บทที่ 4

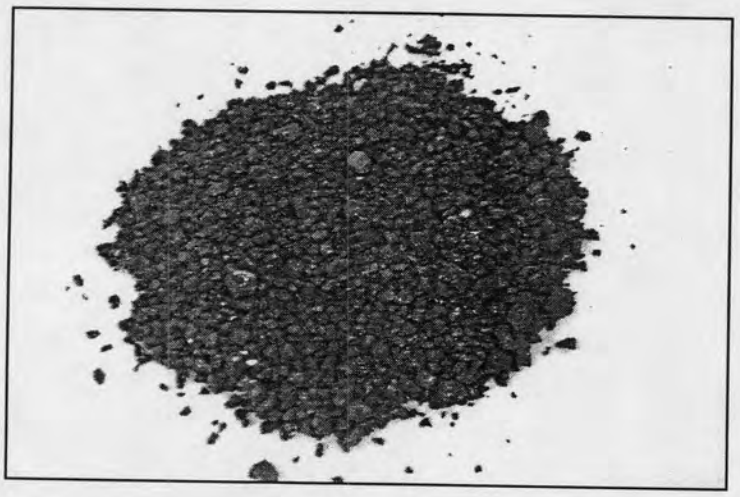
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

4.1 ผลการการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตะกรันทองแดง

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของตะกรันทองแดง

1. ลักษณะทั่วไป (Appearance)

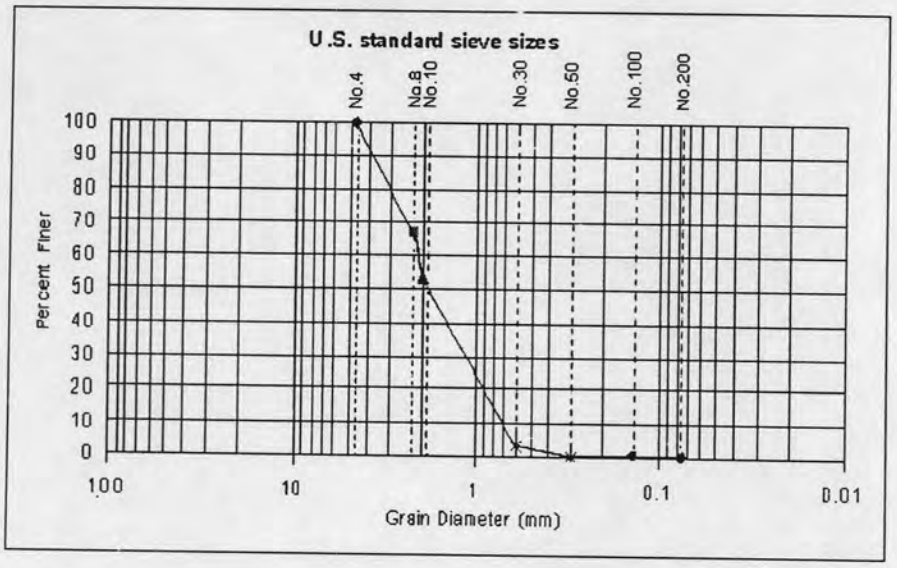
จากการศึกษาลักษณะทั่วไปของตะกรันทองแดงด้วยตาเปล่า พบว่าลักษณะเม็ดตะกรันเป็นก้อนแข็งมีเหลี่ยมมุม สีดำมันวาวและเปราะ ทั้งนี้ลักษณะที่เปราะเนื่องจากตะกรันทองแดงถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วหลังออกจากเตาหลอมด้วยการฉีดพ่นน้ำแรงดันสูง ทำให้โครงสร้างผลึกของอนุภาคไม่สามารถผนึกตัวได้อย่างแข็งแรง ตะกรันทองแดงที่ได้นี้เรียกว่า Granulated Slag นอกจากนี้เมื่อนำเม็ดตะกรันทองแดงมาทุบให้แตก จะมีสีทองแดงปรากฏอยู่ชัดเจน



รูปที่ 4.1 ลักษณะตะกรันทองแดง

2. การกระจายขนาดคละ (Size Distribution)

การทดสอบการกระจายขนาดคละของตะกรัน ตามวิธีมาตรฐาน ASTM C136-06 ผลที่ได้พบว่า กากตะกรันทองแดงมีขนาดเฉลี่ย (D_{50}) เท่ากับ 1.98 มิลลิเมตร และมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของขนาดคละ (Coefficient of Uniformity, C_u) หรือค่า D_{60}/ D_{10} เท่ากับ3.125 มิลลิเมตร โดยมีกราฟการกระจายขนาดคละแสดงดังรูปที่ 4.2 จากผลการศึกษาที่ได้พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Emery (1986) ที่ตะกรันทองแดงมีขนาดคละอยู่ในช่วง 0.075 ถึง 4.75 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.2 กราฟการกระจายขนาดคละของตะกรันทองแดง

3. **ความถ่วงจำเพาะ** (Specific Gravity)

เมื่อนำตะกรันทองแดงมาทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ โดยการแทนที่ในน้ำมันก๊าด ตามมาตรฐาน ASTM C188-95 พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.35 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาในปี1986 ของ Emery ที่พบว่าตะกรันทองแดงมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.8 ถึง 3.8 และในปี1991ของ Douglas, Mainwaring และ Hemmingh ที่ได้ค่าเท่ากับ 3.39 การมีค่าความถ่วงจำเพาะที่สูงนี้อาจมาจากการรวมตัวกันของธาตุที่มีมวลโมเลกุลสูง (Molecular Weight) เช่น เหล็ก ซิลิกา และอลูมินา ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่มาก ซึ่งจะเห็นได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันทองแดงด้วยเครื่อง XRF ที่แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4.1.2 ลักษณะทางเคมีของตะกรันทองแดง

1. **พีเอช** (pH)

เมื่อวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของตะกรันทองแดง ด้วยเครื่องวัดพีเอช (pH Meter) พบว่ามีค่าเท่ากับ 8.72 แสดงถึงความเป็นด่างของตะกรันทองแดง

2. **ความชื้น** (Moisture content)

จากการทดสอบความชื้นตามมาตรฐาน ASTM C114-05 นำตัวอย่างมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส พบว่าตะกรันทองแดงมีค่าความชื้นเท่ากับ ร้อยละ 3.845 สอดคล้องกับงานของ Emery ในปี1986 ที่พบว่าตะกรันทองแดงมีค่าความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 5

3. **ค่าการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุ** (Loss On Ignition **หรือ**LOI)

การศึกษาการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุเนื่องจากการเผา ตามมาตรฐาน ASTM C114-05 แสดงถึงปริมาณคาร์บอนและความชื้นทั้งหมดที่มีในวัสดุ พบว่าตะกรันทองแดงมีค่า LOI เท่ากับร้อยละ0.133 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากตะกรันทองแดงได้ผ่านกระบวนการถลุงแร่ทองแดง ซึ่งทำที่อุณหภูมิสูงมากคือมากกว่า 1200 องศาเซลเซียส ในขณะที่การหาค่า LOI เป็นการหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุที่อุณหภูมิ 950±50 องศาเซลเซียส ทำให้ตะกรันทองแดงมีค่า LOI ในปริมาณต่ำ ซึ่งผลที่ได้มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาของในปี 2005 ของ Al-Jabri และคณะที่ได้ค่า LOI เท่ากับ 0 และงานวิจัยของ Zain และคณะในปี 2004 ที่ได้ค่า LOI น้อยกว่า 1

4. **องค์ประกอบทางเคมี** (Chemical Composition)

ผลการศึกษาการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันทองแดง ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุในรูปออกไซด์ ด้วยเครื่อง XRF แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันทองแดงด้วยเครื่อง XRF

สารประกอบ	ความเข้มข้น (ร้อยละ)	สารประกอบ	ความเข้มข้น (ร้อยละ)
Fe_2O_3	53.55	ZnO	1.05
SiO_2	31.19	CuO	0.69
Al_2O_3	3.59	MoO_3	0.31
CaO	1.83	PbO	0.18
SO_3	1.39	MnO	0.06
K_2O	1.23	Cr_2O_3	0.05
MgO	1.16	NiO	0.03
Na_2O	0.28	BaO	0.03
TiO_2	0.22	V_2O_5	0.01
P_2O_5	0.13	LOI	0.133
		รวมทั้งหมด	97.11

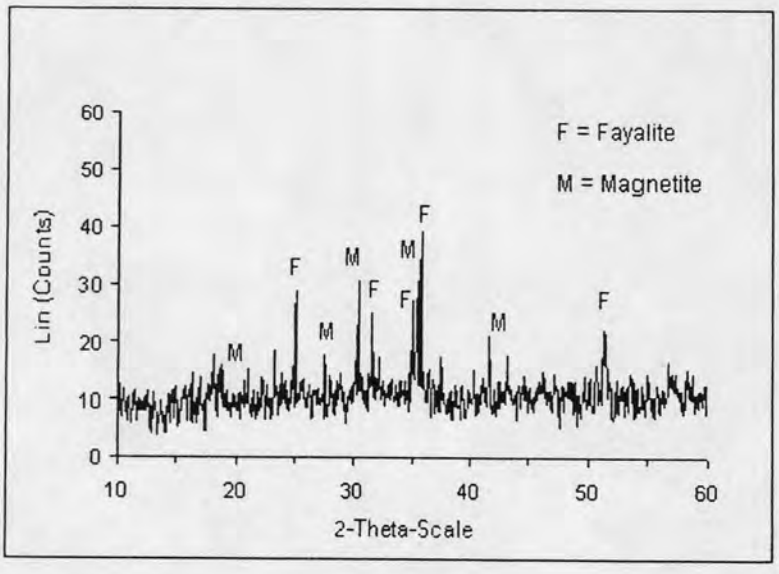
จากตารางที่ 4.1 พบว่าสารประกอบที่มีในปริมาณสูงในตะกรันทองแดงได้แก่ เหล็ก (Fe_2O_3) มีปริมาณสูงที่สุดถึงร้อยละ 53.55 รองลงมาคือ ซิลิกา (SiO_2) มีปริมาณร้อยละ 31.19

นอกจากนี้มีอลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียม (CaO) ร่วมด้วย จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีนี้เป็นสารประกอบหลักเช่นเดียวกับในปูนซีเมนต์ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ หลายงานไม่ว่าจะเป็นของ Mobasher, Devaguptapu และArion ในปี1996 ที่แสดงในตารางที่ 2.18 หรืองานของ Shi และ Qian ในปี 2000 ที่แสดงในตารางที่ 2.19 และงานของ Al-Jabri และคณะ ในปี 2005 ที่แสดงในตารางที่ตารางที่ 2.20 ดังนั้นตะกรันทองแดงจึงมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนเผาร่วมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ แต่ทั้งนี้ในตะกรันทองแดงยังมีองค์ประกอบของโลหะหนักหลายชนิดรวมอยู่ด้วย โดยโลหะหนักที่มีอยู่ในปริมาณสูงคือ สังกะสี (Zn) และทองแดง (CU)

ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบเบื้องต้น เช่น ผลของการชะละลายของโลหะหนัก หรือการนำไปใช้ประโยชน์ของตะกรันทองแดงในงานต่างๆ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ได้นำตะกรันทองแดงเป็นวัตถุดิบทดแทนในการเผาร่วมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ จึงต้องมีการศึกษาและตรวจสอบถึงผลกระทบของโลหะหนักที่อาจจะเกิดขึ้นต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์

5. **รูปแบบสารประกอบในวัสดุที่เป็นผลึก** (Mineralogical Composition)

ผลการศึกษารูปแบบสารประกอบ โดยตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD พบว่าตะกรันทองแดงมี Fayalite หรือ Fe_2SiO_4 และแมกนีไทต์ Magnetite หรือ Fe_3O_4 ชี้ให้เห็นว่าเหล็ก และซิลิเกตเป็นองค์ประกอบหลักในตะกรัน เช่นเดียวกับผลการศึกษา XRF และสอดคล้องกับการศึกษาของ Mobasher, Arino และ Devaguptapu (1996) ที่พบสารประกอบทั้งสองชนิดมากในตะกรันทองแดง รูปแบบของสารประกอบในตะกรันทองแดงดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 รูปแบบของสารประกอบหลักของตะกรันทองแดง ตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD

6. **ชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมด** (Total Heavy Metals)

เมื่อนำตะกรันมามาทำการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Digester) ตามมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 3052 เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นของเหลวใส จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในตะกรันทองแดงด้วยเครื่อง ICP

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าในตะกรันทองแดงมีปริมาณโลหะหลายชนิด โดยโลหะหนักที่มีอยู่ในปริมาณสูงคือ สังกะสี (Zn) มีความเข้มข้น 9127.699 มก./กก. และทองแดง (Cu) มีความเข้มข้น 6849.946 มก./กก. และเมื่อเทียบความเข้มข้นจากมก./กก. เป็นร้อยละพบว่า สังกะสีมีความเข้มข้นร้อยละ 0.9127 ทองแดงมีความเข้มข้นร้อยละ 0.685 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันทองแดงด้วยเครื่อง XRF ในตารางที่ 4.1 ที่สังกะสีมีความเข้มข้นร้อยละ1.05 และทองแดงที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.69 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักในตะกรันทองแดง

ชนิดโลหะ	ความเข้มข้น (มก./กก.)	ชนิดโลหะ	ความเข้มข้น (มก./กก.)
As	212.991	Zn	9127.699
Cd	24.100	Ag	< 0.003
Cr	69.781	Ba	75.494
Cu	6849.946	Co	< 0.010
Hg	<0.004	Ga	< 0.040
Ni	81.665	Mn	284.231
Pb	1576.328	Se	< 0.102
Tl	< 0.247	Sr	2.224
V	21.737		

7. **ทดสอบการชะละลาย** (Leaching Test)

7.1 มาตรฐานการชะละลาย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้ พศ.2548 ทดสอบการชะละลายของตะกรัน ด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ผลการศึกษาตารางที่ 4.3

ตารางที่4.3 ผลการศึกษาการชะละลายของตะกรันทองแดงด้วยวิธี WET

ชนิดโลหะหนัก	ค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (มก./ล.)	ค่าเฉลี่ยที่ตรวจวัดได้ด้วยวิธี WET (มก./ล.)
As	5	0.075
Cd	1	0.045
Cr	5	0.09
Cu	25	4.575
Hg	0.2	< 0.004
Ni	20	1.570
Pb	5	0.728
Tl	7	< 0.247
V	24	4.053
Zn	250	5.876
Ag	5	< 0.003
Ba	100	1.547
Co	80	< 0.010
Se	1	< 0.102

ผลการศึกษาการชะละลายของตะกรันทองแดง จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าการชะละลายโลหะหนักของตะกรันทองแดงมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้ พศ.2548 ดังนั้นจึงถือว่าตะกรันทองแดงเป็นของเสียที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายภายใต้ค่ามาตรฐานที่ยอมรับ

7.2 มาตรฐานการชะละลายของ US EPA SW-846 Method 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure หรือ TCLP) ทดสอบการชะละลายของตะกรันทองแดง ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่4.4 ผลการศึกษาการชะละลายของตะกรันทองแดงด้วยวิธี TCLP

ชนิดโลหะหนัก	ค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (มก./ล.)	ค่าเฉลี่ยที่ตรวจวัดได้ด้วยวิธี TCLP (มก./ล.)
As	5	0.096
Cd	1	0.072
Cr	5	0.303
Hg	0.2	< 0.004
Pb	5	1.645
Ag	5	< 0.003
Ba	100	2.606
Se	1	< 0.102

ผลการศึกษาการชะละลายของตะกรันทองแดง จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่าการชะละลายโลหะหนักของตะกรันทองแดงมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของ TCLP ดังนั้นจึงถือว่าตะกรันทองแดงเป็นของเสียที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายภายใต้ค่ามาตรฐานที่ยอมรับ สามารถนำกากของเสียไปใช้ประโยชน์ใหม่ได้ เช่นเดียวกับ งานวิจัยของ Alter (1997) ที่ทำการทดสอบการชะชะลายโลหะหนักของตะกรันทองแดงด้วยวิธี TCLP พบว่ามีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน จึงพิจารณาว่าตะกรันทองแดงไม่เป็นของเสียอันตราย

แม้ว่าตะกรันทองแดงถูกจัดว่าไม่เป็นของเสียอันตราย แต่ปริมาณโลหะหนักที่มีมากในตะกรันทองแดง อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้หากไม่ได้รับการจัดการที่ถูกต้อง

4.2 ผลการศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในปูนเม็ด

การศึกษาชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในปูนเม็ด ทั้งนี้ต้องมาทำการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Digester) ตามมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 3052 จากนั้นนำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง ICP ได้ผลค่าเฉลี่ยชนิดและปริมาณโลหะหนักในปูนเม็ดของตัวอย่างทั้งหมด แสดงดังตารางที่ค.2 ในภาคผนวก ค จากนั้นทำการเลือกตัวอย่างปูนเม็ด เพื่อทำการศึกษาในขั้นตอนต่อไป หลักเกณฑ์คือ พิจารณาตัวอย่างที่มีโลหะหนักในปริมาณสูงเกินเกณฑ์ในการผลิตปูนเม็ด (S-QA-012) และ/หรือเป็นตัวอย่างที่มีชนิดและปริมาณของโลหะหนักสูงสุดในแต่ละอัตราส่วน

ผลค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักที่ได้หลังจากเลือกตัวอย่างปูนซีเมนต์เพื่อทำการศึกษาในขั้นตอนต่อไป แสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งมี 9 อัตราส่วนคือร้อยละ 0 1.8 2.0 2.2

2.4 2.6 2.8 3.0 และ 3.2 ตามลำดับ ตัวอย่างที่เลือกเป็นตัวแทนของแต่ละอัตราส่วน แทนด้วย C0 C18 C20 C22 C24 C26 C28 C30 และ C32 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาชนิดและปริมาณโลหะหนักในปูนเม็ด เทียบกับเกณฑ์การผลิตปูนเม็ด*

ชนิดโลหะ	เกณฑ์การผลิตปูนเม็ด* (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนเม็ด (มก./กก.)								
		C0	C18	C20	C22	C24	C26	C28	C30	C32
As	40	11.599	16.505	17.618	20.682	18.217	24.660	25.679	27.260	30.273
Cd	1.5	< 0.009	< 0.009	< 0.009	< 0.009	< 0.009	**2.024**	< 0.009	< 0.009	< 0.009
Cr	150	14.136	16.187	16.766	17.810	22.806	20.506	18.801	23.423	31.526
Cu	100	43.306	85.821	76.644	88.191	97.675	**147.763**	**159.281**	**184.005**	**204.035**
Hg	0.5	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004
Ni	150	9.198	18.121	16.399	20.246	25.009	24.682	17.125	21.233	25.167
Pb	100	10.595	13.767	12.907	17.543	18.369	27.392	24.774	26.342	28.387
Tl	2.0	< 0.247	< 0.247	< 0.247	< 0.247	< 0.247	< 0.247	< 0.247	< 0.247	< 0.247
V	150	16.023	29.831	33.968	33.854	32.057	38.634	32.927	36.440	39.585
Zn	450	74.279	172.950	202.275	255.541	238.622	337.505	373.988	380.043	395.663
Ag	-	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003
Ba	-	16.763	41.647	43.394	55.530	46.289	59.468	57.971	69.631	61.756
Co	-	4.253	6.547	5.268	7.036	6.792	6.606	11.850	7.655	9.919
Ga	-	< 0.040	< 0.040	< 0.040	< 0.040	< 0.040	< 0.040	< 0.040	< 0.040	< 0.040
Mn	-	41.754	81.818	70.614	77.012	85.436	121.773	129.646	159.510	167.312
Se	-	< 0.102	< 0.102	< 0.102	< 0.102	< 0.102	< 0.102	< 0.102	< 0.102	< 0.102
Sr	-	25.270	35.809	41.626	56.560	64.177	80.036	87.089	92.294	82.515

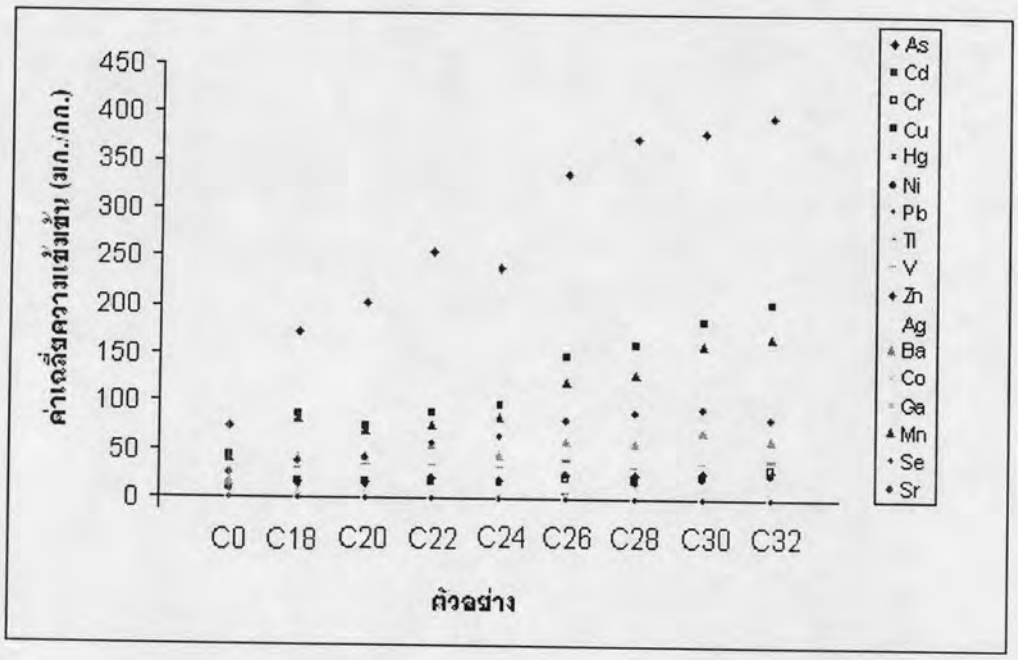
หมายเหตุ: 1. * คือเกณฑ์การผลิตปูนเม็ด S-QA-012 ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

2. ตัวเลขที่เป็นตัวเข้ม คือเกินเกณฑ์การผลิต

จากการสรุปตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของตะกรันทองแดงที่ใช้ในการเผาร่วมเพิ่มขึ้น โดยทองแดงมีค่าความเข้มข้นเกินเกณฑ์ในการผลิตที่ยอมให้มีได้ในปูนเม็ดของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการผลิตปูนซีเมนต์ คือ C26 C28 C30

และ C32 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 148 159 184 และ 204 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยค่าเกณฑ์การผลิตของทองแดงที่ยอมให้มีได้ในปูนเม็ดเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ทั้งนี้เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบหลักด้วยเครื่อง XRF และหาชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในตะกรันทองแดงด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digester) ที่แสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 พบว่า ทองแดงในตะกรันทองแดงมีความเข้มข้นในปริมาณสูง จึงเป็นผลให้ความเข้มข้นของทองแดงในปูนเม็ดมีค่าความเข้มข้นเกินเกณฑ์การผลิต ดังนั้นผลมาจากการใช้ตะกรันทองแดงเป็นวัตถุดิบทดแทน ส่งผลกระทบต่อคุณภาพปูนเม็ด เมื่อนำตะกรันทองแดงมาเผาร่วมในตั้งแต่ C26 เป็นต้นไป แต่ในงานวิจัยนี้ได้มีการเผาร่วมสูงถึง C32 ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อคุณภาพของปูนเม็ด และเสี่ยงต่อการชะละลายของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อมได้ จึงต้องมีการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของปูนเม็ดต่อไป



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ

4.3 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของปูนเม็ด

4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของปูนเม็ด

1. ความละเอียด (Fineness)

การหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) มีหน่วยเป็นพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก เป็นหนึ่งในวิธีมาตรฐานในการหาค่าความละเอียด ซึ่งค่าพื้นที่ผิวจำเพาะนี้ หาโดยใช้เครื่องหาความซึมอากาศเบลน (Blaine Air Permeability) ตามมาตรฐาน ASTM C204-05 เมื่อนำปูนเม็ดที่เลือก

ได้จากผลการศึกษาที่ 4.2 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ช่วงระหว่าง 3419 – 3535 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม แสดงในตารางที่ ค.3 (ภาคผนวก ค) โดยค่าความละเอียดต่ำสุดของของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาต้องไม่ต่ำกว่า 2800 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ทั้งนี้ขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีของปูนซีเมนต์มาก โดยขนาดอนุภาคที่เล็กสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดี แต่ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กมากจนเกินไปก็จะทำปฏิกิริยากับความชื้นที่มีในอากาศ ทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพได้ง่ายก่อนนำไปใช้งานได้ (วินิต ช่อวิเชียร, 2544) ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดลองจึงเป็นค่าที่ยอมรับได้

จากผลการศึกษาดังกล่าวจะเห็นว่า ปริมาณที่เพิ่มขึ้นของโลหะหนักในปูนเม็ดไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการบดได้ของปูนเม็ด จากการศึกษาในปี 1997 ของ Tsivilis และ Kakali ทำการศึกษาผลกระทบของโลหะหนักต่อความสามารถในการบดได้ของปูนเม็ด พบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นมีทั้งไปช่วยเพิ่มความพรุนในปูนเม็ด ทำให้ความสามารถในการบดได้ของปูนเม็ดเพิ่มขึ้น เช่น Mn Cr และโลหะหนักบางชนิด เช่น Zn จะไปลดความสามารถในการบดได้ของปูนเม็ด ในการศึกษาครั้งนั้นได้นำโลหะหนักแต่ละชนิดร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ผลกระทบที่เกิดขึ้นจึงมีความชัดเจน สำหรับการวิจัยครั้งนี้ เมื่อเทียบปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดในปูนเม็ดมีปริมาณไม่ถึงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โลหะหนักจึงไม่ส่งผลกระทบดังกล่าว

2. **ความถ่วงจำเพาะ** (Specific Gravity)

การศึกษาหาค่าความถ่วงจำเพาะ ตามมาตรฐาน ASTM C188-95 พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 3.129-3.155 แสดงในตารางที่ ค.4 (ภาคผนวก ค) ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งโดยทั่วไปมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 3.150 (วินิต ช่อวิเชียร, 2544) ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดลองจึงเป็นค่าความถ่วงจำเพาะตามปกติ

4.3.2 ลักษณะทางเคมีของปูนเม็ด

1. **ค่าการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุเนื่องจากการเผา** (Loss on Ignition **หรือ** LOI)

การศึกษาการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุเนื่องจากการเผา ตามมาตรฐาน ASTM C114-05 แสดงถึงปริมาณคาร์บอนและความชื้นทั้งหมดที่มีในวัสดุ พบว่าปูนเม็ดมีค่า LOI อยู่ระหว่างร้อยละ 0.749 -1.524 โดยน้ำหนัก แสดงในตารางที่ ค.4 (ภาคผนวก ค) เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางเคมีของปูน กำหนดให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักไม่ควรเกินกว่าร้อยละ 3 หากเกินกว่านี้แสดงว่าปูนบางส่วนได้ทำปฏิกิริยากับน้ำไปบ้างแล้ว อาจเป็นผลจากการเก็บรักษาที่ไม่ดีพบ ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพเสื่อมลงได้ (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

2. **องค์ประกอบทางเคมี** (Chemical Composition)

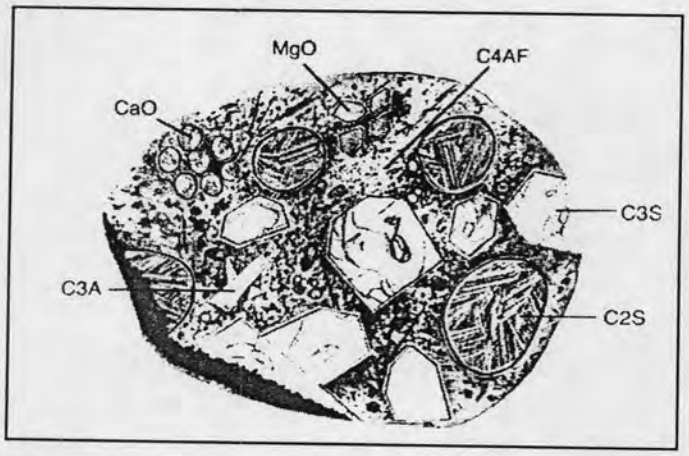
ผลการศึกษาการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนเม็ด ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุในรูปออกไซด์ ตรวจวัดด้วยเครื่อง XRF แสดงดังตารางที่ค.5 (ภาคผนวก ค) จากตารางที่ 4.5 พบว่ามีแคลเซียม (CaO) ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (FeO) สูง แต่ทั้งนี้ในปูนเม็ดยังมีองค์ประกอบของโลหะหนักหลายชนิดรวมอยู่ด้วย โดยโลหะหนักที่มีอยู่ในปริมาณสูงคือ สังกะสี (Zn) และทองแดง (CU) เป็นผลมาจากตะกรันทองแดงที่นำมาเผาร่วม นอกจากนี้ยังสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณโลหะหนักในปูนเม็ดมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนตะกรันทองแดงที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.6 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRF

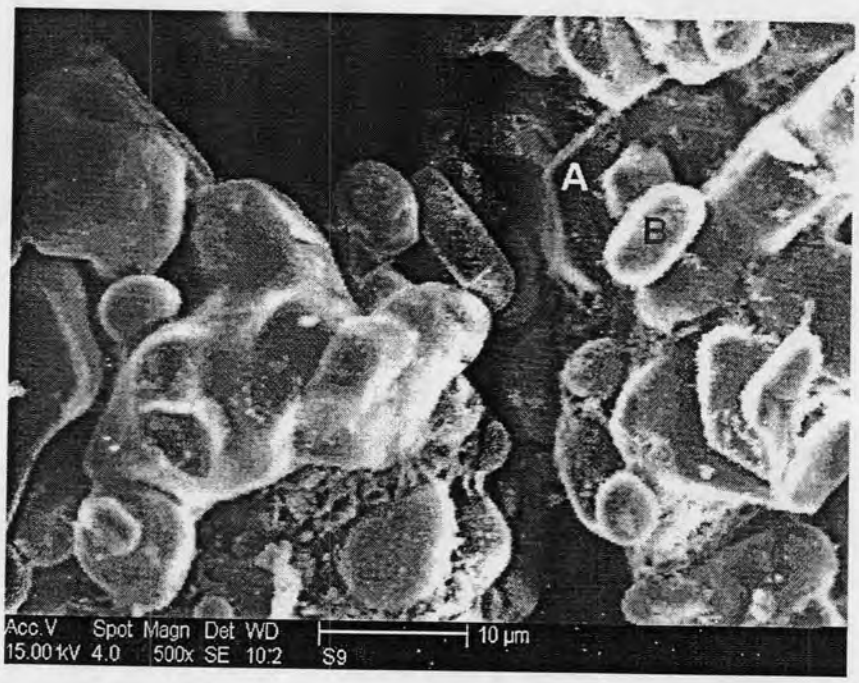
องค์ประกอบทางเคมี		ความเข้มข้นองค์ประกอบในปูนเม็ด								
		C0	C18	C20	C22	C24	C26	C28	C30	C32
องค์ประกอบหลัก (ร้อยละ)	CaO	62.45	61.38	62.54	59.84	62.59	59.49	60.77	63.48	62.64
	SiO_2	22.55	21.88	20.56	23.88	22.32	23.65	22.84	20.26	20.79
	Al_2O_3	5.74	6.98	6.49	6.30	5.89	5.81	6.69	5.61	6.50
	Fe_2O_3	3.95	4.46	4.74	4.40	3.82	4.70	4.16	4.68	4.54
	MgO	3.73	3.71	3.96	3.92	3.78	4.70	3.87	4.27	3.88
	อื่นๆ	1.13	1.13	1.23	1.19	1.22	1.21	1.20	1.27	1.20
โลหะหนัก (มก./กก.)	ZnO	68.292	190.772	198.583	216.734	227.619	230.052	356.516	353.197	388.261
	CuO	39.418	76.292	75.238	93.410	131.174	118.537	129.942	190.421	229.451
	MnO	31.632	55.443	73.923	68.518	81.421	97.937	115.052	120.681	129.819
	SrO	27.068	56.777	71.182	69.088	68.216	75.485	73.689	76.485	75.212
	MoO_3	25.780	39.476	42.518	55.472	58.061	48.612	70.361	58.356	67.441
	PbO	18.678	26.117	37.984	45.404	56.277	39.921	47.842	62.553	58.417
	รวม	210.868	444.877	499.428	548.626	622.767	610.544	793.402	861.693	948.601
LOI		0.892	0.986	1.042	1.291	1.524	0.963	0.749	1.138	1.011
ผลรวม (ร้อยละ)		99.583	99.633	99.614	99.629	99.702	99.681	99.693	99.758	99.732

4.4 ผลการศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในปูนเม็ด โดยศึกษาลักษณะทางกายภาพ

จากการนำตัวอย่างปูนเม็ดมาตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหรือ SEM (Scanning Electron Microscope) สำหรับตรวจสอบลักษณะการจับตัวกันและการกระจายตัวของโลหะหนักในปูนเม็ดในโครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructure) โดยใช้งานร่วมกับ EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) เพื่อตรวจสอบถึงรายละเอียดองค์ประกอบที่เป็นธาตุ ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM/EDS สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4.6 ถึง 4.13



รูปที่ 4.5 ลักษณะโครงสร้างภายในปูนเม็ด (Bishop, Bott และBarron, 2003)

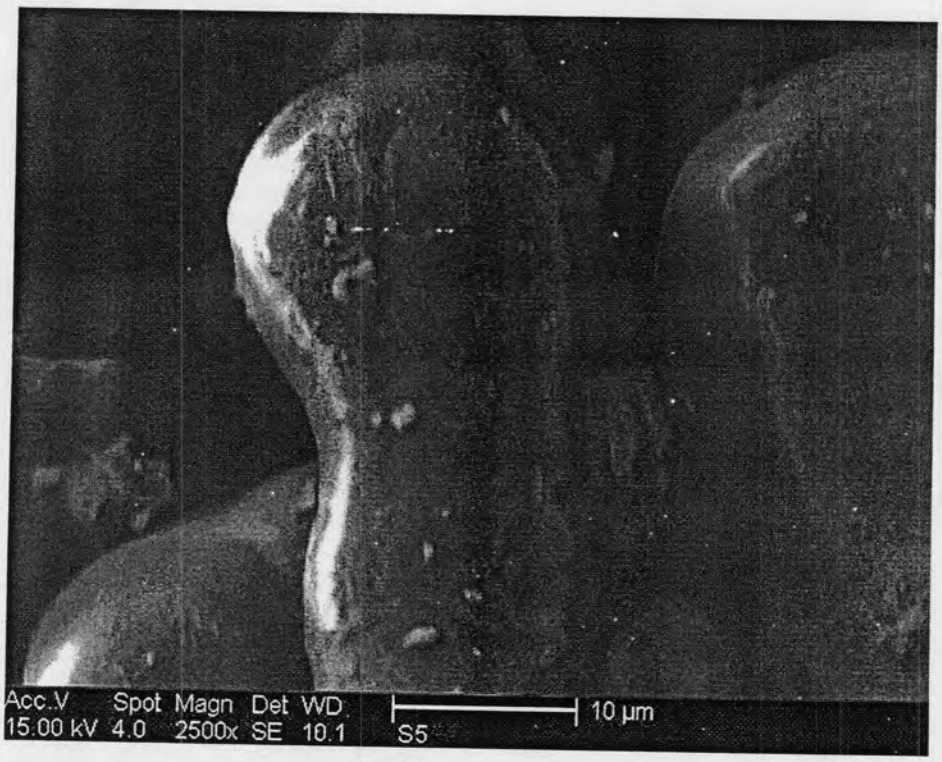


รูปที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างภายในปูนเม็ด ที่กำลังขยาย 500 เท่า ตรวจวัดด้วยเครื่อง SEM (สัญลักษณ์ A= C_3S B= C_2S)

จากรูป 4.6 ลักษณะที่สังเกตได้คือปูนเม็ดมีผิวขรุขระ และมีความมน เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะโครงสร้างภายในปูนเม็ดในรูป 4.5 จากการศึกษาของ Bishop, Bott และBarron จะสังเกตเห็นโครงสร้างองค์ประกอบหลักภายในปูนเม็ด โครงสร้างที่เป็นแผ่น (A) คาดว่าเป็นลักษณะโครงสร้างของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ที่มีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม และมีปริมาณมากที่สุดในปูนเม็ดประมาณร้อยละ 40-70 มีขนาดประมาณ 25 µm และขนาดใหญ่ได้สูงสุดถึง

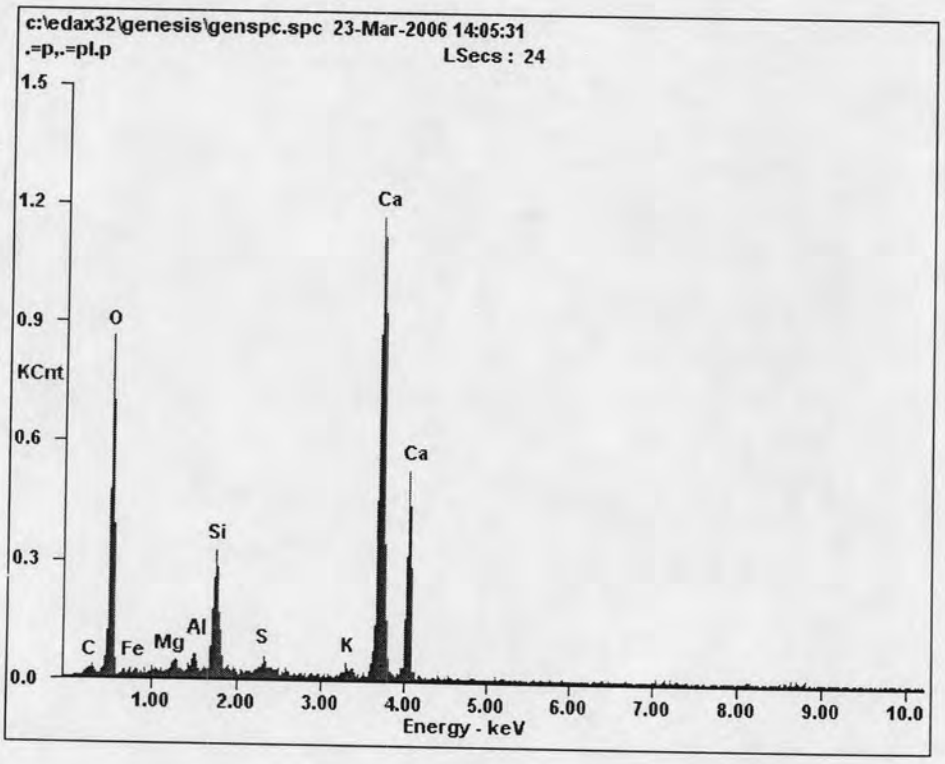
150 µm ส่วนโครงสร้างที่เป็นเม็ดกลม (B) เป็นลักษณะโครงสร้างของไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) มีปริมาณประมาณร้อยละ 15-45 มีขนาดอยู่ระหว่าง 5 ถึง 40 µm (Stutzman, 2004)

นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบที่สำคัญในปูนเม็ด แต่มีปริมาณน้อยและขนาดเล็กกว่า ทำให้ยากต่อการวิเคราะห์ด้วย SEM คือ C_3A และ C_4AF โดย C_3A มีปริมาณประมาณร้อยละ 1-15 มีขนาดเล็กประมาณ 1- 20 µm มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูปลูกบาศก์ หรือรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ส่วน C_4AF มีปริมาณประมาณร้อยละ 0-18 มีลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นใย (Andrade, Maringolo และ Kihara, 2003; Stutzman, 2004)

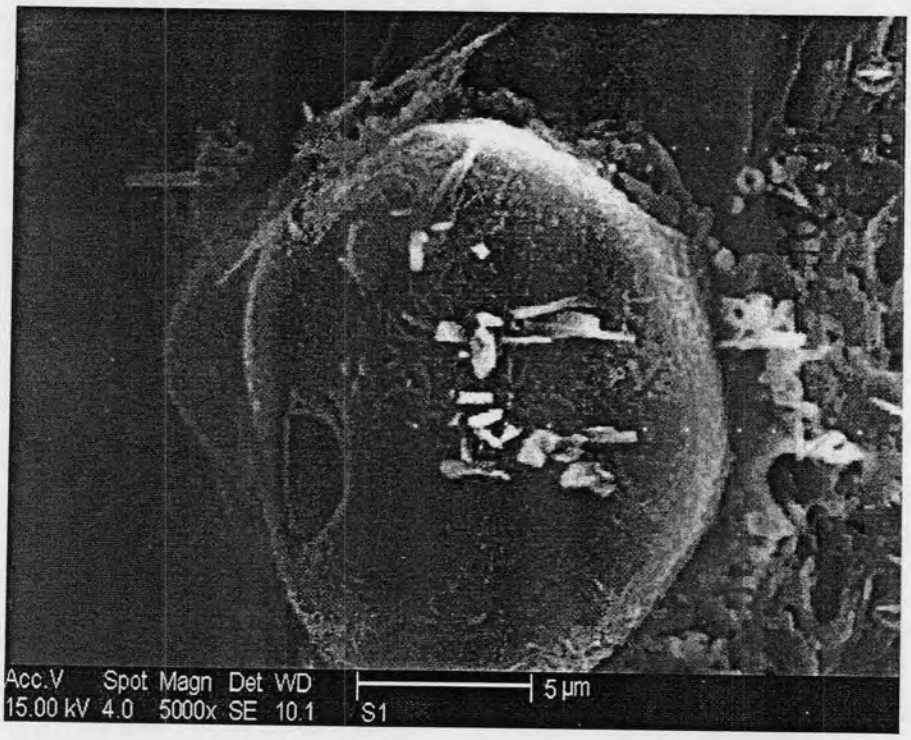


รูปที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างภายในปูนเม็ด ที่กำลังขยาย 2500 เท่า ตรวจวัดด้วยเครื่อง SEM

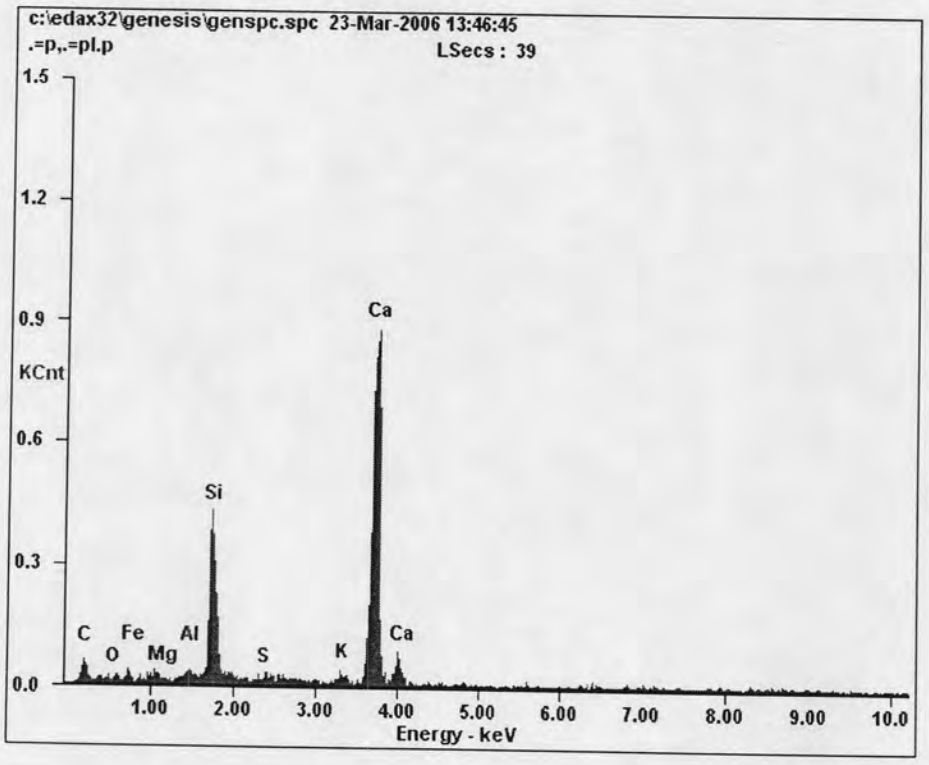
รูปที่ 4.8 ลักษณะโครงสร้างที่ผิวภายในปูนเม็ด ที่มีแคลเซียมออกไซด์ ตรวจวัดด้วยเครื่อง SEM



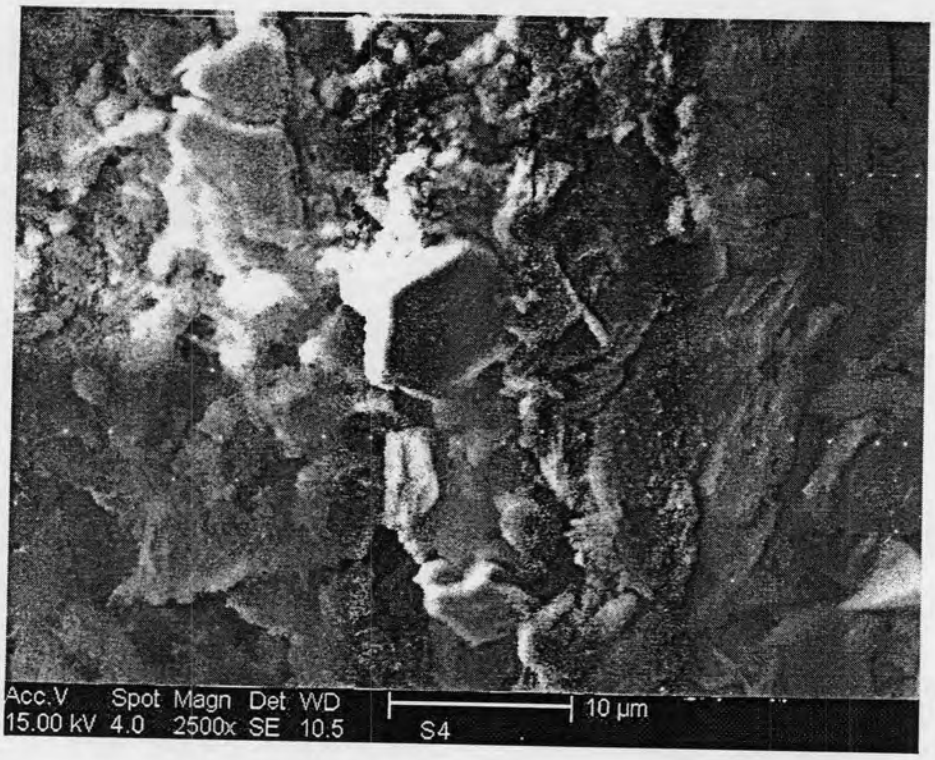
รูปที่ 4.9 ผลการศึกษา EDS ของโครงสร้างที่ผิวภายในปูนเม็ด ที่มีแคลเซียมออกไซด์



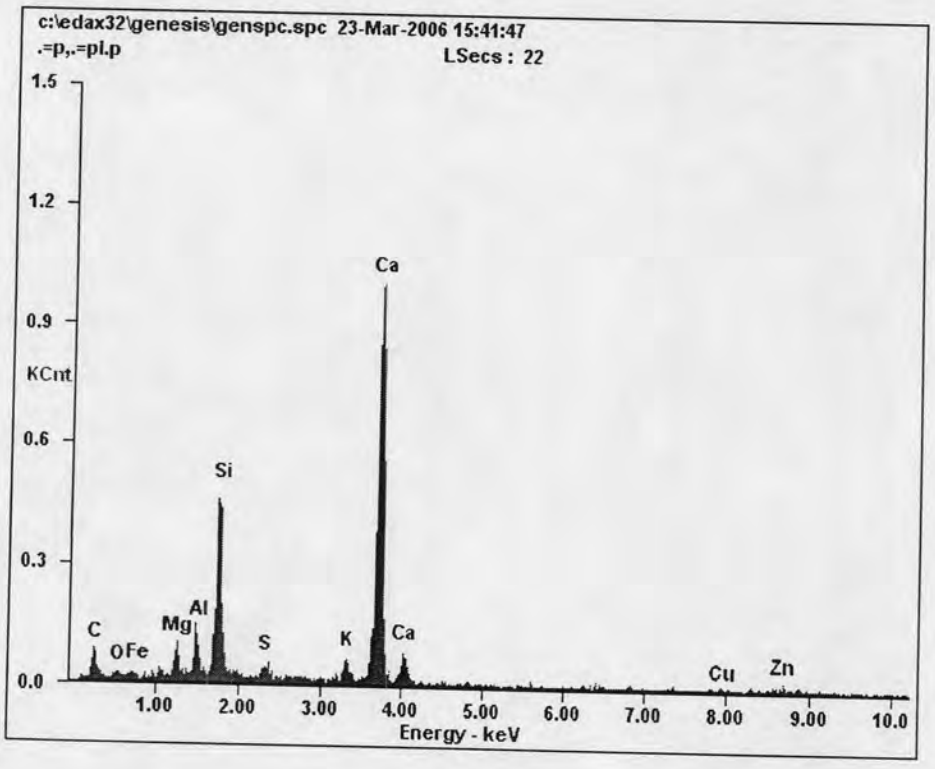
รูปที่ 4.10 ลักษณะโครงสร้าง C_2S ในปูนเม็ด ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ตรวจวัดด้วยเครื่อง SEM



รูปที่ 4.11 ผลการศึกษา EDS ของลักษณะโครงสร้าง C_2S ในปูนเม็ด



รูปที่ 4.12 ลักษณะโครงสร้าง C_3S ในปูนเม็ด ที่กำลังขยาย 2500 เท่า ตรวจวัดด้วยเครื่อง SEM



รูปที่ 4.13 ผลการศึกษา EDS ของลักษณะโครงสร้าง C_3S ในปูนเม็ด

จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นลักษณะโครงสร้างภายในปูนเม็ดที่กำลังขยาย 5000 เท่า ลักษณะที่สังเกตได้คือ ลักษณะโครงสร้างเป็นเม็ดกลม คาดว่าเป็นโครงสร้างของ C_2S เนื่องจากการตรวจสอบด้วย EDS รูปที่ 4.11 พบว่ามีปริมาณของแคลเซียม และซิลิกาสูง โดยมีปริมาณของ Ca/Si เท่ากับ 2 และลักษณะที่เป็นเม็ดกลม ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างของ C_2S (Stutzman, 2004) สำหรับการศึกษาครั้งนี้ไม่พบโลหะหนักใดจับอยู่ในโครงสร้างของ C_2S เนื่องจากปริมาณโลหะหนักน้อยเกินไป ทั้งนี้การศึกษาของ Andrade, Maringolo และ Kihara (2003) ทำการศึกษาพฤติกรรมของโลหะหนัก V Zn และ Pb กับการเข้าไปรวมตัวภายในโครงสร้างปูนเม็ด พบว่า V มักเข้าไปอยู่ใน C_2S

สำหรับผลการศึกษา SEM รูปที่ 4.12 ลักษณะที่สังเกตได้คือ ลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่นหกเหลี่ยม ในโครงสร้างภายในปูนเม็ดที่กำลังขยาย 2500 เท่า คาดว่าเป็นโครงสร้างของ C_3S จากการตรวจสอบด้วย EDS รูปที่ 4.13 พบว่ามีปริมาณของแคลเซียม และซิลิกาสูง นอกจากนี้พบโลหะหนัก คือ Cu และ Zn ร่วมด้วย เนื่องจากปริมาณโลหะหนักทั้งสองชนิดมีมาก จึงสามารถตรวจวัดได้ง่าย จากการศึกษาหลายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า Zn มักเข้าไปรวมตัวอยู่ในโครงสร้างของ C_3S โดยมีผลกระทบต่อระยะเวลาก่อตัว และความแข็งแรง (Murat และ Sorrentino, 1996; Stephan และคณะ,1999; Andrade, Maringolo และ Kihara ,2003)

ผลการศึกษา SEM/EDS ของตัวอย่างปูนเม็ดที่อัตราส่วนต่างๆ โดยมากพบเพียงองค์ประกอบหลักหรือองค์ประกอบพื้นฐานที่มีอยู่ในปูนเม็ด ได้แก่ แคลเซียม และซิลิกา แต่ไม่สามารถวิเคราะห์หาลักษณะของโลหะชนิดต่างๆ บนผิวของปูนเม็ดได้ ยกเว้น Cu และ Zn ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของโลหะชนิดอื่นมีน้อยเกินไป ทำให้มีการกระจายตัวออกไปจนไม่สามารถตรวจวัดได้ตรวจวัดด้วยเครื่อง SEM/EDS

4.5 ผลการศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในปูนเม็ดโดยศึกษาลักษณะทางเคมี

4.5.1 ผลการศึกษาชนิดสารประกอบโลหะหนัก ด้วยเครื่อง XRD

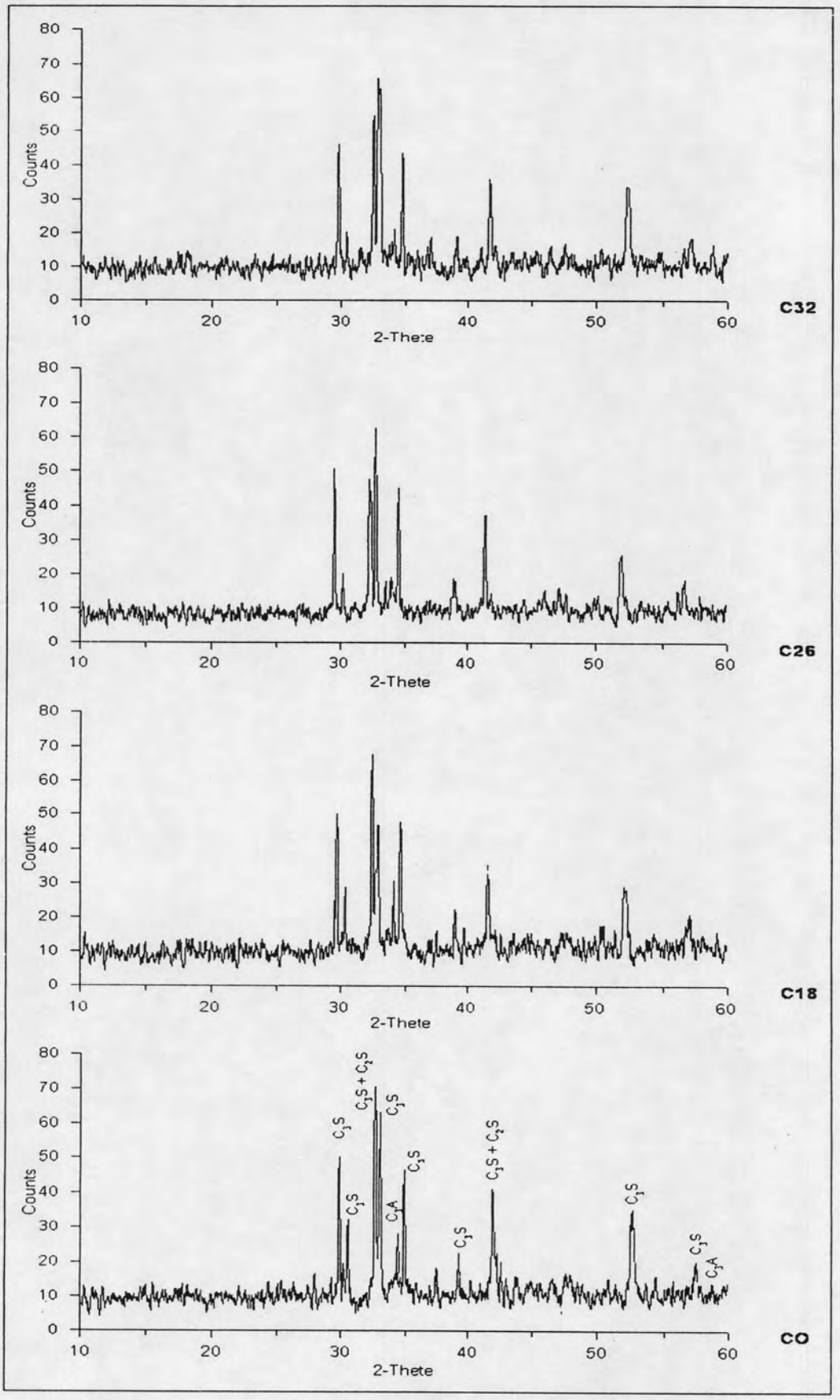
จากการนำตัวอย่างของปูนเม็ดจากการแปรผันอัตราส่วนตะกรันทองแดงที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่าง C0 ถึง C32 มาตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD สิ่งที่ได้จากการวัดคือ กราฟความถี่ของสารประกอบต่างๆ โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม 2θ และ Relative Intensity นำกราฟที่ได้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่มี ซึ่งทำให้สามารถระบุสารประกอบโลหะแต่ละชนิดได้ ซึ่งผลการศึกษาทั้งหมด แสดงในรูปที่ง.1 ถึงรูปที่ ง.17 (ภาคผนวก ง)

จากการศึกษาด้วยเครื่อง XRD จะพบรูปแบบของสารประกอบทั้งแบบอสัณฐาน (Amorphous Phase) และแบบควอทซ์ (Crystalline Phase) ทั้งนี้รูปแบบสารประกอบแบบอสัณฐานจะมีลักษณะเป็นเนิน ไม่มีจุดสูงสุด (Peak) ส่วนรูปแบบควอทซ์จะมีลักษณะแหลมสูงมีจุดสูงสุดให้เห็นอย่างชัดเจน ผลการศึกษาที่ได้พบว่าสารประกอบที่อยู่ในรูปแบบควอทซ์ ได้แก่ ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในปูนเม็ด โดยมาก C_2S มี Diffraction peak ร่วมกับ C_3S เด่นชัดที่ 32.19° 34.36° และ 41.54° ส่วน C_3A มี Diffraction peak เด่นชัดที่ 29.44° 32.46° และ 51.71° (Shih, Chang และ Chiang,2003)

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ อัตราส่วนตะกรันที่ใช้เผาร่วมมีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงแสดงกราฟเฉพาะในตัวอย่างที่ C0 C18 C26 และ C32 เพื่อให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนของอัตราส่วนที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าการแปรผันอัตราส่วนตะกรันทองแดงที่เพิ่มขึ้น กราฟความถี่ของสารประกอบหลักในทุกตัวอย่างมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน รูปแบบของสารประกอบแบบควอทซ์ยังคงแสดง Diffraction peak ขององค์ประกอบหลักที่ชัดเจน คือกราฟความถี่ของไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต และไตรแคลเซียมอลูมิเนต อันเป็นส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญของปูนเม็ด แตกต่างที่ค่าความเข้มที่วัดได้ของ C_3S และ C_2S จะมีค่าลดลง โดยความแตกต่างจะเห็นชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่าง C0 และ C32

ทั้งนี้ค่าความเข้มที่ต่างกันนี้อาจเนื่องจากการมีปริมาณโลหะหนักที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราส่วนของตะกรันทองแดงที่นำมาเผาร่วม สารประกอบโลหะหนักที่ตรวจวัดได้ในปูนเม็ดจากการวัดด้วยเครื่อง XRD แสดงในตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าโลหะหนักไปรวมตัวกับองค์ประกอบหลักบางส่วน เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex Compound) ระหว่างองค์ประกอบหลักกับโลหะหนัก เช่น CaZn $CaMn_7O_{12}$ และ Zn_2SiO_4 ทำให้องค์ประกอบหลักที่จะเกิดเป็น C_3S และ C_2S น้อยลง

การลดลงของ C_3S และ C_2S มีผลต่อความแข็งแรงของปูนซีเมนต์หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เนื่องจากสารประกอบทั้งสองชนิดนี้จะเป็นตัวควบคุมทำให้มอร์ตาหรือคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดทั้งในระยะแรกและระยะหลัง (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)



รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงสารประกอบหลักในปูนเม็ด ที่อัตราส่วนต่างๆ

ส่วนรูปแบบของสารประกอบโลหะหนักในตัวอย่างปูนเม็ดที่มีการเผาร่วมกับตะกรัน เมื่อทำการสืบค้นข้อมูลกราฟความถี่ที่ได้กับฐานข้อมูลที่มีในเครื่อง XRD แสดงผลดังภาคผนวก ง และสามารถสรุปได้ตารางที่4.7 จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD สารประกอบโลหะหนักที่พบมีเพียง Zn Cu และ Mn ซึ่งพบได้ในตัวอย่าง ทั้งนี้เนื่องจากโลหะหนักทั้งสามชนิดมีปริมาณมากกว่าโลหะหนักชนิดอื่น เห็นได้จากผลการศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในปูนเม็ด (ตารางที่4.5) และผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRF (ตารางที่4.6) นอกจากนี้พบว่าโลหะหนักทั้งสามชนิด จะอยู่ในรูปสารประกอบที่มีพันธะคาร์บอเนต พันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ และพันธะกับซัลไฟด์

ตารางที่ 4.7 สรุปผลการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRD

ตัวอย่าง	ชื่อสารประกอบที่ตรวจพบ	ชื่อย่อ
C0	Tricalcium Silicate	Ca_3SiO_5
	Dicalcium Sillcate	Ca_2SiO_4
	Tricalcium Aluminate	$Ca_3Al_2O_6$
C18	Tricalcium Silicate	Ca_3SiO_5
	Dicalcium Sillcate	Ca_2SiO_4
	Tricalcium Aluminate	$Ca_3Al_2O_6$
	Calcium Zinc	CaZn
	Copper Oxid	CuO
	Zinc Oxid	ZnO
C20	Tricalcium Silicate	Ca_3SiO_5
	Dicalcium Sillcate	Ca_2SiO_4
	Tricalcium Aluminate	$Ca_3Al_2O_6$
	Calcium Zinc	CaZn
	Copper Oxid	CuO
	Zinc Oxid	ZnO
C22	Tricalcium Silicate	Ca_3SiO_5
	Dicalcium Sillcate	Ca_2SiO_4
	Tricalcium Aluminate	$Ca_3Al_2O_6$
	Manganese Carbonate	$MnCO_3$
	Copper Iron Sulfide	$CuFeS_2$
	Zinc Carbonate	$ZnCO_3$

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) สรุปผลการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRD

ตัวอย่าง	ชื่อสารประกอบที่ตรวจพบ	ชื่อย่อ
C24	Tricalcium Silicate	Ca_3SiO_5
	Dicalcium Sillcate	Ca_2SiO_4
	Tricalcium Aluminate	$Ca_3Al_2O_6$
	Manganese Carbonate	$MnCO_3$
	Copper Carbonate	Cu_2CO_3
	Calcium Zinc	CaZn
C26	Tricalcium Silicate	Ca_3SiO_5
	Dicalcium Sillcate	Ca_2SiO_4
	Tricalcium Aluminate	$Ca_3Al_2O_6$
	Iron Manganese Oxide	$FeMnO_3$
	Copper Iron Sulfide	$CuFeS_2$
	Zinc Carbonate	$ZnCO_3$
	Zinc Silicate Oxide	Zn_2SiO_4
C28	Tricalcium Silicate	Ca_3SiO_5
	Dicalcium Sillcate	Ca_2SiO_4
	Tricalcium Aluminate	$Ca_3Al_2O_6$
	Calcium Manganese Oxide	$CaMn_7O_{12}$
	Copper Carbonate	Cu_2CO_3
	Zinc Iron Oxide	$ZnFe_2O_4$
	Calcium Zinc	CaZn
C30	Tricalcium Silicate	Ca_3SiO_5
	Dicalcium Sillcate	Ca_2SiO_4
	Tricalcium Aluminate	$Ca_3Al_2O_6$
	Iron Manganese Oxide	$FeMnO_3$
	Copper Iron Sulfide	$CuFeS_2$
	Zinc Iron Oxide	$ZnFe_2O_4$
	Calcium Zinc	CaZn

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) สรุปผลการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRD

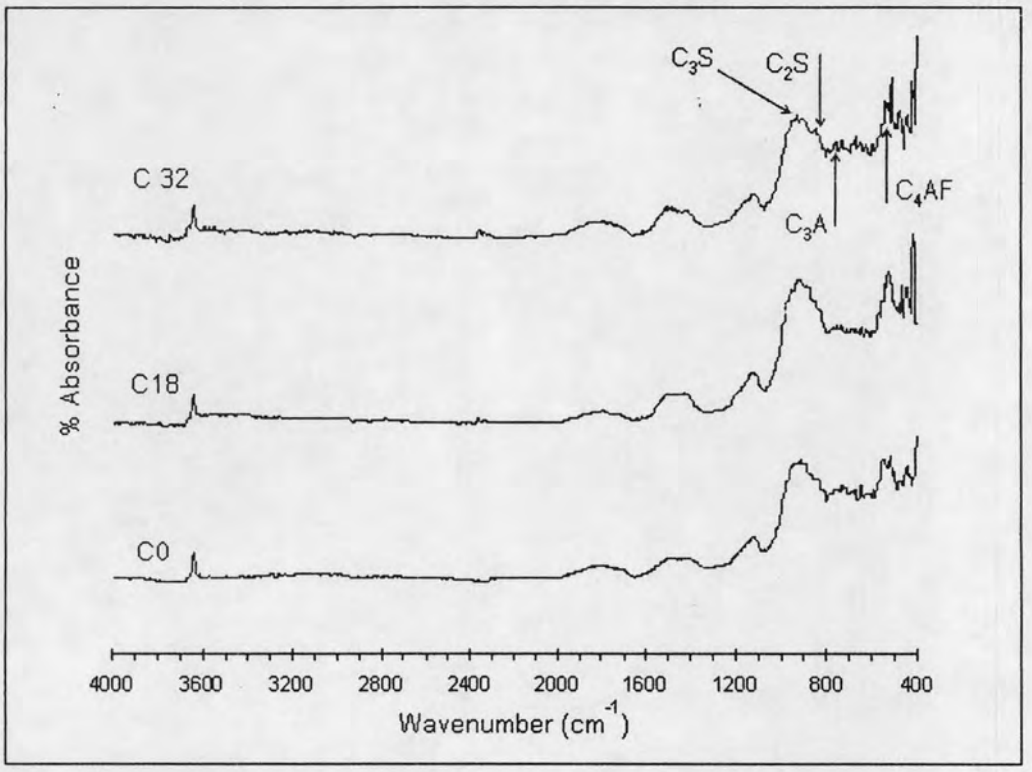
ตัวอย่าง	ชื่อสารประกอบที่ตรวจพบ	ชื่อย่อ
C32	Tricalcium Silicate	Ca_3SiO_5
	Dicalcium Sillcate	Ca_2SiO_4
	Tricalcium Aluminate	$Ca_3Al_2O_6$
	Calcium Manganese Oxide	$CaMn_7O_{12}$
	Copper Iron Sulfide	$CuFeS_2$
	Zinc Silicate Oxide	Zn_2SiO_4
	Calcium Zinc	CaZn

จากผลการศึกษาชนิดสารประกอบโลหะหนัก ด้วยเครื่อง XRD สรุปได้ว่าโลหะหนักมีผลต่อโครงสร้างภายในของปูนเม็ด โดยโลหะหนักไปรวมตัวกับองค์ประกอบหลัก เกิดเป็นสารประกอบที่ซับซ้อน นอกจากนี้ผลกระทบที่จะเกิดในปูนเม็ดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปแบบสารประกอบโลหะหนักที่ก่อตัวขึ้น แต่ในการศึกษาครั้งนี้ไม่สามารถยืนยันรูปแบบสารประกอบโลหะหนักกับผลที่เกิดได้ชัดเจน เนื่องจากมีโลหะหนักรวมกันอยู่หลายชนิด และมีปริมาณไม่มากพอที่เครื่อง XRD จะสามารถตรวจวัดได้ครบ แตกต่างจากงานวิจัยบางส่วนที่ศึกษาถึงเรื่องสถานภาพของโลหะหนักในผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ โดยเลือกชนิดของโลหะหนักที่สนใจ และใช้สารประกอบของโลหะบริสุทธิ์ที่สังเคราะห์ขึ้น มีความเข้มข้นของโลหะหนักปริมาณสูง ทำให้เห็นผลกระทบที่เกิดขึ้นได้ชัดเจนกว่า

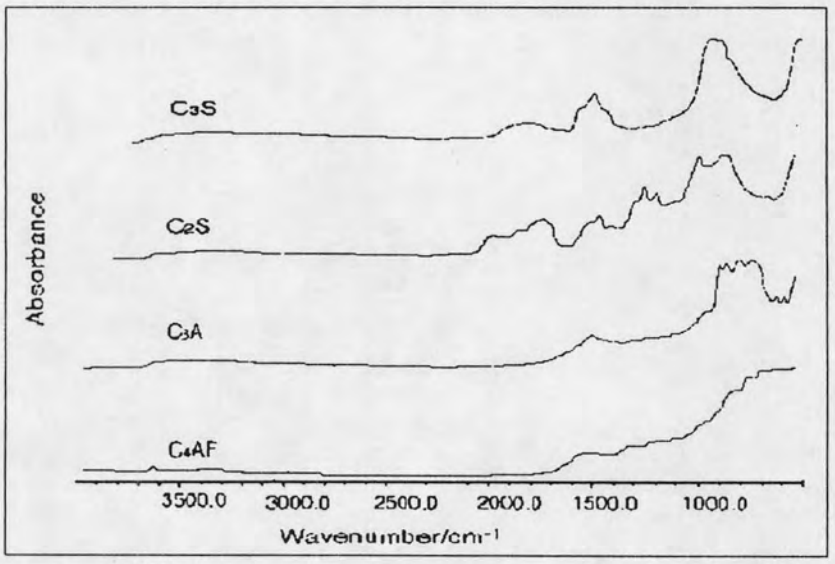
4.5.2 ผลการศึกษาพันธะของสารประกอบโลหะหนัก (Functional Group)

การศึกษาพันธะของสารประกอบโลหะหนัก โดยใช้หลักการรังสีอินฟาเรด ด้วยเครื่อง FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscope) เป็นการตรวจวัดในเชิงคุณภาพ เพื่อให้ทราบพันธะของสารประกอบโลหะหนักที่มีอยู่ในปูนเม็ด เป็นการเพิ่มความชัดเจนของการศึกษาชนิดสารประกอบโลหะหนักที่มีลักษณะเป็นผลึก ตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD และการสกัดแยก

ผลจากการนำตัวอย่างของปูนเม็ดจากการแปรผันอัตราส่วนตะกรันทองแดงที่เพิ่มขึ้น มาวิเคราะห์พันธะสารประกอบโลหะ ด้วยเครื่อง FT-IR ที่ความถี่ในการสแกน 200 ครั้ง ผลแบบ Absorbance กราฟความถี่ที่วัดได้แสดงดังรูปที่ แสดงในรูปที่จ.3 ถึงรูปที่ จ.11 (ภาคผนวก จ.) โดยแกนนอน (x) คือค่าเลขคลื่น และแกนตั้ง (y) คือค่า Absorbance (%)



รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของตัวอย่างปูนเม็ด C0 C18 และ C32



รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของ C_3S C_2S C_3A และ C_4AF (Hughes และคณะ,1995)

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ อัตราส่วนตะกรันที่ใช้เผาร่วมมีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงแสดงแสดงผลการวิเคราะห์รูปแบบหลักของสารประกอบในตัวอย่างปูนเม็ดที่อัตราส่วนตะกรันทองแดงที่ต่างกันมากๆ เพื่อให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจน คือในตัวอย่างปูนเม็ด C0 C18 และC32 จากรูป

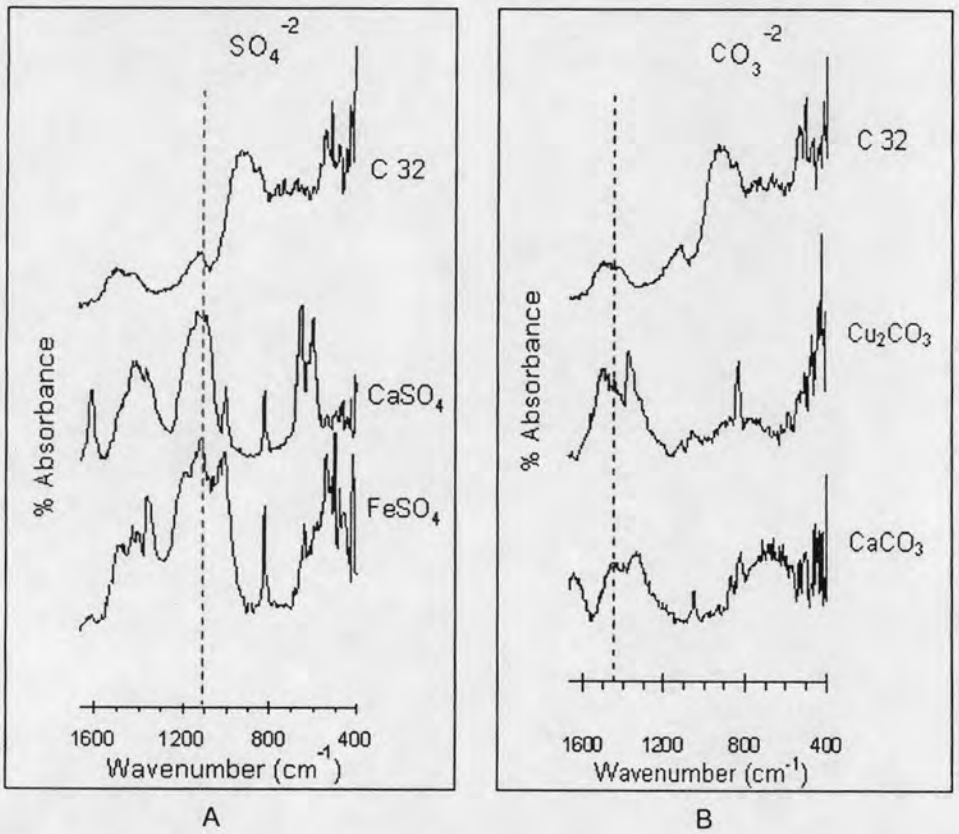
ที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าลักษณะรูปแบบที่เกิดขึ้นมีลักษณะโดยรวมใกล้เคียงกัน ในการศึกษาของ Spence (1993) และHughesและคณะ (1995) ที่แสดงเลขคลื่นของพันธะ C_3S C_2S C_3A และ C_4AF ดังตารางที่ 4.8 เป็นการสังเคราะห์สารบริสุทธิ์ขึ้นมาวิจัย และทำการศึกษาแยกแต่ละพันธะเพื่อหาช่วงเลขคลื่นที่แน่นอน แต่ในทางปฏิบัติพันธะทั้งสี่ชนิดจะซ้อนทับกันอยู่ (Overlap) จึงไม่สามารถระบุเลขคลื่นที่ชัดเจนได้ อีกทั้ง C_3S และ C_2S คือแคลเซียมเกิดพันธะกับซิลิเกต ดังนั้นเลขคลื่นที่พบจะเป็นช่วงเดียวกับเลขคลื่นของพันธะซิลิเกต

ถึงแม้จะไม่สามารถระบุเลขคลื่นที่แน่นอนของพันธะทั้งสี่ได้ แต่สามารถทราบช่วงคลื่นที่จะพบพันธะได้ โดย C_3S C_2S จะเกิดที่เลขคลื่นใกล้เคียงกันช่วง 930 -1000 C_3A ช่วงเลขคลื่น 850-890 และ C_4AF ที่ช่วงคลื่น 500-700 นอกจากนี้ในตัวอย่างปูนเม็ด C0 C18 และC32 ยังคงแสดงลักษณะรูปแบบโดยรวมคล้ายกับรูปแบบพันธะของ C_3S C_2S C_3A และ C_4AF ที่แสดงดังรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.8 พันธะของสารประกอบที่เลขคลื่นต่างๆ

พันธะของสารประกอบ	สาร	เลขคลื่น (Wavenumber ,cm^{-1})				อ้างอิง
$(SO_4)^{2-}$		1105	983	611	450	Nakamoto, 1986
		1120 ,1145				Spence, 1993
		1105 ,1117		604		Hughes และคณะ , 1995
		1100-1150				Mollah และคณะ, 2000
	$FeSO_4$	1122	991	645	447	ผลการวิเคราะห์
	$CaSO_4$	1095	1006	659	447	ผลการวิเคราะห์
$(CO_3)^{2-}$			1429-1492	879	706	Nakamoto, 1986
		1504	1429-1492	866	711	Spence, 1993
			1458	876,849	714	Hughes และคณะ, 1995
	$CaCO_3$	1500	1446	871	713	ผลการวิเคราะห์
	Cu_2CO_3	1504	1431	867	725	ผลการวิเคราะห์
$(SiO_4)^{4-}$	-	970	925			Spence, 1993
		956	813	527	340	Nakamoto, 1986
$(FeO_4)^{2-}$	-	832	790	340	322	Nakamoto, 1986
C_3S	-	952	525			Spence, 1993
		935	521			Hughes และคณะ, 1995
C_2S	-	991	879	847	509	Hughes และคณะ, 1995
C_3A	-	889	860	812	762,785	Hughes และคณะ, 1995
C_4AF	-	500-700				Hughes และคณะ, 1995

ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำสาร $CaSO_4$และ $FeSO_4$ มาวิเคราะห์เป็นมาตฐานพันธะซัลเฟต $(SO_4)^{2-}$ และนำสารมาตฐาน $CaCO_3$ และ Cu_2CO_3 มาวิเคราะห์เป็นมาตฐานพันธะคาร์บอเนต $(CO_3)^{2-}$ แสดงดังรูปที่ จ.1 และรูปที่ จ.2 (ภาคผนวก จ.) แล้วทำการเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลของ Nakamoto (1986), Spence (1993), Hughes และคณะ (1995) และ Mollah และคณะ (2000) แสดงในตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์พันธะในตัวอย่างปูนเม็ด C32 เทียบกับมาตราฐานพันธะซัลเฟต (A) และพันธะคาร์บอเนต (B)

จากรูปที่ 4.17 (A) เป็นการนำสาร $CaSO_4$และ $FeSO_4$มาวิเคราะห์เป็นมาตฐานพันธะซัลเฟต $(SO_4)^{2-}$ พบว่า $CaSO_4$มีพันธะซัลเฟต ที่เลขคลื่น 1095 1006 659 และ 447 ส่วน $FeSO_4$ มีพันธะซัลเฟต ที่เลขคลื่น 1122 991 645 และ 447 ผลจากการนำสารทั้งสองชนิดมาวิเคราะห์มีความใกล้เคียงกับเลขคลื่นจากข้อมูลที่อ้างอิง (แสดงในตารางที่ 4.8) และลักษณะโดยรวมของพันธะซัลเฟตจากสารทั้งสองมีความคล้ายคลึงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างปูนเม็ด C32 ซึ่งเป็นตัวแทนของปูนเม็ดที่มีการใช้ตะกรันในอัตราส่วนสูงสุด และมีปริมาณโลหะหนักสูงสุด พบว่าพันธะของซัลเฟตในตัวอย่างปูนเม็ด C32 ไม่ชัดเจนเหมือนกับการนำสาร $CaSO_4$และ $FeSO_4$มาวิเคราะห์ เนื่องจากการรบกวนของโลหะหนัก โดยในตัวอย่างปูนเม็ด C32 พบพันธะของซัลเฟต

ได้ในช่วงเลขคลื่น 1100-1150 สำหรับโลหะหนักที่เกิดพันธะซัลเฟต มีได้หลายชนิดดังผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีสกัดแยกที่มีการชะละลายของโลหะหนักหลายชนิดในขั้นที่ 4 (สำหรับการสกัดโลหะที่มีพันธะกับซัลไฟด์) และผลจากการตรวจวัดด้วย XRD พบสารประกอบโลหะหนัก อยู่ในรูป $CuFeS_2$

จากรูปที่ 4.17 (B) เป็นการนำสาร $CaCO_3$และ Cu_2CO_3มาวิเคราะห์เป็นมาตฐานพันธะคาร์บอเนต $(CO_3)^{2-}$ พบว่า $CaCO_3$ มีพันธะคาร์บอเนตที่เลขคลื่น 1500 1446 871 และ 713 ส่วน Cu_2CO_3มีพันธะคาร์บอเนต ที่เลขคลื่น 1504 1431 867 และ 725 ผลการวิเคราะห์ของสารทั้งสองชนิดมามีความใกล้เคียงกับเลขคลื่นจากข้อมูลหลายงานวิจัย แสดงในตารางที่ 4.8 เมื่อเปรียบเทียบในตัวอย่างปูนเม็ด C32 พบว่ามีพันธะของคาร์บอเนตช่วงกว้าง (Broad band) อยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่1400-1500 สำหรับโลหะหนักที่เกิดพันธะคาร์บอเนตจากการตรวจวัดด้วย XRD พบสารประกอบโลหะหนัก อยู่ในรูป Cu_2CO_3 $MnCO_3$ และ $ZnCO_3$

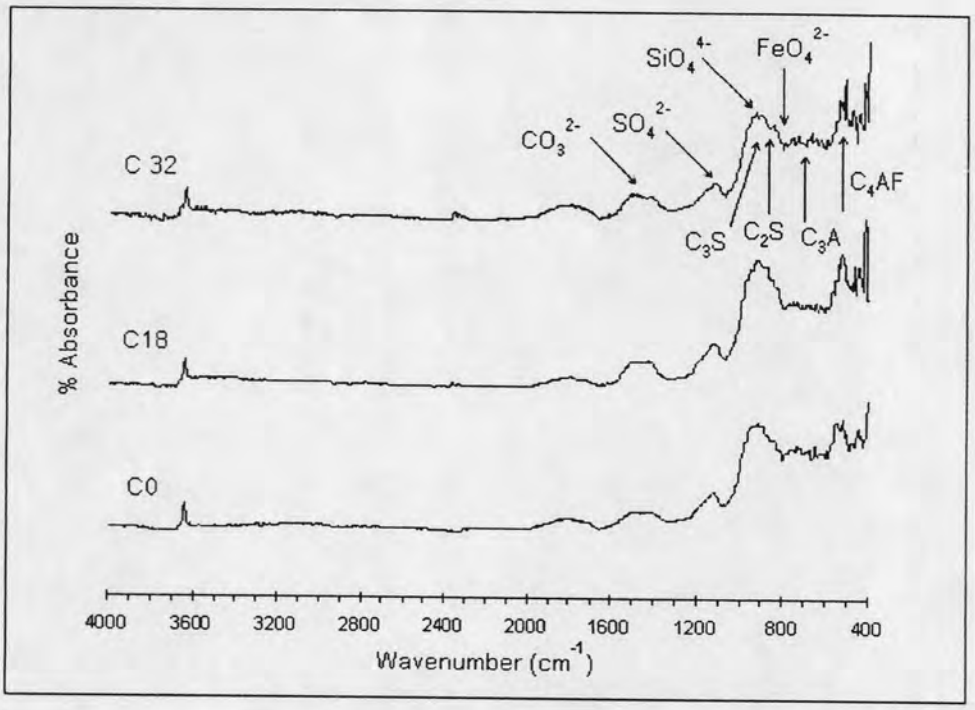
นอกจากนี้ในตัวอย่างปูนเม็ด C32 ยังพบพันธะของเหล็ก $(FeO_4)^{2-}$ และพันธะของซิลิเกต $(SiO_4)^{4-}$ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีมากในปูนเม็ด จากข้อมูลของ Nakamoto (1986) พันธะของเหล็กพบได้ที่เลขคลื่น 832 790 ส่วนพันธะของซิลิเกต $(SiO_4)^{4-}$ จากข้อมูลของ Nakamoto (1986) และ Spence (1993) พบได้ที่เลขคลื่น 970 956 925 และ 813 ข้อมูลทั้งหมดชี้ให้เห็นว่ามีความใกล้เคียงกันของเลขคลื่นที่มีโอกาสพบพันธะทั้งสอง อีกทั้งเลขคลื่นที่ทับซ้อนกับเลขคลื่นของ C_3S และ C_2S ที่กล่าวไปข้างต้น นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Xin และคณะ (2004) ได้กล่าวถึงผลกระทบจากการแทนที่ไอออนโลหะหนักในพันธะของสารประกอบ ทำให้ลักษณะเลขคลื่นเลื่อนไปได้

ดังนั้นในตัวอย่างปูนเม็ด C32 ไม่สามารถระบุเลขคลื่นที่ชัดเจน (Strong band) ของพันธะทั้งสองได้ เนื่องจากกราฟเกิดการซ้อนทับกัน แต่สามารถบอกช่วงคลื่นที่พบพันธะทั้งสองได้ โดยพันธะของเหล็ก จะพบที่เลขคลื่นช่วง 790 -830 และพันธะซิลิเกต พบที่เลขคลื่นช่วง 920-1000

สำหรับโลหะหนักที่สามารถเกิดพันธะกับเหล็ก และซิลิเกต พบสารประกอบโลหะหนัก อยู่ในรูป $ZnFe_2O_4$ และ Zn_2SiO_4 จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD ทั้งนี้ยังมีโลหะหนักอีกหลายชนิดที่สามารถเกิดพันธะกับเหล็ก และซิลิเกต ดังผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีสกัดแยก ที่พบการชะละลายของโลหะหนักหลายชนิดในขั้นที่ 3 (สำหรับการสกัดโลหะที่มีพันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์)

จากผลการศึกษาพันธะของสารประกอบโลหะหนัก ด้วยเครื่อง FT-IR สรุปได้ว่าโลหะหนักไม่มีผลต่อลักษณะรูปแบบที่เกิดขึ้น เนื่องจากลักษณะรูปแบบที่เกิดขึ้นในตัวอย่างปูนเม็ดที่อัตราส่วนต่างกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของโลหะ

หนักที่มีอยู่ในปูนเม็ดที่มีปริมาณน้อย ทั้งนี้การระบุเลขคลื่นของพันธะต่างๆ ทำได้ยาก เนื่องจากมีการซ้อนทับกันของเลขคลื่นจากหลายพันธะ



รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์พันธะต่างๆในตัวอย่างปูนเม็ด

4.5.3 **ผลการศึกษาชนิดสารประกอบโลหะหนัก โดยวิธีการสกัดแยก** (Sequential Extraction)

วิธีการสกัดแยก เป็นการสกัดแยกสารประกอบโลหะซึ่งละลายได้ในน้ำสกัดที่ต่างชนิดกัน เป็นการเพิ่มความชัดเจนของสารประกอบจากผลการศึกษาพันธะของสารประกอบโลหะหนักหรือ Functional Group ตรวจวัดด้วยเครื่อง FT-IR และการศึกษาชนิดสารประกอบโลหะหนักที่มีลักษณะเป็นผลึก ตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD เนื่องมาจากขีดความสามารถอันจำกัดของเครื่องในการแยกแยะความถี่ของกราฟที่อาจเกิดการซ้อนทับกัน หรือจากการถูกบดบังจากองค์ประกอบที่ชัดเจนกว่า และสามารถบอกได้ถึงในเชิงปริมาณ ในการศึกษานี้จะใช้วิธีสกัดตามแบบของ Tessier และคณะ (1979) โดยมี 5 ขั้นตอน

ขั้นที่ 1 สำหรับ สารประกอบโลหะที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่าย

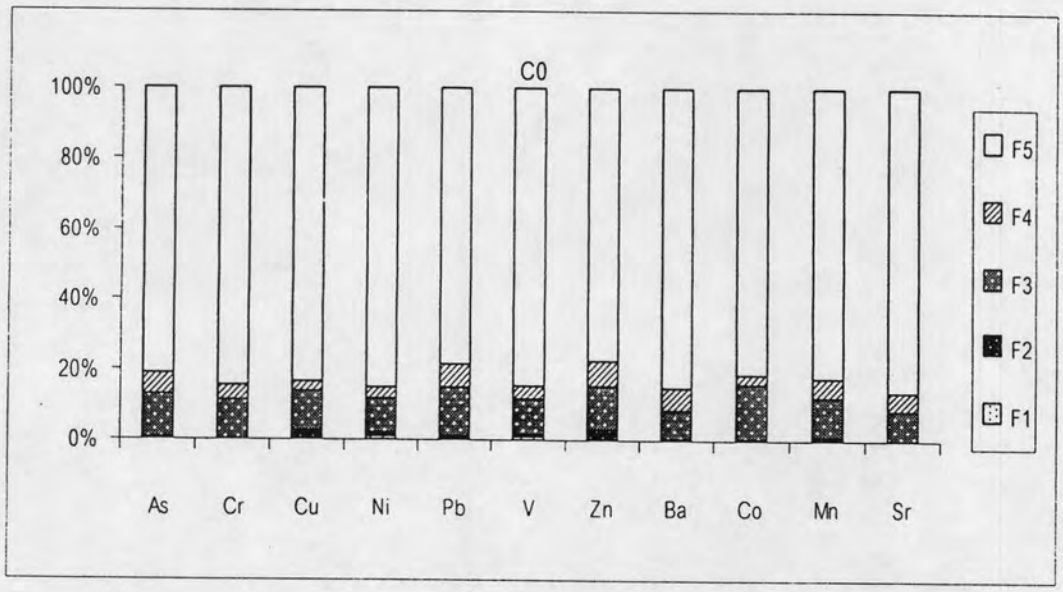
ขั้นที่ 2 สำหรับ สารประกอบโลหะที่มีพันธะกับคาร์บอเนต

ขั้นที่ 3 สำหรับ สารประกอบโลหะที่มีพันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์

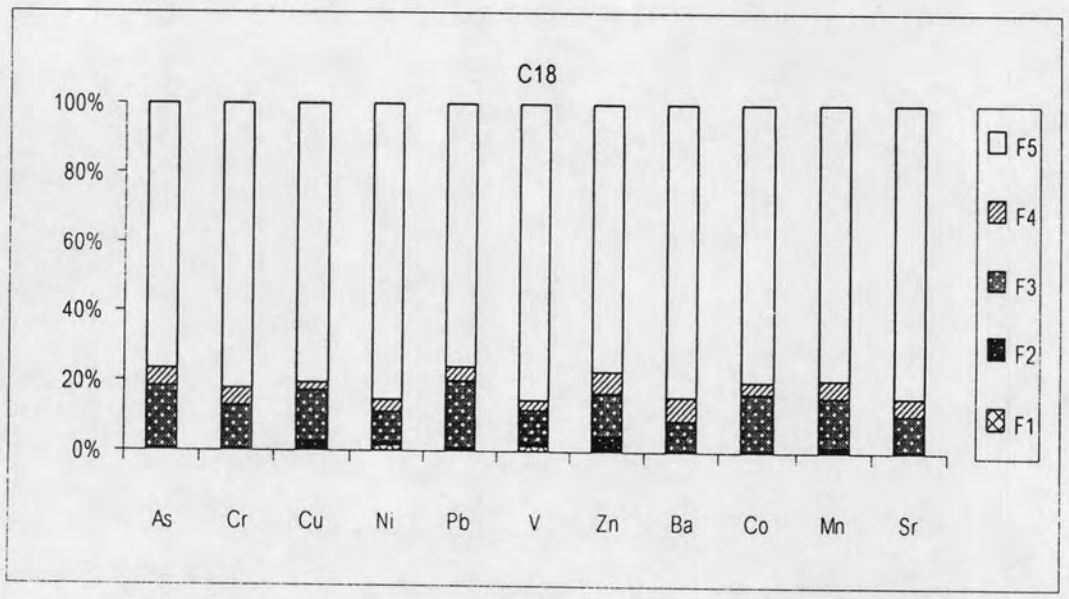
ขั้นที่ 4 สำหรับ สารประกอบโลหะที่มีพันธะกับสารอินทรีย์หรือซัลไฟด์

ขั้นที่ 5 สำหรับ สารประกอบโลหะที่เหลือ (Residual Fraction)

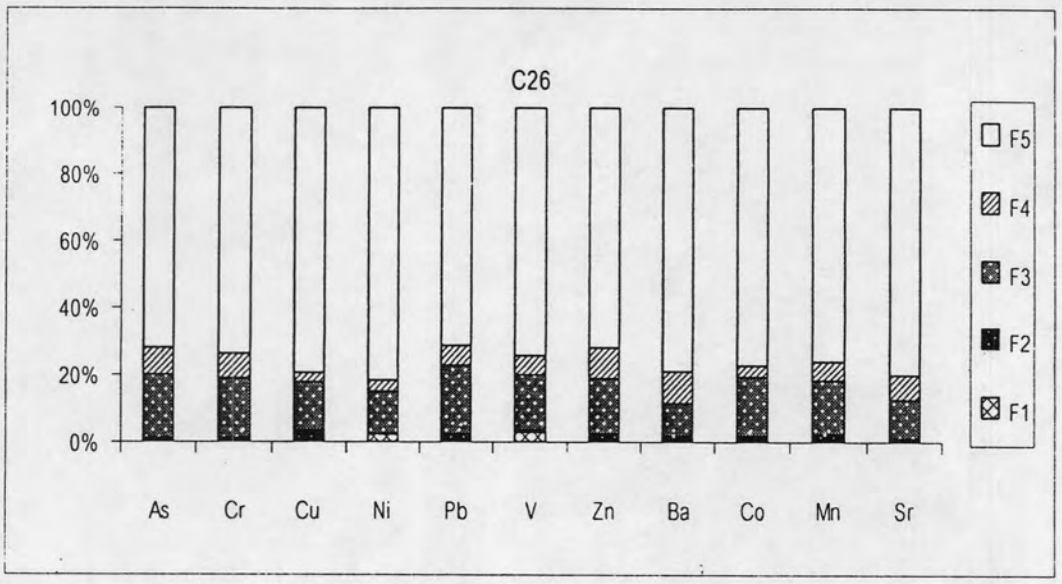
ผลจากการวิเคราะห์ชนิดและสารประกอบโลหะหนักด้วยวิธีสกัดแยกสารประกอบ สามารถสรุปได้ดัง รูปที่ 4.19 ถึง 4.27 ซึ่งข้อมูลเป็นร้อยละในแต่ละขั้นของการสกัดแยกสารประกอบโลหะแสดงดังภาคผนวก ฉ



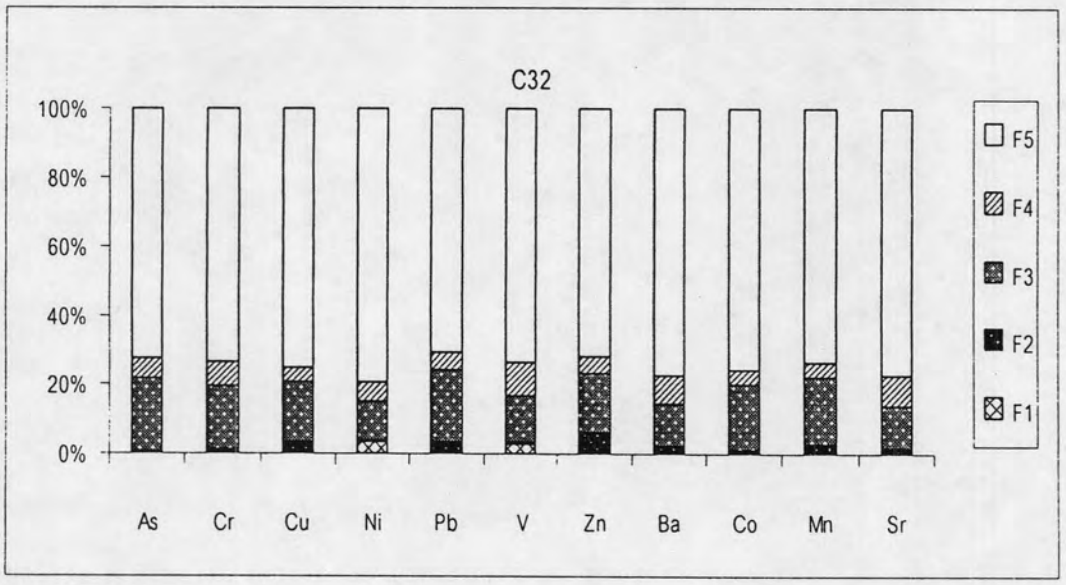
รูปที่ 4.19 ผลการชะละลายสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ขั้น ตัวอย่าง C0



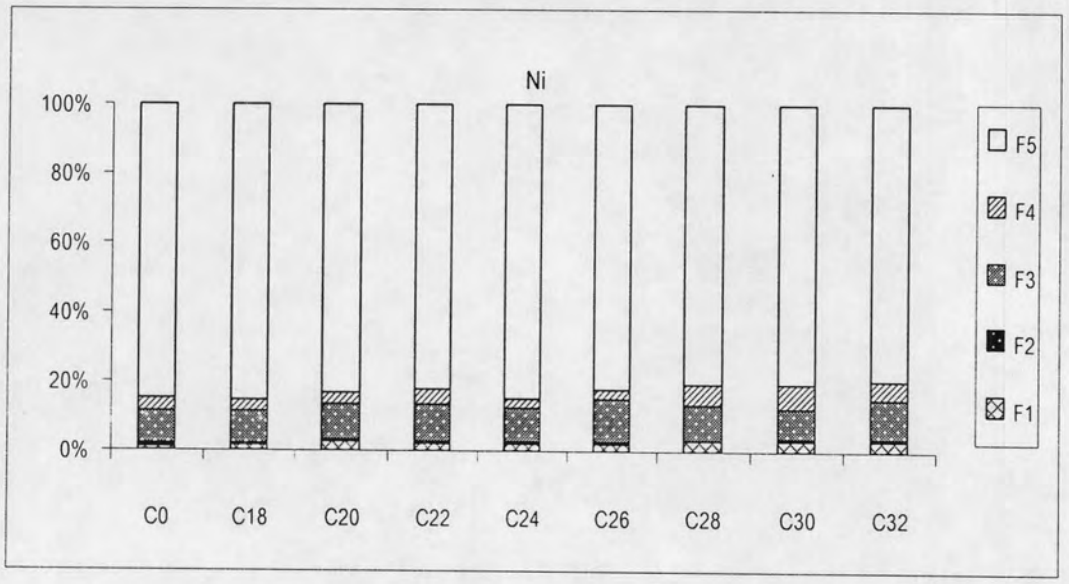
รูปที่ 4.20 ผลการชะละลายสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ขั้น ตัวอย่าง C18



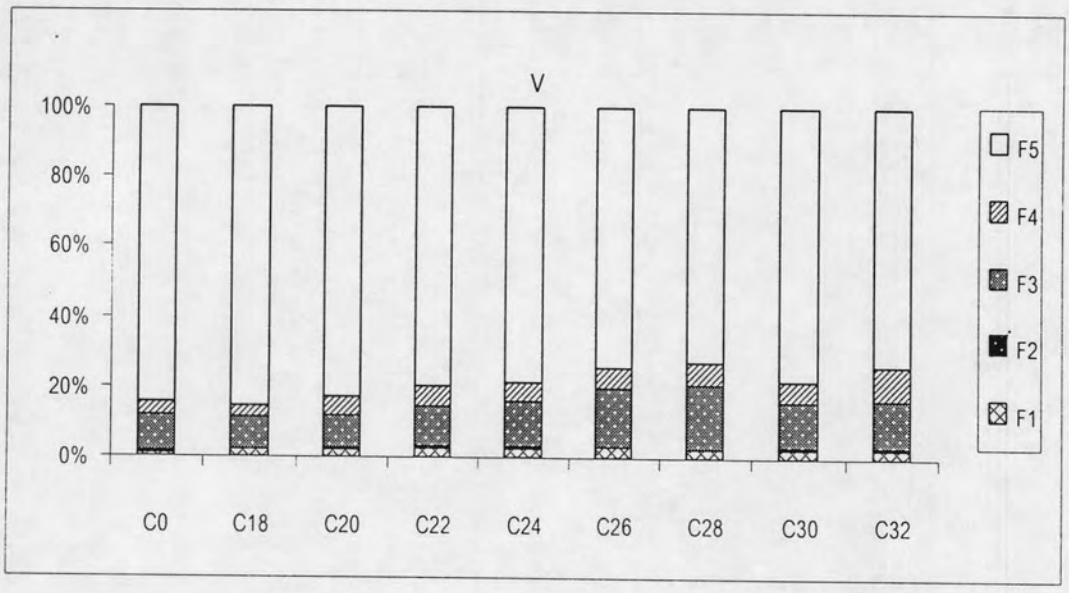
รูปที่ 4.21 ผลการชะละลายสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ขั้น ตัวอย่าง C26



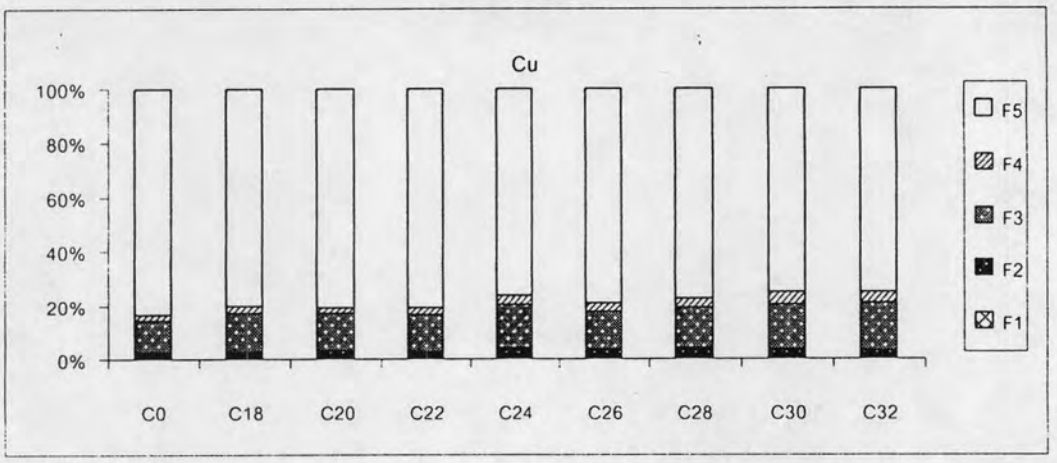
รูปที่ 4.22 ผลการชะละลายสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ขั้น ตัวอย่าง C32



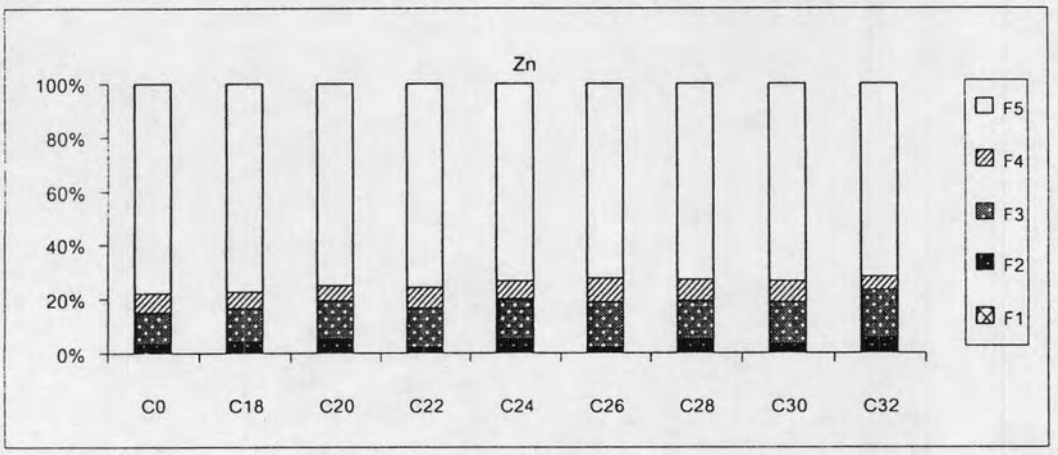
รูปที่ 4.23 ผลการชะละลายของนิกเกิล ทั้ง 5 ขั้น ในตัวอย่าง C0 ถึง C32



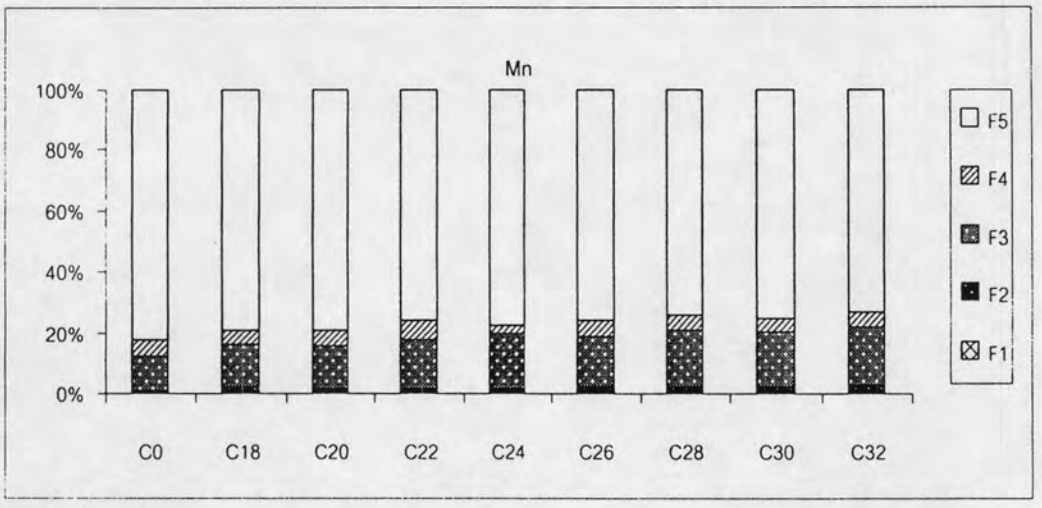
รูปที่ 4.24 ผลการชะละลายของวาเนเดียมทั้ง 5 ขั้น ในตัวอย่าง C0 ถึง C32



รูปที่ 4.25 ผลการชะละลายของทองแดง ทั้ง 5 ขั้น ในตัวอย่าง C0 ถึง C32



รูปที่ 4.26 ผลการชะละลายของสังกะสี ทั้ง 5 ขั้น ในตัวอย่าง C0 ถึง C32



รูปที่ 4.27 ผลการชะละลายของแมงกานีส ทั้ง 5 ขั้น ในตัวอย่าง C0 ถึง C32

ผลการวิเคราะห์พบว่าขั้นที่ 1 สำหรับ สารประกอบโลหะที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่าย มีพีเอชในการสกัดเท่ากับ 7 โลหะหนักส่วนใหญ่ไม่ถูกชะละลายออกมาในขั้นตอนนี้ (ไม่เกินร้อยละ 1) ยกเว้นนิกเกิล (Ni) และวาเนเดียม (V) จะถูกชะละลายออกมาในขั้นตอนนี้ในทุกอัตราส่วน (ไม่เกินร้อยละ 3) แสดงดังรูป 4.23-4.24 โดย Achternbosh และคณะ(2003) พบว่าที่ พีเอชน้อยกว่า 8 นิเกลมีการชะละลายอย่างรวดเร็ว และการชะละลายของวาเนเดียมจะเกิดขึ้นที่พีเอชน้อยกว่า 9 สารประกอบโลหะหนักทั้งสองชนิดนี้มีพันธะโลหะที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่าย จึงมีความเสถียรต่ำ และมีโอกาสชะละลายออกมาได้ง่ายมากกว่าโลหะหนักชนิดอื่น (Tessier, Champbell และ Bisson,1979) ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังและควรควบคุมความเข้มข้นในการนำวัตถุดิบที่มีโลหะหนักเหล่านี้ก่อนเข้าสู่ระบบการผลิตปูนซีเมนต์

ผลการวิเคราะห์ขั้นที่ 2 สำหรับ สารประกอบโลหะที่มีพันธะกับคาร์บอเนต ที่พีเอชในการสกัดเท่ากับ 5 พบว่า ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) ตะกั่ว(Pb) และแบเรียม (Ba) มีการชะละลายออกมาในขั้นตอนนี้มากกว่าโลหะหนักชนิดอื่น (ไม่เกินร้อยละ 5) แสดงดังรูป 4.25-4.27 แสดงว่าโลหะหนักเหล่านี้อยู่ในรูปพันธะกับคาร์บอเนต สอดคล้องกับผลการศึกษาชนิดสารประกอบโลหะหนักที่มีลักษณะเป็นผลึก ตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD ที่พบโลหะหนักในรูป Cu_2CO_3 $ZnCO_3$ และ $MnCO_3$ แต่ไม่พบตะกั่ว และแบเรียม ทั้งนี้โลหะหนักส่วนใหญ่ไม่ถูกชะละลายออกมาในขั้นตอนนี้ ไม่เกินร้อยละ1 จากการศึกษาของ Li และคณะ ในปี 2001 ที่มีการศึกษาการสกัดแยกโลหะหนักจากการทำเสถียรโดยทำเป็นก้อนแข็ง พบว่าในขั้นที่ 2 มีความเปลี่ยนแปลงของพีเอชไปมาก โดยพีเอชจะมีการเพิ่มขึ้นจาก 5 ไปถึง 9 ซึ่งเป็นพีเอชในช่วงเดียวกันกับพีเอชในระบบซีเมนต์ ทำให้ความเข้มข้นในการชะละลายของโลหะหนักออกมาในขั้นนี้มีค่าต่ำนั้นเอง

ผลการวิเคราะห์ขั้นที่ 3 สำหรับ สารประกอบโลหะที่มีพันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ที่พีเอชในการสกัดเท่ากับ 2 พบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่มีพันธะกับเหล็กหรือแมงกานีสออกไซด์ เนื่องมีการชะละลายของโลหะทุกชนิดออกมามากกว่าในขั้นอื่น ประมาณร้อยละ10-20 เนื่องจากในระบบซีเมนต์มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้โลหะหนักมีโอกาสไปจับพันธะกับเหล็กได้มาก ดังนั้นการชะละลายในขั้นตอนนี้จึงพบชนิดและปริมาณโลหะหนักสูง เช่นเดียวกับในงานวิจัยที่ผ่านมาของ Tessier Champbell และ Bisson (1979) และงานวิจัยของ Li และคณะ (2001) พบว่าวิธีการสกัดแยกในขั้นที่ 3 มีการชะละลายของโลหะหนักส่วนใหญ่ออกมามากที่สุด ทั้งนี้การตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD พบสารประกอบโลหะหนักของทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) ที่อยู่ในรูป $CuFeS_2$ และ $ZnFe_2O_4$ เพียงสองชนิด เนื่องจากทองแดง สังกะสี มีปริมาณความเข้มข้นสูงมากเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดอื่น

ผลการวิเคราะห์ขั้นที่ 4 สำหรับ สารประกอบโลหะที่มีพันธะกับสารอินทรีย์หรือซัลไฟด์ ที่พีเอชในการสกัดเท่ากับ 2 พบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่ถูกชะละลายออกมาในขั้นตอนนี้ (ไม่เกินร้อยละ10) ดังนั้นเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมปกติความสามารถของการชะละลายโลหะหนักจะมีปริมาณน้อย สอดคล้องกับผลการศึกษาชนิดสารประกอบโลหะหนักที่มีลักษณะเป็นผลึก ตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD ที่พบโลหะหนักทองแดงที่เกิดพันธะกับซัลไฟด์ ส่วนสารประกอบโลหะหนักที่มีพันธะกับสารอินทรีย์จะมีโอกาสเกิดได้น้อยมาก เนื่องจากในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ต้องใช้ความร้อนสูงมาก คาดว่าจะทำลายองค์ประกอบของสารอินทรีย์โดยสมบูรณ์

ผลการวิเคราะห์ขั้นที่ขั้นที่ 5 สำหรับสารประกอบโลหะที่เหลือ (Residual Fraction) พบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 70 จะเหลืออยู่ในขั้นตอนนี้ แสดงว่าโลหะหนักมีความเสถียรสูง และยากต่อการชะละลายในสภาวะแวดล้อมปกติ ดังการศึกษาของ Tessier Champbell และ Bisson (1979) และงานของ Wan และคณะ (2006) ที่สรุปไว้ว่าโลหะหนักที่เหลืออยู่ในขั้นนี้ จะไปรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในโครงสร้างของระบบซีเมนต์

ผลการศึกษาชนิดสารประกอบโลหะหนักโดยวิธีการสกัดแยกสารประกอบโลหะหนักทั้งหมดจากการแปรผันอัตราส่วนตะกรันทองแดงที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่าง C0 ถึง C32 มีความแตกต่างไม่มากนัก โดยมีแนวโน้มการชะละลายออกมาเพิ่มขึ้น เมื่อมีอัตราส่วนตะกรันที่เพิ่มขึ้น และสรุปได้ว่าโลหะหนักส่วนใหญ่มีพันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ จึงมีการชะละลายออกมาในขั้นที่ 3 มากกว่าขั้นอื่น ส่วนนิกเกิล และวาเนเดียมสามารถพบได้ในรูปของสารประกอบที่มีความเสถียรต่ำ ซึ่งแม้จะมีในปริมาณไม่มากเท่ากับสารประกอบที่มีความเสถียรที่สูงกว่า แต่เป็นจุดที่ควรให้ความระมัดระวังและควรมีการควบคุมความเข้มข้นของโลหะเหล่านี้ไม่ให้มีค่าสูงเกินไปในวัตถุดิบที่นำมาใช้ในระบบการผลิต นอกจากนี้โลหะหนักบางส่วนจะอยู่ในรูปสารอินทรีย์หรือซัลไฟด์ ทั้งนี้ในสภาวะแวดล้อมปกติการชะละลายของสารประกอบโลหะหนักทั้งหมดจะเกิดได้ยาก แสดงถึงความเสถียรที่สูงมากของโลหะหนักในปูนเม็ด