

การชะละลายของโลหะหนักจากถัง/ภาชนะบรรจุน้ำดื่ม  
ซึ่งทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากกระบวนการเผาพร้อม



นายธีรพล พิรุฬห์ทรัพย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2549  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LEACHING OF HEAVY METALS FROM DRINKING WATER CONTAINERS  
MADE OF PORTLAND CEMENT FROM CO-INCINERATION PROCESS

Mr. Terapol Pirunsup

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

Copyright of Chulalongkorn University

**490792**



ธีรพล พิรุฬห์ทรัพย์ : การชะละลายของโลหะหนักจากถัง/ภาชนะบรรจุน้ำดื่มซึ่งทำจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์จากกระบวนการเผาพร้อม (LEACHING OF HEAVY METALS FROM DRINKING WATER CONTAINERS MADE OF PORTLAND CEMENT FROM CO-INCINERATION PROCESS) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร.มนัสกร ราชากรกิจ, 355 หน้า

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากถัง/ภาชนะบรรจุน้ำดื่มซึ่งทำจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์จากกระบวนการเผาพร้อม และประยุกต์การทดสอบการชะละลายมาตรฐานของ EA NEN 7375 รวมถึงศึกษาปัจจัยหลายชนิดที่มีผลต่อการชะละลายของโลหะหนักที่ฝังตัวอยู่ในซีเมนต์เพสต์ นอกจากนี้ยังนำผลการทดสอบการชะละลายไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่มเพื่อประเมินระดับความปลอดภัยของโลหะหนักในสารชะละลายภายหลังการทดสอบ ก่อนนำซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านการทดสอบการชะละลายที่เวลาต่างๆไปศึกษาการเปลี่ยนแปลงของการจับตัวและสารประกอบด้วยเครื่อง XRD (X-Ray Diffraction Spectrometer) และ เครื่อง FT-IR (Fourier Transform Infra-Red Spectrophotometer) ตามลำดับ

ผลการศึกษาการชะละลายแสดงให้เห็นว่ามีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อความสามารถในการชะละลายของโลหะหนักแต่ละชนิดพร้อมกัน อาทิ ปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นในปูนเม็ด ชนิดและปริมาณของสารชะละลาย ซึ่งจากการวิจัยพบว่าที่อัตราส่วนสารชะละลายต่อพื้นที่ผิวสัมผัสเท่ากับ 8 จะมีความเข้มข้นของโลหะหนักในสารชะละลายสูงมากเนื่องจากเกิดการสะสมความเข้มข้นในบริเวณผิวหน้าที่เกิดการชะละลาย นอกจากนี้การทดสอบด้วยสารชะละลายต่างชนิดกันแสดงให้เห็นว่า แมงกานีสไม่เกิดการชะละลายในน้ำประปา และ โบรอนชะละลายออกมามากในน้ำฝนกรดสังเคราะห์ชนิดปิดฝาทดสอบ โดยโลหะหนักแต่ละชนิดจะแสดงพฤติกรรมการชะละลายที่แตกต่างกันออกไปที่เห็นได้ชัดเจนได้แก่ อะลูมิเนียมจะเกิดการชะล้างที่ผิวหน้าในช่วงต้นการทดสอบและเกิดการละลายในช่วงท้าย ส่วนโครเมียมเกิดการชะล้างที่ผิวหน้าในช่วงต้นของการทดสอบเพียงอย่างเดียว สำหรับการศึกษาการชะละลายในระบบเปิดพบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีผลทำให้พีเอชและความนำไฟฟ้าของระบบมีค่าลดลงและมีตะกอนเกิดขึ้น โลหะหนักส่วนใหญ่มีความสามารถในการชะละลายลดลง ยกเว้นวานาเดียมซึ่งแสดงความสามารถที่เพิ่มขึ้นในช่วงท้ายของการทดสอบ สำหรับปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักที่ชะละลายออกมาเมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่มพบว่าโลหะหนักบางชนิดมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน เช่น แคดเมียมและ ตะกั่วสำหรับทุกสภาวะและสารชะละลาย ในการศึกษาซีเมนต์เพสต์และตะกอนที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง XRD และ FTIR พบว่าตะกอนที่เกิดขึ้นคือตะกอนหินปูน ( $\text{CaCO}_3$ ) แต่ไม่สามารถตรวจพบโลหะหนักซึ่งอาจมีผลมาจากปริมาณที่น้อยและมีความกระจายตัวสูงในซีเมนต์

ภาควิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต..... ธีรพล พิรุฬห์ทรัพย์  
สาขาวิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ดร.  
ปีการศึกษา..... 2549..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

# # 4670335421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD : CEMENT / LEACHING / HEAVY MEATAL / DRINKING WATER / NEN 7375

TERAPOL PIRUNSUP : LEACHING OF HEAVY METALS FROM DRINKING WATER  
CONTAINERS MADE OF PORTLAND CEMENT FROM CO-INCINERATION PROCESS.

THESIS ADVISOR: MANASKORN RACHAKORNKIJ, Ph.D., 355 pp.

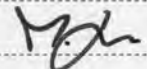
This research studied leaching behaviors of heavy metals from drinking water containers made of Portland cement from co-incineration process. The modified version of EA NEN 7375, a standard leaching test, was applied to examine various factors affecting heavy metals leachability. The leaching results were compared to drinking water standards to assess the contamination level of heavy metals in leachants. Moreover, the cement paste samples with the same properties as the drinking water containers were analyzed using X-ray Diffraction Spectrometer (XRD) and Fourier Transform Infra-Red Spectrophotometer (FT-IR) to consider the change of bond and compound in cement matrix after leaching tests.

The experimental results indicated that initial concentration of heavy metals in cement paste, type, and amount of the leachants play crucial roles on metal leachability. The studies showed that at Liquid/Surface ratio of 8, cumulative concentration of metals at the water-solid interface was substantially high. Besides, the leachates from various leachants showed that Manganese did not mobilize in tap water while Boron leached substantially in a closed system with synthetic acid rain as a leachant. Various Leaching phenomena of heavy metals were observed. After surface wash off phenomenon Alumimium showed the obvious dissolution at the final state of the study, while Chromium showed solely surface wash off at the beginning state. For the leaching in open system, CO<sub>2</sub> affected in decreasing pH and conductivity and the precipitate has formed. Under this condition, most of heavy metals, except Vanadium, became less mobilized. Cadmium and Lead were found the concentration higher than the standards of drinking water under all conditions for all leachants. Analyzing cement paste and precipitate with XRD and FTIR, the precipitate was found to be CaCO<sub>3</sub>. Heavy metals were not detected by XRD and FTIR because of their relatively small amounts in cement.

Department ..Environmental Engineering.....

Student's Signature 

Field of Study ..Environmental Engineering..

Advisor's Signature 

Academic Year .....2006.....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา กับผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้ คำชี้แนะ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่มอบทุนอุดหนุนสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งทำให้งานวิจัยสามารถดำเนินไปได้อย่างราบรื่น

ขอขอบคุณบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) จังหวัดสระบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและตัวอย่างของวัตถุดิบในการวิจัย รวมทั้งการอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานกับทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการของเสี่ยอันตราย ศูนย์เครือข่ายคณะวิศวกรรมศาสตร์ โครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสี่ยอันตราย (CUFE, NRC-EHWM) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือที่ห้องวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณป้า และพี่น้อง ที่ให้การสนับสนุนในทุกเรื่องและเป็นกำลังให้ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคน (บิว นก จุน กิฟท์ บัด แบ่ง พี่ปอม แอน เพื่อนร่วมรุ่นที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) ที่ให้ความช่วยเหลือต่างๆ รวมทั้งเป็นกำลังใจอย่างดีเยี่ยมแก่ผู้วิจัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ปูนซีเมนต์.....	6
2.1.1 ความหมายของปูนซีเมนต์.....	6
2.1.2 วัตถุดิบ.....	6
2.1.3 กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์ (Manufacture of Portland cement).....	7
2.1.3.1 กรรมวิธีผลิตของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน).....	9
2.1.4 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	9
2.1.4.1 อิทธิพลของสารประกอบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์.....	10
2.1.5 ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ (Hydration of cement).....	12
2.1.5.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์.....	12
2.1.5.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์.....	15
2.2 การนำกากอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิง ในการผลิตปูนซีเมนต์.....	16
2.2.1 ความหมายของกากของเสียอุตสาหกรรม.....	16
2.2.2 การนำกากของเสียอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบ หรือเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์.....	17

2.3 การรั่ว / ชะละลายของโลหะหนักเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	
ระยะแรกในระบบที่เมเนต์.....	20
2.4 การชะละลายในระยะยาว .....	20
2.5 การชะละลายและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการชะละลาย.....	25
2.5.1 ปัจจัยทางฟิสิกส์ที่มีอิทธิพลต่อการชะละลาย.....	25
2.5.2 ปัจจัยทางเคมีที่มีอิทธิพลต่อการชะละลาย.....	27
2.6 การปลดปล่อยของอนุภาคจำแนกตามคุณสมบัติ	
ทางเคมีฟิสิกส์ของสาร .....	28
2.7 การเกิดคาร์บอนเนชัน .....	32
2.8 การทดสอบการชะละลาย.....	32
2.8.1 ภาพรวมการทดสอบการชะละลาย .....	33
2.8.2 การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของ NEN 7375.....	36
2.9 มาตรฐานสำหรับน้ำดื่ม .....	37
2.10 ความเป็นพิษของโลหะหนัก .....	39
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย.....	56
3.1 แผนการวิจัย.....	56
3.1.1 การวางแผนการทดลอง .....	56
3.1.2 ขั้นตอนการทดลอง .....	56
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	56
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	56
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	57
3.2.3 การเตรียมสารเคมี.....	57
3.3 การเตรียมตัวอย่างปูนเม็ด .....	57
3.4 การดำเนินการทดลอง .....	58
3.4.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างปูนเม็ด .....	58
3.4.1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง.....	58
3.4.1.2 รายละเอียดขั้นตอนในการทดลองที่ 1.....	59
3.4.2 การทดสอบการชะละลายของโครงสร้างบรรจุน้ำ ที่เวลาต่าง ๆ.....	60
3.4.2.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง.....	60
3.4.2.2 รายละเอียดขั้นตอนในการทดลองที่ 2.....	62



3.4.3 ขั้นตอนการทดสอบการเปลี่ยนแปลงระดับอนุภาคของโครงสร้าง	
ภายหลังผ่านการชะละลาย.....	65
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	69
4.1 ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของโลหะหนักในตัวอย่างปูนเม็ด .....	69
4.1.1 การเลือกตัวอย่างซีเมนต์ไปทดสอบชะละลาย.....	73
4.2 การชะละลายของซีเมนต์เพสต์ .....	74
4.2.1 ภาพรวมผลการทดสอบการชะละลาย.....	75
4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นในปูนเม็ด	
กับผลการชะละลาย .....	86
4.2.3 การชะละลายกับมาตรฐานน้ำดื่ม .....	98
4.2.4 การชะละลายกับอัตราส่วนสารชะละลายต่อพื้นที่ผิวสัมผัส .....	108
4.2.5 ผลของพีเอชกับการชะละลาย .....	112
4.2.6 สารชะละลายกับการชะละลาย .....	113
4.2.7 การเกิดคาร์บอนขึ้นกับการชะละลาย.....	123
4.2.8 กลไกการชะละลาย .....	125
4.2.8.1 ความแตกต่างระหว่างการทดสอบตามมาตรฐานการชะละลาย	
ของ EA NEN 7375 และการทดสอบในงานวิจัย .....	125
4.2.8.2 การวิเคราะห์กลไกการชะละลาย.....	125
4.3 ผลการศึกษาซีเมนต์เพสต์ภายหลังการทดสอบการชะละลาย.....	134
4.3.1 ผลตรวจวัดสารประกอบโลหะหนักที่เป็นผลึก .....	134
4.3.2 ผลการตรวจวัดพันธะของสารประกอบโลหะหนัก.....	140
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	145
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	145
5.2 ข้อเสนอแนะและปัญหาอุปสรรคที่พบในงานวิจัย .....	147
รายการอ้างอิง .....	149
ภาคผนวก .....	154
ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์ชนิดและความเข้มข้นของโลหะหนัก.....	155
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบการชะละลาย .....	158
ภาคผนวก ค. รายการคำนวณการวิเคราะห์กลไกการชะละลาย .....	287

ภาคผนวก ง. ผลการวิเคราะห์สารประกอบโลหะหนักที่เป็นผลึกด้วย เครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD).....	297
ภาคผนวก จ. ผลการวิเคราะห์พันธะพันธะของสารประกอบโลหะหนักด้วย เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) .....	310
ภาคผนวก ฉ. มาตรฐานการทดสอบการชะละลาย EA NEN 7375158.....	322
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	355

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	8
2.2	10
2.3	11
2.4	17
2.5	18
2.6	18
2.7	19
2.8	38
3.1	58
3.1	59
3.2	60
3.2	61
3.3	65
4.1	69
4.2	70
4.3	74
4.4	87
4.5	99
4.6	125
4.7	127
4.8	128
4.9	129
4.10	130
4.11	131

4.12	ค่า $rc$ และกลไกการชะละลายจากการคำนวณของ Sr.....	132
4.13	ค่า $rc$ และกลไกการชะละลายจากการคำนวณของ Zn.....	133
5.1	ปริมาณเฉลี่ยของโลหะหนักหนักในปูนเม็ดและปริมาณที่ชะละลายออกมาคิดเป็นร้อยละ....	145
5.2	กลไกการชะละลายของโลหะทั้ง 5 ชนิด.....	146

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนภาพของแบบจำลอง Shrink front (ชนิดที่มีอนุภาคที่สนใจ 1 ชนิด)..... 23
2.2	แผนภาพของแบบจำลอง Shrink front (ชนิดที่มีอนุภาคที่สนใจ 2 ชนิด)..... 24
2.3	ปัจจัยทางฟิสิกส์-เคมี ที่มีผลต่อการชะละลายของสารมลพิษออกจากวัตถุก้อนแข็ง ..... 26
2.4	ทิศทางการไหลผ่านของสารชะละลายผ่านตัวกลางชนิดต่างๆ ..... 27
2.5	รูปแบบการชะละลายของเกลือซึ่งเป็นฟังก์ชันกับพีเอช ..... 31
2.6	รูปแบบการชะละลายของไอออนประจุบวกซึ่งเป็นฟังก์ชันกับพีเอช ..... 31
2.7	รูปแบบการชะละลายของไอออนประจุลบซึ่งเป็นฟังก์ชันกับพีเอช ..... 31
2.8	ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการชะละลาย ..... 32
3.1	การทดสอบการชะละลายที่อัตราส่วนสารชะละลายต่อพื้นที่ผิวสัมผัสต่างๆกัน ..... 64
3.2	แผนผังแสดงภาพรวมของการทดสอบการชะละลาย ..... 66
3.3	แผนผังแสดงขั้นตอนการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ ตามวิธีมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 3052..... 67
3.4	แผนผังแสดงขั้นตอนการทดสอบการชะละลาย ..... 68
4.1-4.5	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP
4.1	แสดงภาพรวมความเข้มข้นของ Fe ในปูนเม็ด ..... 71
4.2	แสดงภาพรวมความเข้มข้นของ Mn ในปูนเม็ด ..... 71
4.3	แสดงภาพรวมความเข้มข้นของ Ba Sr และ Zn ในปูนเม็ด..... 72
4.4	แสดงภาพรวมความเข้มข้นของ Cr และ V ในปูนเม็ด..... 72
4.5	แสดงภาพรวมความเข้มข้นของ Cd Co Ni Pb และ Sr ในปูนเม็ด ..... 73
4.6-4.16	ภาพรวมการชะละลาย
4.6	ของ (ซ้าย) Al (ขวา) Ba ด้วยน้ำปราศจากไอออน ..... 75
4.7	ของ (ซ้าย) Ca(ขวา) Cr ด้วยน้ำปราศจากไอออน ..... 76
4.8	ของ Sr ด้วยน้ำปราศจากไอออน..... 77
4.9	ของ B จากตัวอย่างซีเมนต์เฟสดีต่างๆ ด้วยน้ำปราศจากไอออน ..... 78
4.10	ของ Be จากตัวอย่างซีเมนต์เฟสดีต่างๆ ด้วยน้ำปราศจากไอออน ..... 79
4.11	ของ Cd จากตัวอย่างซีเมนต์เฟสดีต่างๆ ด้วยน้ำปราศจากไอออน..... 80

4.12	ของ Mn จากตัวอย่างซีเมนต์เฟสค์ต่าง ๆ ด้วยน้ำปราศจากไอออน.....	81
4.13	ของ Ni จากตัวอย่างซีเมนต์เฟสค์ต่าง ๆ ด้วยน้ำปราศจากไอออน .....	82
4.14	ของ Pb จากตัวอย่างซีเมนต์เฟสค์ต่าง ๆ ด้วยน้ำปราศจากไอออน .....	83
4.15	ของ V จากตัวอย่างซีเมนต์เฟสค์ต่าง ๆ ด้วยน้ำปราศจากไอออน.....	84
4.16	ของ Zn จากตัวอย่างซีเมนต์เฟสค์ต่าง ๆ ด้วยน้ำปราศจากไอออน .....	85
4.17-4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้น		
4.17	กับการชะละลายของ Ba ที่ L/S ต่างๆ .....	88
4.18	กับการชะละลายของ Cr ที่ L/S ต่างๆ.....	89
4.19	กับการชะละลายของ Cu ที่ L/S ต่างๆ .....	90
4.20	กับการชะละลายของ Fe ที่ L/S ต่างๆ.....	91
4.21	กับการชะละลายของ Mn ที่ L/S ต่างๆ.....	92
4.22	กับการชะละลายของ Ni ที่ L/S ต่างๆ .....	93
4.23	กับการชะละลายของ Pb ที่ L/S ต่างๆ .....	94
4.24	กับการชะละลายของ Sr ที่ L/S ต่างๆ .....	95
4.25	กับการชะละลายของ V ที่ L/S ต่างๆ.....	96
4.26	กับการชะละลายของ Zn ที่ L/S ต่างๆ.....	97
4.27	ภาพรวมการชะละลายของ Al เมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่ม.....	100
4.28	ภาพรวมการชะละลายของ B เมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่ม.....	101
4.29	ภาพรวมการชะละลายของ Ba เมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่ม .....	102
4.30	ภาพรวมการชะละลายของ Ca เมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่ม .....	103
4.31	ภาพรวมการชะละลายของ Cd เมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่ม .....	104
4.32	ภาพรวมการชะละลายของ Cr เมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่ม .....	105
4.33	ภาพรวมการชะละลายของ Mn เมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่ม.....	106
4.34	ภาพรวมการชะละลายของ Pb เมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่ม .....	107
4.35	พีเอชและความนำไฟฟ้าที่ L/S Ratioต่างกัน	
	ของซีเมนต์เฟสค์วันที่ 22 มกราคม 2548 .....	109
4.36	L/S Ratio กับการชะละลายของโลหะชนิดต่างๆ	
	จากซีเมนต์เฟสค์วันที่ 22 มกราคม 2548 .....	110

4.37 การสะสมความเข้มข้นของ Mn ที่บริเวณการทดสอบการชะละลาย ของตัวอย่างวันที่ (ซ้าย) 22 ตุลาคม 2547 และ (ขวา) 7 กุมภาพันธ์ 2548.....	111
4.38 ความนำไฟฟ้าที่ L/S ต่างๆของ (ซ้าย) 22 ตุลาคม 2547 และ (ขวา) 7 กุมภาพันธ์ 2548.....	111
4.39 การชะละลายของ V ในระบบเปิดซึ่งเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง (ซ้าย) 22 ตุลาคม 2547 (ขวา) 6 มกราคม 2548 .....	112
4.40 ภาพรวมพีเอชจากการทดสอบการชะละลายของธาตุต่างๆ .....	113
4.41 การชะละลายของ Al ในน้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และฝนกรดสังเคราะห์ .....	114
4.42 การชะละลายของ B ในน้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และฝนกรดสังเคราะห์ .....	115
4.43 การชะละลายของ Ba ในน้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และฝนกรดสังเคราะห์ .....	116
4.44 การชะละลายของ Be ในน้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และฝนกรดสังเคราะห์ .....	117
4.45 การชะละลายของ Ca ในน้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และฝนกรดสังเคราะห์ .....	118
4.46 การชะละลายของ Cr ในน้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และฝนกรดสังเคราะห์.....	119
4.47 การชะละลายของ Mn ในน้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และฝนกรดสังเคราะห์ .....	120
4.48 การชะละลายของ Sr ในน้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และฝนกรดสังเคราะห์ .....	121
4.49 การชะละลายของ Zn ในน้ำปราศจากไอออน น้ำประปา และฝนกรดสังเคราะห์ .....	122
4.50 ความแตกต่างระหว่างการทดสอบแบบเปิดฝาและปิดฝาของตัวอย่าง วันที่ 22 ตุลาคม 2547 (บน) และตัวอย่างวันที่ 22 มกราคม 2548 (ล่าง).....	124
4.51 ผลการวิเคราะห์ซีเมนต์เฟสดีที่ผ่านการชะละลายด้วยฝนกรดสังเคราะห์ชนิดเปิดฝา .....	124
4.52 ตัวอย่างภาพที่มีการแพร่เป็นตัวควบคุมการชะละลายอย่างสมบูรณ์ตลอดการทดสอบ.....	126
4.53 การชะละลายสะสมของ Al ที่เวลาต่างๆ เทียบกับเส้นความชัน $rc = 0.5$ .....	127
4.54 การชะละลายสะสมของ Ba ที่เวลาต่างๆ เทียบกับเส้นความชัน $rc = 0.5$ .....	128
4.55 การชะละลายสะสมของ Ca ที่เวลาต่างๆ เทียบกับเส้นความชัน $rc = 0.5$ .....	129
4.56 การชะละลายสะสมของ Cr ที่เวลาต่างๆ เทียบกับเส้นความชัน $rc = 0.5$ .....	130
4.57 การชะละลายสะสมของ Mn ที่เวลาต่างๆ เทียบกับเส้นความชัน $rc = 0.5$ .....	131
4.58 การชะละลายสะสมของ Sr ที่เวลาต่างๆ เทียบกับเส้นความชัน $rc = 0.5$ .....	132
4.59 การชะละลายสะสมของ Zn ที่เวลาต่างๆ เทียบกับเส้นความชัน $rc = 0.5$ .....	133
4.60 ผล XRD แสดงสารประกอบหลักของซีเมนต์เฟสดีวันต่างๆ ก่อนการชะละลาย.....	135
4.61 ผล XRD เปรียบเทียบปริมาณ $Ca(OH)_2$ ก่อน และ หลังการทดสอบการชะละลาย .....	136
4.62 ผล XRD แสดง $CaCO_3$ ที่เกิดขึ้นในสารชะละลายทั้ง 3 ชนิด ภายหลังการทดสอบ .....	137

4.63	ผล XRD เปรียบเทียบปริมาณ $\text{CaCO}_3$ ของการทดสอบชนิดปิดฝาและเปิดฝา.....	138
4.64	ผลการวิเคราะห์ตะกอนที่เกิดขึ้นในสารชะละลายภายหลังการทดสอบ.....	139
4.65	รูปแบบสารประกอบของ $\text{C}_3\text{S}$ $\text{C}_2\text{S}$ $\text{C}_3\text{A}$ และ $\text{C}_4\text{AF}$ จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง FT-IR .....	140
4.66	ภาพรวมผลที่ได้จากการวิเคราะห์ซีเมนต์เฟสดีซึ่งผ่านการชะละลายด้วยเครื่อง FT-IR .....	141
4.67	ภาพรวมผลการวิเคราะห์สารประกอบในซีเมนต์เฟสดีด้วยเครื่อง FT-IR ภายหลังการทดสอบการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน.....	142
4.68	ภาพรวมผลการวิเคราะห์สารประกอบในซีเมนต์เฟสดีด้วยเครื่อง FT-IR ภายหลังการทดสอบการชะละลายด้วยน้ำประปา .....	142
4.69	ภาพรวมผลการวิเคราะห์สารประกอบในซีเมนต์เฟสดีด้วยเครื่อง FT-IR ภายหลังการทดสอบการชะละลายด้วยน้ำฝนล้างคราห์ชนิดปิดฝา .....	143
4.70	ภาพรวมผลการวิเคราะห์สารประกอบในซีเมนต์เฟสดีด้วยเครื่อง FT-IR ภายหลังการทดสอบการชะละลายด้วยน้ำฝนล้างคราห์ชนิดเปิดฝา .....	143
4.71	ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบจากตะกอนที่เกิดจากการทดสอบการชะละลายเทียบกับมาตรฐานพันธะของสาร $\text{CaCO}_3$ ด้วยเครื่อง FT-IR .....	144
4.72	ภาพรวมผลการวิเคราะห์สารประกอบของตะกอนที่เกิดขึ้นในสารชะละลายต่างๆ ภายหลังการทดสอบการชะละลาย.....	144