ลักษณะเฉพาะเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของโลหะหนักในปูนเม็ดที่เกิดจากกระบวนการเผาร่วมกับตะกรันทองแดง

นางสาวปวันรัตน์ สัมมะสุต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-2537-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

QUANTITATIVE AND QUALITATIVE CHARACTERISTICS OF HEAVY METALS IN CEMENT CLINKER FROM CO- INCINERATION PROCESS USING COPPER SLAG

Miss Pawanrat Sammasut

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

ISBN 974-14-2537-6

Copyright of Chulalongkorn University

492193

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ลักษณะเฉพาะเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของโลหะหนักในปูนเม็ดที่เกิดจากกระบวนการเผาร่วมกับตะกรันทองแดง
โดย	นางสาวปวันรัตน์ สัมมะสุต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี)

ปวันรัตน์ สัมมะสุต : ลักษณะเฉพาะเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของโลหะหนักในปูนเม็ดที่เกิดจากกระบวนการเผาร่วมกับตะกรันทองแดง (QUANTITATIVE AND QUALITATIVE CHARACTERISTICS OF HEAVY METALS IN CEMENT CLINKER FROM CO-INCINERATION PROCESS USING COPPER SLAG) อ. ที่ปรึกษา: อ. ดร. มนัสกร ราชากรกิจ, 135 หน้า. ISBN 974-14-2537-6.

การวิจัยครั้งนี้ ศึกษาลักษณะเฉพาะเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของโลหะหนักในปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการเผาร่วมกับตะกรันทองแดง ศึกษาก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยใช้ตะกรันทองแดงเป็นวัตถุดิบทดแทนในปริมาณร้อยละ 0-3.2 โดยน้ำหนักของวัตถุดิบทั้งหมด ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานำมาจากบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) โดยมีการเก็บตัวอย่างเป็นแบบแบตช์จากกระบวนการผลิตจริง เครื่องมือที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ลักษณะเชิงคุณภาพในปูนเม็ด ได้แก่ XRD (X-Ray Diffraction Spectrometer) XRF (X-ray Fluorescence Spectrometer) FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectrometer) และ SEM/EDS (Scanning Electron Microscope / Energy Dispersive X-ray Spectrometer) ส่วนวิธีที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ลักษณะเชิงปริมาณ ได้แก่ วิธีการสกัดแยกองค์ประกอบทางเคมี (Sequential Extraction)

ผลการศึกษาลักษณะเชิงปริมาณของโลหะหนักในปูนเม็ด พบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบของเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ ดังผลการศึกษาด้วยวิธีสกัดแยก พบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่จะถูกสกัดออกมาในขั้นที่ 3 มากกว่าขั้นอื่น (ประมาณร้อยละ 20 ของสารประกอบทั้งหมด) ทั้งนี้สารประกอบโลหะหนักส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่มีความเสถียรสูง (ร้อยละ 70 ของสารประกอบทั้งหมด) จึงมีโอกาสชะละลายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้น้อย ส่วนนิกเกิล และวาเนเดียมสามารถพบในรูปที่มีความเสถียรต่ำ อาจมีการชะละลายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย จึงเป็นโลหะที่ต้องระมัดระวังในการควบคุมไม่ให้มีปริมาณของโลหะเหล่านี้สูงเกินไปในระบบ

แม้ว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักที่สูงขึ้นในปูนเม็ดมีความสัมพันธ์กับการแปรผันอัตราส่วนตะกรันทองแดงเผาร่วมที่มากขึ้น แต่ผลการศึกษาลักษณะเชิงคุณภาพของปูนเม็ดจาก XRD และ FT-IR พบว่าคุณภาพของปูนเม็ดไม่แตกต่างกันจากการแปรผันอัตราส่วน ผลการศึกษาทั้งหมดสรุปได้ว่าตะกรันทองแดงสามารถใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนเผาร่วมในการผลิตปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ โดยตะกรันทองแดงปริมาณร้อยละ 2.4 โดยน้ำหนักของวัตถุดิบทั้งหมด จะไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพปูนเม็ด

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2549 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

4670700821: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEYWORD: CO-INCINERATION PROCESS / CO-PROCESSING /CEMENT CLINKER / COPPER SLAG / HEAVY METALS / BEFORE HYDRATION

PAWANRAT SAMMASUT: QUANTITATIVE AND QUALITATIVE CHARACTERISTICS OF HEAVY METALS IN CEMENT CLINKER FROM CO-INCINERATION PROCESS USING COPPER SLAG. THESIS ADVISOR: MANASKORN RACHAKORNKIJ, Ph.D., 135 pp. ISBN 974-14-2537-6.

This research investigated qualities and forms of heavy metals in cement clinker obtained from co-incineration process, using copper slag as a raw material, before the cement clinker is subject to hydration. The influence of co-incinerating copper slag containing various concentrations of heavy metals on properties of the clinkers is evaluated. Samples were prepared by adding 0 - 3.2% (by weight) copper slag to the raw meal. Samples with different concentration of copper slag were quantitatively and qualitatively characterized by X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD), X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF), Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) and Scanning Electron Microscope (SEM) combined with Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS). Furthermore, Sequential extraction was applied to quantitatively examine partitioning of metals into each fraction.

The sequential extraction results showed that approximately 20% of the heavy metals were mainly distributed in Fraction 3 (bound to iron and manganese oxide). Majority of the heavy metals (70%) were mostly distributed in Fraction 5 (residual fraction) indicating that these stable or less leachable metals had entered such phase during cement production process. In contrast, Ni and V were found in readily leachable forms, suggesting that these two metals are able to leach more easily to the environment than other metals. Consequently, the amounts of these metals in raw materials need to be controlled to protect the human health and the environment.

Although the concentrations of heavy metals in the clinker increased with the increasing percentage of copper slag, intensities of the major crystalline phases in the XRD pattern and FT-IR results at different percentage showed no significant difference. Finally, the results led to a conclusion that copper slag can be used as an alternative raw material. Copper slag addition of up to 2.4 wt % has no significant influences on the properties of the clinker.

Department Environmental Engineering
Field of Study Environmental Engineering
Academic Year 2006

Student's Signature Pawanrat.
Advisor's Signature
Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา คำอธิบาย และช่วยแก้ปัญหาให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้ คำชี้แนะ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) จังหวัดสระบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและตัวอย่างของวัตถุดิบในการวิจัย รวมทั้งการอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานกับทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ศูนย์เครือข่ายคณะวิศวกรรมศาสตร์ โครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย (CUFE, NRC-EHWM) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือที่ห้องวิจัย

ขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคน (จูน ปัด แป้ง บิว ตี๋ นก แอน แนน และเพื่อนร่วมรุ่นทุกคน) ที่ให้ความช่วยเหลือต่างๆ และที่ขาดไม่ได้คือครอบครัวที่คอยสนับสนุนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูป ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 ปูนซีเมนต์ 4

2.2 กากของเสียอุตสาหกรรม 8

2.3 ทบทวนงานวิจัยการนำกากของเสียอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ 11

2.4 ตะกรัน (Slag) 29

2.5 ตะกรันทองแดง (Copper slag) 30

บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย 39

3.1 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย 39

3.2 ตัวอย่างตะกรันทองแดงและปูนเม็ดที่ใช้ในการวิจัย 39

3.3 อุปกรณ์และสารเคมี 40

3.4 การดำเนินการวิจัย 41

บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล 50

4.1 ผลการการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตะกรันทองแดง 50

4.2 ผลการศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในปูนเม็ด 56

4.3 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของปูนเม็ด 58

4.4 ผลการศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในปูนเม็ด โดยศึกษาลักษณะทางกายภาพ .. 60

4.5 ผลการศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในปูนเม็ดโดยศึกษาลักษณะทางเคมี..... 66
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 83
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 83
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 84
รายการอ้างอิง..... 86
ภาคผนวก..... 91
ภาคผนวก ก. วิธีการทดลอง..... 92
ภาคผนวก ข. ผลการการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของ
ตะกรันทองแดง..... 98
ภาคผนวก ค. ผลการวิเคราะห์ของปูนเม็ด..... 102
ภาคผนวก ง. ผลการศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในปูนเม็ด โดย XRD..... 114
ภาคผนวก จ. ผลการศึกษาพันธะของสารประกอบ (Functional Group)
ด้วยเครื่อง FT-IR..... 124
ภาคผนวก ฉ. ผลการศึกษาชนิดสารประกอบโลหะหนัก โดยวิธีการสกัดแยก
(Sequential Extraction)..... 131
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 135

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ปริมาณออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 7

2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 7

2.3 คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 8

2.4 ตัวอย่างกากของเสียอุตสาหกรรมที่ใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ 13

2.5 ปริมาณวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบการผลิตปูนเม็ดในประเทศเยอรมนีปี 1999 14

2.6 ปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่ระบบการผลิตปูนเม็ดในประเทศเยอรมนีปี 1999 14

2.7 องค์ประกอบภายในของของเสียอันตรายและกากอุตสาหกรรมบางชนิดที่ใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 17

2.8 แหล่งที่มาของโลหะหนักบางชนิดจากวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน 19

2.9 ชนิดของกากของเสียจากอุตสาหกรรมที่ใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์และโลหะที่เกี่ยวข้อง 21

2.10 ความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนซีเมนต์จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ 22

2.11 ความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนซีเมนต์จากเตาเผาจริง 24

2.12 ความเข้มข้นของโลหะหนักในฝุ่นปูนจากเตาเผาจริง สำรวจเมื่อปี1982 และปี 1991 25

2.13 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของงานวิจัยทั้งสามกลุ่มที่ต่างกัน 26

2.14 ลักษณะผลกระทบของโลหะหนักต่อปูนซีเมนต์ 28

2.15 ผลกระทบของโลหะหนักต่อปูนซีเมนต์ 28

2.16 ปริมาณตะกรันทองแดงที่เกิดขึ้นในแต่ละภูมิภาคของโลก 31

2.17 ลักษณะทางกายภาพและลักษณะเชิงกลบางประการ 33

2.18 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันทองแดงจากหลายแหล่งที่มา 34

2.19 องค์ประกอบของตะกรันที่เกิดจากการเตาถลุง 35

2.20 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันทองแดงและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 36

3.1 สรุปการศึกษาทั้งหมดในตะกรันทองแดง 45

3.2 สรุปการศึกษาทั้งหมดในปูนเม็ด 49

4.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันทองแดงด้วยเครื่อง XRF 52

4.2 ความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะชนิดต่างๆ ในตะกรันทองแดง 54

4.3 ผลการศึกษาการชะละลายของตะกรันทองแดงด้วยวิธี WET 55

4.4 ผลการศึกษาการชะละลายของตะกรันทองแดงด้วยวิธี TCLP 56
4.5 ผลการศึกษาชนิดและปริมาณโลหะหนักในปูนเม็ด เทียบกับเกณฑ์การผลิตปูนเม็ด.....57
4.6 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRF 60
4.7 สรุปผลการวิเคราะห์สารประกอบโลหะหนักในปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRD..... 69
4.8 พันธะของสารประกอบที่เลขคลื่นต่างๆ 73
ข.1 ผลการกระจายขนาดอนุภาคของตะกรันทองแดงด้วยวิธีผ่านชุดตะแกรงร่อน (Sieve Analysis)..... 99
ข.2 ผลการศึกษาชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในตะกรันทองแดง 100
ข.3 ผลการชะละลายของโลหะหนักในตะกรันทองแดงตามมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 101
ข.4 ผลการชะละลายของโลหะหนักในตะกรันทองแดงตามมาตรฐาน TCLP ของ US EPA SW-846 Method 1311.....101
ค.1 ค่าความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ของปูนเม็ด.....103
ค.2 สรุปค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ของปูนเม็ด.... 109
ค.3 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C204-92.....111
ค.4 ค่าความถ่วงจำเพาะและค่าสูญเสียน้ำหนัก (LOI) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์.....112
ค.5 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRF.....113
ฉ.1 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ของปูนเม็ด โดยวิธีสกัดแยก.....132

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 รายละเอียดจุดที่มีการเติมวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทั้งประเภทหลักและทดแทนเข้าสู่กระบวนการผลิตของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) 16

2.2 ศึกษารูปแบบสารประกอบที่มีลักษณะเป็นผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction..... 35

3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟตามวิธีมาตรฐาน US EPA SW-846 Method3052 42

3.2 แผนผังขั้นตอนการทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ.2548 43

3.3 แผนผังการทดสอบการชะละลายมาตรฐาน US EPA SW-846 Method1311 44

3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการสกัดด้วยวิธีสกัดแยกสารประกอบ 48

4.1 ลักษณะตะกรันทองแดง 50

4.2 กราฟการกระจายขนาดคละของตะกรันทองแดง 51

4.3 รูปแบบของสารประกอบหลักของตะกรันทองแดง ตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD..... 53

4.4 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ..... 58

4.5 ลักษณะโครงสร้างภายในปูนเม็ด 61

4.6 ลักษณะโครงสร้างภายในปูนเม็ดที่กำลังขยาย 500 เท่า ตรวจวัดด้วยเครื่อง SEM..... 61

4.7 ลักษณะโครงสร้างภายในปูนเม็ดที่กำลังขยาย 2500 เท่า ตรวจวัดด้วยเครื่อง SEM..... 62

4.8 ลักษณะโครงสร้างที่ผิวภายในปูนเม็ดที่มีแคลเซียมออกไซด์ ตรวจวัดด้วยเครื่อง SEM... 63

4.9 ผลการศึกษา EDS ของโครงสร้างที่ผิวภายในปูนเม็ด ที่มีแคลเซียมออกไซด์..... 63

4.10 ลักษณะโครงสร้าง C_2S ในปูนเม็ดที่กำลังขยาย 5000 เท่า ตรวจวัดด้วยเครื่อง SEM 64

4.11 ผลการศึกษา EDS ของลักษณะโครงสร้าง C_2S ในปูนเม็ด 64

4.12 ลักษณะโครงสร้าง C_3S ในปูนเม็ด ที่กำลังขยาย 2500 เท่า ตรวจวัดด้วยเครื่อง SEM 65

4.13 ผลการศึกษา EDS ของลักษณะโครงสร้าง C_3S ในปูนเม็ด 65

4.14 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงสารประกอบหลักในปูนเม็ด ที่อัตราส่วนต่างๆ 68

4.15 ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของตัวอย่างปูนเม็ด C0 C18 และ C32..... 72

4.16 ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของ C_3S C_2S C_3A และ C_4AF 72

4.17 ผลการวิเคราะห์พันธะในตัวอย่างปูนเม็ด C32 เทียบกับมาตราฐานพันธะซัลเฟตและพันธะคาร์บอเนต 74

4.18 ผลการวิเคราะห์พันธะต่างๆในตัวอย่างปูนเม็ด 76

4.19 ผลการชะละลายสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ขั้น ตัวอย่าง C0 77
4.20 ผลการชะละลายสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ขั้น ตัวอย่าง C18 77
4.21 ผลการชะละลายสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ขั้น ตัวอย่าง C26 78
4.22 ผลการชะละลายสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ขั้น ตัวอย่าง C32 78
4.23 ผลการชะละลายของนิกเกิล ทั้ง 5 ขั้น ในตัวอย่าง C0 ถึง C32 79
4.24 ผลการชะละลายของวาเนเดียม ทั้ง 5 ขั้น ในตัวอย่าง C0 ถึง C32 79
4.25 ผลการชะละลายของทองแดง ทั้ง 5 ขั้น ในตัวอย่าง C0 ถึง C32 80
4.26 ผลการชะละลายของสังกะสี ทั้ง 5 ขั้น ในตัวอย่าง C0 ถึง C32 80
4.27 ผลการชะละลายของแมงกานีส ทั้ง 5 ขั้น ในตัวอย่าง C0 ถึง C32 80
ข.1 รูปแบบของสารประกอบหลักของตะกรันทองแดงวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD..... 99
ง.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงสารประกอบหลักในปูนเม็ด ตัวอย่าง C0..... 115
ง.2 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงสารประกอบหลักในปูนเม็ด ตัวอย่าง C18..... 116
ง.3 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในปูนเม็ด ตัวอย่าง C18 116
ง.4 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงสารประกอบหลักในปูนเม็ด ตัวอย่าง C20..... 117
ง.5 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในปูนเม็ด ตัวอย่าง C20 117
ง.6 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงสารประกอบหลักในปูนเม็ด ตัวอย่าง C22..... 118
ง.7 ผลการวิเคราะห์กด้วย XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในปูนเม็ด ตัวอย่าง C22..... 118
ง.8 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงสารประกอบหลักในปูนเม็ด ตัวอย่าง C24..... 119
ง.9 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในปูนเม็ด ตัวอย่าง C24 119
ง.10 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงสารประกอบหลักในปูนเม็ด ตัวอย่าง C26..... 120
ง.11 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในปูนเม็ด ตัวอย่าง C26 120
ง.12 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงสารประกอบหลักในปูนเม็ด ตัวอย่าง C28..... 121
ง.13 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในปูนเม็ด ตัวอย่าง C28 121
ง.14 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงสารประกอบหลักในปูนเม็ด ตัวอย่าง C30..... 122
ง.15 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในปูนเม็ด ตัวอย่าง C30 122
ง.16 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงสารประกอบหลักในปูนเม็ด ตัวอย่าง C32..... 123
ง.17 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในปูนเม็ด ตัวอย่าง C32 123
จ.1 ผลการนำ $CaSO_4$ และ $FeSO_4$ มาวิเคราะห์พันธะซัลเฟต (SO_4^{2-}) 125
จ.2 ผลการนำ $CuCO_3$ และ $CaCO_3$ มาวิเคราะห์พันธะคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) 125
จ.3 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบ ในตัวอย่างปูนเม็ด C0 126
จ.4 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบ ในตัวอย่างปูนเม็ด C18 126

จ.5 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบ ในตัวอย่างปูนเม็ด C20 127
จ.6 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบ ในตัวอย่างปูนเม็ด C22 127
จ.7 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบ ในตัวอย่างปูนเม็ด C24 128
จ.8 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบ ในตัวอย่างปูนเม็ด C26 128
จ.9 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบ ในตัวอย่างปูนเม็ด C28 129
จ.10 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบ ในตัวอย่างปูนเม็ด C30 129
จ.11 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบ ในตัวอย่างปูนเม็ด C32 130