



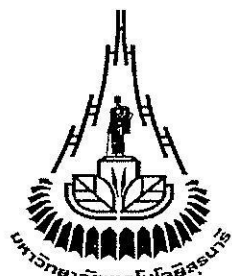
รายงานการวิจัย

สมการทำนายกำลังอัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวล
ที่ปริมาณความชื้นสูง

(AN EQUATION FOR PREDICTING STRENGTH
DEVELOPMENT IN CEMENT-BIOMASS ASH STABILIZED
CLAY AT HIGH WATER CONTENT)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

สมการทำนายกำลังอัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวล
ที่ปริมาณความชื้นสูง

(AN EQUATION FOR PREDICTING STRENGTH DEVELOPMENT IN CEMENT-
BIOMASS ASH STABILIZED CLAY AT HIGH WATER CONTENT)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.วีรยา นิมอ้อย
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2552

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2553

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จะไม่สำเร็จล่วงได้ ถ้าปราศจากการช่วยเหลือทางจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง การกล่าวขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือให้ครบทุกท่านเป็นงานที่ยาก ผู้เขียนต้องขอขมา ณ ที่นี้ด้วย หากมิได้กล่าวนามของท่าน

ผู้เขียนขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.ณรงค์ อัครพัฒนานุกุล ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่าน ที่ให้ความสะดวกและความช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน และขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งลาวัลย์ ราชัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร นายอภิชาติ สุดดีพงษ์ นักวิจัยสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับคำปรึกษาและความช่วยเหลือในการปฏิบัติงานจนทำงานวิจัยนี้สำเร็จล่วงด้วยดี

ท้ายสุด ผู้เขียนขอขอบคุณท้ายสุด ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นอย่างยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ปีงบประมาณ 2552

สุขสันต์ หอพิบูลสุข

หัวหน้าโครงการวิจัย

มิถุนายน 2553

บทคัดย่อ

เถ้าชีวมวลเป็นวัสดุเหลือใช้ที่สามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ได้ รายงานนี้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของเถ้าชีวมวลในการปรับปรุงกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์ เถ้าชีวมวลทำหน้าที่เป็นวัสดุกระจายตัว ซึ่งทำให้อุณหภูมิของปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำได้ดียิ่งขึ้น อิทธิพลของการกระจายตัวเปรียบเสมือนการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ จากหลักการนี้ สมมติฐานอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์สำหรับดินเหนียวซีเมนต์เถ้าชีวมวลได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัด แม้ว่าตัวอย่างดินเหนียวซีเมนต์เถ้าชีวมวลจะมีความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และเถ้าชีวมวล แตกต่างกัน แต่ตัวอย่างดินเหนียวซีเมนต์เถ้าชีวมวลจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด และกำลังอัดใกล้เคียงกัน ถ้าอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์มีค่าเท่ากันท้ายสุด ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์ และอายุบ่มสำหรับดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล ได้รับการพัฒนาและตรวจสอบความถูกต้อง ความสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นนี้มีประโยชน์อย่างมากในการประมาณกำลังอัดที่อายุบ่มใดๆ เมื่อแปรผันตัวแปรปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณเถ้าชีวมวล การเติมเถ้าชีวมวลในประมาณร้อยละ 25 ช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 15.8

ABSTRACT

Biomass ash has been widely accepted as a waste material substituting Portland cement. In this report, the role of the biomass ash on the strength development of cement admixed Bangkok clay is investigated. The biomass ash is dispersing material, increasing the reactive surface of the cement grains. The contribution of the dispersing effect to the strength development is regarded akin as an addition of cement. Based on this premise, the clay-water/cement ratio hypothesis for blended cement admixed clay is proposed for analyzing and assessing the strength development. Even with the difference in water content, cement content and ash content, the blended cement admixed clay samples having the same w_c/C possess practically the same stress-strain response and strength. The relationship among strength, clay-water/cement ratio, and curing time for the blended cement admixed Bangkok clay is finally developed and verified. It is useful to assess the strength at any curing time wherein water content, cement content, and biomass ash content vary over a wide range by using the test result of a single laboratory trial. An addition of 25% biomass ash can save on the input of cement up to 15.8%.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทัศนัวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ประวัติความเป็นมาของดินซีเมนต์.....	3
2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	4
2.2.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์.....	4
2.2.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	5
2.2.3 ปฏิกริยาเมื่อผสมปูนซีเมนต์กับดินและน้ำ.....	5
2.3 เถ้าลอย.....	6
2.3.1 คุณสมบัติพื้นฐานและทางเคมีของเถ้าลอย.....	7
2.3.1.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย.....	7
2.3.1.2 ส่วนประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอย.....	9
2.3.2 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของเถ้าลอย.....	9
2.3.2.1 รูปร่างของเถ้าลอย.....	10
2.3.2.2 ความละเอียด.....	10
2.3.2.3 ดัชนีกำลัง.....	11
2.3.3 เทคนิคการทดแทนเถ้าลอยในงานคอนกรีต.....	11
2.3.4 คอนกรีตผสมเถ้าลอยเหมาะสม.....	12
2.3.4.1 กำลังอัด.....	12
2.3.4.2 ความละเอียด.....	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.4.3 การต้านทานการกัดกร่อน.....	13
2.4 ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์.....	14
2.4.1 ปริมาณปูนซีเมนต์และชนิดของปูนซีเมนต์.....	14
2.4.2 คุณสมบัติของดิน.....	18
2.4.3 ปริมาณดินเหนียวและชนิดของแร่ดินเหนียว.....	19
2.4.4 คุณสมบัติทางเคมีของดิน.....	21
2.4.5 การผสม.....	22
2.4.5.1 ระยะเวลาในการผสม.....	22
2.4.5.2 ปริมาณน้ำในมวลดิน.....	24
2.4.5.3 ความหนาแน่น.....	24
2.4.6 การบ่ม.....	25
2.4.7 การผสมรวม.....	26
บทที่ 3 ผลการศึกษาและบทสรุป.....	28
3.1 บทนำ.....	29
3.2 สมมติฐานอัตราส่วนน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์.....	30
3.3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	30
3.2.1 ดินตัวอย่าง.....	30
3.2.2 ปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล.....	32
3.2.3 วิธีการทดสอบ.....	32
3.4 ผลทดสอบและการวิเคราะห์ผลทดสอบ.....	33
3.5 สมการทำนายกำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าชีวมวล.....	34
3.6 บทสรุป.....	38
เอกสารอ้างอิง.....	41
ประวัติผู้ประพันธ์.....	45

สารบัญตาราง

	หน้า
2.1 ออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	4
2.2 สารประกอบหลักที่รวมอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	4
2.3 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618.....	7
2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2533 ถึง 2541.....	8
2.5 ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C-618.....	9
2.6 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง.....	11
2.7 กำลังอัดของคันทูกรังผสมปูนซีเมนต์ที่อายุบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน (ทรงพล, 2529)...	18
3.1 คุณสมบัติทางเคมีของดินเหนียวกรุงเทพ ปูนซีเมนต์ และเถ้าชีวมวล.....	31
3.2 ผลการทำนายกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล.....	38

สารบัญรูป

	หน้า
2.1 Scanning Electron Microscope (SEM) ของเถ้าลอย.....	10
2.2 อิทธิพลของปูนซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดของดิน Sandy Loam (Felt, 1955).....	14
2.3 อิทธิพลของปูนซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน (Felt, 1955)..	15
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์กับกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Metcalf, 1977).....	15
2.5 ผลเปรียบเทียบกำลังอัดของดิน Sandy Loam (Soil 2a-6) และ Silty Clay Loam (Soil 4d) ผสมปูนซีเมนต์ประเภท 1 และประเภท 3 เมื่อผสมเสร็จแล้วทดสอบทันที (Felt, 1955).....	16
2.6 ขอบเขตปฏิสัมพันธ์ของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003).....	17
2.7 กราฟกำลังอัดแกนเดียวสัมพันธ์กับปริมาณปูนซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2006).....	17
2.8 อิทธิพลของวัสดุที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Norling and Peckard, 1958).....	20
2.9 อิทธิพลของปริมาณดินเหนียวต่อค่า Modulus of Elasticity ของดินซีเมนต์ (Reinhold, 1995).....	20
2.10 อิทธิพลของแรงดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 8 (Davidson et al., 1962).....	20
2.11 อิทธิพลของแรงดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 12 (Davidson et al., 1962).....	21
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับค่า pH ของดินผสมซีเมนต์ในอัตราส่วน 1:10 (Sherwood, 1958).....	22
2.13 ผลของระยะเวลาที่ใช้ผสมต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Felt, 1955).....	23
2.14 การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้ระยะเวลาการบดอัดนานขึ้น (Ingles and Metcalf, 1972).....	23
2.15 อิทธิพลของความหนาแน่นต่อกำลังอัดของดินที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (Felt, 1955).....	24
2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิที่ใช้บ่มดินซีเมนต์ (Clare and Pollard, 1954).....	25
2.17 อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Leadabrand, 1956).....	26
3.1 การกระจายขนาดของดินเหนียวกรุงเทพ ปูนซีเมนต์ และเถ้าชีวมวล.....	30
3.2 รูปถ่ายกำลังขยายของดินเหนียวกรุงเทพ ปูนซีเมนต์ และเถ้าชีวมวล.....	31

สารบัญรูป

	หน้า
3.3 การวิเคราะห์กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวลด้วยพารามิเตอร์ w/C	33
3.4 การพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล.....	35
3.5 ผลเปรียบเทียบกำลังอัดที่ได้จากการทำนายและห้องปฏิบัติการ.....	37

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญปัญหา

พื้นที่ในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยเฉพาะบริเวณแถบชายฝั่ง ได้แก่ แม่น้ำเจ้าพระยา ในประเทศไทย กลุ่มน้ำโขง ในประเทศลาวและกัมพูชา พื้นที่ตอนกลางของประเทศฟิลิปปินส์ และพื้นที่ชายฝั่งทะเล ประเทศอินโดนีเซีย มาเลเซีย สิงคโปร์ ชองกง เกาหลี ญี่ปุ่น และไต้หวัน ประสบกับปัญหาทางด้านวิศวกรรมปฐพี พื้นที่เหล่านี้ปกคลุมด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนา ซึ่งมีกำลังต้านทานแรงเฉือนต่ำ ปริมาณความชื้นสูง และการอัดตัวสูงเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก

เมื่อมีการก่อสร้างโครงสร้างสาธารณูปโภค เช่น ถนน และฐานรากสะพาน เป็นต้น บนชั้นดินเหนียวอ่อน จะก่อให้เกิดปัญหาทางด้านวิศวกรรมปฐพี ชั้นดินนี้จะเกิดการอัดตัวคายน้ำและก่อให้เกิดการทรุดตัวและการเสียรูปด้านข้างอย่างมากระหว่างและหลังการก่อสร้าง ปัญหาที่มักพบอีกปัญหานึงคือการวิบัติของดินฐานรากระหว่างและหลังการก่อสร้างอันเกิดจากน้ำหนักที่ไม่ได้คาดคิด เช่น แผ่นดินไหว วิธีการแก้ปัญหามีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งคือการผสมวัสดุเชื่อมประสานในดินที่ระดับลึก ที่เรียกว่าเทคนิคการผสมลึก (Deep mixing technique) วิธีการนี้เป็นการเพิ่มพันธะเชื่อมประสานให้กับดินโดยใช้สารเคมี (ซีเมนต์และปูนขาว เป็นต้น) ความต้านทานการอัดตัวและกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นกับอายุบ่ม เทคนิคการปรับปรุงดินนี้เป็นการสร้างเสาเข็มในชั้นดินเหนียวอ่อนเพื่อเปลี่ยนจากชั้นดินเหนียวเป็นชั้นดินผสม (Composite ground)

การปรับปรุงดินอ่อนด้วยวัสดุเชื่อมประสาน (Binder/Cementing agents) นี้เป็นเทคนิคการปรับปรุงดินที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในและต่างประเทศ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ภายในระยะเวลาอันสั้น วัสดุเชื่อมประสานที่นิยมใช้กันคือปูนซีเมนต์ เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศ แต่อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินในปริมาณที่มากจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง เพื่อเป็นการลดต้นทุนการก่อสร้างเราจำเป็นต้องลดปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยการทดแทนด้วยวัสดุปอชโซลานที่มีราคาต่ำ การทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอชโซลาน ในอัตราส่วนที่เหมาะสมนอกจากจะช่วยเพิ่มกำลังอัดแล้วยังช่วยเพิ่มความคงทน (Durability) ให้กับดินซีเมนต์ด้วย วัสดุปอชโซลานที่เป็นที่ยอมรับในงานโครงสร้างของประเทศ ได้แก่ เถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุเหลือ (Byproduct) จากการผลิตไฟฟ้าที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหิน และเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ของวัสดุตามธรรมชาติ เช่น เปลือกไม้ ชานอ้อย และขี้เถ้าแกลบ เป็นต้น เถ้าประเภทนี้เรียกว่าเถ้าชีวมวล (Biomass ash) การประยุกต์ใช้เถ้าลอยถ่านหินในงานวิศวกรรมเป็นที่

ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย (สมนึกและคณะ 2547; ปริญญา 2547; Owens, 1979; Mitsui, et al., 1994; Ollivier et al., 1995; Mindess, 1996; Igarashi et al., 1996; Ollivier and Massat, 1996; Jaturapitakkul, 1999; Chindapasirt et al. 2001; Yang and Su, 2002; Chindapasirt et al. 2004 และ Thumasujarit and Tangtermsirikul, 2004) จึงทำให้เถ้าลอยถ่านหินมีค่าราคาที่สูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เอง งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เถ้าชีวมวลซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ไม่มีราคาในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียวกรุงเทพร่วมกับปูนซีเมนต์ พร้อมทั้งสร้างสมการทำนายกำลัง

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาลักษณะการพัฒนากำลังอัดของดินกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์เถ้าชีวมวล โดยพิจารณาอิทธิพลของของตัวแปรควบคุม (ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าชีวมวล และอายุบ่ม) และสร้างทำนายสมการทำนายกำลังอัดในพจน์ของตัวแปรควบคุม

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. เข้าใจถึงอิทธิพลของเถ้าชีวมวลต่อการพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์
2. ได้สมการทำนายกำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าชีวมวล เมื่อมีการแปรผันปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าชีวมวล และอายุบ่ม

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมาของดินซีเมนต์

ดินเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีอยู่อย่างมากมาย ซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดและสภาพแวดล้อม จึงมีความจำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพดินให้มีความเหมาะสมกับงานแต่ละประเภท แนวความคิดเรื่องการปรับปรุงดินให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น โดยการผสมวัสดุเชื่อมประสานได้เกิดขึ้นเป็นเวลาหลายพันปีมาแล้ว ได้มีการนำดินมาผสมกับปูนขาวหรือวัสดุปอชโซลานเพื่อให้ค่าดัชนีสภาพพลาสติก (Plasticity Index, PI) ของดินลดลง ซึ่งทำให้ดินรับแรงอัดได้ดีขึ้น หลังจากนั้น ได้มีการศึกษาอย่างต่อเนื่องมาหลายศตวรรษ (Terrel et al., 1979)

ในประเทศ Sweden ศาสตราจารย์ Bengt Broms ได้ใช้เสาเข็มปูนขาวในงานฐานรากและงานโครงสร้าง (Broms and Boman, 1975) เทคนิคนี้ได้เริ่มต้นใช้ในประเทศญี่ปุ่นในปลายปี ค.ศ. 1970 (Okumura and Terashi, 1975; Terashi et al., 1979; Kawasaki et al., 1981 และ Suzuki, 1982) DJM Research Group (1984), Chida (1982) และ Miura et al. (1986) ได้รายงานความสำเร็จของการประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในงานวิศวกรรมปฐพี ในปี ค.ศ. 1980 และ 1982 หลังจากการประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ไม่นานนัก นักวิจัยและวิศวกรหลายท่านได้สร้างทฤษฎีวิธีการวิเคราะห์และวิธีการออกแบบ

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930 เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้ามีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง ค.ศ. 1930 ถึง 1939 นักวิจัยชาวสหรัฐอเมริกาได้เริ่มศึกษาการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต โดยในปี ค.ศ. 1937 Davis และคณะ จากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ได้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต ในปี ค.ศ. 1948 ได้มีการใช้เถ้าลอยในการก่อสร้างเขื่อน Hungry Horse ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 ถึง 1979 ได้เกิดวิกฤติการณ์น้ำมันทำให้ต้องใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงและมีผลให้ปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น และการศึกษาเพื่อสร้างความเข้าใจในปฏิกิริยาเคมีของเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์จึงเกิดขึ้นในช่วงเวลานั้นจนถึงปัจจุบันการนำเถ้าลอยในงานคอนกรีตได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อเป็นการลดต้นทุนของคอนกรีตและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดเถ้าลอยทิ้ง นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาการนำเถ้าลอยลิกไนต์จากอำเภอแม่เมาะมาผสมในดินสำหรับงานถนน เช่น อนิรุทธ์ (2530) สมชัย (2535) และ Rhee (1982) นักวิจัยเหล่านี้พบว่ากำลังอัดของซีเมนต์ผสมเถ้าลอยมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น (ในช่วงร้อยละ 0 ถึง 15) ระยะเวลาการบ่มและค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ขีดจำกัดเหลว พิกัดพลาสติก และดัชนีสภาพพลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย

2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.2.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยส่วนผสมที่สำคัญคือ 1) Catcareous Material ได้แก่ หินปูน (Limestone) และดินสอพอง (Chalk) 2) Argillaceous Material ได้แก่ Silica ซึ่งอยู่ในรูปของดินเหนียว (Clay) และดินดาน (Shale) 3) Iron Oxide Material ได้แก่ แร่เหล็ก (Iron) หรือ สีลาแลง (Laterite) เมื่อทำการเผาวัสดุตั้งกล่าวทั้งหมดรวมกันในหม้อเผาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่คือ ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , NaO , TiO_2 , P_2O_5 ปริมาณออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงในตารางที่ 2.1 ออกไซด์หลักจะรวมตัวกันในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาล, 2536)

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60-67
SiO_2	17-25
Al_2O_3	3-8
Fe_2O_3	0.5-0.6
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1-5.5
$\text{Na}_2 + \text{K}_2\text{O}$	0.5-1.3
TiO_2	0.1-0.4
P_2O_5	0.1-0.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบหลักที่รวมอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาล, 2536)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียม อลูมินา	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตราแคลเซียม อลูมินาเฟอร์ไรท์	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

2.2.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับผลิตคอนกรีตทั่วไป ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราเพชร ตราพญานาคสีเขียว

2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสมสำหรับใช้ในงานที่เกิดความร้อนปานกลาง ทนซัลเฟตได้ปานกลาง ปัจจุบันไม่มีผลิตในประเทศไทย

3) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังอัดสูงในระยะแรก เพราะมีความละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็ว หรือถอดแบบในเวลาอันสั้น ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราเอราวัณ ตราสามเพชร ตราพญานาคสีแดง ข้อควรระวังคือ ไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เพราะความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดสูงมากในช่วงต้น อาจก่อให้เกิดโครงสร้างเกิดการแตกร้าวได้

4) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ได้ถูกพัฒนาครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำ ในประเทศไทยไม่มีการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ปัจจุบันนี้ถูกทดแทนโดยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาผสมกับเถ้าลอย

5) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistance Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะมีไตรแคลเซียม (C_3A) ต่ำ จึงทำให้มีการพัฒนากำลังอัดช้า ทำให้เกิดความร้อนต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้างฟ้า ตราปลาฉลาม

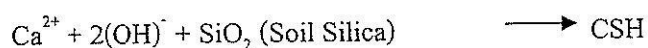
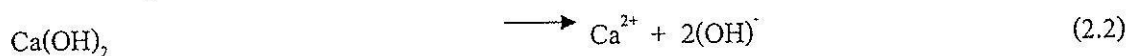
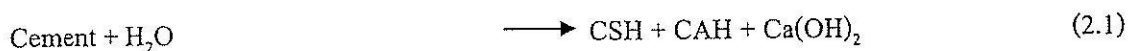
2.2.3 ปฏิกิริยาเมื่อผสมปูนซีเมนต์กับดินและน้ำ

เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับดินและน้ำจะเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้ดินมีกำลังเพิ่มขึ้น ซึ่งได้มีการศึกษาและบันทึกไว้โดยนักวิจัยหลายท่าน

Davidson (1961) ได้กล่าวไว้ว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียวชั้น จะทำให้เกิดการลดลงของค่าดัชนีสภาพพลาสติกของดินซึ่งน่าจะมาจากการแยกตัวของ อีออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) ในระหว่างเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เม็ดดินยึดเกาะกันเป็นก้อน เนื่องจากแรงยึดเกาะทางเคมีที่มีอยู่ในดิน หรือการยึดเกาะกันระหว่างผิวของอนุภาคซีเมนต์ที่อยู่ใกล้กัน

Lambe et al. (1959) ได้ศึกษาการปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์ และอธิบายไว้ว่า ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นจากผลึกของ Tricalcium Silicate, Dicalcium Silicate, Tricalcium Aluminate และ Tetracalcium Aluminate Ferrite เมื่อผสมปูนซีเมนต์เข้ากับดินและน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา จะได้สารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (CSH), Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Hydrated Lime หรือ Calcium Hydroxide ($Ca(OH)_2$) แยกตัวออกมา CSH และ

ไปทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาในแร่ดินเหนียว เกิดสารประกอบ CSH และ CAH ขึ้นมาอีก ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำในมวลดิน จะทำให้ค่า pH ในดินเพิ่มขึ้น ซึ่งเชื่อว่าการเพิ่มขึ้นของ pH เนื่องจากการแตกตัวของ Ca(OH)_2 หรือ Hydrated Lime ทำให้ซิลิกาและอลูมินา ซึ่งเป็นแร่ประกอบในดินเหนียวเกิดการแตกตัวเข้าทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน ได้วัสดุเชื่อมประสานขึ้นอีก ปฏิกิริยานี้จะต้องใช้เวลานานกว่าจะสมบูรณ์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในดินซีเมนต์แสดงได้ดังสมการที่ (2.1) ถึง (2.3)



การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เกิดจากการที่ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำแล้วเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และผลของปฏิกิริยาจะได้สารประกอบ CSH, CAH และ Ca(OH)_2 ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไป โดย Ca(OH)_2 จะแตกตัวออกเป็น Ca^{2+} และทำปฏิกิริยากับ SiO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งเป็นแร่ในดินเหนียวได้ สารประกอบ CSH และ CAH ออกมาอีก สารประกอบเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสานทำให้อนุภาคของเม็ดดินเกิดการรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีกำลังสูงขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามสมการที่ 2.1 และ 2.2 เรียกว่า Primary Reaction และสมการที่ 2.3 เรียกว่า Secondary Reaction

2.3 เถ้าลอย

เถ้าถ่านหิน หรือเถ้าลอย (Fly Ash หรือ Pulverized Fuel Ash) ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานโรงไฟฟ้าถ่านหิน มีสีเทา เทาดำหรือน้ำตาล มีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของซิลิกาและอะลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่น ไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับ Ca(OH)_2 และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (Cementitious) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและช่วงเวลาการเผา ดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหิน

หน่วยงานวิจัยสองหน่วยงานกำหนดถึงคุณสมบัติและข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิงถึงของเถ้าลอยคือ American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Material (ASTM) ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยตาม ASTM C-618 และ ASTM C-593 เพื่อควบคุมคุณภาพและคัดเลือกเถ้าลอยมาใช้ในการงานคอนกรีต แต่จากการศึกษาของ สมชัยและ

คณะ (2540) พบว่าคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะเป็นได้ทั้ง Class F และ Class C ดังนั้นการจำแนกประเภทของเถ้าลอยโดยอาศัยหลักเกณฑ์ดังกล่าวอาจเกิดข้อโต้แย้งได้ คณะอนุกรรมการสาขาคอนกรีตและวัสดุ คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ จึงริเริ่มที่จะดำเนินการร่างมาตรฐานเพื่อใช้กับเถ้าลอยและการออกแบบคอนกรีตสำหรับประเทศไทยขึ้น

2.3.1 คุณสมบัติพื้นฐานและทางเคมีของเถ้าลอย

2.3.1.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

American Society for Testing and Material (1995) แนะนำให้ทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี โดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence เถ้าลอยทั่วไปประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหิน ขบวนการเผา อุณหภูมิที่ใช้เผา มาตรฐาน ASTM C-618 แยกเถ้าลอยเป็น Class F และ Class C ซึ่งมีปริมาณส่วนประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618

องค์ประกอบทางเคมี	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ และ Fe_2O_3), min %	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3), max %	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, max %	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition (LOI)), max %	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O), max %	1.5	1.5

ข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 ใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินา และเหล็กในการจำแนก Class โดยที่ Class F และ Class C ผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับ เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างเพียงพอ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในระยะยาวด้วย สำหรับร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) กำหนดไม่ให้เกิน 5 เพราะซัลเฟอร์ มีผลเสียต่อการพัฒนากำลังอัด ระยะเวลาก่อตัว

และยังมีผลเสียต่อกอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟต (Sulfate Attack)

ความชื้นของเถ้าลอยไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition (LOI)) ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอย หากมี LOI มาก การควบคุมในด้าน Air entrainment ของคอนกรีตสดจะทำให้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่ม ในคอนกรีตโดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่าร้อยละ 6 มาก ปริมาณอัลคาไลน์ (Alkali) ในรูปของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O Equivalent) มากที่สุดไม่เกิน ร้อยละ 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C-618 เพราะเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูง จะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ Alkali-aggregate ขึ้นได้ ถ้าต้องการนำเถ้าลอยที่มีปริมาณอัลคาไลน์ มากกว่าร้อยละ 1.5 ไปใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่าไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2533 ถึง 2541

ปี พ.ศ.	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	LOI
2533	37.8	20.5	14.2	17.4	3.3	0.9	2.1	3.9	0.8
2534	42.8	23.3	14.0	10.5	2.4	0.8	2.3	3.9	0.7
2535	40.3	24.0	15.0	11.2	2.8	1.0	2.6	3.1	0.5
2536	43.1	20.0	13.2	13.0	2.7	1.3	2.4	2.6	0.6
2537	52.8	18.0	8.5	13.3	1.4	0.9	2.0	2.8	0.3
2538	40.6	22.8	12.8	14.4	2.5	0.7	2.0	2.8	0.9
2539	40.6	23.6	13.0	13.0	2.5	1.2	3.0	2.4	0.7
2540	41.5	28.1	12.3	10.0	1.2	0.6	3.3	2.0	0.8
2541	37.3	22.1	14.4	11.4	2.7	1.1	2.7	2.5	0.1

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ พ.ศ. 2431 ถึง 2541 คุณสมบัติโดยทั่วไปมีปริมาณผลรวมของออกไซด์ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 70 ปริมาณ CaO จะสูงมากกว่าร้อยละ 10 ปริมาณ LOI ต่ำมาก คือน้อยกว่าร้อยละ 1 นอกจากนี้ข้อที่น่าสังเกตคือ ปริมาณ Fe_2O_3 จะสูงกว่าแหล่งอื่น

2.3.1.2 ส่วนประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอย (Mineralogical composition)

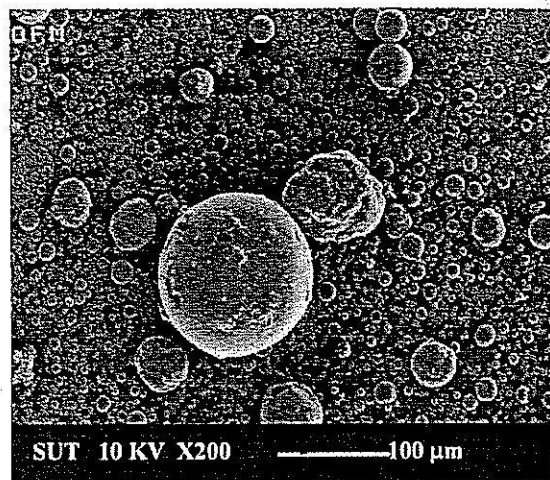
สมชัยและคณะ (2540) แสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ผลต่อองค์ประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอยด้านการเกิดผลึก (Crystalline) สำหรับเถ้าลอยลิกไนต์จะมีความเป็น Noncrystalline (glass) มากกว่าร้อยละ 90% อันเป็นส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี แต่ก็ยังคงมีองค์ประกอบของ Crystalline จำพวก Quartz Anhydrite Calcite Hematite Mullite ซึ่งเกี่ยวข้องการเกิดปฏิกิริยา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction จะพบว่าเถ้าลอยจากถ่านลิกไนต์จะมีองค์ประกอบของ Crystalline น้อยกว่าเถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัสและแอนทราไซต์

2.3.2 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของเถ้าลอย

คุณสมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของเถ้าลอย สามารถเห็นได้จากพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม (Fly ash concrete) แต่คุณสมบัติของเถ้าลอยอาจเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากกระบวนการเผาไหม้ เช่นมีการเผาน้ำมันเตาร่วมกับการเผาถ่านหิน มีการเติมวัสดุบางประเภทเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ และลดการกัดกร่อน ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของเถ้าลอยเพื่อนำไปใช้งาน อาศัยข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C-618 ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C-618

ข้อกำหนดด้านกายภาพ	Class of Fly Ash	
	F	C
ความละเอียด : ส่วนข้างตะแกรงเบอร์ 325 หลังการร่อนแบบเปียก, Max %	34	34
หาดัชนีกำลัง : โดยผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์		
7 วัน , Min % เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
28 วัน , Min % เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
ความต้องการน้ำ : Max % เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	105	105
ความอยู่ตัว : การขยายตัวหรือหดตัวโดยวิธี Autoclave , Max %	0.8	0.8
การกำหนดความสม่ำเสมอ (Uniformity requirement)		
- ความหนาแน่น , Max จากค่าเฉลี่ย %	5	5
- ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 , Max จากค่าเฉลี่ย %	5	5
Multiple Factor (ผลคูณระหว่าง %LOI กับ % ของปริมาณความชื้นที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325)	255	-
Drying Shrinkage ของแท่งมอร์ต้าที่ 28 วัน Max% ที่แตกต่างจากตัวควบคุม	0.03	0.03



รูปที่ 2.1 Scanning Electron Microscope (SEM) ของเถ้าลอย (ขยาย 3,000 เท่า)

2.3.2.1 รูปร่างของเถ้าลอย

อนุภาคเถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลม บางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจมีรูปร่างไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผาผ่านหินซึ่งแตกต่างจากปูนซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยม เมื่อถ่ายภาพอนุภาคของเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นรูปร่างกลม ดังรูปที่ 2.1 เมื่อเถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบ และทำให้คอนกรีตแข็งแรงต่อการเทซึ่งคอนกรีตบางชนิดต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้ แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้

2.3.2.2 ความละเอียด (Fineness)

ขนาดหรือพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งจะใช้การทดสอบความละเอียดของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM C-430 โดยกำหนดปริมาณของเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 มิลลิเมตร) โดยวิธีร่อนเปียก (Wet Sieving) เนื่องจากเถ้าลอยที่มีอนุภาคหยาบจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่าอนุภาคที่ละเอียดกว่า นั่นคือส่วนที่ผ่านตะแกรงแล้วจะทำปฏิกิริยาได้มีประสิทธิภาพดีกว่า นอกจากนี้ยังจะบอกขนาดของอนุภาคจากการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลน (Blaine specific surface-area technique) ตามมาตรฐาน ASTM C-204 หรือวิธี Particle size-analysis หรือวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัม การทดสอบเทอร์บิไดมิเตอร์ (Turbidimeter test) ตาม ASTM C-115 และการใช้ไฮโดรมิเตอร์ โดย

การทดสอบทั้งสี่วิธีนี้อาจให้ค่าความละเอียดที่แตกต่างกันได้มาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการทดสอบ โดยผลการทดสอบขึ้นอยู่กับความหนาแน่น และความพรุนของเถ้าลอยแต่ละอนุภาคเป็นอย่างมาก แต่จากการทดสอบเถ้าลอยจากอำเภอแม่เมาะ การบอกขนาดของอนุภาคโดยวิธีดังกล่าว ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

ชนิดตัวอย่าง	ความถ่วงจำเพาะ	ส่วนที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 (%)	สภาพให้อากาศซึมได้ (cm^2/g)	ขนาดเฉลี่ย (mm)
ปูนซีเมนต์	3.14	4.7	3120	13.0
เถ้าลอย	2.02	37.4	2370	28.5

จะเห็นได้ว่าเถ้าลอยมีปริมาณที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 สูงกว่าปูนซีเมนต์ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า ส่งผลให้เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารหน่วงเมื่อผสมร่วมกับปูนซีเมนต์

2.3.2.2 ดัชนีกำลัง (Strength Activity Index)

ค่าดัชนีกำลังจะเป็นอัตราส่วนร้อยละของกำลังอัดเฉลี่ย (Compressive Strength) ของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C-311 เทียบกับมอร์ต้ามาตรฐานที่ไม่ผสมวัสดุปอซโซลาน โดยกำหนดไว้ว่าไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้ามาตรฐาน ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

2.3.3 เทคนิคการทดแทนเถ้าลอยในงานคอนกรีต

เทคนิคการผสมเถ้าลอยในคอนกรีต (Berry and Malhotra, 1980) มีสามวิธีดังนี้

1) ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน การทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยนั้นมีการทดแทนโดยน้ำหนักและการทดแทนโดยปริมาตร จากการทดลองพบว่าการทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 1:1 นั้นจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในช่วงสามเดือนแรกต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่กำลังอัดเมื่ออายุหนึ่งปีจะสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา

2) ใช้เป็นมวลละเอียดเพิ่มในคอนกรีต การใช้เถ้าลอยเป็นมวลละเอียดเพิ่มในคอนกรีตเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มสารเชื่อมประสานในคอนกรีตซึ่งจะทำให้กำลังอัดตั้งแต่อายุสามเดือนขึ้นไปมีค่าเพิ่มมากขึ้น

3) ใช้ทั้งทดแทนปูนซีเมนต์และใช้เป็นมวลรวมละเอียดด้วย การทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยและใช้เถ้าลอยเป็นมวลรวมละเอียดเพิ่มด้วยนี้ หากต้องการให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีกำลังอัดในช่วงแรกเท่ากับคอนกรีตธรรมดา ปริมาณเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยรวมกันจะต้องมากกว่าปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตธรรมดา

2.3.4 คอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ

2.3.4.1 กำลังอัด

บุรฉัตร และพิชัย (2538) ได้นำเถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะมาทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60, และ 90 วัน ของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยแม่เมาะ โดยให้เถ้าลอยแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 15, 25, และ 35 และใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก การไหลของมอร์ต้ากำหนดที่ร้อยละ 105 ถึง 115 จากการทดลองพบว่ามอร์ต้าผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อายุเริ่มแรกจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังต่ำกว่ามอร์ต้าธรรมดา ค่ากำลังอัดในช่วงยาวจะมากกว่าค่ากำลังอัดของมอร์ต้าธรรมดา

วิศว และชัยโรจน์ (2540) ได้ทำการศึกษาและทดสอบคุณสมบัติของเถ้าลอยแม่เมาะที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง (High Performance concrete : คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง มีการพัฒนา กำลังอย่างรวดเร็ว สามารถใช้งานได้สะดวกและมีคุณภาพดีกว่าคอนกรีตธรรมดา) โดยใช้วิธีวิเคราะห์การวัดความร้อนภายใต้สูญญากาศ (Thermalgravimetry Analysis, TGA) ซึ่งเป็นการทดสอบทางเคมีเพื่อหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ และหาปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีผลต่อกำลังอัด จากนั้นนำผลที่ได้มาเป็นแนวในการหาปริมาณของเถ้าลอยแม่เมาะที่เหมาะสมเมื่อนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ในคอนกรีต โดยตัวอย่างทดสอบจะเป็นคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ผสมด้วยเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยปริมาณร้อยละ 0 ถึง 35 โดยน้ำหนักของปริมาณปูนซีเมนต์ และใช้อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดเท่ากับ 0.26 ถึง 0.32 หรืออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ระหว่าง 0.30 ถึง 0.50 ผลที่ได้จากการศึกษาและทดสอบพบว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีกำลังอัดที่สูงขึ้น เนื่องจากแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่เกิดขึ้นในซีเมนต์พาสต์ผสมเถ้าลอย จะมีค่ามากกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่เกิดขึ้นในซีเมนต์พาสต์ธรรมดาร้อยละ 5 ที่อายุบ่ม 28 วัน และร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 56 วัน แสดงว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดเพิ่มขึ้นตามเวลา นอกจากนั้นยังพบอีกว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะมีกำลังอัดดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย โดยกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันโดยตรงกับปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก และจากผลของการศึกษาจะได้ว่าปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ควรอยู่ระหว่างร้อยละ 15 ถึง 25 ของปูนซีเมนต์

2.3.4.2 ความละเอียด

สมิทร และชัย (2538) ได้ศึกษาถึงผลของความละเอียดของถ้ำลอยแม่เมาะที่มีผลต่อคอนกรีตผสมถ้ำลอย โดยถ้ำลอยที่ใช้แทนปูนซีเมนต์จะมีความละเอียดต่างกัน 3 ขนาด แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, และ 35 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์และทำการทดสอบการก่อตัว การไหล และกำลังอัดที่ 1, 3, 7, 14, 28, 60, และ 90 วัน จากผลการทดลองพบว่าการแทนที่ถ้ำลอยในปูนซีเมนต์มีผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น และค่าการไหลเพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าการใช้ถ้ำลอยที่มีความละเอียดมากขึ้นมีผลทำให้กำลังอัดของมอร์ต้าพัฒนาเร็วขึ้น

ทิน และคณะ (2535) ได้นำถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาแยกด้วยเครื่อง Air Classifier และนำถ้ำลอยความละเอียดสูงซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2.8 ไมครอน มาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, และ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เพื่อทำคอนกรีตกำลังสูงในการศึกษาจะใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อคงปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน ให้มีค่าเท่ากับ 0.26 และมีค่ายุบตัวที่ใกล้เคียงกันซึ่งมีค่ามากกว่า 5 เซนติเมตร ผลการทดสอบกำลังอัดพบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้ำลอยละเอียดมากๆ ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, และ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ กำลังอัดโดยรวมจะสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้ถ้ำลอย และมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใส่ถ้ำลอยที่อายุบ่ม 17 วันขึ้นไป ซึ่งมีค่ากำลังอัดเทียบเป็นร้อยละ 113 ถึง 115 ของตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่ใส่ถ้ำลอยที่อายุ 365 วัน

2.3.4.3 การต้านทานการกัดกร่อน

สมหมาย และคณะ (2535) ได้ทดลองนำถ้ำลอยจากประเทศสหรัฐอเมริกาและถ้ำลอยแม่เมาะมาผสมในปูนซีเมนต์มอร์ต้าในอัตราส่วนร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และกำหนดให้ค่าอัตราส่วนของน้ำต่อสารเชื่อมประสานมีค่า 0.50 ทำการหล่อเป็นก้อนทดสอบรูปลูกบาศก์ และนำไปแช่ในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 100 มิลลิลิตรต่อลิตร วัดน้ำหนักที่หายไปในช่วงเวลา 7 และ 21 วัน ที่แช่ในกรด การทดลองพบว่าชนิดของถ้ำลอยไม่มีผลต่อการต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตมากนัก และคอนกรีตที่มีถ้ำลอยผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา

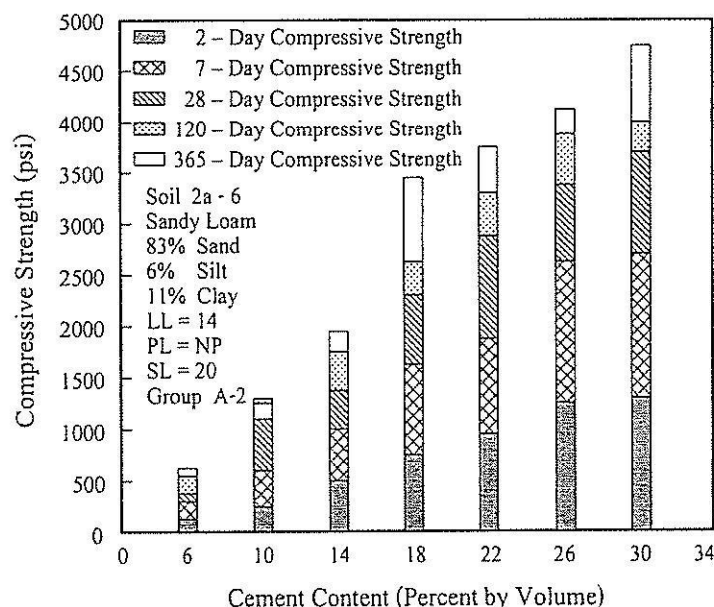
ทิน และชัย (2540) ได้นำถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาแยกออกเป็น 4 ขนาดด้วยเครื่องแยกขนาด (Air Classifier) แล้วนำไปผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 20, 30, 40, และ 50 โดยน้ำหนักในมอร์ต้า ควบคุมให้มีการไหลแผ่อยู่ระหว่าง 101 ถึง 115 เพื่อทดสอบกำลังอัดและความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักเป็นระยะเวลา 126 วัน ผลการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนพบว่าตัวอย่างมอร์ต้าที่ผสมถ้ำลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก สามารถต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าตัวอย่างที่มีถ้ำลอย

ผสมอยู่ร้อยละ 0, 20, 30, และ 40 เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยในขนาดเดียวกัน นอกจากนั้นยังพบว่าการใช้เถ้าลอยที่มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) น้อยกว่าจะสามารถทนต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าการใช้เถ้าลอยที่มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์สูงกว่า

2.4 ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์

2.4.1 ปริมาณซีเมนต์และชนิดของปูนซีเมนต์

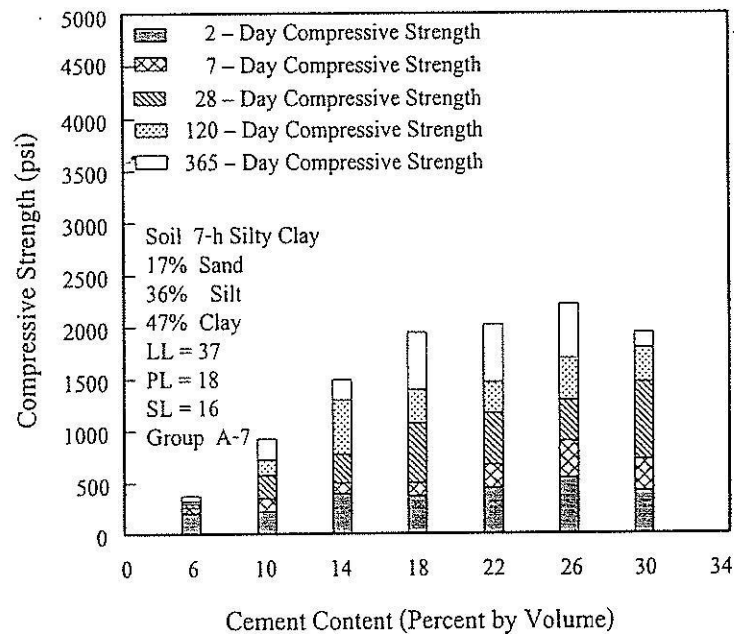
Ruenkrairergsa (1982) อธิบายว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อคุณภาพของดินซีเมนต์ คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น กำลังอัดของดินซีเมนต์ก็จะเพิ่มขึ้น และอัตราการเพิ่มกำลังอัดของดินซีเมนต์ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นฐานของดินด้วย โดยดินซีเมนต์ที่มีมวลเม็ดหยาบมากกว่าจะมีค่าเพิ่มสูงกว่าดินซีเมนต์ที่มีมวลเม็ดละเอียดกว่า



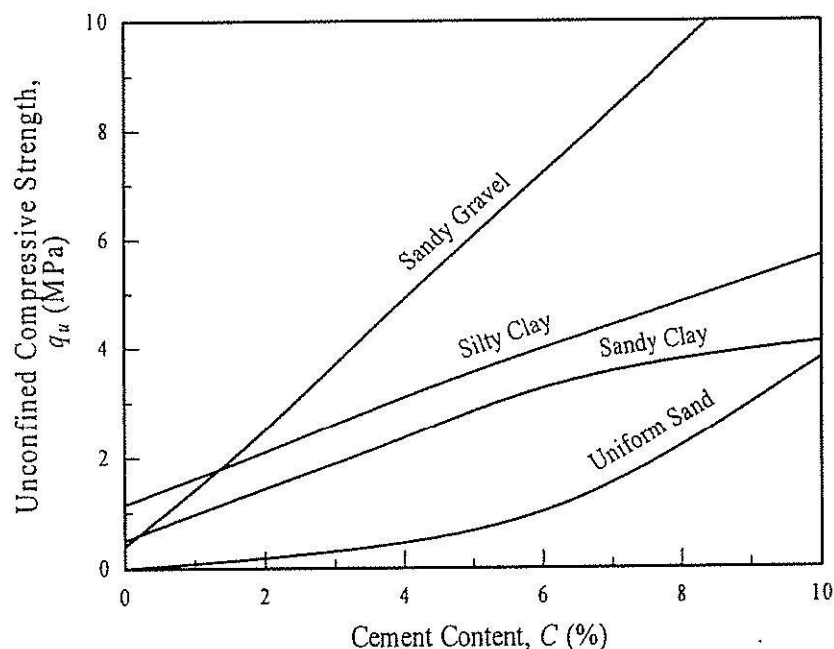
รูปที่ 2.2 อิทธิพลของปูนซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดของดิน Sandy Loam (Felt, 1955)

Felt (1955) ได้นำดิน Sandy Loam และดินเหนียวปนดินตะกอนมาผสมกับปูนซีเมนต์ โดยแปรผันปริมาณปูนซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 6 ถึง 30 โดยปริมาตร นำมาทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 5 ค่า ตั้งแต่ 2 วัน ถึง 1 ปี ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3 พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสม และดินที่มีดินเหนียวในปริมาณสูงกว่าจะมีกำลังอัดต่ำกว่าดินที่มีดินเหนียวต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Metcalf (1977) ซึ่งสรุปว่า ปริมาณปูนซีเมนต์มีผลโดยตรงกับกำลังอัดของดินซีเมนต์โดยเฉพาะกับดินเม็ดหยาบ โดยกำลังอัดของดินซีเมนต์จะแปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์ แต่สัดส่วนการเพิ่มจะแตกต่างกันออกไปตามคุณสมบัติของดิน ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.4 นอกจากนี้

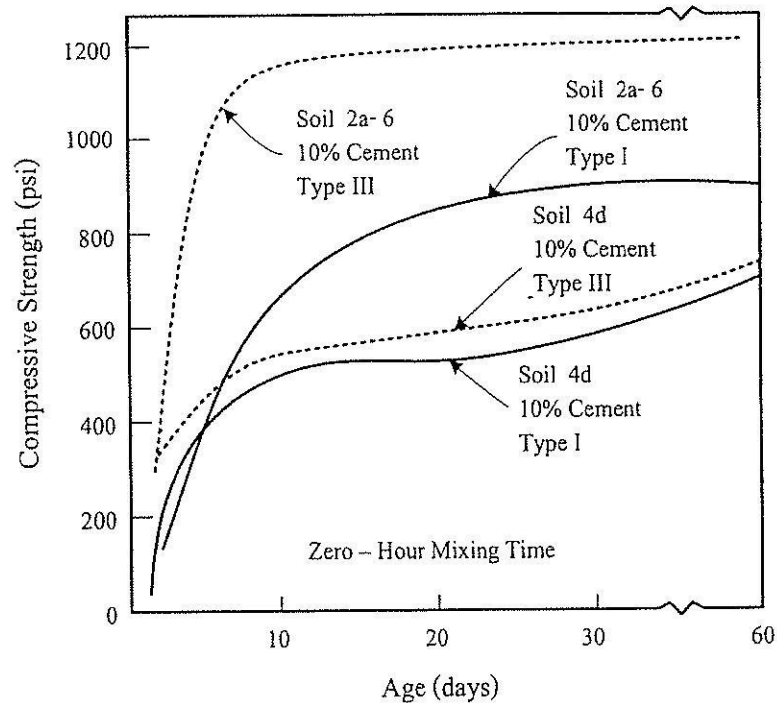
Felt (1955) ยังได้ทดลองหาอิทธิพลของปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง และปูนซีเมนต์ประเภทสามต่อกำลังอัดของดินสองชนิด คือ Sandy Loam และดินเหนียวปนดินตะกอน ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.5 และสรุปว่า ดินที่ผสมปูนซีเมนต์ประเภทสามมีกำลังอัดสูงกว่าดินที่ผสมปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณปูนซีเมนต์และอายุบ่มเดียวกัน



รูปที่ 2.3 อิทธิพลของปูนซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน (Felt, 1955)



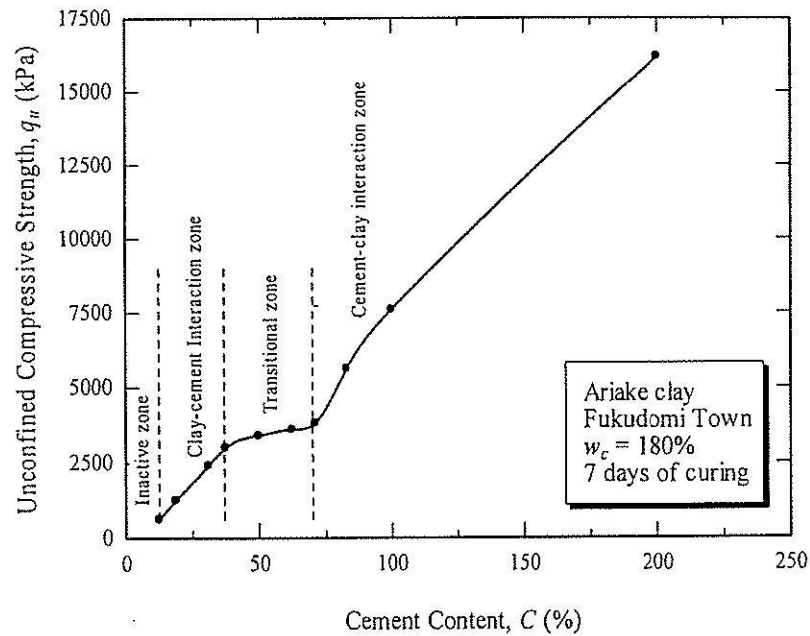
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์กับกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Metcalf, 1977)



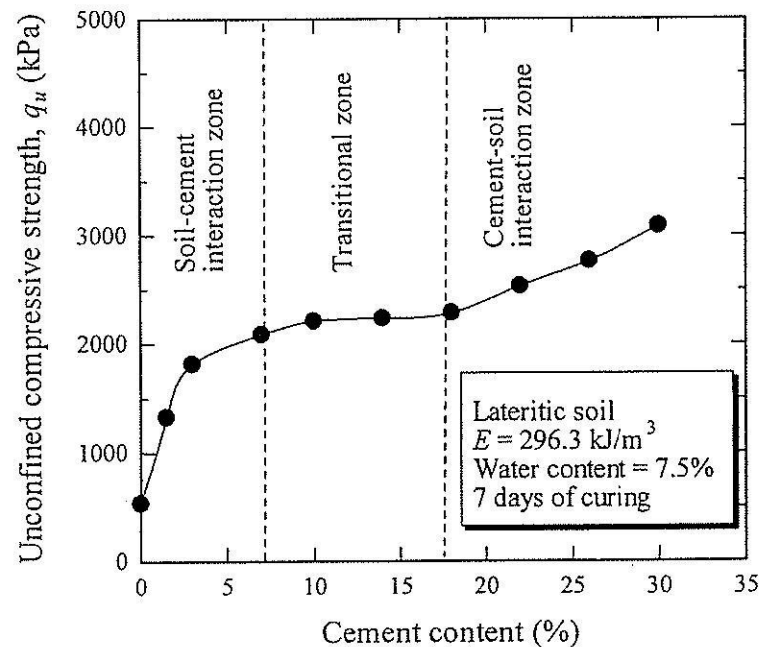
รูปที่ 2.5 ผลเปรียบเทียบกำลังอัดของดิน Sandy Loam (Soil 2a-6) และ Silty Clay Loam (Soil 4d) ผสมปูนซีเมนต์ประเภท 1 และประเภท 3 เมื่อผสมเสร็จแล้วทดสอบทันที (Felt, 1955)

Horpibulsuk et al. (2003) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวที่มีปริมาณน้ำในมวลดินสูง และพบว่าสำหรับดินซีเมนต์ที่อายุปมค่าหนึ่ง กำลังอัดของดินตัวอย่างแปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 กราฟของกำลังอัดแกนเดียวสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ช่วง ช่วงแรกซึ่งเป็นช่วงที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำ เรียกว่า Clay - cement interaction zone ในช่วงนี้กำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ ช่วงที่สองกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าค่อนข้างคงที่ ช่วงนี้เรียกว่า Transitional zone และถัดจากช่วงนี้ไปเป็น Cement - clay interaction zone ซึ่งกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าสูงขึ้นอีก นอกจากนั้นยังพบอีกว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุปมค่าหนึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์ (Clay - water/cement ratio, w_c/C) เท่านั้น

Horpibulsuk et al. (2006) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังที่มีปริมาณน้ำในมวลดินต่ำ พบพฤติกรรมกราฟเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณปูนซีเมนต์มีลักษณะที่คล้ายกับเส้นกราฟของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวที่มีปริมาณน้ำในมวลดินสูงที่ศึกษาโดย Horpibulsuk et al. (2003) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ขอบเขตปฏิสัมพันธ์ของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003)



รูปที่ 2.7 กราฟกำลังอัดแกนเดียวสัมพันธ์กับปริมาณปูนซีเมนต์ (Horpibulsuk et al, 2006)

ทรงพล (2529) ได้ศึกษากำลังอัดของดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์บดอัดด้วยพลังงานแบบมาตรฐาน และแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 1, 3, 5 และ 7 โดยน้ำหนักดินแห้ง ผลการศึกษาแสดง ในตารางที่ 2.7 ซึ่งสรุปได้ว่า กำลังอัดของดินจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และอายุบ่ม โดยกำลังอัดจะมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอายุบ่ม 7 วันแรก หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มของกำลังอัดจะลดลง

ตารางที่ 2.7 กำลังอัดของดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ที่อายุปูน 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน (ทรงพล, 2529)

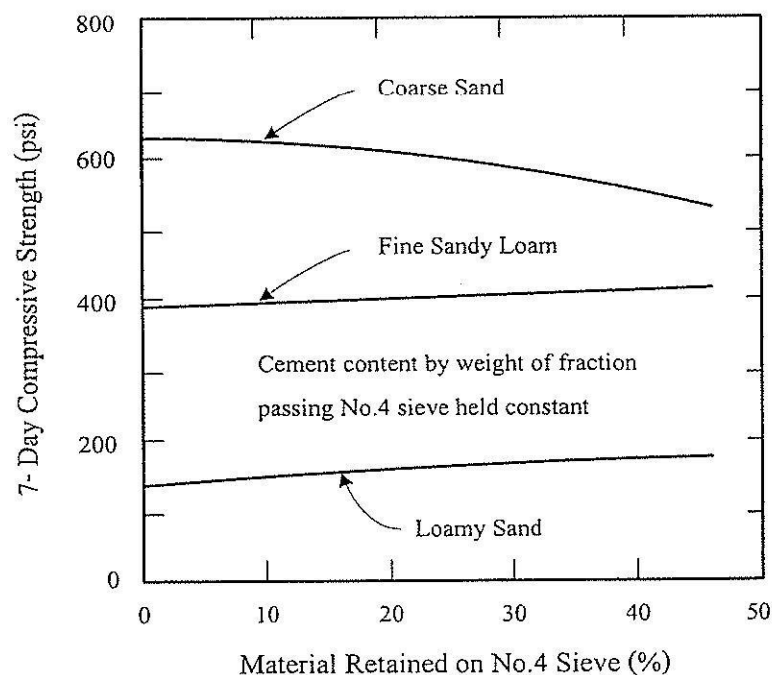
พลังงาน บดอัด	ปริมาณ ซีเมนต์, %	กำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่อายุปูน 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน เทียบกับกำลังอัดของดินที่ไม่ผสมซีเมนต์, %				
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
มาตรฐาน	1	66	68	66	67	77
	3	240	333	544	603	725
	5	603	711	799	944	1252
	7	653	755	836	1100	1252
สูงกว่ามาตรฐาน	1	5	5	15	15	15
	3	7	100	112	145	220
	5	182	259	302	330	365
	7	254	348	382	445	557

2.4.2 คุณสมบัติของดิน

แร่ธาตุที่ประกอบอยู่ในมวลดินตามธรรมชาติ หรือชนิดของดินมีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมดินเข้ากับปูนซีเมนต์และน้ำ และมีผลต่อกำลังอัดและความคงทนของดินซีเมนต์ ส่วนประกอบเหล่านี้ได้แก่ ดินจำพวกทราย, ดินตะกอน, ดินเหนียว และสารประกอบอินทรีย์ เป็นต้น

Winterkorn and Chandrasekharn (1951) ได้รายงานผลการทดสอบกำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ว่าจะได้ผลดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณมวลเม็ดหยาบและปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน

Norling and Peckard (1958) ได้ศึกษาอิทธิพลของมวลหยาบโดยใช้ร้อยละที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 ต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ 3 ชนิด คือ ทรายหยาบ (Coarse Sand) ทรายละเอียดปนอินทรีย์สาร (Fine Sand Loam) และทรายปนอินทรีย์สาร (Loamy Sand) โดยผสมด้วยปริมาณซีเมนต์ที่เท่ากัน แต่เพิ่มปริมาณมวลรวมที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 แตกต่างกันไป ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.8 และพบว่า Loamy Sand และ Fine Sand Loam จะมีกำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณมวลรวมที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 เพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีของ Coarse Sand จะมีกำลังอัดลดลง แต่การศึกษานี้ยังมีข้อจำกัด กล่าวคือ เป็นการศึกษากำลังอัดที่อัตราส่วนผสมของปริมาณน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์ค่าเดียวกัน ซึ่งค่ากำลังอัดของดินทั้ง 3 ชนิด อาจแตกต่างจากนี้ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์



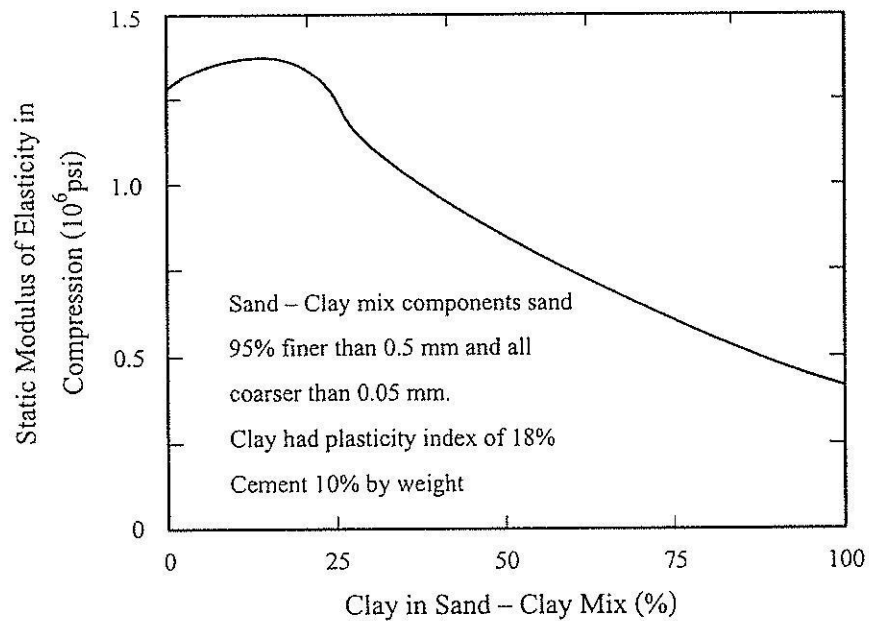
รูปที่ 2.8 อิทธิพลของวัสดุที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์

(Norling and Peckard, 1958)

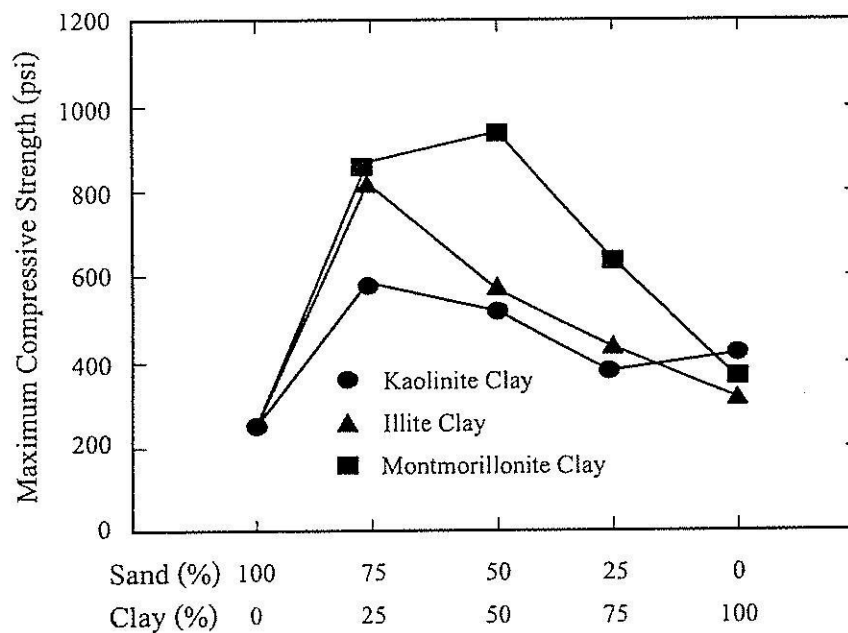
2.4.3 ปริมาณดินเหนียวและชนิดของแร่ดินเหนียว

Reinhold (1955) ได้นำเอาทรายมาผสมกับดินเหนียวและปูนซีเมนต์ โดยเปลี่ยนปริมาณดินเหนียว ผลแสดงในรูปที่ 2.9 พบว่า เมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะลดลง ซึ่งหมายความว่าค่ากำลังอัดก็จะลดลง

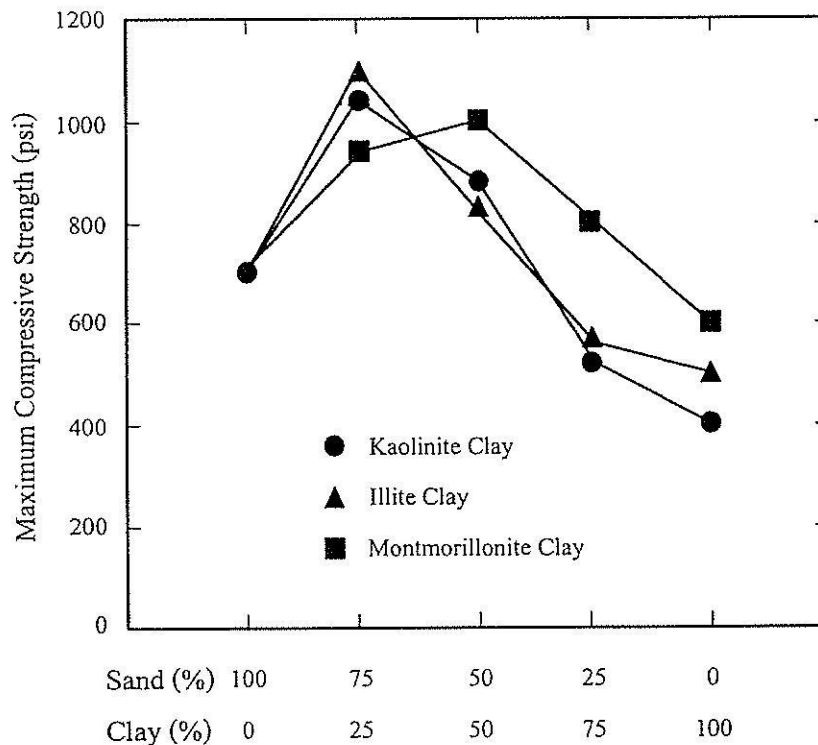
Davidson et al. (1962) ได้ศึกษากำลังอัดของดินเหนียว 3 ชนิด คือเคโอลิไนต์ อิลไลต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ ผสมกับทรายและปูนซีเมนต์ โดยเพิ่มอัตราส่วนผสมของดินเหนียวที่ละร้อยละ 25 กล่าวคือ ใช้อัตราส่วนทรายต่อดินเหนียวดังนี้ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, และ 0:100 ผลแสดงในรูปที่ 2.10 และ 2.11 พบว่าเมื่อปริมาณดินเหนียวเกินกว่าร้อยละ 25 ดินเม็ดหยาบผสมปูนซีเมนต์จะมีกำลังอัดลดลงอย่างชัดเจน และค่ากำลังอัดของดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์มีแนวโน้มสูงกว่าดินเหนียวเคโอลิไนต์และอิลไลต์



รูปที่ 2.9 อิทธิพลของปริมาณดินเหนียวต่อค่า Modulus of Elasticity ของดินซีเมนต์
(Reinhold, 1955)



รูปที่ 2.10 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 8
(Davidson et al., 1962)

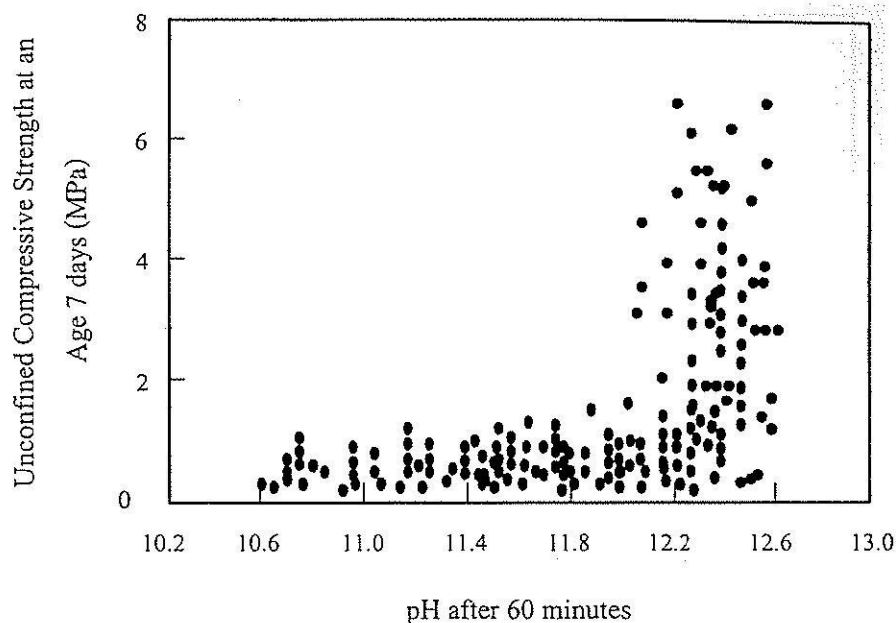


รูปที่ 2.11 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 12
(Davidson et al., 1962)

2.4.4 คุณสมบัติทางเคมีของดิน

Davidson (1961) ได้รายงานไว้ว่า ส่วนประกอบทางเคมีของดินจะทำให้ดินทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์แตกต่างกัน และจะขึ้นอยู่กับประจุลบ (Cation) ที่มีอยู่ในอนุภาคของดิน โดยเฉพาะดินที่มีสารอินทรีย์ผสมอยู่จะทำให้ปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป เช่น เกิดการแข็งตัวช้า ส่วนดินที่มีสารซัลเฟตผสมอยู่จะเกิดการบวมตัวและทำให้ค่ากำลังอัดลดลง

Sherwood (1958) ได้ศึกษาอิทธิพลของสารอินทรีย์ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับค่า pH ของดินซีเมนต์ที่ได้จากการผสมดินและซีเมนต์ในอัตราส่วน 1:10 ดังแสดงในรูปที่ 2.12 พบว่า ถ้าค่า pH ต่ำกว่า 12.1 แสดงว่าดินที่นำมาใช้ผสมมีสารอินทรีย์ผสมอยู่จึงทำให้ดินซีเมนต์แข็งตัวช้า และเป็นผลทำให้กำลังอัดลดลงเมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน



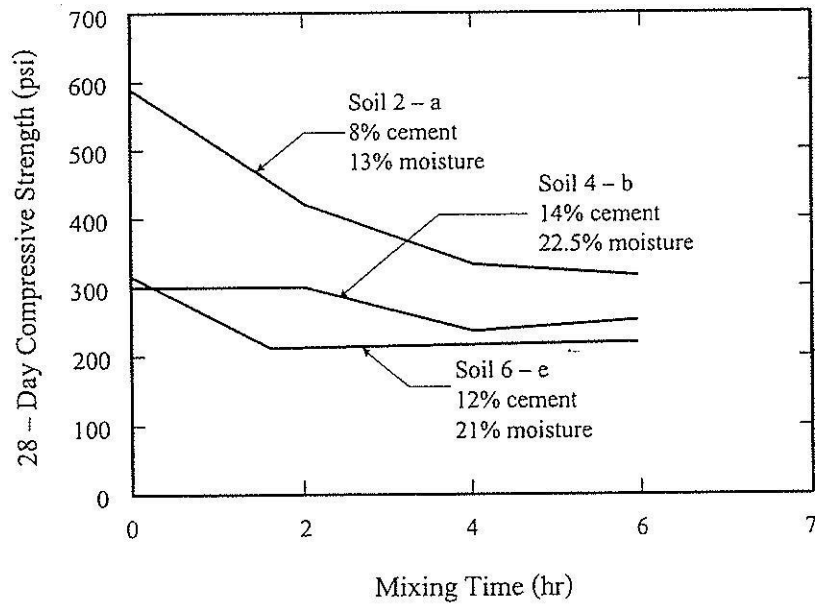
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับค่า pH ของดินผสมซีเมนต์ในอัตราส่วน 1:10
(Sherwood, 1958)

2.4.5 การผสม

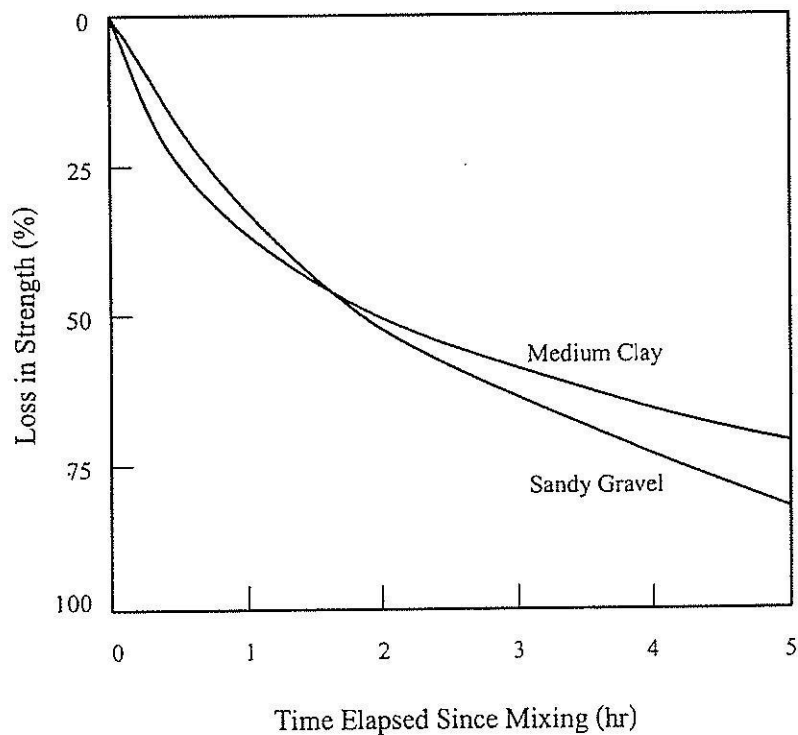
2.4.5.1 ระยะเวลาในการผสม

Felt (1955) ได้ศึกษาอิทธิพลของการหน่วงเวลาในการผสมดินกับต่อกำลังอัดของดิน 3 ชนิด คือ ดินกลุ่ม A - 2 Sandy Loam (LL = 26%, PI = 11%) ดินกลุ่ม A - 4 Silty Clay Loam (LL = 35%, PI = 12%) และ ดินกลุ่ม A - 6 - 7 Clay (LL = 47%, PI = 26%) ความสัมพันธ์ของผลการทดสอบระหว่างการหน่วงเวลาผสมกับกำลังอัด แสดงในรูปที่ 2.13 พบว่า ดินทั้งสามชนิดมีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อการหน่วงเวลาในการผสมแบบทิ้งไว้นานขึ้น และการหน่วงเวลาในการผสมแบบหยุดเป็นครั้งคราวที่ใช้เวลานานขึ้นมีผลเสียน้อยกว่าการหยุดผสมเลย

Ingles and Metcalf (1972) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่ใช้ผสมดินซีเมนต์ โดยใช้ดิน 2 ชนิด คือ ดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Clay) และทรายปนกรวด (Sandy Gravel) ผลแสดงในรูปที่ 2.14 พบว่า ถ้าระยะเวลาในการผสมที่นาน 1 ถึง 2 ชั่วโมง กำลังอัดของดินเหนียวแข็งปานกลาง และทรายปนกรวด จะลดลงมากกว่าร้อยละ 50 แต่ถ้าใช้เวลาในการผสมนานกว่า 2 ชั่วโมง ขึ้นไป ร้อยละของการลดกำลังอัดในดินทรายปนกรวดจะมากกว่าดินเหนียวแข็งปานกลางเล็กน้อย



รูปที่ 2.13 ผลของระยะเวลาที่ใช้ผสมต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Felt, 1955)



รูปที่ 2.14 การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้ระยะเวลาการบดอัดนานขึ้น (Ingles and Metcalf, 1972)

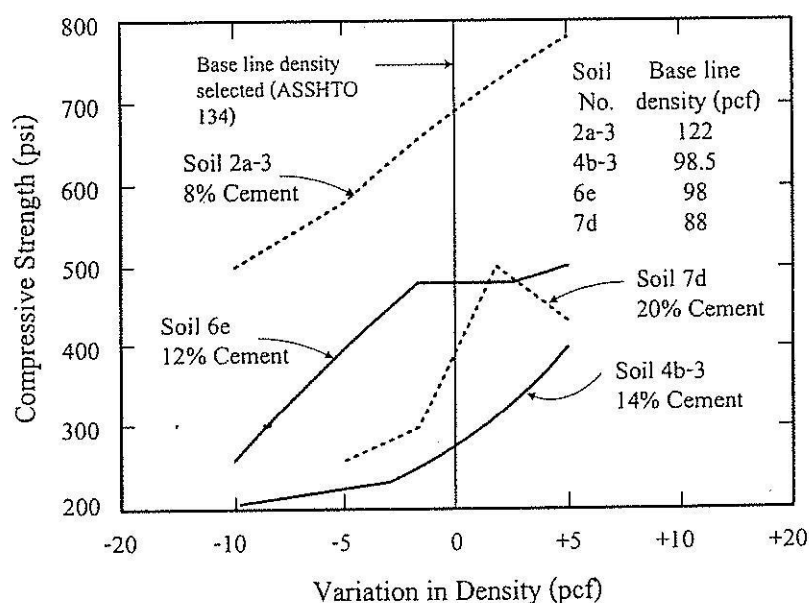
2.4.5.2 ปริมาณน้ำในมวลดิน

Felt (1955) และ Davidson et al. (1962) ทำการทดลองได้ผลตรงกันว่าปริมาณน้ำและความหนาแน่นมีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ สำหรับดินทรายควรบดอัดให้อยู่ทางด้านแห้งของปริมาณน้ำเหมาะสมเล็กน้อยจะทำให้ได้กำลังอัดสูงสุด ส่วนดินเหนียวต้องบดอัดให้อยู่ทางด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสมเล็กน้อยจะทำให้ได้กำลังอัดสูงสุด

Davidson (1961) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเหมาะสมกับความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ กับดิน 6 ชนิด ได้แก่ ดินกลุ่ม A-2 (Sandy Loams), A-3 (Sands), A-4 (Silt and Loams), A-5 (Silt), A-6 (Medium Clays) และ A-7 (Heavy Clays) พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการผสมให้นานขึ้นหรือทำการบดอัดซ้ำจะมีผลทำให้ค่าปริมาณน้ำเหมาะสมเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะลดลงและทำให้กำลังอัดลดลงด้วย

2.4.5.3 ความหนาแน่น

Felt (1955) ได้นำดิน 4 ชนิด คือ ดินกลุ่ม A - 2 Sandy Loam (LL = 26%, PI = 11%), A - 4 Silty Clay Loam (LL = 35%, PI = 12%), A - 6 - 7 Clay (LL = 47%, PI = 26%) และ A - 7 (LL = 118%, PI = 83%) มาทดสอบ เพื่อประเมินผลกำลังอัดจากความหนาแน่น โดยใช้การบดอัดแบบมาตรฐานตามมาตรฐาน ASSHTO กำหนดเป็นเส้นความหนาแน่นพื้นฐาน ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.15 พบว่า ทุกตัวอย่างการผสม เมื่อความหนาแน่นของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้น กำลังอัดจะเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 2.15 อิทธิพลของความหนาแน่นต่อกำลังอัดของดินที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (Felt, 1955)

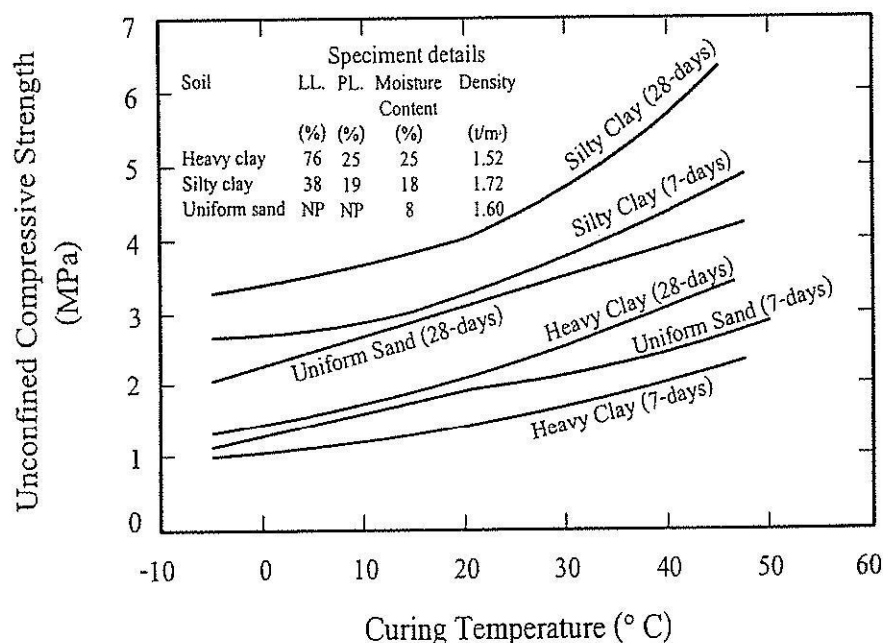
2.4.6 การบ่ม

Clare and Pollard (1954) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ พบว่า งานก่อสร้างดินซีเมนต์ในระหว่างอากาศอบอุ่น จะให้กำลังอัดสูงกว่างานก่อสร้างที่มีลักษณะคล้ายกันในช่วงอากาศหนาวเย็นกว่า 50 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดที่อายุบ่ม 3 เดือนแรก ภายหลังการก่อสร้าง

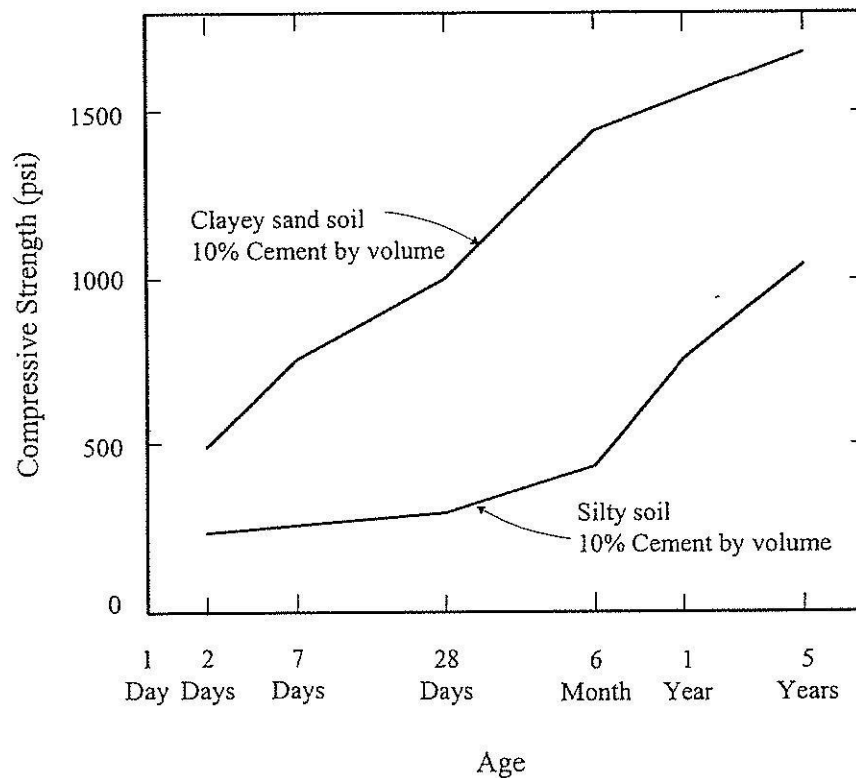
Ng (1966) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อดินลูกรัง 3 ชนิด ผสมซีเมนต์ พบว่า เมื่ออุณหภูมิของการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 21 เป็น 38 องศาเซลเซียส กำลังอัดจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Clare and Pollard (1954) ที่พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์แปรผันตามอุณหภูมิที่ใช้บ่ม โดยให้เหตุผลว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำในมวลดิน ผลแสดงดังในรูปที่ 2.16

Leadabrand (1956) ได้ศึกษากำลังอัดของดิน 2 ชนิด คือ ดินเหนียวปนทราย (Clayey Sand) และดินตะกอนผสมกับปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักดินแห้ง ที่อายุบ่มตั้งแต่ 2 วัน ถึง 5 ปี พบว่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุบ่มคล้ายกับคอนกรีต ผลแสดงดังในรูปที่ 2.17

Maner (1952) ทำการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุในการบ่มดิน โดยนำวัสดุต่าง ๆ ได้แก่ Waterproof Paper, RC-2 Asphalt, Tar และ Asphalt Emulsion มาบ่มดินซีเมนต์ที่ใช้เป็นชั้นรองพื้นทางพบว่า วัสดุที่มีส่วนผสมของดินน้ำมัน (Bituminous Materials) ทั้ง 3 ชนิด และ Waterproof Paper มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้บ่มดินซีเมนต์



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิที่ใช้บ่มดินซีเมนต์ (Clare and Pollard, 1954)



รูปที่ 2.17 อิทธิพลของอายุบ่มต่อการกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Leadabrand, 1956)

2.4.7 สารผสมร่วม

Ruenkairergsa (1982) ได้รายงานว่าจำนวนปูนขาวเพียงเล็กน้อยที่เพิ่มเข้าไปผสมในดินที่มีค่าดัชนีสภาพพลาสติกสูงก่อนที่จะผสมกับปูนซีเมนต์จะช่วยลดค่าดัชนีสภาพพลาสติกของดินเดิมลงได้มาก และทำให้ดินผสมกับปูนซีเมนต์ได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ปูนขาวที่เพิ่มเข้าไปจะช่วยลดอิทธิพลของสารอินทรีย์ที่จะมีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อีกด้วย

Lambe et al. (1959) ได้ทดลองนำสารประกอบจำพวกโซเดียม และเถ้าลอย (Fly - Ash) มาผสมร่วมกับดินและปูนซีเมนต์ พบว่า การใช้สารประกอบจำพวกโซเดียมจะช่วยให้ดินซีเมนต์มีกำลังอัดและความคงทนเพิ่มขึ้น ส่วนเถ้าลอยเป็นสารผสมเพิ่มที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน ซึ่งจะทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ เถ้าลอยยังช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้การก่อสร้างงานดินซีเมนต์มีราคาถูก

Horpibulsuk et al. (2009) ได้ศึกษาอิทธิพลของเถ้าลอยต่อการกำลังอัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์ พบว่าเถ้าลอยในดินซีเมนต์แทบจะไม่ช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก แต่จะทำหน้าที่เป็นวัสดุกระจายตัว ทำให้อนุภาคเม็ดดินซีเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดีขึ้น เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มมากขึ้น กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยขึ้นอยู่กับอิทธิพลร่วม

ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการกระจายตัว ซึ่งอิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะถูกควบคุมด้วย
ปูนซีเมนต์ ขณะที่อิทธิพลของการกระจายตัวถูกควบคุมด้วยปริมาณน้ำลอย

บทที่ 3

ผลทดสอบและบทสรุป

3.1 บทนำ

ดินเหนียวกรุงเทพฯจัดเป็นดินที่มีปริมาณความชื้นสูงใกล้เคียงขีดจำกัดเหลว กำลังต้านทานแรงเฉือนต่ำ และการอัดตัวสูง ดินเหนียวกรุงเทพฯจัดเป็นดินเหนียวที่ไม่บวมตัวถึงบวมตัวต่ำ ซึ่งความบวมตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึก (Horpibulsuk et al., 2007) วิธีการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพฯที่นิยมวิธีหนึ่งคือเทคนิคการผสมลึก (Deep mixing) เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมาเพื่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในชั้นดินเหนียวอ่อน วัสดุเชื่อมประสานที่นิยมใช้ในประเทศไทยคือปูนซีเมนต์

การศึกษาการพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์ได้มีมาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน (Terashi et al., 1979; Kawasaki et al., 1981; Kamon and Bergado, 1992; Horpibulsuk et al., 2004a และ b เป็นต้น) การศึกษาเหล่านี้ใช้ปริมาณความชื้นและปริมาณปูนซีเมนต์เป็นพารามิเตอร์หลักในการศึกษาพฤติกรรมทางกล โดยปราศจากการพิจารณาอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณความชื้นและปริมาณปูนซีเมนต์ อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์ (Clay-water/cement ratio, w_c/C) ได้ถูกเสนอขึ้นเพื่ออธิบายอิทธิพลร่วมต่อการพัฒนาพฤติกรรมทางกล (Horpibulsuk and Miura, 2001; Miura et al., 2001; และ Horpibulsuk et al., 2005) ปริมาณความชื้นในดินเหนียวสะท้อนแฟบrikของดิน ขณะที่ ปริมาณปูนซีเมนต์ควบคุมผลิตภัณฑ์ที่เชื่อมประสานแฟบrik โดยอาศัยพารามิเตอร์นี้ร่วมกับกฎของ Abrams (Abrams, 1918) Horpibulsuk et al. (2003) ได้พัฒนาแบบจำลองเชิงประสบการณ์สำหรับทำนายกำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์ ในพจน์ของปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่ม แบบจำลองนี้ได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสมกับดินเหนียวไม่บวมตัวถึงบวมตัวต่ำ โดย Horpibulsuk et al. (2010)

เพื่อเป็นการลดต้นทุนค่าก่อสร้างของเทคนิคการผสมลึก การทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวล ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ เป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพทางเลือกหนึ่ง Horpibulsuk et al. (2009) ได้อธิบายอิทธิพลของการใส่เถ้าลอยลงในดินเหนียวซีเมนต์ และกล่าวว่าอิทธิพลของเถ้าลอยในดินซีเมนต์แตกต่างจากในคอนกรีต (ซึ่งกำลังอัดที่ต้องการมีค่าสูงกว่า 28 เมกกะปาสกาล) ในกรณีของคอนกรีตเมื่อปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ จะเกิดผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ ซึ่งได้แก่ คัลเซียมซิลิเกต (CSH) คัลเซียมอลูมิเนต (CAH) และคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) และก่อให้เกิดความแข็งแรงอย่างรุนแรง ต่างที่เกิดขึ้นนี้จะละลายซิลิกาและอลูมินาออกจากวัสดุปอซโซลาน และก่อให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่ในกรณีของดินเหนียวซีเมนต์ ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นน้อยมาก เนื่องจากคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จาก

ปฏิกิริยาไฮเดรชันมีไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา อิทธิพลของเถ้าลอยทำหน้าที่กระจายอนุภาคของปูนซีเมนต์ที่จับตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่เมื่อสัมผัสน้ำ ให้กลายเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็กและสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดียิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้จะวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวรูปทรงผสมปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล และอธิบายอิทธิพลของเถ้าชีวมวลในดินเหนียวซีเมนต์ และท้ายสุด จะนำเสนอสมการทำนายกำลังอัดในพจน์ของปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าชีวมวล และอายุบ่ม สมการที่นำเสนอนี้พัฒนาขึ้นจากสมมติฐานอัตราส่วนน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์

3.2 สมมติฐานอัตราส่วนน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และดินเป็นวัสดุอนุภาค ซึ่งประกอบกันเป็นหน่วยที่มีความเป็นอิสระต่อกัน วัสดุอนุภาคสามารถจำแนกได้เป็นสองประเภท ได้แก่ วัสดุอนุภาคที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ และวัสดุอนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ ปูนซีเมนต์และดินเหนียวจัดเป็นวัสดุอนุภาคที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ ส่วนเถ้าลอย ดินตะกอน และทรายจัดเป็นวัสดุอนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ เนื่องจากมีพื้นที่ผิว (Specific surface) น้อยและไม่มีประจุไฟฟ้า เนื่องจากปฏิกิริยาร่วมทางกายภาพเคมีของดินเหนียวในน้ำ ดินเหนียวจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาค (Nagaraj and Miura, 2001) ที่มีโครงสร้าง เมื่อผสมปูนซีเมนต์ผสมเข้ากับดินเหนียว อนุภาคของดินเหนียวและปูนซีเมนต์จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (Horpibulsuk et al., 2009 และ 2010)

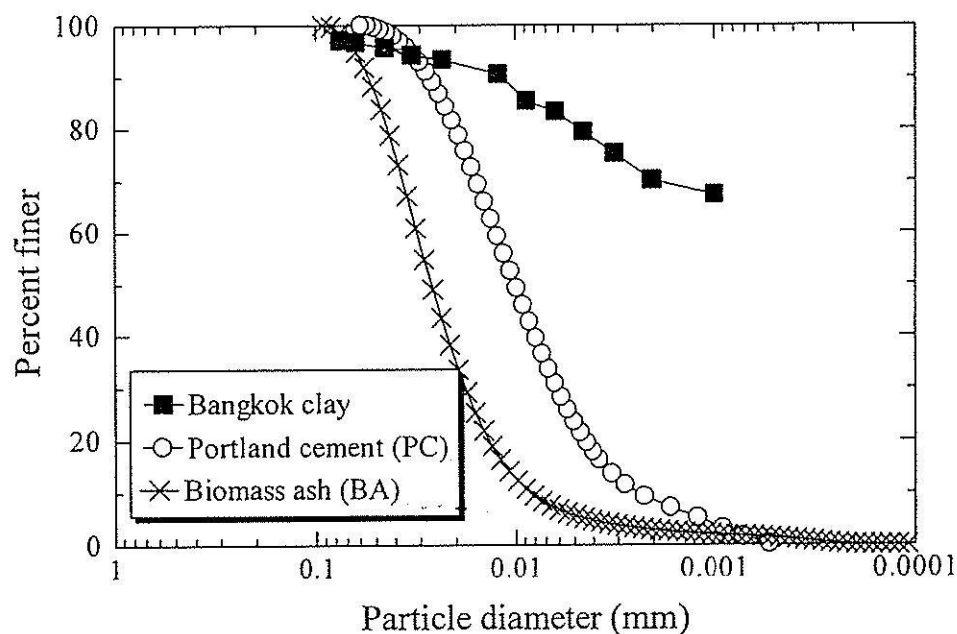
เถ้าลอยและเถ้าชีวมวล (ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ) จะทำหน้าที่กระจายกลุ่มอนุภาคของดินและปูนซีเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้อนุภาคของปูนซีเมนต์สัมผัสน้ำได้มากขึ้น จึงทำให้ผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานเกิดได้มากขึ้น (Horpibulsuk et al., 2009) นอกจากนี้ Horpibulsuk et al. (2009) ยังได้แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานในดินซีเมนต์เถ้าลอยเกิดน้อยมาก จากผลการศึกษาทางโครงสร้างจุลภาค อันประกอบด้วย Scanning electron microscope, Mercury intrusion porosimetry และ Thermal gravimetry analyzer อิทธิพลของการกระจายตัวสามารถพิจารณาได้เสมือนกับการเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ โดยการพิจารณาว่าการเติมเถ้าชีวมวลสามารถเทียบเท่าได้กับการเติมปูนซีเมนต์ (Papadakis and Tsimas, 2002) ปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า (Equivalent cement content, C_e) มีค่าเท่ากับ ka เมื่อ k คือตัวแปรประสิทธิผล และ a คือปริมาณเถ้าชีวมวล ปริมาณปูนซีเมนต์สำหรับดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลจึงเท่ากับผลรวมของปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใส่เข้าไป (C) และปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า (C_e) ดังนั้น สมมติฐานอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์ (Clay-water/cement ratio hypothesis) สำหรับดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลสามารถแสดงได้ดังนี้ “การพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าชีวมวลแปรผันโดยตรงกับอัตราส่วนน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์” Horpibulsuk et al. (2011) กล่าวว่าปริมาณเถ้าลอยที่ใส่แทนที่ปูนซีเมนต์ไม่ควรเกินร้อยละ 25 ของปูนซีเมนต์ เพราะเถ้าลอยจะขัดขวาง

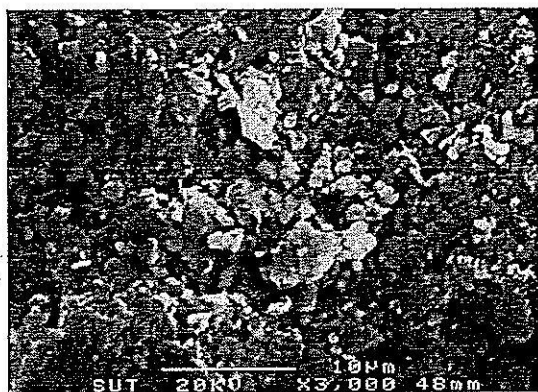
การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นน้อยมากในดินซีเมนต์เถ้าขี้มวล ดังนั้น C_s จึงมีค่าแปรผันอย่างมากกับอิทธิพลของการกระจายตัว ซึ่งถูกควบคุมโดยปริมาณเถ้าขี้มวลและไม่แปรผันตามอายุบ่ม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า k จะมีค่าประมาณคงที่ไม่แปรผันตามอายุบ่ม สำหรับทุกส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และเถ้าขี้มวล

3. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

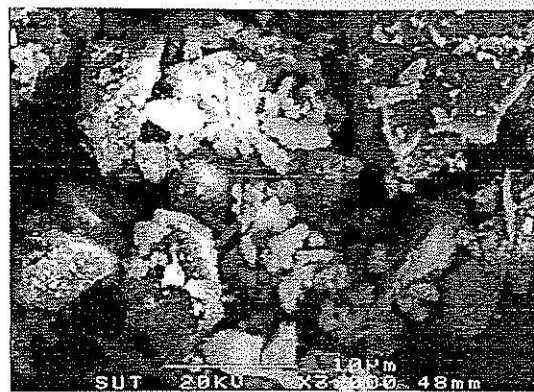
3.1 ดินตัวอย่าง

ดินตัวอย่างทดสอบเป็นดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่เก็บจากอำเภอลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ที่ระดับความลึก 3 เมตร ดินตัวอย่างประกอบด้วยทรายร้อยละ 3 ดินตะกอนร้อยละ 27 และดินเหนียวร้อยละ 70 และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 ชีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของดินเท่ากับร้อยละ 89 และ 30 ตามลำดับ ดินตัวอย่างนี้จัดเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง (CH) ตามการจำแนกด้วยระบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS) ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับความลึก 1.0 เมตร จากผิวดิน ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติเท่ากับร้อยละ 85 ผลทดสอบการบวมตัวอิสระโดยวิธีของ Prakash and Sridharan (2004) พบว่าดินเหนียวทดสอบนี้มีค่าอัตราส่วนการบวมตัวอิสระเท่ากับ 1.3 ซึ่งได้เป็นดินเหนียวบวมตัวต่ำ ส่วนประกอบทางเคมีและการกระจายขนาดของเม็ดดินแสดงในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.1 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ของดินเหนียวตามธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 3.2

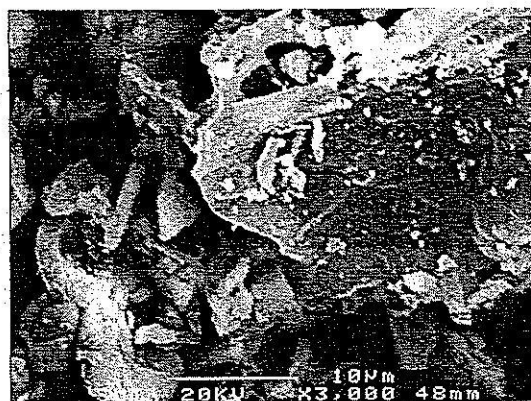




(a) ดินเหนียวกรุงเทพ



(b) ปูนซีเมนต์



(c) ไข่ขาวมว

รูปที่ 3.2 รูปถ่ายกำลังขยายของดินเหนียวกรุงเทพ ปูนซีเมนต์ และไข่ขาวมว

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางเคมีของดินเหนียวกรุงเทพ ปูนซีเมนต์ และไข่ขาวมว

Chemical composition (%)	Bangkok clay	PC	BA
SiO ₂	62.83	20.90	74.12
Al ₂ O ₃	21.34	4.76	0.57
Fe ₂ O ₃	8.41	3.41	0.88
CaO	0.94	65.41	1.54
MgO	1.54	1.25	5.91
SO ₃	1.22	2.71	3.33
Na ₂ O	0.28	0.24	1.71
K ₂ O	2.45	0.35	0.52
LOI	0.99	0.96	11.42

3.3.2 ปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล

ปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง (PC) และเถ้าชีวมวล (BA) จากบริษัท ไทยพาวเวอร์ชีฟฟลาย จำกัด จากจังหวัดฉะเชิงเทราถูกใช้ในงานวิจัยนี้ คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวลแสดงในตารางที่ 3.1 เถ้าชีวมวลถูกนำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เพื่อคัดขนาดอนุภาคใหญ่ออก ผลรวมของปริมาณธาตุ SiO_2 , Al_2O_3 , และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 75.57 ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (D_{50}) ของเถ้าชีวมวลเท่ากับ 28 ไมครอน การกระจายขนาดของอนุภาคเถ้าชีวมวลแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งได้จากการทดสอบด้วย Laser particle size analysis ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวลเท่ากับ 3.15 และ 1.95 ตามลำดับ ภาพถ่ายกำลังขยายของ PC และ BA แสดงในรูปที่ 3.2 จากกราฟการกระจายขนาดของอนุภาคและภาพถ่ายกำลังขยาย จะเห็นได้ว่าอนุภาคของดินเหนียวกรุงเทพฯมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล อนุภาคของเถ้าชีวมวลมีขนาดใหญ่ที่สุด

3.3.3 วิธีการทดสอบ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์ (w/C) ต่อพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล พร้อมทั้งสร้างสมการทำนายกำลังอัดของของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์เถ้าชีวมวล ดินเหนียวกรุงเทพฯถูกนำมาร้อนผ่านตะแกรงขนาดช่องเปิด 2 มิลลิเมตร เพื่อแยกอนุภาคของดินที่มีขนาดใหญ่ออก ปริมาณความชื้นของดินเหนียวกรุงเทพฯถูกปรับให้มีค่าเท่ากับ 1, 1.5 และ 2 เท่าของดัชนีสภาพเหลว ดัชนีสภาพเหลวนี้นำมาใช้เป็นตัวบ่งบอกถึงความเป็นพลาสติกของดินก่อนที่จะปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล การเพิ่มปริมาณความชื้นให้กับดินทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นที่เกิดจากวิธีการผสมเปียกของเทคนิคการผสมลึก ดินเหนียวที่ปริมาณความชื้นทั้งสามค่าจะถูกนำมาผสมกับปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล ในปริมาณปูนซีเมนต์ระหว่างร้อยละ 0 ถึง 30 และปริมาณเถ้าชีวมวลร้อยละ 0 ถึง 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ในเครื่องผสมเป็นเวลา 10 นาที ตามคำแนะนำของ Miura et al. (2001); and Horpibulsuk et al. (2005) ส่วนผสมระหว่างดิน ปูนซีเมนต์ และเถ้าชีวมวล จะถูกนำมาบรรจุใส่ในแบบหล่อขนาด 50x100 มิลลิเมตร และห่อด้วยพลาสติก หลังจากได้อายุบ่ม 24 ชั่วโมง ตัวอย่างทดสอบจะถูกนำออกจากแบบหล่อและห่อด้วยพลาสติกและถูกนำไปเก็บในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ดินเหนียวซีเมนต์เถ้าชีวมวลจะถูกนำไปทดสอบแรงอัดแกนเดียวเมื่อมีอายุบ่มครบ 7, 14, 28, 60, 90, และ 120 วัน อัตราการเคลื่อนตัวในการทดสอบแรงอัดแกนเดียวเท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อนาที ผลทดสอบทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยสมมติฐานอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์ เพื่อสร้างสมการทำนายกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล สมการที่นำเสนอจะถูกรวบรวมด้วยผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวกรุงเทพฯผสม

ปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล ที่ปริมาณความชื้นในช่วงร้อยละ 89 ถึง 148 ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ถึง 30 และปริมาณเถ้าชีวมวลร้อยละ 15 และ 20 ของปริมาณปูนซีเมนต์

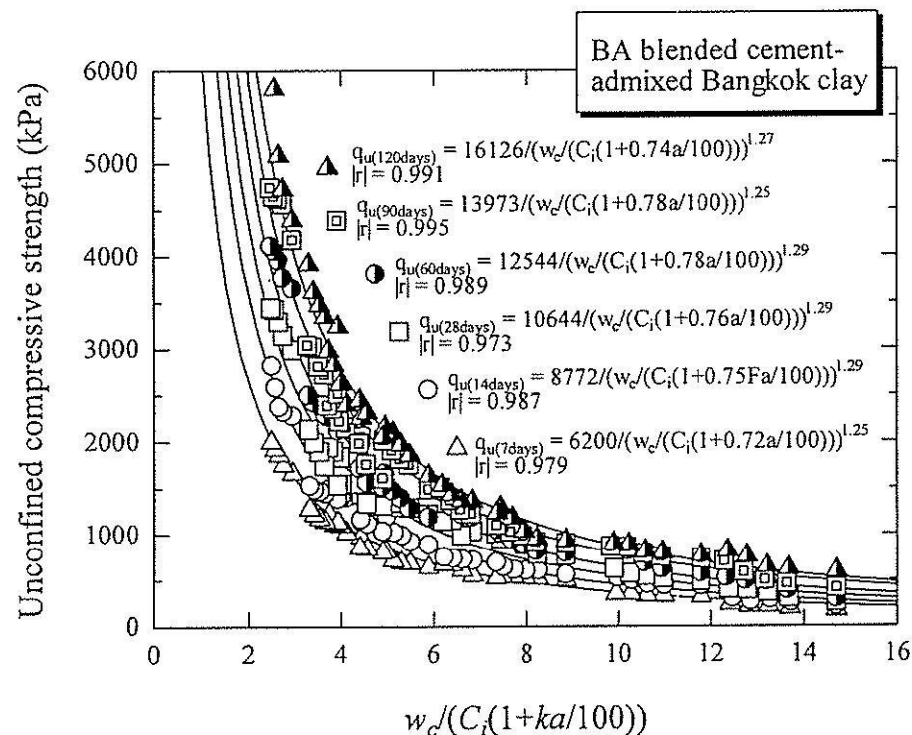
3.4 ผลทดสอบและการวิเคราะห์ผลทดสอบ

จากกฎของ Abrams และสมมติฐานอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์ สมการพัฒนากำลังอัดสามารถแสดงได้ดังนี้

$$q_u = \frac{A}{\left(\frac{w_c}{C_i + C_e}\right)^B} \quad (3.1ก)$$

$$q_u = \frac{A}{\left(\frac{w_c}{C_i(1+ka)}\right)^B} \quad (3.1ข)$$

เมื่อ q_u คือกำลังอัดของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่อายุบ่มหนึ่ง และ w_c คือปริมาณความชื้นของดินเหนียว A และ B คือค่าคงที่ พารามิเตอร์ A, B และ k ที่อายุบ่มหนึ่งสามารถหาได้จากการทำ Multi-regression analysis (MRA) เมื่อ a เท่ากับร้อยละศูนย์ (ไม่มีเถ้าชีวมวล) สมการที่ (3.1ข) จะกลายเป็นสมการที่พัฒนาขึ้นสำหรับดินเหนียวซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2010a)



รูปที่ 3.3 การวิเคราะห์กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลด้วยพารามิเตอร์ w_c/C

เมื่อนำผลการทำ MRA มาทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและ w_c/C จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าการพัฒนากำลังอัดที่อายุบ่มหนึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของสมการที่ (3.1) พารามิเตอร์ A มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม พารามิเตอร์ B มีค่าประมาณ 1.25 ถึง 1.29 โดยไม่แปรผันตามอายุบ่ม ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของดินเหนียวซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003 และ 2010a) พารามิเตอร์ k มีค่าแปรผันในช่วง 0.7 ถึง 0.8 และสามารถพิจารณาให้เป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.75 สำหรับทุกอายุบ่ม การที่ k มีค่าประมาณคงที่เป็นการยืนยันได้ว่าปฏิกิริยาปอซอลานที่เกิดขึ้นในดินซีเมนต์มีน้อยมาก ซึ่งแตกต่างกันในกรณีของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ k มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม (Papadakis and Tsimas, 2002)

3.5 สมการทำนายกำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าชีวมวล

ที่อายุบ่มหนึ่ง พารามิเตอร์ A ซึ่งเป็นค่าคงที่ จะถูกจัดออกได้โดยการพิจารณาอัตราส่วนของกำลังอัดที่อัตราส่วนปริมาตรน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์ต่างๆ ดังสมการต่อไปนี้

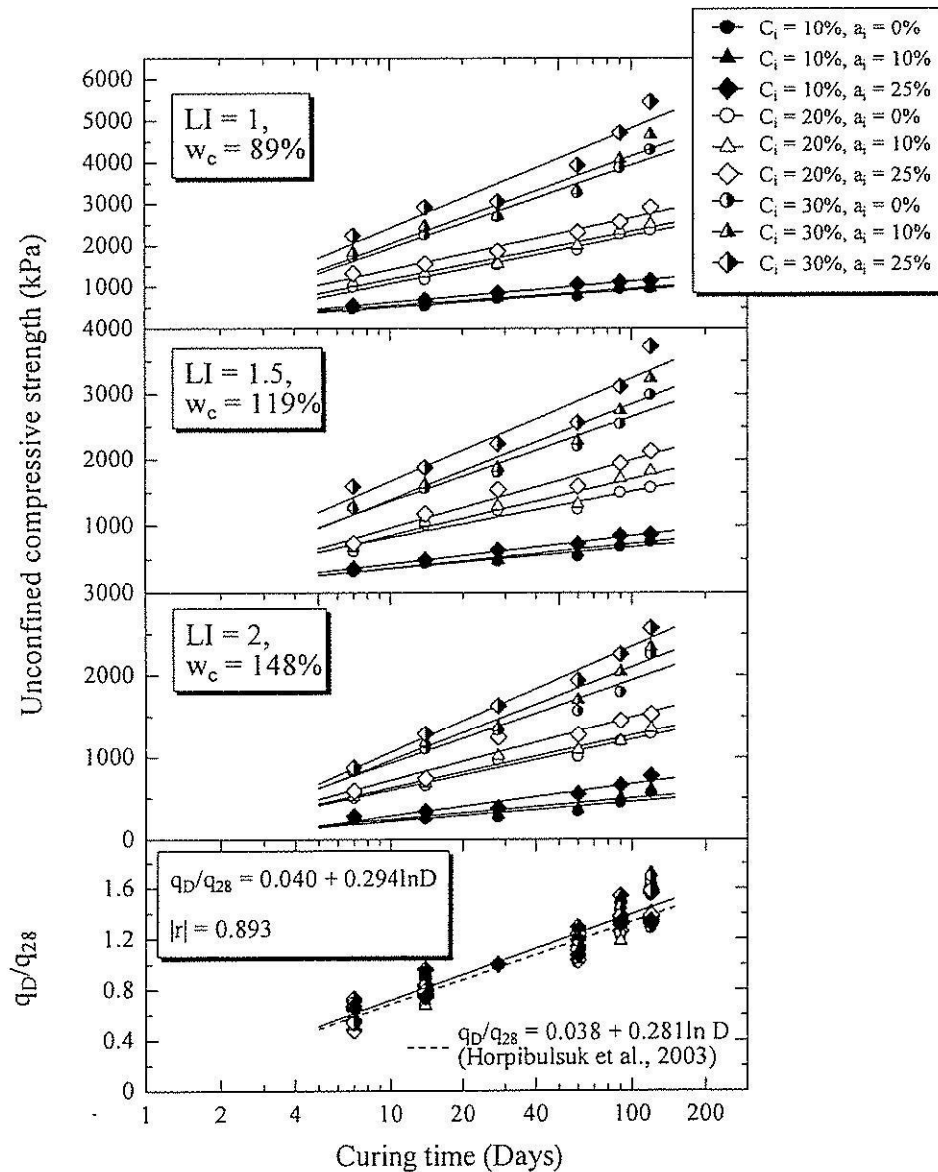
$$\left\{ \frac{q_{(w_c/C)_1}}{q_{(w_c/C)_2}} \right\} = \left[\frac{(w_c/C)_2}{(w_c/C)_1} \right]^{1.27} \quad (3.2)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)_1}$ คือกำลังอัดที่ต้องการประมาณค่า ที่อัตราส่วนปริมาตรน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์ที่เท่ากับ $(w_c/C)_1$ และ $q_{(w_c/C)_2}$ คือกำลังอัดที่ทราบค่า ที่อัตราส่วนปริมาตรน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์ที่เท่ากับ $(w_c/C)_2$ พารามิเตอร์ B มีค่าเท่ากับ 1.27 เช่นเดียวกับสมการของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2010a) สมการข้างต้นนี้มีประโยชน์ในการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่อายุบ่มหนึ่ง ที่อัตราส่วนปริมาตรน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์ (ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณเถ้าชีวมวล) ต่างๆ สมการข้างต้นนี้มีข้อจำกัดที่ยังไม่สามารถรวมอิทธิพลของอายุบ่ม ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถตอบคำถามที่ว่าในทางปฏิบัติหากต้องการลดปริมาณปูนซีเมนต์โดยเพิ่มอายุบ่มเพื่อให้ได้กำลังอัดเท่าเดิม จะเพิ่มอายุบ่มอีกเท่าไร ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาการพัฒนา กำลังอัดเวลา

รูปที่ 3.4 แสดงการพัฒนา กำลังอัดกับอายุบ่มของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล จะเห็นได้ว่าการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล เมื่อเวลาอยู่ในแกนล็อกการิทึม มีลักษณะเป็นเส้นตรง ที่ w_c/C ค่าหนึ่ง การพัฒนากำลังอัดจะแปรผันตามพารามิเตอร์ A เพียงอย่างเดียว เนื่องจากพารามิเตอร์ B และ k มีค่าประมาณคงที่ ดังนั้น สมการการพัฒนา กำลังอัดกับเวลาสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{q_{D1}}{q_{D2}} = \frac{A_{D1}}{A_{D2}} \quad (3.3)$$

เมื่อ q_{D1} คือกำลังอัดที่ต้องการประมาณค่า ที่อายุบ่ม D_1 วัน q_{D2} คือกำลังอัดที่ทราบค่า ที่อายุบ่ม D_2 วัน และ A_1 และ A_2 คือค่าของพารามิเตอร์ A ที่อายุบ่ม D_1 และ D_2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 การพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล

Horpibulsuk et al. (2003 และ 2010a) แสดงให้เห็นว่าแม้ว่าค่าของพารามิเตอร์ A จะแตกต่างกันตามแต่นิคมของดินซีเมนต์ เนื่องจากความแตกต่างกันขององค์ประกอบดินและของเหลวภายในอนุภาคดิน แต่อัตราการพัฒนากำลังอัดกับเวลามีค่าใกล้เคียงกันสำหรับดินเหนียวซีเมนต์ชนิดต่างๆ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ควบคุมอัตราการพัฒนากำลังอัด ดังนั้น สมการที่ (3.3) จึงพิจารณาว่าเป็นสมการทั่วไปสำหรับดินซีเมนต์

สมการการพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์ได้พัฒนาขึ้น โดยใช้กำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน เป็นค่าอ้างอิง (Horpibulsuk et al., 2003; 2009a; and 2010a) หลักการพัฒนาสมการการพัฒนากำลังอัดนี้สามารถใช้ได้กับดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลเช่นเดียวกัน เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นกับดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลมีน้อยมาก (ปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นปฏิกิริยาหลัก) สมการการพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนผสมต่างๆ และปริมาณความชื้นต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.4 และสมการที่ (3.4)

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.026 + 0.293 \ln D \quad (3.4)$$

เมื่อ q_D คือกำลังอัดที่อายุบ่ม D วัน q_{28} คือกำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน และ D คืออายุบ่ม (วัน) สมการนี้ได้รวมอิทธิพลของปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณเถ้าชีวมวลแล้ว

ในการพัฒนาสมการทำนายกำลังอัดระหว่างอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์และอายุบ่ม ค่าของพารามิเตอร์ B และ k มีค่าเท่ากับ 1.27 และ 0.75 ตามลำดับ ดังนั้น โดยการรวมสมการที่ (3.2) และ (3.4) จะได้สมการทำนายกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวลดังนี้

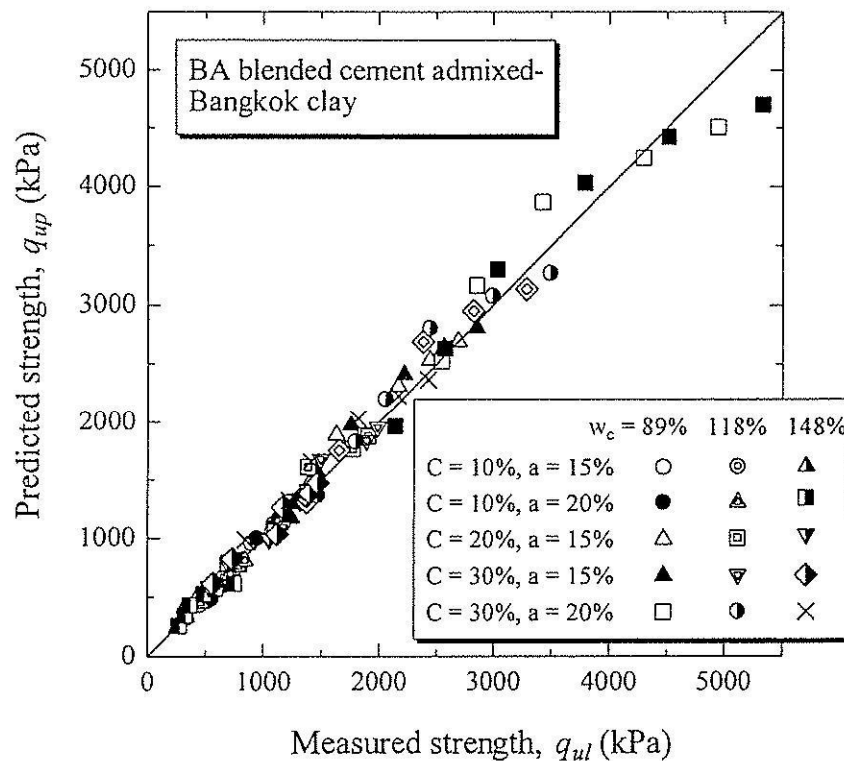
$$\left\{ \frac{q_{(w/C)_D}}{q_{(w/C)_{28}}} \right\} = \left[\frac{(w_c/C)_{28}}{(w_c/C)_D} \right]^{1.27} (0.026 + 0.293 \ln D) \quad (3.5)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)_D}$ คือกำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่ต้องการทราบค่าที่อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ $(w_c/C)_D$ ที่อายุบ่ม D วัน และ $q_{(w_c/C)_D}$ คือกำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่ทราบค่าที่อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ (w_c/C) ที่อายุบ่ม 28 วัน และ

$$C = C_i (1 + 0.75a) \quad (3.6)$$

ในการสร้างความสัมพันธ์นี้ k มีค่าเท่ากับ 0.75 ตารางที่ 3.2 แสดงตัวอย่างการทำนายกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล ที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 89, 118, และ 148 ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 30 ปริมาณเถ้าชีวมวลร้อยละ 15 และ 20 และอายุบ่ม 7, 28, และ 90 วัน รูปที่ 3.5 แสดงผลเปรียบเทียบกำลังอัดที่ได้จากการทำนายและจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับตัวอย่างจำนวน 108 ตัวอย่าง ภายใต้เงื่อนไขการผสมดังนี้ ปริมาณความชื้นร้อยละ 89, 118, และ

148 ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20, และ 30 ปริมาณเถ้าชีวมวลร้อยละ 15 และ 20 และอายุบ่ม 7, 14, 28, 60, 90 และ 120 วัน กำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน ของตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่มีปริมาณความชื้นร้อยละ 89 และปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และปริมาณเถ้าชีวมวลร้อยละ 15 ถูกนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงความผิดพลาดของผลทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในงานวิศวกรรม ซึ่งมีค่าร้อยละของความผิดพลาดเฉลี่ยสมบูรณ์ (Mean absolute percent error, $\sum \left| \frac{q_{up} - q_{ul}}{q_{ul}} \right| \times 100\%$) ไม่เกินร้อยละ 6 ความผิดพลาดที่น้อยนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถของสมการที่ (3.5) สมการนี้เป็นสมการอย่างง่ายที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของกฎของ Abrams และต้องการเพียงผลทดสอบหนึ่งผลทดสอบเท่านั้น



รูปที่ 3.5 ผลเปรียบเทียบกำลังอัดที่ได้จากการทำนายและห้องปฏิบัติการ

สำหรับการศึกษานี้ การออกแบบส่วนผสมที่ประหยัดที่สุดคือ การเติมเถ้าชีวมวลในปริมาณร้อยละ 25 ดังนั้น โดยการแทนค่า a เท่ากับร้อยละ 25 ลงในสมการที่ (3.6) จะได้ปริมาณปูนซีเมนต์ในพจน์ของปริมาณปูนซีเมนต์ทั้งหมดเท่ากับ

$$C_i = 0.842C \quad (3.7)$$

ในทางปฏิบัติ ปริมาณปูนซีเมนต์ทั้งหมดสำหรับดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลเพื่อให้ได้กำลังอัดตามต้องการสามารถประมาณได้จากสมการที่ (3.5) สมการนี้ต้องการเพียงผลทดสอบกำลังอัดของดินเหนียว

ซีเมนต์ (ผสมหรือไม่ผสมเถ้าชีวมวลก็ได้) ที่อายุบ่มหนึ่งและสภาพการผสม (ปริมาณความชื้นและปริมาณปูนซีเมนต์) หนึ่ง วิธีการออกแบบส่วนผสมนี้สามารถประหยัดปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 15.8 $\left(\left[\frac{1-0.842}{1} \right] \times 100\% \right)$

ตารางที่ 3.2 ผลการทำนายกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล

Time (days)	Water content, w_c (%)	cement content, C_i (%)	Fly ash content, a (%)	w_c/C	Labolatory strength, q_{ul} (kPa)	Predicted strength, q_{up} (kPa)
7	89	10	15	7.96	520	466
7	89	10	20	7.7	547	486
7	89	30	15	2.65	1882	1879
7	89	30	20	2.57	2141	1960
7	118	10	15	10.59	332	324
7	118	10	20	10.25	332	338
7	118	30	15	3.53	1371	1307
7	118	30	20	3.42	1467	1363
7	148	10	15	13.23	257	244
7	148	10	20	12.79	273	255
7	148	30	15	4.41	844	986
7	148	30	20	4.26	865	1029
28	89	10	15	7.96	781	reference
28	89	10	20	7.7	820	816
28	89	30	15	2.65	2855	3159
28	89	30	20	2.57	3038	3295
28	118	10	15	10.59	514	545
28	118	10	20	10.25	547	568
28	118	30	15	3.53	2056	2198
28	118	30	20	3.42	2150	2293
28	148	10	15	13.23	320	411
28	148	10	20	12.79	366	429
28	148	30	15	4.41	1409	1658
28	148	30	20	4.26	1549	1730

ตารางที่ 3.2 (ต่อ) ผลการทำนายกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล

Time (days)	Water content, w_c (%)	cement content, C_i (%)	Fly ash content, a (%)	w_c/C	Labolatory strength, q_{ul} (kPa)	Predicted strength, q_{up} (kPa)
90	89	10	15	7.96	1078	1050
90	89	10	20	7.7	1101	1095
90	89	30	15	2.65	4298	4238
90	89	30	20	2.57	4522	4420
90	118	10	15	10.59	747	731
90	118	10	20	10.25	785	762
90	118	30	15	3.53	2822	2948
90	118	30	20	3.42	2994	3075
90	148	10	15	13.23	565	551
90	148	10	20	12.79	587	575
90	148	30	15	4.41	2162	2224
90	148	30	20	4.26	2227	2320

3.6 บทสรุป

งานวิจัยเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล สมการทำนายกำลังอัดสร้างขึ้นจากสมมติฐานอัตราส่วนน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์ (Miura et al., 2001 และ Horpibulsuk et al., 2005) กฎของ Abrams (Abrams, 1918) และหลักการปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า (Papadakis and Tsimas, 2002) บทสรุปที่ได้จากงานวิจัยนี้แสดงได้ดังนี้

1. ผลทดสอบและผลวิเคราะห์ด้านกำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าชีวมวลสรุปได้ว่าเถ้าชีวมวลเป็นวัสดุเหลือใช้ที่ทำหน้าที่กระจายอนุภาคของปูนซีเมนต์ อิทธิพลจากการกระจายนี้จะทำให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำได้ดียิ่งขึ้น มีผลให้ผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานและกำลังอัดสูงขึ้น การใส่เถ้าชีวมวลในปริมาณร้อยละ 25 สามารถช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 15.8
2. อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์เป็นพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล อิทธิพลจากการกระจายตัวเปรียบเสมือนการเพิ่มปูนซีเมนต์ ปริมาณปูนซีเมนต์ทั้งหมดจึงเท่ากับผลรวมของ

ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใส่เริ่มต้นและปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่าจากอิทธิพลของการกระจายตัว กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลจะมีค่าเท่ากันเมื่อ w/C มีค่าเท่ากัน แม้ว่าปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณเถ้าลอย จะมีค่าแตกต่างกันก็ตาม

3. เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานในดินเหนียวซีเมนต์เถ้าชีวมวลเกิดขึ้นน้อยมากและปริมาณเถ้าชีวมวลถูกใส่เพิ่มเป็นสัดส่วนกับปริมาณปูนซีเมนต์ แฟกเตอร์การกระจายตัว k จึงมีค่าประมาณคงที่สำหรับทุกอายุบ่มและปริมาณปูนซีเมนต์ ซึ่งหมายความว่าอิทธิพลของการกระจายตัวเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันเส้นตรงกับปริมาณเถ้าชีวมวล
4. ความสัมพันธ์ร่วมระหว่างกำลังอัด อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์ และอายุบ่ม สร้างขึ้นจากสมมติฐานอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินเหนียวต่อปูนซีเมนต์ ความสัมพันธ์นี้มีประโยชน์อย่างมากในการประมาณกำลังอัด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณเถ้าชีวมวล โดยอาศัยเพียงหนึ่งผลทดสอบเท่านั้น ความสัมพันธ์นี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับดินเหนียวอื่นที่มีระดับการบวมตัวต่ำ โดยใช้ค่า B เท่ากับ 1.26 (Horpiulsuk et al., 2010a) แฟกเตอร์การกระจายตัว k มีเท่ากับ 0.75 สำหรับทุกอายุบ่มและปริมาณปูนซีเมนต์ สำหรับเถ้าลอยชนิดอื่น ค่าคงที่ k สามารถหาได้โดยวิธีเช่นเดียวกันที่นำเสนอในรายงานนี้

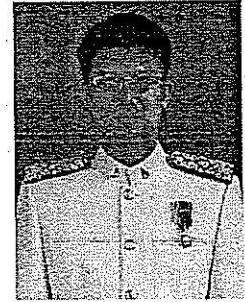
เอกสารอ้างอิง

- ชัชวาล เศรษฐบุตร (2536). *คอนกรีตเทคโนโลยี*. กรุงเทพฯ: บริษัทคอนกรีตผสมเสร็จซีแพค.
- ทรงพล บุญมาดี (2529). *ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength กับ CBR ของดินลูกรังผสมซีเมนต์*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ทิน เกตุรัตน์บวร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2540). ความละเอียดของไส้ถ่านหินที่ได้จากการแยกขนาดต่อกำลังอัด และการกร่อนเนื่องกรดซัลฟูริกของมอดาร์. *วารสาร กฟผ.* หน้า 53-61
- ทิน เกตุรัตน์บวร ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ เอกภพ อังสุวรรณ (2535). การใช้ไส้ถ่านหินแยกขนาดจากแม่เมาะในงานคอนกรีตกำลังสูง. *วารสาร กฟผ.* หน้า 36-45.
- บุรชัย ฉัตรวีระ และ พิชัย นิมิตรยงสกุล (2538). ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*. หน้า 37-51.
- วิศว จักรไพศาล และ ชัยโรจน์ จักรไพศาล (2540). ผลของเถ้าลอยในปฏิกิริยาปอซโซลานิกของคอนกรีตสมรรถนะสูง. *วารสาร กฟผ.* หน้า 60-67.
- สมชัย กกกำแหง (2535). การนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุก่อสร้างงานดิน. *การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2535 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์*. หน้า 26-29.
- สมหมาย สว่างกิจ และคณะ. (2535). การใช้ไส้ถ่านหินในการป้องกันการกัดกร่อนของคอนกรีต. *เอกสารการประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2535 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์*. หน้า 51-63
- สมิทร ส่งพิริยะกิจ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2538). การศึกษาการบดเถ้าจากแม่เมาะเพื่อให้เป็นสารปอซโซลานในการเพิ่มกำลังคอนกรีต. *วารสาร สจร.* หน้า 27-36.
- อนิรุทธิ์ รังไชย และ สุเทพ นิ่มนวล (2530). การใช้ประโยชน์เถ้าลอยในการเป็นวัสดุสร้างทางหลวง. *รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*.
- Abrams DA. (1918), "Design of Concrete Mixtures", *Structural Materials Research Laboratory*, Lewis Institute, Chicago, Bulletin Vol.1, 20p.
- Broms, B. B., and Boman, P. (1975) "Lime stabilized column", *Proc., 5th Asian Regional conference*, Indian Institute of Science, Bangalore, India, Vol.1, pp.277-234.
- Chida, S. (1982), "Dry jet mixing method, State of the Art on Improvement Method for Soft Ground", *Journal of Japan society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tsuchi-To-Kiso, pp.69-76.

- Clare, K. E., and Pollard, A. E. (1954), "The effect of curing temperature on the compressive strength of soil-cement mixture", *Geotechnique*, Vol.4, No.3, pp.97-107.
- Davidson, D.T. (1961), "Soil stabilization with Portland cement", *Highway Research Board*, 200 p.
- Davidson, D.T., Pitre, G.L., Mateos, M., and Kalankamary, P.G. (1962), "Moisture-density, Moisture-strength and compaction characteristic of cement-treated soil mixture", *Highway Research Board*, pp.42-63.
- DJM Research Group (1984), *The Manual for the Dry Jet Mixing Method*, Japan.
- Felt, E.J. (1955), "Factors influencing physical properties of soil-cement mixture", *Highway Research Board*, pp.138-163.
- Horpibulsuk, S., and Miura, N. (2001), "A new approach for studying behavior of cement stabilized clays" *Proceedings of 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*, Istanbul, Turkey, Vol.3, pp.1759-1762.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., and Nagaraj, T.S. (2003), "Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis", *Geotechnique*, Vol.53, No.4, pp.439-444.
- Horpibulsuk, S., Bergado, D.T., and Lorenzo, G.A. (2004a), "Compressibility of cement admixed clays at high water content", *Geotechnique*, Vol.54, No.2, pp.151-154.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., and Bergado, D.T. (2004b), "Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. Vol.30, No.10, pp.1096-1105.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., Nagaraj, T.S. (2005), "Clay-water/cement ratio identity of cement admixed soft clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.131, No.2, pp.187-192.
- Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Suddeepong, A. (2011), "Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay", *Construction and Building Materials*.
- Horpibulsuk S, Rachan R, and Raksachon Y. (2009) "Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay", *Soils and Foundations*, Vol.49, No.1, pp.85-98.
- Horpibulsuk, S., Katkan, W., Sirilerdwattana, W., and Rachan, R. (2006), "Strength development in cement stabilized low plasticity and coarse grained soils : laboratory and field study", *Soils and Foundations*, Vol.46, No.3, pp.351-366.

- Horpibulsuk S, Rachan R, Suddepong A. and Chinkulkijniwat, A (2010a), "Strength development in cement admixed Bangkok clay: laboratory and field investigations", *Soils and Foundations* (In press).
- Horpibulsuk, S., Shibuya, S., Fuenkajorn, K, and Katkan, W. (2007), "Assessment of engineering properties of Bangkok clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.44, No.2, pp.173-187.
- Horpibulsuk S, Rachan R, Raksachon Y, Suddepong A, and Chinkulkijniwat A. (2010b) "Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay based on microstructural considerations", *Construction and Building Materials*, Vol.24, pp.2011-2021.
- Ingles, O. G., and Metcalf, J. B. (1972), *Soil Stabilization*, Sydney, Butterworths, pp.64-69.
- Kamon, M. and Bergado, D.T. (1992), "Ground improvement techniques", *Proceedings of 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.2, pp.526-546.
- Kamon, M. (1979), *Study on Engineering Properties of Very Soft Clay and Its Stabilization*, Doctoral dissertation, Kyoto University, Kyoto, Japan (in Japanese).
- Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y. and Honjo, Y. (1981), "Deep mixing method using cement hardening agent", *Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.721-724.
- Lambe, T.W., Mitchaels, A.S., and Moh, Z.C. (1959), "Improvements of soil-cement with Alkali compounds", *Highway Research Board*, Vol.241, pp.67-103.
- Leadarand, J. A. (1956), "Some engineering aspects of soil-cement mixture", *Mid-South Section, ASCE*, Vol.27, pp.64-69.
- Maner, A. W. (1952), "Curing soil cement base", *Highway Research Board*, Vol.31, pp.540-548
- Metcalf, J.B. (1977), "Principle and application of cement and lime stabilization. *Australian Road Research Board*, 20p.
- Miura, N., Horpibulsuk, S., and Nagaraj, T.S. (2001), "Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content", *Soils and Foundations*, Vol.41, No.5, pp.33-45.
- Miura, N., Koga, Y. and Nishida, K. (1986), "Application of deep mixing method with quick lime for Ariake clay ground", *Journal of Japan Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tsuchi-To-Kiso, Vol.34, No.4, pp. 5-11.
- Nagaraj TS, and Miura N. (2001) *Soft Clay Behaviour – Analysis and Assessment*. A.A.Balkema, Netherlands.
- Ng, S.C. (1966), *Cement Stabilization of Lateritic Soil*, Master of Engineering Thesis, Civil Engineering Program, No. 125, Seato Graduate School of Engineering.

- Norling, L. T., and Peckard, R. G. (1958), "Expended short-cut test method for determining cement factor for sandy soil", *Highway Research Board*, Vol.198, pp.20-31.
- Okamura, T., and Terashi, M. (1975), "Deep lime mixing method of stabilization for marine clays", *Proceedings of 5th Asian Regional conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Bangalore, India, pp.69-75.
- Papadakis VG, and Tsimas S. (2002), "Supplementary cementing materials in concrete Part I: efficiency and design", *Cement and Concrete Research*; Vol.32, pp.1525-1532.
- Prakash, K., and Sridharan, A. (2004), "Free swell ratio and clay mineralogy of fine-grained soils", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.27, No.2, pp.220-225.
- Reinhold, F. (1955), "Elastic behavior of soil-cement mixtures", *Highway Research Board*, Vol.108, pp.128-137.
- Rhee, Y. H. (1982). *Soil Stabilization with lime and Fly Ash*. Master of Engineering Thesis, Asian Institute Technology.
- Ruennkairergsa, T. (1982), "Principal of Soil Stabilization", *Group Training in Road Construction*, Bangkok, Thailand, pp.17-26
- Sherwood, P.T. (1958), "The effect of sulphates on cement stabilization clay. *Highway Research Board*, Vol.198, pp.45-54.
- Terashi, M., Tanaka, H. and Okumura, T. (1979), "Engineering properties of lime treated marine soils and DMM", *Proceedings of 6th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.191-194.
- Terrel, R. L., Barenberg, E. J., Michell, J. M., and Thomson, M. R. (1979), *Soil Stabilization in Pavement Structure a User's Manual Mixture Design Consideration*, Washington: Government Printing Office.
- Winterkorn, H. F., and Chandrasekharn, E.C. (1951) "Lateritic Soil and Their Stabilization", *Highway Research Board*, Vol.44, pp.10-29.



ประวัติผู้ประพันธ์

ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยม) สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปี พ.ศ. 2539 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมปฐพีจากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ในปี พ.ศ. 2541 และวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเทคนิคธรณี จากมหาวิทยาลัย Saga ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2544

ดร. สุขสันต์ ได้เริ่มปฏิบัติงานในตำแหน่งอาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2545 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ หัวหน้าหน่วยวิจัยเพื่อเทคโนโลยีการก่อสร้าง หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา และบรรณาธิการวารสารเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ท่านได้รับทุนสนับสนุนงานและทำวิจัยหลายทุนทั้งจากองค์กรภายในและภายนอกประเทศ มีผลงานวิจัยที่เผยแพร่ในวารสารและสัมมนาวิชาการระดับนานาชาติและระดับประเทศมากกว่า 100 เรื่อง และมีผลงานประพันธ์หนังสือสองเล่ม “ปฐพีกลศาสตร์” และ “วิศวกรรมฐานราก” งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ ลักษณะทางวิศวกรรมของดินตามธรรมชาติ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของดิน และเทคนิคการปรับปรุงดิน

ดร.สุขสันต์ มีประสบการณ์การเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาระดับบัณฑิตศึกษาและการให้บริการวิชาการ ท่านเป็นวิศวกรที่ปรึกษาด้านกำแพงกันดินเสริมกำลัง (Mechanically Stabilized Earth Wall) ให้กับบริษัท จีโอฟอร์ม จำกัด นอกจากนี้ท่านยังเป็นผู้ทรงคุณวุฒิในการประเมินผลงานวิจัยและหนังสือให้กับหน่วยงานภาครัฐและเอกชนทั้งในและต่างประเทศ