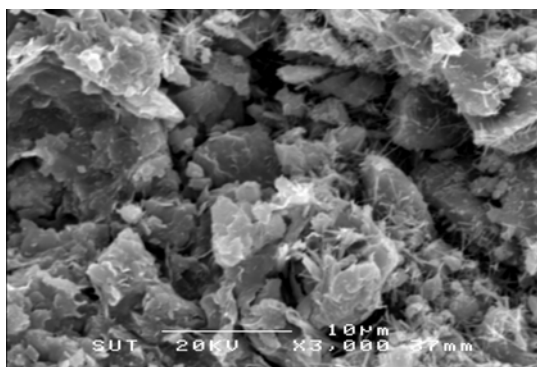
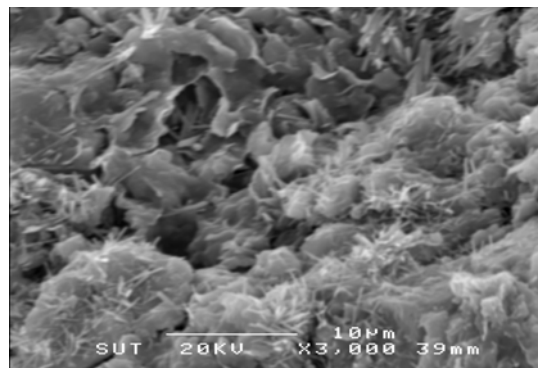
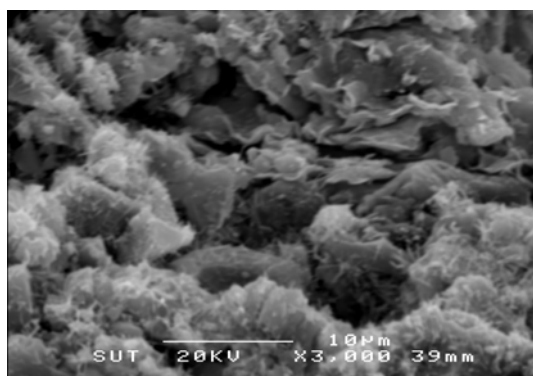




(h) ปูนซีเมนต์ 35 เปอร์เซ็นต์



(i) ปูนซีเมนต์ 40 เปอร์เซ็นต์

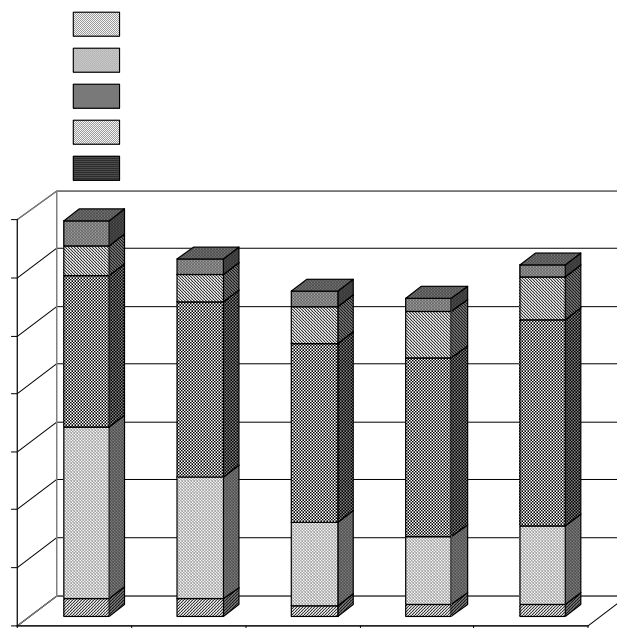
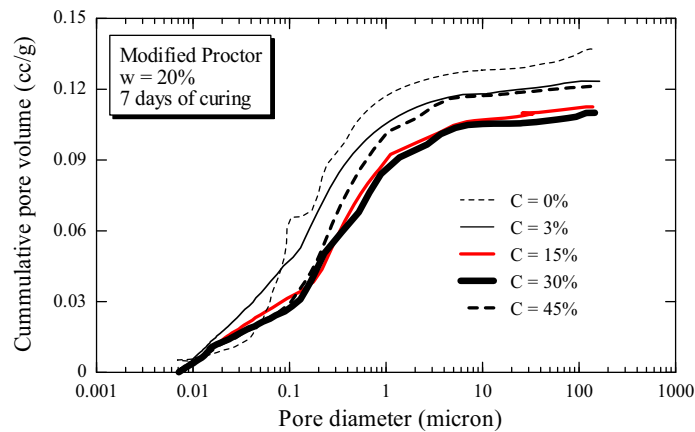


(j) ปูนซีเมนต์ 45 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายขยายของดินซีเมนต์ที่บดอัดที่ปริมาณปูนซีเมนต์ต่างๆ ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน (รูปที่ 4.13a-c สำหรับโซนแอคทีฟ รูปที่ 4.13d-g สำหรับโซนล่าช้า และรูปที่ 4.13h-j สำหรับโซนลดกำลัง)

ตารางที่ 4.4 ปริมาณ Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์ที่บดอัดที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน

โซนการปรับปรุง	ปริมาณซีเมนต์ (%)	น้ำหนักที่สูญเสีย (%)	ปริมาณ Ca(OH)_2 (%)
แอคทีฟ	3	1.34	5.51
	7	1.50	6.17
	11	1.60	6.58
ล่าช้า	15	1.62	6.66
	20	1.65	6.78
	30	1.68	6.90
ลดกำลัง	35	1.54	6.33
	40	1.48	6.08
	45	1.37	5.63

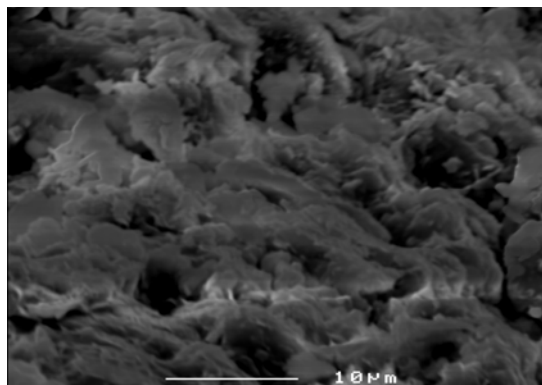


รูปที่ 4.14 การกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์ที่บดอัดที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 7 วัน

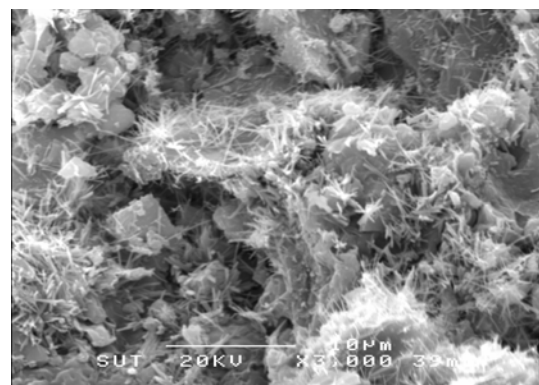
4.4.2.3 อิทธิพลของอายุบ่ม

รูปที่ 4.15 แสดงอิทธิพลของอายุบ่มต่อโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ บดอัดที่ปริมาณความชื้น 20 เปอร์เซ็นต์ (1.2OWC) ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน จะเห็นได้ว่าหลังจาก 4 ชั่วโมง กลุ่มอนุภาคดินและโพรงถูกปกคลุมไปด้วยซีเมนต์เจล (รูปที่ 4.15a) เมื่ออายุบ่มมากขึ้น ผลึกเกลือไฮดรอกไซด์ในโพรงเพิ่มขึ้นและกลุ่มดินซีเมนต์มีขนาดใหญ่ขึ้น (รูปที่ 4.15b ถึง c) ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของผลึกเกลือไฮดรอกไซด์กับเวลา (ตารางที่ 4.5)

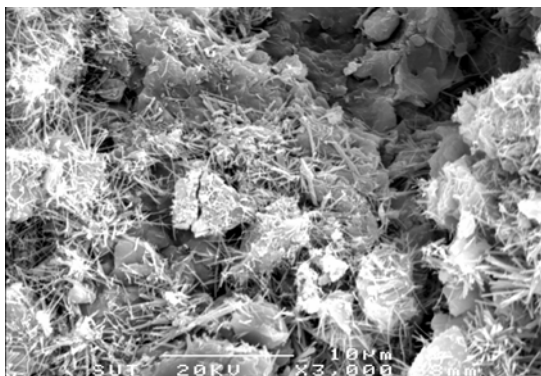
อิทธิพลของอายุบ่มต่อการกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์แสดงดังรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าที่ อายุบ่มเริ่มต้น (อายุบ่มน้อยกว่า 7 วัน) โพรงที่เล็กกว่า 0.1 ไมครอน มีปริมาตรลดลงอย่างเห็นได้ชัด ขณะที่ โพรงที่ใหญ่กว่า 0.1 ไมครอน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าในช่วงอายุบ่ม 7 วัน ผลึกไฮดรเจนออกไซด์โพรงขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอน ในขณะที่ อนุภาคขนาดใหญ่ (อนุภาคของ ซีเมนต์ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ) ก่อให้เกิดกลุ่มอนุภาคดินซีเมนต์ ที่มีโพรงขนาดใหญ่ หลังจากอายุบ่ม 7 วัน ปริมาตรโพรงขนาดใหญ่กว่า 0.1 ไมครอน มีแนวโน้มลดลง ขณะที่ ปริมาตรโพรงขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์เช่นนี้อาจเกิดเนื่องจากผลึกไฮดรเจนออกไซด์โพรงขนาดใหญ่ (> 0.1 ไมครอน) ทำให้ปริมาตรโพรงขนาดเล็ก (< 0.1 ไมครอน) เพิ่มขึ้น มีผลให้ปริมาตรโพรง ทั้งหมดลดลง



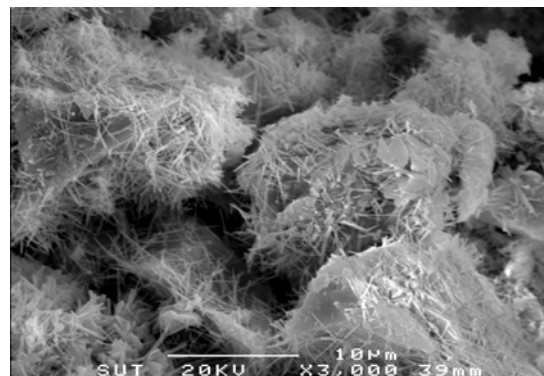
(a) อายุบ่ม 4 ชั่วโมง



(b) อายุบ่ม 7 วัน



(c) อายุบ่ม 28 วัน



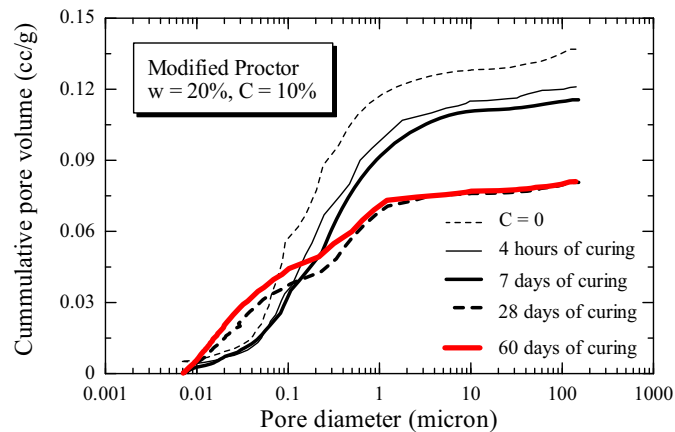
(d) อายุบ่ม 60 วัน

รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายขยายของดินซีเมนต์ 10% บดอัดที่ 1.2OWC ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่มต่างๆ

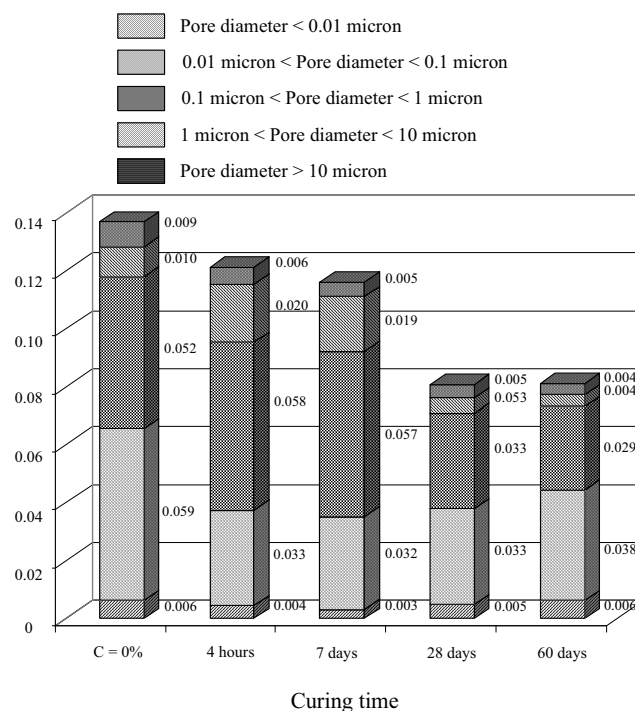
ตารางที่ 4.5 ปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ของดินซีเมนต์ 10% บดอัดที่ 1.2OWC

ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่มต่างๆ

อายุบ่ม (วัน)	น้ำหนักที่สูญเสีย (%)	ปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (%)
7	1.52	6.25
28	1.65	6.78
60	1.85	7.63



(a)



(b)

รูปที่ 4.16 การกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์ 10% บดอัดที่ 1.2OWC

ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่มต่างๆ

4.5 การวิจารณ์ผลทดสอบ

จากผลทดสอบทั้งหมด โพรงในมวลดินซีเมนต์สามารถจำแนกออกได้เป็นสามประเภท ได้แก่ โพรงอากาศ (> 10 ไมครอน) โพรงขนาดใหญ่ระหว่างกลุ่มดินซีเมนต์ ($10-0.1$ ไมครอน) และโพรงขนาดเล็กระหว่างกลุ่มดินซีเมนต์ (< 0.1 ไมครอน) โพรงขนาดใหญ่ระหว่างกลุ่มดินซีเมนต์มีปริมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรโพรงทั้งหมด และโพรงขนาดเล็กระหว่างกลุ่มดินซีเมนต์มีปริมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรโพรงทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบการกระจายขนาดโพรงของดินเหนียว อิมตัวด้วยน้ำ (Nagaraj et al., 1990) ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ทำให้ปริมาตรทั้งหมดลดลง แต่ปริมาตรโพรงแต่ละขนาดเทียบกับปริมาตรโพรงทั้งหมดยังคงเหมือนเดิม

เราอาจสมมติว่าเมื่อผสมปูนซีเมนต์เข้ากับดินเหนียวเปียก ปูนซีเมนต์ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำจะถูกล้อมรอบด้วยอนุภาคของดินและกลายเป็นกลุ่มอนุภาคดินซีเมนต์ขนาดใหญ่ ก่อให้เกิดโพรงขนาดใหญ่ ซีเมนต์เจล (ซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ) จะเสถียรอยู่ในโพรงระหว่างกลุ่มดินซีเมนต์ขนาดเล็กด้วยแรงดึงดูดที่เกิดจากพลังงานการบดอัดและแรงปฏิกิริยากายภาพเคมี (Physicochemical forces) และในโพรงระหว่างกลุ่มอนุภาคดินซีเมนต์ขนาดใหญ่ด้วยแรงตึงผิวที่เกิดขึ้นระหว่างกลุ่มดินซีเมนต์และซีเมนต์เจล แม้ว่าอากาศจะถูกไล่ออกจากมวลดินซีเมนต์โดยการบดอัด แต่ก็ไม่สามารถไล่ออกได้ทั้งหมด ดังจะเห็นได้จากโพรงอากาศที่ตกค้างอยู่ในปริมาณ 8-10 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรโพรงทั้งหมด (ระดับความอิมตัวด้วยน้ำประมาณ 90-92 เปอร์เซ็นต์) ในช่วงแรกของการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ โพรงขนาดใหญ่ (> 0.1 ไมครอน) มีปริมาณเพิ่มขึ้นเนื่องจากการก่อตัวของกลุ่มดินซีเมนต์ ในขณะที่ ซีเมนต์เจลลดโพรงขนาดเล็ก (< 0.1 ไมครอน) เมื่อแข็งตัว เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น โพรงขนาดใหญ่ (> 0.1 ไมครอน) ถูกอุดด้วยผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน ส่งผลให้ปริมาตรโพรงขนาดเล็ก (< 0.1 ไมครอน) เพิ่มขึ้น และปริมาตรทั้งหมดลดลง

บทที่ 5

อิทธิพลของเถ้าลอยต่อโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์เถ้าลอย

5.1 บทนำ

งานวิจัยทางด้านคอนกรีตเทคโนโลยี (Owens, 1979; Mitsui et al., 1994; Ollivier and Massat, 1996; Igashi et al., 1996; Yang and Su, 2002; Chindaprasirt et al., 2004 เป็นต้น) ได้ประยุกต์ใช้วัสดุปอสolanเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมในการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วน วัสดุปอสolan ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย silica, alumina, และ ferric oxide เป็นหลัก ส่วนประกอบเหล่านี้จะก่อให้เกิดเป็นตัวเชื่อมประสาน (Cementitious material) เมื่อรวมตัวกับซีเมนต์และน้ำ เถ้าลอยจัดเป็นวัสดุ Pozzolan ชนิดหนึ่งที่ได้จากขบวนการผลิตไฟฟ้า ซึ่งมีปริมาณมากเกินไปกว่าความต้องการ Kawasaki et al. (1981) ได้ใช้เถ้าลอยผสมกับซีเมนต์ในการก่อสร้างเกาะสำหรับสะพาน Hakucho ในเกาะฮอกไกโด ผลทดสอบในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่าซีเมนต์ผสมเถ้าลอยสามารถช่วยลดการบวมตัว การอัดตัว และเพิ่มกำลังอัดให้กับดิน เถ้าลอยที่ใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์อาจมีส่วนช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์ และมีผลให้คุณสมบัติทางวิศวกรรม (กำลังอัด การอัดตัว และการซึมผ่านน้ำ) ของดินซีเมนต์ดีขึ้น จนถึงปัจจุบัน บทบาทของเถ้าลอยต่อการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคยังไม่ได้รับการศึกษามากนัก การศึกษานี้มีจำเป็นอย่างยิ่งการวิเคราะห์ลักษณะทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์เถ้าลอย

5.2 วัสดุทดสอบและวิธีการศึกษา

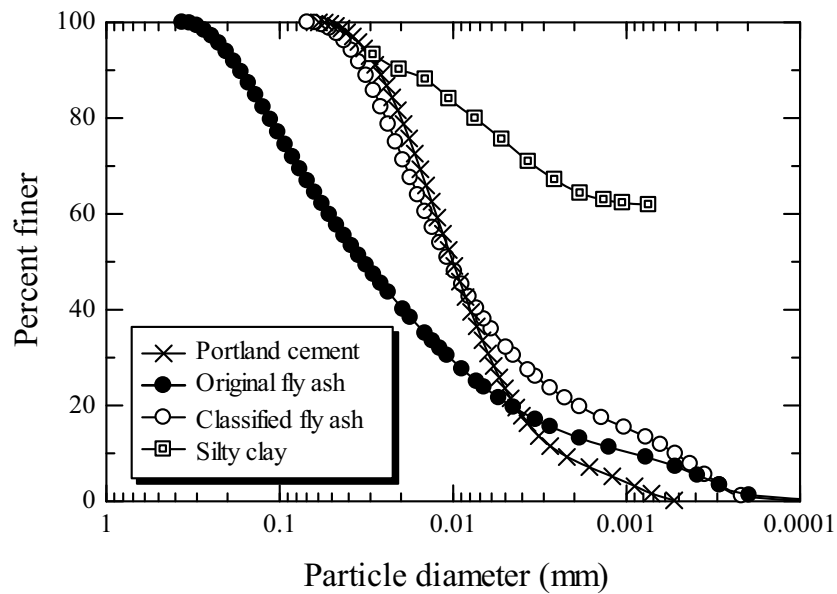
ดินตัวอย่างเป็นดินเหนียวปนดินตะกอนที่เก็บภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ที่ระดับความลึก 3 เมตร ซึ่งมีคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมดังได้กล่าวแล้วในบทที่ 4 เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษานำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียว ปูนซีเมนต์ (Portland cement, PC) และเถ้าลอยหยาบ (Original fly ash, OFA) และเถ้าลอยละเอียด (Classified fly ash, CFA) แสดงดังตารางที่ 5.1 เถ้าลอยละเอียดได้จากการร่อนเถ้าลอยหยาบผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ผลรวมของส่วนผสมหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ใน OFA และ CFA มีปริมาณเท่ากับ 81.54 และ 79.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้น เถ้าลอยทั้งสองนี้จึงจัดเป็นเถ้าลอยชั้น F (Class F) ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ขนาดเม็ดดินเฉลี่ย (Median particle size, D_{50}) มีค่าเท่ากับ 0.03 มิลลิเมตร (30 ไมครอน) และ 0.09 มิลลิเมตร (9 ไมครอน) สำหรับ OFA และ CFA ตามลำดับ กราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยแสดงดังรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่ากราฟการกระจายขนาดของ PC และ CFA มีลักษณะคล้ายกันมาก D_{50} ของ PC มีค่าเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตร (10 ไมครอน)

ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า D_{50} ของ CFA ค่าความถ่วงจำเพาะของ PC, OFA และ CFA เท่ากับ 3.15, 2.33, และ 2.54 ตามลำดับ รูปถ่ายกำลังขยายของ PC, OFA และ CFA แสดงดังรูปที่ 5.2 จากกราฟการกระจายขนาดและรูปถ่ายกำลังขยาย จะเห็นได้ว่าเม็ดดินมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์และเถ้าลอยมาก อนุภาคซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ขณะที่อนุภาคเถ้าลอยมีลักษณะเป็นทรงกลม

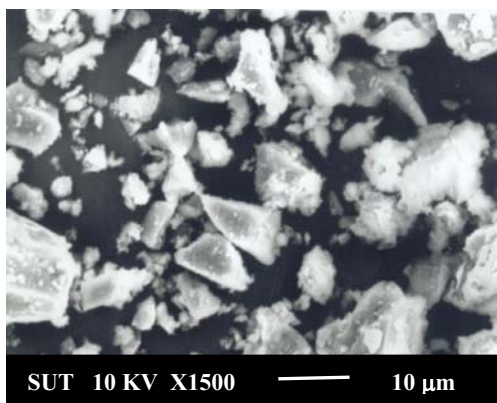
ตารางที่ 5.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวปนดินตะกอน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย

Chemical composition (%)	Silty clay	PC	OFA	CFA
SiO ₂	20.10	20.90	45.69	44.72
Al ₂ O ₃	7.55	4.76	24.59	23.69
Fe ₂ O ₃	32.89	3.41	11.26	11.03
CaO	26.15	65.41	12.15	12.67
MgO	0.47	1.25	2.87	2.63
SO ₃	4.92	2.71	1.57	1.28
Na ₂ O	ND	0.24	0.07	0.07
K ₂ O	3.17	0.35	2.66	2.87
LOI	3.44	0.96	1.23	1.42

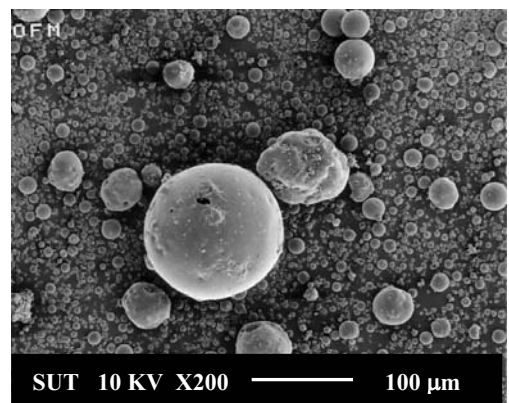
ดินเหนียวแห้งจะถูกนำมาผสมกับวัสดุเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย) ในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง และบดอัดด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานในแบบหล่อ ปริมาณเถ้าลอยที่แทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับ 0, 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน หลังจากการบดอัดแล้ว 24 ชั่วโมง ตัวอย่างจะถูกถอดออกจากแบบหล่อ ห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร และเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นจนได้อายุบ่ม 7, 28, 60, 90, และ 120 วัน เมื่อได้อายุบ่มที่ต้องการแล้ว นำตัวอย่างมาทำการทดสอบแรงอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาค ซึ่งได้แก่ การถ่ายภาพกำลังขยาย (Scanning electron microscope, SEM) การทดสอบการกระจายขนาดโพรง (Mercury intrusion porosimetry, MIP) และการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง (Thermal gravity analysis)



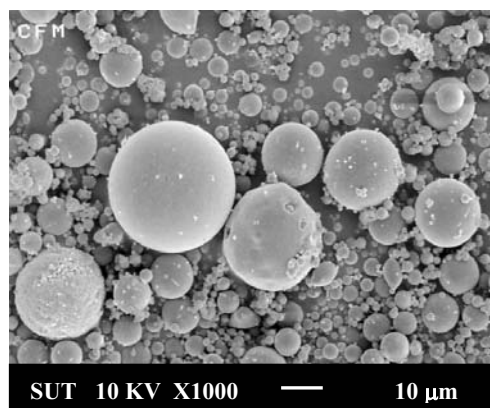
รูปที่ 5.1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย



(a) Type I Portland Cement (PC)



(b) Original Fly Ash (OFA)

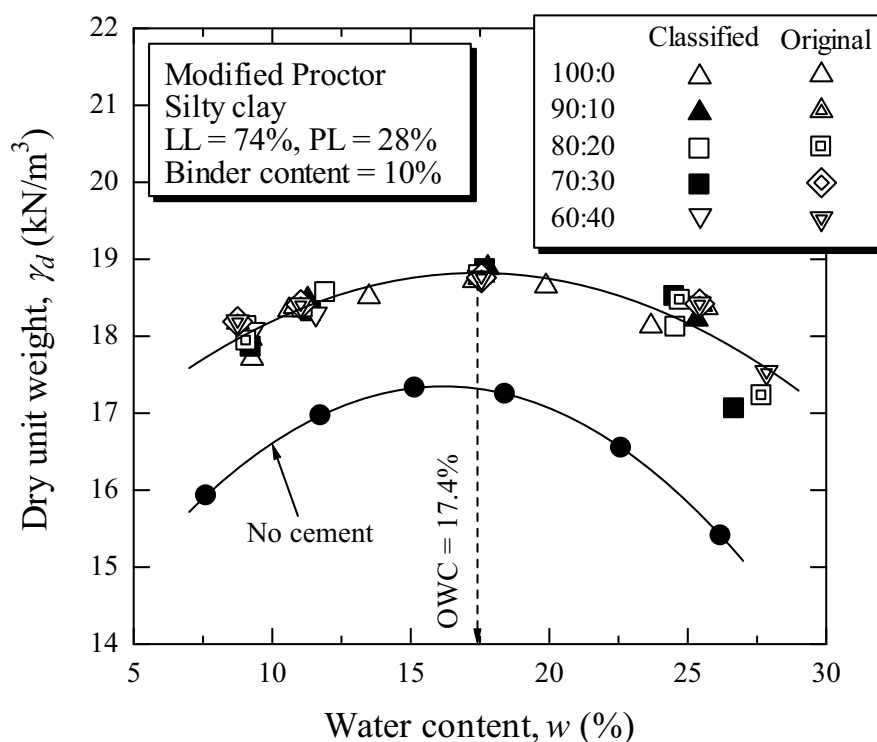


(c) Classified Fly Ash (CFA)

รูปที่ 5.2 ภาพถ่ายกำลังขยายของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

5.3 ผลทดสอบการบดอัดและแรงอัดแกนเดียว

รูปที่ 5.3 แสดงกราฟการบดอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยทั้งสองชนิด ที่อัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ เปรียบเทียบกับกราฟการบดอัดดิน จะเห็นได้ว่าความละเอียดของเถ้าลอยและอัตราส่วนการแทนที่ที่ไม่มีผลต่อกราฟการบดอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินซีเมนต์เถ้าลอยมีค่าสูงกว่าของดินบดอัด ในขณะที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าเท่ากัน ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันกับดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์เพียงอย่างเดียว (Horpibulsuk et al., 2006 และ 2008c) ตารางที่ 5.2 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนปนดินเหนียว ดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียด จะเห็นได้ว่าพิกัดพลาสติกของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าลอยมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์ (การลดลงของอัตราส่วนการแทนที่) การเพิ่มขึ้นของพิกัดพลาสติกบ่งบอกถึงการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคดินเนื่องจากการดูดซับ Ca^{2+} จากขบวนการแลกเปลี่ยนประจุ เถ้าลอยไม่มีอิทธิพลต่อพิกัดพลาสติกดังจะเห็นได้จากผลทดสอบที่ C:F = 0:100 และ C:F = 0:0 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า เถ้าลอยไม่มีอิทธิพลต่อการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน การรวมตัวเป็นกลุ่มอนุภาคมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดแต่แทบจะไม่ผลต่อขีดจำกัดเหลว ด้วยเหตุนี้ ปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC) ของดินเหนียว ดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์เถ้าลอยจึงค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินเหนียวรวมตัวต่ำถูกควบคุมโดยขีดจำกัดเหลว (Nagaraj et al., 2006 และ Horpibulsuk et al., 2008a)

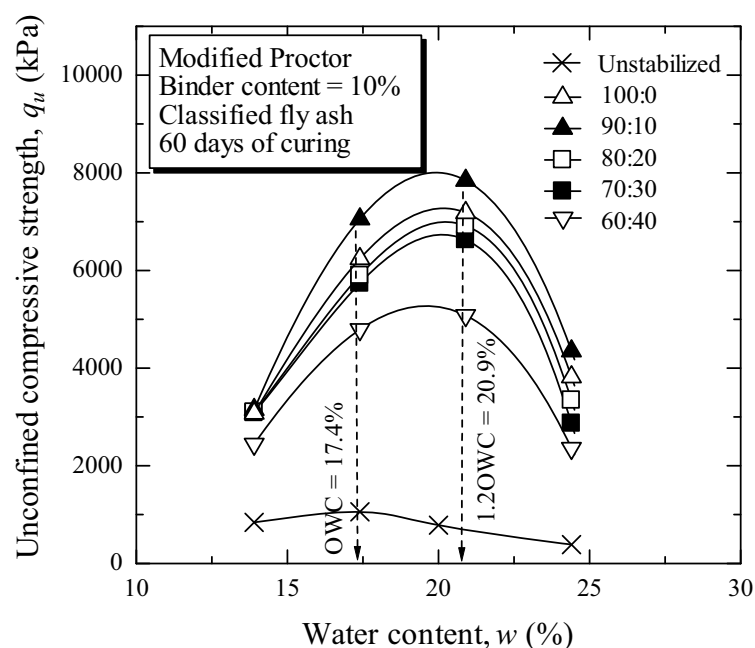


รูปที่ 5.3 กราฟการบดอัดดินซีเมนต์เถ้าลอย

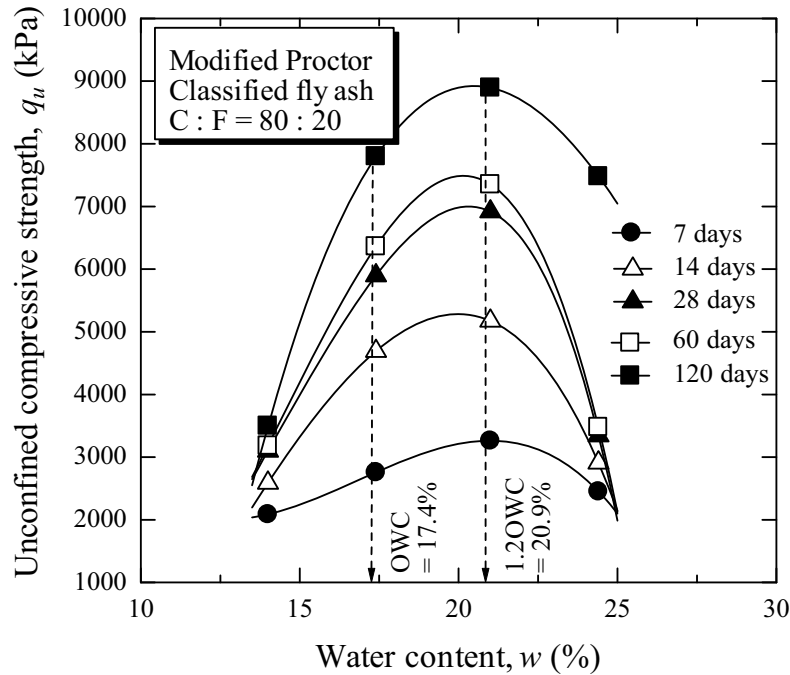
รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์เถ้าลอยเม็ดละเอียด ที่อัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ ที่อายุบ่ม 60 วัน เปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ของดินบดอัดกำลังอัดสูงสุดของดินซีเมนต์เถ้าลอยเกิดที่ปริมาณความชื้นประมาณ 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม ขณะที่ กำลังอัดสูงสุดของดินบดอัดเกิดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม ซึ่งเป็นจุดที่หน่วยน้ำแข็งมีค่าสูงสุด สำหรับดินซีเมนต์เถ้าลอย กำลังอัดสูงสุดยังคงเกิดที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสมที่อายุบ่มต่างๆ (รูปที่ 5.5) ซึ่งเป็นลักษณะเช่นเดียวกันกับดินเหนียวซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2008c) สำหรับทุกอายุบ่ม อัตราส่วนการแทนที่ และความละเอียด

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนแทนที่ต่างๆ

Type of stabilization	C:F	Atterberg's limits (%)		
		LL	PL	PI
No stabilization	0:0	74.1	27.5	46.6
PC	100:0	71.0	44.8	26.2
PC + CFA	0:100	73.1	29.4	43.7
	80:20	71.4	37.6	33.8
	60:40	71.7	33.3	38.4
PC + OFA	80:20	71.4	36.3	35.1
	60:40	71.7	33.3	38.4



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียด ที่อัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ ที่อายุบ่ม 60 วัน



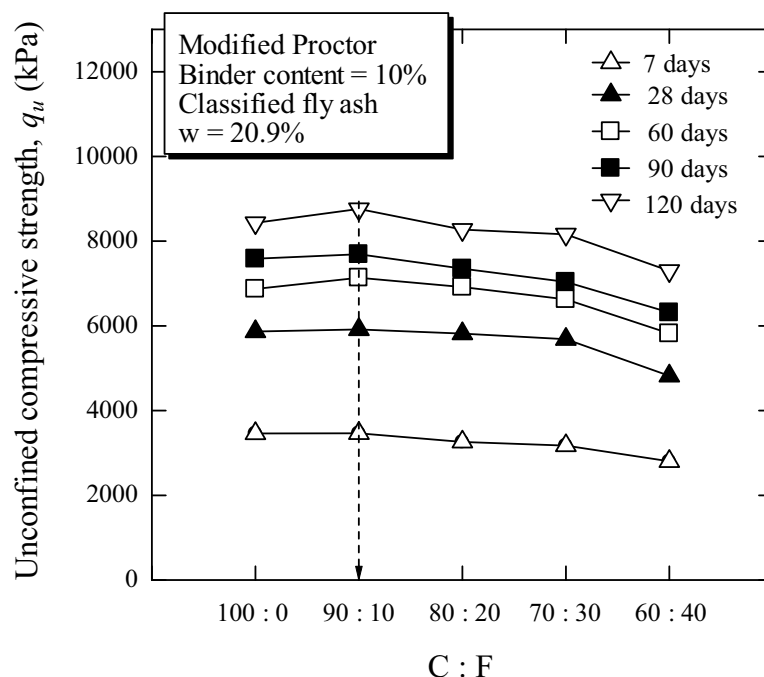
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียด
ที่อัตราส่วนการแทนที่ 80:20 ที่อายุบ่มต่างๆ

ตารางที่ 5.3 กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่มต่างๆ

Curing time (days)	Compressive strength (kPa)								
	C:F =	C:F = 90:10		C:F = 80:20		C:F = 70:30		C:F = 60:40	
	100:0	CFA	OFA	CFA	OFA	CFA	OFA	CFA	OFA
7	3460	3465	3479	3262	3257	3174	3082	2803	2669
28	5867	5916	5362	5817	5701	5685	5263	4821	4634
60	6872	7138	6828	6918	6437	6627	6537	5821	5840
90	7586	7353	7691	7353	7043	7038	6753	6316	6181
120	8432	8272	8566	8271	8182	8771	7901	7300	7200

อิทธิพลของอัตราส่วนการแทนที่และความละเอียดของเถ้าลอยต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม ที่อายุบ่มต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.6 และ ตารางที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าที่ทุกอายุบ่ม กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดมีค่าสูงกว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบเล็กน้อย ดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียดที่มีอัตราส่วนการแทนที่ 20 เปอร์เซ็นต์ ให้กำลังอัดใกล้เคียงกับดินซีเมนต์ (อัตราส่วนแทนที่ 0 เปอร์เซ็นต์) ดินซีเมนต์เถ้าลอยที่มีอัตราส่วนแทนที่ 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ให้กำลังอัดต่ำกว่าดินซีเมนต์ ดินซีเมนต์เถ้าลอยที่มีอัตราส่วนการแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ให้กำลังอัดสูงที่สุด ตั้งแต่อายุบ่มเริ่มแรก ผลการทดสอบนี้มีความแตกต่างจากผลทดสอบของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ซึ่งเถ้าลอยในฐานะของวัสดุป้อนสถานจะเริ่มแสดงบทบาทที่

อายุบ่มสูงๆ (โดยทั่วไปเกินกว่า 60 วัน) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า กำลังอัดของคอนกรีตเถ้าลอยจะมีค่ามากกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ปราศจากเถ้าลอยเมื่ออายุบ่มเกินกว่า 60 วัน

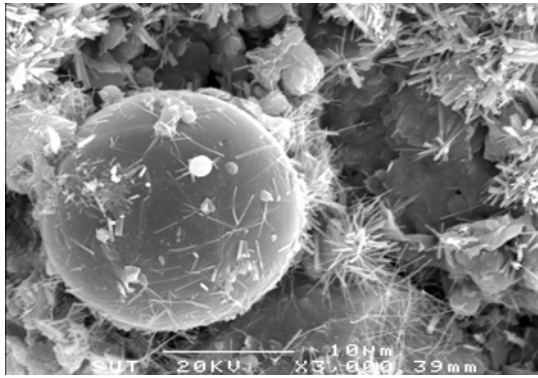


รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนการแทนที่ ที่อายุบ่มต่างๆ

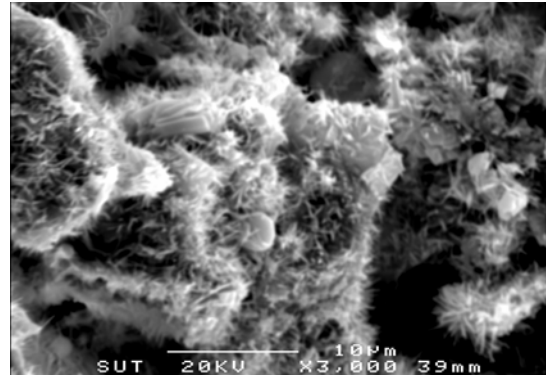
5.4 การวิเคราะห์ด้านโครงสร้างจุลภาค

5.4.1 ภาพถ่ายกำลังขยาย

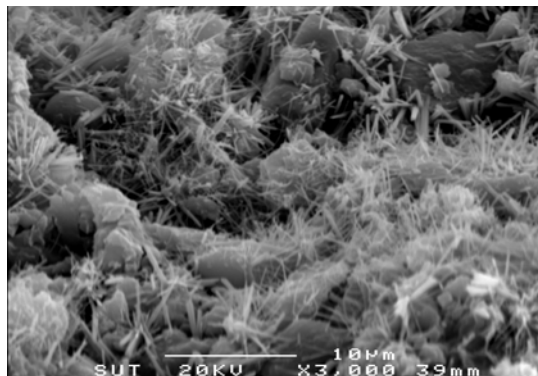
รูปที่ 5.7 ถึง 5.10 แสดงภาพถ่ายขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียดที่บดอัดที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม (20 เปอร์เซ็นต์) ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน ที่อัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ อนุภาคของเถ้าลอยปรากฏให้เป็นอย่างชัดเจนระหว่างกลุ่มอนุภาคดินและซีเมนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับอัตราส่วนการแทนที่ 30 เปอร์เซ็นต์ (C:F = 70:30) สำหรับทั้งสองอายุบ่ม (รูปที่ 5.7a, 5.8a, 5.9a และ 5.10a) ผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ที่พัฒนาขึ้นรอบอนุภาคปูนซีเมนต์เชื่อมต่อกับอนุภาคของเม็ดดิน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยเข้าด้วยกัน ที่อายุบ่มเดียวกัน อนุภาคของเถ้าลอยยิ่งเล็กก็ยิ่งอุดโพรงในมวลดินได้มาก นอกจากนี้ยังพบว่าแม้ว่าผิวของเถ้าลอยถูกเคลือบด้วยชั้นของผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ แต่ผิวของเถ้าลอยที่อายุบ่มต่างๆ ยังคงเรียบ สิ่งนี้บ่งบอกว่าเถ้าลอยเป็นวัสดุเฉื่อย ผลการวิจัยนี้แตกต่างจากผลการศึกษาทางด้านคอนกรีตเทคโนโลยี ซึ่งอิทธิพลของปฏิกิริยาปอซลานเห็นได้อย่างชัดเจนจากรอยกัดตามผิวของเถ้าลอย (Fraay et al., 1989; Berry et al., 1994; and Xu and Sarker, 1994; and Chindapasirt, 2005) ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ในคอนกรีตมีปริมาณสูงมากพอที่จะผลิต Ca(OH)_2 เพื่อใช้ในปฏิกิริยาปอซลาน จากผลการสังเกตนี้ เราสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาปอซลานแทบจะไม่มีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย



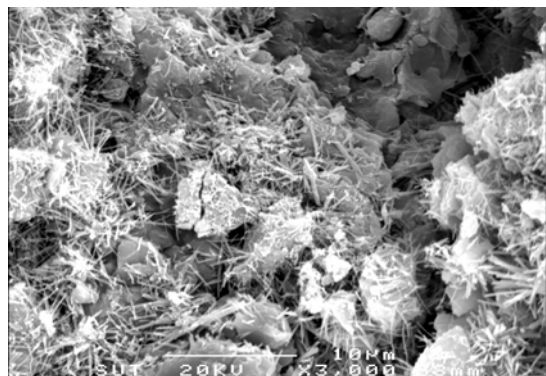
(a) 70:30



(b) 80:20

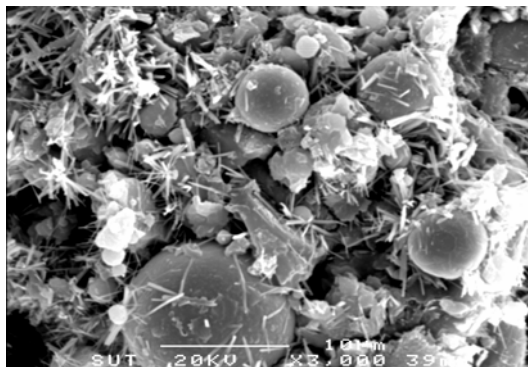


(c) 90:10

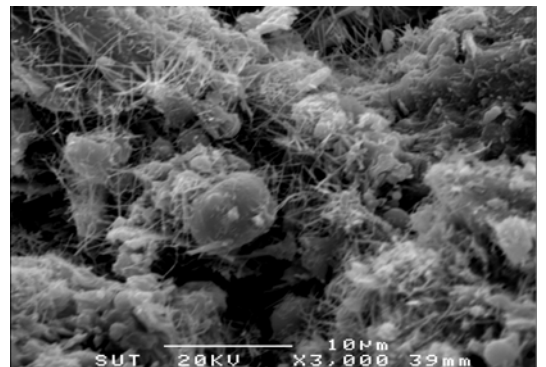


(d) 100:0

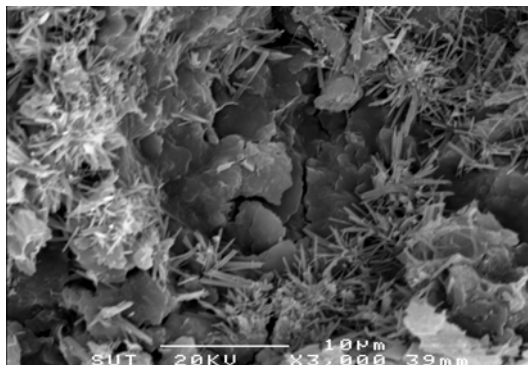
รูปที่ 5.7 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบที่อายุบ่ม 28 วัน



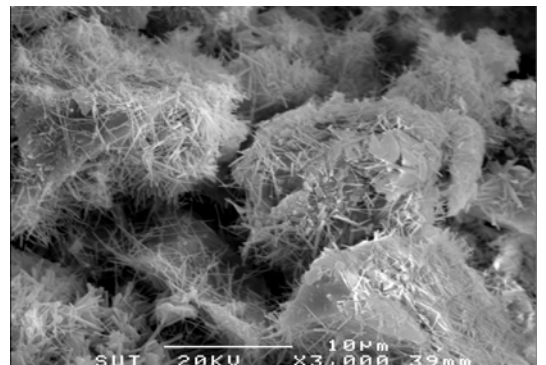
(a) 70:30



(b) 80:20

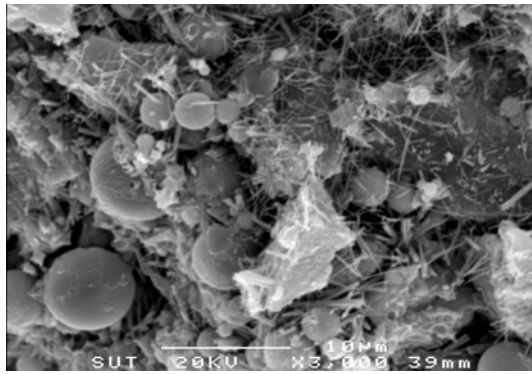


(c) 90:10

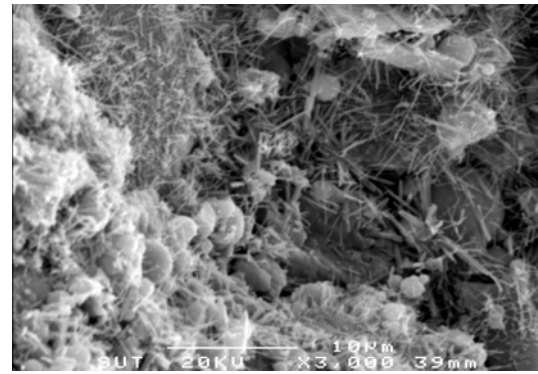


(d) 100:0

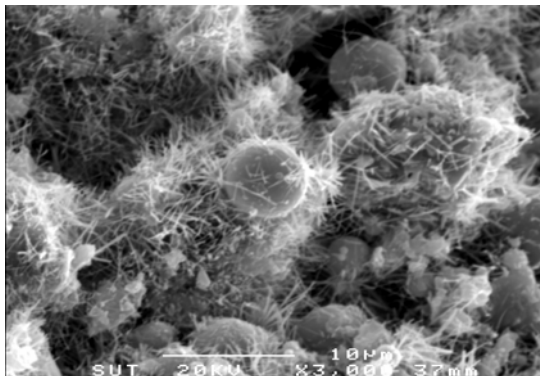
รูปที่ 5.8 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบที่อายุบ่ม 60 วัน



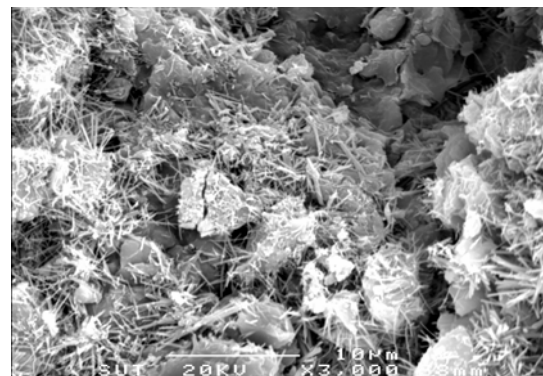
(a) 70:30



(b) 80:20

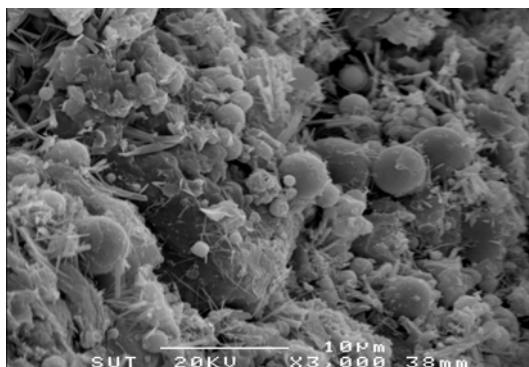


(c) 90:10

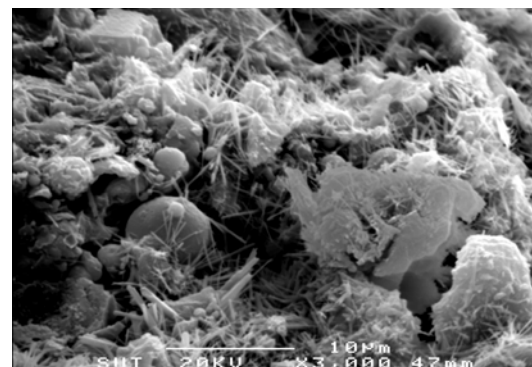


(d) 100:0

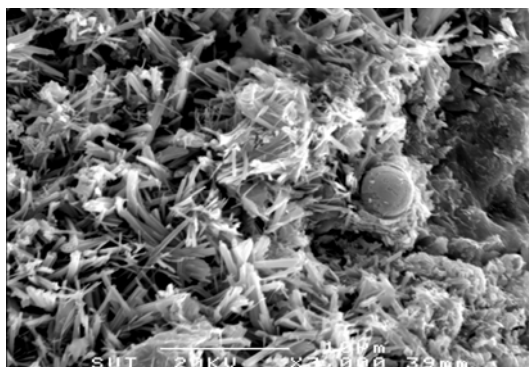
รูปที่ 5.9 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เส้นใยละเอียดที่อายุบ่ม 28 วัน



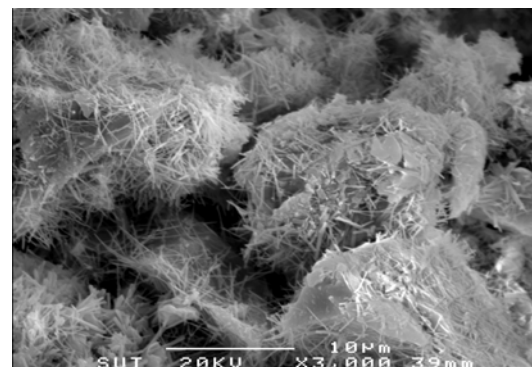
(a) 70:30



(b) 80:20



(c) 90:10

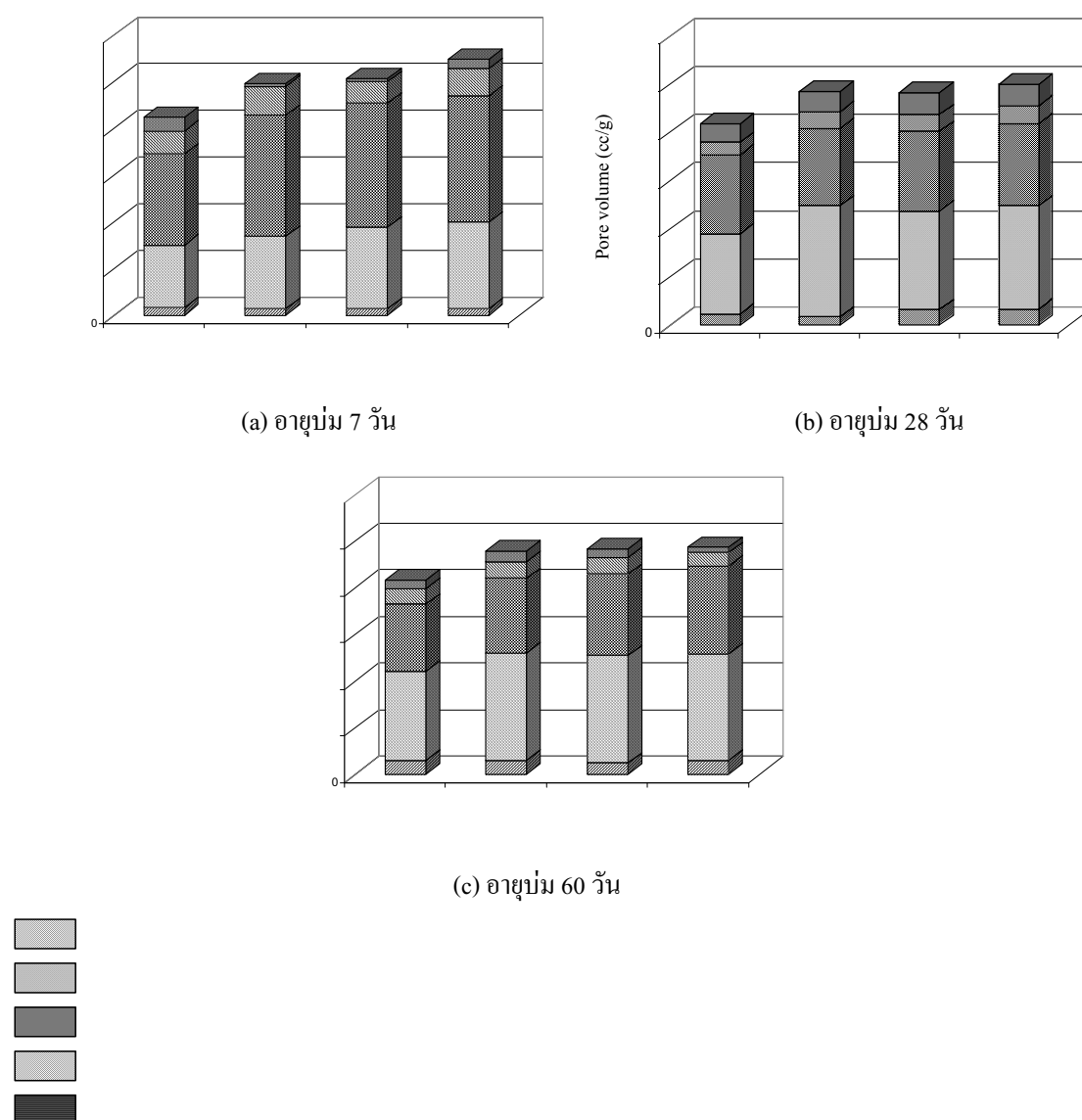


(d) 100:0

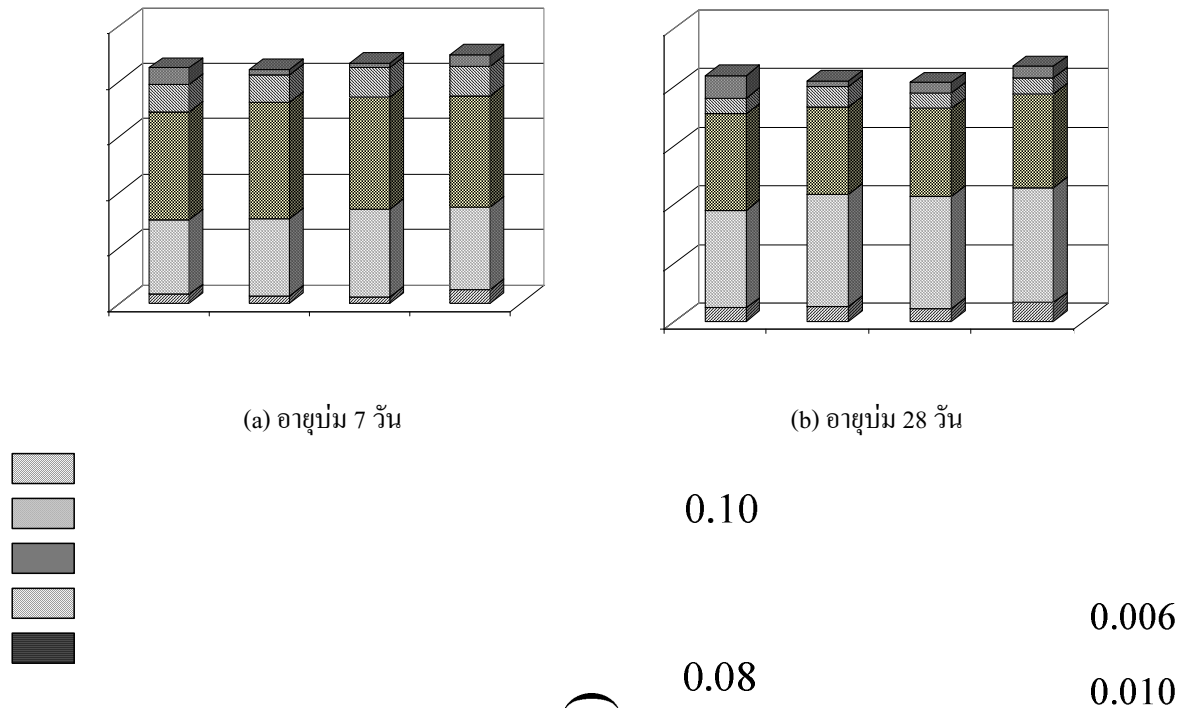
รูปที่ 5.10 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เส้นใยละเอียดที่อายุบ่ม 60 วัน

5.4.2 การกระจายขนาดโพรง

รูปที่ 5.11 และ 5.12 แสดงการกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียดที่อายุบ่มและอัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ จะเห็นได้ว่าที่อายุบ่มหนึ่ง การกระจายขนาดโพรงแปรผันตามความละเอียดของเถ้าลอย ดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดมีปริมาตรโพรงทั้งหมด (Total pore volume) ต่ำกว่า ปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับภาพถ่ายขยาย สำหรับดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบ ปริมาตรโพรงทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ เนื่องจากอนุภาคของเถ้าลอยหยาบมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของดินและปูนซีเมนต์ ดังนั้น การเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่จึงเป็นการเพิ่มมวลหยาบ ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของโพรง แต่สำหรับดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียด การกระจายขนาดโพรงมีลักษณะเกือบเหมือนกันสำหรับทุกอัตราส่วนการแทนที่ ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยละเอียดมีลักษณะคล้ายกัน อีกทั้ง D_{50} ยังมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5.11 การกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบที่อายุบ่มต่างๆ



รูปที่ 5.12 การกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดที่อายุบ่มต่างๆ

แม้ว่าการกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียดจะมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด แต่กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยทั้งสองชนิดมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่า แม้ว่าโพรงทั้งหมดของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบที่อัตราส่วนการแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณมากกว่าของดินซีเมนต์ เถ้าลอยมีค่าสูงกว่า สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยมิได้แปรผันตามการกระจายขนาดโพรงเพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตาม การกระจายขนาดโพรงอาจมีอิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและความคงทน เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น โพรงทั้งหมดและโพรงขนาดใหญ่ (>0.1 ไมครอน) มีปริมาณลดลง ขณะที่ โพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) มีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ไฮดรชันอุดโพรงในมวลดิน การเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ไฮดรชันจะอธิบายในหัวข้อถัดไป สิ่งที่น่าสนใจอีกประเด็นหนึ่งที่พบจากการศึกษานี้ก็คือ โพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) ของทั้งดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียดมีปริมาณสูงกว่าของดินซีเมนต์ ซึ่งหมายความว่าเถ้าลอยช่วยทำให้กลุ่มดินซีเมนต์ที่มีโพรงขนาดใหญ่มีปริมาณลดลง ส่งผลให้ปริมาณของโพรงขนาดเล็กเพิ่มขึ้น

5.4.3 ผลทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง

อิทธิพลของปริมาณความชื้นต่อปฏิกิริยาไฮดรชันแสดงดังตารางที่ 5.4 ซึ่งแสดงปริมาณ Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียดที่อัตราส่วนการแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุบ่ม 7 วัน ที่ปริมาณความชื้นต่างๆ ปริมาณ Ca(OH)_2 เกิดมากที่สุดที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 12 เท่าของปริมาณ

Pore diameter < 0.0

$0.01 \text{ micron} < \text{Pore}$

ความชื้นเหมาะสม สำหรับทั้งดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียด ซึ่งเป็นปริมาณความชื้นที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด ที่ปริมาณความชื้น 17 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาณความชื้นเหมาะสม) แม้ว่าหน่วยน้ำหนักแห้งของดินซีเมนต์เถ้าลอยจะมีค่าสูงที่สุด แต่ Ca(OH)_2 มีปริมาณน้อยกว่าที่ปริมาณความชื้น 1.2 ของปริมาณความชื้นเหมาะสม สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่านอกจากเฟบrikแล้ว พันธะเชื่อมประสานเป็นตัวแปรหลักที่ควบคุมกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย

ตารางที่ 5.4 Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ C: F = 90:10 ที่อายุบ่ม 7 วัน

Water content (%)	Fly ash	Weight loss (%)	Ca(OH)_2 (%)
14% (0.8 OWC)	CFA	1.59	6.52
17% (OWC)	CFA	1.63	6.72
20% (1.2 OWC)	CFA	1.70	6.97
24% (1.4 OWC)	CFA	1.62	6.67
14% (0.8 OWC)	OFA	1.57	6.43
17% (OWC)	OFA	1.61	6.61
20% (1.2 OWC)	OFA	1.65	6.77
24% (1.4 OWC)	OFA	1.55	6.35

ตารางที่ 5.5 แสดง Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสมสำหรับอัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่มต่างๆ จากตารางที่ 5.4 และ 5.5 เราสามารถสรุปได้ว่า Ca(OH)_2 มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามความละเอียด สำหรับทุกปริมาณความชื้น อัตราส่วนการแทนที่ และอายุบ่ม ที่ปริมาณความชื้นและอายุบ่มหนึ่ง Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียดลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ ก็ต่อเมื่ออัตราส่วนการแทนที่มีค่าเกินกว่าค่าๆ หนึ่ง ผลทดสอบนี้แตกต่างจากผลการศึกษาทางด้านคอนกรีตเทคโนโลยี ซึ่ง Ca(OH)_2 มีปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความละเอียดและอัตราส่วนการแทนที่ (Berry et al., 1989; Sybertz and Wiens, 1991; and Harris et al., 1987; and Chindapasirt, 2005 and 2006 เป็นต้น) เนื่องจากปฏิกิริยาปอสนาน ปริมาณ Ca(OH)_2 เกิดมากที่สุดที่ C:F = 90:10 สำหรับทั้งการปรับปรุงด้วยเถ้าลอยหยาบและละเอียด และสำหรับทุกอายุบ่ม เมื่ออัตราส่วนการแทนที่มีค่าเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ Ca(OH)_2 มีค่าลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ Ca(OH)_2 ที่อัตราส่วนการแทนที่ 20 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณใกล้เคียงกับที่อัตราส่วนการแทนที่ 0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวที่ว่าอัตราส่วนการแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ให้กำลังอัดสูงสุด และกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนการแทนที่ 0 และ 20 เปอร์เซ็นต์ มีค่าประมาณใกล้เคียงกันสำหรับทุกอายุบ่ม ดังนั้น เราสามารถสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันเป็นตัวควบคุมการพัฒนากำลังอัด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่มี

เงื่อนไขการผสม (ปริมาณซีเมนต์ อัตราส่วนการแทนที่ และอายุบ่ม) ต่างกัน จะมีค่าประมาณใกล้เคียงกัน ตลาดใดที่ผลิตภัณฑ์ไฮดรชันมีปริมาณเท่ากัน

จากภาพถ่ายขยายและผลการกระจายขนาดโพรง เราสามารถกล่าวได้ว่าเนื้อลอมเป็นวัสดุเหนียวที่ทำหน้าที่กระจายกลุ่มของอนุภาคดินซีเมนต์ที่รวมตัวกันเมื่อสัมผัสกับน้ำให้แตกตัวออกเป็นกลุ่มที่มีขนาดเล็กลง ด้วยเหตุนี้เอง ผิวสัมผัสที่ทำปฏิกิริยาไฮดรชันจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไฮดรชันมีปริมาณมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากปริมาณ Ca(OH)_2 ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของการกระจายตัว (Dispersion effect) (ตารางที่ 5.5)

ตารางที่ 5.5 Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์เนื้อลอมที่อัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่มต่างๆ

Curing time (days)	Replacement ratio C : F	Fly ash	Ca(OH)_2 (%)		
			Test	Hydration	Induced
7	100:0	-	6.67	6.67	0.00
	90:10	CFA	6.97	6.00	0.97
	80:20	CFA	6.79	5.34	1.45
	70:30	CFA	6.39	4.67	1.72
	90:10	OFA	6.77	6.00	0.77
	80:20	OFA	6.66	5.34	1.32
	70:30	OFA	6.12	4.67	1.45
28	100:0	-	6.79	6.79	0.00
	90:10	CFA	6.96	6.11	0.85
	80:20	CFA	6.81	5.43	1.38
	70:30	CFA	6.57	4.75	1.82
	90:10	OFA	6.83	6.11	0.72
	80:20	OFA	6.76	5.43	1.33
	70:30	OFA	6.46	4.75	1.70
60	100:0	-	6.82	6.82	0.00
	90:10	CFA	7.16	6.14	1.02
	80:20	CFA	6.92	5.46	1.46
	70:30	CFA	6.68	4.77	1.91
	90:10	OFA	6.89	6.14	0.75
	80:20	OFA	6.81	5.46	1.35
	70:30	OFA	6.53	4.77	1.76
90	100:0	-	7.07	7.07	0.00
	90:10	CFA	7.28	6.36	0.91
	80:20	CFA	6.94	5.66	1.28
	70:30	CFA	6.67	4.95	1.72
	90:10	OFA	7.07	6.36	0.71
	80:20	OFA	6.83	5.66	1.17
	70:30	OFA	6.62	4.95	1.67
120	100:0	-	7.08	7.08	0.00
	90:10	CFA	7.29	6.37	0.92
	80:20	CFA	6.96	5.66	1.30
	70:30	CFA	6.70	4.96	1.74
	90:10	OFA	7.09	6.37	0.72
	80:20	OFA	6.85	5.66	1.19
	70:30	OFA	6.68	4.96	1.72

ปริมาณ Ca(OH)_2 ที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถคำนวณได้จากผลต่างของ Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่เกิดจากอิทธิพลร่วม (อิทธิพลจากไฮเดรชันและการกระจายตัว) และจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน Ca(OH)_2 เนื่องจากอิทธิพลร่วมหาได้โดยตรงจากผลทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วงของดินซีเมนต์เถ้าลอย ในทำนองเดียวกัน Ca(OH)_2 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสามารถหาได้จากการทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วงของดินซีเมนต์ซึ่งมีปริมาณซีเมนต์เท่ากับของดินซีเมนต์เถ้าลอยเพื่อความง่าย Ca(OH)_2 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ใดๆ สามารถประมาณได้จาก Ca(OH)_2 ที่ทราบค่าของดินซีเมนต์ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ค่าหนึ่ง โดยการสมมติว่าการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณปูนซีเมนต์ (Sinsiri et al., 2006) ดังนั้น Ca(OH)_2 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (H) ที่อัตราส่วนการแทนที่ใดๆ ที่อายุบ่มค่าหนึ่งสามารถประมาณได้จาก

$$H = T \times \left(1 - \frac{F}{100} \right) \quad (5.1)$$

เมื่อ T คือ Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์ (อัตราส่วนการแทนที่เท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งหาได้จากการทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง และ F คืออัตราส่วนการแทนที่ในหน่วยเปอร์เซ็นต์

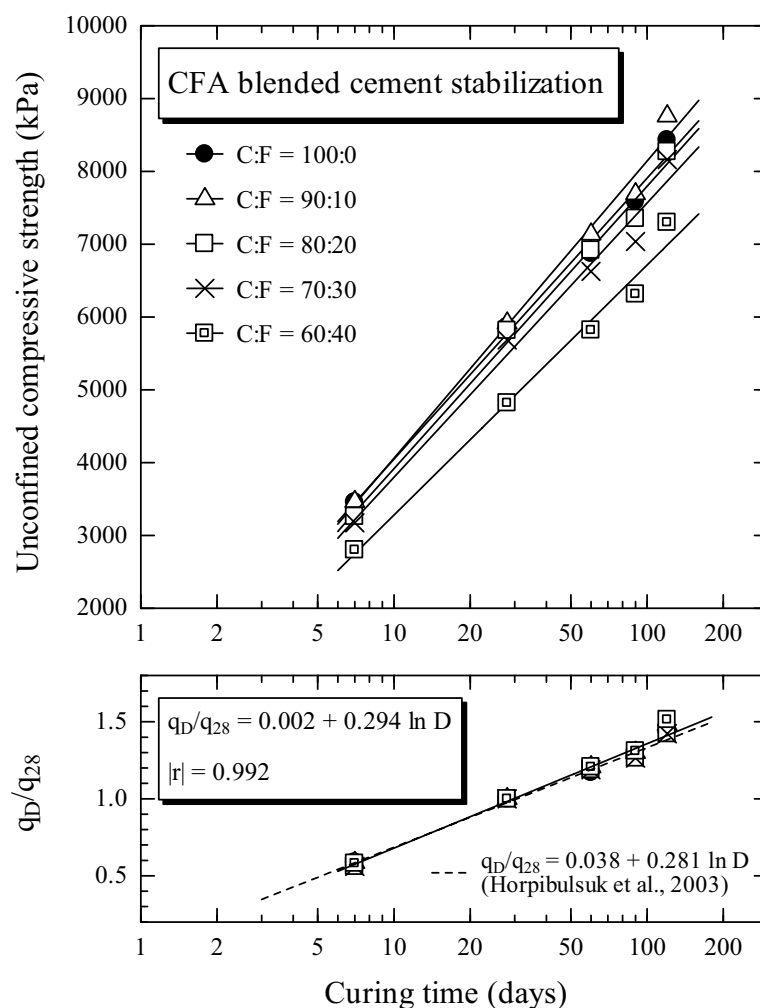
Sinsiri et al. (2006) ได้แสดงให้เห็นว่า Ca(OH)_2 ของซีเมนต์เพสเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่า Ca(OH)_2 ที่เกิดจากไฮเดรชัน (H) เสมอ เนื่องจากการใช้ Ca(OH)_2 ในปฏิกิริยาปออสลาน แต่ในกรณีของดินซีเมนต์เถ้าลอย Ca(OH)_2 เนื่องจากอิทธิพลร่วมมีค่าสูงกว่าของปฏิกิริยาไฮเดรชัน สำหรับทุกอัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่ม Ca(OH)_2 ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการกระจายตัวเพิ่มขึ้นตามความละเอียดของเถ้าลอยและอัตราส่วนการแทนที่ สำหรับทุกอายุบ่ม

5.5 การวิจารณ์ผลทดสอบ

ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และดินต่างเป็นวัสดุอนุภาค (Particulate material) ซึ่งประกอบด้วยหน่วยต่างๆ ที่อิสระต่อกัน วัสดุอนุภาคอาจจัดเป็นวัสดุที่ทำปฏิกิริยาหรือไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ สำหรับการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย ปูนซีเมนต์และดินเหนียวจัดเป็นวัสดุที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ เถ้าลอย ดินตะกอน และทราย จัดเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ เนื่องจากมี Specific surface ต่ำ และไม่มีประจุที่ผิว ซีเมนต์เพสจะทำหน้าที่เชื่อมต่อโครงสร้างดินซีเมนต์เถ้าลอยเข้าด้วยกัน โดยวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำจะถูกฝังอยู่ในโครงสร้าง (Embedded state)

เนื่องจากปูนซีเมนต์และดินเหนียวเป็นวัสดุที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ เมื่อดินเหนียวถูกผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำ อนุภาคดินเหนียวและปูนซีเมนต์จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาคขนาดใหญ่ เถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำสามารถกระจายกลุ่มของอนุภาคดินและซีเมนต์ให้เป็นกลุ่มที่มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้ดีขึ้น

รูปที่ 5.13 แสดงการพัฒนากำลังอัด (q_D/q_{28}) กับเวลาของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียด เมื่อ q_D คือ กำลังอัดที่อายุบ่ม D วัน และ q_{28} คือกำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเหมือนกันสำหรับทุกอัตราส่วนการแทนที่และสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นสูงที่เสนอโดย Horpibulsuk et al. (2003) ผลทดสอบนี้สนับสนุนบทสรุปที่ได้จากการสังเกตโครงสร้างจุลภาคที่ว่า การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์และดินซีเมนต์เถ้าลอยขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยที่ปฏิกิริยาปอสถานแทนจะไม่มีบทบาท



รูปที่ 5.13 การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดกับเวลา

จากการศึกษาี้ เราสามารถสรุปได้ว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยขึ้นอยู่กับอิทธิพลร่วม (ไฮเดรชันและการกระจายตัว) อิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันถูกควบคุมโดยปริมาณปูนซีเมนต์ ขณะที่อิทธิพลจากการกระจายตัวถูกควบคุมโดยปริมาณเถ้าลอย (อัตราส่วนการแทนที่) ที่อัตราส่วนการที่ 10 เปอร์เซนต์ อิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีมากที่สุด แต่อิทธิพลจากการกระจายตัวมีน้อยที่สุด (Ca(OH)_2 ที่เพิ่มขึ้นจากการกระจายตัวมีปริมาณต่ำสุด) ในทางตรงกันข้าม ที่อัตราส่วนการแทนที่ 40

เปอร์เซ็นต์ อิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮดรชันมีน้อยที่สุด แต่อิทธิพลจากการกระจายตัวสูงมีมากที่สุด แม้ว่าอิทธิพลจากการกระจายตัวที่อัตราส่วนการแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ จะมีน้อยที่สุด แต่กำลังอัดมีค่าสูงที่สุด และสามารถกล่าวได้ว่าอัตราส่วนการแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด ทั้งนี้ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ไฮดรชัน ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เนื่องจากอิทธิพลร่วมมีปริมาณมากที่สุด ดังนั้น เราสามารถกล่าวได้ว่านอกจากการประยุกต์ใช้เถ้าลอยในรูปแบบของวัสดุแทนที่ (Replacement material) แล้ว เรายังสามารถประยุกต์ใช้เถ้าลอยในรูปแบบของวัสดุช่วยเพิ่มการกระจายตัวของซีเมนต์ (Dispersing material) ที่เติมลงในปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มปฏิกิริยาไฮดรชัน และเพิ่มกำลังอัด ซึ่งอัตราส่วนการเพิ่มที่เหมาะสมนั้นจำเป็นต้องได้รับการศึกษาต่อไป

บทที่ 6

บทสรุป

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยสามบทหลัก อันได้แก่ กราฟการบดอัด: การวิเคราะห์และการประเมิน การวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์จากการพิจารณาโครงสร้างจุลภาค และอิทธิพลของเถ้าลอยต่อโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์เถ้าลอย บทสรุปของงานวิจัยนี้สามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

กราฟการบดอัด: การวิเคราะห์และการประเมิน

1. คุณสมบัติการบดอัด (ปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด) ของดินเม็ดละเอียดแปรผันตามชนิดจำกัดเหลว พิกัดพลาสติก และคุณสมบัติของดินแต่ละชนิด ดังนั้นจึงไม่สามารถสร้างสมการในการหาคุณสมบัติการบดอัดในพจน์ของขีดจำกัดเหลวหรือพิกัดพลาสติกเพียงอย่างเดียว อัตราส่วนปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC/OWC_{st}) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อกำจัดอิทธิพลของคุณสมบัติของดินแต่ละชนิด
2. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น (w) และระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (S) สามารถแสดงได้ดังนี้
$$w = A_d S^{B_d} \quad \text{สำหรับด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม}$$
$$w = A_w S^{B_w} \quad \text{สำหรับด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม}$$
พารามิเตอร์ A_d และ A_w เป็นตัวควบคุมหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ถ้า A_d และ A_w ที่สูงจะให้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่สูง พารามิเตอร์ B_d และ B_w แปรผันตามชนิดของดิน โดยไม่แปรผันตามพลังงานการบดอัด พารามิเตอร์ทั้งสี่นี้สามารถใช้ในการจำลองกราฟการบดอัดของดินบดอัดได้เป็นอย่างดี
3. งานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการอย่างง่ายในการทำนายกราฟการบดอัดของดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด ที่พลังงานการบดอัดใดๆ ด้วยผลการทำนายที่แม่นยำสูง โดยอาศัยเพียงหนึ่งผลทดสอบเท่านั้น
4. กราฟการบดอัดโอไฮโอปรับปรุง (Modified Ohio's curves) ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มีประโยชน์อย่างมากในการประมาณกราฟการบดอัดที่พลังงานการบดอัดเท่ากับ 296.3, 1346.6 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

การวิเคราะห์การพัฒนากำลั้งอัดของดินซีเมนต์จากการพิจารณาโครงสร้างจุลภาค

5. การปรับปรุงด้วยซีเมนต์ช่วยเพิ่มพันธะเชื่อมประสานระหว่างกลุ่มอนุภาคดินและลวดโพรง ในมวลดิน โพรงสามารถจำแนกออกได้เป็นสามประเภท ได้แก่ โพรงอากาศ (>10 ไมครอน) โพรงขนาดใหญ่ระหว่างกลุ่มอนุภาคดินซีเมนต์ ($10-0.1$ ไมครอน) และโพรงขนาดเล็กระหว่างกลุ่มอนุภาคดินซีเมนต์ (<0.1 ไมครอน)
6. กำลั้งอัดสูงสุดของดินเหนียวซีเมนต์อยู่ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม ที่สภาวะนี้ กำลั้งของพันธะเชื่อมประสานมีความแข็งแรงที่สุด แม้ว่าโพรงทั้งหมดจะมีปริมาตรสูงกว่าโพรงทั้งหมดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่ากำลั้งอัดของดินเหนียวซีเมนต์แปรผันอย่างมากกับพันธะเชื่อมประสาน
7. ที่อายุบ่มและปริมาณความชื้นค่าหนึ่ง การปรับปรุงดินสามารถแบ่งออกเป็นสามโซน ได้แก่ แอคทีฟ ล่าช้า และลดยาล้าง ในโซนแอคทีฟ ปริมาตรโพรงขนาดน้อยกว่า 0.1 ไมครอน ลดลงอย่างมากตามปริมาณซีเมนต์เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพันธะเชื่อมประสาน ในโซนล่าช้า ทั้งการกระจายขนาดโพรงและผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลั้งอัดน้อย ในโซนลดยาล้าง ปริมาณน้ำมีไม่เพียงพอสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชัน เนื่องจากมีปริมาณปูนซีเมนต์มากเกินไป จึงก่อให้เกิดกลุ่มอนุภาคดินซีเมนต์ขนาดใหญ่และแข็ง ดังนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาตรโพรงจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ กำลั้งอัดลดลง
8. ในช่วงเริ่มต้นของการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ โพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) มีปริมาตรลดลงอย่างมาก ขณะที่ ปริมาตรโพรงขนาดใหญ่ (>0.1 ไมครอน) เพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาตรโพรงขนาดใหญ่ที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอนุภาคปูนซีเมนต์ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ หลังจาก 7 วัน โพรงขนาดใหญ่และโพรงทั้งหมดมีปริมาตรลดลง ขณะที่ โพรงขนาดเล็กมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพันธะเชื่อมประสานทำหน้าที่อุดโพรงขนาดใหญ่ในโครงสร้าง

อิทธิพลของเถ้าลอยต่อโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์เถ้าลอย

9. เถ้าลอยมีผลต่อคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวน้อยมาก ขบวนการแลกเปลี่ยนประจุก่อให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มของดินเหนียว มีผลให้พิกัดพลาสติกลดลงและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงขึ้น ปริมาณซีเมนต์ยิ่งมาก (อัตราส่วนการแทนที่ยิ่งต่ำ) การรวมตัวเป็นกลุ่มก็ยิ่งมาก การรวมตัวเป็นกลุ่มมีอิทธิพลต่อขีดจำกัดเหลวเล็กน้อย ดังนั้น ปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินซีเมนต์เถ้าลอยจึงมีค่าใกล้เคียงกับของดินธรรมชาติ
10. ผิวของเถ้าลอยในดินซีเมนต์ยังคงเรียบแม้ว่าอายุบ่มและความละเอียดจะเพิ่มขึ้น สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอสถานเกิดขึ้นได้น้อยมาก ดังนั้น เถ้าลอยจึงถูกพิจารณาเป็นวัสดุเฉื่อย

ในงานปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ ปรากฏการณ์นี้แตกต่างจากงานคอนกรีตอย่างเห็นได้ชัด ซึ่ง Ca(OH)_2 จากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีปริมาณมากพอต่อการใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชัน

11. ผลการกระจายขนาดโพรงแสดงให้เห็นว่าโพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) ในดินซีเมนต์เถ้าลอยมีปริมาตรสูงกว่าในดินซีเมนต์ สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำทำหน้าที่กระจายกลุ่มอนุภาคดินซีเมนต์ขนาดใหญ่ (ที่มีโพรงขนาดใหญ่) ให้เป็นกลุ่มขนาดเล็ก (ที่มีโพรงขนาดเล็ก)
12. อิทธิพลของการกระจายตัวโดยเถ้าลอยช่วยเพิ่มผิวที่ทำปฏิกิริยากับน้ำและมีผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดียิ่งขึ้น ดังจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของ Ca(OH)_2 ตามอัตราส่วนการแทนที่ และความละเอียด การเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาไฮเดรชันกับเวลานอกจากจะสังเกตได้จากผลการทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ว่าง แล้วยังสังเกตได้จากผลการกระจายขนาดโพรง โพรงขนาดใหญ่ (>0.1 ไมครอน) และโพรงทั้งหมดมีปริมาตรลดลงตามเวลา สิ่งนี้แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่ทำหน้าที่อุดโพรง
13. การสังเกตเชิงมหภาคของผลการพัฒนากำลังอัดกับเวลาสนับสนุนบทสรุปที่ได้จากโครงสร้างจุลภาคที่ว่าพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลัก
14. ผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่เกิดขึ้นในดินซีเมนต์เถ้าลอยเป็นผลมาจากอิทธิพลร่วม (ปฏิกิริยาไฮเดรชันและการกระจายตัว) ปริมาณความชื้นที่ 1.2OWC และอัตราส่วนการแทนที่ 10 เปอร์เซนต์ เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงดิน ซึ่งเกิด Ca(OH)_2 ในปริมาณที่มากที่สุด

OUTPUT ของงานวิจัย

Accepted ISI Journal papers

Horpibulsuk, S., Katkan, W., and Apichatvullop, A. (2008), “An approach for assessment of compaction curves of fine-grained soils at various energies using a one point test. *Soils and Foundations*, 48(1): 115-126.

Horpibulsuk, S., Katkan, W., and Naramitkornburee, A. (2009), “Modified Ohio’s curves: A rapid estimation of compaction curves for coarse- and fine-grained soils”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM., 32(1) (in press).

Submitted ISI Journal papers

Horpibulsuk, S., Rasachon, Y., and Apichatvullop, A. “Analysis of strength development in cement stabilized silty clay from microstructural considerations” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE.

Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Rasachon, Y. “Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay”. *Soils and Foundations*.