ประกอบเป็นจำนวนมาก จึงจัดได้ว่าเป็นธาตุประเภทธาตุเสริมประโยชน์ (beneficial elements) สำหรับพืชหลายชนิด และเป็นธาตุอาหารที่มีความสำคัญมากสำหรับการเจริญเติบโตของพืชบางชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าว ซิลิคอนในรูปของซิลิเกต กรดซิลิซิกเป็นชื่อเรียกโดยทั่วไปของกลุ่มสารประกอบที่ประกอบด้วยซิลิคอนจับกับหมู่ออกไซด์หรือไฮดรอกซิล กลุ่มสารประกอบนี้มีสูตรทั่วไปคือ $[\text{SiO}_x(\text{OH})_{4-2x}]_n$ กรดซิลิซิกบางตัวสามารถละลายในน้ำได้ดีมาก ได้แก่ metasilicic acid (H_2SiO_3) orthosilicic acid (H_4SiO_4 , $\text{pK}_{a1}=9.84$, $\text{pK}_{a2}=13.2$ at 25 °C) disilicic acid ($\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5$), และ pyrosilicic acid ($\text{H}_6\text{Si}_2\text{O}_7$) อย่างไรก็ตาม เมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นของแข็ง กรดซิลิซิกจะอยู่ในรูปของ polymeric silicic acids ซึ่งมีลักษณะเป็น complex structure ซิลิคอนในรูปของซิลิเกต เช่น กรดซิลิซิก และสารประกอบซิลิเกตในรูปอื่นๆ ไม่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินโดยตรง แต่เป็นสารที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิด และนอกจากนี้ สารประเภทนี้ได้แก่ ปุ๋ยซิลิเกตชนิดต่างๆ โดยเฉพาะสารที่มีส่วนผสมของซิลิคอนในรูปกรดซิลิซิก ยังมีการนำเข้าหรือผลิตออกมาจำหน่ายในท้องตลาดในประเทศไทย เพื่อใช้ใส่ลงในดิน เพื่อการผลิตพืช

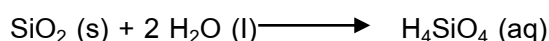
1.2 รูปแบบของซิลิคอนที่ปรากฏในธรรมชาติ

1) ซิลิกาผลึก (crystalline silica)

ซิลิกาผลึกนี้สามารถแบ่งย่อยเป็นหลายชนิด ตามความแตกต่างของรูปร่าง ลักษณะของผลึกและความหนาแน่นของซิลิกา รูปร่างผลึกมีหลายแบบ เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ และเส้นยาว ตัวอย่างซิลิกาที่มีลักษณะเป็นรูปผลึก เช่น high-temperature quartz หรืออาจพบในรูป low-temperature quartz ซิลิกาผลึกสามารถแบ่งย่อยได้ 3 รูปแบบใหญ่ ๆ ได้แก่ quartz, tridymite และ cristobalite ซึ่งสองรูปหลังพบได้ยากตามธรรมชาติ รูปแบบต่างๆสามารถเปลี่ยนไปมาระหว่างกันได้โดยการใช้ความร้อนกระทำ

2) ซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica or non-crystalline silica)

ซิลิกาอสัณฐานเป็นซิลิกาที่มีส่วนประกอบของรูปร่างที่ไม่เป็นรูปผลึกที่แน่นอน พันธะเคมีในซิลิกาอสัณฐานมีหลายชนิด รวมทั้ง siloxane (-Si-O-Si) silanol (-Si-O-H) silane (-Si-H) หรือ organic silicon (-Si-O-R หรือ -Si-C-R) ปฏิกิริยาที่สำคัญของซิลิกาอสัณฐาน คือ คุณสมบัติในการละลายน้ำ ซึ่งสามารถละลายได้ 1.4-2.2 mg/kg ที่อุณหภูมิ 25 °C ดังสมการ



การละลายน้ำของซิลิกาอสัณฐาน จะไม่ขึ้นอยู่กับ pH ถ้า pH ของสารละลายต่ำกว่า 9 แต่ถ้า pH สูงกว่า 9 ความสามารถในการละลายของซิลิกาจะสูงขึ้น เพราะเกิดจากการแตกตัวของกรดซิลิซิกที่มีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อน ซิลิกาอสัณฐาน แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

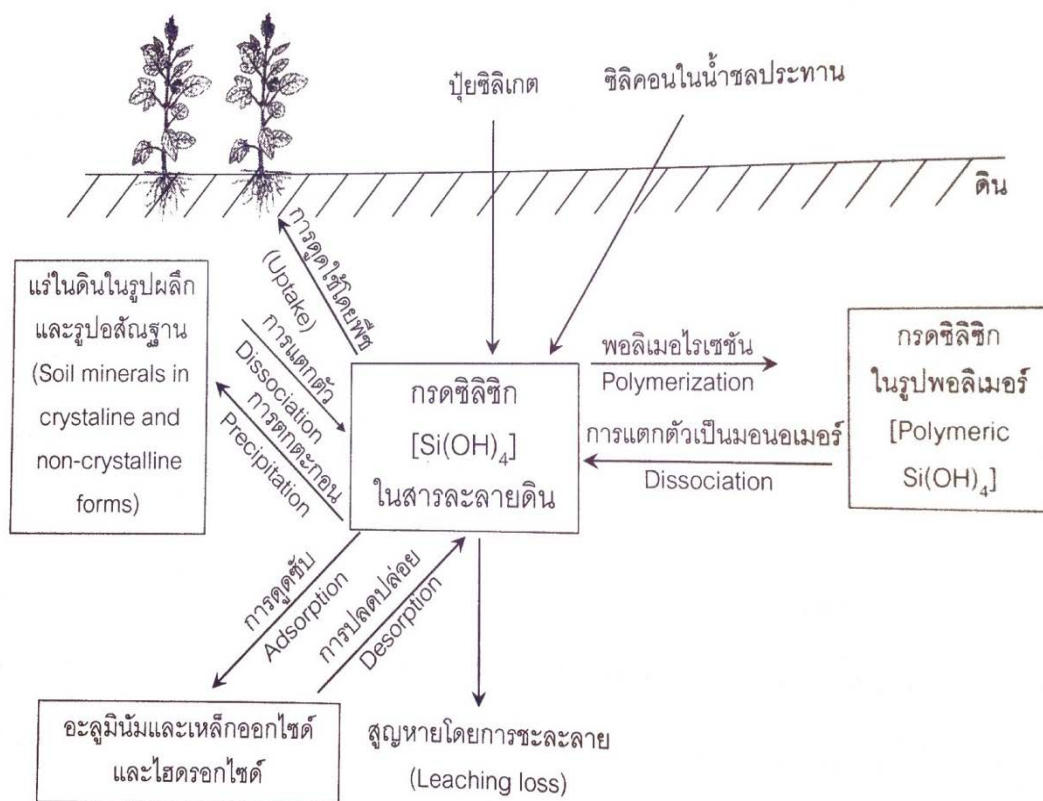
1. Vitreous silica เป็นซิลิกาที่ใช้ทำแก้ว มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันโดยตลอด ไม่มีรู ขนาดเล็ก เกิดจากการหลอมซิลิกาชนิดผลึก

2. Silica gel เป็นซิลิกาที่มีรูปร่างเป็นรูขนาดเล็ก (porous) อยู่เป็นจำนวนมาก มีพื้นที่ผิวอนุภาคสูง ตัวอย่างของซิลิกาชนิดนี้ได้แก่ aquagel, alcogels, xerogels และ aerogels

3. Silica powder เป็นซิลิกาที่มีส่วนประกอบเป็นโครงสร้างที่มีรูขนาดเล็กมาก ในระดับไมโครเมตรถึงนาโนเมตร เรียกโครงสร้างนี้ว่า microstructure หรือ nanostructure ตามลำดับ ตัวอย่างซิลิกาชนิดนี้ได้แก่ ผงไพโรจีนิก (pyrogenic powder) ได้จากการระเหยเอาส่วนที่เป็นน้ำในซิลิกาออกไป ผงเอควาเจล (aquagel powder) ได้จากการตกตะกอนสารละลายเอควาเจนิก (aquagenic) และผงไบโอจีนิก เป็นซิลิกาชนิดผงเอควาเจนิกที่สร้างขึ้นในพืชหรือไดอะตอม

2. ซิลิคอนในดิน แหล่งที่มา และรูปที่พืชดูดใช้

จากที่กล่าวมาข้างต้นแล้วว่า ซิลิคอนเป็นธาตุที่มีมากในเปลือกโลก ประมาณร้อยละ 60 โดยน้ำหนักของซิลิคอน (Si) ในรูปซิลิกา (SiO_2) พบในเปลือกโลก ในจำนวนนี้ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก พบปะปนอยู่ในดินในรูปต่างๆ ทั้งรูปผลึกและรูปอสัณฐาน รูปที่ถูกดูดซับหรือตกตะกอนกับสารประกอบไฮดรอกไซด์ (hydrous oxide) ของอะลูมิเนียม เหล็ก และแมงกานีสในดิน ปริมาณของซิลิคอนที่ละลายอยู่ในสารละลายดินมีเพียงเล็กน้อย รูปของธาตุนี้ในสารละลายดินส่วนมากได้แก่ กรดโมโนซิลิซิก (H_4SiO_4 หรือ $\text{Si}(\text{OH})_4$) สภาพละลายได้ของกรดดังกล่าวอยู่ที่อุณหภูมิ 25°C ประมาณ 2 mM หรือ 56 mg Si/L ความเข้มข้นของกรดโมโนซิลิซิกในสารละลายดิน โดยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 14-20 mg Si/L (พิสัย 3.5-4.0 mg Si/L) หากมีค่าเกิน 56 mg Si/L ถือว่าเป็นสารละลายอิ่มตัวพอดี หรือกรดดังกล่าวเริ่มรวมตัวกันเป็นโพลิเมอร์ ความเข้มข้นของกรดโมโนซิลิซิกในสารละลายดินอาจลดลงเนื่องจาก pH ของดินสูงกว่า 7 และในดินมีเซสควิวออกไซด์ (sesquioxide) มาก เป็นเหตุให้เกิดการดูดซับแอนไอออนสูง ซึ่งพบมากในดินเขตร้อน กรดโมโนซิลิซิกที่เป็นโมเลกุลที่ไม่มีประจุ และพบในดินที่มีระดับ pH ต่ำกว่า 8 ซึ่งเป็นรูปของธาตุซิลิคอนในดินที่พืชดูดใช้ได้ ดังนั้นความเข้มข้นของระดับความเป็นประโยชน์ได้โดยทันทีของซิลิคอนในดินจึงขึ้นอยู่กับปริมาณหรือความเข้มข้นของกรดโมโนซิลิซิกในสารละลายดินเป็นสำคัญ ซึ่งปัจจัยสำคัญที่ควบคุมความเข้มข้นหรือความเข้มข้นของกรดโมโนซิลิซิกในสารละลายดิน ได้แก่ ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ความชื้นในดิน ระดับค่าศักย์ไฟฟ้ารีดอก (redox potential หรือ Eh) ในดิน และปริมาณเหล็กและอะลูมิเนียมในดิน ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ดังกล่าว รวมทั้งปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลอย่างสำคัญในเชิงบวกและลบต่อระดับความเป็นประโยชน์ต่อพืชหรือความเข้มข้นของกรดโมโนซิลิซิกในสารละลายดิน หรืออาจจะเรียกได้ว่าเป็นวัฏจักรซิลิคอน (silicon cycle) ในดิน ดังภาพที่ 1 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างรูปต่างๆ ของซิลิคอนในดิน กระบวนการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น และแหล่งที่มาของซิลิคอนจากภายนอก ปัจจัยที่มีผลต่อการได้มาหรือการเพิ่มปริมาณของกรดโมโนซิลิซิกในสารละลายดิน

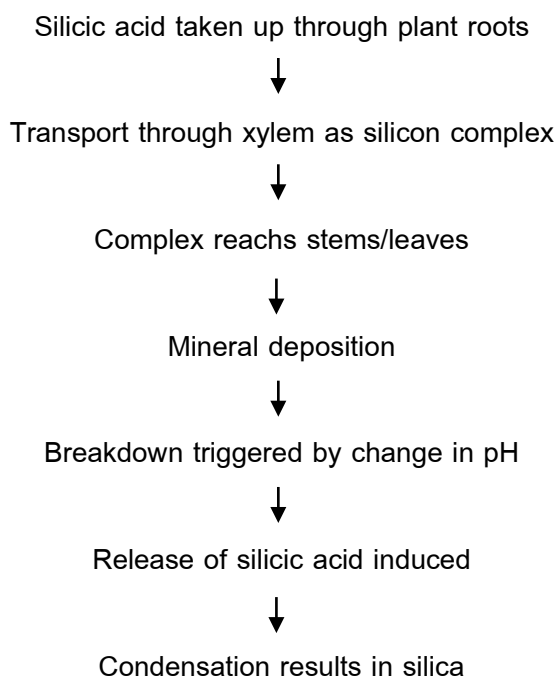


ภาพที่ 2.1 วัฏจักรซิลิคอน
ที่มา Savant et al., 1997

3. การดูดซึมซิลิคอนในพืช

พืชดูดซิลิคอนในรูปกรดมอโนซิลิซิก $[Si(OH)_4]$ ซึ่งภายหลังดูดเข้าไปในพืชแล้ว ซิลิคอนจะเคลื่อนย้ายเข้าไปในต้น (shoot) ด้านบนทางไซเล็ม (xylem) พร้อมๆกับการคายน้ำ (transpiration stream) และต่อมาโมเลกุลของกรดมอโนซิลิซิกที่มีจำนวนมากขึ้น (เข้มข้นขึ้นมากกว่า 2 Mm ที่อุณหภูมิ 25 °C) จะเกิดพอลิเมอร์ไรซ์ (polymerization) จับตัวกันและสะสมอยู่ในผนังเซลล์ (cell wall) ของเนื้อเยื่อบริเวณไซเล็ม ช่วยทำให้ไซเล็มแข็งแรงและไม่ยุบตัวขณะที่พืชมีอัตราการคายน้ำสูง และปริมาณการสะสมซิลิคอนจะมากหรือน้อย ขึ้นกับอัตราการคายน้ำของพืชในส่วนนั้นๆ และการสะสมจะมีมากขึ้นตามอายุพืช โดยมากกว่าร้อยละ 90 ซิลิคอนจะสะสมในพืชในรูปของซิลิกาเจล หรือในรูปซิลิกาอสัณฐาน โดยจัดเรียงเป็นชั้นต่างๆ ในผนังเซลล์ของไซเล็ม รวมทั้งในบุลลiform เซลล์ (bulliform cells) และดัมเบลล์เซลล์ (dumbbell cells) ซึ่ง

เป็นเซลล์ที่มีรูปร่างยาวและสันบนผิวใบพืชและในเปลือกเมล็ด ขั้นตอนการดูดซึมซิลิคอนในพืช แสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ขั้นตอนการดูดซึมซิลิคอนในพืช
ที่มา Salam, H. A., *et al.*, 2012

4. ประโยชน์ของซิลิคอนในพืช

จากการวิเคราะห์พืชทางเคมี พบว่ามีธาตุต่างๆ มากมาย ได้แก่ C H O N P K Ca Mg S Fe Mn Zn Cu B Mo Cl Si Na Co V G Al Cs Li Ba Sr Ce Pb Rb และอื่นๆ ซิลิคอนไม่ใช่ธาตุอาหารหลัก แต่ก็เป็นธาตุอาหารที่สำคัญที่ใช้ในกลไกในการสังเคราะห์แสงและการสร้างโครงสร้างของลำต้นและใบพืชโดยเฉพาะ พืชใบเลี้ยงเดี่ยว เช่น ข้าว อ้อย ฝั่ หญ้าคา ฯลฯ ซิลิคอนที่อยู่ในดินสลายตัวมาอยู่ในรูปแบบที่ละลายน้ำได้ การที่ซิลิคอนไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืชจะทำให้โครงสร้างของลำต้นพืชอ่อนแอ ตกเป็นเป้าทำลายของโรคและแมลง ซิลิคอนมีประโยชน์ในการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งจะกล่าวโดยกว้างๆ สำหรับพืชทั่วไป

1. ซิลิคอน ช่วยปลดปล่อยฟอสฟอรัส ในดินให้พืชสามารถใช้งานได้ ความจริงฟอสฟอรัสในดินมีปริมาณมาก แต่ภาวะดินเปรี้ยว และการใช้สารเคมีเชิงซ้อนปริมาณมาก ทำให้ฟอสฟอรัสในดินส่วนใหญ่ อยู่ในรูปที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ การให้ซิลิคอนกับพืช จึงทำให้ใช้ประโยชน์จากฟอสฟอรัสในดินอย่างคุ้มค่า ฟอสฟอรัส เป็นธาตุอาหารหลัก เกี่ยวข้องกับระบบรากและยอดอ่อน
2. ซิลิคอนที่พืชได้รับ จะถูกเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งสะสมอยู่ตามผนังเซลล์ ทำให้โครงสร้างต่างๆของพืชแข็งแรง แผลงจะเหี่ยวแห้งได้ยากลำบาก โรคต่างๆ โดยเฉพาะที่เกิดจากเชื้อรา เข้าทำลายพืชได้ยากขึ้น
3. โครงสร้างที่แข็งแรง ทำให้ใบตั้งและรับแสงได้ดีขึ้น ใบกว้างขึ้น และแสงผ่านใบได้น้อยลง อัตราการสังเคราะห์แสงของพืชจะเพิ่มขึ้น
4. ซิลิคอน ช่วยดูดซับพิษจากโลหะ เช่น อลูมิเนียม สนิมเหล็ก โซเดียม แมงกานีส (ธาตุอาหารพืช, ม.ป.ป.)

5. ปัจจัยและหลักการในการพิจารณาการใช้สารประกอบซิลิคอนเพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของซิลิคอนในดินที่จะปลูกพืช

- 1) ชนิดพืช ชนิดพืชที่สำคัญที่สุดคือ ข้าว ทั้งนี้เพราะข้าวต้องการดูดใช้ซิลิคอนในปริมาณสูงมาก กล่าวคือ ในการผลิตข้าวกล้อง (brown rice) ให้มีน้ำหนัก 100 กิโลกรัม ข้าวต้องดูดใช้ซิลิคอนในรูปซิลิกา (SiO_2) สูงถึงประมาณ 20 กิโลกรัม หรือประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก หรือดูดใช้ธาตุซิลิคอนในรูปซิลิกามากกว่าธาตุไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) ประมาณ 10 40 และ 6 เท่า ตามลำดับ (Ma and Takahashi, 2002) ดังนั้นการใช้ซิลิคอนกับข้าว จึงควรใช้ในปริมาณมากกว่าการใช้กับพืชชนิดอื่น ๆ โดยส่วนใหญ่
- 2) ชนิดดิน ชนิดดินทั่ว ๆ ไป ที่มักมีปัญหาการขาดซิลิคอนเพราะมีปริมาณซิลิคอนที่เป็นประโยชน์ต่อพืชต่ำ ได้แก่ ดินทราย ดินอินทรีย์ ดินที่ผ่านการชะล้างพังทลายสูงและดินที่มีปัญหา (problem soils) ทางด้านการเกษตร (Ma and Takahashi, 2002) การใช้สารหรือปุ๋ยซิลิกากับดินประเภทนี้ ควรใช้ในปริมาณมากกว่าการใช้กับดินแร่ (mineral soils) ที่มีเนื้อละเอียด โดยเฉพาะเนื้อละเอียดที่มีแร่ดินในรูปอสัณฐาน (non-crystalline forms) ที่มีซิลิคอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณมากทั้งนี้เพราะแร่ดินหรือสารประกอบในรูปอสัณฐานที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบในปริมาณมากจะมีความโปร่งพรุนและมีพื้นที่มาก สามารถปลดปล่อยซิลิคอนออกมาให้พืชดูดใช้ได้มากกว่าและรวดเร็วกว่าแร่ดินในรูปผลึก เช่น ในรูปอะลูมิโนซิลิเกต ที่มีโครงสร้างที่แน่นอน แข็งแรง และมีความคงตัว (setting) หรือความคงทนต่อการแปรสภาพสูงกว่าแร่ดินในรูปอสัณฐานมาก

3) ผลการวิเคราะห์ปริมาณซิลิคอน (Si) ที่สกัดได้หรือที่เป็นประโยชน์ในดิน โดยใช้วิธีวิเคราะห์ที่เหมาะสมและยอมรับกันโดยทั่วไป หรือที่นิยมใช้ปฏิบัติกันในห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ดินต่าง ๆ เช่น วิธีวิเคราะห์ปริมาณซิลิคอนที่สกัดได้ในดินนา โดยใช้ไนยาสกัดในรูปกรดอะซีติกเข้มข้น 1 N pH 4.0 (N CH₃COOH, pH 4.0) ที่พัฒนาโดย Imaizumi และ Yoshida (Imaizumi & Yoshida, 1958) ที่พบว่า ข้าวตอบสนองต่อการใส่ซิลิคอนเมื่อวิเคราะห์ผลโดยวิธีดังกล่าว มีปริมาณซิลิคอนที่เป็นประโยชน์ในดินต่ำกว่า 10 ส่วนต่อล้านส่วน (ppm) หรือวิธีการ “บ่มดิน (incubation) ภายใต้สภาวะขังน้ำ” ที่พัฒนาโดย Takahashi และ Nonaka (Takahashi & Nonaka, 1986) ซึ่งเป็นวิธีที่พบว่า มีสหสัมพันธ์กับปริมาณการดูดใช้ซิลิคอนดีกว่าวิธีที่พัฒนาโดย Imaizumi และ Yoshida ดังกล่าวข้างต้น

4) ชนิดของสารประกอบที่มีซิลิคอนในปริมาณมาก ที่จะใช้เพื่อปรับปรุงระดับความอุดมสมบูรณ์หรือความเป็นประโยชน์ของซิลิคอนในดิน ได้แก่ สารปรับปรุงดินในรูปหินแร่ ที่ได้จากธรรมชาติ เช่น แร่วอลลาสโตไนต์ (wollastonite: CaSiO₃) ฯลฯ สารในรูปสแลค (slag) ต่าง ๆ โดยเฉพาะที่ได้จากการประกอบการอุตสาหกรรมในการถลุงเหล็ก ปุ๋ยซิลิเกตที่เตรียมขึ้น เช่น ปุ๋ยฟิวต์แมกนีเซียมฟอสเฟต (fused magnesium phosphate) ที่มีซิลิกาที่ละลายได้ในน้ำยาซิเตรท (citrate-soluble Si) มากกว่าร้อยละ 20 ฯลฯ ปุ๋ยซิลิกาเจล (silica gel) กรดมอนอซิลิซิก [Si(OH)₄] ผลพลอยได้คือวัสดุเหลือทิ้งที่มีซิลิกาในปริมาณมาก เช่น แกลบดินบด ขี้เถ้าแกลบ เศษฟางข้าว ปุ๋ยหมัก และอื่น ๆ ฯลฯ ซึ่งแต่ละชนิด สามารถใช้เพื่อปรับปรุงความเป็นประโยชน์ของซิลิคอนในดินบางชนิดได้ดีแตกต่างกันไป โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเลือกใช้ว่าจะใช้สารปุ๋ยซิลิเกตชนิดใด และในอัตราอย่างน้อยแค่ไหน ควรพิจารณาจากรูปซิลิคอนในตัวสารหรือปุ๋ยซิลิเกต เช่น อยู่ในรูปซิลิกา ซิลิเกต (SiO₄²⁻) หรือในรูปกรดมอนอซิลิซิก ซึ่งถ้าจะพิจารณาความสามารถในการละลายในน้ำหรือการดูดใช้โดยพืช โดยเฉพาะข้าวจะดูดใช้ซิลิคอนในรูปกรดมอนอซิลิซิกได้ดีกว่าอยู่ในรูปสารประกอบซิลิเกต เช่น แคลเซียมซิลิเกต โซเดียมซิลิเกต โพแทสเซียมซิลิเกต ฯลฯ นอกจากนั้น ควรพิจารณาจากราคาของตัวสารหรือปุ๋ยซิลิเกตพร้อม ๆ กันไปด้วย ซึ่งโดยหลักการอย่างกว้าง ควรใช้สารหรือปุ๋ยซิลิเกตที่ใส่ให้กับพืชแล้วให้ผลดี มีราคาถูก หาง่าย หรืออยู่ในรูปผลพลอยได้ วัสดุเหลือทิ้ง หรือเป็นสารหรือปุ๋ยซิลิเกตที่ใส่ลงดินแล้วให้ผลต่อการปรับปรุงดินแบบเอนกประสงค์พร้อม ๆ กันไป นอกจากนั้น อาจใส่แกลบดิน หรือปุ๋ยหมักชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะปุ๋ยหมักฟางข้าว ฯลฯ ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มพูนปริมาณซิลิกาในดินที่มีซิลิคอนที่เป็นประโยชน์ (available Si) ต่ำแล้วยังช่วยปรับปรุงสมบัติทางด้านอื่น ๆ ของดินได้ด้วย โดยเฉพาะดินที่มีปัญหาทางด้านกายภาพ เช่น การปรับปรุงสภาพการระบายอากาศของดิน การระบายน้ำและความจุในการอุ้มน้ำ รวมทั้งสมบัติทางเคมีและทางจุลชีพของดินบางประการ

การใส่ปุ๋ยซิลิเกตลงดินเพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ ควรใส่โดยวิธีหว่านกระจายแล้วพรวนหรือคราดกลบลงดินก่อนการปลูกพืช ถ้าสารหรือปุ๋ยที่ใช้มีสมบัติละลายน้ำยาก เช่น

ซิลิคอนในรูปซิลิกาเจล (silica gel) หรือการใช้กับพืชที่ปลูกด้วยระยะชิด หรือมีความหนาแน่นของพืชที่ปลูก (จำนวนต้น) ต่อพื้นที่สูง เช่น ข้าว ฯลฯ และเนื่องจากซิลิคอนเป็นธาตุที่ไม่เคลื่อนย้ายในพืช หลังจากที่พืชดูดขึ้นจากดินไปใช้และได้เคลื่อนย้ายไปสะสมอยู่ในแต่ละส่วนของพืชแล้ว ดังนั้น ระยะเวลาในการใส่ธาตุซิลิคอนให้แก่พืช เช่น ข้าว ฯลฯ ในแต่ละช่วงเวลาในการเติมโต จึงมีความสำคัญมากกว่าการใส่ทั้งหมดเพียงครั้งเดียวในช่วงก่อนปลูก ตอนปลูก หรือหลังการปลูก ยกตัวอย่าง เช่น จากการศึกษาของ Ma และคณะ (Ma et al., 1989) พบว่าการใส่ซิลิคอนให้กับข้าวในระยะเจริญพันธุ์ (reproductive stage) มีผลอย่างเด่นชัดต่อการเพิ่มน้ำหนักต่อซังแห้งและน้ำหนักเมล็ดมากกว่าใส่ในระยะการเติบโตไม่อาศัยเพศ (vegetative stage) อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาการใส่ซิลิคอนให้กับพืช เช่น ข้าว ฯลฯ ควรพิจารณาถึงวัตถุประสงค์และสภาพปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ด้วย เช่น ถ้าจะต้องการใส่เพื่อเพิ่มความต้านทานของพืชต่อการทำลายของโรคและแมลงศัตรูพืชบางชนิด และใส่เพื่อลดปัญหาการล้ม (lodging) ของต้น เพราะมีสภาพลมแรงในพื้นที่ปลูก และรวมทั้งการลดการบังแสงซึ่งกันและกัน (mutual shading) ของใบพืช (หรือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงของพืช) ก็ควรใส่ซิลิคอนลงดินในช่วงก่อนปลูกหรือก่อนย้ายกล้าปลูกในวันปลูก หรือในช่วงต่าง ๆ ในระยะหลังปลูกหรือย้ายปลูกอันเป็นระยะการเติบโตไม่อาศัยเพศ เช่น ระยะเริ่มการแตกกอ (initial tillering stage) หรือระยะที่ข้าวมีการแตกกออย่างรวดเร็ว (active tillering stage) เป็นต้น

6. ผลการใช้ซิลิคอนในพืช

แม้ว่าซิลิคอนจะเป็นธาตุที่ไม่จำเป็นสำหรับพืชโดยทั่วไป แต่สำหรับข้าว ซิลิคอนเป็นธาตุที่มีความสำคัญอย่างยิ่งทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อการเติบโตของข้าว ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ปกติข้าวที่ปลูกในดินเนื้อละเอียดที่มีแร่ดินเหนียวประเภทอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicates) ในปริมาณมากไม่น่าจะมีปัญหาการขาดธาตุซิลิคอน ถ้าปัจจัยที่ควบคุมความมากน้อยของความเข้มข้นของซิลิคอน ในรูปกรดมอนอซิลิซิกและในรูปซิลิเกตไอออน ในสารละลายดินมีความเหมาะสมต่อการเพิ่มพูนปริมาณซิลิคอนที่เป็นประโยชน์ (available silicon) ทั้งสองรูปเช่น ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินความชื้น ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดอก (redox potential หรือ Eh) ปริมาณเหล็กและอะลูมิเนียมในดินและปัจจัยอื่น ๆ และมีผลทำให้เกิดการแปรสภาพหรือการปลดปล่อยซิลิคอนออกมาสู่สารละลายดินในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ โดยเฉพาะ ในรูปกรดมอนอซิลิซิก เช่น การปลดปล่อยซิลิคอนออกมาจากแร่ดิน (soil minerals) ในรูปอสัณฐาน (non-crystalline forms) ที่มีซิลิคอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณมากหรือการการแตกตัวของพอลิเมอร์ซิลิซิก แอซิด ในดินออกมาเป็นโมเลกุลเดี่ยว ๆ ในรูปกรดมอนอซิลิซิก ฯลฯ อย่างไรก็ตาม จากการทดลองโดยนักวิจัยหลายท่าน พบว่า แม้ว่าโดยทั่วไป ดินที่มักมีปริมาณซิลิคอนที่พืชดูดใช้ได้ต่ำ คือดินเนื้อหยาบ เช่น ดินทรายและดินอินทรีย์ (organic soil) เช่น ดินพรุ (peat

soil) ดินที่เกิดการกร่อนดิน (soil erosion) มากและบ่อยครั้ง แต่ในดินเนื้อละเอียดบางประเภท หรือดินบางชุดดิน (Soil series) โดยเฉพาะประเภทดินที่มีปัญหา (problem soil) ก็พบว่าพืชที่ปลูกหลายชนิด โดยเฉพาะ ข้าว แสดงการตอบสนองทางด้านการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตต่อคนใช้สารที่มีซิลิคอนในปริมาณมากหรือต่อปุ๋ยซิลิคอนที่ใส่ลงดิน ยกตัวอย่าง เช่น จากผลการทดลองปลูกข้าวและข้าวโพดในดินเปรี้ยวชุดดินของครุฑักษ์โดยใช้แคลเซียมซิลิเกต 4 อัตรา และแกลบดิน 2 อัตรา พบว่า การใช้แคลเซียมซิลิเกตและแกลบดิน ในอัตรา 300 มิลลิกรัมของซิลิกาต่อ 1 กิโลกรัม หรือ เทียบเท่ากับการใช้แคลเซียมซิลิเกต 93.60 กิโลกรัม และแกลบดิน 622.13 กิโลกรัม ต่อดิน 1 ไร่ ชั้นไถพรวน (0-15 ซม.) ตามลำดับ มีผลทำให้ข้าวมีน้ำหนักเมล็ดมากกว่าข้าวที่ไม่ได้ใส่ซิลิคอน ประมาณร้อยละ 49 และ 43 ตามลำดับ (จุฑารัตน์, 2546) และในการทดลองเดียวกัน ยังทำให้ข้าวโพดให้น้ำหนักของตอซังแห้งมากขึ้นถึงประมาณร้อยละ 75 และ 74 ตามลำดับ (ตารางที่ 2) นอกจากนี้ จากผลงานวิจัยในประเทศเกาหลี Park (Park, 2001) พบว่า การใช้ปุ๋ยซิลิเกตในรูปแคลเซียมซิลิเกต หรือในรูปแร่โวลลาสโตไนต์ (wollastonite) บดในอัตรา 320 กิโลกรัมต่อไร่กับดินบนที่มีปริมาณซิลิกาท่ำกว่า 130 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม ให้ผลดีเด่นชัดต่อการเพิ่มผลผลิตข้าว

ในประเทศจีนดินที่ใช้ในการปลูกข้าว ประมาณ 5-6 ล้าน เฮกตาร์ (ประมาณ 31.25-37.50 ล้านไร่) ขาดซิลิคอน และการใช้ซิลิกาในรูปปุ๋ยซิลิเกต มีผลทำให้ได้ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้นร้อยละ 0-400 ขึ้นกับระดับความรุนแรงของการขาดซิลิคอนของดิน ยกตัวอย่าง เช่น การใช้โซเดียมซิลิเกตกับดินในหลายพื้นที่ในอัตรา 12-21.6 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลทำให้เพิ่มผลผลิตของข้าวระหว่างร้อยละ 13-17 (Takahashi et al., 1990) สำหรับการใส่แคลเซียมซิลิเกตในรูปสแลค (calcium silicate slag) ซึ่งเป็นวัสดุคัตทิ้งหรือผลพลอยได้จากการประกอบการอุตสาหกรรม ผลการวิจัยในมลรัฐฟลอริดา ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยการใช้แคลเซียมซิลิเกตสแลคกับข้าวที่ปลูกในดินอินทรีย์และดินทรายที่มีปริมาณซิลิคอนที่เป็นประโยชน์ (available silicon) ต่ำ พบว่า ทำให้ได้ผลผลิตข้าวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 30 ซึ่งในมลรัฐฟลอริดา เกษตรกรที่ปลูกข้าวทั่ว ๆ ไปนิยมใช้แคลเซียมซิลิเกตสแลค ในอัตราปริมาณ 800 กิโลกรัมต่อไร่ (160 กิโลกรัม Si ต่อไร่) สำหรับดินที่มีปริมาณซิลิคอนที่สกัดได้โดยน้ำยาแอมโมเนียอะซิเตท 0.5 โมลาร์ (0.5 M ammonium acetate) เท่ากับหรือต่ำกว่า 10 มิลลิกรัม ซิลิคอนต่อกิโลกรัม (Snyder, 1991) ในประเทศญี่ปุ่น อัตราของปุ๋ยซิลิเกตที่แนะนำให้ใช้กับดินนาเนื้อละเอียดปานกลางและดินนาเนื้อละเอียด คือ ระหว่าง 240-320 กิโลกรัมต่อไร่ โดยการใช้ในช่วงปริมาณดังกล่าวกับดินที่มีเนื้อดินทั้ง 2 ประเภท มีผลทำให้ได้ผลผลิตข้าวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 10 และ 12 ตามลำดับ สำหรับพืชชนิดอื่น ๆ ที่ต้องการซิลิคอนในปริมาณสูง เช่น อ้อย พบว่า การใช้แคลเซียมซิลิเกต ในอัตราระหว่าง 112-896 กิโลกรัมต่อไร่ กับอ้อยที่ปลูกในดินทรายที่มีปริมาณซิลิคอน ที่เป็นประโยชน์ (available silicon) ต่ำมีผลทำให้ผลผลิตของอ้อยเพิ่มขึ้นระหว่าง 76-12 (Korndorfer and Lepsch, 2001)

ตารางที่ 2.2 ผลการใช้แคลเซียมซัลเฟตและแกลบดินต่อการเติบโต ผลผลิต และการดูดใช้ธาตุอาหารหลักและธาตุซิลิคอนของข้าวพันธุ์สุวรรณบุรี 1 และข้าวโพดพันธุ์สุวรรณ 5 ที่ปลูกในดินเปรี้ยว ชุดดินนครักษ์

ตำรับทดลอง (Treatment)	ข้าว							ข้าวโพด			
	น้ำหนักเมล็ด (กรัม/กระถาง)	จำนวน เมล็ดลีบ (ร้อยละ)	ปริมาณธาตุอาหารในพืช (มิลลิกรัม/กระถาง)				น้ำหนักต่อชั่ง แห้ง (กรัม/ กระถาง)	ปริมาณธาตุอาหารในพืช (มิลลิกรัม/กระถาง)			
			N	P	K	Si		N	P	K	Si
1. ไม่ใช่ซิลิกา	16.17	41.78	729.95	199.02	875.49	626.53	19.12	382.89	40.32	273.54	405.65
2. แคลเซียมซัลเฟต 100 มก./กก.ดิน	18.74 (15.89)	36.61	797.18	222.96	981.54	819.62	29.82(55.96)	509.21	47.52	452.41	472.37
3. แคลเซียมซัลเฟต 200 มก./กก.ดิน	20.61(27.46)	27.63	883.47	261.69	1,047.11	990.01	31.39(68.17)	638.15	58.77	437.12	816.47
4. แคลเซียมซัลเฟต 300 มก./กก.ดิน	24.09(48.98)	23.38	964.57	278.03	1,195.14	1,257.73	33.39(74.63)	649.54	66.27	583.17	1,385.66
5. แคลเซียมซัลเฟต 400 มก./กก.ดิน	20.61(27.46)	27.36	875.40	243.41	1,058.61	848.44	31.42(64.33)	488.08	54.34	549.07	974.99
6. แกลบดิน 300 มก./ กก.ดิน	21.60(33.58)	29.25	965.68	236.49	1,082.45	1,028.09	33.19(73.59)	736.57	66.96	642.21	2,370.96
7. แกลบดิน 400 มก. / กก.ดิน	20.59(27.33)	31.22	843.96	24.18	945.63	907.59	31.93(67.00)	526.15	60.29	527.02	1,303.42
ความแตกต่างกันทาง สถิติโดยวิธี F-test	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**

1/ การใช้แคลเซียมซัลเฟต อัตรา 100,200,300,400 และแกลบดินดิบ อัตรา 300 และ 400 มิลลิกรัม SiO_2 ต่อดินแห้ง 1 กิโลกรัม เทียบค่าได้จากการใช้แคลเซียมซัลเฟต อัตรา 31.2,62.4,93.6,124.8และแกลบดินที่ใช้ในการทดลองนี้มีปริมาณซิลิกา ร้อยละ 15.045 โดยน้ำหนัก 622.13 และ 829.51 กิโลกรัมต่อดิน 1 ไร่ ขึ้นไถพรวน (0-15 ซม.) ตามลำดับ

2/ ค่าเฉลี่ยในวงเล็บ คือ ค่าร้อยละของผลผลิตที่เพิ่มขึ้นจากข้าวที่ไม่ใช่ซิลิกา

3/ ns และ ** = ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ตามลำดับ

ที่มา : จุฬารัตน์ (2546)

7. กระบวนการในการแยกซิลิกา

7.1 การแยกทางเคมี เช่น การทำปฏิกิริยากับ HCl เกิดเป็น Trichlorosilane แล้วนำไปกลั่นเพื่อแยกให้บริสุทธิ์มากขึ้น

7.2 การแยกด้วยวิธีทางฟิสิกส์ เช่น การนำซิลิคอนที่ได้ มาทำการหลอมซ้ำและทิ้งให้เย็นเพื่อให้ซิลิคอนมีสถานะของแข็งอีกครั้งหนึ่ง เป็นการดึงเอาสารปนเปื้อนให้แยกออกจากซิลิคอนบริสุทธิ์โดยสารปนเปื้อนดังกล่าวจะรวมตัวอยู่ที่ปลายสุดด้านหนึ่งของแท่งทำให้สามารถตัดส่วนปลายนั้นทิ้งไปได้และล้างด้วยกรดเพื่อแยกเอาสิ่งปนเปื้อนออกไป ทำให้ได้ซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น หรืออาจทำได้โดยการนำ ซิลิคอนที่ได้มาหลอมที่อุณหภูมิสูงเพื่อดึงเอาโลหะตัวอื่นๆ ที่เหลือนอกออกไป ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นตอนนี้ มีความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้น กรรมวิธีดังกล่าวได้รับความนิยมอย่างมากในวงการอุตสาหกรรมโดยทั่วไป

7.3 การเผา คือ จะเผาที่อุณหภูมิ 500 – 700 °C ซึ่งเป็นวิธีที่นิยม เนื่องจากได้เปอร์เซ็นต์ซิลิกาสูง ซึ่งการแยกซิลิกาจากวัสดุทางการเกษตรจะนิยมใช้วิธีนี้มากที่สุด เพราะลงทุนไม่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น

8. วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

ปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเกิดขึ้นในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก และมีความหลากหลาย เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย กากมะพร้าว ขุยมะพร้าว กะลามะพร้าว ชังข้าวโพด ต้นมันสำปะหลัง เปลือกถั่วลิสง ต้นฝ้าย เปลือกถั่วเหลือง ข้าวฟ่าง กะลาปาล์ม ไร่ข้าว เป็นต้น ในปี พ.ศ. 2543 พบว่าปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ประมาณ 63 ล้านตัน โดยถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงและใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นๆประมาณ 16 ล้านตัน ปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรส่วนที่ยังไม่ได้ใช้เท่ากับ 42 ล้านตัน (ชัยชาญ ฤทธิเกรียงไกร, 2547) ตารางที่ 2 แสดงปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของไทย ปี 2544 - 2545

ตารางที่ 2.3 ปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของไทย ปี 2544 – 2545

ชนิด	ผลผลิตต่อปี (10 ⁶ กก.)	ส่วนที่เหลือใช้	ปริมาณวัสดุเหลือใช้ ต่อปี
อ้อย	60,013	ชานอ้อย	3,615.00
		ยอดและใบ	17,870.19
ข้าว	26,514	แกลบ	3,006.42
		ฟางข้าว	8,106.60
ปาล์มน้ำมัน	4,089	ทะลายปาล์ม	1,022.05
		เส้นใยปาล์ม	80.55
		กะลาปาล์ม	7.41
		ทะลายตัวผู้	952.74
		ก้านทาง	10,647.76
มะพร้าว	1,396	เปลือก	300.68
		กะลามะพร้าว	84.43
		ทะลายมะพร้าว	57.66
		ทางมะพร้าว	254.11
มันสำปะหลัง	16,868	ลำต้น	604.14
ข้าวโพด	4,466	ซังข้าวโพด	816.88
ถั่วลิสง	126	เปลือก	41.67
ฝ้าย	36	ลำต้น	116.35
ถั่วเหลือง	292	ลำต้น ใบ เปลือก	590.97
ข้าวฟ่าง	145	ใบ ต้น	117.64

ที่มา กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2548)

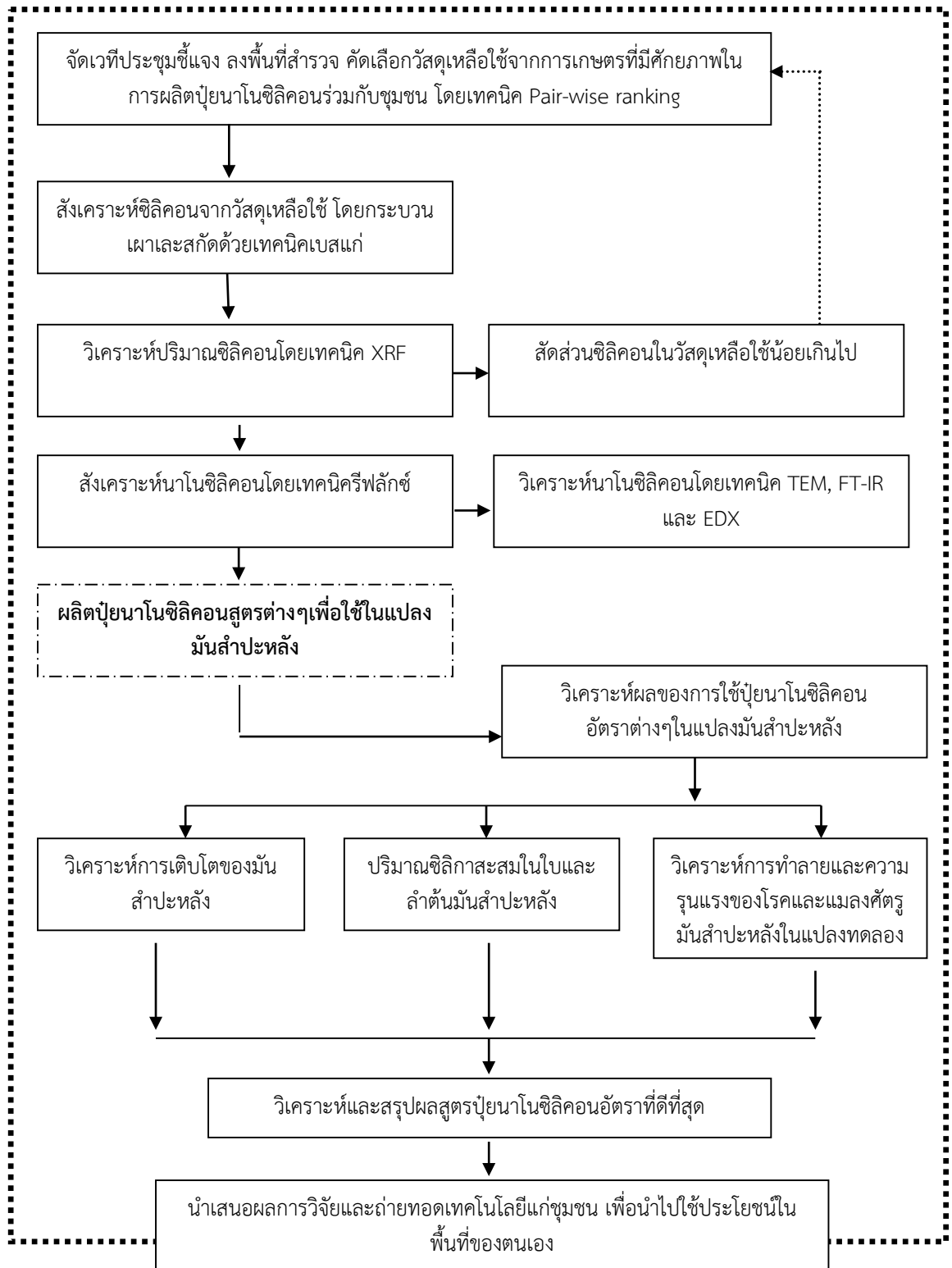
การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

ก้องเกียรติ ภูเก็ด (2531) ศึกษาการเตรียมซิลิคอนไดออกไซด์จากแกลบข้าว โดยเผาในช่วงอุณหภูมิ 700-1000 °C ในบรรยากาศ ในการศึกษาจะนำแกลบมาแช่ในสารละลายกรด HCl ที่มีความเข้มข้น 2 N ประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น ตากให้แห้ง แล้วจึงนำไปเผาในเตาที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก ประมาณ 1 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ซิลิคอนไดออกไซด์ที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C มีความบริสุทธิ์ 99.4% ซึ่งสูงกว่าการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า การทำให้เถ้าซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูง จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเผา ความเข้มข้นของกรด และเวลาในการแช่แกลบ

อรรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ และคณะ (2549) ศึกษาความเป็นประโยชน์ของซิลิคอนจากเถ้าลอยลิกไนต์ต่อคุณภาพการสีของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ด้วยแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block ทำ 3 ซ้ำ ประกอบด้วยแปลงทดลองดินเดิม (เคยใส่เถ้าลอยลิกไนต์ 2 ตัน/ไร่ เมื่อปี พ.ศ. 2544) การใส่ปุ๋ยเคมี และการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับเถ้าลอยลิกไนต์ 2 ตัน/ไร่ พบว่า การใส่เถ้าลอยลิกไนต์มีผลทำให้ปริมาณซิลิคอนในดิน (ปริมาณทั้งหมดและปริมาณที่เป็นประโยชน์) พางข้าว และแกลบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนผลผลิตข้าวเปลือก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้การใส่เถ้าลอยลิกไนต์ยังส่งผลให้คุณภาพการสีของข้าวอยู่ในเกณฑ์คุณภาพการสีดีมาก (ข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าว > 50%) โดยคุณภาพการสีของข้าวมีความสัมพันธ์กับปริมาณซิลิคอนทั้งหมด ($r = 0.706^*$) และปริมาณซิลิคอนที่เป็นประโยชน์ ($r = 0.740^*$) ในดิน แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณซิลิคอนในพางข้าวและเปลือกข้าว (แกลบ) ($r = 0.518$ และ $r = 0.479$)

นิตยา ทวดอาจ (2550) ศึกษาการเตรียมนาโนซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าว เพื่อนำมาปรับปรุงสมบัติเชิงกลต้านกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ โดยทำการเผาแกลบข้าวที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 3 และ 6 ชั่วโมงตามลำดับ พบว่าที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ได้ปริมาณซิลิกาเท่ากับ 98.14 % เถ้าแกลบข้าวที่เตรียมได้จะถูกสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2.0 2.5 และ 3.0 N ตามลำดับ พบว่าที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 N ให้ปริมาณร้อยละผลพลอยได้ของการสกัดซิลิกาเท่ากับ 90.3 % และทำการตรวจสอบจากข้อมูลอินฟราเรดสเปกตรัมพบพันธะในกลุ่มซิลานอลและกลุ่มไฮดรอกซิล จากนั้นนำซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าวมาทำการเตรียมเป็นอนุภาคระดับนาโนเมตรด้วยกระบวนการตกตะกอน โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดตะกอนคือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 2.0 2.5 และ 3.0 N ตามลำดับ หลังจากนั้นซิลิกาจะถูกกรีฟลักซ์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.0 N เป็นเวลา 8 10 และ 12 ชั่วโมง ผลการทดลองจาก

กรอบแนวคิดในการวิจัย



ภาพที่ 2.3 กรอบแนวคิดในการวิจัย