ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา — **สาขา**

วิศวกรรมโยธา — **ภาควิชา**

เรื่อง การใช้กากดินขาวเพื่อพัฒนาซีเมนต์สังเคราะห์ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน

Utilization of Kaolin Waste to Produce Cements for Soft Clay Stabilization

นามผู้วิจัย นางสาวพิชชาอร ศรีพานิช

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(รองศาสตราจารย์ศุภกิจ นนทนานันท์, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภินิติ โชติสังกาศ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การใช้กากดินขาวเพื่อพัฒนาซีเมนต์สังเคราะห์ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน

Utilization of Kaolin Waste to Produce Cements for Soft Clay Stabilization

โดย

นางสาวพิชชาอร ศรีพานิช

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พิชชาอร ศรีพานิช 2556: การใช้กากดินขาวเพื่อพัฒนาซีเมนต์สังเคราะห์ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ศุภกิจ นนทนานันท์, D.Eng. 177 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากดินขาวและเถ้าลอยลิกไนต์ร่วมกับกากอุตสาหกรรมบางประเภท โดยทำการศึกษาคุณสมบัติกากดินขาวเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้น และศึกษาองค์ประกอบทางเคมีรวมถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยา ตลอดจนศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์โครงสร้างผลึก X-Ray Diffraction Analysis (XRD), X-Ray Florescense (XRF) และ Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อเลือกสัดส่วนผสมที่ดีที่สุดไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน

ผลการทดลองพบว่าสัดส่วนกากอุตสาหกรรมสำหรับปูนซีเมนต์สังเคราะห์ที่เหมาะสมประกอบด้วย เปลือกหอยแครง อยู่ในช่วง 40-50% , ผงหินปูน อยู่ในช่วง 15-20% , กากดินขาวประมาณ 15% และเถ้าลอยลิกไนต์ประมาณ 10% จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสารประกอบหลัก พบว่า มี C_3S และ C_2S เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 และมีความสามารถแข็งตัวได้ เมื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับน้ำ เกิดเป็น CSH และ $Ca(OH)_2$ ส่วนปริมาณ $Ca(OH)_2$ ลดลงตามอายุการบ่มเนื่องจากถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ CSH เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดมอร์ต้าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม สำหรับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์จากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเชื่อมประสานและอายุการบ่ม ปริมาณความชื้นในมวลดินลดลงอย่างชัดเจนในช่วงต้นของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและมีอัตราคงที่ในช่วงการบ่มต่อมา เกิดเป็น CSH และ $Ca(OH)_2$ นอกจากนี้ยังพบว่า กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารของ CSH ที่เพิ่มขึ้นในระยะยาวซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้ CSH มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ $Ca(OH)_2$ มีแนวโน้มลดลง โดยค่ากำลังรับแรงอัดที่สารเชื่อมประสาน 150, 200 และ 250 kg/m^3 ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน เป็น 0.28, 3.87, 10.13 และ 0.37, 12.21, 21.97 ksc. ตามลำดับ

_____ _____ ___ / ___ / ____

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Pitchaorn Sripanich 2013: Utilization of Kaolin Waste to Produce Cements for Soft Clay Stabilization. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Supakij Nontananandh, D.Eng. 177 pages.

The research attempts to produce the cement burned from kaolin waste, lignite fly ash and combined with industrial wastes. The study includes characterization of Kaolin waste as a substrate for producing cement and the chemical composition as well as the reaction mechanism. The composition of the cement crystal structure was studied using analysis techniques of X-Ray Diffraction Analysis (XRD), X-Ray Florescence (XRF) and Scanning Electron Microscope (SEM), to select the best composition to improve the quality of soft clay.

The experimental results showed that the most suitable proportion of good quality cement from industry waste is the combination of the ask shell in the range 40-50%, lime powder in the range of 15-20%, kaolin waste about 15% and about 10% fly ash. The main chemical composition in the cement such as C_3S and C_2S, is similar to ordinary Portland cement. The paste sample has self-hardening property cement with hydration reaction with water as CSH and $Ca(OH)_2$. The product concentration of $Ca(OH)_2$ was decreased in pozzolanic reaction with the curing time, which makes products such as CSH increased. As a result the mortar compressive strength increased with curing time. The results of the uniaxial compressive strength of soil cement from industry waste showed that the cement compressive strength increased with increasing of cementitious material and curing time. Moisture content in soil decreased significantly in the early part of the hydration reaction and constant rate during the curing time of the CSH and $Ca(OH)_2$. It has also been found that compressive strength tends to increase with increasing concentration of CSH in long term as a result of pozzolanic reaction, the CSH has increase and $Ca(OH)_2$ tended to decrease. The compressive strength of the cementitious material 150, 200 and 250 kg/m^3 at 28 and 90 days were 0.28, 3.87, 10.13 and 0.37, 12.21, 21.97 ksc, respectively.

_____ _____ ___ / ___ / __

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ นนทนานันท์ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้ความเมตตากรุณาอย่างมากในการให้คำปรึกษาในการเรียน การศึกษาค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ อีกทั้งการอบรมสั่งสอนชี้แนะแนวทางการใช้ชีวิตทั้งโลกและทางธรรม อันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยยิ่งนัก

พร้อมกันนี้กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภินิติ โชติสังกาศ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนาดล คงสมบูรณ์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก และ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวเลข วณิชเวทิน ประธานกรรมการดำเนินการสอบ ที่ได้ให้ความกรุณา คำแนะนำ และทำการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงฤดี ฉายสุวรรณ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ ที่ได้มอบความรู้อีกหนึ่งแขนงสำคัญ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ในงานวิจัยเป็นอย่างมาก

ขอบคุณโรงงานกระเบื้องเคลือบเขลางค์ จังหวัดลำปาง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กากดินขาว ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม จังหวัดลำปาง และบริษัทปูนซีเมนต์ไทย (ท่าหลวง) จำกัด จังหวัดสระบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบที่จำเป็นในงานวิจัยนี้ อีกทั้งขอบคุณเพื่อนร่วมรุ่น พี่และน้อง สาขาวิศวกรรมปฐพีทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือตลอดมา อีกทั้งเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดี

กราบขอบพระคุณพ่อไพรัช แม่อรทัย ผู้ให้กำเนิดและครอบครัวศรีพานิชทุกท่าน พร้อมมอบความรัก ความอบอุ่น การเลี้ยงดูอบรมสอนสั่งที่ดี และขอบคุณคุณธนูศักดิ์ อุ่นชาติ ที่คอยเป็นกำลังใจให้เสมอมา ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใด ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมและเป็นกำลังใจของผู้วิจัยตลอดมาในทุกเรื่องจึงทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์

พิชชาอร ศรีพานิช

มีนาคม 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	29
อุปกรณ์	29
วิธีการ	31
ผลและวิจารณ์	48
สรุปและข้อเสนอแนะ	101
สรุป	101
ข้อเสนอแนะ	102
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	103
ภาคผนวก	108
ภาคผนวก ก การคำนวณไฮเดรชั่น, อัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ และปริมาณน้ำในมวลดินซีเมนต์คิดเป็นโมลโมเลกุล	109
ภาคผนวก ข SEM กากอุตสาหกรรม ซีเมนต์เพสต์และดินซีเมนต์	121
ภาคผนวก ค XRD กากอุตสาหกรรม ซีเมนต์เพสต์และดินซีเมนต์	151
ภาคผนวก ง ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ดินซีเมนต์	158
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	177

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	5
2	คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	13
3	ข้อกำหนดทางเคมีและทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน	19
4	คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดินขาว	20
5	การพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานจากดินขาวเผา	23
6	ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618	25
7	องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2528 – 2544	25
8	ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบวิธี XRD	36
9	ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบวิธี XRF	37
10	เกณฑ์กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าตามมาตรฐาน ASTM C-109	39
11	ค่าความคลาดเคลื่อนของอายุที่ยอมให้ของซีเมนต์มอร์ต้า	40
12	คุณสมบัติทางกายภาพของกากดินขาว	48
13	ค่าความละเอียดและความถ่วงจำเพาะของกากอุตสาหกรรม	49
14	องค์ประกอบทางเคมีจากกากอุตสาหกรรม	54
15	การคำนวณสัดส่วนผสมของกากอุตสาหกรรมเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้น	55
16	การคำนวณเกณฑ์การคัดเลือกสัดส่วนกากอุตสาหกรรม	56
17	น้ำหนักเฉลี่ยของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผา	57
18	องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี X-Ray Florescence Spectrometry (XRF) ของวัสดุก้อนสีเทาดำที่ได้จากการเผา	58
19	ปริมาณออกไซด์ของปูนซีเมนต์ที่แนะนำโดย M.L. Gambhir (2004)	59
20	สารประกอบหลักจำพวก C_3S และ C_2S ของสารเชื่อมประสาน	60
21	ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า ที่อายุการบ่มต่างๆ	62
22	ปริมาณสารประกอบหลัก C_3S และ C_2S ของซีเมนต์เพสต์	67
23	ปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH ของซีเมนต์เพสต์	67
24	ปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก $Ca(OH)_2$ ของซีเมนต์เพสต์	68

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
25	กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่มเมื่อเปรียบเทียบกับ OPC และ GCM	76
26	ปริมาณน้ำในดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	81
27	แนวโน้มของปริมาณน้ำในมวลดินซีเมนต์	82
28	ปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH ของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	86
29	ปริมาณสารประกอบหลัก C_3S และ C_2S ของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	87
30	ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ $Ca(OH)_2$ ของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่มต่างๆ	89

ตารางผนวกที่

ก1	การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C1	110
ก2	การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C2	111
ก3	การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C3	112
ก4	การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C4	113
ก5	การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C5	114
ก6	การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C6	115
ก7	การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C7	116
ก8	การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C8	117
ก9	การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C9	118
ก10	การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C10	119
ก11	การคำนวณปริมาณน้ำในมวลดินซีเมนต์คิดเป็นโมลโมเลกุล	120

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRD ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	6
2	โครงสร้างระดับจุลภาคโดยใช้เทคนิค SEM ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	6
3	กำลังรับแรงของดินผสมจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมระหว่างเถ้าลอยลิกไนต์กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซต์	7
4	กำลังรับแรงอัดแกนเดียวระหว่างดินเหนียวกับสารเชื่อมประสานที่ปริมาณ 250 kg/m^3	8
5	ค่ากำลังรับแรงอัดระหว่างดินลมหอบกับกากอุตสาหกรรมเผาและดินลมหอบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ 1	9
6	กำลังรับแรงอัดของดินเจือโลหะหนักที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	11
7	กระบวนการเกิด Calcium Silicate Hydrate (CSH gel)	11
8	กำลังรับแรงอัดคอนกรีตพรุนที่สัดส่วนผสมต่างๆ	12
9	การพัฒนากำลังของสารประกอบหลัก	16
10	ปฏิกิริยาทางเคมีของซีเมนต์และดิน	17
11	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคของปูนซีเมนต์	17
12	ลักษณะอนุภาคของดินขาวเผา โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)	24
13	บริเวณบ่อทิ้งกากดินขาวหลังโรงงานเซรามิก อ.เมือง จ.ลำปาง	31
14	ลำดับขั้นตอนการวิจัย	32
15	เตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง 1700°c	34
16	รูปแบบการเผาและช่วงเวลาต่างๆ	35
17	สารตั้งต้นในการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์	35
18	เครื่องบด ROCKLABS – sample preparation equipment และหม้อบด	36
19	เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย X-Ray Diffracttometer หรือ XRD	36
20	เครื่องทดสอบด้วยเทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ X-Ray Florescence Spectrometer หรือ XRF	37

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	เครื่องมือศึกษาโครงสร้างภายในระดับจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning Electron Microscope หรือ SEM	38
22	การทดสอบคุณสมบัติความคงทนในเบื้องต้น	38
23	การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าด้วยเครื่องกวนผสมดินซีเมนต์ (Horbart Mixer)	39
24	การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ของมอร์ต้า	40
25	ตัวอย่างดินซีเมนต์ที่เตรียมการทดสอบ Unconfined Compression Test	41
26	การกระจายขนาดเม็ดดินของกากดินขาว	49
27	การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRD ของกากดินขาว	50
28	การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRD ของเถ้าลอย	50
29	การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRD ของเปลือกหอยแครง	51
30	การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRD ของผงหินปูน	51
31	การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของกากอุตสาหกรรม	53
32	รูปแบบและระยะเวลาการเผาที่ใช้ในงานวิจัย	56
33	ตัวอย่างสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเผาสัดส่วนผสม	57
34	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์โดยวิธี X-Ray Diffraction (XRD)	60
35	การทดสอบการคงตัว (slaking) ของซีเมนต์เพสต์	61
36	แนวโน้มกำลังรับแรงอัดมอร์ต้าที่อายุการบ่มต่างๆ	63
37	ลักษณะการวิบัติของซีเมนต์มอร์ต้า C1 ที่อายุการบ่มต่างๆ	63
38	ลักษณะการวิบัติของซีเมนต์มอร์ต้า C2 ที่อายุการบ่มต่างๆ	64
39	ลักษณะการวิบัติของซีเมนต์มอร์ต้า C3 ที่อายุการบ่มต่างๆ	64
40	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRD ของซีเมนต์เพสต์ C1	65
41	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRD ของซีเมนต์เพสต์ C2	66
42	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRD ของซีเมนต์เพสต์ C3	66
43	ปริมาณสารประกอบหลัก C_3S ตามอายุการบ่มของซีเมนต์เพสต์ C1, C2 และ C3	69

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
44	ปริมาณสารประกอบหลัก C_2S ตามอายุการบ่มของซีเมนต์เพสต์ C1, C2 และ C3	69
45	ปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH ตามอายุการบ่มของซีเมนต์เพสต์ C1, C2 และ C3	70
46	ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ $Ca(OH)_2$ ตามอายุการบ่มของซีเมนต์เพสต์ C1, C2 และ C3	70
47	ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH กับกำลังรับแรงอัดมอร์ต้า	71
48	โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย × 5000)	71
49	โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย × 3000)	72
50	โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 14 วัน (กำลังขยาย × 5000)	72
51	โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 28 วัน (กำลังขยาย × 5000)	73
52	โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 60 วัน (กำลังขยาย × 3000)	73
53	โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 90 วัน (กำลังขยาย × 3000)	74
54	องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวอ่อนก่อนปรับปรุงคุณภาพโดยวิธี XRD	75
55	โครงสร้างระดับจุลภาคของดินเหนียวก่อนปรับปรุงคุณภาพโดยวิธี SEM	75
56	ลักษณะการวิบัติของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่มต่างๆ	77
57	ลักษณะการวิบัติของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่มต่างๆ	78
58	ลักษณะการวิบัติของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่มต่างๆ	79
59	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	80
60	ปริมาณน้ำในดินซีเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอายุการบ่มต่างๆ	81
61	แนวโน้มปริมาณน้ำในมวลดินซีเมนต์	82
62	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารประกอบ C_3S และปริมาณน้ำคิดเป็นโมล	83
63	การวิเคราะห์ปริมาณสารผลิตภัณฑ์โดยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) ของ WBC 150	84
64	การวิเคราะห์ปริมาณสารผลิตภัณฑ์โดยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) ของ WBC 200	84
65	การวิเคราะห์ปริมาณสารผลิตภัณฑ์โดยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) ของ WBC 250	85
66	ปริมาณสารประกอบผลิตภัณฑ์หลัก CSH ตามปริมาณสารเชื่อมประสานที่อายุการบ่มต่างๆ	87
67	ปริมาณสารประกอบหลัก C_3S ตามอายุการบ่ม	88
68	ปริมาณสารประกอบหลัก C_2S ตามอายุการบ่ม	88

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
69	ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ $Ca(OH)_2$ ตามอายุการบ่มของดินซีเมนต์ WBC 150	90
70	ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ $Ca(OH)_2$ ตามอายุการบ่มของดินซีเมนต์ WBC 200	90
71	ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ $Ca(OH)_2$ ตามอายุการบ่มของดินซีเมนต์ WBC 250	91
72	โครงสร้างระดับจุลภาคของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุบ่มต่างๆ	92
73	โครงสร้างระดับจุลภาคของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุบ่มต่างๆ	95
74	โครงสร้างระดับจุลภาคของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุบ่มต่างๆ	98

ภาพผนวกที่

ข1	การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของกากดินขาว	122
ข2	การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของเถ้าลอยแม่เมาะ	123
ข3	การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของเปลือกหอยแครง	124
ข4	การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของผงหินปูน	125
ข5	การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินเหนียวอ่อน ก่อนปรับปรุงคุณภาพ	126
ข6	การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 3 วัน	127
ข7	การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 7 วัน	128
ข8	การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 14 วัน	129

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่ **หน้า**

ข9 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 28 วัน 130

ข10 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 60 วัน 131

ข11 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 90 วัน 132

ข12 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 3 วัน 133

ข13 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 7 วัน 134

ข14 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 14 วัน 135

ข15 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 28 วัน 136

ข16 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 60 วัน 137

ข17 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 90 วัน 138

ข18 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 3 วัน 139

ข19 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 7 วัน 140

ข20 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 14 วัน 141

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่ **หน้า**

ข21	การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 28 วัน	142
ข22	การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 60 วัน	143
ข23	การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 90 วัน	144
ข24	การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 3 วัน	145
ข25	การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 7 วัน	146
ข26	การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 14 วัน	147
ข27	การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 28 วัน	148
ข28	การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 60 วัน	149
ข29	การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 90 วัน	150
ค1	การทดสอบ XRD ของกากดินขาว	152
ค2	การทดสอบ XRD ของเถ้าลอย	152
ค3	การทดสอบ XRD ของเปลือกหอยแครง	153
ค4	การทดสอบ XRD ของผงหินปูน	153
ค5	การทดสอบ XRD ของดินเหนียวอ่อนก่อนปรับปรุงคุณภาพ	154

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่ **หน้า**

ค6	การทดสอบ XRD ของปูนซีเมนต์	154
ค7	การทดสอบ XRD ของซีเมนต์เพสต์ C1	155
ค8	การทดสอบ XRD ของซีเมนต์เพสต์ C2	155
ค9	การทดสอบ XRD ของซีเมนต์เพสต์ C3	156
ค10	การทดสอบ XRD ของดินซีเมนต์ WBC 150	156
ค11	การทดสอบ XRD ของดินซีเมนต์ WBC 200	157
ค12	การทดสอบ XRD ของดินซีเมนต์ WBC 250	157
ง1	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 3 วัน	159
ง2	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 3 วัน	160
ง3	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 3 วัน	161
ง4	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 7 วัน	162
ง5	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 7 วัน	163
ง6	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 7 วัน	164
ง7	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 14 วัน	165
ง8	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 14 วัน	166
ง9	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 14 วัน	167
ง10	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 28 วัน	168
ง11	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 28 วัน	169
ง12	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 28 วัน	170
ง13	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 60 วัน	171
ง14	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 60 วัน	172
ง15	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 60 วัน	173
ง16	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 90 วัน	174
ง17	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 90 วัน	175
ง18	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 90 วัน	176

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การใช้กากดินขาวเพื่อพัฒนาซีเมนต์สังเคราะห์ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน

Utilization of Kaolin Waste to Produce Cements for Soft Clay Stabilization

คำนำ

ปัญหาด้านการจัดการขยะอุตสาหกรรมทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่อันเนื่องมาจากขยายตัวของสังคมไทยในปัจจุบันที่ยังขาดประสิทธิภาพ ส่งผลต่อปัญหาต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นพื้นที่ที่ไม่เพียงพอต่อการกำจัดขยะ อีกทั้งการเผชิญกับปัญหามลพิษทางอากาศ จากการเผาขยะที่ส่งผลเสียต่อสุขภาพของผู้อาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียง เหล่านี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของปัญหาทั้งหมดที่กล่าวมา ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงปัญหาด้านการกำจัดขยะอุตสาหกรรมที่ควรลดปริมาณขยะลงโดยการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งในอุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้ดินขาวเป็นวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิต จึงทำให้มีแนวคิดที่จะนำเอากากดินขาวมาใช้ประโยชน์ได้อีกครั้งหนึ่ง ในงานวิจัยที่ผ่านมามีการปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังของกากดินขาวด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นทางในงานก่อสร้างถนน (อรุณเดช, 2555)

แนวคิดในการศึกษาและพัฒนาปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากขยะอุตสาหกรรมในด้านการรักษาสภาพแวดล้อมตามแนวคิดทางวิศวกรรมปฐพีสิ่งแวดล้อม (Nonthananandh et al, 1991) มีการนำกากอุตสาหกรรมต่างๆ คือ เปลือกหอยแครง ฝุ่นผงหินปูน ตะกอนประปา และปูนขาว เพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ (ศุภกิจและคณะ, 2552) ที่สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างต่างๆ อาทิเช่น เป็นวัสดุเชื่อมประสานในการผลิตคอนกรีตพรุนโดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์ร่วมด้วย (เกียรติคุณและคณะ, 2554) รวมถึงการประยุกต์ใช้กับปูนขาวเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรม (ศุภกิจและศรัณรัตน์, 2549)

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมจากกากดินขาว เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ฯให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยจำเป็นจะต้องศึกษาคุณสมบัติหลักของกากดินขาวให้เป็นไปตามเกณฑ์ “NICE Criteria” (Nonthananandh *et al*, 1991) รวมทั้งศึกษากลไกและองค์ประกอบทางเคมีของขั้นตอนกระบวนการผลิตสารเชื่อมประสาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ที่ได้จากกากดินขาว เพื่อดูคุณสมบัติที่สอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อีกทั้งมีการประยุกต์ใช้กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ในการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของสารเชื่อมประสาน เหล่านี้ล้วนเป็นหนึ่งทางเลือกในการใช้ประโยชน์จากกากอุตสาหกรรม เพื่อนำไปใช้ในงานก่อสร้างจริงซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้วัสดุที่มิตรกับสิ่งแวดล้อม นำมาซึ่งคุณภาพชีวิตของคนในประเทศชาติต่อไปในอนาคต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. พัฒนาปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากดินขาวร่วมกับกากอุตสาหกรรมบางประเภท

2. ศึกษาการพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อน

ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติของกากดินขาวเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ โดยใช้เกณฑ์การพิจารณาเลือกองค์ประกอบของสารตั้งต้น ได้แก่ ค่า Hydration Modulus (MH), Lime Saturation Factor (LSF), Silica Ratio (SR) และ Alumina Ratio (AR) เพื่อให้เกิดสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์สังเคราะห์เทียบเคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีเพื่อประเมินสารประกอบหลักที่มีในปูนซีเมนต์สังเคราะห์ และอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นการทำลายตัวอย่าง (X-Ray Diffracttometer หรือ XRD) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในรูปออกไซด์ด้วยเทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Florescence Spectrometry หรือ XRF) และศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope หรือ SEM)

3. ศึกษาศักยภาพของการใช้ปูนซีเมนต์สังเคราะห์เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยทดสอบด้านกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 3 – 90 วัน ในห้องปฏิบัติการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

ดินเป็นวัสดุที่เกิดจากการผุกร่อน แตกสลายของหินตามธรรมชาติ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามขนาดเม็ดดิน ได้แก่ ดินเม็ดหยาบ (Coarse Grained Soils) และดินเม็ดละเอียด (Fine Grained Soils) ดินเหนียวจัดเป็นดินเม็ดละเอียด ขนาดไม่เกิน 0.02 มิลลิเมตร คุณสมบัติที่สำคัญของดินประเภทนี้คือ มีความเป็นพลาสติกสูง มีความเหนียวจากแรงดึงดูดของประจุไฟฟ้า ในทางวิศวกรรมจัดว่าดินเหนียวอ่อนมีคุณสมบัติด้านการรับกำลังต่ำ และใช้ระยะเวลานานในการทรุดตัว (สมศักดิ์ และ สุทธิศักดิ์, 2550)

Moh *et al.* (1969) กล่าวว่า ดินเหนียวอ่อนที่เป็นดินตะกอนปากแม่น้ำในพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่างว่า ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ หรือ Bangkok Clay ดินบริเวณนี้มีความหนาของชั้นดินประมาณ 10 – 18 เมตร ประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ

ส่วนแรก Marine Clay เม็ดดินมีความละเอียดมากกว่าส่วนหยาบ มีซากพืชซากสัตว์มาก และมีโครงสร้างดินเป็นลักษณะกระจัดกระจาย ส่วนที่สองคือ Inter Deposited Clay เป็นดินตามชายฝั่งทะเล มีปริมาณเกลือแร่ในดินน้อยกว่า Marine Clay จึงมีลักษณะโครงสร้างมวลดินแบบกระจัดกระจายน้อยกว่าด้วย และส่วนสุดท้ายคือ Weathered Clay เป็นดินที่ผ่านกระบวนการทางธรรมชาติเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติดินต้นกำเนิด ส่งผลต่อกำลังมากขึ้นกว่าดินทั้งสองส่วนที่ได้กล่าวมา

ปณุฑ (2545) ได้จัดตั้งระบบฐานข้อมูลชั้นดิน GeSEP (Geotechnical Subsoil Explorer Project) ซึ่งรวบรวมข้อมูลจากการการเจาะสำรวจทางธรณีเทคนิคในบริเวณกรุงเทพฯ พบว่า ชั้นดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็ง พบที่ความลึกประมาณ 4.0 – 25.0 เมตรจากระดับผิวดินและชั้นทรายแน่นมากพบที่ระดับความลึกประมาณ 27.3 เมตรจากระดับผิวดิน เมื่อศึกษาข้อมูลค่าการตอก SPT (N) พบว่า มีความสัมพันธ์ระดับปานกลางกับหน่วยน้ำหนักประสิทธิผล (σ'_v) ตามสมการที่ 1 และยังสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในดินเหนียว (S_u) ตามสมการที่ 2 อีกด้วย

$$N = 0.127 \times \sigma'_v \quad (1)$$

$$S_u = 0.5 \times N \quad (2)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โดยที่ N = Blow Count (SPT)

σ'_v = Effective principal stress

S_u = Undrained shear strength

ณพล (2554) ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ณ สนามบินสุวรรณภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 1 จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction หรือ XRD) พบว่า ดินเหนียวประกอบด้วยแร่ดินเหนียวประเภท Montmorilonite, Illite และ Kaolinite แสดงในภาพที่ 1 และศึกษาโครงสร้างดินเหนียวในระดับจุลภาคด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) พบว่า มีลักษณะเป็นแผ่นแบนคล้ายใบไม้ ซึ่งแสดงในภาพที่ 2

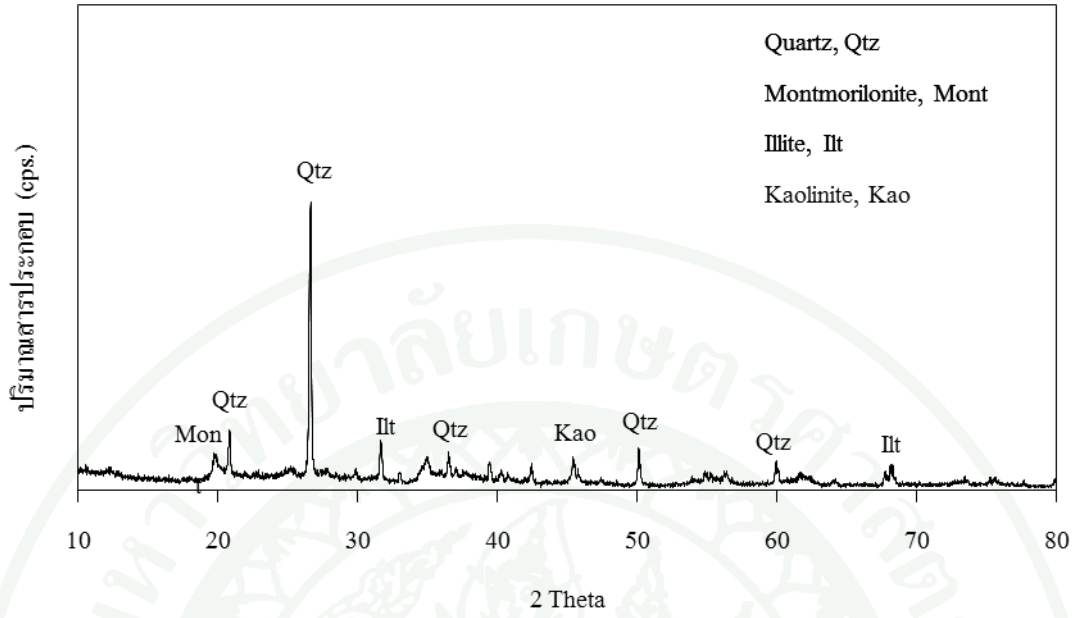
ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของกากดินขาว	ผลการทดสอบ
Natural Water Content (%)	101.43
Liquid Limit, LL (%)	99.86
Plastic Limit, PL (%)	39.71
Plastic Index, PI (%)	60.15
Specific Gravity, Gs	2.69
Total Density (t/m^3)	1.51
UCS	CH
AASHTO	A – 7 – 5

ที่มา: ณพล (2554)

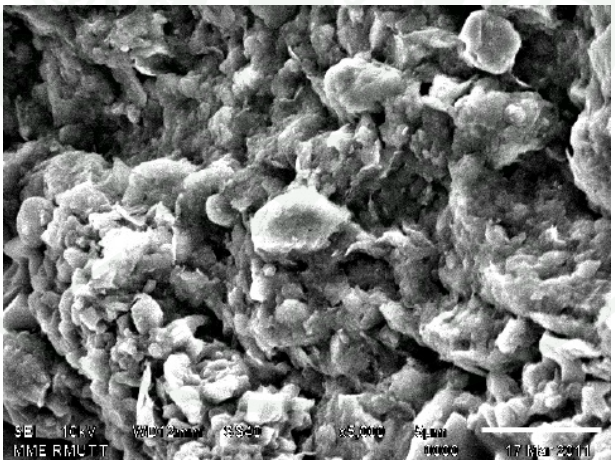
สุทธิศักดิ์ และ วิชาญ (2547) ทำการศึกษาพฤติกรรมระยะยาวของการทรุดตัวของถนนบนดินอ่อนเนื่องจากน้ำหนักจร พบว่า การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์หรือเสาเข็มคอนกรีตถ่ายแรงสู่ชั้นดินแข็งแรงดีกว่าวิธีการเร่งการทรุดตัว เนื่องจากโอกาสเกิดแรงดันน้ำส่วนเกินจากน้ำหนักจรยังคงมีอยู่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีวิเคราะห์โดยวิธี XRD ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ที่มา: ณพล (2554)

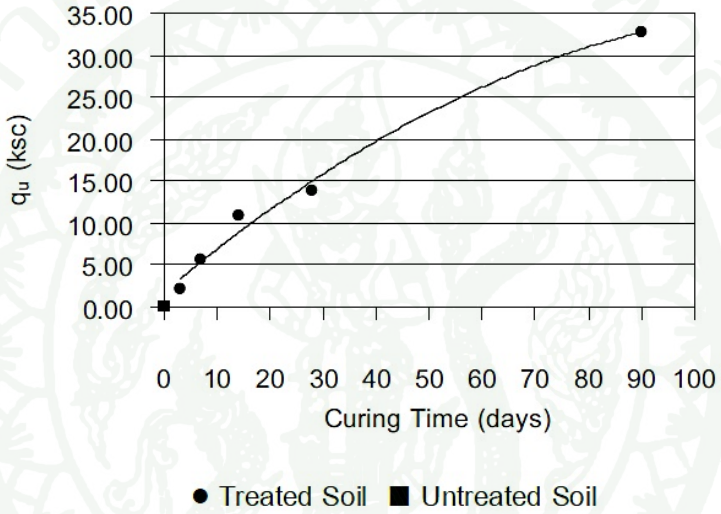


ภาพที่ 2 โครงสร้างระดับจุลภาคโดยใช้เทคนิค SEM ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ที่มา: ณพล (2554)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กฤตย์ (2554) ได้ปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพโดยใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผสมระหว่างเถ้าลอยลิกไนต์กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซต์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ในสัดส่วนจีโอโพลิเมอร์เพสต์ต่อดินเหนียวเท่ากับ 60 : 40 โดยน้ำหนัก โดยการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดแกนเดียว กำลังรับแรงแบกทานแบบแคลิฟอร์เนียร์ (CBR) สัมประสิทธ์ความซึมน้ำได้และความทนทานโดยวิธีเปียกสลับแห้ง พบว่า คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดแกนเดียว กำลังรับแรงแบกทานแบบแคลิฟอร์เนียร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม แสดงในภาพที่ 3 ส่วนค่าสัมประสิทธ์ความซึมน้ำได้และค่าการบวมตัวค่อนข้างต่ำ และมีความทนทานต่อสภาพอุณหภูมิและความชื้น



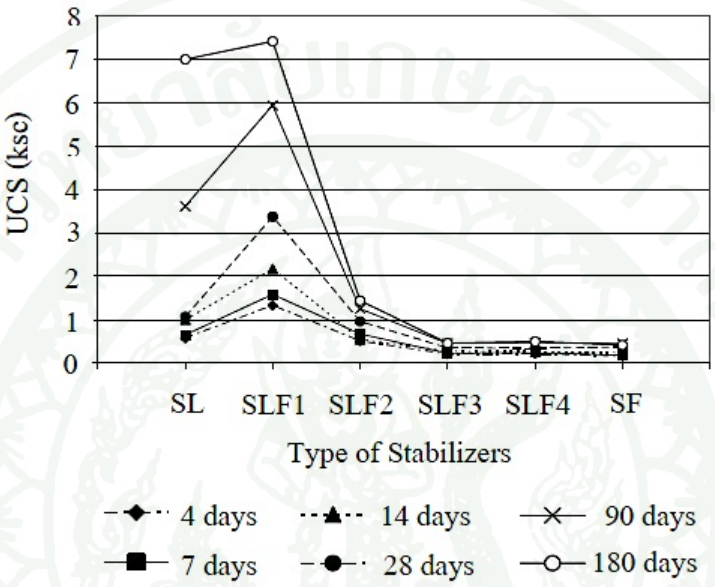
ภาพที่ 3 กำลังรับแรงของดินผสมจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมระหว่างเถ้าลอยลิกไนต์กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซต์

ที่มา: กฤตย์ (2554)

ศุภกิจและศรัณย์รัตน์ (2549) ปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนโดยใช้ปูนขาวและปูนขาวผสมเถ้าลอยลิกไนต์เป็นสารเชื่อมประสานที่อัตราส่วน 1 :1, 1 : 3, 1 : 6 และ 1 : 9 โดยน้ำหนักในปริมาณ 100, 150, 200, และ 250 kg/m^3 มีอายุการบ่ม 4, 7, 14, 28, 90 และ 180 วัน อัตราส่วนน้ำต่อสารเชื่อมประสานเท่ากับ 0.8 ตามมาตรฐาน JSF T821-1990 โดยการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดแกนเดียว พบว่า เมื่อดินเหนียวผสมปูนขาวในปริมาณที่เหมาะ (Optimum Lime Content, OLC) ที่ 200 kg/m^3 เพียงอย่างเดียวทำให้มีการพัฒนากำลังตลอดระยะเวลาการบ่มอย่างต่อเนื่อง ส่วนดินที่เหนียวที่ใช้ปูนขาวผสมกับเถ้าลอยทำให้มีการพัฒนากำลังที่อัตราส่วน 1 : 1 ใน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปริมาณสารเชื่อมประสาน 200 kg/m^3 มีการพัฒนากำลังชัดเจน และโดยเฉพาะปริมาณสารเชื่อมประสาน 250 kg/m^3 มีการพัฒนากำลังชัดเจนมากที่สุด แสดงในภาพที่ 4 รองลงมา คือ ใช้ปริมาณสารเชื่อมประสานที่ 100 และ 150 kg/m^3 สำหรับอัตราส่วน 1 : 3 ดินเหนียวมีการพัฒนากำลังเพียงเล็กน้อย และอัตราส่วนที่มากกว่า 1 : 3 ดินเหนียวมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงดินลดลงอย่างมาก

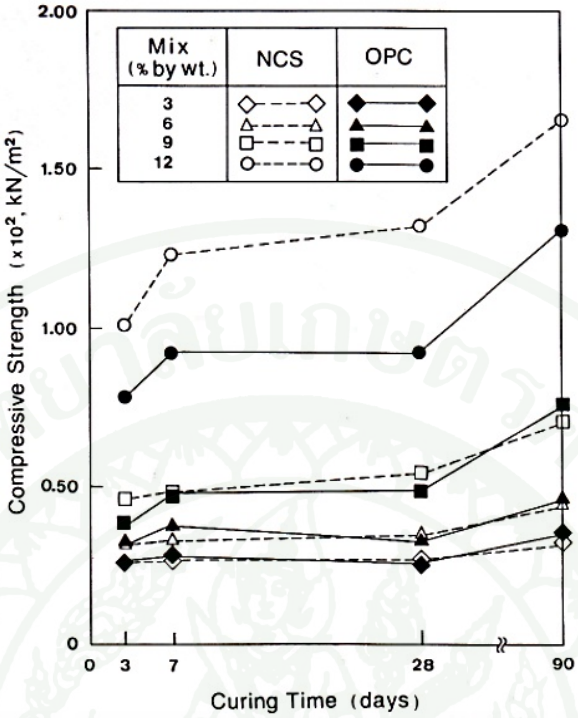


ภาพที่ 4 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวระหว่างดินเหนียวกับสารเชื่อมประสานที่ปริมาณ 250 kg/m^3

ที่มา: ศุภกิจ และ ศรัณย์รัตน์ (2549)

Kamon and Nontanandh (1991) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากขยะจากโรงงานอุตสาหกรรมมาเผาแล้วผสมระหว่างดินกับปูนขาวเปรียบเทียบกับดินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบ (Loam Soil) ในชั้นรองคันทางให้มีประสิทธิภาพ อายุการบ่มที่ 3, 7, 28 และ 90 วัน โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว พบว่าที่สัดส่วนต่ำกว่า 6 % โดยน้ำหนัก ค่ากำลังรับแรงอัดระหว่างดินกับกากอุตสาหกรรมเผา และดินกับปูนซีเมนต์มีค่าไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อสัดส่วนที่ 12 % โดยน้ำหนัก ค่ากำลังรับแรงอัดระหว่างดินกับกากอุตสาหกรรมเผามากกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของดินกับปูนซีเมนต์ฯ ดังแสดงในภาพที่ 5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 5 ค่ากำลังรับแรงอัดระหว่างดินลมหอบกับกากอุตสาหกรรมเผาและดินลมหอบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ 1

ที่มา: Kamon and Nontanandh (1991)

ในการนำกากอุตสาหกรรมมาผลิตซีเมนต์สังเคราะห์ ต้องทำการคัดเลือกกากอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพเหมาะสมตามเกณฑ์ “NICE Criterial” (Nontananandh *et al,* 1991) โดยมีข้อกำหนดดังต่อไปนี้

1. N หมายถึง Nonhazardous waste material กากอุตสาหกรรมต้องไม่มีสารพิษ หรือถ้ามีควรมีในปริมาณที่น้อยมาก ไม่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม

2. I หมายถึง Waste with high improvability กากอุตสาหกรรมสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

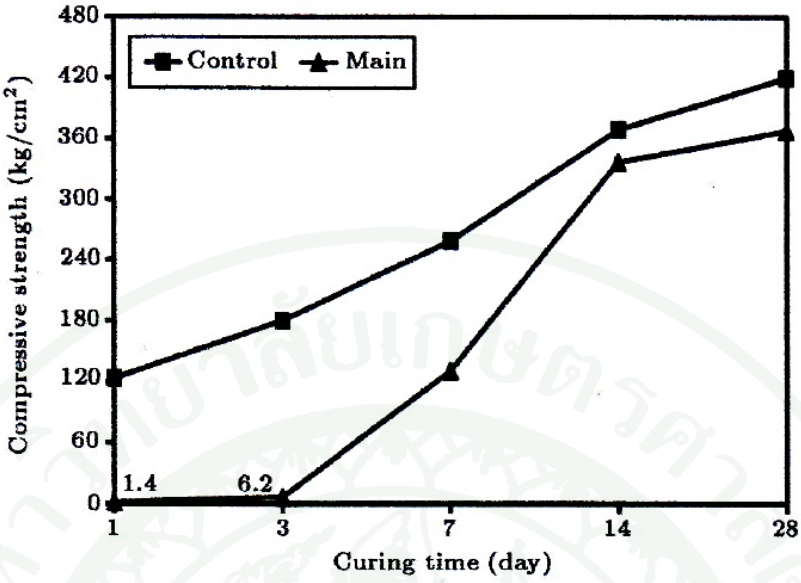
3. C หมายถึง Waste with high compatibility กากอุตสาหกรรมไม่มีสิ่งเจือปน หรือถ้ามีควรมีในปริมาณที่น้อยมาก มีคุณสมบัติสม่ำเสมอ

4. E หมายถึง Waste with high Economic Feasibility กากอุตสาหกรรมมีคุณภาพสูงแต่ราคาต่ำ และมีปริมาณมาก

Ganjidoust (2009) ทำการศึกษาดินที่เจือปนด้วยโลหะหนักซึ่งเกิดจากขยะอันตรายและทำการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยใช้อัตราส่วนดินต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 8% โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงอัดลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของอายุการบ่ม แล้วก็มีกำลังเพิ่มขึ้นหลังจากการบ่มแล้ว 7 วัน ความเข้มข้นของโลหะหนักในดินลดลงในช่วงอายุการบ่ม 1-28 วัน ดังแสดงในภาพที่ 6 เมื่อทำการศึกษาการพัฒนากำลังอัดโดยใช้ X-Ray Diffracttometer หรือ XRD พบว่าเกิด Calcium Silicate Hydrate, CSH gel ดังแสดงในภาพที่ 7 จึงทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักในดินลดลง

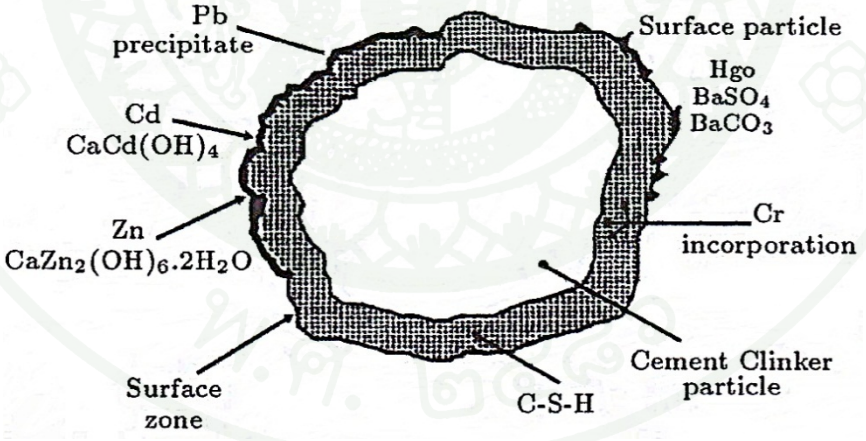
เกียรติคุณและคณะ (2554) ได้พัฒนาปูนซีเมนต์จากขยะที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์ โดยผลิตตัวอย่างคอนกรีตพรุน ด้วยปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากขยะอุตสาหกรรมสีเทาดำ (Gray Cementing Material, GCM) ที่ผลิตจากตะกอนประปา ฝุ่นผงหินปูน เปลือกหอยแครง และปูนขาว ในสัดส่วนที่เหมาะสมและมีรูปแบบการเผาที่มีช่วงเวลาและอุณหภูมิสูงสุดที่ 1450 $^{\circ}$c มีการใช้เถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุทดแทนสารเชื่อมประสาน OPC และ GCM ที่สัดส่วน 10 % และ 20% ซึ่งเป็นงานวิจัยร่วมกับ เกียรติคุณและคณะ (2553) พบว่า คอนกรีตพรุนมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อมีการใช้เถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุทดแทนสารเชื่อมประสาน OPC ในสัดส่วน 10 % โดยน้ำหนัก ซึ่งสัดส่วนของสารเชื่อมประสาน OPC, GCM และเถ้าลอยลิกไนต์แสดงให้เห็นในตารางที่ 2 ส่วนแผนภูมิแท่งแสดงกำลังรับแรงอัดคอนกรีตพรุนที่สัดส่วนผสมต่างๆแสดงในภาพที่ 8

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 6 กำลังรับแรงอัดของดินเจือโลหะหนักที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

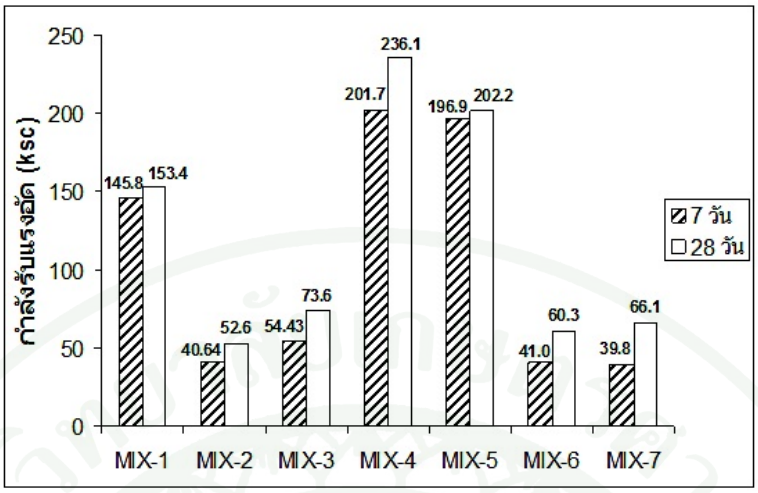
ที่มา: Ganjidoust (2009)



ภาพที่ 7 กระบวนการเกิด Calcium Silicate Hydrate (CSH gel)

ที่มา: Ganjidoust (2009)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 8 กำลังรับแรงอัดคอนกรีตพรุนที่สัดส่วนผสมต่างๆ

ที่มา: เกียรติคุณ (2554)

การศึกษาแนวทางในการจัดการขยะแบบผสมผสานซึ่งเกียรติคุณและคณะ (2553) ได้นำกากอุตสาหกรรมบางประเภทกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง พบว่า ตะกอนประปา ผงหินปูน เปลือกหอยแครง และปูนขาว ในอัตราส่วน 25 : 50 : 5 : 20 มีความเหมาะสมในการผลิตเป็นสารเชื่อมประสานได้ มีคุณสมบัติในการแข็งตัวได้ และมีคุณสมบัติด้านการรับกำลังอัดมอร์ต้า ในเวลาต่อมา ณพล (2554) มุ่งเน้นคัดเลือกกากอุตสาหกรรมเพื่อผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ สามารถประยุกต์ใช้ปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยการทดสอบกำลังอัดแบบแกนเดียว พบว่า อัตราส่วนของตะกอนประปา : ฝุ่นผงหินปูน : เปลือกหอยแครง : ปูนขาว เท่ากับ 25: 50 : 5 : 20 เกิดเป็นปูนซีเมนต์สังเคราะห์ที่มีสมบัติเทียบเคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทั้งทางด้านองค์ประกอบทางเคมีและด้านกายภาพ เมื่อทำการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีกับปูนซีเมนต์สังเคราะห์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) ในช่วงต้น และปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ในระยะยาวเช่นเดียวกับที่เกิดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อนำปูนซีเมนต์สังเคราะห์มาปรับปรุงคุณภาพดินเหนียว มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าอย่างชัดเจน และผลการทดสอบแรงดูดรวมของดินซีเมนต์พบว่า แรงดูดรวม (Total suction) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ตามกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

สารประกอบหลักปูนซีเมนต์ทั่วไปคือ C_3S, C_2S, C_3A และ C_4AF ซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติและคุณภาพของปูนซีเมนต์ เนื่องจากมีปริมาณมากถึง 90 % ซึ่งแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คุณสมบัติ	สารประกอบ			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
อัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วกว่า (นาที)
การพัฒนากำลัง	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (1วัน)	เร็วมาก (1วัน)
กำลังประลัย	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง

ที่มา: ปริญญา และชัย (2549)

Bouge (1955) สามารถคำนวณหาสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ได้ ดังต่อไปนี้

$$C_3S = 4.071CaO - 7.6024SiO_2 - 1.4297Fe_2O_3 - 6.7187Al_2O_3 - 2.852SO_3 \quad (3)$$

$$C_2S = 8.6024SiO_2 + 1.0785Fe_2O_3 + 5.0683Al_2O_3 - 3.071CaO \quad (4)$$

$$C_3A = 2.6504Al_2O_3 - 1.6920Fe_2O_3 \quad (5)$$

$$C_4AF = 3.043Fe_2O_3 \quad (6)$$

โดย CaO, SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 คือปริมาณร้อยละของออกไซต์ในปูนซีเมนต์ ใช้ได้กับปูนซีเมนต์ทั่วไปเมื่อ Al_2O_3/ Fe_2O_3 มากกว่า 0.64 แต่ถ้าปูนซีเมนต์ที่มีอลูมินาต่ำที่มีอัตาส่วน Al_2O_3/ Fe_2O_3 น้อยกว่า 0.64 ซึ่งทำให้เฟอร์ไรต์อยู่ในรูปของ C_4AF+C_2F สามารถคำนวณปริมาณของปูนซีเมนต์ใหม่ ดังสมการต่อไปนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$C_3S = 4.071CaO - 7.6024SiO_2 - 1.4297Fe_2O_3 - 6.7187Al_2O_3 - 2.852SO_3 \quad (7)$$

$$C_2S = 8.6024SiO_2 + 1.0785Fe_2O_3 + 5.0683Al_2O_3 - 3.071CaO \quad (8)$$

$$C_3A = 0 \quad (9)$$

$$C_4AF + C_2F = 2.100Al_2O_3 + 1.702Fe_2O_3 \quad (10)$$

การออกแบบสัดส่วนผสมต่างๆเพื่อผลิตสารเชื่อมประสานในเบื้องต้นใช้เพื่อทำให้ซีเมนต์มีคุณภาพดี เกณฑ์ในการเลือกองค์ประกอบของวัตถุดิบตั้งต้น มีดังต่อไปนี้

1. Hydration Modulus (HM) กำหนดให้อยู่ในช่วงระหว่าง 2.0 - 2.4 ถ้าน้อยกว่าเกณฑ์ทำให้ปูนมีกำลังรับแรงอัดต่ำ ถ้ามากกว่าเกณฑ์จะทำให้ปริมาตรของซีเมนต์ไม่คงตัว

$$HM = Cao / (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3) \quad (11)$$

2. Alumina Ratio (Ma, AR) กำหนดให้อยู่ในช่วงระหว่าง 1.8 – 2.5 ถ้าน้อยกว่าเกณฑ์ทำให้ซีเมนต์แข็งตัวช้า ถ้ามากกว่าเกณฑ์ทำให้ซีเมนต์แข็งตัวเร็ว

$$Ma = Al_2O_3 / Fe_2O_3 \quad (12)$$

3. Lime Saturation Factor (LSF) กำหนดให้อยู่ในช่วงระหว่าง 90 – 100 % ถ้าน้อยกว่าเกณฑ์ทำให้ซีเมนต์มีการพัฒนากำลังค่อนข้างช้า ถ้ามากกว่าเกณฑ์ทำให้ซีเมนต์มีกำลังรับแรงอัดดีแต่เกิดเนื้อปูนอิสระมาก

$$LSF = (CaO / (2.8SiO_2 + 1.18Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3)) \times 100\ \% \quad (13)$$

4. Silica Ratio (Ms, SR) กำหนดให้อยู่ในช่วงระหว่าง 1.9 – 3.0 ถ้าน้อยกว่าเกณฑ์ทำให้ซีเมนต์มีกำลังค่อนข้างต่ำเนื่องจาก C3S และ C2S เกิดไม่สมบูรณ์ ถ้ามากกว่าเกณฑ์ทำให้ซีเมนต์มีใช้เวลานานในการแข็งตัว

$$Ms = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3) \quad (14)$$

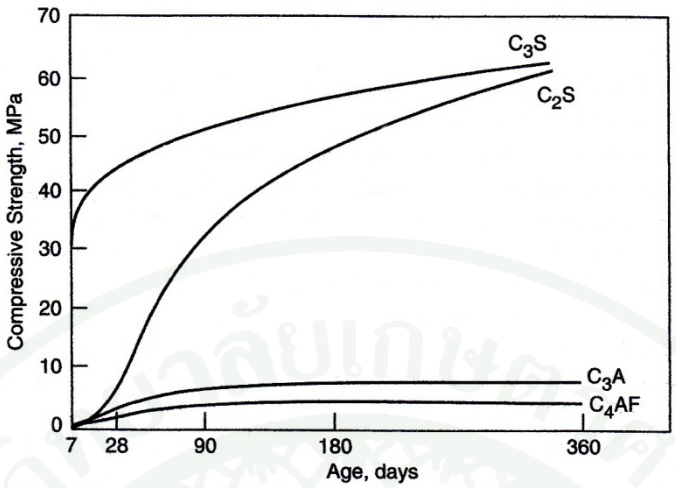
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Gambhir (2004) ศึกษาคุณสมบัติของสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ พบว่า มีปริมาณ Tricalcium silicate (C_3S) และ Dicalcium silicate (C_2S) ประมาณ 70 - 80 % ซึ่งสารประกอบหลักเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญต่อการพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ โดยจะให้สารผลิตภัณฑ์หลักคือ Calcium Silicate Hydrated (CSH) และ Calcium Hydroxide ($Ca(OH)_2$)

เมื่อสารประกอบหลัก C_3S ผสมกับน้ำจะเกิดอัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและพัฒนากำลังช่วงแรกได้เร็ว ส่วน C_2S เกิดอัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและการพัฒนากำลังช่วงแรกช้ากว่า C_3S แต่จะให้ค่ากำลังอัดประลัยสูงใกล้เคียงกันเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น สำหรับ Tricalcium Aluminate (C_3A) จะเกิดอัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอย่างรวดเร็ว ทันทีทันใด เรียกกระบวนการนี้ว่า flash set คือ สามารถพัฒนาได้ภายวันเดียวแต่กำลังประลัยที่ได้จะมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับ C_3S และ C_2S ส่วน Tetracalcium Alumino Ferrite (C_4AF) จะเกิดอัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอย่างรวดเร็วและพัฒนากำลังเร็วมากเช่นเดียวกับ C_3A แต่มีค่ากำลังประลัยต่ำกว่า C_3A เล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 9

เมื่อสารประกอบหลักจำพวก C_3S และ C_2S ของปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำในมวลดิน ดังแสดงในภาพที่ 10 เกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH (Hydrated gels) และ $Ca(OH)_2$ ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์ในขั้นปฐมภูมิ (Primary cementitious products) แต่ $Ca(OH)_2$ เป็นปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ จำเป็นต้องไปจับตัวกับ SiO_2 และ Al_2O_3 ในดิน เกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ CSH และ CAH ตามลำดับ ซึ่งเป็นสาร สารผลิตภัณฑ์ในขั้นทุติยภูมิ (Secondary cementitious products) ดังแสดงในภาพที่ 11 ตามสมการต่อไปนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 9 การพัฒนากำลังของสารประกอบหลัก

ที่มา: Gambhir (2004)

$$C_3S + H_2O \rightarrow C_3S_2H_x \text{ (hydrated gels)} + Ca(OH)_2 \quad (15)$$

Primary cementitious products

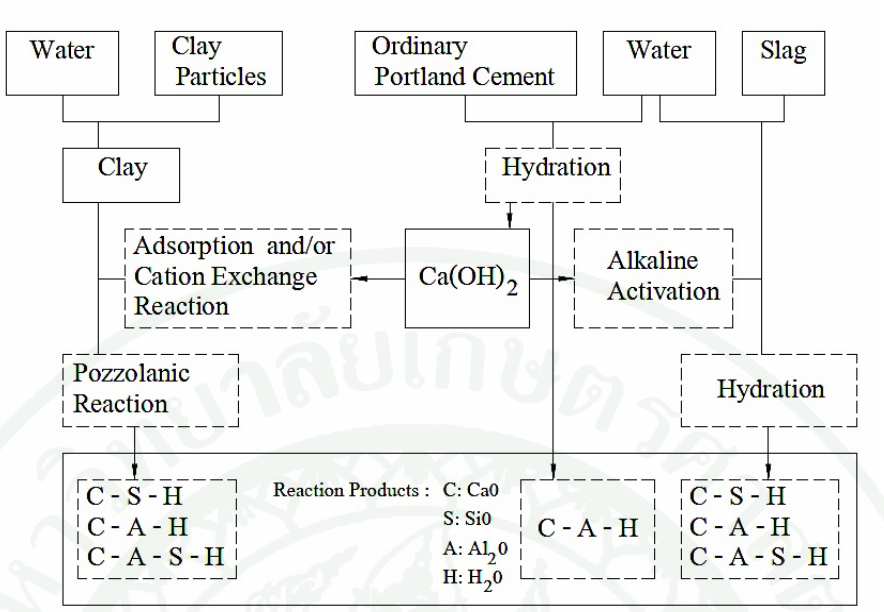
$$Ca(OH)_2 + SiO_2 \text{ (soil silica)} \rightarrow CSH \quad (16)$$

Secondary cementitious products

$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 \text{ (soil alumina)} \rightarrow CAH \quad (17)$$

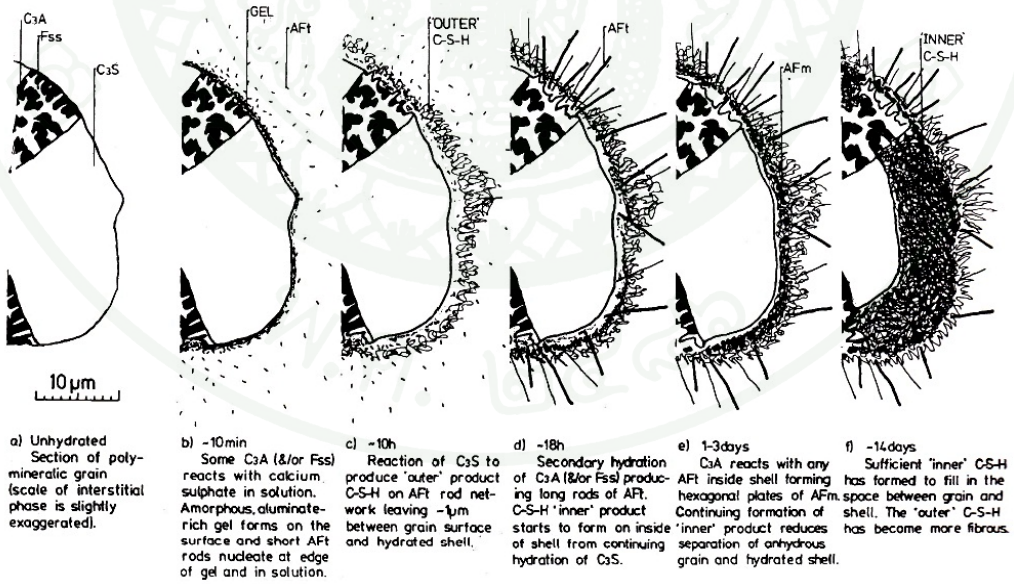
Secondary cementitious products

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 10 ปฏิกิริยาทางเคมีของซีเมนต์และดิน

ที่มา: Saitoh *et al*. (1985)



ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคของปูนซีเมนต์

ที่มา: Taylor (1998)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารปอซโซลาน

นอกจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา 5 ประเภทแล้ว ยังมีปูนซีเมนต์ประเภทอื่นที่ผลิตจากการนำกากอุสาหกรรมมาใช้ในกระบวนการผลิต คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (Portland Pozzolan Cement) วัสดุปอซโซลาน คือ วัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาละเอียด มีคุณสมบัติเชื่อมประสานเมื่อทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ และน้ำจะได้สารที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน ซึ่งวัสดุปอซโซลาน ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash) ซิลิกาฟูม (Silica Fume) ดินเหนียวเผา และเถ้าแกลบบดละเอียด เป็นต้น การใช้วัสดุปอซโซลานเหล่านี้ช่วยให้กากอุตสาหกรรมต่างๆในประเทศลดลง เป็นการลดปริมาณขยะ และเพิ่มมูลค่าโดยการนำกลับมาใช้ประโยชน์อย่างสูงสุด (Chindaprasirt and Hovichitr, 1987)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน ได้จากการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับสารปอซโซลาน ทำให้มีคุณสมบัติหลายด้านโดยเฉพาะด้านความทนทานของคอนกรีตดีขึ้น

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามมาตรฐาน ASTM C595 ดังต่อไปนี้

1. ชนิด P เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานใช้ในงานที่ไม่ต้องการกำลังที่อายุต้น

2. ชนิด IP เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานธรรมดาใช้ในงานทั่วไป มีสารปอซโซลานประมาณ 15 – 40 %

3. ชนิด I(PM) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานดัดแปลง (Pozzolan-modified Portland cement) ใช้ในงานทั่วไป มีสารปอซโซลานต่ำกว่า 15 %

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดทางเคมีและทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน

ข้อกำหนดทางเคมี (ร้อยละสูงสุด)	ปูนซีเมนต์ชนิด P, IP และ I(PM)
MgO	6
SO_3	4
LOI	5

ที่มา: ปริญญา (2553)

สารปอซโซลาน สามารถใช้ปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีต อีกทั้งทำให้คอนกรีตมีความทนทานและมีกำลังเพิ่มขึ้น โดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะเหมือนกับของปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ธรรมดา เพียงแต่การเกิดปฏิกิริยาช้ากว่าและทำให้กำลังช่วงแรกน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ธรรมดา นอกจากนี้ สารปอซโซลานยังสามารถลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จึงมีการนำไปใช้ในงานคอนกรีตขนาดใหญ่

ดินขาว

ดินขาว ($Al_2O_3.2SiO_2$, AS_2) เป็นดินที่มีลักษณะสีขาวอ่อนมีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นแร่ดินกลุ่ม Kaolinite นิยมนำไปเป็นวัตถุดิบในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมเกษตร หรือแม้กระทั่งอุตสาหกรรมเซรามิก

อรุณเดช (2555) ได้ปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังของกากดินขาวด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นทางในการก่อสร้างถนน โดยนำกากดินขาวผสมสารเชื่อมประสานระหว่างปูนซีเมนต์และเถ้าลอย พบว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานอย่างเพียงเดียวเกิดการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็วในช่วงอายุการบ่มช่วงแรกๆ คือ 0 – 3 วัน รองลงมาคือตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยในอัตราส่วนที่เท่ากันเป็นสารเชื่อมประสาน และตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยเป็นสารเชื่อมประสานอย่างเพียงเดียว มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำที่สุด แม้ปริมาณของเถ้าลอยและอายุการบ่มเพิ่มขึ้น ก็ไม่สามารถทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าสูงขึ้นกว่านี้ได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิชัย และ วชิรพล (2549) ศึกษาความคงทนของดินขาวที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยกลวิธีโพลิเมอร์ไรเซชั่น โดยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยากับแร่อลูมิโนซิลิเกตในดินขาว จากทั้งหมด 5 แหล่ง ได้แก่ สุราษฎร์ธานี, ลำปาง, ปราจีนบุรี, อุตรดิตถ์ และระนอง นำมาผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 8 และ 10 ตามลำดับ ทำการทดสอบภายใต้สภาวะต่าง ๆ ทั้งหมด 3 สภาวะได้แก่ สภาวะมาตรฐานที่อุณหภูมิห้อง สภาวะโดนแดดและฝนโดยธรรมชาติ และสภาวะจำลองโดยใช้เครื่องทดสอบการเสื่อมสภาพของวัสดุด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตประเภทเอ เพื่อทดสอบหากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่แรงดัน 15 MPa ของดินขาวที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180 และ 270 วัน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในด้านความคงทน พบว่าดินขาวจากจังหวัดอุตรดิตถ์ จะมีความคงทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับดินแหล่งอื่น ๆ และพบว่าการทดสอบภายใต้สภาวะจำลองโดยใช้เครื่องทดสอบจะทำให้ตัวอย่างถูกทำลายน้อยกว่าการทดสอบภายใต้สภาวะโดนแดดโดนฝนโดยธรรมชาติ

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดินขาว

คุณสมบัติเบื้องต้นของกากดินขาว	แหล่งดินขาว				
	ปราจีนบุรี	ระนอง	ลำปาง	สุราษฎร์ธานี	อุตรดิตถ์
Liquid Limit (%)	34.43	44.69	34.67	50.33	29.37
Plastic Limit (%)	15.70	25.67	23.86	25.03	24.31
Shrikage Limit (%)	15.22	25.09	23.44	19.09	23.28
Plastic Index (%)	18.73	19.02	10.81	25.30	5.06
Specific Gravity	2.63	2.62	2.68	2.64	2.71

ที่มา: วิชัย และ วชิรพล (2549)

อมลวรรณ และ วิชัย (2549) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์และวิศวกรรมของดินขาวที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยกลวิธีโพลิเมอไรเซชั่น โดยผสมกับสารละลายด่างที่ต่างกัน ได้แก่ $Na_2SiO_3.5H_2O$, Na_2CO_3, Na_2HPO_4, Na_3PO_4, NaOH และ KOH แล้วกระตุ้นปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชั่น โดยใช้ดินขาวจาก 13 แหล่ง ได้แก่ ลำปาง 4 แหล่ง, อุตรดิตถ์, ระนอง, สุราษฎร์ธานี, นราธิวาส, อุดรธานี,ปราจีนบุรี, ระยอง, ราชบุรี และเพชรบุรี เพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดจนถึงอายุบ่ม 56 วัน ร่วมกับวิธีแคลอริเมตริกเพื่อวัดปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปรับปรุงคุณภาพร่วมกับการพิจารณาองค์ประกอบทางเคมี โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่า ทุกจังหวัดมีปริมาณออกไซด์หลักใกล้เคียงกัน อีกทั้งพิจารณาองค์ประกอบด้านแร่ดินเหนียว โดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) พบว่าลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของดินขาวแต่ละจังหวัดใกล้เคียงกัน และการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของดินเหนียว โดยใช้กล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า ลักษณะผลึกเป็นแผ่นเกล็ดของแร่ดินเหนียวกลุ่ม Kaolinite เป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นดินขาวจากจังหวัดระนองมีลักษณะผลึกเป็นเส้นยาว ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวกลุ่ม Attapulgite เป็นส่วนใหญ่ ผลการทดสอบพบว่าดินขาวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วจะเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชั่น ตามค่ากำลังรับแรงอัด ซึ่งขึ้นอยู่กับการประเมินค่าการวัดปริมาณความร้อน และพบว่าดินขาวส่วนใหญ่มีแนวโน้มในการปรับปรุงคุณภาพด้วย KOH และ NaOH ยกเว้นดินขาวอุตรดิตถ์ จะมีแนวโน้มในการปรับปรุงคุณภาพด้วย $Na_2SiO_3.5H_2O$

ต่อมายังคงมีการปรับปรุงด้วยกลวิธีโพลิเมอไรเซชั่นซึ่ง สันติ และ วิชัย (2550) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดินขาวโดยใช้วิธีแคลอริเมตริก กระตุ้นต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชั่นของดินขาวจากแหล่งต่างๆภายในประเทศ 13 แหล่งเดิม ผลการทดสอบพบว่าเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้นตามปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกกลุ่มตัวอย่าง นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส โดยดินขาวที่ผสมด้วยสาร KOH มีปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมสูงกว่าดินขาวที่ผสมด้วยสาร NaOH ในเกือบทุกตัวอย่างยกเว้น ดินขาวระยอง ดินขาวระนอง ดินขาวสุราษฎร์ธานี ดินขาวนราธิวาส ที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 และ 60 องศาเซลเซียส ดินขาวที่ผสมด้วยสาร KOH และ NaOH มีปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมใกล้เคียงกันกับสารผสมเพิ่มชนิดอื่น และอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา ไม่มีผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชั่นของดินขาว

ดินขาวเผา (Metakaolin) คือ การนำดินขาวดิบเผาด้วยอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม ลักษณะเป็นผงสีขาว ขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เฉลี่ย 1.5 ไมครอน ประโยชน์ของดินขาวเผาคือใช้เป็นสารปอซโซลานที่ใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ จัดให้ดินขาวเผาเป็นสารปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐาน ASTM 618 ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาดินขาวมีผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 650 - 850°C (Neville, 1996)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Potgieter (2006) ศึกษากำลังของซีเมนต์มอร์ต้าที่ผลิตจากดินขาวเผา พบว่า อุณหภูมิการเผา 850 °C เป็นเวลา 60 นาที และใช้ปริมาณดินขาวเผา 10 % โดยน้ำหนัก ผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้ดินขาวเผามีคุณสมบัติดีต่อการพัฒนากำลังอัดมอร์ต้า ดังแสดงในตารางที่ 5

Sayamipuk (2000) ศึกษาการพัฒนากำลังของมอร์ต้าที่ผลิตจากดินขาวในประเทศไทยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาเทียบกับมอร์ต้าที่ผลิตจากดินขาวดิบ พบว่า กำลังของมอร์ต้าที่ผลิตจากดินขาวเผามีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าที่ผลิตจากดินขาวดิบ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีจากดินขาวดิบไปเป็นดินขาวเผา ซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้ในการผลิตคอนกรีต ดังสมการต่อไปนี้ (Salvador, 1995)

$$\underset{\text{Kaolin}}{Al_2Si_2O_3(OH)_4} + HEAT \rightarrow \underset{\text{Metakaolin}}{Al_2Si_2O_3.2SiO_2} + 2H_2O \qquad (18)$$

นอกจากการพัฒนากำลังของมอร์ต้าที่ผลิตจากดินขาวเผาและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีค่าสูงกว่ามอร์ต้าที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียวแล้ว ยังพบว่า ความสามารถในการซึมผ่านน้ำในมอร์ต้าที่ผสมดินขาวเผาลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่ใช้ผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานนิกและ Microfiller Effect ซึ่งทำให้มอร์ต้าแน่นขึ้นและส่งผลต่อช่องว่างน้อยลง

เจริญชัย และ ปริญญา (2550) ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์ที่ผลิตจากดินขาวระนองเผา โดยการทดสอบกำลังแรงอัด ตามอุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาดินขาว, อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์, ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์, ระยะเวลาตามอุณหภูมิในการบ่ม และอายุของตัวอย่าง จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสใช้ระยะเวลา 3 ชั่วโมง เหมาะสมสำหรับการเผาดินขาว ส่วนสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้กำลังรับแรงอัดที่ดีกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนของ $Na_2O.SiO_2$ ต่อ KOH = 1.33 ให้กำลังรับแรงอัดมอร์ต้าร์เท่ากับ 320 กก./ ตร.ซม. กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้นมากกว่า 15 โมลล่าร์ จะทำให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิและระยะเวลาในการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บ่มที่เหมาะสมคือ 50 องศาเซลเซียส และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์หลังจากการบ่มที่อุณหภูมิสูงเพิ่มขึ้นไม่มากนัก

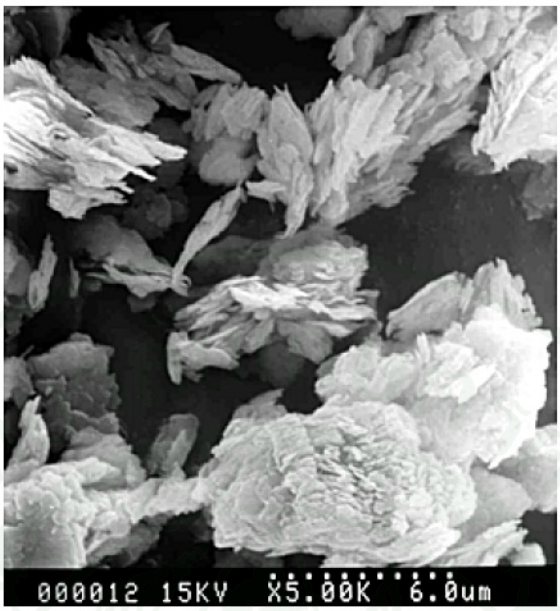
ตารางที่ 5 การพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานจากดินขาวเผา

Source*	w/c ratio	% MK	curing age (days)	compressive Strength (MPa)		% relative increase
				OPC	MK+OPC	
A	0.5	15% in concrete	3	44	43	-2
A	0.5		28	58	80	38
A	0.5		56	65	82	26
B	0.4	10% in concrete	3	25.5	32.9	29
B	0.4		28	36.4	39.9	10
B	0.4		90	42.5	43.0	1
C	0.4	10% in concrete	28	69.0	85.8	24
C	0.4		90	83.8	112.7	35
D	0.56	20% in concrete	28	37.0	49.0	32
E (750 °C)	0.38	10% in mortar	2	23.4	51.3	119
	0.38		28	50.9	92.8	82
E (850 °C)	0.38	10% in mortar	2	23.4	62.8	168
	0.38		28	50.9	101.6	100

หมายเหตุ *A หมายถึง ECC Int. (1996), B หมายถึง Zhang and Malhotra (1995), C หมายถึง Gruber and Sarker (1996), D หมายถึง Mackechnie (1997)) และ E หมายถึง Potgieter (2006)

ที่มา: Potgieter (2006)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 12 ลักษณะอนุภาคของดินขาวเผา โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

ที่มา: เจริญชัย และ ปริญญา (2550)

เถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านที่มีขนาดเล็กกว่า 1-200 ไมครอนจะถูกจับโดยเครื่องดักจับไฟฟ้าสถิต เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานใช้ผสมปูนซีเมนต์ทำคอนกรีต สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามมาตรฐาน ASTM C618 ดังนี้

1. ชนิด N (Class N) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ เถ้าภูเขาไฟ (Vocano Ash) หรือ ทัฟท์ (Tuff) มีปริมาณ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่า 70 % และมีปริมาณ SiO_2 ต่ำที่สุด

2. ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่า 70 % โดยทั่วไปจะมีปริมาณ CaO ต่ำ จึงเรียกเถ้าลอยชนิดนี้ว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนียวและควอตซ์ของถ่านชนิดนี้ให้เถ้าลอยที่มี SiO_2 สูง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัส เป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่า 50 % มีปริมาณ CaO สูง จึงเรียกเถ้าลอยชนิดนี้ว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนียวและควอตซ์ของถ่านชนิดนี้ให้เถ้าลอยที่มี SiO_2 และ Al_2O_3 ต่ำ ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แสดงตามตารางที่ 7

ตารางที่ 6 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด (%)		
	N	F	C
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ ต่ำสุด	70	70	50
SO_3 สูงสุด	4	5	5
ปริมาณความชื้นสูงสุด	3	3	3
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	10	6	6
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบกับ Na_2O	1.5	1.5	1.5

ที่มา: ปริญญา (2553)

ตารางที่ 7 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2528 – 2544

ปี พ.ศ.	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	LOI
2528	12.0	5.9	17.3	39.5	4.6	2.0	0.8	11.5	6.3
2533	37.8	20.5	14.2	17.4	3.3	0.9	2.1	3.9	0.8
2535	40.3	24.0	15.0	11.2	2.8	1.0	2.6	3.1	0.5
2540	41.5	28.1	12.3	10.0	1.2	0.6	3.3	2.0	0.8
2544	39.9	18.2	13.6	17.2	2.4	1.3	2.7	1.5	0.1

ที่มา: ปริญญา (2553)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การนำไปใช้ในงานคอนกรีตของเถ้าลอยนิยม เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์จำพวก SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และให้กำลังอัดคอนกรีตสูงเมื่อใช้เถ้าลอยคุณภาพดีและมีปริมาณที่เหมาะสม การใช้เถ้าลอยในปริมาณมากไม่ได้ทำให้กำลังคอนกรีตเพิ่ม แต่กลับทำให้คอนกรีตมีกำลังต่ำลงจนไม่สามารถใช้งานได้

จุดอ่อนของการนำเถ้าลอยมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์คือ การพัฒนากำลังช่วงอายุต้นต่ำ สามารถแก้ไขโดยใช้เถ้าลอยที่ละเอียดมากขึ้น หรือใช้ไมโครซิลิก้า (ซิลิก้าฟูม) หรือสารลดน้ำผสมกับเถ้าลอย จึงทำให้การพัฒนากำลังในช่วงแรกดีขึ้น (Berry และ Malhotra, 1980)

เอกภาพ และคณะ (2540) ได้ทำการศึกษาความละเอียดของเถ้าลอยจากแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต พบว่า ขนาดอนุภาคของเถ้าลอยที่มีขนาดเล็ก ประมาณ 8,000 – 12,000 ซม^2/กรัม ใช้แทนไมโครซิลิก้าเพื่อผลิตคอนกรีตกำลังสูงได้ เมื่อเทียบกำลังคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ธรรมดาที่ไม่ใช้เถ้าลอย พบว่ามีการพัฒนากำลังใกล้เคียงกันที่อายุ 7 วัน และเทียบกับคอนกรีตที่ผสมไมโครซิลิก้า พบว่า มีการพัฒนากำลังต่ำกว่าเล็กน้อยที่อายุ 7 วัน แต่เมื่อผ่านไป 28 วัน พบว่า การพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นมากกว่าเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

ตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast Furnace Slag) คือ ผลพลอยได้จากการผลิตเหล็กตะกรันซึ่งหลอมละลายเหล็กให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยจุ่มลงในน้ำ มีลักษณะเป็นเม็ดที่ไม่ใช่ผลึก ขนาดประมาณ 4.75 มม. ตะกรันเตาถลุงเหล็กประกอบด้วย CaO, SiO_2, Al_2O_3 และ MgO เป็นหลักซึ่งมีมากกว่า 95% ครั้งแรกของการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กโดยทำมอร์ต้าเป็นส่วนผสมระหว่างตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ปูนขาวและทราย (Mather, 1957) และได้มีการพัฒนาเรื่อยมาจนสามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้จริง นอกจากตะกรันเตาถลุงเหล็กจะใช้เป็นวัตถุดิบการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ยังเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อีกด้วย

ASTM C595 แบ่งประเภทปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กตามปริมาณออกเป็น 3 ดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag Cement) ซึ่งมีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประมาณ 70% ใช้ในงานที่ไม่ต้องการกำลัง เช่น งานก่ออิฐ หรืองานฉาบปูน

2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Portland Blast-Furnace Slag Cement) ซึ่งมีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประมาณ 25-70% แบ่งออกเป็น 4 ชนิดย่อยตามประเภทของงานที่ใช้ คือ

2.1 Type I(SM) ใช้สำหรับงานคอนกรีตทั่วไป
2.2 Type I(MS) ใช้ในงานคอนกรีตต้านทานซัลเฟตระดับปานกลาง
2.3 Type I(A) ใช้ในงานคอนกรีตที่มีฟองอากาศ
2.4 Type I(MH) ใช้ในงานคอนกรีตความร้อนปานกลาง

3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลงตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag-Modified Portland Cement) ซึ่งมีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่เกิน 25% แบ่งออกเป็น 4 ชนิดย่อยตามประเภทของงานที่ใช้ คือ

3.1 Type IS ใช้สำหรับงานคอนกรีตทั่วไป
3.2 Type IS(MS) ใช้ในงานคอนกรีตต้านทานซัลเฟตระดับปานกลาง
3.3 Type IS(A) ใช้ในงานคอนกรีตที่มีฟองอากาศ
3.4 Type IS(MH) ใช้ในงานคอนกรีตความร้อนปานกลาง

การทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กและน้ำ พบว่า สารผลิตภัณฑ์จำพวก CSH เกิดจากสารประกอบ C_2S มากกว่า C_3S ซึ่งปฏิกิริยาของตะกรันเตาถลุงเหล็กขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ปริมาณ ความละเอียด องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็ก และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีผลต่อกำลังอัดมอร์ต้าเป็นอย่างมาก ที่อายุต่ำกว่า 28 วัน กำลังของมอร์ต้าลดลงเมื่อปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออายุการบ่มมากกว่า 28 วัน กลับมีการพัฒนากำลังอัดได้ดีเมื่อปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กสูงขึ้น (Hogan and Meusel, 1981)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ไมโครซิลิกา

ไมโครซิลิกา (Microsilica) หรือ ซิลิกาฟูม (Silica Fume) คือผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมททรัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์ ลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทา หรือเทาดำ หรือเทาอมขาว ขนาดอนุภาคเล็กมากประมาณ 2.0 $x10^5$-$2.5x10^5$ ซม^2/กรัม ที่ไม่เป็นผลึก มีพื้นที่ผิวสูง จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้รวดเร็ว องค์ประกอบทางเคมีของไมโครซิลิก้าส่วนใหญ่เป็น SiO_2 ที่มากถึง 90% ขึ้นไป

พุทธิพงศ์ และ คณะ (2546) ศึกษาการนำไปใช้ไมโครซิลิกาในงานคอนกรีต พบว่า สามารถเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต ความทนทานต่อสภาวะการแข็งตัว และละลายน้ำสลับกันได้ดี เนื่องจากไมโครซิลิกาทำโพรงของซีเมนต์เพสต์มีขนาดเล็กลง มีการซึมผ่านน้ำต่ำ ซึ่งสัดส่วนที่เหมาะสมคือ 5% หรือ 10% จะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณภาพดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว

การใช้ไมโครซิลิกาส่งผลต่อการขยายตัวของปฏิกิริยาของอัลคาไลซิลิกาในคอนกรีต โดยการใช้ไมโครซิลิกาในปริมาณ 15% (Malhotra, 1984) ส่วนการใช้ไมโครซิลิกาในปริมาณที่มากกว่า 10% จะช่วยลดการขยายตัวได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของไมโครซิลิกาเลย (Hooton, 1993) ในปัจจุบัน ไมโครซิลิกาได้รับความนิยมในการทำคอนกรีตกำลังสูง และเพิ่มความทนทานของคอนกรีต เรามักใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษเพื่อจะได้ไม่ต้องใช้น้ำมาก

งานวิจัยจึงมีความมุ่งเน้นในการนำกากดินขาวเป็นสารตั้งต้นเพื่อใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมในอัตราส่วนที่เหมาะสม ต่อยอดงานวิจัยของ ณพล (2554) Nontananandh et al. (2011) ใช้กากอุตสาหกรรม เช่น ตะกอนประปา ฝุ่นผงหินปูน เปลือกหอยแครง และผงปูนขาว เพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สามารถนำปูนซีเมนต์สังเคราะห์ไปปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวกรุงเทพฯให้มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นและสามารถนำไปใช้งานได้จริงในอนาคต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องบดความละเอียดสูง (Mechanical grinding machine) ชื่อเครื่อง ROCKLABS – sample preparation equipment ชนิด BENCHTOP RINGMILL รุ่น 1A-BT พร้อมหม้อบด

2. อุปกรณ์ทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบสมบัติของดิน Standard of American Society for Testing and Material (ASTM)

3. เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง 1,700°c (Electric high temperature furnace) รุ่น HT 08/17 ยี่ห้อ Nabertherm

4. ถ้วยครูซิเบิ้ล (Crucible cup) พร้อมฝาปิด (Lid) ทนอุณหภูมิได้ไม่ต่ำกว่า 1,500 องศาเซลเซียส

5. เครื่องกวนผสมดินซีเมนต์ (Horbart Mixer)

6. ชุดเครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ สำหรับการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

7. เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย (X-Ray Diffracttometer) หรือ XRD รุ่น X'Pert Diffractometer ยี่ห้อ Philips

8. เครื่องมือวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Florescence Spectrometer) หรือ XRF รุ่น XGT – 2000W ยี่ห้อ Horiba

9. เครื่องมือศึกษาโครงสร้างภายในระดับจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) หรือ SEM รุ่น XL 30 ยี่ห้อ Philips

10. แบบหล่อทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3.5 ซ.ม. สูง 7 ซ.ม. สำหรับการทดสอบ Unconfined Compression Test ของดินซีเมนต์

11. เครื่องทดสอบ Compressive Strength Test รุ่น AP-1010 ยี่ห้อ SOILTEST

12. เครื่องทดสอบ Unconfined Compression Test

13. เครื่องบดปูนเม็ด Ball Mill พร้อมหม้อบด

14. ครกอาร์เก็ต

15. ตู้อบดินอุณหภูมิสูง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. กากดินขาวที่ได้จากโรงงานผลิตเซรามิก อ.เมือง จ.ลำปาง
2. เปลือกหอยแครง ฝุ่นหงหินปูน ปูนขาว และเถ้าลอยลิกไนต์
3. ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ
4. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)
5. ทราย
6. ยิปซัม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการ

1. การเก็บตัวอย่างสารตั้งต้นและการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

กากดินขาว มีลักษณะผงละเอียดสีขาว เก็บจากโรงงานผลิตเซรามิก อ.เมือง จ.ลำปาง บริเวณบ่อทิ้งกากดินขาวหลังโรงงานแล้วตักใส่กระสอบหุ้มด้วยถุงใสมัดปากถุงให้แน่นเพื่อความถูกต้องและความแม่นยำในการทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของกากดินขาว ได้แก่ การทดสอบปริมาณความชื้น (Natural water content, Wn) , ทดสอบอัตเตอร์เบิร์กลิมิต (Atterberg's limits, LL, PL, PI), ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific gravity, Gs) , การหาขนาดเม็ดดิน (Grain size distribution) และการจำแนกเม็ดดิน (Soil classification)

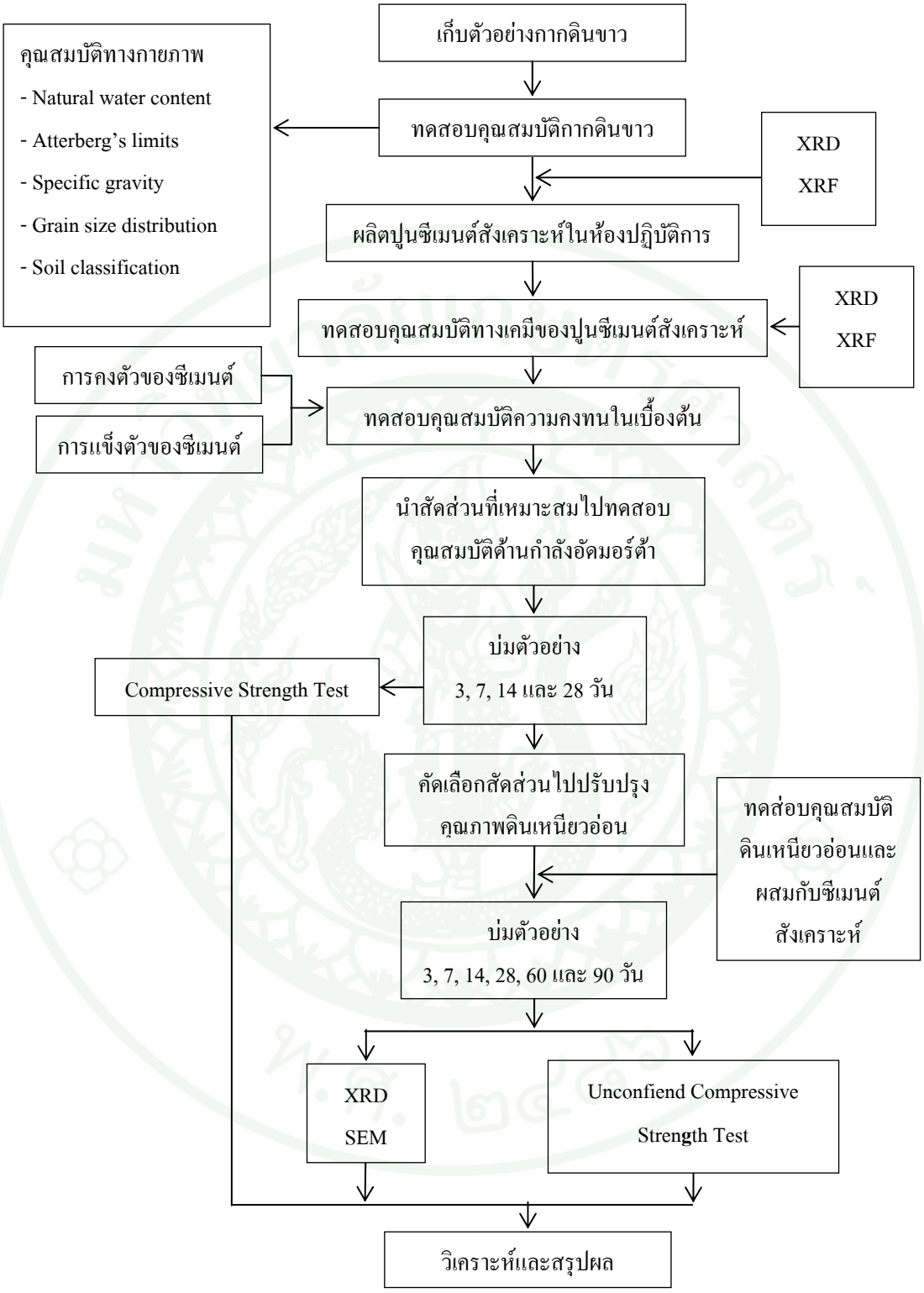


ภาพที่ 13 บริเวณบ่อทิ้งกากดินขาวหลังโรงงานเซรามิก อ.เมือง จ.ลำปาง

เถ้าลอย มีลักษณะผงละเอียดสีน้ำตาล ได้จากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ ที่ใช้ความร้อนปานกลางอยู่ช่วงระหว่าง 1,100 – 1,400 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด

เปลือกหอยแครง จากแหล่งบ้านบางตะปูน อ.บ้านแหลม จ.เพชรบุรี ซึ่งได้บดละเอียดเป็นผง สีขาวเรียบร้อยแล้วซึ่งถูกบรรจุในถุงใสหนา มัดปากอย่างแน่นหนากันไม่ให้ถูกความชื้น รักษาไว้ในอุณหภูมิห้องปกติ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 14 ลำดับขั้นตอนการวิจัย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผงหินปูน มีลักษณะผงละเอียดสีขาวขุ่น ได้จากโรงโม่หินปูน จ.สระบุรี ซึ่งโม่หินเพื่อส่งไปยังโรงผลิตปูนซีเมนต์ ตัวอย่างที่ใช้ทดลองบรรจุในถุงใสหนา มัดปากอย่างแน่นหนากันไม่ให้ถูกความชื้น รักษาไว้ในอุณหภูมิห้อง

2. **การผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์**

นำกากดินขาวไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) หาปริมาณสารแคลเซียมออกไซด์ (CaO) , ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) , อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งเป็นออกไซด์หลักเพื่อนำไปออกแบบสัดส่วนที่ทำให้ปูนซีเมนต์สังเคราะห์มีคุณภาพดีตามเกณฑ์ดังต่อไปนี้

1. Hydration Modulus (HM) กำหนดให้อยู่ในช่วงระหว่าง 2.0 - 2.4 ถ้าน้อยกว่าเกณฑ์ทำให้ปูนมีกำลังรับแรงอัดต่ำ ถ้ามากกว่าเกณฑ์จะทำให้ปริมาตรของซีเมนต์ไม่คงตัว

$$HM = Cao / (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3) \quad (19)$$

2. Alumina Ratio (Ma , AR) กำหนดให้อยู่ในช่วงระหว่าง 1.8 – 2.5 ถ้าน้อยกว่าเกณฑ์ทำให้ซีเมนต์แข็งตัวช้า ถ้ามากกว่าเกณฑ์ทำให้ซีเมนต์แข็งตัวเร็ว

$$Ma = Al_2O_3 / Fe_2O_3 \quad (20)$$

3. Lime Saturation Factor (LSF) กำหนดให้อยู่ในช่วงระหว่าง 90 – 100 % ถ้าน้อยกว่าเกณฑ์ทำให้ซีเมนต์มีการพัฒนากำลังค่อนข้างช้า ถ้ามากกว่าเกณฑ์ทำให้ซีเมนต์มีกำลังรับแรงอัดดีแต่เกิดเนื้อปูนอิสระมาก

$$LSF = (CaO / (2.8SiO_2 + 1.18Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3)) \times 100\ \% \quad (21)$$

4. Silica Ratio (Ms , SR) กำหนดให้อยู่ในช่วงระหว่าง 1.9 – 3.0 ถ้าน้อยกว่าเกณฑ์ทำให้ซีเมนต์มีกำลังค่อนข้างต่ำเนื่องจาก C3S และ C2S เกิดไม่สมบูรณ์ ถ้ามากกว่าเกณฑ์ทำให้ซีเมนต์มีใช้เวลานานในการแข็งตัว

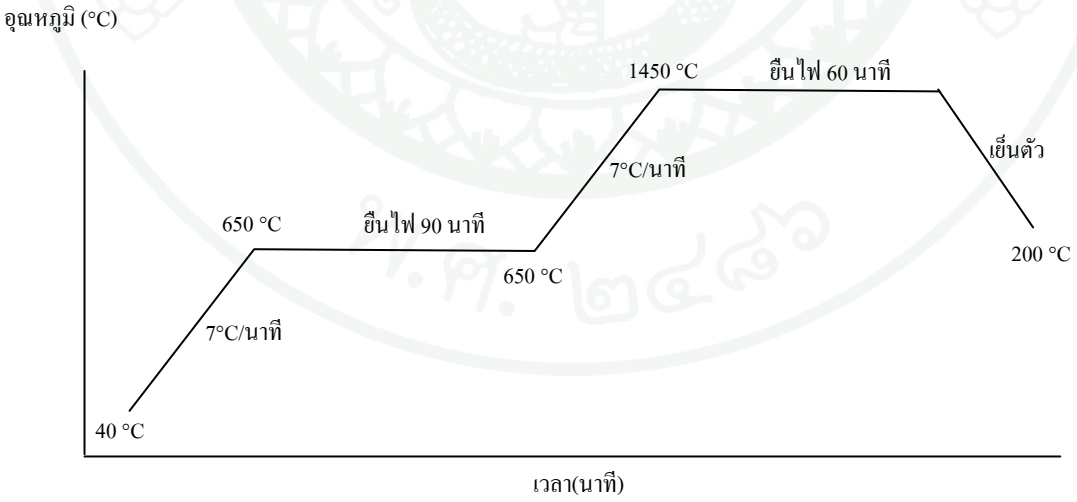
$$Ms = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3) \quad (22)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อได้สัดส่วนที่เหมาะสมแล้ว นำไปเผาด้วยเตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง ณ ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์วิจัยวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ดังแสดงในภาพที่ 15 ด้วยรูปแบบการเผาและเวลาต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 16 หลังจากปูนเม็ด (clinker) เย็นตัวลง จากนั้นเก็บตัวอย่างไว้ในถุงซิปเพื่อควบคุมไม่ให้ตัวอย่างมีความชื้น



ภาพที่ 15 เตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง 1700°c



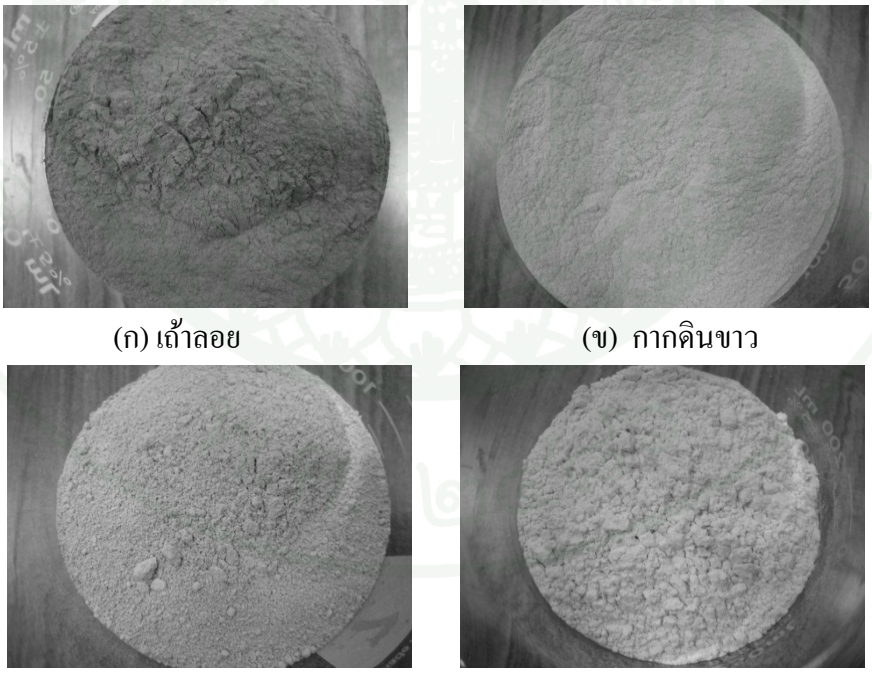
ภาพที่ 16 รูปแบบการเผาและช่วงเวลาต่างๆ

ที่มา: ณพล (2554)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. **การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์สังเคราะห์**

บด clinker ให้ละเอียดประมาณ 3,200 – 3,600 ซม.^{2}/กรัม ด้วยเครื่องบด ROCKLABS – sample preparation equipment ชนิด BENCHTOP RINGMILL รุ่น 1A-BT สำหรับเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์ XRF ดังภาพที่ 18 จากนั้นนำสารเชื่อมประสานมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การทดสอบหาความละเอียดของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกโดยใช้เครื่องแอร์เพอร์มี-อะบิลิตี้แบบเบลน (Blain Air-Permeability Apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM C204-07 และการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ ตามมาตรฐาน ASTM C188-09 และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในรูปออกไซด์ด้วยเทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ด้วยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) และวิธีวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นการทำลายตัวอย่าง X-Ray Diffracttrometer Analysis (XRD) ณ ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์วิจัยวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน เพื่อประเมินสารประกอบหลักจำพวก C_3S และ C_2S เทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) และ GCM



(ก) เถ้าลอย (ข) กากดินขาว

(ค) เปลือกหอยแครง (ง) ผงหินปูน

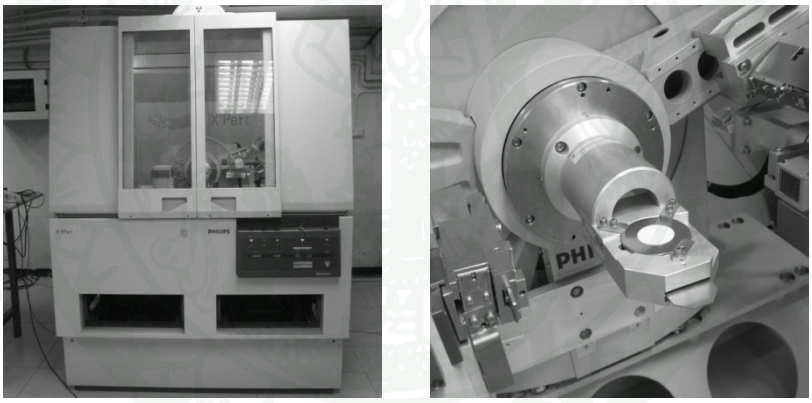
ภาพที่ 17 สารตั้งต้นในการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 18 เครื่องบด ROCKLABS – sample preparation equipment และหม้อบด

หมายเหตุ ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม อ.เกาะคา จ.ลำปาง



ภาพที่ 19 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย X-Ray Diffracttometer หรือ XRD

ตารางที่ 8 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบวิธี XRD

Condition	Pattern
Input energy	40 kV and 30 mA
Scanning speed	2 degrees/min.
Start angle (2θ)	10 degrees
Stop angle (2θ)	80 degrees

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 9 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบวิธี XRF

Condition	Pattern
Probe current	20 mA
Accelerating voltage	10 kA
Working distance	10 – 30 mm

4. การทดสอบคุณสมบัติความคงทนในเบื้องต้น

นำสารเชื่อมประสานทดสอบคุณสมบัติความคงทนในเบื้องต้น โดยการทดสอบคุณสมบัติการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ ดังแสดงในภาพที่ 22 ซึ่งแต่ละสัดส่วนจะมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ระหว่าง 0.3 – 0.8 ซึ่งค่า w/c ที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์จับตัวกันเป็นก้อนได้ระหว่างน้ำและสารเชื่อมประสาน อยู่ในช่วงระหว่าง 0.4 - 0.6 จากนั้นนำไปทดสอบการคงตัวโดยการนำตัวอย่างไปแช่น้ำ (Slaking) เป็นระยะเวลา 30 วัน ดูถึงการบวมตัวและการหลุดร่อนของผิวตัวอย่าง เพื่อพิจารณาว่าซีเมนต์มีคุณสมบัติที่ดีในเบื้องต้นก่อนจะนำไปศึกษาถึงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมต่อไป

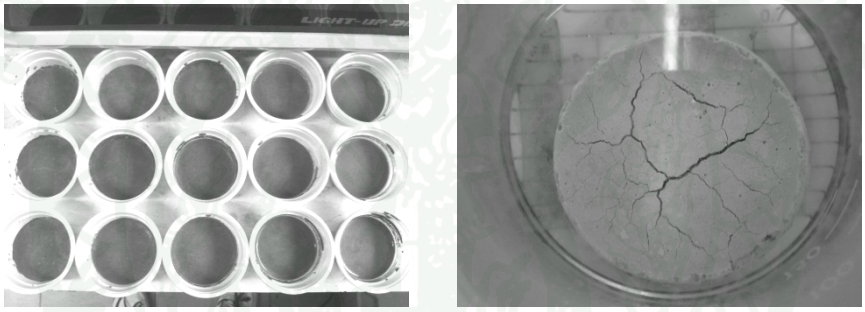


ภาพที่ 20 เครื่องทดสอบด้วยเทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ X-Ray Florescence Spectrometer หรือ XRF

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 21 เครื่องมือศึกษาโครงสร้างภายในระดับจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning Electron Microscope หรือ SEM



ภาพที่ 22 การทดสอบคุณสมบัติความคงทนในเบื้องต้น

5. **การทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า**

นำสารเชื่อมประสานไปบดให้มีความละเอียดช่วงประมาณ 5,300 – 6,600 ซม.^{2}/กรัม ประเมินคุณสมบัติด้านวิศวกรรมโดยการทดสอบกำลังอัดมอร์ต้ารูปลูกบาศก์ ขนาด 5x5x5 ลบ.ซม. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.485 และอัตราส่วนปูนซีเมนต์สังเคราะห์ต่อทราย เท่ากับ 1:2.75 ที่อายุการบ่ม 3 , 7 , 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109 เทียบกับกำลังอัดมอร์ต้าของ OPC และ GCM โดยการนำตัวอย่างที่มีคุณสมบัติดี ไม่บวมตัว ผิวหลุดร่อน หรือ ละลายไปกับน้ำจากการทดสอบคุณสมบัติความคงทนในเบื้องต้น

นำสารเชื่อมประสานผสมยิปซัม 5 % เพื่อเป็นปูนซีเมนต์สังเคราะห์ ส่วนทรายที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำที่สะอาด เพื่อเตรียมให้เป็นทรายมาตรฐานที่ต้องร่อนผ่านตระแกรงเบอร์ 20 แต่ค้างบน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตะแกรงเบอร์ 30 นำปูนซีเมนต์สังเคราะห์ผสมทรายและน้ำด้วยเครื่องกวนผสมดินซีเมนต์ (Horbart Mixer) ดังแสดงในภาพที่ 23 แล้วบรรจุในแบบหล่อที่ชโลมน้ำมันในช่องแบบจนทั่วแล้วใส่ซีเมนต์มอร์ต้าลงไปประมาณครึ่งหนึ่งของความสูงแบบหล่อ กระทุ้ง 32 ครั้ง ภายใน 10 วินาที จากนั้นก็ใส่ซีเมนต์ลงไปในแบบหล่อให้เต็มแล้วกระทุ้งเหมือนเดิม ปาดหน้าให้เรียบแล้วใช้แผ่นฟิล์มใสหุ้มไว้แล้วคลุมด้วยผ้าชุบน้ำพอหมาด ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้วจึงแกะตัวอย่างมอร์ต้าไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 23 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 23 การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าด้วยเครื่องกวนผสมดินซีเมนต์ (Horbart Mixer)

ก่อนเวลาการทดสอบ 24 ชั่วโมง ควรคลุมด้วยผ้าหมาดจนถึงเวลาทดสอบ เช็ดผิวให้แห้ง เวลาทดสอบผิวหน้าที่สัมผัสกับเครื่องทดสอบต้องเรียบ และต้องวัดขนาดหน้าตัด ความสูง และชั่งน้ำหนักแต่ละก้อนตัวอย่าง เมื่อทดสอบเสร็จสิ้นได้ค่ากำลังอัดเทียบกับค่ามาตรฐาน ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 10 เกณฑ์กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าตามมาตรฐาน ASTM C-109

อายุการบ่ม	ปูนซีเมนต์ประเภทที่				
	1	2	3	4	5
1 วันในอากาศชื้น(ksc)	-	-	120	-	-
1 วันในอากาศชื้น, 2 วันในน้ำ (ksc)	85	70	210	-	-
1 วันในอากาศชื้น, 6 วันในน้ำ (ksc)	150	130	-	55	105
1 วันในอากาศชื้น, 27 วันในน้ำ (ksc)	245	245	-	140	210

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โดยตัวอย่างที่ทำการทดสอบสามารถมีความคลาดเคลื่อนของอายุที่ยอมให้ ดังนี้

ตารางที่ 11 ค่าความคลาดเคลื่อนของอายุที่ยอมให้ของซีเมนต์มอร์ต้า

อายุตัวอย่างทดสอบ	ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ (ชม.)
1 วัน	$\pm$ 0.5
3 วัน	$\pm$ 1
7 วัน	$\pm$ 3
28 วัน	$\pm$ 12

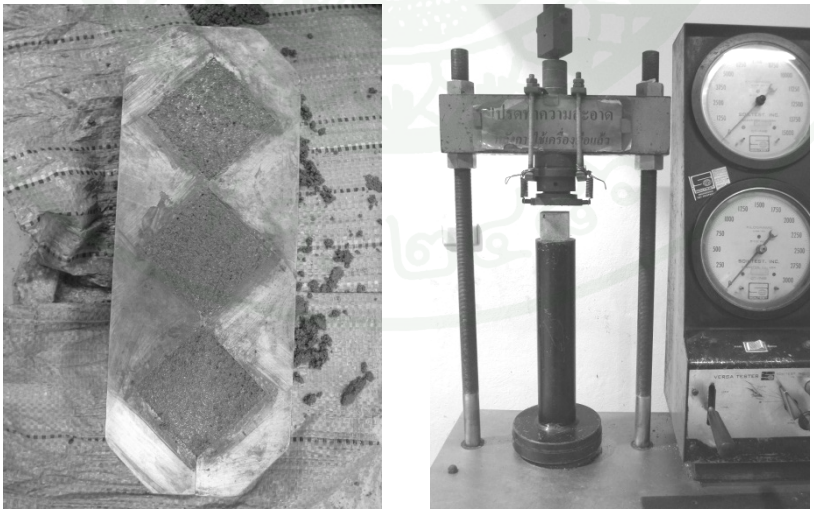
ค่ากำลังอัด (Compressive Strength) ของซีเมนต์มอร์ต้า หาได้จากสมการ

$$f_c = P / A$$

โดยที่ f_c = กำลังรับแรงอัดประลัย มีหน่วยเป็น กก/ตร.ซม.

P = แรงอัด มีหน่วยเป็น กก.

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง มีหน่วยเป็น ตร.ซม.



ภาพที่ 24 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ของมอร์ต้า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. **การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน (ดินซีเมนต์)**

ดินเหนียวอ่อนจากโครงการคลองระบายน้ำสุวรรณภูมิ จ.สมุทรปราการ เก็บแบบไม่คงสภาพ (Disturbed sample) ที่ระดับความลึกประมาณ 2-10 เมตร นำสารเชื่อมประสานไปปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยมีปริมาณสารเชื่อมประสาน 150 , 200 และ 250 กก./ม^3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์และปริมาณสารเชื่อมประสาน ที่อายุการบ่ม 3 , 7 , 14 , 28 , 60 และ 90 วัน นำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด (Unconfined Compression Test) และนำดินซีเมนต์ที่ทำการทดสอบแล้วไปศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี XRD และศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีด้วยวิธี SEM อีกทั้งหาปริมาณน้ำในมวลดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ

การเตรียมดินซีเมนต์ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ผสมดินเหนียวอ่อนกับสารเชื่อมประสานในแต่ละปริมาณของสารเชื่อมประสานด้วยเครื่องกวน Horbart Mixer โดยแบ่งดินเหนียวอ่อนสลับกับสารเชื่อมประมาณ ผสมกันโดยใช้เวลาประมาณ 2 – 3 นาที และคอยสังเกตส่วนผสมเข้ากันได้ดี นำดินซีเมนต์บรรจุลงในแบบบรรจุขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 ซ.ม. สูง 7 ซ.ม. ตามมาตรฐาน JSF T821-1990 จากนั้นทิ้งตัวอย่างไว้ 24 ชม. จึงนำตัวอย่างออกจากแบบ หุ้มด้วยฟิล์มใส (Wrap) เพื่อกันความชื้นภายในตัวอย่างระเหยออกไปและป้องกันความชื้นจากอากาศภายนอก จากนั้นหุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟอยด์เพื่อป้องกันการกระแทก ดังแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 25 ตัวอย่างดินซีเมนต์ที่เตรียมการทดสอบ Unconfined Compression Test

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อดินซีเมนต์ครบตามอายุการบ่มที่ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน จากนั้นนำดินซีเมนต์ชั่งน้ำหนัก วัดความสูง และเส้นผ่าศูนย์กลาง จดบันทึกค่าเพื่อนำไปคำนวณค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดก่อนนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด (Unconfined Compression Test) ด้วยเครื่อง Compression Testing Machine หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้น ทำการทดสอบสารประกอบหลัก สารผลิตภัณฑ์ในดินตัวอย่างด้วยวิธี XRF และศึกษาโครงสร้างการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในระดับจุลภาคด้วยวิธี SEM

ค่าสูงสุดของกำลังกด (Unconfined Compressive Strength)

$$q_u = P/A$$

โดยที่ P = กำลังกดสูงสุด (กก.)

A = พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ถูกแรงกระทำ (ซม^2.)

ตัวแปรและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

การทดสอบวัสดุด้วยวิธี XRD

สารตั้งต้น	กากดินขาว, เถ้าลอย, เปลือกหอยแครง, ผงหินปูน, ดินเหนียวอ่อน, ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จำนวน 10 สัดส่วน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	1 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	15 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์สังเคราะห์จำนวน 3 สัดส่วน
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	1 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	18 ตัวอย่าง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารตั้งต้น	ดินซีเมนต์จากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ปริมาณ 150, 200 และ 250 กก./ลบ.ม.
ระยะเวลาในการบ่ม	0, 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	1 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	21 ตัวอย่าง

รวมจำนวนตัวอย่างการทดสอบวัสดุด้วยวิธี XRD ทั้งหมด 54 ตัวอย่าง

การทดสอบวัสดุด้วยวิธี XRF

สารตั้งต้น	กากดินขาว,ดินเหนียวอ่อน, ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จำนวน 10 สัดส่วน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	1 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	12 ตัวอย่าง

รวมจำนวนตัวอย่างการทดสอบวัสดุด้วยวิธี XRF ทั้งหมด 12 ตัวอย่าง

การทดสอบวัสดุด้วยวิธี SEM

สารตั้งต้น	ซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์สังเคราะห์จำนวน 1 สัดส่วน
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	1 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	6 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ดินซีเมนต์จากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ปริมาณ 150, 200 และ 250 กก./ลบ.ม.
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	1 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	21 ตัวอย่าง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รวมจำนวนตัวอย่างการทดสอบวัสดุด้วยวิธี SEM ทั้งหมด 27 ตัวอย่าง

การทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ต้า (ASTM C109)

สารตั้งต้น	ปูนซีเมนต์สังเคราะห์ จำนวน 3 สัดส่วน
W/B ratio	0.485
อัตราส่วนปูนซีเมนต์สังเคราะห์ต่อทราย	1:2.75
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 14 และ 28 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	2 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	12 ตัวอย่าง

รวมจำนวนตัวอย่างการทดสอบด้านกำลังรับแรงอัดมอร์ต้าทั้งหมด 12 ตัวอย่าง

การทดสอบกำลังรับแรงอัดดินซีเมนต์

สารตั้งต้น	ดินเหนียวอ่อน
สารผสมเพิ่ม	สารเชื่อมประสาน C2
ปริมาณสารผสมเพิ่ม	150 กก./ลบ.ม.
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 14 และ 28 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	12 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ดินเหนียวอ่อน
สารผสมเพิ่ม	สารเชื่อมประสาน C2
ปริมาณสารผสมเพิ่ม	150 กก./ลบ.ม.
ระยะเวลาในการบ่ม	60 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	2 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	4 ตัวอย่าง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารตั้งต้น	ดินเหนียวอ่อน
สารผสมเพิ่ม	สารเชื่อมประสาน C2
ปริมาณสารผสมเพิ่ม	200 กก./ลบ.ม.
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 14 และ 28 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	12 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ดินเหนียวอ่อน
สารผสมเพิ่ม	สารเชื่อมประสาน C2
ปริมาณสารผสมเพิ่ม	250 กก./ลบ.ม.
ระยะเวลาในการบ่ม	60 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	2 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	4 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ดินเหนียวอ่อน
สารผสมเพิ่ม	สารเชื่อมประสาน C2
ปริมาณสารผสมเพิ่ม	250 กก./ลบ.ม.
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 14 และ 28 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	12 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ดินเหนียวอ่อน
สารผสมเพิ่ม	สารเชื่อมประสาน C2
ปริมาณสารผสมเพิ่ม	250 กก./ลบ.ม.
ระยะเวลาในการบ่ม	60 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	2 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	4 ตัวอย่าง

รวมจำนวนตัวอย่างการทดสอบด้านกำลังรับแรงอัดดินซีเมนต์ทั้งหมด 48 ตัวอย่าง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มาตรฐานการทดสอบ

ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars.

ASTM C204-07 Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus.

ASTM D422-63 Standard Test Method for Particle-size Analysis of Soils.

ASTM D854-92 Standard Test Method for Specific Gravity of Soils.

ASTM D2166-97 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soils.

ASTM D2216-92 Standard Test Method for Laboratory Determination of Water Content of Soils.

ASTM D2487-93 Standard Classification of Soil for Engineering Purpose (Unified Soil Classification System)

ASTM D4318-93 Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soil.

JSF T821-1990 Practice of making and Curing Non-Compacted Stabilized Soil Specimens.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ

ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์วิจัยวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ

ห้องปฏิบัติการเฉพาะหน่วย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ

ระยะเวลาในการทำวิจัยและแผนการดำเนินงานวิจัย

ระยะเวลาวิจัยประมาณ 12 เดือน (มิถุนายน 2555 ถึง มีนาคม 2556)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

การศึกษาคุณสมบัติของกากอุตสาหกรรม

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของกากอุตสาหกรรมใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากขยะอุตสาหกรรม เช่น กากดินขาว เปลือกหอยแครง ผงหินปูน และเถ้าลอย พบว่ากากดินขาวมีลักษณะเป็นผง สีขาวขุ่น เมื่อนำไปศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ปริมาณน้ำในมวลดิน ทดสอบสภาพของดินโดยวิธี Atterberg's Limits ความถ่วงจำเพาะเม็ดดิน การจำแนกดินทางวิศวกรรมโดยระบบ Unified Soil Classification System (UCS) และAASHTO Classification สามารถแสดงค่าต่างๆในตารางที่ 12 และกราฟการกระจายตัวขนาดเม็ดดินแสดงในภาพที่ 26 สำหรับคุณสมบัติของเปลือกหอยแครง ผงหินปูน และเถ้าลอย สามารถสรุปได้ในตารางที่ 13

ตารางที่ 12 คุณสมบัติทางกายภาพของกากดินขาว

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของกากดินขาว	ผลการทดสอบ
Natural Water Content (%)	27.5
Liquid Limit, LL (%)	60.11
Plastic Limit, PL (%)	17.91
Plastic Index, PI (%)	42.20
Specific Gravity, Gs	2.65
UCS	CH
AASHTO	A – 7 – 6

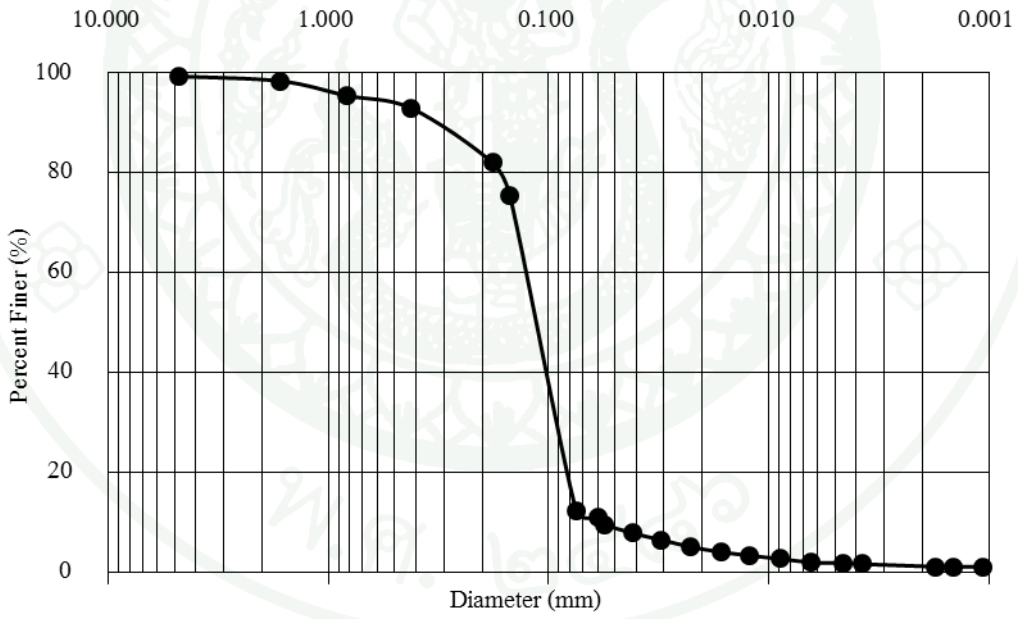
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 13 ค่าความละเอียดและความถ่วงจำเพาะของกากอุตสาหกรรม

ชนิดกากอุตสาหกรรม	ค่าความละเอียด (ซม^2/กรัม)	ความถ่วงจำเพาะ
เปลือกหอยแครง	5,720	2.70
เถ้าลอย	3,320	2.30
ผงหินปูน	4,480	2.71

หมายเหตุ ค่าความละเอียดได้จากการทดสอบ Blain Air-Permeability Apparatus ตามมาตรฐาน ASTM C204-07

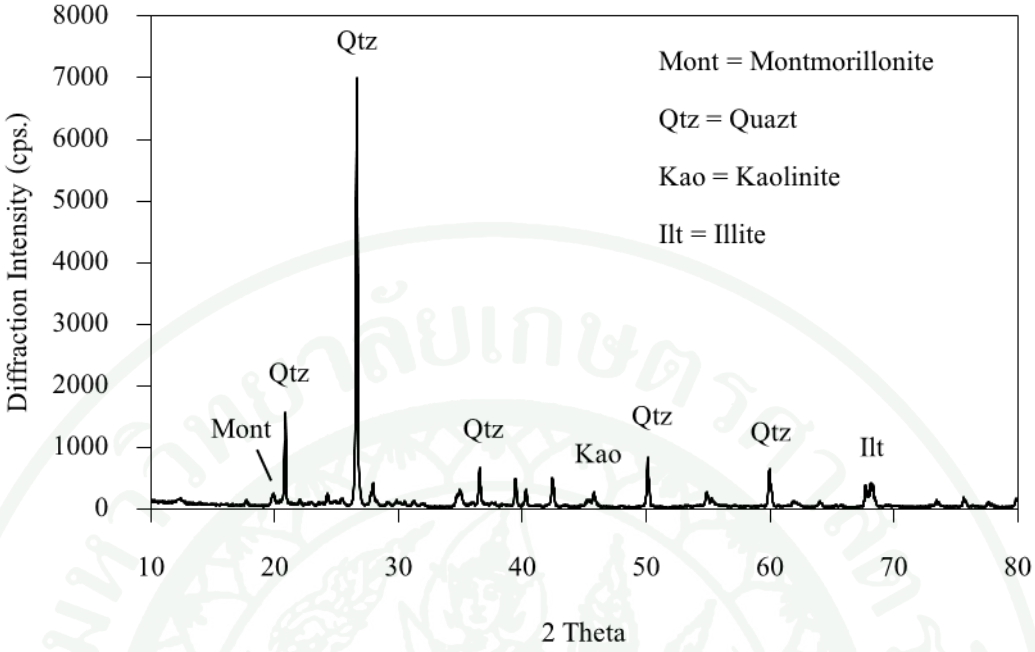
ที่มา: ณพล (2554)



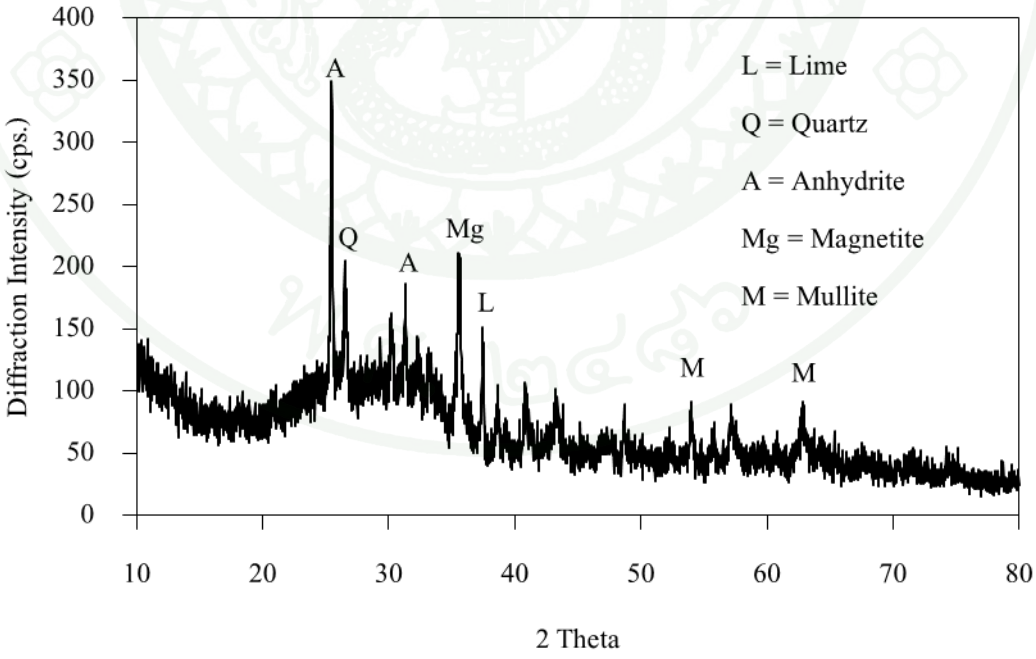
ภาพที่ 26 การกระจายขนาดเม็ดดินของกากดินขาว

หมายเหตุ Dry sieve

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

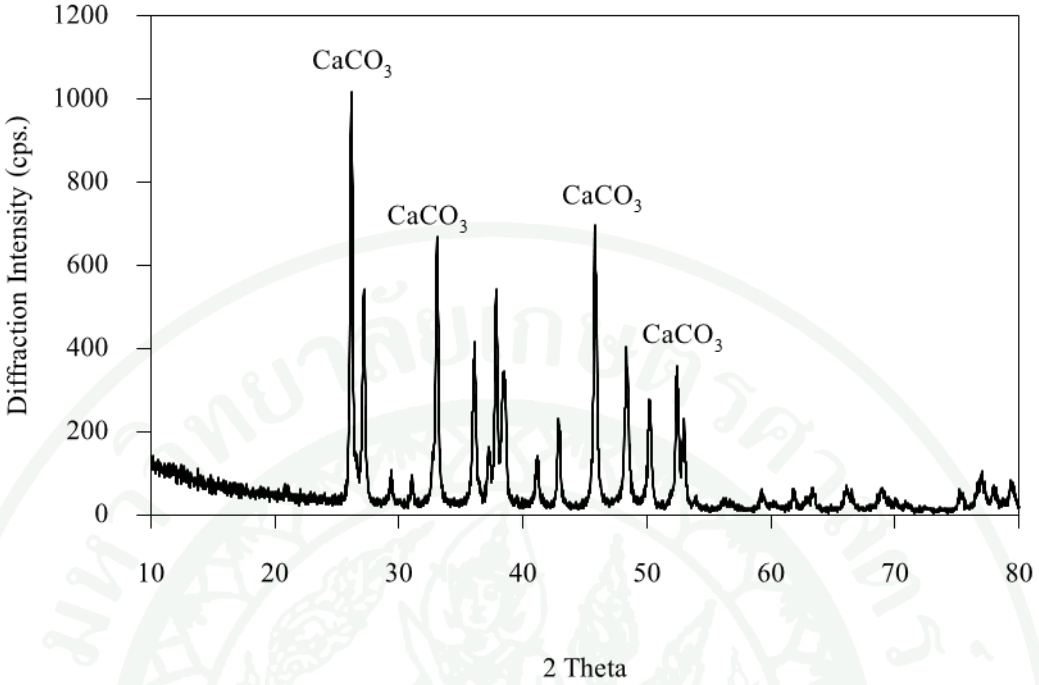


ภาพที่ 27 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRD ของกากดินขาว

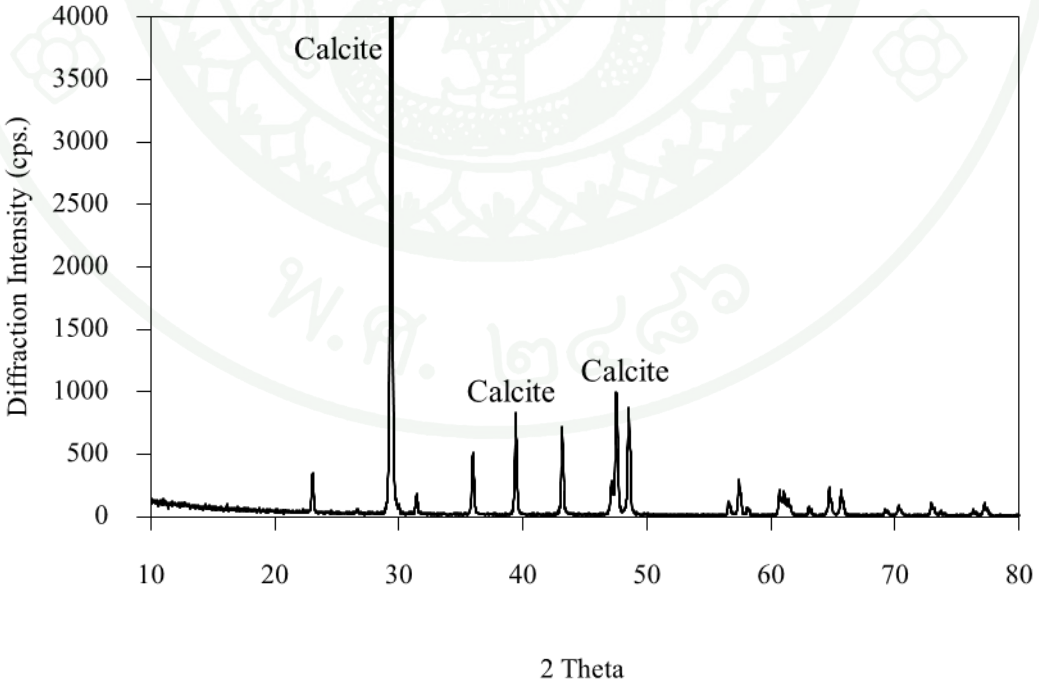


ภาพที่ 28 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRD ของเถ้าลอย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 29 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRD ของเปลือกหอยแครง



ภาพที่ 30 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRD ของผงหินปูน

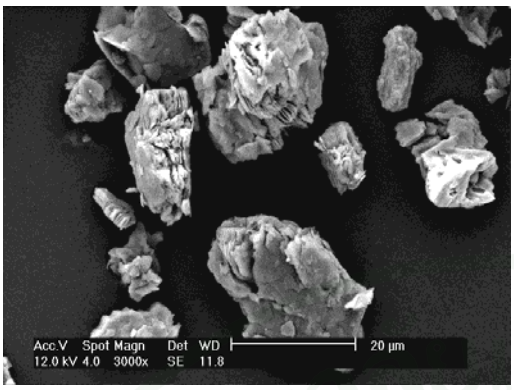
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 27 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRD ของกากดินขาว พบว่า มีแร่สำคัญประกอบด้วย Montmorillonite, Kaolinite, Illite และ Quartz (SiO_2) สำหรับเถ้าลอยประกอบด้วย Lime, Quartz, Anhydrite, Magnetite และ Mullite ซึ่งมีปริมาณของ Anhydrite มากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 28 ส่วนเปลือกหอยแครงประกอบด้วยสารแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 29 และผงหินปูนซึ่งประกอบด้วยแคลไซต์ โดยมีปริมาณสูงที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 30

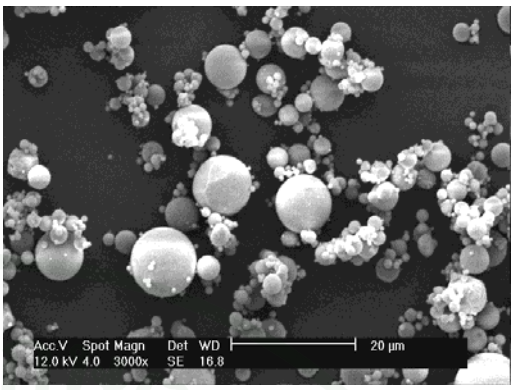
การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของกากอุตสาหกรรมทั้ง 4 ประเภท โดยการวิเคราะห์ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน SEM พบว่า กากดินขาวมีลักษณะของอนุภาคเป็นแผ่นเกล็ด ซ้อนกันอยู่ ดังแสดงในภาพที่ 31(ก) เถ้าลอยมีอนุภาคลักษณะเป็นทรงกลม ขนาดไม่เท่ากัน ดังแสดงในภาพที่ 31(ข) ส่วนเปลือกหอยแครงพบว่า ผิวของอนุภาคขรุขระ ไม่เรียบ ดังแสดงในภาพที่ 31(ค) และผงหินปูนมีลักษณะของอนุภาคคล้ายกับกากดินขาว ที่เป็นแผ่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 31(ง)

ผลการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของกากอุตสาหกรรมโดยการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่อง X-Ray Florescence Spectrometry หรือ XRF พบว่า กากดินขาวและเถ้าลอยมีปริมาณซิลิกอนออกไซด์ มากที่สุดคือ 72.37 และ 36.79 % ตามลำดับ ส่วนเปลือกหอยแครงและผงหินปูนมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์มากที่สุดคือ 53.19 และ 51.70 % ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 14

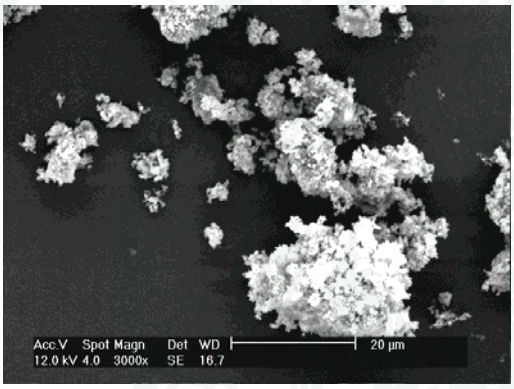
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



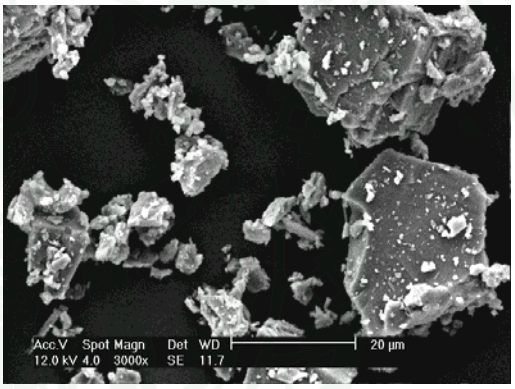
(ก) กากดินขาว (กำลังขยาย × 3000)



(ข) เถ้าลอย (กำลังขยาย × 3000)



(ค) เปลือกหอยแครง (กำลังขยาย × 3000)



(ง) ผงหินปูน (กำลังขยาย × 3000)

ภาพที่ 31 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของกากอุตสาหกรรม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 14 องค์ประกอบทางเคมีจากกากอุตสาหกรรม

องค์ประกอบทางเคมี (%โดยน้ำหนัก)	กากดินขาว	เปลือกหอยแครง	ผงหินปูน	เถ้าลอย
CaO	1.72	53.91	51.70	16.60
Al_2O_3	19.41	-	0.06	19.90
SiO_2	72.37	0.07	0.11	36.79
Fe_2O_3	1.76	0.02	0.04	10.09
Na_2O	0.97	0.50	0.01	10.28
MgO	0.13	0.03	0.36	1.98
K_2O	3.05	0.002	0.005	2.92
LOI	- *	44.70	42.40	0.24
รวม	99.41	99.23	94.63	98.83

หมายเหตุ * หมายถึง ไม่มีผลทดสอบ

การคำนวณสัดส่วนผสมของกากอุตสาหกรรม

สัดส่วนที่ทำให้ปูนซีเมนต์มีสารเชื่อมประสานคุณภาพดีจำเป็นต้องยึดหลักเกณฑ์เบื้องต้น โดยการคำนวณค่าผลรวมของออกไซด์แต่ละชนิด คือ ค่า Hydration Modulus (HM), ค่า Lime Saturation Facto (LSF), ค่า Silica Ratio (SR) และค่า Alumina Ratio (AR) ดังแสดงในตารางที่ 15 จากนั้นจึงนำไปเผาตามรูปแบบอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 32 รูปแบบที่ใช้เผาพิจารณาจากปริมาณสารผลิตภัณฑ์รวมที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาด้วยเตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง คือ ก้อนผลึกแข็งสีเทาดำและผงสีน้ำตาลอ่อน ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 7°C/นาที และระยะเวลาในการเผาที่ยาวนานเท่ากับ 5.85 ชั่วโมง จะให้ปริมาณสารผลิตภัณฑ์มากที่สุด (ณพล, 2554)

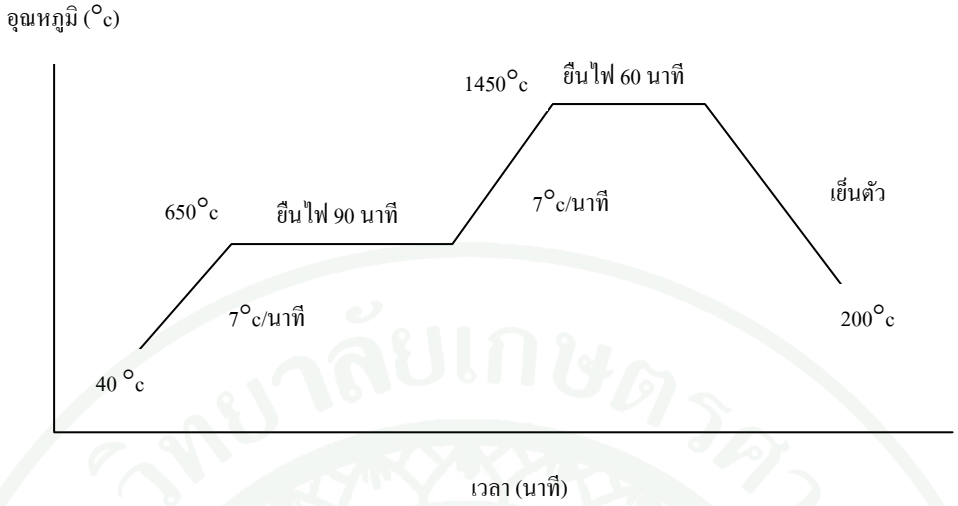
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 15 การคำนวณสัดส่วนผสมของกากอุตสาหกรรมเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้น

สัดส่วนผสม	กากอุตสาหกรรม (ร้อยละ)					ทั้งหมด (ร้อยละ)
	เปลือกหอยแครง	ผงหินปูน	กากดินขาว	เถ้าลอย	ปูนขาว	
C1	50	15	15	10	10	100
C2	40	25	15	10	10	100
C3	45	20	15	10	10	100
C4	40	25	10	5	20	100
C5	70	10	20	0	0	100
C6	80	0	20	0	0	100
C7	65	15	20	0	0	100
C8	50	10	15	15	10	100
C9	45	15	5	25	10	100
C10	65	10	20	0	5	100

จากตารางที่ 17 แสดงน้ำหนักเฉลี่ยของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเผาสัดส่วนผสมทั้งหมด พบว่า ประมาณร้อยละ 90 เกิดเป็นก้อนผลึกแข็งสีเทาดำเกิดขึ้น และประมาณร้อยละ 10 เกิดเป็นผงสีน้ำตาล ดังแสดงในภาพที่ 33 จากนั้นนำสารเชื่อมประสานไปบดให้มีความละเอียดในช่วง 3,200 – 3,600 ซม.^{2}/กรัม เพื่อทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี XRF และ XRD เพื่อประเมินสารประกอบหลักเทียบกับ GCM ที่สังเคราะห์โดย ณพลและคณะ (2554) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ดังแสดงในตารางที่ 18

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



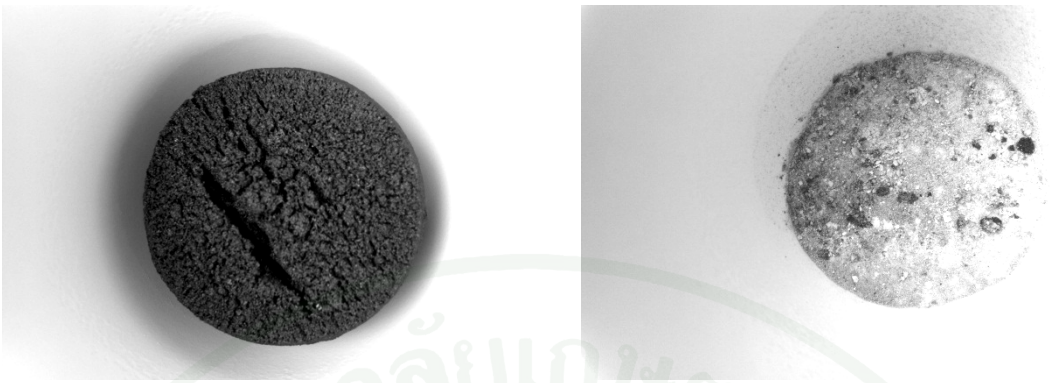
ภาพที่ 32 รูปแบบและระยะเวลาการเผาที่ใช้ในงานวิจัย

ที่มา: ณพล (2554)

ตารางที่ 16 การคำนวณเกณฑ์การคัดเลือกสัดส่วนกากอุตสาหกรรม

สัดส่วนผสม	Initial Hydration Modulus* (HM)	Lime Saturation Factor (LSF)	Silica Ratio (SR)	Alumina Ratio (AR)
C1	2.24	98.21	2.35	3.81
C2	2.23	97.71	2.35	3.81
C3	2.24	97.96	2.35	3.81
C4	4.34	188.05	2.50	4.22
C5	2.30	94.99	3.41	10.51
C6	2.31	95.52	3.42	10.55
C7	2.29	94.73	3.41	10.49
C8	1.86	82.93	2.13	3.29
C9	2.16	103.34	1.50	2.27
C10	2.42	100.08	3.41	10.54

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก) ก้อนผลึกแข็งสีเทาดำ (ข) ผงสีน้ำตาลอ่อน

ภาพที่ 33 ตัวอย่างสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเผาสัดส่วนผสม

ตารางที่ 17 น้ำหนักเฉลี่ยของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผา

สัดส่วนผสม	ก้อนผลึกสีดำ (กรัม)	ผงสีน้ำตาล (กรัม)	รวมทั้งหมด (กรัม)	ก้อนผลึกสีดำ (%)	ผงสีน้ำตาล (%)	รวมทั้งหมด (%)
C1	64.39	2.43	66.82	96.36	3.63	100
C2	64.28	2.51	66.79	96.24	3.76	100
C3	64.67	2.31	65.98	96.55	3.45	100
C4	62.72	1.03	63.75	98.38	1.62	100
C5	61.74	2.21	63.95	96.54	3.46	100
C6	59.81	4.82	64.63	92.54	7.46	100
C7	60.74	4.05	64.79	93.75	6.25	100
C8	55.26	12.65	67.82	81.48	18.52	100
C9	61.71	3.33	65.04	94.88	5.12	100
C10	62.45	4.06	66.51	93.90	6.10	100

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 18 องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี X-Ray Florescence Spectrometry (XRF) ของวัสดุก้อนสีเทาดำที่ได้จากการเผา

สัดส่วน	องค์ประกอบทางเคมี (%)					
	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3
OPC	65.79	24.11	5.72	1.92	1.55	14.14
GCM*	64.31	18.42	9.25	2.63	1.23	0.09
C1	64.48	24.77	6.87	2.60	0.49	0.78
C2	65.55	24.11	6.44	2.69	0.64	0.57
C3	63.79	25.12	6.69	2.51	1.12	0.76
C4	77.79	17.31	4.65	1.35	1.66	1.70
C5	69.50	25.42	4.77	0.71	1.15	0.83
C6	68.52	25.72	5.33	0.10	1.11	0.92
C7	96.28	25.36	4.98	0.35	1.17	0.69
C8	59.49	27.19	8.16	0.69	1.72	4.22
C9	68.94	25.62	5.06	0.05	1.17	0.69
C10	64.99	27.40	5.87	0.73	1.37	1.60

หมายเหตุ * จากการศึกษาโดย ณพล (2554)

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของสารผลิตภัณฑ์

จากการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRF พบว่า สัดส่วน C1, C2 และ C3 มีปริมาณออกไซด์หลัก คือ CaO, SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) และ GCM เมื่อเทียบปริมาณออกไซด์หลักของสัดส่วน C1, C2 และ C3 พบว่า ใกล้เคียงกับค่าที่แนะนำโดย M.L. Gambhir (2004) ดังตารางที่ 19 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRD เพื่อยืนยันคุณสมบัติที่ดีของปูนซีเมนต์สังเคราะห์พบว่า ทุกสัดส่วนมีลักษณะรูปแบบการหักเหเดียวกับ OPC และ GCM ดังแสดงในภาพที่ 34 จากนั้นทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบหลักจำพวก C_3S (Tri-calcium silicate) และ C_2S (Di-calcium silicate) เมื่อผสมกับน้ำจะทำให้เกิดปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลักจำพวก CSH (Calcium silicate hydrate) และ $Ca(OH)_2$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(Calcium hydroxide) พบว่า ทุกสัดส่วนมีปริมาณสารประกอบมากกว่าสารเชื่อมประสาน GCM ที่ได้จากงานวิจัย ณพลและคณะ (2554) โดยสัดส่วน C1, C2 และ C3 มีปริมาณสารประกอบหลัก C_3S และ C_2S ใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 20) และสอดคล้องกับผลการทดสอบการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์เบื้องต้น ที่จะกล่าวในลำดับต่อไป

ตารางที่ 19 ปริมาณออกไซด์ของปูนซีเมนต์ที่แนะนำโดย M.L. Gambhir (2004)

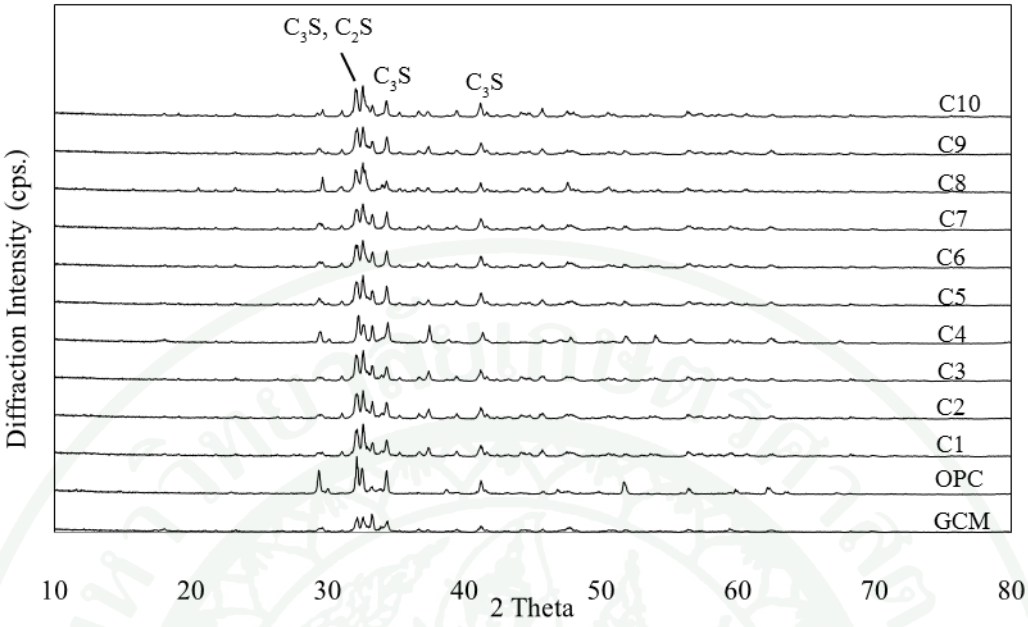
องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	ช่วงระหว่าง	เฉลี่ย
CaO	60 – 65	63
SiO_2	17 – 25	20
Al_2O_3	3 – 8	6.3
Fe_2O_3	0.5 – 6	3.6
MgO	0.5 – 4	2.4
SO_3	1 – 2	1.5
Alkalis, $Na_2O + K_2O$	0.5 - 1.3	1.0

ที่มา: Gambhir (2004)

จากการทดสอบการจับตัวกันเป็นก้อนของวัสดุที่สังเคราะห์ทุกตัวอย่าง พบว่าสารผลิตภัณฑ์มีจับตัวกันเป็นก้อนและแข็งตัวได้ หลังจากนั้นนำสารผลิตภัณฑ์ไปทดสอบการคงตัวโดยการนำตัวอย่างไปแช่น้ำ (slaking) พบว่า เพสต์จากสัดส่วน C1, C2 และ C3 ยังคงจับตัวเป็นก้อน ไม่พบการบวมตัวและการหลุดร่อนของผิว สำหรับเพสต์จากสัดส่วน C4 ร่วนละลายไปกับน้ำ และเพสต์จากสัดส่วนอื่นๆ พบลักษณะร่วน ผิวหลุดร่อนและเกิดการบวมตัว ดังแสดงในภาพที่ 35

จากผลการศึกษาเบื้องต้น สรุปได้ว่าสัดส่วนที่เหมาะสำหรับการวิจัยเพื่อพัฒนาปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม คือ สัดส่วน C1, C2 และ C3 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ผ่านการทดสอบการคงตัวในเบื้องต้นแล้วโดยนำสัดส่วนทั้งสามไปทดสอบความเป็นไปได้ด้านกำลังรับแรงอัดมอร์ต้าต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

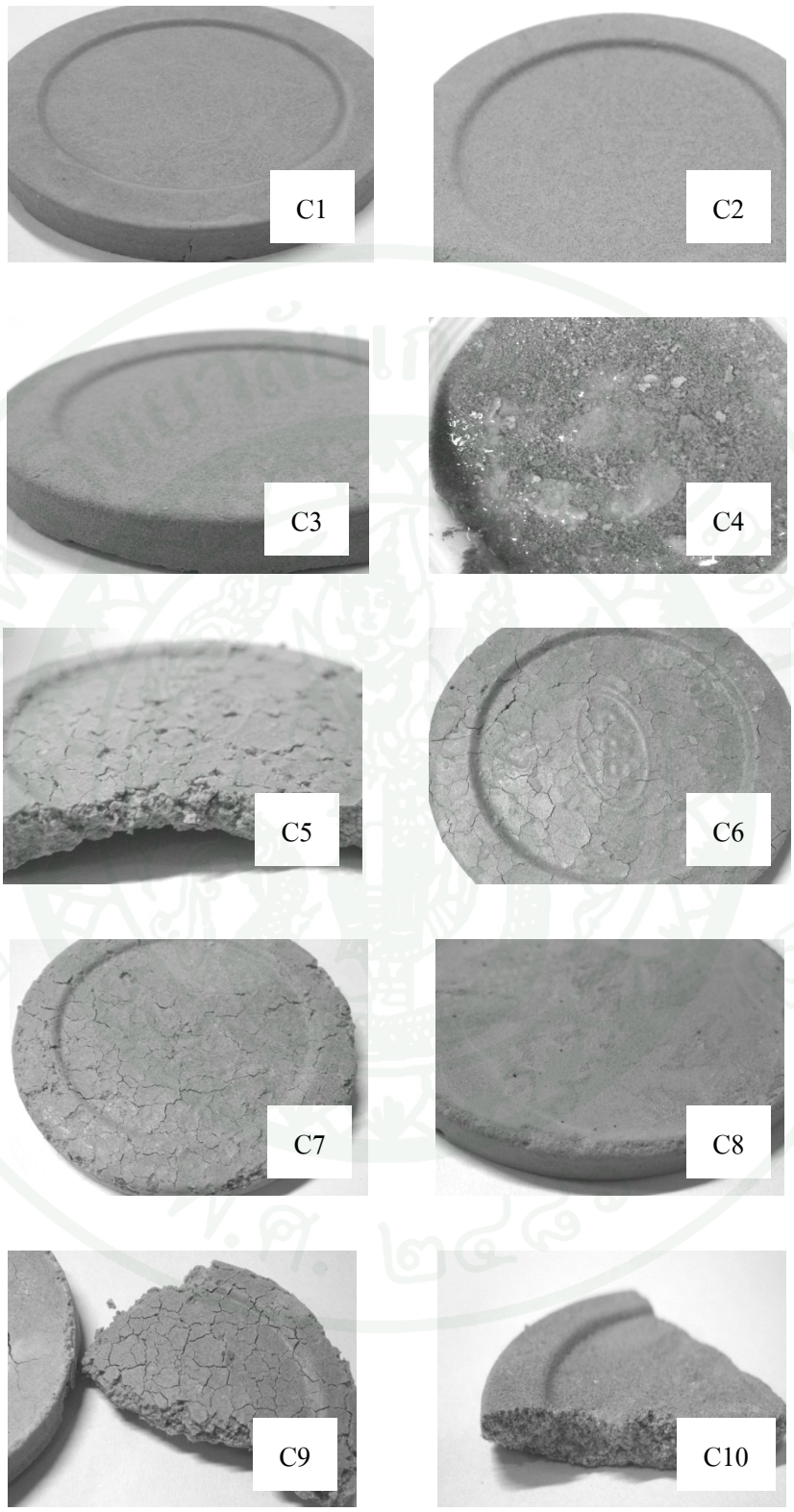


ภาพที่ 34 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์โดยวิธี X-Ray Diffraction (XRD)

ตารางที่ 20 สารประกอบหลักจำพวก C_3S และ C_2S ของสารเชื่อมประสาน

สัดส่วนผสม	ปริมาณสารประกอบหลัก (cps.)	
	C_3S	C_2S
C1	738	877
C2	639	743
C3	710	831
C4	471	504
C5	655	751
C6	665	683
C7	651	660
C8	707	677
C9	695	703
C10	819	764
OPC	1194	908
GCM	386	421

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 35 การทดสอบการคงตัว (slaking) ของซีเมนต์เพสต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การคัดเลือกสัดส่วนเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน

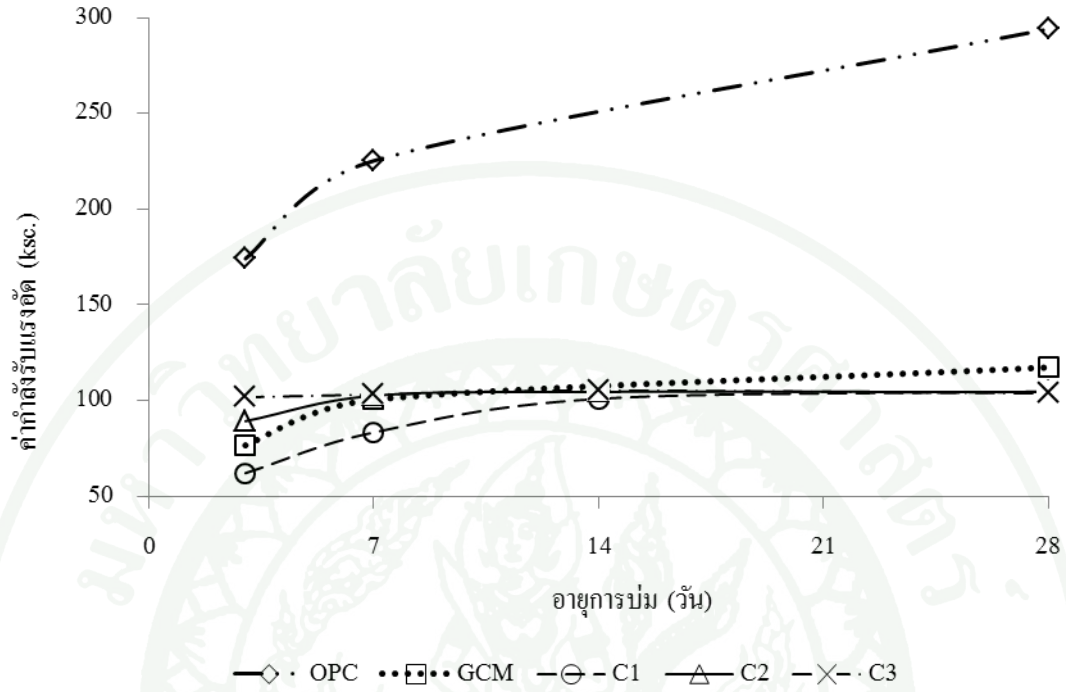
จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าตามมาตรฐาน ASTM C109 ขนาดลูกบาศก์ 5×5×5 ซม^2. พบว่า ทั้งสามสัดส่วนมีการพัฒนากำลังอย่างต่อเนื่องตามอายุการบ่ม แต่ยังมีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่า OPC และ GCM โดยสัดส่วน C1 มีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 62.02 ksc. เป็น 104.69 ksc. ที่อายุการบ่ม 28 วัน ส่วนสัดส่วน C2 มีค่ากำลังรับแรงอัดเริ่มต้นเท่ากับ 89.16 ksc. ซึ่งมีค่ามากกว่า C1 และพัฒนากำลังจนถึง 104.33 ksc. ที่อายุการบ่ม 28 วัน และสัดส่วน C3 มีค่ากำลังรับแรงอัดเริ่มต้นเท่ากับ 101.66 ksc. ซึ่งมีค่ามากกว่า C1 และ C2 ตามลำดับ และพัฒนากำลังจนถึง 103.65 ksc. ที่อายุการบ่ม 28 วัน แสดงในตารางที่ 21 และภาพที่ 36

ตารางที่ 21 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า ที่อายุการบ่มต่างๆ

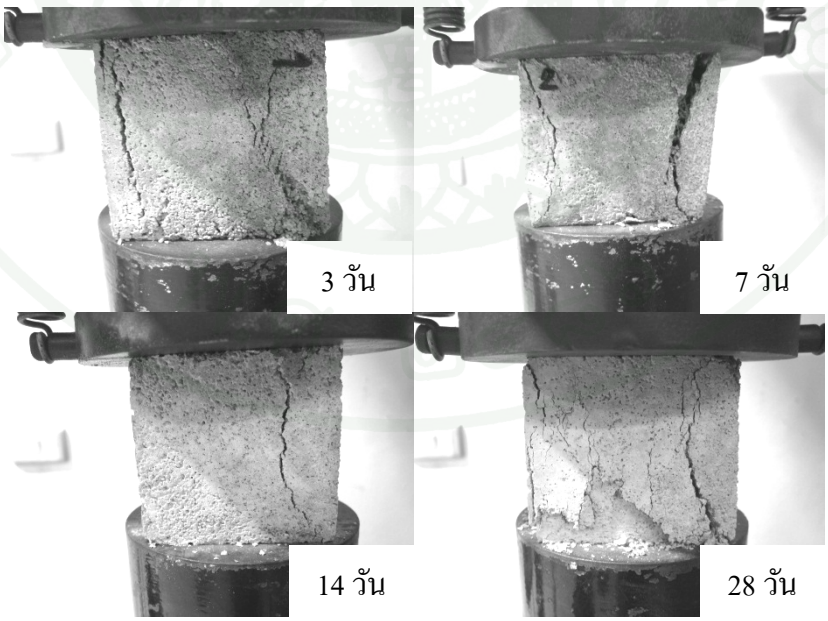
สัดส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด (ksc.)			
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
OPC	174.12	225.28	*	294.06
GCM	76.56	100.42	*	117.23
C1	62.02	83.26	100.84	104.69
C2	89.16	102.46	104.47	104.33
C3	101.66	103.08	105.15	103.65

หมายเหตุ * หมายถึง ไม่มีผลการทดสอบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

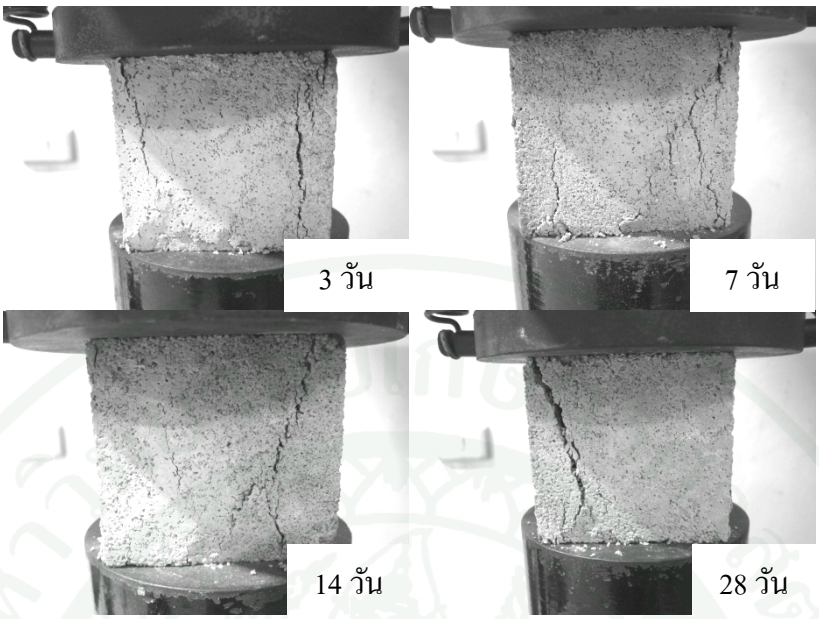


ภาพที่ 36 แนวโน้มกำลังรับแรงอัดมอร์ต้าที่อายุการบ่มต่างๆ

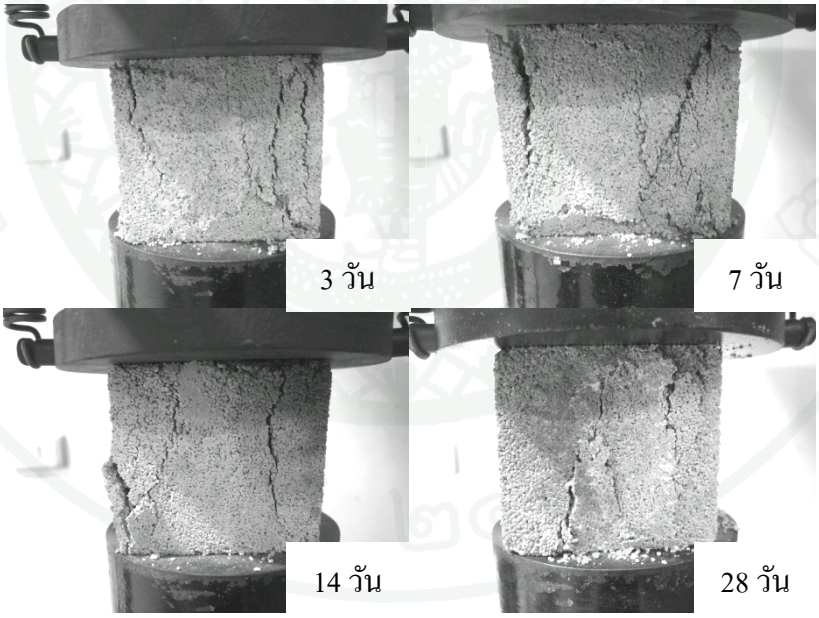


ภาพที่ 37 ลักษณะการวิบัติของซีเมนต์มอร์ต้า C1 ที่อายุการบ่มต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 38 ลักษณะการวิบัติของซีเมนต์มอร์ต้า C2 ที่อายุการบ่มต่างๆ

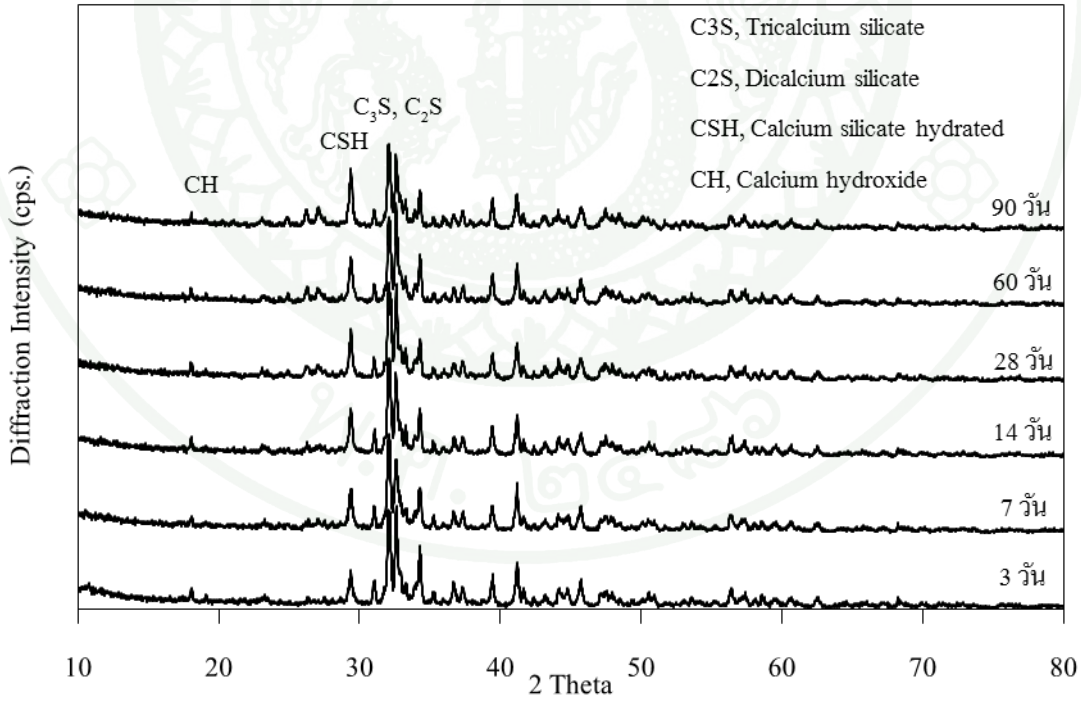


ภาพที่ 39 ลักษณะการวิบัติของซีเมนต์มอร์ต้า C3 ที่อายุการบ่มต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

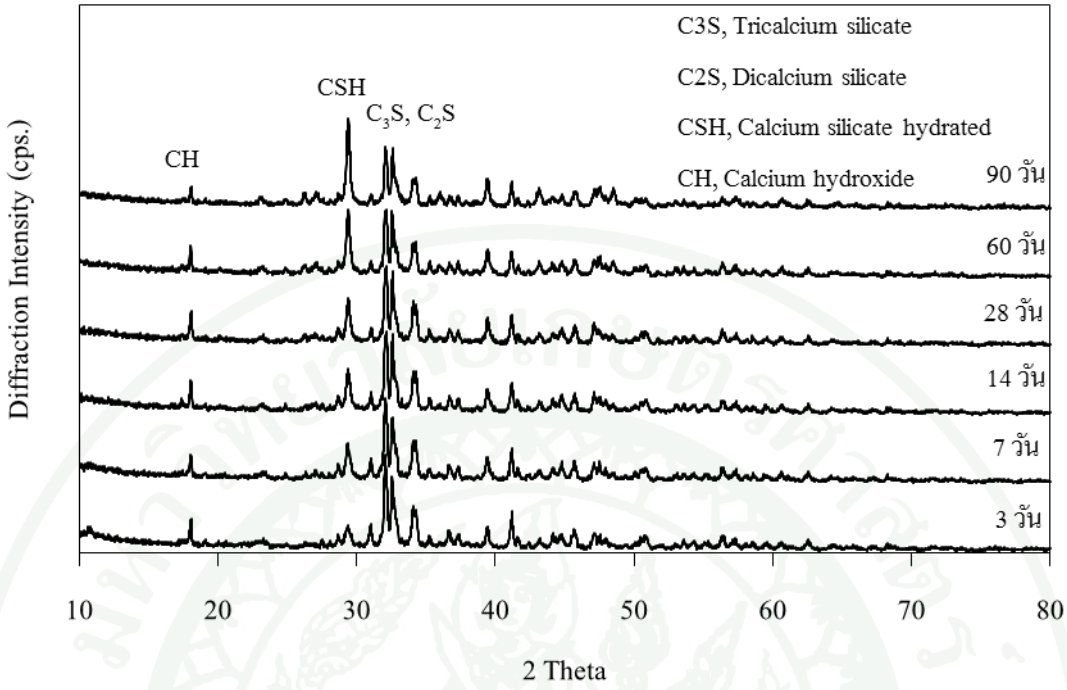
เมื่อสังเกตลักษณะการวิบัติของซีเมนต์มอร์ต้า C1-C3 พบว่ามุมระนาบการวิบัติในแนวดิ่งและเอียงทำมุมประมาณ 30 องศากับแนวแรงที่กระทำกับตัวอย่าง และบริเวณโดยรอบของการวิบัติพบการหลุดร่อนของทรายปะปนเล็กน้อย แสดงในภาพที่ 37 – ภาพที่ 39

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ทั้งสามสัดส่วน ดังแสดงในภาพที่ 40 ถึงภาพที่ 42 พบว่า ทุกสัดส่วนมีปริมาณสารประกอบหลัก C_3S และ C_2S ลดลงตามอายุการบ่ม และมีปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยสัดส่วน C3 มีปริมาณสารประกอบหลัก C_2S และ C_3S มากที่สุด รองลงมาคือ C2 และ C1 ตามลำดับ และทำนองเดียวกัน สัดส่วน C3 ก็มีปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก C_2S และ C_3S มากที่สุดเช่นกัน รองลงมาคือ C2 และ C1 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 22 สำหรับปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH พบว่า มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ดังแสดงในตารางที่ 23 สำหรับปริมาณสารผลิตภัณฑ์ $Ca(OH)_2$ จากตารางที่ 24 พบว่า มีปริมาณลดลงตามอายุการบ่ม เนื่องจากถูกนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาในระยะยาว (Pozzolanic Reaction) ซึ่งสอดคล้องกับผลวิจัยของ ณพล (2554)

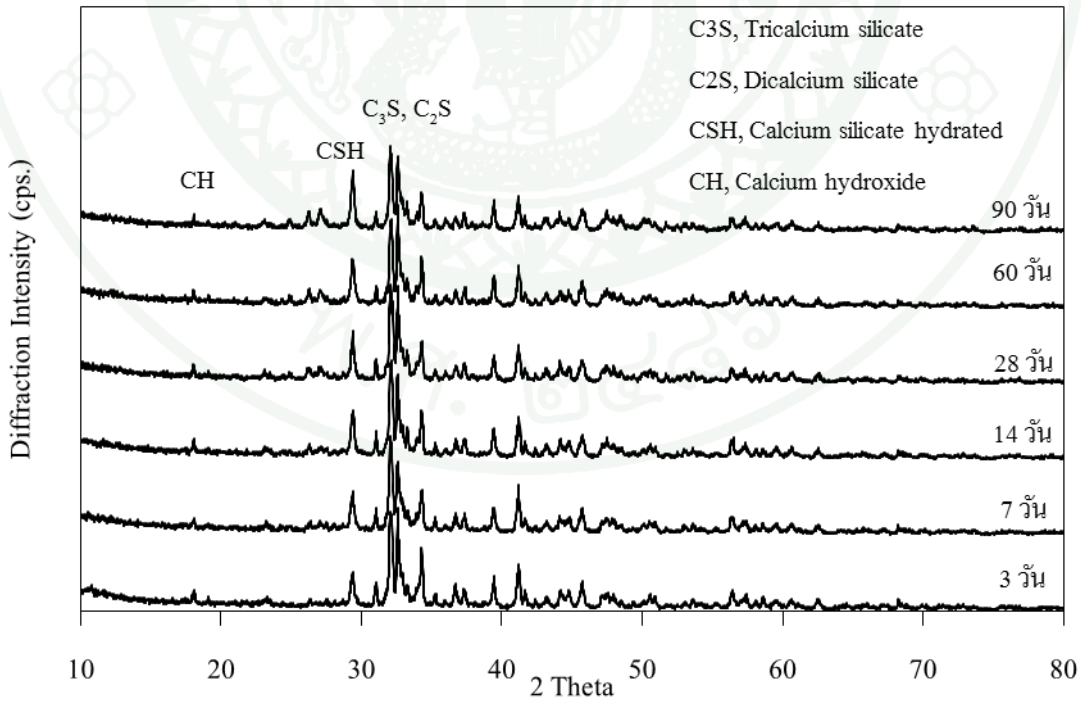


ภาพที่ 40 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRD ของซีเมนต์เพสต์ C1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 41 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRD ของซีเมนต์เพสต์ C2



ภาพที่ 42 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRD ของซีเมนต์เพสต์ C3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 22 ปริมาณสารประกอบหลัก C_3S และ C_2S ของซีเมนต์เพสต์

วัน	C_3S (cps.)			C_2S (cps.)		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3
3	480	519	576	472	515	520
7	464	475	539	413	431	452
14	434	447	460	395	403	424
28	367	402	407	346	354	364
60	364	370	396	329	334	345
90	352	363	385	301	319	336

ตารางที่ 23 ปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH ของซีเมนต์เพสต์

วัน	ปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH (cps.)		
	C1	C2	C3
3	170	197	256
7	204	303	358
14	262	346	379
28	282	359	381
60	328	418	484
90	392	491	539

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

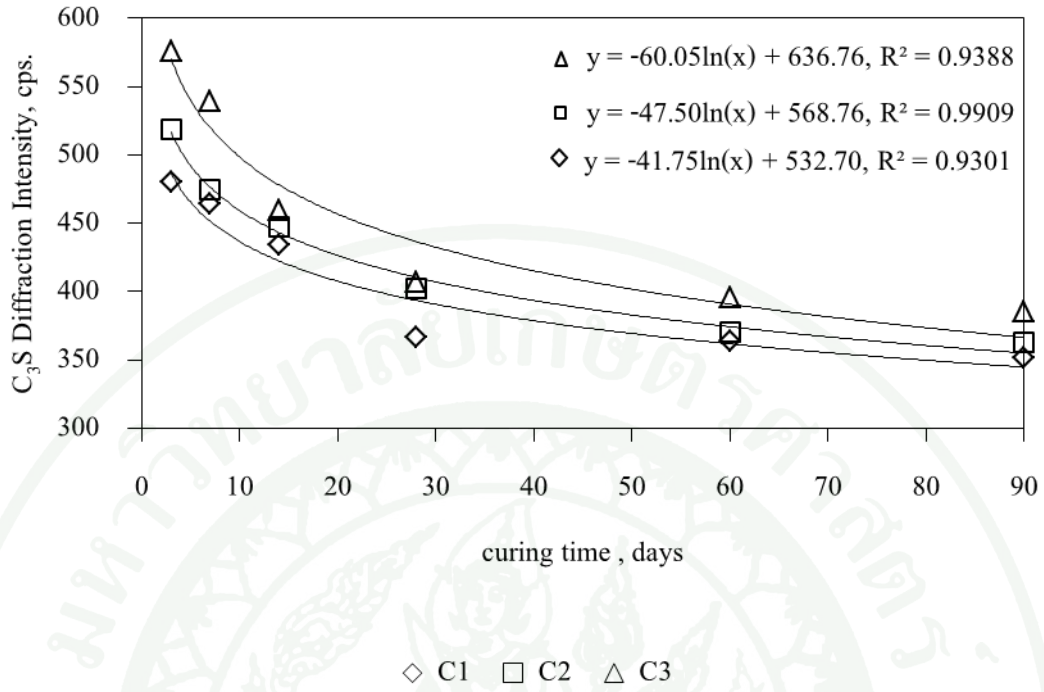
ตารางที่ 24 ปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก $Ca(OH)_2$ ของซีเมนต์เพสต์

วัน	ปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก $Ca(OH)_2$ (cps.)		
	C1	C2	C3
3	225	187	141
7	219	159	122
14	216	132	106
28	180	130	100
60	125	128	98
90	101	96	86

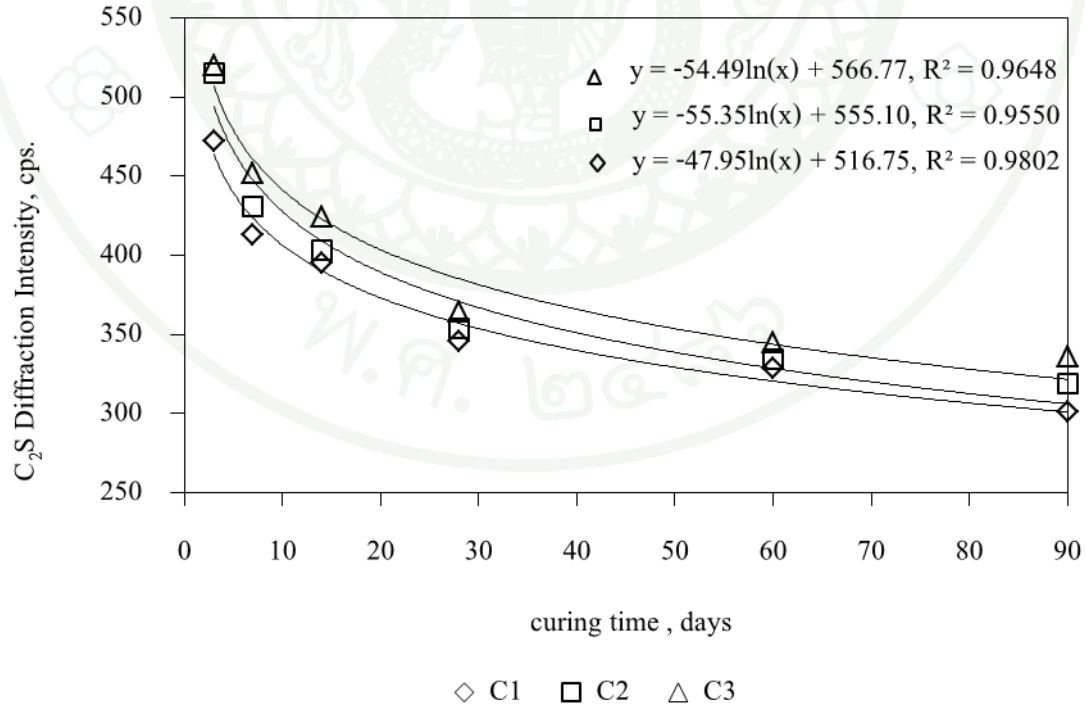
จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อสารเชื่อมประสานผสมกับน้ำ ปริมาณสารประกอบหลัก C_3S และ C_2S มีค่าลดลงตามอายุการบ่ม ดังแสดงในภาพที่ 43 และภาพที่ 44 เนื่องจากน้ำถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในการสร้างสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม แสดงในภาพที่ 45 สำหรับอัตราการลดลงของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 14 วันแรก จากนั้น มีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่ ในทำนองเดียวกัน อัตราการเพิ่มขึ้นของสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วง 14 วันแรก หลังจากนั้น มีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ลดลงจนกระทั่งเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ในระยะยาว เช่นเดียวกับอัตราการลดลงของสารผลิตภัณฑ์หลัก $Ca(OH)_2$ ที่มีแนวโน้มการลดลงอย่างชัดเจนในช่วง 14 วันแรก หลังจากนั้น จึงเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ในระยะยาว (Pozzolanic Reaction) ภาพที่ 47 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดมอร์ต้ากับปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH จะสังเกตเห็นได้อย่างชัดว่า กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ CSH ที่เพิ่มขึ้น

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) ของซีเมนต์เพสต์จากสัดส่วน C2 เพื่อเป็นการยืนยันว่าเกิดสารผลิตภัณฑ์ CSH เพิ่มมากขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นจาก 3 วัน ไปจนถึงระยะเวลา 90 วัน แสดงในภาพที่ 48 – ภาพที่ 53 สำหรับงานวิจัยนี้เลือกสัดส่วนผสม C2 เป็นตัวแทนของปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มีผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและการพัฒนากำลังอัดมอร์ต้าเฉลี่ยระหว่าง C1 และ C3 จึงนำสัดส่วน C2 ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

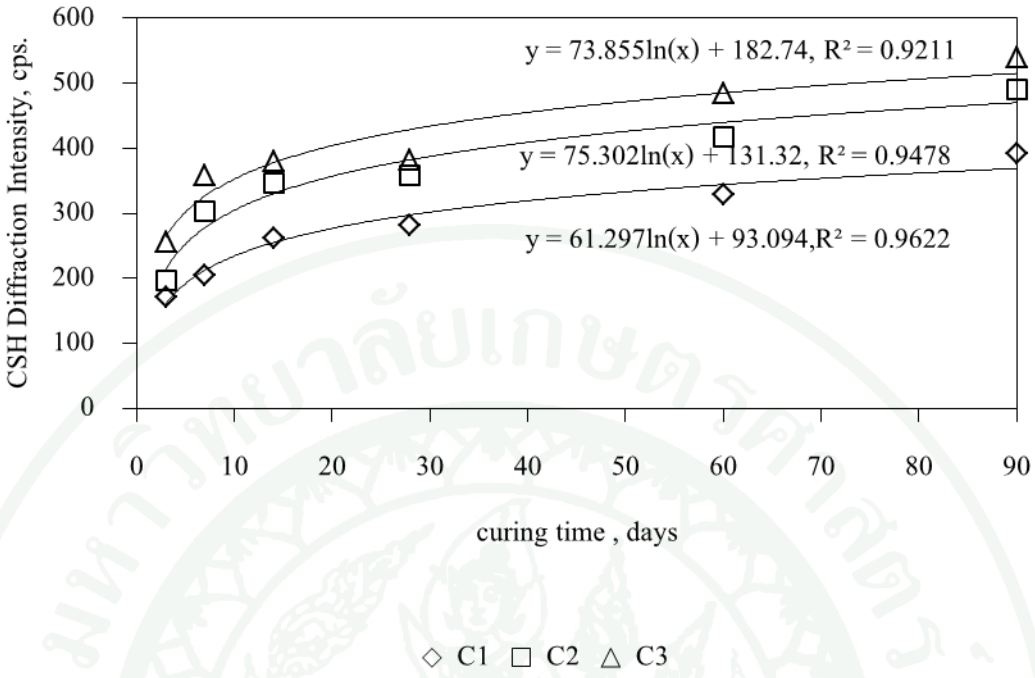


ภาพที่ 43 ปริมาณสารประกอบหลัก C_3S ตามอายุการบ่มของซีเมนต์เพสต์ C1, C2 และ C3

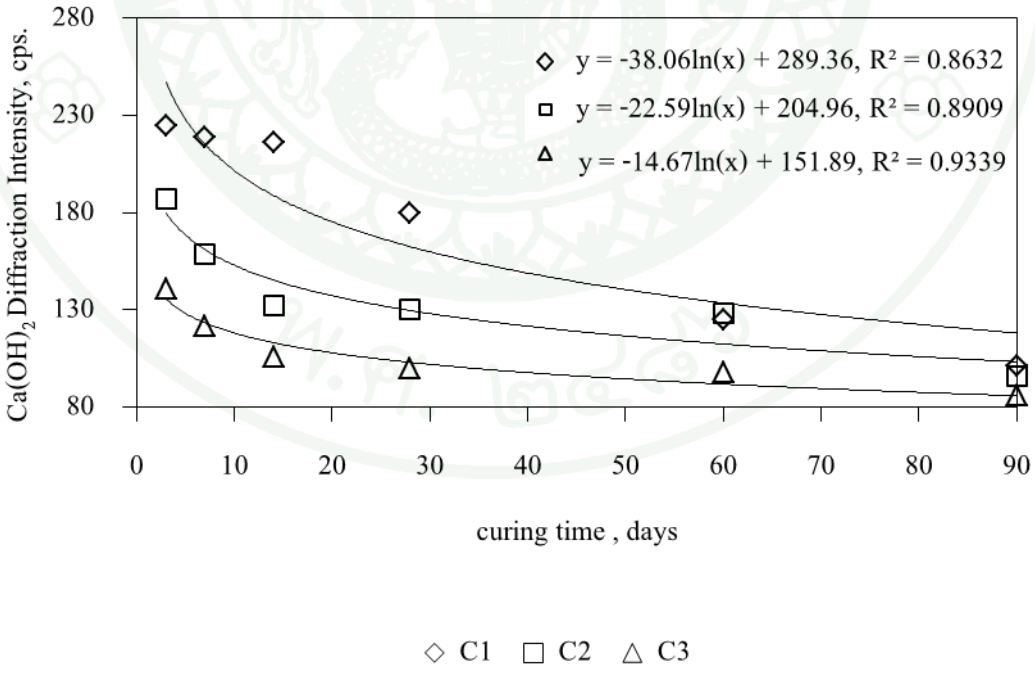


ภาพที่ 44 ปริมาณสารประกอบหลัก C_2S ตามอายุการบ่มของซีเมนต์เพสต์ C1, C2 และ C3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

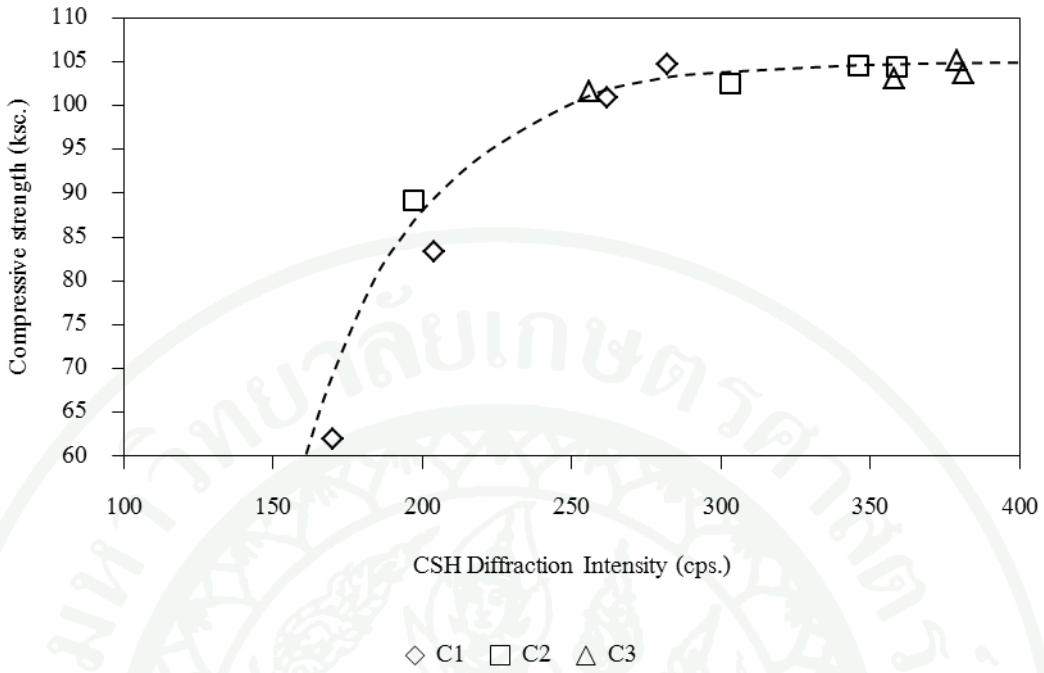


ภาพที่ 45 ปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH ตามอายุการบ่มของซีเมนต์เพสต์ C1, C2 และ C3

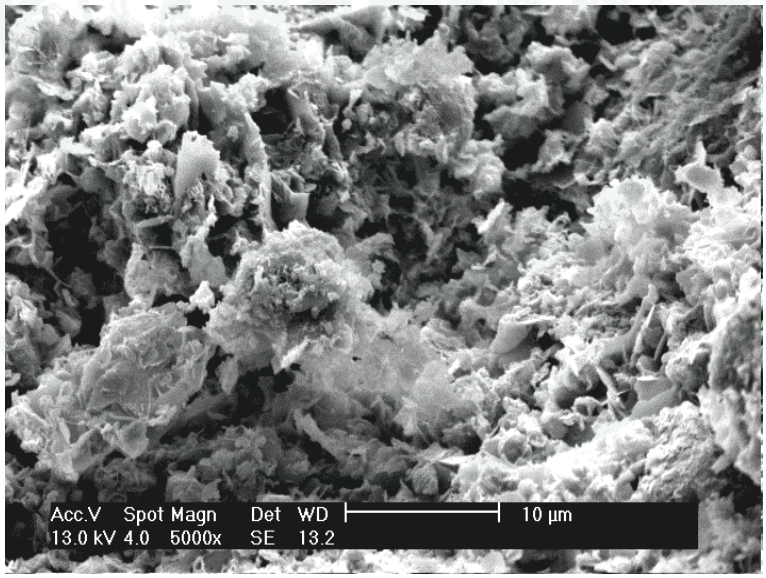


ภาพที่ 46 ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ $Ca(OH)_2$ ตามอายุการบ่มของซีเมนต์เพสต์ C1, C2 และ C3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

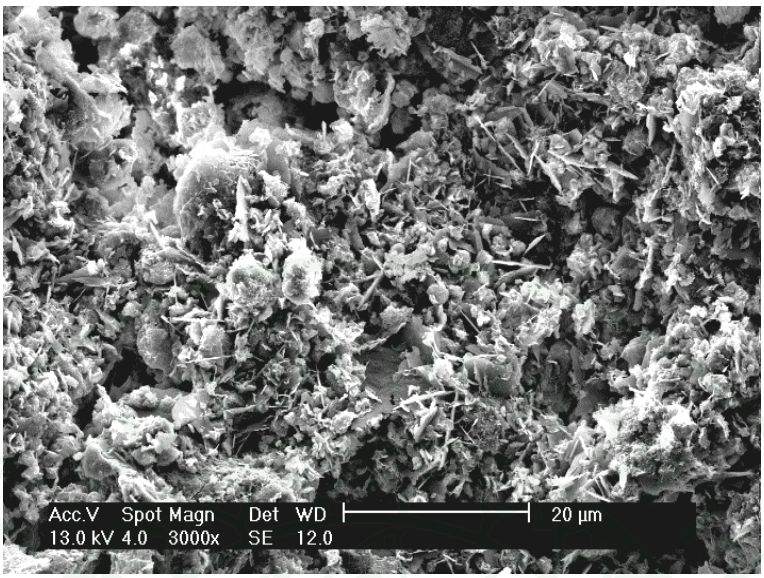


ภาพที่ 47 ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH กับกำลังรับแรงอัดมอร์ต้า

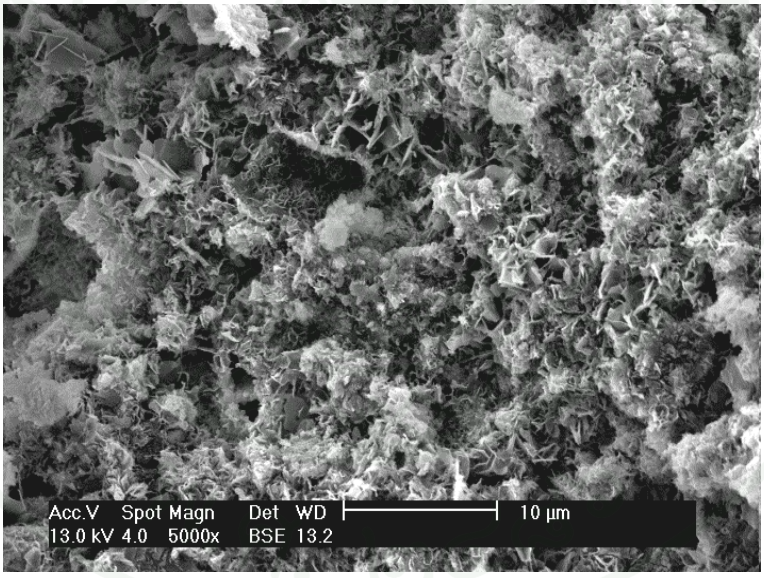


ภาพที่ 48 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย × 5000)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

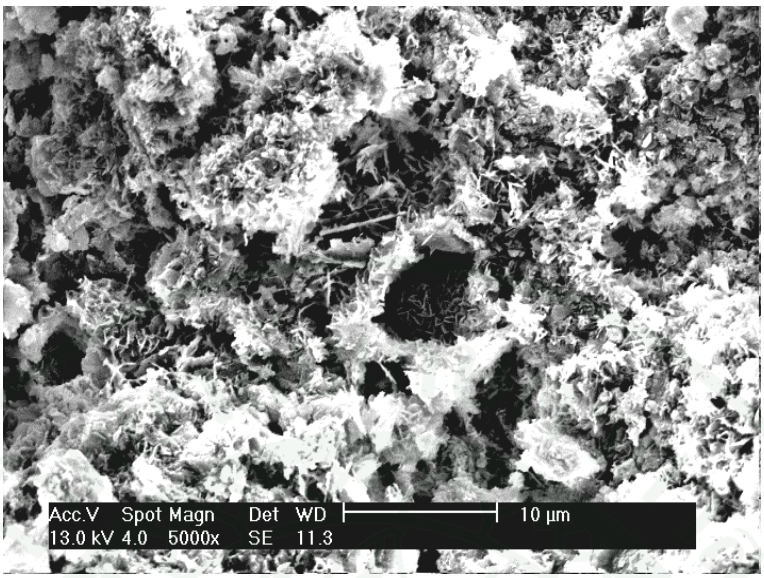


ภาพที่ 49 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย × 3000)

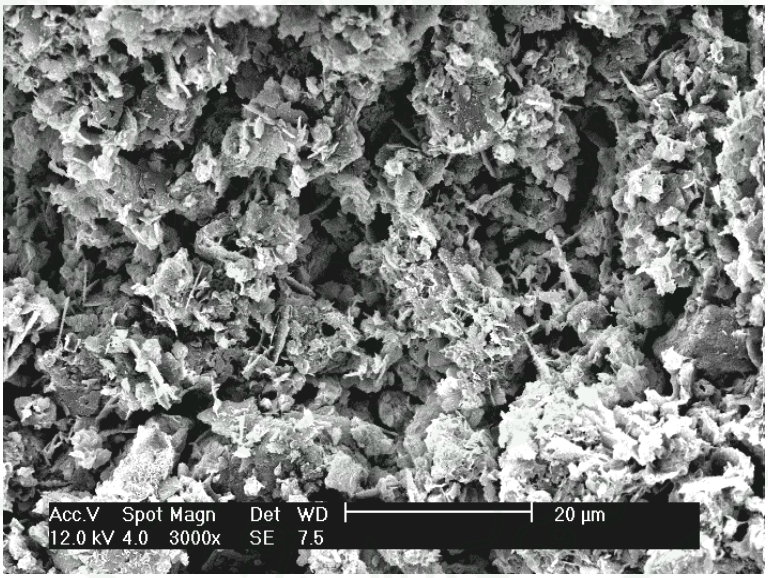


ภาพที่ 50 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 14 วัน (กำลังขยาย × 5000)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

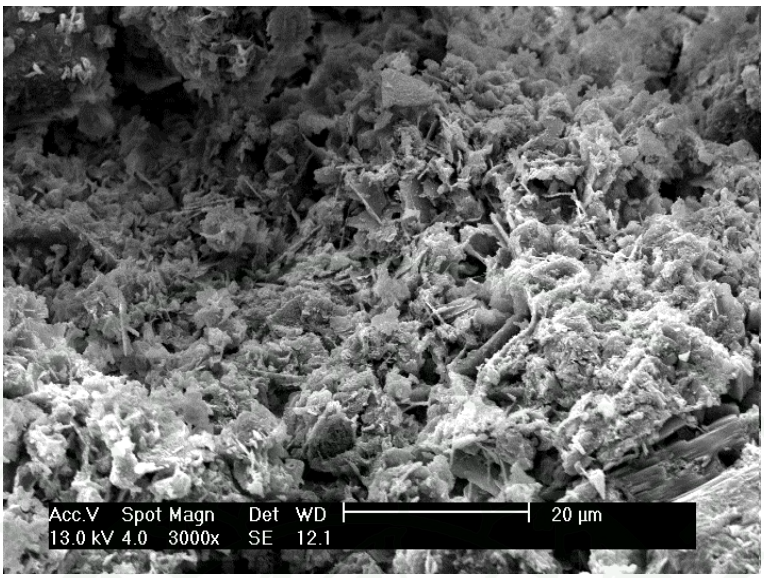


ภาพที่ 51 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 28 วัน (กำลังขยาย × 5000)



ภาพที่ 52 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 60 วัน (กำลังขยาย × 3000)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 53 โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 90 วัน (กำลังขยาย × 3000)

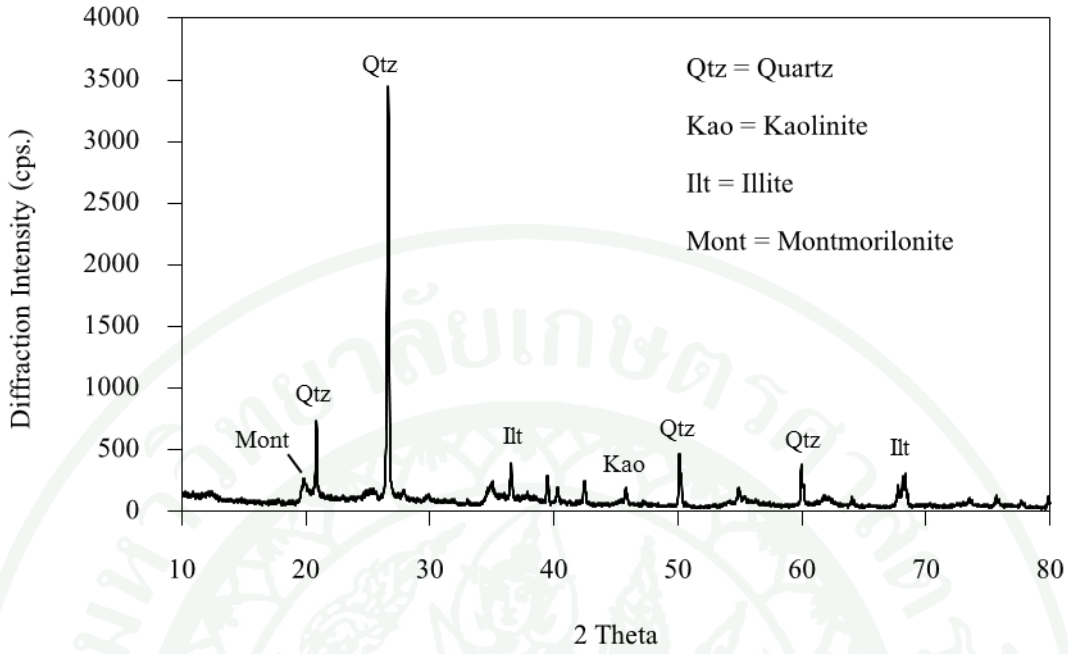
คุณสมบัติทางกายภาพดินเหนียวอ่อนหลังการปรับปรุงคุณภาพ

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ พบว่าดินเหนียวมีปริมาณความชื้นในมวลดินตามธรรมชาติ เท่ากับ 104.65 % ผลการทดสอบ Atterberg's limits มีค่าดังต่อไปนี้ Liquid Limit เท่ากับ 99.97 % , Plastic Limit เท่ากับ 40.01 % , Plastic Index และ PI (%) เท่ากับ 59.96 % ส่วนความถ่วงจำเพาะของดินเหนียวเท่ากับ 2.70 ความหนาแน่นเปียกเท่ากับ 1.51 ตัน/ม^3 สามารถจำแนกดินทางวิศวกรรมโดยระบบ Unified Soil Classification จัดอยู่ในประเภท CH และระบบ AASHTO Classification จัดอยู่ในประเภท A-7-5

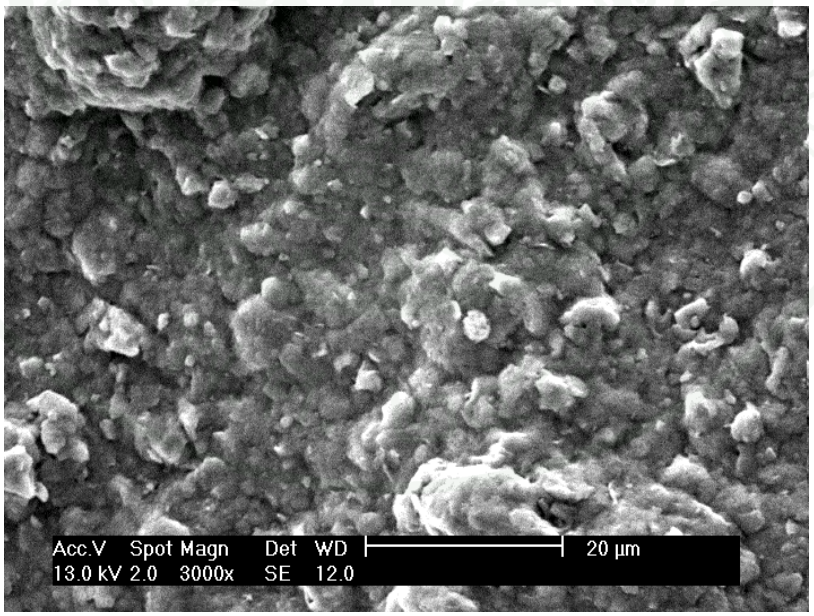
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) พบว่า ดินเหนียวประกอบด้วยแร่ดินเหนียวสำคัญ คือ Illite Kaolinite และ Montmorillonite ส่วนแร่หลักเช่น Quartz ก็พบในปริมาณมากเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 54

การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของดินเหนียวอ่อนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนโดยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า ดินเหนียวอ่อนมีลักษณะแผ่น จับตัวกันอย่างแน่นหนา ดังแสดงในภาพที่ 55

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 54 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวอ่อนก่อนปรับปรุงคุณภาพโดยวิธี XRD



ภาพที่ 55 โครงสร้างระดับจุลภาคของดินเหนียวก่อนปรับปรุงคุณภาพโดยวิธี SEM

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คุณสมบัติดินเหนียวอ่อนหลังถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์สังเคราะห์

เมื่อนำปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมจากสัดส่วน C2 ผสมกับดินเหนียวอ่อนที่ความชื้นตามธรรมชาติ เพื่อผลิตตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ปริมาณสารเชื่อมประสานต่างๆ คือ 150 , 200 และ 250 kg/m^3(WBC 150, WBC 200 และ WBC 250 ตามลำดับ) และเทียบกับกำลังของดินซีเมนต์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) และดินซีเมนต์จากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ (GCM) ของงานวิจัยณพล (2554) ซึ่งใช้สารเชื่อมประสานในปริมาณ 200 kg/m^3 พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์มีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยดินซีเมนต์สังเคราะห์ที่ได้จากกากดินขาวและเถ้าลอยลิกไนต์ WBC 200 และ WBC 250 จะมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า OPC และ GCM ที่อายุการบ่ม 28 วัน แต่ WBC 150 ยังคงมีการพัฒนากำลังที่ช้าและน้อยกว่า เมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัด OPC และ GCM ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์สรุปดังตารางที่ 25

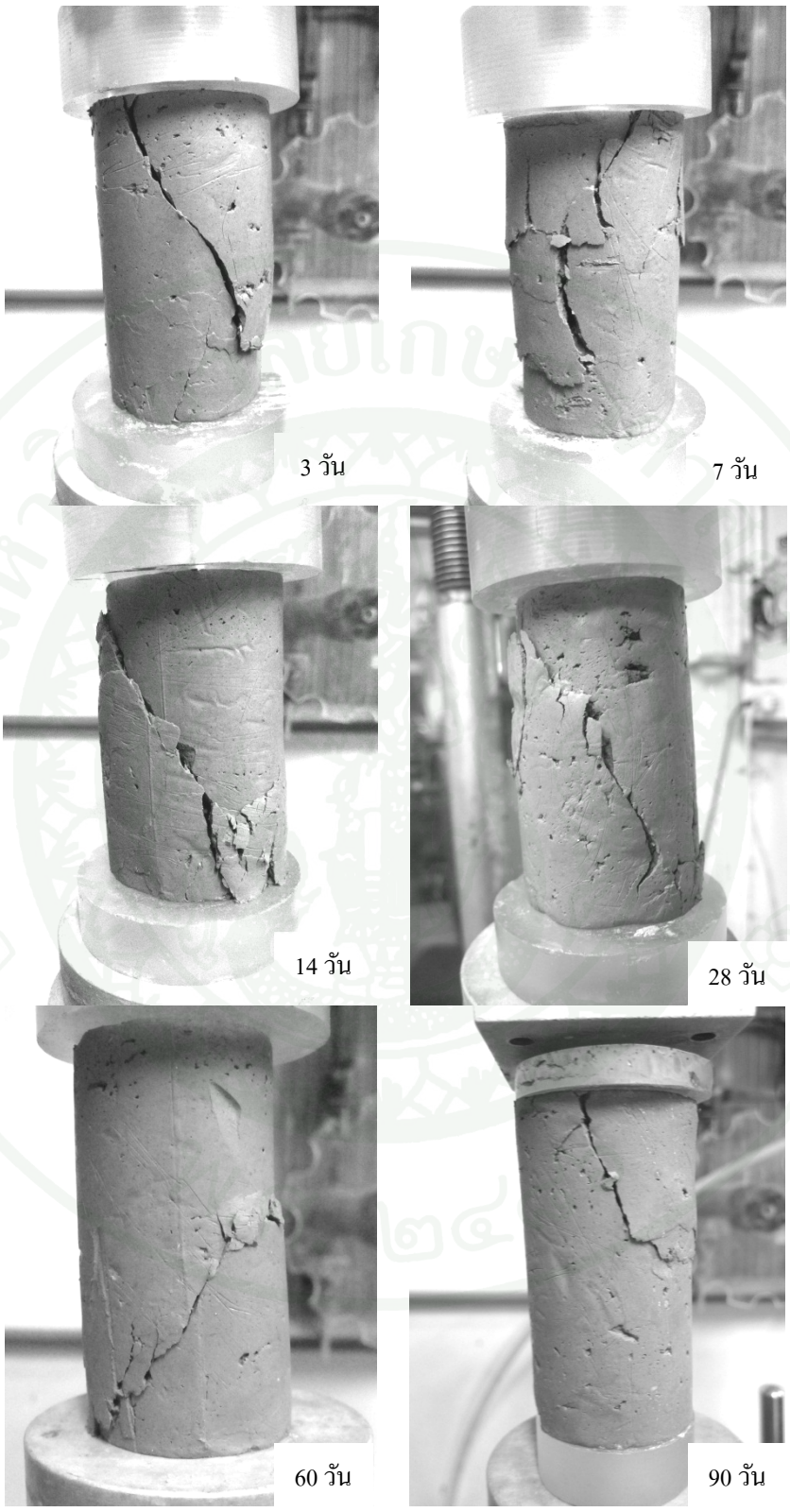
ตารางที่ 25 กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่มเมื่อเปรียบเทียบกับ OPC และ GCM

อายุการบ่ม	กำลังอัด (ksc.)				
วัน	WBC 150	WBC 200	WBC 250	OPC*	GCM*
3	0.26	0.40	0.41	1.31	2.08
7	0.27	0.40	0.44	1.81	2.82
14	0.28	0.52	2.00	-	-
28	0.28	3.87	10.13	2.05	3.53
60	0.33	10.76	16.43	-	-
90	0.37	12.21	21.97	2.81	4.66

หมายเหตุ * จากงานวิจัยของ ณพลและคณะ (2554)

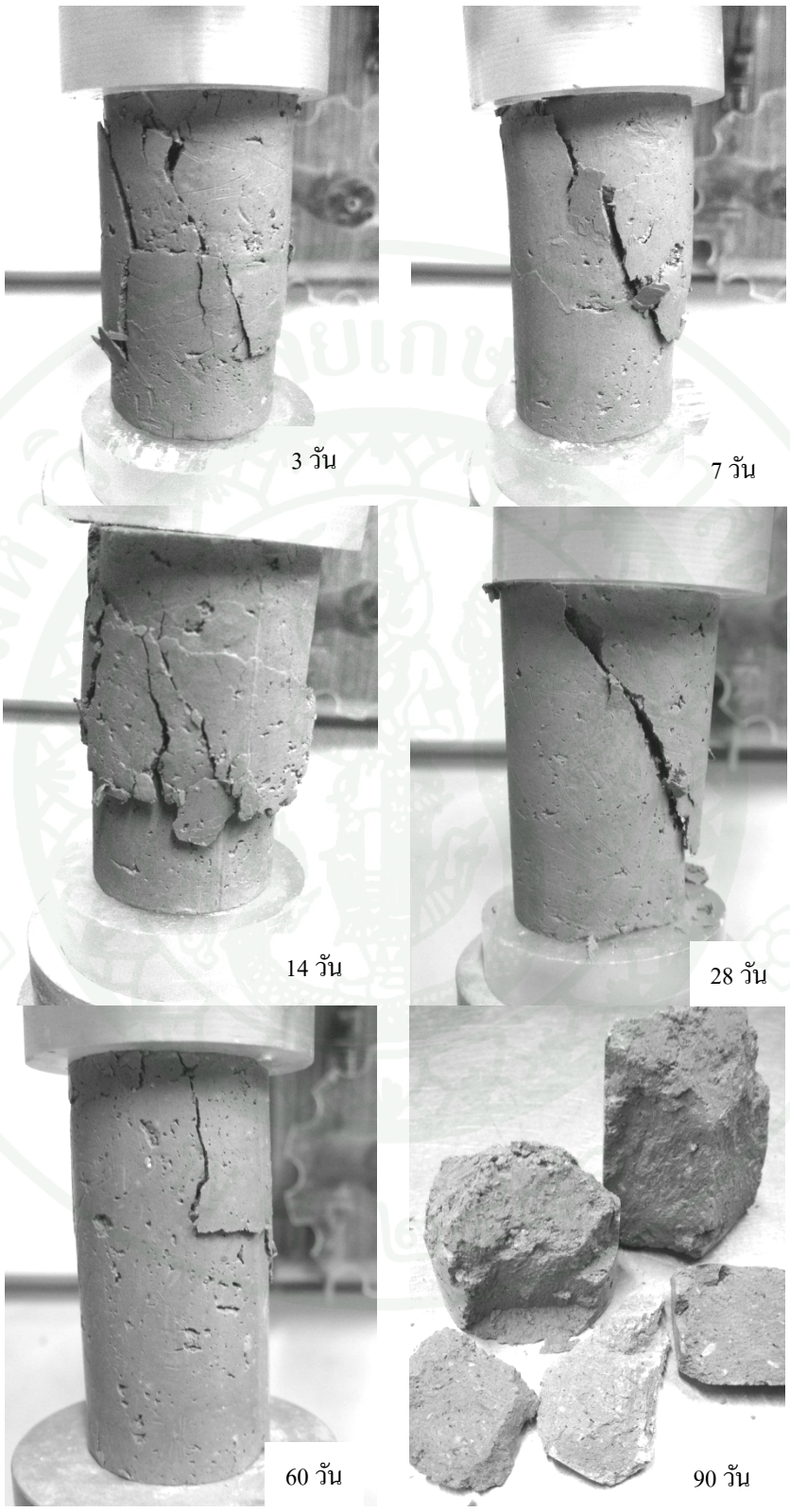
ภาพที่ 56 – ภาพที่ 58 แสดงการวิบัติของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ พบว่า ลักษณะการวิบัติของดินซีเมนต์ WBC 150 เอียงทำมุมประมาณ 45-60 องศาจากแนวแรงกระทำ ซึ่งเป็นลักษณะการวิบัติของดินเหนียวอ่อน Medium Stiff clay เมื่อเปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ WBC 200 ตั้งแต่อายุการบ่ม 60 และดินซีเมนต์ WBC 250 ตั้งแต่อายุการบ่ม 28 พบว่า ลักษณะการวิบัติของดินซีเมนต์แตกออกแสดงให้เห็นถึงการพัฒนากำลังที่เพิ่มมากขึ้นตามอายุการบ่ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



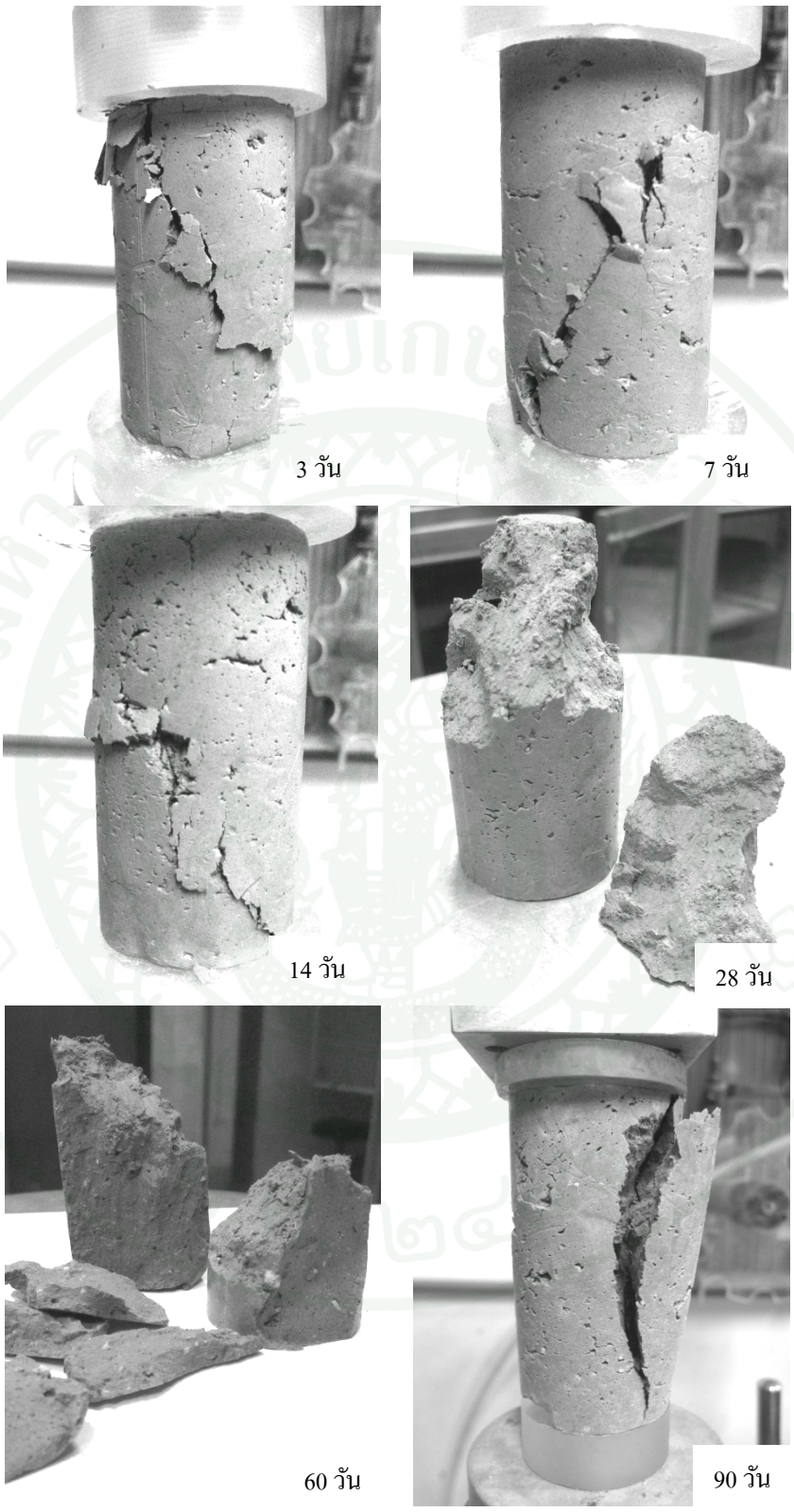
ภาพที่ 56 ลักษณะการวิบัติของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่มต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



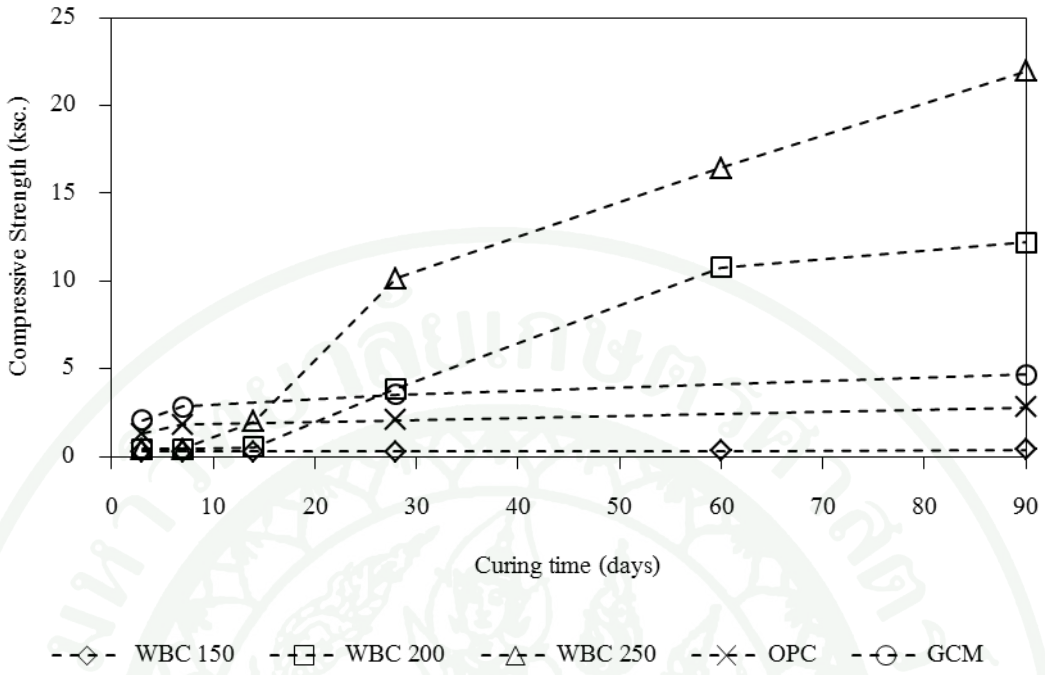
ภาพที่ 57 ลักษณะการวิบัติของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่มต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 58 ลักษณะการวิบัติของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่มต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 59 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ

การพัฒนากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ แสดงในภาพที่ 59 ดินซีเมนต์ WBC 150 มีการพัฒนากำลังช้ามากอย่างเห็นได้ชัด จากค่ากำลังอัด 0.28 ksc. ที่อายุการบ่ม 28 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 0.33 ksc. ที่อายุการบ่ม 60 วัน ส่วน WBC 200 เริ่มมีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จาก 0.52 ksc ที่อายุการบ่ม 14 วัน เป็น 3.87 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน เช่นเดียวกับ WBC 250 มีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จาก 0.44 ksc ที่อายุการบ่ม 7 วัน เป็น 2.00 ksc ที่อายุการบ่ม 14 วัน

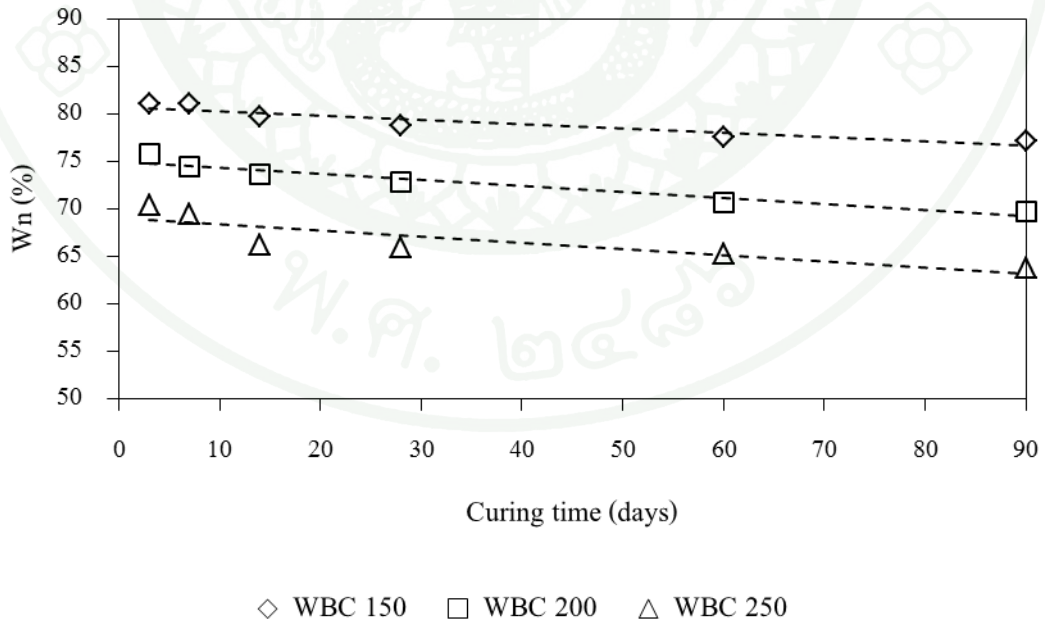
จากตารางที่ 26 และภาพที่ 60 แสดงปริมาณน้ำในดินซีเมนต์ที่มีค่าลดลงตามอายุการบ่ม และพบว่าปริมาณน้ำในดินซีเมนต์ลดลงตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เติมลงไปในดินเหนียวอ่อน เนื่องจากสารประกอบหลัก C_2S และ C_3S ที่มีอยู่มากในสารเชื่อมประสาน มีความต้องการในการดึงน้ำในมวลดินมาใช้ทำปฏิกิริยามากกว่าดินซีเมนต์ที่มีปริมาณสารเชื่อมประสานน้อย ดังนั้นดินซีเมนต์ WBC 250 จึงมีปริมาณน้ำในมวลดินน้อยที่สุด รองลงมาคือ WBC 200 และ WBC 150 ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 26 ปริมาณน้ำในดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ

อายุการบ่ม	ปริมาณน้ำในดินซีเมนต์ (%)		
วัน	WBC 150	WBC 200	WBC 250
3	81.03	75.76	70.40
7	81.00	74.49	69.44
14	78.77	73.68	66.19
28	79.74	72.78	65.94
60	77.54	70.69	65.23
90	77.11	69.78	63.73

ตารางที่ 27 แสดงแนวโน้มการใช้น้ำในมวลดินซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณสารเชื่อมประสานที่อายุการบ่มต่างๆ โดยอายุการบ่มช่วงต้น คือ 3-14 วันแรก ดินซีเมนต์มีอัตราการใช้น้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจาก 14 วันไปแล้ว พบว่า อัตราการดึงน้ำไปใช้ในการสร้างสารผลิตภัณฑ์เริ่มคงที่อย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในภาพที่ 61

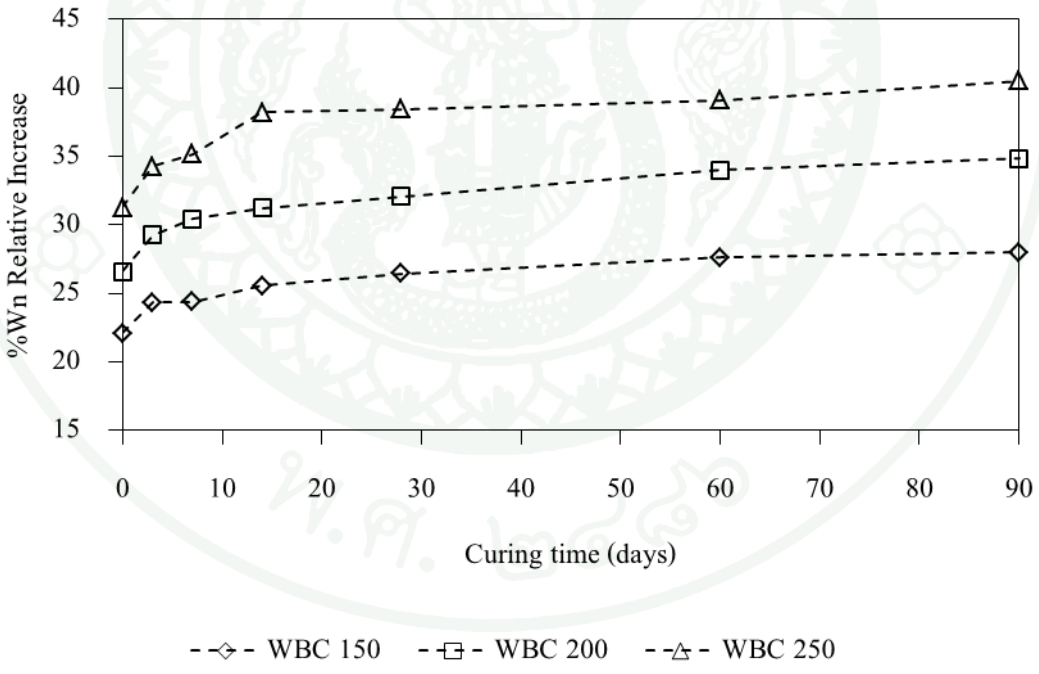


ภาพที่ 60 ปริมาณน้ำในดินซีเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอายุการบ่มต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 27 แนวโน้มของปริมาณน้ำในมวลดินซีเมนต์

อายุการบ่ม (วัน)	% Relative Increase		
	WBC 150	WBC 200	WBC 250
0	22.07	26.57	31.29
3	24.34	29.26	34.27
7	24.37	30.44	35.16
14	25.55	31.21	38.20
28	26.45	32.05	38.43
60	27.60	34.00	39.09
90	28.00	24.85	40.49

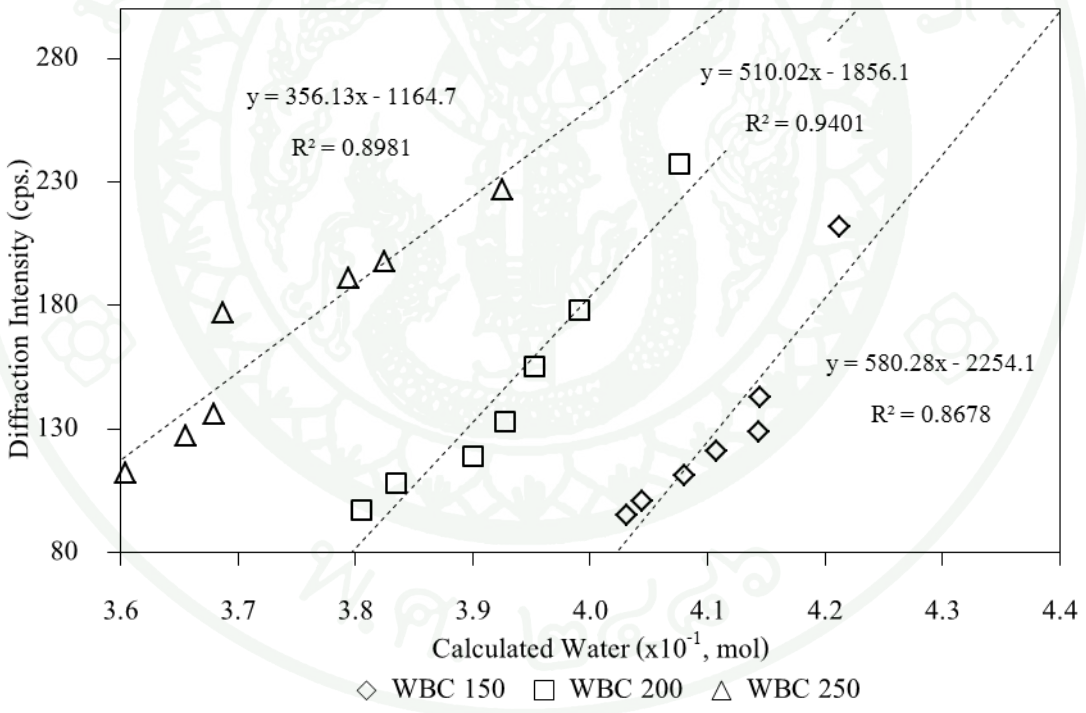


ภาพที่ 61 แนวโน้มปริมาณน้ำในมวลดินซีเมนต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

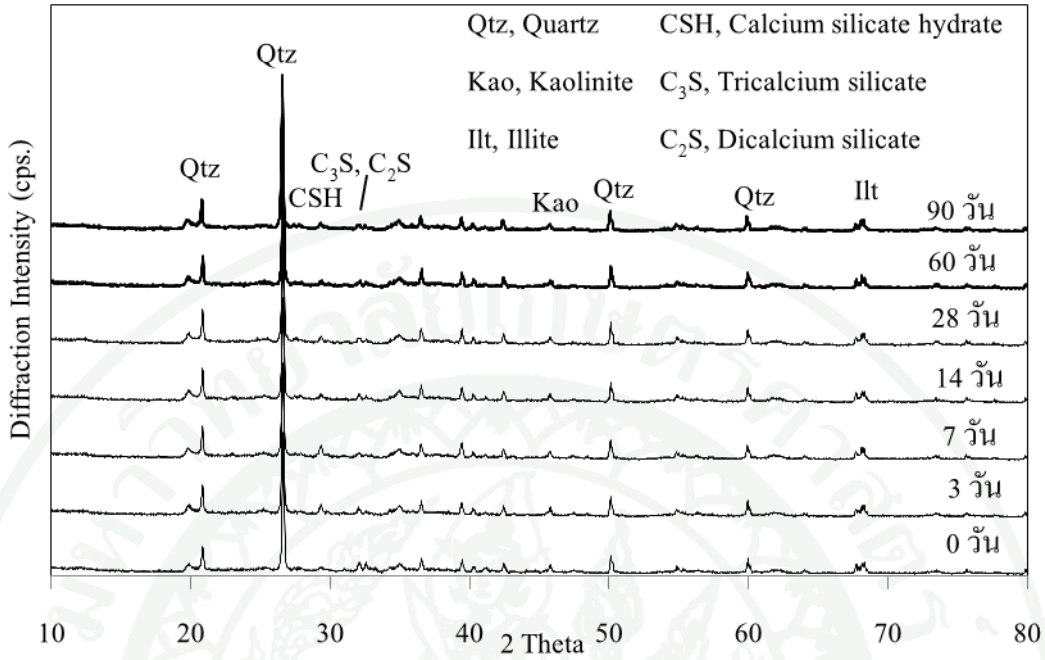
เมื่อวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในมวลดินโดยใช้การคำนวณหาจำนวนโมลในทางเคมี ดังแสดงในภาพที่ 62 พบว่า ดินซีเมนต์ที่มีปริมาณน้ำในมวลดินจากมากไปหาน้อยที่สุด คือ WBC 150 > WBC 200 > WBC 250 ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างสารประกอบ C_3S และน้ำเพื่อสร้างสารผลิตภัณฑ์ CSH ยังไม่ถูกใช้ไป จึงทำให้ปริมาณสารประกอบ C_3S มีอยู่ในดินซีเมนต์ WBC 150 มากที่สุด รองลงมาคือ WBC 200 และ WBC 250 ตามลำดับ และสอดคล้องกับการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH

การวิเคราะห์ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างดินซีเมนต์ จะใช้วิธี X-Ray Diffraction (XRD) พบว่า ปริมาณสารประกอบหลัก C_3S และ C_2S และปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH มีแนวโน้มลดลงและเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 63- 65

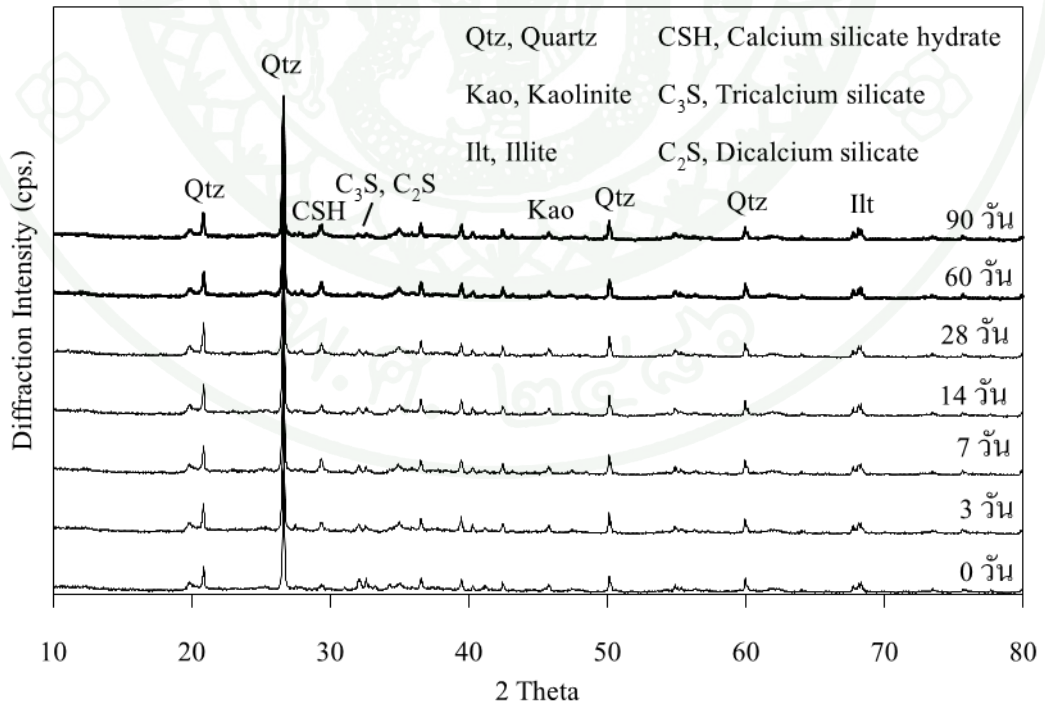


ภาพที่ 62 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารประกอบ C_3S และปริมาณน้ำคิดเป็นโมล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

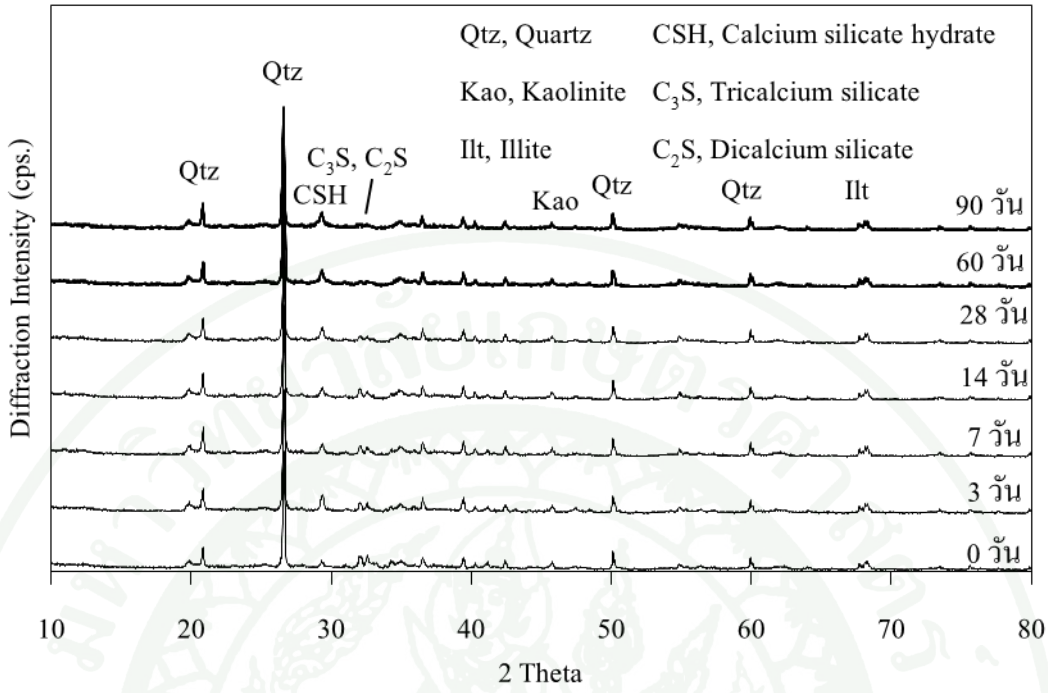


ภาพที่ 63 การวิเคราะห์ปริมาณสารผลิตภัณฑ์โดยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) ของ WBC 150



ภาพที่ 64 การวิเคราะห์ปริมาณสารผลิตภัณฑ์โดยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) ของ WBC 200

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 65 การวิเคราะห์ปริมาณสารผลิตภัณฑ์โดยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) ของ WBC 250

ตารางที่ 28 แสดงปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH ที่อายุการบ่มต่างๆ โดยสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเชื่อมประสานเรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ WBC 250 > WBC 200 > WBC 150 ตามลำดับ โดยดินซีเมนต์ WBC 150 มีอัตราการเพิ่มขึ้นของสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH น้อยที่สุด สอดคล้องกับการปริมาณของน้ำในมวลดินที่มีการนำไปใช้น้อยที่สุดด้วย ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ในทางเดียวกันกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ WBC 250 ก็มีอัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์มากที่สุดเช่นกัน ผลการวิจัยสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า ปริมาณสารเชื่อมประสานมีผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ (Zheng and Qin, 2003) ดังแสดงในภาพที่ 66

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 28 ปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH ของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ

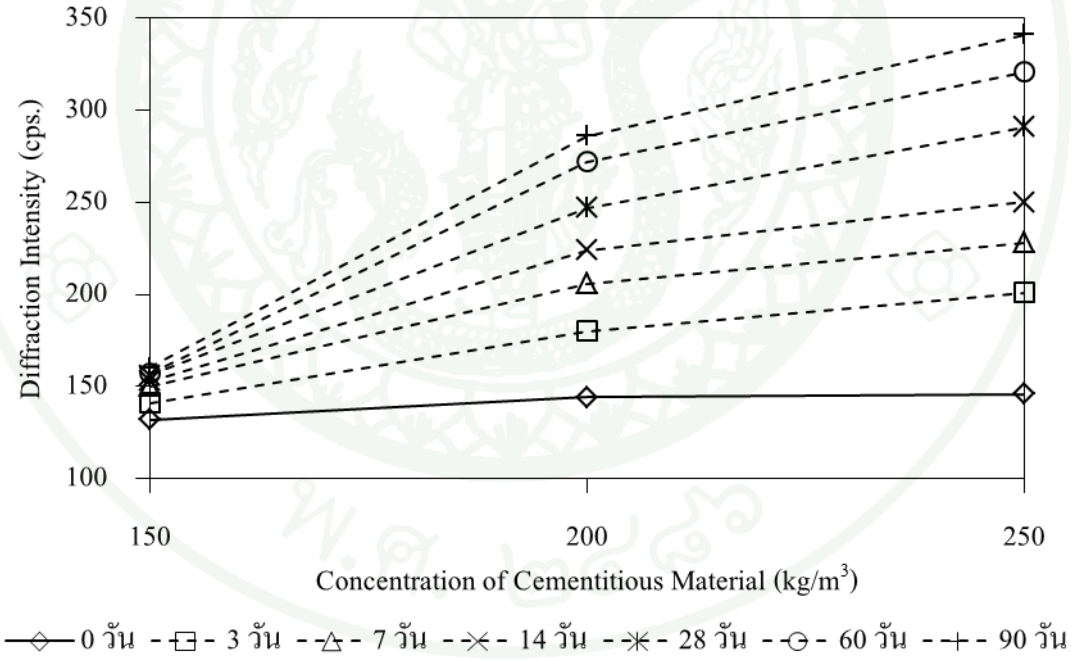
วัน	CSH (cps.)		
	WBC 150	WBC 200	WBC 250
0	132	144	146
3	141	180	201
7	150	206	228
14	153	224	250
28	156	247	291
60	157	272	321
90	160	286	341

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับสารประกอบหลัก C_3S และ C_2S ของดินซีเมนต์ทุกตัวอย่าง แสดงในตารางที่ 29 พบว่า ปริมาณสารประกอบหลัก C_3S และ C_2S มีค่าลดลงตามอายุการบ่ม (ภาพที่ 67 และ ภาพที่ 68) โดยปริมาณสารประกอบ C_3S มีมากกว่าสารประกอบ C_2S และตัวอย่างดินซีเมนต์ WBC 150 มีอัตราการลดลงของสารประกอบช้าที่สุด รองลงมาคือ WBC 200 และ WBC 250 ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่มีการนำสารประกอบหลัก C_3S และ C_2S ไปใช้ในการเกิดสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH ซึ่งสอดคล้องกับผลการพัฒนากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดอย่างต่อเนื่องตามอายุการบ่ม โดยการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ WBC 250 มีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุด รองลงมาคือ WBC 200 และ WBC 150 ตามลำดับ และพบว่า สอดคล้องกับปริมาณสารประกอบหลักของดินเหนียวอ่อนก่อนการปรับปรุงคุณภาพซึ่งมีค่าน้อยกว่าปริมาณสารประกอบหลังปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

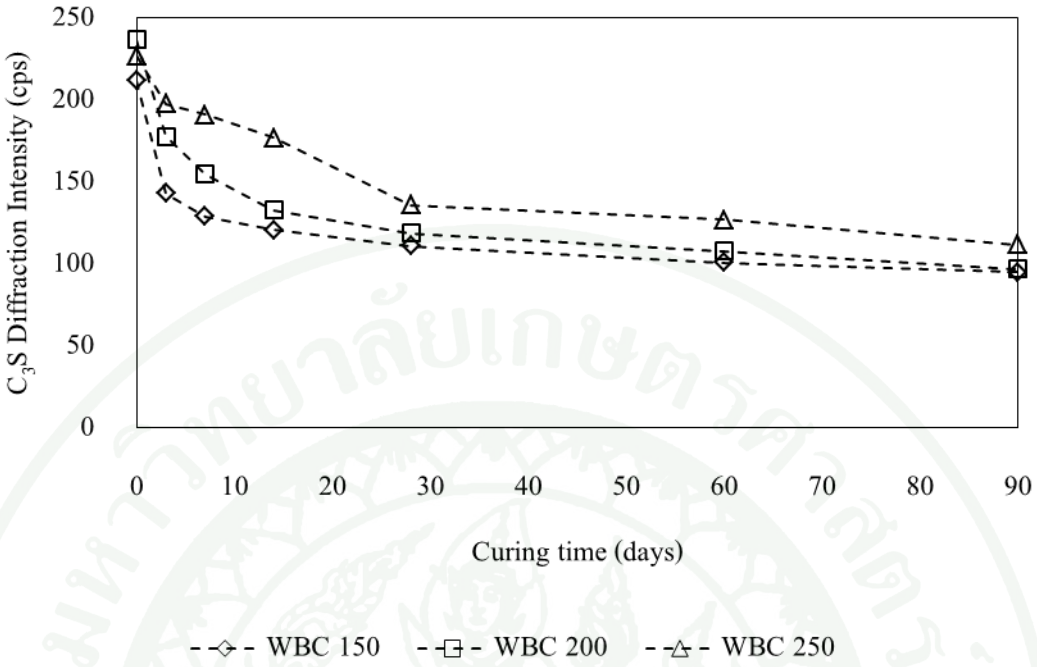
ตารางที่ 29 ปริมาณสารประกอบหลัก C_3S และ C_2S ของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ

วัน	C_3S (cps.)			C_2S (cps.)		
	WBC 150	WBC 200	WBC 250	WBC 150	WBC 200	WBC 250
0	212	237	227	188	216	221
3	143	178	198	148	156	178
7	129	155	191	122	148	154
14	121	133	177	110	118	148
28	111	119	136	104	108	129
60	101	108	127	97	105	118
90	95	97	112	90	94	105

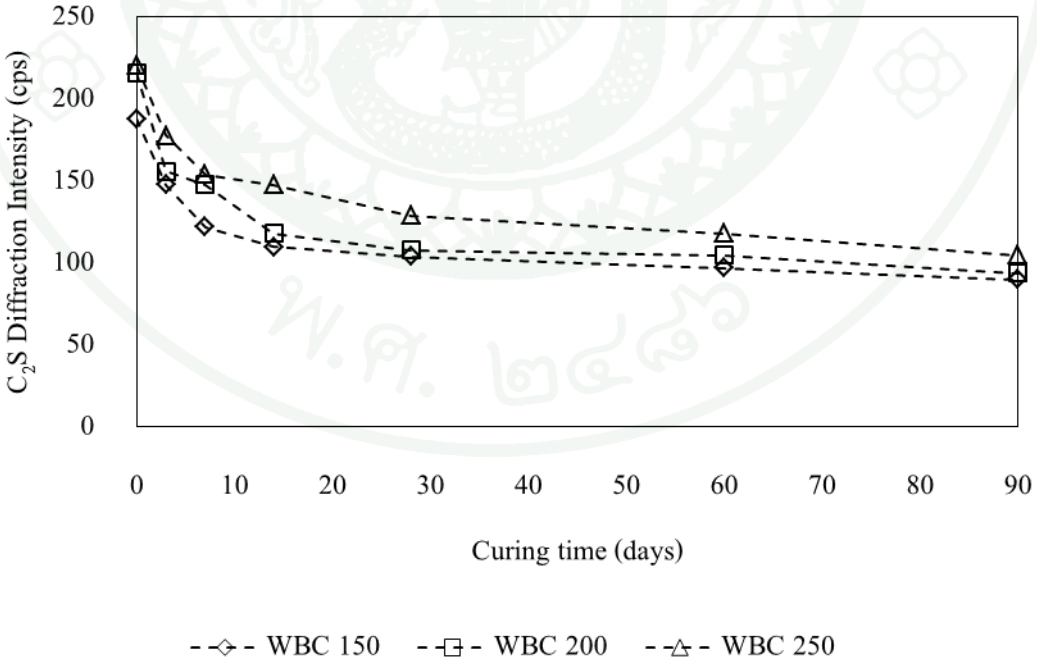


ภาพที่ 66 ปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH ตามปริมาณสารเชื่อมประสานที่อายุการบ่มต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 67 ปริมาณสารประกอบหลัก C_3S ตามอายุการบ่ม



ภาพที่ 68 ปริมาณสารประกอบหลัก C_2S ตามอายุการบ่ม

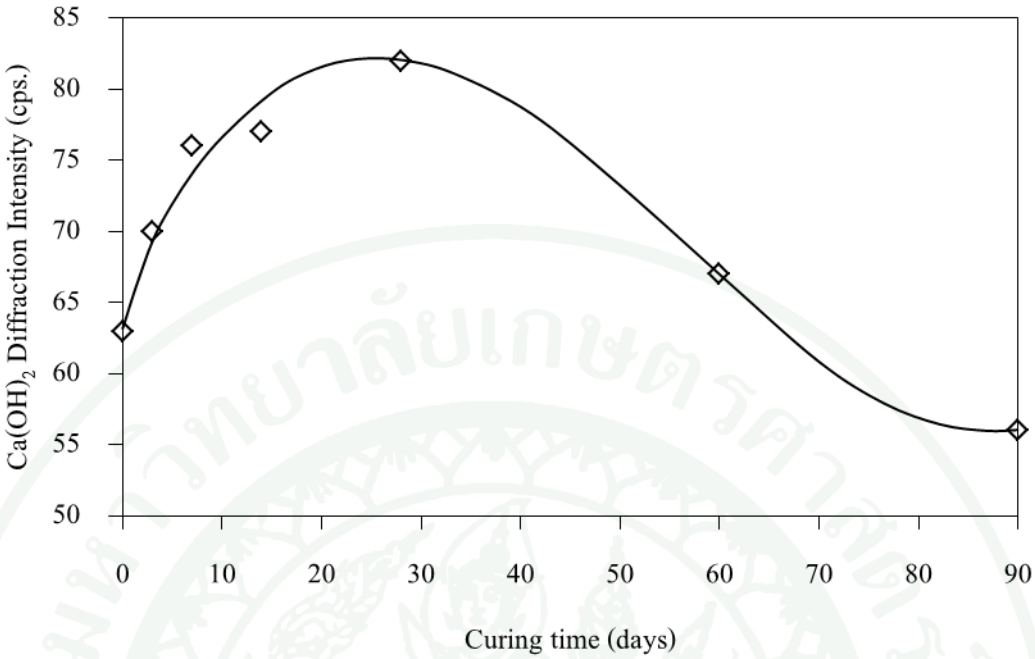
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 30 ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ $Ca(OH)_2$ ของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่มต่างๆ

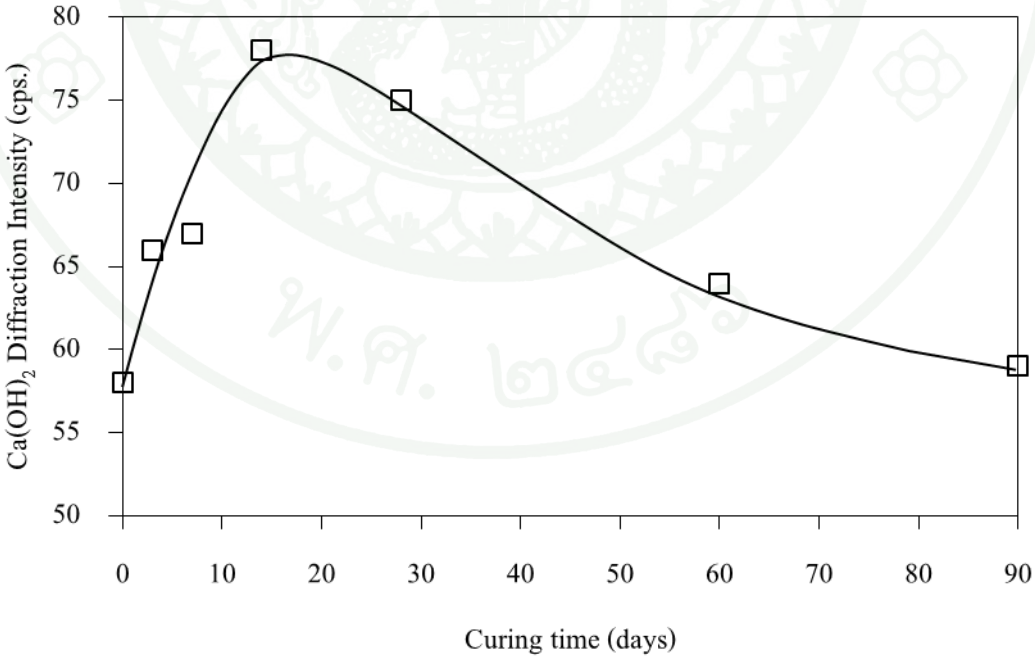
วัน	$Ca(OH)_2$ (cps.)		
	WBC 150	WBC 200	WBC 250
0	63	58	64
3	70	66	66
7	76	67	83
14	77	78	79
28	82	75	70
60	67	64	65
90	56	59	58

สารผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิ (Primary Cementatious Products) ที่เกิดจากสารประกอบจำพวก C_3S และ C_2S เมื่อผสมกับน้ำจะได้ CSH และ $Ca(OH)_2$ ซึ่งพบว่า ในดินซีเมนต์ทุกตัวอย่างมีปริมาณสารผลิตภัณฑ์ดังกล่าวเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ดังแสดงในตารางที่ 30 โดยดินซีเมนต์ WBC 150 จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึง 28 วัน หลังจากนั้นก็มีแนวโน้มลดลง ส่วนตัวอย่าง WBC 200 และ WBC 250 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเช่นกันจนถึง 14 วัน และ 7 วัน ตามลำดับ หลังจากนั้นก็ลดลง ดังแสดงในภาพที่ 69 – ภาพที่ 71 เนื่องจากสารผลิตภัณฑ์ $Ca(OH)_2$ ถูก Soil Silica (SiO_2) ซึ่งเป็นแร่ในมวลดินนำไปใช้เพื่อสร้างสารผลิตภัณฑ์ขั้นทุติยภูมิ (Secondary Cementatious Products) คือ CSH ซึ่งมีความสอดคล้องกับการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น (ภาพที่ 67)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

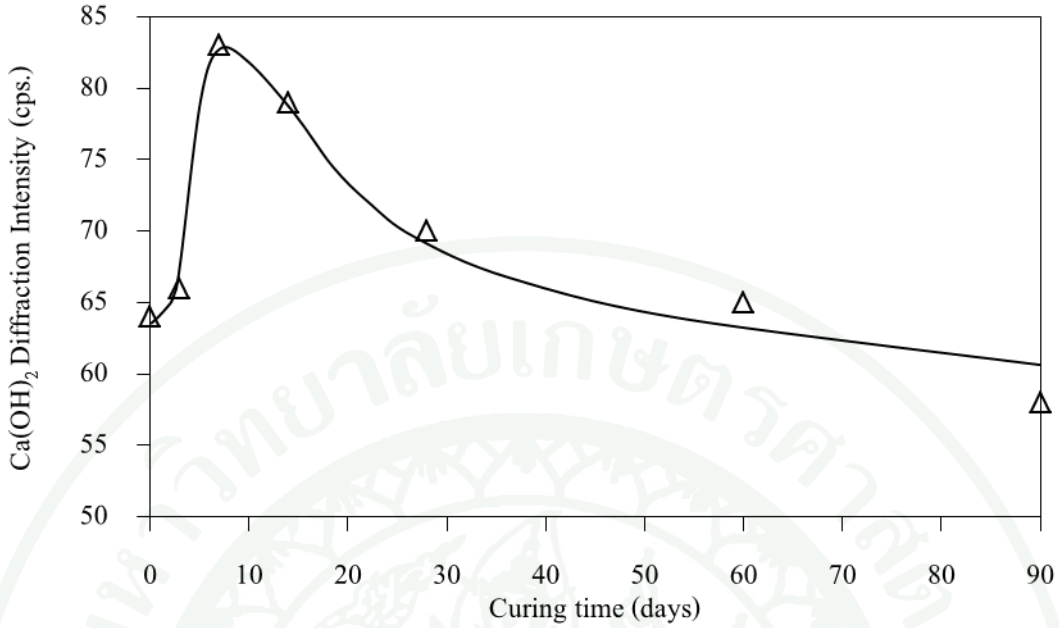


ภาพที่ 69 ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ $Ca(OH)_2$ ตามอายุการบ่มของดินซีเมนต์ WBC 150



ภาพที่ 70 ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ $Ca(OH)_2$ ตามอายุการบ่มของดินซีเมนต์ WBC 200

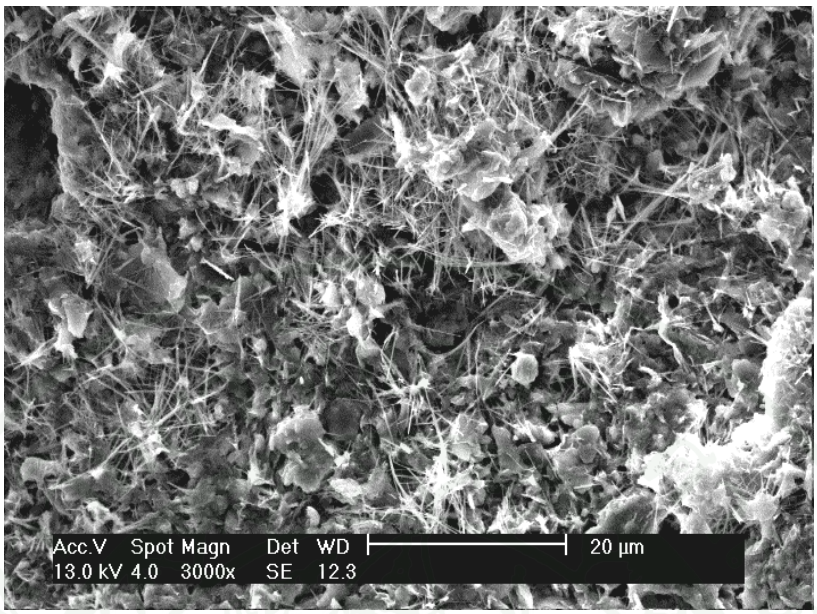
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



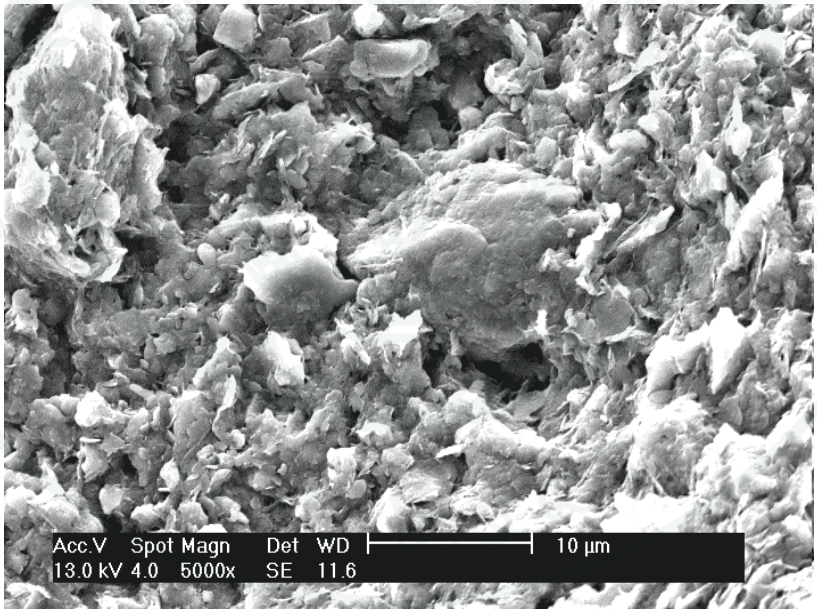
ภาพที่ 71 ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ $Ca(OH)_2$ ตามอายุการบ่มของดินซีเมนต์ WBC 250

ภาพที่ 72 – ภาพที่ 74 แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคของดินซีเมนต์ โดยใช้กล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH ซึ่งมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น และสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ XRD

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



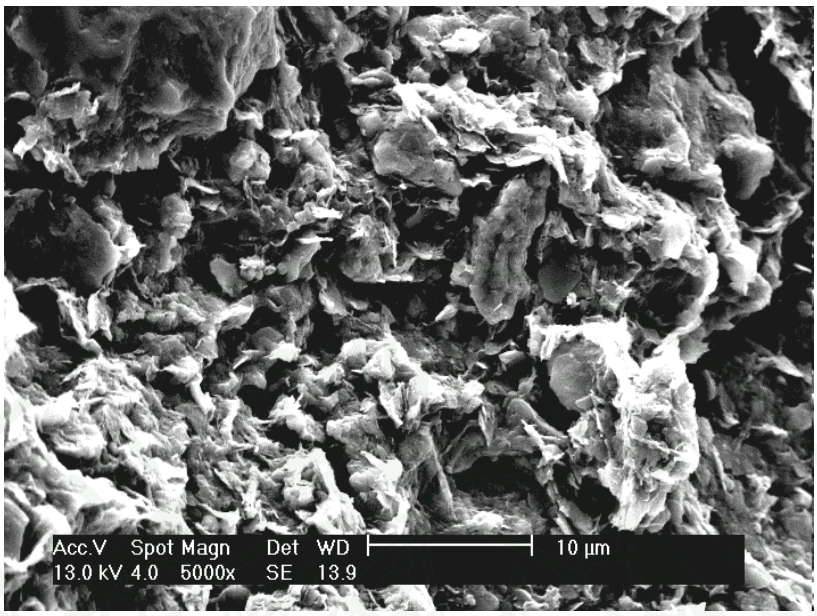
(ก) อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย x 5000)



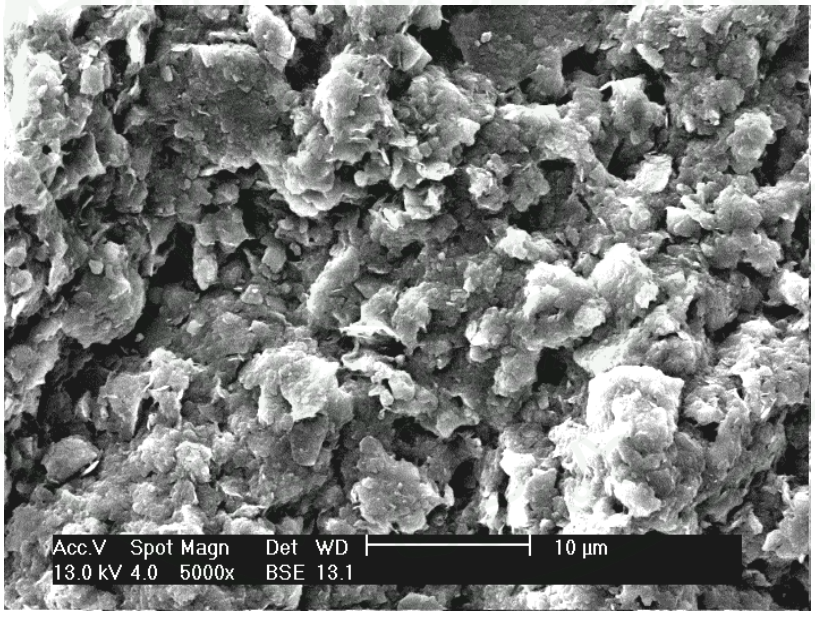
(ข) อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย x 5000)

ภาพที่ 72 โครงสร้างระดับจุลภาคของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุบ่มต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



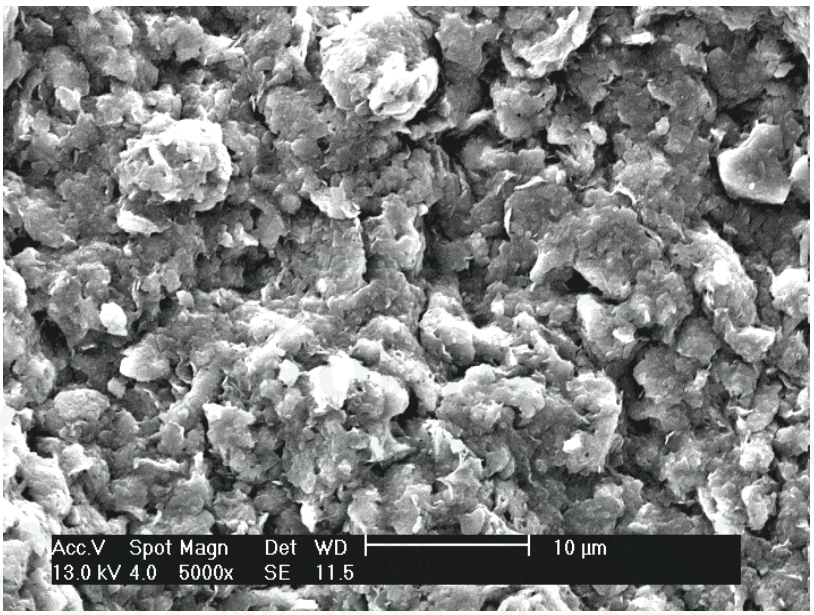
(ค) อายุการบ่ม 14 วัน (กำลังขยาย x 5000)



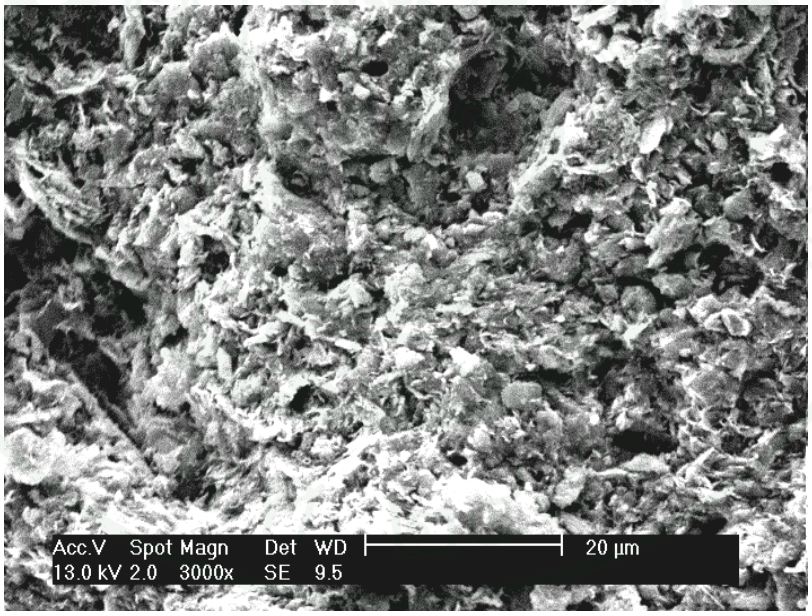
(ง) อายุการบ่ม 28 วัน (กำลังขยาย x 5000)

ภาพที่ 72 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



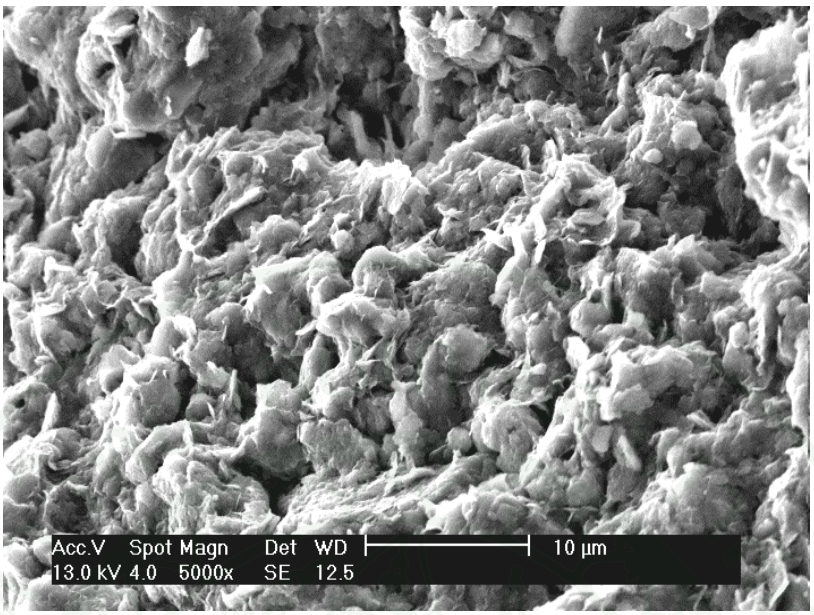
(จ) อายุการบ่ม 60 วัน (กำลังขยาย x 5000)



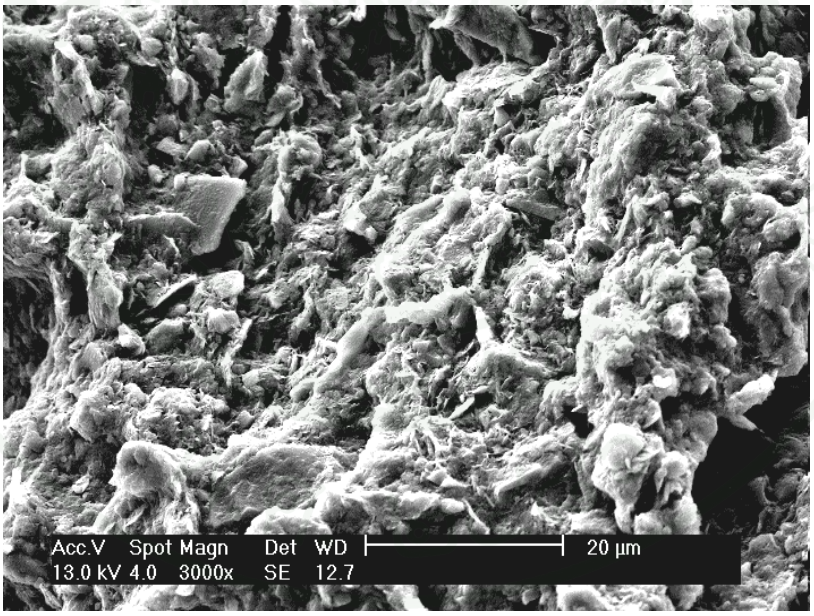
(ฉ) อายุการบ่ม 90 วัน (กำลังขยาย x 3000)

ภาพที่ 72 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



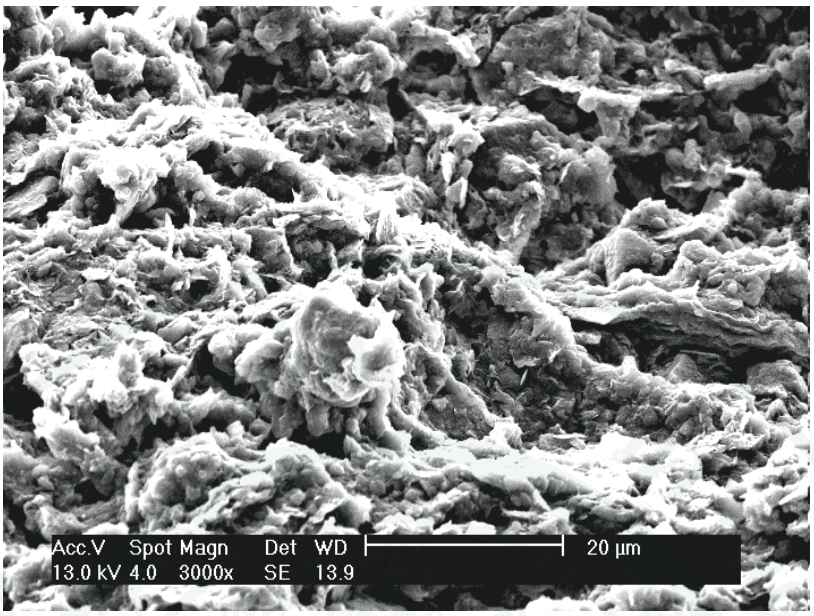
(ก) อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย x 5000)



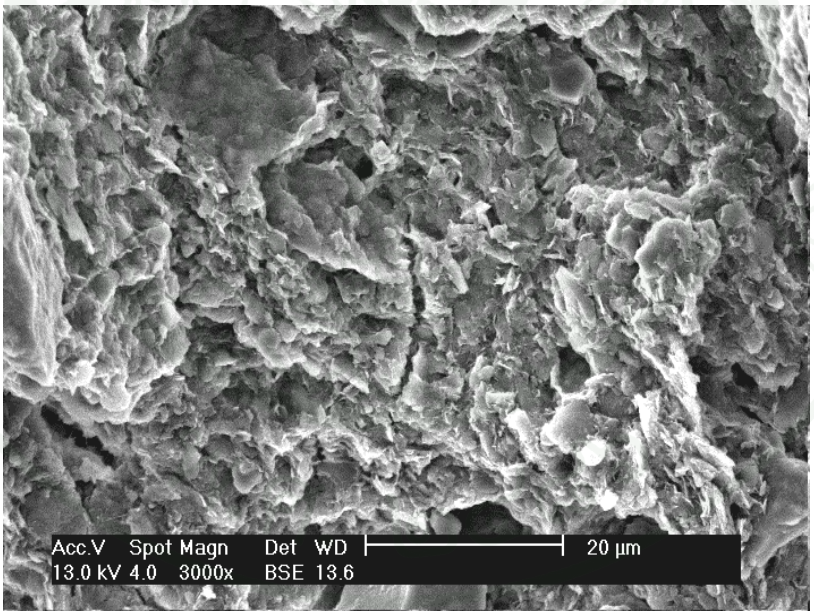
(ข) อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย x 3000)

ภาพที่ 73 โครงสร้างระดับจุลภาคของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุบ่มต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



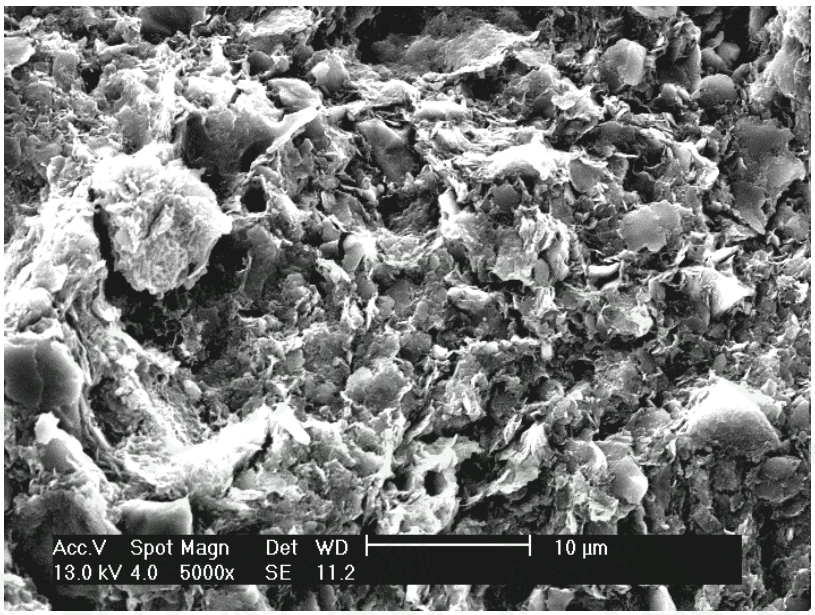
(ค) อายุการบ่ม 14 วัน (กำลังขยาย x 3000)



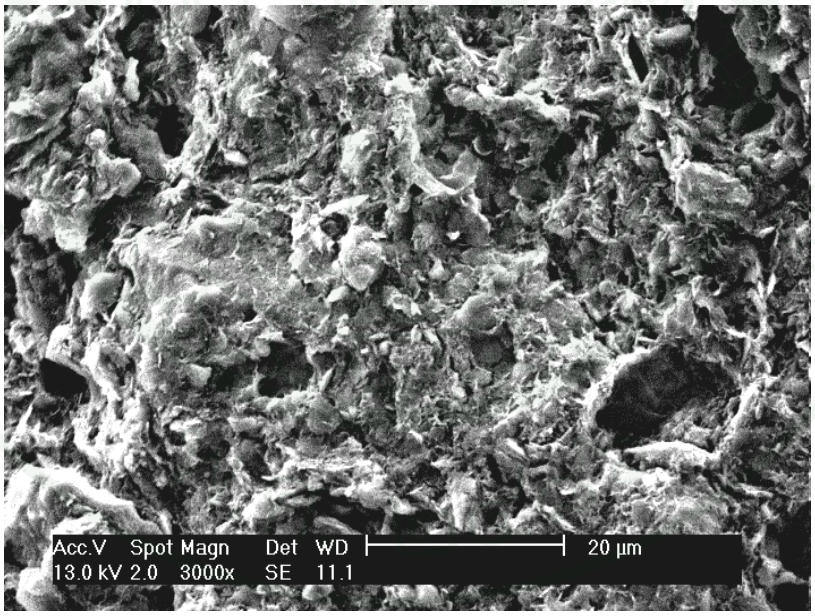
(ง) อายุการบ่ม 28 วัน (กำลังขยาย x 3000)

ภาพที่ 73 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



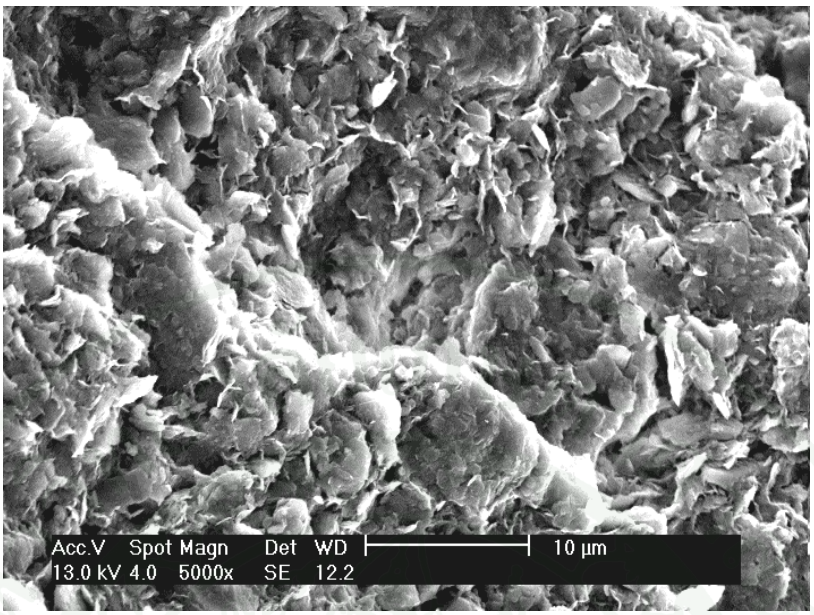
(จ) อายุการบ่ม 60 วัน (กำลังขยาย x 5000)



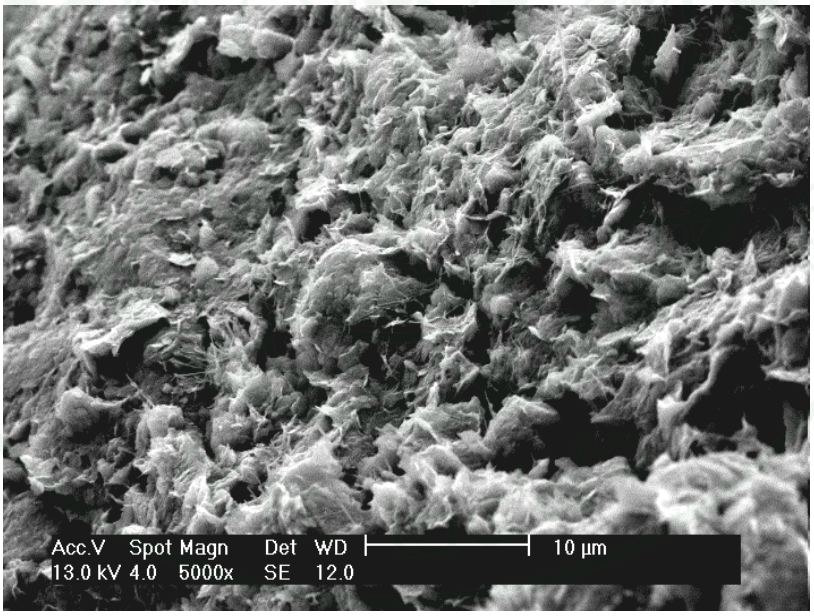
(ฉ) อายุการบ่ม 90 วัน (กำลังขยาย x 3000)

ภาพที่ 73 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



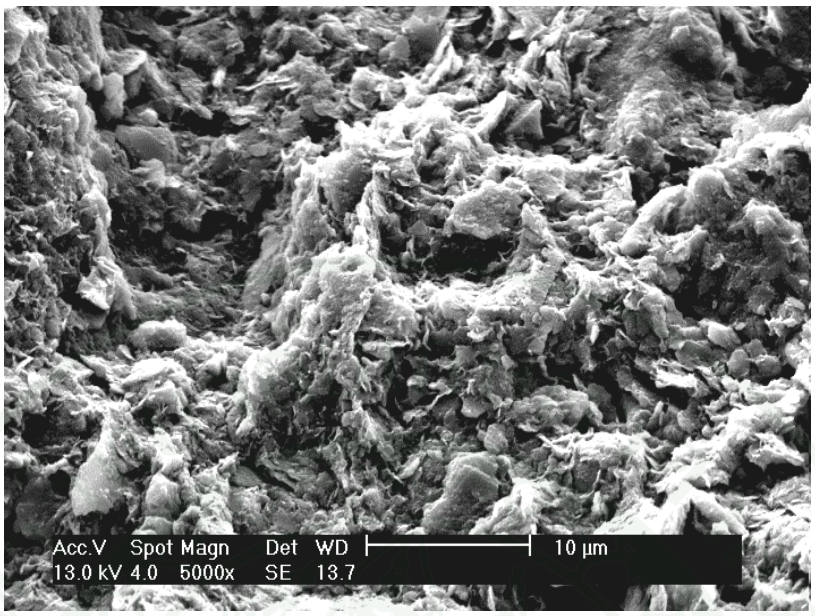
(ก) อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย x 5000)



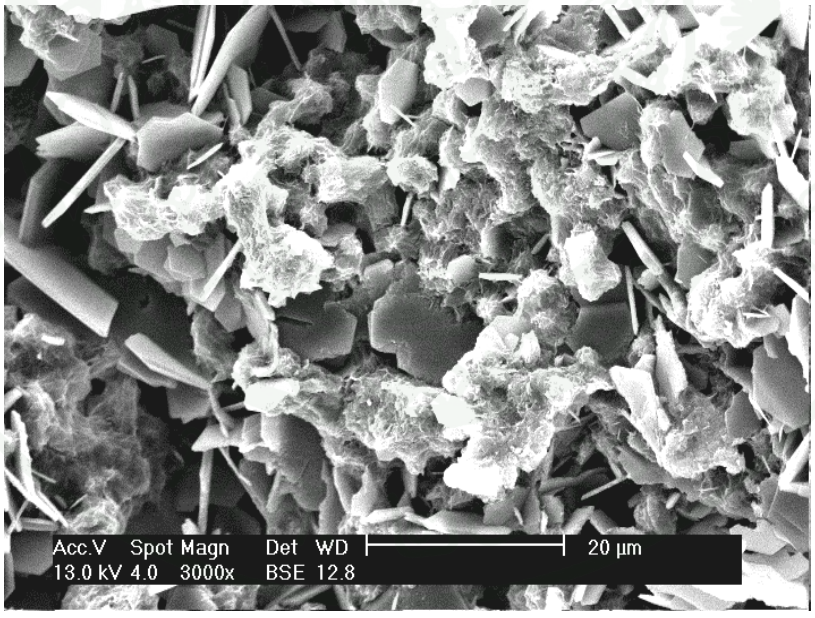
(ข) อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย x 5000)

ภาพที่ 74 โครงสร้างระดับจุลภาคของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุบ่มต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



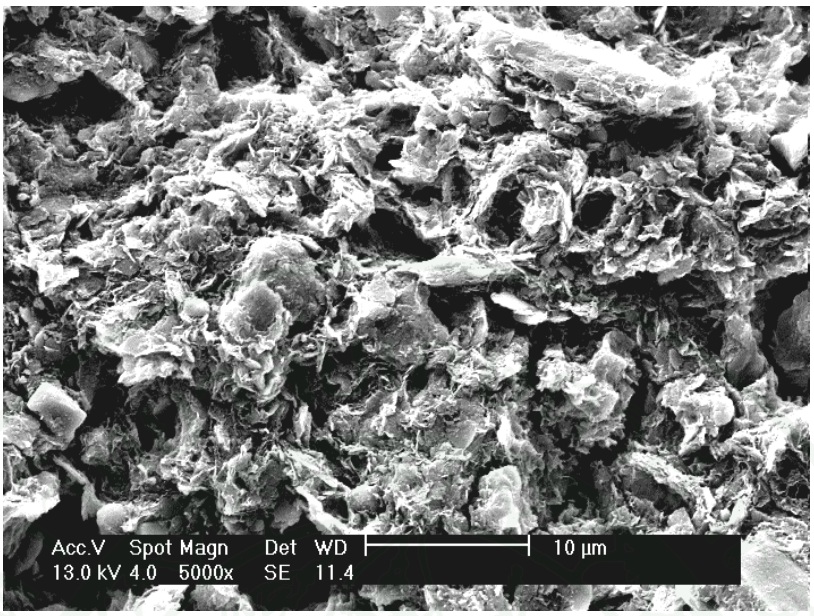
(ค) อายุการบ่ม 14 วัน (กำลังขยาย x 5000)



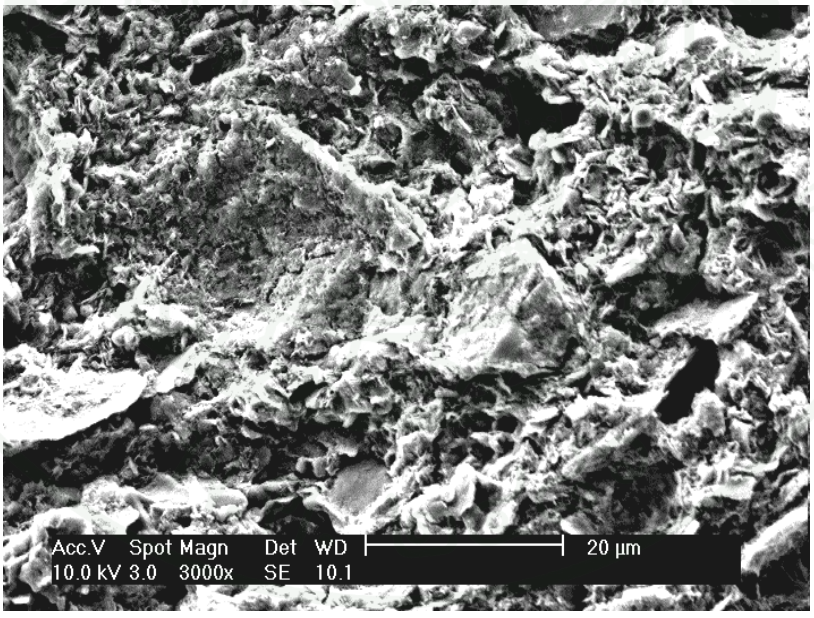
(ง) อายุการบ่ม 28 วัน (กำลังขยาย x 3000)

ภาพที่ 74 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(จ) อายุการบ่ม 60 วัน (กำลังขยาย x 5000)



(ฉ) อายุการบ่ม 90 วัน (กำลังขยาย x 3000)

ภาพที่ 74 (ต่อ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการพัฒนาปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมจากกากดินขาว เพื่อศึกษาศักยภาพการใช้กากอุตสาหกรรมเพื่อเป็นวัสดุในการก่อสร้างทางวิศวกรรมปฐพี สิ่งแวดล้อมในด้านนำการจัดการปัญหากากอุตสาหกรรมที่มีมากขึ้นทุกวันโดยนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่อีกครั้ง จากการผลวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สัดส่วนกากอุตสาหกรรมที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ที่ทำให้ปูนมีคุณภาพดี คือ เปลือกหอยแครง อยู่ในช่วงระหว่าง 40 – 50 % , ผงหินปูนอยู่ในช่วงระหว่าง 15 – 20 % , กากดินขาวประมาณ 15 % และเถ้าลอยประมาณ 10 % โดยมีสารประกอบหลักที่ผลิตได้อยู่ในช่วงมาตรฐานเทียบเคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2. ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ปริมาณสารประกอบหลักจำพวก C_3S และ C_2S มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนในช่วงอายุการบ่มเริ่มต้น ส่วนการทำปฏิกิริยาปอซโซลานเกี่ยวข้องกับปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก $Ca(OH)_2$ โดยมีแนวโน้มลดลงตามอายุการบ่ม เนื่องจากถูกนำไปใช้ในการเกิดปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH ส่งผลต่อการพัฒนากำลังของมอร์ต้าเพิ่มขึ้น

3. กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ขึ้นอยู่กับปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมดินเหนียวอ่อน โดยการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามอายุการบ่ม โดยกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากงานวิจัยนี้ สูงกว่าดินซีเมนต์ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ประเภทที่ 1 อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากปฏิกิริยาขั้นปฐมภูมิของสารผลิตภัณฑ์ CSH และ $Ca(OH)_2$ ไปจับกับ Soil Silica (SiO_2) ซึ่งเป็นแร่ประกอบดินเหนียวเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ CSH ที่ส่งผลต่อการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ได้มากยิ่งขึ้นในระยะยาว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงคุณภาพเพิ่มเติมด้วยปูนซีเมนต์สังเคราะห์ เช่น กำลังรับแรงอัดสามแกน (Triaxial Test), ความทนทานในสภาวะเปียกสลับแห้ง (Durability Test), ความซึมน้ำ (Permeability Test), การทรุดตัวของดิน (Consolidation Test) และแรงดึงดูดรวม (Total Suction) เป็นต้น เพื่อยืนยันการนำไปใช้ในงานทางวิศวกรรมต่อไป

2. งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมจากกากดินขาว เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ฯให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น สำหรับงานวิจัยในอนาคตควรศึกษาวิจัยเพิ่มเติมศักยภาพของกากอุตสาหกรรมประเภทอื่นให้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น เพื่อยืนยันการรักษาสภาพแวดล้อมตามแนวคิดทางวิศวกรรมปฐพีสิ่งแวดล้อม

3. ควรทำการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อยืนยันการเกิด Pozzolanic Reaction ระหว่าง $Ca(OH)_2$ กับ ซิลิก้า ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียว เกิดเป็น CSH โดยวิธีวิเคราะห์ X-Ray Microanalyzer (EDX) and Phase Analysis เปรียบเทียบกับการพัฒนากำลังในระยะยาว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กฤตย์ คมขำ. 2554. **คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพโดยใช้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เกียรติคุณ ทองแดง, ศุภกิจ นนทนานันท์, ณพล อยู่บรรพต และดวงฤดี ฉายสุวรรณ. 2553. **การศึกษาแนวทางการจัดการขยะอุตสาหกรรมเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง.** การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15. อุบลราชธานี.

เจริญชัย ฤทธิรุทธ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2550. จีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าจากดินขาวระนองเผา. **วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์** ปีที่ 34 ฉบับที่ 2.

ณพล อยู่บรรพต. 2554. **การพัฒนาปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง** วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิชัย สังวรปทานสกุล และ วชิรพล ฐิตะสัจจา. 2549. ความคงทนของดินขาวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกลวิธีโพลิเมอไรเซชั่น. **วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์** ปีที่ 33 ฉบับที่ 5.

ศุภกิจ นนทนานันท์, เกียรติคุณ ทองแดง, ณพล อยู่บรรพต, มณฑล ฐานุตตมวงศ์ และ ยุทธนา บุญสินชัย. 2554. **การพัฒนาปูนซีเมนต์จากขยะที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมโดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์.** การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16. ชลบุรี.

ศุภกิจ นนทนานันท์, ศรันรัตน์ พวงพัฒน์ และ กมล อมรฟ้า. 2545. **การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยใช้ซีเมนต์และปูนขาว**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 8. ขอนแก่น.

ศุภกิจ นนทนานันท์ และศรัณรัตน์. 2549. **การปรับปรุงคุณภาพของดินโดยใช้ปูนขาวและเถ้าลอยลิกไนต์ที่สัดส่วนผสมต่างๆ**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 11. ภูเก็ต.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ณพล อยู่บรรพต, ศุภกิจ นนทนานันท์, ดวงฤดี ฉายสุวรรณ, เกียรติคุณ ทองแดง และ ศมณพร สุทธิบาก. 2552. **การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาแนวทางในการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากขยะอุตสาหกรรม.** การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16. ชลบุรี.

ปณุฑ สุวรรณวิวัฒนา. 2545. **ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ โดยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ GRASS.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2553. **เถ้าลอยในงานคอนกรีต.** สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2549. **Cement Pozolanic and Concrete.** สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ.

พุทธิพงศ์ หะลีห์รัตนวัฒนา, Andreas Saxer และ เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ. 2546. **ผลของโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลในสภาวะแข็งตัว.** การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 1. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. กรุงเทพฯ.

สมศักดิ์ เลิศประเสริฐพันธ์ และ สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์. 2550. **การปรับปรุงฐานรากดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯในสนามความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์.** การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12. พิษณุโลก.

สันติ ศิริพันธ์ และ วิชัย สังวรปทานสกุล. 2550. ผลกระทบของอุณหภูมิกระตุ้นต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชั่นของดินขาว. **วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์** ปีที่ 34 ฉบับที่ 4.

สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์ และ วิชาญ ภู่พัฒน์. 2547. **พฤติกรรมการทรุดตัวระยะยาวของถนนบนดินอ่อนและแนวทางการแก้ปัญหาที่เหมาะสมโดยการปรับปรุงฐานรากด้วยความร้อน.** การสัมมนาวิชาการ เรื่องการปรับปรุงคุณภาพดินและการใช้วัสดุเสริมแรงชนิดใยสังเคราะห์ ครั้งที่ 5.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อมลวรรณ พิศิษฐวานิช และ วิชัย สังวรปทานสกุล. 2549. กลไกของการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวด้วยกลวิธีโพลิเมอไรเซชั่น. **วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์** ปีที่ 33 ฉบับที่ 6.

อรุณเดช บุญส่ง. 2555. การปรับปรุงคุณสมบัติกากดินขาวเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นทาง. **วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์** ปีที่ 39 ฉบับที่ 1.

เอกภาพ อังศุวัฒนา, ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, อเนก ศิริพานิชกร, จารุรัตน์ วรนิสรากุล, พยูร เกตุกราย, พิชัย นิมิตยงสกุล, ปริญญา จินดาประเสริฐ, ชัยยศ ตั้งสถิตกุลชัย และทิน เกตุรัยนบวร. 2540. **การใช้เถ้าถ่านหินแยกขนาดจากแม่เมาะมาทำคอนกรีตกำลังสูง,** น. 206-215. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 4. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. กรุงเทพฯ.

Berry, E.E. and V.M. Malhotra. 1980. Fly Ash for Use in Concrete-A Critical Review. **American Concrete Institute Journal.** 77(2): 59-73.

Bouge, R.H. 1955. **Chemistry of Portland Cement.** Newyork, Reinhold.

Chindaprasit, P. and I. Hovichitr. 1987. Portland Pozzolana Cement – A Cheaper Alternative for Thailand, pp. 152-159. *In* **Proceeding of the Symposium on Building Materials for Low-Income Housing in Asia and Pacific.** ESCAP-RILEM-CLIB. 20 – 26 January 1987. Bangkok, Thailand.

ECC International. 1996. **A New Pozzolanic Material for the Cement and Concrete Industry.** Cornwall, U.K.

Gambhir, M.L. 2004. **Concrete Technology.** 3rd Ed. Tata McGraw-Hill Publishing, India.

Ganjidoust, H. 2009. Cement-Based Solidification / Stabilization of Heavy Metal Contaminated Soils with the Objective of Achieving High Compressive Strength for the Final Matrix. **Tnaction A : Civil Engineering.** 16(2): 107-115.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Gruber, K.A. and S.L. Sarker. 1996. Exploring the Pozzolanic Activity of High Reactivity Metakaolin. **World Cem.** 27(2): 78-80

Hogan, F.J. and J.W. Meusel. 1981. Evaluation for Durability and Strengt Development of a Ground Granulated Blast-Furnace Slag. **Cement, Concrete and Aggregates.** 3(1): 40-52.

Hooton, R.D. 1993. Influence of Silica Fume Replacement of Cement on Physical Properties and Resistance to Sulfate Attrack, Freezing and Thawing, and Alkali-Silica Reactivity. **ACI Materials Journal.** 90(2): 143-151

Mackechine, J.R. 1997. Laboratory Trials with Western Cape Metakaolin. **Beton/Concrete**. 87(1): 16-23

Malhotra, V.M. 1984. Use of Mineral Admixyure for Specialized Concrete. **Concrete International Design & Construction**. 6(4): 19-24

Masashi, K. and S. Nontananandh. 1991. Combining Industrial Wastes with Lime for Soil Stabilization. **Journal of Geotechnical Engineering**. 117(1): 1-17.

Mather, B. 1957. Laboratory Tests of Portland Blast-Furnace Slag Cement. **ACI Journal.** 54(3): 205-232

Moh, Z.C., J.D. Neilson. and E.W. Brand. 1969. Strength and Deformation Behavior of Bangkok Clay. **Proceeding 7th International Conference of Soil Mechanics and Foundation**, Mexico 1:287 – 296

Neville, A. M. 1996. **Properties of Concrete. 4nd Ed**. Addison Wesley Longman, England.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Nonthananandh, S., M. Kamon and T. Seishi. 1991. **Environmental Geotechnology for Potential Waste Utilization.** Proc.of 9th Asian Regional Comference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, Thailand, Vol.1, pp.397-400.

Potgieter-Vermaak, S. and J.H. Potgieter. 2006. Metakaolin as an Extender in South African Cement. **Journal of Materials in Civil Engineering.** 18: 619-623.

Saitoh, S. *et al*. 1985. Hardening of Soil Improvement by Deep Mixing Method. **Proc. Of the 11th ISCMFE**, San Francisco 3: 1745 – 1748.

Salvador, S. 1995. Pozzolanic Properties of Flash-Calcined Kaolinnite: A Comparative Study with Soak-Calcined Products**. Cement and Concrete Research.** 25(1): 102-112.

Sayamipuk, S. 2000. **Development of Durable Mortar and Concrete Incorporating Metakaolin from Thailand**. Ph.D. Thesis. AIT.

Taylor, H.F.W. 1998. **Cement Chemistry.** 2nd Ed. Thomas Telford, London.

Zhang, M.H. and V.M. Malhotra. 1995. Characteristics of a Thermally Activated Alumino-Silicate Pozzolanic Material and Its Use in Concrete. **Cem. Concr. Res,** 25(8): 1713-1725

Zheng, J. and W. Qin. 2003. Performance Characteristics of Soil-Cement from Indrustry Waste Binder. **Journal of Materials in Civil Engineering.** 15(6): 616-618

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

การคำนวณค่าไฮเดรชั่นโมดูลัส, อัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ
และปริมาณน้ำในมวลดินซีเมนต์คิดเป็นโมลโมเลกุล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C1

ชนิดกาก	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
อุตสาหกรรม	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3
เปลือกหอยแครง	26.95	0.00	0.04	0.01
	53.91x50/100	0x50/100	0.07x50/100	0.02x50/100
ผงหินปูน	7.76	0.01	0.02	0.01
	51.70x15/100	0.06x15/100	0.11x15/100	0.04x15/100
กากดินขาว	0.26	2.91	10.86	0.26
	1.72x15/100	19.41x15/100	72.37x15/100	1.76x15/100
เถ้าลอย	1.66	1.99	3.68	1.01
	16.60x10/100	19.90x10/100	16.79x10/100	10.09x10/100
ปูนขาว	10.00	0.00	0.00	0.00
	100x10/100	0x10/100	0x10/100	0x10/100
รวม %	46.62	4.91	14.59	1.29

หมายเหตุ HM = 46.62 / (4.91+14.59+1.29) =2.24

LSF = (46.62x100) / [(2.8x14.59) + (1.18x4.91) + (0.65x1.29)] = 98.21

Ms = 14.59 / (4.91+1.29) = 2.35

Ma = 4.91 / 1.29 = 3.81

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก2 การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C2

ชนิดกาก	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
อุตสาหกรรม	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3
เปลือกหอยแครง	21.56	0.00	0.03	0.01
	53.91x40/100	0x40/100	0.07x40/100	0.02x40/100
ผงหินปูน	12.93	0.02	0.03	0.01
	51.70x25/100	0.06x25/100	0.11x25/100	0.04x25/100
กากดินขาว	0.26	2.91	10.86	0.26
	1.72x15/100	19.41x15/100	72.37x15/100	1.76x15/100
เถ้าลอย	1.66	1.99	3.68	1.01
	16.60x10/100	19.90x10/100	16.79x10/100	10.09x10/100
ปูนขาว	10.00	0.00	0.00	0.00
	100x10/100	0x10/100	0x10/100	0x10/100
รวม %	46.40	4.92	14.59	1.29

หมายเหตุ HM = 46.40 / (4.92+14.59+1.29) =2.23

LSF = (46.40x100) / [(2.8x14.59) + (1.18x4.92) + (0.65x1.29)] = 97.71

Ms = 14.59 / (4.92+1.29) = 2.35

Ma = 4.92 / 1.29 = 3.81

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก3 การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C3

ชนิดกาก	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
อุตสาหกรรม	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3
เปลือกหอยแครง	24.26	0.00	0.03	0.01
	53.91x45/100	0x45/100	0.07x45/100	0.02x45/100
ผงหินปูน	10.34	0.01	0.02	0.01
	51.70x20/100	0.06x20/100	0.11x20/100	0.04x20/100
กากดินขาว	0.26	2.91	10.86	0.26
	1.72x15/100	19.41x15/100	72.37x15/100	1.76x15/100
เถ้าลอย	1.66	1.99	3.68	1.01
	16.60x10/100	19.90x10/100	16.79x10/100	10.09x10/100
ปูนขาว	10.00	0.00	0.00	0.00
	100x10/100	0x10/100	0x10/100	0x10/100
รวม %	46.51	4.91	14.59	1.29

หมายเหตุ HM = 46.51 / (4.91+14.59+1.29) =2.24

LSF = (46.51x100) / [(2.8x14.59) + (1.18x4.91) + (0.65x1.29)] = 97.96

Ms = 14.51 / (4.91+1.29) = 2.35

Ma = 4.91 / 1.29 = 3.81

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก4 การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C4

ชนิดกาก	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
อุตสาหกรรม	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3
เปลือกหอยแครง	21.56	0.00	0.03	0.01
	53.91x40/100	0x40/100	0.07x40/100	0.02x40/100
ผงหินปูน	12.93	0.02	0.03	0.01
	51.70x25/100	0.06x25/100	0.11x25/100	0.04x25/100
กากดินขาว	0.17	1.94	7.24	0.18
	1.72x10/100	19.41x10/100	72.37x10/100	1.76x10/100
เถ้าลอย	0.83	1.00	1.84	0.50
	16.60x5/100	19.90x5/100	16.79x5/100	10.09x5/100
ปูนขาว	20.00	0.00	0.00	0.00
	100x20/100	0x20/100	0x20/100	0x20/100
รวม %	55.49	2.95	9.13	0.70

หมายเหตุ HM = 55.49 / (2.95+9.13+0.70) = 4.34

LSF = (55.49x100) / [(2.8x9.13) + (1.18x2.95) + (0.65x0.70)] = 188.05

Ms = 9.13 / (2.95+0.70) = 2.50

Ma = 2.95 / 0.70 = 4.22

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก5 การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C5

ชนิดกาก	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
อุตสาหกรรม	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3
เปลือกหอยแครง	37.73	0.00	0.05	0.01
	53.91x40/100	0x40/100	0.07x40/100	0.02x40/100
ผงหินปูน	5.17	0.01	0.01	0.00
	51.70x25/100	0.06x25/100	0.11x25/100	0.04x25/100
กากดินขาว	0.34	3.88	14.47	0.35
	1.72x10/100	19.41x10/100	72.37x10/100	1.76x10/100
เถ้าลอย	0.00	0.00	0.00	0.00
	16.60x5/100	19.90x5/100	16.79x5/100	10.09x5/100
ปูนขาว	0.00	0.00	0.00	0.00
	100x20/100	0x20/100	0x20/100	0x20/100
รวม %	43.24	3.89	14.53	0.37

หมายเหตุ HM = 43.24 / (3.89+14.53+0.37) = 2.30

LSF = (43.24x100) / [(2.8x14.53) + (1.18x3.89) + (0.65x0.37)] = 94.99

Ms = 9.13 / (3.89+0.37) = 3.41

Ma = 3.89 / 0.37 = 10.51

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก6 การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C6

ชนิดกาก	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
อุตสาหกรรม	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3
เปลือกหอยแครง	43.12	0.00	0.06	0.02
	53.91x80/100	0x80/100	0.07x80/100	0.02x80/100
ผงหินปูน	0.00	0.00	0.00	0.00
	51.70x0/100	0.06x0/100	0.11x0/100	0.04x0/100
กากดินขาว	0.34	3.88	14.47	0.35
	1.72x20/100	19.41x20/100	72.37x20/100	1.76x20/100
เถ้าลอย	0.00	0.00	0.00	0.00
	16.60x0/100	19.90x0/100	16.79x0/100	10.09x0/100
ปูนขาว	0.00	0.00	0.00	0.00
	100x0/100	0x0/100	0x0/100	0x0/100
รวม %	43.46	3.88	14.53	0.37

หมายเหตุ HM = 43.46 / (3.88+14.53+0.37) = 2.31

LSF = (43.46x100) / [(2.8x14.53) + (1.18x3.88) + (0.65x0.37)] = 95.52

Ms = 9.13 / (3.88+0.37) = 3.42

Ma = 3.88 / 0.37 = 10.55

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก7 การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C7

ชนิดกาก	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
อุตสาหกรรม	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3
เปลือกหอยแครง	35.04	0.00	0.05	0.01
	53.91x65/100	0x65/100	0.07x65/100	0.02x65/100
ผงหินปูน	7.76	0.01	0.02	0.01
	51.70x15/100	0.06x15/100	0.11x15/100	0.04x15/100
กากดินขาว	0.34	3.88	14.47	0.35
	1.72x20/100	19.41x20/100	72.37x20/100	1.76x20/100
เถ้าลอย	0.00	0.00	0.00	0.00
	16.60x0/100	19.90x0/100	16.79x0/100	10.09x0/100
ปูนขาว	0.00	0.00	0.00	0.00
	100x0/100	0x0/100	0x0/100	0x0/100
รวม %	43.13	3.89	14.53	0.37

หมายเหตุ HM = 43.13 / (3.89+14.53+0.37) = 2.29

LSF = (43.13x100) / [(2.8x14.53) + (1.18x3.89) + (0.65x0.37)] = 94.73

Ms = 9.13 / (3.89+0.37) = 3.41

Ma = 3.89 / 0.37 = 10.49

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก8 การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C8

ชนิดกาก	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
อุตสาหกรรม	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3
เปลือกหอยแครง	26.95	0.00	0.04	0.01
	53.91x50/100	0x50/100	0.07x50/100	0.02x50/100
ผงหินปูน	5.17	0.01	0.01	0.00
	51.70x10/100	0.06x10/100	0.11x10/100	0.04x10/100
กากดินขาว	0.26	2.91	10.86	0.26
	1.72x15/100	19.41x15/100	72.37x15/100	1.76x15/100
เถ้าลอย	2.49	2.99	5.52	1.51
	16.60x15/100	19.90x15/100	16.79x15/100	10.09x15/100
ปูนขาว	10.00	0.00	0.00	0.00
	100x10/100	0x10/100	0x10/100	0x10/100
รวม %	44.87	5.90	16.42	1.79

หมายเหตุ HM = 44.87 / (5.90+16.42+1.79) = 1.86

LSF = (44.87x100) / [(2.8x16.42) + (1.18x5.90) + (0.65x1.79)] = 82.93

Ms = 9.13 / (5.90+1.79) = 2.13

Ma = 5.90 / 1.79 = 3.29

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก9 การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C9

ชนิดกาก	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
อุตสาหกรรม	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3
เปลือกหอยแครง	24.26	0.00	0.03	0.01
	53.91x45/100	0x45/100	0.07x45/100	0.02x45/100
ผงหินปูน	7.76	0.01	0.02	0.01
	51.70x15/100	0.06x15/100	0.11x15/100	0.04x15/100
กากดินขาว	0.09	0.97	3.62	0.09
	1.72x5/100	19.41x5/100	72.37x5/100	1.76x5/100
เถ้าลอย	4.15	4.98	9.20	2.52
	16.60x25/100	19.90x25/100	16.79x25/100	10.09x25/100
ปูนขาว	10.00	0.00	0.00	0.00
	100x10/100	0x10/100	0x10/100	0x10/100
รวม %	46.25	5.95	12.86	2.63

หมายเหตุ HM = 46.25 / (5.95+12.86+2.63) = 2.16

LSF = (46.25x100) / [(2.8x12.86) + (1.18x5.95) + (0.65x2.63)] = 103.34

Ms = 9.13 / (5.95+2.63) = 1.50

Ma = 5.95 / 2.63 = 2.27

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก10 การคำนวณไฮเดรชั่นโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ C10

ชนิดกาก	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
อุตสาหกรรม	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3
เปลือกหอยแครง	35.04	0.00	0.05	0.01
	53.91x65/100	0x65/100	0.07x65/100	0.02x65/100
ผงหินปูน	5.17	0.01	0.01	0.00
	51.70x10/100	0.06x10/100	0.11x10/100	0.04x10/100
กากดินขาว	0.34	3.88	14.47	0.35
	1.72x20/100	19.41x20/100	72.37x20/100	1.76x20/100
เถ้าลอย	0.00	0.00	0.00	0.00
	16.60x0/100	19.90x0/100	16.79x0/100	10.09x0/100
ปูนขาว	5.00	0.00	0.00	0.00
	100x10/100	0x10/100	0x10/100	0x10/100
รวม %	45.55	3.89	14.53	0.37

หมายเหตุ HM = 45.55 / (3.89+14.53+0.37) = 2.42

LSF = (45.55x100) / [(2.8x14.53) + (1.18x3.89) + (0.65x0.37)] = 100.08

Ms = 9.13 / (3.89+0.37) = 3.41

Ma = 3.89 / 0.37 = 10.54

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก11 การคำนวณปริมาณน้ำในมวลดินซีเมนต์คิดเป็นโมลโมเลกุล

อายุการบ่ม (วัน)	โมลโมเลกุล ($x10^{-1}$, mol)		
	WBC 150	WBC 200	WBC 250
0	4.2121	4.0762	3.952
	((0.83x100)/(1+0.83))/108	((0.78x100)/(1+0.78))/108	((0.73x100)/(1+0.73))/108
3	4.1446	3.9911	3.8253
	((0.81x100)/(1+0.81))/108	((0.75x100)/(1+0.75))/108	((0.70x100)/(1+0.70))/108
7	4.1435	3.9529	3.7948
	((0.81x100)/(1+0.81))/108	((0.74x100)/(1+0.74))/108	((0.69x100)/(1+0.69))/108
14	4.1078	3.9280	3.6878
	((0.79x100)/(1+0.79))/108	((0.73x100)/(1+0.73))/108	((0.66x100)/(1+0.66))/108
28	4.0799	3.9002	3.6794
	((0.78x100)/(1+0.78))/108	((0.72x100)/(1+0.72))/108	((0.65x100)/(1+0.65))/108
60	4.0440	3.8347	3.6554
	((0.77x100)/(1+0.77))/108	((0.70x100)/(1+0.70))/108	((0.65x100)/(1+0.65))/108
90	4.0312	3.8055	3.6040
	((0.77x100)/(1+0.77))/108	((0.69x100)/(1+0.69))/108	((0.63x100)/(1+0.63))/108

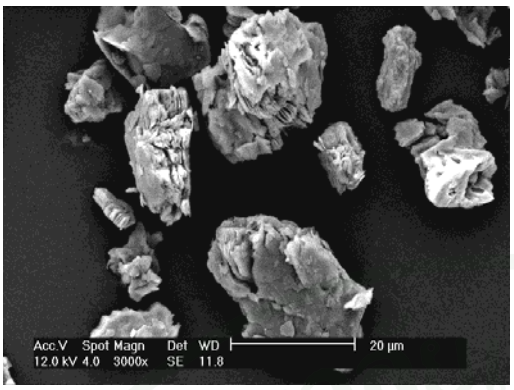
หมายเหตุ mol = g/Mw(H_2O) = ((Wnx100)/(1+Wn))/108

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

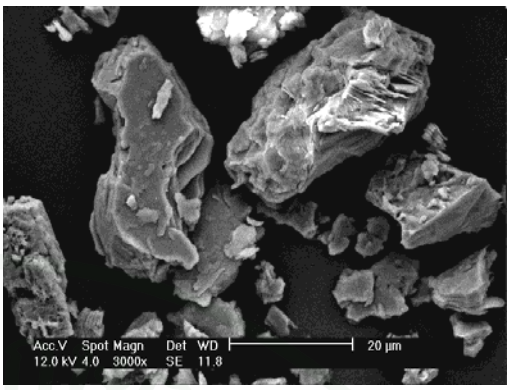
ภาคผนวก ข

Scanning Electron Microscope ของกากอุตสาหกรรม, ซีเมนต์เพสต์ และดินซีเมนต์

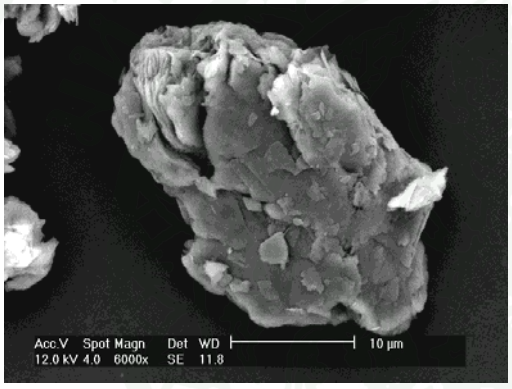
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



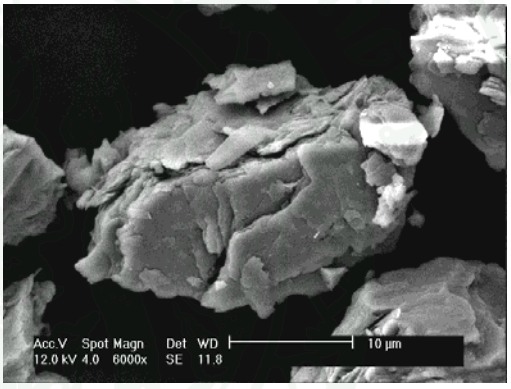
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



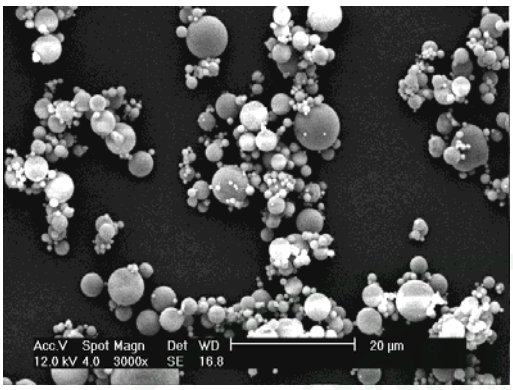
(ค) กำลังขยาย 6000 เท่า



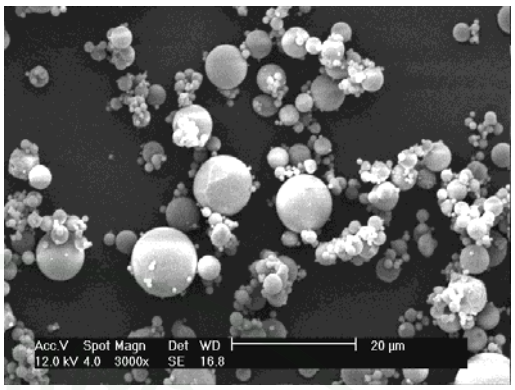
(ง) กำลังขยาย 6000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข1 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของกากดินขาว

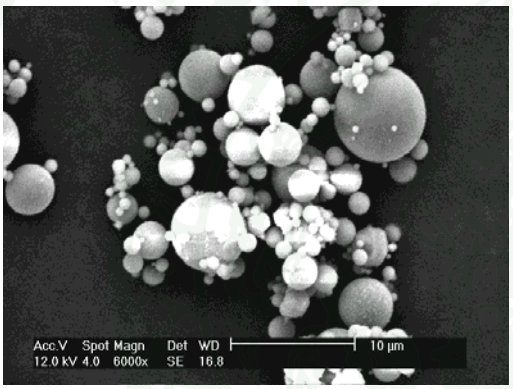
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



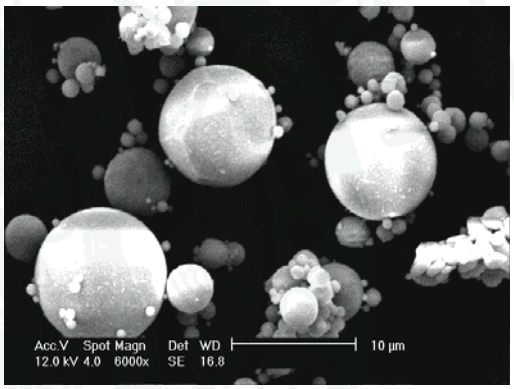
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



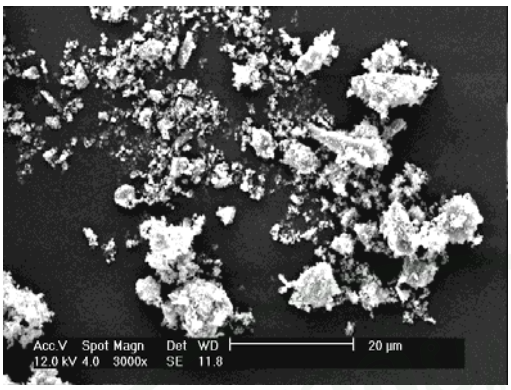
(ค) กำลังขยาย 6000 เท่า



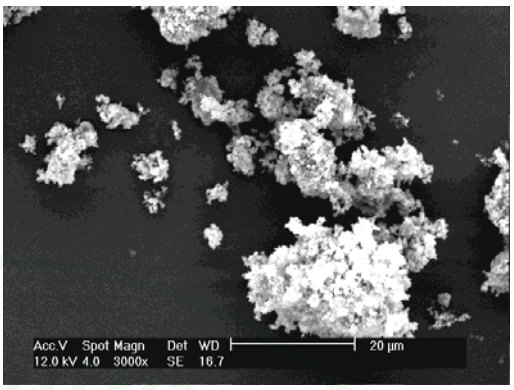
(ง) กำลังขยาย 6000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข2 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของเถ้าลอยแม่เมาะ

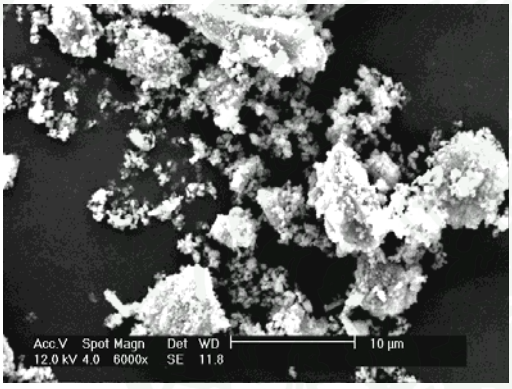
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



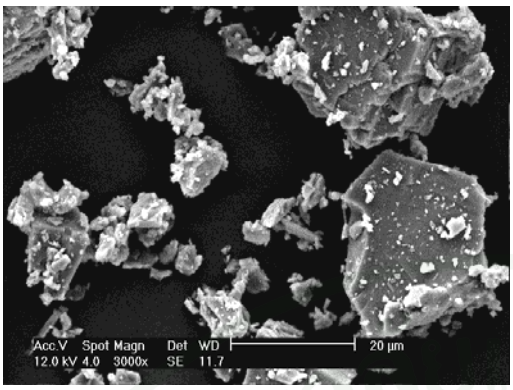
(ค) กำลังขยาย 6000 เท่า



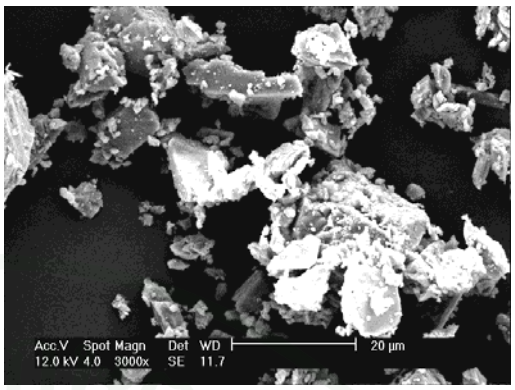
(ง) กำลังขยาย 15000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข3 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของเปลือกหอยแครง

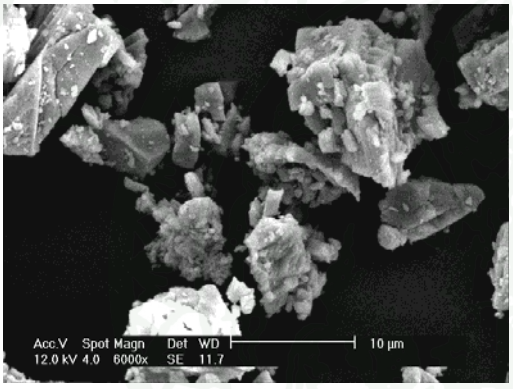
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



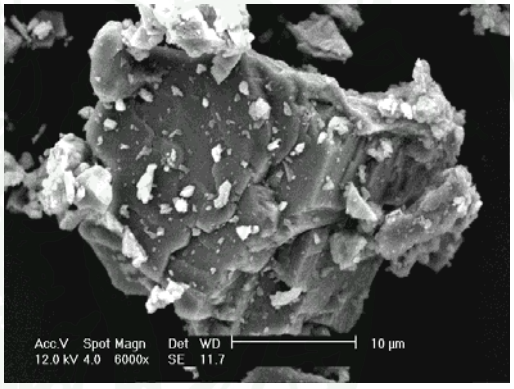
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



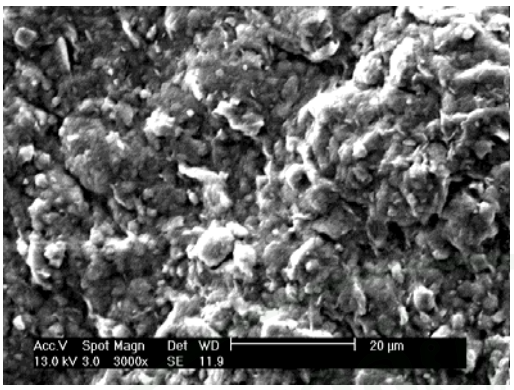
(ค) กำลังขยาย 6000 เท่า



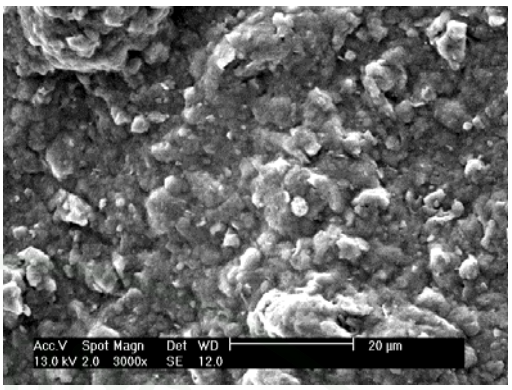
(ง) กำลังขยาย 6000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข4 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของผงหินปูน

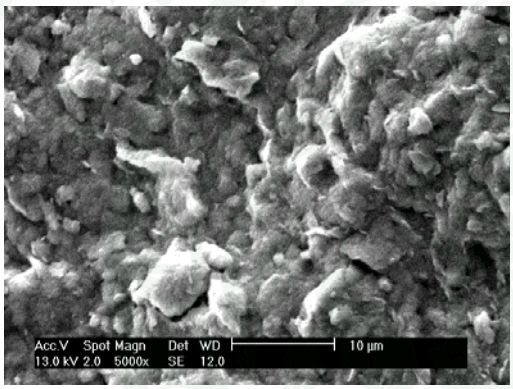
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



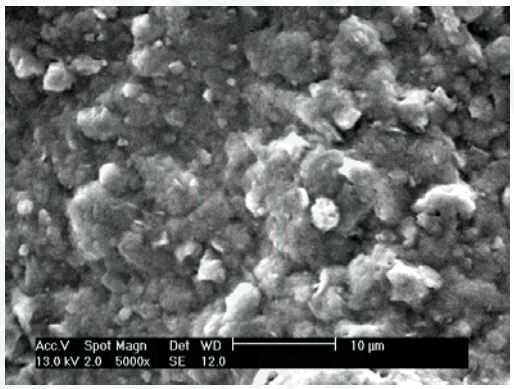
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



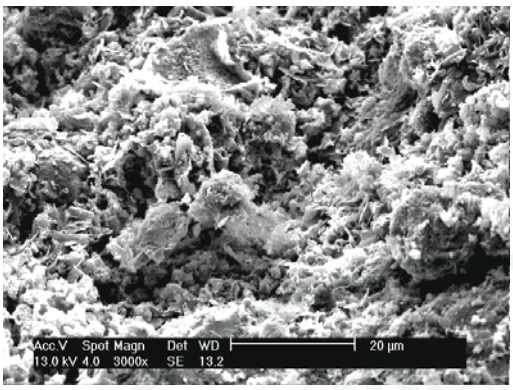
(ค) กำลังขยาย 5000 เท่า



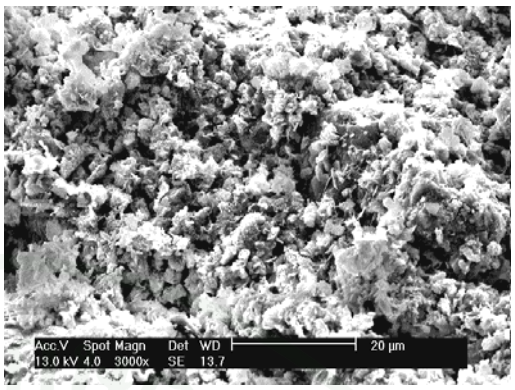
(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข5 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินเหนียวอ่อนก่อนปรับปรุงคุณภาพ

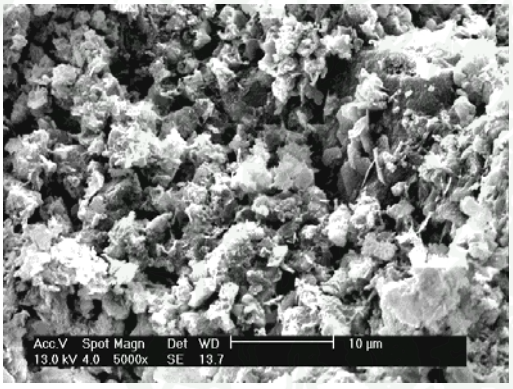
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



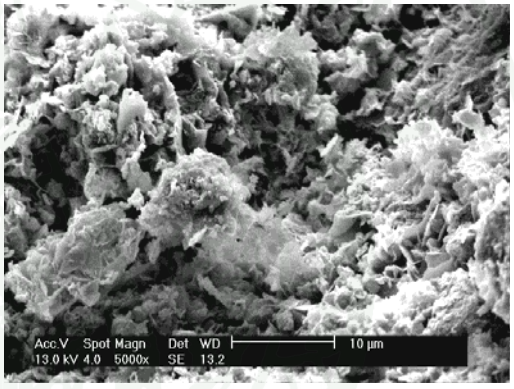
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



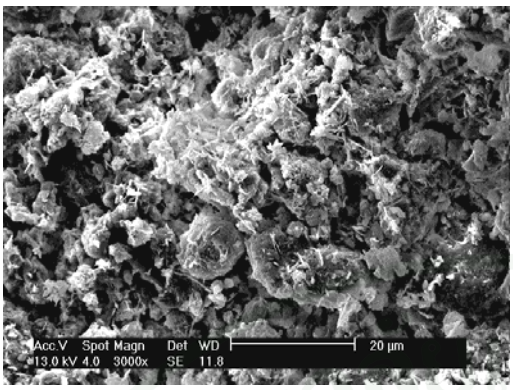
(ค) กำลังขยาย 5000 เท่า



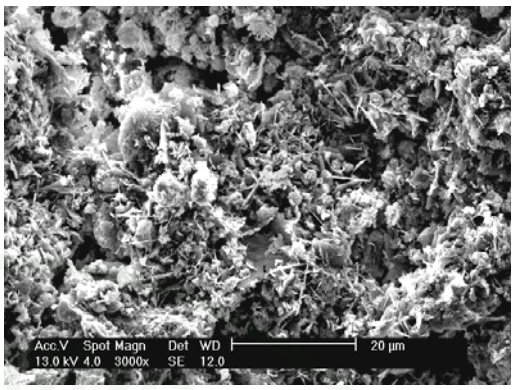
(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข6 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 3 วัน

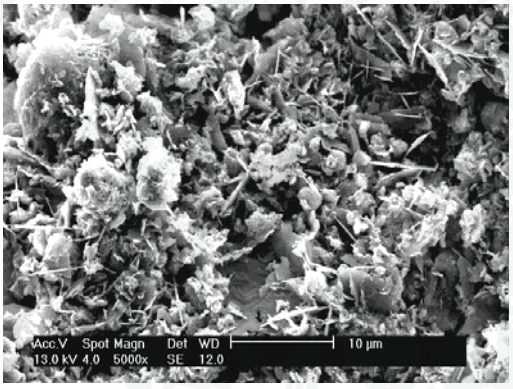
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



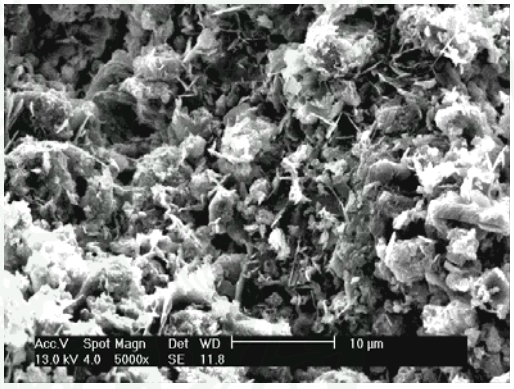
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



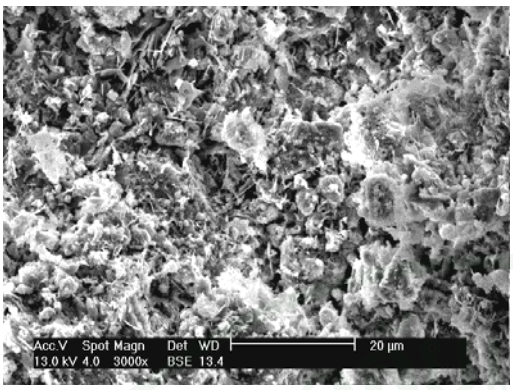
(ค) กำลังขยาย 5000 เท่า



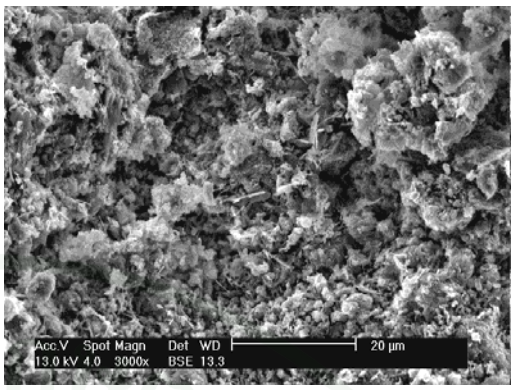
(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข7 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 7 วัน

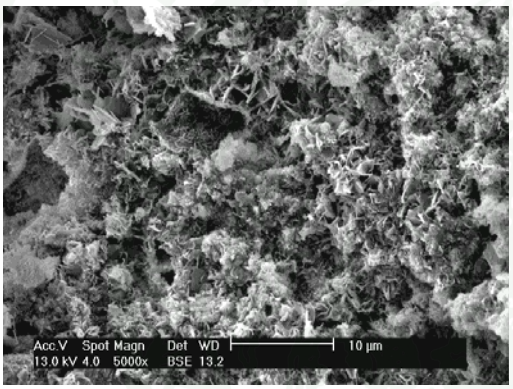
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



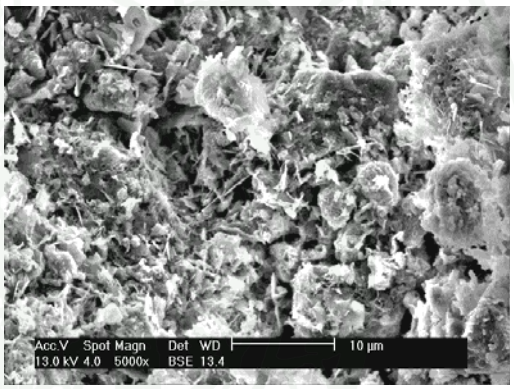
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



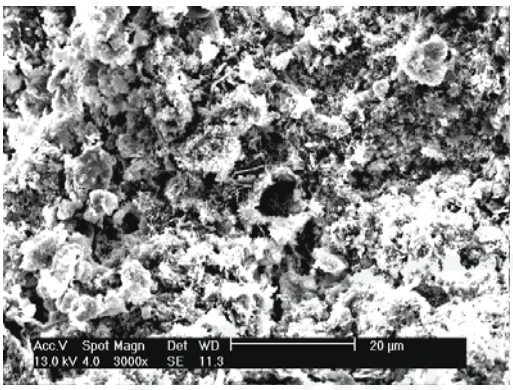
(ค) กำลังขยาย 5000 เท่า



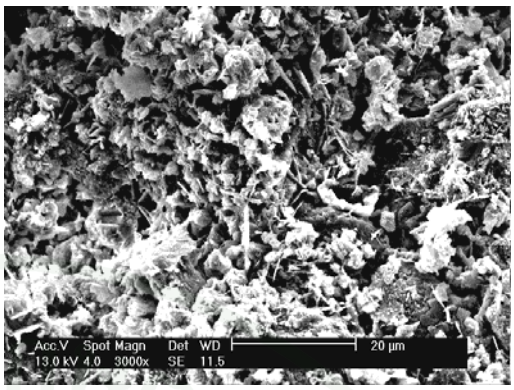
(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข8 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 14 วัน

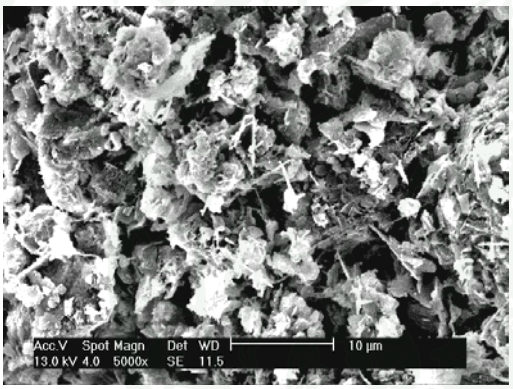
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



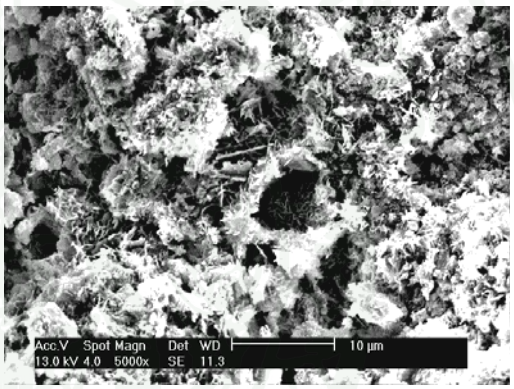
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



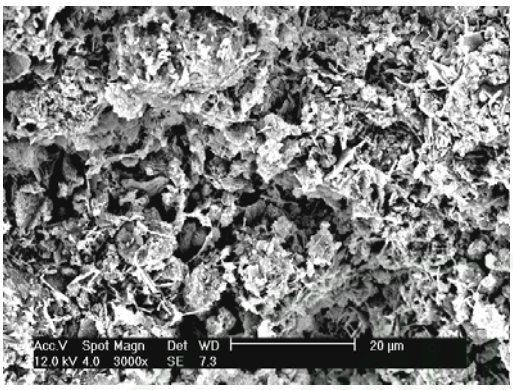
(ค) กำลังขยาย 5000 เท่า



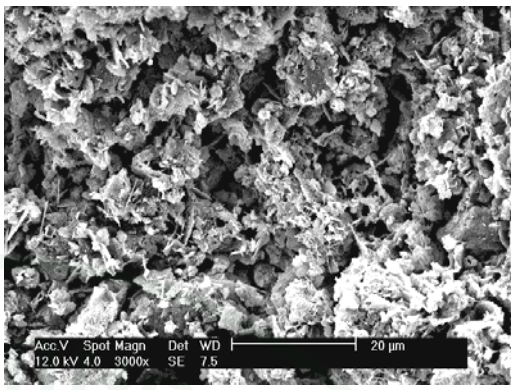
(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข9 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 28 วัน

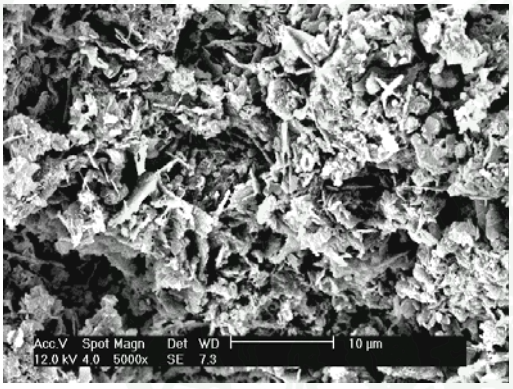
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



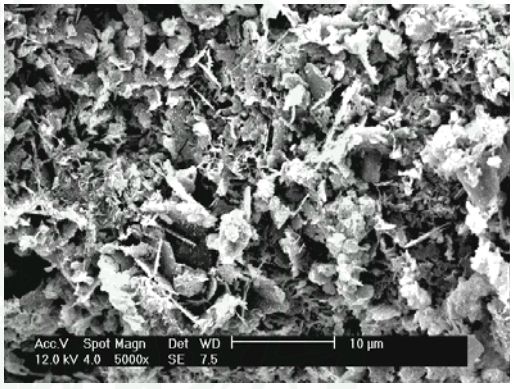
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



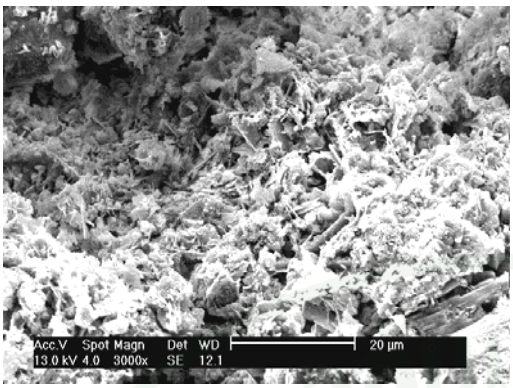
(ค) กำลังขยาย 5000 เท่า



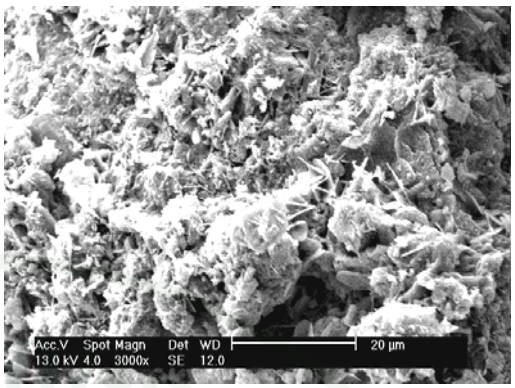
(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข10 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 60 วัน

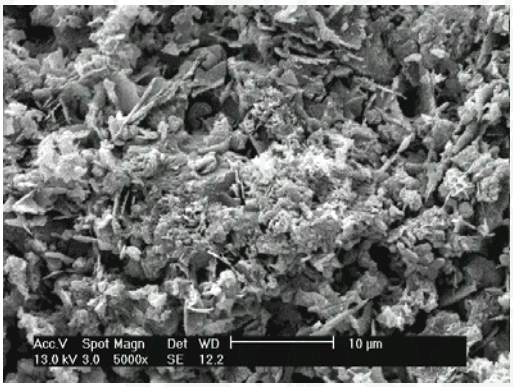
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



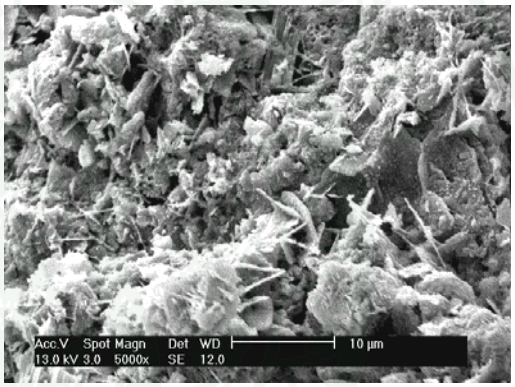
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



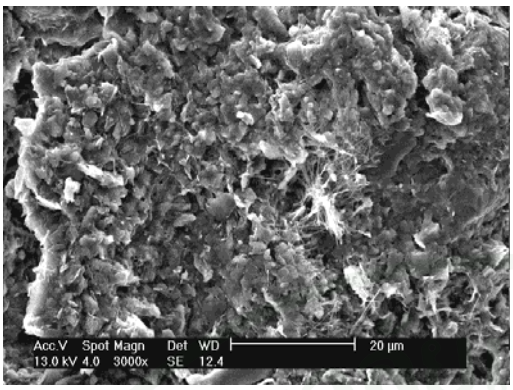
(ค) กำลังขยาย 5000 เท่า



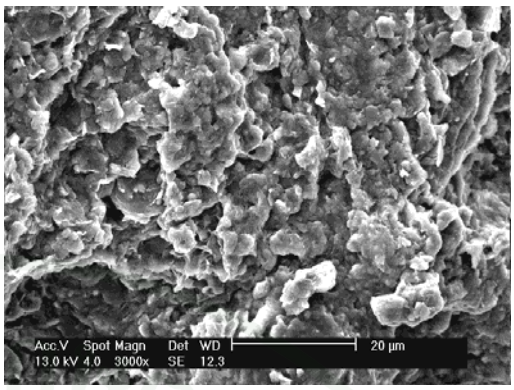
(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข11 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของซีเมนต์เพสต์ C2 ที่อายุการบ่ม 90 วัน

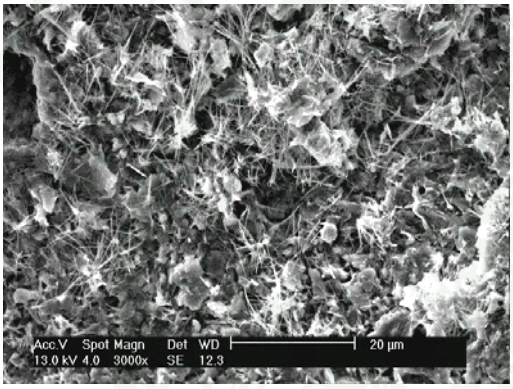
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



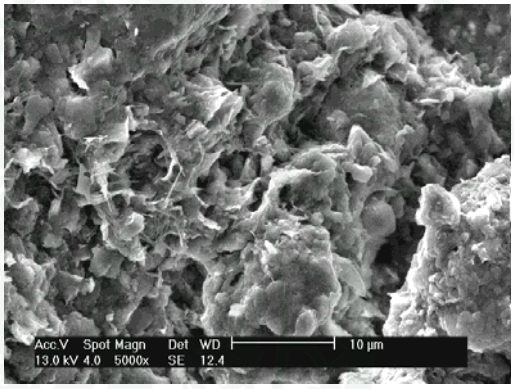
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



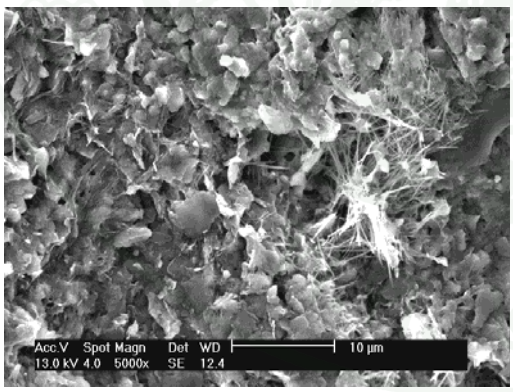
(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



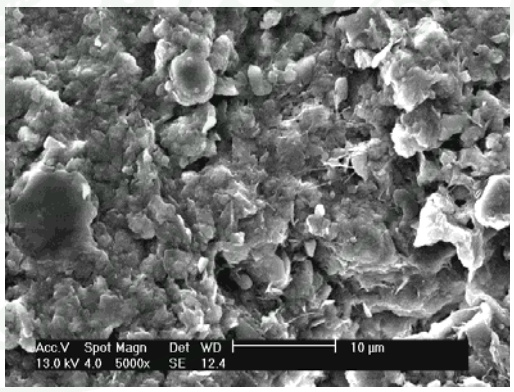
(ค) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



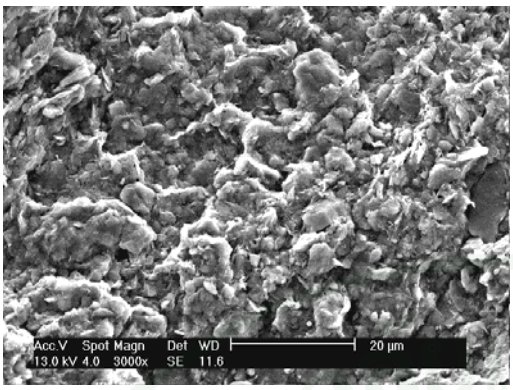
(จ) กำลังขยาย 5000 เท่า



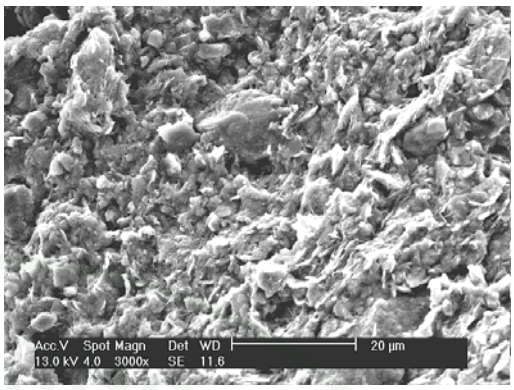
(ฉ) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข12 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 3 วัน

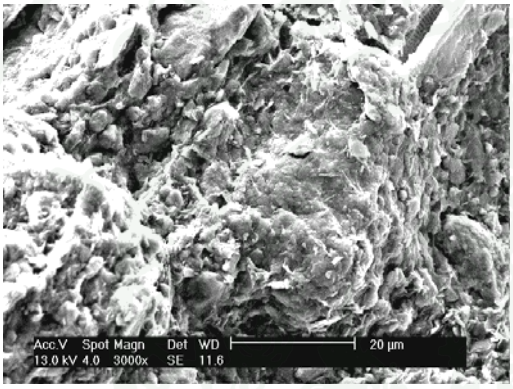
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



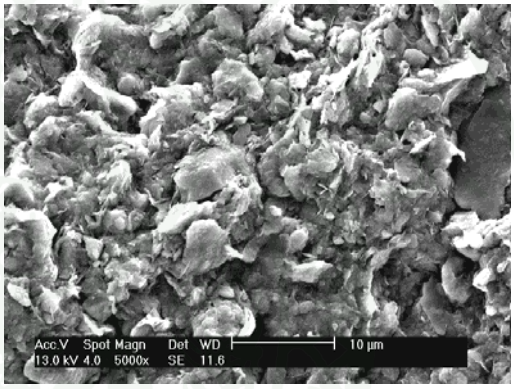
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



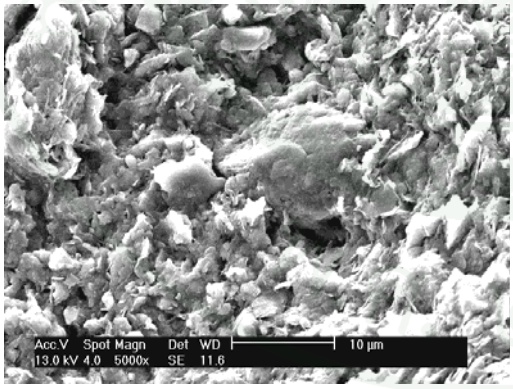
(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



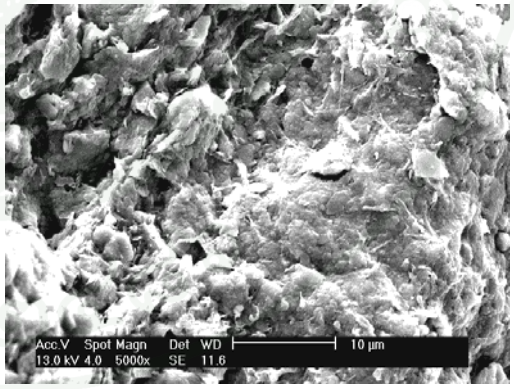
(ค) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



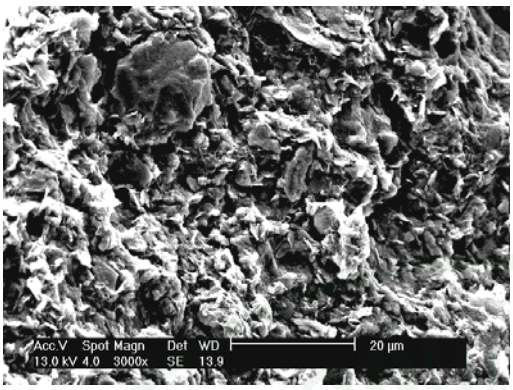
(จ) กำลังขยาย 5000 เท่า



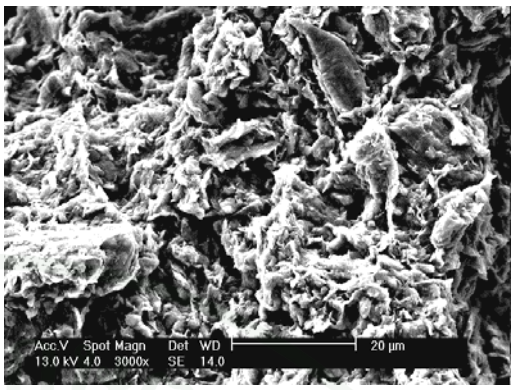
(ฉ) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข13 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 7 วัน

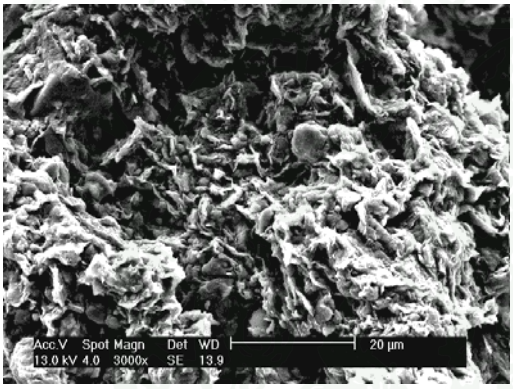
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



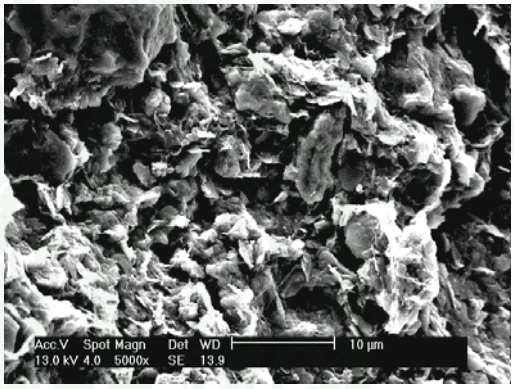
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



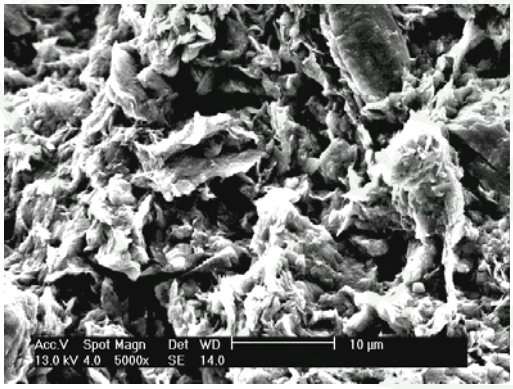
(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



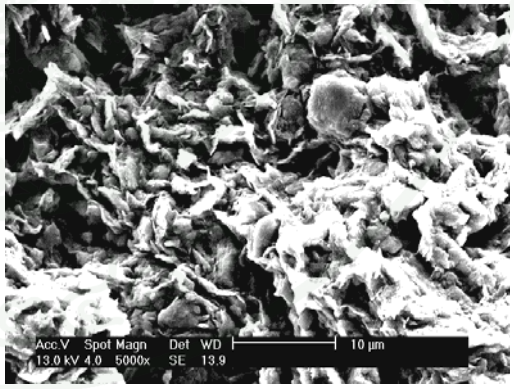
(ค) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



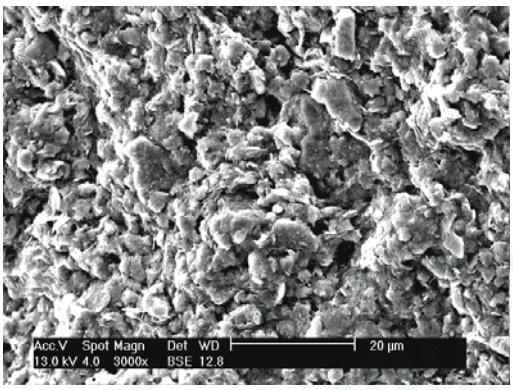
(จ) กำลังขยาย 5000 เท่า



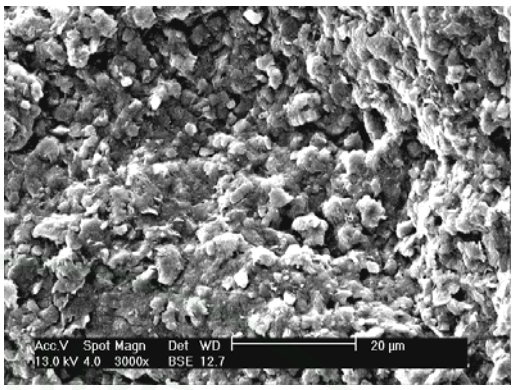
(ฉ) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข14 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 14 วัน

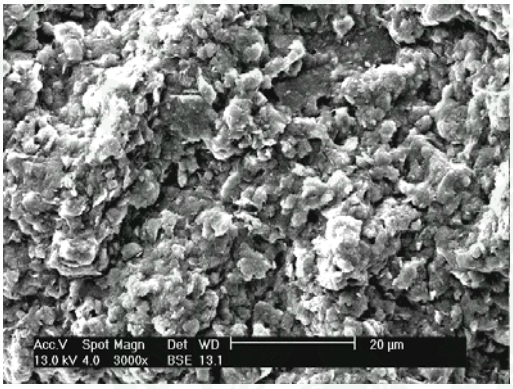
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



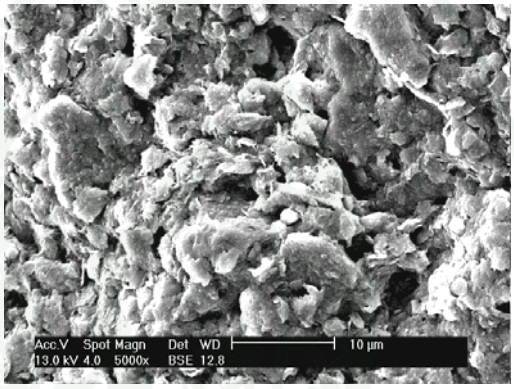
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



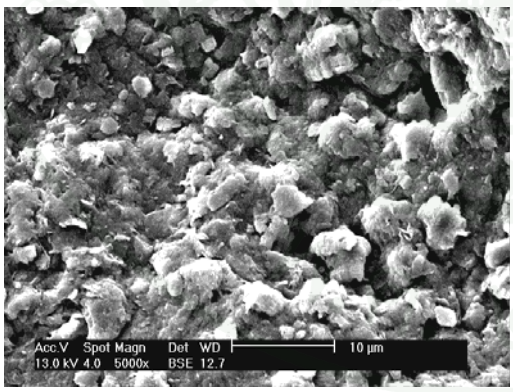
(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



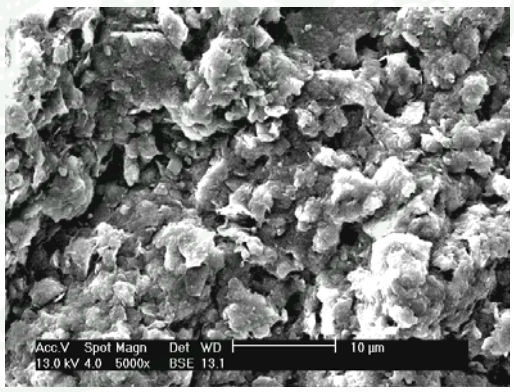
(ค) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



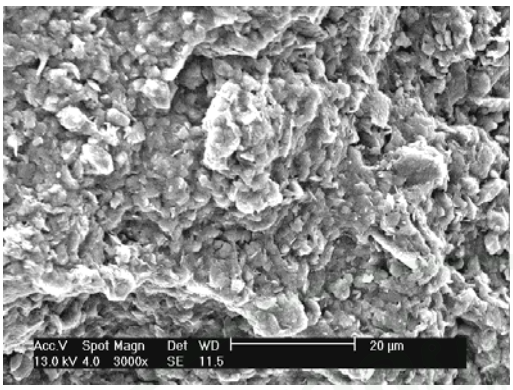
(จ) กำลังขยาย 5000 เท่า



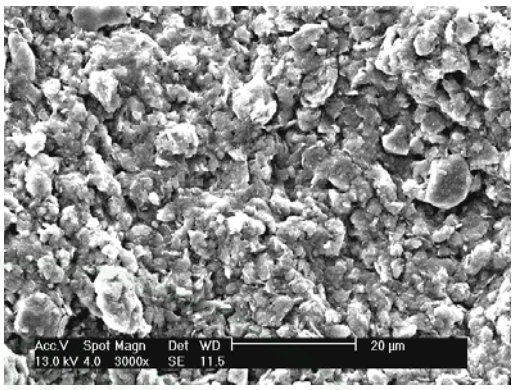
(ฉ) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข15 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 28 วัน

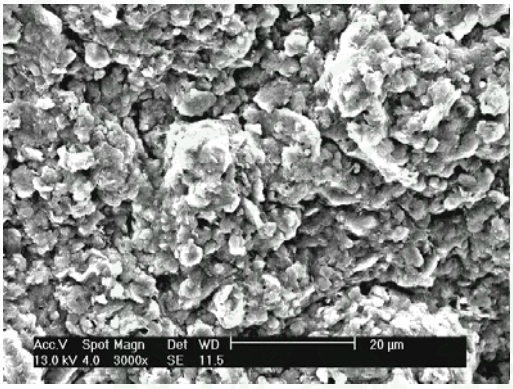
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



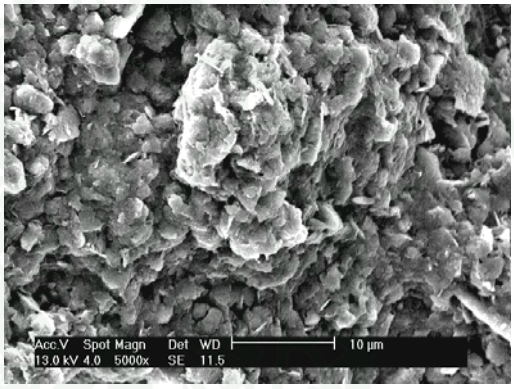
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



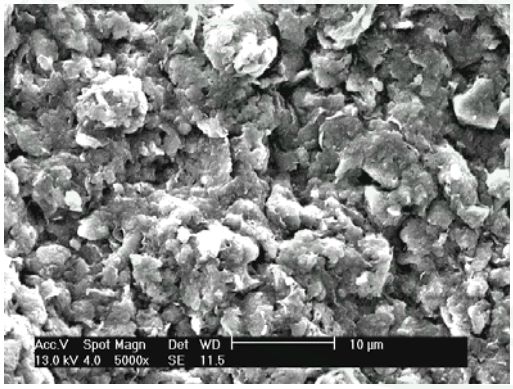
(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



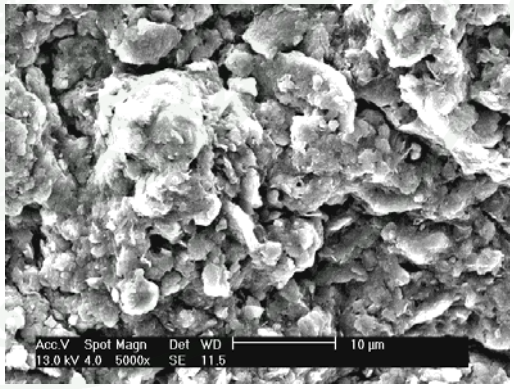
(ค) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



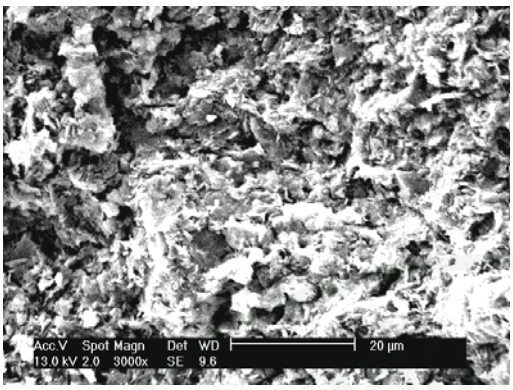
(จ) กำลังขยาย 5000 เท่า



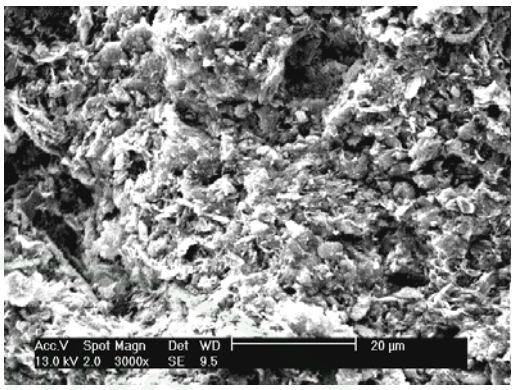
(ฉ) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข16 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 60 วัน

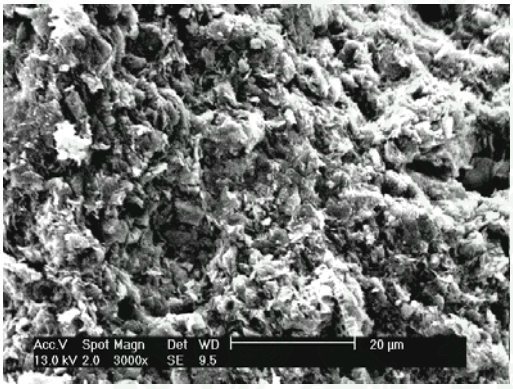
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



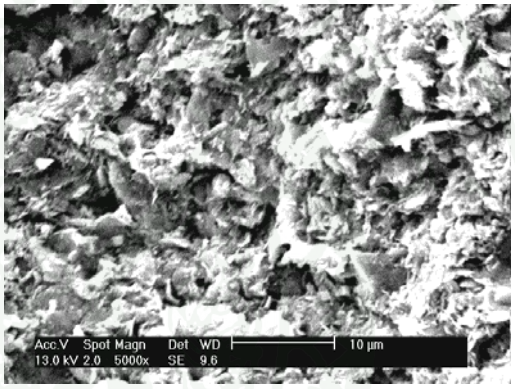
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



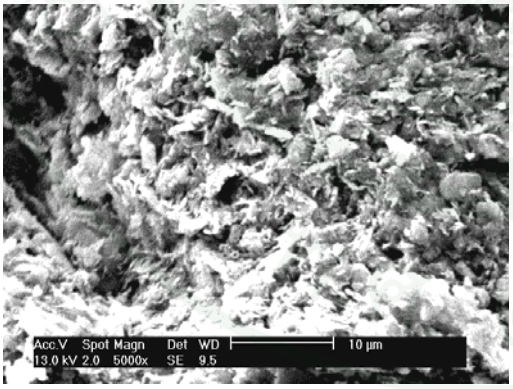
(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



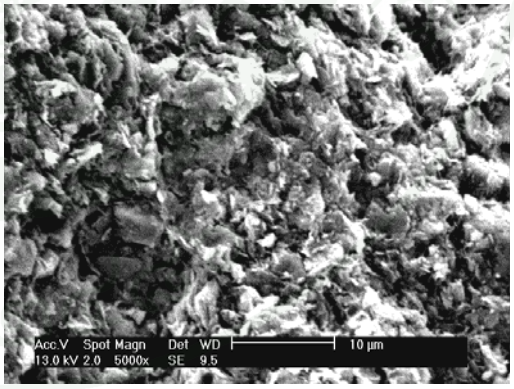
(ค) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



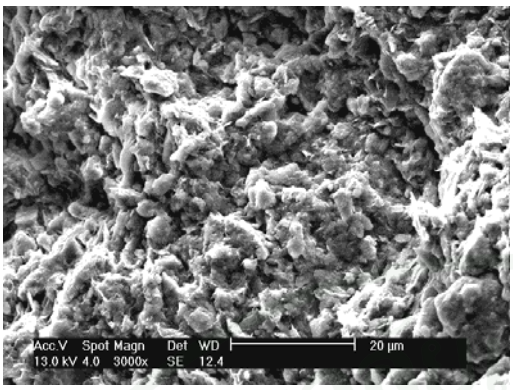
(จ) กำลังขยาย 5000 เท่า



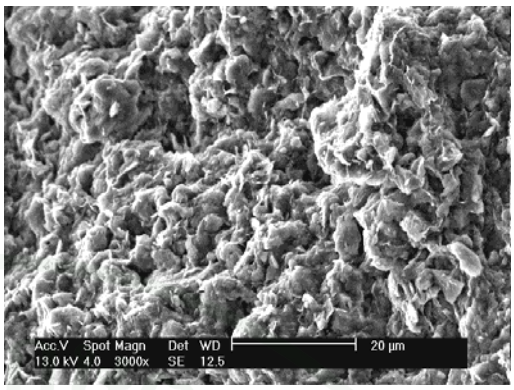
(ฉ) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข17 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 90 วัน

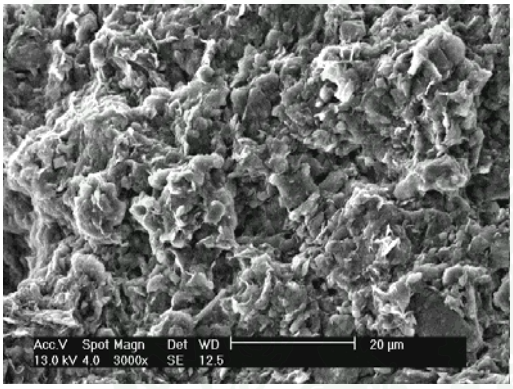
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



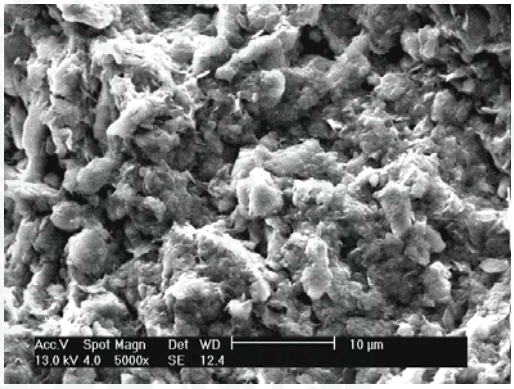
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



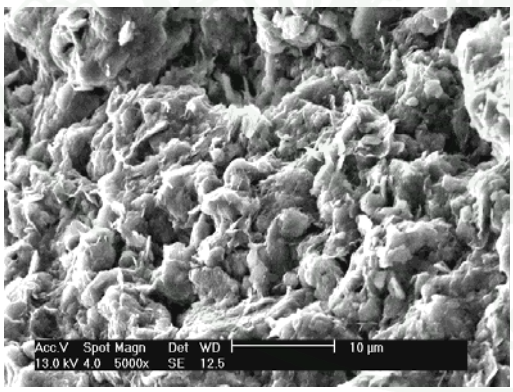
(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



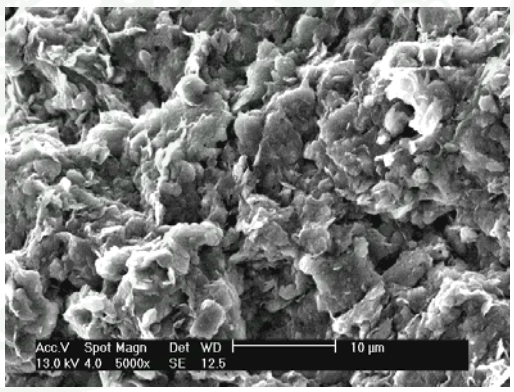
(ค) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



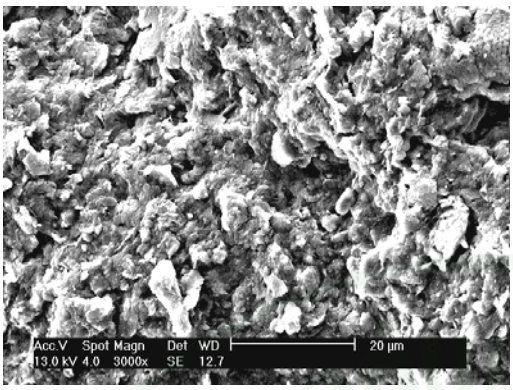
(จ) กำลังขยาย 5000 เท่า



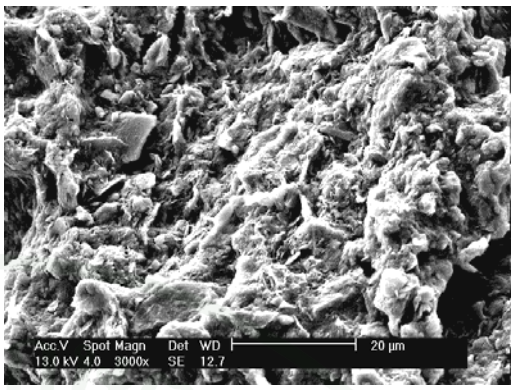
(ฉ) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข18 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 3 วัน

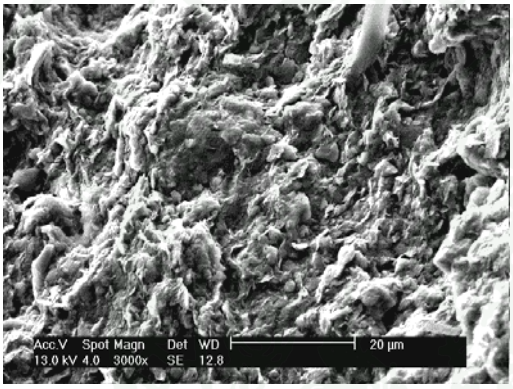
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



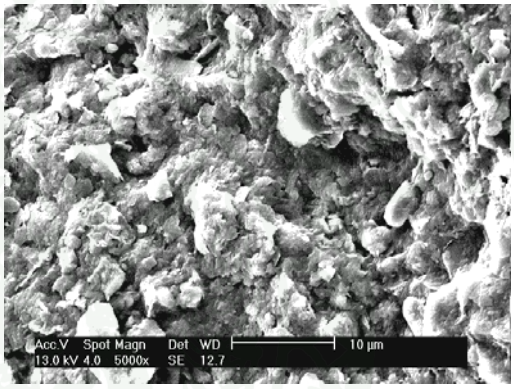
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



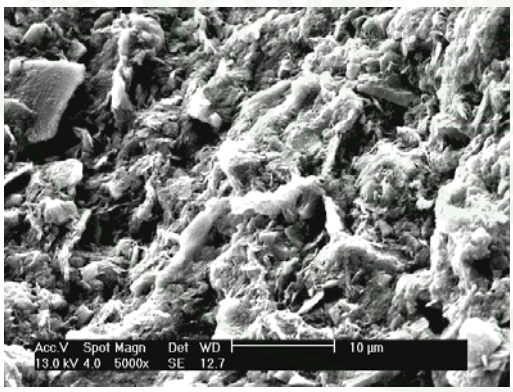
(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



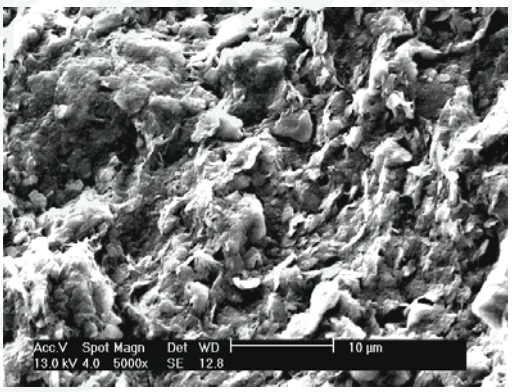
(ค) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



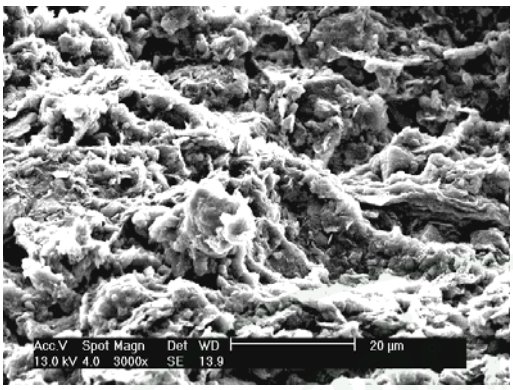
(จ) กำลังขยาย 5000 เท่า



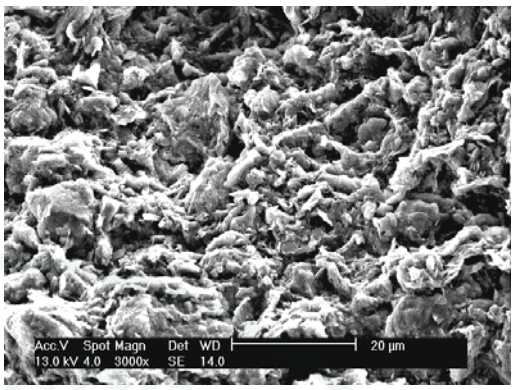
(ฉ) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข19 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 7 วัน

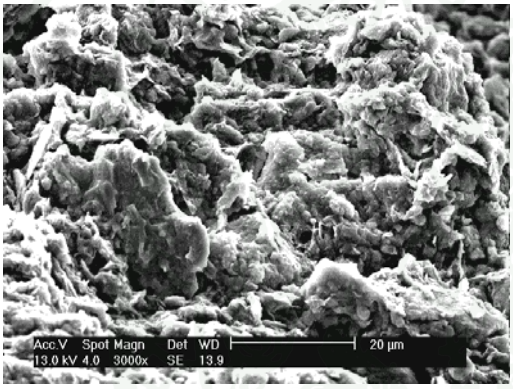
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



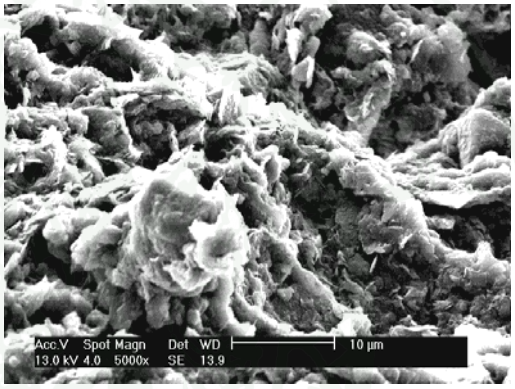
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



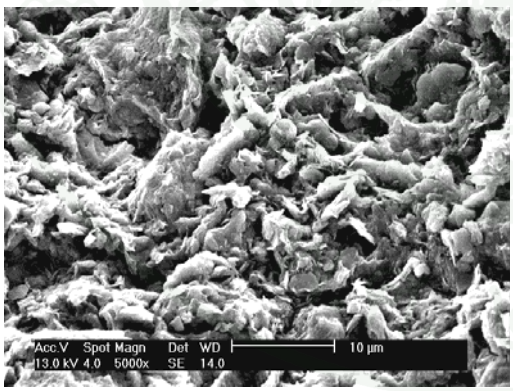
(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



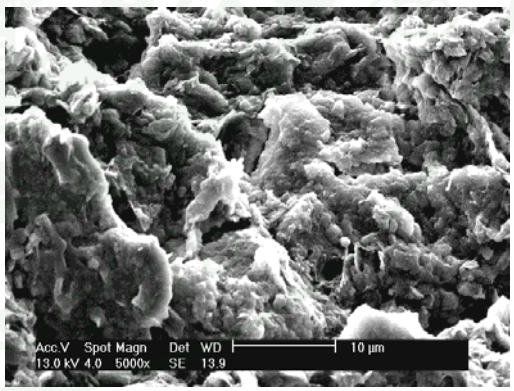
(ค) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



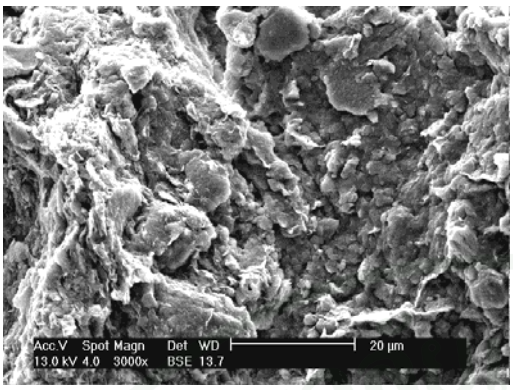
(จ) กำลังขยาย 5000 เท่า



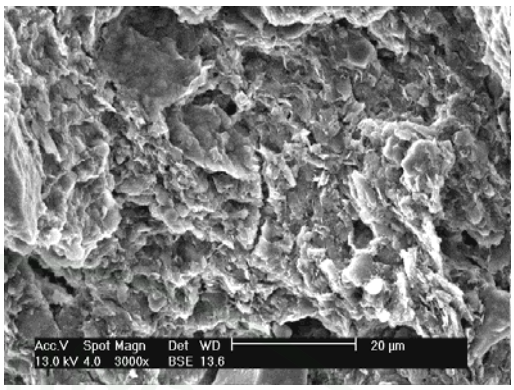
(ฉ) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข20 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 14 วัน

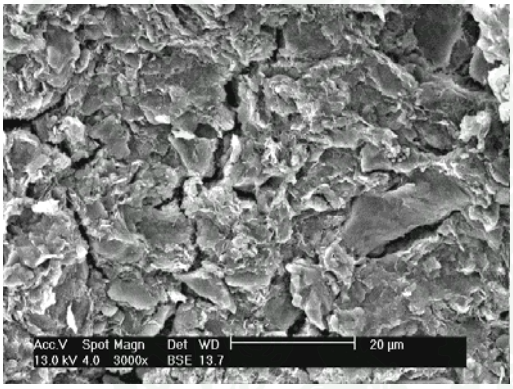
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



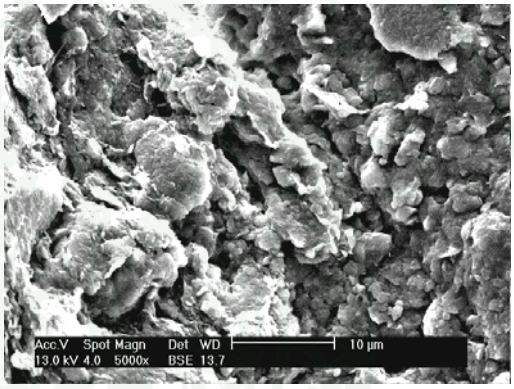
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



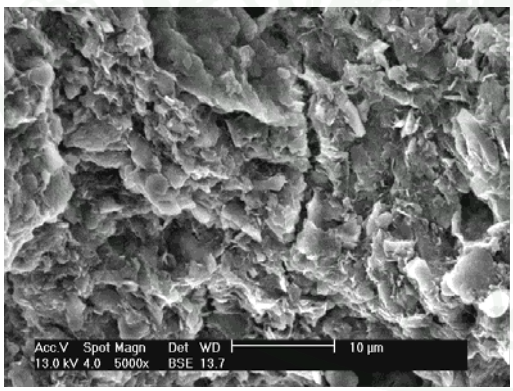
(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



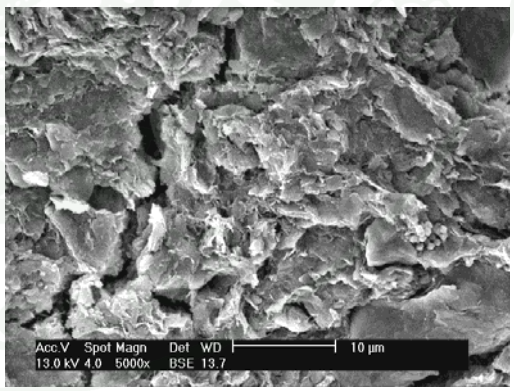
(ค) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



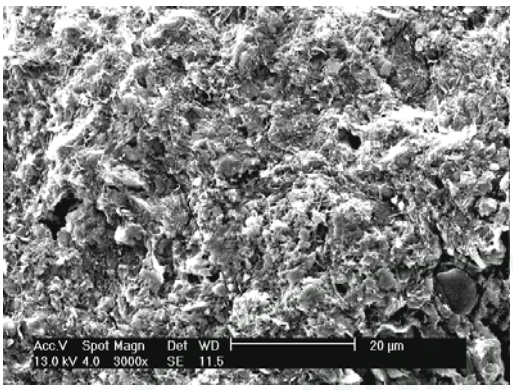
(จ) กำลังขยาย 5000 เท่า



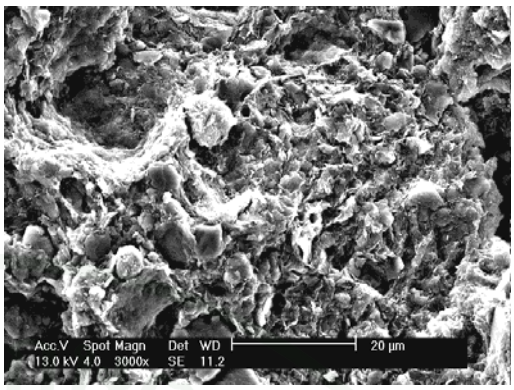
(ฉ) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข21 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 28 วัน

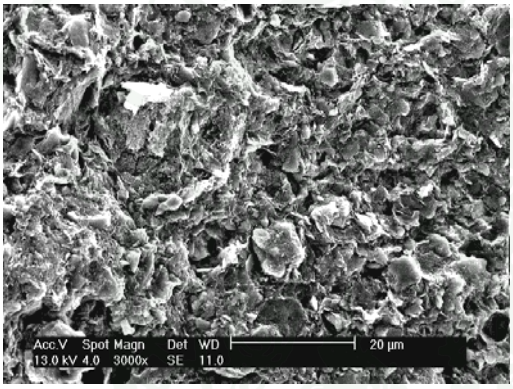
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



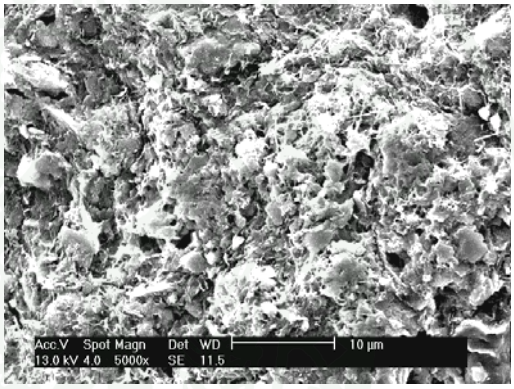
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



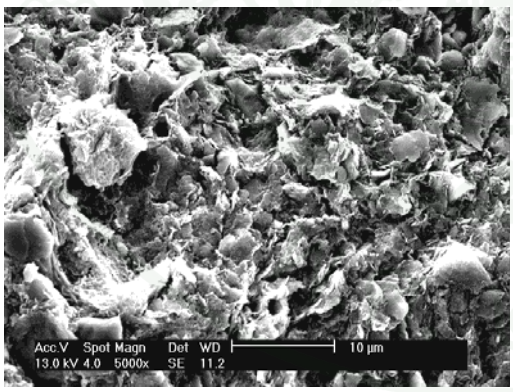
(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



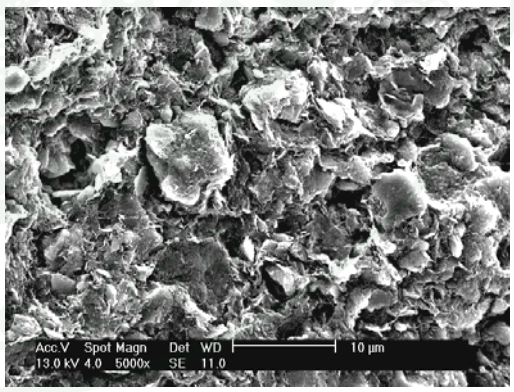
(ค) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



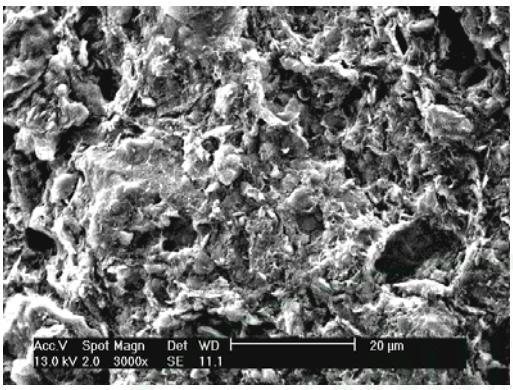
(จ) กำลังขยาย 5000 เท่า



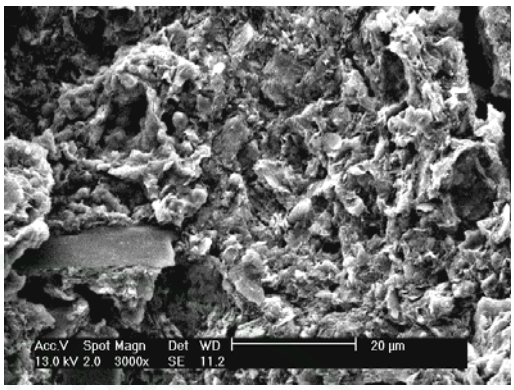
(ฉ) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข22 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 60 วัน

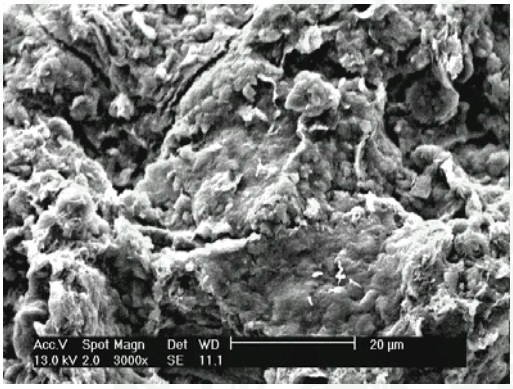
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



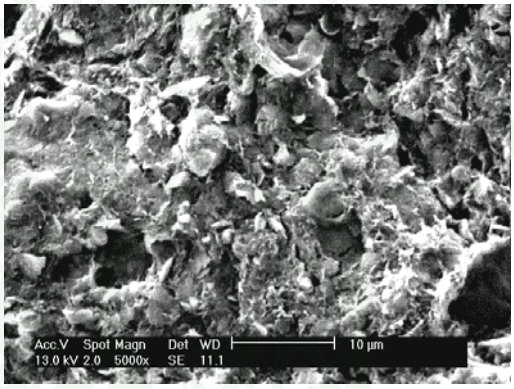
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



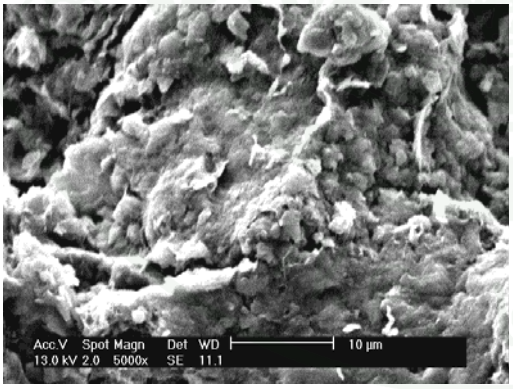
(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



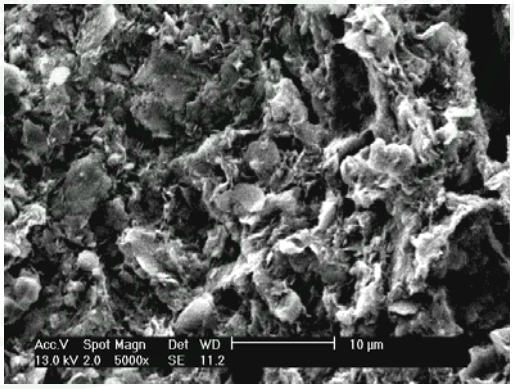
(ค) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



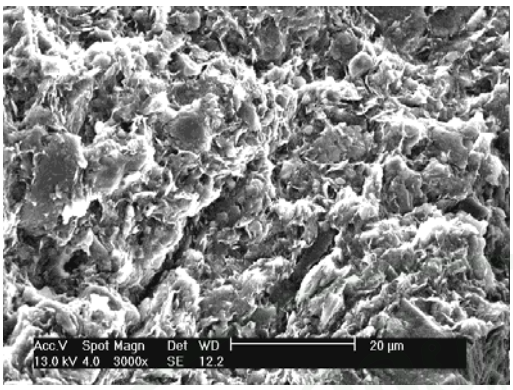
(จ) กำลังขยาย 5000 เท่า



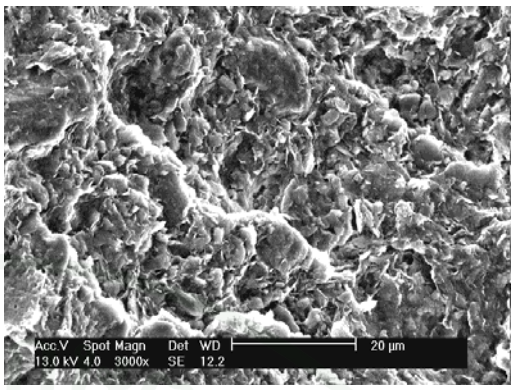
(ฉ) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข23 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 90 วัน

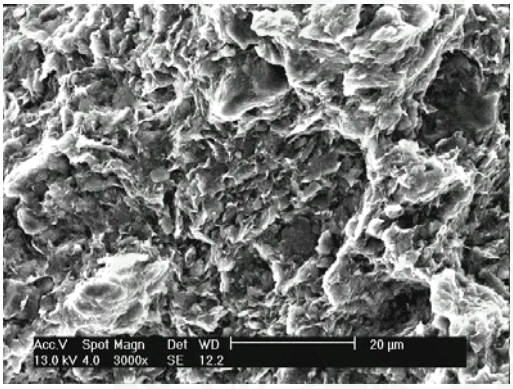
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



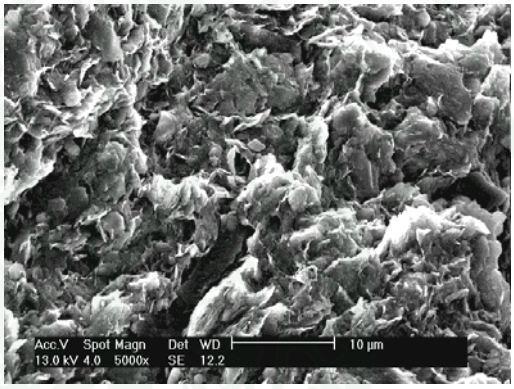
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



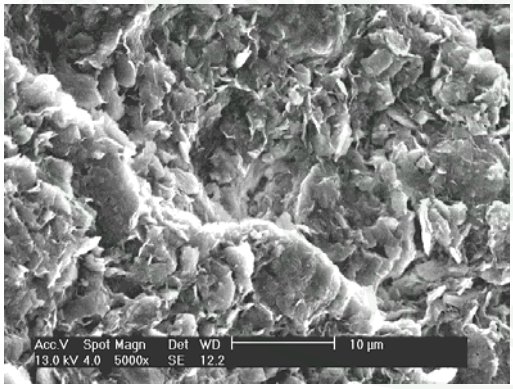
(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



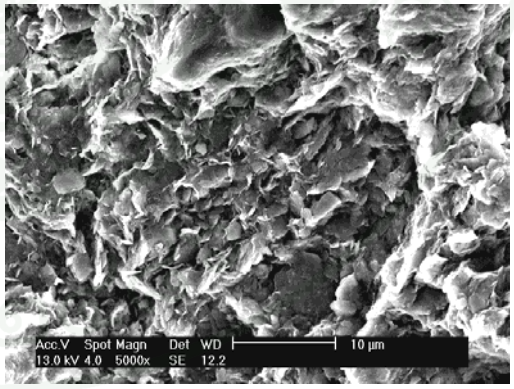
(ค) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



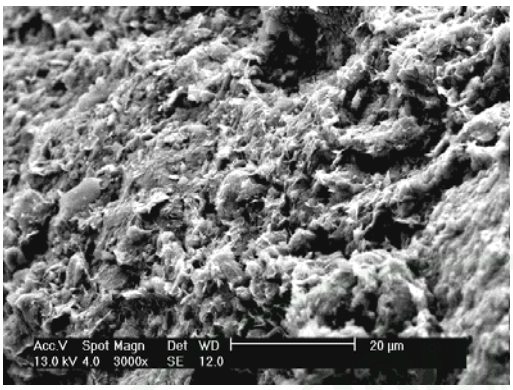
(จ) กำลังขยาย 5000 เท่า



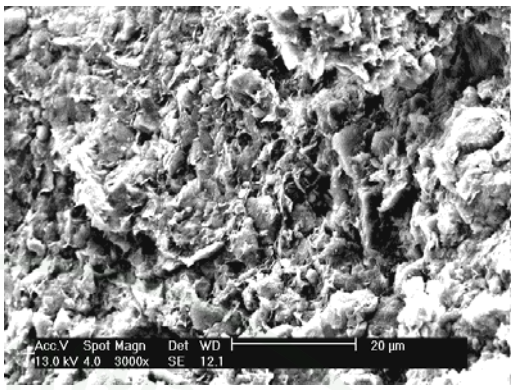
(ฉ) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข24 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 3 วัน

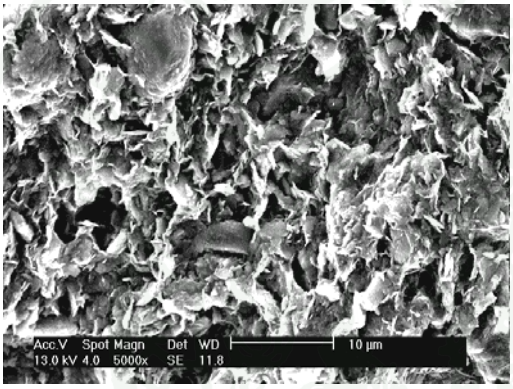
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



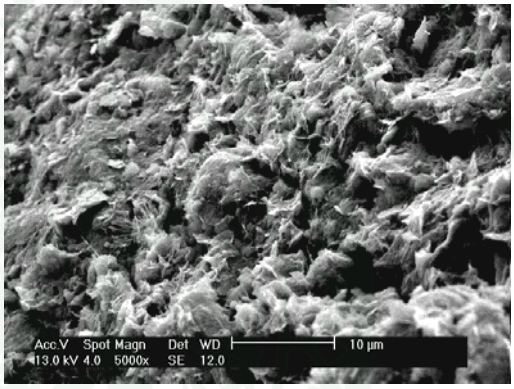
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



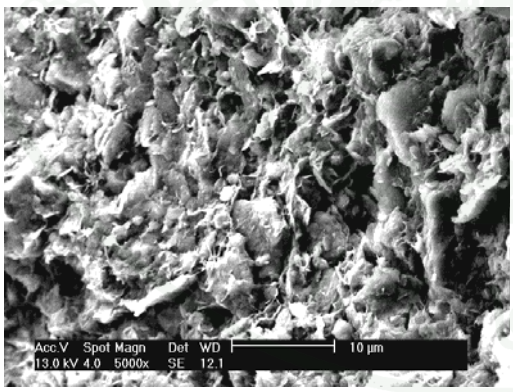
(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



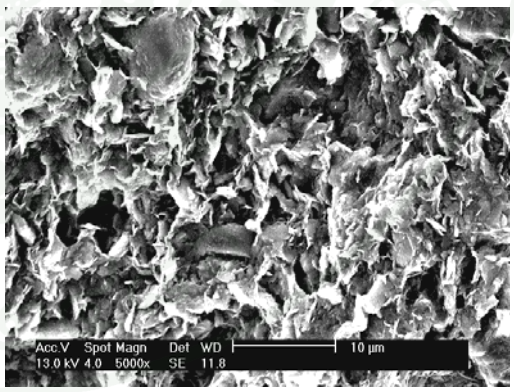
(ค) กำลังขยาย 5000 เท่า



(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



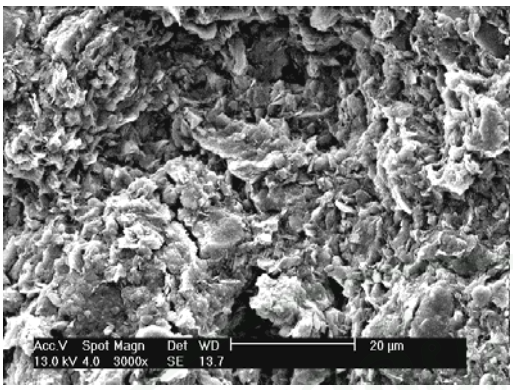
(จ) กำลังขยาย 5000 เท่า



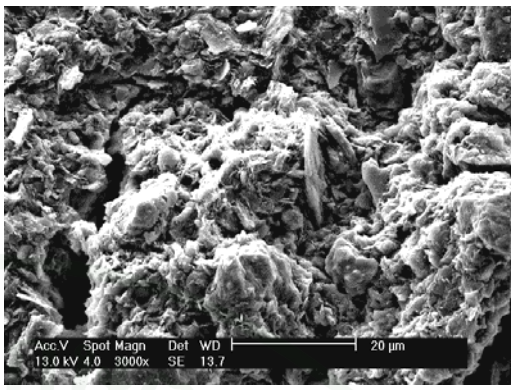
(ฉ) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข25 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 7 วัน

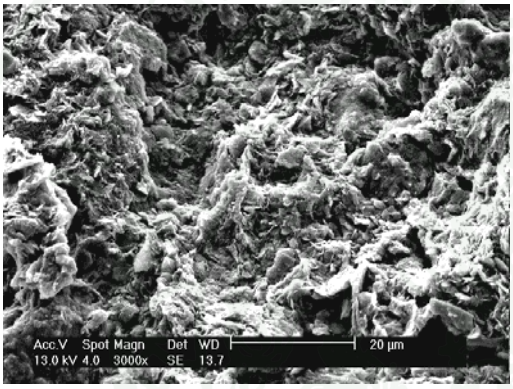
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



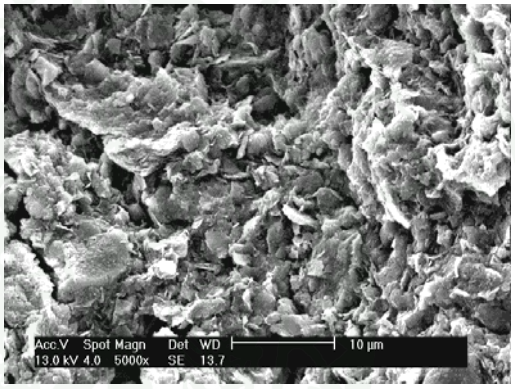
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



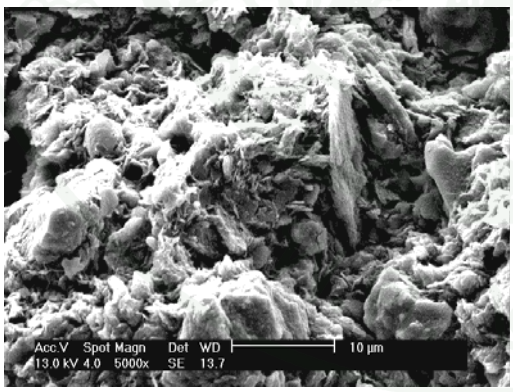
(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



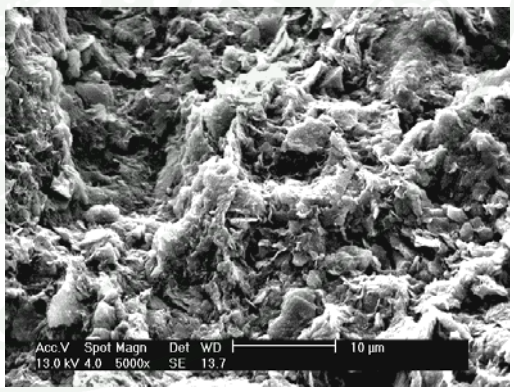
(ค) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



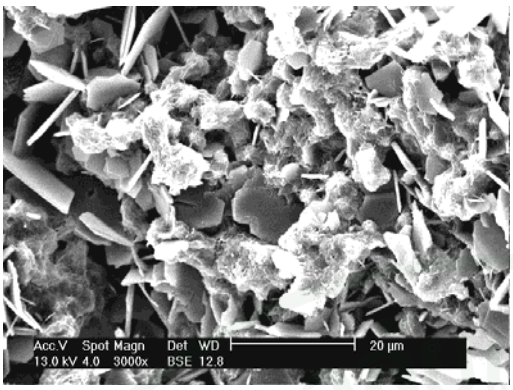
(จ) กำลังขยาย 5000 เท่า



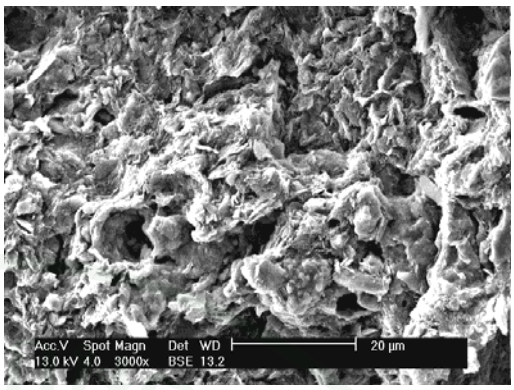
(ฉ) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข26 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 14 วัน

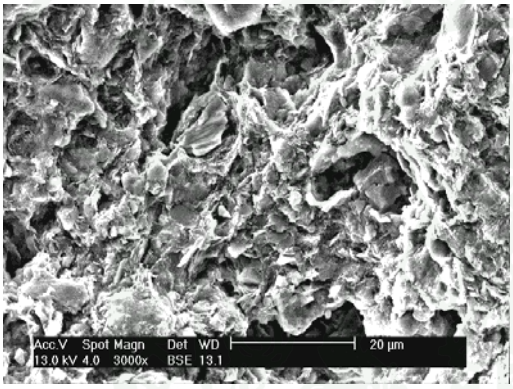
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



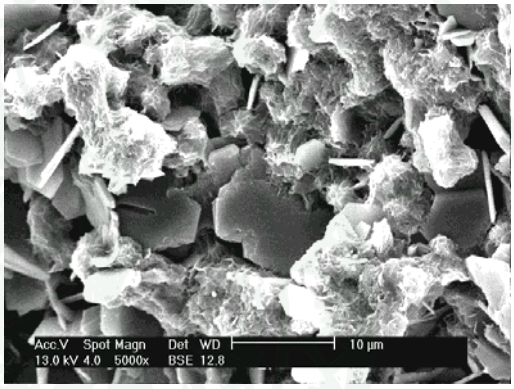
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



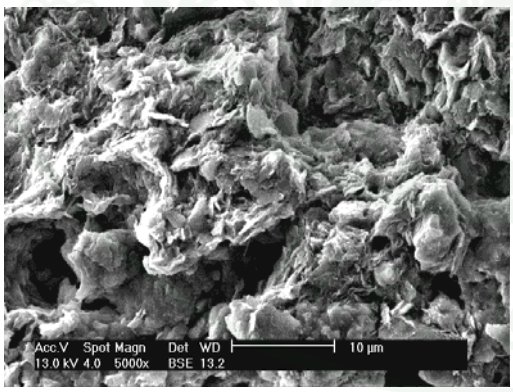
(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



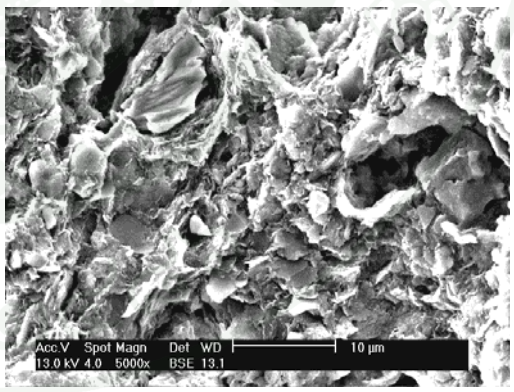
(ค) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



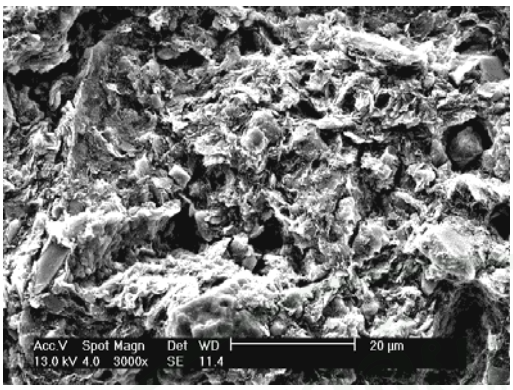
(จ) กำลังขยาย 5000 เท่า



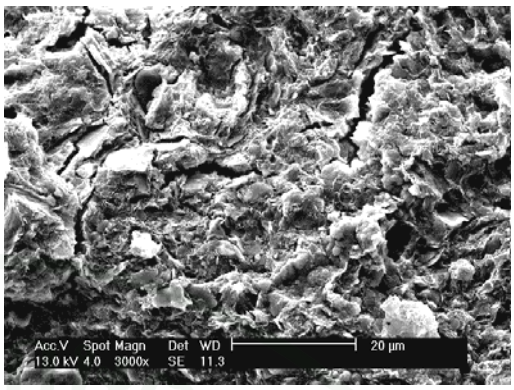
(ฉ) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข27 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 28 วัน

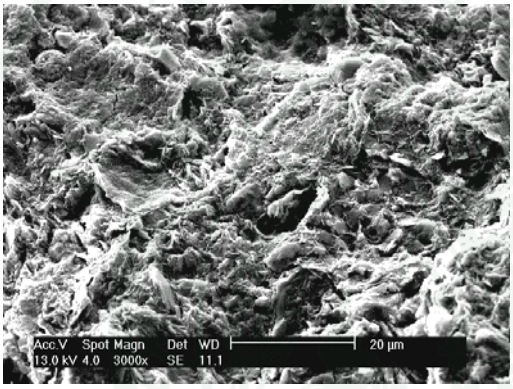
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



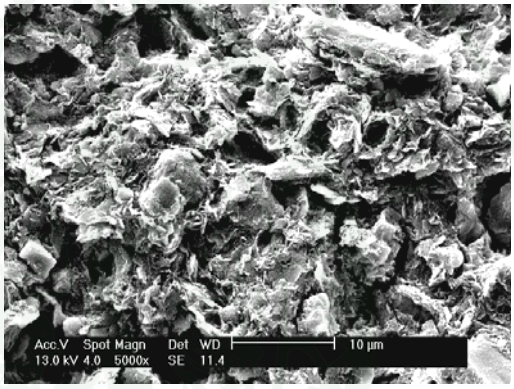
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



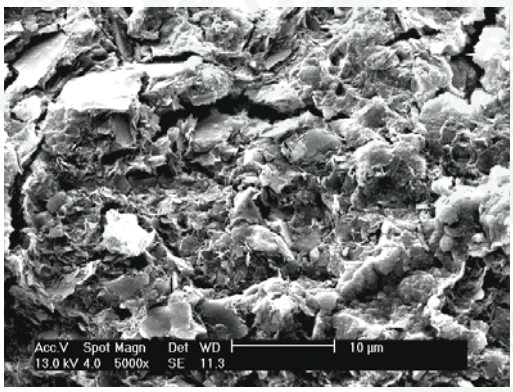
(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



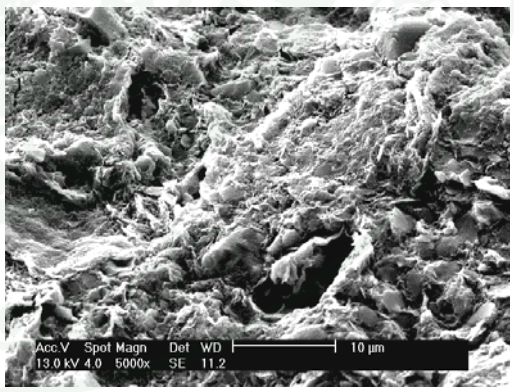
(ค) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



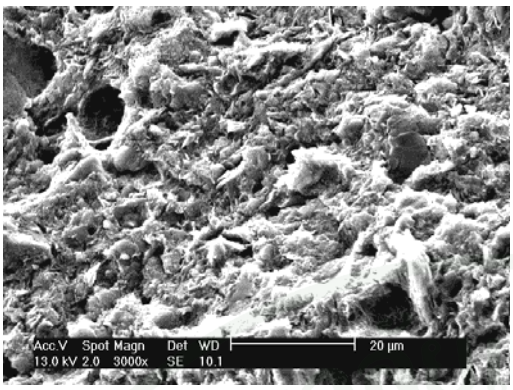
(จ) กำลังขยาย 5000 เท่า



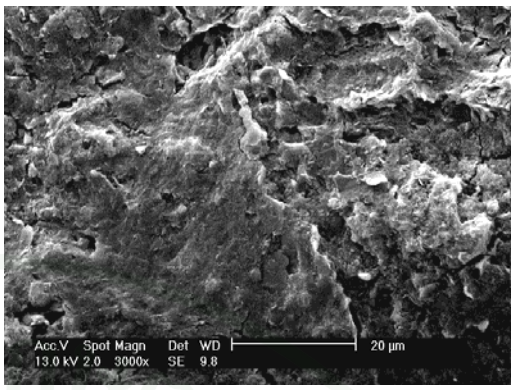
(ฉ) กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพผนวกที่ ข28 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 60 วัน

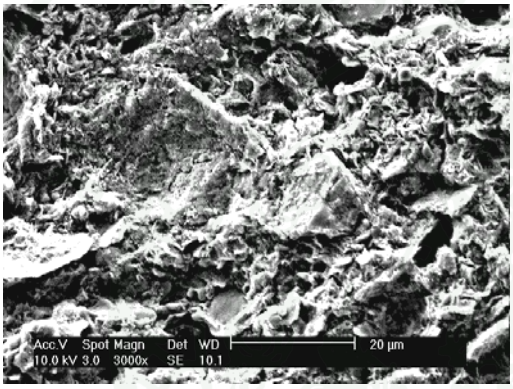
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



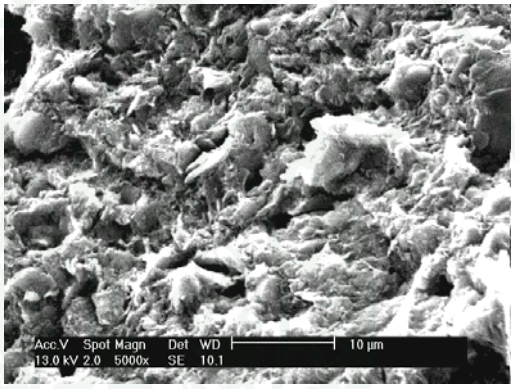
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า



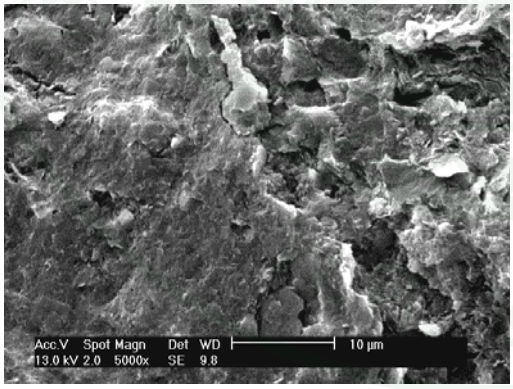
(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า



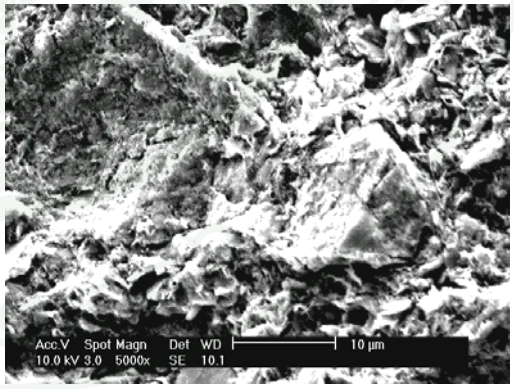
(ค) กำลังขยาย 3000 เท่า



(ง) กำลังขยาย 5000 เท่า



(จ) กำลังขยาย 5000 เท่า



(ฉ) กำลังขยาย 5000 เท่า

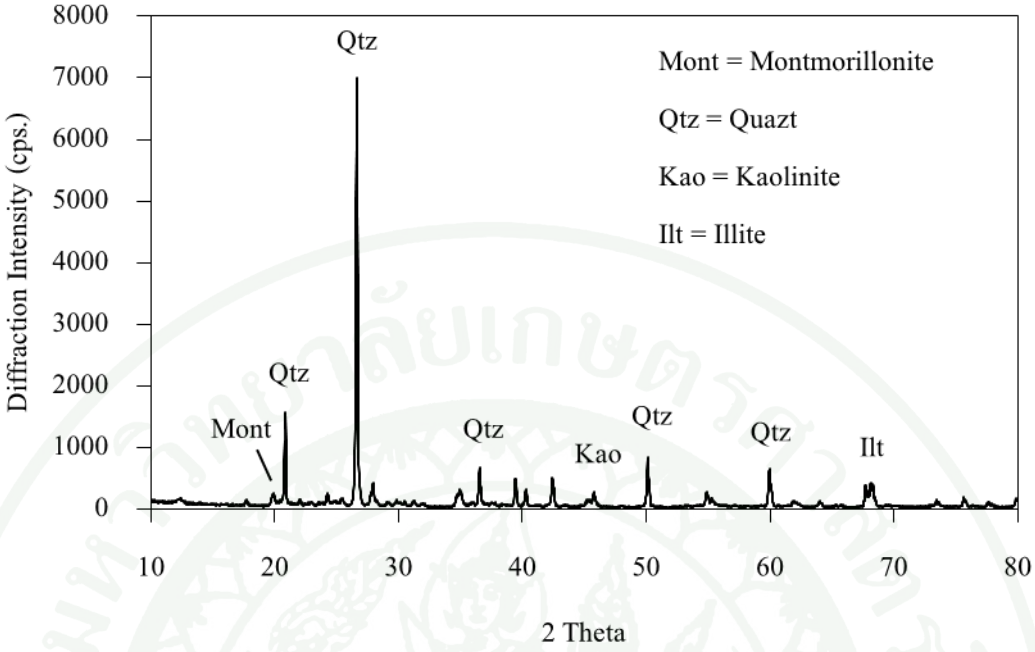
ภาพผนวกที่ ข29 การทดสอบในระดับจุลภาคโดยวิธี SEM ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 90 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

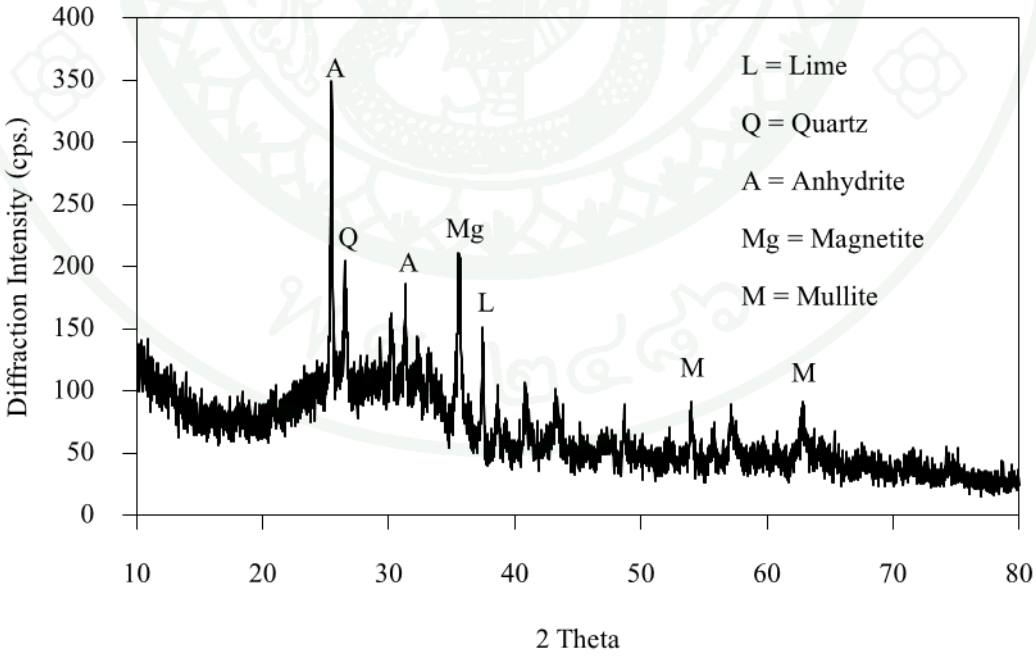
ภาคผนวก ค

X-Ray Diffraction ของกากอุตสาหกรรม, ซีเมนต์เพสต์ และดินซีเมนต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

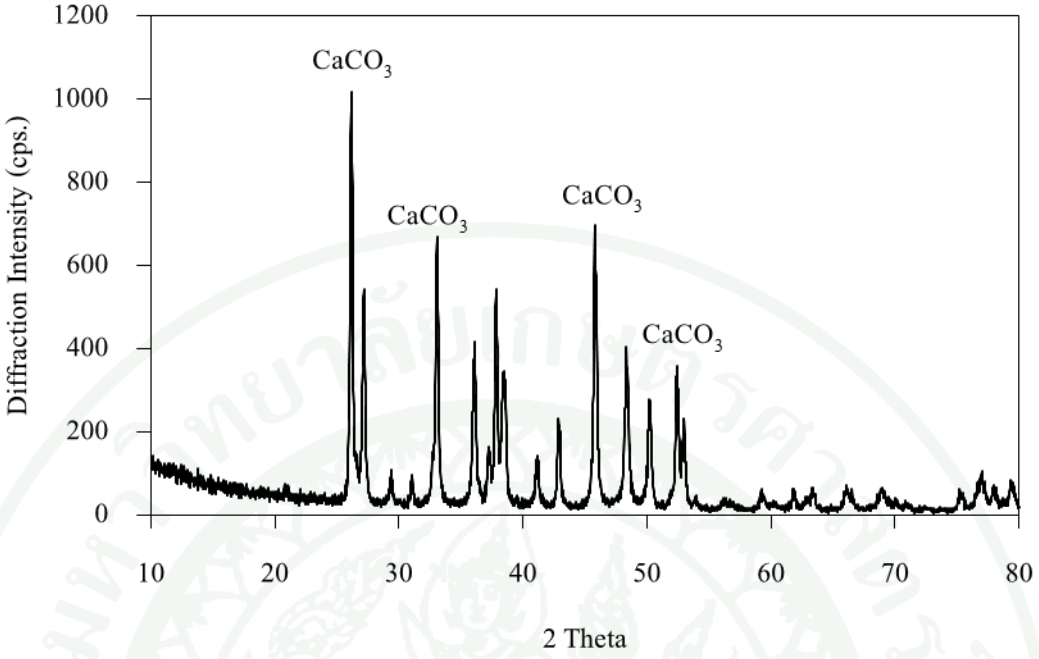


ภาพผนวกที่ ค1 การทดสอบ XRD ของกากดินขาว

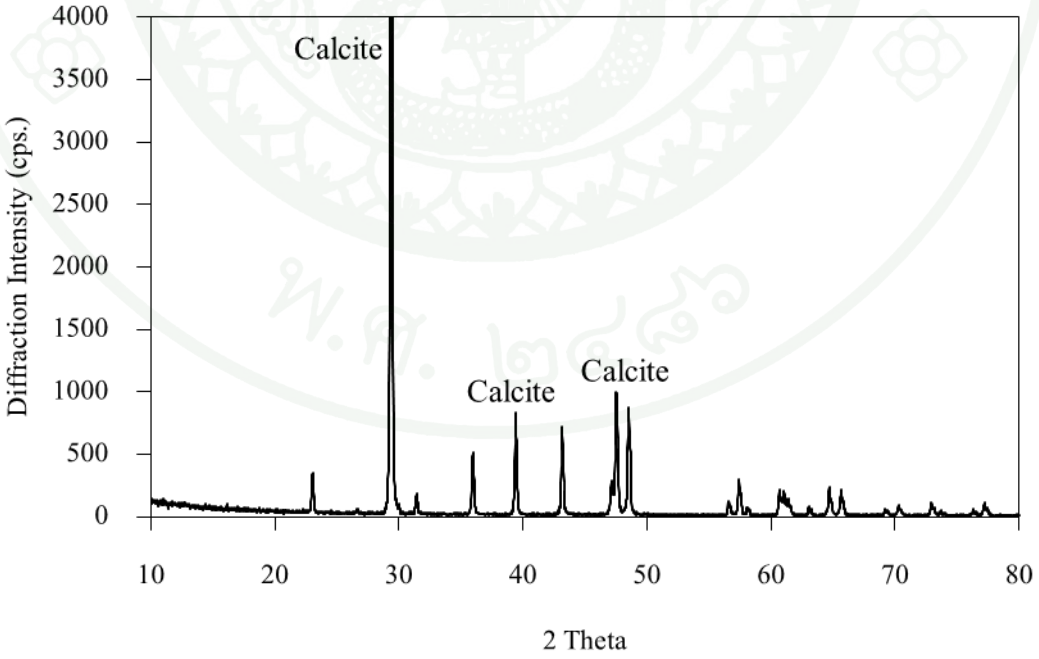


ภาพผนวกที่ ค2 การทดสอบ XRD ของเถ้าลอย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

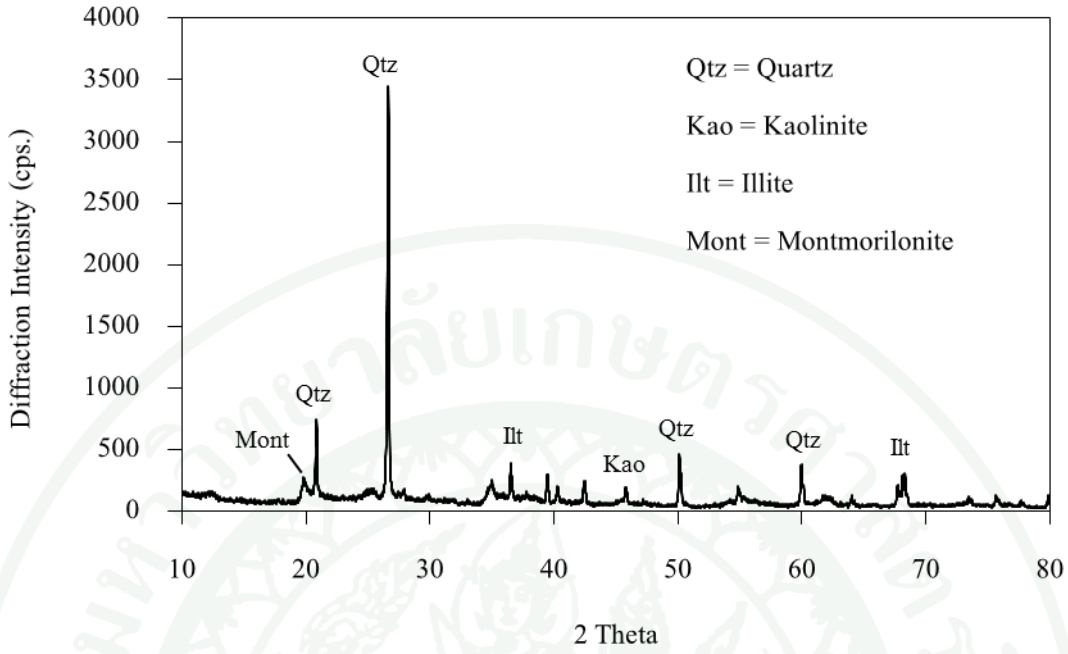


ภาพผนวกที่ ค3 การทดสอบ XRD ของเปลือกหอยแครง

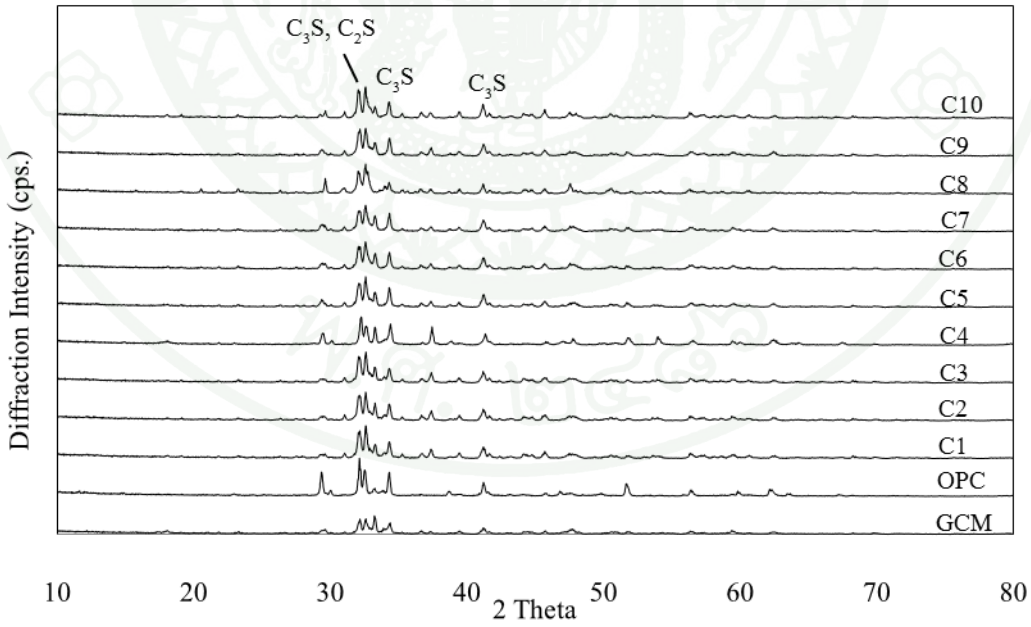


ภาพผนวกที่ ค4 การทดสอบ XRD ของผงหินปูน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

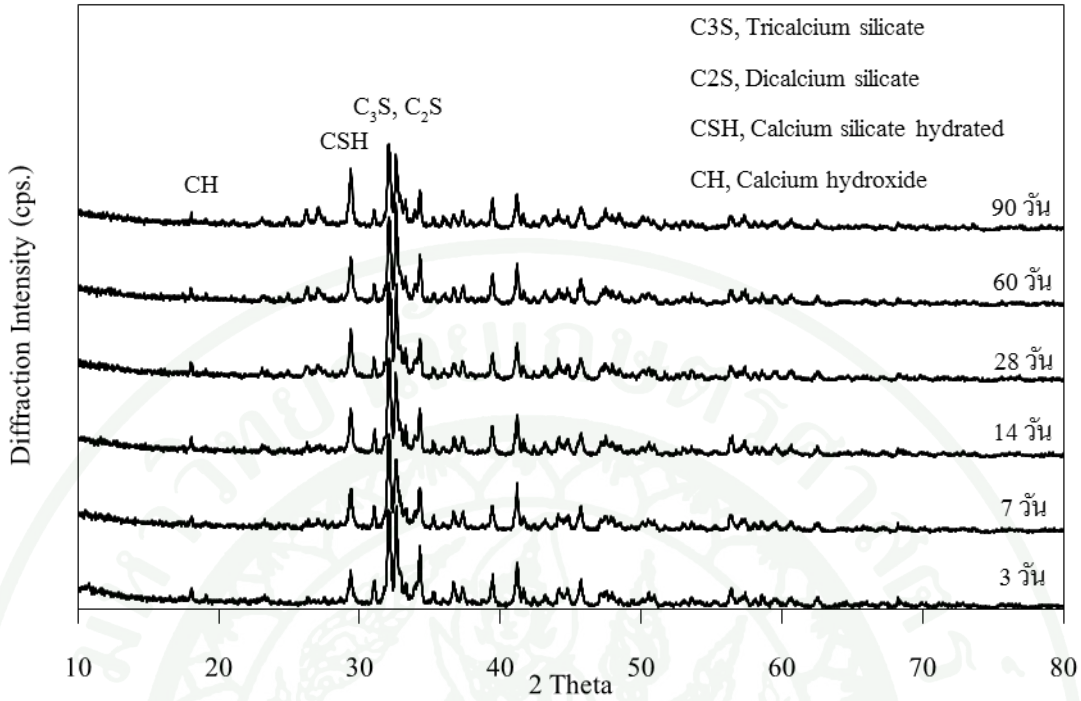


ภาพผนวกที่ ค5 การทดสอบ XRD ของดินเหนียวอ่อนก่อนปรับปรุงคุณภาพ

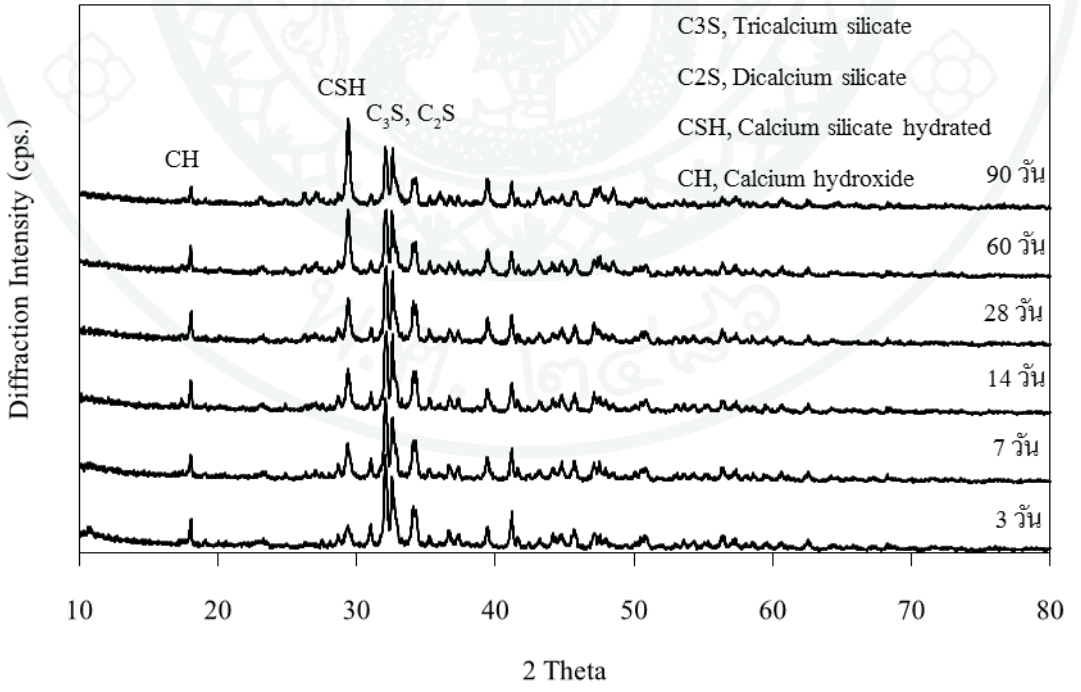


ภาพผนวกที่ ค6 การทดสอบ XRD ของปูนซีเมนต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

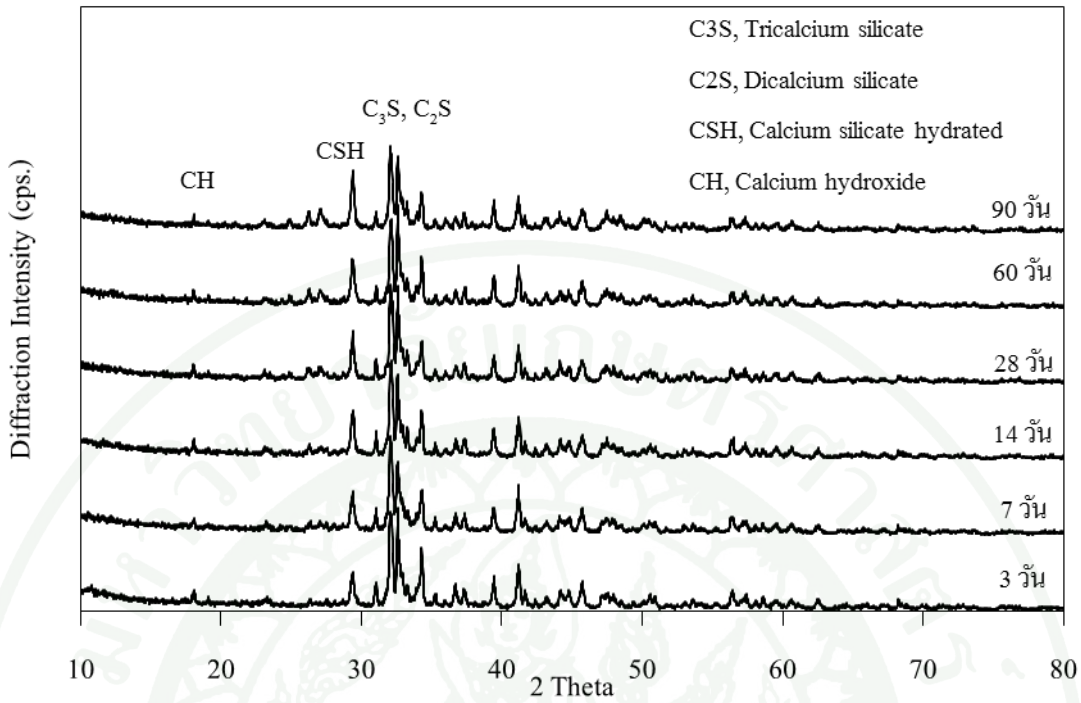


ภาพผนวกที่ ค7 การทดสอบ XRD ของซีเมนต์เพสต์ C1

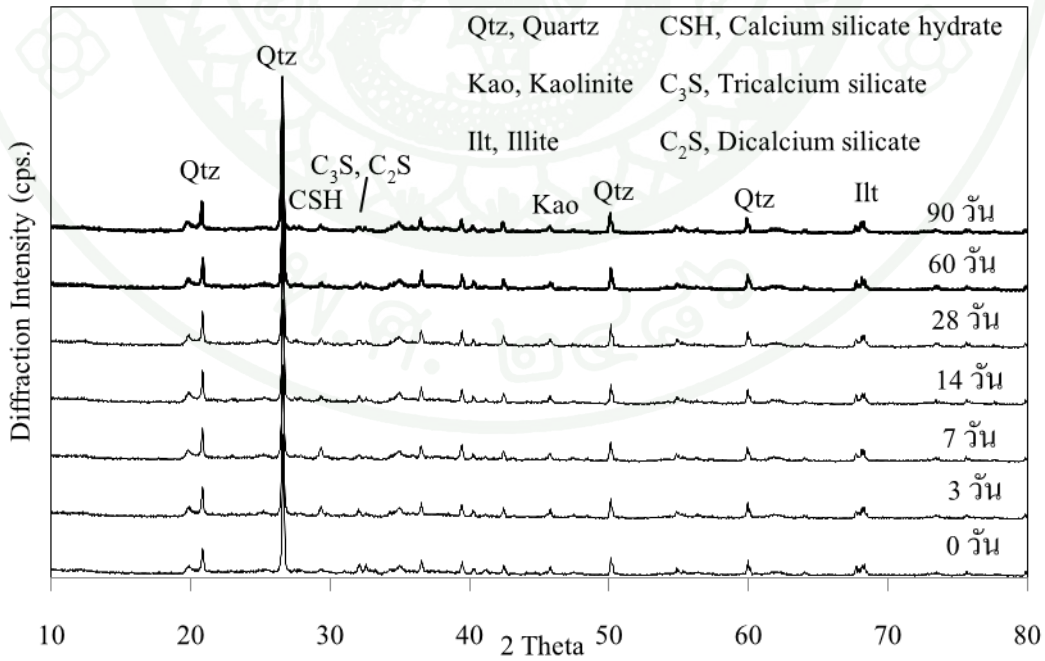


ภาพผนวกที่ ค8 การทดสอบ XRD ของซีเมนต์เพสต์ C2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

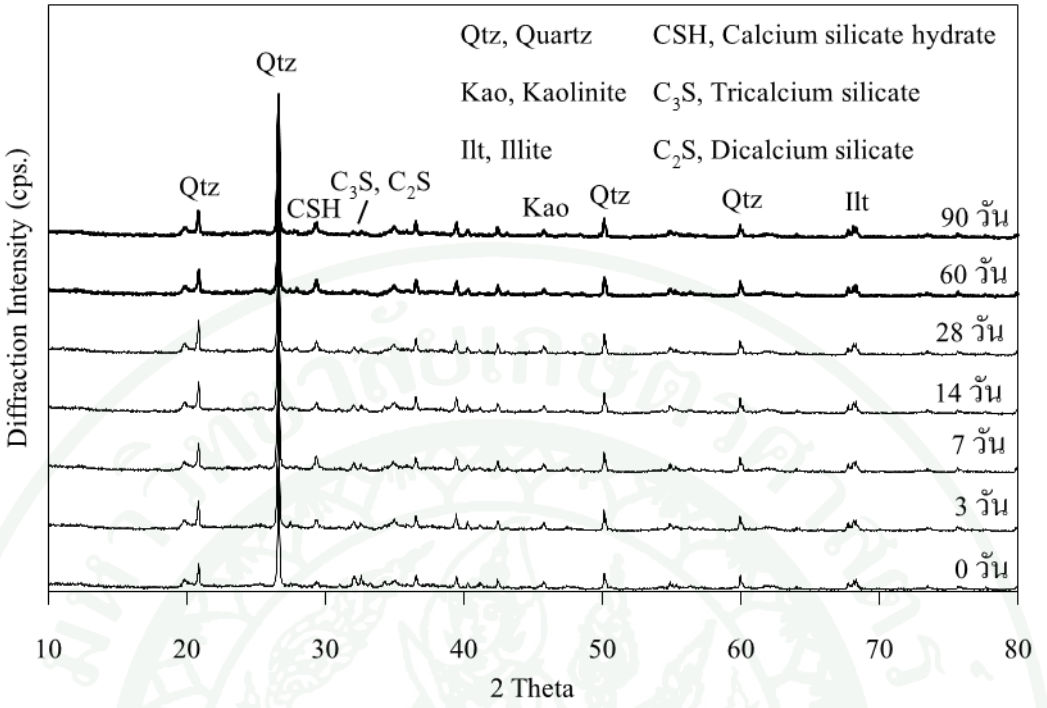


ภาพผนวกที่ ค9 การทดสอบ XRD ของซีเมนต์เพสต์ C3

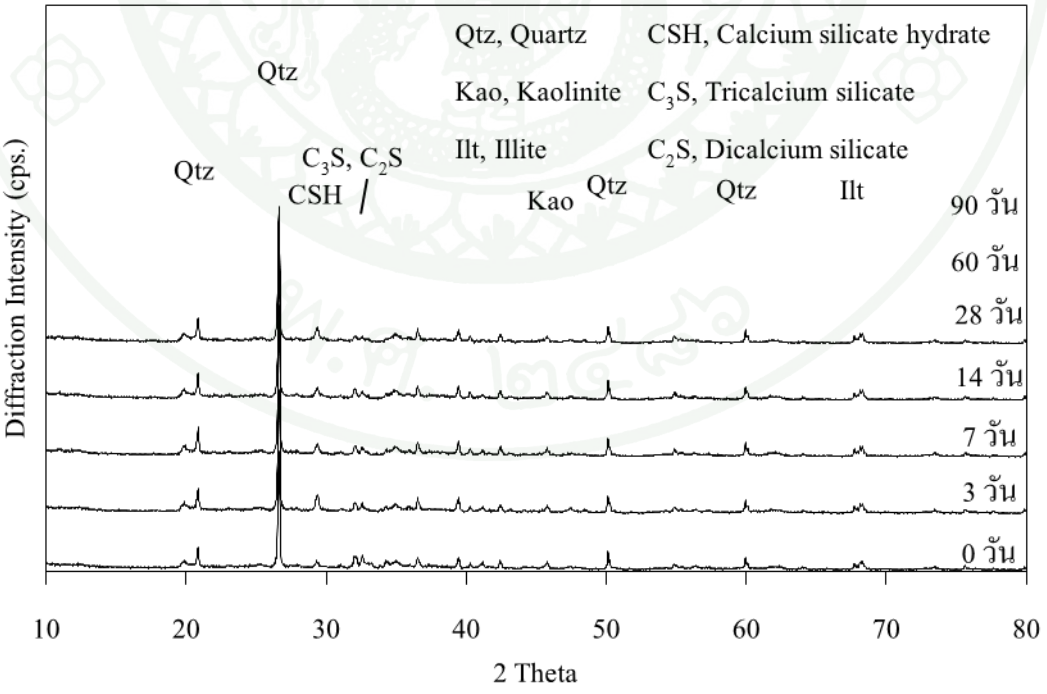


ภาพผนวกที่ ค10 การทดสอบ XRD ของดินซีเมนต์ WBC 150

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ค11 การทดสอบ XRD ของดินซีเมนต์ WBC 200



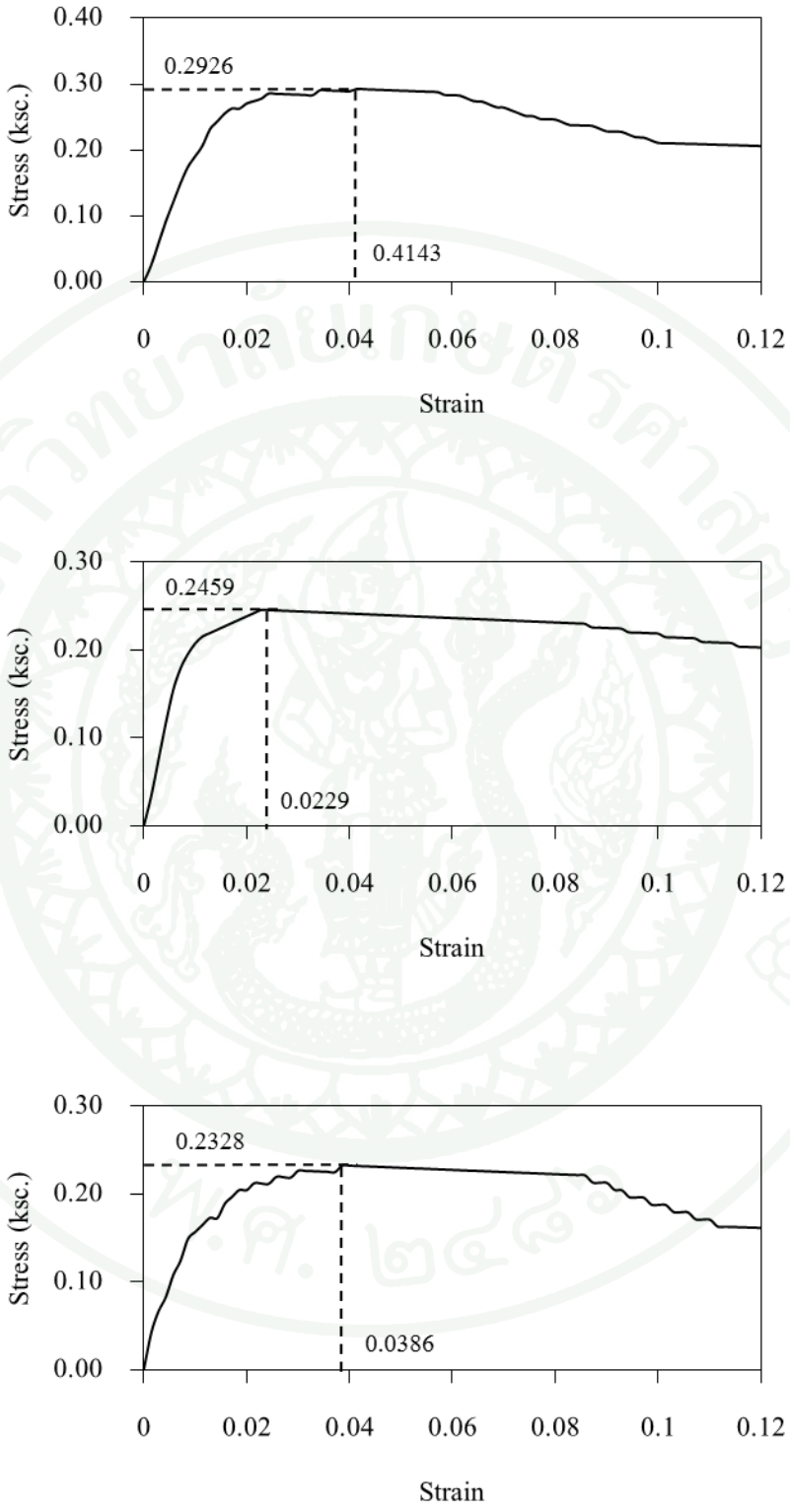
ภาพผนวกที่ ค12 การทดสอบ XRD ของดินซีเมนต์ WBC 250

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ง

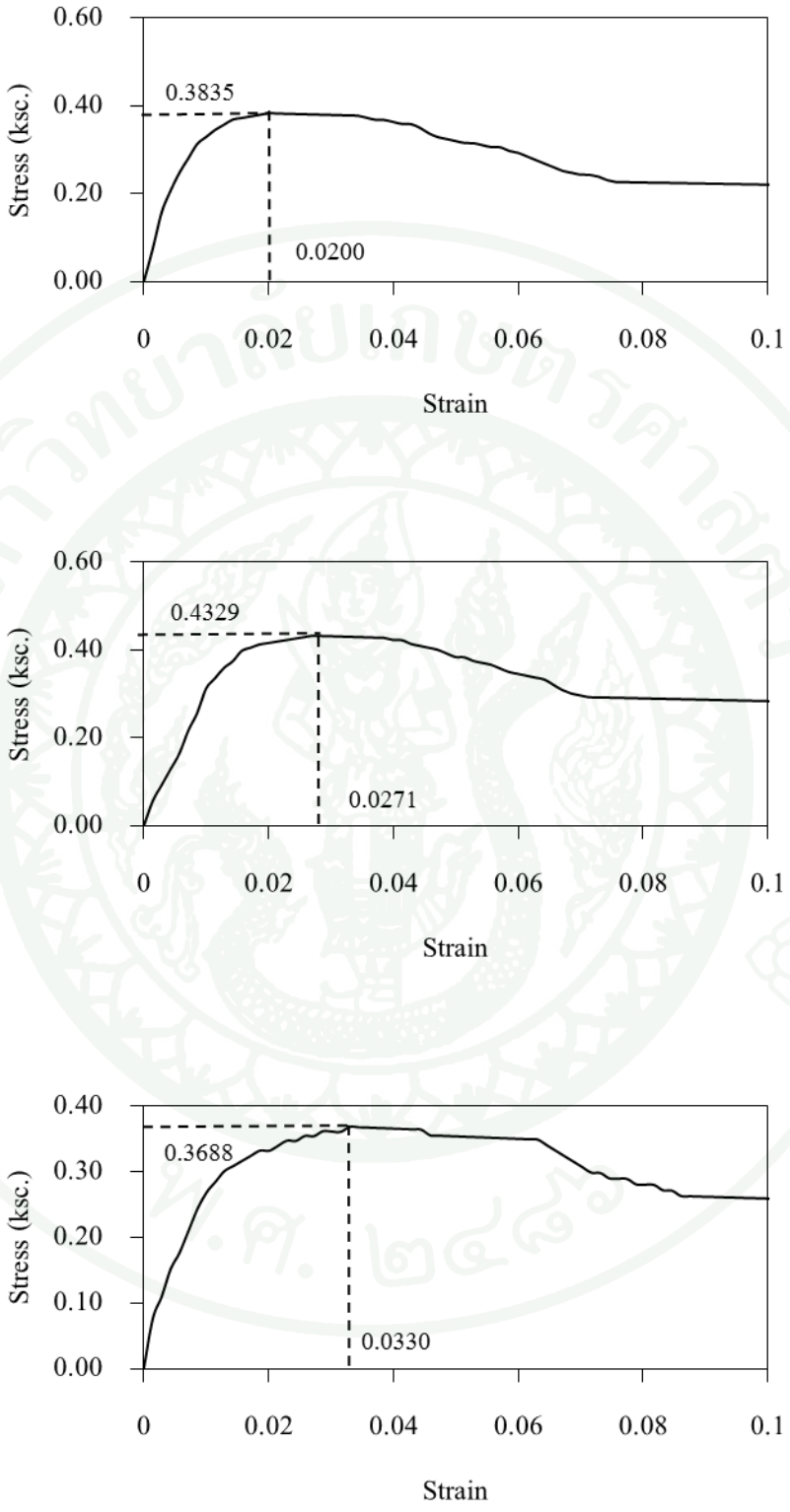
ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ดินซีเมนต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



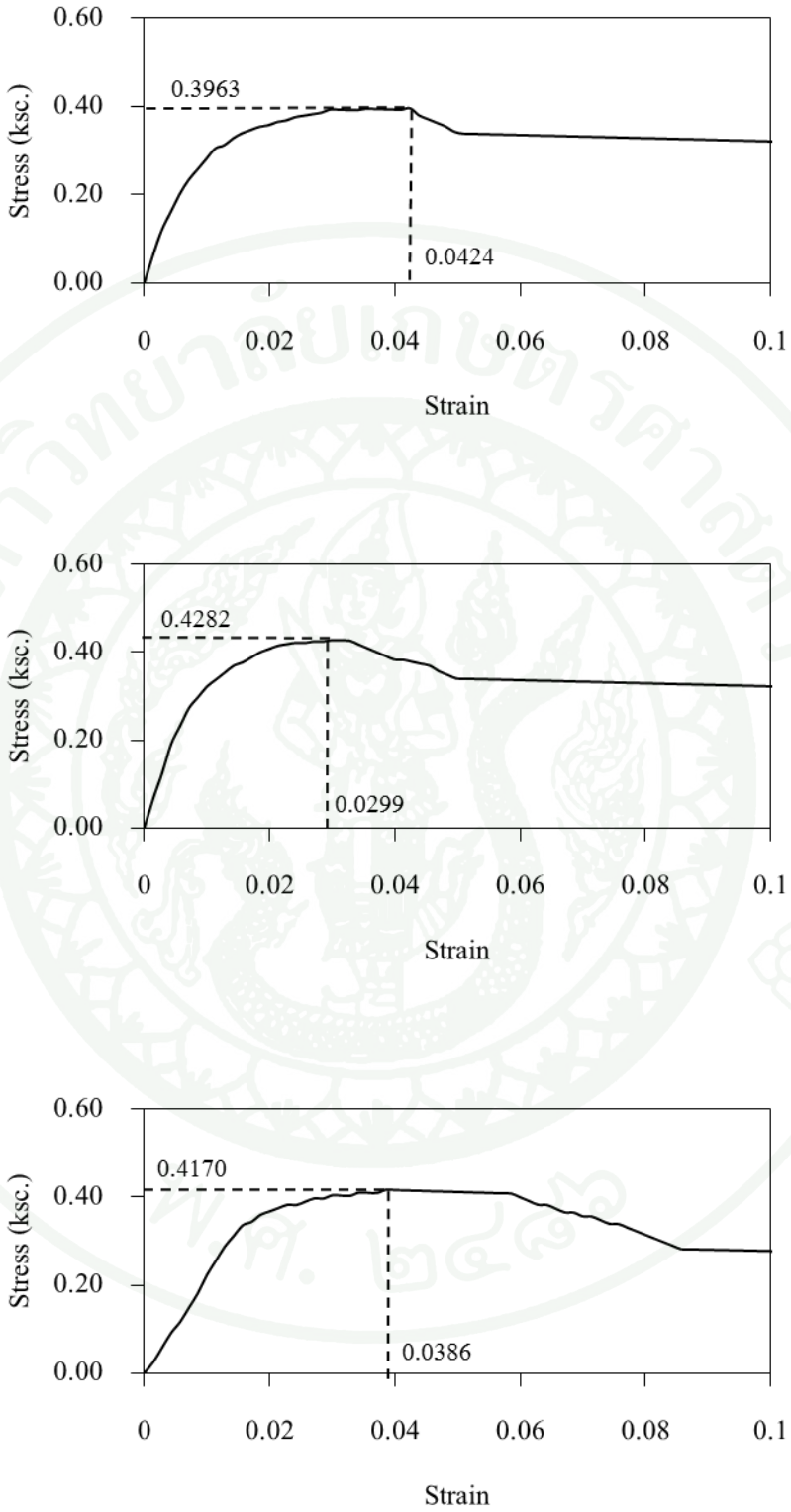
ภาพผนวกที่ ง1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 3 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



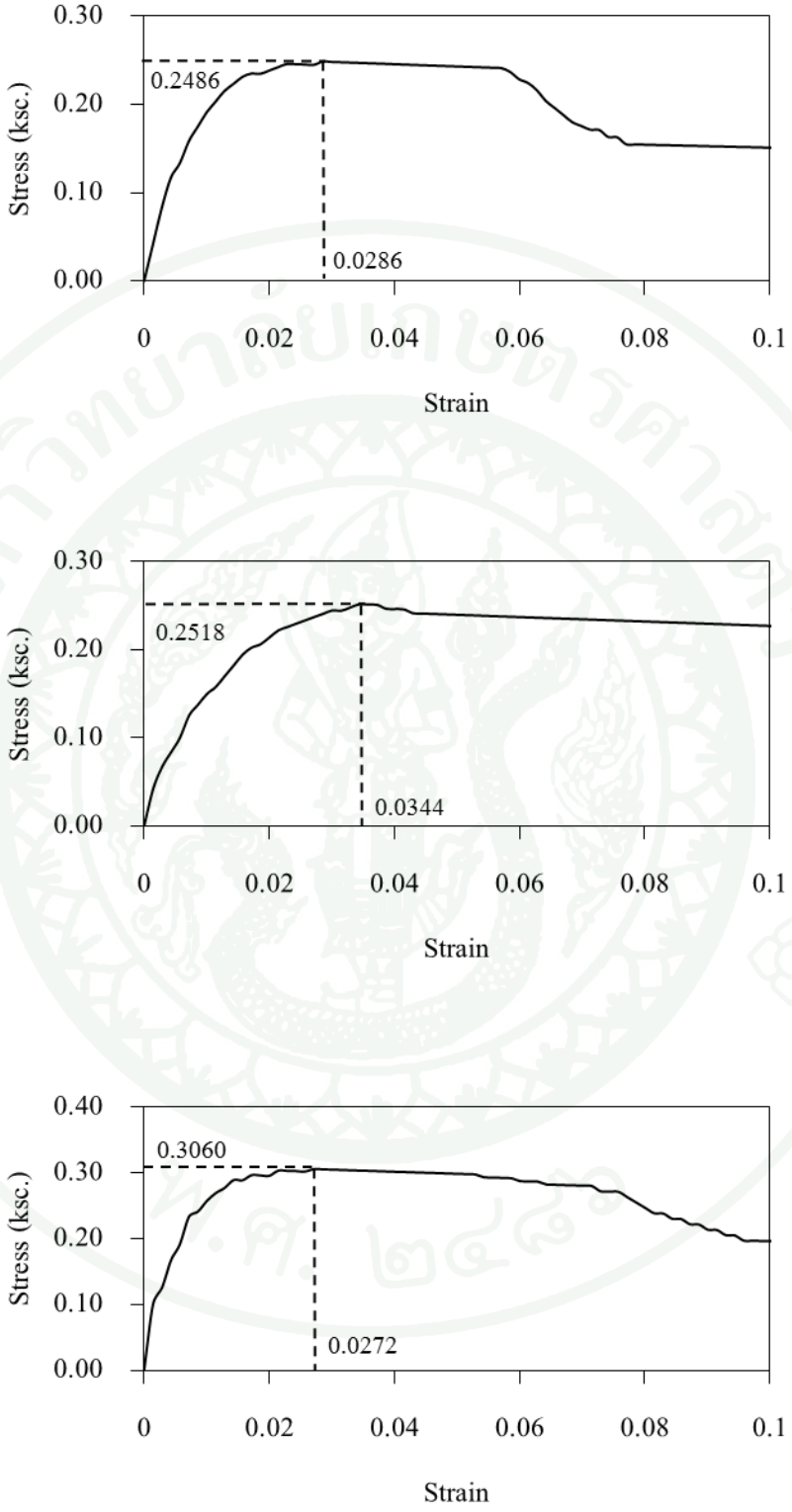
ภาพผนวกที่ ง2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 3 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



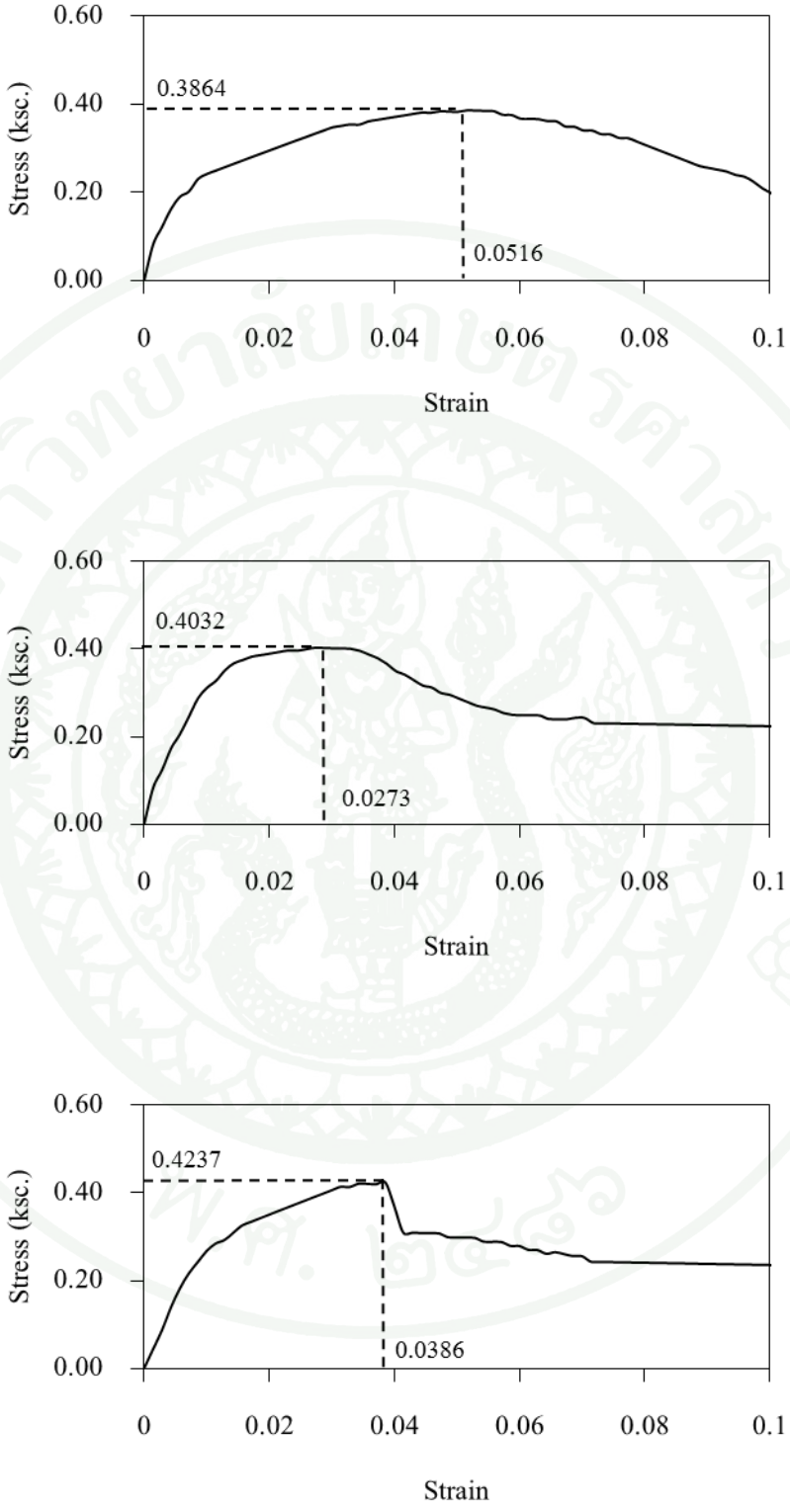
ภาพผนวกที่ ง3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 3 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



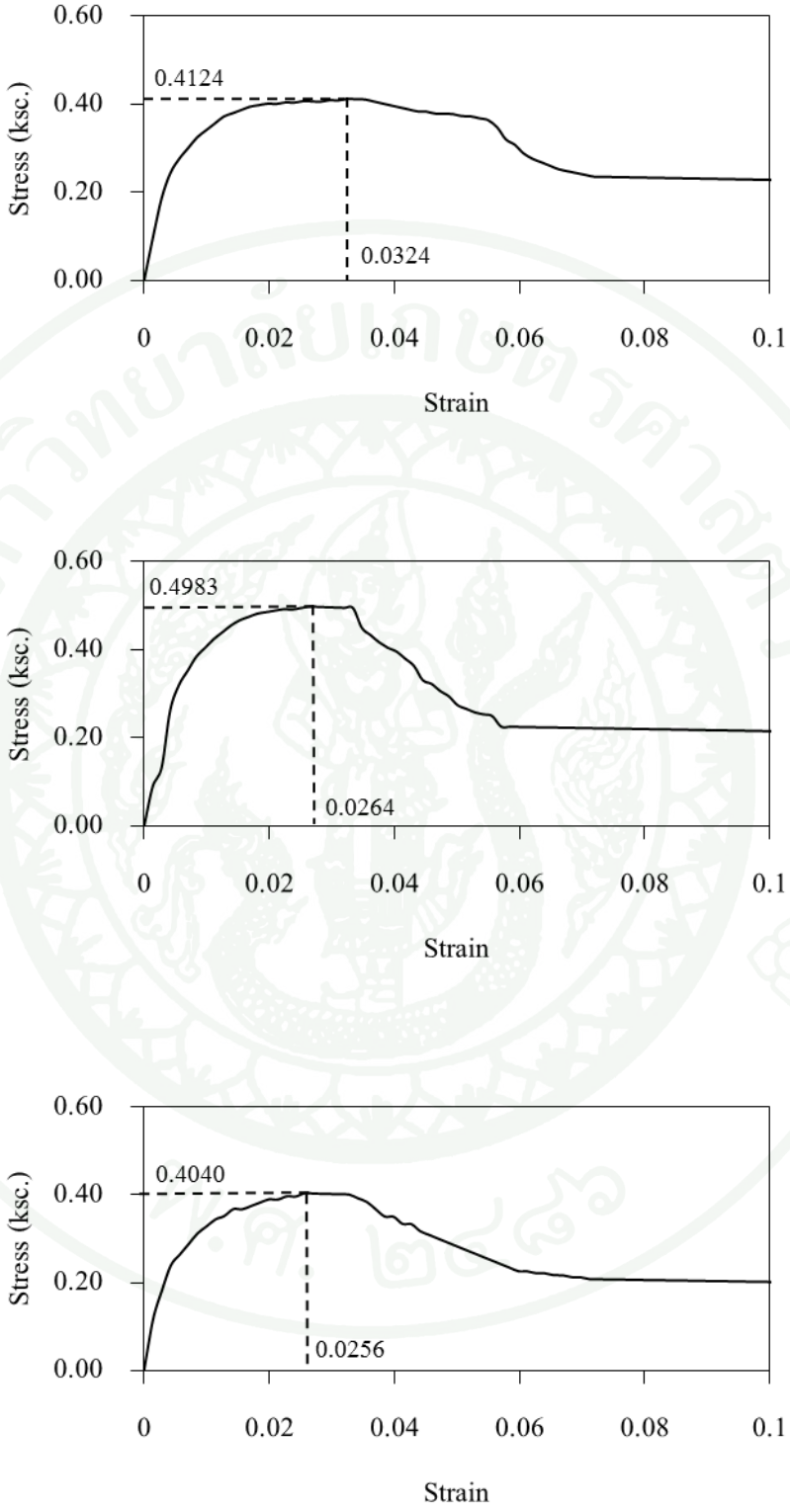
ภาพผนวกที่ ง4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 7 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



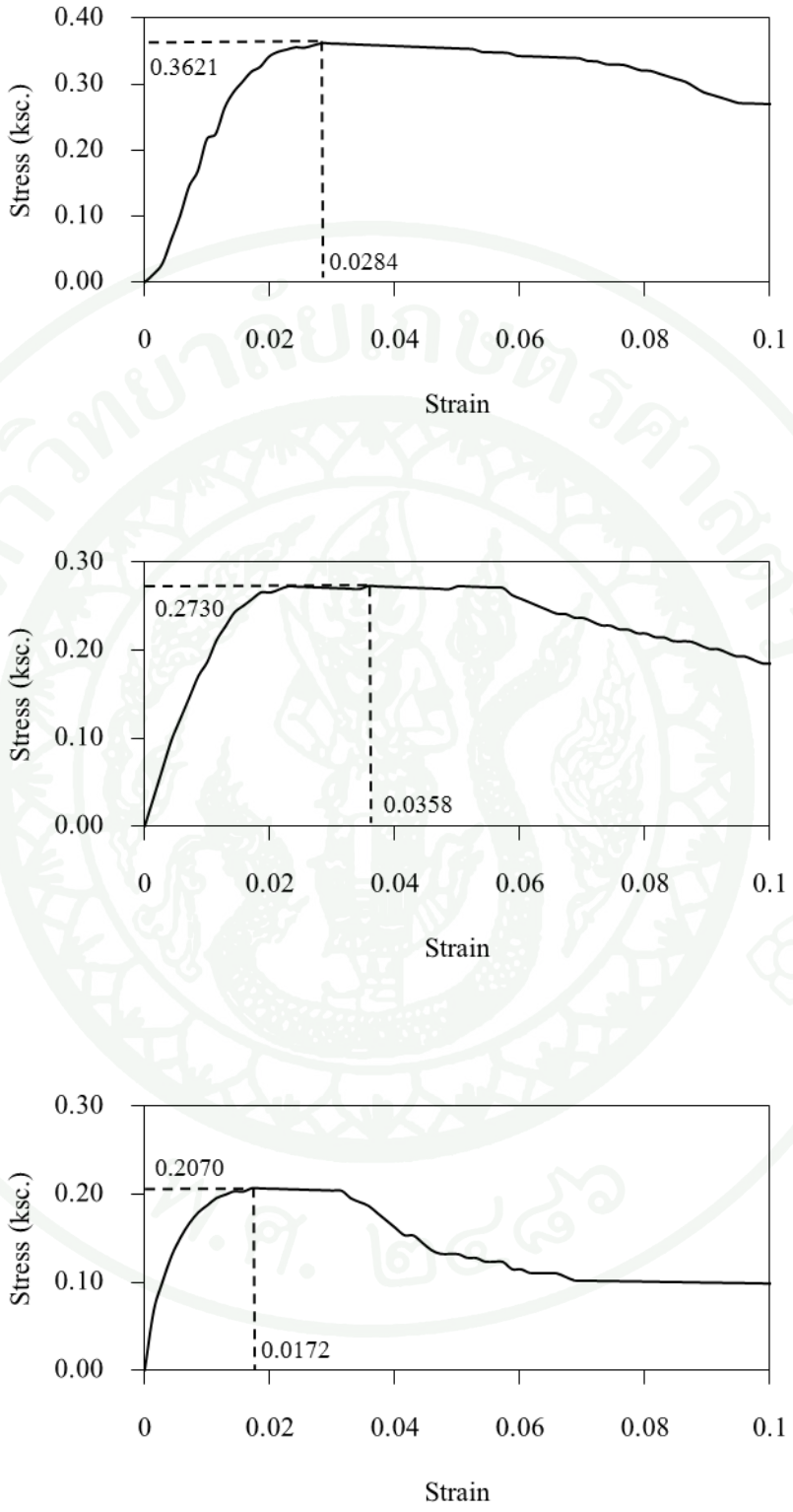
ภาพผนวกที่ ง5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 7 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



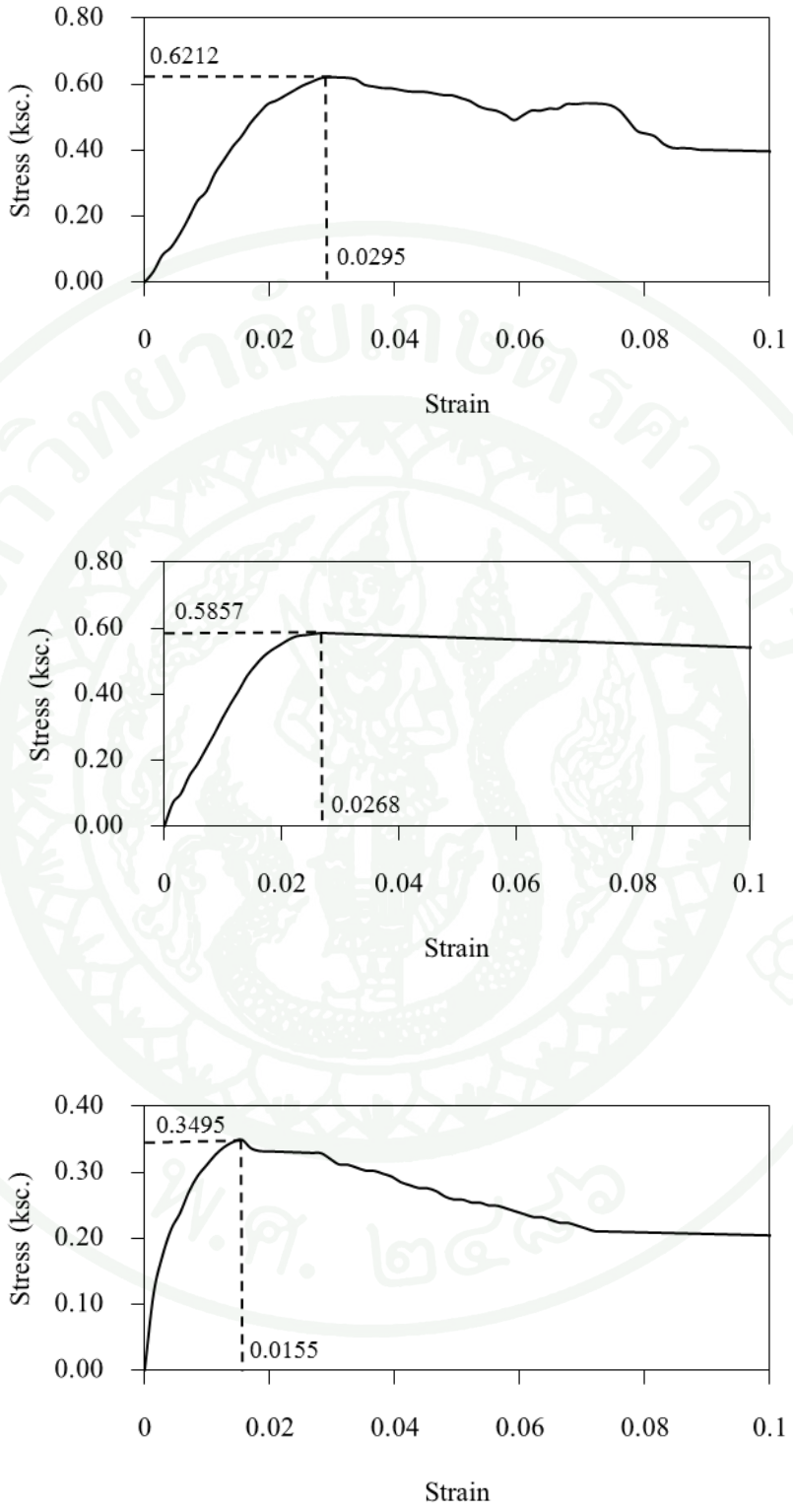
ภาพผนวกที่ ง6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 7 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



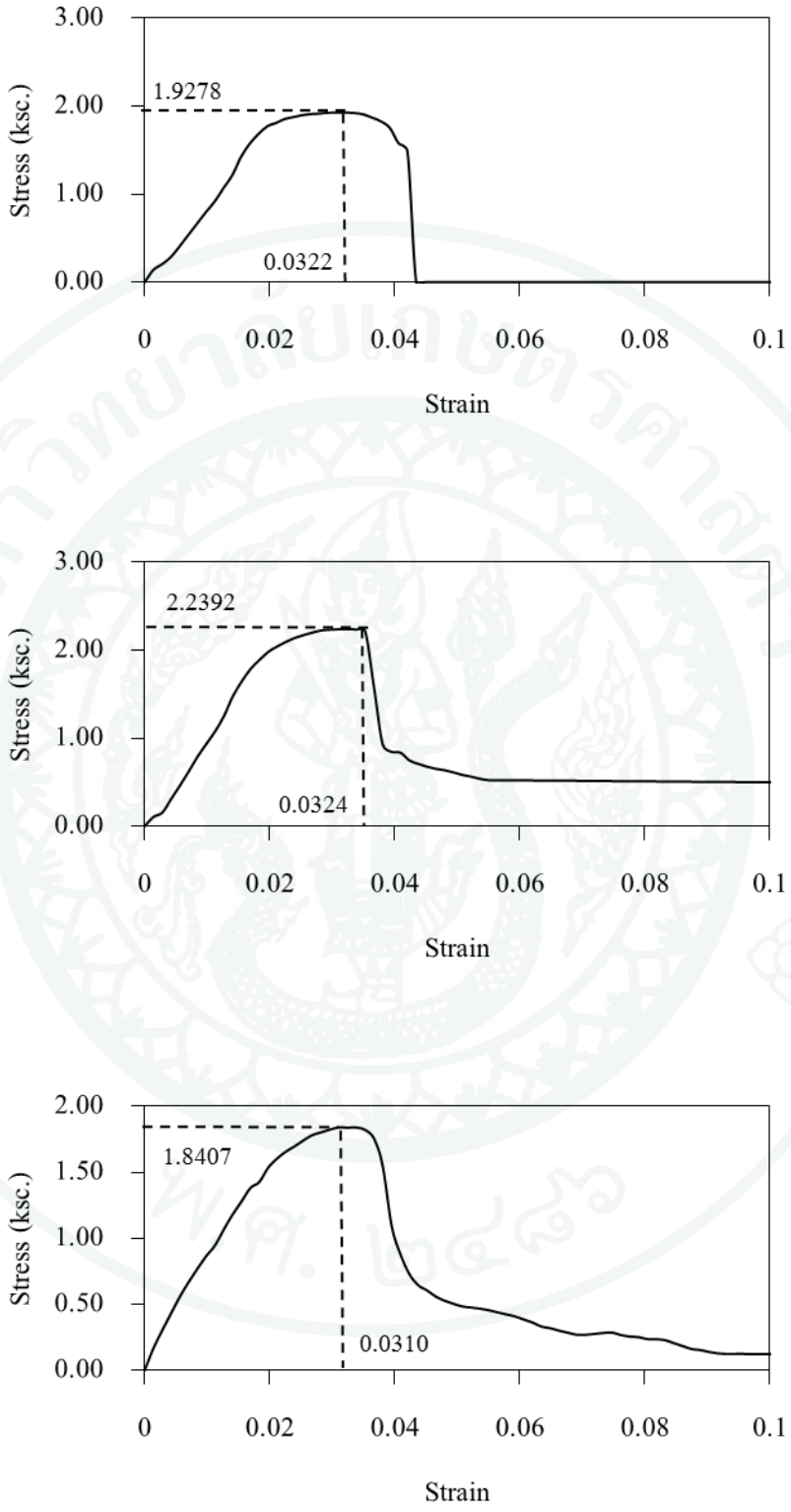
ภาพผนวกที่ ง7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 14 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



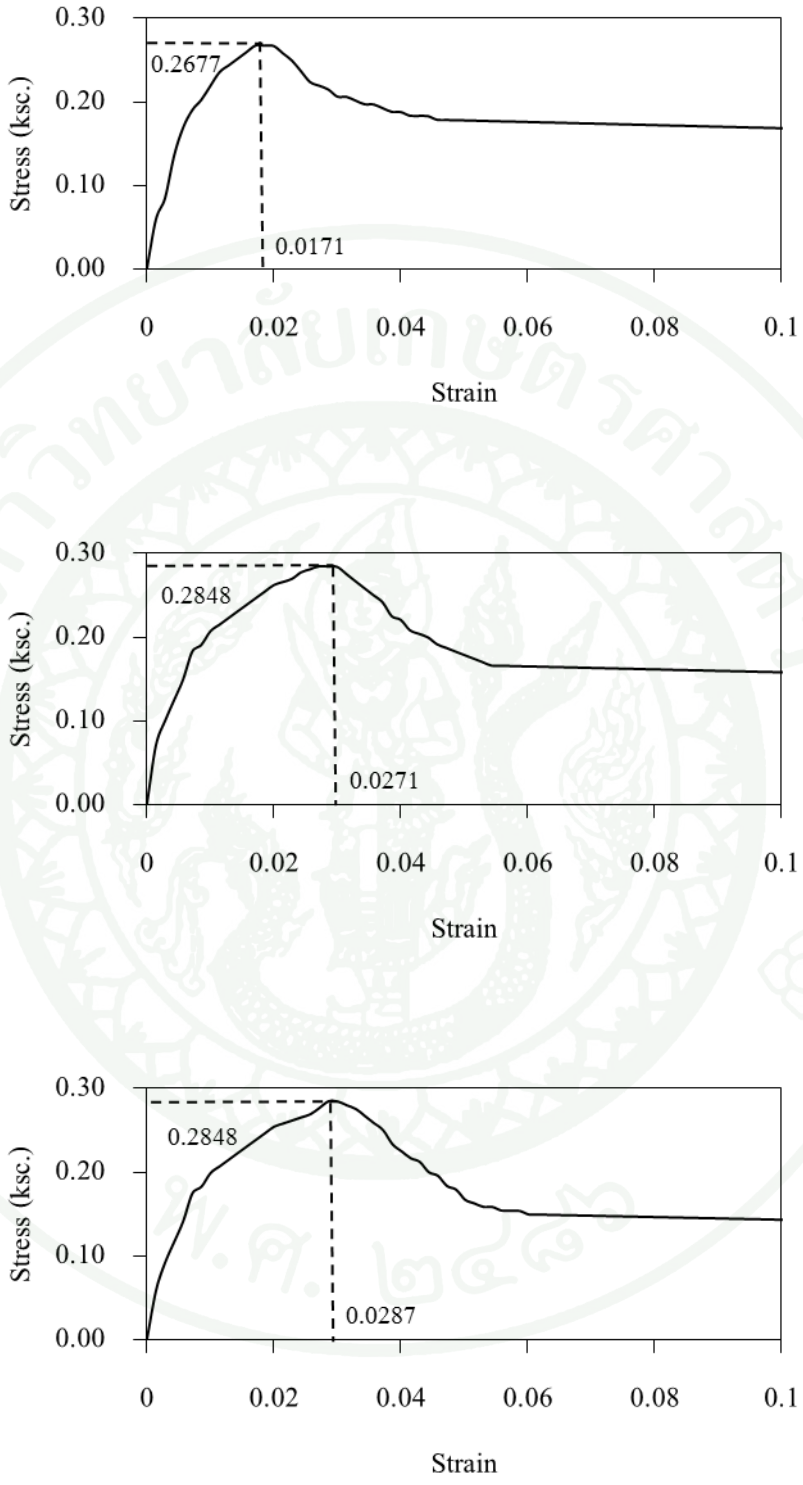
ภาพผนวกที่ ง8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 14 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



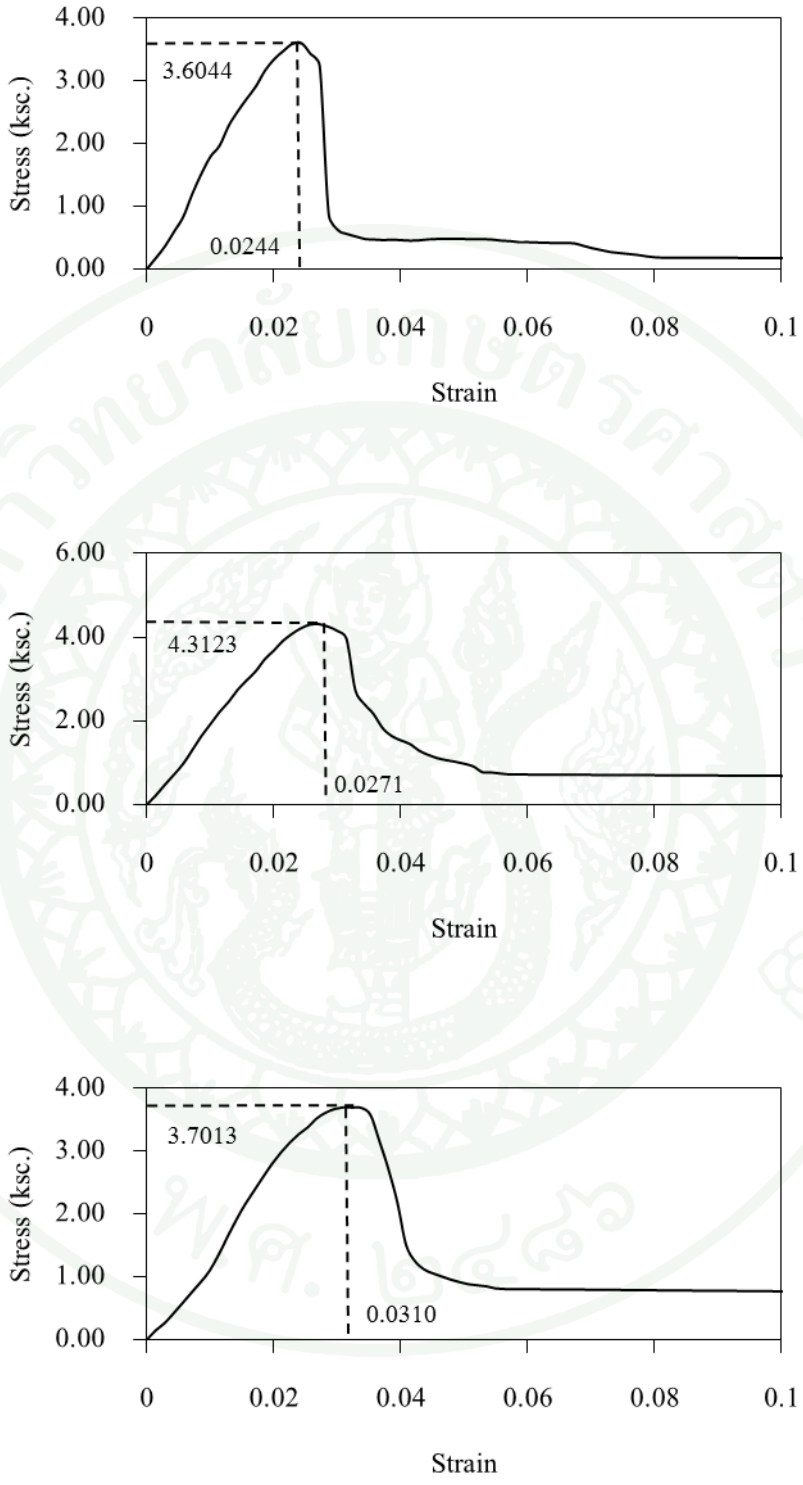
ภาพผนวกที่ ง9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 14 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



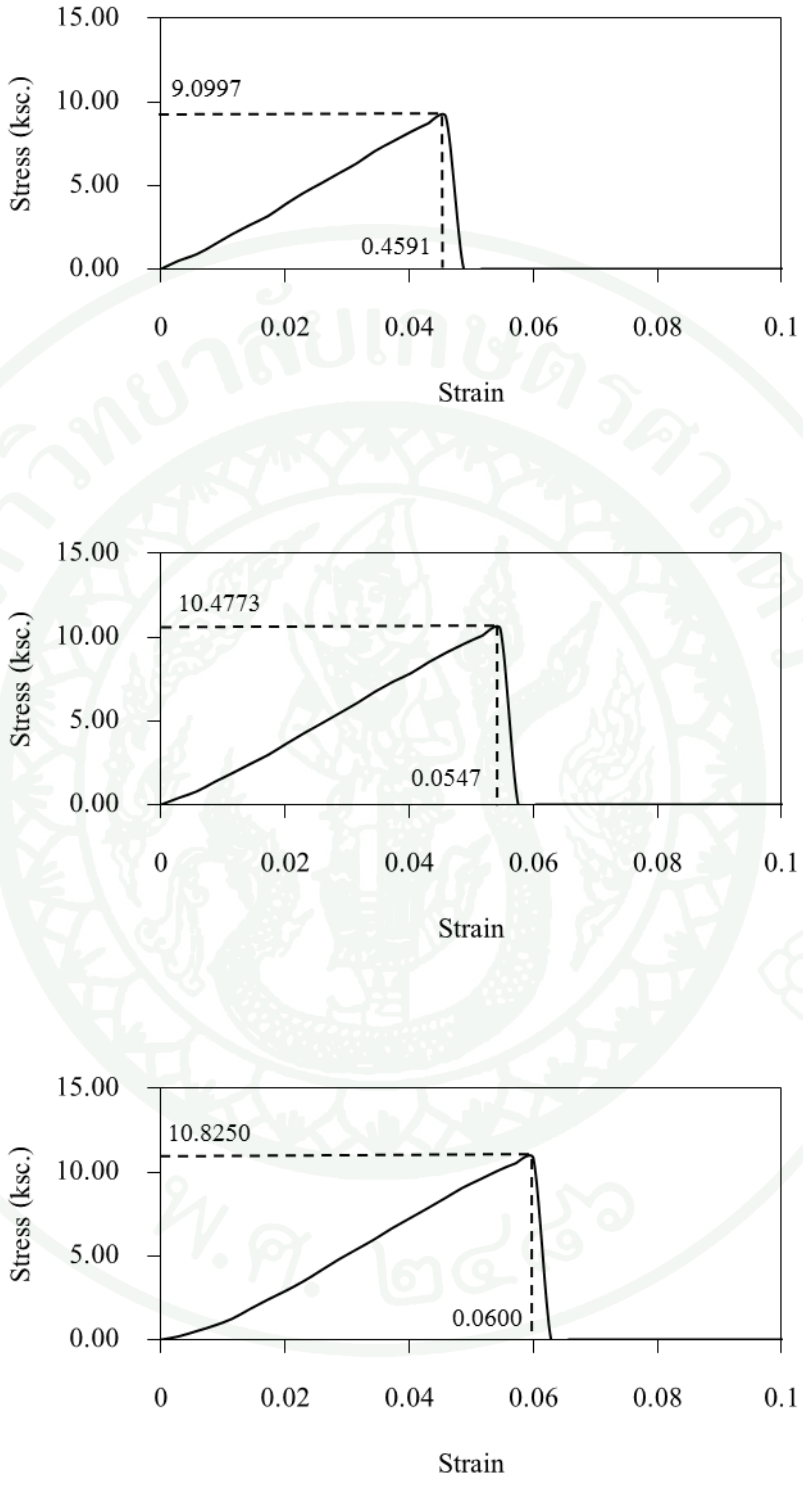
ภาพผนวกที่ ง10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 28 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



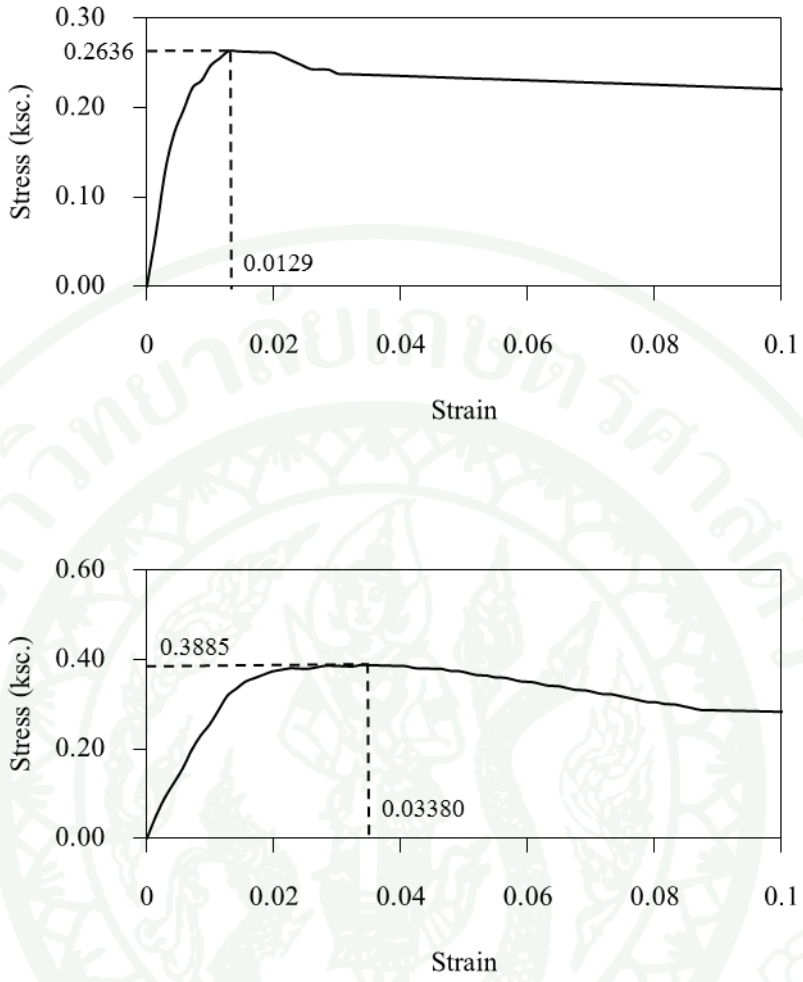
ภาพผนวกที่ ง11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 28 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



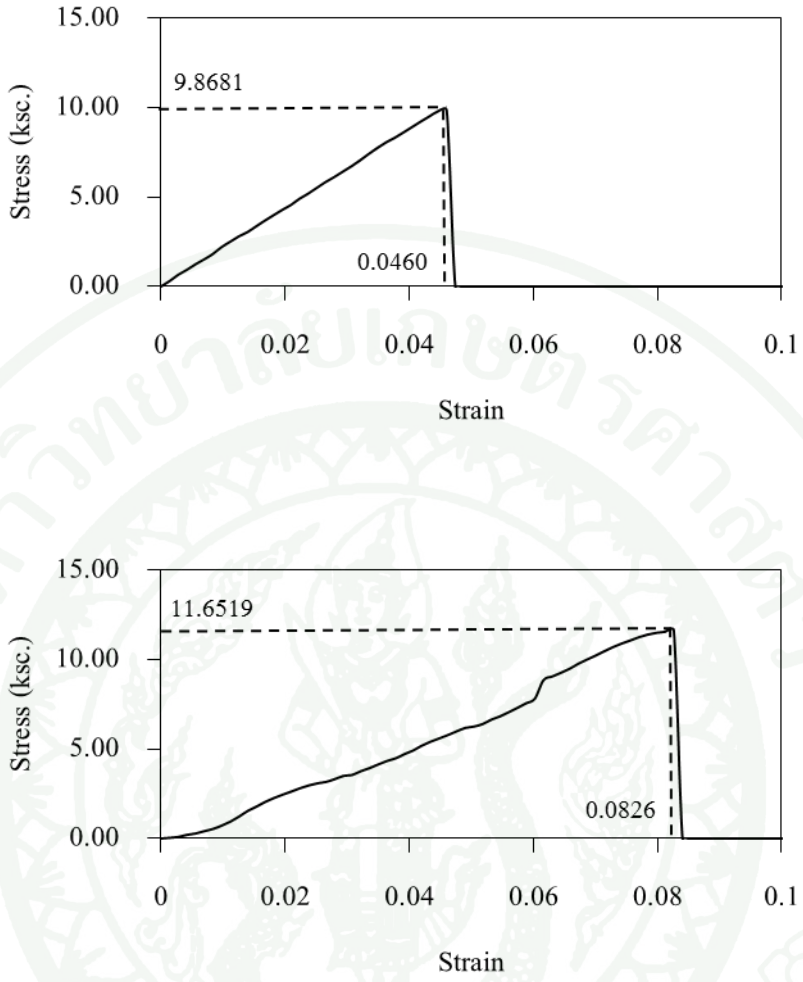
ภาพผนวกที่ ง12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 28 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



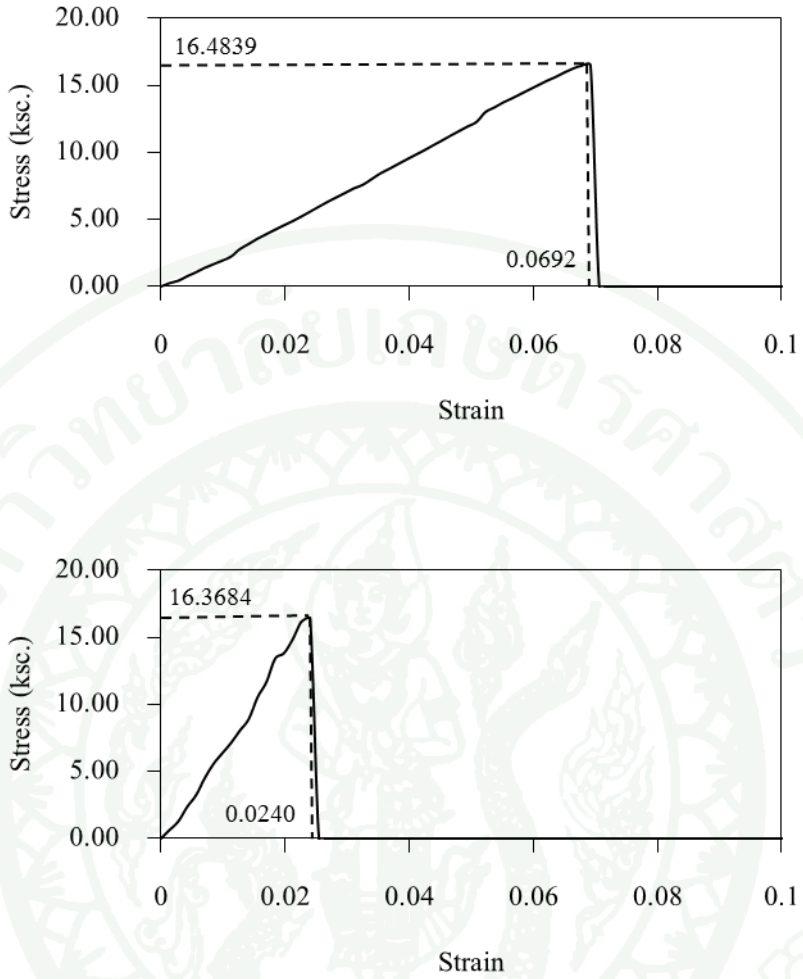
ภาพผนวกที่ ง13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 60 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



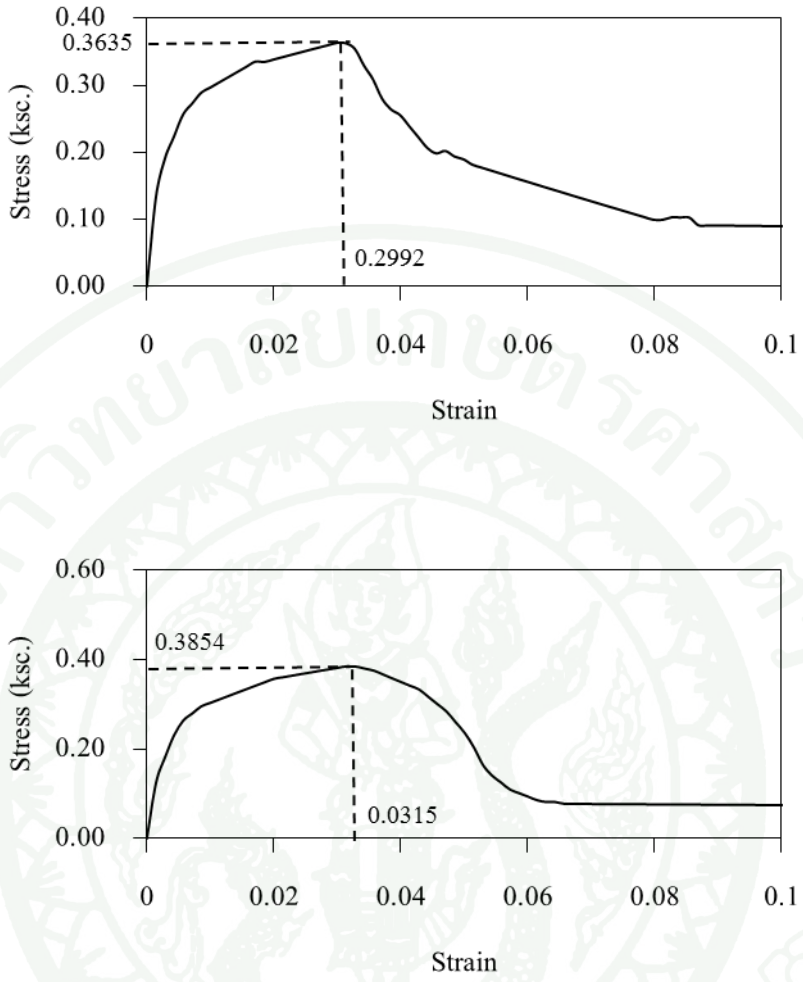
ภาพผนวกที่ ง14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 60 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



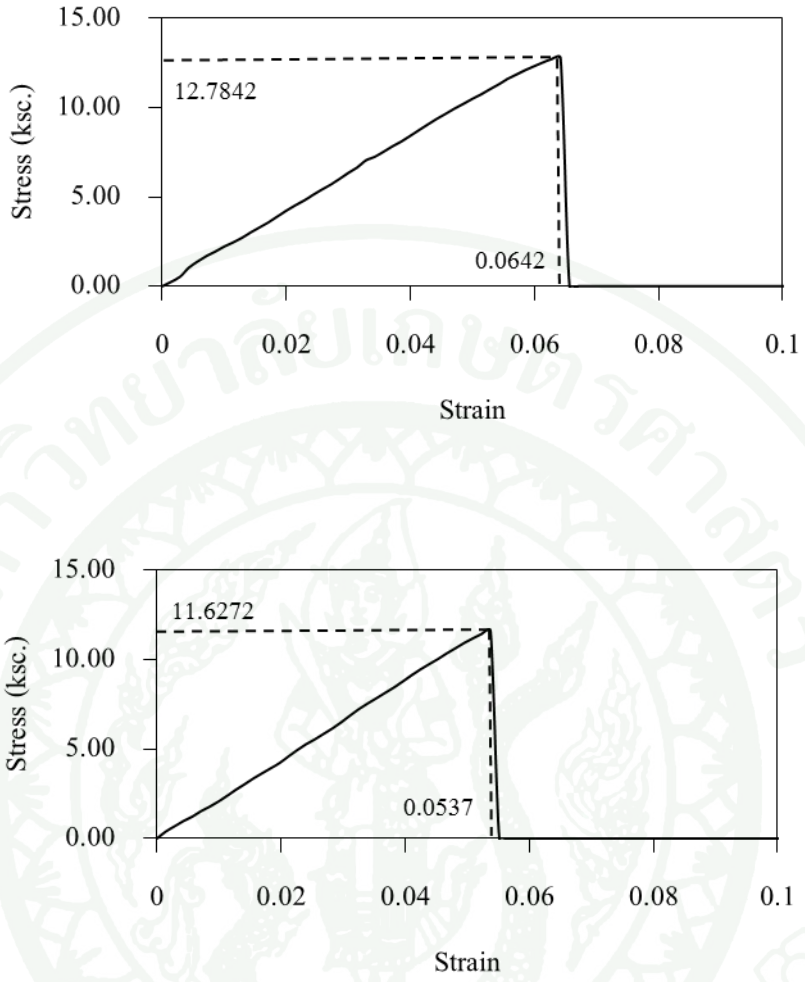
ภาพผนวกที่ ง15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 60 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



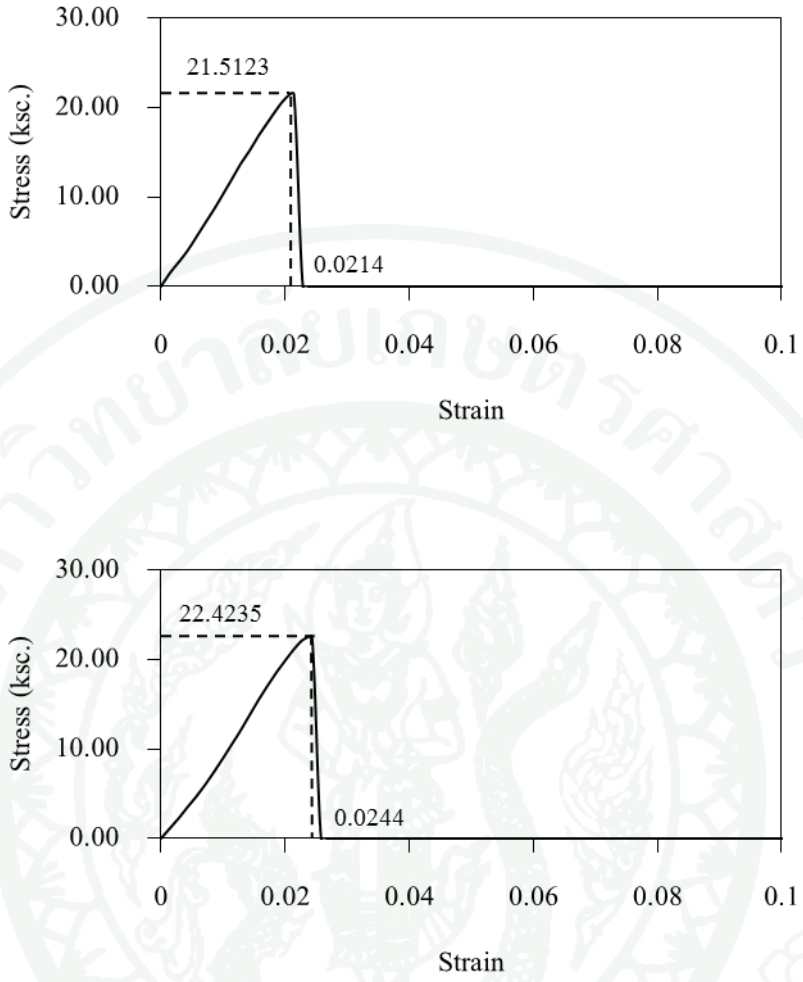
ภาพผนวกที่ ง16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 150 ที่อายุการบ่ม 90 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ง17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 200 ที่อายุการบ่ม 90 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ง18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินซีเมนต์ WBC 250 ที่อายุการบ่ม 90 วัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวพิชชาอร ศรีพานิช
เกิดวันที่	10 พฤศจิกายน 2531
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์