



บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของโลหะหนักในตัวอย่างจากส่วนต่างๆ ของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างจากส่วนต่างๆ ของการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการใช้กากอุตสาหกรรมร่วมในกระบวนการ สรุปได้ดังต่อไปนี้

4.1.1 วัตถุประสงค์หลัก

วัตถุประสงค์หลักซึ่งประกอบด้วย หินปูน (Limestone) หินเชลอะลูมินาสูง (Shale Mix) หินเชลซิลิกาสูง (Shale Core) และดินลูกรังหรือแร่เหล็ก (Iron Ore) จำนวนตัวอย่างที่มีการเก็บจากโรงปูนซีเมนต์โดยเริ่มตั้งแต่เดือนกันยายน 2547 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2548 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1.) หินปูน มีการเก็บตัวอย่าง จำนวน 27 ตัวอย่าง
- 2.) หินเชลอะลูมินาสูง มีการเก็บตัวอย่าง จำนวน 12 ตัวอย่าง
- 3.) หินเชลซิลิกาสูง มีการเก็บตัวอย่าง จำนวน 12 ตัวอย่าง
- 4.) แร่เหล็ก มีการเก็บตัวอย่าง จำนวน 27 ตัวอย่าง

นำตัวอย่างของวัตถุประสงค์ทั้งหมด เข้าสู่ขั้นตอนการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟเพื่อให้ได้ลักษณะตัวอย่างเป็นของเหลวใส จากนั้นวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ค่าสูงสุด ต่ำสุดและค่าเฉลี่ยแสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 และทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นโลหะหนักในวัตถุประสงค์หลักทั้งสิ้น ระหว่างเดือนกันยายนถึงเดือนตุลาคม 2547 ซึ่งมีทั้งสิ้น 12 ตัวอย่างที่มีวันเก็บตัวอย่างที่ตรงกัน ดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 โดยข้อมูลความเข้มข้นของตัวอย่างแต่ละชนิดในแต่ละวันแสดงดังตารางในภาคผนวก ก.

จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในหินปูน (Limestone) (รูปที่ 4.1) จะเห็นได้ว่า แมงกานีส (Mn) สตรอนเชียม (Sr) แบเรียม (Ba) และสังกะสี (Zn) มีความเข้มข้นที่สูงกว่าโลหะหนักชนิดอื่น (ค่าเฉลี่ยประมาณ 204 98 65 และ 51 มก./กก. ตามลำดับ) และมีความเข้มข้นลดลงเมื่อเข้าสู่เดือนตุลาคม 2547

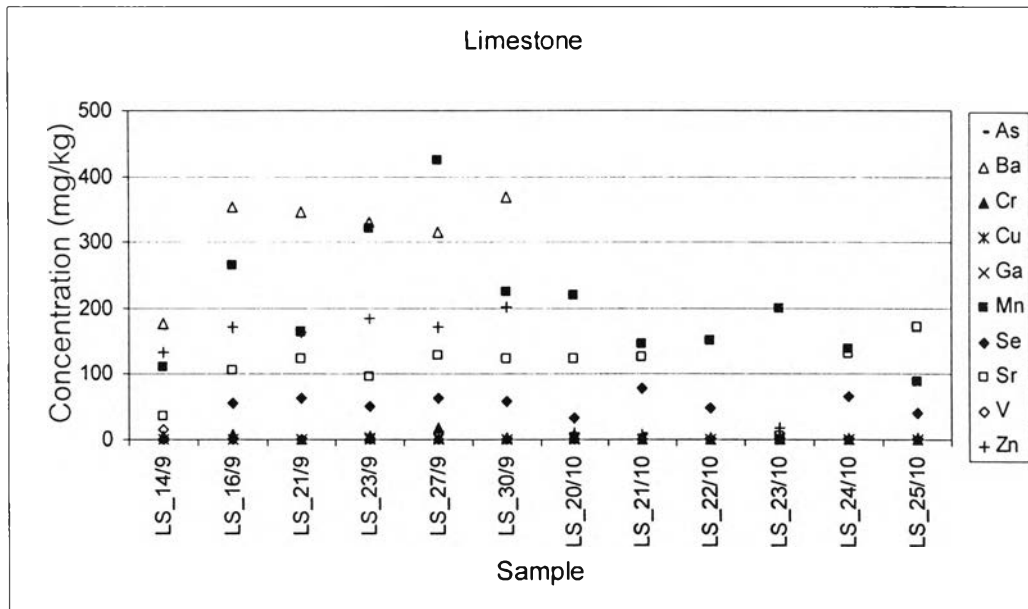
จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในหินเชลอะลูมินาสูง (Shale Mix) (รูปที่ 4.2) จะเห็นได้ว่า แบเรียม (Ba) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) และโครเมียม (Cr) มีความเข้มข้นที่สูงกว่าโลหะหนักชนิดอื่น (ค่าเฉลี่ยประมาณ 428 206 200 และ 94 มก./กก. ตามลำดับ) และมีความเข้มข้นค่อนข้างคงที่เมื่อเข้าสู่เดือนตุลาคม 2547

ตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นสูงสุดและต่ำสุดและค่าเฉลี่ยของโลหะชนิดต่างๆ ที่อยู่ในหินปูน และหินเชลมีอะลูมินาสูง

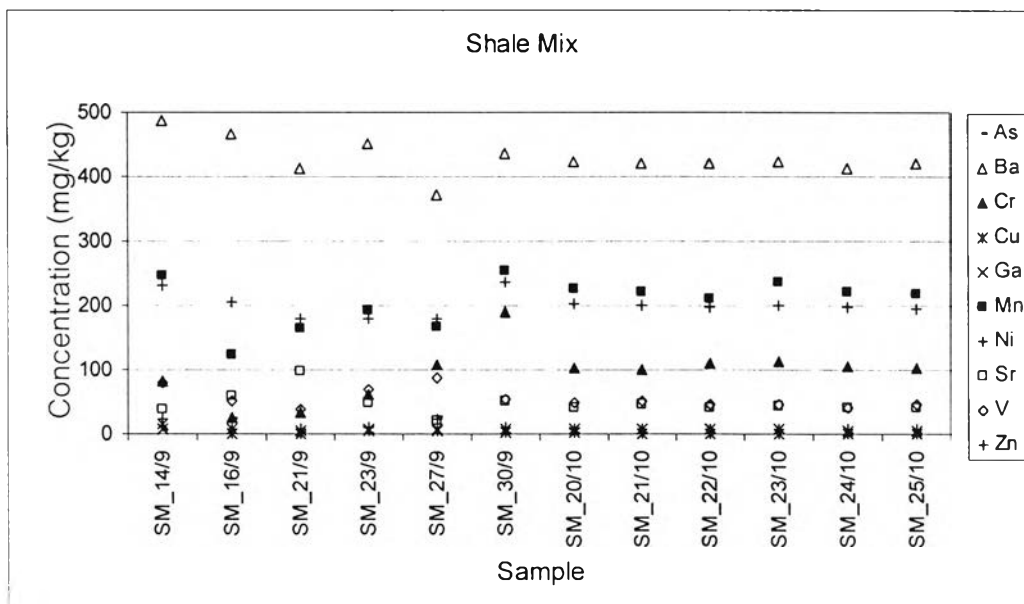
ชนิดของ โลหะหนัก	หินปูน (Limestone)				หินเชลมีอะลูมินาสูง (Shale Mix)			
	ความเข้มข้นสูงสุด (มก./กก.)	ความเข้มข้นต่ำสุด (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ย		ความเข้มข้นสูงสุด (มก./กก.)	ความเข้มข้นต่ำสุด (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ย	
			(มก./กก.)	SD.			(มก./กก.)	SD.
As	15.71	< 0.06	3.10	4.99	25.23	0.00	4.65	8.97
Ba	367.85	< 0.003	76.13	131.36	487.43	372.60	428.77	28.01
Cd	< 0.01	< 0.01	0.00	0.00	< 0.01	< 0.01	0.00	0.00
Co	< 0.01	< 0.01	0.00	0.00	< 0.01	< 0.01	0.00	0.00
Cr	91.04	< 0.01	8.21	17.96	189.49	26.59	94.57	40.49
Cu	27.80	< 0.01	3.22	6.92	14.69	< 0.01	2.75	3.88
Ga	4.22	< 0.04	0.83	1.20	8.95	4.01	6.88	1.36
Mn	424.69	63.69	204.56	92.45	253.66	122.01	206.61	36.96
Ni	< 0.05	< 0.05	0.08	0.40	23.33	7.06	10.63	5.77
Pb	< 0.07	< 0.07	0.00	0.00	< 0.07	< 0.07	0.00	0.00
Se	77.32	< 0.10	41.41	23.52	10.91	< 0.10	1.49	3.43
Sr	172.22	4.55	98.43	44.59	97.46	20.93	47.26	17.35
V	16.13	< 0.01	1.68	3.50	80.02	38.92	55.10	14.64
Zn	202.50	1.60	51.41	65.74	236.55	179.23	200.47	17.34

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นสูงสุดและต่ำสุดและค่าเฉลี่ยของโลหะชนิดต่างๆ ที่อยู่ในหินเชลซิลิกาสูง และแร่เหล็ก

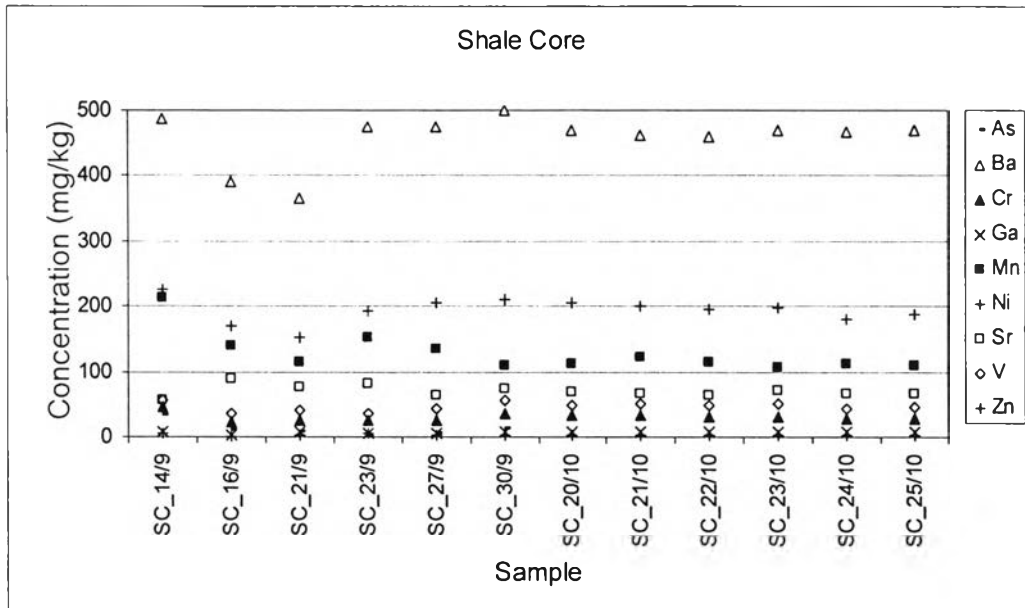
ชนิดของ โลหะหนัก	หินเชลซิลิกาสูง (Shale Core)				แร่เหล็ก (Iron Ore)			
	ความเข้มข้นสูงสุด (มก./กก.)	ความเข้มข้นต่ำสุด (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ย		ความเข้มข้นสูงสุด (มก./กก.)	ความเข้มข้นต่ำสุด (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ย	
			(มก./กก.)	SD.			(มก./กก.)	SD.
As	32.21	0.00	5.66	9.07	653.61	12.91	99.73	197.40
Ba	500.77	366.32	457.92	37.11	1301.72	33.01	875.96	691.50
Cd	< 0.01	< 0.01	0.00	0.00	29.78	< 0.01	5.42	9.76
Co	< 0.01	< 0.01	0.00	0.00	128.39	0.00	61.70	45.26
Cr	45.85	23.87	30.33	5.83	572.66	32.07	260.24	134.20
Cu	< 0.01	< 0.01	0.00	0.00	6853.88	2.94	977.99	2242.93
Ga	8.33	3.74	6.58	1.27	57.47	22.48	27.71	11.56
Mn	213.19	105.64	127.98	29.22	16620.32	82.30	6352.54	4565.89
Ni	6.22	0.22	2.34	1.57	124.99	< 0.05	65.26	41.33
Pb	< 0.07	< 0.07	0.00	0.00	1282.13	0.00	213.04	443.50
Se	1.18	< 0.10	0.10	0.33	< 0.10	< 0.10	0.00	0.00
Sr	89.05	55.84	69.77	8.66	113.41	0.00	43.10	38.44
V	56.69	34.92	46.27	6.59	1044.85	< 0.01	361.93	242.02
Zn	227.0	151.09	193.57	18.95	7206.04	54.82	1227.11	2444.70



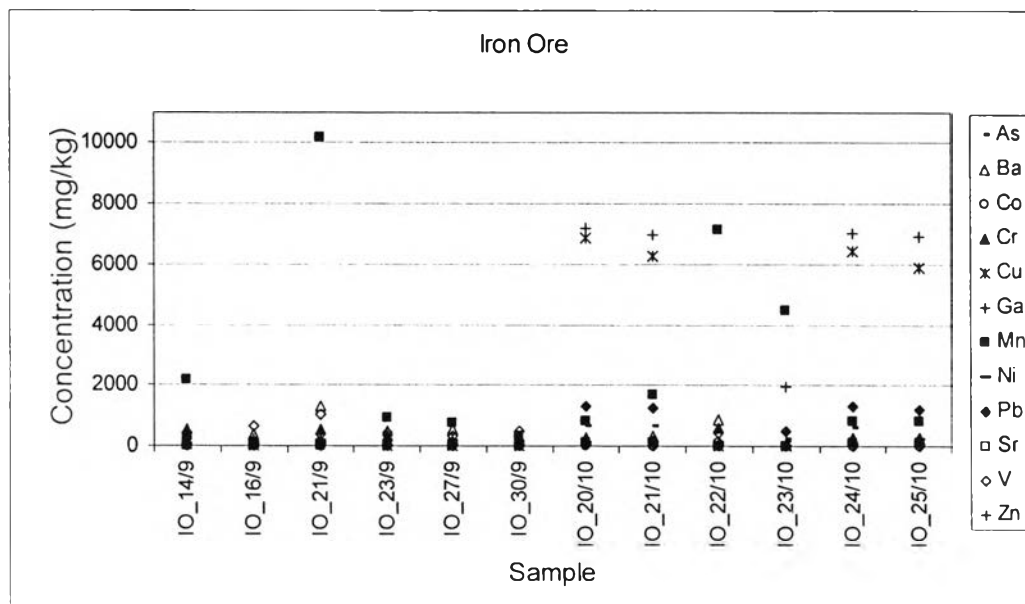
รูปที่ 4.1 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในหินปูน (Limestone) สำหรับช่วงเดือนกันยายน ถึงเดือนตุลาคม 2547



รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในหินเชลอะลูมินาสูง (Shale Mix) สำหรับช่วงเดือนกันยายน ถึงเดือนตุลาคม 2547



รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในหินเชลซิลิกาสูง (Shale Core) สำหรับช่วงเดือนกันยายน ถึงเดือนตุลาคม 2547



รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในดินลูกรังหรือแร่เหล็ก (Iron Ore) สำหรับช่วงเดือนกันยายน ถึงเดือนตุลาคม 2547

จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในหินเชลซิลิกาสูง (Shale Core) (รูปที่ 4.3) จะเห็นได้ว่า แบเรียม (Ba) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) และสตรอนเชียม (Sr) มีความเข้มข้นที่สูงกว่าโลหะหนักชนิดอื่น (ค่าเฉลี่ยประมาณ 457 193 127 และ 69 มก./กก. ตามลำดับ) และมีความเข้มข้นค่อนข้างคงที่เมื่อเข้าสู่เดือนตุลาคม 2547

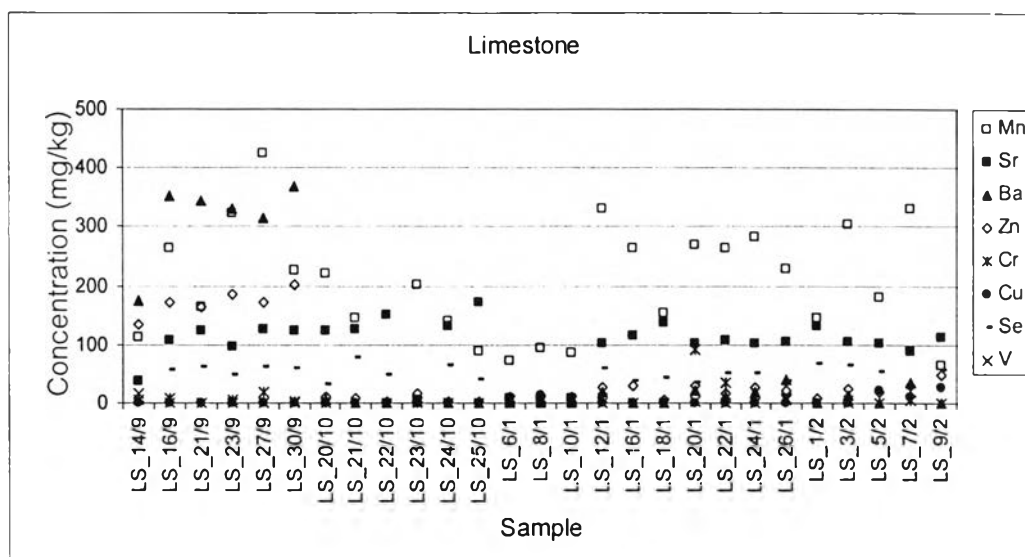
จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในดินลูกรังหรือแร่เหล็ก (Iron Ore) (รูปที่ 4.4) จะเห็นได้ว่า แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) และทองแดง (Cu) มีความเข้มข้นที่สูงกว่าโลหะหนักชนิดอื่น (ค่าเฉลี่ยประมาณ 6352 1227 และ 977 มก./กก. ตามลำดับ) และค่อนข้างเป็นความเข้มข้นที่ไม่คงที่ ดังเช่นที่พบในหินปูน และหินเชลทั้งสองชนิด ส่วนโลหะหนักชนิดอื่นพบในความเข้มข้นที่ค่อนข้างคงที่

นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะของหินปูนและแร่เหล็กทั้งหมด ซึ่งมีจำนวนตัวอย่างชนิดละ 27 ตัวอย่าง สามารถสรุปความเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ เมื่อเวลาผ่านไปโดยเริ่มตั้งแต่เดือนกันยายน 2547 จนมาถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2548 ได้ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

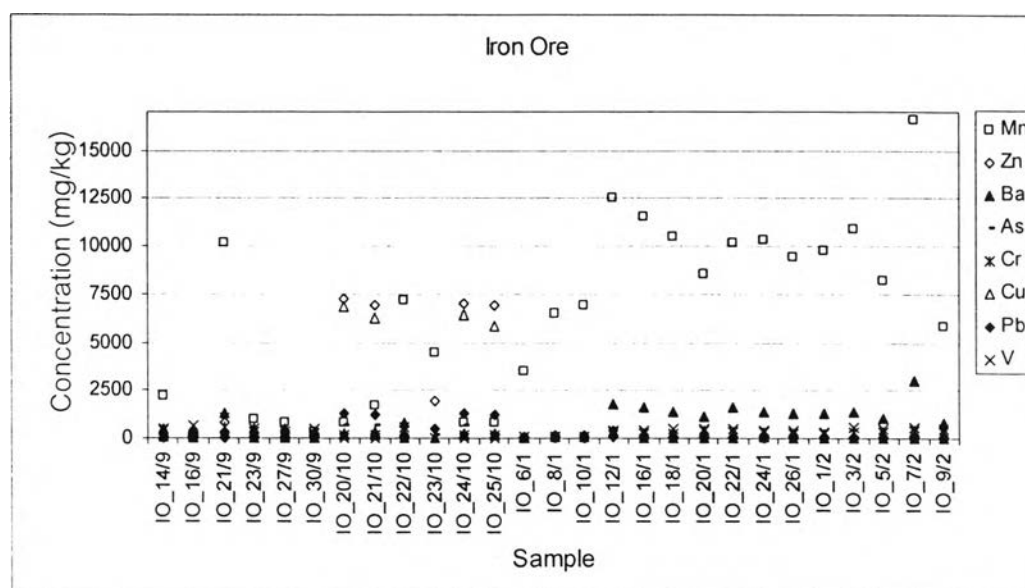
จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าแมงกานีสมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัด โดยความเข้มข้นจะลดลงเมื่อเข้าสู่เดือนตุลาคม 2547 และจากนั้นจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่เดือนมกราคม 2548

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าแมงกานีสอีกเช่นกันที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัด โดยความเข้มข้นจะสูงขึ้นมาก (ประมาณ 11000 มก./กก.) เมื่อเข้าสู่เดือนมกราคม 2548

ซึ่งความแตกต่างของความเข้มข้นโลหะหนักแต่ละชนิดรวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของแมงกานีสนี้ควรจะมีผลต่อปฏิกิริยาเคมีของโลหะที่เปลี่ยนแปลงไปตามวันต่างๆ นั้นจะเป็นพื้นฐานสำหรับการสรุปถึงที่มาของโลหะหนักที่ปรากฏอยู่ในปูนเม็ดหรือฝุ่นปูนซึ่งจะมีการศึกษาความสัมพันธ์ในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ในหินปูน (Limestone) ตั้งแต่เดือนกันยายน 2547 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2548



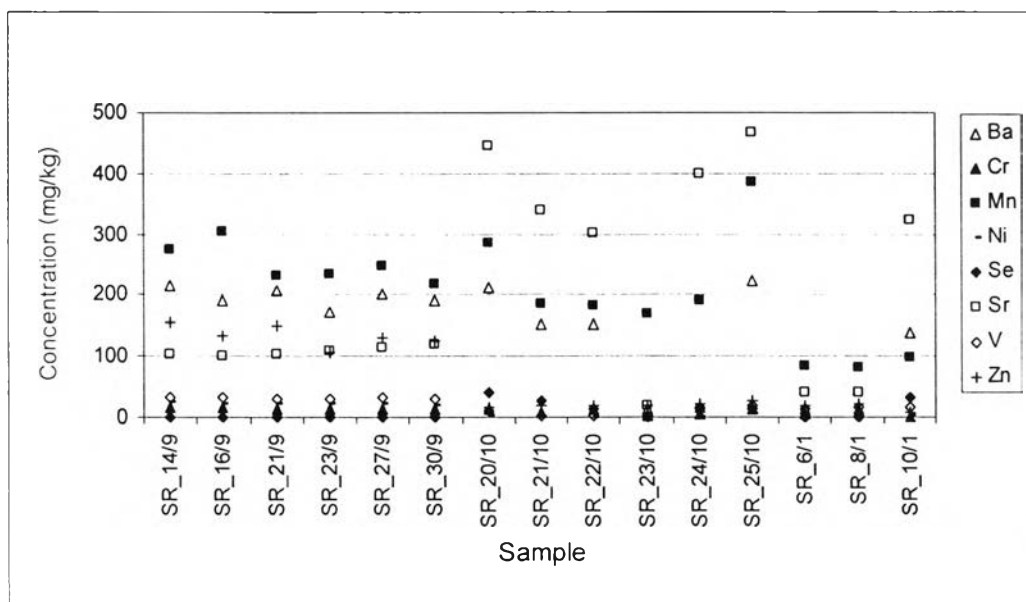
รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ในแร่เหล็ก (Iron Ore) ตั้งแต่เดือนกันยายน 2547 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2548

4.1.2 วัตถุดิบทดแทน

วัตถุดิบทดแทน (Secondary Raw Material) ซึ่งเป็นส่วนผสมของ แก้วลอย แก้วหนัก และ คตะลิสต์ (Catalyst) ซึ่งต่างเป็นกากของเสียจากอุตสาหกรรมที่ใช้ร่วมในการผลิต มีการเก็บ ตัวอย่างจากโรงปูนซีเมนต์โดยอยู่ในช่วงระหว่างเดือนกันยายน 2547 ถึงเดือนมกราคม 2548 ทั้งหมด 15 ตัวอย่าง

นำตัวอย่างของวัตถุดิบทดแทน เข้าสู่ขั้นตอนการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายด้วย ไมโครเวฟ เพื่อให้ได้ลักษณะตัวอย่างเป็นของเหลวใส จากนั้นวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนัก ชนิดต่างๆ สามารถสรุปเป็นความเข้มข้นสูงสุด ความเข้มข้นต่ำสุด และค่าเฉลี่ยได้ดังตารางที่ 4.3 และเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นโลหะหนักในวัตถุดิบทดแทน ระหว่างเดือน กันยายน 2547 ถึงเดือนมกราคม 2548 ดังรูปที่ 4.7

จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในวัตถุดิบทดแทน (รูปที่ 4.7) จะเห็นได้ว่า แมงกานีส (Mn) สตรอนเซียม (Sr) แบเรียม (Ba) และสังกะสี (Zn) มีความเข้มข้นที่สูงกว่าโลหะหนักชนิดอื่น (ค่าเฉลี่ยประมาณ 211 201 140 64 มก./กก. ตามลำดับ) และความเข้มข้นของ โลหะมีความแปรปรวนขึ้นอยู่กับวัตถุดิบทดแทนหลายชนิดที่ใส่เข้าไปในระบบ โดยจะเห็นได้ว่าช่วง เดือนตุลาคม 2547 ข้อมูลความเข้มข้นจะมีความแปรปรวนมากที่สุด



รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในวัตถุดิบทดแทน สำหรับช่วงเดือนกันยายน 2547 ถึงเดือนมกราคม 2548

ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นสูงสุดและต่ำสุดและค่าเฉลี่ยของโลหะชนิดต่างๆ ที่อยู่ในวัดฤทธิบททดแทน และเขื่อนเพลิงทดแทน

ชนิดของ โลหะหนัก	วัดฤทธิบททดแทน				เขื่อนเพลิงทดแทน			
	ความเข้มข้นสูงสุด (มก./กก.)	ความเข้มข้นต่ำสุด (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ย		ความเข้มข้นสูงสุด (มก./กก.)	ความเข้มข้นต่ำสุด (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ย	
			(มก./กก.)	SD.			(มก./กก.)	SD.
As	16.30	< 0.06	2.01	4.85	21.30	< 0.06	2.21	5.83
Ba	223.91	12.35	140.43	80.11	157.96	< 0.003	65.68	66.15
Cd	< 0.01	< 0.01	0.00	0.00	< 0.01	< 0.01	0.00	0.00
Co	8.19	< 0.01	3.51	3.34	< 0.01	< 0.01	0.00	0.00
Cr	16.88	0.99	10.76	4.63	2.19	< 0.01	1.00	0.86
Cu	5.35	< 0.01	1.98	2.03	8.51	2.23	5.07	2.60
Ga	6.72	< 0.04	0.93	1.85	< 0.04	< 0.04	0.00	0.00
Mn	386.45	82.35	211.40	81.99	16.79	7.22	10.29	3.08
Ni	24.56	< 0.05	9.40	9.93	< 0.05	< 0.05	0.00	0.00
Pb	< 0.07	< 0.07	0.00	0.00	< 0.07	< 0.07	0.00	0.00
Se	39.71	< 0.10	9.21	13.10	16.95	< 0.10	1.41	4.68
Sr	466.97	18.01	201.67	152.97	11.53	0.00	3.12	2.92
V	33.86	2.06	19.16	11.51	11.18	< 0.01	5.38	4.84
Zn	156.05	8.85	64.60	57.30	197.50	17.31	123.52	51.50

ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นสูงสุดและต่ำสุดและค่าเฉลี่ยของโลหะชนิดต่างๆ ที่อยู่ในปูนเม็ด และฝุ่นปูน

ชนิดของโลหะหนัก	ปูนเม็ด				ฝุ่นปูน			
	ความเข้มข้นสูงสุด (มก./กก.)	ความเข้มข้นต่ำสุด (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ย		ความเข้มข้นสูงสุด (มก./กก.)	ความเข้มข้นต่ำสุด (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ย	
			(มก./กก.)	SD.			(มก./กก.)	SD.
Ag	0.11	< 0.002	0.02	0.02	1.26	< 0.002	0.27	0.41
As	19.32	< 0.09	1.28	4.78	29.02	< 0.09	12.66	10.85
Ba	154.99	< 0.003	76.09	67.35	122.31	100.22	109.41	6.54
Be	< 0.001	< 0.01	<0.001	0.00	< 0.001	< 0.001	<0.001	0.00
Cd	2.80	< 0.01	0.18	0.69	1.51	< 0.01	0.17	0.47
Co	13.81	2.34	8.82	3.25	10.69	< 0.01	3.24	4.60
Cr	88.40	29.15	44.12	13.53	62.81	30.62	38.38	10.29
Cu	274.12	9.58	48.90	72.66	158.68	6.17	62.32	43.02
Fe	24044.73	2434.98	15220.05	5165.51	18402.54	11584.53	13325.09	2039.42
Ga	< 0.04	< 0.04	<0.04	0.00	3.95	< 0.01	1.91	1.47
Hg	< 0.04	< 0.04	<0.004	0.00	< 0.003	< 0.003	<0.003	0.00
Mn	501.63	315.17	414.56	57.75	414.13	272.28	324.76	49.75
Ni	38.10	14.91	27.55	7.69	26.67	12.47	16.89	5.17
Pb	46.88	< 0.11	6.16	12.75	33.96	< 0.11	10.52	10.97
Se	23.16	< 0.10	9.72	8.97	50.68	15.57	27.97	11.37
Sr	281.09	126.29	213.26	41.75	257.05	204.55	227.02	15.62
Tl	< 0.25	< 0.25	<0.25	0.00	4.97	< 0.11	1.25	1.76
V	87.50	40.11	68.51	14.97	82.30	13.74	38.18	26.14
Zn	342.35	33.14	86.69	85.29	232.13	34.33	102.30	55.78

4.1.3 เชื้อเพลิงหลัก

เชื้อเพลิงหลัก (Primary Fuel) ซึ่งเป็นส่วนผสมของลิกไนต์ บิทูมินัส และถ่านหิน จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ สามารถสรุปเป็นความเข้มข้นสูงสุด และความเข้มข้นต่ำสุดได้ดังตารางที่ 4.5

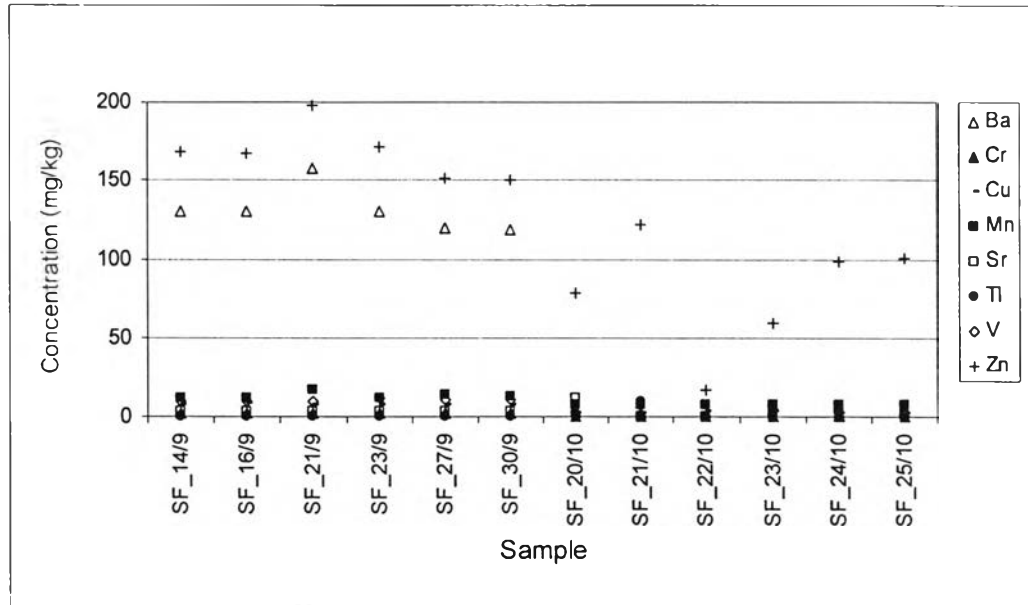
ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะชนิดต่างๆ ที่พบในเชื้อเพลิงหลัก

ชนิดของโลหะหนัก	ความเข้มข้นเฉลี่ยของเชื้อเพลิงหลัก (มก./กก.)
As	0.00
Ba	0.00
Cd	0.00
Cr	0.00
Cu	138.50
Mn	252.75
Ni	41.50
Pb	0.00
Sr	1114.67
V	0.00
Zn	193.50

4.1.4 เชื้อเพลิงทดแทน

เชื้อเพลิงทดแทน (Secondary Fuel) ซึ่งประกอบด้วยกากลิกไนต์ และส่วนผสมของกากอาหารสัตว์ ได้แก่ กากผลิตภัณฑอาหารสัตว์ กากข้าวโพด แกลบ และเศษถุงผลิตภัณฑสำหรับบรรจุอาหารสัตว์ เมื่อนำตัวอย่างของเชื้อเพลิงทดแทน เข้าสู่ขั้นตอนการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ เพื่อให้ได้ลักษณะตัวอย่างเป็นของเหลวใส และวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ สามารถสรุปเป็นความเข้มข้นสูงสุด ความเข้มข้นต่ำสุด และค่าเฉลี่ยได้ดังตารางที่ 4.3 และเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นโลหะหนักในวัตถุดิบทดแทนระหว่างเดือนกันยายน ถึงเดือนตุลาคม 2547 ดังรูปที่ 4.8

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าสังกะสี (Zn) และแบเรียม (Ba) เป็นโลหะที่พบความเข้มข้นสูงสุดในเชื้อเพลิงทดแทน (ค่าเฉลี่ยประมาณ 123 และ 65 มก./กก. ตามลำดับ) ส่วนโลหะชนิดอื่นค่อนข้างมีความเข้มข้นน้อย และมีความเข้มข้นคงที่



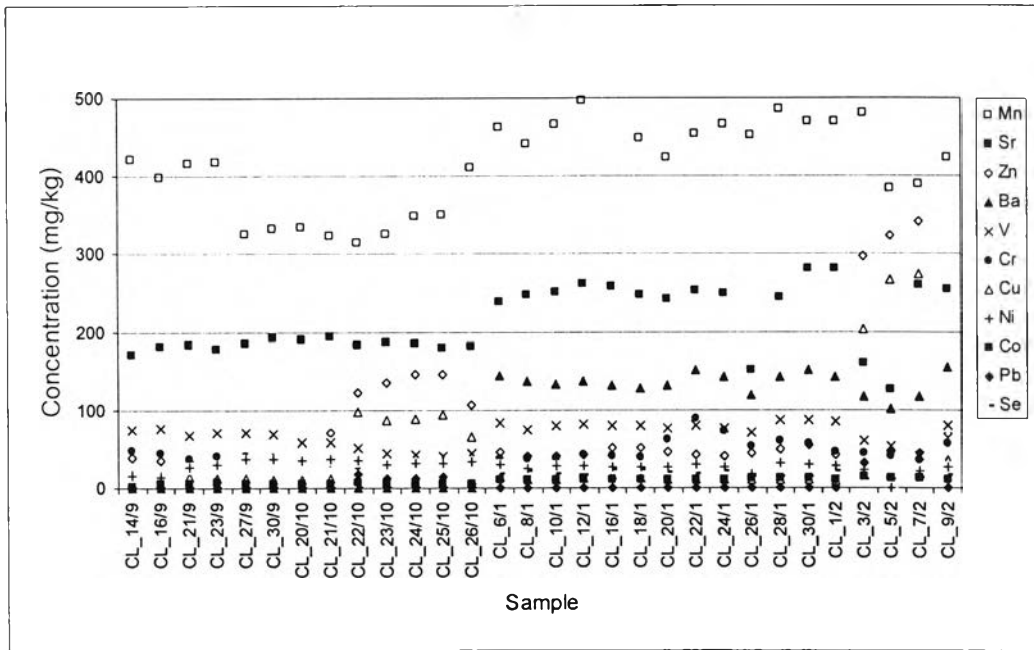
รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงทดแทน สำหรับช่วงเดือนกันยายน ถึงตุลาคม 2547

4.1.5 ปูนเม็ดและฝุ่นปูน

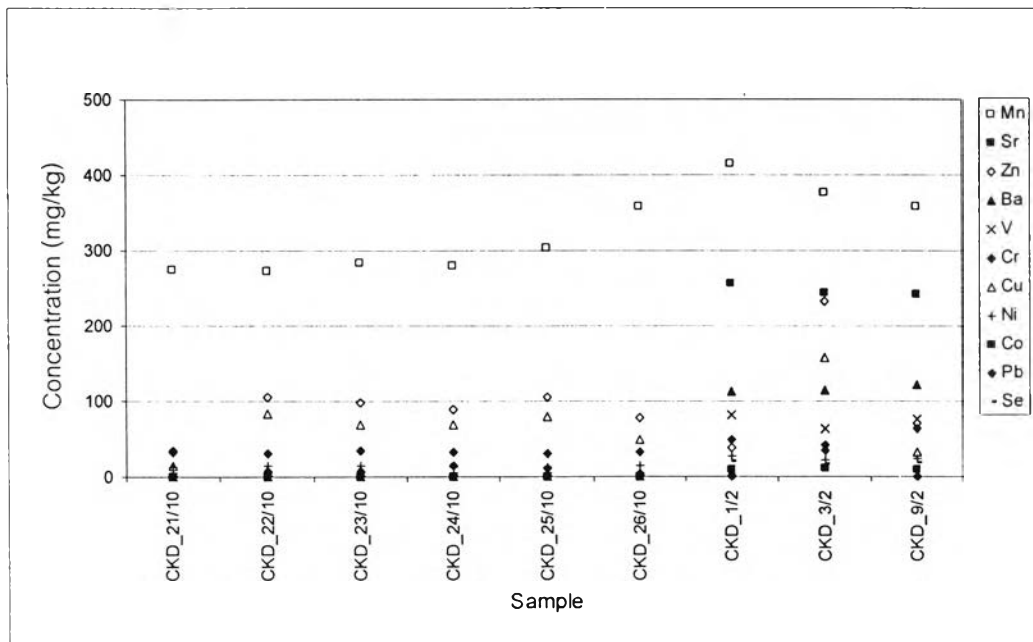
ปูนเม็ด (Clinker) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเผาปูนซีเมนต์ มีการเก็บตัวอย่างจากโรงปูนซีเมนต์โดยเริ่มตั้งแต่เดือนกันยายน 2547 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2548 รวม 30 ตัวอย่าง และฝุ่นปูน (CKD) ที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับปูนเม็ด มีการเก็บตัวอย่างในช่วงเดือนตุลาคม 2547 และช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 2548 รวม 9 ตัวอย่าง นำปูนเม็ดและฝุ่นปูนที่ได้จากการเก็บตัวอย่างทั้งหมดเข้าสู่ขั้นตอนการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ เพื่อให้ได้ลักษณะตัวอย่างเป็นของเหลวใส จากนั้นวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ สามารถสรุปเป็นความเข้มข้นสูงสุด ต่ำสุดและค่าเฉลี่ยได้ดังตารางที่ 4.4 และเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนเม็ดตลอดช่วงที่มีการเก็บตัวอย่าง และความเข้มข้นของโลหะหนักในฝุ่นปูนในเดือนที่มีการเก็บตัวอย่าง ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนเม็ด (รูปที่ 4.9) จะเห็นได้ว่า แมงกานีส (Mn) สตรอนเชียม (Sr) สังกะสี (Zn) และแบเรียม (Ba) มีความเข้มข้นที่สูงกว่าโลหะหนักชนิดอื่นตามลำดับ โดยแมงกานีสมีความเข้มข้นเฉลี่ยที่ประมาณ 414 มก./กก. สตรอนเชียมมีความเข้มข้นเฉลี่ยที่ประมาณ 213 มก./กก. และโลหะทั้งหมดมีความเข้มข้นค่อนข้างผันผวนไปตามช่วงเดือนต่างๆ ที่เปลี่ยนไป โดยพบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักส่วนใหญ่จะสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่เดือนมกราคม 2548

จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในฝุ่นปูน (รูปที่ 4.10) จะเห็นได้ว่า แมงกานีส (Mn) มีความเข้มข้นที่สูงกว่าโลหะหนักชนิดอื่นอย่างเห็นได้ชัด โดยมีความเข้มข้นเฉลี่ยที่ประมาณ 324 มก./กก. ในขณะที่โลหะหนักอื่นๆ มีความเข้มข้นที่ประมาณ 100 มก./กก. และโลหะหนักบางชนิด เช่น สตรอนเชียม (Sr) สังกะสี (Zn) และแบเรียม (Ba) มีความเข้มข้นสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่เดือนกุมภาพันธ์ 2548



รูปที่ 4.9 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในปูนเม็ด สำหรับช่วงเดือนกันยายน 2547 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2548



รูปที่ 4.10 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในฝุ่นปูน สำหรับช่วงเดือนตุลาคม 2547 และช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 2548

4.2 ผลการศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์โดยสังเกตจากลักษณะทางเคมี

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ชนิดและสารประกอบโลหะหนักโดยวิธีการสกัดแยกสารประกอบ (Sequential Extraction)

ในการวิเคราะห์ชนิดและสารประกอบโลหะหนัก ตัวอย่างที่ใช้คือปูนเม็ดและฝุ่นปูน ซึ่งเป็นตัวอย่างเดียวกันกับที่ใช้ในการวิจัยหัวข้อที่ 4.1.5 ผลสืบเนื่องจากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักที่อยู่ในปูนเม็ด และฝุ่นปูนในหัวข้อที่ 4.1.5 ช่วยในการเลือกตัวอย่างเพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์สารประกอบด้วยวิธี Sequential Extraction โดยหลักในการเลือกตัวอย่าง จะสังเกตได้จากความเข้มข้นของโลหะหนักในแต่ละเดือนทั้งสิ้นของการเก็บตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลง อันเป็นผลมาจากความแปรปรวนของวัตถุดิบทดแทนที่เข้าระบบการผลิตปูนซีเมนต์ในแต่ละเดือนนั้น จึงแยกการวิเคราะห์ในแต่ละเดือน โดยเลือกตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักสูงเป็นส่วนใหญ่ จำนวนที่เลือกคือ 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งเดือน และสำหรับชนิดของโลหะหนักที่พิจารณานั้น จากผลที่ได้จากการวิจัยในหัวข้อที่ 4.1.5 ทำให้พบว่ามีโลหะหนักที่พบในความเข้มข้นสูง และมีความน่าสนใจ 10 ชนิดได้แก่ แบเรียม (Ba) โคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) ซีลีเนียม (Se) สตรอนเชียม (Sr) วานาเดียม (V) และสังกะสี (Zn) ผลจากการวิเคราะห์ชนิดและสารประกอบโลหะหนักด้วยวิธี Sequential Extraction สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4.11 ถึง 4.15

โดยที่สัญลักษณ์ของขั้นตอนทั้ง 5 ในรูปที่ 4.11 ถึง 4.15 มีความหมายดังนี้

F1 แทน การสกัดในขั้นที่ 1 สำหรับ สารประกอบโลหะที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่าย

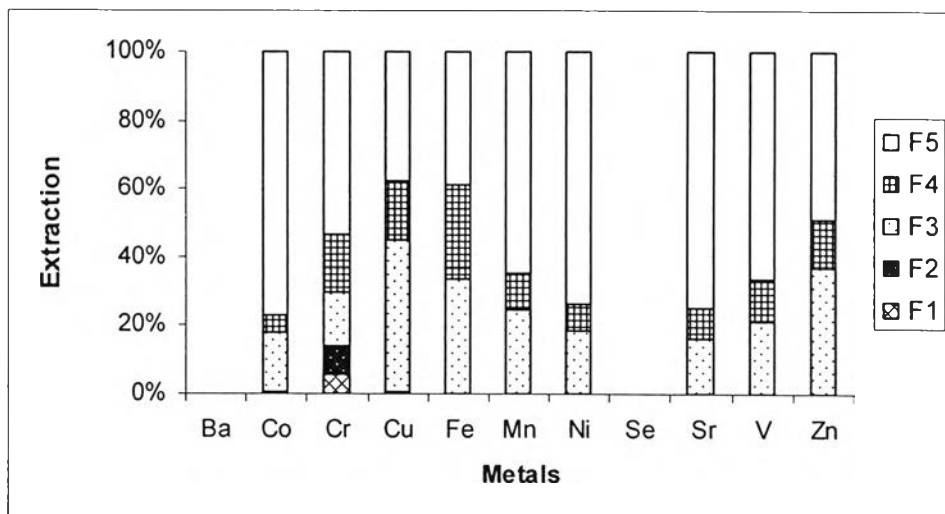
F2 แทน การสกัดในขั้นที่ 2 สำหรับ สารประกอบโลหะที่มีพันธะกับคาร์บอเนต

F3 แทน การสกัดในขั้นที่ 3 สำหรับ สารประกอบโลหะที่มีพันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์

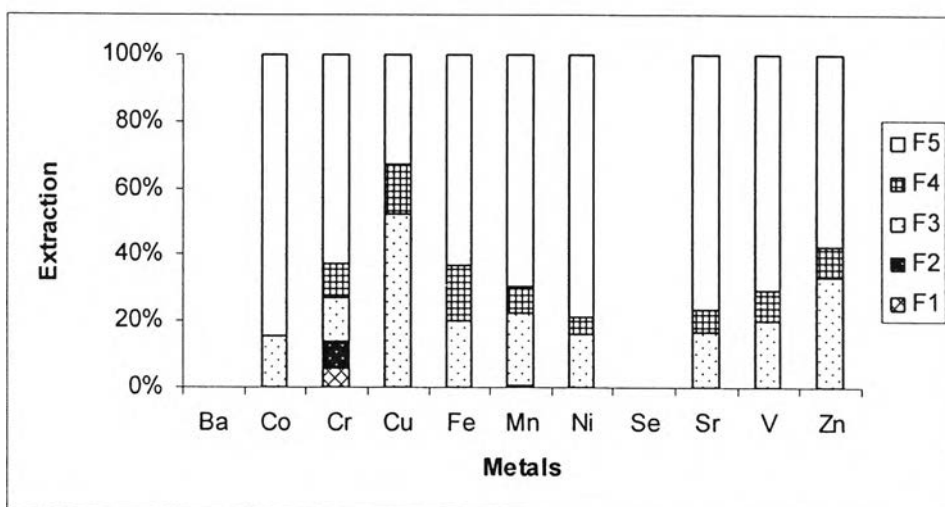
F4 แทน การสกัดในขั้นที่ 4 สำหรับ สารประกอบโลหะที่มีพันธะกับสารอินทรีย์และซิลไฟด์

F5 แทน การสกัดในขั้นที่ 5 สำหรับ สารประกอบโลหะที่เหลือ (Residual Fraction)

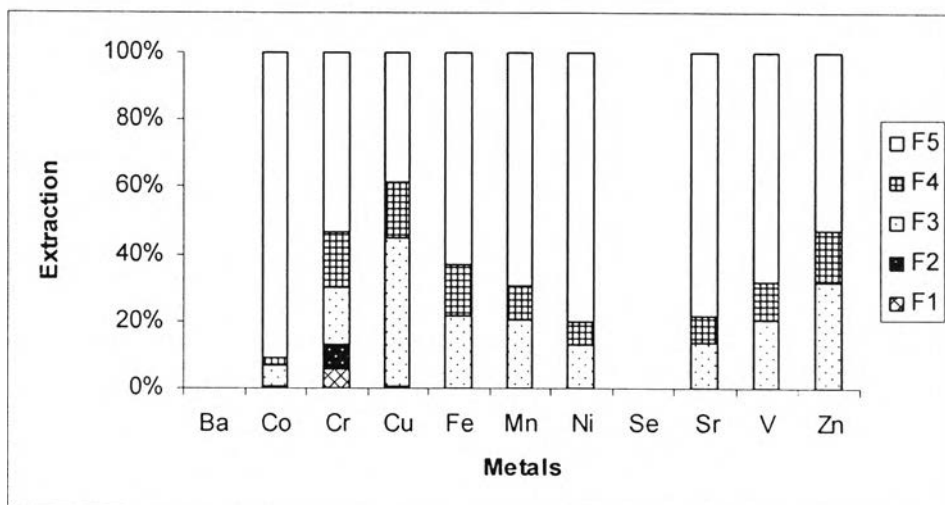
ซึ่งข้อมูลเป็นร้อยละในแต่ละขั้นของการสกัดแยกสารประกอบโลหะแสดงดังภาคผนวก ข.



ก.) ปูนเม็ด วันที่ 21 กันยายน 2547

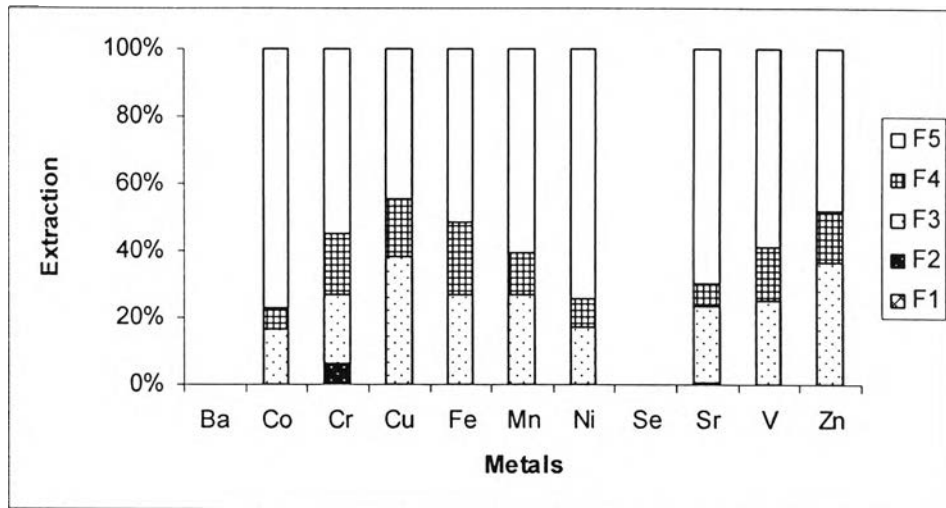


ข.) ปูนเม็ด วันที่ 23 กันยายน 2547

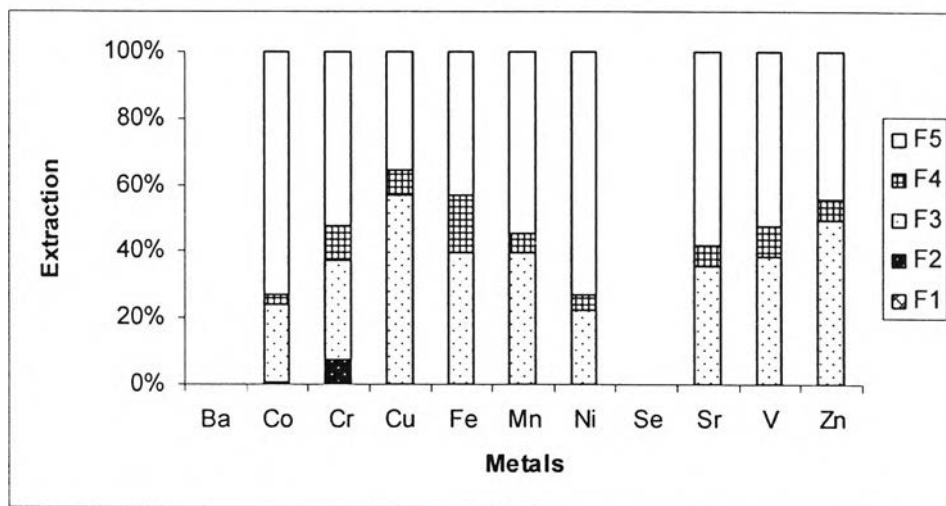


ค.) ปูนเม็ด วันที่ 27 กันยายน 2547

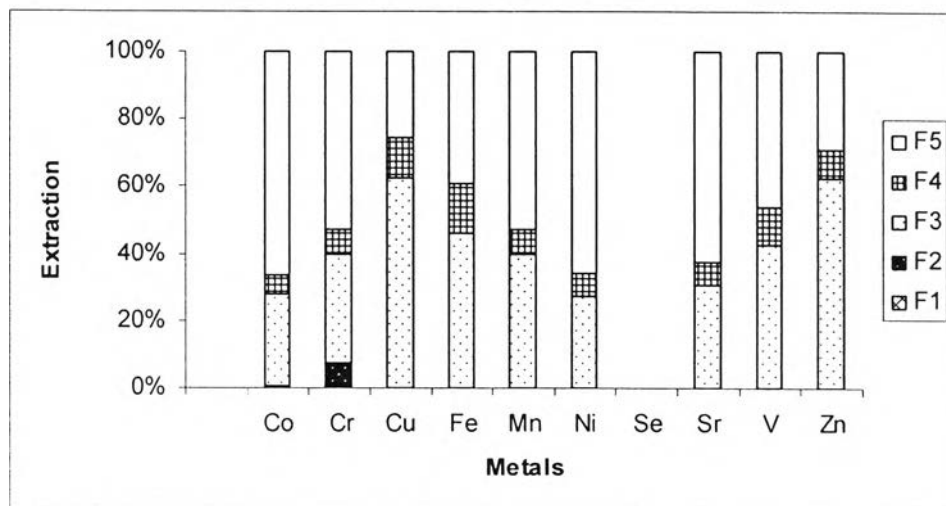
รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ชั้นในปูนเม็ด ในเดือนกันยายน 2547



ก.) ปูนเม็ด วันที่ 23 ตุลาคม 2547



ข.) ปูนเม็ด วันที่ 24 ตุลาคม 2547



ค.) ปูนเม็ด วันที่ 26 ตุลาคม 2547

รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ชั้นในปูนเม็ด ในเดือนตุลาคม 2547

ผลของตัวอย่างจากปูนเม็ดทั้งสามวัน จากการสกัดแยกสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ชั้นในเดือนกันยายน 2547 (รูปที่ 4.11) พบว่าโคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) สตรอนเชียม (Sr) วาเนเดียม (V) และสังกะสี (Zn) มีการกระจายตัวอยู่ในชั้นที่ 5 (Residual Fraction) เป็นส่วนใหญ่ (มากกว่าร้อยละ 50 ของทุกชั้นรวมกัน) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าโลหะหนักส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารประกอบที่เหลือจากสี่ชั้นแรก โดยโลหะหนักที่พบในชั้นที่ 5 นี้จะมีความเสถียรสูงและชะละลายได้ยากที่สุด (Li และคณะ, 1995)

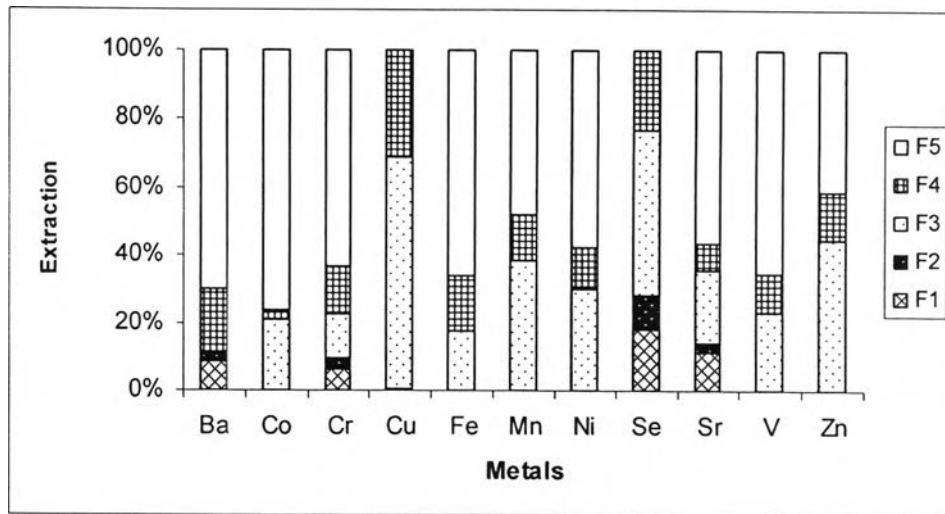
ส่วนโครเมียม (Cr) เป็นโลหะหนักชนิดเดียวที่พบในทั้งชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ซึ่งหมายถึงชั้นที่โลหะอยู่ในรูปสารประกอบที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่าย และสารประกอบโลหะที่มีพันธะกับคาร์บอนเนต ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าโครเมียมนอกจากจะอยู่ในรูปที่มีความเสถียรสูงแล้วยังสามารถพบได้ในรูปที่มีความเสถียรต่ำและชะละลายได้ง่ายอีกด้วย ถึงแม้จะพบที่ไม่เกินร้อยละ 10 ของทุกชั้นรวมกันก็ตาม

นอกจากนี้สำหรับในชั้นที่ 3 ซึ่งหมายถึงชั้นที่มีสารประกอบโลหะที่มีพันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ พบว่าโลหะทุกชนิดสามารถพบได้ในชั้นนี้สูงรองจากที่พบในชั้นที่ 5 โดยมีทองแดง (Cu) เป็นโลหะที่พบในความเข้มข้นที่สูงกว่าโลหะชนิดอื่น

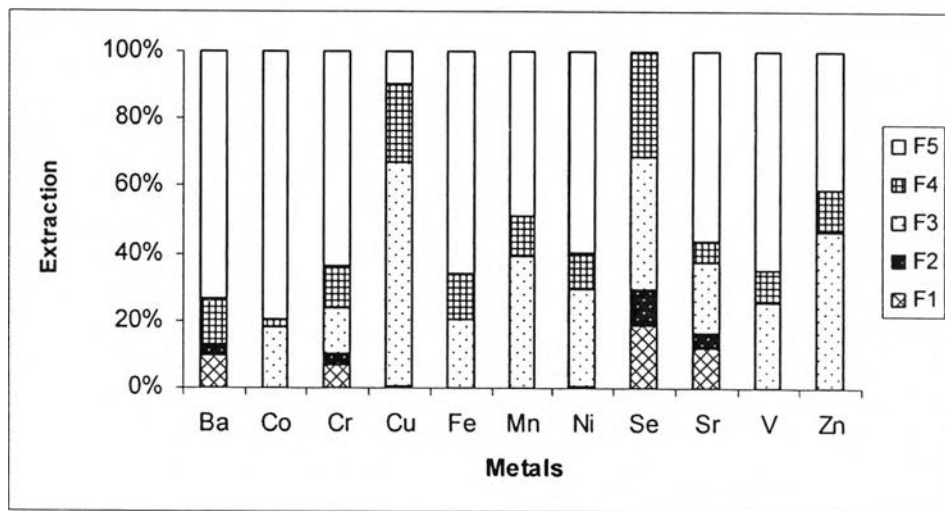
ผลของตัวอย่างจากปูนเม็ดทั้งสามวัน จากการสกัดแยกสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ชั้นในเดือนตุลาคม 2547 (รูปที่ 4.12) พบว่าโคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) สตรอนเชียม (Sr) และวาเนเดียม (V) มีการกระจายตัวอยู่ในชั้นที่ 5 (Residual Fraction) เป็นส่วนใหญ่ (มากกว่าร้อยละ 50 ของทุกชั้นรวมกัน) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าโลหะหนักส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารประกอบที่เหลือจากสี่ชั้นแรก โดยโลหะหนักที่พบในชั้นที่ 5 นี้จะมีความเสถียรสูงและชะละลายได้ยากที่สุด (Li และคณะ, 1995)

ส่วนโครเมียม (Cr) เป็นโลหะหนักชนิดเดียวที่พบในชั้นที่ 2 ซึ่งหมายถึงชั้นที่โลหะอยู่ในรูปสารประกอบกับคาร์บอนเนต ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าโครเมียมนอกจากจะอยู่ในรูปที่มีความเสถียรสูงแล้วยังสามารถพบได้ในรูปที่มีความเสถียรต่ำและชะละลายได้ง่ายอีกด้วย ถึงแม้จะพบที่ไม่เกินร้อยละ 10 ของทุกชั้นรวมกันก็ตาม

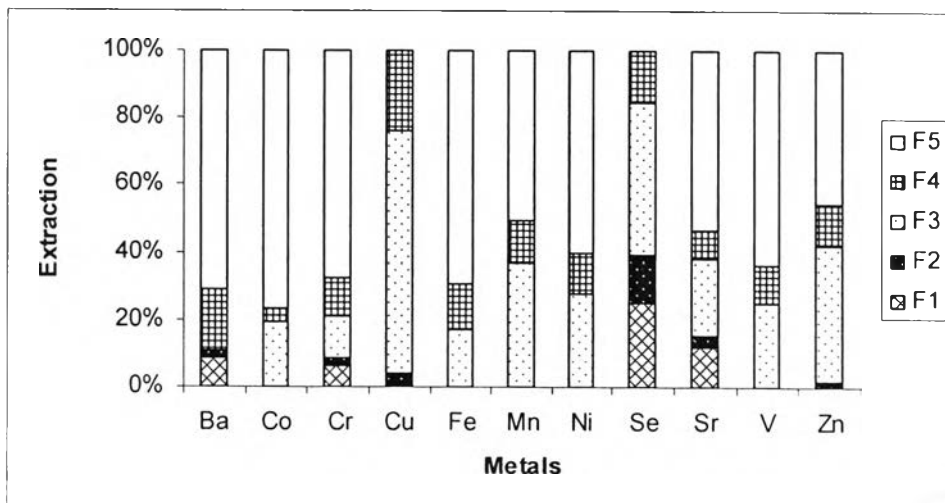
และเป็นไปในทำนองเดียวกันกับผลที่วิเคราะห์ได้ในเดือนกันยายน 2547 นั่นคือพบว่าโลหะทุกชนิดสามารถพบได้ในชั้นที่ 3 ซึ่งหมายถึงชั้นที่มีสารประกอบโลหะที่มีพันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ สูงรองจากที่พบในชั้นที่ 5 โดยมีทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) เป็นโลหะที่พบในชั้นที่ 3 ในความเข้มข้นที่สูงกว่าโลหะชนิดอื่น



ก.) ปูนเม็ด วันที่ 12 มกราคม 2548

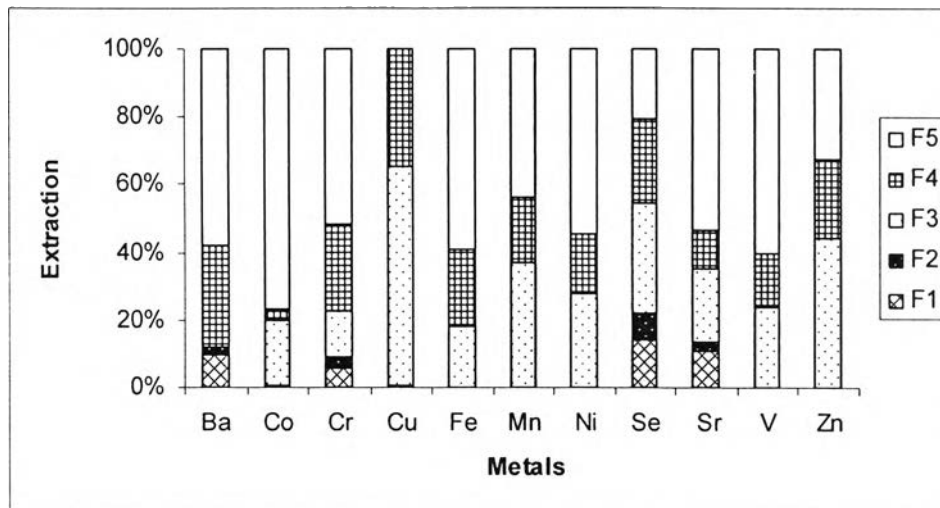


ข.) ปูนเม็ด วันที่ 22 มกราคม 2548

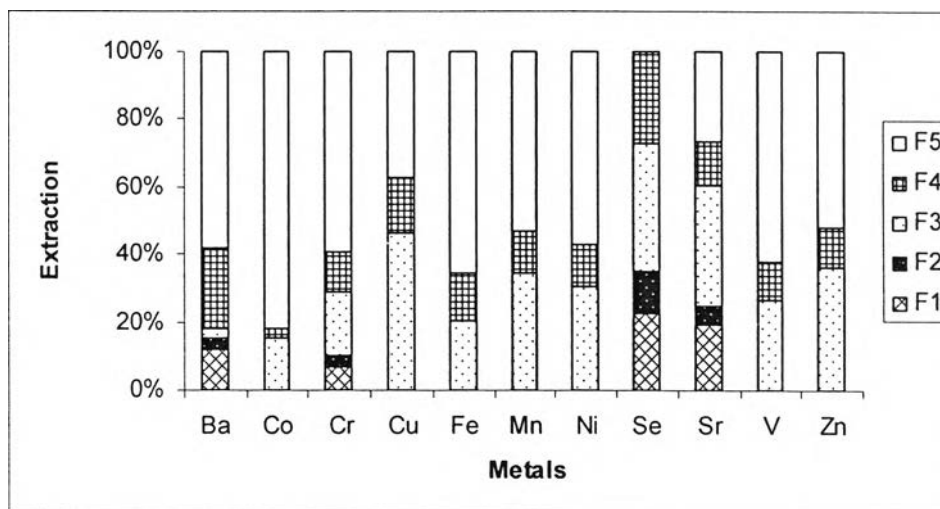


ค.) ปูนเม็ด วันที่ 28 มกราคม 2548

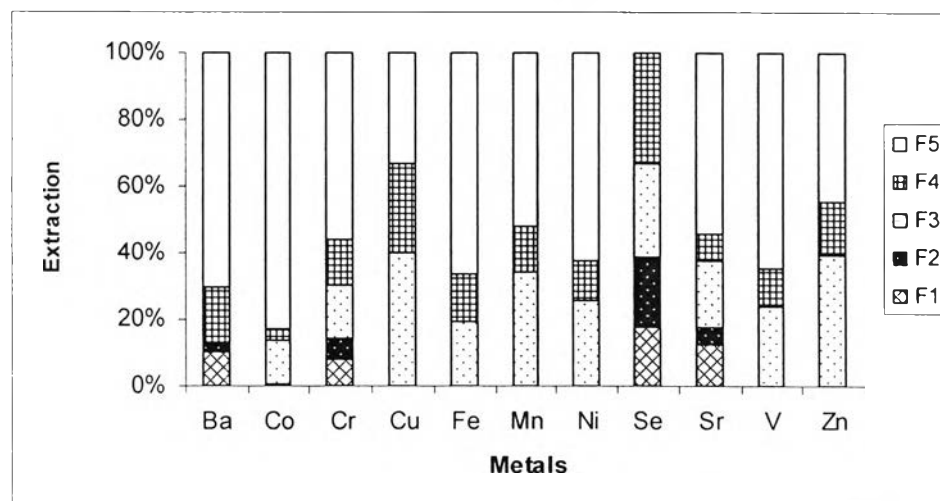
รูปที่ 4.13 การกระจายตัวของสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ชั้นในปูนเม็ด ในเดือนมกราคม 2548



ก.) ปูนเม็ด วันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2548



ข.) ปูนเม็ด วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548



ค.) ปูนเม็ด วันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2548

รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ชั้นในปูนเม็ด ในเดือนกุมภาพันธ์ 2548

ผลของตัวอย่างจากปูนเม็ดทั้งสามวัน จากการสกัดแยกสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ชั้นในเดือนมกราคม 2548 (รูปที่ 4.13) พบว่าแบเรียม (Ba) โคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) สตรอนเชียม (Sr) และวาเนเดียม (V) มีการกระจายตัวอยู่ในชั้นที่ 5 (Residual Fraction) เป็นส่วนใหญ่ (มากกว่าร้อยละ 50 ของทุกชั้นรวมกัน) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าโลหะหนักส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารประกอบที่เหลือจากสี่ชั้นแรก โดยโลหะหนักที่พบในชั้นที่ 5 นี้จะมีความเสถียรสูงและชะละลายได้ยากที่สุด (Li และคณะ, 1995)

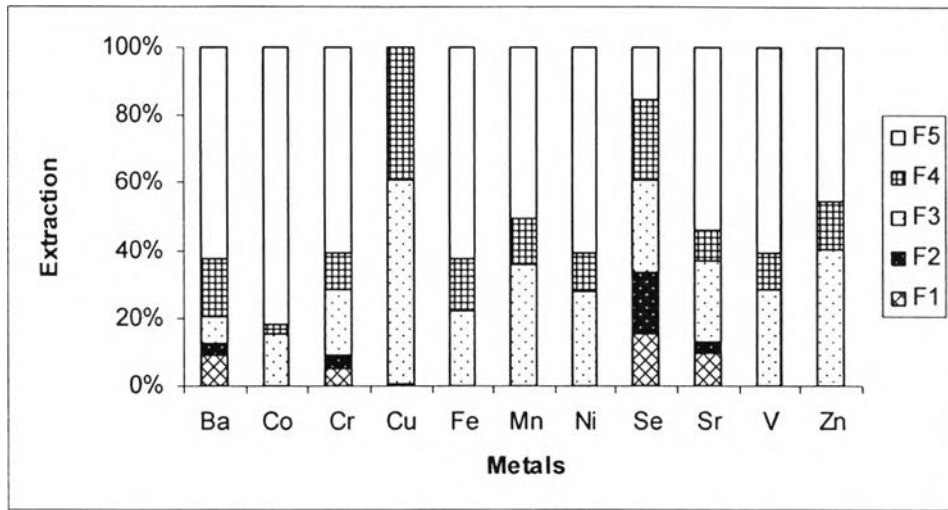
ส่วนแบเรียม (Ba) โครเมียม (Cr) ซีลีเนียม (Se) และสตรอนเชียม (Sr) เป็นโลหะหนักสี่ชนิดที่พบในชั้นที่ 1 และ 2 ซึ่งหมายถึงชั้นที่โลหะอยู่ในรูปสารประกอบที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่ายและสารประกอบโลหะที่มีพันธะกับคาร์บอเนต ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าโลหะทั้งสี่ชนิดนี้อยู่ในรูปที่มีความเสถียรต่ำและชะละลายได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งซีลีเนียมซึ่งพบว่ามีความเข้มข้นในชั้นที่ 1 และ 2 สูงอย่างชัดเจนมากกว่าโลหะตัวอื่น

นอกจากนี้โลหะสามชนิดคือทองแดง (Cu) และซีลีเนียม (Se) และสังกะสี (Zn) เป็นโลหะที่สามารถพบความเข้มข้นของโลหะหนักสูงอย่างชัดเจนในชั้นที่ 3 โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือทองแดงที่มีความเข้มข้นสูงที่สุดและมีความชัดเจน ซึ่งหมายถึงชั้นที่มีสารประกอบโลหะที่มีพันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์

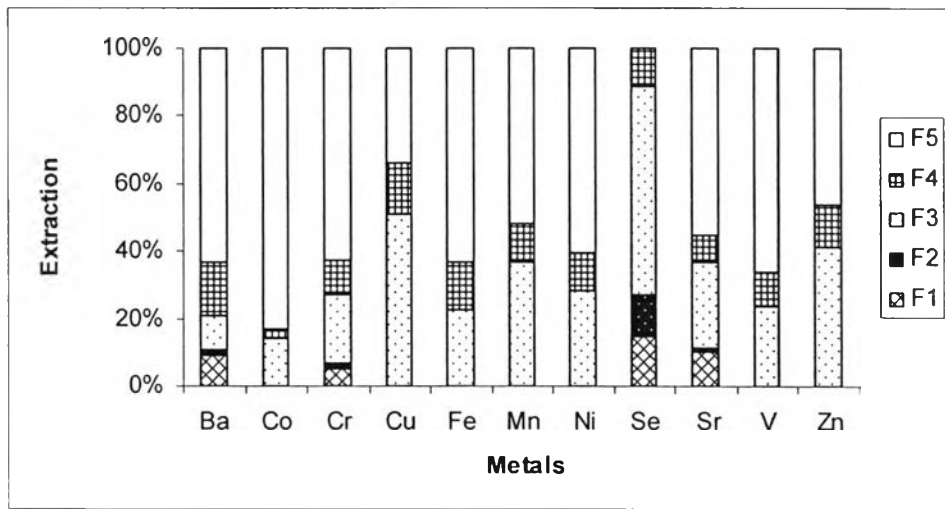
ผลของตัวอย่างจากปูนเม็ดทั้งสามวัน จากการสกัดแยกสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ชั้นในเดือนกุมภาพันธ์ 2548 (รูปที่ 4.14) พบว่าแบเรียม (Ba) โคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) และวาเนเดียม (V) มีการกระจายตัวอยู่ในชั้นที่ 5 (Residual Fraction) เป็นส่วนใหญ่ (มากกว่าร้อยละ 50 ของทุกชั้นรวมกัน) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าโลหะหนักส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารประกอบที่เหลือจากสี่ชั้นแรก โดยโลหะหนักที่พบในชั้นที่ 5 นี้จะมีความเสถียรสูงและชะละลายได้ยากที่สุด (Li และคณะ, 1995)

ส่วนแบเรียม (Ba) โครเมียม (Cr) ซีลีเนียม (Se) และสตรอนเชียม (Sr) เป็นโลหะหนักสี่ชนิดที่พบในชั้นที่ 1 และ 2 ซึ่งหมายถึงชั้นที่โลหะอยู่ในรูปสารประกอบที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่ายและสารประกอบโลหะที่มีพันธะกับคาร์บอเนต ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าโลหะทั้งสี่ชนิดนี้อยู่ในรูปที่มีความเสถียรต่ำและชะละลายได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งซีลีเนียมซึ่งพบว่ามีความเข้มข้นในชั้นที่ 1 และ 2 สูงอย่างชัดเจนมากกว่าโลหะตัวอื่น ซึ่งให้ผลที่คล้ายคลึงกับรูปที่ 4.13

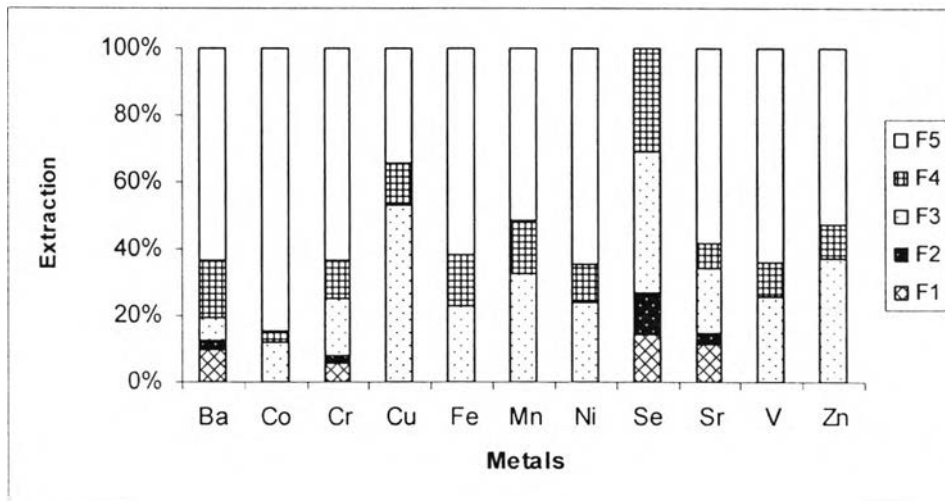
นอกจากนี้โลหะหลายชนิดคือทองแดง (Cu) แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) ซีลีเนียม (Se) และสังกะสี (Zn) เป็นโลหะที่สามารถพบความเข้มข้นของโลหะหนักสูงในชั้นที่ 3 ซึ่งหมายถึงชั้นที่มีสารประกอบโลหะที่มีพันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์



ก.) ฝุ่นปูน วันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2548



ข.) ฝุ่นปูน วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548



ค.) ฝุ่นปูน วันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2548

รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ชั้นในฝุ่นปูน ในเดือนกุมภาพันธ์ 2548

ผลของตัวอย่างจากฝุ่นปูนทั้งสามวัน จากการสกัดแยกสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ชั้นในเดือนกุมภาพันธ์ 2548 (รูปที่ 4.15) พบว่ามีผลที่ใกล้เคียงและเป็นไปในทิศทางเดียวกับความเข้มข้นของโลหะที่พบในแต่ละชั้นที่วิเคราะห์ในปูนเม็ดของวันที่เก็บตัวอย่างวันเดียวกัน ดังรูปที่ 4.14 นั่นคือพบว่า แบเรียม (Ba) โคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) และวานาเดียม (V) มีการกระจายตัวอยู่ในชั้นที่ 5 (Residual Fraction) เป็นส่วนใหญ่ (มากกว่าร้อยละ 50 ของทุกชั้นรวมกัน) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าโลหะหนักส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารประกอบที่เหลือจากชั้นแรก โดยโลหะหนักที่พบในชั้นที่ 5 นี้จะมีความเสถียรสูงและชะละลายได้ยากที่สุด

ส่วนแบเรียม (Ba) โครเมียม (Cr) ซีลีเนียม (Se) และสตรอนเชียม (Sr) เป็นโลหะหนักสี่ชนิดที่พบในชั้นที่ 1 และ 2 ซึ่งหมายถึงชั้นที่โลหะอยู่ในรูปสารประกอบที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่าย และสารประกอบโลหะที่มีพันธะกับคาร์บอนेट ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าโลหะทั้งสี่ชนิดนี้อยู่ในรูปที่มีความเสถียรต่ำและชะละลายได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งซีลีเนียมซึ่งพบว่ามีค่าความเข้มข้นในชั้นที่ 1 และ 2 สูงอย่างชัดเจนมากกว่าโลหะตัวอื่น ซึ่งให้ผลที่คล้ายคลึงกับรูปที่ 4.13 และ 4.14

นอกจากนี้โลหะสามชนิดคือทองแดง (Cu) แมงกานีส (Mn) และสังกะสี (Zn) เป็นโลหะที่สามารถพบความเข้มข้นของโลหะหนักสูงในชั้นที่ 3 ซึ่งหมายถึงชั้นที่มีสารประกอบโลหะที่มีพันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลของสารประกอบทางเคมีที่พบในปูนเม็ด และฝุ่นปูน ที่มีการเก็บตัวอย่างในวันเดียวกัน จะเห็นได้ว่าทั้งชนิดของโลหะหนักและร้อยละของความเข้มข้นที่พบระหว่างตัวอย่างทั้งสองนั้นมีความคล้ายคลึงกัน

สิ่งที่น่าสังเกตจากผลการวิจัยคือเมื่อเข้าสู่เดือนมกราคม 2548 มีการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบทองแดง และซีลีเนียมอย่างชัดเจน โดยพบอยู่ในรูปของสารประกอบกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ และในรูปของสารประกอบกับสารอินทรีย์และซัลไฟด์มากขึ้นจากเดิมในเดือนกันยายนถึงเดือนตุลาคม 2547 ที่พบว่าส่วนใหญ่ทองแดงและซีลีเนียมอยู่ในรูปของสารประกอบที่เหลือ (Residual) ซึ่งมีความเสถียรสูงและชะละลายออกมาได้ยาก เมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ของวัตถุุดิบที่เข้าสู่ระบบ พบว่าในช่วงเดือนมกราคม 2548 ดังกล่าว มีการนำวัตถุุดิบหลักซึ่งคือหินปูน (Limestone) และแร่เหล็ก (Iron Ore) ที่มีค่าของแมงกานีสความเข้มข้นสูงเข้าไปในระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแมงกานีสที่พบในแร่เหล็กนั้นมีสูงถึงประมาณ 11000 มก./กก. จึงสามารถสรุปได้ว่าแมงกานีสที่เข้าสู่ระบบมากขึ้น ทำให้พบทองแดงและซีลีเนียมอยู่ในรูปของสารประกอบเหล็กและแมงกานีสออกไซด์เพิ่มขึ้นด้วย

จากข้อมูลที่ได้จากรูปที่ 4.11 ถึง 4.15 สามารถสรุปเป็นตารางแสดงโลหะชนิดต่างๆ ที่พบในแต่ละชั้นที่ทำการสกัดแยกสารประกอบโลหะหนัก ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ชนิดของโลหะต่างๆ ที่พบในแต่ละชั้นของการสกัดแยกสารประกอบโลหะ

ชั้นการสกัด	ความหมาย	ชนิดโลหะที่พบ
ชั้นที่ 1	สารประกอบโลหะที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่าย	Ba Cr Se Sr
ชั้นที่ 2	สารประกอบโลหะที่มีพันธะกับคาร์บอนेट	Ba Cr Se Sr
ชั้นที่ 3	สารประกอบโลหะที่มีพันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์	ทุกชนิด
ชั้นที่ 4	สารประกอบโลหะที่มีพันธะกับสารอินทรีย์และซัลไฟด์	ทุกชนิด
ชั้นที่ 5	สารประกอบโลหะที่เหลือจากทั้งสี่ชั้น	ทุกชนิด

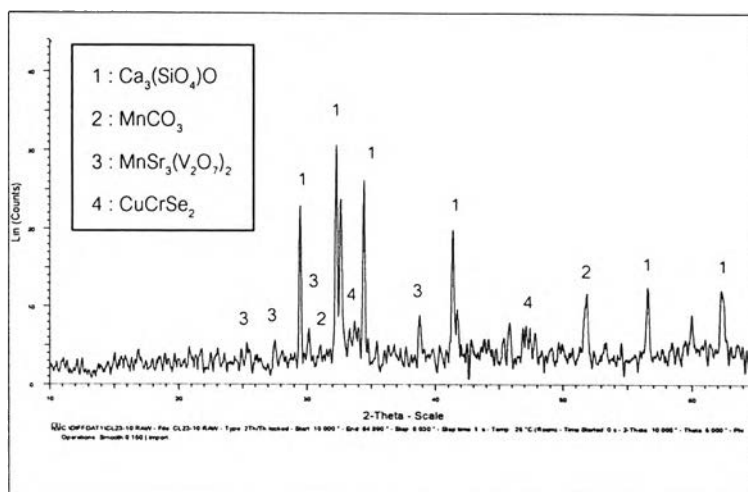
จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าโลหะหนักทุกชนิดที่ทำการวิเคราะห์ในปูนเม็ดและฝุ่นปูน ซึ่งได้แก่ แบเรียม (Ba) โคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) ซีลีเนียม (Se) สตรอนเชียม (Sr) วาเนเดียม (V) และสังกะสี (Zn) พบว่าจะอยู่ในรูปของสารประกอบโลหะหนักครบทั้ง 5 ชนิด แต่สำหรับในชั้นที่ 1 และ 2 พบว่ามีโลหะสี่ชนิด ได้แก่ แบเรียม โครเมียม ซีลีเนียม และสตรอนเชียม อยู่ในรูปสารประกอบโลหะที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่าย และสารประกอบคาร์บอนेट ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความเสถียรต่ำและมีโอกาสชะละลายออกมาได้สูง (Li และคณะ, 1995) จึงเป็นโลหะสี่ชนิดที่ต้องระมัดระวังและควรควบคุมความเข้มข้นในการนำวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบเหล่านี้สูงเข้าสู่ระบบการผลิตปูนซีเมนต์

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ชนิดและสารประกอบโลหะหนัก โดยเครื่อง XRD (X-Ray Diffraction Spectrometer)

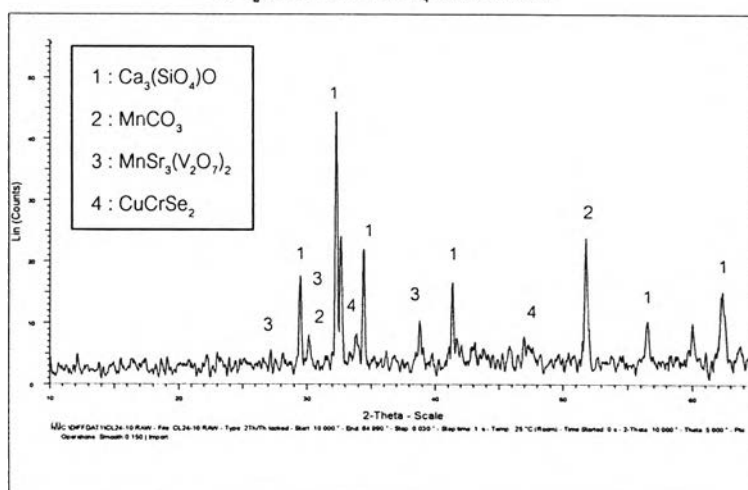
เมื่อนำส่วนของปูนเม็ด และฝุ่นปูนที่มาจากกระบวนการผลิตซีเมนต์ซึ่งเป็นตัวอย่างชนิดเดียวกับในการวิจัยในหัวข้อที่ผ่านมา โดยวิธีการเลือกตัวอย่างโดยการแบ่งข้อมูลเป็นสี่ชุดในแต่ละเดือนเช่นเดียวกับที่วิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.2.1 มาบดให้ละเอียดและนำมาวิเคราะห์ชนิดและสารประกอบของโลหะที่มีลักษณะเป็นผลึก โดยใช้ปริมาณตัวอย่างประมาณ 5 กรัม สิ่งที่ได้จากการวัดคือ กราฟความถี่ของสารประกอบต่างๆ โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า 2θ (Degrees) และ Relative Intensity นำกราฟที่ได้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่มี ซึ่งทำให้สามารถระบุสารประกอบโลหะแต่ละชนิดได้ ผลจากการวิจัยมีดังนี้

ผลการวิเคราะห์สารประกอบโลหะหนักที่อยู่ในปูนเม็ดของเดือนตุลาคม 2547 เดือนมกราคม 2548 และเดือนกุมภาพันธ์ 2548 และสารประกอบที่อยู่ในฝุ่นปูนของเดือนกุมภาพันธ์ 2548 สรุปในรูปกราฟความถี่ของสารประกอบโลหะต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.16 ถึง 4.19 และสรุปชนิดของสารประกอบโลหะต่างๆ ในปูนเม็ด และฝุ่นปูน ได้ดังตารางที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

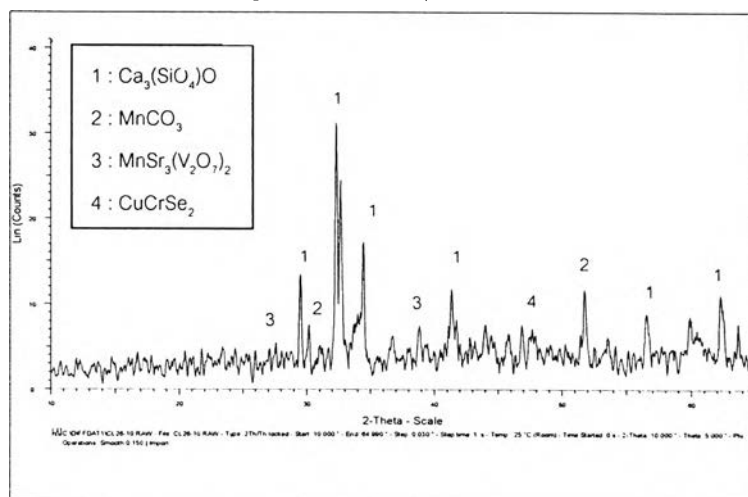
ผลจากการวิเคราะห์ในทั้งปูนเม็ดและฝุ่นปูน พบว่ากราฟความถี่ที่เป็นกราฟหลักและมีความชัดเจนมากที่สุดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD คือกราฟความถี่ของแคลเซียมซิลิเกตออกไซด์ ($\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}$) และแคลเซียมอะลูมินาซิลิเกต ($\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$) ซึ่งอาจเรียกว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไตรแคลเซียมอะลูมินาซิลิเกต (C_3A) ตามลำดับ อันเป็นส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั่นเอง (ชัชวาลย์, 2539) สำหรับการสืบค้นข้อมูลกราฟความถี่ที่ได้กับฐานข้อมูลที่มีในเครื่อง XRD แสดงผลดังภาคผนวก ค.



ก.) ปูนเม็ดวันที่ 23 ตุลาคม 2547

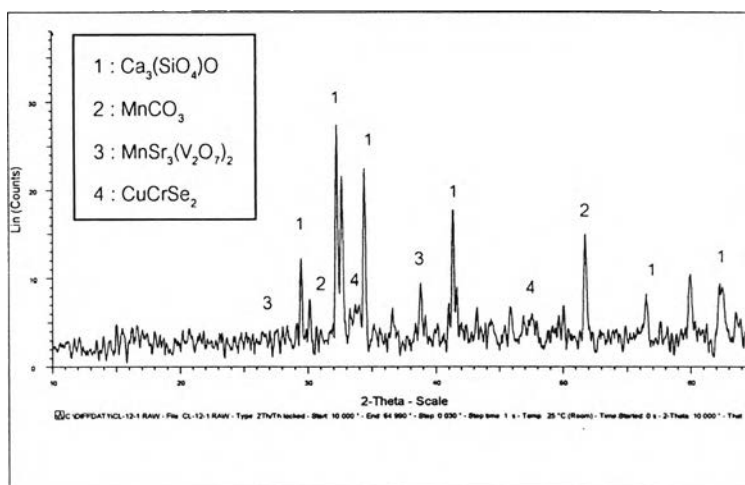


ข.) ปูนเม็ดวันที่ 24 ตุลาคม 2547

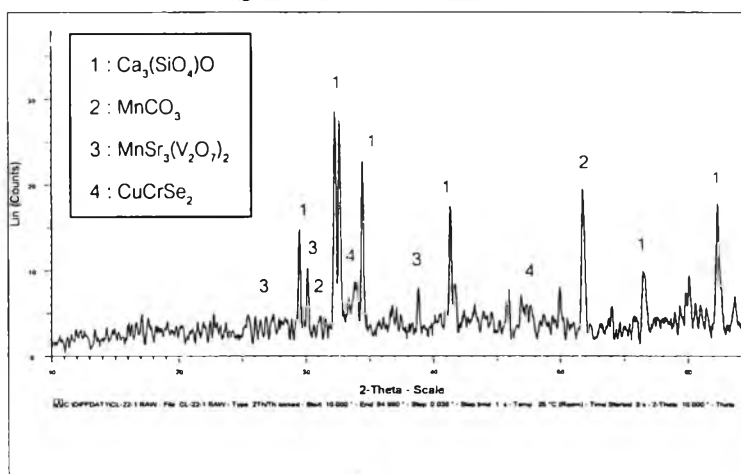


ค.) ปูนเม็ดวันที่ 26 ตุลาคม 2547

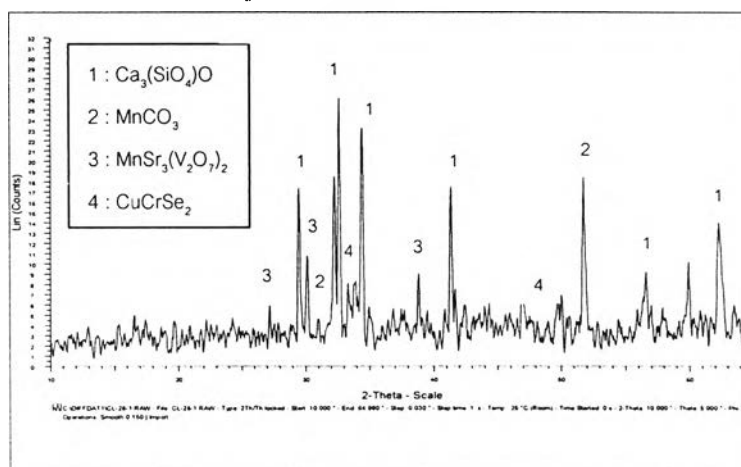
รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ด เดือนตุลาคม 2547 ด้วยเครื่อง XRD



ก.) ปูนเม็ดวันที่ 12 มกราคม 2548

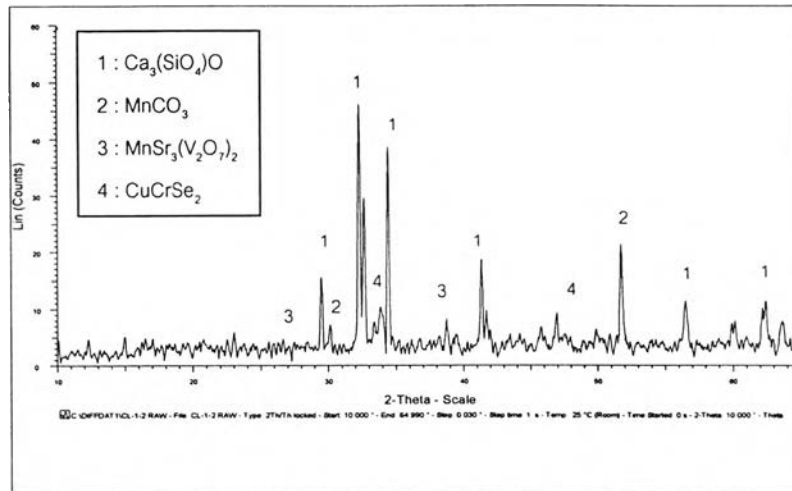


ข.) ปูนเม็ดวันที่ 22 มกราคม 2548

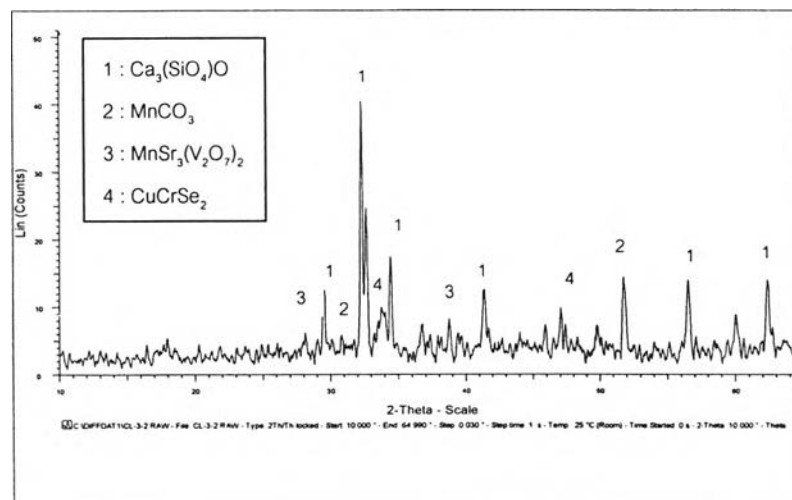


ค.) ปูนเม็ดวันที่ 28 มกราคม 2548

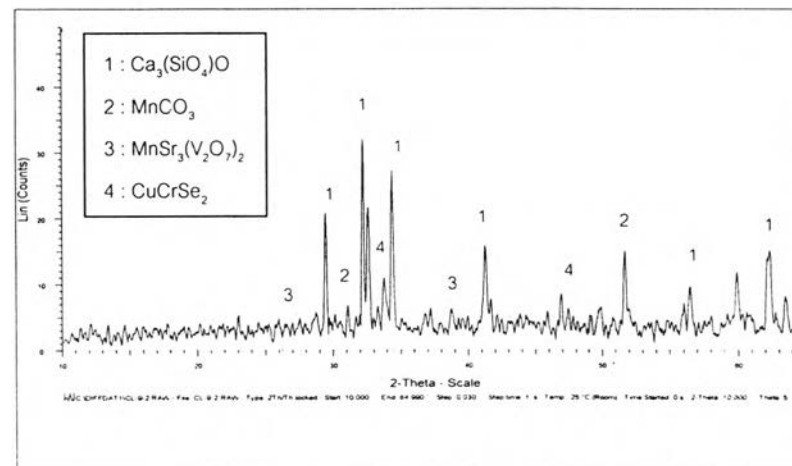
รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ด เดือนมกราคม 2548 ด้วยเครื่อง XRD



ก.) ปูนเม็ดวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2548

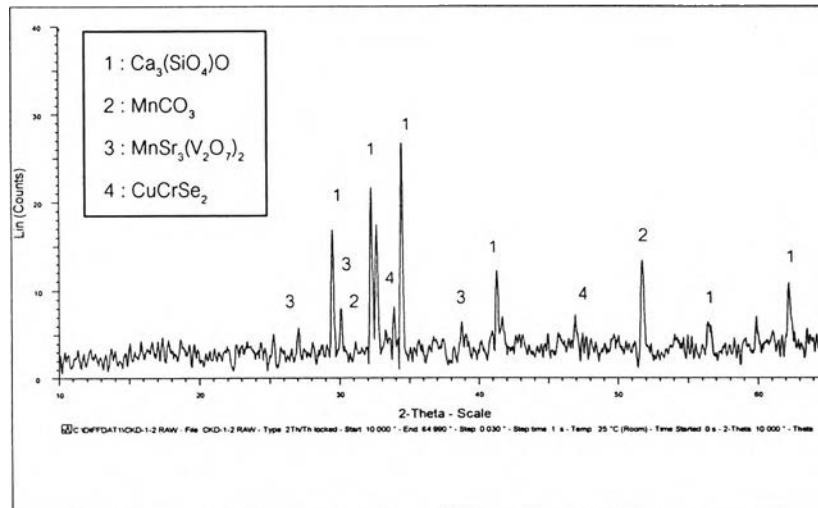


ข.) ปูนเม็ดวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548

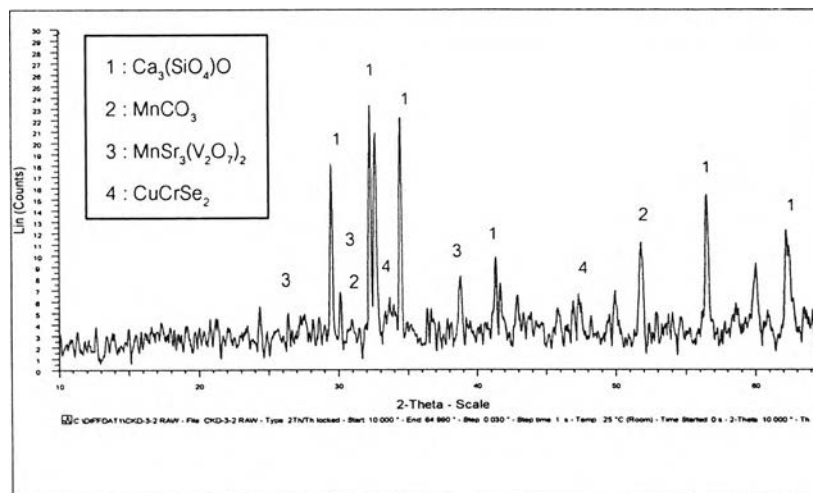


ค.) ปูนเม็ดวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2548

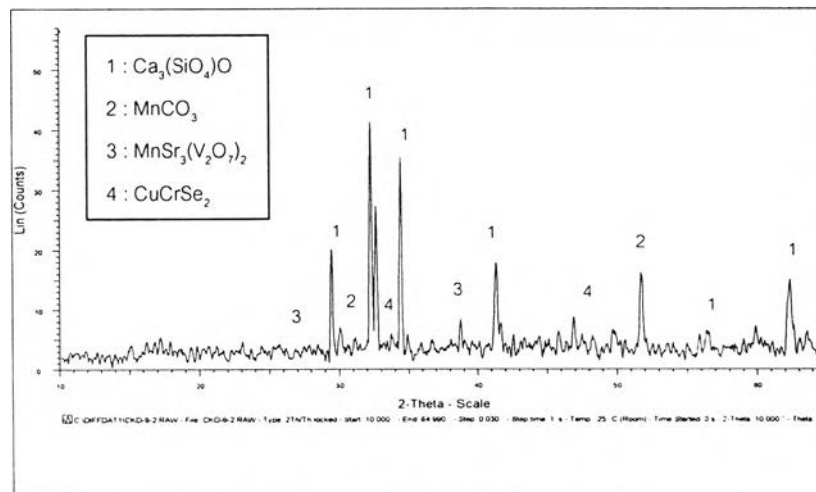
รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ด เดือนกุมภาพันธ์ 2548 ด้วยเครื่อง XRD



ก.) ฝุ่นปูนวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2548



ข.) ฝุ่นปูนวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548



ค.) ฝุ่นปูนวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2548

รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในฝุ่นปูน เดือนกุมภาพันธ์ 2548 ด้วยเครื่อง XRD

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์สารประกอบโลหะหนักในปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRD

เดือนที่เก็บตัวอย่าง	ชื่อสารประกอบในปูนเม็ด	ชื่อย่อ
ตุลาคม 2547	Calcium Silicate Oxide	$\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}$
	Calcium Alumina Silicate	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
	Copper Chromium Selenide	CuCrSe_2
	Daubreelite	FeCr_2S_4
	Iron Selenide	Fe_7Se_8
	Iron Selenium Chloride	FeSeCl_7
	Manganese Carbonate	MnCO_3
	Manganese Strontium Vanadium Oxide	$\text{MnSr}_3(\text{V}_2\text{O}_7)_2$
Strontium Manganese Oxide	$\text{Sr}_4\text{Mn}_3\text{O}_{10}$	
มกราคม 2548	Calcium Silicate Oxide	$\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}$
	Calcium Alumina Silicate	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
	Cobalt Manganese Spinel	Co_2MnO_4
	Copper Iron Sulfide	CuFeS_2
	Daubreelite	FeCr_2S_4
	Iron Selenide	Fe_7Se_8
	Iron Selenium Chloride	FeSeCl_7
	Manganese Carbonate	MnCO_3
	Manganese Strontium Vanadium Oxide	$\text{MnSr}_3(\text{V}_2\text{O}_7)_2$
	Manganese Vanadium Silicate	$\text{Mn}_3\text{V}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
Strontium Manganese Oxide	$\text{Sr}_4\text{Mn}_3\text{O}_{10}$	
กุมภาพันธ์ 2548	Calcium Silicate Oxide	$\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}$
	Calcium Alumina Silicate	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
	Cobalt Manganese Spinel	Co_2MnO_4
	Copper Iron Sulfide	CuFeS_2
	Copper Chromium Selenide	CuCrSe_2
	Daubreelite	FeCr_2S_4
	Iron Selenide	Fe_7Se_8
	Iron Selenium Chloride	FeSeCl_7
	Manganese Carbonate	MnCO_3
	Manganese Strontium Vanadium Oxide	$\text{MnSr}_3(\text{V}_2\text{O}_7)_2$
	Strontium Manganese Oxide	$\text{Sr}_4\text{Mn}_3\text{O}_{10}$

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์สารประกอบโลหะหนักในฝุ่นปูนด้วยเครื่อง XRD

เดือนที่เก็บตัวอย่าง	ชื่อสารประกอบในฝุ่นปูน	ชื่อย่อ
กุมภาพันธ์ 2548	Calcium Silicate Oxide	$\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}$
	Calcium Alumina Silicate	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
	Calcium Oxide	CaO
	Cobalt Manganese Spinel	Co_2MnO_4
	Copper Chromium Selenide	CuCrSe_2
	Copper Iron Sulfide	CuFeS_2
	Iron Selenide	Fe_7Se_8
	Manganese Carbonate	MnCO_3
	Manganese Strontium Vanadium Oxide	$\text{MnSr}_3(\text{V}_2\text{O}_7)_2$
	Strontium Manganese Oxide	$\text{Sr}_4\text{Mn}_3\text{O}_{10}$

สำหรับสารประกอบของโลหะหนักที่สนใจ ที่วิเคราะห์ได้จากปูนเม็ดและฝุ่นปูน พบว่ามีโคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) แมงกานีส (Mn) ซีลีเนียม (Se) สตรอนเชียม (Sr) และวานาเดียม (V) ซึ่งอยู่ในรูปสารประกอบที่แตกต่างกันไปดังแสดงในตารางที่ 4.7 และ 4.8

โคบอลต์ (Co) ที่พบจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD จะอยู่ในรูปสารประกอบที่มีพันธะกับแมงกานีสออกไซด์ (Co_2MnO_4) ซึ่งสอดคล้องกับผลที่วิเคราะห์ได้จากการสกัดแยกสารประกอบโลหะ (Sequential Extraction) ของการวิจัยในหัวข้อที่ 4.2.1 ที่พบว่ามีโคบอลต์ชะละลายออกมาในขั้นที่ 3 ซึ่งเป็นขั้นที่มีสารประกอบโลหะที่มีพันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ และนอกจากนี้ จากตารางที่ 4.7 จะเห็นว่าไม่พบสารประกอบโคบอลต์ปรากฏในเดือนตุลาคม 2547 แต่พบว่ามีในเดือนมกราคมและกุมภาพันธ์ 2548 ซึ่งเมื่อย้อนกลับไปยังผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในการวิจัยของหัวข้อที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าผลการวิจัยสอดคล้องกันเนื่องจากความเข้มข้นของโคบอลต์ที่พบในปูนเม็ดของเดือนมกราคม 2548 (ประมาณ 11 มก./กก.) มีสูงกว่าในเดือนตุลาคม 2547 (ประมาณ 5 มก./กก.) โดยมีที่มาจากแร่เหล็ก (Iron Ore) ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปในทางสูงขึ้นเช่นเดียวกันในเดือนดังกล่าว (จากประมาณ 20 มก./กก. สูงขึ้นเป็นประมาณ 100 มก./กก.)

ทองแดง (Cu) จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD พบสารประกอบในรูป CuFeS_2 และ CuCrSe_2 ซึ่งเป็นไปตามผลของการสกัดแยกสารประกอบโลหะ (Sequential Extraction) ที่พบว่ามีความเข้มข้นของทองแดงออกมาในขั้นที่ 4 และ 5 (สารประกอบในรูปซัลไฟด์และ Residual ตามลำดับ)

แมงกานีส (Mn) จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD พบสารประกอบในรูป $\text{MnSr}_3(\text{V}_2\text{O}_7)_2$ $\text{Mn}_3\text{V}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ และ $\text{Sr}_4\text{Mn}_3\text{O}_{10}$ ซึ่งล้วนอยู่ในรูปของออกไซด์ ซึ่งเป็นไปตามผลของการสกัดแยกสารประกอบโลหะ (Sequential Extraction) ที่พบความเข้มข้นออกมาในขั้นที่ 3 ของการสกัด ส่วน MnCO_3 ที่พบจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสกัดแยกสารประกอบในขั้นที่ 2 (สารประกอบในรูปคาร์บอเนต) พบว่ามีความเข้มข้นของแมงกานีสในขั้นนี้น้อยมาก จึงอาจสรุปได้ว่าแมงกานีสไม่ใช่โลหะที่น้ำก้างวลมากนักในเรื่องของการชะละลายออกมาได้ง่าย

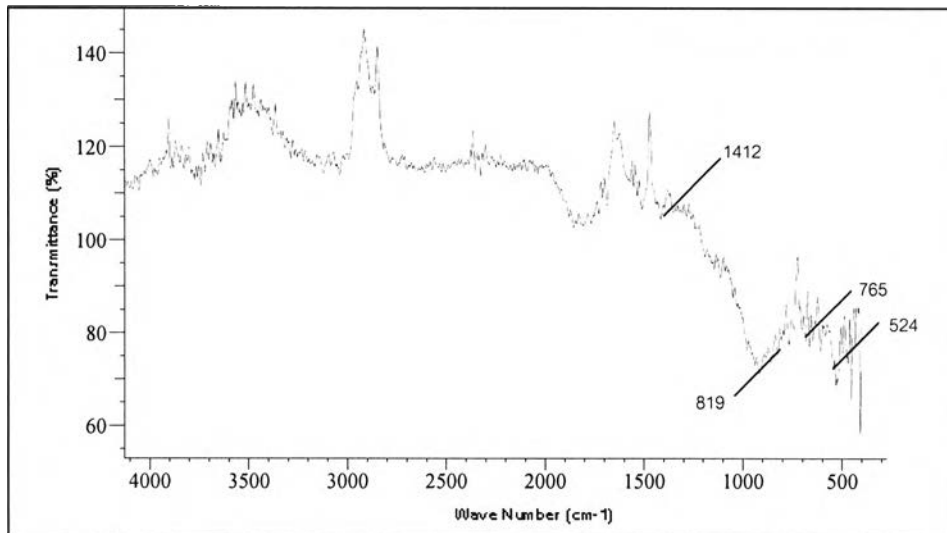
โครเมียม (Cr) และซีลีเนียม (Se) พบว่าเป็นสารประกอบที่รวมอยู่กับเหล็ก ได้แก่ FeCr_2S_4 Fe_7Se_8 และ FeSeCl_7 และพบว่ารวมอยู่ด้วยกันในรูป CuCrSe_2 แต่ไม่พบในรูปอื่นจากการวิเคราะห์ด้วย XRD

สตรอนเชียม (Sr) และวานาเดียม (V) พบว่าเป็นสารประกอบร่วมกับแมงกานีสออกไซด์ ได้แก่ $\text{Sr}_4\text{Mn}_3\text{O}_{10}$ $\text{MnSr}_3(\text{V}_2\text{O}_7)_2$ และ $\text{Mn}_3\text{V}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ซึ่งสอดคล้องกับที่พบความเข้มข้นในขั้นที่ 3 ของการสกัดแยกสารประกอบโลหะ (Sequential Extraction) แต่ไม่พบในรูปอื่นจากการวิเคราะห์ด้วย XRD

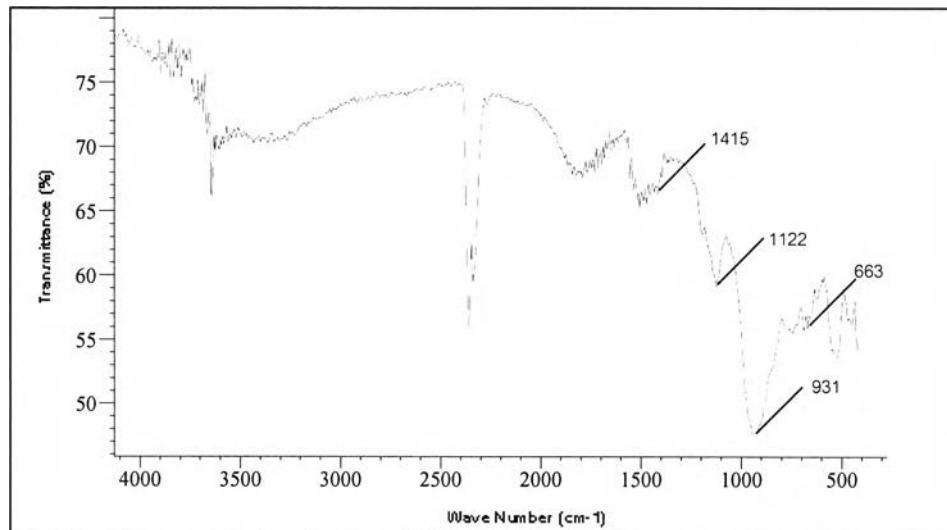
จากผลที่กล่าวมาทั้งหมด อาจสรุปได้ว่าผลึกสารประกอบของโลหะที่พบในปูนเม็ด และฝุ่นปูน ส่วนใหญ่อยู่ในรูปแมงกานีสออกไซด์

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ชนิดและสารประกอบโลหะหนัก โดยเครื่อง FTIR

ผลจากการนำตัวอย่างของปูนเม็ดและฝุ่นปูนมาวิเคราะห์สารประกอบโลหะ ด้วยเครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) ที่ความถี่ในการสแกน 200 ครั้ง ผลแบบ Transmittance กราฟความถี่ที่วัดได้ในแต่ละวันแสดงดังรูปที่ 4.20 ถึง 4.23 โดยแกนนอน (x) คือค่าเลขคลื่น และแกนตั้ง (y) คือค่า Transmittance (%)



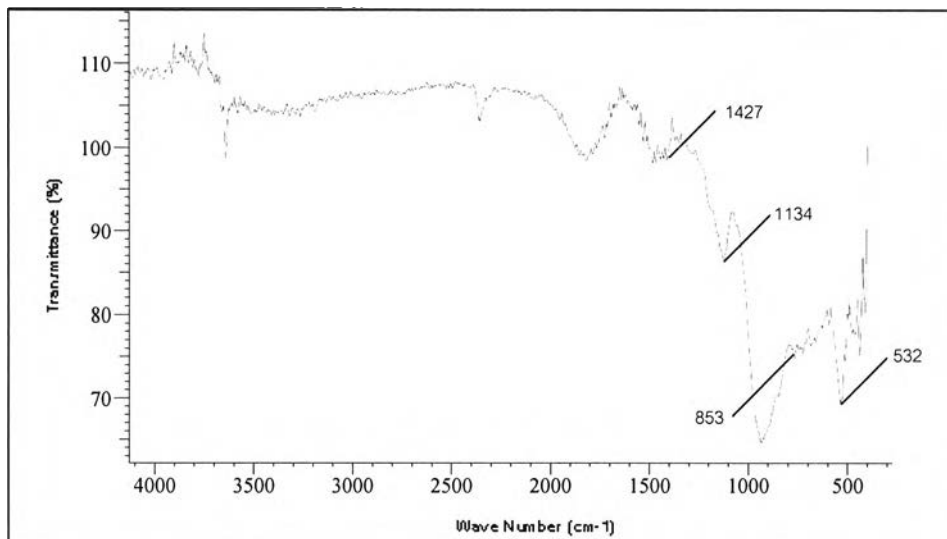
รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ดวันที่ 24 ตุลาคม 2547 ด้วยเครื่อง FTIR



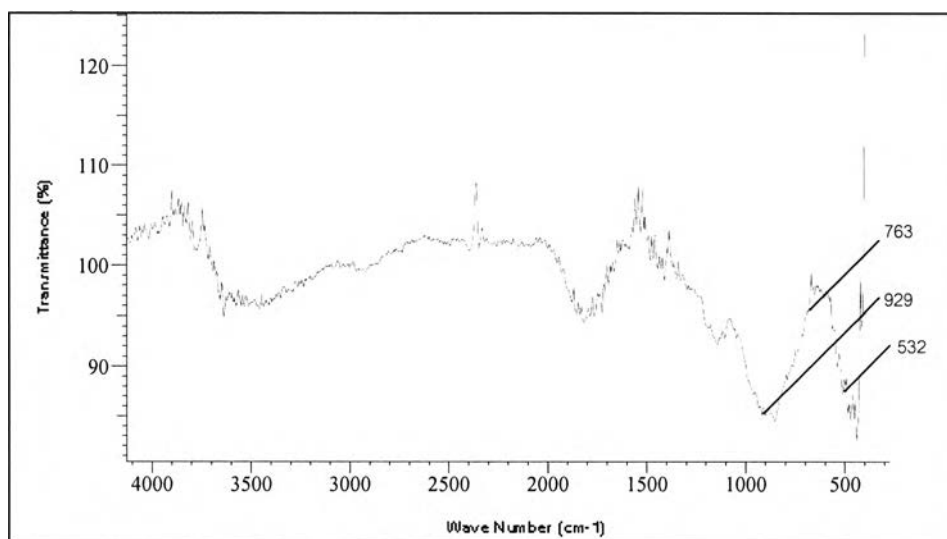
รูปที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ดวันที่ 22 มกราคม 2548 ด้วยเครื่อง FTIR

ผลของการเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล (Nakamoto, 1986 และ Spence, 1993) จากรูปที่ 4.20 ของตัวอย่างปูนเม็ดในเดือนตุลาคม 2547 พบว่ามีสารประกอบของ $(\text{SeO}_4)^{2-}$ (เลขคลื่น 430) $\text{V}_4(\text{SiO}_4)^{2-}$ (เลขคลื่น 524) $(\text{CrO}_4)^{3-}$ (เลขคลื่น 765) $(\text{SiO}_4)^{4-}$ (เลขคลื่น 819) และ CaCO_3 (เลขคลื่น 1412)

ผลของการเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล จากรูปที่ 4.21 ของตัวอย่างปูนเม็ดในเดือนมกราคม 2548 พบว่ามีสารประกอบของ $\text{V}_4(\text{SiO}_4)^{2-}$ (เลขคลื่น 528) BaO (เลขคลื่น 663) SiO (เลขคลื่น 931) SO_4 (เลขคลื่น 1122) และ CaCO_3 (เลขคลื่น 1415)



ก.) ปูนเม็ด

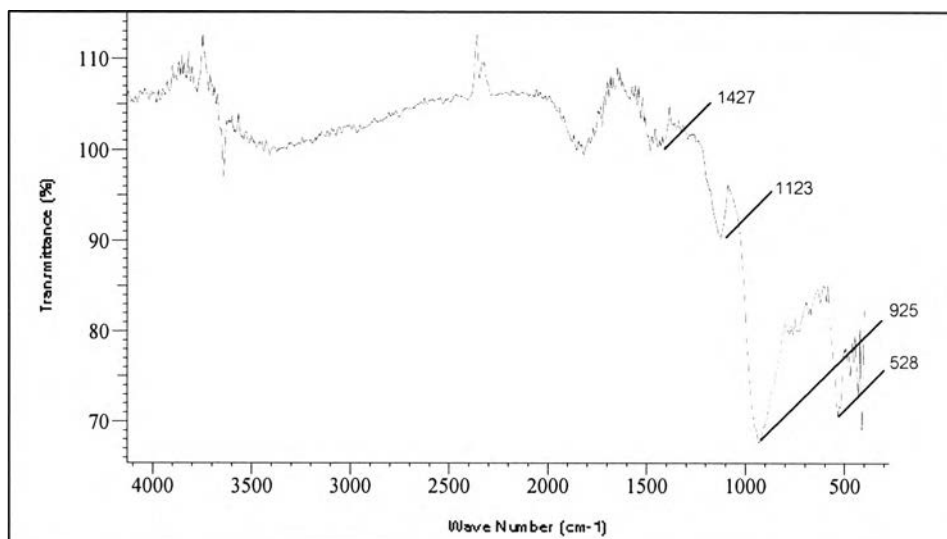


ข.) ฝุ่นปูน

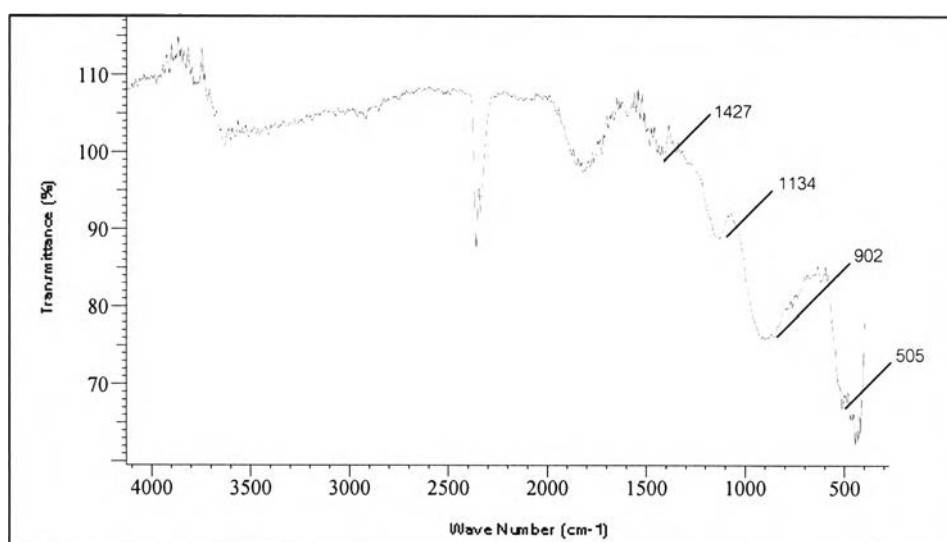
รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ดและฝุ่นปูนวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 ด้วย FTIR

ผลจากการเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล จากรูปที่ 4.22 ของตัวอย่างปูนเม็ดในวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 พบว่ามีสารประกอบของ $V_4(SiO_4)^{2-}$ (เลขคลื่น 532) $(CrO_4)^{2-}$ (เลขคลื่น 853) SO_4 (เลขคลื่น 1134) และ $CaCO_3$ (เลขคลื่น 1427)

ส่วนผลของตัวอย่างฝุ่นปูนในวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 พบสารประกอบของ $(SeO_4)^{2-}$ (เลขคลื่น 436) $V_4(SiO_4)^{2-}$ (เลขคลื่น 532) $(CrO_4)^{3-}$ (เลขคลื่น 763) และ MnO_4 (เลขคลื่น 929)



ก.) ปูนเม็ด



ข.) ฝุ่นปูน

รูปที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ดและฝุ่นปูนวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2548 ด้วย FTIR

ผลของการเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล จากรูปที่ 4.23 ของตัวอย่างปูนเม็ดในวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2548 พบว่ามีสารประกอบของ $(\text{SeO}_4)^{2-}$ (เลขคลื่น 428) $\text{V}_4(\text{SiO}_4)^{2-}$ (เลขคลื่น 528) SiO (เลขคลื่น 925) SO_4 (เลขคลื่น 1123) และ CaCO_3 (เลขคลื่น 1427)

ส่วนผลของตัวอย่างฝุ่นปูนในวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2548 พบสารประกอบของ $(\text{SeO}_4)^{2-}$ (เลขคลื่น 430) $\text{V}_4(\text{SiO}_4)^{2-}$ (เลขคลื่น 505) MnO_4 (เลขคลื่น 902) SO_4 (เลขคลื่น 1134) และ CaCO_3 (เลขคลื่น 1427)

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ดด้วยเครื่อง FTIR

เดือนที่เก็บตัวอย่าง	สารประกอบในปูนเม็ด	สารประกอบในฝุ่นปูน
ตุลาคม 2547	$(\text{SeO}_4)^{2-}$ $\text{V}_4(\text{SiO}_4)^{2-}$ $(\text{CrO}_4)^{3-}$ $(\text{SiO}_4)^{4-}$ CaCO_3	CaCO_3
มกราคม 2548	$\text{V}_4(\text{SiO}_4)^{2-}$ BaO SiO $(\text{SO}_4)^{2-}$ CaCO_3	-
กุมภาพันธ์ 2548	$(\text{SeO}_4)^{2-}$ $\text{V}_4(\text{SiO}_4)^{2-}$ $(\text{CrO}_4)^{2-}$ SiO $(\text{SO}_4)^{2-}$ CaCO_3	$(\text{SeO}_4)^{2-}$ $\text{V}_4(\text{SiO}_4)^{2-}$ $(\text{CrO}_4)^{3-}$ MnO_4 $(\text{SO}_4)^{2-}$ CaCO_3

จากการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ดและฝุ่นปูนด้วยเครื่อง FTIR สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่า $\text{V}_4(\text{SiO}_4)^{2-}$ และ CaCO_3 เป็นสารประกอบที่พบในทุกตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ สำหรับ $\text{V}_4(\text{SiO}_4)^{2-}$ มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Sequential Extraction ที่มีการพบความเข้มข้นของวาเนเดียมในชั้นที่ 5 (Residual) และยังคงสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ที่มีการพบสารประกอบของ $\text{Mn}_3\text{V}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ในปูนเม็ดและฝุ่นปูนอีกด้วย ส่วน CaCO_3 ซึ่งเป็นส่วนประกอบของวัตถุดิบที่เข้าระบบ การมีสารประกอบชนิดนี้ในปูนเม็ดหรือฝุ่นปูน เป็นไปได้ว่าอาจมีการตกค้างจากการกระบวนการเผาที่ไม่สมบูรณ์

BaO ที่พบในเดือนมกราคม 2547 มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Sequential Extraction ที่มีการพบความเข้มข้นของแบเรียมในชั้นที่ 1 (สารประกอบที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่าย) และ MnO_4 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ก็มีความสอดคล้องกับผล

จากทั้งวิธี Sequential Extraction และจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ที่มีการพบสารประกอบของแมงกานีสออกไซด์เป็นส่วนใหญ่

$(CrO_4)^{3-}$ และ $(SeO_4)^{2-}$ ที่พบได้ในทั้งปุ๋ยมัดและฝุ่นปุ๋นจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Sequential Extraction ที่มีการพบความเข้มข้นของโครเมียมและซีลีเนียมในชั้นที่ 1 (สารประกอบที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่าย)

จากการวิเคราะห์สารประกอบโลหะหนักในปุ๋นมัดและฝุ่นปุ๋นทั้งสามวิธี ได้แก่ การวิเคราะห์ด้วยวิธี Sequential Extraction การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR พบว่าภายใต้การเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ได้มาซึ่งปุ๋นมัดและฝุ่นปุ๋นนั้น องค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นมีความหลากหลายแต่มีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกัน วิธี Sequential Extraction สามารถให้ผลขององค์ประกอบทางเคมีอย่างครอบคลุม ส่วนเครื่อง XRD และ FTIR เป็นการตรวจสอบและยืนยันรูปแบบของสารประกอบทางเคมีที่ละเอียดยิ่งขึ้น แต่ทั้งนี้การที่ไม่สามารถตรวจพบสารประกอบอีกหลายชนิดด้วยเครื่องมือทั้งสองนี้ ดังเช่นที่พบสารประกอบนั้นๆ ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี Sequential Extraction เป็นผลสืบเนื่องมาจากการที่เครื่องวัดไม่สามารถแยกแยะการทับซ้อนของกราฟความถี่ได้ หรือเกิดจากการบดบังจากองค์ประกอบอื่นที่มีความชัดเจนมากกว่านั่นเอง

4.3 ผลการศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์โดยสังเกตจากลักษณะทางกายภาพ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาคือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ตัวอย่างที่ใช้คือปูนเม็ดที่มาจากกระบวนการผลิตซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมหรือเตา นำมาศึกษาทั้งที่เป็นผิวด้านนอก และด้านในของปูนเม็ด เพื่อหารูปแบบการกระจายตัวของโลหะที่อยู่ในปูนเม็ด โดยเริ่มจากการส่องกราดพลังงานบนตัวอย่างเพื่อตรวจสอบการจับตัวกันและการกระจายตัวของโลหะหนักที่ปรากฏอยู่บนพื้นผิวนั้น และเมื่อต้องการตรวจสอบถึงรายละเอียดของปริมาณและชนิดที่โลหะหนักที่แน่นอนในจุดที่สนใจ จำเป็นต้องใช้การหาองค์ประกอบที่เป็นธาตุด้วย EDS หรือ Energy Dispersive เพื่อช่วยในการศึกษา ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4.24 ถึง 4.27

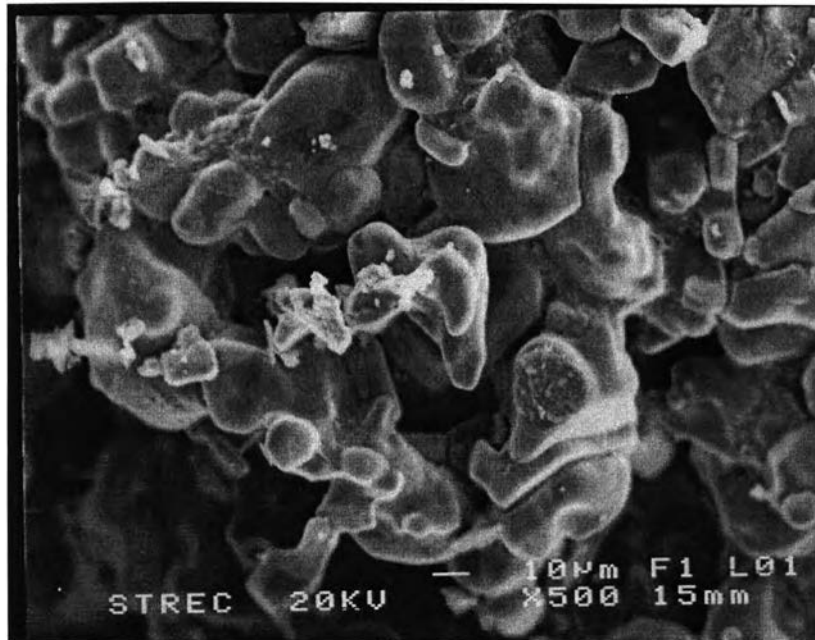
จากรูปที่ 4.24 เป็นลักษณะพื้นผิวภายในของปูนเม็ด ที่กำลังขยาย 500 เท่า ลักษณะที่สังเกตเห็นได้คือปูนเม็ดมีผิวขรุขระและมีความมัน เมื่อตรวจสอบหาองค์ประกอบในภาพด้วย EDS (รูปที่ ๑.1 ในภาคผนวก) พบว่ามีองค์ประกอบของแคลเซียมสูง มีซิลิกาและออกซิเจนในปริมาณที่น้อยกว่า

จากรูปที่ 4.25 เป็นลักษณะของผลึกของแคลเซียมที่ฝังอยู่บนผิวของปูนเม็ด ที่กำลังขยาย 3300 เท่า ซึ่งจากการตรวจสอบด้วย EDS พบว่ามีปริมาณของแคลเซียมสูง

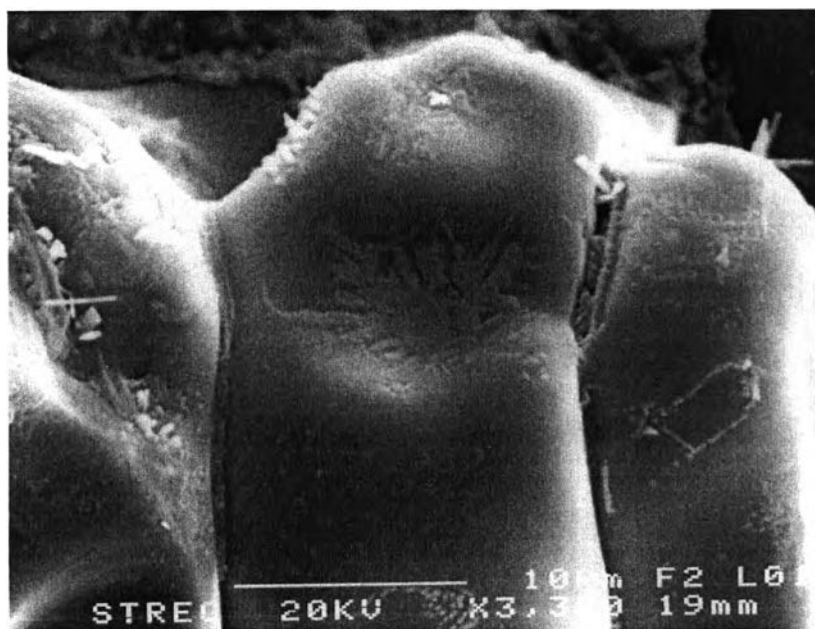
จากรูปที่ 4.26 เป็นลักษณะของผิวที่มีองค์ประกอบของซิลิกา และแคลเซียม ที่กำลังขยาย 10000 เท่า ซึ่งคาดว่าจะจะเป็นเถ้าลอย (Fly Ash)

จากรูปที่ 4.27 เป็นลักษณะของผลึกซึ่งอาจเป็นแคลเซียมออกไซด์ ที่กำลังขยาย 2500 เท่า ซึ่งจากการตรวจสอบด้วย EDS (รูปที่ ๑.2 ในภาคผนวก) พบว่ามีปริมาณของแคลเซียม และออกซิเจนสูง

จะเห็นได้ว่าจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM สำหรับงานวิจัยนี้พบเพียงองค์ประกอบหลักหรือองค์ประกอบพื้นฐานที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ ได้แก่ แคลเซียม ออกไซด์ และซิลิกา แต่ไม่สามารถวิเคราะห์หาโลหะชนิดต่างๆ บนผิวของปูนเม็ดได้ อันเนื่องจากความเข้มข้นของโลหะมีน้อยเกินไป ทำให้มีการกระจายตัวออกไปจนไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง SEM ดังกล่าว



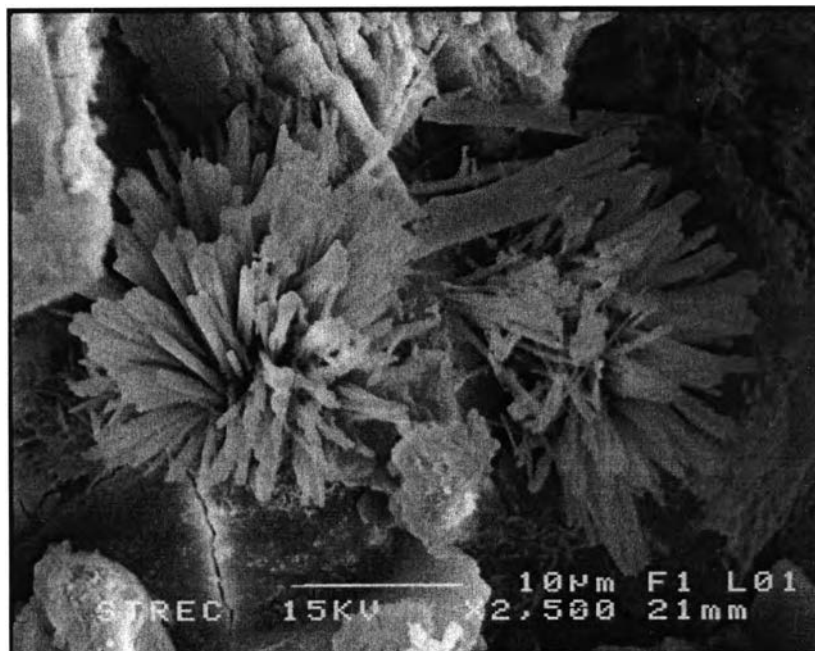
รูปที่ 4.24 โครงสร้างที่ผิวภายในปูนเม็ด ที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.25 ลักษณะผลึกของแคลเซียม ที่อยู่ในปูนเม็ด ที่กำลังขยาย 3300 เท่า



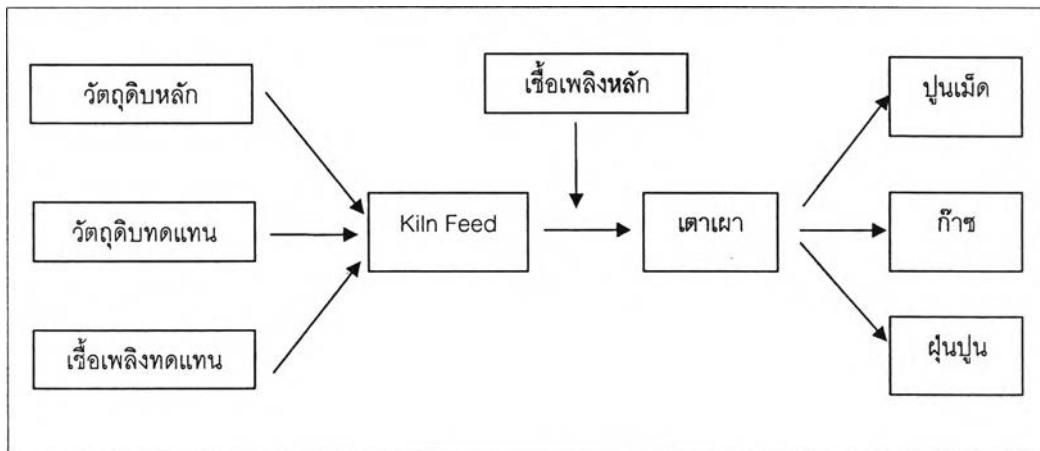
รูปที่ 4.26 ลักษณะของผิวที่มีองค์ประกอบของซิลิกา และแคลเซียม ที่กำลังขยาย 10000 เท่า



รูปที่ 4.27 ลักษณะผลึกซึ่งอาจเป็นแคลเซียมออกไซด์ ที่กำลังขยาย 2500 เท่า

4.4 ผลการศึกษาสมดุลมวลของโลหะหนักในระบบซีเมนต์และการสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์

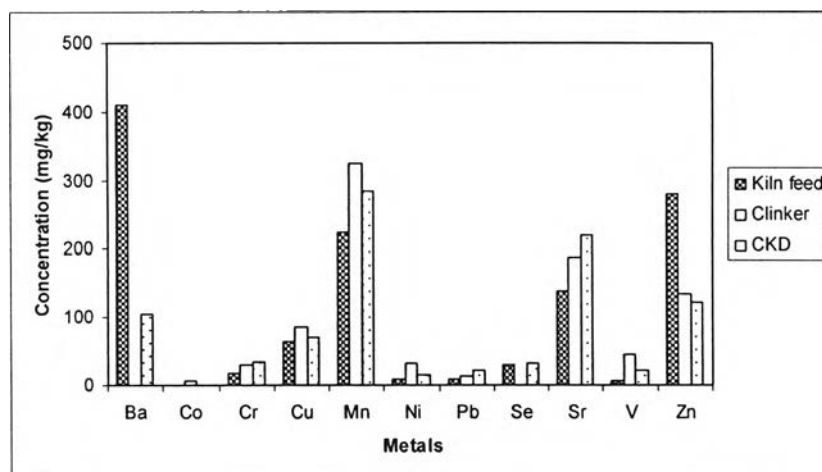
กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด มหาชน เริ่มจากการใส่วัตถุดิบหลัก วัตถุดิบทดแทน เชื้อเพลิงหลัก และเชื้อเพลิงทดแทนเข้าสู่ระบบการเผาปูนซีเมนต์ จนได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นปูนเม็ด ฝุ่นปูน และก๊าซ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4.28



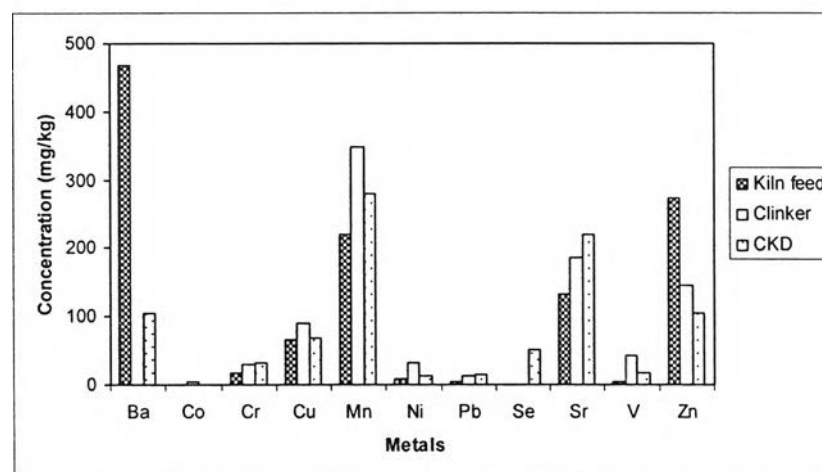
รูปที่ 4.28 ผังสมดุลมวลที่เข้าและออกจากระบบการผลิตซีเมนต์

4.4.1 ความเข้มข้นของโลหะที่เข้าและออกจากระบบการผลิตซีเมนต์

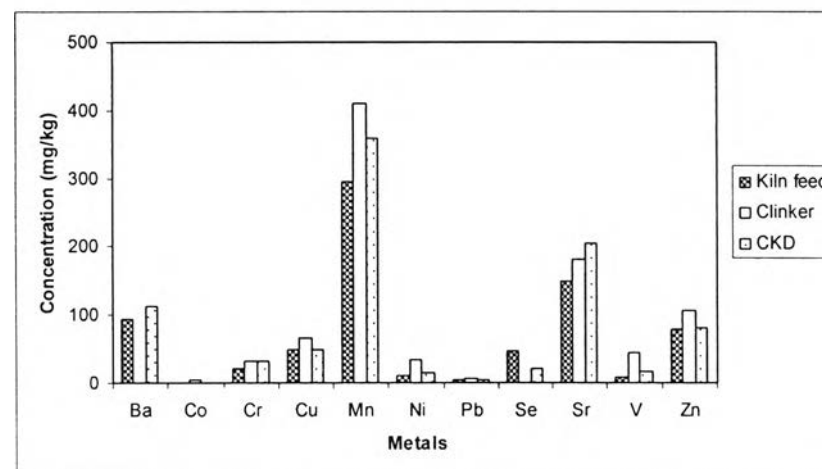
จากผลจากการวิเคราะห์ชนิดและความเข้มข้นของโลหะหนักจากการวิจัยในหัวข้อที่ 4.1 เมื่อนำมาประกอบกับแผนผังสมดุลมวลที่เข้าและออกจากระบบการผลิตซีเมนต์ และให้ Kiln Feed เป็นตัวแทนของวัตถุดิบที่เข้าสู่ระบบ ที่ยังไม่รวมกับเชื้อเพลิงหลัก สิ่งที่ได้จากการเผาในกระบวนการคือปูนเม็ด ฝุ่นปูน และก๊าซ ซึ่งในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโลหะที่เข้าและออกจากระบบจะพิจารณาความเข้มข้นที่มีอยู่ใน Kiln Feed ปูนเม็ดและฝุ่นปูน ที่ได้จากผลการวิจัยในหัวข้อที่ 4.1 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบเมื่อมีการใช้ปริมาณของตัวอย่างเท่ากัน โดยเลือกตัวอย่างวันที่มีการเก็บตัวอย่างของปูนเม็ดพร้อมกับฝุ่นปูนซึ่งมีทั้งหมด 6 ชุดตัวอย่าง และสามารถสรุปความสัมพันธ์ของวัตถุที่เข้าและออกจากระบบดังกล่าวได้ดังรูปที่ 4.29 และ 4.30



ก.) วันที่ 23 ตุลาคม 2547

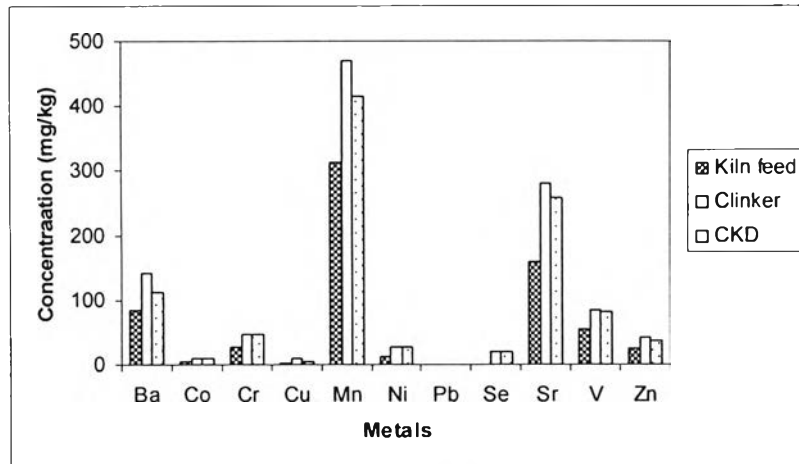


ข.) วันที่ 24 ตุลาคม 2547

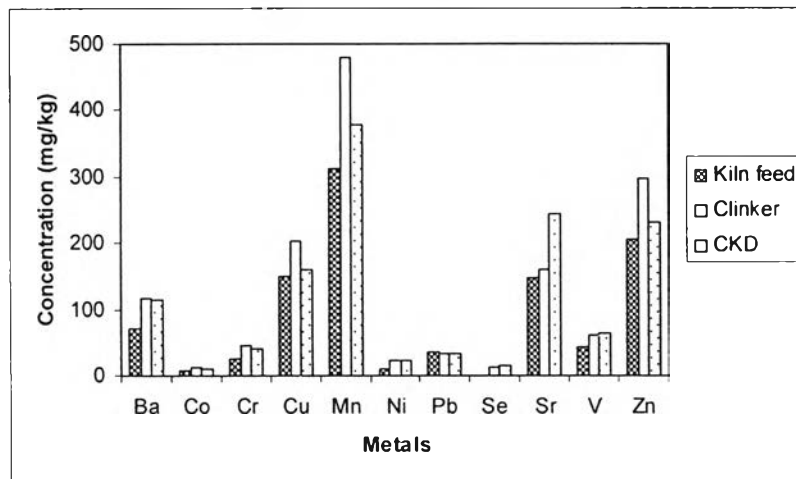


ค.) วันที่ 26 ตุลาคม 2547

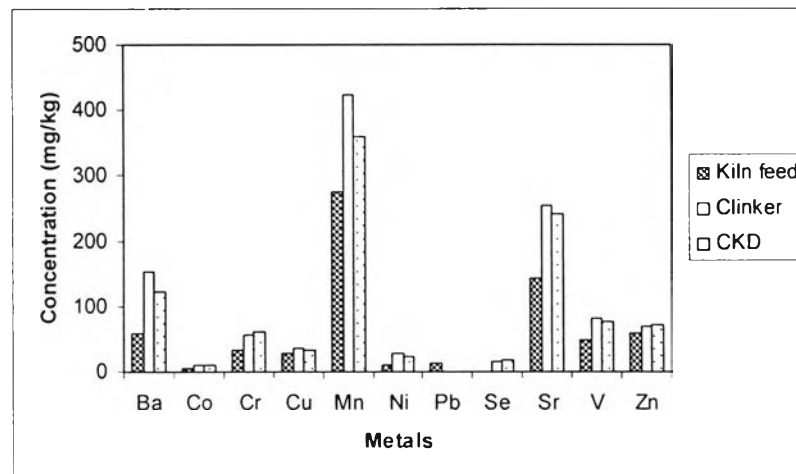
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ในหน่วย มก./กก. ที่อยู่ใน Kiln Feed ปูนเม็ด และฝุ่นปูน เมื่อใช้ปริมาณตัวอย่างเท่ากัน สำหรับช่วงเดือนตุลาคม 2547



ก.) วันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2548



ข.) วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548



ค.) วันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2548

รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ในหน่วย มก./กก. ที่อยู่ใน Kiln Feed ปูนเม็ด และฝุ่นปูน เมื่อใช้ปริมาณตัวอย่างเท่ากัน สำหรับช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 2548

สำหรับตัวอย่างในช่วงเดือนตุลาคม 2547 (รูปที่ 4.29) จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของโครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล และวาเนเดียม มีอยู่ในปูนเม็ด มากกว่าฝุ่นปูน และมากกว่า Kiln Feed ตามลำดับ ส่วนแบเรียม และสังกะสีมีความแตกต่างออกไป โดยพบความเข้มข้นของแบเรียมสูงใน Kiln Feed แต่ไม่ค่อยพบแบเรียมอยู่ในปูนเม็ดดังที่พบในฝุ่นปูน สำหรับสังกะสีพบว่ามีความเข้มข้นของโลหะใน Kiln Feed มากกว่าปูนเม็ด และฝุ่นปูนตามลำดับ

สำหรับตัวอย่างในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 2548 (รูปที่ 4.30) พบว่าความเข้มข้นของโลหะส่วนใหญ่มีอยู่ในปูนเม็ด มากกว่าฝุ่นปูน และมากกว่า Kiln Feed ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์ที่กล่าวมา สรุปได้ว่าส่วนใหญ่ความเข้มข้นของโลหะต่างๆ เมื่อคิดเทียบต่อปริมาณตัวอย่างที่เท่ากัน มีอยู่ในปูนเม็ด มากกว่าฝุ่นปูนและมากกว่า Kiln Feed ตามลำดับ แต่สำหรับการคิดเปรียบเทียบเป็นมวล จะได้กล่าวถึงในการศึกษาต่อไป

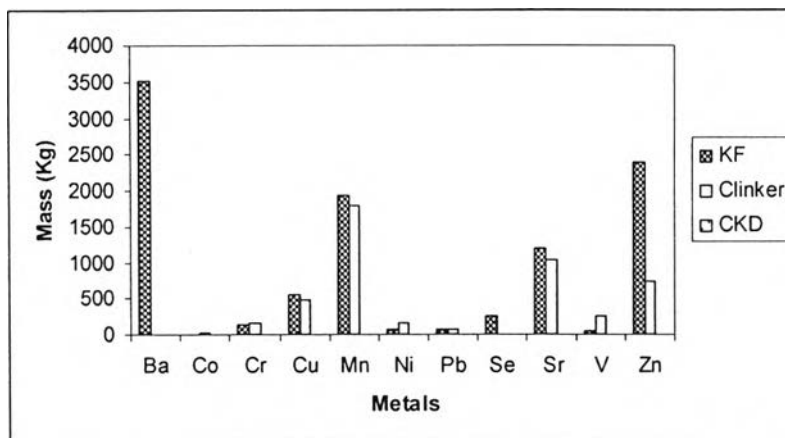
4.4.2 ปริมาณโดยมวลของโลหะที่เข้าและออกจากระบบการผลิตซีเมนต์

จากการสอบถามข้อมูลจากบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด มหาชน ทำให้ทราบรายละเอียดของอัตราการป้อนวัตถุดิบต่างๆ ที่เข้าและออกจากระบบการผลิตซีเมนต์ ดังตารางที่ 4.10

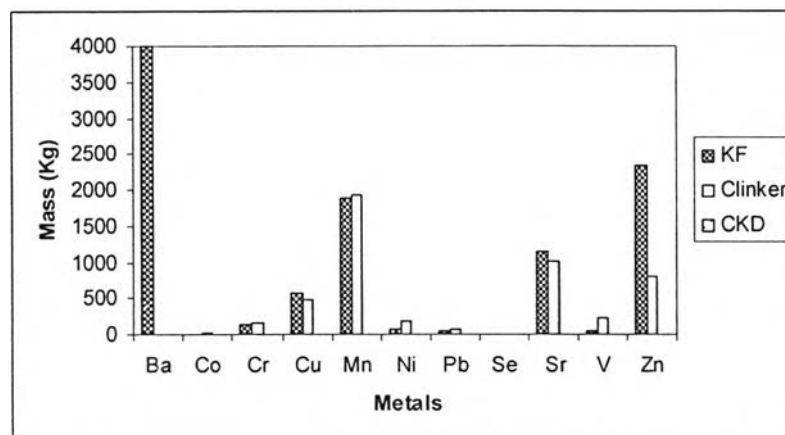
ตารางที่ 4.10 อัตราการป้อนวัตถุดิบต่างๆ ในระบบการผลิตซีเมนต์

ชนิดของวัตถุดิบที่เข้าระบบ	อัตราที่เข้าระบบ (ตันต่อวัน)
1. วัตถุดิบหลัก	
- หินปูน (Limestone)	7165.5
- แร่เหล็ก (Iron Ore)	126.45
- หินเชลซิลิกาสูง (Shale Mix)	1011.6
- หินเชลอะลูมินาสูง (Shale Core)	126.45
2. วัตถุดิบทดแทน	100
3. เชื้อเพลิงทดแทน	50
4. Kiln Feed (เกิดจากข้อ 1 ถึง 3 รวมกัน)	8580
5. เชื้อเพลิงหลัก	1100
ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากระบบ	อัตราที่ออกจากระบบ (ตันต่อวัน)
1. ปูนเม็ด	5500
2. ฝุ่นปูน	15
3. ก๊าซ	4165

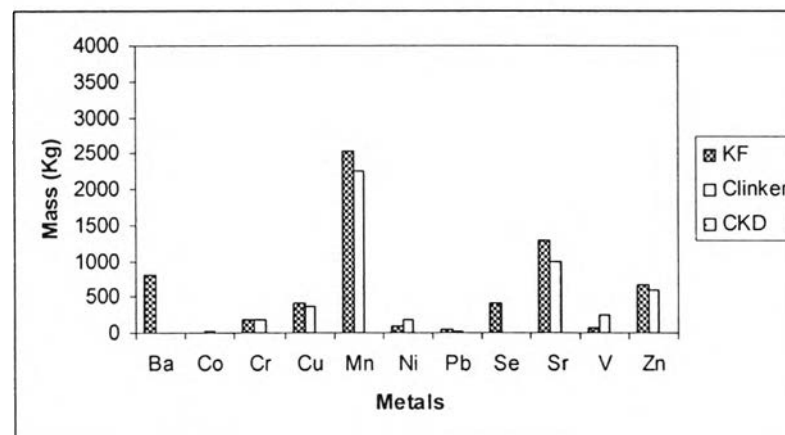
เมื่อทำการเปรียบเทียบมวลระหว่าง Kiln Feed ปูนเม็ด และฝุ่นปูน ซึ่งคำนวณจากค่าอัตราที่ป้อนเข้าและออกจากระบบของส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 4.10 และเลือกตัวอย่างชุดเดียวกับที่วิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในหัวข้อที่ 4.4.1 จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.31 และ 4.32



น.) วันที่ 23 ตุลาคม 2547

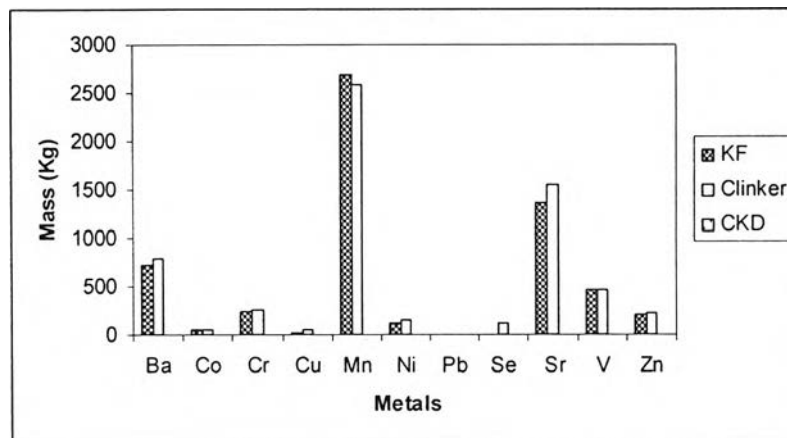


ข.) วันที่ 24 ตุลาคม 2547

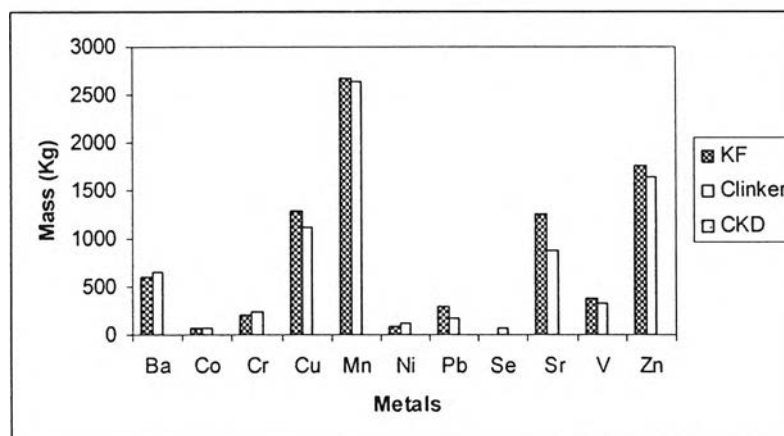


ค.) วันที่ 26 ตุลาคม 2547

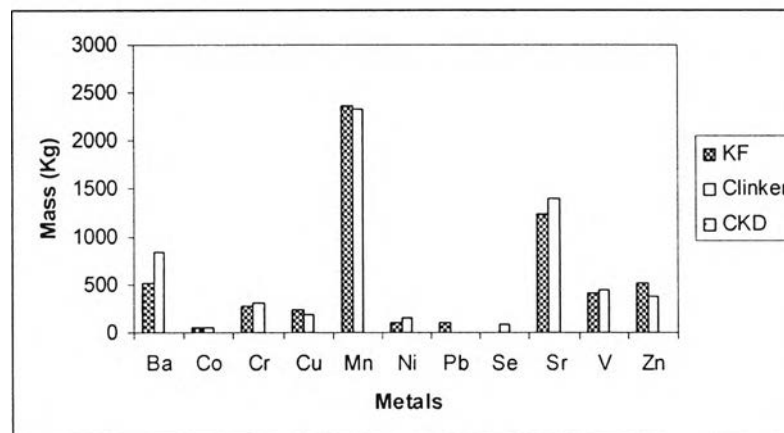
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง Kiln Feed ปูนเม็ดและฝุ่นปูนในรูปของมวลเป็นกิโลกรัม ต่อ 1 วัน ในช่วงเดือนตุลาคม 2547



ก.) วันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2548



ข.) วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548



ค.) วันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2548

รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง Kiln Feed ปูนเม็ดและฝุ่นปูนในรูปของมวลเป็นกิโลกรัมต่อ 1 วัน ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 2548

จากความสัมพันธ์ที่ได้จากรูปที่ 4.31 ซึ่งเป็นช่วงเดือนตุลาคม 2547 พบว่า โครเมียมทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว สตรอนเชียม มีปริมาณโดยมวลของโลหะดังกล่าวใน Kiln Feed ในค่าที่ใกล้เคียงหรือมากกว่าเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปูนเม็ด แต่สำหรับแบเรียมและสังกะสีพบว่าปริมาณโดยมวลของโลหะหนักใน Kiln Feed มากกว่าในปูนเม็ดหลายเท่า ซึ่งจากการตรวจสอบสมบัติของโลหะ พบว่าแบเรียมและสังกะสีมีจุดเดือดต่ำมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะหนักอีกหกชนิดดังที่กล่าวไปข้างต้น (จุดเดือดและจุดหลอมเหลวของโลหะชนิดต่างๆ สรุปได้ดังตารางที่ ๑.7 ในภาคผนวก) ในการผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูงด้วยระยะเวลาที่นานพอสมควร จึงอาจสรุปได้ว่าแบเรียมและสังกะสีมีการสลายตัวได้เร็วและอาจหลุดออกไปทางปล่องควันขณะผ่านกระบวนการเผานั้นเอง นอกจากนี้แบเรียมยังมีสมบัติพิเศษคือมีความสามารถในการออกซิไดซ์ได้ง่ายและรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับอากาศ จึงเป็นการยากเช่นกันที่จะพบแบเรียมในรูปแบบแบเรียมบริสุทธิ์ (www.answers.com, 2006) ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปได้ว่ามวลของโลหะทั้งสองที่หายไประหว่างกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูงนั้นเป็นผลสืบเนื่องมาจากสมบัติของโลหะดังกล่าว

ส่วนในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 2548 (รูปที่ 4.32) พบว่าปริมาณโดยมวลของโลหะหนักทุกชนิดระหว่าง Kiln Feed และปูนเม็ดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ไม่พบว่ามีปริมาณของแบเรียมหรือสังกะสีก่อนเข้าระบบการเผาสูงเหมือนเช่นที่วิเคราะห์ได้ในเดือนตุลาคม 2549 จึงอาจสรุปได้ว่านอกจากสมบัติเรื่องจุดเดือดของโลหะแล้ว ยังมีผลจากปัจจัยอื่นอีกด้วยเช่น สภาพที่เหมาะสมในการเผาในเตาเผาที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีของโลหะได้หลายรูปแบบ

จากการศึกษาทั้งหมดพบว่ามวลของโลหะหนักที่มาจากฝุ่นปูนมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับที่มาจากทั้ง Kiln Feed และปูนเม็ด อันเนื่องมาจากอัตราการผลิตของฝุ่นปูนที่ได้จากกระบวนการมีน้อยนั่นเอง และสิ่งที่สามารถสรุปได้จากการศึกษาเรื่องสมดุลมวลของโลหะในระบบการผลิตซีเมนต์ คือโลหะส่วนใหญ่มีมวลของโลหะที่หายไปเนื่องจากการปล่อยออกทางปล่องควันในรูปแบบแก๊สน้อยมากเมื่อเทียบกับมวลที่ออกมาอยู่ร่วมกับผลิตภัณฑ์ซีเมนต์

4.4.3 การสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ของวัตถุที่เข้าและออกจากระบบการผลิตซีเมนต์

จากแผนผังสมดุลมวลที่เข้าและออกจากระบบการผลิตซีเมนต์ในรูปที่ 4.28 ในการสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ในงานวิจัยนี้ เพื่อต้องการทราบทั้งชนิดและที่มาของโลหะหนักในรูปของค่าคงที่ในสมการ จากแหล่งของวัตถุดิบที่เข้าระบบซึ่งประกอบด้วย วัตถุดิบหลัก (ส่วนผสมของหินปูน แร่เหล็ก หินเชลซิลิกาสูง และหินเชลอะลูมินาสูง) วัตถุดิบทดแทน เชื้อเพลิงหลัก และเชื้อเพลิงทดแทน ที่จะออกไปยังปูนเม็ด ฝุ่นปูน และแก๊ส ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

โปรแกรมที่ใช้สำหรับช่วยในการวิเคราะห์คือโปรแกรมทางสถิติ SPSS (Statistical Package for Social Science) ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติที่สามารถสร้างความสัมพันธ์และวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในการศึกษานี้ได้แก่ การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรมากกว่าสองตัวขึ้นไป

ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์มีความเกี่ยวเนื่องมาจากผลของความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิด ซึ่งอยู่ในผลการวิจัยหัวข้อที่ 4.1 นำมาคูณอัตราที่เข้าและออกจากระบบซึ่งได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.10 เพื่อให้อยู่ในรูปของปริมาณหรือมวลซึ่งมีหน่วยเป็นกิโลกรัม ปริมาณของโลหะแต่ละชนิดที่อยู่ในวัตถุต่างๆ ที่เข้าและออกจากระบบ สรุปได้ดังตารางที่ ๑.8 ถึง ๑.14 ในภาคผนวก ส่วนในการคำนวณมวลของโลหะหนักในก๊าซ จะนำมาจากผลต่างของมวลที่เข้าและออกจากระบบ เพื่อให้มวลทั้งสองส่วนมีความสมดุลกัน

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ของมวลโลหะหนักแต่ละชนิดในวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ดังตารางที่ ๑.8 ถึง ๑.14 นั้น จะเห็นได้ว่ามวลโลหะหนักที่อยู่ในฝุ่นปูนมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับมวลโลหะหนักที่อยู่ในปูนเม็ด และมวลโลหะหนักในเชื้อเพลิงทดแทนมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับมวลโลหะหนักที่อยู่ในวัตถุดิบหลัก ซึ่งสามารถสรุปสัดส่วนความแตกต่างได้ดังตารางที่ ๑.15 และ ๑.16 ในภาคผนวก ซึ่งการที่มีตัวแปรหลายประเภทและมีค่าที่แตกต่างกันมาก เช่นนี้อาจส่งผลให้เกิดความไม่มั่นคงสำคัญต่อการสร้างสมการหรือทำให้ข้อมูลมีความขัดแย้งกันมากขึ้น ข้อมูลที่จะนำมาใช้ในสมการจึงมาจากการรวมส่วนที่เป็นมวลของโลหะหนักในปูนเม็ดและฝุ่นปูนเข้าด้วยกัน และการรวมมวลของโลหะหนักในวัตถุดิบทดแทนและเชื้อเพลิงทดแทนเข้าด้วยกัน ทั้งนี้ได้มีการตัดข้อมูลของโลหะบางชนิดออกไปเนื่องจากชุดของข้อมูลมีความขัดแย้งกันในตัว สำหรับโลหะที่พิจารณาจะมีการตัดข้อมูลในบางวันที่มีข้อมูลของวัตถุที่เข้าระบบและออกจากระบบไม่สัมพันธ์กันออกไป เนื่องจากอาจส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการมีความแปรปรวนและขาดความน่าเชื่อถือได้ มวลของโลหะแต่ละชนิดในวัตถุดิบที่เข้าสู่ระบบและผลิตภัณฑ์ที่ออกจากระบบที่จะนำมาใช้สร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ ๑.17 ถึง ๑.21 ในภาคผนวก

ในการสร้างความสัมพันธ์ถดถอยเชิงพหุ สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้ตัวแปรต้นคือโลหะแต่ละชนิด ตัวแปรตามพิจารณาสองขั้นตอน ขั้นแรกคือมวลของโลหะหนักในปูนเม็ดและฝุ่นปูนรวมกัน ส่วนขั้นที่สองคือมวลของโลหะหนักในก๊าซที่ออกจากระบบ สำหรับตัวแปรอิสระคือมวลของโลหะแต่ละชนิดในวัตถุดิบหลัก วัตถุดิบทดแทนและเชื้อเพลิงทดแทนรวมกัน และเชื้อเพลิงหลักในแต่ละวันที่มีการเก็บตัวอย่าง

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลทั้งหมดโดยใช้โปรแกรมทางสถิติสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างโลหะในวัตถุแต่ละชนิดที่เข้าระบบต่อปูนเม็ดและฝุ่นปูนรวมกัน และความสัมพันธ์ระหว่างโลหะในวัตถุแต่ละชนิดที่เข้าระบบต่อก๊าซที่ออกจากระบบ ผลที่ได้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของสมการมีความแปรปรวนและไม่อาจทำนายได้ในทิศทางเดียวกันทั้งหมด โดยเป็นผลมาจากการเก็บตัวอย่างข้อมูลที่มีจำนวนจำกัดและยังเป็นผลมาจากความไม่สมเหตุสมผลกันของข้อมูลชุดเดียวกัน ดังนั้นจึงวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่ได้จากการสร้างสมการโดยการแบ่งออกเป็นสองกรณี คือ กรณีที่มีข้อมูลของตัวแปรอิสระครบทั้งสามประเภท และกรณีที่มีข้อมูลของตัวแปรอิสระไม่ครบทั้งสามประเภท ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

4.4.3.1 กรณีที่มีข้อมูลของตัวแปรอิสระครบทั้งสามประเภท โลหะหนักที่พบในกรณีนี้คือสังกะสี การสร้างสมการที่ได้จากกรณีนี้สามารถเป็นแนวทางสำหรับการนำไปใช้ได้ โดยเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุดิบที่เข้าสู่ระบบและผลิตภัณฑ์ที่ออกจากระบบในจำนวนชุดตัวอย่างทั้ง 5 วันที่มีความสอดคล้องกัน แต่ยังไม่มีความเหมาะสมในการใช้ทำนายสมมูลมวลทั้งระบบ สำหรับชุดตัวอย่างในวันทีนอกเหนือจากวันทั้งห้าวันนั้น มีความขัดแย้งกันระหว่างวัตถุที่เข้าและออกจากระบบอยู่บ้าง โดยมีสาเหตุมาจากชุดของตัวอย่างที่มีจำนวนน้อยจนเกินไปและอาจเป็นผลมาจากการเก็บตัวอย่างของวัตถุดิบในแต่ละแหล่งที่ไม่ได้เป็นชุดเดียวกันหรือมีความคลาดเคลื่อนกับผลิตภัณฑ์ที่ออกจากระบบในวันนั้น ซึ่งมีข้อแนะนำคือควรมีการเก็บตัวอย่างเพิ่มเติมให้ได้จำนวนชุดตัวอย่างที่มากขึ้น และพยายามให้วัตถุที่เข้าระบบเป็นชุดเดียวกันกับผลิตภัณฑ์ที่ออกจากระบบในการเก็บตัวอย่างวันเดียวกัน ผลที่ได้จากการสร้างสมการของสังกะสีสรุปได้ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสังกะสีจากวัตถุที่เข้าระบบแต่ละชนิด ต่อปูนเม็ดและฝุ่นปูน และต่อก๊าซที่ออกจากระบบ

ตัวแปรอิสระ	ความสัมพันธ์ต่อปูนเม็ดและฝุ่นปูน			ความสัมพันธ์ต่อก๊าซที่ออกจากระบบ		
	ค่าสัมประสิทธิ์	R	R ²	ค่าสัมประสิทธิ์	R	R ²
วัตถุดิบหลัก	0.047	1.000	0.999	0.953	1.000	1.000
เชื้อเพลิงหลัก	0.460			0.540		
วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน	0.908			0.092		

4.4.3.2 กรณีที่มีข้อมูลของตัวแปรอิสระไม่ครบทั้งสามประเภท ซึ่งสามารถแบ่งได้อีกสองกรณี คือ กรณีที่มีข้อมูลของตัวแปรอิสระบางตัวเป็นศูนย์ และกรณีที่มีการตัดข้อมูลของตัวแปรอิสระบางตัวออกไป โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

ก.) กรณีที่มีข้อมูลของตัวแปรอิสระบางตัวเป็นศูนย์ โลกทัศน์ที่พบในกรณีนี้คือ แบบเรียน ตะกั่ว และซีลีเนียม กลุ่มนี้ต้องมีการแปรผลของค่าสัมประสิทธิ์จากสมการด้วยความระมัดระวัง โดยจะต้องมีฐานข้อมูลที่เป็นเหตุเป็นผลต่อกัน เนื่องจากการมีค่าตัวแปรอิสระบางตัวเป็นศูนย์ เช่น เชื้อเพลิงหลัก ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากการใช้โปรแกรมช่วยในการคำนวณได้ (ระบบจะนำศูนย์เข้าร่วมในการคูณหรือหารในการสร้างสมการ) ดังนั้นสมการที่ได้จึงไม่เหมาะสมในการใช้ทำนาย แต่เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุที่เข้าและออกจากระบบของตัวอย่าง 12 ชุด นอกจากนี้ถ้ามีข้อมูลของตัวแปรอิสระเปลี่ยนไปโดยไม่ใช้ศูนย์ ก็ควรมีการปรับแก้สมการดังกล่าว ให้มีความสอดคล้องกับข้อมูลด้วย ผลที่ได้จากการสร้างสมการสำหรับกรณีนี้สรุปได้ดังตารางที่ 4.12 ถึง 4.14

ตารางที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแบบเรียนจากวัตถุที่เข้าระบบแต่ละชนิด ต่อปุณเม็ดและฝุ่นปุณ และต่อก๊าซที่ออกจากระบบ

ตัวแปรอิสระ	ความสัมพันธ์ต่อปุณเม็ดและฝุ่นปุณ			ความสัมพันธ์ต่อก๊าซที่ออกจากระบบ		
	ค่าสัมประสิทธิ์	R	R ²	ค่าสัมประสิทธิ์	R	R ²
วัตถุดิบหลัก	0.000	0.477	0.228	1.000	1.000	1.000
เชื้อเพลิงหลัก	-			-		
วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน	0.051			0.949		

ตารางที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างตะกั่วจากวัตถุที่เข้าระบบแต่ละชนิด ต่อปุณเม็ดและฝุ่นปุณ และต่อก๊าซที่ออกจากระบบ

ตัวแปรอิสระ	ความสัมพันธ์ต่อปุณเม็ดและฝุ่นปุณ			ความสัมพันธ์ต่อก๊าซที่ออกจากระบบ		
	ค่าสัมประสิทธิ์	R	R ²	ค่าสัมประสิทธิ์	R	R ²
วัตถุดิบหลัก	0.226	0.705	0.497	0.774	0.959	0.920
เชื้อเพลิงหลัก	-			-		
วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน	-			-		

ตารางที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างซีลีเนียมจากวัตถุที่เข้าระบบแต่ละชนิด ต่อปุ๋ยมืดและฝุ่นปูน และต่อก๊าซที่ออกจากระบบ

ตัวแปรอิสระ	ความสัมพันธ์ต่อปุ๋ยมืดและฝุ่นปูน			ความสัมพันธ์ต่อก๊าซที่ออกจากระบบ		
	ค่าสัมประสิทธิ์	R	R ²	ค่าสัมประสิทธิ์	R	R ²
วัตถุติดหลัก	0.000	0.666	0.444	1.000	1.000	1.000
เชื้อเพลิงหลัก	-			-		
วัตถุติดและเชื้อเพลิงทดแทน	0.080			0.920		

ข.) กรณีที่มีการตัดข้อมูลของตัวแปรอิสระบางตัวออกไป โลกະหนักที่พบในกรณีนี้ได้แก่ สตรอนเซียม จากข้อมูลมวลของสตรอนเซียมที่อยู่ในวัตถุติดและผลิตภัณฑ์ดังตารางที่ ๑.20 ที่จะนำมาใช้ในการสร้างสมการแต่เดิมนั้น พบว่ามีปริมาณของสตรอนเซียมในวัตถุติดและเชื้อเพลิงทดแทนในสัดส่วนที่น้อยกว่าที่พบทั้งในวัตถุติดหลัก และในเชื้อเพลิงหลักอย่างมาก (น้อยกว่าประมาณร้อยละ 1) และไม่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับสตรอนเซียมที่อยู่ในปุ๋ยมืดและฝุ่นปูน ซึ่งถ้านำตัวแปรของวัตถุติดและเชื้อเพลิงทดแทนดังกล่าวมาใช้ในการสร้างสมการ จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากสมการมีความแปรปรวนและมีค่าลบเกิดขึ้น (ดังตารางที่ ๑.22) จนไม่สามารถอธิบายค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากสมการทั้งหมดได้ ดังนั้นจึงต้องมีการตัดส่วนของตัวแปรอิสระดังกล่าวทิ้งไป เพื่อให้สามารถอธิบายค่าสัมประสิทธิ์ของสมการได้ทั้งหมดนั่นเอง สำหรับข้อมูลปริมาณของสตรอนเซียมในวัตถุติดและผลิตภัณฑ์หลังจากมีการตัดข้อมูลดังกล่าวแล้ว ที่จะนำมาใช้ในการสร้างสมการสามารถสรุปได้ดังตารางที่ ๑.23 และผลที่ได้จากการสร้างสมการสำหรับกรณีนี้สรุปได้ดังตารางที่ 4.15

สมการที่ได้ในกรณีนี้เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโลกະในวัตถุติดที่เข้าและออกจากระบบของตัวอย่างทั้ง 5 ชุดที่มีความสอดคล้องกัน และถ้ามีการเปลี่ยนแปลงคือมีปริมาณของโลกະในวัตถุติดและเชื้อเพลิงทดแทนสูงขึ้น ก็ควรมีการปรับแก้สมการให้มีความสอดคล้องกับข้อมูลด้วยการนำตัวแปรนี้กลับมาพิจารณาอีกครั้ง

ตารางที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสตรอนเนียมจากวัตถุที่เข้าระบบแต่ละชนิด ต่อบุณเมีดและฝุ่นปูน และต่อก๊าซที่ออกจากระบบ

ตัวแปรอิสระ	ความสัมพันธ์ต่อบุณเมีดและฝุ่นปูน			ความสัมพันธ์ต่อก๊าซที่ออกจากระบบ		
	ค่าสัมประสิทธิ์	R	R ²	ค่าสัมประสิทธิ์	R	R ²
วัตถุดิบหลัก	0.192	1.000	1.000	0.808	1.000	1.000
เชื้อเพลิงหลัก	0.782			0.218		
วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน	-			-		

ความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางสถิติของทั้งสองกรณีข้างต้น สามารถสรุปเป็นสมการเส้นถดถอยได้ดังตารางที่ 4.16

โดยกำหนดให้	Cement	แทน	มวลของโลหะในปูนเมีดและฝุ่นปูน
	Gas	แทน	มวลของโลหะในก๊าซที่ออกจากระบบ
	PR	แทน	มวลของโลหะในวัตถุดิบหลัก
	PF	แทน	มวลของโลหะในเชื้อเพลิงหลัก
	SRF	แทน	มวลของโลหะในวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน

ตารางที่ 4.16 สมการเส้นถดถอยของความสัมพันธ์ของโลหะชนิดต่างๆ ในวัตถุที่เข้าระบบต่อผลิตภัณฑ์ที่ออกจากระบบ

ชนิดของโลหะ		อิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์	สมการเส้นถดถอย	ค่าความสัมพันธ์ (r^2)
กรณีที่ 1 ตัวแปรอิสระครบสามตัว	Zn	ปูนเม็ดและฝุ่นปูน	Cement = 0.047 PR + 0.460 PF + 0.908 SRF	0.999
		ก๊าซที่ออกจากระบบ	Gas = 0.953 PR + 0.540 PF + 0.092 SRF	1.000
กรณีที่ 2ก. ตัวแปรอิสระไม่ครบสามตัว (ข้อมูลบางตัวแปรเป็น 0)	Ba	ปูนเม็ดและฝุ่นปูน	Cement = 0.051 SRF	0.228
		ก๊าซที่ออกจากระบบ	Gas = 1.000 PR + 0.949 SRF	1.000
	Pb	ปูนเม็ดและฝุ่นปูน	Cement = 0.226 PR	0.497
		ก๊าซที่ออกจากระบบ	Gas = 0.774 PR	0.920
	Se	ปูนเม็ดและฝุ่นปูน	Cement = 0.080 SRF	0.444
		ก๊าซที่ออกจากระบบ	Gas = 1.000 PR + 0.920 SRF	1.000
กรณีที่ 2ข. ตัวแปรอิสระไม่ครบสามตัว (มีการตัดตัวแปร)	Sr	ปูนเม็ดและฝุ่นปูน	Cement = 0.192 PR + 0.782 PF	1.000
		ก๊าซที่ออกจากระบบ	Gas = 0.808 PR + 0.218 PF	1.000

สิ่งที่ได้จากความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.16 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของโลหะแต่ละตัวในวัตดูดิบ หรือเชื้อเพลิงทั้งประเภทหลักและทดแทนที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้มีผลต่อโลหะนั้นในปูนเม็ดหรือฝุ่นปูน และก๊าซที่ออกจากระบบที่แตกต่างกันไป ซึ่งสามารถอธิบายความหมายจากสมการได้ดังต่อไปนี้

สังกะสีที่พบในปูนเม็ดและฝุ่นปูน ได้รับอิทธิพลมาจากวัตดูดิบและเชื้อเพลิงทดแทนเป็นหลัก ส่วนสังกะสีที่พบในก๊าซที่ออกจากระบบ ได้รับอิทธิพลมาจากวัตดูดิบหลักเป็นหลัก และต่างมีอิทธิพลมาจากเชื้อเพลิงหลักรองลงมา

แบเรียมที่พบในปูนเม็ดและฝุ่นปูน มีที่มาจากวัตดูดิบและเชื้อเพลิงทดแทน ส่วนแบเรียมที่พบในก๊าซที่ออกจากระบบ มีที่มาจากวัตดูดิบหลัก และ วัตดูดิบและเชื้อเพลิงทดแทน ด้วยอิทธิพลที่ใกล้เคียงกัน

ตะกั่วที่พบในปูนเม็ดและฝุ่นปูน รวมทั้งก๊าซที่ออกจากระบบ มีที่มาจากวัตดูดิบหลักเพียงอย่างเดียว

ซีลีเนียมที่พบในปูนเม็ดและฝุ่นปูน มีที่มาจากวัตดูดิบและเชื้อเพลิงทดแทนเพียงอย่างเดียว ส่วนซีลีเนียมที่พบในก๊าซที่ออกจากระบบ มีที่มาจากวัตดูดิบหลัก และวัตดูดิบและเชื้อเพลิงทดแทนด้วยอิทธิพลที่ใกล้เคียงกัน

สำหรับโลหะบางชนิดได้แก่ แบเรียม และซีลีเนียม ไม่พบว่ามียุทธิพลจากโลหะในวัตดูดิบหรือเชื้อเพลิงหลักที่เข้าสู่ระบบส่งไปถึงปูนเม็ดและฝุ่นปูน และยังพบว่ามียุทธิพลจากวัตดูดิบและเชื้อเพลิงทดแทนน้อย ในทางกลับกันพบว่ามียุทธิพลของโลหะหนักในก๊าซที่ออกจากระบบสูงกว่า จึงอาจสรุปได้ว่าหลังจากกระบวนการเผาซีเมนต์ที่ต้องใช้ความร้อนสูง โลหะดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะรวมอยู่กับก๊าซที่ออกจากระบบมากกว่าในปูนเม็ดหรือฝุ่นปูน

สตรอนเชียมที่พบในปูนเม็ดและฝุ่นปูน มีอิทธิพลส่วนใหญ่มาจากเชื้อเพลิงหลักเป็นหลัก ส่วนสตรอนเชียมที่พบในก๊าซที่ออกจากระบบ มีอิทธิพลมาจากวัตดูดิบหลักสูงสุด

จากข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ในการหาความสัมพันธ์นั้น ยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้อยู่มาก โดยเป็นการแสดงความสัมพันธ์ของวัตดูดิบที่เข้าสู่ระบบและผลิตภัณฑ์ที่ออกจากระบบในชุดตัวอย่างของวันที่มีความสอดคล้องกันสำหรับการผลิตซีเมนต์ในช่วงระหว่างเดือนกันยายนถึงเดือนตุลาคม 2547 แต่ยังไม่มีความเหมาะสมในการใช้ทำนายสมมูลมวลทั้งระบบ เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือในทางสถิติในการอธิบายผลที่ได้จากสมการจึงควรเป็นไปด้วยความระมัดระวังดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

ข้อเสนอแนะในการสร้างสมการในลักษณะนี้คือ ควรมีการเก็บตัวอย่างที่จริงจังให้มีชุดตัวอย่างจำนวนมากและเป็นชุดข้อมูลที่อยู่ในเส้นการผลิตเดียวกันทั้งหมด นอกจากนี้ต้องมีการทำสถิติควบคู่ไปกับการเก็บตัวอย่างและมีการทบทวนสมการด้วยชุดข้อมูลนอกเหนือจากที่ใช้อยู่ด้วย

4.5 การเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงในลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของโลหะหนักที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ในการศึกษาลักษณะเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของโลหะหนักในซีเมนต์ที่มาจากกาใช้กากอุตสาหกรรมร่วมในกระบวนการผลิตนั้น มีการศึกษาควบคู่กันไปสองกรณีคือ การศึกษาสถานะภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ก่อนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งคืองานวิจัยที่กำลังศึกษาอยู่ และอีกกรณีคือการศึกษาสถานะภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์หลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน หรือซีเมนต์เฟสดีซึ่งศึกษาโดย ฤทัยรัตน์ แพรอด (2548) โดยมีการใช้ตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่มีการเก็บตัวอย่างในวันเดียวกัน ทำให้สามารถทำการเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงสถานะภาพของโลหะหนักที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีได้

4.5.1 ผลการเปรียบเทียบชนิดและสารประกอบโลหะด้วยวิธีการสกัดแยกสารประกอบ (Sequential Extraction) ระหว่างปูนซีเมนต์ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ผลการเปรียบเทียบชนิดและสารประกอบโลหะหนักระหว่างปูนเม็ด (ก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน) และซีเมนต์เฟสดี (หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน) ที่ได้จากชุดตัวอย่างเดียวกัน ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดแยกสารประกอบ (Sequential Extraction) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบชนิดและสารประกอบโลหะหนักระหว่างปูนเม็ด (ก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน) และซีเมนต์เฟสดี (หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน) ที่ได้จากวิธีการสกัดแยกสารประกอบ (Sequential Extraction)

สิ่งที่พิจารณา	ก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน
ชนิดของโลหะที่พบในชั้นที่ 1 สารประกอบโลหะที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่าย	Ba Cr Se Sr	Se
ชนิดของโลหะที่พบในชั้นที่ 2 สารประกอบโลหะที่มีพันธะกับคาร์บอเนต	Ba Cr Se Sr	ไม่มี
ชนิดของโลหะที่พบในชั้นที่ 3 สารประกอบโลหะที่มีพันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์	Ba Co Cr Cu Mn Ni Se Sr V Zn	Co Cr Cu Mn Se Sr V Zn
ชนิดของโลหะที่พบในชั้นที่ 4 สารประกอบโลหะที่มีพันธะกับสารอินทรีย์และซัลไฟด์	Ba Co Cr Cu Mn Ni Se Sr V Zn	Ba Cu Mn Se Sr
ชนิดของโลหะที่พบในชั้นที่ 5 สารประกอบโลหะที่เหลือจากทั้งสี่ชั้น	Ba Co Cr Cu Mn Ni Se Sr V Zn	Ba Co Cr Cu Mn Ni Se Sr V Zn

จากตารางที่ 4.17 จะเห็นว่า โลหะหนักที่พบในซีเมนต์เพสต์มีชนิดและจำนวนที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่พบในปูนเม็ด โดยมีซีลีเนียม (Se) เป็นโลหะที่อยู่ในรูปสารประกอบที่มีความเสถียรต่ำ เนื่องจากพบได้ในชั้นที่ 1 (สารประกอบโลหะที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่าย) ของทั้งในปูนเม็ดและซีเมนต์เพสต์ และยังพบว่ามีความเข้มข้นของซีลีเนียมของซีเมนต์เพสต์ในปริมาณน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับปูนเม็ด (ความเข้มข้นในปูนเม็ดและซีเมนต์เพสต์ประมาณร้อยละ 18 และ 2.5 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ ข.16 ถึง ข.18 ของภาคผนวก ข.) ส่วนความเข้มข้นของโลหะหนักที่พบในชั้นที่ 5 (สารประกอบที่เหลือ) ของซีเมนต์เพสต์มีปริมาณมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับปูนเม็ด (ความเข้มข้นในปูนเม็ดและซีเมนต์เพสต์ประมาณร้อยละ 60 และ 90 ตามลำดับ ดังแสดงในภาคผนวก ข.) จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน สารประกอบโลหะหนักแต่ละชนิดในปูนซีเมนต์จะมีความเสถียรมากขึ้นทำให้ยากต่อการชะละลายออกสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากนี้จากการศึกษาของ ฤทัยรัตน์ (2548) ยังพบว่าอายุบ่มของซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มขึ้น ก็จะส่งผลให้โลหะหนักยิ่งมีความเสถียรมากขึ้นอีกด้วย ดังแสดงข้อมูลในภาคผนวก ข. (ตารางที่ ข.16 ถึง ข.18)

4.5.2 ผลการเปรียบเทียบชนิดและสารประกอบโลหะด้วยเครื่อง XRD (X-Ray Diffraction Spectrometer) ระหว่างปูนซีเมนต์ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

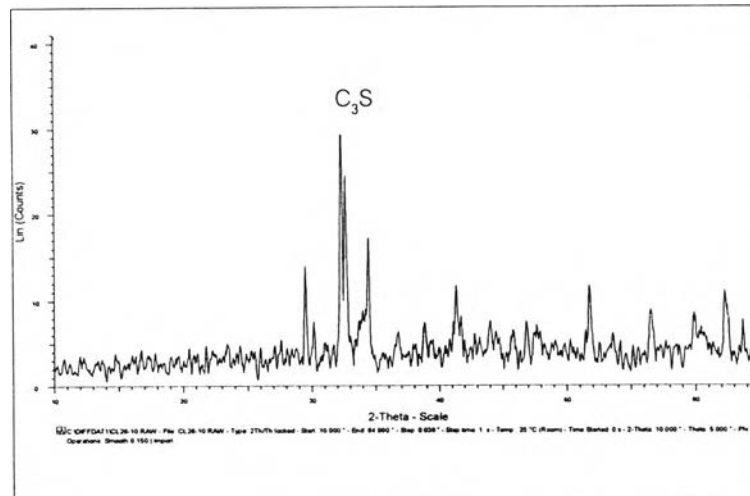
ผลการเปรียบเทียบชนิดและสารประกอบโลหะหนักระหว่างปูนเม็ด (ก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน) และซีเมนต์เพสต์ที่อายุบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วัน (หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน) ที่ได้จากชุดตัวอย่างเดียวกันในเดือนตุลาคม 2547 ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD (X-Ray Diffraction Spectrometer) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบชนิดและสารประกอบโลหะหนักระหว่างปูนเม็ด (ก่อนปฏิกิริยาไฮเดรชัน) และซีเมนต์เพสต์ (หลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน) สำหรับตัวอย่างในเดือนตุลาคม 2547 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD (X-Ray Diffraction Spectrometer)

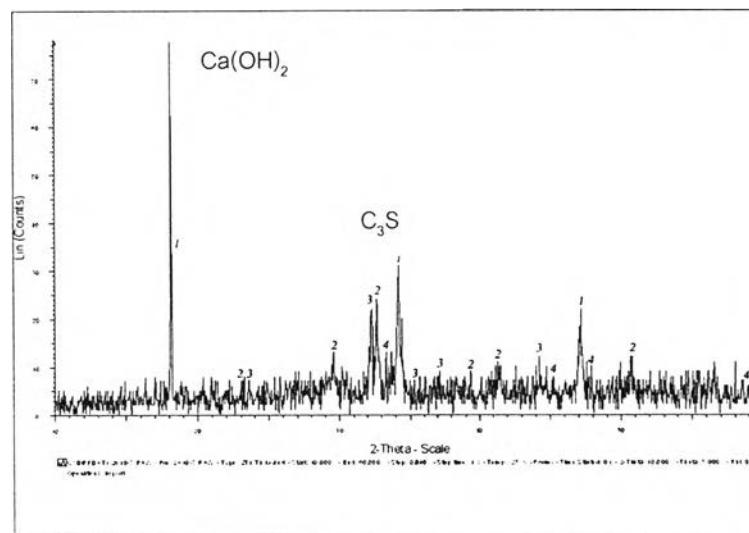
สารประกอบในปูนเม็ด	สารประกอบในซีเมนต์เพสต์
$\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}$ หรือ C_3S	C_3S
$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ หรือ C_3A	C_3S
CuCrSe_2	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
FeCr_2S_4	$\text{Ca}_3\text{Mn}_2\text{O}_7$
Fe_7Se_8	CuCr_2O_4
FeSeCl_7	$\text{Cu}_{0.85}\text{Mn}_{0.15}\text{Cr}_2\text{S}_4$
MnCO_3	Cu_5Zn_8
$\text{MnSr}_3(\text{V}_2\text{O}_7)_2$	$\text{Ni}_6\text{Zn}_4\text{O}$
$\text{Sr}_4\text{Mn}_3\text{O}_{10}$	$\text{Sr}_3\text{Mn}_2\text{O}_7$
	$\text{Sr}_2\text{MnSiO}_7$
	$\text{SrV}_6\text{O}_{11}$
	$\text{V}_2\text{O}_5 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
	ZnO
	$\text{SrZn}_7\text{Si}_2\text{O}_{17}$

ผลที่ได้จากตารางที่ 4.18 สามารถสรุปได้ว่า สารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์มีการเปลี่ยนแปลงไปจากที่เคยมีในปูนเม็ด โลหะที่พบส่วนใหญ่เป็นชนิดเดียวกันกับที่พบในปูนเม็ด คือ แมงกานีส (Mn) สตรอนเชียม (Sr) วาเนเดียม (V) และสังกะสี (Zn) ซึ่งพบอยู่ในรูปสารประกอบที่หลากหลายมากกว่าที่พบในปูนเม็ด แต่ยังคงอยู่บนพื้นฐานของสารประกอบโลหะหนักชนิดเดียวกัน คือ สารประกอบโลหะในรูปแมงกานีสออกไซด์ และรูปออกไซด์ซึ่งเป็นสารประกอบที่พบมากในปูนซีเมนต์ โดยมี $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เพิ่มขึ้นตามอายุบ่มที่มากขึ้นอย่างเด่นชัดซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน สำหรับการสืบค้นข้อมูลกราฟความถี่ที่ได้กับฐานข้อมูลที่มีในเครื่อง XRD ของตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์เพสต์ แสดงผลดังภาคผนวก ค. (รูปที่ ค.9)

เมื่อทำการเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงของลักษณะเส้นกราฟความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ระหว่างปูนเม็ดและซีเมนต์เพสต์ที่มีการเก็บตัวอย่างในวันเดียวกันคือวันที่ 26 ตุลาคม 2547 พบว่าตำแหน่งของกราฟความถี่ของสารประกอบหลัก (C_3S) มีความคล้ายคลึงกันแต่มีปริมาณที่ต่างกันโดย C_3S จะลดลงเมื่อซีเมนต์ผ่านการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และมีกราฟความถี่ของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เพิ่มขึ้นมาอย่างชัดเจนในซีเมนต์เพสต์ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.33



ก.) ปูนเม็ด



ข.) ซีเมนต์เพสต์

รูปที่ 4.33 ผลจากการเปรียบเทียบการวิเคราะห์สารประกอบโลหะหนักด้วยเครื่อง XRD ระหว่าง ปูนเม็ด (ก่อนปฏิกิริยาไฮเดรชัน) และซีเมนต์เพสต์ (หลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน)

จากผลการเปรียบเทียบที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นสามารถสรุปได้ว่า ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ปูนซีเมนต์ที่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ด้วยเครื่อง XRD พบว่ามีสารประกอบของ Ca(OH)_2 อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญและเกิดขึ้นจากการที่แคลเซียมซิลิเกตรวมตัวกับน้ำในปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์นั่นเอง และสารประกอบโลหะหนักอื่นๆ ที่พบเป็นส่วนใหญ่นั้นมีความคล้ายคลึงกับที่พบได้ในปูนเม็ด คือสารประกอบประเภทออกไซด์ หรือแมงกานีสออกไซด์ สำหรับชนิดของโลหะหนักที่พบได้ในรูปสารประกอบทั้งในปูนเม็ดและซีเมนต์เพสต์นั้นสามารถสรุปได้ว่าเป็นโลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูงเป็นลำดับต้นๆ ในปูนเม็ด จึงจะส่งผลให้เกิดสารประกอบของโลหะเหล่านี้ในรูปแบบต่างๆ ได้ ส่วนผลที่ได้จากการเปรียบเทียบสารประกอบด้วยวิธีการสกัดแยกสารประกอบ (Sequential Extraction) นั้นสามารถสรุปได้ว่า เมื่อปูนซีเมนต์ผ่านการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้วนั้น สารประกอบโลหะหนักทุกชนิดจะมีความเสถียรมากขึ้น ทำให้ยากต่อการชะละลายสู่สิ่งแวดล้อม และสามารถช่วยลดความกังวลในเรื่องผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนได้