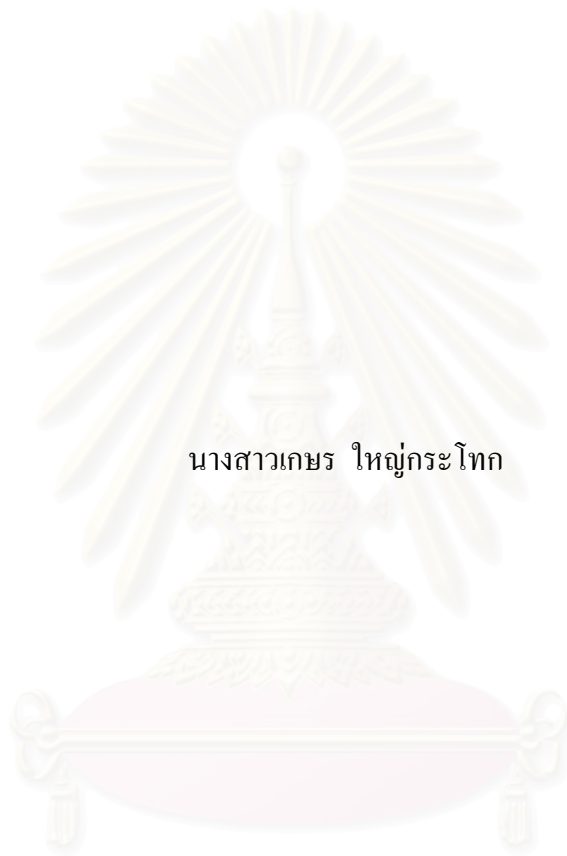


การชะละลายระยะยาวของโลหะหนักในการทำเสถียร
และหล่อก้อนแข็งกากตะกอนซบโลหะด้วยปูนซีเมนต์



นางสาวเกษร ใหญ่กระโทก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LONG-TERM LEACHING OF HEAVY
METALS IN STABILIZED/SOLIDIFIED
ELECTROPLATING SLUDGE BY CEMENT



Miss Kesorn Yaigratok

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

เกษร ไชยฤทธิ์โทก : การชะละลายระยะยาวของโลหะหนักในการทำเสถียรและหล่อก้อน
แข็งกากตะกอนชุบโลหะด้วยปูนซีเมนต์ (LONG-TERM LEACHING OF HEAVY
METALS IN STABILIZED/SOLIDIFIED ELECTROPLATING SLUDGE BY
CEMENT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. มนัสกร ราชากรกิจ ,180 หน้า.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงกลไกในการชะละลายระยะยาวของโลหะหนักจาก
ตัวอย่างก้อนแข็งที่ผ่านการปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็งกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียใน
อุตสาหกรรมการชุบผิวโลหะ โดยการเปรียบเทียบระหว่างปูนซีเมนต์จากกระบวนการผลิต
ตามปกติและปูนซีเมนต์จากกระบวนการเผาร่วมกากของเสีย โดยการแทนที่กากตะกอนที่ร้อยละ
0, 5, 10 และ ร้อยละ 15 ของปูนซีเมนต์ การทดลองประกอบด้วยการศึกษาถึงคุณสมบัติทางกายภาพ
และทางเคมี คุณสมบัติทางกลของก้อนแข็งและการทดสอบการชะละลาย ผลการทดสอบกำลังรับ
แรงอัดพบว่าเมื่อร้อยละในการแทนที่กากตะกอนเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งลดลงอย่าง
มาก เนื่องจากการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของสังกะสี และพบว่าโลหะหนัก โดยส่วนใหญ่ที่ทำการ
พิจารณาการชะละลายอยู่ในพันธะเหล็กและแมงกานีส

จากการศึกษากลไกการชะละลายของโลหะหนักจากการประยุกต์การทดสอบการชะ
ละลายระยะยาวตามมาตรฐาน EA NEN 7375: 2004 โดยใช้น้ำชะละลาย 2 ชนิด ได้แก่ น้ำ
ปราศจากอิออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์ ระยะเวลาในการทดสอบ ได้แก่ 0.25 , 1 , 2.25 , 4 , 9 ,
16 , 36 และ 64 วัน ผลการทดสอบพบว่าค่าความเป็นกรด่างของน้ำชะละลายเพิ่มขึ้นในช่วง
เริ่มต้นและลดลงในช่วงสุดท้ายของการทดสอบ ซึ่งพบว่าการชะละลายของก้อนตัวอย่างที่เกิดขึ้น
ในน้ำชะละลายทั้งสองชนิดมีแนวโน้มเข้าสู่จุดสมดุล โดยส่วนใหญ่โลหะหนักที่พิจารณาถูกชะ
ละลายในช่วงเริ่มต้นแบบการชะล้างที่ผิวหน้าในน้ำชะละลายทั้งสองชนิด ซึ่งโครเมียมมีความ
เข้มข้นในการชะละลายเกินมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน และอลูมิเนียมมีความเข้มข้นในการชะ
ละลายออกมามากกว่าโลหะหนักชนิดอื่นๆ

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม... ลายมือชื่อนิสิต... กณร
สาขาวิชา... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก...
ปีการศึกษา... 2551

4970233321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
 KEYWORDS : WASTE MANAGEMENT/ELECTROPLATING SLUDGE
 STABILIZATION-SOLIDIFICATION/ LEACHING TEST

KESORN YAIGRATOK : LONG-TERM LEACHING OF HEAVY METALS IN
 STABILIZED/SOLIDIFIED ELECTROPLATING SLUDGE BY CEMENT.

THESIS ADVISOR: ASST.PROF.MANASKORN RACHAKORNKIJ,Ph.D.,180 pp.

The objective of this research is to explore leaching mechanisms of heavy metals in stabilized/solidified samples prepared with typical ordinary Portland cement and cement from a cement manufacturing plant that utilizes industrial wastes (co-processing). Replacement of cement by the sludge was varied from 0%, 5%, 10%, and 15%. A battery of tests on the solidified samples includes physical, chemical, and mechanical characterizations and leaching tests. Compressive strength results showed that higher replacements produced lower compressive strengths in the mortar samples due to retardation of cement hydration by zinc. Results of sequential extraction showed that the majority of heavy metals bound with iron and manganese oxides and thus leachable.

Long-term leaching test modified from EA NEN 7375:2004 was then performed to explain the leaching mechanisms and fates of the metals. It employed two leachants that include deionized water (DI) and synthetic acid rain. The leachant replenishing time was set at 0.25, 1, 2.25, 4, 9, 16, 36, and 64 days. Results of EA NEN 7375 test showed that the pH increase occurred at the initial stage and dropped at the final stage indicating that the leaching of heavy metals approached equilibriums. All heavy metals leached via surface wash-off mechanism. Chromium in the leachants was found to exceed Thai groundwater quality standards while aluminium had a relatively higher leaching potential than other heavy metals.

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

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชกรกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้และคำปรึกษาด้านต่าง ๆ ตลอดจนให้การสนับสนุนเกี่ยวกับงานวิจัยแก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณประธานและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำ ข้อชี้แนะ และตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้เรียบร้อยสมบูรณ์ รวมทั้งขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้มอบความรู้ทางด้านวิชาการแก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่มอบทุนสนับสนุนงานวิจัยด้านอุปกรณ์และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ซึ่งทำให้งานวิจัยสามารถดำเนินไปได้อย่างราบรื่น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการหน่วยทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ห้องปฏิบัติการของเสียด้านรายโครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียด้านราย คณะวิศวกรรมศาสตร์ และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียด้านราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านสถานที่และเครื่องมือในงานวิจัย

ขอขอบคุณคุณสุนทร วรรณวงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์ในการทำวิทยานิพนธ์และคุณธารทิพย์ พันธุ์เมธาฤทธิ์ ที่ช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์และช่วยเหลืองานด้านต่าง ๆ เกี่ยวกับงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีและขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ แม่ใหญ่ คุณพ่อและคุณแม่ รวมทั้งพี่และน้องๆ ที่ให้การสนับสนุนด้านเงินทุนในการศึกษาเล่าเรียนของผู้วิจัยมาโดยตลอดและเป็นกำลังใจที่สำคัญแก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ปูนซีเมนต์.....	4
2.1.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	4
2.1.2 การผลิตปูนซีเมนต์ (Cement Manufacturing Process).....	5
2.1.3 วัตถุดิบ (Raw Material).....	6
2.1.4 การเผาปูนเม็ด (Clinker Burning).....	9
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์.....	11
2.2.1 คุณสมบัติของสารประกอบหลักและอิทธิพลที่มีต่อคุณสมบัติของ ปูนซีเมนต์.....	12
2.2.2 คุณสมบัติของสารประกอบรอง.....	13
2.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์.....	14
2.3.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต.....	15
2.3.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต.....	15
2.3.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์.....	16
2.3.4 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์.....	16
2.3.5 ปฏิกิริยาที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	18
2.3.6 ปริมาตรของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน.....	19

2.4	น้ำในงานปูนซีเมนต์.....	19
2.4.1	น้ำสำหรับผสมปูนซีเมนต์.....	19
2.4.2	น้ำสำหรับบ่มมอร์ต้า.....	20
2.4.3	น้ำสำหรับล้างมวลรวม.....	21
2.5	สารผสมเพิ่มหรือน้ำยาผสมคอนกรีต.....	21
2.5.1	สารเคมีผสมเพิ่ม.....	21
2.5.2	แร่ผสมเพิ่ม.....	21
2.5.3	สารผสมเพิ่มชนิดอื่น ๆ	21
2.6	กากของเสียอุตสาหกรรม (Industrial waste).....	21
2.6.1	กากของเสียที่ไม่อันตราย (Non Hazardous waste).....	22
2.6.2	ลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่เป็นของเสีย อันตราย.....	22
2.7	การจัดการกากของเสียอุตสาหกรรม.....	24
2.7.1	การปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็ง (Stabilization/Solidification).....	24
2.7.2	การบำบัดและกำจัดด้วยความร้อน (Thermal).....	24
2.7.3	การฝังกลบกากของเสียอุตสาหกรรม.....	24
2.8	การใช้กากอุตสาหกรรมเป็นเชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนในกระบวนการผลิต ปูนซีเมนต์ (Co-processing).....	25
2.9	การตะกอนน้ำเสียจากการชุบผิวโลหะ.....	26
2.9.1	การชุบสังกะสี (Zinc Plating).....	26
2.9.2	ลำดับขั้นตอนในการชุบสังกะสี.....	27
2.9.3	การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการชุบด้วยสังกะสี.....	28
2.10	การทำเสถียรและการหล่อก้อนแข็ง (Stabilization and Solidification).....	29
2.10.1	การทำเสถียร (Stabilization).....	31
2.10.2	การหล่อก้อนแข็ง (Solidification).....	31
2.10.3	รูปแบบกลไกในการทำเสถียร (Mechanisms).....	32
2.10.4	หลักในการพิจารณากากของเสียในการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็ง.....	33
2.10.5	การทดสอบกากของเสียที่ผ่านการปรับเสถียรและหล่อก้อนแข็ง.....	37
2.10.6	ปัจจัยที่มีผลต่อการรั่วไหลของสิ่งปนเปื้อนจากก้อนแข็ง.....	37
2.11	กระบวนการชะละลาย (Leaching process).....	38
2.11.1	กลไกการชะละลาย.....	39
2.11.2	การทดสอบการชะละลายตามวิธี EA NEN 7375: 2004.....	40

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำเสถียรและการหล่อก้อนแข็งจากของเสีย	
อันตราย.....	41
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	47
3.1 แผนการวิจัย.....	47
3.2 การดำเนินงานวิจัย.....	47
3.2.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างกากตะกอนจาก	
กระบวนการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมการชุบโลหะ.....	47
3.2.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างปูนซีเมนต์ทั้งสอง	
ชนิดโดยการเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนัก.....	49
3.2.3 การทดสอบคุณสมบัติโดยทั่วไปในการปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็ง.	50
3.2.4 การทดสอบการชะละลายที่สัมพันธ์กับรูพรุนหรือโพรงในมอร์ต้าและ	
ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในตัวอย่างก้อนแข็ง.....	56
3.2.5 การทดสอบอิทธิพลของค่าพีเอชที่มีต่อลักษณะการชะละลายของก้อน	
แข็ง.....	57
3.2.6 การทดสอบการชะละลายโดยการประยุกต์ใช้การทดสอบแบบ	
Monolithic Leaching test (ML) EA NEN 7375: 2004.....	58
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	61
4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอนจากการชุบผิว	
โลหะ.....	61
4.4.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ.....	61
4.4.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางเคมี.....	61
4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์.....	64
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างก้อนแข็ง.....	64
4.3.1 การทดสอบความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง.....	65
4.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง.....	66
4.4 ผลการสกัดโลหะหนักด้วยวิธี Sequential extraction test.....	68
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุนในมอร์ต้ากับความสามารถในการเคลื่อนที่	
ของโลหะหนัก (Pore water and maximum mobile fraction test).....	72
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับการชะละลายของโลหะหนัก.....	80
4.7 การชะละลายระยะยาว.....	84
4.7.1 กลไกการชะละลาย.....	88
4.7.2 การชะละลายกับมาตรฐานน้ำใต้ดิน.....	110

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	112
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	112
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	113
รายการอ้างอิง.....	114
ภาคผนวก.....	119
ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์ชนิดและความเข้มข้นของโลหะหนัก.....	120
ภาคผนวก ข. ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการทดสอบ Sequential extraction test	122
ภาคผนวก ค. ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการทดสอบปริมาณรูพรุนในก้อนมอร์	
ตา (PW-MMF).....	125
ภาคผนวก ง. ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าพี	
เอชกับการชะละลายของโลหะหนัก.....	128
ภาคผนวก จ. ผลการทดสอบการชะละลายตามมาตรฐาน EA NEN 7375: 2004.....	133
ภาคผนวก ฉ. มาตรฐานการทดสอบการชะละลาย EA NEN 7375:2004.....	143
ภาคผนวก ช. รายการคำนวณตามมาตรฐานการทดสอบการชะละลาย EA NEN	
7375:2004.....	176
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	180

สารบัญญัตินำ

ตารางที่		หน้า
2.1	สารประกอบและความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	9
2.2	องค์ประกอบของปูนซีเมนต์คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก.....	13
2.3	ข้อดีและข้อเสียในการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งในแต่ละวิธี.....	34
2.4	ข้อดีและข้อเสียในการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์.....	36
3.1	การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างกากตะกอน.....	49
3.2	การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างปูนซีเมนต์.....	50
3.3	การทดสอบคุณสมบัติโดยทั่วไปของตัวอย่างกากตะกอน.....	56
3.4	อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (Liquid/Solid Ratio) ต่าง ๆ.....	57
3.5	การทดสอบการชะละลายของตัวอย่างก้อนแข็ง.....	59
4.1	ปริมาณของโลหะหนักจากตัวอย่างกากตะกอน.....	62
4.2	ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการทดสอบการชะละลายในตัวอย่างกากตะกอน.....	63
4.3	ปริมาณโลหะหนักของตัวอย่างปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด.....	64
4.4	การทดสอบความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง.....	66
4.5	การทดสอบกำลังการรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง.....	67
4.6	ความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งหมดจากการสกัดด้วยวิธี Sequential extraction test....	68
4.7	กลไกการชะละลายในแต่ละช่วงการทดสอบ.....	89
4.8	กลไกการชะละลายของอลูมิเนียมในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดไม่มีการเผา ร่วมกากของเสียอันตราย.....	90
4.9	กลไกการชะละลายของอลูมิเนียมในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดที่มีการเผา ร่วมกากของเสียอันตราย.....	91
4.10	กลไกการชะละลายของโครเมียมในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดไม่มีการเผา ร่วมกากของเสียอันตราย.....	94
4.11	กลไกการชะละลายของโครเมียมในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดที่มีการเผา ร่วมกากของเสียอันตราย.....	95
4.12	กลไกการชะละลายของเหล็กในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดไม่มีการเผา ร่วมกากของเสียอันตราย.....	98
4.13	กลไกการชะละลายของเหล็กในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดที่มีการเผา ร่วมกากของเสียอันตราย.....	99
4.14	กลไกการชะละลายของสตรอนเตียมในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดไม่มีการ	

เผาพร้อมกากของเสียอันตราย..... 102

4.15 กลไกการชะละลายของสตรอนเตียมในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดที่มีการเผาพร้อมกากของเสียอันตราย..... 103

4.16 กลไกการชะละลายของสังกะสีในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดไม่มีการเผาพร้อมกากของเสียอันตราย..... 106

4.17 กลไกการชะละลายของสังกะสีในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดที่มีการเผาพร้อมกากของเสียอันตราย..... 107

4.18 ความเข้มข้นจากการชะละลายของโลหะหนักในก้อนแข็ง..... 111



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์.....	7
2.2	อุณหภูมิของก๊าซและวัตถุดิบในเตาเผาแบบ Rotary Kiln.....	10
2.3	กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์.....	11
2.4	ตัวอย่างระบบบำบัดน้ำเสีย.....	30
2.5	การแบ่งรูปแบบการทำก้อนแข็งกากของเสีย.....	36
2.6	ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการชะละลายจากก้อนแข็ง รวมทั้งกากของเสียที่อยู่ในรูปของการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็ง.....	39
3.1	ตัวอย่างก้อนแข็งที่อายุบ่ม 28 วันและอุปกรณ์ในการบ่มก้อนตัวอย่าง.....	53
3.2	การทดสอบการชะละลายโดยการประยุกต์ตามมาตรฐาน EA NEN 7375:2004....	59
3.3	สรุปภาพรวมขั้นตอนในการวิจัยเรื่องการชะละลายระยะยาวของโลหะหนักในการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งกากตะกอน.....	60
4.1	ตัวอย่างกากตะกอนชนิดเปียกและอบแห้ง.....	61
4.2	การทดสอบความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง.....	65
4.3	การทดสอบการรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง.....	67
4.4	ความเข้มข้นของอลูมิเนียมในแต่ละขั้นตอนจากการสกัดด้วยวิธี Sequential Extraction test.....	69
4.5	ความเข้มข้นของโครเมียมในแต่ละขั้นตอนจากการสกัดด้วยวิธี Sequential Extraction test.....	70
4.6	ความเข้มข้นของเหล็กในแต่ละขั้นตอนจากการสกัดด้วยวิธี Sequential Extraction test.....	70
4.7	ความเข้มข้นของสตรอนติยมในแต่ละขั้นตอนจากการสกัดด้วยวิธี Sequential Extraction test.....	71
4.8	ความเข้มข้นของสังกะสีในแต่ละขั้นตอนจากการสกัดด้วยวิธี Sequential Extraction test.....	71
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชที่อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (L/S Ratio) ต่างๆ.	72
4.10	ความเข้มข้นของอลูมิเนียมที่ L/S Ratio 0.5-100 มิลลิลิตรต่อกรัม.....	73
4.11	ความเข้มข้นของโครเมียมที่ L/S Ratio 0.5-100 มิลลิลิตรต่อกรัม.....	75
4.12	ความเข้มข้นของเหล็กที่ L/S Ratio 0.5-100 มิลลิลิตรต่อกรัม.....	76
4.13	ความเข้มข้นของโซเดียมที่ L/S Ratio 0.5-100 มิลลิลิตรต่อกรัม.....	77

4.14	ความเข้มข้นของสตรอนเตียมที่ L/S Ratio 0.5-100 มิลลิลิตรต่อกรัม.....	78
4.15	ความเข้มข้นของสังกะสีที่ L/S Ratio 0.5-100 มิลลิลิตรต่อกรัม.....	79
4.16	การชะละลายของอลูมิเนียมที่สัมพันธ์กับค่าพีเอช.....	80
4.17	การชะละลายของโครเมียมที่สัมพันธ์กับค่าพีเอช.....	81
4.18	การชะละลายของเหล็กที่สัมพันธ์กับค่าพีเอช.....	82
4.19	การชะละลายของโซเดียมที่สัมพันธ์กับค่าพีเอช.....	83
4.20	การชะละลายของสตรอนเตียมที่สัมพันธ์กับค่าพีเอช.....	83
4.21	การชะละลายของสังกะสีที่สัมพันธ์กับค่าพีเอช.....	84
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างน้ำชะละลายทั้งสองชนิด.....	85
4.23	การชะละลายของอลูมิเนียมในน้ำปราศจากอ็อกซิเจนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์.....	86
4.24	การชะละลายของโครเมียมในน้ำปราศจากอ็อกซิเจนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์.....	86
4.25	การชะละลายของเหล็กในน้ำปราศจากอ็อกซิเจนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์.....	87
4.26	การชะละลายของสตรอนเตียมในน้ำปราศจากอ็อกซิเจนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์.....	87
4.27	การชะละลายของสังกะสีในน้ำปราศจากอ็อกซิเจนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์.....	88
4.28	การชะละลายสะสมของอลูมิเนียม.....	92
4.29	การชะละลายสะสมของโครเมียม.....	96
4.30	การชะละลายสะสมของเหล็ก.....	100
4.31	การชะละลายสะสมของสตรอนเตียม.....	105
4.32	การชะละลายสะสมของสังกะสี.....	108

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศต่างๆ ทั่วโลกให้ความสำคัญกับปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ซึ่งในแต่ละประเทศได้มีการนำปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมมาพิจารณาเป็นประเด็นสำคัญ โดยเป็นการมุ่งเน้นให้ประชาชนได้ตระหนักถึงความรับผิดชอบต่อการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ รวมถึงรณรงค์เรื่องการประหยัดพลังงานเพื่อลดปัญหาด้านมลพิษหรือปริมาณก๊าซของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมและในกระบวนการผลิตทั่วไป

โดยส่วนใหญ่กากของเสียอุตสาหกรรมมักมีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง การบำบัดหรือการจัดเก็บทำได้ยาก ในกรณีที่มีการจัดการกากของเสียอันตรายที่ไม่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ได้ ดังนั้นการพัฒนาอุตสาหกรรมต้องทำควบคู่ไปกับการดูแลรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมเพื่อเป็นการป้องกันการเกิดผลกระทบหรือให้เกิคน้อยที่สุด จึงมีความจำเป็นในการเลือกหาวิธีในการจัดการกากของเสียให้ถูกต้องและเหมาะสมกับชนิดของเสียอันตรายต่อไป ซึ่งนอกจากการบำบัดและการกำจัดกากของเสียแล้วยังมีแนวคิดเกี่ยวกับการแลกเปลี่ยนของเสียอันตรายระหว่างอุตสาหกรรม รวมถึงการนำของเสียอันตรายกลับมาใช้ใหม่หรือนำมาทดแทนวัตถุดิบอื่น โดยทางเลือกหนึ่งที่ใช้กันในหลายประเทศและได้มีการศึกษาวิจัยทำการค้นคว้าเพื่อพัฒนาขั้นตอนในกระบวนการผลิต รวมถึงได้มีการศึกษาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตกันอย่างกว้างขวาง เช่น การนำกากของเสียอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทนในกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ เนื่องจากเป็นการเผาทำลายกากของเสียอุตสาหกรรมในเตาเผาด้วยอุณหภูมิที่สูง (ประมาณ 1,450 องศาเซลเซียส) โดยไม่เหลือเถ้าที่ต้องนำไปฝังกลบและสามารถทำลายก๊าซพิษที่อาจเกิดจากกระบวนการเผาไหม้ได้ นอกจากนี้ในกรณีที่ของเสียอุตสาหกรรมมีคุณสมบัติที่สามารถทดแทนวัตถุดิบและเชื้อเพลิงได้จะทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตปูนซีเมนต์ โดยยังคงคุณสมบัติที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์ไว้ได้อีกด้วย ในการนำกากอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์นั้นอาจมีกากของเสียบางชนิดที่ไม่เหมาะสมกับกระบวนการนี้หรือไม่สามารถนำมาทดแทนวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงได้ ก็สามารถนำมาเผาพร้อมได้โดยถือว่าการเผาเพื่อทำลายทิ้ง หรืออาจมีการนำกากของเสียอันตรายมาทำเสถียรและหล่อก้อนแข็ง ซึ่งทั้งสองกระบวนการนี้เป็นการผสมรวมกากของเสียกับวัสดุประสาน เพื่อลดปริมาณการชะละลายของสิ่งปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยใช้กระบวนการทางกายภาพและทางเคมีร่วมกัน เพื่อให้กากของเสียอันตรายอยู่ในรูปที่ไม่เป็นอันตราย

หรือมีความเป็นพิษน้อยลง ก่อนนำก้อนแข็ง ไปฝังกลบหรือนำมาใช้ในงานก่อสร้างได้ (Spence และ Shi, 2005)

การทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งถือเป็นอีกวิธีหนึ่งในการจัดการกากของเสียอันตรายที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง เช่น กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย และมีการนำมาประยุกต์ใช้กับกากกัมมันตภาพรังสี (Low-level radioactive) กากของเสียอันตรายและกากของเสียผสม (Mixed wastes) รวมทั้งการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนซึ่ง US Environmental Protection Agency ได้ยอมรับว่าเทคโนโลยีการหล่อก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์นั้นเป็น best demonstrated available technology

ปูนซีเมนต์ถูกใช้ในการปรับสภาพกากของเสียอันตราย เนื่องจากปูนซีเมนต์มีราคาถูก สามารถจัดหาได้ง่ายและสามารถรวมตัวกันอย่างรวดเร็วกับกากของเสียที่ถูกทำเสถียรซึ่งคุณสมบัติความแข็งแรงในปูนซีเมนต์จะช่วยลดการชะละลายของสารอนินทรีย์ที่เป็นพิษหรือโลหะหนักที่เป็นอันตรายได้ (Singh และ Pant, 2006)

ในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อนำกากตะกอนน้ำเสียจากระบบการชุบผิวโลหะที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักสูงมาทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งเพื่อศึกษากลไกการชะละลายของโลหะหนักจากก้อนแข็งและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและการชะละลายของโลหะหนัก รวมถึงการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง โดยหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากตะกอนและวัสดุประสาน ซึ่งเป็นการศึกษาหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ลักษณะโครงสร้างภายในก้อนแข็งและคุณสมบัติความแข็งแรงของมอร์ตาร์โดยตระหนักถึงการชะละลายของโลหะหนักจากก้อนแข็ง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการให้ความรู้ความเข้าใจกับชุมชน ประชาชนทั่วไป หรือหน่วยงานต่างๆ ทั้งทางภาครัฐและภาคเอกชน เกี่ยวกับการบริหารจัดการด้านความเสี่ยงจากการกำจัดกากของเสียที่อาจเกิดขึ้นกับสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมในอนาคตได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาอัตราส่วนระหว่างกากตะกอนกับปูนซีเมนต์และผลกระทบของโลหะหนักในกากตะกอนที่มีต่อการทำเสถียรและการหล่อก้อนแข็ง
2. เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (L/S Ratio) ที่มีผลต่อลักษณะการชะละลายของโลหะหนัก
3. เพื่อประเมินถึงลักษณะการชะละลายของโลหะหนักเมื่อผ่านกระบวนการปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็ง
4. เพื่อศึกษากลไกการชะละลายระยะยาวของโลหะหนักในก้อนแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง(L/S Ratio) และกลไกการชะละลายของโลหะหนักในก้อนแข็งที่ผ่านการทำเสถียรและการหล่อก้อนแข็ง โดยเปรียบเทียบระหว่างปูนซีเมนต์ที่ใช้กระบวนการเผาร่วมกากของเสียอันตราย (Co-processing) และปูนซีเมนต์ที่ผลิตตามขั้นตอนปกติที่ไม่มีการเผาร่วมกากของเสีย การศึกษาการชะละลายของก้อนแข็งเป็นการประยุกต์ใช้การทดสอบแบบ Tank test โดยทดสอบการชะละลายด้วยน้ำฝนกรดสังเคราะห์และน้ำปราศจากไอออน ซึ่งเป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ สถานที่ในการดำเนินงานวิจัยคือ ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

1. งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการ โดยการประยุกต์การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐาน EA NEN 7375:2004
2. ตัวอย่างกากตะกอนที่นำมาศึกษาในงานวิจัยเป็นกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการชุบผิวโลหะ บริษัทมารูยาซี อินดัสตรีส์ (ไทยแลนด์) จำกัด นิคมอุตสาหกรรมอีสเทิร์นซีบอร์ด อำเภอปลวกแดง จังหวัดระยอง
3. ตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่ทำการศึกษาเป็นตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่มีการเผาร่วมกากของเสียและปูนซีเมนต์ที่ไม่มีการเผาร่วมกากของเสียที่มีจำหน่ายโดยทั่วไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง(L/S Ratio) ที่มีผลต่อการชะละลายของโลหะหนักจากการนำกากตะกอนมาปรับเสถียรและหล่อก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์
2. ทราบถึงแนวโน้มในการชะละลายของโลหะหนักจากการทำเสถียรและการหล่อก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ โดยการชะละลายของน้ำฝนกรดสังเคราะห์และน้ำปราศจากไอออน
3. ทราบถึงแนวทางในการคาดการณ์ลักษณะการชะละลายของโลหะหนักเมื่อผ่านการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งเมื่อนำไปฝังกลบ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดและทฤษฎีพื้นฐานในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการใช้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนในกระบวนการผลิต และกากของเสียอันตรายจากอุตสาหกรรมการชุบผิวโลหะ รวมถึงผลกระทบของโลหะหนักที่มีต่อก่อนแข็งหลังจากการปรับเสถียรและหล่อก้อนแข็ง โดยใช้เป็นความรู้พื้นฐานและเพื่อทำความเข้าใจถึงแนวโน้มการชะละลายด้วยน้ำฝนกรดสังเคราะห์และน้ำปราศจากไอออน เมื่อนำกากของเสียอันตรายมาผ่านการปรับเสถียรและหล่อก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ก่อนการนำไปฝังกลบ

2.1 ปูนซีเมนต์ (วินิต ช่อวิเชียร, 2529)

ปูนซีเมนต์ หมายถึง วัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีต โดยสามารถยึดวัสดุประเภทอิฐ หิน หรือทรายเข้าด้วยกัน โดยสามารถก่อตัวและเกิดการแข็งตัวได้ด้วยการทำปฏิกิริยากับน้ำเรียกว่า “ปฏิกิริยาไฮเดรชัน” เมื่อนำมาใช้งานสามารถขึ้นรูปได้ตามที่ต้องการซึ่งในงานด้านวิศวกรรมโยธาถือว่าเป็นซีเมนต์ประเภทนั้นบิทูมินัส (Non-bituminous) คือมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทาอ่อน ซึ่งได้จากการบดเม็ดปูนที่ผ่านการเผาส่วนผสมจนสุกพอดี ส่วนผสมที่บดแล้วประกอบด้วยวัสดุต่างๆ เช่น หินปูน(Lime stone) ดินปูนขาว(Marl) หินเชล(Shale) และดินเหนียว(Clay) โดยในปูนซีเมนต์มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต(Tricalcium silicate) ไดแคลเซียมซิลิเกต(Dicalcium silicate) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต(Tricalcium aluminates) และเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium aluminoferrite) โดยคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่ใช้เป็นวัตถุดิบและกรรมวิธีในกระบวนการผลิต

2.1.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ในปูนซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิดซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ จากอิทธิพลของสารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์แต่ละชนิด ทำให้สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของปูนซีเมนต์เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานแต่ละประเภทได้ ซึ่งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดา (Ordinary Portland Cement) ประเภทที่ 1 โดยที่ปูนซีเมนต์ชนิดนี้เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่นิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตกันมากที่สุด ซึ่งมีไว้สำหรับใช้

ในงานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตหรืองานที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา โดยปูนซีเมนต์จะให้กำลังสูงในระยะเวลาไม่เร็วมากนักและให้ความร้อนปานกลาง

2. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) ประเภทที่ 2 ใช้สำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องสัมผัสกับดินหรือน้ำที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตสูงกว่าปกติแต่ไม่ถึงในระดับรุนแรง เนื่องจากมีปริมาณของไตรแคลเซียมอลูมินेट (C_3A) อยู่ในปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 8 เมื่อทำปฏิกิริยาให้ความร้อนไม่สูงมากนักและให้กำลังใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดาส่วนใหญ่นำมาใช้ในงานก่อสร้างทำเทียบเรือ เขื่อน หรือตอม่อสะพาน เป็นต้น

3. ปูนซีเมนต์กำลังอัดสูงเร็ว (High Early Strength Portland Cement) ประเภทที่ 3 เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่ให้กำลังอัดสูงในระยะแรกและให้ความร้อนเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันสูง เนื่องจากมีปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) สูงและมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ชนิดธรรมดา เหมาะสำหรับงานที่ต้องการใช้งานเร็วหรือมีการถอดแบบในเวลาอันสั้นเช่น เสาเข็มคอนกรีต เสาไฟฟ้าคอนกรีต หมอนรองรางรถไฟ ผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูป (precast concrete) และงานซ่อมแซมถนน เป็นต้น

4. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทให้ความร้อนต่ำ (Low heat Portland Cement) ประเภทที่ 4 ในปูนซีเมนต์ชนิดนี้ เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์แล้วจะดำเนินไปอย่างช้าๆ และให้ความร้อนที่ต่ำมาก เนื่องจากมีปริมาณของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ต่ำโดยเฉลี่ยมีค่าประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 แต่จะมีปริมาณของไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ที่ค่อนข้างสูงประมาณร้อยละ 50 ถึง 60 จึงเหมาะสำหรับใช้ในงานคอนกรีตหยาบ (Mass Concrete) เช่น เขื่อนคอนกรีตหรือตอม่อขนาดใหญ่ เนื่องจากทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตขณะก่อตัวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นซึ่งเป็นการลดความเสี่ยงในการแตกร้าวที่เกิดจากความร้อน (Thermal Cracking) ได้

5. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตสูง (Sulfate Resistance Portland Cement) ประเภทที่ 5 เป็นปูนซีเมนต์ประเภทต้านทานซัลเฟตได้สูง เนื่องจากมีปริมาณไตรแคลเซียมอลูมินेट (C_3A) ต่ำมากโดยทั่วไปมีอยู่ในปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 5 เพราะจะทำให้เกิดการรวมตัวกับซัลเฟตได้ง่าย และเมื่อปริมาณของไตรแคลเซียมอลูมินेट (C_3A) มีปริมาณน้อย จึงเกิดปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อย ดังนั้นการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตก็จะลดลงจึงเหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องสัมผัสกับเกลือหรือสารละลายซัลเฟตที่รุนแรง เช่นงานก่อสร้างบริเวณที่มีดินเค็มหรือ โครงสร้างในทะเล เป็นต้น โดยต้องใช้ร่วมกับส่วนผสมของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำเพื่อทำให้เนื้อคอนกรีตที่ได้มีลักษณะที่บวมขึ้นและสามารถลดความเสียหายของคอนกรีตที่อาจเกิดจากซัลเฟตได้

2.1.2 การผลิตปูนซีเมนต์ (Cement Manufacturing Process)

ในปัจจุบันกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ได้มีการพัฒนาไปจากเดิมมาก แต่ยังคงมีการใช้วัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิต และมีการนำวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมอื่นๆ (Process

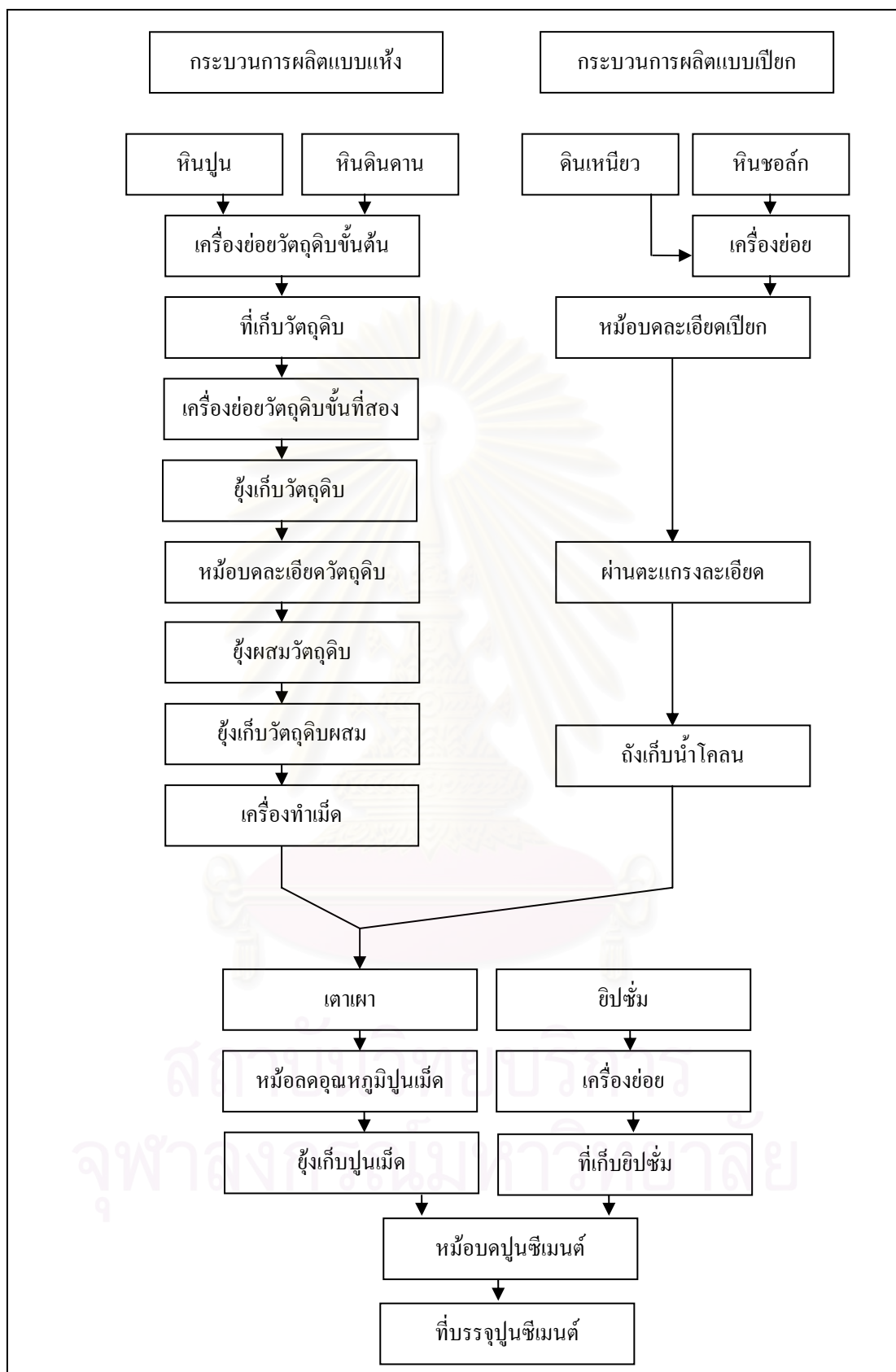
residues) มาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน แต่ยังคงให้ความสำคัญที่คุณภาพของปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้และประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต ซึ่งปูนเม็ด 1 ตันต้องใช่วัตถุดิบประมาณ 1.5 ถึง 1.6 ตัน การสูญเสียวัตถุดิบในระหว่างขั้นตอนการผลิตโดยส่วนใหญ่จะเกิดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่บรรยากาศในปฏิกิริยาการเผาของหินปูน (calcinations reaction) และใช้พลังงานในการผลิตประมาณ 3,000 - 3,300 เมกกะจูลหรือร้อยละ 30 - 40 ของราคาค้นทุนการผลิต หลังจากหักค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องจักรกล โดยมีแหล่งเชื้อเพลิงที่ใช้ทั่วไปได้แก่ ถ่านหิน ถ่านโค้ก ก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมัน และอาจมีการนำกากของเสียหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วมาเป็นเชื้อเพลิงทดแทน (Cement and Co-processing) ซึ่งการผลิตปูนซีเมนต์ได้จำแนกกระบวนการผลิตตามลักษณะของวัตถุดิบที่นำมาใช้เป็น 2 วิธีได้แก่ การผลิตแบบเปียก (Wet Process) และการผลิตแบบแห้ง (Dry Process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้โดยทั่วไป เนื่องจากมีการใช้พลังงานในขั้นตอนการเผาวัตถุดิบน้อยกว่ากระบวนการผลิตแบบเปียกที่มีการใช้พลังงานความร้อนส่วนหนึ่งในการทำให่วัตถุดิบแห้งก่อนเริ่มขั้นตอนการเผาปูนเม็ด นอกจากนี้แล้วมีขั้นตอนในกระบวนการผลิตที่ใกล้เคียงกันแต่แตกต่างกันเฉพาะในขั้นตอนของการเตรียมวัตถุดิบเท่านั้น

1. การผลิตแบบเปียก (Wet Process) เป็นวิธีการผลิตที่ใช่วัตถุดิบความชื้นสูงเช่น ดินขาว (Marl) และดินเหนียว (Clay) มาผสมรวมกันในสภาพที่เปียกและเติมน้ำในอัตราส่วนที่พอเหมาะเพื่อช่วยในการบดผสมวัตถุดิบ ซึ่งหลังจากเตรียมเสร็จแล้วจะมีน้ำเป็นส่วนผสมร้อยละ 30 ถึง 40 มีลักษณะเหลวและไหลได้เรียกว่า Slurry ก่อนนำไปป้อนเข้าเตาเผา และให้ความร้อนเพื่อไล่ความชื้นออกให้หมดก่อนเริ่มทำการเผาต่อเพื่อให้ได้ปูนเม็ดและนำมาบดเป็นปูนซีเมนต์ต่อไป

2. การผลิตแบบแห้ง (Dry Process) เป็นวิธีการผลิตที่ใช่วัตถุดิบที่มีความชื้นตามปกติ เช่น หินปูน (Lime stone) หินดินดาน (Shale) ดินลูกรัง (Late rite) และทราย (Sand) โดยมีการนำส่วนผสมที่ได้บดในสภาพที่แห้งด้วยเครื่องย่อยขั้นต้น (primary crusher) และเครื่องย่อยขั้นที่สอง (secondary crusher) ในระหว่างการบดวัตถุดิบจะใช้ลมร้อนที่เหลือจากระบบเตาเผาช่วยไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบและส่วนผสมที่เตรียมเสร็จแล้วจะมีลักษณะเป็นผงละเอียด หลังจากนั้นนำไปป้อนเข้าเตาเผาในสภาพที่แห้งซึ่งไม่มีการสูญเสียความร้อนในการไล่ความชื้นและทำการเผาต่อเพื่อให้ได้ปูนเม็ดและนำมาบดเป็นปูนซีเมนต์ต่อไป

2.1.3 วัตถุดิบ (Raw Materials)

ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นมีวัตถุดิบหลักหลายชนิด โดยในขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นวัตถุดิบถือเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิต ซึ่งเริ่มจากการคัดเลือกวัตถุดิบ การเตรียมวัตถุดิบ และการผสมวัตถุดิบแต่ละชนิดก่อนการนำเข้าหม้อบดให้ละเอียดเพื่อรอเข้าระบบเตาเผาต่อไป



รูปที่ 2.1 กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ (ปริญญาและชัย, 2547)

1. ประเภทของวัตถุดิบ (Type of materials) วัตถุดิบหลักที่มีการนำมาใช้ในขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ สามารถแบ่งประเภทตามลักษณะและองค์ประกอบของวัตถุดิบได้เป็น 3 ประเภท และหลังจากการเผาจนได้ปูนเม็ดแล้วจะมีการเติม Additive Materials เพื่อใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของปูนซีเมนต์โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 Calcareous Materials วัตถุดิบประเภทนี้มีองค์ประกอบทางเคมีโดยส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate หรือ CaCO_3) โดยมีปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 80 ขึ้นไป เช่น หินปูน (Limestone) ดินขาว (Marl) และดินสอพอง (Chalk) เป็นต้น

1.2 Argillaceous Materials องค์ประกอบทางเคมีโดยส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของซิลิกา (Silicon Dioxide, SiO_2) อลูมินา (Aluminium Oxide หรือ Al_2O_3) และเหล็ก (Iron Oxide หรือ Fe_2O_3) เช่น หินดินดาน (Shale) และดินดำหรือดินเหนียว (Clay) เป็นต้น

1.3 Corrective Materials เป็นวัตถุดิบที่ใช้สำหรับเพิ่มองค์ประกอบทางเคมีบางตัวซึ่งในหินดินดานหรือดินดำมีปริมาณไม่เพียงพอ เช่น ต้องการเพิ่ม SiO_2 โดยการเติมทราย (Sand) หรือเพิ่ม Al_2O_3 โดยเติมดินแดง (High Alumina Clay) และเพิ่ม Fe_2O_3 โดยการเติมแร่เหล็ก (Iron Ore) และดินลูกรัง (Lite rite) เป็นต้น

1.4 Additive Materials ในกระบวนการเผาเมื่อได้ปูนเม็ดแล้วจะมีการเติมสารผสมเพิ่มในขั้นตอนสุดท้ายของการบดปูนเม็ดเพื่อใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ เช่นการเติมยิปซัมเพื่อช่วยยืดระยะเวลาในการแข็งตัว ปรับปรุงคุณสมบัติการหดตัวและพัฒนากำลังอัด กรณีของปูนซีเมนต์ผสมมีการเติมหินปูน เพื่อช่วยลดการหดตัวซึ่งเป็นสาเหตุของการแตกร้าวและยังมีการเติมสารผสมเพิ่มชนิดอื่นๆ เช่น สารปอซโซลาน สารลดน้ำ และสารกระจายฟองอากาศ เป็นต้น

2. การเตรียมวัตถุดิบ (Raw Materials Preparation) ในกระบวนการผลิตแบบแห้งนั้น วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตโดยส่วนใหญ่เป็นหินปูน (Lime stone) หินดินดาน (Shale) จากเหมืองหิน (Quarry) โดยทำการเจาะและระเบิดหิน หลังจากนั้นลำเลียงหินไปยังเครื่องย่อย (Crusher) เพื่อย่อยให้มีขนาดเล็กลงประมาณ 2.5 เซนติเมตร ซึ่งการย่อยวัตถุดิบให้มีขนาดใกล้เคียงกันจะทำให้วัตถุดิบมีคุณภาพที่สม่ำเสมอและเมื่อย่อยจนได้ขนาดแล้วจะถูกลำเลียงไปเก็บในถังเก็บวัตถุดิบ (Raw Material Storage) เพื่อรอเข้ากระบวนการบดต่อไป

3. การบดวัตถุดิบ (Raw Material Grinding) เริ่มจากขั้นตอนการลำเลียงวัตถุดิบในถังเก็บวัตถุดิบ (Raw Material storage) เข้าสู่หม้อบดวัตถุดิบ (Raw Mill) ซึ่งในระหว่างการบดจะมีการใช้ลมร้อนที่เหลือจากระบบเตาเผาช่วยไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบด้วย หลังจากนั้นทำการคัดแยกวัตถุดิบด้วยเครื่องคัดแยก ซึ่งวัตถุดิบที่ผ่านขั้นตอนการบดและการคัดแยกจนได้ขนาดตามที่ต้องการแล้ว จะมีลักษณะที่ละเอียดคล้ายแป้ง จากนั้นจะลำเลียงวัตถุดิบไปเก็บในไซโลเพื่อรอ

ป้อนเข้าสู่ระบบเตาเผาต่อไป ส่วนวัตถุดิบที่หยาบหรือไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการจะถูกนำกลับไปยังสายพานลำเลียง เพื่อรอเข้าสู่ระบบหม้อบดวัตถุดิบอีกครั้ง

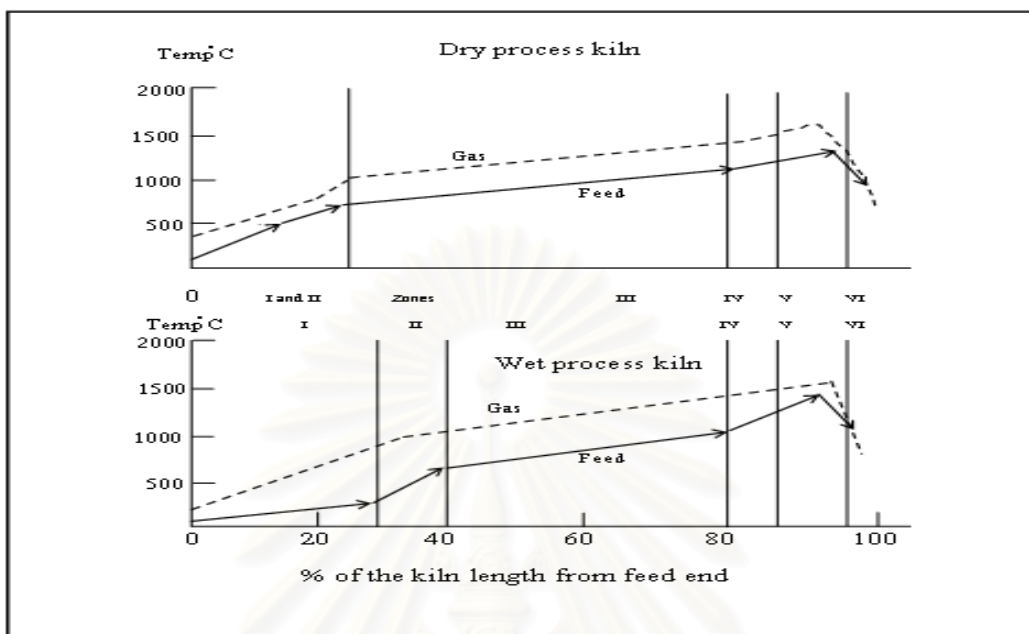
ตารางที่ 2.1 สารประกอบและความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Spence และ Shi, 2005)

Composition and Fineness	Type of Portland Cement					
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	White
Chemical Composition (%)						
SiO ₂ (Sulfur dioxide)	20.5	21.2	20.6	22.2	2.9	22.7
Al ₂ O ₃ (Alumina)	5.4	4.6	4.9	4.6	3.9	4.1
Fe ₂ O ₃ (Ferric oxides)	2.6	3.5	2.8	5.0	4.2	0.3
CaO (Free lime)	63.9	63.8	63.4	62.5	63.8	66.7
MgO (Magnesium oxide)	2.1	2.1	2.2	1.9	2.2	0.9
SO ₃ (Sulfur trioxide)	3.0	2.7	3.5	2.2	2.3	2.7
Na ₂ O (Sodium oxide)	0.61	0.51	0.56	0.36	0.48	0.18
Mineral Composition (%)						
3CaO.SiO ₂ (C ₃ S)	54	55	55	42	54	63
2CaO.SiO ₂ (C ₂ S)	18	19	17	32	22	18
CaO.Al ₂ O ₃ (C ₃ A)	10	6	9	4	4	10
4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ (C ₄ AF)	8	11	8	15	13	1
Blaine Fineness (m ² /kg)	369	377	548	340	373	482

2.1.4 การเผาปูนเม็ด (Clinker Burning)

ในขั้นตอนการเผาปูนซีเมนต์มีการลำเลียงวัตถุดิบเพื่อรอป้อนเข้าสู่เตาเผาโดยก่อนป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เตาจะต้องผ่านกระบวนการ Preheated เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของวัตถุดิบก่อนเข้าสู่ Burning Zone ภายในเตาเผา (Kiln) ซึ่งวิธีการนี้สามารถลดความยาวของเตาเผาให้สั้นลงได้และสามารถลดพลังงานความร้อน (Heat Consumption) ที่ใช้ในการผลิตได้อีกทางหนึ่งด้วย ซึ่งในขั้นตอนการเผาปูนเม็ดต้องมีการควบคุมปริมาณวัตถุดิบที่ป้อนเข้าเตาเผาให้พอเหมาะกับขนาดและการทำงานของเตา ซึ่งภายในเตาเผามีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 1,450 องศาเซลเซียส วัตถุดิบที่ถูกเผาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเป็นปูนเม็ด (Clinker) ในเตาเผาและเมื่อผ่านขั้นตอนการเผาตามเวลาที่กำหนดแล้วปูนเม็ดที่ได้จะถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วในบริเวณ Cooling Zone หลังจากที่น่าออกมาจากเตาเผาแล้วโดยมีขั้นตอนการเป่าลมผ่านปูนเม็ดที่ร้อนจัดด้วยเพื่อดึงเอา

ความร้อนออกไป ปูนเม็ดที่ได้มีลักษณะค่อนข้างกลมสีเทาเข้มโดยสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของวัตถุดิบในระหว่างการเผาปูนซีเมนต์ได้ดังนี้



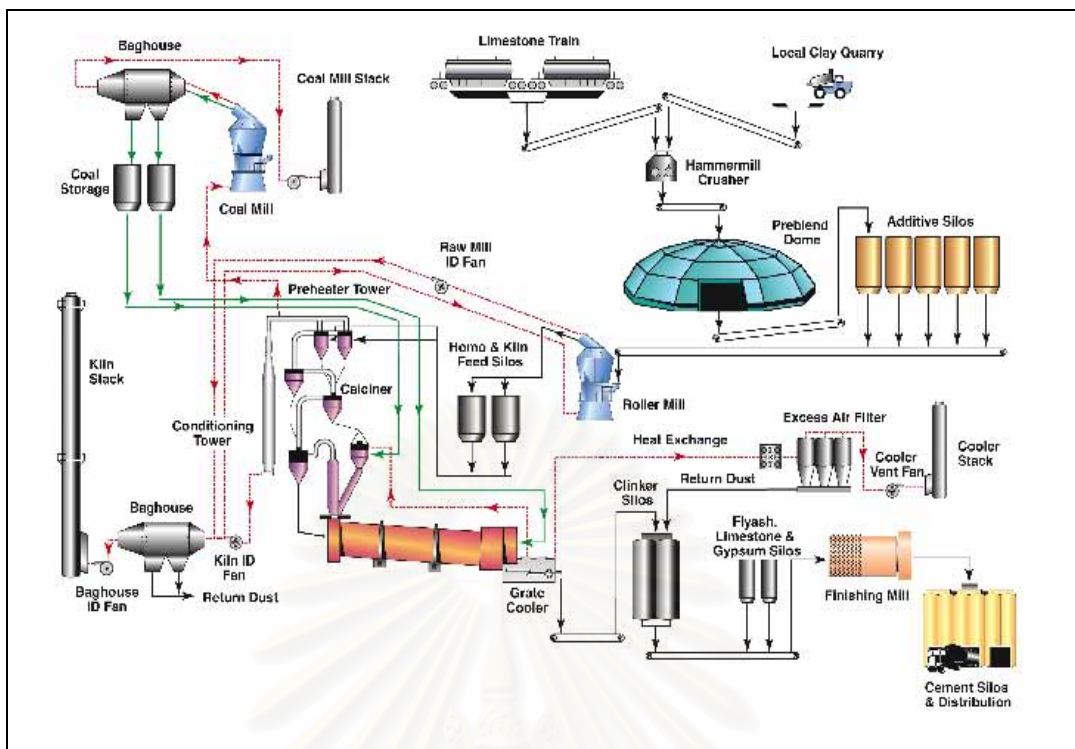
รูปที่ 2.2 อุณหภูมิของก๊าซและวัตถุดิบในเตาเผาแบบ Rotary Kiln (Ghosh, 1991)

ขั้นตอนที่ 1 การกำจัดน้ำโดยการระเหย (Evaporation) โดยเริ่มต้นจากการป้อนวัตถุดิบเข้าทางด้านบนของเตาเผาและให้ความร้อนแก่วัตถุดิบจนมีอุณหภูมิประมาณ 250 ถึง 450 องศาเซลเซียส ซึ่งในขั้นตอนนี้จะให้น้ำระเหยออกจากส่วนผสมของวัตถุดิบ

ขั้นตอนที่ 2 การขจัดน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Calcinations) ในขั้นตอนนี้ น้ำที่เหลืออยู่จะถูกขับออกมาจากหินปูนหรือดินสอพอง และจะเหลือเพียงแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งหลังจากมีการให้ความร้อนอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นถึง 600 องศาเซลเซียส ซึ่งวัตถุดิบเริ่มเกิดการสลายตัวโดยโมเลกุลของน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกกำจัดออกไปและเมื่ออุณหภูมิภายในเตาเผาเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส จะเกิดสารประกอบของแคลเซียมอลูมิเนตและเฟอร์ไรต์

ขั้นตอนที่ 3 การทำปฏิกิริยาเกิดเป็นปูนเม็ด (Clinkering) โดยในขั้นตอนนี้มีการหลอมตัวของออกไซด์ระหว่างแคลเซียมกับซิลิกา อลูมินาและเหล็กเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงประมาณ 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส ส่วนผสมจะทำปฏิกิริยาเป็นเม็ดปูนก้อนกลมขนาด 3 ถึง 40 มิลลิเมตร

ขั้นตอนที่ 4 ในขั้นตอนนี้จะเกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่างๆ และกระบวนการตกผลึกเมื่อทำให้เม็ดปูนเย็นตัวลงโดยปูนเม็ดที่ออกมาจากส่วนล่างของเตาเผาจะยังคงร้อนมากจึงมีการลดอุณหภูมิของปูนเม็ดก่อนนำไปบด ซึ่งอัตราการลดลงของอุณหภูมิมิมีผลต่อผลึก (Crystal) ของปูนเม็ดต่อจากนั้นจึงมีการนำปูนเม็ดมาบดรวมกับอิปซั่มในหม้อบดปูนซีเมนต์ (Cement mill)



รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ (<http://www.inlandcanada.com/NR/rdonlyres/271E990D-976D-41B9-AE35-B45013E7F6A4/0/ProcessDiagram2006noshadow.JPG>)

2.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ (วินิต ช่อวิเชียร , 2529; ปรีญา และชัย, 2547)

ในปูนซีเมนต์ประกอบด้วยออกไซด์หลัก(Major oxides) และออกไซด์รอง (Minor oxides) โดยมีส่วนประกอบของออกไซด์ชนิดอื่นๆ ผสมรวมอยู่ในปูนด้วย เช่น ไททานเนียมออกไซด์ (TiO_2) และฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5) นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบของออกไซด์อื่นซึ่งถูกจัดรวมอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition) และกากที่ไม่ละลายทั้งในกรดและด่าง (Insoluble residue) ออกไซด์ โดยเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวอยู่ในรูปของสารประกอบโดยออกไซด์หลักได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) อยู่รวมกันประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และออกไซด์รองได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na_2O และ K_2O) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และยิปซัม โดยมีสารประกอบที่สำคัญได้แก่

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (tricalcium silicate) องค์ประกอบทางเคมี คือ $3CaO \cdot SiO_2$
2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (dicalcium silicate) องค์ประกอบทางเคมี คือ $2CaO \cdot SiO_2$
3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (tricalcium aluminate) องค์ประกอบทางเคมี คือ $3CaO \cdot Al_2O_3$
4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (tetracalcium aluminoferrite) องค์ประกอบทางเคมี คือ $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$

2.2.1 คุณสมบัติของสารประกอบหลักและอิทธิพลที่มีต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ (Cement and application, 2548)

ปริมาณของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์มีมากถึงกว่าร้อยละ 90 ด้วยเหตุนี้ สารประกอบหลักจึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติและคุณภาพของปูนซีเมนต์ ซึ่งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารประกอบต่างๆ ดังนี้

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S หรือ Alite) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม โดยคุณสมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกตจะเหมือนกับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งเมื่อผสมกับน้ำแล้วจะเกิดการก่อตัวและแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง

เมื่อเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัมและมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรกโดยทั่วไปแล้วกำลังอัดในช่วงแรกของปูนซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังปฏิกิริยามีผลต่อกำลังอัดด้วยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3S อยู่ประมาณร้อยละ 50-70

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S หรือ Belite) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลมมีอยู่หลายชนิด แต่มีเพียง βC_2S ที่มีคุณสมบัติในการยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดการแข็งตัวและเกิดความร้อน 250 จูลต่อกรัมซึ่งหลังจากเกิดการแข็งตัวแล้วจะพัฒนากำลังอย่างช้าๆ ในช่วงแรกและกำลังอัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอายุมากกว่า 7 วันแต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S ซึ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_2S อยู่ประมาณร้อยละ 15 ถึง 30

3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A หรือ Aluminates) มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อตัวทันทีทำให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนสูงในช่วงแรกประมาณ 850 จูลต่อกรัมและมีการพัฒนากำลังเร็วมาก

ในการป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิปซัมลงในขั้นตอนการบดปูนซีเมนต์เพื่อทำหน้าที่หน่วงการก่อตัวเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของ C_3A และจะพัฒนากำลังอัดในช่วง 1 - 2 วันแรก แต่มีกำลังอัดค่อนข้างต่ำโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มี C_3A ประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 ซึ่งปูนซีเมนต์ชนิดที่มีปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตต่ำจะสามารถทนทานต่อซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตสูง

4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF หรือ Ferrite) จะอยู่ในสภาพของสารละลายแข็ง โดยเป็นสารประกอบที่ได้จากวัตถุดิบที่มีสารประกอบเป็นแร่เหล็กและอลูมิเนียมโดยจะมีผลต่อสีของปูนซีเมนต์ทำให้มีสีเทา

นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วและก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันประมาณ 420 จูลต่อกรัมกำลังอัดของ C_4AF มีค่าต่ำและไม่แน่นอน โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีปริมาณของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ประมาณร้อยละ 5 ถึง 15

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของปูนซีเมนต์คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก (ปริญญา และชัย,2547)

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก	สัญลักษณ์
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	60-67	C
ซิลิกา (SiO ₂)	17-25	S
อลูมินา (Al ₂ O ₃)	3-8	A
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	0.5-0.6	F
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.1-4.0	M
ออกไซด์ของอัลคาไล (Na ₂ O)	0.1-1.8	N
ออกไซด์ของอัลคาไล (K ₂ O)	0.1-1.8	K
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	0.5-3.0	S
สารประกอบอื่น ๆ	0.5-3.0	-
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition)	0.1-3.0	LOI
กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble residue)	0.20-0.75	-

2.2.2 คุณสมบัติของสารประกอบรอง (ปริญญา และชัย, 2547)

ปูนซีเมนต์โดยทั่วไปประกอบด้วยสารประกอบรองซึ่งมีอยู่นอกเหนือจากสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด โดยสารประกอบรองมีอยู่จำนวนเล็กน้อยแต่มีบางชนิดที่มีผลกระทบต่อซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตทั้งขณะที่คอนกรีตยังไม่แข็งตัวและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

1. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ในขั้นตอนสุดท้ายของการเผาปูนซีเมนต์มีการบดเม็ดปูนร่วมกับยิปซัม (gypsum, CaSO₄·2H₂O หรือ CaO·SO₃·2H₂O หรือ CSH₂) เพื่อป้องกันการก่อตัวเร็วเกินไปของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งในทางตรงกันข้ามถ้ามีปริมาณยิปซัมมากเกินไปจะทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วเกิดการขยายตัวและอาจแตกร้าวได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมอลูมิเนตกับยิปซัมจะทำให้เกิดเอทริงไทต์ (Ettringite) ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากเดิม

เมื่อมีปริมาณยิปซัมผสมอยู่น้อยปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมอลูมิเนตกับยิปซัมจะเกิดขึ้นขณะที่ซีเมนต์เพสต์ยังอยู่ในสภาพพลาสติก ทำให้การขยายตัวของปริมาตรเกิดขึ้นก่อนการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นจึงมีการกำหนดปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ในปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 3 ซึ่งซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ร้อยละ 0.1 ถึง 0.5 ได้มาจากวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

2. ปูนขาวอิสระ (Free Lime, CaO) อาจเกิดขึ้นเนื่องจากประเภทของวัตถุดิบที่มีปริมาณปูนขาว (CaO) มากเกินไปสำหรับทำปฏิกิริยากับ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ ในเตาเผาหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาเป็นปูนเม็ดในระหว่างการเผาที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เหลือปูนขาวอิสระ

โดยทั่วไปจะมีประมาณร้อยละ 0.5 ถึง 1.0 เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวของ CaCO_3 ประมาณ 900 องศาเซลเซียสแต่อุณหภูมิในระหว่างการเผาปูนซีเมนต์สูงถึง 1,400 -1,600 องศาเซลเซียสซึ่งทำให้ปูนขาวถูกเผาจนเกรียมเป็นผลให้ปูนขาวอิสระรวมตัวกับน้ำได้อย่างช้าๆ ซึ่งการรวมตัวกันของปูนขาวอิสระกับน้ำเกิดขึ้นหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวแล้ว โดยการรวมตัวดังกล่าวทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีปริมาณมากขึ้น ถ้าปูนขาวอิสระมีมากเกินไปอาจจะทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ก่อตัวแล้วเกิดการขยายตัวและแตกร้าวได้ซึ่งสามารถทดสอบได้โดยวิธีการทดสอบเลอชาเตอริเออร์ (Le Chatelier test)

3. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) วัตถุประสงค์สำหรับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์มีแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) ผสมอยู่เล็กน้อย ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะสลายตัวเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) บางส่วนจะอยู่ในรูปผลึกอิสระและรวมตัวกับน้ำได้ช้ามากกินเวลานานปี เช่นเดียวกับปูนขาวอิสระ การรวมตัวกับน้ำจะเกิดขึ้นหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวแล้ว การมีแมกนีเซียมออกไซด์ผสมอยู่อาจทำให้เกิดความไม่คงตัวและเนื่องจากปฏิกิริยาเกิดช้ามากดังนั้นการทดสอบเพื่อหาความไม่คงตัวของแมกนีเซียมออกไซด์จะใช้วิธีออโตคลอว์ (Autoclave test) เพื่อเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้นซึ่งเป็นการวัดผลรวมของความไม่คงตัวที่เกิดจากแมกนีเซียมออกไซด์และปูนขาวอิสระ

4. ออกไซด์ของอัลคาไล (Alkali oxides) ออกไซด์ประเภทนี้ได้แก่ K_2O และ Na_2O ที่มีอยู่ในส่วนประกอบประมาณร้อยละ 0.5 ถึง 1.3 แต่มีบทบาทสำคัญในกรณีที่มีมวลรวม (Aggregate) ซึ่งได้แก่ ทรายและหินทำปฏิกิริยากับอัลคาไล มวลรวมจำพวกนี้เป็นซิลิกาที่ว่องไวและทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของอัลคาไลได้จึงเรียกปฏิกิริยานี้ว่า “ปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา (Alkali-silica reaction)” ปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดอัลคาไลซิลิกาเจล (Alkali-silica gel) ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวและอาจทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้ ในการแก้ปัญหานี้สามารถใส่ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลต่ำ (ต่ำกว่าร้อยละ 0.06 โดยคิดเป็นค่าเทียบเท่าปริมาณของ Na_2O) หรืออาจหลีกเลี่ยงการใช้มวลรวมที่มีซิลิกาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาหรือใช้สารปอซโซลานในส่วนผสมของคอนกรีต เป็นต้น

5. ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5) พบได้ในวัตถุดิบที่ใช้ทำปูนซีเมนต์ในบางแห่ง ซึ่งส่วนมากมาจากหินปูนและมักมีอยู่ไม่เกินร้อยละ 0.1 ถึง 0.2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ซึ่งสารนี้ทำให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวเนื่องจาก P_2O_5 ทำให้ไตรแคลเซียมซิลิเกตสลายตัวเป็น C_2S กับ CaO นอกจากนี้ถ้ามีปริมาณ P_2O_5 มากพออาจทำให้เกิดความไม่คงตัวได้เพราะมีปริมาณปูนขาวอิสระเพิ่มมากขึ้น

2.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Hydration of cement)

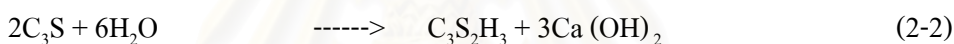
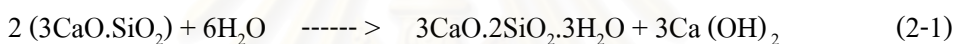
เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งทำให้เกิดความร้อน การก่อตัวและการแข็งตัวของปูนซีเมนต์โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบภายในของปูนซีเมนต์และเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ทั้งในสภาพก่อนและหลังการแข็งตัวแล้ว

โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ใน 2 ลักษณะ คืออาศัยการละลายซึ่งปูนซีเมนต์จะละลายในน้ำทำให้เกิดไอออนในสารละลาย และไอออนเหล่านี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบชนิดใหม่และมีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็งซึ่งเกิดขึ้นโดยตรงที่บริเวณผิวของแข็งและไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย จึงเรียกปฏิกิริยาประเภทนี้ว่า “Solid State Reaction” เนื่องจากปูนซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิดเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้วผลิตภัณฑ์ที่ได้ อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไปทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้แตกต่างจากที่เกิดขึ้นในครั้งแรก

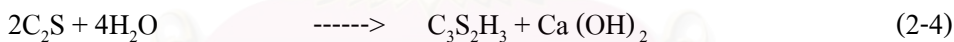
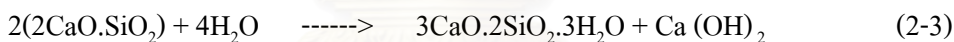
2.3.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S)

เมื่อแคลเซียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ประมาณร้อยละ 15 ถึง 25 และเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate หรือ $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ หรือ $C_3S_2H_3$ หรือ CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้ความแข็งแรงดังสมการต่อไปนี้

สมการของ C_3S



สมการของ C_2S



จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเกิดเจล (Gel) ขึ้นซึ่งเมื่อเกิดการแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุนโดยองค์ประกอบทางเคมีของ CSH จะขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์โดย $Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นต่างอย่างมากโดยมีค่า pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีผลต่อการชะละลายของโลหะหนักด้วย

2.3.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดและก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ดังสมการต่อไปนี้

สมการของ C_3A



การผลิตปูนซีเมนต์มีการเติมยิปซั่มในขั้นตอนการบดปูนเม็ดเพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A ไม่ให้เกิดเร็วเกินไปในขั้นตอนการผสมปูนซีเมนต์โดยยิปซั่มที่ใส่เข้าไปจะทำปฏิกิริยากับ C_3A ทำให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการต่อไปนี้

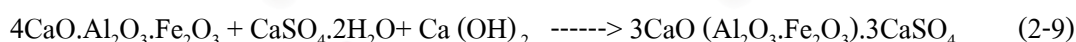


ชั้นของ Ettringite จะก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของไตรแคลเซียมอลูมิเนตและการก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซัลเฟตและไตรแคลเซียมอลูมิเนตเป็นส่วนใหญ่แต่ชั้นของ Ettringite ไม่หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กล่าวคือเมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออกและเกิดปฏิกิริยาของ C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัวจะเกิด Ettringite ตัวใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่งขั้นตอนเป็นเช่นนี้ไปจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะเกิด Ettringite ก็จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนตโดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate

2.3.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)

โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นในช่วงต้นซึ่งเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์จะเข้าทำปฏิกิริยากับยิปซั่มและ $Ca(OH)_2$ เกิดเป็น Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการต่อไปนี้

สมการของ C_4AF



2.3.4 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

ส่วนประกอบของซีเมนต์เพสต์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งผลที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาจะเคลือบอยู่บนผิวอนุภาคปูนซีเมนต์และหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งอธิบายการเกิด “Dormant Period” อันเป็นช่วงเวลาที่ซีเมนต์เพสต์ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงโดยที่ยังคงสภาพเหลวและสามารถไหลได้ในเวลา 1 ถึง 2 ชั่วโมง

เมื่อสิ้นสุดช่วง Dormant Period จะเข้าสู่จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial set) โดยที่ CSH gel จะเคลือบอยู่บนผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์และเกิดการแตกออกด้วยแรงดันออสโมติก (Osmotic) ซึ่งแรงดันนี้จะเกิดขึ้นจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอออนในสารละลายที่อยู่ระหว่าง Gel

กับอนุภาคของปูนซีเมนต์ และอออนในสารละลายที่อยู่รอบๆ CSH จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป

ปริมาตรของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีขนาดใหญ่กว่า 2 เท่าของปูนซีเมนต์ก่อนที่ทำการปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ละน้อยจนเกิดผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ทำให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาจะมากขึ้นทำให้เกิดจุดเชื่อมต่อกันมากขึ้นจนอนุภาคของปูนซีเมนต์ไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ได้และกลายเป็นของแข็งในที่สุดซึ่งถือว่าเป็นการเข้าสู่จุดแข็งตัวสุดท้าย

1. แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต มีปริมาณมากที่สุดในส่วนประกอบของซีเมนต์เพสต์จึงมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์โดยจะเกิดชั้นของ CSH ขยายออกจากเม็ดปูนเข้าสู่ช่องว่างและเกิดภายใต้ผิวเดิมของเม็ดปูนและขยายเข้าสู่ภายในเม็ดปูนเมื่อเกิดปริมาณมากและเชื่อมโยงถึงกันก็จะสามารถรับกำลังได้โดยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีอยู่ประมาณร้อยละ 50 ถึง 70 โดยปริมาตร

2. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีปริมาณร้อยละ 20 ถึง 25 โดยปริมาตร เป็นผลึกที่มีรูปร่างหลายแบบซึ่งเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นพอแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะตกผลึกซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างรวดเร็วอีกครั้งหนึ่งและหลังจากนี้จะเพิ่มจำนวนและขยายตัวเข้าสู่โพรงคาปิลารีโดยจะขยายเข้าสู่ที่ว่างเท่านั้นและจะหยุดเมื่อไม่มีช่องว่างเหลืออยู่ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารประกอบที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความคงทนลดลงเนื่องจากเป็นสารที่ละลายได้และถูกชะล้างออกมาได้ง่าย

3. แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ในซีเมนต์เพสต์มีแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตหรือเอททริงไกต์และแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตประมาณร้อยละ 10 ถึง 15 โดยเอททริงไกต์เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ มีลักษณะเป็นเข็มยาวเกิดขึ้นรอบเม็ดปูนและขยายตัวเข้าไปในช่องว่างซึ่งถ้าเกิดหลังจากซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้วจะทำให้เกิดแรงดันและทำให้ซีเมนต์เพสต์ขยายตัวและแตกร้าวได้เมื่ออออนของซัลเฟตหมดเอททริงไกต์จะทำปฏิกิริยาและเปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตที่มีลักษณะเป็นแผ่น

4. เม็ดปูนซีเมนต์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา โดยทั่วไปเม็ดปูนซีเมนต์ขนาดเล็กสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีและทำปฏิกิริยาได้จนหมดขณะที่เม็ดปูนขนาดใหญ่ต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาซึ่งผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่เกิดขึ้นจะขยายเข้าสู่ช่องว่างที่เหลืออยู่แต่เนื่องจากช่องว่างระหว่างอนุภาคมีจำกัด ดังนั้นเม็ดปูนที่ทำปฏิกิริยาไม่หมดจะยังคงมีอยู่ในซีเมนต์เพสต์

5. ความพรุนของซีเมนต์เจล (porosity) โพรงขนาดเล็กและความกว้างของโพรงจะกำหนดพฤติกรรมของน้ำที่อยู่ภายในโพรงซีเมนต์โดยทั่วไปสามารถแบ่งโพรงออกเป็น 2 ชนิดคือโพรงของเจล (gel pore) และโพรงคาปิลารี (capillary pore)

6. น้ำในซีเมนต์เพสต์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 พวก คือน้ำที่ระเหยได้ (evaporable water) เป็นน้ำส่วนที่ถูกจัดออกไปเมื่อนำซีเมนต์เพสต์ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส น้ำส่วนนี้จะรวมถึงน้ำในโพรงคาปิลารี น้ำในโพรงของเจลและน้ำบางส่วนของแคลเซียมซิลิโพลูมิเนตไฮเดรต นอกจากนี้ยังมีน้ำที่ระเหยไม่ได้ (non-evaporable water) โดยเป็นน้ำส่วนที่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์และกลายเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างของเจล และสามารถจัดออกไปเมื่อนำซีเมนต์เพสต์ไปเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส น้ำที่ระเหยไม่ได้จะเป็นสัดส่วนกับจำนวนปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาและขึ้นอยู่กับปริมาณของสารประกอบในปูนซีเมนต์

7. ความถ่วงจำเพาะของเนื้อซีเมนต์เจล น้ำที่ระเหยไม่ได้จะทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์และกลายเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างของเจลดังนั้นเนื้อซีเมนต์เจลจึงหมายถึงซีเมนต์เจลที่มีน้ำที่ระเหยไม่ได้

8. การยึดเหนี่ยวทางเคมี ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับว่าซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วมีคุณสมบัติคล้ายกับวัสดุเซรามิกซึ่งมีการยึดเหนี่ยวแบบอออนนิคโควาเลนต์ (ionic-covalent-bonding) เป็นหลักโดยการยึดเหนี่ยวแบบแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals) มีอยู่เพียงประมาณหนึ่งในสามเท่านั้น การที่กำลังดึงของซีเมนต์เพสต์มีค่าต่ำเพราะมีรอยแตกร้าวเล็ก ๆ (flaws) อยู่ทั่วไปในซีเมนต์เพสต์

2.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

เมื่อผสมน้ำกับปูนซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. อายุของซีเมนต์เพสต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดมากที่สุดในช่วงแรกยกเว้นในช่วง Dormant Period และจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งเมื่อถึงจุดๆ หนึ่งปฏิกิริยาจะสิ้นสุดโดยสมบูรณ์

2. องค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ในช่วงแรกเท่านั้นที่ขึ้นอยู่กับสารประกอบหลักแต่ละชนิด ซึ่งปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตและไตรแคลเซียมอลูมิเนตมากจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วแต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงปลายของแต่ละสารประกอบหลักจะไม่แตกต่างกันมากนัก

3. ความละเอียดของปูนซีเมนต์ เมื่อปูนซีเมนต์มีความละเอียดเพิ่มมากขึ้นทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำได้มากจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกสูงขึ้นแต่ไม่ส่งผลในช่วงปลาย

4. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ในระยะแรกอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ไม่เกิดผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาแต่ในระยะหลังถ้าส่วนผสมมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลงจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงด้วยนอกจากนี้ยังส่งผลให้ทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยเฉลี่ยและอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงอีกด้วย

5. อุณหภูมิ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์

6. สารผสมเพิ่ม ชนิดที่ผสมอยู่ในปูนซีเมนต์แบ่งเป็น 2 ประเภทได้แก่ สารหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น สารจำพวกน้ำตาล กรดและเกลือของ Lignosulphonic และสารประเภทเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)

2.3.6 ปริมาตรของผลผลิตไฮเดรชัน

ผลผลิตไฮเดรชันที่ได้ประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกต (CSH) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) และ Ettringite เป็นหลักและส่วนประกอบย่อยอื่นๆ ซึ่งจะเข้าไปแทนที่ช่องว่างที่มีอยู่โดย CSH มีปริมาณมากที่สุดในส่วนประกอบของซีเมนต์เพสต์ และเมื่อไม่มีที่ว่างเหลืออยู่แล้วการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะหยุดลง ยกเว้นการเกิด Ettringite ซึ่งถ้ามีต่อไปจะทำให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์ โดยทั่วไปในซีเมนต์เพสต์จะมีปริมาณไอออนของซัลเฟตอยู่จำนวนจำกัดจึงทำให้ Ettringite ไม่เกิดขึ้น เมื่อซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้ว ดังนั้นปริมาณของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเท่ากับปริมาตรเดิมของปูนซีเมนต์และน้ำ

2.4 น้ำในงานคอนกรีต

ในการผสมมอร์ตาร์หรือคอนกรีตต้องใช้น้ำเป็นส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และส่วนผสมอื่น ๆ หรือใช้ในการบ่มก้อนคอนกรีตเพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ในกรณีที่มีมวลรวมที่ใช้ในงานปูนซีเมนต์หรือคอนกรีตมีความสกปรกก็มีการใช้น้ำล้างมวลรวมให้มีความสะอาดเพียงพอสำหรับนำไปใช้ในงานคอนกรีต

2.4.1 น้ำสำหรับผสมปูนซีเมนต์

โดยทั่วไปน้ำที่ใช้ในงานคอนกรีตควรเป็นน้ำจืดที่สะอาด หรือควรมีการทดสอบก่อนการนำมาใช้งาน ซึ่งน้ำที่มีสารแปลกปลอมเจือปนอยู่มากเกินไป อาจก่อให้เกิดปัญหาด้านระยะเวลาในการก่อตัว การหดตัวของคอนกรีต การมีรอยคราบเกลือ (Efflorescence) ที่ผิวของคอนกรีต กำล้างที่ลดต่ำลงตลอดจนความคงทนของงานคอนกรีต สิ่งแปลกปลอมเหล่านี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. สารแขวนลอย (Suspended Solids, SS) น้ำที่ใช้ในงานคอนกรีตไม่ควรมีความขุ่นที่เกิดจากสารแขวนลอยจำพวกดินตะกอนและดินเหนียวเกิน 2,000 ส่วนในล้านส่วนหรือคิดเป็นร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักน้ำ ในกรณีที่น้ำมีความขุ่นมากควรทิ้งให้ตกตะกอนก่อนนำมาใช้งาน แต่ถ้าหากมีสารแขวนลอยที่เป็นพืช เช่น สาหร่าย (algae) มักจะไม่ตกตะกอนและเมื่อนำมาใช้ผสมในคอนกรีตจะทำให้ปริมาณอากาศในซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นเป็นผลให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้

2. สารละลายอินทรีย์ น้ำที่มีสารละลายอินทรีย์ปนอยู่เล็กน้อย สามารถนำมาผสมคอนกรีตได้ยกเว้นสารละลายบางชนิด เช่น โซเดียมซัลไฟด์หากมีปริมาณถึง 100 ส่วนในล้านส่วนก็สามารถทำให้เกิดปัญหาต่อคอนกรีตได้ เกลือบางชนิดสามารถใช้เป็นสารผสมเพิ่มได้ดี เช่น เกลือแคลเซียมคลอไรด์ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต เกลือคาร์บอเนตและโบคาร์บอเนตจะทำให้ปูนซีเมนต์ก่อตัวเร็ว เกลือซัลเฟตจะเพิ่มกำลังให้คอนกรีตในระยะแรก สารละลายของเกลืออินทรีย์บางชนิด อาจทำให้การก่อตัวและการแข็งตัวของคอนกรีตช้าลงได้ เช่น แมงกานีสทองแดง สารละลายเกลือของสังกะสี ตะกั่ว ดีบุก สารละลายของฟอสเฟต สารละลายของอาร์ซีเนตและโบเรต เป็นต้น ซึ่งยอมให้มีได้ไม่เกิน 500 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งน้ำที่มีความเข้มข้นของสารละลายจำพวกนี้โดยส่วนมากเป็นน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือน้ำที่มาจากการทำเหมืองแร่ น้ำที่มีความเป็นกรดสามารถนำมาใช้ผสมคอนกรีตได้ แต่เมื่อระดับความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 3 ต้องเพิ่มความระมัดระวังในการใช้งาน น้ำที่มีความเป็นด่างของสารจำพวกโซเดียมและ โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์อาจเกิดปัญหาในการก่อตัวอย่างรวดเร็ว และทำให้กำลังรับแรงลดลงเร็วในภายหลัง สารอัลคาไลไฮดรอกไซด์จะทำให้ปฏิกิริยากับยิปซัม และทำให้ความสามารถในการหน่วงปฏิกิริยาของยิปซัมลดลง น้ำทะเลจะมีสารละลายอินทรีย์จำพวกเกลือประมาณร้อยละ 3.5 โดยมีปริมาณโซเดียมคลอไรด์คิดเป็นร้อยละ 2.7 นอกนั้นเป็นเกลือคลอไรด์และซัลเฟตอื่นๆ การใช้น้ำทะเลผสมคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีกำลังระยะต้นสูงขึ้นแต่กำลังที่อายุ 28 วัน เป็นต้นไปจะมีกำลังต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดผสม โดยทั่วไปกำลังอัดจะต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดประมาณไม่เกินร้อยละ 15 นอกจากนี้ไม่ควรใช้น้ำทะเลผสมในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก เพราะเกลือคลอไรด์ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ง่ายและการใช้น้ำทะเลผสมในงานคอนกรีตยังทำให้เกิดรอยคราบเกลือที่ผิวหน้าของคอนกรีตได้

3. สารละลายอินทรีย์ โดยส่วนใหญ่สารละลายอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำตามธรรมชาตินั้นเป็นกรดแทนนิก (Tannic acid) และกรดฮิวมิก (Humic acid) ทำให้น้ำมีสีเข้มขึ้นเมื่อนำน้ำที่มีส่วนผสมของสารละลายอินทรีย์ไปผสมในงานซีเมนต์หรือใช้ในการผสมคอนกรีตจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำช้าลงได้ ซึ่งสามารถส่งผลต่อการรับแรงของผลิตภัณฑ์จากปูนซีเมนต์ได้

2.4.2 น้ำสำหรับบ่มมอร์ตาร์

ในทางปฏิบัติการเลือกน้ำในการบ่มมอร์ตาร์จะใช้น้ำที่สะอาดและมีคุณภาพเดียวกันกับน้ำที่ใช้ในการผสมปูนซีเมนต์ด้วย และไม่ควรมีสารที่ทำลายคอนกรีตผสมอยู่ในน้ำนั้น เช่น สารซัลเฟตและพวกกรดต่างๆ และการใช้น้ำทะเลบ่มคอนกรีตอาจทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ สำหรับน้ำที่มีสนิมเหล็ก ดินตะกอน หรือเกลือผสมอยู่จะทำให้ผิวของคอนกรีตสกปรกและทาสีทับได้ยาก

2.4.3 น้ำสำหรับล้างมวลรวม

สำหรับการล้างมวลรวมควรใช้น้ำที่ไม่มีสิ่งแปลกปลอมเจือปนอยู่ เช่น ดินตะกอน สารอินทรีย์ และเกลือต่างๆ หากน้ำที่ใช้ในการล้างมวลรวมปนเปื้อนเมื่อนำน้ำมาล้างจะจับอยู่ที่ผิวของมวลรวม และอาจมีผลต่อการยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เฟส หรือมีผลต่อการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำส่งผลให้คุณภาพของคอนกรีตด้อยลงได้

2.5 สารผสมเพิ่มหรือน้ำยาผสมคอนกรีต

สารผสมเพิ่มมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีตสดหรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ ซึ่งสามารถจำแนกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ดังนี้

2.5.1 สารเคมีผสมเพิ่ม

สารเคมีประเภทนี้ใช้เติมในส่วนผสมของคอนกรีตก่อนผสมหรือขณะผสม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต เช่น เพื่อลดปริมาณน้ำในงานคอนกรีต เร่งหรือหน่วงการก่อตัวและการแข็งตัวของคอนกรีต หรือเพื่อปรับปรุงความสามารถในการใช้งานคอนกรีตสด

2.5.2 แร่ผสมเพิ่ม

ลักษณะของแร่ผสมเพิ่มจะเป็นผงละเอียดที่เติมลงไปในส่วนผสมของคอนกรีต หรือมอร์ตาร์ เพื่อช่วยปรับปรุงความสามารถในการใช้งาน เช่น การเพิ่มกำลัง ความคงทน ทำให้คอนกรีตสดมีคุณสมบัติในการยึดเกาะตัวดีขึ้น และยังสามารถใช้ทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์ได้บางส่วน เป็นต้น

2.5.3 สารผสมเพิ่มชนิดอื่น ๆ

สารเคมีชนิดที่มีการผลิตขึ้นเพื่อใช้งานคอนกรีตเฉพาะด้านเท่านั้น เช่น การผสมในงานคอนกรีตที่ต้องการคุณสมบัติที่พิเศษกว่าแบบธรรมดา

2.6 กากของเสียอุตสาหกรรม (Industrial waste)

ในปัจจุบันมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณกากของเสียอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก โดยส่วนใหญ่เป็นกากของเสียอันตรายซึ่งต้องมีการกำจัดอย่างถูกต้อง จากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ.2548 ได้กำหนดนิยามและแนวทางในการจำแนกประเภทของเสียและของเสียอันตราย รวมทั้งได้กำหนดวิธีการจัดการของเสียไว้ดังนี้

“สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว” หมายความว่า สิ่งของที่ไม่ใช้แล้ว หรือของเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการประกอบกิจการ โรงงาน รวมถึงของเสียจากวัตถุดิบ ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ของเสียที่เป็นผลิตภัณฑ์เสื่อมคุณภาพ และน้ำทิ้งที่มีองค์ประกอบหรือมีคุณลักษณะที่เป็นอันตราย

“ของเสียอันตราย” หมายความว่า สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีองค์ประกอบ หรือปนเปื้อนสารอันตราย หรือมีคุณสมบัติที่เป็นอันตราย

“การจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุไม่ใช่แล้ว” หมายความว่า การบำบัด ทำลายฤทธิ์ ทั้ง กำจัด จำหน่ายจ่ายแจก แลกเปลี่ยน หรือนำกลับไปใช้ประโยชน์ใหม่ในรูปแบบต่างๆ รวมถึงการกักเก็บไว้เพื่อทำการดังกล่าว

2.6.1 กากของเสียที่ไม่อันตราย (Non Hazardous waste)

กากของเสียที่ไม่อันตราย หมายถึง สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วหรือกากของเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการประกอบกิจกรรม รวมถึงของเสียจากวัตถุดิบและกากของเสียที่ไม่ใช่แล้ว แต่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของบุคคล สิ่งแวดล้อมและทรัพย์สิน ได้แก่ สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากสำนักงาน บ้านพักอาศัยและโรงอาหารในบริเวณโรงงาน (ได้รับการยกเว้น) หรือเมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) มีองค์ประกอบของสารในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (mg/L) น้อยกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) ที่ได้มีการกำหนดไว้

2.6.2 ลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่เป็นของเสียอันตราย

สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ.2548 มีข้อกำหนดในการระบุกากของเสียอันตรายไว้ดังนี้

1. สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารไวไฟ (Ignitable substances)

1.1 ประเภทของเหลวมีจุดวาบไฟ (Flash point) ต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียสแต่ไม่รวมถึงสารละลายที่มีแอลกอฮอล์ผสมอยู่น้อยกว่าร้อยละ 24 โดยปริมาตร

1.2 เป็นสารที่ไม่ใช่ของเหลวแต่สามารถลุกเป็นไฟได้เมื่อมีการเสียดสีหรือมีการดูดความชื้น หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นเองภายในสารนั้น จนเมื่อลุกเป็นไฟจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและต่อเนื่อง ก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรงได้ภายใต้อุณหภูมิและความดันปกติ

1.3 ก๊าซอัดที่จุดระเบิดได้ (Ignitable compressed gas) ก๊าซอัดนี้ให้หมายถึงวัสดุหรือของผสมใด ๆ ที่บรรจุอยู่ในถังที่มีความดันสมบูรณ์ (Absolute pressure) มากกว่า 2.81 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส หรือมีความดันสมบูรณ์มากกว่า 7.31 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส

1.4 สารออกซิไดเซอร์ (Oxidizer) ที่สามารถกระตุ้นให้เกิดการเผาไหม้ของสารอินทรีย์ขึ้นได้ ได้แก่ สารประกอบจำพวก Chlorate permanganate inorganic peroxide และ nitrate

2. สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทที่เป็นสารกัดกร่อน (Corrosive substances)

1.1 สารละลาย (Aqueous solution) มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า และค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 12.5 หรือสูงกว่า

1.2 ของเหลวที่กัดกร่อนเหล็กกล้าชั้น SAE 1020 ได้ในอัตราที่สูงกว่า 6.35 มิลลิเมตร ต่อปี ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส

3. สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (Reactive substances)

1.1 สารที่มีสภาพไม่คงตัว สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและรุนแรงโดยไม่มีภาวะระเบิดเกิดขึ้น

1.2 สารที่ทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับน้ำ หรือสารซึ่งเมื่อรวมกับน้ำจะได้ออกผสมที่จะระเบิดได้ และสารซึ่งเมื่อผสมกับน้ำ จะทำให้เกิดก๊าซพิษ ไอพิษ หรือควันพิษขึ้นในปริมาณที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพบุคคลและสิ่งแวดล้อมได้

1.3 เป็นสารที่มีองค์ประกอบของไซยาไนด์หรือซัลไฟด์ เมื่อต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีความเป็นกรดค่าระหว่าง 2 ถึง 11.5 แล้วสามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาระเบิดรุนแรงได้

1.4 เป็นสารที่เมื่อถูกทำให้ร้อนในที่จำกัดจะก่อให้เกิดปฏิกิริยารุนแรงได้

1.5 เป็นสารซึ่งสามารถระเบิดได้ทันที หรือเกิดปฏิกิริยาระเบิดได้ ในสภาวะอุณหภูมิและความดันมาตรฐานจะมีปฏิกิริยารุนแรง

4. สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารพิษ (Toxic substance)

1.1 สารที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพหรือสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นสารก่อมะเร็ง สารพิษแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง หรือสารที่มีคุณสมบัติสะสมในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตหรือตกค้างยาวนานในสิ่งแวดล้อม

1.2 เป็นสารที่มีค่า Acute oral LD₅₀ น้อยกว่า 250 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวหนึ่งกิโลกรัมเมื่อใช้หนู (Rat) เป็นสัตว์ทดลอง หรือมีค่า Acute inhalation LC₅₀ น้อยกว่า 10,000 ส่วนในล้านส่วน ในสภาพของไอหรือก๊าซ หรือเมื่อใช้กระด่ำยเป็นสัตว์ทดลอง มีค่า Acute dermal LD₅₀ น้อยกว่า 4,300 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวหนึ่งกิโลกรัม

1.3 เป็นสารที่มีค่า Acute aquatic 96-hour LC₅₀ น้อยกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อวัดในน้ำอ่อน (ความกระด้างทั้งหมดเท่ากับ 40-48 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต)

1.4 สารที่มีองค์ประกอบของสารที่ระบุไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 ในปริมาณความเข้มข้นของสารใดสารหนึ่งหรือปริมาณรวมของสารทั้งหมด มากกว่าหรือเท่ากับ 0.001% โดยน้ำหนัก

5. สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่มีองค์ประกอบของสิ่งเจือปน

1.1 เมื่อนำสิ่งปฏิภูลมาหาค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสิ่งเจือปน พบว่ามีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตราย ในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อหนึ่งกิโลกรัมของ

สิ่งปนเปื้อนหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว (mg/kg ; wet weight) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC)

1.2 ในกรณีนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) และวิเคราะห์น้ำสกัดแล้ว มีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์อันตราย ในหน่วยมิลลิกรัมสารต่อลิตรของน้ำ สกัด (mg/L) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC)

2.7 การจัดการกากของเสียอุตสาหกรรม

ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีเข้ามาใช้ในอุตสาหกรรม เพื่อช่วยลดการเกิดของเสียในกระบวนการผลิตหรือในขั้นตอนต่างๆ ของแต่ละอุตสาหกรรมซึ่งเป็นการควบคุมปริมาณของเสียได้ นอกจากการใช้หลักการในการควบคุมการกำเนิดกากของเสียอุตสาหกรรมแล้ว หากจำเป็นต้องมีการกำจัดของเสียจากกระบวนการผลิต ทั้งที่เป็นกากของเสียอุตสาหกรรมที่อันตราย หรือกากของเสียอุตสาหกรรมทั่วไป ควรมีการเลือกแนวทางในการกำจัดในแต่ละประเภทให้เหมาะสม โดยกระบวนการที่ใช้ในการบำบัดกากของเสียอุตสาหกรรมแบ่งเป็น 3 ประเภทดังนี้

2.7.1 การปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็ง (Stabilization and Solidification)

ส่วนใหญ่ใช้ในการกำจัดกากของเสียอุตสาหกรรมหรือ เพื่อปรับสภาพกากของเสียก่อนนำไปฝังกลบโดยมีการเติมสารเคมีลงไปของเสียนั้น เพื่อลดความเป็นพิษของสิ่งปนเปื้อนไม่ให้ออกสู่สิ่งแวดล้อม และลดความสามารถในการละลายของสารปนเปื้อนไม่ให้ออกไปปนเปื้อนยังแหล่งอื่นๆ กากอุตสาหกรรมจะถูกเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพโดยการปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็ง ซึ่งต้องได้รับการทดสอบเพื่อให้แน่ใจและมั่นใจได้ว่าจะไม่มีการรั่วไหลของสารปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม เช่นการทดสอบการรับแรงอัด การทดสอบความคงทน การทดสอบ Freeze and thaw และ wet and dry ซึ่งเกิดจากปริมาณน้ำส่วนเกินที่มีอยู่ในก้อนแข็งเนื่องจากหลังจากการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งแล้วต้องนำไปฝังกลบ

2.7.2 การบำบัดและกำจัดด้วยความร้อน (Thermal)

ในประเทศไทยการบำบัดและกำจัดด้วยความร้อนนั้นส่วนใหญ่ คือ การเผาไหม้ (Combustion or Incineration) ซึ่งจะทำให้กากอุตสาหกรรมกลายเป็นขี้เถ้า ไอเสีย ควัน หรือเศษที่ไม่ไหม้ไฟ โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้กากอุตสาหกรรม คือ 600 ถึง 1,200 องศาเซลเซียส ซึ่งการเผาไหม้ที่ดีและเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ต้องมีออกซิเจนที่เพียงพอและอย่างทั่วถึงภายในเตาเผา เพื่อให้กากของเสียสัมผัสกับความร้อนได้อย่างทั่วถึง

2.7.3 การฝังกลบกากของเสียอุตสาหกรรม

การฝังกลบจะเป็นวิธีการสุดท้าย หลังจากมีการกำจัดกากของเสียอุตสาหกรรมด้วยการเผาไหม้หรือการปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็งแล้ว ซึ่งต้องดำเนินการตามหลักวิชาการที่

เหมาะสมและสามารถยืนยันความปลอดภัย รวมถึงมีขั้นตอนการป้องกันความเป็นพิษของกากของเสียอุตสาหกรรมที่อาจมีการรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงควรพิจารณาในการเลือกพื้นที่ และการเตรียมความพร้อมก่อนการดำเนินการฝังกลบกากของเสีย รวมถึงการปฏิบัติดูแลหลังการฝังกลบอย่างต่อเนื่อง และมีการเตรียมพร้อมเพื่อรับสถานการณ์ฉุกเฉินหลังจากการปิดหลุมฝังกลบ แต่ในปัจจุบันเกิดปัญหาการขาดแคลนพื้นที่ หรือหากมีการเลือกพื้นที่ในการฝังกลบพื้นที่บริเวณนั้น และพื้นที่ใกล้เคียงก็จะสูญเสียมูลค่าไปในที่สุด ดังนั้นจึงต้องมีการพิจารณาเพื่อหาทางเลือกอื่น ในการกำจัดกากของเสียอุตสาหกรรมเหล่านี้

2.8 การใช้กากของเสียอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ (Co-processing)

ในปัจจุบันมีการใช้เชื้อเพลิงเพื่อเป็นแหล่งพลังงานในด้านต่างๆ เป็นจำนวนมาก ซึ่งต่อมาได้มีการพิจารณาใช้เชื้อเพลิงทดแทนในอุตสาหกรรม เช่น เชื้อเพลิงชีวมวล กากของเสียอุตสาหกรรม เป็นต้น ซึ่งของเสียหรือวัสดุไม่ใช่แล้วหลายชนิด ได้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทน (Alternative fuels and raw materials, AFR) ทั้งที่เป็นกากของเสียอันตรายและกากของเสียที่ไม่อันตราย มาใช้ในกระบวนการเผาพร้อมกับปูนซีเมนต์ ซึ่งมีการนำมาใช้ในหลายประเทศ เช่น ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา และออสเตรเลีย ตั้งแต่ปี 2513 เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน ค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตหรือเพื่อการทำเสถียร โลหะหนักหรือสารมลพิษของกากของเสียให้อยู่ใน ส่วนผสมของปูนซีเมนต์

ในการใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน จะต้องคำนึงถึงการจัดลำดับขั้นตอนการจัดการกากของเสีย (Waste hierarchy) โดยควรบูรณาการเข้ากับการจัดการของเสีย ซึ่งจะต้องสนับสนุนต่อกลยุทธ์การใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและจะต้องไม่มีผลกระทบต่อความปลอดภัยออกจากเตาเผาและกระบวนการเผาพร้อมต้องไม่ทำให้คุณภาพของปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ลดต่ำลง

นอกจากนี้ของเสียบางชนิดยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในกระบวนการเผาพร้อมกับปูนซีเมนต์ เช่น กากของเสียจากโรงพยาบาล ของเสียที่อาจทำให้เกิดการระเบิดหรือเป็นสารกัมมันตภาพรังสี และของเสียที่ไม่ผ่านการคัดแยก ซึ่งกากของเสียเหล่านี้หากมีการนำมาใช้ในกระบวนการ Co-processing อาจก่อให้เกิดปัญหากับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์หรือผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ ซึ่งกากของเสียชนิดต่างๆ จำเป็นต้องผ่านขั้นตอนการเตรียมการขั้นต้นก่อนนำไปใช้ ทั้งนี้การนำวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนมาใช้งาน ต้องมีการดูแลเอาใจใส่ในระบบการควบคุมและการจัดการของโรงงานอย่างมีประสิทธิภาพ ตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมกากของเสียขั้นต้นไปจนถึงขั้นตอนการป้อนวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนเข้าสู่เตาเผา โดยเกณฑ์ที่กำหนดขึ้น ต้องได้รับการเห็นชอบและผ่านการรับรองจากหน่วยงานของภาครัฐที่เกี่ยวข้อง

2.9 กากตะกอนน้ำเสียจากการชุบผิวโลหะ

ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์มีการชุบเหล็กและเหล็กกล้าด้วยสังกะสี เพื่อความทนทานและความสวยงามของชิ้นงาน ในกระบวนการชุบนี้จะเกิดน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงและเหลือกากตะกอนจากการอัดตะกอนซึ่งต้องนำไปกำจัดทิ้ง ในการกำจัดกากตะกอนโดยทั่วไปเป็นการนำมาผ่านการทำเสถียรและการหล่อก้อนแข็งก่อนการนำไปฝังกลบ นอกจากนี้ยังมีการนำไปเผาทิ้งร่วมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์อีกด้วย ซึ่งกากตะกอนจากการชุบสังกะสีจะมีลักษณะเป็นก้อนสีเหลือง มีความชื้นสูง และมีสารประกอบส่วนใหญ่เป็นสังกะสีรวมถึงโลหะหนักชนิดอื่นด้วยเช่น ทองแดง โครเมียม แมงกานีส และนิกเกิล ในปริมาณสูง ซึ่งกากตะกอนชุบสังกะสีที่นำมาศึกษาในงานวิจัยเพื่อทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งนี้ ทำการเก็บตัวอย่างจากขั้นตอนการบีบอัดกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย

2.9.1 การชุบสังกะสี (Zinc Plating)

สังกะสีเป็นโลหะที่ใช้ในการเคลือบผิววัสดุและอุปกรณ์หลายชนิด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการป้องกันการผุกร่อน โดยการเคลือบผิวด้วยสังกะสีจะติดอยู่แนบสนิทจริงถึงแม้ว่าชั้นของการเคลือบจะมีการบุบสลายบ้างแต่ยังคงป้องกันการผุกร่อนได้

โดยทั่วไปแล้วการป้องกันการผุกร่อนในผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมมักจะทำโดยการเคลือบคลุมผิวของโลหะเป็นชั้น ๆ ด้วยวัสดุอย่างใดอย่างหนึ่ง การเคลือบผิวโลหะ เช่น การเคลือบเหล็กกล้าหรือเหล็กกล้าด้วยสังกะสีทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ เช่น ขนาดและรูปร่างของวัสดุที่จะทำการเคลือบ ซึ่งสามารถแบ่งการเคลือบผิวโลหะด้วยสังกะสีได้ดังนี้

1.1 Hot Dip Galvanizing วิธีการนี้ทำได้โดยการจุ่มแผ่นเหล็กที่ล้างสะอาดแล้วลงในสังกะสีที่ร้อนจัดมีลักษณะหลอมเหลว ในขณะที่แผ่นเหล็กจุ่มอยู่นั้นจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้สังกะสีที่อยู่ด้านล่างเข้าไปเกาะจับกับเหล็กจนเกิดเป็นการเคลือบผิวขึ้น

1.2 การเคลือบผิวโลหะ โดยการพ่นสังกะสีออกมาจากหัวพ่นชนิดพิเศษ (Zinc Spraying) ในลักษณะร้อนจนหลอมเหลว หรือลักษณะเป็นฝอยละเอียด สังกะสีที่ใช้ อาจจะเป็นชนิดผงหรือเส้นลวดก็ได้

1.3 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (Zinc Plating หรือ Electro galvanizing) กรรมวิธีนี้ทำได้โดยการจุ่มชิ้นเหล็กที่ต้องการเคลือบผิวลงไป ในน้ำยาสารละลายสังกะสี แล้วผ่านกระแสไฟฟ้า

1.4 การเคลือบแบบเชอราไดซิง (Sherardizing) เป็นการทาผิวหน้าของเหล็กด้วยสีซึ่งผสมสังกะสีในอัตราส่วนที่เหมาะสม

1.5 การเคลือบผิวแบบวิธีทาด้วยสีผสมผงสังกะสี (Zinc Dust Paints) วิธีนี้ทำได้โดยการทาผิวหน้าของเหล็กด้วยสี ซึ่งผสมสังกะสีในอัตราอันเหมาะสมเพียงพอที่จะทำให้ผิวของเหล็กยังคงเป็นสื่อไฟฟ้าได้ดีเช่นเดิม

นอกจากนี้ยังมีการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้า (Zinc Plating or Electro-Galvanizing) เป็นวิธีการที่นิยมมาก เนื่องจากผิวของชิ้นงานจากการชุบมีลักษณะเรียบทั้งการชุบชนิดด้านและการชุบชนิดเงา นอกจากนี้ยังสามารถวัดความหนาของการชุบได้อย่างชัดเจน รวมทั้งยังสามารถชุบแผ่นเหล็กที่เป็นม้วนยาว ๆ หรือแบบที่เป็นเส้นลวดได้

2.9.2 ลำดับขั้นตอนในการชุบสังกะสี

การชุบผิวหรือการเคลือบผิววัสดุ ต้องมีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนการชุบเพื่อประสิทธิภาพและความคงทนของชิ้นงานหลังจากทำการชุบแล้ว

การชุบสังกะสีโดยทั่วไปจะเลือกใช้สังกะสีบริสุทธิ์เป็นขั้วแอโนด ซึ่งความเข้มข้นของน้ำยาชุบอาจเปลี่ยนแปลงได้ ทั้งนี้สาเหตุเนื่องมาจากประสิทธิภาพของการชุบสังกะสีบริสุทธิ์ที่ใช้เป็นขั้วแอโนดอาจจะละลายออกมาอย่างรวดเร็วและมากเกินไป

1.1 การทำความสะอาด (Cleaning) เป็นขั้นตอนเริ่มต้นที่สำคัญมาก ในขั้นตอนการชุบโลหะซึ่งโดยธรรมชาติแล้วสังกะสีจะเกาะติดแน่นกับผิวของโลหะ หากชิ้นงานมีความสกปรกเกาะติดอยู่ก่อนทำการชุบจะทำให้สังกะสีเกาะติดได้ไม่แน่นสนิท ซึ่งสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนในการทำความสะอาดได้ดังนี้

1. การล้างไขมัน (Degreasing) โดยการใช้ น้ำมันที่มีคุณสมบัติละลายไขมันได้ เช่น น้ำมันไตรโคโรเททิลีนทำได้โดยการจุ่มชิ้นงานลงในน้ำต่างชนิดร้อนหรือจุ่มลงในน้ำต่างชนิดเย็น และใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อทำให้ไขมันหลุดออกจากผิวของชิ้นงาน

2. การล้างด้วยน้ำสะอาด (Rinsing) เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกต่างๆ ที่พื้นผิวของชิ้นงาน เนื่องจากถ้าชิ้นงานมีความสกปรกจะทำให้การชุบผิวชิ้นงานไม่เรียบหรือเกาะติดได้ไม่สม่ำเสมอ

3. การจุ่มน้ำกรดกำจัดสนิม (Pickling) เป็นขั้นตอนการกำจัดสนิมหรือเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออกจากบริเวณผิวของชิ้นงานหรือกำจัดออกไซด์ต่างๆที่เกาะติดอยู่ให้หลุดออกเพื่อเตรียมชิ้นงานก่อนชุบสังกะสีที่ผิวของชิ้นงาน

4. การล้างด้วยน้ำสะอาดอีกครั้งก่อนการชุบผิว (Thorough Rinsing) เป็นการทำความสะอาดผิวของชิ้นงานเป็นครั้งสุดท้าย หลังจากกำจัดสิ่งสกปรกออกแล้วต้องล้างด้วยน้ำสะอาดอีกครั้ง เพื่อให้ผิวของชิ้นงานเกิดความเงางามและไม่สกปรก

1.2 การชุบ (Plating) หลังจากผ่านขั้นตอนการทำความสะอาดตามลำดับขั้นตอนต่าง ๆ แล้วให้นำชิ้นส่วนลงชุบในถังทันที ทั้งนี้เพื่อป้องกันความสกปรกที่ผิวหน้าของชิ้นงาน โดยทั่วไปในการชุบสังกะสีจะเลือกใช้สังกะสีบริสุทธิ์เป็นขั้วแอโนด ซึ่งสามารถเกิดการละลายได้ ขณะที่ความเข้มข้นของน้ำยาชุบอาจเปลี่ยนแปลงไป

1.3 การตกแต่งขั้นสุดท้าย (Post Treatment) ชิ้นงานต่างๆ หลังจากผ่านการชุบสังกะสีแล้วอาจต้องจุ่มน้ำยาเคมีบางชนิดอีกครั้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ชิ้นงานที่ผ่านการชุบแล้วมีความเงางาม เพิ่มความต้านทานการผุกร่อนหรือการเพิ่มสีให้กับชิ้นงาน เป็นต้น

1.4 การอบแห้ง (Drying) หลังจากทำการชุบเสร็จแล้วและทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดครั้งสุดท้ายต้องทำให้ชิ้นงานแห้งโดยเร็ว เพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นงานเกิดรอยด่างสกปรก ในกรณีที่ชุบครั้งละมาก ๆ จะใช้การเป่าด้วยลมอุ่น ๆ หรืออาจใช้ลมธรรมชาติในกรณีที่มีน้อยชิ้น

2.9.3 การบำบัดน้ำเสียจากการชุบสังกะสี

น้ำเสียจากกระบวนการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการล้างและการทำความสะอาดชิ้นงาน ทำให้สารเคมีที่ติดมากับชิ้นงานเกิดการปนเปื้อนและผสมรวมอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งในขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียต้องมีการแยกน้ำจากแต่ละกระบวนการก่อนจะนำมาบำบัดรวมกันในถังผสมหลังจากผ่านกระบวนการบำบัดแล้วจะได้ส่วนที่เป็นน้ำทิ้งสามารถนำมาใช้ในกระบวนการชุบได้อีกครั้ง และส่วนที่เหลือเป็นกากตะกอนที่เหลือจากขั้นตอนการอัดกากตะกอน โดยสามารถแยกเป็นขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียได้ดังนี้

1.1 บ่อพักน้ำเสีย การทำงานของบ่อพักน้ำเสียที่มีโซยาไนต์จะมีการรวบรวมน้ำเสียและการทำปฏิกิริยาที่ค่าความเป็นกรดค่า (pH) ระหว่าง 8.0 ถึง 10.5 โดยสารเคมีที่ใช้ปรับค่าพีเอช คือ โซดาไฟ (NaOH 10 %) และกรดซัลฟูริก (H₂SO₄ 10 %) และให้ได้ค่า ORP เท่ากับ 300 mV ขึ้นไป หลังจากนั้นจะสูบน้ำเข้าถังเป็นกลาง (Neutralization Tank)

1.2 ถังปฏิกิริยาของน้ำเสียที่มีโครเมียม (Chromium Reaction Tank) โดยมีค่าพีเอชอยู่ประมาณ 3 หลังจากนั้นน้ำเสียจะถูกสูบเข้าสู่ถังผสม (Mixing Tank) ซึ่งน้ำเสียในถังผสมจะไหลมารวมกันประกอบด้วยน้ำที่มาจากถังเก็บน้ำเสียกรดค่าและน้ำจากถังปฏิกิริยาโครเมียม ภายในถังมีไบพัดกวนตลอดเวลาและเติมแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂ 10%) เพื่อช่วยในการผสมน้ำเสีย หลังจากการผสมแล้วจะใช้ระบบน้ำไหลล้น (Overflow) โดยน้ำจะไหลออกไปรวมกันที่ถังเป็นกลาง (Neutralization Tank)

1.3 ถังเป็นกลาง ในส่วนที่เป็นถังเป็นกลางนี้จะมีการปรับค่าพีเอชให้อยู่ระหว่าง 9.5 ถึง 11.0 ก่อนที่น้ำเสียจะไหลไปที่บ่อบำบัดและน้ำเสียจะถูกสูบต่อไปยังถังกลั่น

1.4 ถังกลั่น การทำงานของถังกลั่น (Condensation Tank) มีการกวนด้วยไบพัดและมีการเติมสารเคมีชนิดพิเศษที่เรียกว่า คอสฟล็อก (crossfloc 0.1%) เพื่อให้สิ่งสกปรกแยกตัวออกจากน้ำเสียและรวมตัวกัน หลังจากนั้นจะไหลต่อไปยังถังน้ำใสหรือถังตกตะกอน (Precipitation Tank) ต่อไป

1.5 กากตะกอน ในส่วนกากตะกอนที่ตกอยู่บริเวณก้นถังจะมีตัวเก็บกักไม่ให้ตะกอนไหลขึ้นมาด้านบนและถูกส่งเข้าถังเก็บสลัดจ์ (Sludge Tank) ในกรณีที่น้ำเสียนี้น้ำเสียมีมากจนเกินไป น้ำ

เสียส่วนที่เกินนี้สามารถไหลล้นไปสู่ถังระบายได้ (Drain Tank) ส่วนตะกอนจะมีการรวบรวมเพื่อ
 รองส่งเข้าเครื่องกรองแบบอัด (Filter Press) ต่อไป ซึ่งกากตะกอนจะถูกบีบอัดทำให้น้ำใสไหลลงสู่
 กระบะด้านล่างของเครื่องและไหลต่อไปยังถังระบาย ส่วนที่ติดค้างอยู่ที่เครื่องกรองจะมีการเก็บ
 รวบรวมเพื่อนำไปกำจัดต่อไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำกากตะกอนจากระบบบำบัดมาทำเสถียรและทำ
 ก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และศึกษาถึงการชะละลายด้วยฝนกรดสังเคราะห์และน้ำ
 ปราศจากอ็อกซิเจน เพื่อศึกษาถึงกลไกในการชะละลายของโลหะหนัก

1.6 น้ำใสส่วนบน น้ำใสส่วนบนจะไหลไปยังถังปฏิกิริยา (Reaction Tank) ซึ่งภายในถัง
 ปฏิกิริยาจะมีการปรับพีเอชประมาณ 8.5 โดยใช้ไบพัดควนตลอดเวลาเพื่อเร่งปฏิกิริยา ส่วนที่ไหล
 ล้นจากถังจะไหลเข้าเครื่องกรองต่อไป หลังจากนั้นจะไหลผ่านไส้กรองที่ถูกเคลือบด้วยตัวกรอง
 เพื่อจับสิ่งสกปรกและน้ำใสจะไหลผ่านไปถังเป็นกลางสุดท้าย (Final neutralization Tank) ต่อไป

1.7 ถังเป็นกลางสุดท้าย ภายในถังเป็นกลางสุดท้ายจะมีการปรับค่าพีเอชให้อยู่ระหว่าง 6
 ถึง 8 และมีการกวนด้วยไบพัด ก่อนที่น้ำจะไหลต่อเข้าสู่ถังน้ำสะอาดเพื่อนำไปใช้ในงานอื่นต่อไป
 หรือทำการบำบัดเพิ่มเติมให้มีความสะอาดมากยิ่งขึ้น

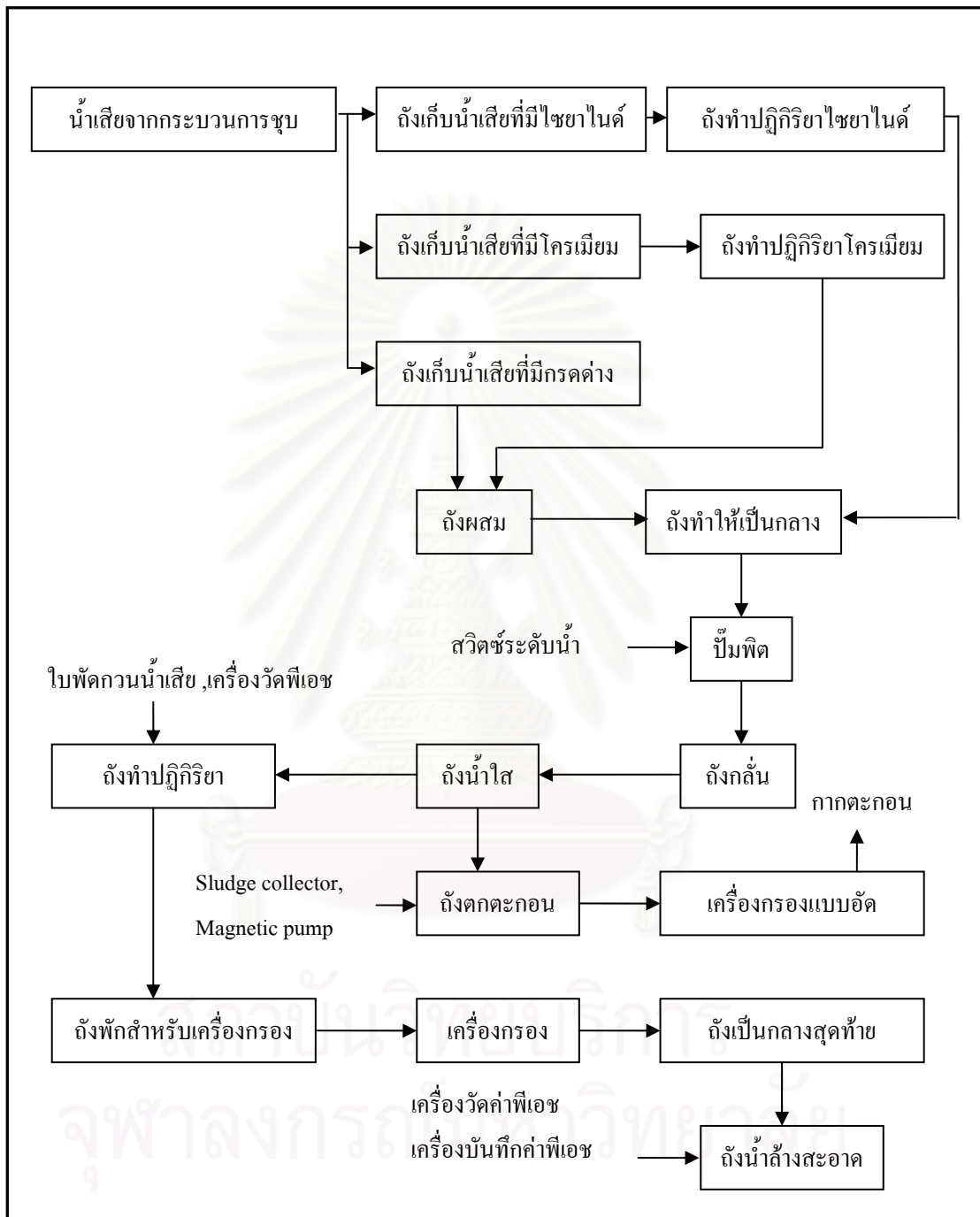
กากตะกอนที่ได้จากระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชนสังกะสีนี้ จะมีปริมาณของโลหะหนัก
 สูง เช่น สังกะสี นิกเกิล และ โครเมียม ซึ่งต้องมีการกำจัดอย่างถูกต้องเพื่อลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม
 ในงานวิจัยนี้ได้นำกากของเสียมาบำบัดด้วยการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งโดยใช้ปูนซีเมนต์เป็น
 วัสดุประสานและทดสอบการชะละลายของตัวอย่างก้อนแข็ง เพื่อประเมินถึงกลไกในการชะละลาย
 ของโลหะหนักจากตัวอย่างก้อนแข็งเมื่อผ่านการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์

2.10 การทำเสถียรและการหล่อก้อนแข็ง (Stabilization and Solidification)

กากของเสียที่ได้รับการทดสอบและพิจารณาว่าเป็นกากของเสียอันตราย ควรมีการจัดการที่
 ถูกต้อง เช่น การแลกเปลี่ยนกากของเสียระหว่างอุตสาหกรรม การนำไปบำบัดหรือกำจัดทิ้ง ซึ่งใน
 การกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบต้องมีการทำลายฤทธิ์กากของเสียอันตรายและลดการเคลื่อนที่เพื่อไม่ให้
 เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

การปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็งกากของเสียอันตรายถูกนำมาใช้เพื่อบำบัดกาก
 นิวเคลียร์มาตั้งแต่ปี 2493 หลังจากนั้นได้มีการนำมาใช้กันอย่างกว้างขวาง และได้รับการพัฒนาเพื่อ
 นำมาใช้กับกากของเสียอันตรายตั้งแต่ต้นปี 2513 (Comner, 1990) ซึ่งสามารถใช้เป็นการบำบัดของ
 เสียต่าง ๆ รวมทั้งการกำจัดดินและตะกอนที่ปนเปื้อนได้ โดยส่วนใหญ่ใช้ปูนซีเมนต์มาเป็นวัสดุ
 เชื่อมประสานและสามารถนำมาผสมรวมกับปูนขาวหรือเถ้าลอย กากตะกรันเตาถลุง (Blast furnace
 slag) หรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันได้ การทำปฏิกิริยากันระหว่างวัสดุประสานและ
 ส่วนประกอบของกากของเสียจะเป็นตัวกำหนดขอบเขตของการบำบัด ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อการ

บำบัดกากของเสียจากอุตสาหกรรม หรือการเตรียมกากของเสียก่อนที่จะนำไปฝังกลบและการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อน



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างระบบบำบัดน้ำเสีย (สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสุนน, 2548)

การบำบัดโดยการทำเสถียรและการหล่อก้อนแข็งเป็นการรวม 2 ปฏิกริยาเข้าด้วยกัน ซึ่ง จะเกิดปฏิกิริยาทางกายภาพและทางเคมีขึ้นพร้อมกัน และเมื่อบำบัดกากของเสียอันตรายด้วยวิธีนี้

จะเป็นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการชะละลายของโลหะหนักหรืออาจนำกลับมาใช้ใหม่ในงานก่อสร้างได้

2.10.1 การปรับเสถียร (Stabilization)

การทำเสถียร คือ กระบวนการที่มีการเติมสารเคมีผสมรวมกับกากของเสียอันตราย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารประกอบภายในกากของเสียนั้น เพื่อเป็นการลดการเคลื่อนที่รวมถึงลดความเป็นพิษให้น้อยลง โดยเปลี่ยนแปลงลักษณะของการเคลื่อนที่และมีการเปลี่ยนกากของเสียที่อยู่ในรูปสารละลายให้อยู่ในรูปของแข็ง เนื่องจากกากของเสียที่อยู่ในรูปสารละลายจะกระจายอยู่ในช่องว่างและสามารถรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้ การตกตะกอนเป็นปฏิกิริยาหลัก ซึ่งเป็นผลให้เกิดการลดการเคลื่อนที่ของสิ่งเจือปน ซึ่งเมื่อกากของเสียอันตรายถูกปรับเสถียรและหล่อก่อนแข็งแล้วจะมีค่าความเป็นกรด่างสูง (pH) ภายในก้อนซีเมนต์ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ของน้ำกับปูนซีเมนต์ทำให้โลหะหนักที่อยู่ในกากของเสียถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นไฮดรอกไซด์ หรือ Mixed hydroxide solids อาจเกิดการตกตะกอนของซัลไฟด์ โดยเฉพาะซัลไฟด์ที่มีการผสมกากตะกอนเตาถลุง (Blast furnace slag) หรือวัสดุเชื่อมประสานที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

2.10.2 การหล่อก่อนแข็ง (Solidification)

การหล่อก่อนแข็ง คือ กระบวนการที่ทำให้กากของเสียเป็นก้อนแข็ง ผลจากการหล่อก่อนแข็งจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของกากของเสีย ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติในการรับแรง ทำให้การขนย้ายสะดวกขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีการบำบัดกากของเสียอันตรายที่เป็นของเหลวหรือสลัดจ์ที่มีความชื้นสูง นอกจากนี้กากของเสียที่ผ่านการปรับเสถียรและการหล่อก่อนแข็งยังมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมลดลงเมื่อทำการกำจัด เนื่องจากไม่มีองค์ประกอบที่เป็นของเหลวที่สามารถเกิดการรั่วไหลปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ และก้อนของเสียที่ได้จะมีขนาดใหญ่กว่ากากของเสียก่อนการบำบัดเป็นผลให้มีขนาดพื้นที่ต่อปริมาตรเล็กลงการรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อมก็ลดลงด้วยกากของเสียที่บำบัดแล้วจะลดการซึมผ่านของน้ำและลดการไหลผ่านก้อนของเสีย ถ้ากากของเสียที่ทำเป็นก้อนแข็งแล้วมีค่าการซึมผ่านต่ำกว่าวัตถุที่อยู่โดยรอบในบริเวณเดียวกันที่กำจัดกากของเสียของเหลวที่มีอยู่ในบริเวณนั้นจะไหลไปรอบๆ มากกว่าที่จะไหลผ่านก้อนของแข็งซึ่งจะเป็นการลดอัตราการรั่วไหลของสิ่งปนเปื้อนได้ ปัจจัยหลักในการศึกษาและประยุกต์การทำเสถียรและการหล่อก่อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ คือ เพื่อลดปัญหาการรบกวนจากสารประกอบที่มีอยู่ในกากของเสียที่มีต่อปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ ซึ่งสารประกอบหลายชนิดได้มีการรายงานการวิจัยว่าสามารถเร่งหรือขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ (Taylor, 1990) และสารประกอบที่พบว่าอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อปูนซีเมนต์ เช่น สารอินทรีย์ องค์ประกอบทางเคมีที่มีธาตุฮาโลเจนเป็นส่วนผสม โลหะและซัลเฟต ซึ่งต้อง

หลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกากของเสียและวัสดุเชื่อมประสาน และถือว่าเป็นปัจจัยหลักในการพัฒนาเทคโนโลยีการทำเสถียรและก้อนแข็งสำหรับกากของเสียบางชนิด (Batchelor, 2006)

2.10.3 รูปแบบกลไกในการปรับเสถียร (Mechanisms)

ในการปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็งกากของเสียแต่ละชนิดมีความจำเป็นในการศึกษาและทำความเข้าใจถึงกลไกทางด้านกายภาพและทางเคมี เพื่อควบคุมประสิทธิภาพของสารเคมีที่จะใช้ในการทำเสถียร ซึ่งนอกจากเป็นเทคโนโลยีในการจัดการกากของเสียอันตรายแล้ว ยังเป็นการพัฒนาสารเคมี หรือการปรับปรุงสารเคมีที่ใช้อยู่เดิม และมีการดัดแปลงเพื่อใช้กับกากของเสียชนิดใหม่หรือกากของเสียที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถแบ่งเป็นกลไกในการปรับเสถียรกากของเสียอันตรายได้ดังนี้

1. Macro encapsulation เป็นวิธีการบำบัดทางกายภาพ โดยกากของเสียจะถูกบรรจุอยู่ในโครงสร้างขนาดใหญ่ของแม่แบบ (Matrix) ซึ่งกากของเสียจะอยู่ในรูพรุนที่มีอยู่ภายในก้อนแข็งที่ผ่านการปรับเสถียรแล้ว โดยก้อนแข็งนี้จะมีการสีกกร่อนทางด้านกายภาพ (break down) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคก่อนการทำเสถียรและยังมีการแตกสลายในเชิงกายภาพของก้อนแข็ง ซึ่งกากของเสียที่อยู่ในรูพรุนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระนอกจากนี้ก้อนของแข็งยังสามารถถูกทำลายได้จากการพังทลาย (ซึ่งทำการวัดแบบ geologic time scale) เนื่องจากก้อนแข็งอยู่ภายใต้แรงกดดันของสิ่งแวดล้อมภายนอก ซึ่งรวมถึงวัฏจักรของ Wetting และ Drying หรือ Freezing และ Thawing การไหลผ่านของของเหลวและการรับแรงของก้อนแข็ง ด้วยเหตุนี้กากของเสียที่ถูกปรับเสถียรด้วยวิธี Macro encapsulation เพียงอย่างเดียวอาจจะเกิดการรั่วไหลของโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ถ้าก้อนแข็งนั้นไม่ได้รับการรักษาให้คงสภาพเดิมไว้

2. Micro encapsulation กากของเสียอยู่ในโครงสร้างผลึกของก้อนแข็งในระดับที่เล็กมาก ซึ่งกากของเสียอันตรายจะถูกย่อยสลายจนได้ขนาดอนุภาคที่เล็กมาก ตัวอย่างเช่น กากของเสียอันตรายที่เป็นน้ำมัน ได้ถูกผสมกับเถ้าลอยปูนขาวและปูนซีเมนต์ จนทำให้น้ำมันอยู่ภายในช่องว่างของแคลซูล ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะถูกกักเก็บไว้คล้ายกับกรณีของการทำ Macro encapsulation เนื่องจากกากของเสียไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือการยึดจับทางเคมี อัตราการรั่วไหลจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของอนุภาคและพื้นที่ผิวที่ถูกสัมผัส

3. Adsorption เป็นลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของแข็งและมีการยึดเกาะกันแบบเคมี-ไฟฟ้า (Electrochemical) โดยวัสดุหรือสารปรับเสถียรเกิดแรงยึดแบบ Hydrogen bonding หรือแบบ Van der waal ทำให้การรั่วไหลหรือการหลุดลอกจากพื้นผิวของแข็งมีน้อยกว่าแบบที่บรรจุอยู่ในแคลซูล

4. Absorption เป็นการดูดกลืน โดยที่กากของเสียอันตรายจะถูกดูดซึมเข้าไปภายในตัวดูดซึม ซึ่งวิธีการนี้จะใช้สารชนิดต่าง ๆ ทำการดูดของเหลวออกจากกากของเสียอันตรายทำให้กากของเสียอันตรายอยู่ในสภาพที่เป็นของแข็งมากขึ้น

5. Precipitation การตกตะกอนผลึกหรือการนำกากของเสียอันตรายมาผสมรวมกับสารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอนผลึก ซึ่งต้องอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม โดยเป็นตะกอนผลึกอนินทรีย์เป็นส่วนใหญ่เช่น Hydroxides Sulfides Silicates carbonates Phosphates เป็นต้น โดยทั่วไปเป็นการกำจัดโลหะหนักด้วยการปรับค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ให้สูงขึ้น หรือให้เหมาะสมต่อการเกิดตะกอนผลึก

6. detoxification เป็นการกำจัดสารพิษหรือความเป็นพิษออกจากกากของเสียอันตราย ด้วยการเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยาทางเคมี เช่น การรีดิวซ์ของโครเมียม โดยการเปลี่ยน Cr^{+6} ซึ่งมีความเป็นพิษมากเป็น Cr^{+3} ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่า โดยอาจใช้ Ferrous sulfate หรือใช้ Ferrous sulfate ร่วมกับ Sodium sulfate

2.10.4 หลักในการพิจารณากากของเสียในการทำเสถียรและหล่อก่อนแข็ง

ในการทำเสถียรและหล่อก่อนแข็ง (Spence และ Shi, 2005) กากของเสียอันตรายควรพิจารณาลักษณะและคุณสมบัติต่าง ๆ ของกากของเสียรวมถึงวัสดุประสานซึ่งก่อนที่จะทำเสถียรและหล่อก่อนแข็งควรมีการพิจารณาเกี่ยวกับกากของเสียดังต่อไปนี้

1. ความสามารถเข้ากันได้ระหว่างปูนซีเมนต์และกากของเสีย (Compatibility between cement and waste materials)
2. การยึดเกาะกากของเสียด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical fixation contaminants)
3. ลักษณะการห่อหุ้มกากของเสียอันตรายหรือดินที่ปนเปื้อนทางด้วยกายภาพ (Physical encapsulation of contaminated waste and soils)
4. การชะละลายกากของเสียอันตรายหรือดินที่ปนเปื้อนหลังจากผ่านขั้นตอนการบำบัดแล้ว (Leach ability of contaminants from the treated waste or soil)
5. ความคงทนของก้อนแข็งหรือวัสดุเมื่อใช้ในการบำบัดกากของเสียหรือวัสดุที่ปนเปื้อนกากของเสีย (Durability of the treated waste or contaminated materials)
6. การคำนวณราคาในการบำบัดด้วยวิธีการปรับเสถียรและการหล่อก่อนแข็งกากของเสียอันตราย (Cost-effectiveness of Stabilization and Solidification)

ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อเสียในการปรับเสถียรและหล่อก้อนแข็งในแต่ละวิธี (กรทิพย์ เชี่ยวชาญอ้างถึง Shukrow,et al.,1982)

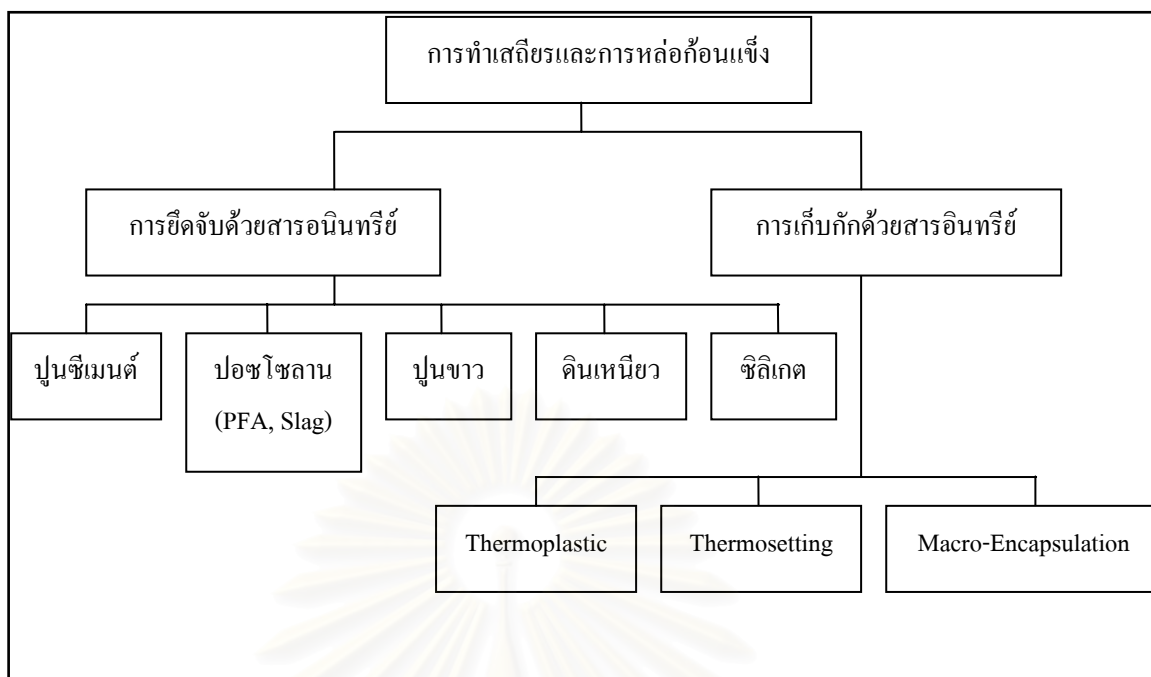
กระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย	ประเภทกากของเสีย
1. Cement and Silicate based solidification	1.วัสดุอุปกรณ์ราคาถูก 2.เทคโนโลยีได้รับการพัฒนาอย่างดี 3.สามารถกำจัดกากของเสียที่เป็นโลหะหนักได้ดี	1.สารอินทรีย์บางชนิดขัดขวางการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ 2.เพิ่มน้ำหนักและปริมาณของเสีย	โดยทั่วไปเหมาะกับกากของเสียอินทรีย์
2. Lime based solidification and fixation	1.วัสดุอุปกรณ์ราคาถูก 2.เทคโนโลยีได้รับการพัฒนาอย่างดี 3.สามารถนำเถ้าลอยมาผสมเพื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์	1.สารอินทรีย์บางชนิดขัดขวางการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ 2.เพิ่มน้ำหนักและปริมาณของเสีย	โดยทั่วไปเหมาะกับกากของเสียอินทรีย์
3. Thermoplastic based	1.ลดการรั่วไหลของสารเคมีได้ดี 2.สารละลายที่ชะล้างมีผลต่อผลิตภัณฑ์น้อยมาก	1.อุปกรณ์และเครื่องมือมีราคาแพงและต้องอาศัยผู้ชำนาญงาน 2.ไม่สามารถกำจัดสารจำพวก Stong oxidants, Dehydrated salts	โดยทั่วไปเหมาะกับกากของเสียสารอินทรีย์
4. Organic Polymer Process	1.ใช้สารเคมีในการทำให้เกิด Polymer's matrix ปริมาณน้อย 2. ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหนาแน่นต่ำ	1.ของเสียถูกยึดไว้อย่างหลวม ๆ 2.สารที่มีพีเอชต่ำทำให้โลหะละลายออกมาได้มากขึ้น 3.การย่อยสลายทางชีวภาพของสาร โพลีเมอร์บางชนิดทำให้เกิดปัญหาในการฝังกลบ	กากของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ
5. Encapsulation	1.ผลิตภัณฑ์ที่ได้ป้องกันน้ำได้ดี 2. ค่าใช้จ่ายในรอบการใช้งานต่ำ 3. ไม่เกิดการชะล้างเมื่อสารที่ห่อหุ้มไม่ถูกทำลาย	1.หากสารเคมีที่ใช้ในการห่อหุ้มถูกทำลายจะเกิดการชะล้างได้ 2.ไม่เหมาะกับการใช้งานในกรณีที่ต้องกำจัดกากของเสียจำนวนมาก	กากของเสียแบบแห้งหรือเปียก
6. Self cementing Techniques	1.ใช้สารผสมเพิ่มประสิทธิภาพน้อยทำให้ส่วนผสมปูนซีเมนต์แข็งตัวเร็ว	1.สารอินทรีย์บางชนิดขัดขวางการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ 2.กากของเสียที่ไม่ได้ห่อหุ้มอาจถูกย่อยสลายและถูกชะล้างภายใต้สภาวะที่มีพีเอชต่ำ	กากของเสียแบบแห้งหรือเปียก
7. Glassification	1.กากของเสียที่ถูกหลอมด้วยแก้วจะถูกชะล้างออกมาน้อยมาก	1.ที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้ของเสียอื่นระเหยออกมา 2.ค่าใช้จ่ายสูงในการให้ความร้อนแก่อุปกรณ์และต้องการผู้ชำนาญงานโดยเฉพาะ	กากของเสียแบบแห้ง

ในงานวิจัยเป็นจำนวนมากได้มีการทำเป็นกรณีศึกษาถึงการนำกากของเสียชนิดต่างๆมาทำเสถียรและหล่อก้อนแข็ง เช่น กากของเสียอุตสาหกรรม ซึ่งนอกจากจะใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานร่วมกับน้ำแล้วยังมีตัวประสานอื่น ๆ และสารผสมเพิ่มอีกประมาณ 20 ชนิด และมีกากของเสียที่แตกต่างกันอีก 230 ชนิด (March, 2001) ซึ่งความแตกต่างในสูตรการผสมทำให้ยากต่อการสังเกตแนวโน้มที่กากของเสียส่งผลกระทบต่อปูนซีเมนต์ แต่สามารถแยกกลุ่มได้ เช่น ถ้ำจากเตาเผาขยะชุมชน (Municipal solid waste incinerator) กากตะกอนชุบโลหะ (Plating sludge) และ ฝุ่นจากโรงงานเหล็กกล้า (Steel industry dusts) จากการศึกษาถึงผลกระทบของออกไซด์โลหะหนัก (โครเมียม ทองแดง สังกะสี อาเซนิก แคดเมียม โปรท และตะกั่ว) ที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์พบว่า โลหะหนักเหล่านี้มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นในปูนซีเมนต์และเกิดผลกระทบในโครงสร้างระดับเล็ก (Microstructure) ของปูนซีเมนต์ในระยะเริ่มแข็งตัวและการพัฒนากำลังของคอนกรีต Diet และคณะ (1998) ศึกษาถึงปฏิกิริยาไฮเดรชันของก้อนแข็งพบว่า สลัดจ์ที่เป็นโลหะไฮดรอกไซด์ (Metal hydroxide sludge) มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและปริมาณของการกำจัดสลัดจ์ และสลัดจ์สามารถทำให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว (Flash set) ได้ และการยึดจับโครเมียมด้วยปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับเลขออกซิเดชัน (Oxidation state) โดย Cr^{+6} จะบ่มได้ยากกว่า Cr^{+3} ที่มีความเป็นพิษน้อยกว่า

Poon และคณะ (1985) ได้แบ่งรูปแบบในการปรับเสถียรและการหล่อแข็งกากของเสียเป็น 2 รูปแบบคือ การยึดจับกากของเสียอันตรายโดยการใส่วัสดุประเภทสารอนินทรีย์ (Inorganic Fixation) ซึ่งเหมาะสำหรับกากของเสียอนินทรีย์ และการเก็บกักด้วยสารอินทรีย์ (Organic Encapsulation) ซึ่งเหมาะกับของเสียอนินทรีย์ดังแสดงในรูปที่ 2.5

US EPA กำหนดเกณฑ์มาตรฐานการรับแรงอัด (Unconfined compressive strength) ของก้อนแข็งต้องไม่น้อยกว่า 0.35 เมกะปาสกาลสำหรับการนำไปฝังกลบ ซึ่งการนำกากของเสียมาทำก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์อาจเกิดผลกระทบต่อการทำงานของปูนซีเมนต์ การรับแรง และอาจจะเกิดการชะละลายได้ (Malviya และ Chaudhary, 2006) ได้สรุปถึงปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนากำลังของคอนกรีตดังนี้

1. อัตราส่วนกากของเสียต่อวัสดุประสานและน้ำต่อ (Waste/binder and water/binder ratio) โดยกำลังอัดของก้อนแข็งจะลดลงเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้นนอกจากนี้การผสมเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์ถ้ามีการเพิ่มอัตราส่วนจะทำให้ต้องการน้ำในการผสมมากขึ้นการรับแรงก็จะลดลงด้วย โดยทั่วไปที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.4 ถึง 0.5 จะใช้กับอัตราส่วนน้ำต่อของแข็ง (water/solid ratio) 0.4 ถึง 0.6 ซึ่งโครงสร้างรูพรุนภายในก้อนแข็งยังส่งผลต่อกำลังอัดด้วย โดยขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารประกอบที่มีอยู่ภายในรูพรุนที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการทำปฏิกิริยากับสารผสมตัวอื่น



รูปที่ 2.5 การแบ่งรูปแบบการทำคอนกรีตของเสี่ย (Poon และ คณะ, 1985)

2. Bulk density เมื่อมีการเพิ่มวัสดุประสาน เช่น (OPC, OPC + sulphur, OPC + SEA) จะเป็นการเพิ่ม Bulk density ด้วย เนื่องจากวัสดุประสานจะเข้าไปแทนที่ช่องว่างภายในก้อนตัวอย่าง (อ้างถึง Knoll และ Andres) ได้มีการเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักตัวอย่างใหม่กับตัวอย่างที่ทำการบ่ม และทำการประเมินปริมาตรที่เปลี่ยนไปในระหว่างขั้นตอนการทำคอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น เนื่องจากในระหว่างการบ่มเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันปอซโซลานทำให้เกิดการเข้าไปแทนที่ช่องว่างภายในคอนกรีต

ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียในการปรับเสถียรและการหล่อคอนกรีตด้วยปูนซีเมนต์

ข้อดี	ข้อเสีย
1. วัสดุประสานที่ใช้หาง่ายและราคาถูกลง	1. หลังจากการหล่อคอนกรีต ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสามารถในการรับแรงอัดต่ำ
2. เทคโนโลยีการทำเสถียรและทำคอนกรีตมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เช่นการนำวัสดุประสานชนิดอื่นมาผสมเพิ่มเพื่อช่วยในการยึดจับกากของเสี่ย	2. กากของเสี่ยบางชนิดต้องมีการบำบัดเบื้องต้นก่อนการทำคอนกรีต เนื่องจากกากของเสี่ยบางชนิดมีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน
3. สามารถควบคุมการชะละลายและลดการเคลื่อนที่ขององค์ประกอบในกากของเสี่ยได้	3. ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการทำคอนกรีตแล้วมีขนาดและน้ำหนักเพิ่มขึ้นจากเดิม

2.10.5 การทดสอบกากของเสียที่ผ่านการปรับเสถียรและหล่อก่อนแข็ง (Batcher,2006)

เมื่อนำกากของเสียอันตรายมาปรับเสถียรและหล่อก่อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์หรือวัสดุประสานชนิดอื่น ๆ แล้ว ควรมีการทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ดังนี้

1.กำลังรับแรงอัด (Unconfined compressive strength) การทดสอบกำลังอัดของก้อนแข็งที่ผ่านการบดแล้วตัวแปรนี้ได้นำเข้าไปพิจารณาในรายละเอียดของการบำบัดด้วยวิธีการทำเสถียรและหล่อก่อนแข็ง (Stabilization/Solidification) ซึ่งเป็นการกำหนดลักษณะทางกายภาพอย่างไรก็ตามการรับแรงอัดจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของการกำจัดกากของเสีย

2.ความคงทนในระยะยาว (Long-term stability) สิ่งที่สำคัญนอกจากความสามารถในการรับแรงแล้วต้องมีการประมาณความคงทนในระยะยาวของก้อนแข็งด้วย กากของเสียที่อยู่ในรูปก้อนแข็งที่แข็งกว่ามีแนวโน้มรักษาสภาพได้ดีกว่ารูปที่อ่อนกว่า แม้ว่าจะไม่สามารถวัดได้อย่างแม่นยำ การคงสภาพอยู่ได้ในระยะยาวมีความสำคัญมาก เนื่องจากก้อนของเสียที่สึกกร่อนจนหลุดออกเป็นอนุภาคเล็กๆ จะเกิดการรั่วไหลอย่างรวดเร็ว

3. Wet-dry และ Freeze-thaw durability tests มีความสำคัญในการนำมาทำนายความคงทนแม้ว่าจะมีการทำนาย Long term performance ของวัสดุก่อสร้างอยู่แล้ว แต่ยังมีข้อสงสัย เนื่องจากในสถานะของแหล่งกำจัดของเสียอาจมีของเสียที่แตกต่างกัน จึงมีการจำลองสถานการณ์เพื่อใช้ในการทดสอบ

4.ค่าความซึมผ่านของน้ำ (Permeability) การทดสอบนี้ใช้เพื่อการทำนายการไหลผ่านของของเหลวผ่านวัสดุหรือก้อนแข็งจากการบำบัดกากของเสียในสถานที่กำจัด

5. โครงสร้างของรูพรุน (Pore structure) เนื่องจากเนื่องจากการบรรจุสิ่งปนเปื้อนลงในรูปของกากของเสียโดยส่วนมากจะกระจายตัวอยู่ในรูพรุน ก้อนของเสียที่มีรูลักษณะที่ซับซ้อนรูพรุนไม่ติดต่อกัน จะช่วยให้สิ่งปนเปื้อนรั่วไหลออกมาได้ช้าลง

2.10.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการรั่วไหลของสิ่งปนเปื้อนจากก้อนแข็ง (Garrabrants และ Kosson,2005 อ้างถึงใน Spence และ Shi,2005)

การชะละลายเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนในการทำความเข้าใจ โดยต้องใช้ความรู้ที่เกี่ยวข้องในหัวข้อเหล่านี้ประกอบเพื่อการศึกษาได้แก่ Mineral Chemistry, เทอร์โมไดนามิก, Reaction Kinetics และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ Mass Transport เป็นต้น เพื่อการประเมินการรั่วไหลในระยะยาวได้อย่างถูกต้อง ปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีมีผลต่อการชะละลาย รวมถึงทิศทางการสึกกร่อนของก้อนแข็งดังแสดงในรูปที่ 3.6 ปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อการชะละลายของก้อนแข็งที่เป็นสารอนินทรีย์ ได้แก่

1. ลักษณะเฉพาะของก้อนแข็ง (matrix characteristics) เช่น matrix mineralogy ค่าความซึมน้ำ และ Acid neutralization capacity (ANC)

2. สภาพของสิ่งแวดล้อมโดยรอบก่อนแข็ง (environmental condition) เช่น การซึมผ่าน (infiltration) และ ส่วนประกอบของน้ำชะละลาย (Leachant composition)

3. ปฏิกริยาระหว่างก้อนของเสียและสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ เช่น acid attack carbon dioxide uptake sulfate attack ในบริเวณที่มีการจัดการกากของเสียอันตรายที่เป็นก้อนแข็ง

2.11 กระบวนการชะละลาย (Leaching process)

กระบวนการชะละลายเป็นลักษณะที่สารอินทรีย์ สารอินทรีย์ปนเปื้อน หรืออะตอมที่ปล่อยรังสีได้ เกิดการรั่วไหล เช่นจากสภาพของแข็งเข้าสู่สถานะของเหลวภายใต้อิทธิพลของแรงธาตุ การละลาย การดูดซับ กระบวนการที่ซับซ้อนโดยเปลี่ยนแปลงตามค่าพีเอช ปฏิกริยารีดอกซ์ การละลายของสารอินทรีย์และการกระทำของแบคทีเรีย โดยกระบวนการเหล่านี้เกิดขึ้นได้ทั่วไป เมื่อวัสดุสัมผัสกับน้ำจะเกิดการชะละลายจากผิวภายนอกของวัตถุหรืออาจเกิดจากภายในซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณความพรุนของวัสดุที่ทำการพิจารณา

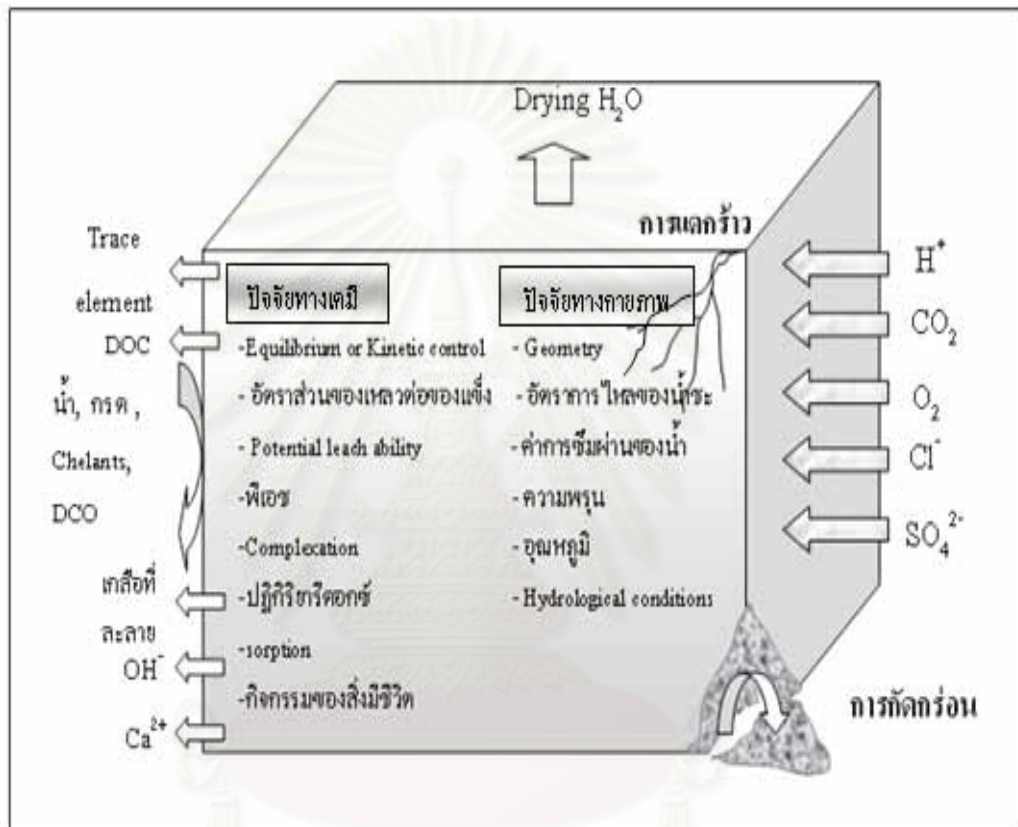
การทดสอบชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เสถียรและการหล่อก้อนแข็ง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการชะละลายที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ภายใต้สภาวะจำลองที่อาจเกิดการรั่วไหลได้ และยังเป็นการพัฒนารูปแบบในการกำจัดของเสียอันตรายอีกด้วย ซึ่งสามารถประเมินได้จากประสิทธิภาพของการบำบัด หรือเพื่อทำให้กากของเสียอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดเหมาะสำหรับการกำจัดทิ้ง การทดสอบการชะละลายก่อนแข็งอาจใช้วิธีทดสอบมากกว่าหนึ่งวิธี เพื่อใช้ในการทำนายถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของสิ่งปนเปื้อน (Trace contaminants) ที่มีอยู่ในก้อนแข็งเช่น ยาปราบศัตรูพืช สารอินทรีย์ โลหะหนัก และ radio nuclides เป็นต้น

2.11.1 กลไกการชะละลาย (Spence และ shi,2005)

โดยรูปแบบพื้นฐานทั่วไป การชะละลายเกิดจากการสัมผัสระหว่างก้อนแข็งกับส่วนที่เป็นของเหลว (Leachant) ซึ่งเข้าไปทำให้องค์ประกอบ (constituent) ภายในของก้อนแข็งเกิดการรั่วไหลและมีการลำเลียงออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก โดยอาจเกิดเป็นของเหลว (Liquor) ซึ่งอัตราการรั่วไหลขององค์ประกอบภายในขึ้นอยู่กับกลไกทางกายภาพและเคมีของการละลาย ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยดังต่อไปนี้

1. Geochemical Control จะเกิดขึ้นบริเวณจุดที่พบกันระหว่างของแข็งและของเหลว โดยบริเวณนี้เกิดการเชื่อมรวมกันระหว่างการละลายของสารประกอบ (mineral phase) และการละลายขององค์ประกอบในสถานะของเหลว (Liquid phase) โดยกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดค่า การรั่วไหลขององค์ประกอบภายในที่จุดสมดุลนี้เกิดขึ้นเมื่อของเหลวถูกแทนที่ด้วยของแข็งที่ละลายผ่านเข้าไป หรือการที่ของเหลวละลายองค์ประกอบที่อยู่ภายใน ซึ่งเกิดขึ้นภายใต้

สภาวะทางเคมีในสภาพที่เป็นของเหลว เช่น ค่าความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ หรือการมีอยู่ของอิออนตัวอื่นๆ โดยจุดสมดุลนี้จะอยู่ในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งมีการสมดุลขึ้นระหว่างสภาพของแข็ง (Solid phase) และองค์ประกอบที่เป็นของเหลว การชะละลายจะได้รับอิทธิพลจากคุณสมบัติของของเหลวรวมถึงค่าความเป็นกรดต่างและสารอินทรีย์ที่ละลายได้ complexing agents หรืออิออนตัวอื่น ๆ



รูปที่ 2.6 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการชะละลายจากก้อนแข็ง รวมทั้งกากของเสียที่อยู่ในรูปการปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็ง (Garrabrants และ Kosson, 2005)

2. Sorption และ Desorption ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันบางตัว เช่น CSH Gel หรือ Sulfoaluminates มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ซึ่งอิออนของโลหะสามารถเข้าไปติดที่ผิวได้ การผันกลับของปฏิกิริยาที่ผิวของสารเหล่านี้ได้รับอิทธิพลเนื่องมาจากทฤษฎี Surface layer และการมีอยู่ของอิออน Na^+ , K^+ , Ca^+ และ H^+ จะแข่งขันกันกับอิออนของโลหะเพื่อให้มีค่าเป็นลบที่บริเวณพื้นผิว นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างอาจได้รับผลจาก surface charge ของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น CSH Gel ซึ่งการทำลายสมดุลของอิออนรวมทั้งการเพิ่มการละลายของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะทำให้เกิดขั้นตอนการตกตะกอนหรือการดูดซับกับสารตัว

อื่น เช่น การละลายของ BaSO_4 จะถูกควบคุมโดยการรั่วไหลออกมาของสารตัวอื่นๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับสารละลาย SO_4^{2-} bearing materials

3. Mass transport Control เมื่อกลไกของการยืดยาวทางเคมีเกิดการผันกลับ เช่น การสัมผัสกับน้ำชะที่มีความเข้มข้นสูงและเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ อัตราการรั่วไหลออกสู่ภายนอก อาจจะถูกจำกัดโดย mass transport ของสารประกอบที่มีอยู่ภายในก้อนแข็ง ซึ่งเส้นทางของ mass transport (mass transport pathways) ของช่องว่างประกอบประกอบด้วยปัจจัยดังต่อไปนี้

3.1 การแพร่ของสารประกอบที่มีอยู่ภายในช่องว่างที่เป็นรูพรุนของวัสดุ (Diffusion of constituents in liquid-filled pores)

3.2 Advection การเคลื่อนของอากาศ หรือการเคลื่อนที่ของของเหลว (Advection or bulk liquid transport)

3.3 Dispersion การกระจายตัวของสารประกอบเนื่องจากก้อนแข็งประกอบด้วยช่องว่างที่เป็นรูพรุนที่มีอยู่ภายในก้อนแข็ง (Dispersion of constituents due to the porous nature of the solid material)

3.4 การเกิดรอยแตกร้าว (Crack flow) การเกิดรอยแตกร้าวเล็ก ๆ ของก้อนแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน (Micro cracks)

3.5 การแพร่ผ่านส่วนที่เป็นของแข็ง (Diffusion through solid phase)

2.11.2 การทดสอบการชะละลายตามวิธี NEN7375:2004 (EA NEN 7375 : 2004)

การชะละลายแบบ Tank test อ้างอิงมาจาก Dutch leaching characterization standard NEN 7375 (2004) เป็นมาตรฐานการทดสอบแบบ Diffusion test ซึ่งทดสอบการชะละลายของก้อนแข็งที่ขึ้นรูป (mould) หรือก้อนแข็ง (Monolithic) และกากของเสียที่ผ่านขั้นตอนการทำเสถียรและการหล่อก้อนแข็ง โดยทำการศึกษาถึงลักษณะการชะละลายในระยะยาวของสารประกอบอนินทรีย์ด้วยการทดสอบแบบ Tank test

วัตถุประสงค์การทดสอบการชะละลายแบบ Diffusion test คือ เพื่อใช้ในการพิจารณาการชะละลาย โดยการจำลองรูปแบบการชะละลายของสารประกอบอนินทรีย์ที่มีอยู่ภายในก้อนแข็ง ภายใต้สภาวะที่มีอากาศ (aerobic) โดยจะเริ่มจากการจัดวางก้อนตัวอย่างในสารละลายที่ทำการทดสอบซึ่งกำหนดระยะเวลาในการทดสอบออกเป็น 8 ช่วง ได้แก่ 0.25, 1, 2.25, 4, 9, 16, 36 และ 64 วัน ตามลำดับ และทำการเก็บตัวอย่างสารละลายที่ใช้ตามระยะเวลาที่ระบุไว้เพื่อมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารประกอบที่ละลายออกมาจากก้อนแข็งที่เวลาต่างๆ โดยตัวแปรอื่นๆสามารถอนุมานได้จากการทดสอบ ซึ่งการทดสอบแบบ Diffusion test นี้ไม่เหมาะกับก้อนทดสอบหรือตัวอย่างที่มีการละลายในช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ

ผลจากการทดสอบแบบ Diffusion test ทำการคำนวณได้ โดยการคิดปริมาณที่ชะละลายออกมาต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยของแต่ละสารประกอบที่มีอยู่ในสารละลาย โดยค่าตัวแปรสามารถอนุมานจากสารประกอบที่ถูกปล่อยออกมาในเวลาที่ยาวนานพอได้ และค่า effective diffusion coefficient สามารถประมาณการได้จากการชะละลายในช่วงเวลาที่ยาวนานมากๆ ได้

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำเสถียรและการหล่อก้อนแข็งกากของเสียอันตราย

Malviya และ Chaudhary (2006) ได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมของการชะละลายและการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักที่ผ่านการทำเสถียรและการหล่อก้อนแข็ง โดยใช้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียจากขั้นตอนการผลิตเหล็กกล้ามาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และทำการศึกษาถึงการรับแรง (Mechanical strength) การทดสอบการชะละลาย และพิจารณาการลดการเคลื่อนที่ของ Pb, Zn, Cu, Fe และ Mn ผลการทดลองพบว่าธาตุที่เกิดการเคลื่อนที่มากที่สุดได้แก่ Na, K และ Cl ซึ่งเป็นเกลือที่เกิดการละลายในตัวอย่างก้อนแข็ง

ในการทดสอบการชะละลายได้ใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐานทดสอบ EA NEN 7345 เพื่อใช้ในการศึกษากลไกการชะละลายของโลหะหนักจากก้อนแข็ง ซึ่งเป็นการจำลองการชะละลายของสารอนินทรีย์ที่อยู่ในรูปก้อนแข็ง (Monolithic) โดยใช้ก้อนทดสอบขนาด 2x2x2 นิ้ว ระยะเวลาการทดสอบ 64 วันทำการแขวนไว้ในน้ำชะที่เป็นกรด (ค่าพีเอชเท่ากับ 4) การชะละลายของโลหะหนักจะพิจารณาในรูปของการชะละลายที่ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและการชะละลายของโลหะไฮดรอกไซด์จากแบบจำลองเพื่อประเมินการเคลื่อนที่และกลไกของการชะละลายโดยพบว่าเกิดการชะล้างที่ผิวหน้า (Surface wash off) เป็นกลไกหลักในช่วงต้นของการทดสอบและค่าการรับแรงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากของเสีย และปูนซีเมนต์สามารถลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักที่ทำการพิจารณาได้เป็นอย่างดี

กรทิพย์ เชี่ยวชาญ (2546) ศึกษาถึงการหล่อก้อนแข็งตะกอนโลหะหนักด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน โดยทดลองหาค่า Optimum moisture content ของเถ้าลอยและตะกอนโลหะหนัก เพื่อให้ก้อนแข็งที่ได้มีความหนาแน่นมากที่สุด ทำการหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมคือ 1.25 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1:3 เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น ระยะเวลาในการบ่มก้อนแข็งมีผลทำให้ความเข้มข้นของทองแดงและสังกะสีในน้ำสกัดลดลงยกเว้นตะกั่ว ประสิทธิภาพในการทำก้อนแข็งตะกอนโลหะหนักเท่ากับ 78.62% 62.16% และ 73.08 % สำหรับทองแดง สังกะสี และ

ตะกั่วตามลำดับ การประมาณค่าใช้จ่ายในการทำตะกอนโลหะหนักเป็นก้อนแข็งด้วยวัสดุประสานเท่ากับ 4,437 บาทต่อตันกากตะกอน

Diet Moszkowics และ Sorrentino (1998) ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในระหว่างการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็ง โดยการผสมตามอัตราส่วนต่างๆ จากสลัดจ์ไฮดรอกไซด์ของโครเมียมและสังกะสีสังเคราะห์กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อใช้ประเมินถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน ระยะก่อตัวเริ่มต้น ความร้อนจากปฏิกิริยา ลักษณะการชะละลาย และโครงสร้างระดับเล็ก (Microstructure) ผลการทดลองพบว่า Zinc hydroxide sludge ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันหยุดลงในระยะเวลาสั้น ๆ เนื่องจากการตกตะกอนของ Solid hydrated phase และที่อัตราส่วน สลัดจ์ต่อปูนซีเมนต์ต่ำกว่า 2 ถึง 3:1 Chromium Hydroxide Sludge จะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่ถ้าอัตราส่วนสูงกว่านี้จะขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา และที่อัตราส่วนสลัดจ์ต่อปูนซีเมนต์สูงมากจะทำให้ค่าพีเอชในน้ำชะละลายสูงขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการออกซิเดชันของโครเมียม

Minocha และ คณะ (2003) ทำการศึกษาถึงผลกระทบของสารอนินทรีย์ที่มีต่อการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็ง โดยใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย และปูนขาวผสมเถ้าลอย ซึ่งโลหะหนักประกอบด้วยสารประกอบในเตรตของโครเมียม นิเกิล โปรทและแคดเมียม ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 3.33 1.43 และ 1.25 ตามลำดับ หลังจากนั้นศึกษาถึงผลกระทบในการเติมสารอนินทรีย์ ได้แก่ ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลเฟต ระยะเวลาบ่มตัวอย่าง 28 วัน ผลการทดลองพบว่าเมื่อเติมโลหะและเกลือของโซเดียมปริมาณ 2-8% จะส่งผลต่อความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างสำหรับวัสดุประสานทุกชนิด ทองแดงและตะกั่วทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงที่ปริมาณการเติมสังกะสีร้อยละ 2 จะไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้รับแรงและตะกั่วจะส่งผลกระทบต่อการใช้รับแรงเพียงเล็กน้อย ในกรณีที่มีการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวการรับแรงค่อนข้างคงที่สำหรับทุกอัตราส่วนและการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้ก้อนตัวอย่างก่อตัวเร็วขึ้นและช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัด

Pereira และคณะ (2007) ทำการศึกษาการชะละลายระยะสั้นและระยะยาวของก้อนแข็งโดยการนำเถ้าลอย ปูนซีเมนต์และปูนขาว มาทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งฝุ่นจากเตาไฟฟ้า (electric arc furnace dust) ซึ่งมีส่วนผสมของโลหะหนัก เช่น สังกะสี ตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียม ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมภายนอก ที่มีต่อการก่อตัวในระหว่างกระบวนการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็ง ในห้องปฏิบัติการ โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส และปล่อยให้ก้อนตัวอย่างในถุงปิดสนิทที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นนำมาทดสอบการชะละลายตาม

มาตรฐานการชะละลาย US EPA SW-846 Method 1311 (TCLP) ผลการทดลองพบว่า ในบางกรณี ลักษณะการก่อตัวของส่วนผสมมีอิทธิพลต่อการชะละลายของน้ำชะอย่างเห็นได้ชัด และทำการประเมินก่อนแข็งเทียบกับเวลา จาก 1 เดือนหลังจากเริ่มหล่อก้อนแข็งจนกระทั่งระยะเวลามากกว่า 9 ปี เพื่อดูลักษณะการชะละลายพบว่าก้อนตัวอย่างที่ทำการบ่มภายในห้องทดลองค่าพีเอชของน้ำชะลดลง เมื่อเวลาผ่านไป ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดการชะละลายมากขึ้น เนื่องจากเกิด Carbonation ของก้อนแข็งและการลดลงของค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) อย่างต่อเนื่อง

กาญจนา ต่วนเทศ (2542) ทำการเปรียบเทียบการทำเสถียรตะกอนซุบโลหะที่มีนิกเกิลโดยใช้ปูนขาว และหล่อก้อนโดยการใช้ปูนขาวผสมเถ้าลอยลิกไนต์ โดยแปรอัตราส่วนปูนขาวต่อกากตะกอนที่ 0.25 0.35 0.50 0.75 และ 1.0 โดยน้ำหนัก และแปรอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 0.50 0.60 และ 0.75 การหล่อก้อนแข็งใช้อัตราส่วนปูนขาวผสมเถ้าลอยลิกไนต์ต่อกากตะกอนที่ 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 รวมทั้งแปรอัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยที่ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.50 การศึกษาพบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำเสถียรอัตราส่วนปูนขาวต่อกากตะกอนเท่ากับ 0.5 โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.75 และอัตราส่วนที่เหมาะสมในการหล่อก้อนคืออัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน 0.75 และอัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอย 1.00 นอกจากนี้พบว่า ระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและการชะละลายของโลหะหนัก จากการทดสอบการชะละลายระยะยาวพบว่านิกเกิลถูกชะออกมาปริมาณมากในช่วง 20 วันแรกและลดลงต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตรตลอดการทดลอง ประสิทธิภาพในการลดการชะละลายของนิกเกิลจากการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งเท่ากับ 97.04% และ 63.46 % ตามลำดับ

ศศิธร แก้วกันยา (2549) ได้ทำการศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากปูนซีเมนต์ที่มีการนำตะกอนทองแดงมาใช้เป็นวัสดุคิบทดแทนในกระบวนการเผาไหม้ในปริมาณร้อยละ 0 ถึง 0.32 โดยน้ำหนักในวัสดุคิบทดแทนทั้งหมด ได้ทำการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของโลหะหนักด้วยวิธีการสกัดแยกสารประกอบโลหะหนัก ทดสอบกำลังรับแรงอัดและการชะละลายโลหะหนักของมอร์ต้าพบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสารประกอบของเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ นิกเกิลและวานาเดียมอยู่ในรูปที่มีเสถียรต่ำมีการชะละลายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย

ธีรพล พิรุฬห์ทรัพย์ (2549) ศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากกระบวนการเผาไหม้และประยุกต์การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐาน EA NEN 7375 โดยทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการชะละลายของโลหะหนักที่มีอยู่ในซีเมนต์เพสต์ จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการชะละลายของโลหะหนักแต่ละชนิดพร้อมกัน เช่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักที่มีอยู่ในปูนเม็ด ชนิดและปริมาณของสารชะละลาย

เมื่อทำการวิจัยพบว่าที่อัตราส่วนสารชะละลายต่อพื้นที่ผิวสัมผัสเท่ากับ 8 จะมีความเข้มข้นของโลหะหนักในสารชะละลายสูงมาก และเมื่อทำการทดสอบด้วยสารละลายต่างชนิดกันพบว่าแมงกานีสไม่เกิดการชะละลายในน้ำประปาและโบรอนจะถูกชะละลายออกมามากในน้ำฝนกรดสังเคราะห์ชนิดปิดฝาทดสอบ นอกจากนี้ลูมิเนียมจะเกิดการชะล้างที่ผิวหน้าในช่วงต้นและเกิดการละลายในช่วงท้ายของการทดสอบ โครเมียมเกิดการชะล้างที่ผิวหน้าเพียงอย่างเดียวและการชะละลายในระบบเปิดพบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีผลทำให้พีเอชและความนำไฟฟ้าของระบบมีค่าลดลงและมีตะกอนเกิดขึ้น โลหะหนักส่วนใหญ่มีการชะละลายลดลง ยกเว้นวานาเดียมมีการชะละลายเพิ่มขึ้นในช่วงท้ายของการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนักที่ชะละลายกับมาตรฐานน้ำดื่มพบว่าโลหะหนักบางชนิดมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน เช่น แคดเมียมและตะกั่วสำหรับทุกสภาวะและสารชะละลาย

Faucon และคณะ(1996) ได้ทำการศึกษาการชะละลายจากซีเมนต์เพสต์ที่เกิดการกร่อนเฉพาะที่บริเวณพื้นผิวเมื่อซีเมนต์เพสต์ถูกกระทำจากน้ำปราศจากไอออน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของชั้นผิว (Surface layer) พบว่ามีการชะละลายของแคลเซียมเป็นปริมาณมากขณะที่ซิลิกอนจะมีปริมาณน้อยกว่าที่ถูกชะละลายออกมา เหล็กและแมกนีเซียมไม่รั่วไหลออกมาแต่จะเพิ่มปริมาณมากขึ้นที่บริเวณผิว โดยที่แมกนีเซียมจะตกตะกอนในรูปของ Hydrotalcite ขณะที่แคลเซียมของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH gel) ถูกแทนที่ด้วยเหล็ก (iron) และถูกชะละลายออกมา Hydroxanates ผ่านได้น้อยหรือไม่มีการชะละลายออกมาเลย

การชะละลายจะเพิ่มค่าเกรเดียน (Gradients) ของความเข้มข้นระหว่างบริเวณพื้นผิวและจุดศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างซึ่งค่าเกรเดียนจะเปลี่ยนแปลงตามสมดุลทางเคมี (Chemical Equilibrium) จากสารละลายที่เกิดจากการกร่อนที่บริเวณพื้นผิว Portlandite AFm และ AFt เกิดการละลาย โดยเหล็กและแมกนีเซียมจะเข้าแทนที่โดยผ่านขั้นตอนการละลาย

Barna และคณะ (2004) ได้ทำการทำนายลักษณะการชะละลายในระยะยาวของกากของเสียจากก้อนแข็ง โดยใช้แบบจำลอง เพื่อศึกษาถึงลักษณะการชะละลายของโลหะหนักที่ทำการพิจารณาและพัฒนาเพื่อใช้ประเมินการรั่วไหลของสารอนินทรีย์จากตัวอย่างก้อนแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน การทดลองประกอบด้วย

1. Pore water test (PW-MMF) เพื่อศึกษาถึงการชะละลายของโลหะหนักภายในโครงสร้างรูพรุนของก้อนตัวอย่างจากปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์
2. Acid neutralization capacity test (ANC) เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของค่าพีเอชที่มีต่อลักษณะการชะละลายของโลหะหนัก

3. Monolithic leaching test (ML) เป็นการทดสอบการชะละลายในระยะยาวของโลหะหนัก จากตัวอย่างก้อนแข็ง

โดยแบบจำลองการชะละลายประกอบด้วยประกอบการชะละลาย 2 รูปแบบ คือ การชะละลายที่สภาวะคงที่ (Steady state) และ Dynamic leaching test (ML) และประยุกต์ใช้แบบจำลอง เพื่อทำการพิจารณาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัตถุและ mass transfer ที่เกิดขึ้นระหว่าง กระบวนการชะละลาย

ผลการทดลองพบว่าการชะละลายของโซเดียมโปแทสเซียม และคลอไรด์ ถูกควบคุมโดยการแพร่ภายในรูพรุน (Intra-pore diffusion) มีการทดลองใช้แบบจำลองในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อ ใช้จำลองลักษณะการชะละลาย เป็นการศึกษาตะกั่ว (Lead) โดยเฉพาะ และนำมาเปรียบเทียบกับ ความเข้มข้นที่ยอมรับได้ของปริมาณที่มีอยู่ในน้ำ พบว่าความเข้มข้นของตะกั่วที่รั่วไหลออกมา แสดงให้เห็นว่าอาจมีการตกตะกอนอยู่ในน้ำชะละลาย (eluate)

Singh และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาการบำบัดกากของเสียอุตสาหกรรมด้วยถ้ำลอยและดินเหนียวโดยการใช้ความร้อน จากการทดลองพบว่าการใช้ความร้อนสูงเป็นปัจจัยในการลดการเคลื่อนที่ของโลหะในกากของเสีย การชะละลายของโลหะ (โครเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี) ลดลงอย่างมากเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส และการเพิ่มถ้ำลอยไม่ช่วยปรับปรุง คุณสมบัติทางวิศวกรรมหรือการชะละลายของโลหะหนักจากตัวอย่างก้อนแข็ง จากการวิเคราะห์ ด้วย X- ray diffraction spectroscopy (XRD) พบว่าส่วนผสมที่อยู่ในก้อนแข็งอยู่ในรูปโลหะ ออกไซด์

เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 850 ถึง 950 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถช่วยพัฒนา คุณสมบัติทางวิศวกรรมได้ โดยไม่มีการแตกร้าวบริเวณผิวของก้อนตัวอย่าง แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มถ้ำลอยลงในส่วนผสมไม่มีผลต่อการลดการเคลื่อนที่ของโลหะในกากของเสีย แต่จะลดการรับแรงและเพิ่มค่า Water absorption ของก้อนตัวอย่าง

Sophia และ Swaminathan (2005) ได้ประเมินกลไกการทำเสถียรและการชะละลายของกากของเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่มีโครเมียม นิกเกิลสังกะสี แมงกานีส และตะกั่วเป็นส่วนประกอบ ด้วยปูนซีเมนต์และถ้ำลอย โดยทำการหล่อก้อนแข็งขนาด 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร (5x5x5) ทำการบ่มก้อนตัวอย่างที่ 28 วัน ก่อนนำทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดและการชะละลายของโลหะหนักที่ทำการพิจารณา

จากผลการทดลองพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวมีค่าสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ผสมถ้ำลอย และความเข้มข้นของการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) ของโครเมียมในน้ำชะละลายมีค่าต่ำกว่า

มาตรฐานที่กำหนด (5 มก./ล.) และการทดสอบการชะละลายตามมาตรฐาน NEN 7341 พบว่า โครเมียมถูกชะละลายออกมาได้น้อยมากในตัวอย่างก้อนแข็งที่ผ่านการบำบัด เมื่อเทียบกับกาก ตะกอนที่ยังไม่ผ่านขั้นตอนการบำบัด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยการศึกษาถึงแนวโน้มในการชะละลายของโลหะหนักจากก้อนมอร์ต้า ซึ่งเป็นการหล่อก้อนแข็งจากตะกอนกับปูนซีเมนต์ ที่ได้จากกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการใช้วัสดุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนและเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ที่ใช้วัสดุดิบและเชื้อเพลิงตามปกติ โดยแบ่งการทดลองเป็นขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมการชุบผิวโลหะ

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดโดยการเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนัก

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบคุณสมบัติโดยทั่วไปในการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็ง

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบการชะละลายที่สัมพันธ์กับรูพรุนหรือโพรงในมอร์ต้าและการทดสอบอิทธิพลของค่าพีเอชที่มีต่อลักษณะการชะละลายของก้อนแข็ง

ขั้นตอนที่ 5 การทดสอบการชะละลาย โดยการประยุกต์ใช้การทดสอบแบบ Monolithic Leaching test (ML) EA NEN 7375:2004

3.2 การดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยเรื่องการชะละลายระยะยาวของโลหะหนักในการทำเสถียรและการหล่อก้อนแข็งจากตะกอนชุบ โลหะด้วยปูนซีเมนต์ประกอบด้วยวิธีในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งรายการอุปกรณ์และสารเคมีพร้อมเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขั้นตอนในการทดสอบดังต่อไปนี้

3.2.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมการชุบผิวโลหะ

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เตาอบ (Oven) ใช้ในการอบกากตะกอนในช่วงอุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส
2. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) เพื่อใช้วัดค่าความเป็นกรด่างของกากตะกอน

3. เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด (Analytical balance)
4. กระดาษกรองใยแก้ว (GF/C) เพื่อกรองในขั้นตอนการทดสอบการชะละลาย
5. กระดาษกรอง 0.45 ไมโครเมตร ใช้ในการกรองสารละลาย
6. กรวยกรอง (Funnel)
7. เครื่องย่อยสลายสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave digester) การย่อยตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก
8. Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก

สารเคมี

1. กรดบอริก (H_3BO_3) ความเข้มข้น 0.87 โมลต่อลิตร
2. กรดไนตริก (HNO_3) ความเข้มข้นร้อยละ 65
3. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
4. กรดไฮโดรฟลูออริก (HF)

3.2.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ โดยเป็นการศึกษาลักษณะทั่วไป (Appearance) ของกากตะกอนที่สามารถสังเกตได้ เช่น ลักษณะสี รูปร่าง เป็นต้น

3.2.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางเคมี

1. การวิเคราะห์ค่าความชื้น (Moisture content (%)) โดยการอบกากตะกอนน้ำเสียที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง จนกากตะกอนมีน้ำหนักคงที่เพื่อควบคุมค่าความชื้นในระหว่างการทดลอง

2. การทดสอบการชะละลาย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 และการชะละลายตามมาตรฐานของ US EPA SW-846 method 1311

3. การวิเคราะห์โลหะหนักทั้งหมด (Total heavy metal) เริ่มจากการย่อยสลายกากตะกอนโดยวิธีการย่อยสลายด้วยเครื่องไมโครเวฟ (Microwave Digester) ตามมาตรฐานของ US EPA SW 846 Method 3052 (EPA, 1995) มีขั้นตอนดังนี้

5.1 บดตัวอย่างปริมาณ 0.5 กรัม เติมน้ำใน Vessel และเติมกรดไนตริก (HNO_3) ปริมาณ 9 มิลลิลิตร กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ปริมาณ 4 มิลลิลิตร

5.2 ทำการเติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ปริมาณ 2 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำชุดตัวอย่างเข้าเครื่องย่อยไมโครเวฟ โดยทำการตั้งรายละเอียดการทำงานในการย่อยสลายครั้งที่ 1 ไว้ 3 ช่วงการ

ทำงาน คือ เริ่มจากอุณหภูมิปกติจนถึงอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5.5 นาที เมื่อถึงอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ให้อุณหภูมิลงที่เป็นเวลา 9.5 นาที และลดอุณหภูมิลงซึ่งใช้เวลาประมาณ 5-15 นาที หลังจากย่อยชุดตัวอย่างในขั้นตอนที่ 1 เรียบร้อยแล้ว รอให้อุณหภูมิของตัวอย่างลดลง และเติมกรดบอริก (H_3BO_3) 0.87 โมลาร์ปริมาณ 37 มิลลิลิตร เพื่อทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ให้เปลี่ยนเป็นกรดฟลูออโรบอริก (HBF_4)

5.3 หลังจากนั้นย่อยตัวอย่างในการย่อยสลายรอบที่ 2 โดยตั้งรอบการทำงานเป็น 3 ช่วงการทำงานคือ เริ่มจากอุณหภูมิปกติจนถึงอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 13 นาที เมื่อถึงอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ให้อุณหภูมิลงที่เป็นเวลา 6 นาที หลังจากนั้นให้ลดอุณหภูมิลง ซึ่งใช้เวลาประมาณ 5-15 นาที เมื่อทำการย่อยชุดตัวอย่างแล้วตั้งทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลง แล้วนำตัวอย่างมากรองและปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP-AES (Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectrometer)

ตารางที่ 3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างกากตะกอน

การวิเคราะห์	มาตรฐาน/วิธี/เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์
1. การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ	สี รูปร่าง ลักษณะโดยทั่วไป
2. การวิเคราะห์ลักษณะความชื้น (%)	อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง
3. การทดสอบการชะละลาย	WET, US EPA SW-846 Method 1311
4. การวิเคราะห์โลหะหนักทั้งหมด	US EPA SW-846 Method 3052 , ICP

3.2.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดโดยการเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนัก

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด (Analytical balance)
2. กระดาษกรองใยแก้ว (GF/C) ในการทดสอบการชะละลาย
3. กระดาษกรอง 0.45 ไมโครเมตร ใช้ในการกรองสารละลาย
4. เครื่องย่อยสลายสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave digester) การย่อยตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก
5. Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก

สารเคมี

1. กรดบอริก (H_3BO_3) ความเข้มข้น 0.87 โมลต่อลิตร
2. กรดไนตริก (HNO_3) ความเข้มข้นร้อยละ 65
3. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ใช้ในการย่อยสลายสารตัวอย่าง
4. กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ใช้ในการย่อยสลายสารตัวอย่าง

3.2.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ เป็นการวิเคราะห์ลักษณะโดยทั่วไปของปูนซีเมนต์ (Appearance) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นปูนซีเมนต์ที่มีจำหน่ายโดยทั่วไป

3.2.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางเคมี

1. การวิเคราะห์โลหะหนักทั้งหมด (Total heavy metal) เริ่มจากการย่อยสลายกากตะกอน โดยวิธีการย่อยสลายด้วยเครื่องไมโครเวฟ (Microwave Digester) ตามมาตรฐาน US EPA SW 846 Method 3052 (EPA, 1995) ขั้นตอนเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.2.1.2 (การวิเคราะห์โลหะหนักทั้งหมด (Total heavy metal))

ตารางที่ 3.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างปูนซีเมนต์

การวิเคราะห์	มาตรฐาน/วิธี/เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์
1. ลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไป	สี และ ลักษณะ โดยทั่วไป
2. การวิเคราะห์โลหะหนักทั้งหมด	US EPA SW-846 Method 3052 , ICP

3.2.3 การทดสอบคุณสมบัติโดยทั่วไปในการปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็ง

ในการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งกากตะกอนหรือวัสดุปนเปื้อนชนิดต่าง ๆ เมื่อทำการบำบัดด้วยวิธีนี้แล้ว ควรมีการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างก้อนแข็ง เพื่อเป็นการประเมินความปลอดภัยและเพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกวิธีการกำจัดในขั้นตอนต่อไป

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด (Analytical balance)
2. กระดาษกรองใยแก้ว (GF/C) ในการทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของ US EPA SW 846 Method 1311
3. กระดาษกรอง 0.45 ไมโครเมตร ใช้ในการกรองสารละลายเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก

4. เครื่องย่อยสลายสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave digester) การย่อยตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก

5. Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก

6. เครื่องฉาบปูนซีเมนต์ ใช้ในการหล่อก้อนแข็ง

7. เครื่องผสมปูนซีเมนต์ ใช้ในการหล่อก้อนแข็ง

8. เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด ในใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งที่ผ่านการบ่มที่ระยะเวลาบ่มที่กำหนด

9. แบบหล่อขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ใช้ในการหล่อก้อนแข็ง

10. เครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary Agitator) ใช้ในการทดสอบการชะละลาย

สารเคมี

1. กรดบอริก (H_3BO_3) ความเข้มข้น 0.87 โมลต่อลิตร

2. กรดไนตริก (HNO_3) ความเข้มข้นร้อยละ 65 เพื่อใช้ในการปรับค่าพีเอชของสารละลายและการล้างภาชนะในการสกัดโลหะหนัก

3. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ใช้ในการย่อยสลายสารตัวอย่าง

4. กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ใช้ในการย่อยสลายสารตัวอย่าง

5. แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

6. โซเดียมอะซิเตต ($NaOAc$) ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร

7. กรดอะซิติก ($HOAc$) ใช้ในการปรับค่าพีเอชในการทดสอบการสกัดแบบขั้นตอน

8. กรดซิตริก ใช้ในการเตรียมน้ำสกัดในการทดสอบความเข้มข้นของโลหะหนักตามมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

9. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้นร้อยละ 30

10. แอมโมเนียมอะซิเตต (NH_4OAc) ความเข้มข้น 3.2 โมลต่อลิตร

11. ไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ ($NH_2.OH.HCl$) ความเข้มข้น 0.04 โมลต่อลิตร

3.2.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1(OPC) ประเภทที่ใช้วัตถุคิบและเชื้อเพลิงทดแทน (จากบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)) และปูนซีเมนต์ชนิดที่ไม่มีการใช้วัตถุคิบและเชื้อเพลิงทดแทน น้ำประปา และทรายละเอียด

วิธีการหล่อก้อนตัวอย่าง

1. ชั่งกากตะกอนและปูนซีเมนต์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยกากตะกอนเท่ากับร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก
2. ชั่งกากตะกอน ปูนซีเมนต์และทราย เพื่อใช้ในขั้นตอนการหล่อก้อนตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM 109/C109 M-99 สำหรับแบบหล่อ 5x5x5 เซนติเมตร³ โดยใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ผสมกากตะกอน: ทรายละเอียด : น้ำเท่ากับ 1:2.75:0.5 โดยน้ำหนัก และผสมให้เข้ากัน โดยใช้เครื่องผสมปูนซีเมนต์
3. เทส่วนผสมที่ได้ลงในแบบหล่อโดยแบ่งการเทเป็น 2 ชั้น สำหรับชั้นแรกหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร แล้วกระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้ง 32 ครั้งใน 10 วินาที แบ่งเป็น 4 รอบ เมื่อกระทุ้งครบทุกช่องแล้ว เทส่วนผสมที่เหลือลงในแบบหล่อให้เต็มแล้วทำการกระทุ้งเช่นเดียวกับชั้นแรก เมื่อเสร็จแล้วใช้เกรียงปาดส่วนที่เกินออก
4. หลังจากหล่อก้อนแข็งเสร็จให้นำตัวอย่างไว้ในที่ชื้น ถอดแบบออกในเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบ่มตัวอย่างที่อายุบ่ม 3 , 7 , 14 และ 28 วัน โดยการใช้อุปกรณ์ในการรดน้ำก่อนตัวอย่างตลอดเวลาที่ทำการบ่ม
5. เมื่อครบตามกำหนดระยะเวลาบ่ม นำก้อนตัวอย่างมาวัดขนาดหน้าตัด ความสูง และชั่งน้ำหนักของก้อนมอร์ตาร์ในทุกอัตราส่วน

เมื่อทำการหล่อก้อนแข็งและครบตามระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ นำมาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression testing Machine) ขั้นตอนในการทดสอบเริ่มจากการนำก้อนตัวอย่างที่อายุบ่มต่าง ๆ มาทดสอบกำลังการรับแรงอัดโดยใช้เครื่องทดสอบอย่างละ 3 ก้อนต่อหนึ่งตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ย โดยทำการกดอัดจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบวิบัติ และทำการบันทึกกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบและนำมาคำนวณจากสมการที่ 3-1

สมการการรับแรงอัด

กำลังอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่าง = น้ำหนักกดประลัย/พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง (3-1)
 สำหรับหน่วยการรับแรงอัดที่ใช้โดยทั่วไป คือ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (Kg/cm²) และนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm²)

3.2.3.2 การทดสอบความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง เมื่อทำการหล่อก้อนตัวอย่างและทำการบ่มที่อายุบ่มต่าง ๆ แล้วนำก้อนตัวอย่างมาทดสอบความหนาแน่นในทุกอัตราส่วนและคำนวณตามสมการ 3-2

ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง = น้ำหนักของก้อนตัวอย่าง (กรัม) ต่อปริมาตร (cm³) (3-2)



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างก้อนแข็งที่อายุบ่ม 28 วันและอุปกรณ์ในการบ่มก้อนตัวอย่าง

3.2.3.3 การสกัดแยกโลหะหนักด้วยวิธี Sequential extraction Test โดยการเลือกตัวอย่างก้อนแข็งที่อายุบ่ม 28 วัน เพื่อประเมินถึงการชะละลายของโลหะหนักในสภาวะและรูปแบบการชะละลายต่าง ๆ โดยการใช้น้ำสกัดที่มีคุณสมบัติและค่าพีเอชที่แตกต่างกัน โดยแบ่งการทดสอบออกได้เป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การสกัดด้วยแมกนีเซียมคลอไรด์ เพื่อทำการแยกสารที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนง่าย

1. ชั่งตัวอย่างก้อนแข็งที่บดละเอียดปริมาณ 5 กรัมใส่ลงในหลอดพลาสติกชนิดพีวีซี
2. เติมน้ำแมกนีเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 M จำนวน 40 มิลลิลิตร (อัตราส่วนของแข็งต่อสารละลายเท่ากับ 1 : 8)
3. นำตัวอย่างเข้าเครื่องกวนเขย่าแบบหมุนเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
4. นำตัวอย่างตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนและกรองตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

ขั้นตอนที่ 2 การสกัดด้วยโซเดียมอะซิเตต เพื่อแยกพันธะคาร์บอเนต

1. นำกากที่เหลือจากขั้นตอนที่ 1 ข้อที่ 4 เติมน้ำโซเดียมอะซิเตตความเข้มข้น 1 M จำนวน 40 มิลลิลิตร (อัตราส่วนของแข็งต่อสารละลายเท่ากับ 1 : 8)
2. ปรับพีเอช (pH) ให้เท่ากับ 5 ด้วยกรดอะซิติก
3. นำตัวอย่างเข้าเครื่องกวนเขย่าแบบหมุนเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
4. นำตัวอย่างที่ได้ออกมาตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน หลังจากนั้นทำการเทกรองน้ำตัวอย่างที่ได้เพื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ต่อไป

ขั้นตอนที่ 3 การสกัดด้วยไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ เพื่อทำการแยกพันธะเหล็กและแมงกานีสออกไซด์

1. นำกากส่วนที่เหลือจากขั้นตอนที่ 2 ข้อที่ 4 เติมไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.04 M ในกรดอะซิติก 25 % โดยปริมาตร จำนวน 100 มิลลิลิตร (อัตราส่วนของแข็งต่อสารละลายเท่ากับ 1 : 20)

2. นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 96 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

3. นำตัวอย่างที่ได้ออกมาตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน หลังจากนั้นทำการกรองน้ำตัวอย่างเพื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ต่อไป

ขั้นตอนที่ 4 การสกัดด้วยแอมโมเนียมอะซิเตต เพื่อแยกพันธะสารอินทรีย์และซัลไฟด์

1. นำกากที่เหลือจากขั้นตอนที่ 3 ข้อที่ 3 เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 % จำนวน 100 มิลลิลิตร (อัตราส่วนของแข็งต่อสารละลายเท่ากับ 1 : 20)

2. นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

3. ตั้งทิ้งไว้ให้อุณหภูมิจนของสารละลายลดลง หลังจากนั้นทำการเติมแอมโมเนียมอะซิเตต ความเข้มข้น 3.2 M ในกรดไนตริก 20 % โดยปริมาตร

4. นำไปเข้าเครื่องกวนเขย่าแบบหมุนเป็นเวลา 30 นาที

5. นำตัวอย่างที่ได้ออกมาตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน หลังจากนั้นทำการกรองน้ำตัวอย่างเพื่อนำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 5 ส่วนที่เหลือจากการสกัด

1. นำกากตะกอนที่ได้จากขั้นตอนทั้งหมดมาย่อยสลายและวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมด

2. นำตัวอย่างที่ได้ในแต่ละขั้นตอนไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP เพื่อทำการตรวจสอบสารประกอบของโลหะหนักที่สกัดได้ในแต่ละขั้นตอน

3.2.3.4 การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐาน US EPA SW 846 method 1311

1. การเตรียมน้ำสกัด

น้ำสกัดชนิดที่ 1 เติมกรดอะซิติกเข้มข้น 5.7 มิลลิลิตร ลงในขวดที่มีน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 N จำนวน 64.3 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร ถ้าเตรียมถูกต้อง พีเอชจะมีค่าประมาณ 4.93 ± 0.05

น้ำสกัดชนิดที่ 2 เติมกรดอะซิติกเข้มข้น 5.7 มิลลิลิตร ลงในขวดที่มีน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร พีเอชจะมีค่าประมาณ 2.88 ± 0.05

2. การเลือกน้ำสกัดที่เหมาะสม ในกรณีที่มีปริมาณของแข็งในตัวอย่างที่นำมาทำการทดสอบมากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 %

2.1 แบ่งตัวอย่างที่เป็นของแข็งขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 มิลลิเมตร จำนวน 500 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่น 96.5 มิลลิลิตร หลังจากนั้นปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา (Watch glass) และนำไปกวนเป็นเวลา 5 นาที วัดและจดค่าพีเอช ถ้าค่าพีเอชที่ได้น้อยกว่า 5.0 เลือกใช้น้ำสกัดชนิดที่ 1

2.2 ถ้าพีเอชมากกว่าหรือเท่ากับ 5.0 เติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N จำนวน 3.5 มิลลิลิตร ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา (Watch glass) นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และวัดค่าพีเอช ถ้าค่าพีเอชน้อยกว่า 5 เลือกใช้น้ำสกัดชนิดที่ 1 แต่ถ้าพีเอชมากกว่า 5 เลือกใช้น้ำสกัดชนิดที่ 2

3. วิธีการทดลอง

3.1 ถ้าตัวอย่างเป็นของเหลวหรือมีของแข็ง (Dry solid) ปะปนอยู่ในปริมาณที่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 ให้กรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (Glass fiber filter) ที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน และนำตัวอย่างของเหลวที่ผ่านการกรองมาวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดยใช้เครื่อง ICP

3.2 หากตัวอย่างมีของแข็งปนอยู่ในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 0.5 ให้นำมาทดสอบด้วยวิธีดังต่อไปนี้

3.2.1 นำตัวอย่างจำนวน 100 กรัม เติมลงในขวดโพลีโพรพิลีน

3.2.2 เลือกน้ำสกัดที่เหมาะสมโดยใช้วิธีทดสอบดังกล่าวไว้แล้วในหัวข้อด้านบน นำมาเติมน้ำในขวดแล้วปรับปริมาตรของของผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก(กรัม)ของตัวอย่าง

3.2.3 นำตัวอย่างมาเข้าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary agitator) ที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

3.2.4 กรองสารละลายจากการสกัด (Leachate) ด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมโครเมตร

3.2.5 นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วมาทำการปรับค่าพีเอชให้น้อยกว่า 2 ด้วยกรดไนตริกจากนั้นนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP

3.2.3.5 การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

1. นำ 50 กรัมของตัวอย่างก้อนแข็งหลังจากทำการบดแล้วลงในขวดโพลีเอทิลีน

2. เติมน้ำสกัด 500 มิลลิลิตรและรีบปิดฝาตัวอย่างเพื่อป้องกันไม่ให้ออกซิเจนในอากาศละลายลงไปในตัวอย่าง และนำไปเขย่าด้วยเครื่องกวนเขย่าแบบหมุนเป็นเวลา 48 ชั่วโมง
3. จากนั้นนำเอาของผสมไปกรองด้วยเมมเบรนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน
4. ควรปรับอุณหภูมิในระหว่างการสกัดให้อยู่ระหว่าง 20-40 องศาเซลเซียส
5. ปรับสภาพสารละลายที่ได้จากกรองให้เป็นกรดด้วยกรดไนตริก
6. นำมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนัก

ตารางที่ 3.3 การทดสอบคุณสมบัติโดยทั่วไปของตัวอย่างก้อนแข็ง

การวิเคราะห์	มาตรฐาน/วิธี/เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์
1. การหล่อก้อนตัวอย่าง	ASTM C109/C109 M-99
2. การทดสอบความหนาแน่น	ASTM C138/C138 M-08
3. การทดสอบการรับแรงอัด	Compression testing Machine
4. การสกัดแยกโลหะหนัก	Sequential extraction Test
5. การทดสอบการชะละลาย	US EPA SW 846 method 1311, WET

3.2.4 การทดสอบการชะละลายที่สัมพันธ์กับรูพรุนหรือโพรงในมอร์ต้าและความสามารถในการเคลื่อนของโลหะหนักในตัวอย่างก้อนแข็ง (Pore water and maximum mobile fraction test (PW-MMF))

ในการทดสอบนี้เพื่อศึกษาถึงลักษณะการชะละลายของโลหะหนักที่มีอยู่ภายในรูพรุนของก้อนแข็ง ซึ่งทำการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนเพื่อประเมินลักษณะการชะละลายของโลหะหนักออกสู่ภายนอก

โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ที่สภาวะสมดุลของสารละลาย ซึ่งมีการกำหนดอัตราส่วน L/S ratio (Liquid/Solid Ratio) ของก้อนแข็งกับน้ำชะละลายที่มีผลต่อปริมาณและความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดที่สามารถชะละลายออกมาจากตัวอย่างก้อนแข็ง ที่ทำการบดละเอียดแล้ว

1. นำตัวอย่างก้อนแข็งที่บดละเอียดแช่ในน้ำที่ปราศจากไอออนในภาชนะปิดเพื่อเตรียมการเขย่าสารละลายเพื่อให้เกิดสมดุล
2. กำหนดค่าการชะละลายด้วยอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (Liquid/Solid Ratio : L/S Ratio) เท่ากับ 1,5,10,50 และ 100 มิลลิลิตรต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง)
3. นำมาเขย่าระยะเวลา 7 วัน นำสารละลายที่ได้มากรองเพื่อวัดค่าพีเอชและความนำไฟฟ้า

4. นำสารละลายที่กรองได้มาวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักที่อัตราส่วน L/S Ratio ต่าง ๆ

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (Liquid/Solid Ratio) ต่าง ๆ

ตัวอย่าง	Liquid/Solid Ratio	ปริมาณมอร์ตา (กรัม)	ปริมาณน้ำ (มล.)
1	100	1	100
2	50	2	100
3	10	10	100
4	5	20	100
5	1	100	100
6	0.5	200	100

3.2.5 การทดสอบอิทธิพลของค่าพีเอชที่มีต่อลักษณะการชะละลายของก้อนแข็ง Acid neutralization capacity test (ANC) (Liquid/Solid ratio เท่ากับ 10 ml/g)

เพื่อทำการศึกษาค่าความเป็นกรดต่างที่มีผลต่ออัตราการชะละลายของโลหะหนักโดยการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดต่างในช่วงเริ่มต้นและช่วงสุดท้ายกับความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิด โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน

1. การไตเตรต (Titration) เพื่อหาปริมาณกรดไนตริกที่ใช้ในการปรับค่าพีเอชของสารละลายที่มีมอร์ตาบดละเอียดแช่อยู่ที่สภาวะสมดุล

1.1 นำตัวอย่างก้อนแข็งและมอร์ตาเปล่าที่บดแล้วมาแช่ในน้ำที่ปราศจากอิออน โดยกำหนดค่าอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งเท่ากับ 10

1.2 นำมาไตเตรตกับกรดไนตริกเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยทำการหยดกรดไนตริกลงไป และกวนเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารละลายอยู่ในสภาวะสมดุล นำสารละลายที่ได้มาวัดค่าพีเอช

2. การทดลองแบบแบทช์ (Batch Experiment)

2.1 หลังจากได้จำนวนโมลของกรดไนตริกที่ใช้ในการปรับค่าพีเอชแล้ว นำตัวอย่างก้อนแข็งและตัวอย่างมอร์ตาเปล่าที่บดละเอียดมาแช่ในน้ำที่ปราศจากอิออน

2.2 เติมกรดไนตริกเพื่อปรับค่าพีเอชให้มีค่าต่างๆ อยู่ในช่วงพีเอช 4-12 โดยกำหนดค่าอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งเท่ากับ 10

2.3 นำตัวอย่างมาเขย่าด้วยเครื่องเขย่าจนเกิดสมดุลของการละลายของสารจากตัวอย่าง ก้อนแข็ง ระยะเวลา 7 วัน กรองสารละลาย และวัดค่าพีเอช หลังจากนั้นนำมาวัดความเข้มข้นของ โลหะหนัก

3.2.6 การทดสอบการชะละลาย โดยการประยุกต์ใช้การทดสอบแบบ Monolithic Leaching test (ML) EA NEN 7375:2004

การทดสอบนี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะการชะละลายของสารอนินทรีย์จากตัวอย่าง ก้อนแข็ง (Moulded) หรือก้อนแข็งที่เกาะกันแน่น (Monolithic materials) โดยใช้การทดสอบแบบ Diffusion test ซึ่งโดยทั่วไปหมายถึงการทดสอบแบบ Tank test

โดยในการทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงลักษณะการชะละลายของสารอนินทรีย์ จากก้อนแข็งในสภาพที่มีอากาศ (Aerobic conditions) นอกจากนี้ตัวแปรอื่น ๆ สามารถอนุมานได้ จากการทดสอบรวมถึงขอบเขตของการเกิดลักษณะการชะล้างที่ผิวหน้าและสัมประสิทธิ์ของการ แพร่สามารถประเมินได้จากช่วงในการทดสอบที่ระยะเวลาอันยาวนานได้ในการทดสอบการชะ ละลายเริ่มจากการแช่ก้อนตัวอย่างที่อายุบ่ม 28 วันในน้ำปราศจากไอออนและ น้ำฝนกรดสังเคราะห์ ตามระยะเวลาที่กำหนด โดยแบ่งออกเป็น 8 ช่วงได้แก่ ที่ระยะเวลา 0.25 ,1,2.25,4,9,16 และ 64 วัน ตามลำดับ เมื่อทำการเก็บน้ำตัวอย่างแล้วนำมากรองและนำมาวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดต่าง ค่าความ นำไฟฟ้า และปริมาณ โลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมาในแต่ละช่วงเวลา เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หา กลไกการชะละลายของโลหะหนักที่ทำการพิจารณา

1. ตัวอย่างสารละลายที่ใช้ในการทดลอง

1.1 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water) โดยปิดฝาของภาชนะตลอดการทดสอบ ที่ค่า พีเอชเริ่มต้นประมาณ 5.5 - 6.5

1.2 น้ำฝนกรดสังเคราะห์ (Synthetic acid rain water) เตรียมตัวอย่างน้ำจากมาตรฐาน US EPA SW-846 method 1320

2. วิธีการทดลอง

2.1 ทำการเก็บตัวอย่างน้ำและวัดพีเอชที่จุดเริ่มต้นการทดลอง

2.2 หลังจากนั้น ทำการเก็บตัวอย่างและเปลี่ยนตัวอย่างสารละลายใหม่เป็นเวลา 0.25 , 1 2.25 , 4 , 9 ,16 ,36 และ 64 วัน ตามวิธีการทดสอบของ EA NEN 7375 โดยทุกครั้งที่เปลี่ยนสารชะ ละลายจะไม่มี การล้างก้อนตัวอย่าง (ไม่มีการเปลี่ยนภาชนะ)

2.3 นำน้ำตัวอย่างที่ได้มาทำการกรองและวัดพีเอช และความนำไฟฟ้าหลังจากนั้นทำการ ปรับพีเอชของสารละลายที่พีเอชต่ำกว่า 2 โดยใช้กรดไนตริก

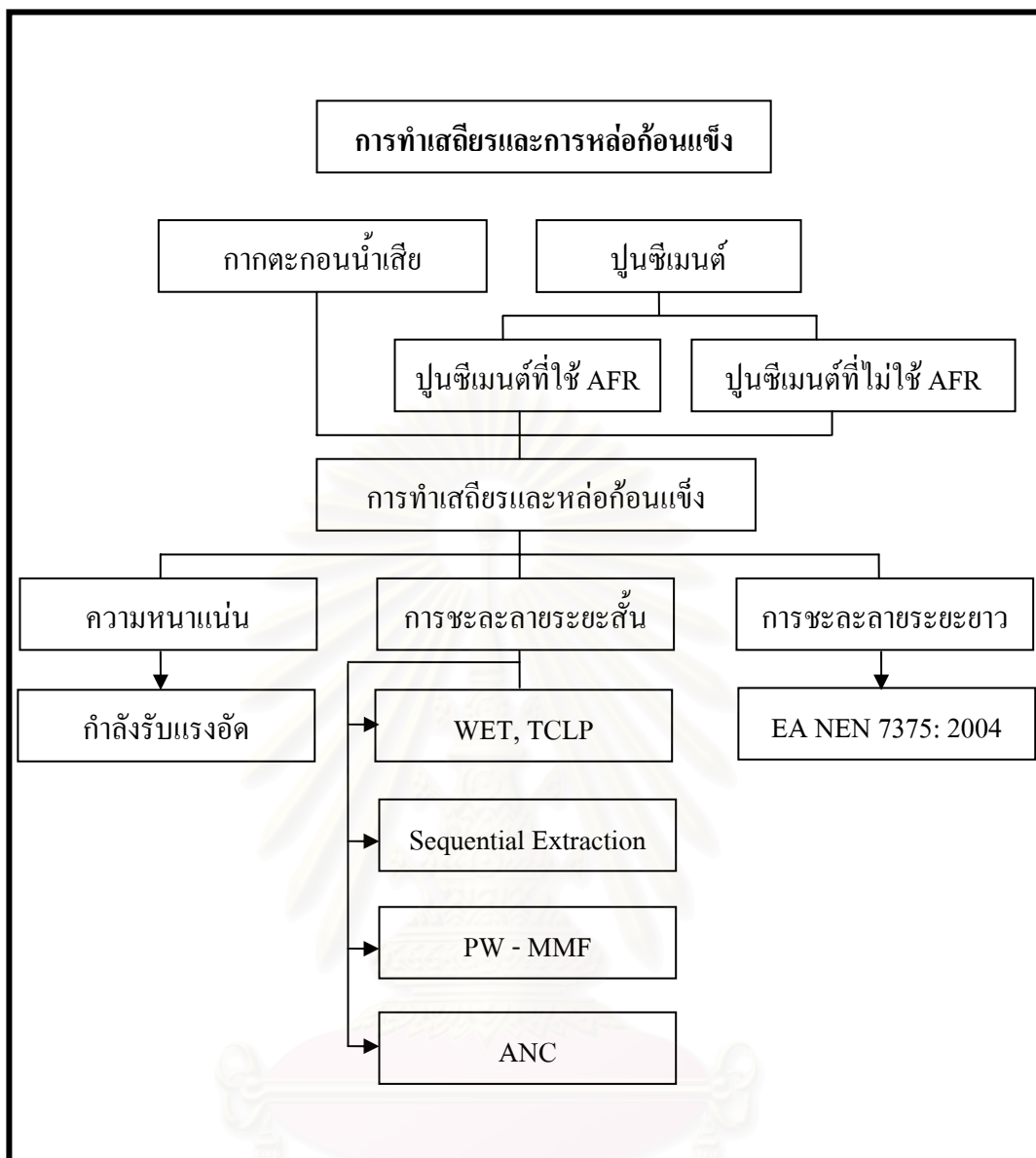
2.4 นำน้ำที่ผ่านการชะละลายที่กรองแล้วไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักที่ชะละลายออกมาทั้งชนิดและปริมาณด้วยเครื่อง ICP-AES จากนั้นนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานน้ำใต้ดินเพื่อใช้ในการประเมินความปลอดภัย



รูปที่ 3.2 การทดสอบการชะละลายโดยการประยุกต์ตามมาตรฐาน EA NEN 7375:2004

ตารางที่ 3.5 การทดสอบการชะละลายของตัวอย่างก้อนแข็ง

การวิเคราะห์	มาตรฐาน/วิธี/เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์
1. การทดสอบความสัมพันธ์ของรูพรุนในตัวอย่างก้อนแข็งที่มีต่อการชะละลายของโลหะหนัก	เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช (pH) และอัตราส่วน L/S ratio (Liquid/Solid) กับค่าความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิด
2. ค่าพีเอชที่มีผลต่อการชะละลายของโลหะหนัก	เขียนกราฟระหว่างค่าพีเอชกับความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิด
3. การทดสอบการชะละลายระยะยาว	EA NEN 7375:2004
4. การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก	US EPA SW 846 Method 3052 ,ICP



รูปที่ 3.3 สรุปภาพรวมขั้นตอนในการวิจัยเรื่องการชะละลายระยะยาวของโลหะหนักในการทำเสถียรและการหล่อก้อนแข็งกากตะกอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอนจากการชุบผิวโลหะ

กากตะกอนชุบโลหะในงานวิจัยเป็นตัวอย่างกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการบำบัดทางเคมี โดยผ่านกระบวนการตกตะกอนและรีดกากตะกอนจากอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ บริษัท มารูยาซี อินดัสตรีส์ (ไทยแลนด์) จำกัด นิคมอุตสาหกรรมอีสเทิร์นซีบอร์ด อำเภอปลวกแดง จังหวัดระยอง

4.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ตัวอย่างกากตะกอนที่นำมาทดสอบมีลักษณะเป็นของแข็งละเอียด สีเหลืองและมีความชื้นร้อยละ 87 ในงานวิจัยมีการนำกากตะกอนมาอบแห้งและบดละเอียดเพื่อทำการปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์เพื่อศึกษาถึงกลไกการชะละลายของโลหะหนัก



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างกากตะกอนชนิดเปียกและอบแห้ง

4.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางเคมี ประกอบด้วยการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดและการทดสอบการชะละลายระยะสั้น โดยเป็นการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 และการทดสอบการชะละลายตามวิธีมาตรฐานของ US EPA SW-846 method 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure หรือ TCLP)

1. การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมด โดยการย่อยกากตะกอนด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Digester) ตามวิธีมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 3052 จากนั้นทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งหมดด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP) ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณของโลหะหนักทั้งหมดจากตัวอย่างกากตะกอน

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (mg/Kg)	ร้อยละ	มาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม (mg/Kg)
Al	3,701.93	2.32	N/A
Cd	63.56	0.04	100
Cr	475.96	0.30	Cr ⁺⁶ =500, Cr ⁺³ =2,500
Cu	220.63	0.14	2,500
Fe	12,673.32	7.93	N/A
Hg	9.37	0.01	20
Mn	1,312.24	0.82	N/A
Ni	54.73	0.03	2,000
Pb	53.67	0.03	1,000
Sr	8,825.31	5.53	N/A
Tl	26.289	0.02	N/A
V	60.777	0.04	2,400
Zn	109,911.36	68.81	5,000

N/A คือไม่มีกำหนดไว้ในประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรม

จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดของตัวอย่างกากตะกอนพบว่ามีสังกะสีเป็นส่วนประกอบหลักโดยมีอัตราส่วนร้อยละ 68.81 ของโลหะหนักทั้งหมด นอกจากนี้ยังประกอบด้วยเหล็กและสตรอนเตียมในปริมาณสูงอีกด้วย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (Total Threshold Limit Concentration (TTLC)) พบว่าสังกะสีมีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนด จึงจัดว่ากากตะกอนที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้เป็นกากของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548 ซึ่งในงานวิจัยได้ทำการศึกษาธาตุที่มีปริมาณสูงในกากตะกอน 4 ชนิดคือ อลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) สตรอนเตียม (Sr) และสังกะสี (Zn) นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาการชะละลายของโครเมียม (Cr) ซึ่งเป็นธาตุที่มีความเป็นพิษสูง โดยทำการพิจารณาถึงความเข้มข้นและรูปแบบการยึดจับในก้อนแข็ง รวมทั้งศึกษากลไกการชะละลายที่มีผลต่อการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งกากตะกอนด้วยปูนซีเมนต์

2. การทดสอบการชะละลาย (Leaching test)

2.1 การทดสอบการชะละลายด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) พบว่าโลหะหนักมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานยกเว้นแคดเมียม (Cd) และสังกะสี (Zn) ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 5.830 และ 334.553 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับมีค่าเกินมาตรฐานเมื่อเปรียบเทียบกับค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) จึงถูกพิจารณาว่าเป็นกากของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

2.2 การทดสอบการชะละลายตามวิธีมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure หรือ TCLP) พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักโดยส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ยกเว้นสังกะสี (Zn) มีค่าเกินมาตรฐาน (Maximum Concentration of Contaminants for Toxicity Characteristic) ซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากับ 387.331 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของโลหะหนักจากกากตะกอนที่ทดสอบการชะละลายทั้งสองวิธีถูกพิจารณาว่าเป็นกากของเสียอันตราย ซึ่งต้องมีการบำบัดและกำจัดอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ เนื่องจากมีความเป็นพิษและอันตราย โดยสามารถส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งสามารถสรุปความเข้มข้นของกากตะกอนได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการทดสอบการชะละลายในตัวอย่างกากตะกอน

โลหะหนัก	ค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (มิลลิกรัม/ลิตร)	
		TCLP	Waste extraction test
Cd	1.0	0.8	5.830
Cr	5.0	0.032	0.940
Cu	25.0	0.457	0.793
Fe	N/A	0.017	16.283
Mn	N/A	0.850	0.312
Ni	20	0.122	0.912
Pb	5.0	0.039	1.602
Sr	N/A	0.081	0.563
Tl	7.0	0.026	1.9195
Zn	250	387.331	334.553

N/A คือไม่มีการกำหนดความเข้มข้นไว้ในมาตรฐาน (US EPA SW-846 method 1311; Maximum Concentration of Contaminants for Toxicity Characteristic และประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548)

4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์

ตัวอย่างปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นปูนซีเมนต์ที่มีจำหน่ายทั่วไป (Ordinary Portland Cement) โดยเลือกปูนซีเมนต์ในการวิจัยแบบชนิดที่มีการเผาร่วมกากของเสียอันตราย (Co-processing) และปูนซีเมนต์ที่ใช้กระบวนการผลิตแบบเดิม โดยตัวอย่างปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติทั่วไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในตัวอย่างปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดด้วยวิธีการย่อยสลายตัวอย่าง (Microwave Digester) ตามวิธีมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 3052 และวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP) ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ปริมาณโลหะหนักของตัวอย่างปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด

โลหะหนัก	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (mg/Kg)	
	ปูนซีเมนต์ที่ไม่มีการเผาร่วมกากของเสีย (A)	ปูนซีเมนต์ที่มีการเผาร่วมกากของเสีย (S)
Al	7,989.03	5,968.80
Cd	1.26	1.90
Cr	32.27	50.14
Cu	14.85	148.72
Fe	8,240.06	10,568.60
Mn	199.07	276.94
Ni	19.09	29.74
Pb	19.71	29.90
Sr	128.04	184.32
Zn	41.19	194.19

4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างก้อนแข็ง

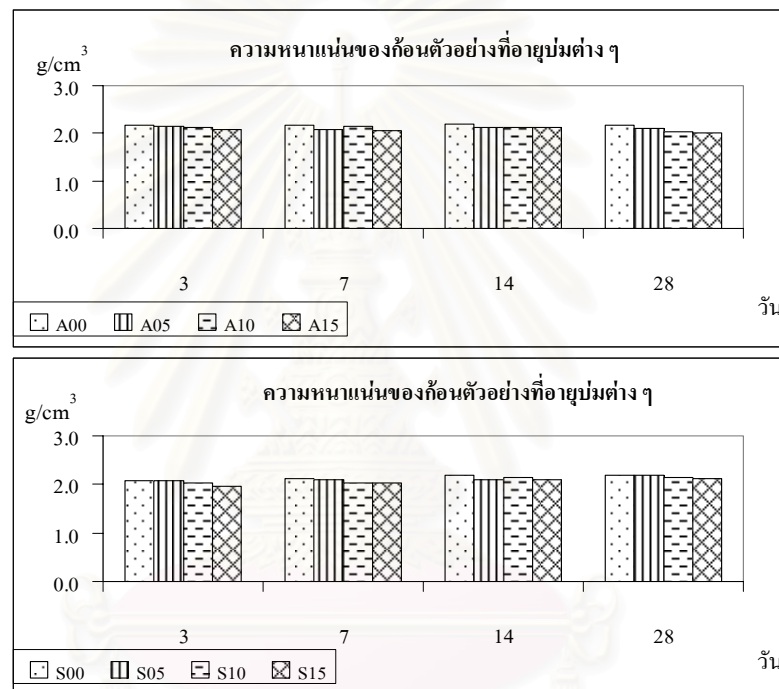
ในการทดสอบก้อนแข็งจากการบำบัดและกำจัดกากของเสียอันตรายด้วยวิธีการปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็งโดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานประกอบด้วยการทดสอบลักษณะโดยทั่วไปของก้อนตัวอย่างที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ

การเตรียมตัวอย่างก้อนแข็งเพื่อทดสอบในขั้นตอนต่างๆ เริ่มจากการอบตัวอย่างกากตะกอนหลังจากนั้นนำมาบดละเอียดเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Li และคณะ, 2001) เพื่อใช้ในการหล่อก้อนแข็งต่อไป การหล่อก้อนแข็งเพื่อใช้ทดสอบกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง

ประกอบด้วย การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยกากตะกอนที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และร้อยละ 15 หลังจากนั้นทำการบ่มก้อนตัวอย่างด้วยระบบโปรยน้ำเพื่อนำไปทดสอบในขั้นตอนต่อไป

4.3.1 การทดสอบความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง

ในการทดสอบความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างเพื่อประเมินถึงความสามารถในการรับแรงอัดและผลกระทบจากกากตะกอนที่มีต่อก้อนแข็ง โดยทดสอบความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน ในทุกอัตราส่วนการแทนที่กากตะกอนด้วยปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 0 - ร้อยละ 15) และในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.2 การทดสอบความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง

จากผลการทดสอบความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างพบว่าก้อนตัวอย่างที่อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันมีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน ซึ่งก้อนตัวอย่างที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 (A00) จากปูนซีเมนต์ที่ไม่มีการเผาไหม้ของเสียมีความหนาแน่นเท่ากับ 2.17 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 15 (A15) มีค่าเท่ากับ 2.00 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่อายุบ่ม 28 วัน ในปูนซีเมนต์ชนิดที่มีการเผาไหม้ของเสียที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 (S00) มีความหนาแน่นเท่ากับ 2.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 15 (S15) มีค่าเท่ากับ 2.13 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยพบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยกากตะกอนเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย และมีลักษณะเดียวกันในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดดังแสดงในรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.4 การทดสอบความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง

ตัวอย่างก้อนแข็ง	อัตราส่วนการแทนที่ (ร้อยละ)	ความหนาแน่น (g/cm ³)			
		3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
A00	0	2.18	2.17	2.20	2.17
A05	5	2.15	2.07	2.13	2.10
A10	10	2.13	2.15	2.12	2.02
A15	15	2.11	2.06	2.12	2.00
S00	0	2.15	2.11	2.24	2.19
S05	5	2.19	2.09	2.10	2.18
S10	10	2.09	2.04	2.14	2.14
S15	15	2.03	2.03	2.12	2.13

หมายเหตุ : A00 = ปูนซีเมนต์ที่ไม่มีการเผาร่วมกากของเสียที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0

S00 = ปูนซีเมนต์ที่มีการเผาร่วมกากของเสียที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0

4.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่อายุบ่ม 3 , 7 , 14 และ 28 วัน โดยใช้อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยกากตะกอนที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.5 ซึ่งก้อนตัวอย่างที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 (A00) มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 324.59 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 15 (A15) มีค่าเท่ากับ 11.18 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรที่อายุบ่ม 28 วัน ในปูนซีเมนต์ชนิดที่มีการเผาร่วมกากของเสียที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 (S00) มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 369.33 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 15 (S15) มีค่าเท่ากับ 9.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

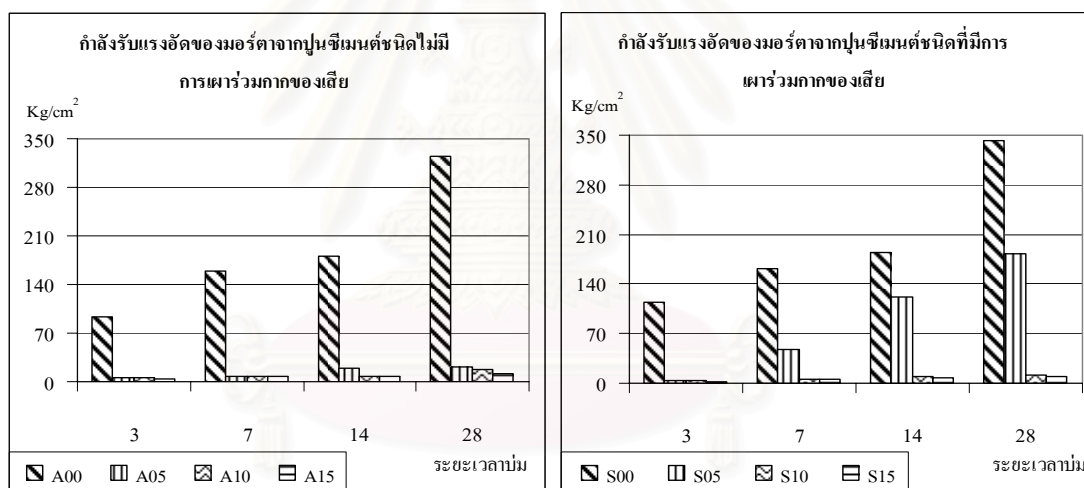
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างพบว่า ที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยกากตะกอนตั้งแต่ร้อยละ 5 เป็นต้นไปความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างลดลงอย่างมากเนื่องจากการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของสังกะสี และเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานของ US EPA, 1989 เกี่ยวกับผลิตภัณฑ์จากการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งเพื่อนำไปฝังกลบ ซึ่งมีค่าประมาณ 3.57 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (0.35 เมกะปาสคาล) พบว่ามีค่าเกินมาตรฐานในทุกอัตราส่วนและในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด โดยกากตะกอนส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงและลักษณะ โดยทั่วไปของก้อนตัวอย่าง โดยกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยกากตะกอนเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง

ตัวอย่างก้อนแข็ง	อัตราส่วนการแทนที่ (ร้อยละ)	กำลังรับแรงอัด (Kg/cm^2)			
		3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
A00	0	93.68	160.03	180.33	324.59
A05	5	5.84	7.70	19.04	21.13
A10	10	5.57	7.54	8.60	17.55
A15	15	3.02	7.15	8.16	11.18
S00	0	114.21	162.34	184.64	369.33
S05	5	4.38	95.85	166.43	288.00
S10	10	3.40	6.15	8.93	11.16
S15	15	2.78	5.71	7.48	9.50

หมายเหตุ : A00 = ปูนซีเมนต์ที่ไม่มีการเผาร่วมกากของเสียที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0

S00 = ปูนซีเมนต์ที่มีการเผาร่วมกากของเสียที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0



รูปที่ 4.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง

นอกจากนี้ในตัวอย่างก้อนแข็งที่มีการแทนที่ด้วยกากตะกอนยังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่องแบบช้า ๆ ในก้อนตัวอย่างดังจะเห็นได้จากการพัฒนาการรับแรงอัดตามระยะเวลาที่ทำการทดสอบ (Stegemann และ Zhou, 2009) โดยเพิ่มขึ้นจากระยะเวลาที่ 3 วัน, 7 วัน และ 14 วัน ซึ่งมีค่ามากที่สุดที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน นอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 15 ปูนซีเมนต์ที่ไม่มีการเผาร่วมกากของเสียมีอัตราการผลิตปฏิกิริยาไฮเดรชันและมีการพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีการเผาร่วมกากของเสียเพียงเล็กน้อย แต่ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 5 ปูนซีเมนต์ที่มีการเผาร่วมกากของเสียมีการพัฒนากำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วันได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่ไม่มีการเผาร่วมกากของเสีย

4.4 การสกัดโลหะหนักแบบลำดับขั้นด้วยวิธี Sequential extraction test

การศึกษาลักษณะเฉพาะทางเคมี (Specific chemical) หรือรูปแบบของพันธะ (bonding forms) ของโลหะหนักในตัวอย่างกึ่งแข็งเป็นไปได้ยาก จึงมีการประยุกต์ใช้การทดสอบแบบ Sequential extraction test ซึ่งให้ผลการทดสอบเกี่ยวกับสัดส่วนของโลหะหนักที่มีอยู่ในช่องว่าง (lattices) ของตัวอย่างกึ่งแข็งได้ (Zhang และคณะ, 2008) เนื่องจากสารประกอบโลหะหนักมีความสามารถในการละลายในน้ำสกัดได้แตกต่างกัน โดยเป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

การสกัดโลหะหนักแบบเป็นลำดับขั้นโดยการประยุกต์การทดสอบตามวิธีของ X.D. Li และคณะ (Li และคณะ, 2001) แบ่งเป็นการสกัดโลหะหนักตามลำดับขั้นตอนดังนี้

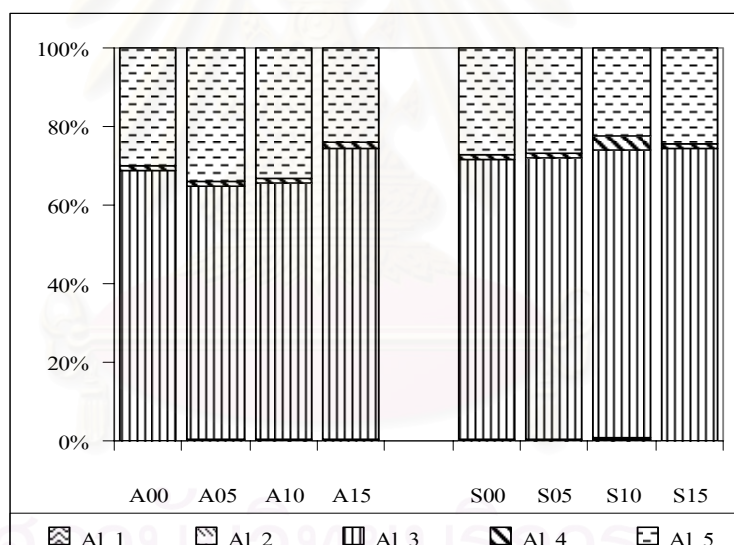
1. ในขั้นตอนแรกเป็นการสกัดพันธะของโลหะที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่าย โดยการใช้ น้ำสกัดที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ซึ่งการชะละลายในขั้นตอนนี้เป็นการสกัดโลหะหนักที่มีแนวโน้มในการชะละลายได้ง่ายในสภาวะปกติ
2. ขั้นตอนที่สองเป็นการสกัดโลหะที่มีพันธะกับคาร์บอเนต โดยเป็นการสกัดจากส่วนที่เหลือในขั้นตอนแรก
3. การสกัดโลหะหนักที่มีพันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์
4. การสกัดโลหะหนักที่มีพันธะกับสารอินทรีย์และซัลไฟด์
5. การสกัดในขั้นตอนสุดท้ายเป็นการสกัดสารประกอบของโลหะหนักที่เหลืออยู่ในส่วนที่เป็นกาก (Residual Fraction)

ตารางที่ 4.6 ความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งหมดจากการสกัดด้วยวิธี Sequential extraction test

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
	Al	Cr	Fe	Sr	Zn
A00	457.9	2.4	485.6	12.8	11.1
A05	419.2	3.6	431.4	10.7	479.4
A10	434.6	5.2	474.1	11.4	940.0
A15	355.5	6.5	474.7	10.2	1,376.8
S00	380.0	1.9	398.3	10.8	7.8
S05	320.4	2.8	356.1	8.5	374.7
S10	244.8	3.5	307.1	8.3	682.9
S15	351.5	6.2	464.7	9.1	1,387.6

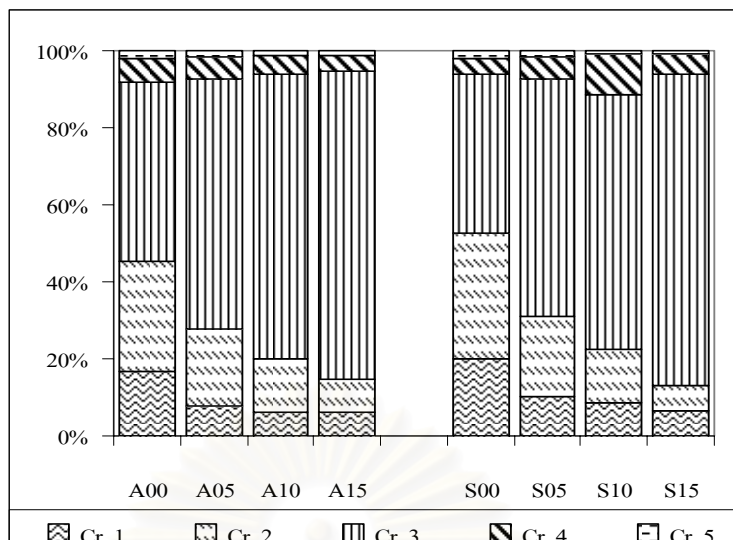
จากตารางที่ 4.6 แสดงความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งหมดที่ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential extraction test) ซึ่งพบว่าอลูมิเนียมถูกชะละลายออกมามากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะการชะละลายของ โครเมียมและสังกะสีจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยกากตะกอน และถูกชะละลายออกมาในปริมาณที่ใกล้เคียงกันในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสังกะสีและโครเมียมโดยส่วนใหญ่มาจากตัวอย่างกากตะกอนและความสามารถในการถูกยึดจับลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เพิ่มขึ้น

ในการวิเคราะห์การสกัดโลหะหนักแบบลำดับขั้นในตัวอย่างก้อนแข็งจากการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งกากตะกอนพบว่าอลูมิเนียมถูกชะละลายออกมาเล็กน้อยในขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 โดยอลูมิเนียมส่วนใหญ่อยู่ในพันธะเหล็กและแมงกานีสออกไซด์เฉลี่ยประมาณร้อยละ 68 ในปูนซีเมนต์ชนิดที่ไม่มี การเผา ร่วม กาก ของ เสี้ย อัตราย และ ร้อยละ 73 ในปูนซีเมนต์ชนิดที่มีการเผา ร่วม กาก ของ เสี้ย อัตราย นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออลูมิเนียมบางส่วนเหลืออยู่ในขั้นตอนสุดท้ายของการสกัดประมาณร้อยละ 30 และร้อยละ 25 ตามลำดับซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างเพียงเล็กน้อยในการยึดจับอลูมิเนียมในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.4



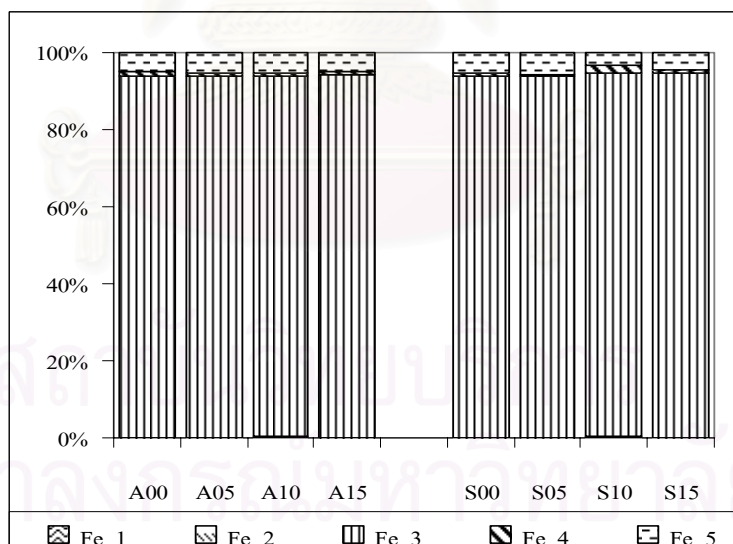
รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นของอลูมิเนียมในแต่ละขั้นตอนจากการสกัดด้วยวิธี Sequential Extraction test

จากผลการสกัดตามลำดับขั้นพบว่าโครเมียมถูกชะละลายออกมาในขั้นตอนแรกและขั้นตอนที่สองโดยมีปริมาณแปรผกผันกับการเพิ่มขึ้นของกากตะกอน โดยส่วนใหญ่โครเมียมยึดจับด้วยพันธะเหล็กและแมงกานีส ซึ่งมีลักษณะการชะละลายคล้ายคลึงกันในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยพบว่าโครเมียมและสตรอนเตียมละลายออกมามากกว่าโลหะหนักชนิดอื่นที่ทำการพิจารณา เนื่องจากช่วงพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการสกัดจึงยากที่จะชะละลายโลหะหนักในรูปคาร์บอเนต (ศศิธร อ้างถึง Li และคณะ, 2001)



รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของโครเมียมจากการสกัดด้วยวิธี Sequential Extraction test

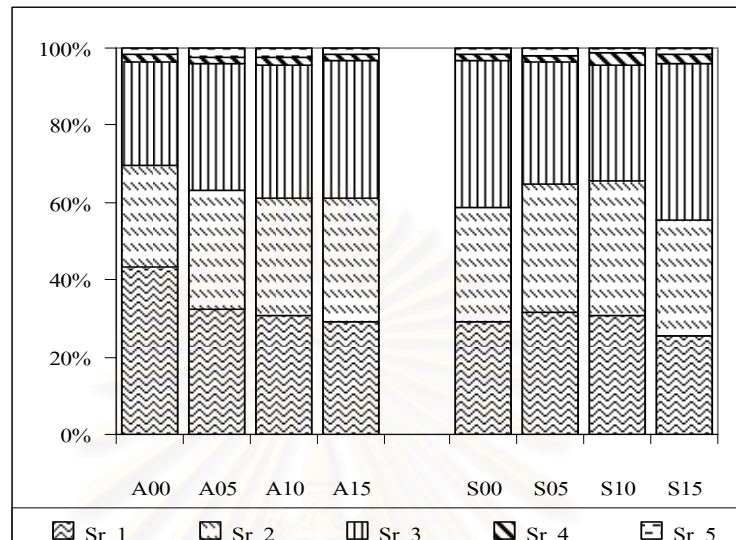
การชะละลายของเหล็กจากการสกัดแบบลำดับขั้นพบว่าเหล็กถูกชะละลายออกมามากที่สุด
ในขั้นตอนที่สามโดยมีปริมาณร้อยละ 90 เนื่องจากในปูนซีเมนต์มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก
โลหะหนักจึงมีโอกาสไปจับกับพันธะเหล็กออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่ามีเหล็กปริมาณร้อยละ 10
เหลืออยู่ในขั้นตอนสุดท้ายซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับการชะละลายของอลูมิเนียม



รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของเหล็กจากการสกัดด้วยวิธี Sequential Extraction test

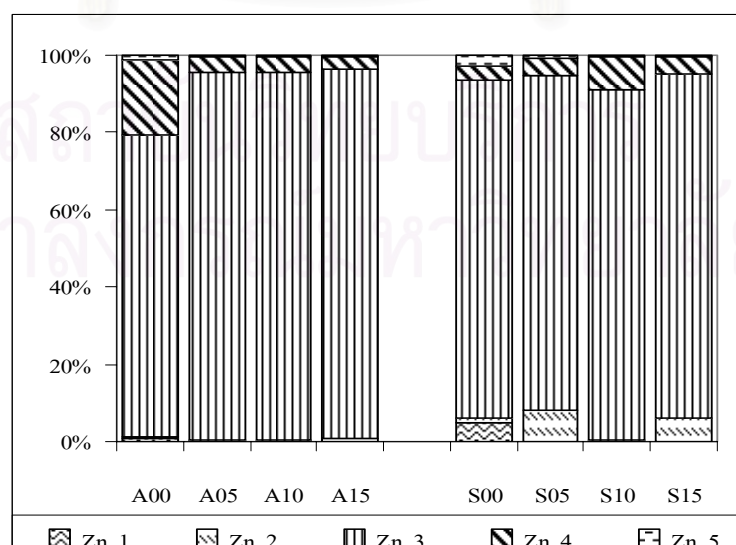
จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าโดยส่วนใหญ่สตรอนเตียม (Sr) ถูกชะละลายออกมาในสาม
ขั้นตอนแรกซึ่งมีรูปแบบการละลายคล้ายคลึงกันกับโครเมียม (Cr) ซึ่งจะเห็นได้ว่าโลหะหนักทั้ง
สองชนิดนี้สามารถถูกชะละลายได้ง่าย ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ

พบว่าโครเมียมถูกชะละลายออกมาในขั้นตอนแรกมากกว่าร้อยละ 50 โดยพบว่าถูกชะละลายออกมาในรูป (Cr^{6+}) ซึ่งมีความเป็นพิษสูง ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษในการกำจัดกากของเสียที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบหลัก



รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นของสตรอนเตียมจากการสกัดด้วยวิธี Sequential Extraction test

การชะละลายของสังกะสีพบว่าโดยส่วนใหญ่สังกะสีอยู่ในพันธะเหล็กและแมงกานีส โดยถูกชะละลายออกมาในขั้นตอนที่สามปริมาณมากที่สุดประมาณร้อยละ 90 และมีบางส่วนอยู่ในพันธะกับสารอินทรีย์และซัลไฟด์ ซึ่งโลหะโดยส่วนใหญ่ไม่อยู่ในพันธะนี้ยกเว้นโครเมียมและสังกะสี เนื่องจากองค์ประกอบของสารอินทรีย์อาจถูกทำลายในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ซึ่งมีการใช้ความร้อนสูงมาก

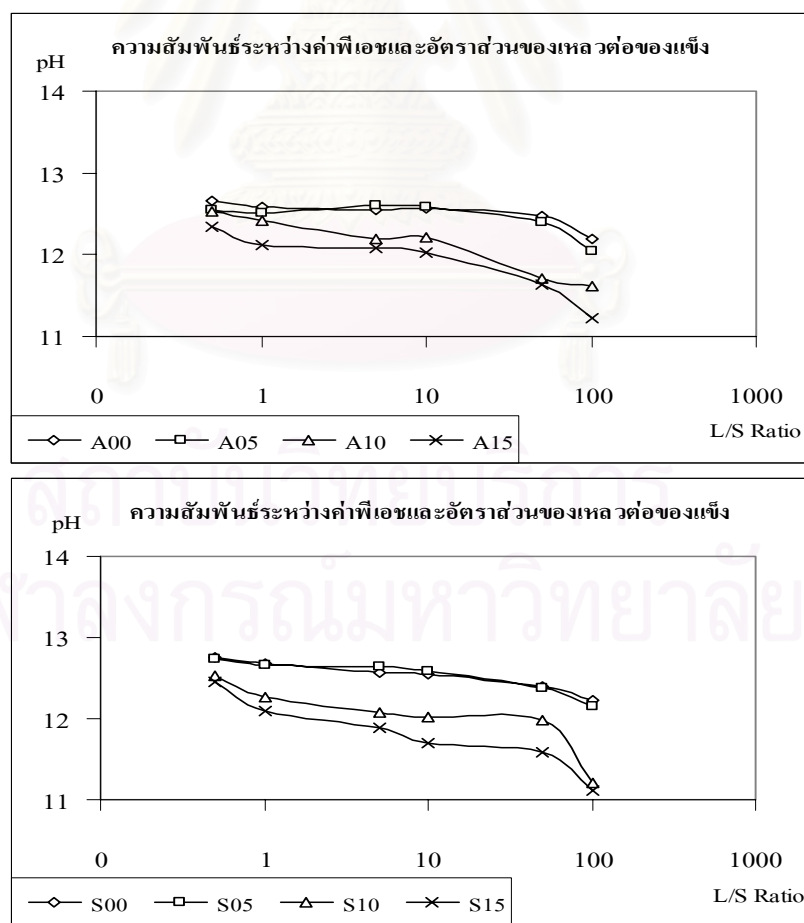


รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นของสังกะสีจากการสกัดด้วยวิธี Sequential Extraction test

จากผลการทดสอบการสกัดโลหะหนักแบบลำดับขั้นพบว่าโลหะหนักที่ทำการพิจารณา มีความสามารถในการถูกชะละลายได้ง่าย ดังนั้นในการกำจัดกากตะกอนประเภทนี้ด้วยวิธีการปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็งหลังจากถูกนำไปฝังกลบ ควรมีการกำกับและดูแลหลุมฝังกลบอย่างเข้มงวดและมีการตรวจสอบการชะละลายภายในหลุมฝังกลบอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากอาจเกิดการชะละลายของโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุนในมอร์ตากับความสามารถในการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก (Pore water and maximum mobile fraction test)

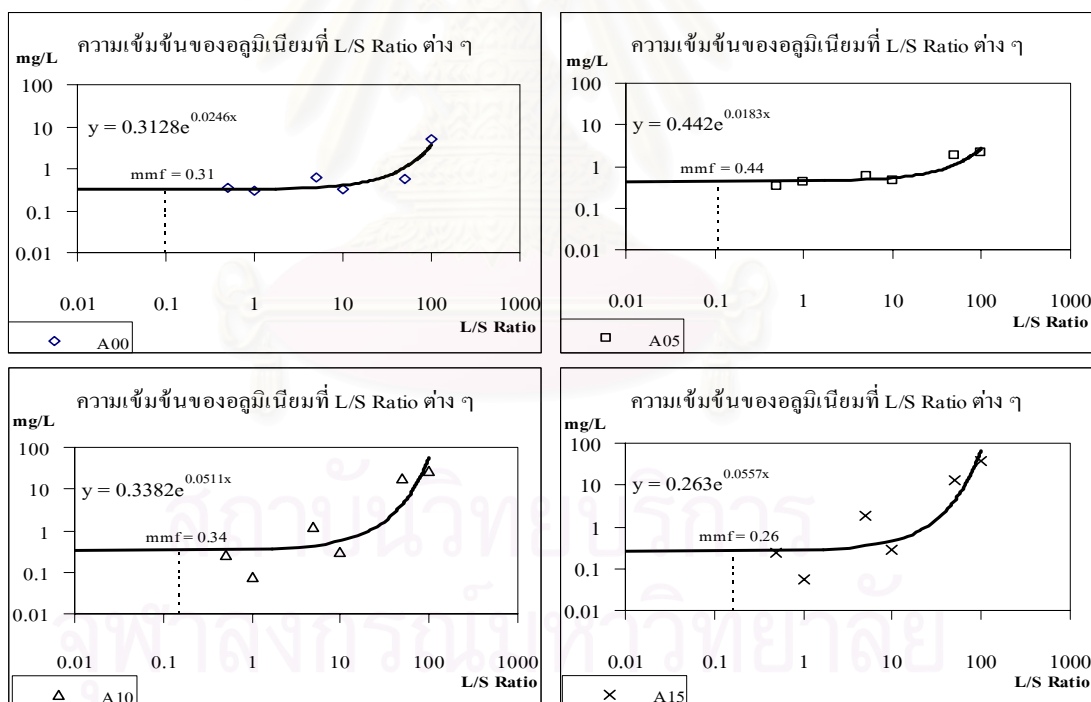
การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างการชะละลายของโลหะหนักและปริมาณรูพรุนในช่องว่างของมอร์ต้า เป็นการประเมินลักษณะการเกิดการชะละลายของสารประกอบ (Constituents) ในสถานะคงที่ โดยการบดก้อนมอร์ต้าและแช่ในน้ำปราศจากอิออน (DI) ในภาชนะปิด ที่อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (L/S Ratio) ต่าง ๆ ทำการเขย่าเป็นเวลา 7 วัน ให้สารละลายอยู่ในสถานะสมดุล (Barna และคณะ, 2004) หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ปริมาณและลักษณะการชะละลายที่แตกต่างกันของธาตุแต่ละชนิดได้



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชที่อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (L/S Ratio) ต่าง ๆ

โดยทั่วไปคุณสมบัติทางด้านกายภาพและทางเคมีของก้อนแข็งมีความเกี่ยวข้องกัน เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆ และพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Binder hydration products) จากรูปที่ 4.9 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชที่อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งต่าง ๆ ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด จากขั้นตอนการทำให้เกิดสมดุลโดยการเขย่าเป็นระยะเวลา 7 วันในน้ำสกัด พบว่าเมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (L/S Ratio) เพิ่มขึ้นค่าพีเอชที่ได้มีค่าลดลง

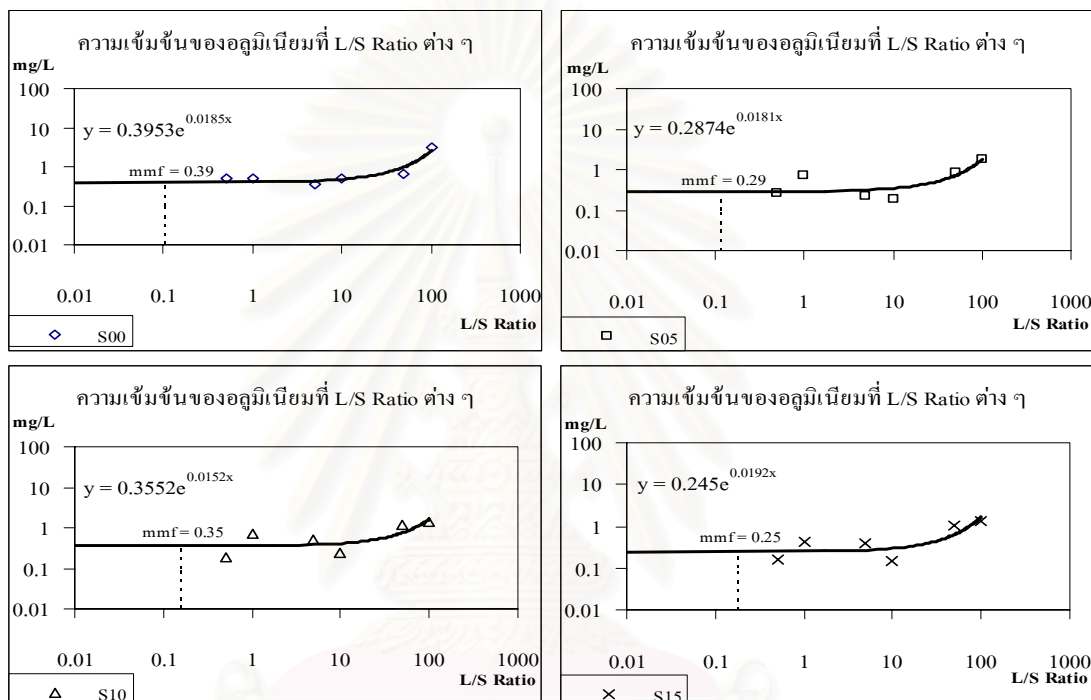
ในตัวอย่างก้อนแข็งที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 และ 5 (A00, S00 และ A05, S05) ค่าพีเอชในทุกอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 15 (A15 และ S15) ค่าพีเอชที่ได้มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากในก้อนตัวอย่างมีปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ของกากตะกอนและจะลดลงเมื่อเกิดการเจือจางของตัวอย่างเมื่อปริมาณน้ำชะละลายเพิ่มขึ้น การทดสอบถึงปริมาณรูพรุนในตัวอย่างก้อนแข็งจากการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งกากตะกอน พบว่า เมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (L/S Ratio) เพิ่มขึ้นค่าพีเอชของน้ำชะละลายมีค่าลดลง



รูปที่ 4.10 ความเข้มข้นของอลูมิเนียมที่ L/S Ratio 0.5-100 มิลลิลิตร/กรัม

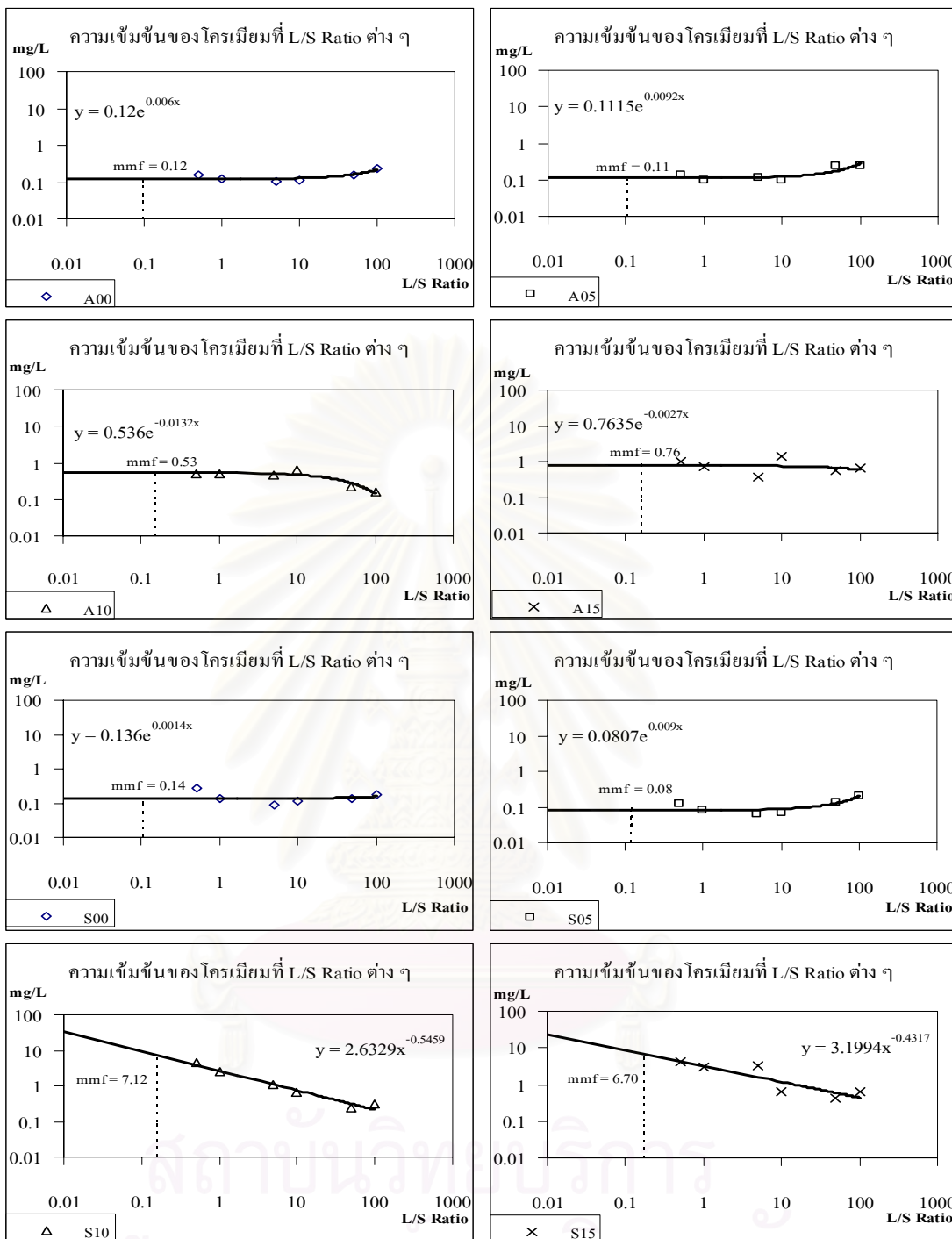
เมื่อนำมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด พบว่าอลูมิเนียมในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดมีความเข้มข้นในการชะละลายใกล้เคียงกันยกเว้นในตัวอย่าง A10 และ A15 ที่อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งเท่ากับ 50 และ 100 มิลลิลิตรต่อกรัม

อลูมิเนียมถูกชะละลายออกมามากที่สุดและมีลักษณะในการชะละลายแบบเดียวกันในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด โดยในตัวอย่างก้อนแข็งพบว่าอลูมิเนียมมีค่า PW-MMF เฉลี่ยเท่ากับ 0.34 และ 0.32 มิลลิกรัมต่อลิตรในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด รวมทั้งมีแนวโน้มในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อค่า L/S Ratio เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอลูมิเนียมมีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ดีและสามารถถูกชะละลายออกมาได้ง่ายซึ่งสัมพันธ์กับการทดสอบการสกัดโลหะหนักแบบลำดับขั้น (Sequential Extraction test)



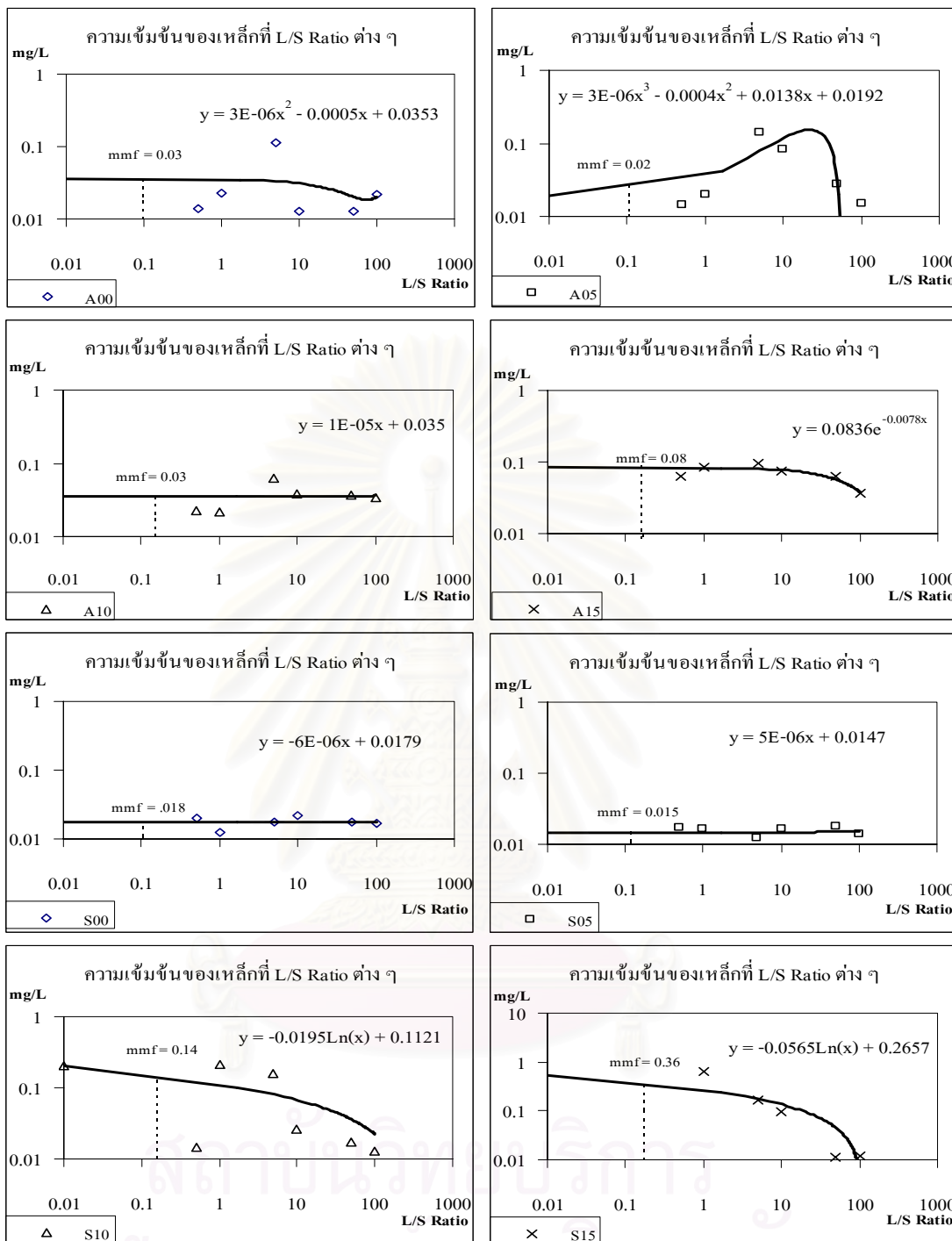
รูปที่ 4.10 (ต่อ) ความเข้มข้นของอลูมิเนียมที่ L/S Ratio 0.5-100 มิลลิกรัม/กรัม

ในการชะละลายของโครเมียมพบว่าในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดมีปริมาณการชะละลายใกล้เคียงกัน ยกเว้นในตัวอย่าง S10 และ S15 มีการชะละลายออกมาสูงกว่าเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณรูพรุนหรือโครงสร้างภายในก้อนแข็งมีผลเพียงเล็กน้อยต่อรูปแบบการชะละลายของโครเมียมในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 และร้อยละ 5 ยกเว้นในตัวอย่างการแทนที่ร้อยละ 10 และร้อยละ 15 การชะละลายของโครเมียมมีแนวโน้มลดลงซึ่งมีลักษณะเดียวกันในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด นอกจากนี้ PW-MMF ของโครเมียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มปริมาณกากตะกอน แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงความสามารถในการยึดจับโลหะหนักในตัวอย่างก้อนแข็งลดลง ซึ่งจะเห็นได้จากลักษณะการชะละลายของโครเมียมที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับการทดสอบการชะละลายแบบลำดับขั้น (Sequential Extraction test) และการทดสอบการชะละลายระยะยาว โดยพบว่าโครเมียมมีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ดี



รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของโครเมียมที่ L/S Ratio 0.5-100 มิลลิตร/กรัม

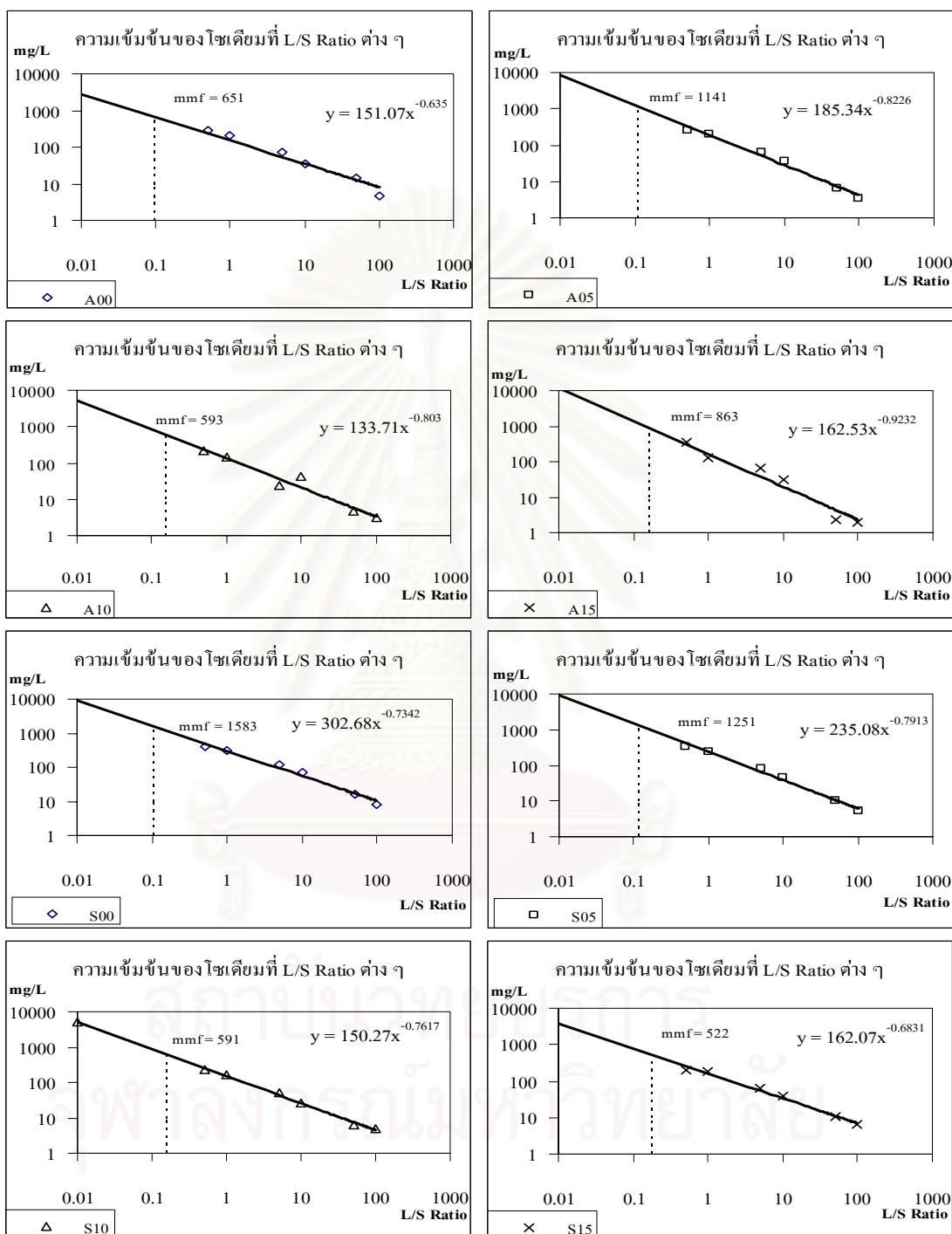
ในการทดสอบการชะละลายของเหล็กพบว่า มีลักษณะการชะละลายที่ค่า L/S Ratio ต่างๆ ใกล้เคียงกัน โดยมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดในตัวอย่าง S10 และ S15 ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่มีการเผาร่วมกากของเสีย โดยสามารถชะละลายได้เพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยกากตะกอนเพิ่มมากขึ้น และ PW-MMF มีค่าเท่ากับ 0.14 และ 0.36 มิลลิตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งพบว่ามีค่าสูงเมื่อเทียบกับอัตราส่วนเดียวกันในปูนซีเมนต์ชนิดไม่มีการเผาร่วมกากของเสีย



รูปที่ 4.12 ความเข้มข้นของเหล็กที่ L/S Ratio 0.5-100 มิลลิกรัม

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการชะละลายของสารประกอบประเภทเกลือ โดยเลือกศึกษาการชะละลายของโซเดียม พบว่าเมื่อมีการเจือจางสารตัวอย่างจากการเพิ่มปริมาณน้ำชะละลายรูปแบบในการชะละลายของโซเดียมมีแนวโน้มลดลง และกราฟที่ได้เป็นเส้นตรง เมื่อ L/S Ratio เพิ่มขึ้น รวมทั้งมีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ดีกว่าโลหะหนักที่ทำการพิจารณา ซึ่งมีลักษณะเดียวกับงานวิจัยของ Barma และคณะ ซึ่งพบว่า การละลายของเกลือเช่น Na, K และ Cl จะละลายได้ดีที่ค่าพี

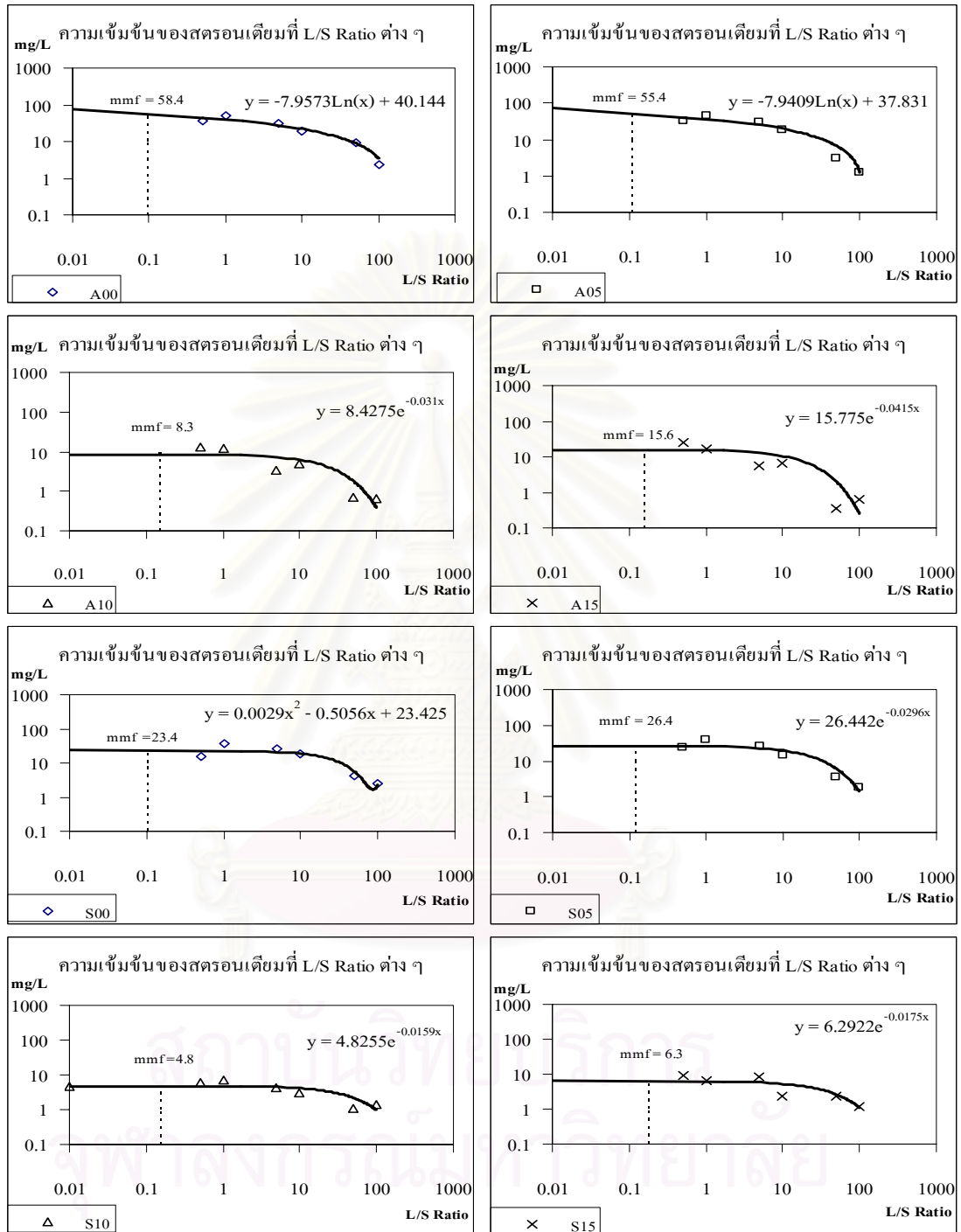
เอชต่างๆ โดยไปในแนวทางเดียวกันกับที่ทั้งสามชนิดนี้เกิดการละลายสูง (high solubility) และเป็นธาตุชนิดที่ไม่ทำปฏิกิริยา (non-reactivity) (Barna และคณะ, 2004)



รูปที่ 4.13 ความเข้มข้นของโซเดียมที่ L/S Ratio 0.5-100 มิลลิกรัม/กรัม

ในการชะละลายของสตรอนเตียมที่มีแนวโน้มในการชะละลายที่ L/S Ratio ต่าง ๆ ลดลงโดยเมื่อค่า L/S Ratio เพิ่มขึ้นและที่อัตราส่วนการแทนที่กาคตะกอนร้อยละ 0 และร้อยละ 5 สตรอน

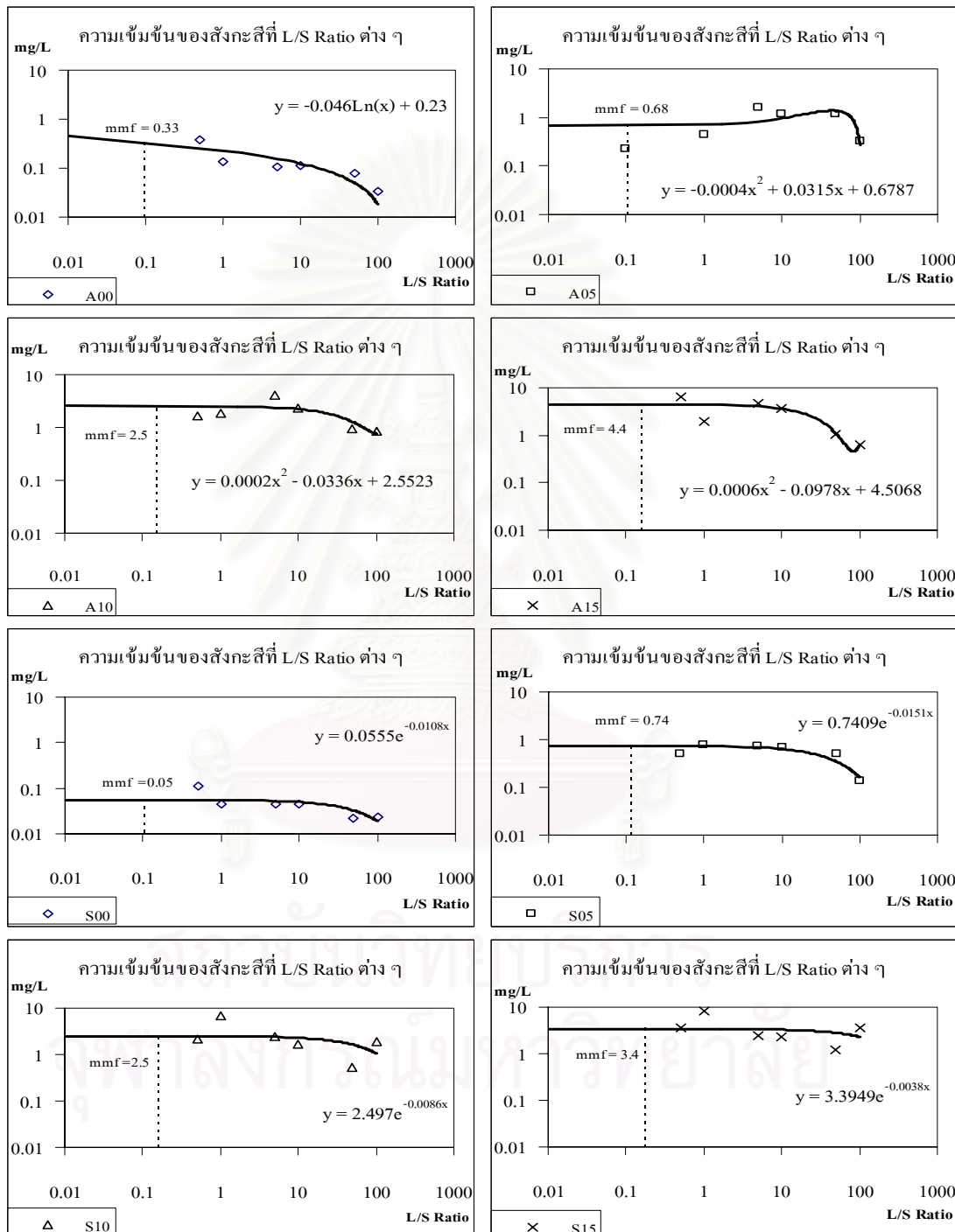
เดียมมีค่า PW-MMF เฉลี่ยเท่ากับ 56.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมากกว่าที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 และ ร้อยละ 15 ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12 มิลลิกรัมต่อกรัม



รูปที่ 4.14 ความเข้มข้นของสตรอนเดียมที่ L/S Ratio 0.5-100 มิลลิกรัม/กรัม

ในการชะละลายของสังกะสีในตัวอย่างการแทนที่ร้อยละ 0 และร้อยละ 5 มีค่า PW-MMF เฉลี่ยที่ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตรและในตัวอย่างการแทนที่ร้อยละ 10 และร้อยละ 15 มีค่า PW-MMF เฉลี่ยที่ 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการแทนที่กากตะกอนเพิ่มขึ้น ปริมาณการชะ

ละลายของสังกะสีจะเพิ่มขึ้นและปริมาณรุกรานในตัวอย่างก้อนแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน และในตัวอย่างปูนซีเมนต์ชนิดที่มีการเผาร่วมกากของเสียมีแนวโน้มปริมาณรุกราน โดยการประมาณจากการชะละลายของสังกะสีน้อยกว่าปูนซีเมนต์ชนิดไม่มีการเผาร่วมกากของเสีย

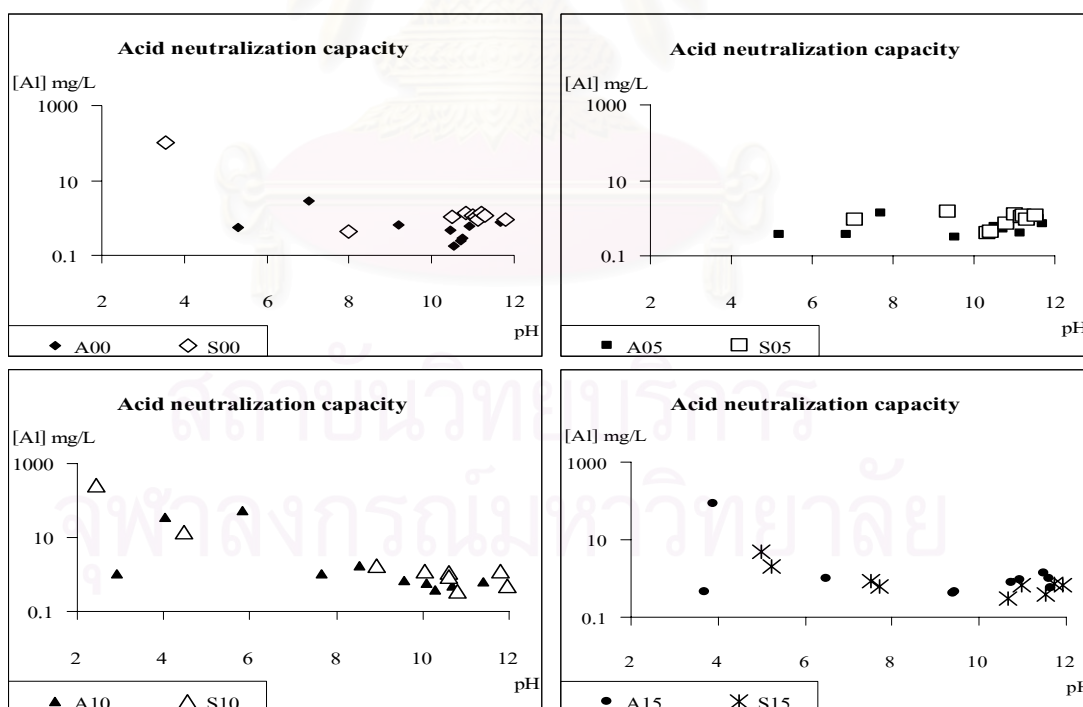


รูปที่ 4.15 ความเข้มข้นของสังกะสีที่ L/S Ratio 0.5-100 มิลลิกรัม/กรัม

จากการศึกษาการชะละลายของโลหะไฮดรอกไซด์(MINTEQ database) พบว่าสังกะสีละลายได้ดีที่พีเอชน้อยกว่า 8 ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าก้อนแข็งมีค่าพีเอชเริ่มต้นในรูพรุน(Pore solution) มีช่วงพีเอชอยู่ระหว่าง 11.9 (ค่าพีเอชถูกควบคุมโดย C-S-H เจล) ถึงพีเอชมากกว่า 13 (ควบคุมโดย high-alkali products) จากการคำนวณโดยอาศัยสมมูลของไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้โลหะหนักอาจไม่เกิดการตกตะกอนในรูปแบบเชิงเดี่ยวแต่อาจอยู่ในเฟสต่างๆ หรืออยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ชนิดอื่นๆ เป็นต้น (Roy และ คณะ,1991;Scheidegger และคณะ ,2000 ; Johnson และ Glasser,2002 อ้างถึงใน Spence และ shi,2005)

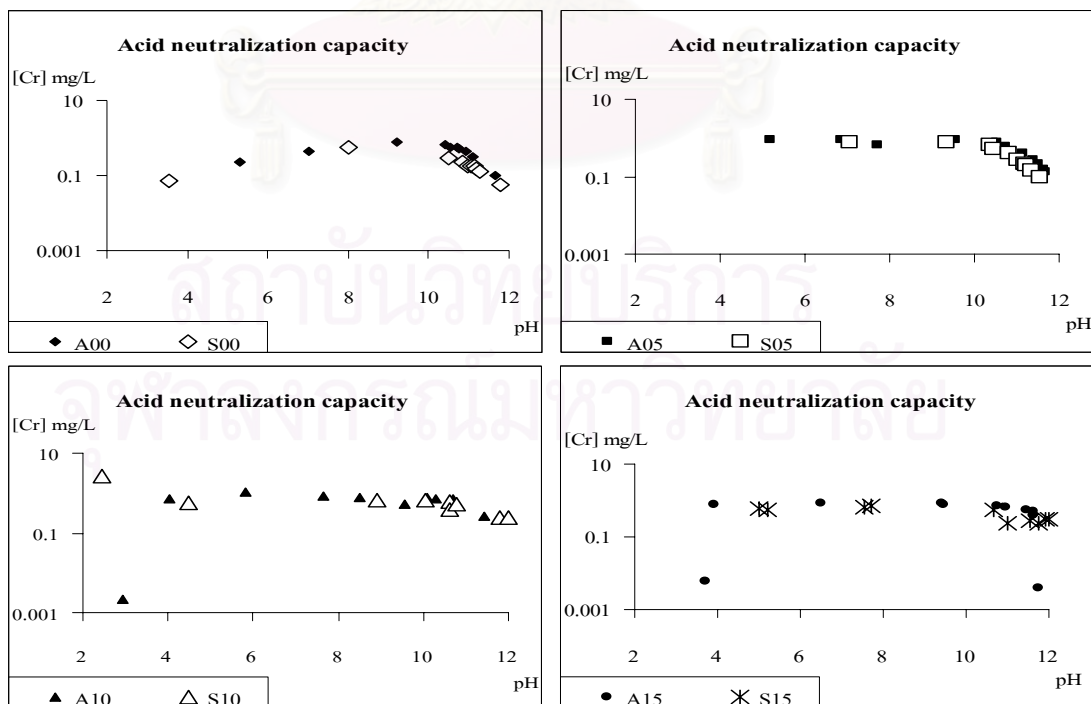
4.6 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับลักษณะการชะละลายของโลหะหนัก

Acid Neutralization Capacity (ANC) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการต้านทานการลดลงของค่าพีเอชของตัวอย่างก้อนแข็ง (Matrix) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำจัดกากของเสียอันตรายด้วยวิธีการปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ เนื่องจากลักษณะการชะละลายของสารอนินทรีย์และ Kinetics ของการละลาย โดยส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช โดยค่า ANC ของก้อนแข็งจะนำมาใช้เพื่อประเมินหาพฤติกรรมของการชะละลายของโลหะหนักภายใต้สภาวะที่มีค่าพีเอชต่างๆ กัน



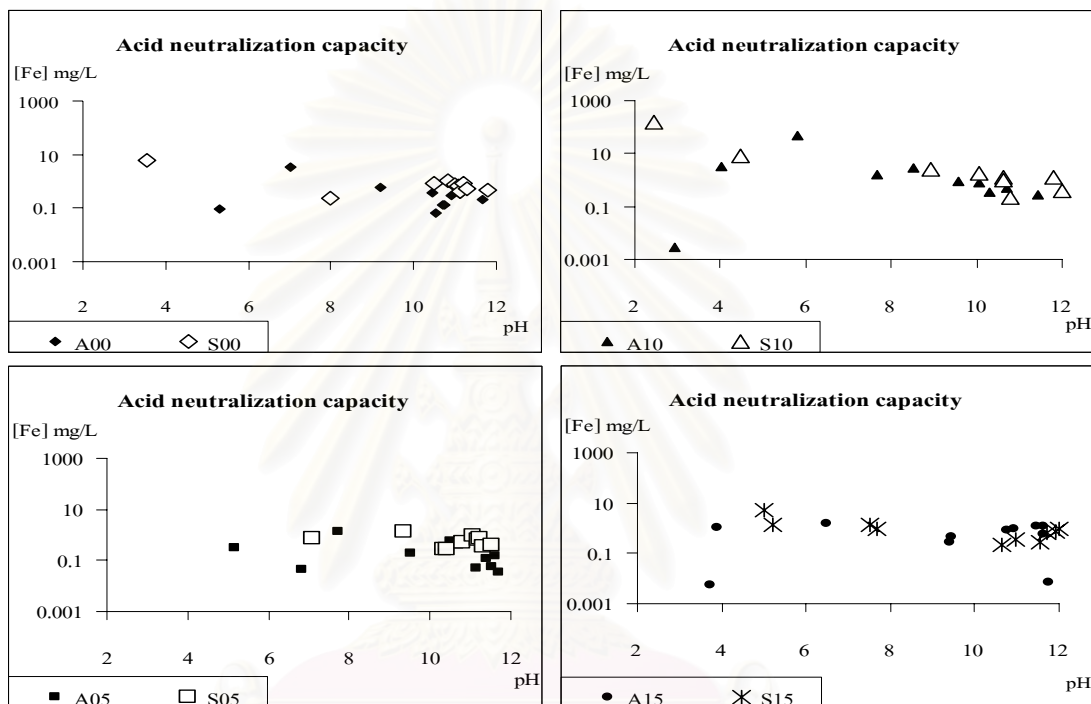
รูปที่ 4.16 การชะละลายของอลูมิเนียมที่สัมพันธ์กับค่าพีเอช

ในการทดสอบ ANC ของก้อนแข็งสามารถทำได้โดยการพล็อตกราฟค่า pH ที่สภาวะคงที่ (Steady state pH response) กับปริมาณกรดที่เติมลงไป ในกรณีที่เป็นสารบริสุทธิ์หรือสารชนิดเดียว สามารถหาค่า ANC ได้จากกราฟโดยตรง เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) มีค่า pH เท่ากับ 12.3 ซึ่งเกิดการทำให้เป็นกลางของปูนขาวอิสระ (Free lime) และที่ค่า pH มากกว่า 11.6 C-S-H gel , ettringite , Monosulfate, hydrogarnet, brucite และ hydrotalcite สามารถหาค่า ANC ได้ แต่ที่ pH ต่ำกว่า 9 ก้อนแข็งจะเกิดการละลาย การเปรียบเทียบค่าพีเอชในการทดสอบ ANC พบว่า ในตัวอย่างที่มีหลายองค์ประกอบหรือเป็นส่วนผสม (additives) ค่าที่ได้จะต่ำและยังมีช่วงบัฟเฟอร์ (Buffering Zone) ที่กว้างกว่าตัวอย่างที่เป็นสารบริสุทธิ์ ดังนั้นการวิเคราะห์ ANC จากเส้นกราฟใน ตัวอย่างก้อนแข็งที่ผสมภาคตะกอนหรือสารผสมอื่น ๆ ก้อนข้างจะซับซ้อนและมีความแม่นยำ ถูกต้องน้อยมาก ในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าความสามารถในการต้านทานความเป็นกรดของ ปูนซีเมนต์เป็นผลมาจากการเกิดการละลายของ C-S-H เจลมากกว่าการละลายของ Ca (OH)₂ (Calcium hydroxide) ซึ่งเป็นตัวควบคุมค่าพีเอชของก้อนแข็งการทดสอบการชะละลายที่ค่าพีเอช ต่าง ๆ พบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่ที่ทำการพิจารณามีลักษณะการชะละลายใกล้เคียงกันใน ปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด ซึ่งจะเห็นได้ว่าไม่มีความแตกต่างในการต้านทานการเกิดสภาวะเป็นกรด ในตัวอย่างปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด นอกจากนี้พบว่าในปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ภาคตะกอนตัวอย่าง S00 เหล็กและอลูมิเนียมมีแนวโน้มในการชะละลายที่พีเอชต่ำๆ ได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ชนิดไม่มีการ เปร่วมภาคของเสีย โดยมีการละลายลดลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.17 การชะละลายของโครเมียมที่สัมพันธ์กับค่าพีเอช

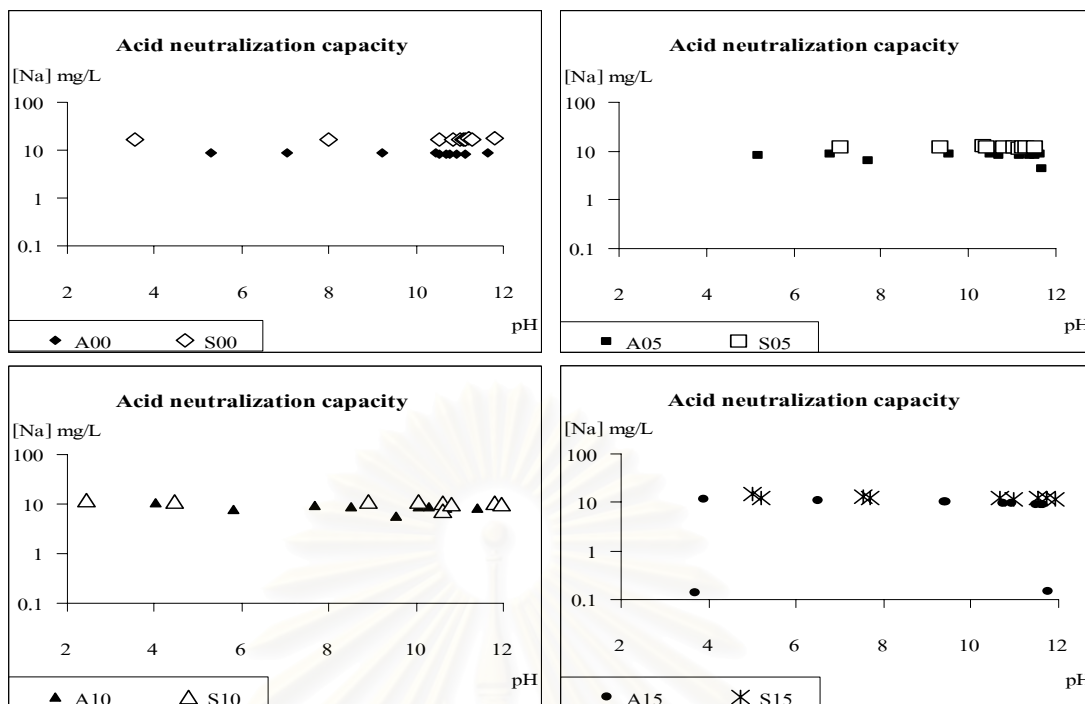
จากการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและการชะละลายของโครเมียมพบว่าโครเมียมสามารถชะละลายได้ดีที่ค่าพีเอชต่าง ๆ โดยมีแนวโน้มในการชะละลายลดลงเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกันในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการต้านทานสถานะที่เป็นกรดของปูนซีเมนต์ที่สัมพันธ์กับการชะละลายของโครเมียมมีความสามารถใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนโครเมียมมีแนวโน้มในการชะละลายเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.18 การชะละลายของเหล็กที่สัมพันธ์กับค่าพีเอช

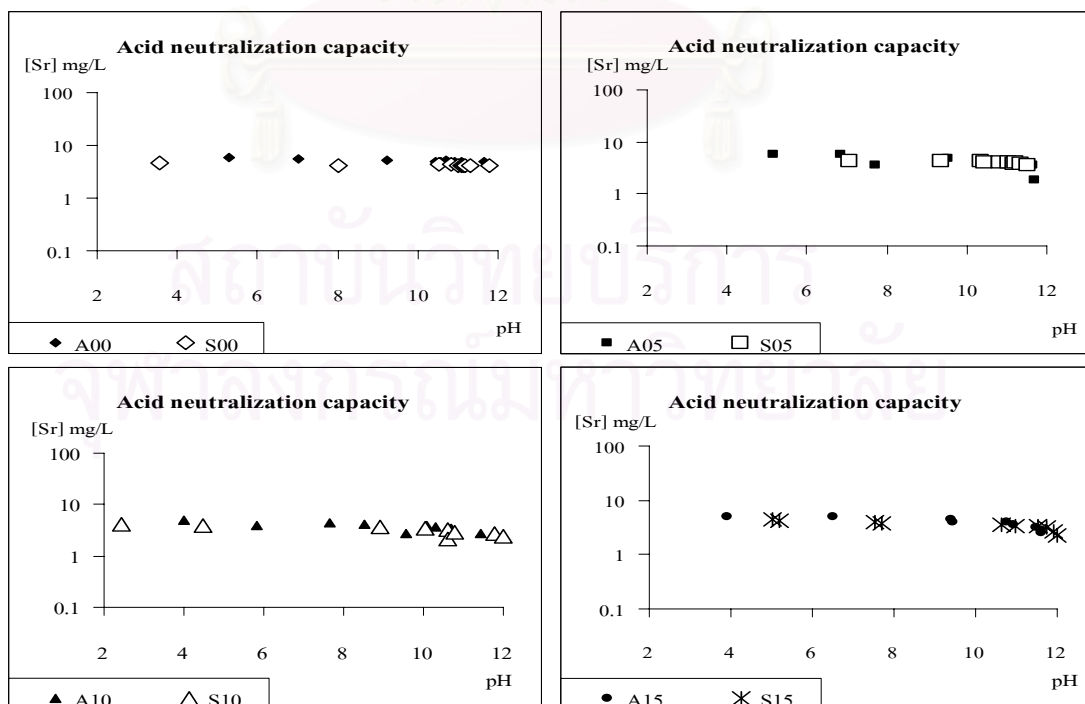
จากการทดสอบการชะละลายของเหล็กที่ค่าพีเอชต่าง ๆ พบว่าเหล็กเกิดการชะละลายที่มีรูปแบบไม่ชัดเจน โดยมีปริมาณการชะละลายใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วน ยกเว้นที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 ที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 6 เหล็กถูกชะละลายออกมาได้ดี

จากรูปที่ 4.19 พบว่าการชะละลายของโซเดียมที่สัมพันธ์กับค่าพีเอช ซึ่งเป็นตัวแทนการชะละลายของเกลือ พบว่าโซเดียมชะละลายได้ดีที่ค่าพีเอชต่าง ๆ และมีลักษณะใกล้เคียงกันในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด และการชะละลายของสตรอนเตียมพบว่าสามารถชะละลายได้ดีที่ค่าพีเอชต่าง ๆ โดยมีปริมาณการชะละลายใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วนและมีลักษณะเดียวกันในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดดังแสดงในรูปที่ 4.18



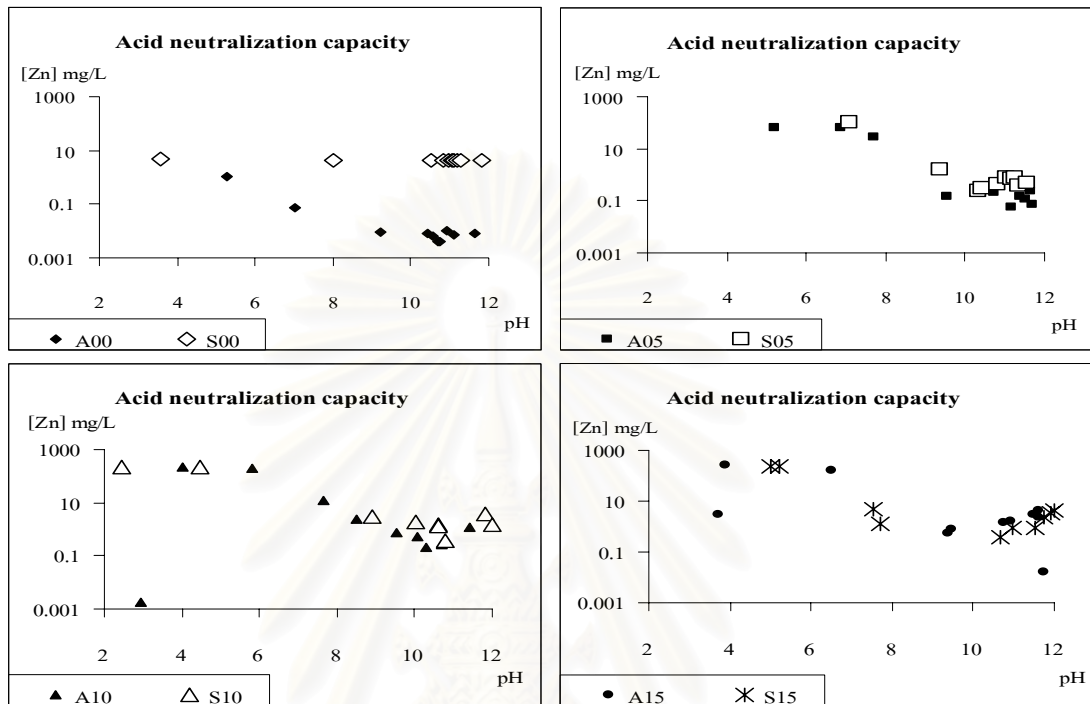
รูปที่ 4.19 การชะละลายของโซเดียมที่สัมพันธ์กับค่าพีเอช

เมื่ออัตราส่วนการแทนที่ภาคตะกอนเพิ่มขึ้นสังกะสีสามารถละลายได้มากขึ้นซึ่งสังกะสีส่วนใหญ่ที่ถูกชะละลายออกมาเป็นสังกะสีที่มีอยู่ในภาคตะกอนเริ่มต้น โดยพบว่าสังกะสีสามารถละลายได้ดีที่พีเอชต่ำกว่า 8 ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.20 การชะละลายของสตรอนเตียมที่สัมพันธ์กับค่าพีเอช

จากลักษณะการชะละลายของสังกะสีจากตัวอย่างก้อนแข็งพบว่า มีลักษณะเดียวกันกับการทดสอบการชะละลายสารประกอบสังกะสีไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (MINTEQ database)



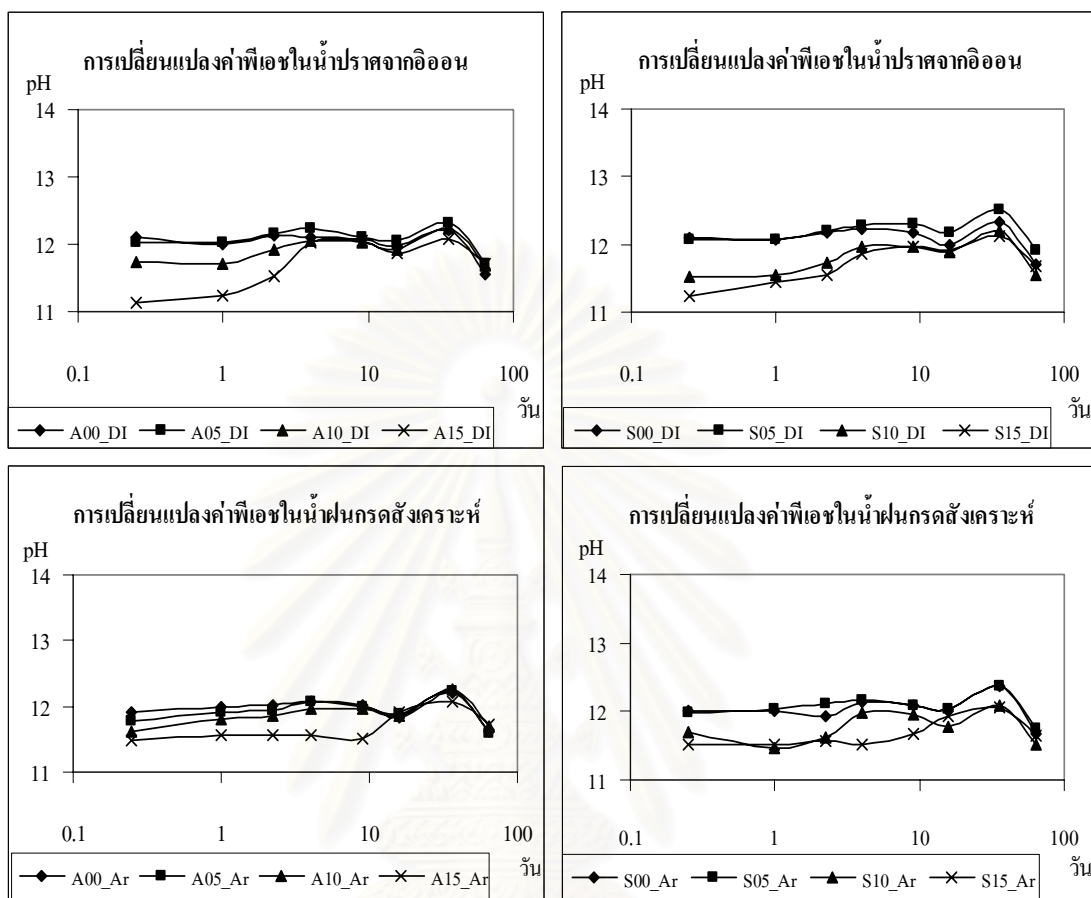
รูปที่ 4.21 การชะละลายของสังกะสีที่สัมพันธ์กับค่าพีเอช

4.7 การชะละลายระยะยาว

การชะละลายของก้อนตัวอย่างจากการปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็งภาคก่อนในงานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์จากมาตรฐานการชะละลายระยะยาวของก้อนแข็งจาก EA NEN 7375: 2004 โดยทำการทดสอบการชะละลายของก้อนแข็งในน้ำปราศจากอิออน และน้ำฝนกรดสังเคราะห์ ในระบบปิด โดยการควบคุมอุณหภูมิ

จากผลการวัดค่าพีเอชของน้ำชะละลายที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 0.25, 1, 2.25, 4, 9, 16, 36 และ 64 วันตามลำดับ พบว่าในช่วงเริ่มต้นของการทดสอบค่าพีเอชของน้ำชะละลายเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกอัตราส่วนและในน้ำชะละลายทั้งสองชนิด โดยในช่วงแรกของการทดสอบที่ระยะเวลา 0.25 วันจนถึงช่วงที่ 5 ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 9 วันค่าพีเอชในน้ำชะละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและหลังจากผ่านช่วงที่ 7 ระยะเวลา 36 วัน ค่าพีเอชลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ที่มีอยู่ในก้อนตัวอย่างในตอนเริ่มต้นลดลง และเกิดการละลายของสารประกอบที่มีอยู่ภายในก้อนแข็ง จะเห็นได้จากการลดลงของค่าพีเอชในน้ำชะ

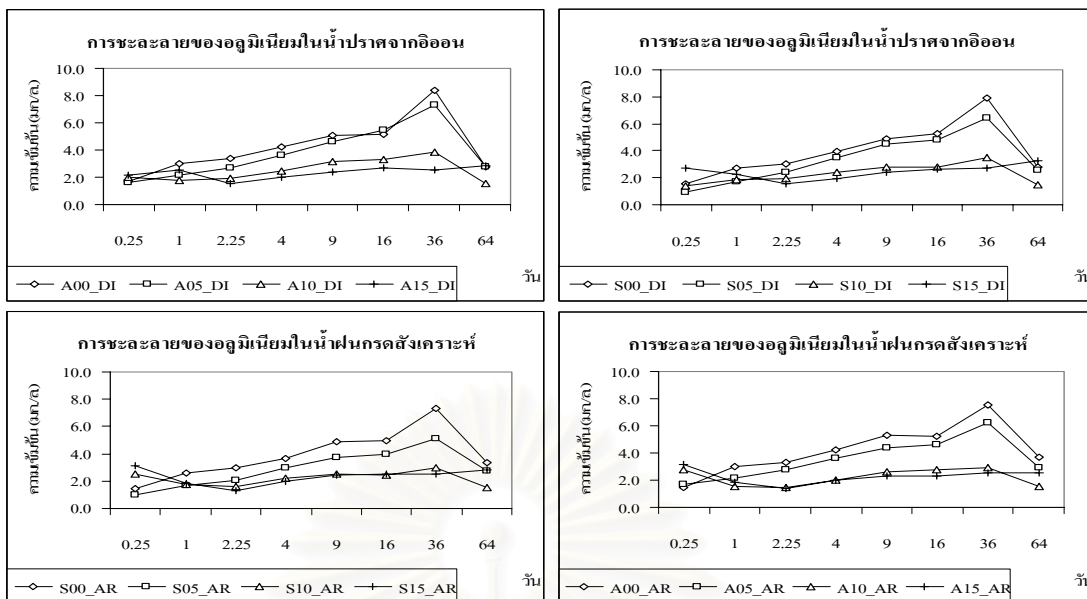
ละลาย ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเข้าสู่สมดุลและมีลักษณะเดียวกันในน้ำชะละลายและในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างน้ำชะละลายทั้งสองชนิด

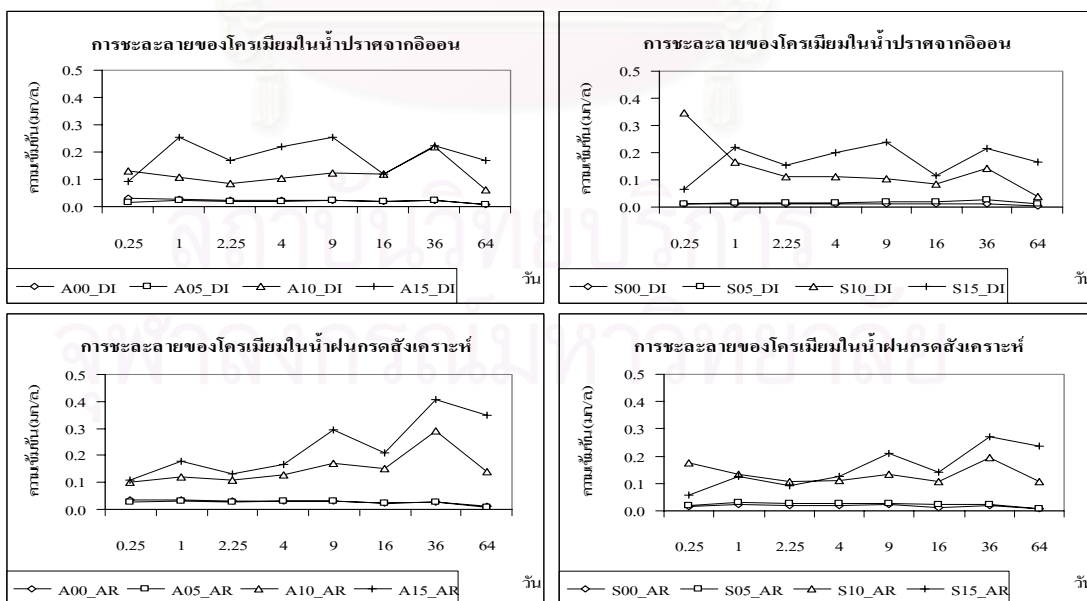
ในรูปที่ 4.22 แสดงปริมาณการชะละลายสะสมของโลหะหนักในน้ำชะละลายทั้งสองชนิด (น้ำปราศจากอ๊อนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์) พบว่าเมื่อเก็บน้ำชะละลายตามระยะเวลาที่กำหนด อลูมิเนียมมีปริมาณการชะละลายที่ใกล้เคียงกันในน้ำชะละลายทั้งสองชนิด โดยมีความเข้มข้นรวมทั้งหมดเท่ากับ 33.6 และ 33.7 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำชะละลายส่งผลต่อลักษณะการชะละลายน้อยกว่าคุณสมบัติภายในก้อนแข็ง ซึ่งอลูมิเนียมมีปริมาณการชะละลายสะสมมากที่สุด รองลงมาได้แก่ สตรอนเตียม สังกะสี และเหล็ก ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.23 แสดงลักษณะการชะละลายของอลูมิเนียมพบว่าอลูมิเนียมเกิดการชะละลายเพียงเล็กน้อยในช่วงเริ่มต้นการทดสอบและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น และในช่วงสุดท้ายของการทดสอบอลูมิเนียมมีแนวโน้มในการชะละลายลดลงอย่างรวดเร็ว

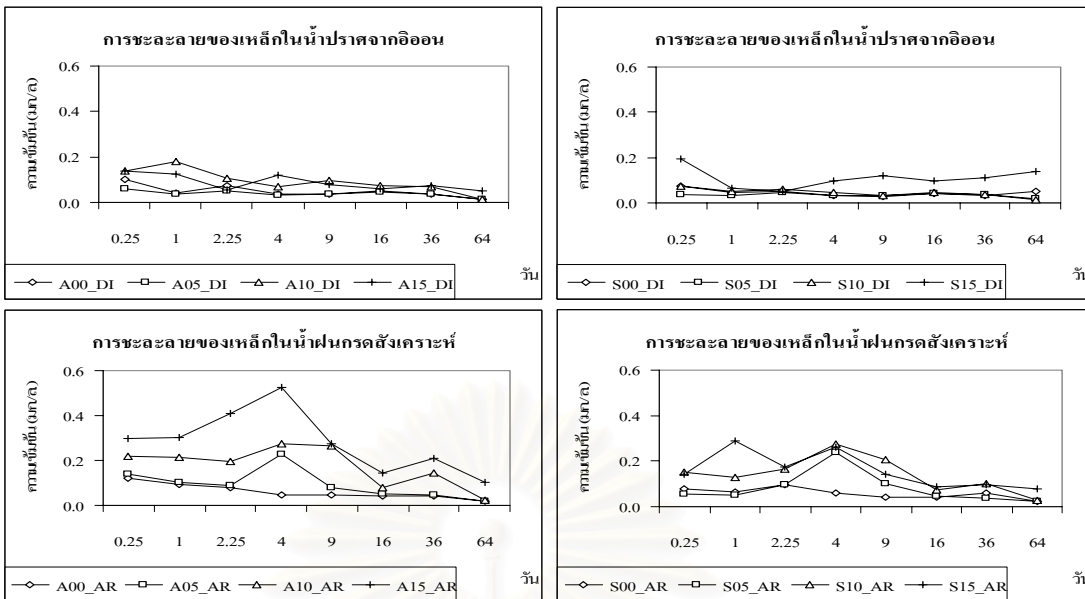


รูปที่ 4.23 การชะละลายของโพลิยูรีเทนในน้ำปราศจากอ๊อนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์

การชะละลายของโพลิยูรีเทนมีรูปแบบที่ไม่ชัดเจน โดยชะละลายออกมาตลอดช่วงการทดสอบและในตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่ไม่มีส่วนผสมของเสียดโพลิยูรีเทนมีแนวโน้มถูกชะละลายออกมาเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในน้ำฝนกรดสังเคราะห์ ซึ่งเป็นแนวทางเดียวกันในการทดสอบการชะละลายแบบลำดับขั้นและการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักในรูปพูนของมอร์ตาที่พบว่าโพลิยูรีเทนมีความสามารถในการชะละลายได้ดี

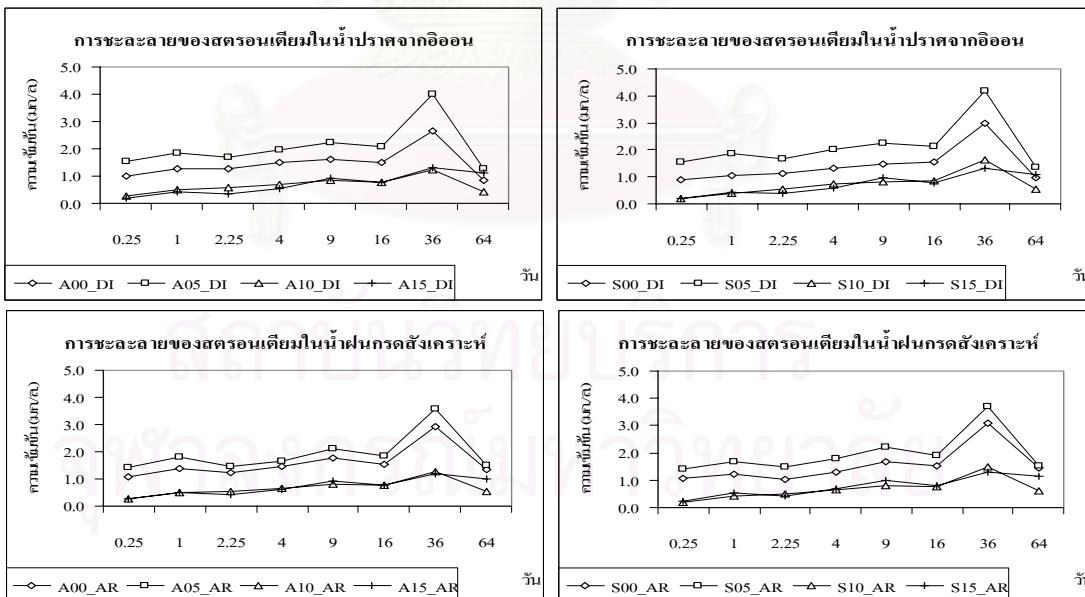


รูปที่ 4.24 การชะละลายของโพลิยูรีเทนในน้ำปราศจากอ๊อนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์



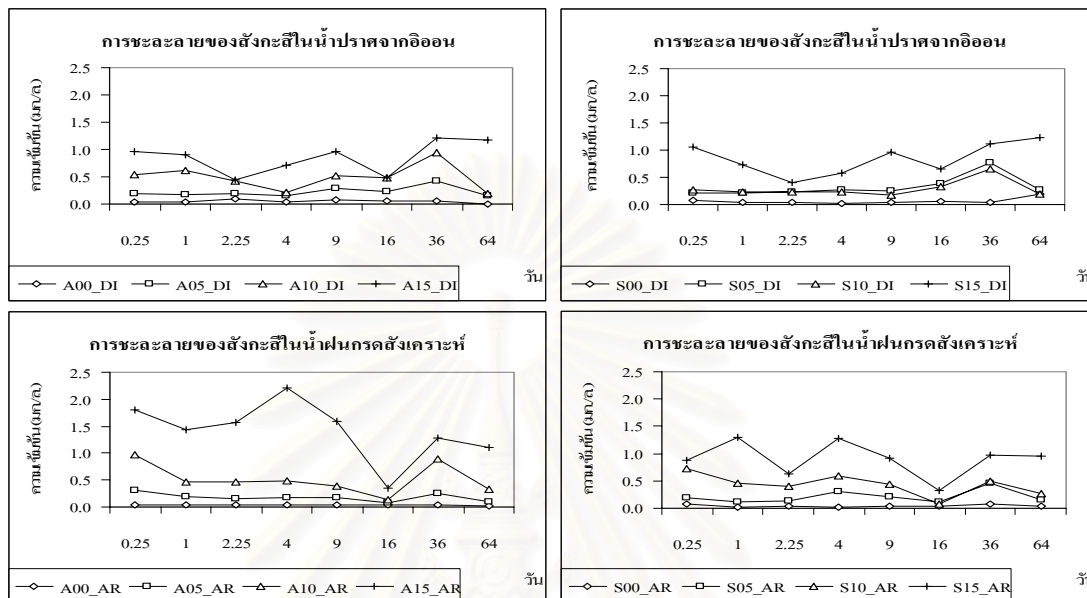
รูปที่ 4.25 การชะละลายของเกลือในน้ำปราศจากอิออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์

การชะละลายของเกลือพบว่าปริมาณการชะละลายในน้ำฝนกรดสังเคราะห์มากกว่าในน้ำปราศจากอิออน โดยถูกชะละลายในช่วงแรกของการทดสอบและมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยพบว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์สูงขึ้นเกลือก็มีแนวโน้มในการชะละลายสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4.26 การชะละลายของสตรอนเตียมในน้ำปราศจากอิออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์

การชะละลายของสตรอนเตียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดการทดสอบและลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงท้ายของการทดสอบซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันในน้ำสกัดทั้งสองชนิดและมีปริมาณการชะละลายเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่กากตะกอนด้วยปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.27 การชะละลายของสังกะสีในน้ำปราศจากไอออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์

จากรูปที่ 4.27 พบว่าการชะละลายของสังกะสีมีลักษณะที่ไม่ชัดเจน โดยถูกชะละลายออกมามากในตัวอย่างปูนซีเมนต์ชนิดที่ไม่มีการเผาร่วมกากของเสียโดยการชะละลายจากน้ำฝนกรดสังเคราะห์

4.7.1 กลไกการชะละลายของตัวอย่างก้อนแข็ง

การทดสอบการชะละลายระยะยาวของก้อนแข็งที่ได้จากการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งกากตะกอน โดยการประยุกต์การชะละลายตามมาตรฐาน EA NEN 7375:2004 ซึ่งสามารถหาคลไคในการชะละลายของโลหะหนักจากตัวอย่างที่ทำการศึกษาได้ โดยการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักและนำมาคำนวณ ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักต่อพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับน้ำชะละลายและเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการชะละลาย เพื่อหาคลไคที่เกิดขึ้น โดยแบ่งช่วงการทดสอบดังตารางที่ 4.6 ซึ่งในแต่ละช่วงการทดสอบสัมพันธ์กับค่า CF_{a-b} ค่า rc และค่า sd_{rc} โดยสามารถนำมาสรุปค่าคลไคในการชะละลายของโลหะหนักได้จากกราฟในแต่ละช่วงการทดสอบ

ตารางที่ 4.7 กลไกการชะละลายในแต่ละช่วงการทดสอบ

Increment a-b	Slope ,rc		
	≤ 0.35	>0.35 และ ≤ 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

จากการทดสอบการชะละลายของตัวอย่างก้อนแข็งจากการปรับเสถียรและหล่อก้อนแข็ง กากตะกอนซุบโลหะ โดยการเปรียบเทียบลักษณะการชะละลายของก้อนแข็งในน้ำชะละลายทั้งสอง ชนิด ได้ผลการทดสอบดังนี้

จากการวิเคราะห์กลไกการชะละลายของอลูมิเนียมจากก้อนแข็งในตัวอย่างปูนซีเมนต์ ทั้งสองชนิด ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 และร้อยละ 5 (A00 และ A05) พบว่าในช่วงแรกของการทดสอบอลูมิเนียมเกิดการแพร่อย่างช้า ๆ (Delayed Diffusion or Dissolution) และในช่วงท้ายของการทดสอบมีลักษณะการชะละลายที่ลดลงอย่างรวดเร็ว (Depletion) นอกจากนี้ยังมีกลไกรวม (Increment 2-7) ตลอดการทดสอบแบบการแพร่ (Diffusion) ในน้ำสกัดทั้งสองชนิด ซึ่งจะเห็นได้ว่า กลไกการชะละลายของอลูมิเนียมถูกควบคุมด้วยความเข้มข้นเริ่มต้นในก้อนตัวอย่างมากกว่าค่าพีเอชในน้ำชะละลาย โดยจะเกิดความแตกต่างเมื่ออัตราส่วนการแทนที่กากตะกอนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 10 และ 15 (A00 และ A05) พบว่าในช่วงแรกของการทดสอบด้วยน้ำปราศจากอิออนอลูมิเนียมเกิด กลไกการชะละลายแบบแพร่และในช่วงท้ายของการทดสอบเกิดการชะละลายของอลูมิเนียมลดลงอย่างรวดเร็ว (Depletion) แต่ในกลไกรวมตลอดการทดสอบพบว่าเกิดการชะล้างที่ผิวหน้า (Surface wash-off) เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตะกอนในก้อนตัวอย่างทำให้อลูมิเนียมเกิดการชะละลายออกมาได้ง่ายขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.8 และตารางที่ 4.9

จากการวิเคราะห์กลไกการชะละลายของอลูมิเนียมที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 และ ร้อยละ 5 พบว่ามีลักษณะการเคลื่อนแบบเดียวกันแสดงให้เห็นว่าการชะละลายขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารภายในก้อนตัวอย่าง และเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในการแทนที่ปูนซีเมนต์ เพิ่มขึ้นพบว่าค่าพีเอชในน้ำชะละลายมีผลต่อกลไกการชะละลายโดยเกิดการชะละลายแบบแพร่ใน น้ำปราศจากอิออนเปลี่ยนเป็นการชะล้างที่ผิวหน้าในน้ำฝนกรดสังเคราะห์

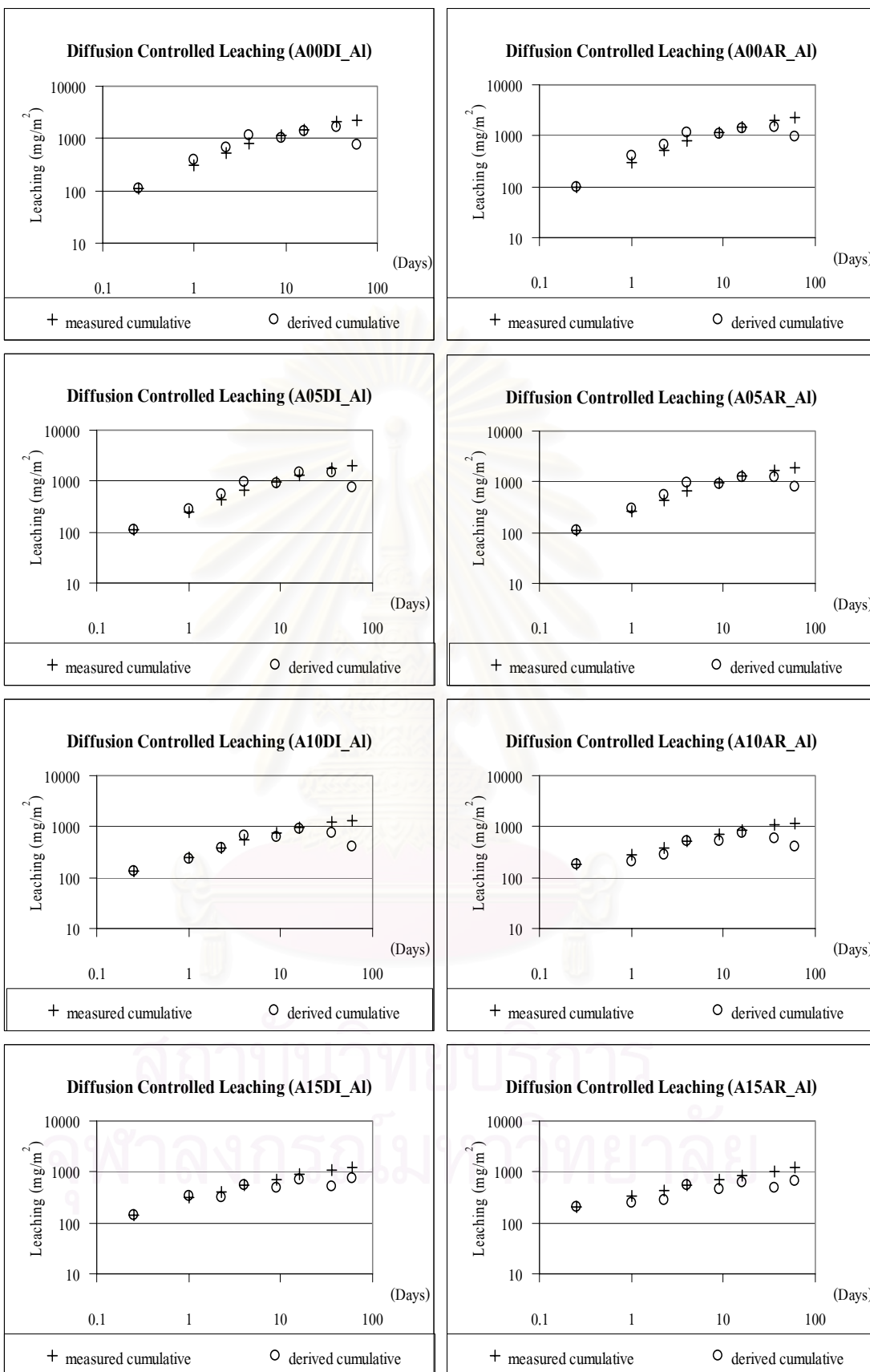
ตารางที่ 4.8 กลไกการชะละลายของอลูมิเนียมในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดไม่มีการเผา
ร่วมกากของเสียอันตราย

ตัวอย่าง	Increment	น้ำปราศจากไอออน		น้ำฝนกรดสังเคราะห์	
		rc	mechanisms	rc	mechanisms
A00	2-7	0.373	Diffusion	0.3515	Diffusion
	5-8	-0.0992	Depletion	-0.0164	Depletion
	4-7	0.2044	Depletion	0.1553	Depletion
	3-6	0.2886	Depletion	0.3048	Depletion
	2-5	0.4594	Diffusion	0.4663	Diffusion
	1-4	0.8243	Delayed diffusion or dissolution	0.8807	Delayed diffusion or dissolution
A05	2-7	0.4485	Diffusion	0.3878	Diffusion
	5-8	-0.1002	Depletion	-0.0511	Depletion
	4-7	0.2279	Depletion	0.1501	Depletion
	3-6	0.4236	Diffusion	0.3372	Depletion
	2-5	0.5657	Diffusion	0.533	Diffusion
	1-4	0.7792	Delayed diffusion or dissolution	0.7583	Delayed diffusion or dissolution
A10	2-7	0.3366	Surface wash-off	0.3211	Surface wash-off
	5-8	-0.2254	Depletion	-0.1557	Depletion
	4-7	0.1042	Depletion	0.0753	Depletion
	3-6	0.3661	Diffusion	0.4077	Diffusion
	2-5	0.4798	Diffusion	0.4685	Diffusion
	1-4	0.5526	Diffusion	0.3417	Surface wash-off
A15	2-7	0.1744	Surface wash-off	0.2324	Surface wash-off
	5-8	0.1475	Depletion	0.1227	Depletion
	4-7	0.0285	Depletion	0.0004	Depletion
	3-6	0.3384	Depletion	0.3236	Depletion
	2-5	0.2045	Depletion	0.3467	Depletion
	1-4	0.4321	Diffusion	0.2905	Surface wash-off

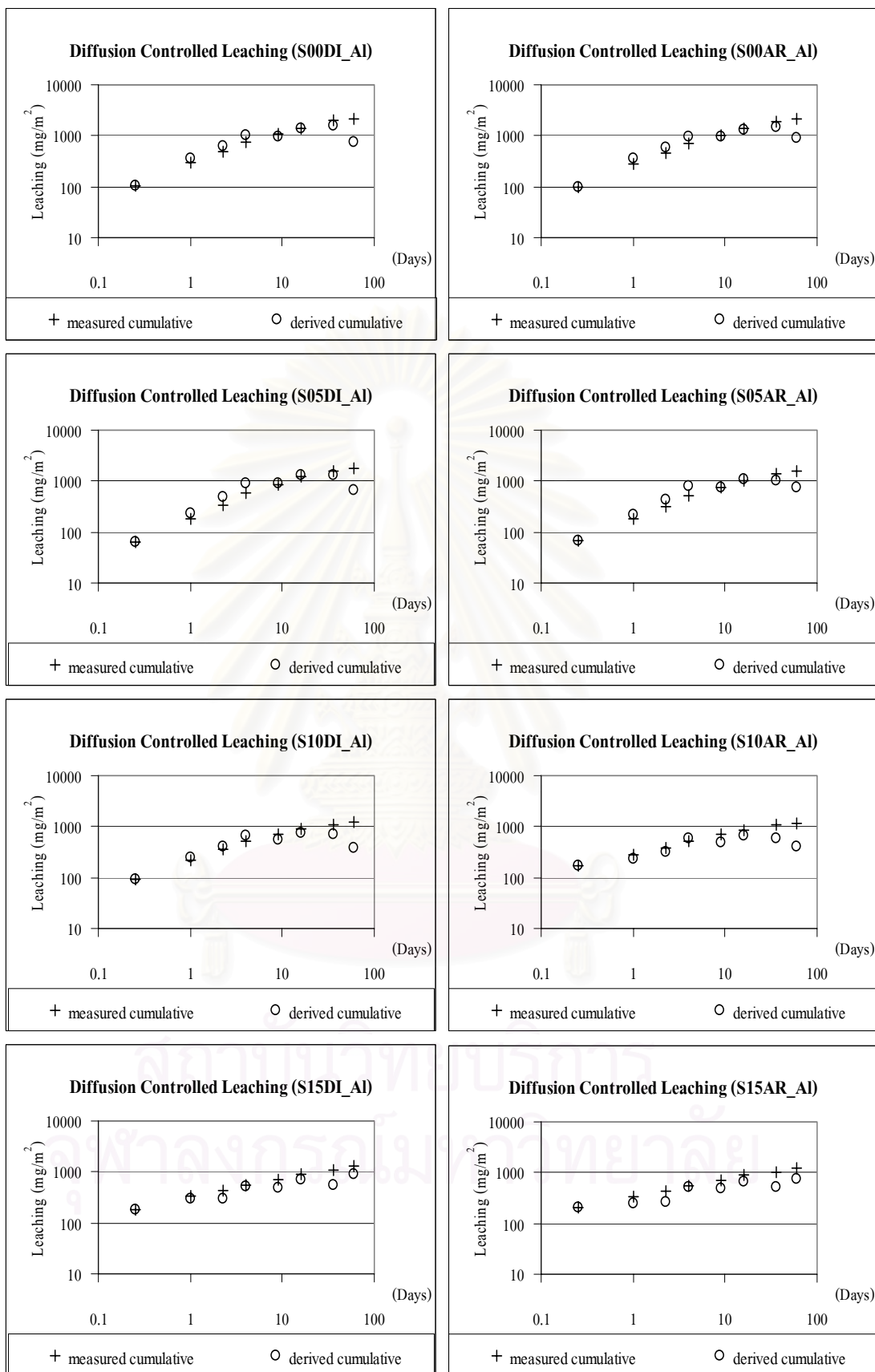
นอกจากนี้กลไกรวมตลอดการทดสอบเปลี่ยนแปลงจากการเกิดกลไกการแพร่เป็นการชะ
ล้างที่ผิวหน้าซึ่งพบว่าความสามารถในการยึดจับอลูมิเนียมในก้อนแข็งลดลง

ตารางที่ 4.9 กลไกการชะละลายของอลูมิเนียมในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดที่มีการเผา
ร่วมกากของเสียอันตราย

ตัวอย่าง	Increment	น้ำปราศจากไอออน		น้ำฝนกรดสังเคราะห์	
		rc	mechanisms	rc	mechanisms
S00	2-7	0.3934	Diffusion	0.3862	Diffusion
	5-8	-0.0954	Depletion	-0.0212	Depletion
	4-7	0.2135	Depletion	0.2017	Depletion
	3-6	0.3548	Depletion	0.3486	Depletion
	2-5	0.4796	Diffusion	0.494	Diffusion
	1-4	0.8127	Delayed diffusion or dissolution	0.7173	Delayed diffusion or dissolution
S05	2-7	0.4644	Diffusion	0.4158	Diffusion
	5-8	-0.1206	Depletion	-0.0129	Depletion
	4-7	0.1808	Depletion	0.146	Depletion
	3-6	0.4213	Diffusion	0.3935	Diffusion
	2-5	0.6494	Diffusion	0.5855	Diffusion
	1-4	0.9585	Delayed diffusion or dissolution	0.8753	Delayed diffusion or dissolution
S10	2-7	0.2734	surface wash-off	0.2685	surface wash-off
	5-8	-0.1689	Depletion	-0.1112	Depletion
	4-7	0.0663	Depletion	0.0369	Depletion
	3-6	0.2457	Depletion	0.278	Depletion
	2-5	0.3881	Diffusion	0.3954	Diffusion
	1-4	0.6923	Delayed diffusion or dissolution	0.4221	Diffusion
S15	2-7	0.2107	surface wash-off	0.2507	surface wash-off
	5-8	0.2169	Depletion	0.1285	Depletion
	4-7	0.061	Depletion	0.0146	Depletion
	3-6	0.3524	Diffusion	0.3923	Diffusion
	2-5	0.2527	Depletion	0.3741	Diffusion
	1-4	0.338	surface wash-off	0.2839	surface wash-off



รูปที่ 4.28 การชะละลายสะสมของอลูมิเนียม จากการวัด (+) และจากการคำนวณ (o)



รูปที่ 4.28 (ต่อ) การชะละลายสะสมของอลูมิเนียมจากการวัด (+) และจากการคำนวณ (o)

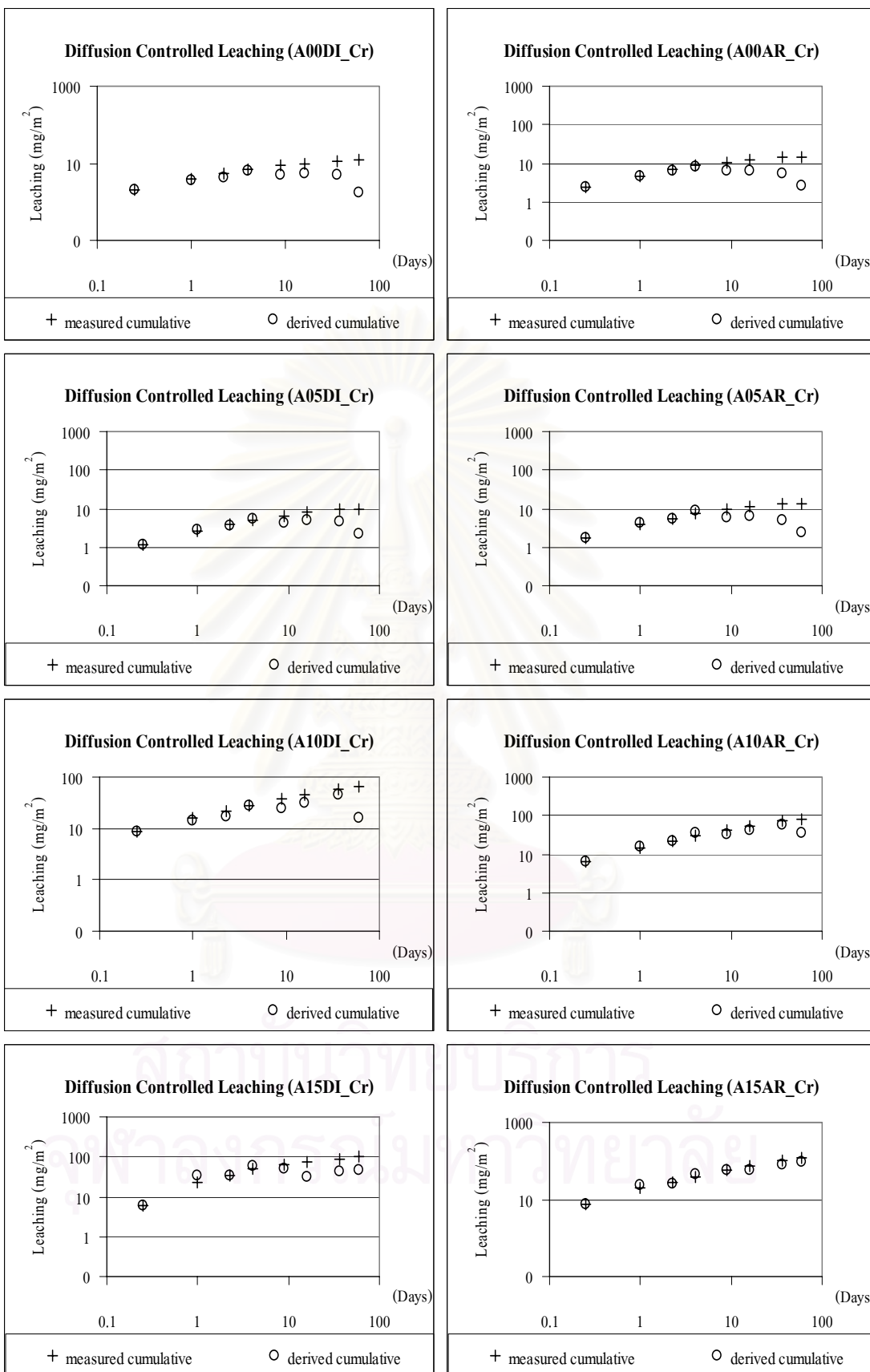
กลไกการชะละลายของโครเมียมในตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่ไม่มีการเผาผนึกของเสีย พบว่าในช่วงแรกของการทดสอบเกิดการชะละลายแบบการแพร่และเกิดการลดลงอย่างรวดเร็ว ในช่วงท้ายของการทดสอบ โดยส่วนใหญ่มีกลไกรวม (Increment 2-7) ตลอดการทดสอบแบบการชะล้างที่ผิวหน้า (Surface wash - off)

ตารางที่ 4.10 กลไกการชะละลายของโครเมียมในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดไม่มีการเผาผนึกของเสียอันตราย

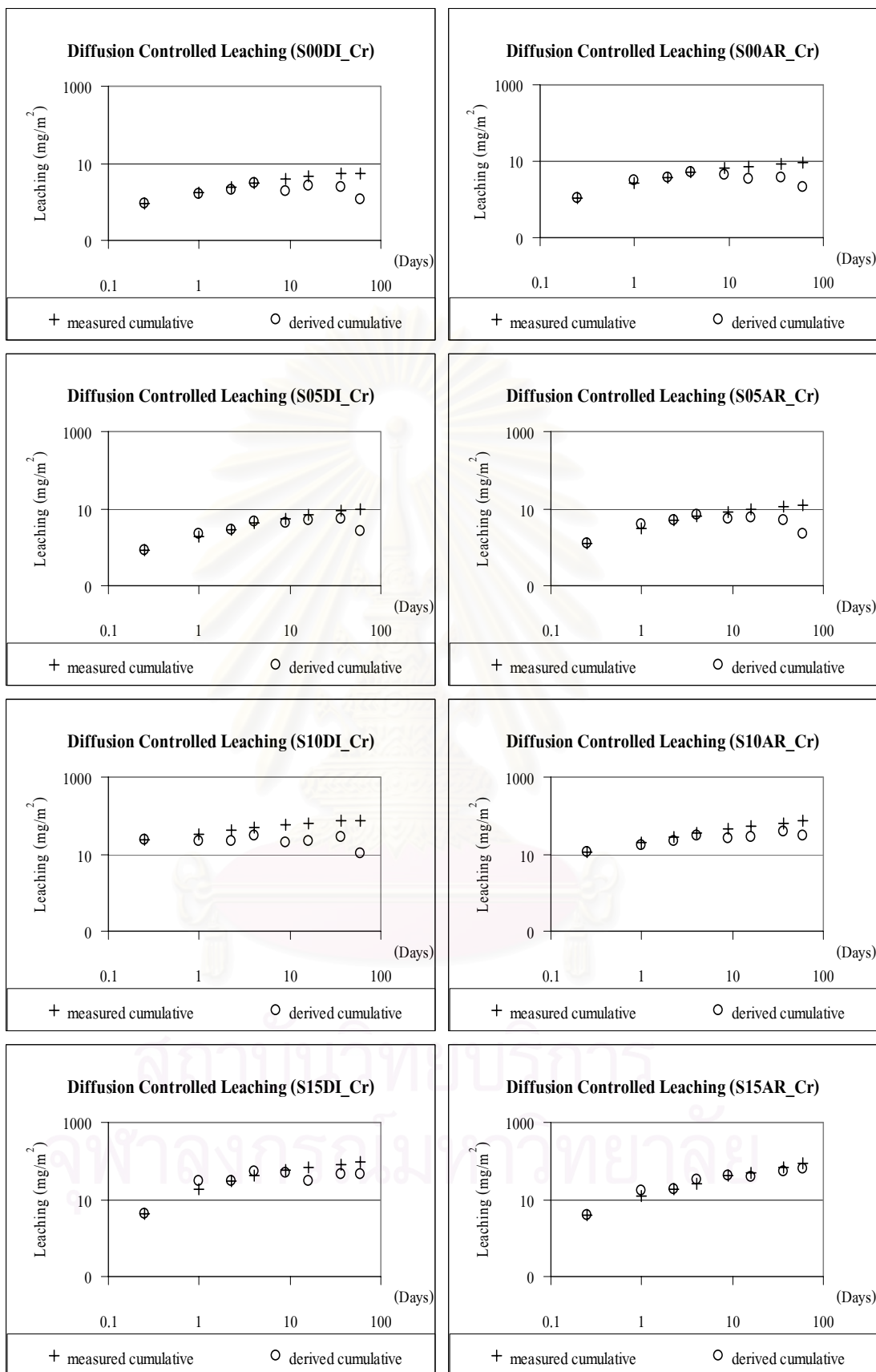
ตัวอย่าง	Increment	น้ำปราศจากไอออน		น้ำฝนกรดสังเคราะห์	
		rc	mechanisms	rc	mechanisms
A00	2-7	0.0768	surface wash-off	0.0347	surface wash-off
	5-8	-0.4643	Depletion	-0.3942	Depletion
	4-7	-0.1015	Depletion	-0.168	Depletion
	3-6	0.0634	Depletion	-0.0398	Depletion
	2-5	0.1685	Depletion	0.1722	Depletion
	1-4	0.3878	Diffusion	0.4378	Diffusion
A05	2-7	0.1181	surface wash-off	0.0375	surface wash-off
	5-8	-0.2917	Depletion	-0.4355	Depletion
	4-7	-0.0572	Depletion	-0.206	Depletion
	3-6	0.0955	Depletion	0.0052	Depletion
	2-5	0.2078	Depletion	0.1794	Depletion
	1-4	0.5558	Diffusion	0.5553	Diffusion
A10	2-7	0.2985	surface wash-off	0.3348	surface wash-off
	5-8	-0.1224	Depletion	0.1020	Depletion
	4-7	0.2302	Depletion	0.2470	Depletion
	3-6	0.2514	Depletion	0.2704	Depletion
	2-5	0.2813	Depletion	0.3646	Diffusion
	1-4	0.3908	Diffusion	0.5739	Diffusion
A15	2-7	0.0436	surface wash-off	0.3518	Diffusion
	5-8	0.0123	Depletion	0.2650	Depletion
	4-7	-0.1657	Depletion	0.2550	Depletion
	3-6	-0.0492	Depletion	0.3850	Diffusion
	2-5	0.2324	Depletion	0.4408	Diffusion
	1-4	0.7775	Delayed diffusion or dissolution	0.6154	Diffusion

ตารางที่ 4.11 กลไกการชะละลายของโครเมียมในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดที่มีการเผา
ร่วมกากของเสียอันตราย

ตัวอย่าง	Increment	น้ำปราศจากอ็อกโซน		น้ำฝนกรดสังเคราะห์	
		rc	mechanisms	rc	mechanisms
S00	2-7	0.0926	Surface wash-off	0.0279	Surface wash-off
	5-8	-0.2328	Depletion	-0.3197	Depletion
	4-7	-0.0549	Depletion	-0.1699	Depletion
	3-6	0.0295	Depletion	-0.0583	Depletion
	2-5	0.1234	Depletion	0.1969	Depletion
	1-4	0.04178	Surface wash-off	0.5586	Diffusion
S05	2-7	0.2486	Surface wash-off	0.0531	Surface wash-off
	5-8	-0.1811	Depletion	-0.4443	Depletion
	4-7	0.0988	Depletion	-0.1304	Depletion
	3-6	0.2251	Depletion	0.0352	Depletion
	2-5	0.3198	Depletion	0.1814	Depletion
	1-4	0.5843	Diffusion	0.6068	Diffusion
S10	2-7	0.0423	Surface wash-off	0.1893	Surface wash-off
	5-8	-0.2423	Depletion	0.0956	Depletion
	4-7	0.0018	Depletion	0.1279	Depletion
	3-6	-0.0575	Depletion	0.0984	Depletion
	2-5	0.0105	Depletion	0.2045	Depletion
	1-4	0.0623	Surface wash-off	0.3187	Surface wash-off
S15	2-7	0.0733	Surface wash-off	0.3383	Surface wash-off
	5-8	0.0241	Depletion	0.2395	Depletion
	4-7	-0.1362	Depletion	0.1935	Depletion
	3-6	-0.0281	Depletion	0.36	Diffusion
	2-5	0.2671	Depletion	0.4642	Diffusion
	1-4	0.8722	Delayed diffusion or dissolution	0.7427	Delayed diffusion or dissolution



รูปที่ 4.29 การชะละลายสะสมของโครเมียมจากการวัด (+) และจากการคำนวณ (o)



รูปที่ 4.29 (ต่อ) การชะละลายสะสมของโครเมียมจากการวัด (+) และจากการคำนวณ (o)

ตารางที่ 4.12 กลไกการชะละลายของเหล็กในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดไม่มีการเผาร่วม
กากของเสียอันตราย

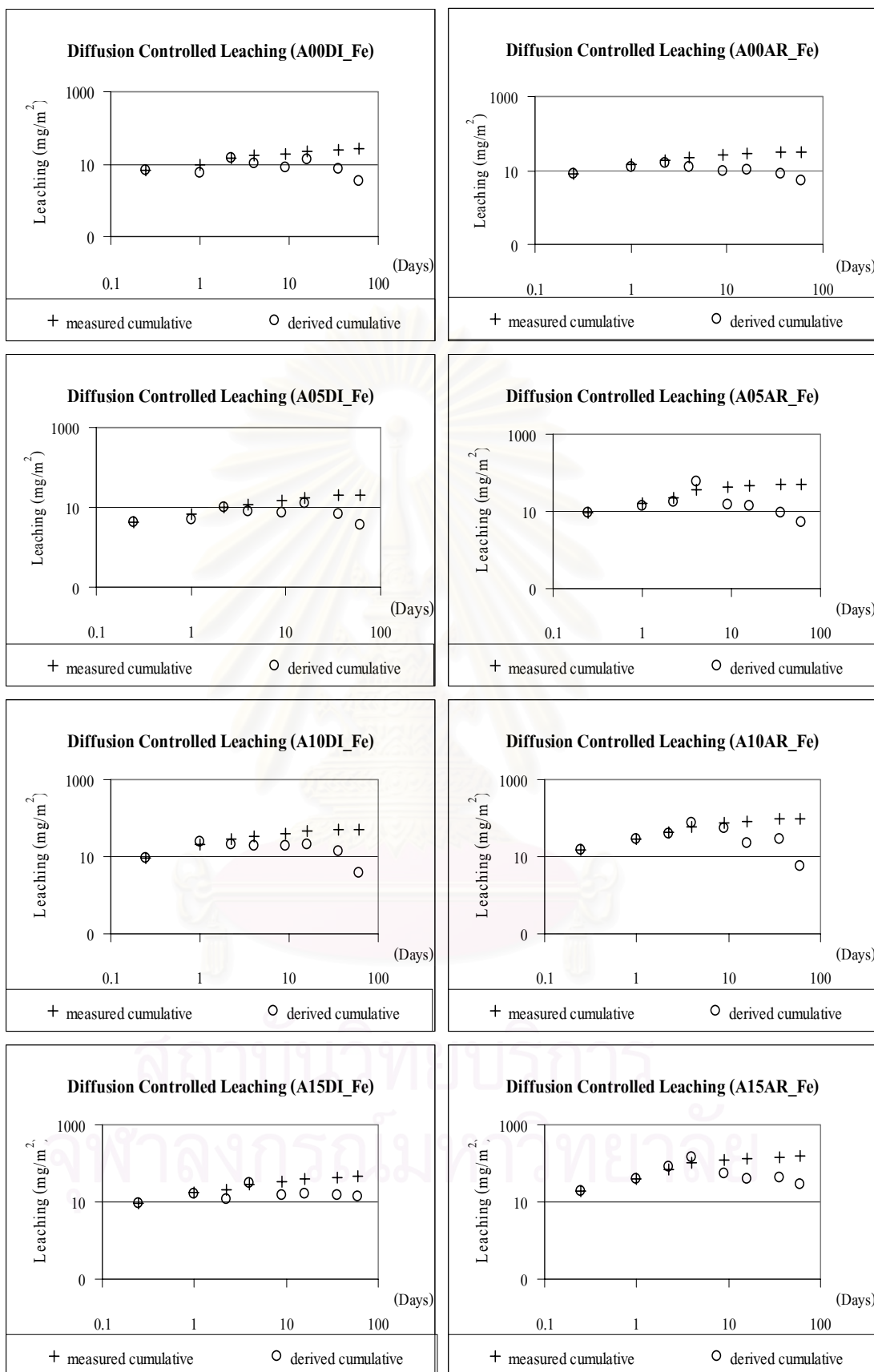
ตัวอย่าง	Increment	น้ำปราศจากอ็อกซิเจน		น้ำฝนกรดสังเคราะห์	
		rc	mechanisms	rc	mechanisms
A00	2-7	0.0231	surface wash-off	-0.1382	surface wash-off
	5-8	-0.4668	Depletion	-0.3132	Depletion
	4-7	-0.0861	Depletion	-0.1611	Depletion
	3-6	-0.1057	Depletion	-0.2128	Depletion
	2-5	0.0882	Depletion	-0.1389	Depletion
	1-4	0.2359	surface wash-off	0.1927	surface wash-off
A05	2-7	0.0829	surface wash-off	-0.1784	surface wash-off
	5-8	-0.4203	Depletion	-0.5317	Depletion
	4-7	-0.0134	Depletion	-0.8144	Depletion
	3-6	0.0684	Depletion	-0.3607	Depletion
	2-5	0.142	Depletion	0.1812	Depletion
	1-4	0.3091	surface wash-off	0.5898	Diffusion
A10	2-7	-0.1231	surface wash-off	-0.0805	surface wash-off
	5-8	-0.8024	Depletion	-0.9193	Depletion
	4-7	-0.128	Depletion	-0.493	Depletion
	3-6	-0.014	Depletion	-0.3131	Depletion
	2-5	-0.1014	Depletion	0.3302	Depletion
	1-4	0.258	surface wash-off	0.5432	Diffusion
A15	2-7	-0.0131	surface wash-off	-0.1216	surface wash-off
	5-8	-0.0761	Depletion	-0.2836	Depletion
	4-7	-0.315	Depletion	-0.5568	Depletion
	3-6	0.0164	Depletion	-0.4941	Depletion
	2-5	0.0899	Depletion	0.1935	Depletion
	1-4	0.3361	surface wash-off	0.698	delayed diffusion or dissolution

การชะละลายของเหล็กโดยส่วนใหญ่เกิดการชะล้างที่ผิวหน้าในช่วงแรกของการทดสอบ
ซึ่งจากการทดสอบการสกัดโลหะหนักแบบลำดับขั้นพบว่าเหล็กอยู่ในพันธะเหล็กและแมงกานีส

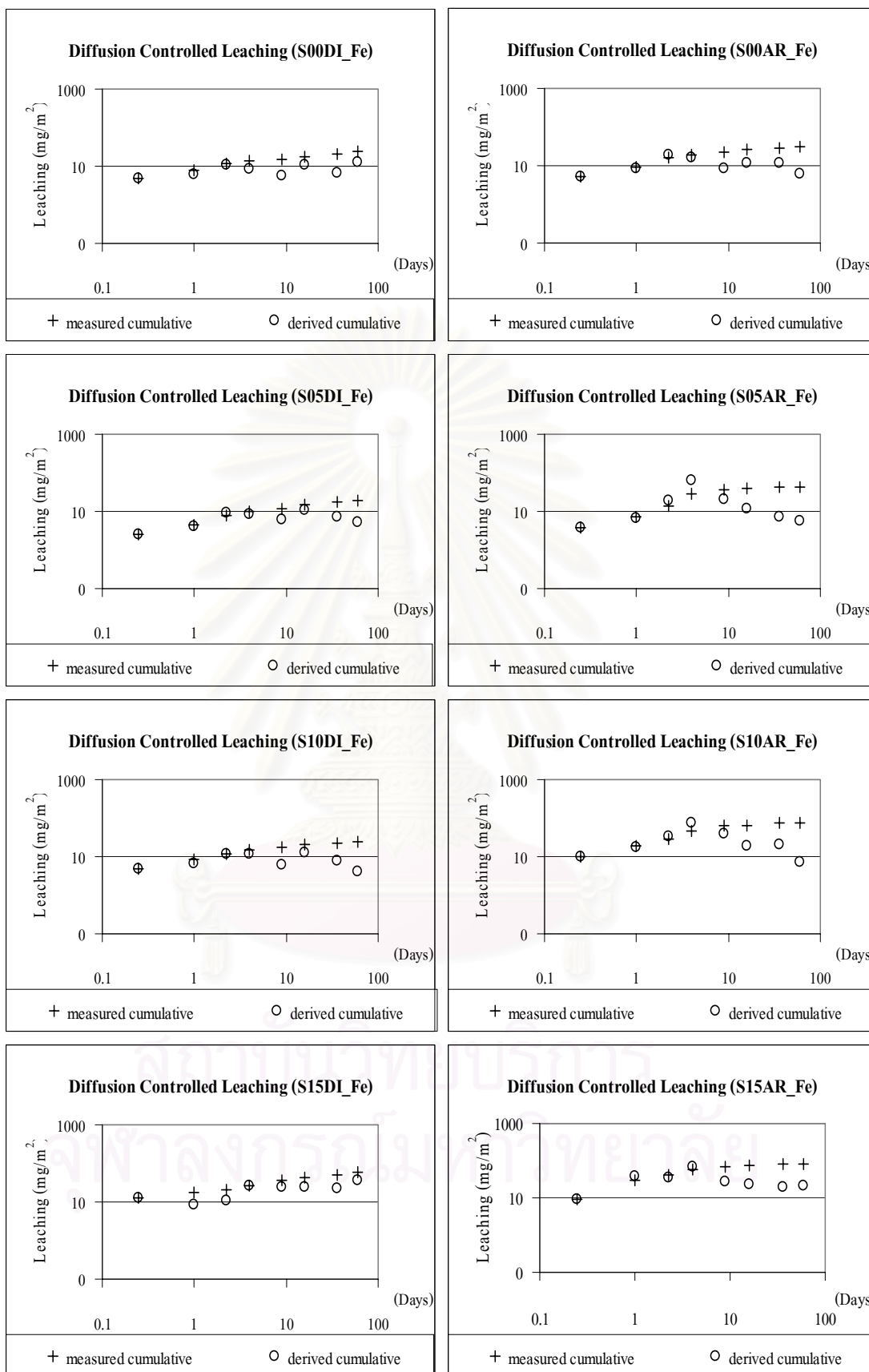
และสามารถถูกชะละลายออกมาได้ง่ายโดยถูกสกัดออกมาประมาณร้อยละ 80 ในขั้นตอนที่สาม และเกิดการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงท้ายของการทดสอบ

ตารางที่ 4.13 กลไกการชะละลายของเหล็กในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดที่มีการเผาพร้อมกากของเสียอันตราย

ตัวอย่าง	Increment	น้ำปราศจากไอออน		น้ำฝนกรดสังเคราะห์	
		rc	mechanisms	rc	mechanisms
S00	2-7	0.0053	surface wash-off	-0.0201	surface wash-off
	5-8	0.2884	Depletion	-0.121	Depletion
	4-7	-0.0179	Depletion	-0.0831	Depletion
	3-6	-0.0556	Depletion	-0.3366	Depletion
	2-5	-0.0637	Depletion	-0.0422	Depletion
	1-4	0.2312	surface wash-off	0.4749	Diffusion
S05	2-7	0.1228	surface wash-off	-0.0878	surface wash-off
	5-8	-0.1465	Depletion	-0.6496	Depletion
	4-7	0.0033	Depletion	-0.9705	Depletion
	3-6	0.0179	Depletion	-0.4196	Depletion
	2-5	0.16	Depletion	0.5978	Diffusion
	1-4	0.4775	Diffusion	0.9738	Delayed diffusion or dissolution
S10	2-7	0.0053	surface wash-off	-0.0549	surface wash-off
	5-8	-0.2761	Depletion	-0.755	Depletion
	4-7	-0.1089	Depletion	-0.6355	Depletion
	3-6	-0.0807	Depletion	-0.3301	Depletion
	2-5	-0.0265	Depletion	0.4575	Diffusion
	1-4	0.3594	Diffusion	0.6794	Delayed diffusion or dissolution
S15	2-7	0.292	surface wash-off	-0.2354	surface wash-off
	5-8	0.1782	Depletion	-1.663	Depletion
	4-7	-0.0589	Depletion	-0.5776	Depletion
	3-6	0.3639	Diffusion	-0.335	Depletion
	2-5	0.5322	Diffusion	-0.0555	Depletion
	1-4	0.1854	surface wash-off	0.6584	Delayed diffusion or dissolution



รูปที่ 4.30 การชะละลายสะสมของเหล็กจากการวัด (+) และจากการคำนวณ (o)



รูปที่ 4.30 (ต่อ) การชะละลายสะสมของเหล็กจากการวัด (+) และจากการคำนวณ (o)

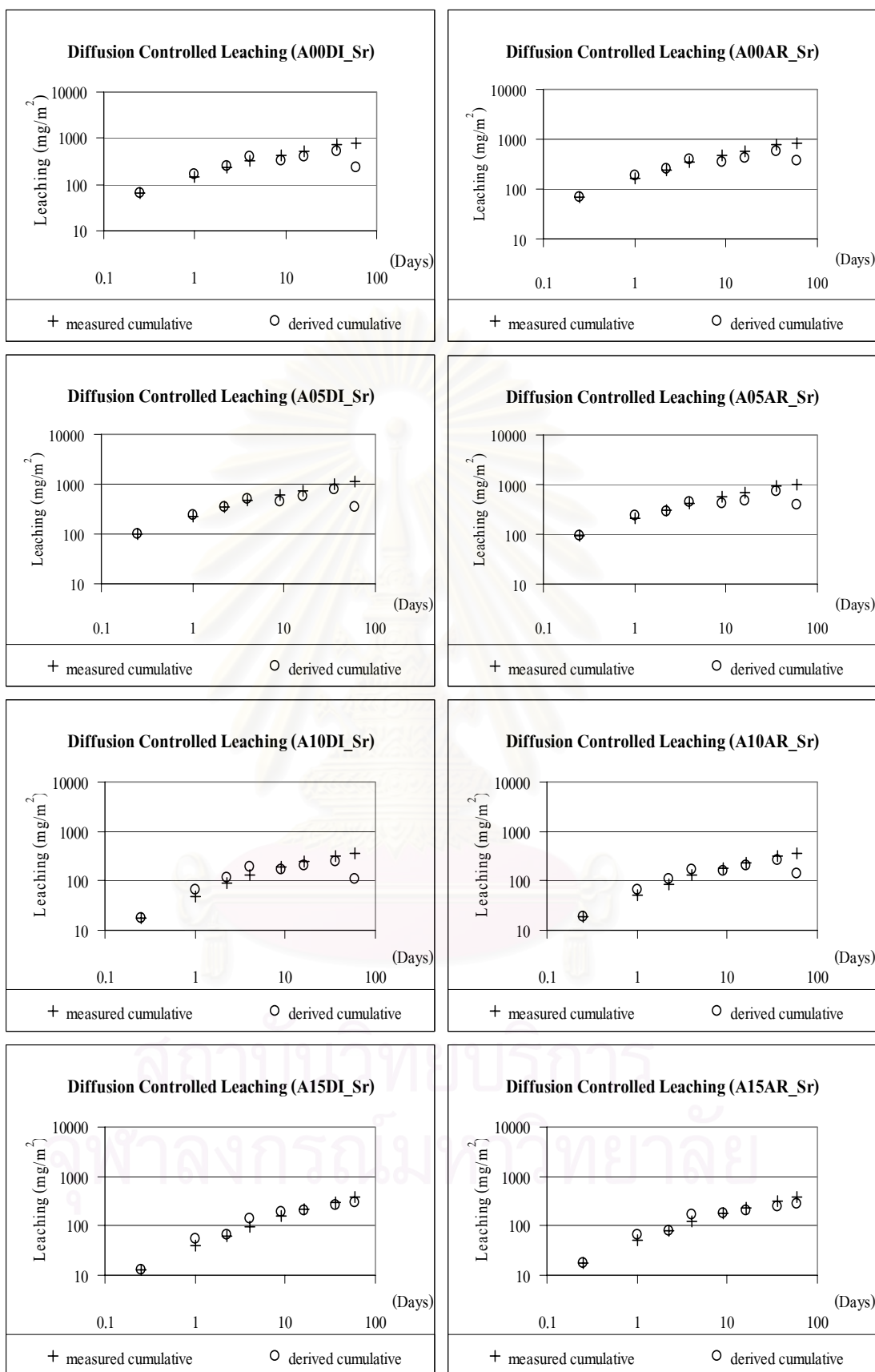
กลไกการชะละลายของสตรอนเตียมในตัวอย่างปูนซีเมนต์ชนิดไม่มีการเผาร่วมกากของเสียจะเกิดการชะล้างที่ผิวหน้าในช่วงแรกของการทดสอบ ยกเว้นในตัวอย่างการแทนที่ร้อยละ 15 เกิดการชะละลายแบบแพร่และเกิดการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงท้ายของการทดสอบ

ตารางที่ 4.14 กลไกการชะละลายของสตรอนเตียมในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดไม่มีการเผาร่วมกากของเสียอันตราย

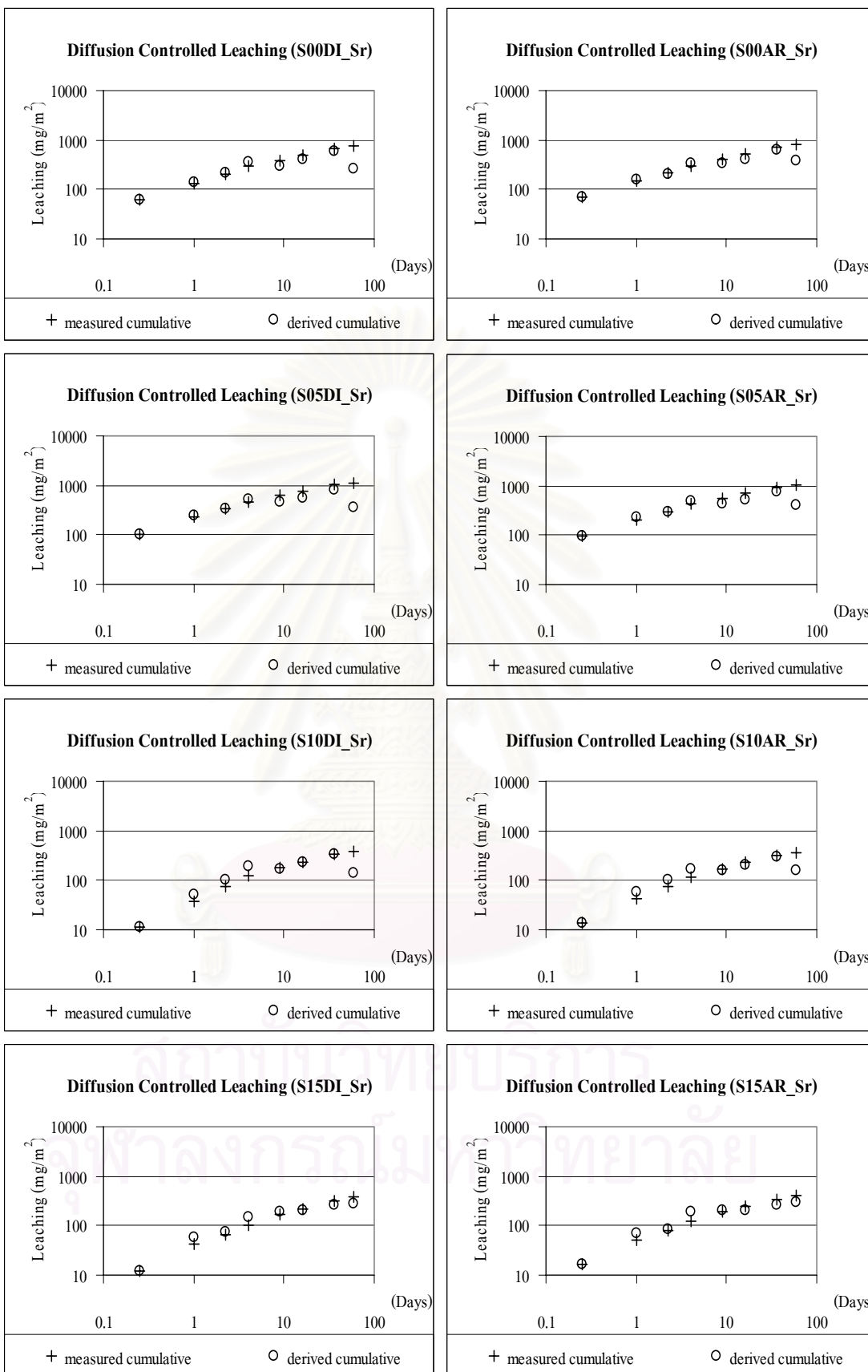
ตัวอย่าง	Increment	น้ำปราศจากไอออน		น้ำฝนกรดสังเคราะห์	
		rc	mechanisms	rc	mechanisms
A00	2-7	0.2809	surface wash-off	0.2899	surface wash-off
	5-8	-0.0995	Depletion	0.0771	Depletion
	4-7	0.1441	Depletion	0.1908	Depletion
	3-6	0.1613	Depletion	0.1991	Depletion
	2-5	0.3305	Depletion	0.3257	Depletion
	1-4	0.6364	Diffusion	0.5952	Diffusion
A05	2-7	0.2928	surface wash-off	0.2797	surface wash-off
	5-8	-0.0542	Depletion	0.0446	Depletion
	4-7	0.2099	Depletion	0.2216	Depletion
	3-6	0.1878	Depletion	0.2098	Depletion
	2-5	0.2989	Depletion	0.283	Depletion
	1-4	0.5701	Diffusion	0.5375	Diffusion
A10	2-7	0.334	surface wash-off	0.3538	Diffusion
	5-8	-0.1686	Depletion	-0.0188	Depletion
	4-7	0.1243	Depletion	0.1961	Depletion
	3-6	0.2328	Depletion	0.2696	Depletion
	2-5	0.4729	Diffusion	0.4388	Diffusion
	1-4	0.8573	Delayed diffusion or dissolution	0.7937	Delayed diffusion or dissolution
A15	2-7	0.4622	Diffusion	0.3723	Diffusion
	5-8	0.239	Depletion	0.2016	Depletion
	4-7	0.2623	Depletion	0.1655	Depletion
	3-6	0.5282	Diffusion	0.4138	Diffusion
	2-5	0.6154	Diffusion	0.5115	Diffusion
	1-4	0.8305	Delayed diffusion or dissolution	0.7664	Delayed diffusion or dissolution

ตารางที่ 4.15 กลไกการชะละลายของสตรอนเทียมในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดที่มีการ
เผาร่วมกากของเสียอันตราย

ตัวอย่าง	Increment	น้ำปราศจากไอออน		น้ำฝนกรดสังเคราะห์	
		rc	mechanisms	rc	mechanisms
S00	2-7	0.3666	Diffusion	0.3578	Diffusion
	5-8	0.0155	Depletion	0.1362	Depletion
	4-7	0.2628	Depletion	0.2786	Depletion
	3-6	0.2377	Depletion	0.3024	Depletion
	2-5	0.3759	Diffusion	0.3681	Diffusion
	1-4	0.6267	Diffusion	0.5346	Diffusion
S05	2-7	0.3033	Surface wash-off	0.302	Surface wash-off
	5-8	-0.0296	Depletion	0.0284	Depletion
	4-7	0.2131	Depletion	0.1992	Depletion
	3-6	0.1982	Depletion	0.2196	Depletion
	2-5	0.3072	Depletion	0.338	Depletion
	1-4	0.5701	Diffusion	0.5672	Diffusion
S10	2-7	0.4614	Diffusion	0.4182	Diffusion
	5-8	-0.0039	Depletion	0.063	Depletion
	4-7	0.2665	Depletion	0.259	Depletion
	3-6	0.314	Depletion	0.3015	Depletion
	2-5	0.5562	Diffusion	0.497	Diffusion
	1-4	1.0035	Delayed diffusion or dissolution	0.9028	Delayed diffusion or dissolution
S15	2-7	0.4368	Diffusion	0.3779	Diffusion
	5-8	0.2083	Depletion	0.2225	Depletion
	4-7	0.2345	Depletion	0.147	Depletion
	3-6	0.4805	Diffusion	0.4089	Diffusion
	2-5	0.6028	Diffusion	0.5323	Diffusion
	1-4	0.8632	Delayed diffusion or dissolution	0.8312	Delayed diffusion or dissolution



รูปที่ 4.31 การชะละลายสะสมของสตรอนเทียมจากการวัด (+) และจากการคำนวณ (o)



รูปที่ 4.31 (ต่อ) การชะละลายสะสมของสตรอนเตียมจากการวัด (+) และจากการคำนวณ (o)

ตารางที่ 4.16 กลไกการชะละลายของสังกะสีในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดไม่มีการเผา
ร่วมกากของเสียอันตราย

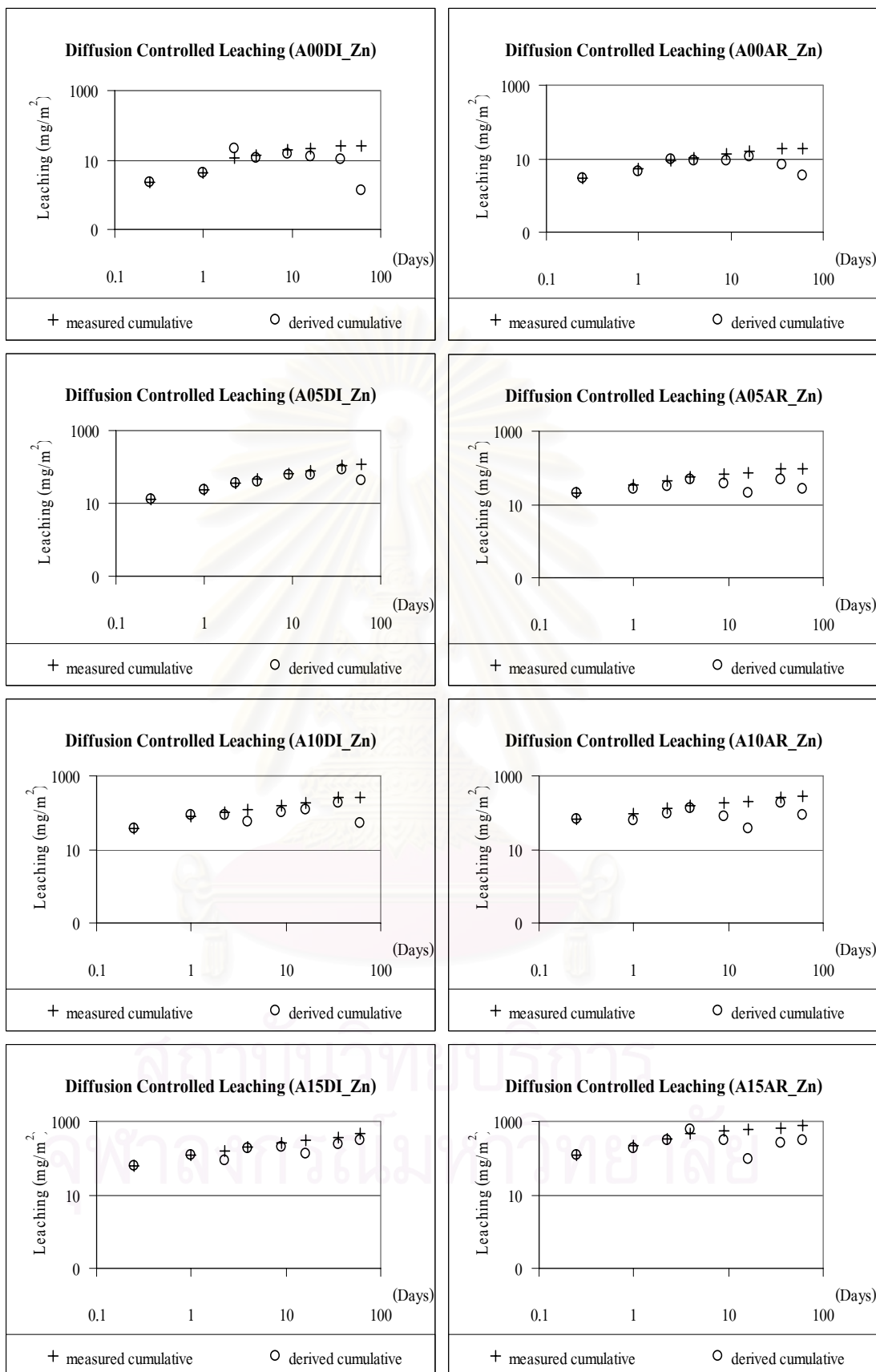
ตัวอย่าง	Increment	น้ำปราศจากไอออน		น้ำฝนกรดสังเคราะห์	
		rc	mechanisms	rc	mechanisms
A00	2-7	0.1544	surface wash-off	0.1014	surface wash-off
	5-8	-1.0829	Depletion	-0.483	Depletion
	4-7	-0.0497	Depletion	-0.0858	Depletion
	3-6	-0.1668	Depletion	0.079	Depletion
	2-5	0.4702	Diffusion	0.2584	Depletion
	1-4	0.7136	Delayed diffusion or dissolution	0.433	Diffusion
A05	2-7	0.342	surface wash-off	0.0649	surface wash-off
	5-8	-0.0803	Depletion	0.011	Depletion
	4-7	0.3333	Depletion	-0.0584	Depletion
	3-6	0.2822	Depletion	-0.2409	Depletion
	2-5	0.401	Diffusion	0.1789	Depletion
	1-4	0.4344	Diffusion	0.2771	surface wash-off
A10	2-7	0.243	surface wash-off	0.0922	surface wash-off
	5-8	-0.2444	Depletion	0.329	Depletion
	4-7	0.5195	Depletion	0.0463	Depletion
	3-6	0.2835	Depletion	-0.4915	Depletion
	2-5	0.0538	Depletion	0.1499	Depletion
	1-4	0.2097	surface wash-off	0.2379	surface wash-off
A15	2-7	0.187	surface wash-off	-0.1052	surface wash-off
	5-8	0.3206	Depletion	0.1487	Depletion
	4-7	0.0536	Depletion	-0.4916	Depletion
	3-6	0.1714	Depletion	-0.6438	Depletion
	2-5	0.2877	Depletion	0.2908	Depletion
	1-4	0.3123	surface wash-off	0.5461	Diffusion

กลไกการชะละลายของสังกะสีโดยส่วนใหญ่เกิดการชะล้างที่ผิวหน้าในช่วงแรกของการทดสอบ โดยมีลักษณะคล้ายคลึงกันในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด และการชะละลายจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงท้ายของการทดสอบโดยมีกลไกรวมตลอดการทดสอบแบบการชะล้างที่ผิวหน้า ซึ่ง

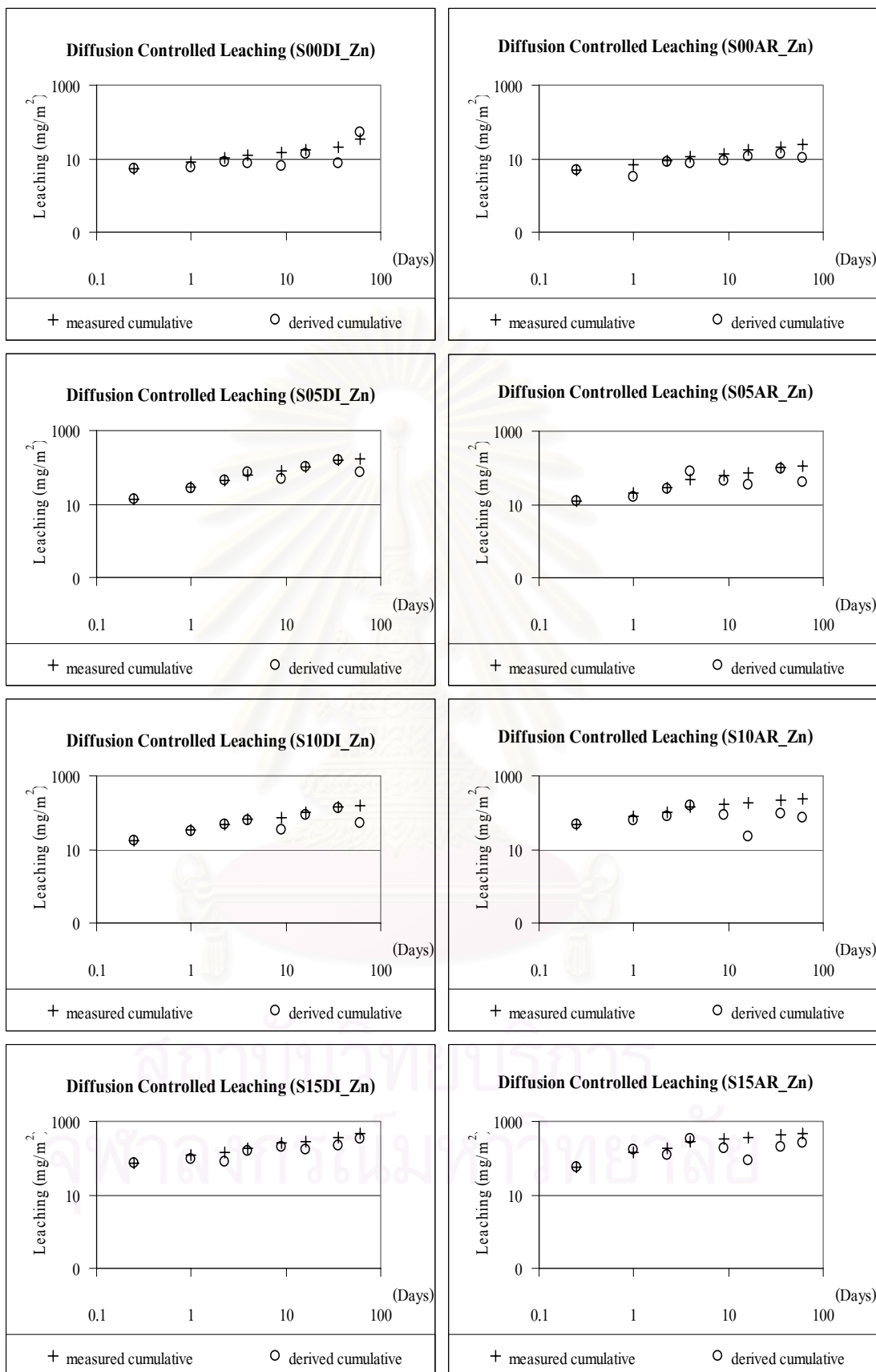
จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสังกะสีมีความสามารถในการชะละลายได้ดี ซึ่งพบว่าเกิดการชะล้างที่ผิวหน้าเป็นส่วนใหญ่ แสดงให้เห็นว่าเมื่อก้อนแข็งอยู่ในสถานะที่สามารถเกิดการชะละลายได้ สังกะสีในตัวอย่างก้อนแข็งมีแนวโน้มในการชะละลายออกอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นผลเสียต่อการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งจากตะกอนชนิดที่มีสังกะสีเป็นส่วนประกอบหลัก

ตารางที่ 4.17 กลไกการชะละลายของสังกะสีในตัวอย่างก้อนแข็งจากปูนซีเมนต์ชนิดที่มีการเผาร่วมกากของเสียอันตราย

ตัวอย่าง	Increment	น้ำปราศจากไอออน		น้ำฝนกรดสังเคราะห์	
		rc	mechanisms	rc	mechanisms
S00	2-7	0.1128	surface wash-off	0.3537	Diffusion
	5-8	0.7979	Dissolution	0.1209	Depletion
	4-7	0.0953	Depletion	0.2951	Depletion
	3-6	0.2111	Depletion	0.2038	Depletion
	2-5	0.0329	Depletion	0.4207	Diffusion
	1-4	0.1583	surface wash-off	0.1892	surface wash-off
S05	2-7	0.4305	Diffusion	0.3499	surface wash-off
	5-8	0.2287	Depletion	0.1531	Depletion
	4-7	0.4028	Diffusion	0.0243	Depletion
	3-6	0.2898	Depletion	-0.0109	Depletion
	2-5	0.304	Depletion	0.5346	Diffusion
	1-4	0.5778	Diffusion	0.6098	Diffusion
S10	2-7	0.3351	surface wash-off	-0.078	surface wash-off
	5-8	0.2565	Depletion	0.1909	Depletion
	4-7	0.4194	Diffusion	-0.3529	Depletion
	3-6	0.1545	Depletion	-0.6711	Depletion
	2-5	0.064	Depletion	0.222	Depletion
	1-4	0.4578	Diffusion	0.3751	Diffusion
S15	2-7	0.2691	surface wash-off	-0.0491	surface wash-off
	5-8	0.2726	Depletion	0.2952	Depletion
	4-7	0.1394	Depletion	-0.3175	Depletion
	3-6	0.3794	Diffusion	-0.2808	Depletion
	2-5	0.3662	Diffusion	0.1275	Depletion
	1-4	0.2203	surface wash-off	0.535	diffusion



รูปที่ 4.32 การชะละลายสะสมของสังกะสีจากการวัด (+) และจากการคำนวณ (o)



รูปที่ 4.32 (ต่อ) การชะละลายสะสมของสังกะสีจากการวัด (+) และจากการคำนวณ (o)

จากการทดสอบการชะละลายสามารถสรุปกลไกการชะละลายของโลหะหนักจากตัวอย่างก้อนแข็ง โดยเลือกกลไกที่เป็นภาพรวมของตัวอย่างจากช่วงการทดสอบที่ 2-7 ของโลหะหนักแต่ละชนิดได้ดังตารางที่ 4.7 การชะละลายของอลูมิเนียมจากตัวอย่างปูนซีเมนต์ชนิด A ที่ถูกชะละลายจากน้ำปราศจากไอออนพบว่าโดยรวมของกลไกการชะละลายแล้วเกิดจากการชะล้างที่ผิวหน้า (Surface wash-off) เป็นส่วนใหญ่โดยในช่วงแรกของการทดสอบอลูมิเนียมจะเกิดกลไกการชะละลายแบบ Diffusion อย่างช้า ๆ และจะถูกชะละลายออกมาจนลดน้อยลงแบบ Depletion ซึ่งในตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยกากตะกอน สามารถวิเคราะห์กลไกในการชะละลายของโลหะหนักได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากค่า r_c ที่ได้มีค่าน้อยจึงพบกลไกแบบการชะล้างที่ผิวหน้าเป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 5 อลูมิเนียมในตัวอย่างก้อนแข็งเกิดกลไกการชะละลายแบบ Diffusion ซึ่งเป็นกลไกเดียวกันในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด นอกจากนี้ในการชะละลายด้วยน้ำฝนกรดสังเคราะห์ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 และ 5 พบว่าเกิดการชะละลายแบบ Diffusion เช่นเดียวกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่ากลไกการชะละลายของอลูมิเนียมเกี่ยวข้องกับค่าพีเอชของน้ำชะละลาย ซึ่งตรงกับการทดสอบ Acid naturalization capacity ของตัวอย่างก้อนแข็ง

การชะละลายของโครเมียมโดยส่วนใหญ่เกิดจากกลไกการชะล้างที่ผิวหน้าเช่นเดียวกับเหล็กและสังกะสีที่มีรูปแบบกลไกการชะละลายที่เหมือนกันยกเว้นในการชะละลายของตัวอย่าง A15_AR และ S00_DI เกิดกลไกแบบ Diffusion ซึ่งเป็นกลไกเดียวกับสตรอนเตียม และโดยส่วนใหญ่สตรอนเตียมจะเกิดจากกลไกแบบ Diffusion นอกจากนี้ในตัวอย่างปูนซีเมนต์ชนิด S โครเมียมจะถูกชะละลายด้วยกลไกแบบ Diffusion ในช่วงแรกและช่วงกลางของการทดสอบ แต่เมื่อดูภาพรวมแล้วเป็นการชะล้างที่ผิวหน้าซึ่งจากผลการวิเคราะห์กลไกการชะละลายแล้วกลไกแบบ Diffusion น่าจะเป็นตัวควบคุมการชะละลายของโครเมียม

4.7.2 การชะละลายกับมาตรฐานน้ำใต้ดิน

การบำบัดกากของเสียอันตรายและการกำจัดกากของเสียจากกระบวนการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งในปัจจุบันเป็นการนำไปฝังกลบที่หลุมฝังกลบ ซึ่งในขั้นตอนการฝังกลบนั้นต้องมีการตรวจสอบความมั่นคงของหลุมฝังกลบด้วย เพื่อเป็นการป้องกันการรั่วไหลของสารพิษเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งหากมีการรั่วไหลเกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะการรั่วไหลลงสู่พื้นดินซึ่งในงานวิจัยได้นำมาตรฐานน้ำใต้ดินมาเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของโลหะหนักที่ชะละลายออกมาจากก้อนแข็ง เพื่อเป็นการประเมินความปลอดภัยในกรณีที่มีการชะละลายเกิดขึ้นจริงในหลุมฝังกลบ

ตารางที่ 4.18 ความเข้มข้นจากการชะละลายของโลหะหนักในก้อนแข็ง

โลหะหนัก	ความเข้มข้น(มิลลิกรัมต่อลิตร)				มาตรฐานน้ำใต้ดิน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	ชนิด A		ชนิด S		
Al	A00_DI_36	8.37	S00_DI_36	7.88	N/A
Cr	A15_AR_36	0.41	S10_DI_0.25	0.35	Cr ⁺⁶ <0.05
Fe	A15_AR_4	0.53	S15_AR_1	0.29	N/A
Sr	A05_DI_36	3.99	S05_DI_36	4.17	N/A
Zn	A15_AR_4	2.21	S15_AR_1	1.31	< 5

N/A: ไม่มีการระบุไว้ในมาตรฐานน้ำใต้ดิน

จากการเปรียบเทียบการชะละลายสะสมของอลูมิเนียมในน้ำชะละลายทั้งสองชนิดพบว่า มีค่าเกินมาตรฐานน้ำใต้ดินของ US EPA ซึ่งกำหนดไว้ที่ 0.05 -0.2 ซึ่งไม่ได้ระบุไว้ในมาตรฐานน้ำใต้ดินของไทย โดยอลูมิเนียมจะถูกชะละลายสะสมน้อยที่สุดในตัวอย่าง A10 โดยการชะละลายด้วยน้ำฝนกรดสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 17.4 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังพบว่าสังกะสีมีค่าไม่เกินมาตรฐานน้ำใต้ดินที่กำหนดไว้ที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในตัวอย่างปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยกากตะกอนร้อยละ 15 โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการเปรียบเทียบปริมาณในการชะละลายของโครเมียมในตัวอย่างก้อนแข็งพบว่ามีความเข้มข้นเกินค่าเกินมาตรฐานน้ำใต้ดินในทุกอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยกากตะกอนและในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด ซึ่งจากการเปรียบเทียบความเข้มข้นในการชะละลายกับมาตรฐานน้ำใต้ดินแล้วพบว่า หากเกิดการรั่วไหลของโลหะหนักจากตัวอย่างก้อนแข็ง เนื่องจากความเข้มข้นที่ถูกชะละลายสะสมมีค่ามากกว่ามาตรฐานน้ำใต้ดิน ดังนั้นหากเกิดการชะละลายสามารถก่อให้เกิดการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงลักษณะและกลไกในการชะละลายของโลหะหนักในระยะสั้นและระยะยาว โดยเป็นการทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548) และมาตรฐาน US EPA SW-846 method 1311 นอกจากนี้มีการประยุกต์ใช้การทดสอบการสกัดโลหะหนักตามลำดับขั้น (Sequential extraction test) และทำการสรุปกลไกในการชะละลายของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ทำการพิจารณาและเปรียบเทียบกลไกและลักษณะการชะละลายของตัวอย่างก้อนแข็งจากการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งจากตะกอนจากปูนซีเมนต์ที่มีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน โดยเน้นพิจารณาที่ข้อแตกต่างระหว่างกระบวนการเผาร่วมกากของเสียอันตราย (Co-processing) และปูนซีเมนต์ที่ใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงตามปกติ โดยสามารถสรุปผลการวิจัยในแต่ละการทดสอบได้ดังนี้

1. การศึกษาปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดพบว่าปูนซีเมนต์จากกระบวนการเผาร่วมกากของเสียอันตราย (Co-processing) มีปริมาณโครเมียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีส นิกเกิล สตรอนเตียม และสังกะสี มากกว่าปูนซีเมนต์จากกระบวนการผลิตตามปกติ

2. การศึกษาความสามารถในการรับแรงอัดในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดพบว่าผลกระทบของกากตะกอนที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างในแต่ละระยะเวลาบ่มมีค่าใกล้เคียงกันยกเว้นที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 5 ในปูนซีเมนต์ที่มีการเผาร่วมกากของเสียอันตรายมีความสามารถในการรับแรงอัดสูงกว่าในปูนซีเมนต์ที่ไม่มีการเผาร่วมกากของเสียอาจเนื่องมาจากข้อแตกต่างในขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์

3. การสกัดโลหะหนักแบบลำดับขั้นตอน (Sequential extraction test) พบว่ามีสตรอนเตียมถูกชะละลายออกมาในขั้นตอนแรกและขั้นตอนที่สอง (ร้อยละ 60) มากกว่าโลหะหนักชนิดอื่นๆ ที่ทำการพิจารณาและโลหะหนักส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่มีพันธะกับเหล็กหรือแมงกานีสออกไซด์ และเมื่อทำการวิเคราะห์โลหะหนักที่เหลือในกากในขั้นตอนสุดท้ายของการสกัด (Residual fraction) พบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่ที่ทำการพิจารณาเหลืออยู่ในขั้นตอนนี้มีน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับการชะละลายระยะยาวของก้อนแข็งที่พบว่าเกิดกลไกการชะละลายโดยส่วนใหญ่แบบการชะล้างที่ผิวหน้า เนื่องจากก้อนแข็งมีความเสถียรต่ำจึงง่ายต่อการถูกชะละลายเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยกากตะกอนเพิ่มมากขึ้น

4. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งที่มีผลต่อการชะละลายของโลหะหนักพบว่าเมื่อมีการแทนที่กากตะกอนเพิ่มขึ้น ปริมาณรุกรานในก้อนตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นซึ่งมีลักษณะเดียวกันในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด

5. การชะละลายโดยการประยุกต์การชะละลายตามมาตรฐาน EA NEN 7373: 2004 พบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่ถูกชะละลายออกมาต่ำกว่ามาตรฐานน้ำใต้ดิน ยกเว้นโครเมียมที่มีการชะละลายเกินมาตรฐานน้ำใต้ดิน ซึ่งกลไกโดยรวมในการชะละลายของโลหะหนักเป็นการชะละลายแบบการชะล้างที่ผิวหน้าเป็นส่วนใหญ่

6. ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยกากตะกอนจากการทดสอบการชะละลายด้วยน้ำชะละลายทั้งสองชนิด (น้ำปราศจากอิออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์) สามารถแทนที่ได้ไม่เกินร้อยละ 5 ของปูนซีเมนต์ เพื่อลดปริมาณการชะละลายของโครเมียมไม่ให้เกินมาตรฐานน้ำใต้ดิน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาถึงผลกระทบในการบ่มก้อนตัวอย่างที่มีผลต่อการชะละลายของโลหะหนัก เนื่องจากการบ่มมีผลต่อการพัฒนากำลั่งอัดและการเกิดผลึกชนิดต่าง ๆ จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์

2. การวิเคราะห์การชะละลายระยะยาวของโลหะหนักแต่ละชนิด ควรเลือกใช้อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งต่าง ๆ เพื่อศึกษาถึงข้อแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำชะละลายที่มีผลต่อความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิด

3. ในการวิเคราะห์กลไกการชะละลาย จากตัวอย่างก้อนแข็งพบว่าการชะละลายของโลหะหนักพร้อมกันและมีกลไกในการควบคุมการชะละลายที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงการทดสอบ ซึ่งไม่สามารถระบุกลไกการชะละลายที่แท้จริงของโลหะหนักแต่ละชนิดได้

4. เนื่องจากการทดลองการชะละลายเป็นการทดสอบก้อนตัวอย่างจากการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็ง ควรมีการเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ที่มีการเผาร่วมกากตะกอน เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการชะละลายจากตัวอย่างที่มีขั้นตอนในการผลิตที่แตกต่างกันและผลจากการเผาไหม้ที่มีต่อกระบวนการชะละลาย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กาญจนา ต่วนเทศ. การเปรียบเทียบการทำเสถียรตะกอนที่มีนิเกิลด้วยปูนขาวและการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาวผสมเถ้าลอยลิกไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- กรทิพย์ เชื้อชาญ. การทำตะกอนโลหะหนักให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- ชัชวาล เศรษฐบุตร; สมหวัง แม้นพิมพ์ชัย; สมชาย จิตต์วิโรดม; และธีรยุทธ พันธุ์มีเชาว์. ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร, 2548.
- ฐากุล หนูเกื้อ. กำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นแห้งของก้อนมอร์ต้าแบบมีฟองอากาศผสมเถ้าลอยลิกไนต์ในเส้นใยปาล์ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- ธีรพล พิรุฬห์ทรัพย์. การชะละลายของโลหะหนักจากถัง/ภาชนะบรรจุน้ำดื่มซึ่งทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากกระบวนการเผา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. ปูนซีเมนต์ ปอชโซลานและคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สมาคมคอนกรีตไทย, 2547.
- ฤทัยรัตน์ แพรรอด. ลักษณะทางกายภาพและชนิดของโลหะหนักในมอร์ต้าที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ที่ใช้กากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://www.diw.go.th/editwebdesign/html/versionthai/laws/27.pdf> [20 พฤศจิกายน 2550]
- วินิต ช่อวิเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529.
- ศศิธร แก้วกันยา. สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโลหะหนักในมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์จากกระบวนการเผาร่วมกับตะกั่วทองแดง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

สุเทพ สุตา. การแก้ไขปัญหาคารบ้ำบัดน้ำเสียจากกระบวนการชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า.

สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

<http://library.dip.go.th/multim6/ebook/DIP%20กสอ12%20ก38.pdf> [17 ธันวาคม 2550]

อุดมวิทย์ กาญจนวงศ์. การทดสอบวัสดุ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สกายบุ๊ก, 2545.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

- American Society for Testing and Materials. ASTM C185-01. Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar. Annual Book of ASTM Standards. 04.01 (2001):168-170.
- American Society for Testing and Materials. ASTM C114-00. Standard Test Method for Chemical Analysis of Hydraulic Cement. Annual Book of ASTM Standards. 04.01 (2001):109-138.
- American Society for Testing and Materials. ASTM C109/C109 M-99. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or [50mm] Cube Specimens). Annual Book of ASTM Standards. 04.01 (2001):83-88.
- American Society for Testing and Materials. ASTM C138/C138M-08. Test Method for Density (Unit weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. Annual Book of ASTM Standards. 04.02 (2008):99-102.
- American Society for Testing and Materials. ASTM C188-95. Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. Annual Book of ASTM Standards. 04.01 (2001):179-180.
- American Society for Testing and Materials. ASTM C204-00. Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus. Annual Book of ASTM Standards. 04.01 (2001):184-191.
- Barna, L.T., Imyim, A. and Barna, R. Long-term prediction of the leaching behavior of pollutants from solidified wastes. Advance in Environmental Research 8 (2004): 697-711.
- Batchelor, B. Overview of waste stabilization with cement. Waste Management. 26 (2006): 689-698.
- Cioffi, R., Lavorgna, M., and Santoro, L. Environmental and technological effectiveness of a process for the stabilization of a galvanic sludge. Journal of Hazardous Materials. B89 (2002): 165-175.
- Conner, J.R. Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes. Van Nostrand Reinhold, NY, USA, 1990.
- Diet, J.N., Moszkowicz, P., and Sorrentino, D. Behaviour of ordinary Portland cement during the stabilization/solidification of synthetic heavy metal sludge: macroscopic and microscopic aspects. Waste management. 18 (1998): 17-24.

- Environment Agency (EA). 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), 2004: 1-32.
- Faucon, P., Bescop, P.L., Adenot, P., Jacquinet, J.F., Pineau, F., and Felix, B. Leaching of cement: Study of the surface layer. Cement and Concrete Research. 26 (1996): 1707-1715.
- Ghosh, S.N. Cement and concrete science & technology. ABI Books Private Limited, 1991.
- Lehighinland. [Online]. Available from: <http://www.lehighinland.com/NR/exeres/3E7E96B8-1DF4-4F8D-A5CA-0FC35A4BDBD5.html> [2007, December 20]
- Li, X.D., Poon, C.S., Sun, H., Lo, I.M.C., and Hirk, D.W. Heavy metal speciation and leaching behaviors in cement based solidified/stabilized waste materials. Journal of Hazardous Materials A82 (2001): 215-230.
- Malviya, R., and Chaudhary, R. Leaching behavior and immobilization of heavy metals in solidified/stabilized products. Journal of Hazardous Materials B137 (2006): 207-217.
- Minocha, A.K., Neeraj, J., and Verma, C.L. Effect of inorganic materials on the solidification of heavy metal sludge. Cement and Concrete Research. 33 (2003): 1695-1701.
- Pereire, C.F., Galiano, Y.L., Rodriguez-Pinero, M.A., and Parapar, J.P. Long and short-term performance of a stabilized/solidified electric arc furnace dust. Journal of Hazardous Materials 148 (2007): 701-707.
- Poon, C.S., Peters, C.J., and Perry, R. Mechanisms of metal stabilization by cement based fixation processes. The science of the total environmental. 41 (1985): 55-71.
- Singh, I.B., Chaturvedi, K., Morchhale, R.K., and Yegneswaran, A.H. Thermal treatment of toxic metals of industrial hazardous wastes with fly ash and clay. Journal of Hazardous Materials. 141 (2007): 215-222.
- Singh, T.S., and Pant, K.K. Solidification/stabilization of arsenic containing solid wastes using portland cement, fly ash and polymeric materials. Journal of Hazardous Materials. 131 (2006): 29-36.
- Sophia, A.C., and Swaminathan, K. Assessment of the mechanical stability and chemical leachability electroplating waste. Chemosphere. 58 (2005): 75-82.
- Spence, R. and Shi, C. Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes. CRC Press, 2005.

- Stegemann, J.A., and Zhou, Q. Screening tests for assessing treatability of inorganic industrial wastes by stabilization / solidification with cement. Journal of Hazardous Materials. 161 (2009): 300-306.
- Taylor, H.F.W. Reactions and Reactivities of compounds in hydraulic cement. Solid State Ionics. 43 (1990): 31-35.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C., and Bisson, M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate traces metals. Analytical Chemistry. 51 (1979): 844-851.
- US Environmental Protection Agency (US EPA) . Stabilization/Solidification of CERCLA and RCRA Wastes, 1989
- US Environmental Protection Agency (US EPA). SW-846 Method 1311. Toxicity characteristic leaching procedure, 1992:1-35.
- US Environmental Protection Agency (US EPA). SW-846 Method 1320. Multiple extraction procedure, 1989:1-2.
- US Environmental Protection Agency (US EPA). SW-846 Method 3052. Microwave digestion of siliceous and organically based matrices, 1995:1-20.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ชนิดและความเข้มข้นของโลหะหนักจากปูนซีเมนต์และกากตะกอน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 ความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด

ชนิดของโลหะหนัก	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	
	ปูนซีเมนต์ที่ไม่มีการเผาไหม้ของเสีย อันตราย (A)	ปูนซีเมนต์ที่มีการเผาไหม้ของเสีย อันตราย (S)
Al	7,989.03	5,968.80
Ba	600.36	276.680
Cd	1.26	1.90
Cr	32.27	50.14
Cu	14.85	148.72
Fe	8,240.06	10,568.60
K	3,652.03	5,608.60
Li	3.55	17.32
Mg	25,696.43	3,220.80
Mn	199.07	276.94
Na	7,762.64	6,985.00
Ni	19.09	29.74
Pb	19.71	29.90
Sr	128.04	184.316
Tl	3.93	3.576
V	105.90	36.212
Zn	41.19	194.19

ตารางที่ ก.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักในตัวอย่างกากตะกอน

ชนิดโลหะหนัก	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละ
Al	3701.93	2.32
Cd	63.56	0.04
Cr	475.96	0.30
Cu	220.63	0.14
Fe	12,673.32	7.93
Hg	9.37	0.01
Mn	1,312.24	0.82
Ni	54.73	0.03
Pb	53.67	0.03
Sr	8,825.31	5.53
Tl	26.289	0.02
V	60.777	0.04
Zn	109,911.36	68.81



ภาคผนวก ข

ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการทดสอบ Sequential extraction test

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการทดสอบด้วยวิธี Sequential Extraction test

ตัวอย่าง	ชั้น ที่	Al	Cr	Fe	Mn	Na	Ni	Pb	Sr	Zn
		มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.
A00	1	0.52	0.40	0.19	0.05	23.89	0.30	0.25	5.54	0.08
A00	2	0.31	0.67	0.17	0.04	1646.60	0.14	0.22	3.36	0.04
A00	3	313.84	1.10	455.72	9.90	685.87	3.73	1.38	3.40	8.69
A00	4	5.66	0.14	4.75	0.47	179.79	0.26	0.24	0.27	2.19
A00	5	137.62	0.05	24.76	0.28	48.05	0.05	0.13	0.19	0.12
รวม		457.95	2.36	485.59	10.74	2584.19	4.48	2.22	12.77	11.12
A05	1	0.59	0.28	0.44	0.03	13.50	0.30	0.20	3.50	0.66
A05	2	0.33	0.71	0.16	0.04	1632.74	0.15	0.24	3.29	0.55
A05	3	270.13	2.33	404.05	8.70	823.10	3.36	1.37	3.48	455.97
A05	4	5.09	0.20	3.16	0.60	58.02	0.23	0.21	0.21	19.98
A05	5	143.03	0.07	23.54	0.35	52.04	0.04	0.15	0.25	2.26
รวม		419.17	3.58	431.36	9.72	2579.40	4.07	2.17	10.73	479.41
A10	1	1.06	0.31	0.85	0.03	21.77	0.27	0.29	3.51	2.75
A10	2	0.29	0.73	0.17	0.03	1648.38	0.16	0.25	3.46	1.29
A10	3	283.01	3.83	444.57	9.01	861.78	3.17	1.30	3.95	894.69
A10	4	6.01	0.26	3.85	0.68	62.88	0.25	0.24	0.21	37.42
A10	5	144.24	0.07	24.65	0.43	46.97	0.04	0.15	0.29	3.84
รวม		434.61	5.20	474.08	10.18	2641.77	3.89	2.23	11.42	939.99
A15	1	0.65	0.40	0.32	0.03	24.80	0.26	0.26	2.98	2.58
A15	2	0.25	0.57	0.16	0.09	1618.64	0.75	0.18	3.25	11.07
A15	3	264.32	5.17	447.85	6.32	867.96	3.26	1.21	3.61	1310.58
A15	4	5.70	0.26	3.75	0.32	62.55	0.24	0.19	0.16	47.54
A15	5	84.63	0.09	22.66	0.30	23.24	0.05	0.12	0.16	5.06
รวม		355.54	6.48	474.75	7.06	2597.20	4.56	1.97	10.16	1376.83

ตารางที่ ข.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการทดสอบด้วยวิธี Sequential Extraction test

ตัวอย่าง	ชั้นที่	Al	Cr	Fe	Mn	Na	Ni	Pb	Sr	Zn
		มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.
S00	1	0.53	0.37	0.20	0.05	22.61	0.35	0.23	3.16	0.39
S00	2	0.31	0.61	0.18	0.03	1593.41	0.86	0.18	3.17	0.08
S00	3	271.59	0.78	373.88	9.45	1013.55	2.48	1.58	4.10	6.88
S00	4	3.55	0.07	2.14	0.29	59.13	0.15	0.22	0.18	0.28
S00	5	104.04	0.04	21.91	0.22	27.15	0.05	0.15	0.18	0.21
รวม		380.03	1.87	398.30	10.03	2715.85	3.90	2.35	10.80	7.85
S05	1	0.76	0.28	0.41	0.03	16.38	0.32	0.21	2.70	0.60
S05	2	0.28	0.57	0.18	0.03	1607.63	1.52	0.17	2.84	29.78
S05	3	230.24	1.70	333.24	8.62	888.16	2.09	1.48	2.70	324.17
S05	4	3.66	0.16	2.46	0.47	61.98	0.22	0.26	0.15	16.57
S05	5	85.48	0.04	19.78	0.24	23.35	0.04	0.14	0.16	3.55
รวม		320.42	2.76	356.07	9.39	2597.49	4.20	2.25	8.55	374.67
S10	1	0.57	0.29	0.19	0.01	26.96	0.23	0.28	2.54	0.09
S10	2	0.94	0.49	0.81	0.06	1615.48	0.90	0.21	2.89	3.56
S10	3	179.70	2.31	289.70	7.49	830.66	2.26	1.54	2.46	617.13
S10	4	8.41	0.37	5.92	0.91	70.91	0.30	0.26	0.27	59.74
S10	5	55.20	0.03	10.49	0.13	25.07	0.02	0.07	0.10	2.36
รวม		244.83	3.50	307.11	8.59	2569.08	3.71	2.36	8.26	682.88
S15	1	0.43	0.40	0.21	0.04	17.54	0.27	0.29	2.33	2.41
S15	2	0.27	0.42	0.14	0.05	1590.64	1.74	0.19	2.73	80.51
S15	3	260.18	5.05	440.06	10.00	1004.57	2.59	1.78	3.70	1239.13
S15	4	5.37	0.33	3.57	0.58	69.58	0.23	0.22	0.22	60.05
S15	5	85.22	0.05	20.67	0.28	21.76	0.04	0.13	0.16	5.53
รวม		351.47	6.24	464.66	10.95	2704.10	4.86	2.60	9.14	1387.63



ภาคผนวก ค

ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการทดสอบปริมาณรุกรานในก้อนมอร์ตา (PW-MMF)

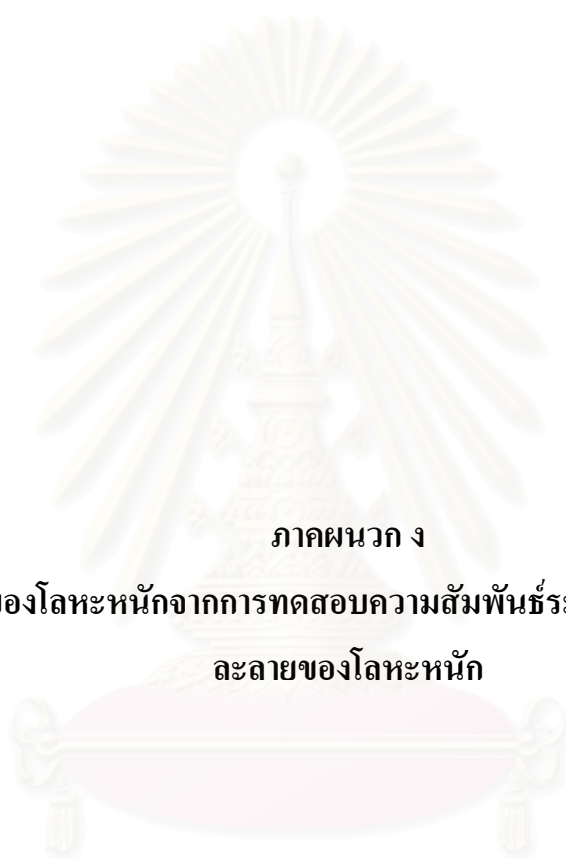
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการทดสอบ **Pore water and maximum mobile fraction test (A)**

ตัวอย่าง	L/S Ratio	Al	Cr	Fe	Na	Sr	Zn
A00	0.5	0.352	0.160	0.014	289.796	36.862	0.379
A00	1	0.293	0.121	0.022	208.667	49.346	0.133
A00	5	0.618	0.107	0.113	69.753	30.481	0.106
A00	10	0.311	0.110	0.013	35.573	19.612	0.115
A00	50	0.557	0.155	0.013	14.588	8.899	0.076
A00	100	5.038	0.228	0.022	4.602	2.279	0.033
A05	0.5	0.346	0.136	0.015	254.529	33.515	0.226
A05	1	0.421	0.101	0.020	205.045	46.434	0.436
A05	5	0.581	0.113	0.140	63.730	30.542	1.587
A05	10	0.471	0.099	0.084	34.894	18.924	1.190
A05	50	1.900	0.239	0.027	6.598	3.146	1.152
A05	100	2.107	0.245	0.015	3.520	1.240	0.329
A10	0.5	0.255	0.512	0.022	218.750	13.329	1.653
A10	1	0.075	0.519	0.022	140.708	12.329	1.852
A10	5	1.211	0.445	0.064	23.164	3.276	4.071
A10	10	0.319	0.642	0.038	42.594	4.908	2.343
A10	50	18.689	0.223	0.037	4.743	0.726	0.953
A10	100	27.794	0.156	0.034	3.204	0.633	0.846
A15	0.5	0.234	0.964	0.063	362.325	25.363	6.325
A15	1	0.057	0.737	0.084	130.206	16.325	1.963
A15	5	1.850	0.365	0.096	63.254	5.362	4.633
A15	10	0.286	1.363	0.074	32.025	6.325	3.625
A15	50	12.782	0.536	0.063	2.366	0.363	1.023
A15	100	38.874	0.633	0.036	2.036	0.633	0.636

ตารางที่ ค.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการทดสอบ **Pore water and maximum mobile fraction test (S)**

ตัวอย่าง	L/S Ratio	Al	Cr	Fe	Na	Sr	Zn
S00	0.5	0.513	0.267	0.020	402.825	14.809	0.115
S00	1	0.513	0.131	0.012	312.015	35.716	0.045
S00	5	0.362	0.091	0.018	121.562	26.757	0.046
S00	10	0.515	0.111	0.022	70.038	17.949	0.044
S00	50	0.661	0.131	0.017	16.042	4.308	0.022
S00	100	3.064	0.171	0.017	8.324	2.520	0.023
S05	0.5	0.270	0.128	0.017	331.348	24.247	0.506
S05	1	0.708	0.084	0.016	244.338	40.818	0.778
S05	5	0.224	0.062	0.013	80.881	25.760	0.732
S05	10	0.184	0.070	0.016	43.723	15.139	0.695
S05	50	0.839	0.130	0.018	10.168	3.517	0.489
S05	100	1.736	0.203	0.014	5.372	1.815	0.137
S10	0.5	0.189	4.393	0.015	230.205	6.249	2.107
S10	1	0.734	2.618	0.216	160.360	7.303	6.785
S10	5	0.497	1.051	0.158	49.351	4.363	2.436
S10	10	0.233	0.640	0.027	26.275	2.905	1.684
S10	50	1.147	0.234	0.017	6.400	1.067	0.521
S10	100	1.376	0.304	0.013	4.929	1.450	1.915
S15	0.5	0.158	4.269	0.009	200.363	9.365	3.625
S15	1	0.426	2.937	0.635	185.396	6.353	8.363
S15	5	0.376	3.266	0.169	63.025	8.363	2.527
S15	10	0.144	0.633	0.094	39.363	2.365	2.365
S15	50	1.058	0.412	0.012	10.254	2.325	1.237
S15	100	1.366	0.633	0.012	6.326	1.237	3.625



ภาคผนวก ง

ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับการชะ
ละลายของโลหะหนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๓.1 ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการทดสอบ Acid neutralization capacity (ปูนซีเมนต์ชนิด A, ตัวอย่าง A00 และ A05)

ตัวอย่าง	pH (เริ่มต้น)	pH (หลัง)	Al	Cr	Fe	Mn	Na	Ni	Pb	Sr	Zn
A00	2	5.29	0.55	0.22	0.10	3.27	8.86	0.23	0.04	5.80	1.01
A00	3	7.02	2.85	0.45	3.21	1.85	8.84	0.11	0.04	5.52	0.08
A00	4	9.21	0.67	0.81	0.62	0.01	8.53	0.01	0.03	5.38	0.01
A00	5	10.43	0.46	0.69	0.38	0.01	8.53	0.01	0.03	5.06	0.01
A00	6	10.55	0.18	0.56	0.06	0.00	8.36	0.01	0.03	5.04	0.01
A00	7	10.70	0.24	0.55	0.13	0.00	8.39	0.01	0.03	5.08	0.00
A00	8	10.76	0.29	0.50	0.13	0.00	8.07	0.01	0.03	4.93	0.00
A00	9	10.91	0.59	0.45	0.29	0.01	8.26	0.01	0.03	4.94	0.01
A00	10	11.11	0.81	0.31	0.33	0.01	8.36	0.01	0.03	4.89	0.01
A00	11	11.66	0.76	0.10	0.21	0.00	8.55	0.01	0.03	4.78	0.01
A00	12	12.04	0.25	0.07	0.11	0.00	8.42	0.01	0.02	4.62	0.01
A05	2	5.18	0.37	0.89	0.30	2.60	8.36	0.20	0.03	5.59	61.07
A05	3	6.85	0.38	0.90	0.05	2.81	8.72	0.21	0.04	5.68	64.21
A05	4	7.72	1.40	0.64	1.32	0.64	6.26	0.08	0.03	3.53	27.29
A05	5	9.54	0.32	0.88	0.18	0.00	8.80	0.02	0.04	4.67	0.15
A05	6	10.52	0.61	0.76	0.57	0.01	8.49	0.02	0.04	4.39	0.31
A05	7	10.72	0.52	0.63	0.42	0.01	8.29	0.02	0.04	4.20	0.22
A05	8	11.16	0.40	0.41	0.05	0.00	8.21	0.01	0.04	4.01	0.06
A05	9	11.40	0.81	0.28	0.11	0.00	7.95	0.01	0.03	3.75	0.14
A05	10	11.51	1.08	0.21	0.06	0.00	8.17	0.01	0.03	3.68	0.11
A05	11	11.64	1.02	0.16	0.15	0.00	8.44	0.01	0.03	3.66	0.25
A05	12	11.68	0.68	0.13	0.03	0.00	4.23	0.01	0.02	1.88	0.07

ตารางที่ ๓.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการทดสอบ Acid neutralization capacity (ปูนซีเมนต์ชนิด A, ตัวอย่าง A10 และ A15)

ตัวอย่าง	pH (เริ่มต้น)	pH (หลัง)	Al	Cr	Fe	Mn	Na	Ni	Pb	Sr	Zn
A10	2	2.92	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
A10	3	4.02	34.65	0.74	3.15	2.75	10.48	0.29	0.06	4.87	232.88
A10	4	5.82	51.82	1.10	49.70	2.08	7.89	0.22	0.08	3.97	199.21
A10	5	7.67	1.03	0.82	1.56	0.40	9.33	0.07	0.04	4.46	12.72
A10	6	8.52	1.67	0.81	2.71	0.05	8.95	0.03	0.04	4.22	2.52
A10	7	9.55	0.68	0.53	0.93	0.01	5.88	0.02	0.03	2.75	0.76
A10	8	10.07	0.56	0.78	0.80	0.01	8.80	0.02	0.04	3.94	0.51
A10	9	10.28	0.37	0.74	0.37	0.01	8.69	0.02	0.04	3.75	0.21
A10	10	10.70	0.48	0.73	0.49	0.01	8.56	0.02	0.04	3.55	0.27
A10	11	11.42	0.61	0.26	0.29	0.00	8.19	0.01	0.03	2.76	1.16
A10	12	12.03	0.65	0.16	0.62	0.01	5.14	0.01	0.02	1.39	1.91
A15	2	3.71	0.45	0.01	0.01	0.01	0.14	0.01	0.02	0.09	2.95
A15	3	3.90	87.35	0.78	1.04	3.14	11.53	0.31	0.07	4.91	251.89
A15	4	6.50	1.02	0.83	1.49	2.11	10.94	0.23	0.05	4.85	169.00
A15	5	9.40	0.42	0.87	0.29	0.00	10.43	0.02	0.04	4.39	0.52
A15	6	9.45	0.45	0.76	0.45	0.01	10.01	0.02	0.04	4.05	0.77
A15	7	10.75	0.77	0.71	0.83	0.01	9.81	0.02	0.04	3.95	1.36
A15	8	10.94	0.93	0.68	0.91	0.01	9.55	0.02	0.04	3.55	1.58
A15	9	11.47	1.42	0.55	1.16	0.01	9.10	0.02	0.03	3.18	2.84
A15	10	11.61	0.97	0.49	1.14	0.01	8.93	0.02	0.03	2.82	4.07
A15	11	11.63	0.59	0.41	0.58	0.01	8.81	0.01	0.03	2.55	2.35
A15	12	11.75	0.01	0.00	0.01	0.00	0.14	0.01	0.01	0.02	0.02

ตารางที่ 3.3 ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการทดสอบ Acid neutralization capacity (ปูนซีเมนต์ชนิด S, ตัวอย่าง S00 และ S05)

ตัวอย่าง	pH (เริ่มต้น)	pH (หลัง)	Al	Cr	Fe	Mn	Na	Ni	Pb	Sr	Zn
S00	2	3.55	104.97	0.07	6.30	6.11	16.52	0.41	0.15	4.78	3.59
S00	3	8.00	0.42	0.55	0.24	0.01	16.52	0.03	0.04	4.19	0.02
S00	4	10.51	1.04	0.29	0.86	0.02	17.09	0.02	0.04	4.33	0.03
S00	5	10.83	1.40	0.23	1.09	0.02	17.19	0.02	0.04	4.32	0.03
S00	6	10.99	1.18	0.18	0.77	0.01	17.08	0.02	0.04	4.22	0.04
S00	7	11.08	1.09	0.18	0.65	0.01	17.06	0.02	0.04	4.18	0.08
S00	8	11.12	0.91	0.17	0.43	0.01	17.08	0.02	0.03	4.20	0.03
S00	9	11.19	1.40	0.15	0.83	0.02	17.25	0.02	0.03	4.24	0.04
S00	10	11.29	1.17	0.13	0.55	0.01	17.10	0.01	0.03	4.16	0.03
S00	11	11.80	0.90	0.06	0.45	0.01	17.70	0.01	0.03	4.20	0.03
S00	12	12.28	1.16	0.04	0.88	0.02	17.96	0.01	0.03	3.97	0.03
S05	2	7.07	0.92	0.78	0.70	2.99	11.56	0.27	0.04	4.28	99.05
S05	3	9.36	1.51	0.77	1.30	0.03	12.05	0.03	0.04	4.21	1.56
S05	4	10.35	0.39	0.68	0.27	0.01	12.22	0.02	0.04	4.24	0.23
S05	5	10.44	0.45	0.52	0.29	0.01	11.98	0.02	0.04	4.08	0.30
S05	6	10.81	0.73	0.41	0.52	0.01	12.04	0.02	0.03	4.08	0.44
S05	7	11.04	1.23	0.28	0.96	0.02	12.02	0.02	0.03	4.01	0.81
S05	8	11.19	1.03	0.21	0.64	0.01	11.33	0.02	0.03	3.72	0.66
S05	9	11.23	1.18	0.20	0.75	0.01	12.08	0.02	0.03	3.92	0.74
S05	10	11.33	0.92	0.15	0.34	0.01	12.18	0.02	0.03	3.89	0.38
S05	11	11.54	1.12	0.10	0.41	0.01	11.90	0.02	0.03	3.62	0.48
S05	12	12.18	0.49	0.04	0.25	0.01	12.12	0.01	0.02	3.12	0.48

ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการทดสอบ Acid neutralization capacity (ปูนซีเมนต์ชนิด S, ตัวอย่าง S10 และ S15)

ตัวอย่าง	pH (เริ่มต้น)	pH (หลัง)	Al	Cr	Fe	Mn	Na	Ni	Pb	Sr	Zn
S10	2	2.45	265.46	2.66	157.23	5.32	12.29	0.41	0.41	4.23	210.22
S10	3	4.48	13.65	0.57	8.53	3.83	11.10	0.35	0.06	3.91	224.65
S10	4	8.92	1.66	0.68	2.50	0.06	11.34	0.03	0.04	3.72	3.11
S10	5	10.05	1.24	0.65	1.74	0.03	11.05	0.02	0.04	3.42	1.82
S10	6	10.61	1.10	0.61	1.21	0.02	10.74	0.02	0.04	3.22	1.43
S10	7	10.63	0.91	0.39	0.96	0.02	7.29	0.02	0.03	2.12	1.38
S10	8	10.80	0.34	0.52	0.22	0.00	10.22	0.02	0.03	2.85	0.37
S10	9	11.80	1.27	0.24	1.22	0.02	10.32	0.01	0.03	2.66	3.73
S10	10	11.98	0.51	0.25	0.39	0.01	9.92	0.01	0.03	2.39	1.57
S10	11	12.05	0.54	0.24	0.45	0.01	9.85	0.01	0.03	2.32	1.99
S10	12	12.23	0.33	0.13	0.27	0.01	6.88	0.01	0.02	0.59	1.37
S15	2	5.00	4.84	0.62	5.27	3.86	14.71	0.40	0.06	4.52	227.57
S15	3	5.21	2.08	0.55	1.31	3.20	12.02	0.38	0.05	4.20	240.22
S15	4	7.53	0.85	0.67	1.36	0.89	12.89	0.11	0.04	4.05	4.82
S15	5	7.69	0.64	0.70	1.00	0.02	12.54	0.02	0.04	3.80	1.25
S15	6	10.65	0.30	0.57	0.22	0.01	12.18	0.02	0.03	3.63	0.36
S15	7	10.99	0.68	0.24	0.34	0.01	11.65	0.02	0.04	3.30	0.89
S15	8	11.54	0.40	0.27	0.28	0.01	12.13	0.01	0.03	3.27	0.94
S15	9	11.73	0.76	0.24	0.64	0.01	12.30	0.01	0.03	3.12	2.36
S15	10	11.93	0.69	0.30	0.73	0.01	11.95	0.02	0.03	2.62	3.24
S15	11	12.02	0.86	0.30	0.94	0.02	11.31	0.01	0.03	2.23	4.35
S15	12	12.31	0.24	0.19	0.15	0.00	10.59	0.01	0.02	0.69	1.78



ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบการชะละลาย EA NEN 7375:2004

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.1 การทดสอบคุณสมบัติตัวอย่างก้อนแข็งและปริมาณของแข็งแขวนลอยในการทดสอบการชะละลายระยะยาว

ตัวอย่าง		ความชื้น (%)	ของแข็งแขวนลอย (กรัม)									
			0.25 days	1 days	Mva	2.25 days	4 days	9 days	16 days	36 days	64 days	Mvb
A00	DI	9.54	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.05
A05	DI	10.73	0.03	0.02	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.08
A10	DI	15.03	0.143	0.087	0.230	0.053	0.066	0.034	0.021	0.019	0.029	0.222
A15	DI	16.08	0.093	0.055	0.149	0.019	0.022	0.003	0.007	0.031	0.006	0.087
A00	AR	9.98	0.015	0.043	0.058	0.007	0.019	0.016	0.010	0.018	0.005	0.074
A05	AR	10.56	0.052	0.041	0.093	0.029	0.022	0.022	0.012	0.031	0.011	0.127
A10	AR	14.52	0.093	0.104	0.197	0.043	0.064	0.030	0.021	0.033	0.012	0.203
A15	AR	15.04	0.147	0.111	0.259	0.178	0.079	0.050	0.057	0.056	0.031	0.450
S00	DI	10.25	0.009	0.022	0.031	0.009	0.011	0.005	0.008	0.008	0.009	0.050
S05	DI	11.40	0.041	0.028	0.069	0.013	0.021	0.028	0.014	0.017	0.021	0.113
S10	DI	14.24	0.026	0.020	0.047	0.013	0.019	0.011	0.012	0.016	0.009	0.080
S15	DI	16.56	0.126	0.015	0.141	0.016	0.266	0.007	0.026	0.033	0.015	0.364
S00	AR	10.23	0.011	0.018	0.029	0.014	0.023	0.011	0.008	0.018	0.011	0.086
S05	AR	11.19	0.038	0.034	0.072	0.018	0.034	0.019	0.015	0.019	0.020	0.125
S10	AR	13.86	0.031	0.040	0.070	0.103	0.025	0.060	0.023	0.022	0.022	0.256
S15	AR	14.61	0.051	0.159	0.210	0.028	0.063	0.028	0.046	0.028	0.032	0.225

ตารางที่ จ.2 ผลการวัดค่าพีเอชในการทดสอบการชะละลายระยะยาว

ตัวอย่าง		pH							
		0.25 days	1 days	2.25 days	4 days	9 days	16 days	36 days	64 days
A00	DI	12.1	12.0	12.1	12.1	12.1	12.0	12.2	11.5
A05	DI	12.0	12.0	12.1	12.2	12.1	12.0	12.3	11.7
A10	DI	11.7	11.7	11.9	12.1	12.0	11.9	12.2	11.7
A15	DI	11.1	11.2	11.5	12.0	12.0	11.9	12.1	11.7
A00	AR	11.9	12.0	12.0	12.1	12.0	11.8	12.2	11.6
A05	AR	11.8	11.9	11.9	12.1	12.0	11.9	12.2	11.6
A10	AR	11.6	11.8	11.9	12.0	12.0	11.9	12.3	11.7
A15	AR	11.5	11.6	11.6	11.6	11.5	11.9	12.1	11.7
S00	DI	12.1	12.1	12.2	12.2	12.2	12.0	12.3	11.7
S05	DI	12.1	12.1	12.2	12.3	12.3	12.2	12.5	11.9
S10	DI	11.5	11.6	11.7	12.0	12.0	11.9	12.2	11.6
S15	DI	11.2	11.5	11.6	11.9	12.0	11.9	12.1	11.7
S00	AR	12.0	12.0	11.9	12.1	12.1	12.0	12.4	11.7
S05	AR	12.0	12.0	12.1	12.2	12.1	12.0	12.4	11.8
S10	AR	11.7	11.5	11.6	12.0	12.0	11.8	12.1	11.5
S15	AR	11.5	11.5	11.6	11.5	11.7	11.9	12.1	11.6

ตารางที่ จ.3 ผลการวัด Oxidation-Reduction Potential ในการทดสอบการชะละลายระยะยาว

ตัวอย่าง		ORP (mV)							
		0.25 days	1 days	2.25 days	4 days	9 days	16 days	36 days	64 days
A00	DI	-292	-286	-293	-293	-290	-285	-298	-299
A05	DI	-288	-286	-292	-299	-295	-290	-304	-308
A10	DI	-273	-278	-283	-289	-286	-284	-299	-306
A15	DI	-243	-265	-294	-294	-269	-279	-293	-303
A00	AR	-282	-285	-286	-292	-291	-280	-298	-300
A05	AR	-277	-277	-282	-289	-285	-281	-299	-301
A10	AR	-267	-275	-281	-284	-282	-280	-300	-306
A15	AR	-260	-268	-287	-295	-286	-281	-292	-303
S00	DI	-286	-282	-291	-294	-295	-288	-303	-308
S05	DI	-292	-292	-296	-304	-303	-297	-313	-319
S10	DI	-260	-274	-281	-285	-284	-282	-297	-298
S15	DI	-261	-297	-296	-304	-301	-282	-293	-301
S00	AR	-283	-281	-275	-291	-293	-286	-305	-305
S05	AR	-288	-283	-280	-295	-290	-288	-308	-310
S10	AR	-252	-259	-267	-279	-282	-275	-292	-296
S15	AR	-263	-276	-263	-295	-278	-284	-289	-298

ตารางที่ จ.4 ผลการวัดความนำไฟฟ้าในการทดสอบการชะละลายระยะยาว

ตัวอย่าง		Conductivity (micro S/cm)							
		0.25 days	1 days	2.25 days	4 days	9 days	16 days	36 days	64 days
A00	DI	1322	1142	1315	1558	1499	1342	1813	1397
A05	DI	1212	1248	1473	1944	1820	1797	2598	2143
A10	DI	808	897	1035	1290	1355	1371	2035	1882
A15	DI	407	657	635		1537	1325	1285	1989
A00	AR	995	985	1313	1481	1424	1242	1928	1628
A05	AR	969	1072	1199	1417	1301	1227	1920	1547
A10	AR	684	814	921	1203	1234	1206	2024	2013
A15	AR	498	635	1584		1650	1625	1331	1954
S00	DI	1199	1160	1354	1651	1769	1674	2494	1984
S05	DI	1562	1594	1792	2115	2412	2404	3818	3404
S10	DI	648	664	809	1099	1161	1221	1811	1595
S15	DI	482	635	685		1571	1138	1288	1924
S00	AR	1096	1098	1013	1314	1533	1411	2353	2043
S05	AR	1254	1124	1215	1673	1882	1607	2747	2637
S10	AR	508	515	570	1051	1176	1008	1655	1607
S15	AR	503	573	576	1638	1657	1201	1892	1797

ตารางที่ จ.5 ผลการวัดอุณหภูมิในการทดสอบการชะละลายระยะยาว

ตัวอย่าง		Temperature (C)							
		0.25 days	1 days	2.25 days	4 days	9 days	16 days	36 days	64 days
A00	DI	25.9	24.1	23.7	25.9	24.8	25.7	25.5	26.2
A05	DI	25.9	24.5	24.1	25.8	25.4	25.5	25.6	26.3
A10	DI	25.8	24.8	24.2	25.7	25.3	25.5	25.5	26.3
A15	DI	25.7	25.9	25.6	25.8	25.7	26.8	27.0	27.5
A00	AR	26.0	25.1	24.7	25.1	24.8	25.7	25.6	26.5
A05	AR	27.0	25.4	24.8	25.4	24.8	26.0	25.7	26.7
A10	AR	25.8	25.2	24.8	25.0	24.5	25.7	25.7	26.7
A15	AR	26.9	25.4	24.8	25.3	25.2	26.8	27.2	27.5
S00	DI	25.6	24.3	24.5	25.6	25.7	25.7	25.1	26.5
S05	DI	25.6	24.6	24.7	25.4	25.6	26.1	25.1	26.6
S10	DI	25.6	24.8	24.6	25.5	25.6	25.4	24.9	26.5
S15	DI	26.2	25.7	25.3	25.6	25.3	26.8	26.9	27.3
S00	AR	26.1	25.2	24.5	24.7	25.6	25.5	25.6	26.6
S05	AR	26.1	25.5	25.0	24.6	25.2	25.5	25.8	26.7
S10	AR	26.0	24.9	24.8	24.6	25.0	25.5	25.8	26.5
S15	AR	27.3	25.1	25.3	25.5	25.3	26.5	27.2	27.5

ตารางที่ จ.6 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในการทดสอบการชะละลายระยะยาว (ตัวอย่าง A00DI0.25-A05DI64)

ตัวอย่าง	ช่วงเวลา	Al	Cr	Fe	Na	Ni	Pb	Sr	Zn
A00DI 0.25	0.25	1.668	0.031	0.101	15.851	0.030	0.106	0.989	0.036
A00DI 1	1	2.968	0.027	0.043	8.747	0.030	0.100	1.253	0.031
A00DI 2.25	2.25	3.391	0.022	0.075	7.015	0.028	0.113	1.254	0.102
A00DI 4	4	4.196	0.024	0.039	9.856	0.030	0.095	1.502	0.044
A00DI 9	9	5.104	0.024	0.039	11.997	0.028	0.109	1.606	0.073
A00DI 16	16	5.126	0.021	0.049	9.496	0.033	0.104	1.493	0.048
A00DI 36	36	8.375	0.024	0.037	20.890	0.028	0.115	2.656	0.054
A00DI 64	64	2.802	0.007	0.013	8.139	0.014	0.051	0.850	0.005
A00AR 0.25	0.25	1.427	0.036	0.121	11.069	0.033	0.106	1.064	0.046
A00AR 1	1	3.033	0.034	0.093	8.020	0.032	0.112	1.384	0.035
A00AR 2.25	2.25	3.345	0.031	0.079	6.198	0.030	0.096	1.244	0.046
A00AR 4	4	4.227	0.031	0.047	8.617	0.030	0.110	1.456	0.034
A00AR 9	9	5.272	0.031	0.047	10.819	0.029	0.102	1.765	0.043
A00AR 16	16	5.194	0.024	0.041	8.466	0.027	0.101	1.533	0.043
A00AR 36	36	7.556	0.028	0.041	19.252	0.027	0.104	2.923	0.034
A00AR 64	64	3.673	0.010	0.019	8.134	0.018	0.056	1.363	0.013
A05DI 0.25	0.25	1.619	0.017	0.061	14.186	0.032	0.105	1.537	0.187
A05DI 1	1	2.138	0.022	0.038	11.604	0.030	0.101	1.840	0.173
A05DI 2.25	2.25	2.699	0.018	0.051	10.257	0.032	0.100	1.701	0.185
A05DI 4	4	3.631	0.020	0.031	12.988	0.029	0.104	1.946	0.146
A05DI 9	9	4.616	0.021	0.038	14.061	0.030	0.101	2.215	0.291
A05DI 16	16	5.461	0.019	0.047	11.613	0.028	0.106	2.096	0.224
A05DI 36	36	7.336	0.023	0.035	21.505	0.035	0.108	3.996	0.423
A05DI 64	64	2.742	0.009	0.014	6.173	0.014	0.050	1.265	0.157

ตารางที่ จ.7 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในการทดสอบการชะละลายระยะยาว (ตัวอย่าง A005AR0.25-A10AR64)

ตัวอย่าง	ช่วงเวลา	Al	Cr	Fe	Na	Ni	Pb	Sr	Zn
A05AR 0.25	0.25	1.707	0.025	0.137	11.458	0.034	0.093	1.415	0.315
A05AR 1	1	2.192	0.032	0.103	10.934	0.027	0.103	1.798	0.200
A05AR 2.25	2.25	2.746	0.026	0.090	9.646	0.030	0.101	1.479	0.158
A05AR 4	4	3.596	0.032	0.226	12.982	0.029	0.101	1.654	0.184
A05AR 9	9	4.415	0.029	0.077	15.196	0.034	0.108	2.098	0.181
A05AR 16	16	4.624	0.023	0.052	11.530	0.035	0.108	1.833	0.077
A05AR 36	36	6.250	0.026	0.046	20.316	0.034	0.113	3.565	0.248
A05AR 64	64	2.928	0.009	0.020	6.031	0.016	0.055	1.491	0.097
A10DI 0.25	0.25	2.006	0.129	0.140	20.075	0.033	0.106	0.259	0.543
A10DI 1	1	1.787	0.107	0.181	16.621	0.029	0.100	0.484	0.624
A10DI 2.25	2.25	1.892	0.085	0.107	10.775	0.032	0.105	0.573	0.414
A10DI 4	4	2.457	0.104	0.069	7.949	0.031	0.103	0.711	0.220
A10DI 9	9	3.183	0.122	0.099	3.508	0.034	0.100	0.859	0.517
A10DI 16	16	3.330	0.120	0.076	0.922	0.034	0.104	0.764	0.472
A10DI 36	36	3.835	0.221	0.068	1.142	0.034	0.109	1.213	0.945
A10DI 64	64	1.511	0.060	0.014	0.605	0.014	0.046	0.407	0.187
A10AR 0.25	0.25	2.783	0.099	0.220	17.108	0.034	0.121	0.281	0.977
A10AR 1	1	1.528	0.122	0.215	19.643	0.033	0.113	0.483	0.459
A10AR 2.25	2.25	1.425	0.108	0.195	12.034	0.034	0.105	0.542	0.456
A10AR 4	4	1.983	0.129	0.272	9.121	0.033	0.114	0.644	0.486
A10AR 9	9	2.603	0.169	0.265	4.077	0.037	0.102	0.800	0.397
A10AR 16	16	2.743	0.151	0.081	0.985	0.032	0.111	0.777	0.135
A10AR 36	36	2.887	0.292	0.144	1.371	0.030	0.111	1.271	0.888
A10AR 64	64	1.506	0.138	0.021	0.530	0.016	0.053	0.528	0.328

ตารางที่ จ.8 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในการทดสอบการชะละลายระยะยาว (ตัวอย่าง A15DI0.25-A15AR64)

ตัวอย่าง	ช่วงเวลา	Al	Cr	Fe	Na	Ni	Pb	Sr	Zn
A15DI 0.25	0.25	2.134	0.091	0.140	14.140	0.031	0.100	0.189	0.959
A15DI 1	1	2.540	0.253	0.123	29.669	0.026	0.096	0.404	0.908
A15DI 2.25	2.25	1.566	0.169	0.057	14.668	0.024	0.115	0.337	0.436
A15DI 4	4	2.010	0.218	0.119	15.904	0.030	0.095	0.537	0.716
A15DI 9	9	2.378	0.253	0.077	11.735	0.024	0.102	0.938	0.968
A15DI 16	16	2.684	0.120	0.060	1.614	0.031	0.096	0.761	0.482
A15DI 36	36	2.575	0.222	0.075	1.608	0.035	0.104	1.299	1.206
A15DI 64	64	2.868	0.170	0.050	0.584	0.035	0.101	1.100	1.169
A15AR 0.25	0.25	3.155	0.109	0.298	14.610	0.028	0.119	0.264	1.804
A15AR 1	1	1.832	0.180	0.302	21.444	0.030	0.079	0.500	1.427
A15AR 2.25	2.25	1.394	0.131	0.407	9.030	0.038	0.108	0.405	1.569
A15AR 4	4	2.029	0.165	0.525	9.511	0.036	0.079	0.626	2.205
A15AR 9	9	2.317	0.295	0.275	6.429	0.035	0.099	0.917	1.598
A15AR 16	16	2.344	0.210	0.144	1.283	0.029	0.087	0.756	0.345
A15AR 36	36	2.504	0.406	0.208	1.439	0.031	0.088	1.201	1.284
A15AR 64	64	2.524	0.349	0.104	0.407	0.034	0.108	1.016	1.103

ตารางที่ จ.9 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในการทดสอบการชะละลายระยะยาว (ตัวอย่าง S00DI0.25-S05DI64)

ตัวอย่าง	ช่วงเวลา	Al	Cr	Fe	Na	Ni	Pb	Sr	Zn
S00DI 0.25	0.25	1.589	0.013	0.075	22.044	0.031	0.121	0.907	0.076
S00DI 1	1	2.750	0.012	0.045	15.867	0.032	0.107	1.029	0.042
S00DI 2.25	2.25	3.030	0.010	0.052	16.295	0.031	0.105	1.108	0.040
S00DI 4	4	3.939	0.011	0.031	20.124	0.030	0.102	1.329	0.028
S00DI 9	9	4.894	0.010	0.027	22.246	0.034	0.116	1.466	0.031
S00DI 16	16	5.286	0.010	0.041	20.333	0.031	0.106	1.552	0.052
S00DI 36	36	7.880	0.012	0.033	39.409	0.031	0.117	3.001	0.037
S00DI 64	64	2.815	0.004	0.049	11.691	0.013	0.048	0.977	0.188
S00AR 0.25	0.25	1.463	0.016	0.076	19.006	0.032	0.121	1.075	0.075
S00AR 1	1	2.617	0.023	0.066	13.782	0.026	0.110	1.207	0.024
S00AR 2.25	2.25	2.978	0.018	0.095	12.053	0.028	0.100	1.017	0.039
S00AR 4	4	3.698	0.020	0.060	16.427	0.030	0.105	1.281	0.027
S00AR 9	9	4.875	0.022	0.041	20.187	0.034	0.098	1.667	0.043
S00AR 16	16	4.997	0.013	0.043	16.560	0.034	0.100	1.542	0.044
S00AR 36	36	7.297	0.019	0.061	35.042	0.031	0.103	3.109	0.068
S00AR 64	64	3.354	0.008	0.023	11.702	0.016	0.059	1.441	0.040
S05DI 0.25	0.25	0.946	0.013	0.039	19.996	0.027	0.107	1.569	0.209
S05DI 1	1	1.730	0.016	0.030	15.223	0.029	0.103	1.850	0.205
S05DI 2.25	2.25	2.417	0.015	0.047	12.351	0.030	0.107	1.670	0.223
S05DI 4	4	3.474	0.017	0.031	15.621	0.034	0.105	2.021	0.268
S05DI 9	9	4.469	0.020	0.030	16.589	0.032	0.102	2.238	0.246
S05DI 16	16	4.842	0.019	0.042	13.744	0.033	0.103	2.132	0.379
S05DI 36	36	6.430	0.027	0.036	25.056	0.035	0.121	4.174	0.762
S05DI 64	64	2.545	0.010	0.020	6.478	0.014	0.048	1.338	0.263

ตารางที่ จ.10 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในการทดสอบการชะละลายระยะยาว (ตัวอย่าง S05AR0.25-S10AR64)

ตัวอย่าง	ช่วงเวลา	Al	Cr	Fe	Na	Ni	Pb	Sr	Zn
S05AR 0.25	0.25	1.001	0.018	0.057	15.774	0.037	0.092	1.409	0.181
S05AR 1	1	1.670	0.029	0.051	14.285	0.030	0.100	1.698	0.124
S05AR 2.25	2.25	2.088	0.025	0.097	10.750	0.023	0.102	1.488	0.131
S05AR 4	4	2.963	0.025	0.239	13.473	0.033	0.094	1.810	0.300
S05AR 9	9	3.725	0.028	0.101	15.202	0.032	0.102	2.205	0.216
S05AR 16	16	3.962	0.022	0.045	11.909	0.028	0.099	1.918	0.124
S05AR 36	36	5.080	0.024	0.037	22.894	0.027	0.109	3.706	0.454
S05AR 64	64	2.756	0.008	0.021	6.835	0.018	0.048	1.514	0.151
S10DI 0.25	0.25	1.364	0.345	0.072	33.785	0.031	0.105	0.174	0.265
S10DI 1	1	1.895	0.164	0.051	17.401	0.027	0.103	0.392	0.233
S10DI 2.25	2.25	1.976	0.110	0.059	10.884	0.031	0.104	0.526	0.240
S10DI 4	4	2.413	0.110	0.045	9.672	0.035	0.099	0.719	0.233
S10DI 9	9	2.766	0.104	0.032	5.989	0.031	0.109	0.823	0.169
S10DI 16	16	2.775	0.084	0.048	2.672	0.034	0.101	0.864	0.330
S10DI 36	36	3.484	0.144	0.039	3.451	0.034	0.112	1.642	0.647
S10DI 64	64	1.443	0.040	0.016	1.222	0.013	0.049	0.529	0.194
S10AR 0.25	0.25	2.485	0.176	0.152	21.901	0.035	0.093	0.206	0.730
S10AR 1	1	1.718	0.133	0.129	17.224	0.035	0.097	0.428	0.460
S10AR 2.25	2.25	1.613	0.109	0.164	10.475	0.032	0.103	0.503	0.396
S10AR 4	4	2.189	0.111	0.275	9.225	0.030	0.101	0.648	0.584
S10AR 9	9	2.481	0.132	0.204	5.808	0.036	0.101	0.795	0.433
S10AR 16	16	2.450	0.107	0.073	2.561	0.028	0.099	0.780	0.081
S10AR 36	36	2.962	0.195	0.100	3.616	0.031	0.112	1.479	0.489
S10AR 64	64	1.501	0.108	0.027	1.183	0.018	0.055	0.596	0.270

ตารางที่ จ.11 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในการทดสอบการชะละลายระยะยาว (ตัวอย่าง S15DI0.25-S15AR64)

ตัวอย่าง	ช่วงเวลา	Al	Cr	Fe	Na	Ni	Pb	Sr	Zn
S15DI 0.25	0.25	2.693	0.065	0.193	12.985	0.021	0.107	0.186	1.059
S15DI 1	1	2.274	0.220	0.065	29.660	0.039	0.122	0.430	0.727
S15DI 2.25	2.25	1.514	0.155	0.052	15.012	0.033	0.102	0.376	0.403
S15DI 4	4	1.943	0.199	0.099	15.239	0.039	0.121	0.567	0.585
S15DI 9	9	2.384	0.239	0.119	11.032	0.045	0.097	0.984	0.963
S15DI 16	16	2.639	0.114	0.095	1.690	0.031	0.106	0.762	0.663
S15DI 36	36	2.699	0.217	0.113	1.645	0.029	0.112	1.300	1.106
S15DI 64	64	3.283	0.164	0.141	0.659	0.031	0.106	1.076	1.231
S15AR 0.25	0.25	3.096	0.057	0.142	13.674	0.037	0.103	0.242	0.879
S15AR 1	1	1.848	0.125	0.289	21.550	0.029	0.091	0.526	1.307
S15AR 2.25	2.25	1.324	0.090	0.172	9.610	0.034	0.096	0.417	0.630
S15AR 4	4	1.987	0.126	0.260	10.433	0.029	0.105	0.704	1.270
S15AR 9	9	2.472	0.211	0.141	7.186	0.036	0.085	0.990	0.907
S15AR 16	16	2.516	0.141	0.087	1.275	0.031	0.097	0.783	0.321
S15AR 36	36	2.532	0.272	0.094	1.669	0.031	0.106	1.307	0.978
S15AR 64	64	2.798	0.235	0.079	0.513	0.032	0.096	1.128	0.953

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ฉ

มาตรฐานการทดสอบการชะละลาย EA NEN 7375:2004

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



EA NEN 7375:2004

**LEACHING CHARACTERISTICS OF MOULDED OR MONOLITHIC
BUILDING AND WASTE MATERIALS**

**DETERMINATION OF LEACHING OF INORGANIC COMPONENTS
WITH THE DIFFUSION TEST**

'THE TANK TEST'

**Based on a translation of the
NETHERLANDS NORMALISATION INSTITUTE STANDARD**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Version 1.0

April 2005

Foreword

This standard is for use with the Environment Agency's guidance on sampling and testing of wastes to determine acceptance at landfill¹. It relates to the determination of the leaching of inorganic components from moulded or monolithic materials using the diffusion test. It is often referred to as the tank test.

The Environment Agency has issued a separate standard for the determination of the maximum potential for leaching of inorganic components from granular waste materials.

The purpose of this diffusion test is to determine the leaching of inorganic components from moulded and monolithic materials under aerobic conditions. Other parameters that can be deduced from the test include the extent of surface rinsing and the effective diffusion coefficient that can be used to estimate the leaching over longer periods.

The diffusion test is not suitable for materials that are soluble during the timescale of the test. Criteria are set out for this.

This standard is based on a translation of the Dutch leaching characterisation standard NEN 7375 (2004)². An earlier diffusion test for building materials and wastes was developed in 1995 as NEN 7345³. The most important differences between NEN 7375 and NEN 7345 are summarised in Annex B. European standards for the characterisation of wastes are being developed under the auspices of CEN Technical Committee 292⁴, and this standard will be superseded in time by one or more of the CEN/TC 292-derived standards.

Acknowledgements

The Environment Agency is very grateful to Anton van Santen for the translation of this standard from Dutch. It would also like to acknowledge the considerable technical advice received from Dr Kathy Lewin and her colleagues at WRC plc and assistance from David Hall and his colleagues at Golder Associates (UK) Ltd.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

¹ See also Guidance on Sampling and Testing of Wastes to meet Landfill Waste Acceptance Procedures, 2005.

² Leaching characteristics – Determination of the leaching of inorganic components from moulded or monolithic materials with the diffusion test – Solid earthy and stony materials.

³ NEN 7345: 1995 Leaching characteristics of solid earthy and stony building and waste materials. Determination of the availability of inorganic components for leaching.

⁴ Comité Européen de Normalisation (European Standards Organisation).

Contents

Foreword

1. Scope
2. Related Standards
3. Terms and definitions
4. Principle
5. Samples for analysis
6. Reagents
7. Apparatus
8. Procedure
9. Calculation
10. Report

Annex A - Validation of the diffusion test.

Annex B – Differences between NEN 7375:2004 and NEN 7345: 1995.

Annex C - Commentary on the Prescribed Test Pieces and Determination of the Geometric Area.

Annex D - Assessment of a Diffusion Coefficient and Calculation of Derived Values.

Annex E - Graphical representation of diffusion controlled leaching in special cases.

Annex F - Explanation of the calculation of the upper limit for leaching in special cases.

1. Scope

This document provides a test for the determination of the leaching of inorganic components from moulded or monolithic materials using the diffusion test (the tank test).

A list of materials for which the applicability of the method has been tested, and for which the precision in terms of repeatability and reproducibility has been determined, is given in Annex A.

2. Related standards

Reference is made to the following standards (and, in brackets, UK 'Blue book' (Methods for the Examination of Waters and Associated Materials, HMSO) equivalent test methods) that should be adopted when using this interim guidance.

ISO 10523:1994	Water Quality – Determination of pH (The measurement of Electrical Conductivity and the Laboratory Determination of the pH value of Natural, Treated and Waste waters. Standing Committee of Analysts, HMSO, 1978).
ISO 7888:1985	Water Quality – Determination of electrical conductivity (The measurement of Electrical Conductivity and the Laboratory Determination of the pH value of Natural, Treated and Waste waters. Standing Committee of Analysts, HMSO, 1978).
ISO 5667-3:2003	Water Quality – Sampling – Part 3: Guidance on the preservation and handling of water samples.
BS EN 13370:2003	Characterisation of waste – Analysis of eluates – Determination of Ammonium, AOX, conductivity, Hg, phenol index, TOC, easily liberatable CN ⁻ and F ⁻ .
BS EN 12506:2003	Characterisation of waste – Analysis of eluates – Determination of pH, As, Ba, Cd, Cl ⁻ , Cr VI, Cu, Mo, Ni, NO ₂ ⁻ , Pb, total S, SO ₄ ²⁻ , V and Zn.
EA NEN 7371:2004	Environment Agency standard based on a translation of the Netherlands Normalisation Institute standard - Leaching characteristics of granular building
EA NEN 7375: 2004	
Version 1 – April 2005	

and waste materials. The determination of the availability of inorganic components for leaching. Available from Environment Agency website.

3. Principles

The purpose of this diffusion test is to simulate the leaching of inorganic components from moulded and monolithic materials under aerobic conditions as a function of time over a period of 64 days.

The test determines the nature and properties of the material matrix under investigation by placing a complete sample in a leaching fluid (demineralised, pH neutral water) and replenishing the eluate at specified times. The concentrations of the leached components in the successive eluate fractions are measured. The pH value at which leaching takes place is determined by the material itself.

On the basis of the diffusion test results, the leached quantity per unit area can be calculated for each component analysed. Parameters can be deduced from the development of the release of components over time, including the extent of surface rinsing and the effective diffusion coefficient that can be used to estimate the leaching over longer periods.

4. Test pieces

The diffusion test requires at least one test piece, the structure, homogeneity and composition of which are representative for the material or product to be tested. The smallest dimension of this test piece (P) must be greater than 40 mm and the volume (V_p) in litres must be known.

If the material to be tested is produced in a product format of which the smallest dimension is less than 40 mm, then this product may only be used as a test piece if one side has a geometric surface area A of at least 75 cm².

NOTES:

1. To increase the representivity of material under test, it is acceptable to aggregate a number of pieces from a batch for the diffusion test. The volume (V_p) and the geometric surface area A is then taken as the total volume and total geometric surface area of the collective pieces.
2. If the diffusion test is being undertaken to determine the effective diffusion coefficient and/or the emission per unit mass, an extra test piece is required for an availability test. The mass (m) in kg and the density (ρ) in kg/m³ of test piece must then be known.

5. Reagents

5.1 Demineralised Water

Demineralised water with a maximum conductivity of 1 μ S/cm.

5.2 Nitric acid

Nitric acid of analytically pure quality at a concentration $c(\text{HNO}_3)$ of 1 ± 0.1 mol/l.

6. Apparatus and Equipment

The materials and equipment mentioned below must be checked before use to ensure their proper operation and absence of interferences that may affect the test results. They must not emit or absorb any of the components to be determined in the eluate.

The apparatus listed under 6.5 and 6.6 must be calibrated.

6.1 Sealable tank or bucket

Sealable tank or bucket of plastic without softening agents of volume between two and five times the volume V_p and of dimensions such that the test piece is surrounded by at least 2 cm of water on all sides.

NOTES:

1. The tank must contain a supporting construction of plastic such that the test piece is surrounded by liquid on all sides. The test piece can also be suspended on a plastic wire from the lid of the tank or bucket.
2. If the surface of the test piece is partly covered with an impervious layer, use a quantity of water (in l) between 50 and 200 times the area (in m²) of the uncovered part of the surface of the test piece.

6.2 Filtration equipment

Filtration equipment suitable for filtration at high or low pressure which is consecutively rinsed with nitric acid (5.2) and demineralised water (5.1).

6.3 Membrane filters

Membrane filters for the filtration equipment (6.2) which have not been previously used, with a pore size of 0.45 µm.

6.4 Storage bottles

Sealable plastic storage bottles.

6.5 pH meter

pH meter calibrated in accordance with ISO 10523, with a measurement accuracy better than ± 0.05 pH units.

6.6 Conductivity meter

Conductivity meter calibrated in accordance with ISO 7888, with a readout accuracy better than ± 1%.

6.7 Measuring beaker or balance

A measuring flask with a measurement capacity of at least six times the volume V_p of the test piece and a measurement accuracy better than ± 1%, or a balance with a capacity of at least three times the weight of the test piece and a measurement accuracy better than ± 0.1%.

7. Method

The diffusion test is undertaken by successively:

- establishing the requirements for the eluate samples to be analysed in accordance with 7.1;
- determining the geometric area of the test piece intended for the diffusion test in accordance with 7.2;
- performing the diffusion test according to 7.3;
- analysing the eluate according to 7.4.

7.1 Eluate samples

Determine the quantity of eluate needed to analyse the leached components and the way in which the eluate samples must be stored through the following steps:

- a) identify for what components, and by what methods, analyses are to be carried out;
- b) check for each component to be analysed whether the eluate will require preservation, and the requirements for this preservation;
- c) determine in the light of the above the minimum quantity of eluate necessary for each component to be analysed.

In undertaking the above, bear in mind that in order to determine whether the matrix is dissolving it may be necessary to analyse all eluate fractions for Ca, Cl and SO₄. Certainty over this is only achieved after completion of the entire test (see 7.4).

NOTE:

To prevent changes in the eluate through physical, chemical or biological reactions, the eluate samples must be preserved and stored as well as possible. Guidelines for surface water and wastewater samples have been developed in ISO 5667-3. It is recommended that these guidelines be followed for the conservation and storage of eluates.

7.2 Determination of geometric area A of the test piece

The area of the test piece is determined by measurement of the characteristic parameters of the geometric surface area.

A distinction is made between:

- a) test pieces with a regular, clearly determinable geometric area;
- b) test pieces with a completely or partly irregular geometric surface or test pieces that are thinner than 40 mm;
- c) test pieces where no regular side can be determined.

The geometric area of test pieces in a) must be determined according to 7.2.1 if these test pieces have a minimum dimension of more than 40 mm in all directions measured perpendicular at any point on the surface.

The geometric area of test pieces in b) must be determined according to 7.2.2.

The geometric surface area of test pieces c) must be determined in accordance with 7.2.3.

NOTE:

For accurate determination of the diffusion coefficient, it is necessary to determine the geometric area of a test piece precisely and clearly. For this, test pieces or parts of test pieces must be studied for which the geometric area is easy to determine. In most situations, suitable test pieces can be found. Section 7.2.1 describes the conditions and procedure for the determination of area. The procedure for selection and determination of usable areas of test pieces is more complex for test pieces with a (partly) irregular surface. The procedures for this are given in 7.2.2 and 7.2.3 respectively. For further information, see Annex C.

7.2.1 Regular test pieces for which the entire geometric area is determined

Determination of the geometric area of a regular test piece for which the geometric area of the entire test piece can be measured clearly.

1. Divide the surface of the test piece into a number of flat or curved parts (units) such that the area of each unit can be calculated geometrically from characteristic values measured such as length, width, height and radius.
2. The units specified under 1 must be selected such that the distance between the defined geometric areas and the material is never greater than 3 mm.
3. Determine the length of the characteristic values with an accuracy of better than 1 mm.
4. Using the characteristic units measured, calculate the geometric area of each of the units selected. The geometric area A expressed in m² is the sum of the areas calculated for each of the units.

7.2.2 Determination of the geometric area of test pieces with a partly covered surface

Determination of the geometric area of a test piece for which:

- a) the entire geometric area cannot be measured clearly;

- b) one or more sides have been produced by sawing or drilling the test piece from a larger element, and where these sides should not be subjected to leaching;
- c) one dimension is less than 40 mm.

1. Cover the parts of the surface:

- a) for which the geometric area cannot be clearly determined, using a waterproof layer;
- b) that have been produced as sawn or drilled surfaces, using a waterproof layer;
- c) of a thin test piece (with a thickness of 40 mm or less), using a waterproof layer such that the uncovered units of the geometric area never have a mutual distance of 40 mm or less measured perpendicular at any point on the geometrically described surface.

For covering, use a waterproof and good bonding material (for example acrylic resin or paraffin) applied to the surface of the test piece. Determine the remaining geometric area after hardening of the resin.

- 2. Divide the uncovered part of the surface of the test piece into a number of flat or curved parts (units) such that the area of each unit can be calculated geometrically from characteristic values measured such as length, width, height and radius.
- 3. The units specified under 2 must be selected such that the defined geometric areas coincide with the relevant area of the test piece, where the actual distance between the material and the defined area of the unit in the case of irregularities in the surface is never greater than 3 mm.
- 4. Determine the length of the characteristic values with an inaccuracy of less than 1 mm.
- 5. Using these, calculate the geometric area of each of the units selected. The geometric area A expressed in m^2 is the sum of the areas calculated for each of the units.

7.2.3 Heavily irregular test pieces with no discernible regular side

Determination of the geometric surface area of heavily irregular test pieces using the paper method.

- 1. Cover each surface of the test piece as tightly as possible with a piece of paper. Use for this a type of paper that has no obvious absorbent properties.
- 2. Fold the paper around the edges of each surface of the test piece and tear or cut the paper as accurately as possible along the folds. Also remove any pieces of paper that may protrude beyond the surface.
- 3. Determine the total weight of pieces of paper derived from step 2.
- 4. Determine the weight of sheet of paper of known area and similar properties to the paper used in step 1.
- 5. Determine the surface area of the test piece from the ratio of weights of paper derived in steps 3 and 4.
- 6. Repeat steps 1 to 5 if the diffusion test is to be based on four or more pieces aggregated together from a batch. Determine the average of the measurements obtained. This is the geometric surface area determined according to the paper method.

NOTES:

- 1. In the determination using the paper method, printer paper and paper for photocopiers (A4 sheets) can be used. It is important that the paper does not have any strongly water absorbent properties.
- 2. If the test piece is damp it may be necessary to dry the paper before weighing in step 3.

7.3 Performing the diffusion test

This diffusion test is carried out in eight stages at a temperature that may vary between 18 and 22°C.

Rinse the tank or bucket (6.1) before performance of the test with nitric acid (5.2) and then rinse with water (5.1). Then place the test piece in the tank or bucket. If more test pieces are placed in the tank (Section 4), the space between the test pieces must be a minimum of 2 cm.

7.3.1 Stage 1

Fill the tank with a quantity V determined to 1% accuracy (6.7) of water (5.1) such that:

- a) if no part of the surface is covered:

$$2 \times V_p \leq V \leq 5 \times V_p \quad (1)$$

or

- b) if parts of the surface are covered:

$$50 \times A \times f \leq V \leq 200 \times A \times f \quad (2)$$

where:

- V is the volume of leaching fluid in litres;
 V_p is the volume of test piece P in litres;
 A is the uncovered geometric area of the test piece P in m²;
 f is a conversion factor: 1 l/m².

The test piece must be placed such that it is in contact with the water on all sides and the uncovered part of the test piece is submerged by at least 2 cm.

Seal the tank or bucket.

After 6 ± 0.5 h, drain off all the eluate. This is the fraction from period 1. Do not dry or rinse the test piece.

Filter over a membrane filter according to the instructions in 7.1 the quantity of eluate required for analysis (6.2 and 6.3).

For the resulting eluate, measure the pH (± 0.05) (6.5) and conductivity K_{25} ($\pm 1\%$) (6.6).

NOTES:

1. The pH value and the conductivity are required to determine if the matrix has dissolving during the test (see 8.4 and 9.3.3.)
2. The pH value gives an indication of the alkalinity of the test piece, and the change in pH during the diffusion test gives an indication of the stability of the material being investigated. Large variations in the eluate pH points towards the material not yet being in equilibrium, i.e. is not yet stabilised.

Transfer the quantity of eluate intended for analysis to the bottles of suitable size (6.4), filling each bottle with at least 10 ml.

Store the eluate samples using the procedures described in 7.1. If more than 1 ml preservative is required per 250 ml eluate, the concentrations determined in 7.4 must be corrected for this.

7.3.2 Stages 2 to 8

Immediately after drainage in stage 1 (7.3.1), fill the tank or bucket again with water (5.1). Use the same quantity V (6.7), determined to $\pm 1\%$ accuracy, as used in stage 1.

Repeat the procedure described in stage 1 a further seven times as shown in Table 1 (the times apply from the immersion).

Table 1: Times at which the water must be replenished

Period (n)	Time (days)
1	0.25 ± 10%
2	1 ± 10%
3	2.25 ± 10%
4	4 ± 10%
5	9 ± 10%
6	16 ± 1
7	36 ± 1
8	64 ± 1

Determine the replenishment times (the time at which the tank has just been emptied) of each period n , to 15 minutes accuracy.

On completion of the test, weigh the solid material that may have fallen off the test piece(s) during the test and remains in the tank. This solid material must first be dried.

If during the replenishment it is found that a relatively large amount of material has fallen off the test piece(s), it is recommended not to wait until the end of the test but to remove the solid material during one or more of the replenishments, and to dry and weigh this.

Calculate the weight loss m_v (g/m^2) of material that has fallen off the test piece during the test (g/A (m^2)) where A is the (uncovered) area of the test piece) in two phases:

- 1) the weight loss m_{va} (g/m^2) in Stages 1 to 2 of the test;
- 2) the weight loss m_{vb} (g/m^2) in Stages 2 to 8 of the test.

NOTE:

These two parameters give insight into the characteristics of the material. A relatively large weight loss m_{va} compared with m_{vb} indicates that the loss is a consequence of the manner in which the test piece has been made or prepared (for example, loss from an inadequately cured test piece at the start of the test, or loss as the result of manner of sawing of the test piece). A relatively large weight loss m_{vb} compared with m_{va} indicates the long term integrity of the material (for example, the ongoing loss of material indicates moderate bonding in a composite material or loss of effectiveness of the binding agent under the influence of water).

7.4 Analysis of the eluates

Analyse the eluate fractions obtained in 7.3 from periods 1 to 8.

If the measured eluates pH values and conductivities indicate dissolution of the matrix during the test, then the following calculations must be undertaken, and assessment made whether criteria 1 and 2 are satisfied. If neither criteria are satisfied, then the components Ca, SO_4 and Cl must be determined to verify whether dissolution has occurred.

1. Calculate the average value of the measured conductivities in periods 5 and 6 (S_{5-6}) in $\mu\text{S}/\text{cm}$.
2. Calculate the average value of the measured conductivities in periods 7 and 8 (S_{7-8}) in $\mu\text{S}/\text{cm}$.
3. Calculate the average pH value in periods 7 and 8 (pH_{7-8}).

Criterion 1

Check if:

$$S_{7-8} > 1.5 \times V_p/V + 10^{(\text{pH}_{7-8} - 11.78)} + 10^{(2.5 - \text{pH}_{7-8})}$$

where:

V is the volume of leaching fluid, in l;

V_p is the volume of the test piece, in l.

If criterion 1 is not satisfied then the matrix is not soluble, and there is no need to analyse the components Ca, Cl and SO₄.

If criterion 1 is satisfied, continue to criterion 2.

Criterion 2

Check if:

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

If criterion 2 is not satisfied then the material is not soluble, and there is no need to analyse the components Ca, Cl and SO₄.

If criterion 2 is satisfied, then analyse Ca, Cl and SO₄ in all eluates to verify whether dissolution has occurred (see 8.3.3).

NOTES:

1. A number of standards for chemical analyses of eluate components are available. The European Standards prEN 13370:2002 and ENV 12506 are intended to define the analytical methods to be used for eluates obtained from waste characterisation tests. UK 'Blue Book' methods (Methods for the Examination of Waters and Associated Materials, HMSO) would be expected to give similar analysis results.
2. Always analyse the eluate samples within the timescales given in the guidance in ISO 5667-3.

8. Calculation

The measured leaching per eluate fraction, the cumulative leached quantities, the leaching mechanism occurring, the cumulative leaching per unit area, the surface wash-off and the upper limit of the leaching of components, for which no diffusion controlled leaching can be determined, are determined for each component under investigation by successively:

- determining the leaching per eluate fraction as per 8.1;
- determining the measured and derived cumulative leaching respectively as per 8.2;
- establishing the leaching mechanism occurring as per 8.3;
- determining the cumulative leaching per unit area as per 8.4;
- determining the surface wash-off in combination with the diffusion controlled leaching as per 8.5;
- determining the upper limit of leaching for the components for which no diffusion controlled leaching can be established, as per 8.6.

The above mentioned quantities only have relevance and may only be used if the matrix of the material does not dissolve. In 8.3.3 a check is made whether this requirements is met.

8.1 Measured leaching of a component per fraction

For each component to be studied, calculate separately the measured leaching per fraction using the formula:

$$E_i^* = \frac{c_i \times V}{f \times A} \quad (3)$$

where:

E_i^* is the measured leaching of a component in fraction i , in mg/m²;

EA NEN 7375: 2004

Version 1 – April 2005

- c_i is the concentration of the component in fraction i in $\mu\text{g/l}$;
 V is the volume of the eluate in l;
 A is the surface area of the test piece in m^2 ;
 f is a conversion factor: 1000 $\mu\text{g/mg}$.

The concentration c_i specified in formula (3) is the concentration originally present in the eluate; the measured value determined according to Section 7.4 must be corrected for the quantity of preservative added in Section 7.3 if this is more than 1 ml per 250 ml eluate.

If the concentration of a component in a specified eluate fraction is below the lowest limit of analytical determination, two calculations must be carried out for the component. The upper limit of E_i^* is calculated by equating c_i in formula (3) with the lowest limit of determination; the lower limit of E_i^* is calculated by setting c_i in formula (3) to 0.

8.2 Measured and derived cumulative leaching of a component

8.2.1 Measured cumulative leaching

For each component to be analysed, calculate separately the measured cumulative leaching ε_n^* in each of the periods $n=1$ to N , where the period $n=1$ lasts from the start of the test to the first replenishment time (comprises fraction $i=1$), period $n=2$ from the start of the test to the second replenishment time (comprises fractions 1 + 2), etc. Carry out this calculation as:

$$\varepsilon_n^* = \sum_{i=1}^n E_i^* \quad \text{for } n=1 \text{ to } N \quad (4)$$

where:

- ε_n^* is the measured cumulative leaching of a component for period n comprising fraction $i=1$ to n , in mg/m^2 ;
 E_i^* is the measured leaching of the component in fraction i in mg/m^2 ;
 N is the number of periods equal to the number of specified replenishment times ($N = 8$).

The calculation method is explained as in Figure 1 below.

8.2.2 Derived cumulative leaching of a component

For each component to be analysed, calculate separately the derived cumulative leaching ε_n in each of the periods $n=1$ to N , where a period n lasts from the start of the test to the n^{th} replenishment time (comprises fractions $i=1$ to n).

Carry out this calculation as follows:

$$\varepsilon_n = (E_i^* \times \sqrt{t_i}) / (\sqrt{t_i} - \sqrt{t_{i-1}}) \quad \text{for } n=1 \text{ to } N \text{ (where } i=n) \quad (5)$$

where:

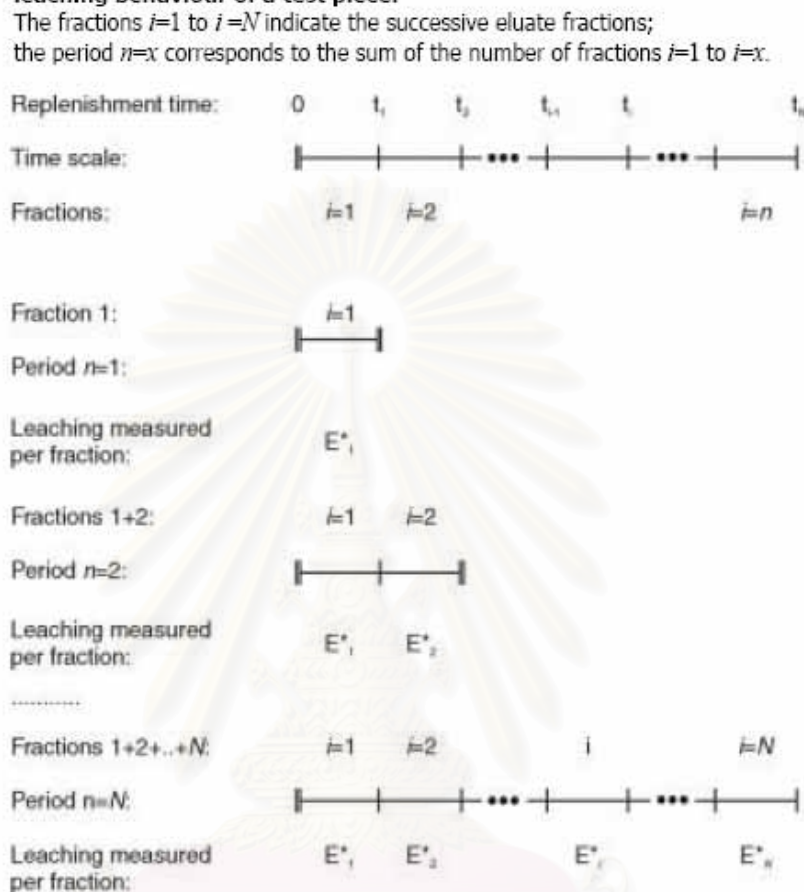
- ε_n is the derived cumulative leaching of a component for period n comprising fraction $i=1$ to n , in mg/m^2 ;
 E_i^* is the measured leaching of the component in fraction i , in mg/m^2 ;
 t_i is the replenishment time of fraction i , i.e. time at end of fraction i , in s;
 t_{i-1} is the replenishment time of fraction $i-1$, i.e. time at start of fraction i , in s.

NOTES:

1. The measured cumulative leaching ε_n^* always includes the measured leaching of previous periods. This means that any deviations in a period (for example wash-off effects) affect the following periods that can make interpretation difficult.

- 2 The derived cumulative leaching ϵ_n determines only the cumulative leaching up to and including period i on the basis of the measured leaching in period i . These values can be used to assess whether the leaching is determined by diffusion (see Section 8.3).

Figure 1: Diagrammatic overview of terms used in this standard in determining the leaching behaviour of a test piece.



8.3 Determination of the leaching mechanism(s) occurring in the diffusion test

Based on the leaching of components as set out in 7.4, establish whether the matrix of the test piece is dissolving during the conduct of the test. If this is not the case, then for all individual components determine whether leaching is diffusion controlled or whether other leaching mechanisms also contribute.

Carry out the procedure in this section for each of the components to be studied.

NOTE:

To support and monitor the further assessment and calculation of the leaching behaviour, it is recommended that the cumulative leaching determined in Sections 8.1 and 8.2 be shown graphically (see Annex E). For this, plot for each individual component the logarithm of the derived cumulative leaching ϵ_n against the logarithm of the time t_i for $n=1$ to N in order to allow a visual inspection of the measurement data. On the same graph also plot the logarithm of the measured cumulative leaching ϵ^*_n .

8.3.1 Definition of incremental periods

Group the eluate fractions collected in the periods 1 to 8 as follows:

<u>Order</u>	<u>Eluate fraction</u>	<u>Increment a-b</u>
1	Fractions 2 to 7	Increment 2-7 incl
2	Fractions 5 to 8	Increment 5-8 incl
3	Fractions 4 to 7	Increment 4-7 incl
4	Fractions 3 to 6	Increment 3-6 incl
5	Fractions 2 to 5	Increment 2-5 incl
6	Fractions 1 to 5	Increment 1-4 incl

Analyse the leachate values according to the procedure in 8.3.2, beginning with increment 2-7, followed by increment 5-8 and so on. Use this order for each component.

NOTES:

- 1 The method to establish whether the leaching mechanism is diffusion controlled is built up as follows:
 - a) Firstly, the eluate fractions obtained and analysed in periods 1 to 8 are divided into increments that are long enough to establish the leaching mechanism.
 - a) For all components to be determined, and for each of the divided increments in a), the concentration factor (CF), the slope (rc) of the linear regression line of $\log \varepsilon$ versus $\log t$ and the standard deviation of the slope (sd_{rc}) are determined and recorded in a table (see 8.3.2).
 - c) Subsequently, on the basis of these values, check that the matrix does not dissolve (see 8.3.3). If the test piece (the matrix) does dissolve, then the leaching from this test piece can not be determined with the diffusion test.
 - d) If the matrix does not dissolve, then for all components, per increment, a check is made whether the quantity of diffusion controlled leaching can be determined. The first increment in the order given in a) for which the quantity of diffusion controlled leaching can be determined is the "leaching mechanism determining increment".
 - e) Subsequently, it is determined whether, in addition to diffusion, other leaching mechanisms are involved.
 - f) If for certain components no diffusion controlled leaching can be established (and there is no suggestion of the matrix dissolving), then an estimate can be made of the upper limit of leaching.
- 2 Increment 2-7 is considered as a "total increment" for the entire diffusion test. The first fraction is not included in order to eliminate interpretative errors in the analysis due to wash-off effects. The last fraction is also not included in the total increment to eliminate as far as possible depletion of a certain component during the test.

8.3.2 Incremental analysis per component

For each component to be studied, undertake an incremental analysis as follows:

Step 1:

For each increment a-b determine the concentration factor CF_{a-b} :

$$CF_{a-b} = \frac{\text{mean concentration in the increment}}{\text{lowest limit of determination}} \quad (6)$$

If in all the fractions in the increment a-b, the measured concentrations for the component under investigation are all higher than the lowest limit of determination for that component, and $CF_{a-b} = 1.5$, then continue to Stage 2. If this is not the case, then for this component no leaching mechanism can be determined in this particular increment.

NOTE:

If for an increment the factor CF_{a-b} for the component under investigation is less than 1.5, the values measured in that increment are too low to allow determination of the leaching mechanism. Also, if in one of the fractions of the increment the concentration is lower than the lowest limit of determination, then it cannot be proved whether the leaching is diffusion controlled.

Step 2:

Using linear regression of the $\log \varepsilon_n - \log t_i$ relation (with $i \neq n$), determine for each increment the slope rc and the associated standard deviation, sd_{rc} calculated from the regression analysis.

The concentration factors, slopes and standard deviations can be given clearly as shown in Table 2 to support and simplify the assessment and further processing of the test results.

Table 2: Overview of concentration factors, slopes and standard deviations as determined in the following increments.

Increment a-b	CF_{a-b}	rc	Sd_{rc}
Increment 2-7			
Increment 5-8			
Increment 4-7			
Increment 3-6			
Increment 2-5			
Increment 1-4			

8.3.3 Determining whether the matrix dissolves

The determination of the leaching mechanism and the quantification of the leaching per component only have meaning if the matrix of the material does not dissolve. In 7.4, two criteria are used examine whether, in principle, this could be the case.

If in 7.4 both criteria are not satisfied, then the material does not dissolve. In this case, proceed to 8.3.4.

If in 7.4 both criteria are satisfied, proceed then on the basis of the values for Ca, Cl and SO_4 determined in 8.3.2 to evaluate whether criterion 3 is satisfied.

Criterion 3:

For at least 2 of the 3 above mentioned components, check whether $CF_{5-8} > 3.0$ and $rc_{5-8} > 0.8$.

If criterion 3 is not satisfied, then the matrix does not dissolve. In this case, proceed to 8.3.4.

If criterion 3 is satisfied, then the matrix does dissolve. In this case the leaching from this test piece cannot be determined through the diffusion test.

NOTE:

This criterion will be satisfied principally by gypsum product and materials with a high salt concentration.

8.3.4 Determining whether the leaching of the different components is diffusion controlled or whether other leaching mechanisms are involved

On the basis of the concentration factors and slopes calculated in 8.3.2, it can be determined which leaching mechanism(s) are involved in the release of different components from the test piece. A precondition for this is that the standard deviation of the slope must meet certain requirements. With fully diffusion controlled leaching, the slope is exactly 0.5.

The significance of the slope of the different increments is summarised in Table 3.

Table 3: Significance of slopes of the different increments.

Increment a-b	Slope, rc		
	≤ 0.35	> 0.35 and ≤ 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

Step 1:

Determine per component for all increments, in the order given in Table 3 beginning with increment 2-7, if the leaching mechanism is diffusion controlled on the basis of the following criteria. The first increment for a component for which the quantity of diffusion controlled leaching can be established is deemed the "leaching mechanism determining increment" for that component.

Criteria for diffusion controlled leaching in increment a-b

$$CF_{a-b} \geq 1.5 \quad sd_{rc} \leq 0.5 \quad 0.35 < rc \leq 0.65$$

If the above criteria are satisfied, then the diffusion controlled leaching of the component concerned can be calculated using the formulas in 8.4.

If, as well as diffusion controlled leaching, there is also an indication of surface wash-off in increment 1-4, then this surface wash-off can be quantified using the formulas in 8.5.

Step 2:

If for certain components diffusion controlled leaching cannot be established in any of the increments (and the material does not dissolve according to the criteria in 8.3.3), then for that component an upper limit for leaching is determined. For this, proceed to 8.6, in which formulas are given for various situations dependent on the controlling leaching mechanism.

NOTE:

In Annex E graphical representations are given of each extreme case of leaching. Depletion events are indicated in Figure E2, surface wash-off in Figure E4 and chemical changes in the material in Figures E3, E5 and E6.

8.4 Calculation of the diffusion controlled leaching of a component per unit surface area

The calculation of leaching of a component per unit surface area must be undertaken in all cases, where the diffusion controlled leaching has been established by the increment analysis in 8.3.4.

The derived leaching of a component per unit surface area over an arbitrary time interval can be determined by the formula:

$$\varepsilon_{x,y} = \left\{ \sqrt{t_y} - \sqrt{t_x} \right\} \left\{ \prod_{i=a}^b \frac{E_i^*}{\sqrt{t_i} - \sqrt{t_{i-1}}} \right\}^{\frac{1}{1+\delta-a}} \quad (7)$$

where:

$\varepsilon_{x,y}$ is the derived leaching of a component in the time period t_x and t_y , in m^2/s ;

- E_i^* is the measured leaching of the component in fraction i in mg/m^2 ;
 t_x is the start time of the interval measured from the start of the test, in days;
 t_y is the end time of the interval measured from the start of the test, in days;
 t_i is the end time of fraction i , which is part of the increment a - b , for which diffusion has been established, measured from the start of the test, in days;
 t_{i-1} is the start time of fraction i , measured from the start of the test, in days. This is part of the increment a - b , for which diffusion has been established..
 a, b are dimensionless indices by which an increment a - b is indicated for which a diffusion mechanism is established.

NOTES:

- The product function in (7) is a measure for the average leaching rate, taking into account the diffusion controlled nature of the leaching process. The leaching is corrected by the square root of the times. In practice, this method of calculation leads to a calculated average negative logarithm of the effective diffusion coefficient (pD_e). For the determination of the average effective diffusion coefficient D_e , see Annex D1.
- If, for example, a diffusion controlled mechanism is established in increment 2-7, then the product function takes the values $a=2$ and $b=7$:

$$\left\{ \prod_{i=2}^7 U_i \right\}^{\frac{1}{6}} = \{U_2 \times U_3 \times U_4 \times U_5 \times U_6 \times U_7\}^{\frac{1}{6}} \quad (8)$$

where:

$$U_i = \frac{E_i^*}{\sqrt{t_i} - \sqrt{t_{i-1}}}$$

Calculate for each component under investigation separately the derived cumulative leaching per unit area over 64 days, ε_{64} , with the formula:

$$\varepsilon_{64} = \sqrt{64} \left\{ \prod_{i=a}^b \frac{E_i^*}{\sqrt{t_i} - \sqrt{t_{i-1}}} \right\}^{\frac{1}{1-b-a}} \quad (9)$$

where:

- ε_{64} is the derived cumulative leaching for a component over 64 days, in mg/m^2 ;
 E_i^* is the measured leaching of the component in fraction i in mg/m^2 ;
 t_i is the end time of fraction i for which diffusion has been established, measured from the start of the test, in days;
 t_{i-1} is the start time of fraction i for which diffusion has been established, measured from the start of the test, in days;
 a, b are dimensionless indices by which an increment a - b is indicated for which a diffusion mechanism is established.

Calculate also for each component under investigation separately the measured cumulative leaching per unit surface area over 64 days ε_{64}^* using the formula:

$$\varepsilon_{64}^* = \sum_{i=1}^N E_i^* \quad (10)$$

where:

- ε_{64}^* is the measured cumulative leaching for a component per unit surface area over 64 days, in mg/m^2 ;
 E_i^* is the measured leaching of the component in fraction i , in mg/m^2 ;

N is the number of periods, equal to the number of prescribed refreshing intervals ($N=8$).

If the measured cumulative leaching over 64 days (ε_{64}^*), calculated using formula (10) is smaller than the derived cumulative leaching calculated using formula (9) and also the slope of increments 3-6 and 4-7 are both smaller than 0.35, then the measured cumulative emission over 64 days is considered to be the upper limit of leaching.

8.5 Quantifying the surface wash-off in combination with diffusion-controlled leaching

The surface wash-off of a component per unit surface area can only be determined where the incremental analysis in 8.3.4 has established that the leaching of that component is diffusion controlled.

If surface wash-off is indicated in the first two fractions of increment 1-4 ($rc \leq 0.35$) whilst in one or more of the following increments diffusion controlled loss is accepted, then the amount of surface wash-off ($\varepsilon_{wash,1-2}$) in mg/m^2 is given by:

$$\varepsilon_{wash,1-2} = E_1^* + E_2^* - \varepsilon_{64} \times \sqrt{1/64} \quad (11)$$

where:

$\varepsilon_{wash,1-2}$ is the washed-off quantity of the particular component, in mg/m^2 ;
 E_1^* is the measured leaching of that component in fraction 1 (1/4 day), in mg/m^2 ;
 E_2^* is the measured leaching of that component in fraction 2 (1 day), in mg/m^2 ;
 ε_{64} is the calculated leached quantity of the particular component over 64 days, in mg/m^2 calculated from formula (9).

NOTE:

See Annex E, figure E4 for a graphical representation of this type of leaching.

8.6 Determination of the upper limit for leaching of components for which no diffusion can be established

The calculation of the upper limit for leaching of a component per unit surface area can only be undertaken when, according to 8.3.4, leaching of the particular component is not diffusion controlled and, according to 8.3.3, the matrix does not dissolve.

NOTE:

If the matrix does not dissolve, then for certain components for which diffusion cannot be established by the increment analysis, an estimate can still be made of the long term leaching by applying the formulas for diffusion controlled leaching.

The calculations must be considered in the order set out in the following paragraphs.

8.6.1 The concentration factor CF_{1-8} is less than 1.5

If the concentration factor CF_{1-8} is less than 1.5, then the upper limit of the cumulative emission over 64 days is calculated as follows:

$$\varepsilon_{64} = \varepsilon_{1-8}^* \quad (12)$$

where ε_{1-8}^* is calculated from 8.1 and 8.2.1, where c_i in Formula (3) is set equal to the lowest limit of determination.

NOTE:

If the concentration factor CF_{1-8} is less than 1.5 then the average concentration for the "total increment" is less than 1.5 times the lowest limit of determination.

The upper limit for leaching over a period T from the beginning of the leaching is calculated from:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{1-8}^* \times \sqrt{T/64} \quad (13)$$

where:

ε_T is the upper limit of the leaching of a component over a period T , in mg/m²;
 T is the duration of the period, in days.

8.6.2 Surface wash-off followed by low concentrations in the subsequent fractions

If through the increment analysis in 8.3.4 it is found that surface washing has occurred, followed by low concentrations on the subsequent fractions, then the upper limit for diffusion over a time period T from the start of leaching is calculated from:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{1-2}^* + \varepsilon_{3-8}^* \times \frac{\sqrt{T} - \sqrt{1}}{\sqrt{64} - \sqrt{1}} \quad (14)$$

where:

ε_T is the upper limit of the leaching of a component over a period T , in mg/m²;
 ε_{1-2}^* is the measured cumulative leaching over the increment 1-2, in mg/m²;
 ε_{3-8}^* is the measured cumulative leaching over the increment 3-8 (upper limit, see 8.1), in mg/m²;
 T is the duration of the period, in days.

NOTE:

Formula (14) for the wash-off applies if in increment 1-4 the slope is less than 0.35 and additionally that the concentrations are well measurable, whilst the concentrations in increment 5-8 are not so measurable. Extrapolation of the measured leaching according to a diffusion controlled leaching will overestimate the true leaching. It is also not correct to extrapolate the initial wash-off using the formula for diffusion controlled leaching; instead the wash-off should be added to the diffusion controlled leaching.

8.6.3 Possible depletion/changing chemical form

If the increment analysis in 8.3.4 reveals that for a component that in at least two of the increments 2-5 and/or 3-6 and/or 4-7 and/or 5-8 the slope is less than 0.35 and the concentration factor is greater than 1.5, then this indicates that depletion of this component may have occurred.

NOTE:

1. There are also indications of depletion if, after initial wash-off, significant concentrations are measured in the extracts in following the periods (as opposed to the situation described in 8.6.2). Extrapolation of the cumulative measured leaching will then overestimate the actual leaching. It is, however, not correct to include the initial wash-off in the formula for the diffusion controlled leaching.
2. Inert components are distinguishable by having the lowest pD_e values in the matrix under consideration, whilst the remaining components always have a higher pD_e value. This means that depletion always occurs earlier with inert components than with the other components. The appearance of an $rc < 0.35$ in such a case can be explained by the fact that chemical conditions change, as a result of which a step change occurs to, for example, a different diffusion level, or that a mobile chemical form becomes depleted whilst a different leachable form of that component remains (more strongly) bonded in the matrix.

The upper limit for leaching over a period T from the start of leaching can then be calculated by the formula:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{1-2}^* + \varepsilon_{3-8}^* \times \frac{\sqrt{T} - \sqrt{1}}{\sqrt{64} - \sqrt{1}} \quad (15)$$

where:

ε_T is the upper limit of the leaching of a component over a period T , in mg/m²;
 ε_{1-2}^* is the measured cumulative leaching over the increment 1-2, in mg/m²;
 ε_{3-8}^* is the measured cumulative leaching over the increment 3-8 (upper limit, see 8.1), in mg/m²;
 T is the duration of the period, in days.

8.6.4 Dissolution

If the slope for the a particular component for the total increment (2-7) is greater than 0.65 (see 8.3.4 Step 1), the leaching over 64 days is calculated as:

$$\varepsilon_{64} = \varepsilon_{1-8}^* \quad (16)$$

ε_{1-8}^* is determined as set out in 8.1 and 8.2.1, where c_i in formula (3) in 8.1 is given the value of the lowest limit of determination if the concentration of a component in a fraction is lower than the lowest limit of determination.

The upper limit of leaching over a period T from the start of leaching is then:

$$\varepsilon_T = 2 \times \varepsilon_{1-8}^* \times \sqrt{T/64} \quad (17)$$

NOTE:

If the slope is greater than 0.65 then there is a possibility of dissolution of the component. This appears contrary to the finding that the test piece is not dissolving. This, however, need not be the case. It can be concluded that, viewed from the leaching mechanism of the matrix, the dissolution of the particular component has no permanent character. It is even possible that dissolution is only occurring from the outer layer of the test piece. The slope can also be greater than 0.65 if at low concentrations the influence of other components is relatively large.

8.6.5 Large spread in measured concentrations

No determination of the slope is possible in 8.3.4 step 1 where the measured concentrations exhibit a wide spread ($sd_{rc} > 0.5$). In this case the leaching over 64 days is calculated by the formula:

$$\varepsilon_{64} = \varepsilon_{1-8}^* \quad (18)$$

ε_{1-8}^* is determined as set out in 8.1 and 8.2.1, where c_i in formula (3) in 8.1 is given the value of the lowest limit of determination if the concentration of a component in a fraction is lower than the lowest limit of determination.

The upper limit of leaching over a period T from the start of leaching is then:

$$\varepsilon_T = 5 \times \varepsilon_{1-8}^* \times \sqrt{T/64} \quad (19)$$

where:

ε_T is the upper limit of the leaching of a component over a period T , in mg/m^2 ;
 ε_{1-8}^* is the measured cumulative leaching over the total duration of the test, in mg/m^2 ;
 T is the duration of the period, in days.

NOTE:

Research has been conducted to investigate how large the error in the value of pD_e could be when $sd_{rc} > 0.5$. In that case the slope rc could rise to 1.5 so that the value of pD_e would be a whole 1 log (m^2/s) lower. This is equivalent to a 10 fold overestimate of the diffusion coefficient, which means at least a three fold overestimate of the leaching. Because the value of pD_e within the period of the diffusion test can decrease even further due to changes in the chemical conditions (for example, through the leaching of lead from a reducing material), a factor of 5 is introduced in the formula for ε_T to give the assumed upper limit.

Table 4: Calculation of the upper limit of leaching of a component in special circumstances

Description	Criteria ^a	Formula for calculating ε_T
1) Measured, average concentration in all fractions is	$CF_{1-8} < 1.5$	$\varepsilon_T = \varepsilon_{1-8}^* \times \sqrt{T/64}$ (13)

low		
2) Wash-off in the first two steps, after which measured concentrations are low	$CF \geq 1.5$ and $rc < 0.35$ for increment 1-4, and $CF < 1.5$ for increment 5-8	$\varepsilon_T = \varepsilon_{1-2}^* + \varepsilon_{3-8}^* \times \frac{\sqrt{T} - \sqrt{1}}{\sqrt{64} - \sqrt{1}}$ (14)
3) Possible depletion of different chemical forms	$rc < 0.35$ and $CF \geq 1.5$ for at least two of the increments 2-5 and/or 3-6 and/or 4-7 and/or 5-8	$\varepsilon_T = \varepsilon_{1-2}^* + \varepsilon_{3-8}^* \times \frac{\sqrt{T} - \sqrt{1}}{\sqrt{64} - \sqrt{1}}$ (15)
4) Dissolution during increment 2-7	$rc > 0.65$ for increment 2-7	$\varepsilon_T = 2 \times \varepsilon_{1-8}^* \times \sqrt{T / 64}$ (17)
5) Large spread in all increments	$sd_{rc} > 0.5$ for increments 3-6, 4-7 and 5-8	$\varepsilon_T = 5 \times \varepsilon_{1-8}^* \times \sqrt{T / 64}$ (19)
<p>^a The parameters have the following meanings:</p> <p>CF_{a-b} is the concentration factor in increment a-b</p> <p>rc is the slope of the relevant increment</p> <p>sd_{rc} is the standard deviation of the slope of the relevant increment</p> <p>ε_T^* is the upper limit of leaching of a component over period T, in mg/m^2</p> <p>ε_{a-b}^* is the measured cumulative leaching over the relevant increment a-b, in mg/m^2</p> <p>T is the duration of the period, in days</p>		

8.6.6 Summary of situations in which the upper limit of leaching can be determined

Table 4 provides a summary of the formulas used to calculate the upper limit of leaching where there is no possibility of diffusion and the matrix is not dissolving. Further information on the exceptional cases in Table 4 are given in Annex F.

9. Report

The report must contain the following data at least:

- a reference to this standard, indicating: "in accordance Environment Agency standard EA NEN 7375:2004";
- the data necessary for identification of the test piece(s);
- source and specifications of the test piece(s);
- the nature of the material studied;
- the temperature range within which the leaching test was performed;
- the pH of the eluates collected, rounded to 0.0.5 pH-unit;
- the conductivity of the eluates collected rounded to maximum 1 significant figure;
- the components analysed and the lowest limits of determination of the components in the eluate;
- the means by which the eluates have been preserved and stored until the time of analysis;
- all concentrations measured, rounded to maximum 2 significant figures;
- the quantity of preservative added in Section 7.3 if this is more than 1 ml per 250 ml eluate;
- the amount of material fallen off the test piece(s) during the test;
- the slopes and corresponding standard deviations of all increments;
- the start and end points of the leaching mechanism-determining increment, if the leaching of the relevant component is diffusion controlled;
- the quantity of the components tested available for leaching;
- the results of the investigation into the (non-) dissolution of the test piece(s);
- the calculated cumulative leaching of the components tested over 64 days (ε_{64}), in mg per m^2 ;
- the measured cumulative leaching of the components tested over 64 days (ε_{64}^*), in mg per m^2 ;
- the evaluated possible surface wash-off of the components tested, in mg/m^2 ;

- the calculated upper limit in possible special circumstances of leaching of one or more components, in mg/m^2 ;
- the eventual weight loss during the test, in mg/m^2 ;
- the duration of the investigation.

If the diffusion test is not carried out fully in accordance with this standard, all deviations from the prescribed procedures must be indicated in the report, giving the reasons.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Annex A

Validation of the Diffusion Test

In developing the Dutch Standard, NEN 7375, a round-robin test was undertaken with 10 laboratories on 3 types of material to establish the precision of the diffusion test in terms of repeatability and reproducibility. The following is taken from the discussion presented in NEN 7375.

The error in the end result of a leaching test is composed of contributions from:

- The origin of the material (variations in the production process);
- The method of sample taking (differences in representativeness);
- The sample pre-treatment (variations in the preparation of the test piece for the leaching test);
- The leaching test itself;
- The chemical analysis (error in the determination of concentration in the eluates);

To establish the precision of the diffusion test, the contribution of these sources of error were minimized through the experimental design. Therefore, in the validation study the following starting points were used.

- Components that can be very inhomogeneous in certain materials were not included in determining the precision.
- The samples were all taken from one batch and the sample preparation was performed in one session.
- All chemical analyses were carried out by one laboratory.
- The precision was only determined for components for which the error in the chemical analysis was sufficiently small (relative standard deviation in repeatability nominal less than 5%). For larger errors in the concentration measurement the precision of the analysis would dominate the precision of the leaching test result too much.

The test pieces examined relate to three different types of moulded materials. The table below gives an overview of the materials used and the components tested:

Table A.1: Investigated materials and components

GRAIN SIZE CLASS	MATERIAL TESTED	COMPONENTS TESTED ¹⁾
Moulded	Fly ash/cement mix	Na, Ba, Mo, SO ₄ , V
Moulded	Sand lime brick with coal dust fly ash	Na, As, (Ni), Se*, SO ₄ , (V)
Moulded	Building brick	Na*, As, V

- 1) All elements in brackets and marked * in Table A.1 were measured but not included in determining the median and the range of the overall precision values, because:
- the error in the concentration measurement was too large (marked with brackets);
 - for the determination of the repeatability less than 5 laboratories were found for which in both duplicate leaching tests using the procedure 8.3 clearly a leaching mechanism could be determined (marked *). For the determination of the reproducibility always the results of at least 8 laboratories could be used.

The round-robin on the above materials and components combinations have the following values for standard deviations for repeatability (S_r) and reproducibility (S_R) in the diffusion test.

	Median	Range
S_r in the determination of ε_{64}	13%	8% to 18%
S_R in the determination of ε_{64}	16%	10% to 42%
S_r in the determination of pD_e (unit: $-\log[m^2/s]$)	0.11	0.07 to 0.17
S_R in the determination of pD_e (unit: $-\log[m^2/s]$)	0.19	0.12 to 0.40

In general no clear dependency of S_r and S_R on the material type was found.

NOTES:

- 1 No correction is made for the contribution of the analytical error, because ε_{64} and pD_e are calculated using a diffusion model through a fitting procedure. In general, the influence of the analytical error is of minor importance in the above values of the precision.
- 2 The precision values for the diffusion test are corrected for the error in the availability test result.
- 3 The values for S_r and S_R shown are only appropriate for material-component combinations for which:
 - the contribution of the relative standard deviation in the concentration measurement is less than 5%.
 - at least 5 data sets are available for which clearly a diffusion controlled leaching mechanism could be determined.

All material-component combinations in table A.1 that are not marked with brackets or *, satisfy these two requirements.

The mentioned median values and ranges for S_r and S_R are indicative values of the attainable precision, if the diffusion test is performed according to this standard and also the requirements mentioned in note 3 above are met. In particular, a higher degree of uncertainty may apply to materials which are very heterogeneous and/or to components for which the concentration measurements in the eluate causes problems (due to e.g. low levels).

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Annex B (Informative)

Differences between NEN 7375 and NEN 7345

The repeatability and reproducibility of the diffusion test according to NEN 7345, established in the round-robin validation test (see Annex A of this standard), proved less good than desired. For this reason, under the auspices of the Action Programme Normalisation and Validation of Environmental Measurement Methods a project *Improvement of the quality of three normalised leaching tests in the NEN-7340 series* (ANVM-216,) was undertaken. In that project, consideration was also given to the developments on European harmonisation under the auspices of the CEN committee TC 292. Most of the changes proposed in ANVM-216 for undertaken diffusion tests have been adopted by the standards committee 390 011 and recommended for adoption in the standard. The existing standard NEN 7345 will not be revised because at this time CEN/TC 292 diffusion tests for earthy and stony waste materials are being developed, so there is a "stand still" on the development of national standards on the same subject. At the same time, it is expected that NEN 7345 will be replaced by one or more of the CEN/TC 292 developed standards for diffusion tests. Because in the meantime there is still a need for a generally applicable diffusion test, in which the recommendations from project ANVM-216 are adopted, a new standard (NEN 7375) has been brought out with a wider applicability than CEN is considering, namely all earthy and stony materials.

The most important changes from NEN 7345 that have been brought forward in NEN 7375 are as follows:

1. The applicability is generalised to earthy and stony materials (as opposed to just earthy and stony building materials and wastes).
2. The diffusion test must in future be conducted with pH neutral instead of acidified water. The most important reason for this is that this will be incorporated in the standards being developed in CEN/TC 292.

An additional advantage of this is that the use of pH neutral water is that, in the case of materials with a low buffering capacity, large differences in the initial leaching by leaching fluid with an imposed pH=4 is overcome. This effect is much less with the use of pH neutral water. A separate literature and model study has considered the consequences of using neutral instead of acidified water. This has found that the difference in leaching results are possibly only observed in materials with a very low buffering capacity. Examples of this are vitrified slag, some industrial slags and sintered products, such as artificial gravel and brick. The differences in leaching for these types of material also appear to be very small (and only observed for metals); under normal laboratory conditions these are barely discernable.

3. The "paper method" has been introduced for the determination of the geometric surface area of highly irregular test pieces.
4. The determination of the leaching mechanism during the diffusion test is more systematically described and elaborated
5. The leaching volume is smaller, thus the required determination limit in testing to (regulatory) standards is easier to achieve analytically.
6. The "diffusion controls the leaching from the matrix" as criterion for applicability of the standard is replaced with the criterion "no dissolution of the matrix".
7. For the calculation of the cumulative leaching per unit surface area, it is no longer necessary to undertake the availability test according to EA NEN 7371, since the value of the diffusion coefficient derived from that test has been eliminated from formulas (7) and (9) for the arithmetic leaching of a component over a given interval ($\epsilon_{x,y}$) and over a period of 64 days (ϵ_{64}), respectively.

8. For the determination of the average negative logarithm of the effective diffusion coefficient per component, it is still necessary to undertake the availability test according to EA NEN 7371. This determination is set out in an informative annex (Annex D.1).
9. For the determination of the leaching per component, for which according to the procedure in 8.3.4 no diffusion controlled leaching can be established, whilst according to 8.3.3 it is established that the matrix does not dissolve, a calculation method is given to establish the upper limit of leaching.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Annex C

Commentary on the Prescribed Test Pieces and Determination of the Geometric Area

- C.1 It is recommended that at least three test pieces are available, two of which meet the dimensional requirements, as supplementary tests may be found necessary. The third test piece may be necessary for performance of an availability test according and is finely ground for this.
- C.2 In general, diffusion is determined on the basis of leaching from the entire test piece. This may be a sample of an original building element (e.g. a brick) or a test piece moulded in a special mould from the material to be tested (e.g. a Marshall slab of asphalt concrete).
- C.3 To prevent practical problems in the performance of the test, it is recommended that an upper limit of 300 mm be set for the largest dimension of the test piece.
- C.4 To prevent the leaching diminishing during the diffusion test due to depletion of a component, the smallest dimension of the test piece must be larger than 40 mm. For components with great mobility, during the test some depletion can occur if the smallest dimension lies in the area of the lower limit of 40 mm. Depletion of mobile components can then be prevented by using a slightly larger test piece.
- C.5 Certain building materials are produced as standard with a thickness of less than 40 mm such as slate roof covering, ceramic roof tiles, thin tiles, hollow bricks or garden tiles. Usually the required strength of these products implicitly leads to materials with such a high pD_e value that no depletion phenomena occur during the diffusion test. For an optimum result in the diffusion test, such thin test pieces must be covered on one side.
- C.6 For partial covering of a test piece with an impervious layer, material must be used that has no disruptive influence on the diffusion process by the release, absorption or (delayed) transmission of components to be studied. It has appeared that acrylic resin is a suitable impervious material for leaching tests on inorganic components with the diffusion test. The usability of other impervious materials is still being studied.
- C.7 The test piece can be prepared in the laboratory under conditions that correspond to those found in practice. Preference is however given to the product as used in practice. The test piece can also be part of the manufactured product unless surface treatment causes significant differences in the surface structure or the ground surface. The latter can be compensated by covering the surface concerned such that no rinsing or diffusion from the surface occurs during the test.
- C.8 If, after production, the product must harden for a specific period before reaching the strength required in practice, it is important for the interpretation of the results of the diffusion test to bear in mind that also the leaching behaviour can change during the period that hardening takes place.
- C.9 Some test pieces are sawn or drilled out of a larger whole, for example a drilling core from a road surface. The sides formed by the sawing or drilling may have leaching extent not shown by the unworked surfaces. The worked surfaces must be covered in accordance with the procedure in Section 7.2.2. For a number of materials, it has been found that the diffusion differs little or not at all from the diffusion from the unworked part. In these cases, the sawn or drilled surfaces can also be included in determining the diffusion.
- C.10 If the geometric area cannot be clearly and easily established for the entire surface, the test can often be carried out on part of the outer surface. Examples of materials where part of the surface must be covered are coarse slag and cobbles. Often one or more test pieces are selected from a representatively assembled sample of such slag or cobbles, for which large parts have an area that can be easily determined geometrically.

Partial covering may also be necessary for certain products with a regular and easily definable geometric area, for example roof tiles (with edges and rounded corners) or grass tiles (with gaps). Hollow building materials must have the holes filled with an impervious material.

Some building materials have different properties on different sides, e.g. if glazed layers or paint are applied. In these cases, the type of material surface to be studied is isolated by covering the other surfaces.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Annex D

Assessment of a Diffusion Coefficient and Calculation of Derived Values

D.1 Assessment of the effective diffusion coefficient of a component

The effective diffusion coefficient of a component can only be calculated when, through the procedure given in 8.3.3 and also the increment analysis in 8.3.2, it can be shown the leaching is diffusion controlled, and when for this material the available leaching quantity is known. For this the following procedure must be followed:

Calculate the average effective diffusion coefficient D_e of a component with the formula:

$$D_e = \left(\frac{\varepsilon_{64}}{2653 \times \rho \times U_{avail}} \right)^2 \times f \quad (D.1)$$

where:

- D_e is the average, effective diffusion coefficient for a given component, in m^2/s ;
- ε_{64} is the derived cumulative leaching of the component over 64 days determined with formula (9), in mg/m^2 ;
- ρ is the density of the test piece, in kg dry matter per m^3 ;
- U_{avail} is the leachable available quantity derived according to EA NEN 7371, in mg per kg dry matter
- f is a factor equal to $1 s^{-1}$.

Also express the average value of the effective diffusion coefficient in the form of a negative logarithm:

$$pD_e = -\log D_e \quad (D.2)$$

D.2 Assessment of a diffusion coefficient

The value of pD_e indicates the rate of leaching. The minimum value of pD_e (maximum rate of leaching) for a component such as sodium is equal to 8.88 (free mobility of sodium in water).

The higher the pD_e value, the lower the speed of leaching of the component concerned with constant availability U_{avail} (this determines the concentration gradient which is the driving force for diffusion):

- $pD_e > 12.5$:component with low mobility;
- $11.0 < pD_e < 12.5$:component with average mobility;
- $pD_e < 11.0$:component with high mobility.

A pD_e value of less than 9.5 has no physical significance as the material to be studied has no further internal porosity (tortuosity). If such a low value is found in the calculation, it is advisable to check the availability measured.

D.3 Comparison of the mobility of a component in a moulded or monolithic material with the free mobility of sodium in water

Tortuosity is a measurement of physical retardation and gives an indication of the path length that a diffusing ion must cover in a porous matrix. It is a material property and therefore not ion-dependent. For calculation of the tortuosity, a component must be selected that has no chemical interaction with the matrix. This component will show the lowest pD_e value in the matrix concerned. In most cases, sodium is the best choice.

The tortuosity of a moulded or monolithic material can be calculated using the formula:

$$T = \frac{D_{Na}}{D_{e,Na}} \quad (D.3)$$

where:

T is the tortuosity of the material;

D_{Na} is the diffusion coefficient of sodium in water ($10^{-9.88}$) in m^2/s ;

$D_{e,Na}$ is the effective diffusion coefficient of sodium in the material in m^2/s .

The retention factor is an indicator of the chemical retention of a component in a moulded or monolithic material. For a component that shows no interaction with the material matrix, this is equal to 1.

The retention factor (R) for the component concerned can be calculated using the formula:

$$R = \frac{D}{D_e \times T} \quad (D.4)$$

where:

R is the retention factor;

D is the diffusion coefficient for the component in water in m^2/s ;

D_e is the effective diffusion coefficient for the component in the material in m^2/s ;

T is the tortuosity of the material.

D.4 Determination of the leached quantity per unit mass in the diffusion test

The quantity of a component leached out per mass unit up to a time t can be calculated using the formula:

$$U_{dif,t} = \frac{2 \times A \times \rho \times U_{avail} \times \sqrt{\frac{D_e \times t}{\pi}}}{m} \quad (D.5)$$

where:

$U_{dif,t}$ is the quantity of a component leached out in the diffusion test to time t in mg per kg dry matter;

U_{avail} is the quantity of component available for leaching in mg per kg dry matter;

D_e is the effective diffusion coefficient of the component in m^2/s ;

t is the time duration of the leaching in s;

A is the area of the test piece in m^2 ;

ρ is the density of the test piece in kg dry matter per m^3 ;

m is the mass of the test piece in kg dry matter.

From the leached quantities of a specific component as calculated in formula (17), and the content of the component available in the test piece, the extent of depletion can be approximated. For this, the relative leaching in the diffusion test must be calculated using the formula:

$$UP_{dif,t} = \frac{U_{dif,t}}{U_{avail}} \times 100\% \quad (D.6)$$

where:

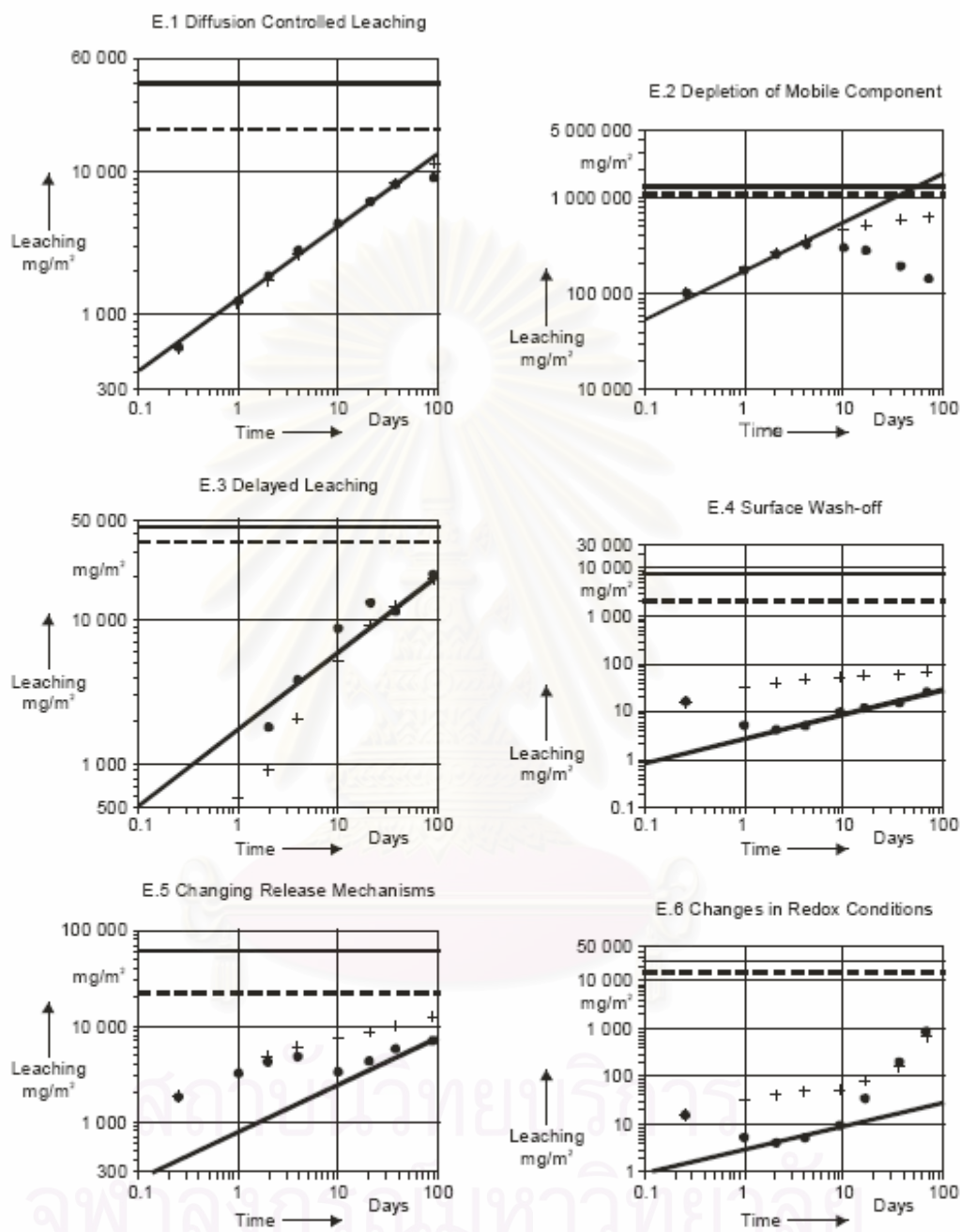
- $UP_{diff,t}$ is the percentage of leached component in time t of the diffusion test in relation to the available content in the test piece
- $U_{diff,t}$ is the leached quantity of the component in time t of the diffusion test in mg per kg dry matter;
- U_{avail} is the quantity of the component available for leaching in mg per kg dry matter.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Annex E (informative)

Graphical representation of diffusion controlled leaching in special cases.



KEY

- + Cumulative measured leaching, from 8.2.1 equation (4)
- Cumulative measured leaching, from 8.2.2 equation (5)
- Slope defined by $rc=0.5$
- Upper limit defined by total content of component
- - - Upper limit based on availability in accordance with NEN 7371

Annex F

Explanation of the calculation of the upper limit for leaching in special cases

If a material behaves as a porous matrix, it may be assumed that all components evenly distributed in the matrix basically leach diffusion controlled. Even for this type of material it is not always possible to demonstrate for each component a diffusion controlled release using procedure 8.3.4. This occurs mainly in components that only have a low availability and/or a high pD_0 value. Also other factors like wash-off, dissolution of only the outer layer of the moulded or monolithic material, chemical specification, complex eluate compositions etc. can lead to no diffusion coefficient being determined for specific components.

In some cases also for components for which no diffusion coefficient could be determined according to 8.3.4, it is possible to give an indication of the cumulative release to be expected based on the results of the diffusion test. For 5 special cases formulas are given in 8.6 of this standard to estimate the upper limit of leaching after a time period of 64 days and for any given time period T (>64 days), respectively. The leaching ε_T after T days will always be calculated from the ε_{64} value using a factor $\sqrt{T/64}$. Partly caused by the restrictions of the one-dimensional diffusion model it can occur that the calculated upper limit in this way is substantially larger than the available amount for the object under investigation given by the formula:

$$\varepsilon_b = U_{avail} \times \rho \times d \quad (F.1)$$

where:

- ε_b is the calculated cumulative release of a component in the object under investigation, in mg dry matter per m²;
- U_{avail} is the available amount for leaching in mg/kg dry matter;
- ρ is the density of the test piece in kg dry matter per m³;
- d is the thickness of material under investigation in m.

If it is found that ε_b is smaller than ε_T then the value of ε_b should be taken as the best estimate of the upper limit.

If a more precise insight into the level of leaching is required than an indicative upper limit, the diffusion test must be carried out with more accurate analysis instruments, a longer test duration, longer periods between replacement or a lower fluid-volume ratio. This standard does not give instructions for this as the approach is not normally considered necessary.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

รายการคำนวณตามมาตรฐานการทดสอบการชะละลาย EA NEN 7375:2004

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 1

1. การคำนวณปริมาณน้ำชะละลายจากสมการ

1.1 ในกรณีที่ไม่มีการปิดพื้นผิวของก้อนตัวอย่าง

$$2 \times V_p \leq V \leq 5 \times V_p \quad (\text{ข-1})$$

1.2 ในกรณีที่มีการปิดพื้นผิวของก้อนตัวอย่าง

$$50 \times A \times f \leq V \leq 200 \times A \times f \quad (\text{ข-2})$$

2. การคำนวณค่าพีเอชและความนำไฟฟ้าซึ่งมีข้อกำหนดคือในกรณีที่ไม่ผ่านข้อกำหนดที่ 1 ก่อนทดสอบนั้นไม่เกิดการละลายแต่ถ้าผ่านข้อกำหนดให้คำนวณต่อในสมการที่สอง (ข-4)

$$S_{7-8} > 1.5 \times V_p / V + 10^{(pH_{7-8} - 11.78)} + 10^{(2.5 - pH_{7-8})} \quad (\text{ข-3})$$

$$S_{7-8} > 2 \times S_{5-6} \quad (\text{ข-4})$$

3. การคำนวณความเข้มข้นของโลหะหนักในแต่ละช่วงการทดสอบ

$$E^*_i = \frac{c_i \times V}{F \times A} \quad (\text{ข-5})$$

$$\varepsilon^*_n = \sum_{i=1}^n E^*_i \quad (\text{ข-6})$$

ตารางที่ ข.1 ช่วงทดสอบจากขั้นตอนที่ 1 ถึง 8

Order	Eluate fraction	Increment a-b
1	Fractions 2 to 7	Increment 2-7 incl
2	Fractions 5 to 8	Increment 5-8 incl
3	Fractions 4 to 7	Increment 4-7 incl
4	Fractions 3 to 6	Increment 3-6 incl
5	Fractions 2 to 5	Increment 2-5 incl
6	Fractions 1 to 5	Increment 1-5 incl

จากตารางที่ ข.1 เป็นการแบ่งช่วงการทดสอบเพื่อใช้ในการประเมินกลไกการชะละลายและการคำนวณความเข้มข้นของโลหะหนักที่ทำการพิจารณาในแต่ละการทดสอบ

ในการคำนวณตามสมการที่ (ซ-7) เป็นการคำนวณความเข้มข้นของโลหะหนักที่สัมพันธ์กับช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ

$$\varepsilon_n = (E^*_i \times \sqrt{t_i}) / (\sqrt{t_i} - \sqrt{t_{i-1}}) \quad (\text{ซ-7})$$

ตารางที่ ซ.2 ตัวอย่างรายการคำนวณความเข้มข้นของสังกะสี

ช่วงการทดสอบ	Zn	Zn(mg/L)	Zn(ug/L)	V(L)	A(m ²)
E*1=	120.2867	1.8043	1804.3	1	0.015
E*2=	95.1200	1.4268	1426.8	1	0.015
E*3=	104.6200	1.5693	1569.3	1	0.015
E*4=	147.0067	2.2051	2205.1	1	0.015
E*5=	106.5000	1.5975	1597.5	1	0.015
E*6=	23.0113	0.3452	345.2	1	0.015
E*7=	85.6133	1.2842	1284.2	1	0.015
E*8=	73.5400	1.1031	1103.1	1	0.015

ตารางที่ ซ.3 กลไกการชะละลายในแต่ละช่วงความชัน

Increment a-b	Slope ,rc		
	≤ 0.35	>0.35 และ ≤ 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

ตารางที่ ๔.4 ตัวอย่างการคำนวณ

Eluate fraction	n=number	LOD (Zn)	CFa-b	rc	SD _{rc}	Mechanisms
561.8713	6	0.2	7023.3917	-0.1052	0.3181	surface wash-off
288.6647	4	0.2	5412.4625	0.1487	0.1442	Depletion
362.1313	4	0.2	6789.9625	-0.4916	0.1657	Depletion
381.1380	4	0.2	7146.3375	-0.6438	0.3081	Depletion
476.2580	4	0.2	8498.3750	0.2908	0.4593	Depletion
467.0333	4	0.2	8756.8750	0.5461	0.4802	Diffusion



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเกษร ใหญ่กระโทก เกิดเมื่อวันที่ 8 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2524 ที่จังหวัด นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2549



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย