ลักษณะเชิงปริมาณและคุณภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่เกิดจากกระบวนการเผาร่วมกับกากอุตสาหกรรม

นางสาวรุจยา บุญญานุวัตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2718-2

ลิขสิทธิ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 22A73191

QUANTITATIVE AND QUALITATIVE CHARACTERISTICS OF HEAVY METALS IN CEMENT FROM CO-INCINERATION PROCESS USING INDUSTRIAL WASTES

Miss Rujaya Boonyanuwat

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 2005

ISBN 974-53-2718-2

481893

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ลักษณะเชิงปริมาณและคุณภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่เกิดจากกระบวนการเผาร่วมกับกากอุตสาหกรรม
โดย	นางสาวรุจยา บุญญานุวัตร
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน)

รุจยา บุญญานุวัตร : ลักษณะเชิงปริมาณและคุณภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่เกิดจากกระบวนการเผาร่วมกับกากอุตสาหกรรม. (QUANTITATIVE AND QUALITATIVE CHARACTERISTICS OF HEAVY METALS IN CEMENT FROM CO-INCINERATION PROCESS USING INDUSTRIAL WASTES) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร.มนัสกร ราชากรกิจ, 169 หน้า. ISBN 974-53-2718-2.

การวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาลักษณะเชิงปริมาณและคุณภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่เกิดจากกระบวนการเผาร่วมกับกากอุตสาหกรรม โดยเป็นการศึกษาในช่วงก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานำมาจากโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการใช้กากอุตสาหกรรมร่วมในกระบวนการผลิต โดยมีการเก็บตัวอย่างเป็นแบบแบตช์ครอบคลุมกระบวนการผลิตทั้งหมดตั้งแต่วัตถุดิบที่เข้าสู่ระบบตลอดจนผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ที่ออกจากระบบซึ่งได้แก่ ปูนเม็ดและฝุ่นปูน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของชนิด ปริมาณ และที่มาของโลหะหนัก รวมทั้งสมดุลมวลที่เข้าและออกจากระบบการผลิตซีเมนต์ เครื่องมือที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ลักษณะเชิงคุณภาพในปูนเม็ดและฝุ่นปูน ได้แก่ XRD (X-Ray Diffraction Spectrometer) FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscope) และ SEM (Scanning Electron Microscope) ส่วนวิธีที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ลักษณะเชิงปริมาณ ได้แก่ วิธีการสกัดแยกองค์ประกอบทางเคมี (Sequential Extraction)

ผลการวิจัยพบว่า การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะที่สูงขึ้นในวัตถุดิบที่เข้าสู่ระบบการผลิตซีเมนต์มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณโลหะหนักที่สูงขึ้นในสารประกอบของปูนเม็ดและฝุ่นปูน โดยวัตถุดิบหลักและวัตถุดิบทดแทนเป็นที่มาของโลหะหนักที่สำคัญ เนื่องจากมีส่วนผสมของกากอุตสาหกรรม เช่น เถ้าลอย เถ้าหนัก และคะตะลิสต์เป็นส่วนประกอบ

สำหรับผลการวิเคราะห์ลักษณะองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีการสกัดแยกองค์ประกอบ พบว่าโลหะหนักที่มีอยู่ในปูนเม็ด มีการกระจายตัวอยู่ในรูปสารประกอบโลหะหนักหลายชนิด เช่น โลหะออกไซด์ โลหะคาร์บอเนต โลหะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ โลหะซัลไฟด์ และอื่นๆ แต่พบว่าสารประกอบโลหะหนักส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ค่อนข้างมีความเสถียร (มากกว่าร้อยละ 60 ของสารประกอบทั้งหมด) จึงมีโอกาสชะละลายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้น้อย ส่วนแบเรียม โครเมียม ซีลีเนียม และสตรอนเชียม พบในรูปที่มีความเสถียรต่ำ อาจมีการชะละลายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย จึงเป็นโลหะที่ต้องระมัดระวังในการควบคุมไม่ให้มีปริมาณของโลหะเหล่านี้สูงเกินไปในระบบ และจากการตรวจสอบสารประกอบโลหะในปูนเม็ดและฝุ่นปูนด้วยเครื่อง XRD และ FTIR พบว่ามีสารประกอบในรูปของโลหะกับแมงกานีสออกไซด์มากที่สุด และโลหะที่พบได้สารประกอบทั่วไปคือ ทองแดง โครเมียม สตรอนเชียม วาเนเดียม และซีลีเนียม

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต รุจยา บุญญานุวัตร
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2548	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

4670457321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEYWORD : CO-PROCESSING / CO-INCINERATION / INDUSTRIAL WASTES / HEAVY METALS / WASTE UTILIZATION / CEMENT KILN

RUJAYA BOONYANUWAT : QUANTITATIVE AND QUALITATIVE CHARACTERISTICS OF HEAVY METALS IN CEMENT FROM CO-INCINERATION PROCESS USING INDUSTRIAL WASTES. THESIS ADVISOR : MANASKORN RACHAKORNKIJ, Ph.D., 169 pp. ISBN 974-53-2718-2.

This research studied the quantitative and qualitative characteristics of heavy metals in Portland cement before hydration reaction from co-incineration process using industrial wastes, solvents, fly ash, bottom ash, catalyst and off-spec pet food as alternative raw materials and fuels. Samples of all raw materials, cement clinker and Cement Kiln Dust (CKD) for analysis in this research were provided by Siam City Cement Public Company Limited, Saraburi, Thailand. X-ray diffraction spectrometer (XRD), Fourier-Transform infrared spectroscope (FTIR) and Scanning electron microscope (SEM) were used to examine phases of heavy metals through qualitative viewpoint. Furthermore, Sequential Extraction was applied to quantitatively examine partitioning of metals into each phase. Both of input and output materials from the cement process were used to study mass balances and partitioning coefficients of metals.

Most of the heavy metals were detected in forms that were associated with manganese oxide as shown by the XRD and FTIR results. Almost all heavy metals (>60%) such as Cu, Cr, Se, Sr, and V were mainly distributed in Fraction 4 and 5 (sulfide and residual fractions) indicating that these stable or less leachable metals had entered such phases during cement process. In contrast, Ba, Cr, Se, and Sr were found in readily leachable forms indicating that these metals can leach more easily to the environment than the other phases. Consequently, the amounts of these metals in raw materials need to be controlled to ensure that human health and the environment will not be compromised.

Department Environmental Engineering	Student's signature Rujaya Boonyanuwat
Field of Study Environmental Engineering	Advisor's signature
Academic year 2005	Co-advisor's signature -

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา คำอธิบาย และช่วยแก้ปัญหาให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้ คำชี้แนะ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) จังหวัดสระบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ทั้งเงินทุน ข้อมูล ตัวอย่างของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ซีเมนต์สำหรับการวิจัย การใช้สถานที่และเครื่องมือในห้องปฏิบัติการในการตรวจวัดปริมาณของโลหะหนัก รวมทั้งการอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานกับทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่มอบทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ศูนย์เครือข่ายคณะวิศวกรรมศาสตร์ โครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย (CUFE, NRC-EHWM) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือที่ห้องวิจัยเป็นอย่างดียิ่งตลอดมา

และขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่อบรมสั่งสอนและให้ความรู้แก่ผู้ทำวิจัย ขอขอบพระคุณคุณฐิตพล คุณกษิดิ์เดช ที่ให้คำแนะนำเรื่องระบบการผลิตซีเมนต์และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบคุณพี่ธนพล ที่คอยชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ ทั้งให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ การแก้ปัญหาต่างๆ และเป็นกำลังใจเสมอมา ขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคน (ตี๋ นก แอน จูน กิฟท์ เอิร์ท บีม ออน ดิว โอ๊ค และเพื่อนร่วมรุ่นทุกคน) ที่คอยให้ความช่วยเหลือทั้งในเรื่องงานในห้องปฏิบัติการและกำลังใจที่ดี และที่ขาดไม่ได้คือบิดา มารดา และน้องสาวของผู้วิจัยที่คอยสนับสนุนอยู่เคียงข้างในทุกเรื่องทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูป ..... ฌ

บทที่ 1 บทนำ 1

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 ความหมายของปูนซีเมนต์ 4

2.2 กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์ 4

2.2.1 วัตถุดิบ 4

2.2.2 กรรมวิธีผลิตซีเมนต์โดยทั่วไป 6

2.2.3 กรรมวิธีผลิตของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) 10

2.3 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 13

2.3.1 อิทธิพลของสารประกอบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 13

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 14

2.4.1 การนำกากอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 15

2.4.2 แหล่งที่มาของโลหะหนักในการผลิตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 20

2.4.3 สถานภาพของโลหะหนักในการผลิตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 22

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 39

3.1 วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี 39

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์ 39

3.1.2 สารเคมี 39

3.2 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย 40

3.2.1 ข้อมูลกระบวนการผลิตของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) 40

3.2.2 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย 41

3.3 ขั้นตอนการวิจัย 42

3.4 การดำเนินการวิจัย 42
3.4.1 การศึกษาที่ 1 การศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในตัวอย่างจากส่วนต่างๆ ของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์.....42
3.4.2 การศึกษาที่ 2 การศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์โดยสังเกตจากลักษณะทางกายภาพ 44
3.4.3 การศึกษาที่ 3 การศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์โดยสังเกตจากลักษณะทางเคมี.....44
3.4.4 การศึกษาที่ 4 การศึกษาสมดุลมวลที่เข้าและออกจากระบบการผลิตซีเมนต์และการสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ 47
บทที่ 4 ผลการวิจัย 49
4.1 ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของโลหะหนักในตัวอย่างจากส่วนต่างๆ ของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์.....49
4.1.1 วัตถุดิบหลัก 49
4.1.2 วัตถุดิบทดแทน 56
4.1.3 เชื้อเพลิงหลัก.....59
4.1.4 เชื้อเพลิงทดแทน 59
4.1.5 ปูนเม็ดและฝุ่นปูน 60
4.2 ผลการศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์โดยสังเกตจากลักษณะทางเคมี 63
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ชนิดและสารประกอบโลหะหนักโดยวิธีการสกัดแยกสารประกอบ (Sequential Extraction) 63
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ชนิดและสารประกอบโลหะหนัก โดยเครื่อง XRD (X-Ray Diffraction Spectrometer) 73
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ชนิดและสารประกอบโลหะหนัก โดยเครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscope) 80
4.3 ผลการศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์โดยสังเกตจากลักษณะทางกายภาพ.....86
4.4 ผลการศึกษาสมดุลมวลของโลหะหนักในระบบซีเมนต์และการสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์.....89
4.4.1 ความเข้มข้นของโลหะที่เข้าและออกจากระบบการผลิตซีเมนต์ 89
4.4.2 ปริมาณโดยมวลของโลหะที่เข้าและออกจากระบบการผลิตซีเมนต์ 93

4.4.3 การสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ของวัตถุที่เข้าและออกจากระบบการผลิตซีเมนต์ 96
4.5 การเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงในลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของโลหะหนักที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 104
4.5.1 ผลการเปรียบเทียบชนิดและสารประกอบโลหะด้วยวิธีการสกัดแยกสารประกอบ (Sequential Extraction) ระหว่างปูนซีเมนต์ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 104
4.5.2 ผลการเปรียบเทียบชนิดและสารประกอบโลหะด้วยเครื่อง XRD (X-Ray Diffraction Spectrometer) ระหว่างปูนซีเมนต์ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 105
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 109
5.1 สรุปผลการวิจัย 109
5.2 ความสำคัญทางวิศวกรรมและการนำไปใช้ประโยชน์ 111
5.3 ข้อเสนอแนะ 112
รายการอ้างอิง 113
ภาคผนวก 116
ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์ชนิดและความเข้มข้นของโลหะหนัก 117
ภาคผนวก ข. ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีแยกสกัดสารประกอบโลหะ (Sequential Extraction) 131
ภาคผนวก ค. ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD 136
ภาคผนวก ง. ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR 140
ภาคผนวก จ. ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM-EDS 145
ภาคผนวก ฉ. ผลการวิเคราะห์สมดุลมวลของโลหะหนัก และการสร้างความสัมพันธ์จากสมการ. 148
ภาคผนวก ช. ลักษณะทางเคมีของโลหะหนักในปูนซีเมนต์หลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 159
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 169

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 สัดส่วนออกไซด์ของธาตุต่างๆ ในปูนเม็ดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 9

2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 13

2.3 คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 14

2.4 ตัวอย่างของเสียที่มักใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ 15

2.5 องค์ประกอบภายในของของเสียอันตรายและกากอุตสาหกรรมบางชนิดที่ใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 16

2.6 สัดส่วนของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบการผลิตปูนเม็ดในประเทศเยอรมนีปี 1999 17

2.7 สัดส่วนของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่ระบบการผลิตปูนเม็ดในประเทศเยอรมนีปี 1999 18

2.8 ผลกระทบของโลหะหนักต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์ 21

2.9 ร้อยละของการรวมตัวของโลหะบางชนิดในซีเมนต์ จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ 22

2.10 การกระจายตัวของโลหะหนักจากหลายเส้นทางที่เข้าสู่ระบบการผลิตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 24

2.11 ของเสียที่เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และโลหะหนักที่เกี่ยวข้อง .28

2.12 เปรียบเทียบโลหะหนักต่างๆ ในก๊าซที่ระบายออกจากเตาเผาซีเมนต์ระหว่างเตาเผาที่ใช้เชื้อเพลิงปกติและเตาเผาที่ใช้เชื้อเพลิงของเสียอันตราย 31

2.13 ความเข้มข้นของโลหะหนักในซีเมนต์ 32

2.14 ความเข้มข้นของโลหะหนักในฝุ่นปูน (ppm) สำรวจเมื่อปี 1991 33

2.15 ความเข้มข้นของโลหะหนักในฝุ่นปูน (ppm) สำรวจเมื่อปี 1982 33

2.16 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของงานวิจัยทั้งสามกลุ่มที่ต่างกัน 35

4.1 ความเข้มข้นสูงสุดและต่ำสุดและค่าเฉลี่ยของโลหะชนิดต่างๆ ที่อยู่ในหินปูน และหินเชลอะลูมินาสูง 50

4.2 ความเข้มข้นสูงสุดและต่ำสุดและค่าเฉลี่ยของโลหะชนิดต่างๆ ที่อยู่ในหินเชลซิลิกาสูงและแร่เหล็ก 51

4.3 ความเข้มข้นสูงสุดและต่ำสุดและค่าเฉลี่ยของโลหะชนิดต่างๆ ที่อยู่ในวัตถุดิบทดแทนและเชื้อเพลิงทดแทน 57

4.4 ความเข้มข้นสูงสุดและต่ำสุดและค่าเฉลี่ยของโลหะชนิดต่างๆ ที่อยู่ในปูนเม็ดและฝุ่นปูน 58

4.5 ความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะชนิดต่างๆ ที่พบในเชื้อเพลิงหลัก 59

4.6 ชนิดของโลหะต่างๆ ที่พบในแต่ละขั้นของการสกัดแยกสารประกอบโลหะ 72
4.7 ผลการวิเคราะห์สารประกอบโลหะหนักในปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRD..... ..78
4.8 ผลการวิเคราะห์สารประกอบโลหะหนักในฝุ่นปูนด้วยเครื่อง XRD.....79
4.9 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ดด้วยเครื่อง FTIR 84
4.10 อัตราการป้อนวัตถุต่างๆ ในระบบการผลิตซีเมนต์ 93
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสังกะสีจากวัตถุที่เข้าระบบแต่ละชนิด ต่อปูนเม็ดและฝุ่นปูน และต่อก๊าซที่ออกจากระบบ.....98
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแบเรียมจากวัตถุที่เข้าระบบแต่ละชนิด ต่อปูนเม็ดและฝุ่นปูน และต่อก๊าซที่ออกจากระบบ.....99
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างตะกั่วจากวัตถุที่เข้าระบบแต่ละชนิด ต่อปูนเม็ดและฝุ่นปูน และต่อก๊าซที่ออกจากระบบ.....99
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างซีลีเนียมจากวัตถุที่เข้าระบบแต่ละชนิด ต่อปูนเม็ดและฝุ่นปูน และต่อก๊าซที่ออกจากระบบ.....100
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสตรอนเซียมจากวัตถุที่เข้าระบบแต่ละชนิด ต่อปูนเม็ดและฝุ่นปูน และต่อก๊าซที่ออกจากระบบ.....101
4.16 สมการเส้นถดถอยของความสัมพันธ์ของโลหะชนิดต่างๆ ในวัตถุที่เข้าระบบ ต่อผลิตภัณฑ์ที่ออกจากระบบ.....102
4.17 ผลการเปรียบเทียบชนิดและสารประกอบโลหะหนักระหว่างปูนเม็ด (ก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน) และซีเมนต์เพสต์ (หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน) ที่ได้จากวิธีการสกัดแยกสารประกอบ (Sequential Extraction).....104
4.18 ผลการเปรียบเทียบชนิดและสารประกอบโลหะหนักระหว่างปูนเม็ด (ก่อนปฏิกิริยาไฮเดรชัน) และซีเมนต์เพสต์ (หลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน) สำหรับตัวอย่างในเดือนตุลาคม 2547 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD (X-Ray Diffraction Spectrometer) 106
ก.1 ความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ของปูนเม็ด จำนวน 30 ตัวอย่าง 118
ก.2 ความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ของฝุ่นปูน จำนวน 9 ตัวอย่าง 120
ก.3 ความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ของหินปูน จำนวน 27 ตัวอย่าง 121
ก.4 ความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ของหินเชลอะลูมินาสูง จำนวน 12 ตัวอย่าง 123
ก.5 ความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ของหินเชลซิลิกาสูง จำนวน 12 ตัวอย่าง 124
ก.6 ความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ของแร่เหล็ก จำนวน 27 ตัวอย่าง 125
ก.7 ความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ของวัตถุดิบทดแทน จำนวน 15 ตัวอย่าง 127
ก.8 ความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ของเชื้อเพลิงทดแทน จำนวน 12 ตัวอย่าง 128

ก.9 ความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ของ Kiln Feed จำนวน 30 ตัวอย่าง 129
ข.1 ผลการวิเคราะห์ปูนเม็ดวันที่ 21 กันยายน 2547 132
ข.2 ผลการวิเคราะห์ปูนเม็ดวันที่ 23 กันยายน 2547 132
ข.3 ผลการวิเคราะห์ปูนเม็ดวันที่ 27 กันยายน 2547 132
ข.4 ผลการวิเคราะห์ปูนเม็ดวันที่ 23 ตุลาคม 2547 132
ข.5 ผลการวิเคราะห์ปูนเม็ดวันที่ 24 ตุลาคม 2547 133
ข.6 ผลการวิเคราะห์ปูนเม็ดวันที่ 26 ตุลาคม 2547 133
ข.7 ผลการวิเคราะห์ปูนเม็ดวันที่ 12 มกราคม 2548 133
ข.8 ผลการวิเคราะห์ปูนเม็ดวันที่ 22 มกราคม 2548 133
ข.9 ผลการวิเคราะห์ปูนเม็ดวันที่ 28 มกราคม 2548 134
ข.10 ผลการวิเคราะห์ปูนเม็ดวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2548 134
ข.11 ผลการวิเคราะห์ปูนเม็ดวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 134
ข.12 ผลการวิเคราะห์ปูนเม็ดวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2548 134
ข.13 ผลการวิเคราะห์ฝุ่นปูนวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2548 135
ข.14 ผลการวิเคราะห์ฝุ่นปูนวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 135
ข.15 ผลการวิเคราะห์ฝุ่นปูนวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2548 135
ง.1 จุดศูนย์กลาง ขอบซ้าย และขอบขวาของกราฟความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ของปูนเม็ด วันที่ 24 ตุลาคม 2547 141
ง.2 จุดศูนย์กลาง ขอบซ้าย และขอบขวาของกราฟความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ของปูนเม็ด วันที่ 22 มกราคม 2548 142
ง.3 จุดศูนย์กลาง ขอบซ้าย และขอบขวาของกราฟความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ของปูนเม็ด วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 142
ง.4 จุดศูนย์กลาง ขอบซ้าย และขอบขวาของกราฟความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ของฝุ่นปูน วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 143
ง.5 จุดศูนย์กลาง ขอบซ้าย และขอบขวาของกราฟความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ของปูนเม็ด วันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2548 143
ง.6 จุดศูนย์กลาง ขอบซ้าย และขอบขวาของกราฟความถี่ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ของฝุ่นปูน วันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2548 144
จ.1 มวลของโลหะหนัก (กก.) ที่อยู่ใน Kiln Feed ปูนเม็ดและฝุ่นปูนวันที่ 23 ตุลาคม 2547 .. 149
จ.2 มวลของโลหะหนัก (กก.) ที่อยู่ใน Kiln Feed ปูนเม็ดและฝุ่นปูนวันที่ 24 ตุลาคม 2547 .. 149
จ.3 มวลของโลหะหนัก (กก.) ที่อยู่ใน Kiln Feed ปูนเม็ดและฝุ่นปูนวันที่ 26 ตุลาคม 2547 .. 149

ฉ.4 มวลของโลหะหนัก (กก.) ที่อยู่ใน Kiln Feed ปูนเม็ดและฝุ่นปูนวันที่ 1 กุมภาพันธ์2548.150
ฉ.5 มวลของโลหะหนัก (กก.) ที่อยู่ใน Kiln Feed ปูนเม็ดและฝุ่นปูนวันที่ 3 กุมภาพันธ์2548.150
ฉ.6 มวลของโลหะหนัก (กก.) ที่อยู่ใน Kiln Feed ปูนเม็ดและฝุ่นปูนวันที่ 9 กุมภาพันธ์2548.150
ฉ.7 จุดหลอมเหลวและจุดเดือดของโลหะชนิดต่างๆ.....151
ฉ.8 ปริมาณของแบเรียม (กก.) ที่อยู่ในวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ซีเมนต์แต่ละชนิด 151
ฉ.9 ปริมาณของทองแดง (กก.) ที่อยู่ในวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ซีเมนต์แต่ละชนิด.....152
ฉ.10 ปริมาณของแมงกานีส (กก.) ที่อยู่ในวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ซีเมนต์แต่ละชนิด 152
ฉ.11 ปริมาณของตะกั่ว (กก.) ที่อยู่ในวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ซีเมนต์แต่ละชนิด.....153
ฉ.12 ปริมาณของซีลีเนียม (กก.) ที่อยู่ในวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ซีเมนต์แต่ละชนิด.....153
ฉ.13 ปริมาณของสตรอนเชียม (กก.) ที่อยู่ในวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ซีเมนต์แต่ละชนิด 154
ฉ.14 ปริมาณของสังกะสี (กก.) ที่อยู่ในวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ซีเมนต์แต่ละชนิด.....154
ฉ.15 ร้อยละของสัดส่วนระหว่างมวลของโลหะหนักในเชื้อเพลิงทดแทนเมื่อเปรียบเทียบกับมวลของโลหะหนักในวัตถุดิบหลัก.....155
ฉ.16 ร้อยละของสัดส่วนระหว่างมวลของโลหะหนักในฝุ่นปูนเมื่อเปรียบเทียบกับมวลของโลหะหนักในปูนเม็ด.....155
ฉ.17 ปริมาณของแบเรียม (กก.) ที่อยู่ในวัตถุดิบและเชื้อเพลิงหลัก วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน ปูนเม็ดและฝุ่นปูน และก๊าซที่ออกจากระบบ 156
ฉ.18 ปริมาณของตะกั่ว (กก.) ที่อยู่ในวัตถุดิบและเชื้อเพลิงหลัก วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน ปูนเม็ดและฝุ่นปูน และก๊าซที่ออกจากระบบ 156
ฉ.19 ปริมาณของซีลีเนียม (กก.) ที่อยู่ในวัตถุดิบและเชื้อเพลิงหลัก วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน ปูนเม็ดและฝุ่นปูน และก๊าซที่ออกจากระบบ 157
ฉ.20 ปริมาณของสตรอนเชียม (กก.) ที่อยู่ในวัตถุดิบและเชื้อเพลิงหลัก วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน ปูนเม็ดและฝุ่นปูน และก๊าซที่ออกจากระบบ (ก่อนการตัดตัวแปร).....157
ฉ.21 ปริมาณของสังกะสี (กก.) ที่อยู่ในวัตถุดิบและเชื้อเพลิงหลัก วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน ปูนเม็ดและฝุ่นปูน และก๊าซที่ออกจากระบบ 158
ฉ.22 ความสัมพันธ์ระหว่างสตรอนเชียมจากวัตถุที่เข้าระบบแต่ละชนิด ต่อปูนเม็ดและฝุ่นปูน และต่อก๊าซที่ออกจากระบบ ซึ่งเป็นผลจากการหาค่าสัมประสิทธิ์จากข้อมูลในตารางที่ ฉ.20. 158
ฉ.23 ปริมาณของสตรอนเชียม (กก.) ที่อยู่ในวัตถุดิบและเชื้อเพลิงหลัก วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน ปูนเม็ดและฝุ่นปูน และก๊าซที่ออกจากระบบ (หลังการตัดตัวแปร) 158

ช.1 ความเข้มข้นและร้อยละของโลหะที่มาจากแต่ละขั้นตอนการสกัดแยกสารประกอบ (Sequential Extraction) สำหรับตัวอย่างวันที่ 26 ตุลาคม 2547 ในรูปแบบซีเมนต์เพสต์ 160
ช.2 ความเข้มข้นและร้อยละของโลหะที่มาจากแต่ละขั้นตอนการสกัดแยกสารประกอบ (Sequential Extraction) สำหรับตัวอย่างวันที่ 22 มกราคม 2548 ในรูปแบบซีเมนต์เพสต์ 162
ช.3 ความเข้มข้นและร้อยละของโลหะที่มาจากแต่ละขั้นตอนการสกัดแยกสารประกอบ (Sequential Extraction) สำหรับตัวอย่างวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 ในรูปแบบซีเมนต์เพสต์ 164

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์	5
2.2	กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้ง	7
2.3	กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบบเปียก	8
2.4	รูปจำลองกระบวนการผลิตซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์ นครหลวง จำกัด (มหาชน)	10
2.5	ผังกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์ นครหลวง จำกัด (มหาชน)	11
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุดิบและเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่ป้อนเข้าสู่ระบบ กับปริมาณ (เป็นร้อยละ) ของสารหนู แคดเมียม โคบอลต์ และโครเมียมที่พบในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	25
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุดิบและเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่ป้อนเข้าสู่ระบบ กับปริมาณ (เป็นร้อยละ) ของทองแดง นิกเกิล แมงกานีส และตะกั่วที่พบในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	26
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุดิบและเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่ป้อนเข้าสู่ระบบ กับปริมาณ (เป็นร้อยละ) ของพลวง ดีบุก วาเนเดียม และสังกะสีที่พบในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	27
2.9	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างซีเมนต์และโลหะหนัก คือการดูดติด (Sorption) การรวมตัวเข้ากับโครงผลึกของสารประกอบซีเมนต์ (Lattice Inclusion) และการเกิดปฏิกิริยากับองค์ประกอบในซีเมนต์แล้วเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ (Compounds)	37
3.1	รายละเอียดจุดที่มีการเติมวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทั้งประเภทหลัก (Primary) และทดแทน (Secondary) เข้าสู่กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)	41
3.2	ผังแสดงขั้นตอนการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ ตามวิธีมาตรฐาน 3052 ขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (US EPA)	43
3.3	ผังแสดงขั้นตอนการสกัดด้วยวิธี Sequential Extraction	46
3.4	ผังการศึกษาสมดุลมวลที่เข้าและออกจากระบบการผลิตซีเมนต์	47
4.1	ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในหินปูน (Limestone) สำหรับช่วงเดือนกันยายน ถึงเดือนตุลาคม 2547	52
4.2	ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในหินเชลอะลูมินาสูง (Shale Mix) สำหรับช่วงเดือนกันยายน ถึงเดือนตุลาคม 2547	52
4.3	ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในหินเชลซิลิกาสูง (Shale Core) สำหรับช่วงเดือนกันยายน ถึงเดือนตุลาคม 2547	53

4.4 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในแร่เหล็ก (Iron Ore) สำหรับช่วงเดือนกันยายน ถึงเดือนตุลาคม 2547 53
4.5 การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ในหินปูน (Limestone) ตั้งแต่เดือนกันยายน 2547 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2548 55
4.6 การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ในแร่เหล็ก (Iron Ore) ตั้งแต่เดือนกันยายน 2547 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2548 55
4.7 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในวัตถุดิบทดแทน สำหรับช่วงเดือนกันยายน 2547 ถึงเดือนมกราคม 2548 56
4.8 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงทดแทน สำหรับช่วงเดือนกันยายน 2547 ถึงเดือนตุลาคม 2547 60
4.9 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในปูนเม็ด สำหรับช่วงเดือนกันยายน 2547 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2548 62
4.10 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในฝุ่นปูน สำหรับช่วงเดือนตุลาคม 2547 และช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 2548 62
4.11 การกระจายตัวของสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ขั้นในปูนเม็ด ในเดือนกันยายน 2547 ... 64
4.12 การกระจายตัวของสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ขั้นในปูนเม็ด ในเดือนตุลาคม 2547 65
4.13 การกระจายตัวของสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ขั้นในปูนเม็ด ในเดือนมกราคม 2548 ... 67
4.14 การกระจายตัวของสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ขั้นในปูนเม็ด ในเดือนกุมภาพันธ์2548 . 68
4.15 การกระจายตัวของสารประกอบโลหะหนักทั้ง 5 ขั้นในฝุ่นปูน ในเดือนกุมภาพันธ์2548 .. 70
4.16 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ด เดือนตุลาคม 2547 ด้วยเครื่อง XRD 74
4.17 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ด เดือนมกราคม 2548 ด้วยเครื่อง XRD 75
4.18 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ด เดือนกุมภาพันธ์ 2548 ด้วยเครื่อง XRD 76
4.19 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในฝุ่นปูน เดือนกุมภาพันธ์ 2548 ด้วยเครื่อง XRD..... 77
4.20 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ดวันที่ 24 ตุลาคม 2547 ด้วยเครื่อง FTIR 81
4.21 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ดวันที่ 22 มกราคม 2548 ด้วยเครื่อง FTIR 81
4.22 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ดและฝุ่นปูนวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 ด้วยเครื่อง FTIR..... 82
4.23 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในปูนเม็ดและฝุ่นปูนวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2548 ด้วยเครื่อง FTIR..... 83
4.24 โครงสร้างที่ผิวภายในปูนเม็ด ที่กำลังขยาย 500 เท่า..... 87
4.25 ลักษณะผลึกของแคลเซียม ที่อยู่ในปูนเม็ด ที่กำลังขยาย 3300 เท่า..... 87

4.26 ลักษณะของผิวที่มีองค์ประกอบของซิลิกา และแคลเซียม ที่กำลังขยาย 10000 เท่า.....88
4.27 ลักษณะผลึกซึ่งอาจเป็นแคลเซียมออกไซด์ ที่กำลังขยาย 2500 เท่า.....88
4.28 ผังสมดุลมวลที่เข้าและออกจากระบบการผลิตซีเมนต์ 89
4.29 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ในหน่วย มก./กก. ที่อยู่ใน Kiln Feed ปูนเม็ดและฝุ่นปูน เมื่อใช้ปริมาณตัวอย่างเท่ากันสำหรับช่วงเดือนตุลาคม 2547 90
4.30 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ในหน่วย มก./กก. ที่อยู่ใน Kiln Feed ปูนเม็ดและฝุ่นปูน เมื่อใช้ปริมาณตัวอย่างเท่ากันสำหรับช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 2548 91
4.31 ความสัมพันธ์ของระหว่าง Kiln Feed ปูนเม็ดและฝุ่นปูน ในรูปของมวลเป็นกิโลกรัมต่อ 1 วันในช่วงเดือนตุลาคม 2547.....94
4.32 ความสัมพันธ์ของระหว่าง Kiln Feed ปูนเม็ดและฝุ่นปูน ในรูปของมวลเป็นกิโลกรัมต่อ 1 วันในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 2548.....95
4.33 ผลจากการเปรียบเทียบการวิเคราะห์สารประกอบโลหะหนักด้วยเครื่อง XRD ระหว่างปูนเม็ด (ก่อนปฏิกิริยาไฮเดรชัน) และซีเมนต์เพสต์ (หลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน) 107
ค.1 ผลการวิเคราะห์กราฟความถี่ของสารประกอบในปูนเม็ด วันที่ 23 ตุลาคม 2547 137
ค.2 ผลการวิเคราะห์กราฟความถี่ของสารประกอบในปูนเม็ด วันที่ 26 ตุลาคม 2547 137
ค.3 ผลการวิเคราะห์กราฟความถี่ของสารประกอบในปูนเม็ด วันที่ 12 มกราคม 2548 138
ค.4 ผลการวิเคราะห์กราฟความถี่ของสารประกอบในปูนเม็ด วันที่ 28 มกราคม 2548 138
ค.5 ผลการวิเคราะห์กราฟความถี่ของสารประกอบในปูนเม็ด วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548 138
ค.6 ผลการวิเคราะห์กราฟความถี่ของสารประกอบในฝุ่นปูน วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2548.....139
ค.7 ผลการวิเคราะห์กราฟความถี่ของสารประกอบในปูนเม็ด วันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2548 139
ค.8 ผลการวิเคราะห์กราฟความถี่ของสารประกอบในฝุ่นปูน วันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2548.....139
จ.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของโลหะด้วย EDS ที่ผิวด้านในของปูนเม็ดที่กำลังขยาย 500 เท่า.....146
จ.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของโลหะด้วย EDS ที่ผิวด้านในของปูนเม็ดที่กำลังขยาย 2500 เท่า.....147
ช.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์วันที่ 26 ตุลาคม 2547 ทั้งห้าอายุบ่ม คือ 3 7 14 28 และ 60 วัน.....168