

การชะละลายระยะยาวของโลหะหนักในมอร์ต้าที่ทำด้วยปูนซีเมนต์  
จากกระบวนการเผาไหม้ที่มีกากอุตสาหกรรมปนโลหะหนัก



นางสาวธัญชนก ภารกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LONG – TERM LEACHING OF HEAVY METALS IN MORTARS MADE WITH  
CEMENT FROM CO – PROCESSING OF HAZARDOUS INDUSTRIAL SLUDGE  
CONTAINING HEAVY METALS



Miss Tananchanok Parakul

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
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 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การชะละลายระยะยาวของโลหะหนักในมอร์ต้าที่ทำด้วย  
ปูนซีเมนต์จากกระบวนการเผาไหม้ที่มีกากอุตสาหกรรม  
ปนโลหะหนัก

โดย

นางสาวธนัญชนก ภารกุล


สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

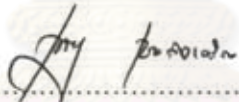
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชกรกิจ

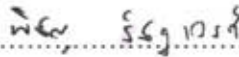
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชวกิ่งเจริญ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชกรกิจ)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์)

ธนัญชนก การกุล : การชะละลายระยะยาวของโลหะหนักในมอร์ต้าที่ทำด้วยปูนซีเมนต์จากกระบวนการเผาไหม้ที่มีกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนัก. (LONG – TERM LEACHING OF HEAVY METALS IN MORTARS MADE WITH CEMENT FROM CO – PROCESSING OF HAZARDOUS INDUSTRIAL SLUDGE CONTAINING HEAVY METALS)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. มนัสกร ราชกรกิจ, 169 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับผลการชะละลายระยะยาวของโลหะหนักห้าชนิด คือ โครเมียม แคลเมียม ทองแดง เหล็กและนิกเกิล ในก้อนมอร์ต้าที่ทำด้วยปูนซีเมนต์จากการเผาไหม้กากตะกอนอุตสาหกรรมโดยการสังเคราะห์ด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูงในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 1,400 และ 1,450 องศาเซลเซียส เวลา 30, 60 และ 75 นาที การแทนที่ปริมาณของกากตะกอนอุตสาหกรรมใช้ที่ร้อยละ 0, 1 และ 2 ของวัตถุดิบทั้งหมด ทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน มอก. 15-2514 ในการทดสอบการชะละลายระยะยาวประยุกต์ใช้การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐาน EA NEN 7375: 2004 และใช้น้ำสกัด 3 ชนิด ได้แก่ น้ำปราศจากไอออน (DI) น้ำฝนกรดสังเคราะห์ ( $H_2SO_4:HNO_3 = 80:20$ ) และน้ำสกัด TCLP (มาตรฐาน US EPA SW-846 Method 1311) ระยะเวลาในการทำการทดสอบการชะละลาย ได้แก่ 0.25, 1, 2.25, 4, 9, 16, 36 และ 64 วัน

ผลการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่กากตะกอนอุตสาหกรรม อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม คือ 1,400 องศาเซลเซียส 60 นาที ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน มีค่าผ่านมาตรฐาน และมอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอนจะมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อปริมาณตะกอนเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบการชะละลายตามมาตรฐาน EA NEN 7375: 2004 ที่น้ำปราศจากไอออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์มีการชะละลายของโลหะหนักไม่เกินมาตรฐานน้ำประปา ส่วนน้ำสกัด TCLP มีปริมาณโลหะหนักชะละลายออกมาเกินมาตรฐานน้ำประปา นอกจากนี้การทดลองแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการชะละลายของโลหะหนักว่ามีความแตกต่างกันในน้ำสกัดแต่ละชนิด และมีกลไกการชะละลายมากกว่าหนึ่งกลไกในช่วงเวลาการทดสอบ และน้ำสกัด TCLP มีประสิทธิภาพในการชะละลายมากกว่าน้ำฝนกรดสังเคราะห์

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนิสิต ชานัญชนก การกุล

ลายมือชื่อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลายมือชื่อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์



# # 4970342021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : CO - PROCESSING / ALTERNATIVE FUELS AND RAW MATERIALS /  
HAZARDOUS INDUSTRIAL SLUDGE

TANANCHANOK PARAKUL: LONG – TERM LEACHING OF HEAVY  
METALS IN MORTARS MADE WITH CEMENT FROM CO – PROCESSING  
OF HAZARDOUS INDUSTRIAL SLUDGE CONTAINING HEAVY METALS.  
THESIS ADVISOR: ASST. PROF. MANASKORN RACHAKORNKIJ, Ph.D.,  
169 pp.

This research studied long-term leaching potential of five heavy metals; namely, Cr, Cd, Cu, Ni, and Zn, in mortar samples made of co-processed cement synthesized in a laboratory high-temperature furnace. Temperature profiles for clinker production in the furnace were used 1,400°C and 1,450°C at 30, 60 and 75 minutes. Substitution by hazardous industrial sludge was varied from 0%, 1% and 2% of total raw material. Compressive Strength was determined according to Thai Industrial Standards and compared against. The long-term leaching test adapted from EA NEN 7375:2004 employed three leachants, including deionized water (DI), synthetic acid rain ( $H_2SO_4:HNO_3 = 80:20$ ), and TCLP solution (US EPA SW-846 Method 1311). The leachant replenishing time was 0.25, 1, 2.25, 4, 9, 16, 36 and 64 days.

The result showed that suitable temperature and time for clinker synthesized with hazardous industrial sludges was 1,400°C and 60 minutes. Compressive strengths at mortar samples after 7 and 28 days of curing were greater than standard. As replacement percentage increases, the compressive strength of mortars reduced. Results of EA NEN 7375 leaching test showed that the concentrations of heavy metals in DI and synthetic acid rain were lower than Thai drinking water standards with an exception of TCLP. Moreover, the results demonstrated that leaching behavior of heavy metals in three leachants are different and there were more than one leaching mechanisms. Leaching potential in TCLP solution was found to be higher than that of the synthetic acid rain.

Department : Environmental Engineering ..... Student's Signature Tananchanok Parakul  
Field of Study : Environmental Engineering ..... Advisor's Signature [Signature]  
Academic Year : ..... 2008 .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ อาจารย์  
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา กับผู้วิจัยมาตลอด

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้ คำชี้แนะ  
และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่มอบทุนอุดหนุนสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้ ซึ่ง  
ทำให้งานวิจัยสามารถดำเนินไปได้อย่างราบรื่น

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการของเสียดันทราย ศูนย์  
เครือข่ายคณะวิศวกรรมศาสตร์ โครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียดันทราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือที่  
ห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณครอบครัว ที่คอยสนับสนุนในทุกเรื่องและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาตลอด

ขอขอบคุณ คุณธารทิพย์ พันธุ์เมธาฤทธิ์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้ความรู้และ  
ความสะดวกในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ปูนซีเมนต์.....	4
2.1.1 ความหมายของปูนซีเมนต์.....	4
2.1.2 วัตถุดิบ.....	4
2.1.3 กรรมวิธีในการผลิตปูนซีเมนต์.....	5
2.1.4 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	7
2.1.5 อิทธิพลของสารประกอบหลักต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์.....	8
2.1.5.1 ไตรแคลเซียมซัลเฟต.....	9
2.1.5.2 ไดแคลเซียมซัลเฟต.....	9
2.1.5.3 ไตรแคลเซียมอลูมิเนต.....	9
2.1.5.4 เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์.....	9
2.1.6 อิทธิพลของสารประกอบรองต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์.....	10
2.1.6.1 แมกนีเซียมออกไซด์.....	10
2.1.6.2 ปูนขาวอิสระหรือ Free Lime.....	11
2.1.6.3 ยิปซัม.....	11
2.1.6.4 ออกไซด์ของอัลคาไล.....	11

2.1.6.5	ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์.....	12
2.1.7	ค่าโมดูลัสของปูนเม็ด.....	12
2.1.7.1	ค่าแฟกเตอร์การอิมตัวด้วยเนื้อปูน.....	12
2.1.7.2	ค่าโมดูลัสซิลิกา.....	12
2.1.7.3	ค่าโมดูลัสอลูมินา.....	13
2.1.8	ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ.....	13
2.1.8.1	ปฏิกริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์.....	13
2.1.8.2	ปฏิกริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์.....	17
2.2	กากของเสียอุตสาหกรรม.....	18
2.2.1	ความหมายของกากของเสียอุตสาหกรรม.....	18
2.2.2	การกำหนดรหัสของชนิดและประเภทของสิ่งปฏิกลหรือ วัสดุที่ไม่ใช่แล้ว.....	18
2.2.3	ลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปฏิกลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว ที่เป็นของเสียอันตราย.....	21
2.2.3.1	สิ่งปฏิกลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารไวไฟ.....	21
2.2.3.2	สิ่งปฏิกลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารกัดกร่อน.....	22
2.2.3.3	สิ่งปฏิกลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารที่เกิด ปฏิกริยาได้ง่าย.....	22
2.2.3.4	สิ่งปฏิกลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารพิษ.....	23
2.2.3.5	สิ่งปฏิกลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่มีองค์ประกอบของ สิ่งเจือปน.....	23
2.2.4	การนำกากของเสียอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิง ทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์.....	24
2.3	การชะละลาย.....	30
2.3.1	กระบวนการทางเคมี.....	31
2.3.1.1	กลไกทางเคมีพื้นฐาน.....	31
2.3.1.2	ค่าความเป็นกรดต่าง.....	31
2.3.1.3	รูปแบบทางเคมีของสารประกอบในวัตถุ.....	33
2.3.1.4	สารประกอบทั้งหมดของวัตถุ.....	34
2.3.1.5	การรับ-จ่ายอิเล็กตรอน.....	34



2.3.1.6	บัพเฟอร์ของกรด-ด่าง.....	34
2.3.1.7	สารอินทรีย์และสารคาร์บอนอินทรีย์ละลาย.....	34
2.3.1.8	ส่วนประกอบของของเหลวรอบวัตถุและ ความแรงไอออน.....	34
2.3.1.9	อุณหภูมิ.....	35
2.3.1.10	เวลา.....	35
2.3.2	อิทธิพลของปัจจัยทางกายภาพต่อการเคลื่อนที่ของสารประกอบ จากวัตถุไปสู่ ของเหลวรอบวัตถุ.....	35
2.3.2.1	กลไกการเคลื่อนที่พื้นฐาน.....	35
2.3.2.2	วัสดุที่เป็นเม็ดเล็กๆ และวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง.....	36
2.3.2.3	ขนาดของอนุภาค.....	36
2.3.2.4	ความพรุน.....	36
2.3.2.5	ความสามารถในการซึมผ่าน.....	36
2.3.2.6	ความคดเคี้ยว.....	37
2.3.2.7	ขนาดและรูปร่างของวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง.....	37
2.3.2.8	ความไวต่อการกักร้อน.....	37
2.3.2.9	การแทรกซอนของเกลือ.....	37
2.3.3	ปัจจัยภายนอก.....	38
2.3.4	สารอินทรีย์จากโครงสร้างของวัตถุ.....	38
2.4	การทดสอบการชะละลาย.....	39
2.4.1	การทดสอบแบบ Static extraction.....	39
2.4.1.1	การทดสอบแบบเขย่า.....	40
2.4.1.2	การทดสอบแบบไม่เขย่า.....	40
2.4.1.3	การทดสอบด้วยการสกัดทางเคมี.....	40
2.4.1.4	การทดสอบแบบสร้างความเข้มข้น.....	41
2.4.2	การทดสอบแบบ Dynamic Extraction.....	41
2.4.2.1	การทดสอบแบบ Serial batch.....	41
2.4.2.2	การทดสอบแบบ Flow-around.....	41
2.4.2.3	การทดสอบแบบ Flow-through.....	42
2.4.2.4	การทดสอบแบบ Soxhlet.....	42

2.5	การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของ EA NEN 7375.....	42
2.6	มาตรฐานสำหรับน้ำดื่ม.....	43
2.7	ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	44
บทที่ 3	ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	48
3.1	ขั้นตอนการทดลอง.....	48
3.2	ตัวอย่างวัตถุดิบในการผลิตปูน กากตะกอนอุตสาหกรรมและปูนซีเมนต์สำเร็จรูปที่ใช้ในการวิจัย.....	48
3.2.1	ตัวอย่างวัตถุดิบในการผลิตปูน.....	48
3.2.2	ตัวอย่างกากตะกอนอุตสาหกรรม.....	49
3.2.3	ตัวอย่างปูนซีเมนต์สำเร็จรูปที่ผลิตโดยกระบวนการเผาพร้อม กับกากอุตสาหกรรม.....	49
3.3	เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	49
3.3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	49
3.3.2	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	50
3.3.3	การเตรียมสารเคมี.....	50
3.4	การดำเนินการทดลอง.....	51
3.4.1	ขั้นที่ 1 การวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ใน การสังเคราะห์ปูนซีเมนต์และกากตะกอนอุตสาหกรรม.....	51
3.4.1.1	องค์ประกอบทางเคมี.....	51
3.4.1.2	ชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมด.....	51
3.4.2	ขั้นที่ 2 การหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ ปูนซีเมนต์ที่ใช้กากตะกอนอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและ เชื้อเพลิงทดแทน.....	52
3.4.3	ขั้นที่ 3 ศึกษาลักษณะทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์	52
3.4.3.1	องค์ประกอบทางเคมี.....	52
3.4.3.2	รูปแบบผลึกของสารประกอบ.....	53
3.4.3.3	ชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมด.....	53
3.4.3.4	ปริมาณของสารประกอบ.....	53
3.4.4	ขั้นที่ 4 การหล่อก้อนมอร์ต้าและการทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	54

3.4.5	ขั้นที่ 5 การทดสอบการชะละลายของปูนซีเมนต์ที่ได้จากการ สังเคราะห์และปูนซีเมนต์สำเร็จรูป.....	55
3.4.5.1	การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของ ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องการจัดตั้งปฏิภูม หรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548.....	55
3.4.5.2	การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานการชะละลาย ของ US EPA SW-846 Method 1311.....	56
3.4.5.3	การทดสอบการชะละลายแบบระยะยาว.....	58
บทที่ 4	ผลการวิจัย.....	61
4.1	ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ และกากตะกอนอุตสาหกรรม.....	61
4.1.1	ปริมาณสารประกอบและ โลหะหนักในวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ปูนซีเมนต์.....	61
4.1.2	ความเข้มข้นโลหะหนักในกากตะกอนอุตสาหกรรม.....	62
4.2	ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ กัน.....	63
4.2.1	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์.....	63
4.2.2	การเลือกอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์...	71
4.2.3	การวิเคราะห์รูปแบบผลึกของสารประกอบในปูนเม็ด.....	72
4.2.4	ความเข้มข้นโลหะหนัก.....	73
4.3	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า.....	74
4.4	ผลการทดสอบการชะละลายระยะสั้นของมอร์ต้า.....	75
4.5	ผลการทดสอบการชะละลายระยะยาวของมอร์ต้า.....	75
4.5.1	ภาพรวมของการชะละลาย.....	75
4.5.2	การชะละลายกับมาตรฐานน้ำดื่ม.....	80
4.5.3	การวิเคราะห์กลไกการชะละลาย.....	87
4.5.4	ผลการศึกษารูปแบบทางเคมีของสารละลายในรูพรุน หรือในโพรงของก้อนมอร์ต้า (Pore Water test).....	96
4.5.5	ผลการศึกษาอิทธิพลของพีเอชต่อการละลายของสาร (Acid Neutralization Capacity test).....	102

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	108
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	108
5.2 ข้อเสนอแนะและปัญหาอุปสรรคที่พบในงานวิจัย.....	111
รายการอ้างอิง.....	112
ภาคผนวก.....	115
ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์.....	116
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบการชะละลาย.....	118
ภาคผนวก ค. มาตรฐานการทดสอบการชะละลาย EA NEN 7375.....	142
ภาคผนวก ง. สรุปกลไกการชะละลายของธาตุที่สนใจจากการคำนวณ.....	156
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	169

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สัดส่วนออกไซด์ของธาตุต่างๆ ในปูนเม็ดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	8
2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	8
2.3 คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	10
2.4 ตัวเลขสองหลักแรกที่แสดงถึงประเภทของการประกอบกิจการหรือชนิดของ สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องสิ่งปฏิภูล หรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548) .....	20
2.4 (ต่อ) ตัวเลขสองหลักแรกที่แสดงถึงประเภทของการประกอบกิจการหรือชนิดของ สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องสิ่งปฏิภูล หรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548) .....	21
2.5 ของเสียที่มักนิยมใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์	25
2.6 ปริมาณของโลหะหนักสูงสุดที่มีได้ในวัตถุดิบทดแทนในอุตสาหกรรมผลิต ปูนซีเมนต์.....	27
2.7 ชนิดของของเสียที่ไม่เหมาะสมกับกระบวนการเผาไหม้และเหตุผลที่ไม่อนุญาต ให้นำมาใช้ในกระบวนการเผาไหม้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์.....	28
2.8 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงหลักและเชื้อเพลิงทดแทนที่ใช้ในกระบวนการผลิต ปูนซีเมนต์.....	29
2.9 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการชะละลาย.....	39
2.10 มาตรฐานสำหรับน้ำดื่ม.....	44
3.1 การศึกษาลักษณะทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์และ ภาคตะกอนอุตสาหกรรม.....	52
3.2 การศึกษาลักษณะทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์.....	54
3.3 การหล่อก้อนมอร์ต้าและการทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	55
3.4 ค่าอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง (Liquid/Solid Ratio) ต่างๆ ที่ทำการศึกษา..	58
3.5 การทดสอบการชะละลายระยะยาวของปูนซีเมนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์และ ปูนซีเมนต์สำเร็จรูป.....	60
4.1 ปริมาณสารประกอบและโลหะหนักในวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์.....	61



ตารางที่	หน้า
4.2 ค่าโมดูลัสของวัสดุบดที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับค่าทั่วไปที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์.....	62
4.3 ความเข้มข้นโลหะหนักในกากตะกอนอุตสาหกรรมเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน Total Threshold Limit Concentration (TTLC) .....	63
4.4 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส 30 นาที.....	65
4.5 ค่าโมดูลัสและค่าสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส 30 นาที.....	65
4.6 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส 60 นาที.....	66
4.7 ค่าโมดูลัสและค่าสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส 60 นาที.....	66
4.8 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส 75 นาที.....	67
4.9 ค่าโมดูลัสและค่าสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส 75 นาที.....	67
4.10 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส 30 นาที.....	68
4.11 ค่าโมดูลัสและค่าสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส 30 นาที.....	68
4.12 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส 60 นาที.....	69
4.13 ค่าโมดูลัสและค่าสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส 60 นาที.....	69
4.14 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส 75 นาที.....	70
4.15 ค่าโมดูลัสและค่าสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส 75 นาที.....	70

ตารางที่	หน้า
4.16 ความเข้มข้นโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับ ค่ามาตรฐาน Total Threshold Limit Concentration (TTLC).....	73
4.17 ค่ากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วนต่างๆ ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน เทียบกับมาตรฐาน.....	74
4.18 ปริมาณโลหะหนักจากการทดสอบการชะละลายระยะสั้นของมอร์ต้าเปรียบเทียบ กับค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC).....	75
4.19 ชนิดของธาตุที่มีความเข้มข้นเกินมาตรฐานน้ำดื่ม.....	81
4.20 การประเมินกลไกการชะละลายจากความชันของกราฟ.....	87
4.21 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของแคลเซียมในน้ำปราศจากไอออน.....	88
4.22 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของโครเมียมในน้ำปราศจากไอออน.....	89
4.23 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของทองแดงในน้ำสกัด TCLP.....	90
4.24 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของเหล็กในน้ำสกัด TCLP.....	92
4.25 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของนิกเกิลในน้ำปราศจากไอออน.....	93
4.26 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของนิกเกิลในน้ำฝนกรดสังเคราะห์.....	94
4.27 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของนิกเกิลในน้ำสกัด TCLP.....	95

## สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์.....	6
2.2 การเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ.....	13
2.3 ปัจจัยทางฟิสิกส์-เคมี ที่มีผลต่อการชะละลายของสารมลพิษออกจากวัตถุอ่อนแข็ง.....	30
2.4 รูปแบบการชะละลายของเกลือซึ่งเป็นฟังก์ชันกับพีเอช.....	32
2.5 รูปแบบการชะละลายของไอออนประจุบวกซึ่งเป็นฟังก์ชันกับพีเอช.....	32
2.6 รูปแบบการชะละลายของไอออนประจุลบซึ่งเป็นฟังก์ชันกับพีเอช.....	33
2.7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการชะละลาย.....	33
4.1 ผลการวิเคราะห์รูปแบบผลึกในปูนซีเมนต์.....	72
(ก) ปูนเม็ดที่สังเคราะห์โดยไม่มีการแทนที่ตะกอน.....	72
(ข) ปูนเม็ดที่สังเคราะห์โดยการแทนที่ตะกอน 1%.....	72
(ค) ปูนเม็ดที่สังเคราะห์โดยการแทนที่ตะกอน 2%.....	72
(ง) ปูนซีเมนต์ในโรงงานอุตสาหกรรม.....	72
4.2 กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่อัตราส่วนต่างๆ ที่อายุบ่ม 1, 7 และ 28 วัน.....	74
4.3 ภาพรวมการชะละลายของแคลเซียมในสารชะละลายชนิดต่างๆ.....	77
4.4 ภาพรวมการชะละลายของโครเมียมในสารชะละลายชนิดต่างๆ.....	77
4.5 ภาพรวมการชะละลายของทองแดงในสารชะละลายชนิดต่างๆ.....	78
4.6 ภาพรวมการชะละลายของเหล็กในสารชะละลายชนิดต่างๆ.....	78
4.7 ภาพรวมการชะละลายของนิกเกิลในสารชะละลายชนิดต่างๆ.....	79
4.8 การชะละลายของแคลเซียมในมอร์ต้าที่ทำจากปูนสำเร็จรูปเทียบกับมาตรฐาน.....	82
4.9 การชะละลายของโครเมียมในมอร์ต้าที่ทำจากปูนสำเร็จรูปเทียบกับมาตรฐาน.....	82
4.10 การชะละลายของเหล็กในมอร์ต้าที่ทำจากปูนสำเร็จรูปเทียบกับมาตรฐาน.....	82
4.11 การชะละลายของนิกเกิลในมอร์ต้าที่ทำจากปูนสำเร็จรูปเทียบกับมาตรฐาน.....	83
4.12 การชะละลายของแคลเซียมในมอร์ต้าที่ไม่มีการแทนที่ตะกอนเทียบกับมาตรฐาน.....	83
4.13 การชะละลายของโครเมียมในมอร์ต้าที่ไม่มีการแทนที่ตะกอนเทียบกับมาตรฐาน.....	83
4.14 การชะละลายของเหล็กในมอร์ต้าที่ไม่มีการแทนที่ตะกอนเทียบกับมาตรฐาน.....	84
4.15 การชะละลายของนิกเกิลในมอร์ต้าที่ไม่มีการแทนที่ตะกอนเทียบกับมาตรฐาน.....	84
4.16 การชะละลายของแคลเซียมในมอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 1% เทียบกับมาตรฐาน.....	84

รูปที่	หน้า
4.17 การชะละลายของโครเมียมในมอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 1% เทียบกับมาตรฐาน.....	85
4.18 การชะละลายของเหล็กในมอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 1% เทียบกับมาตรฐาน.....	85
4.19 การชะละลายของนิกเกิลในมอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 1% เทียบกับมาตรฐาน.....	85
4.20 การชะละลายของแคดเมียมในมอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 2% เทียบกับมาตรฐาน.....	86
4.21 การชะละลายของโครเมียมในมอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 2% เทียบกับมาตรฐาน.....	86
4.22 การชะละลายของเหล็กในมอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 2% เทียบกับมาตรฐาน.....	86
4.23 การชะละลายของนิกเกิลในมอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 2% เทียบกับมาตรฐาน.....	87
4.24 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของแคดเมียมในน้ำปราศจากไอออน.....	88
4.25 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของโครเมียมในน้ำปราศจากไอออน.....	89
4.26 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของทองแดงในน้ำสกัด TCLP.....	91
4.27 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของเหล็กในน้ำสกัด TCLP.....	92
4.28 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของนิกเกิลในน้ำปราศจากไอออน.....	93
4.29 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของนิกเกิลในน้ำฝนกรดสังเคราะห์.....	95
4.30 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของนิกเกิลในน้ำสกัด TCLP.....	96
4.31 ความสามารถในการชะละลายของแคดเมียมกับอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อ ของแข็ง.....	97
(ก) มอร์ดำที่ทำจากปูนสำเร็จรูป.....	97
(ข) มอร์ดำที่ไม่มีมีการแทนที่ตะกอน.....	97
(ค) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 1%.....	97
(ง) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 2 %.....	97
4.32 ความสามารถในการชะละลายของโครเมียมกับอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อ ของแข็ง.....	98
(ก) มอร์ดำที่ทำจากปูนสำเร็จรูป.....	98
(ข) มอร์ดำที่ไม่มีมีการแทนที่ตะกอน.....	98
(ค) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 1%.....	98
(ง) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 2 %.....	98
4.33 ความสามารถในการชะละลายของทองแดงกับอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อ ของแข็ง.....	99
(ก) มอร์ดำที่ทำจากปูนสำเร็จรูป.....	99

รูปที่	หน้า
(ข) มอร์ดำที่ไม่มีการแทนที่ตะกอน.....	99
(ค) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 1%.....	99
(ง) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 2 %.....	99
4.34 ความสามารถในการชะละลายของเหล็กกับอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อ ของแข็ง.....	100
(ก) มอร์ดำที่ทำจากปูนสำเร็จรูป.....	100
(ข) มอร์ดำที่ไม่มีการแทนที่ตะกอน.....	100
(ค) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 1%.....	100
(ง) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 2 %.....	100
4.35 ความสามารถในการชะละลายของนิกเกิลกับอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อ ของแข็ง.....	101
(ก) มอร์ดำที่ทำจากปูนสำเร็จรูป.....	101
(ข) มอร์ดำที่ไม่มีการแทนที่ตะกอน.....	101
(ค) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 1%.....	101
(ง) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 2 %.....	101
4.36 ค่าพีเอชที่มีผลต่อการชะละลายของแคลเซียม.....	102
(ก) มอร์ดำที่ทำจากปูนสำเร็จรูป.....	102
(ข) มอร์ดำที่ไม่มีการแทนที่ตะกอน.....	102
(ค) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 1%.....	102
(ง) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 2 %.....	102
4.37 ค่าพีเอชที่มีผลต่อการชะละลายของโครเมียม.....	103
(ก) มอร์ดำที่ทำจากปูนสำเร็จรูป.....	103
(ข) มอร์ดำที่ไม่มีการแทนที่ตะกอน.....	103
(ค) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 1%.....	103
(ง) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 2 %.....	103
4.38 ค่าพีเอชที่มีผลต่อการชะละลายของทองแดง.....	104
(ก) มอร์ดำที่ทำจากปูนสำเร็จรูป.....	104
(ข) มอร์ดำที่ไม่มีการแทนที่ตะกอน.....	104
(ค) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 1%.....	104



รูปที่	หน้า
(ง) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 2 %.....	104
4.39 ค่าพีเอชที่มีผลต่อการชะละลายของเหล็ก.....	105
(ก) มอร์ดำที่ทำจากปูนสำเร็จรูป.....	105
(ข) มอร์ดำที่ไม่มีการแทนที่ตะกอน.....	105
(ค) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 1%.....	105
(ง) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 2 %.....	105
4.40 ค่าพีเอชที่มีผลต่อการชะละลายของนิกเกิล.....	106
(ก) มอร์ดำที่ทำจากปูนสำเร็จรูป.....	106
(ข) มอร์ดำที่ไม่มีการแทนที่ตะกอน.....	106
(ค) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 1%.....	106
(ง) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 2 %.....	106
4.41 ค่าพีเอชที่มีผลต่อการชะละลายของธาตุ.....	107

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

ปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดของเสียอันตรายอยู่มากมาย และมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้นอีกในอนาคต โดยส่วนใหญ่กระบวนการผลิตนั้นจะก่อให้เกิดของเสียที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ เช่น ปรอท (Hg) ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) เป็นต้น ซึ่งกากของเสียอันตรายเหล่านี้มีความเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โดยการจัดการของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นในปัจจุบันที่นิยม ได้แก่ การทำให้เสถียรร่วมกับการหล่อแข็ง ก่อนส่งไปยังหลุมฝังกลบของเสียอันตราย แต่เนื่องจากอุตสาหกรรมในประเทศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และของเสียก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นตลอดเวลา และหลุมฝังกลบขณะนั้น มีพื้นที่ค่อนข้างจำกัด อีกทั้งค่าใช้จ่ายในการนำไปกำจัดมีราคาสูงมาก จึงมีการคิดค้นวิธีในการกำจัดของเสียอันตรายที่มีประสิทธิภาพกว่าวิธีเดิม

เมื่อไม่นานมานี้ ได้มีการจัดการกากอุตสาหกรรมโดยวิธีการนำไปใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ โดยเป็นการใช้ประโยชน์จากกากของเสียอันตรายในรูปของวัตถุขี้หรือเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ เนื่องจากกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภท มีปริมาณของซิลิกา แคลเซียมและอลูมินาอยู่มาก ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของซีเมนต์ และกระบวนการเผาในการผลิตปูนซีเมนต์ ใช้อุณหภูมิสูง และระยะเวลาในการเผายาวนานเพียงพอที่จะทำให้องค์ประกอบที่เป็นสารอินทรีย์ถูกทำลายอย่างสมบูรณ์ แต่โลหะหนักที่ไม่สามารถถูกทำลายโดยการเผาได้ ก็มีแนวโน้มว่าจะไปรวมตัวอยู่ในรูปของฝุ่นปูนซีเมนต์ หรือไปรวมตัวกันอยู่ในปูนเม็ด

ดังนั้น กระบวนการเผาของปูนซีเมนต์ที่ใช้กากอุตสาหกรรม เป็นวัตถุขี้และเชื้อเพลิงทดแทน จึงถือได้ว่าเป็นการจัดการของเสียอันตรายขั้นสุดท้าย โดยไม่ต้องมีการปรับเสถียรและการหล่อแข็ง อีกทั้งไม่ต้องนำไปฝังกลบ เป็นการลดพื้นที่ฝังกลบที่มีอยู่อย่างจำกัด สามารถประหยัดวัตถุขี้และค่าน้ำมันเชื้อเพลิง เป็นการช่วยรักษาและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง

ถึงแม้ว่าการนำกากอุตสาหกรรมมาเผาในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะมีประโยชน์มากมาย แต่ก็ยังมีข้อสงสัยเกี่ยวกับความเสี่ยงทางด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ในการนำปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้มาใช้งานจริง ดังนั้นจึงได้มีการวิจัยเพื่อตอบคำถามที่ว่า โลหะหนักมีการ

กระจายตัวอยู่ในเม็ดปูนและฝุ่นปูนอย่างไร และโลหะหนักที่มีอยู่มีความเสถียรหรือไม่ โลหะหนักจะส่งผลต่อการนำปูนซีเมนต์ไปใช้งานจริงหรือไม่ อย่างไร โดยในการวิจัยนี้จะเน้นการนำปูนซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการเผาร่วมกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักมาทดสอบการชะละลายระยะยาว ในสภาพแวดล้อมที่มีความเป็นกรด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์ที่มีกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน
2. ศึกษาพฤติกรรมของการชะละลายแบบระยะยาวของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในปูนซีเมนต์ที่มีกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในสภาวะที่มีความเป็นกรด
3. เปรียบเทียบปริมาณของโลหะหนักที่ชะละลายออกมาจากปูนซีเมนต์กับมาตรฐานน้ำดื่มเพื่อให้เข้าใจถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้จากการนำปูนซีเมนต์ที่ผลิตโดยมีกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนไปใช้งาน

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในการศึกษากลไกการชะละลายของโลหะหนักจากโครงสร้างซึ่งทำจากปูนซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการเผาร่วมกากตะกอนอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน ในสภาวะที่เป็นกรด ซึ่งมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

1. ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นวัตถุดิบที่ในการผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) โรงงานสระบุรี ตัวอย่างดังกล่าวจะนำมาทำการทดลองโดยทำการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์โดยการเผาพร้อมกับกากตะกอนอุตสาหกรรมในเตาเผาระดับห้องปฏิบัติการ และนำมาหาปริมาณของโลหะหนักที่ชะละลายออกมาที่เวลาต่างๆ
2. การทดสอบการชะละลายนั้น กระทำโดยการจำลองสภาพอัตราส่วนระหว่างสารชะละลายต่อพื้นที่ผิวสัมผัสจริง (Liquid-to-surface ratio) มาสร้างเป็นสภาพการชะละลายจำลอง

3. กากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักที่ใช้ในการทดสอบเป็นกากตะกอนได้มาจากกระบวนการเจียร กิ่ง ชั้ในงานแผ่นโลหะในอุตสาหกรรมทำชิ้นส่วนและขึ้นรูปโลหะ มีรหัสของเสียคือ 120118 HA
4. สารละลายที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย น้ำปราศจากไอออน (Deionized water) สารละลายฝนกรดตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540 เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว และน้ำสกัด TCLP เตรียมตามมาตรฐานการชะละลายของ US EPA SW-846 Method 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure หรือ TCLP)
5. ระยะเวลาในการทดสอบนั้นกระทำตามวิธีการทดสอบของ EA NEN 7375:2004 (Determination of the leaching of the inorganic components with the diffusion test) (EA NEN 7375, 2004)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์ที่มีกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในเตาเผาในระดับห้องปฏิบัติการ
2. ทราบการเปลี่ยนแปลงในระดับ โครงสร้างของปูนซีเมนต์ที่ระยะเวลาการชะละลายต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาสาเหตุที่ทำให้เกิดการชะละลายของโลหะหนักชนิดนั้นๆ
3. เป็นแนวทางในการคาดการณ์ผลการชะละลายในระยะยาวที่จะเกิดขึ้นได้
4. ทราบปริมาณและชนิดของโลหะหนักที่ชะละลายออกมา และระดับความปนเปื้อนเมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำดื่ม เพื่อให้เข้าใจถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้จากการใช้ปูนซีเมนต์ที่มีกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปูนซีเมนต์

##### 2.1.1 ความหมายของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ดที่ได้จากการเผาวัตถุดิบต่างๆ (หินปูนหรือดินปูนขาว กับดินเหนียวหรือดินดาน) จนรวมตัวกันสุกพอดี โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญทางเคมีได้แก่ แคลเซียม และอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวในที่นี่จะหมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ โดยการทำปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ไฮเดรชัน (Hydration) อัตราการก่อและแข็งตัวตลอดจนความร้อนที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับความละเอียดและส่วนประกอบของผงปูน ความแข็งแรงและความทนทานเมื่อแข็งตัว ขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสม และการให้ความชื้นในขณะที่เริ่มแข็งตัว

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรม เมื่อนำไปผสมรวมกับทรายและน้ำจะได้เป็นมอร์ตาร์ (Mortar) ซึ่งนำไปใช้เป็นปูนก่อสำหรับงานก่ออิฐ หรือปูนฉาบสำหรับงานฉาบ เป็นต้น หากนำไปผสมรวมกับหิน กรวด ทราย และน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะมีความแข็งแรงและทนทานคล้ายหิน ตัวอย่างสิ่งก่อสร้างคอนกรีต ได้แก่ ฐานราก คอม่อ เขื่อน พื้น และถนน ซึ่งเมื่อเสริมด้วยเหล็กเส้นจะเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับใช้ในงานพื้น หลังคา สะพาน อุโมงค์และอื่นๆ (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

##### 2.1.2 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่สำคัญซึ่งใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์อาจจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ประเภทที่ให้ธาตุแคลเซียมเป็นส่วนใหญ่ (Calcareous materials) ซึ่งอยู่ในรูปของ  $\text{CaCO}_3$  ได้แก่ หินปูน (Limestone) ดินสอพอง หรือชอล์ก (Chalk) ดินปูนขาว (Marl)
2. ประเภทที่ให้ออกไซด์ของธาตุซิลิกอน ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมิเนียม ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นส่วนใหญ่ (Argillaceous materials) ได้แก่ ดินดานหรือหินเชล (Shale) ดินดำหรือดินเหนียว (Clay) หินชนวน (Slate)

ในบางครั้ง วัตถุดิบทั้งสองประเภทนี้อาจมีปริมาณของธาตุที่ต้องการน้อยไป หรือมีปริมาณของธาตุอื่นมากเกินไปจึงจำเป็นต้องปรับส่วนผสมให้พอเหมาะเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มี



คุณสมบัติตามต้องการ เช่น การเพิ่มปริมาณแร่เหล็ก (Iron ore) ซึ่งมีอยู่มากในสิลาแลง (Laterite) เมื่อหินเชลหรือดินเหนียวที่จะใช้มีปริมาณของแร่เหล็กต่ำ หรือเลือกใช้วัสดุดิบ ที่มีแร่เหล็กน้อยลง เพื่อผลิตปูนซีเมนต์ขาว นอกจากนี้ยังมีการเติมยิปซัม (Gypsum) เพื่อใช้เป็นสารหน่วงการก่อตัวโดยผสมรวมกับปูนเม็ดที่ได้จากเตาเผา เป็นต้น (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

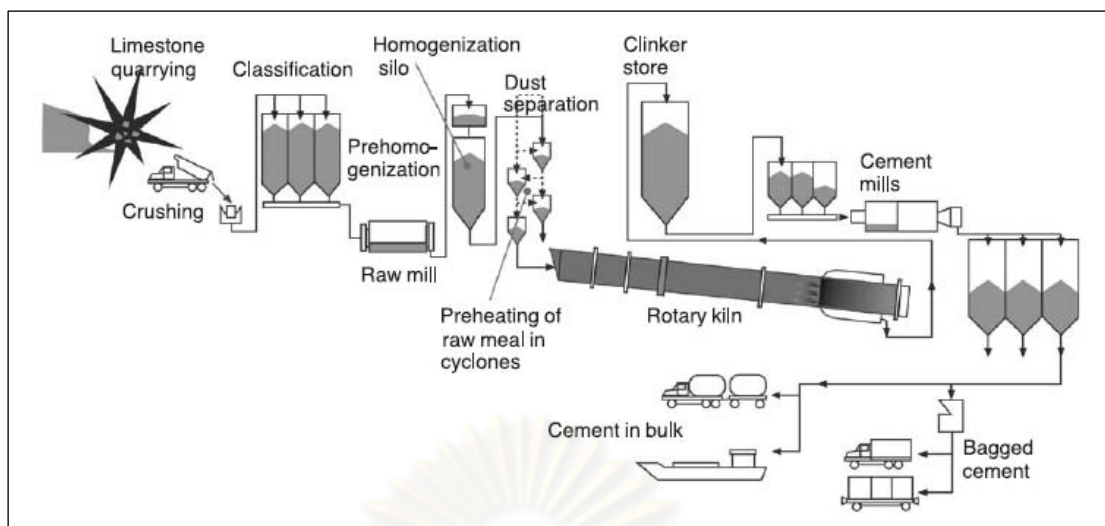
### 2.1.3 กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ (Manufacture of Portland cement)

กรรมวิธีในการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งได้เป็นสองแบบ คือ การผลิตแบบแห้ง (Dry process) และการผลิตแบบเปียก (Wet process) ซึ่งความแตกต่างของกระบวนการทั้งสองคือ ในกระบวนการผลิตแบบแห้ง วัสดุดิบ ได้แก่ หินปูน ดินดาน และแร่เหล็ก จะถูกทำให้แห้งก่อนการบด และการผสม ในปัจจุบันวิธีการผลิตปูนซีเมนต์โดยกระบวนการแบบแห้งเป็นระบบที่ทันสมัยและใช้เชื้อเพลิงในการผลิตน้อยกว่าการผลิตแบบอื่น รวมทั้งไม่ใช้น้ำในกระบวนการผลิตเลย ยกเว้นเพียงน้ำหล่อเย็นในเครื่องจักร ส่วนในกระบวนการผลิตแบบเปียก วัสดุดิบ ได้แก่ ดินสอพอง ดินเหนียว จะได้รับการบดและการผสมเปียก

1. กระบวนการผลิตแบบเปียก วัสดุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนจะถูกนำไปผสมกับน้ำตามสัดส่วนที่กำหนด โดยปกติ ถ้าใช้ดินเหนียวและหินชอล์กจะใช้อัตราส่วนวัสดุดิบต่อน้ำประมาณ 1:3 จากนั้นจะบดส่วนผสมให้ละเอียดในหม้อบดละเอียดเปียก จะได้เป็นน้ำโคลนข้น จากนั้นจะนำไปผ่านตะแกรงละเอียดแล้วส่งเข้าเตาเผา วัสดุดิบที่เข้าเตาเผาจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 35 ถึง 50

2. กระบวนการผลิตแบบแห้ง วัสดุดิบที่ระเบิดมาจากเหมืองจะนำมาย่อยให้เล็กลงในเครื่องย่อยขั้นต้น และเครื่องย่อยขั้นที่สองตามลำดับ จากนั้นจึงนำวัสดุไปบดละเอียดในหม้อบดวัสดุดิบ แล้วผสมกันตามสัดส่วนที่ต้องการในไซโลผสมวัสดุดิบ จากนั้นเพิ่มความร้อนของวัสดุดิบด้วยลมร้อนก่อนส่งเข้าเตาเผา

ในกรณีของกระบวนการผลิตแบบกึ่งแห้ง จะนำวัสดุดิบไปทำเป็นเม็ดโดยการเติมน้ำเล็กน้อยและผ่านเข้าไปในเครื่องทำเม็ด วัสดุดิบจะจับกันเป็นก้อนกลมขนาดประมาณ 12 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อทำให้การป้อนวัสดุดิบเข้าสู่เตาเผาสะดวกขึ้น วัสดุดิบจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 12 ดังนั้นเตาเผาของกระบวนการผลิตแบบแห้งและกึ่งแห้งจึงมีขนาดเล็กกว่าเตาเผาในกระบวนการผลิตแบบเปียก รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ (Kääntee และคณะ, 2004)

หลักในการเลือกกระบวนการผลิต จะต้องคำนึงถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบ น้ำที่จะช่วยให้โรงงาน ราคาของเชื้อเพลิง แหล่งกำลังไฟฟ้า วิธีเก็บฝุ่น ตลอดจนความสม่ำเสมอของวัตถุดิบ ก่อนที่จะป้อนเข้าสู่เตาเผา ถ้าวัตถุดิบที่มีอยู่เป็นหินซีเมนต์ และหินปูนซึ่งแห้งตามธรรมชาติหรือมีความชื้นอยู่น้อย ก็อาจทำให้แห้งก่อนโดยใช้ความร้อนที่ออกจากเตาเผา แล้วจึงนำไปบดและผสมกันในสภาวะแห้งได้โดยมีราคาการผลิตต่ำ ซึ่งในลักษณะนี้กระบวนการผลิตแบบแห้งจะเสียค่าใช้จ่ายน้อย แต่อย่างไรก็ดี ถ้ามีส่วนผสมหนึ่งอยู่ในสภาวะเปียก การผลิตแบบเปียกจะซับซ้อนน้อยกว่าและเหมาะสมกว่า แต่ในการปรับปรุงคุณภาพและการเพิ่มชนิดของปูนซีเมนต์จากวัตถุดิบที่มีอยู่ กระบวนการผลิตแบบแห้งจะสามารถควบคุมให้มีประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการผลิตแบบเปียก แต่ในปัจจุบันในประเทศไทยไม่มีการใช้วิธีการผลิตปูนซีเมนต์โดยใช้กระบวนการผลิตแบบเปียกแล้ว เนื่องจากค่อนข้างล้าสมัย

เมื่อนำวัตถุดิบมาบดละเอียดและผสมเข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่พอเหมาะแล้ว จะทำการป้อนส่วนผสมนี้เข้าทางด้านบนของเตาเผา (Kiln) ซึ่งเตาเผาเปรียบเสมือนหัวใจของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ เป็นเครื่องจักรที่ใหญ่และแพงที่สุดที่ทำงานตลอด 24 ชั่วโมง โดยไม่มีการหยุดพัก ส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะใช้เตาเผาแบบชนิดหมุน (Rotary kiln) ซึ่งเป็นเหล็กกล้ามีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกยาวประมาณ 50 – 150 เมตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 – 4 เมตร ภายในบดด้วยอิฐทนไฟเพื่อเก็บกักความร้อนไว้ภายใน หมุนรอบตัวในแนวเอียงอย่างช้าๆ ประมาณนาที่ละ 1.3 รอบ อุณหภูมิที่ใช้เผาประมาณ 1,400 – 1,600 องศาเซลเซียส วัตถุดิบที่ผสมรวมกันและได้รับการเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำปฏิกิริยาเคมี เกิดการรวมตัวของออกไซด์ของธาตุต่างๆ และจับกันเป็นเม็ดเล็กๆ เรียกว่า ปูนเม็ด (Clinker) ส่งออกมาข้างนอกทางด้านล่างของเตา โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นในเตาเผาสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนคือ

1. การขจัดน้ำอิสระโดยการระเหย (Evaporation) โดยในขั้นแรกวัตถุดิบที่ป้อนเข้าทาง ส่วนบนของเตาเผาจะได้รับความร้อนจากอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิ 250 ถึง 450 องศาเซลเซียสและ ขจัดน้ำอิสระออกไป

2. การขจัดน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ (Calcinations) ในขั้นนี้ที่อุณหภูมิของวัตถุดิบ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึง 600 องศาเซลเซียส ที่จุดนี้วัตถุดิบเริ่มสลายตัว โมเลกุลของน้ำและ คาร์บอนไดออกไซด์จะค่อยๆ ถูกขจัดออกไป

3. การทำปฏิกิริยาเป็นปูนเม็ด (Clinkering) ในขั้นนี้ที่อุณหภูมิประมาณ 1,200 องศา เซลเซียส เกิดปฏิกิริยาเบื้องต้นเกิดสารประกอบของแคลเซียมอลูมิเนตและเฟอร์ไรต์ซึ่งทำหน้าที่ เป็นตัวช่วยให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ จนอุณหภูมิประมาณ 1,350 องศาเซลเซียส เกิดการ หลอมละลายของแคลเซียมอลูมิเนตและเฟอร์ไรต์และเริ่มทำปฏิกิริยาเป็นปูนเม็ด (Clinker) วัตถุดิบ จะหลอมละลายและประมาณร้อยละ 20-30 จะกลายเป็นของเหลว เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส ส่วนผสมจะทำปฏิกิริยาเป็นปูนเม็ดก้อนกลมขนาด 3-40 มิลลิเมตร

4. การลดอุณหภูมิ (Cooling) ในส่วนท้ายสุดของเตาเผา อุณหภูมิจะเริ่มลดลงอย่าง รวดเร็วและปูนเม็ดจะไหลออกจากเตาเผา

โดยในตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณออกไซด์หลักของธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในปูนเม็ด ซึ่งจะเห็นว่า มีปริมาณรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของปริมาณทั้งหมด (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

#### 2.1.4 สารประกอบของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกอน อลูมิเนียม และ เหล็ก จะทำปฏิกิริยาทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ด โดยอยู่ในรูปของผลึกที่ ละเอียดมาก สารประกอบที่สำคัญที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์หลังจากการเผา ได้แก่ ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate) ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate) และ เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium aluminoferrite) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของ ปูนซีเมนต์ทั่วไป ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนออกไซด์ของธาตุต่างๆ ในปูนเม็ดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
(ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2540)

ออกไซด์		ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	CaO	60 - 67
	SiO <sub>2</sub>	17 - 25
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 - 8
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5 - 6.0
ออกไซด์รอง	MgO	0.1 - 5.5
	Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	0.5 - 1.3
	TiO <sub>2</sub>	0.1 - 0.4
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1 - 0.2
	SO <sub>3</sub>	1 - 3

ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2540)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	33 - 55
ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	15 - 35
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	7 - 15
เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF	5 - 10

### 2.1.5 อิทธิพลของสารประกอบหลักต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์

สารประกอบหลักที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์คือ C<sub>3</sub>S C<sub>2</sub>S C<sub>3</sub>A และ C<sub>4</sub>AF นั้นมีผลต่อคุณสมบัติด้านต่างๆ ของปูนซีเมนต์ เนื่องจากมีปริมาณมากถึงร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติและคุณภาพของปูนซีเมนต์เมื่อนำไปผสมกับน้ำเพื่อทำให้เป็นมอร์ตาร์หรือคอนกรีต ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านต่างๆ ของสารประกอบที่สำคัญ

### 2.1.5.1 ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ )

เป็นสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ มีอยู่มากที่สุดในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 33-55 มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิในเตาเผา 1,250 องศาเซลเซียส  $C_3S$  สามารถสลายตัวได้ ซึ่งการสลายตัวนี้ค่อนข้างช้าและเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส  $C_3S$  จะมีเสถียรภาพและจะไม่เปลี่ยนแปลงสภาพ เมื่อผสม  $C_3S$  กับน้ำ จะทำให้เกิดกำลังรับแรงอัดได้เร็วในระยะแรก (ประมาณ 14 วันหลังการผสม) มีอัตราการทำปฏิกิริยากับน้ำปานกลาง ก่อตัวภายในไม่กี่ชั่วโมง ให้ความร้อนปานกลาง (ประมาณ 120 กิโลจูลต่อกรัม) เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต

### 2.1.5.2 ไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ )

มีอยู่ในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 15 ถึง 35 มีลักษณะเป็นเม็ดกลม เมื่อผสมกับน้ำทำให้เกิดกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นในระยะหลัง (ตั้งแต่ 14 – 28 วัน และเรื่อยไปเมื่อได้รับการบ่มชื้น) ทำให้เกิดปฏิกิริยากับน้ำค่อนข้างช้า และให้ความร้อนที่น้อย (ประมาณ 60 กิโลจูลต่อกรัม) เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีความทนทานสูงต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตและมีการหดตัวน้อย (Drying shrinkage) (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

### 2.1.5.3 ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ )

มีอยู่ในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 7 ถึง 15 ลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมีสี่เหลี่ยม เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยารุนแรงมากและทำให้เพสต์ก่อตัวทันทีทำให้เกิดกำลังรับแรงอัดได้เร็วมากในระยะแรก (ประมาณ 1 วันหลังการผสม) เพราะจะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อตัวและแข็งตัวเร็ว ให้ความร้อนสูง (ประมาณ 210 กิโลจูลต่อกรัม) เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่ไม่ทำให้มีกำลังรับแรงอัดในระยะหลัง จึงทำให้เกิดความไม่คงตัว (Unsoundness) และไม่ทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต

### 2.1.5.4 เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรท์ ( $C_4AF$ )

มีอยู่ในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 และอยู่ในสภาพของสารละลายแข็ง (Solid solution) ไม่ค่อยมีส่วนในการพัฒนากำลังรับแรงอัดทั้งในระยะแรกและระยะหลัง เนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำค่อนข้างช้า ให้ความร้อนน้อย (ประมาณ 100 กิโลจูลต่อกรัม) เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน สารประกอบชนิดนี้ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา – ดำ



### 2.1.6 อิทธิพลของสารประกอบรองต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์

สารประกอบรองหมายถึง สารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ที่นอกเหนือจากสารประกอบหลักทั้ง 4 อย่าง สารประกอบรองเหล่านี้มีอยู่จำนวนที่น้อยก็จริง แต่สารประกอบบางตัวมีผลกระทบต่อซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตทั้งขณะที่ยังไม่แข็งตัวและที่แข็งตัวแล้ว

#### 2.1.6.1 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

วัตถุดิบสำหรับผลิตปูนซีเมนต์มีแมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $MgCO_3$ ) ผสมอยู่เล็กน้อย เมื่อเผาวัตถุดิบ  $MgCO_3$  จะสลายตัวเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะอยู่ในรูปผลึกอิสระและรวมตัวกับน้ำได้อย่างช้ามากกินเวลานานปี การรวมตัวกับน้ำจะเกิดขึ้นหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวแล้ว หากมีแมกนีเซียมออกไซด์ผสมอยู่ในปูนซีเมนต์เกินกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะทำให้เกิดความไม่คงตัว โดยมีการขยายตัวในมอร์ตาร์และคอนกรีตจนเกิดการแตกร้าวเสียหาย

### ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

(ซ์वाल เศรษฐบุตร, 2540)

คุณสมบัติด้านต่างๆ	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังรับแรงอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (อาทิตย์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังรับแรงอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากไฮเดรชัน (จุดต่อกรัม)	ปานกลาง (500)	น้อย (250)	สูงมาก (850)	ปานกลาง (420)
5. คุณสมบัติอื่นๆ	คุณสมบัติเหมือนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	-	ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา



### 2.1.6.2 ปูนขาวอิสระหรือ Free Lime (CaO)

อาจเกิดขึ้นเนื่องจากวัตถุดิบมีปริมาณปูนขาว (CaO) มากเกินไปสำหรับทำปฏิกิริยากับ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ในเตาเผา หรืออาจเกิดขึ้นเมื่อปริมาณปูนขาวไม่มากเกินไปแต่การทำปฏิกิริยาเป็นปูนเม็ดในระหว่างการเผาไม่สมบูรณ์ ทำให้เหลือปูนขาวอิสระ โดยทั่วไปปูนซีเมนต์จะมีปูนขาวอิสระอยู่ประมาณร้อยละ 0.5 ถึง 1 เนื่องจากอุณหภูมิของการสลายตัวของ  $\text{CaCO}_3$  ประมาณ 900 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิในการเผาปูนซีเมนต์สูง 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียสจะทำให้ปูนขาวถูกเผาจนเกรียม เป็นผลทำให้ปูนขาวอิสระรวมตัวกับน้ำอย่างช้าๆ ซึ่งการรวมตัวของปูนขาวอิสระกับน้ำจะเกิดขึ้นหลังจากที่ปูนซีเมนต์แข็งตัวแล้ว หากมีอยู่เกินกว่าร้อยละ 3 จะทำให้เกิดความไม่คงตัวและก่อตัวช้า

### 2.1.6.3 ยิปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

ในขั้นตอนสุดท้ายของการผลิตปูนซีเมนต์ จะบดปูนเม็ดร่วมกับยิปซัม เพื่อป้องกันการก่อตัวเร็วเกินไปของซีเมนต์เพสต์ ในทางตรงกันข้ามถ้ามีปริมาณของยิปซัมมากเกินไปจะทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วเกิดการขยายตัวและแตกร้าวได้ ทำให้ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติก่อตัวและแข็งตัวช้าลง หากมีอยู่มากจะทำให้เกิดความไม่คงตัว และทำให้กำลังรับแรงน้อยลง เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{C}_3\text{A}$  กับยิปซัมทำให้เกิดเอทริงไทท์ (Ettringite) ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากเดิม เมื่อมียิปซัมผสมอยู่น้อย ปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{C}_3\text{A}$  กับยิปซัมจะเกิดขึ้นเมื่อซีเมนต์เพสต์ยังอยู่ในสภาพพลาสติก ทำให้การขยายตัวของปริมาตรเกิดขึ้นก่อนการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์จึงไม่ก่อให้เกิดอันตราย

### 2.1.6.4 ออกไซด์ของอัลคาไล (alkali oxides)

ออกไซด์ของอัลคาไล ได้แก่ โพแทสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ) และโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่าง (Alkalies) มีอยู่ประมาณร้อยละ 0.5 ถึง 1.3 ในปูนซีเมนต์แต่ละจะมีบทบาทสำคัญในกรณีที่มีมวลรวม (Aggregate) ซึ่งได้แก่ ทรายและหิน สามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไล มวลรวมจำพวกนี้เป็นพวกซิลิกาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของอัลคาไลได้ ทำให้เพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะแรก แต่ทำให้กำลังรับแรงอัดในระยะหลังลดลง ถ้าผสมใช้กับวัสดุผสมที่ทำปฏิกิริยากับด่างอาจทำให้เกิดการขยายตัวในมอร์ตาร์หรือคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ นอกจากนี้ยังทำให้ปูนซีเมนต์ที่บรรจุอยู่ในถุง จับตัวเป็นก้อนเร็ว

### 2.1.6.5 ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ ( $P_2O_5$ )

มีอยู่ในวัตถุดิบที่ใช้ทำปูนซีเมนต์บางแหล่ง ส่วนมากมักจะมาจากหินปูนและมีอยู่ไม่เกินร้อยละ 0.1 ถึง 0.2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ สารนี้จะทำให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวช้าเนื่องจาก  $P_2O_5$  จะทำให้  $C_3S$  สลายตัวเป็น  $C_2S$  กับ  $CaO$  นอกจากนี้ถ้ามี  $P_2O_5$  มากพอ ก็อาจจะทำให้เกิดความไม่คงตัวเนื่องจากมีปูนขาวอิสระเกิดขึ้น ถ้าหากมีปริมาณ  $P_2O_5$  ผสมอยู่มากก็ควรที่จะลดปริมาณของปูนขาวโดยการลดปริมาณหินปูนจากวัตถุดิบลง

ในปูนซีเมนต์จะมีสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) และไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) รวมกันเป็นปริมาณถึงร้อยละ 70-80 ของปริมาณทั้งหมด สารประกอบทั้งสองจะเป็นตัวควบคุมทำให้มอร์ตาร์หรือคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดทั้งในระยะแรกและระยะหลัง หากต้องการให้เกิดกำลังรับแรงอัดเร็วในระยะแรกจะต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่สารประกอบ  $C_3S$  ผสมอยู่มาก ซึ่งปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันก็จะมากด้วย ทำนองเดียวกันเมื่อต้องการให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดในเวลาต่อมา ก็ต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่มีสารประกอบ  $C_2S$  ผสมอยู่มากเช่นกัน ส่วนผสมกรณีที่ต้องการให้ได้คอนกรีตที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตที่มีอยู่ในดินหรือน้ำ ก็จะต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่มีสารประกอบไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) ผสมอยู่น้อย (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

## 2.1.7 ค่าโมดูลัสของปูนเม็ด

### 2.1.7.1 ค่าแฟกเตอร์การอิ่มตัวด้วยเนื้อปูน (Lime Saturation Factor)

แฟกเตอร์การอิ่มตัวด้วยเนื้อปูน (Lime Saturation Factor, LSF) คือ ปริมาณ  $CaO$  ทั้งหมดต่อปริมาณ  $CaO$  ที่สามารถมีได้มากที่สุดในปูนเม็ด โดยอิทธิพลของ LSF ที่มีต่อคุณสมบัติของปูนเม็ดคือ ถ้าค่า LSF สูง จะทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงอัดที่ดี แต่ค่า LSF ต่ำจะทำให้มีกำลังรับแรงอัดเกิดขึ้นช้า และส่งผลต่อการผลิต ทำให้ในการเผาวัตถุดิบเกิดเป็นปูนเม็ดได้ง่าย จึงใช้พลังงานในการเผาไหม้ต่ำ ค่า LSF โดยทั่วไปที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์อยู่ในช่วง 90 – 101 สูตรการคำนวณคือ

$$\text{Lime saturation factor (LSF)} = \frac{CaO}{2.8SiO_2 + 1.2Al_2O_3 + 0.65} \quad (2.1)$$

### 2.1.7.2 ค่าโมดูลัสซิลิกา (Silica Ratio)

ค่าโมดูลัสซิลิกา (Silica Ratio, SR) คืออัตราส่วนระหว่าง  $SiO_2$  ต่อ  $Al_2O_3$  รวมกับ  $Fe_2O_3$  มีผลต่อคุณสมบัติของปูนคือ ถ้ามีค่าสูงจะทำให้การเผายาก ใช้พลังงานสูง การแข็งตัวของปูน

เม็ดเกิดขึ้นช้า โดยค่าทั่วไปที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์อยู่ในช่วง 1.4 – 1.2 สูตรการคำนวณคือ

$$\text{Silica ratio (SR)} = \frac{\text{SiO}_2}{(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)} \quad (2.2)$$

### 2.1.7.3 ค่าโมดูลัสอลูมินา (Alumina Ratio)

ค่าโมดูลัสอลูมินา (Alumina Ratio, AR) คืออัตราส่วนระหว่าง  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่อ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มีผลต่อคุณสมบัติของปูนคือ ถ้ามีค่าสูงจะทำให้ปูนเม็ดที่ได้มีค่าไทรแคลเซียมอลูมินเนตสูง และเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์ต่ำ อุนหภูมิในการเผาผลาดต่ำลง โดยค่าทั่วไปที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์อยู่ในช่วง 1.4 – 1.2 สูตรการคำนวณคือ

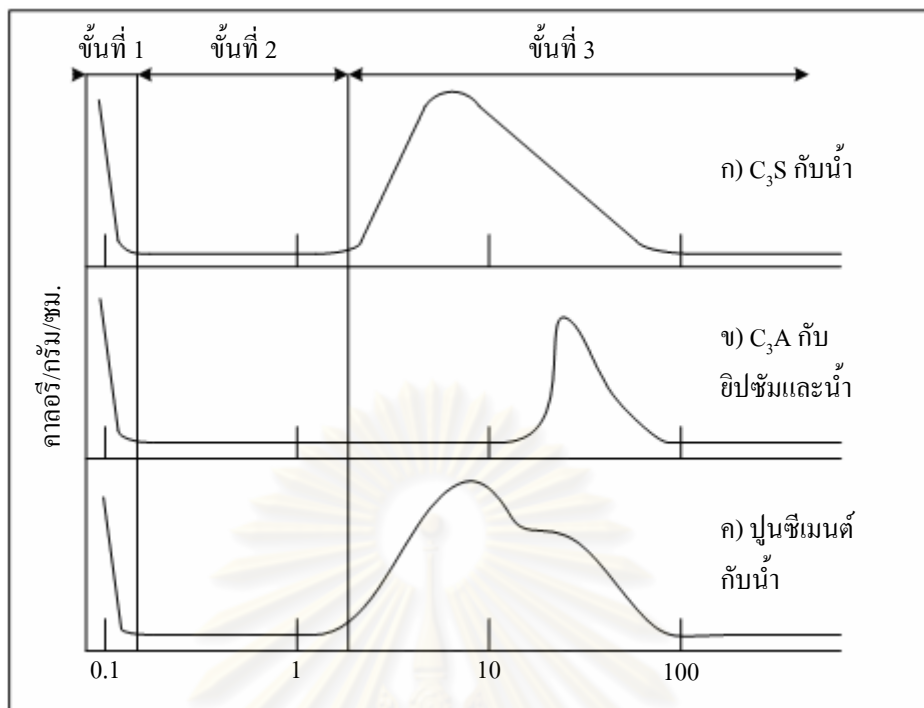
$$\text{Alumina ratio (AR)} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (2.3)$$

## 2.1.8 ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ (Hydration of cement)

### 2.1.8.1 ปฏิกริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์

ปฏิกริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ปูนซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลักคือ  $\text{C}_3\text{S}$   $\text{C}_2\text{S}$   $\text{C}_3\text{A}$  และ  $\text{C}_4\text{AF}$  ซึ่งรวมกันแล้วมีปริมาณมากถึงร้อยละ 90 ของปริมาตรรวม จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ ดังนั้น ปฏิกริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นพร้อมๆ กันหลายปฏิกริยา และมีอิทธิพลซึ่งกันและกัน ดังนั้นในการที่จะเข้าใจปฏิกริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์สามารถทำได้โดยเริ่มด้วยการศึกษาปฏิกริยาไฮเดรชันของสารประกอบแต่ละตัว และรูปที่ 3.2 แสดงการเกิดความร้อนเมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกริยากับน้ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**รูปที่ 2.2** การเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

### 1. แคลเซียมซิลิเกต (C<sub>3</sub>S และ C<sub>2</sub>S)

สารประกอบ C<sub>3</sub>S และ C<sub>2</sub>S ที่อยู่ในผงปูนซีเมนต์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (3CaO·2SiO<sub>2</sub>·3H<sub>2</sub>O: C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub>) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub> หรือ CaO·H<sub>2</sub>O: CH) ซึ่ง C<sub>3</sub>S จะให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์มากกว่า ดังสมการเคมีต่อไปนี้



เมื่อผสม C<sub>3</sub>S กับน้ำ ไอออนของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว สารละลายจะมีความเป็นด่างสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยมีค่าพีเอชสูงกว่า 12 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ซึ่งจะมีมากในระยะแรกและจะลดลงอย่างรวดเร็ว การลดลงของปฏิกิริยาสืบเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของไอออนของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ ทำให้สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น เมื่อถึงจุดหนึ่งความเข้มข้นของไอออนในสารละลายสูงพอ ทำให้เกิดการตกผลึกของ CH และในเวลาเดียวกัน C<sub>3</sub>S จะเริ่มทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วอีกครั้งหนึ่ง ปฏิกิริยาจะ

เกิดขึ้นบริเวณผิวของ  $C_3S$  ทำให้เกิด CSH ล้อมรอบเม็ดปูนหนาแน่นขึ้น และปฏิกิริยาเป็นไปได้ยากขึ้นแต่ยังคงเกิดขึ้นต่อไป สามารถเขียนเป็นขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 เกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว (Rapid heat generation) ประมาณ 15 นาที เมื่อผสมกับน้ำ โดยที่ผิวของ  $C_3S$  จะปล่อยแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ พีเอชจะเพิ่มขึ้นจนเป็นสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง เมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ถึงจุดวิกฤตจึงเกิดการสร้างรูปของผลึก CH และ C-S-H เกิดขึ้น โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นแรกนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

ขั้นที่ 2 ระยะดอร์แมนต์ (Dormant period) เกิดภาวะเป็นพลาสติกของซีเมนต์ (2-4 ชั่วโมง) ปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้ามาก CH สร้างผลึกจากสารละลาย C-S-H เกิดขึ้นบนผิวของ  $C_3S$  และสร้างชั้นเคลือบผิว เนื่องจากชั้นที่หนาขึ้น ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการทะลุผ่านชั้นของน้ำจึงมากขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงต่ำ  $C_2S$  เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างช้าๆ เนื่องจากเป็นสารประกอบที่ทำปฏิกิริยาได้น้อยกว่า

ขั้นที่ 3 ขั้นตอนการเร่ง (Acceleration period) ความเข้มข้นวิกฤตของไอออน และซิลิเกตไฮเดรตเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ขั้นนี้ ซึ่งเป็นระยะที่ผ่านการก่อตัวระยะปลายมาแล้ว และกำลังเกิดการแข็งตัวในระยะต้น (4-8 ชั่วโมง)

ขั้นที่ 4 ขั้นการถดถอย (Deceleration) อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม

ขั้นที่ 5 ขั้นคงที่ (Steady state) อัตราการเกิดปฏิกิริยาคงที่ (12-24 ชั่วโมง) ที่จุดนี้อุณหภูมิส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อการเกิดไฮเดรชัน

ส่วนปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_2S$  นั้นทำปฏิกิริยากับน้ำในทำนองเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3S$  แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นช้ากว่าเพราะ  $C_2S$  ไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยาเท่ากับ  $C_3S$  ดังนั้นความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_2S$  จึงน้อยกว่า  $C_3S$

สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต  $C_3S_2H_3$  ทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดเป็นวุ้น (Gel) มีคุณสมบัติเป็นตัวประสานมีความเหนียวคล้ายกาว ก่อตัว แข็งตัว และยึดเกาะแน่นกับวัสดุผสม ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่าง ช่วยป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริม แคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้อาจทำปฏิกิริยาต่อไปอีกกับวัสดุที่มีธาตุซิลิกาและอลูมินาผสมอยู่เช่น วัสดุปอซโซลาน

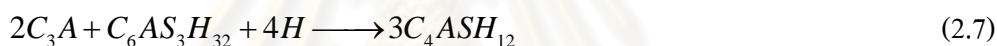


## 2. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) และยิปซัม

เนื่องจาก  $C_3A$  ทำปฏิกิริยารวดเร็วกับน้ำอย่างมาก ทำให้เกิดการก่อตัวอย่างเฉียบพลัน (Flash set) ดังนั้นจึงผสมยิปซัม ( $CaSO_4 - 2H_2O$  หรือ  $CSH_2$ ) ลงในปูนซีเมนต์เพื่อหน่วงปฏิกิริยาของ  $C_3A$  ซึ่ง  $C_3A$  จะทำปฏิกิริยากับน้ำและไอออนของซัลเฟตจากยิปซัม ดังสมการ



ซึ่งผลที่ได้คือ แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตไฮเดรต (Calcium sulpho aluminate hydrate:  $C_6AS_3H_{32}$ ) หรือทั่วไปเรียกว่า เอททรินไกท์ (Ettringite) ซึ่งมีลักษณะยาวคล้ายเข็มและจะเกิดขึ้นรอบๆ  $C_3A$  เอททรินไกท์เพิ่มมากขึ้นรอบๆ  $C_3A$  จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ยากขึ้นและจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อไอออนของซัลเฟตที่ได้จากยิปซัมหมดไปก่อนที่  $C_3A$  จะเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ ปฏิกิริยาที่ 2 สามารถเกิดขึ้นได้ โดยผลที่ได้เป็นแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตไฮเดรตที่มีซัลเฟตลดลงมีชื่อเรียกว่า โมโนซัลโฟอลูมิเนต (Monosulfoaluminate:  $C_4ASH_{12}$ ) ดังสมการ



ซึ่งปฏิกิริยานี้อาจเกิดขึ้นก่อนการสร้างรูปของเอททรินไกท์ก็ได้ หากปฏิกิริยาของ  $C_3A$  และซัลเฟตนั้นเร็วกว่าที่ยิปซัมให้ได้ ถ้าโมโนซัลโฟอลูมิเนตได้รับไอออนของซัลเฟตอีกครั้งหนึ่ง จะสร้างเอททรินไกท์เพิ่มขึ้นและอาจทำให้เกิดรอยแตกซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการเกิดการทำลายด้วยซัลเฟต เนื่องจากเอททรินไกท์มีปริมาณมากกว่า โมโนซัลโฟอลูมิเนต

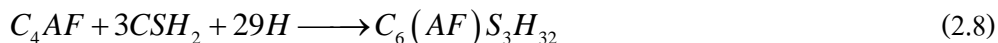
เมื่อไม่มีซัลเฟตที่ได้จากยิปซัม  $C_3A$  เกิดปฏิกิริยากับน้ำและสร้างรูปของแคลเซียมไฮเดรต 2 ชนิด ที่ไม่คงสภาพซึ่งต่อมาอาจเปลี่ยนเป็นไฮโดรกราเนท ซึ่งเป็นกระบวนการเดียวกันกับที่พบใน HAC โดย  $C_3A$  บริสุทธิ์อาจไม่ให้ค่าความแข็งแรงเมื่อก่อตัว

## 3. เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ( $C_4AF$ )

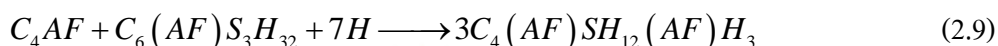
ปฏิกิริยาของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ( $C_4AF$ ) มีความคล้ายคลึงกับปฏิกิริยาของ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) โดยยิปซัมจะหน่วงปฏิกิริยาของ  $C_4AF$  มากกว่าการหน่วงปฏิกิริยาของ  $C_3A$  โดยปฏิกิริยาระหว่าง  $C_4AF$  และยิปซัมจะทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต (Calcium Sulphoaluminate) และแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรท์ (Calcium Sulphoferrite)

นอกจากนี้ปฏิกิริยาจะทำให้เกิดสารประกอบ  $(AF)_H$  อันเนื่องมาจากปริมาณของปูนขาวไม่เพียงพอสำหรับปฏิกิริยา ดังสมการ





แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต และแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรท์ มีลักษณะเหมือนเข็มคล้ายเอททรินไท์ และทำนองเดียวกันแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรท์จะสามารถทำปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ที่มีซัลเฟตต่ำ ดังสมการ



ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ  $C_4AF$  มากพอ และ  $C_3A$  ต่ำ จะทนทานต่อการทำลายของซัลเฟต แสดงว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงกลับจากโมโนซัลโฟลูมิเนตที่เกิดจาก  $C_4AF$  เป็นเอททรินไท์

### 2.1.8.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์

การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ สารประกอบต่างๆ ของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำและมีอิทธิพลต่อกัน เช่น  $C_3A$  และ  $C_4AF$  จะแย่งไอออนของซัลเฟต  $C_3A$  ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากกว่าจะแย่งไอออนของซัลเฟตได้มากกว่าเป็นผลให้  $C_4AF$  ไม่ถูกหน่วงในการทำปฏิกิริยามากเท่ากับในกรณีของ  $C_3A$  นอกจากนี้ในปูนซีเมนต์นั้นยังมีสารประกอบอื่นปะปนอยู่ และถ้ามีในปริมาณมากพออาจมีผลต่อปฏิกิริยา เช่น  $P_2O_5$  สามารถทำให้  $C_3S$  สลายตัวเป็น  $C_2S$  กับ  $CaO$

ปริมาณของยิปซัมในปูนซีเมนต์จะต้องมีพอเหมาะ ซึ่งถ้ามียิปซัมมากเกินไปจะทำให้เกิดเอททรินไท์มากหลังจากซีเมนต์ได้ก่อตัวแล้ว ทำให้เกิดการขยายตัวและเกิดการวิบัติของซีเมนต์เพสต์ได้ แต่หากถ้ามียิปซัมน้อยเกินไป  $C_3A$  จะทำปฏิกิริยาและเกิดเป็นสารละลายแข็ง  $C_3A(CS,CH)H_{12}$  ก่อนที่  $C_3S$  จะก่อตัว ปฏิกิริยาของ  $C_3A$  ดังกล่าวต้องการไอออนของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ ทำให้ความเข้มข้นของไอออนของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ลดลง และการเริ่มตกผลึกเป็น  $CH$  และการก่อตัวของ  $C_2S$  ต้องล่าช้าออกไป

ความร้อนที่ได้จากการที่ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำเรียกว่า Heat of hydration วัดเป็นคาลอรีต่อกรัมของปูนซีเมนต์ สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ให้ความร้อนประมาณ 85 ถึง 100 คาลอรีต่อกรัม ตามระยะเวลาภายหลังการผสม ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้บางส่วนจะหนีผ่านเนื้อคอนกรีตออกมาแต่บางส่วนจะอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต ถ้าความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตมีค่าสูง คอนกรีตอาจเสียความแข็งแรงได้ และความร้อนนี้จะทำให้เกิดหน่วยแรงต่างๆ ภายในเนื้อของคอนกรีตซึ่งเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าว ในโครงสร้างคอนกรีตที่บาง ความร้อนสามารถถ่ายเท

ออกได้แต่โครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่และหนา เช่น เขื่อน จะต้องมียุทธวิธีการออกแบบให้มีการถ่ายเทความร้อนให้เหมาะสมเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต วิธีหนึ่งซึ่งอาจทำได้โดยใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่สี่ ที่ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำ (ประมาณ 60-70 คาลอรีต่อกรัม)

การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจะหยุดเมื่อน้ำระเหยหนีออกจากเพสต์หมดแล้ว ดังนั้นการบ่มซึ่งเป็นวิธีการป้องกันการสูญเสียน้ำในคอนกรีตจึงนับว่าเป็นสิ่งสำคัญ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ขึ้นอยู่กับปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ชนิดของปูนซีเมนต์ ความละเอียดของปูนซีเมนต์ อุณหภูมิ และอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำกว่า 0.55 โดยน้ำหนัก จะขึ้นอยู่กับกาให้น้ำจากภายนอกด้วย ถ้าบ่มคอนกรีตที่ใช้กันตามธรรมดาเป็นเวลา 1 เดือน โดยให้อยู่ในสภาวะมาตรฐานของห้องทดลองจะพบว่าปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำกว่าร้อยละ 80 อย่างไรก็ดี ตามสภาพในสนาม คอนกรีตจะแห้งภายในเวลาไม่กี่วัน หลังจากนั้นปูนซีเมนต์ยังคงทำปฏิกิริยากับน้ำต่อไปโดยอาศัยน้ำที่ซึมมาจากใต้ดินหรือจากความชื้นในขณะฝนตก หรือในขณะที่มีความชื้นในอากาศสูง ดังนั้นภายใต้สภาวะแวดล้อมธรรมดา การทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำจะยังคงมีต่อไปอีกนานหลายปี

## 2.2 กากของเสียอุตสาหกรรม

### 2.2.1 ความหมายของกากของเสียอุตสาหกรรม

กากของเสียอุตสาหกรรม หมายถึง ของที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต หรือสิ่งของที่ไม่สามารถใช้งานได้ หรือไม่ต้องการใช้อีกต่อไป ซึ่งอาจมีคุณสมบัติหรือความเข้มข้นในระดับที่สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมได้ โดยจะแบ่งของเสียอุตสาหกรรมตามที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548 โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 2.2.2 การกำหนดรหัสของชนิดและประเภทของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว

สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจะถูกแบ่งออกเป็น 19 หมวดหมู่ และมีการกำหนดรหัสเฉพาะของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว โดยใช้รหัสเลข 6 หลัก *ตัวเลขสองหลักแรก* แสดงถึงประเภทของการประกอบกิจการ หรือชนิดของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วแสดงดังตารางที่ 2.4 *ตัวเลขสองหลักกลาง* แสดงถึงกระบวนการเฉพาะในการประกอบกิจการนั้นๆ ที่ทำให้เกิดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว หรือเป็นชนิดของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว *ตัวเลขสองหลักสุดท้าย* แสดงถึงลักษณะเฉพาะของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วนั้น เช่นรหัส 05 07 01 หมายถึง สิ่งปฏิกูล

หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (05) จากกระบวนการแยกก๊าซธรรมชาติ (07) ที่ปนเปื้อนด้วยสารปรอท (01) เป็นต้น

ในการกำหนดรหัสที่เหมาะสมกับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ให้พิจารณาตามขั้นตอนต่อไปนี้เป็นต้น

1. พิจารณาว่าสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เกิดขึ้น มาจากกระบวนการที่สอดคล้องกับหมวด 01 ถึง หมวด 12 หรือ หมวด 17 ถึง หมวด 19 หรือไม่ โดยให้หารหัสเลข 6 หลักที่เหมาะสมในหมวดเหล่านี้ ยกเว้นรหัสที่มีเลข 2 หลักสุดท้ายเป็น 99
2. หากไม่สามารถหารหัสที่เหมาะสมตามขั้นตอนแรกได้ ให้ตรวจสอบรหัสตามชนิดของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ในหมวด 13 ถึง 15
3. ถ้ายังไม่สามารถระบุได้ ให้ตรวจสอบรหัสสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วในหมวด 1
4. หากยังไม่สามารถระบุรหัสเลข 6 หลัก จากหมวด 16 ได้ ให้กลับไปใช้รหัสที่มีเลข 2 หลักสุดท้ายเป็น 99 ในหมวดที่เกี่ยวข้องในข้อแรก

สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีรหัสเลข 6 หลักที่กำกับด้วยตัวอักษร HA (Hazardous waste Absolute entry) หรือ HM (Hazardous waste – Mirror entry) ให้ถือว่าเป็นสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีคุณสมบัติเป็นของเสียอันตราย ตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ สำหรับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีรหัสกำกับด้วย HM ผู้ประกอบการต้องทำการวิเคราะห์ตามหลักเกณฑ์ที่กำหนด ในกรณีที่ต้องการโต้แย้งว่าสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วดังกล่าวไม่เข้าข่ายเป็นของเสียอันตราย ตามคุณสมบัติที่กำหนดไว้ รหัสเลข 6 หลักของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 ตัวเลขสองหลักแรกที่แสดงถึงประเภทของการประกอบกิจการ หรือชนิดของสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548)

หมวด 01	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากการสำรวจ การทำเหมืองแร่ การทำเหมืองหิน และการปรับสภาพแร่ธาตุโดยวิธีกายภาพและเคมี
หมวด 02	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากการเกษตรกรรม การเพาะปลูกพืชสวน การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ การทำป่าไม้ การล่าสัตว์ การประมง การแปรรูปอาหารต่างๆ
หมวด 03	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากกระบวนการแปรรูปไม้ และการผลิตแผ่นไม้เครื่องเรือน ยื่อกระดาษ กระดาษ หรือกระดาษแข็ง
หมวด 04	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากอุตสาหกรรมเครื่องหนัง ขนสัตว์ และอุตสาหกรรมสิ่งทอ
หมวด 05	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียม การแยกก๊าซธรรมชาติ และกระบวนการบำบัดถ่านหินโดยการเผาแบบไม่ใช้ออกซิเจน
หมวด 06	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากกระบวนการผลิตสารอินทรีย์ต่างๆ
หมวด 07	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากกระบวนการผลิตสารอินทรีย์ต่างๆ
หมวด 08	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากการผลิต การผสมตามสูตร การจัดส่ง และการใช้งานของสี สารเคลือบเงา สารเคลือบผิว กาว สารติดผนัง และหมึกพิมพ์
หมวด 09	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับการถ่ายภาพ
หมวด 10	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากกระบวนการใช้ความร้อน
หมวด 11	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากการปรับสภาพผิวโลหะและวัสดุต่างๆ ด้วยวิธีเคมี รวมทั้งการชุบเคลือบผิว และของเสียจากกระบวนการ non-ferrous hydro-metallurgy
หมวด 12	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากการตัดแต่ง และปรับสภาพผิวโลหะ พลาสติก ด้วยกระบวนการทางกายภาพ หรือเชิงกล
หมวด 13	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภท น้ำมันและเชื้อเพลิงเหลว ไม่รวมน้ำมันที่บริโภคได้

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) ตัวเลขสองหลักแรก que แสดงถึงประเภทของการประกอบกิจการ หรือชนิดของ สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง สิ่งปฏิภูล หรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548)

หมวด 14	สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทตัวทำละลายอินทรีย์ สารทำความ เย็น สารขับเคลื่อน ที่ไม่รวมไว้ในหมวด 07 และหมวด 08
หมวด 15	สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทบรรจุภัณฑ์ วัสดุอุดซับ ผ้า สำหรับเช็ดวัสดุตัวกรอง และชุดป้องกันที่ไม่ได้ระบุไว้ในหมวดอื่น
หมวด 16	สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทต่างๆ ที่ไม่ได้ระบุไว้ในหมวดอื่น
หมวด 17	สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากงานก่อสร้างและการรื้อทำลาย สิ่งก่อสร้างรวมถึงดินที่ขุดจากพื้นที่ปนเปื้อน
หมวด 18	สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากการสาธารณสุขสำหรับมนุษย์และ สัตว์ รวมถึงการวิจัยทางด้านสาธารณสุข
หมวด 19	สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากโรงปรับคุณภาพของเสีย โรงบำบัด น้ำเสีย โรงผลิตน้ำประปา และโรงผลิตน้ำใช้อุตสาหกรรม

### 2.2.3 ลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่เป็นของเสียอันตราย

#### 2.2.3.1 สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่เป็นสารไวไฟ (Ignitable Substance)

1. เป็นของเหลวที่มีจุดวาบไฟ (Flash point) ต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส แต่ไม่ รวมถึงสารละลายที่มีแอลกอฮอล์ผสมอยู่น้อยกว่า 24% โดยปริมาตร วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ทำ โดยการวัดด้วยเครื่องมือ Pensky-Martens Closed Cup Tester ตามวิธีทดสอบของมาตรฐาน ASTM Standard D-93-79 หรือ D-93-80 หรือการวัดโดยเครื่องมือ Setafash Closed Cup Tester ตามวิธี ทดสอบของมาตรฐาน ASTM Standard D-3278-78

2. เป็นสารที่ไม่ใช่ของเหลวแต่สามารถลุกเป็นไฟได้ เมื่อมีการเสียดสี หรือเมื่อมีการดูดความชื้น หรือเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นเองภายในสารนั้น และเมื่อเกิดลุกเป็นไฟ จะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและอย่างต่อเนื่องที่ก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรงได้ ภายใต้อุณหภูมิและความดัน มาตรฐาน (ความดัน 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส)

3. เป็นก๊าซอัดที่จุดระเบิดได้ (Ignitable compressed gas) ซึ่งก๊าซอัดนี้จะหมายถึง วัสดุหรือของผสมใดๆ ที่บรรจุในถังที่มีความดันสมบูรณ์ (Absolute pressure) มากกว่า 2.81 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส หรือมีความดันสมบูรณ์มากกว่า 7.31



กิโกลรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์จะทำตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D-323

4. เป็นสารออกซิไดเซอร์ (Oxidizer) โดยสามารถไปกระตุ้นให้สารอินทรีย์เกิดการเผาไหม้ได้ ได้แก่สารประกอบจำพวก Chlorate permanganate inorganic peroxide และ Nitrate

### 2.2.3.2 สิ่งปนื้อกหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารกัดกร่อน (Corrosive substances)

1. เป็นสารละลาย (Aqueous solution) ที่มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า และค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 12.5 หรือสูงกว่า วิธีทดสอบหรือวิเคราะห์ทำโดยวัดด้วย pH-meter ตามวิธีทดสอบของ US EPA Method 9040

2. เป็นของเหลวที่กัดกร่อนเหล็กกล้าชั้น SAE 1020 ได้ในอัตราสูงกว่า 6.35 มิลลิเมตรต่อปี ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส วิธีทดสอบหรือวิเคราะห์ทำโดยวิธีทดสอบของ NACE (National Association of Corrosion Engineers) Standard TM-01-69

### 2.2.3.3 สิ่งปนื้อกหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (Reactive substances)

1. เป็นสารที่มีสภาพไม่คงตัว สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว รุนแรง โดยไม่มีกการระเบิดเกิดขึ้น

2. เป็นสารที่ทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับน้ำ

3. เป็นสารที่รวมกับน้ำแล้วได้ของผสมที่เกิดการระเบิดได้

4. เป็นสารที่ผสมกับน้ำแล้วก่อให้เกิดก๊าซพิษ ไอพิษ หรือควันพิษขึ้นในปริมาณที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้

5. เป็นสารที่มีองค์ประกอบของไซยาไนด์หรือซัลไฟด์ เมื่อต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ระหว่าง 2 ถึง 11.5 แล้ว สามารถก่อให้เกิด ก๊าซพิษ ไอพิษ หรือควันพิษขึ้นในปริมาณที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้

6. เป็นสารที่เมื่อถูกทำให้ร้อนในพื้นที่ที่จำกัดจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาระเบิดรุนแรง

7. เป็นสารที่สามารถระเบิดได้ทันที หรือเกิดปฏิกิริยาระเบิดได้ในสภาวะอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (ความดัน 1 บรรยากาศและอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส) และมีปฏิกิริยารุนแรง



### 2.2.3.4 สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารพิษ (Toxic substances)

1. เป็นสารที่มีความเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์หรือสิ่งแวดล้อม เพราะมีคุณสมบัติเป็นสารก่อมะเร็ง เป็นพิษแบบเฉียบพลัน เป็นพิษแบบเรื้อรัง มีคุณสมบัติสะสมในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต หรือตกค้างยาวนานในสิ่งแวดล้อม

2. เป็นสารที่มีความเป็นพิษ คือ เป็นสารที่มีค่า Acute oral LD<sub>50</sub> น้อยกว่า 2,500 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวหนึ่งกิโลกรัมเมื่อใช้หนูเป็นสัตว์ทดลอง หรือมีค่า Acute inhalation LC<sub>50</sub> น้อยกว่า 10,000 ส่วนในล้านส่วนในสภาพของไอหรือก๊าซ หรือเมื่อใช้กระต่ายเป็นสัตว์ทดลอง มีค่า Acute dermal LD<sub>50</sub> น้อยกว่า 4,300 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวหนึ่งกิโลกรัม ทั้งนี้ ค่า LD<sub>50</sub> หมายถึงค่า(ปริมาณ)เฉลี่ยของสารพิษ (Medium lethal dosage) ที่ทำให้สัตว์ที่ใช้ในการทดลองเสียชีวิตไปครึ่งหนึ่ง (50%) ค่า LD<sub>50</sub> มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมของสารพิษต่อน้ำหนักตัวสัตว์ทดลองหนึ่งกิโลกรัม และค่า LC<sub>50</sub> หมายถึงค่า(ความเข้มข้น)เฉลี่ยของสารพิษ (Medium lethal concentration) ในตัวกลางที่ทำให้สัตว์ที่ใช้ในการทดลองเสียชีวิตไปครึ่งหนึ่ง (50%) ค่า LC<sub>50</sub> มีหน่วยเป็นล้านส่วน (โดยปริมาตรหรือน้ำหนัก) ของสารพิษต่อล้านส่วน (โดยปริมาตรหรือน้ำหนัก) ของตัวกลาง

3. เป็นสารที่มีค่า Acute aquatic 96-hour LC<sub>50</sub> น้อยกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อวัดในน้ำอ่อน (ความกระด้างทั้งหมด เท่ากับ 40-48 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต) กับปลา fathead minnows (*Pimephales promelas*) ปลา rainbow trout (*Salmo gairdneri*) หรือปลา golden shiners (*Notemigonus crysoleucas*) ตามที่กำหนดใน Part 800 ของ the “Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (16<sup>th</sup> Edition),” American Public Health Association, 1985

4. เป็นสารที่มีองค์ประกอบของสารที่ระบุไว้ในปริมาณความเข้มข้นของสารใดสารหนึ่ง หรือปริมาณรวมของสารทั้งหมด มากกว่าหรือเท่ากับ 0.001% โดยน้ำหนัก สารนั้นได้แก่ 2-Acetylaminofluorene (2-AAF), Acrylonitrile, 4- Aminodiphenyl, Benzidine and its salts, bis (Chloromethyl) ether (BCME), Methyl chloromthyl ether, 1,2-Dibromo-3-chloropropane (DBCP), 3,3'-Dichlorobenzidine and its salts (DCB), 4-Dimethylaminoazobenzene (DAB), Ethyleneimine (EL), alpha-Naphthylamine(1-NA), beta-Naphthylamine (2-NA), 4-Nitrobiphenyl (4-NBP), N-Nitrosodimethylamine (DMN), beta-Propiolactone (BPL) และ Vinyl chloride (VCM)

### 2.2.3.5 สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่มีองค์ประกอบของสิ่งเจือปน

1. เมื่อนำมาหาค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสิ่งเจือปน พบว่ามีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อหนึ่งกิโลกรัมของสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว (มก./กก. โดยน้ำหนัก) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Total Threshold Limit

Concentration (TTLC) ที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

2. เมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) และวิธีวิเคราะห์น้ำสกัดแล้ว มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (มก./ล.) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (SPLC) ที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

3. การทดสอบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ที่นำมาสกัดโดยวิธี Waste Extraction Test (WET) จะทำขึ้นเมื่อ ค่าความเข้มข้นทั้งหมด (Total Concentration) ของสารอันตรายใดๆ มีค่าไม่เกินค่า TTLC แต่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่า STLC ของสารนั้นที่กำหนดไว้หรือเมื่อต้องการนำสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วนั้นไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบ

#### 2.2.4 การนำกากของเสียอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ (Co-processing)

ในปัจจุบันปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมกำลังทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เห็นได้ชัดจากการเกิดปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่ร้ายแรง และภาวะโลกร้อน สิ่งเหล่านี้ล้วนเกิดจากการกระทำของมนุษย์ทั้งสิ้น ประกอบกับทรัพยากรธรรมชาติที่ลดน้อยลงไปทุกวัน เมื่อประชากรในโลกเพิ่มมากขึ้น ความต้องการในการใช้ทรัพยากรธรรมชาติจึงมีมากขึ้นไปด้วย เมื่อประชากรในโลกที่มีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เกิดปัญหาดามมาคือ การจัดการกับของเสียที่เพิ่มมากขึ้น และมีความต้องการสิ่งก่อสร้างเพื่อรองรับจำนวนประชากรก็เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้น การจัดการของเสียด้วยการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงในเตาเผาปูนซีเมนต์ จึงเป็นการช่วยในการจัดการของเสียและรองรับความต้องการวัสดุในการก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นควบคู่กันไปด้วย

กระบวนการเผาพร้อม (Co-processing) คือการนำกากของเสียหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว มาทดแทนวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงในการผลิตปูนซีเมนต์ โดยเรียกของเสียที่นำมาทดแทนนี้ว่า AFR (Alternative Fuel and Raw Material) โดยของเสียที่นิยมนำมาใช้ในเตาเผาปูนซีเมนต์ได้แก่ ของเสียที่เป็นพลาสติก กระดาษ จากการค้าและกิจกรรมจากอุตสาหกรรม ยางรถยนต์ น้ำมันเก่า ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เศษยาง เศษเหลือจากการแยกชิ้นส่วนรถยนต์ ตัวทำละลายที่ใช้แล้ว ยาฆ่าแมลงหรือวัชพืช ยาที่หมดอายุแล้ว เป็นต้น ถึงแม้ว่ากระบวนการเผาพร้อมจะสามารถนำของเสียมาใช้ได้หลากหลายชนิด แต่ก็ยังมีข้อจำกัดของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่นำมาใช้ทดแทนในกระบวนการผลิตซีเมนต์นั้น คือ จะต้องไม่มีการปนเปื้อนของสารพิษที่เป็นอันตราย เช่น พิซีบี (PCBs-Polychlorinated Biphenyls) วัสดุของเสียจากโรงพยาบาลที่ยังไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้น

วัสดุที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นพิษสูง กากกัมมันตภาพรังสี วัสดุจากแร่ใยหิน แอสเบสตอส ของเสียที่เป็นอันตรายทางชีววิทยาและยังไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้น รวมทั้งขยะจากครัวเรือนทั่วไปที่ยังไม่ผ่านการคัดแยก ตารางที่ 2.5 จะแสดงของเสียที่มักนิยมใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ก็จะกำหนดปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทน เพื่อไม่ให้ส่งผลต่อคุณภาพของปูนเม็ดและประสิทธิภาพของเตาเผาปูนซีเมนต์ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.6

#### ตารางที่ 2.5 ของเสียที่มักนิยมใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิต

ปูนซีเมนต์ (Environmental Toxicology International, 1992; Trezza และ Scian, 2000; Achtembosch และคณะ, 2003; Ract, Espinosa และ Tenorio, 2003; Shih และคณะ, 2003)

ชนิด	วัตถุดิบที่ใช้
วัตถุดิบทดแทน	แร่เหล็ก ทราฟที่ใช้เป็นแบบหล่อ เถ้าหนัก เถ้าลอยจากถ่านหิน วัสดุจากการผลิตเหล็ก เถ้าจากการเผาน้ำมันรถยนต์เก่าที่ใช้แล้ว กัลวานิก สลัดจ์จากโรงงานชุบด้วยไฟฟ้า
เชื้อเพลิงทดแทน	เศษไม้ ตัวทำละลาย ของเสียพวกน้ำมัน ยางรถยนต์เก่า เชื้อเพลิงจากการผลิตขยะอุตสาหกรรมเฉพาะ เชื้อเพลิงทดแทนจากขยะชุมชน ขยะกระดาษ ขยะพลาสติก ส่วนผสมในกระดาษและพลาสติก วัสดุรถยนต์ วัสดุสิ่งทอ สารอินทรีย์ที่ใช้แล้ว เนื้อสัตว์และอาหารสัตว์

หลักในการพิจารณาคัดแยกกากของเสียบางชนิดออกจากกระบวนการ Co-processing

1. กากของเสียอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics waste) ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์และชิ้นส่วนอุปกรณ์เสริม เครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์เพื่อความบันเทิงต่างๆ อุปกรณ์เพื่อการสื่อสาร โดยซากอิเล็กทรอนิกส์มีส่วนประกอบของโลหะอยู่ร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก รองลงมาร้อยละ 23 เป็นพลาสติก และร้อยละ 20 เป็นสารประกอบของหลอดแสดงรูปภาพ องค์ประกอบโดยเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่า ซากอิเล็กทรอนิกส์มีสารที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยและสิ่งแวดล้อม เช่น คลอรีน (Cl) โบรมีน (Br) แคดเมียม (Cd) นิกเกิล (Ni) ปรอท (Hg) โพลีคลอรีเนเต็ดไบฟีนิล (PCB) และสารโบรมิเนเต็ด ซึ่งเป็นสารระเหยได้ นอกจากนั้น ซากเหล่านี้ยังประกอบไปด้วยโลหะ จึงควรที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง

2. แบตเตอรี่ที่หมดอายุแล้ว (Entire Batteries) สามารถจำแนกเป็น แบตเตอรี่ในรถยนต์ ส่วนใหญ่เป็นแบตเตอรี่แบบแผ่นตะกั่วมีสารละลายที่มีลักษณะเป็นกรด แบตเตอรี่ในอุตสาหกรรม จะประกอบไปด้วยแบตเตอรี่แบบแผ่นตะกั่ว มีสารละลายที่เป็นกรด และแบบนิเกิล-แคดเมียม และ แบตเตอรี่แบบพกพา จะเป็นแบตเตอรี่ที่ใช้สำหรับงานทั่วไป ส่วนใหญ่ประกอบด้วยแผ่นสังกะสี แท่งคาร์บอน และแบตเตอรี่ที่มีแมงกานีสอัลคาไลน์ ซึ่งล้วนมีอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม หากมีการนำมาใช้ในกระบวนการ Co-processing จะทำให้ระดับความเข้มข้นของสารมลพิษที่ไม่ต้องการอยู่ในปูนซีเมนต์

3. ของเสียดูดเชื้อและกากของเสียชีวภาพทางการแพทย์ (Infectious and biologically active medical wastes) ของเสียดูดเชื้อ กากของเสียชีวภาพจากโรงพยาบาลรวมถึงการเกษตรกรรม หรือเกิดจากการรักษามนุษย์ การดูแลรักษาสัตว์ และการค้นคว้าวิจัย เช่น ถุงบรรจุเลือดที่ใช้แล้ว เข็มฉีดยาและรวมถึงเศษชิ้นส่วนของร่างกายและอวัยวะ การกำจัดของเสียเหล่านี้ต้องใช้หลัก สุขอนามัยและต้องการการควบคุมความปลอดภัยในการทำงาน การเก็บบรรจุ และการขนส่งเป็นพิเศษ ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะนำมากำจัดในกระบวนการ Co-processing

4. กรดจากแร่หรือถ่านหินและสารที่กัดกร่อนได้ (Mineral acids and Corrosives) เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดฟอสฟอริก และกรดซัลฟูริก หรือแร่อนินทรีย์ เช่น กำมะถัน และคลอรีน ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของกรด มีผลกระทบต่อปูนเม็ด และคุณภาพของปูนซีเมนต์ และอาจก่อให้เกิดก๊าซเสียที่ไม่ต้องการ กรดอาจกัดกร่อนและทำลายอุปกรณ์หรือเครื่องมือในกระบวนการ

5. สารที่ระเบิดได้ (Explosives) เป็นสารประกอบเคมี เช่น สารไนโตร-กลีเซอริน พลุ ดอกไม้ไฟ ฉนวนระเบิด เครื่องมือที่จุดระเบิดได้ ดินระเบิด เป็นต้น เหตุผลที่ไม่นำสารที่ระเบิดได้ มาใช้ในกระบวนการ Co-processing ก็เพื่อความปลอดภัยในการทำงาน ซึ่งจะเป็นการเสี่ยงที่ไม่สามารถควบคุมการระเบิดในระหว่างกระบวนการผลิตได้ เช่น การขนส่ง การจัดการ การตัด ออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ เป็นต้น ปฏิกริยาระเบิดที่เกิดในเตาเผาปูนซีเมนต์จะเป็นผลลบต่อความเสถียรภาพของกระบวนการ Co-processing

6. แร่ใยหินหรือแอสเบสตอส (Asbestos) เป็นชื่อที่ใช้เรียกกลุ่มของแร่ธาตุที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ในลักษณะของเส้นใยคล้ายเส้นไหมยาวๆ มีคุณสมบัติที่ทนทานต่อการขัดถู เฉื่อยต่อกรด และสารละลายที่มีสมบัติเป็นด่าง ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของแร่ใยหินสามารถถูกบำบัดได้ในเตาเผาแบบหมุนเป็นพิเศษ (Equipped rotary kiln) ที่อุณหภูมิมากกว่า 800 องศาเซลเซียส ด้วยเวลาที่แน่นอน แร่ใยหินจะถูกเปลี่ยนเป็นแร่ที่คล้ายกับ Oilvine หรือ sterite

7. กากของเสียที่เป็นกัมมันตภาพรังสี (Radioactive waste) ตามปกติจะถูกแยกออกตาม การจัดการกากของเสีย ซึ่งกากของเสียที่เป็นกัมมันตภาพรังสีไม่สามารถนำไปบำบัดได้ตามกฎการ กำจัดของเสียจากบ้านเรือนและเทศบาล และ โรงงานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ก็ไม่มีสิทธิ์ในการ กำจัดกากของเสียที่เป็นกัมมันตภาพรังสีได้

8. กากของเสียชุมชนที่ระบุประเภทไม่ได้ (Unsorted municipal wastes) กากของเสียชุมชนเป็นวัสดุที่มีหลากหลายประเภทรวมกันอยู่ และในประเทศที่กำลังพัฒนาส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ของท้องถิ่น เช่น วัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากครัวเรือน วัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยาและเศษเหลือจากการบริโภค เช่น วัสดุบรรจุภัณฑ์ นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น กระดาษแข็ง พลาสติก แก้ว หรือโลหะ

ตารางที่ 2.6 ปริมาณของโลหะหนักสูงสุดที่มีได้ในวัตถุดิบทดแทนในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ (Siam City Cement Public Company Limited, 2005)

โลหะหนัก	ปริมาณสูงสุดที่มีได้ในวัตถุดิบทดแทน (ppm)
As	< 1,000
Cr	< 5,000
Cd	< 50
Cu	< 2,200
Pb	< 5,000
Hg	< 50
Zn	< 10,000
Tl	< 50
V	< 1,000
Ni	< 1,000
Ti	< 1,000



ตารางที่ 2.7 ชนิดของเสียที่ไม่เหมาะสมกับกระบวนการเผาไหม้และเหตุผลหลักที่ไม่อนุญาต  
ให้นำมาใช้ในกระบวนการเผาไหม้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์  
(GTZ-Holcim Public Private Partnership, 2006)

	การตกค้าง ของมลพิษ ในปูนเม็ด	มลพิษทาง อากาศ	มีผลต่อ สุขภาพ ของมนุษย์	การ หมุนเวียน กลับมาใช้	นำไปฝัง กลบดีกว่า	มีผลเสียต่อ กระบวนการ เผา
ขยะอิเล็กทรอนิกส์	X	X		X		
แบตเตอรี่หม้ออายุ	X	X		X		X
ของเสียอันตรายจาก โรงพยาบาล			X			
กรดและสารกัดกร่อน		X	X			X
ระเบิด	X		X			X
วัสดุจากแร่ใยหิน			X		X	
สารกัมมันตภาพรังสี	X		X			
ขยะชุมชนที่ไม่ได้แยก	X	X		X		X

สิ่งสำคัญที่ต้องตระหนักในการนำเชื้อเพลิงทดแทนมาใช้ นอกจากความเป็นอันตรายที่จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์แล้ว ยังจะต้องคำนึงถึงค่าพลังงานความร้อน (Calorific value) ของเชื้อเพลิงทดแทนด้วย ว่าเหมาะสมหรือไม่ ซึ่งจะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิความร้อนในการเผาปูนเม็ดให้คงที่ จึงต้องมีการควบคุมกระบวนการเผาไหม้ให้เหมาะสม คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทดแทนที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์คือ จำเป็นจะต้องมีค่าความร้อนไม่น้อยกว่า 7.5 – 9 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ไม่เช่นนั้นจะมีผลทำให้อุณหภูมิในเตาเผาตกลง โดยการเปรียบเทียบค่าความร้อนของเชื้อเพลิงหลักและเชื้อเพลิงทดแทนแสดงดังตารางที่ 2.8

การปฏิบัติตามเกณฑ์พื้นฐานของการทำ Co-processing จะเป็นการรับประกันได้ว่า การใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน จะไม่ทำให้การปล่อยมลพิษจากปล่องเตาเผาปูนซีเมนต์เปลี่ยนแปลงไป เช่น การป้อนเชื้อเพลิงทดแทนลงไปในส่วนที่เหมาะสมที่สุดในเตาเผา หรือการใส่วัตถุดิบที่ประกอบด้วยสารที่ระเหยง่ายจำนวนมากลงไปในส่วนที่มีอุณหภูมิสูงเท่านั้น และหลีกเลี่ยงการใช้วัตถุดิบที่ประกอบด้วยสารมลพิษที่เตาเผาไม่สามารถรองรับได้ เช่น สารปรอท นอกจากนี้ค่าการปล่อยมลพิษต่างๆ จะต้องมีการตรวจวัดตามมาตรฐานที่กำหนดไว้อย่างต่อเนื่องและควรมีการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม ตลอดจนมีการประเมินความเสี่ยงเพื่อตรวจสอบจุดบกพร่องของระบบ และการตรวจวิเคราะห์การไหลของมวลสาร และการไหลของพลังงาน ซึ่งจะช่วยให้การใช้ทรัพยากรเป็นไปอย่างคุ้มค่าและเหมาะสมที่สุด



ตารางที่ 2.8 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงหลักและเชื้อเพลิงทดแทนที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ (GTZ-Holcim Public Private Partnership, 2006)

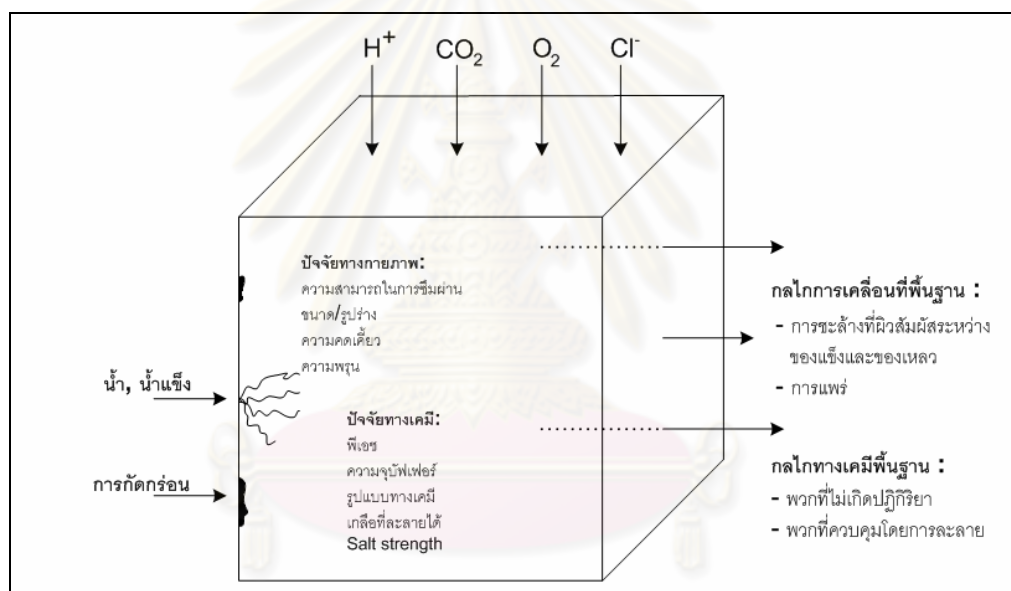
Grade of fuel	Fuel type	Calorific value (MJ/kg)
<b>High Grade</b>	Pure polyethylene	46
	Light oil	42
	Heavy oil	40
	Pure polystyrene	40
	By-product of tar	38
	Pure rubber	36
	Anthracite	34
	Waste oil	30-38
	Scrap tyres	28-32
	Coal	24-29
<b>Medium Grade</b>	Pot liners	20
	Paint sludge	19
	Dried paint	18
	Dried wood/sawdust	16
	Rice husks	16
<b>Low Grade</b>	Cardboard/paper	15
	Dried sewage sludge	10
	Wet sewage sludge	7.5

การนำกากของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้เพื่อทดแทนเชื้อเพลิงและวัตถุดิบในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้น มีข้อจำกัดคือ จะต้องไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยและความปลอดภัยของพนักงานตลอดจนคุณภาพสิ่งแวดล้อมของชุมชนในท้องถิ่น โดยจะต้องมีการจัดการดูแล และควบคุมอย่างถูกต้องเหมาะสม และต้องคำนึงถึงข้อเท็จจริงที่ว่า จะไม่นำกากของเสียไปใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ หากมีทางเลือกอื่นที่ดีกว่า

## 2.3 การชะละลาย (Van der Sloot และ Dijkstra, 2004)

### กลไกของการเกิดการชะละลาย

ในเทอมของการชะละลาย จะแบ่งวัตถุที่เกิดการชะละลายได้เป็น 2 ชนิด คือ วัตถุที่มีลักษณะเป็นก้อนแข็ง (Monolithic) และวัตถุที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ (Granular) ในวัสดุที่เป็นก้อนแข็งจะมีกลไกการแพร่เป็นตัวควบคุมการชะละลาย คือ การชะละลายเกิดจากการแพร่ ส่วนวัสดุที่เป็นเม็ดเล็กๆ จะมีการไหลผ่านของของเหลวเป็นตัวควบคุมการชะละลาย คือชะละลายออกมาเนื่องจากน้ำที่ไหลผ่านวัตถุ ตัวอย่างของวัตถุที่มีลักษณะเป็นก้อนแข็ง ได้แก่ ผลิตภัณฑ์จากซีเมนต์ (คอนกรีต อิฐ วัสดุที่ใช้สำหรับปกคลุม) การชะละลายของวัตถุทั้งสองชนิด ได้รับอิทธิพลจากลักษณะของวัตถุ และปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.3 ปัจจัยทางกายภาพ-เคมี ที่มีผลต่อการชะละลายของสารมลพิษ ออกจากวัตถุก้อนแข็ง

(Van der Sloot และ Dijkstra, 2004)

ในทางปฏิบัติทุกๆ ไป จะใช้ร่วมกันทั้งกระบวนการทางเคมี และทางกายภาพ โดยกระบวนการและปัจจัยที่มีความสำคัญอธิบายได้ดังต่อไปนี้

กระบวนการทางเคมีและทางกายภาพ เกิดจากการชะละลายของสารประกอบในวัตถุลง ไปสู่น้ำโดยมีกลไกที่คอยควบคุมกระบวนการชะละลายคือ

1. กระบวนการทางเคมี ได้แก่ การแตกตัวของธาตุ การดูดซับ การมีอยู่ของอนุภาคที่ ละลายได้
2. กระบวนการทางกายภาพ ได้แก่ การพา (Advection) การชะล้างที่ผิวสัมผัสระหว่าง ของแข็งและของเหลว และการแพร่

### 2.3.1 กระบวนการทางเคมี

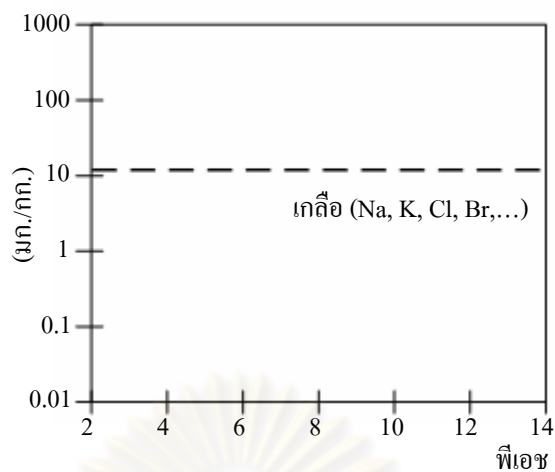
#### 2.3.1.1 กลไกทางเคมีพื้นฐาน

มีกลไกทางเคมี 3 ตัวที่คอยควบคุมการชะละลายของสารปนเปื้อน ได้แก่ การแตก ตัวของธาตุ (ควบคุมโดยการละลาย) กระบวนการดูดซับ (ควบคุมโดยการดูดซับ) และการมีอยู่ของ อนุภาคที่ละลายได้ ในวัตถุ ตัวอย่างของการควบคุมโดยการละลายคือ การแตกตัวของออกไซด์ของ โลหะในวัตถุ เช่น ออกไซด์ของสังกะสี ในโครงสร้างของสารปนเปื้อนบางตัวจะมีแรงดึงดูดของ การดูดซับ ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าประจุบวกของโลหะหนัก ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ไม่ได้ควบคุมโดยการ แตกตัวของธาตุ แต่จะถูกควบคุมโดยการดูดซับโดยประจุลบที่ผิวหน้าของวัตถุ เช่น สารอินทรีย์ และปริมาณออกไซด์ที่ผิว เป็นต้น

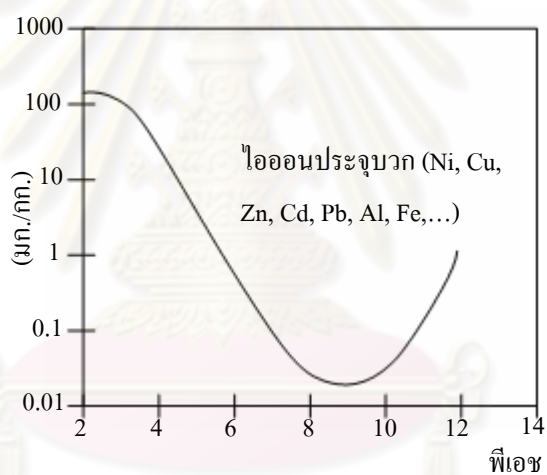
จำนวนของสารประกอบอินทรีย์จะไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยา และไม่ได้ถูกควบคุมโดย การละลาย และ การดูดซับ ตัวอย่างเช่น เกลือที่ละลายได้ เช่น โซเดียมคลอไรด์ เมื่อสัมผัสกับน้ำจะ ละลายทันทีและสามารถวัดปริมาณได้ โดยการชะละลายจะถูกควบคุมโดย การมีอยู่ของอนุภาคที่ ละลายได้

#### 2.3.1.2 ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)

ค่าพีเอชของวัตถุและค่าพีเอชของสิ่งแวดล้อม มีความสำคัญมากในการหาการ ชะละลายของสารประกอบ ค่าพีเอชของของเหลวที่อยู่รอบๆ ตัวอย่างจะใช้หาความเข้มข้นสูงสุด ของของเหลวรอบวัตถุ ที่ค่าพีเอชนั้นๆ และแต่ละวัสดุจะมีค่าพีเอชที่มีผลต่อการชะละลาย โดย รูปแบบของการชะละลายจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันอย่างเด่นชัดในแต่ละกลุ่มของธาตุ คือ กลุ่มที่มี ประจุบวก ประจุลบ และเกลือ ดังรูปที่ 2.4 – 2.6 และรูปที่ 2.7 แสดงปริมาณการชะละลายสุดท้ายที่ แตกต่างกันเนื่องจากผลของรีดอกซ์ และคาร์บอนอินทรีย์ละลาย รูปแบบของการชะละลายของธาตุ ที่กลุ่มต่างกันสำหรับวัสดุทุกประเภทนั้นเป็นระบบมากจะต่างกันเพียงปริมาณการชะละลายสุดท้าย

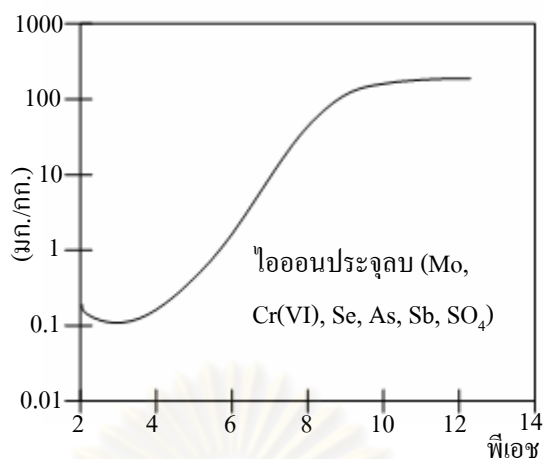


รูปที่ 2.4 รูปแบบการชะละลายของเกลือซึ่งเป็นฟังก์ชันกับพีเอช (Van der Sloot และ Dijkstra, 2004)

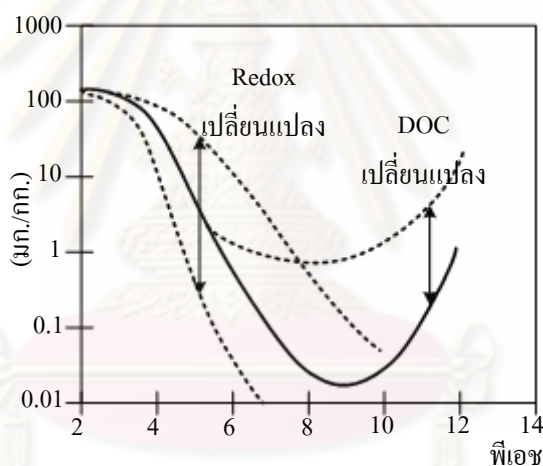


รูปที่ 2.5 รูปแบบการชะละลายของไอออนประจุบวกซึ่งเป็นฟังก์ชันกับพีเอช (Van der Sloot และ Dijkstra, 2004)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 รูปแบบการชะละลายของไอออนประจุลบซึ่งเป็นฟังก์ชันกับพีเอช (Van der Sloot และ Dijkstra, 2004)



รูปที่ 2.7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการชะละลาย (Van der Sloot และ Dijkstra, 2004)

### 2.3.1.3 รูปแบบทางเคมีของสารประกอบในวัตถุ

นอกเหนือจากกลไกทางเคมีพื้นฐานแล้ว รูปแบบทางเคมีของสารประกอบจะทำให้หาคุณลักษณะของพฤติกรรมชะละลาย สารปนเปื้อนอาจอยู่ในรูปตัวออกซิไดส์หรือรีดิวซ์ (เช่น โครเมียม อาจอยู่ในรูป  $\text{CrO}_4^{2-}$  หรือ  $\text{Cr}^{3+}$  ซึ่งเป็นตัวที่มีความสำคัญในการชะละลาย โลหะหนัก ที่มีรูปแบบโครงสร้างที่ซับซ้อนกับสารอินทรีย์ในธรรมชาติ ในแหล่งน้ำธรรมชาติ ในดิน และในวัสดุจากธรรมชาติ เช่น ไม้ รูปแบบที่ซับซ้อนของโลหะหนักโดยทั่วไปจะมีความสามารถในการละลายได้สูง และจะชะละลายออกมาได้เร็วกว่ารูปแบบที่ไม่ซับซ้อน (Organic matter)



### 2.3.1.4 สารประกอบทั้งหมดของวัตถุ

สารประกอบทั้งหมด (Total composition) ในรูปมิลลิกรัมของธาตุต่อกิโลกรัมของวัตถุ จะมีข้อจำกัดของการชะละลายของธาตุส่วนใหญ่ ยกเว้นเกลือละลายที่ไม่ทำปฏิกิริยา ปริมาณที่ชะละลายออกมาได้สูงสุดต่อเวลาก็คือปริมาณสารประกอบที่มีอยู่ในวัตถุ ในเบื้องต้นการชะละลายของธาตุอื่นๆ จะมีสาเหตุมาจากกลไกทางเคมีธรณี (Geochemical) และปัจจัยทางกายภาพ และด้วยเหตุนี้ปริมาณที่ชะละลายออกมาจึงแทบไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณทั้งหมด

### 2.3.1.5 การรับ-จ่ายอิเล็กตรอน

การรับ-จ่ายอิเล็กตรอน ของวัตถุหรือของสิ่งแวดล้อม มีอิทธิพลต่อรูปแบบทางเคมีของสารปนเปื้อน สำหรับโลหะหนัก การเกิดออกซิเดชัน ในขั้นแรกจะลดประสิทธิภาพในการชะละลาย ในขณะที่ การเกิดรีดักชันจะให้ผลในทางตรงกันข้าม

### 2.3.1.6 บัฟเฟอร์ของกรด-ด่าง

ความจุบัฟเฟอร์กรด-ด่าง (Acid – base buffering) ของวัตถุคือการหาค่าพีเอชต่อเวลา ภายใต้อิทธิพลของปัจจัยภายนอก ตัวอย่างคือการทำให้ซีเมนต์มีค่าเป็นกลางเพื่อดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในบรรยากาศ ในบางกรณีเช่นอัลคาไลน์ การหาความจุบัฟเฟอร์ของซีเมนต์คือการหาเวลาที่ต้องการจนกว่าพีเอชจะลดลงจากด่างแก่ (พีเอชประมาณ 12) จนมีค่าเป็นกลาง (พีเอชประมาณ 8)

### 2.3.1.7 สารอินทรีย์และสารคาร์บอนอินทรีย์ละลาย

ของแข็งและสารอินทรีย์ละลายน้ำ หรือ สารฮิวมิก (Humic substance) มักนิยมใช้คำว่า DOC, Dissolved Organic Carbon (คาร์บอนอินทรีย์ละลาย) ประกอบไปด้วยโมเลกุลที่ซับซ้อนที่มีแรงดึงดูดอย่างแรงกับโลหะหนัก การเกิดคาร์บอนอินทรีย์ละลายสามารถปรับปรุงการชะละลายได้ เนื่องจากจะเกิดการรวมตัวระหว่างคาร์บอนอินทรีย์ละลายและโลหะหรือโลหะอิสระ สารคาร์บอนอินทรีย์ละลายจะพบในวัตถุที่ใช้ในการก่อสร้างที่มาจากธรรมชาติ เช่น ไม้ ส่วนสารอินทรีย์มักจะพบอยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นปริมาณมาก เช่น ดิน ตะกอน แม้แต่คอนกรีตจะมีคาร์บอนอินทรีย์ละลายอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ที่มาจากสารเดิมคือ สารหน่วงการก่อตัว

### 2.3.1.8 ส่วนประกอบของของเหลวรอบวัตถุ และความแรงไอออน

เกลือที่อยู่ในสารละลายในวัตถุหรือในสิ่งแวดล้อม มีอิทธิพลต่อการละลายของสารประกอบ โดยทั่วไปปริมาณที่สูงของเกลือจะทำให้สารปนเปื้อนชะละลายออกมาได้มากขึ้น

ส่วนสารประกอบอื่นๆ ที่อยู่ในสารละลายอาจจะเป็นสาเหตุในการปรับปรุงการชะละลายจากการเกิดสารที่ซับซ้อน เช่น โลหะเชิงซ้อนกับคลอไรด์หรือคาร์บอเนต

### 2.3.1.9 อุณหภูมิ

โดยทั่วไปการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้การละลายสูงขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเพิ่มขึ้น และเพิ่มอัตราการแพร่

### 2.3.1.10 เวลา

เวลาเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อปริมาณการชะละลายคือ อัตราของปฏิกิริยาที่กำลังดำเนินการอยู่จะมีข้อจำกัดในการชะละลายในกรณีที่ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ช้าหรือเกิดการแพร่ช้า นั่นก็คือธาตุมีการแตกตัวได้ช้า และอาจจะไม่ยอมให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้สำเร็จ ดังนั้นเวลาในการชะละลายอาจจะใช้ระยะเวลาานานมาก การเปลี่ยนคุณสมบัติของวัตถุหรือการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม เมื่อเวลาผ่านไป ตัวอย่างคือ การเกิดคาร์บอเนชันของวัตถุที่มีความเป็นด่าง หรือการเพิ่มของพื้นที่ผิวของวัตถุที่เป็นก้อนแข็งเนื่องจากการกัดกร่อน

การทดสอบการชะละลายประกอบไปด้วยหลายขั้นตอน เพื่อให้มีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ในเรื่องผลทั้งระยะสั้น และระยะยาวของการชะละลาย บางการทดลองก็จะให้ข้อมูลที่ใช้สำหรับการประมาณผลของการชะละลายทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

## 2.3.2 อิทธิพลของปัจจัยทางกายภาพต่อ การเคลื่อนที่ของสารประกอบจากวัตถุไปสู่ของเหลวรอบวัตถุ

### 2.3.2.1 กลไกการเคลื่อนที่พื้นฐาน

นอกจากกระบวนการทางเคมีแล้ว กระบวนการเคลื่อนที่ทางกายภาพจะใช้หาการเคลื่อนที่ของสารประกอบจากวัตถุสู่ของเหลวรอบวัตถุ กลไกพื้นฐาน 3 ข้อ สามารถบอกความแตกต่างได้พอสังเขป ดังนี้ กระบวนการที่สารประกอบเมื่อสัมผัสกับน้ำ (ฝน) โดยที่มีการไหลผ่านวัตถุ จะเรียกว่าการพา (Advection) น้ำที่ไหลผ่านวัตถุเป็นประจำมักจะมีสาเหตุมาจากการที่ฝนตก และเกิดการชะละลายจนมีผลกระทบต่อดิน และน้ำใต้ดิน เนื่องจากการแพร่ของสารประกอบ การไหลผ่านวัตถุจะเป็นไปได้เฉพาะวัสดุที่มีรูพรุนเท่านั้น เช่น วัสดุที่เป็นเม็ดเล็กๆ

การแพร่ คือการเคลื่อนที่ของสารประกอบเนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในขณะที่ไม่มีการไหล นี่ก็คือคุณสมบัติโดยทั่วไปของวัตถุที่มีการอัดและมีความสามารถในการซึมผ่านและมีความพรุนต่ำมาก (น้ำในรูพรุนจะหยดนิ่งไม่มีการเคลื่อนที่) เมื่อเกิดการชะละลาย และ

เป็นการเคลื่อนที่แบบการแพร่ ภายใต้สถานการณ์การแพร่อาจจะถูกจำกัดการเคลื่อนที่ ก่อนที่สารประกอบจะสามารถรวมตัวเพื่อเกิดการพา อัตราของการแพร่จะขึ้นอยู่กับเกรเดียนท์ขององค์ประกอบระหว่างวัตถุ และส่วนที่สัมผัสกับของเหลว และขึ้นกับเวลา การชะล้างที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็ง คือกระบวนการที่คล้ายกับการเกิดการพา โดยในทอมของการชะล้างที่ผิวสัมผัสจะใช้หาการชะล้างของสารละลายบนผิวภายนอกของวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง ภายหลังจากการชะล้างที่ผิวสัมผัส การแพร่คือกลไกการเคลื่อนที่หลักของวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง

### 2.3.2.2 วัตถุที่เป็นเม็ดเล็กๆ และวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง

ความสำคัญของความแตกต่างระหว่างวัตถุที่เป็นเม็ดเล็กๆ และวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง คือสาเหตุของการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่แตกต่างกัน พฤติกรรมการชะละลายเนื่องจากการสัมผัสกับของเหลว คือการไหลผ่านจะมีอิทธิพลกับวัตถุที่เป็นเม็ดเล็กๆ และการแพร่จะมีอิทธิพลต่อวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง ส่วนปริมาณของการชะละลายจะขึ้นกับเวลาในการแพร่ขององค์ประกอบจากของแข็งสู่ของเหลว สำหรับวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง

### 2.3.2.3 ขนาดของอนุภาค

สำหรับวัตถุที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ จะใช้ขนาดของอนุภาคในการหาระยะทางต่อสารปนเปื้อนที่ต้องเคลื่อนที่จากจุดศูนย์กลางของอนุภาคไปสู่ของเหลรรอบ การเกิดปฏิกิริยาและการเคลื่อนที่ที่เร็วในอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ส่วนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะถูกจำกัดการเคลื่อนที่ โดยมีแนวโน้มที่จะเกิดการแพร่ได้มากกว่า

### 2.3.2.4 ความพรุน

ช่องว่างหรือความพรุน (ช่องว่างต่อปริมาตรทั้งหมด) คือปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการเคลื่อนที่ของสารประกอบไปสู่ของเหลรรอบ ทั้งวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง และวัตถุที่เป็นเม็ดเล็กๆ การเคลื่อนที่ของน้ำในตัวกลางที่มีความพรุนสูงจะเกิดได้ง่ายกว่าในตัวกลางที่มีความพรุนต่ำกว่า ดังนั้นถ้าวัตถุมีความพรุนมากก็จะยิ่งชะละลายออกมาได้มาก

### 2.3.2.5 ความสามารถในการซึมผ่าน

ความสามารถในการซึมผ่านหรือ สภาพนำน้ำ (Hydraulic conductivity) เป็นการหาว่าทำอย่างไรให้น้ำซึมเข้าไปในวัตถุ และทำอย่างไรสารปนเปื้อนจึงจะชะละลายออกมาได้เร็ว ความสามารถในการซึมผ่านอาจเป็นประเด็นสำคัญสำหรับวัตถุที่มีความหนาแน่น เช่น ดินเหนียว หรือวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง น้ำจะไหลรอบวัตถุด้วยความสามารถในการซึมผ่านที่ต่ำมากกว่าที่จะซึม

เข้าไปภายใน จึงเป็นที่มาว่า ทำไมวัตถุที่มีความสามารถในการซึมผ่านต่ำจึงมีการแพร่เป็นตัวควบคุมการชะละลาย

### 2.3.2.6 ความคดเคี้ยว

สำหรับในวัตถุที่เป็นก้อนแข็งซึ่งมีการแพร่เป็นตัวควบคุมการชะละลาย ปัจจัยอื่นที่ใช้หาอัตราการแพร่คือ ความคดเคี้ยว โดยเป็นการหาค่าอัตราส่วนระหว่างเส้นทางจริงและเส้นทางที่ปรากฏการแพร่ผ่านวัสดุ (Actual Path Length) ต่อสารประกอบตัวที่เคลื่อนที่ระหว่างสองจุด และระยะทางที่เป็นเส้นตรงระหว่างสองจุดนี้ วัตถุที่มีช่องว่างที่ละเอียด โครงสร้างของรูพรุนภายในจะมีความคดเคี้ยวสูง ทำให้มีผลคือ มีอัตราการชะละลายของสารต่ำ

### 2.3.2.7 ขนาดและรูปร่างของวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง

ปริมาณของสารที่ชะละลายออกมาจากวัตถุโดยการแพร่ จะขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะรูปร่างของวัตถุ ปัจจัยนี้มีผลโดยตรงกับปริมาณพื้นที่ผิวของวัตถุ โดยเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการแพร่ การแพร่จะเกิดได้เร็วในวัตถุที่มีค่าพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักมีค่าสูง การทดสอบการแพร่และเกณฑ์การแพร่จะอยู่บนพื้นฐานของคุณลักษณะของตัวอย่างวัตถุก้อนแข็ง คือ ต้องมีความหนาพอที่จะเก็บความเข้มข้นของสารภายในกึ่งกลางของก้อนตัวอย่างให้อยู่ในระดับเริ่มต้น ทั้งนี้ที่แกนกลางของตัวอย่างมีระดับของสารประกอบลดลงหรือหมดลงจะมีผลกระทบต่อผลการทดสอบ

### 2.3.2.8 ความไวต่อการกัดกร่อน

สำหรับวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง การกัดกร่อนและการสึกกร่อน จากอิทธิพลของน้ำและการแข็งตัว จะมีผลต่อการชะละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากสองปัจจัย อันดับแรก ได้แก่ การกัดกร่อนจะทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น อันดับสองคือ พื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกรเดียนท์ของความเข้มข้นของสารปนเปื้อนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้การชะละลายเพิ่มมากขึ้น

### 2.3.2.9 การแทรกซอนของเกลือ

การเกิดการแทรกซอนของเกลือ (Salt Intrusion) เช่น คลอไรด์ ผู้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก อาจเกิดความเสียหายอย่างรุนแรง เนื่องจากการออกซิเดชันของเหล็ก ทำให้ตัวคอนกรีตแตกร้าว ทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น และเกิดการชะละลายเพิ่มขึ้น

### 2.3.3 ปัจจัยภายนอก

ปัจจัยภายนอกหลายๆ ตัวมีความสำคัญต่อพฤติกรรมการชะละลายภายใต้สภาวะจริงที่เกิดขึ้น หลายตัวมีความเกี่ยวข้องกับปริมาณของเหลวที่วัตถุสัมผัสในช่วงเวลาที่แน่นอน เช่น อัตราการไหลของของเหลวในวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง และการเกิดเส้นทางการไหลในวัตถุที่เป็นเม็ดเล็กๆ ปัจจัยภายนอกนี้จะขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้ในการทดสอบ ตัวอย่างเช่น วัตถุมีการปกคลุมหรือไม่ปกคลุม ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการชะละลาย ได้แก่ การลดลงของอินทรีย์สารในวัตถุ หรือการลดลงของสารเนื่องจากอิทธิพลของแสง

### 2.3.4 สารอินทรีย์จากโครงสร้างของวัตถุ

ในการวิจัยที่ผ่านมามักจะมุ่งประเด็นไปที่สารอินทรีย์ จึงทำให้ความรู้เกี่ยวกับการชะละลายกับสารอินทรีย์ ตัวอย่างเช่น สารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAH) อย่างไรก็ตาม กระบวนการที่สำคัญของสารอินทรีย์ต่อกระบวนการชะละลายสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การแพร่
2. การเกิดคาร์บอนอินทรีย์ละลายเนื่องจากธรรมชาติของตัวมันที่ไม่ชอบน้ำ และมีความเกี่ยวข้องกับการรวมตัวของสารอินทรีย์
3. พีเอช รีดอกซ์ และเกลือ เนื่องจากการชะละลายของคาร์บอนอินทรีย์ละลายจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช รีดอกซ์ และเกลือ
4. การระเหย จำนวนของสารอินทรีย์อาจแสดงพฤติกรรมการชะละลาย โดยมีอิทธิพลจากการส่งผ่านของสถานะก๊าซ และอุณหภูมิก็อาจเป็นปัจจัยที่เพิ่มการชะละลาย
5. การเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ สารอินทรีย์หลายตัวมีแนวโน้มที่จะเกิดการสลายตัว เนื่องจากการเกิดการสลายตัวโดยแสง (Photochemical Degradation) การสลายตัวโดยจุลินทรีย์ (Microbial Degradation) การเกิดการสลายตัวจะขึ้นอยู่กับเวลา

ถึงแม้ว่าสารอินทรีย์หลายตัวที่เกิดการชะละลายอาจมีกระบวนการที่เหมือนกับสารอินทรีย์ เช่นการแพร่ แต่ก็ยังต้องมีการทดสอบอีกมาก ข้อเสนอของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการชะละลายจะแสดงอยู่ในตารางที่ 2.9 โดยปัจจัยทุกตัวอาจมีความสำคัญและความเกี่ยวข้องไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการทดสอบ



ตารางที่ 2.9 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการชะละลาย (Van der Sloot และ Dijkstra, 2004)

ปัจจัยทางเคมี	ปัจจัยทางกายภาพ	ปัจจัยภายนอก
<ul style="list-style-type: none"> <li>- การแตกตัว</li> <li>- พีเอช</li> <li>- รูปแบบของสารประกอบ</li> <li>- ปริมาณสารประกอบ/ การมีอยู่ของอนุภาคที่ละลายได้</li> <li>- การรับ - จ่ายอิเล็กตรอน</li> <li>- บัฟเฟอร์ของกรด - ด่าง</li> <li>- คาร์บอนอินทรีย์ละลาย</li> <li>- ส่วนประกอบของสารสกัด/ ความแรงไอออน</li> <li>- อุณหภูมิ</li> <li>- เวลา</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การไหลผ่านวัตถุ</li> <li>- การแพร่</li> <li>- การชะล้างที่ผิวสัมผัส</li> <li>- วัตถุที่เป็นเม็ดเล็ก ๆ/ วัตถุที่เป็นก้อนแข็ง</li> <li>- ขนาด (อนุภาคหรือก้อนตัวอย่าง)</li> <li>- ความพรุน</li> <li>- ความสามารถในการซึมผ่าน</li> <li>- ความคดเคี้ยว</li> <li>- การกีดกีดร่อน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ปริมาณของสารสกัด</li> <li>- เวลาในการสัมผัส</li> <li>- พีเอชของสิ่งแวดล้อม</li> <li>- อุณหภูมิ</li> <li>- การรับ - จ่ายอิเล็กตรอน</li> <li>- คาร์บอนอินทรีย์ละลาย/ การดูดซับ</li> </ul>

#### 2.4 การทดสอบการชะละลาย (Hartwell และ Calovini, 1999)

โดยทั่วไปสามารถแบ่งการทดสอบการชะละลายได้ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ Static Extraction tests และ Dynamic Extraction tests โดยการทดสอบแบบ Static Extraction นั้น การทดสอบจะใช้สารละลายเดียวที่กำหนดปริมาตร ส่วนการทดสอบแบบ Dynamic Extraction นั้น สารละลายที่ใช้มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตลอดช่วงการทดสอบ

##### 2.4.1 การทดสอบแบบ Static extraction

ทดสอบโดยใช้สารละลายที่กำหนดปริมาตรแน่นอนสัมผัสกับของเสียที่มีปริมาณตามที่กำหนดตลอดช่วงเวลาการทดสอบที่ระบุไว้โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสารละลาย โดยทั่วไปคือที่สิ้นสุดการทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป การทดสอบแบบ Static Extraction มีสมมุติฐานว่าสภาวะคงตัว (Steady state condition) เกิดขึ้นที่จุดสิ้นสุดของการทดลอง ชนิดของการทดสอบรวมทั้ง การทดสอบแบบที่มีการเขย่า (Agitated) ไม่เขย่า (Non-agitated) การสกัดแยก (Sequential chemical extraction tests) และการทดสอบแบบสร้างความเข้มข้น (Buildup tests)

### 2.4.1.1 การทดสอบแบบเขย่า

ในการทดสอบแบบเขย่านั้นของเสียและสารชะละลายผสมเข้าด้วยกันและเกิดการเขย่า ดังนั้นการทดสอบนี้จะถึงสภาวะคงตัวได้เร็วเท่าที่จะเป็นไปได้ ในการทดสอบโดยมากจะต้องมีขั้นตอนการลดขนาดของของเสียเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส ดังนั้น จึงทำให้ใช้เวลาสั้นลงในการเข้าถึงสภาวะคงที่ การทดสอบแบบเขย่าจะวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของระบบของเสีย/สารชะละลายมากกว่าทางฟิสิกส์และกลไกควบคุมอัตราการชะละลาย ด้วยเหตุผลนี้การทดสอบประเภทนี้จึงให้ผลที่เกินความเป็นจริงในการประเมินการปลดปล่อยของสารองค์ประกอบในช่วงสั้น ตัวอย่างสำหรับการทดสอบแบบเขย่านั้นรวมถึง TCLP, EP Tox, California EPA WET, SPLP และ CEN 292

### 2.4.1.2 การทดสอบแบบไม่เขย่า

การทดสอบแบบไม่เขย่านั้นของเสียและสารชะละลายได้รับการผสมกันแต่ไม่เขย่า โดยการทดสอบแบบดังกล่าวนี้เป็นการวิเคราะห์ทางด้านฟิสิกส์ และกลไกควบคุมอัตราการชะละลาย มากกว่าสมบัติทางเคมีของระบบของเสีย/สารชะละลาย ซึ่งอยู่ภายใต้สมมุติฐานว่าความสมบูรณ์ของโครงสร้างของของเสียส่งผลกระทบต่อปริมาณขององค์ประกอบที่จะชะละลายออกมาจากโครงสร้าง การทดสอบแบบไม่เขย่านั้นใช้เวลายาวนานกว่าในการเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อเทียบกับการทดสอบแบบเขย่า ตัวอย่างของการทดสอบประเภทนี้คือ Strategic Leach test (MCC-1) และ High Temperature Static Leach test (MCC-2) ทั้งสองวิธีจากประเทศแคนาดา

### 2.4.1.3 การทดสอบด้วยการสกัดทางเคมี

การทดสอบด้วยการสกัดทางเคมีเป็นการทดสอบแบบอนุกรมของการสกัดด้วยการเขย่าด้วยการใช้สารสกัดที่มีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีการทดสอบ 2 แบบ แบบแรกเตรียมการทดสอบหลายครั้ง แต่แต่ละการทดสอบนั้นจะใช้สารสกัดต่างกันไปโดยสมมุติว่าสารสกัดแต่ละชนิดนั้นสามารถสกัดองค์ประกอบที่สารสกัดที่มีความรุนแรงน้อยกว่าสกัดออกมาได้รวมกับสิ่งที่ปนเปื้อนที่เพิ่มออกมาอีกปริมาณหนึ่งหรือจำนวนมาก อีกวิธีหนึ่งคือ ของเสียที่มีปริมาณเดียวกันสามารถนำมาใส่ในสารชะละลายแต่ละลำดับโดยสมมุติว่าสารชะละลายในลำดับถัดมานั้นจะสกัดสารบางอย่างที่สารสกัดลำดับก่อนหน้านั้นสกัดออกมาไม่ได้ ในแต่ละกรณีอยู่ในสมมุติฐานที่ว่า การเพิ่มความรุนแรงของสารสกัดจะส่งผลให้สามารถสกัดสิ่งปนเปื้อนออกมาได้เพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างของการทดสอบด้วยการสกัดทางเคมีคือ ASTM's Sequential Batch Extraction of Wastes with Acidic Extraction Fluid ส่วนการทดสอบอื่นๆ ยังอยู่ในขั้นตอนของการวิจัยและพัฒนา

#### 2.4.1.4 การทดสอบแบบสร้างความเข้มข้น

วิธีการสำหรับการทดสอบแบบสร้างความเข้มข้น (Concentration build-up tests) กระทำได้โดยการนำของเสียที่มีปริมาณเท่ากันไปสัมผัสกับสารสกัดชนิดเดิมซ้ำๆ ที่อัตราสารชะละลายต่อของแข็งที่ต่ำ การทดสอบประเภทนี้จำลองของเหลวปริมาณหนึ่งที่ไหลผ่านเนื้อของของเสียด้วยความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนที่เพิ่มขึ้นในสารสกัด การทดสอบนี้อาจเป็นการจำลองที่ดีของรูพรุนซึ่งเป็นองค์ประกอบของของเสีย ตัวอย่างของการทดสอบประเภทนี้คือ Wisconsin's Standard Leach Test ขั้นตอนที่ C

#### 2.4.2 การทดสอบแบบ Dynamic Extraction

สารชะละลายจะได้รับการเปลี่ยนใหม่ แบบชนิดต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องอย่างใดอย่างหนึ่งเพื่อรักษาแรงขับในกระบวนการชะละลาย เนื่องจากความมั่นคงทางกายภาพของของเสียโดยทั่วไปยังคงรักษาไว้ได้ในช่วงระหว่างการทดสอบ และข้อมูลที่ได้แปรผันตามกับเวลา การสกัดแบบ Dynamic ให้ข้อมูลเกี่ยวกับค่าทางจลนศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของสิ่งปนเปื้อน โดยทั่วไปการทดสอบแบบ Dynamic นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น Serial batch tests, Flow-around tests, Flow-through tests และ Soxhlet tests

##### 2.4.2.1 การทดสอบแบบ Serial batch

ในการทดสอบแบบ Serial batch นั้นก่อนตัวอย่างที่นำมาทดสอบจำนวนหนึ่งจะถูกทำให้แตกเป็นก้อนเล็กๆ และนำไปผสมกับสารชะละลายก่อนทำการเขย่าตามเวลาที่กำหนดไว้ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเวลา สารชะละลายจะถูกแยกออกและเปลี่ยนสารชะละลายใหม่กลับเข้าไป การทดสอบเกิดขึ้นซ้ำๆ จนกว่าจะครบตามจำนวนของช่วงการทดสอบที่กำหนดไว้ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่วัดได้ในสารชะละลายแบบอนุกรมให้ข้อมูลทางจลนศาสตร์เกี่ยวกับการละลายของสารปนเปื้อน ตัวอย่างของการทดสอบประเภทนี้คือ Multiple Extraction Procedure (SW-846 Method 1320), NEN 7341 Availability Test (เนเธอร์แลนด์), NEN 7349 Serial Batch Test (เนเธอร์แลนด์) และ Graded Serial Batch test (US Army)

##### 2.4.2.2 การทดสอบแบบ Flow-around

การทดสอบแบบไหลรอบ (Flow-around) ปกติใช้ทดสอบกับตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นก้อนแข็ง (Monolithic) โดยวางก้อนตัวอย่างลงในหลอดทดสอบซึ่งมีพื้นที่ว่างอยู่โดยรอบก้อนตัวอย่าง และเติมสารชะละลายซึ่งจะไหลรอบก้อนตัวอย่าง สารชะละลายดังกล่าวอาจทำการเปลี่ยนใหม่อย่างต่อเนื่องในกรณีที่ศึกษาเป็นช่วงเวลา หรืออาจเปลี่ยนสารชะละลายเป็นครั้งคราว ในแต่ละกรณีนั้นอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็งแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของ

สารชะละลายต่อพื้นที่ผิวของก้อนตัวอย่าง ตัวอย่างของการทดสอบประเภทนี้คือ the ISO Leach Test 6961, ANSI 16-1, NEN 7345 Monolithic Diffusion test (เนเธอร์แลนด์) และ ASTM C 1220-92 (Static Leaching of Monolithic Waste Forms for disposal of Radioactive Wastes)

#### 2.4.2.3 การทดสอบแบบ Flow-through

การทดสอบแบบไหลผ่าน (Flow-through) มีความแตกต่างกับการทดสอบแบบไหลรอบ (Flow-around) ตรงที่สารชะละลายนั้นจะไหลผ่านก้อนตัวอย่าง ซึ่งแปลว่าก้อนตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบนั้นจะต้องมีความพรุนมากกว่าตัวอย่างที่เป็นก้อนแข็ง (Monolithic) พอสมควร นอกเหนือจากนั้นการทดสอบกระทำคล้ายกับในการทดสอบแบบไหลรอบ โดยทั่วไปแล้วการทดสอบแบบไหลผ่านนิยมติดตั้งในรูปของคอลัมน์ (Columns) โดยมีช่องทางให้สารชะละลายไหลผ่าน การเปลี่ยนแปลงของการไหลอาจเกิดขึ้นได้จากความนำไฟฟ้าของสารชะละลายหรือการอุดตันของระบบเนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กรวมไปถึงการเจริญเติบโตทางชีววิทยา (Biological growth) แต่การทดสอบแบบไหลผ่านสามารถติดตั้งเลียนแบบสภาวะจริงที่เกิดขึ้นได้ ตัวอย่างการทดสอบประเภทนี้คือ Waste Interface Leach test (แคนาดา), NVN 7344 column test และ ASTM's Column test

#### 2.4.2.4 การทดสอบแบบ Soxhlet

การทดสอบแบบ Soxhlet สามารถใช้ในการชะละลายของของเสียโดยการให้ของเสียสัมผัสกับสารชะละลายอย่างต่อเนื่อง ในการทดสอบประเภทนี้ สารชะละลายจะถูกเปลี่ยนใหม่อย่างต่อเนื่องด้วยสารชะละลายที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle leachant) จากสารชะละลายก่อนหน้านี้ที่นำสิ่งปนเปื้อนออกไปแล้ว การทดสอบนี้ถูกออกแบบมาเพื่อสกัดสิ่งปนเปื้อนออกมาให้ได้ปริมาณมากที่สุดและเร็วเท่าที่จะทำได้ ตัวอย่างการทดสอบคือ Soxhlet test (MCC-5s) (แคนาดา)

### 2.5 การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของ NEN 7375 (EA NEN 7375, 2004)

การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของ NEN 7375 เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาการชะละลายของสารประกอบจากวัสดุที่ถูกขึ้นรูป (Moulded) หรือเป็นก้อนแข็ง (Monolithic) โดยหลักการการแพร่ โดยทั่วไปจะเรียกการทดสอบนี้ว่า การทดสอบแบบแท็งก์ (Tank test)

วัตถุประสงค์ของการทดสอบแบบแพร่นี้เพื่อจำลองการชะละลายของสารประกอบอนินทรีย์จากวัสดุที่ถูกขึ้นรูปและวัสดุก้อนแข็งภายใต้สภาวะที่มีอากาศเป็นฟังก์ชันกับเวลา ในช่วงเวลา 64 วัน โดยการทดสอบนี้เป็นการประเมินธรรมชาติและคุณสมบัติของวัสดุภายใต้การทดลอง

โดยแช่ตัวอย่างไว้ในสารชะละลาย (น้ำปราศจากแร่ธาตุ น้ำที่มีค่าพีเอชเป็นกลาง) และเปลี่ยนสารชะละลายใหม่เมื่อถึงเวลาที่เหมาะสม ความเข้มข้นขององค์ประกอบในสารชะละลายที่สนใจจะถูกนำไปวิเคราะห์แยกกันในแต่ละช่วงการทดสอบ ส่วนค่าพีเอชในการชะละลายจะขึ้นอยู่กับวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้ โดยพื้นฐานของผลการทดสอบแบบแพร่ ปริมาณของสารแต่ละชนิดที่ชะละลายออกมาต่อหน่วยพื้นที่จะสามารถคำนวณได้ ปัจจัยอื่นๆ สามารถอนุมานได้จากการทดลองรวมทั้งการประเมินการชะล้างที่ผิวสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลว และสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของการชะละลาย ซึ่งสามารถใช้ในการประเมินการชะละลายในช่วงเวลาที่ยาวนานกว่าได้ โดยการทดสอบแบบแพร่ ไม่เหมาะสำหรับตัวอย่างที่สามารถละลายได้ในระหว่างการทดสอบ มาตรฐานการทดสอบการชะละลายนี้มีพื้นฐานมาจากมาตรฐานลักษณะการชะละลายของประเทศเนเธอร์แลนด์ NEN 7345

## 2.6 มาตรฐานสำหรับน้ำดื่ม

ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้มาตรฐานน้ำประปาของการประปานครหลวง ซึ่งนำเอามาตรฐานขององค์การอนามัยโลก (WHO) ปี 2006 มาปรับใช้ ดังตารางที่ 2.10 เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการชะละลายที่ได้จากการทดสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 2.10 มาตรฐานสำหรับน้ำดื่ม (การประปานครหลวง, 2549)

สาร	ค่าแนะนำ (มก./ล.)
สารหนู (Arsenic)	0.01
แคดเมียม (Cadmium)	0.003
โครเมียม (Chromium)	0.05
ไซยาไนด์ (Cyanide)	0.07
ตะกั่ว (Lead)	0.01
ปรอท (Inorganic Mercury)	0.006
เซเลเนียม (Selenium)	0.01
ฟลูออไรด์ (Fluoride)	1.5
คลอไรด์ (Chloride)	250
ทองแดง (Copper)	2.0
เหล็ก (Iron)	0.3
แมงกานีส (Manganese)	0.4
อลูมิเนียม (Aluminium)	0.1
โซเดียม (Sodium)	200
ซัลเฟต (Sulfate)	250
สังกะสี (Zinc)	3

## 2.7 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พวงรัตน์ ขจิตวิชยานุกูล และ เอกชัย ทวีกิจวานิช (2548) ได้ทำการศึกษาผลของโลหะหนัก ที่มีต่อโครงสร้างเฟสของปูนเม็ดในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยใช้โลหะหนัก 3 ชนิดคือ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$  และ  $\text{ZnO}$  และความเข้มข้นของโลหะหนักที่ใช้คือ ร้อยละ 0.1 0.5 1 และ 2 โดยน้ำหนัก นำวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ผสมกับโลหะหนักตามสัดส่วน แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,300 – 1,400 องศาเซลเซียส แล้วนำไปวิเคราะห์หาปูนขาวอิสระ ( $\text{CaO}$ ) และวิเคราะห์เฟสพื้นฐานของปูนเม็ดในรูปแบบผลึก Alite ( $\text{C}_3\text{S}$ ) Belite ( $\text{C}_2\text{S}$ ) และ Aluminate ( $\text{C}_3\text{A}$ ) โดยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) และ X-ray Diffraction (XRD) พบว่า โลหะหนักทั้ง 3 ชนิดคือ โครเมียม นิกเกิล และสังกะสี ส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างเฟสของปูนเม็ดที่แตกต่างกัน โดยโครเมียมส่งผลให้ค่า ร้อยละของปูนขาวอิสระเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของโครเมียมเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 2 ในทางตรง

ข้ามทั้งนิกเกิลและสังกะสีจะทำให้ค่าร้อยละของปูนขาวอิสระลดลง และสังกะสีทำให้เฟสของปูนเม็ดในรูปของ Aluminate เพิ่มขึ้น ขณะที่โครเมียมส่งผลให้ Alite ลดลง

Altun (1999) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราความร้อนต่อการเผาปูนเม็ด โดยการนำวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งมีส่วนผสมได้แก่ หินปูน ดินLoam และทราย มาทำการบดและเผา โดยใช้ความร้อนและเวลาสองแบบ คือ อุณหภูมิสุดท้ายที่ 1450 องศาเซลเซียส เวลาในการเผา 145 นาที และอัตราความร้อน 29.5 และ 3.85 เคลวินต่อนาที และอุณหภูมิสุดท้ายที่ 1410 องศาเซลเซียส เวลาในการเผา 112 นาที และอัตราความร้อน 36.4 และ 5.3 เคลวินต่อนาที แล้วนำปูนเม็ดที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ลักษณะการจัดเรียงตัวของผลึก Alite และ Belite การกระจายตัวของแคลเซียมออกไซด์ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันระหว่างสองตัวอย่าง สรุปได้ว่าสามารถเผาปูนเม็ดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาสั้นกว่า 145 นาที โดยจะต้องมีค่าอัตราความร้อนที่สูงกว่า

Dalton และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้กากตะกอนปนเปื้อนที่ขุดลอกจากท่าเรือนิวยอร์ก/นิวยอร์ก ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยทำการทดลองระดับห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับการเผาในเตาเผาปูนซีเมนต์ โดยการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ จะทำการเผาวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ร่วมกับกากตะกอนปนเปื้อนในเตาเผาไฟฟ้าโดยใช้ปริมาณกากตะกอน ร้อยละ 0 1.49 6.63 และ 12.3 โดยน้ำหนัก นำไปเผาที่อัตราความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส จากนั้นเผาที่อัตราความร้อน 15 องศาเซลเซียสต่อนาที จนอุณหภูมิได้ 1,450 องศาเซลเซียส แล้วให้อุณหภูมิอยู่ที่ 1,450 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์รูปแบบของสารประกอบ (XRD) พบว่า ผลึก Alite ในปูนเม็ดที่ได้จากการทดลองในเตาเผาปูนซีเมนต์มีค่ามากกว่าที่ได้จากการเผาในระดับห้องปฏิบัติการ และที่ปริมาณกากตะกอนสูงที่สุดคือร้อยละ 12.3 ก็จะมีปริมาณผลึก Alite สูงที่สุด และจากการหาปริมาณคลอไรด์อิสระพบว่าที่ปริมาณตะกอนร้อยละ 12.3 จะมีปริมาณคลอไรด์อิสระน้อยที่สุดด้วย

Hillier และคณะ (1999) ได้ทำการศึกษาการชะละลายระยะยาวของโลหะที่เป็นพิษจากคอนกรีตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้การทดสอบการชะละลายด้วยวิธี NVN 5432 maximum leachability test โดยทำการหล่อก้อนคอนกรีตขนาด 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำการบ่มก้อนคอนกรีตเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำก้อนคอนกรีตไปแช่ในน้ำสกัดคือน้ำที่ปราศจากไอออน โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำชะและเปลี่ยนน้ำสกัดใหม่เป็นเวลา 1.5 ชม. 6 ชม. 24 ชม. 4 วัน 16 วัน 64 วัน และ 256 วัน โดยน้ำชะที่เก็บได้จะถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าโลหะ โดยพบว่า มีค่าการชะละลายของแอนติ

โมนีและแคลเซียมต่ำกว่า 5 ไมโครกรัมต่อกรัม ค่าการชะละลายของปรอทต่ำกว่า 12 ไมโครกรัมต่อกรัม และค่าการชะละลายของเซเลเนียมต่ำกว่า 2 ไมโครกรัมต่อกรัม

Mulviya และ Chaudhary (2006) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการชะละลายของโลหะหนักที่ผ่านการปรับเสถียรและทำให้เป็นก้อนแข็ง โดยใช้ตะกอนที่มีโลหะหนักจากโรงงานผลิตโลหะโดยใช้อัตราส่วนระหว่างตะกอนแห้งต่อปูนซีเมนต์ 0 0.16 0.5 1.0 2.0 4.0 5.0 6.0 7.0 และ 8.0 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปทดสอบการชะละลายด้วยวิธี NEN 7345 แล้วนำน้ำชะที่เก็บได้ในช่วงเวลา 0.6 1 2.25 4 9 16 32 และ 64 วัน ไปวิเคราะห์ ค่าความนำไฟฟ้า ค่าพีเอช ค่าความเข้มข้นของโลหะและไอออนต่างๆ ผลการวิเคราะห์พบว่า ที่อัตราส่วนของตะกอนแห้งต่อปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นค่า พีเอช จะยังมีค่าลดลง แต่ค่าความนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ส่วนความแข็งแรงก็จะลดลงด้วยเช่นกัน จากผลการทดสอบการชะละลาย พบว่า การชะละลายของตะกั่วขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณตะกอนโลหะหนักที่มีอยู่ โดยจะชะละลายออกมาได้มากที่สุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 12 สังกะสีจะชะละลายออกมาเพียงร้อยละ 0.1-2.3 เนื่องจากส่วนใหญ่จะถูกจับอยู่ในปูนเม็ด แมงกานีส มีแนวโน้มในการชะละลายเพิ่มมากขึ้นหากมีปริมาณตะกอนเพิ่มมากขึ้น ส่วนโซเดียม โปแตสเซียม และคลอไรด์จะชะละลายออกมาร้อยละ 99 เกือบทุกอัตราส่วน

Shih และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนที่ปนโลหะหนักมาใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ โดยนำกากตะกอนที่ปนโลหะหนักจากอุตสาหกรรมขึ้นรูปโลหะปริมาณร้อยละ 15 มาเผาพร้อมกับวัตถุดิบหลักในการผลิตปูนซีเมนต์ จากการวิเคราะห์ ค่าสารประกอบหลักในปูนเม็ด พบว่าการรวมตัวของไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนเม็ดจะถูกปรับปรุงเนื่องจากการเพิ่มของโลหะหนัก โดยไตรแคลเซียมซิลิเกตจะไปยับยั้งการแทนที่ของกาก และมากกว่าร้อยละ 90 ของธาตุที่มีการระเหยได้สูง เช่น ปรอท จะกลายเป็นไอที่อุณหภูมิสูง และไม่ถึงร้อยละ 90 ของธาตุที่มีการระเหยได้น้อย เช่น ทองแดง โครเมียมและ นิกเกิล จะถูกจับอยู่ในปูนเม็ด และจากผลการทดสอบการชะละลายพบว่าไม่มีการชะละลายของสารออกมาในสภาวะที่เป็นกรด ดังนั้น การใช้กากตะกอนปนโลหะหนักเป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ไม่มีสารที่เป็นอันตรายชะละลายออกมา

Taweekitwanit (2004) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการชะล้างของโลหะหนักจากซีเมนต์โดยโลหะหนักในการศึกษานี้ ได้แก่ โครเมียม นิกเกิล และ สังกะสี ในการศึกษาพฤติกรรมการชะล้างนี้ วิธีการทดสอบมาตรฐาน ได้แก่ Microwave-assisted leach method 3015A, Availability leaching test (NEN 7341) และ pH static leach test จากผลการทดลองพบว่า โครเมียมและสังกะสีมีแนวโน้มที่จะถูกชะล้างออกมาจากซีเมนต์ได้ง่ายซึ่งมากกว่าร้อยละ 80 ของ โครเมียมและสังกะสี

นั้นจะสามารถถูกชะล้างสู่สิ่งแวดล้อมได้ ในขณะที่มีเพียงร้อยละ 3 ของนิกเกิลเท่านั้นที่ที่สามารถถูกชะล้างสู่สิ่งแวดล้อมได้ และจากการทดสอบด้วยวิธี pH Static Leach test จะพบว่าโครเมียมนั้นจะถูกชะล้างได้ดีที่น้ำชะล้างมีค่าพีเอช อยู่ในช่วง 4-10 สำหรับนิกเกิลและสังกะสีนั้น จะถูกชะล้างได้ดีที่น้ำชะล้างมีค่าพีเอช 4 และจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อน้ำชะล้างมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้ยังได้มีการทดสอบซีเมนต์ที่มีโลหะหนักผสมอยู่ว่าจัดเป็นของเสียอันตรายด้วย โดยวิธีที่ใช้ทดสอบคือ Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) และการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540 จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อวัตถุขี้มีโครเมียมผสมอยู่มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักซีเมนต์ที่ได้นั้นจัดว่าเป็นของเสียอันตราย ในขณะที่ นิกเกิลและสังกะสีนั้น เมื่อมีอยู่ในวัตถุขี้มากถึงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ก็ไม่จัดว่าเป็นของเสียอันตราย

Trezza และ Scian (2005) ได้ทำการศึกษาลักษณะทางเคมี และกายภาพของปูนเม็ดที่ใช้ของเสียได้แก่ Pyrolytic Carbon Petroleum Waste Carbon และเถ้าที่เหลือจากการเผาของเสียหลายชนิดเป็นเชื้อเพลิงทดแทน เปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่ได้ใช้เชื้อเพลิงทดแทน โดยทำการเผาวัตถุขี้ในการผลิตปูนซีเมนต์ ใช้ Pyrolytic carbon ร้อยละ 0.4 0.6 และ 0.8 โดยน้ำหนัก ใช้ Petroleum waste carbon ร้อยละ 5 10 และ 20 โดยน้ำหนัก และใช้เถ้าร้อยละ 0.03 0.06 และ 0.24 โดยน้ำหนัก ทำการเผาที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เผาโดยใช้เวลา 1 ชั่วโมง จากนั้น นำปูนเม็ดที่ได้มาวิเคราะห์ค่า รูปแบบของสารประกอบ พบว่าจากการใช้ Pyrolytic Carbon ทำให้ปริมาณของเฟสเปลี่ยนแปลงไป โดยมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างอ้างอิง และเป็นทุกๆ อัตราส่วน และจากการใช้ Petroleum Waste Carbon พบว่าจะมีผลึกของซิลิเกตต่ำกว่าตัวอย่างอ้างอิง และจากการใช้เถ้าจากการเผาของเสีย พบว่า ที่ร้อยละ 0.24 มีปริมาณผลึกในเฟสของปูนเม็ดสูงกว่าในตัวอย่างอ้างอิง ที่ร้อยละ 0.03 และ 0.06 ก็จะมีเฟสที่ใกล้เคียงกับตัวอย่างอ้างอิง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### การดำเนินการวิจัย

#### 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากมอร์ต้าที่ทำจากปูนซีเมนต์ ที่ใช้กากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน โดยแบ่งการทดลองได้ดังนี้

1. ขั้นที่ 1 ศึกษาลักษณะทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์และกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนัก
2. ขั้นที่ 2 การหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์ที่ใช้กากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน
3. ขั้นที่ 3 ศึกษาลักษณะทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์
4. ขั้นที่ 4 การหล่อก้อนมอร์ต้าและการทดสอบกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์และปูนซีเมนต์สำเร็จรูป
5. ขั้นที่ 5 ศึกษาการชะละลายแบบระยะสั้นและระยะยาวของปูนซีเมนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์และปูนซีเมนต์สำเร็จรูป

#### 3.2 ตัวอย่างวัตถุดิบในการผลิตปูน กากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักและปูนซีเมนต์สำเร็จรูปที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.2.1 ตัวอย่างวัตถุดิบในการผลิตปูน

การวิจัยครั้งนี้ ตัวอย่างวัตถุดิบในการผลิตปูนได้มาจากบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) อัตราส่วนของวัตถุดิบโดยประมาณประกอบด้วย หินปูน (Limestone) ร้อยละ 85 หินเชลลูมินา (Shale Mix) ร้อยละ 12 หินเชลซิลิกา (Shale Core) ร้อยละ 1.5 และแร่เหล็ก (Iron Ore) ร้อยละ 1.5



### 3.2.2 ตัวอย่างกากอุตสาหกรรมปนโลหะหนัก

กากอุตสาหกรรมปนโลหะหนักได้มาจากกระบวนการเจียร กิ่ง ขึ้นงานแผ่นโลหะในอุตสาหกรรมทำชิ้นส่วนและขึ้นรูปโลหะ พบว่ามีรหัสของเสียคือ 12 01 18 HA โดยนำมาเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการเผาพร้อมกับตัวอย่างวัตถุดิบปูนซีเมนต์

### 3.2.3 ตัวอย่างปูนซีเมนต์สำเร็จรูปที่ผลิตโดยกระบวนการเผาพร้อมกับกากของเสียอุตสาหกรรม

ตัวอย่างปูนซีเมนต์สำเร็จรูปที่ใช้กระบวนการเผาพร้อมกับกากของเสียอุตสาหกรรม จะใช้ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ตรานกอินทรี

## 3.3 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

### 3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เตาเผาอุณหภูมิสูง (High temperature muffle furnace)
2. ถ้วยใส่ตัวอย่างสำหรับเผา (Crucible)
3. เครื่องชั่งละเอียด 4 ทศนิยม
4. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
5. แผ่นกรองขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร
6. แผ่นกรองใยแก้วขนาดรูพรุน 0.6-0.8 ไมโครเมตร
7. หลอดทดลอง
8. ขวดรูปชมพู่
9. เครื่องบดปูนเม็ด
10. เครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary Agitator)
11. เครื่องย่อยสลายสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Digester)
12. เครื่อง ICP (Inductively Coupled Plasma Spectroscopy)
13. เครื่องวัดความนำไฟฟ้า (Conductivity meter)
14. เครื่อง XRD (X-ray Diffraction Spectroscopy)
15. เครื่อง XRF (X-ray Fluorescence Spectroscopy)
16. แบบสำหรับหล่อซีเมนต์
17. เครื่องแก้วสำหรับวัดดวง
18. อุปกรณ์สำหรับไตเตรท

19. ขวดโพลีเอทิลีน (Polyethylene)
20. แมกเนติกสเตอร์เรอร์ (Magnetic stirrer)
21. เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด
22. เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper)

### 3.3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ )
2. กรดไฮโดรฟลูออริก (HF)
3. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
4. กรดบอริก ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ )
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
6. กรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
7. กรดซिटริก ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ )
8. กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )

### 3.3.3 การเตรียมสารเคมี

1. การเตรียมสารละลายกรดบอริก  
ชั่งผงกรดบอริก 53.4647 กรัม ละลายในน้ำที่ปราศจากไอออน ปรับปริมาตรให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายกรดบอริกความเข้มข้น 0.87 โมลาร์
2. การเตรียมสารละลายฝนกรด  
นำน้ำกลั่นผสมสารละลายกรดซัลฟูริก และกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนค่าพีเอชมีค่าคงที่เท่ากับ 5
3. การเตรียมสารละลายโซเดียมซิเตรท  
นำสารละลายกรดซिटริกในปริมาณที่เหมาะสมมาปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 นอร์มอล
4. การเตรียมน้ำสกัด TCLP  
นำกรดอะซิติกเข้มข้น 5.7 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดที่มีน้ำกลั่นอยู่ 500 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร ถ้าเตรียมถูกต้องพีเอชจะมีค่าประมาณ  $2.88 \pm 0.05$

### 3.4 การดำเนินการทดลอง

#### 3.4.1 ขั้นที่ 1 ศึกษาลักษณะทางเคมี ของวัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์และกากอุตสาหกรรมป่นโลหะหนัก

##### 3.4.1.1 องค์ประกอบทางเคมี

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุในรูปออกไซด์ ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) โดยนำตัวอย่าง 10 กรัม บดให้ละเอียดที่ความเร็วในการบด 300 รอบต่อนาที แล้วนำไปใส่แบบพิมพ์อัดให้แน่นด้วยเครื่องอัด จากนั้นนำตัวอย่างในแบบพิมพ์ไปวิเคราะห์

##### 3.4.1.2 ชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมด (Total Heavy Metals)

ทำการย่อยสลายตัวอย่างโดยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digester) โดยวิธีมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 3052 โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งตัวอย่าง 0.5 กรัม ใส่ลงในหลอดเวสเซล
2. เติมกรดไนตริก  $9\pm 0.1$  มิลลิลิตร กรดไฮโดรคลอริก  $2\pm 2$  มิลลิลิตร และกรดไฮโดรฟลูออริก  $3\pm 0.1$  มิลลิลิตร
3. ปิดฝาหลอดเวสเซล จากนั้นนำเข้าเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส โดยแบ่งเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกอุณหภูมิ 0-180 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 5.5 นาที ช่วงที่ 2 อุณหภูมิคงที่ 180 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 9.5 นาที และช่วงที่ 3 ช่วงลดอุณหภูมิ ใช้เวลา 5-15 นาที
4. เมื่อถึงเวลาที่กำหนด นำหลอดเวสเซลออกจากเครื่อง ทิ้งให้เย็น และเติมกรดบอริก 37 มิลลิลิตร
5. ปิดฝาหลอดเวสเซล จากนั้นนำเข้าเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยแบ่งเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกอุณหภูมิ 0-160 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 13 นาที ช่วงที่ 2 ช่วงอุณหภูมิคงที่ 160 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 6 นาที ช่วงที่ 3 ช่วงลดอุณหภูมิ ใช้เวลา 5-15 นาที
6. เมื่อถึงเวลาที่กำหนด นำหลอดเวสเซลออกจากเครื่อง ทิ้งให้เย็น ได้สารละลายใส จากนั้นนำไปวิเคราะห์ชนิดและปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP

**ตารางที่ 3.1** การศึกษาลักษณะทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์และ  
กากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนัก

หัวข้อที่ศึกษา	มาตรฐาน/วิธี/เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์
1. องค์ประกอบทางเคมี	X-ray Fluorescence Spectroscopy
2. ชนิดและปริมาณของโลหะหนัก	เครื่องย่อยสลายสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ ของ US EPA SW-846 Method 3052 เครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectroscopy

**3.4.2 ขั้นที่ 2** การหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์ที่ใช้  
กากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน

ในการหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์ที่มีกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน จะทำการเตรียมกากอุตสาหกรรมโดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ และร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 200 จะได้กากอุตสาหกรรมที่มีลักษณะเป็นผงสีดำ ขนาดอนุภาค 75 ไมโครเมตรและเล็กกว่า และจากนั้นใช้ปริมาณกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักร้อยละ 0 1 และ 2 โดยน้ำหนัก คลุกเคล้ากับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์จนเป็นเนื้อเดียวกัน และทำการเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูงในห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 60 และ 75 นาที และเผาที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 60 และ 75 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี เพื่อเลือกปูนเม็ดที่จะทำการทดสอบต่อไป

**3.4.3 ขั้นที่ 3** ศึกษาลักษณะทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์

**3.4.3.1 องค์ประกอบทางเคมี**

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุในรูปออกไซด์ ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) โดยนำตัวอย่าง 10 กรัม บดให้ละเอียดที่ความเร็วในการบด 300 รอบต่อนาที แล้วนำไปใส่แบบพิมพ์อัดให้แน่นด้วยเครื่องอัด จากนั้นนำตัวอย่างในแบบพิมพ์ไปวิเคราะห์

### 3.4.3.2 รูปแบบผลึกของสารประกอบ

ตรวจวัดด้วยเครื่อง X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD) โดยใช้ปริมาณตัวอย่าง 5 กรัม ค่าที่ได้จากการวัดเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม  $2\theta$  และ Relative Intensity นำกราฟที่ได้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลในเครื่องมือ ซึ่งทำให้สามารถระบุชนิดขององค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างได้

### 3.4.3.3 ชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมด

ทำการย่อยสลายตัวอย่างโดยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digester) โดยวิธีมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 3052

### 3.4.3.4 ปริมาณของสารประกอบ

ทำการหาปริมาณของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ที่เผาได้ โดยนำค่าออกไซด์ที่ได้จากการหาองค์ประกอบทางเคมี มาคำนวณโดยวิธีของอาร์ เอช โบก (R. H. Bogue) ตามมาตรฐาน ASTM C150-07 และสมการโมดูลิ

#### สมการของ R. H. Bogue

$$C_3S = 4.071CaO - 7.60SiO_2 - 4.479Al_2O_3 - 2.859Fe_2O_3 \quad (1)$$

$$C_2S = 2.867SiO_2 - 0.7544C_3S \quad (2)$$

$$C_3A = 2.650Al_2O_3 - 1.692Fe_2O_3 \quad (3)$$

$$C_4AF = 3.043Fe_2O_3 \quad (4)$$

#### สมการ moduli

$$\text{Lime saturation factor (LSF)} = \frac{CaO}{2.8SiO_2 + 1.2Al_2O_3 + 0.65} \quad (5)$$

$$\text{Silica ratio (SR)} = \frac{SiO_2}{(Al_2O_3 + Fe_2O_3)} \quad (6)$$

$$\text{Alumina ratio (AR)} = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (7)$$

**ตารางที่ 3.2** การศึกษาลักษณะทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ที่มี  
ภาคอุตสาหกรรมปนโลหะหนักเป็นวัตถุอันตรายและเชื้อเพลิงทดแทน

หัวข้อที่ศึกษา	มาตรฐาน/วิธี/เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์
1. องค์ประกอบทางเคมี	X-ray Fluorescence Spectroscopy
2. รูปแบบผลึกของสารประกอบ	X-ray Diffraction Spectroscopy
3. ชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมด	เครื่องย่อยสลายสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ ตามวิธี US EPA SW-846 Method 3052 เครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectrometer
4. ปริมาณของสารประกอบ	สมการ R. H. Bogue (ASTM C150-07) สมการ Modulli

**3.4.4 ขั้นที่ 4 การหล่อก้อนมอร์ต้าและทดสอบกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ที่ได้จาก  
การสังเคราะห์และปูนซีเมนต์สำเร็จรูป**

ทำการหล่อก้อนมอร์ต้า โดยบ่มที่ระยะเวลา 1 7 และ 28 วัน ในแต่ละอายุบ่มจะทำ 3

ตัวอย่างและทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-05

- นำปูนเม็ดที่ผ่านการบดแล้วผสมกับยิปซัม โดยอัตราส่วนผงปูนต่อยิปซัมเท่ากับ 96 ต่อ 4
- นำปูนเม็ดที่ผสมยิปซัมแล้วมาผสมทราย ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2.75 และนำไปผสมกับน้ำในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.485
- ผสมให้เข้ากัน เทลงในแบบหล่อขนาด 5×5×5 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยแบ่งการเทเป็น 2 ชั้น ชั้นแรกหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร แล้วกระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้ง 32 ครั้ง ใน 10 วินาที แบ่งเป็น 4 รอบ
- เมื่อทำการกระทุ้งครบทุกช่องแล้วให้เทซีเมนต์มอร์ต้าที่เหลือลงในแบบหล่อให้เต็ม แล้วทำการกระทุ้งเช่นเดียวกับชั้นแรก เมื่อกระทุ้งเสร็จแล้วให้ซีเมนต์ก้อนมอร์ต้าสูงกว่าแบบหล่อเล็กน้อย
- ใช้เกรียงปาดผิวหน้าให้เรียบ
- เมื่อหล่อเสร็จเรียบร้อยแล้วทิ้งไว้ในแบบหล่อ 24 ชั่วโมง ก่อนแกะแบบออก
- นำไปทำการบ่มขึ้นที่ระยะเวลา 1 7 และ 28 วัน
- นำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด



**ตารางที่ 3.3** การหล่อก้อนมอร์ต้าและการทดสอบกำลังรับแรงอัดปูนซีเมนต์ที่ได้จากการ  
สังเคราะห์และปูนซีเมนต์สำเร็จรูป

หัวข้อที่ศึกษา	มาตรฐาน/วิธี/เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์
1. การหล่อก้อนมอร์ต้า	ASTM C109/C109M-05
2. การทดสอบกำลังรับแรงอัด	ระยะเวลาในการบ่ม 1 7 และ 28 วัน

**3.4.5 ขั้นที่ 5 การทดสอบการชะละลายของปูนซีเมนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์และ  
ปูนซีเมนต์สำเร็จรูป**

ในการทดสอบการชะละลายจะแบ่งเป็นการทดสอบการชะละลายระยะสั้น ได้แก่ การชะละลายตามมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 และการทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 1311 และการทดสอบการชะละลายระยะยาว ในการทดสอบการชะละลายระยะยาวทำได้โดย นำปูนซีเมนต์ที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมมาหล่อก้อนมอร์ต้าตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-05 แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าต่างๆ หลังจากนั้นจึงนำไปทดสอบการชะละลายโดยวิธีตามมาตรฐานของ EA NEN 7375

**3.4.5.1 ทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของประกาศกระทรวง  
อุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548**

การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 การวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ Extraction Fluid) ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์หลุมฝังกลบสำหรับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีลักษณะเป็นของแข็งที่สามารถบดได้ จะต้องนำไปร่อนหรือไปบดเพื่อให้สามารถร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 2 มิลลิเมตร (เบอร์ 10) ก่อนนำไปสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) หากมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (มก./ล.) น้อยกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) แสดงถึงของเสียที่ไม่เป็นอันตราย วิธี Waste Extraction Test (WET) มีขั้นตอนดังนี้

1. น้ำสกัดให้ใช้สารละลาย 0.2 โมลาร์ โซเดียมซัลเฟต ที่มีพีเอช  $5.0 \pm 0.1$  โดยเตรียมจากการนำสารละลายกรดซัลฟริก ในปริมาณที่เหมาะสมมาปรับพีเอชให้เป็น 5.0 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4.0 โมลาร์
2. สารละลายกรดซัลฟริก สามารถเตรียมได้โดยนำเอากรดซัลฟริกไปละลายในน้ำกลั่น (deionized water)
3. นำตัวอย่าง 50 กรัม ใส่ลงในภาชนะที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีน (ควรใช้ภาชนะที่ทำจากแก้วเมื่อต้องการวิเคราะห์หาสารอินทรีย์อันตราย) ภาชนะที่ใช้ในการสกัดควรผ่านการล้าง (rinsed) อย่างต่อเนื่องด้วยสารละลายกรดไนตริก ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการนำเอาสารละลายกรดไนตริกมาผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร
4. เติมน้ำสกัด 500 มิลลิลิตรลงในตัวอย่าง เมื่อเสร็จแล้วให้ทำการปิดฝาภาชนะอย่างรวดเร็ว และนำไปเขย่าโดยใช้ เทเบิลเชกเกอร์ (table shaker) หรือ โอเวอร์เฮด สเตอร์เรอร์ (overhead stirrer) หรือ โรตารี เอ็กซ์แทรกเตอร์ (rotary extractor) ซึ่งสามารถทำให้ของผสมอยู่ในสภาพถูกกวนผสมอยู่ตลอดเวลา (vigorously agitated suspension) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
5. จากนั้นนำเอาของผสมไปกรอง หรืออาจปั่นด้วยแรงเหวี่ยง (centrifuged) แล้วมากรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (membrane filter) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอนโดยใช้ thick-walled suction flask ที่สะอาด สำหรับของแข็งขนาดหยาบสามารถใช้ Pressure filtration แทน vacuum filtration ได้ สำหรับของแข็งขนาดละเอียดอาจต้องเหวี่ยงที่ความเร็วรอบถึง 10,000G ก่อนนำไปกรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (membrane filter) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน
6. ควรปรับอุณหภูมิในระหว่างการสกัดให้อยู่ระหว่าง 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส
7. ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะ (metal elements) เท่านั้น ให้ถ่ายสารละลายที่กรองได้จาก ข้อ 5. ลงในขวดโพลีเอทิลีน และปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดไนตริก จนความเข้มข้นของกรดในสารละลายผสม (สารละลายที่กรองได้จากข้อ 5. ผสมกับกรดไนตริก) เป็นร้อยละ 5 โดยปริมาตร (ให้ปรับสภาพให้เป็นกรดทันทีหลังจากผ่านการกรอง)
8. นำเอาของเหลวที่ผ่านการกรองไปทำการวิเคราะห์หาค่าของสารนั้นด้วยเครื่อง ICP

### 3.4.5.2 ทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานการชะละลายของ US EPA SW-846 Method 1311

ในการทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานการชะละลายของ US EPA SW-846 Method 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure หรือ TCLP) ซึ่งเป็นวิธีออกแบบมาเพื่อ

หาการชะละลายของทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลว ซึ่งเป็นการจำลองการย่อยสลายในหลุมฝังกลบ (Landfill) มีวิธีทดสอบดังต่อไปนี้

### 1. การเตรียมน้ำสกัด

น้ำสกัดชนิดที่ 1 เติมกรดอะซิติกเข้มข้น 5.7 มิลลิลิตร ลงในขวดที่มีน้ำกลั่นอยู่ 500 มิลลิลิตร เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 นอร์มัล จำนวน 64.3 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร ถ้าเตรียมถูกต้อง พีเอชจะมีค่าประมาณ  $4.93 \pm 0.05$

น้ำสกัดชนิดที่ 2 เติมกรดอะซิติกเข้มข้น 5.7 มิลลิลิตร ลงในขวดที่มีน้ำกลั่นอยู่ 500 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร ถ้าเตรียมถูกต้องพีเอชจะมีค่าประมาณ  $2.88 \pm 0.05$

### 2. การเลือกน้ำสกัดให้เหมาะสมในกรณีปริมาณของแข็งในตัวอย่าง $\leq 0.5\%$

(1) แบ่งตัวอย่างที่เป็นของแข็งขนาด  $\leq 1$  มิลลิเมตร จำนวน 500 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่น 96.5 มิลลิลิตร ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา (Watchglass) นำไปกวนด้วยแมกเนติกสเตอร์เลอร์เป็นเวลา 5 นาที วัดและจดค่าพีเอช ถ้า พีเอช  $< 5.0$  เลือกใช้น้ำสกัดชนิดที่ 1

(2) ถ้าพีเอช  $\leq 5.0$  เติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 นอร์มัล จำนวน 3.5 มิลลิลิตร ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา นำไปให้ความร้อนที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและตรวจวัดค่าพีเอช ถ้าพีเอช  $< 5$  เลือกใช้น้ำสกัดชนิดที่ 1 แต่ถ้าพีเอช  $> 5$  เลือกใช้น้ำสกัดชนิดที่ 2

### 3. วิธีการทดลอง มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) หากตัวอย่างเป็นของเหลวหรือมีของแข็ง (Dry solids) ปะปนในปริมาณที่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 ให้กรองตัวอย่างนั้นด้วยแผ่นกรองใยแก้ว (Glass fiber filter) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน แล้วนำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดยใช้เครื่อง ICP

(2) หากตัวอย่างมีของแข็งปนอยู่ในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 0.5 ให้นำมาทดสอบด้วยวิธีดังต่อไปนี้

2.1 นำตัวอย่างจำนวน 100 กรัม ใส่ลงในขวดโพลีโพรพิลีน

2.2 เลือกน้ำสกัดที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการทดสอบดังที่กล่าวไว้แล้วด้านบนเติมลงในขวด แล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง

2.3 เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary Agitator) ที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

2.4 กรองสารละลายจากการสกัด (Leachate) ด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน

2.5 นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วมาทำการปรับค่าพีเอชให้น้อยกว่า 2 ด้วยกรดไนตริกจากนั้นนำไปทำการวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเครื่อง ICP

### 3.4.5.3 การทดสอบการชะละลายแบบระยะยาว จะทำการทดลองดังนี้

1. การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสารละลายในรูปพรุนหรือโพรงของก้อนมอร์ต้า Pore Water test (PW)

เป็นการหาความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายที่อยู่ในรูปพรุนหรือโพรงของก้อนมอร์ต้าที่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยทำการบดก้อนมอร์ต้าผสมน้ำที่อัตราส่วนต่างๆ กัน แล้วหาค่าปริมาณของไอออน โดยมีวิธีการดังนี้

1.1 นำตัวอย่างปูนซีเมนต์บดให้มีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร ผสมกับน้ำปราศจากไอออนโดยมีค่าอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 200 100 50 10 2 1 และ 0.5 มิลลิลิตรต่อกรัม

1.2 นำไปเขย่าโดยเครื่องเขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้จนเกิดสมดุลการละลายของสารจากก้อนมอร์ต้าเป็นเวลา 7 วัน

1.3 จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองที่มีความพรุน 0.45 ไมโครเมตร วัดค่าพีเอช จากนั้นนำไปวัดค่าโลหะหนักโดยเครื่อง ICP

ตารางที่ 3.4 ค่าอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง (Liquid/Solid Ratio) ต่างๆ ที่ทำการศึกษา

ตัวอย่างที่	Liquid/Solid Ratio	ปริมาณปูนซีเมนต์ (กรัม)	ปริมาณน้ำ (มิลลิลิตร)
1	200	0.5	100
2	100	1	100
3	50	2	100
4	10	10	100
5	2	50	100
6	1	100	100
7	0.5	500	100

## 2. การศึกษาอิทธิพลของพีเอชต่อการละลายของสาร Acid Neutralization

### Capacity test (ANC)

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายกับค่าพีเอช โดยจะแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนคือ การไตเตรท (Titration) เพื่อหาปริมาณกรดไนตริกที่ใช้ในการปรับค่าพีเอช ของสารละลายที่มีมอร์ต้าแช่อยู่ที่สภาวะสมดุล และการทดลองแบบแบทช์ (Batch Experiment) โดยมีรายละเอียดของการทดลองดังนี้

#### 2.1 การไตเตรท

(1) บดตัวอย่างให้เล็กกว่า 1 มิลลิเมตร ผสมกับน้ำปราศจากไอออน ที่ค่าอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 มิลลิลิตรต่อกรัม

(2) ไตเตรทกับกรดไนตริกเข้มข้น 1 โมลาร์ เพื่อหาปริมาณกรดที่ใช้ในการปรับพีเอชให้มีค่าต่างๆ โดยหยุดกรดไนตริกกลงไป ทำการคนเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารละลายอยู่ในสภาวะสมดุลแล้ววัดค่าพีเอชจะได้จำนวนโมลของกรดไนตริกที่ใช้ในการปรับค่าพีเอช

#### 2.2 การทดลองแบบแบทช์

(1) นำตัวอย่างซีเมนต์ที่บดแล้ว ผสมกับน้ำปราศจากไอออน ที่ค่าอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 มิลลิลิตรต่อกรัม

(2) ปรับพีเอชโดยกรดไนตริกให้มีค่าต่างๆ อยู่ในช่วงพีเอช 4-12 นำไปเขย่าโดยเครื่องเขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ให้สารละลายอยู่ในสภาวะสมดุลของการละลายของสารเป็นเวลา 7 วัน

(3) นำของเหลวที่ได้กรองด้วยกระดาษกรองที่มีความพรุน 0.45 ไมโครเมตร วัดค่าพีเอช จากนั้นนำไปวัดค่าโลหะหนักโดยเครื่อง ICP

## 3. การทดสอบการชะละลาย Monolithic Leaching test (ML)

### EA NEN 7375

1. หล่อก้อนมอร์ต้าขนาด 5×5×5 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ASTM C109/C109M-05) โดยใช้ปูนที่ได้จากการสังเคราะห์และปูนซีเมนต์สำเร็จรูป ชั่งน้ำหนัก และหาพื้นที่ผิวของก้อนตัวอย่าง

2. แช่ก้อนซีเมนต์ที่หล่อไว้ในน้ำสกัด โดยน้ำสกัดที่ใช้ได้แก่ น้ำปราศจากไอออน ฝนกรดสังเคราะห์ และน้ำสกัด TCLP โดยมีค่าของเหลวต่อพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 10 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร

3. เก็บตัวอย่างของเหลวไปวิเคราะห์ที่เวลา 0.25 1 2 4 9 16 36 และ 64 วัน และเติมน้ำสกัดใหม่ทุกครั้งที่เก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์

4. นำของเหลวไปวิเคราะห์ค่าต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) วัดทันที ได้แก่ ค่าพีเอช และความนำไฟฟ้า



(2) วัดที่หลัง ได้แก้ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักโดยเครื่อง ICP

#### 4. ปริมาณโลหะหนัก

ทำการย่อยสลายตัวอย่างโดยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digester) โดยวิธีมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 3052 แล้วนำไปวัดโดยเครื่อง ICP

ตารางที่ 3.5 การทดสอบการชะละลายระยะยาวของปูนซีเมนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์และปูนซีเมนต์สำเร็จรูป

หัวข้อที่ศึกษา	มาตรฐาน/วิธี/เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์
1. องค์ประกอบทางเคมีของสารละลายในรูป รุนหรือ โพรงของก้อนคอนกรีต	ผสมซีเมนต์กับน้ำปราศจากไอออนที่อัตราส่วน L/S Ratio 200 100 50 10 2 1 และ 0.5 มล./ก. ทิ้งไว้ 7 วันจนเกิดสมมูล แล้วนำไปวัดโลหะหนัก
2. อิทธิพลของพีเอชต่อการละลายของสาร	ผสมซีเมนต์กับน้ำปราศจากไอออน ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 4-12 ทิ้งไว้ 7 วันจนเกิดสมมูล แล้ววัดค่าพีเอชและวัดโลหะหนัก
3. การชะละลาย	EA NEN 7375
- พีเอช	เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter)
- ความนำไฟฟ้า	เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity meter)
4. ปริมาณโลหะหนัก	เครื่องย่อยสลายสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ ของ US EPA SW-846 Method 3052 เครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectrometer

ศูนย์วิจัยทรัพยากรชีวภาพ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์และกากอุตสาหกรรมปณโลหะหนัก

##### 4.1.1 ปริมาณสารประกอบและโลหะหนักในวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์

ตารางที่ 4.1 ปริมาณสารประกอบและโลหะหนักในวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์

สารประกอบ	ค่าที่วัดได้ (%)	ชนิดโลหะหนัก	ค่าที่วัดได้ (มก./กก.)
CaO	42.15	Cd	104.09
SiO <sub>2</sub>	14.99	Cr	34.64
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.53	Cu	29.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.23	Ni	36.95
MgO	1.26	Fe	6,841.19
K <sub>2</sub> O	0.31	Mn	1,729.45
Na <sub>2</sub> O	0.07	Pb	26.88
SO <sub>3</sub>	0.17	Tl	12.28
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	V	52.58
Cl	0.01	Zn	73.48
TiO <sub>2</sub>	0.17		
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05		

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์วัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์และกากอุตสาหกรรมปณโลหะหนัก พบว่าวัตถุดิบที่นำมาใช้สำหรับการสังเคราะห์ตัวอย่างซีเมนต์นั้นมีความเหมาะสม เพราะการคำนวณองค์ประกอบหลักทางเคมีของวัตถุดิบด้วยสมการ โมดูลัสแล้วค่า LSF, SR และ AR ที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานเดียวกับที่ใช้กันทั่วไปในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ โดยค่าที่คำนวณได้เทียบกับมาตรฐานแสดงดังตารางที่ 4.2

$$\text{Lime saturation factor (LSF)} = \frac{\text{CaO}}{(2.8\text{SiO}_2 + 1.2\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65\text{Fe}_2\text{O}_3)} \quad (1)$$

$$\text{Silica ratio (SR)} = \frac{\text{SiO}_2}{(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)} \quad (2)$$

$$\text{Alumina ratio (AR)} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (3)$$

ตารางที่ 4.2 ค่าโมดูลัสของวัตถุดิบที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับมาตรฐาน

ค่าโมดูลัส	ค่าที่คำนวณได้	ค่ามาตรฐาน
LSF	88.88	88 - 105
SR	2.60	1.4 - 4.2
AR	1.28	0.6 - 4.2

#### 4.1.2 ความเข้มข้นโลหะหนักในกากตะกอนอุตสาหกรรม

กากอุตสาหกรรมปนโลหะหนักได้มาจากกระบวนการเจียร กิ่ง ขึ้นงานแผ่นโลหะในอุตสาหกรรมทำชิ้นส่วนและขึ้นรูปโลหะ พบว่ามีรหัสของเสียคือ 12 01 18 HA ซึ่งจัดเป็นของเสียอันตราย สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณของโลหะหนักทั้งหมดด้วยวิธีการย่อยด้วยกรดโดยเครื่องไมโครเวฟ และวัดปริมาณของโลหะหนักด้วยเครื่อง inductively coupled plasma spectroscopy (ICP) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งพบว่าปริมาณของ โครเมียม แคดเมียม ทองแดง นิกเกิล เกินจากค่ามาตรฐาน Total Threshold Limit Concentration (TTLC) ของกรมโรงงานอุตสาหกรรมในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 และมีปริมาณของโลหะหนักปริมาณสูง จากการที่พบปริมาณของเหล็กมากนั้น ทำให้สามารถนำของเสียดังกล่าวมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนแร่เหล็กในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาการนำกากของเสียดังกล่าวมาศึกษาการแทนที่แร่เหล็กในวัตถุดิบสำหรับกระบวนการเผาปูนซีเมนต์โดยใช้หลักการแทนที่ของเสียดังกล่าวในวัตถุดิบสำหรับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยทำการแทนที่เริ่มต้นตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 2 นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังสนใจศึกษาผลกระทบชะละลายระยะยาวของโลหะหนัก โครเมียม แคดเมียม ทองแดง เหล็ก และ นิกเกิล เนื่องจากเป็นโลหะหนักห้าตัวแรกที่มีปริมาณมากในตัวอย่างกากอุตสาหกรรมปนโลหะหนัก

ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นโลหะหนักในกากอุตสาหกรรมปูน โลหะหนักเปรียบเทียบกับค่า  
มาตรฐาน Total Threshold Limit Concentration (TTLC)

ชนิดโลหะ หนัก	ค่าที่วัดได้ (มก./ กก.)	มาตรฐาน (มก./ กก.)
As	-	500
Cr	<b>8,190.96</b>	<b>500</b>
Cd	<b>707.78</b>	<b>100</b>
Cu	<b>950.00</b>	<b>2,500</b>
Pb	74.00	1,000
Hg	27.07	20
Zn	475.68	5,000
Tl	25.75	700
V	95.52	2,400
Ni	<b>2,290.96</b>	<b>2,000</b>
K	484.92	-
Fe	<b>108,526.80</b>	-

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิและเวลา ต่างๆ กัน

##### 4.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยทำการ  
แทนที่กากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักร้อยละ 0 1 และ 2 จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ  
กัน ได้แก่ 1,400 องศาเซลเซียส 30 นาที 1,400 องศาเซลเซียส 60 นาที 1,400 องศาเซลเซียส 75 นาที  
1,450 องศาเซลเซียส 30 นาที 1,450 องศาเซลเซียส 60 นาที และที่ 1,450 องศาเซลเซียส 75 นาที  
นำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี และนำมาคำนวณ หาค่าโมดูลัสของปูนซีเมนต์ เพื่อนำไป  
เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน

จากนั้นนำค่าองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์มาคำนวณปริมาณสารประกอบหลัก ได้แก่  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  และ  $C_4AF$  โดยใช้วิธีของ อาร์ เอช โบก (R. H. Bogue) ตามมาตรฐาน ASTM C150 ซึ่งหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C_3S = 4.071CaO - 7.600SiO_2 - 6.718Al_2O_3 - 1.430Fe_2O_3 - 2.852SO_3 \quad (4)$$

$$C_2S = 2.867SiO_2 - 0.7544C_3S \quad (5)$$

$$C_3A = 2.650Al_2O_3 - 1.692Fe_2O_3 \quad (6)$$

$$C_4AF = 3.043Fe_2O_3 \quad (7)$$

ค่าสารประกอบหลักที่ได้จากการวิเคราะห์ ค่าโมดูลัส และองค์ประกอบหลักทางเคมีที่คำนวณได้ แสดงดังตารางที่ 4.4 – 4.15

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ จะเห็นได้ว่า ปูนซีเมนต์ที่ได้ทำการสังเคราะห์ในเตาเผาห้องปฏิบัติการ มีองค์ประกอบทางเคมี อยู่ในช่วงค่าที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และจากการนำไปคำนวณหาค่า LSF, SR และ AR โดยสมการ โมดูลัส ค่าที่ได้ก็อยู่ในช่วงที่นิยมใช้เช่นเดียวกันดังนั้น ปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์โดยการเผา ร่วมกับกากตะกอนอุตสาหกรรมจึงสามารถนำไปใช้ได้จริง

เมื่อสังเกตปริมาณของเหล็กออกไซด์ในตัวอย่างปูนซีเมนต์สังเคราะห์นั้นพบว่าสามารถแทนที่กากตะกอนของเสียได้สูงสุดที่ร้อยละ 2 เนื่องจากปริมาณของเหล็กออกไซด์จะมากเกินไปจะทำให้เกิดการองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ได้

จากตารางค่าโมดูลัสและค่าสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียสและ 1,450 องศาเซลเซียสของทุกอุณหภูมิ พบว่าปริมาณของ  $C_3A$  มีแนวโน้มลดลงในขณะที่ ปริมาณของ  $C_4AF$  มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น น่าจะมีผลมาจากปริมาณแร่เหล็กที่มีมากขึ้นในตัววัตถุดิบทำให้การเกิดโครงสร้างขององค์ประกอบทางเคมีไปเกิดเป็น  $C_4AF$  ได้มากกว่า  $C_3A$  นั่นเอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส 30 นาที

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปริมาณตะกอน			ค่าทั่วไปที่นิยมใช้
	0%	1%	2%	
CaO	64.25	63.84	63.01	60-67
SiO <sub>2</sub>	23.40	22.81	21.69	17-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.27	5.06	4.75	3-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.09	4.97	6.63	0.5-6
MgO	1.93	1.95	1.94	0.1-4
K <sub>2</sub> O	0.27	0.29	0.32	0.1-1.8
Na <sub>2</sub> O	0.13	0.13	0.12	0.1-1.8
SO <sub>3</sub>	0.05	0.04	0.04	0.5-3
สารประกอบอื่นๆ	0.61	0.91	1.50	0.5-3
รวม	100	100	100	100

ตารางที่ 4.5 ค่าโมดูลัสและค่าสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส 30 นาที

ค่าโมดูลัส	ค่าที่ได้จากการคำนวณ			ค่ามาตรฐาน (%)
	0%	1%	2%	
LSF	86.36	87.36	89.20	90 – 101
SR	2.50	2.27	1.91	1.4 - 4.2
AR	1.29	1.02	0.72	0.6 – 4.2
สารประกอบหลัก				
C <sub>3</sub> S	42.47	45.42	50.33	45 – 55
C <sub>2</sub> S	35.05	31.14	24.22	15 – 35
C <sub>3</sub> A	7.05	5.00	1.36	7 – 15
C <sub>4</sub> AF	12.42	15.11	20.15	5 - 10

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส 60 นาที

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปริมาณตะกอน			ค่าทั่วไปที่นิยมใช้
	0%	1%	2%	
CaO	65.49	64.49	63.44	60-67
SiO <sub>2</sub>	22.31	21.82	21.15	17-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.12	5.15	4.92	3-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.53	5.09	6.71	0.5-6
MgO	1.90	1.90	1.86	0.1-4
K <sub>2</sub> O	0.18	0.25	0.35	0.1-1.8
Na <sub>2</sub> O	0.12	0.12	0.12	0.1-1.8
SO <sub>3</sub>	0.08	0.04	0.04	0.5-3
สารประกอบอื่นๆ	1.27	1.14	1.41	0.5-3
รวม	100	100	100	100

ตารางที่ 4.7 ค่าโมดูลัสและค่าสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส 60 นาที

ค่าโมดูลัส	ค่าที่ได้จากการคำนวณ			ค่ามาตรฐาน (%)
	0%	1%	2%	
LSF	92.48	91.50	91.45	90 – 101
SR	2.58	2.13	1.82	1.4 - 4.2
AR	1.45	1.01	0.73	0.6 – 4.2
สารประกอบหลัก				
C <sub>3</sub> S	57.57	54.85	54.93	45 – 55
C <sub>2</sub> S	20.54	21.18	19.18	15 – 35
C <sub>3</sub> A	7.60	5.04	1.68	7 – 15
C <sub>4</sub> AF	10.74	15.46	20.40	5 - 10

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส 75 นาที

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปริมาณตะกอน			ค่าทั่วไปที่นิยมใช้
	0%	1%	2%	
CaO	64.01	63.70	62.88	60-67
SiO <sub>2</sub>	22.77	22.87	21.61	17-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.45	5.11	4.79	3-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.15	5.00	6.72	0.5-6
MgO	1.92	1.93	1.94	0.1-4
K <sub>2</sub> O	0.18	0.22	0.29	0.1-1.8
Na <sub>2</sub> O	0.12	0.12	0.12	0.1-1.8
SO <sub>3</sub>	0.09	0.05	0.04	0.5-3
สารประกอบอื่นๆ	1.31	1.00	1.61	0.5-3
รวม	100	100	100	100

ตารางที่ 4.9 ค่าโมดูลัสและค่าสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส 75 นาที

ค่าโมดูลัส	ค่าที่ได้จากการคำนวณ			ค่ามาตรฐาน (%)
	0%	1%	2%	
LSF	87.81	86.90	89.15	90 – 101
SR	2.37	2.26	1.88	1.4 - 4.2
AR	1.31	1.03	0.71	0.6 – 4.2
สารประกอบหลัก				
C <sub>3</sub> S	44.95	44.05	49.97	45 – 55
C <sub>2</sub> S	31.39	32.33	24.27	15 – 35
C <sub>3</sub> A	7.42	5.11	1.31	7 – 15
C <sub>4</sub> AF	12.61	15.16	20.44	5 - 10

ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส 30 นาที

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปริมาณตะกอน			ค่าทั่วไปที่นิยมใช้
	0%	1%	2%	
CaO	64.39	63.88	63.01	60-67
SiO <sub>2</sub>	23.86	22.52	21.44	17-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.65	5.18	4.70	3-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.35	5.00	6.72	0.5-6
MgO	1.90	1.89	1.94	0.1-4
K <sub>2</sub> O	0.22	0.24	0.32	0.1-1.8
Na <sub>2</sub> O	0.20	0.12	0.12	0.1-1.8
SO <sub>3</sub>	0.06	0.04	0.04	0.5-3
สารประกอบอื่นๆ	0.37	1.13	1.71	0.5-3
รวม	100	100	100	100

ตารางที่ 4.11 ค่าโมดูลัสและค่าสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส 30 นาที

ค่าโมดูลัส	ค่าที่ได้จากการคำนวณ			ค่ามาตรฐาน (%)
	0%	1%	2%	
LSF	85.12	88.23	90.17	90 – 101
SR	2.65	2.21	1.88	1.4 - 4.2
AR	1.69	1.04	0.70	0.6 – 4.2
สารประกอบหลัก				
C <sub>3</sub> S	38.07	47.02	52.60	45 – 55
C <sub>2</sub> S	39.68	29.08	21.78	15 – 35
C <sub>3</sub> A	9.30	5.27	1.10	7 – 15
C <sub>4</sub> AF	10.19	15.19	20.43	5 - 10

ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส 60 นาที

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปริมาณตะกอน			ค่าทั่วไปที่นิยมใช้
	0%	1%	2%	
CaO	64.16	64.25	63.49	60-67
SiO <sub>2</sub>	23.81	21.85	21.10	17-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.37	5.63	4.96	3-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.36	5.11	6.61	0.5-6
MgO	1.75	1.83	1.89	0.1-4
K <sub>2</sub> O	0.26	0.26	0.32	0.1-1.8
Na <sub>2</sub> O	0.13	0.12	0.12	0.1-1.8
SO <sub>3</sub>	0.09	0.05	0.04	0.5-3
สารประกอบอื่นๆ	0.07	0.90	1.47	0.5-3
รวม	100	100	100	100

ตารางที่ 4.13 ค่าโมดูลัสและค่าสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส 60 นาที

ค่าโมดูลัส	ค่าที่ได้จากการคำนวณ			ค่ามาตรฐาน (%)
	0%	1%	2%	
LSF	84.01	90.31	91.69	90 – 101
SR	2.45	2.03	1.83	1.4 - 4.2
AR	1.90	1.10	0.75	0.6 – 4.2
สารประกอบหลัก				
C <sub>3</sub> S	32.62	50.38	55.29	45 – 55
C <sub>2</sub> S	43.65	24.64	18.80	15 – 35
C <sub>3</sub> A	11.20	6.26	1.95	7 – 15
C <sub>4</sub> AF	10.22	15.54	20.09	5 - 10



ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส 75 นาที

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปริมาณตะกอน			ค่าทั่วไปที่นิยมใช้
	0%	1%	2%	
CaO	64.28	63.89	63.17	60-67
SiO <sub>2</sub>	23.84	22.54	21.56	17-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.68	5.34	4.77	3-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.33	5.03	6.64	0.5-6
MgO	1.86	1.86	1.91	0.1-4
K <sub>2</sub> O	0.16	0.26	0.30	0.1-1.8
Na <sub>2</sub> O	0.12	0.12	0.12	0.1-1.8
SO <sub>3</sub>	0.07	0.04	0.04	0.5-3
สารประกอบอื่นๆ	0.66	0.92	1.49	0.5-3
รวม	100	100	100	100

ตารางที่ 4.15 ค่าโมดูลัสและค่าสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส 75 นาที

ค่าโมดูลัส	ค่าที่ได้จากการคำนวณ			ค่ามาตรฐาน (%)
	0%	1%	2%	
LSF	85.01	87.91	89.86	90 – 101
SR	2.65	2.17	1.89	1.4 - 4.2
AR	1.71	1.06	0.72	0.6 – 4.2
สารประกอบหลัก				
C <sub>3</sub> S	37.60	45.75	51.80	45 – 55
C <sub>2</sub> S	39.99	30.10	22.72	15 – 35
C <sub>3</sub> A	9.41	5.65	1.42	7 – 15
C <sub>4</sub> AF	10.11	15.28	20.17	5 - 10

#### 4.2.2 การเลือกอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์

ในการเลือกอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์ที่ทำการแทนที่ภาคตะกอนอุตสาหกรรมที่อัตราส่วนร้อยละ 0 1 และ 2 จะนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี เพื่อคำนวณหาค่าโมดูลัสและค่าองค์ประกอบหลัก ได้แก่  $C_3S$   $C_2S$   $C_3A$  และ  $C_4AF$  โดยมีเกณฑ์ในการตัดสินใจดังนี้

1. มีค่าสารประกอบหลักอยู่ในช่วงมาตรฐานที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์
2. มีค่าโมดูลัสอยู่ในช่วงมาตรฐานที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์
3. มีค่าองค์ประกอบหลักในปูนซีเมนต์อยู่ในช่วงมาตรฐานที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่า มีค่าอยู่ในช่วงมาตรฐานทุกตัวอย่างที่ทำการสังเคราะห์ ดังนั้น จึงทำการวิเคราะห์จากค่าโมดูลัสและค่าองค์ประกอบหลักในปูนซีเมนต์เป็นหลัก

เมื่อวิเคราะห์ปูนซีเมนต์ที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที มีเมื่อคำนวณหาค่าโมดูลัส พบว่า ค่า LSF มีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐาน และค่า  $C_3S$  ที่ ตัวอย่าง 0% มีค่าน้อย ซึ่งจะทำให้มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดในระยะแรก

ปูนซีเมนต์ที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที มีค่าโมดูลัสอยู่ในช่วงมาตรฐาน และองค์ประกอบหลัก ได้แก่  $C_3S$  และ  $C_2S$  อยู่ในช่วงมาตรฐานเช่นเดียวกัน

ปูนซีเมนต์ที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส เวลา 75 นาที ค่าโมดูลัสและค่าองค์ประกอบหลัก น้อยกว่ามาตรฐาน

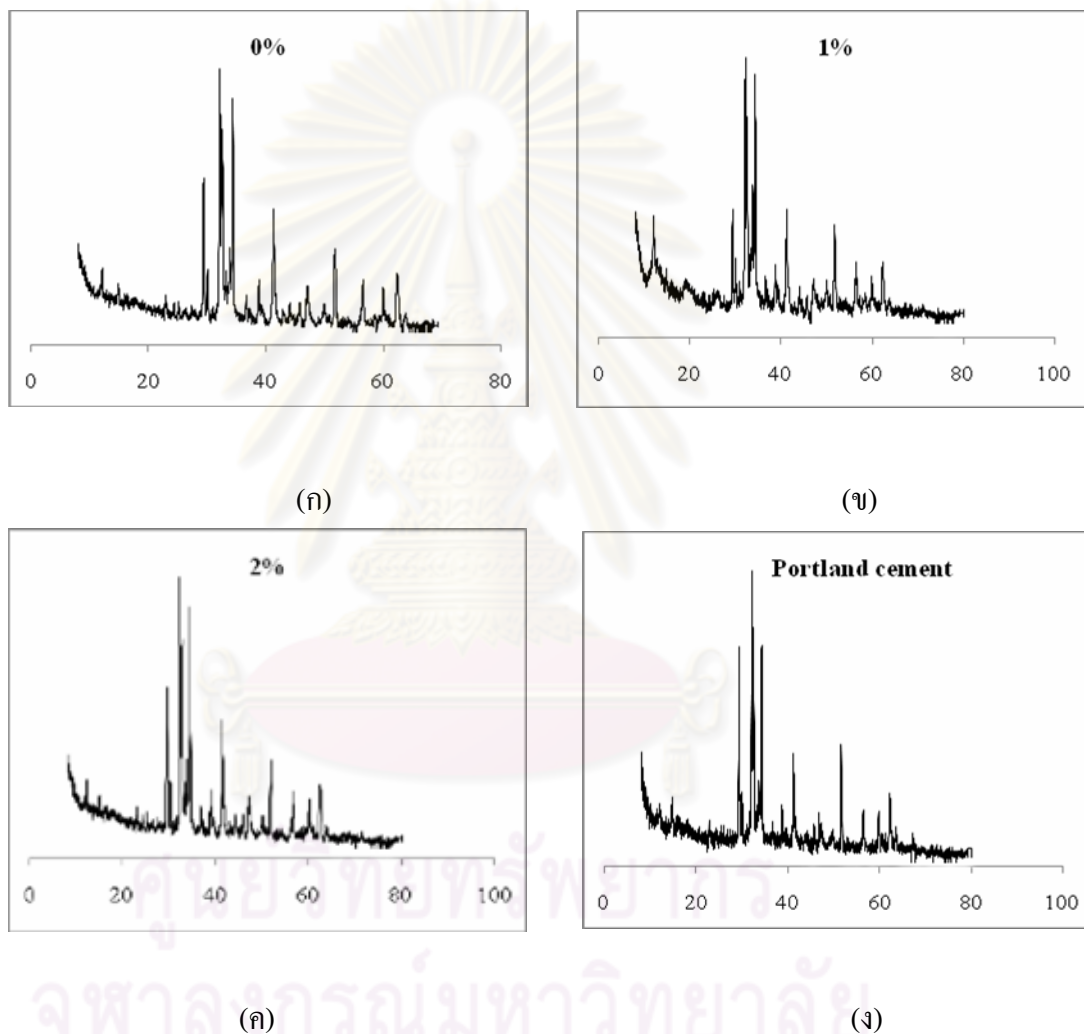
ปูนซีเมนต์ที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส เวลา 30 60 และ 75 นาที มีรูปแบบเหมือนกันคือมีค่าโมดูลัสน้อยกว่ามาตรฐาน และค่าองค์ประกอบหลัก คือ  $C_2S$  ที่ตัวอย่าง 0% มีค่าเกินในช่วงมาตรฐานมีผลทำให้การพัฒนา กำลังรับแรงอัดเกิดขึ้นช้า

ในตัวอย่างที่ทำการสังเคราะห์ทุกตัวอย่างจะมีค่าองค์ประกอบหลัก คือ  $C_4AF$  สูงกว่ามาตรฐานทุกตัวอย่างเนื่องมาจาก ในภาคตะกอนอุตสาหกรรมที่ใช้แทนที่ มีปริมาณของเหล็กมาก จึงทำให้เกิด  $C_3A$  น้อย เนื่องจาก  $C_3A$  จะไปจับตัวกับเหล็กเกิดเป็น  $C_4AF$  โดย  $C_4AF$  มีผลทำให้ซีเมนต์ทำปฏิกิริยาและก่อตัวได้อย่างรวดเร็ว และมีการพัฒนาของกำลังรับแรงอัดได้เร็ว

จากการพิจารณาจึงเลือกที่จะทำการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที เพื่อให้คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ใกล้เคียงกับมาตรฐานมากที่สุดเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบขั้นตอนต่างๆ ต่อไป

### 4.2.3 การวิเคราะห์รูปแบบผลึกของสารประกอบในปูนเม็ด

ผลการวิเคราะห์รูปแบบผลึกของสารประกอบในปูนเม็ดโดยเครื่อง X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD) แสดงดังรูปที่ 4.1 สังเกตเห็นว่า รูปแบบของกราฟที่ได้จากการวัดของปูนเม็ดที่ได้จากการสังเคราะห์กับปูนซีเมนต์ที่ได้จากการกระบวนการผลิตในโรงงานปูนซีเมนต์มีความคล้ายคลึงกัน



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์รูปแบบผลึกของสารประกอบในปูนซีเมนต์ (ก) ปูนเม็ดที่สังเคราะห์ไม่มีการแทนที่กากตะกอน (ข) ปูนเม็ดที่สังเคราะห์โดยการแทนที่กากตะกอน 1% (ค) ปูนเม็ดที่สังเคราะห์โดยการแทนที่กากตะกอน 2% (ง) ปูนเม็ดจากโรงงานอุตสาหกรรม

#### 4.2.4 ความเข้มข้นโลหะหนัก

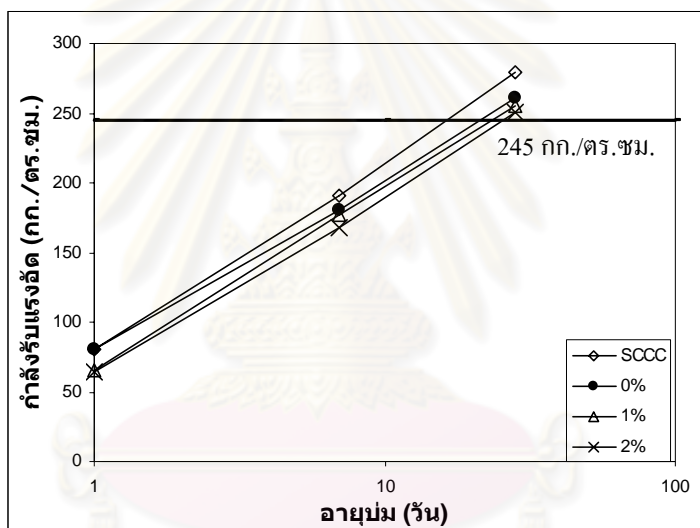
การทดสอบหาความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ร่วมกับกากอุตสาหกรรมปนโลหะหนัก เพื่อเป็นการบอกว่าปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นอันตรายหรือไม่ หากนำไปใช้จริง ดังตารางที่ 4.16 เป็นการเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ได้กับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 จากตารางไม่มีโลหะหนักที่มีค่าเกินมาตรฐาน ดังนั้นจึงพอสรุปได้ว่า ปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์จากการเผาร่วมกับกากอุตสาหกรรมเป็นของเสียที่ไม่อันตราย และสามารถนำไปใช้ได้จริง

ตารางที่ 4.16 ปริมาณของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน Total Threshold Limit Concentration (TTLC)

ชนิดโลหะหนัก	ปริมาณโลหะหนักในปูนที่สังเคราะห์ได้ (มก./กก.)			มาตรฐาน (มก./กก.)
	0%	1%	2%	
As	-	-	-	500
Ba	83.95	94.92	110.32	10,000
Be	-	-	-	75
Ca	15,686.38	14,944.46	15,220.59	-
Cd	0.41	0.67	0.79	100
Cr	52.98	198.70	467.92	500
Cu	121.76	77.50	164.25	2,500
Fe	7,704.40	9,968.20	18,619.00	-
Ni	21.64	54.95	120.05	-
Pb	7.06	5.08	6.85	1,000
Tl	5.61	3.14	4.31	700
V	29.14	28.77	31.41	2,400
Zn	142.19	85.03	144.36	5,000

### 4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า

จากการหล่อก้อนมอร์ต้าของปูนซีเมนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยการเผาพร้อมกับกากอุตสาหกรรม แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 1, 7 และ 28 วัน พบว่าที่อายุบ่ม 7 วันและ 28 วัน มีค่าเกินมาตรฐานของมอก. 15-2514 โดยค่ากำลังรับแรงอัดที่ 7 วันและ 28 วันแสดงดังตารางที่ 4.17 จากการเพิ่มอัตราส่วนของกากอุตสาหกรรม ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง โดยค่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์สำเร็จรูปมีค่าสูงที่สุด อาจเป็นผลมาจากกระบวนการผลิตในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์นั้น วัตถุดิบมีการควบคุมผสมที่สมบูรณ์มากกว่าในห้องปฏิบัติการจึงให้กำลังรับแรงอัดดีกว่า และในการบดปูนเม็ดใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการซึ่งทำให้ขนาดของอนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ได้มีความแตกต่างจากในกระบวนการผลิตจริง จึงมีผลต่อกำลังรับแรงอัด



รูปที่ 4.2 กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่อัตราส่วนต่างๆ ที่อายุบ่ม 1, 7 และ 28 วัน

ตารางที่ 4.17 ค่ากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วนต่างๆ ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน เทียบกับมาตรฐาน

อายุก้อนมอร์ต้า	กำลังรับแรงอัด ก.ก./ตร.ซม.				ค่ามาตรฐาน ก.ก./ตร.ซม.
	SCCC	0%	1%	2%	
1 วันในอากาศขึ้น 6 วันในน้ำ	190.3	180.5	177.4	168.4	150
1 วันในอากาศขึ้น 27 วันในน้ำ	279.4	260.7	255.6	250.3	245

#### 4.4 ผลการทดสอบการชะละลายระยะสั้นของมอร์ต้า

จากการทดสอบการชะละลายระยะสั้น โดยทำการทดสอบด้วยวิธี Wet Extraction Test (WET) ตามมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 และวิธี ตามมาตรฐานการชะละลายของ US EPA SW-846 Method 1311 แล้วนำปริมาณโลหะหนักที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) แสดงดังตารางที่ 4.18 พบว่า โลหะหนักที่ชะละลายออกมามีค่าต่ำกว่ามาตรฐานทั้งสองมาตรฐาน

ตารางที่ 4.18 ปริมาณโลหะหนักจากการทดสอบการชะละลายระยะสั้นของมอร์ต้าเปรียบเทียบกับค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC)

ชนิดโลหะหนัก	ค่าที่ตรวจวัดได้จากการทดลอง (มก. /ล.)								ค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (มก. /ล.)
	WET				TCLP				
	SCCC	0%	1%	2%	SCCC	0%	1%	2%	
Ba	0.2915	0.2507	0.1607	0.1661	0.2304	0.8585	0.2081	0.3069	100
Cd	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0009	0.0010	0.0013	0.0009	1
Cr	0.3992	3.3769	1.9715	0.6249	0.2160	3.7145	2.3213	0.4980	5
Cu	0.4332	0.4707	0.3382	0.3961	0.0041	0.0035	0.0045	0.0043	25*
Fe	2.994	5.064	3.894	3.043	0.0189	0.0039	0.0047	0.0054	-
Pb	2.0334	2.2544	1.9454	2.0169	0.0366	0.0348	0.0328	0.0388	5
Ni	0.8158	0.8449	0.9730	0.7374	0.0110	0.0109	0.0079	0.0085	20*
Tl	1.3868	2.1307	2.3255	1.7801	0.0180	0.0192	0.0175	0.0258	7*
V	0.0266	0.0032	0.0236	0.0208	0.0050	0.0021	0.0034	0.0031	24*
Zn	1.3793	0.9502	1.0480	1.3072	0.0625	0.0364	0.0305	0.0396	250*

หมายเหตุ: \* คือ ไม่มีมาตรฐานกำหนดไว้สำหรับ TCLP

#### 4.5 ผลการทดสอบการชะละลายระยะยาวของมอร์ต้า

##### 4.5.1 ภาพรวมของการชะละลาย

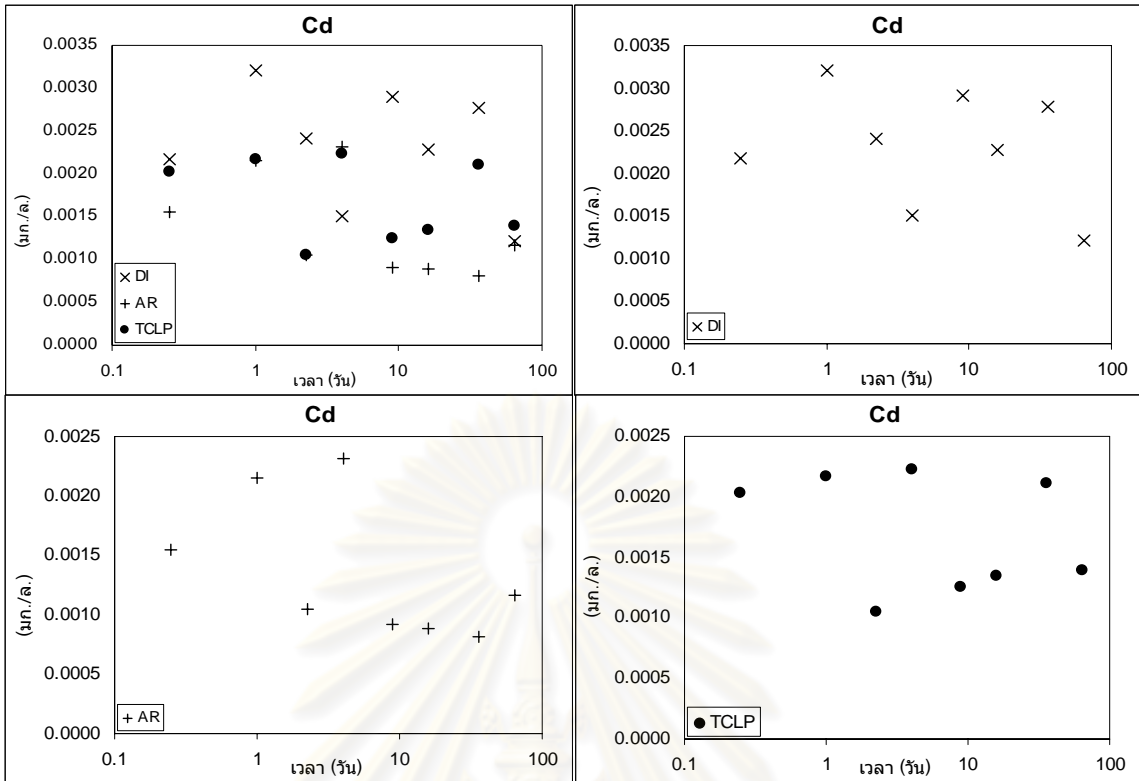
จากการศึกษาการชะละลายของธาตุห้าชนิด ได้แก่ แคลเซียม โครเมียม ทองแดง เหล็ก และนิกเกิล พบว่าที่น้ำปราศจากไอออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์ ธาตุที่มีการชะละลายออกมาเป็นปริมาณน้อยได้แก่ แคลเซียม ทองแดง เหล็ก และนิกเกิล แคลเซียมและนิกเกิล มีการชะละลายที่ไม่



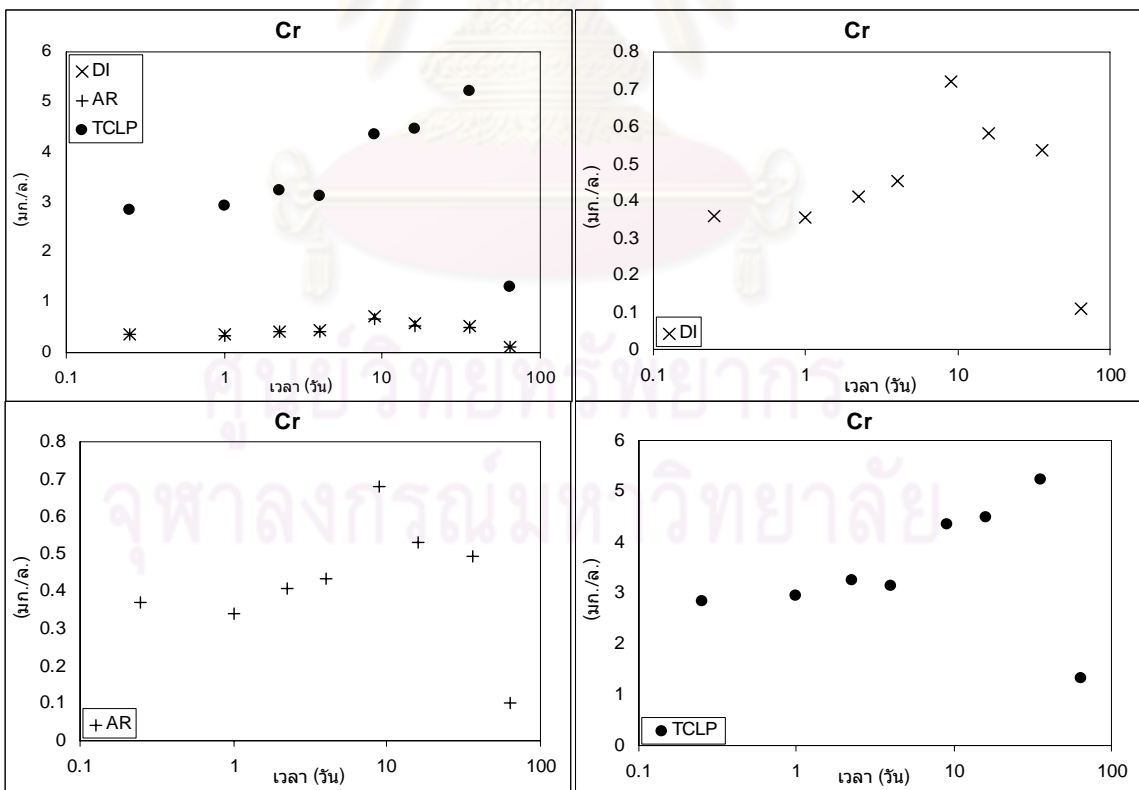
เป็นแบบแผนที่แน่นอนเนื่องมาจากมีปริมาณการชะละลายออกมาน้อยมาก คือ แคลเซียมมีการชะละลายออกมาน้อยกว่า 0.005 มก./ล. และนิกเกิลมีการชะละลายออกมาน้อยกว่า 0.01 มก./ล. การชะละลายของโครเมียมมีปริมาณน้อยกว่า 1 มก./ล. โดยในช่วงแรกมีการชะละลายค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงกลางของการทดสอบ และมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงท้ายของการทดสอบ ทองแดงมีการชะละลายออกมาเป็นปริมาณน้อยมากตลอดการทดสอบ ยกเว้นช่วงท้าย ที่มีปริมาณการชะละลายเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย แต่มีแนวโน้มว่าจะชะละลายเพิ่มขึ้นอีก เหล็กมีการชะละลายออกมามากในช่วงแรก และลดลงอย่างรวดเร็ว และมีแนวโน้มว่าจะลดลงเรื่อยๆ ตลอดการทดสอบ

ส่วนที่น่าสนใจ TCLP การชะละลายของแคลเซียมมีปริมาณน้อยมาก และมีค่าแปรปรวน ไม่มีแบบแผนที่แน่นอน โครเมียม ทองแดง เหล็ก และนิกเกิล มีแนวโน้มเช่นเดียวกันคือ การชะละลายลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โครเมียม มีแนวโน้มที่จะชะละลายออกมาเพิ่มขึ้นในช่วงแรก จนถึงช่วงกลางของการทดสอบ และลดลงในช่วงท้ายของการทดสอบจะเห็นได้ชัดที่ตัวอย่างมอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 2% และมีปริมาณการชะละลายของโครเมียมออกมามากที่สุด ทองแดงมีการชะละลายออกมามากในช่วงแรกและมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆตลอดการทดสอบ เหล็กมีการชะละลายออกมาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงช่วงกลางของการทดสอบ และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงท้าย นิกเกิล มีการชะละลายออกมาเรื่อยๆ ตลอดการทดสอบ โดยมอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 2% มีการชะละลายออกมามากที่สุด ตามด้วย 1% และที่ไม่มีมีการแทนที่ตะกอนกับปูนซีเมนต์สำเร็จรูปตามลำดับ โดยมีปริมาณการชะละลายออกมามีอยู่ในช่วง 0.05 – 0.5 มก./ล. และในช่วงท้ายของการทดสอบมีการชะละลายออกมามีลดลง และมีแนวโน้มว่าจะลดลงเรื่อยๆ รูปแบบของภาพรวมการชะละลายของธาตุในสารชะละลายทั้งสามชนิดแสดงดังรูปที่ 4.3 – 4.7

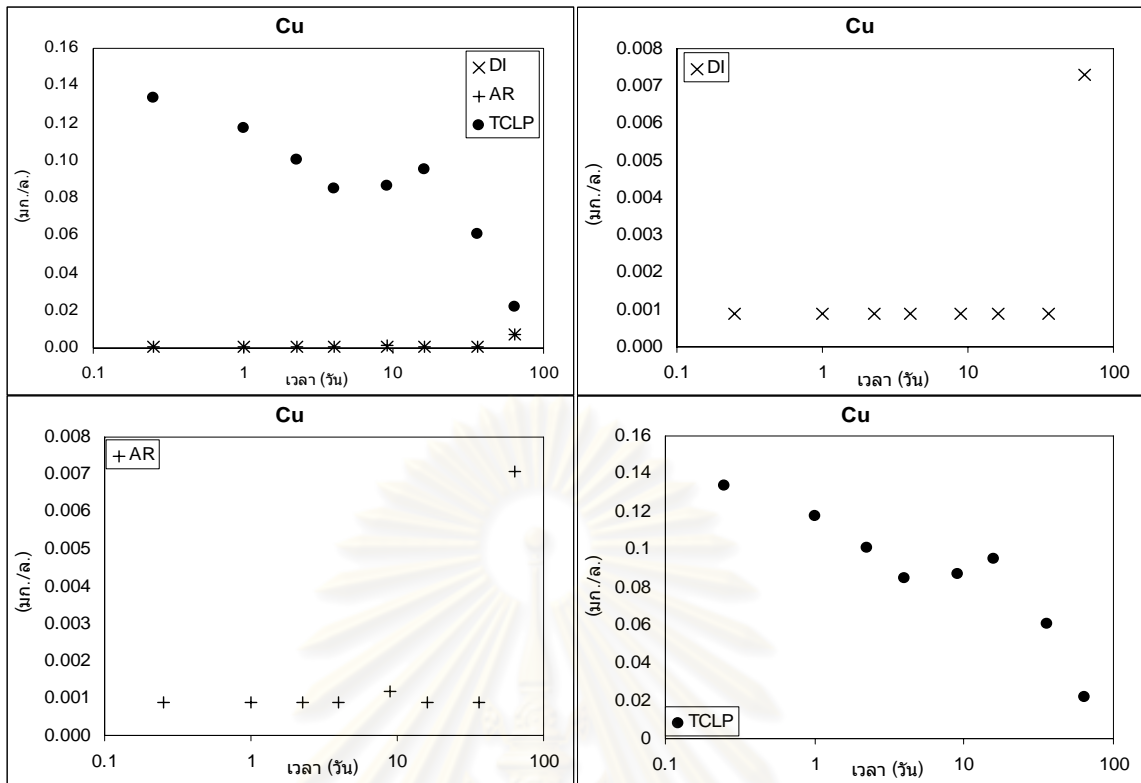
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



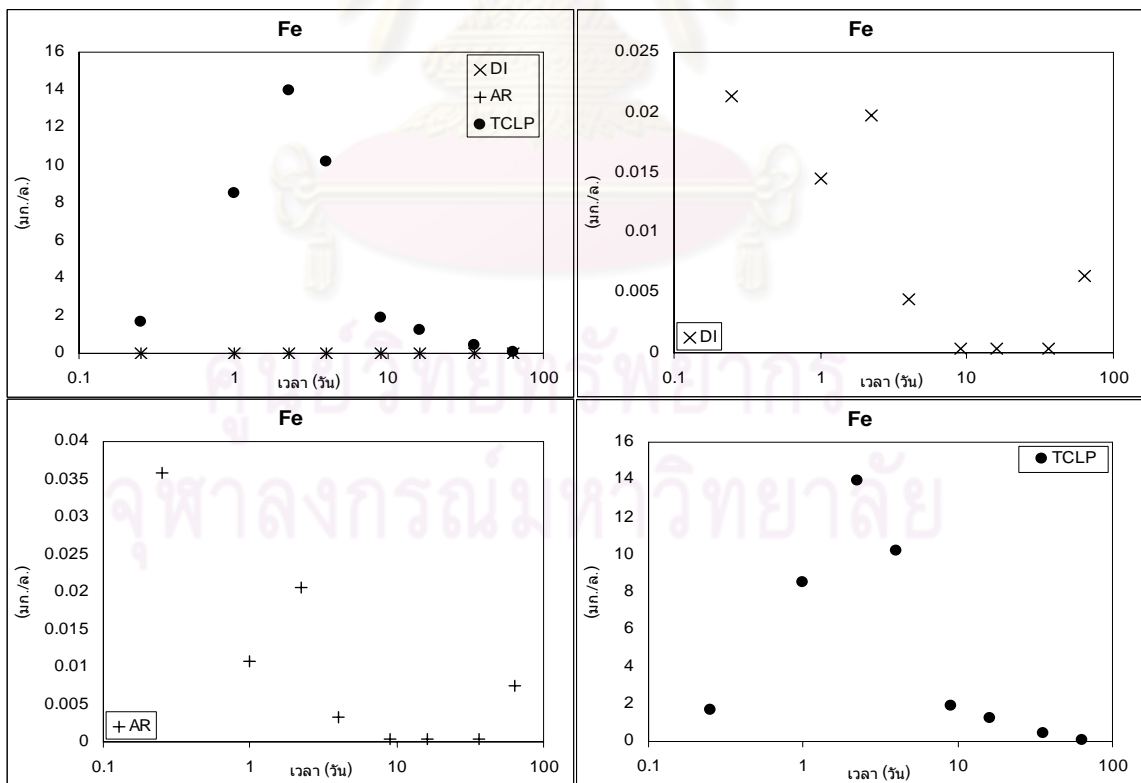
รูปที่ 4.3 ภาพรวมการชะละลายของแคดเมียมในสารชะละลายชนิดต่างๆ



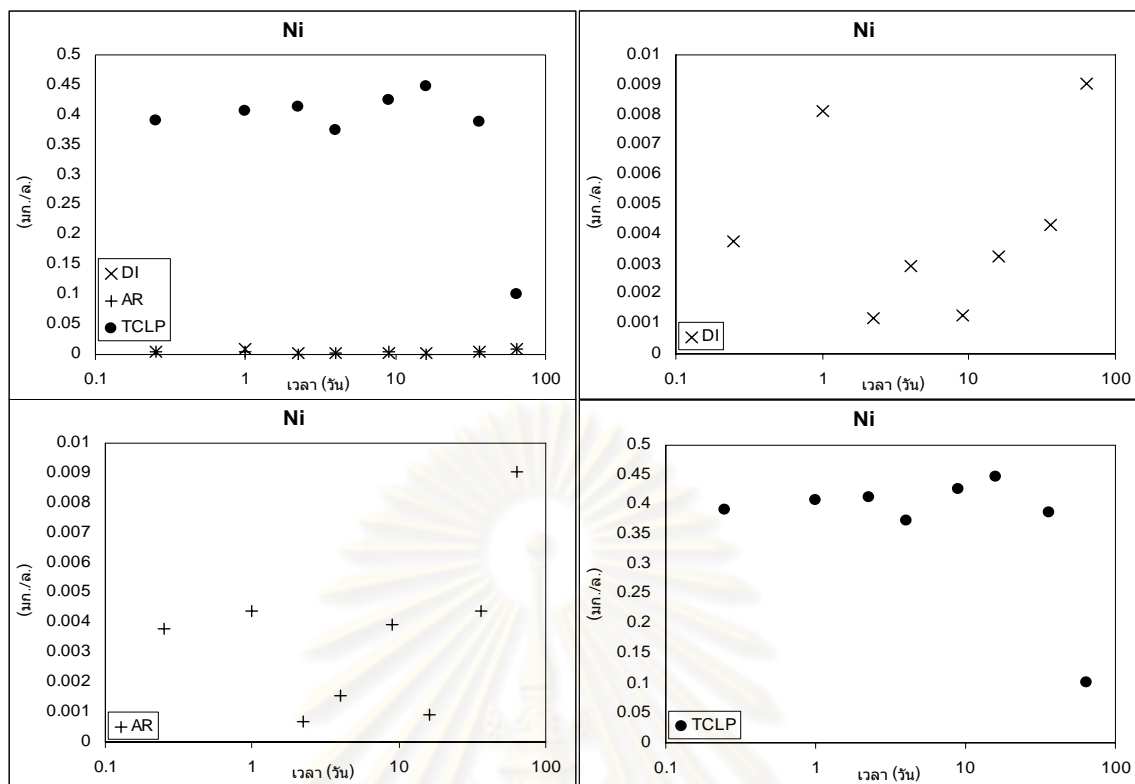
รูปที่ 4.4 ภาพรวมการชะละลายของโครเมียมในสารชะละลายชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.5 ภาพรวมการชะละลายของทองแดงในสารชะละลายชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.6 ภาพรวมการชะละลายของเหล็กในสารชะละลายชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.7 ภาพรวมการชะละลายของนิกเกิลในสารชะละลายชนิดต่างๆ

ความแตกต่างของการชะละลายในสารชะละลายทั้งสามชนิด ได้แก่ ปริมาณที่ชะละลายออกมา ที่น้ำปราศจากไอออนและฟลักตสังเคราะห์ที่มีปริมาณการชะละลายออกมาน้อยมาก เนื่องจากฟลักตสังเคราะห์มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 จึงมีความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกและกรดไนตริก ปริมาณน้อย ปริมาณ  $H^+$  ที่แตกตัวก็จะมีปริมาณไม่มาก ความแรงของกรดจึงน้อยตามไปด้วย ทำให้ปริมาณการชะละลายของโลหะหนักต่ำ

แต่ในทางตรงข้ามที่น้ำสกัด TCLP มีค่าพีเอช 2.88 มีปริมาณของกรดสูง จึงเกิดการชะละลายของโลหะหนักออกมาได้เป็นปริมาณมาก

#### 4.5.2 การชะละลายกับมาตรฐานน้ำดื่ม

ในการเปรียบเทียบการชะละลายกับมาตรฐานน้ำดื่มจะใช้มาตรฐานน้ำประปาของไทย ซึ่งได้นำมาตรฐานของ WHO มาปรับใช้ โดยมาตรฐานของน้ำประปาจะไม่มีมาตรฐานสำหรับธาตุ निकเกิด ดังนั้นจะยึดมาตรฐานของ WHO จากการเปรียบเทียบการชะละลายกับมาตรฐานน้ำดื่มพบว่า ที่น้ำปราศจากไอออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์ ความเข้มข้นของ โลหะหนักที่สนใจไม่มีค่าเกินจากค่ามาตรฐานน้ำประปา แสดงให้เห็นว่าปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์โดยการเผาพร้อมกับกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนัก ไม่มีอันตรายในการนำไปใช้กักเก็บน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค แต่ในน้ำสกัด TCLP พบว่ามี แคดเมียม โครเมียม เหล็กและนิกเกิล มีความเข้มข้นเกินมาตรฐาน จึงควรระมัดระวังหากนำไปใช้เป็นวัสดุในหลุมฝังกลบของเสีย ตารางที่ 4.19 แสดงค่าความเข้มข้นที่เกินจากมาตรฐานและวันที่เก็บน้ำสกัด

รูปที่ 4.8 - 4.23 แสดงการชะละลายของธาตุต่างๆ จากมอร์ต้าที่สังเคราะห์โดยกระบวนการเผาพร้อมกับกากอุตสาหกรรมที่อัตราส่วนต่างๆ เทียบกับมาตรฐานน้ำประปา เป็นการวาดกราฟโดยแกนตั้งเป็นความเข้มข้น และแกนนอนเป็นตัวอย่าง ทำการพล็อตทุกตัวอย่างน้ำสกัด โดยแยกเป็นชนิดของธาตุ และชนิดของตัวอย่างของมอร์ต้า

การชะละลายของแคดเมียมที่เกินมาตรฐาน (มาตรฐานของการประปานครหลวง มีค่า 3 มก./ล.) จะปรากฏในน้ำสกัด TCLP โดยค่าสูงสุดที่เกินมาตรฐานคือ 8.493 มก./ล. จากมอร์ต้าที่ทำจากปูนซีเมนต์สำเร็จรูป

การชะละลายของโครเมียม (มาตรฐานของการประปานครหลวง มีค่า 50 มก./ล.) พบว่ามีค่าสูงสุดเท่ากับ 5,254.7 มก./ล. โดยเกิดจากมอร์ต้าที่สังเคราะห์โดยมีกากตะกอนอุตสาหกรรมผสมอยู่ร้อยละ 2 โดยค่าสูงสุดเกิดขึ้นวันที่ 36 ของการเก็บน้ำสกัด

การชะละลายของทองแดง พบว่า ไม่มีตัวอย่างใดที่มีค่าเกินมาตรฐาน (มาตรฐานของการประปานครหลวง มีค่า 2,000 มก./ล.) ทั้งในน้ำปราศจากไอออน น้ำฝนกรดสังเคราะห์ และน้ำสกัด TCLP อาจเนื่องมาจากมีปริมาณอยู่ในปูนซีเมนต์น้อยมาก โดยพบความเข้มข้นสูงสุดที่ 439.7 มก./ล. จากมอร์ต้าที่ทำจากปูนซีเมนต์สำเร็จรูป

การชะละลายของเหล็ก (มาตรฐานของการประปานครหลวง มีค่า 300 มก./ล.) มีค่าเกินมาตรฐานที่น้ำสกัด TCLP โดยมีค่าสูงสุดถึง 16,089 มก./ล. โดยพบในมอร์ต้าที่สังเคราะห์โดยมีกากอุตสาหกรรมผสมอยู่ โดยการชะละลายจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงช่วงกลางของการทดสอบ และหลังจากนั้นก็ลดลงจนต่ำกว่ามาตรฐาน ในช่วงท้ายของการทดสอบ

การชะละลายของนิกเกิล (มาตรฐานของ WHO มีค่า 20 มก./ล.) เนื่องจากการชะละลายของนิกเกิลซับซ้อนและไม่มีแบบแผนที่แน่นอน ดังนั้นปริมาณที่ชะละลายออกมามากหรือน้อยจึง

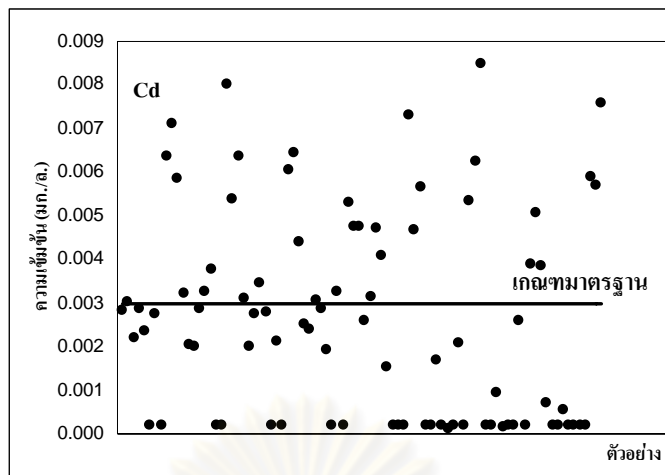
ไม่ได้เกี่ยวข้องกับระยะเวลา โดยจะพบปริมาณที่ชะละลายออกมามากที่สุด คือ 453.1 มก./ล. จากมอร์ต้าที่สังเคราะห์โดยมีกากอุตสาหกรรมผสมอยู่ร้อยละ 2

ตารางที่ 4.19 ชนิดของธาตุที่มีความเข้มข้นเกินมาตรฐานน้ำดื่ม

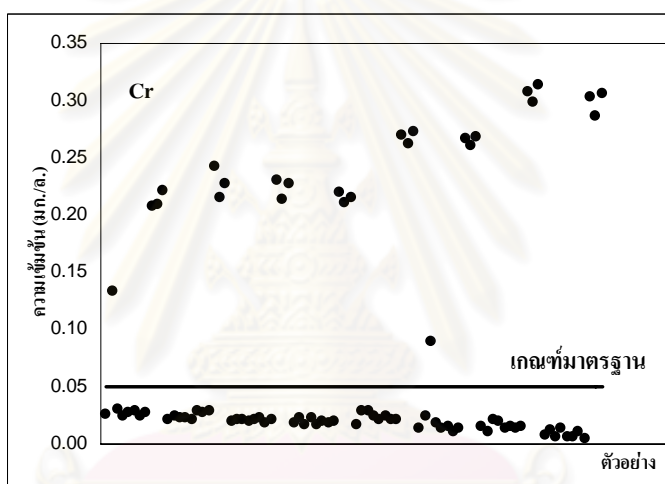
เปอร์เซ็นต์ตะกอน	ธาตุ	วันที่มีค่าสูงสุด/น้ำสกัด	ค่าสูงสุด (มก./ล.)	ค่ามาตรฐาน (มก./ล.)
SCCC	Cd	16/น้ำสกัด TCLP	8.49	3.00
	Cr	36/น้ำสกัด TCLP	313.70	50.00
	Fe	2.25/น้ำสกัด TCLP	9276.10	300.00
	Ni	2.25/น้ำสกัด TCLP	101.66	20.00
0%	Cd	4/น้ำสกัด TCLP	4.81	3.00
	Cr	64/น้ำสกัด TCLP	708.96	50.00
	Fe	2.25/น้ำสกัด TCLP	9970.40	300.00
	Ni	1/น้ำสกัด TCLP	98.18	20.00
1%	Cd	4/น้ำสกัด TCLP	4.11	3.00
	Cr	36/น้ำสกัด TCLP	2966.60	50.00
	Fe	4/น้ำสกัด TCLP	16089.00	300.00
	Ni	9/น้ำสกัด TCLP	282.94	20.00
2%	Cd	4/น้ำสกัด TCLP	4.26	3.00
	Cr	36/น้ำสกัด TCLP	5254.70	50.00
	Fe	2.25/น้ำสกัด TCLP	15035.00	300.00
	Ni	16/น้ำสกัด TCLP	453.10	20.00

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

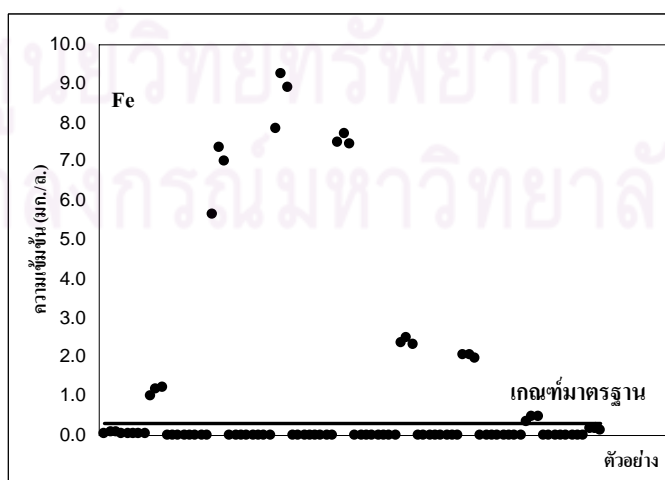




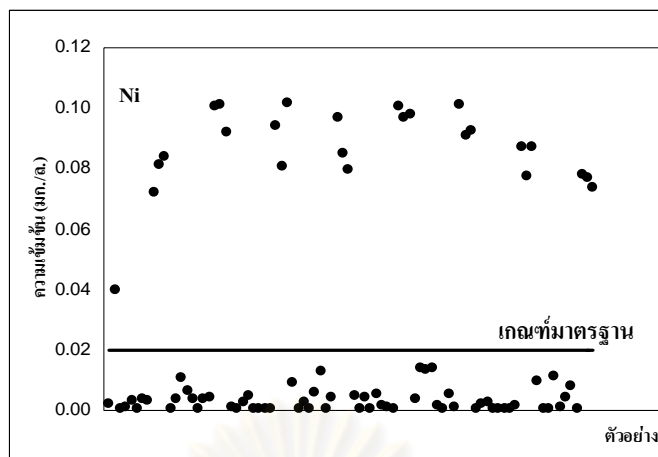
รูปที่ 4.8 การชะละลายของแคดเมียมในมอร์ต้าที่ทำจากปูนซีเมนต์สำเร็จรูปเทียบกับมาตรฐาน



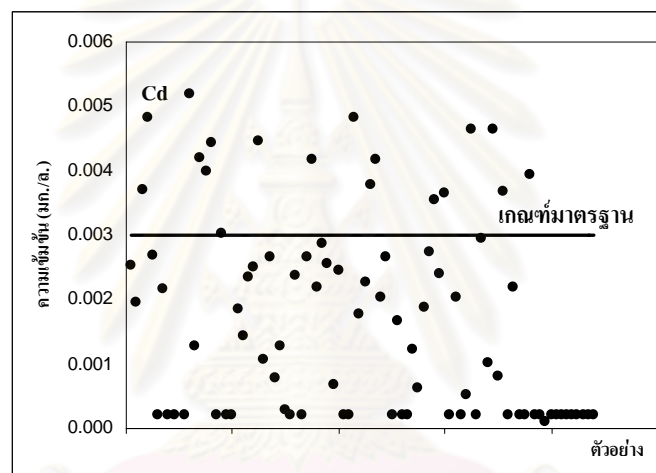
รูปที่ 4.9 การชะละลายของโครเมียมในมอร์ต้าที่ทำจากปูนซีเมนต์สำเร็จรูปเทียบกับมาตรฐาน



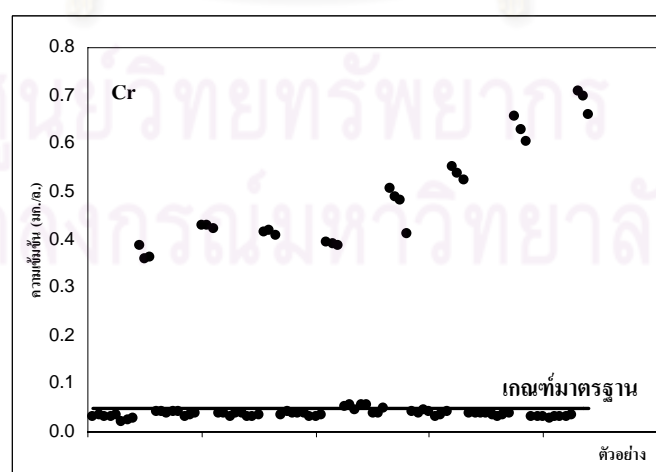
รูปที่ 4.10 การชะละลายของเหล็กในมอร์ต้าที่ทำจากปูนซีเมนต์สำเร็จรูปเทียบกับมาตรฐาน



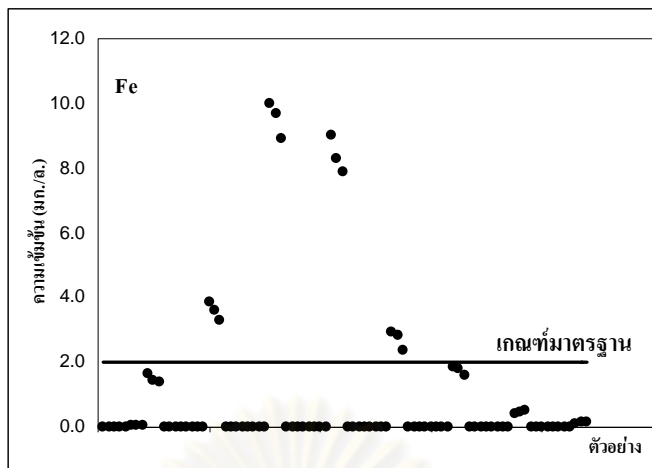
รูปที่ 4.11 การชะละลายของนิกเกิลในมอร์ต้าที่ทำจากปูนซีเมนต์สำเร็จรูปเทียบกับมาตรฐาน



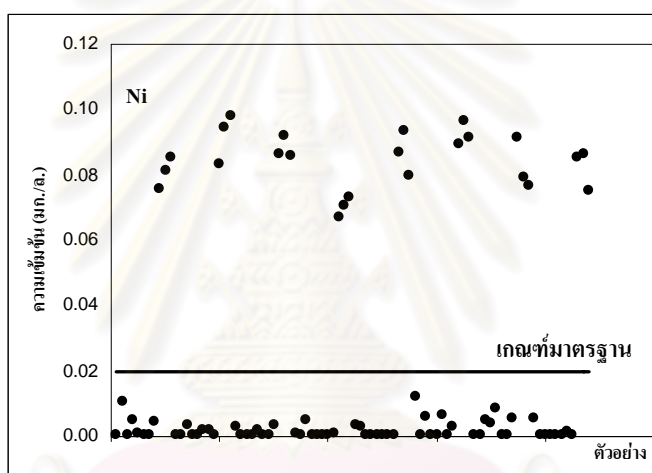
รูปที่ 4.12 การชะละลายของแคดเมียมในมอร์ต้าที่ไม่มีการแทนที่ตะกอนเทียบกับมาตรฐาน



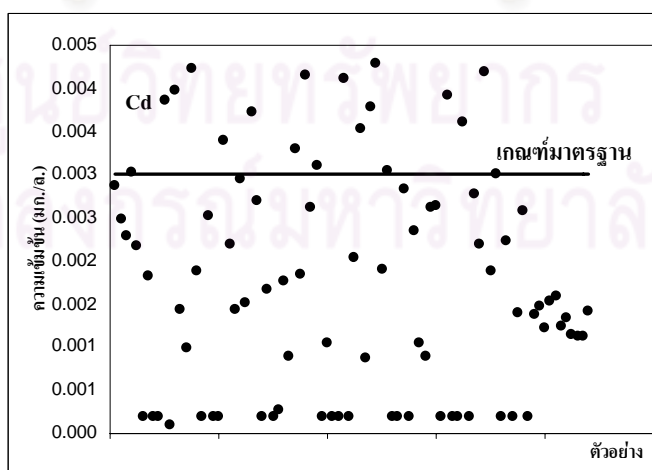
รูปที่ 4.13 การชะละลายของโครเมียมในมอร์ต้าที่ไม่มีการแทนที่ตะกอนเทียบกับมาตรฐาน



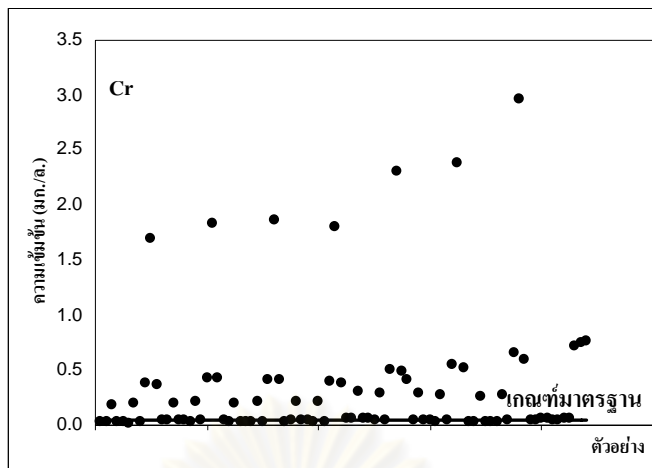
รูปที่ 4.14 การชะละลายของเหล็กในมอร์ต้าที่ไม่มีสารแทนที่ตะกอนเทียบกับมาตรฐาน



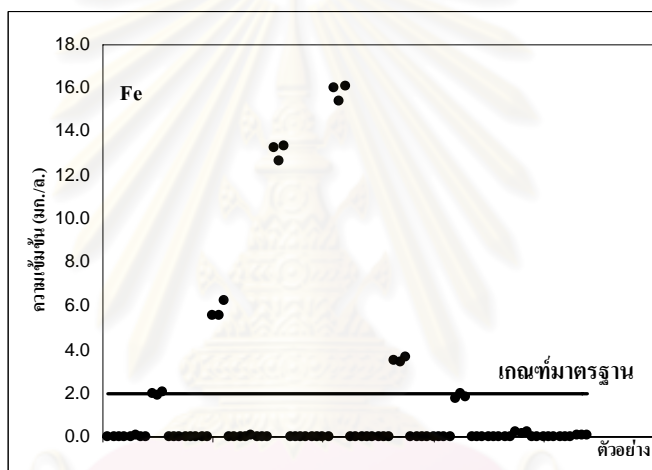
รูปที่ 4.15 การชะละลายของนิกเกิลในมอร์ต้าที่ไม่มีสารแทนที่ตะกอนเทียบกับมาตรฐาน



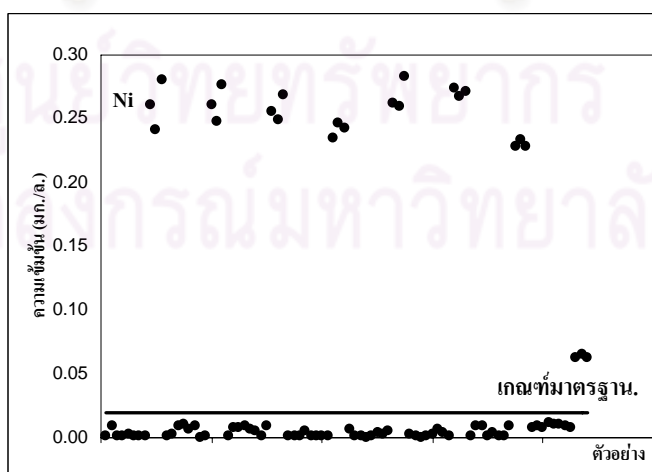
รูปที่ 4.16 การชะละลายของแคดเมียมในมอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 1% เทียบกับมาตรฐาน



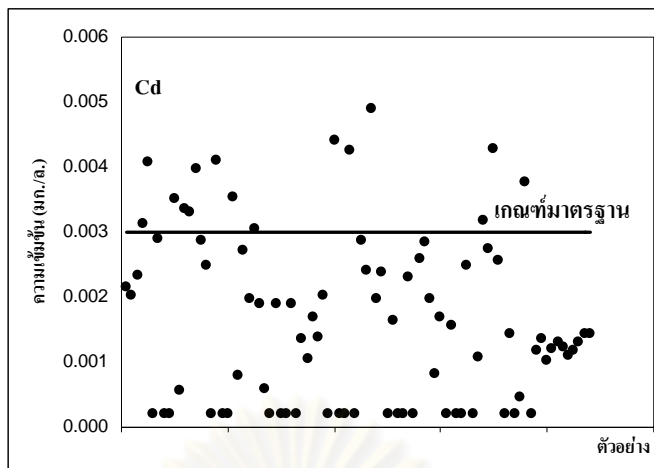
รูปที่ 4.17 การชะละลายของโครเมียมในมอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 1% เทียบกับมาตรฐาน



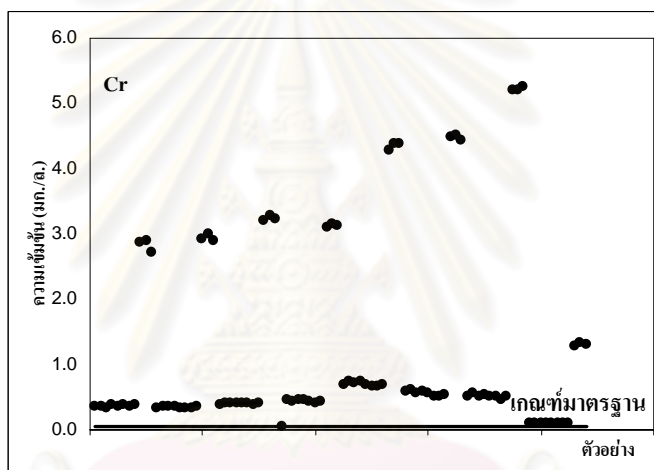
รูปที่ 4.18 การชะละลายของเหล็กในมอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 1% เทียบกับมาตรฐาน



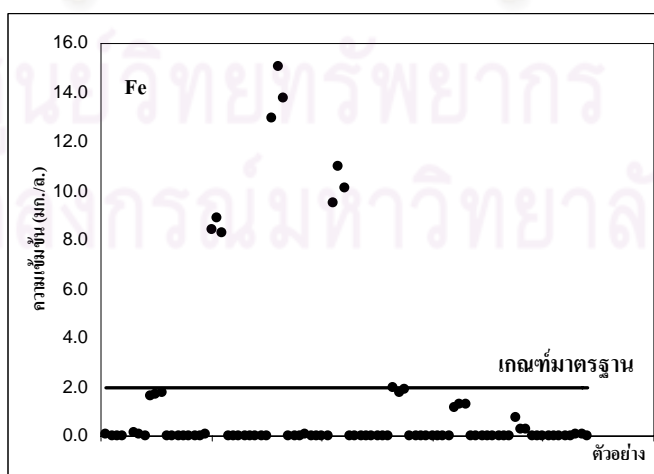
รูปที่ 4.19 การชะละลายของนิกเกิลในมอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 1% เทียบกับมาตรฐาน



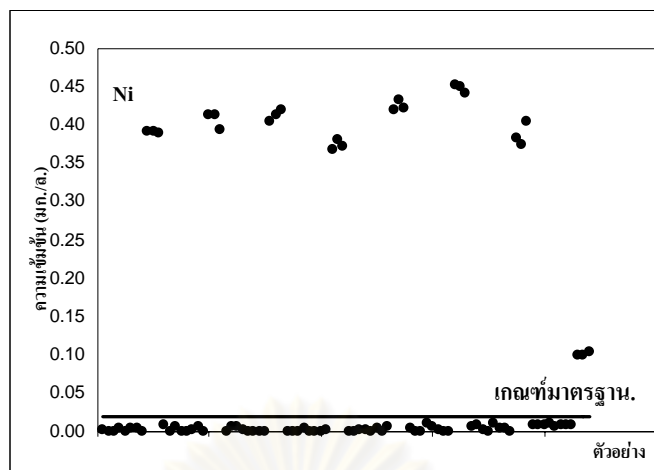
รูปที่ 4.20 การชะละลายของแคดเมียมในมอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 2% เทียบกับมาตรฐาน



รูปที่ 4.21 การชะละลายของโครเมียมในมอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 2% เทียบกับมาตรฐาน



รูปที่ 4.22 การชะละลายของเหล็กในมอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 2% เทียบกับมาตรฐาน



รูปที่ 4.23 การชะละลายของนิกเกิลในมอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 2% เทียบกับมาตรฐาน

#### 4.5.3 การวิเคราะห์กลไกการชะละลาย

ในการวิเคราะห์กลไกการชะละลายตามแนวทางในการคำนวณตามมาตรฐาน NEN 7375 นั้นสามารถวิเคราะห์ได้ก็ต่อเมื่อปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักที่วัดมีค่ามากกว่า Limit of Determination (LOD) ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่เครื่อง ICP จะวัดได้ ทำการพล็อตกราฟโดยแกนตั้งเป็นค่า Log ของการชะละลายสะสมที่วัดได้ รวมกับค่า log ของการชะละลายสะสมที่ได้จากสูตร และแกนนอนเป็นค่า Log ของเวลาการทดสอบ และจะพิจารณาว่าโดยรวมเป็นกลไกการชะละลายแบบใด จากค่าความชันของกราฟ ดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 การประเมินกลไกการชะละลายจากค่าความชันของกราฟ

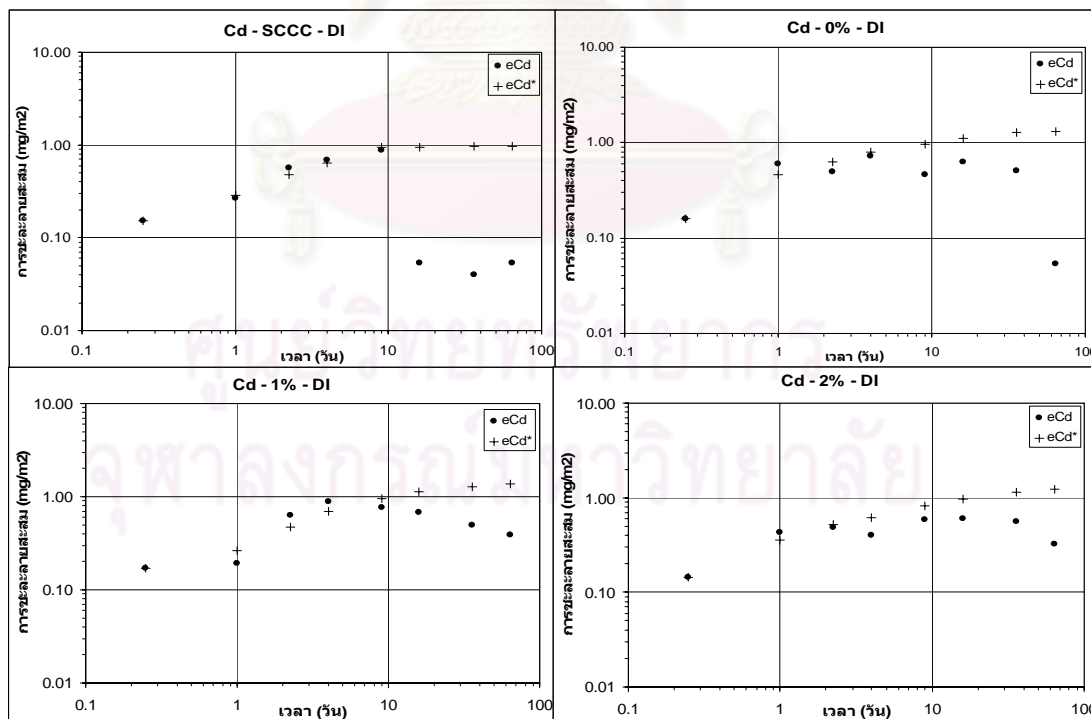
Increment a-b	ความชัน, rc		
	น้อยกว่า 0.35	ระหว่าง 0.35 ถึง 0.65	มากกว่า 0.65
Increment 2-7	Surface wash-off	Diffusion	Dissolution
Increment 5-8	Depletion	Diffusion	Dissolution
Increment 4-7	Depletion	Diffusion	Dissolution
Increment 3-6	Depletion	Diffusion	Dissolution
Increment 2-5	Depletion	Diffusion	Dissolution
Increment 1-4	Surface wash-off	Diffusion	Delayed Diffusion or Dissolution



กลไกการชะละลายของแคดเมียมในน้ำปราศจากไอออน และน้ำสกัด TCLP ใน 4 ช่วงแรก การชะละลายควบคุมโดยการแพร่ ดังแสดงในตารางที่ 4.21 และรูปที่ 4.24 และลดลงอย่างรวดเร็ว ในช่วงท้ายของการทดสอบ การชะละลายโดยรวมน่าจะเกิดจากค่าเฉลี่ยความเข้มข้นมากกว่าเกิดจากการชะล้างที่ผิวหน้าโดยมีลักษณะเดียวกันในทุกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 4.21 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของแคดเมียมในน้ำปราศจากไอออน

Order	Increment a-b	กลไกการชะละลาย			
		SCCC	0%	1%	2%
1	2 - 7	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off
2	5 - 8	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
3	4 - 7	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
4	3 - 6	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
5	2 - 5	Diffusion	Depletion	Diffusion	Depletion
6	1 - 4	Diffusion	Diffusion	Diffusion	Diffusion

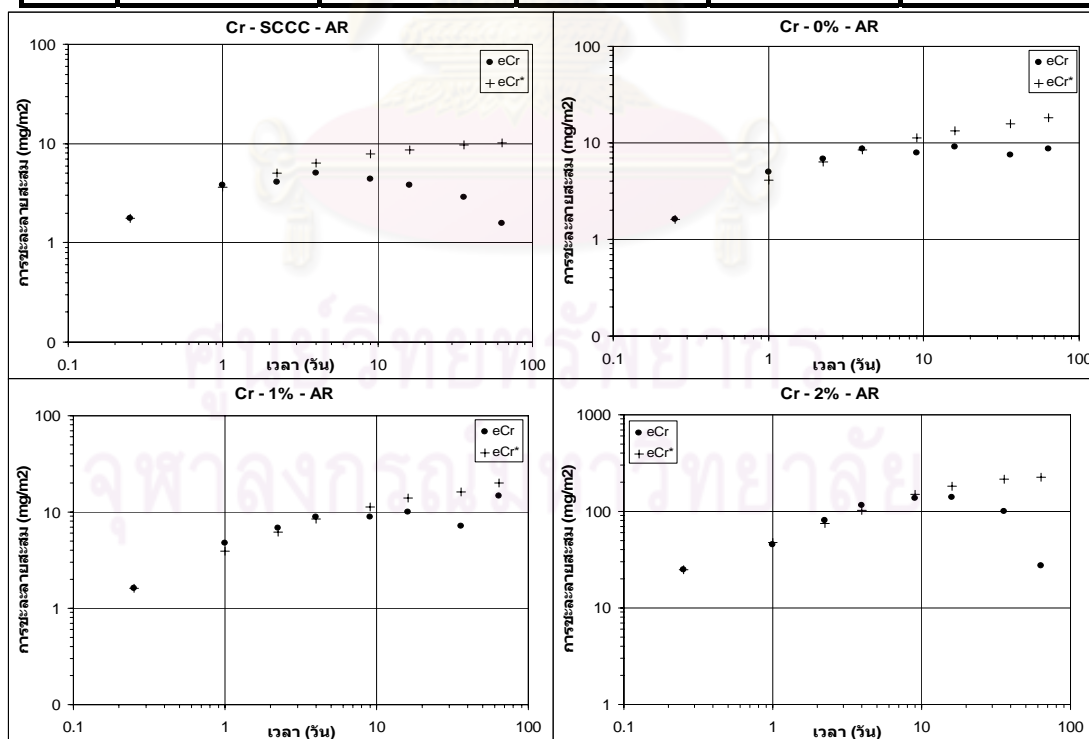


รูปที่ 4.24 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของแคดเมียมในน้ำปราศจากไอออน

กลไกการชะละลายของโครเมียมในน้ำสกัดทั้ง 3 ชนิด มีลักษณะเช่นเดียวกับแคลเซียม คือ ใน 4 ช่วงแรกการชะละลายควบคุมโดยการแพร่ ดังแสดงในตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.25 และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงท้ายของการทดสอบ การชะละลายโดยรวมน่าจะเกิดจากค่าเฉลี่ยความเข้มข้นมากกว่าเกิดจากการชะล้างที่ผิวหน้า

ตารางที่ 4.22 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของโครเมียมในน้ำปราศจากไอออน

Order	Increment a-b	กลไกการชะละลาย			
		SCCC	0%	1%	2%
1	2 - 7	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off
2	5 - 8	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
3	4 - 7	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
4	3 - 6	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
5	2 - 5	Depletion	Depletion	Depletion	Diffusion
6	1 - 4	Diffusion	Surface wash-off	Diffusion	Diffusion

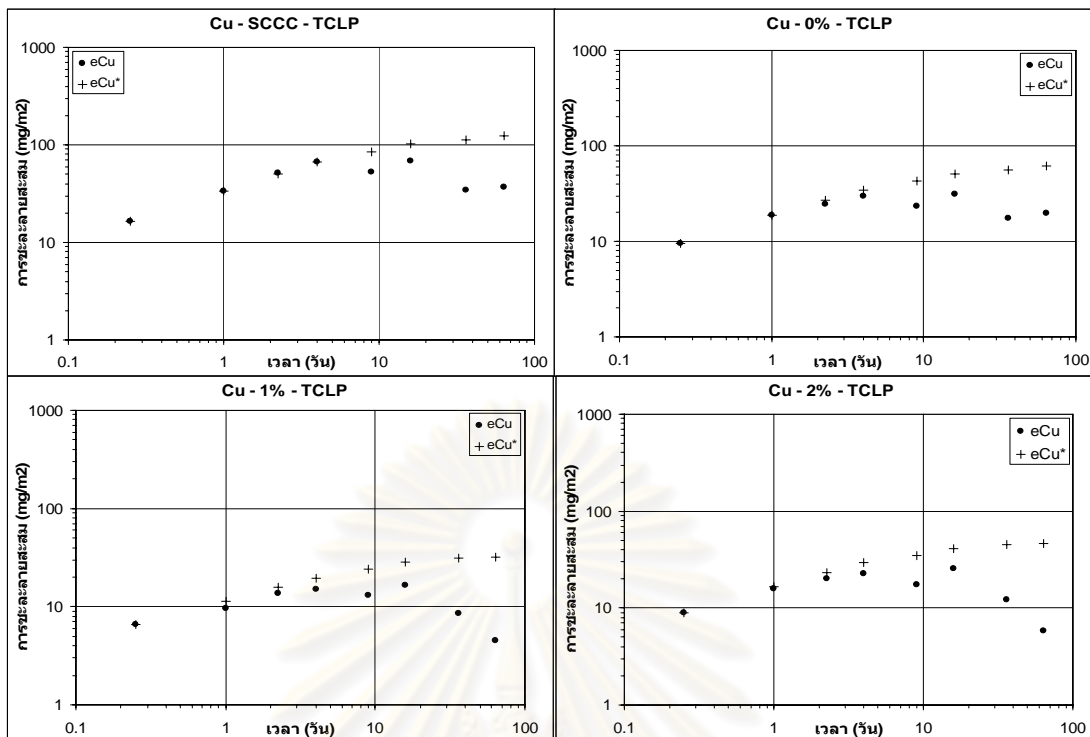


รูปที่ 4.25 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของโครเมียมในน้ำปราศจากไอออน

การชะละลายของทองแดงเกิดเฉพาะในน้ำสกัด TCLP เนื่องจากในน้ำปราศจากไอออน และน้ำฝนกรดสังเคราะห์มีปริมาณการชะละลายออกมาน้อยกว่าค่า LOD จึงไม่สามารถวิเคราะห์ กลไกการชะละลายได้ โดยกลไกมีความแตกต่างกันคือ ในตัวอย่างมอร์ต้าที่ทำจากปูนซีเมนต์ สำเร็จรูปกับปูนซีเมนต์ที่ไม่มีกรแทนที่ตะกอน จะเป็นกลไกแบบการแพร่ในช่วงแรก และลดลง อย่างรวดเร็วในช่วงท้ายของการทดสอบ แต่ในตัวอย่างที่ทำจากปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ตะกอน 1% กับ 2% ในช่วงแรกจะเป็นกลไกแบบการชะล้างที่ผิวหน้า และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงท้าย ของการทดสอบดังในตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.26

ตารางที่ 4.23 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของทองแดงในน้ำสกัด TCLP

Order	Increment a-b	กลไกการชะละลาย			
		SCCC	0%	1%	2%
1	2 - 7	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off
2	5 - 8	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
3	4 - 7	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
4	3 - 6	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
5	2 - 5	Depletion	Depletion	Depletion	Diffusion
6	1 - 4	Diffusion	Diffusion	Surface wash-off	Surface wash-off



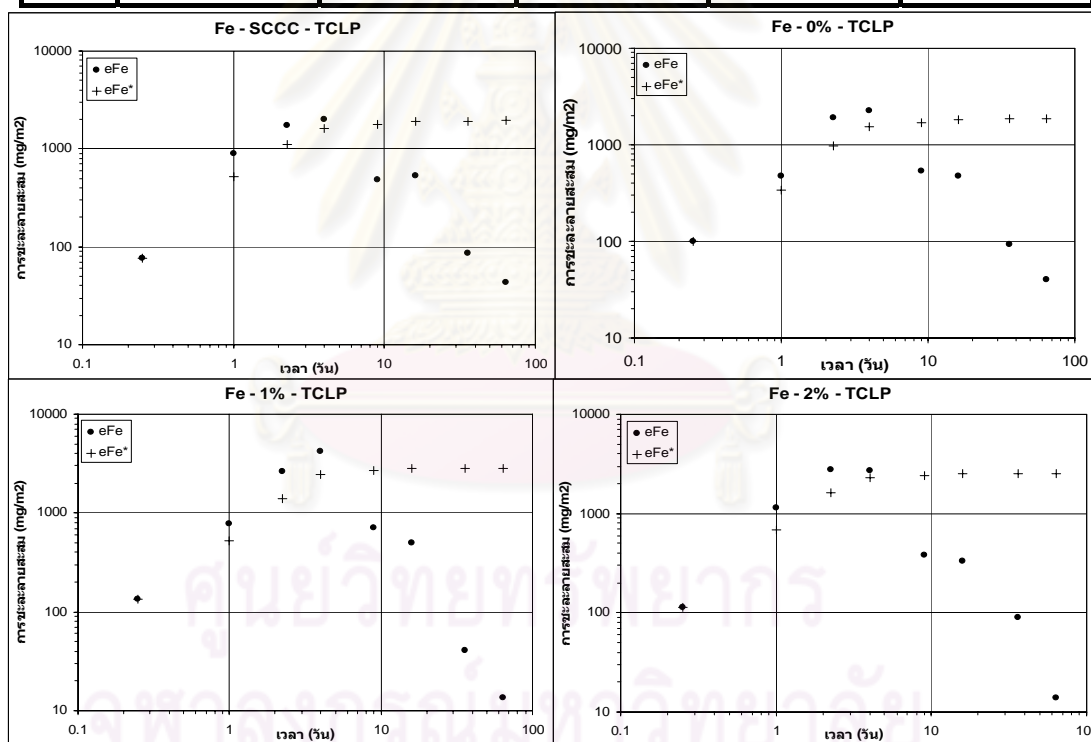
รูปที่ 4.26 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของทองแดงในน้ำสกัด TCLP

กลไกการชะละลายของเหล็ก ในน้ำปราศจากไอออนและฟลักครดสังเคราะห์จะวิเคราะห์ได้ เฉพาะในตัวอย่างมอร์ต้าที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ตะกอน 2% เนื่องจากในตัวอย่างที่เหล็กมี ปริมาณการชะละลายออกมาน้อยกว่าค่า LOD จึงไม่สามารถวิเคราะห์ได้ โดยในช่วงแรกกลไกการ ชะละลายเป็นแบบการชะล้างที่ผิวหน้า และเกิดการละลายในช่วงท้ายของการทดสอบ

ส่วนในน้ำสกัด TCLP กลไกการชะละลายของเหล็กในทุกตัวอย่าง ในช่วงแรกจะเป็นการ แพร่หรือการละลายที่ล่าช้า และเกิดการลดลงอย่างรวดเร็วของเหล็กในช่วงท้ายของการทดสอบ ดัง ในตารางที่ 4.24 และรูปที่ 4.27

ตารางที่ 4.24 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของเหล็กในน้ำสกัด TCLP

Order	Increment a-b	กลไกการชะละลาย			
		SCCC	0%	1%	2%
1	2 - 7	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off
2	5 - 8	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
3	4 - 7	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
4	3 - 6	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
5	2 - 5	Depletion	Depletion	Depletion	Diffusion
6	1 - 4	delayed diffusion or dissolution	delayed diffusion or dissolution	delayed diffusion or dissolution	delayed diffusion or dissolution



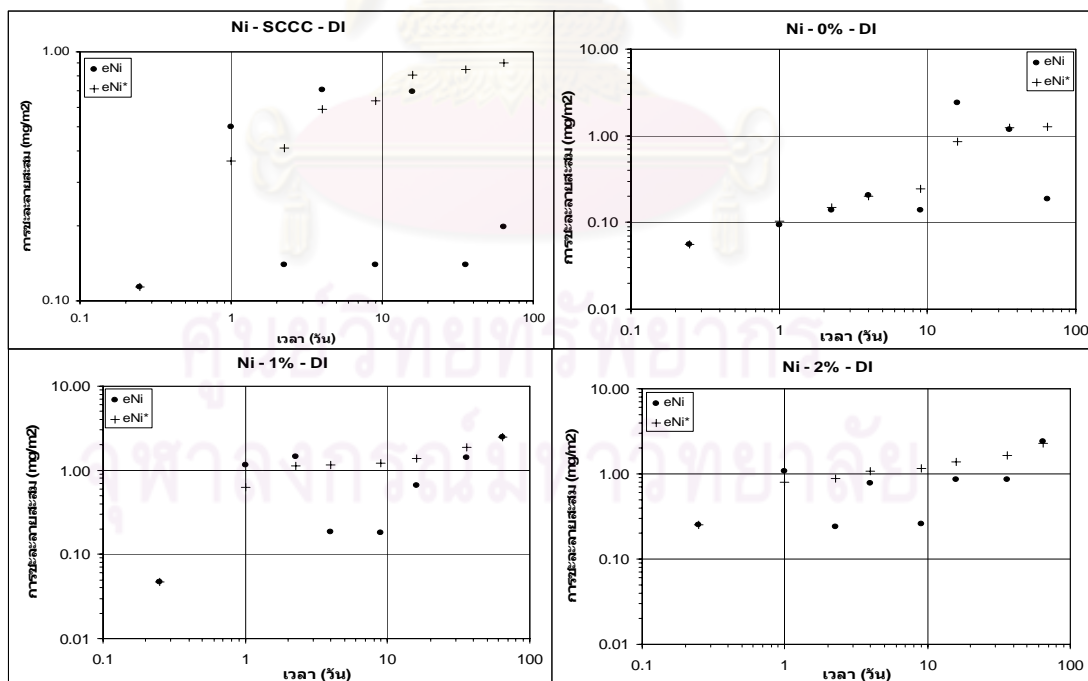
รูปที่ 4.27 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของเหล็กในน้ำสกัด TCLP

กลไกการชะละลายของนิกเกิล มีความแตกต่างกันในน้ำสกัด 3 ชนิด โดยในน้ำปราศจากไอออน ในตัวอย่างมอร์ต้าที่ทำจากปูนซีเมนต์สำเร็จรูป เกิดการแพร่ในช่วงแรก และลดลงในช่วงท้ายของการทดสอบ ส่วนในตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์โดยไม่มีการแทนที่ตะกอน ในช่วงแรกไม่สามารถวิเคราะห์กลไกการชะละลายได้เนื่องจากมีปริมาณการชะละลายออกมาน้อยกว่าค่า LOD แต่ในช่วงท้ายของการทดสอบเป็นกลไกแบบการละลาย ในตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่

ตะกอน 1% ในช่วงแรกจะเกิดการละลายหรือการแพร่ที่ล่าช้า และเกิดการละลายในช่วงท้ายของการทดสอบ ส่วนในตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ตะกอน 2% ในช่วงแรกจะเป็นการชะล้างที่ผิวหน้า และเกิดเป็นการละลายในช่วงท้ายของการทดสอบ ดังในตารางที่ 4.25 และรูปที่ 4.28

ตารางที่ 4.25 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของนิกเกิลในน้ำปราศจากไอออน

Order	Increment a-b	กลไกการชะละลาย			
		SCCC	0%	1%	2%
1	2 - 7	Surface wash-off	Dissolution	Surface wash-off	Surface wash-off
2	5 - 8	Depletion	Depletion	Dissolution	Dissolution
3	4 - 7	Depletion	Dissolution	Dissolution	Dissolution
4	3 - 6	Diffusion	Dissolution	Depletion	Diffusion
5	2 - 5	Depletion	-	Depletion	Depletion
6	1 - 4	Diffusion	-	delayed diffusion or dissolution	Surface wash-off



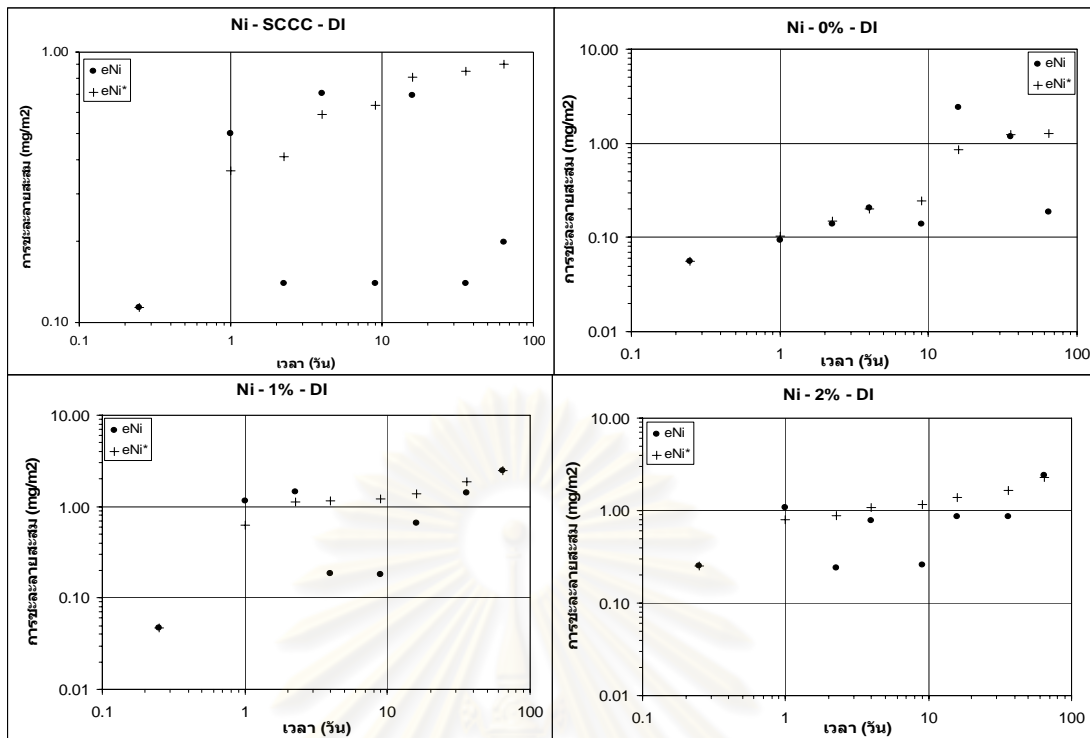
รูปที่ 4.28 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของนิกเกิลในน้ำปราศจากไอออน



กลไกการชะละลายของนิกเกิลในน้ำฝนกรดสังเคราะห์ ในตัวอย่างมอร์ต้าที่ทำจากปูนซีเมนต์สำเร็จรูปและตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์โดยไม่มีการแทนที่ตะกอน ในช่วงแรกของการทดสอบจะเป็นการแพร่ และเกิดการลดลงอย่างรวดเร็วของนิกเกิลในช่วงท้ายของการทดสอบ ในตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ตะกอน 1% ในช่วงแรกจะเกิดการละลายหรือการแพร่ที่ล่าช้า และในช่วงท้ายของการทดสอบจะเกิดการแพร่ และในตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ตะกอน 2% ในช่วงแรกจะเป็นการชะล้างที่ผิวหน้า และในช่วงท้ายจะเป็นกลไกการแพร่ ดังตารางที่ 4.26 และรูปที่ 4.29

ตารางที่ 4.26 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของนิกเกิลในน้ำฝนกรดสังเคราะห์

Order	Increment a-b	กลไกการชะละลาย			
		SCCC	0%	1%	2%
1	2 - 7	Surface wash-off	Diffusion	Surface wash-off	Surface wash-off
2	5 - 8	Depletion	Depletion	Diffusion	Dissolution
3	4 - 7	Depletion	Dissolution	Dissolution	Depletion
4	3 - 6	Diffusion	Diffusion	Depletion	Depletion
5	2 - 5	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
6	1 - 4	Diffusion	Diffusion	delayed diffusion or dissolution	Surface wash-off

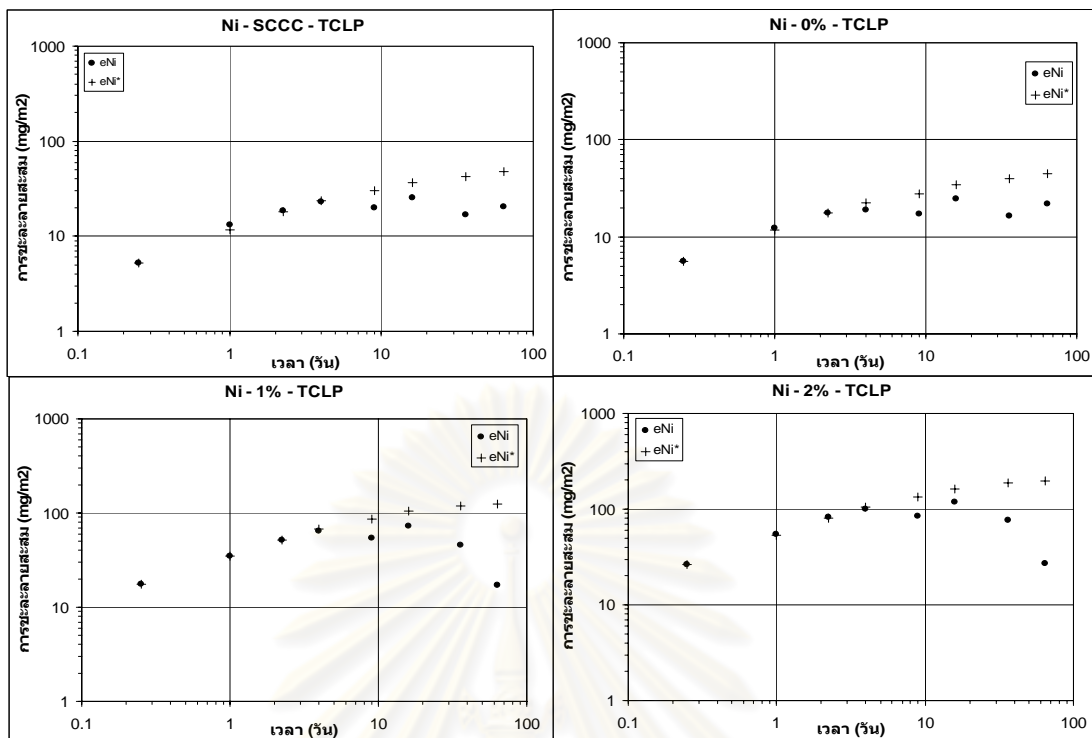


รูปที่ 4.29 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของนิกเกิลในน้ำฝนกรดสังเคราะห์

กลไกการชะละลายของนิกเกิลในน้ำสกัด TCLP ในช่วงแรกของการทดสอบควบคุมโดยกลไกการแพร่ และเกิดการลดลงอย่างรวดเร็วของนิกเกิลในช่วงท้ายโดยรูปแบบกลไกการชะละลายดูได้จากตารางที่ 4.27 และรูปที่ 4.30

ตารางที่ 4.27 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของนิกเกิลในน้ำสกัด TCLP

Order	Increment a-b	กลไกการชะละลาย			
		SCCC	0%	1%	2%
1	2 - 7	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off
2	5 - 8	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
3	4 - 7	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
4	3 - 6	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
5	2 - 5	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
6	1 - 4	Diffusion	Diffusion	Diffusion	Diffusion



รูปที่ 4.30 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของนิกเกิลในน้ำสกัด TCLP

#### 4.5.4 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสารละลายในรูปพูนหรือโพรงของก้อน

##### มอร์ต้า Pore Water test (PW)

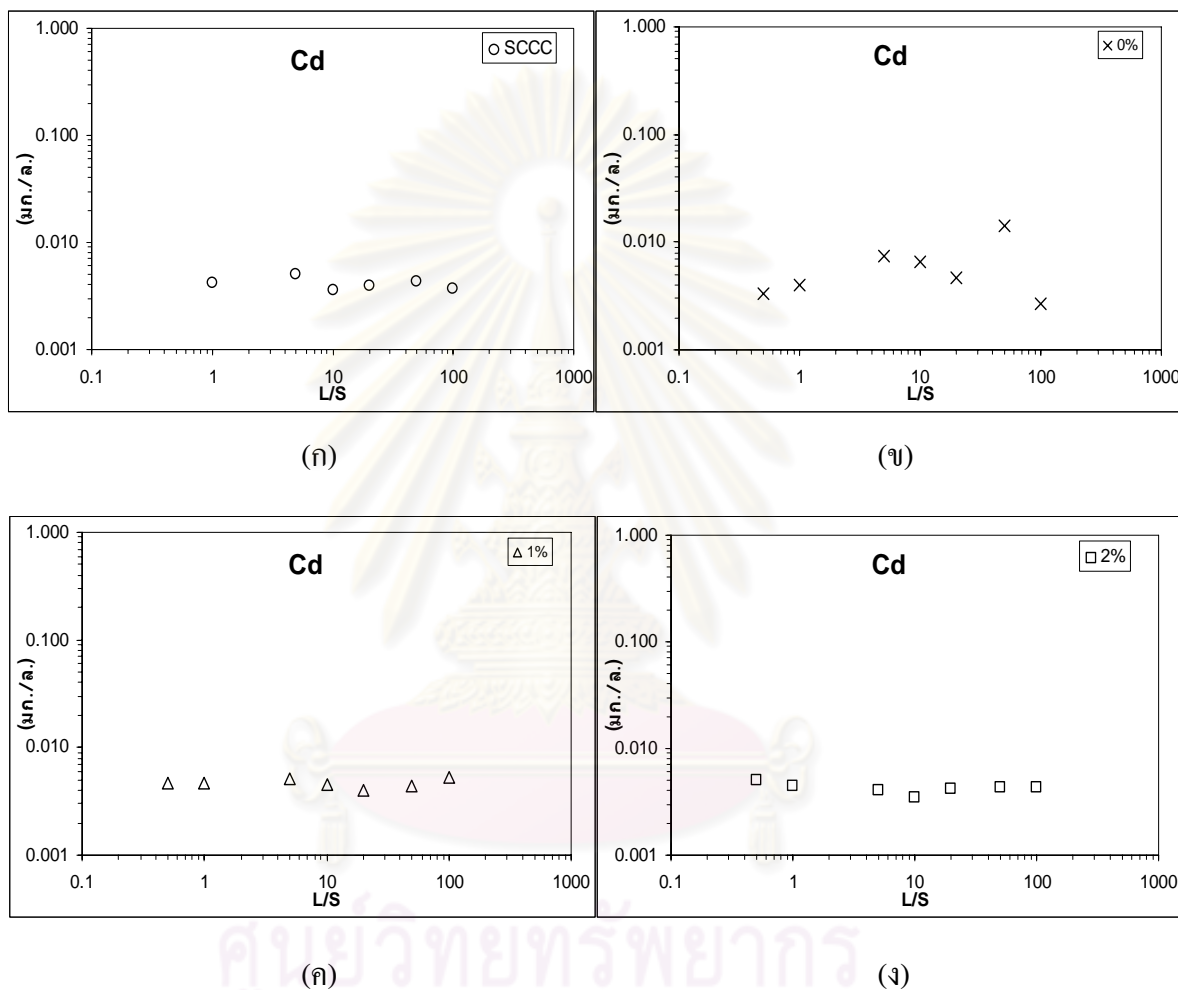
จากการศึกษาองค์ประกอบของสารละลายในรูปพูนหรือโพรงของก้อนมอร์ต้าที่ทำจากปูนซีเมนต์สำเร็จรูป และปูนที่สังเคราะห์จากการเผาพร้อมกับกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนัก ที่อัตราส่วนร้อยละ 0 1 และ 2 โดยน้ำหนัก และนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง กับความเข้มข้นของธาตุที่ชะละลายออกมาพบว่า

รูปแบบการชะละลายของโลหะหนักที่สนใจคือ แคดเมียม ทองแดง และนิกเกิล มีรูปแบบการชะละลายของธาตุเหมือนกัน คือแนวโน้มการชะละลายมีความเป็นเส้นตรง ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนระหว่างของเหลวและของแข็งไม่มีผลต่อการชะละลายของโลหะหนักทั้งสามชนิดนี้ เนื่องจากธาตุทั้งสามชนิดมีความสามารถในการละลายออกมาได้อย่างอิมิตัว โดยรูปแบบของการชะละลายแสดงดังรูปที่ 4.31 4.33 และ 4.35

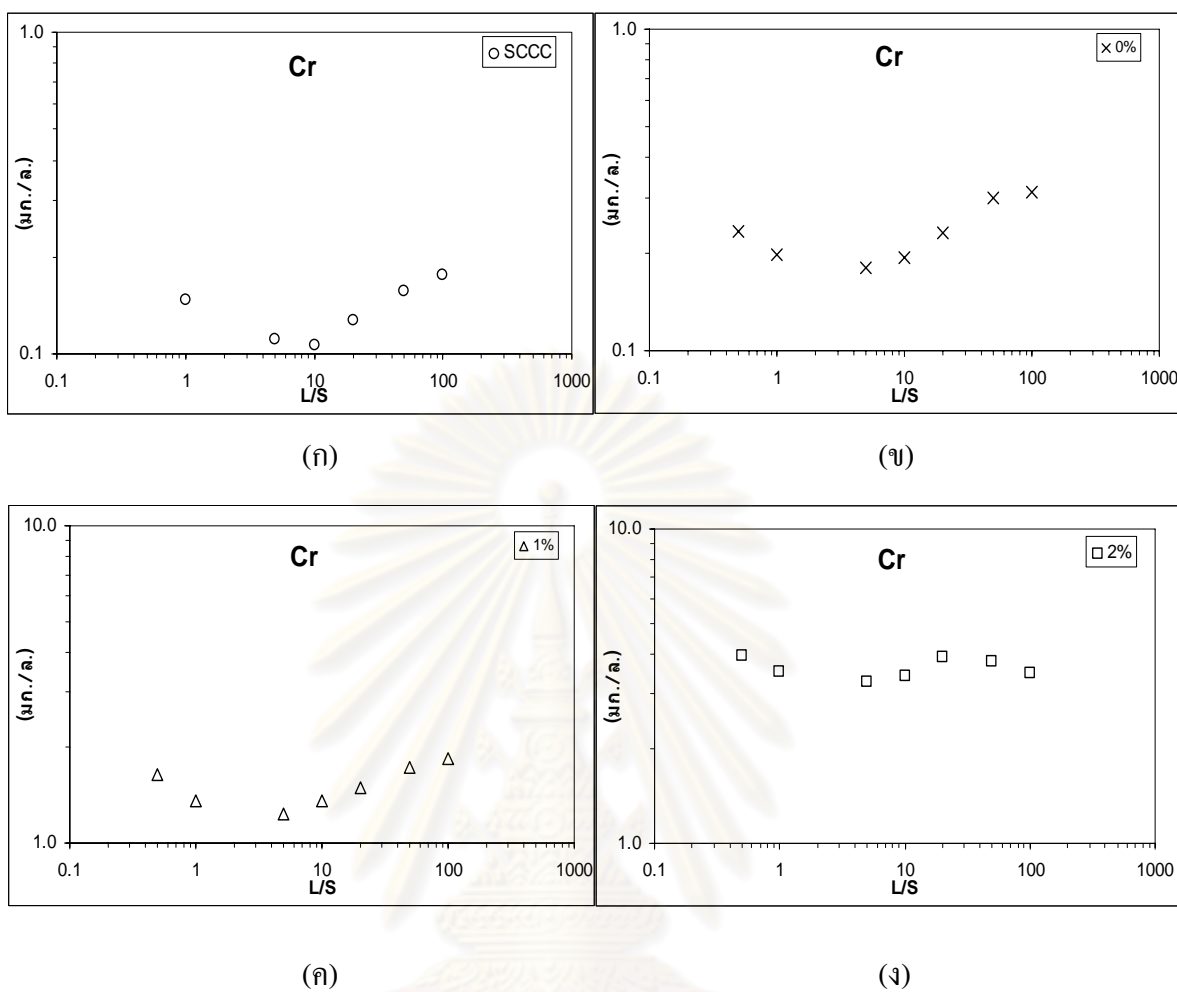
ส่วนโครเมียม ที่ L/S มีค่าน้อย จะชะละลายออกมามาก และค่อยๆ ลดลง และจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ค่า L/S สูงขึ้น โดยที่อัตราส่วนตะกอน 2% มีการชะละลายออกมามากกว่า 1% และ 0% และ ปูนซีเมนต์สำเร็จรูปตามลำดับ เนื่องจาก ในเตาเผาปูนซีเมนต์มีการผสมดีบุก จึงเกิดการรวมตัวของสารประกอบหลักภายในปูนเม็ดได้ดี และมีความเสถียรมากกว่าการสังเคราะห์เองใน

ห้องปฏิบัติการ ซึ่งวัตถุประสงค์ที่ทำการผสมกากอุตสาหกรรมอาจไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และทำการตั้งเคราะห์ได้เพียงครั้งละน้อยๆ โลหะหนักจึงอาจจับอยู่ในปูนเม็ดได้ไม่ดีเท่าในการผลิตจริง โดยรูปแบบการชะละลายแสดงดังรูปที่ 4.32

รูปแบบการชะละลายของเหล็ก ไม่สามารถสรุปได้ เนื่องจากมีการกระจายตัวที่ไม่เป็นรูปแบบที่แน่นอน จึงไม่สามารถคาดการณ์ได้ ดังรูปที่ 4.34

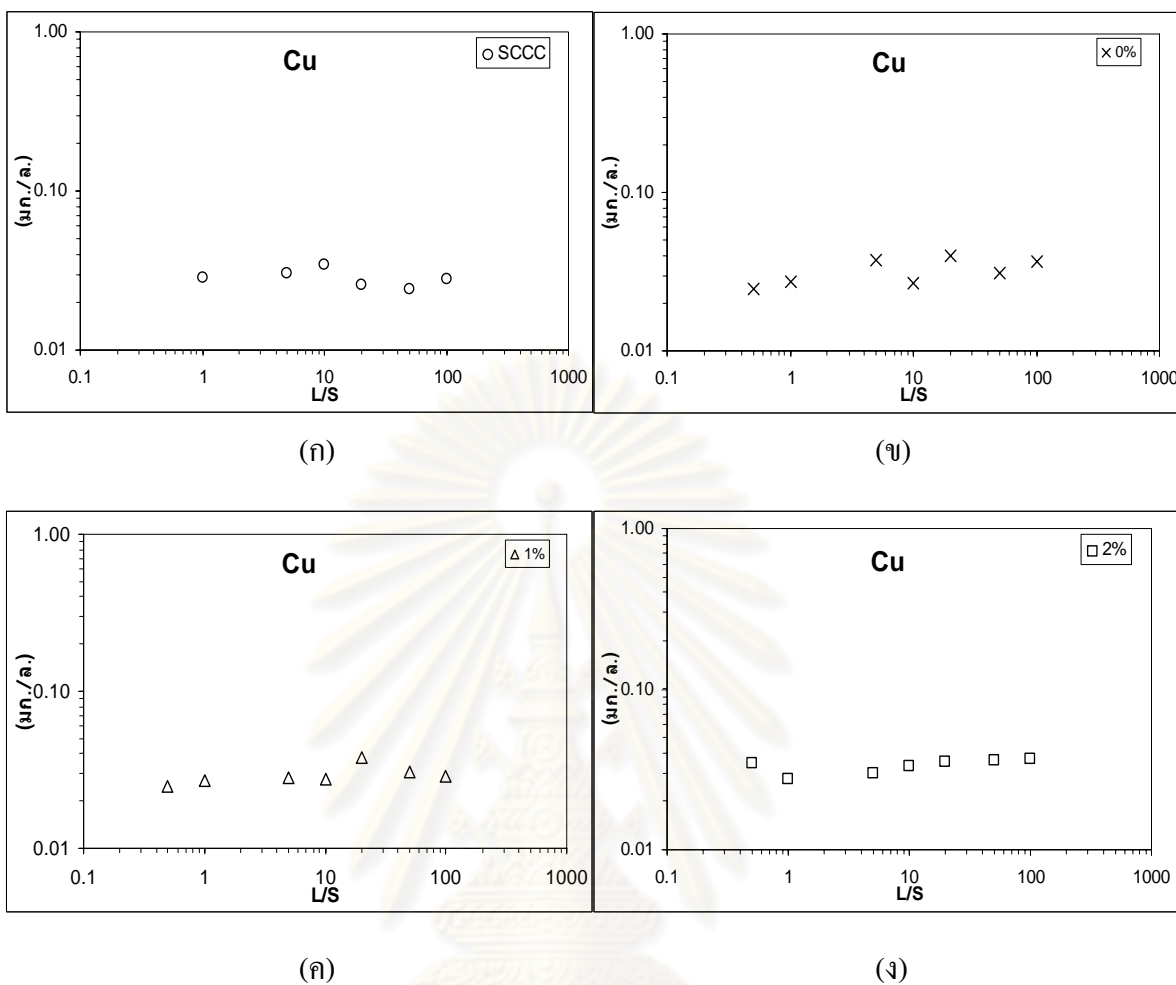


**รูปที่ 4.31** ความสามารถในการชะละลายของแคดเมียมกับอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง  
 (ก) มอร์ต้าที่ทำจากปูนสำเร็จรูป (ข) มอร์ต้าที่ไม่มีการแทนที่ตะกอน  
 (ค) มอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 1% (ง) มอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 2%



**รูปที่ 4.32** ความสามารถในการชะละลายของโครเมียมกับอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง  
 (ก) มอร์ต้าที่ทำจากปูนสำเร็จรูป (ข) มอร์ต้าที่ไม่มีการแทนที่ตะกอน  
 (ค) มอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 1% (ง) มอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 2%

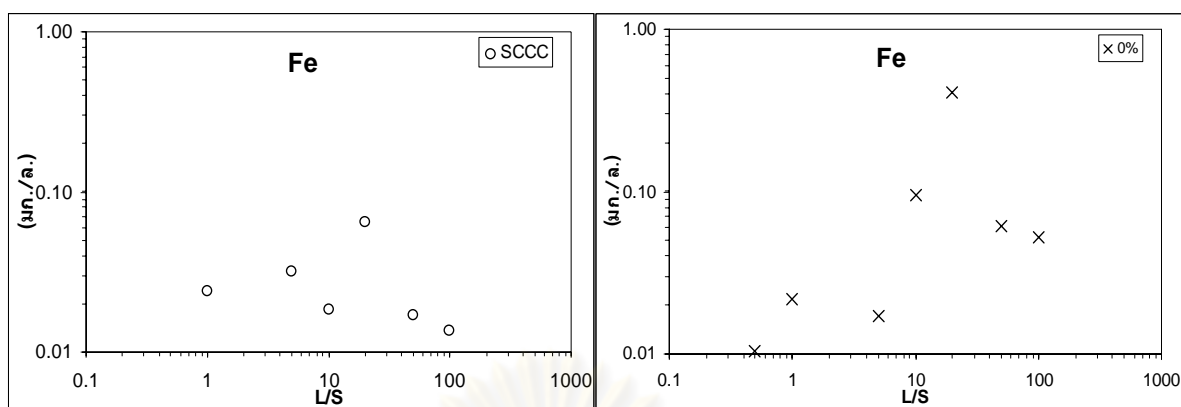
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.33 ความสามารถในการชะละลายของทองแดงกับอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง  
 (ก) มอร์ต้าที่ทำจากปูนสำเร็จรูป (ข) มอร์ต้าที่ไม่มี การแทนที่ตะกอน  
 (ค) มอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 1% (ง) มอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 2%

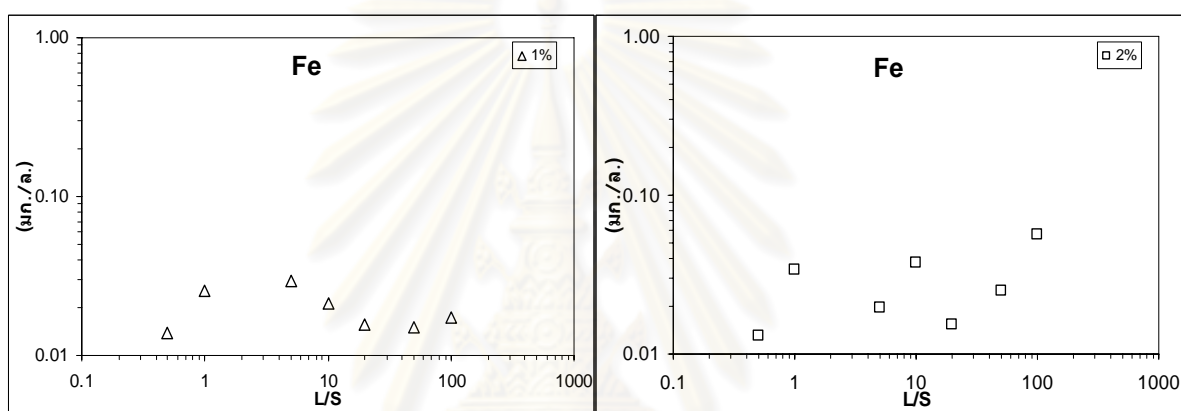
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





(ก)

(ข)



(ค)

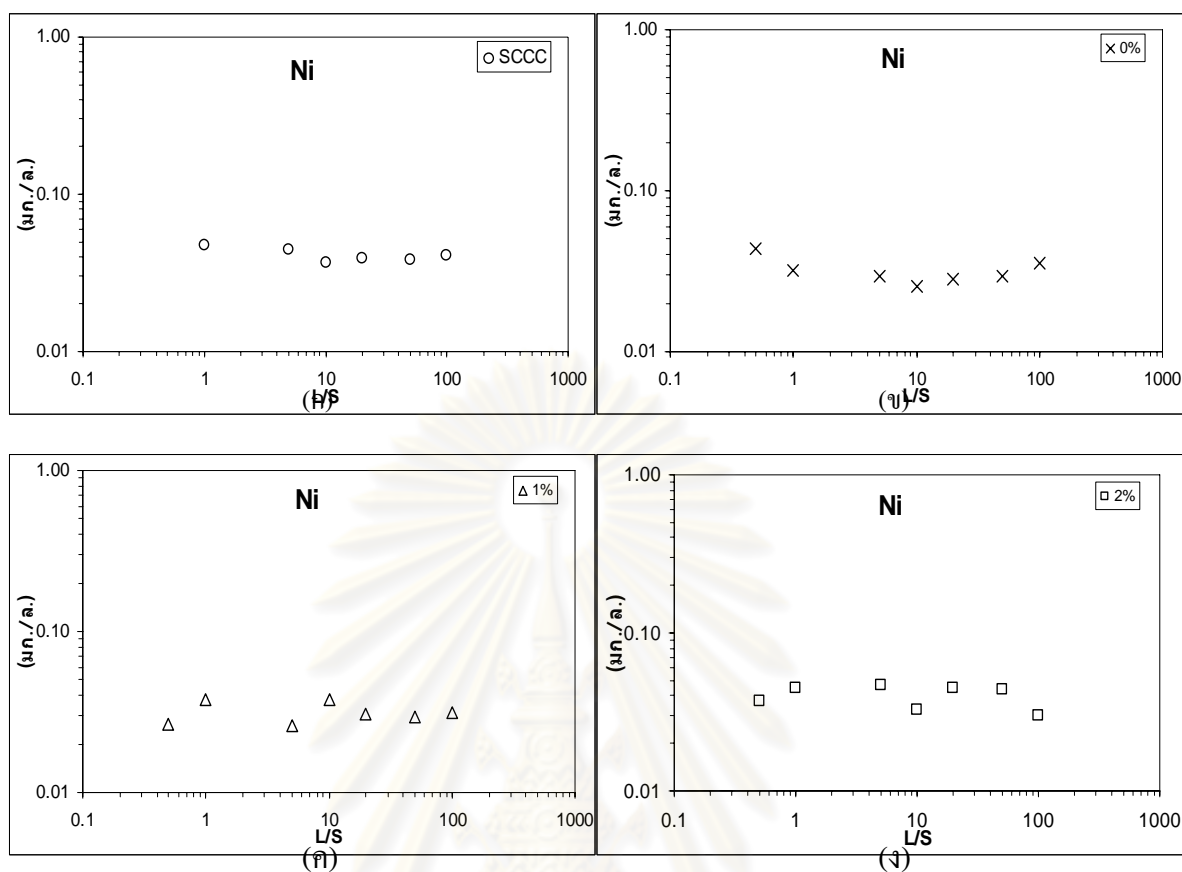
(ง)

**รูปที่ 4.34** ความสามารถในการชะละลายของเหล็กกับอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง

(ก) มอร์ต้าที่ทำจากปูนสำเร็จรูป (ข) มอร์ต้าที่ไม่มีการแทนที่ตะกอน

(ค) มอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 1% (ง) มอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 2%

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.35 ความสามารถในการชะละลายของนิกเกิลกับอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง

(ก) มอร์ต้าที่ทำจากปูนสำเร็จรูป (ข) มอร์ต้าที่ไม่มีกรแทนที่ตะกอน

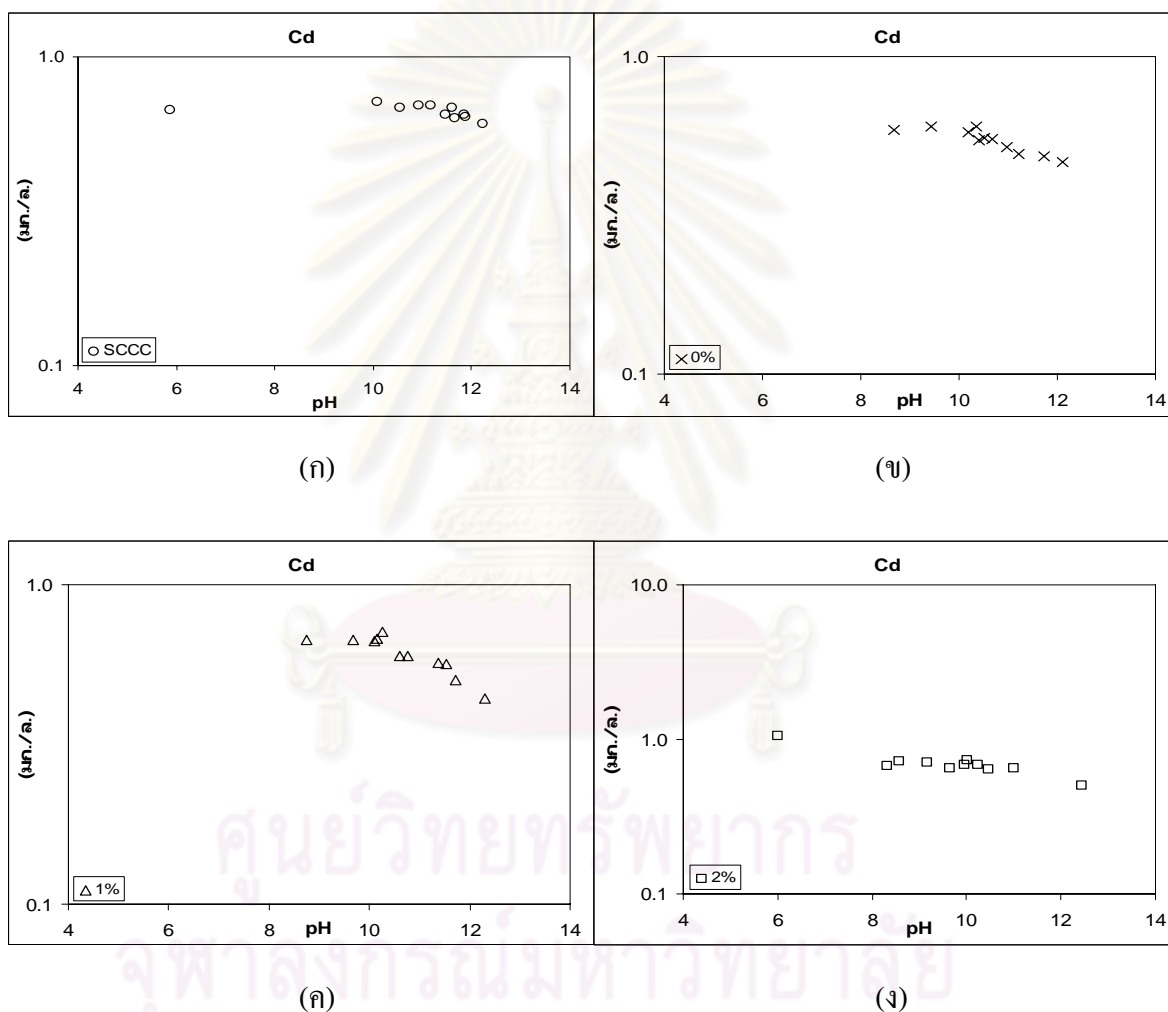
(ค) มอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 1% (ง) มอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 2%

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.5.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของพีเอชต่อการละลายของสาร Acid Neutralization

##### Capacity test (ANC)

ผลของพีเอชต่อการละลายของแคดเมียม เนื่องจากมีการชะละลายออกมาเป็นปริมาณน้อย และรูปแบบการชะละลายค่อนข้างแตกต่างกันในแต่ละตัวอย่าง พอจะสรุปได้ว่าที่ค่าพีเอชน้อยๆ 2 – 6 แคดเมียมสามารถละลายออกมาได้มาก และค่อยๆ ลดลงที่พีเอชประมาณ 8 จากนั้นการละลายเพิ่มได้อีกเล็กน้อยที่ค่าพีเอช 10 จากนั้นจึงมีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 4.36

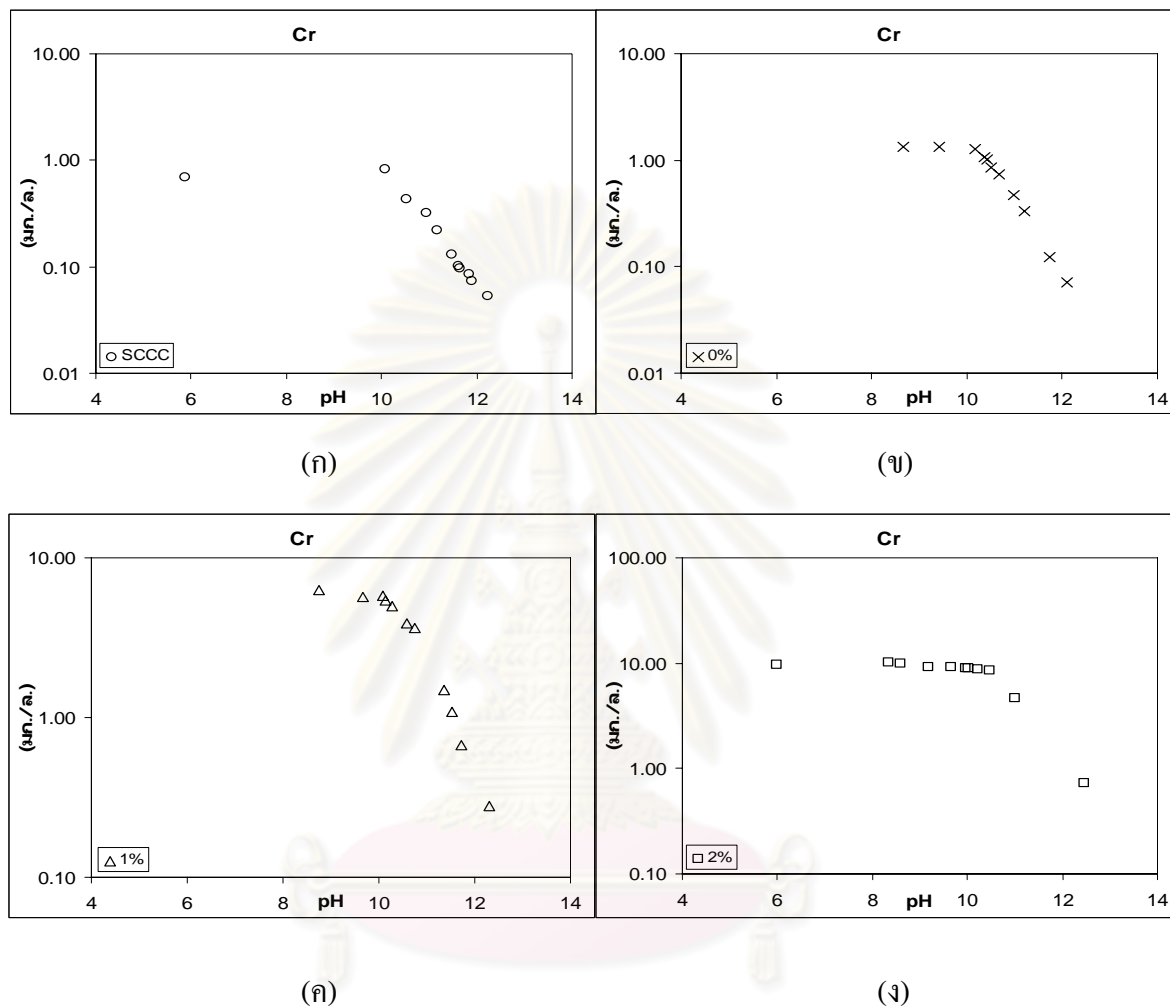


รูปที่ 4.36 ค่าพีเอชที่มีผลต่อการชะละลายของแคดเมียม (ก) มอร์ไซต์ที่ทำจากปูนสำเร็จรูป

(ข) มอร์ไซต์ที่ไม่มีการแทนที่ตะกอน (ค) มอร์ไซต์ที่มีการแทนที่ตะกอน 1%

(ง) มอร์ไซต์ที่มีการแทนที่ตะกอน 2%

ผลของพีเอชต่อการชะละลายของโครเมียม โดยค่าพีเอชที่มีผลต่อการชะละลายคือประมาณ 10 และความสามารถในการละลายลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มมากขึ้น โดยการชะละลายของโครเมียมในการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ดังรูปที่ 4.37

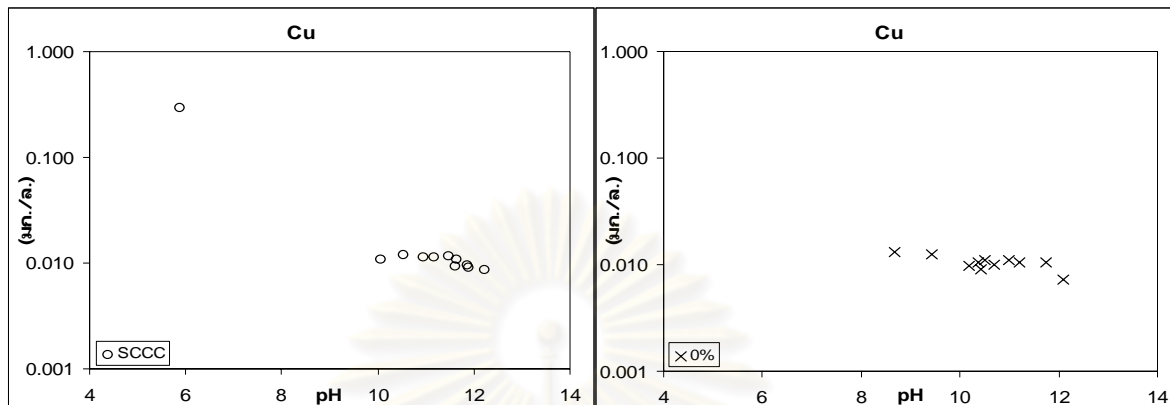


รูปที่ 4.37 ค่าพีเอชที่มีผลต่อการชะละลายของโครเมียม (ก) มอร์แดนท์ที่ทำจากปูนสำเร็จรูป

(ข) มอร์แดนท์ที่ไม่มีการแทนที่ตะกอน (ค) มอร์แดนท์ที่มีการแทนที่ตะกอน 1%

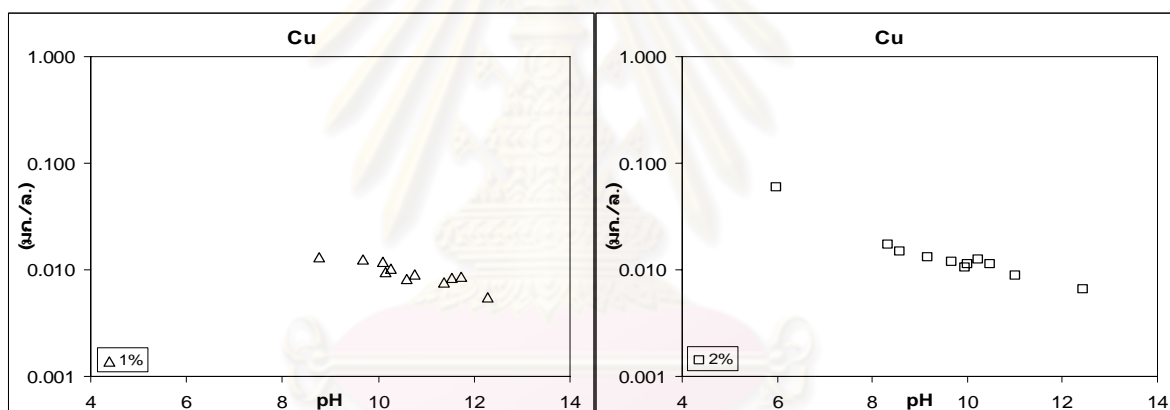
(ง) มอร์แดนท์ที่มีการแทนที่ตะกอน 2%

เนื่องจากทองแดงมีการชะละลายออกมาเป็นปริมาณน้อยมาก คือน้อยกว่า 1 มก./ล. รูปแบบการชะละลายจึงไม่แน่นอน ความสามารถในการชะละลายของทองแดงคือที่ค่าพีเอช 5-6 และความสามารถในการละลายลดลงที่ค่าพีเอชสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.38



(ก)

(ข)



(ค)

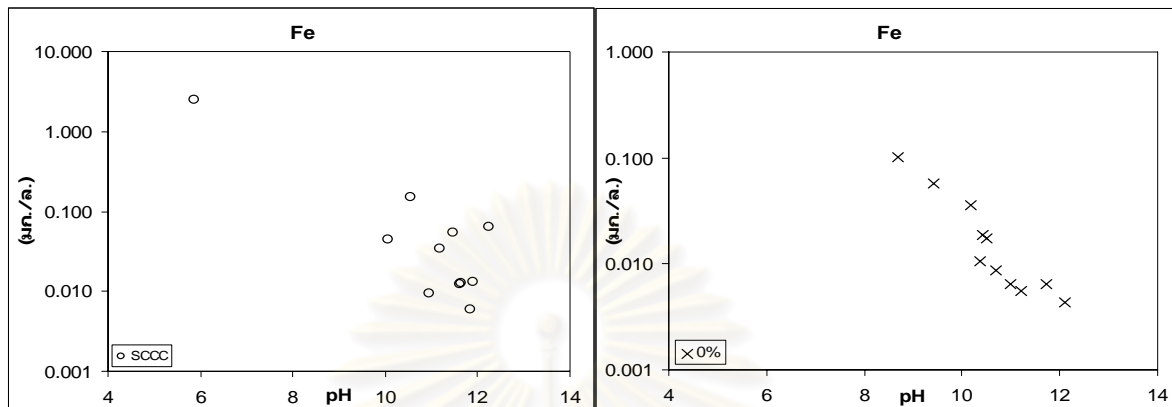
(ง)

รูปที่ 4.38 ค่าพีเอชที่มีผลต่อการชะละลายของทองแดง (ก) มอร์ต้าที่ทำจากปูนสำเร็จรูป

(ข) มอร์ต้าที่ไม่มีการแทนที่ตะกอน (ค) มอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 1%

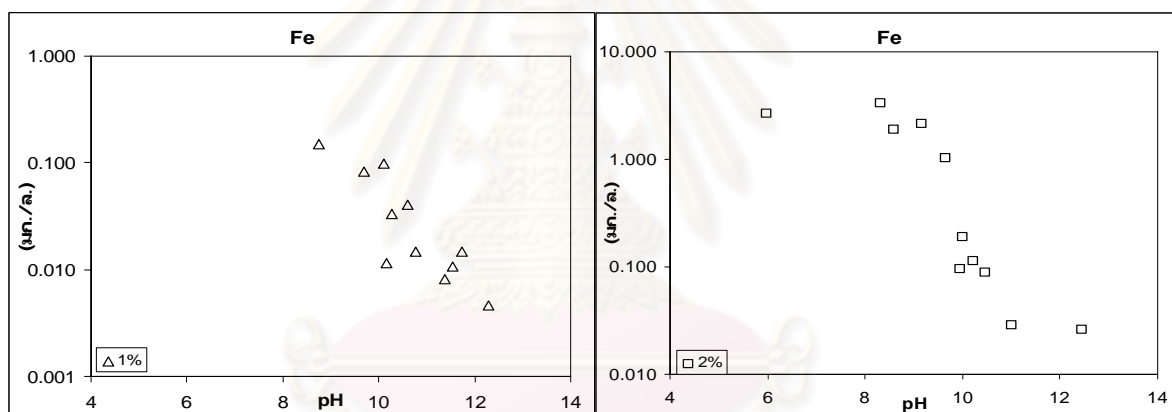
(ง) มอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 2%

การชะละลายของเหล็ก มีการชะละลายได้ดีที่ค่าพีเอชต่ำ หรือในสถานะที่เป็นกรด โดยค่าพีเอชที่เหล็กสามารถชะละลายออกมาได้มากมีค่าประมาณ 3 - 4 และความสามารถในการชะละลายจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อพีเอชมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.39



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

รูปที่ 4.39 ค่าพีเอชที่มีผลต่อการชะละลายของเหล็ก (ก) มอร์ต้าที่ทำจากปูนสำเร็จรูป

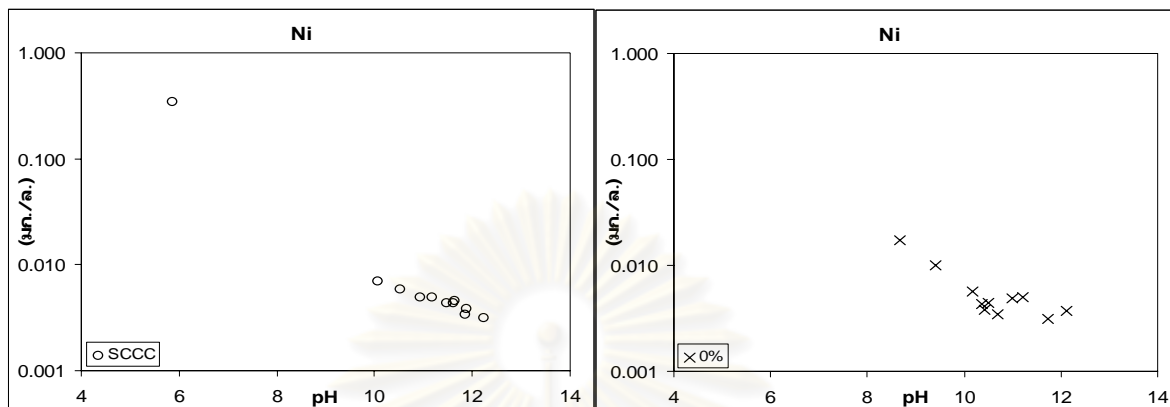
(ข) มอร์ต้าที่ไม่มีการแทนที่ตะกอน (ค) มอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 1%

(ง) มอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอน 2%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

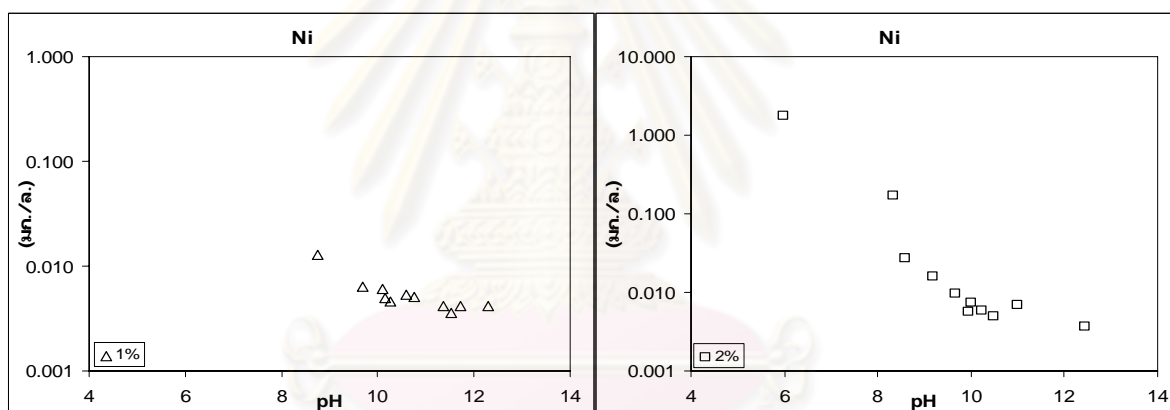


นิกเกิลมีการชะละลายออกมาเป็นปริมาณที่น้อยมาก (น้อยกว่า 1 มก./ล) แต่รูปแบบการชะละลายก็จะมีผลคล้ายคลึงกันทุกตัวอย่าง คือ นิกเกิลมีการชะละลายได้ที่พีเอชมีประมาณ 6 – 8 จากนั้นความสามารถในการชะละลายก็จะลดลงเมื่อพีเอชมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.40



(ก)

(ข)

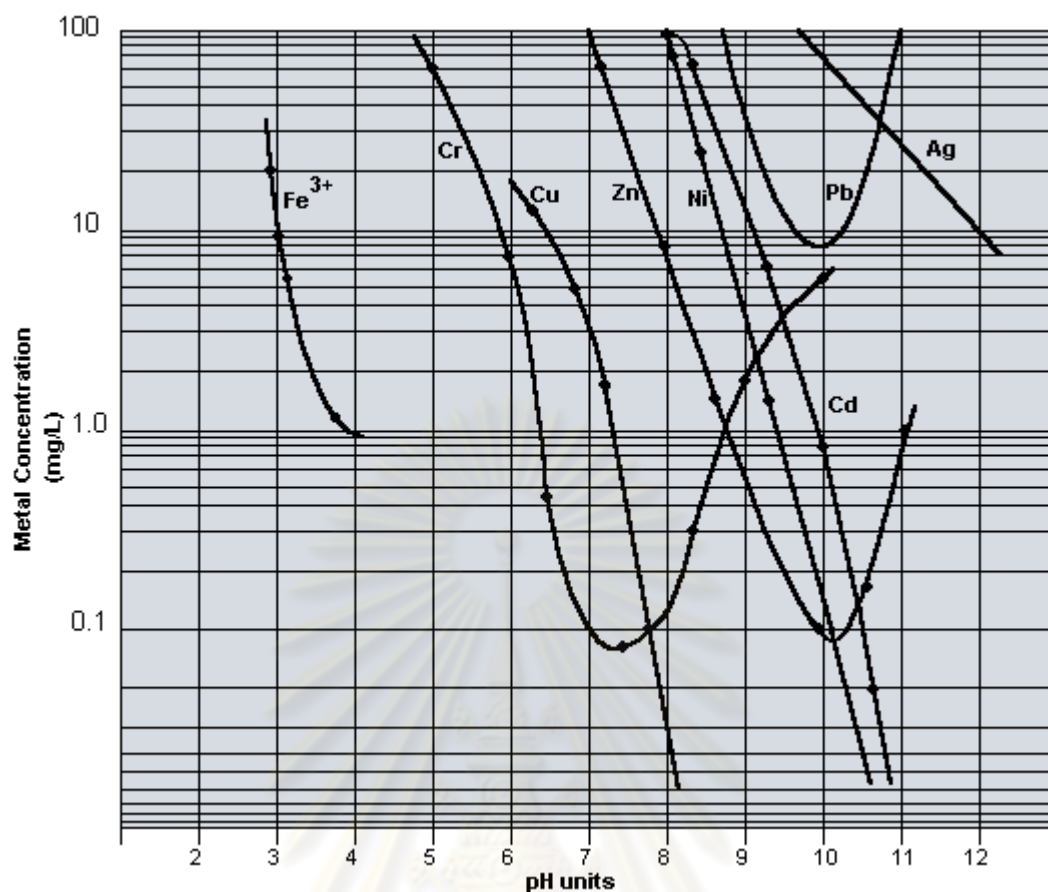


(ค)

(ง)

**รูปที่ 4.40** ค่าพีเอชที่มีผลต่อการชะละลายของนิกเกิล (ก) มอร์ดำที่ทำจากปูนสำเร็จรูป  
(ข) มอร์ดำที่ไม่มีการแทนที่ตะกอน (ค) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 1%  
(ง) มอร์ดำที่มีการแทนที่ตะกอน 2%

ในการพิจารณาอิทธิพลของค่าพีเอชต่อการชะละลายของธาตุต่างๆ จะอ้างอิงผลจากกราฟแสดงค่าพีเอชที่มีผลต่อการชะละลายของธาตุ ดังรูปที่ 4.41 โดยเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับการละลายของธาตุ ได้แก่ เหล็ก โครเมียม แคลเซียม ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว เงิน และ สังกะสี เช่น ทองแดง ที่ค่าพีเอช 6 จะสามารถละลายได้ประมาณ 20 มก./ล. และที่พีเอช 8 จะสามารถละลายได้ลดลง คือประมาณ 0.05 มก./ล. ซึ่งผลของการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับการละลายของธาตุ



รูปที่ 4.41 ค่าพีเอชที่มีผลต่อการชะละลายของธาตุ (Hoffland Environmental Inc., 2009)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์โดยการเผาพร้อมกับกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักจากกระบวนการเจียร กิ่ง ชื้นงานแผ่นโลหะในอุตสาหกรรมทำชิ้นส่วนและขึ้นรูปโลหะ ทำการแทนที่ตะกอนที่อัตราส่วนร้อยละ 0 1 และ 2 จากนั้นนำมอร์ต้าไปทดสอบการชะละลายระยะสั้น โดยทำการทดสอบด้วยวิธี Wet Extraction Test (WET) ตามมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 และตามมาตรฐานการชะละลายของ US EPA SW-846 Method 1311 และทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานของมอก. 15-2514

ทำการทดสอบการชะละลายระยะยาว ซึ่งประยุกต์ใช้ตามมาตรฐานของ EA NEN 7375 โดยมีสารชะละลาย 3 ชนิด ได้แก่ น้ำปราศจากไอออน สารละลายฝนกรดตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540 เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว และน้ำสกัด TCLP ตามมาตรฐานการชะละลายของ US EPA SW-846 Method 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure หรือ TCLP) ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์ พบว่ามีค่าองค์ประกอบทางเคมีเมื่อนำมาคำนวณในสมการโมดูลัสแล้ว ค่า LSF SR และ AR อยู่ในช่วงมาตรฐานที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์

5.1.2 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนัก พบว่าปริมาณของ โครเมียม แคดเมียม ทองแดง นิกเกิล เกินจากค่ามาตรฐาน Total Threshold Limit Concentration (TTLC) ของกรมโรงงานอุตสาหกรรมในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 และมีปริมาณของโลหะหนักปริมาณสูง จากการที่พบปริมาณของเหล็กมากนั้นทำให้สามารถนำของเสียดังกล่าวมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนแร่เหล็กในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ได้

5.1.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ กันพบว่า ปูนเม็ดที่ได้ทำการสังเคราะห์ในเตาเผาห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที มีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจาก มีองค์ประกอบทางเคมี อยู่ในช่วงค่าที่ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และจากการนำไปคำนวณหาค่า LSF SR และ AR โดย สมการโมดูลัสและค่าองค์ประกอบหลัก ได้แก่  $C_3S$   $C_2S$   $C_3A$  และ  $C_4AF$  โดยใช้วิธีของ อาร์ เอช โบก (R. H. Bogue) ค่าที่ได้ก็อยู่ในช่วงที่นิยมใช้เช่นเดียวกันดังนั้น ปูนเม็ดที่สังเคราะห์โดยการเผา ร่วมกับกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักจึงสามารถนำไปใช้ได้จริง และเหมาะที่จะนำไปทำการ ทดสอบต่อไป

จากค่าสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียสและ 1,450 องศาเซลเซียสของทุกอุณหภูมิ พบว่าปริมาณของ  $C_3A$  มีแนวโน้มลดลงในขณะที่ ปริมาณ ของ  $C_4AF$  มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น น่าจะมีผลมาจากปริมาณแร่เหล็กที่มีมากขึ้นในตัววัตถุดิบทำให้ การเกิดโครงสร้างขององค์ประกอบทางเคมีไปเกิดเป็น  $C_4AF$  ได้มากกว่า  $C_3A$  (J. Bensted and P. Barnes, 2002)

5.1.4 ผลการวิเคราะห์รูปแบบผลึกของสารประกอบในปูนเม็ดที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที โดยเครื่อง X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD) พบว่า รูปแบบของกราฟที่ได้จากการวัดของปูนเม็ดที่ได้จากการสังเคราะห์กับปูนเม็ดที่ได้จากการ ผลิตในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์มีความคล้ายคลึงกัน

5.1.5 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนเม็ดที่สังเคราะห์ร่วมกับกาก อุตสาหกรรมปูนโลหะหนักเปรียบเทียบกับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) ตาม ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 พบว่าไม่มี ค่าโลหะหนักที่เกินมาตรฐานเนื่องจากโลหะหนักจะถูกจับอยู่ในเม็ดปูน ดังนั้น ปูนเม็ดที่สังเคราะห์ จากการเผาร่วมกับกากตะกอนอุตสาหกรรม เป็นของเสียที่ไม่อันตราย และสามารถนำไปใช้ได้จริง

5.1.6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่ทำด้วยปูนเม็ดจากการสังเคราะห์ ร่วมกับกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักเปรียบเทียบกับมาตรฐานของมอก. 15-2514 พบว่าที่อายุบ่ม 7 วันและ 28 วัน มีค่าเกินมาตรฐาน จากการเพิ่มอัตราส่วนของกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักทำ ให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง โดยค่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์สำเร็จรูปมีค่าสูงที่สุด และปูน เม็ดที่สังเคราะห์โดยไม่ได้ใช้กากอุตสาหกรรม มีค่าน้อยกว่า อาจเป็นผลมาจากกระบวนการผลิตใน โรงงานผลิตปูนซีเมนต์นั้น วัตถุดิบมีการกวนผสมที่สมบูรณ์มากกว่าในห้องปฏิบัติการจึงให้กำลัง รับแรงอัดดีกว่า

5.1.7 ผลการทดสอบการชะละลายระยะสั้นของมอร์ต้าที่ทำด้วยปูนเม็ดจากการสังเคราะห์ร่วมกับกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักโดยทำการทดสอบด้วยวิธี Wet Extraction Test (WET) ตามมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 และวิธี ตามมาตรฐานการชะละลายของ US EPA SW-846 Method 1311 แล้วนำค่าโลหะหนักที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) พบว่าโลหะหนักที่ชะละลายออกมามีค่าน้อยและต่ำกว่ามาตรฐานทั้งสองมาตรฐาน ดังนั้นปูนเม็ดที่สังเคราะห์ได้จึงไม่มีความเป็นอันตรายหากนำไปใช้จริง

5.1.8 ผลการทดสอบการชะละลายระยะยาวของมอร์ต้าที่ทำด้วยปูนเม็ดจากการสังเคราะห์ร่วมกับกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักพบว่าน้ำสกัดชนิดน้ำปราศจากไอออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์ มีปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักที่ศึกษาไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำประปา ดังนั้นการนำปูนเม็ดที่ได้จากการเผาพร้อมกับกากอุตสาหกรรมชนิดนี้ไปใช้จริงจะไม่ก่อให้เกิดอันตราย แต่ในกรณีที่สภาวะแวดล้อมที่มีค่าพีเอชต่ำมากนั้นยังต้องให้ความระมัดระวังเพราะจากการทดสอบในน้ำสกัด TCLP พบว่ามีโลหะหนักชะละลายออกมาเกินค่ามาตรฐานน้ำประปา ได้แก่ แคดเมียม โครเมียม ทองแดง เหล็ก และนิกเกิล โดยที่โครเมียม ทองแดง เหล็กและนิกเกิลมีค่าเกินมาตรฐานนั้นเนื่องจากน้ำสกัด TCLP มีสภาพเป็นกรดแก่ทำให้มีโอกาสที่โลหะหนักจะชะละลายออกมาได้มากกว่าในน้ำปราศจากไอออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์ ดังนั้นปูนเม็ดที่สังเคราะห์ได้จึงไม่เหมาะกับการนำไปใช้ในหลุมฝังกลบเนื่องจากภายในหลุมฝังกลบของเสียอาจเกิดสภาวะที่เป็นกรดขึ้นได้ง่าย ซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดการชะละลายของโลหะหนักและรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ได้

5.1.9 จากการวิเคราะห์กลไกการชะละลายของธาตุที่สนใจโดยอิงมาตรฐานของ EA NEN 7375 พบว่ามีกลไกการชะละลายที่แตกต่างกัน กลไกการชะละลายของแคดเมียมและโครเมียม มักจะเกิดกลไกการแพร่และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงท้าย ทองแดงจะสามารถวิเคราะห์กลไกการชะละลายได้เฉพาะน้ำสกัด TCLP โดยเป็นกลไกการแพร่และลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ในตัวอย่างมอร์ต้าที่มีการแทนที่ตะกอนจะเป็นกลไกแบบการชะล้างที่ผิวและลดลงอย่างรวดเร็ว เหล็กมีกลไกการชะละลายที่เด่นชัดในน้ำสกัด TCLP คือเป็นกลไกการแพร่หรือการละลายที่ล่าช้าและลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงท้าย นิกเกิลจะมีรูปแบบกลไกการชะละลายที่แตกต่างกันไป โดยในธาตุที่มีการชะละลายออกมามีปริมาณน้อยจะทำให้พิจารณาการชะละลายได้ยาก และภาพรวมของการชะละลายในช่วง Increment 2-7 น่าจะเกิดจากความชันมากกว่าจะเป็นกลไกการชะละลายหลักของธาตุนั้นๆ

5.1.10 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสารละลายในรูปพูนหรือโพรงของก้อนมอร์ต้า พบว่ารูปแบบการชะละลายของ แคลเซียม ทองแดง และนิกเกิล มีรูปแบบการชะละลายของธาตุเหมือนกัน คือแนวโน้มการชะละลายมีความเป็นเส้นตรง ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนระหว่างของเหลวและของแข็งไม่มีผลต่อการชะละลายของโลหะหนักทั้งสามชนิดนี้เนื่องจากธาตุทั้งสามชนิดมีความสามารถในการละลายออกมาได้อย่างอิมิตัว โครเมียมที่อัตราส่วนตะกอน 2% มีการชะละลายออกมามากกว่า 1% และ 0% และปูนซีเมนต์สำเร็จรูปตามลำดับ เนื่องจาก ในเตาเผาปูนซีเมนต์มีการผสมดีกว่า จึงเกิดการรวมตัวของสารประกอบหลักภายในปูนเม็ดได้ดี และมีความเสถียรมากกว่าการสังเคราะห์เองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งวัตถุดิบที่ทำการผสมกากอุตสาหกรรมปูนโลหะหนักอาจไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และทำการสังเคราะห์ได้เพียงครั้งละน้อยๆ โลหะหนักจึงอาจจับอยู่ในปูนเม็ดได้ไม่ดีเท่าในการผลิตจริง รูปแบบการชะละลายของเหล็ก ไม่สามารถสรุปได้ เนื่องจากมีการกระจายตัวที่ไม่เป็นรูปแบบที่แน่นอน จึงไม่สามารถคาดการณ์ได้

อิทธิพลของค่าพีเอชต่อการชะละลาย ค่าพีเอชที่ทำให้โลหะหนักที่สนใจเกิดการชะละลายคือ แคลเซียมมีการชะละลายได้ที่ค่าพีเอช 8 – 10 โครเมียมที่ค่าพีเอชประมาณ 10 ทองแดงที่ค่าพีเอชประมาณ 6 เหล็กที่ค่าพีเอชประมาณ 3-4 และนิกเกิลที่ค่าพีเอชประมาณ 6 – 8 ซึ่งสอดคล้องกับกราฟแสดงค่าพีเอชที่มีผลต่อการละลายของโลหะหนัก

## 5.2 ข้อเสนอแนะและปัญหาอุปสรรคที่พบในงานวิจัย

5.2.1 ควรมีการจำลองเตาเผาขนาดเล็กขึ้นมาใช้งานเพื่อที่จะสามารถควบคุมการเดิมวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในปริมาณที่ต้องการได้ และสามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตได้

5.2.2 ในการบดปูนที่ได้จากการสังเคราะห์ก่อนการนำไปผสมกับยิปซัมนั้น ใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการซึ่งทำให้ขนาดของอนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ได้มีความแตกต่างจากในกระบวนการผลิตจริงซึ่งอาจมีผลต่อการชะละลายของโลหะหนัก



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

การประสานครหลวง. 2549. มาตรฐานคุณภาพน้ำ [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

[http:// www.mwa.co.th/standard.html](http://www.mwa.co.th/standard.html) [25 มีนาคม 2551]

ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2540. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง (ซีแพค).

ธีรพล วิรุฬห์ทรัพย์. 2549. การชะละลายของโลหะหนักจากถัง/ภาชนะบรรจุน้ำดื่มซึ่งทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากกระบวนการเผาร่วม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2547. ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สมาคมคอนกรีตไทย.

พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล และ เอกชัย ทวีกิจวานิช. 2548. ผลของโลหะหนักที่มีต่อเฟสของปูนเม็ดในซีเมนต์ที่ได้จากการเผาร่วมกับของเสียอันตราย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10. หน้า 74-79. 2-4 พฤษภาคม ณ โรงแรมแอมบาสเดอร์ซีดี จอมเทียน จังหวัดชลบุรี

วินิต ช่อวิเชียร. 2544. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 9. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548 [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

<http://www.diw.go.th/editwebdesign/html/versionthai/laws/27.pdf> [27 เมษายน 2549]

### ภาษาอังกฤษ

Achternbosch, M., Brautigam, K. R., Hartlieb, N., Kupsch, C., Richers, U. and Stemmermann, P. 2003. Heavy Metals in Cement and Concrete resulting from the co-incineration of Wastes in Cement Kilns with Regard to the Legitimacy of Waste Utilisation. ITAS-Project.

Altun, I. A. 1999. Influence of Heating Rate on the Burning of Cement Clinker. Cement and Concrete Research. 29: 599-602.

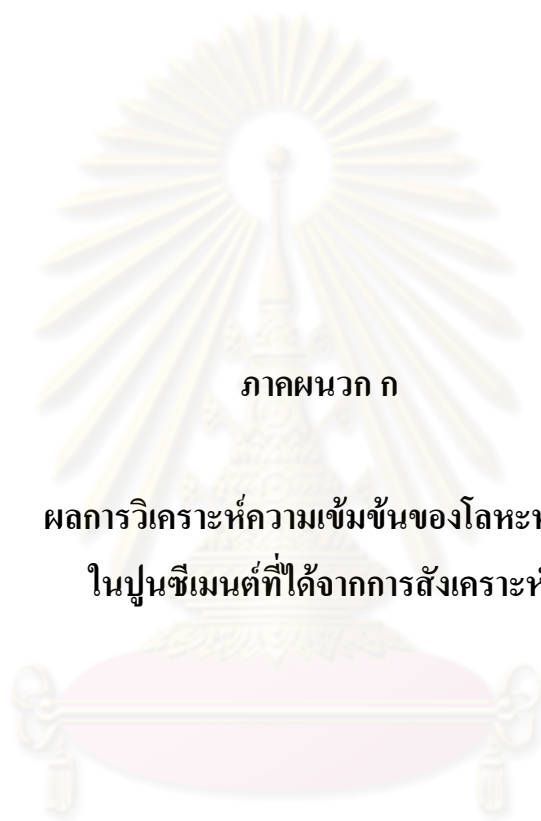
- American Society for Testing and Materials. 1996. Standard specification for mortar cement. C1329-96. Annual book of ASTM standard vol. 04.02 section 4: 519-521.
- Dalton, J. L., Gardner, K. H., Seager, T. P., Weimer, M. L., Spear, J. C. M. and Magee, B. J. 2004. Property of Portland Cement made from Contaminated Sediments. Resource, Conservation and Recycling. 41: 227-241.
- Environment Agency (EA). 2004. Leaching Characteristic of Moulded or Monolithic Building and Wastes Materials. Determination of Leaching of Inorganic Components with the Diffusion test. NEN 7375. Based on a Translation of the Netherlands Normalisation Institute Standard (NNI). pp. 1-32.
- Environmental Toxicology International, Inc. (ETI). 1992. All Fired Up Burning Hazardous Waste in Cement Kilns. ETI, Seattle, WA.
- GTZ and Holcim Public Private Partnership. 2006. Guidelines on Co-processing Waste Materials in Cement Production [Online]. Available from: <http://coprocem.ecs.ch/> [October 29, 2007]
- Hartwell, S. W. and Calovini, F. 1999. Overview of Current Leaching Approaches [Online]. Available from: <http://www.epa.gov/sw-846/pdfs/hartwell1.pdf> and <http://www.epa.gov/sw-846/pdfs/current.pdf> [December 12, 2006]
- Hillier, S. R., Sangha, C. M., Plunkett, B. A. and Walden, P. J. 1999. Long-term Leaching of Toxic Trace Metals from Portland Cement Concrete. Cement and Concrete. 29: 515-521.
- Hoffland Environmental Inc. 2006. Hydroxide Precipitation [Online]. Available from: <http://www.hoffland.net/src/tks/3.xml> [April 10, 2009]
- Kääntee, U., Zevenhoven, R., Backman, R. and Hupa, M. 2004. Cement Manufacturing Using Alternative Fuels and the Advantages of Process Modeling. Fuel Processing Technology. 85: 293-301.
- Malviya, R. and Chaudhary, R. 2006. Leaching Behavior and Immobilization of Heavy Metals in Solidified/Stabilized Products. Journal of Hazardous Materials. B137: 207-217.
- Pan, J. R., Huang, C., Kuo, J. J. and Lin, S. H. In press. 2007. Recycling MSWI Bottom and Fly Ash as Raw Materials for Portland Cement [Online]. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science> [ January 21, 2008]
- Ract, P. G., Espinosa, D. C. R. and Tenorio, J. A. S. 2003. Determination of Cu and Ni Incorporation Ratios in Portland Cement Clinker. Waste Management. 23: 281-285.

- Shih, P.H., Chang, J.E. and Chiang, L.C. 2003. Replacement of Raw Mix in Cement Production by Municipal Solid Waste Incineration Ash. Cement and Concrete Research. 33: 1831-1836.
- Shih, P.H., Chang, J.E., Lu, H. C. and Chiang L.C. 2005. Reuse of Heavy Metal-Containing Sludge in Cement Production. Cement and Concrete Research. 35: 2110-2115.
- Siam City Cement Public Company Limited. 2005. Environmental Care. Environmental Initiatives [Online]. Available from: <http://www.siamcitycement.com> [2009, April 10]
- Taweekitwanit, E. 2004. Leaching Behavior of Heavy Metals from Cement Derived from the Co-Burning of Hazardous Waste. Master's Thesis. International Postgraduate Programs in Environmental Management (Hazardous Waste Management). Chulalongkorn University.
- Tiruta-Barna, L., Imyim, A. and Barna, R. 2004. Long-term Prediction of Leaching Behavior of Pollutants from Solidified Wastes. Advances in Environmental Research. 8: 697-711.
- Trezza, M.A. and Scian, A.N. 2000. Burning Wastes as an Industrial Resource: Their Effect on Portland Cement Clinker. Cement and Concrete Research. 30: 137-144.
- Trezza, M.A. and Scian, A.N. 2005. Waste Fuels: Their Effect on Portland Cement Clinker. Cement and Concrete Research. 35: 438-444.
- US Environmental Protection Agency (EPA). 1992. Method 1311. Toxicity Characteristic Leaching Procedure. 1-38.
- US Environmental Protection Agency (EPA). 1995. Method 3052. Microwave Assisted Acid Digestion of Siliceous and Organically Based Matrices. 1-20.
- Van der Sloot, H. A. and Dijkstra, J. J. 2004. Development of Horizontally Standardized Leaching tests for Construction Materials: A Material Based or Release Based Approach Identical Leaching Mechanisms for Different Materials. ECN Clean Fossil Fuels. ECN-C-04-060



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนัก  
ในปูนซีเมนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์

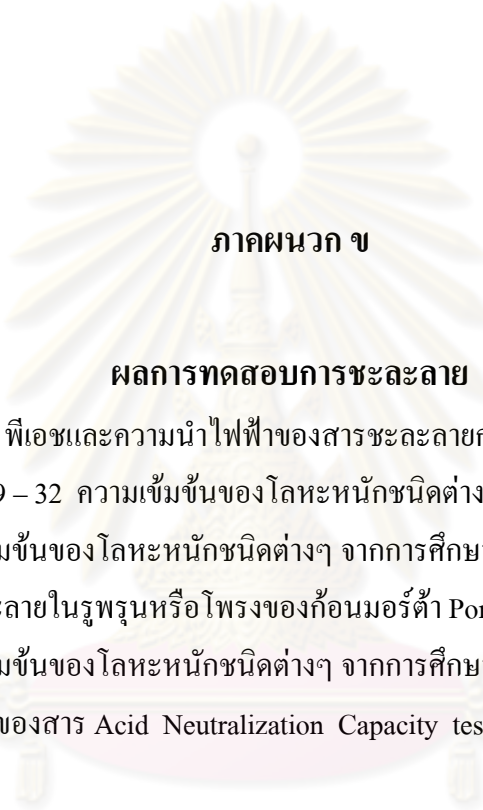
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก ความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนเม็ดที่ได้จากการสังเคราะห์

ชนิดโลหะหนัก	ปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์ (มก./กก.)		
	0%	1%	2%
Al	4185.60	4458.40	3888.00
Ba	83.950	94.920	110.320
Ca	15686.38	14944.46	15220.59
Cd	0.406	0.6668	0.7884
Cr	52.98	198.70	467.92
Cu	121.76	77.50	164.25
Fe	7704.40	9968.20	18619.00
K	3096.40	3924.40	4273.20
Li	16.33	18.85	19.98
Mg	2783.80	2540.00	3123.00
Mn	203.66	296.82	468.36
Na	3014.00	5649.20	4221.40
Ni	21.64	54.95	120.05
Pb	7.06	5.08	6.85
Sr	94.28	94.564	103.752
Tl	5.606	3.138	4.31
V	29.144	28.772	31.41
Zn	142.19	85.03	144.36

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





**ภาคผนวก ข**

**ผลการทดสอบการชะละลาย**

(ตาราง ข. 1 - 8 พีเอชและความนำไฟฟ้าของสารชะละลายก่อน – หลังการทดสอบ)

(ตาราง ข. 9 – 32 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ หลังการทดสอบ)

(ตารางที่ ข. 33 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของ  
สารละลายในรูพรุนหรือโพรงของก้อนมอร์ต้า Pore Water (PW))

(ตารางที่ ข. 34 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ จากการศึกษาอิทธิพลของพีเอชต่อการละลาย  
ของสาร Acid Neutralization Capacity test (ANC))

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข. 1 ค่าเริ่มต้น – ภายหลังการทดสอบการชะละลายของมอร์ต้าช่วงที่ 1

ค่าเริ่มต้นก่อนการทดสอบ				
สารชะละลาย	ค่าพีเอช	ค่าความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	
น้ำปราศจากไอออน	5.63	0.54	26.5	
น้ำฝนกรดสังเคราะห์	4.99	3.88	26.7	
น้ำสกัด TCLP	2.88	545	27.3	
ค่าที่ได้หลังการทดสอบการชะละลายช่วงที่ 1 ระยะเวลาการทดสอบ 6 ชั่วโมง				
สารชะละลาย	ตัวอย่าง	ค่าพีเอช	ค่าความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )
น้ำปราศจากไอออน	SCCC (1)	11.85	1,554	25.8
	SCCC (2)	11.95	1,737	26.0
	SCCC (3)	11.95	1,572	25.7
	0% (1)	11.82	1,211	26.3
	0% (2)	11.89	1,326	26.5
	0% (3)	11.88	1,268	26.8
	1% (1)	11.68	972	25.8
	1% (2)	11.69	975	26.2
	1% (3)	11.65	873	25.9
	2% (1)	11.55	858	26.4
	2% (2)	11.53	936	26.8
	2% (3)	11.53	876	26.7
น้ำฝนกรดสังเคราะห์	SCCC (1)	11.71	1,287	26.5
	SCCC (2)	11.74	1,438	26.5
	SCCC (3)	11.75	1,402	26.4
	0% (1)	11.74	894	26.2
	0% (2)	11.8	1,016	26.8
	0% (3)	11.8	1,020	26.9
	1% (1)	11.81	1,122	26.5
	1% (2)	11.87	1,226	26.4
	1% (3)	11.84	1,166	26.5
	2% (1)	11.54	809	26.7
	2% (2)	11.49	849	26.5
	2% (3)	11.49	940	26.3
น้ำสกัด TCLP	SCCC (1)	4.46	2,960	26.7
	SCCC (2)	4.37	2,850	26.6
	SCCC (3)	4.39	2,930	26.4
	0% (1)	4.39	2,740	26.6
	0% (2)	4.37	2,750	26.5
	0% (3)	4.36	2,730	26.5
	1% (1)	4.52	2,840	26.4
	1% (2)	4.43	2,790	26.6
	1% (3)	4.42	2,850	26.8
	2% (1)	4.42	2,710	26.7
	2% (2)	4.43	2,730	26.5
	2% (3)	4.36	2,620	26.7

ตารางที่ ข. 2 ค่าเริ่มต้น – ภายหลังจากทดสอบการชะละลายของมอร์ต้าช่วงที่ 2

ค่าเริ่มต้นก่อนการทดสอบ				
สารชะละลาย	ค่าพีเอช	ค่าความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	
น้ำปราศจากไอออน	6.25	0.68	25.9	
น้ำฝนกรดสังเคราะห์	5.01	5.11	26.0	
น้ำสกัด TCLP	2.88	635	26.0	
ค่าที่ได้หลังการทดสอบการชะละลายช่วงที่ 2 ระยะเวลาการทดสอบ 1 วัน				
สารชะละลาย	ตัวอย่าง	ค่าพีเอช	ค่าความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )
น้ำปราศจากไอออน	SCCC (1)	11.88	1,303	25.8
	SCCC (2)	11.94	1,476	25.9
	SCCC (3)	11.93	1,372	25.9
	0% (1)	11.91	1,354	26.0
	0% (2)	11.94	1,453	26.1
	0% (3)	11.93	1,399	26.1
	1% (1)	11.8	1,230	26.3
	1% (2)	11.82	1,201	26.3
	1% (3)	11.83	1,195	25.8
	2% (1)	11.68	1,228	25.7
	2% (2)	11.78	1,299	25.7
	2% (3)	11.78	1,248	25.9
น้ำฝนกรดสังเคราะห์	SCCC (1)	11.98	1,533	25.9
	SCCC (2)	11.98	1,553	26.5
	SCCC (3)	11.99	1,556	26.3
	0% (1)	11.86	1,171	26.1
	0% (2)	11.88	1,244	26.0
	0% (3)	11.89	1,267	26.4
	1% (1)	11.88	1,291	26.3
	1% (2)	11.94	1,368	26.1
	1% (3)	11.9	1,325	26.2
	2% (1)	11.78	1,200	26.3
	2% (2)	11.73	1,216	26.4
	2% (3)	11.73	1,268	26.2
น้ำสกัด TCLP	SCCC (1)	4.5	3,120	26.3
	SCCC (2)	4.42	2,960	25.8
	SCCC (3)	4.42	3,090	25.7
	0% (1)	4.5	2,990	25.7
	0% (2)	4.44	3,020	26.1
	0% (3)	4.45	3,010	26.2
	1% (1)	4.51	2,790	26.0
	1% (2)	4.46	2,850	26.3
	1% (3)	4.46	2,940	26.4
	2% (1)	4.34	2,680	25.9
	2% (2)	4.34	2,730	25.8
	2% (3)	4.34	2,670	25.8

ตารางที่ ข.3 ค่าเริ่มต้น – ภายหลังจากทดสอบการชะละลายของมอร์ต้าช่วงที่ 3

ค่าเริ่มต้นก่อนการทดสอบ				
สารชะละลาย	ค่าพีเอช	ค่าความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	
น้ำปราศจากไอออน	6.23	0.8	25.8	
น้ำฝนกรดสังเคราะห์	5.00	4.51	25.8	
น้ำสกัด TCLP	2.88	623	25.7	
ค่าที่ได้หลังการทดสอบการชะละลายช่วงที่ 3 ระยะเวลาการทดสอบ 2.25 วัน				
สารชะละลาย	ตัวอย่าง	ค่าพีเอช	ค่าความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )
น้ำปราศจากไอออน	SCCC (1)	11.83	1,468	25.9
	SCCC (2)	11.86	1,568	25.8
	SCCC (3)	11.87	1,559	25.9
	0% (1)	11.96	1,747	25.6
	0% (2)	12	1,785	26.1
	0% (3)	12.01	1,751	26.5
	1% (1)	11.92	1,479	26.4
	1% (2)	11.93	1,467	25.8
	1% (3)	11.95	1,509	25.8
	2% (1)	11.76	1,472	25.6
	2% (2)	11.77	1,512	25.4
	2% (3)	11.78	1,511	25.8
น้ำฝนกรดสังเคราะห์	SCCC (1)	11.88	1,521	26.1
	SCCC (2)	11.89	1,445	25.9
	SCCC (3)	11.9	1,560	26.5
	0% (1)	11.97	1,570	26.4
	0% (2)	11.97	1,583	26.1
	0% (3)	12.02	1,682	26.1
	1% (1)	11.97	1,534	26.3
	1% (2)	12	1,582	26.3
	1% (3)	11.98	1,543	25.8
	2% (1)	11.64	1,487	25.9
	2% (2)	11.76	1,492	25.6
	2% (3)	11.71	1,582	25.7
น้ำสกัด TCLP	SCCC (1)	4.5	3,050	25.7
	SCCC (2)	4.42	2,890	26.1
	SCCC (3)	4.43	3,020	26.0
	0% (1)	4.54	2,930	26.0
	0% (2)	4.43	2,910	26.4
	0% (3)	4.43	2,950	26.3
	1% (1)	4.51	2,810	26.1
	1% (2)	4.46	2,820	26.3
	1% (3)	4.46	2,890	26.5
	2% (1)	4.45	3,000	26.4
	2% (2)	4.43	2,960	26.1
	2% (3)	4.4	2,950	26.1

ตารางที่ ข. 4 ค่าเริ่มต้น – ภายหลังจากทดสอบการชะละลายของมอร์ต้าช่วงที่ 4

ค่าเริ่มต้นก่อนการทดสอบ				
สารชะละลาย	ค่าพีเอช	ค่าความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	
น้ำปราศจากไอออน	6.82	0.7	26.0	
น้ำฝนกรดสังเคราะห์	5.00	4.89	26.0	
น้ำสกัด TCLP	2.88	564	26.0	
ค่าที่ได้หลังการทดสอบการชะละลายช่วงที่ 4 ระยะเวลาการทดสอบ 4 วัน				
สารชะละลาย	ตัวอย่าง	ค่าพีเอช	ค่าความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )
น้ำปราศจากไอออน	SCCC (1)	12.05	1,535	26.0
	SCCC (2)	12.11	1,770	26.2
	SCCC (3)	12.03	1,539	26.2
	0% (1)	12.05	1,723	26.5
	0% (2)	12.06	1,762	26.3
	0% (3)	12.05	1,763	25.9
	1% (1)	12.19	1,530	25.7
	1% (2)	12.17	1,504	26.5
	1% (3)	12.18	1,580	26.4
	2% (1)	11.99	1,612	26.3
	2% (2)	12.03	1,741	26.1
	2% (3)	12.02	1,684	26.5
น้ำฝนกรดสังเคราะห์	SCCC (1)	12.04	1,569	26.3
	SCCC (2)	12.04	1,535	25.8
	SCCC (3)	12.04	1,526	25.7
	0% (1)	12.01	1,551	25.9
	0% (2)	12.01	1,559	25.8
	0% (3)	12.03	1,679	26.1
	1% (1)	12.14	1,524	25.9
	1% (2)	12.15	1,581	25.8
	1% (3)	12.14	1,552	26.1
	2% (1)	12.02	1,672	26.3
	2% (2)	12.04	1,679	26.4
	2% (3)	12.04	1,692	25.9
น้ำสกัด TCLP	SCCC (1)	4.44	2,950	25.6
	SCCC (2)	4.4	2,870	25.4
	SCCC (3)	4.42	2,970	25.8
	0% (1)	4.5	2,850	26.1
	0% (2)	4.45	2,850	25.9
	0% (3)	4.43	2,850	26.4
	1% (1)	4.33	2,780	25.8
	1% (2)	4.32	2,780	25.9
	1% (3)	4.34	2,820	25.9
	2% (1)	4.55	2,970	26.0
	2% (2)	4.55	3,010	26.0
	2% (3)	4.5	2,960	26.1

ตารางที่ ข.5 ค่าเริ่มต้น – ภายหลังจากทดสอบการชะละลายของมอร์ต้าช่วงที่ 5

ค่าเริ่มต้นก่อนการทดสอบ				
สารชะละลาย	ค่าพีเอช	ค่าความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S/cm}$ )	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	
น้ำปราศจากไอออน	6.11	0.72	26.7	
น้ำฝนกรดสังเคราะห์	5.00	4.89	26.5	
น้ำสกัด TCLP	2.89	546	26.8	
ค่าที่ได้หลังการทดสอบการชะละลายช่วงที่ 5 ระยะเวลาการทดสอบ 9 วัน				
สารชะละลาย	ตัวอย่าง	ค่าพีเอช	ค่าความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S/cm}$ )	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )
น้ำปราศจากไอออน	SCCC (1)	12.06	1,852	25.9
	SCCC (2)	12.14	1,904	26.1
	SCCC (3)	12.1	1,923	26.2
	0% (1)	12.16	2,540	25.8
	0% (2)	12.19	2,560	25.9
	0% (3)	12.19	2,550	26.3
	1% (1)	12.09	2,280	26.1
	1% (2)	12.1	2,270	26.2
	1% (3)	12.14	2,490	26.4
	2% (1)	12.09	2,670	26.3
	2% (2)	12.12	2,850	26.5
	2% (3)	12.11	2,720	26.1
น้ำฝนกรดสังเคราะห์	SCCC (1)	12.14	1,956	26.5
	SCCC (2)	12.12	1,941	26.3
	SCCC (3)	12.11	1,922	26.3
	0% (1)	12.12	2,220	26.1
	0% (2)	12.15	2,230	26.1
	0% (3)	12.21	2,540	26.2
	1% (1)	12.13	2,210	25.9
	1% (2)	12.16	2,240	26.1
	1% (3)	12.16	2,390	26.2
	2% (1)	12.13	2,560	25.8
	2% (2)	12.12	2,640	25.7
	2% (3)	12.13	2,630	25.9
น้ำสกัด TCLP	SCCC (1)	4.85	4,200	26.2
	SCCC (2)	4.81	4,180	26.3
	SCCC (3)	4.82	4,250	26.1
	0% (1)	4.87	4,130	26.1
	0% (2)	4.86	4,110	25.9
	0% (3)	4.79	4,070	25.8
	1% (1)	4.8	4,080	25.9
	1% (2)	4.81	4,110	25.9
	1% (3)	4.81	4,210	25.8
	2% (1)	5.04	4,740	26.2
	2% (2)	5.03	3,210	26.1
	2% (3)	4.97	4,620	26.3



ตารางที่ ข. 6 ค่าเริ่มต้น – ภายหลังจากทดสอบการชะละลายของมอร์ต้าช่วงที่ 6

ค่าเริ่มต้นก่อนการทดสอบ				
สารชะละลาย	ค่าพีเอช	ค่าความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	
น้ำปราศจากไอออน	6.33	0.85	26.5	
น้ำฝนกรดสังเคราะห์	4.98	7.84	26.8	
น้ำสกัด TCLP	2.89	467	26.6	
ค่าที่ได้หลังการทดสอบการชะละลายช่วงที่ 6 ระยะเวลาการทดสอบ 16 วัน				
สารชะละลาย	ตัวอย่าง	ค่าพีเอช	ค่าความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )
น้ำปราศจากไอออน	SCCC (1)	11.93	1,319	26.8
	SCCC (2)	12.1	1,855	26.5
	SCCC (3)	11.96	1,359	26.8
	0% (1)	12.18	2,490	26.9
	0% (2)	12.18	2,530	26.6
	0% (3)	12.19	2,530	26.6
	1% (1)	11.96	2,020	26.5
	1% (2)	11.98	2,050	26.4
	1% (3)	12.05	2,240	26.3
	2% (1)	12.02	2,120	26.5
	2% (2)	12.06	1,980	26.3
	2% (3)	12.04	1,906	26.3
น้ำฝนกรดสังเคราะห์	SCCC (1)	11.99	1,469	26.7
	SCCC (2)	11.96	1,382	26.8
	SCCC (3)	11.93	1,365	26.8
	0% (1)	12.1	2,030	26.5
	0% (2)	12.11	2,040	26.9
	0% (3)	12.19	2,470	26.4
	1% (1)	11.99	2,030	26.9
	1% (2)	12.05	2,160	26.5
	1% (3)	12.06	2,160	26.8
	2% (1)	12.03	1,967	26.4
	2% (2)	12.05	2,040	26.7
	2% (3)	12.06	2,060	26.3
น้ำสกัด TCLP	SCCC (1)	4.91	4,230	26.3
	SCCC (2)	4.85	4,150	26.5
	SCCC (3)	4.82	4,230	26.3
	0% (1)	4.91	4,440	26.4
	0% (2)	4.88	4,460	26.8
	0% (3)	4.85	4,400	26.8
	1% (1)	4.9	4,180	26.8
	1% (2)	4.86	4,190	26.9
	1% (3)	4.86	4,310	26.9
	2% (1)	4.89	4,250	26.5
	2% (2)	4.87	4,300	26.7
	2% (3)	4.81	4,180	26.7

ตารางที่ ข. 7 ค่าเริ่มต้น – ภายหลังการทดสอบการชะละลายของมอร์ต้าช่วงที่ 7

ค่าเริ่มต้นก่อนการทดสอบ				
สารชะละลาย	ค่าพีเอช	ค่าความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S/cm}$ )	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	
น้ำปราศจากไอออน	6.12	0.88	25.8	
น้ำฝนกรดสังเคราะห์	4.98	8.24	25.6	
น้ำสกัด TCLP	2.89	535	25.6	
ค่าที่ได้หลังการทดสอบการชะละลายช่วงที่ 7 ระยะเวลาการทดสอบ 36 วัน				
สารชะละลาย	ตัวอย่าง	ค่าพีเอช	ค่าความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S/cm}$ )	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )
น้ำปราศจากไอออน	SCCC (1)	11.91	1,917	26.5
	SCCC (2)	12.1	2,730	26.8
	SCCC (3)	11.96	1,951	26.3
	0% (1)	11.99	2,390	26.4
	0% (2)	12.07	2,470	26.8
	0% (3)	12.09	2,490	26.7
	1% (1)	11.73	2,460	26.8
	1% (2)	11.76	2,450	26.9
	1% (3)	11.84	2,610	26.4
	2% (1)	12.06	2,430	26.3
	2% (2)	12.09	2,460	26.4
	2% (3)	12.06	2,220	26.8
น้ำฝนกรดสังเคราะห์	SCCC (1)	12	2,060	25.9
	SCCC (2)	11.98	1,948	25.7
	SCCC (3)	11.98	1,924	25.9
	0% (1)	12.05	2,080	25.8
	0% (2)	12.04	2,070	25.9
	0% (3)	12.13	2,550	26.1
	1% (1)	11.86	2,530	26.2
	1% (2)	11.9	2,700	26.5
	1% (3)	11.9	2,640	26.4
	2% (1)	12.06	2,210	26.9
	2% (2)	12.08	2,280	26.7
	2% (3)	12.09	2,320	26.8
น้ำสกัด TCLP	SCCC (1)	5.46	5,710	26.5
	SCCC (2)	5.37	5,650	26.8
	SCCC (3)	5.39	5,740	26.4
	0% (1)	5.44	5,680	26.5
	0% (2)	5.39	5,620	26.9
	0% (3)	5.35	5,560	26.5
	1% (1)	5.57	5,810	26.9
	1% (2)	5.53	5,760	26.8
	1% (3)	5.68	5,750	26.5
	2% (1)	5.31	5,370	26.4
	2% (2)	5.35	5,460	26.7
	2% (3)	5.29	5,390	26.7

ตารางที่ ข. 8 ค่าเริ่มต้น – ภายหลังจากทดสอบการชะละลายของมอร์ต้าช่วงที่ 8

ค่าเริ่มต้นก่อนการทดสอบ				
สารชะละลาย	ค่าพีเอช	ค่าความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	
น้ำปราศจากไอออน	6.55	0.48	26.5	
น้ำฝนกรดสังเคราะห์	4.99	3.95	25.8	
น้ำสกัด TCLP	2.88	524	26.7	
ค่าที่ได้หลังการทดสอบการชะละลายช่วงที่ 8 ระยะเวลาการทดสอบ 64 วัน				
สารชะละลาย	ตัวอย่าง	ค่าพีเอช	ค่าความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )
น้ำปราศจากไอออน	SCCC (1)	11.86	1,366	25.6
	SCCC (2)	11.98	1,715	26.2
	SCCC (3)	11.85	1,322	25.6
	0% (1)	11.91	1,792	26.1
	0% (2)	11.94	1,828	26.5
	0% (3)	11.96	1,845	25.9
	1% (1)	12.05	1,775	26.5
	1% (2)	12.05	1,748	26.8
	1% (3)	12.08	1,831	26.9
	2% (1)	11.99	1,914	25.8
	2% (2)	11.99	1,937	25.7
	2% (3)	11.93	1,739	25.9
น้ำฝนกรดสังเคราะห์	SCCC (1)	11.96	1,696	26.5
	SCCC (2)	11.95	1,648	25.9
	SCCC (3)	11.95	1,630	25.8
	0% (1)	11.9	1,562	26.1
	0% (2)	11.92	1,582	25.6
	0% (3)	11.99	1,872	25.7
	1% (1)	12.1	1,885	26.9
	1% (2)	12.14	2,050	25.8
	1% (3)	12.11	1,959	26.2
	2% (1)	11.94	1,749	25.9
	2% (2)	11.95	1,820	25.6
	2% (3)	11.96	1,840	25.6
น้ำสกัด TCLP	SCCC (1)	5.51	5,810	26.2
	SCCC (2)	5.46	5,780	26.3
	SCCC (3)	5.49	5,860	26.8
	0% (1)	5.45	5,930	26.5
	0% (2)	5.45	5,950	26.4
	0% (3)	5.42	5,920	26.5
	1% (1)	5.52	5,470	26.6
	1% (2)	5.49	5,750	26.6
	1% (3)	5.51	5,780	25.8
	2% (1)	5.34	5,610	26.5
	2% (2)	5.36	5,700	26.3
	2% (3)	5.31	5,610	26.4

ตารางที่ ข. 9 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำปราศจากไอออน ช่วงที่ 1 (6 ชั่วโมง)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0028	0.0258	0.0009	0.0275	0.0021
SCCC (2)	0.0030	0.1332	0.4397	0.0774	0.0396
SCCC (3)	0.0022	0.0299	0.0009	0.0754	0.0007
0% (1)	0.0025	0.0314	0.0009	0.0003	0.0007
0% (2)	0.0020	0.0349	0.0009	0.0003	0.0108
0% (3)	0.0037	0.0312	0.0009	0.0003	0.0007
1% (1)	0.0029	0.0314	0.0009	0.0108	0.0010
1% (2)	0.0025	0.0349	0.0009	0.0346	0.0096
1% (3)	0.0023	0.1774	0.0009	0.0182	0.0007
2% (1)	0.0022	0.3531	0.0009	0.0482	0.0031
2% (2)	0.0020	0.3565	0.0009	0.0214	0.0007
2% (3)	0.0023	0.3354	0.0009	0.0213	0.0004

ตารางที่ ข. 10 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำปราศจากไอออน ช่วงที่ 2 (1 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0032	0.2091	0.0009	0.0033	0.0007
SCCC (2)	0.0020	0.2218	0.0009	0.0042	0.0039
SCCC (3)	0.0020	0.0212	0.0009	0.0003	0.0108
0% (1)	0.0052	0.0414	0.0009	0.0003	0.0007
0% (2)	0.0013	0.0436	0.0009	0.0003	0.0007
0% (3)	0.0042	0.0389	0.0009	0.0003	0.0007
1% (1)	0.0040	0.0414	0.0009	0.0003	0.0007
1% (2)	0.0014	0.0436	0.0009	0.0003	0.0026
1% (3)	0.0010	0.1971	0.0009	0.0003	0.0092
2% (1)	0.0034	0.3434	0.0009	0.0110	0.0091
2% (2)	0.0033	0.3589	0.0009	0.0046	0.0008
2% (3)	0.0040	0.3617	0.0009	0.0177	0.0071

ตารางที่ ข. 11 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำ  
ปราศจากไอออน ช่วงที่ 3 (2.25 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0031	0.0202	0.0009	0.0003	0.0013
SCCC (2)	0.0020	0.0212	0.0009	0.0003	0.0007
SCCC (3)	0.0027	0.0206	0.0009	0.0003	0.0026
0% (1)	0.0023	0.0388	0.0009	0.0003	0.0007
0% (2)	0.0025	0.0374	0.0009	0.0003	0.0007
0% (3)	0.0045	0.0330	0.0009	0.0003	0.0007
1% (1)	0.0014	0.0388	0.0009	0.0003	0.0007
1% (2)	0.0030	0.0374	0.0009	0.0003	0.0072
1% (3)	0.0015	0.2048	0.0009	0.0003	0.0076
2% (1)	0.0027	0.3927	0.0009	0.0003	0.0007
2% (2)	0.0020	0.4094	0.0009	0.0151	0.0070
2% (3)	0.0031	0.4206	0.0009	0.0003	0.0070

ตารางที่ ข. 12 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำ  
ปราศจากไอออน ช่วงที่ 4 (4 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0025	0.0184	0.0009	0.0003	0.0090
SCCC (2)	0.0024	0.0234	0.0009	0.0003	0.0007
SCCC (3)	0.0031	0.0167	0.0009	0.0003	0.0029
0% (1)	0.0027	0.0355	0.0009	0.0003	0.0007
0% (2)	0.0042	0.0430	0.0009	0.0003	0.0007
0% (3)	0.0022	0.0371	0.0009	0.0003	0.0007
1% (1)	0.0033	0.0355	0.0009	0.0003	0.0007
1% (2)	0.0019	0.0430	0.0009	0.0003	0.0007
1% (3)	0.0042	0.2167	0.0009	0.0003	0.0007
2% (1)	0.0014	0.0465	0.0009	0.0003	0.0007
2% (2)	0.0011	0.4571	0.0009	0.0037	0.0007
2% (3)	0.0017	0.4449	0.0009	0.0052	0.0007

ตารางที่ ข. 13 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำ  
ปราศจากไอออน ช่วงที่ 5 (9 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0026	0.0163	0.0009	0.0003	0.0049
SCCC (2)	0.0032	0.0294	0.0009	0.0003	0.0007
SCCC (3)	0.0047	0.0283	0.0009	0.0003	0.0045
0% (1)	0.0023	0.0540	0.0009	0.0003	0.0007
0% (2)	0.0038	0.0571	0.0009	0.0003	0.0007
0% (3)	0.0042	0.0465	0.0009	0.0003	0.0007
1% (1)	0.0020	0.0540	0.0009	0.0003	0.0007
1% (2)	0.0035	0.0571	0.0009	0.0003	0.0007
1% (3)	0.0038	0.3027	0.0009	0.0003	0.0007
2% (1)	0.0029	0.7046	0.0009	0.0003	0.0007
2% (2)	0.0024	0.7405	0.0009	0.0003	0.0016
2% (3)	0.0049	0.7152	0.0009	0.0003	0.0014

ตารางที่ ข. 14 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำ  
ปราศจากไอออน ช่วงที่ 6 (16 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0002	0.0131	0.0009	0.0003	0.0036
SCCC (2)	0.0002	0.0249	0.0009	0.0003	0.0138
SCCC (3)	0.0002	0.0891	0.0009	0.0003	0.0133
0% (1)	0.0019	0.4122	0.0009	0.0003	0.0007
0% (2)	0.0027	0.0416	0.0009	0.0003	0.0007
0% (3)	0.0036	0.0385	0.0009	0.0003	0.0007
1% (1)	0.0023	0.4122	0.0009	0.0003	0.0007
1% (2)	0.0010	0.0416	0.0009	0.0003	0.0007
1% (3)	0.0009	0.2910	0.0009	0.0003	0.0007
2% (1)	0.0026	0.5821	0.0009	0.0003	0.0048
2% (2)	0.0029	0.6078	0.0009	0.0003	0.0007
2% (3)	0.0020	0.5607	0.0009	0.0003	0.0008



ตารางที่ ข. 15 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำ  
ปราศจากไอออน ช่วงที่ 7 (36 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0002	0.0149	0.0009	0.0003	0.0007
SCCC (2)	0.0002	0.0102	0.0009	0.0003	0.0007
SCCC (3)	0.0002	0.0210	0.0009	0.0003	0.0007
0% (1)	0.0029	0.0381	0.0009	0.0003	0.0007
0% (2)	0.0010	0.0372	0.0009	0.0003	0.0049
0% (3)	0.0046	0.0380	0.0009	0.0003	0.0041
1% (1)	0.0028	0.0381	0.0009	0.0003	0.0007
1% (2)	0.0022	0.0372	0.0009	0.0003	0.0094
1% (3)	0.0042	0.2583	0.0009	0.0003	0.0085
2% (1)	0.0011	0.5235	0.0009	0.0003	0.0068
2% (2)	0.0032	0.5632	0.0009	0.0003	0.0084
2% (3)	0.0027	0.5193	0.0009	0.0003	0.0014

ตารางที่ ข. 16 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำ  
ปราศจากไอออน ช่วงที่ 8 (64 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0007	0.0083	0.0009	0.0003	0.0098
SCCC (2)	0.0002	0.0119	0.0009	0.0003	0.0007
SCCC (3)	0.0002	0.0062	0.0009	0.0003	0.0007
0% (1)	0.0002	0.0309	0.0009	0.0003	0.0007
0% (2)	0.0002	0.0323	0.0009	0.0003	0.0007
0% (3)	0.0002	0.0303	0.0009	0.0003	0.0007
1% (1)	0.0014	0.0497	0.0058	0.0068	0.0074
1% (2)	0.0015	0.0519	0.0057	0.0071	0.0091
1% (3)	0.0012	0.0549	0.0083	0.0084	0.0079
2% (1)	0.0012	0.1111	0.0079	0.0068	0.0094
2% (2)	0.0014	0.1138	0.0075	0.0088	0.0090
2% (3)	0.0010	0.1071	0.0060	0.0056	0.0084

ตารางที่ ข. 17 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำฝน  
กรดสังเคราะห์ ช่วงที่ 1 (6 ชั่วโมง)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0002	0.0280	0.0009	0.0441	0.0007
SCCC (2)	0.0028	0.0245	0.0009	0.0347	0.0040
SCCC (3)	0.0002	0.0267	0.0009	0.0574	0.0033
0% (1)	0.0002	0.0216	0.0009	0.0272	0.0007
0% (2)	0.0022	0.0245	0.0009	0.0267	0.0007
0% (3)	0.0002	0.0264	0.0009	0.0388	0.0046
1% (1)	0.0002	0.0216	0.0009	0.0397	0.0007
1% (2)	0.0018	0.2043	0.0009	0.0237	0.0007
1% (3)	0.0002	0.0246	0.0009	0.0303	0.0010
2% (1)	0.0002	0.3750	0.0009	0.1255	0.0036
2% (2)	0.0029	0.3607	0.0009	0.0422	0.0040
2% (3)	0.0002	0.3768	0.0009	0.0293	0.0007

ตารางที่ ข. 18 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำฝน  
กรดสังเคราะห์ ช่วงที่ 2 (1 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0038	0.0292	0.0009	0.0003	0.0006
SCCC (2)	0.0002	0.0280	0.0009	0.0003	0.0039
SCCC (3)	0.0002	0.0285	0.0009	0.0003	0.0042
0% (1)	0.0002	0.0311	0.0009	0.0003	0.0019
0% (2)	0.0030	0.0354	0.0009	0.0057	0.0021
0% (3)	0.0002	0.0395	0.0009	0.0003	0.0007
1% (1)	0.0002	0.0311	0.0009	0.0003	0.0097
1% (2)	0.0025	0.2103	0.0009	0.0003	0.0005
1% (3)	0.0002	0.0395	0.0009	0.0015	0.0013
2% (1)	0.0002	0.3438	0.0009	0.0104	0.0017
2% (2)	0.0041	0.3213	0.0009	0.0110	0.0071
2% (3)	0.0002	0.3525	0.0009	0.0485	0.0007

ตารางที่ ข. 19 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำฝน  
กรดสังเคราะห์ ช่วงที่ 3 (2.25 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0002	0.0229	0.0009	0.0003	0.0007
SCCC (2)	0.0021	0.0178	0.0009	0.0003	0.0007
SCCC (3)	0.0002	0.0205	0.0009	0.0003	0.0007
0% (1)	0.0008	0.0320	0.0009	0.0003	0.0007
0% (2)	0.0013	0.0327	0.0009	0.0003	0.0007
0% (3)	0.0003	0.0365	0.0009	0.0003	0.0033
1% (1)	0.0002	0.0320	0.0009	0.0003	0.0049
1% (2)	0.0017	0.2134	0.0009	0.0003	0.0007
1% (3)	0.0002	0.0365	0.0009	0.0003	0.0093
2% (1)	0.0002	0.4118	0.0009	0.0291	0.0007
2% (2)	0.0019	0.3879	0.0009	0.0302	0.0007
2% (3)	0.0002	0.4188	0.0009	0.0120	0.0007

ตารางที่ ข. 20 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำฝน  
กรดสังเคราะห์ ช่วงที่ 4 (4 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0002	0.0192	0.0009	0.0003	0.0127
SCCC (2)	0.0033	0.0185	0.0009	0.0003	0.0007
SCCC (3)	0.0002	0.0196	0.0009	0.0003	0.0041
0% (1)	0.0007	0.0298	0.0009	0.0003	0.0007
0% (2)	0.0025	0.0307	0.0009	0.0003	0.0007
0% (3)	0.0002	0.0366	0.0009	0.0003	0.0009
1% (1)	0.0002	0.0298	0.0009	0.0003	0.0007
1% (2)	0.0010	0.2118	0.0009	0.0003	0.0007
1% (3)	0.0002	0.0366	0.0009	0.0003	0.0011
2% (1)	0.0002	0.4376	0.0010	0.0030	0.0007
2% (2)	0.0044	0.4184	0.0009	0.0037	0.0007
2% (3)	0.0002	0.4404	0.0009	0.0003	0.0024

ตารางที่ ข. 21 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำฝน  
กรดสังเคราะห์ ช่วงที่ 5 (9 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0002	0.0242	0.0009	0.0003	0.0015
SCCC (2)	0.0002	0.0215	0.0009	0.0003	0.0010
SCCC (3)	0.0002	0.0206	0.0009	0.0003	0.0007
0% (1)	0.0002	0.0401	0.0015	0.0003	0.0007
0% (2)	0.0017	0.0393	0.0031	0.0003	0.0007
0% (3)	0.0002	0.0480	0.0009	0.0003	0.0007
1% (1)	0.0019	0.0401	0.0009	0.0003	0.0045
1% (2)	0.0030	0.2947	0.0009	0.0003	0.0032
1% (3)	0.0002	0.0480	0.0009	0.0003	0.0054
2% (1)	0.0002	0.6747	0.0009	0.0047	0.0047
2% (2)	0.0016	0.6754	0.0009	0.0003	0.0007
2% (3)	0.0002	0.6915	0.0009	0.0003	0.0064

ตารางที่ ข. 22 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำฝน  
กรดสังเคราะห์ ช่วงที่ 6 (16 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0002	0.0148	0.0012	0.0003	0.0007
SCCC (2)	0.0021	0.0109	0.0009	0.0003	0.0056
SCCC (3)	0.0002	0.0136	0.0009	0.0003	0.0009
0% (1)	0.0002	0.0319	0.0009	0.0003	0.0064
0% (2)	0.0020	0.0359	0.0009	0.0003	0.0007
0% (3)	0.0002	0.0428	0.0009	0.0003	0.0031
1% (1)	0.0002	0.0319	0.0009	0.0003	0.0063
1% (2)	0.0039	0.2728	0.0009	0.0003	0.0038
1% (3)	0.0002	0.0428	0.0009	0.0003	0.0007
2% (1)	0.0002	0.5237	0.0009	0.0009	0.0011
2% (2)	0.0016	0.5220	0.0009	0.0009	0.0007
2% (3)	0.0002	0.5456	0.0009	0.0009	0.0007

ตารางที่ ข. 23 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำฝน  
กรดสังเคราะห์ ช่วงที่ 7 (36 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0002	0.0155	0.0009	0.0003	0.0007
SCCC (2)	0.0026	0.0132	0.0076	0.0003	0.0007
SCCC (3)	0.0002	0.0144	0.0010	0.0003	0.0015
0% (1)	0.0002	0.0313	0.0009	0.0003	0.0007
0% (2)	0.0022	0.0354	0.0009	0.0003	0.0007
0% (3)	0.0002	0.0397	0.0009	0.0003	0.0054
1% (1)	0.0002	0.0313	0.0048	0.0003	0.0007
1% (2)	0.0022	0.2802	0.0009	0.0003	0.0007
1% (3)	0.0002	0.0397	0.0009	0.0003	0.0085
2% (1)	0.0002	0.5033	0.0009	0.0003	0.0039
2% (2)	0.0014	0.4728	0.0009	0.0003	0.0049
2% (3)	0.0002	0.5084	0.0009	0.0003	0.0007

ตารางที่ ข. 24 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำฝน  
กรดสังเคราะห์ ช่วงที่ 8 (64 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0002	0.0064	0.0009	0.0003	0.0043
SCCC (2)	0.0002	0.0102	0.0009	0.0040	0.0079
SCCC (3)	0.0002	0.0052	0.0009	0.0003	0.0007
0% (1)	0.0002	0.0315	0.0009	0.0003	0.0007
0% (2)	0.0002	0.0311	0.0009	0.0003	0.0015
0% (3)	0.0002	0.0355	0.0009	0.0003	0.0007
1% (1)	0.0012	0.0519	0.0076	0.0071	0.0100
1% (2)	0.0013	0.0557	0.0076	0.0082	0.0092
1% (3)	0.0011	0.0559	0.0066	0.0071	0.0080
2% (1)	0.0012	0.1053	0.0067	0.0083	0.0096
2% (2)	0.0011	0.0983	0.0064	0.0186	0.0081
2% (3)	0.0012	0.1037	0.0081	0.0065	0.0094

ตารางที่ ข. 25 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำสกัด TCLP ช่วงที่ 1 (6 ชั่วโมง)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0064	0.2082	0.2416	0.9907	0.0721
SCCC (2)	0.0071	0.2091	0.2269	1.1877	0.0813
SCCC (3)	0.0058	0.2218	0.2803	1.2305	0.0837
0% (1)	0.0002	0.3895	0.1539	1.6376	0.0758
0% (2)	0.1455	0.3597	0.1455	1.4611	0.0815
0% (3)	0.0002	0.3647	0.1316	1.3919	0.0855
1% (1)	0.0002	0.3895	0.1050	1.9733	0.2604
1% (2)	0.0039	1.6912	0.0899	1.9257	0.2413
1% (3)	0.0002	0.3647	0.0998	2.0868	0.2800
2% (1)	0.0002	2.8842	0.1297	1.6485	0.3907
2% (2)	0.0035	2.9008	0.1447	1.7273	0.3917
2% (3)	0.0006	2.7239	0.1257	1.7321	0.3898

ตารางที่ ข. 26 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำสกัด TCLP ช่วงที่ 2 (1 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0080	0.2417	0.2450	5.6715	0.1005
SCCC (2)	0.0054	0.2148	0.2485	7.3822	0.1011
SCCC (3)	0.0064	0.2273	0.2587	7.0203	0.0919
0% (1)	0.0002	0.4298	0.1419	3.8644	0.0833
0% (2)	0.0019	0.4310	0.1370	3.6224	0.0945
0% (3)	0.0014	0.4220	0.1403	3.3028	0.0982
1% (1)	0.0002	0.4298	0.0708	5.5861	0.2605
1% (2)	0.0034	1.8324	0.0672	5.5917	0.2482
1% (3)	0.0022	0.4220	0.0797	6.2239	0.2771
2% (1)	0.0002	2.8842	0.1297	1.6485	0.3907
2% (2)	0.0035	2.9008	0.1447	1.7273	0.3917
2% (3)	0.0006	2.7239	0.1257	1.7321	0.3898



ตารางที่ ข. 27 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำสกัด TCLP ช่วงที่ 3 (2.25 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0060	0.2300	0.2653	7.8694	0.0944
SCCC (2)	0.0064	0.2133	0.2463	9.2761	0.0809
SCCC (3)	0.0044	0.2275	0.2599	8.8867	0.1017
0% (1)	0.0002	0.4144	0.1166	9.9704	0.0863
0% (2)	0.0024	0.4206	0.1283	9.6591	0.0920
0% (3)	0.0002	0.4094	0.1210	8.9289	0.0857
1% (1)	0.0003	0.4144	0.0670	13.245	0.2557
1% (2)	0.0018	1.8588	0.0744	12.632	0.2489
1% (3)	0.0009	0.4094	0.0635	13.378	0.2691
2% (1)	0.0002	3.2078	0.1005	12.977	0.4046
2% (2)	0.0019	3.2777	0.1023	15.035	0.4137
2% (3)	0.0002	3.2332	0.0996	13.785	0.4194

ตารางที่ ข. 28 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำสกัด TCLP ช่วงที่ 4 (4 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0053	0.2200	0.2576	7.5173	0.0968
SCCC (2)	0.0048	0.2100	0.2424	7.7051	0.0848
SCCC (3)	0.0047	0.2159	0.2592	7.4646	0.0794
0% (1)	0.0002	0.3953	0.1135	8.9944	0.0670
0% (2)	0.0048	0.3927	0.1106	8.2849	0.0706
0% (3)	0.0018	0.3889	0.1127	7.8902	0.0730
1% (1)	0.0002	0.3953	0.0549	16.044	0.2342
1% (2)	0.0041	1.8026	0.0564	15.410	0.2459
1% (3)	0.0002	0.3889	0.0589	16.089	0.2427
2% (1)	0.0002	3.1004	0.0846	9.4679	0.3676
2% (2)	0.0043	3.1513	0.0854	10.980	0.3817
2% (3)	0.0002	3.1267	0.0854	10.135	0.3731

ตารางที่ ข. 29 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำสกัด TCLP ช่วงที่ 5 (9 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0073	0.2695	0.2623	2.3609	0.1007
SCCC (2)	0.0047	0.2617	0.2522	2.4998	0.0967
SCCC (3)	0.0057	0.2772	0.2756	2.3378	0.0982
0% (1)	0.0002	0.5061	0.1182	2.9318	0.0867
0% (2)	0.0012	0.4881	0.1209	2.8150	0.0936
0% (3)	0.0006	0.4838	0.1135	2.3901	0.0796
1% (1)	0.0002	0.5061	0.0600	3.5312	0.2621
1% (2)	0.0028	2.3058	0.0631	3.4598	0.2599
1% (3)	0.0002	0.4838	0.0707	3.6962	0.2829
2% (1)	0.0002	4.2892	0.0764	1.9726	0.4201
2% (2)	0.0023	4.3845	0.0949	1.7860	0.4323
2% (3)	0.0002	4.3923	0.0894	1.9222	0.4231

ตารางที่ ข. 30 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำสกัด TCLP ช่วงที่ 6 (16 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0053	0.2672	0.2572	2.0467	0.1010
SCCC (2)	0.0063	0.2610	0.2468	2.0463	0.0907
SCCC (3)	0.0085	0.2684	0.2622	1.9631	0.0925
0% (1)	0.0005	0.5505	0.1266	1.8732	0.0896
0% (2)	0.0046	0.5373	0.1199	1.8037	0.0964
0% (3)	0.0002	0.5225	0.1073	1.6170	0.0917
1% (1)	0.0002	0.5505	0.0609	1.7858	0.2738
1% (2)	0.0036	2.3813	0.0644	2.0048	0.2670
1% (3)	0.0002	0.5225	0.0626	1.8650	0.2716
2% (1)	0.0002	4.4847	0.0938	1.1312	0.4531
2% (2)	0.0025	4.5021	0.0930	1.2618	0.4501
2% (3)	0.0002	4.4328	0.0984	1.3038	0.4408

ตารางที่ ข. 31 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำสกัด TCLP ช่วงที่ 7 (36 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0039	0.3080	0.1658	0.3516	0.0872
SCCC (2)	0.0051	0.2985	0.1654	0.4628	0.0777
SCCC (3)	0.0039	0.3137	0.1808	0.4677	0.0871
0% (1)	0.0002	0.6583	0.0929	0.4221	0.0913
0% (2)	0.0039	0.6305	0.0899	0.4755	0.0795
0% (3)	0.0002	0.6029	0.0803	0.5111	0.0767
1% (1)	0.0014	0.6583	0.0423	0.2528	0.2286
1% (2)	0.0026	2.9666	0.0363	0.1406	0.2330
1% (3)	0.0002	0.6029	0.0492	0.2115	0.2285
2% (1)	0.0005	5.2079	0.0608	0.7637	0.3825
2% (2)	0.0038	5.2028	0.0571	0.2970	0.3753
2% (3)	0.0002	5.2547	0.0650	0.2914	0.4041

ตารางที่ ข. 32 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ภายหลังจากทดสอบการชะละลายในน้ำสกัด TCLP ช่วงที่ 8 (64 วัน)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC (1)	0.0059	0.3032	0.1402	0.1743	0.0780
SCCC (2)	0.0057	0.2865	0.1414	0.1863	0.0769
SCCC (3)	0.0076	0.3060	0.1358	0.1323	0.0738
0% (1)	0.0002	0.7090	0.0708	0.1275	0.0856
0% (2)	0.0002	0.6993	0.0783	0.1627	0.0867
0% (3)	0.0002	0.6615	0.0703	0.1616	0.0751
1% (1)	0.0011	0.7184	0.0176	0.0480	0.0629
1% (2)	0.0011	0.7502	0.0168	0.0447	0.0658
1% (3)	0.0014	0.7663	0.0169	0.0605	0.0625
2% (1)	0.0013	1.2921	0.0217	0.0532	0.1000
2% (2)	0.0014	1.3307	0.0210	0.0705	0.1003
2% (3)	0.0014	1.3177	0.0232	0.0335	0.1037

ตารางที่ ข.33 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของ  
สารละลายในรูปพูนหรือโพรงของก้อนมอร์ต้า Pore Water (PW)

ตัวอย่าง	L/S	ความเข้มข้นโลหะหนัก (มก./ล.)				
		Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC	1	0.00420	0.14698	0.02862	0.02395	0.04723
	5	0.00505	0.11083	0.03030	0.03168	0.04428
	10	0.00355	0.10702	0.03452	0.01837	0.03664
	20	0.00387	0.12762	0.02548	0.06481	0.03893
	50	0.00434	0.15687	0.02390	0.01707	0.03847
	100	0.00368	0.17586	0.02794	0.01363	0.04056
	0%	0.5	0.00330	0.23517	0.02426	0.01036
1		0.00404	0.19914	0.02741	0.02184	0.03179
5		0.00742	0.18037	0.03730	0.01722	0.02965
10		0.00658	0.19455	0.02652	0.09506	0.02544
20		0.00461	0.23375	0.03954	0.40874	0.02825
50		0.01425	0.29824	0.03078	0.06118	0.02918
100		0.00270	0.31260	0.03631	0.05271	0.03543
1%	0.5	0.00466	1.6392	0.02502	0.0139	0.02641
	1	0.00469	1.36	0.02713	0.02561	0.03769
	5	0.00520	1.2349	0.02807	0.02973	0.02575
	10	0.00448	1.3603	0.02785	0.02128	0.03807
	20	0.00404	1.4973	0.03795	0.01579	0.03095
	50	0.00437	1.7362	0.03042	0.01499	0.02963
	100	0.00524	1.8525	0.02855	0.01718	0.03102
2%	0.5	0.00506	3.968	0.03424	0.01294	0.03697
	1	0.00450	3.5088	0.02757	0.03375	0.04523
	5	0.00410	3.2635	0.03006	0.01941	0.04634
	10	0.00342	3.4131	0.03291	0.03783	0.03295
	20	0.00420	3.9174	0.03544	0.01538	0.04438
	50	0.00436	3.7956	0.03624	0.02514	0.04342
	100	0.00437	3.4721	0.03700	0.05685	0.03010

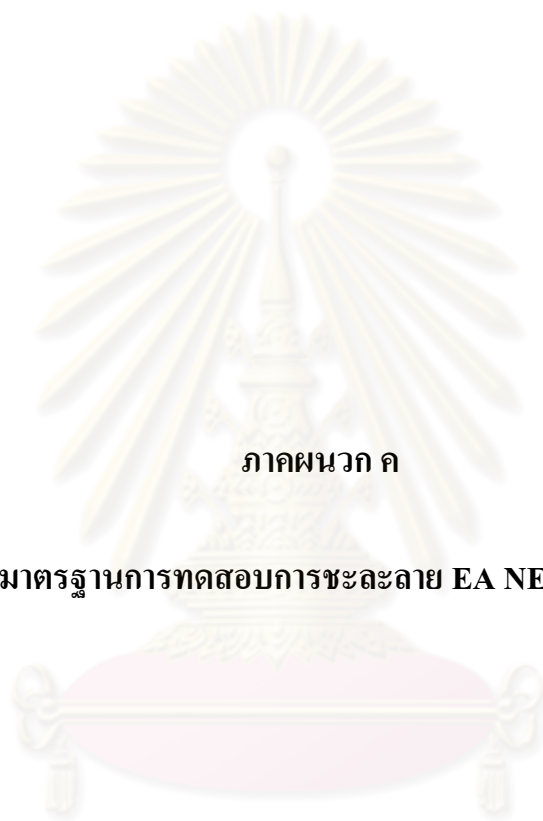
ตารางที่ ข. 34 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ จากการศึกษายัทธิพลของพีเอชต่อการละลายของสาร Acid Neutralization Capacity test (ANC)

ตัวอย่าง	pH	ความเข้มข้นโลหะหนัก (มก./ล.)				
		Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
SCCC	2	0.67258	0.70078	0.29660	2.48832	0.34017
	3	0.71239	0.82152	0.01090	0.04483	0.00698
	4	0.68176	0.43194	0.01191	0.15295	0.00579
	5	0.69689	0.32045	0.01143	0.00947	0.00491
	6	0.69670	0.21900	0.01125	0.03434	0.00485
	7	0.64999	0.13158	0.01150	0.05502	0.00428
	8	0.68392	0.10173	0.00922	0.01234	0.00431
	9	0.63360	0.09641	0.01081	0.01276	0.00455
	10	0.65056	0.08529	0.00945	0.00593	0.00341
	11	0.63902	0.07358	0.00904	0.01304	0.00386
	12	0.60464	0.05353	0.00852	0.06434	0.00315
	0%	2	0.58771	1.34143	0.01312	0.10073
3		0.60135	1.32680	0.01258	0.05792	0.01004
4		0.57555	1.25993	0.00972	0.03593	0.00572
5		0.60042	1.05827	0.01046	0.01048	0.00430
6		0.54471	1.01720	0.00915	0.01860	0.00383
7		0.55259	0.85231	0.01100	0.01739	0.00437
8		0.54914	0.73616	0.01003	0.00859	0.00345
9		0.51958	0.46931	0.01095	0.00650	0.00488
10		0.49422	0.33020	0.01049	0.00553	0.00500
11		0.18471	0.12382	0.01038	0.00648	0.00312
12		0.46625	0.07082	0.00730	0.00432	0.00374

ตารางที่ ข. 34 (ต่อ) ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ จากการศึกษาอิทธิพลของพีเอชต่อการละลายของสาร Acid Neutralization Capacity test (ANC)

ตัวอย่าง	pH	ความเข้มข้นโลหะหนัก (มก./ล.)				
		Cd	Cr	Cu	Fe	Ni
1%	2	0.67254	6.33803	0.01302	0.14835	0.01300
	3	0.67220	5.70593	0.01252	0.08366	0.00637
	4	0.66609	5.80427	0.01203	0.09719	0.00605
	5	0.67604	4.40340	0.00955	0.01155	0.00493
	6	0.71231	4.99030	0.01024	0.03329	0.00465
	7	0.59745	3.87497	0.00828	0.04013	0.00529
	8	0.59633	3.61237	0.00906	0.01482	0.00504
	9	0.57041	1.48723	0.00759	0.00807	0.00413
	10	0.56502	1.08333	0.00847	0.01069	0.00360
	11	0.50326	0.67202	0.00867	0.01476	0.00416
	12	0.44080	0.27952	0.00559	0.00465	0.00419
	2%	2	1.05636	9.64880	0.05912	2.66228
3		0.67489	10.13480	0.01740	3.33483	0.17164
4		0.71810	9.88793	0.01479	1.86843	0.02688
5		0.70450	9.30980	0.01299	2.12730	0.01619
6		0.64808	9.21453	0.01182	1.01245	0.00967
7		0.69027	8.97283	0.01044	0.09499	0.00569
8		0.73297	8.95187	0.01123	0.19064	0.00752
9		0.68327	8.83803	0.01241	0.11273	0.00582
10		0.64004	8.44980	0.01127	0.08833	0.00493
11		0.65315	4.63277	0.00876	0.02871	0.00687
12		0.50677	0.72381	0.00652	0.02574	0.00363





ภาคผนวก ค

มาตรฐานการทดสอบการชะละลาย EA NEN 7375

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทนำ

มาตรฐานการทดสอบการชะละลาย EA NEN 7375: 2004 เป็นมาตรฐานที่แปลจากประเทศเนเธอร์แลนด์ เป็นการเก็บและทดสอบของเสียเพื่อประเมินความเหมาะสมก่อนนำไปกำจัดในหลุมฝังกลบ โดยจะเกี่ยวข้องกับการประเมินปริมาณสารอนินทรีย์ในวัสดุขึ้นรูปหรือวัสดุที่เป็นก้อนแข็งจากการทดสอบการแพร่

วัตถุประสงค์ของการทดสอบแบบการแพร่คือ เพื่อประเมินการชะละลายของสารอนินทรีย์จากวัสดุขึ้นรูปหรือวัสดุที่เป็นก้อนแข็งภายใต้สภาวะที่มีอากาศ พารามิเตอร์อื่นๆ สามารถประเมินได้จากการทดสอบซึ่งครอบคลุมถึงขอบเขตของการชะล้างที่ผิว และสัมประสิทธิ์ประสิทธิผลของการแพร่ที่ใช้ในการคาดการณ์ผลการชะละลายในระยะยาว การทดสอบการแพร่ไม่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่สามารถละลายได้ในระหว่างการทดสอบ

## ทฤษฎี

วัตถุประสงค์ของการทดสอบการแพร่ เป็นการจำลองลักษณะการชะละลายของสารอนินทรีย์จากวัสดุขึ้นรูปและวัสดุที่เป็นก้อนแข็งภายใต้สภาวะที่มีอากาศ ภายในระยะเวลาไม่เกิน 64 วัน การทดสอบจะทำการแทนที่ตัวอย่างในสารชะละลาย ได้แก่ น้ำปราศจากไอออน หรือน้ำที่มีค่าพีเอชเป็นกลาง และมีการเปลี่ยนสารชะละลายตามระยะเวลาที่กำหนด และทำการวัดความเข้มข้นของสารประกอบในสารชะละลายเมื่อเสร็จสิ้นในแต่ละช่วงการทดสอบ

บนพื้นฐานของผลการทดสอบการแพร่ ปริมาณสารประกอบที่ชะละลายออกมาสามารถคำนวณได้ โดยเมื่อเวลาผ่านไปปริมาณสารประกอบอาจเพิ่มมากขึ้นหรือลดลง ทำให้เห็นถึงปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบที่ชะละลายออกมาในช่วงเวลาต่างๆ

## ตัวอย่างในการทดสอบ

ในการทดสอบการแพร่ต้องการตัวอย่างในการทดสอบอย่างน้อย 1 ชิ้น ที่มีลักษณะของรูปทรงที่แน่นอน มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และมีองค์ประกอบที่สามารถเป็นตัวแทนของตัวอย่างหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทดสอบ จะต้องมียุทธศาสตร์ไม่น้อยกว่า 40 มม. และสามารถคำนวณปริมาตรของก้อนตัวอย่างในหน่วยลิตร ( $V_p$ ) ถ้าหากตัวอย่างมีขนาดเล็กกว่า 40 มม. ก็จะต้องมีพื้นที่ผิวด้านใดด้านหนึ่งไม่น้อยกว่า 75 ตร.ซม.

## สารละลาย

1. น้ำปราศจากไอออน ที่มีค่าความนำไฟฟ้าไม่เกิน 1 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร
2. กรดไนตริก ความเข้มข้น  $1 \pm 0.1$  โมลต่อลิตร

## อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ถังแบบปิด เป็นพลาสติกที่แข็งแรง ปริมาตรของถังต้องมากกว่าก๊อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ 2-5 เท่า เมื่อวางก๊อนตัวอย่างทดสอบภายในถัง ก๊อนตัวอย่างจะต้องห่างจากถังไม่น้อยกว่า 2 ซม. และต้องมีน้ำล้อมรอบก๊อนตัวอย่าง
2. ชุดกรอง สำหรับการกรองด้วยความดันสูงและต่ำ จะต้องทำการล้างอย่างต่อเนื่องด้วยกรดไนตริก และน้ำปราศจากไอออน
3. กระจกกรอง จะต้องไม่เคยผ่านการใช้งานมาก่อน และมีขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร
4. ขวดเก็บตัวอย่าง เป็นขวดพลาสติกมีฝาปิด
5. เครื่องวัดค่าพีเอช มีค่าความถูกต้องมากกว่า  $\pm 0.05$  หน่วย
6. เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า มีค่าความถูกต้องมากกว่า  $\pm 1\%$
7. บีกเกอร์หรือภาชนะที่ใช้ในการตวง

## การทดสอบ

ทำการวัดขนาดของก๊อนตัวอย่างก่อนทำการทดสอบ โดยวัดขนาดของด้านที่จะต้องสัมผัสกับสารละลาย การทดสอบการแพร่ประกอบไปด้วย 8 ช่วงการทดสอบ ที่อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 18 และ 22 องศาเซลเซียส ก่อนทำการทดสอบต้องล้างภาชนะที่จะวางก๊อนทดสอบด้วยกรดไนตริกอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน วางก๊อนตัวอย่างในภาชนะโดยที่จะต้องมีพื้นที่ว่างระหว่างภาชนะกับก๊อนตัวอย่าง อย่างน้อย 2 ซม.

## ช่วงการทดสอบที่ 1

เติมน้ำปราศจากไอออนปริมาณ  $V$  โดยคำนวณดังนี้

ก) ในกรณีที่ก๊อนตัวอย่างไม่มีส่วนใดที่ถูกปิดหรือปกคลุม

$$2 \times V_p \leq V \leq 5 \times V_p$$

ข) ในกรณีที่ก้อนตัวอย่างถูกปิดบางส่วน

$$50 \times A \times f \leq V \leq 200 \times A \times f$$

เมื่อ:

V ปริมาตรของสารชะละลาย, ลิตร

Vp ปริมาตรของก้อนตัวอย่าง P, ลิตร

A พื้นที่ผิวของก้อนตัวอย่างส่วนที่ไม่ถูกปิด, ตร.ม.

f ตัวแปลงหน่วยมีค่า 1 ลิตร/ตร.ม.

ก้อนตัวอย่างจะต้องสัมผัสกับสารชะละลายทุกด้านและก้อนตัวอย่างที่มีส่วนที่ถูกปิดจะต้องอยู่ในสารชะละลายอย่างน้อย 2 ชม. จากนั้นปิดภาชนะที่ใส่ก้อนตัวอย่าง

หลังจากผ่านไป  $6 \pm 0.5$  ชม. เทสารชะละลายออก นับเป็นช่วงที่ 1 ไม่ต้องทำให้ก้อนตัวอย่างแห้งหรือล้างตัวอย่าง สารละลายที่ได้จะถูกนำไปกรอง และนำไปวิเคราะห์ วัดค่าพีเอช และค่าความนำไฟฟ้า เก็บสารชะละลายที่ได้ไว้ในขวดเก็บตัวอย่างเป็นปริมาณ 10 มล. เพื่อวัดค่าโลหะหนัก

### ช่วงการทดสอบที่ 2 – 8

หลังจากที่ทำการเทสารชะละลายออกจากภาชนะในช่วงที่ 1 ให้เติมน้ำปราศจากไอออนทันทีเป็นปริมาณเท่าเดิม ในช่วงทดสอบที่เหลือก็ทำเช่นเดียวกัน โดยแต่ละช่วงเวลาการทดสอบที่ทำการเปลี่ยนสารชะละลายได้แก่

ช่วงทดสอบ (n)	เวลา (วัน)
1	$0.25 \pm 10\%$
2	$1 \pm 10\%$
3	$2.25 \pm 10\%$
4	$4 \pm 10\%$
5	$9 \pm 10\%$
6	$16 \pm 1$
7	$36 \pm 1$
8	$64 \pm 1$

## การคำนวณ

ข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณตามมาตรฐานของ EA NEN 7375

1. พีเอช และความนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนส์) แสดงอยู่ในภาคผนวก ข
2. ปริมาตรของก้อนตัวอย่างและปริมาตรของสารชะละลาย (ลิตร)
3. ความเข้มข้นของธาตุที่สนใจ (มก./ล) ที่เวลาต่างๆ
4. ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้ของธาตุนั้นๆ (LOD: Limit of Determination) (มกค./ล.)

**ขั้นตอนที่ 1** ตรวจสอบว่าปริมาตรของสารชะละลายเหมาะสมต่อการศึกษากลไกการชะละลายหรือไม่ โดยในการทดสอบเป็นการชะละลายที่ตัวอย่างสัมผัสกับของเหลวทุกด้าน

$$2 \times V_p \leq V \leq 5 \times V_p$$

V: ปริมาตรของสารชะละลาย หน่วย ลิตร

$V_p$ : ปริมาตรของก้อนตัวอย่าง หน่วย ลิตร

A: พื้นที่ที่เกิดการชะละลาย หน่วย ตร.ม.

**ขั้นตอนที่ 2** วิเคราะห์ค่าพีเอชและความนำไฟฟ้าของสารชะละลายที่ผ่านการทดสอบซึ่งมีข้อกำหนด 2 ข้อ ซึ่งถ้าไม่ผ่านข้อกำหนดทั้ง 2 ข้อนี้ จะต้องทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของ Ca,  $SO_4$  และ Cl เพื่อพิจารณาว่าก้อนตัวอย่างนั้นเกิดการละลายของโครงสร้างหรือไม่

### ข้อกำหนดที่ 1

$$S_{7-8} > 1.5 \times \frac{V_p}{V} + 10^{(pH_{7-8} - 11.78)} + 10^{(2.5 - pH_{7-8})}$$

ถ้าไม่ผ่านข้อกำหนดที่ 1 แสดงว่าโครงสร้างของก้อนทดสอบไม่เกิดการละลาย ไม่จำเป็นต้องวิเคราะห์หา Ca,  $SO_4$  และ Cl แต่หากผ่านข้อกำหนดที่ 1 ให้คำนวณข้อกำหนดที่ 2 ต่อ

**ข้อกำหนดที่ 2**

$$S_{7-8} > 2 \times S_{5-6}$$

$S_{5-6}$  คือ ความนำไฟฟ้าเฉลี่ยของช่วงที่ 5 และ 6 หน่วย ไมโครซีเมนส์/เซนติเมตร

$S_{7-8}$  คือ ความนำไฟฟ้าเฉลี่ยของช่วงที่ 7 และ 8 หน่วย ไมโครซีเมนส์/เซนติเมตร

$pH_{7-8}$  คือ ค่าเฉลี่ยของ pH ในช่วงที่ 7 และ 8

$V_p$  คือ ปริมาตรของก้อนทดสอบ (ลิตร)

$V$  คือ ปริมาตรของสารชะละลาย (ลิตร)

**ตารางที่ ค. 1** แสดงผลการคำนวณจากข้อกำหนดทั้งสอง

ข้อกำหนด ที่	$S_{7-8}$ $\mu\text{S}/\text{cm}$	>	$1.5 \times \frac{V_p}{V} + 10^{(pH_{7-8} - 11.78)} + 10^{(2.5 - pH_{7-8})}$	ผล
1	2,126.4	>	1.949	ผ่าน-คำนวณต่อ
ข้อกำหนด ที่	$S_{7-8}$ $\mu\text{S}/\text{cm}$	>	$2 \times S_{5-6}$	ผล
2	2,126.4	>	4793.4	ไม่ผ่าน-โครงสร้าง ไม่เกิดการละลาย

**ขั้นตอนที่ 3** นำผลที่ได้ภายหลังจากการทดสอบการชะละลายไปหาค่าตัวแปรต่างๆ โดยความเข้มข้นของ Cr ภายหลังจากการทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ ค. 2

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ค. 2 ความเข้มข้นของ Cr จากมอร์ต้าที่ทำจากปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์โดยมีการแทนที่ตะกอน 2 % ในน้ำปราศจากไอออน ภายหลังจากการทดสอบการชะละลายที่เวลาต่างๆ

Leachant	sample	Time Days	Conc. ppb
DI	2%	0.25	356.8040
		1	353.6940
		2.25	411.6000
		4	453.2000
		9	719.6160
		16	579.8860
		36	534.2960
		64	110.3844

1. การคำนวณค่าที่ชะละลายออกมาของธาตุที่สนใจในการเปลี่ยนสารชะละลายแต่ละครั้ง  
(Measured leaching of a component per fraction)

สำหรับธาตุแต่ละชนิดที่จะศึกษาจะต้องคำนวณหา ค่าการชะละลายที่วัดได้ โดยใช้สูตร

$$E^*_i = \frac{C_i \times V}{f \times A}$$

$E^*_i$  คือ ค่าการชะละลายที่วัดได้ของธาตุหนึ่งในการเปลี่ยนสารชะละลายครั้งที่  $i$  หน่วย  $\text{mg}/\text{m}^2$

$C_i$  คือ ความเข้มข้นของธาตุในสารชะละลาย  $i$  หน่วย ลิตร

$V$  คือ ปริมาตรของสารชะละลาย หน่วย ลิตร

$f$  คือ ตัวแปลงหน่วย :  $1000 \mu\text{g}/\text{mg}$

ความเข้มข้น  $C_i$  เป็นความเข้มข้นที่ปรากฏอยู่ในสารชะละลายที่ผ่านการทดสอบ ถ้าความเข้มข้นดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าค่าต่ำสุดที่เครื่องมือจะวัดได้ให้แทนค่า  $C_i$  ด้วยค่าที่เครื่องมือสามารถวัดได้ต่ำที่สุดซึ่งจะได้ผลเป็นค่าขอบเขตบนของ  $E^*_i$  และแทนค่า  $C_i$  ด้วย 0 จะได้ผลเป็นขอบเขตล่างของ  $E^*_i$  สำหรับผลการวิเคราะห์ค่า  $E^*_i$  แสดงอยู่ในตารางที่ ค. 3

ตารางที่ ค. 3 ค่าการชะละลายที่วัดได้ต่อพื้นที่

Leachant	Sample	Time Days	Conc. (C) ppb	Volume (V) L	Area (A) m <sup>2</sup>	Fraction (i)	E* <sub>i</sub> mg/m <sup>2</sup>	
DI	2%	0.25	356.8040	1	0.015	1	E* <sub>1</sub>	23.7869
		1	353.6940			2	E* <sub>2</sub>	23.5796
		2.25	411.6000			3	E* <sub>3</sub>	27.4400
		4	453.2000			4	E* <sub>4</sub>	30.2133
		9	719.6160			5	E* <sub>5</sub>	47.9744
		16	579.8860			6	E* <sub>6</sub>	38.6591
		36	534.2960			7	E* <sub>7</sub>	35.6197
		64	110.3844			8	E* <sub>8</sub>	7.3590

## 2. การคำนวณการชะละลายสะสมที่วัดได้ (Measured cumulative leaching)

สำหรับธาตุที่นำมาวิเคราะห์จะต้องคำนวณการชะละลายสะสม ( $\epsilon_n^*$  : the measured cumulative leaching) ของช่วงเวลาตั้งแต่  $n = 1$  ถึง  $N$  ซึ่งช่วงเวลา  $n = 1$  นั้น นับตั้งแต่เริ่มการทดสอบการชะละลายไปจนถึงการเปลี่ยนสารชะละลายครั้งแรก (ประกอบด้วยสารชะละลาย  $i = 1$ ) สำหรับช่วงเวลา  $n = 2$  นั้น นับตั้งแต่เริ่มการทดสอบการชะละลายไปจนถึงการเปลี่ยนสารชะละลายครั้งที่ 2 (ประกอบด้วยสารชะละลาย  $1 + 2$ ) เรื่อยไปจนครบโดยใช้สูตร

$$\epsilon_n^* = \sum_{i=1}^n E_i^* \quad \text{สำหรับ } n = 1 \text{ ถึง } N$$

$\epsilon_n^*$  คือ การชะละลายสะสมที่วัดได้จากธาตุที่สนใจในช่วงเวลา  $n$

ประกอบไปด้วยสารชะละลาย  $i = 1$  ถึง  $n$  หน่วย  $\text{mg/m}^2$

$N$  คือ จำนวนเวลาที่เท่ากับจำนวนครั้งของการเปลี่ยนตัวอย่างทั้งหมด ( $N = 8$ )

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\epsilon_3^* = E_1^* + E_2^* + E_3^* = 23.7869 + 23.5796 + 27.4400 = 74.8065 \text{ mg/m}^2$$

### 3. การคำนวณการชะละลายสะสมที่ได้จากสูตร (Derived cumulative leaching of a component)

สำหรับธาตุที่สนใจต้องทำการคำนวณการชะละลายสะสม ( $\mathcal{E}_n$ : the derived cumulative leaching) ในแต่ละช่วงตั้งแต่  $n = 1$  ถึง  $N$  ซึ่ง  $n$  จะนับตั้งแต่เริ่มการทดสอบ จนถึงการเปลี่ยนสารชะละลายครั้งที่  $n$  (ประกอบด้วยสารชะละลายที่  $i = 1$  ถึง  $n$ ) โดยใช้สูตรดังต่อไปนี้

$$\mathcal{E}_n = \frac{(E^*_i \times \sqrt{t_i})}{(\sqrt{t_i} - \sqrt{t_{i-1}})} \quad \text{สำหรับ } n = 1 \text{ ถึง } N \text{ (โดยที่ } i = n)$$

$\mathcal{E}_n$  คือ การชะละลายสะสมที่ได้จากสูตรของธาตุที่สนใจในช่วงเวลา  $n$

ซึ่งประกอบด้วยสารชะละลายตั้งแต่  $i = 1$  จนถึง  $n$  หน่วย  $\text{mg}/\text{m}^2$

$t_i$  คือ เวลาที่เปลี่ยนสารชะละลาย  $i$  (เวลาที่จุดสิ้นสุดของสารชะละลายที่  $i$ ) หน่วย วินาที

$t_{i-1}$  คือ เวลาที่เปลี่ยนสารชะละลาย  $i-1$  (เวลาเริ่มต้นของสารชะละลายที่  $i$ ) หน่วย วินาที

#### ตัวอย่างการคำนวณ

$$\sqrt{t_3} = \sqrt{(0.25 + 1 + 2.25) \times 24 \times 60 \times 60} = 549.91 \text{ sec } \frac{1}{2}$$

$$\mathcal{E}_n = \frac{(E^*_3 \times \sqrt{t_3})}{(\sqrt{t_3} - \sqrt{t_2})} = \frac{(27.44 \times 549.91)}{(549.91 - 328.63)} = 68.192 \text{ mg}/\text{m}^2$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค. 4 ค่า  $\mathcal{E}_n^*$  และ  $\mathcal{E}_n$  ที่คำนวณได้ตามเวลาต่างๆ

Time Days	Fraction (i)	$E_i^*$ mg/m <sup>2</sup>		$\mathcal{E}_n^*$ mg/m <sup>2</sup>		SQR Time Sec <sup>1/2</sup>		$\mathcal{E}_n$ mg/m <sup>2</sup>	
		$E_i^*$		$\mathcal{E}_n^*$		$t_0$	0	$\mathcal{E}_n$	
0.25	1	$E_1^*$	23.7869	$\mathcal{E}_1^*$	23.7869	$t_1$	146.97	$\mathcal{E}_1$	23.7869
1	2	$E_2^*$	23.5796	$\mathcal{E}_2^*$	47.3665	$t_2$	328.63	$\mathcal{E}_2$	47.1592
2.25	3	$E_3^*$	27.4400	$\mathcal{E}_3^*$	74.8065	$t_3$	549.91	$\mathcal{E}_3$	82.32
4	4	$E_4^*$	30.2133	$\mathcal{E}_4^*$	105.0199	$t_4$	804.98	$\mathcal{E}_4$	120.8533
9	5	$E_5^*$	47.9744	$\mathcal{E}_5^*$	152.9943	$t_5$	1193.98	$\mathcal{E}_5$	143.9232
16	6	$E_6^*$	38.6591	$\mathcal{E}_6^*$	191.6533	$t_6$	1675.71	$\mathcal{E}_6$	154.6363
36	7	$E_7^*$	35.6197	$\mathcal{E}_7^*$	227.2731	$t_7$	2432.78	$\mathcal{E}_7$	106.8592
64	8	$E_8^*$	7.3590	$\mathcal{E}_8^*$	234.632	$t_8$	3383.49	$\mathcal{E}_8$	29.4358

#### ขั้นตอนที่ 4 การพิจารณาการไหลการชะละลายที่เกิดขึ้นในการทดสอบแบบแพร่

ภายหลังจากการทดสอบว่าก้อนตัวอย่างไม่เกิดการละลายซึ่งอธิบายไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ต่อจากนี้เป็นการพิจารณาการชะละลายสำหรับธาตุที่สนใจว่ากลไกการแพร่เป็นตัวควบคุมกระบวนการชะละลายเพียงอย่างเดียวหรือว่ามีกลไกอื่นด้วย

#### 4.1 การพิจารณาช่วงเวลาเพิ่มขึ้น (Definition of incremental periods)

รวมกลุ่มของสารชะละลายในช่วงเวลาที่ 1- 8 ดังนี้

Order	Elute fraction	Increment a-b
1	Fraction 2 to 7	Increment 2-7
2	Fraction 5 to 8	Increment 5-8
3	Fraction 4 to 7	Increment 4-7
4	Fraction 3 to 6	Increment 3-6
5	Fraction 2 to 5	Increment 2-5
6	Fraction 1 to 4	Increment 1-4

4.2 การคำนวณเชิง increment ของธาตุแต่ละชนิด (Incremental analysis per component)  
 สำหรับทุกธาตุที่ศึกษาสามารถทำการวิเคราะห์เชิง increment ได้ดังนี้

**ขั้นตอนที่ 4.2.1 :**

สำหรับแต่ละ Increment a-b คำนวณค่า  $CF_{a-b}$  (the concentration factor)

$$CF_{a-b} = \frac{\text{Mean concentration in the increment}}{\text{Lowest limit of determination}}$$

ถ้าความเข้มข้นที่วัดได้ในทุก fraction ใน increment a-b ทั้งหมดมีค่าสูงกว่าค่าต่ำสุดที่วัดได้สำหรับธาตุนั้น (the lowest limit of determination) และค่า  $CF_{a-b}$  สูงกว่า 1.5 ให้ทำต่อไปที่ขั้นตอนที่ 4.2.2 ถ้าไม่เป็นไปตามนี้ แสดงว่าธาตุที่สนใจไม่สามารถพิจารณาการชะละลายได้ใน increment นั้นๆ

**ขั้นตอนที่ 4.2.2 :**

ใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นของ  $\text{Log } E_n$  และ  $\text{Log } t_i$  หาค่าความชัน (rc) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความชัน (Sdrc) และสรุปเป็นตารางดังแสดงในตารางที่ ค. 5

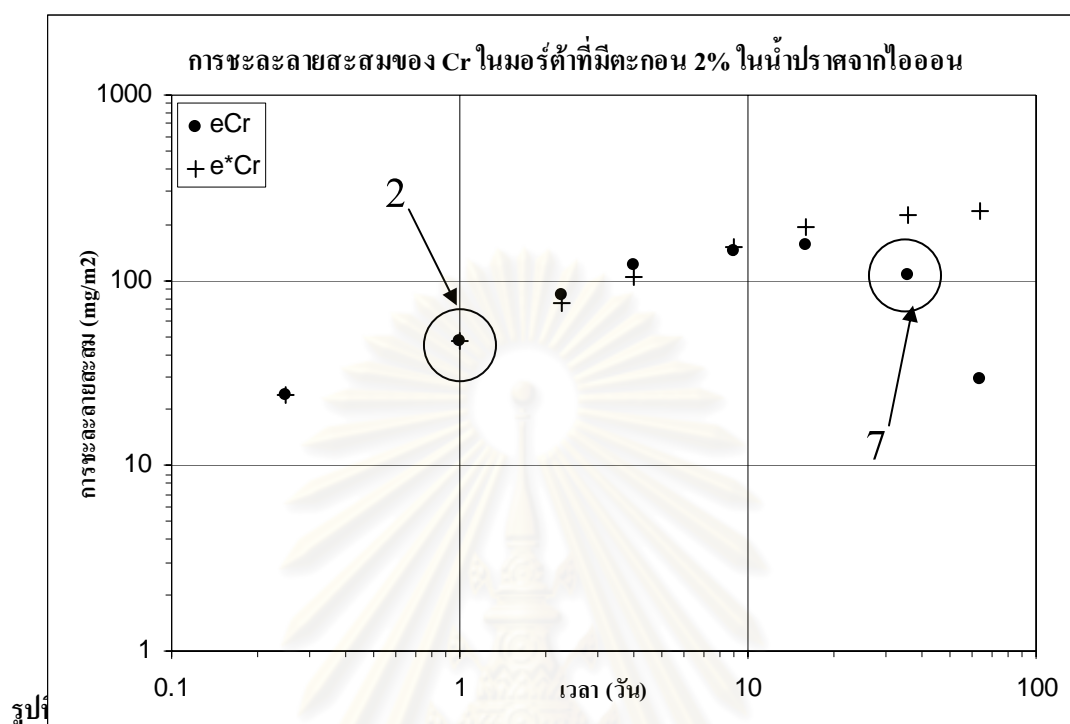
ตัวอย่างการคำนวณ

$$CF_{2-7} = \frac{(353.694+411.6+453.2+719.616+579.886+534.296+110.3844)/6}{0.5}$$

(โดยที่ 0.5 เป็นค่า LOD ของ Cr)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$R_{c_{2-7}}$  และ  $Sd_{rc}$  หาได้จากกราฟโดย  $rc_{2-7}$  เป็นความชันของ  $\epsilon_n$  ตั้งแต่จุดที่ 2-7 ส่วน  $Sd$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความชันที่จุด 2-7



ตารางที่ ค. 5 ค่า  $CF_{rc}$  และ  $Sd$  ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการชะละลายสะสมของ Cr

Order	Increment a-b	$CF_{a-b}$	$rc$	$Sd_{rc}$
1	Increment 2-7	1017.4307	0.2484	0.4479
2	Increment 5-8	972.0192	-0.7575	0.2169
3	Increment 4-7	1143.4990	-0.0444	0.3539
4	Increment 3-6	1082.1510	0.3059	0.4773
5	Increment 2-5	969.0550	0.518	0.5372
6	Increment 1-4	787.6490	0.5857	0.5338



**ขั้นตอนที่ 4.2.4** การพิจารณาว่าการชะละลายของธาตุที่ต่างกันมีกลไกการแพร่เป็นตัวควบคุมหรือมีกลไกอื่นร่วมด้วยหรือไม่

บนพื้นฐานของการคำนวณ CF และ Slope ใน ขั้นตอนที่ 4.2.2 สามารถพิจารณาได้ว่ามีกลไกใดที่เกี่ยวข้องกับการชะละลายขององค์ประกอบที่แตกต่างกันจากก้อนทดสอบ โดยการทดสอบเบื้องต้นคือค่าเบี่ยงเบนของความชันจะต้องได้ตรงตามความต้องการโดยการชะละลายที่มีกลไกการชะละลายเป็นแบบแพร่อย่างสมบูรณ์จะต้องมีความชันอยู่ที่ 0.5 พอดี ความสำคัญของความชัน  $rc$  แสดงอยู่ในตารางที่ ค. 6

**ตารางที่ ค.6** ความสำคัญของค่า  $rc$  ใน Increment ต่างๆ

Increment a-b	Slope, $rc$		
	$\leq 0.35$	$> 0.35$ and $\leq 0.65$	$> 0.65$
Increment 2-7	Surface wash-off	Diffusion	Dissolution
Increment 5-8	Depletion	Diffusion	Dissolution
Increment 4-7	Depletion	Diffusion	Dissolution
Increment 3-6	Depletion	Diffusion	Dissolution
Increment 2-5	Depletion	Diffusion	Dissolution
Increment 1-4	Surface wash-off	Diffusion	Delayed diffusion or Dissolution

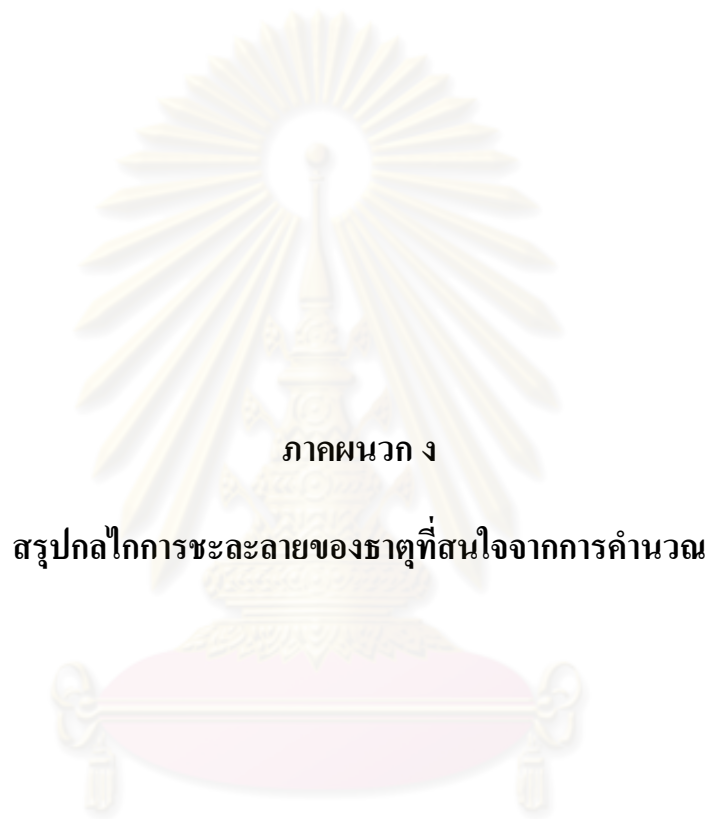
นำผลการวิเคราะห์  $rc$  มาเปรียบเทียบได้ผลดังแสดงในตารางที่ ค. 7

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค. 7 ผลการเปรียบเทียบค่า  $r_c$  กับกลไกการชะละลายใน Increment ต่างๆ

Order	Increment a-b	$r_c$	Mechanism
1	Increment 2-7	0.2484	Surface wash-off
2	Increment 5-8	-0.7575	Depletion
3	Increment 4-7	-0.0444	Depletion
4	Increment 3-6	0.3509	Depletion
5	Increment 2-5	0.518	Diffusion
6	Increment 1-4	0.5857	Diffusion

ผลจากการวิเคราะห์ค่า  $r_c$  ของ Cr พบว่ามีกลไกการชะละลายที่เกี่ยวข้องอยู่ 3 กลไก ได้แก่ ในช่วงแรกของการทดสอบเป็นกลไกแบบการแพร่ ใน 4 ช่วงแรก และปริมาณ ลดลงในช่วงท้ายของการทดสอบ แต่ในภาพรวมการทดสอบอาจเกิดจากการเฉลี่ยค่าความชันมากกว่าเป็นการชะล้างที่ผิวหน้า



ภาคผนวก ง

สรุปผลการชะละลายของธาตุที่สนใจจากการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.1 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของแคดเมียมในน้ำปราศจากไอออน

Order	Increment a-b	กลไกการชะละลาย			
		SCCC	0%	1%	2%
1	2 - 7	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off
2	5 - 8	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
3	4 - 7	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
4	3 - 6	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
5	2 - 5	Diffusion	Depletion	Diffusion	Depletion
6	1 - 4	Diffusion	Diffusion	Diffusion	Diffusion

ตารางที่ ง. 2 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของแคดเมียมในน้ำสกัด TCLP

Order	Increment a-b	กลไกการชะละลาย			
		SCCC	0%	1%	2%
1	2 - 7	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off
2	5 - 8	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
3	4 - 7	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
4	3 - 6	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
5	2 - 5	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
6	1 - 4	Diffusion	Surface wash-off	Diffusion	Diffusion

ตารางที่ ง. 3 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของโครเมียมในน้ำปราศจากไอออน

Order	Increment a-b	กลไกการชะละลาย			
		SCCC	0%	1%	2%
1	2 - 7	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off
2	5 - 8	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
3	4 - 7	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
4	3 - 6	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
5	2 - 5	Depletion	Depletion	Depletion	Diffusion
6	1 - 4	Diffusion	Surface wash-off	Diffusion	Diffusion

ตารางที่ ง. 4 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของโครเมียมในน้ำฝนกรดสังเคราะห์

Order	Increment a-b	กลไกการชะละลาย			
		SCCC	0%	1%	2%
1	2 - 7	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off
2	5 - 8	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
3	4 - 7	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
4	3 - 6	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
5	2 - 5	Depletion	Depletion	Depletion	Diffusion
6	1 - 4	Diffusion	Diffusion	Diffusion	Diffusion

ตารางที่ ง. 5 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของโครเมียมในน้ำสกัด TCLP

Order	Increment a-b	กลไกการชะละลาย			
		SCCC	0%	1%	2%
1	2 - 7	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off
2	5 - 8	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
3	4 - 7	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
4	3 - 6	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
5	2 - 5	Depletion	Depletion	Depletion	Diffusion
6	1 - 4	Diffusion	Diffusion	Diffusion	Diffusion

ตารางที่ ง. 6 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของทองแดงในน้ำสกัด TCLP

Order	Increment a-b	กลไกการชะละลาย			
		SCCC	0%	1%	2%
1	2 - 7	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off
2	5 - 8	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
3	4 - 7	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
4	3 - 6	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
5	2 - 5	Depletion	Depletion	Depletion	Diffusion
6	1 - 4	Diffusion	Diffusion	Surface wash-off	Surface wash-off



ตารางที่ ง. 7 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของเหล็กในน้ำปราศจากไอออน

Order	Increment a-b	กลไกการชะละลาย			
		SCCC	0%	1%	2%
1	2 - 7	-	-	-	Surface wash-off
2	5 - 8	-	-	-	Dissolution
3	4 - 7	-	-	-	Depletion
4	3 - 6	-	-	-	Depletion
5	2 - 5	-	-	-	Diffusion
6	1 - 4	-	-	-	Surface wash-off

ตารางที่ ง. 8 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของเหล็กในน้ำฝนกรดสังเคราะห์

Order	Increment a-b	กลไกการชะละลาย			
		SCCC	0%	1%	2%
1	2 - 7	-	-	-	Surface wash-off
2	5 - 8	-	-	-	Dissolution
3	4 - 7	-	-	-	Depletion
4	3 - 6	-	-	-	Depletion
5	2 - 5	-	-	-	Diffusion
6	1 - 4	-	-	-	Surface wash-off

ศูนย์วิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง. 9 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของเหล็กในน้ำสกัด TCLP

Order	Increment a-b	กลไกการชะละลาย			
		SCCC	0%	1%	2%
1	2 - 7	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off
2	5 - 8	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
3	4 - 7	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
4	3 - 6	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
5	2 - 5	Depletion	Depletion	Depletion	Diffusion
6	1 - 4	delayed diffusion or dissolution	delayed diffusion or dissolution	delayed diffusion or dissolution	delayed diffusion or dissolution

ตารางที่ ง. 10 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของนิกเกิลในน้ำปราศจากไอออน

Order	Increment a-b	กลไกการชะละลาย			
		SCCC	0%	1%	2%
1	2 - 7	Surface wash-off	Dissolution	Surface wash-off	Surface wash-off
2	5 - 8	Depletion	Depletion	Dissolution	Dissolution
3	4 - 7	Depletion	Dissolution	Dissolution	Dissolution
4	3 - 6	Diffusion	Dissolution	Depletion	Diffusion
5	2 - 5	Depletion	-	Depletion	Depletion
6	1 - 4	Diffusion	-	delayed diffusion or dissolution	Surface wash-off

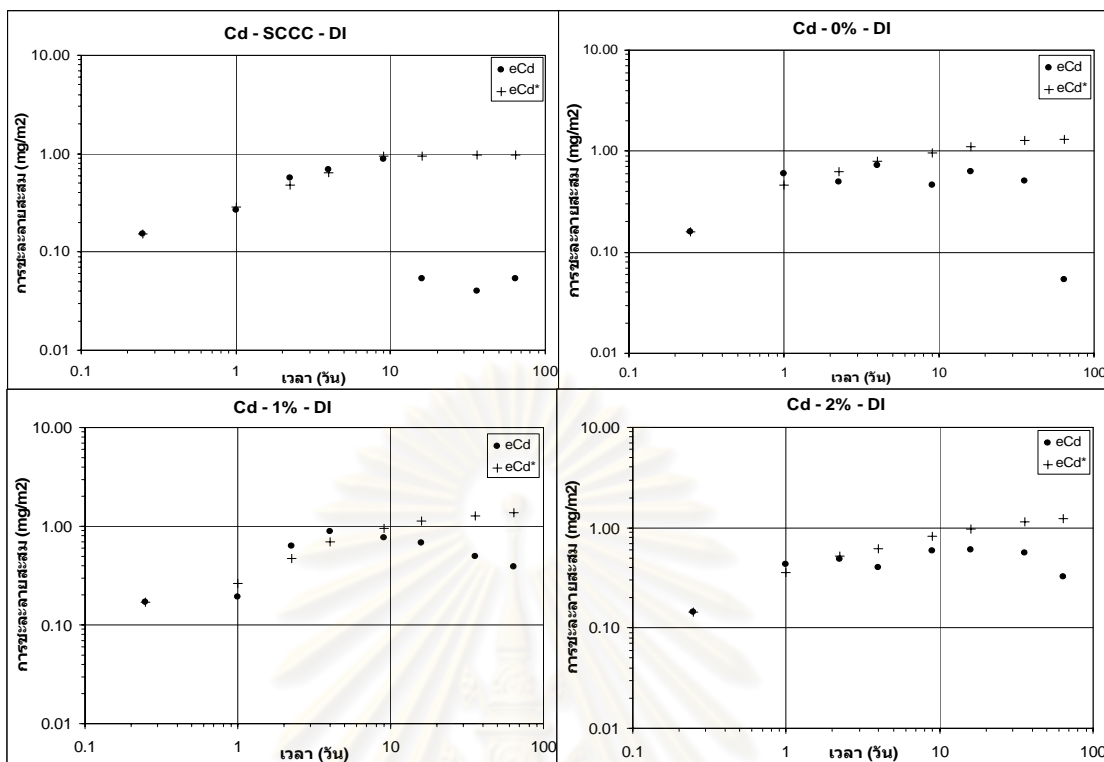
ตารางที่ ง. 11 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของนิกเกิดในน้ำฝนกรดสังเคราะห์

Order	Increment a-b	กลไกการชะละลาย			
		SCCC	0%	1%	2%
1	2 - 7	Surface wash-off	Diffusion	Surface wash-off	Surface wash-off
2	5 - 8	Depletion	Depletion	Diffusion	Dissolution
3	4 - 7	Depletion	Dissolution	Dissolution	Depletion
4	3 - 6	Diffusion	Diffusion	Depletion	Depletion
5	2 - 5	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
6	1 - 4	Diffusion	Diffusion	delayed diffusion or dissolution	Surface wash-off

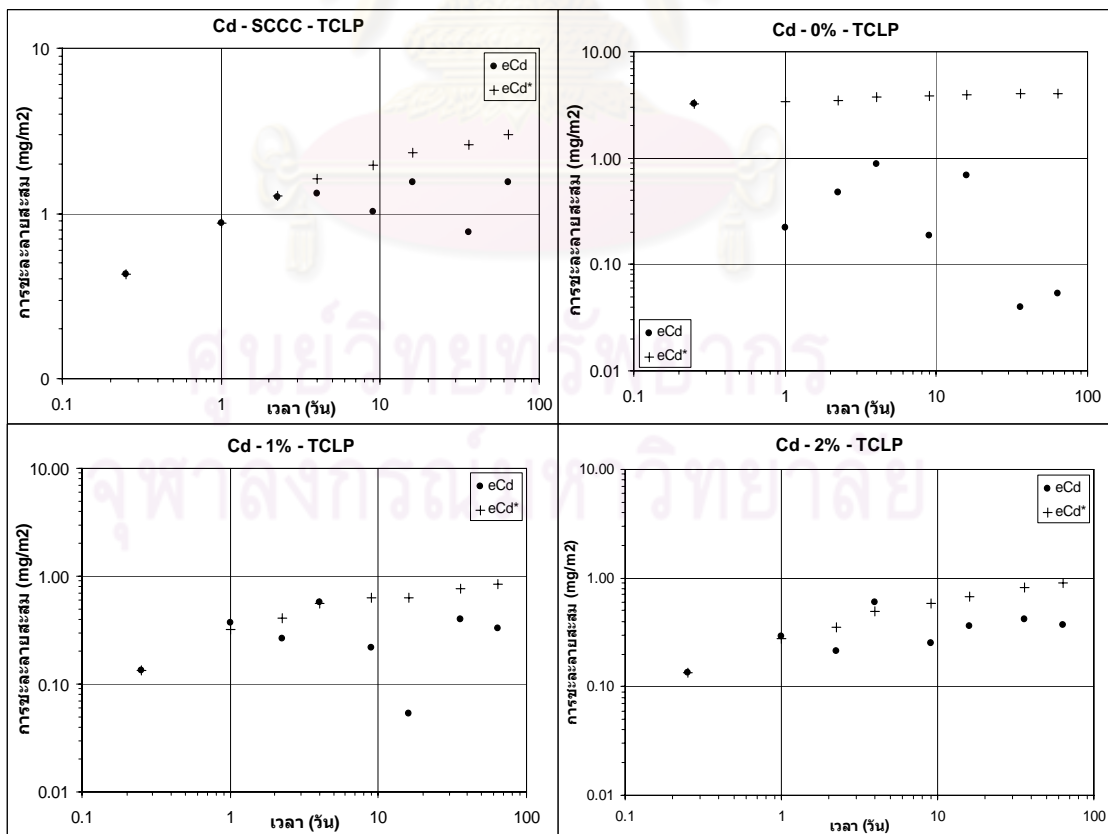
ตารางที่ ง. 12 กลไกการชะละลายจากการคำนวณของนิกเกิดในน้ำสกัด TCLP

Order	Increment a-b	กลไกการชะละลาย			
		SCCC	0%	1%	2%
1	2 - 7	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off	Surface wash-off
2	5 - 8	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
3	4 - 7	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
4	3 - 6	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
5	2 - 5	Depletion	Depletion	Depletion	Depletion
6	1 - 4	Diffusion	Diffusion	Diffusion	Diffusion

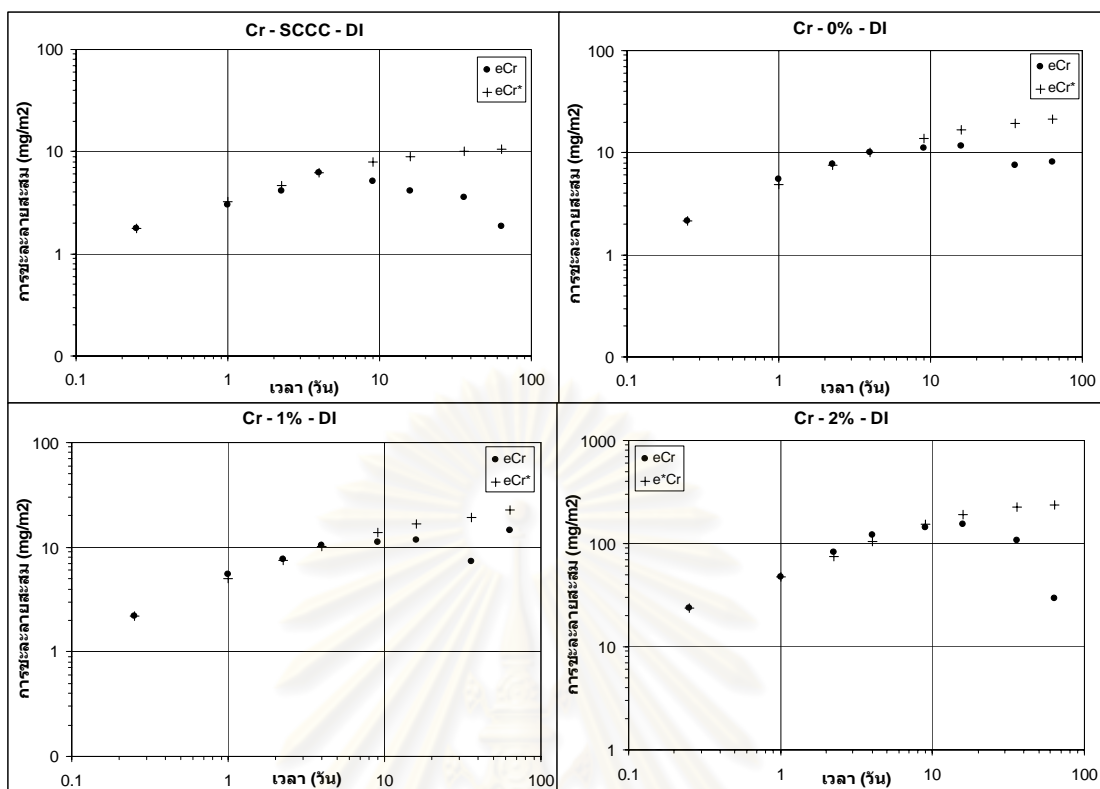
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



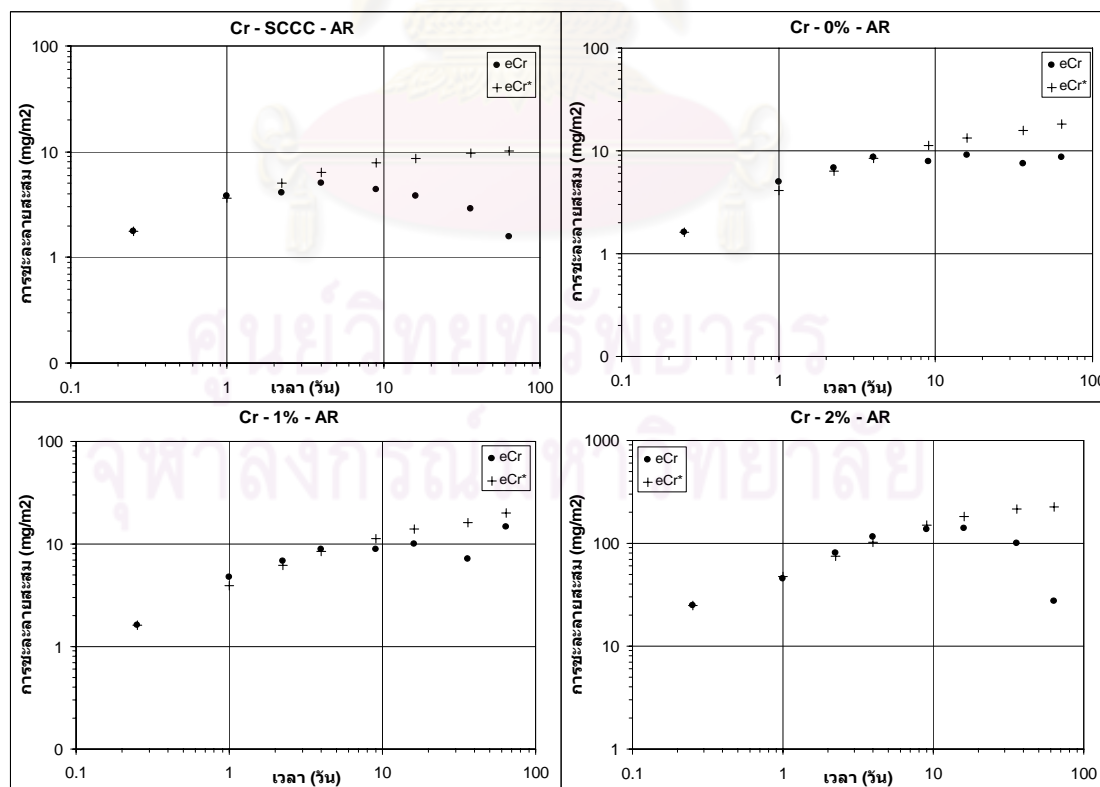
รูปที่ 1 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของแคดเมียมในน้ำปราศจากไอออน



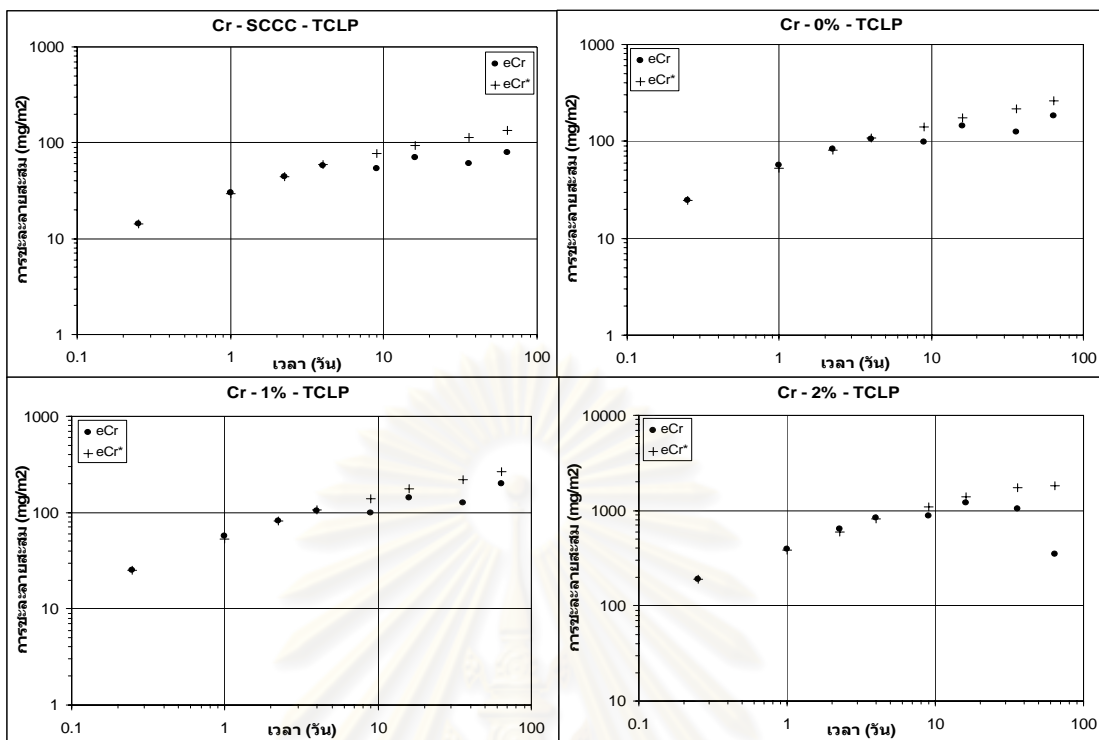
รูปที่ 2 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของแคดเมียมในน้ำสกัด TCLP



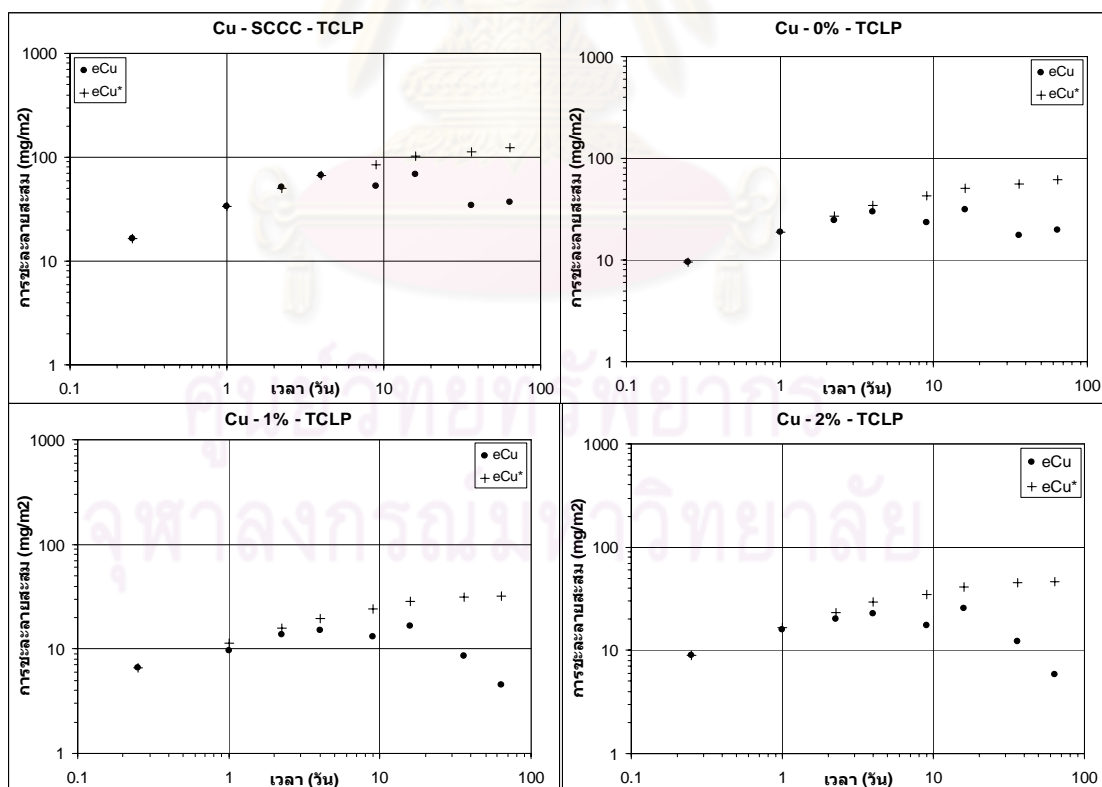
รูปที่ 3 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของโครเมียมในน้ำปราศจากไอออน



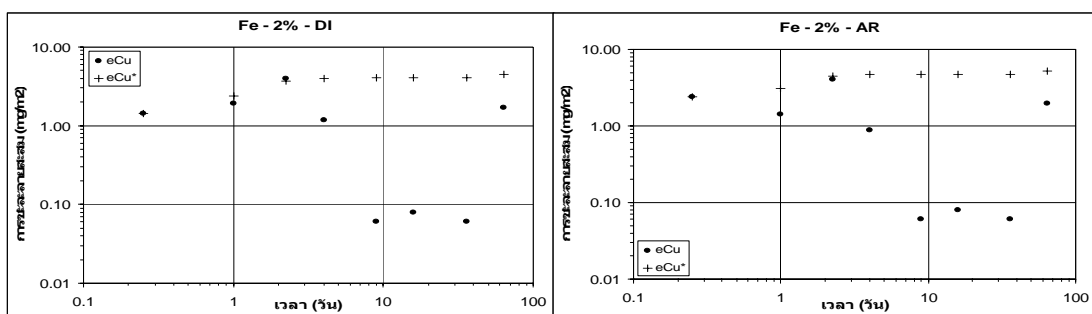
รูปที่ 4 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของโครเมียมในน้ำฝนกรดสังเคราะห์



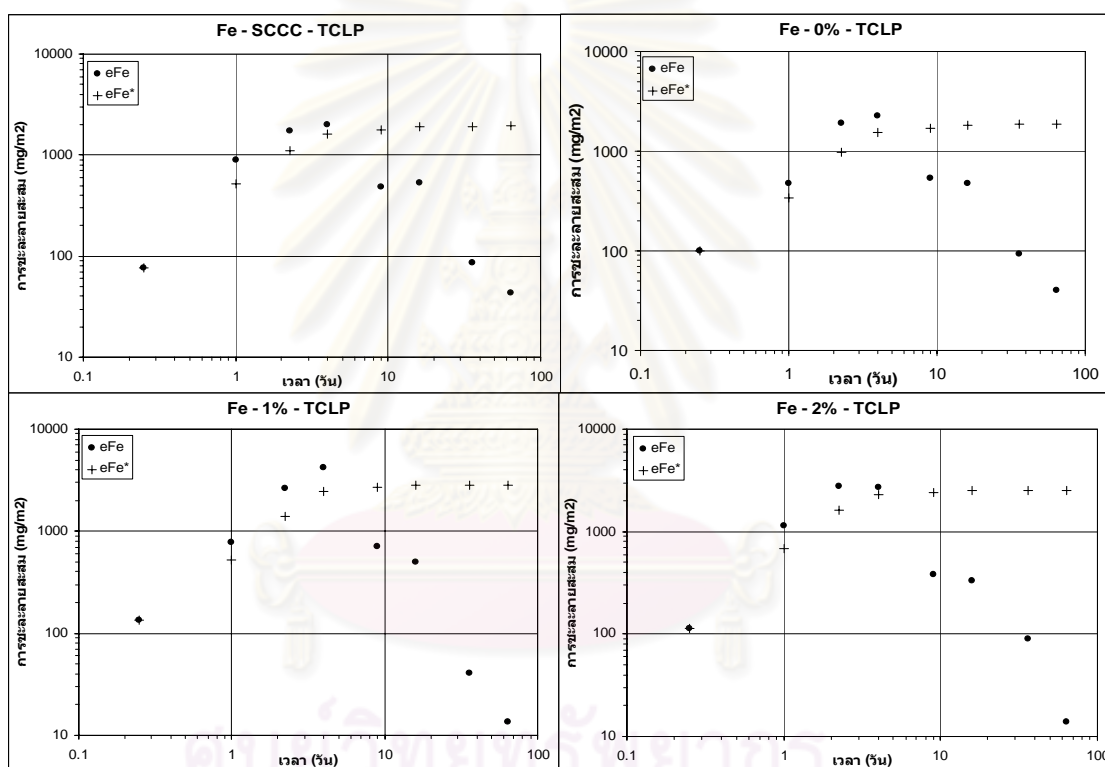
รูปที่ 5 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของโครเมียมในน้ำสกัด TCLP



รูปที่ 6 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของทองแดงในน้ำสกัด TCLP

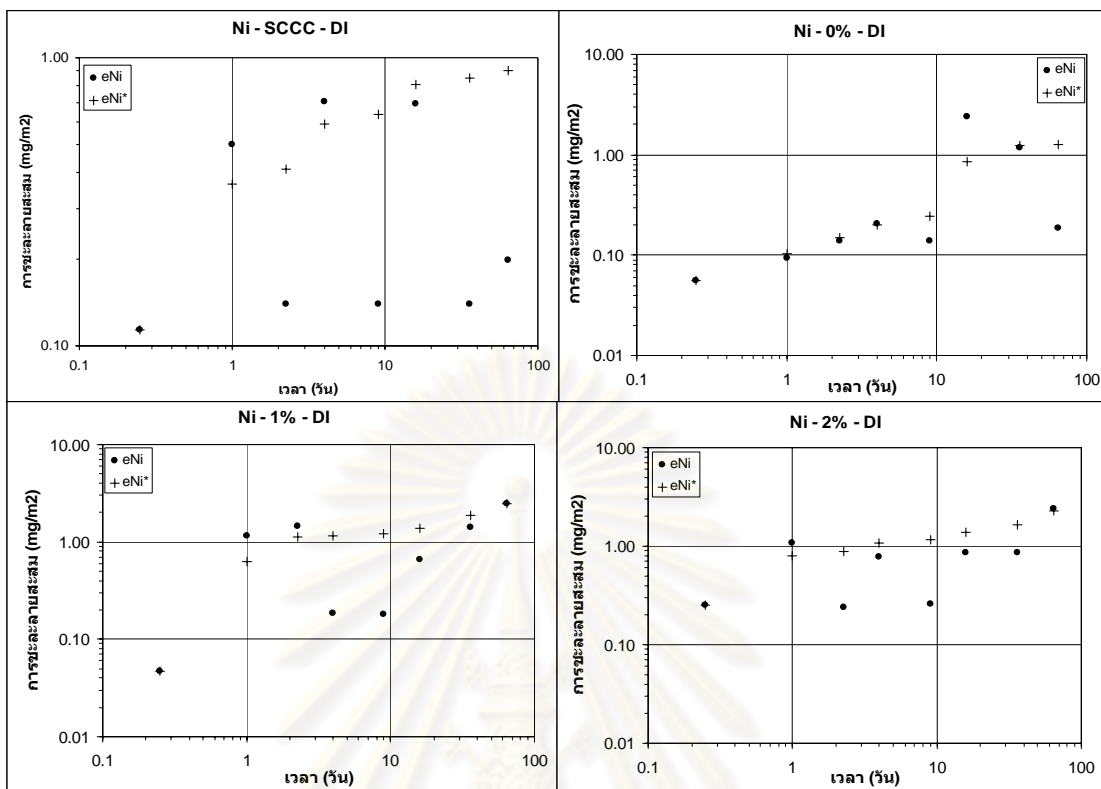


รูปที่ 7 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของเหล็กในน้ำปราศจากไอออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์

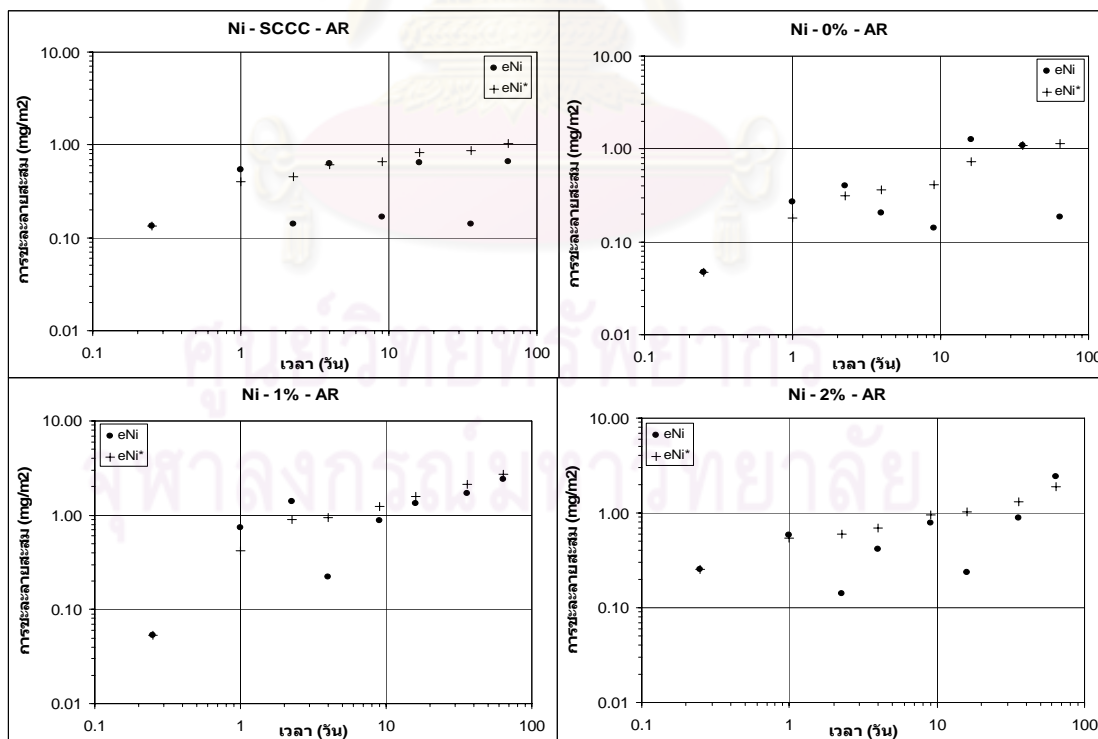


รูปที่ 8 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของเหล็กในน้ำสกัด TCLP

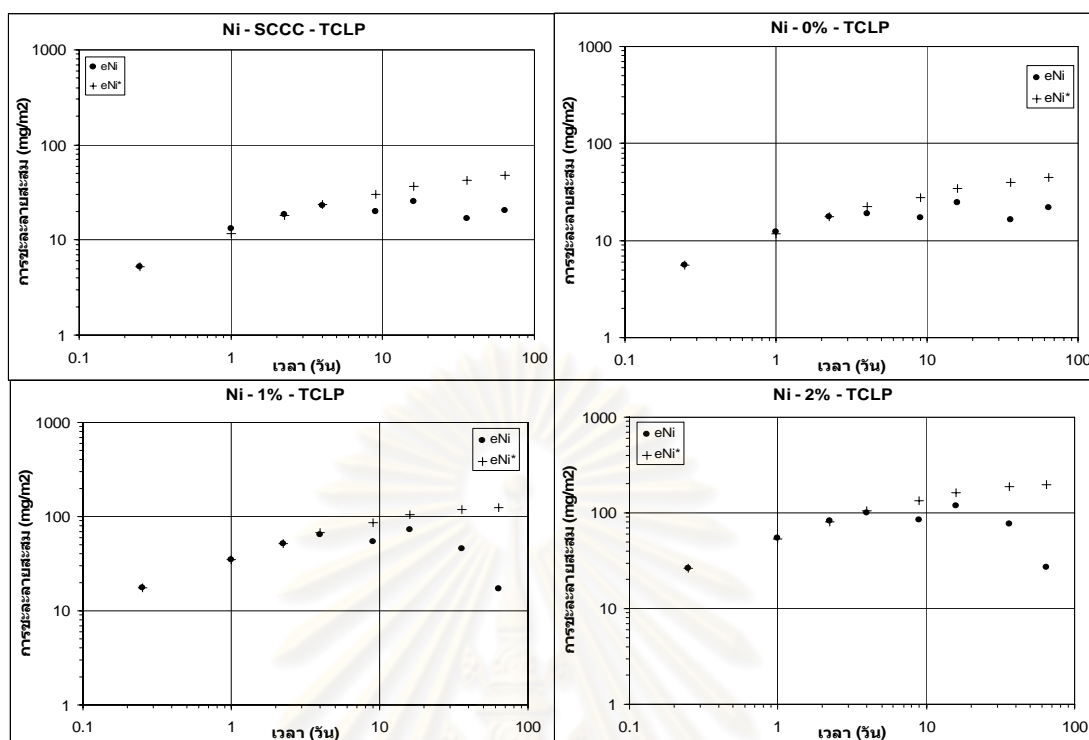




รูปที่ 9 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของนิกเกิลในน้ำปราศจากไอออน



รูปที่ 10 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของนิกเกิลในน้ำฝนกรดตั้งเกาะห้



รูปที่ 11 การชะละลายสะสมที่เวลาต่างๆ ของนิกเกิลในน้ำสกัด TCLP

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวธนัญชนก ภารกุล เกิดเมื่อวันที่ 9 เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2549



ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย