



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสร้างหน่วยสเกลเพื่อใช้ในการคาดการณ์ผลกระทบของโลหะหนัก
(โครเมียม แคดเมียม และสังกะสี) ที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์

โดย

รศ.ดร. พวงรัตน์ ขจิตวิยานุกุล

ดร. ปรีชา เต็มสุขสวัสดิ์

นางสาวจันทมาศ บุญสุนทิ

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาธิปไตย บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

มิถุนายน 2551

สัญญาเลขที่ RDG5050002

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสร้างหน่วยสเกลเพื่อใช้ในการคาดการณ์ผลกระทบของโลหะหนัก
(โครเมียม แคดเมียม และสังกะสี) ที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์

คณะผู้วิจัย

รศ.ดร. พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกุล

ดร. ปรีชา เต็มสุขสวัสดิ์

นางสาวจามาศ บุญสนิท

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาธิปไตย บางมด พุ่่งครุ กรุงเทพฯ 10140

ชุดโครงการสนับสนุนผู้ปฏิบัติการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.)

และบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

งานวิจัยศึกษาถึงผลกระทบของโลหะหนักสามชนิด ได้แก่ โครเมียม แคดเมียม และสังกะสีที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ โลหะหนักทั้งสามชนิดในรูปโครเมียมออกไซด์ แคดเมียมออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ได้ถูกผสมกันตามสัดส่วนที่กำหนด โดยความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้นอยู่ในช่วงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการทดลองผสม (mixing experiment) ในการหาสมการ เพื่อใช้ในการคาดการณ์ผลกระทบของโลหะหนักทั้งสามชนิดที่มีต่อคุณสมบัติด้านการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109-95 นอกจากนี้ได้แสดงผลกระทบของโลหะหนักต่อลักษณะสมบัติอื่นๆ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบของเฟสต่างๆ ของปูนเม็ดซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และ SEM จากผลการทดลองพบว่า โครเมียม แคดเมียม และ สังกะสีส่งผลให้ค่าการรับกำลังอัดลดลง ผลการทดลองประมวลผลด้วยโปรแกรมมินิแทบ พบว่า $R^2 = 76.63\%$ และสมการที่มีความเป็นไปได้ในการที่จะนำมาสร้างเป็นหน่วยสเกลได้แก่ $Y = 10.905Cr + 15.497Cd + 12.634Zn + 4.064CrZn + 46.403Cr^2CdZn - 44.367CrCd^2Zn + 20.321CrCdZn^2 - 3.591 CrCd(Cr-Cd)^2$

คำสำคัญ : การทดลองผสม/ พื้นผิวผลตอบ/ โลหะหนัก/ ค่าการรับกำลังอัด/ ซีเมนต์

Abstract

In this study, effect of heavy metals (chromium, cadmium, and zinc) on cement properties was investigated. All studied heavy metals were in form of oxide compound as chromium oxide, cadmium oxide, and zinc oxide with initial concentration in the range of 0 - 2%wt. Effect of heavy metals on compressive strength was determined following ASTM C109-95 standard method. For compressive strength prediction, the mixing experiment design and response surface methodology were used to develop the compressive strength scale for cement mortar. In addition, the phase change of cement composition was also monitored by XRD and SEM and reported in this paper. Results show that chromium cadmium and zinc decreased compressive strength capacity of cement mortar. Overall effect of heavy metals on compressive strength were analyzed by MINITAB with $R^2 = 76.63\%$ and the representative equation for compressive strength prediction was $Y = 10.905Cr + 15.497Cd + 12.634Zn + 4.064CrZn + 46.403Cr^2CdZn - 44.367CrCd^2Zn + 20.321CrCdZn^2 - 3.591 CrCd(Cr-Cd)^2$

Keywords : Mixing experiment / Response surface methodology / Heavy metal / Compressive Strength/ Cement

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี โดยความร่วมมือและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่านและหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร.พวงรัตน์ ขจิตวิยานุกุล อาจารย์ที่ปรึกษาผู้ที่คอยดูแลให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณ ดร.ปรีชา เต็มสุขสวัสดิ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ร่วมที่ได้ให้คำปรึกษาในการวิเคราะห์ข้อมูลทางคณิตศาสตร์ ขอขอบคุณ อ.ศักดิ์ชัย สุริยจันทร์ทอง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ ดร.คุณมาศ พันธุเศษะ วิศวกรโยธา 6ว สำนักบำรุงและอำนวยความสะดวกงานทาง กรมทางหลวงชนบทผู้ให้คำปรึกษาในการแก้ไขเพิ่มเติมให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และ บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด(มหาชน) ในการสนับสนุนทุนวิจัยและให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยต่างๆ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ประจำโรงงาน 1 และ 2 บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน, ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิตที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในงานวิจัยนี้ที่ไม่ได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้ด้วย สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยชิ้นนี้จะช่วยสร้างความรู้ และความเข้าใจในงานทางด้านนี้ต่อไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ	iv
รายการตาราง	viii
รายการรูปประกอบ	ix
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	xiii

บทที่

1. บทนำ

1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	2

2. ทฤษฎี/งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การนำของเสียอุตสาหกรรมเผาไหม้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์	4
2.1.1 วัตถุดิบทดแทน (Alternative raw material)	5
2.1.2 เชื้อเพลิงทดแทน (Alternative fuels)	5
2.2 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์	6
2.2.1 วัตถุดิบ	6
2.2.2 กรรมวิธีในการผลิต	7
2.2.3 การเผาปูนเม็ด	9
2.3 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์	11
2.3.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมี	11
2.3.2 การก่อตัวและการแข็งตัว	14
2.3.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน	15
2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	17

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.4	กำลังอัดของคอนกรีต	18
2.4.1	ธรรมชาติของกำลังอัดของคอนกรีต	18
2.4.2	ปัจจัยที่มีผลต่อกำลัง	19
2.4.3	สาเหตุที่กำลังอัดไม่เป็นไปตามข้อกำหนด	22
2.5	คุณสมบัติและความเป็นพิษของโลหะหนัก	22
2.5.1	โครเมียม	23
2.5.2	แคดเมียม	24
2.5.3	สังกะสี	26
2.5.4	การปนเปื้อนของโลหะหนักในซีเมนต์	27
2.6	ความรู้พื้นฐานทางสถิติ	27
2.6.1	หลักการพื้นฐาน	27
2.6.2	แนวทางในการออกแบบการทดลอง	28
2.6.3	วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM)	29
2.6.4	การทดลองผสม(Mixture Design)	30
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
3.	วิธีการทดลอง/ระเบียบวิธีวิจัย	36
3.1	การออกแบบการทดลอง	37
3.2	การทดลองเพื่อหาการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ของโลหะหนักหลายชนิด	39
3.2.1	การเตรียมปูนเม็ด	39
3.2.2	การทดสอบลักษณะสมบัติของปูนเม็ดและซีเมนต์	41
3.2.3	การทดสอบหาค่ากำลังอัด (compressive strength) ของซีเมนต์	41
3.3	การสร้างหน่วยสเกลการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์	43
3.3.1	การนำหน่วยสเกลไปใช้คาดการณ์การรับกำลังอัด	43

4. ผลการทดลอง/วิจัย	44
4.1 การเปรียบเทียบลักษณะปุนเม็ดที่ได้จากการสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการและปุน เม็ด ที่ได้จากกระบวนการผลิต	44
4.2 ลักษณะของปุนเม็ดที่มีโลหะหนักปนเปื้อน	48
4.2.1 ปุนเม็ดที่มีโลหะหนักเพียงชนิดเดียวเป็นสารปนเปื้อน	48
4.2.1.1 ปุนเม็ดที่มีโครเมียมเป็นสารปนเปื้อน	49
4.2.1.2 ปุนเม็ดที่มีแคดเมียมเป็นสารปนเปื้อน	52
4.2.1.3 ปุนเม็ดที่มีสังกะสีเป็นสารปนเปื้อน	55
4.2.1.4 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของปุนเม็ดเมื่อมีโลหะหนักปนเปื้อน เพียงชนิดเดียว	58
4.2.2 ปุนเม็ดที่มีโลหะหนักปนเปื้อนสองชนิด	61
4.2.2.1 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของปุนเม็ดเมื่อไม่มีโลหะหนัก มีโลหะ หนักชนิดเดียว และมีโลหะหนักสองชนิดปนเปื้อน	61
4.2.2.2 ลักษณะสมบัติของปุนเม็ดเมื่อมีโลหะหนักปนเปื้อนเป็น โครเมียม และแคดเมียม	66
4.2.2.3 ลักษณะสมบัติของปุนเม็ดเมื่อมีโลหะหนักปนเปื้อนเป็น โครเมียม และสังกะสี	70
4.2.2.4 ลักษณะสมบัติของปุนเม็ดเมื่อมีโลหะหนักปนเปื้อนเป็นแคดเมียม และสังกะสี	74
4.2.3 ปุนเม็ดที่มีโลหะหนักปนเปื้อนหลายชนิด	79
4.2.3.1 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของปุนเม็ดเมื่อไม่มีโลหะหนัก มีโลหะ หนักชนิดเดียว มีโลหะหนักสองชนิด และมีโลหะหนักหลายชนิด ปนเปื้อน	79
4.2.3.2 ลักษณะสมบัติของปุนเม็ดเมื่อมีโลหะหนักหลายชนิดปนเปื้อน	84
4.3 การทำนายค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์เมื่อมีโลหะหนักปนเปื้อนหลายชนิด	88
4.4 ตรวจสอบสมการ	92

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5. สรุปและข้อเสนอแนะ	93
5.1 สรุปผลการทดลอง	93
5.1.1 ผลของโลหะหนักที่มีต่อคุณสมบัติของซีเมนต์	93
5.1.2 ผลของโลหะหนักที่มีต่อค่าการรับกำลังอัด	94
5.1.3 ข้อเสนอแนะ	94
 เอกสารอ้างอิง	 95
 ภาคผนวก ก	 98
ภาคผนวก ข	104
ภาคผนวก ค	112

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ตารางแสดงประเภทของวัตถุดิบ	7
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	12
2.3 โครงสร้างหลักของปูนเม็ด	12
2.4 ผลของขนาดและลักษณะของก้อนตัวอย่างต่อค่ากำลังอัด	21
2.5 ตัวอย่างการทดสอบหาคุณสมบัติของเสียมโครเมียมเป็นส่วนประกอบ	23
2.6 ประโยชน์ของสารประกอบแคลเซียมที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ	25
2.7 ตัวอย่างอุตสาหกรรมส่วนหนึ่งที่ของเสียมสังกะสีเป็นส่วนประกอบ	26
3.1 แสดงสัดส่วนการผสมของโลหะหนัก โครเมียม แคลเซียม และสังกะสีในการทำ การทดลองแบบผสมโดยความเข้มข้นของโลหะหนักรวมกันเท่ากับ 2	38
4.1 การหาค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่ละลายอยู่ ของปูนเม็ดที่ได้จาก ห้องปฏิบัติการ	44
4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ANOVA)	89
4.3 การวิเคราะห์ค่าคงที่และตัวแปรแต่ละเทอม	90
4.4 เปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดลอง และจากการใช้ สมการทำนายที่ความเข้มข้นของโลหะหนักแตกต่างกัน	92

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 กระบวนการผลิตแบบเปียก	8
2.2 กระบวนการผลิตแบบแห้ง	9
2.3 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์	11
2.4 ช่องว่างที่ถูกจำกัดของปัจจัยของส่วนผสมที่มี (a) $p = 2$ ส่วนประกอบ, (b) $p=3$ ส่วนประกอบ	30
2.5 ระบบโคออร์ดิเนตแกนสามเส้น	31
2.6 การออกแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์สำหรับ $p = 3$ และ $p = 4$ ส่วนประกอบ	32
3.3 ขั้นตอนการเตรียมปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสม	40
3.4 การวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือยู่ (free lime)	42
4.1 โครงสร้างของปูนเม็ดจากกระบวนการผลิต กับปูนเม็ดจากการสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD	46
4.2 ภาพเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของปูนเม็ด	47
4.3 ภาพแสดงองค์ประกอบหลักของปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิต	47
4.4 เปรียบเทียบค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือยู่ของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและปูนเม็ดที่มีโลหะหนักแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก	49
4.5 แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องSEMเมื่อ (ก) ปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก (ข) ปูนเม็ดที่มีโครเมียม 2% โดยน้ำหนัก	49
4.6 โครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และปูนเม็ดที่มีโครเมียมปนเปื้อนจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD	51
4.7 การเปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนักกับมอร์ตาร์ที่มีโครเมียมความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก	52
4.8 เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักกับปูนเม็ดที่มีแคลเซียมปนเปื้อนจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องSEM	53
4.9 โครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และปูนเม็ดที่มีแคลเซียมผสม จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD	54
4.10 การเปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนักกับมอร์ตาร์ที่มีแคลเซียมความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก	55

รายการรูปประกอบ(ต่อ)

รูป	หน้า
4.11 เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักกับปูนเม็ดที่มีสังกะสีปนเปื้อนจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องSEM	56
4.12 โครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และปูนเม็ดที่มีแคลเซียมผสม จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD	57
4.13 การเปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนักกับมอร์ตาร์ที่มีสังกะสีความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก	58
4.14 แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดที่มีโลหะหนัก และปูนเม็ดที่มีโลหะหนักชนิดเดียวเป็นสารปนเปื้อนจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องSEM	59
4.15 โครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสม ชนิดเดียว จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD	60
4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและปูนเม็ดที่มีโลหะหนักแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักกับค่าการรับกำลังอัด	61
4.17 เปรียบเทียบค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักกับปูนเม็ดที่มีโลหะหนักชนิดเดียว และปูนเม็ดที่มีโลหะหนักสองชนิด	62
4.18 แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องSEMเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักกับปูนเม็ดที่มีโลหะหนักชนิดเดียว และสองชนิดปนเปื้อน	63
4.19 โครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสมชนิดเดียวและสองชนิด จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD	65
4.20 เปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนัก กับมอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักชนิดเดียว และมอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักสองชนิด	66
4.21 เปรียบเทียบค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักกับปูนเม็ดที่มีโครเมียมและแคลเซียม	67
4.22 แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องSEMเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่มีโครเมียมผสมเพียงชนิดเดียวกับปูนเม็ดที่มีโครเมียมผสมกับแคลเซียม	68
4.23 โครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และ ปูนเม็ดที่มีโครเมียมและแคลเซียมผสม จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD	69
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนักและมอร์ตาร์ที่มี โครเมียมและแคลเซียมปนเปื้อนกับค่าการรับกำลังอัด	70

รายการรูปประกอบ(ต่อ)

รูป		หน้า
4.25	เปรียบเทียบค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักกับปูนเม็ดที่มีโครเมียมและสังกะสี	71
4.26	แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องSEMเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่มีโครเมียมผสมเพียงชนิดเดียวกับปูนเม็ดที่มีโครเมียมผสมกับสังกะสี	72
4.27	โครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และ ปูนเม็ดที่มีโครเมียมและสังกะสีผสมจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD	73
4.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนักและมอร์ตาร์ที่มีโครเมียมและสังกะสีปนเปื้อนกับค่าการรับกำลังอัด	74
4.29	เปรียบเทียบค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักกับปูนเม็ดที่มีแคลเซียมและสังกะสี	75
4.30	แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องSEMเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่มีโครเมียมผสมเพียงชนิดเดียวกับปูนเม็ดที่มีโครเมียมผสมกับสังกะสี	76
4.31	โครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และ ปูนเม็ดที่มีแคลเซียมและสังกะสีผสมจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD	77
4.32	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนักและมอร์ตาร์ที่มีแคลเซียมและสังกะสีปนเปื้อนกับค่าการรับกำลังอัด	78
4.33	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนักและมอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักสองชนิดปนเปื้อนกับค่าการรับกำลังอัด	79
4.34	เปรียบเทียบค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักกับปูนเม็ดที่มีโลหะหนักชนิดเดียว ปูนเม็ดที่มีโลหะหนักสองชนิดและปูนเม็ดที่มีโลหะหนักหลายชนิด	80
4.35	แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องSEMเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก ปูนเม็ดที่มีโลหะหนักชนิดเดียว สองชนิด และหลายชนิดปนเปื้อน	81
4.36	โครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสมชนิดเดียว สองชนิด และหลายชนิด จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD	83
4.37	เปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนัก กับมอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักชนิดเดียว สองชนิด และหลายชนิด	84
4.38	แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องSEMเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักกับปูนเม็ดที่มีโลหะหนักหลายชนิดปนเปื้อน	85

รายการรูปประกอบ(ต่อ)

รูป	หน้า
4.39 โครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และ ปูนเม็ดที่มีโครเมียม แคดเมียมและ สังกะสีผสม จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD	87
4.40 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การทดลองแบบผสม	88
4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักทั้งสามชนิดกับค่าการรับกำลังอัดในรูป คอนทัวร์พล็อต	91
4.42 แสดงวิธีการอ่านค่าใน contour plot	91

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

ANOVA	=	Analysis of Variance
C ₃ S	=	ไตรแคลเซียมซิลิเกต
C ₂ S	=	ไดแคลเซียมซิลิเกต
C ₃ A	=	ไตรแคลเซียมอลูมินेट
C ₄ AF	=	ไตรแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์
Independent Variable	=	ตัวแปรอิสระ
Interaction Effect	=	อิทธิพลร่วม
Lack of Fit	=	ความสมบูรณ์ของตัวแบบ
Main Effect	=	อิทธิพลหลัก
Mixture Design	=	การออกแบบการทดลองแบบผสม
Natural Variables	=	ตัวแปรธรรมชาติ
Normality Test	=	การทดสอบความปกติของข้อมูล
R ²	=	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
Randomization	=	การสุ่ม
Replication	=	การทำภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน
Reproducibility	=	ความสามารถในการทำเหมือน
RSM	=	Response Surface Methodology
SEM	=	Scanning Electron Microscopy
XRD	=	X-ray Diffraction

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

แนวความคิดการปล่อยมลพิษเป็นศูนย์ หรือ zero emission concept เป็นแนวความคิดที่ได้นำมาใช้กันมากในภาคอุตสาหกรรม โดยอยู่ในหลักการที่ว่าภาคอุตสาหกรรมจากโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งจะสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆได้ [1] จากแนวความคิดนี้เองได้ทำให้อุตสาหกรรมหลายประเภทได้นำกากของเสียมากำจัดด้วยการเผา ร่วมกับการผลิตปูนซีเมนต์ โดยกากของเสียเหล่านั้นได้กลายเป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทน ตัวอย่างของกากของเสียเหล่านี้ เช่น กากสี กากตะกรันอลูมิเนียม ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย จีโหลหะ (slag) แผลงวงจระ ยาง เป็นต้น โดยกากของเสียหลายชนิดมักมีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า [1,2] โลหะหนักหลายชนิด เช่น โครเมียม วานาเดียมส่งผลเชิงลบต่อลักษณะของซีเมนต์ และสามารถถูกชะล้างออกมาจากซีเมนต์ได้ ในขณะที่โลหะหนักหลายชนิด เช่น นิกเกิล เป็นต้น ส่งผลต่อลักษณะของซีเมนต์น้อยมาก และถูกชะล้างออกมาจากซีเมนต์ในระดับต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด ซึ่งทำให้ซีเมนต์นั้นสามารถนำไปใช้งานได้ต่อไป อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นการศึกษาถึงผลกระทบของโลหะหนักแต่ละชนิด ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว การนำของเสียอุตสาหกรรมมาเผาร่วมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นจะเป็นการนำของเสียอุตสาหกรรมหลายประเภท ซึ่งมีโลหะหนักหลายชนิดมาเผาร่วมกัน จึงทำให้งานวิจัยในส่วนที่จำเป็นต้องมีการศึกษา คือ ผลของโลหะหนักหลายชนิดที่มาจากของเสียอุตสาหกรรมต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์นั้น จำเป็นต้องมีการวิจัย ซึ่งงานวิจัยในส่วนดังกล่าวยังไม่ได้มีการศึกษาแต่อย่างใด และการคาดการณ์ผลกระทบของซีเมนต์อันเนื่องมาจากสัดส่วนของโลหะหนักหลายชนิดที่แตกต่างกันในซีเมนต์นั้น ไม่ได้มีการสร้างเป็นรูปแบบแนวทางที่ชัดเจน

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะรวมผลงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้มีการศึกษาผลกระทบของโลหะหนักแต่ละชนิดจากของเสียอุตสาหกรรมต่อลักษณะของซีเมนต์ ได้แก่ โครเมียม แคลเซียม และสังกะสี ซึ่งโลหะหนักทั้งสามชนิดแสดงแนวโน้มในการรับกลั้งอัดของซีเมนต์ และงานวิจัยในส่วนการทดลองที่นำเสนอใหม่นี้คือ การนำของเสียที่มีโลหะหนักผสมทั้งสามชนิดโดยรู้สัดส่วนของความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดอย่างชัดเจนมาเผาร่วมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และศึกษาสมบัติของซีเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงไป แล้วนำข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาสร้างเป็นหน่วยสเกลของผลกระทบของโลหะหนักต่อลักษณะของซีเมนต์ เพื่อประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์ในการจะนำหน่วยสเกลดังกล่าวไปใช้คาดการณ์ลักษณะสมบัติของซีเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปที่สามารถเกิดขึ้นได้ หากมีอัตราส่วนความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดที่แตกต่างกันในของเสียอุตสาหกรรม

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ หน่วยสเกลที่ใช้ในการคาดการณ์ผลกระทบของโลหะหนักทั้งสามชนิด ได้แก่ โครเมียม แคดเมียม และสังกะสีต่อการรับกำจัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ ซึ่งสามารถนำไปใช้งาน ได้จริงในกระบวนการผลิตซีเมนต์ที่มีการเผาร่วมกับของเสียอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างหน่วยสเกลในการคาดการณ์ผลกระทบของโลหะหนักทั้งสามชนิด ได้แก่ โครเมียม แคดเมียม และสังกะสีต่อการรับกำจัดของซีเมนต์มอร์ตาร์
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของโลหะหนักทั้งสามชนิดต่อลักษณะสมบัติอื่นๆของซีเมนต์ ได้แก่ ลักษณะปูนเม็ด ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ (free lime) และเฟสส่วนประกอบของปูนเม็ด

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้หน่วยสเกลในการคาดการณ์ผลกระทบของโลหะหนักทั้งสามชนิด ได้แก่ โครเมียม แคดเมียม และสังกะสีต่อการรับกำจัดของซีเมนต์มอร์ตาร์
2. ได้ผลกระทบของโลหะหนักทั้งสามชนิดต่อลักษณะสมบัติอื่นๆของซีเมนต์ ได้แก่ ลักษณะปูนเม็ด ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ (free lime) และเฟสส่วนประกอบของปูนเม็ด

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. ปูนเม็ดที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นปูนเม็ดสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เตาเผาชนิด เฟอร์เนซ (furnace)
2. ความเข้มข้นของโลหะหนัก โครเมียม แคดเมียม และสังกะสีรวมกันเท่ากับร้อยละ 2 โดย น้ำหนัก
3. ไม่ศึกษารายละเอียดเชิงลึกที่อธิบายสาเหตุและกลไกความสัมพันธ์ที่ส่งผลต่อค่าการรับกำจัด
4. โครเมียม ที่ใช้ในงานวิจัยอยู่ในรูปโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0.5 0.667 1.0 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก

1.4 ขอบเขตงานวิจัย (ต่อ)

5. แคดเมียม ที่ใช้ในงานวิจัยอยู่ในรูปแคดเมียมออกไซด์ (CdO) ความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0.5 0.667 1.0 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก

6. สังกะสี ที่ใช้ในงานวิจัยอยู่ในรูปซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0.5 0.667 1.0 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 การนำของเสียอุตสาหกรรมเผาร่วมในกระบวนการผลิตซีเมนต์

แนวคิดที่จะมุ่งช่วยเหลือสังคมในการจัดการวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมโดยนำหลักการของ การปลดปล่อยมลพิษเป็นศูนย์ (Zero Emission Key Concept) ซึ่งหมายถึง การรวมกลุ่มกันของอุตสาหกรรมต่างๆ และนำวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมหนึ่งมาเป็นเชื้อเพลิง หรือวัตถุดิบทดแทนสำหรับอีกอุตสาหกรรมหนึ่ง เช่น การนำยางรถยนต์หรือน้ำมันใช้แล้วมาเป็นเชื้อเพลิงทดแทนในโรงงานปูนซีเมนต์ การดำเนินงานในลักษณะเช่นนี้ได้มีการดำเนินงานอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ [4] ไม่ว่าจะเป็นยุโรป ประเทศญี่ปุ่น หรือในประเทศไทยเองก็ตาม [5]

การนำวัสดุที่ไม่ใช้แล้วมาใช้เป็นเชื้อเพลิง และวัตถุดิบทดแทนหรือนำมากำจัดในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์นี้ เป็นการดำเนินการภายใต้ระบบการผลิตเดิมทั้งหมด แต่จะมีการติดตั้งเครื่องจักรอุปกรณ์บางส่วน และจำเป็นต้องจัดทำและขอความเห็นชอบรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม จากกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม และขออนุญาตเป็นโรงงานปรับปรุงคุณภาพของเสียรวมหรือโรงงาน 101 จากกรมโรงงานอุตสาหกรรมก่อนจึงจะดำเนินการได้ [5]

โดยทั่วไปแล้วของเสียที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนี้มีทั้งของเสียที่จัดเป็นขยะจากอุตสาหกรรมและของเสียอันตรายอันประกอบด้วย น้ำมันที่ใช้แล้ว ตัวทำละลาย ไม้และของเสียจำพวกเศษไม้จากอุตสาหกรรมไม้ ยางรถยนต์ ของเสียอุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมพลาสติก ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย โดยของเสียเหล่านี้มักมีโลหะหนักเจือปนมาด้วยในปริมาณที่แตกต่างกัน เช่น ในน้ำมันและตัวทำละลายที่ใช้แล้วจะมีตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) ในพลาสติกจะมีโลหะหนักได้แก่ โคบอลต์ (Co) แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว และสังกะสี ส่วนยางรถยนต์จะมีสังกะสีอยู่มาก และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียมักมีโลหะหนักหลายชนิดเจือปนอยู่ เป็นต้น

เตาเผาปูนซีเมนต์ซึ่งรับกำจัดของเสียในเชิงพาณิชย์รับของเสียจากผู้กำเนิดของเสียในการใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนเม็ดในกระบวนการผลิตซีเมนต์ (Portland cement clinker) ของเสียเหลวปกติจะป้อนเข้าบริเวณส่วนปลายของเตาซึ่งมีอุณหภูมิสูง ของเสียของแข็งอาจจะป้อนเข้าบริเวณ แคลซิเนีย (Calcining zone) ด้วยเครื่องมือต่างๆ สำหรับเตาเผาที่มีความยาว ของเสียของแข็งสามารถนำ เข้าทางบริเวณกลางเตาเผา (Mid-kiln) และเข้าบริเวณชุดให้ความร้อนเบื้องต้น (Pre-heater/Pre-calciner kiln) ซึ่งจะทำการป้อนบริเวณชั้นที่มีอุณหภูมิสูง [6]

ข้อดีของเตาเผาในกระบวนการผลิตซีเมนต์

- อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในกระบวนการเผาปูนเม็ดสูงถึง 1450 องศาเซลเซียส ซึ่งเพียงพอที่จะหลอมละลาย หรือเผาไหม้วัตถุดิบ หรือกากอุตสาหกรรมเกือบทุกประเภท
- ระยะเวลาในการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงนานมากกว่า 5 วินาที ที่ 1,200 องศาเซลเซียส ทำให้มีเวลาเพียงพอต่อการเผาไหม้วัตถุดิบ หรือกากอุตสาหกรรม
- เถ้าถ่าน(Ash) จากการเผาไหม้คือส่วนหนึ่งของวัตถุดิบที่หลอมละลายในกระบวนการผลิตออกเป็นปูนเม็ด ส่งผลให้ไม่มีเถ้าถ่าน ที่ต้องถูกกำจัดอีกครั้ง
- วัตถุดิบหลักได้ แก่ หินปูนที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ คือสารปรับสภาพ (Neutralizing Agent) มีการใช้อย่างแพร่หลายอยู่แล้วโรงงานปูนซีเมนต์

2.1.1 วัตถุดิบทดแทน (Alternative raw material)

วัตถุดิบทดแทนคือวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบหลักเหมือนกับวัตถุดิบทั่วไปในการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ไรท์ (Fe_2O_3) กากอุตสาหกรรมก็เป็นวัตถุดิบทดแทนชนิดหนึ่งซึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนวัตถุดิบได้ โดยข้อดีในการนำของเสียเข้ามาทดแทนวัตถุดิบ ได้แก่ การลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในการผลิตปูนซีเมนต์ เช่น หินปูน หินดินดาน ดินอูมินา ดินลูกรัง และเป็นการลดพลังงานที่ต้องใช้ในการกระเบื้องเหมือนหินเพื่อที่จะได้วัตถุดิบดังกล่าว นอกจากนี้กากของเสียอุตสาหกรรมบางชนิดยังมีคุณสมบัติทางเคมีเป็นแคลเซียมออกไซด์ไม่ใช่แคลเซียมคาร์บอเนตทำให้ไม่มีความจำเป็นจะต้องใช้พลังงานในเปลี่ยนรูปแคลเซียมคาร์บอเนตมาเป็นแคลเซียมออกไซด์อีก ซึ่งถือว่าประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้นทางหนึ่ง นอกจากนี้ยังเป็นการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะเกิดขึ้นจากกระบวนการดังกล่าวไม่ให้เกิดขึ้นด้วย ถือเป็นการได้ประโยชน์จากการใช้วัตถุดิบทดแทนในเชิงเชื้อเพลิงทดแทนด้วยเช่นกัน

2.1.2 เชื้อเพลิงทดแทน (Alternative fuels)

เชื้อเพลิงทดแทนคือวัสดุหรือสิ่งใดก็ตามที่มีความสามารถในการจุดติดไฟและสามารถนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตปูนเม็ด โดยในขั้นตอนการเผาโรตารีคลินน์มีสถานะที่เหมาะสมสำหรับการนำของเสียมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน ซึ่งสถานะที่เหมาะสมนี้ประกอบด้วย อุณหภูมิที่สูง สภาพความเป็นออกซิไดซิงแอทโมสเฟียร์ (oxidizing atmosphere) การเผาของเสียทั้งที่เป็นโลหะ (Metallic) และอโลหะ (Non-metallic) จะได้รับการดูดซับอย่างสมบูรณ์ การมีพื้นที่สำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมากพอ การผสมของแก๊สและผลิตภัณฑ์ที่ดี และเวลาที่เพียงพอมากกว่า 2 วินาทีสำหรับการกำจัดของเสียอันตราย [7] เพื่อให้การดำเนินการและการเผาไหม้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

ในการนำของเสียอันตรายที่มีโลหะหนักนี้มาใช้เป็นสารทดแทนเป็นเชื้อเพลิงนี้ นอกจากจะคำนึงถึงปริมาณความร้อนที่ของเสียจะให้ได้ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้แล้ว ยังต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งในแง่ของการปล่อยก๊าซเสียสู่บรรยากาศภายนอกเตาเผา และการปนเปื้อนของโลหะหนักในผลิตภัณฑ์อีกด้วย

2.2 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

อุตสาหกรรมการผลิตซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานสูงโดยพลังงานที่ใช้คิดเป็น 30-40 เปอร์เซ็นต์ของค่าใช้จ่ายในการผลิต ไม่รวมค่าใช้จ่ายในการลงทุน [8] ตั้งแต่ในอดีตที่ผ่านมาเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ คือ ถ่านหิน และมีการใช้เชื้อเพลิงอื่นๆ เช่น แก๊สธรรมชาติและน้ำมัน นอกจากเชื้อเพลิงเหล่านี้แล้วในอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์ยังใช้ของเสียเป็นเชื้อเพลิงด้วยในทวีปยุโรป อุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์มีการใช้กากของเสียอุตสาหกรรมประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ของการใช้เชื้อเพลิงทั้งหมด [8] ในแง่ของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ วัตถุดิบหลักๆ ได้แก่ หินปูน หินดินดาน ดินอูมินาสูง ดินลูกรัง และอื่นๆ โดยมีสัดส่วนประมาณ 77.8 18.5 1.5 2.0 และ 0.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2.2.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบ (raw material) ที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ค่อนข้างมีความหลากหลาย ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของวัตถุดิบชนิดนั้นๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 4 ประเภทดังตารางที่ 2.1

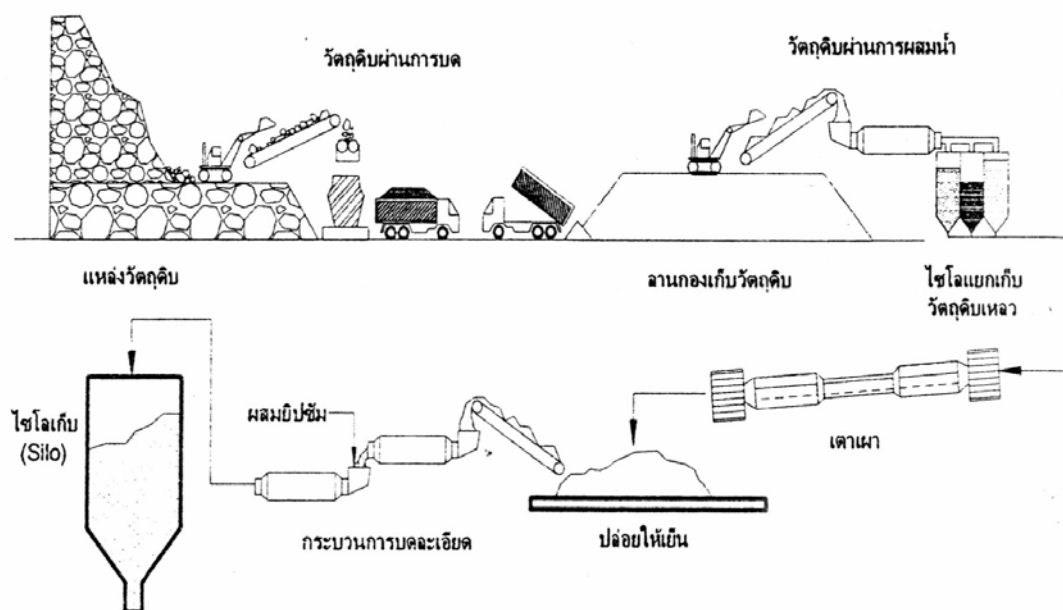
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงประเภทของวัตถุดิบ

ประเภทของวัตถุดิบ	รายละเอียด
1.Calcareous Material	เป็นวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate หรือ CaCO_3) ตั้งแต่ 80 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป เช่น หินปูน (Limestone) ดินขาว (Marl) และดินสอพอง (Chalk) เป็นต้น
2.Argillaceous Material	เป็นวัตถุดิบที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Silicon Dioxide หรือ SiO_2) อลูมินา (Alumina Oxide หรือ Al_2O_3) และเหล็ก (Iron Oxide หรือ Fe_2O_3) เป็นส่วนใหญ่ เช่น หินดินดาน (Shale) และดินดำหรือดินเหนียว (Clay) เป็นต้น
3.Corrective Material	เป็นวัตถุดิบที่ใช้สำหรับเพิ่มเติมองค์ประกอบทางเคมีบางตัวซึ่งในหินดินดานหรือดินดำ มีปริมาณไม่เพียงพอ เช่น ● เพิ่ม SiO_2 ทราย (Sand) ● เพิ่ม Al_2O_3 ดินแดง (High Alumina Clay) ● เพิ่ม Fe_2O_3 แร่เหล็ก (Iron Ore)
2.Additive Material	เป็นสารผสมเพิ่มที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่สำคัญคือการเติมยิปซัมเพื่อช่วยยืดระยะเวลาการแข็งตัว ปรับปรุงคุณสมบัติการหดตัว และพัฒนากำลังอัดของปูนซีเมนต์ กรณีปูนซีเมนต์ผสม มีการเติมหินปูน เพื่อช่วยลดการหดตัว ซึ่งจะช่วยลดการแตกร้าว นอกจากนี้ ยังอาจมีการผสมสารผสมเพิ่มชนิดอื่นๆ เช่น สารปอซโซลาน GGBS สารลดน้ำ และสารกระจายกักฟองอากาศ เป็นต้น

2.2.2 กรรมวิธีในการผลิต

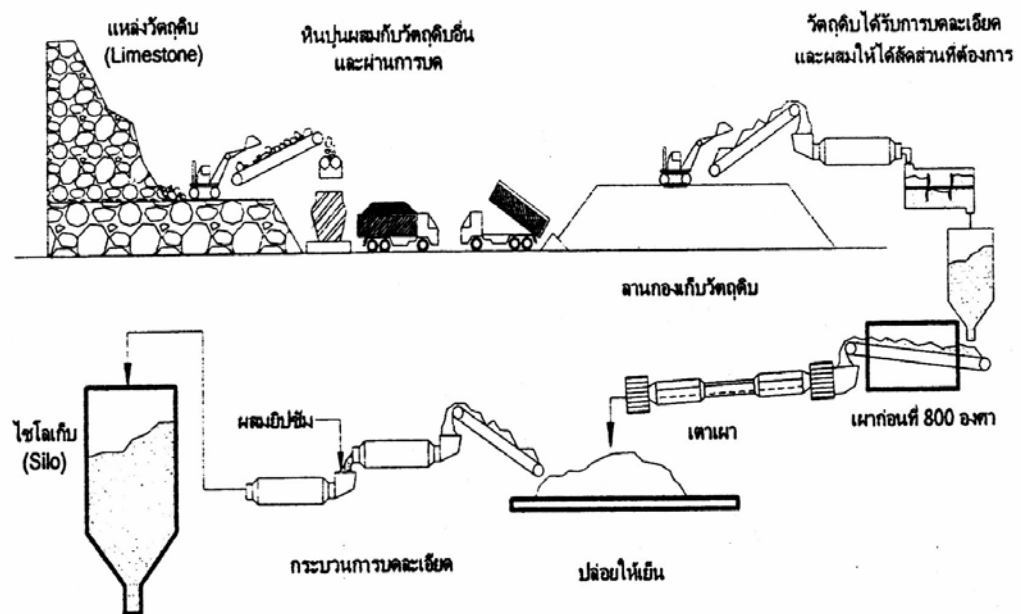
กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ กระบวนการผลิตแบบเปียก (Wet process) และกระบวนการผลิตแบบแห้ง (Dry process) การเลือกกระบวนการผลิตแบบใดขึ้นอยู่กับความชื้นของวัตถุดิบในสภาพธรรมชาติ ความแข็งของวัตถุดิบ และชนิดของวัตถุดิบ ที่ความชื้นช่วงหนึ่งการบดวัตถุดิบจะทำได้ยาก จำเป็นต้องขจัดความชื้นที่มีอยู่หรือเติมน้ำให้มีปริมาณมากขึ้น ถ้า

ในกระบวนการผลิตแบบเปียก วัตถุดิบจะผสมกับน้ำตามสัดส่วนที่กำหนด โดยปกติถ้าใช้ดินเหนียว และหินชอล์กจะใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อน้ำประมาณ 1:3 จากนั้นจะบดส่วนผสมให้ละเอียดในหม้อบดละเอียดเปียก (Wash mill) น้ำโคลนข้น (Slurry) ที่ได้จะนำไปผ่านตะแกรงละเอียดแล้วส่งเข้าเตาเผา วัตถุดิบที่ป้อนเข้าเตาเผาจะมีความชื้นประมาณ 37 ถึง 39 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตแบบเปียก[9]

ในกระบวนการผลิตแบบแห้ง วัตถุดิบที่ระเบิดมาจากเหมืองจะนำมาย่อยให้เล็กลงในเครื่องย่อยขั้น ดัน (primary crusher) และเครื่องย่อยขั้นที่สอง (secondary crusher) ตามลำดับ จากนั้นจึงนำวัสดุไปบดละเอียดในหม้อบดวัตถุดิบ (raw mill) แล้วผสมกันตามสัดส่วนที่ต้องการในไซโลผสมวัตถุดิบ (blending silo) จากนั้นเพิ่มความร้อนของวัตถุดิบด้วยลมร้อนก่อนส่งเข้าเตาเผา ในกรณีของการผลิตแบบกึ่งแห้ง (semi-dry process) จะนำวัตถุดิบไปทำเป็นเม็ดโดยการเติมน้ำเล็กน้อยและผ่านเข้าไปในเครื่องทำเม็ด (granulator) วัตถุดิบจะจับกันเป็นก้อนกลมขนาดประมาณ 12 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อให้การป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เตาเผาสะดวกขึ้น วัตถุดิบจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 12 ดังนั้นเตาเผาของกระบวนการผลิตแบบแห้งและกึ่งแห้งจึงมีขนาดเล็กกว่าเตาเผาในกรณีกระบวนการผลิตแบบเปียก



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตแบบแห้ง [9]

ในปัจจุบัน โรงงานปูนซีเมนต์ไทยทุกโรงงาน ใช้กรรมวิธีการผลิตแบบแห้งซึ่งเป็นวิธีที่ทันสมัยกว่า เพราะเป็นวิธีที่ใช้พลังงานความร้อนต่ำกว่า จึงช่วยประหยัดเชื้อเพลิงในการเผาได้ดีกว่า และยังสามารถควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ได้ง่ายกว่า จึงทำให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอมากกว่า นอกจากนี้ ยังมีระบบการควบคุมคุณภาพทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ เพื่อความมั่นใจว่าจะสามารถผลิตปูนซีเมนต์ที่มีคุณภาพดี สม่ำเสมอ และได้มาตรฐาน [9]

2.2.3 การเผาปูนเม็ด

การเผาปูนเม็ด (clinker burning) มีขั้นตอนดังนี้ คือ เริ่มจากการลำเลียงวัตถุดิบสำเร็จที่ได้เข้าสู่ระบบหม้อเผา ซึ่งในปัจจุบันก่อนจะป้อนวัตถุดิบสำเร็จเข้าสู่หม้อเผาจะต้องป้อนวัตถุดิบสำเร็จผ่านหอให้ความร้อนเบื้องต้น (preheater) เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนก่อนจะป้อนเข้าสู่บริเวณเผาวัตถุดิบ (burning zone) ภายในเตาเผาโรตารีคิลน์ (rotary kiln) ซึ่งเตาเผา โรตารีคิลน์มีลักษณะเป็นเตาเผาแบบหมุน ทำด้วยเหล็กกล้ารูปทรงกระบอกข้างในบุด้วยอิฐทนไฟ เตาเผาแบบหมุนมีความเอียงจากแนวราบเล็กน้อยประมาณ 3 ถึง 5 ในร้อย และหมุนรอบแกนของทรงกระบอกอย่างช้าๆ ประมาณ 1 ถึง 3 รอบต่อนาที เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาเป็นถ่านหิน น้ำมัน หรือก๊าซธรรมชาติ วัตถุดิบจะป้อนเข้าสู่ส่วนบนของเตา สำหรับกระบวนการผลิตแบบเปียกวัตถุดิบอยู่ในเตาเผาเป็นเวลานาน 2 ถึง 2.5 ชั่วโมงและเป็นเวลา 0.5 ถึง 1 ชั่วโมง [10] สำหรับกรณีการผลิตแบบแห้ง

กระบวนการที่เกิดขึ้นในเตาเผาสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ

1. การขจัดน้ำอิสระโดยการระเหย (evaporation)
2. การขจัดน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ (calcination)
3. การทำปฏิกิริยาเป็นปูนเม็ด (clinkering)
4. การลดอุณหภูมิ (cooling)

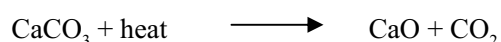
ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์หากแบ่งอุณหภูมิที่ใช้ จะแบ่งได้เป็น 3 ช่วงได้แก่

1. ช่วงอุณหภูมิ 15-805 องศาเซลเซียส

เป็นช่วงที่เรียกว่า drying and preheating zone ซึ่งในช่วงนี้อุณหภูมิของน้ำอิสระ และน้ำที่อยู่ในวัตถุดิบ จะถูกทำให้ระเหย โดยทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจากอุณหภูมิห้อง

2. ช่วงอุณหภูมิ 805-1200 องศาเซลเซียส

เป็นช่วงที่เรียกว่าแคลซินิ่ง (calcining) โดยวัตถุดิบจะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปอีก ทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีอยู่จะเปลี่ยนรูปไปเป็นแคลเซียมออกไซด์(CaO) หรือที่เรียกว่าปูนขาว(lime) และเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น ดังสมการ



ในขณะเดียวกันแมกนีเซียมคาร์บอเนต(MgCO₃) ที่มีอยู่บ้างในวัตถุดิบ จะเปลี่ยนรูปไปเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์เช่นเดียวกัน กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า calcinations

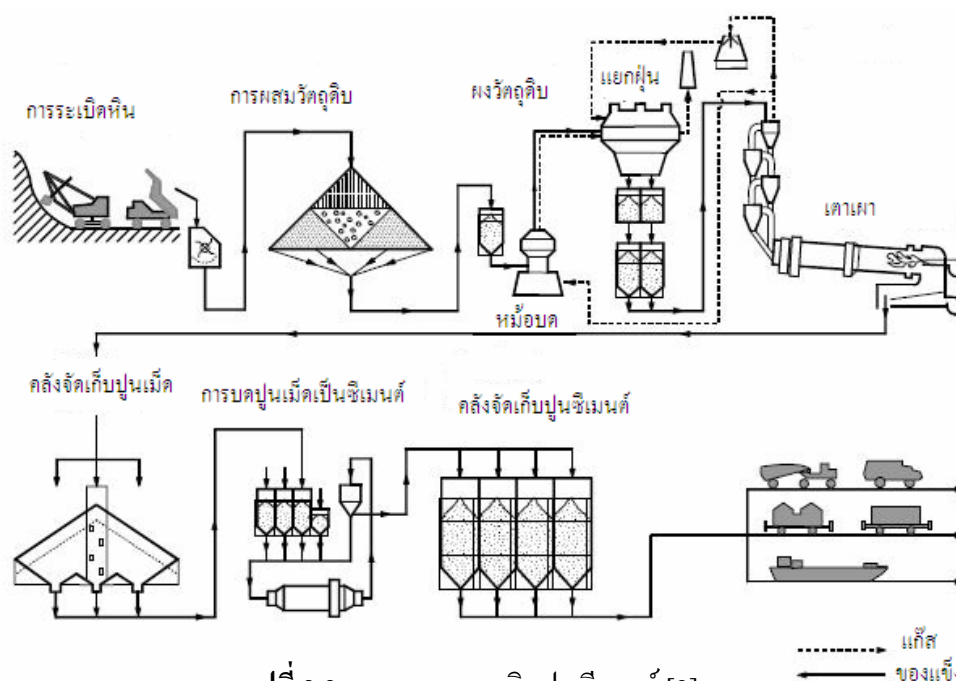
3. ช่วงอุณหภูมิ 1200-1500 องศาเซลเซียส

เป็นช่วงที่เรียกว่า burning zone โดยวัตถุดิบจะถูกให้ความร้อน โดยทำให้เกิดปูนเม็ดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 1450 องศาเซลเซียส

ปูนเม็ดที่ออกจากส่วนล่างของเตาเผาจะยังคงร้อนมาก และจะลดอุณหภูมิปูนเม็ด ซึ่งอัตราการลดลงของอุณหภูมิมิผลต่อความเป็นผลึกของปูนเม็ด ต่อจากนั้นนำปูนเม็ดมาบดรวมกับยิปซัมในหม้อบดปูนซีเมนต์ ปริมาณยิปซัมที่ใช้ประมาณร้อยละ 2.5 ถึง 3 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เพื่อหน่วงการก่อตัวอย่างรวดเร็วของปูนซีเมนต์ [10]

เชื้อเพลิงที่ใช้เพื่อให้พลังงานความร้อนในการเผาปูนเม็ด แบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักได้แก่

1. เชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป (non-renewable fuel) เช่น ถ่านหิน น้ำมันเตา และ Pet Coke เป็นต้น
2. เชื้อเพลิงทดแทน (secondary fuel) ช่วยลดมลภาวะทางด้านสิ่งแวดล้อมและประหยัดการใช้เชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป แบ่งออกเป็น 2 ประเภทย่อย ได้แก่
 - เชื้อเพลิงชีวมวล (biomass) เป็นวัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรมหรืออุตสาหกรรม ที่เกี่ยวกับการเกษตร เช่น แกลบ จี้เลื่อย ใยปาล์ม เปลือกไม้ และกะลาปาล์ม เป็นต้น
 - เชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรม (industrial waste) เช่น ขางรถยนต์ และ น้ำมันใช้แล้ว เป็นต้น [11]



รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ [9]

2.3 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์

2.3.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมี

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ดีจะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ [10]
- ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 และยิปซัม ปริมาณออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงในตาราง 2.2

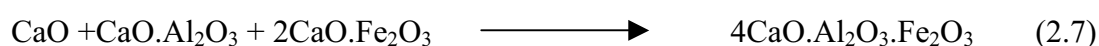
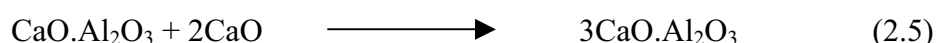
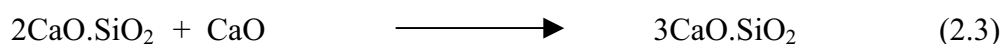
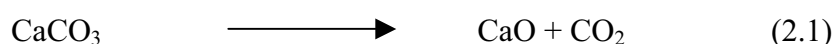
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
ซิลิกา, SiO_2	17-25
อลูมินา, Al_2O_3	3-8
เฟอร์ริกออกไซด์, Fe_2O_3	0.5-6.0
แคลเซียมออกไซด์, CaO	60-67
ออกไซด์รอง	
แมกนีเซียมออกไซด์, MgO	0.1-4.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์, SO_3	0.5-3.0
แคลเซียมออกไซด์ที่เหลือ, Free lime	1-2

ตารางที่ 2.3 โครงสร้างหลักของปูนเม็ด

โครงสร้างหลักของปูนเม็ด	สูตรโมเลกุล	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	Ca_3SiO_5	C_3S (alite)
ไบแคลเซียมซิลิเกต	Ca_2SiO_4	C_2S (belite)
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	C_3A (aluminite)
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	C_4AF (ferrite)

โดยแคลเซียมออกไซด์เป็นวัตถุดิบตั้งต้นของส่วนประกอบของปูนเม็ด ซึ่งทำปฏิกิริยาโดยต่อเนื่องจนเกิดเป็นส่วนประกอบต่างๆ



ส่วนประกอบของปูนเม็ดที่ต้องการจะอยู่ในรูปของไตรแคลเซียมซิลิเกตเป็นหลัก โดยควรมีประมาณร้อยละ 45-50 ในขณะที่ไตรแคลเซียมซิลิเกต ควรอยู่ในช่วงร้อยละ 15-35 เป็นหลัก โดยมีไตรแคลเซียมอะลูมิเนต และเตตระแคลเซียม อะลูมิโนเฟอร์ไรท์อย่างละร้อยละ 7-15 อุณหภูมิที่ให้กับวัตถุดิบในแต่ละช่วงจะมีส่วนประกอบของปูนเม็ดที่แตกต่างกัน [10] กล่าวคือ

- แคลเซียมคาร์บอเนต จะกลายเป็นแคลเซียมออกไซด์ที่อุณหภูมิประมาณ 901 องศาเซลเซียสด้วยปฏิกิริยาคูคความร้อน

- ไตรแคลเซียมซิลิเกตจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาคูคความร้อน โดยเปลี่ยนรูปมาจากแคลเซียมออกไซด์ที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส

- ไตรแคลเซียมซิลิเกตจะเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์ และไตรแคลเซียม ซิลิเกต โดยเป็นปฏิกิริยาคูคความร้อนที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1352 องศาเซลเซียส โดยจะได้ ไตรแคลเซียมซิลิเกตในรูปของของเหลว ซึ่งหลังจากการทำปฏิกิริยาแล้วต้องทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ไตรแคลเซียมซิลิเกตแข็งตัวกลายเป็นของแข็ง

2.3.1.1 คุณสมบัติของสารประกอบหลัก

สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF) เนื่องจากมีปริมาณมากถึงกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติและคุณภาพของปูนซีเมนต์ [9]

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) มีอยู่มากที่สุดในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 45 ถึง 55 มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมสี่เหลี่ยม ที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ไตรแคลเซียมซิลิเกตสามารถสลายตัวได้ ซึ่งการสลายตัวนี้ค่อนข้างช้าและเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส ไตรแคลเซียมซิลิเกตจะมีเสถียรภาพและจะไม่เปลี่ยนแปลงสภาพเมื่อผสมไตรแคลเซียมซิลิเกตกับน้ำจะเกิดการก่อตัวและแข็งตัวและให้กำลังค่อนข้างดีโดยเฉพาะในช่วง 7 วันแรก

2. ไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 15-35 ไตรแคลเซียมซิลิเกตมีลักษณะเป็นเม็ดกลมและแสดงลักษณะทวินิ่ง เมื่อผสมกับน้ำสามารถทำปฏิกิริยาเกิดความร้อนขึ้นได้ ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตค่อนข้างต่ำ การพัฒนากำลังของไตรแคลเซียมซิลิเกตค่อนข้างช้าและช้ากว่า ไตรแคลเซียมซิลิเกตมาก คือเริ่มให้กำลังหลังจาก 4 สัปดาห์ขึ้นไป

3. ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต

ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 7-15 ลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยม มีสีเทาอ่อน ปฏิกิริยากับน้ำรุนแรงมากและทำให้เฟสก่อตัวทันที การพัฒนากำลังของ ไตร

4. เติตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์

เติตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 5-10 และอยู่ในสภาพสารละลายแข็ง เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาและทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว พัฒนากำลังได้เร็วมากเช่นเดียวกับไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่กำลังประลัยที่ได้ค่อนข้างต่ำและต่ำกว่าไตรแคลเซียมอลูมิเนต เล็กน้อย

2.3.1.2 คุณสมบัติของสารประกอบรอง [10]

1. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) หากมีอยู่ในปูนซีเมนต์เกินกว่า 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้เกิดความไม่คงตัว โดยมีการขยายตัวในมอร์ตาร์และคอนกรีต เกิดการแตกร้าวเสียหาย
2. ปูนขาวอิสระ (Free Lime หรือ CaO) จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆหลังจากที่ปูนซีเมนต์แข็งตัวแล้ว หากมีอยู่เกินกว่า 3 เปอร์เซ็นต์จะทำให้เกิดความไม่คงตัว และก่อตัวช้า
3. ยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ทำให้ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติก่อตัวและแข็งตัวช้าลง หากมีอยู่มากจะทำให้เกิดความไม่คงตัว และทำให้การรับแรงน้อยลง
4. โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ซึ่งเป็นด่างทำให้เพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะแรกแต่กำลังรับแรงอัดในระยะหลังลดลง ถ้าผสมใช้กับวัสดุผสมที่ทำปฏิกิริยากับด่าง อาจทำให้เกิดการขยายตัวในมอร์ตาร์หรือคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหาย นอกจากนี้ยังทำให้ปูนซีเมนต์บรรจุอยู่ในถุง จับตัวเป็นก้อนเร็ว

2.3.2 การก่อตัวและการแข็งตัว

ปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นผงละเอียด สามารถเกิดการก่อตัวและการแข็งตัวได้ด้วยการทำปฏิกิริยากับน้ำซึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration reaction) ทำให้มีคุณสมบัติในการรับแรงได้ ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำจะก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลวและสามารถหล่อได้ในช่วงเวลาหนึ่ง โดยจะเรียกช่วงเวลาที่คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า ช่วงเวลาดอร์แมนท์ (dormant period) หลังจากนั้นซีเมนต์เพสต์จะเริ่มจับตัว (stiff) ถึงแม้ว่าจะยังนิ่งอยู่แต่ก็จะไม่สามารถหล่อตัวได้อีกแล้ว (unworkable) จุดนี้จะเป็นจุดที่เรียกกันว่า จุดแข็งตัวเริ่มต้น (initial Set) และระยะเวลาตั้งแต่ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงจุดนี้ เรียกว่า เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (initial Setting Time) การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์จะยังคงดำเนินไปเรื่อยๆจนถึงจุดที่เป็นของแข็งที่คงสภาพ (rigid solid) ซึ่งจะเรียกว่า จุดแข็งตัวสุดท้าย (final Set) และเวลาที่ใช้นจนถึงจุดดังกล่าวเรียกว่า เวลา

2.3.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

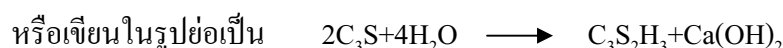
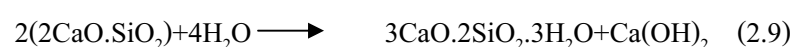
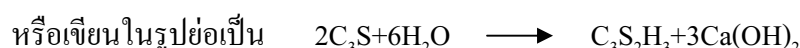
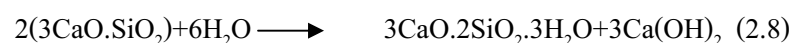
เมื่อทำการผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดความชื้นเหนียว(cement paste) จากนั้น ซีเมนต์เพสต์ เริ่มก่อตัวและค่อยๆแข็งตัว จนมีความมันคงทนทาน กลายเป็นซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวเต็มที่ สามารถรับกำลังอัดได้มากขึ้น จะมากหรือน้อยเร็วหรือช้า ขึ้นอยู่กับซิลิเกตและอลูมินัต โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ

- 1) อาศัยการละลายปูนซีเมนต์จะละลายในน้ำก่อนให้เกิดประจุในสารละลายและประจุที่เกิดขึ้นจะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น
- 2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็งโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า “ Solid State Reaction “

ซีเมนต์ประกอบไปด้วยสารประกอบหลายชนิด ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจจะเกิดปฏิกิริยาต่อไปทำให้มีความแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ในช่วงแรก ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์ที่ได้ ดังนั้นจึงจะทำการแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของซีเมนต์

2.3.3.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต

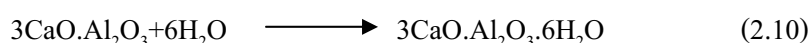
ไตรแคลเซียมซิลิเกต เมื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำ จะเกิดความร้อนและแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ให้ความสามารถในการรับแรงอัดได้ในช่วงอายุต้น ๆ โดยเฉพาะในระหว่าง 4 สัปดาห์แรก แล้วค่อยๆลดลงในเวลาต่อมา ผลจากการไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต จะเปลี่ยนแปลงเป็นเจลของ $C_3S_2H_3$ และน้ำปูน $Ca(OH)_2$ แยกออกมาสำหรับ H ได้มาจากน้ำ(H_2O) ส่วน C_2S จะเกิดปฏิกิริยาค่อยๆแต่ได้น้ำปูนน้อยกว่า ปัจจุบันจะเขียน $C_3S_2H_3$ ในรูป C-S-H เมื่อแคลเซียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับน้ำและก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ และ Calcium Silicate Hydrate C-S-H) แล้วจะทำหน้าที่เป็นตัวประสานสมการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้



C-S-H เกิดขึ้นประมาณ 50 – 70 เปอร์เซ็นต์ของเนื้อที่ทั้งหมด ลักษณะเป็นเจลที่ทำให้เกิดการก่อตัวเมื่อปริมาณ C-S-H เพิ่มขึ้น ความพรุนของซีเมนต์เพสต์จะลดลง และกำลังรับแรงอัดเริ่มพัฒนาขึ้น C-S-H อยู่ในรูปของอนุภาคเล็กๆ มีขนาดประมาณเท่ากับสารแขวนลอย (เล็กกว่า 1 ไมโครเมตรทุกมิติ) มีลักษณะปรากฏเป็นอสัณฐาน (Amorphous) จากการใช้เครื่องขยายอิเล็กตรอน พบว่า C-S-H มีลักษณะเป็นผลึกที่หายากมาก ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นประมาณ 20-25 เปอร์เซ็นต์ ของเนื้อที่ทั้งหมด จะอยู่บริเวณรอบๆอนุภาคของเม็ดปูน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่าง ช่วยป้องกันการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมเหล็กได้ดี และแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้อาจทำปฏิกิริยาต่อไปอีกกับวัสดุที่มีธาตุซิลิกา และอะลูมินาผสมอยู่ เช่น วัสดุปอซโซลาน

2.3.3.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต

สำหรับไตรแคลเซียมอะลูมิเนต แม้จะมีจำนวนน้อย ก็เป็นสารประกอบที่ทำให้เกิดการก่อตัวเฉียบพลัน ดังนั้นจึงต้องเติมยิปซัมลงไปแก้ไข การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตจะเกิดอย่างรวดเร็ว และเกิดความร้อนมาก ผลึกที่ได้จากไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต เป็นลักษณะสี่เหลี่ยม และมีเจล C-S-H ที่ได้จากไฮเดรชันห่อหุ้มไว้ สมการการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้



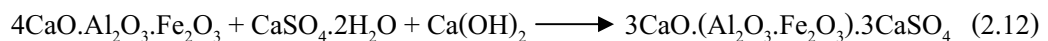
เนื่องจาก ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ทำปฏิกิริยากับน้ำเร็วเกินไปอาจทำให้เกิดการก่อตัวผิดปกติ จึงต้องผสมยิปซัมในขั้นตอนบดปูนเม็ดประมาณ 3 – 6 เปอร์เซ็นต์ เพื่อยืดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตให้นานขึ้น และจะได้สมการเกิดปฏิกิริยาดังนี้



จากปฏิกิริยา ได้สารประกอบแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต หรือ อีกชื่อหนึ่ง คือ เอทริงไจต์ (Ettringite) มีลักษณะคล้ายเข็มเกิดเป็นชั้นรอบ ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ทำให้ปฏิกิริยาของ ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ถูกหน่วง ดังนั้น การก่อตัวในช่วงนี้จึงขึ้นกับ ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต จนกระทั่งชั้นของเอทริงไจต์แตกทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต เกิดต่อไป จนไอออนของซัลเฟตไม่พอที่จะทำให้เกิดเอทริงไจต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ ไตรแคลเซียมอะลูมิเนตจะเปลี่ยนเป็นเอทริงไจต์ น้อยลง หรือเรียกอีกชื่อว่า โมโนซัลโฟอะลูมิเนต

2.3.3.3 ปฏิกริยาไฮเดรชันของ เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์

เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ มีคุณสมบัติคล้ายกับไตรแคลเซียมอะลูมิเนต จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำได้เร็วมาก ทำให้การก่อตัวภายในช่วงเวลาสั้น ส่งผลให้เกิดความร้อนสูง แต่ให้กำลังต่ำ โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซัม ซึ่งยิปซัมจะหน่วงปฏิกิริยาให้ช้าลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็น แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต และแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรต์ ดังสมการ



2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน [9]

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ และคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว จะขึ้นกับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยจะมีผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว

2.3.4.1 อายุของซีเมนต์เพสต์ ยกเว้นช่วงระยะเวลาเริ่มต้นผสม อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากที่สุดในช่วงแรก และลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2.3.4.2 ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เป็นธรรมชาติของปฏิกิริยาเคมีที่จะเกิดความร้อนตามปฏิกิริยาไฮเดรชันก็จะมีความร้อนเกิดขึ้นเช่นเดียวกัน และมีปริมาณความร้อน(หน่วยวัดเป็นจุลต่อ 1 กรัมของปูนซีเมนต์) ซึ่งขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันช่วงขณะนั้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น โดยการเพิ่มอุณหภูมิต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของซีเมนต์เพสต์ วิธีวัดค่าความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้กำหนดไว้ใน ASTM C186-98

2.3.4.3 ความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่มีความละเอียดสูง จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำได้มาก ผลก็คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดในอัตราที่เร็วโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในช่วงแรกของปฏิกิริยา

2.3.4.4 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ในช่วงต้นอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จะไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในช่วงหลัง อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง ถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลง ผลก็คือ ทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเฉลี่ยและอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง

2.3.4.5 อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีข้อแม้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของซีเมนต์เพสต์

2.3.4.6 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละตัวในซีเมนต์ไม่เหมือนกัน

2.4 กำลังอัดของคอนกรีต [9]

คุณสมบัติของคอนกรีตในขณะที่ยังอยู่ในสภาพเหลวจะมีความสำคัญเพียงขณะก่อสร้างเท่านั้น ในขณะที่คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว จะมีความสำคัญไปตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตนั้น อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ คุณสมบัติของคอนกรีตทั้ง 2 ลักษณะ จะมีผลต่อกันและกัน การที่จะให้ได้คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วดี จะต้องมาจากการเลือกสัดส่วนผสม เพื่อให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพเหลวมีความเหมาะสมอย่างมากในการใช้งาน

คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วได้แก่ กำลัง ความทนทาน และการเปลี่ยนแปลงปริมาตร แต่ในที่นี้จะกล่าวเพียงกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งเป็นเพียงส่วนหนึ่งของคุณสมบัติด้านกำลัง

2.4.1 ธรรมชาติของกำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการคือ

1. กำลังของมอร์ตาร์
2. กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม
3. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ตาร์กับผิวของมวลรวม

2.4.1.1 กำลังของมอร์ตาร์

กำลังของมอร์ตาร์มีบทบาทอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยกำลังของมอร์ตาร์นี้ขึ้นอยู่กับความพรุนภายในเนื้อมอร์ตาร์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ Degree of Hydration แต่ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังและความพรุน จะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า กำลังของมอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับอย่างมากกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

การเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติของมวลรวม เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดกะ ปริมาณ กำลัง ลักษณะผิว ขนาดใหญ่สุด การดูดซึมและแร่ธาตุต่างๆ จะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตไม่มากนัก

2.4.1.2 กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม

สำหรับกำลังของมอร์ตาร์ที่กำหนดให้ ความสามารถต้านแรงของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังของหินและแรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ตาร์ แต่โดยทั่วไปกำลังของมวลรวม จะสูงเป็นหลายเท่าของกำลังของมอร์ตาร์ ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวจะเป็นตัวควบคุมการแตกของคอนกรีต

สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่กำหนดให้ กำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้หินขนาดใหญ่ขึ้น เพราะหินขนาดใหญ่จะก่อให้เกิดน้ำใต้หินมากขึ้นทำให้แรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ตาร์ลดลง

ขนาดของมวลรวม จะมีผลต่อกำลังของคอนกรีต ที่มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำหรือปานกลาง มากกว่าที่สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูง

การเพิ่มปริมาณของมวลรวมในส่วนผสมจะเป็นการเพิ่มกำลังอัด รวมทั้งถ้าใช้หินที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะทำให้กำลังของคอนกรีตดีขึ้น

2.4.1.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ตาร์กับผิวของมวลรวม

แรงยึดเหนี่ยวนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพ เช่น รูปร่าง ลักษณะผิวของมวลรวม และลักษณะทางเคมีคือ ปฏิกริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับแร่ธาตุต่างๆในเนื้อมวลรวม

นอกจากนี้ทิศทางการหล่อและทิศทางการให้น้ำหนักจะมีผลต่อกำลังเช่นกัน โดยจะมีผลต่อกำลังดึงมากกว่ากำลังอัดด้วยเหตุผลที่ว่าจะเกิดช่องว่างทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมหยาบกับมอร์ตาร์ต่ำลง

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลัง

2.4.2.1 คุณสมบัติของวัสดุผสม

- **ปูนซีเมนต์** เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลที่สำคัญมาก ทั้งนี้เพราะว่าปูนซีเมนต์แต่ละประเภทจะก่อให้เกิดกำลังของคอนกรีตที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ นอกจากนี้แม้ว่าจะเป็นปูนซีเมนต์ประเภทเดียวกัน แต่มีความละเอียดแตกต่างกันแล้ว อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตก็จะแตกต่างกันไปด้วยคือ ถ้าปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากก็จะให้กำลังสูง โดยเฉพาะหลังจากที่แข็งตัวไปแล้วไม่นาน

- **มวลรวม** มวลรวมมีผลต่อคอนกรีตเพียงเล็กน้อย เพราะมวลรวมที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป มักมีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์เพสต์ อย่างไรก็ตามมวลรวมหยาบที่เป็นหินย่อยซึ่งมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมหรือผิวหยาบจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตดีกว่าพวกกรวดที่มีผิวเกลี้ยง ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมก็มีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน เพราะคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่ามวลรวมขนาดเล็ก สำหรับคอนกรีตที่มีความสามารถเท่าได้เท่ากัน ดังนั้นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่ จึงมักให้กำลังดีกว่า ส่วนขนาดละเอียดของมวลรวมจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตในแง่ที่ว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีส่วนขนาดละเอียดที่ไม่เหมาะสม คือมีส่วนละเอียดมากเกินไปนั้น จะต้องการปริมาณน้ำมากกว่ามวลรวมที่มีส่วนละเอียดที่ดี เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถเท่าได้เท่ากัน อีกทั้งยังก่อให้เกิดฟองอากาศแทรกตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตเป็นจำนวนมากกว่า ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลงได้ นอกจากนี้ความสะอาดของมวลรวมก็จะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน

- น้ำ น้ำมีผลต่อคอนกรีตตามความใส และปริมาณของสารเคมีหรือเกลือแร่ที่ผสมอยู่ น้ำที่มีเกลือคลอไรด์ผสมอยู่ จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตในระยะต้นสูง น้ำปูนหรือน้ำที่มีสารแขวนลอยปนอยู่ จะทำให้กำลังของคอนกรีตต่ำลงซึ่งอาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารแขวนลอยนั้น

2.4.2.2 การทำคอนกรีต

- การชั่งตวงส่วนผสม

- การชั่งตวงส่วนผสม หากใช้การตวงโดยปริมาตรจะมีโอกาสผิดพลาดมากกว่าการชั่งส่วนผสมโดยน้ำหนัก ซึ่งหากอัตราส่วนผสมคอนกรีตผิดไปจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงได้
- อัตราส่วนผสม จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรง โดยเฉพาะอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

- การผสมคอนกรีต

การผสมคอนกรีตจะต้องผสมวัสดุทำคอนกรีตให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุด เพื่อให้มีน้ำมีโอกาสทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้อย่างทั่วถึง และเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์กระจายแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างมวลรวมได้เต็มที่ ดังนั้น การผสมคอนกรีตหากกระทำอย่างไม่ทั่วถึง จะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่คงที่ได้

- การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและการอัดแน่น

จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตเพราะ หากคอนกรีตเกิดการแยกตัวในขณะที่ลำเลียงหรือเท จะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้การทำให้คอนกรีตแน่นตัว หากทำได้ไม่เต็มที่ก็จะทำให้เกิดรูโพรงขึ้นในเนื้อคอนกรีต มีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าลดลงได้ หรือหากใช้วิธีที่ทำให้คอนกรีตแน่นตัวไม่เหมาะสม ก็สามารถทำให้เกิดการแยกตัวเกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตได้ ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ

2.4.2.3 การบ่มคอนกรีต

- ความชื้น จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต เพราะปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำจะค่อยเป็นค่อยไป นับตั้งแต่ปูนซีเมนต์เริ่มผสมกับน้ำเป็นซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์เพสต์จะมีกำลังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ถ้ามีความชื้นอยู่ตลอดเวลา ถ้าซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตไม่มีความชื้นอยู่ คอนกรีตก็จะไม่มีการเพิ่มกำลังอีกต่อไป ในทางปฏิบัติเรามักจะบ่มคอนกรีตจนถึงอายุ 28 วัน ดังนั้นเมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัวจึงควรทำการบ่มด้วยความชื้นทันที

- อุณหภูมิ ถ้าหากอุณหภูมิสูงในขณะที่บ่มก็จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตถูกเร่งให้เร็วขึ้น ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงกว่าคอนกรีตที่ได้รับการบ่มในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า

- **เวลาที่ใช้ในการบ่ม** ถ้าหากสามารถบ่มคอนกรีตให้ขึ้นอยู่ตลอดเวลาได้ยาวนานเท่าใดก็จะยิ่งได้กำลังของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

2.4.2.4 การทดสอบ

การควบคุมคุณภาพคอนกรีตสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะทำให้รูปของการชักคอนกรีตสดมาทำก้อนตัวอย่าง โดยถือว่ากำลังของคอนกรีตตัวอย่างเป็นตัวแทนของคอนกรีตที่หล่อเป็นโครงสร้าง ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตดังต่อไปนี้

- **ขนาดและลักษณะของแท่งทดสอบ** การใช้แท่งทดสอบที่ต่างขนาดและต่างลักษณะกันจะมีผลทำให้ค่ากำลังของคอนกรีตเกิดความแตกต่าง ดังแสดงในตาราง 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลของขนาดและลักษณะของก้อนตัวอย่างต่อค่ากำลังอัด

ขนาดตัวอย่าง รูปทรง ลูกบาศก์ (ซม)	กำลังอัดสัมพัทธ์	ขนาดตัวอย่างรูปทรง กระบอก (ซม)		กำลังอัดสัมพัทธ์
7.5	106	5	10	109
10	104	7.5	15	106
15	100	15	30	100
20	95	20	40	97
25	92	30	60	91
		45	90	87
		60	120	84
		90	180	82

- **วิธีการทำตัวอย่าง** การทำให้คอนกรีตแน่น โดยการกระทุ้งด้วยเหล็ก จะได้ค่ากำลังต่ำกว่าคอนกรีตที่ได้รับการทำให้แน่นด้วยเครื่องเขย่า
- **ความชื้นในแท่งทดสอบ** ในขณะที่จะทำการทดสอบ ถ้าหากแท่งทดสอบมีความชื้นก็จะให้ค่ากำลังที่ต่ำกว่าแท่งทดสอบที่แห้ง
- **อัตราการกด** ในการทดสอบกำลังอัด ถ้าใช้อัตราการกดสูงจะทำให้กำลังของคอนกรีตสูงตามไปด้วย จึงควรใช้อัตราการกดตามที่มาตรฐานกำหนดไว้
- **เครื่องทดสอบ** น้ำหนักที่กดอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง จึงจะให้กำลังอัดที่ถูกต้อง ซึ่งจะเกิดได้ดังนี้

- 1) ก้อนตัวอย่างต้องอยู่จุดกึ่งกลาง และแกนของก้อนตัวอย่างต้องอยู่ในแนวดิ่ง
- 2) แผ่นรองกดต้องอยู่ในแนวตั้งฉากกับแกนของก้อนตัวอย่าง
- 3) แผ่นรองกดต้องเคลื่อนตัวได้เล็กน้อย
- 4) แผ่นรองกดจะต้องเรียบเป็นระนาบ
- 5) ถ้าต้องใช้วัสดุ Cap ก้อนตัวอย่าง ควรจะเลือกวัสดุที่มีกำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นใกล้เคียงกับของคอนกรีต

2.4.3 สาเหตุที่กำลังอัดไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

การที่กำลังอัดของคอนกรีต ได้ค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดนี้ อาจมีสาเหตุมาจากหลายๆ ประการอันได้แก่

- 1) ใช้สัดส่วนผสมที่ไม่เหมาะสม
- 2) ควบคุมปริมาณน้ำไม่ดีพอ
- 3) ควบคุมปริมาณฟองอากาศไม่ดี
- 4) การผสมไม่ดีพอ
- 5) มีสารอินทรีย์ต่างๆ มากเกินข้อกำหนด
- 6) ใช้หินทรายที่สกปรก
- 7) ใช้น้ำยาผสมคอนกรีตที่ไม่มีประสิทธิภาพ
- 8) ไม่ได้ปรับความชื้นในมวลรวม
- 9) การอัดแน่นไม่ถูกต้อง
- 10) การบ่มไม่เพียงพอ
- 11) การลำเลียงและการทดสอบไม่ถูกต้อง
- 12) อุณหภูมิผันแปรไป

2.5 คุณสมบัติและความเป็นพิษของโลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง ธาตุที่มีเลขอะตอมอยู่ในช่วง 23-92 และอยู่ในคาบที่ 4-7 ในตารางธาตุ มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5.0 ขึ้นไป โดยไม่รวมโลหะที่เป็นโลหะอัลคาไลน์และโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท ซึ่งในสภาพปกติโลหะหนักจะเป็นผลึกบริสุทธิ์มีความเป็นพิษน้อย แต่ถ้าอยู่ในสภาวะความดันไอสูง สารประกอบโลหะหนักบางชนิดจะมีความเป็นพิษสูง เช่น methyl mercury ตัวอย่างของโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว(Pb) ปรอท(Hg) แคดเมียม(Cd) สังกะสี(Zn) โครเมียม(Cr) เหล็ก(Fe) แมงกานีส(Mg) เป็นต้น

2.5.1 โครเมียม

2.5.1.1 ลักษณะทั่วไปของโครเมียม

โครเมียมเป็นโลหะแข็งสีเทา ไม่มีกลิ่น มีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 52 โครเมียมมีผลกระทบต่อคนในระบบทางเดินหายใจ โครเมียมมีรูปที่สำคัญอยู่สองรูปได้แก่ โครเมียมไตรวาเลนต์ (Cr^{+3}) และโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{+6}) ซึ่งมีความเป็นพิษมากกว่าโครเมียมไตรวาเลนต์พบว่าโครเมียมเฮกซะวาเลนต์สามารถละลายน้ำได้ มีพิษรุนแรงมาก เป็นสารก่อมะเร็ง และทำให้ไปรบกวนทางเดินหายใจ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาต่อสภาวะแวดล้อมได้มากมาย ส่วนโครเมียมไตรวาเลนต์ จะไม่ละลายน้ำ ซึ่งมีผลกระทบต่อผิวหนังคนเมื่อถูกสัมผัสเป็นเวลานาน ดังนั้นจำเป็นต้องกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ไปเป็นสารประกอบโครเมียมไตรวาเลนต์ [12]

2.5.1.2 การนำโครเมียมไปใช้ประโยชน์

โครเมียมใช้ในงานชุบผิววัสดุ ใช้ในงานฟอกหนัง ใช้ในงานรักษาเนื้อไม้ และใช้ในงานเกี่ยวกับอุปกรณ์ใช้ไฟฟ้า สามารถพบสารโครเมียมได้ในรูปของ $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ สารโครเมียมมีข้อดีที่สำคัญคือสามารถต้านทานกรดได้ [12]

โครเมียมสกัดได้จากสินแร่แล้วนำมาทำให้บริสุทธิ์ หรือผลิตเป็นสารประกอบของโครเมียมชนิดต่าง ๆ เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมตามที่ต้องการ ในระหว่างกระบวนการผลิตโลหะ การใช้โครเมียมชุบเคลือบ หรือใช้สารประกอบโครเมียมในอุตสาหกรรมต่าง ๆ จะเกิดของเสียที่มีโลหะโครเมียมเจือปนอยู่ทั้งสิ้น ในตารางที่ 2.5 เป็นตัวอย่างอุตสาหกรรมที่ของเสียมีโครเมียมเป็นส่วนประกอบ

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างกากอุตสาหกรรมส่วนหนึ่งที่ของเสียมีโครเมียมเป็นส่วนประกอบ [14]

ชนิดของอุตสาหกรรม	ประเภทของเสีย
การเคลือบโลหะ	กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย
การชุบโลหะ	กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย
สีย้อมอนินทรีย์	กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย
การสกัดน้ำมันปิโตรเลียม	กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย
เหล็กและเหล็กกล้า	กากส่วนที่เหลือจากเตา
การทำตะกั่วเบื้องต้น	ของแข็งจากบ่อฝัง
การทำสังกะสีเบื้องต้น	ฝุ่น/กากตะกอน

2.5.1.3 พิษของโครเมียมและโรคที่เกิดขึ้น

การสูดดมฝุ่นละอองของโครเมียมเป็นระยะเวลานาน จะทำให้เยื่อชั้นโพรงจมูกทะลุ พวกสารประกอบของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ เช่น โครเมต (Chromate) จะทำให้ผิวหนังเกิดอาการอักเสบ เกิดแผลที่หายช้า ถ้าทานเข้าไปปริมาณ 5 มิลลิกรัม ในรูปของสารละลายเกลือ ทำให้ตายได้ และสารโครเมตนี้ทำให้เกิดโรคมะเร็งในปอด และถ้าสูดดมเป็นเวลานาน ๆ (10-15 ปี) จะมีโอกาสเป็นมากกว่าคนธรรมดาถึง 20 เท่า [14] สำหรับพิษที่เกิดจากการกิน จะทำให้เกิดอาการทางระบบทางเดินอาหารอย่างรุนแรง และมีผลเสียต่อไต แต่พวกเกลือของโครเมียมไตรวาเลนต์ เช่น ฟอสเฟต (Phosphate) หรือคาร์บอเมต (Carbamate) จะมีพิษน้อยกว่า จะเห็นได้ว่า โครเมียมเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ ปอด ตับ ไต ระบบประสาทและผิวหนัง ทั้งเฉียบพลัน และเรื้อรัง โดยเฉพาะ โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาทางป้องกันไม่ให้แพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อม

2.5.2 แคลเมียม

2.5.2.1 ลักษณะทั่วไปของแคลเมียม

แคลเมียมเป็นโลหะสีเงินไม่มีกลิ่น มีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 112.41 กรัมต่อโมล มีจุดหลอมเหลว และจุดเดือดเท่ากับ 321 และ 769 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 8.65 มีความสามารถระเหยออกได้ ณ ความดันไอ เท่ากับ 1 มิลลิเมตรปรอท ณ 394 องศาเซลเซียส มีค่าออกซิเดชันเท่ากับ 0 +1 และ +2 แต่ที่พบเห็นโดยทั่วไปจะอยู่ในสถานะที่เลขออกซิเดชันเป็น +2 มักพบในรูปผลึกหกเหลี่ยม (Hexagonal) [12]

2.5.2.2 การนำไปใช้ประโยชน์

การนำมาใช้ประโยชน์ในโรงงานชุบโลหะเคลือบเงา และพ่นกันสนิมอุตสาหกรรมแบตเตอรี่(นิกเกิล-แคลเมียม) ยานพาหนะ นอกจากนี้ ใช้ในอุปกรณ์รถยนต์ ชิ้นส่วนของเครื่องบิน วิทยุ โทรทัศน์ ตู้เย็น และอื่นๆ อีกมากมาย ดังสรุปไว้ในตารางที่ 2.6 สารแคลเมียมนี้ควรนำกลับมาใช้ใหม่ และควรนำไปกำจัดโดยวิธีการฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล ไม่ควรใช้วิธีการเผา [12]

จากตารางที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าแคลเมียมออกไซด์ มักพบในกากของเสียอุตสาหกรรมหลายชนิด อาทิ กากอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ อุปกรณ์ไฟฟ้า อะไหล่รถยนต์ โลหะผสม อุตสาหกรรมเพชรพลอย กากตะกอนจากการโรงงานบำบัด กากสีย้อม เรซิน จีโโลหะ ฝุ่นเหล็ก เป็นต้น เมื่อมีการนำเอาแคลเมียมมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ แคลเมียมก็ยังมีโอกาสที่จะแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้หลายทาง จึงต้องตระหนักถึงความเป็นพิษที่จะส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

ตารางที่ 2.6 ประโยชน์ของสารประกอบแคดเมียมที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ [11]

ชนิดของอุตสาหกรรม	ประเภทของเสีย
การทำเหมือง	ฝุ่นแป้ง
การหลอมและการถลุง	กากตะกอนที่มีแคดเมียม
โรงงานชุบโลหะแคดเมียม	กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย
อุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่	กากที่เกิดจากระบวนการผลิต

2.5.2.3 พิษของแคดเมียมและโรคที่เกิดขึ้น

การได้รับแคดเมียมจำนวนมากอาจทำให้เกิดพิษเฉียบพลันได้ แต่ส่วนใหญ่โรคที่เกิดจากแคดเมียมมักเป็นชนิดเรื้อรัง โดยการได้รับแคดเมียมติดต่อกันเป็นเวลานาน โรคที่เกิดอาจแบ่งเป็นกลุ่มได้ดังนี้ [16]

1. โรคกระดูก แคดเมียมเข้าไปสะสมในกระดูก ทำให้กระดูกพรุน และมีอาการปวดกระดูกอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กระดูกสะโพก ที่เคยเกิดกับชาวญี่ปุ่นที่เมืองฟูซุ ในช่วงก่อน และระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งเรียกโรคนี้ว่า อีไต อีไต(itai itai)
2. โรคปอดเรื้อรัง การได้รับแคดเมียมนานๆ และในปริมาณมาก โดยเฉพาะจากการหายใจ จะทำให้เกิดการอุดตันภายในปอด หลอดลมอักเสบ มีพังผืดจับในทางเดินหายใจส่วนล่าง และมีการทำลายของถุงลม ซึ่งจะกลายเป็นโรคถุงลมโป่งพองในที่สุด ผู้ที่มีความเสี่ยงมาก คือคนทำงานกับผงแคดเมียมโดยตรง เช่น โรงงานแบตเตอรี่ขนาดเล็ก
3. โรคไตอักเสบ จะพบแคดเมียมในปัสสาวะสูง ระบบการทำงานทางท่อในไตเสียสมดุล และพบว่าการสะสมของแคดเมียมที่หมวกไต ก่อให้เกิดการอักเสบและเป็นอันตรายถึงขั้นเป็นไตวายได้ในที่สุด การเกิดโรคไตอักเสบนี้จะเป็นแบบถาวร แม้ว่าจะไม่ได้รับแคดเมียมต่อไปแล้ว แต่ไตก็ยังไม่สามารถฟื้นคืนกลับมาดังเดิมได้
4. โรคความดันโลหิตสูงและโรคหัวใจ พบว่าแคดเมียมทำให้ความดันโลหิตสูงขึ้นมาก และมีโอกาสเป็นโรคหัวใจสูงขึ้นด้วย ซึ่งอาจจะเป็นการร่วมกันกับโรคไตดังที่กล่าวมาแล้ว
5. โรคมะเร็ง มีข้อมูลการศึกษาติดตามคนงานที่ทำงานสัมผัสกับแคดเมียม เช่น โรงงานทำแบตเตอรี่แห่งขนาดเล็ก พบว่ามีความเสี่ยงต่อการเป็นโรคมะเร็งปอด สูงกว่าคนทั่วไปและอาจมีผลต่อการเสี่ยงเป็นโรคมะเร็งของต่อมลูกหมาก

องค์การอนามัยโลก/องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (1989) ได้กำหนดปริมาณแคดเมียมสูงสุดที่ร่างกายรับได้ไว้ที่ 7 ไมโครกรัม/กก./คน(สำหรับคนที่มีน้ำหนักตัว 60 กก. [16]

2.5.3 สังกะสี

2.5.3.1 ลักษณะทั่วไปของสังกะสี

สังกะสี เป็นโลหะสีขาว มีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 65.39 กรัมต่อโมล มีจุดหลอมเหลว เท่ากับ 130 องศาเซลเซียส มีความเสถียร สลายตัวเมื่อถูกความร้อน ทำให้เกิดซิงค์ออกไซด์ และไอของกรด

2.5.3.2 การนำไปใช้ประโยชน์

การนำมาใช้ของสังกะสีพบว่ามียูอยู่ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น สารหล่อลื่น และสาร releasing agent ในการหล่ออย่างในอุตสาหกรรม อุตสาหกรรมเกี่ยวกับการผลิต เครื่องสำอางค์ ยา น้ำมัน และใช้เป็นสารกันน้ำสำหรับคอนกรีต หิน กระดาษและสิ่งทอ เป็นสารป้องกันการเกิดฟองและทำให้ทนต่อแรง และอื่นๆ อีกมากมาย ดังสรุปไว้ในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างอุตสาหกรรมส่วนหนึ่งของเสียมีสังกะสีเป็นส่วนประกอบ [14]

ชนิดกากอุตสาหกรรม	ประเภทของเสีย
การทำสังกะสีเบื้องต้น	ฝุ่นจากกระบวนการผลิต
กากสี (Paint Sludge)	กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย
กากตะกอนเคมี (Chemical Sludge)	กากตะกอนเคมี
อุตสาหกรรมพลาสติก	กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย
การสกัดน้ำมันปิโตรเลียม(Petroleum Refining)	กากตะกอน
เหล็กและเหล็กกล้า(Iron and Steel)	ฝุ่น/กากตะกอน
อุตสาหกรรมยางรถยนต์	เศษยางรถยนต์

2.5.3.3 พิษของสังกะสีและโรคที่เกิดขึ้น

การหายใจเอาสังกะสีเข้าไปในปริมาณเล็กน้อยไม่เป็นพิษ ส่งผลให้มีอาการ ไอ ระคายเคืองทางเดินหายใจ การสัมผัสถูกผิวหนัง ไม่ก่อให้เกิดการระคายเคือง และไม่ดูดซึมผ่านผิวหนัง การกลืนหรือกินเข้าไป ไม่เป็นพิษ การสัมผัสถูกตาจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตาเล็กน้อย อาจทำให้น้ำตาไหล และปวดตา

จากข้อมูลเกี่ยวกับความเป็นพิษของสังกะสีพบว่า มีความเป็นพิษไม่มาก แต่เมื่อมีปริมาณสะสมจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพในระยะยาวได้ และในส่วนของ การนำสังกะสีมาเผาไหม้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์ พบว่ามีสังกะสีจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

2.5.4 การปนเปื้อนของโลหะหนักในซีเมนต์

จากข้อมูลการศึกษาเกี่ยวกับการปนเปื้อนของโลหะหนักในกากอุตสาหกรรมพบว่ามีการกากอุตสาหกรรมหลายประเภทที่มีโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ โครเมียม แคดเมียม และสังกะสี ปนเปื้อนอยู่ และในปัจจุบันกากอุตสาหกรรมเหล่านี้ได้ถูกนำไปกำจัดโดยการเผาไหม้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์ ทั้งในส่วนการนำไปเป็นเชื้อเพลิงทดแทน หรือวัตถุดิบทดแทน [5] โดยมีผู้ทำการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดนี้ได้เข้าไปแทรกอยู่ในองค์ประกอบของปูนเม็ด ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาเกี่ยวกับผลของโลหะหนักเหล่านี้ที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และพฤติกรรมการชะล้างของโลหะหนักเหล่านี้จากซีเมนต์

2.6 ความรู้พื้นฐานทางสถิติ [21]

2.6.1 หลักการพื้นฐาน

ในการทำการทดลองให้มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลได้สูงสุด จะต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง คำว่า “การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment)” หมายถึงกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งที่จำเป็น ถ้าหากต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่ เนื่องจากข้อมูลในการทดลองย่อมมีความคลาดเคลื่อน

หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลองคือ การทำซ้ำ (Replication) การสุ่มทดลอง (Randomization) และ การบล็อกกิง (Blocking) ในที่นี้กำหนดให้การทำซ้ำ หมายถึง การทำการทดลองซ้ำ โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ใหม่ทุกครั้งที่ทำทดลองทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ตัวประมาณค่าความผิดพลาดนี้กลายเป็นหน่วยของการวัดขั้นพื้นฐานสำหรับพิจารณาว่า ความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ การทำซ้ำเป็นการกระจายความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

การสุ่ม หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูล (หรือความผิดพลาด) จะต้องเป็นตัวแทนแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ การสุ่มเป็นการเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

บล็อกกิง เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) โดยการป้องกันไม่ให้ผลของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้เข้ามาในข้อมูล

2.6.2 แนวทางในการออกแบบการทดลอง

ขั้นตอนในการดำเนินการทำได้ดังต่อไปนี้

2.6.2.1 ทำความเข้าใจถึงปัญหา ในขั้นตอนนี้เป็นการพัฒนาแนวความคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง โดยจะรวบรวมข้อมูลจากทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น แผนกวิศวกรรม แผนกผลิต แผนกการตลาด ผู้บริหาร ลูกค้า มาวิเคราะห์ปัญหาที่แท้จริงที่จะส่งผลให้เกิดความเข้าใจและสามารถหาคำตอบให้กับปัญหานั้นๆ ได้ ดังนั้นในการออกแบบการทดลองทุกครั้งควรจะทำงานเป็นทีม

2.6.2.2 เลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ ซึ่งความรู้นี้อาจจะได้มาจากประสบการณ์และความรู้จากทางทฤษฎี ถึงจะมีการกำหนดปัจจัยที่ส่งผลกระทบระหว่างการทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยจะเกิดการเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง ต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยที่กำหนดอย่างไร และจะทำการวัดผลได้เช่นไร นอกจากนี้หากวัตถุประสงค์การทดลองเป็นการกรองปัจจัย (Screening) ควรกำหนดให้ระดับ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อยๆ เลือกขอบเขตให้มีความกว้างมากๆ และเมื่อเราได้เรียนรู้เพิ่มขึ้นว่า ตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ถึงจะลดขอบเขตให้แคบลงได้

2.6.2.3 เลือกตัวแปรผลตอบแทน เนื่องจากบ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือทั้งสองอย่างของกระบวนการมักจะเป็นตัวแปรผลตอบแทน ซึ่งเป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลตอบแทนหลายตัว จึงจำเป็นต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรผลตอบแทน และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ในการเลือกตัวแปรผลตอบแทน ผู้ทดลองต้องแน่ใจว่า ตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่จริง ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

2.6.2.4 เลือกการออกแบบการทดลอง ในการเลือกการออกแบบจำเป็นจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองเป็นหลัก จากนั้นจึงเลือกการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดของตัวอย่าง เลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล ในการทดลองทางวิศวกรรมส่วนมากจะทราบว่าปัจจัยใดที่มีผลต่อผลตอบแทนที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงต้องหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่างและประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

2.6.2.5 ทำการทดลอง ในการทำการทดลองเราจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานเพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผนการทดลอง ถ้ามีเหตุผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทดลองจะทำให้ผลการทดลองนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

2.6.2.6 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดี และสามารถทำการทดลองตามที่ได้ ออกแบบไว้ การนำวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อดูว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อดีของวิธีการทางสถิติคือ สามารถใช้เครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพในการตัดสินใจ และหากนำวิธีการทางสถิติมาประยุกต์ใช้กับความรู้ทางวิศวกรรม ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ และสามัญสำนึก จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

2.6.2.7 สรุปและข้อเสนอแนะ เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขส่วนที่ผิดพลาด นอกจากนี้การทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirm Testing) ควรจะทำการขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นด้วย

2.6.3 วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)

เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองเปรียบเสมือนกับการปีนภูเขา ซึ่งยอดเขาของพื้นผิวจะเป็นจุดที่มีผลตอบสนองสูงสุด หรือถ้าค่าที่ดีที่สุดคือค่าที่ต่ำที่สุดในที่นี้เราอาจจะคิดเสมือนว่า เรากำลังเคลื่อนที่ลงสู่หุบเขา จุดประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบคือ การหาเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดของระบบ หรือเพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยก่อให้เกิดการทำงานที่น่าพอใจ

วิธีการเคลื่อนที่ขึ้นเขาด้วยทางชันที่สุด (Steepest Ascent)

วิธีการเคลื่อนที่ขึ้นเขาด้วยทางชันที่สุด เป็นวิธีการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างเป็นลำดับบนเส้นทางที่มีความชันมากที่สุด ในทิศทางที่มีการขึ้นของผลตอบสูงที่สุด ในทางกลับกัน หากต้องการหาค่าที่ต่ำที่สุดแทน เราจะเรียก วิธีการดังกล่าวว่า การเคลื่อนที่ลงเขาด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest descent)

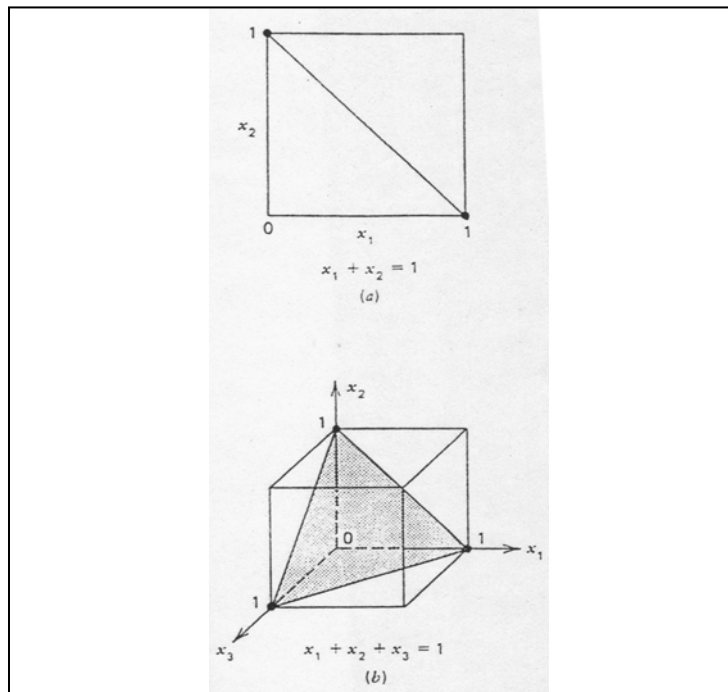
2.6.4 การทดลองผสม (Mixture design)[21]

ในการทดลองผสม (Mixture experiment) ปัจจัยจะเป็นส่วนหนึ่งของการทดลองผสม และสิ่ง ที่ตามมาคือระดับของปัจจัยเหล่านี้จะไม่เป็นอิสระต่อกันตัวอย่างเช่นถ้า $x_1, x_2, \dots, x_p$ เป็นสัดส่วนของ ส่วนประกอบ p ของส่วนผสม (mixture) ดังนั้น

$$0 \leq x_i \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, p \quad \text{และ}$$

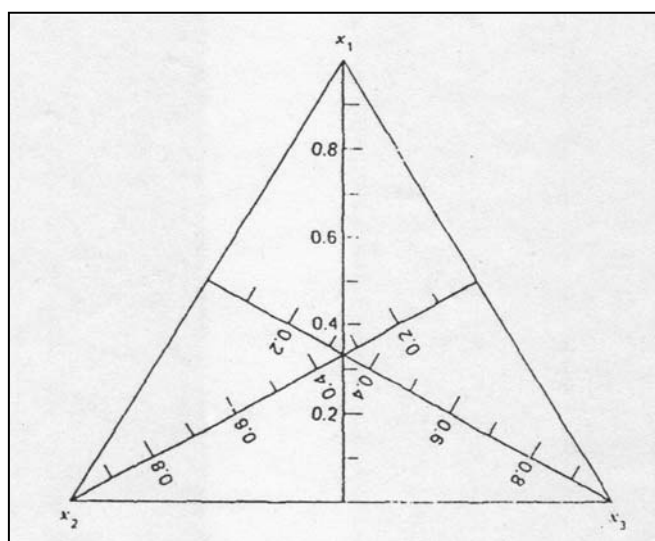
$$x_1 + x_2 + \dots + x_p = 1$$

ข้อจำกัดนี้ถูกแสดงเป็นกราฟฟิกในรูปที่ 2.4 สำหรับ $p = 2$ และ $p = 3$ ส่วนประกอบ สำหรับกรณี 2 ส่วนประกอบที่อยู่บนส่วนของเส้นตรง $x_1 + x_2 = 1$ ซึ่งแต่ละส่วนประกอบจะถูกจำกัดด้วยขอบเขต 0 หรือ 1 สำหรับแบบ 3 ส่วนประกอบ ช่องว่างระหว่างส่วนประกอบผสมจะเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีจุด ยอดเกี่ยวข้องกับจุดที่เป็นส่วนผสมบริสุทธิ์ (Pure Blend) นั่นคือ ส่วนผสมที่มี 100 เปอร์เซ็นต์ของ ส่วนประกอบเดียว



รูปที่ 2.4 ช่องว่างที่ถูกจำกัดของปัจจัยของส่วนผสมที่มี (a) $p = 2$ ส่วนประกอบ, (b) $p = 3$ ส่วนประกอบ [21]

เมื่อมี 3 ส่วนประกอบของส่วนผสม บริเวณของการทดลองที่ถูกจำกัดสามารถเขียนอยู่บนกระดาษ แกนสามเส้น (Trilinear Coordinate Paper) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แต่ละด้านของทั้งสามด้านของกราฟ ในรูป จะไม่มีส่วนผสมของทั้งสามส่วนประกอบนี้ (ส่วนประกอบจะถูกเขียนอยู่ที่จุดยอดที่อยู่ตรงกันข้าม) เส้นกริด (grid line) 9 เส้นในแต่ละทิศทางจะเป็นการเพิ่มขึ้นทีละ 10 เปอร์เซ็นต์ในส่วน ของส่วนประกอบนั้นๆ



รูปที่ 2.5 ระบบโคออร์ดิเนตแกนสามเส้น [21]

การออกแบบซิมเพล็กซ์ (Simplex Design) ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาผลของส่วนประกอบของส่วนผสมกับตัวแปรผลตอบ การออกแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์ (Simplex Lattice Design) $\{p, m\}$ สำหรับ p ส่วนประกอบจะประกอบไปด้วยจุดที่กำหนดโดยโคออร์ดิเนตดังต่อไปนี้ สัดส่วนจะสมมติว่าแต่ละส่วนประกอบจะใช้ $m + 1$ ค่าจาก 0 ถึง 1 ที่มีระยะห่างเท่ากัน

$$x_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, 1 \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (2.24)$$

และการรวม (ส่วนผสม) ที่เป็นไปได้ของสัดส่วนจากสมการ 2.14 จะถูกนำมาใช้ตัวอย่างเช่น ให้ $p = 3$ และ $m = 2$ ดังนั้น

$$x_i = 0, \frac{1}{2}, 1 \quad i = 1, 2, 3$$

และโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์ประกอบด้วย 6 รันต่อไปนี้

$$(x_1, x_2, x_3) = (1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1), (1/2, 1/2, 0), (1/2, 0, 1/2), (0, 1/2, 1/2)$$

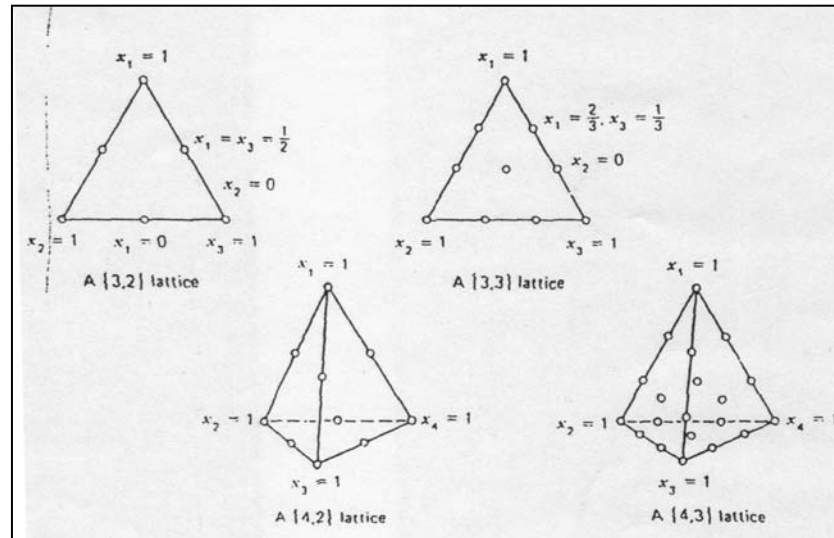
การออกแบบนี้แสดงในรูปที่ 2.6 จุดยอดทั้งสาม $(1, 0, 0)$, $(0, 1, 0)$, และ $(0, 0, 1)$ จะมีส่วนผสมบริสุทธิ์ โดยที่จุด $(1/2, 1/2, 0)$, $(1/2, 0, 1/2)$ และ $(0, 1/2, 1/2)$ จะมีส่วนผสมแบบไบนารี หรือส่วนผสมของสองส่วนประกอบ ที่ถูกวางไว้ที่จุดกึ่งกลางของด้านทั้งสามของรูปสามเหลี่ยม รูปที่ 2.6 ยังแสดงการออกแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์แบบ $\{3, 3\}$, $\{4, 2\}$ และ $\{4, 3\}$ ให้ดูอีกด้วย ตามปกติจำนวนจุดใน $\{p, m\}$ การออกแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์คือ

$$N = \frac{(p+m-1)!}{m!(p-1)!} \quad (2.25)$$

N = จำนวนจุดในการออกแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์

p = จำนวนส่วนประกอบ

m = จำนวน lattice



รูปที่ 2.6 การออกแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์สำหรับ $p = 3$ และ $p = 4$ ส่วนประกอบ [21]

แบบจำลองผสมแตกต่างจากพหุนามที่ใช้ในงานเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบตามปกติ เนื่องจากมีข้อจำกัด $\sum x_i = 1$ อยู่รูปแบบมาตรฐานของแบบจำลองผสมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ

เชิงเส้น
$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i x_i \quad (2.26)$$

ควอดราติก
$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i x_i + \sum_{i < j}^p \beta_{ij} x_i x_j \quad (2.27)$$

คิวบิกเต็มรูป
$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i x_i + \sum_{i < j}^p \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j}^p \delta_{ij} x_i x_j (x_i - x_j) \quad (2.28)$$

$$+ \sum_{i < j < k} \sum \sum \beta_{ijk} x_i x_j x_k$$

คิวบิกแบบพิเศษ
$$\sum (y) = \sum_{i=1}^p \beta_i x_i + \sum_{i < j}^p \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j < k} \sum \sum \beta_{ijk} x_i x_j x_k \quad (2.29)$$

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tashiro และ Oba ได้ทำการศึกษาผลกระทบของ Cr_2O_3 , $\text{Cu}(\text{OH})_2$, ZnO และ PbO ที่มีต่อการพัฒนากำลังและการเกิดไฮดรชันในการแข็งตัวของเฟสไตรแคลเซียมอลูมินेटซึ่งเป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ พบว่า

1. Cr_2O_3 ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮดรชันในระยะแรกของไตรแคลเซียมอลูมินेट แต่มีผลกระทบน้อยกว่า $\text{Cu}(\text{OH})_2$ และ ZnO และอัตราการพัฒนากำลังอัดจะเพิ่มสูงขึ้นก่อนอายุ 7 วันและจะลดลงตามลำดับ
2. $\text{Cu}(\text{OH})_2$ และ ZnO มีผลต่อการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮดรชันเป็นอย่างมาก แต่การพัฒนากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 14 วันเป็นผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดสูงกว่า Cr_2O_3
3. PbO จะยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮดรชันของไตรแคลเซียมอลูมินेट การพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นช้ามาก รวมทั้งความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มขึ้นน้อยกว่า Cr_2O_3 , $\text{Cu}(\text{OH})_2$ และ ZnO ที่ส่วนผสมเดียวกัน

Murat และ Sorrentino [18] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมโลหะหนัก ซึ่งได้แก่ แคลเมียม โครเมียม ตะกั่ว และ สังกะสี ในวัตถุดิบผลิตซีเมนต์ที่มีต่อเฟสส่วนประกอบและคุณสมบัติของปูนเม็ดและซีเมนต์ โดยในงานวิจัยนี้ได้เติมโลหะหนักทั้งสี่ชนิดลงในวัตถุดิบสำหรับผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์แคลเซียมอลูมินेट พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถดูดซับแคลเมียมและสังกะสีได้ดี ส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวเพิ่มขึ้นและค่าการรับกำลังอัดต่ำ ส่วนโครเมียมส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวลดลงค่าการรับกำลังอัดสูง และสำหรับปูนซีเมนต์แคลเซียมอลูมินेटพบว่าแคลเมียม และโครเมียมสามารถจับกับอนุภาคของปูนชนิดนี้ได้ง่าย ระยะเวลาในการก่อตัวช้า ให้ค่าการรับกำลังอัดดี ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการก่อตัว และค่าการรับกำลังอัด นอกจากนี้ยังพบว่าสังกะสีออกไซด์ในปริมาณมากจะส่งผลเชิงลบกับค่าการรับกำลังอัดในปูนซีเมนต์แคลเซียมอลูมินेट

พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล และเอกชัย ทวีกิจวานิช [1] ศึกษาผลของโลหะหนักที่มีต่อเฟสของปูนเม็ดในซีเมนต์ที่ได้จากการนำของเสียอันตรายไปกำจัดโดยการเผาพร้อมกับกระบวนการผลิตซีเมนต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของโลหะหนัก ซึ่งได้แก่ โครเมียม สังกะสี และนิกเกิล ที่มีต่อเฟสโครงสร้างขององค์ประกอบหลักของปูนเม็ดในกระบวนการผลิตซีเมนต์ ซึ่งพบว่าโลหะหนักแต่ละชนิดเข้าไปแทรกในปูนเม็ดแล้วก่อให้เกิดผลดังนี้ ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมเพิ่มขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามทั้งนิกเกิลและสังกะสีค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่กลับลดลง จากผลการวิเคราะห์พบว่าสังกะสีและนิกเกิลได้ทำให้เฟสของปูนเม็ดในรูปของไตรแคลเซียมอลูมินेटเพิ่มขึ้น ในขณะที่โครเมียมส่งผลให้เฟสของไตรแคลเซียมซิลิเกตลดลง

พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกุล และอริสรา ทองศรีนุ่น [3] ศึกษาผลของแคลเซียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการวิเคราะห์การชะล้าง จากการทดลองพบว่าแคลเซียมจะยับยั้งการเกิดไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต แคลเซียมที่ตกค้างมีแนวโน้มทำให้เกิดสารประกอบชนิดใหม่ได้แก่ แคลเซียมซัลไฟด์(CdSO_3) และแคลเซียมอลูมิเนียมออกไซด์(CdAl_2O_4) นอกจากนี้ยังพบว่าแคลเซียมส่งผลให้ค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์และระยะเวลาในการก่อตัวลดลง และจากการศึกษาการชะล้างพบว่ามอร์ตาร์ที่มีความเข้มข้นของแคลเซียมเริ่มต้นมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก จัดเป็นของเสียอันตรายเมื่อทดสอบตามมาตรฐานประเทศไทยตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

D.Stephan และคณะ [19] ทำการศึกษาผลกระทบของ โครเมียม นิกเกิล และสังกะสี ที่มีต่อคุณสมบัติของปูนเม็ดในส่วนของไตรแคลเซียมซิลิเกต ผลการศึกษาพบว่าโลหะหนักทั้งสามชนิดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักขึ้นไปมีแนวโน้มส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของไตรแคลเซียมซิลิเกต โดยโครเมียมความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักทำให้ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ลดลง และเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นพบว่าทั้ง โครเมียม นิกเกิล และสังกะสีทำให้ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันพบว่า โครเมียมความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักกระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยความร้อนออกมา ในขณะที่สังกะสีเป็นตัวขัดขวางการปลดปล่อยความร้อนในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาและเมื่อพิจารณาลักษณะพื้นผิวพบว่าโครเมียมและนิกเกิลแทรกตัวอยู่ในไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เป็นจำนวนมากในขณะที่พบสังกะสีจำนวนน้อย

จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าโลหะหนักทั้งสามชนิดในปริมาณที่มีอยู่ในวัตถุดิบตามธรรมชาติไม่ส่งผลกระทบต่อไตรแคลเซียมซิลิเกต และแม้จะมีการเพิ่มโครเมียมและนิกเกิลอีก 20 เท่าหรือเพิ่มสังกะสีอีก 10 เท่าของที่มีอยู่โดยปกติในวัตถุดิบพบว่าไม่ส่งผลต่อไตรแคลเซียมซิลิเกตเช่นเดียวกัน

D.Stephan และคณะ [20] ทำการศึกษาผลกระทบของ โครเมียม นิกเกิล และสังกะสี ที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับปูนสามชนิด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซัลเฟต และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว จากการศึกษาพบว่าโครเมียม นิกเกิล และสังกะสีในปริมาณที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ และระยะเวลาในการก่อตัวเริ่มต้น และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้น 5000ppm พบว่าโครเมียมเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวเร็วขึ้นทำให้ค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลง สำหรับนิกเกิลพบว่าแทบจะไม่ส่งผลกระทบใดๆ ส่วนสังกะสีพบว่าเป็นตัวขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวนานขึ้นค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันสำหรับปูนทั้งสามชนิด

P.E.Tsakiridis และคณะ [23] ศึกษาผลของการเติมโคลนแดงในวัตถุดิบสำหรับผลิตปูนเม็ดปอร์ตแลนด์ โดยโคลนแดงเกิดจากการย่อยหินบดไชด์ด้วยไฮเดรียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งองค์ประกอบหลักของโคลนแดง ได้แก่ Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Na_2O และ CaO องค์ประกอบรอง ได้แก่ V, Ga, Cr, P, Mn, Cu, Cd, Zn, Ni, Pb เป็นต้น ผลการศึกษาพบว่า การเติมโคลนแดงปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักลงในวัตถุดิบไม่ส่งผลกระทบต่อ การเกิดไฮเดรชัน โดยคุณสมบัติที่เกิดขึ้นเมื่อเติมโคลนแดงเป็นดังนี้

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกตที่เกิดขึ้นมีลักษณะผลึกเล็กและมีขนาดสม่ำเสมอ
2. ผลึกไดแคลเซียมซิลิเกตเกิดในปริมาณต่ำและมักแทรกตัวอยู่ในไตรแคลเซียมซิลิเกต แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในปูนเม็ดส่งผลให้เกิดเฟสของไตรแคลเซียมซิลิเกตโดยตรง และลักษณะของการผสมก็มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน
3. ส่วนของระยะเวลาในการก่อตัวพบว่าอัตราส่วนน้ำที่เกิดขึ้นเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับปูนซีเมนต์ที่ไม่มีโคลนแดง
4. ค่าการรับกำลังอัดที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าโคลนแดงสามารถนำมาผสมกับวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ โดยไม่เพิ่มภาระค่าใช้จ่ายและช่วยลดต้นทุนในการผลิต นอกจากนี้ยังเป็นวิธีการกำจัดของเสียที่ดีอีกวิธีหนึ่งด้วย

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในปัจจุบันการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมเป็นไปอย่างรวดเร็ว ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณกากของเสียจากอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก โดยในปี พ.ศ. 2547 มีปริมาณกากอุตสาหกรรมชนิดไม่อันตรายและกากอุตสาหกรรมชนิดอันตรายเกิดขึ้น 5.9 ล้านตัน และ 0.97 ล้านตัน ตามลำดับ กากอุตสาหกรรมเหล่านี้ได้ถูกนำไปกำจัดด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ การฝังกลบ และการเผาโดยใช้เตาเผา โดยวิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยมกันมากคือ การใช้เตาเผาปูนซีเมนต์ในการร่วมกำจัดของเสียอันตราย ซึ่งวิธีการดังกล่าวนอกจากจะสามารถกำจัดของเสียได้แล้วยังได้รับประโยชน์จากของเสียอีกด้วย เช่น การใช้ของเสียเป็นวัตถุดิบ หรือ เชื้อเพลิงทดแทน เป็นต้น อย่างไรก็ตามวิธีการกำจัดของเสียอันตรายด้วยการเผาในเตาเผาปูนซีเมนต์ต้องมีการคำนึงถึงผลกระทบที่อาจมีผลต่อลักษณะสมบัติของผลิตภัณฑ์ และการชะล้างของเสียอันตรายกลุ่มของโลหะหนักออกจากซีเมนต์ด้วย

จากการดำเนินการวิจัยที่ผ่านมาในหัวข้อ “การศึกษาการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์ที่ใช้กากของเสียอุตสาหกรรมในกระบวนการผลิต” และ “ผลของแคะเมียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการวิเคราะห์การชะล้าง” ซึ่งได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด(มหาชน) โดยได้ทำการศึกษาถึงผลของโลหะหนักสี่ชนิด คือ โครเมียม นิกเกิล แคะเมียม และสังกะสี ที่มีต่อลักษณะสมบัติของปูนเม็ด รวมไปถึงพฤติกรรมการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์ โดยในงานดังกล่าวโลหะหนักจะผสมกับวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์แล้วนำไปเผาเพื่อให้ได้ปูนเม็ดและนำมาสร้างเป็นซีเมนต์มอร์ตาร์ ซึ่งผลส่วนหนึ่งจากงานวิจัยนี้พบว่า โลหะหนักที่ส่งผลให้การรับกำลังอัดลดลงได้แก่ โครเมียม แคะเมียม และสังกะสี ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ โดยงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของโลหะหนักแต่ละชนิด อย่างไรก็ตามในแง่ปฏิบัติแล้ว การนำของเสียอุตสาหกรรมมาเผาร่วมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นจะเป็นการนำของเสียอุตสาหกรรมหลายประเภท ซึ่งมีโลหะหนักหลายชนิดมาเผาร่วมกัน ซึ่งยังไม่มียานวิจัยที่ศึกษาผลของโลหะหนักโดยรวมต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์

งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะสร้างหน่วยสเกลเพื่อใช้ในการคาดการณ์การรับกำลังอัดของซีเมนต์ที่เปลี่ยนไปเมื่อมีโลหะหนักเผาร่วมในกระบวนการผลิตซีเมนต์ โดยเลือกโลหะหนักสามชนิดมาใช้ในการศึกษาได้แก่ โครเมียม แคะเมียม และสังกะสี ซึ่งโลหะหนักทั้งสามชนิดนี้เป็นโลหะหนักที่ส่งผลในการลดการรับกำลังอัดของซีเมนต์และ โลหะหนักทั้งสามชนิดนี้มักจะพบใน ของเสียอุตสาหกรรมร่วมกันอีกด้วย ซึ่งจากการค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมาและสิทธิบัตรพบว่ายังไม่มีการสร้างหน่วยสเกลเพื่อคาดการณ์การรับกำลังอัดของซีเมนต์ที่มีการเผาร่วมกับของเสียอุตสาหกรรมมาก่อน

3.1 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการทางคณิตศาสตร์ เรียกว่า การทดลองผสม (Mixture design) ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถใช้ออกแบบการทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมมาตร ทำการวิเคราะห์ข้อมูลสร้างเป็นสมการสำหรับการทำนายผล และแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลในรูปแบบของกราฟสามมิติหรือคอนทัวร์พล็อต (Contour plot) ทำให้ทราบจุดที่สูงที่สุดหรือต่ำสุดของข้อมูลในชุดการทดลองได้ โดยสามารถใช้โปรแกรมมินิแท็บ 15 (minitab 15) ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองด้วยวิธีการดังกล่าว ซึ่งรายละเอียดของวิธีการนี้แสดงในส่วนของทฤษฎี การออกแบบการทดลองแบบผสมในงานวิจัยนี้ใช้แบบ โครงตาข่ายซิมเพล็กซ์ (simplex lattice design) โดยกำหนดส่วนประกอบที่สนใจศึกษาเป็น 3 ส่วนซึ่งจะแทนด้วยตัวแปร (p) นั่นคือ โครเมียม แคลเซียม และสังกะสี ที่มีความเข้มข้นรวมกันเท่ากับร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก กำหนดช่วงในการทดสอบ 4 ช่วงแทนด้วยตัวแปร (m) ทำให้ได้ระดับในการทดลอง 5 ระดับ(m+1) หรือความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งสามชนิดที่ใช้ในการทดลองมี 5 ค่านั่นเอง

ในที่นี้จะได้โครงตาข่ายซิมเพล็กซ์ $\{p, m\} = \{3, 4\}$ และได้จำนวนสัดส่วนผสมในการทดสอบโดยคำนวณจากสูตร

$$N = \frac{(p+m-1)!}{m!(p-1)!}$$

N = จำนวนจุดในการออกแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์

p = จำนวนส่วนประกอบ

m = จำนวน lattice

จากเงื่อนไขที่กำหนดจะได้

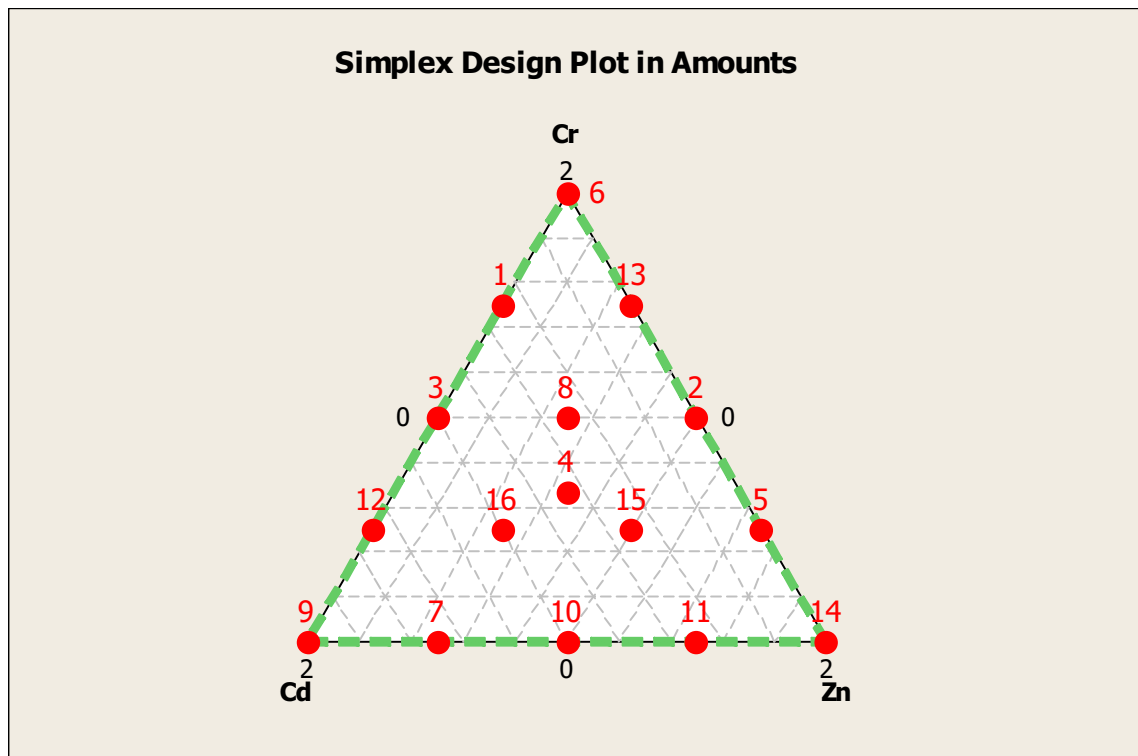
$$\text{จำนวนจุด} = \frac{(3+4-1)!}{4!(3-1)!} = 15 \text{ และรวมจุดศูนย์กลางอีก 1 จุดทำให้ได้จำนวนจุดทั้งหมด 16}$$

จุดในการทดลอง 1 ซ้ำซึ่งในแต่ละจุดมีสัดส่วนการผสมของโลหะหนักทั้งสามชนิดแสดงดังตารางที่ 3.1 แต่ในการทดลองจริงจะทำ 3 ซ้ำ ซึ่งจะได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 48 ครั้ง

ตารางที่ 3.1 แสดงสัดส่วนการผสมของโลหะหนัก โครเมียม แคดเมียม และสังกะสีในการทำการ
ทดลองแบบผสมโดยความเข้มข้นของโลหะหนักรวมกันเท่ากับ 2

ลำดับที่	สัดส่วนการผสมของโลหะหนัก โครเมียม แคดเมียม และสังกะสี		
	Cr	Cd	Zn
1	1.500	0.500	0.000
2	1.000	0.000	1.000
3	1.000	1.000	0.000
4	0.667	0.667	0.667
5	0.500	0.000	1.500
6	2.000	0.000	0.000
7	0.000	1.500	0.500
8	1.000	0.500	0.500
9	0.000	2.000	0.000
10	0.000	1.000	1.000
11	0.000	0.500	1.500
12	0.500	1.500	0.000
13	1.500	0.000	0.500
14	0.000	0.000	2.000
15	0.500	0.500	1.000
16	0.500	1.000	0.500

การกำหนดสัดส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.1 ใช้โปรแกรมมินิแทบในการออกแบบซึ่งตัว
โปรแกรมจะออกแบบให้สัดส่วนที่กำหนดเป็นแบบสมมาตรเพื่อจะใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง
ในลำดับถัดไปโดยใช้ โปรแกรมได้ ตำแหน่งจุดที่ทำการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงจุดที่ทำการทดสอบทั้ง 16 จุดในการออกแบบการทดลองแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์

การวิจัยในโครงการนี้ประกอบด้วยการทดลองทั้งสิ้น 3 ส่วน คือ การทดลองเพื่อหาการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ของโลหะหนักหลายชนิด การสร้างหน่วยสเกลการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ และการนำหน่วยสเกลไปใช้คาดการณ์การรับกำลังอัด โดยมีรายละเอียดของการทดลองในแต่ละส่วน ดังนี้

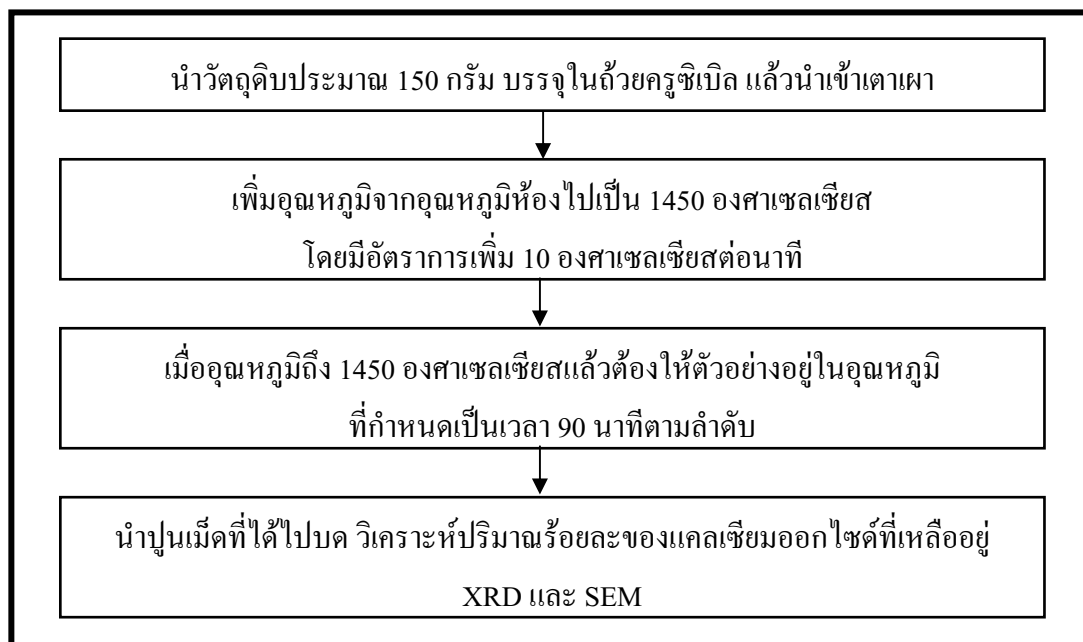
3.2 การทดลองเพื่อหาการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ของโลหะหนักหลาย

ชนิด

3.2.1 การเตรียมปูนเม็ด

การเตรียมปูนเม็ดในที่นี้จะดำเนินการโดยการเคียวสารโครเมียม แคลเซียม และสังกะสีในรูปของโลหะออกไซด์ลงไปในวัตถุดิบในการผลิตปูนเม็ด โดยสภาวะที่ใช้ในการเตรียมปูนเม็ดนั้นทำได้โดยการนำวัตถุดิบเผาที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 90 นาที โดยมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที หลังจากนั้นจะทิ้งไว้ให้เย็นตัวลง แล้วนำปูนเม็ดที่ได้ไปหล่อก้อนแข็งซีเมนต์ โดยใช้เวลาในการหล่อก้อนซีเมนต์ทั้งสิ้นเป็นเวลา 28 วันแล้วจึงนำมาทำการทดสอบหาการรับกำลังอัดของซีเมนต์

ขั้นตอนการเตรียมปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักผสมแสดงดังรูปที่ 3.2 ส่วนการเตรียมปูนเม็ดที่มีโลหะ-หนักผสมสองชนิดหรือสามชนิดแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 การเตรียมปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักผสม



รูปที่ 3.3 การเตรียมปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสม

3.2.2 การทดสอบลักษณะสมบัติของปูนเม็ดและซีเมนต์

ปูนเม็ดที่ได้ในขั้นตอนแรกนั้นจะนำมาทดสอบทางกายภาพ และซีเมนต์ที่ได้จะนำมาทดสอบลักษณะสมบัติ โดยปูนเม็ดที่ได้จะนำมาบดแล้วนำไปหาลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดที่เปลี่ยนไป ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer โดยหาผลของโลหะหนักต่อเฟสส่วนประกอบต่างๆของปูนเม็ด ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกตหรือ alite ไดแคลเซียมซิลิเกตหรือ belite ไตรแคลเซียม อลูมินेट หรือ aluminite และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์หรือ ferrite โดยเทียบกับลักษณะส่วนประกอบที่ได้จากปูนเม็ดของจริงที่ผลิตได้จากกระบวนการผลิตซีเมนต์

นอกจากนี้จะนำปูนเม็ดที่ได้มาวิเคราะห์หาค่า free lime เพื่อตรวจสอบปริมาณของ CaO ที่เหลืออยู่อีกด้วย โดยการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ (free lime) แสดงดังรูปที่ 3.4

3.2.3 การทดสอบหาค่ากำลังอัด (compressive strength) ของซีเมนต์

การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงผลของโลหะหนักผสมที่มีต่อกำลังอัดของซีเมนต์ โดยหล่อซีเมนต์เป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดมาตรฐาน 5 x 5 x 5 ซม.³ โดยดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-95 (ASTM Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars) โดยแรงอัดที่มากที่สุด ณ จุดที่มีการแตกของซีเมนต์จะถูกจดบันทึกไว้ และนำมาหาค่ากำลังอัดตามสมการ

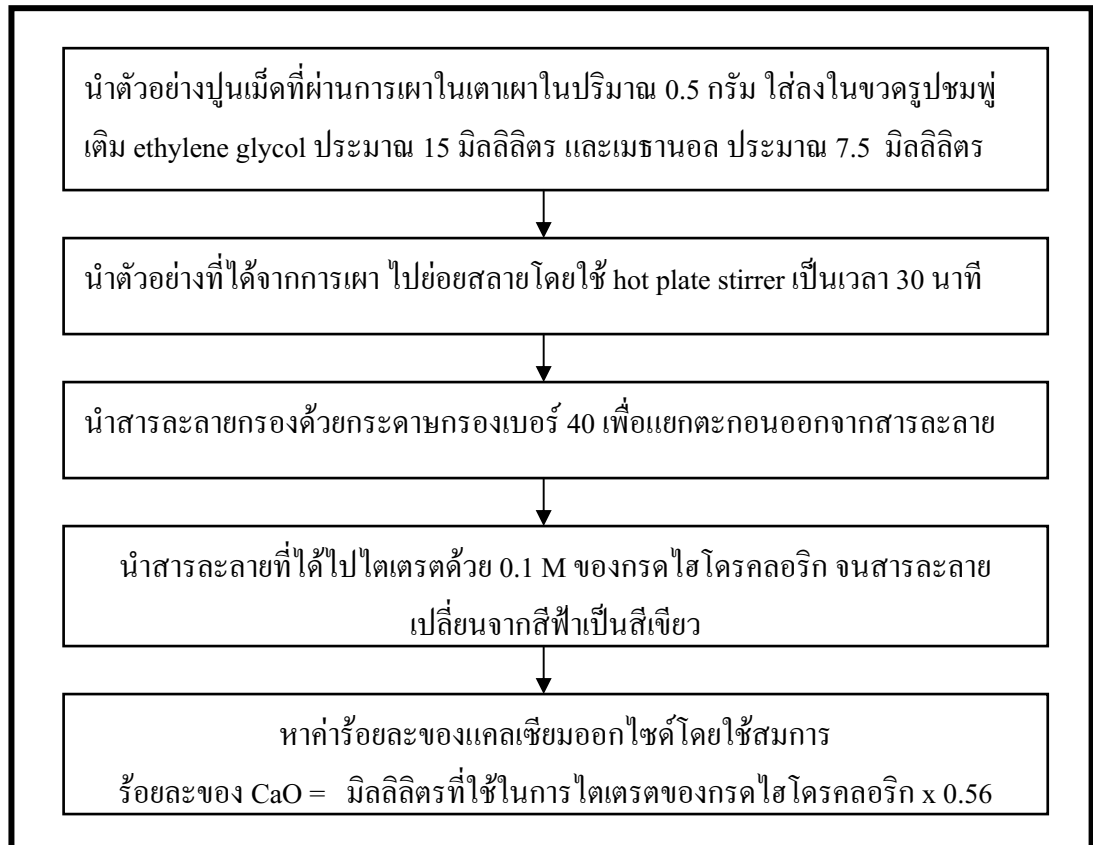
$$f_m = P/A$$

โดย f = compressive strength, P = total maximum load และ A = area of loaded surface

ในการทดลองนี้เป็นการหาผลของโลหะหนักผสมต่อกำลังอัดโดยก้อนซีเมนต์มอร์ตาร์จะทำการขึ้นโดยการบ่มตามระยะเวลา 28 วัน เพื่อดูกำลังอัดที่เปลี่ยนไปเมื่อมีโลหะหนักผสมอยู่ในซีเมนต์ รายละเอียดในการหาลำดับของซีเมนต์มอร์ตาร์มีดังนี้

1) การเตรียมแบบหล่อ

- ทาแบบหล่อด้วยน้ำมัน ให้ทั่วด้านในแบบหล่อต่างๆ
- ประกอบแบบหล่อ เมื่อประกอบเสร็จแล้ว เช็ดน้ำมันส่วนเกินที่ไหลเยิ้มบริเวณผิวด้านในตามขอบและก้นแบบหล่อทุกอัน
- วางแบบหล่อบนแผ่นวัสดุที่ได้ระนาบ และไม่ดูดซึมน้ำ ซึ่งทาน้ำมันไว้แล้ว
- ใช้ขี้ผึ้งหรือน้ำมันพาราฟิน 3 ส่วน ต่อ น้ำมันสน 5 ส่วน โดยน้ำหนัก ทาอุดแนวรอยต่อด้านนอกของแบบหล่อและแผ่นรอง



รูปที่ 3.4 การวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ (free lime)

2) การเตรียมซีเมนต์มอร์ตาร์และทดสอบการรับกำลังอัด

1. ส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 1 ส่วนต่อทรายมาตรฐาน 2.75 ส่วน โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.485

2. การผสมมอร์ตาร์ ให้ผสมด้วยเครื่องผสม (Mixer) โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ทำความสะอาดใบพาย หม้อผสม แล้วทำให้แห้งใส่ปูนซีเมนต์ที่คำนวณได้ลงในหม้อผสม
- ใส่ปูนซีเมนต์ที่ซั่งไว้แล้วลงในน้ำ แล้วเปิดเครื่องผสมด้วยความเร็วต่ำ (140 รอบ/นาที) เป็นเวลา 30 วินาที
- ในขณะที่เปิดเครื่องผสมความเร็วต่ำ ค่อยๆเติมทรายที่เตรียมไว้ลงในหม้อผสมอย่างช้าๆจนหมดภายในเวลา 30 วินาที
- ปิดเครื่องผสม แล้วปรับความเร็วในระดับความเร็วปานกลาง (285 รอบ/นาที) เป็นเวลา 30 วินาที
- ปิดเครื่องผสมเป็นเวลา 1 นาที 30 วินาที ระหว่างนี้ให้ปาดซีเมนต์ที่ติดอยู่ข้างๆหม้อผสม และใบพาย ให้มารวมกันอยู่ตรงกลางให้เสร็จภายในเวลา 15 วินาที แล้วนำฝาภาชนะมาปิดหม้อผสมไว้จนครบเวลาที่กำหนด
- เปิดเครื่องผสมในระดับความเร็วปานกลาง อีกเป็นเวลา 1 นาที เสร็จแล้วปิดเครื่อง

3. ให้เริ่มหล่อก้อนทดสอบภายในเวลาไม่เกิน 4 นาที นับตั้งแต่ผสมเสร็จ เอาซีเมนต์ใส่ลงในแบบหล่อโดยแบ่งเป็น 2 ชั้น
4. กระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้งชั้นละ 32 ครั้ง ในเวลา 10 วินาที โดยการกระทุ้งจะแบ่งขึ้นตัวอย่างเป็น 8 ส่วน กระทุ้งวนในแต่ละส่วนจนครบ 4 รอบ
5. ใช้เกรียงปาดหน้ามอร์ตาร์ส่วนที่เกินออกให้เสมอขอบเขตของแบบหล่อเพียง 1 ครั้ง ในลักษณะเหมือนการเลื่อย แล้วแต่งหน้ามอร์ตาร์ให้เรียบ
6. หลังจากหล่อขึ้นตัวอย่างเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้บ่มก้อนทดสอบทั้งแบบในห้องขึ้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยปล่อยให้ผิวหน้าด้านบนสัมผัสกับอากาศขึ้น แต่อย่าให้ถูกหยดน้ำเมื่อครบ 24 ชั่วโมง ถอดแบบออกนำไปบ่มในน้ำตามระยะเวลาที่ต้องการ
7. เช็ดผิวก้อนตัวอย่างทดสอบแต่ละก้อนให้แห้ง
8. วางก้อนตัวอย่างทดสอบไว้ในเครื่องกดให้อยู่ได้ศูนย์กลางเป็นกด ในระหว่างทำการทดสอบจะต้องไม่ทำการปรับแท่งกลไกควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบ

3.3 การสร้างหน่วยสเกลการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

การทดลองในส่วนนี้เป็นการนำกำลังอัดที่ได้ของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักเพียงชนิดเดียวได้แก่ โครเมียม หรือแคดเมียม หรือสังกะสี โลหะหนักผสมสองชนิด ได้แก่ โครเมียมและแคดเมียม โครเมียมและสังกะสี และแคดเมียมและสังกะสี โลหะหนักผสมสามชนิด ได้แก่ โครเมียม แคดเมียม และสังกะสี มาสร้างสมการเพื่อหาความสัมพันธ์ของการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์กับความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในปูนเม็ด โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ศึกษามีค่าไม่เกินร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นของโลหะหนักผสมสอง และสามชนิดมีค่าเท่ากับร้อยละ 2 โดยน้ำหนักเพื่อให้สอดคล้องกับความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีการปนเปื้อนในการผลิตปูนเม็ดที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ โดยสมการที่ได้ใช้โปรแกรมมินิแทบ 15 ในการตรวจสอบความถูกต้อง

3.3.1 การนำหน่วยสเกลไปใช้คาดการณ์การรับกำลังอัด

หลังจากที่มีการสร้างหน่วยสเกลสำหรับการใช้โลหะหนักผสมทั้งสามชนิด คือ โครเมียม แคดเมียม และสังกะสี แล้ว งานส่วนที่นี้จะเป็นการนำโลหะหนักผสมของสารทั้งสามในอัตราส่วนความเข้มข้นอื่นๆที่ความเข้มข้นรวมกันเท่ากับร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มาหาค่าการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ เพื่อนำมาใช้ในการทดสอบความถูกต้องของหน่วยสเกลที่สร้างขึ้น

บทที่ 4 ผลการทดลอง/วิจัย

4.1 การเปรียบเทียบลักษณะปูนเม็ดที่ได้จากการสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการและปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิต

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สภาวะที่เหมาะสมในการเผาปูนเม็ดในห้องปฏิบัติการจากรายงานการศึกษาการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์ที่ใช้กากของเสียอุตสาหกรรมในกระบวนการผลิต[1] โดยรายงานว่าลักษณะของปูนเม็ดที่เผาในห้องปฏิบัติการโดยใช้อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที จะมีลักษณะเหมือนกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิต การทดลองนี้ได้นำข้อมูลในส่วนนี้มาใช้ในการเผาปูนเม็ดและได้เปรียบเทียบลักษณะของปูนเม็ดที่ได้จากการสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการและปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตเพื่อนำข้อมูลของปูนเม็ดที่สังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเป็นตัวแทนของข้อมูลจากกระบวนการผลิต ซึ่งประกอบด้วยการหาค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM โดยผลการทดลองแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

ผลของการหาค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการจากการทดลอง 3 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4.1

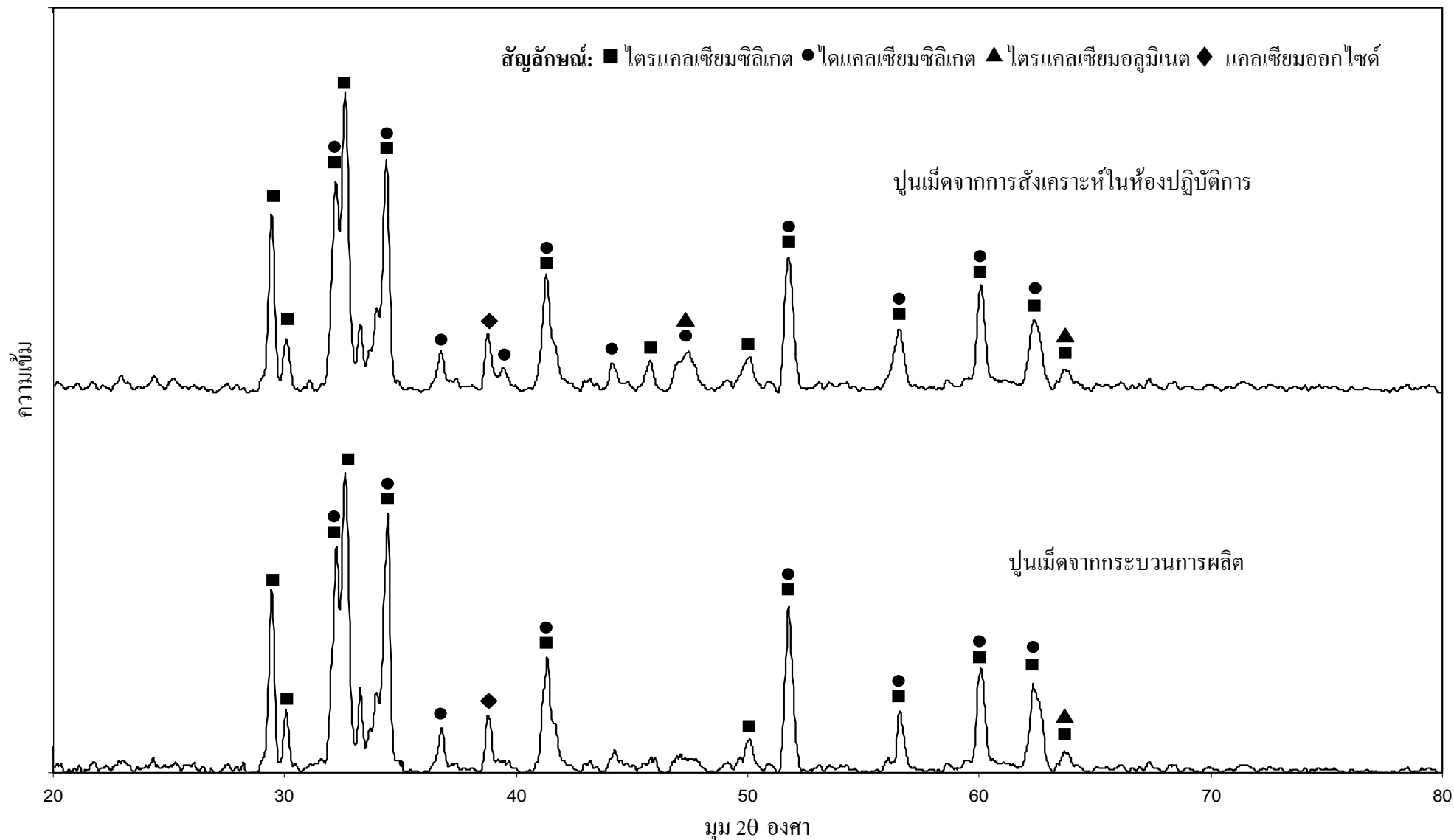
ตารางที่ 4.1 การหาค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ ของปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการ

การเผาปูนเม็ด ครั้งที่	ร้อยละ free lime ตัวอย่างที่ 1	ร้อยละ free lime ตัวอย่างที่ 2	ร้อยละ free lime ตัวอย่างที่ 3	ร้อยละ free lime เฉลี่ย
1	1.147	1.148	1.149	1.15
2	0.9	1	1.1	1
3	1.12	1.14	1.1	1.12
				เฉลี่ย = 1.092

หมายเหตุ : ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ ของปูนเม็ดที่ต้องการอยู่ในช่วงร้อยละ 1-1.5

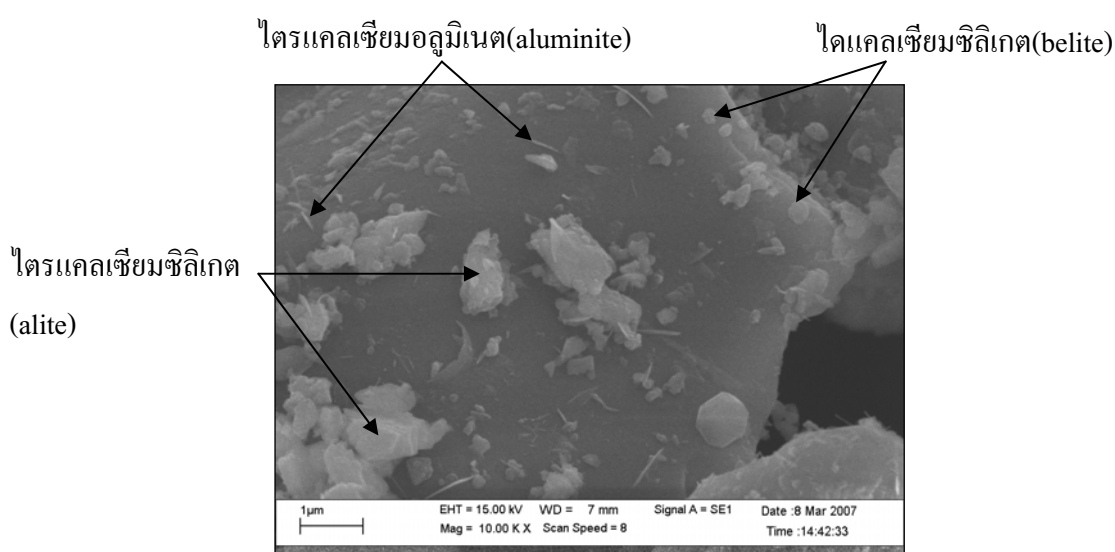
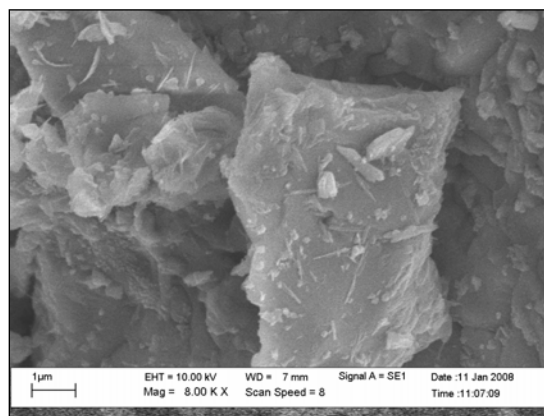
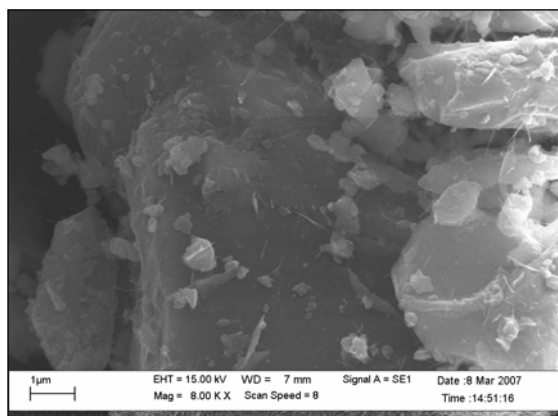
การวิเคราะห์หาค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดแสดงให้เห็นถึงปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาและไม่เปลี่ยนรูปไปเป็นองค์ประกอบหลักของปูนเม็ด ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมอลูมิเนต และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์ซึ่งเป็นส่วนประกอบของซีเมนต์ โดยผลการทดลองพบว่า การสังเคราะห์ปูนเม็ดที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที ให้ผลของค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดเท่ากับ 1.09 ซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงร้อยละ 1-1.5 ซึ่งเป็นช่วงของร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตจริง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตจริงที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.05 พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกัน ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือจึงบ่งบอกได้ว่าปูนเม็ดที่สังเคราะห์จากห้องปฏิบัติการมีลักษณะใกล้เคียงกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิต

ในส่วนของการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดเพื่อเปรียบเทียบส่วนประกอบหลักของปูนเม็ดที่ปรากฏในโครงสร้างของปูนเม็ดที่สังเคราะห์จากห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตโดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer ในการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างที่เกิดขึ้น เพื่อทำการเปรียบเทียบตำแหน่งที่เกิดและความสูงของพีคส่วนประกอบหลัก ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต และ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต โดยผลการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตกับปูนเม็ดที่ได้จากการสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการแสดงดังรูปที่ 1 หากพิจารณาค่าตำแหน่งของส่วนประกอบหลักที่เกิดขึ้นของปูนเม็ดทั้ง 2 แหล่ง ซึ่งได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต และ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต พบว่าส่วนประกอบหลักเกิดที่ตำแหน่งตรงกัน และเมื่อพิจารณาในเชิงความสูงของพีคส่วนประกอบหลักของปูนเม็ดที่ได้จากการสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเทียบกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิต ซึ่งแสดงโดยความเข้มในภาพรวมของกราฟ XRD จะพบว่าความสูงของโครงสร้างของปูนเม็ดทั้งในส่วน of ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต และ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของป่านี้นำที่ได้จากกระบวนการผลิตและป่านี้นำที่ได้จากการสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพโดยทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง Scanning-Electron Microscopy (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะของพื้นผิวของปูนเม็ดเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่ได้จากการสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตแสดงดังรูปที่ 4.2 จากรูปจะเห็นได้ชัดเจนว่าลักษณะของเฟสที่เกิดขึ้นที่ได้จากการสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเทียบกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตมีลักษณะมีลักษณะใกล้เคียงกันมาก และเมื่อการพิจารณาลักษณะของเฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้นในปูนเม็ดจะพบลักษณะโครงสร้างของเฟสปูนเม็ดดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งมีลักษณะของเฟสต่างๆ ดังนี้ ไตรแคลเซียมซิลิเกต จะมีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยมซึ่งเป็นเฟสที่พบมากที่สุดมีทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็ก ไดแคลเซียมซิลิเกต จะมีลักษณะกลมมนเป็นเฟสที่พบรองลงมาจากไตรแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมอลูมิเนต มีลักษณะเป็นเกล็ดยาว มักแทรกอยู่ทั่วไปตามเฟสปูนเม็ด



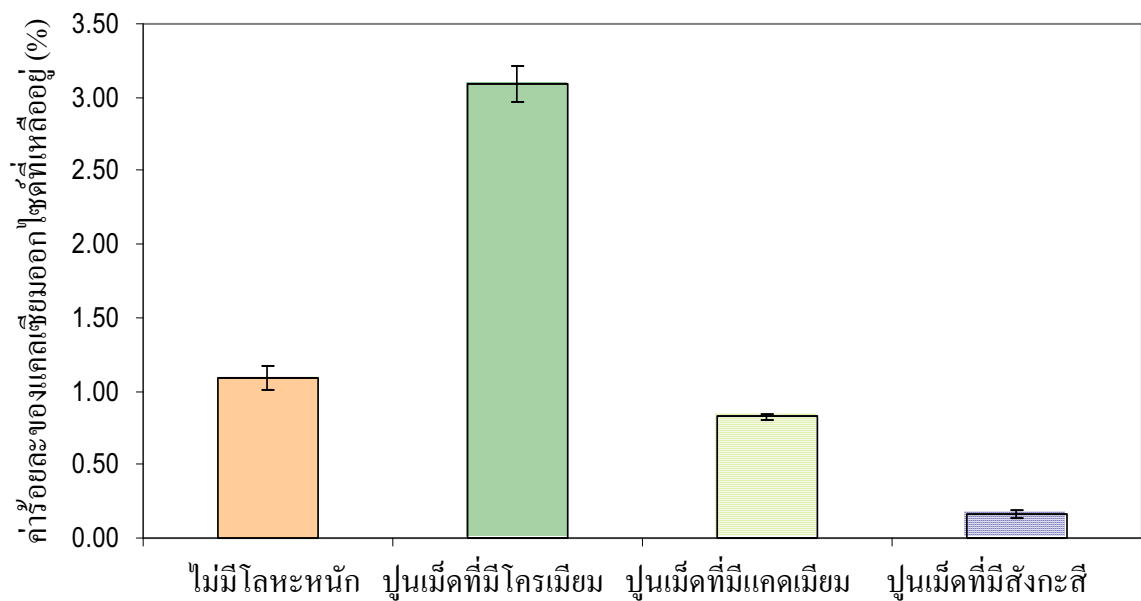
จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าสถานะที่ใช้ในการสังเคราะห์ปูนเม็ดคือ การให้อุณหภูมิปูนเม็ดที่ 1450 องศาเซลเซียสโดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสภายในเวลา 1 นาที และเผาเป็นเวลานาน 90 นาที จากนั้นปล่อยให้ปูนเม็ดเย็นตัว สามารถนำมาใช้ในการเตรียมปูนเม็ดที่มีลักษณะใกล้เคียงกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตได้ และปูนเม็ดที่ทำการสังเคราะห์นี้จะนำไปใช้ในการศึกษาผลการทดสอบกำลังอัด โดยคาดว่าจะให้ผลที่เทียบเคียงกับผลที่เกิดขึ้นจริงเมื่อมีการนำโลหะหนักไปเผาพร้อมกับวัตถุดิบในกระบวนการผลิตซีเมนต์โดยใช้เตาจริงที่ใช้ในโรงงานปูนซีเมนต์ตามชนิดและปริมาณที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

4.2 ลักษณะของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักปนเปื้อน

4.2.1 ปูนเม็ดที่มีโลหะหนักเพียงชนิดเดียวเป็นสารปนเปื้อน

ในการทดลองนี้ทำการศึกษาผลของโลหะหนักแต่ละชนิดที่มีต่อลักษณะสมบัติของปูนเม็ด โดยทำการศึกษา ร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ ลักษณะพื้นผิว ลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ด ผลการศึกษาแสดงดังนี้

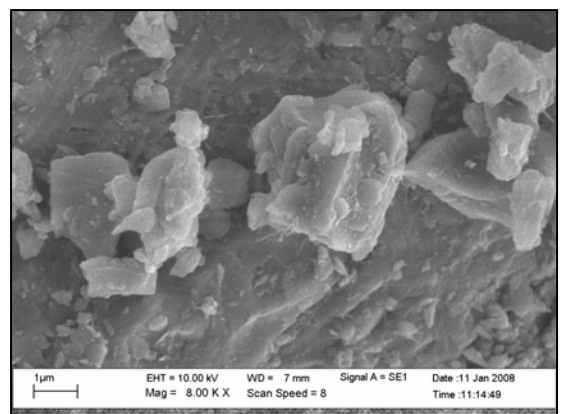
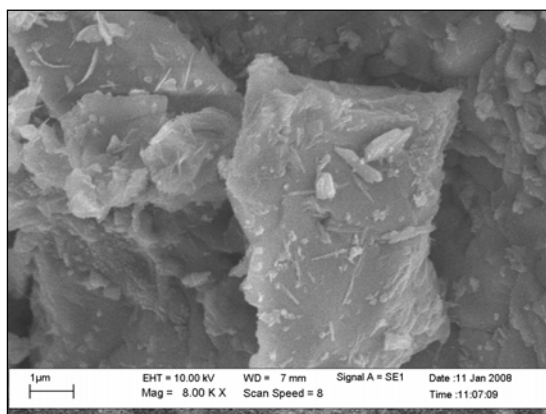
ในงานวิจัยนี้ผลของการทดสอบ ร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่มีโลหะหนัก โครเมียม แคดเมียม และสังกะสี อย่างใดอย่างหนึ่ง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยพบว่าค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่มีโครเมียม แคดเมียม และสังกะสี มีค่า 3.091, 0.829 และ 0.162 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปูนเม็ดที่มีโครเมียม อาจมีผลต่อการขัดขวางการนำแคลเซียมออกไซด์ไปใช้ในการเปลี่ยนรูปเป็นไตรแคลเซียม-ซลิเกตหรือไดแคลเซียมซลิเกต ส่วนปูนเม็ดที่มีแคดเมียมหรือสังกะสี แคลเซียมออกไซด์ถูกนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยามากกว่าปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า แคลเซียมออกไซด์ถูกเปลี่ยนไปเป็นไตรแคลเซียมซลิเกตหรือไดแคลเซียมซลิเกต หรืออาจจะไปทำปฏิกิริยากับสารอื่น



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าร้อยละของแกละเชื่อมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และปูนเม็ดที่มีโลหะหนักแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

4.2.1.1 ปูนเม็ดที่มีโครเมียมเป็นสารปนเปื้อน

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง SEM ของปูนเม็ดที่มีโครเมียมเป็นสารปนเปื้อน เปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่มีโครเมียมมีลักษณะใกล้เคียงกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครเมียมไม่ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ด



(ก) ปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก

(ข) ปูนเม็ดที่มีโครเมียมเริ่มต้น 2% โดยน้ำหนัก

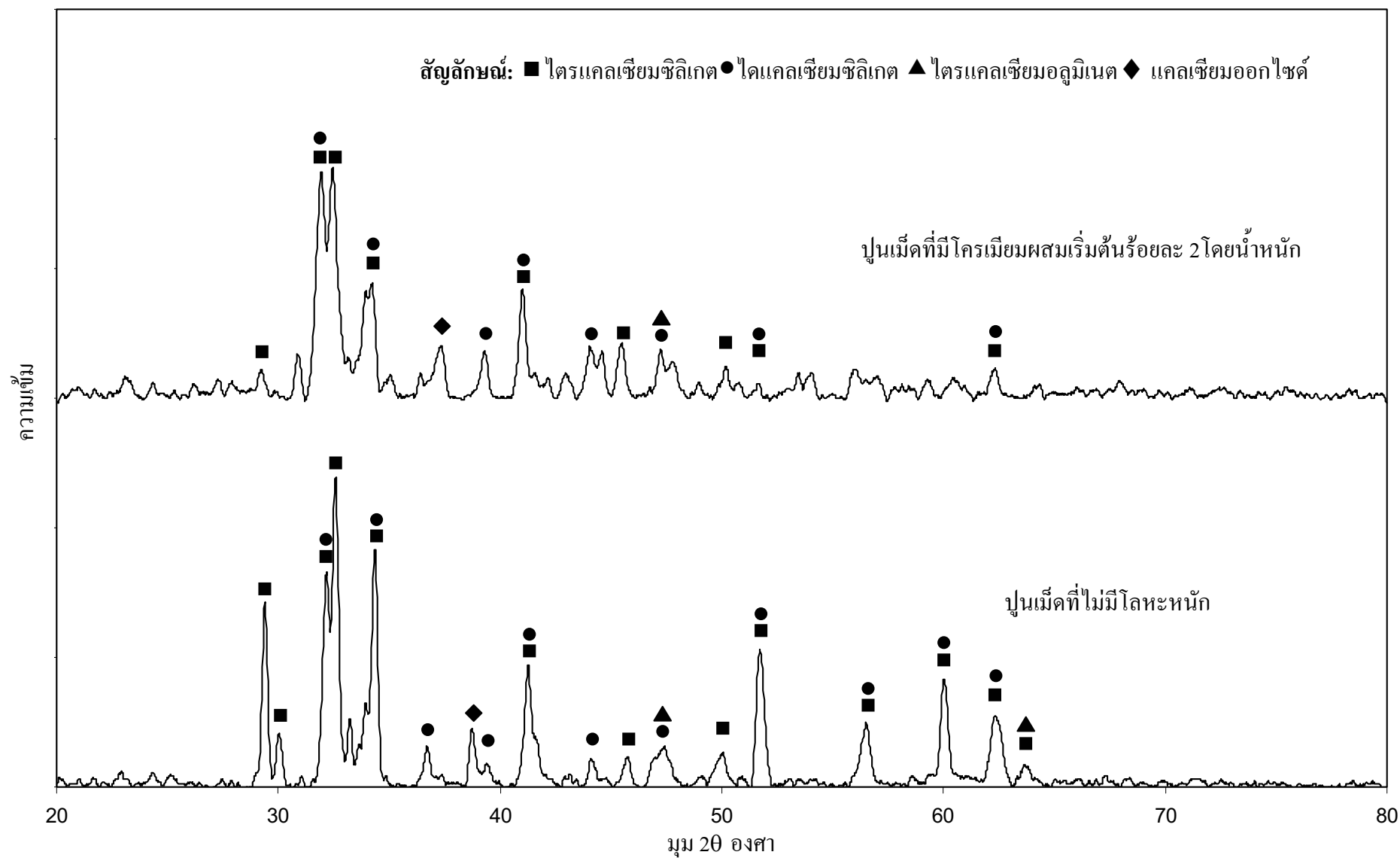
รูปที่ 4.5 แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM เมื่อ

(ก) ปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก

(ข) ปูนเม็ดที่มีโครเมียม 2% โดยน้ำหนัก

การศึกษาลักษณะโครงสร้าง เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักกับปูนเม็ดที่มีโครเมียม ปูนเปื้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ซึ่งตำแหน่งของโครงสร้างหลักของปูนเม็ดที่พิจารณา ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต และไตรแคลเซียมอลูมิเนต

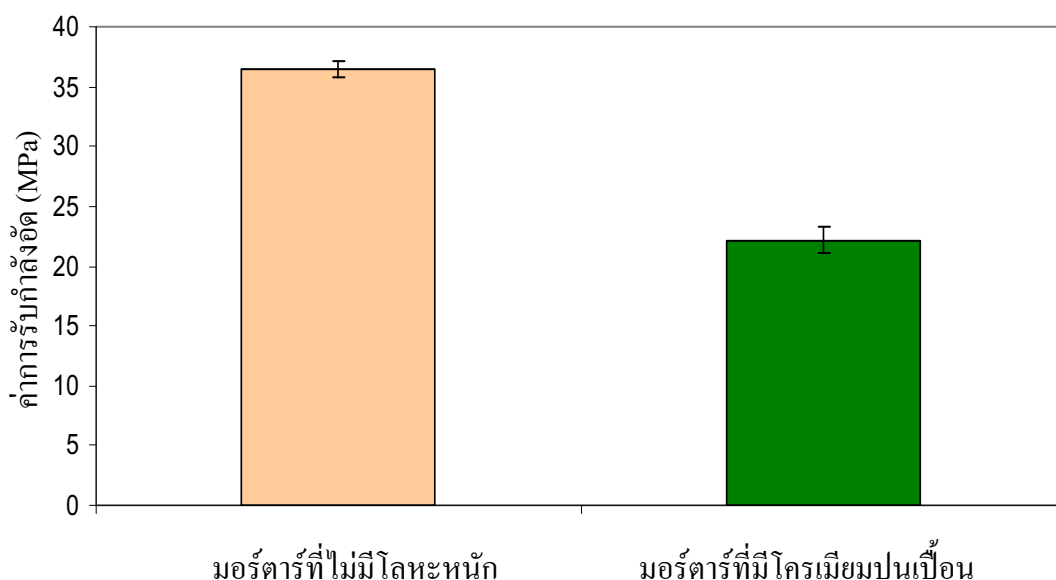
จากการวิเคราะห์พบว่าโครงสร้างของปูนเม็ดที่ได้จากการผสมโครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มี ตำแหน่งของโครงสร้างหลักของปูนเม็ดปรากฏในตำแหน่งเดียวกันกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และเมื่อพิจารณาความสูงของพีคของปูนเม็ดที่ได้จากการผสมโครเมียมเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักซึ่งแสดงโดยความเข้มในภาพรวมของกราฟ XRD พบว่าความสูงของพีคองค์ประกอบหลักบางตำแหน่งของโครงสร้างของปูนเม็ดทั้งในส่วนของ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต และไตรแคลเซียมอลูมิเนต ในปูนเม็ดที่ได้จากการผสมโครเมียมร้อยละ 2 โดยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลง ซึ่งลักษณะที่เกิดขึ้นสืบเนื่องมาจากการที่โครเมียมความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักเข้าไปทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบหลักได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกตของปูนเม็ดทำให้ความสูงของพีคองค์ประกอบหลักมีการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว



รูปที่ 4.6 โครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และปูนเม็ดที่มีโครเมียมปนเปื้อน จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

ผลของโครเมียมที่มีต่อค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์

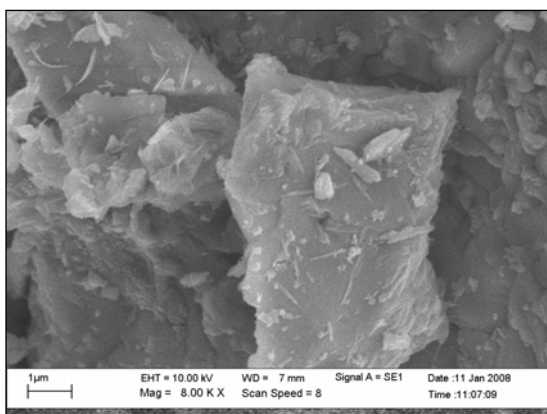
ในการศึกษาค่าการรับกำลังอัดที่ระยะเวลา 28 วันเปรียบเทียบระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนักและมอร์ตาร์ที่มีโครเมียมความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีโครเมียมปนเปื้อน และมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนัก มีค่า 22.19 และ 36.43 MPa ตามลำดับซึ่งค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีโครเมียมปนเปื้อนมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนัก 39.09% แสดงให้เห็นว่าปูนเม็ดที่มีโครเมียมเป็นสารปนเปื้อนส่งผลต่อค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ เนื่องจากปูนเม็ดที่มีโครเมียมปนเปื้อนทำให้องค์ประกอบหลัก ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกตลดลง



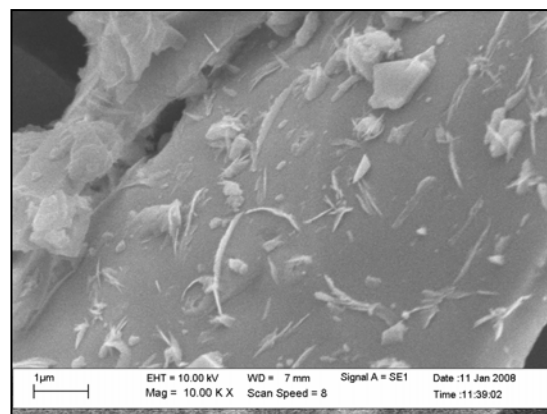
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนักกับมอร์ตาร์ที่มีโครเมียมความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

4.2.1.2 ปูนเม็ดที่มีแคลเซียมเป็นสารปนเปื้อน

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว ของปูนเม็ดที่มีแคลเซียมเป็นสารปนเปื้อนเปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่มีแคลเซียมปนเปื้อนมีลักษณะแตกต่างจากปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก โดยพบว่ามีลักษณะเป็นเส้นเพิ่มขึ้น แสดงว่าปูนเม็ดที่มีแคลเซียมปนเปื้อนส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ด



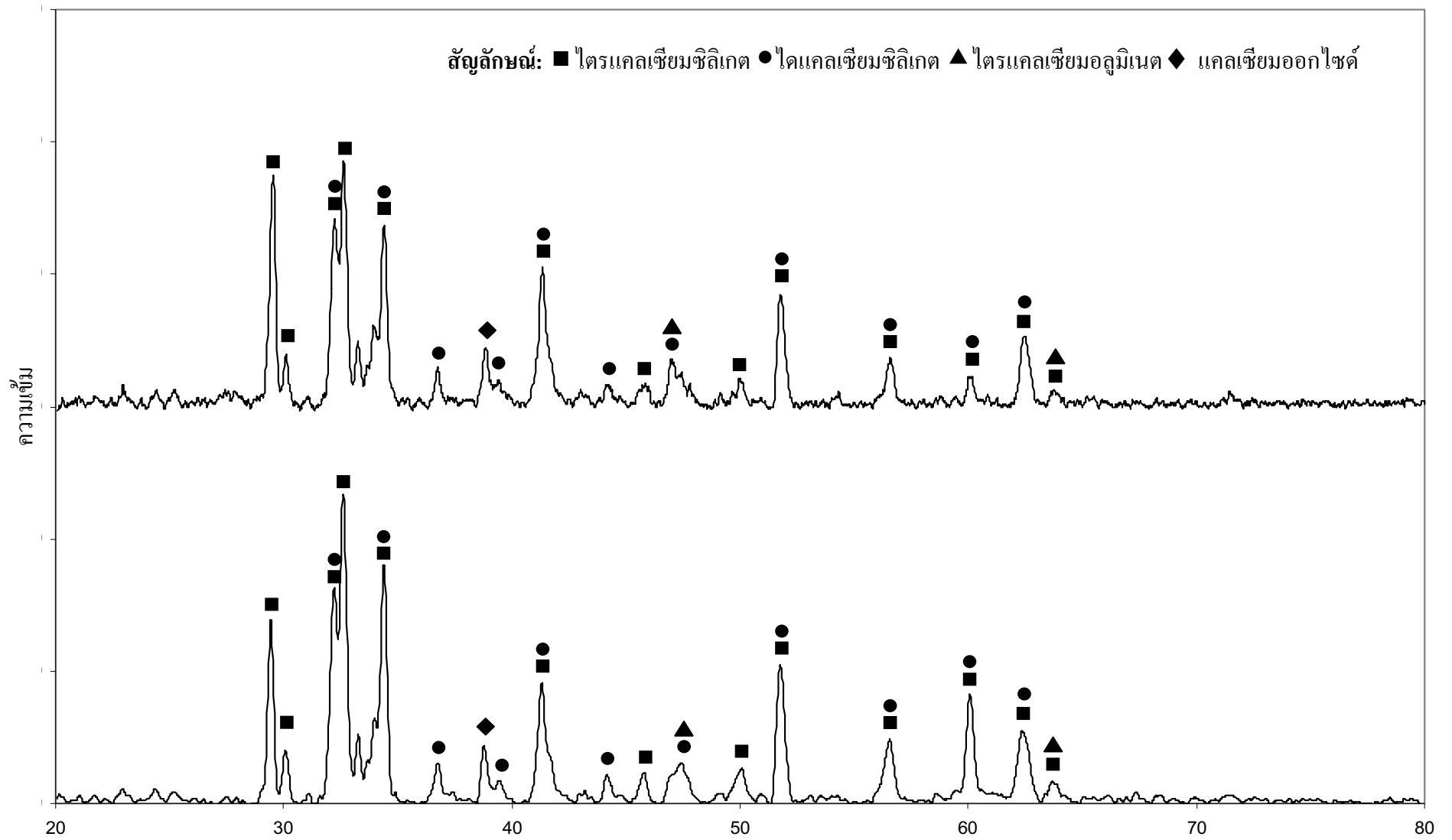
(ก) ปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก



(ข) ปูนเม็ดที่มีแคดเมียมเริ่มต้น 2% โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักกับปูนเม็ดที่มีแคดเมียมปนเปื้อนจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM

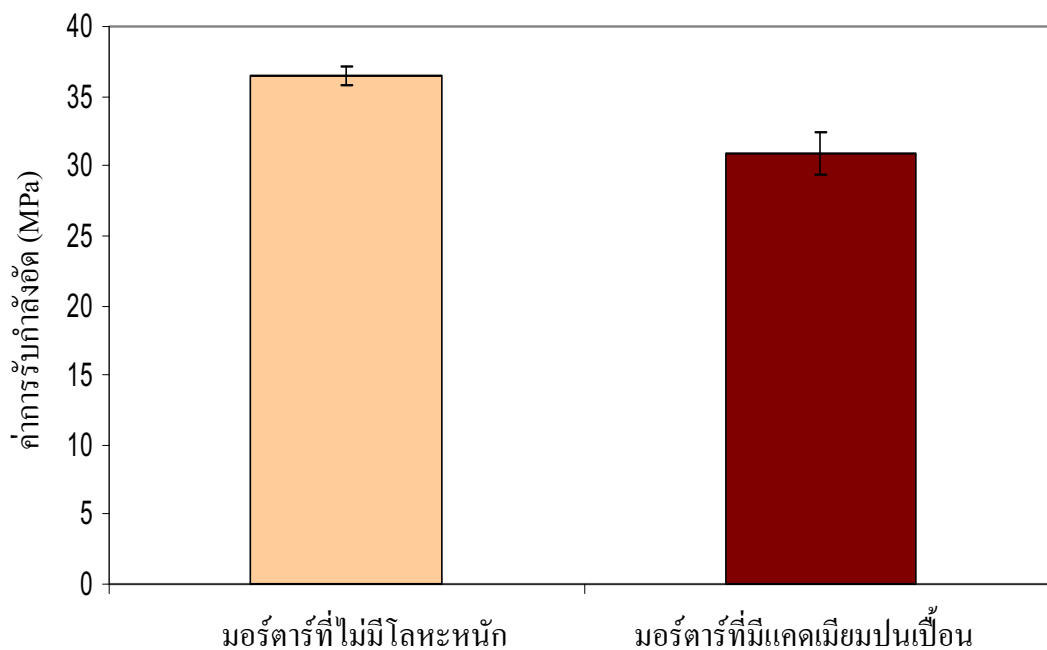
เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักเปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่มีแคดเมียมผสมอยู่ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าโครงสร้างของปูนเม็ดที่มีแคดเมียม มีตำแหน่งของโครงสร้างหลัก ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต และไตรแคลเซียมอลูมิเนตปรากฏในตำแหน่งเดียวกันกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และความสูงของพีคของโครงสร้างซึ่งแสดงโดยความเข้มในภาพรวมของกราฟ XRD พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างไม่สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างปูนเม็ดที่มีแคดเมียมปนเปื้อนและปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักได้



รูปที่ 4.9 โครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และปูนเม็ดที่มีแคลเซียมผสม จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

ผลของแคดเมียมที่มีต่อค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์

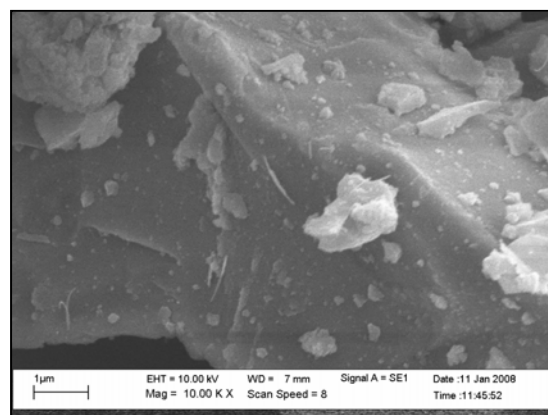
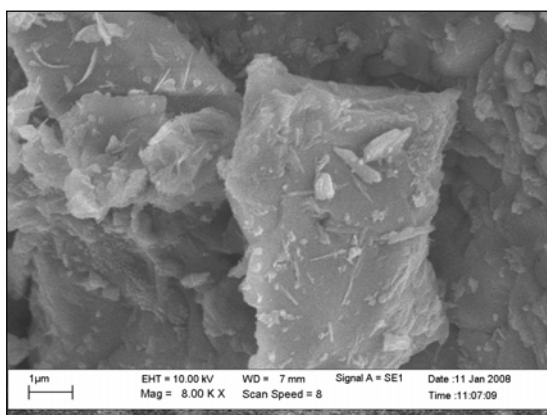
การวิเคราะห์ค่าการรับกำลังอัดโดยเปรียบเทียบระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนักกับมอร์ตาร์ที่มีแคดเมียมเป็นสารปนเปื้อนดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนัก และมอร์ตาร์ที่มีแคดเมียมเป็นสารปนเปื้อนมีค่า 36.43 และ 30.85 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีแคดเมียมเป็นสารปนเปื้อนมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนัก 15.32%



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนักกับมอร์ตาร์ที่มีแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

4.2.1.3 ปูนเม็ดที่มีสังกะสีเป็นสารปนเปื้อน

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว ของปูนเม็ดที่มีสังกะสีเป็นสารปนเปื้อนเปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่มีสังกะสีเป็นสารปนเปื้อนมีลักษณะไม่แตกต่างจากปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก แสดงว่าปูนเม็ดที่มีสังกะสีปนเปื้อนไม่ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ด

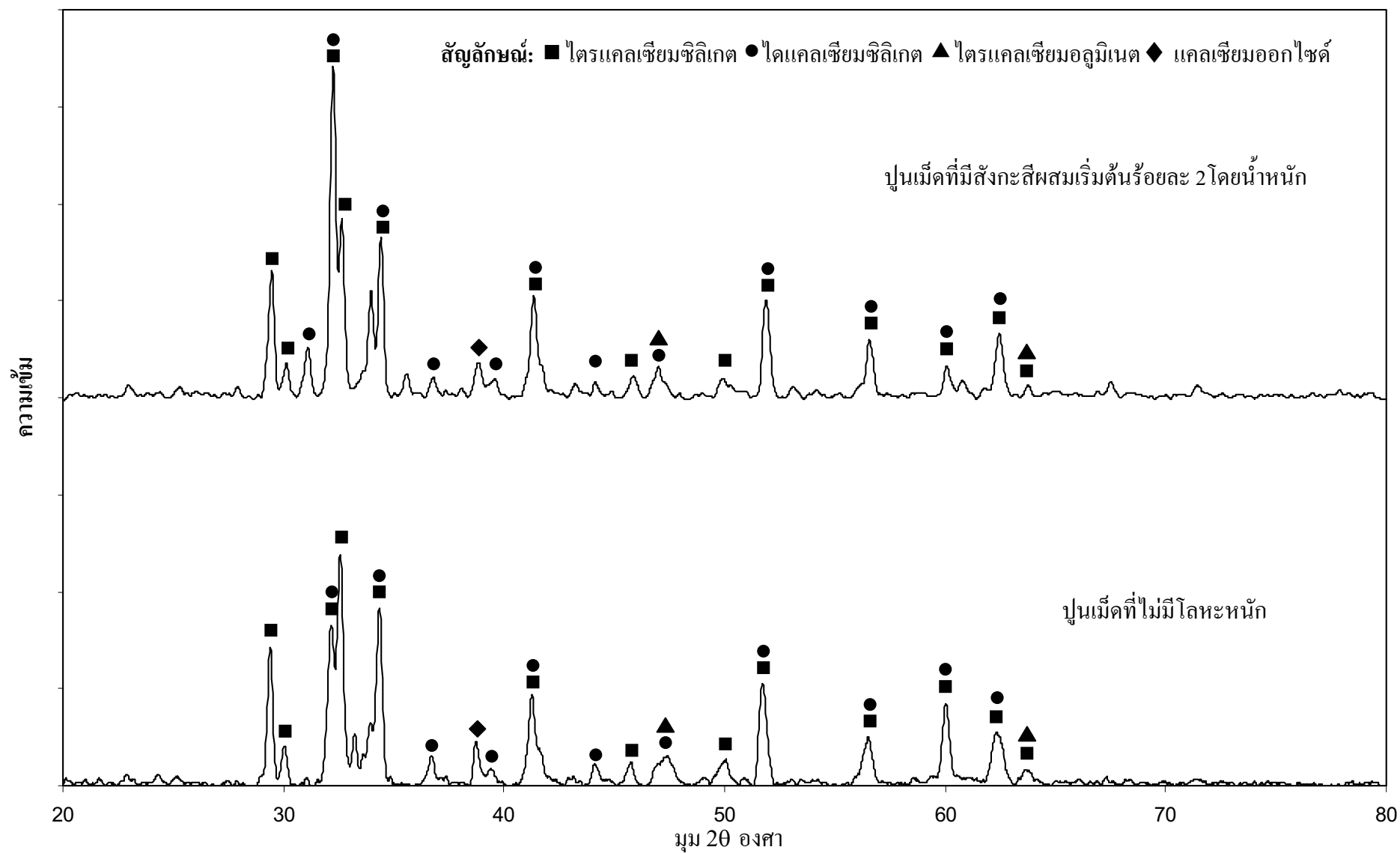


(ก) ปูนเม็ดยที่ไม่มีโลหะหนัก

(ง) ปูนเม็ดยที่มีสังกะสีเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดยที่ไม่มีโลหะหนักกับปูนเม็ดยที่มีสังกะสีปนเปื้อนจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM

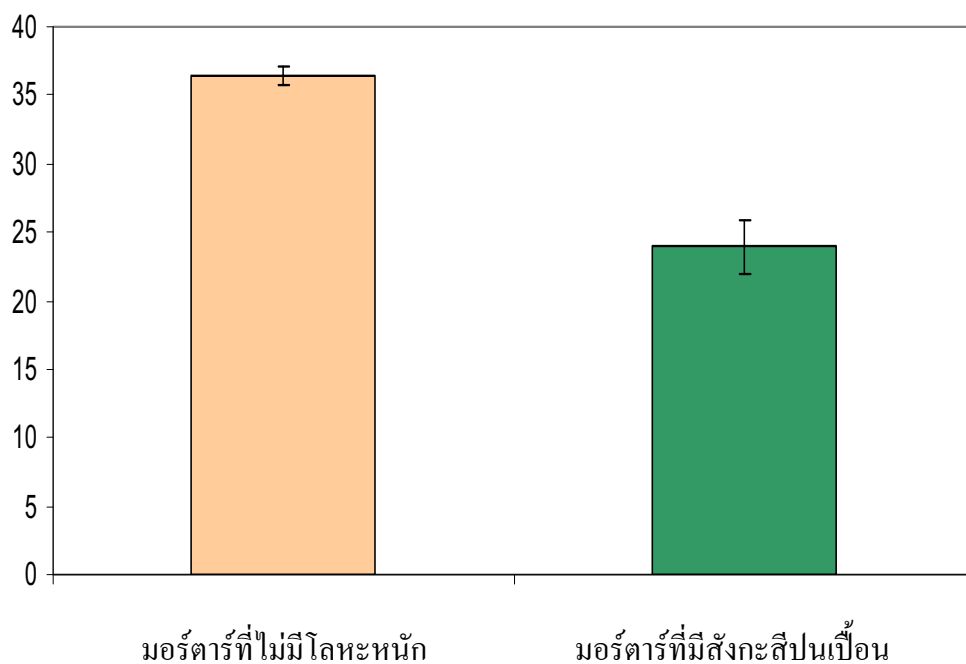
การเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดยที่ไม่มีโลหะหนัก และปูนเม็ดยที่มีสังกะสีผสมอยู่ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าโครงสร้างของปูนเม็ดยที่มีสังกะสี มีตำแหน่งของโครงสร้างหลัก ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต และไตรแคลเซียม-อลูมิเนต ปรากฏในตำแหน่งเดียวกันกับปูนเม็ดยที่ไม่มีโลหะหนัก และเมื่อพิจารณาความเข้มโดยภาพรวมพบว่า มีลักษณะใกล้เคียงกับปูนเม็ดยที่ไม่มีโลหะหนัก แสดงให้เห็นว่าไม่สามารถสังเกตความแตกต่างระหว่างปูนเม็ดยที่มีสังกะสีปนเปื้อนและปูนเม็ดยที่ไม่มีโลหะหนัก จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ได้



รูปที่ 4.12 โครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และปูนเม็ดที่มีแคลเซียมผสม จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

ผลของสังกะสีที่มี ต่อค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์

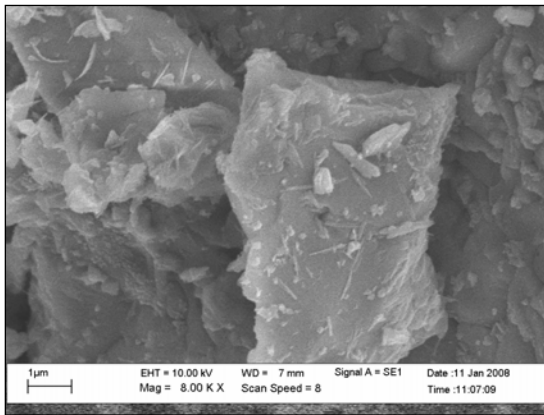
การวิเคราะห์ค่าการรับกำลังอัดโดยเปรียบเทียบระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนักกับมอร์ตาร์ที่มีสังกะสีเป็นสารปนเปื้อนดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนัก และมอร์ตาร์ที่มีสังกะสีเป็นสารปนเปื้อนมีค่า 36.43 และ 23.92 ตามลำดับซึ่งแสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์ที่มีสังกะสีเป็นสารปนเปื้อนส่งผลต่อการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์โดยทำให้ค่าการรับกำลังอัดลดลง 34.34%



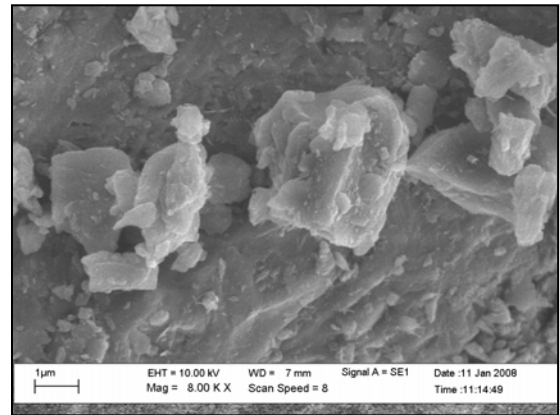
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนักกับมอร์ตาร์ที่มี

4.2.1.4 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของปูนเม็ดเมื่อมีโลหะหนักปนเปื้อนเพียงชนิดเดียว

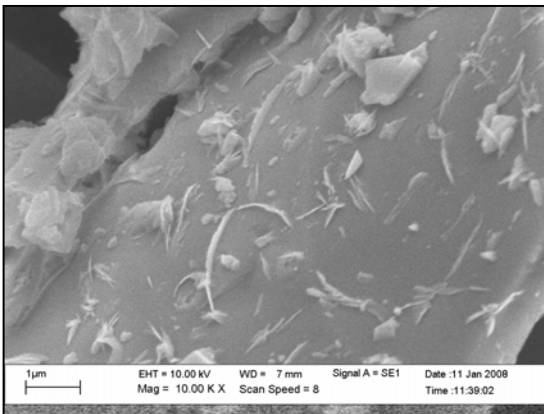
การเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักกับปูนเม็ดที่มีโลหะหนักปนเปื้อนเพียงชนิดเดียวดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าปูนเม็ดที่มีแคลเซียมปนเปื้อนส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดมากที่สุด โดยมีเฟสใหม่ลักษณะเป็นเส้นเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด



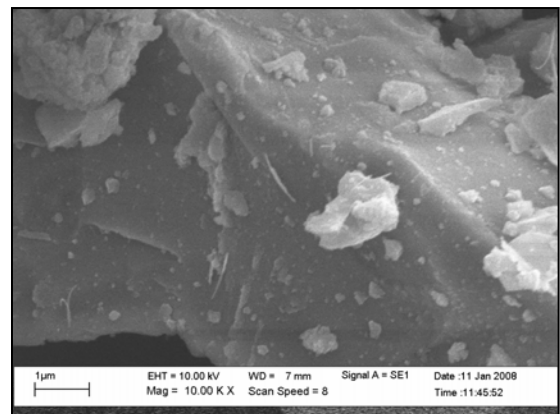
(ก) ปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก



(ข) ปูนเม็ดที่มีโครเมียมเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก



(ค) ปูนเม็ดที่มีแคดเมียมเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

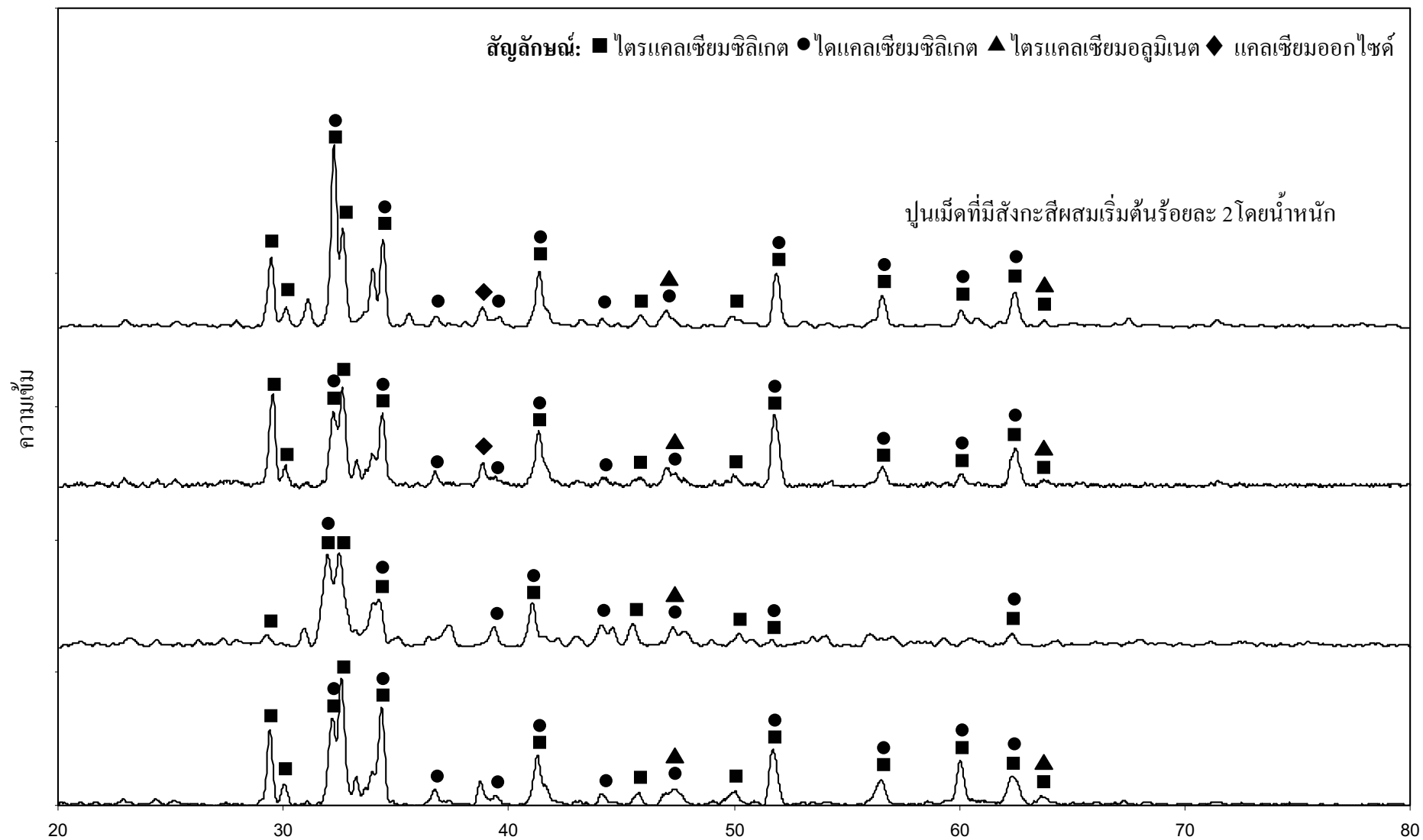


(ง) ปูนเม็ดที่มีสังกะสีเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

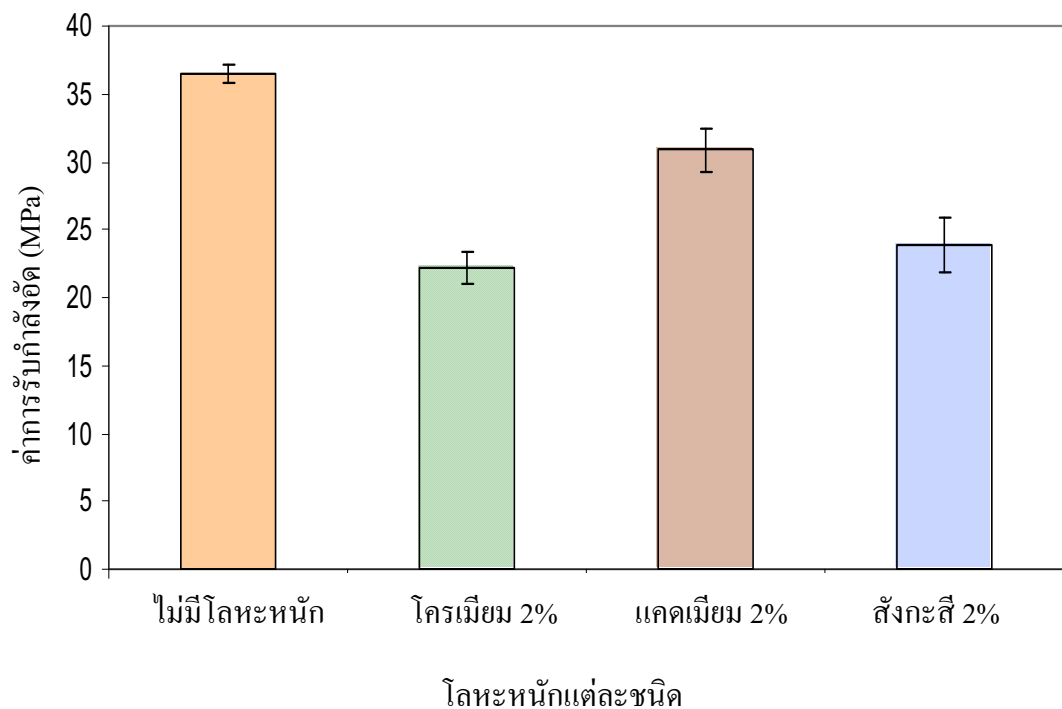
รูปที่ 4.14 แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และปูนเม็ดที่มีโลหะหนักชนิดเดียวเป็นสารปนเปื้อนจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องSEM

ผลของโลหะหนักชนิดเดียวที่มี ต่อค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์

สำหรับผลของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักที่มีต่อการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนัก โดยทำการศึกษาค่าการรับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน แสดงดังรูปที่ 4.15 โดยจากรูปพบว่าค่ากำลังอัดมีของมอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักแต่ละชนิดผสมค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างโดยพบว่าเฟสของไตรแคลเซียมซิลิเกตลดลงเมื่อปูนเม็ดมีโครเมียมหรือแคดเมียมเป็นสารปนเปื้อน โดยปูนเม็ดที่มีโครเมียมปนเปื้อนทำให้ค่าการรับกำลังอัดลดลงประมาณ 39.09% ปูนเม็ดที่มีแคดเมียมปนเปื้อนทำให้ค่าการรับกำลังอัดลดลงประมาณ 15.32% และปูนเม็ดที่มีสังกะสีปนเปื้อน ค่าการรับกำลังอัดลดลงประมาณ 34.34%



รูปที่ 4.15 โครงสร้างของป้อนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และป้อนเม็ดที่มีโลหะหนักผสม ชนิดเดียว จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

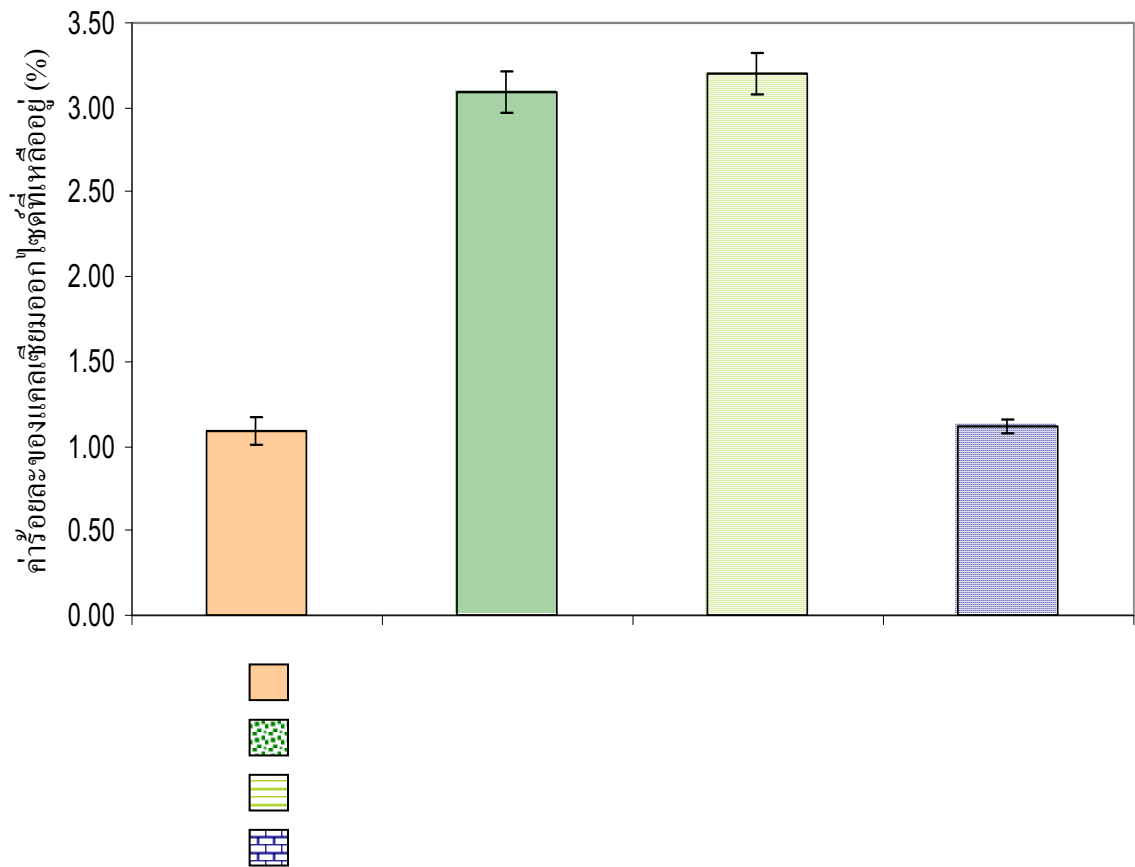


รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและปูนเม็ดที่มีโลหะหนักแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยนำหนักกับค่าการรับกำลังอัด

4.2.2 ปูนเม็ดที่มีโลหะหนักปนเปื้อนสองชนิด

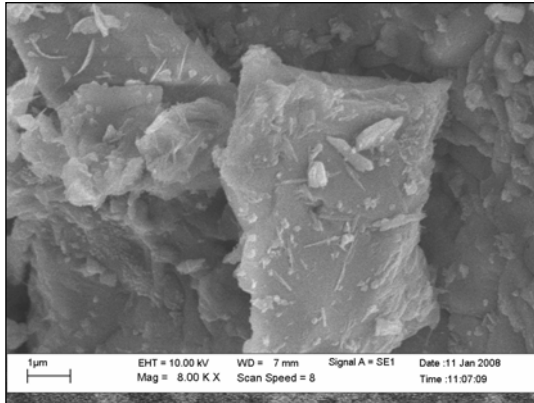
4.2.2.1 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของปูนเม็ดเมื่อไม่มีโลหะหนัก มีโลหะหนักชนิดเดียว และมีโลหะหนักสองชนิดปนเปื้อน

ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่มีโครเมียมเป็นสารปนเปื้อนหลักดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อปูนเม็ดมีโครเมียมผสมเพียงชนิดเดียว ปูนเม็ดที่มีโครเมียมผสมกับแคดเมียม และปูนเม็ดมีโครเมียมผสมกับสังกะสี ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่มีค่า 3.091, 3.203 และ 1.118 ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่าสูงกว่าปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก ซึ่งอาจส่งผลให้เฟสของไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกตลดลง เนื่องจากโลหะหนักเข้าไปขัดขวางการเปลี่ยนแคลเซียมออกไซด์ไปอยู่ในรูปของเฟสดังกล่าว และจากการผสมกันของโลหะหนักสองชนิดแสดงให้เห็นว่าโครเมียมมีแนวโน้มส่งผลต่อค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่มากที่สุด

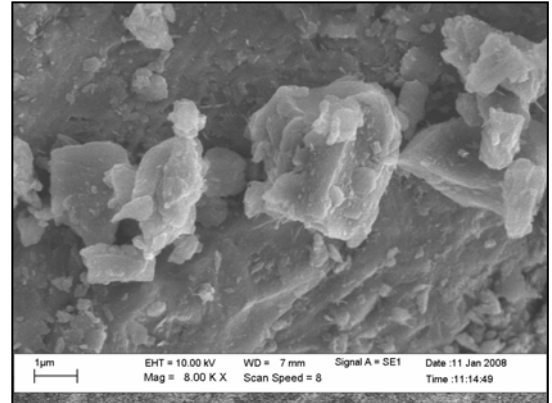


รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปุนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก กับ ปุนเม็ดที่มีโลหะหนักชนิดเดียว และปุนเม็ดที่มีโลหะหนักสองชนิด

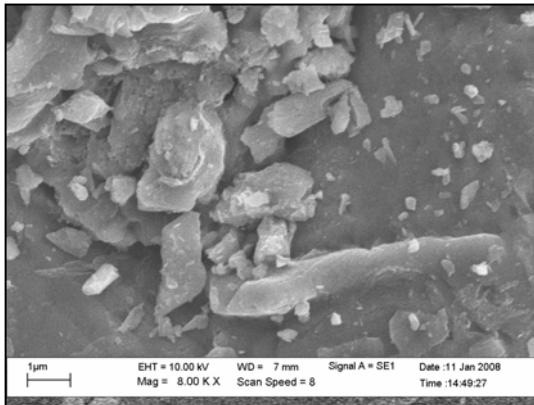
การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวเปรียบเทียบระหว่างปุนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก กับปุนเม็ดที่มีโลหะหนักชนิดเดียวและปุนเม็ดที่มีโลหะหนักสองชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าปุนเม็ดที่มีโครเมียมเพียงชนิดเดียว โครเมียมผสมกับแคดเมียม และปุนเม็ดที่มีโครเมียมผสมกับสังกะสีมีลักษณะใกล้เคียงกับปุนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวไม่สามารถสังเกตความแตกต่างระหว่างปุนเม็ดที่มีโลหะหนักชนิดเดียว และปุนเม็ดที่มีโลหะหนักผสมสองชนิดในกรณีที่มีโครเมียมเป็นสารปนเปื้อนหลักได้เมื่อเทียบปุนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก



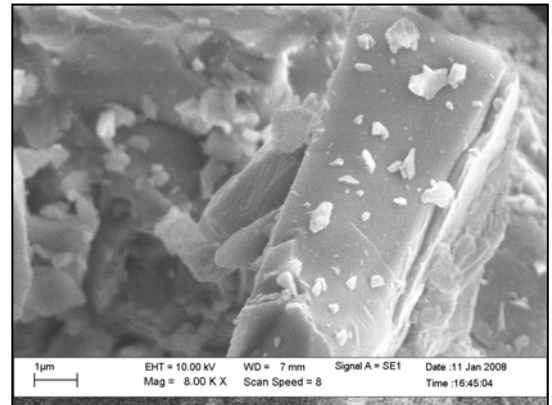
(ก) ปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก



(ข) ปูนเม็ดที่มีโครเมียมเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก



(ค) ปูนเม็ดที่มีโครเมียม : แคดเมียม = 1.5 : 0.5



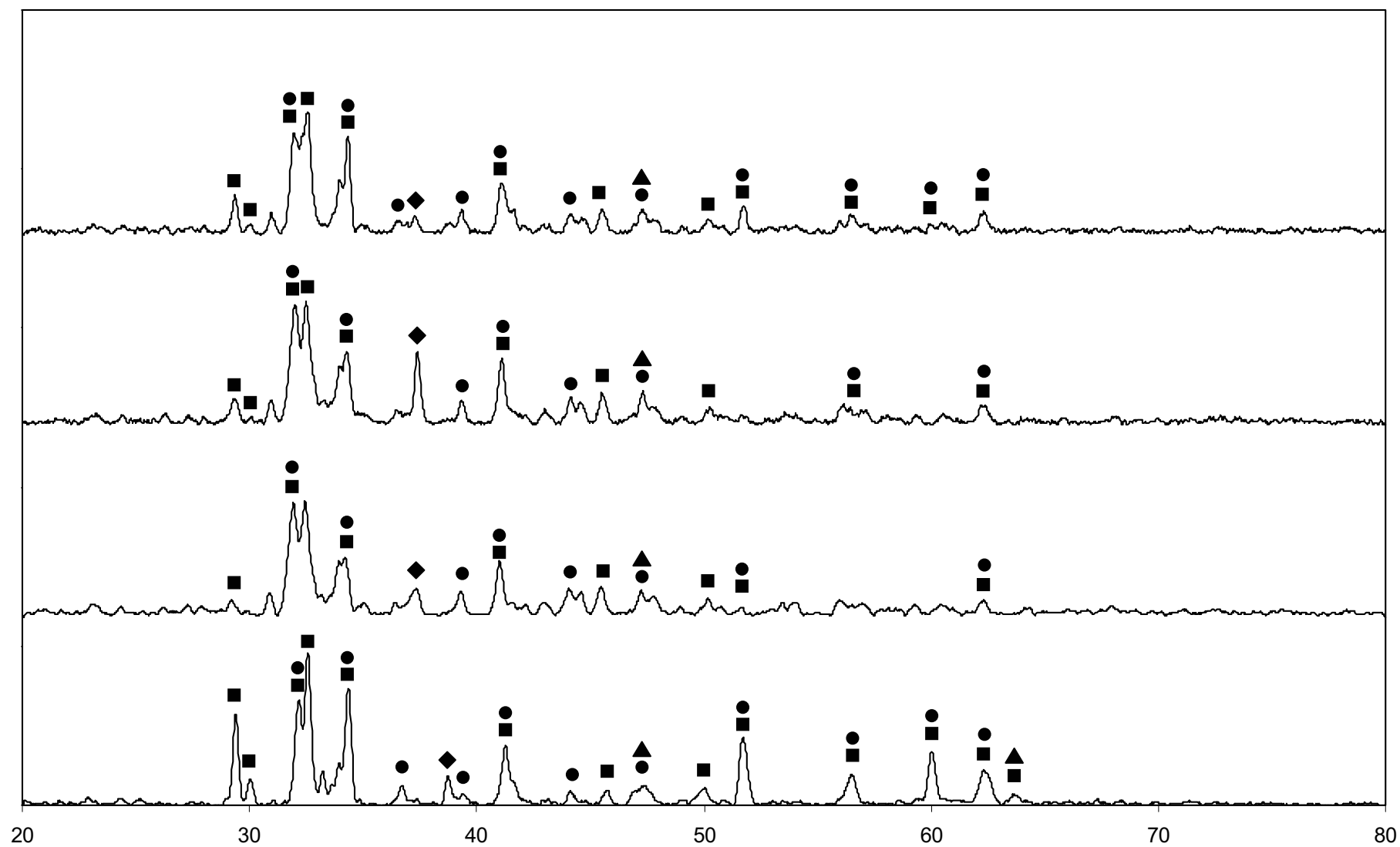
(ง) ปูนเม็ดที่มีโครเมียม : สังกะสี = 1.5 : 0.5

รูปที่ 4.18 แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องSEMเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักกับปูนเม็ดที่มีโลหะหนักชนิดเดียว และสองชนิดปนเปื้อน

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก กับปูนเม็ดที่มีโลหะหนักชนิดเดียวและปูนเม็ดที่มีโลหะหนักสองชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าพีคของเฟสไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกตในตำแหน่งที่ 20 เท่ากับ 29, 52, 57, 60 และ 63 ลดลงสำหรับปูนเม็ดที่มีโครเมียมผสมกับแคดเมียมเมื่อเปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและพีคของเฟสไตรแคลเซียมซิลิเกตในตำแหน่งที่ 20 เท่ากับ 37.5 เมื่อเปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่มีโครเมียมเพียงชนิดเดียว ในขณะที่ปูนเม็ดที่มีโครเมียมผสมกับสังกะสีมีลักษณะใกล้เคียงกับปูนเม็ดที่มีโครเมียมแต่มีลักษณะแตกต่างจากปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักโดยพีคของเฟสไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกตในตำแหน่งที่ 20 เท่ากับ 52, 57, 60 และ 63 ลดลง ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างแสดงให้เห็น

ผลของโลหะหนักชนิดเดียว และสองชนิดที่มี ต่อค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์

การเปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนัก กับมอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักชนิดเดียวและมอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักสองชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มี โครเมียมความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โครเมียมผสมกับแคดเมียมในอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 1.5:0.5 โดยน้ำหนัก และโครเมียมผสมกับสังกะสีในอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 1.5:0.5 โดยน้ำหนักมีค่า 22.19, 21.16 และ 26.6 MPa ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์ที่ปนเปื้อนโลหะหนักชนิดเดียว และมอร์ตาร์ที่ปนเปื้อนโลหะหนักสองชนิด มีแนวโน้มส่งผลให้ค่าการรับกำลังอัดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนัก และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างมอร์ตาร์ที่ผสมโครเมียมเพียงชนิดเดียว และมอร์ตาร์ที่มีโครเมียมผสมกับแคดเมียม พบว่าโครเมียมน่าจะเป็นสารปนเปื้อนหลักที่ส่งผลต่อค่าการรับกำลังอัด ในขณะที่มอร์ตาร์ที่มีโครเมียมผสมกับสังกะสีค่าการรับกำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์ที่มีโครเมียมเพียงชนิดเดียว ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโครเมียมและสังกะสีส่งผลเชิงบวกต่อค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์



รูปที่ 4.19 โครงสร้างของพูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และพูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสมชนิดเดียวและสองชนิด จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD