



บทที่ 2

ทฤษฎีและทบทวนผลงานในอดีต

การปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียวโดยใช้ปูนขาวนั้น เป็นวิธีการหนึ่งที่ได้ผลดีและใช้กันอย่างแพร่หลาย นอกจากนี้ปูนขาวยังเป็นวัสดุราคาถูกจึงทำให้ผู้สนใจและทำการศึกษากันอย่างมากในอดีต ผลการศึกษาที่ผ่านมาได้มีการเสนอทฤษฎีเพื่อใช้ประกอบการอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมต่าง ๆ ของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวเป็นอย่างมาก ในบทนี้จะได้กล่าวถึงทฤษฎีและทบทวนผลงานในอดีตที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

- ความคิดพื้นฐาน (Basic concept)
- ปฏิกริยาพื้นฐานของดินเหนียวกับปูนขาว (Basic reaction of clay-lime mixture)
- ทบทวนผลงานในอดีต เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม

2.1 ความคิดพื้นฐาน

2.1.1 แร่ดินเหนียว (clay minerals)

"ดินเหนียว (clay)" เมื่อใช้เป็นคำที่บ่งบอกถึงขนาดจะหมายถึง ส่วนประกอบของดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.002 มม. แต่ถ้าเป็นความหมายทางด้านแร่แล้วจะใช้คำว่า "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 มม. และในทำนองเดียวกันแร่ที่ไม่ใช่ดินเหนียว (nonclay minerals) บางตัวนั้นก็อาจมีขนาดเล็กกว่า 0.002 มม.

แร่ดินเหนียวมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดแต่ที่พบกันมากในแถบภูมิอากาศแบบประเทศไทยนี้มี 3 ชนิด คือ คาโอลิไนท์ (Kaolinite) อิลไลต์ (Illite) และมอนท์โมริลโลไนท์

(Montmorillonite) โครงสร้างพื้นฐานและคุณสมบัติของแร่ดินเหนียวแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ทำให้การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม เมื่อผสมปูนขาวเข้าไปในดินเหนียวแต่ละชนิดจึงแตกต่างกันดังจะกล่าวถึงรายละเอียดในตอนต่อไป

2.1.2 Double layer

อนุภาคดินเหนียวจะมีประจุไฟฟ้าลบอยู่ตามผิวซึ่งเกิดขึ้นเนื่องมาจากผลหลายประการกล่าวคือ

1. การเกิด isomorphous substitution ซึ่งเป็นการแทนที่ของ Si^{4+} โดย Al^{3+} ใน silica sheet หรือการแทนที่ของ Al^{3+} โดยอะตอมที่มีวาเลนซ์ 2 ใน octahedral sheet ทำให้มีประจุไฟฟ้าลบที่ไม่ถูกทำให้สมดุลย์ในโครงสร้างของผลึก

2. การเกิด broken bond กล่าวคือตามขอบของ silica-alumina unit จะมีประจุไฟฟ้าซึ่งจะถูกทำให้สมดุลย์ได้ด้วย cations ที่ดูดซึมเข้ามา Wiklander (1964) ได้อธิบายว่าเมื่อเกิด broken bond ขึ้นแล้ว hydroxyls จะเข้าไปหา Silicon ของ tetrahedral unit ที่แตกออกมาและจะ ionize ให้เกิดเป็น



ซึ่งจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าลบบนโครงสร้างผลึก

3. เกิดจากการที่ H^+ ของ hydroxyl ถูกแทนที่โดย cation (Grim 1968)

ประจุลบที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวนี้จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าลบบรรอบตัวมันและอาจถูกทำให้สมดุลย์ได้โดยประจุบวก อาทิเช่น Na^+ และ Ca^{2+} เป็นต้น โดยทั่วไปอนุภาคดินเหนียวจะมีน้ำอยู่โดยรอบทำให้ประจุบวกเหล่านี้สามารถเคลื่อนตัวออกห่างจากผิวได้บ้างแต่จะยังอยู่ภายในอำนาจของสนามไฟฟ้าลบบรรอบอนุภาคดินเหนียว โดยเฉพาะบริเวณใกล้ผิวของอนุภาคดินเหนียวจะมีประจุบวกอยู่กันอย่างหนาแน่นและจะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะทางที่ห่างออกไป ประจุลบที่อยู่บนผิวดินและประจุบวกที่กระจายอยู่ในน้ำรอบ ๆ อนุภาคดินเหนียวนี้รวมเรียกว่า

diffuse double layer หรือ double layer ตามรูปที่ 2.1 double layer นี้จะมีผลต่อคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของแร่ดินเหนียวเป็นอย่างมากซึ่งจะได้กล่าวถึงในตอนต่อไป

2.1.3 แรงระหว่างอนุภาค

แรงระหว่างอนุภาคที่กระทำต่อกันนั้นมีทั้งแรงผลักร (Repulsive force) และแรงดึงดูด (Attractive force) ซึ่งแรงแต่ละชนิดมีสาเหตุที่เกิดขึ้นดังนี้

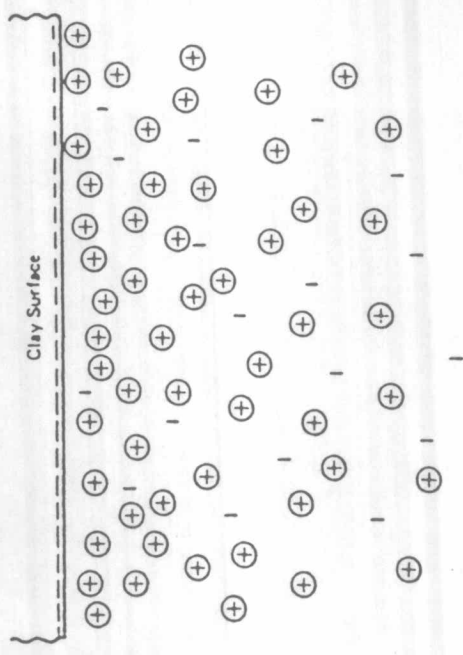
2.1.3.1 แรงผลักร (Repulsive force)

แรงผลักรเกิดขึ้นจากเหตุหลายประการ กล่าวคือ

1). Born repulsion เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคดินเหนียวเข้ามาอยู่ใกล้กันมากจนเกิดการซ้อนกันของหมอกอิเล็กตรอน (electron cloud) ในอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกัน จะทำให้เกิดแรงผลักรกันสูงมาก โดยที่การจัดเรียงตัวของอนุภาคอาจเป็น face to face, edge to edge หรือ edge to face ก็ได้

2). แรงผลักรที่เกิดเนื่องมาจากพลังงาน hydration ที่ผิวอนุภาค และที่อออน แรงผลักรอันเกิดจากพลังงาน hydration นี้จะเกิดสูงมากเมื่อระยะระหว่างอนุภาคอยู่ใกล้กันมาก (ระยะห่างระหว่างผิวของอนุภาคดินเหนียวประมาณ 20 \AA) จากการศึกษาของ Van Olphen (1963) พบว่าพลังงานที่จะไล่น้ำที่อยู่ระหว่างอนุภาคดินหรือที่อออนให้ออกไปนี้จะต้องมีค่าสูงถึง $0.05-0.1 \text{ จูล/ม}^2$. แต่แรงผลักรที่เกิดขึ้นนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะห่างระหว่างอนุภาคดินหรืออออนเพิ่มมากขึ้น

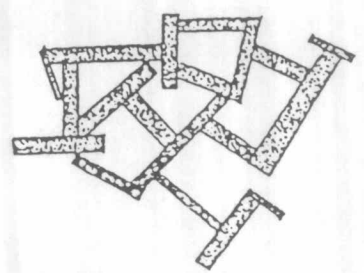
3). Double layer repulsion เมื่อระยะห่างระหว่างอนุภาคดินเหนียวเกินกว่าที่จะเกิดแรงผลักร 2 แอมที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ผนัง double layer จะเป็นสิ่งสำคัญที่ก่อให้เกิดแรงผลักร โดยเมื่ออนุภาคดินเหนียวมาอยู่ใกล้กันมากจนผนัง double layer เกิดซ้อนกัน จะเกิดแรงผลักรซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากประจุที่เหมือนกันในผนัง double layer แรงผลักรระหว่างผนัง double layer นี้จะ sensitive มากต่อ cation valence และความเข้มข้นของอออน (ion concentration) ดังจะกล่าวถึงรายละเอียดในภาคผนวก ก.



รูปที่ 2.1 Double layer (Mitchell,1976)



(ก) โครงสร้างแบบ เป็นระ เบียบ (Dispersed Structure)



(ข) โครงสร้างแบบระ เกะระกะ (Flocculated Structure)

รูปที่ 2.2 โครงสร้างดิน (Lambe,1958)

4). Osmotic repulsion เกิดขึ้นเนื่องมาจากความเข้มข้นของออสโมนในของเหลวที่กึ่งกลางระหว่างอนุภาคสูงกว่าสารละลายภายนอก น้ำจึงไหลจากภายนอกซึ่งมีความเข้มข้นของออสโมนต่ำกว่า เข้าสู่ชั้นน้ำ double layer ทำให้เกิดความดันที่เรียกว่า Osmotic pressure ซึ่งจะผลักให้อนุภาคแยกจากกัน

2.1.3.2 แรงดึงดูด (Attractive force)

แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคเกิดจากเหตุผลหลายประการ กล่าวคือ

1). Electrostatic attraction เมื่อขอบและผิวของอนุภาคดินเหนียวมีประจุแตกต่างกันวงน้ำ double layer ที่ขอบและผิวของอนุภาคดินเหนียวก็จะมีประจุแตกต่างกัน จึงเกิดการดึงดูดกันระหว่างวงน้ำ double layer จากการศึกษาของ Mc Ewan (1953) พบว่าระยะห่างระหว่างอนุภาคดินเหนียวที่จะเกิดการดึงดูดแบบนี้ต้องห่างกันไม่เกิน 30 \AA

ในดินที่มีเนื้อละเอียด (fine grained Soil) เมื่อถูกรวมให้แห้ง จะพบว่าแต่ละอนุภาคดินจะเกาะติดกันอันเป็นผลเนื่องมาจาก electrostatic attraction

เมื่อ V_1 และ V_2 เป็นศักย์ไฟฟ้า (Potential) ของอนุภาคที่ห่างกันเป็นระยะ d จากการศึกษาของ Ingles (1962) พบว่าจะเกิดแรงดึงดูดกัน มีค่าเท่ากับ

$$F = \frac{4.4 \times 10^{-6} (V_1 - V_2)^2}{d^2}$$

เมื่อ F เป็นแรงดึงดูด . นิวตัน/ม²
 d ระยะห่างระหว่างอนุภาค . ไมโครมิเตอร์
 V_1, V_2 เป็นศักย์ไฟฟ้า . มิลลิโวลต์

แรงดึงดูดนี้จะเพิ่มขึ้นกับขนาดของอนุภาคและจะมีความสำคัญมากเมื่อระยะห่างระหว่างอนุภาคน้อยกว่า 25 \AA

2). Primary valence bonding เป็นแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นใน ระยะใกล้ ๆ โดยแรงดึงดูดนี้โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นในปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างอนุภาคหรือ ระหว่างอนุภาคกับของเหลวที่อยู่รอบ ๆ โดยระยะห่างระหว่างอนุภาคจะต้องน้อยกว่า 3 \AA Primary valence bonding ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษานี้มีด้วยกัน 2 ประเภทคือ

- Covalent bonding
- Ionic bonding

2.1). Covalent bonding เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน เป็น จำนวน 1 ตัวหรือมากกว่าของนิวเคลียส 2 ตัว ทำให้มีอิเล็กตรอนใน shell วงนอกสุด ของแต่ละอะตอมครบและเกิดการสมดุลงของอิเล็กตรอน covalent bonding นี้โดยทั่วไป จะเกิดในพวกก๊าซ เช่น H_2 , Cl_2 และ CH_4 เป็นต้น ในสภาพของแข็ง Covalent bonding จะเกิดระหว่างอะตอมของพวกที่ไม่ใช่โลหะ (nonmetallic) กับ O_2 , Cl_2 , N_2 และ F_2 เป็นต้น

2.2). Ionic bonding เป็นแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างกันทาง ไฟฟ้าของประจุอาจเป็นเพราะอะตอมได้รับอิเล็กตรอนหรือสูญเสียอิเล็กตรอน จึงทำให้เกิด ประจุไฟฟ้าลบและบวกในแต่ละอะตอม สำหรับอะตอมที่เกิดประจุไฟฟ้าบวกนั้นจะเรียกว่า cation ส่วนในอะตอมที่มีประจุไฟฟ้าลบเรียกว่า Anion อะตอมแต่ละอะตอมจำเป็นต้อง มีอิเล็กตรอนอีกเล็กน้อยเพื่อที่จะทำให้ shell วงนอกสุดเกิดการสมดุลง แต่ไม่สามารถ จะให้อิเล็กตรอนร่วมกันเป็นแบบ Covalent bonding ได้เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่มีอยู่ในแต่ละอะตอมแตกต่างกันจึงทำให้เกิดการดึงดูดกัน

ionic bonding เป็นการเกาะกันของอะตอมแบบไม่มีทิศทางเพราะ cation จะดึงดูด Anion ที่อยู่โดยรอบ เนื่องจาก ionic bonding นี้ทำให้เกิดการแยก กันระหว่างศูนย์กลางประจุบวกและลบในโมเลกุล ดังนั้น โมเลกุลจะจัดเรียงตัวเองในสนาม ไฟฟ้าทำให้เกิดขั้วไฟฟ้าขึ้น 2 ขั้ว ซึ่งเรียกว่า dipole กำลังของ dipole จะใช้ dipole moment, μ เป็นสิ่งเปรียบเทียบโดย

$$\mu = d \cdot \delta e$$

เมื่อ $\pm \delta e$ เป็นประจุไฟฟ้า 2 ประจุ

e เป็นประจุของอิเล็กตรอน (electronic charge)

d เป็นระยะห่างระหว่างประจุ

Covalent bonding ก็ทำให้โมเลกุลจัดเรียงตัวเป็น dipole ได้เช่นเดียวกับ ionic bonding ในแร่ดินเหนียวพวก silicate mineral ส่วนใหญ่การยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคจะยึดกันโดย covalent bonding และ ionic bonding

3). Hydrogen bond แรงดึงดูดประเภทนี้เกิดขึ้นระหว่างประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันของโมเลกุลที่เกิดเป็น dipole ถ้าเกิด H_2 เป็นขั้วบวกของ dipole แล้วแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นนี้จะเรียกว่า hydrogen bond hydrogen bond จะเกิดกับอะตอมที่มี electronegativity สูง ๆ เช่นพวก O_2 และ F_2 เพราะว่าอะตอมของธาตุที่กล่าวมานั้นจะทำให้เกิด dipole ที่แข็งแรงมากที่สุด ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนของ H_2 ถูกนำไปใช้ในการยึดเกาะตัวอย่างเช่น น้ำจะทำให้เหลือแต่โปรตอน เนื่องจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันของ H_2 และ O_2 ในโมเลกุลของน้ำ จะทำให้อิเล็กตรอนมารวมอยู่ระหว่างอะตอมของธาตุทั้ง 2 ทำให้ O_2 อะตอมเป็นขั้วลบของ dipole และ H_2 โปรตอนจะเป็นขั้วบวก ขั้วบวกจะดึงดูดกับขั้วลบในโมเลกุลน้ำอีกโมเลกุลหนึ่ง

กำลังของ hydrogen bond นี้จะมากกว่าแรงดึงดูดแบบ Van der Waals เพราะว่าประจุไฟฟ้าของ H_2 นั้นมีขนาดเล็ก Hydrogen bond เป็นแรงดึงดูดที่มีความสำคัญมากในแร่ดินเหนียวบางชนิดและในการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคดินเหนียวกับน้ำ

4). Van der Waals force เป็นแรงดึงดูดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic) ซึ่งเกิดจากการแกว่งไปมาของ dipole ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กซึ่งจะทำให้เกิดการดึงดูดกัน แรงดึงดูดชนิดนี้มักจะมีอยู่ระหว่างอนุภาคในสารแขวนลอย

จากการศึกษาโดย London (1937) Casimir และ Polder (1948) ได้ศึกษาพบว่าพลังงานในการดึงดูดกันระหว่างอนุภาคที่ขนานกันมีค่าดังนี้

$$V_A = - \left[\frac{A}{48\pi} \frac{1}{d^2} + \frac{1}{(d+\delta)^2} - \frac{2}{(d+\delta/2)^2} \right]$$

- เมื่อ V_A เป็นพลังงานในการดึงดูดกันระหว่างโมเลกุล 2 โมเลกุล
 d เป็นระยะทางครึ่งหนึ่งระหว่างอนุภาคที่ชนกัน
 δ เป็นความหนาของอนุภาค โดยวัดที่ระนาบเดียวกันกับการวัดระยะ d
 A เป็นค่าคงที่ Van der Waals ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 10^{-11} ถึง 10^{-14} เอ็ก

โดย Derjaguin (1960) แนะนำให้ใช้เท่ากับ 5×10^{-14}

แรงดึงดูด Van der Waals นี้เป็นแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นในระยะห่างของพวกแร่ดินเหนียวโดยแรงดึงดูดนี้จะแปรผกผันกับกำลัง 4 ของระยะห่างระหว่างอนุภาค

5). การยึดประสาน (Cementation) เป็นแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น เกิดผลึกของแคลไซต์ ซิลิกา อลูมินา ออกไซด์ของเหล็กหรืออาจเป็นสารประกอบของอินทรีย์สารและอินทรีย์สารต่าง ๆ มาประสานอนุภาคดิน การปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวตัวอย่าง เช่น การผสมปูนซีเมนต์หรือปูนขาวก็ทำให้เกิดการยึดประสานระหว่างอนุภาคของดินได้

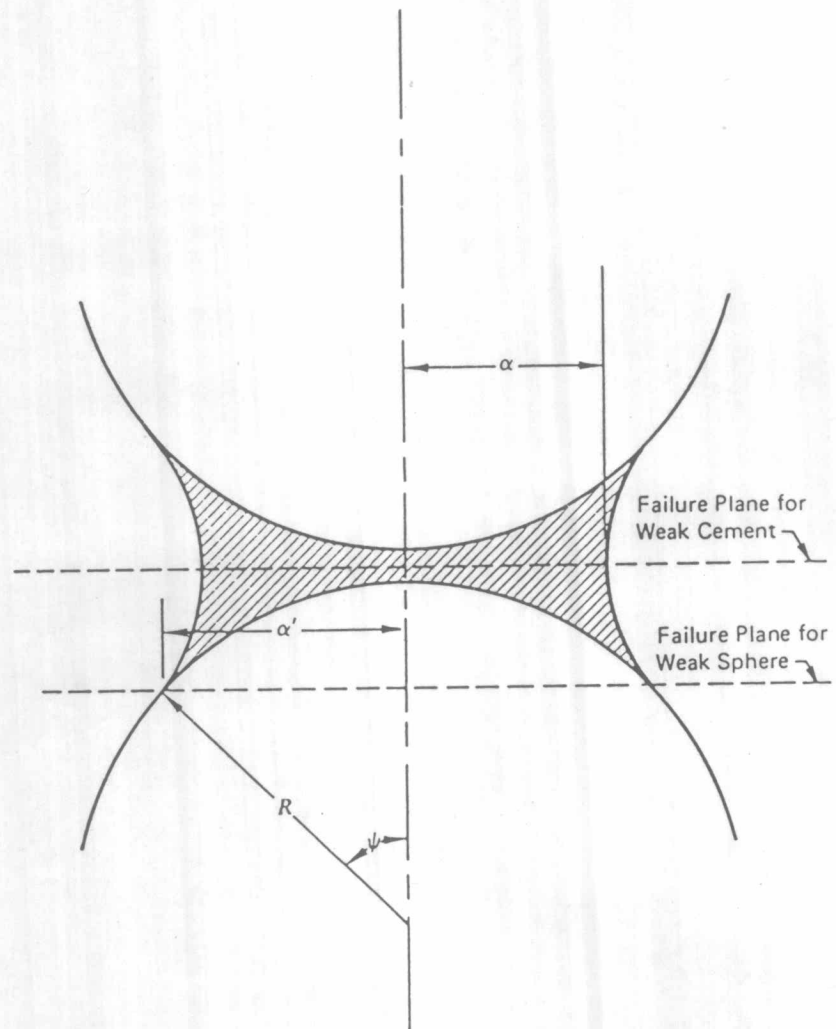
การวิเคราะห์ในด้านกำลังที่เกิดเนื่องมาจากการยึดประสานนี้จะพิจารณา 2 ประเด็นคือ

1. เกิดการพิบัติ (failure) ในตัวประสานหรือในอนุภาคดิน
2. เกิดการพิบัติที่ผิวของการเกาะกันระหว่างตัวประสานกับอนุภาคดิน

Ingles (1962) ได้ศึกษาพบว่าความสัมพันธ์กำลังดึง σ_T เป็นดังนี้

$$\sigma_T = Pk \left(\frac{1}{1+e} \right) \frac{n}{\sum_i A_i}$$

- เมื่อ P เป็นกำลังยึดเหนี่ยว (bond strength) ของจุดสัมผัส (แสดงในรูปที่ 2. . .
 k เป็น mean coordination number ของเม็ด (grain) หนึ่ง ๆ
 e เป็นอัตราส่วนช่องว่าง (void ratio)
 n เป็นจำนวนของเม็ด (grain) ที่อยู่บนระนาบรอยแตกในอุดมคติ (ideal breakage plane) ซึ่งตั้งได้ฉากกับทิศทางของ σ_T
 A_i เป็นพื้นที่ผิวของเม็ด (grain) ที่ i



รูปที่ 2.3

จุดการสัมผัสของอนุภาคที่เป็นทรงกลม เมื่อมีตัวประสาน (Mitchell, 1976)

จากการทดลองพบว่า $ke/(1+e) \approx 3.1$

สำหรับโครงสร้างที่ประกอบกันเป็นแบบ random และ isotropic ของอนุภาคที่มีลักษณะเป็นทรงกลมซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง d จะมีกำลังดึงดังนี้

$$\sigma_T = \frac{Pk}{3.1d^2(1+e)}$$

สำหรับโครงสร้างที่ประกอบกันเป็นแบบ random และ isotropic ของอนุภาคที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกความยาว L และเส้นผ่าศูนย์กลาง d จะมีกำลังดึงดังนี้

$$\sigma_T = \frac{Pk}{3.1d(L+d/2)(1+e)}$$

P ของทรงกลมที่ถูกประสานกันมีรัศมี R ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.3 นั้นได้พบว่า

$$\cos h \frac{(R - \cos \psi)}{\alpha} = R \sin \psi$$

ดังนั้นเมื่อทราบค่า ψ จะทำให้รู้ค่า α ได้ สำหรับการพิบัติในตัวประสานพบว่ากำลังยึดเหนี่ยว (P) จะมีค่าดังนี้

$$P = \sigma_c \pi \alpha^2$$

เมื่อ σ_c เป็นกำลังดึงของตัวประสาน แต่ถ้าเกิดการพิบัติในอนุภาคทรงกลมกำลังยึดเหนี่ยว (P') จะมีค่าดังนี้

$$P' = \sigma_s \pi (\alpha')^2$$

เมื่อ $\alpha' = R \sin \psi$ และ σ_s เป็นกำลังดึงของทรงกลม

สำหรับการพิบัติที่ผิวของการเกาะกันระหว่างตัวประสานกับอนุภาคดินนั้นกำลังยึดเหนี่ยวจะมีค่าดังนี้

$$P'' = \sigma_i \times \frac{\sin \psi}{\phi} \times 2\pi R^2 (1 - \cos \psi)$$

เมื่อ σ_i เป็นกำลังดึงของการยึดเกาะกันที่ผิวของการเกาะกันระหว่างตัวประสานกับอนุภาคดิน

2.1.4 โครงสร้างของดิน (Soil Structure)

การจัดเรียงตัวของอนุภาคดินเหนียวมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ

1. โครงสร้างแบบเป็นระเบียบ (Dispersed Structures)

จะเกิดเมื่อผลรวมของแรงระหว่างอนุภาคดินเหนียวเป็นแรงผลัก แต่ละอนุภาคของดินเหนียวจะผลักกันและพยายามที่จะเคลื่อนที่แยกจากกันและมีการจัดเรียงอนุภาคให้ขนานกัน ดังนั้นจะได้โครงสร้างที่เป็นระเบียบตามรูปที่ 2.2 ก.

2. โครงสร้างแบบระเกะระกะ (Flocculated Structure)

จะเกิดเมื่อผลรวมของแรงระหว่างอนุภาคดินเหนียวเป็นแรงดึงดูด แต่ละอนุภาคจะเคลื่อนเข้าหากันและเกาะกันอย่างไม่เป็นระเบียบได้โครงสร้างที่ระเกะระกะ (Flocculated Structure) ตามรูปที่ 2.2 ข

การจัดเรียงตัวของอนุภาคดินเหนียวจะมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดิน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของโครงสร้างแบบระเกะระกะและโครงสร้างแบบเป็นระเบียบ

โครงสร้างแบบระเกะระกะ	โครงสร้างแบบเป็นระเบียบ
1. ความหนาแน่นน้อย	1. ความหนาแน่นมาก
2. สัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านสูงในทุกทิศทาง	2. สัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านในทิศทางตั้งฉากกับการเรียงตัวของอนุภาคมีค่าต่ำกว่าในทิศทางขนานกับการเรียงตัวของอนุภาค
3. ความต้านทานแรงเฉือนสูงในทุกทิศทาง	3. ความต้านทานแรงเฉือนในแนวขนานกับการเรียงตัวของอนุภาคต่ำกว่าความต้านทานแรงเฉือนในทิศทางอื่น
4. สามารถยุบตัวได้มากเมื่อรับแรงกระทำ	4. สามารถยุบตัวได้น้อยเมื่อรับแรงกระทำ

2.2 ปฏิกริยาพื้นฐานของดินเหนียวกับปูนขาว

Herrin และ Mitchell (1961) ได้พบว่าเมื่อผสมปูนขาวเข้าไปในดินเหนียว จะช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียวทางด้าน plasticity, shrinkage, workability และกำลังของส่วนผสม Herrin และ Mitchell (1960) ได้กล่าวถึงปฏิกริยาพื้นฐานระหว่างดินเหนียวกับปูนขาวที่มีผลทำให้เกิดการพัฒนาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมว่ามี 4 ปฏิกริยา กล่าวคือ

- Cation exchange
- Flocculation - Agglomeration
- Carbonation
- ปฏิกริยา pozzolanic

หลังจากปี ค.ศ. 1960 ได้มีผู้ศึกษาถึงรายละเอียดของปฏิกริยาพื้นฐานทั้ง 4 ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับการศึกษานี้

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^-

แหล่งของ exchange capacity ในดินนั้น Grim (1968) ได้พบว่าเกิดจาก

1. Isomorphous substitution
2. Broken bond
3. การแทนที่ของ H_2 ใน hydroxyl

ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.1.2 จะพบว่า cation ชนิดหนึ่งอาจถูกแทนที่โดย cation อีกชนิดหนึ่งได้ตัวอย่าง เช่น Ca^{2+} แทนที่ Na^+ หรือ Na^+ แทนที่ Ca^{2+} หรือ Fe^{3+} แทนที่ Mg^{2+} และอื่น ๆ

การแทนที่กันโดย cation อีกชนิดหนึ่งขึ้นกับหลายสาเหตุกล่าวคือ

1. วาเลนซ์ของ cation
2. ความซุกซุมของ 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 $\text{Na}^+ < \text{Li}^+ < \text{K}^+ < \text{Rb}^+ < \text{Cs}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Ba}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Al}^{3+} < \text{Fe}^{3+} < \text{Th}^{4+}$ แต่อาจจะเป็นไปได้ที่ cation ที่มีกำลังในการแทนที่ (replacing power) สูงกว่าถูกแทนที่โดย cation ที่มีกำลังในการแทนที่ต่ำกว่า ตัวอย่างเช่น Al^{3+} สามารถถูกแทนที่โดย Na^+ ได้เพราะว่าความเข้มข้นของ Na^+ ในสารละลายมีค่าสูงกว่า Al^{3+} มาก

อัตราการแทนที่ของ cation จะขึ้นกับเหตุผลหลายประการคือ

1. ชนิดของแร่ดินเหนียว
2. ความเข้มข้นของสารละลาย
3. อุณหภูมิ

โดยทั่วไปแล้วแร่ดินเหนียวคาโอลิไนท์จะถูกแทนที่โดยทันทีทันใด ส่วนอิลไลต์ อาจจะใช้เวลาประมาณไม่กี่ชั่วโมงถึงจะแทนที่กันหมด เพราะว่า exchange capacity นั้นอยู่ระหว่างช่องว่างของอนุภาคดินเหนียวและนอกจากนี้อิลไลต์ยังมีขนาดเล็กกว่าคาโอลิไนท์ สำหรับมอนต์โมริลไลต์นั้นก็ใช้เวลาเพิ่มมากขึ้นอีกเพราะ exchange capacity นั้นอยู่ระหว่าง interlayer' และนอกจากนี้ยังมีขนาดเล็กกว่าอิลไลต์อีกด้วย

เมื่อผสมปูนขาวเข้าไปในดินเหนียวนั้นจะทำให้มี Ca^{2+} ส่วนเกินเข้าไปมาก ดังนั้นจะเกิด cation exchange ในโครงสร้างของดิน การเปลี่ยนแปลง cation ของดินโดย Ca^{2+} นี้จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลง double layer ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมบางอย่างเปลี่ยนแปลงไป ดังจะกล่าวถึงรายละเอียดในตอนต่อไป

2.2.2 Flocculation - Agglomeration

การเพิ่มปูนขาวเข้าไปในดินเหนียวจะทำให้โครงสร้างของดินเหนียวเกิดการจัดเรียงตัวเป็นแบบระเกะระกะและมีขนาดใหญ่ขึ้น Herzog และ Mitchell (1963) ได้อธิบายการจัดเรียงตัวของอนุภาคดินเหนียวเป็นโครงสร้างแบบระเกะระกะดังนี้คือ เมื่อเพิ่มปูนขาวเข้าไป Ca^{2+} ของน้ำในช่องว่างของมวลดินมีความเข้มข้นของไอออนสูงขึ้น ดังนั้นจะเกิด cation exchange ของแร่ดินเหนียวซึ่งจะทำให้วงน้ำ double layer หดตัวแคบเข้าและจะเกิดการดึงดูดกัน เป็นโครงสร้างแบบระเกะระกะ

Diamond และ Kinter (1965) ได้อธิบายว่าโครงสร้างแบบระเกะระกะนี้จะถูกทำให้มั่นคงขึ้นโดยสารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วคือ tetracalcium aluminate hydrate ซึ่งเป็นตัวประสาน (cementing agent) โครงสร้างแบบระเกะระกะให้มั่นคงขึ้น

ผลของ cation exchange และ flocculation - agglomeration ต่อคุณสมบัติทางด้าน plasticity และ shrinkage ของส่วนผสมได้ศึกษาโดย Thompson (1964) พบว่าปฏิกิริยาที่กล่าวมานั้นมีผลต่อค่า plasticity, shrinkage และ workability ของส่วนผสม แม้ว่าจะใช้ปูนขาวเป็นปริมาณเล็กน้อยก็ทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ Thompson ยังพบว่า ปฏิกิริยา cation exchange และ flocculation - agglomeration นี้ไม่ได้เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้กำลังของส่วนผสมดินเหนียวกับปูนขาวพัฒนาขึ้นมา

2.2.3 Lime Carbonation

Davidson และ Handy (1960) พบว่าปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับ CO_2 ในอากาศ แล้วเกิดเป็น CaCO_3 และ MgCO_3 ซึ่งเป็นตัวประสานอย่างอ่อน ๆ โดยที่การเกิดสารประกอบคาบอเนตชนิดใดนั้นขึ้นกับชนิดของปูนขาวที่ใช้ Goldberg และ Klein (1952) Eades และ Grim (1962) พบ CaCO_3 เมื่อทดลองผสมดินเหนียวด้วยปูนขาวในห้องทดลองและบ่มทิ้งไว้ให้สัมผัสกับอากาศ Eades,

Nichols และ Grim (1962) ได้พบว่าเกิด CaCO_3 ถึง 2.5 % โดยน้ำหนักในส่วนผสมของดินเหนียว-ปูนขาวที่ทำการทดลองในสนาม

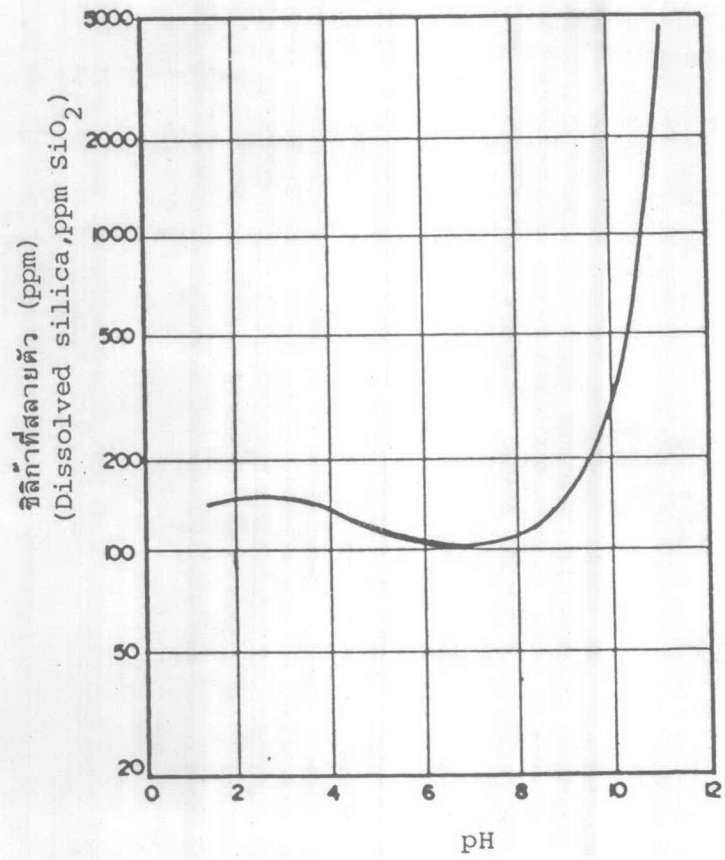
ถึงแม้ว่า Carbonation จะเป็นปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดตัวประสานอย่างอ่อน ๆ ก็ตาม แต่ปฏิกิริยา Carbonation ก็เป็นปฏิกิริยาที่ไม่ควรให้เกิดขึ้นมากเพราะจะทำให้ปูนขาวถูกใช้ไปและ เหลือเพื่อที่จะทำปฏิกิริยาอื่นลดน้อยลง จากการศึกษาของ Davidson และ Handy (1960) พบว่าในตัวอย่างดินที่ป้องกันไม่ให้ปูนขาวเกิดปฏิกิริยา Carbonation กับอากาศนั้น เมื่อระยะเวลาในการบ่มนาน ๆ จะให้กำลังสูงกว่าตัวอย่างดินที่บ่มแล้วปล่อยให้ปูนขาวทำปฏิกิริยากับอากาศได้

2.2.4 ปฏิกิริยา Pozzolanic

ปฏิกิริยา Pozzolanic ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียวด้วยปูนขาวนี้ Eades (1962) และ Thompson (1966) ได้อธิบายว่าเป็นปฏิกิริยาระหว่าง ซิลิกา และ/หรือ อลูมินากับปูนขาวซึ่งจะได้สารประกอบใหม่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Pozzolanic สารประกอบใหม่นี้จะมีคุณสมบัติ เป็นตัวประสานซึ่งถือเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้กำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวเพิ่มมากขึ้น โดยทั่วไป ซิลิกา และ/หรือ อลูมินา ที่ใช้ในปฏิกิริยานี้จะได้มาจากแร่ดินเหนียว ควอทซ์ เฟลสปา ไมก้า และสารประกอบพวก ซิลิเกตหรืออลูมิโน ซิลิเกต อื่น ๆ

เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวเพียงเล็กน้อย (มากกว่า 1 %) pH ของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวจะเพิ่มขึ้นเป็น 12.3 ซึ่งเป็น pH ของสารละลายปูนขาวอิ่มตัว ซึ่งค่า pH จะสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับ pH ของดินตามธรรมชาติ Krauskopf (1959) และ Correns (1961) พบว่าที่ pH สูงนี้การละลายตัว (Solubility) ของซิลิกาและอลูมินา จะเพิ่มมากขึ้นด้วย

Krauskopf (1959) ได้อธิบายถึงการละลายตัวของแร่พวกซิลิเกต (Silicate minerals) ว่าเป็นการที่มีซิลิกาละลายตัวลงไปในสารละลายไปเป็นสารซิลิเกตที่ไม่มีโครงสร้างเป็นผลึก (amorphous silicate) การละลายตัวของแร่พวกซิลิเกตนี้ Krauskopf พบว่ามีความสัมพันธ์กับ pH ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะเห็นว่าที่ pH สูง ๆ นั้นจะมีซิลิกาละลายตัวออกมาเพิ่มสูงมาก



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างซิลิกาที่ละลายตัวออกมากับ pH (Krauskopf, 1959)

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

Diamond, et al. (1964) ได้พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาว ที่มีความเป็นด่างสูง ๆ (highly alkaline) จะเกิดโดยการสลายตัวของสารประกอบซิลิเกต ที่ชอบของอนุภาคดินเหนียวและทำปฏิกิริยากับปูนขาว เกิดเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น

สารประกอบที่ได้มาจากปฏิกิริยาระหว่างดินเหนียวกับปูนขาวนี้ได้มีนักวิจัยหลายคนได้ทำการศึกษา Eades และ Grim (1962) ได้พบว่าสารประกอบที่เกิดขึ้นนั้น เป็นผลึกของ Calcium silicate hydrate และจากการศึกษาค้นคว้าโดย Diamond, et al. (1964) ก็ได้ยืนยันว่า Calcium silicate hydrate นี้เป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาของดินเหนียวกับปูนขาว

Hilt และ Davidson (1961) Glenn และ Handy (1963) และ Diamond, et al (1964) ได้พบว่าสารประกอบพวก Calcium aluminate hydrate ก็เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างดินเหนียวกับปูนขาวเช่นเดียวกัน จะเห็นว่าในสภาวะแวดล้อมที่มีความเป็นด่างสูง ๆ นั้น อนุภาคดินเหนียวจะมีการสลายตัวอย่างมาก ซึ่งไม่เพียงแต่ทำให้เกิดซิลิกา อิสระมาสู่สารละลาย ยังทำให้มี อลูมินา สลายตัวมาสู่สารละลายเพื่อมาทำปฏิกิริยากับปูนขาวอีกด้วย

องค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อปฏิกิริยา Pozzolanic

1. คุณสมบัติตามธรรมชาติของดิน

Thompson (1966) พบว่าความสามารถของดินที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยา Pozzolanic นั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติตามธรรมชาติของดิน และได้ศึกษาถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยา 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 และดินบางชนิดก็มีการพัฒนากำลังมากขึ้นหลาย เปอร์เซ็นต์โดยขึ้นอยู่กับส่วนประกอบต่าง 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 ก็จะมีเกิดขึ้น

เนื่องจากแร่ดินเหนียวเป็นแหล่งสำคัญของ ซิลิกา และ/หรือ อลูมินา ที่ จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยา pozzolanic แต่ในดินที่มีปริมาณอินทรีย์สารอยู่พอสมควรนั้น Wiklander (1955) พบว่า organic cation จะเกาะกับผิวของอนุภาคดินเหนียวและ organic cation นี้จะไม่สามารถถูกแทนที่โดย cation อื่นได้เสียทั้งหมด Cooper (1952) และ Iler (1955) ได้อธิบายว่าการที่มี organic complex บนผิวของอนุภาคดินเหนียวแล้วไม่เกิดการสลายตัวของซิลิกา และ/หรือ อลูมินา เพราะ masking effect คือ organic cation จะเป็นตัวกันคอย บังกันไม่ให้อนุภาคดินเหนียวสลายตัว

1.2 Clay content แร่ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ จะทำปฏิกิริยากับปูนขาวและจะ ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน โดยที่ ซิลิกา และ/หรือ อลูมินา ที่ใช้ระหว่างปฏิกิริยา pozzolanic ส่วนใหญ่ได้มาจากแร่ดินเหนียว ทั้งนี้เพราะอนุภาคดินเหนียวมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface) สูง จึงสามารถสลายตัวให้ ซิลิกา และ/หรือ อลูมินา ได้ดีกว่าสารที่มี ขนาดใหญ่กว่า Iler (1955) Eades (1962) Eades และ Grim (1962) Diamond, et al. (1964) ดังนั้นปริมาณของแร่ดินเหนียวในดินจึงมีความจำเป็นในการที่จะพัฒนา กำลังของดินด้วย ปูนขาว

1.3 ชนิดของแร่ดินเหนียว Thompson (1966) พบว่าชนิดของแร่ดินเหนียวนั้นมีผลอย่างมากคือ lime reactivity โดยเฉพาะพวก mixed layer และมอนท์โมริลโลไนท์ จะสามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวได้ดีมาก ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อชนิดของแร่ดินเหนียว ที่มีผลต่อการพัฒนา กำลัง

1.4 คุณสมบัติทางเคมีของดิน มีผลอย่างมากคือ lime reactivity Thompson (1966) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH ของดินตามธรรมชาติกับ lime reactivity ตามรูปที่ 2.5 pH มีค่ามากขึ้น lime reactivity ก็จะมีค่าสูงขึ้น สำหรับดินที่มี pH ต่ำกว่า 7 นั้นจะมี lime reactivity น้อยกว่า 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นอกจากนี้พบว่า cation exchange capacity, exchangeable bases, percent base saturation และอัตราส่วนของ Ca/Mg ไม่ได้มีความสัมพันธ์ที่สำคัญอย่างมากกับ lime reactivity

2. ชนิดของปูนขาว

ปูนขาวเป็นผลผลิตที่ได้จากหินปูน ดังนั้น ชนิดของปูนขาวจึงขึ้นกับส่วนประกอบของหินปูนตามธรรมชาติ ปูนขาวแบ่งออกเป็น 5 ประเภท คือ

- | | |
|------------------------------------|--|
| - High calcium quick lime | CaO |
| - Dolomitic quick lime | CaO+MgO |
| - Hydrated high calcium lime | Ca(OH) ₂ |
| - Normal hydrated dolomitic lime | Ca(OH) ₂ +MgO |
| - Pressure hydrated dolomitic lime | Ca(OH) ₂ +Mg(OH) ₂ |

จากการศึกษาของ Laguros, et al. (1956) Lu, et al. (1957) และ Wang, et al. (1962) พบว่าชนิดของปูนขาวมีผลอย่างมากต่อปฏิกิริยา pozzolanic {Ca(OH)₂+MgO} โดยทั่วไปจะทำให้เกิดกำลังในส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวมากกว่า {Ca(OH)₂} Remus และ Davidson (1961) ได้สรุปผลการศึกษาดินเหนียวจาก 9 แหล่งแล้วนำมาผสมกับปูนขาวชนิดต่าง ๆ พบว่า {CaO+MgO} ทำให้กำลังเกิดสูงขึ้นมากในดินเหนียวที่มีแร่ดินเหนียวพวกมอนท์โมริลโลไนท์และอิลไลท์ แต่สำหรับแร่ดินเหนียวพวกคาโอลิไนท์แล้วทั้ง {CaO+MgO} และ {Ca(OH)₂} ก่อให้เกิดกำลังสูงขึ้นพอ ๆ กัน

Lime reactivity 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หมายความว่า ผลต่างของ maximum unconfined compressive strength ของดินเหนียวที่ผสมกับปูนขาวแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 73⁰ฟ. (22.8⁰ซ.) เป็นเวลา 28 วันกับ unconfined compressive strength ของดินตามธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

Wang, et al (1962) ได้ใช้ปูนขาวที่ผลิตมาจากแหล่งต่าง ๆ กันพบว่า $\{Ca(OH)_2 + MgO\}$ ให้กำลังที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แต่ใน $\{Ca(OH)_2\}$ แล้วแม้ว่าจะผลิตมาจากแหล่งต่าง ๆ กันก็ยังไม่ให้กำลังที่ใกล้เคียงกัน

แม้ว่าจากการศึกษาในอดีตจะพบว่าโดยทั่วไปแล้ว $\{Ca(OH)_2 + MgO\}$ จะใช้ได้ดีกว่า $\{Ca(OH)_2\}$ แต่ในบางกรณี $\{Ca(OH)_2\}$ อาจสามารถทำให้เกิดกำลังสูงกว่า $\{Ca(OH)_2 + MgO\}$ ได้ Thompson (1966)

3. ปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสม

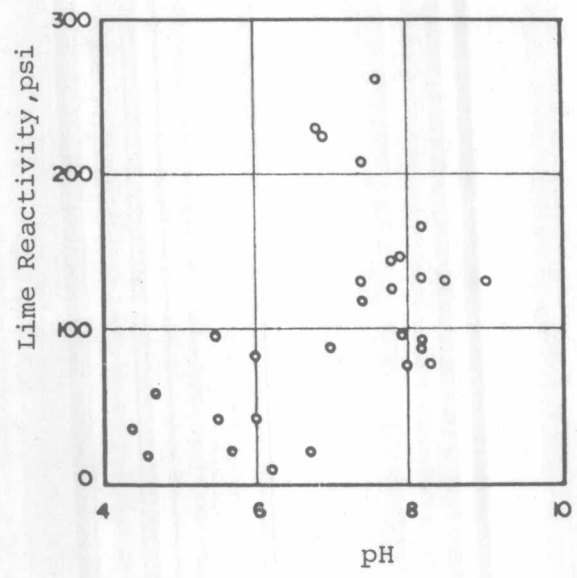
Thompson (1966) ได้พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมแล้วกำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวจะเพิ่มสูงขึ้น จนถึงปริมาณปูนขาวปริมาณหนึ่งที่เมื่อเพิ่มปูนขาวเกินกว่านี้ กำลังของส่วนผสมจะลดลงหรือไม่เพิ่มขึ้นมาก เรียกปริมาณปูนขาวนี้ว่า ปริมาณปูนขาวที่พอเหมาะ (Optimum lime content) Remus และ Davidson (1961) พบว่าปริมาณปูนขาวที่พอเหมาะของดินเหนียวที่ใช้ $\{CaO + MgO\}$ จะสูงกว่าปริมาณปูนขาวที่เป็น $\{CaO\}$ ซึ่งผลจากการศึกษายังไม่สามารถสรุปลักษณะของดินเหนียวที่มีผลอย่างมากคือปริมาณปูนขาวที่พอเหมาะ แต่เชื่อว่าองค์ประกอบที่มีผลคือปริมาณปูนขาวที่พอเหมาะคือคุณสมบัติทางด้านเคมี ฟิสิกส์และทางด้านแร่ของดินเหนียวชนิดของปูนขาว ระยะเวลาในการบ่ม อุณหภูมิในการบ่มและองค์ประกอบอื่น ๆ

4. สภาพะในการบ่ม

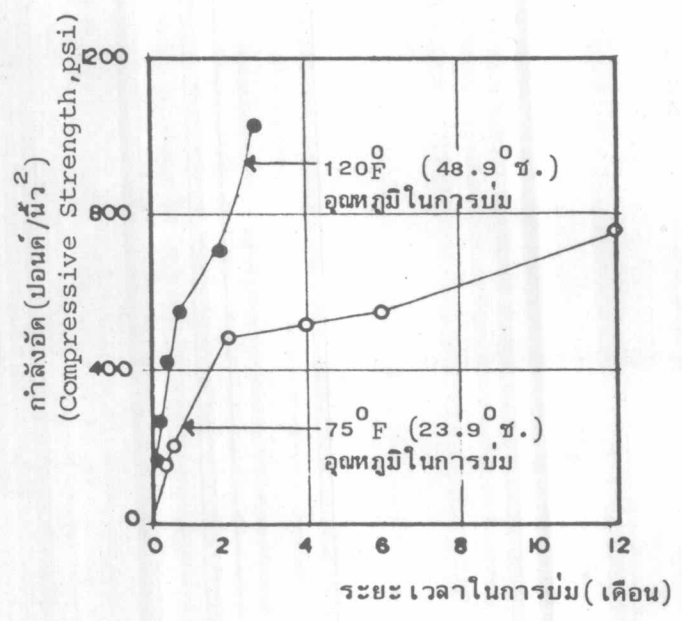
Herrin และ Mitchell (1961) ได้พบว่าเมื่อเวลาในการบ่มและอุณหภูมิในการบ่มเพิ่มมากขึ้นจะทำให้กำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ Thompson (1965) ได้สรุปผลการศึกษาเช่นเดียวกับ Herrin และ Mitchell (1961) โดยได้แสดงถึงความสัมพันธ์ของเวลาและอุณหภูมิในการบ่มกับกำลังของดิน Illinois ตามรูปที่ 2.6

5. ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของสารที่ถูกบดอัดก็มีผลต่อกำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาว Herrin และ Mitchell (1961) ได้สรุปไว้ว่ากำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวจะเพิ่มขึ้นเมื่อส่วนผสมนี้ถูกบดอัดให้มีหน่วยน้ำหนัก (unit weight) สูงขึ้นโดยใช้พลังงานในการบดอัดสูงขึ้น



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Lime-Reactivity กับ pH ของดินตามธรรมชาติ (Thompson, 1966)



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (Compressive Strength) ที่อุณหภูมิในการบ่ม 75 และ 120^oฟ. (23.9 และ 48.9^oซ.) กับระยะเวลาในการบ่ม (Thompson, 1965)

2.3 ทบทวนผลงานในอดีต เกี่ยวกับการ เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม

การศึกษาในอดีตถึงผลการ เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียว เมื่อผสมปูนขาว เข้าไปนั้น ได้มีผู้ศึกษากันอย่างกว้างขวาง ในบทนี้จะได้ทบทวนถึงผลงานในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

- การ เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้าน plasticity
- การ เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางการบดอัด
- การ เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านกำลังของส่วนผสม

2.3.1 การ เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้าน plasticity

เมื่อผสมปูนขาวลงไปดินเหนียว ถึงแม้ว่าจะเป็นปริมาณเพียงเล็กน้อย แต่จะทำให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงคือจะเกิดปฏิกิริยา cation exchange และ Flocculation-agglomeration Herrin และ Mitchell (1961) ได้ศึกษาพบว่า Ca^{2+} ซึ่งเป็นประจุบวกจากปูนขาวจะ เข้าแทนที่ในประจุบวกที่มีวาเลนซ์ต่ำกว่า เช่น Na^+ หรือ H^+ บนผิวของอนุภาคดินเหนียว จึงทำให้ประจุไฟฟ้าบนผิวของอนุภาคดินเหนียวเกิดการ เปลี่ยนแปลง และนอกจากนี้ Ca^{2+} จากปูนขาวที่อยู่ในน้ำรอบ ๆ อนุภาคดินเหนียวก็ทำให้ electrolyte content ของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น จึงเป็นเหตุให้โครงสร้างของดินเหนียวเกิดการ จัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างแบบระเกะระกะมากขึ้น แต่ว่าโครงสร้างแบบระเกะระกะนี้ยังคงมีความไว (Sensitive) ค่อนข้างมาก คือถ้าปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น electrolyte content จะลดลงซึ่งเป็นผลทำให้วงน้ำ (double layer) ขยายตัวมีแรงผลักรวมกันจนอาจทำให้เกิดการ deflocculate ได้ แต่เนื่องจาก Ca^{2+} ในสารละลายนั้นจะถูกดูดซับโดยสารประกอบหลายชนิดคือ แร่ดินเหนียวที่มีโครงสร้างแบบ three-layer (เช่น มอนต์โมริลไลไนท์และอิลไลท์) อินทรีย์สารและคาโอลิไนท์ แล้วจะทำปฏิกิริยาเกิดสารประกอบใหม่ เป็นสารประกอบที่มีผลึกที่ชัดเจนของ tetracalcium aluminate hydrate C_4AH_{13} (เมื่อ $C = CaO$, $A = Al_2O_3$, $H = H_2O$ และ $S = SiO_2$) สารประกอบใหม่นี้จะ เกิดที่จุดสัมผัสระหว่างขอบอนุภาคดินเหนียวอนุภาคหนึ่งกับผิวของอนุภาคดินเหนียวอีกอนุภาคหนึ่งในโครงสร้างแบบระเกะระกะ สารประกอบใหม่นี้จะเป็นตัวประสานที่ทำให้โครงสร้างแบบระเกะระกะนี้มั่นคงขึ้น จึงทำให้คุณสมบัติทางด้าน

plasticity ของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวเปลี่ยนแปลงไป

Herrin และ Mitchell (1961) พบว่า Plastic Limit และ Liquid Limit ของดินเหนียวจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อผสมปูนขาวโดยค่า Plastic Limit จะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่ผสมเข้าไป จากการศึกษาของ Lund และ Ramsey (1959) Wang, Mateos และ Davidson (1963) Jan และ Walker (1963) พบว่าค่า Plastic Limit จะเพิ่มขึ้นทันทีเมื่อผสมปูนขาวเข้าไปและอัตราการเพิ่มนี้จะเปลี่ยนไปโดยตรงกับปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมจนถึง lime fixation point ซึ่งเป็นปริมาณปูนขาวที่เมื่อผสมปูนขาวในปริมาณที่เกินจากปริมาณนี้ไป ค่า Plastic Limit จะไม่เพิ่มขึ้นหรือเพิ่มขึ้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของค่า Plastic Limit ในช่วงแรก ๆ

ส่วนค่า Liquid Limit นั้น Herrin และ Mitchell (1961) พบว่าโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าลดลงเมื่อผสมปูนขาวปริมาณมากขึ้น แต่ในดินบางชนิดกลับพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวแล้วค่า Liquid Limit กลับเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น Herrin และ Mitchell จึงสรุปว่าเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวแล้วค่า Liquid Limit จะลดลงในดินเหนียวที่มี Plasticity สูง แต่ในดินที่มี Plasticity ต่ำแล้ว Liquid Limit จะเพิ่มขึ้น จากการศึกษาของ Wang, Mateos และ Davidson (1963) Jan และ Walker (1963) พบว่าเมื่อเพิ่มส่วนผสมปูนขาวแล้วค่า Liquid Limit จะลดลงแต่ Clare และ Cruchley (1957) Zolkov (1962) พบว่า Liquid Limit จะเพิ่มขึ้น ส่วน Lund และ Ramsey (1959) Woods และ Yoder (1952) Taylor และ Armain (1960) พบว่าค่า Liquid Limit นี้จะมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงขึ้นกับชนิดของดินที่ทำการทดลอง ค่า Liquid Limit ของดินเหนียวนี้จะมีความไวมากกว่าชนิดของประจุบวกมากกว่า Plastic Limit

Herrin และ Mitchell (1961) ได้ศึกษาพบว่า ไม่ว่าค่า Liquid Limit จะเพิ่มขึ้นหรือลดลง เมื่อได้เพิ่มปริมาณปูนขาวค่า Plastic Limit ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Plasticity Index ลดลงเสมอ ค่า Plasticity Index ของดินที่มี Plasticity สูงจะลดลง 50-80 % เมื่อผสมปูนขาวเข้าไปแม้จะเป็นปริมาณเล็กน้อย แต่ในดินบางชนิดที่มี Plasticity ต่ำเมื่อเพิ่มส่วนผสมปูนขาวเข้าไปกลับทำให้ค่า Plasticity Index เพิ่มขึ้นเล็กน้อย Diamond และ Kinter (1965) ก็พบว่าบางทีการเพิ่มปูนขาวกลับไปทำให้ค่า Plasticity Index เพิ่มขึ้นในดินบางชนิด

Leonard (1962) พบว่าโดยทั่วไปแล้วเมื่อผสมปูนขาวกับดินเหนียวจะทำให้ค่า Plasticity Index ของดินเหนียวที่มี plasticity ดำนั้นเพิ่มสูงขึ้น แต่ในดินที่มี plasticity สูงนั้น ค่า Plasticity Index จะลดลงเมื่อเพิ่มส่วนผสมปูนขาวเข้าไป

การเปลี่ยนแปลงค่า Plasticity Index จะขึ้นกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างดินเหนียวกับปูนขาวด้วย การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นมากภายในเวลาชั่วโมงแรก ๆ ที่ผสมปูนขาวและภายใน 2-3 วัน การเปลี่ยนแปลงทางด้าน plasticity จะเกิดขึ้นหมด ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่า Plasticity Index เมื่อเวลาในการบ่มมาก ๆ นั้นยังพบว่าแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นถ้าเทียบกับการเปลี่ยนแปลงในช่วงแรก ๆ

2.3.2 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางการบดอัด

จากการศึกษาของ Herrin และ Mitchell (1961) พบว่าเมื่อทำการบดอัดด้วยพลังงานจำนวนเดียวกัน ความหนาแน่นแห้งของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวจะมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นแห้งของดินตามธรรมชาติที่บดอัดด้วยพลังงานเดียวกันและเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาว ความหนาแน่นแห้งก็จะลดลงตาม ความหนาแน่นแห้งในดินโดยทั่วไปจะลดลงประมาณ 2.5 % โดยน้ำหนัก แต่ในดินพวก Micaceous Silt นั้นความหนาแน่นแห้งจะลดลงถึง 5 % เมื่อผสมด้วยปูนขาว 5 %

เมื่อผสมปูนขาวเข้าไปในดินนั้นปริมาณความชื้นที่พอเหมาะจะสูงขึ้นถึงแม้ว่าจะผสมปูนขาวด้วยปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ตาม จากการทดลองของ Herrin และ Mitchell (1961) พบว่าเมื่อผสมปูนขาว 3 % จะทำให้ปริมาณความชื้นที่พอเหมาะเพิ่มสูงขึ้นถึง 25 % และเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวเข้าไปจนถึงปริมาณปูนขาวหนึ่งที่ทำให้ปริมาณความชื้นที่พอเหมาะเพิ่มขึ้นอย่างมากแล้วการเพิ่มปริมาณปูนขาวเข้าไปอีกจะทำให้ปริมาณความชื้นที่พอเหมาะนี้เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย

ชนิดของปูนขาวจะมีผลต่อคุณสมบัติในการบดอัดเพียงเล็กน้อย กล่าวคือเมื่อใช้ $\{CaO\}$ แล้วปริมาณความชื้นที่พอเหมาะจะสูงกว่าดินที่ใช้ $\{Ca(OH)_2\}$ เพียงเล็กน้อย แต่ถ้าปูนขาวที่ใช้มีปริมาณเดียวกันแล้วถึงแม้จะใช้ปูนขาวต่างชนิดกันก็ยังคงให้ความหนาแน่นแห้งเท่ากัน การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นแห้งเมื่อผสมปูนขาวนั้นจากการศึกษาของ Herrin และ

Mitchell (1961) พบว่าไม่ได้มีความสัมพันธ์กับชนิดของดิน ค่า Plasticity Index หรือความหนาแน่นแห้งของดินตามธรรมชาติ

ถึงแม้ว่าเมื่อผสมปูนขาวแล้วความหนาแน่นแห้งจะลดลงแต่กำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวก็ไม่ได้ลดลงตาม Whitehurst และ Yoder (1952) ได้ทำการทดลองและยืนยันข้อความที่กล่าวมาแล้วคือ เมื่อทดลองเพิ่มส่วนผสมปูนขาวเข้าไป 5 % พบว่า หน่วยน้ำหนักจะน้อยกว่าดินที่ไม่ได้ผสมปูนขาวแต่กำลังของส่วนผสมกลับเพิ่มขึ้นถึง 60 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

2.3.3 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านกำลังของส่วนผสม

กำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวสามารถหาได้จากหลาย ๆ วิธี อาทิ เช่น Unconfined Compression, California Bearing Ratio (CBR), Hveem Stabilometer และ Triaxial test แต่วิธีที่สะดวกและแพร่หลายคือ unconfined Compression Test Thompson (1966) สรุปว่า Unconfined Compressive Strength นี้เป็นดัชนีที่สามารถใช้วัดถึงปฏิกิริยา pozzolanic ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อผสมดินเหนียวด้วยปูนขาวที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ทั้งนี้เพราะค่า Unconfined Compressive Strength นี้จะบอกถึงคุณภาพของส่วนผสม Thompson (1965, 1966) ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมที่สำคัญหลาย ๆ อย่างที่สัมพันธ์กับ Unconfined Compressive Strength

Mitchell และ Hooper (1961) พบว่ากำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวนี้ขึ้นกับองค์ประกอบสำคัญหลาย ๆ อย่าง เช่น ชนิดของดิน ปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสม ชนิดของปูนขาว ระยะเวลาในการบ่ม อุณหภูมิในการบ่ม ปริมาณน้ำที่ใช้ผสม ความหนาแน่นของตัวอย่าง และเวลาในการผสม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นซึ่งขึ้นกับองค์ประกอบสำคัญที่กล่าวมาแล้วนั้นจะมีผลต่อกำลังของส่วนผสม โดยทั่วไปแล้วกำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนขาว ระยะเวลาในการบ่มและความหนาแน่นของตัวอย่างดินเพิ่มขึ้น

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า เมื่อผสมปูนขาวเข้าไปในดินเหนียวแล้วจะเกิดปฏิกิริยาพื้นฐานขึ้น 4 ปฏิกิริยา คือ Cation exchange, Flocculation - Agglomeration

Carbonation และปฏิกิริยา pozzolanic

Diamond และ Kinter (1965) ได้ศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมดินเหนียวด้วยปูนขาวและศึกษาจากผลงานในอดีตได้สรุปผลดังนี้

- ปฏิกิริยา cation exchange และ Flocculation - Agglomeration นั้นไม่ใช่ปฏิกิริยาหลักที่ก่อให้เกิดกำลังส่วนผสมเพิ่มขึ้นมาก
- ปฏิกิริยา Carbonation ถึงแม้ว่าจะให้สารประกอบคาบอเนต ซึ่งเป็นตัวประสานอย่างอ่อน ๆ ก็ตาม แต่ถ้าป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้แล้วเมื่อเวลาในการบ่มมากขึ้นจะทำให้ส่วนผสมมีกำลังมากกว่าในตัวอย่างที่ปล่อยให้เกิดปฏิกิริยา Carbonation ระหว่างปูนขาวกับอากาศ
- ปฏิกิริยา pozzolanic เป็นปฏิกิริยาสำคัญที่ทำให้เกิดสารประกอบที่เป็นตัวประสาน ซึ่งทำให้กำลังในส่วนผสมเพิ่มขึ้นมาก

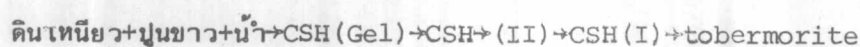
จากการศึกษาของ Hilt และ Davidson (1961) McCaleb (1962) Glenn (1963) Glenn และ Handy (1963) และ Wang (1966) ได้ศึกษาพบว่า ปฏิกิริยา pozzolanic ก่อให้เกิดสารประกอบใหม่คือ Calcium silicate hydrate และ Calcium aluminate hydrate เกิดขึ้นหลายรูปแบบตามอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยา

Sender และ Smother (1957) Taylor และ Moorhad (1960) Midgley และ Chopra (1960) Locher (1962) และ Kalousek (1964) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของ Calcium silicate hydrate และได้สรุปว่าทุกรูปแบบของ Calcium silicate hydrate นี้มีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน

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

Jambor (1963) ศึกษาพบว่ารูปแบบหรือชนิดของ calcium silicate hydrate และปริมาณของสารประกอบใหม่นี้มีผลต่อการพัฒนากำลังของส่วนผสมปูนขาวกับ pozzolana paste (สาร Siliceous หรือ Siliceous aluminous)

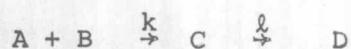
Ruff และ Ho (1966) พบว่า การเพิ่มขึ้นของกำลังในส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวที่บ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ ขึ้นกับรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นของสารประกอบที่ได้จากปฏิกิริยาดังนี้คือ



เมื่อปฏิกิริยาดำเนินต่อไปมากเท่าไรกำลังก็จะมากตามด้วย นอกจากนี้ยังพบการแทนที่ในโครงสร้างของผลึก calcium silicate hydrate ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 50^oซ. ขึ้นไป

Taylor (1961) ได้ทดลองใช้ปูนขาวผสมกับ quartz paste พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของควอตซ์ เริ่มโดยจะเกิดสารประกอบใหม่ CSH (II) ในขณะที่ส่วนผสมยังมีปริมาณปูนขาวและปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปจนปริมาณปูนขาวในส่วนผสมหมดลง ต่อมา CSH (II) จะทำปฏิกิริยากับควอตซ์ที่เหลืออยู่เป็น 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 จะทำปฏิกิริยากับควอตซ์ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยากับปูนขาวอย่างช้า ๆ เกิดเป็น gyrolite

Ruff และ Ho (1966) กล่าวว่าถ้าปฏิกิริยาระหว่างดินเหนียวกับปูนขาว คล้ายกับปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับ quartz paste แล้วปฏิกิริยาที่ซับซ้อนระหว่างดินเหนียวกับปูนขาวนี้จะสามารถสรุปได้ดังนี้

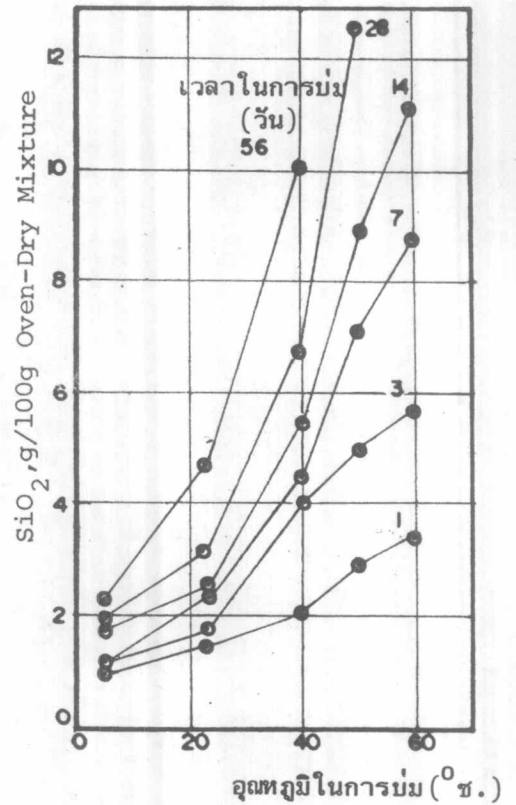
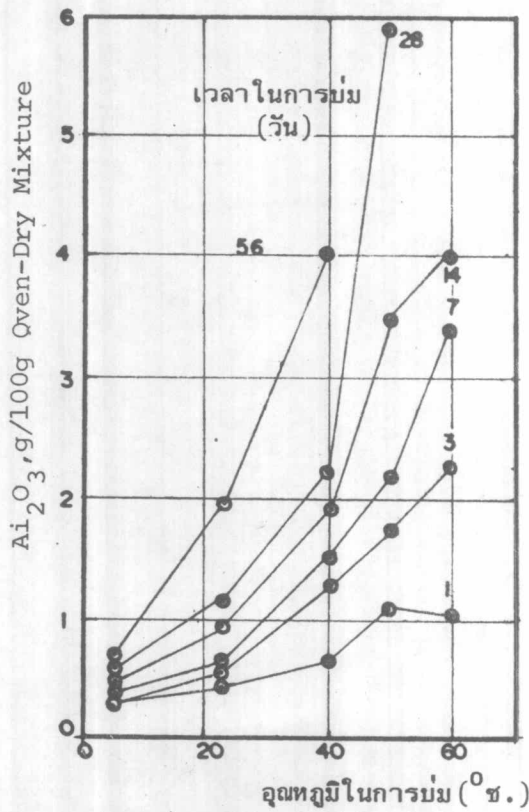


โดยที่ A เป็นดินเหนียว B เป็นปูนขาว C เป็นสารประกอบ calcium silicate hydrate หรือ calcium aluminate hydrate D เป็นสารประกอบ calcium silicate hydrate หรือ calcium aluminate hydrate รูปแบบอื่นที่ให้กำลังสูงกว่า C

K เป็น rate constant ในช่วงปฏิกิริยาแรกและ k เป็น rate constant ของปฏิกิริยาที่ 2 ถ้า $k > K$ จะไม่เกิด C และถ้า $k \ll K$ ปริมาณของ D ก็จะมีขึ้นน้อยมาก เนื่องจาก K และ k ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้นที่อุณหภูมิหนึ่งเมื่อ K มีค่ามากกว่า k เล็กน้อย จะเกิดทั้ง C และ D เมื่อเวลามากขึ้นปริมาณของ D ก็มากขึ้นเพราะ C เมื่อเวลามากขึ้นแล้วอัตราการเกิดก็จะช้าลง เนื่องจาก D เป็นตัวที่ก่อให้เกิดกำลังมากกว่า C ในเวลาหนึ่งที่ D มีปริมาณมากพอในส่วนผสมก็จะประพฤติเหมือนกับว่ากำลังของส่วนผสมที่เกิดทั้งหมดสืบเนื่องมาจาก D ที่อุณหภูมิห้องหรือต่ำกว่านั้นจะเกิดเพียงปฏิกิริยาแรก แต่เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 40°C . ขึ้นไปจะเกิดปฏิกิริยาที่ 2 ขึ้นแทน ซึ่งจะมีอัตราการเกิดพอ ๆ กับอัตราที่เกิดปฏิกิริยาแรก ดังนั้น ความสำคัญของสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาแรกจึงน้อยลงมาก

Ruff และ Ho (1966) ได้ใช้วิธีของ X-ray diffraction เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมเมื่อผสมปูนขาวกับ เบนโทไนท์ (Bentonite) จากการศึกษาพบว่า มีสารประกอบใหม่เกิดขึ้นคือที่เวลาในการบ่ม 1 วันจะเกิด tobermorite hydrate group ขึ้น ซึ่งพบจาก peak 3.07 และ 1.82 \AA และ C_4AH_{13} เกิดขึ้นเล็กน้อยโดยพบจาก peak 7.5, 4.1, 3.99 และ 2.88 \AA สารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นนี้จะพบในทุกอุณหภูมิของการบ่มและพบว่าที่ระยะเวลาในการบ่ม 1 วันนี้มีการเปลี่ยนแปลงในปริมาณ acid soluble silica และ alumina หลังจาก 5°C . น้อยมากแต่พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิในการบ่มเพิ่มเป็น 60°C . ซึ่งแสดงว่าเมื่อระยะเวลาในการบ่ม 1 วันที่อุณหภูมิ 5°C . ซิลิกา และ อลูมินา จะสลายตัวออกมาจากอนุภาคดินเหนียวน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 60°C . ปริมาณ ซิลิกา และ อลูมินา จะสลายตัวออกมามากกว่า

เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มเป็น 3 วันพบว่ามี peak เช่นเดียวกับที่ 1 วันแต่พบ C_4AH_n รูปแบบอื่น ๆ ถึงแม้ว่าจะเป็น weak peak แต่พบว่าที่ทุกอุณหภูมิในการบ่มจะเกิด peak ที่ 3.03 \AA และนอกจากนี้ยังพบว่าเกิด CSH (II) ด้วย ปริมาณ acid soluble silica และ alumina จะเพิ่มมากขึ้นกว่าในตัวอย่างดินที่บ่มเพียง 1 วัน ผลของ acid soluble silica และ alumina ที่เวลาในการบ่มต่าง ๆ กับอุณหภูมิได้แสดงในรูปที่ 2.7 นอกจากนี้ Ruff และ Ho (1966) ยังได้สรุปว่าที่อุณหภูมิในการบ่มหนึ่ง ๆ ปริมาณ acid soluble silica และ/หรือ alumina ที่เกิดขึ้นจะแปรผันโดยตรงกับกำลังของส่วนผสม



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง acid soluble alumina และ silica ที่เวลาในการบ่มต่างๆกับอุณหภูมิ (Ruff และ Ho, 1966)

Eades และ Grim (1960) พบว่า ปริมาณปูนขาวที่จำเป็นต้องใช้เพื่อให้ดินมีกำลัง เพิ่มมากขึ้นนั้นจะแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของแร่ดินเหนียวและได้สรุปปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมที่จะก่อให้เกิดกำลัง เพิ่มมากที่สุดตามชนิดของแร่ดิน เหนียวดังนี้คือ

- ปริมาณปูนขาว 4-6 % สำหรับแร่ดินเหนียว คาโอลิไนท์
- ปริมาณปูนขาว 8 % สำหรับแร่ดินเหนียว อิลไลต์และมอนท์โมริลโลไนท์

คาโอลิไนท์ กำลังจะเพิ่มขึ้นแม้จะมีปริมาณปูนขาวผสม เข้าไป เพียง เล็กน้อย ส่วนในแร่ดิน เหนียวอิลไลต์และมอนท์โมริลโลไนท์นั้น ปริมาณปูนขาวจะต้องมากกว่า 4-6 % กำลังของดินจึงจะเริ่มพัฒนา ที่เป็นเช่นนี้เพราะปฏิกิริยาที่แร่ดิน เหนียวแต่ละชนิดทำกับปูนขาวนั้นแตกต่างกัน กล่าวคือ ในแร่ดินเหนียวคาโอลิไนท์นั้น เมื่อทำปฏิกิริยากับปูนขาวจะก่อให้เกิดสารประกอบใหม่ คือ calcium silicate hydrate ปฏิกิริยา เกิดโดยการที่ปูนขาวถูกดูดซึม เข้าไปที่ขอบของอนุภาคดินเหนียวและจะทำปฏิกิริยากับ ซิลิกา และ/หรือ อลูมิน่า ที่สลายตัวออกมา เกิดเป็นสารประกอบใหม่ขึ้นมาซึ่งจะเกาะรอบแกนของแร่ดิน เหนียวคาโอลิไนท์ที่ยังไม่ได้เปลี่ยนแปลง

สำหรับแร่ดิน เหนียวที่มีโครงสร้างเป็นแบบ three layer structure (เช่น อิลไลต์และมอนท์โมริลโลไนท์) นั้นจะเกิดปฏิกิริยา cation exchange ระหว่าง silica sheet กับ Ca^{2+} จนกระทั่ง interlayer ของแร่ดิน เหนียวนี้อัดตัวไปด้วย Ca^{2+} แล้วโครงสร้างของแร่ดิน เหนียวก็จะสลายตัวหมดโดยจะยังไม่เกิดสารประกอบใหม่ขึ้นเลย หลังจากนั้นจึงจะทำปฏิกิริยากับปูนขาวส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยา cation exchange และก่อให้เกิดสารประกอบใหม่ คือ calcium silicate hydrate และ calcium aluminate hydrate

ในกรณีของแร่ดิน เหนียวมอนท์โมริลโลไนท์ซึ่งมีค่า cation exchange Capacity (CEC) สูงนั้นต้องใช้ปูนขาวปริมาณมากพอควร เพื่อที่จะทำให้ดินนั้นอัดตัวด้วย Ca^{2+} ดังนั้น ปริมาณปูนขาวเริ่มแรกที่ใส่ไป เล็กน้อยนั้นจะทำให้กำลัง เพิ่มขึ้น เพียง เล็กน้อยหรืออาจไม่ เพิ่มขึ้นเลย โดยเฉพาะพวกโซเดียมมอนท์โมริลโลไนท์ นั้นจะต้องการปูนขาวมากกว่าพวกแคลเซียมมอนท์โมริลโลไนท์ เพราะโซเดียมมอนท์โมริลโลไนท์มีค่า CEC สูงกว่า ดังนั้นดิน เหนียวที่มีแร่ดิน เหนียวพวกโซเดียมมอนท์โมริลโลไนท์จึงพัฒนากำลัง ได้น้อยกว่าแคลเซียมมอนท์โมริลโลไนท์เมื่อผสมปูนขาว เข้าไปในปริมาณที่เท่ากัน

Herrin และ Mitchell (1961) ได้ศึกษาพบว่า องค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อการพัฒนากำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวหรืออาจจะกล่าวได้ว่ามีผลต่อปฏิกิริยา pozzolanic ซึ่งได้กล่าวเอาไว้ข้างแล้วในหัวข้อที่ 2.2.4 แต่ในส่วนนี้จะกล่าวถึงองค์ประกอบที่มีผลต่อการพัฒนากำลังอย่างละเอียดดังนี้

1. ปริมาณปูนขาว โดยทั่วไปแล้วกำลังของส่วนผสมจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมเพิ่มมากขึ้น โดยที่ปริมาณปูนขาวที่เหมาะสม (Optimum lime content) นั้นอาจมีหรือไม่มีก็ได้ขึ้นกับระยะเวลาในการบ่ม McDowell และ Moore (1948) Spangler และ Patel (1949) Whitehurst และ Yoder (1952) Lund และ Ramsey (1959) McDowell (1959)

Diamond และ Kinter (1965) ศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของ Ca^{2+} และ OH^- ในสารละลายลดลงอย่างรวดเร็ว โดยปูนขาวประมาณ 3 % โดยน้ำหนักได้ถูกดูดซึมโดยอนุภาคดินเหนียวในเวลาเพียง 5 นาที ปริมาณปูนขาวที่ถูกดูดซึมเข้าไปนี้จะ เป็นปริมาณใกล้เคียงกับ lime fixation point และจะมีการดูดซึมอย่างช้า ๆ ต่อไปอีก แสดงว่าจะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นต่อเนื่องไปอีกและ เป็นปฏิกิริยาที่ดำเนินไปอย่างช้า ๆ ซึ่งจะก่อให้เกิดสารประกอบใหม่ คือ calcium silicate hydrate และ Calcium aluminate hydrate ซึ่งเป็นตัวประสานที่ก่อให้เกิดกำลังในส่วนผสม

2. ชนิดของปูนขาวจะมีผลต่อกำลังของส่วนผสม เช่นเดียวกับที่กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 2.2.4(2)

3. ชนิดของแร่ดินเหนียว การที่กำลังของดินเพิ่มขึ้นเมื่อผสมปูนขาวลงไปนั้นขึ้นกับ pozzolan (สาร siliceous หรือ siliceous aluminous) ในดิน เมื่อมี pozzolan ที่ต้องการและสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับปูนขาวแล้วจะเกิดปฏิกิริยา เพื่อให้สารประกอบใหม่ที่ จะทำให้กำลังของส่วนผสมนั้นเพิ่มมากขึ้น สำหรับดินที่มี pozzolan น้อยหรือแทบไม่มีเลย เมื่อเติมปูนขาวลงไปก็ จะไม่มีการพัฒนา กำลังของส่วนผสม

แร่ดินเหนียวนั้นสามารถที่จะทำปฏิกิริยาได้ดีกับปูนขาวและจะทำให้กำลังในส่วนผสมของดินเหนียว-ปูนขาวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของแร่ดินเหนียวดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น กล่าวคือ มีขนาดเล็กและพื้นที่ผิวจำเพาะมาก จึงสลายตัวให้ pozzolan มากกว่าสารอื่น แต่เนื่องจากแร่ดินเหนียวนั้นมีหลายชนิดและแต่ละชนิดก็มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้น เมื่อผสมปูนขาวลงไปจึงมีการทำปฏิกิริยาได้ดีไม่เท่ากัน

4. ความหนาแน่นของส่วนผสมจะมีผลต่อกำลังของส่วนผสม เช่นเดียวกันกับที่กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 2.2:4 (5)

5. ระยะเวลาในการบ่ม Herrin และ Mitchell (1961) พบว่า เมื่อเวลาในการบ่มมากขึ้นกำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวจะเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยทั่วไปแล้วกำลังของส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นเร็วมากในช่วงแรกและเมื่อเวลาในการบ่มมากขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังจะลดน้อยลงจนถึงระยะเวลาหนึ่งที่กำลังของส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นน้อยมาก

จากการศึกษาของ Ruff และ Ho (1966) พบว่า เมื่อเวลาในการบ่มมากขึ้นจะมีซิลิกา และ/หรือ อลูมินา สลายตัวจากดินและมาทำปฏิกิริยากับปูนขาวมากขึ้นด้วย จึงทำให้กำลังของส่วนผสมเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น

6. อุณหภูมิในการบ่ม Herrin และ Mitchell (1966) พบว่า อัตราการเพิ่มของกำลังในส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวจะสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิในการบ่ม ที่อุณหภูมิในการบ่มต่ำ ๆ การเพิ่มขึ้นของกำลังจะช้ามากแต่เมื่อบ่มที่อุณหภูมิปกติ อัตราการเพิ่มของกำลังจะสูงขึ้น และเมื่อบ่มที่อุณหภูมิสูง (140°F . หรือ 60°C .) ส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวนี้จะมีกำลังเพิ่มสูงขึ้นมากเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น

Laguros, Davidson et al (1956) ได้ทดลองบ่มตัวอย่างดินที่ 140°F . (60°C .) เป็นเวลา 10 วัน ปรากฏว่า ตัวอย่างดินมีกำลังเท่ากับตัวอย่างดินที่บ่มที่อุณหภูมิ 70°F . (21.1°C .) เป็นเวลาถึง 3-4 เดือน

Diamond และ Kinter (1956) พบว่า ปฏิกิริยาของปูนขาวกับดินเหนียวนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการบ่มเพิ่มขึ้น และจะเกิดรูปแบบใหม่ของ calcium aluminate hydrate คือ C_3AH_6 ซึ่งเป็น cubic phase มีโครงสร้างผลึกแตกต่างจาก tetracalcium aluminate hydrate (C_4AH_{13}) ซึ่งรูปแบบนี้จะเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า 30°C .

Eades และ Grim (1960) ได้ทดลองผสมคาโอไลนัทกับปูนขาวที่อุณหภูมิ 60°C . และศึกษาผลที่เกิดขึ้นโดยใช้วิธี X-ray diffraction พบว่า สารประกอบใหม่ที่ได้เป็น calcium silicate hydrate และยังพบ peak ที่ 5.1 Å ซึ่งเป็น C_3AH_6

Diamond, White และ Dolch (1964) ได้ศึกษาพบว่า คาโอไลนัทและมอนท์โมริลโลไนท์ เมื่อทำปฏิกิริยากับปูนขาวแล้วจะทำให้เกิดสารประกอบใหม่แตกต่างกันตามอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา กล่าวคือ ที่อุณหภูมิในการบ่ม 60°C . คาโอไลนัทและมอนท์โมริลโลไนท์ทำให้เกิดสารประกอบที่เหมือนกันคือ CSH (I) ส่วนคาโอไลนัทจะทำให้เกิดสารประกอบเพิ่มขึ้นอีกคือ C_3AH_6 ในขณะที่มอนท์โมริลโลไนท์ไม่เกิดสารประกอบพวก calcium aluminate hydrate เลย

ที่อุณหภูมิในการบ่มต่ำกว่า 60°C . พบว่า เกิด tobermorite gel และ calcium aluminate hydrate ซึ่งพบที่ peak 7.16 \AA โดยที่ tobermorite gel และ calcium aluminate hydrate นี้เป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาของปูนขาวกับ ไมก้า อิลไลต์หรือไพโรไฟไลต์ ส่วนควอทซ์ นั้นทำปฏิกิริยากับปูนขาวที่อุณหภูมิ 60°C . จะทำให้เกิด tobermorite gel

Glenn และ Handy (1964) ได้ศึกษาพบว่า ปฏิกิริยาของปูนขาวกับมอนท์โมริลโลไนท์ที่อุณหภูมิห้องจะเกิด tobermorite gel, CSH (I), C_4AH_{13} และ CSH (II)

Ruff และ Ho (1966) ได้พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการบ่มเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ซิลิกา และ/หรือ อลูมินา สลายตัวออกจากแร่ดินเหนียวเพิ่มมากขึ้น

จะเห็นได้ว่า ดินที่มีการพัฒนากำลังมากนั้นจะต้องเป็นดินที่ให้อลูมินา และซิลิกา ออกมาทำปฏิกิริยาได้มากกว่าดินชนิดอื่น ในขณะที่เดียวกันก็ต้องมีปูนขาวเพื่อที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกา และ อลูมินา ที่สลายออกจากแร่ดินเหนียวมากพอ