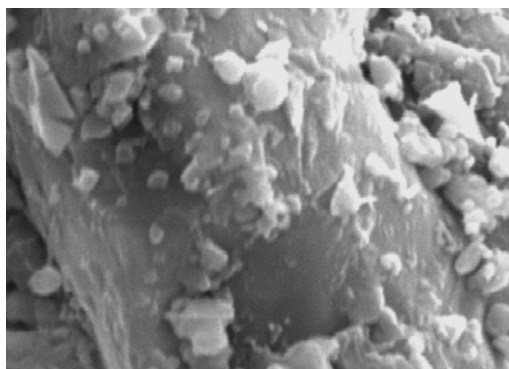
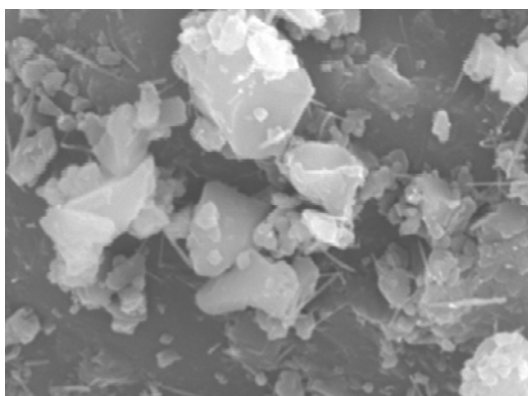
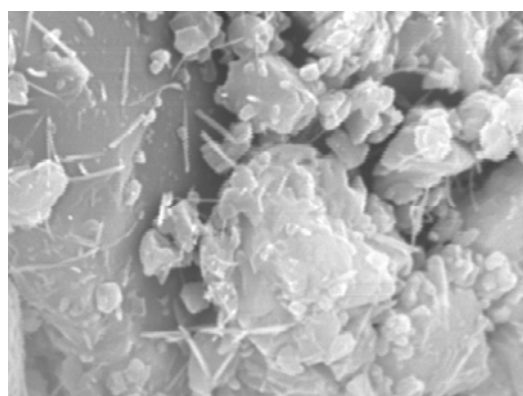




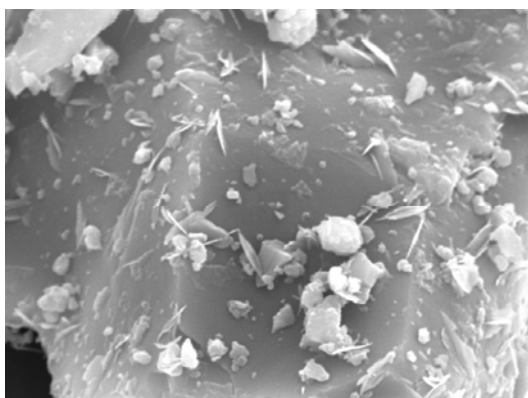
(ก) ปูนเม็ดที่ไม่มีแคลเซียมผสมอยู่



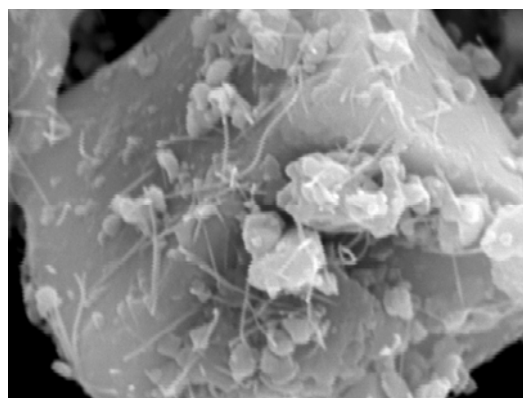
(ข) ปูนเม็ดที่มีแคลเซียม 0.5 เปอร์เซ็นต์



(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

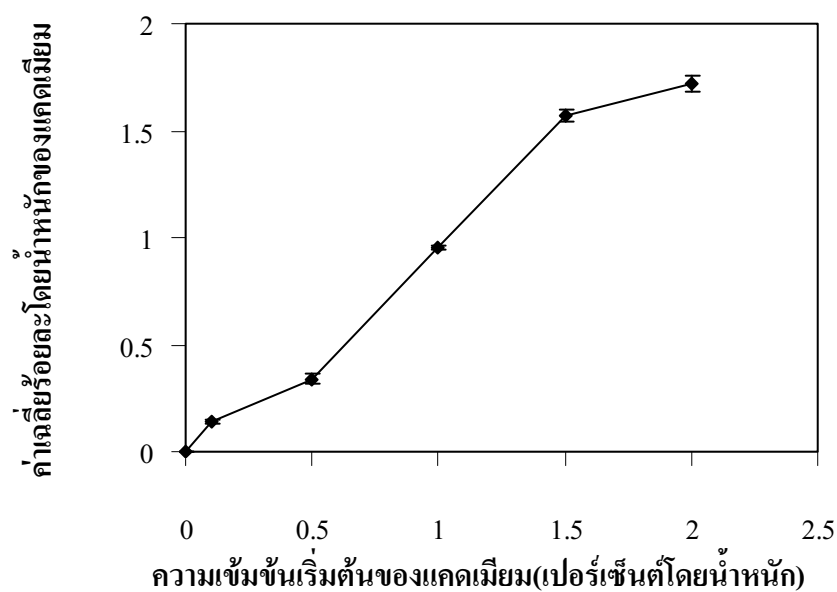
ตารางที่ 4.4 ส่วนประกอบของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักแคดเดียมผสมอยู่ในช่วง 0-2.0เปอร์เซ็นต์

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

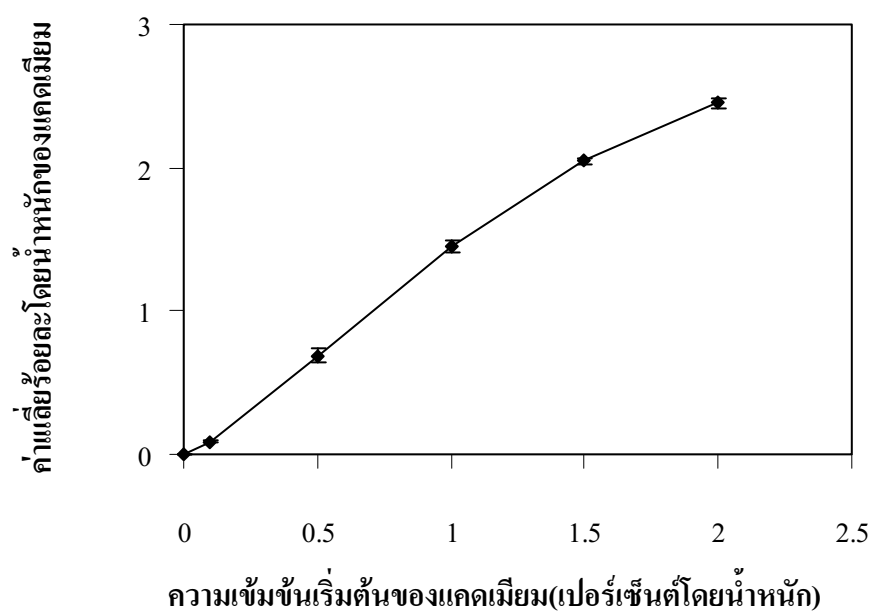
หมายเหตุ ค่าที่แสดงในตารางแต่ละค่าเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด 3 ค่า

ค่าจากการวิเคราะห์ EDS ไม่สามารถนำไปอ้างอิงในการทดลองอื่นได้

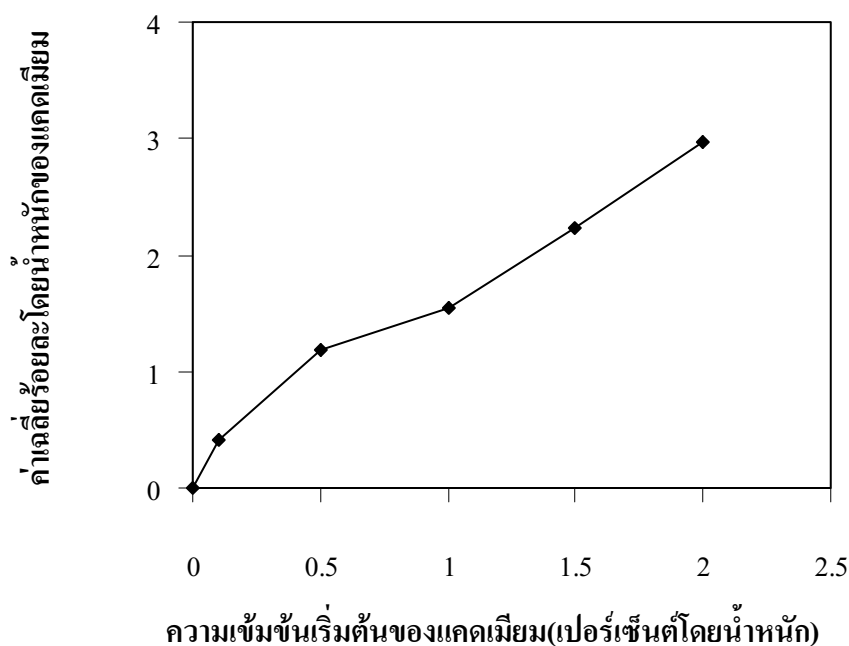
เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากตารางมาแสดงเป็นเส้นแนวโน้มได้ดังรูปที่ 4.7



(ก) ร้อยละของแคลเซียมที่ปรากฏในเฟสของalite



(ข) ร้อยละของแคลเซียมที่ปรากฏในเฟสของbelite



(ค) ร้อยละของแคลเซียมที่ปรากฏในเฟสของaluminite

รูปที่ 4.7 ร้อยละของแคลเซียมที่ปรากฏในเฟสต่างๆของปูนเม็ดวิเคราะห์ด้วย EDS

จากรูปที่ 4.7 พบว่าที่แคลเซียมจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับปูนเม็ดโดยปรากฏในส่วน of aluminite เป็นหลัก และปรากฏในส่วน of alite และ belite ในสัดส่วนที่ต่ำกว่า โดยในเฟสของ aluminite ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมร้อยละ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะค่าเท่ากับ 2.97

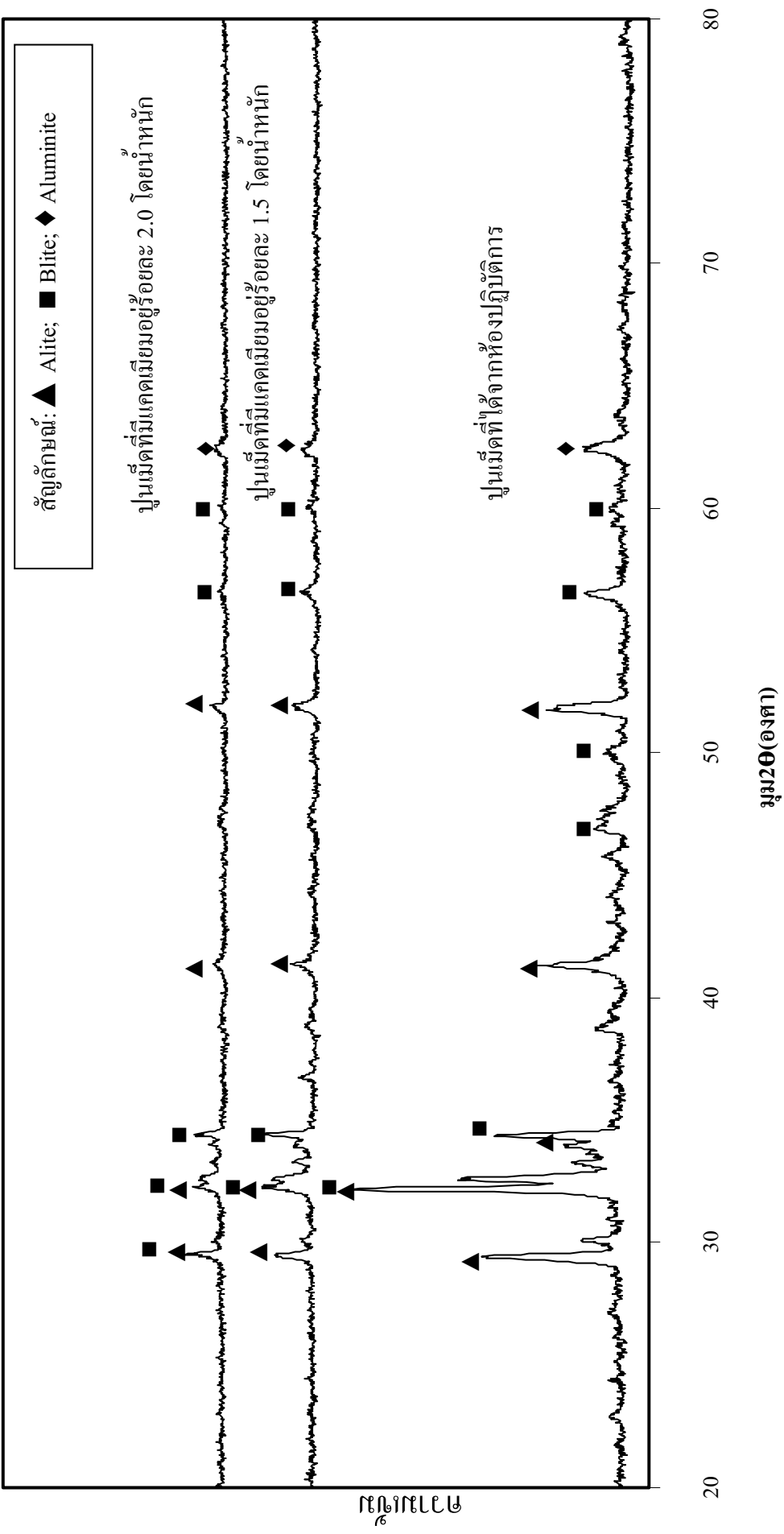
การทดสอบลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดด้วยเครื่อง X-ray diffraction(XRD) ได้แสดงใน รูปที่ 4.8 และ 4.9 โดยในรูปที่ 4.8 แสดงลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดเมื่อมีความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียม 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และรูปที่ 4.9 แสดงลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดเมื่อมีความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียม 2.0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

เมื่อมีความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมในช่วง 0.5-1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาลักษณะของพีคที่ได้ในภาพรวมเทียบกับปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการ จะพบว่ามีลักษณะไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีระดับความสูงของพีคในภาพรวมและตำแหน่งของ alite belite และ aluminite ลดลงที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมสูงกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมในระดับความเข้มข้นที่ศึกษาจะส่งผลต่อปริมาณของ alite และ belite ซึ่งสอดคล้องกับค่าร้อยละ free lime ที่เหลืออยู่ที่ได้ทดสอบมาข้างต้น ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น ในช่วง 1.12-1.23 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลจากการทดสอบค่าร้อยละ free lime ที่เหลืออยู่ และเฟสต่างๆของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วย XRD ได้แสดงให้เห็นว่าที่แคลเซียมความเข้มข้นที่ใช้ในการศึกษานี้ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสต่างๆ ของปูนเม็ด

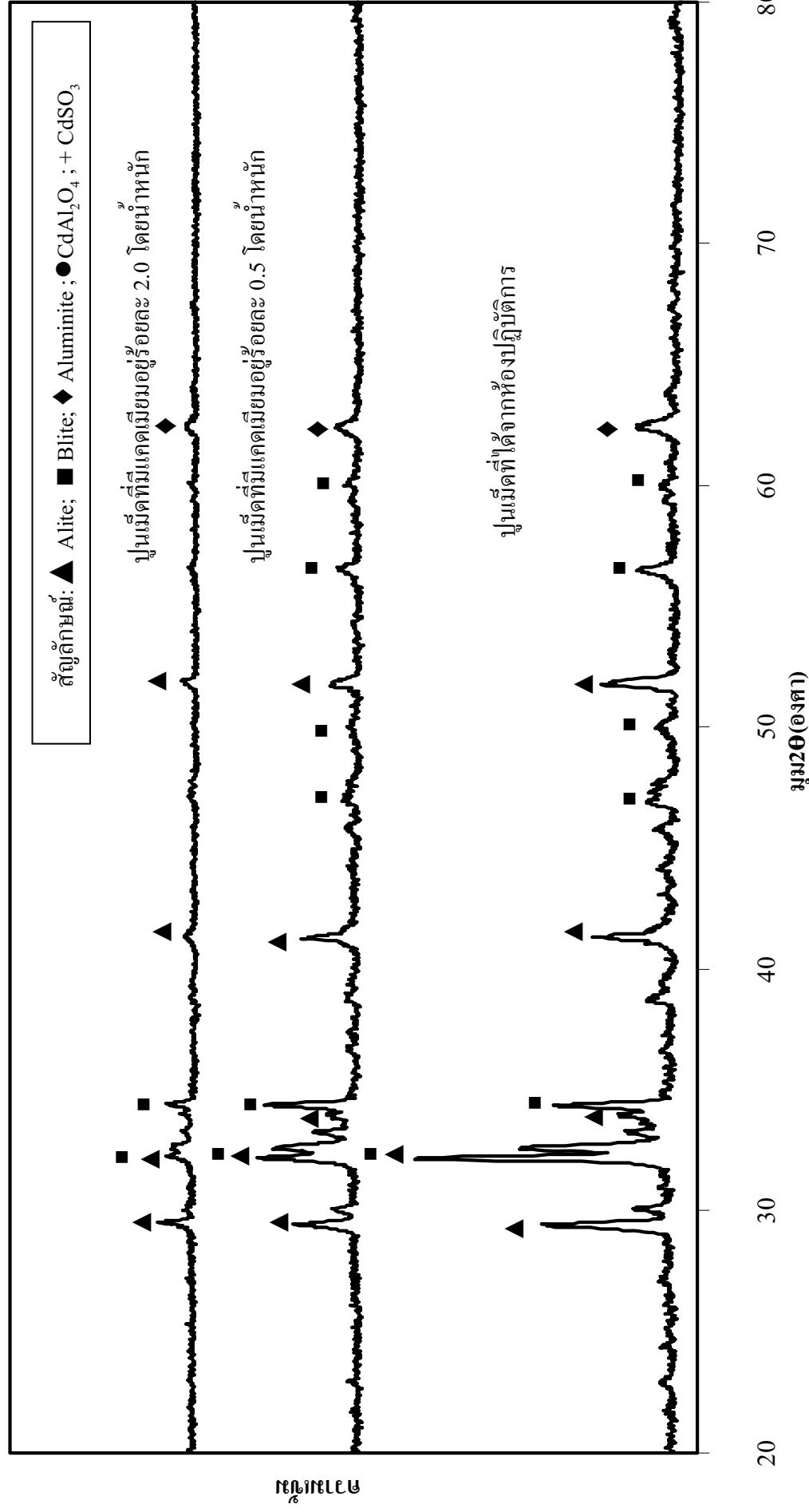
จากรูปที่ 4.9 เมื่อนำรูปแบบของกราฟ XRD มาวิเคราะห์ถึงตำแหน่งของพีคของเฟสหลัก พบว่ามี การพบพีคใหม่ ซึ่งแสดงถึงการเกิดสารประกอบชนิดใหม่เกิดขึ้นเมื่อมีแคดเมียมอยู่ในปูนเม็ด จากการ วิเคราะห์ตำแหน่งของพีคด้วยเครื่อง XRD จะพบว่า ตำแหน่งของพีคใหม่ที่เกิดขึ้นหลายตำแหน่งสอดคล้อง กับตำแหน่งโครงสร้างของสารประกอบสองชนิด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

แคดเมียมอลูมิเนียมออกไซด์ (CdAl_2O_4) พบในกราฟจากการวิเคราะห์ด้วย XRD ของปูนเม็ดที่มี แคดเมียมที่มุม $2\theta = 23.2\ 31.26\ 32.6\ 32.8\ 35.3\ 37.5\ 38.84\ 44.18$ 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

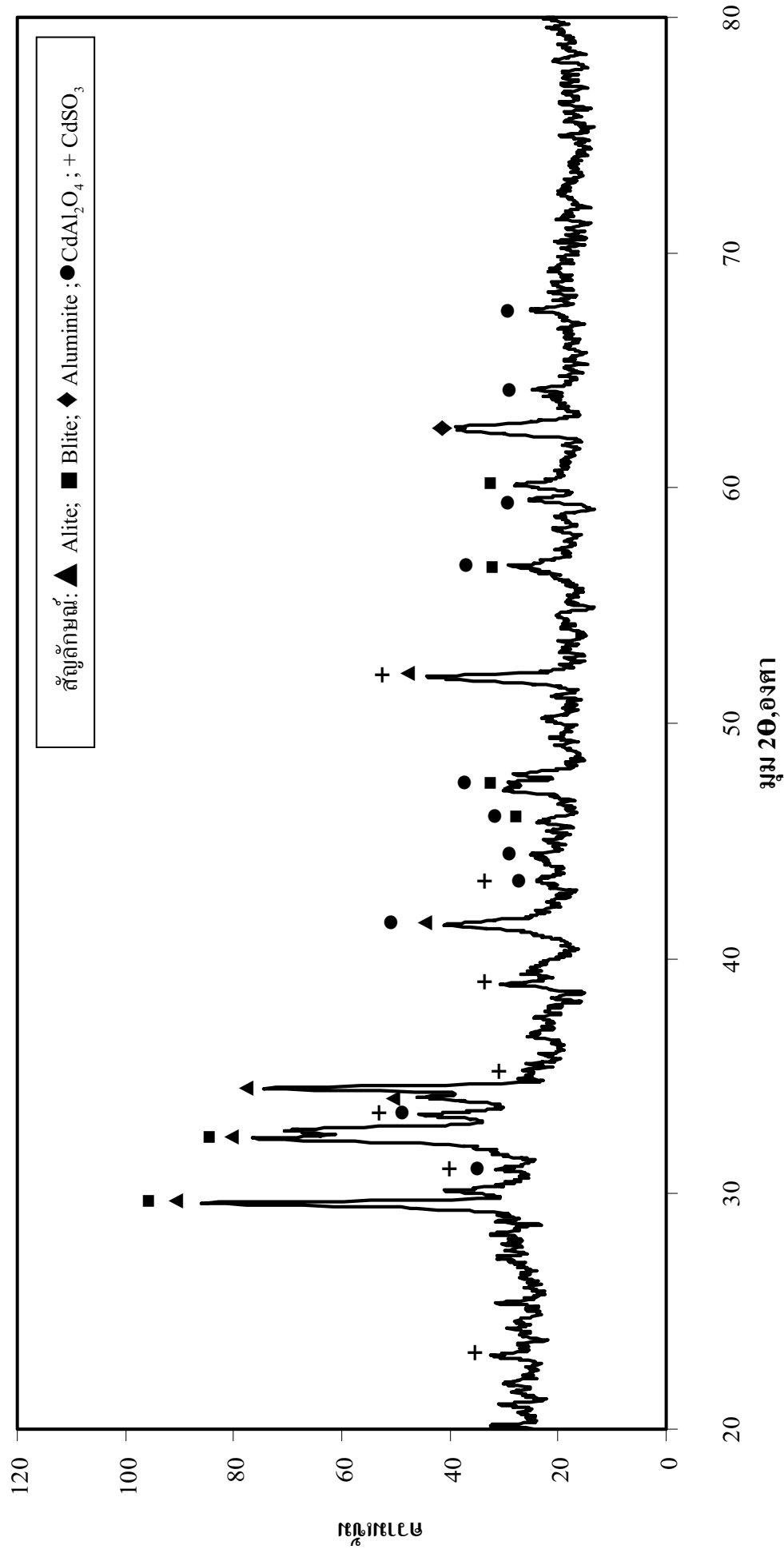
สารประกอบอีกชนิดที่ปรากฏในกราฟจากการวิเคราะห์ด้วย XRD ของปูนเม็ด คือ แคดเมียมซัล ไฟท์ (CdSO_3) โดยตำแหน่งของมุมที่พบ คือ $2\theta = 31.26\ 32.82\ 37.48\ 41.34\ 44.18\ 45.8\ 47.56\ 56.64\ 59.54\ 64.08$ และ 67.56 ทั้งนี้สืบเนื่องมาจากซัลเฟต(SO_3) เป็นส่วนประกอบที่กระจายอยู่ในทุกเฟสของ ปูนเม็ด



รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์เฟสของปูนเม็ดที่มีแคลเซียมที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วย X-ray diffraction



รูปที่ 4.9 สารประกอบใหม่ของแคลเซียมที่ปรากฏในการวิเคราะห์ปูนเม็ดด้วย X-ray diffraction

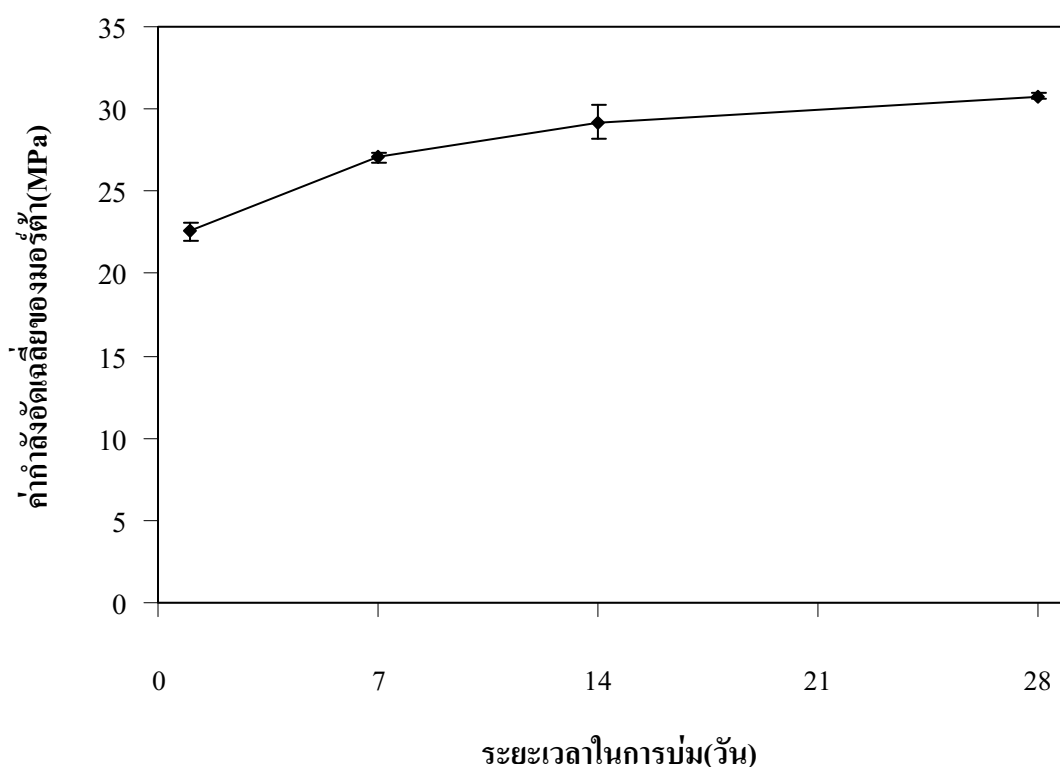


รูปที่ 4.10 สารประกอบใหม่ของเคดเมียมที่ปรากฏในการวิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction

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

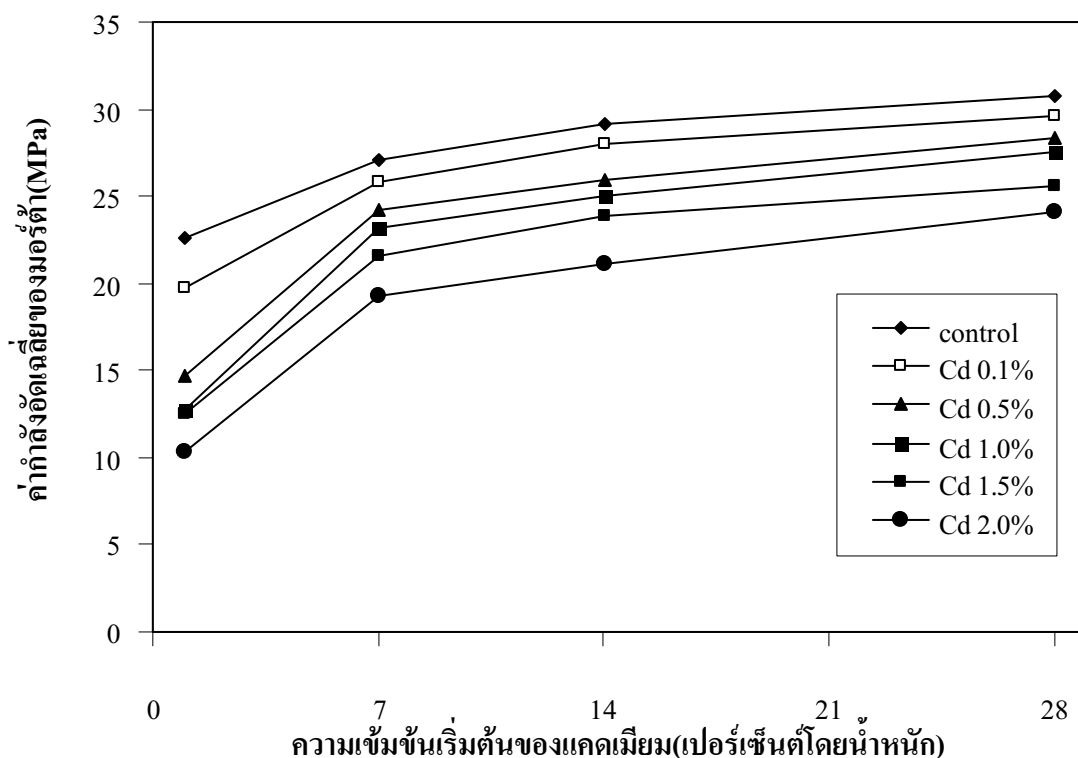
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับกำลังอัดกับระยะเวลาการบ่ม ตัวอย่างจากการทดลองพบว่าความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่ไม่มีส่วนผสมของแคะเมียมที่มีอายุ 1 วันเท่ากับ 22.56 MPa จากนั้นจึงเพิ่มขึ้นเป็น 27.04 MPa ที่อายุ 7 วัน และมีแนวโน้มการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ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



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่ไม่มีส่วนผสมของแคะเมียมที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 1 7 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

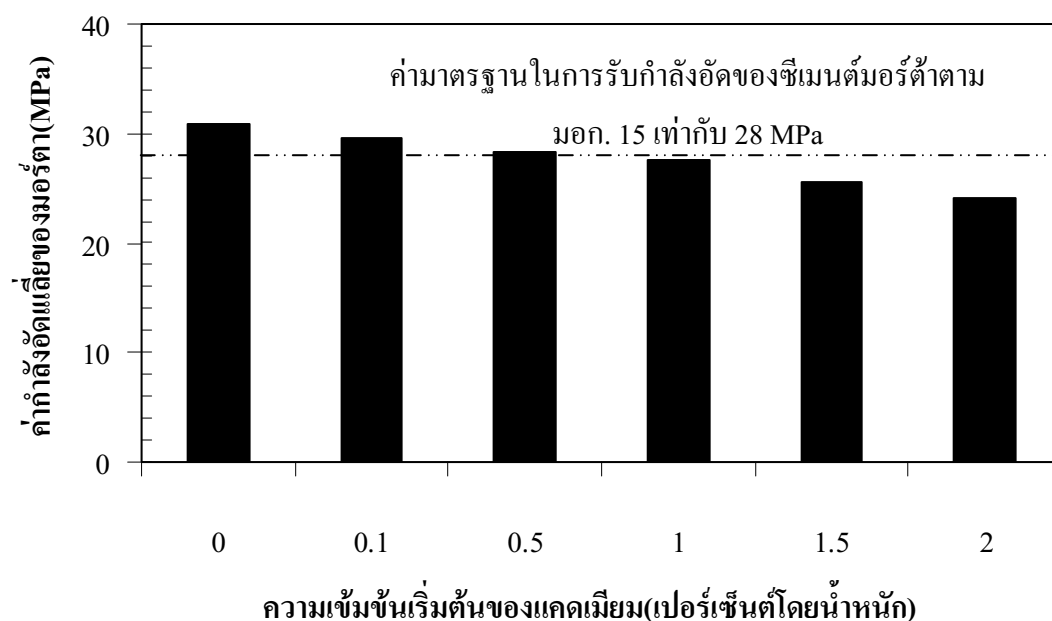
สำหรับซีเมนต์มอร์ต้าที่มีสารประกอบแคะเมียมอยู่ในปริมาณ 0.1 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้ความสามารถในการรับกำลังอัดของมอร์ต้าหลังจากการบ่มได้ 1 วันเท่ากับ 19.75 14.73 12.79 12.456 และ 10.36 MPa ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าซีเมนต์มอร์ต้าที่ไม่มีส่วนผสมของแคะเมียมที่มีอายุเท่ากัน และความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของแคะเมียมจะมีการพัฒนาการรับกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม 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 แคลเซียมออลูมิเนียมออกไซด์(CdAl_2O_4) และแคลเซียมออลูมิเนียมซัลไฟท์(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

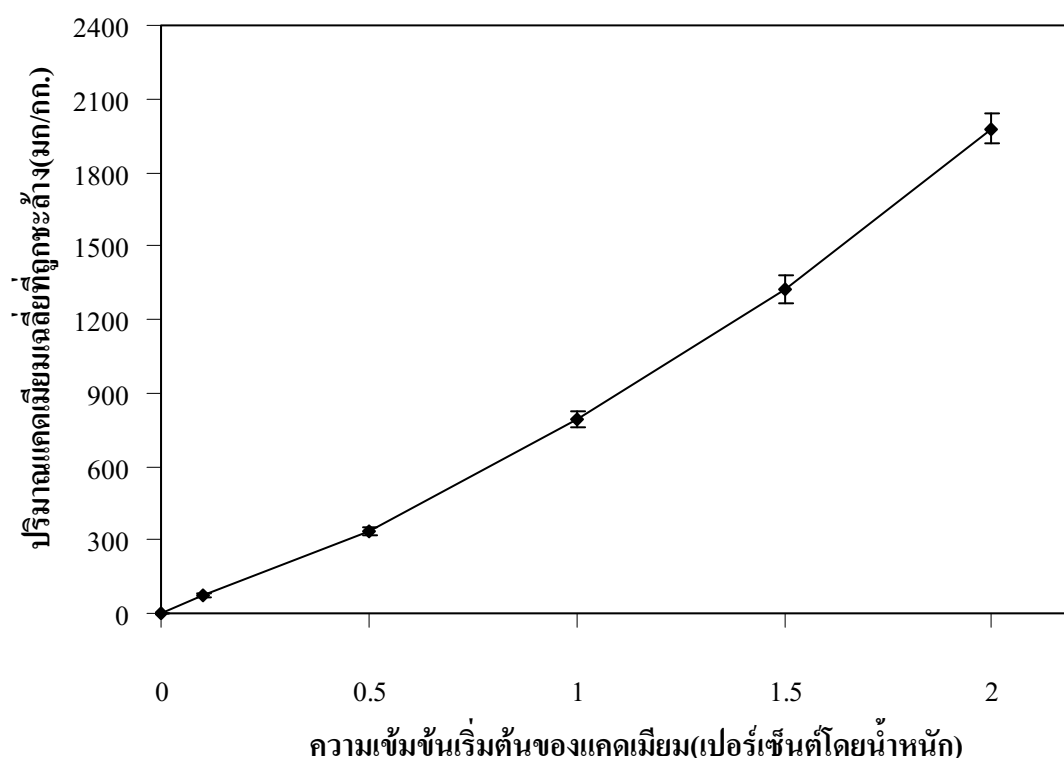
ผลจากการทดสอบการชะล้างแคลเซียมออกจากซีเมนต์มอร์ต้าด้วยวิธี Microwave Assisted Leach Method 3051A แสดงดังตารางที่ 4.6 ซึ่งความเข้มข้นของแคลเซียมเริ่มต้นที่ใช้ในการวิจัยนี้ความเข้มข้นเป็น 0, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ และแต่ละความเข้มข้นได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง

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

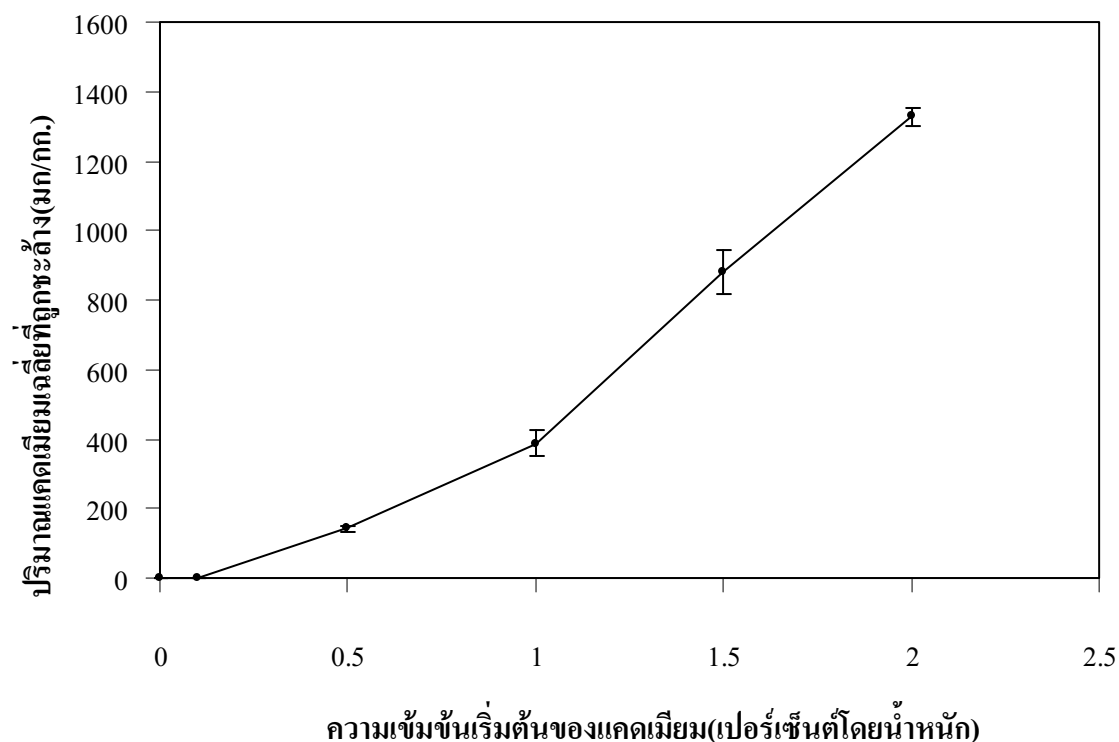
ผลจากการทดสอบการชะล้างแคดเมียมจากซีเมนต์มอร์ต้าด้วยวิธี Availability leaching test NEN 7341(AVLT) แสดงดังตารางที่ 4.7 ซึ่งความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็น 0 0.1 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ และแต่ละความเข้มข้นได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง

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

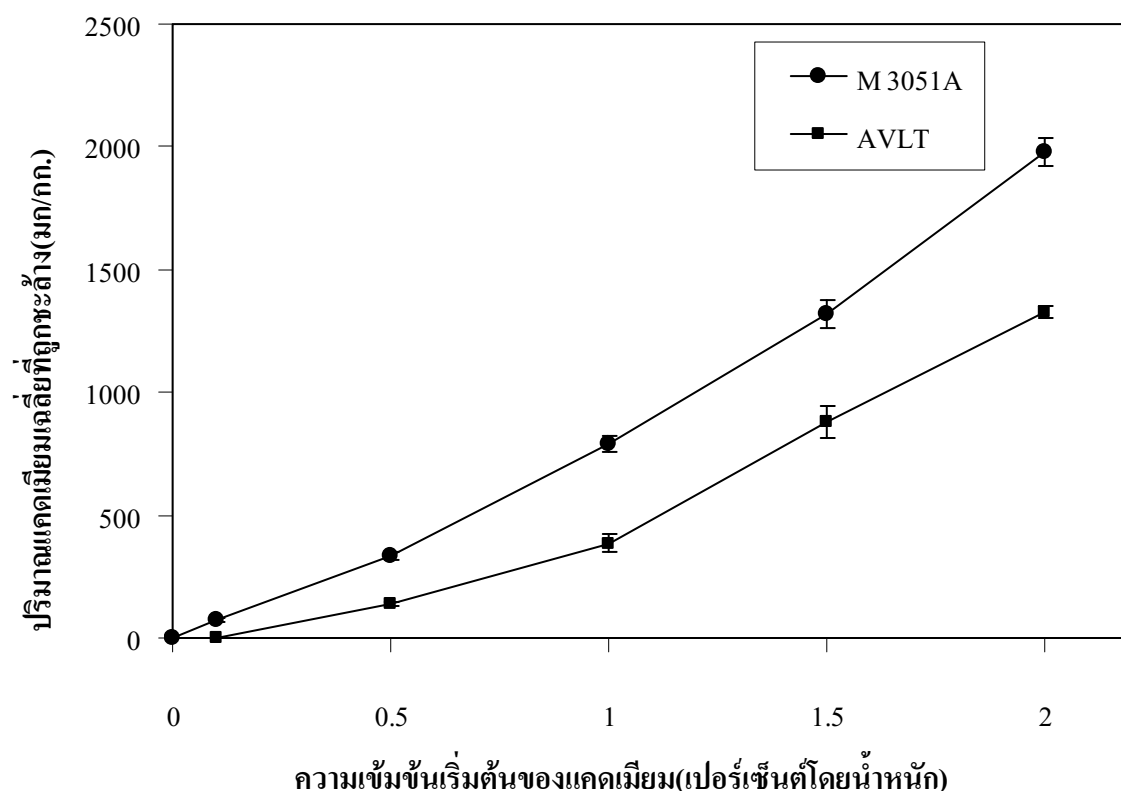
หมายเหตุ : ND คือ ค่าที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง ICP ซึ่งกำหนดค่าความเข้มข้นต่ำสุดไว้ที่ 0.001 มก./ล. หรือมีปริมาณแคดเมียมต่ำกว่า 0.050 มก./กก.

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 จึงสามารถนำซีเมนต์มอร์ต้านั้นไปใช้งานได้

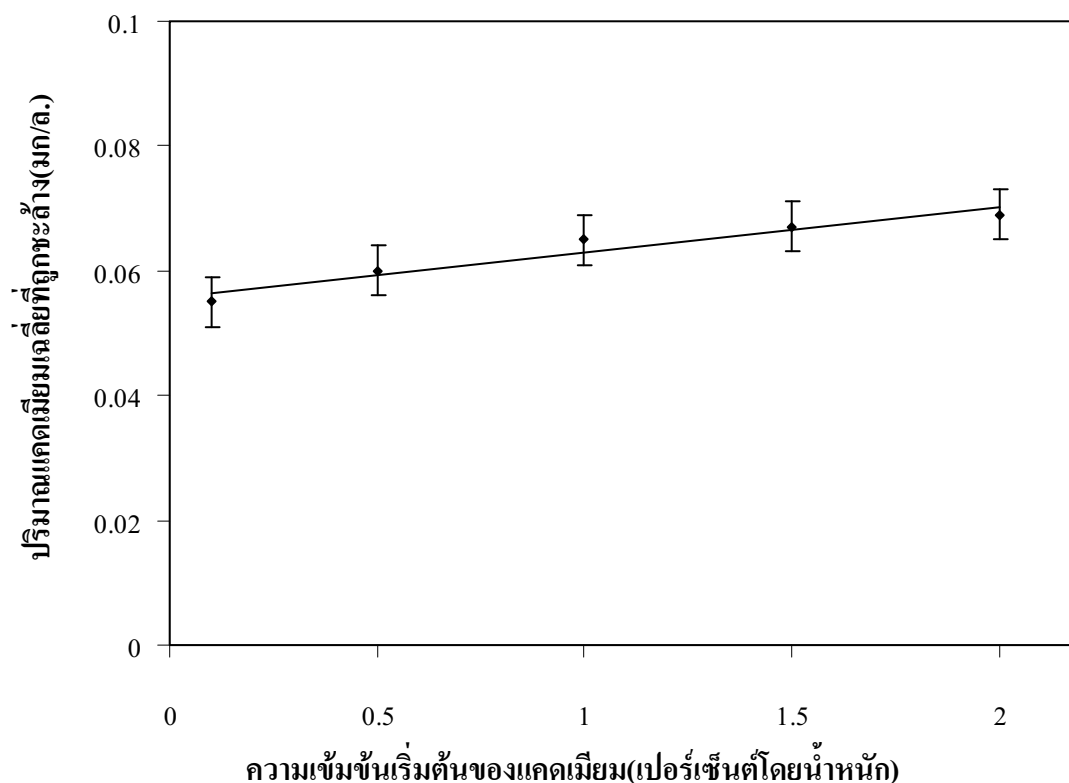
เมื่อพิจารณาถึงปริมาณของแคดเมียมที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้พบว่า เมื่อปริมาณของแคดเมียมในปูนเม็ดเพิ่มมากขึ้นปริมาณของแคดเมียมที่ถูกสกัดมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยปริมาณของแคดเมียมที่ถูกชะล้างโดยเฉลี่ยแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งพบว่าปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะล้างออกมามีความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมเริ่มต้นในปูนเม็ดในลักษณะของกราฟเส้นตรงโดยมีสมการดังนี้

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

โดยที่ y = ปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะล้างได้ (มก./ล.)

x = ความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

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



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

(หมายเหตุ: ค่าความเข้มข้นแคดเมียมที่ถูกชะล้างต่ำกว่า 1.0 มก./ด.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

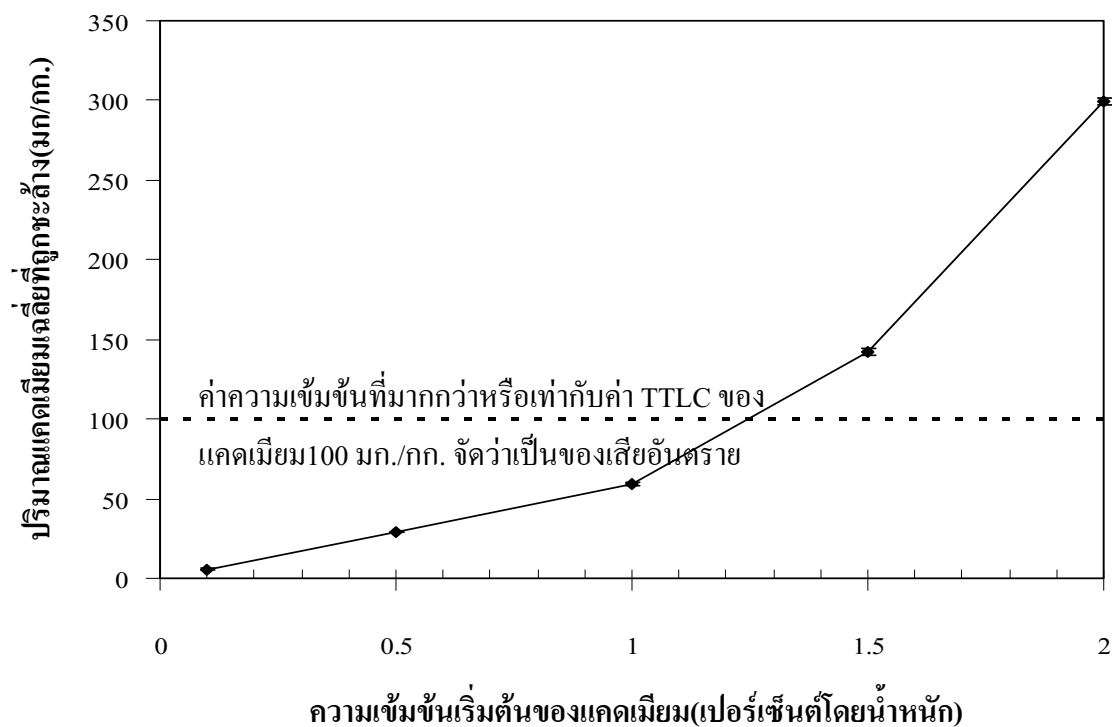
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ต้าด้วยวิธีการทดสอบแบบ acid digestion of sediments, sludges and soils(Method 3050B)

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 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าปริมาณการชะล้างของแคลเซียมหรือสารประกอบแคลเซียมเท่ากับ 142 และ 299.73 มก./กก. ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้มีค่าสูงกว่าค่าของ TTLC ที่กำหนด จากกราฟแสดงได้ดังเส้นประ โดยกำหนดให้มีปริมาณแคลเซียมหรือสารประกอบแคลเซียมไม่เกิน 100 มก./กก. จึงจะจัดได้ว่าวัสดุซีเมนต์มอร์ต้าที่มีแคลเซียมเป็นส่วนประกอบมากกว่าหรือเท่ากับ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าที่ได้มีปริมาณสูงกว่าเส้นที่กำหนดไว้ จึงจัดเป็นของเสียอันตราย และพบว่าวัสดุที่มีแคลเซียมเผาไหม้ร่วมกับวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์อยู่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 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

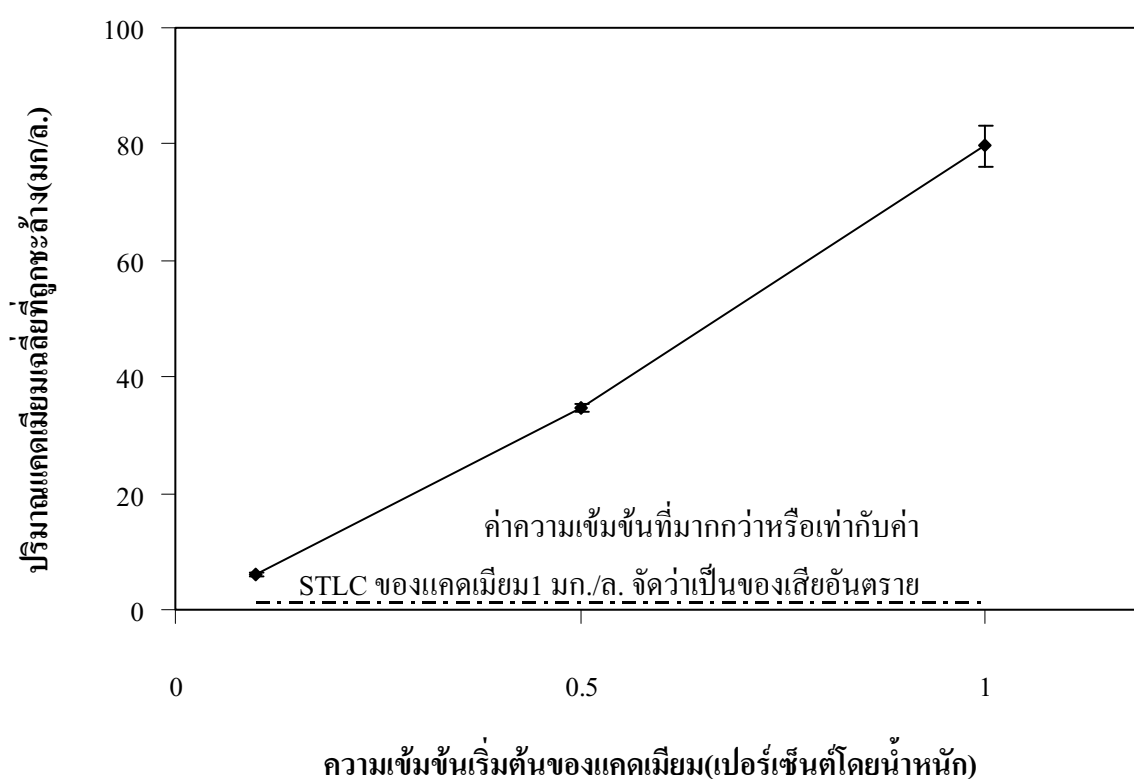
ผลจากการทดสอบการชะล้างแคดเมียมออกจากวัสดุซีเมนต์มอร์ต้าด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) แสดงดังตารางที่ 4.11 ซึ่งความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้นที่ใช้ในการวิจัยนี้ความเข้มข้นเป็น 0 0.1 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ และแต่ละความเข้มข้นได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง

ตารางที่ 4.11 ผลการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ต้าที่มีโลหะหนักแคดเมียมผสมอยู่ด้วยวิธี Waste Extraction Test(WET)

ร้อยละความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้นโดยน้ำหนัก	ปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะล้างออกจากซีเมนต์มอร์ต้าที่ได้จากการเผาไหม้ (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 ที่มีค่าพีเอชต่างๆกัน 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

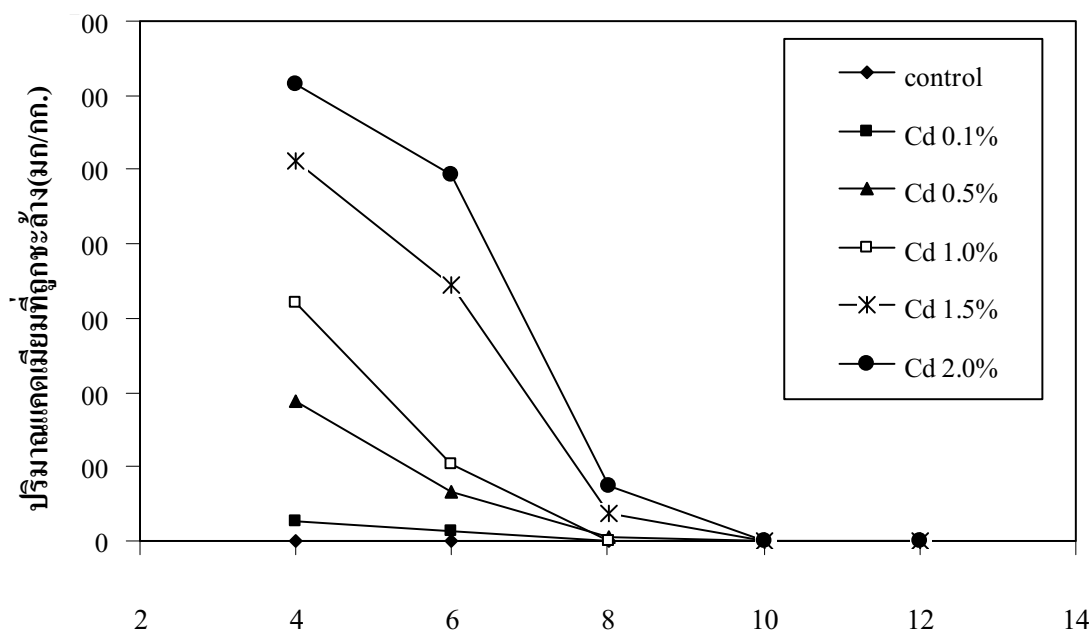
ตารางที่ 4.12 ผลการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ต้าที่ได้จากการเผาพร้อมกับแคลเซียมผสมอยู่ด้วย
วิธีการทดสอบแบบ pH static leach test

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 ผลการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ต้าที่ได้จากการเผาร่วมกับแคลเซียมผสมอยู่ด้วย
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 = ไม่จัดเป็นของเสียอันตรายเนื่องจากผ่านการทดสอบด้วยวิธี WET
 - ✗ = จัดเป็นของเสียอันตราย
 - *² = ต้องทำการทดสอบด้วยวิธี WET เนื่องจากผ่านการทดสอบด้วยวิธี M 3050B
 - ✗³ = จัดเป็นของเสียอันตรายเนื่องจากไม่ผ่านการทดสอบด้วยวิธี M 3050B
 - ✗⁴ = จัดเป็นของเสียอันตรายเนื่องจากไม่ผ่านการทดสอบด้วยวิธี 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. ในส่วนการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีแคดเมียมเผาร่วมกับวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์ พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้ามีแนวโน้มที่ลดลง โดยผลจากการวิจัยพบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมตั้งแต่ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้ามีค่าเท่ากับ 27.51 MPa ซึ่งพบว่ามีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 28 MPa[14] ดังนั้นวัตถุดิบทดแทนหรือเชื้อเพลิงทดแทนที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมมากกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขึ้นไปจะส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดต่ำกว่ามาตรฐาน สามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างที่ไม่ต้องการกำลังอัดสูงเช่น งานฉาบผิว แต่เมื่อพิจารณาในเชิงความสามารถของการชะล้างพบว่าค่าที่ได้จากการชะล้างมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน ดังนั้นจึงไม่ควรนำซีเมนต์ที่ได้จากการเผาร่วมกับแคดเมียมมาใช้งานเพราะอาจเกิดผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

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 ปริมาณของแคลเซียมที่ถูกชะล้างออกมามากที่สุด และเมื่อพีเอชมีค่าสูงขึ้นปริมาณของแคลเซียมที่ถูกชะล้างออกมาจะมีค่าต่ำลง 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, พิมพ์ครั้งที่ 1, 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.

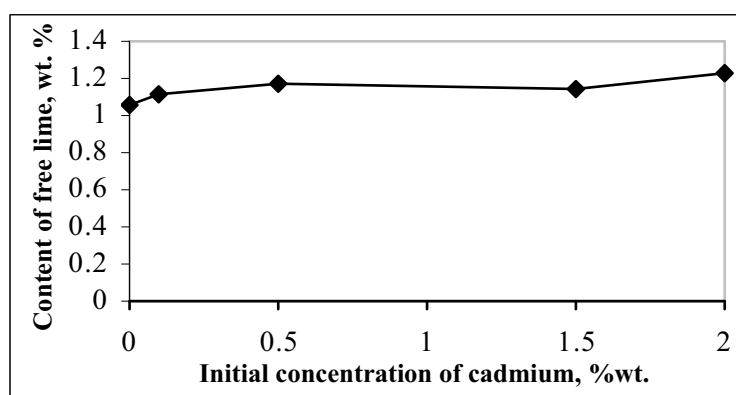


Figure 1. Free lime content of clinker in the presence of cadmium with different initial concentrations

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 clinkering 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.

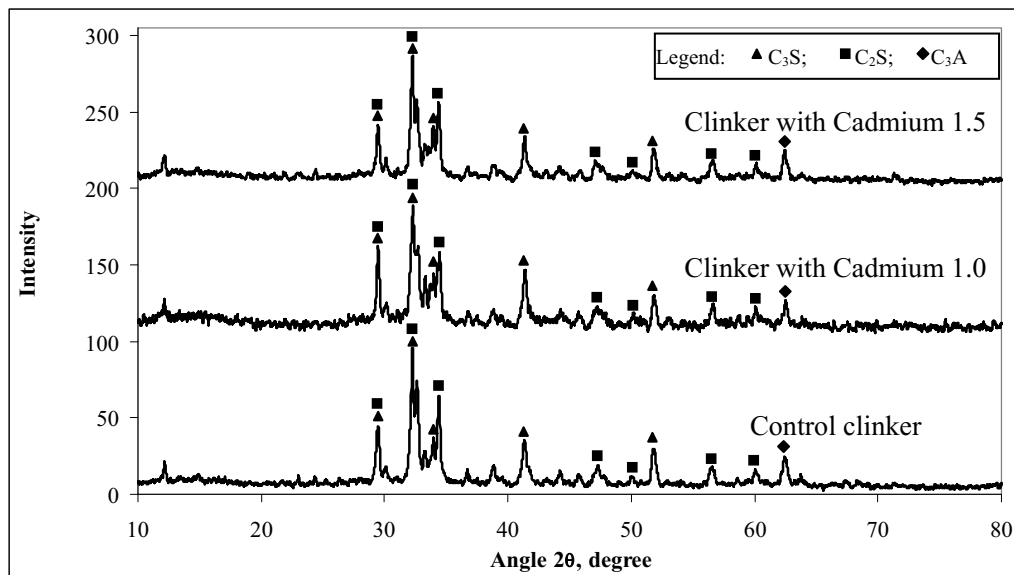


Figure 2. XRD pattern of clinker in the presence of cadmium with different initial concentrations

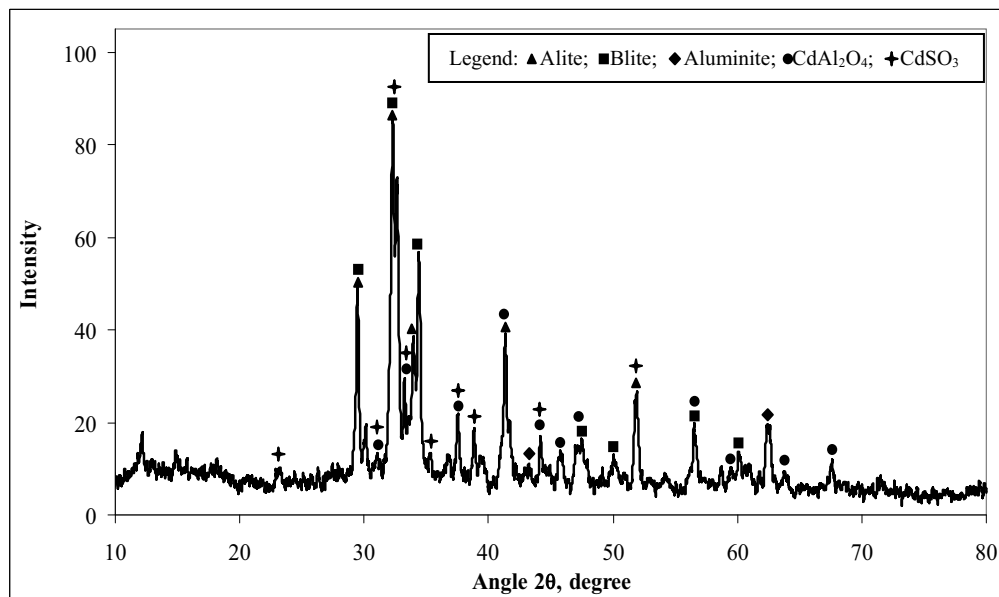


Figure 3. XRD pattern in identification of new compound of cadmium in clinker

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)).

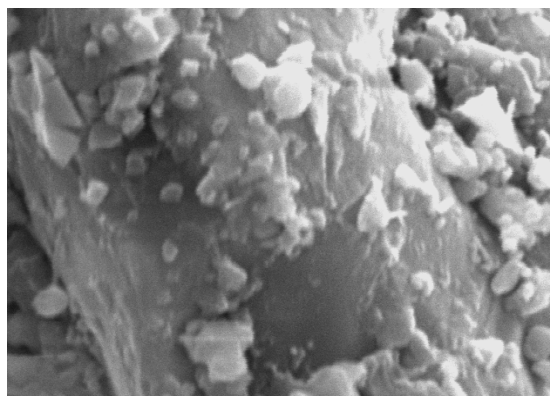
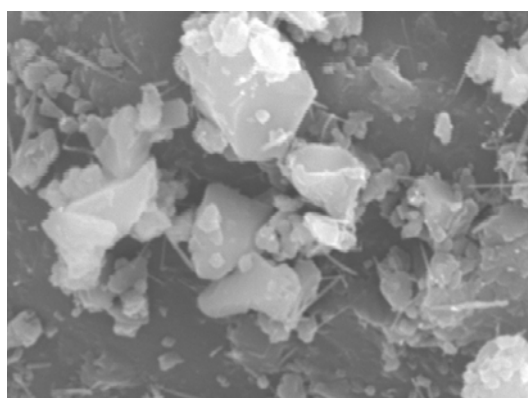
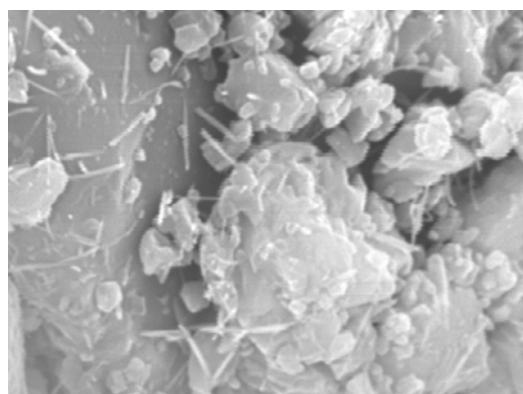


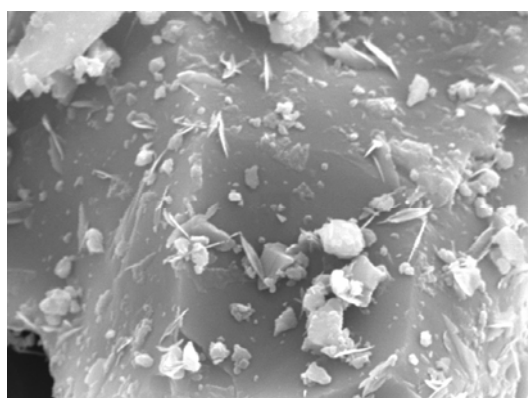
Figure 4. SEM micrograph of clinker without cadmium



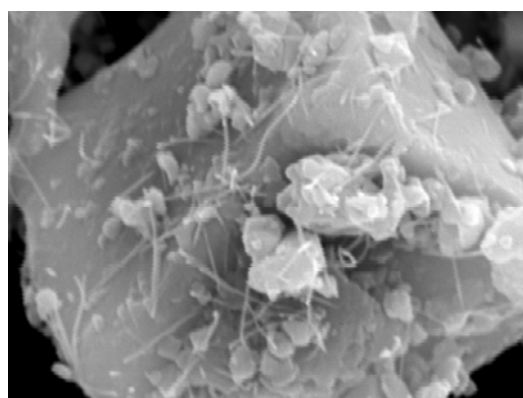
(a) clinker with 0.5% cadmium



(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