

บทที่ 2

ทฤษฎีและทบทวนผลงานในอดีต

แหล่งแร่สังกะสีที่บริเวณผาแดง อำเภอแม่สอด จ.ตาก เป็นแหล่งแร่สังกะสีที่ใหญ่ที่สุดของประเทศ ตามธรณีวิทยาพบว่า แหล่งแร่สังกะสีผาแดง เป็นแหล่งแร่ที่มีความหนาไม่คงที่ เกิดอยู่ในบริเวณที่เป็นหินปูนและหินทราย ประกอบไปด้วย แร่สังกะสีซิลิเกต (Hemimorphite) และแร่สังกะสีคาร์บอเนต (Smithsonite) เป็นส่วนใหญ่ รูปร่างของแหล่งแร่มีลักษณะคล้าย ๆ อานม้า โดยชั้นบนจะพบแร่ทั้ง 2 แยกกันอยู่พอลึกลงไปจะพบอยู่รวมกัน ในบริเวณแหล่งแร่ นอกจากแร่สังกะสีแล้ว ยังมีแร่ควอร์ตซ์ (Quartz) แคลไซต์ (Calcite) เหล็กและแร่ดินเหนียวเกิดร่วมอยู่ด้วย

การกำเนิดของแหล่งแร่จากข้อมูลทางธรณีวิทยาสันนิษฐานว่า เกิดจากการที่สารละลายที่มีธาตุสังกะสีปนอยู่ไหลมาทำปฏิกิริยากับหินปูน และหินทรายที่อยู่ในบริเวณนี้ เกิดเป็นแร่สังกะสีชนิดซิลิเกต และคาร์บอเนต

คุณสมบัติเฉพาะของสินแร่สังกะสี

ประกอบด้วย	ปริมาณโดยเฉลี่ย
แร่สังกะสีซิลิเกต (Hemimorphite) $Zn_4(SiO_7)(OH_2) \cdot H_2O$	66 %
แร่สังกะสีคาร์บอเนต (Smithsonite) $ZnCO_3$	34 %

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบแร่โดยเฉลี่ยของสินแร่สังกะสีแหล่งแม่สอด

องค์ประกอบ	ปริมาณองค์ประกอบ
Zn	23 %
SiO ₂	37 %
CaO	2.8 - 4.2 %
MgO	1.32 - 2.85 %
Fe	4.3 %
Cd	0.73 - 0.28 %
แหล่งข้อมูล กรมทรัพยากรธรณี เมษายน 2528	

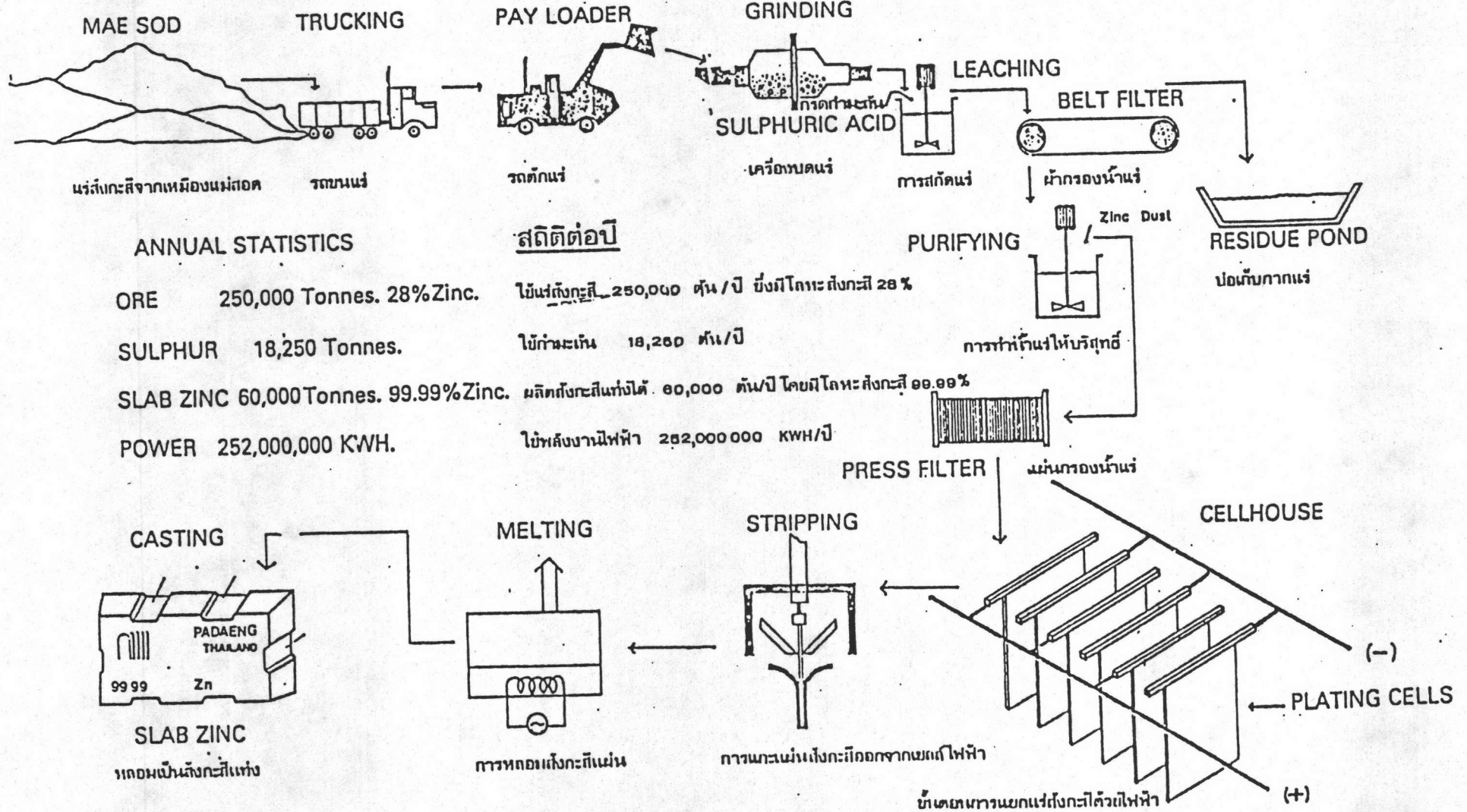
กรรมวิธีการถลุงแร่สังกะสีของบริษัทผาแดงอินดัสทรี จำกัด เป็นวิธีการสกัดโดยใช้วิธีแยกแร่สังกะสีด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Zinc Smelting Process) โดยมีขั้นตอนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในการบดแร่จะบดให้สินแร่มีขนาดเล็กกว่า 0.2 ม.ม. และส่งผ่านสายพานเพื่อไปยังโรงสกัดแร่ การสกัดแร่จะใช้กรดกำมะถัน (H₂SO₄) กรดกำมะถันจะละลายโลหะส่วนใหญ่ออกจากสินแร่ และแร่จะตกตะกอน จากนั้นจึงส่งไปยังกระบวนการทำให้เป็นกลาง โดยเติมหินปูนและปูนขาว สารละลายที่ได้จากกระบวนการทำให้เป็นกลาง จะส่งไปยังกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ ส่วนกากแร่สังกะสีก็จะถูกส่งไปทิ้งยังบ่อกักเก็บ

จากความคิดเห็นฐานที่ว่า ดินเหนียว (Clay) "จะหมายถึงอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.002 ม.ม." แต่ถ้าเป็นความหมายทางด้านแร่แล้วจะเรียกว่า "แร่ดินเหนียว (Clay minerals)" ซึ่งเป็นผลึกเล็ก ๆ ที่ประกอบด้วย Silica tetrahedral sheets และ Octahedral sheets ส่วนแร่ที่ไม่ใช่ดินเหนียว อันได้แก่กรวดและทรายรวมทั้งทรายละเอียด (Silt) จะประกอบด้วยแร่ที่ไม่ใช่ดินเหนียว เช่น ควอทซ์ เฟลสปาร์ และแร่คาร์บอเนต โดยที่ดินเป็นผลที่ได้จากการสลายตัวหรือการแตกตัวของหินทั้งทางกล และทางเคมี ซึ่งควอทซ์เป็นพวก Silica tetrahedral นอกจากนี้แร่ดินเหนียวบางตัวอาจมีขนาดใหญ่กว่า 0.002 ม.ม. และแร่ที่ไม่ใช่ดินเหนียว (Nonclay minerals) บางตัวก็อาจมีขนาดเล็กกว่า 0.002 ม.ม. ก็ได้

ในการที่ดินจะทำปฏิกิริยากับปูนขาว เพื่อที่จะเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic จำเป็นต้องมีการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผิวของอนุภาคดิน ซึ่งเกิดขึ้นภายหลังจากที่ใส่ปูนขาวทำให้มี Ca^{2+} ส่วนเกินเข้าไปมากเกิด Cation exchange ซึ่งจะวัดออกมาในเทอมของ Cation exchange capacity (CEC) จากผลของการแลกเปลี่ยนประจุจะทำให้ซิลิกา และ/หรืออลูมิน่า ในดินเกิดการสลายตัวออกมาทำปฏิกิริยากับปูนขาวเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic การที่ปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับดินได้ดีเพียงใดก็ขึ้นกับการสลายตัวของซิลิกา และ/หรืออลูมิน่า รวมทั้งความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ของดิน

ผลจากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่า กากแร่สังกะสี ก็คือดินที่ได้จากการบดดิน และ/หรือหินที่มีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กกว่า 0.2 มม. กากแร่สังกะสีมีแร่ควอทซ์ (SiO_2) อยู่มากพอควร ซึ่งเป็นแร่ที่สลายตัวให้สารประกอบออกไซด์อิสระที่จะทำปฏิกิริยากับปูนขาว เกิดการพัฒนากำลังขึ้นในส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว

ขั้นตอนการผลิตสังกะสี
ELECTROLYTIC ZINC SMELTING PROCESS
โครงการสังกะสี ผาแดง จ. ตาก
PADAENG REFINERY



ANNUAL STATISTICS

ORE 250,000 Tonnes. 28%Zinc.
 SULPHUR 18,250 Tonnes.
 SLAB ZINC 60,000Tonnes. 99.99%Zinc.
 POWER 252,000,000 KWH.

สถิติต่อปี

ไม้แร่สังกะสี 250,000 ตัน/ปี ซึ่งมีโลหะสังกะสี 28%
 ไม้กำมะถัน 18,250 ตัน/ปี
 ผลิตภัณฑ์สังกะสีแท่งได้ 60,000 ตัน/ปี โดยมีโลหะสังกะสี 99.99%
 ไม้พลังงานไฟฟ้า 252,000,000 KWH/ปี

รูปที่ 2.1 แสดงขั้นตอนการผลิตแร่สังกะสี

2.1 องค์ประกอบที่มีผลต่อกำลังของส่วนผสม

2.1.1 ชนิดของปูนขาว ปูนขาวเป็นวัสดุที่ได้จากการเผาหินปูน (Limestone) จนกระทั่งคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แยกตัวออกมา ปูนขาวที่พบทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทดังนี้

- High calcium quick lime	CaO
- Dolomitic quick lime	CaO + MgO
- Hydrated high calcium lime	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
- Normal hydrated dolomitic lime	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{MgO}$
- Pressure hydrated dolomitic lime	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Mg}(\text{OH})_2$

ประเภทของปูนขาวต่าง ๆ ขึ้นกับส่วนประกอบของหินปูนและขั้นตอนการเผา กล่าวคือ หินปูนที่ประกอบด้วย Calcium carbonate (CaCO_3) ภายหลังการเผา ก็จะได้เป็น High calcium lime แต่ถ้าหินปูนบางแหล่งมี Magnesium carbonate (MgCO_3) ผสมอยู่ด้วย ปูนขาวที่ได้จะเป็นพวก Dolomitic lime ถ้าหินปูนถูกเผาอย่างสมบูรณ์ปูนขาวที่ได้ก็จะเป็นพวก Quick lime กล่าวคืออยู่ในรูปออกไซด์ แต่ถ้าได้รับความชื้นองค์ประกอบออกไซด์ก็จะรวมตัวกับน้ำ กลายเป็นรูปของไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะเรียกว่า Hydrated lime

ชนิดของปูนขาวจะมีผลต่อกำลังรับแรงของส่วนผสมดินและปูนขาวเมื่อใช้ปูนขาวปริมาณเท่า ๆ กัน Dolomitic lime จะทำให้กำลังรับแรงของส่วนผสมดินและปูนขาวสูงกว่า High - calcium lime อย่างไรก็ตามเกี่ยวกับข้อสรุปนี้วิศวกรบางกลุ่มยังมีความเชื่อว่ายาวแล้วปูนขาวทั้งสองชนิดน่าจะทำให้กำลังรับแรงของดินเพิ่มขึ้นเท่ากัน

Laguros (1956) พบว่า Quick lime จะมีผลในการปรับปรุงคุณภาพของดินได้ดีกว่า Hydrated lime แต่ถึงกระนั้นในการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยใช้ปูนขาวโดยทั่วไป จะนิยมใช้ Hydrated lime มากกว่า เนื่องจากสะดวกในการใช้มากกว่าและมีอันตรายน้อยกว่า

2.1.2 ชนิดของดิน Herrin และ Mitchell (1961) รายงานว่าปูนขาวจะสามารถปรับปรุงคุณภาพของดินที่มี Plasticity สูง ได้มากกว่าดินที่มี Plasticity ต่ำ โดยปกติแล้วดินเหนียว (Clay) จะทำปฏิกิริยากับปูนขาวได้มากกว่าดินชนิดอื่น และมีกำลังรับแรงเพิ่มขึ้นมากกว่า

Pietsch และ Davidson (1962) นั้นทักไว้ว่าปูนขาวจะไม่ทำปฏิกิริยากับดินซึ่งมีขนาดเม็ดดินใหญ่กว่าขนาดของทรายละเอียด silt size

2.1.3 แร่ดินเหนียว (Clay minerals) "ดินเหนียว (Clay)" เมื่อใช้เป็นคำที่บ่งบอกถึงขนาดจะหมายถึง ส่วนประกอบของดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.002 ม.ม. แต่ถ้าเป็นความหมายทางด้านแร่แล้ว จะใช้คำว่า "แร่ดินเหนียว (Clay minerals)" ซึ่งเป็นผลึกเล็ก ๆ ที่ประกอบด้วย Silica tetrahedral sheets และ Octahedral sheets ของ Al, Mg ฯลฯ โดยทั่วไปจะเป็น hydrous aluminum silicates ซึ่งมี Fe หรือ Mg เข้ามาแทนที่ในตำแหน่งของ Al เป็นบางส่วน (Grim 1962, 1968) แร่ดินเหนียวบางตัวจะมีขนาดใหญ่กว่า 0.002 ม.ม. และในทำนองเดียวกันแร่ที่ไม่ใช่ดินเหนียว (Nonclay minerals) บางตัวนั้นก็อาจมีขนาดเล็กกว่า 0.002 ม.ม.

Eades และ Grim (1960) ศึกษาปฏิกิริยาของ hydrated lime กับแร่ดินเหนียวบริสุทธิ์ (Pure clay minerals) พบว่าสำหรับ Kaolinite กำลังรับแรงจะเพิ่มขึ้นเมื่อ Calcium กระแทกกับผิวของ Kaolinite particle สำหรับ Illite และ Montmorillonite กำลังรับแรงจะเพิ่มขึ้นหลังจาก Clay particle อิ่มตัวด้วยประจุบวกของ Calcium แล้ว

Mateos (1964) ได้รายงานว่า Montmorillonite, Kaolinite และดินที่มี Particle เป็น holloysite กำลังรับแรงจะเพิ่มขึ้นน้อยกว่าอนุภาคดินชนิดอื่น เมื่อผสมด้วยปูนขาว

2.1.4 การบ่ม (Curing) ขึ้นกับระยะเวลาและอุณหภูมิ

1. ระยะเวลาในการบ่มตัว ส่วนผสมดินและปูนขาวจะมีกำลังรับแรงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มตัว ตามปกติกำลังรับแรงจะเพิ่มขึ้นเร็วในช่วงแรกของการบ่มตัว และจะช้าลงในช่วงหลังของการบ่มตัว

2. อุณหภูมิในการบ่มตัว อุณหภูมิจะมีผลกระทบต่อความเร็วในการทำปฏิกิริยาระหว่างดินและปูนขาว ถ้าอุณหภูมิในการบ่มตัวยิ่งสูงค่ากำลังรับแรงของดินก็จะยิ่งเพิ่มขึ้นมาก

Mateos (1964) เสนอแนะว่า ในการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยปูนขาวควรจะทำในระยะเริ่มต้นของฤดูร้อน จะช่วยให้การปรับปรุงคุณภาพได้ผลดียิ่งขึ้น

2.2 ปฏิกิริยาระหว่างดินกับปูนขาว

Herrin และ Mitchell (1960) ได้กล่าวถึงปฏิกิริยาพื้นฐานระหว่างดินเหนียวกับปูนขาวที่มีผลทำให้เกิดการพัฒนาคคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมมี 4 ปฏิกิริยา ด้วยกันคือ

- Cation exchange
- Flocculation & Agglomeration
- Carbonation
- Pozzolanic reaction

Herrin และ Mitchell (1961) ได้พบว่าเมื่อผสมปูนขาวเข้าไปในดินเหนียวจะช่วยให้การปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียวทางด้าน Plasticity, Shrinkage, Workability และกำลังของส่วนผสม

2.2.1 Cation exchange เป็นการแทนที่ Cation ของดินโดย Cation อื่น ซึ่ง Cation ที่พบมากในดินโดยเรียงจากมากไปหาน้อยคือ Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ และ K^+ ส่วน anion ที่พบมากคือ SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-} และ NO_3^-

เมื่อปูนขาวผสมกับดินเนื้อละเอียด (Fine grained soil) ปูนขาวจะแตกตัวออกเป็น Ca^{2+} (หรือ Mg^{2+}) และ OH^- หลังจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาต่อไปนี้

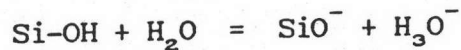
1. เกิดการแลกเปลี่ยนของประจุบวก Ca^{2+} จะเข้าแทนที่ประจุบวกของธาตุที่แข็งแรงน้อยกว่า เช่น Na^+ และ H^+ ที่ผิวของอนุภาคดิน
2. เกิดการรวมตัวของ Ca^{2+} ที่เหลือรอบ ๆ อนุภาคดิน

ทั้งสองปฏิกิริยานี้จะเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของประจุไฟฟ้ารอบ ๆ อนุภาคดิน

แหล่งของ exchange capacity ในดินนั้น Grim (1968) ได้พบว่าเกิดจาก

1. Isomorphous substitution ซึ่งเป็นกาแทนที่ของ Si^{4+} โดย Al^{3+} ใน Silica sheet หรือกาแทนที่ของ Al^{3+} โดยอะตอมที่มีวาเลนซ์ 2 ใน Octahedral sheet ทำให้มีประจุไฟฟ้าลบที่ไม่ถูกทำให้สมดุลย์ในโครงสร้างของผลึก

2. Broken bond ตามขอบของ silica alumina unit จะมีประจุไฟฟ้าซึ่งจะถูกทำให้สมดุลย์ได้ด้วย cations ที่ดูดซึมเข้ามา Wiklander (1964) ได้อธิบายว่าเมื่อเกิด broken bond ขึ้นแล้ว hydroxyls จะเข้าไปหา silicon ของ tetrahedral unit ที่แตกออกมา และจะ ionize ให้เกิดเป็น



ซึ่งจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าลบบนโครงสร้างผลึก

3. กาแทนที่ของ H_2 ใน hydroxyl จะพบว่า Cation ชนิดหนึ่งอาจถูกแทนที่โดย Cation อีกชนิดหนึ่งได้ตัวอย่างเช่น Ca^{2+} แทนที่ Na^+ หรือ Na^+ แทนที่ Ca^{2+} หรือ Fe^{3+} แทนที่ Mg^{2+} และอื่น ๆ กาแทนที่กันโดย Cation อีกชนิดหนึ่งขึ้นกับหลายสาเหตุกล่าวคือ

1. วาเลนซ์ของ Cation
2. ความซุกซุ่มของ Cation ชนิดอื่น
3. ขนาดของไอออน

Trivalent cation ถูกยึดเหนี่ยวได้มั่นคงกว่า divalent cation และ divalent cation ก็ถูกยึดเหนี่ยวได้มั่นคงกว่า Monovalent cation และโดยทั่วไปแล้ว Cation ที่มีขนาดเล็กจะแทนที่ Cation ที่ขนาดใหญ่กว่าได้ Grim (1953) พบว่าลำดับในการแทนที่ของ Cation เป็นลำดับดังนี้ $\text{Na}^+ < \text{Li}^+ < \text{Rb}^+ < \text{Cs}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Ba}^{2+} < \text{Cu}^{2+} < \text{Al}^{3+} < \text{Fe}^{3+} < \text{Th}^{4+}$ แต่อาจจะเป็นไปได้ที่ Cation ที่มีกำลังในการแทนที่ (Replacing power) สูงกว่าถูกแทนที่โดย Cation ที่มีกำลังในการแทนที่ต่ำกว่า ตัวอย่างเช่น Al^{3+} สามารถถูกแทนที่โดย Na^+ ได้เพราะว่าความเข้มข้นของ Na^+ ในสารละลายมีค่าสูงกว่า Al^{3+} มาก

อัตราการแทนที่ของ Cation จะขึ้นกับ

1. ชนิดของแร่ดินเหนียว
2. ความเข้มข้นของสารละลาย
3. อุณหภูมิ

โดยทั่วไปแล้วแรดินเหนียวคาโอลิไนท์จะถูกแทนที่โดยทันทีทันใด ส่วนอิลไลต์อาจจะใช้ เวลาประมาณไม่กี่ชั่วโมงถึงจะแทนที่ทั้งหมด เพราะว่า exchange capacity นั้นอยู่ระหว่าง ช่องว่างของอนุภาคดินเหนียว และนอกจากนี้อิลไลต์ยังมีขนาดเล็กกว่าคาโอลิไนท์ สำหรับมอนท์โม ริลโลไนท์นั้น ก็จะใช้เวลาเพิ่มมากขึ้นอีกเพราะ exchange capacity นั้นอยู่ระหว่าง interlayer และนอกจากนี้ยังมีขนาดเล็กกว่าอิลไลต์อีกด้วย

เมื่อผสมปูนขาวเข้าไปในดินเหนียวนั้นจะทำให้มี Ca^{2+} ส่วนเกินเข้าไปมาก ดังนั้นจะ เกิด cation exchange ในโครงสร้างของดิน การเปลี่ยนแปลง Cation ของดินโดย Ca^{2+} นี้จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลง double layer ซึ่งจะให้คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมบางอย่าง เปลี่ยนแปลงไป

2.2.2 Flocculation and Agglomeration การเพิ่มปูนขาวเข้าไปในดิน เหนียวจะทำให้โครงสร้างของดินเหนียวเกิดการจัดเรียงตัวเป็นแบบระเกะระกะมีขนาดใหญ่ขึ้น Herzog และ Mitchell (1963) ได้อธิบายการจัดเรียงตัวของอนุภาคดินเหนียวเป็น โครงสร้างแบบระเกะระกะดังนี้คือ เมื่อเพิ่มปูนขาวเข้าไป Ca^{2+} ของน้ำในช่องว่างของมวลดินมีความ เข้มข้นของไอออนสูงขึ้น ดังนั้นจะเกิด cation exchange ของแรดินเหนียวซึ่งจะทำให้วงน้ำ double layer หดตัวแคบเข้าและจะเกิดการดึงดูดกันเป็นโครงสร้างแบบระเกะระกะ

Diamond และ Kinter (1965) ได้อธิบายว่าโครงสร้างแบบระเกะระกะ นี้จะถูกทำให้มั่นคงขึ้นโดยสารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วคือ tetracalcium aluminate hydrate ซึ่งเป็นตัวประสาน (Cementing agent) โครงสร้างแบบระเกะระกะให้มั่นคงขึ้น

Thompson (1964) พบว่าปฏิกิริยา Cation exchange และ flocculation and agglomeration นี้ไม่ได้เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้กำลังของส่วนผสมดินเหนียว กับปูนขาวพัฒนาขึ้นมาก

2.2.3 Lime carbonation Davidson และ Handy (1960) พบว่าปูนขาวจะ ทำปฏิกิริยากับ CO_2 ในอากาศแล้วเกิดเป็น $CaCO_3$ และ $MgCO_3$ ซึ่งมีแรงยึดเกาะกันค่อนข้างต่ำ ทำให้กำลังรับแรงของส่วนผสมดินและปูนขาวลดลง ทำให้การเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ซ้ำลง Goldberg และ Klein (1952) Eddes และ Grim (1962) พบ $CaCO_3$ เมื่อทดลองผสมดิน เหนียวด้วยปูนขาวในห้องทดลอง และบ่มทิ้งไว้ให้สัมผัสกับอากาศ Eades, Nichols และ Grim

(1962) ได้พบว่าเกิด CaCO_3 ถึง 2.5% โดยน้ำหนักในส่วนผสมของดินเหนียว-ปูนขาวที่ทำการทดลองในสนาม

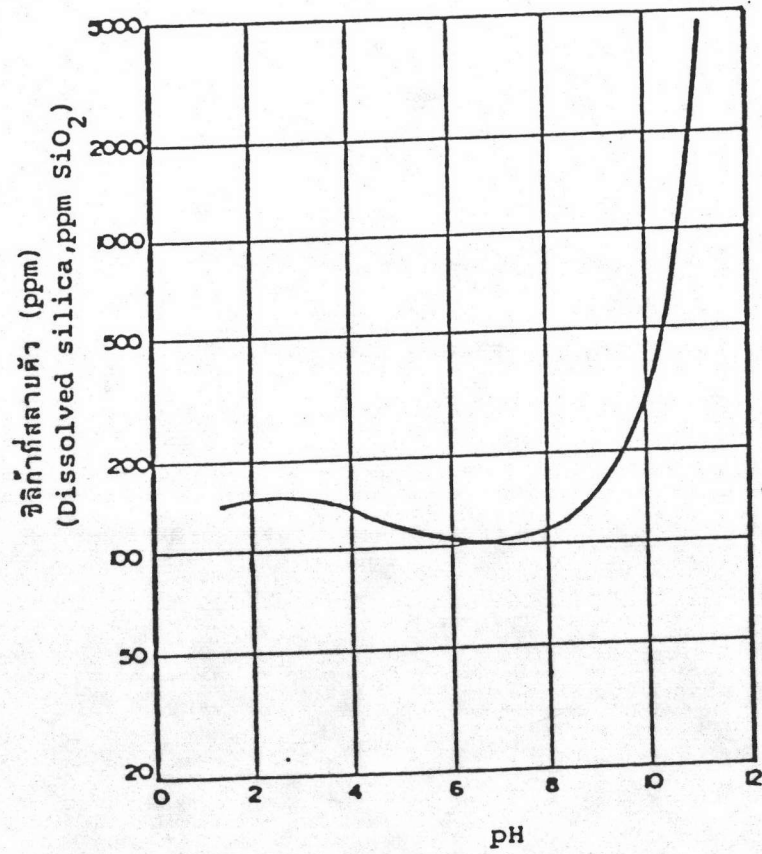
ถึงแม้ว่า Carbonation จะเป็นปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดตัวประสานอย่างอ่อน ๆ ก็ตาม แต่ปฏิกิริยานี้ก็ไม่ควรให้เกิด เพราะจะทำให้ปริมาณปูนขาวที่จะเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ลดลงไป Davidson และ Handy (1960) พบว่าตัวอย่างดินที่ได้ป้องกันไม่ให้ปูนขาวเกิดปฏิกิริยา Carbonation เสียก่อนนั้น เมื่อระยะเวลาในการบ่มนาน ๆ จะให้กำลังสูงกว่าตัวอย่างดินที่บ่มแล้วปล่อยให้ปูนขาวทำปฏิกิริยากับอากาศได้

2.2.4 Pozzolanic reaction Eades (1962) และ Thompson (1966) ได้อธิบายว่าในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียวด้วยปูนขาวเป็นปฏิกิริยาระหว่างซิลิกา และ/หรืออลูมินากับปูนขาวจะได้สารประกอบใหม่ ซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Pozzolanic โดยทั่วไป ซิลิกา และ/หรืออลูมินา ที่ใช้ในปฏิกิริยานี้ได้มาจากแร่ดินเหนียว ควอทซ์ เฟลสปา ไมก้า และสารประกอบพวกซิลิเกต หรืออลูมิโนซิลิเกตอื่น ๆ สารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Pozzolanic มีคุณสมบัติเป็นตัวประสานที่ถือว่าเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้กำลังของส่วนผสมดินกับปูนขาวเพิ่มขึ้น

เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวลงในดินจะทำให้ pH ของดินมีค่าสูงขึ้น Kranskopf (1959) และ Correns (1961) พบว่าที่ pH สูง การละลายตัว (Solubility) ของซิลิกาและอลูมินา จะเพิ่มมากขึ้นด้วย

Kranskopf (1959) ได้อธิบายถึงการละลายตัวของแร่พวกซิลิเกต (Silicate minerals) ว่าเป็นการที่มีซิลิกาละลายตัวลงไปในสารละลายไปเป็นสารซิลิเกตที่ไม่มีโครงสร้างเป็นผลึก (amorphous silicate) การละลายตัวของแร่พวกซิลิเกตนี้ Kranskopf พบว่ามีความสัมพันธ์กับ pH ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นว่าที่ pH สูง ๆ นั้นจะมีซิลิกาละลายตัวออกมาเพิ่มสูงมาก

Eades (1962) พบว่าที่ pH สูง ๆ นั้น ซิลิกาจะละลายตัวออกจากโครงสร้างของอนุภาคดินเหนียวมาทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} แล้วเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกต ปฏิกิริยานี้จะมีต่อไปตรารบไต่ที่ยังมี Ca(OH)_2 และซิลิกาอยู่ในส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาว



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างซิลิกาที่ละลายตัวออกมากับ pH (Krauskopf, 1959)

Eades และ Grim (1962) ได้พบว่าสารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่เป็นผลึกของ Calcium silicate hydrate Diamond, et al. (1964) ก็ได้ยืนยันว่า Calcium silicate hydrate นี้เป็นผลเนื่องจากปฏิกิริยาของดินเหนียวกับปูนขาว

Diamond, et al. (1964) ได้พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในส่วนผสมดินเหนียวกับปูนขาวที่มีความเป็นด่างสูง ๆ จะเกิดโดยการสลายตัวของสารประกอบซิลิเกตที่ขอบของอนุภาคดินเหนียว และทำปฏิกิริยากับปูนขาวเกิดเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น

Hilt และ Davidson (1961) Glenn และ Handy (1963) และ Diamond, et al. (1964) ได้พบว่าสารประกอบพวก Calcium aluminate hydrate ก็เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างดินเหนียวกับปูนขาวเช่นเดียวกัน จะเห็นว่าในสภาวะแวดล้อมที่มีความเป็นด่างสูง ๆ นั้น อนุภาคดินเหนียวจะมีการสลายตัวอย่างมาก ซึ่งไม่เพียงแต่ทำให้เกิดซิลิกา อีสระมาสู่สารละลาย ยังทำให้มีอลูมินาละลายตัวมาสู่สารละลายเพื่อมาทำปฏิกิริยากับปูนขาวอีกด้วย องค์ประกอบที่สำคัญซึ่งมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic

1. คุณสมบัติตามธรรมชาติของดิน

Thompson (1966) ได้ศึกษาพบว่าความสามารถของดินที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยา Pozzolanic นั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติตามธรรมชาติของดิน และยังสามารถศึกษาถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาว โดยใช้ Lime reactivity ซึ่งเป็นค่าผลต่างของ Unconfined compressive strength ของดินตามธรรมชาติกับ Maximum unconfined compressive strength ที่เกิดขึ้นเมื่อผสมปูนขาวที่ปริมาณต่าง ๆ แล้วบ่มเป็นเวลา 28 วัน ที่อุณหภูมิ 73 °F. (22.8 °C) เป็นเกณฑ์ในการศึกษา ผลจากการศึกษาพบว่า ดินบางชนิดไม่แสดงว่ามี Lime reactivity และดินบางชนิดก็มีการพัฒนากำลังมากขึ้นหลายเปอร์เซ็นต์โดยขึ้นอยู่กับส่วนผสมต่าง ๆ ดังนี้

1.1 ปริมาณอินทรีย์สารในดินจะมีผลทำให้ปฏิกิริยา Pozzolanic เกิดช้าลง Thompson (1966) ได้พบว่า อินทรีย์สารนั้นมี base exchange capacity สูงคือมีค่าสูงถึง 150-500 meq/100 gm ดังนั้น เมื่อผสมปูนขาวเข้าไปในดินเหนียวที่มีอินทรีย์สารอยู่ Ca^{2+} จะถูกนำไปใช้กับ exchange capacity ของอินทรีย์สาร จึงเป็นการลดปริมาณของปูนขาวที่จะไปทำปฏิกิริยา Pozzolanic ทำให้ lime reactivity มีค่าลดลง แต่เมื่อผสมปูนขาวลงไปจนมีปริมาณจนเพียงพอที่จะใช้สำหรับ exchange capacity ของอินทรีย์สารแล้ว ปฏิกิริยา Pozzolanic ก็จะเกิดขึ้น

เนื่องจากแรดินเหนียวเป็นแหล่งสำคัญของซิลิกา และ/หรือ อลูมินาที่จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยา Pozzolanic แต่ในดินที่มีปริมาณอินทรีย์สารอยู่พอสมควรนั้น Wiklander (1955) พบว่า Organic cation จะเกาะกับผิวของอนุภาคดินเหนียวและ Organic cation นี้จะไม่สามารถถูกแทนที่ โดย cation อื่นได้เสียทั้งหมด Cooper (1952) และ Iler (1955) ได้อธิบายว่าการที่มี Organic complex บนผิวของอนุภาคดินเหนียวแล้วไม่เกิดการสลายตัวของซิลิกา และ/หรือ อลูมินา เพราะ Masking effect คือ Organic cation จะเป็นตัวกันคอยป้องกันไม่ให้อนุภาคดินเหนียวสลายตัว

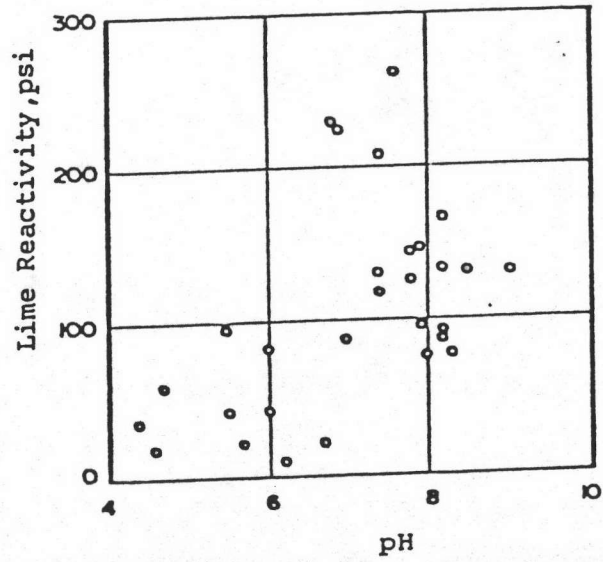
1.2 ปริมาณแรดินเหนียวจากการที่ซิลิกา และ/หรืออลูมินาที่ใช้ระหว่างปฏิกิริยา Pozzolanic ส่วนใหญ่ได้มาจากแรดินเหนียว ทั้งนี้เพราะอนุภาคดินเหนียวมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface) สูง จึงสามารถสลายตัวให้ซิลิกา และ/อลูมินาได้ดีกว่าสารที่มีขนาดใหญ่กว่า Iler (1955) Eades (1962) Eades และ Grim (1962) Diamond, et al. (1964)

1.3 ชนิดของแรดินเหนียว Thompson (1966) พบว่าชนิดของแรดินเหนียวนั้นมีผลอย่างมากต่อ lime reactivity โดยเฉพาะพวก mixed layer และมอนท์โมริลโลไนท์ จะสามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวได้ดีมาก

1.4 คุณสมบัติทางเคมีของดิน Thompson (1966) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH ของดินตามธรรมชาติกับ lime reactivity ตามรูปที่ 2.3 pH มีค่ามากขึ้น lime reactivity ก็จะมีค่าสูงขึ้น สำหรับดินที่มี pH ต่ำกว่า 7 นั้นจะมี lime reactivity น้อยกว่า 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

2. ชนิดของปูนขาว Laguros, et al. (1956) Lu, et al. (1957) และ Wang, et al. (1962) พบว่าชนิดของปูนขาวมีผลต่อปฏิกิริยา Pozzolanic Nonmal hydrated dolomitic lime โดยทั่วไปจะทำให้เกิดกำลังในส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวมากกว่า Hydrated high calcium lime Remus และ Davidson (1961) ได้สรุปผลการศึกษาดินเหนียวจาก 9 แหล่ง แล้วนำมาผสมกับปูนขาวชนิดต่าง ๆ พบว่า $\text{CaO} + \text{MgO}$ ทำให้กำลังเกิดสูงขึ้นมากในดินเหนียวพวกมอนท์โมริลโลไนท์และอิลไลท์ แต่สำหรับแรดินเหนียวพวกคาโอไลไนท์แล้ว ทั้ง $\text{CaO} + \text{MgO}$ และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ก่อให้เกิดกำลังสูงขึ้นพอ ๆ กัน

Lime reactivity 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หมายความว่าผลต่างของ maximum unconfined compressive strength ของดินเหนียวที่ผสมกับปูนขาวแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 73°F (22.8°C) เป็นเวลา 28 วัน กับ unconfined compressive strength ของดินตาม



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Lime-Reactivity กับ pH ของดินตามธรรมชาติ
(Thompson, 1966)

ธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

2.3 ทบทวนผลงานในอดีตเกี่ยวกับเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม

2.3.1 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางการบดอัด

Whitehurst และ Yoder (1952) ได้พบว่าเมื่อผสมปูนขาวแล้วความหนาแน่นแห้งจะลดลงแต่กำลังของส่วนผสมก็ไม่ได้ลดลงตาม โดยทำการทดลองและยืนยันข้อความดังกล่าวคือ ทดลองเพิ่มส่วนผสมปูนขาวเข้าไป 5% พบว่าหน่วยน้ำหนักจะน้อยกว่าดินที่ไม่ได้ผสมปูนขาว แต่กำลังของส่วนผสมกับเพิ่มขึ้นถึง 60 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

Herrin และ Mitchell (1961) พบว่าเมื่อทำการบดอัดด้วยพลังงานจำนวนเดียวกัน ความหนาแน่นแห้งของส่วนผสมดิน-ปูนขาว จะมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นแห้งของดินตามธรรมชาติที่บดอัดด้วยพลังงานเดียวกัน และเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวความหนาแน่นแห้งก็จะลดลงตามความหนาแน่นแห้งในดินโดยทั่วไปจะลดลงประมาณ 2.5% โดยน้ำหนัก แต่ในดินพวก Micaceous Silt นั้นความหนาแน่นแห้งจะลดลงถึง 5% เมื่อผสมด้วยปูนขาว 5%

เมื่อผสมปูนขาวเข้าไปในดินนั้นปริมาณความชื้นที่พอเหมาะจะสูงขึ้น ถึงแม้ว่าจะผสมปูนขาวด้วยปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ตาม และการเพิ่มปริมาณปูนขาวเข้าไปจนถึงปริมาณปูนขาว จำนวนหนึ่ง ที่ทำให้ปริมาณความชื้นที่พอเหมาะเพิ่มขึ้นอย่างมาก การเพิ่มปริมาณปูนขาวเข้าไปอีก จะทำให้ปริมาณความชื้นที่พอเหมาะนี้เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย Herrin และ Mitchell (1961)

ชนิดของปูนขาวจะมีผลต่อคุณสมบัติในการบดอัดเพียงเล็กน้อย กล่าวคือเมื่อใช้ CaO แล้วปริมาณความชื้นที่พอเหมาะจะสูงกว่าดินที่ใช้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เพียงเล็กน้อย

Herrin และ Mitchell (1961) พบว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นแห้งเมื่อผสมด้วยปูนขาวนั้น ไม่มีความสัมพันธ์กับชนิดของดิน ค่า Plasticity Index หรือความหนาแน่นแห้งของดินตามธรรมชาติ

Woo Siu-Mun (1971) รายงานว่าการเพิ่มปริมาณปูนขาวจะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งลดลง และทำให้ปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินเพิ่มขึ้น

ความยืดขาดในการบดอัดส่วนผสมจะทำให้ค่าความหนาแน่นลดลง ซึ่งอธิบายได้ว่าเกิดการต้านทานต่อการบดอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากพลังงานในการบดอัดจะต้องไปทำลาย การยึดประสานที่เกิดขึ้นแล้ว Croft (1964)

2.3.2 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านกำลังของส่วนผสม

คุณสมบัติทางด้านกำลังของส่วนผสมดินกับปูนขาวสามารถหาได้หลายวิธี อาทิ เช่น Unconfined Compression Test, California Bearing Ratio (CBR) และ Triaxial Test แต่ที่นิยมใช้กันเพราะสะดวกและแพร่หลายก็คือ Unconfined Compression Test

Thompson (1966) สรุปว่า Unconfined Compressive Strength เป็นดัชนีที่สามารถใช้วัดถึงปฏิกิริยา Pozzolanic ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อผสมดินเหนียวด้วยปูนขาวที่อัตราส่วนของส่วนผสมต่าง ๆ ทั้งนี้เพราะค่า Unconfined Compressive Strength จะบอกลักษณะของส่วนผสม

Mitchell และ Hooper (1961) พบว่ากำลังของส่วนผสมดิน-ปูนขาวขึ้นอยู่กับองค์ประกอบสำคัญหลายประการ เช่นชนิดของดิน ปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสม ชนิดของปูนขาว ระยะเวลาในการบ่ม อุณหภูมิในการบ่ม ปริมาณน้ำที่ใช้ผสม ความหนาแน่นของตัวอย่างและระยะเวลาในการผสม องค์ประกอบดังกล่าวจะมีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้วกำลังของส่วนผสมดิน-ปูนขาวจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนขาว ระยะเวลาในการบ่มและความหนาแน่นของตัวอย่างดินเพิ่มขึ้น

Pictsch และ Davidson (1962) รายงานว่าโดยทั่วไปปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมที่ให้กำลังสูงสุดจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขการบ่ม Eades และGrim(1962) ปริมาณปูนขาวที่สูงกว่าปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมจะให้ผลทางด้านกำลังต่ำกว่า Woo Siu-Mun (1971) ปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมทางด้านกำลังขึ้นอยู่กับชนิดของดินและระยะเวลาบ่ม Pongsit(1975) ปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมและความชื้นที่เหมาะสมให้ค่ากำลังสูงสุดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่บ่ม

Mitchell et al (1961) ศึกษาถึงผลของความล่าช้าในการบดอัด Organic expansive clay soil ด้วยปูนขาวชนิด dolomitic hydrated 4% พบว่าช่วง

เวลาระหว่างการผสมและการบดอัดจะมีผลต่อค่ากำลังและการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ความยืดขาดในการบดอัดจะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้ง และค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ค่ากำลังจะลดลงประมาณ 30% เมื่อล่าช้าไปเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

Diamond และ Kinter (1965) ได้ศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมดินเหนียวด้วยปูนขาว และทำการศึกษากจากผลงานในอดีตพบว่า

- ปฏิกิริยา cation exchange และ Flocculation-Agglomeration นั้นไม่ใช่ปฏิกิริยาหลักที่ก่อให้เกิดกำลังของส่วนผสม

- ปฏิกิริยา Carbonation แม้ว่าจะให้สารประกอบคาร์บอเนต ซึ่งเป็นตัวประสานอย่างอ่อน ๆ ก็ตาม แต่ถ้าป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้แล้ว เมื่อเวลาในการบ่มมากขึ้น ทำให้ส่วนผสมมีกำลังมากกว่าในตัวอย่างที่ปล่อยให้เกิดปฏิกิริยา Carbonation ระหว่างปูนขาวกับอากาศ

- ปฏิกิริยา Pozzolanic เป็นปฏิกิริยาสำคัญที่ทำให้เกิดสารประกอบที่เป็นตัวประสานทำให้กำลังของส่วนผสมเพิ่มขึ้น

- ปฏิกิริยา Carbonation มีผลต่อกำลังของส่วนผสมดิน-ปูนขาวน้อยมาก เพราะว่าเป็นแรงประสานอ่อน ๆ

Hilt และ Davidson (1961) McCaleb (1962) Glonn (1963) Glonn และ Handy (1963) และ Wany (1966) ได้ศึกษาแล้วพบว่า ปฏิกิริยา Pozzolanic ก่อให้เกิดสารประกอบใหม่คือ Calcium silicate hydrate และ calcium aluminate hydrate เกิดขึ้นหลายรูปแบบตามอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยา

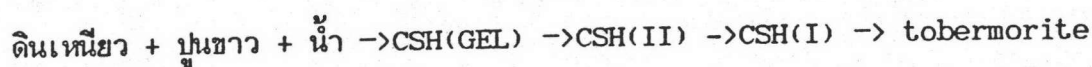
Sonder และ Smother (1957) Taylor และ Moohad (1960) Midgley และ Chopra (1960) Locher (1962) และ Kalousek (1964) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของ Calcium silicate hydrate พบว่าทุกรูปแบบของ calcium silicate hydrate มีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน

Lea (1950) Boque (1955) และ Czernin (1962) พบว่า Calcium aluminate hydrate และ calcium silicate hydrate ก็เกิดขึ้นในปฏิกิริยา Hydration ของ Portland cement ซึ่งเชื่อว่าเป็นตัวประสานที่ก่อให้เกิดกำลังใน

Portland cement concrete

Thompson (1966) ปริมาณอินทรีย์สารที่อยู่ในดินมีผลต่อปริมาณปูนขาวเป็นอย่างมากเนื่องมาจากจะไปหน่วงปฏิกิริยา Pozzolanic คือ Organic cation อาจจะทำให้ขวางไม่ให้ซิลิกา และ/หรือ อลูมินาจากดินเหนียวทำปฏิกิริยากับปูนขาว

Ruff และ Ho(1966) พบว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังในส่วนผสมดิน-ปูนขาว ที่บ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นของสารประกอบที่ได้จากปฏิกิริยาดังนี้



Ruff และ Ho(1966) ได้ใช้วิธีของ X-ray diffraction เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมเมื่อผสมปูนขาวกับเบนโทไนท์ (Bentonite) จากการศึกษาพบว่า มีสารประกอบใหม่เกิดขึ้นคือที่เวลาในการบ่ม 1 วัน จะเกิด tobermorite hydrate group ขึ้น ซึ่งพบจาก peak 3.07 และ 1.82 Å และ C_4AH_{13} เกิดขึ้นเล็กน้อยโดยพบจาก peak 7.5, 4.1, 3.99 และ 2.88 Å สารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นนี้จะพบในทุกอุณหภูมิของการบ่มและพบว่าที่ระยะเวลาในการบ่ม 1 วันนี้ มีการเปลี่ยนแปลงในปริมาณ Acid soluble silica และ alumina ที่ 5 °ซ น้อยมาก แต่พบว่าที่อุณหภูมิในการบ่มเพิ่มเป็น 60 °ซ มีการเปลี่ยนแปลงแสดงว่าเมื่อระยะเวลาในการบ่ม 1 วัน ที่อุณหภูมิ 5 °ซ ซิลิกา และอลูมินา จะสลายตัวออกมาจากอนุภาคดินเหนียวมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 60 °ซ ปริมาณซิลิกาและอลูมินาจะสลายตัวออกมามากกว่า

Taylor (1961) ได้ศึกษาโดยใช้ปูนขาวผสมกับ Quartz paste พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดบนผิวของควอทซ์ เริ่มโดยจะเกิดสารประกอบใหม่ CSH (II) ในขณะที่ส่วนผสมยังมีปริมาณปูนขาว และปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปจนปริมาณปูนขาวในส่วนผสมหมดลง ต่อมา CSH(II) จะทำปฏิกิริยากับกับควอทซ์ที่เหลืออยู่เป็น CSH (I) จนกระทั่งอัตราส่วน C/S ลดลงเหลือ 0.8 ถ้าอุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มพอ CSH (I) จะตกผลึกใหม่ (recrystallize) เป็น Tobermorite เมื่ออัตราส่วน C/S ต่ำกว่า 0.8 CSH(I) หรือ Tobermorite จะทำปฏิกิริยากับควอทซ์ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยากับปูนขาวอย่างช้า ๆ เกิดเป็น Gyronite

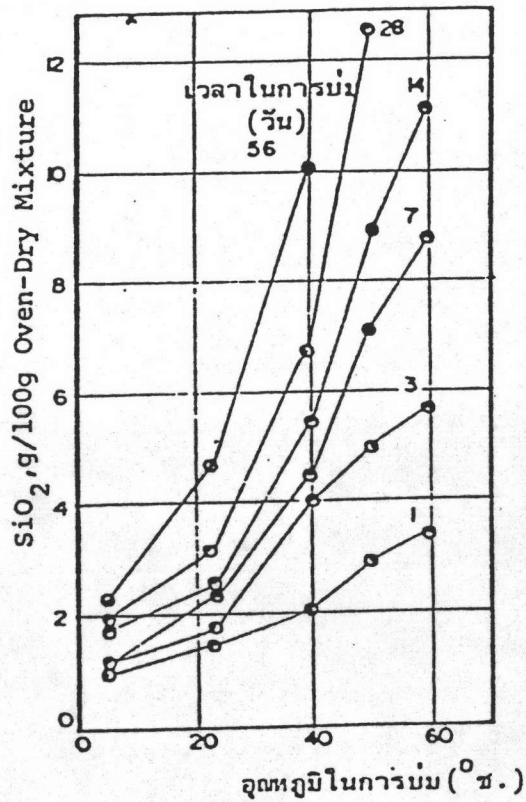
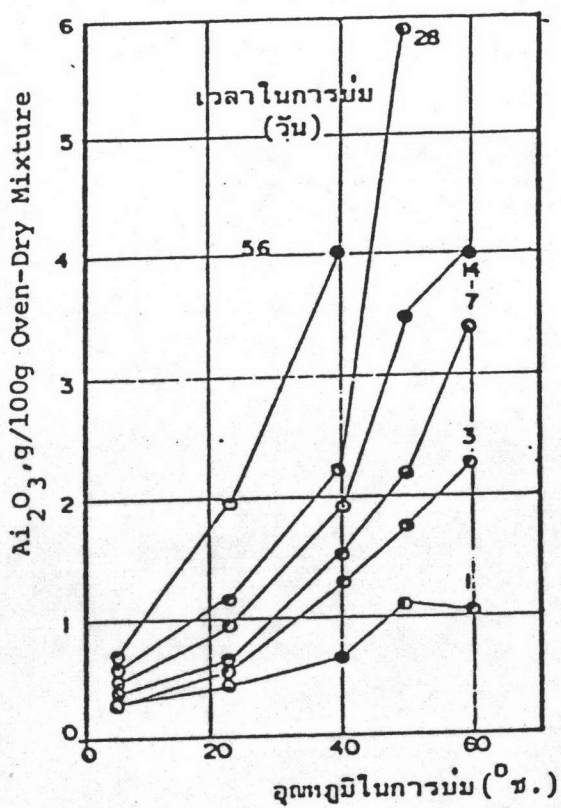
เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มเป็น 3 วัน พบว่ามี peak เช่นเดียวกับที่ 1 วัน แต่พบ C_4SH_n รูปแบบอื่น ๆ แม้ว่าจะเป็น weak peak แต่พบว่าที่อุณหภูมิในการบ่มจะเกิด peak ที่ 3.03 \AA และนอกจากนี้ยังพบว่าเกิด CSH (II) ด้วย ปริมาณ acid soluble silica และ alumina จะเพิ่มมากขึ้นกว่าตัวอย่างที่บ่ม 1 วัน ผลของ acid soluble silica และ alumina ที่เวลาในการบ่มต่าง ๆ กับอุณหภูมิได้แสดงในรูปที่ 2.4 Ruff และ Ho (1966) ยังสรุปว่าที่อุณหภูมิในการบ่มหนึ่ง ๆ ปริมาณ Acid soluble silica และ/หรือ alumina ที่เกิดขึ้นจะแปรผันโดยตรงกับกำลังของส่วนผสม

Herrin และ Mitchell (1961) พบว่าองค์ประกอบที่สำคัญที่มีผลต่อปฏิกิริยา pozzolanic มีรายละเอียดดังนี้

ก. ปริมาณปูนขาวโดยทั่วไปกำลังของส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมเพิ่มมากขึ้น โดยที่ปริมาณปูนขาวที่เหมาะสม (Optimum lime content) นั้นอาจมีหรือไม่มีก็ได้ขึ้นกับระยะเวลาในการบ่ม McDowell และ Moore (1948) Spangler และ Patel (1949) Whitehurst และ Yoder (1952) Lund และ Ramsey (1959) McDowell (1959) Davidson et al (1963) และ Dumbleton (1962) ได้รายงานว่าค่ากำลังรับแรงอัดของของส่วนผสมดิน-ปูนขาวเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาว จนกระทั่งปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่งค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลง

ข. ชนิดของปูนขาว มีผลต่อกำลังของส่วนผสมเช่นเดียวกับที่กล่าว แล้ว ในหัวข้อ 2.1.1 Thompson (1967) รายงานว่าที่ปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมสำหรับ dolomitic lime ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า Calcitic lime Sherman, et al. (1972) พบว่า Quick lime มีประสิทธิภาพมากกว่า hydrated lime ในการปรับปรุงค่ากำลังรับแรงอัดของดิน

ค. ชนิดของแร่ดินเหนียว การที่กำลังของดินเพิ่มขึ้นเมื่อผสมปูนขาวลงไปนั้น ขึ้นกับ pozzolan (สาร siliceous หรือ aluminous) ในดิน เมื่อมี pozzolan ที่ต้องการและสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับปูนขาวแล้ว จะเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้สารประกอบใหม่ที่จะทำให้กำลังของส่วนผสมนั้นเพิ่มมากขึ้น สำหรับดินที่มี pozzolan น้อย หรือ แทบไม่มีเลยเมื่อเติมปูนขาวลงไปก็จะเป็นการพัฒนากำลังของส่วนผสม เนื่องจากแร่ดินเหนียวมีขนาดเล็ก และพื้นที่ผิวจำเพาะมาก จึงสลายตัวให้ pozzolan มากกว่าสารอื่น



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง acid soluble alumina และ silica ที่เวลาในการบ่มต่างๆกับอุณหภูมิ (Ruff และ Ho, 1966)

ง. ความหนาแน่นของส่วนผสมจะมีผลต่อกำลังของส่วนผสม กล่าวคือเมื่อส่วนผสมถูกบดอัดให้มีหน่วยน้ำหนัก (Unit weight) สูงขึ้นโดยใช้พลังงานในการบดอัดสูงขึ้น

จ. ระยะเวลาในการบ่ม เมื่อเวลาในการบ่มมากขึ้นกำลังของส่วนผสมจะเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยทั่วไปแล้วกำลังของส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นเร็วมากในช่วงแรกและเมื่อเวลาในการบ่มมากขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังจะลดน้อยลงจนถึงระยะเวลาหนึ่งที่กำลังของส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นน้อยมาก Ruff และ Ho (1966) พบว่าเมื่อเวลาในการบ่มมากขึ้นจะมีซิลิกา และ/หรืออลูมิน่า สลายตัวจากดินและมาทำปฏิกิริยากับปูนขาวมากขึ้นด้วย จึงทำให้กำลังของส่วนผสมเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น

ฉ. อุณหภูมิในการบ่มอัตราการเพิ่มของกำลังในส่วนผสมจะสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิในการบ่มที่อุณหภูมิในการบ่มต่ำ ๆ การเพิ่มขึ้นของกำลังจะช้ามากแต่เมื่อบ่มที่อุณหภูมิปกติ อัตราการเพิ่มของกำลังจะสูงขึ้นและเมื่อบ่มที่อุณหภูมิสูง (140 °ฟ หรือ 60 °ซ) ส่วนผสมจะมีกำลังเพิ่มสูงขึ้นมากเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น การที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าที่อุณหภูมิสูงการสลายตัวของ ซิลิกา และ/หรือ อลูมิน่าจะมีค่ามาก

Laguros, Davidson, et al. (1956) ได้ทดลองบ่มตัวอย่างดินที่ 140 °ฟ (60 °ซ) เป็นเวลา 10 วัน ปรากฏว่าตัวอย่างดินมีกำลังเท่ากับตัวอย่างดินที่บ่มที่อุณหภูมิ 70 °ฟ (21 °ซ) เป็นเวลาถึง 3-4 เดือน

Ruff และ Ho (1966) พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการบ่มเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ซิลิกา และ/หรือ อลูมิน่าสลายตัวออกมาจากรีดินเหนียวเพิ่มมากขึ้น

ดินที่มีการพัฒนากำลังมากขึ้นนั้น จะต้องเป็นดินที่ให้ซิลิกา และอลูมิน่าออกมาทำปฏิกิริยาได้มากกว่าดินชนิดอื่น

Pietsch และ Davidson (1962) พบว่าปูนขาวจะเพิ่มกำลังให้กับดินเกือบทุกชนิด ภายใต้เงื่อนไขในการบ่ม ปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมจะให้กำลังสูงสุดและเมื่อปริมาณขาวมากกว่านี้จะให้ค่ากำลังที่ต่ำกว่า

O' Flaherty และ Andrew (1967) พยายามจะเพิ่มเสถียรภาพของทรายด้วยปูนขาว 4% และผลที่ออกมาก็ไม่เป็นที่พอใจ กำลังสูงสุดที่ได้รับเพียง 25 ปอนด์/ตารางนิ้ว

Pietsch และ Davidson (1962) สังเกตว่าปูนขาวจะไม่ทำปฏิกิริยากับดินที่มีขนาดใหญ่กว่าทรายละเอียด (Silt size)

Laguros, et al. (1956) พบว่า Quick lime โดยทั่วไปจะให้ประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินมากกว่า hydrate limes เช่นให้ค่าความเป็นพลาสติกต่ำกว่าลดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร และให้กำลังสูงกว่า อย่างไรก็ตามในการปฏิบัติ Quick lime มีอันตรายต่อมือที่จับต้อง

Mateos (1964) แนะนำว่าในการเพิ่มเสถียรภาพของดินด้วยปูนขาวควรทำในฤดูร้อน และการใช้ไอน้ำบ่มตัวอย่างเพื่อให้ได้กำลังที่สูง

2.3.3 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านความคงทน

Corson (1953) เป็นผู้แนะนำวิธีการเตรียมตัวอย่างและการบ่ม คือ บดอัดตัวอย่างให้มีขนาดเท่า Proctor ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม ด้วยก้อนขนาด 10 ปอนด์ เป็นจำนวน 3 ชั้น ๆ ละ 25 ครั้ง และบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิ 140 °F

Viskochell, et al. (1957) พบว่าการพองตัวของตัวอย่างจะลดลงในขณะที่ยานวนรอบของการทดลอง Wetting & Drying เพิ่มขึ้น

Davidson, Hoover และ Handy (1958) ได้ศึกษาแล้วพบว่า การบดอัดด้วยความหนาแน่นที่สูงกว่าการบดอัดแบบมาตรฐานจะให้ค่าความต้านทานของส่วนผสมดิน-ปูนขาว ต่อขบวนการ Wetting & Drying สูงกว่าการบดอัดส่วนผสมด้วยความหนาแน่นแบบมาตรฐาน

Davidson (1961) พบว่าพลังงานในการบดอัดที่สูงกว่าการบดอัดแบบมาตรฐาน จะมีความคงทนมากกว่าการบดอัดแบบมาตรฐานและอุณหภูมิในการบ่ม ถ้าสูงกว่า 70 °F ก็จะให้ค่าความคงทนที่สูงกว่าบ่มตัวอย่างที่ 70 °F