



รายงานฉบับสมบูรณ์

ผลของแคดเมียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการวิเคราะห์การชะล้าง

โดย

ผศ.ดร. พวงรัตน์ ขจิตวิยานุกุล

นางสาวอริสรา ทองศรีนุ่น

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาธิปไตย บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

30 มีนาคม 2550

สัญญาเลขที่ RDG4950004

รายงานฉบับสมบูรณ์

ผลของแคะเมียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการวิเคราะห์การชะล้าง

คณะผู้วิจัย

ผศ.ดร. พวงรัตน์ ขจิตวิยานุกุล

นางสาวอริสรา ทองศรีนุ่น

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาธิปไตย บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

ชุดโครงการสนับสนุนผู้ปฏิบัติการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.)

และบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

แบบสรุปโครงการวิจัย (Executive Summary)

สัญญาเลขที่	RDG4950004
ชื่อโครงการ	ผลของแคดเมียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการวิเคราะห์การชะล้าง
หัวหน้าโครงการ	ผศ.ดร.พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล สถาบัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
โทรศัพท์	02-4709193 โทรศัพท์ 02-4709165
E-mail address	puangrat@kmutt.ac.th

ความสำคัญ/ความเป็นมา

แคดเมียมเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่ง ซึ่งมักเป็นส่วนประกอบในกากของเสียอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น จีโหละ เรซิน ผุ่นเหล็ก กากสี ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย กากของเสียเหล่านี้จัดเป็นกากของเสียหลักที่มีการกำจัดด้วยการเผาพร้อมกับซีเมนต์ โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งในประเทศและต่างประเทศ พบว่ามีงานวิจัยจำนวนน้อยมากที่มีการศึกษาถึงผลกระทบของแคดเมียมต่อลักษณะสมบัติซีเมนต์ และการชะล้างแคดเมียมออกจากซีเมนต์ โดยแคดเมียมจัดเป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษสูง และเป็นหนึ่งในโลหะหนักที่ใช้ในการระบุวากากของเสียอุตสาหกรรมนั้นจัดว่าเป็นของเสียอันตรายโดยการทดสอบการชะล้างด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ตามมาตรฐานที่กำหนดโดยองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (US.EPA) ซึ่งได้ระบุค่าความเข้มข้นของแคดเมียมจากการชะล้างควรต่ำกว่า 1.0 มก./ล.

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่ศึกษาถึงผลกระทบของแคดเมียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์รวมถึงการชะล้างของแคดเมียมออกจากเมตริกซ์ของซีเมนต์เป็นสำคัญ ทั้งนี้สืบเนื่องจากแคดเมียมเป็นโลหะหนักที่เป็นส่วนประกอบของกากของเสียอุตสาหกรรมหลายชนิดที่นำมากำจัดโดยการเผาพร้อมกับการผลิตปูนซีเมนต์ ผลของแคดเมียมต่อซีเมนต์จึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงได้ยาก นอกจากนี้การชะล้างแคดเมียมออกจากซีเมนต์ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรง ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ จะสามารถนำไปใช้งานทั้งในแง่การปรับปรุงลักษณะสมบัติของซีเมนต์เพื่อให้เหมาะสมกับการนำซีเมนต์ไปใช้งานต่อไป และบอกถึงแนวทางในการนำซีเมนต์ที่มีแคดเมียมในปริมาณสูงไปใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบที่เหมาะสมอีกด้วย

วัตถุประสงค์โครงการ

1. เพื่อศึกษาผลของแคลเซียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ ได้แก่ เฟสส่วนประกอบของปูนเม็ด และกำลังอัด(compressive strength)
2. เพื่อศึกษาการชะล้างของแคลเซียมที่ถูกชะล้างออกจากซีเมนต์ ด้วยการทดสอบด้วยวิธีมาตรฐาน
3. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของแคลเซียมเริ่มต้นที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการชะล้าง

ผลที่ได้รับ	บรรลุมติวัตถุประสงค์	โดยได้ทำ
1. ได้ลักษณะสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปขององค์ประกอบปูนเม็ดที่มีแคลเซียมปนเปื้อน	1. เพื่อศึกษาผลของแคลเซียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ 2. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของแคลเซียมเริ่มต้นที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการชะล้าง	ได้ลักษณะสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปขององค์ประกอบปูนเม็ดที่มีแคลเซียมปนเปื้อน โดยเมื่อมีแคลเซียมในปูนเม็ดส่งผลให้ค่าร้อยละแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือน้อยสูงขึ้น และแคลเซียมมีแนวโน้มที่จะทำปฏิกิริยาทำให้เกิดสารประกอบใหม่คือ CdAl_2O_4 และ CdSO_3 และในส่วนของลักษณะโครงสร้างขององค์ประกอบของปูนเม็ดแคลเซียมเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณ alite และ belite ลดลง
2. ได้ผลของแคลเซียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์	1. เพื่อศึกษาผลของแคลเซียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ 2. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของแคลเซียมเริ่มต้นที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการชะล้าง	ผลของแคลเซียมที่มีต่อลักษณะของซีเมนต์ โดยเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมสูงส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความสามารถในการรับกำลังอัดลดลง
3. ได้ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมต่อการชะล้างของแคลเซียมจากซีเมนต์	1. เพื่อศึกษาการชะล้างของแคลเซียมที่ถูกชะล้างออกจากซีเมนต์ด้วยการทดสอบด้วยวิธีมาตรฐาน	1. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียม โดยเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณแคลเซียมที่ชะล้างจากซีเมนต์มากขึ้น โดยแคลเซียมมีพฤติกรรมการชะล้างออกจากซีเมนต์ได้ง่าย 2. ได้แนวโน้มในการนำซีเมนต์ที่มีแคลเซียมปนเปื้อนไปใช้งาน เนื่องจากผลการทดลอง

ผลที่ได้รับ	บรรลุลักษณะประสงค์	โดยได้ทำ
		แสดงให้เห็นว่า ซีเมนต์ที่มีแคลเซียมเริ่มต้นในปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณการชะล้างสูงกว่ามาตรฐาน ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน

การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

- การนำกากของเสียอุตสาหกรรมที่มีแคลเซียมมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตซีเมนต์นั้น แคลเซียมในระดับความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 0.1-2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้ผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ที่ได้ไม่จัดว่าเป็นของเสียอันตราย เมื่อทดสอบด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ตามมาตรฐานที่กำหนดโดยองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (US.EPA) แต่เมื่อทำการทดสอบการชะล้างตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 พบว่าซีเมนต์ที่มีแคลเซียมเริ่มต้นในปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณการชะล้างสูงกว่ามาตรฐาน ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน
- ทำให้ทราบแนวโน้มในการนำซีเมนต์ที่มีแคลเซียมมาใช้งาน ดังนี้
 - แคลเซียมที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าหรือเท่ากับ 0.5% โดยน้ำหนัก จะไม่ทำให้ความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้คือ 28 MPa แต่แนวโน้มในการรับกำลังอัดของซีเมนต์พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าลดลง
 - แคลเซียมที่ปนอยู่ในซีเมนต์มอร์ต้าสามารถถูกชะล้างออกมาได้ดีเมื่อสัมผัสกับน้ำที่มีค่า pH อยู่ในช่วง 4-6
 - ซีเมนต์ที่มีแคลเซียมอยู่ในระดับมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะไม่จัดว่าเป็นของเสียอันตราย แต่เมื่อทำการทดสอบการชะล้างตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

การประชาสัมพันธ์**1. เผยแพร่บทความในการประชุมวิชาการนานาชาติ**

P.Kajitvichyanukul, S. Sinyoung and A. Tongsrinoon, “Microstructure Study of Clinker Contaminated with Cadmium from Clinkerization Process”, Proceeding of International Forum on Natural Treatment and Hazardous Substance Management, Khonkaen, May 29-30, 2006

บทคัดย่อ

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้เข้ามามีส่วนร่วมในการแก้ปัญหาการจัดการด้านกากของเสียมากขึ้น โดยการกำจัดกากของเสียที่มาจากอุตสาหกรรมแหล่งต่างๆ สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลของแคดเมียมในปูนเม็ดสำหรับการผลิตซีเมนต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้แคดเมียมที่ใช้อยู่ในรูปของแคดเมียมออกไซด์(CdO) ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.1-2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยผสมลงในวัตถุดิบแล้วทำการเผาพร้อมในการผลิตปูนเม็ด วิธีการดังกล่าวเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของแคดเมียมโดยตรง และทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง X-ray diffraction(XRD) Scanning electron microscope(SEM) และ Energy dispersive X-ray spectrometer(EDS) ในการหาลักษณะและส่วนประกอบของปูนเม็ด จากการวิเคราะห์พบว่าแคดเมียมจะไปยับยั้งในการเกิดองค์ประกอบหลักของปูนเม็ดคือไตรแคลเซียมซิลิเกต(C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต(C_2S) แคดเมียมที่ตกค้างมีแนวโน้มทำให้เกิดสารประกอบชนิดใหม่ได้แก่ แคดเมียมซัลไฟต์(CdSO_3) และแคดเมียมอลูมิเนียมออกไซด์(CdAl_2O_4) นอกจากนี้ยังพบว่า แคดเมียมยังส่งผลให้การรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าลดลง จากการศึกษาระยะล้างด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure(US.EPA) พบว่ามอร์ต้าที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมสูงถึง 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่จัดว่าเป็นของเสียอันตรายเนื่องจากผลการชะล้างแคดเมียมจากมอร์ต้ามีค่าเท่ากับ 0.07 มก./ล. ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดที่ 1 มก./ล. แต่เมื่อทำการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ.2548 ด้วยวิธี Waste Extraction Test พบว่าวัสดุมอร์ต้าที่มีส่วนผสมของแคดเมียมมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จัดว่าเป็นของเสียอันตรายเนื่องจากแคดเมียมถูกชะล้างมากกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนดเป็น 1.0 มก./ล.

Abstract

Cement industry has been participated in the waste management by using different kinds of industrial wastes as alternative fuel or raw materials in manufacturing process. In this work, cadmium was introduced into the raw material with the variation of initial concentrations of CdO ranging from 0.1-2.0% by weight. The clinker characteristics were analyzed by X-ray diffraction(XRD) and scanning electron microscope(SEM) with energy dispersive X-ray spectrometer(EDS). Results showed that cadmium inhibited the formation of C_3S and C_2S which are the major phases of clinker. The new compounds of cadmium as $CdSO_3$ and $CdAl_2O_4$ were identified in the composition of clinker. It was found that cadmium affected on the clinker properties by decreasing the compressive strengths. In the study of cadmium leaching behavior, using Toxicity Characteristic Leaching Procedure Test(US.EPA), cement mortars doped with cadmium up to 2.0% by weight was not classified as hazardous waste, as the concentration of cadmium leached from the mortar was 0.07 mg/L which is lower than the regulated value(1 mg/L). However, with Waste Extraction Test following were Thailand regulation, mortars with concentration of cadmium equal or higher than 0.1% by weight were classified as hazardous waste, as the concentration of cadmium leached from mortar was higher than 1.0 mg/L which is the regulated value.

สารบัญ

	หน้า
แบบสรุปโครงการวิจัย	i
บทคัดย่อภาษาไทย	v
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	vi
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 แนวความคิดการปลดปล่อยมลพิษที่เป็นศูนย์	3
2.2 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์	4
2.2.1 ความหมายของปูนซีเมนต์	5
2.2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์	5
2.2.3 กรรมวิธีในการผลิตปูนซีเมนต์	6
2.2.4 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์	11
2.2.5 คุณสมบัติของสารประกอบหลัก	12
2.2.6 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	13
2.3 คุณสมบัติและการทดสอบซีเมนต์	16
2.3.1 ปูนซีเมนต์	16
2.3.2 การทดสอบซีเมนต์เพสต์	17
2.4 การใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตซีเมนต์	17
2.5 ลักษณะของวัตถุดิบทดแทนและเชื้อเพลิงทดแทน	18
2.5.1 วัตถุดิบทดแทน	18
2.5.2 เชื้อเพลิงทดแทน	18
2.6 แคลเซียม	20
2.6.1 การป่นเปื้อนของแคลเซียมในซีเมนต์	24
2.7 การป่นเปื้อนของแคลเซียมในซีเมนต์	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	26
3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	28
3.3 การเตรียมซีเมนต์โดยมีของเสียอันตรายที่เป็นคลหะหนัก	28
3.3.1 การเตรียมปูนเม็ดสำหรับซีเมนต์	28
3.3.2 การเตรียมปูนเม็ดที่มีแคลเซียมผสมอยู่	28
3.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่	29
3.3.4 การนำตัวอย่างของปูนเม็ดไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่อง XRD	30
3.4 การทดสอบหาค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า	31
3.4.1 การเตรียมวัสดุทดสอบ	31
3.5 การทดสอบการชะล้างแคลเซียมจากซีเมนต์มอร์ต้า	32
3.5.1 การทดสอบวิธี Microwave-assisted leach method 3051 A	33
3.5.2 การทดสอบวิธี Availability Leaching Test	33
3.5.3 การทดสอบ Toxicity Characteristic Leaching Procedure (US.EPA)	33
3.5.4 การทดสอบการชะล้างตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัด สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548	34
3.5.5 การทดสอบ pH Static Leach Test	36
3.6 แผนการดำเนินการวิจัย	37
3.7 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	38
บทที่ 4 ผลของแคลเซียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการวิเคราะห์การชะล้าง	39
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะของปูนเม็ดที่ไม่มีแคลเซียม	39
4.2 การวิเคราะห์ลักษณะของปูนเม็ดที่มีแคลเซียมผสมอยู่	43
4.2.1 ผลของแคลเซียมที่มีต่อค่า free lime	43
4.2.2 ผลของแคลเซียมที่มีต่อลักษณะ โครงสร้างของปูนเม็ด	45
4.3 ผลของแคลเซียมที่มีต่อการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า	55
4.4 การชะล้างแคลเซียมจากซีเมนต์	59
4.4.1 การทดสอบการชะล้างวิธี Microwave Assisted Leach Method 3051A	59
4.4.2 การทดสอบการชะล้างวิธี Availability Leaching Test (NEN 7341)	61
4.4.3 การทดสอบการชะล้างวิธี Toxicity characteristic leaching procedure(US.EPA)	64

สารบัญ(ต่อ)

4.5.4 การทดสอบการชะล้างตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัด สิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548	66
4.4.5 การทดสอบการชะล้างวิธี pH Static Leach Test	71
4.5.6 แนวทางการนำซีเมนต์ที่ได้จากการเผาพร้อมกับแคลเซียมไปใช้งาน	73
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	76
เอกสารอ้างอิง	78
ภาคผนวก	80

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ส่วนประกอบ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของวัตถุดิบบางชนิดในกระบวนการผลิตซีเมนต์	6
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	11
2.3 โครงสร้างหลักของปูนเม็ด	11
2.4 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	13
2.5 ตัวอย่างกากอุตสาหกรรมที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทน	19
2.6 ลักษณะทั่วไปของแคลเซียม	21
2.7 คุณสมบัติทางกายภาพของแคลเซียม	21
2.8 ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของแคลเซียม	21
3.1 ส่วนประกอบของวัตถุดิบในขั้นตอนการผลิตปูนเม็ดของงานวิจัยนี้	26
3.2 แผนการดำเนินงานวิจัย	37
3.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับทุก 6 เดือน	38
4.1 การหาค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดจากห้องปฏิบัติการ	39
4.2 ส่วนประกอบของวัตถุดิบในการผลิตปูนเม็ดซึ่งในการทดลองนี้	43
4.3 ร้อยละของค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดเมื่อมีแคลเซียมผสมอยู่ในค่าความเข้มข้น 0-2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	44
4.4 ส่วนประกอบของปูนเม็ดที่ได้จากการเผาพร้อมกับโลหะหนักแคลเซียมผสมอยู่ในช่วง 0-2.0เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	48
4.5 ตารางแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของกำลัที่ลดลงต่อปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มสูงขึ้น	57
4.6 ผลการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ต้าที่มีโลหะหนักแคลเซียมผสมอยู่ด้วยวิธีการทดสอบแบบ Microwave assisted leach method 3051A	59
4.7 ผลการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ต้าที่มีโลหะหนักแคลเซียมผสมอยู่ด้วยวิธีการทดสอบแบบ Availability leaching test NEN 7341(AVLT)	61
4.8 การชะล้างแคลเซียมด้วยวิธี Microwave assisted leach method 3051A(M 3051A)เปรียบเทียบกับวิธี Availability leaching test NEN 7341(AVLT)	64
4.9 ผลการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ต้าที่มีโลหะหนักแคลเซียมผสมอยู่ด้วยวิธีการทดสอบแบบ Toxicity Characteristic Leaching Procedure(US.EPA)	65

รายการตาราง(ต่อ)

ตาราง		หน้า
4.10	ผลการทดสอบการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ต้าด้วยวิธีการทดสอบแบบ acid digestion of sediments, sludges and soils(Method 3050B)	67
4.11	ผลการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ต้าที่มีโลหะหนักแคะเมียมผสมอยู่ด้วยวิธี Waste Extraction Test(WET)	69
4.12	ผลการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ต้าที่ได้จากการเผาพร้อมกับแคะเมียมผสมอยู่ด้วยวิธีการทดสอบแบบ pH static leach test	71
4.13	เปรียบเทียบผลการชะล้างของแคะเมียมจากซีเมนต์มอร์ต้าด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure(TCLP) ตามมาตรฐาน US.EPA และตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548	74
4.14	การเปรียบเทียบผลการชะล้างแคะเมียมด้วยวิธี pH Static Leach Test กับค่ามาตรฐานต่างๆ โดยพิจารณาซีเมนต์ที่ได้จากการเผาด้วยความเข้มข้นเริ่มต้นแคะเมียมน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	75

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	แนวความคิดการปลดปล่อยมลพิษที่เป็นศูนย์(Zero emissions)	3
2.2	ตัวอย่างการส่งกากของเสียอุตสาหกรรมจากโรงงานหนึ่งไปยังอีกโรงงานหนึ่ง	4
2.3	ตัวอย่างวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต	5
2.4	ขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์	7
2.5	การเตรียมกองวัตถุดิบสำหรับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์	8
2.6	การนำกองวัตถุดิบเข้าเผาสำหรับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์	8
2.7	แสดงกระบวนการผลิตโดยทั่วไปและขอบเขตระบบการผลิตซีเมนต์	9
2.8	ลักษณะเตาเผาโรตารีคิลน์	9
3.1	รายละเอียดการผลิตซีเมนต์และการทดสอบ	27
3.2	ขั้นตอนการเตรียมปูนเม็ดที่มีแคลเซียมผสม	29
3.3	ขั้นตอนการเตรียมซีเมนต์มอร์ตาร์ด้าเพื่อทดสอบการชะล้างแคลเซียม	32
3.4	ขั้นตอนการทดสอบการชะล้างด้วยวิธี Waste Extraction Test(WET)	36
4.1	กราฟจากการวิเคราะห์โครงสร้างของปูนเม็ดที่ได้จากการเผาด้วยเครื่อง XRD	40
4.2	ภาพเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของปูนเม็ดที่กำลังขยาย 350 เท่า	42
4.3	ภาพแสดงเฟสต่างๆ ของปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตของโรงงาน	42
4.4	กราฟแสดงค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่	44
4.5	แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM	45
4.6	แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM	46
4.7	ร้อยละของแคลเซียมที่ปรากฏในเฟสของปูนเม็ดด้วย EDS	49
4.8	ผลการวิเคราะห์เฟสของปูนเม็ดที่มีแคลเซียมที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วย XRD	52
4.9	เฟสต่างๆของปูนเม็ดในการวิเคราะห์ด้วย XRD	53
4.10	สารประกอบใหม่ของแคลเซียมที่ปรากฏในการวิเคราะห์ปูนเม็ดด้วย XRD	54
4.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ด้าที่ไม่มีส่วนผสมของแคลเซียมที่ ระยะเวลาในการบ่มที่ 1 7 14 และ 28 วัน	55
4.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ด้าที่มีส่วนผสมของความเข้มข้นเริ่มต้นแคลเซียมที่ต่างๆ กันกับระยะเวลาในการบ่มที่ 1 7 14 และ 28 วัน	56

รายการรูปประกอบ(ต่อ)

รูป		หน้า
4.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์อร์ต้าที่มีส่วนผสมของความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมที่ต่างกัน กับระยะเวลาในการบ่มที่ 28 วัน	57
4.14	ค่าเฉลี่ยปริมาณของแคลเซียมที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้จากซีเมนต์อร์ต้าด้วยวิธี Microwave assisted leach method 3051A	60
4.15	ปริมาณของแคลเซียมที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้จากซีเมนต์อร์ต้าด้วยวิธี Availability leaching test NEN 7341(AVLT)	62
4.16	การเปรียบเทียบการชะล้างแคลเซียมด้วยวิธี Microwave assisted leach method 3051A (M 3051A) และ Availability leaching test NEN 7341(AVLT)	63
4.17	การชะล้างแคลเซียมด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure(US.EPA)	66
4.18	การชะล้างแคลเซียมด้วยวิธี acid digestion of sediments, sludges and soils (M 3050B)	69
4.19	การชะล้างแคลเซียมด้วยวิธี Waste Extraction Test(WET)	70
4.20	การชะล้างแคลเซียมออกจากซีเมนต์ที่ได้จากการเผาพร้อมกับแคลเซียมด้วยวิธี pH static leach test	72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ในสภาวะปัจจุบัน กระแสการตื่นตัวทางด้านสิ่งแวดล้อมโลก ได้ถูกนำมาพิจารณาเป็นประเด็นสำคัญในการกำหนดแนวทางในการพัฒนาประเทศกันอย่างกว้างขวาง จึงเกิดแนวคิดในการการนำเอากากของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ทั้งในแง่ของการใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือเป็นวัตถุดิบทดแทน เช่น การนำน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว หรือน้ำมันเครื่องที่ใช้แล้ว ขากรยยนต์เก่าๆ ตลอดจนสารทำละลายใช้แล้ว (Spent solvents) นำกลับมาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล หรือทรัพยากรธรรมชาติด้านเชื้อเพลิง เช่น น้ำมันเตา ถ่านหิน และลิกไนต์ ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ อีกทั้งช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และมลพิษทางอากาศอื่นๆ ได้อีกด้วย ดังนั้นเตาเผาปูนซีเมนต์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าจะมีความเหมาะสมในด้านสิ่งแวดล้อม ในการนำกากของเสียจากอุตสาหกรรม มาใช้ร่วมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ (Waste Co-processing) ทั้งนี้ เนื่องจากประเทศไทยมีปริมาณกากของเสียจากอุตสาหกรรมจำนวน ซึ่งส่วนใหญ่ยังขาดการจัดการที่เป็นระบบ และส่งผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ดังนั้นการนำกากของเสียจากอุตสาหกรรมดังกล่าวมาใช้ในกระบวนการผลิต สามารถช่วยในการแก้ไขปัญหาการจัดการของเสียจากอุตสาหกรรมได้อย่างครบวงจร และช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการกำจัดกากของเสียด้วยวิธีการฝังกลบและการเผาแบบดั้งเดิม ซึ่งประโยชน์ที่จะเกิดแก่ สังคม สิ่งแวดล้อม และผลดีในเชิงเศรษฐศาสตร์ นานัปการ

แนวคิดการปล่อยมลพิษเป็นศูนย์ หรือ zero emission concept เป็นแนวคิดที่ได้นำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม โดยตั้งในหลักการที่ว่า กากอุตสาหกรรมจากโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่ง สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้ จากแนวความคิดนี้เอง ได้ทำให้อุตสาหกรรมหลายประเภท ได้นำกากของเสียมาจัดการด้วยการเผาพร้อมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยกากของเสียเหล่านี้ กลายเป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทน ตัวอย่างของกากของเสียเหล่านี้ เช่น กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย กากสี กากตะกรันอลูมิเนียม จีโโลหะ แผลงวงจรยาง เป็นต้น[1] โดยกากของเสียหลายชนิด มักมีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบ ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อ ลักษณะสมบัติของซีเมนต์ และการชะล้างโลหะหนักออกจากซีเมนต์เมื่อมีการนำซีเมนต์ไปใช้งาน

แคลเซียม เป็นโลหะหนักชนิดหนึ่ง ซึ่งมักเป็นส่วนประกอบในกากของเสียจากอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น กากตะกอนจากการบำบัด กากสี ผลิตภัณฑ์เรซิน จีโโลหะ ผุ่นเหล็ก เป็นต้น กากของเสียเหล่านี้จัดได้ว่าเป็นกากของเสียหลักที่มีการนำมาจัดการด้วยการเผาพร้อมกับซีเมนต์ โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมา ทั้งในประเทศและต่างประเทศ พบว่ามีงานวิจัยจำนวนน้อยมากที่มีการศึกษาถึงผลกระทบของแคลเซียมต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ และการชะล้างโลหะหนักออกจากซีเมนต์ โดยแคลเซียมจัดว่าเป็น

โลหะหนักที่มีความเป็นพิษสูง และเป็นหนึ่งในโลหะหนักที่ใช้ในการระบุค่ากากของเสียอุตสาหกรรม นั้นจัดว่าเป็นของเสียอันตราย โดยการทดสอบการชะล้างด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ตามมาตรฐานที่กำหนดโดยองค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (US.EPA) ซึ่งได้ระบุค่าความเข้มข้นของแคดเมียมจากการชะล้าง ควรต่ำกว่า 1.0 มก./ล.

งานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาถึง ผลกระทบของแคดเมียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ รวมไปถึงการชะล้างของแคดเมียมออกจากเมตริกซ์ของซีเมนต์เป็นสำคัญ ทั้งนี้สืบเนื่องจาก แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่เป็นส่วนประกอบของกากของเสียอุตสาหกรรมหลายชนิดที่ได้นำมากำจัดโดยการเผา ร่วมกับการผลิตปูนซีเมนต์ ผลของแคดเมียมต่อซีเมนต์จึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงได้ยาก นอกจากนี้การชะล้างแคดเมียมออกจากซีเมนต์ยังส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรง ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ จะสามารถนำไปใช้งานทั้งในแง่ของการปรับปรุงลักษณะสมบัติของซีเมนต์ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำซีเมนต์ไปใช้งานต่อไป และบอกถึงแนวทางในการนำซีเมนต์ที่มีแคดเมียมในปริมาณสูงไปใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบที่เหมาะสมอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- (1) เพื่อศึกษาผลของแคดเมียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ ได้แก่ เฟสส่วนประกอบของปูนเม็ด และกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า
- (2) เพื่อศึกษาการชะล้างของแคดเมียมที่ถูกชะล้างออกมาจากซีเมนต์ด้วยการทดสอบการชะล้างโลหะหนักด้วยวิธีมาตรฐาน
- (3) เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้น ที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ และการชะล้าง

1.3 ประโยชน์ที่คาดหวังว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- (1) แนวโน้มของแคดเมียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ ได้แก่ เฟสส่วนประกอบของปูนเม็ด และกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า
- (2) พฤติกรรมการชะล้างของแคดเมียมที่ถูกชะล้างออกมาจากซีเมนต์ ด้วยการทดสอบโดยวิธีมาตรฐาน
- (3) ผลของความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้น ที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการชะล้างแคดเมียมจากซีเมนต์

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

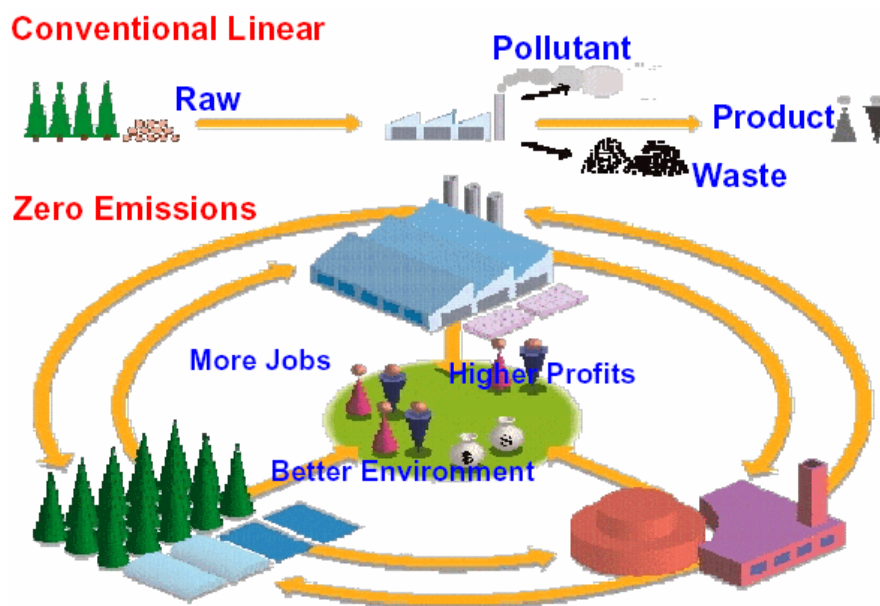
- (1) ปูนเม็ดที่ใช้ในงานวิจัยเป็นปูนเม็ดที่สังเคราะห์ได้จากห้องปฏิบัติการ โดยใช้เตาเผาไฟฟ้า
- (2) แคดเมียมที่ใช้ในงานวิจัยอยู่ในรูป CdO และการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ร้อยละ 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

บทที่ 2

ทฤษฎี

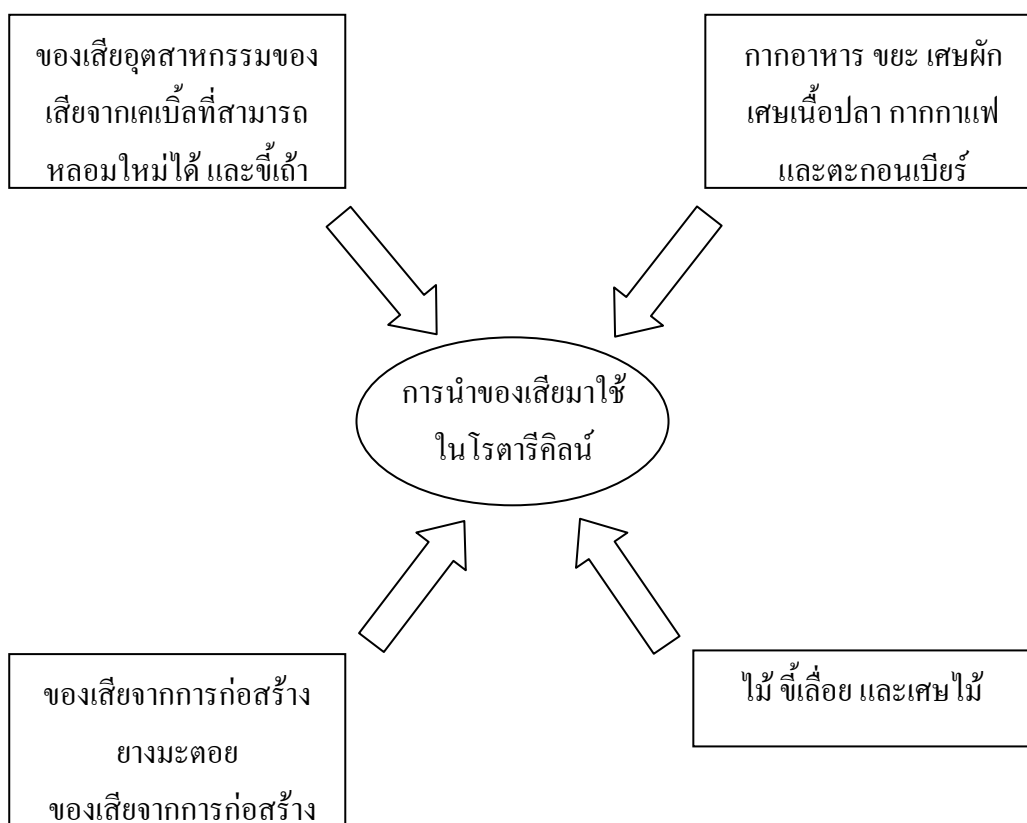
2.1 แนวความคิดการปลดปล่อยมลพิษที่เป็นศูนย์ (Zero Emission Concept)

แนวความคิดการปล่อยมลพิษที่เป็นศูนย์หรือ Zero emission concept คือ การทำให้กลุ่มอุตสาหกรรมมีลักษณะที่เป็นวงจรปิด โดยที่กากของเสียอุตสาหกรรมจากโรงงานอุตสาหกรรมหนึ่งจะสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรมอื่นได้ ซึ่งทำให้ไม่เกิดการปล่อยกากของเสียออกจากวงจร ดังรูปที่ 2.1 แนวความคิดนี้ได้อธิบายถึงประโยชน์ที่แต่ละองค์กรหรือหน่วยงานจะได้รับ อาทิเช่น ประโยชน์ทางด้านการคัดเลือกวัตถุดิบในการผลิตที่ก่อให้เกิดของเสียในปริมาณที่น้อย การลดปริมาณกากของเสียอุตสาหกรรมที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยส่งต่อให้เป็นเชื้อเพลิงหรือวัตถุดิบของอีกอุตสาหกรรมหนึ่ง การลดปริมาณการปล่อยมลพิษทางอากาศและทางน้ำ การสร้างงานหรือธุรกิจใหม่เชิงติดต่อประสานงานจัดการกากของเสียอุตสาหกรรม นำมาสู่การเพิ่มรายได้ให้แก่ชุมชน เป็นต้น[2,3]



รูปที่ 2.1 แนวความคิดการปลดปล่อยมลพิษที่เป็นศูนย์(Zero emissions)

ด้วยแนวความคิดนี้ การนำของเสียมาเผาพร้อมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงเกิดขึ้นตั้งแต่ในปีค.ศ.1970 โดยได้มีการนำกากของเสียมาเผาพร้อมในเตาเผาซีเมนต์ (Co-incineration) ครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกา หลังจากนั้นได้มีการนำเทคนิคนี้ไปใช้ในทวีปยุโรปและเอเชีย ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการส่งกากของเสียอุตสาหกรรมจากโรงงานหนึ่งไปยังอีกโรงงานหนึ่ง [5]

ส่วนในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2538 ได้มีการเริ่มนำกากของเสียมาเผาพร้อมในเตาเผาปูนซีเมนต์ซึ่งสามารถเป็นทางเลือกในการกำจัดของเสียจาก Zero concept emission นำมาให้เกิดแนวปฏิบัติในการจัดการกากของเสียอุตสาหกรรมตามลำดับ

2.2 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

อุตสาหกรรมการผลิตซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานสูงโดยพลังงานที่ใช้คิดเป็น 30-40 เปอร์เซ็นต์ของค่าใช้จ่ายในการผลิต ไม่รวมค่าใช้จ่ายในการลงทุน ตั้งแต่ในอดีตที่ผ่านมาเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ คือ ถ่านหิน และมีการใช้เชื้อเพลิงอื่นๆ เช่น Petroleum coke แก๊สธรรมชาติและน้ำมัน นอกจากนี้เชื้อเพลิงเหล่านี้แล้วในอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์ยังใช้ของเสียเป็นเชื้อเพลิงด้วยในทวีปยุโรป อุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์มีการใช้กากของเสียอุตสาหกรรมประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ของการใช้เชื้อเพลิง

ทั้งหมด ในแง่ของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ วัตถุดิบหลักๆ ได้แก่ หินปูน หินดินดาน ดินอลูมินา สูง ดินลูกรัง และ อื่นๆ โดยมีสัดส่วนประมาณ 77.8, 18.5, 1.5, 2.0 และ 0.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ก.หินปูน (Lime Stone)



ข.หินดินดาน (Shale)

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต

ก.หินปูน (Lime Stone)

ข.หินดินดาน (Shale)

2.2.1 ความหมายของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ เป็นวัสดุประสานที่ได้จากการบดปูนเม็ดซึ่งเกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ หินปูน (Lime Stone) หรือดินปูนขาว(Marl) กับดินเหนียว(Clay) หรือหินดินดาน(Shale)ในสัดส่วนที่เหมาะสมเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตโดยอาจมีการเติมแร่เหล็ก หรือยิปซัม ตามความจำเป็น เพื่อปรับปรุงให้มีคุณสมบัติตามความต้องการ ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำและวัสดุผสมอื่น ๆ จำพวกหินย่อย หรือทรายจะเกิดความแข็งแรงและความทนทานคล้ายหิน จึงเป็นที่นิยมใช้กันมากในงานก่อสร้างต่างๆ หรือเมื่อผสมกับน้ำ ทราย และปูนขาวจะสามารถใช้เป็นปูนก่อ หรือปูนฉาบ ที่ใช้ในงานก่ออิฐ และฉาบปูน ปูนซีเมนต์ที่ผลิตใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์

วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์แบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก คือ

1. วัสดุธาตุปูน(Calcareous materials) เป็นออกไซด์ของธาตุแคลเซียม(Calcium) ได้แก่ หินปูน และหินชอล์ก
2. วัสดุอาจิลลาเซียส(Argillaceous material) เป็นออกไซด์ของธาตุซิลิกอน(Silicon) และ อลูมิเนียม(Aluminium) ได้แก่ ดินเหนียว หินเชลล์ หรือหินดินดาน และหินชนวน

ในบางครั้งดินที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีทั้งออกไซด์ของแคลเซียมและซิลิกอน ได้แก่ ดินมาร์ล นอกจากนี้ การผลิตซีเมนต์ยังต้องการวัตถุดิบอย่างอื่น ได้แก่ ออกไซด์ของเหล็ก ซึ่งได้จากดินลูกรัง ออกไซด์ของอลูมิเนียมและเหล็กช่วยให้ปฏิกิริยาในเตาเผาเกิดได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังต้องการยิปซัม (Gypsum) เพื่อหน่วงปฏิกิริยาไม่ให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวเร็วเกินไปโดยบดรวมกับปูนเม็ด(Clinker) ในขั้นตอนสุดท้าย โดยในตาราง 2.1 ได้แสดงส่วนประกอบ(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของวัตถุดิบบางชนิดในกระบวนการผลิตซีเมนต์

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของวัตถุดิบบางชนิดในกระบวนการผลิตซีเมนต์[4]

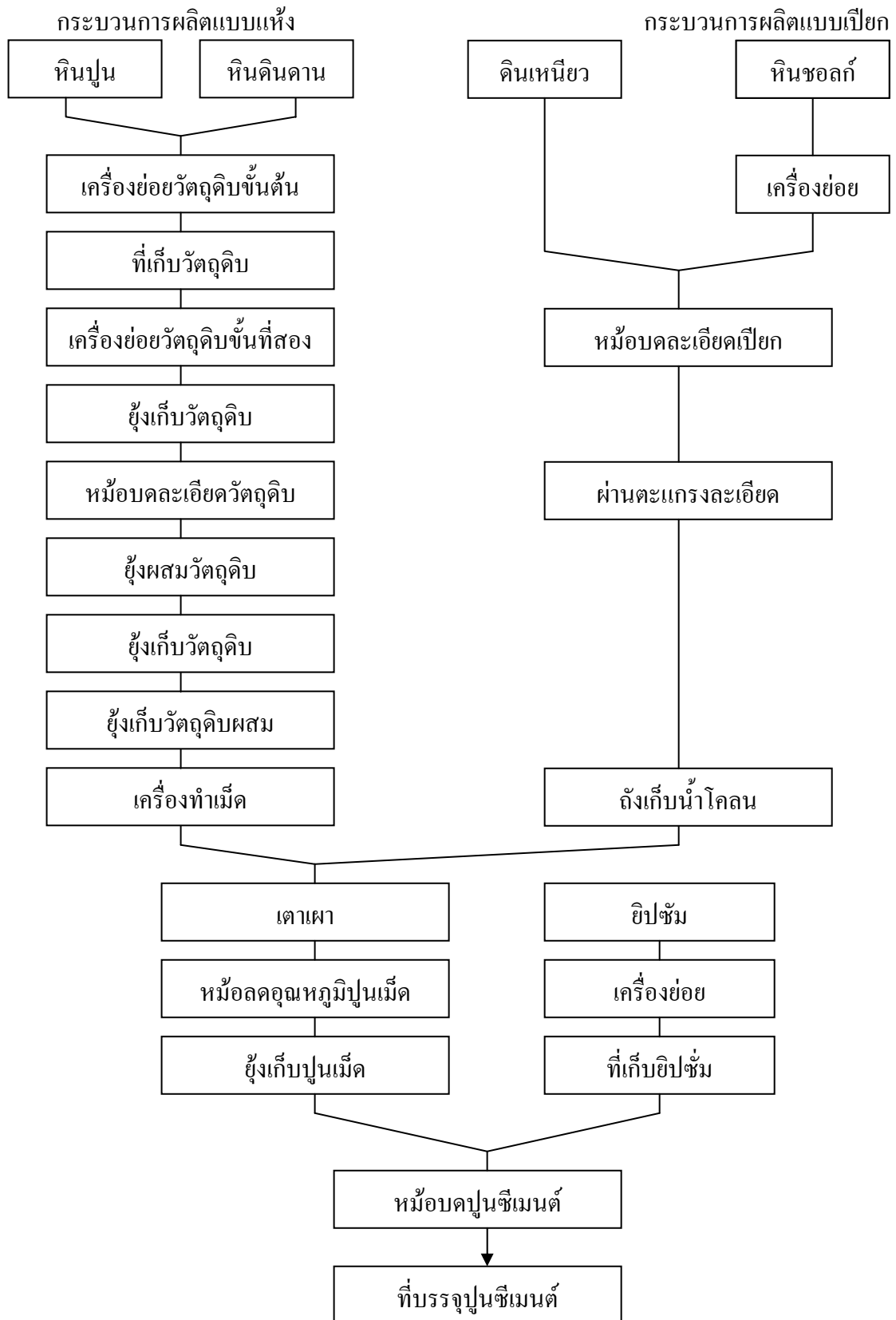
ส่วนประกอบ	หินปูน	ดินร่วน	ดินเหนียว	ดินทราย	สินแร่บอไซด์	สินแร่
LOI	40.38	24.68	7.19	0.2	15-20	5-12
SiO ₂	3.76	27.98	67.29	99.2	16-22	20-25
Al ₂ O ₃	1.10	10.87	8.97	-	44-58	3-9
Fe ₂ O ₃	0.66	3.08	4.28	0.5	10-16	45-60
CaO	52.46	30.12	7.27	-	2-4	0.5-2.5
MgO	1.23	1.95	1.97	-	0.2-1.0	1.5-7
K ₂ O	0.18	0.20	1.20	-	-	0.3-0.6
Na ₂ O	0.22	0.33	1.51	-	-	-
SO ₃	0.01	0.70	0.32	-	-	-
รวม	100.0	99.91	100	99.9	-	-

- LOI คือ ปริมาณที่สูญเสียไปเนื่องจากการเผา

โดยวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์จะประกอบด้วยสารจำพวกโลหะและอโลหะปะปนอยู่ เช่น พลวง สารหนู แบเรียม แคลเซียม โครเมียม ตะกั่ว ปรอท นิกเกิล เงิน วานาเดียม สังกะสี โบรมีน คลอรีน ฟลูออรีน และไอโอดีน เป็นต้น ซึ่งวัตถุดิบมีส่วนประกอบประเภทใดนั้นขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของวัตถุดิบแต่ละแหล่ง

2.2.3 กรรมวิธีในการผลิตปูนซีเมนต์

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ กระบวนการผลิตแบบเปียก (Wet process) และกระบวนการผลิตแบบแห้ง (Dry process) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 การเลือกกระบวนการผลิตแบบใดขึ้นอยู่กับความชื้นของวัตถุดิบในสภาพธรรมชาติ ความแข็งของวัตถุดิบ และชนิดของวัตถุดิบ ที่ความชื้นช่วงหนึ่งการบดวัตถุดิบจะทำได้ยาก จำเป็นต้องขจัดความชื้นที่มีอยู่หรือเพิ่มน้ำให้มีปริมาณมากขึ้น ถ้าวัตถุดิบเป็นดินเหนียวจะมีความชื้นสูง ดังนั้นจึงใช้กระบวนการผลิตแบบเปียก หากวัตถุดิบเป็นหินปูนและหินเชลจะมีความชื้นค่อนข้างต่ำจึงควรใช้กระบวนการผลิตแบบแห้ง



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์[4]

ในปัจจุบันนิยมใช้กระบวนการผลิตแบบแห้งเพราะค่าใช้จ่ายถูกกว่ากระบวนการผลิตแบบเปียกมาก เตาเผาของระบบแห้งมีขนาดเล็กกว่าระบบเปียก และพลังงานที่ใช้ในการเผาจะน้อยกว่าของระบบเปียกมาก

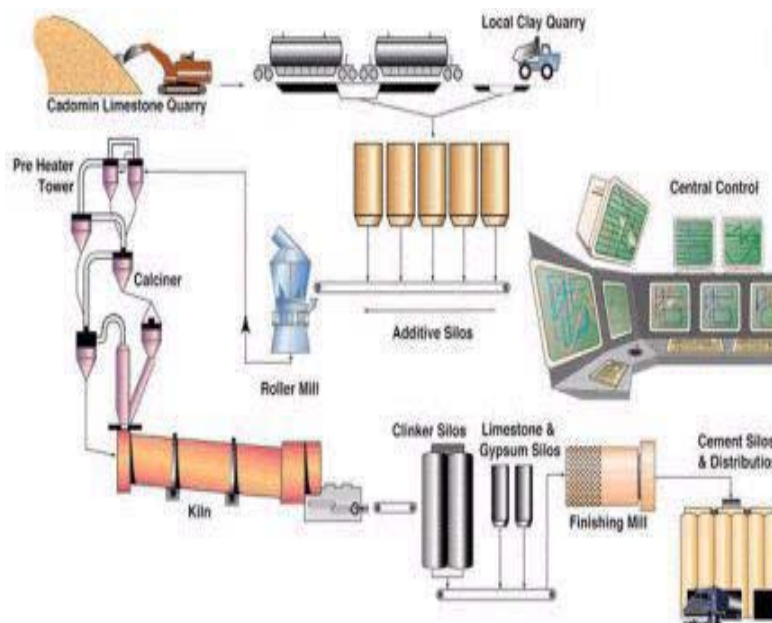
ในกระบวนการผลิตแบบเปียก วัตถุดิบจะผสมกับน้ำตามสัดส่วนที่กำหนด โดยปกติถ้าใช้ ดินเหนียวและหินชอล์กจะใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อน้ำประมาณ 1:3 จากนั้นจะบดส่วนผสมให้ละเอียดในหม้อบดละเอียดเปียก(Wash mill) น้ำโคลนข้น(Slurry) ที่ได้จะนำไปผ่านตะแกรงละเอียดแล้วส่งเข้าเตาเผา วัตถุดิบที่ป้อนเข้าเตาเผาจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 35 ถึง 50



รูปที่ 2.5 การเตรียมกองวัตถุดิบสำหรับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

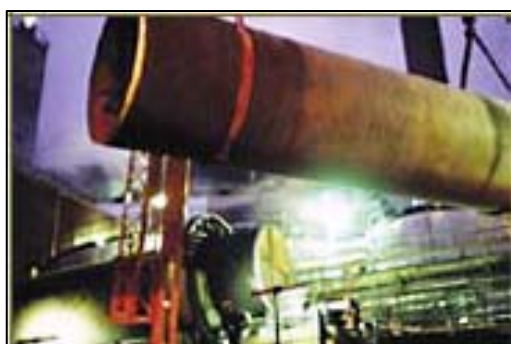


รูปที่ 2.6 การนำกองวัตถุดิบเข้าเผาสำหรับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์



รูปที่ 2.7 แสดงกระบวนการผลิตโดยทั่วไปและขอบเขตระบบการผลิตซีเมนต์

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



รูปที่ 2.8 ลักษณะเตาเผาโรตารีคิลน์

เตาเผาโรงงานปูนซีเมนต์เป็นเตาเผาแบบหมุน(rotary kiln) ทำด้วยเหล็กกล้ารูปทรงกระบอกข้างในบุด้วยอิฐทนไฟ เตาเผาแบบหมุนมีความเอียงจากแนวราบเล็กน้อยประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์ และหมุนรอบแกนของทรงกระบอกอย่างช้าๆ ประมาณ 1-3 รอบต่อนาที เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาเป็น ถ่านหิน น้ำมัน หรือก๊าซธรรมชาติ วัตถุดิบจะป้อนเข้าทางส่วนบนของเตา สำหรับกระบวนการผลิตแบบเปียก วัตถุดิบอยู่ในเตาเผาเป็นเวลา 2 ถึง 2 ชั่วโมงครึ่ง และเป็นเวลาครึ่งชั่วโมงถึง 1 ชั่วโมงสำหรับกรณีการผลิตแบบแห้ง

กระบวนการที่เกิดขึ้นในเตาเผาสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน[5,6] คือ

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

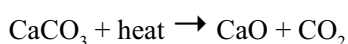
ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์หากแบ่งอุณหภูมิที่ใช้ จะแบ่งได้เป็น 3 ช่วงได้แก่

- 1) ช่วงอุณหภูมิ 15-805 องศาเซลเซียส

เป็นช่วงที่เรียกว่า drying and preheating zone ซึ่งในช่วงนี้อุณหภูมิของน้ำอิสระ และน้ำที่อยู่ในวัตถุดิบจะถูกทำให้ระเหย โดยทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจากอุณหภูมิห้อง

- 2) ช่วงอุณหภูมิ 805-1200 องศาเซลเซียส

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



ในขณะเดียวกันแมกนีเซียมคาร์บอเนต(MgCO₃)ที่มีอยู่บ้างในวัตถุดิบ จะเปลี่ยนรูปไปเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และคาร์บอนไดออกไซด์เช่นเดียวกัน กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า calcinations

- 3) ช่วงอุณหภูมิ 1200-1500 องศาเซลเซียส

เป็นช่วงที่เรียกว่า burning zone โดยวัตถุดิบจะถูกให้ความร้อน โดยทำให้เกิดปูนเม็ดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 1450 องศาเซลเซียส

ปูนเม็ดที่ออกจากส่วนล่างของเตาเผายังคงร้อนมาก และจะลดอุณหภูมิปูนเม็ด ซึ่งอัตราการลดลงของอุณหภูมิจึงมีผลต่อความเป็นผลึกของปูนเม็ด ต่อจากนั้นนำปูนเม็ดมาบดรวมกับยิปซั่มในหม้อบดปูนซีเมนต์(cement mill) ปริมาณยิปซั่มที่ใช้ประมาณร้อยละ 2.5 ถึง 3 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เพื่อหน่วงการก่อตัวอย่างรวดเร็วของปูนซีเมนต์

2.2.4 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์

1. องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 2.2 แสดงถึงองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งออกไซด์หลัก(major oxides) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์(CaO) ซิลิกา(SiO₂) อลูมินา(Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์(Fe₂O₃) ออกไซด์ทั้ง 4 องค์ประกอบนี้รวมกันได้ร้อยละกว่า 90 ของปูนซีเมนต์ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รอง(minor oxides) ซึ่งได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์(MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล(Na₂O และ K₂O) และซัลเฟอร์ ไตรออกไซด์(SO₃) และมีส่วนประกอบของออกไซด์อื่น ผสมอยู่บ้าง เช่น ไทเทเนียมออกไซด์(TiO₂) และฟอสฟอรัส-เพนทอกไซด์(P₂O₅) นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจะจัดรวมอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา(loss on ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง(insoluble residue) ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบ สารประกอบที่สำคัญมีอยู่ 4 อย่างแสดงในตารางที่ 2.3

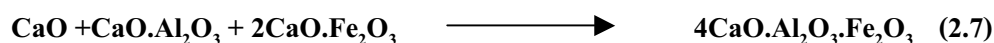
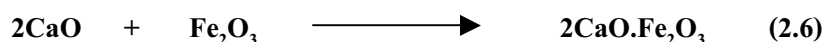
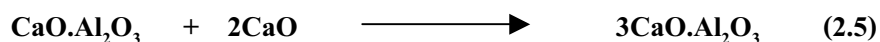
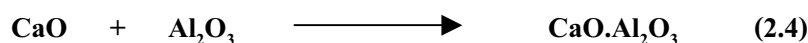
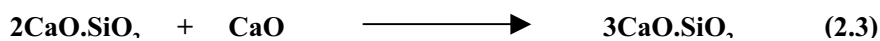
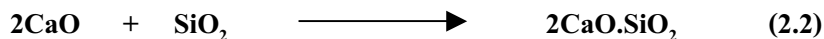
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก
แคลเซียมออกไซด์	60-67
ซิลิกา	17-25
อลูมินา	3-8
เฟอร์ริกออกไซด์	0.5-6.0
แมกนีเซียมออกไซด์	0.1-4.0
ออกไซด์ของอัลคาไล	0.1-1.8
ซัลเฟอร์ ไตรออกไซด์	0.5-3.0
สารประกอบอื่นๆ	0.5-3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา	0.1-3.0
กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง	0.20-0.75

ตารางที่ 2.3 โครงสร้างหลักของปูนเม็ด

โครงสร้างหลักของปูนเม็ด	สูตรโมเลกุล	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	Ca ₃ SiO ₅	C ₃ S (alite)
ไบแคลเซียมซิลิเกต	Ca ₂ SiO ₄	C ₂ S (belite)
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	Ca ₃ Al ₂ O ₆	C ₃ A (aluminite)
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	C ₄ AF (ferrite)

โดยแคลเซียมออกไซด์เป็นวัตถุดิบตั้งต้นของส่วนประกอบของปูนเม็ด ซึ่งทำปฏิกิริยาโดยต่อเนื่องจนเกิดเป็นส่วนประกอบต่างๆ



ส่วนประกอบของปูนเม็ดที่ต้องการจะอยู่ในรูปของไตรแคลเซียมซิลิเกตเป็นหลัก โดยควรมีประมาณร้อยละ 45-50 ในขณะที่ไดแคลเซียม ซิลิเกต ควรอยู่ในช่วงร้อยละ 15-35 เป็นหลัก โดยมีไตรแคลเซียม อะลูมิเนต และเตตระแคลเซียม อะลูมิโนเฟอร์ไรท์อย่างละร้อยละ 7-15 อุณหภูมิที่ให้กับวัตถุดิบในแต่ละช่วงจะให้ส่วนประกอบของปูนเม็ดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ

- แคลเซียมคาร์บอเนต จะกลายเป็นแคลเซียมออกไซด์ที่อุณหภูมิประมาณ 901 องศาเซลเซียส ด้วยปฏิกิริยาคูความร้อน
- ไดแคลเซียมซิลิเกตจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาคูความร้อน โดยเปลี่ยนรูปมาจากแคลเซียมออกไซด์ที่อุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียส
- ไตรแคลเซียมซิลิเกตจะเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์และไดแคลเซียมซิลิเกต โดยเป็นปฏิกิริยาคูความร้อนที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1352 องศาเซลเซียส โดยจะได้ไตรแคลเซียมซิลิเกตในรูปของของเหลว ซึ่งหลังจากการทำปฏิกิริยาแล้วต้องทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ไตรแคลเซียมซิลิเกตแข็งตัวกลายเป็นของแข็ง

2.2.5 คุณสมบัติของสารประกอบหลัก

สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์คือ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF เนื่องจากมีปริมาณมากถึงกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติและคุณภาพของปูนซีเมนต์ คุณสมบัติที่สำคัญได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คุณสมบัติ	สารประกอบ			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
อัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วกว่า(นาที่)
การพัฒนากำลัง	เร็ว (วัน)	ช้า(สัปดาห์)	เร็วมาก(1 วัน)	เร็วมาก(1วัน)
กำลังประลัย	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต

C₃S มีอยู่มากที่สุดในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 45 ถึง 55 มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมสี่เท่าแก่ ที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส C₃S สามารถสลายตัวได้ ซึ่งการสลายตัวนี้ค่อนข้างช้าและเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส C₃S จะมีเสถียรภาพและจะไม่เปลี่ยนแปลงสภาพเมื่อผสม C₃S กับน้ำจะเกิดการก่อตัวและแข็งตัวและให้กำลังค่อนข้างดีโดยเฉพาะในช่วง 7 วันแรก

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต

C₂S มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 15-35 C₂S มีลักษณะเป็นเม็ดกลมและแสดงลักษณะทวินิ่งเมื่อผสมกับน้ำสามารถทำปฏิกิริยาเกิดความร้อนขึ้นได้ ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₂S ค่อนข้างต่ำ การพัฒนากำลังของ C₂S ค่อนข้างช้าและช้ากว่า C₃S มาก คือเริ่มให้กำลังหลังจาก 4 สัปดาห์ขึ้นไป

3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต

C₃A มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 7-15 ลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยม มีสีเทาอ่อน ปฏิกิริยากับน้ำรุนแรงมากและทำให้เพสต์ก่อตัวทันที การพัฒนากำลังของ C₃Aจะเร็วมากคือ สามารถพัฒนาได้ภายในวันเดียวดังประลัยที่ได้ค่อนข้างต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับ C₃S หรือ C₂S

4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์

C₄AF มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 5-10 และอยู่ในสภาพสารละลายแข็ง เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาและทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว พัฒนากำลังได้เร็วมากเช่นเดียวกับ C₃S แต่กำลังประลัยที่ได้ค่อนข้างต่ำและต่ำกว่า C₃A เล็กน้อย

2.2.6 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และประโยชน์ในการใช้งาน

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์(Portland Cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทั่วไปเป็นปูนซีเมนต์ที่นิยมใช้งานกันมากที่สุด สามารถจำแนกตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 15 ได้ 5 ประเภทด้วยกันคือ

-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง จัดเป็นปูนซีเมนต์มาตรฐาน เหมาะกับงานก่อสร้างทั่วไป ที่ไม่ต้องการคุณสมบัติ นอกเหนือไป กว่าปกติ ส่วนใหญ่ใช้ในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น งานก่อสร้างเสา คาน พื้นของอาคารต่างๆ สะพาน ถังน้ำ บ่อน้ำ ท่อระบายน้ำ คอนกรีตทางเท้า เป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ไม่เหมาะกับ งานที่ต้องสัมผัสกับซัลเฟตที่มีความเข้มข้นสูง หรืองานที่ไม่ต้องการให้เกิดความร้อน จาก ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำมาก จนเป็นสาเหตุทำให้คอนกรีตเสียหาย ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ที่ผลิตและมีจำหน่ายทั่วไปในประเทศไทย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราช้าง ตราเพชรเม็ดเดียว ตราพญานาคเศียรเดียวสีเขียว ตราทีพีไอ สีแดง ตราภูเขา และตราดาวเทียม เป็นต้น

-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่สอง จัดเป็นปูนซีเมนต์ดัดแปลง เพื่อให้มีความต้านทานต่อซัลเฟตปานกลาง เกิดความร้อนจาก ปฏิกิริยาระหว่าง ปูนซีเมนต์กับน้ำต่ำและค่อยๆ เพิ่มขึ้นในอัตราช้ากว่าปูนประเภทที่หนึ่ง ดังนั้น จึงสามารถช่วยลดอุณหภูมิของคอนกรีต ในอากาศร้อนได้ดี ปูนซีเมนต์ประเภทนี้เหมาะกับงาน โครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น ตอม่อขนาดใหญ่ สะพานเทียบเรือ เขื่อนหรือกำแพงกันดิน รวมทั้งใน บริเวณที่สัมผัสกับน้ำเค็มหรือน้ำทะเลเป็นครั้งคราว ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ที่เคยผลิตใน ประเทศไทย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราพญานาค 7 เศียร

-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่สาม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ จะมีเนื้อปูนละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นผลทำให้แข็งตัวและรับแรงได้เร็วกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยปกติจะ สามารถรับแรงที่อายุ 7 วัน เท่ากับที่อายุ 28 วัน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นอกจากนั้นยังนิยมนำไปใช้กับงานที่ต้องถอดแบบเร็วๆ เช่น คอนกรีตสำเร็จรูป หรืองาน ซ่อมแซมถนน หรืออาคารต่างๆ เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างรวดเร็ว ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ที่ ผลิตในประเทศไทย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราเอราวัณ ตราพญานาคเศียรเดียวสีแดง ตราสามเพชร และตราทีพีไอ สีดำ เป็นต้น

-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่สี่ เป็นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่มีคุณสมบัติเหมาะกับงาน ซึ่งต้องการควบคุมทั้งปริมาณ และอัตรา ความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีตให้น้อยที่สุด เท่าที่จะทำได้ ดังนั้นอัตราการเกิดกำลังของคอนกรีต ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภทนี้ จะเป็นไปอย่างช้าๆ จึงนิยมใช้กับงานคอนกรีตขนาดใหญ่ เช่น เขื่อนกันน้ำ ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ถ้ามากเกินไปจะเป็นอันตรายกับ ตัวโครงสร้างเขื่อน เนื่องจากจะทำให้เกิดขยายตัว เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ และทำให้ คอนกรีตเกิดการแตกร้าวขึ้นได้

-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้านทานซัลเฟตได้สูงหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้า เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีคุณสมบัติในการต้านทานซัลเฟตสูงจึงเหมาะกับงานก่อสร้างใน

บริเวณดินหรือน้ำที่มีส่วนประกอบของซิลเฟตเข้มข้นสูงปูนซีเมนต์ประเภทนี้ที่ผลิตในประเทศไทย ได้แก่ ตราปลาฉลาม ตราช้างพื้นสีฟ้า และตราที่พีไอ สีฟ้า ฯลฯ

2) ปูนซีเมนต์ผสม (Mixed Cement)

ปูนซีเมนต์ผสมหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ปูนซีเมนต์ซิลิกา (Silica Cement) ได้จากการนำเอาทรายหรือหินปูนบดละเอียด ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 25 ถึง 30 เพื่อให้มีปริมาณมากขึ้นและราคาถูกลง และลดการยืดหดตัวของปูนซีเมนต์เมื่อแข็งตัวแล้ว เนื่องจากคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ชนิดนี้มีกำลังต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งดังนั้นจึงเหมาะกับการใช้งานโครงสร้างที่ไม่สำคัญและไม่ต้องรับแรงมาก และเนื่องจากมีคุณสมบัติแข็งตัวช้าและไม่ยืดหดตัวมากนัก จึงนิยมใช้ในงานปูนก่อ ปูนฉาบและปูนตกแต่งทั่วไป เนื่องจากสามารถช่วยลดการแตกร้าวของผิวได้ ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ที่ผลิตในประเทศไทย ได้แก่ ตราเสือ ตรางูเห่า ตรานกอินทรีและ ตราที่พีไอสีเขียว เป็นต้น

3) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์พิเศษอื่นๆที่มีการใช้งานอยู่ทั่วไป ได้แก่

-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ ผลิตจากการนำเอาวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอยจากถ่านหิน บดผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง ส่วนใหญ่ใช้กับงานโครงสร้างใต้น้ำ ทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม เช่น งานสะพาน เขื่อน ท่าเทียบเรือ เนื่องจากมีคุณสมบัติทนซัลเฟตได้ดี

-ปูนซีเมนต์ขาว

เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่มีออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส อยู่ในปริมาณที่ต่ำจึงทำให้มีสีขาวจึงสามารถผสมกับสีฝุ่นต่างๆ เพื่อทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเขียว แดง เหลือง ฯลฯ ได้ตามต้องการ ดังนั้นจึงนิยมใช้ในงานตกแต่งต่าง ๆ เช่น งานหินขัด งานปูกระเบื้อง และงานสถาปัตยกรรมอื่น ๆ ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ที่ผลิตในประเทศไทย ได้แก่ ตราช้างเผือก ตราเสือเผือกและตรามังกร เป็นต้น

-ปูนซีเมนต์บ่อน้ำมัน

เป็นปูนซีเมนต์ไฮโดรลิกชนิดหนึ่ง ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตได้สูง ผสมกับสารหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งคุณสมบัติจะแตกต่างไปจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบบธรรมดา ตรงที่ปูนซีเมนต์บ่อน้ำมันจะสามารถก่อตัวได้ในที่อุณหภูมิสูง ๆ นิยมใช้งานก่อสร้างขุดเจาะบ่อน้ำมันลึก ๆ

2.3 คุณสมบัติและการทดสอบ

มาตรฐานเกณฑ์คุณภาพของปูนซีเมนต์เป็นการกำหนดคุณสมบัติของตัวปูนซีเมนต์และคุณสมบัติของปูนซีเมนต์เมื่อได้นำไปผสม ซึ่งได้แก่ คุณสมบัติบางอย่างของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้า

2.3.1 ปูนซีเมนต์

คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ทั้งทางเคมีและกายภาพมีผลต่อคุณสมบัติและการใช้งานของคอนกรีต คุณสมบัติที่สำคัญ ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี ความละเอียด ความถ่วงจำเพาะ การสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการเผาและกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง

1) ความละเอียด

ปูนซีเมนต์ผงเป็นวัสดุที่มีอนุภาคเล็กมากใน 1 กิโลกรัมจะมีอนุภาคมากถึง 1.1×10^{12} อนุภาค เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเริ่มจากผิวหน้าของปูนซีเมนต์ ดังนั้นการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำจึงขึ้นอยู่กับความละเอียดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่ละเอียดจะมีพื้นที่ผิวมาก มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาและมีอัตราการเพิ่มของกำลังเร็วขึ้น วิธีวัดความละเอียดของปูนซีเมนต์ที่นิยมกัน ได้แก่ การร่อนด้วยตะแกรงหรือแรงการทดสอบด้วยเทอร์บิเดเตอร์และการทดสอบด้วยวิธีแอร์เพอร์มิอะบิลิตี เป็นต้น

2) ความถ่วงจำเพาะ

ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ใช้ในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต และเป็นค่าที่ใช้ประกอบการควบคุมคุณภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย หาได้โดยวิธีแทนที่ด้วยน้ำมันก๊าดด้วยปูนซีเมนต์จำนวนหนึ่งทีร่อนน้ำหนักแน่นอน ขวดแก้วสำหรับบรรจุน้ำมันก๊าดเป็นขวดแก้วเลอชาเตอลิเอร์ รายละเอียดทดสอบมีอยู่ในมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 2 และ ASTM C188

3) การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา

การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา เป็นการวัดปริมาณคาร์บอนและความชื้นในปูนซีเมนต์ขึ้นจากการทำปฏิกิริยากับอากาศ มาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1 และ ASTM C150 กำหนดค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูงสุดไม่เกินร้อยละ 3 สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

4) กากที่ไม่ได้ละลายในกรดและด่าง

เป็นการวัดสิ่งแปลกปลอมในปูนซีเมนต์ซึ่งส่วนมากเป็นสารที่เจือปนมากับยิปซัมและวัตถุดิบที่เหลือจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ กากที่ไม่ละลายในกรดและด่างมากเกินไปทำให้กำลังของมอร์ต้าหรือกำลังของคอนกรีตต่ำลงเนื่องจากปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมมีน้อยลง โดยมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1 และ ASTM C150 ได้กำหนดค่าสูงสุดไม่เกินร้อยละ 0.75

2.3.2 การทดสอบซีเมนต์เพสต์

ซีเมนต์เพสต์เป็นส่วนผสมที่ได้จากการผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ คุณสมบัติหลายๆ อย่างของซีเมนต์เพสต์จะสะท้อนถึงคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ที่นำไปใช้ทำมอร์ต้าหรือคอนกรีต ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์จึงเป็นสิ่งที่จำเป็น การทดสอบซีเมนต์เพสต์ที่สำคัญ ได้แก่

1) ความข้นเหลวปกติ

ในการทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ เช่น เวลาก่อตัว(setting time) และการก่อตัว จะใช้ซีเมนต์เพสต์มาตรฐานที่ความข้นเหลวปกติ(normal consistency) รายละเอียดของการทดสอบความข้นเหลวปกติมีอยู่ในมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 8 และ ASTM C187 โดยใช้เครื่องมือไวเคต ซีเมนต์เพสต์จะถือว่าอยู่ในเกณฑ์ความข้นเหลวปกติเมื่อเข็มไวเคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. น้ำหนัก 300 กรัม สามารถจมลงในซีเมนต์เพสต์ 10 มม. ในเวลา 30 วินาที โดยทั่วไปอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์สำหรับความข้นเหลวปกติจะอยู่ในช่วง 0.24 ถึง 0.33

2) เวลาก่อตัว

ภายหลังจากการผสมปูนซีเมนต์กับน้ำแล้ว หากถึงไวส์กพัททิงจะถึงเวลาที่ซีเมนต์เพสต์เริ่มก่อตัว(initial set) และทำให้คุณสมบัติเหลวปั่นได้หมดไป เรียกระยะเวลาที่ว่าเวลาก่อตัวเริ่มต้น(initial setting time) ซีเมนต์เพสต์จะก่อตัวไปเรื่อยๆ จนกระทั่งกลายเป็นก้อนแข็งซึ่งเป็นระยะสุดท้ายของการก่อตัว เรียกว่า เวลาก่อตัวสุดท้าย(final setting time) หลังจากนั้นเป็นการแข็งตัว(hardening) ซึ่งซีเมนต์เพสต์จะมีกำลังเพิ่มขึ้นตามลำดับ การทดสอบเวลาการก่อตัวสามารถวัดได้โดยการทดสอบแบบไวเคตตามมาตรฐาน มอก.15 เล่ม 9 และ ASTM C191 หรือการทดสอบแบบกิลโมร์ ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 10 และ ASTM C266

2.4 การใช้วัตถุเติมและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตซีเมนต์

การนำของเสียอันตรายไปเป็นสารทดแทนเชื้อเพลิงในการผลิตซีเมนต์นั้น จัดได้ว่าเป็นวิธีการกำจัดของเสียอันตรายวิธีหนึ่งที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในหลายประเทศ โดยทั่วไปแล้วของเสียที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนี้มีทั้งของเสียที่จัดเป็นขยะจากอุตสาหกรรมและของเสียอันตราย อันประกอบด้วย น้ำมันที่ใช้แล้ว ตัวทำละลาย ไม้และของเสียจำพวกเศษไม้จากอุตสาหกรรมไม้ ยางรถยนต์ ของเสียอุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมพลาสติก ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย โดยของเสียเหล่านี้จะมีการป้อนเข้าไปในเตาเผาซึ่งแสดงในรูปที่ 2.8 ของเสียเหล่านี้มักมีโลหะหนักเจือปนมาด้วยในปริมาณที่แตกต่างกัน เช่น ในน้ำมันและตัวทำละลายที่ใช้แล้วจะมีตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) ในพลาสติกจะมีโลหะหนักได้แก่ โคบอลต์ (Co) แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) ส่วนยางรถยนต์จะมีสังกะสีอยู่มาก และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียมักมีโลหะหนักหลายชนิดเจือปนอยู่เป็นต้น

เตาเผาปูนซีเมนต์ซึ่งรับกำจัดของเสียในเชิงพาณิชย์รับของเสียจากผู้กำเนิดของเสียในการใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนเม็ดในกระบวนการผลิตซีเมนต์ (Portland cement clinker) ของเสียเหลือปกติจะป้อนเข้าบริเวณส่วนปลายของเตาซึ่งมีอุณหภูมิสูง ของเสียของแข็งอาจจะป้อนเข้าบริเวณ แคลซินิง (Calcining zone) ด้วยเครื่องมือต่างๆ สำหรับเตาเผาที่มีความยาว ของเสียของแข็งสามารถนำเข้าทางบริเวณกลางเตาเผา (Mid-kiln) และเข้าบริเวณชุดให้ความร้อนเบื้องต้น (Pre-heater/Pre-calciner kiln) ซึ่งจะทำให้การป้อนบริเวณชั้นที่มีอุณหภูมิสูง

ในการนำของเสียอันตรายที่มีโลหะหนักนี้มาใช้เป็นสารทดแทนเป็นเชื้อเพลิงนี้ นอกจากจะคำนึงถึงปริมาณความร้อนที่ของเสียจะให้ได้ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้แล้ว ยังต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งในแง่ของการปล่อยก๊าซเสียสู่บรรยากาศภายนอกเตาเผา และการปนเปื้อนของโลหะหนักในผลิตภัณฑ์อีกด้วย

2.5 ลักษณะของวัตถุดิบทดแทนและเชื้อเพลิงทดแทน

2.5.1 วัตถุดิบทดแทน (Alternative raw material)

กากของเสียอุตสาหกรรมซึ่งไม่มีค่าความร้อนและมีองค์ประกอบหลักเหมือนกับวัตถุดิบทั่วไปในการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ไรท์ (Fe₂O₃) โดยข้อดีในการนำของเสียเข้ามาทดแทนวัตถุดิบได้แก่ การลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในการผลิตปูนซีเมนต์ เช่น หินปูน หินดินดาน ดินอลูมินา ดินลูกรัง และลดพลังงานที่ใช้ในการระเบิดเหมืองหินซึ่งเป็นกระบวนการที่จะได้วัตถุดิบดังกล่าวมา นอกจากนี้กากของเสียอุตสาหกรรมบางชนิดยังมีสภาพเป็นแคลเซียมออกไซด์ไม่ใช่แคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้ไม่มีความจำเป็นจะต้องใช้พลังงานในการแตกตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต มาเป็นแคลเซียมออกไซด์อีก ซึ่งถือว่าประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้นทางหนึ่ง นอกจากนี้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะเกิดขึ้นจากกระบวนการดังกล่าวไม่เกิดขึ้นด้วย ถือเป็นการได้ประโยชน์จากการใช้วัตถุดิบทดแทนในเชิงเชื้อเพลิงทดแทนด้วยเช่นกัน

2.5.2 เชื้อเพลิงทดแทน (Alternative fuels)

กระบวนการผลิตปูนเม็ดโดยการเผาในโรตารีคิลนมีสถานะที่เหมาะสมสำหรับการนำของเสียมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน ซึ่งสถานะที่เหมาะสมนี้ประกอบด้วย อุณหภูมิที่สูง สภาพความเป็น Oxidizing atmosphere การเผาของเสียทั้งที่เป็นโลหะ (Metallic) และอโลหะ (Non-metallic) จะได้รับการดูดซับอย่างสมบูรณ์ การมีพื้นที่สำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมากพอ การผสมของแก๊สและผลิตภัณฑ์ที่ดี และเวลาที่เพียงพอมากกว่า 2 วินาที สำหรับการกำจัดของเสียอันตราย

เพื่อให้การดำเนินการและการเผาไหม้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพซึ่งจะเป็นปัจจัยที่สำคัญซึ่งจะต้องพิจารณาความต้องการให้กระบวนการผลิตที่ทำให้เกิดปูนเม็ด โดยการผสมสิ่งต่างๆเข้าด้วยกันอย่างเป็นเนื้อเดียว

และการเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยกระบวนการออกซิเดชันของส่วนประกอบเชื้อเพลิงจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของการใช้เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการป้อนเข้าจะสามารถใช้ได้ดีกว่า เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงแข็งซึ่งได้ทำการผสมเป็นเนื้อเดียวกันและใช้ในเวลาเดียวกัน

การนำของเสียมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทนมีข้อดีอื่นๆ ดังนี้

- 1) การบำบัดของเสียไม่ต้องการแหล่งความร้อนเพิ่มเติม
- 2) ไม่มีการเพิ่มสารมลภาวะแก่บรรยากาศเนื่องจากคุณสมบัติ Neutralize ของปูนเม็ด และกระบวนการดักฝุ่นของการเผาปูนซีเมนต์
- 3) ค่าใช้จ่ายของการเผาของเสียในเตาปูนซีเมนต์สามารถทำให้ถูกกว่าการสร้างโรงงานเตาเผาใหม่
- 4) กระบวนการเผาปูนเม็ดสามารถเผาของเสียอันตรายและทำให้ผ่านมาตรฐานของ EU
- 5) แก๊สที่เกิดจากการเผาไม่ก่อให้เกิดของเสียต่อเนื่อง
- 6) อาจช่วยลดวัตถุดิบบางประเภทได้

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างกากอุตสาหกรรมที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทน

ตัวอย่างกากที่ใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน	ตัวอย่างกากที่ใช้เป็นพลังงานทดแทน
● ตะกรันจากงานหลอมโลหะ ● จี๊เหล้าลอย จี๊เหล้าหนัก ● ทรายหล่อแบบ ● อิฐทนไฟเสื่อมสภาพ ● สารโพลีเมอร์ ● ผลิตภัณฑ์เซรามิกชำรุด ● แม่พิมพ์เซรามิก ● กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย ● ดินและโคลนปนเปื้อนสารเคมี ● สารดูดความชื้นเสื่อมสภาพ	● สารเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างๆ ● พลาสติกและผ้าปนเปื้อน ● กากสีและตะกอนสี ● สีนํ้าและวัตถุดิบหมดอายุหรือไม่ได้คุณภาพ ● เมลามีนหรือกระเบื้องเสื่อมสภาพ ● เศษยางหรือผลิตภัณฑ์จากยางที่ไม่ใช้แล้ว ● ยางรถยนต์เก่า ● ผงคาร์บอน ● ตัวทำละลายต่างๆ ● น้ำมันใช้แล้ว หรือวัสดุปนเปื้อนน้ำมัน ● น้ำหล่อเย็น น้ำเสีย และน้ำจากกระบวนการทำความสะอาด ● เศษไม้ จี๊เหล้าลอย แกลบ และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่นๆ ● พลาสติกเรซิน และเรซินจากระบบบำบัดน้ำเสีย

ในกรณีที่เป็นของเสียอันตราย จะต้องทำให้มั่นใจว่าได้ทำการสลายสารพิษจำพวกธาตุโลหะ โดยของเสียอันตรายจะป้อนเข้าบริเวณจุดเผาหลัก และถูกทำลายบริเวณที่เผาขั้นต้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 2,000 องศาเซลเซียส ของเสียซึ่งป้อนเข้าบริเวณจุดเผาขั้นที่สอง(Secondary burner Pre-heater หรือ Pre-calciner) จะถูกเผาด้วยอุณหภูมิต่ำอย่างช้าๆ แต่จะถูกเผาไหม้อย่างเร็วที่อุณหภูมิใน Pre-calciner ประมาณ 1,000 - 2,000 องศาเซลเซียส ส่วนของเสียซึ่งมีสารประกอบประเภทที่ระเหยได้ง่ายที่ป้อน เข้าบริเวณส่วนบนของปลายเตาหรือใช้ในรูปแบบเชื้อเพลิงก้อนที่สามารถระเหยได้ สารประกอบเหล่านี้จะไม่ผ่านบริเวณที่เผาในช่วงแรกและอาจจะไม่ได้ถูกทำลายหรือประกอบ เป็นปูนเม็ด ดังนั้นการใช้ของเสียซึ่งมีส่วนประกอบของโลหะที่ระเหยง่าย เช่น ปรอท หรือสารประกอบประเภทสารอินทรีย์ที่ระเหยง่าย อาจจะเป็นผลในการเพิ่มปริมาณสารมลพิษของปรอทหรือสารประกอบประเภทสารอินทรีย์ที่ระเหยง่าย ซึ่งไม่เหมาะสมในการนำไปใช้

2.6 แคดเมียม[7]

เป็นโลหะทรานซิชัน สีเงินขาว เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมเป็น 48 และมีประจุหลายชนิด เช่น 106, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114 และ 116 ซึ่งเป็นธาตุที่ค่อนข้างหายากในธรรมชาติ และพบในรูปผลึกหกเหลี่ยม (Hexagonal) แคดเมียมมักอยู่รวมกับกำมะถันเป็น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) มีสีเหลือง และมักปนอยู่ในแร่สังกะสีซัลไฟด์ (ZnS) และจากกากอุตสาหกรรมที่มีปริมาณแคดเมียมมากที่สุด มาจากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียเป็นส่วนใหญ่ และจากกากสี หรือจากผลิตภัณฑ์เรซินก็มีปริมาณแคดเมียมปนอยู่ในกากอุตสาหกรรมดังกล่าวเช่นกัน การนำเอาแคดเมียมมาใช้ประโยชน์ เช่น เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ การผลิตสีผสมพลาสติก สีทาบ้าน อุปกรณ์ไฟฟ้า โลหะผสม อะไหล่รถยนต์ เป็นสาเหตุให้โลหะแคดเมียม เข้ามาเจือปนอยู่ในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งที่มีการทำเหมืองแร่สังกะสี (รวมทั้งตะกั่ว ทองแดง) การเผาไหม้สิ่งของที่เป็นพวกพลาสติกและยาง โรงงานทำโลหะเจือและชุบโลหะ จึงเกิดการปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อมโดยเข้าไปปนอยู่ในน้ำ และในดิน ตัวอย่างเช่น จะมีโลหะแคดเมียมถูกชะลงตามน้ำและสะสมในดิน เมื่อปลูกข้าวในบริเวณนั้นจะพบปริมาณของแคดเมียมในข้าวสูงมาก จนทำให้คนที่รับประทานข้าวจากบริเวณนั้นป่วยเป็นโรคพิษจากแคดเมียมกันมากมาย เพราะฉะนั้นน้ำจึงเป็นตัวพาแคดเมียมไปสะสมในที่ต่างๆ ถ้ายิ่งน้ำฝนที่เป็นกรดด้วยก็จะเพิ่มปริมาณการสะสมแคดเมียมในดิน พืชจึงดูดไปสะสมได้มากขึ้น ลักษณะเฉพาะของแคดเมียม แสดงในตารางที่ 2.6 ในส่วนของค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของแคดเมียมได้แสดงในตารางที่ 2.7 ซึ่งค่ามาตรฐานของหน่วยงานต่างๆ ส่วนใหญ่ยังไม่มีการระบุค่ามาตรฐานที่ชัดเจนและเป็นมาตรฐานเดียวกัน

ตารางที่ 2.6 ลักษณะทั่วไปของแคดเมียม [8]

ลักษณะทั่วไป	
ชื่อ, สัญลักษณ์, หมายเลข	แคดเมียม, Cd, 48
CAS.No	1306-19-0
มวลอะตอม	128.411 กรัม/โมล

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติทางกายภาพของแคดเมียม[8]

คุณสมบัติทางกายภาพของแคดเมียม	
สถานะ	ผง, ผลึกของแข็ง
ความหนาแน่น	8150 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
จุดเดือด	1559 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	1500 องศาเซลเซียส
ความสามารถในการละลายน้ำ (กรัม/100 มล.)	0.005 ที่ 20 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.8 ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของแคดเมียม[8]

ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของแคดเมียม	
LD ₅₀ (มก./กก.)	12 (หนู)
LC ₅₀ (มก./ม ³ .)	780 / 10 ชั่วโมง
IDLH (พีพีเอ็ม)	1.71
PEL- TWA (พีพีเอ็ม) 8 ชั่วโมงต่อวัน	0.00095
TLV – TWA (พีพีเอ็ม) 8 ชั่วโมงต่อวัน	0.019042056
พรบ.โรงงาน พ.ศ.2535 (พีพีเอ็ม)	-

หมายเหตุ : LD₅₀ (Mean Lethal Dose 50) คือ ปริมาณของสารพิษ เป็นมิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนัก ทำให้สัตว์ทดลองที่ได้รับสารนั้นเพียงชนิดเดียวตายร้อยละ 50 ของจำนวนสัตว์ทดลองทั้งหมด

LC₅₀ (Mean Lethal Concentration) คือ ค่าความเข้มข้นของสารเคมีในอากาศหรือน้ำที่ทำให้สัตว์ทดลองตายไปเป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของสัตว์ทดลองทั้งหมด ในระยะเวลาของสัตว์ทดลองหายใจเอาสารเคมีเข้าไป หรือระยะเวลาที่สัตว์น้ำอยู่ในน้ำที่มีสารเคมีละลายอยู่ IDLH คือ ค่าความเข้มข้นของสารเคมีสูงสุดเมื่อเกิดความบกพร่องจากอุปกรณ์ป้องกันการหายใจ แล้วสามารถอพยพออกจากบริเวณนั้นภายใน 30 นาที

PEL คือ ค่าความเข้มข้นของสารเคมีในบรรยากาศการทำงานที่อนุญาตให้มีได้ตามกฎหมายความปลอดภัยและอาชีวอนามัยแห่งสหรัฐอเมริกา

TLV (Threshold Limit Value) คือ ความเข้มข้นสูงสุดของสารมลพิษอากาศชนิดหนึ่ง โดยเชื่อว่าคนในภาคอุตสาหกรรมที่มีสุขภาพสมบูรณ์ สามารถรับได้ทุกวัน ไม่เกิน 8 ชั่วโมง โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ เมื่อนำความเข้มข้นของสารปนเปื้อนมาคำนวณค่าเฉลี่ยโดยน้ำหนักเวลา จะได้เป็นค่า Time Weighted Average (TWA) ด้วยการกำหนดว่าทำงาน 8 ชั่วโมง ถ้าต้องการพิจารณาว่าพื้นที่ของการกำจัดขยะอันตรายปลอดภัยต่อชุมชนหรือไม่ โดยเปรียบเทียบค่า TLV – TWA กับค่าผลรวมของความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ถ้าผลรวมของค่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อน มีมากกว่าค่า TLV – TWA จะหมายความว่าพื้นที่นี้ไม่ปลอดภัย และในทางกลับกัน ถ้าผลรวมของความเข้มข้นของสารปนเปื้อนน้อยกว่าค่า TLV – TWA จะหมายความว่าพื้นที่นี้ปลอดภัย

แคดเมียมอยู่ในร่างกายได้นานสิบปี มักไปสะสมที่ตับและไต การสะสมของแคดเมียมในร่างกายทำให้เกิดโรคอิไต-อิไต (Itai- Itai) เกิดอาการปวดกระดูกตามข้อ ชีโครงและสันหลัง ซึ่งส่วนมากเป็นเพศหญิง โดยเฉพาะหญิงที่มีบุตรหลายคนและวัยหมดประจำเดือน ซึ่งต่อมามีการค้นพบว่าสาเหตุมาจากการบริโภคข้าวที่ปนเปื้อนสารแคดเมียมเป็นเวลานาน 30 ปีขึ้นไป

เมื่อ แคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจะสะสมในร่างกายและปริมาณการสะสมเพิ่มขึ้นกับอายุ การสะสมแคดเมียมในร่างกายในปริมาณที่สูงทำให้คนและสัตว์เป็นหมันและเป็นมะเร็งได้ นอกจากนี้แล้วยังทำให้เกิดโรคความดันโลหิตสูง ก่อความเสียหายต่อตับและไต[9]

อาการและอาการแสดงของโรคอิไต-อิไต ได้แก่ ปวดสะโพก (Hip pain), ปวดแขน ขา (extremity pain), มีวงแหวนแคดเมียม (yellow ring), ปวดกระดูก (Bone pain), ปวดข้อ (joint pain), มีความผิดปกติที่กระดูก สันหลัง ทำให้มีลักษณะเตี้ย หลังค่อม อาการระยะสุดท้าย ได้แก่ เบื่ออาหาร น้ำหนักลด มีความผิดปกติของ เมตาบอลิซึม โดยส่วนใหญ่เสียชีวิตจากภาวะไตวาย และ การเสียสมดุลของเกลือแร่ (Electrolyte Imbalance) เริ่มแรกผู้ป่วยจะปวดบริเวณสะโพก แขนขา อาการนี้จะหายเมื่อประคบหรือแช่น้ำร้อน บริเวณที่ติดกับเหงือกจะมีสีเหลืองเรียกว่า วงแหวนแคดเมียม ต่อมาจะปวดกระดูกตามข้อ โดยเฉพาะกระดูกเชิงกรานและหัวหน้าคล้ายมีวัตถุแหลมมาทิ่มแทงทั่วร่างกาย แคดเมียมจะสลายตัวออกจากกระดูก ผู้ป่วยเดินถ่างขาคล้ายเป็ด ระยะหลังผู้ป่วยจะเจ็บปวดมากจนเดินไม่ไหวร่างกายเตี้ยค่อมกระดูกหักมากขึ้น กระดูกสะโพกขาดความแข็งแรง ระยะนี้กินเวลานาน 20-30 ปี ในการได้รับสารระยะสุดท้ายผู้ป่วยจะกินไม่ได้ นอนไม่หลับ เบื่ออาหาร น้ำหนักลด อ่อนเพลีย หดแรงแรง และเสียชีวิตในที่สุด การรักษาพิษของแคดเมียม โดยการใช้ BAL จะไม่ได้ผลเหมือนโลหะตัวอื่น กลับจะเป็นพิษมากขึ้นเพราะสารแคดเมียมจะจับกับสาร BAL จะผ่านไตและแคดเมียมจะแยกตัวออกมาจับกับเซลล์ที่ไตได้อีก จึงเป็นการยากในการขับสารพิษแคดเมียมออกจากร่างกายทางที่ควรป้องกันการปนเปื้อนของสารแคดเมียมในสิ่งแวดล้อมมากเกินไปจนคิดอันตรายระดับและขีดความปลอดภัย การได้รับสารแคดเมียม 1300 ไมโครกรัม/วัน

จะเป็นพิษ เกิดการกลายพันธุ์ และทำให้เป็นโรคโลหิตจาง ความดันโลหิตสูง อายุสั้นลง กรณีที่เกิดการระบาดของโรคอีไค-อีไค เพราะมีแคดเมียมปะปนในน้ำ 0.4-3.36 ส่วน ต่อล้านส่วน

พิษของแคดเมียมและโรคที่เกิดขึ้น

การได้รับแคดเมียมจำนวนมากอาจทำให้เกิดพิษเฉียบพลันได้ แต่ส่วนใหญ่โรคที่เกิดจากแคดเมียมมักเป็นชนิดเรื้อรัง โดยการได้รับแคดเมียมติดต่อกันเป็นเวลานาน โรคที่เกิดอาจแบ่งเป็นกลุ่มได้ดังนี้

1. โรคปอดเรื้อรัง การได้รับแคดเมียมนานๆ และในปริมาณมากโดยเฉพาะจากการหายใจ จะทำให้เกิดการอุดตันภายในปอด ซึ่งเป็นเพราะมีการอักเสบของหลอดลม มีพังผืดจับในทางเดินหายใจส่วนล่าง และมีการทำลายของถุงลมซึ่งจะกลายเป็นโรคถุงลมโป่งพองในที่สุด ผู้ที่มีความเสี่ยงมากคือคนทำงานกับผงแคดเมียมโดยตรง เช่น โรงงานแบตเตอรี่ขนาดเล็ก

2. โรคไตอักเสบ จะแสดงออกโดยมีการอักเสบของไต โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ท่อในไตซึ่งจะพบแคดเมียมในปัสสาวะสูง มีโปรตีน กลูโคสสูงในปัสสาวะ การทำงานทางท่อในไตเสียการทำงาน พบว่ามีการสะสมของแคดเมียมที่หมวกไตก่อให้เกิดการอักเสบและเป็นอันตรายต่อไป และอาจเป็นไตวายได้ในที่สุดการเกิดโรคไตอักเสบนี้จะเป็นแบบถาวร แม้ว่าจะไม่ได้รับแคดเมียมต่อไปแล้ว แต่ไตก็ยังไม่สามารถฟื้นคืนกลับมาดังเดิมได้

3. โรคกระดูก แคดเมียมทำให้เกิดการสูญเสียแคลเซียมออกมาในปัสสาวะสูง และอาจมีแคดเมียมเข้าไปสะสมในกระดูกทำให้กระดูกพรุน และมีอาการปวดกระดูกอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาการปวดกระดูกสะโพก เช่นที่เกิดกับชาวญี่ปุ่นที่เมืองฟูซุ ในช่วงก่อนและระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งเรียกโรคนี้ว่า อีไตอีไต (itai itai) หรือ เอช เอช (ouch ouch) ชื่อโรคมานจากเสียงร้องอย่างเจ็บปวดในภาษาญี่ปุ่น ซึ่งได้รับแคดเมียมมากเป็นเวลานานจากการกินข้าวที่ปนเปื้อนด้วยแคดเมียมมาก คนกลุ่มนี้จะมีกระดูกเปราะ แตกหักง่าย และอาจมีความสูงลดลงได้ เพราะการสูญเสียแคลเซียมทำให้เป็นโรคกระดูกพรุน

4. โรคความดันโลหิตสูงและโรคหัวใจ พบว่าแคดเมียมทำให้ความดันโลหิตสูงขึ้นมากและมีโอกาสเป็นโรคหัวใจสูงขึ้นด้วย ซึ่งอาจจะเป็นการร่วมกันกับโรคไตดังที่กล่าวมาแล้ว

5. โรคมะเร็ง มีข้อมูลการศึกษาติดตามคนงานที่ทำงานสัมผัสกับแคดเมียม เช่น โรงงานทำแบตเตอรี่แห่งขนาดเล็ก พบว่ามีความเสี่ยงต่อการเป็นโรคมะเร็งปอด สูงกว่าคนทั่วไปและอาจมีผลต่อการเสี่ยงเป็นโรคมะเร็งของต่อมลูกหมาก

2.6.1 การปนเปื้อนของแคลเซียมในซีเมนต์

แคลเซียมเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่มักพบในส่วนของเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ แคลเซียมมักอยู่รวมกับกำมะถันเป็น แคลเซียมซัลไฟด์ และมักปนอยู่ในแร่สังกะสีซัลไฟด์ มักพบในบริเวณที่มีการทำเหมืองแร่สังกะสี (รวมทั้งตะกั่ว ทองแดง) รวมไปถึงแคลเซียมในกากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น กากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสีย กากสี และผลิตภัณฑ์เรซิน เมื่อมีการนำกากอุตสาหกรรมต่างๆ มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาแบบโรตารีคิลในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ แคลเซียมจะตกค้างอยู่ทั้งในส่วนของปูนเม็ดและฝุ่นจากเตา(kiln dust)

โครงการนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะหาผลของแคลเซียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์รวมถึงการชะล้างของแคลเซียมออกจากเมตริกซ์ของซีเมนต์เป็นสำคัญ นอกจากนี้ ผลของแคลเซียมยังส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมได้โดยตรง ผลงานวิจัยในส่วนผลของแคลเซียมที่ได้จากงานวิจัยนี้จะสามารถนำไปใช้งานทั้งในแง่ของการปรับปรุงลักษณะสมบัติของซีเมนต์ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำซีเมนต์ไปใช้งานต่อไปได้ และยังบอกได้ว่าซีเมนต์ที่มีแคลเซียมในปริมาณสูงนั้น ควรจะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทนี้จะเหมาะสมที่สุด

2.7 การทดสอบการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์

ในส่วนของการชะล้างในประเด็นของผลที่มีต่อสิ่งแวดล้อมนั้น ได้มีวิธีทดสอบมาตรฐานที่ได้ถูกจัดตั้งขึ้น เพื่อใช้ในการหาปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกมาได้จากของแข็ง ได้แก่

1) การทดสอบวิธี Microwave-assisted leach method 3051 A[10]

การทดลองนี้เพื่อหาปริมาณเริ่มต้นของโลหะหนักที่มีอยู่ในซีเมนต์เพื่อใช้เปรียบเทียบกับ การทดสอบการชะล้างอื่นๆ ที่จะได้จัดทำขึ้นเป็นการหาสัดส่วนของการชะล้างโลหะหนักด้วยกรดเมื่อเทียบกับปริมาณโลหะหนักที่มีทั้งหมดในซีเมนต์ โดยวิธีการทดสอบได้ปฏิบัติตามมาตรฐานของ US.EPA

2) การทดสอบวิธี Availability Leaching Test

การทดสอบนี้เพื่อหาปริมาณของโลหะหนักทั้งหมดที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้ โดยการทดสอบ Availability Leaching Test นี้ได้จำลองกรณีที่โลหะหนักสามารถถูกชะล้างออกมาได้มากที่สุด การทดสอบนี้จึงเป็นการหาปริมาณที่มากที่สุดที่โลหะหนักจะถูกชะล้างออกมาได้

3) การทดสอบวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (US.EPA)

การทดสอบนี้เพื่อตรวจสอบว่าปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกชะล้างด้วยวิธี TCLP นั้นมีค่ามากกว่าที่มาตรฐานของ US. EPA กำหนดหรือไม่ ซึ่งหากมีค่ามากกว่าแล้ว แม้ว่าของเสียอันตรายที่มีโลหะหนักนั้นถูกกำจัดด้วยการเผาแล้วก็ตาม แต่โลหะหนักที่มีอยู่นั้นยังปนอยู่ในซีเมนต์และสามารถถูกชะล้างออกมาได้ในปริมาณที่สูงกว่าที่กำหนด ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ซีเมนต์นั้นๆถูกจัดว่าเป็นของเสียอันตรายด้วย ซึ่งไม่ควรนำมาใช้งานโดยเด็ดขาด

3) การทดสอบการชะล้างตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548[11]

ในการทดสอบการชะล้างโลหะหนักออกจากสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วได้แบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วนโดยวิธีการแรกเป็นการทดสอบหาค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสิ่งเจือปน โดยจะมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตราย ในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อหนึ่งกิโลกรัมของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วเท่ากับหรือมากกว่าค่า Total Threshold Limit Concentration(TTLC)[40] ที่กำหนดให้ปริมาณแคดเมียมหรือสารประกอบแคดเมียมในปริมาณ 100 มก./กก.ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายโดยวิธี acid digestion of sediments, sludges, and soils(Method 3050B)[12] เนื่องจากเป็นการหาปริมาณของโลหะหนักและสารประกอบต่างๆ

การทดสอบที่สองเป็นการทดสอบสิ่งปฏิกูลที่ไม่ใช้แล้ว โดยนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test(WET) การทดสอบนี้จะกระทำต่อเมื่อ ค่าความเข้มข้นของสารอันตรายใดๆมีค่าไม่เกินค่า Total Threshold Limit Concentration(TTLC) แต่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration(STLC) ของสารนั้นที่กำหนดไว้ให้ปริมาณของแคดเมียม 1.0 มก./ล

4) การทดสอบวิธี pH Static Leach Test

การทดสอบนี้เพื่อหาปริมาณของโลหะหนักที่สามารถถูกชะล้างเมื่อผลิตภัณฑ์ซึ่งเม้นต์นั้นๆ สัมผัสกับน้ำ ที่มีค่าพีเอชต่างๆกัน โดยทั่วไปแล้วการชะล้างของโลหะหนักนั้นจะทำให้มีปริมาณโลหะหนักมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำเป็นสำคัญ โดยโลหะหนักแต่ละชนิดจะให้ปริมาณโลหะหนักมากที่สุดที่ค่าพีเอชแตกต่างกันไปการทดสอบนี้นอกจากจะบอกถึงปริมาณโลหะหนักที่ชะล้างออกมาแล้วยังสามารถบอกถึงพฤติกรรมในการถูกชะล้างของโลหะหนักแต่ละชนิดด้วย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบในกระบวนการผลิตซีเมนต์

วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยมาจากบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) โดยส่วนประกอบของวัตถุดิบที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตปูนเม็ดแสดงในตารางที่ 3.1 ส่วนแคลเซียมที่ใช้ในการทดลองอยู่ในรูป CdO มีความเข้มข้นเริ่มต้นในรูปร้อยละ 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำการทดลองที่ละค่าความเข้มข้นดังกล่าว เพื่อศึกษาผลของแคลเซียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของปูนเม็ดที่ได้จากค่าเริ่มต้นที่ค่าต่างๆ กัน[13]

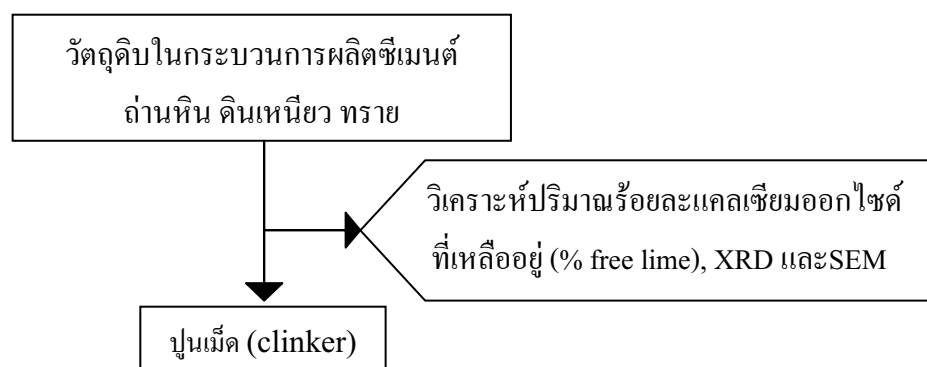
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของวัตถุดิบในขั้นตอนการผลิตปูนเม็ดของงานวิจัยนี้

สารประกอบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
SiO ₂	13.99
Al ₂ O ₃	3.18
Fe ₂ O ₃	2.15
CaO	43.41
MgO	1.02
K ₂ O	0.50
Na ₂ O	0.07
SO ₃	0.30
LOI	35.38
รวม	100

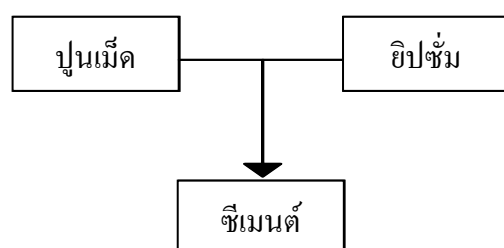
หมายเหตุ : LOI (Loss On Ignition) = การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา

การศึกษางานวิจัยในโครงการนี้เป็นการศึกษาผลของแคลเซียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ และการทดสอบการชะล้างของแคลเซียมที่ออกจากซีเมนต์ที่ได้ โดยรายละเอียดในการทดลองมีดังนี้

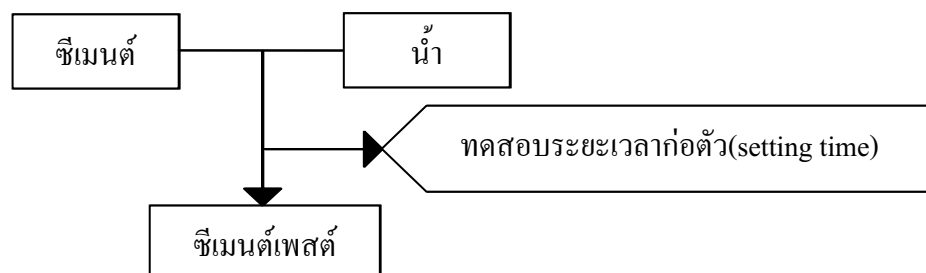
ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการผลิตปูนเม็ด (clinker) แล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติของปูนเม็ดที่ได้



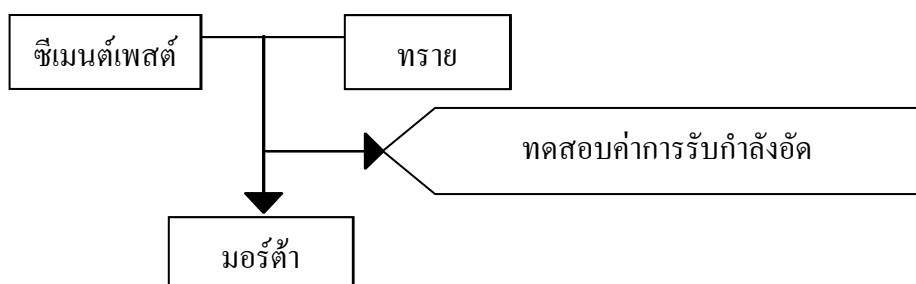
ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนการผลิตซีเมนต์



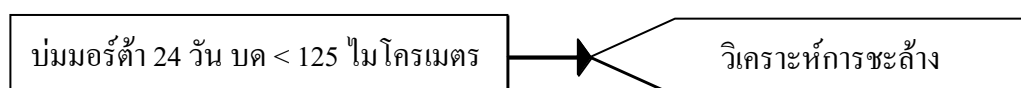
ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์ (setting time of cement)



ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนการทดสอบค่าการรับกำลังอัด (compressive strength)



ขั้นตอนที่ 5 ขั้นตอนการทดสอบการชะล้าง



รูปที่ 3.1 รายละเอียดการผลิตซีเมนต์และการทดสอบ

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.2.1 X-ray Diffractometer (XRD)

3.2.2 Scanning Electron Microscope (SEM)

3.2.3 Energy-Dispersive X-ray Spectrometer (EDS)

3.2.4 Inductively Couple Plasma Spectrometer (ICP)

3.3 การเตรียมซีเมนต์โดยมีของเสียอันตรายที่เป็นโลหะหนัก

จากการทบทวนงานวิจัยที่มีผู้ศึกษามาก่อนหน้านี้ พบว่า สภาวะที่นิยมใช้ในการเตรียมปูนเม็ด (clinker) ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง (electric furnace) ได้แก่ การเผาวัตถุดิบจากอุณหภูมิห้อง ไปจนถึงอุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส โดยมีรอบการเผาไหม้อยู่ในช่วง 10-30 องศาเซลเซียส ต่อนาที โดยวัตถุดิบจะถูกเผาที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที แล้วจึงนำปูนเม็ดที่ได้มาทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งผลที่ได้จากการเผา จะทำให้ได้ปูนเม็ดที่มีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์มากที่สุด เพื่อให้แน่ใจได้ว่าปูนเม็ดที่ได้มีลักษณะสมบัติที่สามารถเทียบเคียงได้จริง จึงมีการทดสอบคุณภาพของปูนเม็ดด้วยวิธีการวัดปริมาณ ร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ โดยค่าที่วัดได้นี้จะเป็นสิ่งที่ชี้ไปถึง ขั้นตอนของการเผาไหม้ (degree of burning) ที่เกิดขึ้นจริงในเตาเผา โดยการเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมจะทำให้ ไตรแคลเซียมซิลิเกตอยู่ในช่วงร้อยละ 40-70 ไตรแคลเซียมซิลิเกตอยู่ในช่วงร้อยละ 20-30 โดยมี ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต และเตตระแคลเซียม อะลูมิโนเฟอไรท์ อย่างละร้อยละ 1-2 โดยค่าปริมาณร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ โดยที่วัดได้ในสภาวะดังกล่าวจะอยู่ในช่วงร้อยละ 1.0 – 2.5 โดยน้ำหนัก

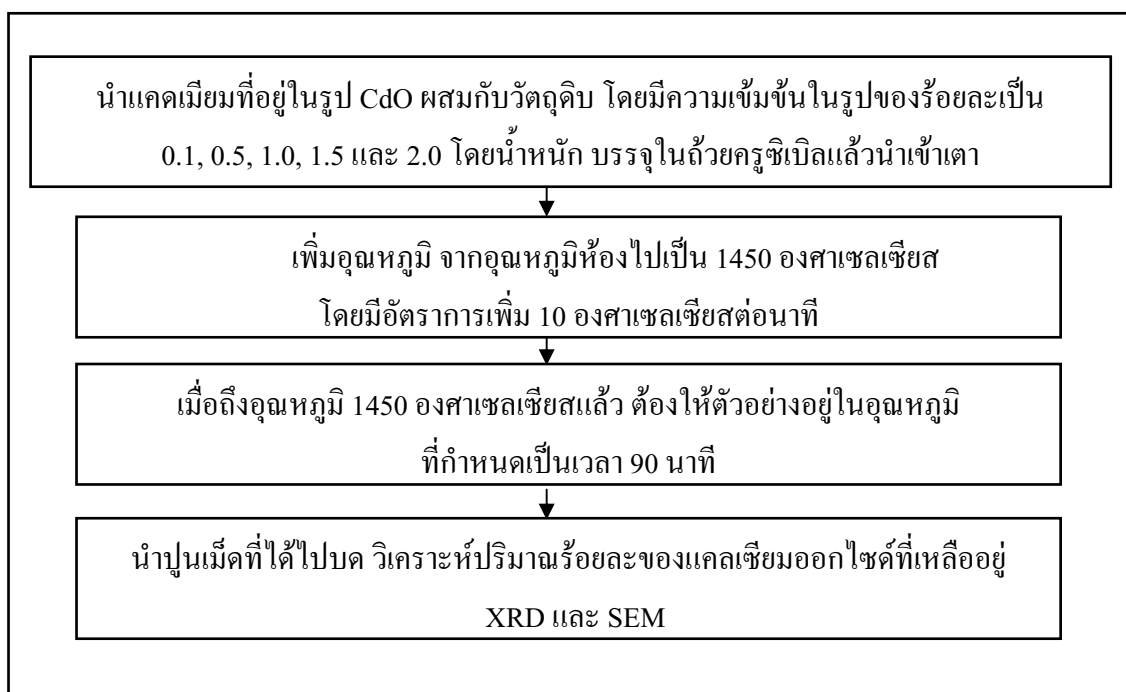
3.3.1 การเตรียมปูนเม็ด

นำวัตถุดิบมาบดให้ละเอียด จากนั้นนำมาบรรจุลงในถ้วยชาม แล้วนำเข้าเตาเผาเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปเป็น 1450 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มเป็น 10 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 นาที เมื่ออุณหภูมิห้องถึง 1450 องศาเซลเซียสแล้ว จะต้องให้ตัวอย่างอยู่ในอุณหภูมิที่กำหนดเป็นเวลา 90 นาที หลังจากการเผาให้ได้ปูนเม็ดตามที่ต้องการแล้ว นำปูนเม็ดออกจากเตาเผาเพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ไตรแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งเกิดในรูปของเหลว นั้น กลายเป็นของแข็ง และอยู่ในรูปของปูนเม็ดตามต้องการ นำปูนเม็ดที่ได้ไปบดแล้ววิเคราะห์หาค่าปริมาณร้อยละ(% free lime)ของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่เหลืออยู่ และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และ SEM

3.3.2 การเตรียมปูนเม็ดที่มีแคลเซียมผสมอยู่

ในส่วนของการผสมโลหะหนักที่มีความเข้มข้นต่างๆ กันเข้าไปในวัตถุดิบในการผลิตปูนเม็ดแล้ว นำเข้าสู่เตาเผาพร้อมกับวัตถุดิบนั้น ในส่วนของโลหะหนักที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ แคลเซียมซึ่งเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่ง มักพบในกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย และจากกากอุตสาหกรรมประเภท reisin

compound เมื่อนำกากตะกอนน้ำเสียมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน ซึ่งจะช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในการผลิตปูนซีเมนต์ และเมื่อนำกาก resin มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาโรตารีคิลน์ที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ จะมีแคะเมียมตกค้างอยู่ภายในส่วนของปูนเม็ดและฝุ่นจากเตา



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมปูนเม็ดที่มีแคะเมียมผสม

3.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของแคะเมียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ (% free lime)

การวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของแคะเมียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ เป็นการหาสัดส่วนของแคะเมียมออกไซด์ที่เหลืออยู่จากการทำปฏิกิริยาในการเกิดเป็นไตรแคะเมียมซิลิเกตและไดแคะเมียมซิลิเกต โดยค่าที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับค่าร้อยละของแคะเมียมออกไซด์ในช่วงร้อยละ 1 - 2.5 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการผลิตปูนเม็ดของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ รายละเอียดในการทดสอบ มีดังนี้

นำตัวอย่างปูนเม็ดที่ผ่านการเผาในเตาเผาในปริมาณ 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วเติม ethylene glycol ประมาณ 15 มิลลิลิตร และเมทานอล ประมาณ 7.5 มิลลิลิตร นำตัวอย่างที่ได้จากการเผา ไปย่อยสลายโดยใช้ hot plate stirrer เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ได้มากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 40 เพื่อแยกตะกอนออกจากสารละลาย นำสารละลายที่ได้ไปไตเตรตด้วย 0.1 M ของกรดไฮโดรคลอริก จนสารละลายเปลี่ยนจากสีฟ้าเป็นสีเขียว นำมาหาค่าร้อยละของแคะเมียมออกไซด์ที่เหลืออยู่โดยใช้สมการที่ 3.1

$$\text{ร้อยละของแคะเมียมออกไซด์} = \text{มิลลิลิตรที่ใช้ในการไตเตรตของกรดไฮโดรคลอริก} \times 0.56 \quad (3.1)$$

3.3.4 การนำตัวอย่างของปูนเม็ดไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่อง XRD และ SEM

นอกจากการทดสอบด้วยการหาค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่เพื่อใช้เป็นอินดิเคเตอร์ของปูนเม็ดที่ได้ ว่ามีลักษณะสมบัติที่สามารถเทียบเคียงกับปูนเม็ดที่ผลิตได้จริงจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ทางผู้วิจัยจึงได้นำปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด และปูนเม็ดที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ทั้งในส่วนที่ไม่มีแคลเซียมและมีแคลเซียมผสมอยู่ ไปวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้ เครื่อง XRD และ SEM เพื่อเปรียบเทียบเฟสที่เกิดขึ้นของปูนเม็ด

1. การวิเคราะห์ X-ray Diffractometer (XRD)

การศึกษาโครงสร้างของสสารและวัสดุโดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เนื่องจากความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์มีขนาดในช่วงเดียวกับระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมของสสารแทบทุกชนิด ในกรณีที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึก รูปแบบการเรียงตัวที่ซ้ำๆ กันของผลึก ทำหน้าที่เหมือนกับเป็น เกรตติงให้กับรังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้าไป ทำให้ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นพื้นฐานในการศึกษาทางด้านฟิสิกส์ศาสตร์

โดยการศึกษานี้ใช้เครื่อง XRD เพื่อแสดงเฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้นในปูนเม็ดจากทั้งสองแหล่ง ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมอลูมินेट เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ และเฟสของแคลเซียมที่อยู่ในปูนเม็ด

2. การวิเคราะห์ Scanning Electron Microscope (SEM)

หลักการทำงานของ SEM คือ การใช้ปืนอิเล็กตรอนเป็นตัวให้กำเนิดลำอิเล็กตรอน เพื่อยิงลงไปยังบนแผ่นเวเฟอร์ อิเล็กตรอนจะถูกเร่งจากแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ด้วยความต่างศักย์ในช่วง 1-30 กิโลโวลต์ โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะควบคุมโดยเลนส์คอนเดนเซอร์ (illuminating lens) ซึ่งจะทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดของหน้าตัดเล็กลง และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอฟเฟอร์เจอร์ (final lens) ซึ่งเป็นช่องเปิดที่มีขนาดต่างกัน จากนั้นเลนส์วัตถุจะปรับโฟกัสลำอิเล็กตรอนให้ไปตกกระทบที่เป้าหมายโดยใช้คอยล์กวาดภาพ (scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนผิวของแผ่นเวเฟอร์ แล้วนำสัญญาณที่ได้มาแปลง

ในการศึกษาเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM เพื่อบอกถึงลักษณะทางโครงสร้างของปูนเม็ดที่ได้ เช่น ลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่ได้ ไปจนถึงลักษณะพื้นผิวของเฟสต่างๆ ที่ปรากฏอยู่ในปูนเม็ด

3.4 การทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ต้า (ASTM C109-95) [14]

3.4.1 การเตรียมวัสดุทดสอบ

1) การเตรียมแบบหล่อ

- 1.1 ทำแบบหล่อด้วยน้ำมัน ให้ทั่วด้านในแบบหล่อต่างๆ
- 1.2 ประกอบแบบหล่อ เมื่อประกอบเสร็จแล้ว เช็ดน้ำมันส่วนเกินที่ไหลเยิ้มบริเวณผิวด้านในตามขอบและก้นแบบหล่อทุกอัน
- 1.3 วางแบบหล่อนบนแผ่นวัสดุที่ได้ระนาบ และไม่ดูดซึมน้ำ ซึ่งทาน้ำมันไว้แล้ว
- 1.4 ใช้ขี้ผึ้งหรือน้ำมันพาราฟิน 3 ส่วน ต่อ น้ำมันสน 5 ส่วน โดยน้ำหนัก

ทาอุดแนวรอยต่อด้านนอกของแบบหล่อและแผ่นรอง

2) การเตรียมซีเมนต์มอร์ต้าและทดสอบการรับกำลังอัด

2.1 ส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ต้า ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 1 ส่วนต่อทรายมาตรฐาน 2.75 ส่วน โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.485

2.2 การผสมมอร์ต้า ให้ผสมด้วยเครื่องผสม (Mixer) โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ก. ทำความสะอาดใบพาย หม้อผสม แล้วทำให้แห้ง ใส่ น้ำ ที่คำนวณได้ เทลงในหม้อผสม
- ข. ใส่ปูนซีเมนต์ที่ชั่งไว้แล้วลงในน้ำ แล้วเปิดเครื่องผสมด้วยความเร็วต่ำ (140 รอบ/นาที) เป็นเวลา 30 วินาที
- ค. ในขณะที่เปิดเครื่องผสมความเร็วต่ำ ค่อยๆเติมทรายที่เตรียมไว้ลงในหม้อผสมอย่างช้าๆ จนหมดภายในเวลา 30 วินาที
- ง. ปิดเครื่องผสม แล้วปรับความเร็วในระดับความเร็วปานกลาง (285 รอบ/นาที) เป็นเวลา 30 วินาที
- จ. ปิดเครื่องผสมเป็นเวลา 1 นาที 30 วินาที ระหว่างนี้ให้ปาดซีเมนต์ที่ติดอยู่ข้างๆหม้อผสม และใบพาย ให้มารวมกันอยู่ตรงกลาง ให้เสร็จภายในเวลา 15 วินาที แล้วนำฟลากลามาปิดหม้อผสมไว้จนครบเวลาที่กำหนด
- ฉ. เปิดเครื่องผสมในระดับความเร็วปานกลาง อีกเป็นเวลา 1 นาที เสร็จแล้วปิดเครื่อง

2.3 ให้เริ่มหล่อก่อนทดสอบภายในเวลาไม่เกิน 4 นาที นับตั้งแต่ผสมเสร็จ เอาซีเมนต์ใส่ลงในแบบหล่อโดยแบ่งเป็น 2 ชั้น

2.4 กระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้งชั้นละ 32 ครั้ง ในเวลา 10 วินาที โดยการกระทุ้งจะแบ่งชั้นตัวอย่างเป็น 8 ส่วน กระทุ้งวนในแต่ละส่วน จนครบ 4 รอบ

2.5 ใช้เกรียงปาดหน้ามอร์ต้าส่วนที่เกินออก ให้เสมอขอบเขตของแบบหล่อเพียง 1 ครั้ง ในลักษณะเหมือนการเลื่อย แล้วแต่งหน้ามอร์ต้าให้เรียบ

2.6 หลังจากหล่อชิ้นตัวอย่างเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้บ่มก้อนทดสอบ ทั้งแบบในห้องขึ้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยปล่อยให้ผิวหน้าด้านบน สัมผัสกับอากาศขึ้น แต่อย่าให้ถูกหยดน้ำ เมื่อครบ 24 ชั่วโมง ถอดแบบออกไปบ่มในน้ำ ตามระยะเวลาที่ต้องการ

2.7 เช็ดผิวก้อนตัวอย่างทดสอบแต่ละก้อนให้แห้ง

2.8 วางก้อนตัวอย่างทดสอบเข้าในเครื่องกด ให้อยู่ได้ศูนย์กลางแป้นกด ในระหว่างทำการทดสอบ จะต้องไม่ทำการปรับแต่งกลไกควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบ

คำนวณหาค่าความต้านทานแรงอัดของซีเมนต์จากสมการ 3.2

$$F = P/A \quad (3.2)$$

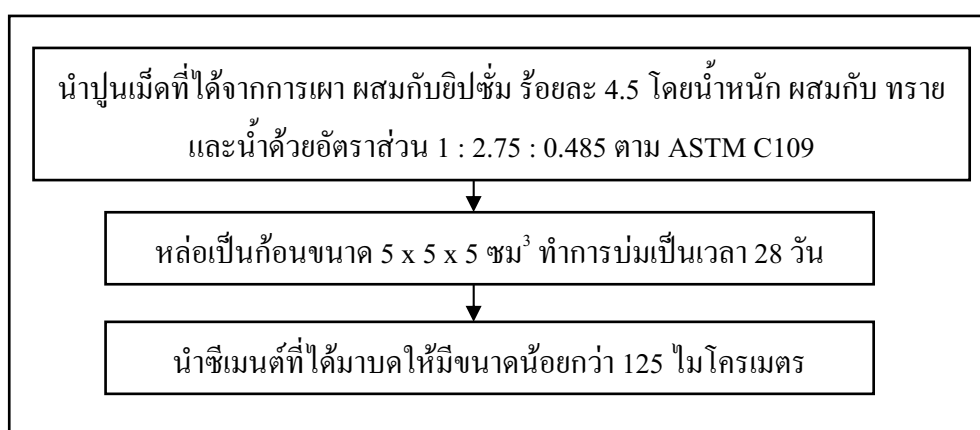
F = ค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยหรือหน่วยแรงอัดเฉลี่ย, $N./mm^2$

P = แรงอัดเฉลี่ย, $N.$

A = พื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นตัวอย่างทดสอบ, mm^2

3.5 การทดสอบการชะล้างแคลเซียมจากซีเมนต์มอร์ต้า

นำซีเมนต์มอร์ต้าที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดโดยระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน มาบดให้มีขนาดน้อยกว่า 125 ไมโครเมตร เพื่อนำไปทดสอบการชะล้างของแคลเซียมจากซีเมนต์ ขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 3.3 โดยแบ่งการทดลองทั้งหมดเป็น 4 ส่วน โดยมีจุดมุ่งหมายและวิธีการที่แตกต่างกัน ดังนี้



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมซีเมนต์มอร์ต้าเพื่อทดสอบการชะล้างแคลเซียม

3.5.1 การทดสอบวิธี Microwave-assisted leach method 3051 A

การหาโลหะหนักที่มีโอกาสถูกชะล้างออกมาได้นั้น ทำได้โดยวิธี Microwave-assisted leach method 3051 A เพื่อหาสัดส่วนของการชะล้างโลหะหนัก ด้วยกรดเมื่อเทียบกับปริมาณโลหะหนักที่มีทั้งหมดในซีเมนต์ โดยวิธีการทดสอบได้ปฏิบัติตามมาตรฐานของ US.EPA คือ Microwave-assisted leach method 3051 A โดยมีรายละเอียด คือ นำซีเมนต์มอร์ต้าบละเอียดมาชั่งน้อยสลายในกรดไนตริกเข้มข้นในไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส เป็นเวลาสั้นๆที่ครั้ง แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นกรองสารละลายที่ได้ เพื่อไปหาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลาย แล้วเทียบกลับมาเป็นปริมาณโลหะหนักต่อปริมาณซีเมนต์

ในขั้นตอนนี้ โลหะหนักจากตะกอน จะถูกวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณของโลหะหนักที่มีอยู่ในซีเมนต์ที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักนี้คือ Inductively Coupled Plasma Spectrometer (ICP)

3.5.2 การทดสอบวิธี Availability Leaching Test

การทดสอบนี้เพื่อหาปริมาณของโลหะหนักที่มากที่สุดที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้ โดยการทดสอบ Availability Leaching Test นี้ ได้จำลองกรณีที่โลหะหนักสามารถถูกชะล้างออกมาได้มากที่สุด การทดสอบนี้จึงเป็นการหาปริมาณที่มากที่สุดที่โลหะหนักจะถูกชะล้างออกมาได้

การทดสอบนี้มีวิธีทดสอบคือ นำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบมาบดละเอียดแล้วนำมาสกัดด้วยการเติมน้ำสกัด ในอัตราส่วนน้ำ ต่อ ซีเมนต์(L/S) เท่ากับ 50 โดยตัวสกัดในที่นี้คือ น้ำบริสุทธิ์ที่ไม่มีไอออนใดอยู่ (deionized water) โดยการสกัดประกอบด้วย การสกัด สอง ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกทำที่พีเอชเท่ากับ 7 และขั้นตอนที่สองทำ ที่พีเอชเท่ากับ 4 โดยใช้เวลาในการสกัด 3 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่ได้จากการสกัดทั้งสองขั้นรวมกัน เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Inductive Couple Plasma (ICP)

3.5.3 การทดสอบ Toxicity Characteristic Leaching Procedure (US.EPA)

การทดสอบนี้เพื่อตรวจสอบว่าปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างด้วยวิธี TCLP นั้น มีค่ามากกว่าที่มาตรฐานของ US. EPA กำหนดหรือไม่ ในการทดสอบ TCLP ประกอบด้วย การนำซีเมนต์มอร์ต้าบมาใส่ในขวดทดลอง เติมกรดอะซิติกให้มีค่าพีเอชประมาณ 2.88 แล้วนำตัวอย่างไปกวนที่ความเร็วรอบประมาณ 30 รอบต่อนาที โดยมีอุณหภูมิคงที่ที่ 23 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปกรอง โดยสารละลายที่ได้ให้เติมกรดไนตริก เพื่อให้ค่าพีเอชต่ำกว่า 2 จากนั้น จึงนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductive Couple Plasma (ICP)

3.5.4 การทดสอบการชะล้างตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548[40]

ในการทดสอบการชะล้างโลหะหนักออกจากสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วได้แบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วนโดยวิธีการแรกเป็นการทดสอบหาค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสิ่งเจือปน โดยจะมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตราย ในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อหนึ่งกิโลกรัมของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วเท่ากับหรือมากกว่าค่า Total Threshold Limit Concentration(TTLC)[40] ที่กำหนดให้ปริมาณแคดเมียมหรือสารประกอบแคดเมียมในปริมาณ 100 มก./กก.ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายโดยวิธี acid digestion of sediments, sludges, and soils(Method 3050B)[41] เนื่องจากเป็นการหาปริมาณของโลหะหนักและสารประกอบต่างๆ

การทดสอบที่สองเป็นการทดสอบสิ่งปฏิกูลที่ไม่ใช้แล้ว โดยนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test(WET) การทดสอบนี้จะกระทำต่อเมื่อ ค่าความเข้มข้นของสารอันตรายใด ๆ มีค่าไม่เกินค่า Total Threshold Limit Concentration(TTLC) แต่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration(STLC) ของสารนั้นที่กำหนดไว้ให้ปริมาณของแคดเมียม 1.0 มก./ล.[40]

1) ผลจากการวิเคราะห์หาค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายโดยวิธี acid digestion of sediments, sludges, and soils (Method 3050B)

การชะล้างโลหะหนักออกจากซีเมนต์ด้วยวิธีการนี้ เป็นการหาค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายหรือโลหะหนักทั้งหมดที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้ ซึ่งทำการย่อยสลายวัสดุอันตรายโดยการเติมกรดไนตริกเข้มข้น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นในการย่อยสลายร่วมกับการให้ความร้อน โดยมีขั้นตอนวิธีการทำเป็นข้อๆดังนี้

1. นำตัวอย่างผ่านการร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 10 ตัวอย่างละ 1 กรัม
2. เติมกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 1:1 และคนให้เข้ากัน โดยให้ความร้อน 95 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที
3. ทิ้งตัวอย่างให้เย็นประมาณ 5 นาที และใส่ไนตริกเข้มข้น 5 มล.และคนให้เข้ากัน โดยให้ความร้อน 95 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที สังเกตว่ามีการเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลหรือไม่ ถ้ามีการทดลองในข้อ 3. ซ้ำจนกระทั่งไม่เกิดสีน้ำตาล จากนั้นจึงให้ความร้อนที่ 95 ± 5 องศาเซลเซียส อีกเป็นเวลา 10 นาที
4. ทิ้งตัวอย่างให้เย็นเป็นเวลา 5 นาที และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ ในปริมาณ 10 มล.
5. ให้ความร้อนที่ 95 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาทีและคงที่ที่ 95 ± 5 องศาเซลเซียส อีก

10 นาที

6. เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 10 มล.และให้ความร้อนที่ 95 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา

15 นาที

7. นำตัวอย่างที่ได้มาผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 41

8. นำสารละลายที่ผ่านการกรองมาปรับปริมาตรด้วย volumetric flask 100 มล.

9. นำสารละลายที่ได้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP

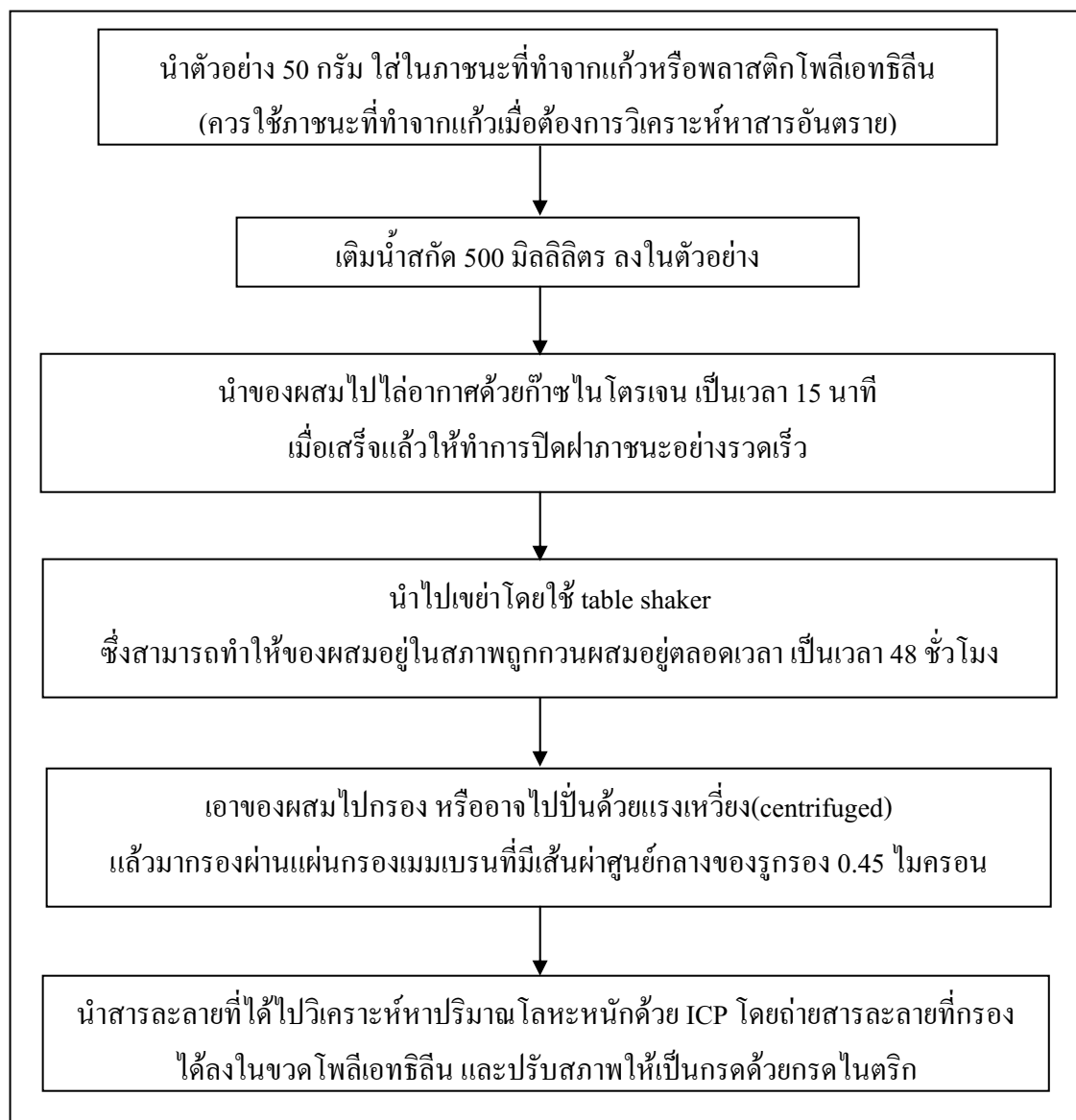
2) การทดสอบการชะล้างด้วยวิธี Waste Extraction Test(WET)

วิธีการทดสอบด้วย Waste Extraction Test(WET) เป็นวิธีการที่ใช้กันในประเทศแคลิฟอร์เนีย (California) เป็นวิธีที่ใช้เสริมวิธีการทดสอบ Toxicity Characteristic Leaching Procedure(TCLP) วิธี WET จะเป็นการนำตัวอย่างมาสกัดโดยการกวนเป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยมีการเติมซิเตรทบัฟเฟอร์ โดยปริมาณอัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อของเหลวคือ 1 ต่อ 10 อย่างไรก็ตามวิธีการทดสอบวิธีนี้จะมีประโยชน์อย่างมากเนื่องจากช่วยลดระยะเวลาในการวิเคราะห์ถึงค่าการชะล้างและง่ายต่อการเคลื่อนย้ายเนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก

การเตรียมสารละลาย 0.2 โมลาร์ sodium citrate ที่พีเอช 5.0 ± 0.1 เป็นน้ำสกัดที่ใช้ในกระบวนการ Waste extraction test(WET) โดยเตรียมจากการนำสารละลาย citric acid ในปริมาณที่เหมาะสมมาปรับพีเอชให้เป็น 5.0 ด้วยสารละลาย 4.0 นอร์มอล NaOH

สารละลาย citric acid สามารถเตรียมโดยนำเอา analytical grade citric acid ไปละลายในน้ำ deionized water เป็นน้ำสกัด

การสกัดด้วยวิธี WET มีขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดสอบการชะล้างด้วยวิธี Waste Extraction Test(WET)

3.5.5 การทดสอบ pH Static Leach Test

การทดสอบนี้เพื่อหาปริมาณของโลหะหนักที่สามารถถูกชะล้างเมื่อผลิตภัณฑ์ซีเมนต์นั้นๆ สัมผัสกับน้ำที่มีค่าพีเอชต่างๆ กัน การทดสอบประกอบด้วย การนำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบมาสกัดด้วยการเติมตัวสกัดในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์(L/S) เท่ากับ 10 โดยตัวสกัดในที่นี้คือน้ำบริสุทธิ์ที่ไม่มีไอออนใดๆ (deionized water) ค่าพีเอชของน้ำจะแปรเปลี่ยนให้อยู่ในช่วง 4 ถึง 12 โดยใช้เวลาในการสกัด 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่ได้จากการสกัดมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Inductive Couple Plasma (ICP)

3.7 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ตารางที่ 3.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับทุก 6 เดือน

กิจกรรม	ผลที่คาดว่าจะได้รับ
เดือนที่ 1-6 1. การเตรียมปูนเม็ด 2. การทดสอบหาลักษณะสมบัติของปูนเม็ด	1. ได้ปูนเม็ดที่มีแคลเซียมปนอยู่เพื่อนำไปทดสอบต่อไป 2. ได้ลักษณะสมบัติของปูนเม็ดเมื่อมีแคลเซียมอยู่
เดือนที่ 7-12 1. การทดสอบหาค่ากำลังอัด (compressive strength) ของซีเมนต์ 2. การทดสอบ Microwave-assisted leach method 3051A 3. การทดสอบ Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)	1. ได้ผลของกำลังอัด (compressive strength) ของซีเมนต์ 2. ได้ผลของปริมาณแคลเซียมทั้งหมดที่มีในซีเมนต์ 3. ได้ผลการชะล้างด้วยวิธี TCLP เพื่อระบุถึงความเข้มข้นของแคลเซียมที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้ตามมาตรฐานของ EPA
เดือนที่ 13-18 1. การทดสอบ Availability Leaching Test 2. การทดสอบ pH Static Leach Test 3. การจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์	1. ได้ปริมาณมากที่สุดของแคลเซียมที่สามารถถูกชะล้างออกได้ 2. ผลการชะล้างแคลเซียมเมื่อซีเมนต์นั้นๆ สัมผัสกับน้ำที่สถานะค่า pH ต่างๆ 3. ได้รายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการนี้ ซึ่งรวมผลงานวิจัยทุกส่วนไว้

บทที่ 4

ผลของแคลเซียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ และการวิเคราะห์การชะล้าง

4.1 การวิเคราะห์ลักษณะของปูนเม็ดที่ไม่มีแคลเซียม

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สถานะที่เหมาะสมในการเผาปูนเม็ดในห้องปฏิบัติการจากรายงานการศึกษาการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์ที่ใช้กากของเสียอุตสาหกรรมในกระบวนการผลิต (พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล และ เอกชัย ทวีกิจวานิช, 2548)[13] ซึ่งจากรายงานดังกล่าวได้รายงานว่าลักษณะของปูนเม็ดที่เผาในห้องปฏิบัติการโดยใช้อุณหภูมิ 1450°C เป็นเวลา 90 นาทีนั้น จะมีลักษณะเหมือนกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิต การทดลองนี้จึงได้นำข้อมูลส่วนนี้มาใช้ในการเผาปูนเม็ด และได้เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของปูนเม็ดที่ได้จากการทดลองนี้กับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตซึ่งประกอบด้วย การหำร้อยละ free lime การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM

ผลของการหำร้อยละของ free lime ของปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการจากการทดลองทั้งสิ้น 3 ครั้ง แสดงในตารางที่ 4.1

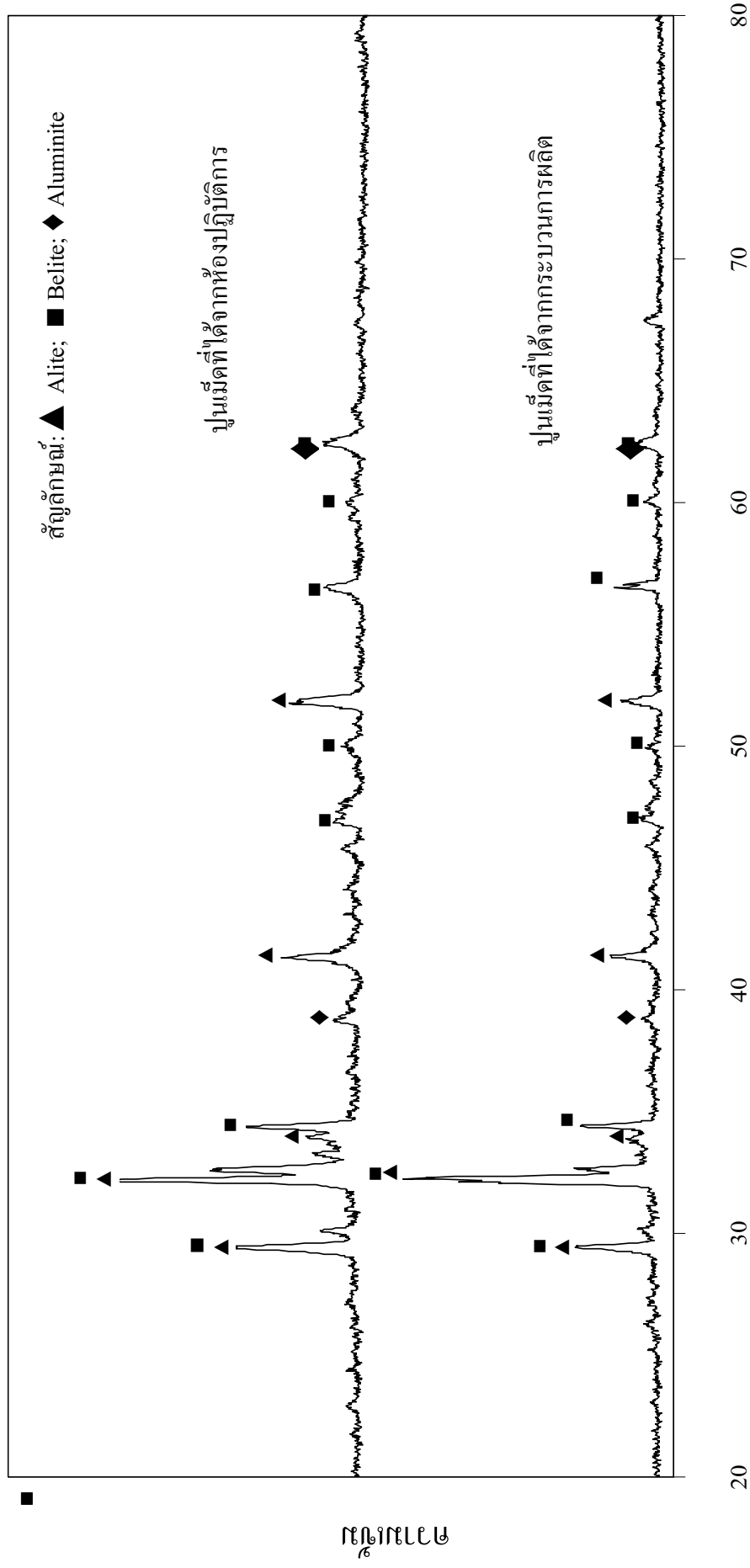
ตารางที่ 4.1 การหำร้อยละของ free lime ของปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการ

การเผาปูนเม็ด ครั้งที่	เปอร์เซ็นต์ free lime ตัวอย่างที่ 1	เปอร์เซ็นต์ free lime ตัวอย่างที่ 2	เปอร์เซ็นต์ free lime ตัวอย่างที่ 3	เปอร์เซ็นต์ free lime เฉลี่ย
1	1.06	1.06	1.06	1.06
2	1.06	1.07	1.05	1.06
3	1.08	1.07	1.06	1.07
				Avg = 1.06

หมายเหตุ: ค่าร้อยละของ free lime ที่ต้องการอยู่ในช่วง 1-1.5เปอร์เซ็นต์

การวิเคราะห์ค่าร้อยละของ free lime นี้แสดงให้เห็นถึงปริมาณของ calcium oxide ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาและไม่เปลี่ยนรูปไปเป็น C_3S และ C_2S ซึ่งเป็นส่วนประกอบของซีเมนต์ จากผลการทดสอบ เมื่อใช้อุณหภูมิ 1450°C เป็นเวลา 90 นาที ให้ผลของร้อยละ free lime เป็น 1.06 ซึ่งค่าดังกล่าวนี้อยู่ในช่วงของค่า free lime ที่เกิดขึ้นเมื่อทดสอบกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิต

ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดที่ได้จากการเผาด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer โดยเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตเทียบกับปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการที่เวลาในการเผาปูนเม็ดที่เวลา 90 นาที โดยแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟจากการวิเคราะห์โครงสร้างของปูนเม็ดที่ได้จากการเผาด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer โดยเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ด◆ที่ได้จากกระบวนการผลิตเทียบกับปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการ

จากกราฟในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD พบว่าเฟสที่ได้ของปูนเม็ดจากห้องปฏิบัติการมีลักษณะเดียวกันกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิต โดยพิจารณาเฟสโครงสร้างหลักของปูนเม็ดที่ปรากฏจากตำแหน่งของพีคของ XRD ที่เกิดขึ้น โดยตำแหน่งหลักของพีคของเฟสหลักของปูนเม็ด มีดังนี้

alite ตำแหน่งพีคหลักจะอยู่ที่มุม $2\theta = 32.24, 32.66$ และ 33.92

belite ตำแหน่งพีคหลักจะอยู่ที่มุม $2\theta = 29.35, 30.44, 32.24, 34.16, 38.57, 41.40, 51.61$ และ 62.69

aluminite ตำแหน่งพีคหลักจะอยู่ที่มุม $2\theta = 38.575$ และ 62.52

จากกราฟ XRD พบว่าเฟสของปูนเม็ดที่ได้จากทั้งการเตรียมในห้องปฏิบัติการและจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์มีความสอดคล้องกันคือ มีโครงสร้างในรูปของ alite (C_3S) เป็นหลัก โดยมีโครงสร้างของ belite (C_2S) ปะปนอยู่ และมีโครงสร้างของ aluminite (C_3A) เล็กน้อย ในขณะที่ tetracalcium aluminoferrite (C_4AF) ไม่ปรากฏในการวิเคราะห์ XRD ของปูนเม็ด

หากพิจารณาถึงปริมาณของเฟสโครงสร้างของปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการเทียบกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตซึ่งแสดงโดยความสูงในภาพรวมในพีคกราฟ XRD จะพบว่าปริมาณของเฟสของปูนเม็ดทั้งในส่วน of alite (C_3S) belite (C_2S) และ aluminite (C_3A) จะมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน

ผลของการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) เพื่อดูลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ด และลักษณะของเฟสต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการเทียบกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตของโรงงาน แสดงในรูปที่ 4.2 จากภาพของปูนเม็ดจะเห็นได้ชัดเจนว่าลักษณะของเฟสที่เกิดขึ้นของปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการมีลักษณะใกล้เคียงกับลักษณะของปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตของโรงงาน ทั้งนี้หากเพิ่มกำลังขยายของการใช้เครื่อง SEM เพื่อพิจารณาลักษณะของเฟสต่างๆที่เกิดขึ้นในปูนเม็ดจะได้ลักษณะโครงสร้างของเฟสของปูนเม็ด ดังแสดงในภาพที่ 4.3 ซึ่งมีลักษณะของเฟสต่างๆ ดังนี้

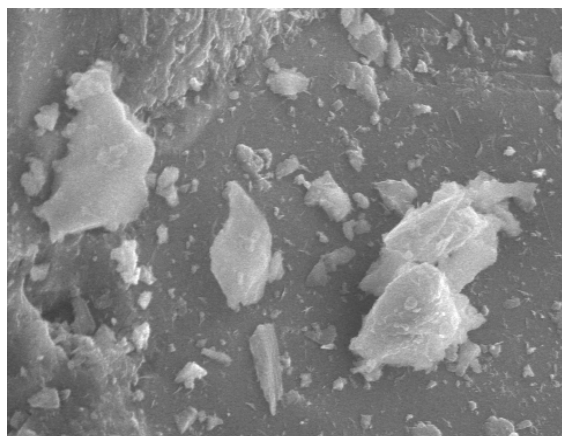
alite (C_3S) จะมีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยม ซึ่งเป็นเฟสที่พบได้มากที่สุดมีทั้งขนาดใหญ่ และขนาดเล็ก

belite (C_2S) จะมีลักษณะกลมมน เป็นเฟสที่พบได้รองลงมาจาก alite

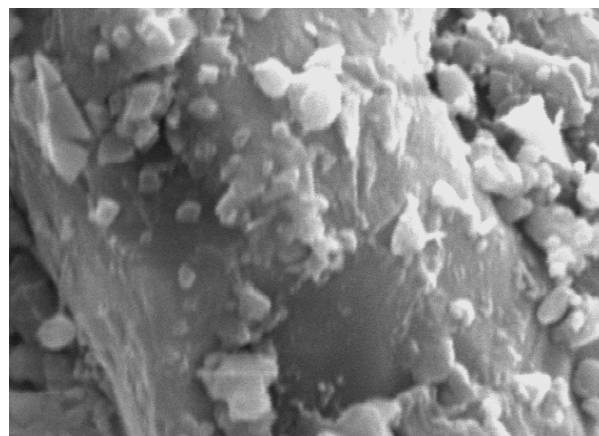
และ aluminite (C_3A) มีลักษณะเป็นเกล็ดยาว มักแทรกตามเฟสปูนเม็ด และกระจายอยู่ทั่วไปใน alite

จากผลข้างต้น สภาวะที่ใช้ในการเผาปูนเม็ดในการศึกษานี้ คือการเผาปูนเม็ดที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มเป็น 1 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 10 นาทีและเผาเป็นเวลานาน 90 นาที จากนั้น ปล่อยให้ปูนเม็ดเย็นตัว ซึ่งเป็นกระบวนการดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการเตรียมปูนเม็ดแล้วได้ลักษณะใกล้เคียงกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิต และปูนเม็ดที่ได้นี้จะนำไปใช้ในการทดสอบเวลา

ในการก่อตัว การทดสอบกำลังอัด และการชะล้างโลหะหนักต่อไป โดยคาดว่าจะให้ผลที่เที่ยงเกี่ยวกับผลที่เกิดขึ้นจริงเมื่อมีการนำโลหะหนักไปเผาในเตาเผาในชนิดและปริมาณที่ศึกษาในงานวิจัยนี้



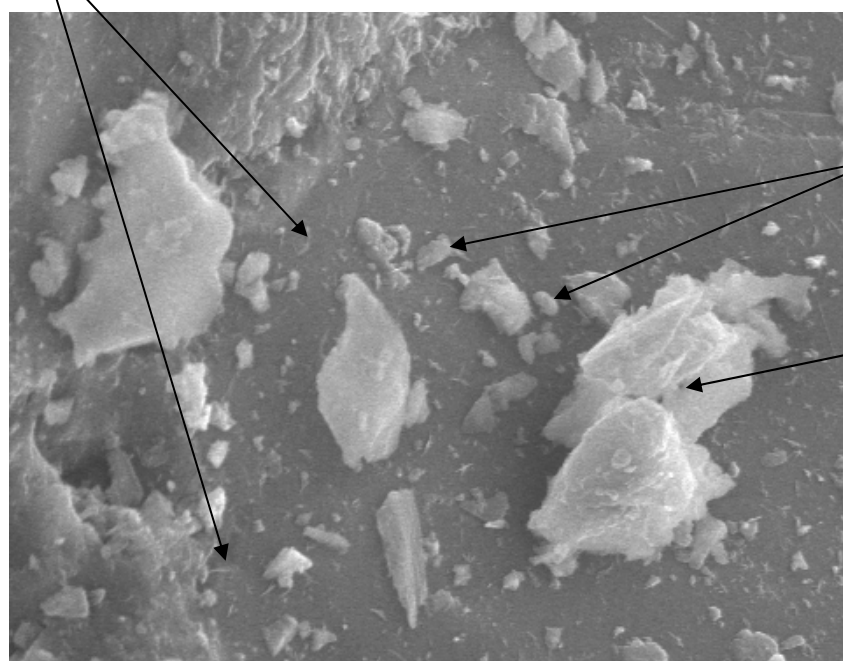
(ก) ปูนเม็ดจากกระบวนการผลิตของโรงงาน



(ข) ปูนเม็ดจากห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 4.2 ภาพเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของปูนเม็ดที่กำลังขยาย 350 เท่า

aluminite (C_3A)



belite (C_2S)

alite (C_3S)

รูปที่ 4.3 ภาพแสดงเฟสต่างๆ ของปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตของโรงงาน

4.2 การวิเคราะห์ลักษณะของปูนเม็ดที่มีแคลเซียมผสมอยู่

การทดลองในส่วนนี้เป็นการเติมแคลเซียมในรูปของ CdO ลงไปในวัตถุดิบที่นำมาศึกษา โดยส่วนประกอบของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนเม็ดแสดงในตารางที่ 4.2 ส่วนแคลเซียมที่ใช้ในการทดลองจะมีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยทำการทดลองที่ละค่าความเข้มข้น และศึกษาลักษณะสมบัติของปูนเม็ดที่ได้จากการแคลเซียมเริ่มต้นที่ค่าต่างๆ กัน

ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบของวัตถุดิบในการผลิตปูนเม็ดซึ่งในการทดลองนี้

สารประกอบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก)
SiO_2	13.99
Al_2O_3	3.18
Fe_2O_3	2.15
CaO	43.41
MgO	1.02
K_2O	0.50
Na_2O	0.07
SO_3	0.30

4.2.1 ผลของแคลเซียมที่มีต่อค่า free lime

ผลของการทดสอบ free lime ของปูนเม็ดที่มีแคลเซียมผสมที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 0.1, 0.5, 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งได้จากการเผาปูนเม็ดในห้องปฏิบัติการแสดงในตารางที่ 4.3 และกราฟแสดงแนวโน้มในการเพิ่มหรือลดของ free lime ที่ความเข้มข้นของแคลเซียมที่ค่าต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.4

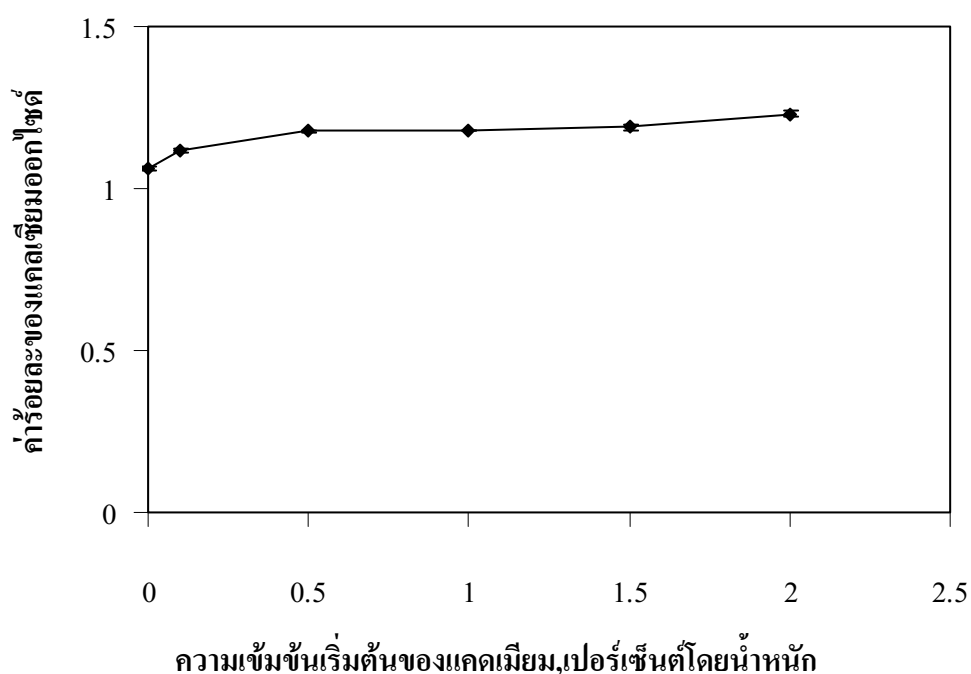
จากกราฟรูปที่ 4.4 ผลของการทดสอบ free lime จะเห็นได้ว่า เมื่อมีแคลเซียมปรากฏอยู่ในปูนเม็ดในช่วงที่มีค่าความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้นน้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ จะส่งผลต่อค่า free lime ที่เกิดขึ้นไม่มากนัก แต่เมื่อมีแคลเซียมปรากฏอยู่ในปูนเม็ดสูงกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ ค่า free lime จะมีค่าสูงขึ้น โดยค่าของ free lime ในช่วงที่มีแคลเซียมในปูนเม็ดในระดับความเข้มข้นต่ำ (น้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์) จะมีค่า free lime อยู่ในช่วง 1.06-1.12 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมเป็น 2 เปอร์เซ็นต์ ค่า free lime จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยมีค่าเป็น 1.23 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแคลเซียมมีแนวโน้มที่จะขัดขวางการเปลี่ยนรูปของ calcium oxide ไปเป็น alite หรือ belite ทำให้เมื่อนำ ปูนเม็ดมาทดสอบหาค่า

ร้อยละของ free lime จึงทำให้ได้ค่าร้อยละของ free lime สูงขึ้นจากปูนเม็ดที่ไม่มีแคลเซียม หรือเมื่อมีความเข้มข้นแคลเซียมในระดับต่ำอยู่ในปูนเม็ด ซึ่งการลดลงของ free lime นี้อาจส่งผลให้เกิดการลดลงของปริมาณ alite และ belite รวมไปถึงการลดลงของการรับกำลังอัดด้วย

ตารางที่ 4.3 ร้อยละของ free lime ของปูนเม็ดเมื่อมีแคลเซียมผสมอยู่ในค่าความเข้มข้น 0-2.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมในปูนเม็ด (เปอร์เซ็นต์ by weight)	ค่าเฉลี่ยของ ร้อยละ free lime
0	1.06 ± 0.01
0.1	1.12 ± 0.01
0.5	1.18 ± 0.01
1.0	1.18 ± 0.00
1.5	1.19 ± 0.01
2.0	1.23 ± 0.01

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยของร้อยละของ free lime นี้ได้มาจากการทดลองในสถานะเดียวกัน 3 ค่า

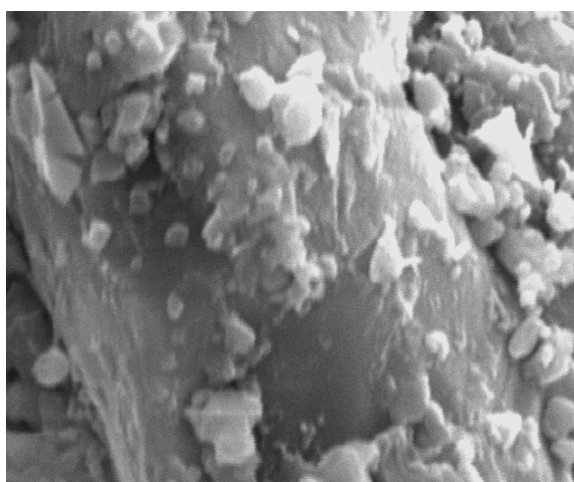


รูปที่ 4.4 กราฟแสดง free lime ที่เหลืออยู่เมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมเริ่มต้นอยู่ในช่วง 0-2.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

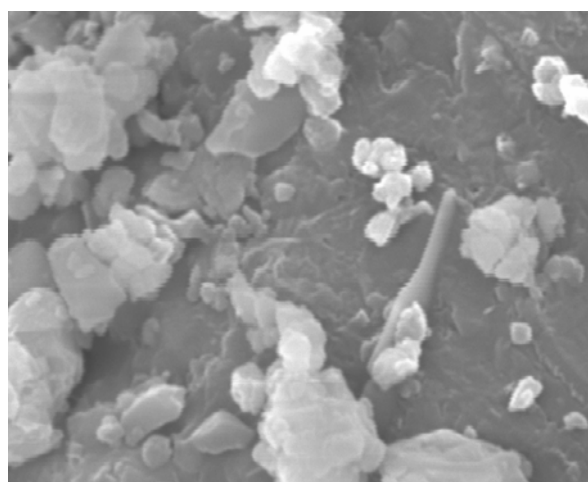
4.2.2 ผลของแคดเมียมที่มีต่อลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ด

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่มีแคดเมียมเจือปนอยู่เปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักอยู่ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 1300 เท่า แสดงในรูปที่ 4.5

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อมีแคดเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ลักษณะของพื้นผิวทางกายภาพจะมีลักษณะค่อนข้างใกล้เคียงกับพื้นผิวของปูนเม็ดที่ไม่มีแคดเมียมอยู่ โดยมีความแตกต่างน้อยมากจนไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของเฟสต่างๆ ได้ชัดเจน



(ก) ปูนเม็ดที่ไม่มีแคดเมียมผสมอยู่

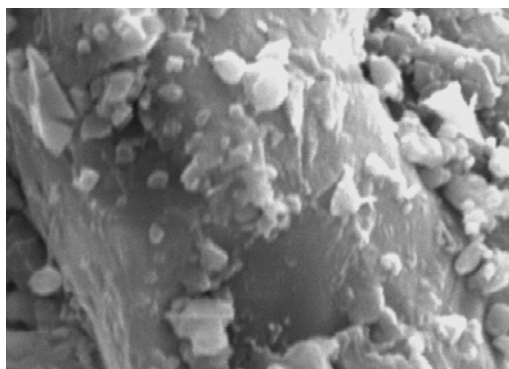


(ข) ปูนเม็ดที่มีแคดเมียม 0.1 เปอร์เซ็นต์

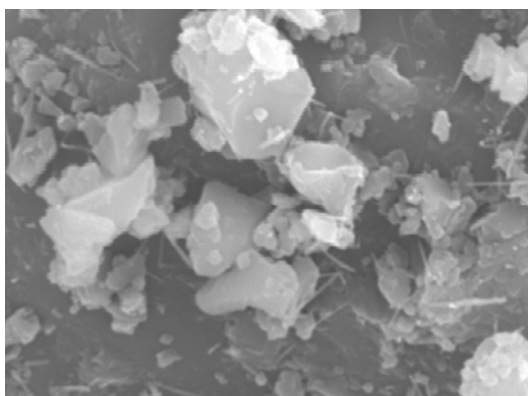
รูปที่ 4.5 แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM เมื่อ

(ก) ปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และ (ข) ปูนเม็ดที่มีแคดเมียม 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

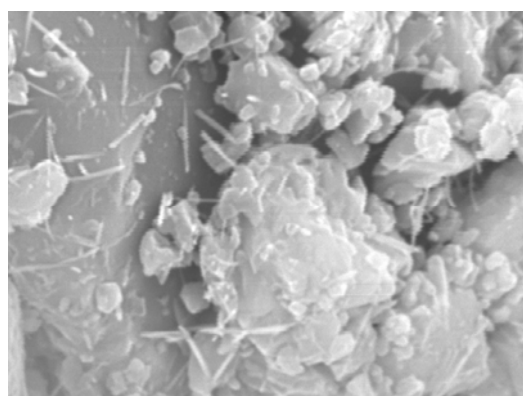
เมื่อปริมาณแคดเมียมเพิ่มมากกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีเฟสใหม่เกิดขึ้นในปูนเม็ดดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยลักษณะของเฟสใหม่ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นเส้น โดยมีลักษณะคล้ายเฟสของ aluminite ที่มีอยู่ในปูนเม็ด โดยมีข้อแตกต่างคือ เฟส aluminite ของปูนเม็ดจะแทรกอยู่ในเนื้อของเม็ดปูน แต่เฟสใหม่ที่เกิดขึ้นนี้จะหลุดออกมาจากเนื้อของเม็ดปูน โดยพบว่าเมื่อมีปริมาณแคดเมียมเพิ่มมากขึ้น เฟสใหม่ของปูนเม็ดนี้มีปริมาณมากขึ้นตามไปด้วยซึ่งเฟสใหม่นี้จะเห็นได้ชัดเจนเมื่อมีความเข้มข้นเริ่มต้นแคดเมียมมากกว่า 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขึ้นไปในปูนเม็ด ทั้งนี้จากการที่เฟสใหม่ของมีลักษณะคล้าย aluminite จึงมีความเป็นไปได้สูงที่แคดเมียมอาจจะรวมตัวกับสารที่อยู่ใน aluminite และกลายเป็นเฟสใหม่ดังกล่าว ทั้งนี้การพบเฟสใหม่ของปูนเม็ดเมื่อมีแคดเมียมนี้ยังไม่เคยมีการรายงานผลแต่อย่างใดในงานวิจัยที่ผ่านมา



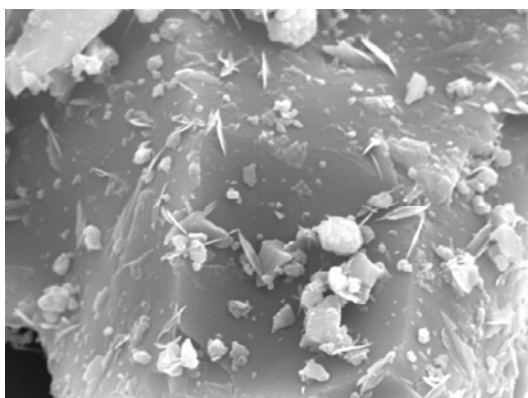
(ก) ปูนเม็ดที่ไม่มีแคลเซียมผสมอยู่



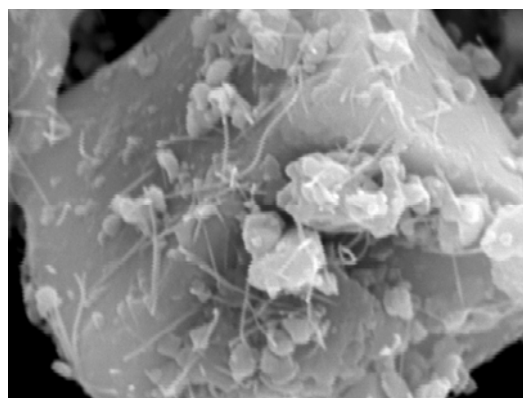
(ข) ปูนเม็ดที่มีแคลเซียม 0.5 เปอร์เซ็นต์



(ค) ปูนเม็ดที่มีแคลเซียม 1.0 เปอร์เซ็นต์



(ง) ปูนเม็ดที่มีแคลเซียม 1.5 เปอร์เซ็นต์



(จ) ปูนเม็ดที่มีแคลเซียม 2.0 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 4.6 แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM เมื่อ (ก) ปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก

(ข) ปูนเม็ดที่มีแคลเซียม 0.5 เปอร์เซ็นต์ (ค) ปูนเม็ดที่มีแคลเซียม 1.0 เปอร์เซ็นต์

(ง) ปูนเม็ดที่มีแคลเซียม 1.5 เปอร์เซ็นต์ และ (จ) ปูนเม็ดที่มีแคลเซียม 2.0 เปอร์เซ็นต์

เพื่อให้ทราบถึงตำแหน่งที่ปรากฏของแคลเซียมในเฟสต่างๆ ของปูนเม็ด ผู้วิจัยได้นำปูนเม็ดไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM โดยใช้เทคนิค EDS ร่วมด้วย ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย EDS นี้จะแตกต่างกันไปตามตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ ในการทดสอบนี้เพื่อศึกษาว่าแคลเซียมที่แทรกอยู่ในปูนเม็ดนั้น ได้เข้าไปอยู่ในเฟสโครงสร้างใดของปูนเม็ด จึงได้ทำการวิเคราะห์หาร้อยละของแคลเซียมโดยละเอียด โดยวิเคราะห์ถึงร้อยละของแคลเซียมที่ปรากฏในเฟสของ alite belite และ aluminite ตามลำดับ โดยผลการทดสอบแสดงใน ตารางที่ 4.4

จากข้อมูลที่แสดงในตารางจะพบว่า ในปูนเม็ดที่มีแคลเซียมในระดับความเข้มข้น 0.1เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก แคลเซียมจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับปูนเม็ดโดยปรากฏในส่วนของ aluminite เป็นหลัก และปรากฏอยู่ในส่วนของ alite และ belite ในปริมาณที่ต่ำกว่า และเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมเพิ่มเป็น 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ปริมาณของแคลเซียมใน aluminite จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และมีปริมาณใน alite และ belite แตกต่างไปจากเดิม จากข้อมูลดังกล่าวแสดงว่าแคลเซียมมีแนวโน้มในการทำปฏิกิริยากับ aluminite และไม่ส่งผลต่อ alite และ belite มากนัก

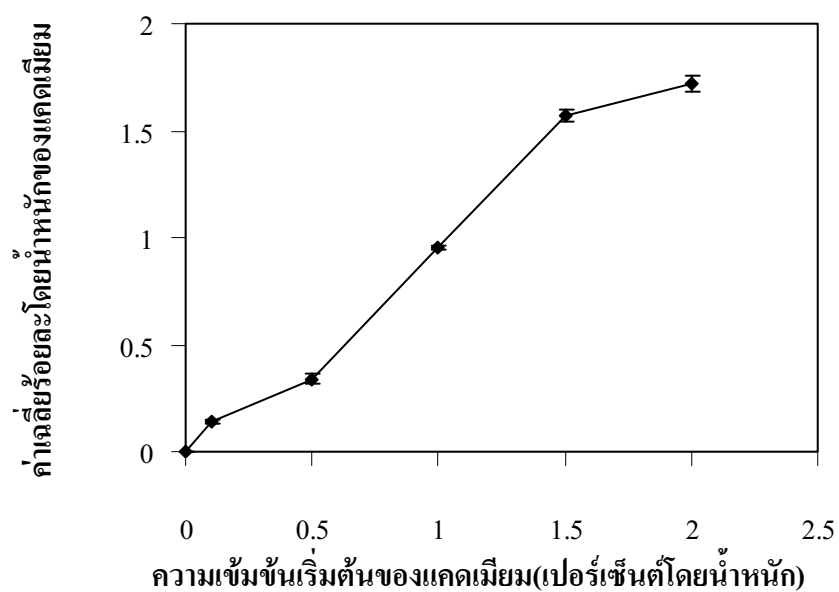
ตารางที่ 4.4 ส่วนประกอบของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักแคดเดียมผสมอยู่ในช่วง 0-2.0เปอร์เซ็นต์

ร้อยละของ แคดเดียม โดยน้ำหนัก	เฟสของ ปูนเม็ด	ร้อยละโดยน้ำหนัก								
		C	O	Mg	Si	Ca	Al	Fe	Cd	รวม
control	alite	9.59	31.15	0.72	6.37	45.48	3.14	3.55	0	100
	belite	11.10	30.11	0.70	6.26	44.72	3.64	3.47	0	100
	aluminite	14.47	27.85	0.63	4.11	47.71	3.79	1.44	0	100
0.1	alite	10.30	44.58	0.77	9.80	33.03	1.20	0.18	<u>0.14</u>	100
	belite	5.10	33.53	0.47	7.37	51.33	0.87	1.24	<u>0.09</u>	100
	aluminite	5.52	33.59	0.55	9.18	48.24	1.31	1.19	<u>0.42</u>	100
0.5	alite	2.22	12.13	0.21	3.67	77.62	1.12	2.69	<u>0.34</u>	100
	belite	3.55	14.16	0.21	3.00	71.65	1.58	5.16	<u>0.69</u>	100
	aluminite	3.62	12.52	0.24	2.04	75.96	1.29	3.15	<u>1.18</u>	100
1.0	alite	2.66	14.20	0.5	2.05	68.31	1.02	10.31	<u>0.95</u>	100
	belite	5.06	23.04	0.55	2.79	62.72	1.51	2.88	<u>1.45</u>	100
	aluminite	2.23	13.07	0.32	3.75	75.87	0.90	2.31	<u>1.55</u>	100
1.5	alite	2.28	15.45	0.29	2.14	71.71	1.33	5.23	<u>1.57</u>	100
	belite	8.05	21.91	0.31	3.42	60.01	1.30	2.95	<u>2.05</u>	100
	aluminite	1.34	5.04	0.11	2.19	85.79	0.32	2.98	<u>2.23</u>	100
2.0	alite	0.99	7.29	0.10	1.56	84.09	0.71	3.54	<u>1.72</u>	100
	belite	2.52	16.67	0.50	4.18	70.22	1.30	2.16	<u>2.45</u>	100
	aluminite	1.32	10.79	0.26	2.69	75.39	1.10	5.48	<u>2.97</u>	100

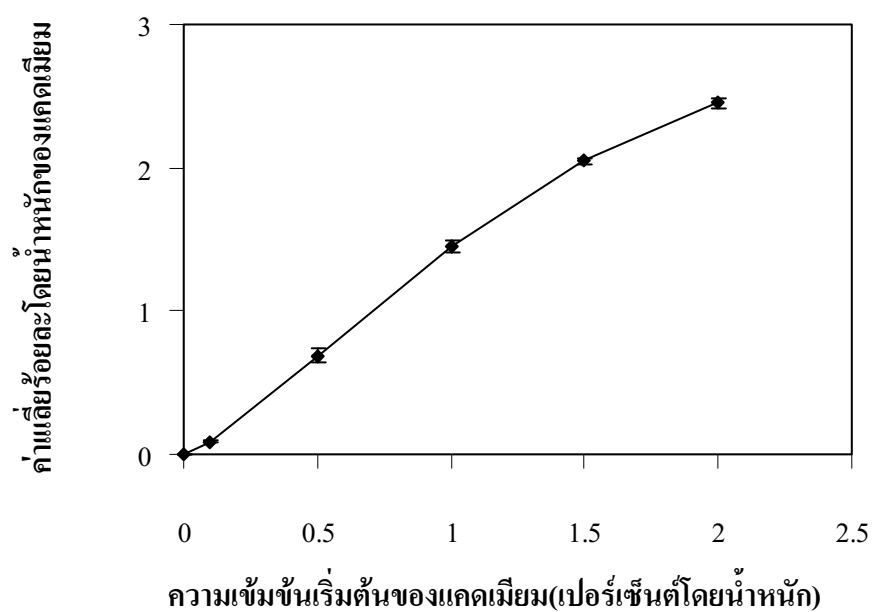
หมายเหตุ ค่าที่แสดงในตารางแต่ละค่าเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด 3 ค่า

ค่าจากการวิเคราะห์ EDS ไม่สามารถนำไปอ้างอิงในการทดลองอื่นได้

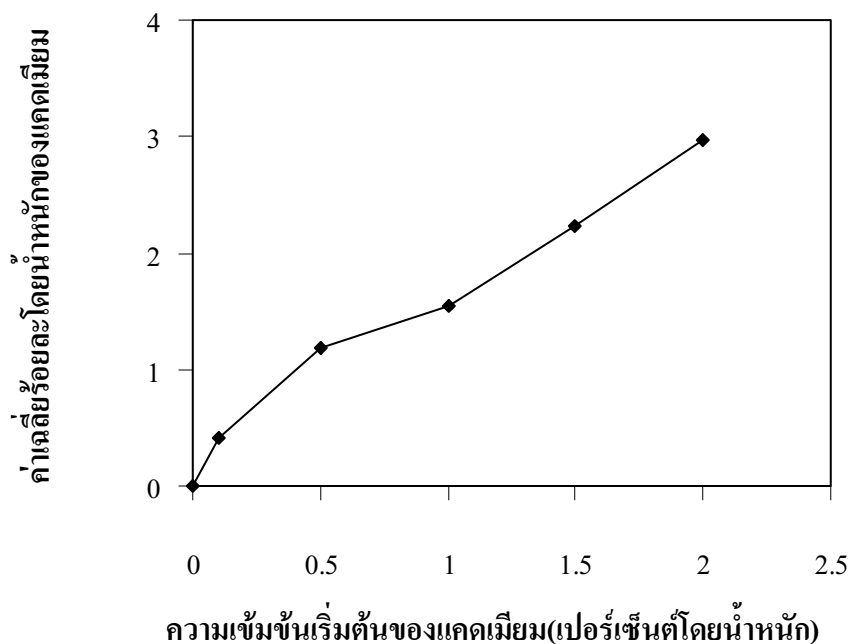
เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากตารางมาแสดงเป็นเส้นแนวโน้มได้ดังรูปที่ 4.7



(ก) ร้อยละของแคะเมียมที่ปรากฏในเฟสของalite



(ข) ร้อยละของแคะเมียมที่ปรากฏในเฟสของbelite



(ค) ร้อยละของแคลเซียมที่ปรากฏในเฟสของaluminite

รูปที่ 4.7 ร้อยละของแคลเซียมที่ปรากฏในเฟสต่างๆของปูนเม็ดวิเคราะห์ด้วย EDS

จากรูปที่ 4.7 พบว่าที่แคลเซียมจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับปูนเม็ดโดยปรากฏในส่วนของ aluminite เป็นหลัก และปรากฏในส่วนของalite และ beliteในสัดส่วนที่ต่ำกว่า โดยในเฟสของaluminite ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแคลเซียมร้อยละ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะค่าเท่ากับ 2.97

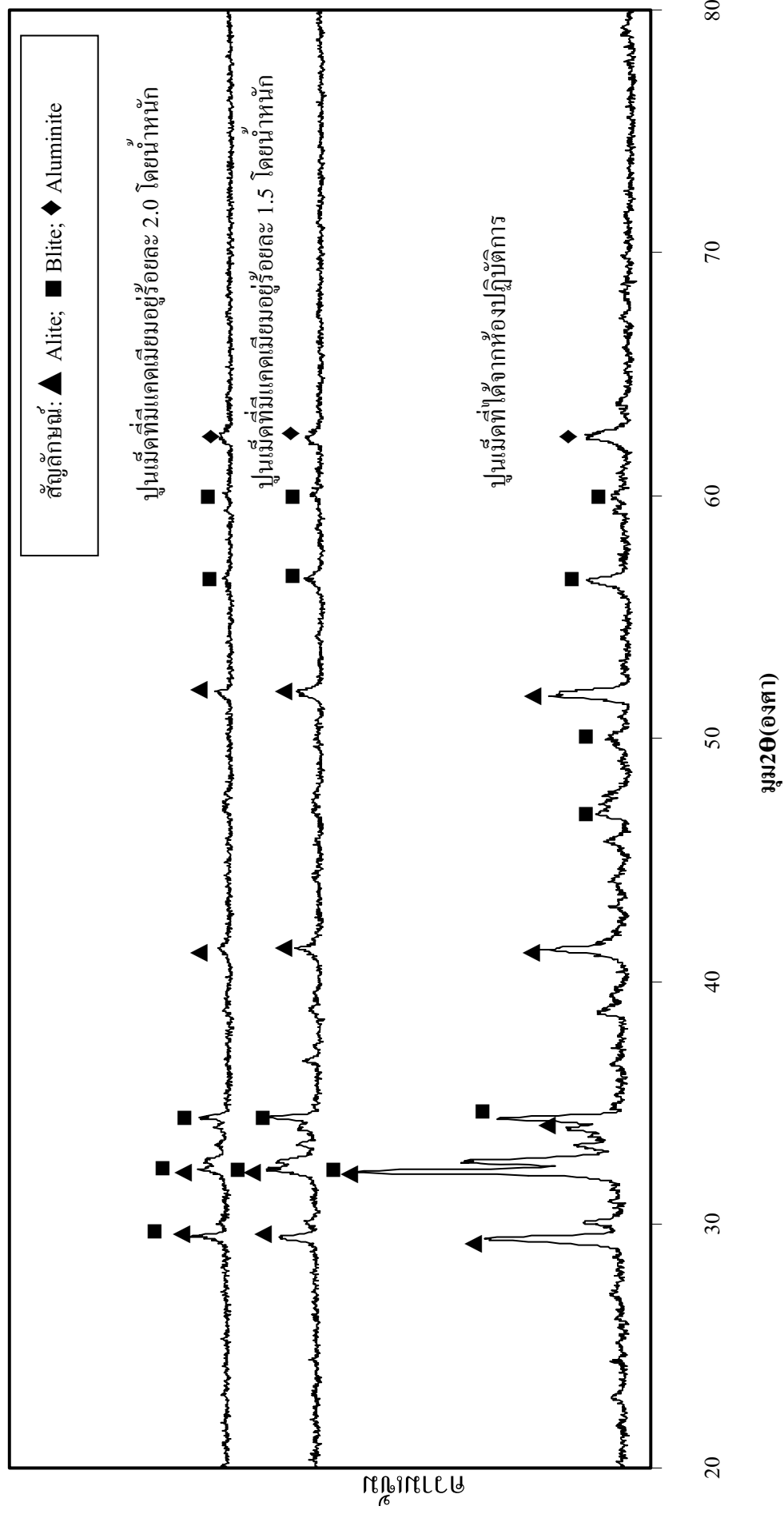
การทดสอบลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดด้วยเครื่อง X-ray diffraction(XRD)ได้แสดงใน รูปที่ 4.8 และ 4.9 โดยในรูปที่ 4.8 แสดงลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดเมื่อมีความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียม 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และรูปที่ 4.9 แสดงลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดเมื่อมีความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียม 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เมื่อมีความเข้มข้นเริ่มต้นแคลเซียมในช่วง 0.5-1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาลักษณะของพีคที่ได้ในภาพรวมเทียบกับปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการ จะพบว่ามีลักษณะไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีระดับความสูงของพีคในภาพรวมและตำแหน่งของalite belite และ aluminite ลดลงที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมสูงกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมในระดับความเข้มข้นที่ศึกษาจะส่งผลต่อปริมาณของalite และ belite ซึ่งสอดคล้องกับค่าร้อยละfree lime ที่เหลืออยู่ที่ได้ทดสอบมาข้างต้น ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น ในช่วง 1.12-1.23 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลจากการทดสอบค่าร้อยละfree limeที่เหลืออยู่ และเฟสต่างของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วย XRD ได้แสดงให้เห็นว่าที่แคลเซียมความเข้มข้นที่ใช้ในการศึกษานี้ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสต่างๆ ของปูนเม็ด

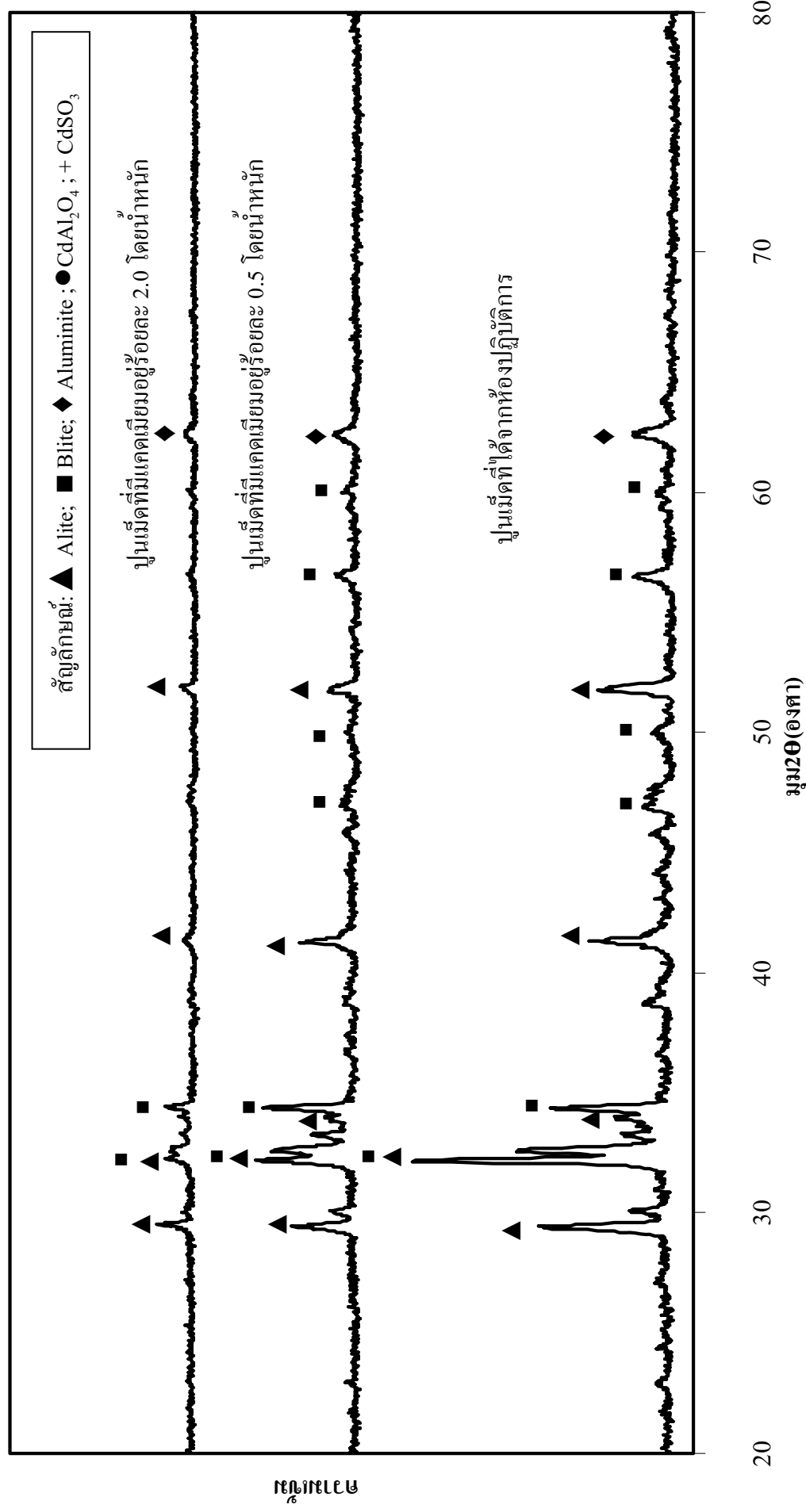
จากรูปที่ 4.9 เมื่อนำรูปแบบของกราฟ XRD มาวิเคราะห์ถึงตำแหน่งของพีคของเฟสหลัก พบว่ามี การพบพีคใหม่ ซึ่งแสดงถึงการเกิดสารประกอบชนิดใหม่เกิดขึ้นเมื่อมีแคดเมียมอยู่ในปูนเม็ด จากการ วิเคราะห์ตำแหน่งของพีคด้วยเครื่อง XRD จะพบว่า ตำแหน่งของพีคใหม่ที่เกิดขึ้นหลายตำแหน่งสอดคล้อง กับตำแหน่ง โครงสร้างของสารประกอบสองชนิด คือ CdAl_2O_4 และ CdSO_3

แคดเมียมอลูมิเนียมออกไซด์ (CdAl_2O_4) พบในกราฟจากการวิเคราะห์ด้วย XRD ของปูนเม็ดที่มี แคดเมียมที่มม $2\theta = 23.2\ 31.26\ 32.6\ 32.8\ 35.3\ 37.5\ 38.84\ 44.18$ และ 51.88 ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จาก การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDS กล่าวคือ จากผลของ EDS จะพบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นขอแคดเมียมตั้งแต่ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แคดเมียมจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนตเป็นหลัก ทำให้ในการ ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของแคดเมียมในปูนเม็ด ได้สารประกอบใหม่ในรูปของแคดเมียมอลูมิเนียม ออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของแคดเมียมและอลูมิเนียมในปูนเม็ด ซึ่งข้อมูลนี้สอดคล้องกับ ลักษณะของเฟสใหม่ที่พบในผลจาก SEM ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ aluminite โดยมีส่วนประกอบของ อลูมิเนียมเป็นหลัก

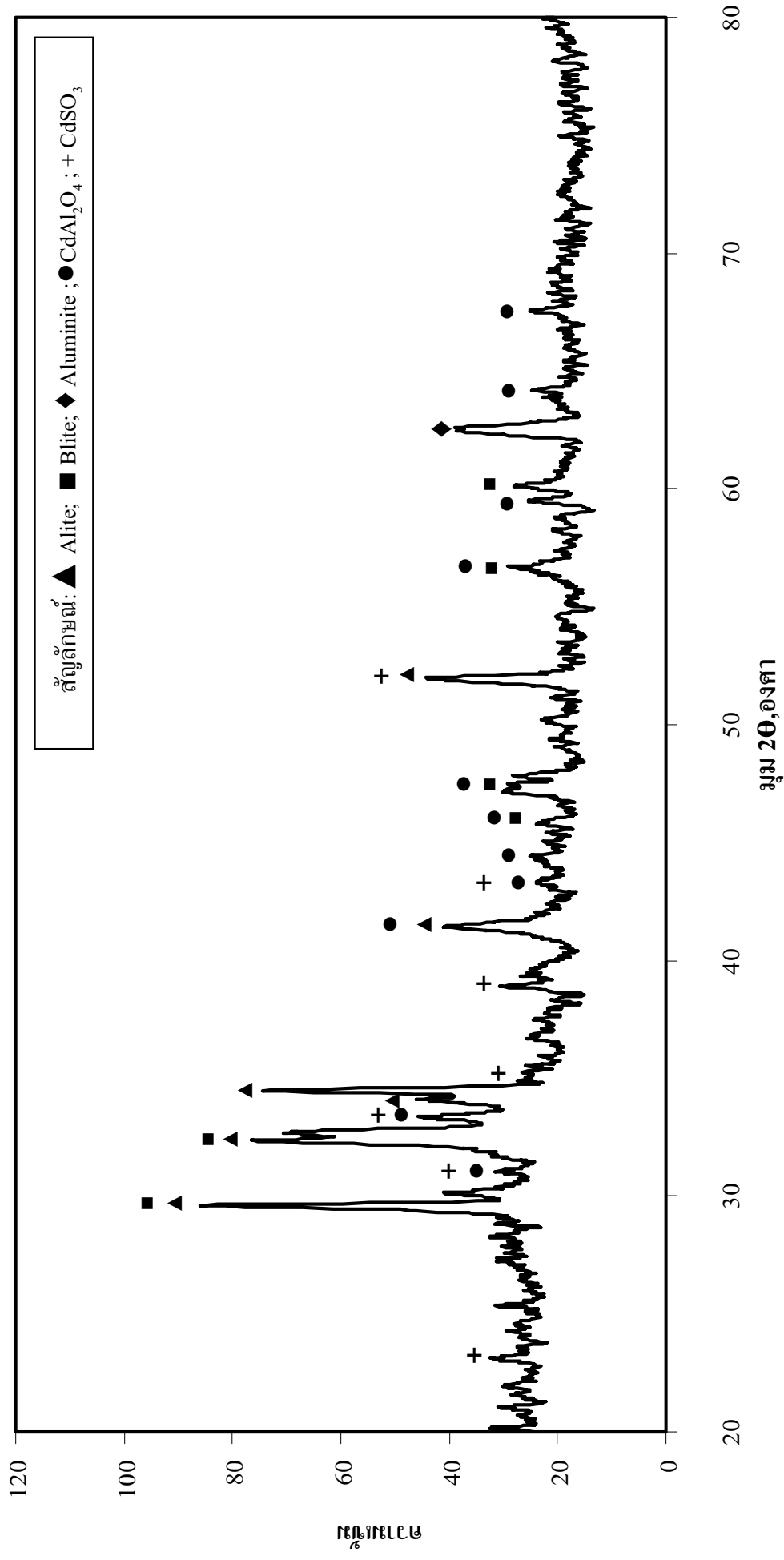
สารประกอบอีกชนิดที่ปรากฏในกราฟจากการวิเคราะห์ด้วย XRD ของปูนเม็ด คือ แคดเมียมซัล ไฟท์ (CdSO_3) โดยตำแหน่งของมุมที่พบ คือ $2\theta = 31.26\ 32.82\ 37.48\ 41.34\ 44.18\ 45.8\ 47.56\ 56.64\ 59.54\ 64.08$ และ 67.56 ทั้งนี้สืบเนื่องมาจากซัลเฟต(SO_3) เป็นส่วนประกอบที่กระจายอยู่ในทุกเฟสของ ปูนเม็ด



รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์เฟสของปูนเม็ดที่มีแคลเซียมที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วย X-ray diffraction



รูปที่ 4.9 สารประกอบใหม่ของแคลเซียมที่ปรากฏในการวิเคราะห์บ่มเนื้อด้วย X-ray diffraction

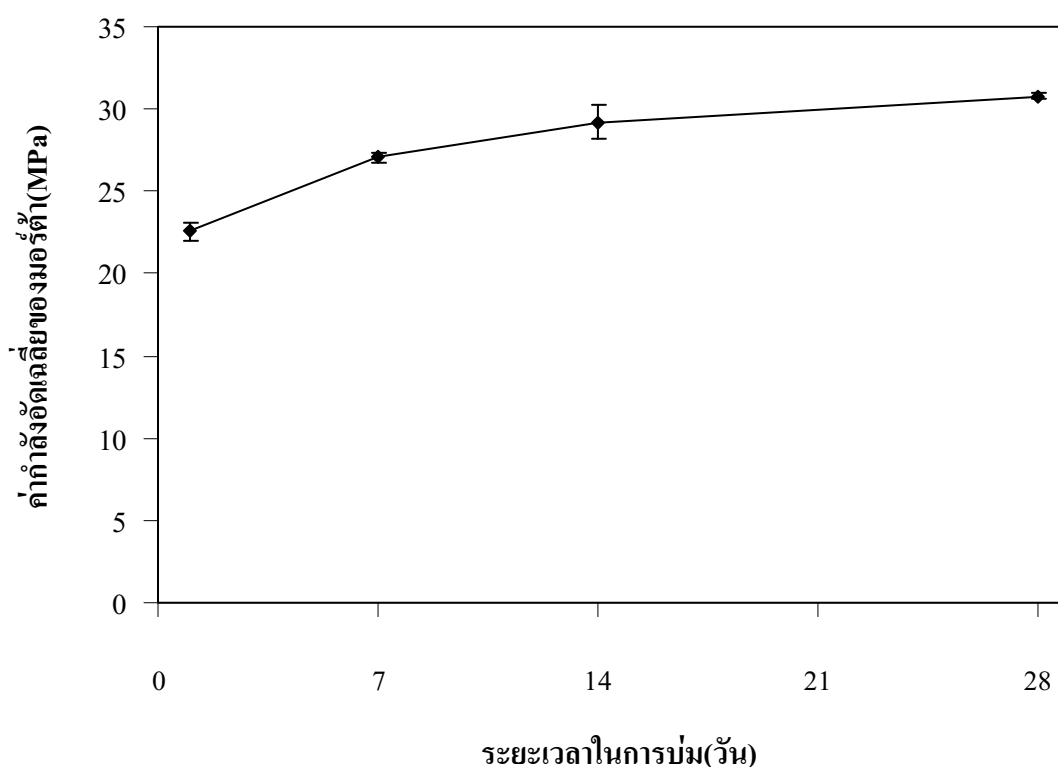


รูปที่ 4.10 สารประกอบใหม่ของแคลเซียมที่ปรากฏในการวิเคราะห์ปูนเม็ดด้วย X-ray diffraction

4.3 ผลของแคะเมียมที่มีต่อการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า

งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของแคะเมียมในซีเมนต์เป็น 0 0.1 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนระหว่างซีเมนต์ต่อทรายต่อน้ำที่อัตราส่วน 1: 2.75 : 0.485 [ASTM C187] โดยทำการศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีระยะเวลาในการบ่มต่างกัน คือ 1 7 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

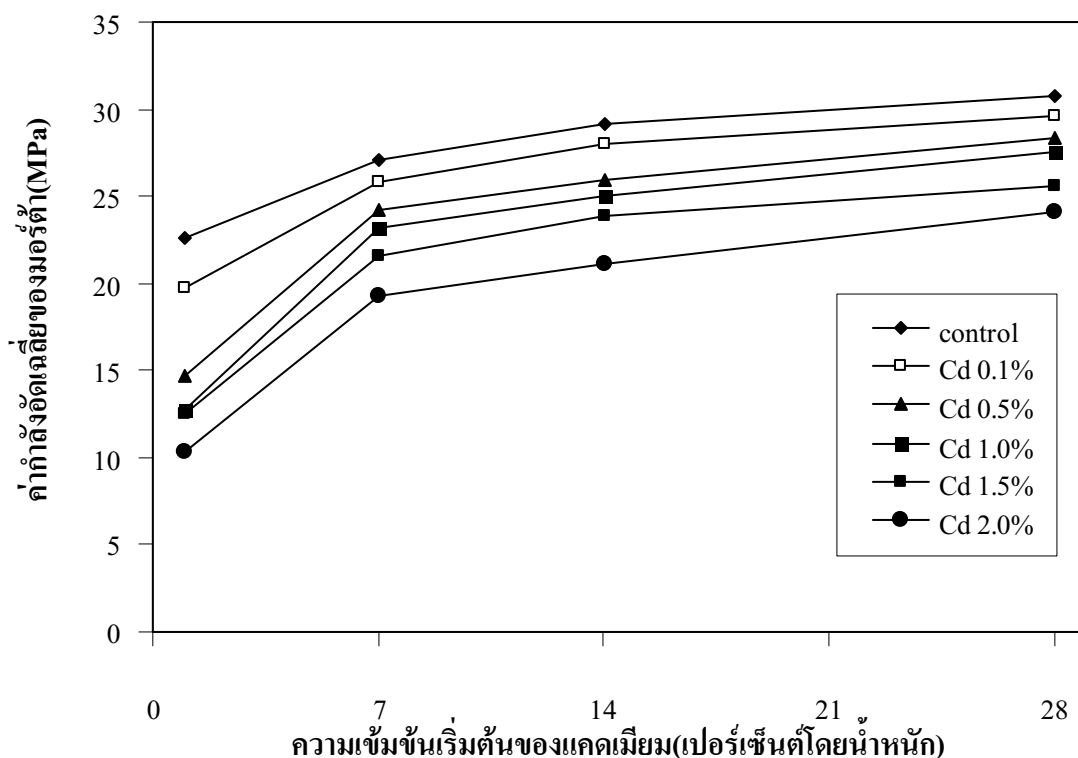
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับกำลังอัดกับระยะเวลาการบ่ม ตัวอย่างจากการทดลองพบว่าความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่ไม่มีส่วนผสมของแคะเมียมที่มีอายุ 1 วันเท่ากับ 22.56 MPa จากนั้นจึงเพิ่มขึ้นเป็น 27.04 MPa ที่อายุ 7 วัน และมีแนวโน้มการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่เมื่อซีเมนต์มอร์ต้ามีอายุการบ่มมากขึ้นการรับกำลังอัดอยู่ในอัตราที่ลดลง



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่ไม่มีส่วนผสมของแคะเมียมที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 1 7 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

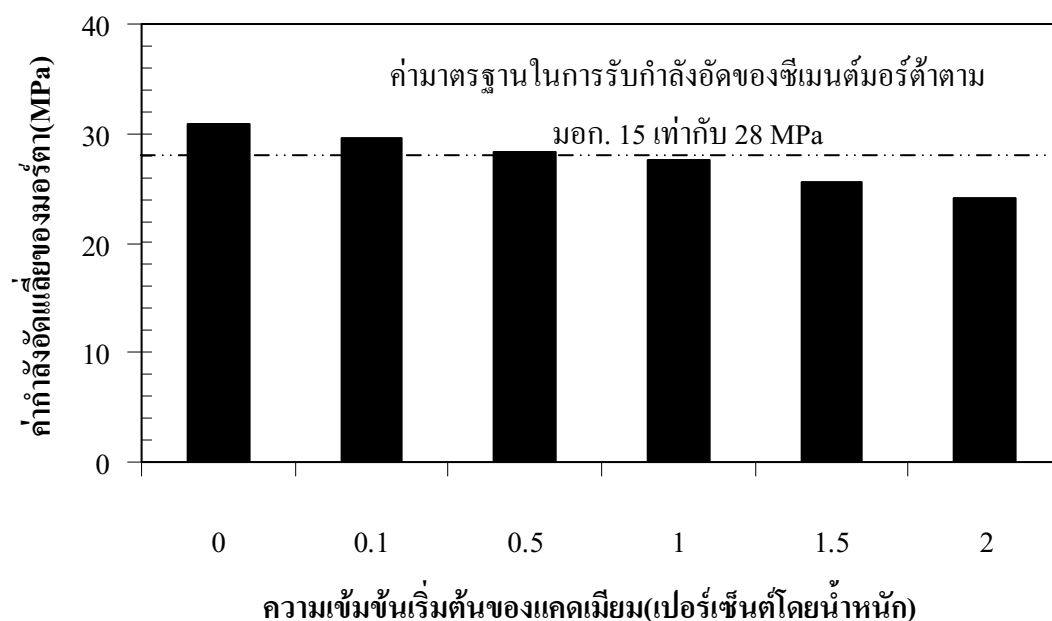
สำหรับซีเมนต์มอร์ต้าที่มีสารประกอบแคะเมียมอยู่ในปริมาณ 0.1 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้ความสามารถในการรับกำลังอัดของมอร์ต้าหลังจากการบ่มได้ 1 วันเท่ากับ 19.75 14.73 12.79 12.456 และ 10.36 MPa ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าซีเมนต์มอร์ต้าที่ไม่มีส่วนผสมของแคะเมียมที่มีอายุเท่ากัน และความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของแคะเมียมจะมีการพัฒนาการรับกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม เช่นเดียวกับซีเมนต์มอร์ต้าที่ไม่มีส่วนผสมของ

แคลเซียม และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมเริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้น ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่ลดลงตามลำดับตามปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมที่เพิ่มสูงขึ้นดังแสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของแคลเซียมที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 1 7 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

ความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของแคลเซียมที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 28 วัน พบว่ามีความสามารถในการรับกำลังอัดต่ำกว่าความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่ไม่มีส่วนผสมของแคลเซียม และพบว่าค่าความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของแคลเซียมมากกว่าหรือเท่ากับ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 เล่ม 1-2547 (มอก.15 เล่ม 1-2547 หน้า 10) [15] ที่ให้ความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีอายุในการบ่มที่ระยะเวลา 28 วัน ไม่น้อยกว่า 28 MPa [15,16] ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์อร์ต้าที่มีส่วนผสมของความชื้นเริ่มต้นของแคะเมียมที่ต่างกัน กับระยะเวลาในการบ่มที่ 28 วัน

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของกำลังที่ลดลงต่อปริมาณแคะเมียมที่เพิ่มสูงขึ้น

ความชื้นเริ่มต้น ของแคะเมียม ร้อยละโดยน้ำหนัก	ค่าความสามารถ ในการรับ กำลังอัด (MPa)	ค่าเปอร์เซ็นต์ของกำลังที่ลดลง ต่อปริมาณแคะเมียมที่เพิ่ม สูงขึ้น
0	30.79	-
0.1	29.56	3.99
0.5	28.31	8.05
1.0	27.51	10.65
1.5	25.61	16.82
2.0	24.09	21.76

โดยพบว่าที่ความชื้นเริ่มต้นของแคะเมียม 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักค่าความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์อร์ต้ามีค่าเท่ากับ 27.51 25.60 และ 24.09 MPa ซึ่งผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการรับกำลังอัดของก้อนซีเมนต์อร์ต้าที่มีส่วนผสมของแคะเมียมจะมีความสามารถในการรับกำลังอัดต่ำกว่าซีเมนต์อร์ต้าที่ไม่มีส่วนผสมของแคะเมียมอาจเกิดเนื่องจากการแทรกสอดของโลหะหนักและทำให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Murat และ Sorrentino[17] ที่พบว่าเมื่อความชื้นเริ่มต้นของแคะเมียม

เริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์อร์ต้าลดลง และผลที่ได้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ที่พบว่าเมื่อมีการเติมแคลเซียมลงไปในวัตถุดิบ โดยเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมมีปริมาณสูงขึ้น จะทำให้ปริมาณของ alite และ belite ลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์อร์ต้าลดลงในอัตราที่เพิ่มมากขึ้นตามตารางที่ 4.5

จากการทดสอบคุณลักษณะของซีเมนต์พบว่าเมื่อในปูนเม็ดมีส่วนผสมของโลหะหนักจะทำให้ปริมาณของค่าร้อยละ free lime ที่เหลืออยู่มีปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้แคลเซียมเข้าไปขัดขวางการเกิดองค์ประกอบหลักของปูนเม็ดคือ alite และ belite มีปริมาณลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นแคลเซียมเพิ่มสูงขึ้นโดยพิจารณาจากการวิเคราะห์ด้วย XRD และแคลเซียมยังก่อให้เกิดสารประกอบชนิดใหม่ในปูนเม็ดคือ แคลเซียมอลูมิเนียมออกไซด์(CdAl_2O_4) และแคลเซียมอลูมิเนียมซัลไฟท์(CdSO_3) ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDS กล่าวคือ แคลเซียมจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ aluminite เป็นหลัก ซึ่งข้อมูลนี้สอดคล้องกับลักษณะของเฟสใหม่ที่พบในผลจาก SEM ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ aluminite สารประกอบอีกชนิดที่พบในกราฟจากการวิเคราะห์ด้วย XRD ของปูนเม็ด คือ แคลเซียมซัลไฟท์(CdSO_3) ทั้งนี้สืบเนื่องมาจากซัลเฟต(SO_3) เป็นส่วนประกอบที่มีอยู่กระจายในทุกเฟสของปูนเม็ด จึงไม่สามารถระบุได้ด้วยการวิเคราะห์ EDS จากการทดสอบระยะเวลาในการก่อตัวผลการทดลองพบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นแคลเซียมที่เพิ่มสูงขึ้น และความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์อร์ต้าพบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมเพิ่มสูงขึ้นพบว่าความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์อร์ต้าลดลง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วย XRD ที่พบว่าฟิสิกขององค์ประกอบหลักลดลง ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์ที่ลดลง

4.4 การชะล้างแคลเซียมจากซีเมนต์

ในส่วนของการชะล้างในประเด็นของผลที่มีต่อสิ่งแวดล้อมนั้น ได้ทดสอบตามวิธีทดสอบมาตรฐานจัดตั้งขึ้น เพื่อใช้ในการหาปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกมาได้จากของแข็ง ได้แก่

4.4.1 การทดสอบการชะล้างวิธี Microwave Assisted Leach Method 3051A

การทดสอบการชะล้างด้วยวิธีมาตรฐานนี้ เป็นการทดสอบการชะล้างโลหะหนัก โดยจำลองสถานการณ์ที่ให้ตัวอย่างถูกสกัดด้วยกรดไนตริกเข้มข้น ร่วมกับการให้ความร้อนในการสกัด ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นการทำให้โลหะหนักถูกชะล้างออกมาให้มากที่สุด เพื่อที่จะหาสัดส่วนของปริมาณการชะล้างของโลหะหนักทั้งหมดในซีเมนต์ ที่สามารถถูกชะล้างออกจากซีเมนต์เมื่อเทียบกับปริมาณของโลหะหนักที่ใส่ไปเริ่มต้น เนื่องจากโลหะหนักที่แทรกตัวอยู่ในส่วนประกอบของซีเมนต์มอร์ต้า นั้น โลหะส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยาและถูกกักขังไว้ในเมตริกซ์ของซีเมนต์มอร์ต้า ในขณะที่มีโลหะหนักเพียงบางส่วนเท่านั้นที่มีโอกาสถูกชะล้างออกมาสู่ภายนอกเมตริกซ์ได้ แต่ทั้งนี้วิธีการทดสอบตามมาตรฐานนี้ ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกมาเป็นเพียงส่วนที่ถูกสกัดจากซีเมนต์มอร์ต้า ไม่ได้หมายรวมถึงโลหะหนักที่แทรกเข้าไปในโครงสร้างของทราย

หนึ่งจากการทดสอบการชะล้างแคลเซียมด้วยวิธี Microwave Assisted Leach Method 3052A พบว่ามีค่าไม่แตกต่างจากผลการทดสอบการชะล้างแคลเซียมด้วยวิธี Microwave Assisted Leach Method 3051A ซึ่งแสดงว่าโลหะหนักแทรกอยู่ในเมตริกซ์ของซีเมนต์มอร์ต้า และไม่ได้แทรกอยู่ในส่วนของทราย ผลที่ได้จากการชะล้างด้วยวิธี Microwave Assisted Leach Method 3051A จึงอนุมานได้ว่าเป็นผลการชะล้างแคลเซียมทั้งหมดที่สามารถออกมาสู่ภายนอกเมตริกซ์ของซีเมนต์มอร์ต้า

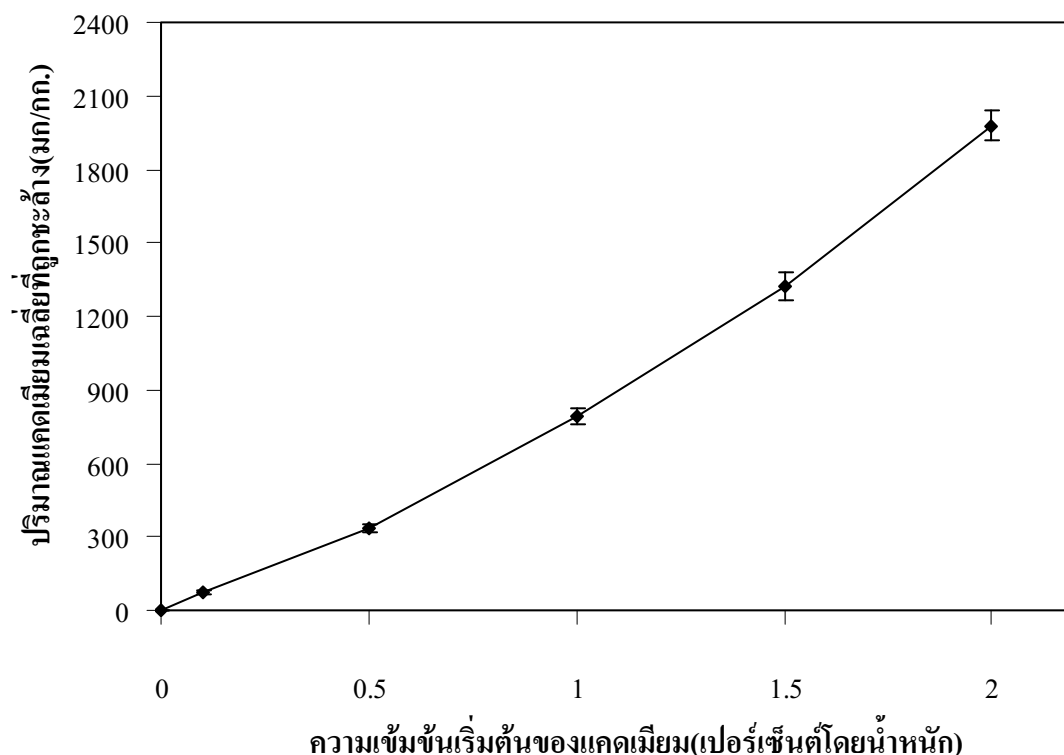
ผลจากการทดสอบการชะล้างแคลเซียมออกจากซีเมนต์มอร์ต้าด้วยวิธี Microwave Assisted Leach Method 3051A แสดงดังตารางที่ 4.6 ซึ่งความเข้มข้นของแคลเซียมเริ่มต้นที่ใช้ในการวิจัยนี้ความเข้มข้นเป็น 0, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ และแต่ละความเข้มข้นได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง

ตารางที่ 4.6 ผลการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ต้าที่มีโลหะหนักแคลเซียมผสมอยู่ด้วยวิธีการทดสอบแบบ Microwave assisted leach method 3051A

ร้อยละความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมโดยน้ำหนัก	ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมที่มีอยู่ในมอร์ต้า (มก./กก.)	ปริมาณแคลเซียมที่ถูกชะล้างออกจากมอร์ต้าที่ได้จากการเผา รวม (มก./กก.)	เปอร์เซ็นต์แคลเซียมที่ถูกชะล้างเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น
0.1	252.26	76.10 ± 7.32	30.17
0.5	1261.32	334.80 ± 19.18	27.53

ตารางที่ 4.6 ผลการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ต้าที่มีโลหะหนักแคดเมียมผสมอยู่ด้วยวิธีการทดสอบแบบ Microwave assisted leach method 3051A (ต่อ)

ร้อยละความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมโดยน้ำหนัก	ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมที่มีอยู่ในมอร์ต้า (มก./กก.)	ปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะล้างออกจากมอร์ต้าที่ได้จากการเผา รวม (มก./กก.)	เปอร์เซ็นต์แคดเมียมที่ถูกชะล้างเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น
1.0	2522.64	791.33 ± 34.27	31.37
1.5	3783.96	1320.60 ± 56.51	34.90
2.0	5045.28	1979.53 ± 59.83	39.24



รูปที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยปริมาณของแคดเมียมที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้จากซีเมนต์มอร์ต้าด้วยวิธี Microwave assisted leach method 3051A

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมเพิ่มมากขึ้นปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะล้างออกมาจากซีเมนต์มอร์ต้าก็เพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยปริมาณแคดเมียมที่สามารถถูกสกัดออกมาได้จากซีเมนต์มอร์ต้าคิดเป็นค่าเฉลี่ยประมาณ 32.642 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้นที่มีในมอร์ต้า โดยปริมาณแคดเมียมส่วนใหญ่จะถูกกักขังอยู่ในซีเมนต์มอร์ต้า ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงให้เห็นว่าแคดเมียมจะแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้างต่างๆของปูนเม็ด

4.5.2 การทดสอบการชะล้างวิธี Availability leaching test NEN 7341(AVLT)

วิธีทดสอบการชะล้างโลหะหนักตามมาตรฐานนี้ เป็นการทดสอบการชะล้างโลหะหนักที่ถูกพัฒนาขึ้นและบรรจุอยู่ในมาตรฐานของประเทศเนเธอร์แลนด์ เพื่อใช้ในการหาปริมาณโลหะหนักที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้มากที่สุดตามธรรมชาติ โดยจำลองสถานการณ์เลียนแบบสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติที่เหมาะสมที่เอื้อให้เกิดการชะล้างโลหะหนักให้ออกมาจากซีเมนต์มอร์ต้าได้มากที่สุดตามธรรมชาติ

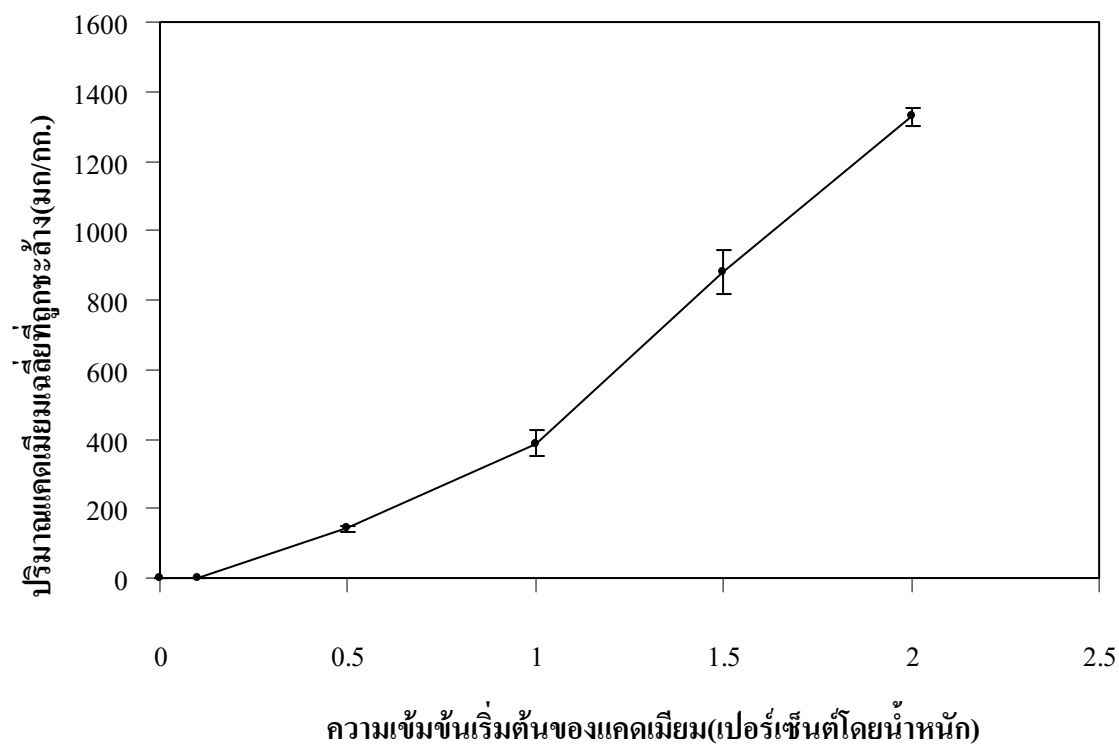
ผลจากการทดสอบการชะล้างแคดเมียมจากซีเมนต์มอร์ต้าด้วยวิธี Availability leaching test NEN 7341(AVLT) แสดงดังตารางที่ 4.7 ซึ่งความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็น 0 0.1 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ และแต่ละความเข้มข้นได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง

ตารางที่ 4.7 ผลการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ต้าที่มีโลหะหนักแคดเมียมผสมอยู่ด้วยวิธีการทดสอบแบบ Availability leaching test NEN 7341(AVLT)

ร้อยละความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมโดยน้ำหนัก	ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมที่มีอยู่ในมอร์ต้า (มก./กก.)	ปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะล้างออกจากมอร์ต้าที่ได้จากการเผาร่วม (มก./กก.)	เปอร์เซ็นต์แคดเมียมที่ถูกชะล้างเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น
0.1	252.26	ND	-
0.5	1261.32	142.00 ± 8.13	11.26
1.0	2522.64	386.65 ± 38.36	15.33
1.5	3783.96	879.50 ± 62.21	23.24
2.0	5045.28	1328.00 ± 25.14	26.32

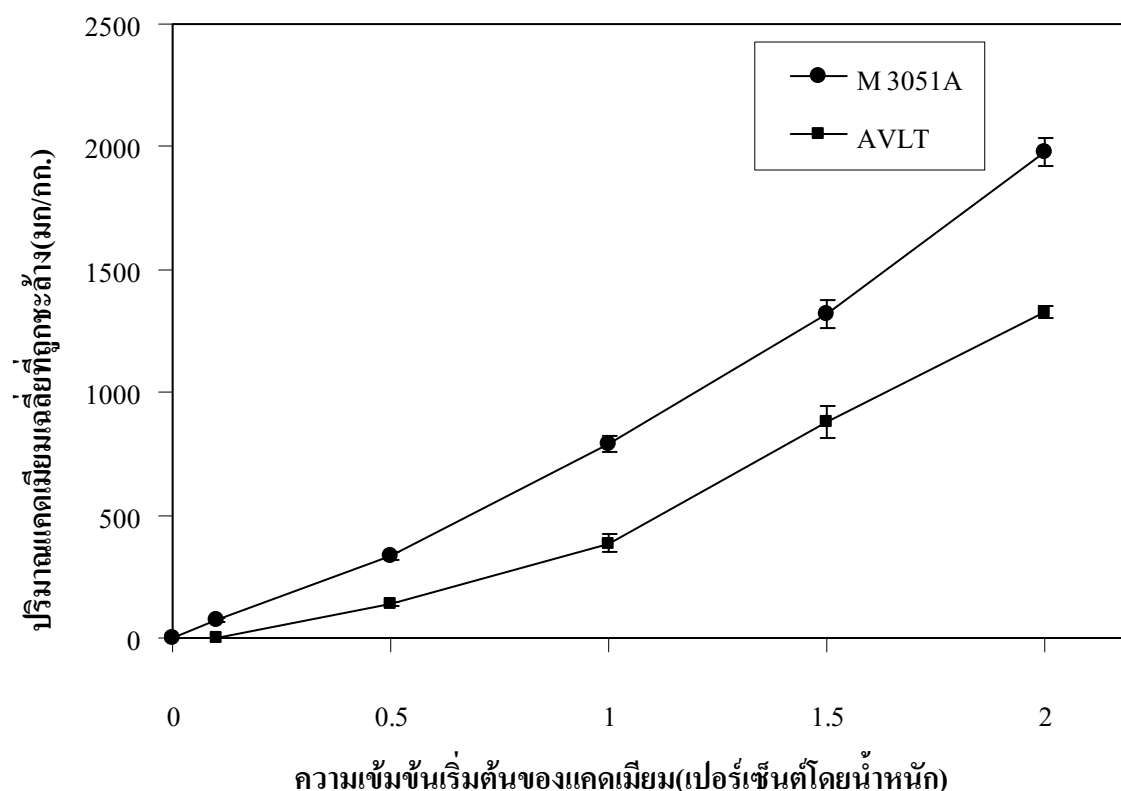
หมายเหตุ : ND คือ ค่าที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง ICP ซึ่งกำหนดค่าความเข้มข้นต่ำสุดไว้ที่ 0.001 มก./ล. หรือมีปริมาณแคดเมียมต่ำกว่า 0.050 มก./กก.

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมเพิ่มมากขึ้นปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะล้างออกมาจากซีเมนต์มอร์ต้าก็เพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยปริมาณแคดเมียมที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้จากซีเมนต์มอร์ต้าคิดเป็นค่าเฉลี่ยประมาณ 29.04 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้นที่มีในมอร์ต้า โดยปริมาณแคดเมียมส่วนใหญ่จะถูกกักขังอยู่ในซีเมนต์มอร์ต้า ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงให้เห็นว่าแคดเมียมจะแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้างต่างๆของปูนเม็ด



รูปที่ 4.15 ปริมาณของแคดเมียมที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้จากซีเมนต์มอร์ต้าด้วยวิธี Availability leaching test NEN 7341(AVLT)

การวิเคราะห์การชะล้างแคดเมียมจากซีเมนต์มอร์ต้าโดยวิธี Microwave assisted leach method 3051A มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะล้างออกมาได้มากที่สุด ส่วนการวิเคราะห์ด้วยวิธี Availability leaching test NEN 7341(AVLT) นั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อจะวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะล้างออกมาได้ตามธรรมชาติ เมื่อนำผลการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธีมาทำการเปรียบเทียบเพื่อศึกษาถึงภาพรวมของการชะล้างแคดเมียมออกจากซีเมนต์มอร์ต้า โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบการชะล้างแคลเซียมด้วยวิธี Microwave assisted leach method 3051A (M 3051A) และ Availability leaching test NEN 7341(AVLT)

จากรูปแสดงให้เห็นว่าปริมาณแคลเซียมที่ถูกชะล้างออกมาด้วยวิธี Microwave assisted leach method 3051A นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมเพิ่มขึ้น และปริมาณแคลเซียมที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้ด้วยวิธี Availability leaching test NEN 7341(AVLT) นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับ Microwave assisted leach method 3051A แต่จะเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่น้อยกว่าวิธี Microwave assisted leach method 3051A โดยแคลเซียมที่สามารถถูกชะล้างออกมาด้วยวิธี Availability leaching test NEN 7341(AVLT) ได้คิดเป็น 42.41-67.09 เปอร์เซ็นต์ของแคลเซียมที่ถูกชะล้างออกมาด้วยวิธี Microwave assisted leach method 3051A ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมในการชะล้างแคลเซียมออกจากซีเมนต์มอร์ต้าได้ โดยแคลเซียมมีแนวโน้มในการถูกชะล้างออกจากซีเมนต์มอร์ต้าได้ค่อนข้างสูง

ตารางที่ 4.8 การชะล้างแคดเมียมด้วยวิธี Microwave assisted leach method 3051A(M 3051A) เปรียบเทียบกับวิธี Availability leaching test NEN 7341(AVLT) (ความเข้มข้นในหน่วย มก./กก.)

ความเข้มข้น เริ่มต้นของ แคดเมียมที่มีอยู่ ในปูนเม็ด (มก./กก.)	ความเข้มข้น เริ่มต้นของ แคดเมียมที่มีอยู่ ในมอร์ต้า (มก./กก.)	ความเข้มข้น แคดเมียมที่ได้จาก วิธี M 3051A ที่ชะ ล้างจากมอร์ต้า (มก./กก.)	ความเข้มข้น แคดเมียมที่ได้จาก วิธี AVLT ที่ชะล้าง จากมอร์ต้า (มก./กก.)	แคดเมียมที่ชะล้าง ออกมาด้วยวิธี AVLT ต่อแคดเมียมที่ถูก ชะล้างด้วยวิธี M 3051A (%)
1000	252.26	76.10	ND	ND
5000	1261.32	334.80	142.00	42.41
10000	2522.64	791.33	386.65	48.86
15000	3783.96	1320.60	879.50	66.60
20000	5045.28	1979.53	1328.00	67.09

หมายเหตุ : ND คือ ค่าที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง ICP ซึ่งกำหนดค่าความเข้มข้นต่ำสุดไว้ที่ 0.001 มก./ล. หรือมีปริมาณแคดเมียมต่ำกว่า 0.050 มก./กก.

4.5.3 การทดสอบการชะล้างวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure(US.EPA)

วิธีการนี้เป็นมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับในการนำมาทดสอบการชะล้างโลหะหนักออกจากซีเมนต์มอร์ต้าทั้งในส่วนของซีเมนต์มอร์ต้าที่เป็นปูนเม็ด และซีเมนต์มอร์ต้าที่ได้จากการทำให้เป็นก้อนแข็ง และการปรับเสถียร(Solidification/Stabilization) เพื่อใช้ในการทดสอบว่าเมื่อน้ำของเสียหรือซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักไปฝังยังหลุมฝังกลบ และถูกชะล้าง โลหะหนักในเมตริกซ์ของซีเมนต์มอร์ต้าจะถูกชะล้างมากน้อยเพียงใด เมื่อเทียบกับมาตรฐานขององค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา(US.EPA) โดยหากค่าที่ได้สูงกว่าค่ามาตรฐาน ของเสียหรือซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักนั้นจะถูกจัดว่าเป็นของเสียอันตรายซึ่งต้องนำไปทำการกำจัดอย่างถูกต้องซึ่งหมายความว่าไม่ควรนำวัสดุนั้นๆ มาใช้งาน

ผลจากการทดสอบการชะล้างแคดเมียมออกจากซีเมนต์มอร์ต้าด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure(US.EPA) แสดงดังตารางที่ 4.9 ซึ่งความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้นที่ใช้ในการวิจัยนี้ความเข้มข้นเป็น 0 0.1 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ และแต่ละความเข้มข้นได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง

ตารางที่ 4.9 ผลการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ต้าที่มีโลหะหนักแคดเมียมผสมอยู่ด้วยวิธีการทดสอบแบบ Toxicity Characteristic Leaching Procedure(US.EPA)

ร้อยละความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมโดยน้ำหนัก	ปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะล้างออกจากมอร์ต้าที่ได้จากการเผาร่วม (มก./ล.)
0	0
0.1	0.055 ± 0.014
0.5	0.060 ± 0.003
1.0	0.065 ± 0.007
1.5	0.067 ± 0.003
2.0	0.070 ± 0.001

จากการทดสอบพบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมเพิ่มสูงขึ้นปริมาณของแคดเมียมที่ถูกออกมาชะล้างออกมาก็มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นด้วยแต่เพิ่มขึ้นในปริมาณที่น้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.17

อย่างไรก็ตามค่าการชะล้างของแคดเมียมจากซีเมนต์มอร์ต้าพบว่าผ่านเกณฑ์ควบคุมของ US.EPA โดยค่าความเข้มข้นของแคดเมียมที่ถูกชะล้างออกมาหากมีค่าน้อยกว่า 1.0 มก./ล. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบจะไม่จัดเป็นของเสียอันตราย และจากการทดสอบพบว่าเมื่อความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้นมีค่า 0.1 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะล้างออกมามีค่าเท่ากับ 0.055 0.06 0.065 0.067 และ 0.07 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าซีเมนต์มอร์ต้าที่มีแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ระหว่างความเข้มข้นเป็น 0 0.1 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นั้น ไม่จัดว่าเป็นของเสียอันตราย ตามมาตรฐานของ US.EPA จึงสามารถนำซีเมนต์มอร์ต้า นั้นไปใช้งานได้

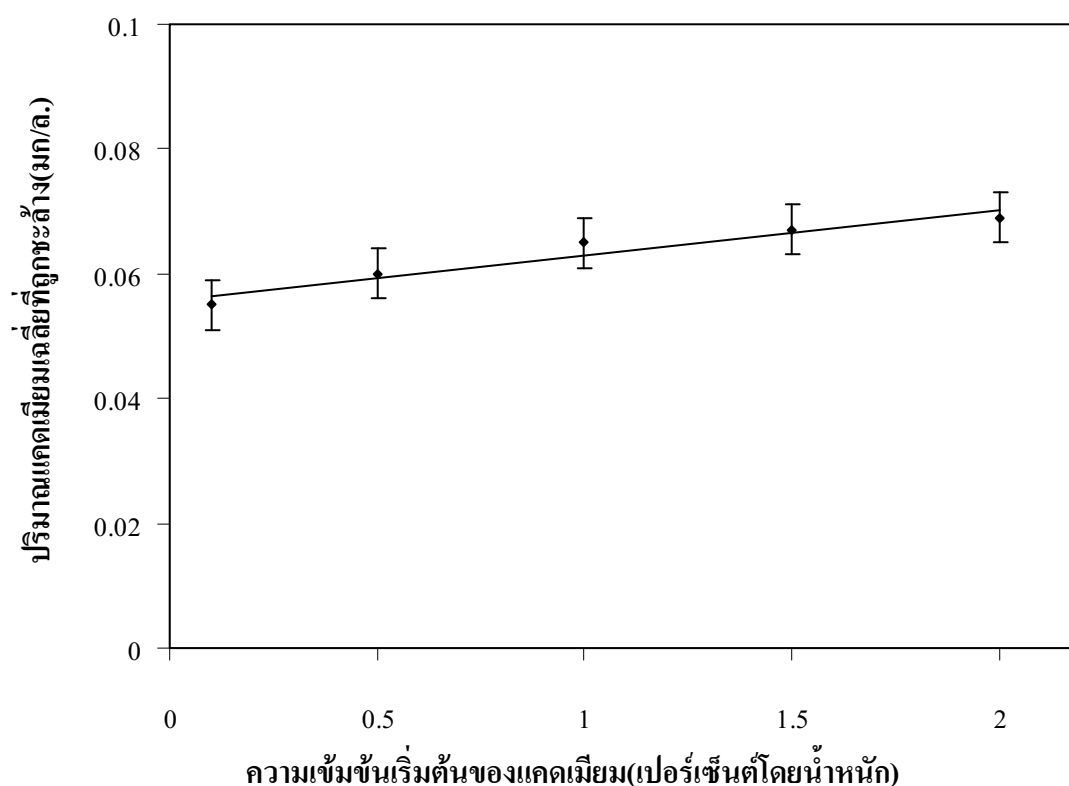
เมื่อพิจารณาถึงปริมาณของแคดเมียมที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้พบว่า เมื่อปริมาณของแคดเมียมในปูนเม็ดเพิ่มมากขึ้นปริมาณของแคดเมียมที่ถูกสกัดมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยปริมาณของแคดเมียมที่ถูกชะล้างโดยเฉลี่ยแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งพบว่าปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะล้างออกมามีความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมเริ่มต้นในปูนเม็ดในลักษณะของกราฟเส้นตรงโดยมีสมการดังนี้

$$y = 0.0072(x) + 0.0558 \quad (4.1)$$

โดยที่ y = ปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะล้างได้ (มก./ล.)

x = ความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

สมการดังกล่าวสามารถใช้ในการทำนายปริมาณของแคดเมียมที่ถูกชะล้างด้วยวิธี แบบ Toxicity Characteristic Leaching Procedure(US.EPA) ได้เมื่อมีความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมในปูนเม็ดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.17 การชะล้างแคดเมียมด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure(US.EPA)

(หมายเหตุ: ค่าความเข้มข้นแคดเมียมที่ถูกชะล้างต่ำกว่า 1.0 มก./ล.จะทำให้วัสดุทดสอบไม่จัดเป็นของเสียอันตรายตามมาตรฐานของ US.EPA)

4.5.4 การทดสอบการชะล้างตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548[40]

ในการทดสอบการชะล้างโลหะหนักออกจากสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วได้แบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วนโดยวิธีการแรกเป็นการทดสอบหาค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสิ่งเจือปน โดยจะมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตราย ในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อหนึ่งกิโลกรัมของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วเท่ากับหรือมากกว่าค่า Total Threshold Limit Concentration(TTLC)[40] ที่กำหนดให้ปริมาณแคดเมียมหรือสารประกอบแคดเมียมในปริมาณ 100 มก./กก.ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายโดยวิธี acid digestion of sediments, sludges, and soils(Method 3050B) เนื่องจากเป็นการหาปริมาณของโลหะหนักและสารประกอบต่างๆ

การทดสอบที่สองเป็นการทดสอบสิ่งปฏิกูลที่ไม่ใช่แล้ว โดยนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test(WET) การทดสอบนี้จะกระทำต่อเมื่อ ค่าความเข้มข้นของสารอันตรายใดๆมีค่าไม่เกินค่า Total Threshold Limit Concentration(TTLC) แต่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration(STLC) ของสารนั้นที่กำหนดไว้ให้ปริมาณของแคดเมียม 1.0 มก./ล.

อย่างไรก็ตาม หากค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายในหน่วยมก./กก.ของสารนั้น มีค่าน้อยกว่าค่า Total Threshold Limit Concentration(TTLC) แต่มากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration(STLC) เมื่อคิดเป็นค่าความเข้มข้นในหน่วย มก./ล. จะต้องนำตัวอย่างของเหลวนั้นมารองผ่านแผ่นกรองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน แล้วนำของเหลวที่ผ่านการกรองทำการวิเคราะห์หาค่าปริมาณของสารนั้น โดยจะจัดว่าเป็นของเสียอันตรายก็ต่อเมื่อค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายในของเหลวที่ผ่านการกรองมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่า Soluble Threshold Limit Concentration(STLC) ที่ระบุไว้สำหรับสารนั้น โดยวิธีการนี้เป็นมาตรฐานในการนำมาชะล้างโลหะหนักออกจากซีเมนต์

1) ผลจากการวิเคราะห์หาค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายโดยวิธี acid digestion of sediments, sludges, and soils (Method 3050B)

การชะล้างโลหะหนักออกจากซีเมนต์ด้วยวิธีการนี้ เป็นการหาค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายหรือโลหะหนักทั้งหมดที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้ ซึ่งทำการย่อยสลายวัสดุอันตรายโดยการเติมกรดไนตริกเข้มข้น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นในการย่อยสลายร่วมกับการให้ความร้อน

ผลการทดสอบการชะล้างแคดเมียมออกจากวัสดุซีเมนต์มอร์ต้าด้วยวิธี acid digestion of sediments, sludges and soils(Method 3050B) แสดงดังตารางที่ 4.10 ซึ่งความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้นที่ใช้ในการวิจัยนี้ความเข้มข้นเป็น 0 0.1 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ และแต่ละความเข้มข้นได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง

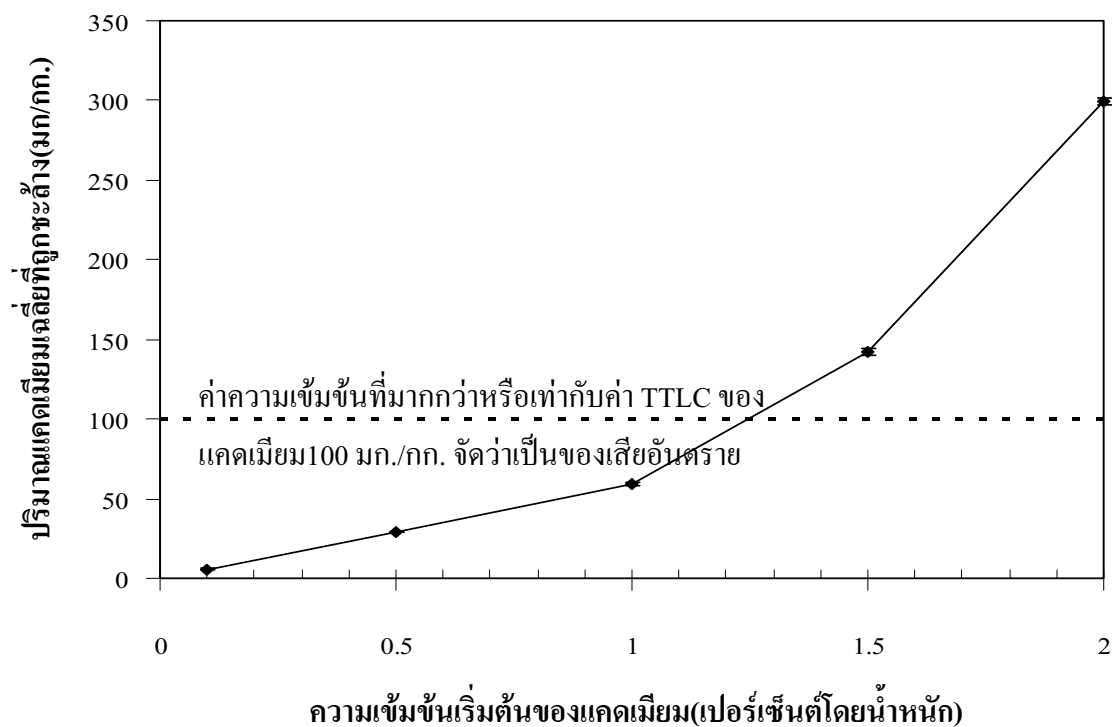
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ต้าด้วยวิธีการทดสอบแบบ acid digestion of sediments, sludges and soils(Method 3050B)

ร้อยละความเข้มข้นเริ่มต้นของ แคดเมียมโดยน้ำหนัก	ปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะล้างออกจาก ซีเมนต์มอร์ต้าที่ได้จากการเผาไหม้ (มก./กก.)
0	0
0.1	5.78 ± 0.30
0.5	28.83 ± 0.17

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ต้าด้วยวิธีการทดสอบแบบ acid digestion of sediments, sludges and soils(Method 3050B)(ต่อ)

ร้อยละความเข้มข้นเริ่มต้นของ แคลเซียมโดยน้ำหนัก	ปริมาณแคลเซียมที่ถูกชะล้างออกจาก ซีเมนต์มอร์ต้าที่ได้จากการเผาไหม้ (มก./กก.)
1.0	59.17 ± 0.87
1.5	142.00 ± 2.51
2.0	299.73 ± 1.97

เมื่อนำผลการทดสอบการชะล้างของวัสดุที่มีแคลเซียมหรือสารประกอบแคลเซียมด้วยวิธี acid digestion of sediments, sludges, and soils(Method 3050B) ที่ได้มาแสดงเป็นเส้นแนวโน้มดังรูปที่ 4.18 พบว่าการชะล้างของแคลเซียมสูงขึ้นแปรตามอัตราส่วนของปริมาณแคลเซียมเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้น โดยวัสดุที่มีปริมาณแคลเซียมเริ่มต้น 1.5 และ 2.0 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก มีค่าปริมาณการชะล้างของแคลเซียมหรือสารประกอบแคลเซียมเท่ากับ 142 และ 299.73 มก./กก. ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้มีค่าสูงกว่าค่าของ TTLC ที่กำหนด จากกราฟแสดงได้ดังเส้นประ โดยกำหนดให้มีปริมาณแคลเซียมหรือสารประกอบแคลเซียมไม่เกิน 100 มก./กก. จึงจะจัดได้ว่าวัสดุซีเมนต์มอร์ต้าที่มีแคลเซียมเป็นส่วนประกอบมากกว่าหรือเท่ากับ 1.5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ค่าที่ได้มีปริมาณสูงกว่าเส้นที่กำหนดไว้ จึงจัดเป็นของเสียอันตราย และพบว่าวัสดุที่มีแคลเซียมเผาไหม้ร่วมกับวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์อยู่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.0 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก จะมีปริมาณแคลเซียมหรือสารประกอบแคลเซียมต่ำกว่าค่า TTLC คือมีค่าเท่ากับ 59.17 มก./กก. ซึ่งในส่วนนี้ยังไม่สามารถที่จะสรุปได้ว่าเป็นของเสียอันตรายหรือไม่ ดังนั้นจำเป็นต้องทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป คือการทำการทดสอบด้วยวิธี Waste extraction test(WET)



รูปที่ 4.18 การชะล้างแคดเมียมด้วยวิธี acid digestion of sediments, sludges and soils(M 3050B)

2) ผลการทดสอบการชะล้างด้วยวิธี Waste Extraction Test(WET)

วิธีการทดสอบด้วย Waste extraction test(WET) เป็นวิธีการที่ใช้กันในรัฐแคลิฟอร์เนีย (California) เป็นวิธีที่ใช้เสริมวิธีการทดสอบ Toxicity Characteristic Leaching Procedure(TCLP) วิธี WET จะเป็นการนำตัวอย่างมาสกัดโดยการกวนเป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยมีการเติมซิเตรทบัฟเฟอร์ ในอัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อของเหลวคือ 1 ต่อ 10

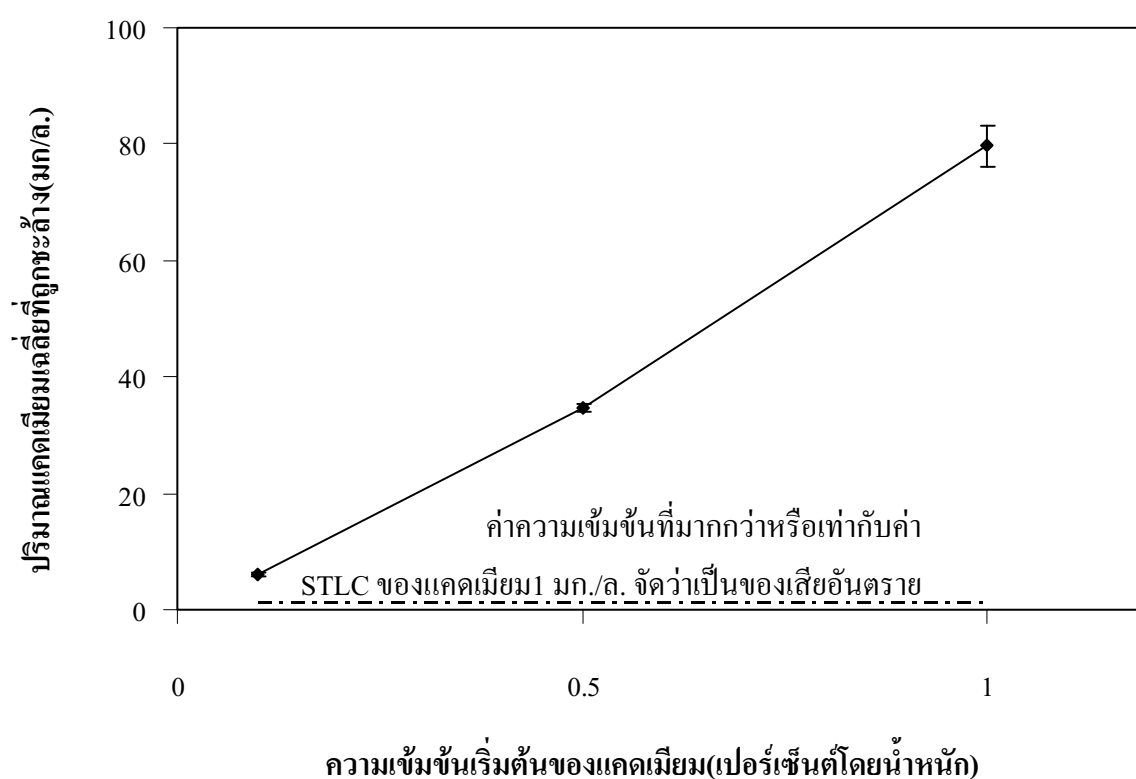
ผลจากการทดสอบการชะล้างแคดเมียมออกจากวัสดุซีเมนต์มอร์ตาร์ด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) แสดงดังตารางที่ 4.11 ซึ่งความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้นที่ใช้ในการวิจัยนี้ความเข้มข้นเป็น 0 0.1 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ และแต่ละความเข้มข้นได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง

ตารางที่ 4.11 ผลการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักแคดเมียมผสมอยู่ด้วยวิธี Waste Extraction Test(WET)

ร้อยละความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้นโดยน้ำหนัก	ปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะล้างออกจากซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้จากการเผาร่วม (มก./ล.)
0	0
0.1	6.03 ± 0.22

ตารางที่ 4.10 ผลการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ต้าที่มีโลหะหนักแคดเมียมผสมอยู่ด้วยวิธี Waste Extraction Test(WET)(ต่อ)

ร้อยละความเข้มข้นของแคดเมียม เริ่มต้นโดยน้ำหนัก	ปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะล้างออกจาก ซีเมนต์มอร์ต้าที่ได้จากการเผาไหม้ (มก./ล.)
0.5	34.74 ± 0.68
1.0	79.65 ± 3.47



รูปที่ 4.19 การชะล้างแคดเมียมด้วยวิธี Waste Extraction Test(WET)

เมื่อนำผลการทดสอบด้วยวิธี Waste Extraction Test(WET) แสดงเป็นเส้นแนวโน้มดังรูปที่ 4.19 พบว่าการชะล้างของแคดเมียมจะสูงขึ้นแปรตามอัตราส่วนของความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมที่เพิ่มสูงขึ้น และพบว่าซีเมนต์ที่ได้จากการเผาไหม้กับแคดเมียมที่มีความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่ผ่านค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยวัสดุที่ผ่านการสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test(WET) กำหนดให้มีปริมาณของแคดเมียมหรือสารประกอบแคดเมียมมีค่าเท่ากับหรือไม่เกินค่า STLC ที่กำหนดไว้ซึ่งเท่ากับ 1.0 มก./ล. จึงจะจัดว่าไม่เป็นของเสียอันตราย ในส่วนของการทดสอบพบว่าเมื่อปริมาณความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีการชะล้างปริมาณแคดเมียมที่อ่านได้โดยการสกัดได้จากการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 6.03 มก./ล. ซึ่งพบว่า

ค่าที่ได้มีค่าสูงกว่าค่า STLC ดังนั้นจึงจัดว่าวัสดุซีเมนต์ที่ได้จากการเผาพร้อมกับแคลเซียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นแคลเซียมมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จัดเป็นของเสียอันตราย

ดังนั้นตามการทดสอบการชะล้างตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548[40] สรุปได้ว่าซีเมนต์ที่ได้จากการเผาพร้อมกับแคลเซียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จัดเป็นของเสียอันตราย

เมื่อเปรียบเทียบวิธีการทดสอบการชะล้างของแคลเซียมออกจากวัสดุซีเมนต์ด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure(US.EPA) และวิธีการทดสอบการชะล้างตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 จะเห็นได้ว่าการทดสอบตามประกาศกระทรวงของประเทศไทยผลที่ออกมาจะเข้มงวดกว่าการทดสอบของประเทศอเมริกา ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงการใช้งานในประเทศไทยจึงสามารถที่สรุปได้ว่าไม่เหมาะสมที่จะนำกากอุตสาหกรรมที่มีแคลเซียมในวัตถุดิบทดแทนและเชื้อเพลิงทดแทนที่มีความเข้มข้นแคลเซียมเริ่มต้นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มาใช้ในการเผาร่วมในกระบวนการผลิตซีเมนต์

4.5.5 การทดสอบการชะล้างวิธี pH static leach test

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณของโลหะหนักที่สามารถถูกชะล้างออกมาเมื่อผลิตภัณฑ์ซีเมนต์มอร์ต้า่นั้นๆ สัมผัสกับน้ำ ที่มีค่าพีเอชต่างกัน โดยทั่วไปแล้วการชะล้างของโลหะหนักออกจากซีเมนต์มอร์ต้า่นั้น จะมีปริมาณโลหะหนักมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำเป็นสำคัญ ซึ่งโลหะหนักแต่ละชนิดจะมีปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกมามากที่สุดที่ค่าพีเอชแตกต่างกันไป การทดสอบนี้นอกจากจะบอกถึงปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกมาแล้วยังสามารถบอกถึงพฤติกรรมในการถูกชะล้างของโลหะหนักแต่ละชนิดอีกด้วย

ผลจากการทดสอบการชะล้างแคลเซียมออกจากซีเมนต์มอร์ต้าด้วยวิธี pH static leach test แสดงดังตารางที่ 4.12 ซึ่งความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมที่ใช้ในการวิจัยนี้ความเข้มข้นเป็น 0 0.1 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ และแต่ละความเข้มข้นได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง

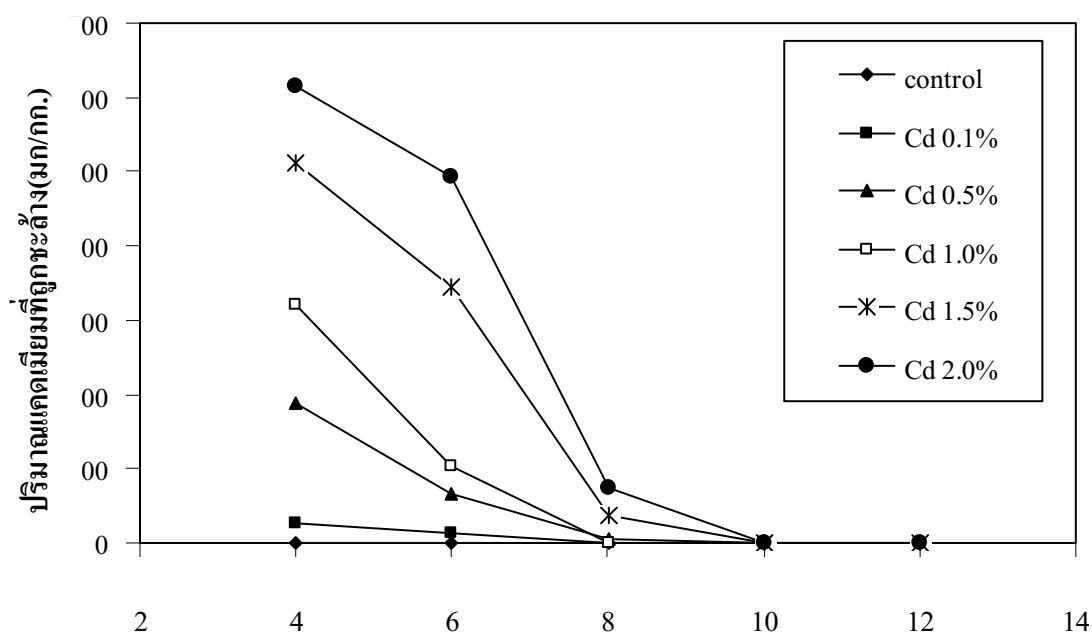
ตารางที่ 4.12 ผลการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ต้าที่ได้จากการเผาพร้อมกับแคลเซียมผสมอยู่ด้วย
วิธีการทดสอบแบบ pH static leach test

ร้อยละความเข้มข้นของ แคลเซียมเริ่มต้นโดยน้ำหนัก	ปริมาณแคลเซียมที่ถูกชะล้าง(มก./กก.)				
	pH 4	pH 6	pH 8	pH10	pH12
0	0	0	0	0	0
0.1	26.2	12.3	0.1	0	0
0.5	188.7	66.8	5.6	0.1	0

ตารางที่ 4.12 ผลการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้จากการเผาร่วมกับแคลเซียมผสมอยู่ด้วย
วิธีการทดสอบแบบ pH static leach test(ต่อ)

ร้อยละความเข้มข้นของ แคลเซียมเริ่มต้นโดยน้ำหนัก	ปริมาณแคลเซียมที่ถูกชะล้าง(มก./กก.)				
	pH 4	pH 6	pH 8	pH10	pH12
1.0	321.4	103.0	6.8	0.1	0
1.5	512.0	344.8	36.4	0.1	0
2.0	615.0	494.4	75.0	0.4	0.3

เมื่อนำผลการทดสอบที่ได้มาแสดงเป็นเส้นแนวโน้มดังรูปที่ 4.20 จะพบว่าการชะล้างของแคลเซียมสูงขึ้นแปรตามอัตราส่วนของความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมที่เพิ่มสูงขึ้น และนอกจากนี้จะเห็นได้ว่าที่ช่วงพีเอช 4 ปริมาณการชะล้างของแคลเซียมจะมีค่าสูงสุด โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแคลเซียม 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งแคลเซียมที่ถูกชะล้างออกมามีปริมาณเท่ากับ 615.0 มก./กก. จากผลการทดสอบจะเห็นว่าเมื่อพีเอชมีค่าสูงขึ้นปริมาณของแคลเซียมที่ถูกชะล้างออกมามีค่าต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการการศึกษาของ Diez และคณะ[18] ที่พบว่าแคลเซียมถูกละลายออกมามากขึ้นเมื่อค่าพีเอชมีค่าต่ำลง และเมื่อพีเอชสูงขึ้นแคลเซียมจะตกตะกอนในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $\text{Cd}(\text{OH})_2$



รูปที่ 4.20 การชะล้างแคลเซียมออกจากซีเมนต์ที่ได้จากการเผาร่วมกับแคลเซียมด้วยวิธี
pH static leach test

4.5.6 แนวทางการนำซีเมนต์ที่ได้จากการเผาพร้อมกับแคลเซียมไปใช้งาน

จากการนำเชื้อเพลิงทดแทนและวัตถุดิบทดแทนซึ่งมีการเผาพร้อมกับแคลเซียมไปใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์ ในการพิจารณาในการนำซีเมนต์ไปใช้งาน ซึ่งสิ่งที่จำเป็นต้องคำนึงถึง คือ ผลกระทบนั้นถูกจัดเป็นของเสียอันตรายหรือไม่ โดยในงานวิจัยนี้วิธีที่ใช้ในการทดสอบเพื่อศึกษาถึงประเด็นนี้คือ Toxicity Characteristic Leaching Procedure(TCLP) ซึ่งเป็นการทดสอบตามมาตรฐานขององค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา(US.EPA) และวิธีการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ.2548 โดยการทดสอบหาความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนักที่อยู่ในวัสดุ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การทดสอบ Method 3050B เนื่องจากวัสดุซีเมนต์ที่ได้จากการเผาพร้อมกับแคลเซียมใน จากนั้นนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับค่า TTLC ที่ได้กำหนด หากมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนด แสดงว่าวัสดุซีเมนต์ที่ได้จากการเผาพร้อมกับแคลเซียมเป็นของเสียอันตราย และหากน้อยกว่าค่าที่กำหนดต้องนำไปทดสอบต่อด้วยวิธี Waste Extraction Test(WET) โดยจะนำค่าที่วิเคราะห์ได้มาเปรียบเทียบกับค่า STLC หากมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่า STLC แสดงว่าวัสดุซีเมนต์ที่ได้จากการเผาพร้อมกับแคลเซียมจัดเป็นของเสียอันตราย โดยผลการทดสอบดังกล่าวและผลการจัดประเภทว่าเป็นของเสียอันตรายหรือไม่แสดงในตารางที่ 4.13

จากการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าหากทำการทดสอบด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure(TCLP) ตามมาตรฐานองค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา (US.EPA) วัสดุซีเมนต์ที่ได้จากการเผาพร้อมกับแคลเซียม จากการวิเคราะห์พบว่าค่าที่ได้จากการชะล้างแคลเซียมออกจากซีเมนต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแคลเซียมเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณที่ถูกชะล้างออกมาเท่ากับ 0.07 มก./ล. จึงไม่จัดว่าเป็นของเสียอันตราย เนื่องจากมีปริมาณแคลเซียมที่ถูกชะล้างน้อยกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดซึ่งเท่ากับ 1.0 มก./ล.

หากทำการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ของประเทศไทยพบว่าวัสดุซีเมนต์ที่ได้จากการเผาพร้อมกับแคลเซียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จัดว่าเป็นของเสียอันตรายและไม่สามารถนำไปใช้งาน

สำหรับการนำไปใช้งานนั้นต้องคำนึงถึงสถานะที่ซีเมนต์สัมผัสกับน้ำโดยในที่นี้จะพิจารณาการใช้งานออกเป็น 3 ส่วน คือ การนำซีเมนต์นั้นไปใช้สำหรับงานก่อสร้าง การนำซีเมนต์ไปใช้เป็นภาชนะบรรจุน้ำดื่ม และการนำซีเมนต์ไปใช้เป็นภาชนะบรรจุน้ำใช้ โดยจะพิจารณาเฉพาะซีเมนต์ที่มีความเข้มข้นของแคลเซียมน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเท่านั้น

ตารางที่ 4.13เปรียบเทียบผลการชะล้างของแคดเมียมจากซีเมนต์มอร์ต้าด้วยวิธี Toxicity

Characteristic Leaching Procedure(TCLP) ตามมาตรฐาน US.EPA และตามประกาศ
กระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

ร้อยละความ เข้มข้นของ แคดเมียมเริ่มต้น โดยน้ำหนัก	TCLP US. EPA (มก./ล.)	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้ แล้ว พ.ศ. 2548		การระบุ ประเภท ของเสีย อันตราย
		M 3050B (มก./กก.)	WET (มก./ล.)	
0	✓	* ²	✓ ¹	✓
0.1	✓	* ²	✗ ⁴	✗
0.5	✓	* ²	✗ ⁴	✗
1.0	✓	* ²	✗ ⁴	✗
1.5	✓	✗ ³	-	✗
2.0	✓	✗ ³	-	✗

- หมายเหตุ
- ✓ = ไม่จัดเป็นของเสียอันตราย
 - ✓¹ = ไม่จัดเป็นของเสียอันตรายเนื่องจากการทดสอบด้วยวิธี WET
 - ✗ = จัดเป็นของเสียอันตราย
 - *² = ต้องทำการทดสอบด้วยวิธี WET เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธี M 3050B
 - ✗³ = จัดเป็นของเสียอันตรายเนื่องจากการไม่ผ่านการทดสอบด้วยวิธี M 3050B
 - ✗⁴ = จัดเป็นของเสียอันตรายเนื่องจากการไม่ผ่านการทดสอบด้วยวิธี WET
 - = ไม่ได้ทำการทดลอง

ในการพิจารณาการนำซีเมนต์ไปใช้ในงานก่อสร้าง จะพิจารณาถึงสถานะซีเมนต์นั้นสัมผัสกับน้ำฝนเป็นหลัก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วน้ำฝนจะมีค่าพีเอชในช่วง 4.3-6.78[19] เมื่อมีการชะล้างแคดเมียมออกจากซีเมนต์โดยการสัมผัสกับน้ำฝน แคดเมียมจะถูกชะล้างและปนเปื้อนกับน้ำฝนและกลายเป็นน้ำไหลนอง ซึ่งจะกลายเป็นน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินตามลำดับ ทำให้ความเข้มข้นของแคดเมียมที่แพร่ร่วมกับวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์อยู่ในน้ำไหลนองเพิ่มขึ้น โดยจากแนวทางการพิจารณาการปนเปื้อนของน้ำชะล้างกับน้ำจากแหล่งธรรมชาติของประเทศสเปน ได้กำหนดไว้ว่าความเข้มข้นของโลหะหนักจะเจือจาง 100 เท่า[20] ซึ่งเมื่อนำค่าความเข้มข้นนี้มาเทียบกับมาตรฐานน้ำผิวดินของประเทศไทย จะได้ค่าแสดงดังตารางที่ 4.14

เมื่อพิจารณาผลของการชะล้างแคลเซียมจากซีเมนต์ในช่วงค่าพีเอช 4-8 ของซีเมนต์พบว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แคลเซียมที่ถูกชะล้างออกมา มีค่ามากกว่าแคลเซียมที่เจือจางในน้ำผิวดิน ดังนั้นซีเมนต์ที่ได้จากการเผาร่วมกับแคลเซียมที่มีปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้ก่อสร้าง

ส่วนการพิจารณาการนำซีเมนต์ไปใช้ในการบรรจุน้ำใช้นั้น จะพิจารณาถึงสถานะที่ซีเมนต์นั้นสัมผัสกับน้ำประปาเป็นหลัก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วน้ำประปามีพีเอชในช่วง 6-8 เมื่อมีการสัมผัสกับน้ำ โลหะหนักจะถูกชะล้างออกมาที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งได้นำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำประปาดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบผลการชะล้างแคลเซียมด้วยวิธี pH Static Leach Test กับค่ามาตรฐาน

ต่างๆ โดยพิจารณาซีเมนต์ที่ได้จากการเผาร่วมโดยมีความเข้มข้นเริ่มต้นแคลเซียมน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ปริมาณแคลเซียมที่ถูกชะล้าง (มก./ล.)			ค่ามาตรฐานของน้ำ			
				น้ำผิวดินที่มีความกระด้างไม่เกิน 100 มก./ล.	น้ำผิวดินที่มีความกระด้างเกิน 100 มก./ล.	น้ำประปา (มก./ล.)	น้ำดื่ม (มก./ล.)
0.1	pH 4 2.620	pH 6 1.227	pH 8 0.007	0.005	0.05	0.01	0.1

จากตารางที่ 4.13 พบว่าซีเมนต์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่ปริมาณการชะล้างแคลเซียมออกจากซีเมนต์เมื่อซีเมนต์สัมผัสกับน้ำในช่วงค่าพีเอช 4 ถึง พีเอช 8 มีค่าสูงกว่าค่าความเข้มข้นของแคลเซียมที่ระบุในน้ำดื่ม จึงทำให้ซีเมนต์ที่มีแคลเซียมปนเปื้อนอยู่ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่สามารถนำมาใช้เป็นภาชนะบรรจุน้ำได้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลของแคดเมียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์

1. จากการวิจัยพบว่า แคดเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นแต่เพิ่มในปริมาณที่น้อยมาก โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมในซีเมนต์เท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์มีค่าเท่ากับ 1.23 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ที่ไม่มีโลหะหนักซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.06 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าแคดเมียมอาจมีผลต่อการยับยั้งการเปลี่ยนรูปของแคลเซียมออกไซด์ไปเป็นองค์ประกอบหลัก คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งผลที่ได้จะสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย XRD ที่แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต ที่มีปริมาณความเข้มข้นของฟิสิกส์ประกอบหลักลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคดเมียมในการเตรียมวัตถุดิบ นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าได้เกิดเฟสของสารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นหลายตำแหน่งสอดคล้องกับตำแหน่งโครงสร้างของสารประกอบสองชนิด คือ CdAl_2O_4 และ CdSO_3

2. ในส่วนการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีแคดเมียมเผาพร้อมกับวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์ พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้ามีแนวโน้มที่ลดลง โดยผลจากการวิจัยพบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมตั้งแต่ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้ามีค่าเท่ากับ 27.51 MPa ซึ่งพบว่ามีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 28 MPa[14] ดังนั้นวัตถุดิบทดแทนหรือเชื้อเพลิงทดแทนที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมมากกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขึ้นไปจะส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดต่ำกว่ามาตรฐาน สามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างที่ไม่ต้องการกำลังอัดสูงเช่น งานฉาบผิว แต่เมื่อพิจารณาในเชิงความสามารถของการชะล้างพบว่าค่าที่ได้จากการชะล้างมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน ดังนั้นจึงไม่ควรนำซีเมนต์ที่ได้จากการเผาพร้อมกับแคดเมียมมาใช้งานเพราะอาจเกิดผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

5.1.2 ผลของแคดเมียมที่มีต่อลักษณะการชะล้าง

1. แคดเมียมมีแนวโน้มที่ถูกชะล้างออกมาจากปูนซีเมนต์ได้ค่อนข้างสูง โดยปริมาณการชะล้างตามธรรมชาติด้วยวิธี Availability leaching test NEN 7341(AVLT) อยู่ในช่วง 42.41-67.09 เปอร์เซ็นต์ของแคดเมียมที่ถูกสกัดออกมาได้มากที่สุดด้วยวิธี Microwave assisted leach method(M 3051A)

2. จากการศึกษาถึงค่าพีเอชที่ผลิตภัณฑ์ซีเมนต์มอร์ต้ามนั้นๆ สัมผัสกับน้ำ ที่มีค่าพีเอชต่างๆกัน พบว่าที่พีเอชเท่ากับ 4 ปริมาณของแคลเซียมถูกชะล้างออกมามากที่สุด และเมื่อพีเอชมีค่าสูงขึ้นปริมาณของแคลเซียมที่ถูกชะล้างออกมามีค่าต่ำลง เนื่องจากแคลเซียมจะตกตะกอนในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $\text{Cd}(\text{OH})_2$
3. จากการวิเคราะห์การชะล้างด้วยวิธี TCLP ตามมาตรฐาน US.EPA เพื่อระบุว่าซีเมนต์ที่มีแคลเซียมผสมอยู่ส่งผลให้ซีเมนต์เหล่านี้จัดเป็นของเสียอันตรายหรือไม่ ผลปรากฏว่าปริมาณการชะล้างแคลเซียมออกมาจากวัสดุซีเมนต์ ทุกความเข้มข้นของปริมาณแคลเซียมเริ่มต้นที่ใส่เข้าไป ปริมาณการชะล้างจะมีค่าต่ำกว่าปริมาณที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ จึงไม่จัดว่าเป็นของเสียอันตราย
4. จากการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 เพื่อศึกษาว่าเมื่อมีแคลเซียมเผาพร้อมกับวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์จะส่งผลให้ซีเมนต์เหล่านี้จัดเป็นของเสียอันตรายหรือไม่ พบว่าวัตถุดิบที่มีการปนเปื้อนของแคลเซียมมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ทำให้วัสดุซีเมนต์ที่ได้จัดเป็นของเสียอันตราย ไม่สามารถนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ได้

เอกสารอ้างอิง

1. บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด มหาชน, การนำกากของเสียมาใช้ในการเผา [Online], Available:<http://www.siamcitycement.com/about/environmental/ecosiam/ecosiam.aspx?lang=th> [2549, สิงหาคม 19].
2. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2538, การกำจัดของเสียโดยการเผาในหม้อเผาปูนซีเมนต์ในประเทศไทย, บริษัทปูนซีเมนต์ไทย(แก่งคอย) จำกัด หน้า 1-8.
3. เจตพล เอมมณี ,2547, การจัดการกากอุตสาหกรรม : การจัดการประเภทกากอุตสาหกรรมในมุมมองของการกำจัดในอุตสาหกรรมซีเมนต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หน้า 3.
4. ปริญญา จินดาประเสริฐ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 1 สมาคมคอนกรีตไทย (ส.ค.ท.).
5. วินิต ช่อวิเชียร, 2539, คอนกรีตเทคโนโลยี, พิมพ์ครั้งที่ 8 , ป.สัมพันธ์พานิชย์, หน้า 6-16.
6. ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2536, คอนกรีตเทคโนโลยี, พิมพ์ครั้งที่1, กรุงเทพฯ: เดอะปรินต์อินเตอร์เนชั่นแนล.
7. อันตรายจากโลหะหนัก, แคดเมียม (Cadmium) [Online], Available:<http://www.gogifoods.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=179512&Ntype=4> [2549, กรกฎาคม 7].
8. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์(MSDS) ,กรมควบคุมมลพิษ,กรุงเทพฯ.
9. วินัส ภูมินาถ, แคดเมียม :สารอันตรายร้ายที่สะสม,อาหาร34.4 (ต.ค-ธ.ค 47) หน้า198-301.
10. U.S. Environmental Protection Agency, **Microwave Assisted Acid Digestion of Sediment sludges, Solid, and** [Online], Available:<http://www.epa.gov/sw846/pdfs/3051a.pdf#search=%22method%203051A%22> [2549, มิถุนายน 7].

11. ราชกิจจานุเบกษา, เล่ม 12 ตอนพิเศษ 11 ง, ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548, หน้า 52, กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2548
12. U.S. Environmental Protection Agency., **Acid Digestion of Sediment, Sludges, Solid, and Soils**[Online],Available<http://www.epa.gov/sw846/pdfs/3050B.pdf#search=%22method%203051A%22> [2549, มิถุนายน 7].
- 13 Taveekitvanit, E.,2004 , **Leaching behaviors of heavy metal from cement derived from the co-burning of hazardous waste**, Master Thesis, Chulalongkorn University, p. 26.
14. American Society for Testing and Materials, ASTM C109-95 : Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar(Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), Annual Book of ASTM Standard, 2001, Vol. 04.01,Philadelphia.
15. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มอก.15-2532 : **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เล่ม 1 ข้อกำหนดคุณภาพ** พิมพ์เพิ่มเติมครั้งที่ 4, กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2539.
16. American Society for Testing and Materials, **ASTM C150-00 : Standard Specification for Portland Cement**, Annual Book of ASTM Standard, 2001, Vol. 04.01, Philadelphia, pp. 149-155.
17. Murat, Sorrentino., 1996 , “Effect of large addition of Cd, Pb, Cr, Zn, to cement raw meal on the composition and the properties of the clinker and the cement”, **Journal of Cement and Concrete Research**, Vol. 26, No. 3, pp. 377-385.
18. J.M. Diez, J. Madrid and A. Macias, 1997, “Characterization of cement-stabilized Cd waste”, **Journal of Cement and Concrete Research**, Vol. 27, No. 4, pp. 479-485.
19. กิตติชัย กิตติวรกาญจน์ ชิดรัตน์ บุญศรี และธีรชัย วัฒนสกุลเอก ,2540, “การตรวจวิเคราะห์และเปรียบเทียบคุณภาพน้ำดื่มบรรจุภัณฑ์ น้ำประปา และน้ำฝน”, ปริญาวิทยุวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หน้า 21.

20. Spanish Royal Decree 1541/1994 of July 8th, 1994, “**Water for human consumption**”. BOE 28 de Julio de

ภาคผนวก ก. บทความสำหรับการเผยแพร่

P. Kajitvichyanukul, S. Sinyoung and A. Tongsrinoon, “Microstructure Study of Clinker Contaminated with Cadmium from Clinkerization Process”, Proceeding of International Forum on Natural Treatment and Hazardous Substance Management, Khonkaen, May 29-30, 2006

International Forum on
**Natural Treatment and
Hazardous Substance Management**
(NTHSM 2006)



29-30 May 2006, Khon Kaen, Thailand



Microstructure Study of Clinker Contaminated with Cadmium from Clinkerization Process

Puangrat Kajitvichyanukul, Suthatip Sinyoung, Arissara Tongsrinoon

Environmental Nanomaterials Research and Development Unit,
Department of Environmental Engineering,
King Mongkut's University of Technology Thonburi,
91 Pracha-Utid Rd., Tungkru, Bangkok, 10140

Abstract

This work presents the microstructure study of clinker contaminated with cadmium from clinkerization process. In this work, the clinkers with initial concentration in the range of 0.1-2.0 wt.% were produced. The phase compositions of clinker were investigated by scanning electron microscopy combined (SEM) with energy-dispersive X-ray spectrometer (EDX) and also by X-ray powder diffraction (XRD). Results from this work showed that cadmium was incorporated in the clinker phase. The percentage of free lime was decreased in the presence of high concentration of cadmium up to 2%. The diminishing of free lime can be affected on the decreasing of alite and belite in the clinker. The new compounds of cadmium were clearly seen in SEM micrograph even in relatively low concentration of cadmium (0.5%) in clinker. From XRD and SEM analysis, the new compounds resulted from the cadmium transformation in the clinker phase tend to be CdAl_2O_4 and CdSO_3 .

Keywords: Clinker, Cadmium, Industrial waste, Cement

1. Introduction

Industrial wastes are recently introduced to the cement coprocessing in several countries. These wastes can be used as alternative fuels or raw material with the requirement that (1) the emissions released by the cement plant must not increase when using alternative fuels, (2) the cement quality and its compatibility with the environment must not decrease, and (3) the use of waste material as alternative fuel must not increase the costs; on the contrary, it must bring profits (Maury, 1999). However, less works were conducted to determine the effect of these industrial wastes on cement properties and their impact on environment. Generally, contaminants normally present in industrial wastes included inorganic materials and heavy metals. In cement process, the volatile components such as mercury, selenium, thallium, lead, antimony can evaporate during the burning process and precipitate in the cooler parts of the kiln. The concentrated portion can be found in the kiln dust. The less volatile components such as chromium, nickel, beryllium, barium, arsenic and silver are incorporated in the clinker phases during the burning process (Portland Cement Association, 1992). Among several types of heavy metal in secondary material in cement process, cadmium is one of the predominant contaminant. Cadmium is a semi-volatile heavy metal, which can be presented in both cement kiln dust and clinker. It is normally found in slag and dust from metal industry and also found in sludge from wastewater treatment plant. The previous works have shown that in the clinker production process, around 51% of the total cadmium fed to the kiln is transferred to the clinker (Sprung, 1985). With the substitution use of industrial wastes containing cadmium in cement process, the residue of cadmium in clinker can possibly react with the raw meal and form the new compound, which poses some effects on the clinker composition and cement properties. The major purpose of this study was to investigate the microstructure of clinker obtained from the co-burning with cadmium in clinkerization process. In this study, cadmium in an oxide form, was injected to the raw material to produce clinker. The microstructure of clinker was examined by free lime analysis, X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM).

2. Research Methodology

2.1 Raw material

The raw meal was taken from cement industry and its composition is given in Table 1. To prepare clinker with high concentrations of cadmium, CdO was added to the raw meal to give a heavy metal concentration of approximately 0.1, 0.5, 1.0, and 2.0 wt.%, respectively.

Table 1. Composition of raw meal

Compound	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	LOI
Quantity (wt.%)	14.33	3.26	2.17	43.13	1.14	0.47	0.03	0.17	35.31

* LOI = loss on ignition

2.2 Sample preparation

The cadmium oxides were intensively mixed with 150 g of raw meal. The clinker was burned in alumina crucible in an electrically heated furnace. The burning time and temperature depended on the composition of the raw meal and was determined by burning the pure raw meal until the content of free lime was between 1.0 and 1.5 wt.%. After burning, the clinker was cooled to prevent decomposition of alite. After that, the clinker was ground and mixed with gypsum. The X-ray diffraction (XRD) was used to analyze the phase composition of the clinker. The scanning electron microscopy (SEM) was used to determine the phase analysis of the clinker.

3. Results and Discussion

3.1 Effect of cadmium on free lime content

The free lime content is normally used as an indicator to determine the degree of burning in the clinker. The content of free lime can change when CaO takes place in a reaction that leads to a new compound such as C_3S , C_2S , C_3A , and etc. Thus, the decreasing of free lime contents means an improvement in the burnability. In contrast a rising of free lime contents means deterioration in the burnability. The analyzed content of free lime in the clinker contaminated with cadmium is shown in Figure 1.

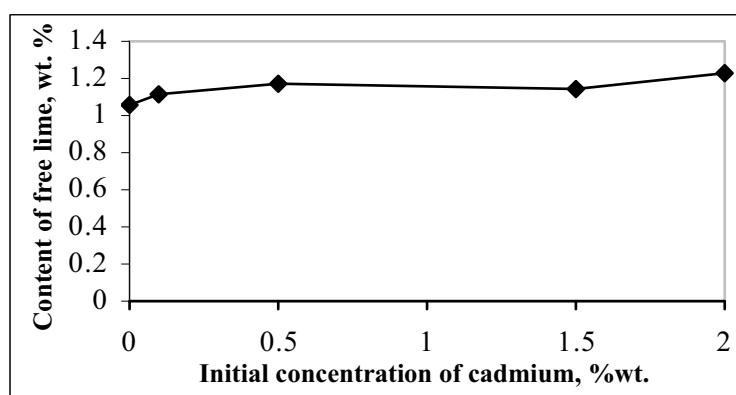


Figure 1. Free lime content of clinker in the presence of cadmium with different initial concentrations

The clinker contaminated with cadmium shows a permanent increase in the free lime content. The greater the concentration of cadmium in the clinker, the higher the free lime content was obtained. Up to a concentration of 2 wt.% of cadmium, the free lime content was increased to 1.23 %. The increasing of free lime content suggested that the CaO in raw meal was less incorporated in the clinking process.

It is anticipated that the amount of major phases of clinker such as C_3S , C_2S and C_3A might be decreased.

3.2 Analysis by XRD

To obtain the change in microstructure of clinker phase in the presence of cadmium, the XRD analysis was performed. Change of amount of clinker phase can be determined from the increasing or decreasing of intensity of the XRD spectra comparing to the control clinker.

Diffraction patterns corresponding to the control and cadmium contaminated clinkers are shown in Figure 2, where all the typical Portland clinker phases, such as C_3S , C_2S and C_3A among others, can be identified. The cadmium addition produces changes in the crystalline net. The diffraction patterns corresponding to the cadmium addition series show a lower crystallinity of the major phases compared to that of the reference sample and similar at every addition percentage. The decrease of major phases as identified by XRD is in a good agreement with the results from free lime analysis. As the CaO was less incorporated in the clinker phase, the content of major phases of clinker should be reduced. With the increasing of initial concentration of cadmium as 2.0%, it was found that the new compound of cadmium was developed as detected in XRD pattern shown in Figure 3.

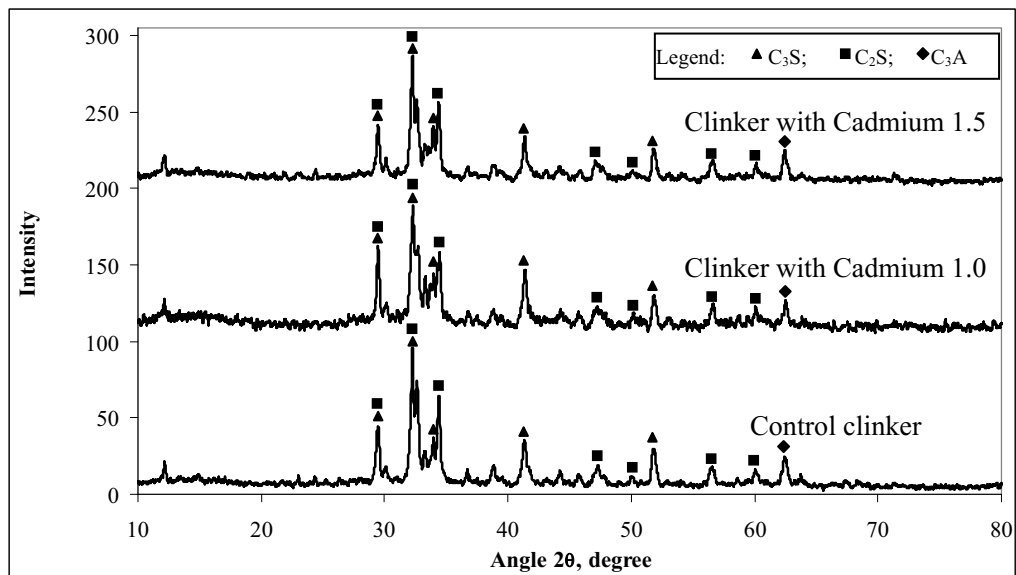


Figure 2. XRD pattern of clinker in the presence of cadmium with different initial concentrations

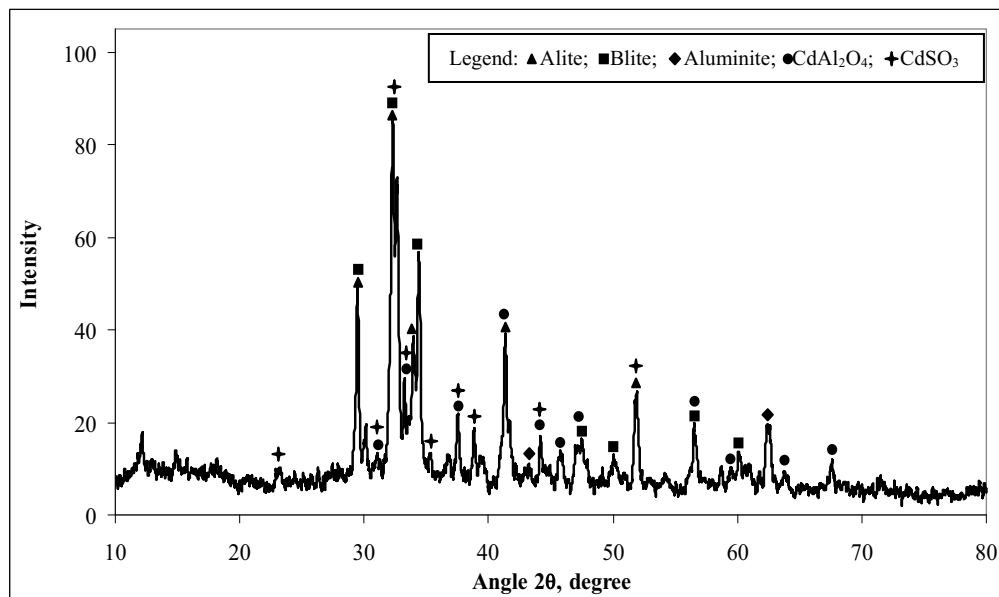


Figure 3. XRD pattern in identification of new compound of cadmium in clinker

This information showed that cadmium is incorporated in clinker. It is anticipated that cadmium is mainly trapped by the alite and belite of the clinker as the intensity of these major phases are reduced in the presence of cadmium. The incorporation of cadmium in clinker was also found by other works (Murat and Sorrentino, 1996; Barros et al., 2004). It was found that 22% of cadmium is trapped in Portland cement and 48% in calcium aluminate. From this work, the new compound of cadmium was detected as CdAl_2O_4 and CdSO_3 . The CdAl_2O_4 was detected in XRD pattern at $2\theta = 23.2, 31.26, 32.6, 32.8, 35.3, 37.5, 38.84, 44.18$ and 51.88 . This compound might form from the reaction of cadmium and aluminum in $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ (C_3A) phase. For CdSO_3 , the position of this compound was identified at $2\theta = 31.26, 32.82, 37.48, 41.34, 44.18, 45.8, 47.56, 56.64, 59.54, 64.08$ and 67.56 . With the abundant of SO_3 in the raw meal, the cadmium can be reacted with SO_3 and transformed to this new compound in alite and belite phase.

3.3 Analysis by SEM

The samples with intakes of cadmium in different initial concentrations (0.5-2.0 wt. %) and the control samples without cadmium were examined by scanning electron microscopy (SEM) as shown in Figure 4 and 5, respectively. The bar shape of the new composition phase was detected in the clinker with cadmium even in the low concentration of cadmium (0.5%) in the clinker (Figure 5 (a)). This new compounds were increased with the increasing of initial concentration of cadmium. The increasing of this new compound is obvious with the 2.0% of cadmium in the clinker(Figure 5 (d)).

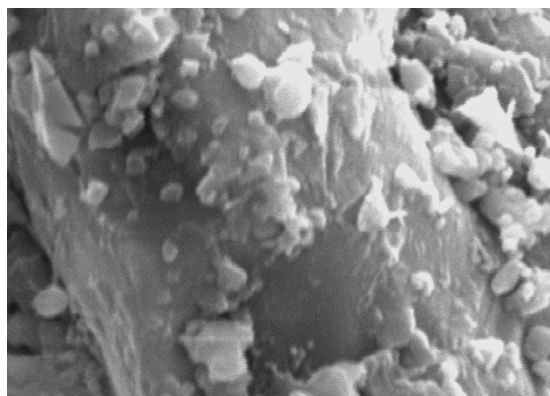
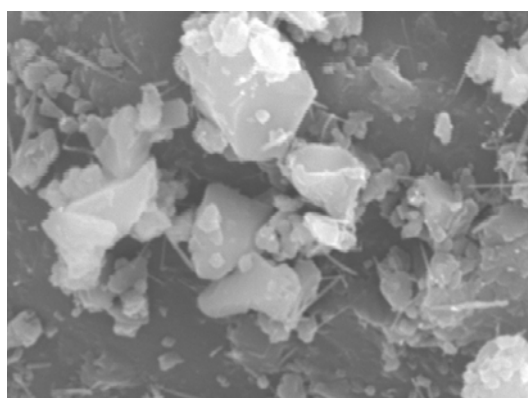
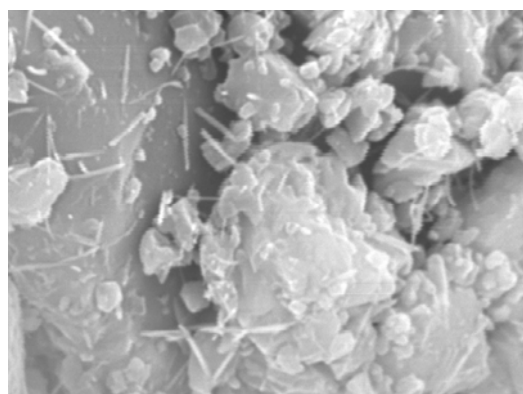


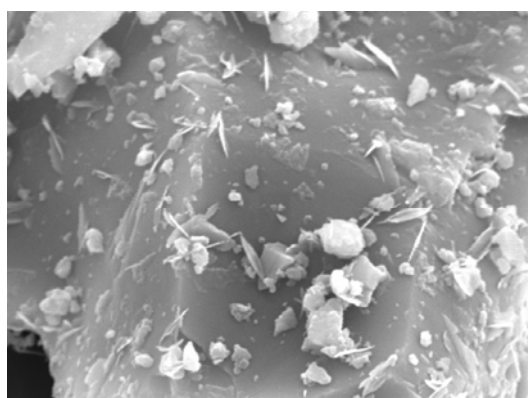
Figure 4. SEM micrograph of clinker without cadmium



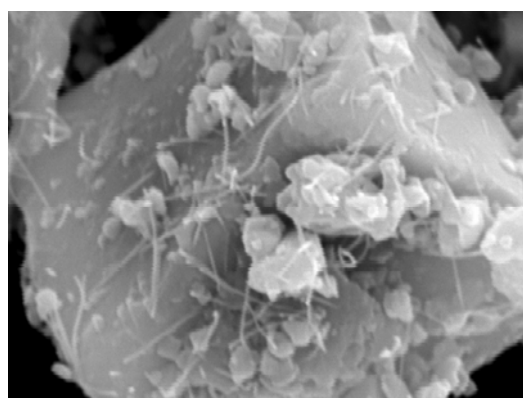
(a) clinker with 0.5% cadmium



(b) clinker with 1.0 % cadmium



(c) clinker with 1.5 % cadmium



(d) clinker with 2.0 % cadmium

Figure 5. SEM micrographs of clinker with cadmium in different initial concentrations.

The composition of new phases was analyzed with an energy-dispersive X-ray spectrometer (EDX) connected with SEM. The EDX is the spot analysis, which is used to determine the heavy metal

in each phase composition of clinker. In this work, cadmium was detected in all phases such as alite, belite, and aluminite phases of clinker. The presence of the new compound in the clinker composition analysis by SEM was in a good agreement with the clinker phase analysis using x-ray diffraction as shown in Figure 3.

Conclusion

In this work, microstructure study of clinker contaminated with cadmium from clinkerization process was investigated. From free lime analysis, it was found that cadmium influenced on the CaO content which incorporated in the major clinker phases. The decreasing of free lime was also detected by XRD analysis. The diminishing of free lime can be affected on the decreasing of alite and belite in the clinker. The new compounds of cadmium were clearly seen in SEM micrograph even in relatively low concentration of cadmium (0.5%) in clinker. From XRD and SEM analysis, the new compounds resulted from the cadmium transformation in the clinker phase tend to be CdAl_2O_4 and CdSO_3 .

Acknowledgement

This work was done with the cooperation and financial support from Thailand Research Fund and Siam City Cement Public Company Limited.

References:

- H.-D. Maury, The production of secondary fuels from domestic and industrial refuse and their utilization in the cement industry, Proceedings 5^o Congresso Brasileiro de Cimento, Associac_ão Brasileira di Cimento Portland, November 8 – 12, Sa~o Paulo, Brasil, 1999, pp. 3 –12.
- M. Murat, F. Sorrentino, Effect of large additions of Cd, Pb, Cr, Zn to cement raw meal on the composition and the properties of the clinker and the cement, Cement and Conacte Research, Vol. 26, No. 3, pp. 377-385.1996
- Portland Cement Association. An Analysis of Selected Metals in Cement and Kiln Dust. Skokie, IL, 1992.
- S. Sprung, Technological Problems in Pyroprocessing Cement Clinker: Cause and Solution, 1st ed., Beton-Verlag, Du''sseldorf, 1985.
- A.M. Barros, D.C.R. Espinosa, J.A.S. Teno'rio, Effect of Cr_2O_3 and NiO additions on the phase transformations at high temperature in Portland cement, Cement and Concrete Research 34 (2004) 1795-1801

ภาคผนวก ข.-ตารางเปรียบเทียบวัสดุประสงค์ กิจกรรมที่ได้ดำเนินการ และผลที่ได้ตลอดโครงการ

ตารางที่ ข.1 ตารางเปรียบเทียบวัสดุประสงค์ และผลที่ได้รับตลอดโครงการ

วัสดุประสงค์	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
1.ศึกษาผลของแคลเซียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของปูนเม็ด	1.ได้ลักษณะสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปขององค์ประกอบปูนเม็ดที่มีแคลเซียมปนเปื้อน โดยเมื่อมีแคลเซียมในปูนเม็ดส่งผลให้ค่าร้อยละแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่สูงขึ้น และแคลเซียมมีแนวโน้มที่จะทำปฏิกิริยาทำให้เกิดสารประกอบใหม่คือ CdAl_2O_4 และ CdSO_3 และในส่วนของคุณลักษณะโครงสร้างขององค์ประกอบของปูนเม็ดแคลเซียมเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณ alite และ belite ลดลง
2.ศึกษาผลของแคลเซียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์	2.ผลของแคลเซียมที่มีต่อลักษณะของซีเมนต์ โดยเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมสูงส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความสามารถในการรับกำลังอัดลดลง
3.ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมต่อการชะล้างของแคลเซียมจากซีเมนต์	1.ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียม โดยเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณแคลเซียมที่ชะล้างจากซีเมนต์มากขึ้น โดยแคลเซียมมีพฤติกรรมการชะล้างออกจากซีเมนต์ได้ง่าย 2.ได้แนวโน้มในการนำซีเมนต์ที่มีแคลเซียมปนเปื้อนไปใช้งาน เนื่องจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าซีเมนต์ที่มีแคลเซียมเริ่มต้นในปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณการชะล้างสูงกว่ามาตรฐาน ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน

ตารางที่ ข.1 ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ และผลที่ได้รับตลอดโครงการ(ต่อ)

วัตถุประสงค์	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
	ทั้งนี้ในการพิจารณาผลที่ได้จากการรายงานนี้เพื่อนำไปใช้งานมีประเด็นที่ควรคำนึงถึง คือ 1) ข้อมูลที่นำมาเสนอนี้เป็นเพียงแนวโน้มของการชะล้าง และการนำซีเมนต์ไปใช้งานโดยเกิดจากการทดลองโดยใช้เตาเผาของห้องปฏิบัติการ ไม่ใช่ผลที่เกิดจากการใช้เตาเผาจริง อย่างไรก็ตามการทดลองโดยใช้เตาเผาของอุตสาหกรรมนั้นเป็นการทดลองที่มีความเสี่ยงสูงในการปนเปื้อนของโลหะหนักต่อผลิตภัณฑ์ การทดลองโดยใช้เตาเผาในห้องปฏิบัติการจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการศึกษาประเด็นของโลหะหนักชะล้างจากซีเมนต์

ตารางที่ ข. ตารางเปรียบเทียบกิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรม และผลที่ได้รับจากการดำเนินการ

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	กิจกรรมที่ได้ ดำเนินการ	ผลการดำเนินงาน
1.การเตรียมปูนเม็ดที่ไม่มี แคลเซียมและมีแคลเซียม ผสมอยู่	1.ได้ปูนเม็ดที่มี แคลเซียมปนอยู่เพื่อ นำไปทดสอบต่อไป	1.การเตรียมปูนเม็ดที่มี แคลเซียม	1.ได้ปูนเม็ดที่มีแคลเซียม ปนเปื้อนอยู่เพื่อนำไป ทดสอบต่อไป
2.การทดสอบหาลักษณะ สมบัติของปูนเม็ดเมื่อมี แคลเซียมปนอยู่	2.ได้ลักษณะสมบัติ ของปูนเม็ดเมื่อมี แคลเซียมปนอยู่	2.การทดสอบหา ลักษณะสมบัติของ ปูนเม็ดเมื่อมีแคลเซียม	2.ได้ลักษณะสมบัติของ ปูนเม็ดเมื่อมีแคลเซียม ปนอยู่
3.การทดสอบหาค่ากำลังอัด (Compressive strength) ของซีเมนต์	3.ได้ผลของแคลเซียม ที่มีต่อค่ากำลังอัดของ ซีเมนต์	3. การทดสอบหาค่าล้ง อัดของซีเมนต์เมื่อมี แคลเซียม	3. ได้ผลของแคลเซียมที่มี ต่อค่ากำลังอัดของซีเมนต์ ซึ่งพบว่าเมื่อมีแคลเซียม มากขึ้น ค่าการรับกำลัง อัดมีแนวโน้มลดลง
4.การทดสอบ Microwave assisted leach method 3051 A	4.ได้ผลของแคลเซียม ที่มีต่อการชะล้าง แคลเซียมจากซีเมนต์	4. การทดสอบ Microwave assisted leach method 3051 A	4. ได้ผลของแคลเซียมที่ ทำการสกัดออกมาจาก ซีเมนต์ โดยพบว่าที่ความ เข้มข้นเริ่มต้นของ แคลเซียมเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าการชะล้างประมาณ 39.21 เปอร์เซ็นต์
5.การทดสอบ Aviability Leaching Test	4.ได้ผลของแคลเซียม ที่มีต่อการชะล้าง แคลเซียมจากซีเมนต์	5.การทดสอบ Aviability Leaching Test	5. ได้ผลของแคลเซียมที่มี ต่อการชะล้างแคลเซียม จากซีเมนต์ โดยพบว่าที่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ แคลเซียมเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าการชะล้างประมาณ 26.32 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ข. ตารางเปรียบเทียบกิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรม และผลที่ได้รับจากการดำเนินการ (ต่อ)

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	กิจกรรมที่ได้ ดำเนินการ	ผลการดำเนินงาน
6.การทดสอบ Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) ตามมาตรฐาน US.EPA	6.ระบุได้ว่าผลิตภัณฑ์ ที่มีแคะเมียมอยู่จัดเป็น ของเสียอันตราย หรือไม่	6.การทดสอบToxicity characteristic leaching procedure (TCLP) ตามมาตรฐาน US.EPA	6.ได้ผลจากการชะล้าง ด้วยวิธี TCLP โดย พบว่าซีเมนต์ที่มีความ เข้มข้นของแคะเมียมที่ มีอยู่ในปูนเม็ดต่ำกว่า หรือเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่จัดว่าเป็นของเสีย อันตราย
7.การทดสอบการ ทดสอบการชะล้าง ตามประกาศกระทรวง อุตสาหกรรม เรื่องการ กำจัดสิ่งปฏิกูล หรือ วัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548	7. ระบุได้ว่าซีเมนต์ที่มี แคะเมียมอยู่จัดเป็น ของเสียอันตราย หรือไม่	7.การทดสอบ acid digestion of sediments, sludges, and soils (Method 3050B) และ Waste Extraction Test(WET)	7. ได้ผลจากการชะ ล้างพบว่าซีเมนต์ที่มี ความเข้มข้นของ แคะเมียมที่มีอยู่ใน ปูนเม็ดมากกว่าหรือ เท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก จัดว่าเป็น ของเสียอันตราย
8.การทดสอบ pH static leaching test	8.ได้ปริมาณมากที่สุด ของแคะเมียมที่ สามารถถูกชะล้าง ออกมาได้เมื่อสัมผัส กับน้ำที่ค่าต่างๆ	8. การทดสอบ pH static leaching test -	8.ได้ผลการชะล้าง แคะเมียมเมื่อสัมผัส กับน้ำที่พีเอชต่างๆ โดยพบว่าแคะเมียมจะ ถูกชะล้างออกมามาก ที่สุดในช่วงค่าพีเอช 4- 6