การเปรียบเทียบการทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิลด้วยปูนขาว และการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาวผสมเถ้าลอยลิกไนต์

นางสาว กาญจนา ต่วนเทศ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-406-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I19247643

COMPARISON OF STABILIZATION OF NICKEL BEARING SLUDGE USING LIME AND SOLIDIFICATION USING LIME-FLY ASH

Miss Kanjana Tuantet

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environment Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-334-406-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบการทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิลด้วยปูนขาวและการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาวผสมเถ้าลอยลิกไนต์
โดย	นางสาว กาญจนา ต่วนเทศ
ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สุรี ขาวเธียร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

.....กรรมการ
(อาจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระ เกรอต)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กาญจนา ต่วนเทศ : การเปรียบเทียบการทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิลด้วยปูนขาวและการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาวผสมเถ้าลอยลิกไนต์ (COMPARISON OF STABILIZATION OF NICKEL BEARING SLUDGE USING LIME AND SOLIDIFICATION USING LIME-FLY ASH) อ.ที่ปรึกษา : รศ. ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ , 110 หน้า.
ISBN 974-334-406-3

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อเปรียบเทียบการทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิลจากการชุบโลหะที่ได้จากโรงงานผลิตแฟ้มโดยใช้ปูนขาวเป็นวัสดุประสาน และการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนขาวผสมเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุประสาน ทำการทดลองหาอัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนที่เหมาะสมในการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อน โดยพิจารณาจากสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างนั่นคือกำลังรับแรงอัด และประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายโลหะนิกเกิล โดยในการทำเสถียรได้ทำการแปรอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปูนขาวต่อตะกอนที่ 0.25 0.35 0.50 0.75 และ1.00 รวมทั้งแปรอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 0.50 0.60 และ0.75 ส่วนในการทำให้เป็นก้อนทำการแปรอัตราส่วนวัสดุประสานนั่นคือปูนขาวผสมเถ้าลอยลิกไนต์ต่อตะกอนที่ 0.25 0.50 0.75 1.00 และ1.25 รวมทั้งแปรอัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยที่ 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 และ1.50

ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำเสถียรได้แก่อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอนเป็น 0.50 โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.75 ส่วนอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำให้เป็นก้อนคือที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน 0.75 และอัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยเป็น 1.00 เมื่อแปรค่าระยะเวลาบ่มพบว่า ระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้นไม่ช่วยให้สมบัติทางกายภาพรวมถึงการลดการชะละลายโลหะหนักเพิ่มขึ้น เมื่อแปรอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมในการทำให้เป็นก้อนเป็น 0.60

จากการทดสอบการชะละลายระยะยาวพบว่าโลหะหนักนิกเกิลถูกชะละลายออกมามากในช่วง 20 วันแรกและลดลงต่ำกว่า 1 มก./ล. จนตลอดการทดลอง ประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายโลหะนิกเกิลในการทำเสถียรและทำให้เป็นก้อนเป็น 97.04 % และ 63.46 % ตามลำดับ ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการทำเสถียรด้วยปูนขาว การทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาวผสมเถ้าลอยลิกไนต์ และหากใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุประสานในการทำให้เป็นก้อน เป็น 2,500 1,903 และ 883 บาทต่อตันตะกอนตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต กาญจนา ต่วนเทศ

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2542

4070208921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD:

STABILIZATION / SOLIDIFICATION / LIME / FLY ASH / NICKEL BARRING SLUDGE

KANJANA TUANTET : COMPARISON OF STABILIZATION OF NICKEL NICKEL BEARING SLUDGE USING LIME AND SOLIDIFICATION USING LIME-FLY ASH. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. PETCHPORN CHAWAKITCHAREON, Ph.D. 110 pp. ISBN 974-334-406-3

This research was investigated the comparison between stabilization and solidification of heavy metal sludge from metal coating industry by using lime for stabilization and lime with lignite fly ash as binder for solidification. The experiments were determined the optimum binder ratio for both stabilization and solidification by consider the physical properties of the test specimens, compressive strength, and leachability efficiency. The experiments were tested by varying the lime/sludge ratio and water/binder ratio in stabilization test and varying the binder/sludge ratio and lime/fly ash ratio in solidification test. Curing time along the test was 7 days and water/binder ratio of all specimems for solidification was 0.50. For stabilization, lime/sludge ratio were 0.25, 0.35, 0.50, 0.75, and 1.00. And water/binder ratio were 0.40, 0.50, 0.60, and 0.75. The result indicated that the optimum lime/sludge ratio was 0.50 and water/binder ratio was 0.75. Regarding the solidification, binder/sludge ratio were 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, and 1.25 and lime/fly ash ratio were 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, and 1.50. As a result, the optimum binder/sludge ratio was 0.75 and the optimum lime/fly ash ratio was 1.00. The optimum water/binder for solidification was 0.60. Almost all of the specimens had shown to give lower physical properties than that accepted by the solidified waste standard promulgated by the Ministry of Industry in Thailand. For long-term leachability test, the nickel concentration in leachate was decreased rapidly during the range twenty days and then continues became lower than 1.0 mg/l until the end. The comparison of the efficiencies on leachability reduction of nickel between the stabilization process and the solidification process was found to be 97.04 % and 63.46 % respectively. Cost estimation (only for chemical) of the aforementioned binder using lime stabilization process, lime solidification process and if use cement as binder in solidification process were 2,500 Baht, 1,903 Baht, and 883 Baht per ton of heavy metal sludge respectively.

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2542

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ ที่กรุณาแนะนำให้คำปรึกษาจนการวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่ให้ความอนุเคราะห์ ตลอดจนถ่ายทอดความรู้ทางวิชาการต่างๆ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ฝ่ายสำรวจของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่อนุเคราะห์เถ้าลอยลิกไนต์ และโรงงานเคลือบแฟ้ม นิคมอุตสาหกรรมนวนคร ที่อนุเคราะห์ตะกอนที่มีนิกเกิล

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และมูลนิธิชิน โสภณพนิชที่ให้ทุนอุดหนุนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ บี พี่ท้วง ล่า แป๊ป เบก เนี้ยว ทิพย์ เอ จิม ปอม พี่อัต และเพื่อนๆทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจแก่ผู้วิจัยอย่างสม่ำเสมอ

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณบิดา มารดา ที่ได้ให้คำสั่งสอน กำลังใจ และการสนับสนุนด้านการเงินและสนับสนุนผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญตาราง..... ฌ
สารบัญรูป..... ฎ
บทที่ 1 บทนำ..... 1
บทที่ 2 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย
2.1 วัตถุประสงค์..... 2
2.2 ขอบเขตการวิจัย..... 2
บทที่ 3 ทบทวนเอกสาร
3.1 นิกเกิล..... 3
3.2 การทำลายฤทธิ์ตะกอนของเสีย..... 6
3.3 การทำให้แข็งตัวเป็นก้อนด้วยปูนขาวและวัสดุปอซโซลาน..... 9
3.4 ปูนขาว..... 11
3.5 เถ้าลอยลิกไนต์..... 11
3.6 ตะกอนที่มีนิกเกิล..... 13
3.7 การตรวจสอบคุณสมบัติของของเสียที่ผ่านการทำลายฤทธิ์โดยการ
ทำให้เป็นก้อนแข็ง..... 15
3.8 เกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน..... 17
3.9 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย..... 23
บทที่ 4 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย
4.1การเตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย..... 31
4.2การดำเนินการทดลอง
การทดลองขั้นต้น วิเคราะห์ส่วนประกอบของตะกอน..... 32
การทดลองที่ 1 วิเคราะห์หาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิล... 32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

การทดลองที่ 2 ศึกษาอัตราส่วนของวัสดุประสานที่เหมาะสมของการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยปูนขาวและเถ้าลอยลิกไนต์..... 34
การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในการทำให้เป็นก้อนแข็ง... 36
การทดลองที่ 4 ทดสอบการชะละลายในระยะยาว..... 37
การทดลองที่ 5 ประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการกำจัดตะกอนที่มีนิกเกิล..... 37
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล
5.1 ลักษณะสมบัติของตะกอนที่มีนิกเกิล..... 44
5.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนปูนขาวที่เหมาะสมในการทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิล..... 45
5.3 ผลการศึกษาอัตราส่วนของวัสดุประสานในการทำให้เป็นก้อนตะกอนที่มีนิกเกิล.... 52
5.4 ผลการศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในการทำให้เป็นก้อนตะกอนที่มีนิกเกิล. 58
5.5 ผลของระยะเวลาบ่มต่ออัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด..... 60
5.6 เปรียบเทียบผลการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนตะกอนที่มีนิกเกิล..... 63
5.7 ผลการทดสอบการชะละลายในระยะยาว..... 67
5.8 ประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของนิกเกิล..... 69
5.9 ผลการประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการบำบัดตะกอนที่มีนิกเกิล..... 69
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง..... 71
บทที่ 7 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม..... 72
รายการอ้างอิง..... 73
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. ข้อมูลลักษณะสมบัติของตะกอนที่มีนิกเกิล..... 76
ภาคผนวก ข. ข้อมูลผลการทดลองการทำเสถียรและทำให้เป็นก้อนตะกอนที่มีนิกเกิล... 80
ภาคผนวก ค. ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพในการทำให้โลหะหนักคงตัว..... 101
ภาคผนวก ง. รายการคำนวณปริมาตรที่เพิ่มขึ้น..... 105
ภาคผนวก จ. เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัด..... 107
ประวัติผู้เขียน..... 110

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ..... 4
3.2 กระบวนการกำจัดของเสียที่เป็นอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อน..... 8
3.3 แสดงมาตรฐาน ASTM C618-85 ซึ่งเกี่ยวกับสารวัสดุซีเมนต์ธรรมชาติ..... 12
3.4 คุณสมบัติทางเคมีในรูปร้อยละของออกไซด์ของเถ้าลอยลิกไนต์..... 13
3.5 ข้อดีและข้อเสียของการทดสอบการชะละลายแบบ Batch test และColumn test..... 17
3.6 เปรียบเทียบวิธีการสกัดสารและคุณสมบัติของของเสียที่ทำลายฤทธิ์แล้วตาม
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมปี พ.ศ. 2531 และ พ.ศ. 2535..... 19
3.7 เปรียบเทียบปริมาณสารซึ่งได้จากการสกัดด้วยวิธีการสกัดตามประกาศกระทรวง
อุตสาหกรรมปี พ.ศ. 2531 และ พ.ศ. 2535..... 20
3.8 แสดงช่วงของของเสียที่เป็นอันตรายและของเสียเฉื่อย..... 21
3.9 แสดงปริมาณโลหะหนักตามมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม..... 22
3.10 คุณลักษณะของน้ำใต้ดินบริเวณใกล้เคียงสถานที่ฝังกลบ..... 23
5.1 ปริมาณโลหะหนักในตะกอนที่มีนิกเกิล..... 44
5.2 ปริมาณโลหะหนักจากการทดสอบการชะละลาย..... 45
5.3 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรที่อัตราส่วนต่างๆ..... 46
5.4 ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรที่อัตราส่วนต่างๆ..... 47
5.5 ค่าพีเอชของตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรที่อัตราส่วนต่างๆ..... 48
5.6 ค่าความนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรที่อัตราส่วนต่างๆ..... 49
5.7 ปริมาณนิกเกิลในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรที่อัตราส่วนต่างๆ..... 50
5.8 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนที่อัตราส่วนต่างๆ..... 52
5.9 ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนที่อัตราส่วนต่างๆ..... 53
5.10 ค่าพีเอชของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนที่อัตราส่วนต่างๆ..... 55
5.11 ค่าความนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนที่อัตราส่วนต่างๆ..... 56
5.12 ปริมาณนิกเกิลในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนที่อัตราส่วนต่างๆ..... 56

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

5.13 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและผลการทดสอบการชะละลายที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ..... 58
5.14 เปรียบเทียบผลของระยะเวลาในการบ่มของอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด..... 61
5.15 เปรียบเทียบการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อน..... 63
5.16 ผลการทดสอบการชะละลายตัวอย่างที่ผ่านการชะละลายระยะยาว..... 69
5.17 ประมาณการค่าใช้จ่ายต่อตันตะกอน..... 70
ผ.1 ผลการวิเคราะห์หาความหนาแน่นรวม..... 78
ผ.2 ค่ากำลังรับแรงอัดตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียร..... 80
ผ.3 ค่าความหนาแน่นตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียร..... 82
ผ.4 ค่าพีเอชของน้ำชะละลายตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียร..... 83
ผ.5 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำชะละลายตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียร..... 84
ผ.6 ค่าปริมาณนิกเกิลของน้ำชะละลายตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียร..... 85
ผ.7 ค่ากำลังรับแรงอัดตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน..... 86
ผ.8 ค่าความหนาแน่นตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน..... 88
ผ.9 ค่าพีเอชของน้ำชะละลายตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน..... 90
ผ.10 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำชะละลายตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน..... 92
ผ.11 ค่าปริมาณนิกเกิลของน้ำชะละลายตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน..... 94
ผ.12 สมบัติทางกายภาพที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ..... 96
ผ.13 ผลการทดสอบการชะละลายที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ..... 96
ผ.14 สมบัติทางกายภาพที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ..... 97
ผ.15 ผลการทดสอบการชะละลายที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ..... 98
ผ.16 ผลการทดสอบการชะละลายระยะยาว..... 99
ผ.17 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดกับการศึกษาที่ผ่านมา..... 108
ผ.18 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกับของ GENCO 109

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

3.1 ความสามารถในการชะละลายโลหะไฮดรอกไซด์..... 5
3.2 ความสามารถในการชะละลายโลหะซัลไฟด์..... 5
3.3 แสดงไดอะแกรมของระบบบำบัด..... 14
4.1 แผนภาพการทดสอบการชะละลายในระยะยาว..... 37
4.2 ภาพเครื่องมือทดสอบการชะละลาย..... 38
4.3 ลักษณะของวัสดุประสานและตะกอนที่มีนิกเกิล..... 38
4.4 ลักษณะของแบบหล่อตัวอย่าง..... 39
4.5 ตัวอย่างของเสียที่ผ่านการทำให้เสถียรและทำให้เป็นก้อน..... 39
4.6 รูปแสดงของเครื่องมือทดสอบการชะละลาย..... 40
4.7 ขั้นตอนการทดสอบการชะละลายในระยะยาว..... 41
4.8 ขั้นตอนการหล่อตัวอย่างและทดสอบกำลังอัด..... 42
4.9 ขั้นตอนการทดสอบการชะละลายของนิกเกิล..... 43
5.1 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์และทรงกระบอก..... 47
5.2 ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์และทรงกระบอกที่ผ่านการทำเสถียร..... 48
5.3 ค่าพีเอชตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียร..... 49
5.4 เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรที่อัตราส่วนต่างๆ..... 50
5.5 ปริมาณนิกเกิลในน้ำสกัดของตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรที่อัตราส่วนต่างๆ..... 51
5.6 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์และทรงกระบอกที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน..... 54
5.7 ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์และทรงกระบอกที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน..... 54
5.8 ค่าพีเอชของก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน..... 55
5.9 เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนที่อัตราส่วนต่างๆ..... 56
5.10 ปริมาณนิกเกิลในน้ำสกัดของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนที่อัตราส่วนต่างๆ..... 57
5.11 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ..... 59
5.12 เปรียบเทียบผลการทดสอบการชะละลายที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ..... 60
5.13 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ..... 61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.14 เปรียบเทียบผลการทดสอบการชะละลายที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ..... 62
5.15 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ..... 65
5.16 เปรียบเทียบผลการทดสอบการชะละลาย..... 66
5.17 ค่าพีเอชของการชะละลายระยะยาว..... 67
5.18 ค่าความนำไฟฟ้าของการชะละลายระยะยาว..... 68
5.19 ปริมาณนิกเกิลของการชะละลายระยะยาว..... 68
ผ.1 การกระจายขนาดคละของตะกอนที่มีนิกเกิล..... 77
ผ.2 ผลการทดสอบ EDX ของตะกอนที่มีนิกเกิล..... 79

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังก้าวไปสู่ความเป็นประเทศอุตสาหกรรม มีการพัฒนาและขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็วทำให้มีโรงงานอุตสาหกรรมเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งนอกจากผลผลิตที่ได้แล้วส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่งก็คือของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต ซึ่งอาจก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้หากไม่มีการกำจัดที่เหมาะสม ปีพ.ศ.2512 กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้ออกเป็นกฎหมายให้มีการบำบัดน้ำเสียเพื่อลดความเข้มข้นของสิ่งสกปรกในน้ำจนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดขึ้นก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ น้ำเสียส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการผลิตดังนั้นองค์ประกอบของน้ำเสียจึงขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรม ซึ่งลักษณะสมบัติของน้ำเสียจะเป็นข้อพิจารณาอย่างหนึ่งในการเลือกระบบบำบัดน้ำเสียรูปแบบต่างๆ โรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภทเป็นแหล่งกำเนิดน้ำเสียที่ประกอบด้วยโลหะหนัก ซึ่งถ้าปล่อยให้แพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตโดยตรงหรือสะสมในร่างกายทำให้เกิดโรคต่างๆได้ จึงต้องมีการกำจัดหรือทำลายฤทธิ์ก่อน ซึ่งวิธีหนึ่งที่นิยมใช้แยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียคือการตกตะกอน ซึ่งสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงก็คือการกำจัดกากตะกอนที่เกิดขึ้น เนื่องจากโลหะหนักในตะกอนเหล่านี้สามารถชะละลายออกมาปนเปื้อนสิ่งแวดล้อมได้อีก ในประเทศไทยมีการกำหนดให้ทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนักโดยจะเน้นไปที่โลหะหนักประเภทที่เป็นของเสียอันตราย เช่น แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว ปรอท เป็นต้น แต่ในบางประเทศมีการกำหนดให้ต้องมีการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนักทั้งที่จัดเป็นและไม่เป็นของเสียอันตราย โรงงานเคลือบแฟ้มเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่เป็นแหล่งกำเนิดของน้ำเสียที่มีโลหะหนักและใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีในการกำจัด ปัญหาที่ตามมาก็คือการกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้นในปัจจุบันทางโรงงานได้ส่งไปกำจัดที่ศูนย์กำจัดกากแสมดำ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมากในการกำจัดซึ่งถ้าทางโรงงานสามารถทำลายฤทธิ์ตะกอนได้ด้วยตัวเองก็จะสามารถลดค่าใช้จ่ายได้

การวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงการทำลายฤทธิ์ตะกอนที่มีนิกเกิลจากโรงงานเคลือบแฟ้ม ซึ่งใช้การเคลือบโลหะด้วยนิกเกิล ตะกอนที่เกิดขึ้นได้จากการตกตะกอนนิกเกิลในน้ำเสีย โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทำเสถียร (Stabilization) ตะกอนที่มีนิกเกิลโดยใช้ปูนขาว และส่วนที่สองเป็นการทำตะกอนที่มีนิกเกิลให้เป็นก้อนแข็ง (Solidification) โดยใช้ปูนขาวและเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุประสาน โดยหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของตะกอนและวัสดุประสาน ปัจจัยประกอบการพิจารณาได้แก่การชะละลาย ค่าความนำไฟฟ้า และค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการกำจัด ส่วนที่สองพิจารณาจาก กำลังรับแรงอัดความหนาแน่น รวมทั้งค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการกำจัด

บทที่ 2

วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย

2.1 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความสามารถในการทำเสถียรกากตะกอนที่มีนิกเกิลโดยใช้ปูนขาวเป็นวัสดุประสาน และการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนขาวและเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุประสาน
2. เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิล โดยการทดสอบค่าความสามารถในการถูกชะละลายโลหะนิกเกิล
3. เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำให้เป็นก้อนตะกอนที่มีนิกเกิล โดยการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด ความสามารถในการถูกชะละลาย และความหนาแน่น
4. ประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการทำเสถียรและทำให้เป็นก้อนตะกอนที่มีนิกเกิล

2.2 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิลโดยใช้ปูนขาวเป็นวัสดุประสาน เปรียบเทียบกับการทำให้เป็นก้อนตะกอนนิกเกิลโดยใช้วัสดุประสานคือปูนขาวและเถ้าลอยลิกไนต์ โดยใช้ตะกอนจากโรงงานเคลือบแฟ้มที่ตั้งอยู่ที่นิคมอุตสาหกรรมนวนครซึ่งได้จากการตกตะกอนนิกเกิลในน้ำเสียด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทำเสถียรและทำให้เป็นก้อนตะกอนที่มีนิกเกิล ได้แก่

1. อัตราส่วนผสมของปูนขาวต่อตะกอน และอัตราส่วนปริมาณน้ำที่ใช้
2. อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน และอัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยลิกไนต์ ในการทำให้เป็นก้อนโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.5
3. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมจากสัดส่วนที่เหมาะสมตามการทดลองที่ได้จากข้อ 2.
4. การพิจารณาวัสดุประสานที่ดีที่สุดจะพิจารณาจากกำลังรับแรงอัด การชะละลายและค่าใช้จ่ายในการบำบัด

บทที่ 3

ทบทวนเอกสาร

3.1 นิกเกิล

น้ำเสียที่มีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบเกิดได้จากหลายแหล่ง ที่สำคัญคือโรงงานอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดใหญ่ของนิกเกิลในน้ำเสีย โดยมักจะอยู่ในรูปสารประกอบที่ละลายน้ำที่มีความคงตัวสูงถ้าในน้ำเสียมีสารประกอบพวกแอมโมเนีย EDTA หรือ ไซยาไนด์ ความเข้มข้นของนิกเกิลจากแหล่งต่างๆดังตัวอย่างในตารางที่ 3.1

โลหะหนักหลายชนิดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในกิจการอุตสาหกรรมต่างๆ และจัดเป็นโลหะที่มีพิษได้แก่ แบริลเรียม (Be)โครเมียม (Cr) แคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) สังกะสี (Zn) เงิน (Ag) อาร์เซนิค (As) แอนติโมนี (Sb) เซเลเนียม (Se) แทลเลียม (Th) และปรอท (Hg) กากของเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรมที่มีการใช้โลหะหนักเหล่านี้มักจะมีโลหะหนักเจือปนซึ่งอาจเข้าข่ายเป็นของเสียที่เป็นอันตราย (Pojasek,1979)

Birge และ Black (1980) กล่าวว่า แม้ว่านิกเกิลดูเหมือนว่าจะมีความเป็นพิษต่อมนุษย์น้อยจึงไม่มีการกำหนดค่าในมาตรฐานน้ำดื่ม อย่างไรก็ตามก็มีการกำหนดค่านิกเกิลไว้เพื่อปกป้องสิ่งมีชีวิตในน้ำเช่น The International Joint Commission for Canada and the United State กำหนดปริมาณนิกเกิลใน the Great Lakes ไว้ที่ 25 µg/l มีรายงานว่าปลาสามารถมีชีวิตอยู่ในน้ำที่รับน้ำทิ้งจากเหมืองแร่และมีนิกเกิลอยู่ 13-18 µg/l อย่างไรก็ตามปริมาณ 30 µg/l ก็อาจทำให้การสืบพันธุ์ของปลาชนิด Daphnia ผิดปกติ และที่ความเข้มข้นต่ำกว่านี้ก็มีผลกระทบต่อไข่และตัวอ่อนของปลาชนิดนี้ ที่ความเข้มข้นของ $NiCl_2.6H_2O$ ในน้ำอ่อนทำให้ปลาทองตายได้ที่ 10 mg/l และที่ 8.1 mg/l ในน้ำก๊อกก็ทำให้ปลาชนิด Top minnow ตายอย่างรวดเร็ว

ESCAP (1982) กล่าวถึงความเป็นพิษของสารประกอบนิกเกิลของน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะต่อปลาโดยกล่าวว่านิกเกิลคลอไรด์ปริมาณ 4.5 mg/l as Ni ทดสอบกับปลาทองจะทำให้ปลาตายใน 200 ชม. และกล่าวว่า ปริมาณนิกเกิล 1-10 mg/l มีผลกระทบต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน และต่อระบบบำบัดน้ำเสีย และปริมาณความเข้มข้นของ นิกเกิล ทองแดง เหล็ก และไซยาไนด์ ที่สูงจะมีผลต่อระบบการผลิตแกสในระบบถังหมักตะกอนแบบไร้อากาศส่วน Vishwakarma และ Singh กล่าวว่านิกเกิลคาร์-บอนิล (Nickel carbonyl)ทำให้เกิดมะเร็งที่ปอด

ตารางที่ 3.1 ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ(Patterson,1985)

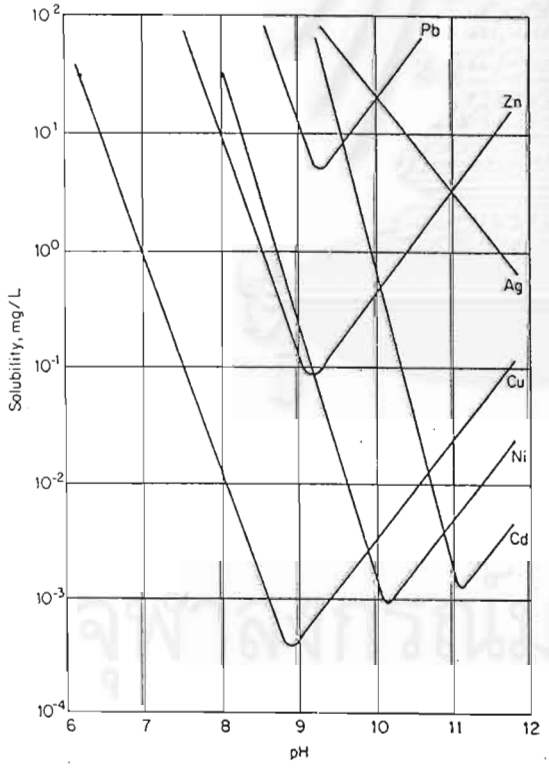
Source	Range of concentration (mg/l)	Average concentration (mg/l)
Plating plants		
Four plants	2-205	-
Five plants	5-58	24
Rinsewaters	2-900	-
Large plating plant		
Segregated flow	-	88
Combined flow	-	46
Large job shop	-	5.7
Plating of zinc castings	45-55	-
Plating of plastics	30-40	-
Manual barrel and rack	15-25	-
Nickel plate rinse	-	132
	-	134
Electroless copper plating	1-150	-
Tableware plating		
Silver-bearing waste	0-30	5
Acid waste	10-130	33
Metal finishing		
Mixed wastes	17-51	-
Acid wastes	12-48	-
Alkaline wastes	2-21	-
Small part fabrication	179-184	181
Steel pickling	0.2-400	-
Stainless steel pickling	-	250
Business machine manufacture		
Plating wastes	5-35	11
Pickling wastes	6-32	17
Other		
Boiler cleaning – acid wastes	80-400	-
- Alkaline wastes	1-10	-
Nickel sulfate manufacture	470-890	-
Paint and ink formulation	0-40	0.5

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

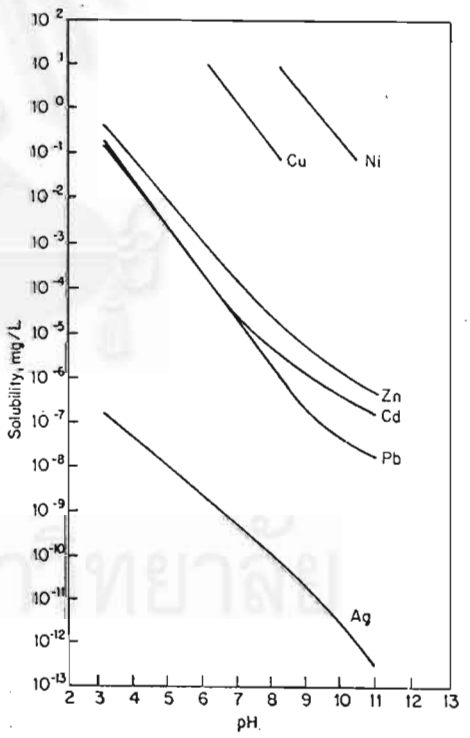
การบำบัดน้ำเสียที่มีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบโดยทั่วไปมีวิธีการดังต่อไปนี้

1. การตกตะกอนทางเคมี(Precipitation) เป็นวิธีการที่นิยมใช้กัน สามารถแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้หลายรูปเช่น ซัลไฟด์ ไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต ซิลิเกต หรือสารประกอบอินทรีย์พวก ซานเทต (Xanthate)
2. กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) สามารถนำกลับนิกเกิลมาใช้ได้ใหม่
3. วิธีอื่นๆ เช่น Evaporative Recovery Reverse Osmosis หรือ Electrodialysis

การแยกโลหะหนักออกโดยการตกตะกอนนั้นจะทำให้เกิดตะกอนโลหะหนักที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอช ซึ่งจะทำให้โลหะหนักชะละลายออกมาได้ ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะนำไปกำจัดโดยวิธีการฝังกลบเนื่องจากน้ำในของเสียและน้ำชะละลายอาจปนเปื้อนลงสู่ดินและน้ำใต้ดินได้โดยง่าย รูปที่ 3.1 และ รูปที่ 3.2 แสดงความสามารถในการชะละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ และโลหะซัลไฟด์ตามลำดับ (Chung, 1989)



รูปที่ 3.1 ความสามารถในการชะละลายโลหะไฮดรอกไซด์



รูปที่ 3.2 ความสามารถในการชะละลายโลหะซัลไฟด์

3.2 การทำลายฤทธิ์ตะกอนของเสีย

เพื่อให้ตะกอนของเสียอยู่ในสภาพที่คงตัวง่ายต่อการขนส่งและกำจัด วิธีที่มักจะใช้เพื่อทำลายฤทธิ์ตะกอนคือ กระบวนการทำให้เป็นก้อนและการทำให้เสถียร (Solidification and Stabilization) ซึ่งนิยามของกระบวนการดังกล่าวมีดังนี้

กระบวนการทำให้เป็นก้อนและการทำให้เสถียร จะใช้อธิบายร่วมกันถึงกระบวนการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพเพื่อสะดวกต่อการขนส่งเคลื่อนย้าย ลดพื้นที่ผิวที่ของเสียสามารถชะละลายออกมา หรือการจำกัดความสามารถในการละลาย หรือลดความเป็นพิษของสารที่เป็นพิษ โดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนหมายถึง กระบวนการที่มีการเติมวัสดุประสานลงไปในของเสียเพื่อทำให้เกิดเป็นของแข็ง ซึ่งอาจจะเกิดหรือไม่เกิดพันธะทางเคมีระหว่างของเสียและวัสดุประสานก็ได้ ส่วนกระบวนการทำให้เสถียรหมายถึง กระบวนการที่ของเสียถูกทำให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปทางเคมีที่คงตัวมากขึ้น และลดความเป็นพิษของกากของเสีย เพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นสารเฉื่อยมากขึ้น ซึ่งก็หมายรวมถึงการทำให้เป็นก้อนด้วย แต่จะหมายรวมเฉพาะการเกิดปฏิกิยาทางเคมีที่เปลี่ยนสารที่มีพิษไปอยู่ในรูปใหม่ที่คงตัว (จำกัดความสามารถในการละลายหรือลดความเป็นพิษ) ซึ่งลักษณะทางกายภาพอาจจะเปลี่ยนแปลงหรือไม่ก็ได้ โดยไม่รวมถึงกระบวนการทางชีวภาพ (Wiles,1989)

The U.S. Engineer's Waterways Experiment Station ได้จัดกระบวนการทำให้เป็นก้อนสำหรับ EPA โดยแบ่งเป็นวิธีการดังนี้

1. Silica และ Cement-based โดยทั่วไปใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และวัสดุปรุงแต่งเช่น เถ้าลอย (Fly ash) เพื่อฟอร์มของเสียให้มีลักษณะที่เป็นก้อนแข็งเหมือนหิน วิธีนี้ได้พัฒนาจนได้รับความสำเร็จในการทำลายฤทธิ์ของตะกอนต่างๆจากกระบวนการตกตะกอนของโลหะหนัก โดยพีเอชที่สูงของส่วนผสมซีเมนต์จะทำให้โลหะหนักถูกยึดไว้โดยก่อตัวเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายหรือเป็นเกลือคาร์บอเนตและติดอยู่ในซีเมนต์
2. Lime-based วิธีนี้จะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาของปูนขาวกับวัสดุที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบและน้ำเพื่อจะทำให้เกิดวัสดุที่มีความแข็งที่รู้จักกันว่าปอซโซลานคอนกรีต วัสดุที่เติมลงไปคือเถ้าลอย และฝุ่นเตาเผาซีเมนต์ (Cement-kiln dust) วิธีนี้มีลักษณะของปัญหาที่เกี่ยวกับการบ่มและการก่อตัวคล้ายกับวิธีแรก และเหมาะสมกับของเสียอนินทรีย์มากกว่าของเสียอินทรีย์ เพราะการย่อยของสารอินทรีย์หลังจากการบ่มจะเพิ่มค่าความซึมน้ำและลดกำลัง วิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่แพงและวัสดุหาได้ง่าย
3. Thermoplastic-based วิธีนี้จะผสมสารพวก บิทูเมน พาราฟิน หรือโพลีเอทีลีน กับของเสียแห้งที่อุณหภูมิมากกว่า 100°C ของผสมจะแข็งตัวระหว่างที่ทำให้เย็นลง และมักจะมีการบรรจุหรือปิดเคลือบผิวก่อนที่จะนำไปกำจัด วิธีการนี้ต้องการเครื่องมือหรืออุปกรณ์เฉพาะซึ่งมีราคาแพงของเสียที่เป็นสารอินทรีย์เคมีที่มีลักษณะคล้าย ตัวทำละลาย (solvent) จะไม่

สามารถใช้วิธีนี้ได้ หรือของเสียที่มีส่วนประกอบของเกลือที่เป็นตัวออกซิไดซ์ซึ่งอย่างแก่ เช่น ไนเตรต คลอเรต และเปอร์คลอเรต แต่วิธีนี้ให้ผลผลิตที่ทนและอัตราการหลุดของของเสียโดยทั่วไปต่ำกว่าวิธีอื่นๆ

4. Organic polymer-based วิธีนี้จะผสมสารพวกโมโนเมอร์ เข้ากับของเสียและเติมสารแคตาลิสต์ เพื่อทำให้เกิดสารโพลีเมอร์เช่นเดียวกับวิธี thermoplastic สารโพลีเมอร์มักไม่ตรึงตัวทางเคมีกับของเหลววิธีที่มักใช้คือวิธี ยูเรีย-ฟอร์มาดีไฮด์ (Urea-formadehyde)ที่พัฒนามาใช้โพลีเอสเตอร์(polyester) และโพลีไวนิลเรซิน (polyvinyl resins)
5. Encapsulation techniques เป็นวิธีการที่มักใช้อธิบายกระบวนการที่ของเสียถูกปิดเคลือบโดยวัสดุประสาน บริษัท TRW ได้พัฒนากระบวนการโดยใช้ โพลีบิวทาดีน (polybutadiene) จำนวนเล็กน้อยเพื่อทำให้ของเสียเป็นก้อนลูกบาศก์ และหลอมโพลีเอทีลีนความหนาแน่นสูง (hight-density polyethylene) เคลือบที่ผิวลูกบาศก์เป็นปลอกซึ่งป้องกันน้ำและสิ่งต่างๆที่จะมารบกวนกัดชะ และสามารถรับแรงกดหนักๆได้ด้วย แต่วิธีนี้ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง และมักใช้กับของเสียที่มีจำนวนน้อย และมีความเป็นพิษสูงมากเท่านั้น

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของกระบวนการทำให้เป็นก้อนประเภทต่างๆ 7 วิธี การเลือกวิธีการบำบัดของเสียดังกล่าว ควรเลือกให้เหมาะสมกับของเสียประเภทต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของของเสียและลักษณะสมบัติเฉพาะของของเสียนั้น สำหรับตะกอนโลหะหนักนั้นสามารถกำจัดได้หลายวิธีเช่น Cement-based, Lime-based, Thermoplastic, Surface Encapsulation, และGlassification

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 กระบวนการกำจัดของเสียที่เป็นอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อน

กระบวนการทำให้เป็นก้อน (Solidification)	รายละเอียด
1. Cement Based	ของเสียจะถูกผสมลงในซีเมนต์ น้ำ และส่วนผสมอื่นๆ แล้วปล่อยให้แห้งจนแข็งตัวเป็นก้อนซีเมนต์
2. Pozzolanic (Lime Based)	ของเสียจะถูกผสมกับปูนขาว และวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นปอซโซ-ลาน เช่น เถ้าลอย ผงซีเมนต์ที่เตาเผา เป็นต้น ซึ่งมีคุณสมบัติแข็งตัวได้เมื่อผสมน้ำแล้วปล่อยให้แข็งตัว
3.Thermoplastic	นำของเสียมาทำให้แห้ง ให้ความร้อนแล้วผสมให้กระจายตัวอยู่ในพลาสติกที่ร้อน เช่น บิทูเมน พาราฟิน หรือโพลีเอทีลีน ปล่อยให้ส่วนผสมเย็นตัวลงและแข็งตัว
4. Organic Polymer	ของเสียในขั้นแรกจะถูกผสมกับสารไพลีเมอร์ (Gelling Agents หรือ Urea Formaldehyde) จะเติมสารแคตาลิสต์ผสมให้เข้ากันก่อนที่สารโพลีเมอร์จะแข็งตัว
5. Surface Encapsulation	ของเสียจะถูกอัดให้เกาะตัวแน่นแล้วเคลือบผิวนอกของของเสียที่ถูกบดอัดด้วยสารเฉื่อยเช่น โพลีเอทีลีน หรือ เรซินอินทรีย์
6. Self-Cementing	สารที่มีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์เช่น แคลเซียมซัลเฟต และแคลเซียมซัลไฟท์ ที่เกิดจากการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรม ได้แก่ การกำจัดแกสซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สามารถนำมาใช้ผสมกับตะกอนของเสียเพื่อหล่อให้แข็งตัวได้ โดยวัสดุที่ได้จะมีคุณ-สมบัติที่ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายและมีความสามารถให้น้ำซึมได้น้อย
7. Glassification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics	สารที่เป็นอันตรายมากเช่น กากสารกัมมันตภาพรังสี สามารถจะนำมาผสมกับทรายแล้วหลอมให้กลายเป็นส่วนผสมของแก้วหรือแร่ซิลิเกตสังเคราะห์ (Synthetic Silicate Mineral) เพื่อป้องกันไม่ให้สารอันตรายนี้ถูกชะละลายด้วยน้ำ สามารถนำไปกำจัดต่อไปโดยไม่ต้องมีกระบวนการหุ้มหรือบรรจุเป็นครั้งที่สอง

3.3 การทำให้แข็งตัวเป็นก้อนด้วยปูนขาวและวัสดุปอซโซลาน

โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานรวมไปถึงวัสดุชนิดซิลิเกตและอลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate)ซึ่งไม่สามารถแสดงกิริยาคล้ายซีเมนต์ได้ด้วยตัวเอง แต่เมื่อรวมตัวกับปูนขาวหรือซีเมนต์และน้ำที่อุณหภูมิปกติจะฟอร์มตัวเป็นสารประกอบคล้ายซีเมนต์ซึ่งเรียกว่า ปอซโซลานิคคอนกรีต (Pozzolanic concrete) วัสดุปอซโซลานจะประกอบด้วยพวกซิลิเกตซึ่งต่างจากวัสดุ lime-based โดยทั่วไป ซึ่งการทดสอบปฏิกิริยาปอซโซลานิค กับปูนขาวและกำลังของวัสดุผสมของปูนขาว/ปอซโซลาน มักใช้ปูนสุกต่อปอซโซลานในอัตราส่วน 1:2 ถึง 1:6 โดยน้ำหนัก ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานิคมักเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาของซีเมนต์ (Means และคณะ, 1995)

Wiles (1989) กล่าวว่า กระบวนการปอซโซลานิคจะใช้ noncrystalline sillica ละเอียดในเถ้าลอยและแคลเซียมในปูนขาวเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาคล้ายซีเมนต์ที่มีกำลังไม่มากนัก น้ำในของผสมจะถูกกำจัดระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชัน ลักษณะบางประการของกระบวนการปอซโซลานิคของปูนขาว/เถ้าลอยได้แก่

- มีการผสมของเสียกับเถ้าลอย (หรือสารปอซโซลานชนิดอื่น) อาจมีการเติมน้ำเพื่อให้ได้ของผสมที่มีลักษณะเหนียวข้น
- เติมปูนขาวลงไปผสม โดยปกติจะใช้ปูนขาว 20-30% เพื่อให้ได้กำลังที่ต้องการ แต่ค่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามแต่ชนิดของสารปอซโซลานที่ใช้
- ความแข็งแรงของพันธะที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับการเกิดของแคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate) และอลูมิเนตไฮเดรต (Aluminate hydrate)
- ในกระบวนการจะมีความเป็นด่างสูง ซึ่งสำหรับของเสียบางชนิดอาจเกิดแกสหรือน้ำชะที่ไม่พึงปราถนาได้
- สารเช่นโซเดียมโบเรต (Sodium borate) คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) และ โปแตสเซียม-ไบโครเมต (Potassium bichromate) จะไปรบกวนปฏิกิริยาทางเคมีส่วนไขมันและน้ำมันก็จะรบกวนปฏิกิริยาทางกายภาพของการจับของเสียได้
- ถ้าไม่มีการปรุงแต่งพิเศษหรือการบำบัดของเสียขั้นต้น ของเสียอันตรายที่บำบัดโดยวิธีนี้ยังคงจัดเป็นของเสียอันตราย
- ระบบนี้ค่อนข้างถูก
- ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ทนทานหรือควบคุมการชะละลายของเสียได้ดีเท่ากระบวนการที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Means และคณะ (1995) กล่าวว่าปัญหาโดยทั่วไปของปฏิกิริยาปูนขาว/ปอซโซลาน รวมถึงการยับยั้งปฏิกิริยาการก่อตัวซึ่งป้องกันการจับยึดวัสดุ โดยการจับยึดในปฏิกิริยาปอซโซลานจะขึ้นอยู่กับการเกิดของแคลเซียมซิลิเกตและอลูมิเนตไฮเดรต ดังนั้นสารยับยั้งส่วนใหญ่ก็จะคล้ายกับกระบวนการ cement-based เช่นไขมัน แอลกอฮอล์ ไกคอล (glycols) อลิฟาติก(aliphatic) อโรเมติค(aromatic) และสาร

คลอรีนอินทรีย์(chlorinated organic) ซึ่งไปลดความคงทนของผลิตภัณฑ์ สารประกอบอนินทรีย์เช่น กรดบอริค ฟอสเฟต ไอโอเดต(iodate) ซัลเฟต และซัลไฟด์ จะไปยับยั้งหรือป้องกันการก่อตัว เกลือของโลหะบางชนิดเช่น แมงกานีส ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และดีบุก จะเพิ่มระยะเวลาก่อตัวและลดกำลัง

Poon (1983) กล่าวว่าวัสดุที่เติมลงไปเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิคในกระบวนการ lime-based มีทั้งที่เป็นวัสดุธรรมชาติและวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น รวมทั้งฝุ่นภูเขาไฟและเถ้าจากการเผาดินเหนียวเปลือกหอย เยื่อไม้มอร์ตา (mortar) และเถ้าลอยจากการผลิตเชื้อเพลิง แต่ที่เป็นที่นิยมมากที่สุดคือเถ้าลอยและฝุ่นจากเตาเผาซีเมนต์ ซึ่งตัวมันเองก็เป็นของเสียดังนั้นการใช้วัสดุเหล่านี้ในการกำจัดของเสียจึงเป็นประโยชน์เพราะได้กำจัดของเสียร่วมกัน สำหรับปฏิกิริยาของปูนขาว/ปอซโซลานในทางทฤษฎีกล่าวว่าวัสดุปอซโซลานเกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกับสารประกอบซีโอไลติก (Zeolitic) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนเบสไอออนที่เป็นองค์ประกอบซึ่งความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะเป็นตัวช่วยให้เกิดการรวมตัวกันของปูนขาวและไอออนของโลหะที่เป็นพิษในกระบวนการตรึงของเสีย (Fixation process) ในอีกทางหนึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานิคเกิดจากการก่อตัวของสารประกอบไฮเดรตใหม่ซึ่งเรียกว่าไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Tricalcium silicate hydrate)เช่นเดียวกับการเกิดไฮเดรชันในปูนซีเมนต์ และโดยการทำแบบจำลองของปฏิกิริยาที่กล่าวมานี้ ซึ่งประกอบด้วยไอออนของ Ca^{2+}, Na^{+}, K^{+}, SiO_4^{2+} และAlO_2^{2-} พบว่ากระบวนการนี้ถูกสนับสนุนโดย อลูมินาและซิลิกาในเถ้าลอยและฝุ่นเตาเผาซึ่งทำปฏิกิริยากับปูนขาวและปฏิกิริยาอื่นๆด้วยในเวลาเดียวกัน ผลผลิตจากปฏิกิริยาอื่นๆประกอบด้วยแคลเซียมอลูมิเนตและแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตกับปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ดำเนินไปเป็นผลให้เกิดส่วนผสมของเจลซึ่งจะล้อมรอบโครงสร้างอื่นๆทั้งที่มีลักษณะเป็นผลึกและกึ่งผลึก (Crystalline and Semi-crystalline) ผลโดยรวมที่เกิดขึ้นคืออนุภาคของเสียจะถูกปิดกั้นไว้ในเมตริกของเจลขนาดใหญ่

Sersale อ้างถึงใน Swamy (1986) กล่าวว่าปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดจากความสามารถในการละลายของโครงสร้างที่คล้ายแร่เฟลสปาร์ (feldspars)ในปูนขาว ซึ่งซิลิกาที่มีโครงสร้างรูปทรงสี่หน้า (tetrahedral silica) ยึดเกาะอยู่ภายในวัสดุโดยมีออกไซด์ไอออนที่ยอดของโครงสร้าง ซึ่งออกไซด์ไอออนจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไฮดรอกซิล คือ $O^{2-} + H_2O \rightarrow 2(OH)^-$ ซึ่งทำให้ระยะห่างของพันธะลดลงและผ่านเข้าไปในสารละลายปูนขาว และทำปฏิกิริยากับแคลเซียมเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต-ไฮเดรต ซิลิกาที่เกิดเป็นสารประกอบแล้วหนึ่งหน่วยจะช่วยทำให้หน่วยอื่นๆอยู่ระหว่างผิวหน้าของวัสดุและสารละลายใกล้กันมากขึ้นทำให้กลไกดำเนินต่อไป ซึ่งกลไกนี้จะเกิดได้ง่ายกับสารปอซโซลานที่เกิดความร้อนเมื่อเป็นด่างเนื่องจากพันธะของโครงสร้างซิลิกาอ่อนแอกว่า

Swamy (1986) กล่าวว่าผลของปฏิกิริยาปูนขาว/ปอซโซลาน มีดังนี้

- Calcium silicate hydrate ในรูป C-S-H
- Calcium aluminate hydrate ในรูป C_4AH_x ซึ่ง x แปรจาก 9-13
- Hydrated gehlenite -C_2ASH_8

- Calcium carboaluminate -$C_3A.CaCO_3H_{12}$

- Ettringite aluminate monosulphate -$C_3A.CaSO_4.12H_2O$

การปรากฏของผลผลิตเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับสารประกอบทางเคมีของปอซโซลานและปูนขาวที่ใช้ ระยะเวลาของปฏิกิริยาไฮเดรชัน และสภาวะบรรยากาศในขณะเกิดไฮเดรชัน โดยทั่วไปผลผลิตทั้งหมดมักไม่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน

3.4 ปูนขาว

ปูนขาวเป็นวัสดุที่ได้จากการเผาหินปูน (Limestone) จนกระทั่งคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แยกตัวออกมา ปูนขาวที่พบทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทดังนี้

-High calcium quick lime	CaO
-Dolomitic quick lime	CaO + MgO
-Hydrated high calcium lime	$Ca(OH)_2$
-Normal hydrated dolomitic lime	$Ca(OH)_2$ + MgO
-Pressure hydrated dolometic lime	$Ca(OH)_2$ + $Mg(OH)_2$

ประเภทของปูนขาวต่างๆขึ้นกับส่วนประกอบของหินปูนและขั้นตอนการเผา กล่าวคือหินปูนที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ภายหลังเผาก็จะได้เป็น ปูนขาวแคลเซียมสูง (High calcium lime) แต่ถ้าหินปูนบางแหล่งมีแมกเนเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ผสมอยู่ด้วยปูนขาวที่ได้จะเป็นพวก Dolomitic lime ถ้าหินปูนถูกเผาอย่างสมบูรณ์ปูนขาวที่ได้ก็จะเป็นพวก ปูนขาวดิบ (Quick lime) กล่าวคืออยู่ในรูปออกไซด์ แต่ถ้าได้รับความชื้นองค์ประกอบออกไซด์ซึ่งจะเรียกว่าปูนขาวสุก (Hydrated lime) ปูนขาวดิบตามท้องตลาดมีส่วนประกอบแคลเซียมออกไซด์ ประมาณร้อยละ 61 และคิดเป็นแคลเซียม-ไฮดรอกไซด์ประมาณร้อยละ 24 ส่วนปูนสุกตามท้องตลาดมีส่วนประกอบของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ประมาณร้อยละ 81.6

3.5 เถ้าลอยลิกไนต์

เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินในโรงงานผลิตไฟฟ้า ได้เถ้าลอยประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของถ่านหิน เถ้าลอยลิกไนต์ (Lignite Fly Ash) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ ซึ่งเถ้าจากการเผาไหม้สามารถแบ่งได้เป็น 3 พวก

1. เถ้าก้นเตา มีขนาดใหญ่และตกลงก้นเตา
2. เถ้าตะกรัน เป็นเถ้าที่หลอมละลายเกาะเป็นตะกรันที่ผนังของเตาเผาหรือหม้อน้ำ
3. เถ้าลอย เป็นเถ้าที่มีเม็ดละเอียดโดยที่เถ้านี้จะลอยไปพร้อมกับแกสร้อนจากปล่องแต่จะถูกจับโดยเครื่องจับตกตะกอนเถ้า หลังจากนั้นจะถูกนำเข้าไปเก็บในถังเก็บ

เถ้าลอยมีขนาดเล็กมากคือมีขนาดตั้งแต่ 0.03 มิลลิเมตร ถึง 0.42 มิลลิเมตร รูปร่างมักมีลักษณะเป็นเม็ดค่อนข้างกลม มีความถ่วงจำเพาะ 2.23 ถึง 2.48 มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานโดยมีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ SiO_2, AlO_3, Fe_2O_3

ตามมาตรฐาน ASTM C618-85 ได้แบ่งประเภทของเถ้าลอยตามปริมาณของ SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 ดังนี้

- เถ้าลอย class C มีส่วนประกอบของ SiO_2, AlO_3, Fe_2O_3 รวมกันไม่น้อยกว่า 50%
- เถ้าลอย class F มีส่วนประกอบของ SiO_2, AlO_3, Fe_2O_3 รวมกันไม่น้อยกว่า 70%

นอกจากนี้เถ้าลอยทั้ง 2 ชนิดยังมีความแตกต่างกันในเรื่องวัตถุดิบที่ใช้ในการเผาดังนี้

- เถ้าลอย class C ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์หรือถ่านหินประเภทซับบิทูมินัส
- เถ้าลอย class F ได้จากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์หรือถ่านหินบิทูมินัส

อนึ่งเถ้าลอย class F จะมีปริมาณคาร์บอนหลงเหลืออยู่มาก และอาจมีปริมาณสารอินทรีย์อยู่ด้วย ในขณะที่เถ้าลอย class C จะมีปริมาณสารทั้งสองเหลืออยู่น้อยกว่า แต่จะมีปริมาณ CaO ในปริมาณที่มากกว่า 10% จึงจัดอยู่ในประเภทสารปอซโซลาน และตัวประสานทั้งนี้เพราะเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับซิลิกาและอลูมินาในเถ้าลอยนั้นเองได้ ส่วนเถ้าลอย class F เป็นสารปอซโซลานแต่เพียงอย่างเดียว ตารางที่ 3.3 แสดงมาตรฐาน ASTM C 618-85 ซึ่งเกี่ยวกับสารวัสดุซีเมนต์ธรรมชาติ

ตารางที่ 3.4 แสดงคุณสมบัติทางเคมีในรูปร้อยละของออกไซด์ของเถ้าลอยลิกไนต์ ซึ่งพบว่าเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าเฉลี่ยของ SiO_4 42.48 % Al_2O_3 23.10 % และ Fe_2O_3 14.14 %

ตารางที่ 3.3 แสดงมาตรฐาน ASTM C618-85 ซึ่งเกี่ยวกับสารวัสดุซีเมนต์ธรรมชาติ

		ชั้นของวัสดุผสม		
		Class N*	Class F	Class C
$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$	%น้อยที่สุด	70	70	50
SO_3	%มากที่สุด	4	5	5
Pozzolan Index	%น้อยที่สุด	75	75	75
ปริมาณน้ำที่ต้องการ	%มากที่สุด	115	105	105

หมายเหตุ * หมายถึงสารปอซโซลานดิบในธรรมชาติหรือที่ผ่านกระบวนการก่อน เช่น ผงหิน เถ้าจากภูเขาไฟ หรือดินเหนียว เป็นต้น

ตารางที่ 3.4 แสดงคุณสมบัติทางเคมีในรูปร้อยละของออกไซด์ของเถ้าลอยลิกไนต์

Month	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	Acid	Base	Slagging Index	Fouling Index
JAN	46.96	26.40	12.04	7.79	2.08	1.83	0.64	2.25	73.36	24.38	1.05	0.212
FEB	50.70	24.54	12.11	0.87	1.01	1.97	0.34	2.26	75.24	22.30	0.99	0.106
MAR	44.40	22.61	14.27	9.91	1.49	2.01	0.52	3.80	67.01	28.20	1.49	0.220
APR	42.87	22.88	16.12	9.80	1.72	2.06	0.50	3.54	65.75	30.20	2.01	0.227
MAY	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
JUN	40.35	22.94	14.34	12.4	2.63	2.47	1.07	3.52	63.29	22.92	1.95	0.557
JUL	40.63	23.70	16.20	11.1	2.60	2.34	0.83	3.60	64.33	33.07	1.90	0.415
AUG	39.56	20.47	14.65	15.0	3.09	2.14	1.14	3.94	60.03	36.03	2.16	0.685
SEP	38.22	21.23	15.15	14.2	3.16	2.13	1.37	4.85	59.45	36.05	2.25	0.828
OCT	37.77	22.30	14.38	14.3	3.27	2.42	1.09	4.43	60.07	35.50	1.51	0.645
NOV	41.48	22.04	12.61	13.5	3.05	2.32	0.92	3.80	63.84	32.36	1.87	0.464
DEC	43.98	24.95	13.71	9.37	2.34	2.66	0.73	2.26	68.93	28.81	1.79	0.305
AVG	42.48	23.10	14.14	11.3	2.40	2.21	0.83	3.48	65.57	30.89	1.72	0.424

ที่มา : สำนักงานวิจัยและพัฒนาวิชาการ การไฟฟ้าผ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2536)

ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นระหว่างปูนขาวกับเถ้าลอยลิกไนต์เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง SiO_2 Al_2O_3 กับ $Ca(OH)_2$ ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและสารประกอบแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ดังนี้

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \text{ ----------} \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O$$

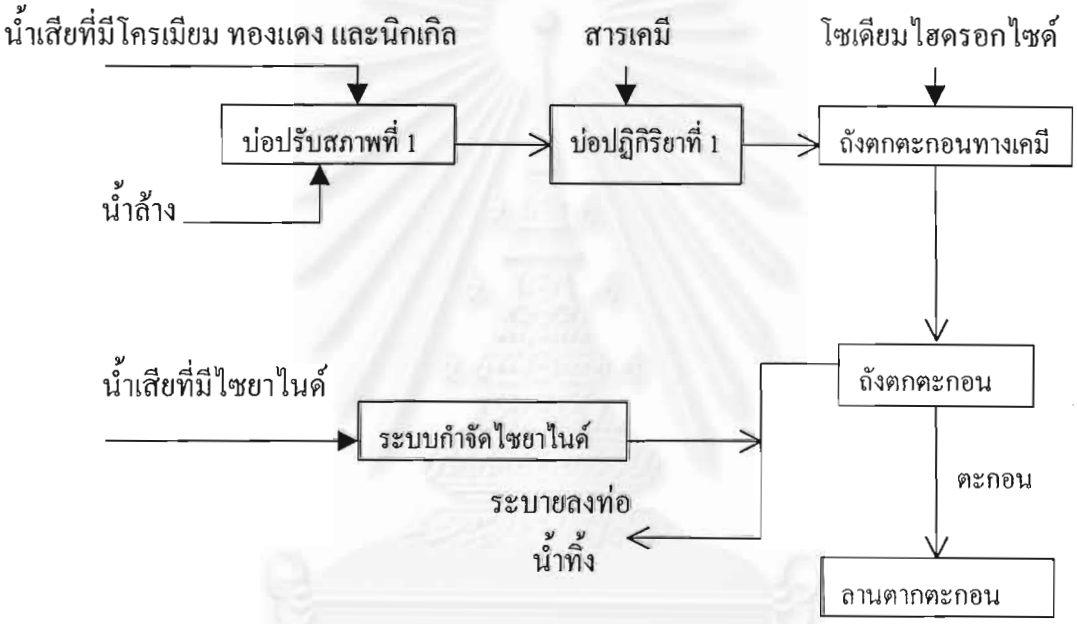
$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \text{ ----------} \rightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O$$

3.6 ตะกอนที่มีนิกเกิล

ตะกอนที่มีนิกเกิลที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้จากโรงงานเคลือบแฟ้มแห่งหนึ่งซึ่งมีระบบบำบัดของเสีย ดังแสดงในรูปที่ 3.3 สำหรับในกระบวนการผลิตมีการเตรียมชิ้นงานด้วยการขัดโลหะที่จะนำไปชุบแล้วทำความสะอาดโดยวิธีการล้างก่อนที่จะนำไปทำการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า ซึ่งนิกเกิลที่ใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าได้แก่ นิกเกิลซัลเฟต ($NiSO_4.7H_2O$) นิกเกิลคลอไรด์ ($NiCl_2.6H_2O$) และกรดบอริค (H_3BO_3) เป็นตัวควบคุมพีเอช รายละเอียดขบวนการบำบัดน้ำเสียมีดังนี้

จากห้องชุบโลหะปริมาณน้ำเสียทั้งหมดรวมกันทั้งสิ้นประมาณ 24 ลบ.ม./วัน น้ำเสียประมาณ 75% หรือ 18 ลบ.ม./วัน เป็นน้ำเสียที่มีค่า โครเมียม ทองแดง และนิกเกิล รวมทั้งน้ำล้าง (Rinse) ที่มีกรดไฮโดรคลอริค (HCl) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะให้ไหลลงไปรวมกันที่บ่อปรับสภาพที่ 1 (Equalization No.1) ซึ่งจะมีการติดตั้งเครื่องสูบน้ำแบบเมกเนติก (Magnetic Pump) เพื่อสูบน้ำเสียจากบ่อปรับสภาพที่ 1 ไปยังถังปฏิกิริยาที่ 1 (Reaction No.1)

ที่ถังปฏิกิริยานี้ จะใส่สารเคมีเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันเปลี่ยนรูปของโครเมียม จากรูป Cr^{+6} กลายเป็นโครเมียมในรูป Cr^{+3} เพื่อให้ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ที่ถังปฏิกิริยานี้ จะติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการปรับ pH และ Oxidation Reduction Potential (ORP) จากนั้นน้ำเสียจะถูกส่งต่อไปยังถังตกตะกอนทางเคมี (Precipitation) ซึ่งจะมีการใส่สารเคมีคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับ พีเอชของน้ำเสียให้สูงขึ้นเพื่อทำปฏิกิริยาเปลี่ยนรูปของโลหะหนัก โครเมียม ทองแดง และนิกเกิล ให้เกิดเป็นตะกอนไฮดรอกไซด์ของโลหะเหล่านั้น ซึ่งเป็นตะกอนที่ไม่ละลายน้ำ



รูปที่ 3.3 แสดงไดอะแกรมของระบบบำบัด

ปฏิกิริยาดังกล่าวจะถูกควบคุมโดยอุปกรณ์การปรับpH เพียงอย่างเดียว น้ำที่ผ่านการตกตะกอนทางเคมีแล้วถูกส่งต่อไปยังถังตกตะกอน (Sedimentation) เพื่อแยกส่วนที่เป็นตะกอนออกจากน้ำ ตะกอนจะถูกนำไปตากแห้งที่ลานตากตะกอน (Sand Drying Bed) ซึ่งปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นมีประมาณ 2.5 ตัน/เดือน

ส่วนน้ำเสียอีกประมาณ 25% หรือ 6 ลบ.ม./วันซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีไซยาไนด์จะนำไปกำจัดไซยาไนด์ด้วยกระบวนการ Alkaline Chlorination ซึ่งน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดไซยาไนด์แล้วจะมีลักษณะใสสะอาดและมีค่า pH อยู่ในระหว่าง 8.5-9.0 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับน้ำทิ้งของนิคมอุตสาหกรรมซึ่งสามารถทิ้งออกนอกโรงงานได้

ส่วนประกอบของตะกอนที่ได้ทำการทดสอบขั้นต้นโดยการวิเคราะห์ EDX (Energy Dispersive X-ray Spectrometry) โดยส่งตะกอนไปทำการวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ร้อยละของปริมาณธาตุต่างๆเป็นดังนี้

C	17.04	%	S	0.41	%	O	47.52	%
Ca	7.77	%	Na	0.45	%	Fe	0.91	%
Mg	0.39	%	Ni	22.89	%	Al	0.42	%
Si	1.96	%	P	0.24	%			

ขวัญเรือน (2540) ได้ทำการวิเคราะห์ตะกอนโดยการย่อยด้วยกรดแก่ 5 ชนิด ตามมาตรฐาน ASTM ได้ปริมาณโลหะหนัก เป็นดังนี้

ชนิดของโลหะหนัก	ปริมาณ (มิลลิกรัม/กรัมของตะกอน)
โครเมียม	1.15
ปรอท	1.14
เหล็ก	143.2
ทองแดง	35.0
นิกเกิล	488.1

และจากการวิเคราะห์ครั้งสุดท้ายพบว่ามีปริมาณนิกเกิลในตะกอนทั้งหมด 48.81%

ธนียา (2540) ได้ทำการวิเคราะห์ตะกอนโดยการย่อยด้วยกรดแก่ 5 ชนิด ตามมาตรฐาน ASTM ภายหลังจากการล้างด้วยน้ำกลั่นและกรดอ่อน ได้ผลดังนี้

ชนิดตะกอน	pH	% Ni ในตะกอน
ตะกอนที่ผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่น	8.62	43.2
ตะกอนที่ผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่นและล้างด้วย 0.1N H_2SO_4	7.42	42.3

เนื่องจากตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ.2540 ไม่ได้กำหนดให้นิกเกิลเป็นของเสียอันตราย แต่ตามประกาศฉบับดังกล่าวได้กำหนดประเภทของของเสียอันตรายจากแหล่งกำเนิดไม่จำเพาะประเภทหรือไม่จำเพาะชนิดซึ่งรวมถึงกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียจากการชุบโลหะทุกชนิดเป็นสิ่งปฏิกูลที่ต้องดำเนินการกำจัดตามที่กำหนดรวมถึงต้องแจ้งชนิดรายละเอียด พร้อมทั้งวิธีเก็บทำลายฤทธิ์ตามประกาศ ดังนั้นตะกอนที่มีนิกเกิลนี้สมควรที่จะได้รับการบำบัดก่อนที่จะทิ้งต่อไป

3.7 การตรวจสอบคุณสมบัติของของเสียที่ผ่านการทำลายฤทธิ์โดยการทำให้เป็นก้อนแข็ง

การทำลายฤทธิ์ของเสียที่เป็นอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อนแข็งนั้นเป็นการบำบัดของเสียเพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยทั่วไปแล้วจะทำการตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆดังนี้

1. ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ซึ่งมีการทดสอบสองวิธีคือ Confined compressive strength และ Unconfined compressive strength
2. อัตราค่าความซึมน้ำ (Permeability) วัสดุคล้ายดิน (Earth material) เกือบทุกชนิดจะยอมให้น้ำซึมผ่านได้เรียกว่าอัตราค่าความซึมน้ำ วัสดุใดมีอัตราค่าความซึมน้ำต่ำแสดงว่าวัสดุนั้นมีความทึบน้ำสูง น้ำซึมผ่านได้ยาก อัตราการชะละลายของสารพิษจะขึ้นอยู่กับอัตราค่าความซึมน้ำ วิธีการทดสอบหาอัตราค่าความซึมน้ำมี 2 วิธีคือ

   -วิธีใช้ความดันคงที่ (Constant head)

   -วิธีใช้ความดันไม่คงที่ (Falling head)
3. คุณสมบัติในการชะละลาย (Leachate) การทดสอบหาคุณสมบัติของน้ำชะละลายมีวิธีหลายวิธีขึ้นกับวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์ Perket และ Webster (1981) กล่าวถึงการสกัดสาร (Extraction) หมายถึงวิธีการมาตรฐานที่ใช้ทดสอบของน้ำชะละลายในห้องปฏิบัติการเพื่อกำหนดประเภทของเสียว่าเป็นของเสียอันตรายหรือไม่ การชะละลาย (Leaching) เป็นการทดสอบคุณสมบัติของน้ำชะละลายเพื่อใช้อ้างอิงในพฤติกรรมงานสนามอย่างไรก็ตามคำสองคำนี้สามารถใช้แทนกันได้

Conway และ Malloy (1981) ได้แบ่งวิธีการทดสอบการชะละลายออกเป็น 2 วิธีคือการทดสอบแบบแบตท์ (Batch tests) และการทดสอบแบบคอลัมน์ (Column tests) โดยการทดสอบแบบแบตท์เป็นการทดสอบการชะละลายโดยให้ตัวอย่างสารสัมผัสกับของเหลวที่ใช้ในการชะละลายในภาชนะตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ ส่วนการทดสอบแบบคอลัมน์นั้นจะทำการทดสอบในคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวอย่างสารที่จะทำการทดสอบจนแน่นและป้อนสารที่ใช้ในการชะละลายผ่านคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง

Boyle อ้างถึงใน Josephson (1982) กล่าวว่า การทดสอบการชะละลายแบบคอลัมน์ให้ผลที่ใกล้เคียงกับสภาวะที่เกิดขึ้นจริงในสถานที่ผังกลบ แต่จะเป็นผลที่เกิดกับสภาวะที่ตัวกลางอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated) ในขณะที่สถานที่ผังกลบจริงมักไม่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ เขาแนะนำให้ใช้การจ่ายสารที่ใช้ชะละลายแบบเป็นหยดให้กับตัวอย่างที่บรรจุในคอลัมน์ขนาดสูง 3 ฟุต เส้นผ่านศูนย์กลาง 1-2 นิ้ว ข้อดีข้อเสียของการทดสอบการชะละลายทั้งสองแบบแสดงไว้ในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ข้อดีและข้อเสียของการทดสอบการชะละลายแบบ Batch test และ Column test

วิธีการ	ข้อดี	ข้อเสีย
Batch test	-ใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยกว่าวิธี Column test -สามารถวิเคราะห์ผลซ้ำได้อีก	-สภาวะที่ใช้ต่างจากที่เกิดขึ้นจริงในสถานที่ฝังกลบ -ไม่ได้วัดผลการชะละลายที่แท้จริง แต่วัดความเข้มข้นที่คงที่ -ต้องการระบบการกรองที่เชื่อถือได้
Column test	-แสดงลักษณะการชะละลายได้ใกล้เคียงกับที่เกิดขึ้นในสถานที่ฝังกลบ -เป็นตัวที่ช่วยทำนายการปล่อยสารต่างๆตามเวลาได้ดี	-อาจเกิดปัญหาจากการบรรจุที่ไม่สม่ำเสมอ คือมีการไหลผ่านช่อง -ปัญหาจากการอุดตัน - ผลกระทบจากขอบคอลัมน์ -ใช้เวลานาน -ไม่สามารถวิเคราะห์ผลซ้ำได้

ที่มา : Poon และคณะ (1983)

3.8 เกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน

กระทรวงอุตสาหกรรมได้กำหนดคุณสมบัติของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ดังแสดงในตารางที่ 3.6 และมาตรฐานสำหรับลักษณะสมบัติของสารมีพิษซึ่งเมื่อนำมาทำการสกัดสาร ตามประกาศกระทรวง พ.ศ.2531 และ พ.ศ.2535 แสดงดังตารางที่ 3.7

กลุ่มประเทศสมาคมยุโรป ได้พิจารณาแยกคุณสมบัติของของเสียที่เป็นอันตรายตามลักษณะของหลุมผังกลบ โดยแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. สำหรับผังกลบกากของเสียที่เป็นอันตราย
2. สำหรับผังกลบของเสียเฉื่อย (Inert waste)
3. สำหรับผังกลบขยะชุมชน และของเสียที่ไม่อันตราย

ทั้งนี้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างของเสียจะต้องพยายามคงรูปเดิมให้ได้มากที่สุด หากเป็นชิ้นโตต้องบดให้เล็กลง แล้วทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน DIN 38414-S4 ซึ่งจะต้องเขย่าโดยการหมุนครั้งละ 180° ต่อนาที นาน 24 ชั่วโมง แล้วเหวี่ยงแยกหรือกรองแยกน้ำใสกับตะกอนด้วยผ้ากรอง 0.45 μm หากผลการวิเคราะห์น้ำสกัดพบว่า

น้ำสกัดมีค่า**อยู่ในช่วง**ของเสียที่เป็นอันตรายต้องนำไปฝังกลบสำหรับของเสียที่เป็นอันตราย สำหรับน้ำสกัดที่มีค่า**สูงเกิน**กว่าช่วงค่าที่ระบุไว้ ของเสียนั้นต้องส่งไปทำลายฤทธิ์ ก่อนที่จะนำไปฝังกลบ

สำหรับกากของเสียอันตราย หากทำลายฤทธิ์ไม่ได้จะต้องฝังในที่ที่ออกแบบเป็นพิเศษ เพื่อเก็บชั่วคราว หรืออาจให้ฝังกลบปนกับที่ฝังกลบขยะชุมชน

น้ำสกัดมีค่าไม่เกินค่าสูงสุดของของเสียเฉื่อยตามที่ระบุไว้ ก็ถือว่าเป็นของเสียเฉื่อยสามารถทิ้งหรือฝังได้ทั่วไป

น้ำสกัดอยู่ระหว่างค่าของเสียเฉื่อยและค่าต่ำสุดสำหรับฝังในที่ฝังกลบของเสียอันตรายให้ถือว่าเป็นของเสียที่ไม่อันตราย ค่าสารมลพิษในน้ำสกัดที่ถือว่าเป็นช่วงของของเสียอันตรายที่สามารถฝังกลบในหลุมฝังกลบแบบของเสียที่เป็นอันตราย และของเสียเฉื่อย แสดงดังตารางที่ 3.8 ปริมาณโลหะหนักตามมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมแสดงไว้ในตารางที่ 3.9 ส่วนตารางที่ 3.10 แสดงคุณลักษณะของน้ำใต้ดินบริเวณใกล้เคียงสถานที่ฝังกลบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.6 เปรียบเทียบวิธีการสกัดสารและคุณสมบัติของของเสียที่ทำลายฤทธิ์แล้วตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ปี พ.ศ. 2531 และ พ.ศ. 2535

	พ.ศ. 2531	พ.ศ. 2535
การสกัดสาร	1.บดตัวอย่างสิ่งปฏิกูลให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาดของสิ่งปฏิกูลระหว่าง 0.5-5 มม.	1.บดตัวอย่างสิ่งปฏิกูลให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มม.
	2.นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ1.หนัก 50 กรัม ใส่ในตัวทำละลายซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมกับกรดไฮโดรคลอริค จนมีความเป็นกรดด่างระหว่าง 5.8 ถึง 6.3 ในอัตราส่วนปริมาณของสารละลายเป็น10เท่า(มิลลิลิตร)ของน้ำหนัก(กรัม) ของตัวอย่างสิ่งปฏิกูล	2.นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ1.หนัก50 กรัม เติมด้วยน้ำสกัดหรือน้ำฝนกรดสังเคราะห์ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก(ในสัดส่วน80ต่อ20โดยน้ำหนัก)จนค่าความเป็นกรดด่างมีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของส่วนผสมในอัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น20เท่า(มิลลิลิตร)ของน้ำหนัก(กรัม)ของตัวอย่าง
	3.เขย่าบนเครื่องเขย่าเป็นเวลา 6 ชั่วโมงโดยใช้เครื่องเขย่าชนิด 200 รอบต่อนาที ที่ช่วงกว้างของการเขย่า 5 ซม.	3.เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน ที่มีอัตราหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
	4.กรองสารละลายโดยใช้กระดาษกรองใยแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู 1ไมครอน	4.กรองสารละลายด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน
	5.นำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าสารมลพิษต่างๆตามวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำทิ้ง	5.นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์น้ำทิ้ง
คุณสมบัติของสิ่งปฏิกูลที่ทำให้เป็นก้อน	1.น้ำซึมผ่านได้ในอัตราต่ำกว่า $1*10^{-6}$ ซม.ต่อวินาที	1. ความซึมน้ำไม่กำหนด
	2.รับแรงอัดได้ไม่น้อยกว่า 14 กก.ต่อ ตร.ซม	2.สามารถรับแรงอัดซึ่งทดสอบตามมาตรฐานได้ไม่น้อยกว่า 3.5 กก.ต่อตร.ซม. หรือต้องรับน้ำหนักที่กดทับด้านบนเมื่ออยู่ในหลุมผังกลบได้อย่างปลอดภัย
	3.มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.4 ตันต่อลบ.ม.	3.มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.15 ตันต่อลบ.ม.
	4.ไม่ได้กำหนดความเข้มข้นของปริมาณสารอันตราย	4.มีปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัดเป็นไปตามเกณฑ์ในการสกัดสารตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมปีพ.ศ. 2535

ที่มา : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2531 และ พ.ศ. 2335

ตารางที่ 3.7 เปรียบเทียบปริมาณสารซึ่งได้จากการสกัดด้วยวิธีสกัดสารตามประกาศกระทรวง-อุตสาหกรรม ปี พ.ศ. 2531 และ พ.ศ. 2535

ชนิดของสาร	ปริมาณ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	พ.ศ. 2531	พ.ศ. 2535
อาร์เซนิก (ทั้งหมด) (Arsenic (total))	5.0	5.0
แบเรียม (Barium)	-	100.0
เบนซิน (Benzene)	-	0.5
แคดเมียม (ทั้งหมด) (Cadmium (total))	1.0	1.0
คาร์บอนเตทตราคลอไรด์ (Carbon tetrachloride)	-	0.5
คลอเดน (Chlordane)	-	0.03
คลอโรเบนซีน (Chlorobenzene)	-	100.0
คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	-	6.0
โครเมียม (ทั้งหมด) (Chromium (total))	5.0	5.0
ออร์โธ-ครีซอล (ortho-Cresol)	-	200.0
เมทา-ครีซอล (meta-Cresol)	-	200.0
พารา-ครีซอล (para-Cresol)	-	200.0
ครีซอล (ทั้งหมด) (Cresol (total))	-	200.0
2-4 ดี (2-4D)	-	10.0
1,4- ไดคลอโรเบนซีน (1,4-Dichlorobenzene)	-	7.5
1,2-ไดคลอโรอีเธน (1,2-Dichloroethane)	-	0.5
1,1-ไดคลอโรเอธีลีน (1,1-Dichloroethylene)	-	0.7
เอลดริน (Endrin)	-	0.02
เฮปตาคแอร์ (Heptachlor and epoxide)	-	0.008
เฮกซาคลอโรเบนซีน (Hexachlorobenzene)	-	0.13
เฮกซาคลอโรบิวตาดีอีน (Hexachlorobutadiene)	-	0.5
เฮกซาคลอโรอีเธน (Hexachloroethane)	-	3.0
ตะกั่ว (ทั้งหมด) (Lead (total))	5.0	5.0
ลินเดน (Lindane)	-	0.4
ปรอท (ทั้งหมด) (Mercury (total))	0.2	0.2
เมธอกซิคลอร์ (Methoxychlor)	-	10.0
เมธิล เอธิล คีโตน (Methyl ethyl ketone)	-	200.0
ไนโตรเบนซีน (Nitrobenzene)	-	2.0
2,4-ไนโตรโทลูอีน (2,4-Nitrotoluene)	-	0.13
เพนตาคลอโรฟีนอล (Pentachlorophenol)	-	100.0
ไพริดีน (Pyridine)	-	5.0

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.7 (ต่อ)

ชนิดของสาร	ปริมาณ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	พ.ศ. 2531	พ.ศ. 2535
ซีลีเนียม (Selenuim)	-	1.0
เงิน (Silver)	-	5.0
เตทตราคลอโรเอทธิลีน (Tetrachloroethylene)	-	0.7
ทอกซาฟีน (Toxaphene)	-	0.5
ไตรคลอโรเอทธิลีน (trichloroethylene)	-	0.5
2,4,5-ไตรคลอโรฟีนอล (2,4,5-Trichlorophenol)	-	400.0
2,4,6-ไตรคลอโรฟีนอล (2,4,6-Trichlorophenol)	-	2.0
2,4,5-ทีพี (ซิลเว็ก) (2,4,5-TP (Silvex))	-	1.0
ไวนิล คลอไรด์ (Vinyl chloride)	-	0.2

ที่มา : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ.2531 และ พ.ศ.2535

ตารางที่ 3.8 แสดงช่วงของของเสียที่เป็นอันตรายและของเสียเฉื่อย (COM,1991)

สารมลพิษ	ช่วงของเสียที่เป็นอันตราย	ช่วงของเสียเฉื่อย
ตะกั่ว	0.4 – 0.2 มก./ล.	สารมลพิษทุกตัวรวมกันไม่มากกว่า 5 มก./ล. และไม่มีสารมลพิษตัวใดตัวหนึ่งเกินค่าที่ระบุไว้
แคดเมียม	0.1 – 0.5 มก./ล.	
โครเมียม (+6)	0.1 – 0.5 มก./ล.	
ทองแดง	2 – 10 มก./ล.	
นิกเกิล	0.4 – 2.0 มก./ล.	
ปรอท	0.02 – 0.1 มก./ล.	
สังกะสี	2 – 10 มก./ล.	
พีเอช	4 – 13	4 – 13
TOC	40 – 200 มก./ล.	< 200 มก./ล.
อาร์เซนิค (+3)	0.2 – 1.0 ก. N/ล.	< 0.1มก./ล.
ฟีนอล	20 - 100 มก./ล.	< 10 มก./ล.
ฟลูออไรด์	10 – 50 มก./ล.	< 5 มก./ล.
แอมโมเนียม	0.2 – 1.0 ก. N/ล.	< 50 มก./ล.
คลอไรด์	1.2 – 6.0 ก./ล.	< 0.5 มก./ล.
ไซยาไนด์	0.2 – 1.0 มก./ล.	< 0.1 มก./ล.
ซัลเฟต*	0.2 – 1.0 ก./ล.	< 1.0 ก./ล.
ไนไตรต์	6 – 30 มก./ล.	< 3 มก./ล.

ตารางที่ 3.8 (ต่อ)

สารมลพิษ	ช่วงของเสียที่เป็นอันตราย	ช่วงของเสียเฉื่อย
AOX **	0.6 – 30 มก./ล.	< 0.3 มก./ล.
Solvents***	0.02 – 0.1 มก./ล.	< 10 มคก. Cl/ล.
Pesticides***	1 – 5 มก. Cl/ล.	< 0.5 มคก. Cl/ล.
Lipoph sub.	0.4 – 2.0 มก./ล.	< 1 มก./ล.

* ถ้าเป็นไปได้ควรน้อยกว่า 500 มก./ล.

** Adsorbed organically bound halogen

*** Chlorinated

ตารางที่ 3.9 แสดงปริมาณโลหะหนักตามมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

ชนิดโลหะหนัก	ปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีได้ (มก./ล.)
ปรอท (Mercury)	0.005
เซเลเนียม (Selemium)	0.02
แคดเมียม (Cadmium)	0.03
ตะกั่ว (Lead)	0.20
อาร์เซนิค (Arsenic)	0.25
โครเมียม (Chromium)	
- Hexavalent Cromium	0.25
- Trivalent Cromium	0.75
บาเรียม (Barium)	1.0
นิกเกิล (Nickel)	1.0
ทองแดง (Copper)	2.0
สังกะสี (Zinc)	5.0
แมงกานีส (Manganese)	5.0

ที่มา : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2539

ตารางที่ 3.10 คุณลักษณะของน้ำใต้ดินบริเวณใกล้เคียงสถานที่ฝังกลบ

ชนิดของสาร	ปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีได้ (มก./ล.)
อาร์เซนิค	0.05
แคดเมี่ยม	0.01
โครเมี่ยม	0.05
ตะกั่ว	0.05
ปรอท	0.001
นิกเกิล	0.05
แมงกานีส	0.3
ทองแดง	1.0
สังกะสี	5.0

ที่มา : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2531

3.9 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

Johannesmeyer (1984) ได้ทำการศึกษาการทำลายฤทธิ์ตะกอนจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะ โดยใช้วิธีการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ ซิลิเกต/ปูนซีเมนต์ และ เถ้าลอย/ปูนขาว เป็นวัสดุประสาน ซึ่งจากการวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. pH ไม่ใช่ปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อการจับยึดโครเมียมและแคดเมียม สารละลายที่ได้จากการทดสอบ EP test (Extraction procedure) สำหรับวิธี ซิลิเกต/ปูนซีเมนต์ มีค่า pH ต่ำกว่าวิธีเถ้าลอย/ปูนขาว แต่วิธีแรกให้ความเข้มข้นของแคดเมียมและโครเมียมในน้ำชะละลายต่ำกว่าวิธีที่ 2
2. EP test ให้ค่าความเข้มข้นของโครเมียมและแคดเมียมในน้ำสกัดสูงกว่าวิธี column leach test
3. การฝังกลบวัสดุที่บำบัดโดยวิธีทำให้เป็นก้อน ควรจะแยกเพื่อป้องกันสภาวะที่เป็นกรด เช่น หลุมฝังกลบทั่วไป
4. วิธี ซิลิเกต/ปูนซีเมนต์ มีประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์แคดเมียมและโครเมียมได้ดีกว่าวิธีเถ้าลอย/ปูนขาว ทั้งโดย EP test และ column leach test
5. ปริมาณซิลิเกตในส่วนผสมมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการทำลายฤทธิ์ ปริมาณซิลิเกตที่มากกว่าจะให้ประสิทธิภาพดีกว่า

Bricka และ Cullinane (1989) ทำการศึกษาการทำให้เสถียร/การทำให้เป็นก้อน (Stabilization /Solidification, s/s) ของเสีย 9 ชนิดตามบัญชีของเสียอันตรายของ RCRA โดยใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ฝุ่นเตาเผา (kiln dust) และปูนขาว/เถ้าลอย โดยเลือกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับของเสียแต่ละชนิดโดยเลือกจากการทดลองที่ผ่านมา และใช้ค่าอัตราส่วนวัสดุประสานต่อของเสียที่ต่างกันไปตามชนิดของของเสีย ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการชะละลายของเสียโดยวิเคราะห์โลหะ 22 ชนิดเทียบกับค่าของ TCLP จากผลการทดสอบขั้นแรกทางด้านกายภาพชี้ว่าของเสียที่ผ่านกระบวนการแล้วมีการเพิ่มกำลังรับแรงอัดตั้งแต่ค่าที่ต่ำมากจนถึง 4,400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ผลการทดสอบการชะละลายของเสียพบปรอทและตะกั่วถูกชะออกมาในปริมาณสูงถึง 26.8 และ 1.16 มก./ลิตร ตามลำดับ และประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของของเสียและโลหะหนักที่เป็นองค์ประกอบ และพบว่าปริมาณปูนซีเมนต์เพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้ของเสียมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

Shin และคณะ (1990) ได้ทำการศึกษาลักษณะการชะละลายของวัสดุที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแข็งภายใต้สภาวะน้ำทะเล โดยใช้ตัวชะละลายสามชนิดคือ น้ำทะเล น้ำกรด และน้ำกลั่น ชะละลายของเสียที่ทำให้เป็นก้อนโดยใช้ตะกอนสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักแคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว ใช้วัสดุประสานคือปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 20% และปูนซีเมนต์ 65% ผสมเถ้าลอย 35% ผลการทดสอบพบว่า

1. ค่า pHสุดท้ายและความเข้มข้นของโลหะหนักภายหลังการชะละลาย 24 ชั่วโมงเป็นผลโดยตรงมาจากชนิดของตัวชะละลาย
2. ภายใต้สภาวะน้ำทะเลความสามารถในการชะละลายของแคดเมียมจะสูงขณะที่ของโครเมียมและปรอทแทบจะไม่มีเลย
3. การผสมเถ้าลอยมีผลให้ pH ของน้ำชะลดลงและเพิ่มปริมาณโลหะหนักที่ละลายออกมา
4. การสะสมของแคดเมียมที่ถูกปล่อยออกมาภายใต้สภาวะน้ำทะเลเพิ่มขึ้นเป็นลักษณะเส้นตรงกับเวลาแต่ของโลหะอื่นๆลดลง
5. จากการทดสอบการชะละลาย 60 วัน ขนาดของตัวอย่างเล็กลงโดยเฉพาะในสภาวะน้ำทะเล และการเติมเถ้าลอยในของเสียมีผลต้านการกัดของน้ำทะเลต่อของเสีย และในสภาวะน้ำทะเลโลหะที่ถูกชะออกมาจะตกตะกอนอีกครั้งเป็นอนุภาคละเอียด (<2 mm.)

Youn (1990) ได้ทำการศึกษา การทำเสถียรสลัดจ์น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการซึ่งส่วนใหญ่เป็นตะกอนจากน้ำเสีย COD มาทำให้เป็นก้อน โดยใช้วัสดุประสานได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาวผสมกับเถ้าแกลบ ผลการทดลองสรุปได้ว่า

1. ความสามารถในการถูกชะละลายเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราส่วนตะกอนน้ำเสียต่อปูนซีเมนต์ และเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะเวลาบ่มตัว

2. กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มตัวและมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในส่วนผสม ในกรณีที่ใช้ปูนขาวผสมเถ้าแกลบเป็นวัสดุประสาน กำลังรับแรงอัดไม่เพิ่มตามระยะเวลาบ่มตัว คือในช่วงแรกเพิ่มขึ้นและต่อมาลดลง และกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากตะกอนที่เพิ่มขึ้น และกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์จะมีค่าสูงกว่าก้อนตัวอย่างที่ใช้ปูนขาว
3. เถ้าแกลบซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์สามารถใช้เป็นวัสดุประสานในการทำให้เป็นก้อนแข็งได้ และมีกำลังอัดที่สูงพอสำหรับนำไปฝังกลบ

Tay (1993) ได้ศึกษาการชะละลายของเถ้าลอยที่ได้จากการเผาขยะชุมชนโดยนำมาทำการทำเสถียรโดยใช้ปูนขาว และปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนของเถ้าลอยและวัสดุประสานที่เท่าๆกัน โดยนำเถ้าลอยหรือเถ้าลอยที่ผ่านการทำเสถียรมาบรรจุลงในคอลัมน์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. มีชั้นความสูง 10 ซม. และใช้ชั้นทรายสูง 10 ซม. และ 5 ซม. วางประกบผิวด้านบนและด้านล่างของเถ้าลอยตามลำดับ และทดลองให้น้ำประปาไหลผ่าน โดยรักษาระดับเฮด 20 ซม. เหนือผิวระบายชั้นบน กำหนดอัตราไหลออกจากคอลัมน์ 50 ลิตรต่อวัน เป็นเวลา 3 เดือน ผลการทดลองสรุปได้ว่าเถ้าลอยที่ผ่านการทำเสถียรด้วยปูนขาวหรือปูนซีเมนต์มีความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำชะละลายต่ำกว่าค่าที่เครื่องสามารถตรวจวัดได้ แสดงว่าปูนซีเมนต์และปูนขาวมีประสิทธิภาพสูงในการทำเสถียรเถ้าลอย และเถ้าลอยจากการเผาขยะชุมชนมีคุณสมบัติเป็นวัสดุผสมเพิ่ม (Fill material)ได้

Roy และคณะ (1991) ได้ทำการศึกษาการทำให้เป็นก้อน/ทำให้เสถียรของตะกอนโลหะหนักที่มีโครเมียม นิกเกิล แคดเมียม และปรอท เป็นองค์ประกอบโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย class-F เป็นวัสดุประสาน โดยมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์/เถ้าลอยเป็น 0.4 และอัตราส่วนตะกอน/ของแข็งเป็น 1.43 ทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 28 วันหลังจากนั้นนำไปตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอน เครื่องตรวจวัดการกระจายพลังงานเอ็กซเรย์สเปคโตรมีทรี (X-ray spectrometry) กล้องจุลทรรศน์ และเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกโตมีทรี(X-ray diffractometry) จากการทดลองพบว่าตะกอนซึ่งมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบจะก่อตัวเป็นของผสมกับวัสดุประสาน หน่วงการเกิดไฮเดรชันและมีผลกระทบต่อเฟสที่ประกอบขึ้นโดยจะไม่เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และพบว่าโลหะที่ถูกปล่อยออกมาอยู่ในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์เช่น $Ni_3O_2(OH)_4$ เถ้าลอยมีผลกระทบต่ออัตราการชะละลายโดยไปลดค่าความซึมน้ำของของเสีย รวมทั้งทำปฏิกิริยาทางเคมีกับตะกอนและวัสดุประสาน จากการศึกษาโดยกล้องจุลทรรศน์พบว่าอนุภาคเถ้าลอยทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์เกิดเป็นผลผลิตหลายชนิดเช่น ettringite และ straetlingite ผลผลิตจากปฏิกิริยาที่เกิดที่ผิวของอนุภาคเถ้าลอยประกอบด้วยบางส่วนของโครเมียมและนิกเกิล ซึ่งคาดว่าทำให้เกิดเสถียรภาพทางเคมีของไอออนโลหะที่เป็นพิษ

Roy และคณะ (1992) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างของกระบวนการทำให้เป็นก้อน/ทำให้เสถียรของตะกอนโลหะหนักสังเคราะห์ที่มีโครเมียม นิกเกิล แคดเมียม และปรอท เป็นองค์ประกอบในปริมาณ

84.1, 86.2, 18.8, และ0.137 มก./ก. โดยใช้ปูนขาวผสมเถ้าลอย Class C เป็นวัสดุประสานในอัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยเป็น 3/5 และอัตราส่วนของเสียต่อวัสดุประสานเป็น 1/0.8 ทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอน เครื่องวิเคราะห์เอนเนอยีดีสเพอร์ซีฟเอ็กซเรย์ (Energy dispersive X-ray microanalysis) และเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกโตมีทรี(X-ray diffractometry) ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างขนาดเล็กและเฟสซึ่งประกอบเป็นส่วนผสมปูนขาว-เถ้าลอยไม่ได้รับผลกระทบจากการผสมตะกอนโลหะหนัก ส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักเพียงแต่มีผลกระทบต่อระดับของการไฮเดรชั่น ตะกอนและวัสดุประสานผสมกันในรูปของผสมที่มีโครงสร้างง่ายๆ โลหะหนักปรากฏอยู่ในรูปอนุภาคขนาดใหญ่ที่ถูกตรึงอยู่ในวัสดุประสานและผสมอยู่อย่างกระจายในเมตริกของของผสมที่ความเข้มข้นต่ำ อนุภาคของเถ้าลอยทำหน้าที่เป็นแหล่งที่เกาะติดของโลหะหนักซึ่งชี้ให้เห็นว่าเถ้าลอยช่วยในกระบวนการทำให้เป็นก้อน/ทำให้เสถียรโดยการยึดเกาะอนุภาคโลหะหนักไว้

Parsa และคณะ (1996) ได้ศึกษาการทำลายฤทธิ์ของเสียอันตรายที่ได้จาก Los Alamos National Laboratories ซึ่งเป็นของเสียผสมจากกระบวนการที่เกี่ยวกับอุปกรณ์ทางนิวเคลียร์ ซึ่งส่วนประกอบหลักคือ กรดไนตริก เฟอร์ริกไนเตรต และน้ำ ด้วยการทำให้เป็นก้อนโดยผสม เถ้าลอยและนำไปอัดให้เป็นก้อน เถ้าลอยที่ใช้ได้จากโรงงานผลิตไฟฟ้าและเป็นชนิด C-grade และ F- grade โดยทำการผสมของเสียต่อเถ้าลอยในอัตราส่วน 1:6 และ 1:8 และอัดใส่โมลด์ขนาด 2.5 x 5 นิ้วด้วยความดัน 1.38- 6.21 MPa และทดสอบการชะละลายตามมาตรฐาน TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) ผลการทดสอบสรุปได้ว่า ของเสียผสมซึ่งเติมโครเมียม แคดเมียม และตะกั่ว ทำให้เป็นก้อนโดยใช้เถ้าลอย C-grade ดีกว่า F-grade อัตราส่วนของเสียต่อเถ้าลอยที่ต่ำกว่า 1:6 จะแห้งเกินไปที่จะทำให้เป็นก้อนได้ และที่สูงกว่า 1:8 จะทำให้เหลวเกินไป เมื่อใช้เถ้าลอย C-grade ตัวอย่างทุกก้อนผ่านข้อกำหนดของ EPA (ทดสอบโดย TCLP) และพบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือที่ pH 9.2 และความดัน 4.65 MPa และอัตราส่วนของเสียต่อเถ้าลอยไม่ใช่ปัจจัยที่สำคัญ

ชวลิต (2532) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของกากแร่สังกะสีเมื่อผสมปูนขาวที่ปริมาณต่าง ๆ โดยคำนึงถึงปฏิกิริยาที่เกิดควบคู่กับคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมที่เปลี่ยนแปลงไป ในการพิจารณาเสถียรภาพของส่วนผสมกากแร่สังกะสี-ปูนขาว จะแยกศึกษาปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมเป็น 2 แนวทางด้วยกันคือ ปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมที่ทำให้ส่วนผสมมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีที่สุด และปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมที่ทำให้ส่วนผสมเกิดการยึดประสานเพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้โลหะหนักหลุดละลายออกมา ผลการศึกษาพบว่าปูนขาวจะช่วยทำให้เสถียรภาพของกากแร่สังกะสีเพิ่มขึ้น โดยส่วนผสมที่มีปริมาณปูนขาวมากกว่า 3% โดยน้ำหนักจะเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในรูปของ C_2SH และ $C_5S_3H_2$ ซึ่งเป็นสารประกอบหลักที่ทำให้ส่วนผสมมีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้น อุณหภูมิในการบ่มมีผลในระยะสั้นและจากการแปรเปลี่ยนปริมาณปูนขาว พบว่าการใช้ปริมาณปูนขาว 10% จะทำให้ส่วนผสมมี

คุณสมบัติทางวิศวกรรมดีที่สุด และปริมาณปูนขาว 4% จะพอเพียงในการที่จะทำให้ส่วนผสมเกิดการยึดประสาน

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2532) ศึกษาวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพของกากแร่สังกะสีจากกระบวนการผลิตสังกะสีของบริษัทผาแดงอันดัสทรี จำกัด โดยใช้เทคนิคการเติมปูนขาวหรือปูนซีเมนต์ และเทคนิคด้านความร้อนสูง พบว่า

1. ปูนขาวและปูนซีเมนต์ สามารถนำมาใช้ผสมกากแร่สังกะสีได้ ในสัดส่วนปริมาณปูนขาวร้อยละ 4 หรือปูนซีเมนต์ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของกากสังกะสีแห้งนั้นพอเพียงที่ทำให้ส่วนผสมมีความคงสภาพและป้องกันไม่ให้โลหะหนักถูกชะละลายออกมาได้ ในการศึกษาสมบัติของส่วนผสม ได้กระทำภายในระยะเวลาบ่ม 90 วัน ถ้าต้องการให้ส่วนผสมมีสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีแล้ว ควรใช้ปริมาณปูนขาวร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 12
2 ในด้านการเพิ่มเสถียรภาพด้วยความร้อน พบว่ากากแร่ผ่านความร้อนเกิน 100 องศาเซลเซียสมีเสถียรภาพดี การชะละลายของโลหะหนักมีน้อยมากต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของกรม-โรงงานอุตสาหกรรม สำหรับการใช้ประโยชน์ของกากแร่มีแนวโน้มที่ใช้ประโยชน์ทางเซรา-มิคได้โดยทำกระเบื้อง ถ้าใช้ส่วนผสมที่มีกากแร่เจือปนไม่มากกว่าร้อยละ 80 ผสมกับดินขาว

นฤมิต (2537) ทำการวิจัยความสามารถในการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสีย COD โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์ แล้วทดสอบกำลังรับแรงอัดความหนาแน่น ความให้ซึมได้ และการทดสอบการชะละลายโลหะหนักได้แก่ ปรอท โครเมียม และเหล็ก รวมทั้งประสิทธิภาพในการถูกชะละลายโลหะหนักและค่าใช้จ่าย ผลการทดลองพบว่าการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0 และ 50 เป็นวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนตะกอนต่อวัสดุประสาน 0.25 จะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ในขณะที่โครเมียมและเหล็กมีค่าต่ำ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 เป็นวัสดุประสานที่มีประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของปรอท โครเมียม และเหล็ก เป็น 30.7, 50 และ 90% ตามลำดับ และค่าใช้จ่ายของวัสดุประสานมีค่าใช้จ่ายของวัสดุประสานมีค่า 3,600 บาทต่อตันของตะกอนแห้ง

รักษพล (2538) ได้ทำการศึกษาการทำเสถียรกากตะกอนจาโรไซต์ โดยการทำให้เป็นก้อนโดยใช้วัสดุประสานคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาว ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมปูนขาว และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกากแร่สังกะสีซิลิเกต โดยแบ่งการทดลองออกเป็น3 ขั้นตอนคือ 1. ทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้น 2. การทดสอบสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด และ 3. การทดสอบการชะละลายในระยะยาว โดยวิธีที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพในการทำให้เป็นก้อน ได้แก่ กำลังรับแรงอัดและความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด ผลการทดลองพบว่า ผลการทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ผลการทดลองดีที่สุด โดยอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 14 สำหรับกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดา และร้อยละ 20 สำหรับกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ ผลการทดสอบสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดพบว่า

ส่วนผสมที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 11 และร้อยละ 15 สำหรับกากตะกอนจาโรไซต์ธรรมดาและกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ ส่วนผลการทดสอบการชะละลายในระยะยาวในคอลัมน์ โดยใช้น้ำประปาพีเอช 5.8 และ 6.3 เป็นน้ำชะละลาย เมื่อกำหนดอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 พบว่าความเข้มข้นโลหะหนักในน้ำชะต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งตลอดช่วงเวลา 90 วัน

ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการใช้ปูนขาวได้ทำการศึกษาเฉพาะการทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้น ซึ่งพบว่าสำหรับกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดาและกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน และ 28 วันเป็นดังนี้

- กากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ : กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)

อัตราส่วนผสมร้อยละ (เทียบกับน้ำหนักกากตะกอนแห้ง)	ที่ 14 วัน	28 วัน
5	1.5	2
10	3.5	3
25	11	14.5

- กากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดา : กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)

อัตราส่วนผสมร้อยละ เทียบกับน้ำหนักกากตะกอนแห้ง (เปียก)	ที่ 14 วัน	28 วัน
7(5)	12	10
14(10)	26	25
35(25)	64	59

ผลการสกัดโลหะหนักตามวิธีมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าที่ทุกอัตราส่วนผสมของตะกอนทั้ง 2 ชนิด ให้ค่าปริมาณโลหะหนักเกณฑ์มาตรฐาน นั่นคือที่อัตราส่วนผสมทุกค่ามีเสถียรภาพในการยึดเกาะโลหะหนัก

ศักดา (2538) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการทำลายฤทธิ์ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงย่างแร่สังกะสี โดยการทำให้ตะกอนแข็งตัวเป็นก้อนด้วยปูนขาว ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย-ลิกไนต์ ผลการศึกษาสรุปได้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มีประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ตะกอนได้ดีกว่าวัสดุประสานชนิดอื่น การใช้สัดส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 เทียบกับน้ำหนักตะกอนแห้งจะสามารถต่อต้านสารประกอบคลอไรด์ และซัลเฟตในตะกอนได้ ทำให้ตะกอนแข็งตัวมีกำลังรับแรงอัดได้ตามเกณฑ์กำหนด ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัด ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดทำให้ตะกอนน้ำเสียไม่จัดอยู่ในกลุ่มของเสียที่เป็นอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการทำให้ตะกอนแข็งตัวเป็นก้อนด้วยปูนขาว พบว่าอัตราส่วนผสมร้อยละ 66 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดถึง 4.9 กก./ตร.ซม. ที่อัตราส่วนผสมต่ำกว่านี้ตะกอนไม่แข็งตัวทดสอบกำลังอัดไม่ได้ ส่วนปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดค่าที่ได้ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด

อนุวัฒน์ (2539) ได้ทำการวิจัยการทำเสถียรตะกอนโลหะหนักที่ได้จากการบำบัดน้ำเสีย COD โดยการเติมโซเดียมซัลไฟด์ลงไปในตะกอนก่อนนำไปทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย-ลิกไนต์ โดยศึกษากำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น ความซึมได้ของน้ำ และทดสอบการละลายเพื่อหาปริมาณโครเมียม ปรอทและเหล็กด้วย จากการทดลองพบว่าปริมาณของโครเมียมและเหล็กในน้ำสกัดมีค่าต่ำมาก ประสิทธิภาพการทำเสถียรของโครเมียมและปรอทมีค่า 60.01 และ 91.00 % ที่สัดส่วนการเติมโซเดียมซัลไฟด์ 1.75 เท่าและเท่ากับ 94.0 และ 99.49 % ที่สัดส่วนโซเดียมซัลไฟด์ 3.0 เท่า ที่อัตราส่วนตะกอนต่อตัวประสาน 0.25

ดวงสมร (2540) ทำการศึกษาการทำตะกอนโลหะหนักที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีโอดีและกาก-หลอดฟลูออเรสเซนต์ให้คงตัวโดยการเติมโซเดียมซัลไฟด์ลงไปก่อนทำให้เป็นก้อนโดยได้ผลการทดลองดังนี้

- การทำตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม จากผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมคืออัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 ซิลิกาฟูมเท่ากับ 40% ใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 0.5 เท่าของปริมาณทางทฤษฎี ใช้ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ประสิทธิภาพในการทำให้ปรอทและโครเมียมคงตัวเท่ากับ 96.89 และ 94.32 % ตามลำดับ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดนี้ประมาณ 7,770 บาทต่อตันของตะกอน
- การทำกากหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 ซิลิกาฟูมเท่ากับ 20 % ใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎี ใช้ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ประสิทธิภาพในการทำให้ปรอทคงตัวเท่ากับ 97.72 % ค่าใช้จ่ายในการบำบัดนี้ประมาณ 4,930 บาทต่อตันของตะกอน
- การทำกากหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อนโดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์ จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.50 โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยลิกไนต์เท่ากับ 1:1 ใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎี ใช้ระยะเวลาบ่ม 28 วันประสิทธิภาพในการทำให้ปรอทคงตัวเท่ากับ 97.77 % ซึ่งใกล้เคียงกับการใช้ซิลิกาฟูมเป็นวัสดุประสานค่าใช้จ่ายในการบำบัดโดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุประสานมีค่าประมาณ 2,610 บาทต่อตันของตะกอนซึ่งมีค่าน้อยกว่าการใช้ซิลิกาฟูมเป็นวัสดุประสาน

ประเสริฐ (2540) ศึกษาการกำจัดปรอทจากตะกอนในการบำบัดน้ำเสียซีโอดีจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดี และตะกอนปรอทจากการชะล้างกากหลอดฟลูออเรสเซนต์โดยการเติมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์เพื่อลดการชะละลายของปรอทโดยใช้ค่า 1.75 เท่าของสตอยชิโอเมตริก จากนั้นนำมาผสมกับปูนซีเมนต์และของเสียซิลิกา-อลูมินา การศึกษาประกอบด้วยการหาอัตราส่วนการเติมของเสียซิลิกา-อลูมินา และอัตราส่วนการเติมปรอทซัลไฟด์ในก้อนซีเมนต์ที่เหมาะสมในการบำบัด และประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการบำบัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

4.1 การเตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้

- ตะกอนที่มีนิกเกิล ใช้ตะกอนจากโรงงานเคลือบแฟ้ม นิคมอุตสาหกรรมนวนคร
- ปูนขาว ใช้ปูนขาวที่หาซื้อได้ตามท้องตลาด
- เถ้าลอยลิกไนต์ ใช้เถ้าลอย Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618-85 จากโรงงานผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
- น้ำใช้น้ำประปา

2. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- Sulfuric Acid
- Nitric Acid
- น้ำกลั่น พีเอช 5 ปรับพีเอชโดยเติมด้วยกรดซัลฟิวริกและกรดไนตริก (ในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนน้ำกลั่นมีค่าพีเอช 5

3. การทำให้เป็นก้อนและทดสอบกำลังรับแรงอัด

- เครื่องชั่ง 2,000 กรัม อ่านได้ละเอียด 0.2 กรัม
- กระบอกตวงขนาด 500 มิลลิลิตร อ่านได้ละเอียด 10 มิลลิลิตร
- แบบหล่อขนาดลูกบาศก์ 2 นิ้วหรือ 50 มม.
- เครื่องผสมหรือแผ่นกระจกสำหรับผสมด้วยมือ
- Tamper ขนาดหน้าตัด ½ x 1 นิ้ว มีความยาว 5 - 6 นิ้ว ปลายตัดเรียบและหน้าตัดตั้งฉากกับแกนของมือจับซึ่งทำจากวัสดุไม่ดูดซึมน้ำ
- เกรียงพลาสติกขนาดหน้ากว้างของใบ 4 – 6 นิ้ว
- ตะแกรงเบอร์ 20 – 16, 30 – 20 และ สูงกว่า 30
- เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด ที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. การทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก

- ตะแกรงขนาด 9.5 มม.
- ขวดพลาสติกขนาด 2 ลิตร
- เครื่องชั่ง 2,000 กรัม
- กระบอกตวงขนาด 2 ลิตร
- เครื่องเขย่าแบบหมุน 30 รอบ/นาที
- กระดาษกรองใยแก้วขนาดรู 0.6 – 0.8 ไมครอน
- เครื่องวัด pH
- เครื่องวัดความนำไฟฟ้า
- เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. การทดสอบการชะละลายในระยะยาว

- คอลัมน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.
- ถัง (ภาชนะ) บรรจุสารเคมี
- สายยางทนกรด – ด่าง

4.2 การดำเนินการทดลอง

แบ่งออกเป็น 6 ชุดการทดลองดังนี้

<u>การทดลองขั้นต้น</u> วิเคราะห์หาส่วนประกอบของตะกอน ใช้วิธีการย่อย (Digestion) โดยใช้กรดไนตริกย่อยสลายตัวอย่างตะกอนอย่างรุนแรง รวมทั้งทดสอบการชะละลายโลหะหนักตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม แล้ววิเคราะห์หาปริมาณของโลหะหนักต่างๆ ได้แก่ Ni, Cr, Cd, Hg, Pb และ As ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer เพื่อหาชนิดของโลหะหนักที่มีโอกาสปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมเมื่อไม่มีการบำบัด รวมทั้งส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์โดยวิธี EDX (Energy Dispersive X-ray Spectrometry) ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

<u>การทดลองที่ 1</u> วิเคราะห์หาอัตราส่วนของปูนขาวต่อตะกอน ที่เหมาะสมในการทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิลโดยใช้ปูนขาว ตัวแปรที่ใช้คืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน ดังนี้

อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน			
	0.2	0.4	0.5	0.6
0.07				
0.15				
0.25				
0.35				
0.50				

หมายเหตุ : ผลการทดลองได้จากค่าเฉลี่ยของการหล่อตัวอย่าง 3 ก้อน

ทำการทดสอบดังนี้

ก. การทดสอบการทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิล มีวิธีการดังนี้

1. ชั่งวัสดุที่ใช้ตามอัตราส่วนที่ต้องการทดสอบข้างต้น
2. ผสมวัสดุด้วยมือ(สวมถุงมือยาง) โดยผสมปูนขาวและตะกอนแต่ละชนิดเข้าด้วยกันบนแผ่นกระจก เมื่อเข้ากันดีแล้วกองส่วนผสมที่ผสมแล้วเป็นรูปภูเขาและให้มีหลุมตรงกลาง เติมน้ำลงในหลุมและตักส่วนผสมจากด้านข้างลงในกลางหลุมผสมด้วยเกรียงให้เข้ากัน
3. เอาส่วนผสมลงในแบบหล่อรูปลูกบาศก์ แบ่งเป็น 2 ชั้น โดยชั้นแรกหนาประมาณ 1 นิ้ว หรือ 2.5 ซม. แล้วใช้ Tamper กระทุ้งชั้นละ 16 ครั้งโดย 8 ครั้งแรกจะมีทิศทางตั้งฉากกัน 8 ครั้งหลังให้แรงกระทุ้งพอประมาณ และเท่ากันตลอด เติมส่วนผสมชั้นที่ 2 ให้เลยขอบแบบหล่อเล็กน้อย และใช้มือป้องขณะกระทุ้งใช้ Tamper กระทุ้ง 16 ครั้ง เช่นเดียวกับครั้งแรก เมื่อเสร็จแล้วให้ใช้เกรียงปาดส่วนเกินออกในลักษณะคล้ายเลื่อย
4. หล่อตัวอย่างรูปทรงกระบอกโดยทำการผสมส่วนผสมตามข้อ 1.และ2. จากนั้นเอาส่วนผสมลงในแบบหล่อใช้ Tamper กระทุ้งตลอดหน้าตัดของแบบหล่อจนเต็มแบบให้เลยขอบแบบหล่อเล็กน้อยเมื่อเสร็จแล้วให้ใช้เกรียงปาดส่วนเกินออกในลักษณะคล้ายเลื่อย
5. หลังจากหล่อเสร็จให้นำตัวอย่างพร้อมแบบหล่อเก็บไว้ในที่ชื้นทันที และถอดแบบในเวลา 24 ชั่วโมง บ่มตัวอย่างต่อจนครบ 7 วัน นำตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด
6. หาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างโดยการชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างและหารด้วยปริมาตรของก้อนตัวอย่าง

ข. การทดสอบการชะละลายของนิกเกิล

ใช้มาตรฐานการทดสอบการชะละลายของนิกเกิลโดยวิธีสกัดสาร ซึ่งกรมโรงงานอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2535) ได้กำหนดไว้ดังนี้

1. บดตัวอย่างให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มม.
2. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1. หนัก 100 กรัม เติมด้วยน้ำสกัด ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) หาค่าความเป็นกรดด่าง พีเอช (pH) ของส่วนผสมมีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง
3. เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary agitator) ที่มีอัตราหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 ^{0}C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
4. กรองสารละลายจากการสกัดด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน
5. นำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณนิกเกิลโดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer
6. วัดค่า pH และความนำไฟฟ้าของน้ำสกัด

การทดลองที่ 2 ศึกษาอัตราส่วนของวัสดุประสานที่เหมาะสมของตะกอนที่มีนิกเกิล โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาวและเถ้าลอยลิกไนต์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.5 โดยมีตัวแปรคือ อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน และอัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยลิกไนต์ โดยใช้เวลาบ่มของทุกส่วนผสมเท่ากับ 7 วัน

อัตราส่วนวัสดุประสาน	อัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอย					
ต่อตะกอน	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
0.25						
0.50						
0.75						
1.00						
1.25						

หมายเหตุ : ผลการทดลองได้จากค่าเฉลี่ยของการหล่อตัวอย่าง 3 ก้อน

โดยทำการทดสอบดังนี้

ก. การทดลองหล่อก้อนตัวอย่างและทดสอบกำลังอัด

ทำการทดลองเช่นเดียวกับที่ใช้กับปูนซีเมนต์ ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. หล่อก้อนตัวอย่างโดยใช้ขนาดโมลด์ 5 x 5 x 5 ซม.^{3} โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.5 โดยชั่งวัสดุที่ใช้ตามอัตราส่วนที่ต้องการทดสอบข้างต้นโดยใช้ปริมาณให้ได้ 3 ตัวอย่างในแต่ละส่วนผสม
2. การผสมใช้วิธีผสมด้วยมือ (สวมถุงมือยาง) โดยผสมวัสดุประสานและตะกอนแต่ละชนิดเข้าด้วยกันบนแผ่นกระจก เมื่อเข้ากันดีแล้วกองส่วนผสมที่ผสมแล้วเป็นรูปภูเขาและให้มีหลุมตรงกลาง เติมน้ำลงในหลุมและตักส่วนผสมจากด้านข้างลงในกลางหลุมในเวลา 30 วินาที และทิ้งให้ซึมตัวด้วยน้ำ 30 วินาที เริ่มผสมด้วยเกรียงให้เข้ากันในเวลา 1 นาที 30 วินาที
3. เอาส่วนผสมลงในแบบหล่อ ภายในเวลาไม่เกิน 2 นาที 30 วินาที หลังการผสมเสร็จการหล่อจะแบ่งเป็น 2 ชั้น โดยชั้นแรกหนาประมาณ 1 นิ้วหรือ 2.5 ซม. แล้วใช้ Tamper กระทุ้งชั้นละ 16 ครั้งโดย 8 ครั้งแรกจะมีทิศทางตั้งฉากกัน 8 ครั้งหลังให้แรงกระทุ้งพอประมาณ และเท่ากันตลอด ใช้เวลาประมาณ 5 วินาที เติมส่วนผสมชั้นที่ 2 ให้เลยขอบแบบหล่อเล็กน้อย และใช้มือป้องขณะกระทุ้งใช้ Tamper กระทุ้ง 16 ครั้ง เช่นเดียวกับครั้งแรก เมื่อเสร็จแล้วให้ใช้เกรียงปาดส่วนเกินออกในลักษณะคล้ายเลื่อย
4. หล่อตัวอย่างรูปทรงกระบอกโดยทำการผสมส่วนผสมตามข้อ 1.และ2. จากนั้นเอาส่วนผสมลงในแบบหล่อใช้ Tamper กระทุ้งตลอดหน้าตัดของแบบหล่อจนเต็มแบบให้เลยขอบแบบหล่อเล็กน้อยเมื่อเสร็จแล้วให้ใช้เกรียงปาดส่วนเกินออกในลักษณะคล้ายเลื่อย
5. หลังจากหล่อเสร็จให้นำตัวอย่างพร้อมแบบหล่อเก็บไว้ในที่ชื้นทันที และถอดแบบในเวลา 24 ชั่วโมง บ่มตัวอย่างต่อจนครบ 7 วัน นำตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด
6. หาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างโดยการชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างและหารด้วยปริมาตรของก้อนตัวอย่าง

ข. ทดสอบการชะละลายของนิกเกิล

ทำการทดสอบดังต่อไปนี้

1. บดตัวอย่างให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มม.
2. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1. หนัก 100 กรัม เติมด้วยน้ำสกัด ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) หาค่าความเป็นกรดด่าง พีเอช (pH) ของส่วนผสมมีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของ

I19247643

ของผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง

3. เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary agitator) ที่มีอัตราหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 ^{0}C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
4. กรองสารละลายจากการสกัดด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน
5. นำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณนิกเกิลโดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer
6. วัดค่า pH และความนำไฟฟ้าของน้ำสกัด

การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในการทำให้เป็นก้อนตะกอนที่มีนิกเกิล โดยใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนและอัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 ใช้เวลาบ่ม 7 วัน โดยแปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ดังนี้ 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.7

ก้อนตัวอย่างที่*	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน			
	0.2	0.4	0.6	0.7
1				
2				
3				

* อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนและอัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยได้จากอัตราส่วนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2

ทำการทดลองดังนี้

ก. ทดลองหล่อก้อนตัวอย่างตามวิธีในการทดลองที่ 2 โดยเปลี่ยนค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานโดยใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน และอัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยตามค่าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 โดยหล่อตัวอย่างในแต่ละส่วน 3 ก้อนตัวอย่าง และเพิ่มการหล่อปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยตามอัตราส่วนแต่ละค่า 2 ก้อนตัวอย่างและเพิ่มที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.5 อีก 2 ก้อนตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบ และทดสอบกำลังอัดและความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง

ข. ทดสอบการละลายของนิกเกิล ทำการทดลองเช่นเดียวกับวิธีในการทดลองที่ 2

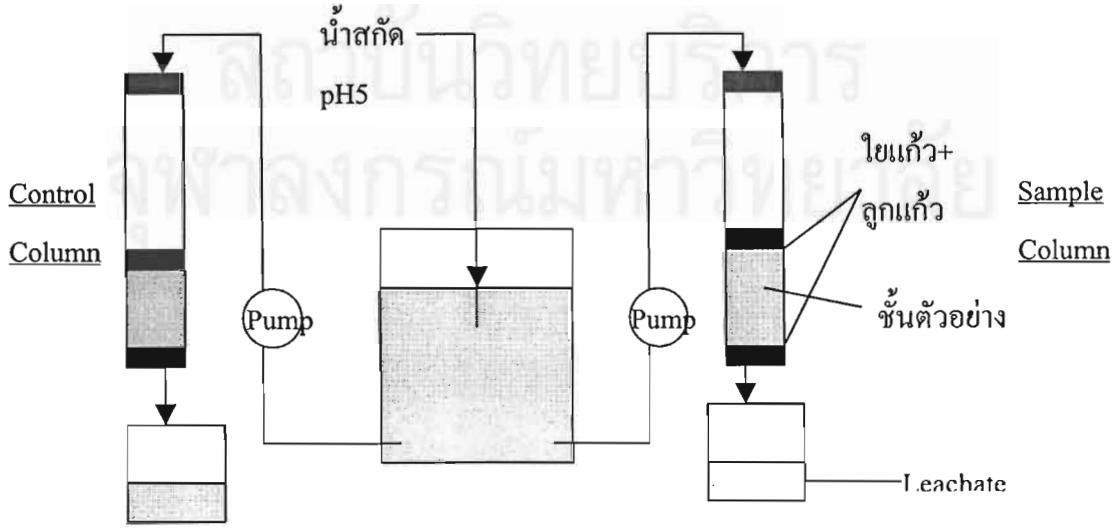
การทดลองที่ 4 ทดสอบการชะละลายในระยะยาวโดยทำการทดสอบกับสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 1 และอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 2

วิธีการทดสอบดังนี้

1. บดตัวอย่างให้มีขนาดประมาณ 9.5 มม.
2. บรรจุลงในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ซม. รองด้านบนและล่างด้วยใยแก้วและลูกแก้วปล่อยให้น้ำสกัดที่มีค่าพีเอช 5 ไหลผ่านชั้นตัวอย่างด้วยปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่าของน้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)
3. เก็บตัวอย่างน้ำวิเคราะห์พีเอช ความนำไฟฟ้า และปริมาณนิกเกิลที่เวลาเริ่มต้น 1 วัน 7 วัน 14 วัน 28 วัน 63 วัน และ 90 วัน

การทดลองที่ 5 ประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการกำจัดกากตะกอนที่มีนิกเกิลและ ประมาณค่าใช้จ่ายต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ดังต่อไปนี้

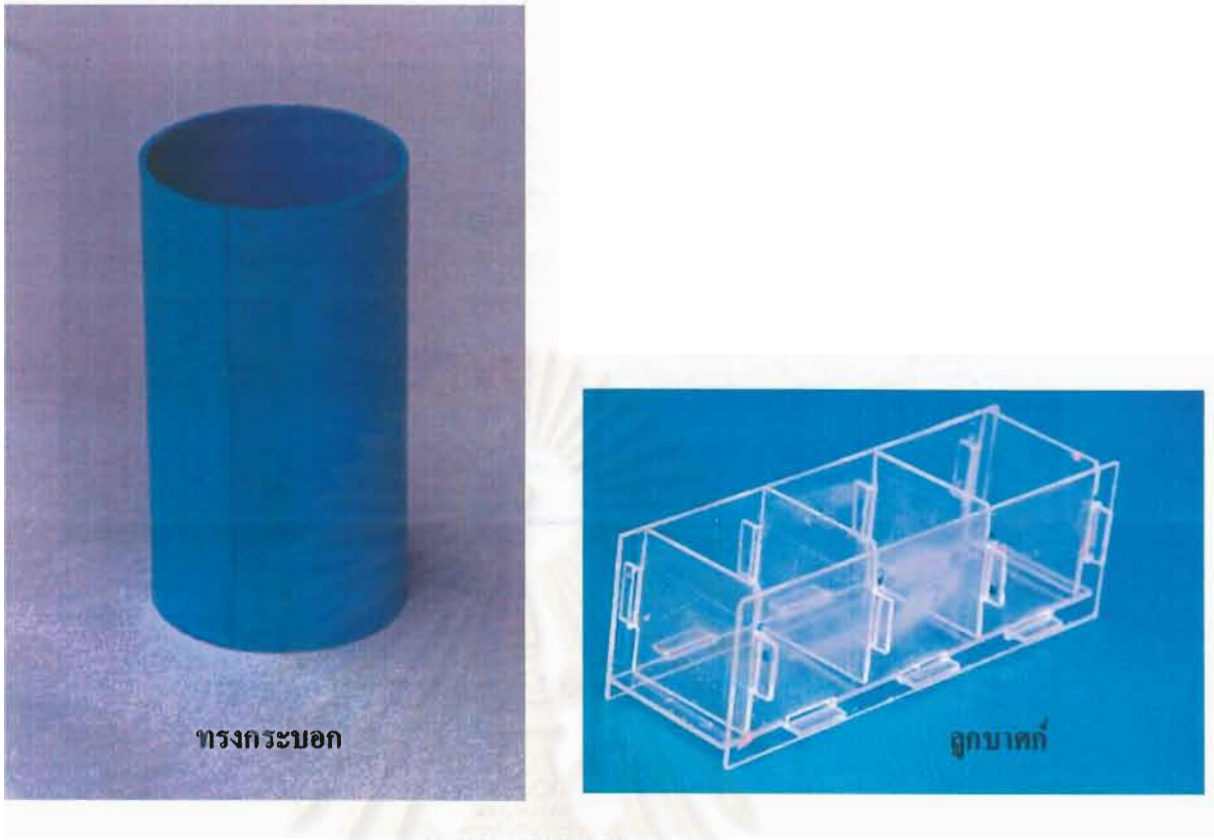
วัสดุผสม		การทำเสถียรด้วยปูนขาว	ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาวและเถ้าลอย	ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย
ส่วนประกอบ	ราคา/กิโลกรัม			
ปูนขาว เถ้าลอยลิกไนต์ ปูนซีเมนต์ น้ำ				
รวม				



รูปที่ 4.1 แผนภาพการทดสอบการชะละลายในระยะยาว

รูปที่ 4.2 ภาพเครื่องมือทดสอบการชะละลายระยะยาว

รูปที่ 4.3 ลักษณะของวัสดุประสานและตะกอนที่มีนิกเกิล

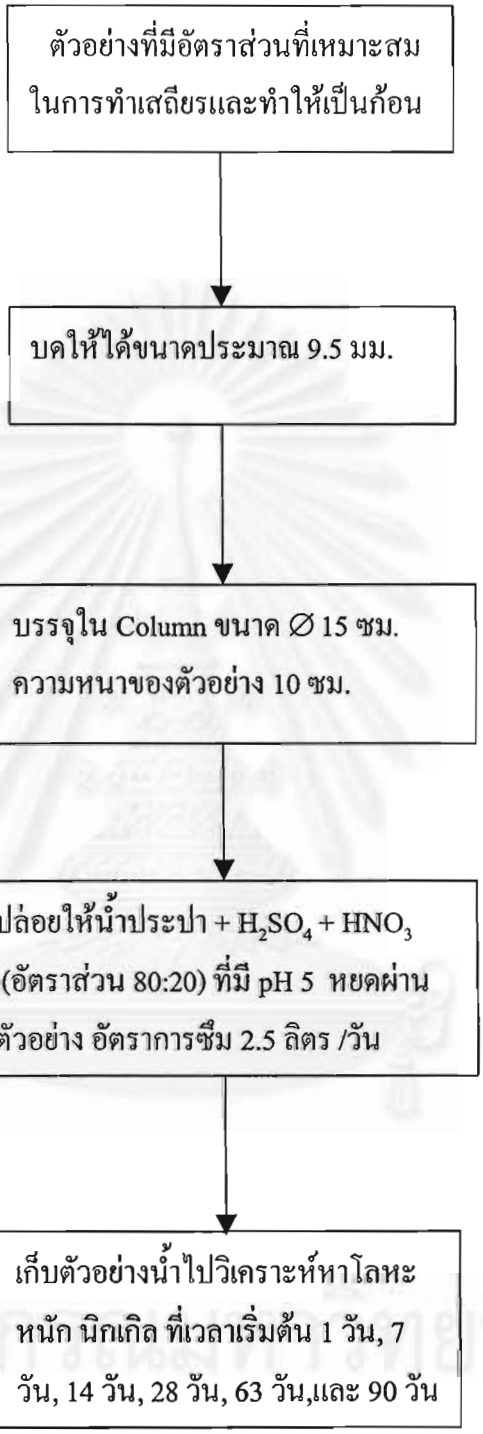


รูปที่ 4.4 ลักษณะของแบบหล่อตัวอย่าง

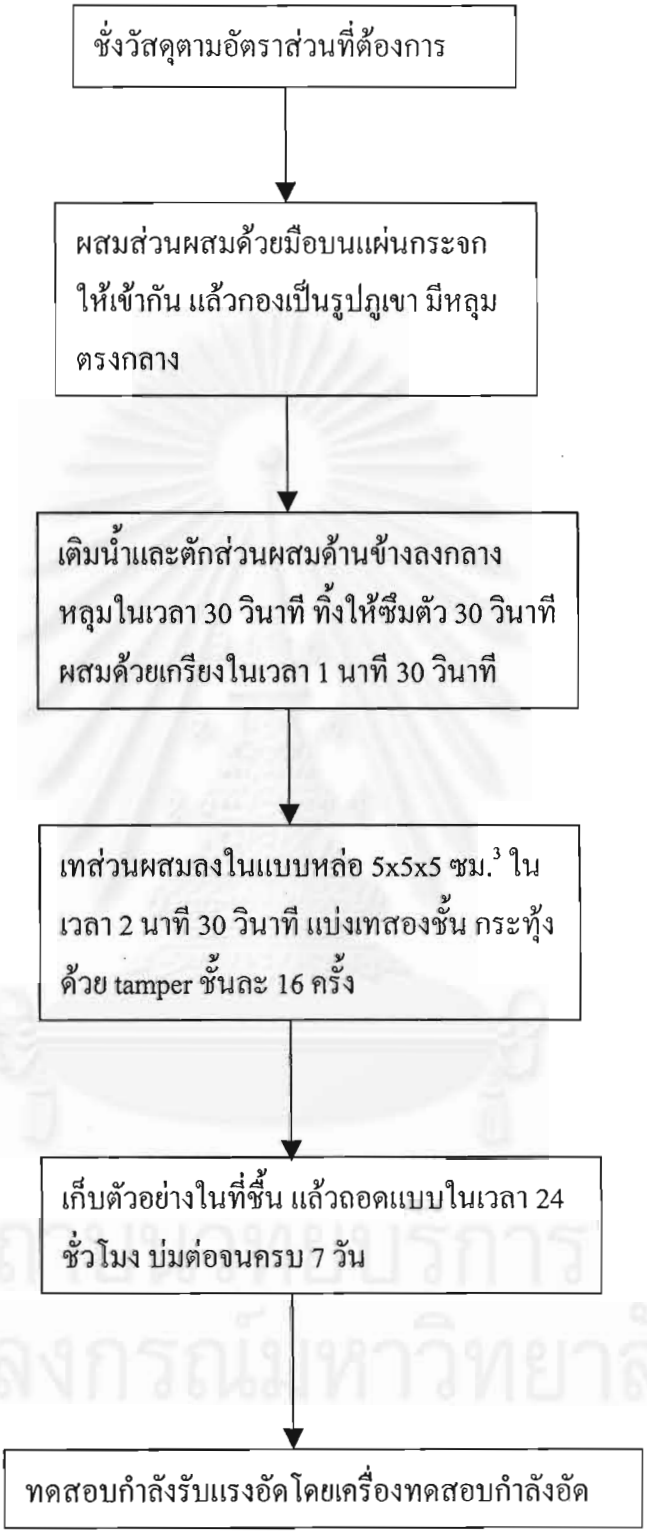
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างของเสียที่ผ่านการทำให้เสถียรและทำให้เป็นก้อน

รูปที่ 4.6 รูปแสดงลักษณะของเครื่องมือทดสอบการชะละลาย

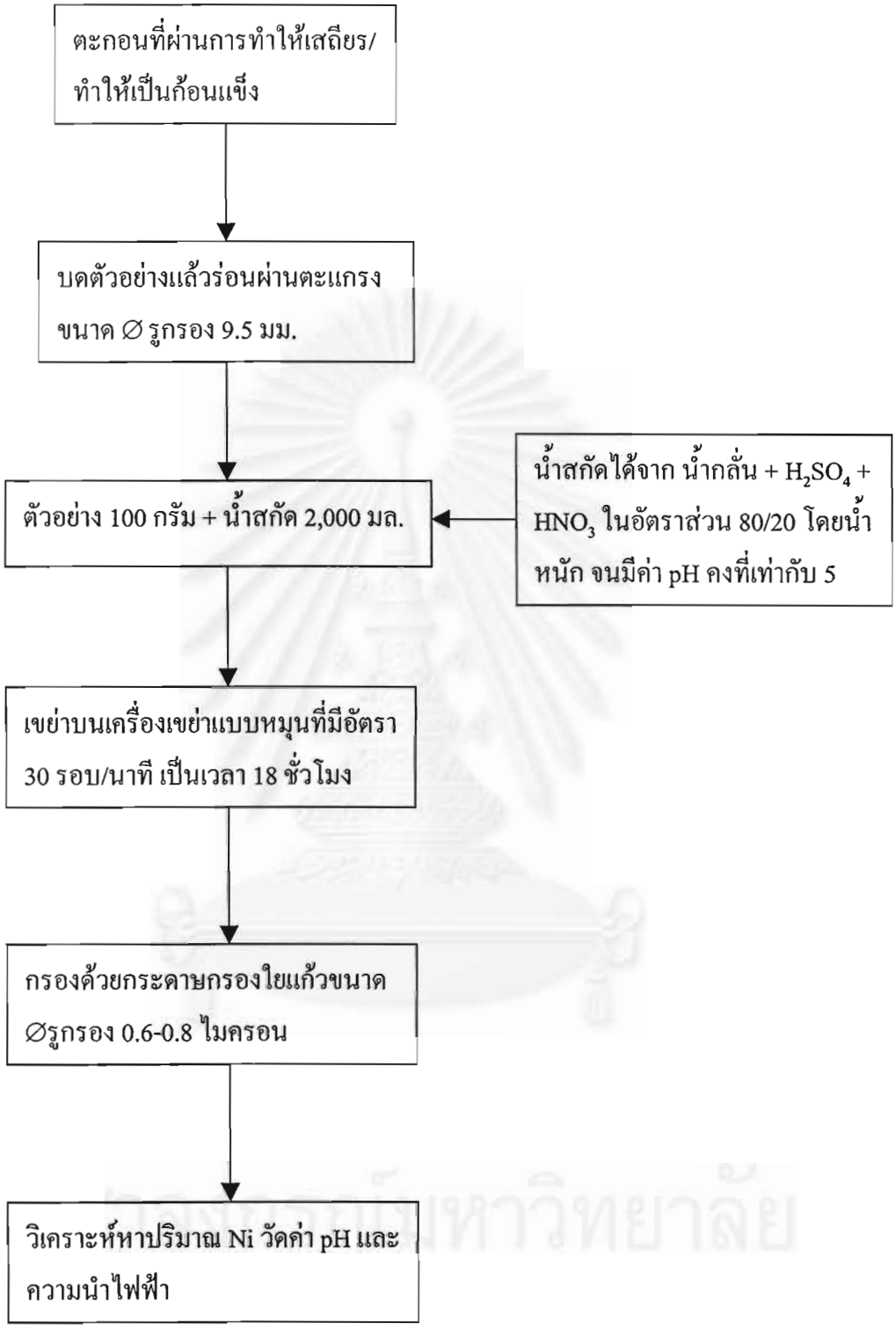
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 ขั้นตอนการทดสอบการชะละลายในระยะยาว



รูปที่ 4.8 ขั้นตอนการหล่อตัวอย่างและทดสอบกำลังอัด



รูปที่ 4.9 ขั้นตอนการทดสอบการชะละลายของนิกเกิล

บทที่ 5
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

5.1 ลักษณะสมบัติของตะกอนที่มีนิกเกิล

5.1.1 สมบัติทางกายภาพของตะกอนที่มีนิกเกิล

- การกระจายขนาดคละ

ทำการทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM C136-80 ผลที่ได้พบว่าตะกอนมีขนาดเฉลี่ย(D_{50})เท่ากับ 0.31 มม. และมีค่า Coefficient of Uniformity (C_u) หรือ D_{50}/D_{10} เท่ากับ 4.21 โดยมีกราฟการกระจายขนาดคละดังแสดงในรูปที่ ผ.1 (ภาคผนวก ก.)

- ความหนาแน่นรวม(Bulk Density)

ทำการทดสอบโดยการแทนที่น้ำสามครั้งได้ค่าความหนาแน่นของตะกอนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.06 ตัน/ลบ.ม. ผลการทดลองแสดงไว้ในตาราง ผ.1 (ภาคผนวก ก.)

5.1.2 องค์ประกอบของตะกอนที่มีนิกเกิล

ผลการวิเคราะห์ตะกอนที่มีนิกเกิลด้วยการย่อยด้วยกรดและวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบเปลวเพลิง (Flame Atomic Absorption Spectrophotometer) ได้ปริมาณโลหะหนักที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ได้แก่นิกเกิลส่วนโลหะหนักชนิดอื่นๆพบในปริมาณที่น้อยมาก

ตารางที่ 5.1 ปริมาณโลหะหนักในตะกอนที่มีนิกเกิล

โลหะหนัก	ปริมาณโลหะหนัก(มก./ก.)	
	ค่าที่วัดได้	ขวัญเรือน(2540)
นิกเกิล (Ni)	334	488.1
โครเมียม (Cr)	0.02	1.15
ตะกั่ว (Pb)	0.36	ND
แคดเมี่ยม (Cd)	ND	ND
ปรอท (Hg)	-	ND
อาร์เซนิค (As)	-	ND

หมายเหตุ - ไม่ได้วิเคราะห์

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลคิดเป็น 33.4 % ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ EDX

ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ EDX (Energy Dispersive X-ray Spectrometry ทำการวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) ได้ส่วนประกอบของตะกอนที่ใช้ในการวิจัยมีปริมาณนิกเกิล 22.89% (ผลการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ก.)

ส่วนผลการวิเคราะห์ตะกอนดังกล่าวเก็บตัวอย่างโดย ธนียา (2540) พบปริมาณนิกเกิล 43.2 % ซึ่งค่าที่แตกต่างกันอาจเป็นผลเนื่องมาจากตะกอนที่ใช้เก็บมาจากระบบจริงซึ่งปริมาณนิกเกิลสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามภาระที่เกิดในระบบผลิต

5.1.3 การทดสอบการชะละลายของตะกอนที่มีนิกเกิล

การทดสอบการชะละลายของตะกอนที่มีนิกเกิลตามมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม โดยทำการปรับพีเอชเมื่อเริ่มต้นเพื่อให้ได้พีเอช 5 ตามมาตรฐาน รวมทั้งทำการปรับพีเอชทุก 6 ชั่วโมง (เลือกปรับพีเอชทุก 6 ชม. เนื่องจากได้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงพีเอชในช่วง 18 ชม.ของการทดสอบการชะละลายซึ่งทำการทดลองโดย ประเสริฐ(2541) พบว่าที่ 6 ชม. มีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างคงที่และสามารถทำงานได้สะดวกในช่วงระยะเวลาดังกล่าว) ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำสกัดดังแสดงในตารางที่ 5.2 พบว่าเมื่อปรับพีเอชเพื่อรักษาค่าพีเอชให้ค่อนข้างคงที่ที่ 5 ปริมาณโลหะหนักนิกเกิลมีค่าสูงขึ้นมากทั้งนี้เป็นผลมาจากความสามารถในการถูกชะละลายของโลหะไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นในสภาวะที่เป็นกรดดังแสดงในรูปที่ 3.1

ตารางที่ 5.2 ปริมาณโลหะหนักจากการทดสอบการชะละลาย

โลหะหนัก	ปริมาณโลหะหนักในตะกอน(มก./ล.)	
	ปรับพีเอชเมื่อเริ่มต้น	ปรับพีเอชทุก 6 ชม.
นิกเกิล (Ni)	604	3,545
โครเมียม (Cr)	0.26	0.33
ตะกั่ว (Pb)	0.03	0.07
แคดเมี่ยม (Cd)	0.11	0.14
ปรอท (Hg)	-	-
อาร์เซนิค (As)	-	-

หมายเหตุ – ไม่ได้วิเคราะห์

5.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนปูนขาวที่เหมาะสมในการทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิล

การทดลองนี้ได้ทำการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิลด้วยปูนขาว โดยแปรค่าอัตราส่วนของปูนขาวต่อตะกอนที่ใช้ตั้งแต่ 0.25 ถึง 1.00 และแปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานตั้งแต่ 0.40 ถึง 0.75 ใช้ระยะเวลาบ่ม 7 วัน หลังจากนั้นนำตะกอนที่ผ่านการทำเสถียรแล้วไป

ทดสอบลักษณะสมบัติทางกายภาพและทดสอบการชะละลาย และเปรียบเทียบผลกับเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนเพื่อเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสม ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

5.2.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตะกอนที่มีนิกเกิลที่ผ่านการทำเสถียร

- กำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 5.3 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของปูนขาวต่อตะกอนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (น้ำ:ปูนขาว) ต่างๆ ส่วนรูปที่ 5.1 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของปูนขาวต่อตะกอนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆของก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์และทรงกระบอก ผลการทดลองพบว่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน และจะมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอนเป็น 0.50 ซึ่งมีค่า 3.56 กก./ตร.ซม. สำหรับตัวอย่างรูปลูกบาศก์ และ 2.16 กก./ตร.ซม. สำหรับตัวอย่างรูปทรงกระบอก หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอนพบว่ากำลังรับแรงอัดลดลง ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างส่วนใหญ่ไม่ผ่านมาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2535 ซึ่งกำหนดไว้ที่ 3.5 กก./ตร.ซม. ยกเว้นที่อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอนเป็น 0.50 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.75 สำหรับก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์ นอกจากนี้พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ก้อนตัวอย่างแห้งเกินไปมีลักษณะร่วนทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าน้อย

กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์และทรงกระบอกจะมีค่าต่างกันเล็กน้อยโดยที่อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอนต่ำก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์เล็กน้อยทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่ปูนขาวมีปริมาณน้อย กำลังรับแรงอัดส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการบดอัดส่วนผสมในแบบหล่อดังนั้นตัวอย่างรูปทรงกระบอกซึ่งมีการบดอัดที่มากกว่าจึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวการยึดเกาะของปูนขาวมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อกำลังรับแรงอัดดังนั้นตัวอย่างรูปลูกบาศก์จึงมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า

ตารางที่ 5.3 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรที่อัตราส่วนต่างๆ

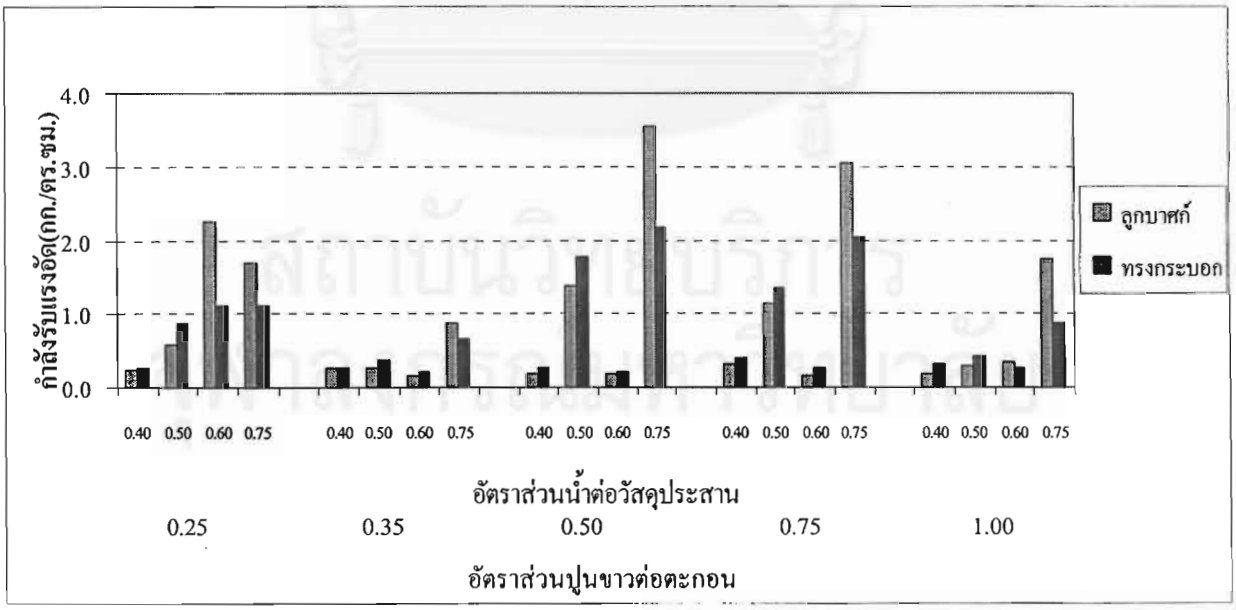
อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน							
	0.40		0.50		0.60		0.75	
	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก
0.25	0.23	0.25	0.23	0.35	0.13	0.22	0.69	0.63
0.35	0.27	0.27	0.26	0.36	0.16	0.21	0.87	0.66
0.50	0.18	0.27	1.37	1.77	0.19	0.21	3.56	2.16
0.75	0.32	0.39	1.14	1.36	0.16	0.26	3.04	2.05
1.00	0.18	0.33	0.30	0.43	0.33	0.27	1.76	0.89

- ความหนาแน่น

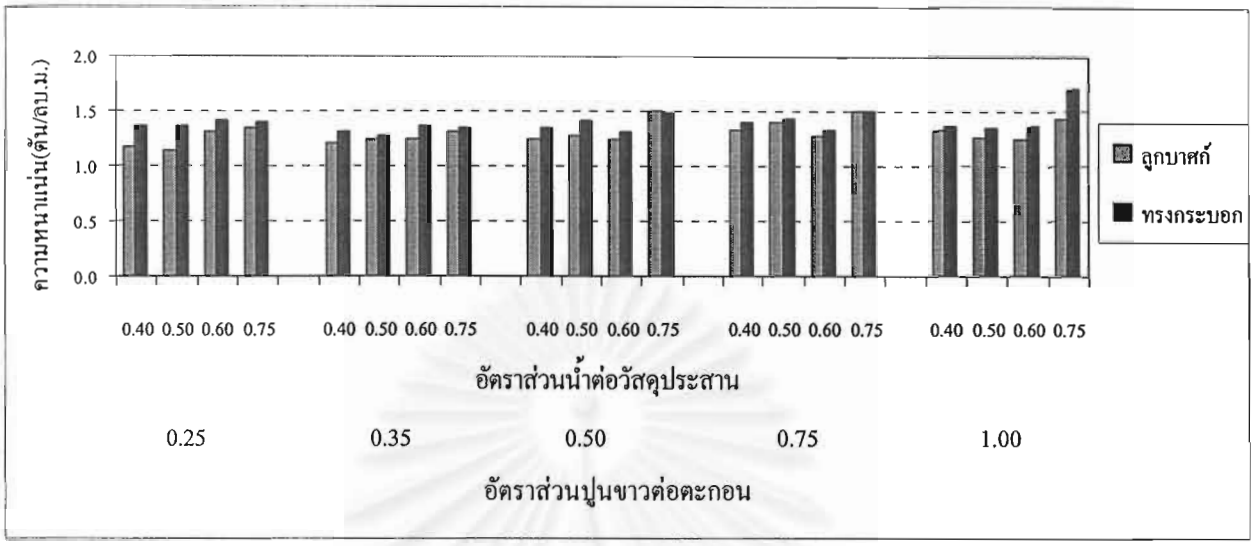
ตารางที่ 5.4 แสดงค่าความหนาแน่นที่อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอนและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบความหนาแน่นของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำเสถียรที่อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอนและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆของก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์และทรงกระบอก จากผลการทดลองพบว่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างมีค่าอยู่ระหว่าง 1.18-1.70 ตัน/ลบ.ม. ซึ่งผ่านมาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรมซึ่งกำหนดไว้ที่ 1.15 ตัน/ลบ.ม. โดยตัวอย่างรูปทรงกระบอกมีความหนาแน่นสูงกว่าตัวอย่างรูปลูกบาศก์ประมาณ 8%

ตารางที่ 5.4 ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรที่อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน							
	0.40		0.50		0.60		0.75	
	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก
0.25	1.18	1.36	1.13	1.37	1.31	1.41	1.34	1.39
0.35	1.21	1.36	1.24	1.28	1.24	1.36	1.31	1.34
0.50	1.23	1.31	1.28	1.42	1.25	1.31	1.50	1.49
0.75	1.33	1.34	1.39	1.42	1.27	1.33	1.50	1.50
1.00	1.32	1.36	1.26	1.35	1.25	1.36	1.42	1.70



รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์และทรงกระบอก



รูปที่ 5.2 ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์และทรงกระบอกที่ผ่านการทำเสถียร

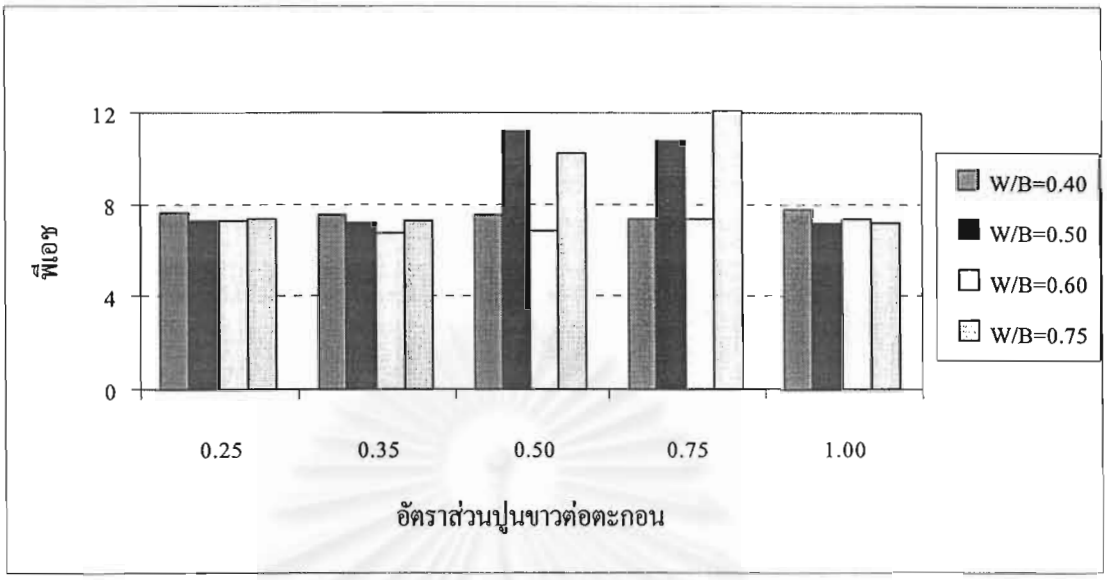
5.2.2 ผลการทดสอบการชะละลายของตะกอนที่มีนิกเกิลที่ผ่านการทำเสถียร

- พีเอช

จากการทดสอบการชะละลายโดยทำการปรับพีเอชทุก 6 ชั่วโมงพบว่าค่าพีเอชมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5 เมื่อทำการชะละลายในช่วงสุดท้ายซึ่งค่าพีเอชสุดท้าย (ชั่วโมงที่ 18) ที่ได้จากการทดลองแสดงไว้ใน ตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.3 แสดงผลของพีเอชของน้ำสกัดที่อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอนและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ

ตารางที่ 5.5 ค่าพีเอชของตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรที่อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วนปูนขาว ต่อตะกอน	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน			
	0.40	0.50	0.60	0.75
0.25	7.61	7.26	7.25	7.32
0.35	4.54	7.21	6.78	7.30
0.50	7.51	11.19	6.80	10.26
0.75	7.32	10.75	7.35	12.05
1.00	7.79	7.22	7.39	7.14



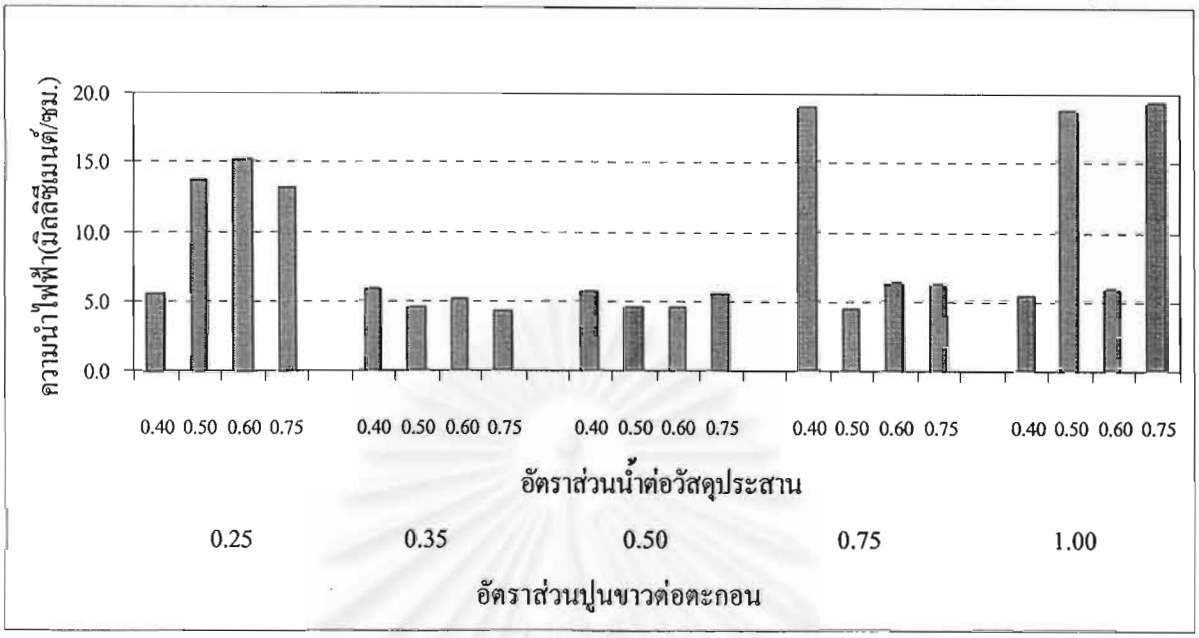
รูปที่ 5.3 ค่าพีเอชตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียร

- ค่าความนำไฟฟ้า

ตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.4 แสดงค่าความนำไฟฟ้าที่อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอนและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ ผลการทดสอบพบว่าค่าความนำไฟฟ้าของน้ำชะละลายมีค่าอยู่ระหว่าง 4.28 – 19.2 มิลลิซีเมนต์/ซม. ทั้งนี้เป็นผลมาจากการปรับพีเอชเพื่อให้คงที่ที่ 5 ซึ่งส่งผลให้เกิดการชะละลายโลหะหนักเพิ่มขึ้นและเพิ่มค่าความนำไฟฟ้า

ตารางที่ 5.6 ค่าความนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรที่อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน			
	0.40	0.50	0.60	0.75
0.25	5.54	13.71	15.13	13.08
0.35	5.90	4.50	5.09	4.28
0.50	5.69	4.59	5.60	4.62
0.75	18.95	4.40	6.22	6.13
1.00	5.24	18.67	5.77	19.2



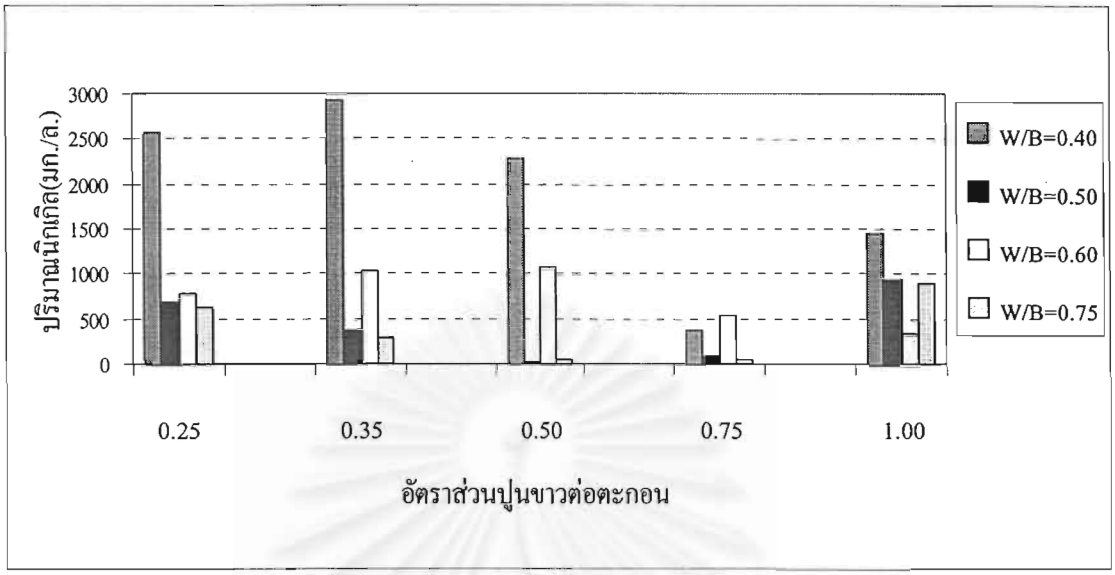
รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าที่ผ่านการทำเสถียรที่อัตราส่วนต่างๆ

- ปริมาณนิกเกิล

ตารางที่ 5.7 และรูปที่ 5.5 แสดงปริมาณนิกเกิลในน้ำสกัดที่อัตราส่วนปูนขาวต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆผลการทดสอบพบว่าปริมาณนิกเกิลในน้ำชะละลายมีค่าสูงมากที่อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอนต่ำๆและมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน

ตารางที่ 5.7 ปริมาณนิกเกิลในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรที่อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วนปูนขาว ต่อตะกอน	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน			
	0.40	0.50	0.60	0.75
0.25	2568.7	702.7	784.0	632.0
0.35	2932.7	387.8	1034.1	297.5
0.50	2290.3	28.5	1070.8	55.9
0.75	373.3	80.27	545.1	43.4
1.00	1464.3	940.3	341.1	899.0



รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบปริมาณนิกเกิลที่อัตราส่วนต่างๆ

สรุปอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำเสถียร

เนื่องจากโลหะหนักนิกเกิลไม่ได้ถูกกำหนดให้เป็นของเสียอันตรายการพิจารณาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดจึงต้องพิจารณาที่กำลังรับแรงอัดและค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างเป็นอันดับแรก และพิจารณาปริมาณโลหะนิกเกิลในน้ำชะละลายเป็นอันดับรอง ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนที่ผ่านมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งกำหนดไว้ที่ 3.50 กก./ตร.ซม. มีเพียงอัตราส่วนเดียวคืออัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอนที่ 0.50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.75 สำหรับก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์ ส่วนที่อัตราส่วนอื่นๆกำลังรับแรงอัดไม่ผ่านมาตรฐาน ค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างทุกอัตราส่วนผ่านมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งกำหนดไว้ที่ 1.15 ตัน/ลบ.ม. เมื่อพิจารณาปริมาณนิกเกิลในน้ำสกัดพบว่าอัตราส่วนที่ถูกชะละลายโลหะนิกเกิลได้ต่ำที่สุดคืออัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน 0.50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.50 ส่วนที่อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอนที่ 0.50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.75 ซึ่งมีปริมาณนิกเกิลถูกชะละลายออกมามากกว่าแต่เมื่อพิจารณาถึงกำลังรับแรงอัดแล้วจึงพิจารณาให้ที่อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน 0.50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.75 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด

5.3 ผลการศึกษาอัตราส่วนของวัสดุประสานที่เหมาะสมในการทำให้เป็นก้อนตะกอนที่มีนิกเกิล

การทดลองนี้ได้ทำการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำให้เป็นก้อนตะกอนที่มีนิกเกิลด้วยปูนขาวและเถ้าลอยลิกไนต์ โดยแปรค่าอัตราส่วนของวัสดุประสานต่อตะกอนที่ใช้ตั้งแต่ 0.25 ถึง 1.25 และอัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยลิกไนต์ตั้งแต่ 0.25 ถึง 1.50 โดยใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.50 ใช้ระยะเวลาบ่ม 7 วัน หลังจากนั้นนำตะกอนที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแล้วไปทดสอบลักษณะสมบัติทางกายภาพและทดสอบการชะละลาย และเปรียบเทียบผลกับเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนเพื่อเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสม ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

5.3.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตะกอนที่มีนิกเกิลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

- กำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 5.8 แสดงผลกำลังรับแรงอัดของตะกอนที่มีนิกเกิลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแล้วทั้งก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์และรูปทรงกระบอก รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่อัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยต่างๆของก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์และทรงกระบอก จากผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน (ปูนขาว+เถ้าลอย:ตะกอน) 0.25 และ 0.50 มีค่าต่ำมากทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากวัสดุประสานมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะพัฒนากำลังรับแรงอัด เมื่อเพิ่มอัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ส่วนผลของอัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยตั้งแต่ 0.25 ถึง 1.25 กำลังรับแรงอัดไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แต่ที่อัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอย 1.50 กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดซึ่งอาจเป็นผลมาจากปริมาณของสารปอซโซลานที่ไม่เพียงพอทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง อัตราส่วนที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดคือที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนเป็น 0.75 ที่อัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยเป็น 1.00 รูปที่ 5.6 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 5.8 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน	อัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอย											
	0.25		0.50		0.75		1.00		1.25		1.50	
	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก
0.25	0.26	0.28	0.20	0.13	0.14	0.54	0.46	0.72	0.15	0.15	0.81	0.77
0.50	0.38	0.49	0.28	0.29	0.28	0.32	0.23	0.28	0.27	0.25	0.19	0.22
0.75	0.87	0.73	1.22	1.34	0.52	1.10	2.68	1.41	0.67	0.89	0.25	0.19
1.00	0.90	0.68	1.39	1.54	2.55	1.30	0.84	0.96	1.16	1.05	0.18	0.21
1.25	1.21	0.59	2.10	0.80	0.95	0.96	1.22	0.78	1.41	0.98	0.20	0.19

กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์และทรงกระบอกจะมีค่าต่างกันเล็กน้อยโดยที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนมีค่าต่ำก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์เล็กน้อยทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่วัสดุประสานมีปริมาณน้อยไม่เพียงพอต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงอัดส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการบดอัดส่วนผสมในแบบหล่อดังนั้นตัวอย่างรูปทรงกระบอกซึ่งมีการบดอัดที่มากกว่าจึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุประสานการก่อตัวของวัสดุประสานโดยปฏิกิริยาปอซโซลานิคมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อกำลังรับแรงอัดดังนั้นตัวอย่างรูปลูกบาศก์จึงมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า

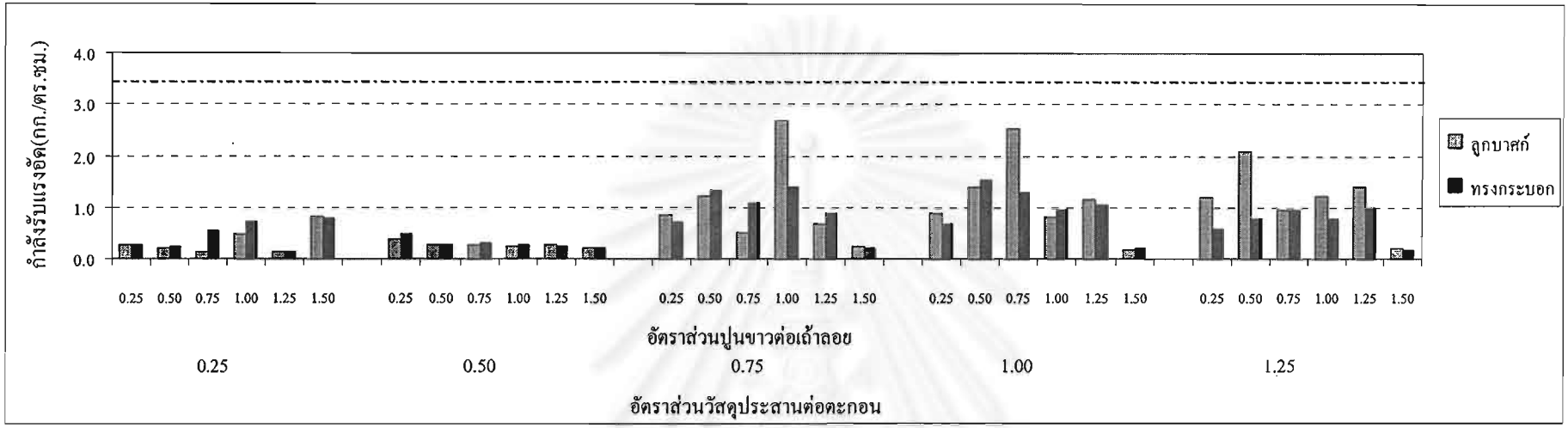
- ความหนาแน่น

ค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 1.23-1.72 ซึ่งความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างทุกอัตราส่วนผ่านมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (กำหนดไว้ที่ 1.15 ตัน/ลบ.ม.) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.9 แสดงผลของความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์และทรงกระบอกที่อัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยต่างๆ

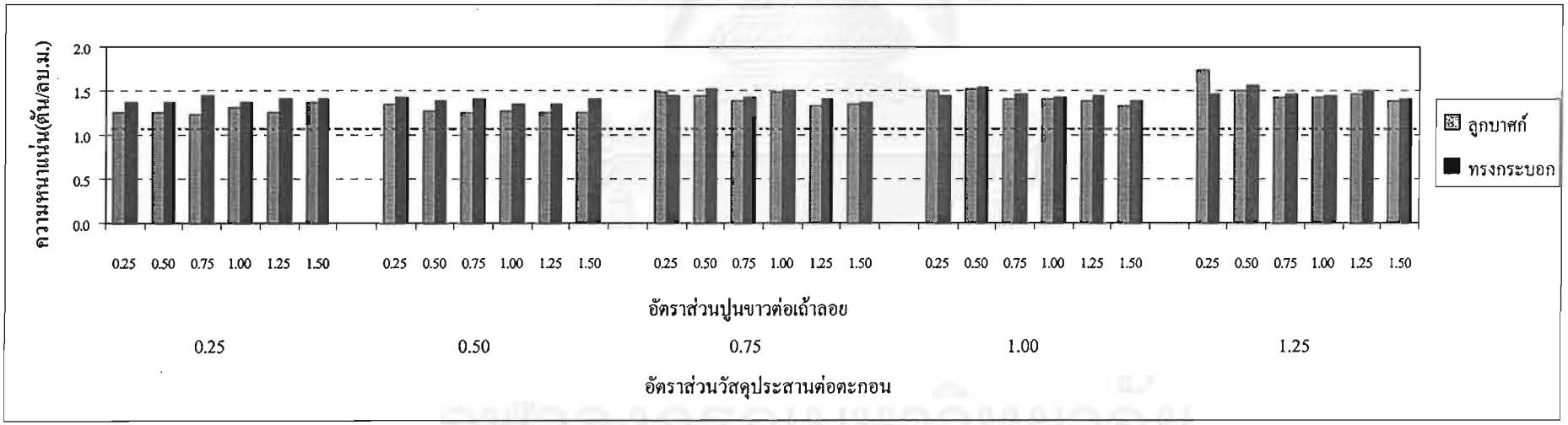
ตารางที่ 5.9 ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนที่อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน	อัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอย											
	0.25		0.50		0.75		1.00		1.25		1.50	
	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก
0.25	1.24	1.36	1.24	1.37	1.23	1.44	1.30	1.36	1.25	1.40	1.36	1.40
0.50	1.34	1.42	1.26	1.38	1.25	1.41	1.27	1.34	1.25	1.34	1.26	1.41
0.75	1.48	1.44	1.45	1.53	1.39	1.42	1.48	1.50	1.33	1.41	1.35	1.37
1.00	1.50	1.44	1.51	1.55	1.41	1.46	1.40	1.43	1.38	1.44	1.33	1.39
1.25	1.72	1.47	1.50	1.55	1.43	1.46	1.42	1.45	1.46	1.50	1.38	1.41

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.6 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์และทรงกระบอกที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน



รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์และทรงกระบอกที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

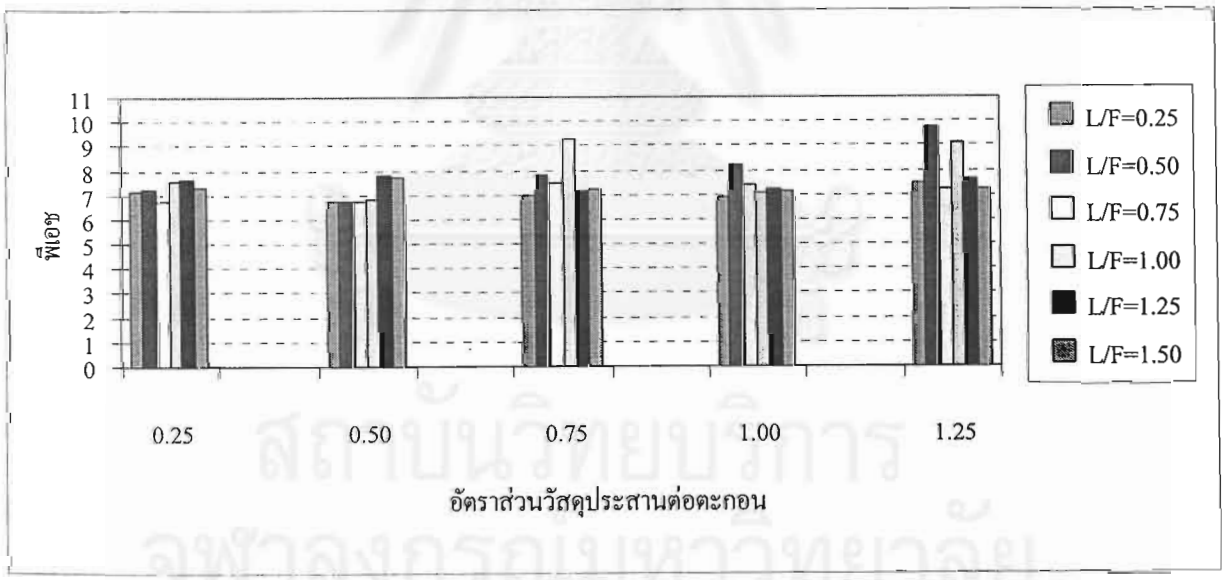
5.3.2 ผลการทดสอบการชะละลายของตะกอนที่มีนิกเกิลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

- พีเอช

จากการทดสอบการชะละลายโดยทำการปรับพีเอชทุก 6 ชั่วโมงพบว่าค่าพีเอชมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5 เมื่อทำการชะละลายในช่วงสุดท้ายซึ่งค่าพีเอชสุดท้ายมีค่าอยู่ในช่วง 6-9 ดังแสดงในตารางที่ 5.10 และรูปที่ 5.8 แสดงผลของพีเอชของน้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลายที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนและอัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยต่างๆ

ตารางที่ 5.10 ค่าพีเอชของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนที่อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วนปูนขาว	อัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอย					
ต่อตะกอน	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
0.25	7.13	7.19	6.73	7.54	7.63	7.32
0.50	6.74	6.76	6.74	6.81	7.78	7.70
0.75	7.02	7.83	7.47	9.26	7.10	7.18
1.00	6.86	8.19	7.40	7.06	7.20	7.17
1.25	7.44	9.78	7.23	9.13	7.59	7.25



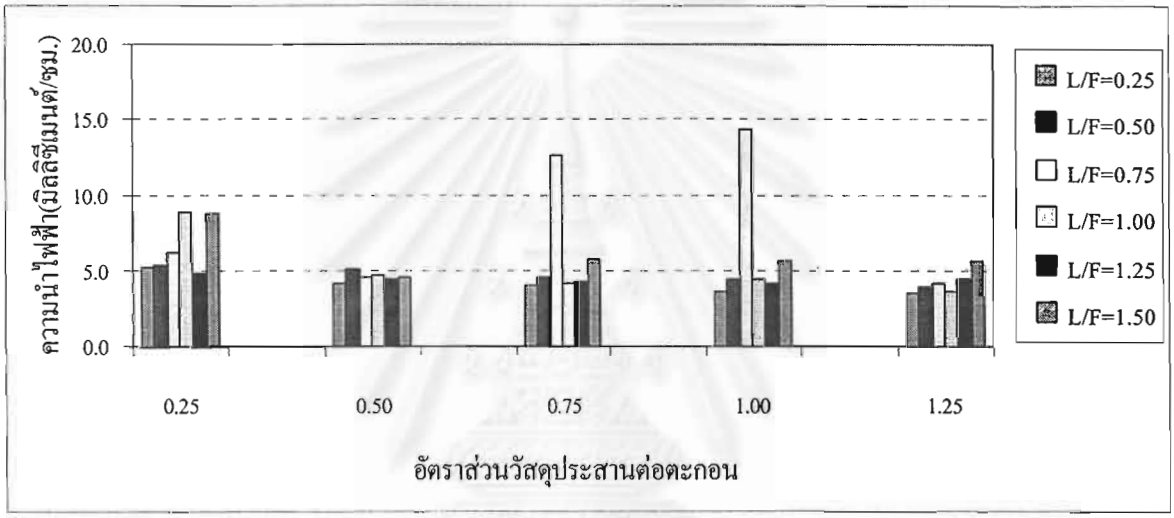
รูปที่ 5.8 ค่าพีเอชของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

- ความนำไฟฟ้า

ตารางที่ 5.11 และรูปที่ 5.9 เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าของน้ำสกัดที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนและอัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยต่างๆ ผลการทดสอบพบว่าค่าความนำไฟฟ้าของน้ำชะละลายมีค่าอยู่ระหว่าง 3.5-14.4 มิลลิซีเมนต์/ซม. ทั้งนี้เป็นผลมาจากการปรับพีเอชเพื่อให้คงที่ที่ 5 ซึ่งส่งผลให้เกิดการชะละลายโลหะหนักเพิ่มขึ้นและเพิ่มค่าความนำไฟฟ้า

ตารางที่ 5.11 ค่าความนำไฟฟ้าที่อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วนปูนขาว	อัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอย					
ต่อตะกอน	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
0.25	5.28	5.39	6.13	8.88	4.83	8.66
0.50	4.18	4.59	4.51	4.64	4.43	4.52
0.75	3.97	4.42	14.40	4.12	4.34	5.84
1.00	3.68	5.10	4.12	4.44	4.20	5.69
1.25	3.53	3.91	4.12	3.66	4.38	5.64



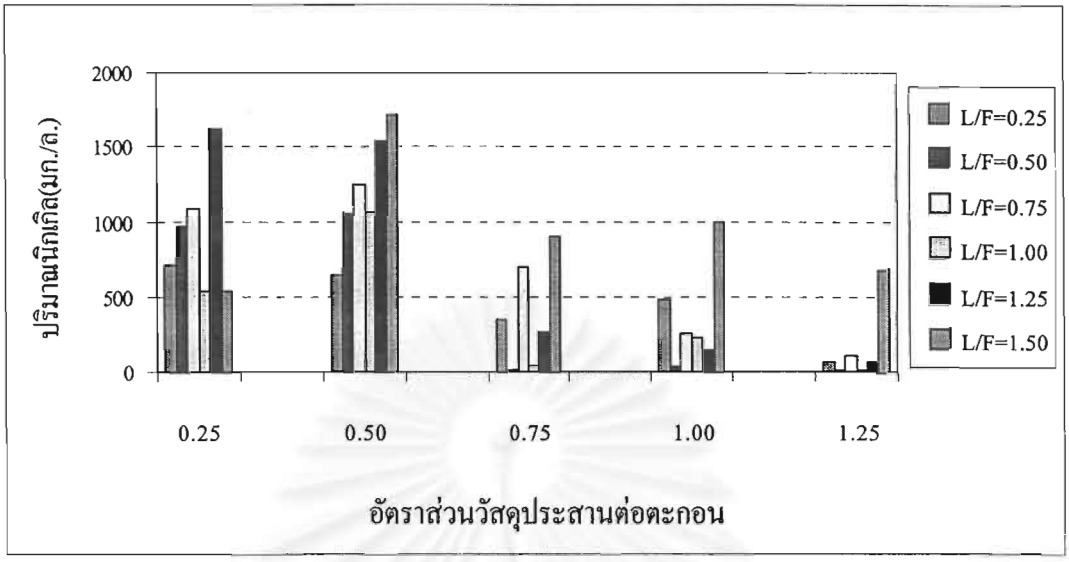
รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนที่อัตราส่วนต่างๆ

- ปริมาณนิกเกิล

ตารางที่ 5.12 และรูปที่ 5.10 เปรียบเทียบปริมาณนิกเกิลในน้ำสกัดที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนและอัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยต่างๆ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนปริมาณนิกเกิลในน้ำสกัดมีค่าลดลงทั้งนี้เนื่องจากการยึดประสานของวัสดุปอซโซลานที่มีมากกว่า

ตารางที่ 5.12 ปริมาณนิกเกิลในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนที่อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วนปูน	อัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอย					
ขาวต่อตะกอน	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
0.25	718.0	972.7	1083.0	1092.0	1629.3	532.0
0.50	647.2	1060.1	1251.0	1062.9	1545.7	1715.0
0.75	349.5	15.4	692.0	36.4	262.7	898.8
1.00	480.1	35.5	248.7	231.8	153.2	999.3
1.25	69.3	18.0	110.0	16.7	62.1	684.9



รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบปริมาณนิกเกิลในน้ำสกัดที่อัตราส่วนต่างๆ

สรุปอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำให้เป็นก้อน

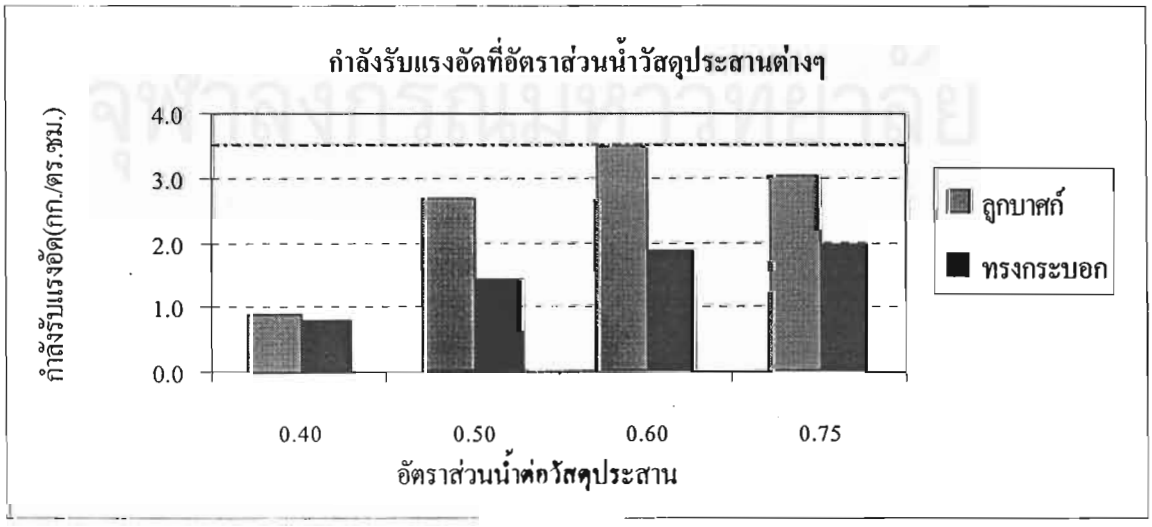
เนื่องจากโลหะหนักนิกเกิลไม่ได้ถูกกำหนดให้เป็นของเสียอันตรายการพิจารณาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดจึงต้องพิจารณาที่กำลังรับแรงอัดและค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างเป็นอันดับแรก และพิจารณาปริมาณโลหะนิกเกิลในน้ำชะละลายเป็นอันดับรอง ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าไม่มีอัตราส่วนใดที่มีกำลังรับแรงอัดผ่านมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งกำหนดไว้ที่ 3.50 กก./ตร.ซม. อัตราส่วนที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดคือที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนเป็น 0.75 อัตราส่วนปูน-ขาวต่อเถ้าลอยเป็น 1.00 มีค่ากำลังรับแรงอัด 2.68 กก./ตร.ซม. สำหรับตัวอย่างรูปลูกบาศก์ และ 1.41 กก./ตร.ซม. สำหรับตัวอย่างทรงกระบอก ค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างทุกอัตราส่วนผ่านมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งกำหนดไว้ที่ 1.15 ตัน/ลบ.ม. ส่วนปริมาณนิกเกิลในน้ำสกัดพบว่าอัตราส่วนที่ถูกชะละลายโลหะนิกเกิลได้ต่ำที่สุดคือที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนเป็น 0.75 อัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยเป็น 0.50 แต่เมื่อพิจารณาทั้งกำลังรับแรงอัดและปริมาณนิกเกิลในน้ำสกัดแล้วพบว่าถึงแม้ว่าปริมาณนิกเกิลในน้ำสกัดของอัตราส่วนแรกที่กล่าวมาข้างต้นจะมีค่าสูงกว่าแต่ว่ามีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญจึงพิจารณาให้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน 0.75 อัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้า-ลอย 1.00 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อทำการทดลองในด้านอื่นๆต่อไป

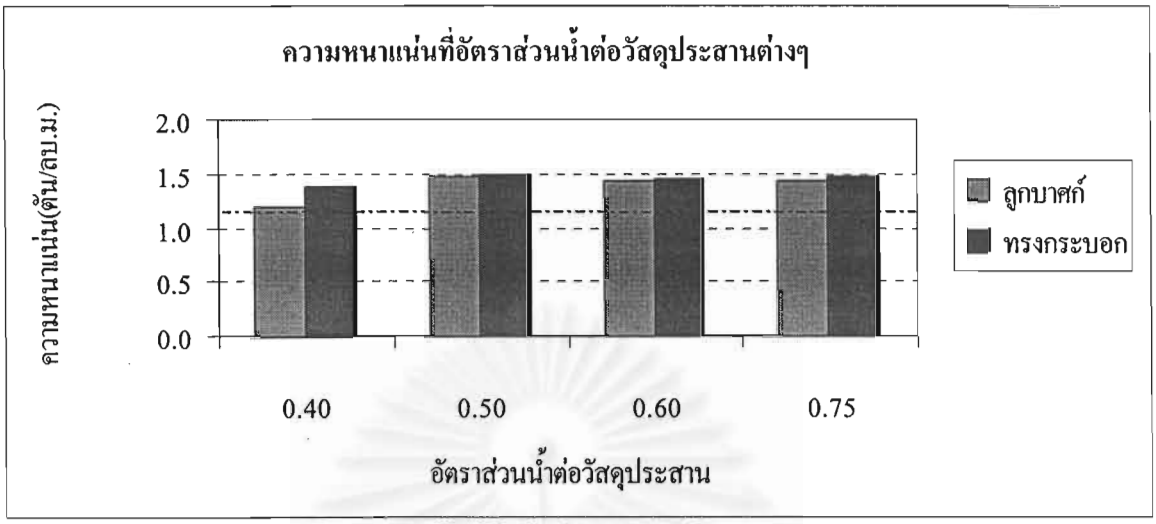
5.4 ผลการศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในการทำให้เป็นก้อนตะกอนที่มีนิกเกิล

การทดลองนี้ได้ทำการแปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (น้ำ:ปูนขาว+เถ้าลอย) ตั้งแต่ 0.4 ถึง 0.75 ใช้ระยะเวลาบ่ม 7 วัน หลังจากนั้นนำตะกอนที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแล้วไปทดสอบลักษณะสมบัติทางกายภาพ และทดสอบการชะละลาย จากนั้นนำมาเปรียบเทียบผลกับเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนเพื่อเลือกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสม ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 5.13 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นและที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.60 ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุดสำหรับตัวอย่างรูปลูกบาศก์ ส่วนตัวอย่างทรงกระบอกค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.75 ส่วนปริมาณนิกเกิลในน้ำชะละลายที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.50 ถูกชะละลายโลหะหนักได้น้อยที่สุด รูปที่ 5.11 แสดงสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ ส่วนรูปที่ 5.12 แสดงผลการทดสอบการชะละลายที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ

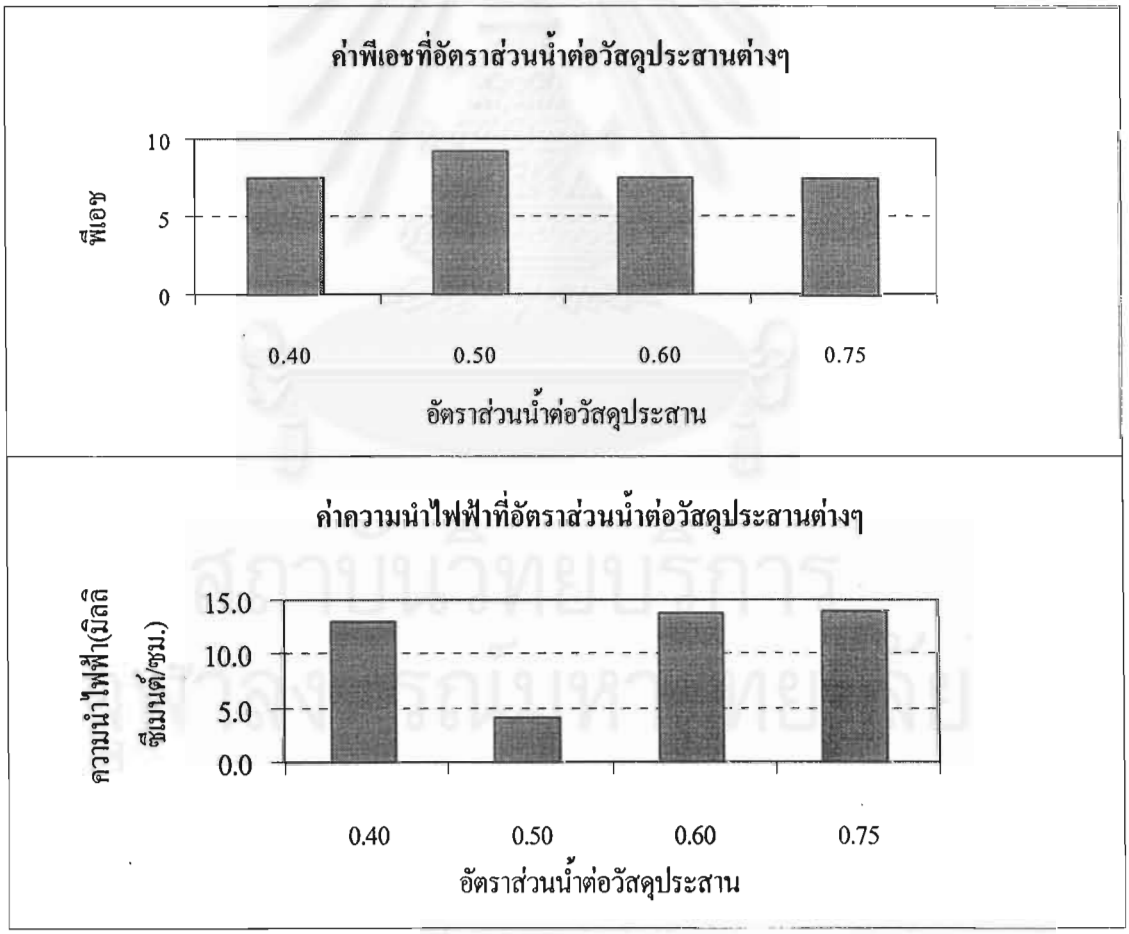
ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

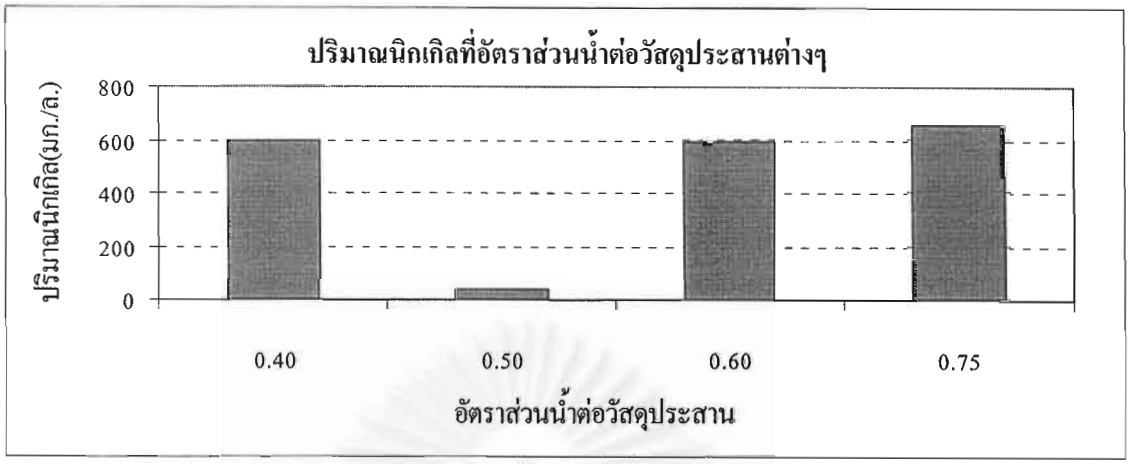
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	สมบัติทางกายภาพ				ผลการทดสอบการชะละลาย		
	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)		ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)		พีเอช	ความนำไฟฟ้า(มล. ซีเมนต์/ซม.)	ปริมาณนิกเกิล (มก./ล.)
	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก			
0.40	0.88	0.78	1.20	1.38	7.50	13.12	598.0
0.50	2.69	1.41	1.48	1.50	9.26	4.12	36.4
0.60	3.49	1.86	1.43	1.46	7.49	13.77	588.0
0.75	3.03	1.96	1.44	1.47	7.52	13.97	646.0





รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ





รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบผลการทดสอบการชะละลายที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพที่สำคัญเป็นอันดับแรกนั่นคือกำลังรับแรงอัดพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 และ 0.75 มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาปริมาณนิกเกิลร่วมด้วยพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ให้ค่าที่ต่ำกว่า ดังนั้นจึงให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.60

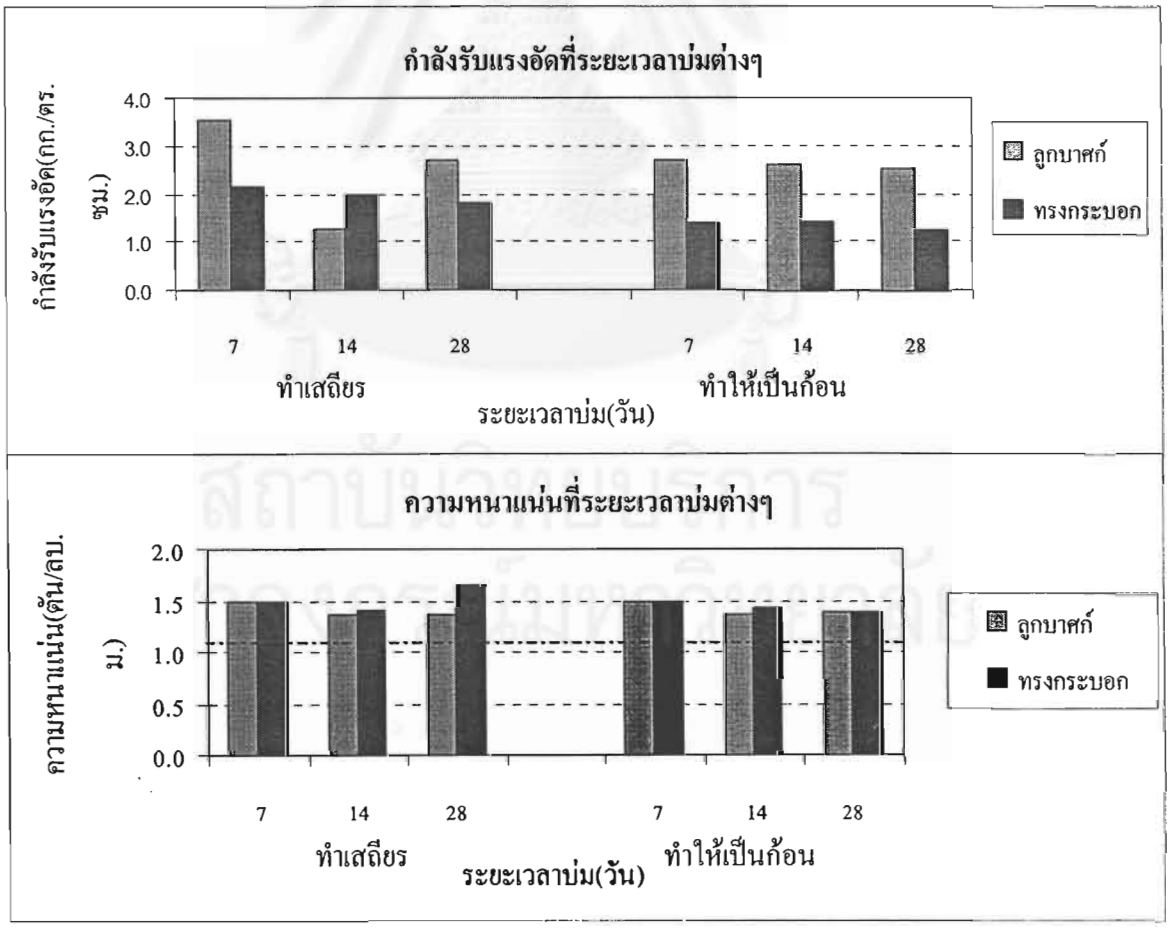
5.5 ผลของระยะเวลาบ่มต่ออัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 5.14 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและผลการชะละลายของก้อนตัวอย่างที่บ่มเป็นเวลา 7, 14, และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่าสำหรับตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่ปูนขาวไม่ได้ช่วยจับยึดของเสียด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ระยะเวลาบ่มจึงไม่ได้พัฒนากำลังรับแรงอัด และจากการสังเกตพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มก้อนตัวอย่างมีความเปียกชื้นเพิ่มมากขึ้นจนมีลักษณะแฉะเป็นผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง ส่วนตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนนั้นปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่ต้องการระยะเวลานานในการพัฒนากำลังรับแรงอัด และต้องการอุณหภูมิค่อนข้างสูงในการบ่มแต่ในการทดลองได้ทำการบ่มที่ที่มีความชื้นมากจึงอาจเป็นเหตุให้กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างไม่เพิ่มขึ้น รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

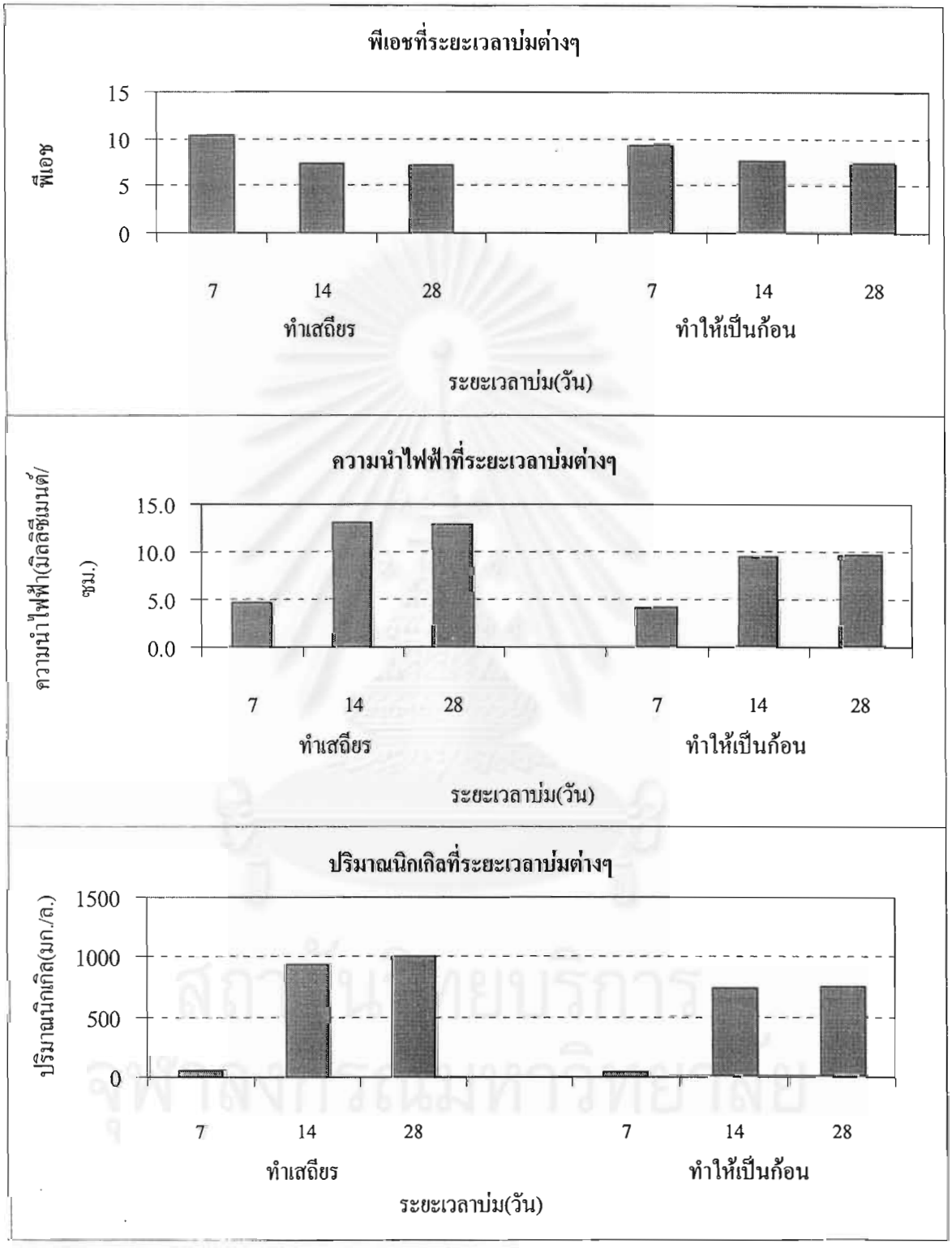
จากผลการทดลองแปรค่าระยะเวลาบ่มของตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรพิจารณาสมบัติทางกายภาพคือกำลังรับแรงอัดพบว่าที่เวลาบ่ม 7 วันให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เมื่อพิจารณาปริมาณนิกเกิลร่วมด้วยที่เวลาบ่ม 7 วันก็ยังคงให้ค่าที่ดีที่สุดดังนั้นที่เวลาบ่ม 7 วันจึงเป็นระยะเวลาบ่มที่ดีที่สุด ส่วนผลของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนพบว่าที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 14 วัน ให้ค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาปริมาณนิกเกิลร่วมด้วยพบว่าที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน มีปริมาณนิกเกิลที่ถูกชะออกมาน้อยกว่ามาก ดังนั้นระยะเวลาบ่มที่เหมาะสมของการทำให้เป็นก้อนจึงเป็น 7 วัน

ตารางที่ 5.14 เปรียบเทียบผลของระยะเวลาบ่มของอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด

ระยะเวลาบ่ม	สมบัติทางกายภาพ				ผลการทดสอบการชะละลาย		
	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)		ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)		พีเอช	ความนำไฟฟ้า (มล.ซีเมนต์/ซม.)	ปริมาณนิกเกิล (มก./ล.)
	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก	ลูกบาศก์	ทรงกระบอก			
ทำเสถียร							
7 วัน	3.56	2.16	1.50	1.49	10.26	4.62	55.9
14 วัน	1.24	1.96	1.37	1.40	7.32	13.09	938.3
28 วัน	2.70	1.80	1.36	1.65	7.19	12.99	1005.3
ทำให้เป็นก้อน							
7 วัน	2.69	1.41	1.48	1.50	9.26	4.12	36.4
14 วัน	2.63	1.42	1.37	1.43	7.42	9.41	726.3
28 วัน	2.53	1.24	1.39	1.40	7.25	9.62	746.3



รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ



รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบผลการทดสอบการชะละลายที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ

5.6 เปรียบเทียบผลการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อน

พิจารณาผลการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนตะกอนที่มีนิกเกิลที่อัตราส่วนวัสดุประสานเดียวกันได้ผลดังตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.15 เปรียบเทียบการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อน

อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)		ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)		พีเอช	ความนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนต์/ซม.)	ปริมาณนิกเกิล (มก./ล.)
อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน 0.25							
ทำเสถียร	0.277	0.350	1.133	1.367	7.230	13.707	702.667
L/F= 0.25	0.263	0.283	1.243	1.360	7.127	5.277	717.967
L/F= 0.50	0.203	0.227	1.243	1.363	7.193	5.387	972.667
L/F= 0.75	0.137	0.540	1.233	1.440	6.733	6.127	1083.000
L/F= 1.00	0.463	0.723	1.300	1.357	7.543	8.883	532.000
L/F= 1.25	0.153	0.153	1.247	1.397	7.630	4.830	1629.333
L/F= 1.50	0.810	0.773	1.360	1.397	7.323	8.660	532.000
อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน 0.50							
ทำเสถียร	1.370	1.770	1.283	1.420	11.190	4.593	28.500
L/F= 0.25	0.383	0.490	1.377	1.420	6.743	4.177	647.200
L/F= 0.50	0.277	0.290	1.263	1.377	6.763	4.587	1060.067
L/F= 0.75	0.280	0.317	1.250	1.407	6.737	4.507	1251.000
L/F= 1.00	0.230	0.280	1.267	1.340	6.813	4.637	1062.933
L/F= 1.25	0.267	0.250	1.247	1.340	7.783	4.427	1545.667
L/F= 1.50	0.190	0.220	1.257	1.413	7.697	4.520	1715.000
อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน 0.75							
ทำเสถียร	1.145	1.363	1.390	1.423	10.750	4.397	80.267
L/F= 0.25	0.870	0.730	1.477	1.437	7.017	3.970	349.500
L/F= 0.50	1.223	1.343	1.447	1.527	7.827	4.417	15.400
L/F= 0.75	0.520	1.097	1.393	1.420	7.470	12.647	692.000
L/F= 1.00	2.687	1.407	1.480	1.497	9.257	4.123	36.433

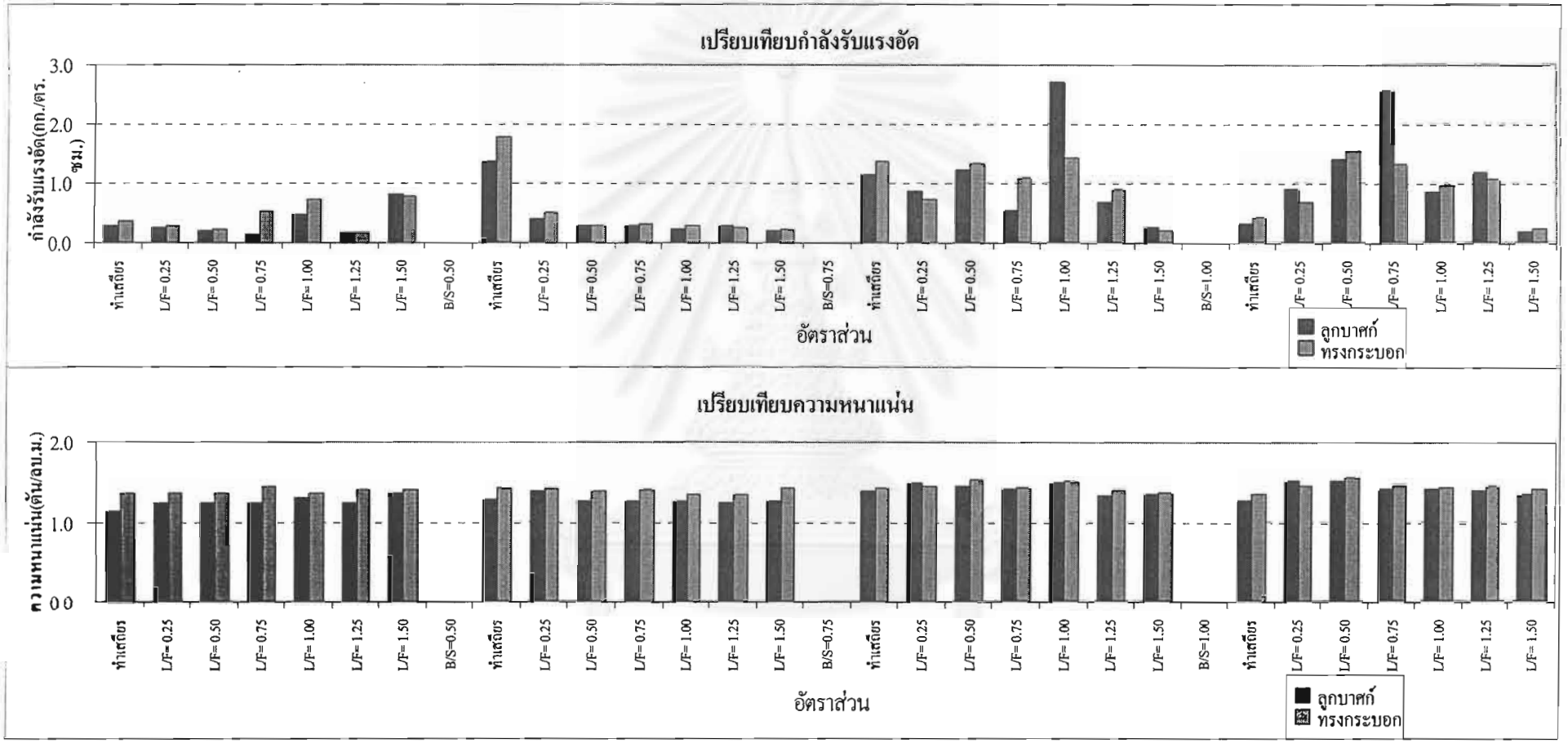
ตารางที่ 5.15 (ต่อ)

อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)		ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)		พีเอช	ความนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนต์/ซม.)	ปริมาณนิกเกิล (มก./ล.)
L/F= 1.25	0.673	0.887	1.327	1.407	7.103	4.337	262.667
L/F= 1.50	0.250	0.193	1.347	1.367	7.183	5.837	898.800
อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน 1.00							
ทำเสถียร	0.303	0.430	1.260	1.347	7.220	18.667	940.333
L/F= 0.25	0.900	0.680	1.497	1.440	6.857	3.680	480.067
L/F= 0.50	1.387	1.543	1.510	1.547	8.187	5.100	35.533
L/F= 0.75	2.547	1.300	1.410	1.457	7.403	14.397	248.667
L/F= 1.00	0.837	0.960	1.397	1.427	7.057	4.440	231.767
L/F= 1.25	1.157	1.047	1.383	1.437	7.200	4.203	153.200
L/F= 1.50	0.177	0.210	1.333	1.393	7.137	5.687	999.276

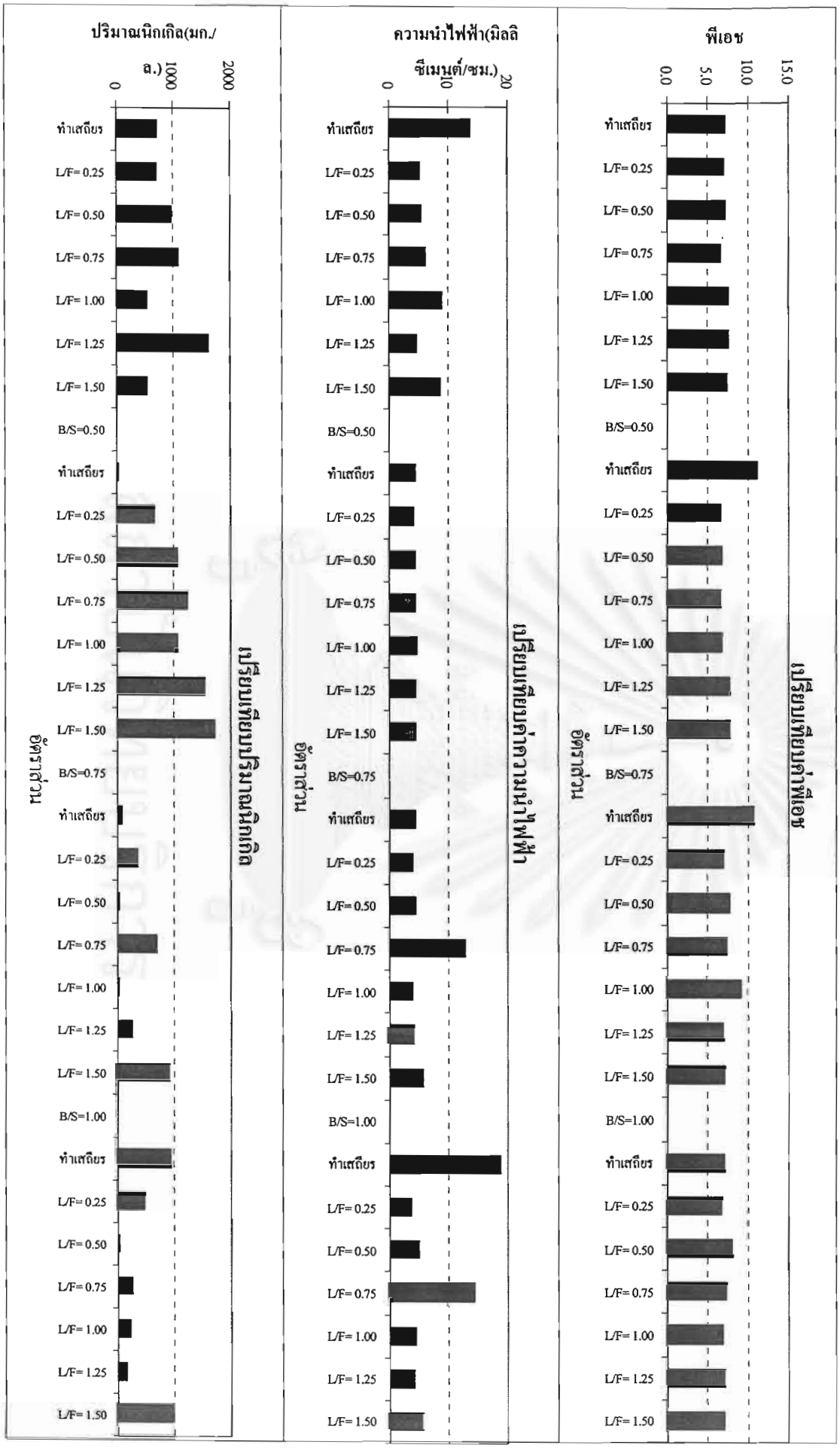
L/F = อัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยในการทำให้เป็นก้อน

จากผลการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพพบว่ากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนต่ำๆก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรจะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่ำการปริมาณของของปูนขาวและเถ้าลอยมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากัน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ทำให้เป็นก้อนจึงสูงขึ้น ส่วนค่าความหนาแน่นพบว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนทุกอัตราส่วน รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างที่ทำเสถียรและทำให้เป็นก้อน

ผลการทดสอบการชะละลายพบว่าค่าพีเอชของตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรค่อนข้างมีค่าสูงกว่าของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนเนื่องจากไฮดรอกไซด์ในปูนขาวที่หลุดออกมาเพิ่มค่าพีเอชของน้ำชะละลาย ค่าความนำไฟฟ้าของตัวอย่างส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนปริมาณนิกเกิลในน้ำชะละลายที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนต่ำๆตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรให้ปริมาณนิกเกิลในน้ำชะละลายต่ำกว่าของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่ำการปริมาณของปูนขาวและเถ้าลอยมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากันทำให้การยึดเกาะโลหะหนักไม่ดี เมื่อเพิ่มอัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนปริมาณนิกเกิลในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ทำให้เป็นก้อนจึงมีค่าต่ำกว่าของตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียร รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบผลการทดสอบการชะละลาย



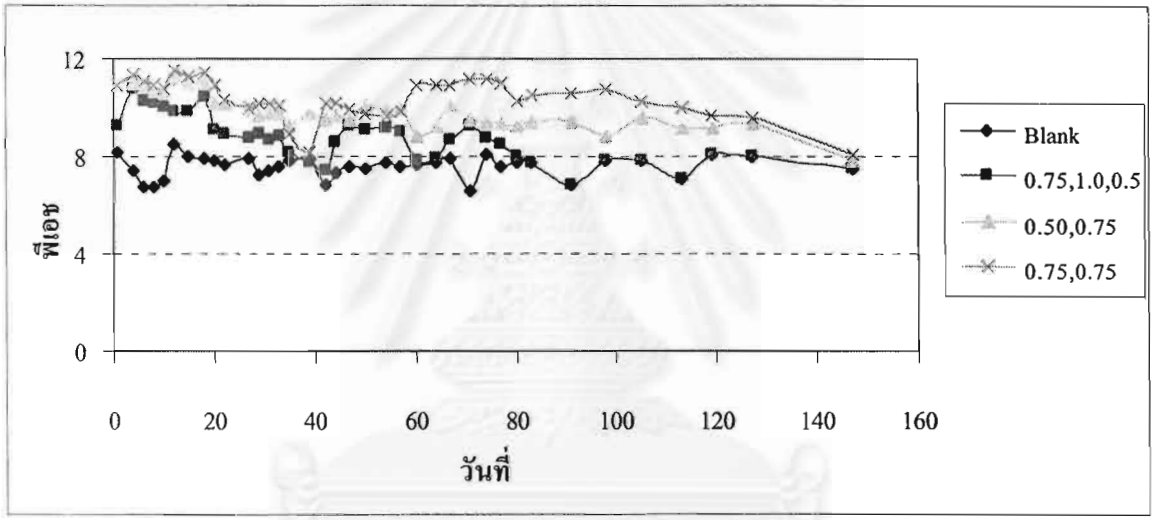
รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ



รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบผลการทดลองของตัวอย่างทั้งหมด

5.7 ผลการทดสอบการชะละลายในระยะยาว

การทดลองนี้ได้ทำการทดสอบกับอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการทำเสถียรและทำให้เป็นก้อนมาทำการทดสอบการชะละลายระยะยาว โดยการนำก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรและทำให้เป็นก้อนแล้วมาบดให้ได้ขนาดบรรจุในคอลัมน์ แล้วให้น้ำชะละลายไหลผ่าน เก็บน้ำชะละลายมาทำการวิเคราะห์ค่าพีเอช ความนำไฟฟ้า และปริมาณนิกเกิล จากผลการทดลองพบว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรที่อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน 0.75 มีค่าพีเอชสูงที่สุดทั้งนี้เนื่องจากไฮดรอกไซด์จากปูนขาวถูกน้ำสกัดชะออกมา ส่วนตัวอย่างที่ทำให้เป็นก้อนมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7-10 ตัวอย่างตะกอนเปล่ามีค่าพีเอชของน้ำชะละลายต่ำที่สุด ผลการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 5.17

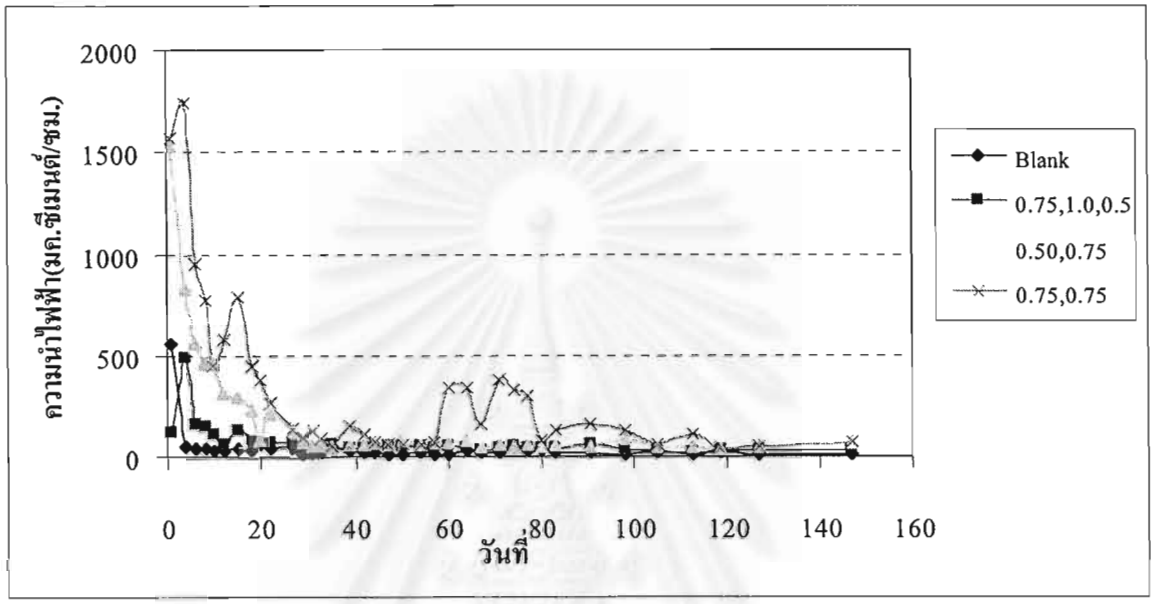


รูปที่ 5.17 ค่าพีเอชของน้ำชะละลายระยะยาว

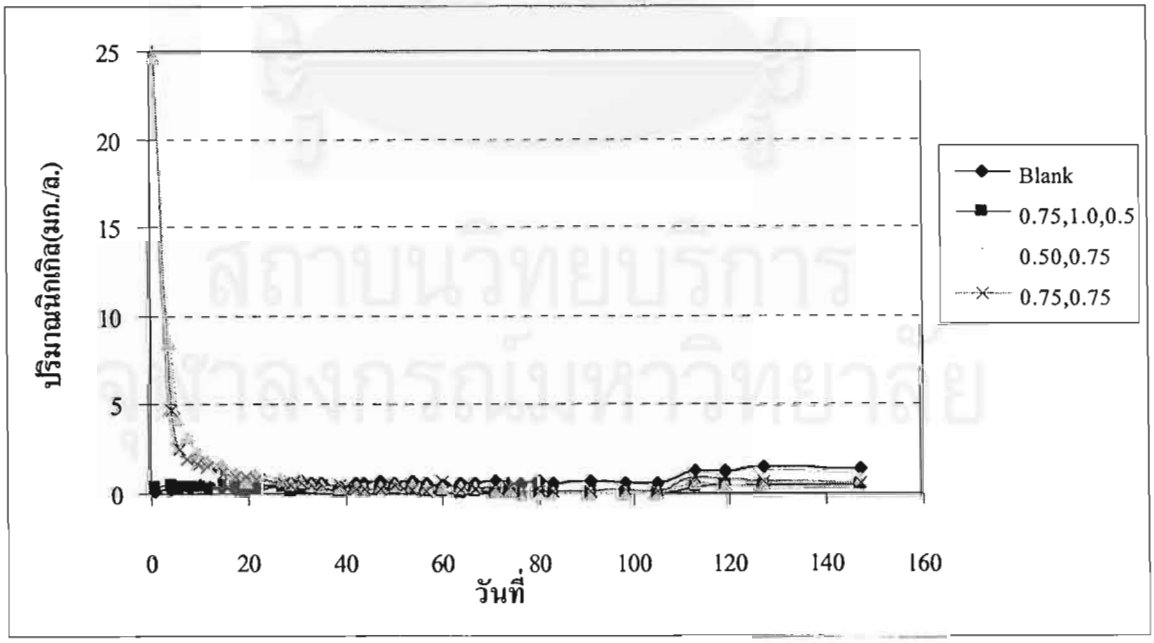
ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำชะละลายมีค่าสูงในช่วงแรกเนื่องมาจากการที่อิออนต่างๆถูกน้ำสกัดชะออกมาในปริมาณมากเมื่อเวลาผ่านไปค่าความนำไฟฟ้าลดลงเนื่องจากอิออนต่างๆถูกชะออกมาได้ง่ายจะถูกชะออกมาจนหมดทำให้ค่าความนำไฟฟ้าลดลง ค่าความนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรที่อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน 0.75 มีค่าสูงที่สุดทั้งนี้เนื่องจากไฮดรอกไซด์จากปูนขาวถูกน้ำสกัดชะออกมาเพิ่มปริมาณอิออนในน้ำชะละลาย ส่วนตัวอย่างที่เป็นตะกอนเปล่ามีค่าความนำไฟฟ้าต่ำอาจเนื่องมาจากตะกอนเปล่ามีเพียงอิออนของไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารประกอบของตะกอนเท่านั้น ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำชะละลายระยะยาวแสดงดังรูปที่ 5.18

ปริมาณนิกเกิลในน้ำชะละลายของตะกอนเปล่ามีค่าต่ำในช่วงแรกหลังจากนั้นปริมาณนิกเกิลมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยจนมากกว่า 1 มก./ล.ในช่วงหลัง ปริมาณนิกเกิลที่หลุดออกมาจากตะกอนที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนมีค่าต่ำตลอดช่วงการทดลอง ส่วนปริมาณนิกเกิลในน้ำชะละลายของตะกอนที่ผ่านการทำเสถียร

มีค่าสูงมากในช่วงแรกและต่ำลงเรื่อยๆจนต่ำกว่า 1 มก./ล.ในช่วง 20 วัน ปริมาณนิกเกิลของอัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอนที่ 0.5 และ 0.75 มีค่าใกล้เคียงกันโดยที่อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอนเป็น 0.75 มีค่าค่อนข้างต่ำกว่าเล็กน้อย ปริมาณนิกเกิลในน้ำชะละลายแสดงดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.18 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำชะละลายระยะยาว



รูปที่ 5.19 ปริมาณนิกเกิลในน้ำชะละลายระยะยาว

หลังจากผ่านการชะละลายระยะยาวได้ทำการทดลองนำตะกอนมาทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรมได้ผลดังตารางที่ 5.16 จากผลการทดลองพบว่าปริมาณนิกเกิลหลังการชะละลายระยะยาวหลุดออกมามากกว่าจากตัวอย่างก่อนการชะละลายระยะยาว อาจเป็นผลเนื่องมาจากการที่ตัวอย่างแช่น้ำสกัดอยู่เป็นเวลานานจึงทำให้การยึดประสานของตัวอย่างลดลงเป็นผลให้มีปริมาณนิกเกิลหลุดออกมาในปริมาณที่มากกว่า

ตารางที่ 5.16 ผลการทดสอบการชะละลายตัวอย่างที่ผ่านการชะละลายระยะยาว

อัตราส่วน	พีเอช	ความนำไฟฟ้า(มิลลิซีเมนต์/ซม.)	ปริมาณนิกเกิล(มก./ล.)
ตะกอนเปล่า :			
ก่อนการชะละลายระยะยาว	7.23	4.05	1428
หลังการชะละลายระยะยาว	6.92	4.26	1575
ตัวอย่างที่ทำให้เป็นก้อน :			
ก่อนการชะละลายระยะยาว	9.26	4.12	36.4
หลังการชะละลายระยะยาว	7.47	3.35	27.5
ตัวอย่างทำเสถียร(L/S=0.50):			
ก่อนการชะละลายระยะยาว	10.26	4.62	55.9
หลังการชะละลายระยะยาว	7.38	5.31	173
ตัวอย่างทำเสถียร(L/S=0.75):			
ก่อนการชะละลายระยะยาว	12.05	6.13	43.4
หลังการชะละลายระยะยาว	7.27	6.63	155

5.8 ประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของนิกเกิล

ทำการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการถูกชะละลายของตะกอนโลหะหนักก่อนและหลังการทำให้เสถียรหรือทำให้เป็นก้อนที่อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดได้ผลดังนี้

ประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของนิกเกิลในการทำเสถียรเป็น 97.04 %

ประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของนิกเกิลในการทำให้เป็นก้อนเป็น 63.46 %

5.9 ผลการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น

การประมาณการค่าใช้จ่ายหากทางโรงงานบำบัดเอง (เฉพาะค่าวัสดุ ไม่รวมค่าขนส่งและค่าแรงงาน) พบว่าราคาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง (ตราช้างของ บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด) ราคาส่ง

ในท้องตลาดเดือนธันวาคม พ.ศ. 2542 ราคาตันละ 2,280 บาท ส่วนราคาปูนขาวตามท้องตลาดราคากิโลกรัมละ 5 บาท ค่าแรงงานคิดเป็นประมาณร้อยละ 20 ของราคาวัสดุ

จากการประมาณราคาพบว่าการทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิลด้วยปูนขาวจะเสียค่าใช้จ่าย 2,500 บาท/ตันตะกอน ส่วนในการทำให้เป็นก้อนจะใช้ค่าใช้จ่าย 1,903 บาท/ตัน แต่ถ้าใช้ปูนซีเมนต์แทนปูนขาวในการทำให้เป็นก้อนจะใช้ค่าใช้จ่าย 883 บาท/ตัน ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด รายระเอียดการคำนวณราคาและเปรียบเทียบราคาแสดงไว้ในภาคผนวก จ.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6
สรุปผลการศึกษา

การทดลองนี้ทำการศึกษาการทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิลโดยใช้ปูนขาวเป็นวัสดุประสาน และการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาวผสมเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุประสาน จากผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. อัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิลคืออัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอนเป็น 0.50 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.75 โดยกำลังรับแรงอัดก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์ผ่านมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนตัวอย่างทรงกระบอกให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

2. อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการทำให้เป็นก้อนตะกอนที่มีนิกเกิลคือ อัตราส่วนวัสดุประสาน(ปูนขาวผสมเถ้าลอย)ต่อตะกอนเป็น 0.75 และอัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอนเป็น 1.00 โดยค่ากำลังรับแรงอัดของทุกอัตราส่วนต่ำกว่ามาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

3. ผลการแปรค่าระยะเวลาบ่มพบว่าระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้นไม่ช่วยให้สมบัติทางกายภาพและการลดการชะละลายโลหะนิกเกิลมีค่าเพิ่มขึ้น

4. ผลการแปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในการทำให้เป็นก้อนตะกอนที่มีนิกเกิลพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมเป็น 0.60

5. เมื่อเปรียบเทียบการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนพบว่าที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนมีค่าต่ำ ตัวอย่างที่ทำเสถียรมีสมบัติทางกายภาพและผลการชะละลายดีกว่าตัวอย่างที่ทำให้เป็นก้อน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน ตัวอย่างที่ทำให้เป็นก้อนมีสมบัติทางกายภาพและผลการชะละลายดีกว่าตัวอย่างที่ทำเสถียร

6. ผลการทดสอบการชะละลายพบว่าปริมาณนิกเกิลในน้ำชะละลายมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 20 วันแรก ปริมาณนิกเกิลที่ชะจากตะกอนที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนมีค่าต่ำตลอดการทดลอง

7. ประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของนิกเกิลในการทำเสถียรเป็น 97.04 % ส่วนประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของนิกเกิลในการทำให้เป็นก้อนเป็น 63.46 %

8. ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการบำบัดตะกอนที่มีนิกเกิลโดยการทำเสถียรเป็น 2,500 บาทต่อตันตะกอน ค่าใช้จ่ายในการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาวผสมเถ้าลอยเป็น 1,903 บาทต่อตันตะกอน และค่าใช้จ่ายในการทำให้เป็นก้อนหากใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยเป็น 883 บาทต่อตันตะกอน

บทที่ 7
ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม

1. ทดลองใช้วัสดุประสานชนิดอื่นเช่น ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว หรือปูนซีเมนต์ผสมโซเดียมซิลิเกต เป็นต้น

2. ทำการทดสอบเปรียบเทียบการชะละลายแบบที่ปรับพีเอชหลายๆช่วงรวมถึงแบบที่ไม่ปรับพีเอช โดยในส่วนที่ปรับพีเอชควรทำการทดลองหลายๆช่วง และอาจทำการทดลองโดยใส่บัฟเฟอร์เพื่อรักษาค่าพีเอชให้คงที่

3. ทดลองการชะละลายแบบที่ใช้คอลัมน์ขนาดใหญ่และรักษาระดับความดันน้ำ (จำลองแบบน้ำท่วมแลนด์ฟิล) เพื่อเปรียบเทียบกับแบบให้น้ำสกัดชะผ่านของเสีย

4. ทำการทดลองในลักษณะที่เหมือนใช้งานจริงโดยการนำตะกอนดิบที่มีความชื้นซึ่งเก็บมาจากลานตากตะกอนมาทำการบำบัดโดยตรง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

การไฟฟ้าผ่ายผลิต. เอกสารสัมนาทางวิชาการเรื่องศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์. สำนักงานวิจัยและพัฒนาวิชาการ การไฟฟ้าผ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ,2536.

ขวัญเรือน หลีสิน. การสกัดนิกเกิลออกจากตะกอนโลหะหนักโดยใช้เชื้อ Thiobacillus Ferrooxidans. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2541.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ. รายงานการศึกษาวิจัยโครงการกำจัดกากแร่สังกะสี. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2512.

ชวลิต ลิ้มอำนวยผล. การเพิ่มเสถียรภาพกากแร่สังกะสีโดยใช้ปูนขาว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2532.

ธนียา เหงี่ยมวิจาวัฒน. การสกัดนิกเกิลออกจากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยใช้แบคทีเรีย. โครงร่างวิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2540.

ดวงสมร ผดุงเกียรติวงษ์. การเปรียบเทียบการทำปรอทซัลไฟด์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม. วิทยานิพนธ์ปริยยามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2540.

นฤมิต คินิมาน. การทำตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2537.

ประเสริฐ งามเลิศประเสริฐ. การใช้ของเสียซิลิกา-อลูมินาในการทำตะกอนปรอทซัลไฟด์ให้เป็นก้อน.โครงร่างวิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2540.

รักษพล ชูชาติ. การทำเสถียรตะกอนจาโรไซต์โดยการทำให้เป็นก้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2538.

ศักดา วรพิพัฒน์. การทำเสถียรตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงย่างแร่สังกะสี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2535

อนุวัฒน์ ปูนพันธ์ฉาย. การทำตะกอนโลหะหนักซัลไฟด์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์เป็นตัวประสาน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2539.

อุตสาหกรรม ,กระทรวง. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่25 (พ.ศ.2531) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2512 เรื่องหน้าที่ของผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงาน. กระทรวงอุตสาหกรรม , 2531.

อุตสาหกรรม ,กระทรวง. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่2 (พ.ศ.2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน. กระทรวงอุตสาหกรรม , 2535.

อุตสาหกรรม ,กระทรวง. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่6 (พ.ศ.2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว. กระทรวงอุตสาหกรรม , 2535.

ภาษาอังกฤษ

Bricka , R. M. and Cullinane , M .J., Jr. Solidification/Stabilization as a Best Demonstrated Available Technology for Resource Conservation and Recovery Act Waste, In Remedial Action, Treatment and Disposal of Hazardous Waste, pp. 437-447. EPA , 1989.

Brige , W. J. and Black , J. A. Nickel in the Environmental. In Aquatic toxicology of Nickel . A Wiley-Interscience Publication , 1980.

Chung , N. K. Chemical Precipitation. In Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal, pp. 7.21-7.31. Mc Graw-Hill Book ,1989.

Commission. European Draft Directive on the Landfill of Wastes. 102 final-SYN 335, Bussels, Belgium, 1991.

Conway , R. A. and Malloy , B. C. Harzardous Solid Waste Testing : First Conference. ASTM STP 760, 1981.

ESCAP. Induatrial Pollution Control Guide-lines : VI Electroplating Industry. United Nation, 1982.

Johannesmeyer , H. Fixation of Electroplating Waste Sludges. In 39th Industrial Waste Conference Perdure University, pp. 113-119. Butterworth Publishers ,1984.

Josephson , J. Immobilization and Leachability of Hazardous Wastes . Environmental Scicnce and Technology. 4 (1982) : 219A-223A.

Manahan , S. E. Hazardous Waste Chemistry, Toxicology and Treatment . Lewis Publishers,1990.

Means , J. L., Smith , L. A., and Nehring , K. W. The Application of Solidification/Stabilization to Waste Materials . Lewis Publishers,1995.

Parsa , J.,Munson-Mcgee , H. S., and Steiner , R.. Solidification/Stabilization of Harzadous Waste Using Fly Ash . Journal of Environmental Engineering.10 (1996) : 935-939.

Patterson , J. W. Industrial Wastewater Treatment Technology . Butterworth Publishers ,1985.

Perket , C. L. and Webster , W. C. The Disolution/Leaching Behavior of Metal Hydroxide/Metal Sulfide Sludges from Plating Waste Water . Hazardous Waste and Hazardous Material. 4 (1981) : 325-355.

Pojasek , R. B. Toxic and Hazardous Wase Disposal. Ann Arbor Science Publishers, 1979.

Pojasek , R. B. Solid -Waste Disposal : Solidification . Industrial Wastewater and Solid Waste Engineering, pp. 307-311. Mc Graw-Hill Publication,1980.

Poon , C. S., Peter, C. J., and Perry, R. Use of Stabilization Pricess in the Controlof Toxic Wastes . Effluent and Water Treatment Journal. 23 (11) : 451-459.

Roy , A., Eaton , H. C., Cartledge , F. K., and Tittlebaum , M. E. Solidification/Stabilization of a Heavy Metal Sludge by a Portland Cement/Fly Ash Binding Mixture. Hazardous Waste and Hazardous Material. 1 (1991) : 33-40.

Roy , A., and Eaton , H. C. Solidification/Stabilization of a Synthetic Electroplating Waste in Lime-Fly Ash Binder. Cement and Concrete Research. 22 (1992) : 589-596.

Shin , H. S., Koo , J. K., Kim , J. O., and Yoon , S. P. Leaching Characteristics of Heavy Metals from Solidified Sludgs Under Seawater Condition. Hazardous Waste and Hazardous Material. 3 (1990) : 261-271.

Swamy , R. N. Concrete Technology and Design Vol. 3 : Cement Replacement Meterial . Surrey University Press ,1986.

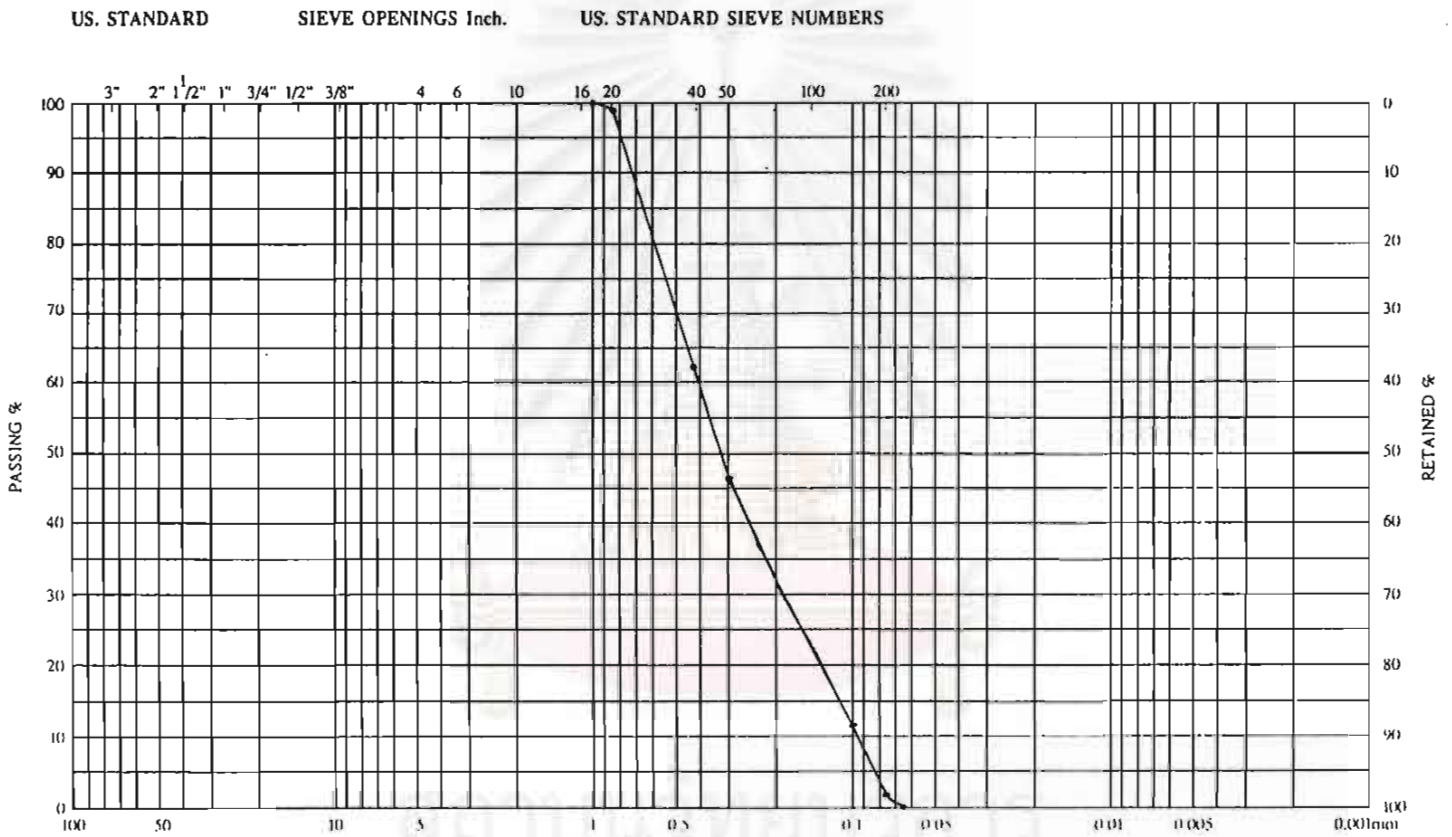
Tay , J. H., and Goh , A. T. C. Municipal Solid Waste Incineratior Fly Ash for Geotecnical Application. Journal of Geotechnical Engineering. 119 (1993) : 811-825.

Wiles , C. C. Solidification and Stabilization Technology. In Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal, pp. 7.85-7.101. Mc Graw-Hill Book ,1989.

Youn , J. H. Solidification of Laboratory Wastes by Using OdinarynPortland Cement and Lime Rice Hush Ash Cement . Thesis No.EV 90-27 Asian Institue of Technology , Bangkok Thailand , 1990.

ภาคผนวก ก.
ข้อมูลลักษณะสมบัติของตะกอนที่มีนิกเกิล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



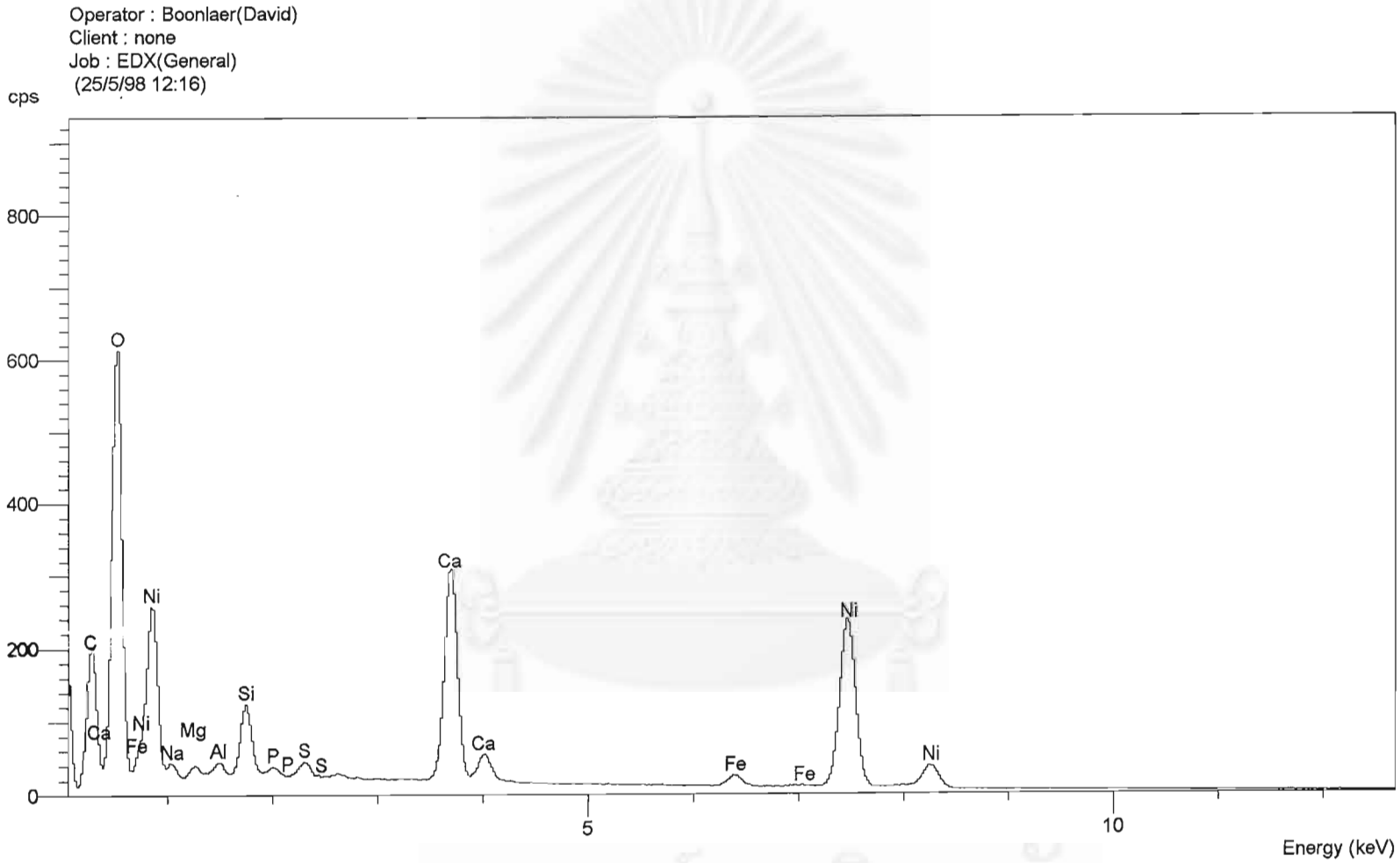
รูปที่ ผ.1 การกระจายขนาดคละของตะกอนที่มีนิกเกิล

ตารางที่ ผ.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นรวม

	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ค่าความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)	2.086	2.055	2.030	2.057	0.0280

จากการวิเคราะห์ตะกอนที่มีนิกเกิลด้วยเครื่องมือ EDX ได้ผลดังนี้

```
SEMQuant results. Listed at 12:19:30 PM on 25/5/98
Operator: Boonlaer(David)
Client: none
Job: EDX(General)
Spectrum label:

System resolution =  99 eV

Quantitative method: ZAF ( 5 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

Standards :
 C  K      CaCO3 01/12/93
 O  K      Quartz 01/12/93
 Na K      Albite 02/12/93
 Mg K      MgO 01/12/93
 Al K      Al2O3 23/11/93
 Si K      Quartz 01/12/93
 P  K      GaP 29/11/93
 S  K      FeS2 01/12/93
 Ca K      Wollas 23/11/93
 Fe K      Fe 01/12/93
 Ni K      Ni 01/12/93

Elmt    Spect.  Element  Atomic
        Type      %        %
C  K     ED     17.04    27.66
O  K     ED     47.52    57.89
Na K     ED      0.45     0.38
Mg K     ED      0.39     0.31
Al K     ED      0.42     0.30
Si K     ED      1.96     1.36
P  K     ED      0.24     0.15
S  K     ED      0.41     0.25
Ca K     ED      7.77     3.78
Fe K     ED      0.90     0.31
Ni K     ED     22.89     7.60
Total          100.00   100.00

* = <2 Sigma
```



รูปที่ ผ.2 ผลการทดสอบ EDX ของตะกอนที่มีนิกเกิล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลการทดสอบการทำเสถียรและทำให้เป็นก้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.2 ค่ากำลังรับแรงอัดตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียร

อัตราส่วน	กำลังรับแรงอัดก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์ (กก./ตร.ซม.)					กำลังรับแรงอัดก้อนตัวอย่างทรงกระบอก (กก./ตร.ซม.)				
	ก้อนที่1	ก้อนที่2	ก้อนที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ก้อนที่1	ก้อนที่2	ก้อนที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
W/B = 0.40										
L/S = 0.25	0.21	0.19	0.28	0.227	0.04726	0.27	0.24	0.25	0.253	0.01247
0.35	0.25	0.29	0.26	0.267	0.02082	0.22	0.24	0.36	0.273	0.06182
0.50	0.17	0.21	0.17	0.183	0.02309	0.24	0.29	0.28	0.270	0.02160
0.75	0.32	0.37	0.28	0.323	0.04509	0.34	0.38	0.45	0.390	0.04546
1.00	0.18	0.16	0.21	0.183	0.02517	0.31	0.43	0.24	0.327	0.07846
W/B = 0.50										
L/S = 0.25	0.23	0.19	0.26	0.227	0.03512	0.35	0.41	0.29	0.350	0.04899
0.35	0.25	0.25	0.27	0.257	0.01155	0.47	0.26	0.35	0.360	0.08602
0.50	1.32	1.50	1.42	1.370	0.07071	1.97	1.65	1.69	1.770	0.14236
0.75	1.32	0.97	1.80	1.145	0.24749	1.38	1.51	1.20	1.363	0.12710
1.00	0.33	0.29	0.29	0.303	0.02309	0.43	0.47	0.39	0.430	0.03266
W/B = 0.60										
L/S = 0.25	0.13	0.17	0.10	0.133	0.03512	0.17	0.21	0.28	0.220	0.04546
0.35	0.11	0.18	0.18	0.157	0.04041	0.20	0.19	0.25	0.213	0.02625
0.50	0.17	0.19	0.22	0.193	0.02517	0.23	0.18	0.23	0.213	0.02357
0.75	0.17	0.18	0.14	0.163	0.02082	0.25	0.25	0.28	0.260	0.01414
1.00	0.33	0.25	0.42	0.333	0.08505	0.28	0.26	0.26	0.267	0.00943
W/B = 0.75										
L/S = 0.25	0.56	0.64	0.87	0.690	0.16093	0.59	0.68	0.61	0.627	0.03859
0.35	0.64	0.97	0.99	0.867	0.19655	0.62	0.82	0.55	0.663	0.11441
0.50	3.61	3.77	3.29	3.557	0.24440	2.18	2.15	2.15	2.160	0.01414
0.75	3.18	3.12	2.83	3.043	0.18717	1.97	2.00	2.13	2.050	0.08000
1.00	1.87	1.67	1.74	1.760	0.10149	0.97	0.95	0.74	0.887	0.10403

W/B = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

L/S = อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน

ตารางที่ ผ.3 ค่าความหนาแน่นตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียร

อัตราส่วน	ความหนาแน่นก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์(ตัน/ลบ.ม.)					ความหนาแน่นก้อนตัวอย่างทรงกระบอก(ตัน/ลบ.ม.)				
	ก้อนที่1	ก้อนที่2	ก้อนที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ก้อนที่1	ก้อนที่2	ก้อนที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
W/B = 0.40										
L/S = 0.25	1.17	1.16	1.20	1.177	0.02082	1.37	1.35	1.35	1.357	0.00943
0.35	1.21	1.21	1.20	1.207	0.00577	1.31	1.31	1.32	1.313	0.00471
0.50	1.22	1.23	1.25	1.233	0.01528	1.37	1.31	1.33	1.337	0.02494
0.75	1.33	1.36	1.31	1.333	0.02517	1.41	1.38	1.39	1.393	0.01247
1.00	1.31	1.31	1.34	1.320	0.01732	1.38	1.35	1.35	1.360	0.01414
W/B = 0.50										
L/S = 0.25	1.12	1.13	1.15	1.133	0.01528	1.37	1.37	1.36	1.367	0.00471
0.35	1.23	1.28	1.22	1.243	0.03215	1.26	1.30	1.27	1.277	0.01700
0.50	1.30	1.33	1.22	1.283	0.05686	1.41	1.43	1.42	1.420	0.00816
0.75	1.38	1.35	1.44	1.390	0.04583	1.41	1.46	1.40	1.423	0.02625
1.00	1.24	1.26	1.28	1.260	0.02000	1.34	1.36	1.34	1.347	0.00943
W/B = 0.60										
L/S = 0.25	1.32	1.31	1.31	1.313	0.00577	1.40	1.41	1.41	1.407	0.00471
0.35	1.22	1.21	1.30	1.243	0.04933	1.30	1.34	1.45	1.363	0.06342
0.50	1.23	1.29	1.22	1.247	0.03786	1.27	1.29	1.36	1.307	0.03859
0.75	1.33	1.29	1.20	1.273	0.06658	1.39	1.29	1.31	1.330	0.04320
1.00	1.26	1.24	1.25	1.250	0.01000	1.39	1.37	1.33	1.363	0.02494
W/B = 0.75										
L/S = 0.25	1.36	1.35	1.30	1.337	0.03215	1.41	1.37	1.40	1.393	0.01700
0.35	1.29	1.31	1.33	1.310	0.02000	1.33	1.35	1.35	1.343	0.00943
0.50	1.50	1.52	1.47	1.497	0.02517	1.49	1.49	1.48	1.487	0.00471
0.75	1.50	1.52	1.48	1.500	0.02000	1.50	1.50	1.51	1.503	0.00471
1.00	1.41	1.43	1.43	1.423	0.01155	1.67	1.60	1.84	1.703	0.10077

W/B = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

L/S = อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน

ตารางที่ ผ.4 ค่าพีเอชของน้ำชะละลายตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียร

อัตราส่วน		ค่าพีเอช				
		ตัวอย่างที่1	ตัวอย่างที่2	ตัวอย่างที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
W/B = 0.40						
L/S =	0.25	7.58	7.60	7.64	7.607	0.03055
	0.35	7.58	7.59	7.44	7.537	0.08386
	0.50	7.25	7.60	7.67	7.507	0.22502
	0.75	7.30	7.35	7.30	7.317	0.02887
	1.00	7.78	7.80	7.79	7.790	0.01000
W/B = 0.50						
L/S =	0.25	7.24	7.26	7.27	7.257	0.01528
	0.35	7.25	7.17	7.21	7.210	0.04000
	0.50	11.57	10.74	11.27	11.193	0.42028
	0.75	10.89	10.61	10.75	10.750	0.14000
	1.00	7.29	7.21	7.15	7.217	0.07024
W/B = 0.60						
L/S =	0.25	7.30	7.21	7.25	7.253	0.04509
	0.35	6.74	6.78	6.83	6.783	0.04509
	0.50	6.77	6.82	6.81	6.800	0.02646
	0.75	7.40	7.26	7.38	7.347	0.07572
	1.00	7.41	7.40	7.37	7.393	0.02082
W/B = 0.75						
L/S =	0.25	7.30	7.32	7.34	7.320	0.02000
	0.35	7.13	7.46	7.32	7.303	0.16563
	0.50	9.88	10.83	10.07	10.260	0.50269
	0.75	12.18	11.91	12.07	12.053	0.13577
	1.00	7.16	7.10	7.16	7.140	0.03464

W/B = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

L/S =อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน

ตารางที่ ผ.5 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำชะละลายตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียร

อัตราส่วน		ค่าความนำไฟฟ้า(มิลลิซีเมนต์/ซม.)				
		ตัวอย่างที่1	ตัวอย่างที่2	ตัวอย่างที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
W/B = 0.40						
L/S =	0.25	5.58	5.55	5.48	5.537	0.05132
	0.35	5.87	6.13	5.71	5.903	0.21197
	0.50	5.89	5.83	5.35	5.690	0.29597
	0.75	18.70	19.03	19.13	18.953	0.22502
	1.00	5.28	5.11	5.34	5.243	0.11930
W/B = 0.50						
L/S =	0.25	13.80	13.58	13.74	13.707	0.11372
	0.35	4.10	4.86	4.53	4.497	0.38109
	0.50	4.64	4.49	4.65	4.593	0.08963
	0.75	4.53	4.27	4.39	4.397	0.13013
	1.00	17.92	18.08	20.00	18.667	1.15747
W/B = 0.60						
L/S =	0.25	14.99	15.15	15.25	15.130	0.13115
	0.35	5.24	5.04	4.99	5.090	0.13229
	0.50	5.47	5.51	5.82	5.600	0.19157
	0.75	5.84	6.17	6.65	6.220	0.40731
	1.00	5.82	5.62	5.87	5.770	0.13229
W/B = 0.75						
L/S =	0.25	13.38	13.12	12.75	13.083	0.31660
	0.35	4.82	4.07	3.95	4.280	0.47149
	0.50	4.91	4.54	4.40	4.617	0.26350
	0.75	6.67	5.67	6.04	6.127	0.50560
	1.00	20.00	19.30	18.30	19.200	0.85440

W/B = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

L/S =อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน

ตารางที่ ผ.6 ปริมาณนิกเกิลของน้ำชะละลายตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียร

อัตราส่วน		ปริมาณนิกเกิล(มก./ล.)				
		ตัวอย่างที่1	ตัวอย่างที่2	ตัวอย่างที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
W/B = 0.40						
L/S =	0.25	2509.00	2507.00	2690.00	2568.667	105.08251
	0.35	2935.00	3170.00	2693.00	2932.667	238.50856
	0.50	2262.00	2320.00	2289.00	2290.333	29.02298
	0.75	430.00	306.00	384.00	373.333	62.68439
	1.00	1510.00	1302.00	1581.00	1464.333	144.99770
W/B = 0.50						
L/S =	0.25	748.00	714.00	646.00	702.667	51.93586
	0.35	323.00	450.00	390.50	387.833	63.54198
	0.50	25.20	38.80	21.50	28.500	9.10988
	0.75	70.40	88.00	82.40	80.267	8.99185
	1.00	1080.00	710.00	1031.00	940.333	200.97346
W/B = 0.60						
L/S =	0.25	746.00	816.00	790.00	784.000	35.38361
	0.35	1185.00	1006.40	910.80	1034.067	139.17792
	0.50	1089.60	932.80	1190.00	1070.800	129.62654
	0.75	413.40	782.80	439.20	545.133	206.22923
	1.00	327.20	286.80	409.40	341.133	62.47634
W/B = 0.75						
L/S =	0.25	590.00	638.00	668.00	632.000	39.34463
	0.35	109.00	527.50	256.00	297.500	212.31404
	0.50	52.30	56.50	59.00	55.933	3.38575
	0.75	39.40	43.70	47.10	43.400	3.85876
	1.00	846.00	1028.00	823.00	899.000	112.30761

W/B = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

L/S =อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน

ตารางที่ ผ.7 กำลังรับแรงอัดตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

อัตราส่วน	กำลังรับแรงอัดก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์ (กก./ตร.ซม.)					กำลังรับแรงอัดก้อนตัวอย่างทรงกระบอก (กก./ตร.ซม.)				
	ก้อนที่1	ก้อนที่2	ก้อนที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ก้อนที่1	ก้อนที่2	ก้อนที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
L/F = 0.25										
B/S = 0.25	0.25	0.28	0.26	0.263	0.01528	0.36	0.21	0.28	0.283	0.07506
0.50	0.72	0.31	0.12	0.383	0.30665	0.52	0.41	0.54	0.490	0.07000
0.75	1.25	0.52	0.84	0.870	0.36592	0.62	0.68	0.89	0.730	0.14177
1.00	1.20	0.91	0.59	0.900	0.30512	0.70	0.58	0.76	0.680	0.09165
1.25	1.71	0.95	0.97	1.210	0.43313	0.53	0.61	0.62	0.587	0.04933
L/F = 0.50										
B/S = 0.25	0.27	0.19	0.15	0.203	0.06110	0.23	0.25	0.20	0.227	0.02517
0.50	0.26	0.25	0.32	0.277	0.03786	0.31	0.22	0.34	0.290	0.06245
0.75	1.41	1.16	1.10	1.223	0.16442	1.24	1.44	1.35	1.343	0.10017
1.00	1.39	1.43	1.34	1.387	0.04509	1.52	1.23	1.88	1.543	0.32563
1.25	2.31	2.03	1.95	2.097	0.18903	1.33	0.23	0.83	0.797	0.55076
L/F = 0.75										
B/S = 0.25	0.17	0.11	0.13	0.137	0.03055	0.63	0.47	0.52	0.540	0.08185
0.50	0.28	0.22	0.34	0.280	0.06000	0.40	0.27	0.28	0.317	0.07234
0.75	0.52	0.51	0.53	0.520	0.01000	1.14	1.13	1.02	1.097	0.06658
1.00	2.79	2.44	2.41	2.547	0.21127	1.56	1.05	1.29	1.300	0.25515
1.25	0.86	0.95	1.05	0.953	0.09504	1.10	0.94	0.84	0.960	0.13115
L/F = 1.00										
B/S = 0.25	0.48	0.40	0.51	0.463	0.05686	0.86	0.62	0.69	0.723	0.12342
0.50	0.27	0.26	0.16	0.230	0.06083	0.25	0.31	0.28	0.280	0.03000
0.75	2.64	2.73	2.69	2.687	0.04509	1.72	1.11	1.39	1.407	0.30534
1.00	0.90	0.79	0.82	0.837	0.05686	1.07	1.01	0.80	0.960	0.14177
1.25	1.31	1.06	1.30	1.223	0.14154	0.70	0.82	0.82	0.780	0.06928
L/F = 1.25										
B/S = 0.25	0.16	0.15	0.15	0.153	0.00577	0.12	0.17	0.17	0.153	0.02887
0.50	0.16	0.38	0.26	0.267	0.11015	0.26	0.25	0.24	0.250	0.01000
0.75	0.69	0.69	0.64	0.673	0.02887	1.05	0.91	0.70	0.887	0.17616

ตารางที่ ผ.7 (ต่อ)

อัตราส่วน	กำลังรับแรงอัดก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์ (กก./ตร.ซม.)					กำลังรับแรงอัดก้อนตัวอย่างทรงกระบอก (กก./ตร.ซม.)				
	ก้อนที่1	ก้อนที่2	ก้อนที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ก้อนที่1	ก้อนที่2	ก้อนที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1.00	1.17	1.24	1.06	1.157	0.09074	0.97	1.12	1.05	1.047	0.07506
1.25	1.74	1.52	0.97	1.410	0.39661	1.05	0.95	0.94	0.980	0.06083
L/F = 1.5.										
B/S = 0.25	0.94	0.75	0.74	0.810	0.11269	0.92	0.66	0.74	0.773	0.13317
0.50	0.14	0.26	0.17	0.190	0.06245	0.20	0.28	0.18	0.220	0.05292
0.75	0.24	0.22	0.29	0.250	0.03606	0.23	0.15	0.20	0.193	0.04041
1.00	0.19	0.16	0.18	0.177	0.01528	0.22	0.22	0.19	0.210	0.01732
1.25	0.21	0.22	0.18	0.203	0.02082	0.18	0.23	0.15	0.187	0.04041

L/F = อัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอย

B/S = อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.8 ค่าความหนาแน่นตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

อัตราส่วน	ความหนาแน่นก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์ (ตัน/ลบ.ม.)					ความหนาแน่นก้อนตัวอย่างทรงกระบอก (ตัน/ลบ.ม.)				
	ก้อนที่1	ก้อนที่2	ก้อนที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ก้อนที่1	ก้อนที่2	ก้อนที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
L/F = 0.25										
B/S = 0.25	1.24	1.26	1.23	1.243	0.01528	1.36	1.35	1.37	1.360	0.01000
0.50	1.42	1.36	1.23	1.337	0.09713	1.39	1.45	1.42	1.420	0.03000
0.75	2.05	1.34	1.04	1.477	0.51868	1.41	1.43	1.47	1.437	0.03055
1.00	1.90	1.44	1.15	1.497	0.37820	1.42	1.40	1.50	1.440	0.05292
1.25	2.43	1.37	1.37	1.723	0.61199	1.46	1.47	1.47	1.467	0.00577
L/F = 0.50										
B/S = 0.25	1.27	1.23	1.23	1.243	0.02309	1.37	1.36	1.36	1.363	0.00577
0.50	1.30	1.25	1.24	1.263	0.03215	1.38	1.37	1.38	1.377	0.00577
0.75	1.47	1.42	1.45	1.447	0.02517	1.51	1.54	1.53	1.527	0.01528
1.00	1.55	1.49	1.49	1.510	0.03464	1.54	1.53	1.57	1.547	0.02082
1.25	1.51	1.49	1.51	1.503	0.01155	1.56	1.55	1.55	1.553	0.00577
L/F = 0.75										
B/S = 0.25	1.23	1.22	1.25	1.233	0.01528	1.38	1.53	1.41	1.440	0.07937
0.50	1.22	1.26	1.27	1.250	0.02646	1.36	1.44	1.42	1.407	0.04163
0.75	1.33	1.42	1.43	1.393	0.05508	1.41	1.43	1.42	1.420	0.01000
1.00	1.43	1.42	1.38	1.410	0.02646	1.46	1.46	1.45	1.457	0.00577
1.25	1.42	1.49	1.37	1.427	0.06028	1.45	1.48	1.46	1.463	0.01528
L/F = 1.00										
B/S = 0.25	1.32	1.30	1.28	1.300	0.02000	1.35	1.36	1.36	1.357	0.00577
0.50	1.25	1.19	1.36	1.267	0.08622	1.35	1.30	1.37	1.340	0.03606
0.75	1.48	1.51	1.45	1.480	0.03000	1.51	1.49	1.49	1.497	0.01155
1.00	1.38	1.40	1.41	1.397	0.01528	1.44	1.42	1.42	1.427	0.01155
1.25	1.44	1.40	1.43	1.423	0.02082	1.45	1.45	1.44	1.447	0.00577
L/F = 1.25										
B/S = 0.25	1.27	1.24	1.23	1.247	0.02082	1.36	1.38	1.45	1.397	0.04726
0.50	1.22	1.27	1.25	1.247	0.02517	1.38	1.33	1.31	1.340	0.03606

ตารางที่ ผ.8 (ต่อ)

อัตราส่วน	ความหนาแน่นก้อนตัวอย่างรูปลูกบาศก์ (ตัน/ลบ.ม.)					ความหนาแน่นก้อนตัวอย่างทรงกระบอก (ตัน/ลบ.ม.)				
	ก้อนที่1	ก้อนที่2	ก้อนที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ก้อนที่1	ก้อนที่2	ก้อนที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0.75	1.30	1.33	1.35	1.327	0.02517	1.41	1.41	1.40	1.407	0.00577
1.00	1.38	1.37	1.40	1.383	0.01528	1.45	1.43	1.43	1.437	0.01155
1.25	1.55	1.42	1.42	1.463	0.07506	1.53	1.53	1.45	1.503	0.04619
L/F = 1.50										
B/S = 0.25	1.34	1.40	1.34	1.360	0.03464	1.38	1.41	1.40	1.397	0.01528
0.50	1.28	1.28	1.21	1.257	0.04041	1.33	1.43	1.48	1.413	0.07638
0.75	1.36	1.31	1.37	1.347	0.03215	1.37	1.37	1.36	1.367	1.36000
1.00	1.31	1.34	1.35	1.333	0.02082	1.46	1.37	1.35	1.393	0.05859
1.25	1.35	1.40	1.39	1.380	0.02646	1.38	1.45	1.40	1.410	0.03606

L/F = อัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอย

B/S = อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.9 ค่าพีเอชของน้ำชะละลายตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

อัตราส่วน		ค่าพีเอช				
		ตัวอย่างที่1	ตัวอย่างที่2	ตัวอย่างที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
L/F = 0.25						
B/S =	0.25	7.18	7.22	6.98	7.127	0.12858
	0.50	6.75	6.73	6.75	6.743	0.01155
	0.75	6.93	7.08	7.04	7.017	0.07767
	1.00	6.81	6.85	6.91	6.857	0.05033
	1.25	7.21	7.46	7.64	7.437	0.21595
L/F = 0.50						
B/S =	0.25	7.16	7.20	7.22	7.193	0.03055
	0.50	6.77	6.76	6.76	6.763	0.00577
	0.75	7.90	7.73	7.85	7.827	0.08737
	1.00	8.05	8.10	8.41	8.187	0.19502
	1.25	9.49	9.24	10.60	9.777	0.72390
L/F = 0.75						
B/S =	0.25	6.64	6.75	6.81	6.733	0.08622
	0.50	6.73	6.73	6.75	6.737	0.01155
	0.75	7.43	7.44	7.54	7.470	0.06083
	1.00	7.47	7.34	7.40	7.403	0.06506
	1.25	7.10	7.24	7.35	7.230	0.12530
L/F = 1.00						
B/S =	0.25	7.56	7.52	7.55	7.543	0.02082
	0.50	6.80	6.83	6.81	6.813	0.01528
	0.75	9.76	9.32	8.69	9.257	0.53780
	1.00	7.06	7.02	7.09	7.057	0.03512
	1.25	9.39	9.37	8.63	9.130	0.43313
L/F = 1.25						
B/S =	0.25	7.72	7.41	7.76	7.630	0.19157
	0.50	7.72	7.81	7.82	7.783	0.05508
	0.75	7.07	7.08	7.16	7.103	0.04933

ตารางที่ ผ.9 (ต่อ)

อัตราส่วน	ค่าพีเอช				
	ตัวอย่างที่1	ตัวอย่างที่2	ตัวอย่างที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1.00	7.34	7.17	7.09	7.200	0.12767
1.25	7.36	7.68	7.74	7.593	0.20429
L/F = 1.50					
B/S = 0.25	7.35	7.35	7.27	7.323	0.04619
0.50	7.75	7.67	7.67	7.697	0.04619
0.75	7.12	7.23	7.20	7.183	0.05686
1.00	7.18	7.23	7.11	7.173	0.06028
1.25	7.25	7.30	7.19	7.247	0.05508

L/F = อัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอย

B/S = อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.10 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำชะละลายตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

อัตราส่วน		ค่าความนำไฟฟ้า(มิลลิซีเมนต์/ซม.)				
		ตัวอย่างที่1	ตัวอย่างที่2	ตัวอย่างที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
L/F = 0.25						
B/S =	0.25	6.15	4.87	4.81	5.277	0.75692
	0.50	4.30	4.13	4.10	4.177	0.10786
	0.75	4.25	3.82	3.84	3.970	0.24269
	1.00	3.80	3.61	3.63	3.680	0.10440
	1.25	3.28	3.42	3.90	3.533	0.32517
L/F = 0.50						
B/S =	0.25	5.46	5.05	5.65	5.387	0.30665
	0.50	4.64	4.67	4.45	4.587	0.11930
	0.75	4.37	4.58	4.30	4.417	0.14572
	1.00	5.15	5.12	5.03	5.100	0.06245
	1.25	4.04	4.03	3.65	3.907	0.22234
L/F = 0.75						
B/S =	0.25	5.89	6.07	6.42	6.127	0.26951
	0.50	4.45	4.53	4.54	4.507	0.04933
	0.75	12.55	12.74	12.65	12.647	0.09504
	1.00	13.94	14.71	14.54	14.397	0.40452
	1.25	4.20	4.10	4.07	4.123	0.06807
L/F = 1.00						
B/S =	0.25	8.28	9.41	8.96	8.883	0.56889
	0.50	4.32	4.66	4.93	4.637	0.30567
	0.75	4.25	4.29	3.83	4.123	0.25482
	1.00	4.54	4.44	4.34	4.440	0.10000
	1.25	3.65	3.55	3.87	3.690	0.16371
L/F = 1.25						
B/S =	0.25	4.64	5.03	4.82	4.830	0.19519
	0.50	4.55	4.44	4.29	4.427	0.13051
	0.75	4.58	4.42	4.01	4.337	0.29400

ตารางที่ ผ.10 (ต่อ)

อัตราส่วน		ค่าความนำไฟฟ้า(มิลลิซีเมนต์/ซม.)				
		ตัวอย่างที่1	ตัวอย่างที่2	ตัวอย่างที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1.00	4.09	4.24	4.28	4.203	0.10017
	1.25	4.44	4.37	4.34	4.383	0.05132
L/F = 1.50						
B/S =	0.25	8.72	8.71	8.55	8.660	0.09539
	0.50	4.60	4.29	4.67	4.520	0.20224
	0.75	6.01	5.68	5.82	5.837	0.16563
	1.00	5.64	5.54	5.88	5.687	0.17474
	1.25	5.71	5.36	5.87	5.647	0.26083

L/F = อัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอย

B/S = อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.11 ปริมาณนิกเกิลของน้ำชะละลายตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

อัตราส่วน		ปริมาณนิกเกิล(มก./ล.)				
		ตัวอย่างที่1	ตัวอย่างที่2	ตัวอย่างที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
L/F = 0.25						
B/S =	0.25	983.00	572.10	598.80	717.967	229.91351
	0.50	538.60	635.80	767.20	647.200	114.72559
	0.75	236.50	456.00	356.00	349.500	109.89427
	1.00	650.40	445.60	344.20	480.067	155.98261
	1.25	96.00	24.50	87.50	69.333	39.05872
L/F = 0.50						
B/S =	0.25	999.00	694.00	1225.00	972.667	266.47764
	0.50	1070.00	1011.00	1099.20	1060.067	44.93121
	0.75	13.10	15.80	17.30	15.400	2.12838
	1.00	40.80	21.30	44.50	35.533	12.46448
	1.25	14.30	15.80	23.90	18.000	5.16430
L/F = 0.75						
B/S =	0.25	1164.00	1096.00	989.00	1083.000	88.22131
	0.50	1263.00	1187.00	1303.00	1251.000	58.92368
	0.75	696.00	616.00	764.00	692.000	74.08104
	1.00	178.00	304.00	264.00	248.667	64.38426
	1.25	176.00	101.00	53.10	110.033	61.94597
L/F = 1.00						
B/S =	0.25	480.00	540.00	576.00	1092.000	48.49742
	0.50	1008.60	1086.00	1094.20	1062.933	47.23233
	0.75	50.20	30.10	29.00	36.433	11.93496
	1.00	228.50	245.30	221.50	231.767	12.23165
	1.25	17.00	15.00	18.00	16.667	1.52753
L/F = 1.25						
B/S =	0.25	1576.00	1847.00	1465.00	1629.333	196.50530
	0.50	1478.00	1680.00	1479.00	1545.667	116.33715
	0.75	202.50	301.50	284.00	262.667	52.83544

ตารางที่ ผ.11 (ต่อ)

อัตราส่วน		ปริมาณนิกเกิล(มก./ล.)				
		ตัวอย่างที่1	ตัวอย่างที่2	ตัวอย่างที่3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1.00	65.80	157.30	236.50	153.200	85.42383
	1.25	51.30	53.00	82.00	62.100	17.25485
L/F = 1.50						
B/S =	0.25	480.00	576.00	540.00	532.000	48.49742
	0.50	1890.00	1518.00	1737.00	1715.000	186.97326
	0.75	1085.00	826.40	785.00	898.800	162.57712
	1.00	886.00	884.80	1227.00	999.267	197.22376
	1.25	672.20	526.10	856.40	684.900	165.51583

L/F = อัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอย

B/S = อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.12 สมบัติทางกายภาพที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	ลูกบาศก์			ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ทรงกระบอก			ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3			ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3		
กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)										
0.40	1.02	0.87	0.75	0.880	0.13528	0.84	0.73	0.78	0.783	0.05508
0.50	2.64	2.73	2.69	2.687	0.04509	1.72	1.11	1.39	1.407	0.30534
0.60	3.87	3.14	3.47	3.493	0.36556	1.88	1.84	1.86	1.860	0.02000
0.75	3.08	3.09	2.91	3.027	0.10116	1.80	2.13	1.95	1.960	0.16523
ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)										
0.40	1.23	1.19	1.19	1.203	0.02309	1.41	1.34	1.39	1.380	0.03606
0.50	1.48	1.51	1.45	1.480	0.03000	1.51	1.49	1.49	1.497	0.01155
0.60	1.47	1.42	1.44	1.443	0.02517	1.44	1.48	1.45	1.457	0.02082
0.75	1.43	1.45	1.45	1.443	0.01155	1.46	1.47	1.49	1.473	0.01528

ตารางที่ ผ.13 ผลการทดสอบการชะละลายที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
พีเอช					
0.40	7.57	7.48	7.45	7.500	0.06245
0.50	9.76	9.32	8.69	9.257	0.53780
0.60	7.55	7.43	7.48	7.487	0.06028
0.75	7.5	7.47	7.59	7.520	0.06245
ความนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนต์/ซม.)					
0.40	12.71	13.21	13.43	13.117	0.36896
0.50	4.25	4.29	3.83	4.123	0.25482
0.60	13.65	13.91	13.74	13.767	0.13204
0.75	13.77	13.99	14.14	13.967	0.18610
ปริมาณนิกเกิล (มก./ล.)					
0.40	578.00	596.00	620.00	598.000	21.07131
0.50	524.00	642.00	598.00	588.000	59.63221
0.60	50.20	30.10	29.00	36.433	11.93496
0.75	618	626	694	646.000	41.76123

ตารางที่ ผ.14 สมบัติทางกายภาพที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ

อัตราส่วน	ลูกบาศก์			ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ทรงกระบอก			ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3			ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3		
กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)										
ทำเสถียร										
บ่ม 7 วัน	3.61	3.77	3.29	3.557	0.24440	2.180	2.150	2.150	2.160	0.01732
บ่ม 14 วัน	1.14	1.21	1.38	1.243	0.12342	2.200	1.860	1.830	1.963	0.20551
บ่ม 28 วัน	2.61	2.66	2.84	2.703	0.12097	1.880	1.450	2.060	1.797	0.31342
ทำให้เป็นก้อน										
บ่ม 7 วัน	2.64	2.73	2.69	2.687	0.04509	1.720	1.110	1.390	1.407	0.30534
บ่ม 14 วัน	3.01	2.45	2.42	2.627	0.33232	1.110	1.420	1.730	1.420	0.31000
บ่ม 28 วัน	2.59	2.74	2.27	2.533	0.24007	1.140	1.210	1.380	1.243	0.12342
ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)										
ทำเสถียร										
บ่ม 7 วัน	1.50	1.52	1.47	1.497	0.02517	1.49	1.49	1.48	1.487	0.00577
บ่ม 14 วัน	1.35	1.39	1.37	1.370	0.02000	1.40	1.41	1.39	1.400	0.01000
บ่ม 28 วัน	1.37	1.35	1.36	1.360	0.01000	1.43	1.45	2.06	1.647	0.35810
ทำให้เป็นก้อน										
บ่ม 7 วัน	1.48	1.51	1.45	1.480	0.03000	1.51	1.49	1.49	1.497	0.01155
บ่ม 14 วัน	1.40	1.36	1.36	1.373	0.02309	1.43	1.43	1.44	1.433	0.00577
บ่ม 28 วัน	1.39	1.38	1.41	1.393	0.01528	1.38	1.40	1.41	1.397	0.01528

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.15 ผลการทดสอบการชะละลายที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ

อัตราส่วน	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
พีเอช					
ทำเสถียร					
บ่ม 7 วัน	9.88	10.83	10.07	10.260	0.50269
บ่ม 14 วัน	7.23	7.32	7.41	7.320	0.09000
บ่ม 28 วัน	7.18	7.19	7.21	7.193	0.01528
ทำให้เป็นก้อน					
บ่ม 7 วัน	9.76	9.32	8.69	9.257	0.53780
บ่ม 14 วัน	7.34	7.48	7.44	7.420	0.07211
บ่ม 28 วัน	7.23	7.22	7.31	7.253	0.04933
ความนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนต์/ซม.)					
ทำเสถียร					
บ่ม 7 วัน	4.91	4.54	4.40	4.617	0.26350
บ่ม 14 วัน	13.98	13.53	11.76	13.090	1.17358
บ่ม 28 วัน	13.53	12.95	12.49	12.990	0.52115
ทำให้เป็นก้อน					
บ่ม 7 วัน	4.25	4.29	3.83	4.123	0.25482
บ่ม 14 วัน	9.61	9.15	9.46	9.407	0.23459
บ่ม 28 วัน	10.22	8.97	9.68	9.623	0.62692
ปริมาณนิกเกิล (มก./ล.)					
ทำเสถียร					
บ่ม 7 วัน	52.30	56.50	59.00	55.933	3.38575
บ่ม 14 วัน	960.00	1046.00	809.00	938.333	119.97639
บ่ม 28 วัน	976.00	1002.00	1038.00	1005.333	31.13412
ทำให้เป็นก้อน					
บ่ม 7 วัน	50.20	30.10	29.00	36.433	11.93496
บ่ม 14 วัน	726.00	549.00	904.00	726.333	177.50023
บ่ม 28 วัน	954.00	617.00	668.00	746.333	181.64342

ตารางที่ ผ.16 ผลการทดสอบการชะละลายระยะยาว

วันที่	ผลการทดสอบการชะละลาย											
	pH				ความนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/ซม.)				ปริมาณนิกเกิล (มก./ล.)			
	ตะกอน	0.75,1,0.5	0.5,0.75	0.75,0.75	ตะกอน	0.75,1,0.5	0.5,0.75	0.75,0.75	ตะกอน	0.75,1,0.5	0.5,0.75	0.75,0.75
1	8.15	9.21	10.92	10.94	554	117	1533	1569	0.10	0.31	24.7	25.35
4	7.41	10.76	10.98	11.34	49	488	835	1745	0.21	0.48	8.52	4.74
6	6.78	10.24	10.85	11.11	42	157	569	951	0.29	0.33	4.25	2.54
8	6.74	10.13	10.67	10.91	40	148	467	780	0.33	0.34	3.19	1.96
10	6.98	9.97	10.58	10.79	26	111	472	457	0.42	0.36	2.27	1.68
12	8.54	9.84	11.17	11.47	31	63	314	577	0.39	0.21	1.79	1.44
15	7.99	9.87	11.02	11.28	35	131	295	785	0.36	0.43	1.61	1.16
18	7.92	10.42	11.04	11.42	42	81	238	449	0.23	0.35	1.12	0.87
20	7.84	9.11	10.14	10.93	55	55	88	377	0.39	0.13	0.65	0.87
22	7.66	8.88	10.18	10.32	44	65	215	264	0.41	0.24	1.06	0.77
27	7.92	8.76	9.92	10.00	45	67	131	138	0.43	0.31	0.75	0.59
29	7.23	8.94	9.69	10.14	23.6	39.4	77.9	97.5	0.57	0.17	0.57	0.46
31	7.41	8.69	9.78	10.19	22.6	42.6	56.2	125.9	0.70	0.23	0.67	0.57
33	7.57	8.81	9.78	10.08	23.1	43.6	62.8	85.5	0.60	0.18	0.46	0.50
35	7.80	8.13	9.25	8.93	46.8	55.0	52.0	53.9	0.60	0.36	0.47	0.42
39	7.95	7.74	9.76	8.20	27.9	36.8	63.2	153.6	0.36	0.16	0.34	0.42
42	6.82	7.41	9.54	10.15	19.0	43.3	62.0	114.4	0.59	0.18	0.30	0.27
44	7.36	8.62	9.70	10.13	22.0	44.2	67.1	69.2	0.59	0.18	0.28	0.24
47	7.57	9.21	9.47	9.94	14.2	51.8	58.9	56.7	0.68	0.21	0.30	0.21
50	7.46	9.12	10.08	9.77	13.8	50.4	82.5	59.2	0.62	0.20	0.43	0.41
54	7.72	9.15	9.87	9.70	15.2	47.1	63.5	63.1	0.69	0.27	0.46	0.19
57	7.61	8.98	9.96	9.83	13.8	44.7	73.9	70.2	0.61	0.13	0.38	0.08
60	7.64	7.83	8.85	10.94	13.9	45.0	72.4	343	0.49	0.12	0.31	0.67
64	7.7.	7.94	9.24	10.95	26.5	41.2	81.7	340	0.53	0.05	0.34	0.26
67	7.91	8.67	10.09	10.91	15.5	34.4	47.5	164	0.56	0.06	0.36	0.21
71	6.62	9.21	9.54	11.14	18.6	44.6	57.1	380	0.70	0.03	0.16	0.33
74	8.06	8.74	9.41	11.14	46.3	46.1	54	326	0.57	0.06	0.14	0.34

ตารางที่ ผ.16 (ต่อ)

วันที่	ผลการทดสอบการชะละลาย											
	pH				ความนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/ซม.)				ปริมาณนิกเกิล (มก./ล.)			
	ตะกอน	0.75,1,0.5	0.5,0.75	0.75,0.75	ตะกอน	0.75,1,0.5	0.5,0.75	0.75,0.75	ตะกอน	0.75,1,0.5	0.5,0.75	0.75,0.75
77	7.62	8.54	9.33	11.01	34.4	40.7	54.9	303	0.63	*	0.04	0.20
80	7.74	7.98	9.23	10.27	28.3	37	54.6	78.1	0.64	*	0.03	0.07
83	7.76	8.26	9.42	10.54	20.4	44.2	61.9	134	0.59	*	0.05	0.13
91	6.87	9.36	9.41	10.60	18.6	63.8	53.8	159	0.69	0.03	0.02	0.09
98	7.83	8.43	8.86	10.78	13.0	31.8	49.1	131.8	0.59	*	*	0.25
105	7.81	8.14	9.55	10.28	17.7	29.4	51.5	57.2	0.59	*	0.04	0.12
113	7.07	7.54	9.19	10.00	13.0	24.8	51.4	107.8	1.26	0.37	0.52	0.90
119	8.08	8.19	9.20	9.67	16.2	26.5	39.6	37.3	1.30	0.42	0.49	0.83
127	8.01	8.65	9.32	9.56	12.0	30.6	46.1	49.3	1.52	0.50	0.58	0.68
147	7.49	7.55	7.80	8.07	9.2	29.5	71.0	73.6	1.38	0.44	0.86	0.61

* : น้อยจนเครื่องไม่สามารถวัดได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

รายการคำนวณประสิทธิภาพในการทำให้โลหะหนักคงตัว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความสามารถในการถูกชะละลายสามารถเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$L = Wi / Wo$$

โดยที่ L = ความสามารถในการถูกชะละลาย

Wi = ความเข้มข้นของสารที่ถูกชะละลายออกไป

Wo = ความเข้มข้นของสารที่มีอยู่ตอนเริ่มต้น

1. ประสิทธิภาพในการทำให้นิกเกิลคงตัวในการทำเสถียร

ที่อัตราส่วนที่เหมาะสมคืออัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน 0.50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.75

- ความสามารถถูกชะละลายนิกเกิลก่อนการทำเสถียร

นำตะกอนที่มีนิกเกิลไปชะละลายพบว่ามีนิกเกิลในน้ำสกัดเท่ากับ 3,545 มก./ล.

ในน้ำชะละละลาย 500 มล. มีนิกเกิล (Wi) = 3,545*500/1,000

= 1,772.5 มก.

ตะกอนที่มีนิกเกิลหนัก 1 กรัม มีนิกเกิลเท่ากับ 334 มก.

ในตะกอน 25 กรัม มีนิกเกิล (Wo) = 334*25/1000

= 8.35 ก.

Lo = Wi / Wo

= 1,772.5 / 8.35

= 212.27 มก./ก.

- ความสามารถถูกชะละลายนิกเกิลหลังการทำเสถียร

นิกเกิลในน้ำสกัดเท่ากับ 55.9 มก./ล.

ในน้ำชะละละลาย 500 มล. มีนิกเกิล (Wi) = 55.9*500/1,000

= 27.95 มก.

ใช้ตัวอย่าง 25 กรัมประกอบด้วยตะกอนที่มีนิกเกิล 1 ส่วน วัสดุประสาน0.5 ส่วนน้ำ 0.75 ส่วนของวัสดุประสานนั่นคือเป็น 0.75*0.5 = 0.375 ส่วน(เทียบกับตะกอน)

ตะกอนที่มีนิกเกิลในตัวอย่าง = 1*25/(1+0.5+0.375)

= 13.33 ก.

Wo = 13.33*334/1000

= 4.45 ก.

Ls = Wi / Wo

= 27.95/4.45

= 6.28 มก./ก.

ประสิทธิภาพในการทำให้นิกเกิลคงตัว

E = (Lo - Ls) * 100 / Lo

= (212.27-6.28)*100/212.27

= 97.04 %

2. ประสิทธิภาพในการทำให้นิกเกิลคงตัวในการทำให้เป็นก้อน

ที่อัตราส่วนที่เหมาะสมคืออัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน 0.75 อัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอย 1.00 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

- ความสามารถถูกชะละลายนิกเกิลก่อนการทำให้เป็นก้อน

นำตะกอนที่มีนิกเกิลไปชะละลายพบว่ามีนิกเกิลในน้ำสกัดเท่ากับ 3,545 มก./ล.

ในน้ำชะละลาย 500 มล. มีนิกเกิล (Wi) = 3,545*500/1,000

= 1,772.5 มก.

ตะกอนที่มีนิกเกิลหนัก 1 กรัม มีนิกเกิลเท่ากับ 334 มก.

ในตะกอน 25 กรัม มีนิกเกิล (Wo) = 334*25/1000

= 8.35 ก.

Lo = Wi / Wo

= 1,772.5 / 8.35

= 212.27 มก./ก.

- ความสามารถถูกชะละลายนิกเกิลหลังการทำให้เป็นก้อน

นิกเกิลในน้ำสกัดเท่ากับ 588 มก./ล.

ในน้ำชะละลาย 500 มล. มีนิกเกิล (Wi) = 588*500/1,000

= 294 มก.

ใช้ตัวอย่าง 25 กรัมประกอบด้วยตะกอนที่มีนิกเกิล 1 ส่วน วัสดุประสาน 0.75 (ปูนขาว 0.75/2 ส่วนและเถ้าลอย 0.75/2 ส่วน) ส่วนน้ำ 0.60 ส่วนของวัสดุประสานนั่นคือเป็น 0.75*0.60 = 0.45 ส่วน(เทียบกับตะกอน)

ตะกอนที่มีนิกเกิลในตัวอย่าง = 1*25/(1+0.75+0.45)

= 11.36 ก.

Wo = 11.36*334/1000

= 3.79 ก.

Ls = Wi / Wo

= 294/3.79

= 77.57 มก./ก.

ประสิทธิภาพในการทำให้นิกเกิลคงตัว

E = (Lo - Ls) * 100 / Lo

= (212.27-77.57)*100/212.27

= 63.46 %

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง.
รายการคำนวณปริมาตรที่เพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื่องจากการทำเสถียรและทำให้เป็นก้อนจะเป็นการเพิ่มปริมาตรของของเสีย ซึ่งจากผลการทดลองที่อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดจะเพิ่มปริมาตรของเสียขึ้นดังแสดง

- ตะกอนดิบ

ความหนาแน่น = 2.06 ตัน/ลบ.ม.

ดังนั้น ตะกอน 1 ตัน จะมีปริมาตร = 1/2.06

= 0.485 ลบ.ม.

- ตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรที่อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอน 0.50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.75

ความหนาแน่นของตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียร = 1.50 ตัน/ลบ.ม.

ตะกอน 1 ตัน จะต้องใช้ปูนขาว 0.50 ตัน และน้ำ 0.50 x 0.75 = 0.375 ตัน

ดังนั้น น้ำหนักรวมของตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียร = 1 + 0.5 + 0.375

= 1.875 ตัน

ดังนั้น ปริมาตรของของเสียที่ผ่านการทำเสถียรเมื่อใช้ตะกอน 1 ตัน

= 1.875 / 1.5

= 1.25 ลบ.ม.

ปริมาตรที่เพิ่มขึ้น = 1.25 / 0.485

= 2.58 เท่า

- ตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน 0.75 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

ความหนาแน่นของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน = 1.49 ตัน/ลบ.ม.

ตะกอน 1 ตัน จะต้องใช้วัสดุประสาน 0.75 ตัน และน้ำ 0.75 x 0.60 = 0.4 ตัน

ดังนั้น น้ำหนักรวมของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน= 1 + 0.75 + 0.51

= 2.2 ตัน

ดังนั้น ปริมาตรของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนเมื่อใช้ตะกอน 1 ตัน

= 2.2/1.49

= 1.48 ลบ.ม.

ปริมาตรที่เพิ่มขึ้น = 1.48 / 0.485

= 3.05 เท่า

ภาคผนวก จ.

เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ.17 แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย (เฉพาะค่าวัสดุ ไม่รวมค่าแรงงาน และค่าขนส่ง) ในการบำบัดตะกอนที่มีนิกเกิลในการทำเสถียร ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาว ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาวผสมเถ้าลอยลิกไนต์ ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ (ในอัตราส่วนวัสดุประสานที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำให้เป็นก้อน โดยทดลองใช้ปูนซีเมนต์แทนปูนขาว) เปรียบเทียบกับของ อนุวัฒน์(2539)ในการทำให้เป็นก้อนตะกอนที่ได้จากกากหลอดฟูออเรสเซนต์โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุประสาน และนฤมิต(2538)ในการทำให้เป็นก้อนตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีโอดีโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุประสาน โดยราคาปูนซีเมนต์-ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง (ตราช้างของ บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด) ราคาส่งในท้องตลาดเดือนธันวาคม พ.ศ. 2542 ราคาตันละ 2,280 บาท ส่วนราคาปูนขาวตามท้องตลาดราคากิโลกรัมละ 5 บาท

ตารางที่ ผ.17 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดกับการศึกษาที่ผ่านมา

วัสดุที่ใช้		ในการศึกษาครั้งนี้						อนุวัฒน์		นฤมิต	
ส่วนประกอบ	ราคา/ตัน (บาท)	ทำเสถียรด้วยปูนขาว		ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาวผสมเถ้าลอย		ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย		ปริมาณ(ตัน)	ค่าใช้จ่าย(บาท)	ปริมาณ(ตัน)	ค่าใช้จ่าย(บาท)
		ปริมาณ(ตัน)	ค่าใช้จ่าย(บาท)	ปริมาณ(ตัน)	ค่าใช้จ่าย(บาท)	ปริมาณ(ตัน)	ค่าใช้จ่าย(บาท)				
ปูนซีเมนต์	2,280	-	-	-	-	0.375	855	2	4,560	2	4,560
ปูนขาว	5,000	0.5	2,500	0.375	1,875	-	-	-	-	-	-
เถ้าลอย	75	-	-	0.375	28.1	0.375	28.1	2	150	2	150
ตะกอนโลหะหนัก	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-
โซเดียมซัลไฟด์	49,000	-	-	-	-	-	-	0.024	1,180	-	-
รวม		1.5	2,500	1.75	1,903	1.75	883	5.024	5,900	5	4,710

หากทางโรงงานต้องการบำบัดเองโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้โดยทำการบำบัดเองที่โรงงาน แล้วนำของเสียที่บำบัดแล้วส่งไปฝังที่ราชบุรี เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกับการที่ส่ง GENCO บำบัด แสดงได้ดังตารางที่ ผ.18 โดยค่าแรงงานคิดเป็นประมาณร้อยละ 20 ของค่าวัสดุ

ตารางที่ ผ.18 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกับของ GENCO

รายการ	บำบัดเอง			ส่ง GENCO
	ทำเสถียรด้วยปูนขาว	ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาวผสมเถ้าลอย	ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย	ค่าใช้จ่าย/ตัน
	ค่าใช้จ่าย/ตัน	ค่าใช้จ่าย/ตัน	ค่าใช้จ่าย/ตัน	
ค่าบำบัดของเสีย	2,500	1,903	883	755
ค่าแรงงาน	500	218.6	176.6	-
ค่าขนส่งของเสียจากโรงงานไปแสมดำ	-	-	-	357.5
ค่าขนกากของเสียไปฝังที่ราชบุรี	450	450	450	228
ค่าฝังกากของเสีย	874	874	874	874
ค่าขนถ่ายของเสีย	300	300	300	300
รวม	4,624	3,745.6	2,683.6	2,514.5

จากตารางข้างต้นจะเห็นว่าค่าใช้จ่ายในการส่ง GENCO บำบัดมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย หากทางโรงงานต้องการที่จะบำบัดของเสียเองนั้นมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. แม้ว่าการทำเสถียรด้วยปูนขาวและการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาวผสมเถ้าลอยลิกไนต์จะมีประสิทธิภาพในการลดการชะละลายของโลหะหนักได้ดี แต่ให้กำลังรับแรงอัดที่ไม่ผ่านมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นหากทางโรงงานต้องการจะทำการบำบัดตะกอนเองจึงควรที่จะเลือกใช้วัสดุประสานอื่นที่ให้กำลังรับแรงอัดได้ดีกว่า

2. หากต้องการใช้ปูนซีเมนต์ควรเลือกใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมใหม่ เนื่องจากค่าที่ใช้ในการคำนวณนี้ได้คำนวณจากอัตราส่วนที่ได้จากการทดลองการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาวผสมเถ้าลอยไม่ได้หามาจากอัตราส่วนที่เหมาะสมจากการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์โดยตรง โดยทำการศึกษาต่อเพื่อหาอัตราส่วนวัสดุประสานที่น้อยที่สุดที่ให้สมบัติทั้งทางกายภาพและลดการชะละลายของโลหะหนักได้ดี ซึ่งคาดว่าจะสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้

3. ราคาจริงที่ใช้ในการบำบัดเองอาจมีค่าต่ำลงได้ทั้งนี้เนื่องจากราคาปูนขาวที่ใช้คำนวณเป็นราคาขายปลีกในท้องตลาดซึ่งอาจมีราคาที่ค่อนข้างสูง

ประวัติผู้เขียน

นางสาว กาญจนา ต่วนเทศ เกิดวันที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2517 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2540

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย