

บทที่ 4

การศึกษาลักษณะโครงสร้างของซีเมนต์เมื่อมีโลหะหนักปนอยู่

4.1 การหาสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมปูนเม็ดสำหรับซีเมนต์

ผลของการทดลองในการทดสอบลักษณะของปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการเทียบกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตจริง ประกอบด้วย การหำร้อยละของ free lime การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM

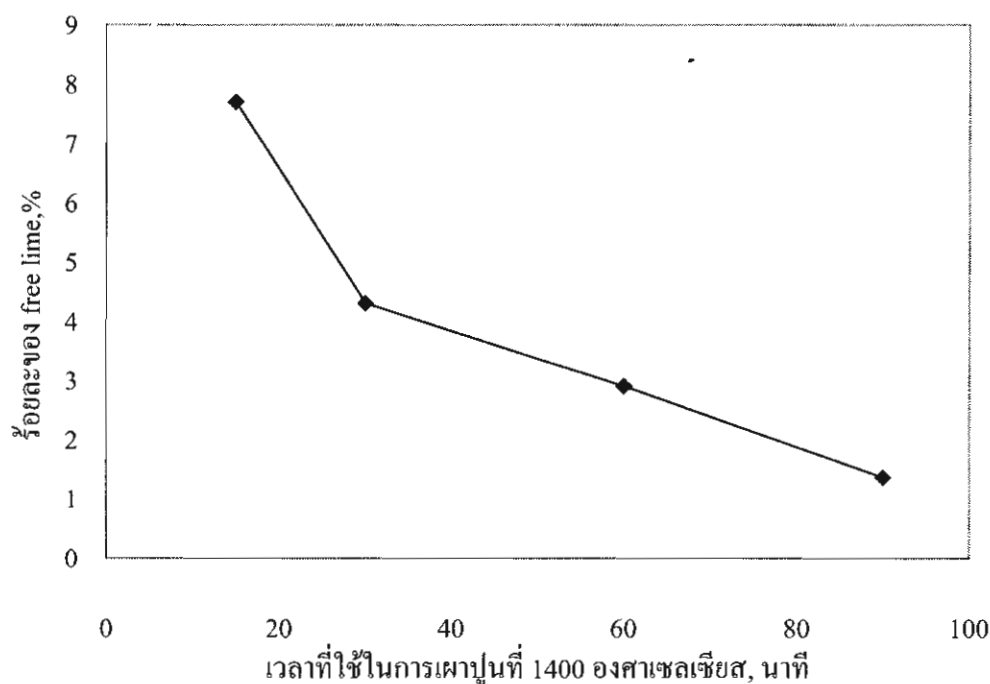
ผลของการหำร้อยละของ free lime แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การหำร้อยละของ free lime ของปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการที่เวลาต่างๆ ที่ใช้ในการเผาปูนเม็ด

เวลาที่ใช้ในการเผาปูนเม็ด (นาทื)	การเผาปูนเม็ดครั้งที่	% free lime ตัวอย่างที่ 1	% free lime ตัวอย่างที่ 2	% free lime ตัวอย่างที่ 3	% free lime เฉลี่ย
15 นาทื	1	7.78	7.82	7.68	7.76
	2	7.37	7.42	7.89	7.56
	3	7.56	7.93	8.03	7.84
					avg = 7.72
30 นาทื	1	4.20	4.31	4.42	4.31
	2	4.37	4.48	3.98	4.28
	3	4.35	4.42	4.22	4.33
					avg = 4.31
60 นาทื	1	2.58	2.46	2.46	2.50
	2	3.08	3.19	3.23	3.17
	3	3.23	2.92	3.02	3.05
					avg = 2.90
90 นาทื	1	1.41	1.47	1.24	1.37
	2	1.35	1.41	1.29	1.35
	3	1.42	1.38	1.24	1.35
					avg = 1.36

หมายเหตุ: ค่าร้อยละของ free lime ที่ต้องการอยู่ในช่วง 1-1.5%

จากผลการทดลองที่ได้ เมื่อเวลาที่ใช้ในการเผาปูนเม็ดน้อย ค่าร้อยละของ free lime จะมีค่าสูง ในขณะที่เมื่อใช้เวลาในการเผาปูนเม็ดนานขึ้นจาก 15 นาที เรื่อยมาจนถึง 90 นาที ค่าร้อยละของ free lime จะลดลงจนอยู่ในช่วงที่ต้องการ ซึ่งค่าร้อยละของ free lime นี้แสดงให้เห็นถึงปริมาณของ calcium oxide ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาและไม่เปลี่ยนรูปไปเป็น C_3S และ C_2S ซึ่งจะมีปริมาณของ calcium oxide ในปริมาณมากเมื่อเผาที่ใช้เวลาน้อย และเมื่อเวลาที่ใช้ในการเผานานมากขึ้นปริมาณของ calcium oxide ที่เข้าทำปฏิกิริยาจะมากขึ้น ทำให้ร้อยละของ free lime น้อยลง แนวโน้มของร้อยละของ free lime ที่เหลืออยู่ตามเวลาที่ใช้ในการเผาปูนเม็ด แสดงในรูปที่ 4.1

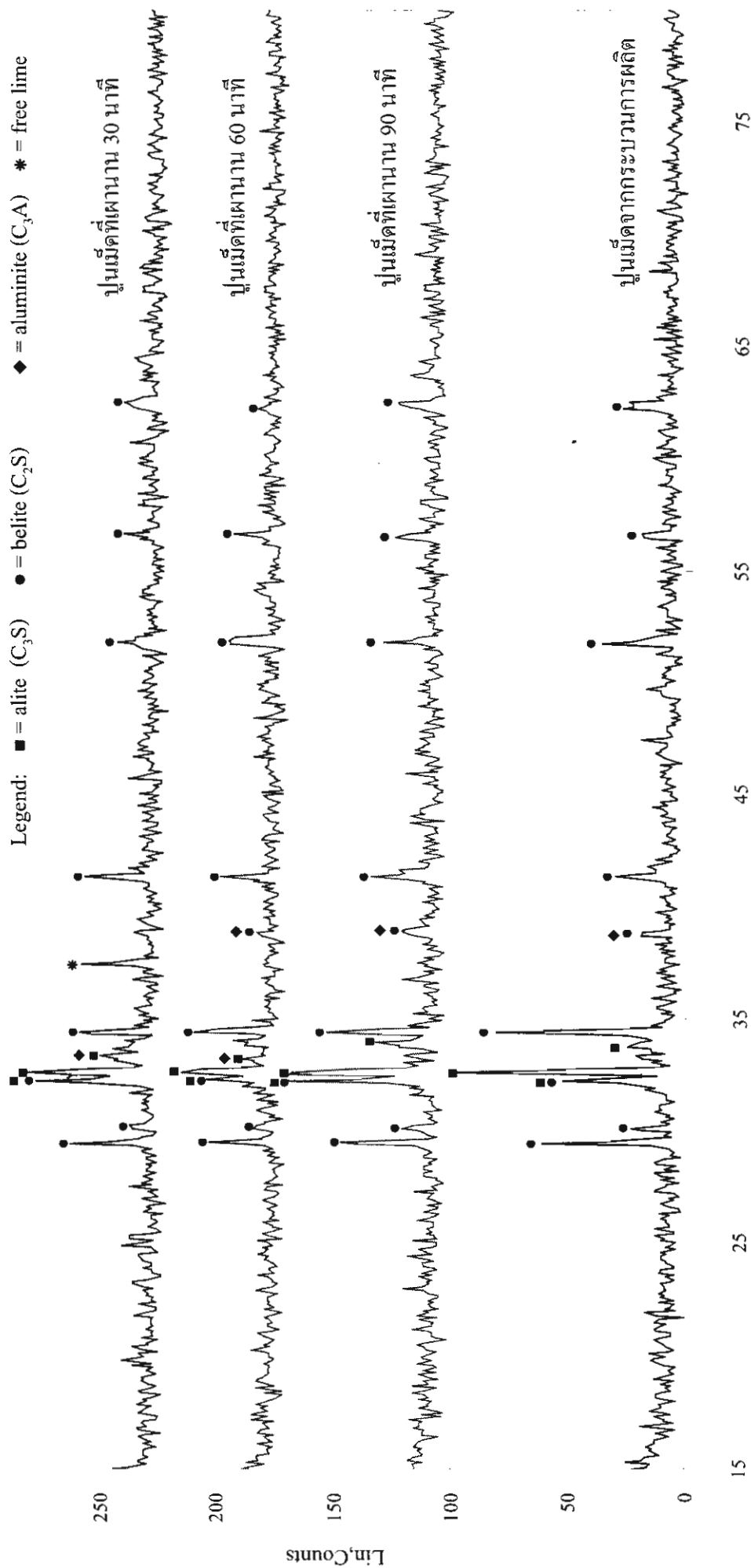


รูปที่ 4.1 ผลของเวลาที่ใช้ในการเผาปูนเม็ดที่มีต่อร้อยละของ free lime

จากผลของการทดสอบ free lime จะได้ข้อมูลของเวลาที่ใช้ในการเผาปูนเม็ดที่ 90 นาที ให้ผลของร้อยละ free lime เป็น 1.36 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เกิดขึ้นเมื่อทดสอบกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิต

ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดที่ได้จากการเผาด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer โดยเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตเทียบกับปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการที่เวลาในการเผาปูนเม็ดที่เวลา 30, 60 และ 90 นาที โดยแสดงในรูปที่ 4.2

จากกราฟในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD พบว่า phase ที่ได้ของปูนเม็ดจากห้องปฏิบัติการมีลักษณะเดียวกันกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิต โครงสร้างหลักที่ปรากฏอย่างชัดเจนโดยดูจากพีคสูงสุดจะเป็น alite (C_3S) โดยมีโครงสร้างของ belite (C_2S) ปะปนอยู่ และมีโครงสร้างของ aluminite (C_3A) เล็กน้อย ในขณะที่ tetracalcium aluminoferrite (C_4AF) ไม่ปรากฏในการวิเคราะห์ XRD ของปูนเม็ด ซึ่งหากพิจารณาจากกราฟที่ได้



2θ, Degree

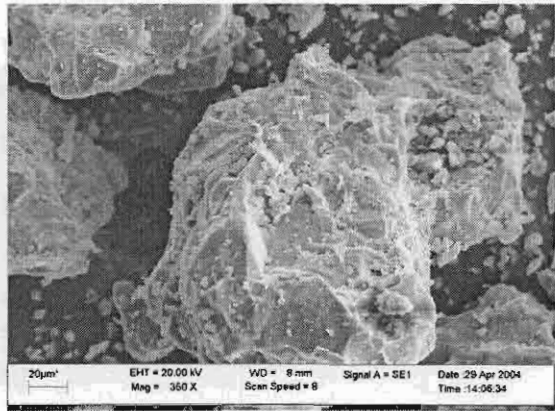
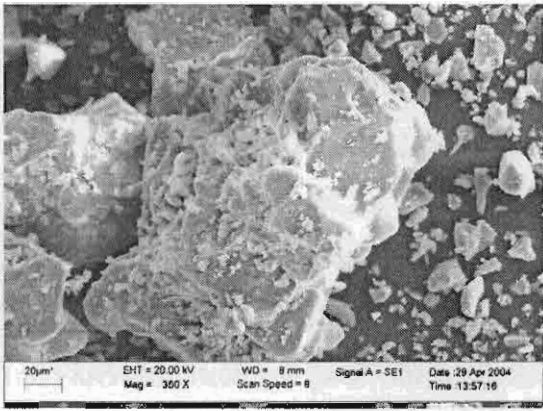
รูปที่ 4.2 กราฟจากการวิเคราะห์โครงสร้างของปูนเม็ดด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer เปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดจากการะบวนการผลิตและปูนเม็ดจากห้องปฏิบัติการ

ลักษณะโครงสร้างทั้งหมดที่เกิดของปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการเป็นรูปแบบเดียวกันกับปูนเม็ดจากกระบวนการผลิตของโรงงาน โดยมีข้อแตกต่างคือค่าความเข้ม (intensity) ที่อ่านได้ไม่เท่ากัน ซึ่งค่าความเข้มนี้จะแสดงถึงปริมาณเทียบเคียงของแต่ละ phase ที่เกิดขึ้นในปูนเม็ด เมื่อพิจารณาโดยรวมจะพบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการเผาปูนเม็ดมีเวลาน้อย ค่าความเข้มจะน้อยตามไปด้วย ในขณะที่เมื่อเวลาที่ใช้ในการเผาปูนเม็ดนานขึ้นเป็น 90 นาที ความเข้มของฟิสิกของ phase ที่ได้ จะสูงขึ้นและใกล้เคียงกับความเข้มของฟิสิกที่ได้จากปูนเม็ดจากกระบวนการผลิตของโรงงาน ความเข้มของฟิสิกที่เกิดขึ้นแสดงถึงปริมาณของ phase ที่เกิดขึ้นของปูนเม็ด โดยที่เวลาในการเผาปูนเม็ด 30 นาทีนั้น ปริมาณของ CaO ที่เหลืออยู่ในปูนเม็ดโดยไม่เปลี่ยนเป็น alite และ belite นั้นจะมีมากกว่าเมื่อใช้เวลาในการเผาปูนเม็ดที่ 90 นาที (ข้อมูลอ้างอิงจากการทดสอบ free lime) จึงทำให้ความเข้มของฟิสิกที่เกิดขึ้นมีความสูงน้อยกว่าเมื่อใช้เวลาในการเผาปูนเม็ดที่เวลาอื่นๆ

จากผลการทดลองในส่วนนี้ ได้ข้อมูลที่ตรงกับการทดสอบ free lime คือ การเผาปูนเม็ดของห้องปฏิบัติการในสถานะที่เลือกใช้ ทำให้ได้ phase ของปูนเม็ดทั้งในส่วน of alite, belite และ aluminite ในรูปแบบเดียวกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ โดยรูปแบบของและความเข้มของฟิสิกที่ใกล้เคียงกับปูนเม็ดจากกระบวนการผลิตมากที่สุดเกิดขึ้นเมื่อเผาปูนเม็ดเป็นเวลา 90 นาที

ผลของการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) เพื่อดูลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ด และลักษณะของ phase ต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการเมื่อใช้เวลาในการเผาเป็น 90 นาทีเทียบกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตของโรงงาน แสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.5 ส่วนลักษณะของ phase ต่างๆ ที่เกิดขึ้นแสดงในรูปที่ 4.4

จากภาพของปูนเม็ดจะเห็นได้ชัดเจนว่า ลักษณะของ phase ที่เกิดขึ้นของปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการเมื่อใช้เวลาในการเผาเป็น 90 นาทีเทียบกับปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตของโรงงาน มีลักษณะใกล้เคียงกันมาก ลักษณะการเผาที่ใช้ในการเตรียมปูนเม็ดของห้องปฏิบัติการ คือการเผาที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มเป็น 25 องศาเซลเซียสภายในเวลา 1 นาทีและเผาเป็นเวลานาน 90 นาที จากนั้นปล่อยให้ปูนเม็ดเย็นตัวลงนั้น สามารถนำมาใช้ในการเตรียมปูนเม็ดเพื่อใช้ในการผลิตซีเมนต์ และนำไปใช้ในการทดสอบชะล้างโลหะหนักได้ โดยคาดว่าจะให้ผลที่เทียบเคียงกับผลที่เกิดขึ้นจริงเมื่อมีการนำโลหะหนักไปเผาในเตาเผาในชนิดและปริมาณที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

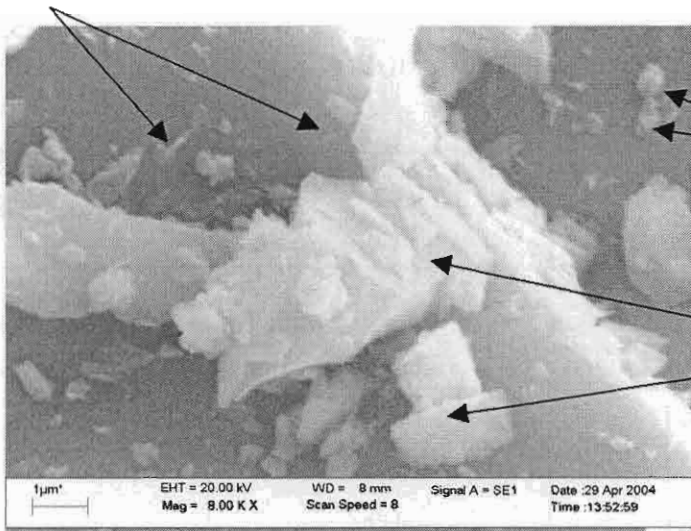


(ก) ปูนเม็ดจากกระบวนการผลิตของโรงงาน

(ข) ปูนเม็ดจากห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 4.3 ภาพเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของปูนเม็ดที่กำลังขยาย 350 เท่า

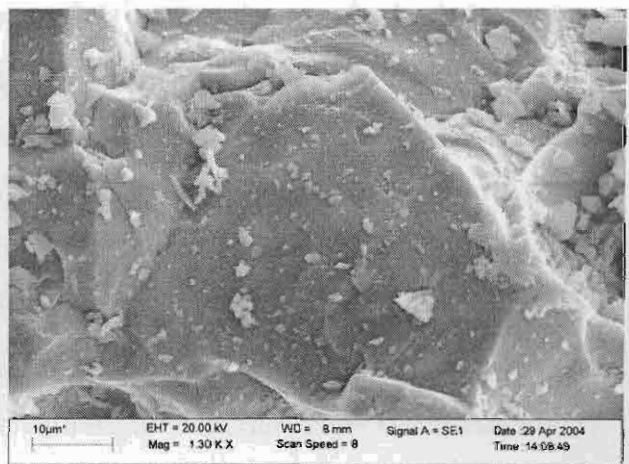
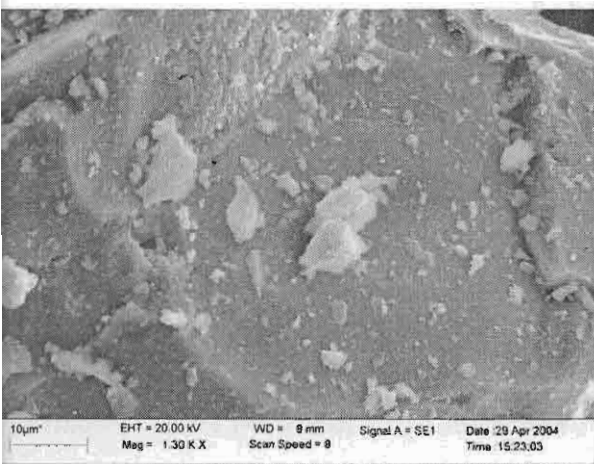
aluminite (C_2A)



belite (C_2S)

alite (C_3S)

รูปที่ 4.4 ภาพแสดง phase ต่างๆ ของปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตของโรงงาน



(ก) ปูนเม็ดจากกระบวนการผลิตของโรงงาน

(ข) ปูนเม็ดจากห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 4.5 ภาพเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของปูนเม็ดที่กำลังขยาย 1300 เท่า

4.2 การเตรียมปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสมอยู่

การทดลองในส่วนนี้เป็นการนำโลหะหนักเติมลงไปในวัตถุดิบ โลหะหนักที่นำมาศึกษาได้แก่ โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) และสังกะสี (Zn) โดยเป็นการเติมโลหะหนักแต่ละชนิดลงในวัตถุดิบโดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้นเป็น 0.1, 0.5, 1.0 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยโครเมียมนำมาจาก Cr₂O₃ นิกเกิลมาจาก NiO และสังกะสีมาจาก ZnO

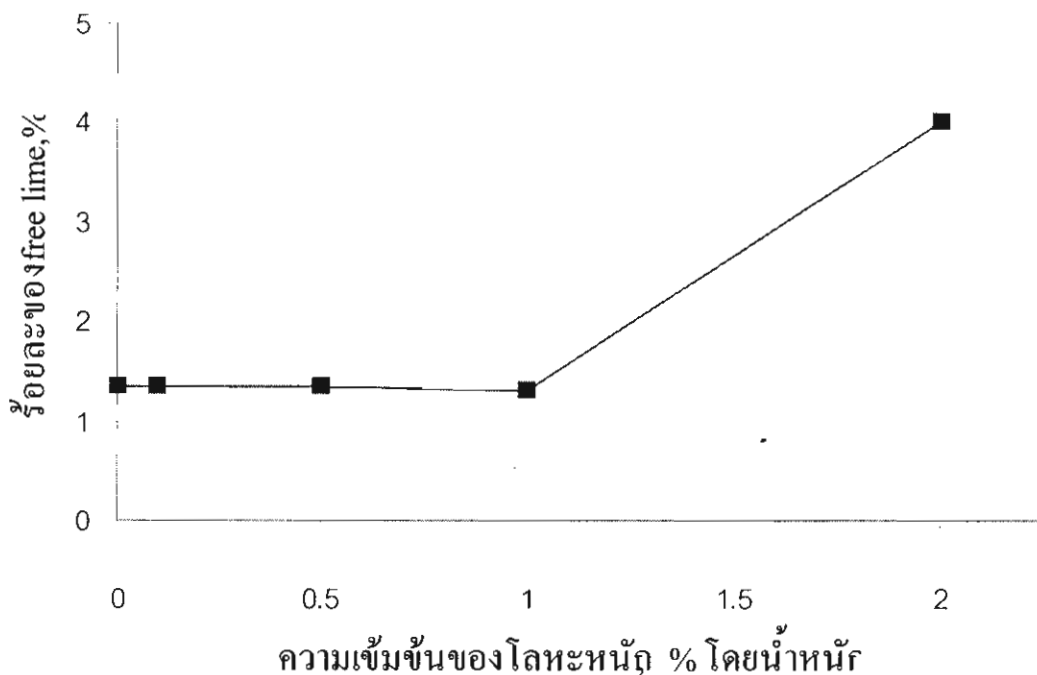
4.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะของปูนเม็ดที่มีโครเมียมผสมอยู่

ผลของการทดสอบ free lime ของปูนเม็ดที่มีโครเมียมผสมอยู่หลังจากการเผาแสดงใน ตารางที่ 2 และกราฟแสดงแนวโน้มในการเพิ่มหรือลดของ free lime ที่ความเข้มข้นของโครเมียมในช่วง 0-2% แสดงในกราฟรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.2 ร้อยละของ free lime ของปูนเม็ดเมื่อมีโครเมียมปะปนอยู่ในค่าความเข้มข้น 0-2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ชนิดของโลหะหนัก	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (% by weight)	ค่าเฉลี่ยของ ร้อยละ free lime (%)
โครเมียม (Cr)	0%	1.36%
	0.1%	1.36%
	0.5%	1.34%
	1.0%	1.31%
	2.0%	4.00%

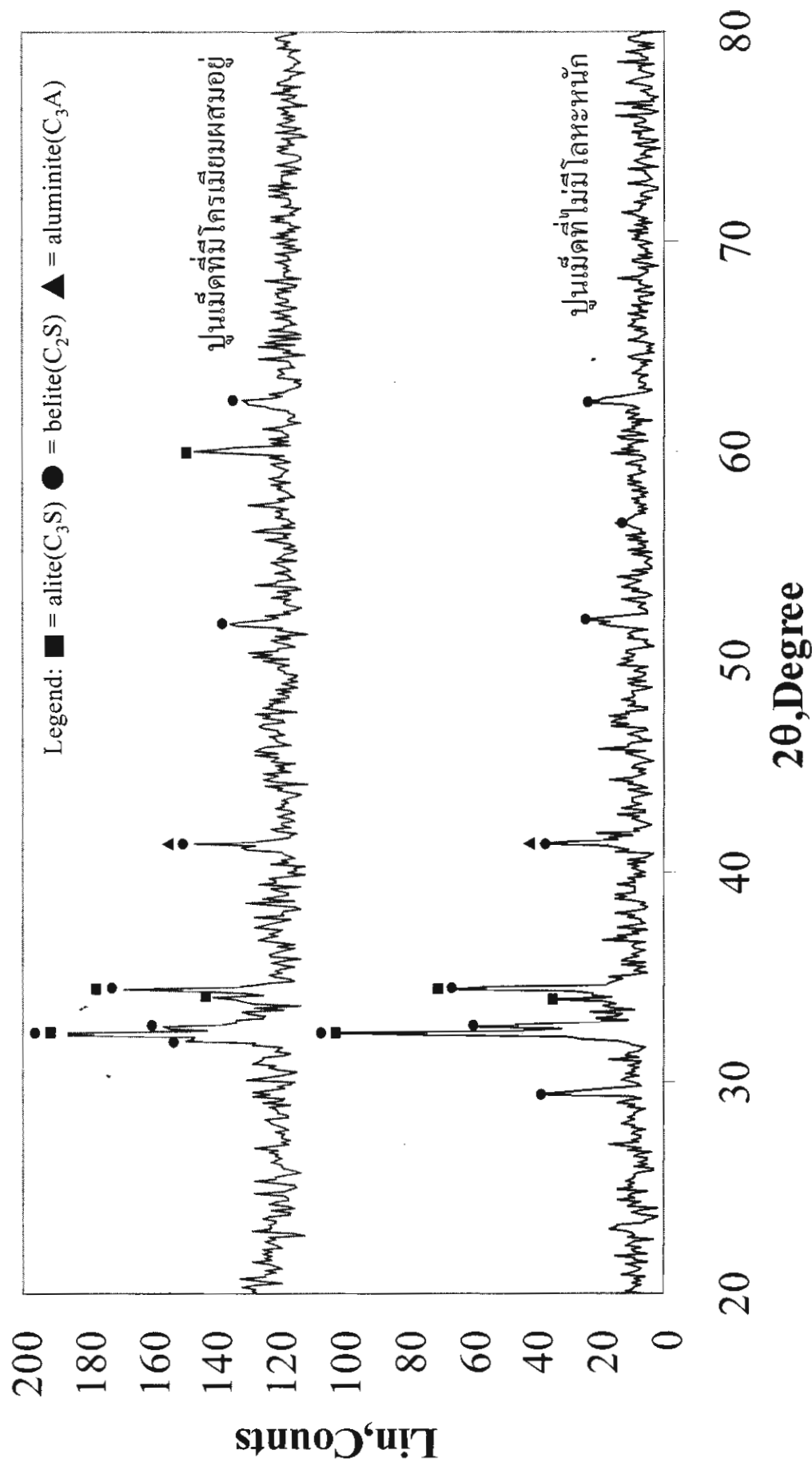
จากผลของการทดสอบ free lime จะเห็นได้ชัดเจนเมื่อมีโครเมียมปรากฏอยู่ในปูนเม็ดในช่วงที่มีค่าความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้นน้อยกว่า 1.0 % จะส่งผลต่อค่า free lime ที่เกิดขึ้นไม่มากนัก แต่เมื่อมีโครเมียมปรากฏอยู่ในโลหะหนักสูงกว่า 1.0% ค่า free lime จะมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยค่าของ free lime ในช่วงที่มีโครเมียมในปูนเม็ดในระดับความเข้มข้นต่ำ (น้อยกว่า 1.0%) จะมีค่า free lime อยู่ในช่วง 1.3 แต่เมื่อความเข้มข้นโครเมียมเป็น 2% ค่า free lime จะเพิ่มไปเป็น 4.00% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครเมียมขัดขวางการเปลี่ยนรูปของ calcium oxide ไปเป็น alite หรือ belite โดยผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการศึกษาแล้วก่อนหน้านี้ (Stephan et al., 1999; Barros et al., 2004) โดยได้มีการรายงานไว้ว่าที่ความเข้มข้นของโครเมียมสูง (2.5% โดยน้ำหนัก) โครเมียมจะขัดขวางการเปลี่ยนรูปของ calcium oxide ไปเป็น alite นอกจากนี้ยังทำให้ belite มีความเสถียรอย่างมาก มีผลให้ alite เกิดขึ้นได้ยาก หรือน้อยลง เมื่อนำมาทดสอบหาค่าร้อยละของ free lime จึงทำให้ได้ค่าร้อยละของ free lime สูงขึ้นจากปูนเม็ดที่ไม่มีโครเมียม หรือมีความเข้มข้นโครเมียมในระดับต่ำอย่างชัดเจน



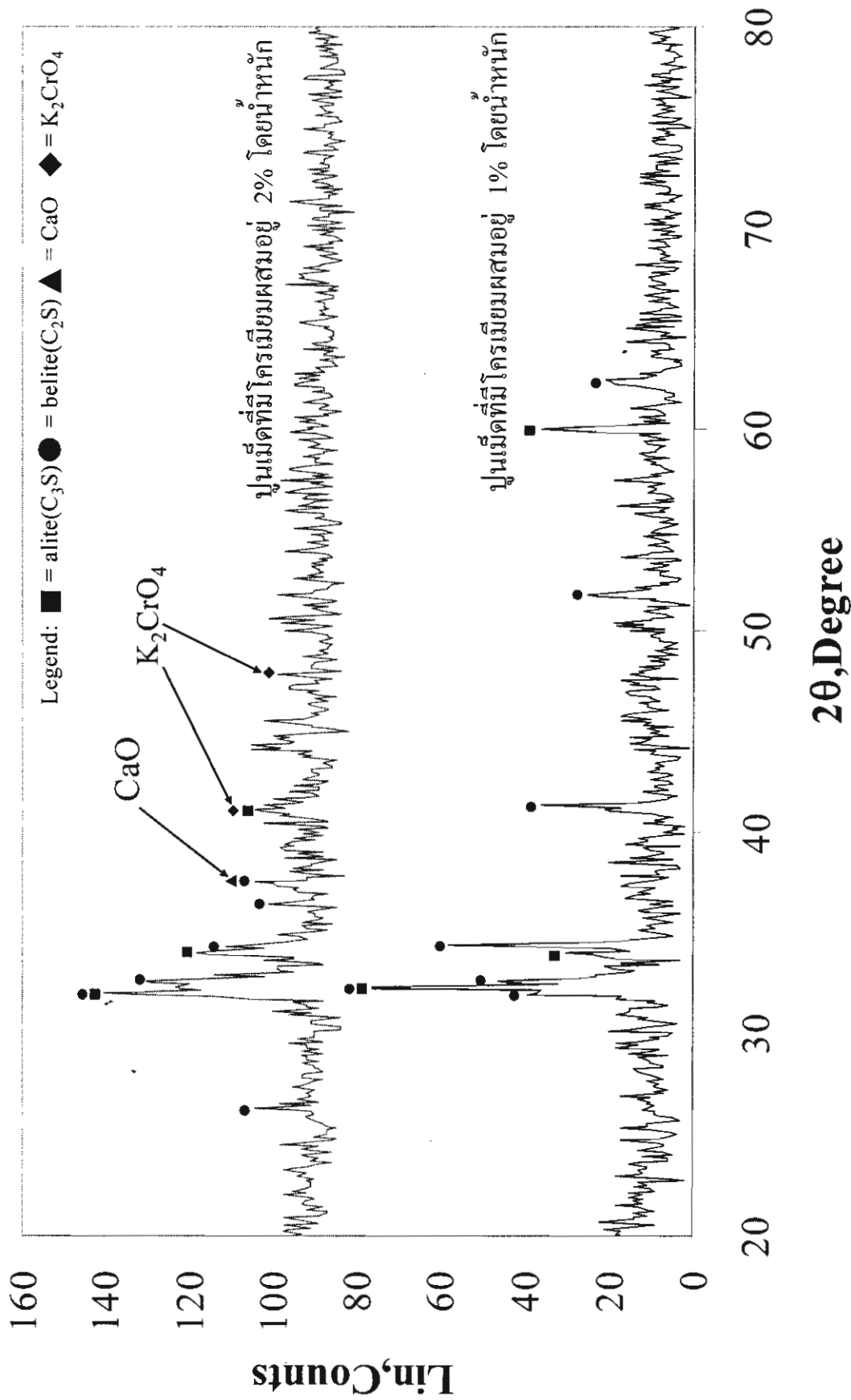
รูปที่ 4.6 กราฟแสดง free lime ที่เหลืออยู่เมื่อความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้นอยู่ในช่วง 0-2%

ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดเมื่อมีโครเมียมปนอยู่ โดยใช้เครื่อง XRD ซึ่งแสดงผลของปูนเม็ดที่มีโครเมียม โดยในรูปกราฟที่ 4.7 แสดงผลของการวิเคราะห์ XRD ของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และปูนเม็ดที่มีโครเมียมผสมอยู่ที่ความเข้มข้น 1% จากกราฟจะเห็นได้ชัดเจนว่า ลักษณะโดยทั่วไปของพีคที่ปรากฏมีความแตกต่างกันไม่มากนัก แต่ความสูงของพีคเมื่อปูนเม็ดมีโครเมียมปรากฏอยู่นั้นลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักใดๆผสมอยู่ การลดลงของพีคตามความเข้มข้นของโครเมียมที่เพิ่มขึ้นนี้ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียมจาก 1% ไปเป็น 2% ดังแสดงในรูปกราฟที่ 4.8 โดยสิ่งที่แตกต่างของโครงสร้างของปูนเม็ดเมื่อมีความเข้มข้นของโครเมียมที่ 2% ปรากฏอยู่นั้น นอกจากความสูงที่ลดลงแล้ว ยังปรากฏการเกิดสารประกอบในโครงสร้างใหม่ระหว่างโครเมียมและแคลเซียมเกิดขึ้น จากการวิเคราะห์ตำแหน่งของพีคด้วยเครื่อง XRD จะพบว่าสารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่นี้มีแนวโน้มที่จะเป็นสารประกอบ K_2CrO_4 เป็นอย่างมาก

นอกจากนี้ในส่วนของความสูงของพีคที่ลดลงแสดงถึงโครงสร้างทั้งในส่วนของ alite และ belite ลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการมีโครเมียมในปูนเม็ดทำให้เกิดการขัดขวางการเกิดโครงสร้างของ alite และ belite ซึ่งข้อมูลนี้สอดคล้องกับผลของการทดสอบ free lime ที่แสดงให้เห็นร้อยละของ CaO ที่เหลืออยู่มากขึ้นเมื่อมีโครเมียมปรากฏอยู่ในปูนเม็ด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีโครเมียมในระดับความเข้มข้นสูงๆ อยู่ในปูนเม็ด

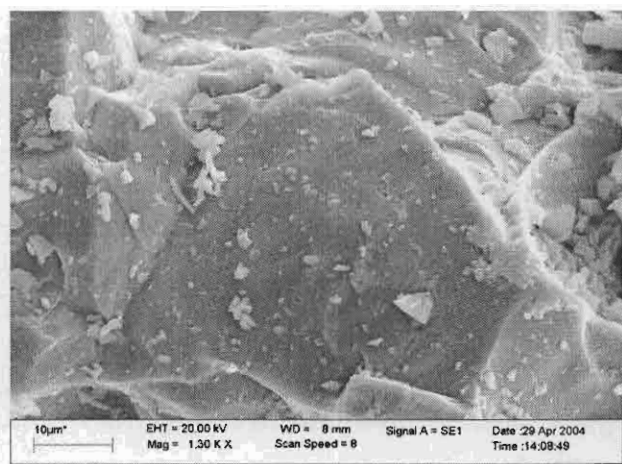


รูปที่ 4.7 แสดงผลของการวิเคราะห์ XRD ของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและปูนเม็ดที่มีโครเมียมผสมอยู่ที่ความเข้มข้น 1%

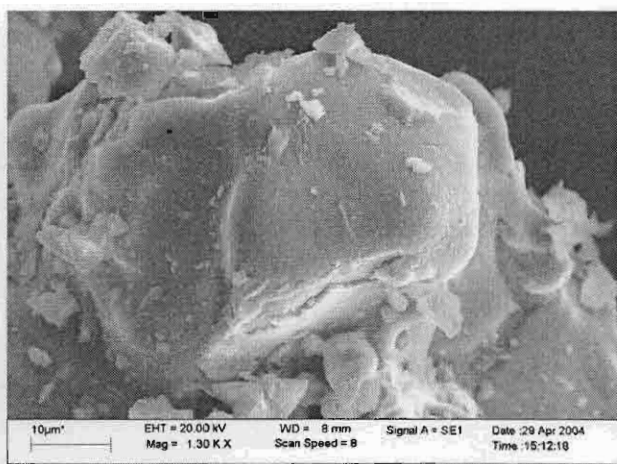


รูปที่ 4.8 แสดงผลของการวิเคราะห์ XRD ของปูนเม็ดที่มีโครเมียมผสมอยู่ที่มีความเข้มข้น 1% และ 2%

ในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักเจือปนอยู่ เปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักอยู่ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 1300 เท่าในรูปที่ 4.9 จะพบว่า เมื่อมีโครเมียมอยู่ ลักษณะของพื้นผิวทางกายภาพจะมีลักษณะค่อนข้างใกล้เคียงกับพื้นผิวของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักอยู่ โดยมีความแตกต่างกันน้อยมากจนไม่สามารถสังเกตเห็นการลดลงของ alite และ belite เนื่องจากการขัดขวางของโครเมียมได้ชัดเจน การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง SEM ในกรณีของโครเมียมนี้ไม่สามารถแสดงภาพลักษณะการเปลี่ยนไปของโครงสร้างของปูนเม็ดได้



(ก) ปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก



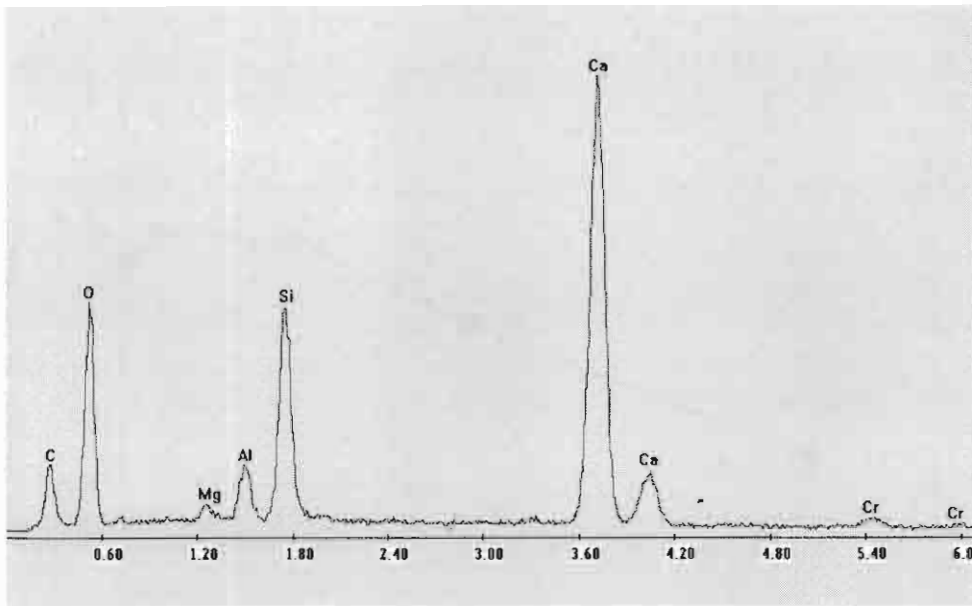
(ข) ปูนเม็ดที่มีโครเมียม 1% โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.9 แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM เมื่อ (ก) ปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และ (ข) ปูนเม็ดที่มีโครเมียม 1% โดยน้ำหนัก

นอกจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และ SEM แล้ว ตัวอย่างของปูนเม็ดได้ถูกนำไปหาสัดส่วนร้อยละที่ปรากฏอยู่ในปูนเม็ดด้วยเครื่อง Energy-Dispersive X-ray Spectrophotometer (EDS) โดยข้อมูลของปูนเม็ดที่มีโครเมียมปนอยู่นั้น แสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.10 ซึ่งแสดงให้เห็นสัดส่วนของโครเมียมที่มีอยู่ในปูนเม็ดเป็น 1%เมื่อเทียบกับธาตุอื่นๆ โดยรวม และเมื่อใช้ EDS ในการวิเคราะห์ถึงสัดส่วนของโครเมียมที่อยู่ในเฟสต่างๆ ของปูนเม็ด จะพบว่าโครเมียมจะปรากฏอยู่ในโครงสร้างของ belite เป็นหลัก และมีอยู่ใน alite บ้าง

ตารางที่ 4.3 ส่วนประกอบของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักโครเมียมผสมอยู่

ธาตุ	Wt %							Total
	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Cr	
ตัวอย่างที่ 1	19.09	40.33	0.84	2.48	8.81	26.98	1.46	100.00
ตัวอย่างที่ 2	13.35	42.80	2.04	6.55	5.71	28.73	0.83	100.00
ตัวอย่างที่ 3	21.61	37.43	1.61	3.53	5.15	29.73	0.94	100.00



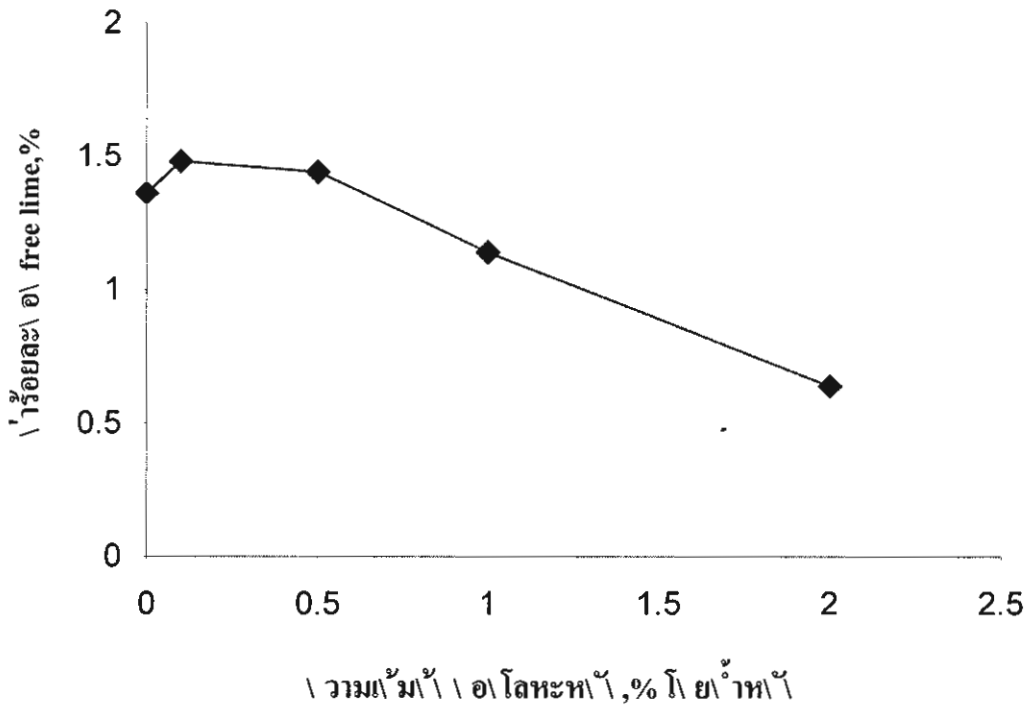
รูปที่ 4.10 แสดงร้อยละของธาตุต่างๆที่ปรากฏอยู่ในปูนเม็ดเมื่อมีโครเมียมอยู่ด้วยเครื่อง EDS

4.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะของปูนเม็ดที่มีนิกเกิลผสมอยู่

ผลของการทดสอบ free lime ของปูนเม็ดที่มีนิกเกิลผสมอยู่หลังจากการเผาแสดงใน ตารางที่ 4.4 และกราฟแสดงแนวโน้มในการเพิ่มหรือลดของ free lime ที่ความเข้มข้นของนิกเกิลในช่วง 0-2% แสดงในกราฟรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.4 ร้อยละของ free lime ของปูนเม็ดเมื่อมีนิกเกิลปะปนอยู่ในค่าความเข้มข้น 0-2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

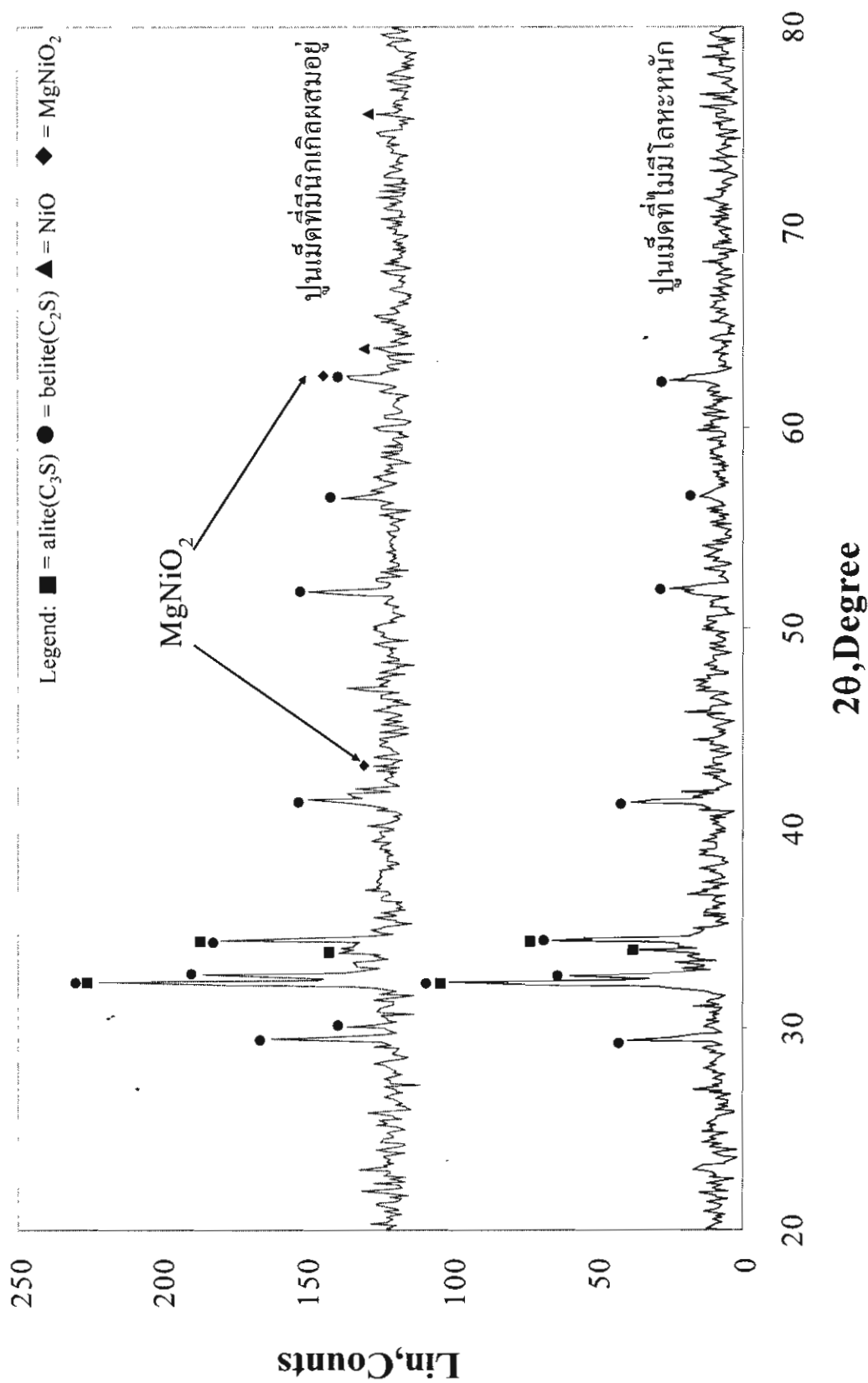
ชนิดของโลหะหนัก	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (% by weight)	ค่าเฉลี่ยของ ร้อยละ free lime (%)
นิกเกิล (Ni)	0%	1.36%
	0.1%	1.48%
	0.5%	1.44%
	1.0%	1.14%
	2%	0.64%



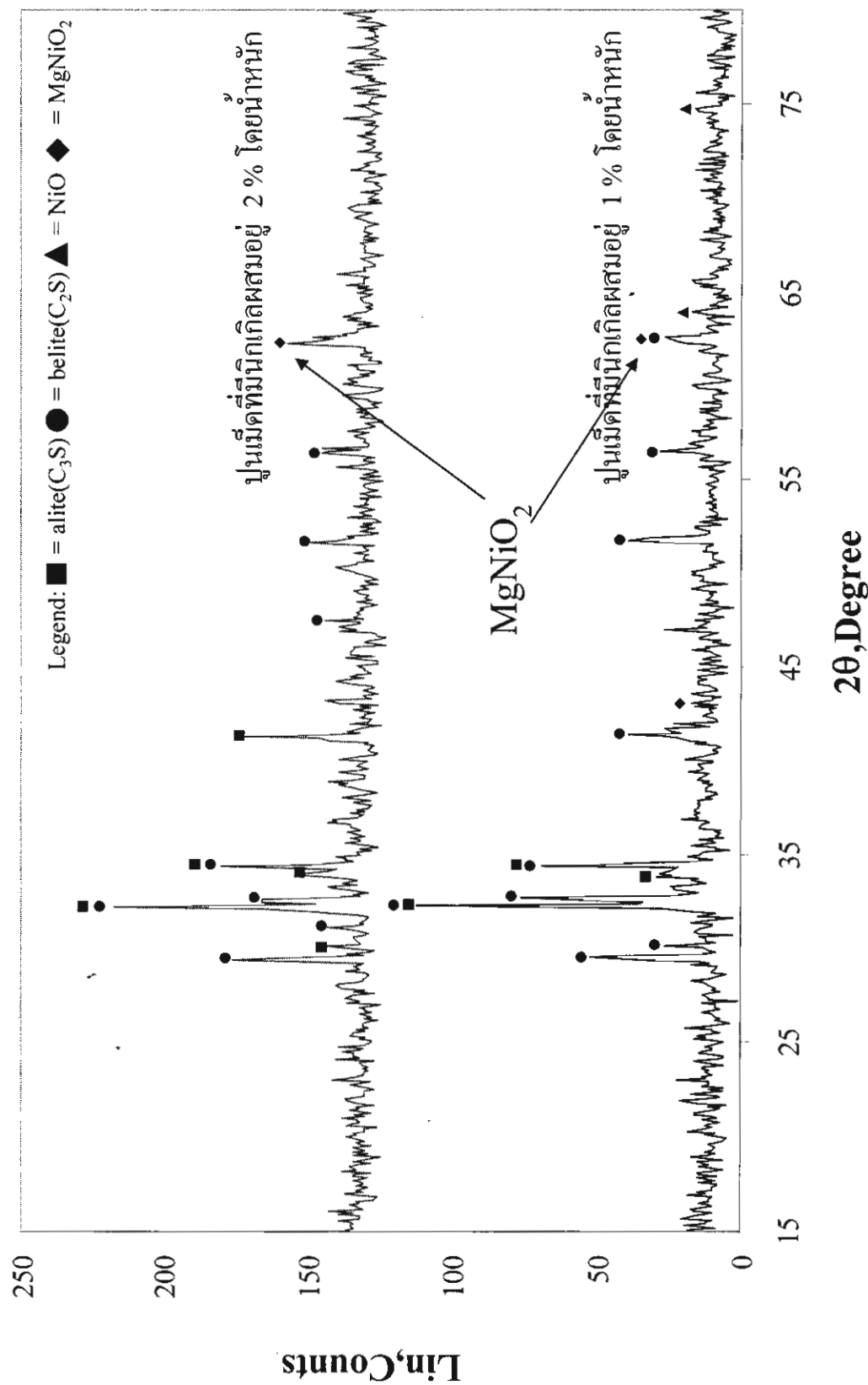
รูปที่ 4.11 กราฟแสดง free lime เมื่อความเข้มข้นของนิเกิลเริ่มต้นอยู่ในช่วง 0-2%

จากกราฟและค่า free lime พบว่าเมื่อมีนิเกิลปรากฏอยู่ในปูนเม็ดจะทำให้ค่า free lime ลดลงเมื่อเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักใดๆ ผสมอยู่ โดยพบว่าเมื่อมีนิเกิลความเข้มข้น 2.0% จะทำให้ปูนเม็ดมีค่า free lime ลดลงเป็น 0.64% และกราฟยังแสดงแนวโน้มในการลดลงของ free lime อย่างต่อเนื่องหากมีการเพิ่มความเข้มข้นของนิเกิลมากขึ้น ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าการมีนิเกิลในปูนเม็ดได้ทำให้มีการนำ CaO ในการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างของปูนเม็ดมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่เคยศึกษามาแล้ว (Stephan et al., 1999) โดยได้มีการรายงานไว้ว่านิเกิลไม่ได้ทำให้โครงสร้างของ alite และ belite แตกต่างไปจากปูนเม็ดที่ไม่มีนิเกิลแต่อย่างใด ทั้งนี้อาจเนื่องจากนิเกิลได้รวมตัวกับ Mg ในการเกิดเป็นสารประกอบ ซึ่งแสดงภาพได้อย่างชัดเจนจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และ SEM ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

การวิเคราะห์โครงสร้างของนิเกิลด้วยเครื่อง XRD โดยเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างระหว่างปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและปูนเม็ดที่มีนิเกิลความเข้มข้น 1% แสดงในรูปที่ 4.12 และกราฟแสดงลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดเมื่อปูนเม็ดมีความเข้มข้นของนิเกิล 1% และ 2% แสดงในรูปที่ 4.13



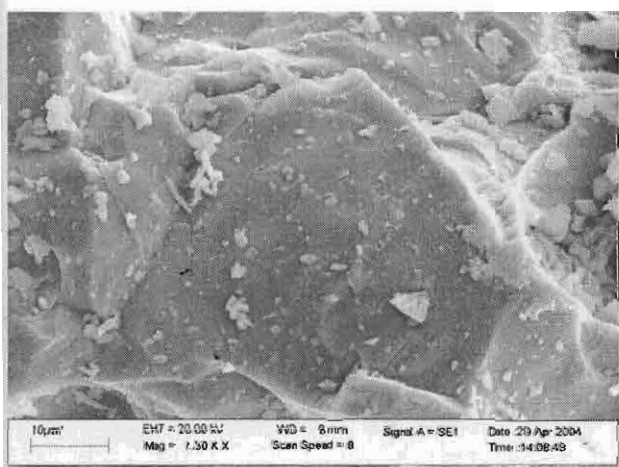
รูปที่ 4.12 แสดงผลของการวิเคราะห์ XRD ของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและปูนเม็ดที่มีนิกิลผสมอยู่ที่ความเข้มข้น 1%



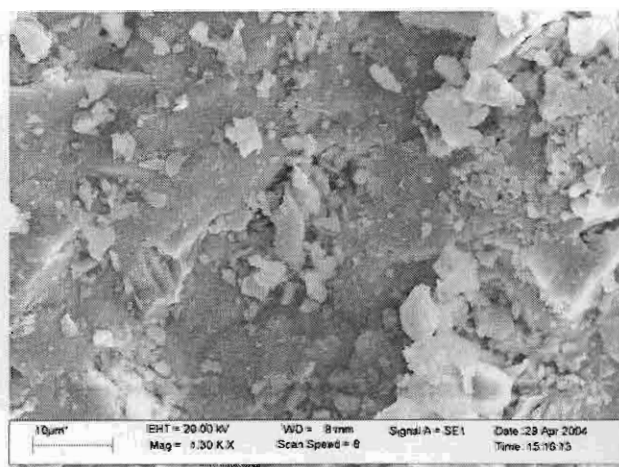
รูปที่ 4.13 แสดงผลของการวิเคราะห์ XRD ของปูนเม็ดที่มีนิกเกิลผสมอยู่ที่ความเข้มข้น 1% และ 2%

กราฟรูปที่ 4.12 ซึ่งแสดงถึงผลของการวิเคราะห์ XRD ของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและปูนเม็ดที่มีนิกเกิลผสมอยู่ จากรูปจะเห็นว่าโครงสร้างของปูนเม็ดในรูป alite และ belite ไม่ได้แตกต่างไปจากปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักมากนัก โดยมีความสูงของพีคของโครงสร้าง alite สูงขึ้น สิ่งที่น่าสนใจที่ปรากฏในกราฟนี้ได้แก่ การเกิดโครงสร้างของ $MgNiO_2$ ในปูนเม็ด ซึ่งจะเห็นได้จากพีคที่เกิดขึ้นใหม่ที่ตำแหน่งมุม $2\theta = 43.2$ และ 62.6 องศา ในขณะที่เดียวกันมีลักษณะโครงสร้างของ NiO ที่เป็นรูปแบบของนิกเกิลเริ่มต้นที่เดิมเข้าไปในวัตถุดิบ ก่อนการผลิตปูนเม็ดยังเหลืออยู่ ซึ่งสังเกตได้จากพีคที่เกิดขึ้นใหม่ที่ตำแหน่งมุม $2\theta = 62.8$ และ 75.6 องศา ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่มีผู้ศึกษามาก่อนหน้านี้แล้ว (Stephan et al., 1999) โดยบอกแนวโน้มว่านิกเกิลจำนวนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับ MgO และเกิดฟอร์มในรูปของ $MgNiO_2$ ในกรณีที่มีการใช้ $MgCO_3$ เป็นส่วนหนึ่งของวัตถุดิบ และหาก Mg มีจำนวนน้อย นิกเกิลจะยังคงอยู่ในรูปเดิม NiO โดยพีคของ $MgNiO_2$ ปรากฏชัดเจนมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของนิกเกิลเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.13

ในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักเจือปนอยู่ เปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักอยู่ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 1300 เท่าในรูปที่ 4.14 จะพบว่าเมื่อนิกเกิลปนอยู่ในปูนเม็ด ลักษณะของปูนเม็ดที่ได้จะทำให้ phase ในรูปของ alite และ belite ที่เป็นแผ่นเล็กๆ บนพื้นผิวของปูนเม็ดซึ่งเป็น alite นั้น มีมากกว่าปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักอยู่ แต่เมื่อนำข้อมูลจากการวิเคราะห์ XRD มาพิจารณาประกอบจะพบว่า แม้รูปแบบของ alite และ belite ในลักษณะแผ่นเล็กๆ จะมากขึ้น แต่ไม่ได้ส่งผลในแง่ของการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของทั้ง alite และ belite เหล่านี้แต่อย่างใด



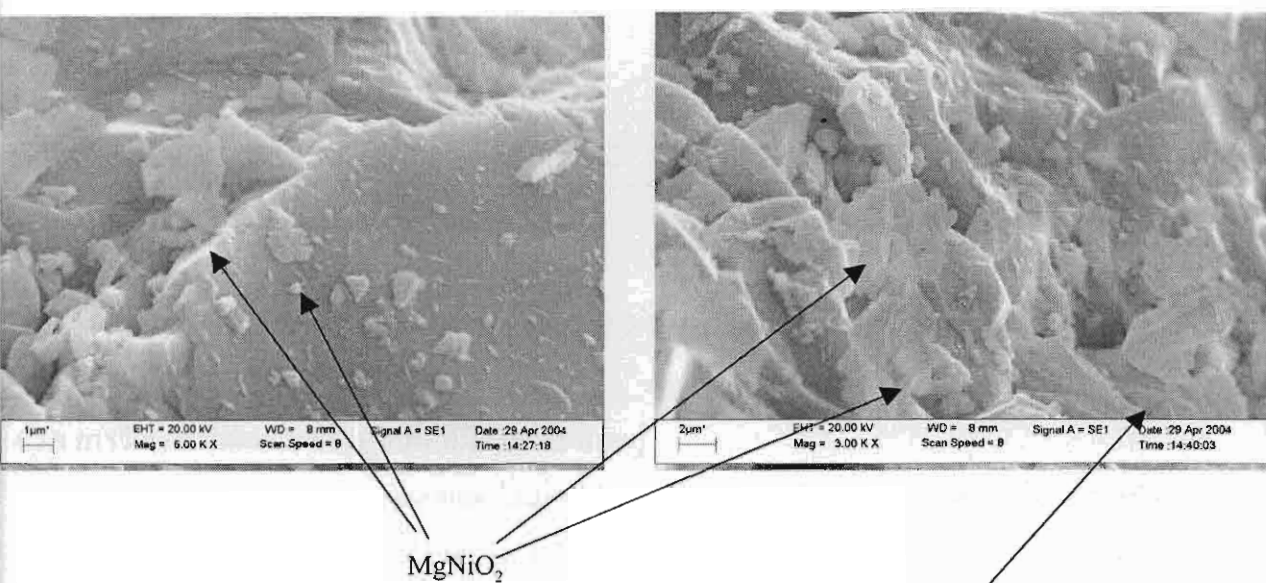
(ก) ปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก



(ข) ปูนเม็ดที่มีนิกเกิล 1% โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.14 ภาพแสดงลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่มีนิกเกิลเปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก ที่กำลังขยาย 1300 เท่า

เมื่อพิจารณาลักษณะของ phase ที่เกิดขึ้นของปูนเม็ดที่มีนิเกิลปนอยู่โดยละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 4.15 จะพบว่ารูปร่างของ phase ที่เกิดขึ้นมาใหม่เป็นลักษณะของแผ่นบางขนาดเล็กปะปนอยู่โดยมีลักษณะเทียบเคียงได้กับ phase ของ MgNiO_2 ซึ่งลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับข้อมูลของ XRD ที่พบพิคของสารประกอบนิเกิลในรูปของ MgNiO_2 เกิดขึ้น เช่นเดียวกัน โดยข้อมูลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีมาก่อนว่า นิเกิลมักจะรวมตัวกับแมกนีเซียมในรูปของ MgNiO_2 ซึ่งลักษณะนี้พบได้จากการวิเคราะห์ด้วย SEM ในทุกความเข้มข้นของนิเกิลจากค่าความเข้มข้นสูงไปจนค่าความเข้มข้นต่ำถึง 0.5% โดยน้ำหนัก

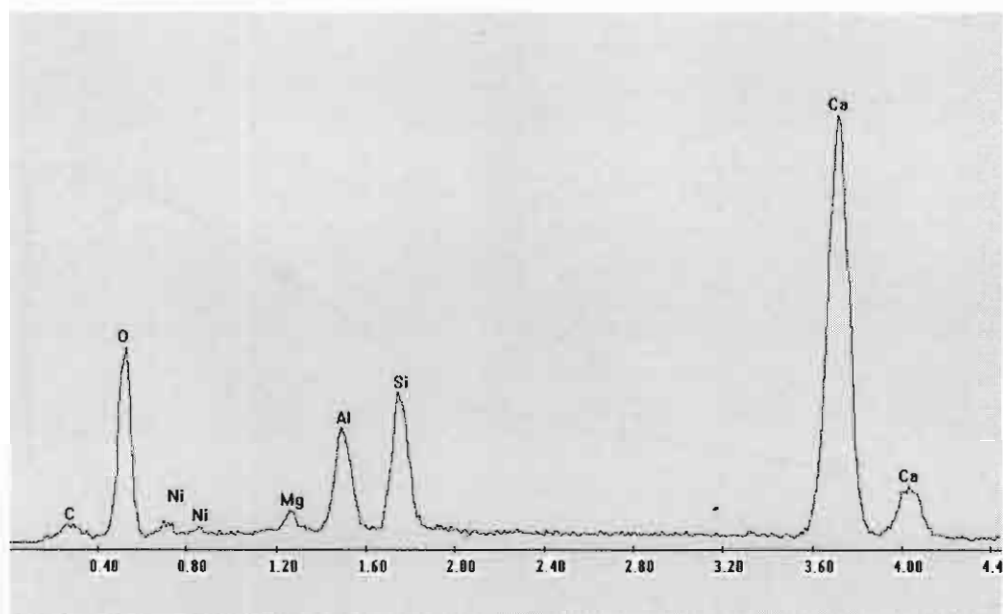


รูปที่ 4.15 ภาพของปูนเม็ดที่มีนิเกิลปนอยู่ โดยในรูปแสดงถึง phase ของ MgNiO_2 ที่กำลังขยาย 5000 และ 3000 เท่า

นอกจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และ SEM แล้ว ตัวอย่างของปูนเม็ดได้ถูกนำไปหาสัดส่วน ร้อยละที่ปรากฏอยู่ในปูนเม็ดด้วยเครื่อง Energy-Dispersive X-ray Spectrophotometer (EDS) โดยข้อมูลของปูนเม็ดที่มีนิเกิลปนอยู่นั้น แสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.16 ซึ่งแสดงให้เห็นสัดส่วนของนิเกิลที่มีอยู่ในปูนเม็ดเป็น 1% เมื่อเทียบกับธาตุอื่นๆ โดยรวม จากการวัดด้วย EDS จะพบว่านิเกิลจะอยู่ในรูปแบบของ MgNiO_2 เป็นหลัก โดยมีบางส่วนอยู่ใน alite และ belite ในปริมาณที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

ตารางที่ 4.5 ส่วนประกอบของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักนิเกิลผสมอยู่

ธาตุ	Wt %							
	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Ni	Total
ตัวอย่างที่ 1	9.38	44.94	1.61	3.55	8.23	31.21	1.09	100.00
ตัวอย่างที่ 2	9.42	44.75	1.57	0.94	12.97	29.46	0.89	100.00
ตัวอย่างที่ 3	9.66	38.89	0.71	0.75	15.04	33.54	1.41	100.00



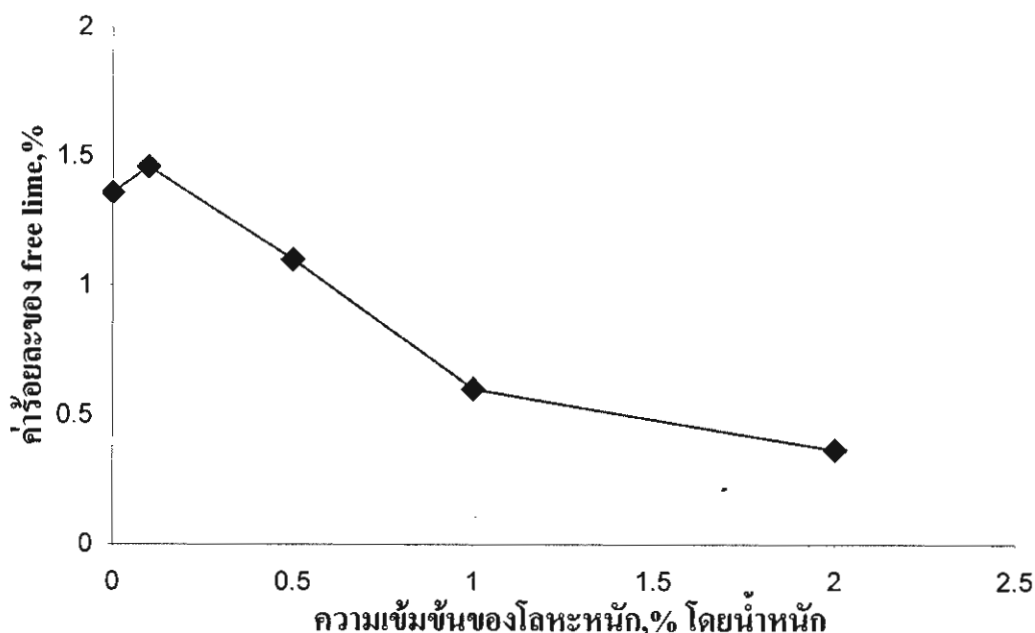
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงส่วนประกอบของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักนิกเกิลผสมอยู่

4.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะของปูนเม็ดที่มีสังกะสีผสมอยู่

ผลของการทดสอบ free lime ของปูนเม็ดที่มีสังกะสีผสมอยู่หลังจากการเผาแสดงใน ตารางที่ 4.6 และกราฟแสดงแนวโน้มในการเพิ่มหรือลดของ free lime ที่ความเข้มข้นของนิกเกิลในช่วง 0-2% แสดงในกราฟรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.6 ร้อยละของ free lime ของปูนเม็ดเมื่อมีสังกะสีปะปนอยู่ในค่าความเข้มข้น 0-2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

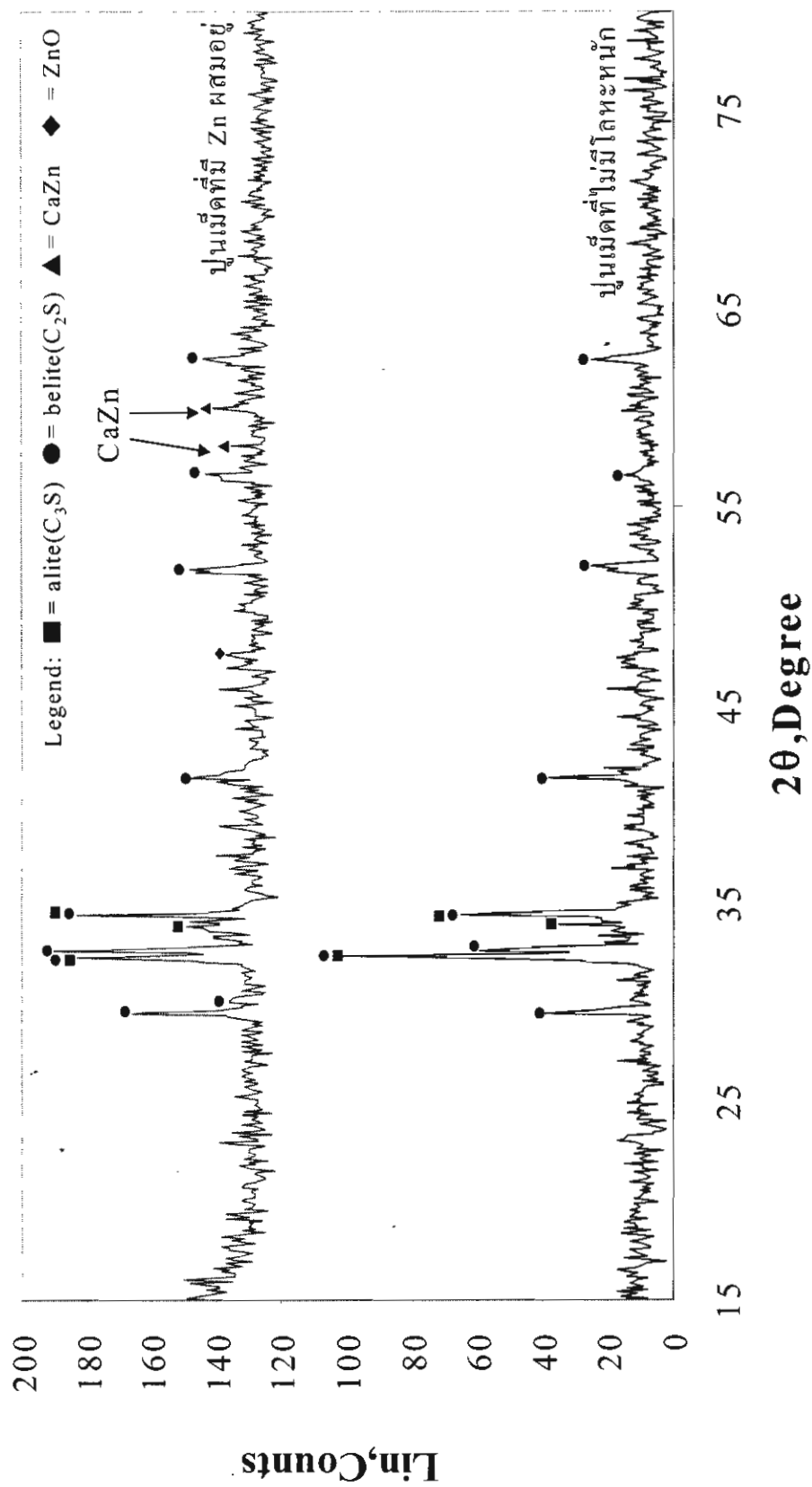
ชนิดของโลหะหนัก	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (% by weight)	ค่าเฉลี่ยของ ร้อยละ free lime (%)
สังกะสี (Zn)	0%	1.36%
	0.1%	1.46%
	0.5%	1.1%
	1.0%	0.6%
	2.0%	0.36%



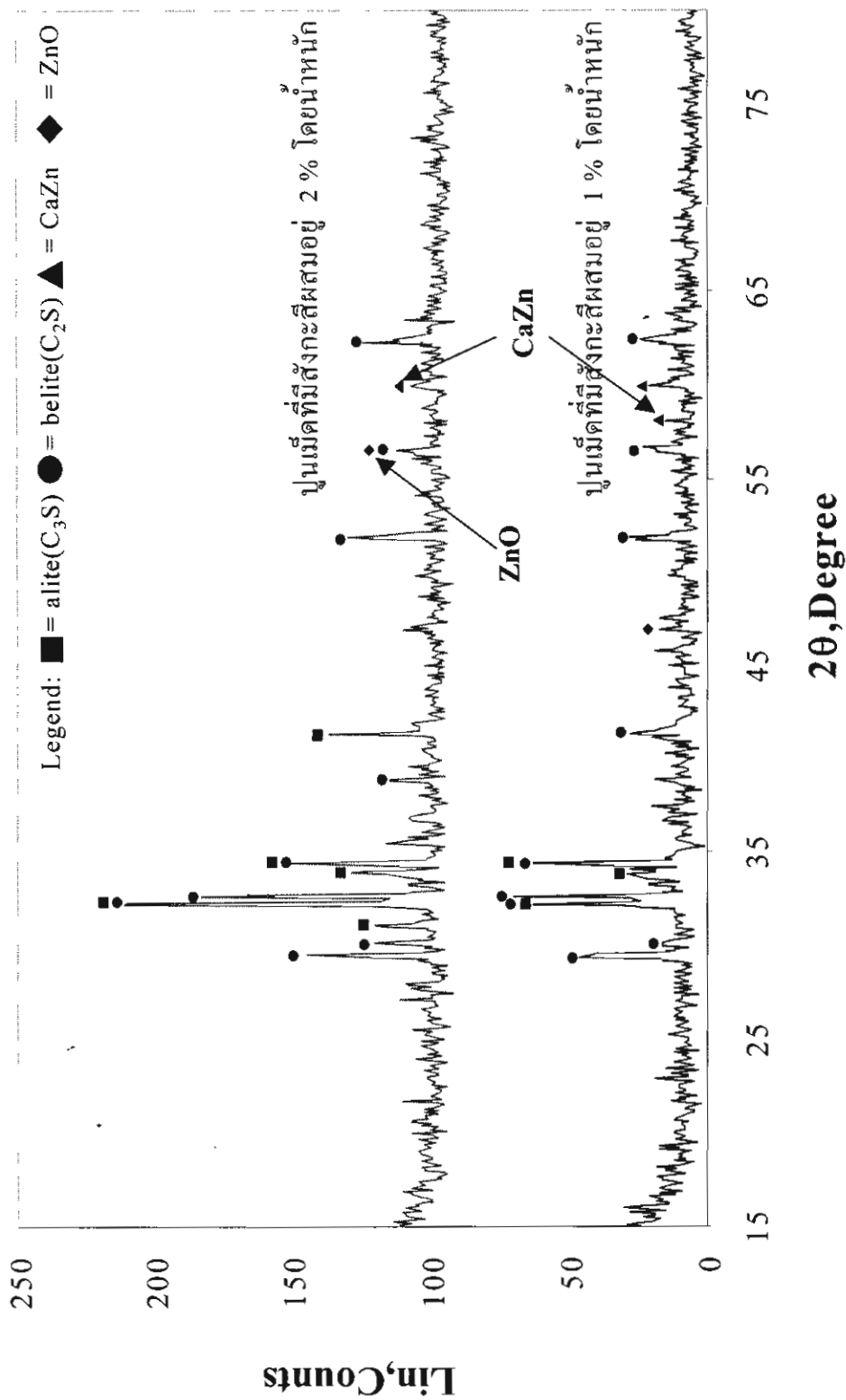
รูปที่ 4.17 กราฟแสดง free lime เมื่อความเข้มข้นของสังกะสีเริ่มต้นอยู่ในช่วง 0-2%

จากกราฟและค่า free lime พบว่าเมื่อมีสังกะสีปรากฏอยู่ในปูนเม็ดจะทำให้ค่า free lime ลดลงเมื่อเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักใดๆ ผสมอยู่ โดยพบว่าเมื่อมีสังกะสีความเข้มข้น 2.0% จะทำให้ปูนเม็ดมีค่า free lime ลดลงเป็น 0.36% และกราฟยังแสดงแนวโน้มในการลดลงของ free lime อย่างต่อเนื่องหากมีการเพิ่มความเข้มข้นของนิกเกิลมากขึ้น ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าการมีสังกะสีในปูนเม็ดได้ทำให้มีการนำ CaO ในการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างของปูนเม็ดมากขึ้นซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันกับของนิกเกิลที่ได้แสดงไว้ก่อนหน้านี้แล้ว โดยในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Andrade et al., 2003) ได้รายงานไว้ว่าสังกะสีจะแทรกเข้าไปในส่วนโครงสร้างของปูนเม็ดทั้งในส่วน of alite และ belite โดยในกรณีที่ปูนเม็ดที่มีความเข้มข้นของสังกะสีสูงๆ สังกะสีจะเข้าไปแทรกในเฟสโครงสร้างของปูนเม็ดในส่วน of alite มากกว่า belite และจะถูกกักขังอยู่ในโครงสร้างของปูน นอกจากนี้ในส่วนของการมีสังกะสีผสมในปูนเม็ดส่งผลให้เกิดลักษณะการเผาที่ดีขึ้นโดยมีค่า free lime ลดลงนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ เช่นเดียวกัน (Bordoloi et al., 1998) โดยหากเพิ่มอุณหภูมิในการเผามากขึ้น จะทำให้ลักษณะการเผาที่ดีนี้ลดลง

การวิเคราะห์โครงสร้างของสังกะสีด้วยเครื่อง XRD โดยเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างระหว่างปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและปูนเม็ดที่มีสังกะสีความเข้มข้น 1% แสดงในรูปที่ 4.18 และกราฟแสดงลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดเมื่อปูนเม็ดมีความเข้มข้นของสังกะสี 1% และ 2% แสดงในรูปที่ 4.19



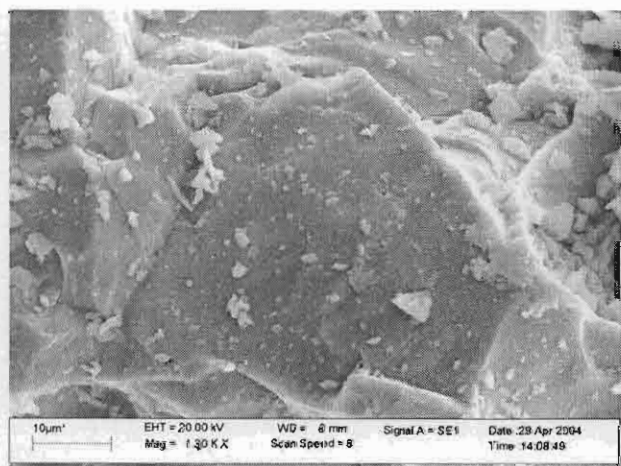
รูปที่ 4.18 แสดงผลของการวิเคราะห์ XRD ของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและปูนเม็ดที่มีสังกะสีผสมอยู่ด้วยความเข้มข้น 1%



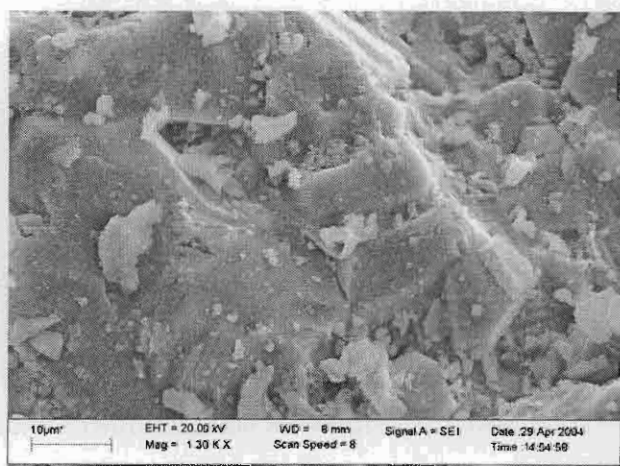
รูปที่ 4.19 แสดงผลของการวิเคราะห์ XRD ของปูนเม็ดที่มีสังกะสีผสมอยู่ด้วยความเข้มข้น 1% และ 2%

สำหรับโครงสร้างของสังกะสีในปูนเม็ดซึ่งวิเคราะห์โดยเครื่อง XRD ในรูปกราฟที่ 4.18 และ 4.19 โดยโครงสร้างหลักของปูนเม็ดที่มีสังกะสีเปลี่ยนแปลงจากปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักน้อยมาก โดยมีโครงสร้างของสารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่างแคลเซียมและสังกะสีปรากฏอยู่ ดังแสดงด้วยพีคที่เกิดขึ้นใหม่ที่ตำแหน่ง $2\theta = 58.2$ และ 60.0 องศา ในขณะที่มีพีคของ ZnO ซึ่งเป็นรูปแบบของสังกะสีเริ่มต้นในจำนวนน้อยมาก โดยแสดงที่ตำแหน่ง $2\theta = 47.5$ องศา การเกิดโครงสร้างของสังกะสีในปูนเม็ดนั้นได้มีการรายงานไว้บ้าง แต่ไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าอยู่ในรูปแบบใด จากงานวิจัยที่มีการศึกษามาแล้ว (Stephan et al., 1999) ได้กล่าวถึงผลของสังกะสีว่าที่ความเข้มข้นของสังกะสีสูงถึง 2.5% โดยน้ำหนัก สังกะสีจะส่งผลให้มีการเพิ่มมากขึ้นของ alite และทำให้ belite มีปริมาณลดลง

นอกจากผลของสังกะสีที่ต่อ alite และ belite แล้ว จากผลของการวิจัยพบว่าสังกะสียังได้ส่งผลต่อโครงสร้างเฟสอื่นๆ ของปูนเม็ด โดยแสดงให้เห็นชัดเจนจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM โดยรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่มีสังกะสีเจือปนอยู่ เปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักอยู่ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 1300 เท่า ซึ่งจะพบว่า เมื่อมีสังกะสีปนอยู่ ลักษณะพื้นผิวโดยรวมของปูนเม็ดจะมีข้อแตกต่างจากปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักเล็กน้อย กล่าวคือ ทำให้ phase ในรูปของ alite และ belite ที่เป็นแผ่นเล็กๆ บนพื้นผิวของปูนเม็ดซึ่งเป็น alite นั้น มีมากกว่าปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักอยู่ อย่างไรก็ตามหากวิเคราะห์โดยละเอียดด้วยเครื่อง SEM ที่มีกำลังขยาย 8000 เท่าดังแสดงในรูปที่ 4.21 จะพบว่าสังกะสีได้เข้าไปแทรกในส่วนองโครงสร้างของปูนเม็ดในส่วนที่เป็น aluminite อีกด้วย

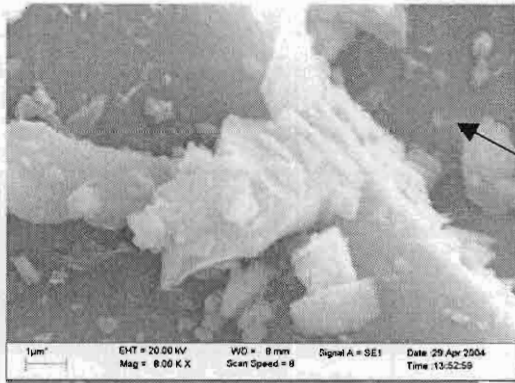


(ก) ปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก

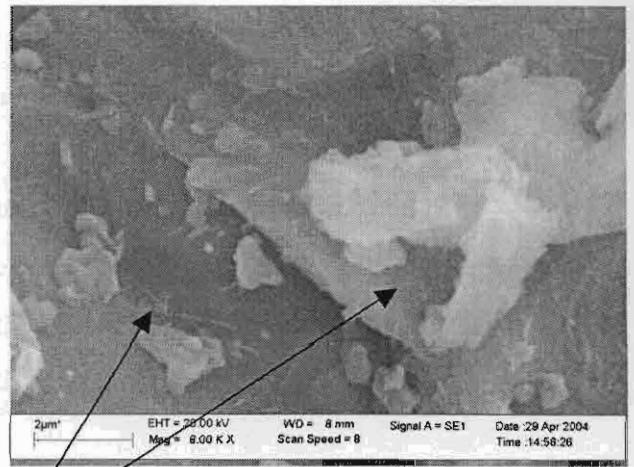


(ข) ปูนเม็ดที่มีสังกะสี 1% โดยน้ำหนัก

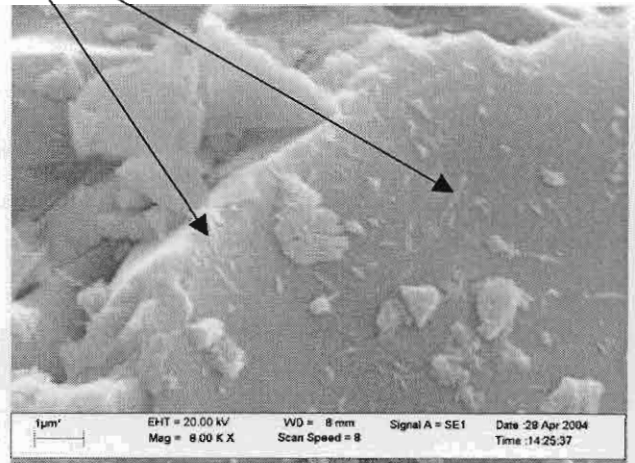
รูปที่ 4.20 ลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักเปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก
ที่กำลังขยาย 1300 เท่า



(ก) ปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักปนอยู่



(ข) ปูนเม็ดที่มีสังกะสีปนอยู่



(ค) ปูนเม็ดที่มีนิกเกิลปนอยู่

รูปที่ 4.21 ภาพแสดง aluminite phase ของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และที่มีนิกเกิลและสังกะสีปนอยู่
ที่กำลังขยาย 8000 เท่า

ในส่วนของผลของสังกะสีที่มีต่อ phase ของปูนเม็ดเมื่อเทียบกับ phase ที่เกิดขึ้นเมื่อไม่มีโลหะหนัก นั้น แสดงได้ในรูปที่ 4.21 โดยหากพิจารณาในภาพรวมจะพบว่า aluminite phase (C_3A) จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก จากงานวิจัยที่มีการศึกษามาก่อนหน้านี้ (Stephan et al., 1999) พบว่าสังกะสีมักจะปนอยู่ใน aluminite phase โดยเฉพาะในปูน Portland cement แต่ถ้าในปูนเม็ดไม่มี aluminite phase ปรากฏอยู่ สังกะสีจะปนอยู่ใน ferrite phase จากภาพที่ถ่ายจาก SEM ในงานวิจัยนี้ จึงคาดการณ์ว่าสังกะสีจะมีผลในแง่ของการเพิ่ม aluminite phase ให้มากขึ้น แต่อาจไม่ส่งผลต่อ alite และ belite phase ซึ่งจะเห็นจากค่าร้อยละของ free lime ที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

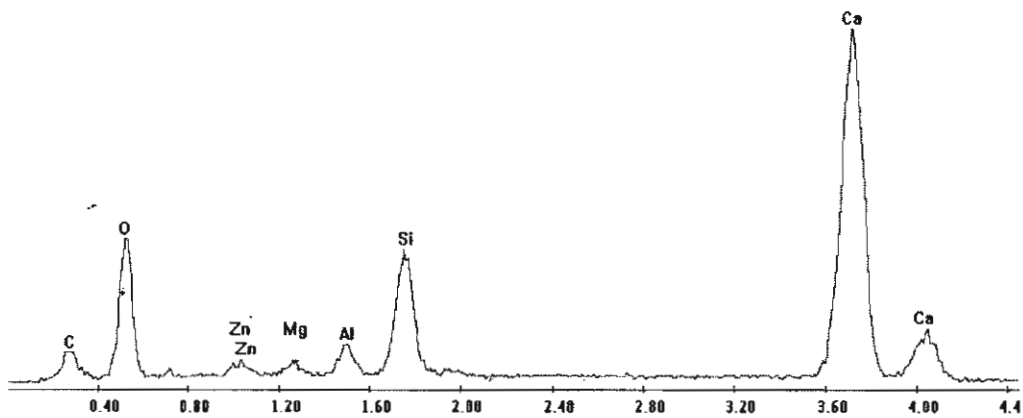
นอกจากสังกะสีแล้ว นิกเกิลเป็นโลหะหนักอีกชนิดหนึ่งที่เมื่อตรวจสอบจากภาพถ่ายด้วยเครื่อง SEM ในภาพรวมแล้ว พบว่าปูนเม็ดที่มีนิกเกิลนั้น มีปริมาณของ aluminite phase เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเช่นเดียวกัน

กับสังกะสี เมื่อเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักอยู่ โดยในงานวิจัยบางงานที่มีการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า ในปูนเม็ดที่มีนิเกิลอยู่นั้น มักจะพบนิเกิลในส่วนของ aluminite และ ferrite phase เป็นหลัก ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันกับสังกะสีที่เอามาแล้วข้างต้น

นอกจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และ SEM แล้ว ตัวอย่างของปูนเม็ดได้ถูกนำไปหาสัดส่วน ร้อยละที่ปรากฏอยู่ในปูนเม็ดด้วยเครื่อง Energy-Dispersive X-ray Spectrophotometer (EDS) โดยข้อมูลของปูนเม็ดที่มีสังกะสีปนอยู่นั้น แสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.22 ซึ่งแสดงให้เห็นสัดส่วนของสังกะสีที่มีอยู่ในปูนเม็ดเป็น 1% เมื่อเทียบกับธาตุอื่นๆ นอกจากนี้ยังพบว่า สังกะสีปรากฏอยู่ใน aliminite เฟสเป็นหลัก

ตารางที่ 4.7 ส่วนประกอบของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักสังกะสีผสมอยู่

ธาตุ	Wt %							
	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Zn	Total
ตัวอย่างที่ 1	13.57	40.42	1.15	2.04	7.90	31.51	3.41	100.00
ตัวอย่างที่ 2	11.63	42.25	1.15	2.85	9.18	29.93	3.01	100.00
ตัวอย่างที่ 3	16.41	40.25	0.90	0.80	10.37	29.43	1.84	100.00



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงส่วนประกอบของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักสังกะสีผสมอยู่

กล่าวโดยสรุปจากข้อมูลของการทดลองและการวิเคราะห์ทั้งหมดนี้ จะได้ข้อสรุปของการทดลองในส่วนของการเตรียมปูนเม็ดสำหรับการผลิตซีเมนต์เพื่อการทดสอบการชะล้างของโลหะหนัก ดังนี้

1) สภาพที่ใช้ในการเตรียมปูนเม็ดที่ทำให้ลักษณะของปูนเม็ดที่ได้จากการเตรียมปูนเม็ดจากห้องปฏิบัติการมีลักษณะใกล้เคียงกับลักษณะของปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตของโรงงาน คือ การเผาปูนเม็ดในเตาเผา (electric furnace) โดยมีการปรับอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส และเผาที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 90 นาที แล้วจึงทำให้ปูนเม็ดให้เย็นตัวลง

2) phase ของปูนเม็ดที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ มีลักษณะเหมือนกับ phase ของปูนเม็ดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตของโรงงาน โดยประกอบด้วย phase หลัก ได้แก่ alite (C_3S) belite (C_2S) aluminite (C_3A) และ ferrite (C_4AF) โดยข้อมูลของการเทียบเคียงลักษณะเหล่านี้ได้จากการตรวจสอบโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer และ Scanning Electron Microscopy

3) โลหะหนักที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ โครเมียม นิกเกิล และสังกะสีนั้น เมื่อเติมเข้าไปในวัตถุดิบพบว่าโลหะหนักเหล่านี้ได้เข้าไปทำปฏิกิริยากับวัตถุดิบ โดยบางชนิดได้ทำให้เกิดรูปร่างของสารประกอบชนิดใหม่ขึ้นมา เช่น การเกิด $MgNiO_2$ ในกรณีของการมีนิกเกิลอยู่ในปูนเม็ด การเกิด $CaZn$ ในกรณีของการมีสังกะสีอยู่ในปูนเม็ด เป็นต้น จึงทำให้คาดการณ์ได้ว่าหากนำปูนเม็ดที่มีโลหะหนักนี้ไปขึ้นรูปเป็นซีเมนต์ และไปเป็นผลิตภัณฑ์นั้น จะยังคงมีโลหะหนักตกค้างอยู่ ซึ่งกรณีที่เกิดในห้องปฏิบัติการนี้ สามารถนำไปเทียบเคียงกับการชะล้างที่เกิดขึ้นจริงได้

บทที่ 5

การชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์

5.1 การชะล้างโครเมียมจากซีเมนต์

5.1.1 การชะล้างโครเมียมด้วยวิธี Microwave-assisted leach method (3051 A)

การชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์ด้วยวิธีนี้ จะบอกถึงปริมาณของโลหะหนักทั้งหมดที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้ โดยจากพื้นฐานของปฏิกิริยาทางเคมีที่เมื่อมีการเติมโลหะหนักเข้าไปในวัตถุดิบของการผลิตปูนเม็ดและผ่านกระบวนการให้ความร้อน โลหะหนักจะทำปฏิกิริยากับวัตถุดิบและเกิดเป็นสารประกอบใหม่ หรือเข้าไปแทรกในโครงสร้างของ alite และ belite ซึ่งทำให้โลหะหนักบางส่วนจะถูกกักขังและไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้อีก ซึ่งเรียกว่าอยู่ในสถานะเสถียร (Stabilization) ในขณะที่โลหะหนักบางส่วนจะไม่ถูกกักขังในเมตริกซ์ของซีเมนต์ และสามารถถูกชะล้างออกมามุ่งภายนอกได้ ทั้งนี้ปริมาณในการถูกชะล้างนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะหนัก และสถานะที่ใช้ในการชะล้าง

ในการทดสอบด้วยวิธี Microwave-assisted leach method 3051 A นี้ เป็นการสกัดโลหะหนักจากซีเมนต์ด้วยกรดไนตริกเข้มข้นร่วมกับให้ความร้อนในการสกัด ซึ่งจะสามารถสกัดโลหะหนักที่ไม่ถูกกักขังในเมตริกซ์ซีเมนต์ให้ออกมาได้ โดยวิธีการนี้จะใช้ในการวัดถึงปริมาณของโลหะหนักทั้งหมดที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้ โดยการใช้กรดไนตริกเข้มข้นนี้จะไม่ใช่การจำลองสถานะที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติ แต่เป็นการสกัดโดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีเป็นหลักเพื่อให้ได้ปริมาณของโลหะหนักทั้งหมด

ผลของการสกัดโครเมียมด้วยวิธีนี้ แสดงในตารางที่ 5.1 โดยในการทดลองนี้ได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง ซึ่งได้ค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 ครั้ง โดยปริมาณโครเมียมเริ่มต้นที่มีในปูนเม็ดจะแตกต่างกัน คือ 0.1%, 0.5%, 1% และ 2% ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 ผลของการชะล้างโครเมียมด้วยวิธี Microwave-assisted leach method 3051 A

โลหะหนัก	ความเข้มข้นเริ่มต้น, %โดยน้ำหนัก	ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้าง(มก./กก.)			
		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
โครเมียม	0	0	0	0	0
	0.1	310	324	318	317.3
	0.5	1487	1568	1539	1531.3
	1	3565	3547	3542	3551.3
	2	6135	6274	6217	6208.67

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ปริมาณโครเมียมที่สามารถถูกสกัดออกมาได้จากซีเมนต์คิดเป็น ค่าเฉลี่ยประมาณ 30-35% ของปริมาณโครเมียมเริ่มต้นที่มีอยู่ในปูนเม็ด โดยส่วนใหญ่จะยังถูกกักขังอยู่ในโครงสร้างของซีเมนต์ ทั้งนี้จากการศึกษาในส่วนของโครงสร้างของซีเมนต์เมื่อมีโลหะหนักปนอยู่ในบทที่ 4 นั้นพบว่าโครเมียมได้เข้าไปแทรกอยู่ในโครงสร้างของ belite เป็นหลัก โดยมีบางส่วนปนอยู่ใน alite และพบโครเมียมจำนวนมากอยู่ในรูปของ K_2CrO_4 ซึ่งจากการเข้าไปเป็นส่วนประกอบของปูนเม็ดนี้เอง ทำให้โครเมียมส่วนใหญ่จะถูกกักขังอยู่ในเมตริกซ์ของซีเมนต์ เป็นหลัก

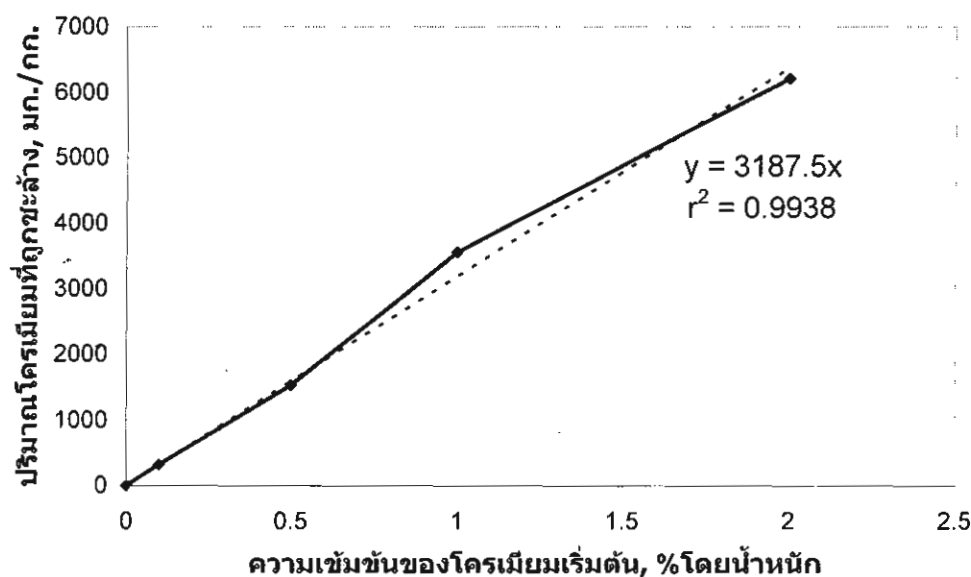
เมื่อพิจารณาถึงปริมาณของโครเมียมที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้พบว่า เมื่อปริมาณของโครเมียมในปูนเม็ดมากขึ้น ปริมาณของโครเมียมที่สกัดได้มากขึ้นตามไปด้วย โดยปริมาณของโครเมียมที่สกัดได้โดยเฉลี่ยนั้นแสดงในรูปที่ 5.1 โดยปริมาณโครเมียมที่สกัดได้มีความสัมพันธ์กับปริมาณโครเมียมเริ่มต้นในปูนเม็ดในลักษณะของสมการเส้นตรงโดยมีสมการดังนี้

$$y = 3187.5(x) \quad (5.1)$$

โดยที่ y = ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะล้าง, มก./กก.

x = ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น, % โดยน้ำหนัก

สมการดังกล่าวสามารถใช้ในการทำนายปริมาณของโครเมียมที่สกัดด้วยกรดไนตริกได้เมื่อปริมาณโครเมียมเริ่มต้นในปูนเม็ดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยของโครเมียมจากการชะล้างด้วยวิธี Microwave-assisted leach method 3051 A

5.1.2 การชะล้างโครเมียมด้วยวิธี Availability Leaching Test (NEN 7341)

การชะล้างด้วยวิธี Availability Leaching Test เป็นวิธีการที่ถูกพัฒนาขึ้นและบรรจุอยู่ในมาตรฐานของประเทศเนเธอร์แลนด์ เพื่อใช้ในการหาปริมาณของโลหะหนักที่มากที่สุดที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้ในสิ่งแวดล้อมในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่เอื้อให้เกิดการชะล้าง วิธีการนี้จึงเป็นวิธีการที่แพร่หลายมากในการหาค่าการชะล้างของโลหะหนัก

ผลของการชะล้างโครเมียมจากซีเมนต์ด้วยวิธีการนี้ แสดงผลเปรียบเทียบกับปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีในปูนเม็ด และปริมาณโครเมียมที่ได้จาก Microwave-assisted leach method 3051A โดยในการทดลองนี้ได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง ผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลของการชะล้างโครเมียมด้วยวิธี Availability Leaching Test NEN 7341

(ความเข้มข้นในหน่วย มก./กก.)

โลหะหนัก	ความเข้มข้นเริ่มต้น, %โดยน้ำหนัก	ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้าง (มก./กก.)			
		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
โครเมียม	0	0	0	0	0
	0.1	270	280	252	267.4
	0.5	1376	1362	1368	1368.6
	1	3294	3145	3278	3239
	2	5256	5408	5230	5298

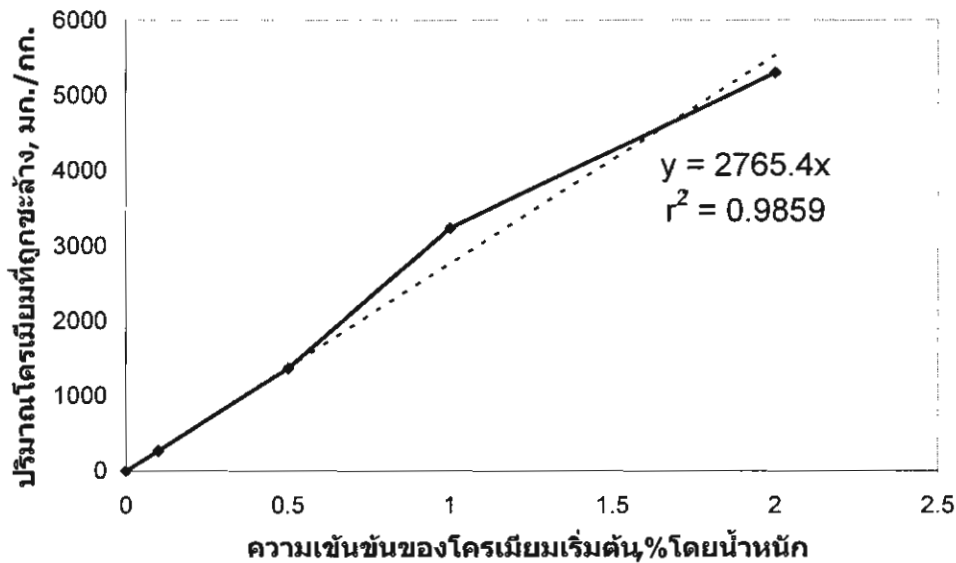
จากค่าเปรียบเทียบของโครเมียมที่สามารถชะล้างออกมาได้มากที่สุดด้วยวิธี Availability Leaching Test NEN 7341 กับโครเมียมที่สกัดได้จากวิธี Microwave-assisted leach method 3051 A จะเห็นว่า โครเมียมที่ถูกชะล้างได้นั้นคิดเป็นร้อยละ 84-91 เมื่อเทียบกับโครเมียมทั้งหมดที่สกัดได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครเมียมมีแนวโน้มที่จะถูกชะล้างออกมาสู่ภายนอกเมตริกซ์ซีเมนต์ได้ง่าย ทั้งนี้เนื่องจากโครเมียมที่ถูกชะล้างออกมาเป็นโครเมียมในรูปของประจุ +6 ซึ่งอาจมาจากโครเมียมจากสารประกอบในรูปของ K_2CrO_4 ที่ตรวจพบด้วยเครื่อง XRD ดังแสดงรายละเอียดในบทที่ 4 โดยโครเมียมในรูปประจุ +6 นั้นจะมีลักษณะที่ไม่เสถียร และพร้อมที่จะถูกชะล้างออกมาจากเมตริกซ์ของซีเมนต์ได้ง่าย

กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของโครเมียมที่ได้จาก Availability leaching test แสดงในรูปที่ 5.2 โดยปริมาณโครเมียมที่ถูกชะล้างด้วยวิธี Availability Leaching Test NEN 7341 นี้มีความสัมพันธ์กับปริมาณโครเมียมเริ่มต้นในปูนเม็ดในลักษณะของสมการเส้นตรงโดยมีสมการดังนี้

$$y = 2765.4 (x) \quad (5.2)$$

โดยที่ y = ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะล้างได้, มก./กก.
 x = ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น, % โดยน้ำหนัก

สมการดังกล่าวสามารถใช้ในการทำนายปริมาณของโครเมียมมากที่สุดที่ชะล้างออกมาได้เมื่อปริมาณโครเมียมเริ่มต้นในปูนเม็ดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.2 ค่าเฉลี่ยของโครเมียมจากการชะล้างด้วยวิธี Availability Leaching Test NEN 7341

5.1.3 การชะล้างโครเมียมด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

วิธีการนี้เป็นวิธีการมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับอย่างมาก ในการนำมาชะล้างโลหะหนักออกจากซีเมนต์ ทั้งในส่วนของซีเมนต์ที่เป็นปูนเม็ดและซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการ Solidification/stabilization เพื่อใช้ในการทดสอบว่าหากนำวัสดุหรือซีเมนต์นั้นไปฝังในหลุมฝังกลบและถูกชะล้างโลหะหนักในเมตริกซ์ของซีเมนต์จะถูกชะล้างมากน้อยเพียงใด เมื่อเทียบกับมาตรฐานของ US.EPA โดยหากค่าที่ได้สูงกว่ามาตรฐาน วัสดุหรือซีเมนต์นั้นจะถูกจัดว่าเป็นของเสียอันตรายซึ่งต้องนำไปกำจัดอย่างถูกต้อง ซึ่ง หมายความว่าไม่ควรนำวัสดุนั้นๆ มาใช้งาน

ในการทดสอบการชะล้างโครเมียมด้วยวิธี TCLP แสดงผลดังตารางที่ 5.3 โดยในการทดลองนี้ได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณของโครเมียมเริ่มต้นเป็น 0.1% หรือ 1,000 มก./กก. ค่าของการชะล้างโครเมียมจะอยู่ในมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ผล TCLP ของ US.EPA และอยู่ในมาตรฐานของการวิเคราะห์ผล TCLP ของประเทศไทย คือมีค่าต่ำกว่า 5 มก./ลิตร ในขณะที่เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นโดยมีค่าปริมาณโครเมียมเริ่มต้นมากกว่า 0.1% ค่าการชะล้างโครเมียมจะสูงขึ้นตามลำดับและไม่อยู่ในมาตรฐาน

ตารางที่ 5.3 ผลของการชะล้างโครเมียมด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)
(ความเข้มข้นในหน่วย มก./ล.)

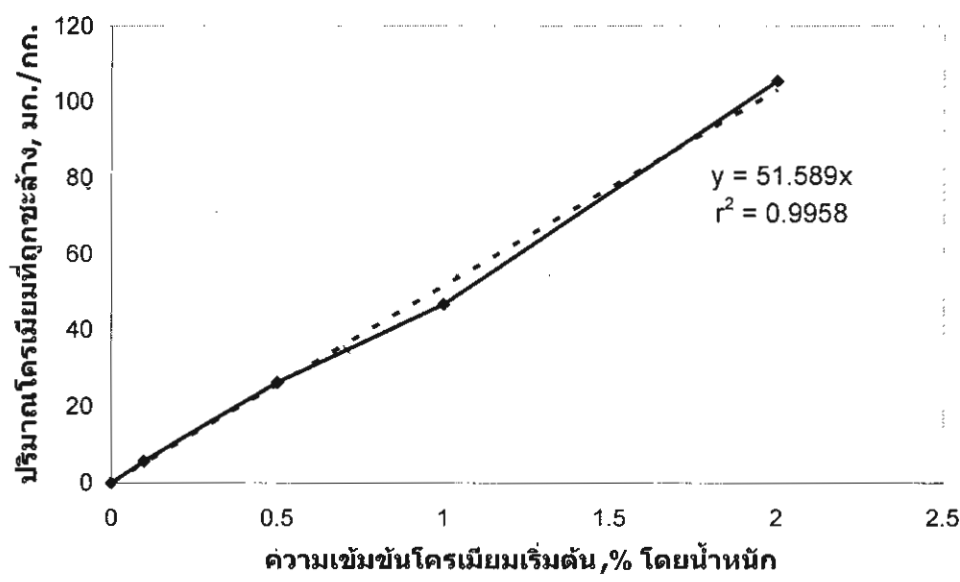
โลหะหนัก	ความเข้มข้นเริ่มต้น, %โดยน้ำหนัก	ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้าง (มก./กก.)			
		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
โครเมียม	0	0	0	0	0
	0.1	5.76	5.61	5.66	5.67
	0.5	25.9	25.98	27.16	26.34
	1	45.67	46.44	47.88	46.6
	2	102.5	106.84	107.1	105.48

กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของโครเมียมที่ได้จาก TCLP แสดงในรูปที่ 5.3 โดยปริมาณโครเมียมที่ถูกชะล้างด้วยวิธี TCLP นี้มีความสัมพันธ์กับปริมาณโครเมียมเริ่มต้นในปูนเม็ดในลักษณะของสมการเส้นตรงโดยมีสมการดังนี้

$$y = 51.589 (x) \tag{5.3}$$

โดยที่ y = ปริมาณโครเมียมที่ถูกชะล้างได้, มก./ลิตร
 x = ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น, % โดยน้ำหนัก

สมการดังกล่าวสามารถใช้ในการทำนายปริมาณของโครเมียมมากที่สุดที่ชะล้างออกมาได้เมื่อปริมาณโครเมียมเริ่มต้นในปูนเม็ดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.3 ค่าเฉลี่ยของการชะล้างโครเมียมด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

5.1.4 การชะล้างโครเมียมด้วยวิธี pH static leach test

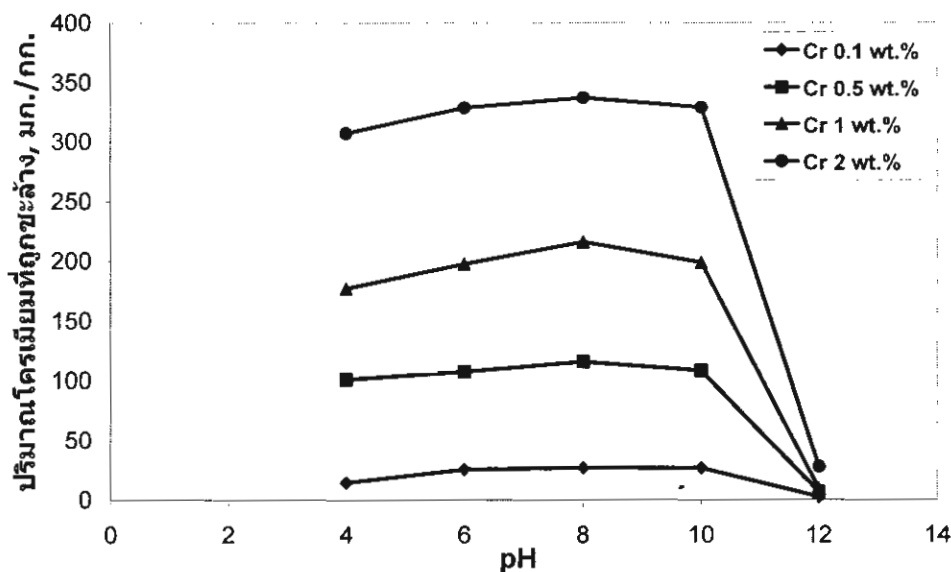
วิธีการทดสอบนี้เป็นวิธีการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมการชะล้างของโลหะหนักจากปูนซีเมนต์ เมื่อปูนซีเมนต์นั้นถูกใช้และมีการสัมผัสกับน้ำที่มีค่าความเป็นกรดหรือด่างที่มีค่าต่างๆ แล้วนั้น โลหะหนักที่มีอยู่ในซีเมนต์จะมีการชะล้างออกมาได้มากน้อยเพียงไร วิธีการนี้เป็นที่แพร่หลายมากในการใช้ทดสอบการชะล้างโลหะหนักเมื่อมีการสัมผัสกับน้ำที่มีค่าความเป็นกรดหรือด่างที่มีค่าต่างๆกัน

ผลของการสกัดโครเมียมด้วยวิธีนี้ แสดงในตารางที่ 5.4 โดยในการทดลองนี้ได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง ซึ่งได้ค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 ครั้ง โดยปริมาณโครเมียมเริ่มต้นที่มีในปูนเม็ดจะแตกต่างกัน คือ 0.1%, 0.5%, 1% และ 2% ตามลำดับ และแสดงผลในกราฟรูปที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลการชะล้างโครเมียมด้วยวิธี pH static leach test

โลหะหนัก	ความเข้มข้นเริ่มต้น, % โดยน้ำหนัก	ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้าง (มก./กก.)				
		pH 4	pH 6	pH 8	pH 10	pH 12
โครเมียม	0	0	0	0	0	0
	0.1	144.2	254.4	268.6	266	24.2
	0.5	1007.2	1072.2	1154.4	1079.6	64
	1	1769	1974	2158	1984.5	91.2
	2	3070	3285.5	3370.5	3287	278

จากผลการทดลองดังแสดงในรูป 5.4 จะพบว่าในช่วง pH 4-10 นั้น มีผลต่อการชะล้างโครเมียมน้อยมาก โดยพิจารณาจากค่าความเข้มข้นของโครเมียมที่ถูกชะล้างออกมานั้นพบว่ามีความแตกต่างกันไม่มากนัก และเมื่อพิจารณาเทียบกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมนั้น จะพบว่าโครเมียมที่ถูกชะล้างออกมาในช่วง pH 4-10 นั้นคิดเป็นร้อยละ 17-20 ของความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม แสดงให้เห็นว่า หากนำซีเมนต์ที่มีโครเมียมปนอยู่ไปใช้งานที่มีการสัมผัสกับน้ำที่มีสภาวะความเป็นกรดหรือด่างต่างๆนั้น โครเมียมจะถูกชะล้างออกมาประมาณร้อยละ 20 ของความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม และที่ pH 12 พบว่า โครเมียมที่ถูกชะล้างออกมานั้นมีค่าต่ำมาก ซึ่งอาจมาจากเหตุผลที่ว่าสารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่ K_2CrO_4 ที่พบจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ในส่วนของการศึกษาโครงสร้างของปูนเม็ดที่มีโครเมียมปนอยู่นั้น สามารถถูกชะล้างออกมาได้ดีที่น้ำชะล้างมีค่า pH ที่มีความเป็นกรดอ่อนๆหรือเป็นกลาง ในขณะที่น้ำชะล้างมีค่าความเป็นด่างนั้นความสามารถในการชะล้างนั้นจะลดลง(van der Sloot, 2000; Serclerat et al., 2000; Wang and Vipulanandan, 2000)



รูปที่ 5.4 ค่าเฉลี่ยของโครเมียมจากการชะล้างด้วยวิธี pH static leach test

5.2 การชะล้างนิกเกิลจากซีเมนต์

5.2.1 การชะล้างนิกเกิลด้วยวิธี Microwave-assisted leach method (3051 A)

ผลของการสกัดนิกเกิลด้วยวิธีนี้ แสดงในตารางที่ 5.5 โดยในการทดลองนี้ได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง โดยปริมาณนิกเกิลเริ่มต้นที่มีในปูนเม็ดจะแตกต่างกัน คือ 0.1%, 0.5%, 1% และ 2% ตามลำดับ

ตารางที่ 5.5 ผลของการชะล้างนิกเกิลด้วยวิธี Microwave-assisted leach method 3051 A

โลหะหนัก	ความเข้มข้นเริ่มต้น, %โดยน้ำหนัก	ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้าง (มก./กก.)			
		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
นิกเกิล	0	0	0	0	0
	0.1	241	212	224	225.67
	0.5	900	880	800	860
	1	2410	2520	2360	2430
	2	4860	4060	4500	4473.3

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ปริมาณนิกเกิลที่สามารถถูกสกัดออกมาได้จากซีเมนต์คิดเป็นค่าเฉลี่ยประมาณ 17-24% ของปริมาณนิกเกิลเริ่มต้นที่มีอยู่ในปูนเม็ด โดยส่วนใหญ่จะยังถูกกักขังอยู่ในโครงสร้างของซีเมนต์ ทั้งนี้จากการศึกษาในส่วนของโครงสร้างของซีเมนต์เมื่อมีโลหะหนักปนอยู่ในบดที่ 4 นั้นพบว่านิกเกิลจะรวมตัวกับแมกนีเซียมในรูปของ $MgNiO_2$ เป็นหลัก โดยมีบางส่วนอยู่ใน alite และ belite ในปริมาณที่ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยจากรายงานที่มีผู้ศึกษามาก่อนพบว่า นิกเกิลจะแทรกอยู่ใน alite ในรูป

แบบของ monoclinic (Barros et al., 2004) โดยหากพิจารณาถึงนิกเกิลที่สามารถสกัดออกมาได้แล้ว จะเห็นได้ว่านิกเกิลจะเกิดปฏิกิริยาได้ดี และเกิดเป็นผลึกที่ชัดเจน ส่งผลให้นิกเกิลส่วนใหญ่จะอยู่ในเมตริกซ์ของซีเมนต์ และส่วนน้อยที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลของการชะล้างที่ได้จากงานวิจัยนี้

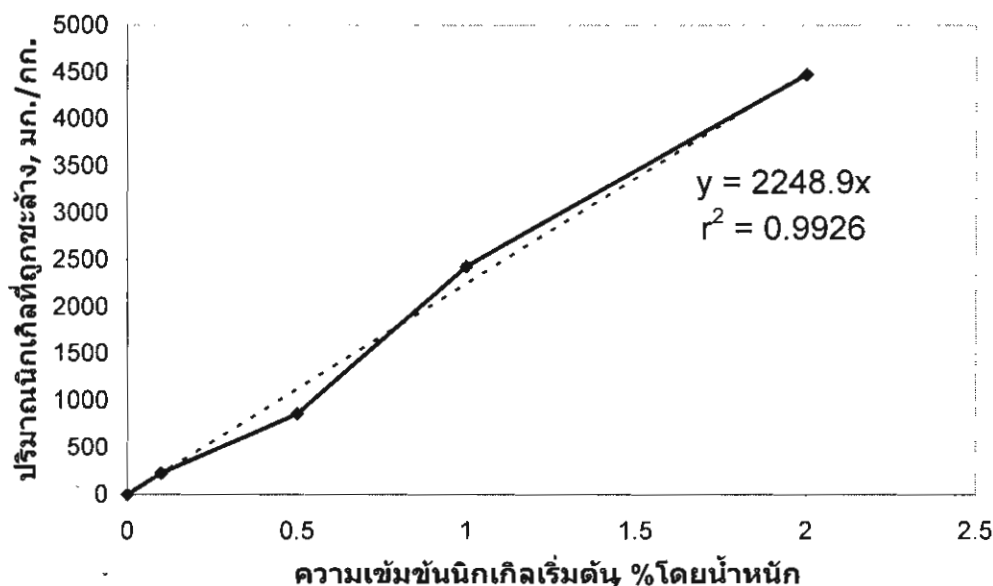
เมื่อพิจารณาถึงปริมาณของนิกเกิลที่สามารถถูกชะล้างออกมาได้พบว่า เมื่อปริมาณของนิกเกิลในปูนเม็ดมากขึ้น ปริมาณของนิกเกิลที่สกัดได้มากขึ้นตามไปด้วย โดยปริมาณของนิกเกิลที่สกัดได้โดยเฉลี่ยนั้นแสดงในรูปที่ 5.5 โดยปริมาณนิกเกิลที่สกัดได้มีความสัมพันธ์กับปริมาณนิกเกิลเริ่มต้นในปูนเม็ดในลักษณะของสมการเส้นตรงโดยมีสมการดังนี้

$$y = 2248.9 (x) \quad (5.4)$$

โดยที่ y = ปริมาณนิกเกิลที่ถูกชะล้างได้, มก./กก.

x = ความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้น, % โดยน้ำหนัก

สมการดังกล่าวสามารถใช้ในการทำนายปริมาณของนิกเกิลที่สกัดด้วยกรดไนตริกได้เมื่อปริมาณนิกเกิลเริ่มต้นในปูนเม็ดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.5 ค่าเฉลี่ยของนิกเกิลจากการชะล้างด้วยวิธี Microwave-assisted leach method 3051 A

5.2.2 การชะล้างนิกเกิลด้วยวิธี Availability Leaching Test (NEN 7341)

ผลของการชะล้างนิกเกิลจากซีเมนต์ด้วยวิธีการนี้ แสดงผลเปรียบเทียบกับปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีในปูนเม็ด และปริมาณนิกเกิลที่ได้จาก Microwave-assisted leach method 3051A โดยในการทดลองนี้ ได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง ผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ผลของการชะล้างนิกเกิลด้วยวิธี Availability Leaching Test NEN 7341 (ความเข้มข้นในหน่วย มก./กก.)

โลหะหนัก	ความเข้มข้นเริ่มต้น, %โดยน้ำหนัก	ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้าง (มก./กก.)			
		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
นิกเกิล	0	0	0	0	0
	0.1	3.62	9.52	6.84	6.66
	0.5	26	88	48	61
	1	44	130	92	146.7
	2	64	166	128	311.5

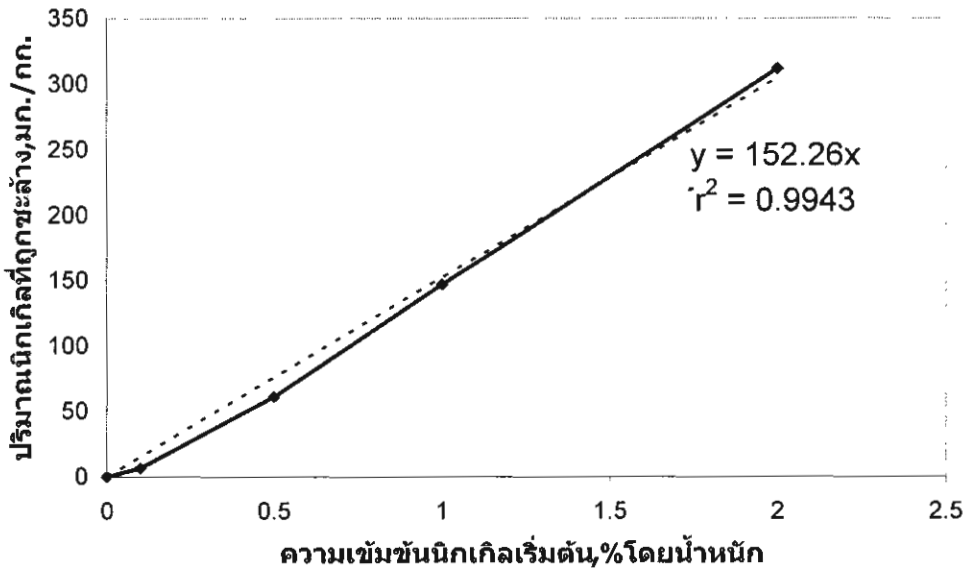
จากค่าเปรียบเทียบของนิกเกิลที่สามารถชะล้างออกมาได้มากที่สุดด้วยวิธี Availability Leaching Test NEN 7341 กับนิกเกิลที่สกัดได้จากวิธี Microwave-assisted leach method 3051 A จะเห็นว่า นิกเกิลที่ถูกชะล้างได้นั้นคิดเป็นร้อยละ 3-7 เมื่อเทียบกับนิกเกิลทั้งหมดที่สกัดได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่านิกเกิลมีแนวโน้มที่จะถูกชะล้างออกมาสู่ภายนอกเมตริกซ์ซีเมนต์ได้น้อยมาก จากการศึกษาถึงโครงสร้างของปูนเม็ดเมื่อนิกเกิลปนอยู่ในบดที่ 4 จะเห็นได้ว่านิกเกิลได้เข้าไปทำปฏิกิริยากับวัตถุดิบ โดยพบว่ามีสารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่จากการทำปฏิกิริยาของ Mg และ Ni ทำให้เกิดสารประกอบ $MgNiO_2$ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ด้วยทั้งเครื่อง XRD และ SEM นอกจากนี้ยังพบว่านิกเกิลยังแทรกอยู่ในโครงสร้างของ alite และ belite ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Stephan et al., 1999(a) และ Ract et al., 2003 โดยพบว่านิกเกิลในซีเมนต์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ $MgNiO_2$ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิด $MgNiO_2$ ซึ่งมีการรายงานไว้ว่าอยู่ในรูปของไฮดรต หรืออิมตัวด้วยน้ำ จึงจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำอีก ซึ่งทำให้การชะล้างของนิกเกิลออกมาได้น้อยมาก

กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของนิกเกิลที่ได้จาก Availability leaching test แสดงในรูปที่ 5.6 โดยปริมาณนิกเกิลที่ถูกชะล้างด้วยวิธี Availability Leaching Test NEN 7341 นี้มีความสัมพันธ์กับปริมาณนิกเกิลเริ่มต้นในปูนเม็ดในลักษณะของสมการเส้นตรงโดยมีสมการดังนี้

$$y = 152.26 (x) \tag{5.5}$$

โดยที่ y = ปริมาณนิกเกิลที่ถูกชะล้างได้, มก./กก.
 x = ความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้น, % โดยน้ำหนัก

สมการดังกล่าวสามารถใช้ในการทำนายปริมาณของนิกเกิลมากที่สุดที่ชะล้างออกมาได้เมื่อปริมาณนิกเกิลเริ่มต้นในปูนเม็ดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.6 ค่าเฉลี่ยของนิกเกิลจากการชะล้างด้วยวิธี Availability Leaching Test NEN 7341

5.2.3 การชะล้างนิกเกิลด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

ในการทดสอบการชะล้างนิกเกิลด้วยวิธี TCLP เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลที่มีอยู่ในปูนเม็ดเป็น 0.1%, 0.5%, 1% และ 2% โดยในการทดลองนี้ได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง ซึ่งพบว่าค่าของนิกเกิลที่ได้จากการทดลองทุกค่า จากทุกสภาวะมีค่าต่ำมาก จนไม่สามารถวัดได้ด้วยเครื่อง ICP โดยค่า ICP ที่ใช้มีค่า detection limit เป็น 0.05 มก./ล. ซึ่งทำให้ค่าของการชะล้างนิกเกิลในช่วงที่ทำการศึกษานี้อยู่ในมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ผล TCLP ของ US.EPA ในขณะที่ประเทศไทยยังไม่มีกำหนดค่า TCLP ของนิกเกิลไว้

อนึ่ง ในส่วนของนิกเกิลที่มีพฤติกรรมการชะล้างที่แตกต่างไปจากโครเมียม โดยหากเปรียบเทียบจะเห็นว่าโครเมียมนั้นมีแนวโน้มถูกชะล้างออกมาจากเมตริกซ์ของซีเมนต์ได้โดยง่าย ในขณะที่นิกเกิลนั้นจะถูกกักขังไว้ในเมตริกซ์ของซีเมนต์อย่างเหนียวแน่นจนยากต่อการชะล้างนั้น ทั้งนี้โครงสร้างของเฟสของซีเมนต์ที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะหนักกับซีเมนต์สามารถแสดงถึงคำอธิบายได้ โดยโครเมียมส่วนใหญ่จะไปแทรกอยู่ใน belite เป็นหลัก และมีปะปนอยู่ใน alite โดยโครเมียมส่วนใหญ่ไม่ได้ก่อให้เกิดส่วนประกอบใหม่ขึ้นมา ทำให้โอกาสในการชะล้างนั้นมีสูง ซึ่งแตกต่างจากนิกเกิล โดยนิกเกิลส่วนใหญ่ได้ทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมจนได้ $MgNiO_2$ และเกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่เห็นได้ชัดเจน นอกจากนี้ $MgNiO_2$ ที่ได้อยู่ในรูป

ของ hydrated form ซึ่งอิมิตด้วยน้ำ (Stephan et al., 1999(a) และ Ract et al., 2003) ซึ่งยากแก่การถูกชะล้าง จึงทำให้ผลของการชะล้างด้วยกรดอะซิติก ซึ่งเป็นกรดอ่อนนั้นในการทดสอบ TCLP นั้น ไม่ส่งผลให้นิกเกิลแตกตัวออกมาจากสารประกอบของ $MgNiO_2$ ได้

5.2.4 การชะล้างนิกเกิลด้วยวิธี pH static leach test

ผลของการสกัดนิกเกิลด้วยวิธีนี้ แสดงในตารางที่ 5.7 โดยในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองที่ค่า pH 4, 6, 8, 10 และ 12 โดยปริมาณนิกเกิลเริ่มต้นที่มีในปูนเม็ดจะแตกต่างกัน คือ 0.1%, 0.5%, 1% และ 2% ตามลำดับ

ตารางที่ 5.7 ผลของการชะล้างนิกเกิลด้วยวิธี pH static leach test

โลหะหนัก	ความเข้มข้นเริ่มต้น, % โดยน้ำหนัก	ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้าง (มก./กก.)				
		pH 4	pH 6	pH 8	pH 10	pH 12
นิกเกิล	0	0	0	0	0	0
	0.1	32.84	21.81	6.82	0.32	0.25
	0.5	37.56	26.72	9.61	0.35	0.26
	1	83.3	37.21	7.8	0.3	0.28
	2	165.4	72.47	17.02	0.33	0.3

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.7 พบว่าที่ pH 4 นั้น นิกเกิลจะถูกชะล้างได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการชะล้างที่ pH 4 กับความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลนั้น พบว่านิกเกิลจะถูกชะล้างได้ดีเป็นร้อยละ 0.8-3.2 ของความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล แสดงให้เห็นว่าเมื่อซีเมนต์ที่มีนิกเกิลผสมอยู่นั้นถูกใช้และสัมผัสกับน้ำที่มีค่า pH เท่ากับ 4 นั้น นิกเกิลจะถูกชะล้างออกมาได้ประมาณร้อยละ 3.2 ของความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล การที่นิกเกิลถูกชะล้างออกมาได้ในปริมาณน้อยนั้นอาจเกิดจากสารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่ $MgNiO_2$ ซึ่งพบจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD จากการศึกษาดังโครงสร้างของปูนเม็ดเมื่อนิกเกิลผสมอยู่ ซึ่ง $MgNiO_2$ นั้นเป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้เมื่อมีการสัมผัสกับน้ำแล้วจึงไม่ถูกชะล้างออกมา จากการทดลองยังพบว่าเมื่อ pH ของน้ำชะล้างมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณของนิกเกิลที่ถูกชะล้างนั้นจะมีค่าลดลง โดยที่ค่า pH 12 นั้นจะให้ค่าการชะล้างของนิกเกิลมีค่าต่ำที่สุด การลดลงของปริมาณนิกเกิลในน้ำชะล้างนั้นอาจเกิดจาก เมื่อน้ำชะล้างมีค่า pH มากขึ้นนั้น นิกเกิลที่ถูกชะล้างออกมาได้นั้นจะอยู่ในรูปของ $Ni(OH)_2$ (Pourbaix, 1994) ซึ่งเมื่อ pH มีค่าสูงขึ้นนั้น ความสามารถในการละลายของ $Ni(OH)_2$ จะมีค่าลดลง ทำให้ปริมาณนิกเกิลในน้ำชะล้างนั้นมีค่าลดลง