บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญที่มาของงานวิจัย

งานก่อสร้างโดยทั่วไปนั้นดินมักก่อให้เกิดปัญหาและอุปสรรคแก่วิศวกรมากกว่าสิ่งอื่น เพราะดินเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ สมบัติต่าง ๆ เปลี่ยนไปตามสภาพพื้นที่และลักษณะการกำเนิด บางครั้งอาจจะสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาโดยการเปลี่ยนสถานที่ก่อสร้าง แต่หากไม่สามารถใช้วิธีดังกล่าวได้และจำเป็นจะต้องแก้ปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพของดินแล้ววิศวกรอาจใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพของดินตามความเหมาะสม

จากการสำรวจสภาพโดยทั่วไปบริเวณ อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ราบลุ่มน้ำทะเลท่วมถึง อำเภอปากพนัง ตั้งอยู่บริเวณใกล้ปากแม่น้ำปากพนังล้อมรอบด้วยป่าชายเลนและป่าพรุ ผิวดินชั้นบนเป็นดินเหนียวอ่อนเนื้อละเอียดสีเทาและมีกลิ่นเหม็น โดยในปัจจุบันอำเภอปากพนังมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วเนื่องจากเป็นเมืองเศรษฐกิจทางประมง สัตว์น้ำ ธุรกิจรังนกหรือที่เรียกว่าคอนโดนกแอ่นและธุรกิจการท่องเที่ยว จึงเกิดการก่อสร้างสาธารณูปโภคพื้นฐานขึ้นอย่างมากมาย อาทิเช่นงานก่อสร้างอาคารและงานก่อสร้างทางที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะถนนและการขนส่งนับเป็นสาธารณูปโภคพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจและการพัฒนาประเทศ

สภาพสิ่งก่อสร้างบริเวณ อำเภอปากพนัง มักพบปัญหาการทรุดของโครงสร้างไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างอาคารหรือโครงสร้างทาง โดยปัญหาที่มักพบกับโครงสร้างอาคารมักเป็นการแตกร้าวหรือเกิดการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันซึ่งส่งผลให้อาคารเกิดการเอียงตัว สำหรับโครงสร้างทางมักพบการทรุดตัวไม่เท่ากันที่บริเวณคอสะพานซึ่งสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน การก่อสร้างถนนในบริเวณ อำเภอปากพนัง มักพบปัญหาการติดหล่มของเครื่องจักรกลหนักหลังจากทำการลอกหน้าดินชั้นบนออกซึ่งเป็นชั้นดินอ่อนที่มี Organic Matter ปนอยู่มากและต้องนำดินจากแหล่งอื่นมาใช้งานซึ่งเป็นการสิ้นเปลือง โดยการก่อสร้างโครงการประตูระบายน้ำปากพนังก็พบปัญหาจากสภาพดินเหนียวอ่อนเช่นกัน จึงต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยวิธี Jet Grouting Cement Column โดยทั่วไปการปรับปรุงคุณภาพของดินมักเสียค่าใช้จ่ายสูง จึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยที่ต้องการนำวัสดุเหลือใช้และสามารถหาได้ในท้องถิ่น เพื่อเป็นการลดการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุ

ที่นิยมใช้ปรับปรุงคุณภาพของดิน โดยพิจารณาเบื้องต้นจากองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่จะนำมาปรับปรุงต้องมีความใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกับการผสมปูนซีเมนต์

เถ้าใยปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม ที่ใช้กากใยปาล์มน้ำมันเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ 800 - 1000 ^{O}C ในระบบปิด สำหรับเถ้าไม้ยางพาราเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานอบไม้ยางพารา ที่ใช้ไม้ยางพาราเผาเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนกับกระบวนการอบไม้ยางพารา มีการเผาไหม้แบบระบบเปิด เถ้าใยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพาราที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี โดยส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้งทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งตามมา ซึ่งเป็นการเสียพื้นที่ในการทิ้งโดยสูญเปล่าและนอกจากนี้ทำให้เกิดมลภาวะจากการฟุ้งกระจายเถ้าใยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

จากที่กล่าวมาข้างต้นเถ้าใยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา มีสมบัติที่สามารถจะพัฒนาเพื่อใช้ในงานปรับปรุงคุณภาพของดิน จึงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมทางสมบัติพื้นฐาน การทดสอบกำลัง วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและทางเคมี ซึ่งหากได้ผลที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้งานได้จะเป็นวัสดุทางเลือกชนิดใหม่ เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาประเทศและยังเป็นการจัดการปัญหาทางสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) ตรวจสมบัติพื้นฐานทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียวปากพนังกรณีที่ยังมิได้ปรับปรุงคุณภาพและกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าใยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

2) เปรียบเทียบคุณลักษณะพฤติภาพของดินเหนียวปากพนังก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าใยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

3) วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางเคมีของดินเหนียวปากพนังกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าใยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1) ดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นดินชั้นดินเดิม (Subgrade) ความลึกของดินตัวอย่างในการทำการศึกษาวิจัยอยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 2 – 3 เมตร จากผิวดินเดิม ที่บริเวณโครงการประตูระบายน้ำปากพนัง อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช

2) ทดสอบสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวปากพนังกรณีที่ยังมิได้ปรับปรุงคุณภาพและกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าใยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

3) การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวปากพนัง เถ้าใยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

4) ทดสอบสมบัติทางเคมีของดินเหนียวปากพนัง เถ้าใยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

5) การทดสอบการบดอัดของดินเหนียวปากพนังกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพเถ้าใยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา โดยบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor)

6) ทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) ของดินเหนียวปากพนังกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพเถ้าใยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา ที่อายุการบ่ม 0, 7, 14, 28 และ 56 วัน ตามลำดับ

7) ทดสอบ California Bearing Ratio (CBR) ของดินเหนียวปากพนังกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพเถ้าใยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา ที่ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด

8) ทดสอบ Consolidation Test ของดินเหนียวปากพนังกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพเถ้าใยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา ที่ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด

9) วิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวปากพนังกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าใยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา ที่อายุการบ่ม 28 วัน

10) การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่เฉพาะอัตราส่วนที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดเท่านั้นที่อายุการบ่ม 7, 14, 28 และ 56 วัน ตามลำดับ

11) ปริมาณการผสมเถ้าใยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา ที่ 0, 5, 10 และ 15 % ของน้ำหนักดินแห้ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน

2) เป็นการนำวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมเกษตรมาใช้ให้เป็นประโยชน์และบรรเทามลภาวะสิ่งแวดล้อม

3) สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ในพื้นที่อื่นที่มีสภาพดินเหนียวอ่อนเช่นกัน

1.5 ทบทวนเอกสาร

1.5.1 ดินเหนียวอ่อน

ดินเหนียวอ่อน (Soft Clayey Soil) หมายถึงดินที่มีขนาดดินเม็ดละเอียดอยู่ในปริมาณมาก มีปริมาณความชื้นสูงและมีปริมาณ Organic Matter สูงด้วย (สุภกิจ, 2537) แร่ดินเหนียว (Clay Minerals) ส่วนใหญ่มักเป็นแร่จำพวก Kaolinite, Illite และ Montmorillonite ซึ่งเป็นแร่ประเภท Hydrous Aluminum Silicate ดินเหนียวแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกันไปตามชนิดของแร่ที่เป็นองค์ประกอบ โครงสร้างการรวมตัวของอนุภาคเม็ดดินรวมทั้งปริมาณน้ำในมวลดินด้วย ดินเหนียวโดยทั่วไปเป็นเม็ดดินที่ตกตะกอนอยู่บริเวณปากแม่น้ำ โดยลักษณะการเกิดของดินเหนียวอ่อนบริเวณนี้จะมีทั้งแบบตกตะกอนในแม่น้ำและในทะเล เนื่องจากเม็ดดินจะพัดพาจากแม่น้ำลงสู่ทะเล ในขณะเดียวกันก็มีการหนุนตัวกลับของน้ำทะเลทำให้เกิดการตกตะกอน ซึ่งเป็นลักษณะการเกิดดินตะกอนบริเวณที่ลุ่มน้ำปากพนัง หรือเรียกว่า ดินเหนียวปากพนัง (Pakphanang Clay)

1.5.2 ธรณีวิทยาทั่วไปของพื้นที่ภาคใต้

อภิชัย (2546) ได้เสนอข้อมูลสภาพทางธรณีและลักษณะของชั้นดินบริเวณภาคใต้ดังนี้

ภาคใต้มีลักษณะแหลมยื่นออกไปในทะเล ด้านตะวันออกติดกับอ่าวไทย ส่วนด้านตะวันตกติดทะเลอันดามัน ทางเหนือเริ่มจากบริเวณอำเภอท่าแซะ จังหวัดชุมพร ลงไปทางใต้สุดจรดประเทศมาเลเซีย ความยาวจากเหนือมาใต้ประมาณ 610 กิโลเมตร มีความกว้างระหว่าง 220 กิโลเมตร จากฝั่งตะวันออกของอำเภอปากพนังไปจนถึงฝั่งตะวันตกของอำเภอท้ายเหมือง จังหวัดพังงา ส่วนแคบสุดของคาบสมุทรอยู่ที่บริเวณคอคอดกระ มีความกว้างประมาณ 64 กิโลเมตร ประกอบด้วยจังหวัดต่าง ๆ 14 จังหวัด ทางริมฝั่งทะเลด้านตะวันออกได้แก่ จังหวัดชุมพร, สุราษฎร์ธานี, นครศรีธรรมราช, สงขลา, ปัตตานี, และนราธิวาส ส่วนริมฝั่งทะเลด้าน

ตะวันตกได้แก่ จังหวัดระนอง, พังงา, ภูเก็ต, กระบี่, ตรัง, และสตูล ส่วนจังหวัดที่ไม่ติดกับทะเลได้แก่ จังหวัดพัทลุงและจังหวัดยะลา

การเปลี่ยนแปลงทางธรณีของชายฝั่งทางภาคใต้เริ่มในช่วงประมาณ 10,000 ปีที่แล้ว โดยคาบสมุทรทางใต้ได้มีการตัวยกตัวเอียงไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ทำให้ชายฝั่งทะเลด้านทิศตะวันออกยกตัวขึ้นและชายฝั่งด้านตะวันตกจมลง ประกอบกับการลดลงของระดับน้ำทะเลฝั่งทะเลตะวันออกที่เคยจมอยู่ใต้น้ำถูกยกขึ้นสูงกว่าระดับน้ำทะเล เกิดเป็นที่ราบกว้างชายฝั่งที่มีระดับต่ำกว่าที่ราบเดิม เกิดเป็นตะพักน้ำทะเลขึ้นมาใหม่ แนวชายฝั่งทะเลบริเวณนี้จะมีลักษณะค่อนข้างราบเรียบ นอกจากนี้การยกตัวขึ้นของแผ่นดินทำให้แม่น้ำต้องมีการปรับการไหลและการกัดเซาะ โดยลำน้ำจะกัดเซาะบริเวณกลางและปลายน้ำให้ลึกลงไป ทำให้มีตะพักแม่น้ำใหม่เกิดขึ้น สภาพภูมิประเทศลำน้ำในบริเวณนี้จึงมีการกัดเซาะในลักษณะของรูปตัวยู

บริเวณที่ราบลุ่มชายทะเลจะมีขนาดแคบทางตอนเหนือของอ่าวบ้านดอนและขยายกว้างขึ้นระหว่างจังหวัดนครศรีธรรมราชจนถึงจังหวัดนราธิวาส ที่ราบในบริเวณนี้เกิดจากกระแสน้ำทะเลและคลื่นพัดพาทรายมากองก่อตัวเป็นสันทรายริมฝั่ง สันทรายนี้จะงอกเป็นแหลมออกไปในทะเล การก่อตัวของสันทรายริมทะเลเป็นแหลมยื่นออกไปที่มีขนาดใหญ่และเห็นได้ชัดเจน คือ แหลมตะลุมพุก จังหวัดนครศรีธรรมราช, แหลมสนอ่อน จังหวัดสงขลา และแหลมตาชี จังหวัดปัตตานี เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งแหลมที่ยื่นไปก็จะปิดบริเวณที่เป็นอ่าว ทำให้เกิดแอ่งน้ำหลังสันทรายขึ้นเรียกว่าลากูน ทะเลสาบสงขลาก็เกิดจากกระบวนการนี้เช่นกัน ซึ่งลากูนเหล่านี้ต่อมาจะตื้นเขินและมีต้นโกงกางหรือไม้น้ำอย่างอื่นขึ้น กลายเป็นป่าพรุหลังแนวชายหาดในปัจจุบันและดินในบริเวณนี้จะเกิดจากการทับถมของต้นไม้เหล่านี้กลายเป็นดินพรุ ซึ่งพบได้ทั่วไปหลังสันทรายในบริเวณจังหวัดปัตตานีและจังหวัดนราธิวาส ลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปจะมีระดับความสูงน้อยกว่า 10 เมตร เหนือระดับน้ำทะเล

การยกตัวของชายฝั่งทะเลด้านตะวันออกทำให้ชายฝั่งด้านตะวันตกจมลง บริเวณที่เป็นชายหาดเดิมจะจมลงใต้ทะเลทำให้ที่ราบริมทะเลมีน้อยลงและผลอันนี้ยังทำให้ชายฝั่งมีรูปร่างเว้าแหว่งมาก มีลักษณะเป็นอ่าวสลับกับแหลมและมีเกาะต่าง ๆ อยู่นอกชายฝั่งเป็นจำนวนมากมาย ในบางบริเวณจะมีภูเขาปิดล้อมชายหาด จากการที่ทิวเขาขนาดใหญ่อยู่ชิดชายฝั่ง เมื่อชายฝั่งจมลงลำน้ำในบริเวณนี้ก็จะปรับตัวกัดเซาะบริเวณต้นน้ำลงเป็นร่องลึกลงไปอีก ทำให้ในบริเวณนี้นอกจากจะมีที่ราบชายฝั่งน้อยแล้ว สภาพร่องน้ำจะเป็นร่องลึกรูปตัววี ต่างจากร่องน้ำฝั่งตะวันออกซึ่งจะเป็นร่องกว้างตื้นและมีตะพักลำน้ำหลายระดับแทบจะไม่พบในชายฝั่งด้านนี้

รูปที่ 1.1 ชายฝั่งทะเลทางภาคใต้เมื่อ 6000 ปีที่แล้ว เทียบกับปัจจุบัน
ที่มา: อภิชัย (2546)

รูปที่ 1.1 แสดงบริเวณที่เคยเป็นชายฝั่งทะเลในอดีตเทียบกับปัจจุบัน ในบริเวณภาคใต้ ให้เห็นอย่างชัดเจนในตัวอำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช ตั้งอยู่ตามแนวสันทรายเก่า และอยู่ห่างจากสันทรายริมทะเลปัจจุบันประมาณ 20 กิโลเมตร นอกจากนี้ยังมีร่องรอยเก่าให้เห็นเป็นแนวยาวในบริเวณด้านทิศตะวันตกของตัวเมือง

สภาพธรณีวิทยาของพื้นที่ อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช ได้จากการศึกษาในเบื้องต้นโดยการรวบรวมข้อมูลเก่าที่ได้มีการศึกษาไว้แล้ว ได้แก่ แผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทยมาตราส่วน 1:1,000,000 (กรมทรัพยากรธรณี, 2544) และทำการสำรวจข้อมูลเพิ่มเติม พบว่าธรณีวิทยาของบริเวณพื้นที่ประกอบด้วยหมวดหินยุคควอเทอร์นารี (Quaternary) ดังรูปที่ 1.2

หินยุคควอเทอร์นารี (Quaternary) ประกอบด้วยชั้นของกรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ซึ่งเกิดจากการพัดพามาสะสมของทางน้ำบริเวณที่ราบเชิงเขาและที่ราบลุ่มแม่น้ำ รวมทั้งตะกอนที่เกิดจากการพัดพามาสะสมโดยน้ำทะเล การสะสมตัวของตะกอนตามบริเวณเชิงเขานอกจากเกิดจากการพัดพามาสะสมของทางน้ำแล้ว บางบริเวณยังอาจเกิดจากการสะสมตัวของตะกอนที่เกิดจากการผุพังของหินโดยกระบวนการทางกายภาพและเคมี ทำให้เกิดการสะสมตัวอยู่กับที่ หินยุคควอเทอร์นารีเป็นชั้นของตะกอนร่วน บางส่วนจะถูกเปลี่ยนแปลงโดยกระบวนการทาง

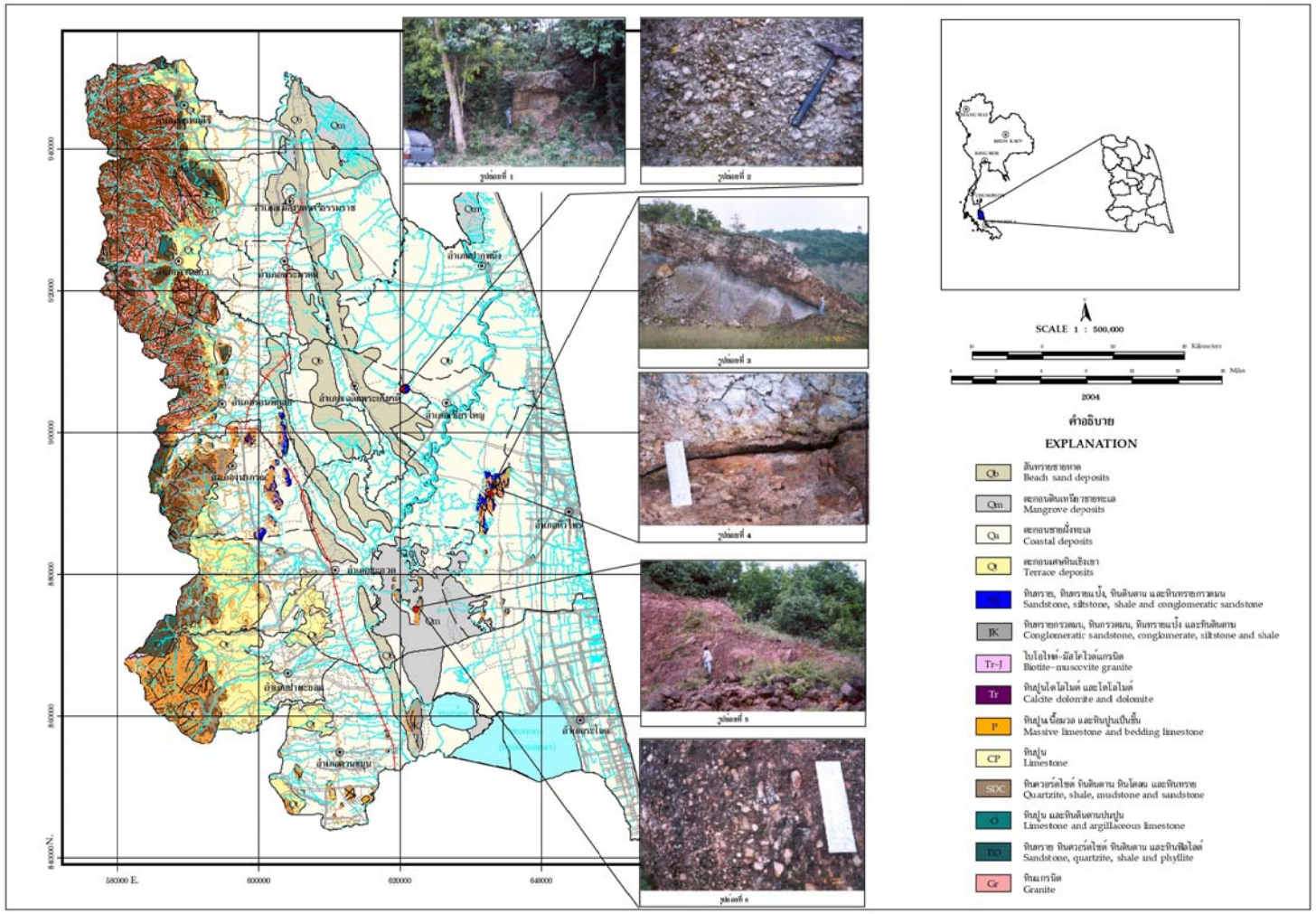
เคมีทำให้เกิดเป็นศิลาแลง อายุของตะกอนอยู่ในช่วงประมาณ 1.6 ล้านปี ถึงปัจจุบัน ตะกอนเหล่านี้สามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทย่อย ๆ ดังนี้

1) สันทรายชายหาด (Beach Sand Deposits, Qb) เป็นชั้นตะกอนทรายขนาดหยาบถึงละเอียดที่เกิดจากการพัดพามาสะสมตัวโดยน้ำทะเล พบอยู่ตามที่ราบชายฝั่งทะเลต่าง ๆ

2) ตะกอนดินเหนียวชายทะเล (Mangrove Deposits, Qm) เป็นชั้นตะกอนดินเหนียวที่เกิดจากการพัดพามาสะสมตัวโดยน้ำทะเล พบบริเวณที่เป็นป่าชายเลน และป่าพรุที่มีน้ำท่วมถึง

3) ตะกอนน้ำพา (Alluviam Deposits, Qa) ประกอบด้วยชั้นกรวดปนทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวที่ถูกพัดพามาโดยแม่น้ำ และสะสมตัวอยู่บริเวณที่ราบน้ำท่วมถึง และที่ราบลุ่มแม่น้ำต่าง ๆ

4) ตะกอนเศษหินเชิงเขา (Terrace Deposits, Qt) เป็นตะกอนเศษดินและหินที่ผุพังมาจากหินบริเวณเชิงเขา และตกตะกอนทับถมเป็นที่ราบบริเวณเชิงเขา ลักษณะของตะกอนมักมีขนาดต่าง ๆ กัน มีความเหลี่ยมคมสูง การคัดขนาดไม่ดี ส่วนประกอบของชั้นตะกอนชนิดนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของหินต้นกำเนิด (Host Rock)

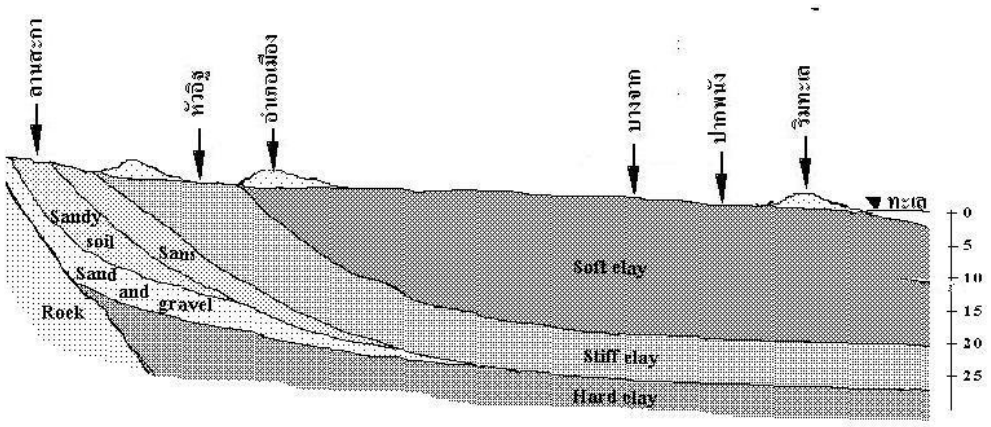


รูปที่ 1.2 แผนที่ลักษณะทางธรณีวิทยาลุ่มน้ำปากพนัง

ที่มา: ดัดแปลงจากกรมทรัพยากรธรณี (2544)

1.7 สภาพชั้นดินบริเวณชายฝั่ง

บริเวณที่ราบชายฝั่งด้านตะวันออก ตั้งแต่จังหวัดสุราษฎร์ธานีลงไปถึงจังหวัดนราธิวาส ชั้นดินบริเวณชายฝั่งส่วนใหญ่จะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน ในบริเวณที่เคยเป็นชายหาดเก่าก็จะมีชั้นทรายทับถมอยู่ข้างบน ในบางบริเวณ เช่นที่อำเภอเมืองสงขลา และอำเภอเมืองนราธิวาส ชั้นทรายอาจหนาถึง 12 เมตร หลังสันทรายจะมีร่องน้ำขนานกับแนวชายฝั่ง ดินผิวบนในบริเวณนี้จะเป็นดินอินทรีย์และในบริเวณจังหวัดนราธิวาส ได้แปรสภาพเป็นดินพรุ (Peat) ปกคลุมผิวบนอยู่หนา 3.0 - 4.0 เมตร ล่างลงไปเป็นดินเหนียวอ่อน (Marine Clay) สภาพการวางตัวของชั้นดินในบริเวณนี้ได้แสดงในรูปที่ 1.3

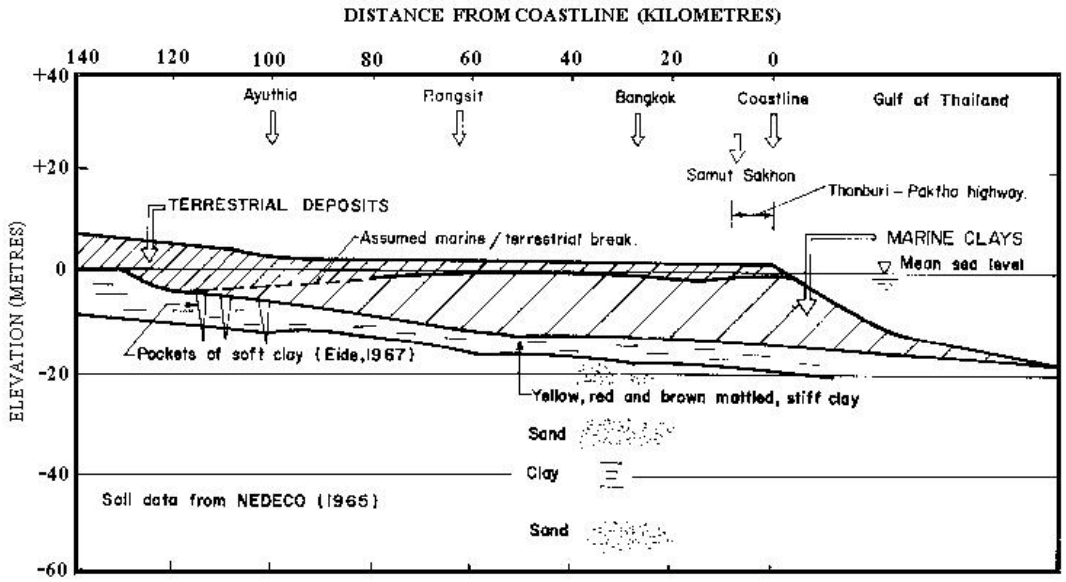


รูปที่ 1.3 ชั้นดินบริเวณชายฝั่งตะวันออก จังหวัดนครศรีธรรมราช
ที่มา: อภิชัย (2546)

ชั้นดินในบริเวณอำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช จะมีชั้นทรายและทรายปนดินสลับอยู่เบื้องล่าง ชั้นดินเหล่านี้เกิดจากการสะสมของตะกอนแม่น้ำก่อนที่ชายฝั่งจะถอยร่นไป การก่อตัวของชายหาดใหม่เกิดจากการก่อตัวเป็นแหลมยื่นออกไปปิดชายฝั่งเดิม ซึ่งรวมถึงทะเลสาบสงขลาด้วย ดังนั้นแนวชายฝั่งใหม่จะไม่มีตะกอนแม่น้ำทับถมอยู่ข้างล่าง ชั้นดินลักษณะนี้เกิดขึ้นตลอดแนวชายฝั่งจากอำเภอปากพนังถึงอำเภอสิงหนคร ยกเว้นบริเวณปากทะเลสาบสงขลาซึ่งมีตะกอนของแม่น้ำเข้ามาทับถมอยู่ด้วย

ภาคใต้ฝั่งตะวันออกในอดีตเป็นส่วนหนึ่งของอ่าวไทย การงอกของชายฝั่งเกิดจากการสะสมของตะกอนที่แม่น้ำพัดพาลงมา ลักษณะเช่นเดียวกันนี้ก็เกิดในบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา ดังนั้นลักษณะชั้นดินชายฝั่งจะไม่แตกต่างกันนัก ดังรูปที่ 1.4 ซึ่งเป็นรูปตัดของชั้นดินที่เสนอโดย

Cox (1970) ข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดอย่างหนึ่งคือ ปากอ่าวเจ้าพระยาคลื่นลมค่อนข้างสงบ ดังนั้นจึงไม่มีการก่อตัวของชายหาดเกิดขึ้นและที่น่าสนใจอีกอย่างก็คือ ชั้นดินเหนียวแข็งที่อยู่ใต้ชั้นดินเหนียวอ่อน (Marine Clay) มีลักษณะค่อนข้างเหมือนกัน ซึ่งเป็นไปได้ว่าในยุคก่อนยุคควอเทอร์นารี ชั้นดินนี้อาจเป็นชั้นผิวดินปกคลุมบริเวณอ่าวไทยในภาคกลางและภาคใต้ ก่อนที่อ่าวไทยจะจมลงใต้น้ำ



รูปที่ 1.4 ชั้นดินบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา
ที่มา: Cox (1970)

1.5.3 สภาพปัญหาทางวิศวกรรม

จากข้อมูลสภาพทางธรณีวิทยาและชั้นดินบริเวณชายฝั่งพบว่า ดินปากพนังมีลักษณะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนหนา ประมาณ 20 เมตร ชั้นล่างลงไปเป็นดินเหนียวแข็งปานกลาง 5 เมตร และถัดลงไปเป็นดินเหนียวแข็ง

ทางด้านวิศวกรรม ดินปากพนังเป็นดินที่มีกำลังต่ำ (Low Strength) มีสภาพการยุบตัวได้สูง (High Compressibility) ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญทางวิศวกรรม ซึ่งมักก่อให้เกิดปัญหาทางวิศวกรรมอัน ได้แก่

1) ปัญหาด้านการทรุดตัว ซึ่งเป็นผลมาจากการรับแรงแบกทานของดินเหนียว ทำให้ดินเหนียวเกิดการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ส่งผลให้เกิดการทรุดตัวสูงและกินระยะเวลานาน ทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งก่อสร้าง

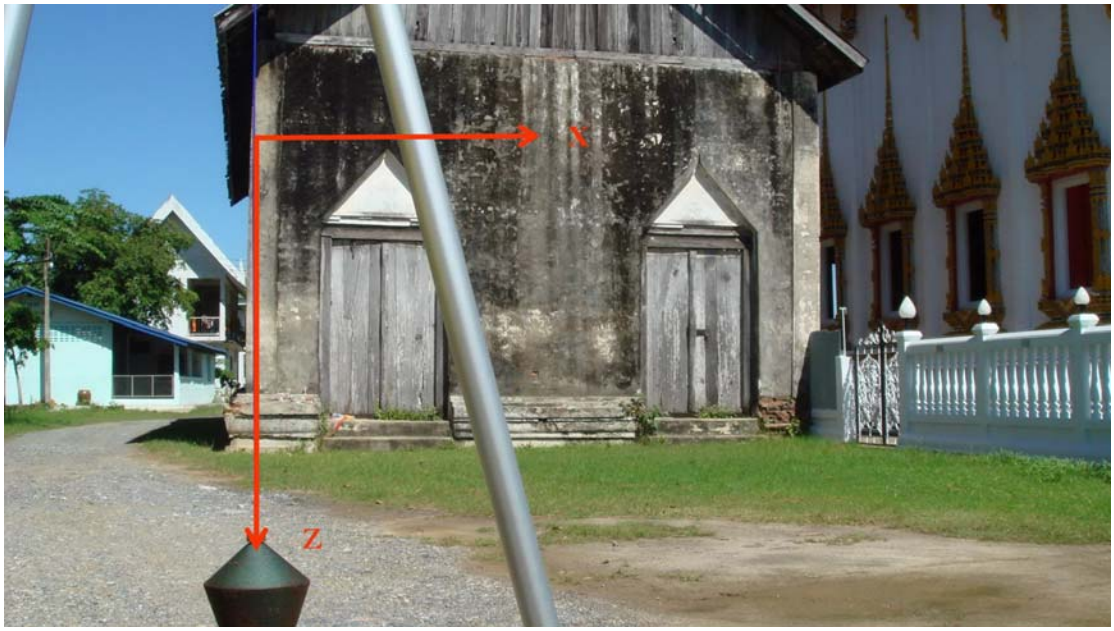
2) ปัญหาเสถียรภาพความมั่นคงของมวลดิน เช่น งานก่อสร้างถนน งานขุดหรือถมดินเพื่อการก่อสร้าง ซึ่งอาจเกิดการเลื่อนพังได้ เนื่องจากกำลังของดินต่ำ ไม่สามารถที่จะรับแรงแบกทานบรรทุกที่เกิดขึ้นได้

จากการสำรวจสิ่งก่อสร้างใน อำเภอปากพนัง มักพบความเสียหายต่อโครงสร้างที่เกิดจากปัญหาสภาพดินอ่อน ดังต่อไปนี้

1) การทรุดตัวของอาคารโดยมักเกิดจากใช้เสาเข็มเสียดทาน (Friction Piles) เนื่องจากสภาพชั้นดินเหนียวอ่อนมีความหนาค่อนข้างมาก ซึ่งอาจก่อให้เกิดการทรุดตัวบริเวณปลายเข็ม แสดงดังรูปที่ 1.5

2) การทรุดตัวที่บริเวณคอสะพานเนื่องจาก โครงสร้างสะพานใช้ฐานรากเสาเข็ม (Pile Foundation) แต่โครงสร้างถนนถูกวางอยู่บนดินเดิม จึงเกิดการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน (Differential Settlement) ดังรูปที่ 1.6

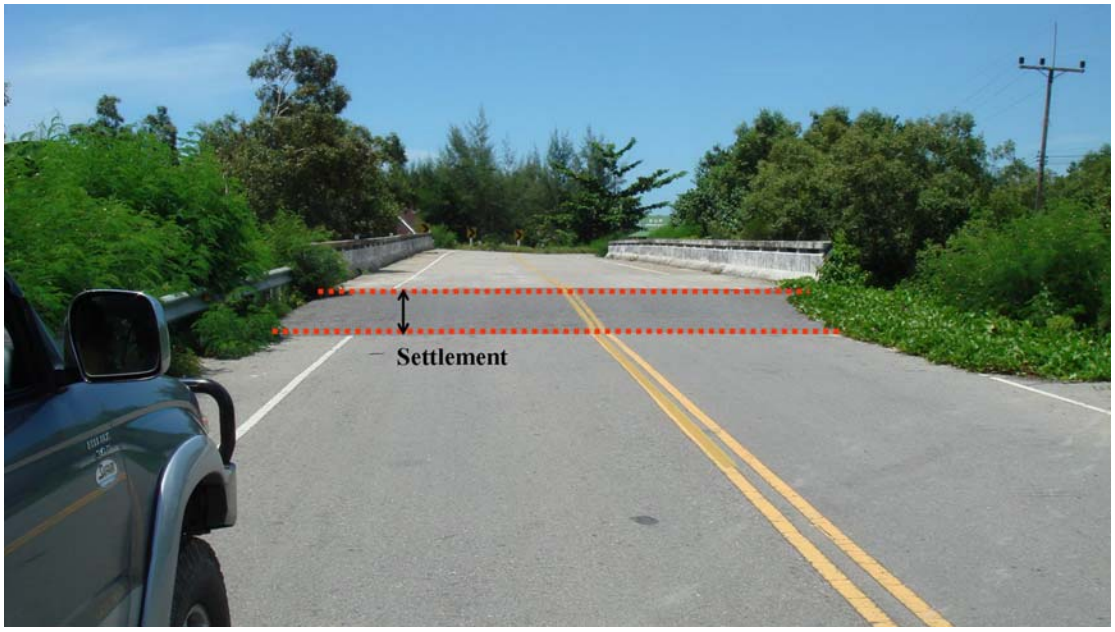
(ก)



(ข)

รูปที่ 1.5 การทรุดตัวของโครงสร้างอาคาร (ก) อาคารทางด้านขวาเกิดการเอียงประมาณ 2 องศา และ (ข) โบสถ์เกิดการเอียงประมาณ 1 องศา

(ก)



(ข)

รูปที่ 1.6 การทรุดตัวของโครงสร้างถนน (ก) ถนนภายในอำเภอปากพนัง และ (ข) ถนนทางหลวงหมายเลข 4013 ตอน อำเภอปากพนัง - ตำบลแหลมตะลุมพุก

1.5.4 การปรับปรุงคุณภาพดินในงานก่อสร้าง

งานก่อสร้างโดยทั่วไปนั้นดินมักก่อให้เกิดปัญหาและอุปสรรคแก่วิศวกรมากกว่าสิ่งอื่น เพราะดินเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติสมบัติต่าง ๆ เปลี่ยนไปตามสภาพพื้นที่และลักษณะการกำเนิด บางครั้งอาจจะสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาโดยการเปลี่ยนสถานที่ก่อสร้าง แต่หากไม่สามารถใช้วิธีดังกล่าวได้และจำเป็นจะต้องแก้ปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพของดินแล้ววิศวกรอาจใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพของดิน โดยแบ่งวิธีการปรับปรุงคุณภาพของดินได้ดังต่อไปนี้

1) การปรับปรุงคุณภาพโดยวิธีทางกล (Mechanical Stabilization)
2) การปรับปรุงคุณภาพโดยวิธีทางเคมี (Chemical Stabilization)
3) การปรับปรุงคุณภาพโดยวิธีระบายน้ำ (Hydraulic Stabilization)
4) การปรับปรุงคุณภาพโดยลดหรือเพิ่มอุณหภูมิ (Thermal Stabilization)
5) การปรับปรุงคุณภาพโดยการใช้ประจุไฟฟ้า (Electrical Stabilization)

United States Airforce (1966) ได้เสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยแบ่งตามขนาดและค่า Plastic Index ดังตารางที่ 1.1

วิธีการปรับปรุงคุณภาพของดินที่เหมาะสมกับดินเหนียวอ่อน ได้แก่ การปรังปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีทางเคมี เนื่องจากสารประสานสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่มีอยู่มากในดินได้ดี ซึ่งเมื่อผสมสารเคมีในปริมาณและชนิดที่เหมาะกับจุดมุ่งหมายของการปรับปรุงคุณภาพแล้ว ดินเหนียวจะมีสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น เช่น มีกำลังอัดสูงขึ้น อัตราการทรุดตัวที่ต่ำลง สารประสานที่นิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียว ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปูนขาว ของเสียอุตสาหกรรม เช่น เถ้า กากแร่ เป็นต้น

ตารางที่ 1.1 วิธีปรับปรุงคุณภาพของดินที่ต่างชนิดกัน

Soil Type	**Most Effective Stabilization Method**
1. Coarse Granular	Mechanical Blending Soil - Asphalt Soil - Cement Lime - Fly Ash
2. Fine Granular Soils	Mechanical Blending Portland Cement Stabilization Soil - Asphalt Lime - Fly Ash Chloride
3. Clays of Low Plasticity	Compaction Portland Cement Stabilization Chemical Waterproofers Lime Modification
4. Clays of High Plasticity	Lime Stabilization

ที่มา: United States Airforce (1966)

วิธีการปรับปรุงคุณภาพของดินที่เหมาะสมกับดินเหนียวอ่อน ได้แก่ การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีทางเคมี เนื่องจากสารประสานสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับ Soil Silica และ Alumina ที่มีอยู่มากในดินได้ดี ซึ่งเมื่อผสมสารเคมีในปริมาณและชนิดที่เหมาะกับจุดมุ่งหมายของการปรับปรุงคุณภาพแล้ว ดินเหนียวจะมีสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น เช่น มีกำลังรับแรงเฉือนสูงขึ้น อัตราการทรุดตัวที่ต่ำลง สารประสานที่นิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียว ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ของเสียอุตสาหกรรม เช่น เถ้า กากแร่ เป็นต้น

1.5.5 วัตถุประสงค์การปรับปรุงคุณภาพของดินโดยวิธีทางเคมี

Hogentogler (1938) กล่าวว่า การปรับปรุงคุณภาพของดินเป็นการทำให้ดินตามธรรมชาติมีความสามารถในการรับแรงแบกทานได้ดีขึ้นและทนทานต่อการสึกหรอ วิธีการปรับปรุงอาจเป็นการบดอัดให้แน่นหรือการใช้สารผสมเพิ่มลงในดิน ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือเป็นผงก็ได้

Winterkorn (1955) กล่าวว่า การปรับปรุงคุณภาพของดินเป็นการนำเอาวิธีการทางด้านฟิสิกส์ และเคมีมาใช้ผสมกับดินเพื่อให้ดินมีสมบัติที่ดีทางด้านวิศวกรรม

Circeo et al. (1962) กล่าวว่า การใส่ปูนซีเมนต์ลงในดินจะเปลี่ยนแปลงสมบัติและโครงสร้างของดิน ดินเกือบทุกชนิดสามารถปรับปรุงคุณภาพได้ แต่จะให้ผลที่แตกต่างกัน ถึงแม้ว่าดินจะมีสมบัติทางฟิสิกส์ที่เหมือนกัน ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากัน แต่แตกต่างกันที่สมบัติทางเคมี ทำให้เกิดผลกระทบต่อกำลังอัดของดินที่ไม่เหมือนกันด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าส่วนประกอบทางเคมีจะมีผลอย่างไรต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์

Mitchell (1982) กล่าวว่า วัตถุประสงค์ในการนำสารเคมีผสมลงในดินก็เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดิน ได้แก่ ควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาณการปรับปรุงคุณภาพในการรับน้ำหนักหรือพฤติกรรมของ Stress และ Strain ปรับปรุงการไหลซึมของน้ำที่ผ่านดิน และความทนทานต่อการกัดกร่อนแตกหักของหิน

การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน อันได้แก่ การบวมตัว หรือหดตัวของดินเมื่อความชื้นในดินมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสภาพของภูมิอากาศ มีผลต่อกำลังรับแรงแบกทานของดิน การควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินสามารถทำได้โดยการผสมสารที่มี Hydration Cation ต่ำๆ เช่น Calcium, Magnesium และ Aluminium เข้าไปแทนที่ดินที่มีสารประกอบประเภท Sodium หรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาที่จะทำให้ประสานเม็ดดิน (Cementitious) เกิดขึ้น รวมทั้งอาจทำได้โดยการใช้สารเคมีช่วยป้องกันการซึมของน้ำ

การที่จะทำให้ความสามารถในการรับแรงแบกทานของดินเพิ่มขึ้นหรือทำให้ดินแข็งแรงขึ้นก็อาจทำได้โดยการลดช่องว่างในเม็ดดิน การทำให้เม็ดดินเชื่อมติดกันหรือการทำให้เกิด Flocculation รวมทั้งการป้องกันไม่ให้เกิดการบวมตัวของดินล้วนมีส่วนช่วยให้ดินมีกำลังแข็งแรงขึ้น การลดการซึมได้ของดินก็ทำได้โดยการปรับปรุงช่องว่างในเม็ดดิน หรือการทำให้ขนาดมวลคละของดินดีขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการปรับปรุงคุณภาพของดินระหว่าง Organic Matter โดยทั่วไปจะแตกต่างกันมาก โดยที่ Organic Matter จะให้กำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและจะหยุดการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงแบกทานเมื่อระยะเวลาหนึ่ง

เมื่อผสมปูนซีเมนต์ลงไปในดินจะเกิดปฏิกิริยาและได้สารสุดท้าย Calcium Silicate Hydrate (CSH) ซึ่งในปูนซีเมนต์จะมี SiO_2 อยู่แล้ว ปฏิกิริยาช่วงสั้น ๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อผสมปูนซีเมนต์ลงในดินประกอบด้วยการแทนที่โดยวิธีการดูดซับ Cation ของ Calcium และเม็ดดินจะดูดซับเอา $Ca(OH)_2$ เข้าไว้ เกิดสารประกอบที่ทำให้เกิดการยึดประสานติดกันของเม็ดดิน และเกิดการเพิ่มสภาพความเป็นด่างขึ้นให้กับสภาวะแวดล้อม ส่วนปฏิกิริยาที่เกิดต่อเนื่องในระยะยาวนั้น เนื่องจากสภาพความเป็นด่างจะทำให้เกิดการแยกตัวของเม็ดดินเหนียว และการผลิตสารประกอบที่ช่วยในการยึดประสานเพิ่มขึ้นต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานหลายปี

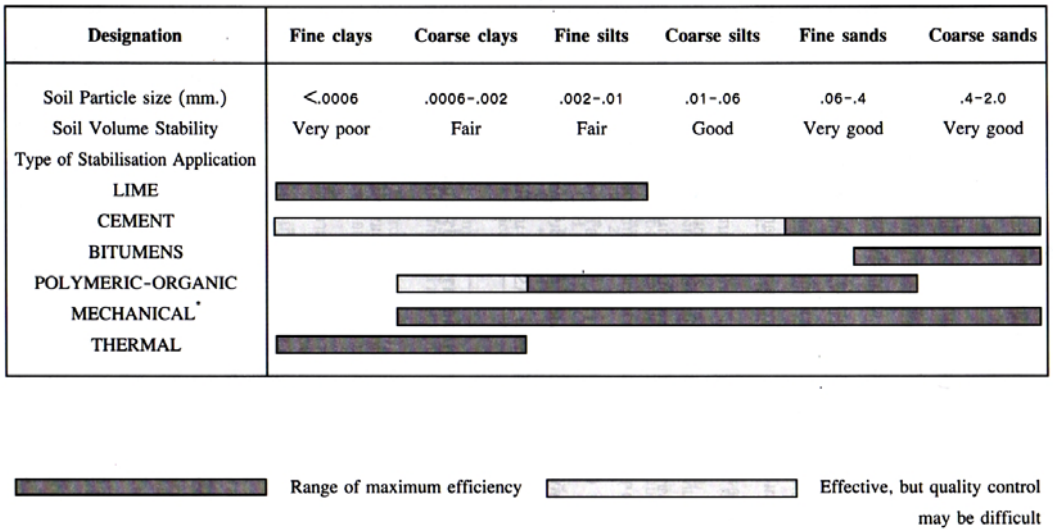
1.5.6 การปรับปรุงคุณภาพของดินโดยวิธีทางเคมี

Gordon (1984) กล่าวว่า การผสมสารเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพของวัสดุทำทางมีการใช้สารหลายชนิดในการผสม ดังนั้นทางเลือกในการใช้สารผสมเพิ่ม จึงต้องพิจารณาถึงสมบัติตามธรรมชาติของวัสดุที่จะทำการปรับปรุง วัตถุประสงค์หรือเป้าหมายของการปรับปรุง สมบัติที่ต้องการของวัสดุหลังจากการปรับปรุง ความสามารถของเครื่องมือที่ใช้ และราคาที่ประหยัดอย่างเหมาะสมที่สุด และยังได้รายงานว่าใน Queensland ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มจะดีที่สุด แต่ในบางครั้งยังใช้ปูนขาวเป็นสารผสมร่วมเพื่อให้เกิดการปรับปรุงเบื้องต้น สำหรับดินที่มีค่า Plastic Index สูงเป็นพิเศษด้วย ในออสเตรเลียโดยทั่วไปใช้ Cement, Lime, Lime – Fly Ash และ Lime – Cement - Bitumen

Metcalf (1977) ได้เสนอการเลือกวิธีปรับปรุงคุณภาพของดิน ดังตารางที่ 1.2 ซึ่งวิธีการจะต้องเลือกให้เหมาะสมที่สุดในแต่ละชนิดของดิน โดยคำนึงถึงอิทธิพลของขนาดเม็ดดินเป็นหลัก

Wilmot (1995) กล่าวว่า In Situ Stabilization ได้ใช้กับงานสร้างทางและ Recycling ในประเทศออสเตรเลีย ตั้งแต่ปี 1950 ซึ่งใช้สารผสมเพิ่มคือ Cement, Cement - Fly Ash, Bitumen และ Hydrate Lime ซึ่งแต่เฉพาะงาน Pavement Recycling ต่อมาในปี 1980 ก็มีการนำปูนซีเมนต์ผสมมาใช้กันอย่างกว้างขวางเพราะเพิ่มระยะเวลาในการทำงานให้นานขึ้น โดยให้ความแข็งแรงเท่ากันในระยะยาว ปูนซีเมนต์ผสมดังกล่าวได้แก่ Cement - Slag, Cement - Fly Ash และ Cement - Lime ซึ่งใช้กันอย่างกว้างขวางใน New South Wale, South Australia และ Queensland ซึ่งได้มีการเสนอแนวทางเลือกใช้สารผสมเพิ่ม ดังตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.2 วิธีปรับปรุงคุณภาพของดินที่แปรผันตามขนาดเม็ดดิน



ที่มา: Metcalf (1977)

ตารางที่ 1.3 แนวทางเลือกใช้สารผสมเพิ่มกับวัสดุแต่ละชนิด

Admixture	Crushed Rock	Well Graded Gravel	Silty/ Clayey Gravel	* Sand	Sandy Silty Clay	Heavy Clay
Cement	A	A	A	B	B	N
Blend Cementitious	A	A	A	A	A	N
Hydrate Lime	B	B	A	N	B	A
Hydrate Lime + Cement	N	N	B	N	B	A
Polymeric	B	A	A	B	A	B
Bitumen	A	A	B	B	B	N

Usually very suitable A

Usually satifactory B

Usually not suitable N

* Depend upon grading. (Single size sand Require higher additive content)

ที่มา: Wilmot (1995)

การปรับปรุงคุณภาพของดินโดยวิธีทางเคมี ซึ่งมีสารเคมีที่ใช้เป็นสารผสมเพิ่ม ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายดังต่อไปนี้

ปูนซีเมนต์ (Portland Cement)

ปฏิกิริยาประสานที่สำคัญของปูนซีเมนต์คือ ปฏิกิริยา Cement Hydration ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำและเกิดเป็นสารเชื่อมประสานเรียกว่า Cement Gel ซึ่งจะจับตัวแข็งเมื่อมีอายุเพิ่มขึ้นและปูนซีเมนต์แต่ละชนิดจะประกอบด้วยสาร Calcuim Silicate ชนิดต่าง ๆ ในปริมาณที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีความแตกต่างในสมบัติการแข็งตัวทั้งด้านระยะเวลาและความแข็งแรง

ปูนขาว (Lime)

Hausmann (1990) กล่าวว่า ปฏิกิริยาทางเคมีขั้นพื้นฐานของดินเมื่อถูกปรับปรุงด้วยปูนขาวมี 4 ลักษณะคือ

1) Hydration

ปูนขาวชนิด Quicklime จะทำปฏิกิริยากับน้ำในดินทันทีเมื่อผสมและทำให้เกิดความร้อนขึ้น ส่งผลให้ปริมาณน้ำในดินลดลง ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาในลักษณะนี้จะมีประโยชน์ต่อการปรับปรุงดินที่มีความชื้นสูง เนื่องจากจะช่วยลดน้ำในดินลง

2) Flocculation (Ion Exchange)

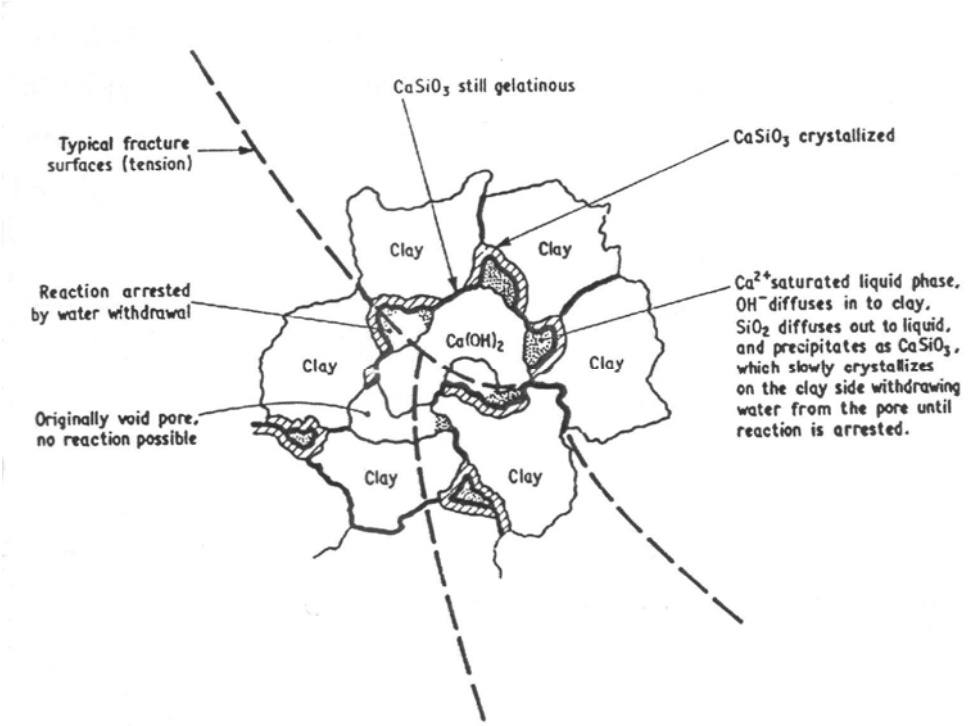
เมื่อปูนขาวผสมกับดินเหนียวที่มีความชื้นจะทำให้ดินเหนียวร่วนขึ้น สามารถแยกเป็นเม็ดได้ง่าย เนื่องจากเกิดการแทนที่หรือแลกเปลี่ยนกันของ Cation ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในดินกับ Ca^{2+} จากปูนขาว โดย Ca^{2+} จะเข้าไปแทนที่ของธาตุโลหะในดินเช่น Na^{+}, H^{+} ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นที่ผิวของเม็ดดิน (Clay Particle)

3) Cementation (Pozzolanic Reaction)

ปฏิกิริยา Cementation หรือ Pozzolanic นั้นเป็นปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวและ Soil Silica หรือ Soil Alumina ซึ่งก่อให้เกิดสารที่มีสมบัติการประสานตัวซึ่งกันและกัน โดยเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่ทำให้กำลังของดินเหนียวผสมปูนขาวเพิ่มมากขึ้น

สารที่จะเกิดปฏิกิริยากับปูนขาวแล้วจะได้สารประกอบชนิดใหม่ที่มีสมบัติในการยึดเหนี่ยวเม็ดดินนี้รู้จักกันในชื่อสาร Pozzolans ดังนั้น ชนิดและปริมาณของสารปอซโซลานจะเป็นตัวควบคุมปฏิกิริยาดังกล่าว สารปอซโซลานที่พบได้แก่เถ้าลอยและเถ้าภูเขาไฟเป็นต้น

Ingles (1970) กล่าวว่า สารละลาย Calcium Aluminate Hydrate (CSH) จะทำหน้าที่ห่อหุ้มเม็ดดินและประสานเม็ดดินให้เกาะกัน ดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 การเกาะตัวของสาร CSH ในโครงสร้างดินเหนียวผสมปูนขาว
ที่มา: Ingles (1970)

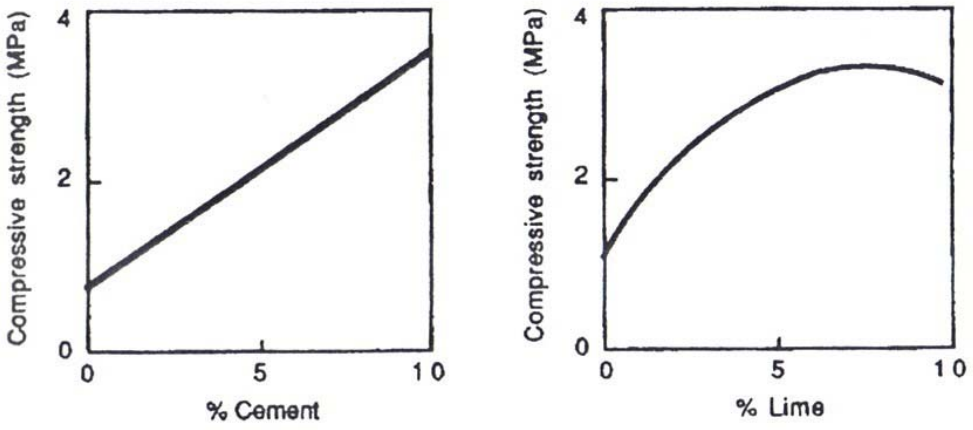
สาร Calcium Aluminate Hydrate (CSH) ที่เกิดขึ้นจากดินผสมปูนขาวเป็นสารชนิดเดียวกันกับสารที่เกิดในดินผสมปูนซีเมนต์ แต่ต่างกันที่สาร CSH ในดินผสมปูนขาวเกิดจากปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction ระหว่าง CaO กับ Soil Silica ส่วนสาร CSH ในดินซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยา Hydration Reaction ของปูนซีเมนต์กับน้ำ

ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดสาร Calcium Aluminate Hydrate (CAH) โดยพื้นฐานแล้วจะเกิดขึ้นทันที โดยจะเกิดที่รอยต่อระหว่างขอบและผิวหน้าของดินเดิม สำหรับสารประกอบ CSH จะเกิดปฏิกิริยาที่ช้ากว่า แรงยึดเกาะที่เกิดขึ้นจากสารประกอบ CAH จะไม่มีความแข็งแรงเหมือนกับแรงยึดเกาะที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ของสารประกอบ CSH

Ruenkrairergsa (1982) กล่าวว่า การเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับดิน ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นอาจจะเพิ่มขึ้นได้ไม่เต็มที่ถ้ามีสารประกอบอื่น ๆ อยู่ในดินด้วย เช่น ปริมาณ Organic Matter และ Sulphate โดยจะทำให้ความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวลดลง โดยจะแบ่ง Ca^{2+} มาจากปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction ทำให้อัตราการเพิ่มความแข็งแรงของดินผสมปูนขาว

ลดลง สารประกอบของเหล็กเช่น Fe_2O_3 ที่เคลือบอยู่ในโครงสร้างของดินก็สามารถหน่วงการเกิดปฏิกิริยาให้ช้าลงได้เช่นกัน

Mitchell (1976) พบว่าปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้เกิดกำลังอัดของดินเหนียวผสมปูนขาวเพิ่มขึ้น แต่จากปริมาณของ Soil Silica ที่มีอยู่จำกัดค่าหนึ่ง ถ้ามีการเพิ่มปูนขาวจนมากกว่าความต้องการในการทำปฏิกิริยากับ Soil Silica ปูนขาวที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลให้กำลังลดลงด้วยซึ่งข้อแตกต่างกับดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ ดังรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับปริมาณสารประสาน
ที่มา: Mitchell (1976)

4) Lime Carbonation

ปฏิกิริยา Lime Carbonation เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในปูนขาวทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 ในอากาศแล้วเกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) กับน้ำ

$CaCO_3$ ที่เกิดขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction ลดลง ซึ่งจะทำให้เกิดสารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ให้ช้าลง อันเป็นผลให้การพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวผสมปูนขาวช้าลงกว่าปกติได้ นอกจากนี้ยังพบว่าในตัวอย่างของดินที่ป้องกันไม่ให้ปูนขาวเกิดปฏิกิริยา Carbonation กับอากาศนั้น เมื่อระยะเวลาในการบ่มนาน ๆ จะให้กำลังสูงกว่าตัวอย่างดินที่บ่มแล้วปล่อยให้ปูนขาวทำปฏิกิริยากับอากาศได้ ดังนั้นจึงไม่เป็นที่พึงประสงค์ให้เกิดปฏิกิริยา Carbonation ขึ้นในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยการผสมปูนขาว โดยต้องเก็บปูนขาวอย่างมิดชิดไม่ให้สัมผัสกับอากาศก่อนการนำไปใช้งาน

เถ้า (Ash)

เป็นวัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อนเช่น หินเถ้าภูเขาไฟ (Vocanic Tuff), หินพรุน (Pumicite), หินเชล (Shale) หรือการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ มีสมบัติเป็นสาร Pozzolans ที่สามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวและเกิดเป็นสารเชื่อมประสานได้

วิจิตอัจฉรา และคณะ (2536) กล่าวว่า เถ้าบางชนิดสามารถเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction เนื่องจากเถ้ามีส่วนผสมของ Silica และ Alumina สูง ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ Lime เกิดเป็น Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ซึ่งทำให้เม็ดของเถ้าเกิดการเกาะรวมตัวกัน ปฏิกิริยานี้คล้ายกับ Hydration ของปูนซีเมนต์

ยางมะตอย (Bitumen)

เป็นสารที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ ซึ่งมีความหนืดที่ขึ้นกับความเข้มข้นของน้ำยาง การใช้ยางมะตอยในการปรับปรุงคุณภาพของดินจะช่วยป้องกันหรือลดการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน ทั้งนี้เป็นเพราะยางมะตอยมีสมบัติทึบน้ำเมื่อไปเคลือบรอบเม็ดดินก็จะทำให้ความชื้นเข้าไปไม่ได้ แต่มีข้อเสียคือยางมีความแข็งแรงต่ำถ้าใช้ในปริมาณมากอาจเกิดผลเสียด้านกำลังได้

โมลลาส (Mollas)

เป็นกากของเหลือในรูปของเหลวจากอุตสาหกรรมน้ำตาลหรือโรงกลั่นสุรา ใช้เพิ่มความเหนียวให้กับดินแต่สามารถถูกชะล้างโดยน้ำฝนได้ง่าย

ยางไม้ลิกนิน

เป็นกากของเหลือในรูปของเหลวจากโรงงานกระดาษ ใช้เพิ่มความเหนียวให้กับดินแต่อาจก่อให้เกิดปัญหาด้านมลภาวะ

โซเดียมคลอไรด์หรือแคลเซียมคลอไรด์

เป็นกากของเหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโซเดียมคาร์บอเนตและฟลูออคาร์บอเนต (ยาสีฟัน) ช่วยในการดูดความชื้นในดิน แต่มีปัญหาเรื่องการกัดกร่อนโครงสร้างถนนคอนกรีต

1.5.7 การปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยปูนซีเมนต์

วิวัฒนาการของดินซีเมนต์

การปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยปูนซีเมนต์เริ่มต้นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1915 ในการก่อสร้างถนน Oak ในเมือง Saratosa รัฐ Florida โดยการขุดเอาเปลือกหอยในอ่าวขึ้นมาผสมกับทรายและปูนซีเมนต์แล้วทำการบดอัดด้วยรถบดอัดไอน้ำขนาด 10 ตัน แทนการทำถนนคอนกรีตเนื่องจากเครื่องผสมคอนกรีตเสีย (Davidson, 1961)

ในปี ค.ศ. 1920 หน่วยงานที่เกี่ยวกับถนนในรัฐต่าง ๆ ของประเทศอเมริกา อันประกอบด้วย รัฐ Iowa, South Dakota, Ohio, California และ Texas ได้เริ่มทดลองนำดินและปูนซีเมนต์ผสมกันเพื่อใช้ในการสร้างถนน แต่ผลการทดลองยังมีความแปรปรวนมากจนไม่สามารถจะคาดการณ์ผลลัพธ์ได้ เนื่องจากยังขาดความรู้เกี่ยวกับสมบัติทางวิทยาศาสตร์ของดิน

ในปี ค.ศ. 1933 และ ค.ศ. 1934 South Calorina State Highway Department โดย Dr. C.H. Moorefield ได้ทำการทดลองนำดินซีเมนต์มาสร้างถนนหลายสาย พบว่าดินซีเมนต์เป็นวัสดุที่เหมาะสมกับการใช้ทำเป็นวัสดุสำหรับชั้นพื้นทางของถนนและราคาถูก จากการค้นพบดังกล่าวได้ส่งเสริมให้เกิดการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับดินซีเมนต์กันอย่างกว้างขวางมากขึ้น (Mills, 1935)

ในปี ค.ศ. 1935 Portland Cement Association โดย F.T. Sheet ได้นำค่าเทคโนโลยีการบดอัด (ซึ่งใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1929) มาปรับปรุงใช้กับการบดอัดดินผสมปูนซีเมนต์ โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่น ผลการทดลองทำให้สามารถหาปริมาณของดินซีเมนต์และน้ำที่ใช้ผสมในการบดอัด (Catton, 1938)

ในปี ค.ศ. 1935 South Carolina State Highway Department, Bureau of Public Roads กับ Portland Cement Association ได้ร่วมกันทำการทดลองสร้างถนนโดยใช้ดินซีเมนต์เป็นระยะทาง 1.5 ไมล์ บริเวณใกล้เมือง Johnsonville ซึ่งเป็นโครงการแรกในทางวงการวิศวกรรม ที่นำดินซีเมนต์มาใช้เป็นวัสดุอย่างกว้างขวางและจากผลสำเร็จของโครงการนี้ทำให้มีการทดลองเพิ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1936 ในรัฐ South Carolina, Ilinois, Michigan, Missouri และ Wisconsin โดย Port land Cement Association เป็นผู้ทดลองสร้าง

ในปี ค.ศ. 1935 มีการใช้ดินซีเมนต์ในโครงการก่อสร้างงานถนนและพื้นสนามบินในสหรัฐอเมริกาอย่างกว้างขวาง (Mill, 1935; Catton, 1938; Davidson, 1961)

ในปี ค.ศ. 1940 ประเทศสหรัฐอเมริกามีงานก่อสร้างถนนด้วยดินซีเมนต์มีพื้นที่มากกว่า 7.5 ล้านตารางหลา ในปี ค.ศ. 1941 ถึง ค.ศ. 1944 ซึ่งเป็นช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 มีการนำดินซีเมนต์มาใช้ในงานสนามบินมีพื้นที่ประมาณ 22 ล้านตารางหลา ซึ่งช่วงเวลานี้งานด้าน

ถนนได้หยุดชะงักลงชั่วคราวจนกระทั่งสงครามโลกยุติ การก่อสร้างถนนด้วยดินซีเมนต์จึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่วนใหญ่นำไปใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางของถนนผิวคอนกรีต ใช้เป็นไหล่ทาง ที่จอดรถ พื้นคลังสินค้า และยังใช้ในงานดาดพื้นอ่างเก็บน้ำคูคลองด้วย (Portland Cement Association, 1956)

ในปี ค.ศ. 1960 การใช้ดินซีเมนต์ในงานก่อสร้างถนนของประเทศสหรัฐอเมริกาและแคนาดามีพื้นที่มากถึง 46 ล้านตารางหลา นอกจากนี้ยังมีการใช้ดินซีเมนต์อย่างกว้างขวางในประเทศอังกฤษ, แอฟริกาใต้, ตะวันออกกลาง, อเมริกาใต้ และเยอรมัน (Davidson, 1961)

ประเภทของดินซีเมนต์

Highway Research Board's Committee on Soil - Portland Cement Stabilization (1959) ได้ให้คำจำกัดความของ Cement - Treated Soil ว่าเป็นการนำเอาดินและปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ต้องการมาผสมกับน้ำให้เข้ากัน แล้วบดอัดให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด และป้องกันความชื้นไม่ให้สูญเสียไปในระหว่างการบ่ม ดินซีเมนต์สามารถแยกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

1) Soil - Cement คือ ดินผสมปูนซีเมนต์และน้ำ และบดอัดโดยวิธีทางกลศาสตร์และทำการบ่มให้แข็งตัว ความแข็งแรงจะพิจารณาจากค่าความคงทน (Durability) และค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์

2) Cement - Modified Granular Soil Mixture เป็นวัสดุผสมปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพบางอย่างของ Granular Soil ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในวัสดุผสมประเภท Cement Modified Granular Soil จะใช้เพื่อลดสมบัติทางด้าน Plasticity และ Swell ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการปรับปรุงวัสดุประเภท Granular Soil ในลักษณะดังกล่าวที่มีสมบัติต่ำกว่ามาตรฐานเพื่อใช้ในงานพื้นทางหรือรองพื้นทางสำหรับทั้งถนนคอนกรีตและถนนลาดยาง ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้อยู่ที่ประมาณ 1 % ของน้ำหนักดินขึ้นไป และปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้มักจะปริมาณน้อยกว่าที่ใช้ใน Soil - Cement

3) Cement - Modified Silty - Clay Soil เป็นการใช้ปูนซีเมนต์เพื่อควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน จุดประสงค์ของการทำ Cement - Modified Silty - Clay Soil ก็เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินที่อ่อนผิดปกติ หรือพื้นที่ดินเปียกแฉะการปรับปรุงคุณภาพโดยวิธีการนี้ใช้ปูนซีเมนต์น้อยกว่า Soil - Cement

4) Plastic Soil - Cement เป็นดินผสมปูนซีเมนต์ที่จะต้องมีน้ำมากพอที่จะทำให้ส่วนผสมมีสภาพเหลวมากพอที่จะนำไปใช้ในงานดาดปูลงไปบนพื้นที่ที่มีความลาดเอียงได้

ส่วนมากจะใช้ปูด้านข้างของถนนเพื่อระบายน้ำ ปูด้านข้างของคลองส่งน้ำ และปูอ่างเก็บน้ำ ความสามารถในการรับน้ำหนัก และความคงทน มีสมบัติคล้าย ๆ Soil - Cement

5) Cement - Treated Soil Slurries and Grouts เป็นดินผสมกับปูนซีเมนต์โดยมีปริมาณน้ำที่สูง และอาจต้องมีสารผสมเพิ่มอื่น ๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของส่วนผสมให้มี Workability สูงพอที่จะนำมาใช้เป็น Grouting Materials ได้ Cement - Treated Soil ประเภทนี้ใช้งานบำรุงรักษาถนน เช่น ทำ Mudjacking กับพื้นถนนที่เกิดการทรุดตัวของคันทาง หรือ Subgrade ที่ถูกน้ำกัดเซาะ หรือปรับปรุงการรับน้ำหนักของ Railroad Ballast ส่วน Grouting ใช้ในการยาหรืออุดรอยรั่วที่เกิดขึ้นในอุโมงค์ส่งน้ำ

กลไกการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยปูนซีเมนต์

Lambe et al. (1959); Moh (1962) กล่าวว่า เมื่อน้ำผสมกับปูนซีเมนต์ซึ่งมีสารประกอบหลักอยู่ 4 อย่างคือ C_3S, C_2S, C_3A และ C_4AF จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Cement Hydration เกิดเป็นสารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (CSH), Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Released Hydrate Lime กระบวนการดังกล่าวส่งผลทำให้เกิดการแข็งตัวของ CSH และ CAH ซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสานและนอกจากนี้ Released Hydrate Lime ที่เกิดขึ้นในกระบวนการดังกล่าวจะทำให้ความเป็นด่าง (pH) ใน Pore Water เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ Colloid Gel หรือ Cement Gel ที่ประกอบไปด้วย CSH และ CAH เกิดการรวมตัวกันแล้วยึดเกาะกันเป็นมวลที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม

ในมวลดินที่มีขนาดเม็ดละเอียดแรงยึดเกาะจะประกอบด้วย 2 กรณีคือ Mechanical Interlock และ Chemical Cementation โดยการยึดเกาะทางด้าน Chemical Cementation นั้นเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับ Silica และ Alumina ที่มีอยู่ตามผิวของเม็ดดิน โดยมีน้ำเป็นตัวกลางของการเกิดปฏิกิริยา ทำให้เกิดเป็นสารประกอบ CSH และ CAH โดยจะอยู่รอบ ๆ เม็ดดินทำให้เม็ดดินเกิดการประสานกัน

ในมวลดินที่มีขนาดเม็ดหยาบเมื่อเกิดปฏิกิริยา Cement Hydration การยึดเกาะกันของเม็ดดินกันจะคล้ายกับในคอนกรีต แต่จะต่างกันที่ Cement Paste จะไม่ไปอุดในช่องระหว่างอนุภาคของดิน โดยแรงยึดประสานจะเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวทางด้าน Mechanical Interlock ของอนุภาคดินที่มี CSH และ CAH เกาะอยู่ที่ผิวอนุภาคดิน โดย Cement Paste จะประสานอนุภาคดินที่อยู่ใกล้เคียงเข้าด้วยกัน ในระหว่างแข็งตัวและจะพัฒนาต่อเนื่องจนแข็งตัวมีโครงสร้างที่แข็งแรง

Herzog and Mitchell (1963) กล่าวว่า การเกิด Cement Hydration เป็นการเกิด Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ซึ่งเป็นกระบวนการช่วงแรก และปฏิกิริยาระหว่าง Silica และ Alumina ที่มีอยู่ในเม็ดดินกับ Calcium Ions ที่เกิดจาก Released Hydrated Lime จะเป็นกระบวนการที่สองที่ทำให้เกิด CSH และ CAH ซึ่งต้องใช้ระยะเวลายาวนานกว่า จึงทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์สูงขึ้นตามอายุของการบ่มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวรู้จักโดยทั่วไปว่า Pozzolanic Reaction

Moh (1965) ได้เขียนปฏิกิริยาของดินซีเมนต์เป็นสมการทางเคมีดังต่อไปนี้

$$\text{Cement} + H_2O \longrightarrow CSH + CAH + Ca(OH)_2$$

$$Ca(OH)_2 \longrightarrow Ca^{++} + 2(OH)^-$$

$$Ca^{++} + 2(OH)^- + SiO_2 \text{ (soil Silica)} \longrightarrow CSH$$

$$Ca^{++} + 2(OH)^- + Al_2O_3 \text{ (soil Alumina)} \longrightarrow CAH$$

เมื่อ CSH = Calcuim Silicate Hydrate

CAH = Calcium Aluminate Hydrate

$Ca(OH)_2$ = Calcium Hydroxide

Pendola et al. (1969) สรุปกลไกการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยปูนซีเมนต์ว่าเป็นกระบวนการร่วมกันของปฏิกิริยาทางฟิสิกส์เคมี (Physical - Chemical) ระหว่างปูนซีเมนต์, น้ำ และดิน ซึ่งประกอบด้วย 4 กลไกคือ

1) Hydration of Cement เป็นกระบวนการสำคัญที่สุด โดยจะเกิดขึ้นขณะที่ปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยา Cement Hydration ก่อให้เกิดการประสานแน่นระหว่างเม็ดดิน และก่อรูปร่างเป็นโครงข่ายที่แข็งแรงต่อเนื่องกันมากบ้างน้อยบ้างตามการคละของขนาดของดิน ทำให้เม็ดที่ไม่ถูกปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกัน โครงข่ายดังกล่าวนอกจากจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุแล้วยังแทรกตัวระหว่างช่องว่าง ทำให้ลดการซึมผ่านและการบวมตัวของมวลดินรวมทั้งเพิ่มความคงทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นรอบ ๆ อีกด้วย

2) Cation Exchange เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยน Cation หรือเกิดการรวมตัวกันของ Cation บนผิวของเม็ดดิน ซึ่งเป็นสมบัติที่สังเกตได้จากการลดของค่า Plastic Index ของ

ดินประเภท Cohesive Soil ที่มีความชื้นอยู่ผสมกับปูนซีเมนต์ ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นภายในไม่กี่วันหลังจากผสมปูนซีเมนต์ซึ่งถือว่าเป็นปฏิกิริยารองจากปฏิกิริยา Cement Hydration

3) Carbonation เป็นกระบวนการเชื่อมแน่นจากที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศกับ Lime ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Cement Hydration กับ Silica หรือ Alumina ในดินทำให้เกิดสารประสานแน่นเพิ่มขึ้นจากเดิมและทำให้เกิดการยึดเกาะกันในวัสดุที่ถูกปรับปรุงคุณภาพ แต่ปฏิกิริยานี้อาศัยเวลานานและมีผลทำให้กำลังของวัสดุเพิ่มขึ้น

4) Pozzolanic Reaction เป็นกระบวนการที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง Free Lime ที่ถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างปฏิกิริยา Cement Hydration กับ Silica หรือ Alumina ในดินทำให้เกิดสารประสานแน่นเพิ่มขึ้นจากเดิมและทำให้เกิดการยึดเกาะกันในวัสดุที่ถูกปรับปรุงคุณภาพ แต่ปฏิกิริยานี้อาศัยเวลานานและมีผลทำให้กำลังของวัสดุเพิ่มขึ้น

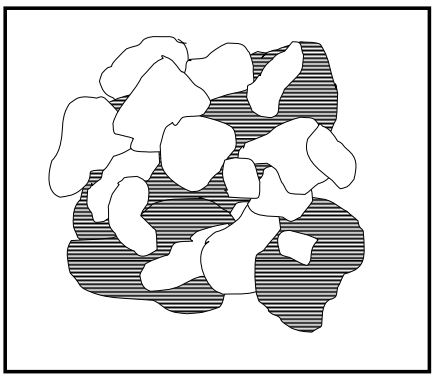
โครงสร้างของดินซีเมนต์

Mitchell and Jack (1966) ได้เสนอเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินภายหลังจากการผสมปูนซีเมนต์ลงไปแล้ว ดังรูปที่ 1.9 แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ

1) ภายใต้การบดอัด ขั้นตอนนี้เป็นช่วงที่ปูนซีเมนต์ยังไม่เกิดปฏิกิริยา Cement Hydration ปูนซีเมนต์จะเข้าไปผสมกับอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 1.9 (ก)

2) ภายใต้การบ่มระยะสั้น อนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา Hydration จะเริ่มเกิดปฏิกิริยา Cement Hydration ซึ่งจะเกิด Cement Gel เข้าแทรกซึมตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของดินและ Released Lime เริ่มเกิดปฏิกิริยากับดินที่เป็น Active Soil Silica และ Active Soil Alumina ในสารละลายจะเป็นผลให้เกิดการแยกตัวของ Active Soil Silica และ Active Soil Alumina ในดินและผลของปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้จะแพร่ตามอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 1.9 (ข)

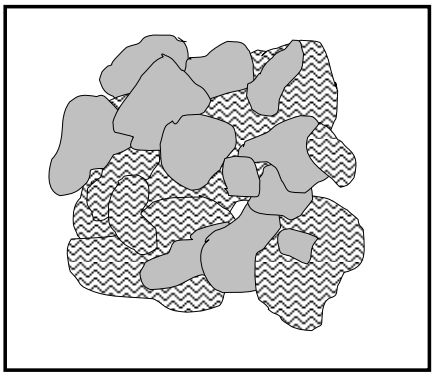
3) ภายใต้การบ่มระยะยาว อนุภาคของปูนซีเมนต์จะเกิดกระบวนการ Cement Hydration อย่างสมบูรณ์ มีผลทำให้ค่ากำลังอัดมีค่าสูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 1.9 (ค)



อนุภาคดินเหนียว

อนุภาคปูนซีเมนต์
(ไม่ผสมน้ำ)

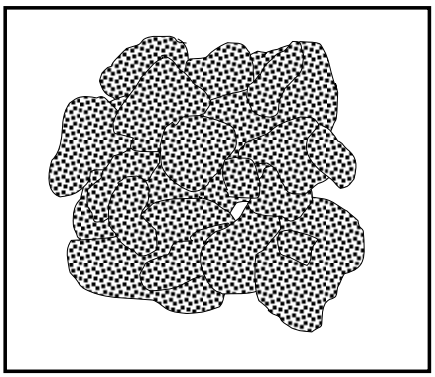
(ก) สถานะช่วงการบดอัด



อนุภาคดินเหนียวลดลง

ผลิตผลปฏิกิริยาของ
ปูนซีเมนต์เจลผสมน้ำกับ
ดินเหนียวผสมปูนขาว

(ข) สถานะภายใต้การบ่มระยะสั้น



วัฏภาคดินเหนียว
และปูนซีเมนต์
ไม่แตกสลาย

(ค) สถานะภายใต้การบ่มระยะยาว

รูปที่ 1.9 โครงสร้างของดินซีเมนต์
ที่มา: ดัดแปลงจาก Mitchell and Jack (1966)

สมบัติของดินที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว

สมบัติของดินที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว ทั้งสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพจะเปลี่ยนแปลงไป คือสมบัติทางกลจะเพิ่มขึ้นอย่างมากในด้านความแข็งแรงและโมดูลัสของการเปลี่ยนรูป (Modulus of Deformation) เมื่อเทียบกับดินก่อนการปรับปรุง ดินที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วจะกลายเป็น Brittle Material ซึ่งลักษณะของการวิบัติจะวิบัติที่ความเครียดต่ำ (Strain Failure) ส่วนสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนไปคือ Water Content ของดินที่ได้รับการปรับปรุงจะต่ำลงในขณะที่ค่า Total Unit Weight จะสูงขึ้น สัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านได้ของน้ำในดินที่ได้รับการปรับปรุงจะต่ำลง

จากการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยปูนซีเมนต์ที่ท่าเรือในประเทศญี่ปุ่นพบว่า ค่า Undrained Shear Strength จะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มและเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ (Cement Content) ที่เพิ่มขึ้นจากสมบัติ Consolidation ของดินที่ได้รับการปรับปรุง สามารถบอกได้ว่า Consolidation Yield Stress เพิ่มขึ้นเมื่อ Cement Content เพิ่ม (Consolidation Yield Stress แสดงค่าที่เข้าใกล้ Unconfined Compressive Strength) และ Compression Index จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อ Consolidation Pressure ต่ำกว่า Consolidation Yield Stress

จากสมบัติของ Undrained Shear Strength และ Consolidation ที่กล่าวมาแล้วในดินที่ได้รับการปรับปรุงสามารถกล่าวได้ว่าจากปฏิกิริยาการสร้างความแข็งแรงทางเคมี (Chemical Solidification Action) ของดินซีเมนต์และดินที่ได้รับการปรับปรุงจะเกิด Yield Stress ตาม Preconsolidation Pressure ของดินที่มาทับถมกันตามธรรมชาติและในสภาวะที่ดินเกิดความเครียดเมื่อถูกน้ำหนักกระทำภายใต้ Yield Stress ของดินที่ได้รับการปรับปรุงพฤติกรรมจะเข้าใกล้สภาวะ Overconsolidation ของดินที่ทับถมเป็นดินตะกอนตามธรรมชาติ

การทดสอบสมบัติของดินในการก่อสร้างจริง ถึงแม้ว่าผลการทดสอบจะสอดคล้องกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการก็ตาม แต่ผลที่ได้รับจากการทดสอบในภาคสนามยังคงมีความไม่แน่นอนอยู่สูง เนื่องจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเก็บตัวอย่างและการทดสอบตัวอย่างขนาดใหญ่

องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของดินซีเมนต์

สมบัติของดินซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างซึ่งแยกได้ดังต่อไปนี้

สมบัติของดิน ส่วนประกอบที่มีตามธรรมชาติของดินทั้งทางกายภาพและทางเคมีจะมีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำ ด้วยเหตุนี้จึงมีผลกระทบต่อการรับแรง

และความคงทนของดินซีเมนต์ ส่วนประกอบที่กล่าวนี้รวมทั้งด้านฟิสิกส์และด้านเคมี เป็นต้นว่า ปริมาณส่วนผสมของ Sand, Silt, Clay และพวก Organic Matter หรือ Sulphate ที่มีอยู่ในดิน

Hicks (1942) ได้ทำการทดลองในรัฐ North Carolina โดยนำดินที่อยู่ใน Series และ Horizon เดียวกันมาปรับปรุงโดยผสมกับปูนซีเมนต์ ได้เสนอว่าดินที่อยู่ใน Series และ Horizon เดียวกันจะใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน แต่ Handy et al. (1955) ได้รายงานผลการทดลองกับดินในรัฐ Iowa ซึ่งเป็นดินชนิด Loess และ Loess - Derived หรือ Till และ Till - Derived ผลออกมาไม่แน่นอนเสมอไปสำหรับการที่จะพิจารณา Series และ Horizon ของดิน ทางที่ถูกต้องที่สุดควรจะพิจารณาใช้ผลที่ได้จากการทดลองในห้องทดลอง

การหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม สามารถใช้ข้อมูลจากปัจจัยต่าง ๆ ต่อไปนี้

1) Soil Classification Groups สภาพตามธรรมชาติของดิน เป็นดัชนีชี้วัดที่บอกถึงปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดิน โดยปริมาณของปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมจากการจำแนกดินตามระบบ Unified และ AASHTO หรือชนิดของดิน ดังตารางที่ 1.4, 1.5 และ 1.6

2) ปริมาณมวลรวมที่ค้างตะแกรงเบอร์ 4 Norling and Packard (1958) กล่าวว่า การเพิ่มของปริมาณมวลรวมหยาบที่มีขนาดค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 แต่จะต้องเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้นด้วย โดยทำให้ความสามารถในการรับแรงแบกทานของดินซีเมนต์สูงขึ้นด้วยเช่นกัน โดยได้ทำการทดลองกับดิน 3 ชนิดคือ Coarse Sand, Fine Sandy Loam และ Loam Sand ด้วยปริมาณปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน 3 ตัวอย่าง แต่เมื่อเพิ่มมวลรวมที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ต่างกัน แล้วนำไปทดลองหาค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน ซึ่งมีผลการทดลอง ดังรูปที่ 1.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่า Loam Sand และ Fine Sandy Loam จะมีกำลังอัดที่สูงขึ้นเมื่อมีปริมาณมวลรวมที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 เพิ่มขึ้น ส่วนกรณีของ Coarse Sand จะมีกำลังอัดลดลง เมื่อปริมาณมวลรวมที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 เพิ่มขึ้นมากกว่า 50 % ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด

3) ปริมาณดินเหนียว Reinhold (1955) ได้ทดลองนำเอาทรายมาผสมกับดินเหนียว โดยเปลี่ยนปริมาณของดินเหนียวตั้งแต่ 0 - 100 % แล้วนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ที่ปริมาณคงที่ จากนั้นนำไปทดลองหาค่ากำลังอัดและค่า Modulus of Elasticity ดังรูปที่ 1.11 พบว่าเมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้น ถ้าค่า Modulus of Elasticity ลดลง แสดงว่ากำลังอัดจะลดลงตามไปด้วย เช่นเดียวกับการทดลองของ Road Research Laboratory (1952) ซึ่งใช้ดินหลายชนิดผสมกับปูนซีเมนต์ประมาณ 10 % กำลังของดินซีเมนต์จะลดลงในขณะที่ปริมาณดินเหนียวมากขึ้น

ตารางที่ 1.4 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับดินแต่ละประเภท จำแนกตามระบบ Unified

Unified Soil Classification	Typical Range Of Cement Requirement (% by wt.)	Typical Cement Content for Moisture - Density Test (ASTM D558) (% by wt.)	Typical Cement Content for Durability Tests (ASTM D559 and D506) (% by wt.)
GW, GP, GM, SW, SP, SM	3 - 5	5	3 - 5 - 7
GM, GP, SM, SP	5 - 8	6	4 - 5 - 6
GM, GC, SM, SC	5 - 9	7	5 - 7 - 9
SP	7 - 11	9	7 - 9 - 11
CL, ML	7 - 12	10	8 - 10 - 12
ML, MH, CH	8 - 13	10	8 - 10 - 12
CL, CH	9 - 15	12	10 - 12 - 14
MH, CH	10 - 16	13	11 - 13 - 15

ที่มา: Anon (1990)

ตารางที่ 1.5 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับดินแต่ละประเภท จำแนกตามระบบ AASHTO

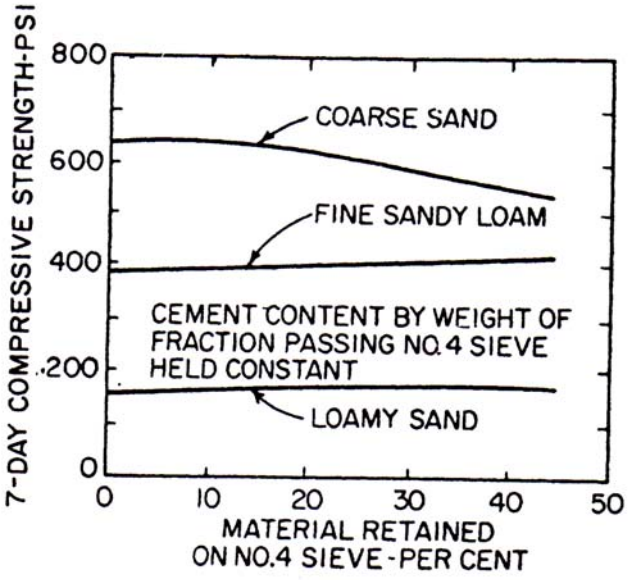
AASHTO Soil Group	Usual Range in Cement Requirement		Estimate Cement Content and That Used in the Moisture Density Test (% by wt.)	Cement Content for Wet - Dry and Freeze - Thaw Tests (% by wt.)
	(% by vol.)	(% by wt.)		
A-1-a	5 - 7	3 - 5	5	3 - 5 - 7
A-1-b	7 - 9	5 - 8	6	4 - 6 - 8
A-2	7 - 10	5 - 9	7	5 - 7 - 9
A-3	8 - 12	7 - 11	9	7 - 9 -11
A-4	8 - 12	7 - 11	10	8 - 10 - 12
A-5	8 - 12	8 - 13	10	8 - 10 - 12
A-6	10 - 14	9 - 15	12	10 - 12 - 14
A-7	10 - 14	10 - 16	13	10 - 13 - 15

ที่มา: Portland Cement Association (1959)

ตารางที่ 1.6 ปริมาณปูนซีเมนต์โดยเฉลี่ยที่ใช้ผสม สำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ

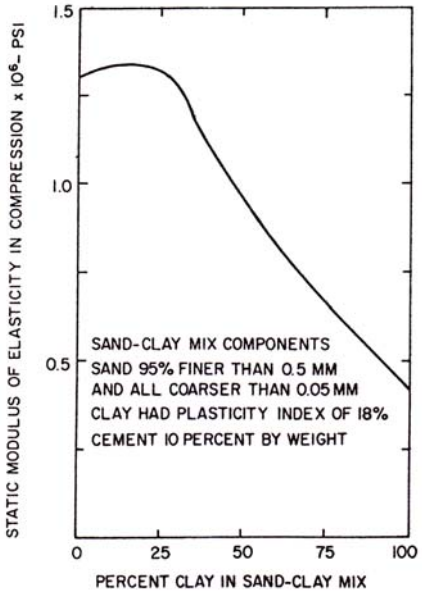
Type of Miscellaneous Material	**Estimate Cement Content and That Used in the Moisture Density Test**		**Cement Content for Wet - Dry and Freeze - Thaw Tests**
	(% by vol.)	**(% by wt.)**	**(% by wt.)**
Shell Soils	8	7	5 - 7 - 9
Limestone Screening	7	5	3 - 5 - 7
Red - Dog	9	8	6 - 8 - 10
Shale or Disintegrated Shale	11	10	8 - 10 - 12
Callche	8	7	5 - 7 - 9
Cinders	8	8	6 - 8 - 10
Chert	9	8	6 - 8 - 10
Chat	8	7	5 - 7 - 9
Marl	11	11	9 - 11 - 13
Scoria (Containing + No.4 Material)	12	11	9 - 11 - 13
Scoria (minus No.4 Material Only)	8	7	5 - 7 - 9
Air - Cooled Slag	9	7	5 - 7 - 9
Water - Cooled Slag	10	12	10 - 12 - 14

ที่มา: Portland Cement Association (1959)



รูปที่ 1.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมวลรวมที่ค้างตะแกรงเบอร์ 4 กับค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์

ที่มา: Norling and Packard (1958)



รูปที่ 1.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเหนียวกับค่า Modulus of Elasticity

ที่มา: Reinhold (1955)

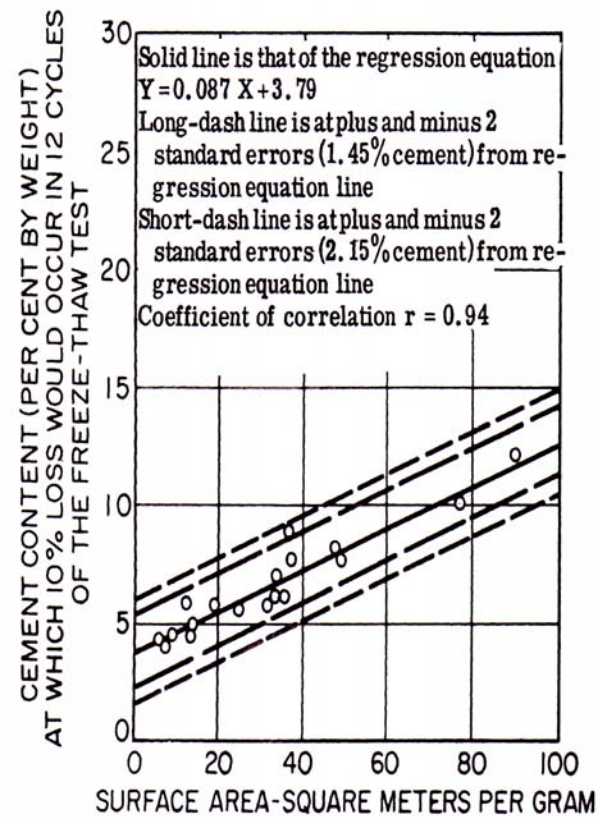
4) พื้นที่ผิวของเม็ดดิน Diamond and Kinter (1958) ได้ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์กับพื้นที่ผิวของเม็ดดิน วิธีหาพื้นที่ผิวใช้วิธีที่เรียกว่า Glycerol Retention นำตัวอย่างมาทดสอบ Freeze - Thaw Test โดยใช้ตัวอย่าง 18 ตัวอย่าง ดินที่นำมาทดลองมี Silt ผสมอยู่ไม่เกิน 45 % ค่า Losses of Weight ที่ทดลองได้ไม่เกิน 10 %

จากรูปที่ 1.12 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวกับปริมาณปูนซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าเม็ดดินที่มีพื้นที่ผิวมากจะต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้นด้วย พื้นที่ผิวเม็ดดินมีค่าอยู่ระหว่าง 6 ถึง 90 ตารางเมตร/กรัม ความสัมพันธ์จะเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$Y = 0.087(X) + 3.79$$

เมื่อ Y = ปริมาณปูนซีเมนต์ (% ของน้ำหนักดิน)

X = พื้นที่ผิวของเม็ดดิน (ตารางเมตร/กรัม)



รูปที่ 1.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์กับพื้นที่ผิวเม็ดดิน

ที่มา: Diamond and Kinter (1958)

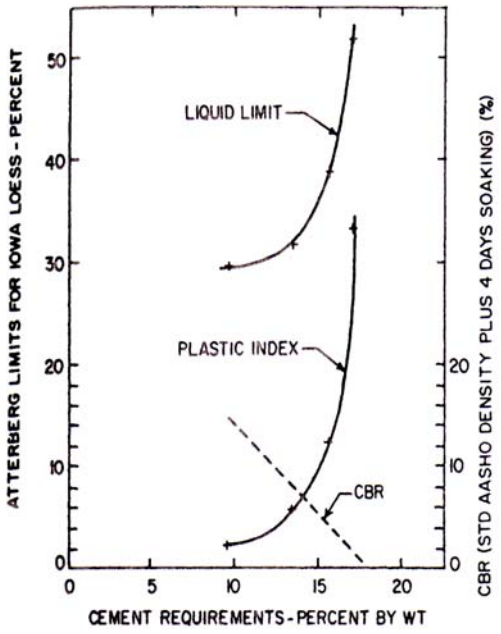
5) Liquid Limit และ Plastic Index ถึงแม้ค่าของดินจะมีผลต่อสมบัติของดินซีเมนต์ แต่สมบัติอื่น ๆ ก็มีอิทธิพลด้วย ไม่ใช่ค่า Plasticity อย่างเดียว การหาปริมาณปูนซีเมนต์พอเหมาะในการทำดินซีเมนต์อาจจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง Plasticity กับปริมาณปูนซีเมนต์เป็นตัวกำหนดได้ดีพอสมควร

Handy et al. (1955) ได้ทำการทดลอง Loess Soil ในทิศตะวันตกเฉียงใต้ของรัฐ Iowa มาศึกษา พบว่าค่า Plastic Index ของดินบริเวณนี้มีความเปลี่ยนแปลงจะเพิ่มขึ้นจากทิศตะวันตกไปทิศตะวันออก จึงเป็นตัวอย่างที่ดีในการนำมาทดลองทำดินซีเมนต์ เพื่อหาความสัมพันธ์ของ Plasticity กับปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม ผลการทดลอง ดังรูปที่ 1.13 เมื่อพิจารณาพบว่าปริมาณปูนซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามค่าของ Liquid Limit และ Plastic Index จนกระทั่งปริมาณปูนซีเมนต์ประมาณ 17 % ของน้ำหนักดิน ค่า Liquid Limit และ Plastic Index จึงไม่มีผลต่อปริมาณปูนซีเมนต์

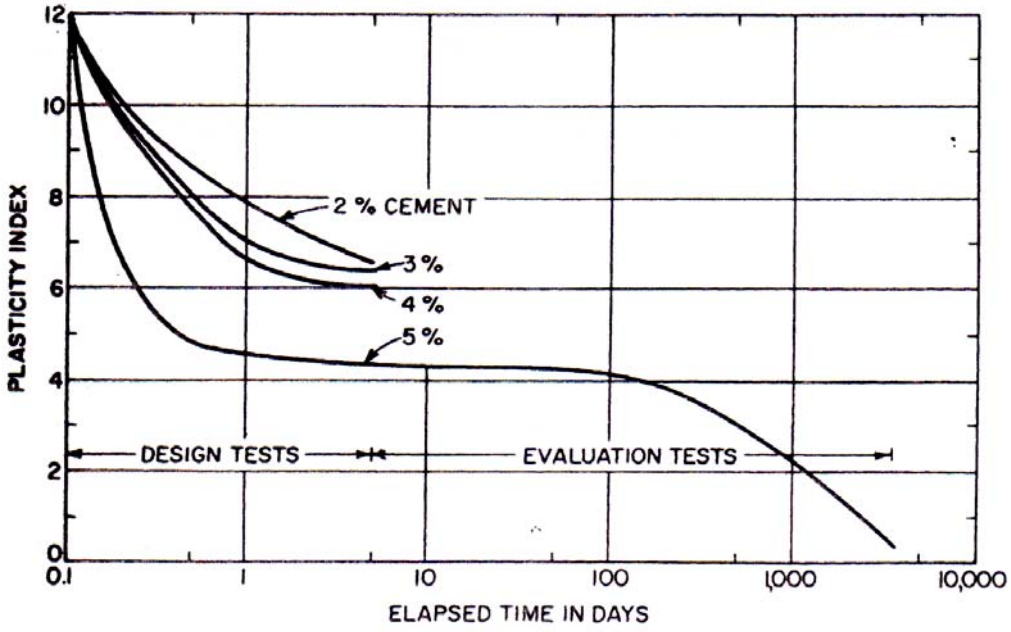
Redus (1958) ได้ทำการศึกษาโดยนำเอาดินซีเมนต์ที่เป็นชั้นพื้นของสนามบินต่าง ๆ มาทำการหาค่า Atterberg Limits ซึ่งเป็นดินซีเมนต์ที่มีอายุใช้งานมาหลายปีแล้ว ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 1.14 จะเห็นว่าปริมาณปูนซีเมนต์จะสัมพันธ์กับการลดลงของค่า Plastic Index ซึ่งจะลดลงช้า นอกจากนี้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา Hydration ยังมีผลต่อการลดลงของค่า Plastic Index ด้วย ซึ่งสอดคล้องกับที่ Spangler and Patel (1949) ได้ทดลองไว้โดยหาค่า Plastic Index กับระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา Hydration Reaction ใน 1 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดลอง ดังรูปที่ 1.15

Terrel et al. (1979) กล่าว่า ดินที่มีค่า Plastic Index ตั้งแต่ระดับต่ำถึงปานกลางจะสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมในการปรับปรุงคุณภาพได้ดี แต่ถ้าดินนั้นมีค่า Plastic Index มากกว่า 30 % จะเป็นผลทำให้การผสมวัสดุนั้นกับปูนซีเมนต์มีความยากลำบากมากขึ้น ความยากในการผสมลดต่ำลงได้โดยการผสมปูนขาวลงก่อนลำดับแรกจะช่วยให้ค่า Plastic Index ของดินลดลง และนอกจากนี้แล้วการผสมปูนขาวยังช่วยเพิ่มค่าความสามารถในการผสมเข้ากัน (Workability) หลังจากนั้นจึงค่อยผสมปูนซีเมนต์ตามทีหลัง

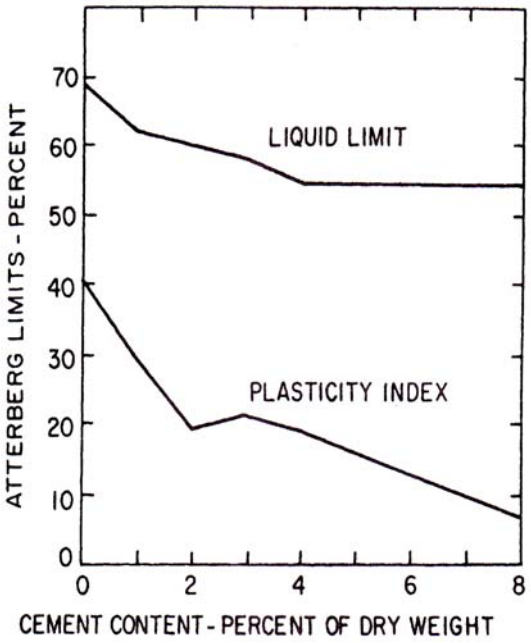
Awal (1979) กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงค่า Plastic Index ของดินผสมปูนซีเมนต์ที่เป็นผลจากการผสมปูนซีเมนต์ ดังรูปที่ 1.16 พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์จะมีผลทำให้ดินมีการเพิ่มค่า Plastic Limit เล็กน้อย แต่จะทำให้มีการลดลงของค่า Liquid Limit และเป็นผลทำให้ Plastic Index มีค่าลดลง



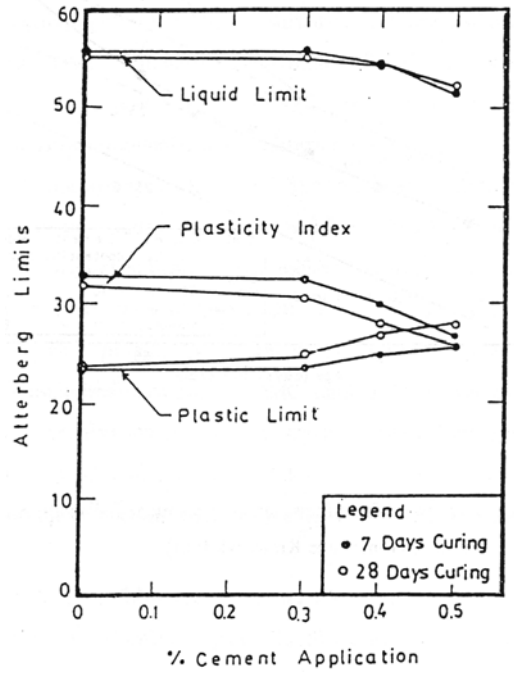
รูปที่ 1.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity กับปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม โดยวิธี CBR
ที่มา: Handy et al. (1955)



รูปที่ 1.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Index กับเวลา
ที่มา: Redus (1958)



รูปที่ 1.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity กับปริมาณปูนซีเมนต์
ที่มา: Spangler and Patel (1949)



รูปที่ 1.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity กับปริมาณปูนซีเมนต์
ที่มา: Awal (1979)

6) สมบัติทางเคมีของดิน Davidson (1961) ได้กล่าวว่า ส่วนประกอบทางเคมีของดินจะทำให้เกิดปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับ Cation ที่มีอยู่ในเม็ดดิน โดยเฉพาะดินที่มี Organic Matter อยู่ด้วยจะทำให้ปฏิกิริยาเปลี่ยนไป เช่น เกิดการแข็งตัวช้าขึ้น หรือมีการบวมตัวเมื่อมีพวก Sulphates ผสม ซึ่งจะทำให้กำลังรับแรงลดต่ำลง

Winterkorn et al. (1942) กล่าวว่า Cation ของแร่สำคัญในเม็ดดินจะมีผลต่อสมบัติของดินเดิมและดินซีเมนต์ด้วย

Ruenkrairergsa (1982) กล่าวว่า สมบัติทางเคมีของดิน จะมีอิทธิพลมากต่อการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินพวกดินเหนียวและดินตะกอน ส่วนดินที่มีขนาดเม็ดก้อนใหญ่ เช่นทรายจะไม่มีผลมากนัก ในดินเหนียวเมื่อผสมด้วยปูนซีเมนต์จะมีการดูดซึม Cation กัน ดินที่มี Calcium Ion จะปรับปรุงได้ยากมาก สำหรับดินที่มี Organic Matter ผสมอยู่ ก็จะมีผลต่อการทำดินซีเมนต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของ Organic Matter นั้นว่าเป็นชนิดใด และมีปริมาณมากน้อยเพียงใด เช่นพวกเศษไม้, ฟาง หรือ Cellulose จะมีผลเพียงเล็กน้อย ส่วนพวก Glucose และ Trataric Acid จะมีผลมากต่อการทำปฏิกิริยา Hydration ของปูนซีเมนต์ทำให้เกิดการแข็งตัวช้าขึ้น ส่วนดินที่มีพวกสาร Sulphate เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ในช่วงปฏิกิริยา Hydration เกิดขึ้นจะไม่มีผล แต่จะมีผลก็ต่อเมื่อเกิดปฏิกิริยา Hydration แล้ว ดังนั้นการปรับปรุงดินที่มีสาร Sulphate อยู่จึงต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่มีสารต่อต้าน Sulphate เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ในช่วงปฏิกิริยา Hydration เกิดขึ้นจะไม่มีผล แต่จะมีผลก็ต่อเมื่อเกิดปฏิกิริยา Hydration แล้ว ดังนั้นการปรับปรุงดินที่มีสาร Sulphate อยู่จึงต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่มีสารต่อต้าน Sulphate มาผสมจึงได้ผลดี

Sherwood (1958) ได้ทดลองเพื่อหาอิทธิพลของ Organic Matter โดยสังเกตความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังและ pH ของ Soil Cement ที่ได้จากการผสมดินและปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 10 ทำการทดลองภายหลังการผสมน้ำ 1 ชั่วโมง แล้วนำค่า pH และค่ากำลังมาวิเคราะห์ พบว่าถ้าค่า pH ต่ำกว่า 12.1 แสดงว่าดินที่นำมาใช้ผสมมี Organic Matter ผสมอยู่จึงทำให้ดินซีเมนต์แข็งตัวได้ช้า และเป็นผลให้กำลังลดต่ำลงเมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน

7) Degree of Pulverization ของดิน

Ruenkrairergsa (1982) กล่าวว่า Degree of Pulverization ในระดับที่ต้องการปกติของดินซีเมนต์คือ ควรมีค่าผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ประมาณ 80 % การบดอัดปูนซีเมนต์ที่มีขึ้นที่มีอยู่ในส่วนผสมจะไม่มีผลกระทบในด้านกำลังดินซีเมนต์ แต่ถ้าเป็นก้อนดินเหนียวแห้งที่ยังมีการสะสมน้ำไม่เพียงพอก่อนการบดอัด เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการบวมตัวขึ้นเมื่อสัมผัสความชื้นและส่งผลให้กำลังลดลง

Felt (1955) กล่าวว่า ดินเหนียวหรือดินตะกอนเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ควรใช้ดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ทั้งหมดจึงจะได้คุณภาพดี แต่ถ้ามีขนาดเม็ดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 4 ก็ไม่ควรเกิน 30 % และเมื่อเวลาผสมกับปูนซีเมนต์และบดอัดควรให้ปริมาณน้ำมากกว่า Optimum Moisture Content เล็กน้อย จะทำให้ดินซีเมนต์มีคุณภาพต่ำลงไม่มากนัก ถ้าบดอัดด้วยปริมาณน้ำน้อยกว่า Optimum Moisture Content จะทำให้คุณภาพลดลงมาก

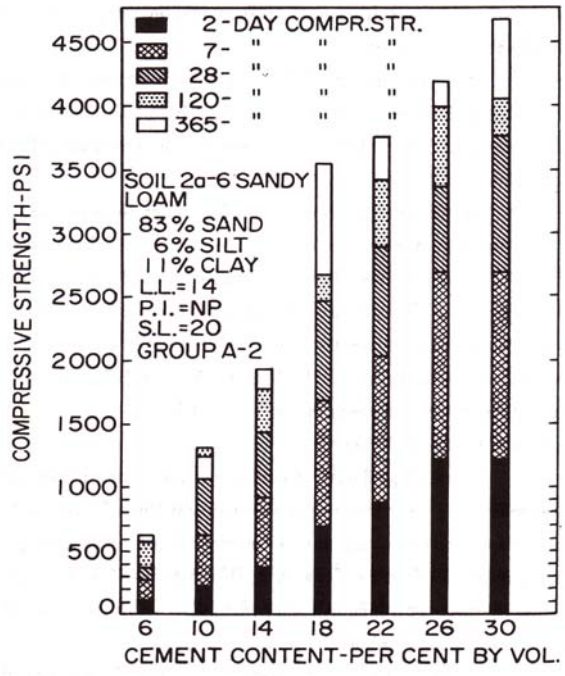
ปริมาณความชื้นในเวลาทำการบดอัด ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่นของดินซีเมนต์จะมีพฤติกรรมเหมือนกับดินทั่วไปที่ไม่ได้ผสมกับปูนซีเมนต์ ด้วยเหตุนี้ความชื้นในส่วนผสมเมื่อเวลาทำการบดอัดจึงมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติของดินซีเมนต์ ความชื้นที่เหมาะสมในการผสมดินซีเมนต์จะทำให้การทำงานและการบดอัดสะดวกง่ายขึ้น แล้วยังเพียงพอที่ใช้ในปฏิกิริยา Hydration Reaction ของปูนซีเมนต์อีกด้วย

Felt (1955) ได้ทดลองศึกษาหาผลของความชื้นที่มีผลกำลังอัดและความชื้นกับ Losses of Weight จากการทำ Wet – Dry และ Freeze – Thaw จากผลที่ได้สรุปได้ว่า ถ้าเป็นดินทรายควรบดอัดด้วยปริมาณความชื้นต่ำกว่าค่า Optimum Moisture Content จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด ส่วนดินเหนียวถ้าจะให้ได้กำลังอัดสูงสุดต้องใช้ปริมาณความชื้นมากกว่า Optimum Moisture Content เล็กน้อย ส่วนผลของการทดลอง Wet – Dry และ Freeze – Thaw สรุปได้ว่าความคงทนของดินเหนียวและดินตะกอนจะลดลง ถ้าปริมาณความชื้นในการบดอัดมีค่าต่ำกว่า OMC ส่วนดินทรายนั้นปริมาณความชื้นจะไม่มีผลต่อความคงทนเลย ซึ่งผลการทดลองนี้จะเหมือนกับการทดลองของ Davidson et al. (1962)

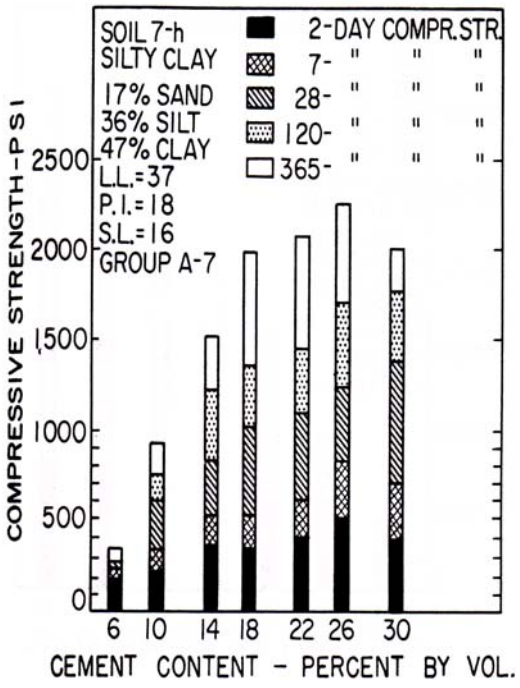
Ruenkrairergsa (1982) ได้กล่าวว่า การหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่นของดินที่บดอัดตามวิธีการของ Proctor มาใช้กับงานดินซีเมนต์ พบว่าปริมาณความชื้นที่ Optimum Moisture Content นั้นนอกจากจะทำให้ได้ค่า Maximum Dry Density แล้วยังทำให้ปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยา Hydration Reaction อย่างสมบูรณ์ด้วย ผลที่ได้ในการก่อสร้างจริงพบว่าการบดอัดที่ Maximum Dry Density ไม่ได้แสดงว่าความแข็งแรงและความคงทนของดินซีเมนต์จะสูงสุดตามการทดลองหาความคงทนตามวิธี Freeze – Thaw ของดินตะกอนและดินเหนียว จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้นที่ Optimum Moisture Content หรือมากกว่าเล็กน้อย แต่ถ้าความชื้นต่ำกว่า Optimum Moisture Content ความคงทนจะลดลง แต่กรณีของดินทรายผสมปูนซีเมนต์ การบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่า Optimum Moisture Content เล็กน้อยจะทำให้ค่าความคงทนสูงขึ้น ส่วนความแข็งแรงของดินทรายเกิดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่า Optimum Moisture Content ประมาณ 3 - 6 % แต่ถ้าเป็นดินเหนียวความแข็งแรงจะเกิดขึ้นที่ปริมาณความชื้นเกิน Optimum Moisture Content ไปเล็กน้อย

ปริมาณปูนซีเมนต์และประเภทของปูนซีเมนต์ โดยหลักทั่วไปแล้วดินเกือบทุกชนิดจะทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ขึ้นอยู่กับประเภทของดินซีเมนต์ สัดส่วนของปูนซีเมนต์ที่ใช้จะเปลี่ยนแปลงตามค่า Plastic Index การเปลี่ยนแปลงปริมาตร, สมบัติความยืดหยุ่น, ความคงทนและชนิดของดินที่จะนำมาปรับปรุงคุณภาพ

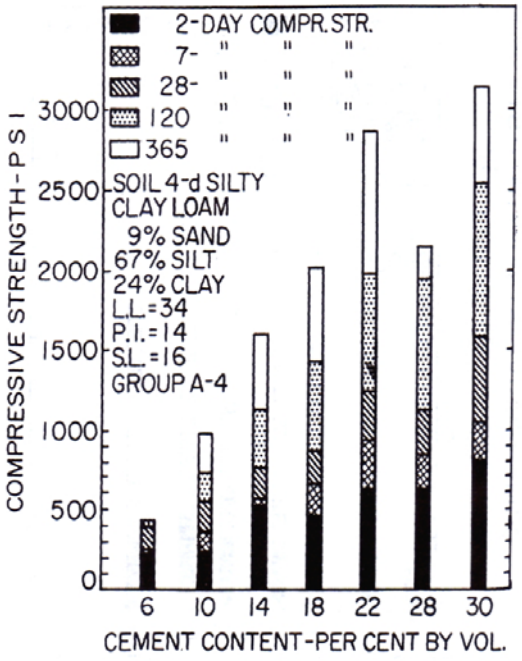
Felt (1955) ได้ทดลองนำดิน 3 ชนิดคือ Sandy Loam, Silty Loam และ Silty Clay มาทดลองผสมกับปูนซีเมนต์ โดยเปลี่ยนปริมาตรปูนซีเมนต์ตั้งแต่ 6 - 30 % ตามปริมาตร แล้วทดสอบหากำลังอัดที่อายุการบ่ม 5 แบบ ตั้งแต่ 2 วันจนถึง 1 ปี และทดสอบหาความคงทนด้วยวิธี Wet – Dry และ Freeze – Thaw ตั้งแต่ 2 รอบถึง 96 รอบ ผลการทดลอง ดังรูปที่ 1.17, 1.18 และ 1.19 และ ดังตารางที่ 1.7 ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ ดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่จะมีกำลังอัดสูงกว่าดินเม็ดเล็ก และดินที่มีปริมาณดินเหนียวผสมอยู่สูงจะรับกำลังน้อยกว่าดินที่มีปริมาณดินเหนียวต่ำกว่า ความคงทนของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้



รูปที่ 1.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับปริมาณปูนซีเมนต์ ของดิน Loamy Sand
ที่มา: Felt (1955)



รูปที่ 1.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับปริมาณปูนซีเมนต์ ของดิน Medium Clay
ที่มา: Felt (1955)



รูปที่ 1.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับปริมาณปูนซีเมนต์ ของดิน Silty Clay Loam
ที่มา: Felt (1955)

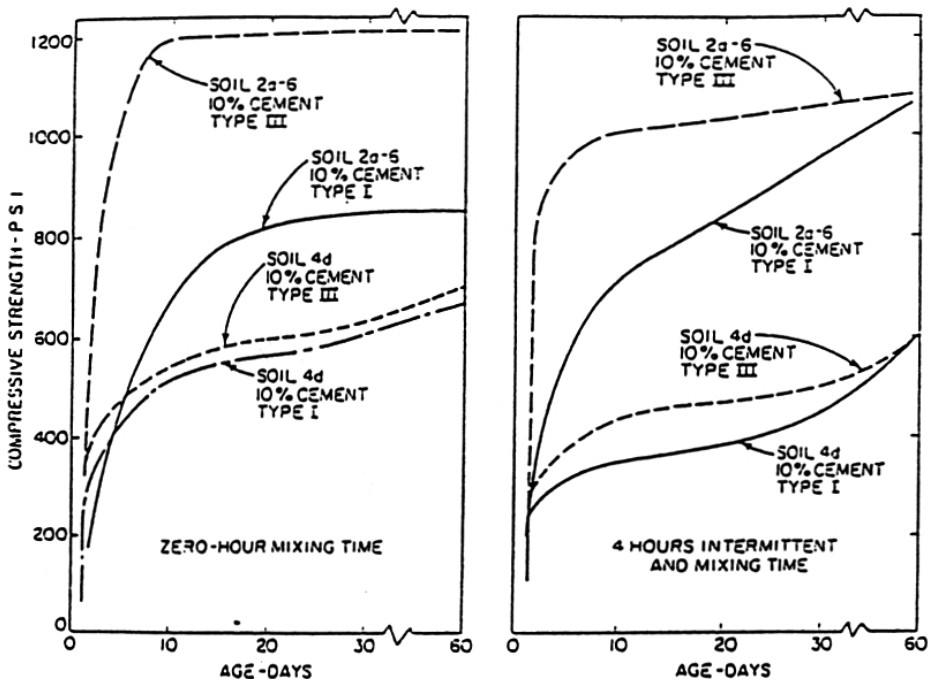
ตารางที่ 1.7 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่มีผลต่อความคงทนของดิน

Soil	Cement Content (Vol. %)	Brahlar Loss (% Orig. wt.)															
		Wet - Dry Test								Freeze - Thaw Test							
		12 Cycles	24 Cycles	36 Cycles	48 Cycles	60 Cycles	72 Cycles	84 Cycles	96 Cycles	12 Cycles	24 Cycles	36 Cycles	48 Cycles	60 Cycles	72 Cycles	84 Cycles	96 Cycles
2a-6	8	6	10	14	18	21	24	27	28	12	19	25	30	37	42	46	51
	10	4	6	7	9	11	12	13	14	5	8	10	13	16	17	19	21
	12	2	3	3	4	5	6	6	6	2	4	5	7	9	10	11	12
	14	2	2	2	3	3	4	4	4	1	2	3	4	5	6	6	7
	18	1	1	1	1	1	2	2	2	0	1	1	1	2	2	2	3
	22	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	2
	26	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	30	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4d	8	7	29	53	67	72	75	80	87	21	58	70	82	92	100	10	100
	10	5	25	43	54	63	70	76	83	7	24	33	53	66	74	88	93
	12	4	21	33	48	56	62	67	78	3	6	9	16	21	40	45	53
	14	2	9	27	35	46	47	52	60	2	4	9	14	18	20	21	24
	18	2	4	11	18	22	38	47	56	2	2	2	3	5	5	5	5
	22	1	2	7	8	9	12	17	20	2	2	2	3	5	5	5	5
	26	1	1	1	3	4	5	7	9	1	1	2	3	4	4	4	4
	30	1	1	1	2	3	4	4	5	1	1	2	2	3	4	4	4
7b	8	9	24	40	61	72	78	80	92	10	19	36	61	84	100	100	100
	10	7	16	33	45	48	49	52	56	6	18	26	41	86	100	100	100
	12	3	10	16	27	39	43	45	46	3	4	7	9	41	64	83	97
	14	2	4	9	18	24	31	33	35	3	4	7	8	10	25	43	52
	18	1	1	2	6	11	15	19	24	2	2	3	3	4	4	4	34
	22	1	1	1	2	6	7	9	11	1	1	2	2	3	3	3	27
	26	1	1	1	1	1	1	3	5	1	1	1	2	2	2	2	3
	30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3

ที่มา: Felt (1955)

Ruenkrairergsa (1982) ได้อธิบายว่าปริมาณปูนซีเมนต์เป็นตัวหลักที่มีอิทธิพลต่อการปรับปรุงคุณภาพของดิน ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติของดินซีเมนต์ดีขึ้นด้วย อัตราการเพิ่มขึ้นของสมบัติของดินผสมปูนซีเมนต์ก็ขึ้นกับชนิดของดินที่นำมาปรับปรุงด้วย การเกาะยึดของดินผสมปูนซีเมนต์ที่มีขนาดเม็ดหยาบจะเพิ่มขึ้นสูงและเร็วกว่าดินที่มีขนาดเม็ดละเอียด ปริมาณปูนซีเมนต์นอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของดินแล้ว ยังขึ้นอยู่กับปริมาณดินเหนียวที่มีอยู่ในดินเดิมด้วย ดังนั้นปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมจึงควรหาจากผลการทดลองที่ได้จากห้องทดลอง

ปูนซีเมนต์ทั้งสองประเภทผลที่ได้จากการทดลอง ดังรูปที่ 1.20 ดินที่ผสมปูนซีเมนต์ประเภทที่สามจะไม่มีผลต่อกำลังรับแรงแบกทานของดินทุกชนิด เป็นต้นว่าดิน Loamy Sand ผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่สามจะให้กำลังอัดเป็นสองเท่าของดินที่ผสมปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งที่อายุการบ่ม 7 วัน และเป็น 1.4 เท่าเมื่ออายุการบ่ม 28 วัน แต่สำหรับดิน Silty Clay Loam เมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ประเภทที่สามจะให้กำลังสูงกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 1.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับเวลา

ที่มา: Felt (1955)

Davidson and Bruns (1960) ได้นำดินทราย, ดินตะกอน และดินเหนียวในรัฐ Iowa มาทดลองผสมปูนซีเมนต์ทั้งสองประเภท แล้วทดสอบหากำลังอัดกับความคงทนด้วยวิธี Freeze – Thaw ผลที่ได้นั้นสรุปว่าการได้ดินซีเมนต์สำหรับงานก่อสร้างถนนควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่สามจะประหยัดและได้เปรียบกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง เพราะการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งต้องใช้เวลาบ่มอย่างน้อย 7 วัน ซึ่งจะมีผลต่อเวลาการก่อสร้าง แต่ปูนซีเมนต์ประเภทที่สามจะลดอายุการบ่มลงทำให้ให้ได้ผลที่ดีกว่า

Massachusetts Institute of Technology (1954) เสนอผลการทดลองของดิน Clayey Sandy Silt ผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่สามและประเภทที่หนึ่ง พบว่าความแข็งแรงของดินที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ประเภทที่สามสูงกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง 1.5 เท่าเมื่ออายุการบ่ม 7 วัน และ 1.3 เท่าเมื่ออายุการบ่ม 28 วัน

ในประเทศอังกฤษ Clare และ Pollard (1951) ได้นำดิน 3 ชนิดมาผสมกับปูนซีเมนต์ประเภท High – Alumina ภายหลังการผสม 24 ชั่วโมง จะทำให้กำลังอัดสูงมาก ขณะที่ปูนซีเมนต์ประเภทอื่นจะให้กำลังอัดเมื่อมีอายุการบ่ม 5 วัน และถ้าใช้ปูนซีเมนต์ประเภท British Rapid Hardening ซึ่งเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ประเภทที่สาม ค่า Yield Strength จะสูงกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งมากเมื่ออายุการบ่มเท่ากัน

การผสมกับการบดอัด เนื่องจากกำลังความแข็งแรงและความคงทนของดินซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการผสม, เครื่องมือในการบดอัด และระยะเวลาของการผสมและการบดอัด การผสมจะเกี่ยวข้องกับเวลาและดีกรีการผสมซึ่งวัดได้จากการเข้ากันตลอดของส่วนผสม สิ่งเหล่านี้จะมีผลต่อสมบัติของดินซีเมนต์

1) ดีกรีการผสม (Degree of Mixing) วิธีการทดลองเพื่อวัดดีกรีการผสมมีผู้ค้นคว้าอยู่ 2 แบบที่จะกล่าวถึง คือ

Baker (1955) ได้ใช้เทคนิคของ Radioactive Tracer วัดความสม่ำเสมอของปูนซีเมนต์ในส่วนผสม โดยใช้ Cobalt 60 บดกับปูนซีเมนต์แล้วผสมกับดิน จากนั้นใช้เครื่องวัดที่เรียกว่า Scintillation Counter เป็นตัววัดความสม่ำเสมอของปูนซีเมนต์ที่กระจายอยู่ในดิน

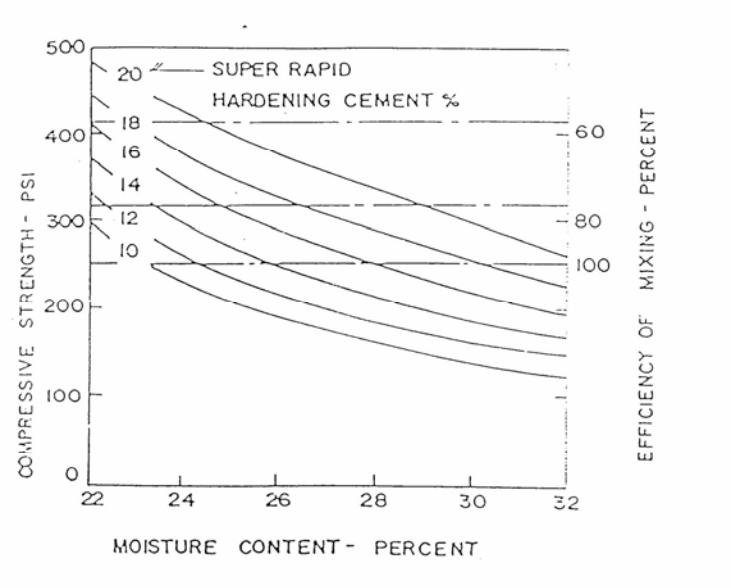
Robinson (1952) หาประสิทธิภาพในการผสมในสนามโดยใช้ตัวอย่างดินที่ผสมในสนามมาหล่อในแบบแล้วทดสอบหากำลังอัด (C_f) จากนั้นนำส่วนผสมอีกตัวอย่างมาผสมซ้ำอีกครั้งในห้องทดลอง โดยทำการหล่อในแบบแล้วทำการทดสอบหากำลังอัด (C_f) การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพในการผสมหาได้จากวิธีการดังต่อไปนี้

ประสิทธิภาพการผสม (%) = (C_f/C_r) x 100

เมื่อ C_r = เป็นค่าเฉลี่ยกำลังอัดของตัวอย่างที่ผสมในสนาม

C_f = เป็นค่าเฉลี่ยกำลังอัดของตัวอย่างที่ผสมในสนามแล้วนำมาผสมซ้ำในห้องทดลองอีกครั้ง

ผลที่ได้สรุปได้ว่าดินที่เป็นพวก Cohesive Soil จะมีประสิทธิภาพในการผสมเท่ากับ 60 % ถ้าเป็นดินพวก Granular และผสมด้วย Plant – Mix แล้วจะมีประสิทธิภาพสูงเกือบ 100 % ดังรูปที่ 1.21 เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการผสมกับกำลังอัดของดินเหนียวที่มี Plastic Index ปานกลาง จะเห็นว่าที่ปริมาณความชื้นเดียวกันและกำลังอัดเท่ากับ 250 ปอนด์/ตารางนิ้ว ประสิทธิภาพในการผสมที่ 60 % จะต้องใช้ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นอีกประมาณ 5 % จึงจะเท่ากับประสิทธิภาพในการผสมที่ 80 % แสดงว่าประสิทธิภาพในการผสมสูงจะช่วยประหยัดในการใช้ปูนซีเมนต์ด้วย



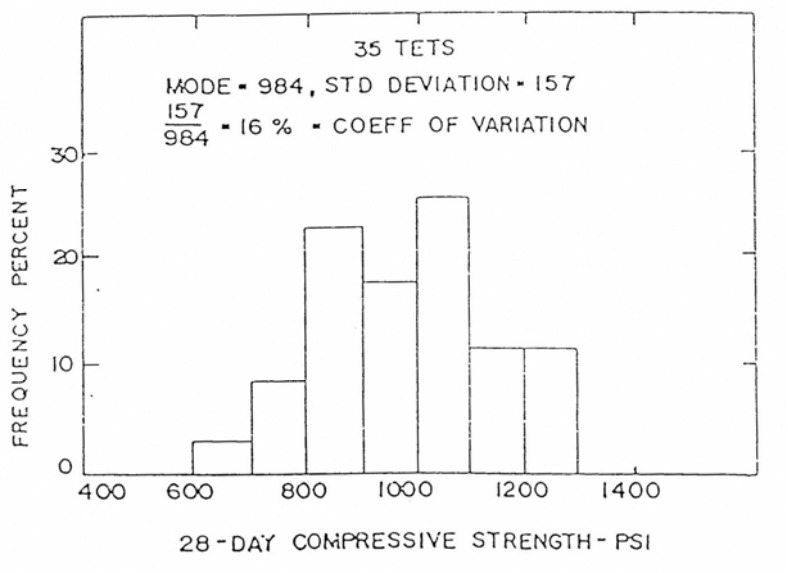
รูปที่ 1.21 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการผสมกับค่ากำลังอัด ของดิน CL

ที่มา: Robinson (1952)

Lovering (1951) ได้หาความสม่ำเสมอในการผสมของดินซีเมนต์ที่ใช้ในการทำพื้นทางของถนนโดยใช้ปูนซีเมนต์ Class A และ Class C มาผสมกับปูนซีเมนต์ด้วยวิธีต่างกัน Class A ผสมกับปูนซีเมนต์ 4 - 5 % ผสมด้วย Plant – Mix Class C ผสมกับปูนซีเมนต์ 2 % ด้วยวิธี Blade – Mixed ผลการทดลอง ดังรูปที่ 1.22 และ 1.23 จากการวิเคราะห์ทางสถิติจะเห็นว่าการผสมของ Class C จะมีกำลังอัดรวมเป็นกลุ่มดีกว่าการผสมของ Class A แต่จะให้กำลังอัดสูงกว่า และการกระจายค่าดีกว่า ค่า Coefficient of Variation ของ Class A จะเท่ากับ 16 % ส่วน Class C เท่ากับ 18.9 % หมายความว่าการผสมของ Class A ดีกว่าการผสมของ Class C เล็กน้อย

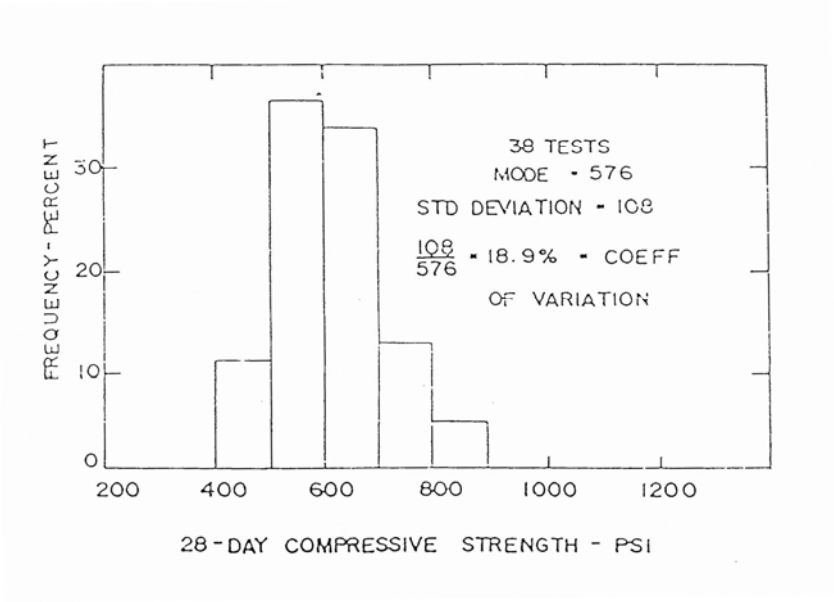
2) ระยะเวลาการผสม (Duration of Mixing Period) Davidson (1961) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่ทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด กับความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินซีเมนต์ที่ทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยแยกตามประเภทของดิน ดังตารางที่ 1.8 ซึ่งพบว่าระยะเวลาของการผสมเพิ่มขึ้น หรือการบดอัดช้าลงจะมีผลทำให้ความชื้นสูงสุดเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะลดลง และกำลังอัดก็ลดลงด้วย ความคงทนเมื่อทดสอบวิธี Wet – Dry และ Freeze – Thaw จะมีค่า Loss of Weight มากขึ้น อิทธิพลที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดของดิน, ระยะเวลาของการผสมหรือการบดอัดช้าลง (หรือทั้งสองอย่าง) และปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสม

Marshall (1954) ทำการทดลองพบว่าการใช้เวลาในการผสมและบดอัดให้ช้าลงจะไปเพิ่มค่าความชื้นให้สูงขึ้น แต่จะมีผลต่อการรับกำลังสูงสุดของดินซีเมนต์หรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของดิน สำหรับดินทรายเวลาการผสมและการบดอัดช้าลงจะมีผลต่อกำลังของดินเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนดินตะกอนและดินเหนียวการใช้เวลาในการผสมและบดอัดนานไปจะมีผลต่อกำลังรับแรงแบกทานอย่างมาก ผลการทดลอง ดังรูปที่ 1.24 ซึ่งจะเห็นว่าการลดลงของกำลังอัดเมื่อใช้ระยะเวลาการผสมนานขึ้น แต่ถ้าจะให้กำลังอัดมีค่าใกล้เคียงกับการผสมโดยไม่ใช้เวลามากจะต้องเพิ่มกำลังบดอัดมากขึ้น



รูปที่ 1.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความสม่ำเสมอในการผสมดินซีเมนต์กับค่ากำลังอัด ของปูนซีเมนต์ Class A 4 - 5 %

ที่มา: Lovering (1951)



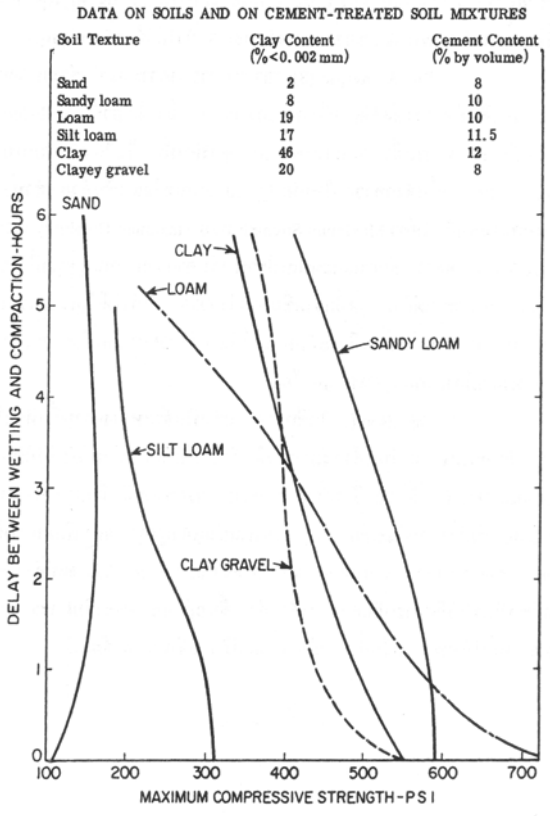
รูปที่ 1.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความสม่ำเสมอในการผสมดินซีเมนต์กับค่ากำลังอัด ของปูนซีเมนต์ Class C 2 %

ที่มา: Lovering (1951)

ตารางที่ 1.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Optimum Moisture Content และ Maximum Dry Density ของ Soil - Cement เปรียบเทียบกับดินเดิม

Soil Group and Type	Change in Maximum Density (pcf)	Change in Optimum Moisture Content (percentage unit)
A-2 Sandy Loams	0 to +3	-1 to +1
A-3 Sands	0 to +6	0 to +1
A-4 Silts and Loams	0 to -6	0 to +3
A-5 Silts	-3 to +1	0 to -3
A-6 Medium Clays	0 to +1	0 to -2
A-7 Heavy Clays	-1 to +2	0 to -4

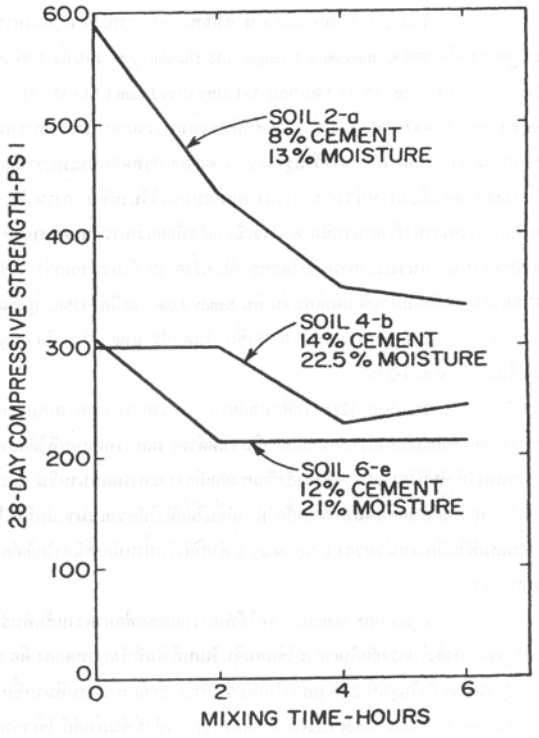
ที่มา: Davidson (1961)



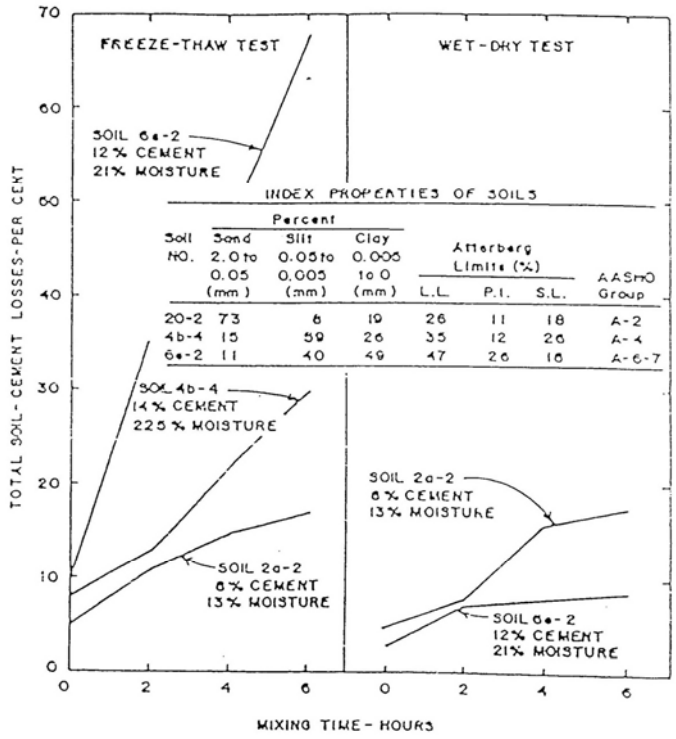
รูปที่ 1.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความล่าช้าในการบดอัดกับปริมาณความชื้นต่อค่ากำลังอัด

ที่มา: Marshall (1954)

Felt (1955) กล่าวว่า การผสมที่ไม่ต่อเนื่อง มีการหยุดทิ้งไว้ระหว่างการผสม ถ้าเวลานานเกินกว่า 6 ชั่วโมงจะทำให้ความชื้นที่ให้ความหนาแน่นสูงสุดสูงขึ้น โดยได้ทดลองนำดิน 3 ชนิด คือ ดินกลุ่ม A - 2 Sandy Loam (Limit Liquid = 26 และ Plastic Index = 11), ดินกลุ่ม A - 4 Silt Clay Loam (Limit Liquid = 35 และ Plastic Index = 12) และดินกลุ่ม A - 6 - 7 Clay (Limit Liquid = 47 และ Plastic Index = 26) ผลการทดลอง ดังรูปที่ 1.25 จะเห็นได้ว่าดินทุกชนิดจะมีกำลังอัดลดลงเมื่อเวลาการผสมนานขึ้น คือมีการผสมและหยุดทิ้งช่วงระหว่างการผสมและค่า Optimum Moisture Content จะเพิ่มขึ้นถ้าเป็นดิน Sandy Loam จะมีค่าเพิ่มขึ้น 1 % ดินตะกอนจะเพิ่มขึ้นประมาณ 1 - 2 % ส่วนดินเหนียวจะเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 1 - 3 % ดังรูปที่ 1.26 เป็นผลของการหาความคงทนด้วยวิธี Wet – Dry และ Freeze – Thaw เมื่อถูกขูดด้วยแปรงลวด 12 รอบ ผลที่ได้แสดงว่าถ้าใช้เวลาในการผสมเปียกมากขึ้น ค่า Loss of Weight จะมีค่าสูงตามไปด้วย นั่นก็คือความคงทนของดินซีเมนต์จะลดลงตามระยะเวลาที่ช้าออกไปในการผสม หรืออาจกล่าวได้ว่าความคงทน (Durability) ของดินซีเมนต์จะแปรผันกับเวลาที่ใช้ในการผสม



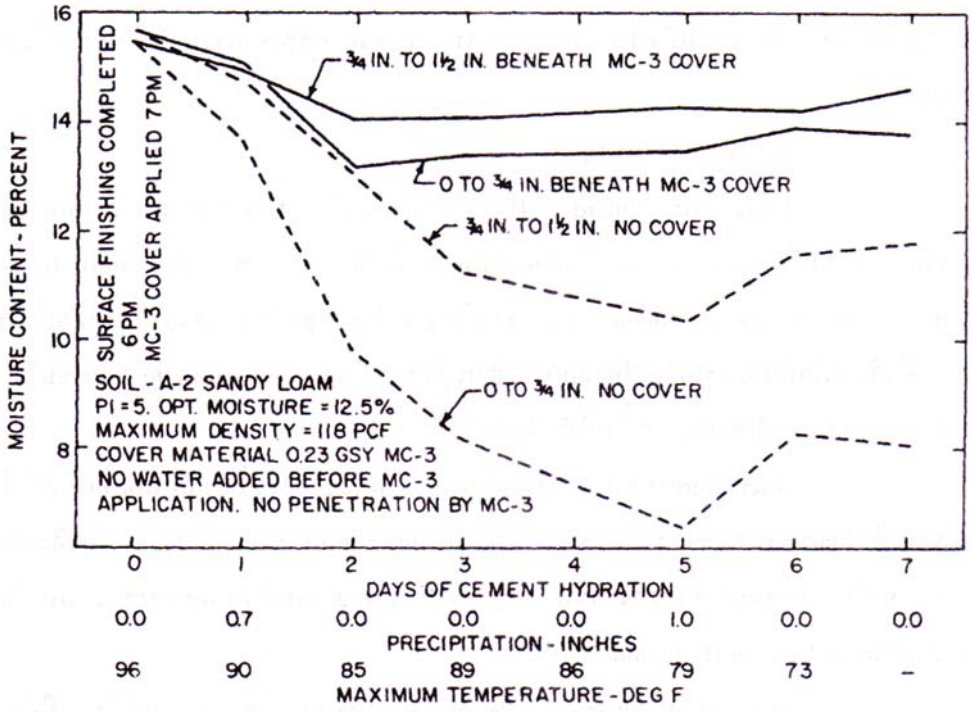
รูปที่ 1.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับระยะเวลาในการผสม
ที่มา: Felt (1955)



รูปที่ 1.26 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับระยะเวลาในการผสม ของดิน Losses Soil
ที่มา: Felt (1955)

การบ่มดินซีเมนต์

1) การบ่มในสนาม องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อสมบัติ และพฤติกรรมของดินซีเมนต์ มาจากสมมุติฐานที่ว่า หลังจากการบดอัดแล้วจะต้องมีน้ำเหลือพอสำหรับการบ่มอย่างน้อย 7 วัน ข้อสมมุติฐานมาจากการบ่มในความชื้นของห้องปฏิบัติที่มีความชื้นและอุณหภูมิได้ตามมาตรฐานที่ต้องการด้วย ดังนั้น Highway Research Board (1943, 1949) ได้ร่วมมือกับรัฐต่าง ๆ 4 รัฐ ในประเทศสหรัฐอเมริกา ทำการเก็บบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับความชื้นที่หลงเหลืออยู่ในดินซีเมนต์ที่ถูกฉาบด้วยวัสดุจำพวก Bituminous Materials โดยแต่ละรัฐจะใช้วัสดุ Bituminous Materials แต่ละชนิดแตกต่างกันไป ที่รัฐ Illinois ใช้ Cutback Asphalt MC - 2, รัฐ Nebraska ใช้ Cutback Asphalt RC - 1 รัฐ Kansas ใช้วัสดุ Negative Oliensis Spot และรัฐ Arkansas ใช้ Asphalt Emulsion ซึ่งผลปรากฏว่าวัสดุฉาบผิวทั้ง 4 ชนิด ใช้ได้ผลดีมากในการป้องกันน้ำให้ค้างอยู่ในดินซีเมนต์ตลอดช่วงอายุการบ่ม 7 วัน ดังรูปที่ 1.27 เป็นการแสดงผลที่ได้จากการทดลองในรัฐ Kansas



รูปที่ 1.27 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับระยะเวลาในการบ่ม
ที่มา: Highway Research Board (1949)

Maner (1952) ได้ทำการทดลองในรัฐ Virginia โดยใช้วัสดุต่าง ๆ เช่น Waterproof Paper, Calcium Chloride, RC - 2 Asphalt, Tar และ Asphalt Emulsion มาทำการบ่มดินซีเมนต์ที่ใช้เป็นชั้นพื้นทาง ดังตารางที่ 1.9 จะเห็นว่าวัสดุ Bituminous Materials 3 ชนิด และ Waterproof Paper ใช้ในการบ่มจะให้ผลเป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังพบว่าความชื้นของอากาศจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อความชื้นในดินซีเมนต์

ตารางที่ 1.9 ปริมาณความชื้นในดินโดยเฉลี่ย (%) กลุ่ม A และ B ต่อวัน

Panel No.	Cover	Ave. Moisture Content (%)					
		0 - $^3/_4$ - In.Depth			$^3/_4$ - 1 $^1/_2$ - In.Depth		
		7-6-51	7-12-51	Net Loss	7-6-51	7-12-51	Net Loss
(a) Group A							
1	None	15.8	5.4	10.4	13.7	9.2	4.5
2	Moist Soil	16.2	12.8	3.4	13.3	12.3	1.0
3	Waterproof Paper	16.5	8.2	7.3	14.0	10.0	4.0
4	$Cacl_2$	12.7	7.8	5.4	12.6	8.3	4.3
5	RC-2 Asphalt	15.2	11.3	3.9	13.8	11.0	2.8
6	Tar RTCB-6	13.5	11.4	2.1	12.7	11.7	1.0
(b) Group B							
10-ft	AE-2	10.3	8.8	1.5	11.0	9.1	1.0
1	None	12.1	4.7	7.4	12.0	7.3	4.7
2	Moist Soil	13.0	11.1	1.9	12.7	11.2	1.5
3	Waterproof Paper	13.3	10.0	3.3	12.5	10.3	2.2
4	$Cacl_2$	12.1	6.9	5.2	12.7	5.4	4.3
5	RC-2 Asphalt	12.0	10.9	1.9	12.4	10.8	2.1
6	Tar RTCB-6	12.3	10.6	1.7	12.1	10.8	1.3

ที่มา: Maner (1952)

2) อุณหภูมิ การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิขณะช่วงเวลาบ่มตัวอย่างดินซีเมนต์จะเป็นผลทำให้กำลังของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้น

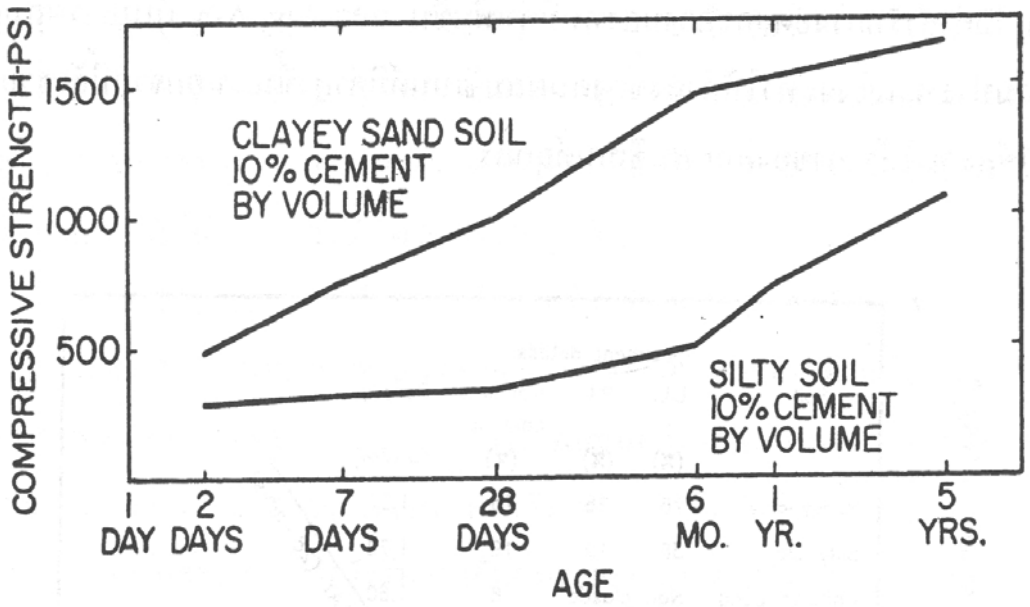
Herzog and Mitchell (1963) ได้ทดลองและพบว่าดินเหนียวที่ผสมปูนซีเมนต์ 30 % บ่มที่อุณหภูมิ 50 ^{o}C จะมีค่ากำลังอัดประมาณเท่ากับดินเหนียวที่ผสมปูนซีเมนต์ 15 % บ่มที่อุณหภูมิ 60 ^{o}C แสดงให้เห็นว่าอัตราเร่งของกำลังที่เพิ่มขึ้นมีผลกระทบโดยตรงจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

Corps of Engineers (1956) กล่าวว่า ถ้าต้องการใช้ค่ากำลังอัดเป็นตัวกำหนดคุณภาพของดินซีเมนต์ในช่วงอากาศอบอุ่น จะให้กำลังมากกว่างานก่อสร้างในช่วงอากาศหนาวประมาณ 50 - 100 % ในช่วงอายุการใช้งาน 3 เดือนแรก

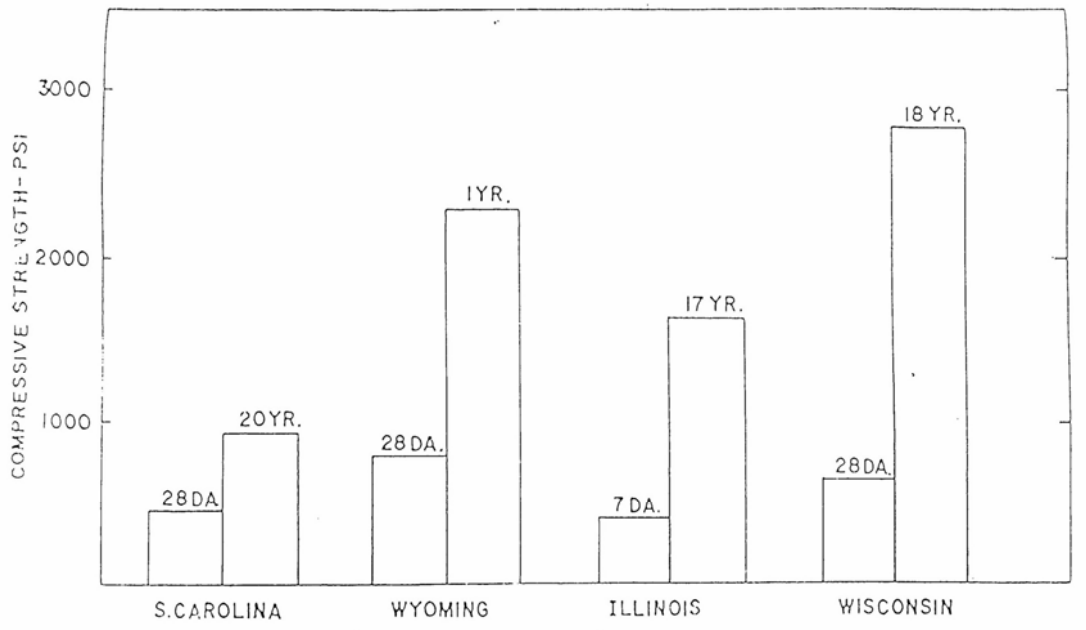
Clare and Pollard (1954) ได้ทดลองหากำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน ของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ อุณหภูมิของการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 25 °C เป็น 60 °C ปรากฏว่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า

Ng (1966) ได้ทดลองดินลูกรังในประเทศไทยผสมปูนซีเมนต์โดยใช้ดินลูกรัง 3 ชนิด และเพิ่มอุณหภูมิการบ่มจาก 70 °F เป็น 100 °F ผลการทดสอบกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 20 %

3) อายุการบ่ม Leadabrand (1956) ได้ทดลองนำดิน 2 ชนิด คือ Clayey Sandy Soil และ Silty Soil มาผสมกับปูนซีเมนต์ 10 % ของน้ำหนักดินแห้ง แล้วทดสอบหากำลังแรงอัดที่มีอายุการบ่มตั้งแต่ 2 วันจนถึง 5 ปี โดยการทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งปรากฏว่าพฤติกรรมของดินซีเมนต์จะคล้ายกับคอนกรีต กล่าวคือกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุของดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 1.28 ส่วนข้อมูลในงานสนามจริงได้ทำการเจาะตัดดินซีเมนต์ จากโครงการก่อสร้างของรัฐต่าง ๆ 4 รัฐในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยมีช่วงอายุตั้งแต่ 1 ถึง 20 ปี นำมาทดสอบกำลังอัด ดังรูปที่ 1.29 ซึ่งจะเห็นได้ว่าดินซีเมนต์มีพฤติกรรมสอดคล้องกับผลในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 1.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับระยะเวลาในการบ่ม การทดลองในห้องปฏิบัติการ
ที่มา: Leadabrand (1956)



รูปที่ 1.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับระยะเวลา การทดสอบในสนาม
ที่มา: Leadabrand (1956)

สารที่ใช้ผสมร่วม

Clare and Pollard (1951) ได้ทำการทดสอบทรายที่มี Organic Matter ผสมอยู่ 0.3 % พบว่า Lime จะช่วยให้มีการแข็งตัวในระยะแรก ซึ่งดินชนิดนี้เมื่อผสมด้วยปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวจะมีการก่อตัวเมื่ออายุ 7 วันขึ้นไป แต่เมื่อเพิ่ม Hydrated Lime ประมาณ 2 % จะช่วยให้แข็งตัวเร็วขึ้น 2 วัน

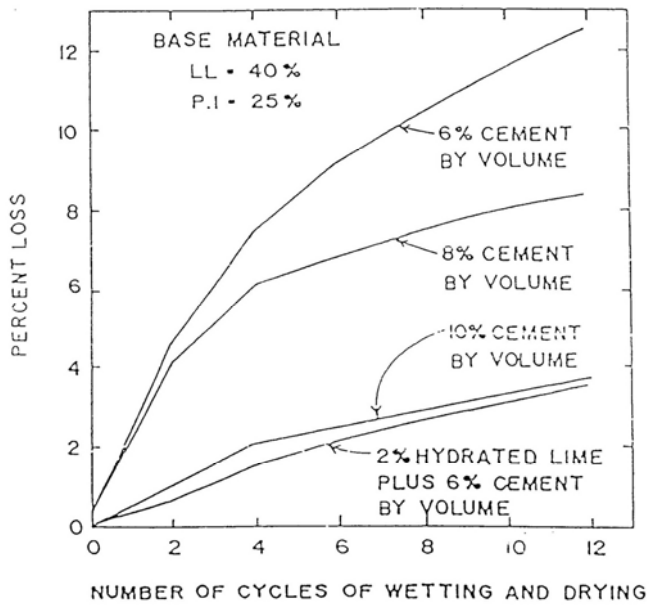
Fuller and Dabney (1952) ได้กล่าวว่า การใส่ปูนขาวกับดินที่มีค่า Plastic Index สูง จะทำให้การบดและการผสมง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น และจากการทดสอบ Wet – Dry โดยใช้ Hydrate Lime ผสมลงไป 2 % จะทำให้ Loss of Weight ลดลง ดังรูปที่ 1.30

Maclean et al. (1952) ได้ทดลองนำดินที่มีค่า Liquid Limit ระหว่าง 70 – 75 และค่า Plastic Index ประมาณ 45 - 53 มาทดลองโดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 15 - 30 % และเพิ่ม Lime ลงไป 2 % ดังรูปที่ 1.31 จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้น และต้านทานการเสียกำลังเมื่อแช่น้ำได้ดียิ่งขึ้น แต่ถ้าผสม Lime เกินกว่า 2 % ผลลัพธ์อาจจะไม่ได้ตามนี้ก็ได้

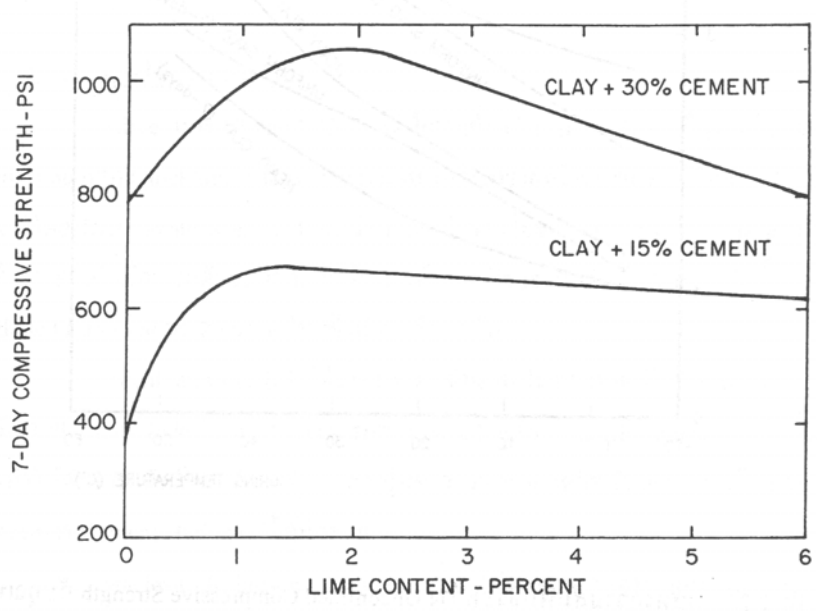
Davidson et al. (1958) รายงานการศึกษาการใช้ปูนซีเมนต์กับเถ้าลอยปรับปรุงคุณภาพของดินว่า เถ้าลอยจะทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนเป็น Admixture ไปด้วยในเวลาเดียวกัน จากการศึกษาพบว่าการผสมเถ้าลอยลงไปจะเพิ่มกำลังอัดที่อายุการบ่ม 120 วัน และลดการแตกร้าว

Ruenkrairergsa (1982) กล่าวว่า จำนวนปูนขาวเพียงเล็กน้อยที่เพิ่มเข้าไปในดินที่มี Plastic Index สูงก่อนจะผสมปูนซีเมนต์ จะช่วยลดค่า Plastic Index ของดินลงได้มากและทำให้ดินผสมกับปูนซีเมนต์ได้ง่ายขึ้น

Lambe et al. (1959) กล่าวว่า การใช้สารประกอบจำพวก Sodium จะช่วยให้ดินผสมปูนซีเมนต์มีกำลังอัดและความคงทนมีค่าเพิ่มขึ้นและเถ้าลอยเป็นสารผสมเพิ่มที่มีสมบัติเชื่อมประสานซึ่งจะทำให้กำลังของดินผสมปูนซีเมนต์มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ลง ทำให้ราคาของดินผสมปูนซีเมนต์ถูกลง



รูปที่ 1.30 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการผสมปูนขาวกับการทดสอบ Wet - Dry Test
ที่มา: Fuller and Dabney (1952)



รูปที่ 1.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับปริมาณปูนขาว
ที่มา: Maclean et al. (1952)

1.5.8 สารปอซโซลาน

ตามมาตรฐาน ASTM ได้ให้คำจำกัดความของคำว่า ปอซโซลาน (Pozzolona) ไว้ดังนี้ สารปอซโซลาน คือ วัสดุที่มี Silica และ Alumina เป็นองค์ประกอบหลัก

ชัยและไกรวุฒิ (2549) กล่าวว่า โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่พอเพียงจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ได้สารประกอบที่สมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์เรียกว่าปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction

การนำสารปอซโซลานมาใช้เป็นวัสดุปูนซีเมนต์ได้มีขึ้นตั้งแต่สมัยโบราณแล้ว โดยเป็นที่ยอมรับกันว่า เมื่อนำวัสดุที่ได้จากการระเบิดของภูเขาไฟมาใช้ร่วมกับหินปูนซึ่งมีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบแล้วสามารถที่จะใช้ปรับปรุงคุณภาพของมอร์ต้าร์ให้ดีขึ้น โดยทำให้มอร์ต้าร์นั้นสามารถแข็งตัวได้ในน้ำ นอกจากนี้ยังได้มีการนำเอาวัตถุที่มีสมบัติในการปรับปรุงคุณภาพของมอร์ต้าร์มาใช้ เช่นดินซานโตริน ไรโอไลท์ทัฟ (Rhyolite Tuff) จากเมืองซานโตริน (Santorin) และฟีโนลิติกทัฟ (Phonolitic Tuff) จากเมืองวิซูเวียส (Vesuvius) ในประเทศอิตาลี เป็นต้น และเมื่อมีการพบวัสดุซึ่งเกิดจากการตกตะกอนทับถมของดินในตำบลใกล้เคียงกับเมืองปอซซูโอลี (Pozzuoli) สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของมอร์ต้าร์ได้ ดังนั้นในยุคต่อ ๆ มาจึงเรียกวัสดุที่นำมาปรับปรุงคุณภาพนี้ว่าปอซโซลาน (Pozzolonas) นอกจากนี้ยังพบว่าได้มีการใช้สารปอซโซลานมาผสมกับปูนซีเมนต์และใช้งานจริงในงานก่อสร้างต่าง ๆ ทั้งในประเทศรัสเซียและประเทศญี่ปุ่นเป็นเวลานานแล้ว ในปัจจุบันสารปอซโซลานที่เห็นโดยทั่วไปและใช้กันมากที่สุด คือเถ้าลอย (Fly Ash)

ในอเมริกา เถ้าลอยเป็นสารปอซโซลานตัวแรกที่ใช้ในงานก่อสร้างคอนกรีตมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930 เถ้าลอยคือผลผลิตที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในเตาเผาจากโรงงานผลิตไฟฟ้า ซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือจากการเผาไหม้ในเตา ในงานการก่อสร้างคอนกรีตที่ประสบความสำเร็จในการใช้เถ้าลอย เป็นส่วนผสมทำคอนกรีตก็คือ การสร้างเขื่อน Hungry Horse ในประเทศอเมริกาโดยเริ่มก่อสร้างในปี ค.ศ. 1948 โดยการใช้เถ้าลอยประมาณ 30 % แทนปูนซีเมนต์ หลังจากนั้นมาเถ้าลอยจึงเป็นส่วนประกอบสำคัญในการสร้างเขื่อนคอนกรีต

สารปอซโซลานอาจแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มตามลักษณะการนำมาใช้งาน คือ

1) สารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Pozzlanas) โดยทั่วไปคือ วัสดุซึ่งเกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ เช่นหินเถ้าภูเขาไฟ (Volcanic Tuff) และหินพรุน (Pumicite) เป็นต้น

2) สารปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzlanas) ส่วนใหญ่คือวัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ดินเหนียว, หินดินดาน (Shale), หินซึ่งมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ, เถ้าลอย และเถ้าจากการเกษตรกรรม เป็นต้น

สมชัย (2535) กล่าวว่า สำหรับในประเทศไทยมีการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้อยู่บนพื้นฐานที่ว่า เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะเมื่อผสมกับน้ำในปริมาณที่พอเหมาะแล้วบ่มทิ้งไว้จะเริ่มแข็งตัวภายใน 1 วัน เนื่องจากมีสมบัติที่แข็งตัวได้ด้วยตัวเอง ทั้งนี้เป็นเพราะเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะส่วนใหญ่จะมีปริมาณ CaO อิสระปนอยู่มากพอที่จะทำปฏิกิริยากับน้ำจนกลายเป็น $Ca(OH)_2$ นี้จะเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ต่อไปกับ Silica และ Alumina ซึ่งอยู่ในรูปของ Non – Crystalline Glass จนเกิดเป็นสารเชื่อมประสานที่แข็งตัวขึ้นได้ เช่น Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) การนำเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างงานดินส่วนใหญ่กระทำใน 2 ลักษณะ คือเถ้าลอยผสมน้ำเทเหลวและเถ้าลอยบดอัด

สมชัย (2536) กล่าวว่า ในปี พ.ศ. 2530 มีการนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ในวัสดุชั้นพื้นทางและรองพื้นทางของถนนภายในโรงไฟฟ้าแม่เมาะและเหมืองลิกไนต์ และในปี พ.ศ. 2535 ได้เริ่มนำเถ้าลอยลิกไนต์ผสมน้ำเทเหลวไปใช้กับงานขนาดใหญ่ คืองานซ่อมแซมการทรุดตัวของระบบระบายน้ำรอบสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ 3 หน้าโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 10 - 11

เถ้าใยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

เถ้าใยปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม ที่ได้จากกากเส้นใยของผลปาล์มเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิในการเผาไหม้ประมาณ $800 – 1000\,^{\circ}C$ เถ้าใยปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้งทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งตามมาและเป็นการสูญเสียพื้นที่ในการทิ้งโดยสูญเปล่า นอกจากนั้นยังทำให้เกิดมลภาวะเนื่องจากการฟุ้งกระจายของเถ้าใยปาล์มน้ำมันอีกด้วย

ในปี ค.ศ. 1990 เริ่มมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต ได้ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 10 % ถึง 50 %

โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเพื่อทำคอนกรีต พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซโซลานต่ำและคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมากกว่า 10 % มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้มีอนุภาคขนาดใหญ่ นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีความหนาแน่นน้อยกว่าและการดูดซึมน้ำมีมากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม (Tay and Show 1995)

ในปี ค.ศ. 1996 Hussin and Awal (1996) นักวิจัยชาวมาเลเซียได้ศึกษาการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยบดเถ้าให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์และแทนที่ในอัตราส่วน 10 % ถึง 60 % พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 30 % ให้กำลังอัดสูงที่สุดที่อายุ 28 วัน โดยกำลังอัดในช่วงอายุก่อน 28 วัน มีค่ากำลังอัดที่ต่ำแต่หลังจากนั้นกำลังอัดมีการพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายกรดไฮดรอคลอริกได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

ในปี ค.ศ. 1999 Awal and Hussin (1999) ได้ศึกษาคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลโดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 30 % พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีการพัฒนากำลังสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว แม้ว่าแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 2 ปี และจากงานวิจัยของ Ishida et al. (1999) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการหดตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมในคอนกรีต โดยบ่มแท่งคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุ 91 วัน พบว่าแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 30 % มีค่าการหดตัวเท่ากับ 430×10^{-6} ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแท่งคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวที่มีค่าการหดตัวเท่ากับ 448×10^{-6}

สำหรับในประเทศไทย สุรพันธ์ และคณะ (2545) พบว่าดัชนีกำลังอัดของเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดมีค่าสูงกว่า 75 % ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับและกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในอัตรา 30 % ยังมีค่าสูงกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานที่อายุ 28 วันขึ้นไป

เถ้าไม้ยางพาราเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานอบไม้ยางพารา ที่ใช้ไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงในการอบไม้ โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคใต้ตอนล่างมีอุตสาหกรรมการแปรรูปไม้ยางพาราอยู่จำนวนมาก หากนำเถ้าทั้งสองชนิดมาใช้ให้เกิดประโยชน์ย่อมส่งผลในแง่ดีต่ออุตสาหกรรมและสภาพแวดล้อมในภาคใต้

จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงเห็นว่าการศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเถ้าปาล์มน้ำมันในต่างประเทศและเป็นการศึกษาเริ่มต้นเท่านั้น ส่วนเถ้าไม้ยางพารายังมี

น้อยมากโดยเฉพาะในประเทศไทย ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันว่าสามารถนำไปใช้ได้ หากมีการปรับปรุงคุณภาพโดยการเพิ่มความละเอียดเสียก่อน จึงเป็นแนวคิดของการทำวิจัยครั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาการใช้เถ้าใยเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพาราในงานปรับปรุงคุณภาพของดิน

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าใยเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

ดนุพลและธนภัทร์ (2551) ได้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าใยปาล์มน้ำมัน พบว่ามีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับ 33.99 % มีปริมาณ Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับ 2.24 % และ 1.65 % ตามลำดับ ดังตารางที่ 1.10 (ก)

ชัยและไกรวุฒิ (2549) กล่าวว่า องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน มีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับ 65.30 % มี Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับ 2.56 % และ 1.98 % ตามลำดับ ดังตารางที่ 1.10 (ข) ซึ่งมีค่าแตกต่างจากงานศึกษาที่ผ่านมาของ Tay (1990) ที่พบว่ามีปริมาณ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับ 34.3 %, 24.6 % และ 14.9 % ตามลำดับและยังแตกต่างจากงานศึกษาของ Hussin and Awal (1996) ที่มีปริมาณ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับ 43.6 %, 11.4 % และ 4.7 % ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันแต่ละแห่งมีความเปลี่ยนแปลงทางเคมีสูง ทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิและวิธีการที่ใช้ในการเผาต่างกัน

สำหรับเถ้าไม้ยางพารา ดนุพลและจิรชาติ (2543) ได้ศึกษามอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าไม้ยางพารา พบว่าเถ้าไม้ยางพารามีปริมาณ CaO เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับ 58.17 % ซึ่งเป็นปริมาณมากพอที่จะเกิดที่จะสามารถเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction โดยจับตัวเป็นก้อนแข็งได้โดยไม่ต้องผสมปูนขาว ดังตารางที่ 1.10 (ค)

ตารางที่ 1.10 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าใยปาล์มน้ำมัน, เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

องค์ประกอบ (%)	(ก) เถ้าใยปาล์มน้ำมัน	(ข) เถ้าปาล์มน้ำมัน	(ค) เถ้าไม้ยางพารา
MgO	7.50	3.08	4.68
Al_2O_3	2.24	2.56	0.25
SiO_2	33.99	65.30	1.61
P_2O_5	3.88	-	-
SO_3	1.23	0.47	1.40
K_2O	11.30	5.72	13.68
CaO	16.43	6.42	58.17
Fe_2O_3	1.65	1.98	0.92
Na_2O	-	0.36	-
LOI	1.02	10.05	-

ปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าใยเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

อภิสิทธิ์ (2547) กล่าวว่า ปฏิกิริยาเคมีของสารปอซโซลานที่ทำให้เกิดการเชื่อมประสานเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินสามารถแบ่งออกเป็น 3 ปฏิกิริยาดังนี้

1) ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า (Ion Exchange)

เป็นปฏิกิริยาการแทนที่ของแคทไอออนซึ่งมีวาเลนซีสูงกว่าหรือมีขนาดใหญ่กว่าแคทไอออนที่มีวาเลนซีต่ำกว่าหรือมีขนาดเล็กกว่า เช่น Ca^{2+} แทนที่ Na^{+} ที่มีอยู่ในดิน ทำให้อนุภาคของเม็ดดินสามารถจับตัวกันดีขึ้นเป็นผลให้ดินมีเสถียรภาพดีขึ้น โดยมากมักเกิดจาก CaO ในสารปอซโซลานทำให้มี Ca^{2+} ไปแทนที่ไอออนที่มีวาเลนซีต่ำกว่าได้

2) ปฏิกิริยาการจับตัวของเม็ดดิน (Flocculation Agglomeration)

เป็นปฏิกิริยาซึ่งทำให้อนุภาคดินเหนียวเกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยแคทไอออนจากเถ้าลอยที่เข้าไปในมวลดินจะเข้าไปจับตัวบนผิวอนุภาคของดินเหนียวและเมื่อความเข้มข้นของไอออนสูงขึ้นจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของแร่ดินเหนียวซึ่งจะทำให้วงน้ำ (Double Layer) หดตัวแคบเข้า ทำให้อนุภาคดินเหนียวจะเคลื่อนตัวเข้าหากันและเกิดการดึงดูดอนุภาคของเม็ดดินรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้โครงสร้างของดินมั่นคงขึ้น

3) ปฏิกิริยาปอซโซลานิค (Pozzolanic)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากสาร SiO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ซึ่งทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดสารเชื่อมประสานขึ้นเรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic)

$CaO+H_2O$ ----------> $Ca(OH)_2$

$3\ Ca(OH)_2+2SiO_2$ ----------> $3CaO.2SiO_2.3H_2O$

$3\ Ca(OH)_2+2Al_2O_3$ ----------> $3CaO.\ 2Al_2O_3.3H_2O$

จากสมการทางเคมีข้างต้นจะทำให้ได้สารประสานที่ดี จะต้องมี CaO ปริมาณหนึ่งทำปฏิกิริยาเคมีกับ SiO_2 และ Al_2O_3 ในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน

การใช้สารปอซโซลานในการปรับปรุงคุณภาพดิน

จากตารางที่ 1.10 พบว่าเถ้าไม้ยางพารามีปริมาณ CaO สูงถึง 58.17 % ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญสำหรับปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction เป็นวัสดุปูนซีเมนต์ในตัวเองโดยไม่ต้องใช้ร่วมกับปูนขาวหรือปูนซีเมนต์

เมื่อเถ้าไม้ยางพาราที่มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักสัมผัสกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาเคมีดังนี้คือ CaO จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็น $Ca(OH_2)$ ซึ่งสารนี้จะทำปฏิกิริยาต่อไปกับ SiO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในเถ้าใยปาล์มน้ำมัน เกิดเป็นสารประกอบใหม่คือ Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ซึ่งมีสมบัติเชื่อมเกาะ (Cementitious) เพิ่มขึ้นตามเวลา

Weiping and Brown (1997) กล่าวว่า สารประกอบ CSH และ CAH เป็นสารผลิตภัณฑ์หลักเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Cement Hydration ของปูนซีเมนต์

เถ้าใยเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารามีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดิน หากมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมจะมีโอกาสพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับงานถนน โดยอาจใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase) หรือเป็นวัสดุชั้นพื้นทาง (Base) แม้ว่าสารปอซโซลานส่วนใหญ่จะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นได้ด้วยตัวเอง แต่มักจะผสมปูนขาวหรือปูนซีเมนต์ร่วมกับสารปอซโซลานเพื่อให้ได้กำลังอัดอยู่ในเกณฑ์กำหนด แต่เถ้าใยเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารามีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมและมีความเป็นไปได้ที่ไม่ต้องใช้ร่วมกับปูนขาวหรือปูนซีเมนต์