บทที่ 4
แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

4.1 แผนการทดลอง

การวิจัยนี้ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการคอนกรีตของภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการของแผนกปฐพีวิทยา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยใช้ตะกอนปรอทที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียซีโอดี และตะกอนปรอทจากการชะล้างกากหลอดฟลูออเรสเซนต์

4.2 การเตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย

1.ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท1 (ปูนซีเมนต์ตราช้าง) รูปที่ 4.1 ภาพซ้าย

2.ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 (ปูนซีเมนต์ตราปลาฉลาม) รูปที่ 4.1 ภาพขวา

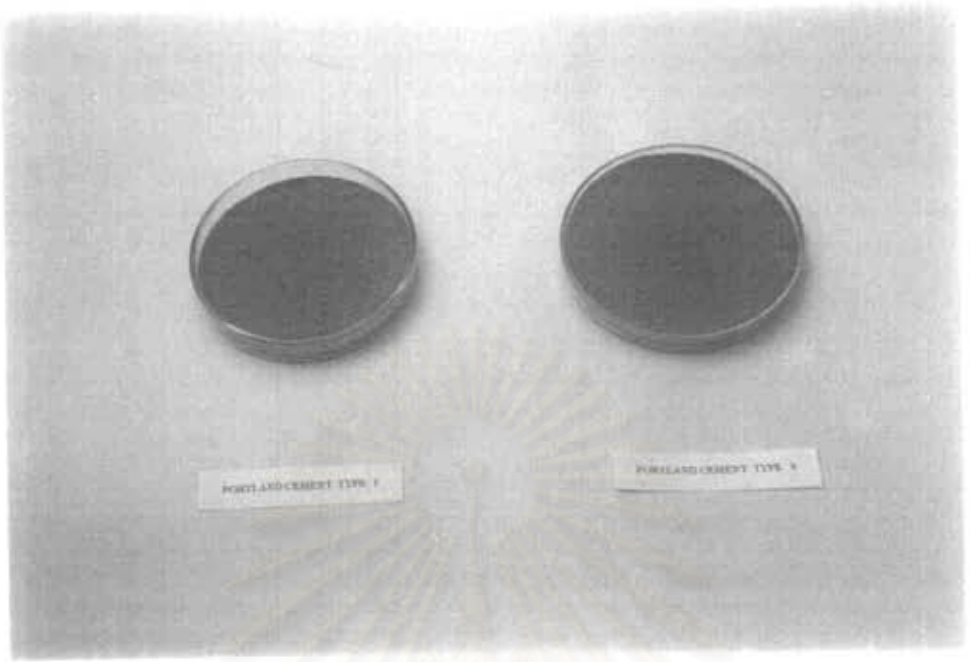
3.ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว (จากโรงงานผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์) รูปที่4.2ภาพซ้าย

4. น้ำประปา

4.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. กรดไฮโดรคลอริก
2. กรดซัลฟุริก
3. โซเดียมซัลไฟด์
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์
5. โซเดียมโบโรไฮไดด์
6. โปตัสเซียมไดโครเมต
7. น้ำกลั่น พีเอช 5.8-6.3 (ปรับพีเอชโดยการเติมกรดไฮโดรคลอริก)
   น้ำกลั่น พีเอช 5.0 (ปรับพีเอชโดยการเติมกรดซัลฟุริกผสมกรดไนตริก 80: 20)
8. เมทธานอล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



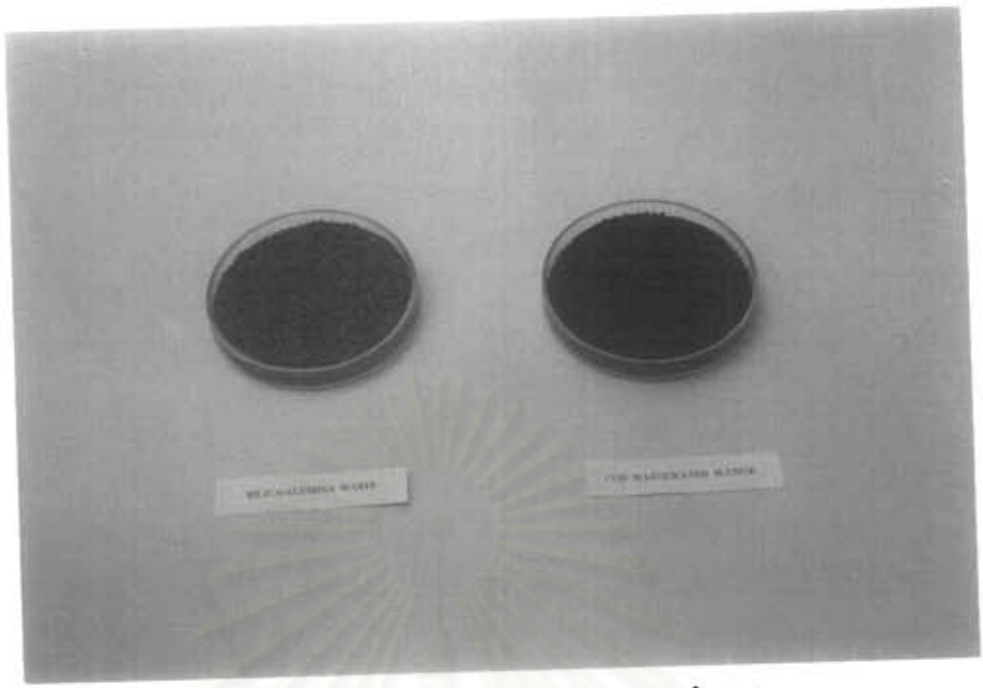
รูปที่ 4.1 ภาพซ้าย แสดงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1
ภาพขวา แสดงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5

4.4 ของเสียที่มีปรอทปนเปื้อน

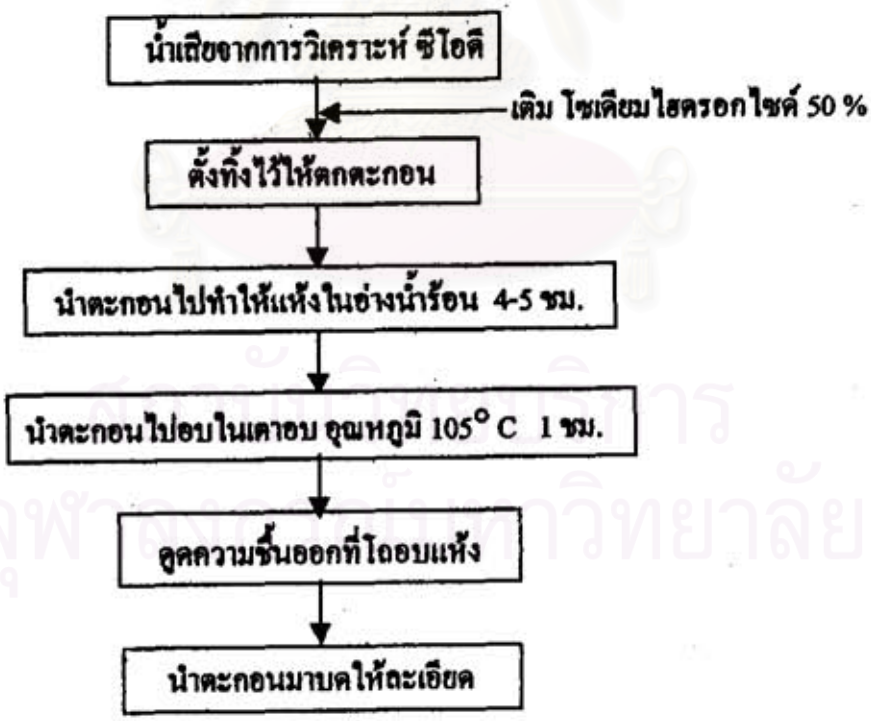
ก. ตะกอนโลหะหนักไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีโอดี (รูปที่ 4.2 ภาพขวา)

ขั้นตอนการเตรียมตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสีย (ดังรูปที่ 4.3)

1. เทน้ำเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดี ประมาณ 2.5 ลิตร ลงในถังกวนขนาด 10 ลิตร
2. ค่อย ๆ เทสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 50% ลงในถังกวนพร้อมทั้งเปิดใบกวนให้มีความเร็วรอบประมาณ 100 รอบต่อนาที ค่าพีเอชของน้ำเสียจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าพีเอชประมาณ 9.5 จึงหยุดเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
3. ปล่อยให้ตะกอนตกลงก้นถัง ทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วจึงถ่ายตะกอนออกทางก้นถัง
4. นำตะกอนที่ได้ไปทำแห้งโดยใช้อ่างน้ำร้อน ประมาณ 4-5 ชั่วโมง
5. เมื่อตะกอนแห้งดีแล้ว นำตะกอนที่ได้ไปเข้าเตาอบที่ 105 องศาเซลเซียสประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปเข้าโถอบแห้งเพื่อดูดความชื้นออก
6. นำตะกอนที่แห้งสนิทแล้วมาบดด้วยเครื่องบดไฟฟ้าจนเป็นผงละเอียด โดยมีผลการเตรียมตะกอนโลหะหนัก ดังแสดงในตารางที่ ผ.1



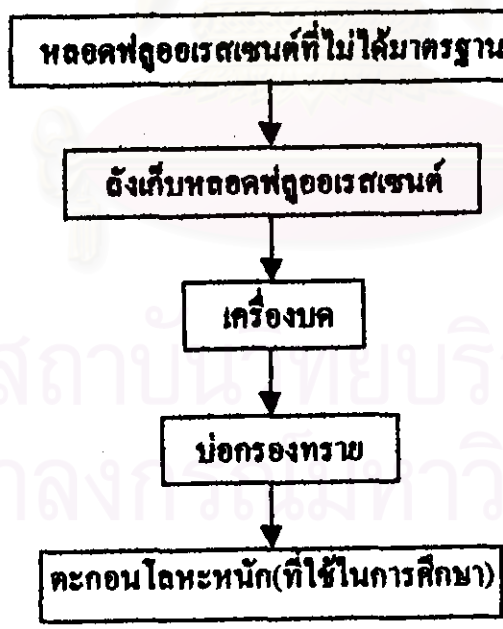
รูปที่ 4.2 ภาพซ้าย แสดงซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว
ภาพขวา แสดงตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีโอดี



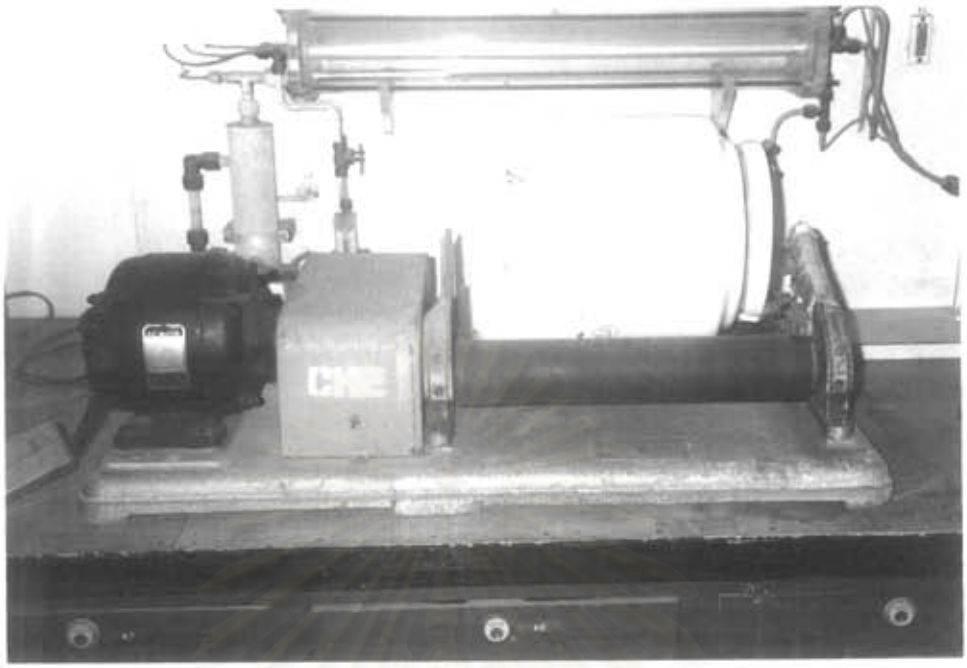
รูปที่ 4.3 แสดงขั้นตอนการเตรียมตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสีย (พวงรัตน์, 2537)

ข. ตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอดฟลูออเรสเซนต์

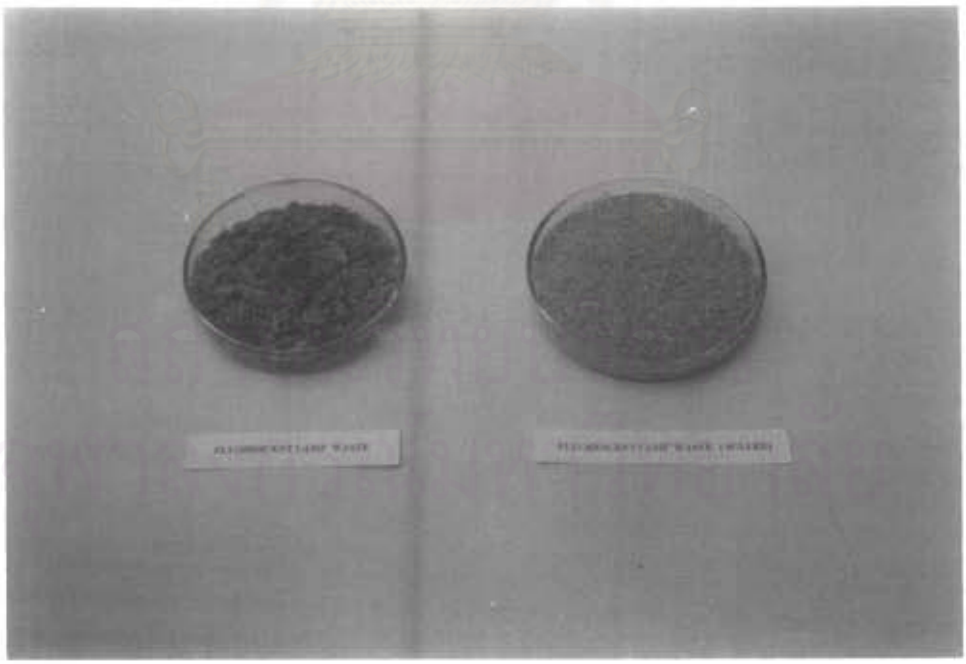
หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ผลิตไม่ได้มาตรฐานการผลิต จะถูกนำมารวมกันก่อนส่งเข้าเครื่องบด โดยในขณะที่บดนั้นจะมีการหล่อน้ำอยู่ตลอดเวลา ปรอทในกากหลอดฟลูออเรสเซนต์จะถูกชะล้างออกมากับน้ำซึ่งหมุนเวียนอยู่ จากนั้นจะทำการแยกเศษแก้วของกากหลอดฟลูออเรสเซนต์ออกไป ส่วนน้ำที่มีปรอทปนเปื้อนจะถูกนำมากรองโดยผ่านบ่อกรองทราย โดยน้ำที่ผ่านการกรองแล้วจะถูกนำไปใช้เป็นน้ำหมุนเวียนในเครื่องบดต่อไป ส่วนปรอทจะตกค้างบนผิวหน้าของลานทรายกรอง ซึ่งลานทรายกรองดังกล่าวจะต้องมีการขุดลอกผิวหน้าทราย 2-3 เดือนต่อครั้งเพื่อนำตะกอนโลหะหนักไปกำจัดต่อไป ดังแสดงกระบวนการตามรูปที่ 4.4 ตะกอนโลหะหนักดังกล่าวเป็นตัวอย่างที่จะนำมาทำการศึกษา แต่เนื่องจากตะกอนโลหะหนักดังกล่าวมีความชื้นสูง และมีสภาพไม่เป็นเนื้อเดียวกัน กล่าวคือ มีส่วนที่เป็นเศษแก้ว และส่วนที่เป็นผง (รูปที่ 4.6 ภาพซ้าย) จึงได้นำตะกอนโลหะหนักดังกล่าวไปตากแดดจนแห้งสนิท แล้วจึงนำไปบดด้วยเครื่องบดตะกอนที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (รูปที่ 4.5) หลังจากบดแล้วจะได้ตะกอนโลหะหนักมีลักษณะเป็นผงละเอียด (รูปที่ 4.6 ภาพขวา)



รูปที่ 4.4 แสดงแหล่งที่มาของตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ข้อมูลจากโรงงานผลิตหลอดฟลูออเรสเซนต์ จ. กรุงเทพฯ)



รูปที่ 4.5 ภาพเครื่องบดตะกอน (ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)



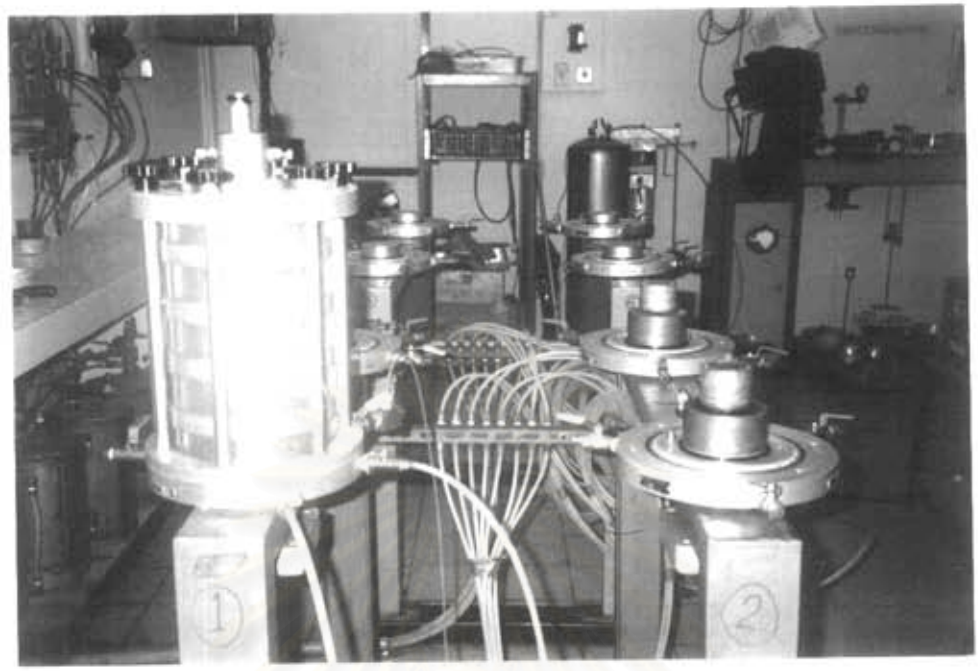
รูปที่ 4.6 ภาพซ้าย แสดงตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ก่อนบด)
ภาพขวา แสดงตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (หลังบด)

4.5 เครื่องมือและอุปกรณ์

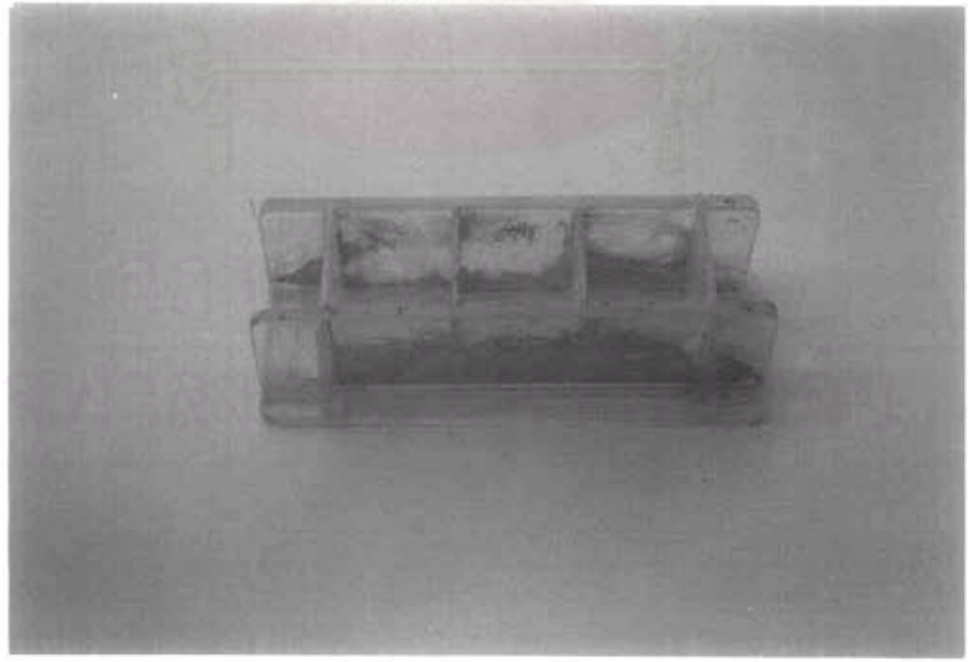
1. การทดลองหล่อซีเมนต์ และการทดสอบกำลังรับแรงอัด
    1. เครื่องชั่ง 2000 กรัม อ่านละเอียดได้ 0.2 กรัม
    2. กระบอกตวงขนาด 500 มล. อ่านได้ละเอียด 10 มล.
    3. เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (รูปที่ 4.7)
    4. เครื่องทดสอบการซึมได้ของน้ำ (รูปที่ 4.8)
    5. แบบหล่อซีเมนต์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม.^{3} (รูปที่ 4.9)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่4.7ภาพเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงอัด(ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)



รูปที่ 4.8 ภาพเครื่องมือทดสอบค่าความซึมได้ของน้ำ (แผนกปฐพีวิทยา กองธรณีวิทยา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย)



รูปที่ 4.9 ภาพ แบบหล่อซีเมนต์ ขนาด 5*5*5 ซม.^{3}

2. การทดสอบการชะละลายของปรอท

1. ตะแกรงขนาด 0.5-5.0 มม.
2. ขวดพลาสติกขนาด 1 ลิตร.
3. เครื่องชั่ง
4. กระบอกตวงขนาด 500 มล.
5. เครื่องเขย่าแบบหมุน 360 องศา (รูปที่ 4.10)
6. เครื่องเขย่าตามแนวขวาง 200 รอบ/นาที (รูปที่ 4.11)
7. เครื่องวัดค่าพีเอช
8. เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า
9. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

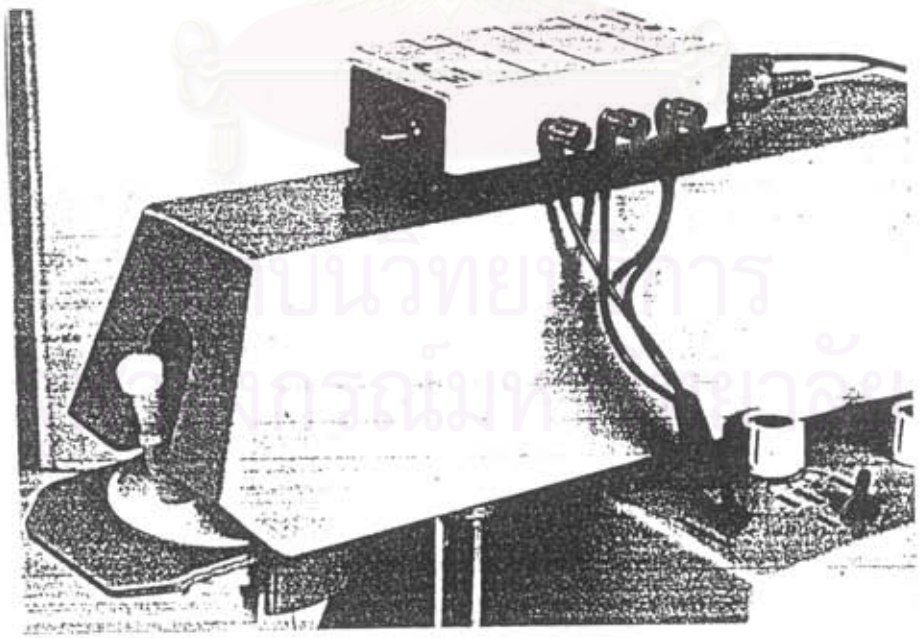
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.10 ภาพแสดงเครื่องเขย่าแบบหมุน 360 องศา

รูปที่ 4.11 ภาพแสดงเครื่องเขย่าตามแนวขวาง

3. การวิเคราะห์หาปริมาณสารแอนทราควินโนน

1. เครื่อง Polarogram Simulator (รูปที่ 4.12)



รูปที่ 4.12 ภาพเครื่อง Polarogram Simulator

4.6 การดำเนินการวิจัย แบ่งออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ดังต่อไปนี้

การทดลองที่ 1. ศึกษาอัตราส่วนของวัสดุประสานที่เหมาะสมของตะกอนปรอทซัลไฟด์

ก) การทำตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อน

ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ (%)	ค่าที่ต้องการทดสอบ*			
	อัตราส่วนผสมของตะกอนต่อวัสดุประสาน (%)			
	0	25	50	75
0				
10				
20				
30				
40				

*ค่าที่ต้องการทดสอบ ได้แก่ 1) ค่ากำลังรับแรงอัด 2) ค่าความสามารถในการถูกชะละลาย
3) ค่าความซึมได้ของน้ำ 4) ค่าความหนาแน่นของก้อนซีเมนต์

ข) การทำตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อน

ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ (%)	ค่าที่ต้องการทดสอบ*			
	อัตราส่วนผสมของตะกอนต่อวัสดุประสาน (%)			
	0	25	50	75
0				
10				
20				
30				
40				

*ค่าที่ต้องการทดสอบ ได้แก่ 1) ค่ากำลังรับแรงอัด 2) ค่าความสามารถในการถูกชะละลาย
3) ค่าความซึมได้ของน้ำ 4) ค่าความหนาแน่นของก้อนซีเมนต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีทำการทดลอง

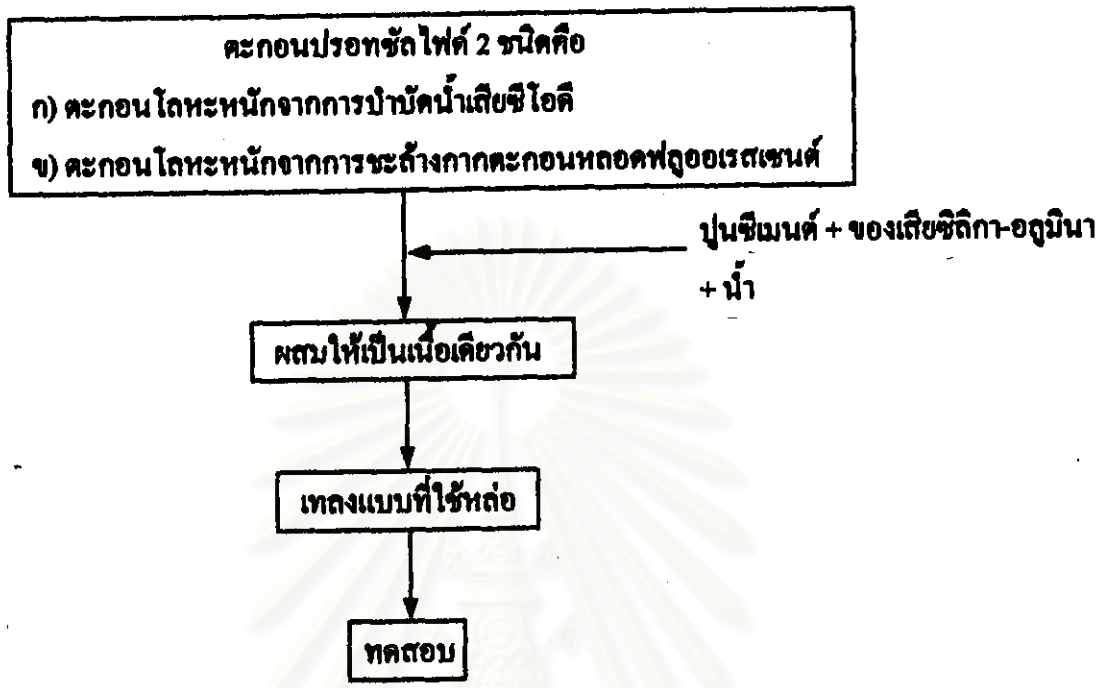
1) หล่อซีเมนต์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม.^{3} โดยมีขั้นตอนการหล่อซีเมนต์ดังรูปที่ 4.13 และมีส่วนผสมดังนี้
   - อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 (นฤมิต คินิมาน, 2537)
   - ตะกอนปรอทซัลไฟด์ เตรียมโดยใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ 1.75 เท่าของค่าปริมาณทางทฤษฎี (อนุวัตน์ ปุ่นพันธ์ฉาย, 2539)
   - ทดลองแปรค่าอัตราส่วนผสมของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0 10 20 30 และ 40%
   - ทดลองแปรค่าอัตราส่วนผสมของตะกอนต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0 25 50 และ 75%
   - ใช้เวลาบ่ม 7 วัน
2) ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์ ที่แข็งตัวแล้ว
3) ทดสอบหาค่าความสามารถในการถูกชะละลายปรอท โดยมีขั้นตอนการทดสอบการชะละลายดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยวิเคราะห์หาความเข้มข้นปรอท เสร็จแล้วนำมาวัดค่าพีเอช ความเป็นด่าง และค่าสภาพนำไฟฟ้าของน้ำสกัด
4) ทดสอบหาค่าความซึมได้ของน้ำ และค่าความหนาแน่นของก้อนซีเมนต์ (ทดสอบเฉพาะค่าอัตราส่วนผสมที่คัดเลือกแล้ว)
5) คำนวณหาประสิทธิภาพของการกำจัดปรอท

   ประสิทธิภาพของการกำจัด = $(C_0 - C_S)/C_0 \times 100$

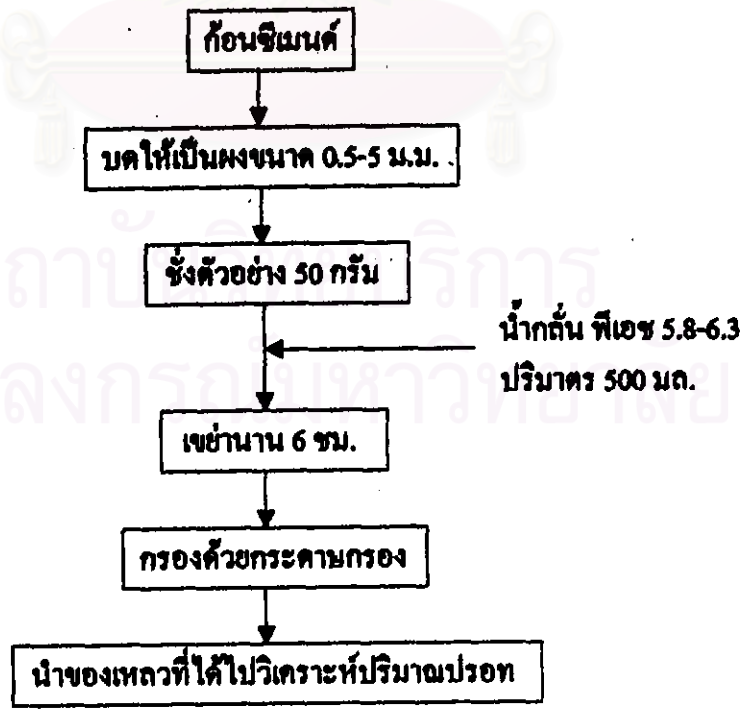
   โดยที่ C_0 = ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดก่อนผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน

   C_S = ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดหลังผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13 แสดงขั้นตอนการหล่อซีเมนต์



รูปที่ 4.14 แสดงการทดสอบการชะละลายของปรอท (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2531)

การทดลองที่ 2. ศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมของตะกอนปรอทซัลไฟด์

ก) การทำตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อน

ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ (%)	ค่าที่ต้องการทดสอบ *				
	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน				
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
0 ค่าที่เลือก					

*ค่าที่ต้องการทดสอบ ได้แก่ 1) ค่ากำลังรับแรงอัด 2) ค่าความสามารถในการถูกชะละลาย
3) ค่าความซึมได้ของน้ำ 4) ค่าความหนาแน่นของก้อนซีเมนต์

ข) การทำตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อน

ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ (%)	ค่าที่ต้องการทดสอบ *				
	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน				
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
0 ค่าที่เลือก					

*ค่าที่ต้องการทดสอบ ได้แก่ 1) ค่ากำลังรับแรงอัด 2) ค่าความสามารถในการถูกชะละลาย
4) ค่าความซึมได้ของน้ำ 4) ค่าความหนาแน่นของก้อนซีเมนต์

วิธีทำการทดลอง

1) หล่อซีเมนต์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม.^{3} โดยมีส่วนผสมดังนี้
   - ตะกอนโลหะหนักซัลไฟด์เตรียมโดยใช้โซเดียมซัลไฟด์ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎี
   - อัตราส่วนผสมของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ (ค่าที่ดีที่สุดจากข้อ 1)
   - อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน (ค่าที่ดีที่สุดจากข้อ 1)
   - ทดลองแปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 0.40 0.50 0.60 และ 0.70
   - ใช้เวลาบ่ม 7 วัน
2) ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว
3) ทดสอบหาค่าความสามารถในการถูกชะละลายปรอท ทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นปรอท จากนั้นแล้วนำมาวัดค่าพีเอช ความเป็นด่าง และค่าสภาพนำไฟฟ้าของน้ำสกัด

4) ทดสอบหาค่าความซึมได้ของน้ำ และค่าความหนาแน่นของก้อนซีเมนต์ (ทดสอบเฉพาะค่าอัตราส่วนผสมที่คัดเลือกแล้ว)

5) คำนวณหาประสิทธิภาพของการกำจัดปรอทแต่ละชนิด

ประสิทธิภาพของการกำจัด = $(C_0 - C_S) / C_0 \times 100$

โดยที่ C_0 = ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดก่อนผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน

C_S = ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดหลังผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน

การทดลองที่ 3/1 ศึกษาผลของระยะเวลาบ่มตัวที่ใช้ในการหล่อก้อนซีเมนต์

ก) การทำตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อน

ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ (%)	ค่าที่ต้องการทดสอบ *				
	ระยะเวลาบ่ม (วัน)				
	1	3	7	14	28
0 ค่าที่เลือก					

*ค่าที่ต้องการทดสอบ ได้แก่ 1) ค่ากำลังรับแรงอัด 2) ค่าความสามารถในการถูกชะละลาย 3) ค่าความซึมได้ของน้ำ 4) ค่าความหนาแน่นของก้อนซีเมนต์

ข) การทำตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อน

ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ (%)	ค่าที่ต้องการทดสอบ *				
	ระยะเวลาบ่ม (วัน)				
	1	3	7	14	28
0 ค่าที่เลือก					

*ค่าที่ต้องการทดสอบ ได้แก่ 1) ค่ากำลังรับแรงอัด 2) ค่าความสามารถในการถูกชะละลาย 4) ค่าความซึมได้ของน้ำ 4) ค่าความหนาแน่นของก้อนซีเมนต์

วิธีทำการทดลอง

1) หล่อซีเมนต์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม.^{3} โดยมีส่วนผสมดังนี้
   - อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ใช้ค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 2)
   - ตะกอนโลหะหนักซัลไฟด์ เตรียมโดยใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ 1.75 เท่าของค่าปริมาณทางทฤษฎี (อนุวัฒน์ ปุนพันธ์ฉาย, 2539)
   - อัตราส่วนผสมของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ (ใช้ค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1)
   - อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน (ใช้ค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1)
   - ใช้เวลาบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน
2) ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์ ที่แข็งตัวแล้ว
3) ทดสอบหาค่าความสามารถในการถูกชะละลายปรอท โดยวิเคราะห์หาความเข้มข้นของปรอท จากนั้นนำมาวัดค่าพีเอช ความเป็นด่าง และค่านำไฟฟ้าของน้ำสกัด
4) ทดสอบหาค่าความซึมได้ของน้ำและค่าความหนาแน่น ของก้อนซีเมนต์ (ทดสอบเฉพาะค่าอัตราส่วนผสมที่คัดเลือกแล้ว)
5) คำนวณหาประสิทธิภาพของการกำจัดปรอทแต่ละชนิด

   ประสิทธิภาพของการกำจัด = $(C_0 - C_S) / C_0 \times 100$

   โดยที่ C_0 = ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดก่อนผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน

   C_S = ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดหลังผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน

การทดลองที่ 3/2 ศึกษาอัตราส่วนของวัสดุประสานที่เหมาะสมของตะกอนปรอทซัลไฟด์เพิ่มเติม

ก) การทำตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อน

อัตราส่วนผสมตะกอนต่อวัสดุประสาน	ค่าที่ต้องการทดสอบ *					
	ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ (%)					
	50	60	70	80	90	100
ค่าที่เลือก						

*ค่าที่ต้องการทดสอบ ได้แก่ 1) ค่ากำลังรับแรงอัด 2) ค่าความสามารถในการถูกชะละลาย
3) ค่าความซึมได้ของน้ำ 4) ค่าความหนาแน่นของก้อนซีเมนต์

ข) การทำตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อน

อัตราส่วนผสมตะกอนต่อวัสดุประสาน	ค่าที่ต้องการทดสอบ *					
	ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ (%)					
	50	60	70	80	90	100
ค่าที่เลือก						

*ค่าที่ต้องการทดสอบ ได้แก่ 1) ค่ากำลังรับแรงอัด 2) ค่าความสามารถในการถูกชะละลาย
3) ค่าความซึมได้ของน้ำ 4) ค่าความหนาแน่นของก้อนซีเมนต์

วิธีทำการทดลอง

1) หล่อซีเมนต์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม.^{3} โดยมีส่วนผสมดังนี้
   - อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ใช้ค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 2)
   - ตะกอนโลหะหนักซัลไฟด์เตรียมโดยใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ 1.75 เท่าของค่าปริมาณทางทฤษฎี (อนุวัตน์ ปุนพันธ์ฉาย, 2539)
   - ทดลองแปรค่าอัตราส่วนผสมของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 50 60 70 80 90 และ 100%
   - อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานใช้ค่าที่ดีที่สุดจากข้อ 1
   - เวลาบ่ม (ใช้ค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3/1)
2) ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว
3) ทดสอบหาค่าความสามารถในการถูกชะละลายปรอท โดยวิเคราะห์หาความเข้มข้นปรอท เสร็จแล้วนำมาวัดค่าพีเอช ความเป็นด่าง และค่านำไฟฟ้าของน้ำสกัด
4) ทดสอบหาค่าความซึมได้ของน้ำและค่าความหนาแน่นของก้อนซีเมนต์ (ทดสอบเฉพาะค่าอัตราส่วนผสมที่คัดเลือกแล้ว)
5) คำนวณหาประสิทธิภาพของการกำจัดปรอท

   ประสิทธิภาพของการกำจัด = $(C_0 - C_S) / C_0 \times 100$

   โดยที่ C_0 = ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดก่อนผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน

   C_S = ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดหลังผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน

การทดทดลองที่ 3/3 เปรียบเทียบวิธีการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (2540) กับประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1 (2531)

ก) การทำตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อน

ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ต่อปูนซีเมนต์ (%)	ค่าที่ต้องการวัด*	
	ประกาศฯ (2540)	ประกาศฯ (2531)
ค่าที่เลือก		

* ค่าที่ต้องการทดสอบ ได้แก่ 1) ปรอท 2) เหล็ก

ข) การทำตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อน

ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ต่อปูนซีเมนต์ (%)	ค่าที่ต้องการวัด*	
	ประกาศฯ (2540)	ประกาศฯ (2531)
ค่าที่เลือก		

* ค่าที่ต้องการทดสอบ ได้แก่ 1) ปรอท 2) เหล็ก 3) โครเมียม

วิธีทำการทดลอง

1) หล่อซีเมนต์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม.^{3} โดยมีส่วนผสมดังนี้
   - อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ใช้ค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 2)
   - ตะกอนโลหะหนักซัลไฟด์เตรียมโดยใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ 1.75 เท่าของค่าปริมาณทางทฤษฎี (อนุวัฒน์ ปูนพันธ์ชาย, 2539)
   - อัตราส่วนผสมของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์(ใช้ค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองที่3/2)
   - อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน (ใช้ค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1)
   - เวลาบ่ม (ใช้ค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3/1)
2) ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว
3) ทดสอบหาค่าความสามารถในการถูกชะละลายปรอท โดยวิเคราะห์หาความเข้มข้นปรอทตามวิธีในประกาศฯ (2540) และตามวิธีในประกาศฯ (2531) เสร็จแล้วนำมาวัดค่าพีเอช ความเป็นด่าง และค่าสภาพนำไฟฟ้าของน้ำสกัด

5) คำนวณหาประสิทธิภาพของการกำจัดปรอท

ประสิทธิภาพของการกำจัด = $(C_0 - C_S) / C_0 \times 100$

โดยที่ C_0 = ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดก่อนผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน

C_S = ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดหลังผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน

การทดลองที่ 3/4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดการถูกชะละลายของสารแอนทราควินโนน

ก) ตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีโอดี

อัตราส่วนตะกอนโลหะหนัก ต่อวัสดุประสาน ต่อวัสดุประสาน	ความสามารถถูกชะละลาย ของสารฯ (มก./มก.)	ประสิทธิภาพในการดูดการ ถูกชะละลายของสารฯ (%)
0		
ค่าที่เลือก		

ข) ตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอดฟลูออเรสเซนต์

อัตราส่วนตะกอนต่อ วัสดุประสาน	ความสามารถถูกชะละลาย ของสารฯ (มก./มก.)	ประสิทธิภาพในการดูดการ ถูกชะละลายของสารฯ (%)
0		
ค่าที่เลือก		

วิธีทำการทดลอง

1) ทดสอบหาค่าความสามารถในการถูกชะละลายของสารแอนทราควินโนนในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วที่ยังไม่ได้ผ่านและผ่านการทำให้เป็นก้อนแล้ว โดยใช้วิธีการทดสอบดังในภาคผนวก ง.

2) คำนวณหาประสิทธิภาพในการดูดการถูกชะละลายของสารแอนทราควินโนน

ประสิทธิภาพในการดูดการถูกชะละลายของสารฯ = $(C_0 - C_S) / C_0 \times 100$

โดยที่ C_0 = ความเข้มข้นของสารฯในสารสกัดก่อนผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน

C_S = ความเข้มข้นของสารฯในสารสกัดหลังผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน

การทดลองที่ 4/1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของปรอท

ก) การทำตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีไอดีให้เป็นก้อน

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ความสามารถถูกชะละลายของโลหะหนัก* (มก./ก.)		ประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของโลหะหนัก* (%)	
	ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ (%)		ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ (%)	
	0	ค่าที่เลือก	0	ค่าที่เลือก
1				
3				
7				
14				
28				

*โลหะหนัก ได้แก่ 1) ปรอท 2) โครเมียม

ข) การทำตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อน

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ความสามารถถูกชะละลายของโลหะหนัก* (มก./ก.)		ประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของโลหะหนัก* (%)	
	ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ (%)		ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ (%)	
	0	ค่าที่เลือก	0	ค่าที่เลือก
1				
3				
7				
14				
28				

*โลหะหนัก ได้แก่ 1) ปรอท

วิธีทำการทดลอง

1)ใช้ตัวอย่างจากการทดลองที่ 3/1 ในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของปรอท

2)ทดสอบหาค่าความสามารถ ในการถูกชะละลายปรอทของตะกอนที่ยังไม่ได้ผ่านการทำให้เป็นก้อนโดยใช้วิธีการทดสอบเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 ข้อ3

3) คำนวณหาประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของปรอท

ประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของปรอท = $(C_0 - C_S) / C_0 \times 100$

โดยที่ C_0 = ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดก่อนผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน

C_S = ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดหลังผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน

การทดลองที่ 4/2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของปรอทเพิ่มเติม

ก) การทำตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อน

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ความสามารถถูกชะละลายของโลหะหนัก* (มก./ก.)		ประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของโลหะหนัก* (%)	
	ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ (%)		ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ (%)	
	0	ค่าที่เลือก	0	ค่าที่เลือก
ค่าที่เลือก				

*โลหะหนัก ได้แก่ 1) ปรอท 2) โครเมียม

ข) การทำตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อน

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ความสามารถถูกชะละลายของโลหะหนัก* (มก./ก.)		ประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของโลหะหนัก* (%)	
	ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ (%)		ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ (%)	
	0	ค่าที่เลือก	0	ค่าที่เลือก
ค่าที่เลือก				

*โลหะหนัก ได้แก่ 1) ปรอท

วิธีทำการทดลอง

1)ใช้ตัวอย่างจากการทดลองที่ 3/2 ในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของปรอท

2)ทดสอบหาค่าความสามารถ ในการถูกชะละลายปรอทของตะกอนที่ยังไม่ได้ผ่านการทำให้เป็นก้อนโดยใช้วิธีการทดสอบเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 ข้อ3

3) คำนวณหาประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของปรอท

ประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของปรอท = $(C_0 - C_S) / C_0 \times 100$

โดยที่ C_0 = ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดก่อนผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน

C_S = ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดหลังผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน

เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการทำตะกอนปรอทซัลไฟด์มาทำให้เป็นก้อน

ก) การทำตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อน

ข) การทำตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอดฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อน

วิธีการคิดราคา

1) นำอัตราส่วนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3/2 มาคำนวนหาน้ำหนักของวัสดุต่างๆที่ใช้

2) การคำนวนราคาจะคิดเฉพาะค่าวัสดุที่ใช้ในการผสมตัวอย่างเท่านั้น ไม่รวมถึงค่าใช้จ่ายอื่นๆ เช่น ค่าอุปกรณ์เครื่องมือ ค่าแรงงาน ค่าขนส่ง เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัสดุที่ใช้		เปรียบเทียบค่าใช้จ่าย							
		ตะกอน ซีไอดี							
		ของเสียซิลิกาฯ		ซิลิกาฟูม		เถ้าลอยลิกไนต์		เถ้าลอยลิกไนต์	
		(ในการศึกษานี้)		(ดวง สมร)		(อนุ วัฒน์)		(นฤมิต)	
ส่วนประกอบ	ราคา* (บ./ กก.)	ปริมาณที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย** (บ.)	ปริมาณที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย** (บ.)	ปริมาณที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย** (บ.)	ปริมาณที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย** (บ.)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิด 1									
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิด 5									
ของเสียซิลิกา-อะลูมินา***									
ซิลิกาฟูม									
เถ้าลอยลิกไนต์									
โซเดียมซัลไฟต์									
น้ำ									
ตะกอนโลหะหนัก									
รวม									

* = คิดราคาโดยใช้ราคาปัจจุบัน

** = คิดค่าใช้จ่ายต่อน้ำหนักตะกอน 1 กก.

*** = ปัจจุบันยังไม่มีการระบุราคาซื้อขาย

วัสดุที่ใช้		เปรียบเทียบค่าใช้จ่าย							
		กากหลอดฟ ลูออเรสเซนต์							
		ของเสียซิลิกาฯ		ซิลิกาฟูม		เถ้าลอยลิกไนต์		เถ้าลอยลิกไนต์	
		(ในการศึกษานี้)		(ดวง สมร)		(ดวง สมร)		(อนุวัฒน์)	
ส่วนประกอบ	ราคา* (บ./ กก.)	ปริมาณที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย** (บ.)	ปริมาณที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย** (บ.)	ปริมาณที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย** (บ.)	ปริมาณที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย** (บ.)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิด 1									
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิด 5									
ของเสียซิลิกา-อะลูมินา***									
ซิลิกาฟูม									
เถ้าลอยลิกไนต์									
โซเดียมซัลไฟด์									
น้ำ									
ตะกอนโลหะหนัก									
รวม									

* = คิดราคาโดยใช้ราคาปัจจุบัน

** = คิดค่าใช้จ่ายต่อน้ำหนักตะกอน 1 กก.

*** = ปัจจุบันยังไม่มีการระบุราคาซื้อขาย