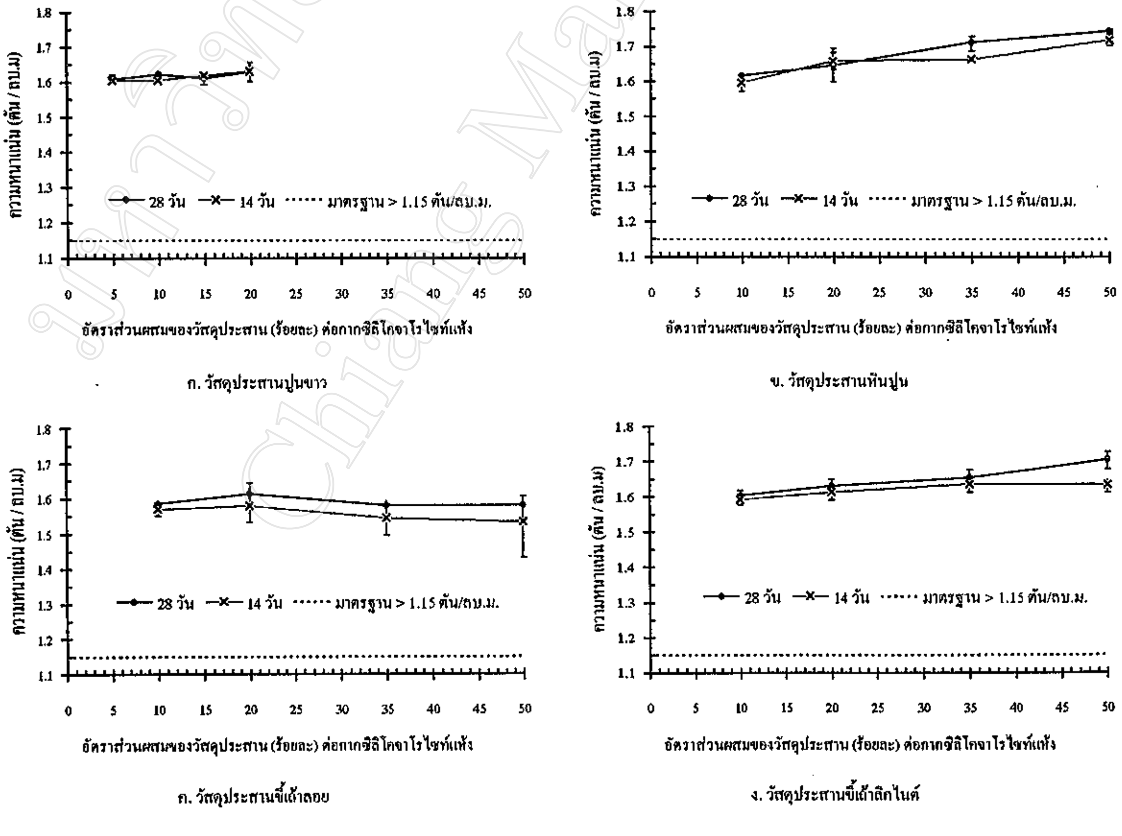
บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การทดสอบอัตราส่วนผสมเบื้องต้น

ได้ทดลองใช้วัสดุประสานและวัสดุประสานคละจำนวน 12 ชนิด ผสมกับกากซิลิโคจาโรไซท์ในอัตราส่วนต่างๆ บ่ม 14 วัน และ 28 วัน แล้วทำการทดสอบเฉพาะค่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่น ได้ผลการทดลองดังข้อ 4.1.1 - 4.1.2

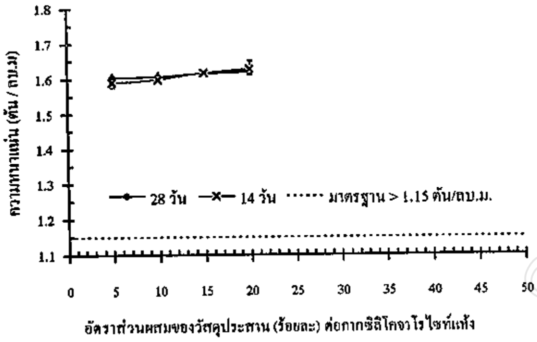
4.1.1 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของก้อนซิลิโคจาโรไซท์เมื่อใช้วัสดุประสานและวัสดุประสานคละชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.1

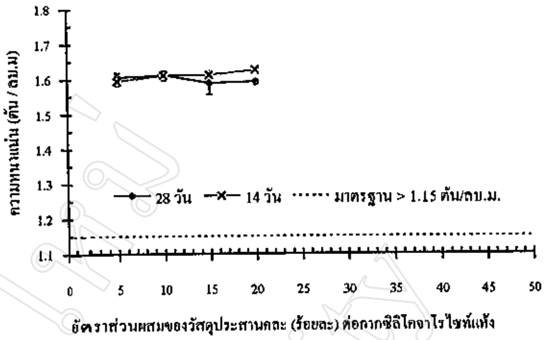


รูป 4.1 ความหนาแน่นของก้อนซิลิโคจาโรไซท์จากการทดสอบอัตราส่วนผสมเบื้องต้น

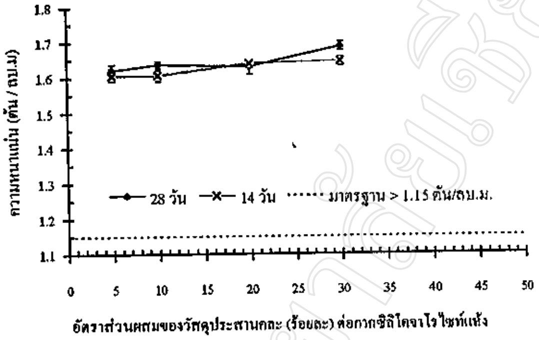
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University



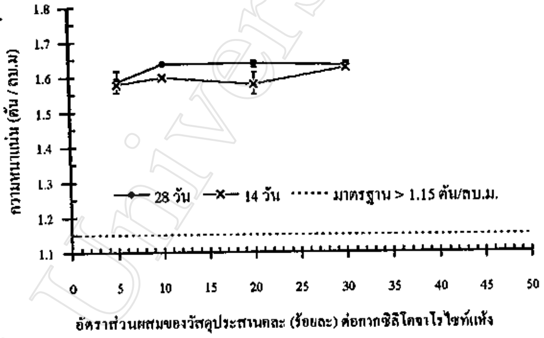
จ. วัสดุประสานปูนซีเมนต์



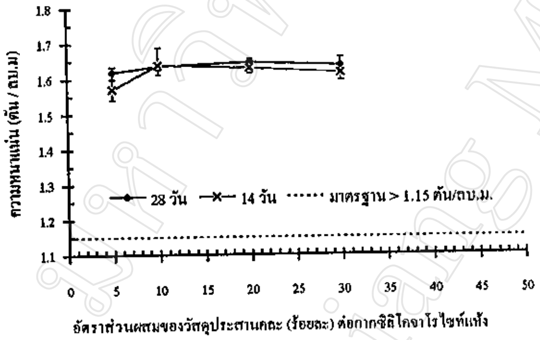
ฉ. วัสดุประสานคละปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ (1:1)



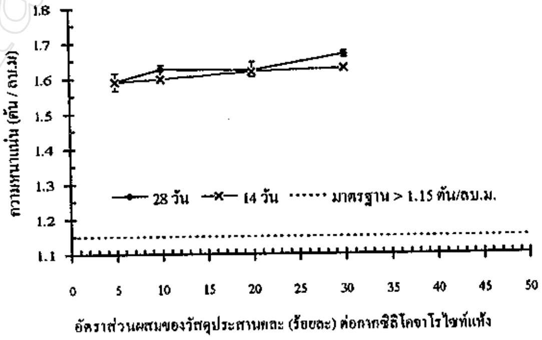
ช. วัสดุประสานคละปูนขาวผสมหินปูน (1:1)



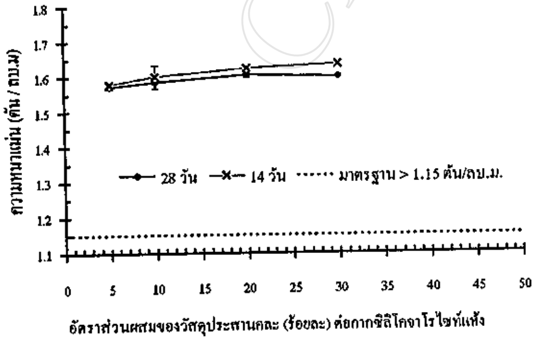
ซ. วัสดุประสานคละปูนขาวผสมขี้เถ้าลอย (1:1)



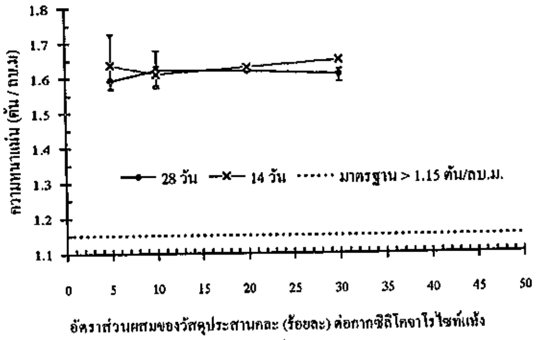
ฌ. วัสดุประสานคละปูนขาวผสมขี้เถ้าลิกไนต์ (1:1)



ญ. วัสดุประสานคละปูนซีเมนต์ผสมหินปูน (1:1)



ฎ. วัสดุประสานคละปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย (1:1)



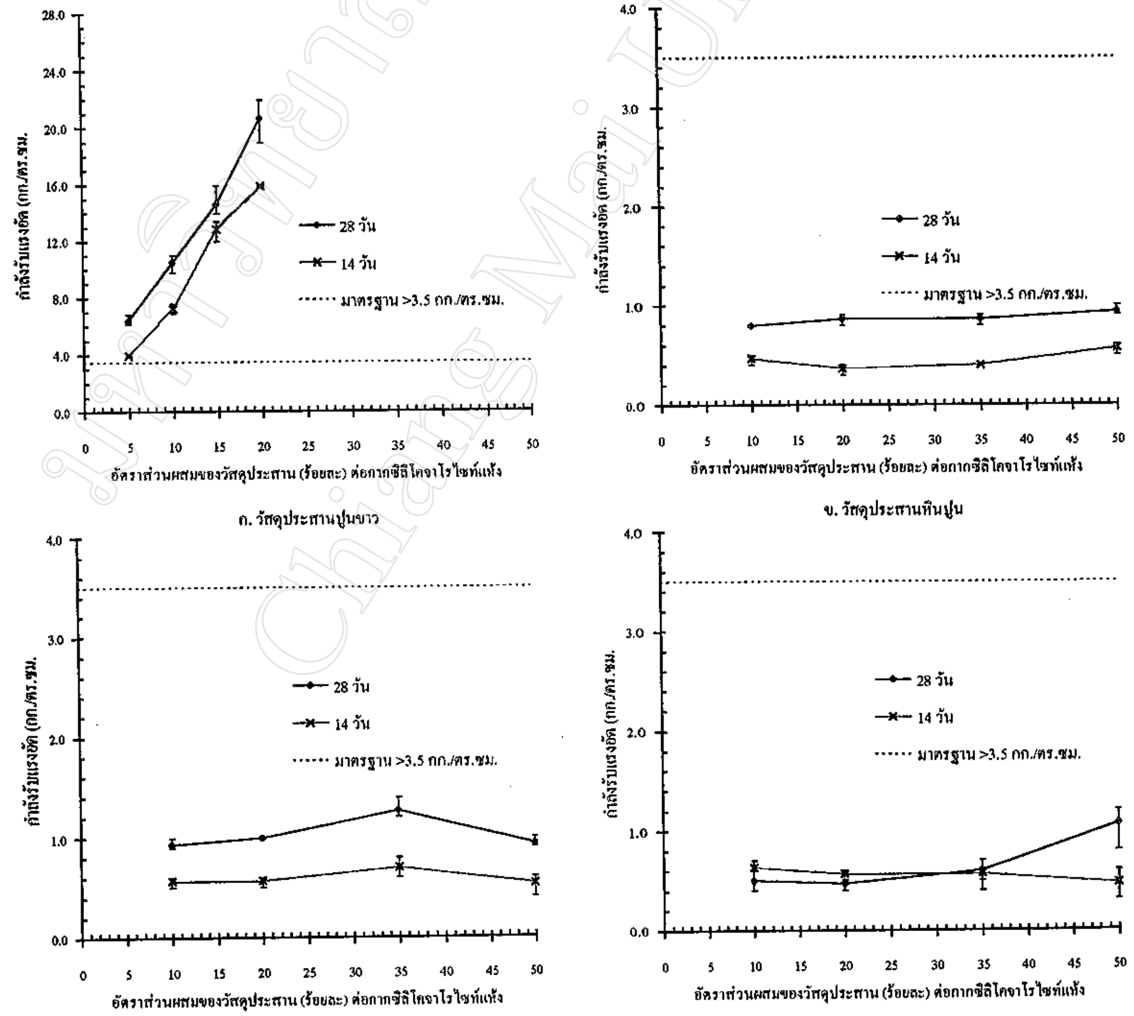
ฏ. วัสดุประสานคละปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลิกไนต์ (1:1)

รูป 4.1 ความหนาแน่นของก้อนซิลิโคจาโรไซท์จากการทดสอบอัตราส่วนผสมเบื้องต้น (ต่อ)

จากรูป 4.1 ก้อนซิลิโคจาโรไซท์ที่บ่ม 14 วัน และ 28 วัน มีความหนาแน่นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากว่ามีการบ่มในสภาพที่มีความชื้น 100% ดังนั้นน้ำหนักของก้อนตัวอย่างจึงมีค่าเท่าเดิมตลอดเวลา ส่วนปริมาตรของก้อนตัวอย่างพบว่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากตลอดเวลาที่ทำการทดลอง ดังนั้นความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุประสาน หรือวัสดุประสานคละทั้ง 12 ประเภทพบว่าก้อนตัวอย่างมีความหนาแน่นประมาณใกล้เคียงกัน คือมีค่าอยู่ในช่วง 1.43 – 1.74 ตัน/ลบ.ม. ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดคือ 1.15 ตัน/ลบ.ม. ทุกการทดลอง

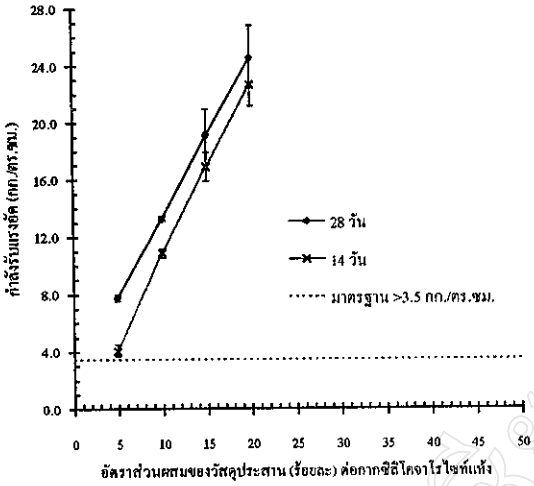
4.1.2 กำลังรับแรงอัด

ก้อนซิลิโคจาโรไซท์มีค่ากำลังรับแรงอัดแตกต่างกันตามประเภทของวัสดุประสานหรือวัสดุประสานคละที่ใช้ซึ่งแสดงดังรูป 4.2

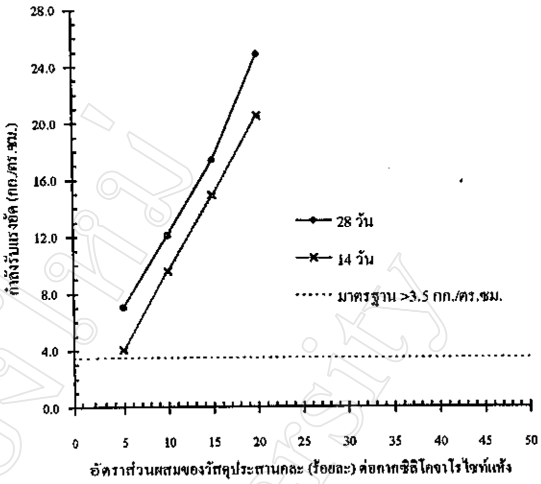


รูป 4.2 กำลังรับแรงอัดของก้อนซิลิโคจาโรไซท์จากการทดสอบอัตราส่วนผสมเบื้องต้น

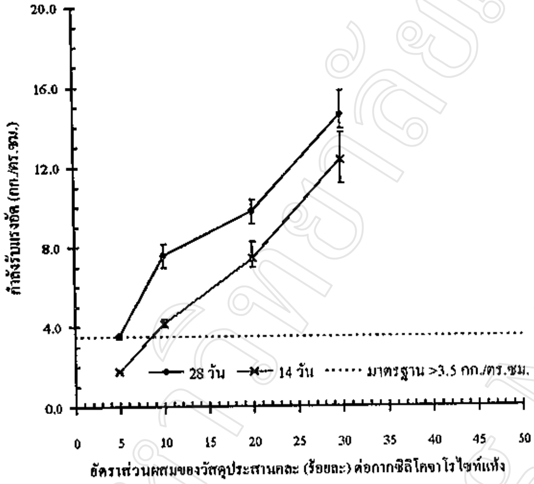
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University



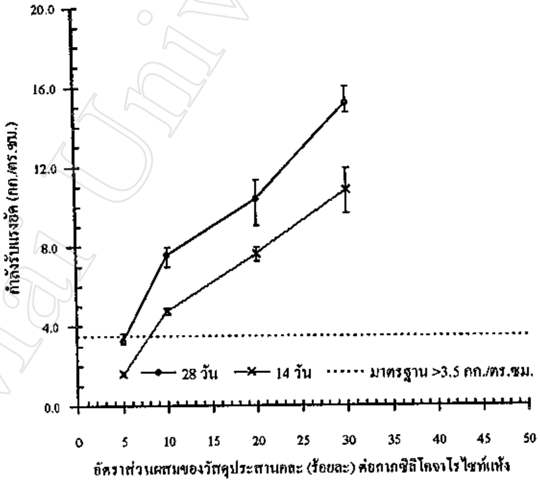
จ. วัสดุประสานปูนซีเมนต์



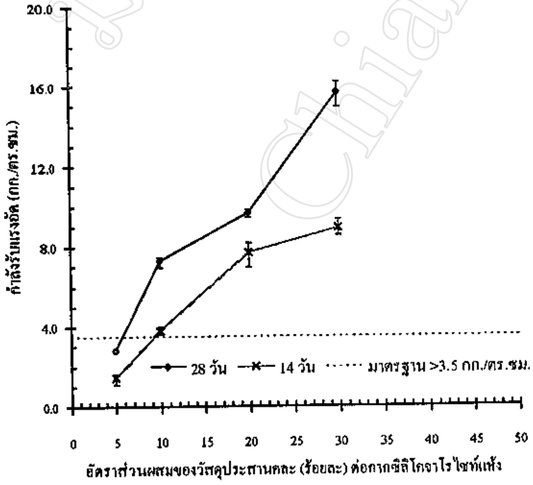
ฉ. วัสดุประสานคละปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ (1:1)



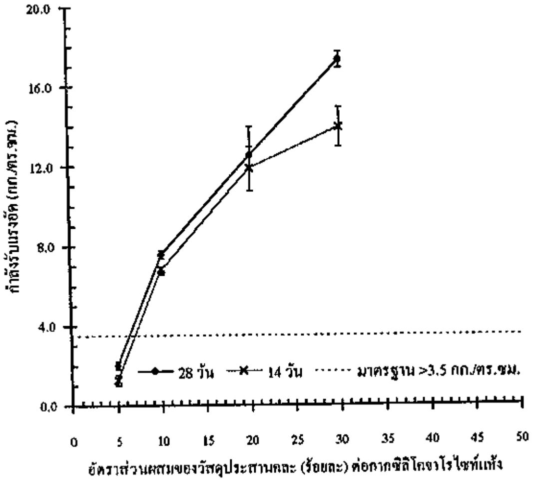
ช. วัสดุประสานคละปูนขาวผสมหินปูน (1:1)



ซ. วัสดุประสานคละปูนขาวผสมขี้เถ้าลอย (1:1)

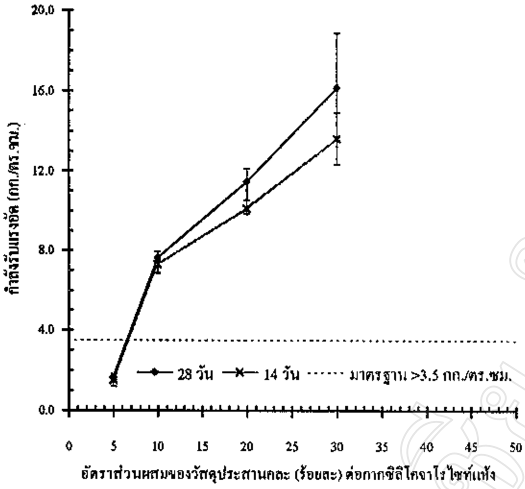


ฌ. วัสดุประสานคละปูนขาวผสมขี้เถ้าลิกไนต์ (1:1)

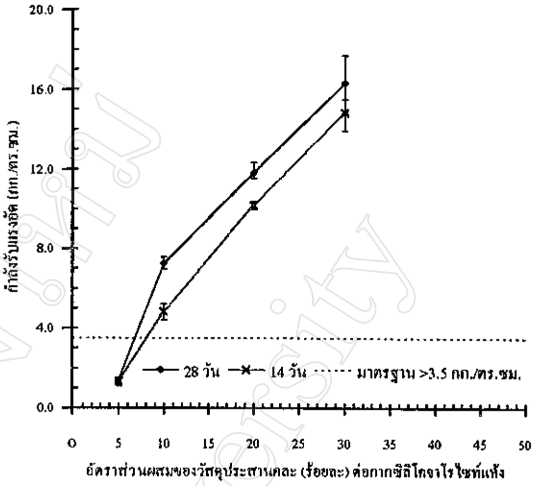


ญ. วัสดุประสานคละปูนซีเมนต์ผสมหินปูน (1:1)

รูป 4.2 กำลังรับแรงอัดของก้อนซิลิโคจาโรไซท์จากการทดสอบอัตราส่วนผสมเบื้องต้น (ต่อ)



ฎ. วัสดุประสานคละปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย (1:1)



ฏ. วัสดุประสานคละปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลิกไนต์ (1:1)

รูป 4.2 กำลังรับแรงอัดของก้อนซิลิโคจาโรไซท์จากการทดสอบอัตราส่วนผสมเบื้องต้น (ต่อ)

จากรูป 4.2 พบว่าก้อนซิลิโคจาโรไซท์ที่บ่ม 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าก้อนตัวอย่างที่บ่ม 14 วัน ทุกการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดจากการใช้วัสดุประสานหรือวัสดุประสานคละต่างๆ สรุปได้ว่า

- ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่สามารถพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนซิลิโคจาโรไซท์ได้ดีที่สุดโดยทำให้ก้อนตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานเมื่อใช้ในอัตราเพียงร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแห้ง จากการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ก้อนตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงถึง 7.76 กก./ตร.ซม. ทั้งนี้เป็นเพราะองค์ประกอบส่วนใหญ่ของปูนซีเมนต์เป็นสารประกอบพวกแคลเซียมซิลิเกต และแคลเซียมอลูมิเนต เมื่อรวมตัวกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เปลี่ยนเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$) และแคลเซียมอลูมินาไฮเดรต ($3CaO.2Al_2O_3.3H_2O$) ภายในโครงสร้างของก้อนตัวอย่าง สารประกอบนี้มีผลโดยตรงที่ทำให้ก้อนตัวอย่างมีความแข็งแรง

- ปูนขาวเป็นวัสดุประสานที่ดีรองลงมาจากปูนซีเมนต์ โดยเมื่อใช้ปูนขาวในอัตราร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแห้ง ก้อนตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัด 6.36 กก./ตร.ซม. ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน การที่ปูนขาวทำให้ก้อนตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าปูนซีเมนต์เพราะปูนขาวไม่มีสารประกอบพวกแคลเซียมซิลิเกต และแคลเซียมอลูมิเนตเป็นองค์ประกอบ แต่การที่องค์ประกอบของปูนขาวเป็นสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ เมื่อรวมตัวกับน้ำและซิลิกาที่มีอยู่ในกากซิลิโคจาโรไซท์ จะทำให้เกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมินาไฮเดรต ได้ดังสมการ

$$3CaO + 3H_2O + 2SiO_2 \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O \quad (4.1)$$

$$3CaO + 3H_2O + 2Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O \quad (4.2)$$

ดังนั้นปูนขาวจึงสามารถพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างได้

- หินปูน ขี้เถ้าลอย และขี้เถ้าลิกไนต์ไม่สามารถพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างให้มีค่าสูงผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ ถึงแม้จะใช้มากถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักแห้งแล้วก็ตาม ทั้งนี้เพราะขี้เถ้าลอย และขี้เถ้าลิกไนต์มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolan) มีส่วนประกอบหลักเป็นสารประกอบออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่น ไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสกับน้ำภายใต้อุณหภูมิปรกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (Cementitious) ดังนั้นการใช้วัสดุประสานที่เป็นขี้เถ้าลอย หรือขี้เถ้าลิกไนต์เพียงชนิดเดียว โดยไม่มีส่วนประกอบของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จึงไม่สามารถเกิดสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมินาไฮเดรตภายในโครงสร้างของก้อนตัวอย่างได้ ส่วนหินปูนเนื่องจากอยู่ในรูปของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ก่อนจึงจะสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาในกากซิลิโคจาโรไซท์เกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมินาไฮเดรตได้

- วัสดุประสานคละทุกชนิดเนื่องจากมีส่วนผสมของปูนขาวหรือปูนซีเมนต์ผสมร่วมอยู่ด้วยจึงสามารถทำให้ก้อนตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ ทั้งนี้เมื่อใช้วัสดุประสานคละปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ (1:1)ในอัตราร้อยละ 5 ต่อกากซิลิโคจาโรไซท์แห้ง ก้อนตัวอย่างจะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่เวลาบ่ม 28 วันเท่ากับ 7.03 กก./ตร.ซม. ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แต่ถ้าใช้วัสดุประสานคละปูนขาวผสมหินปูน (1:1) ปูนขาวผสมขี้เถ้าลอย (1:1) ปูนขาวผสมขี้เถ้าลิกไนต์ (1:1) ปูนซีเมนต์ผสมหินปูน (1:1) ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย (1:1) หรือปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลิกไนต์ (1:1) ในอัตราร้อยละ 5 ต่อกากซิลิโคจาโรไซท์แห้ง ก้อนตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน แต่เมื่อเพิ่มอัตราการใช้เป็นร้อยละ 10 และทำการบ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน ก้อนตัวอย่างจึงมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้

ดังนั้นในการทดลองขั้นที่ 2 จะไม่ทดลองใช้หินปูน ขี้เถ้าลอย หรือขี้เถ้าลิกไนต์เป็นวัสดุประสานหลักเพียงอย่างเดียว ส่วนวัสดุประสานอื่นๆ จะทำการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อไป จากผลการทดลองในขั้นตอนที่ 1 สรุปปริมาณวัสดุประสานหรือวัสดุประสานคละในเบื้องต้นที่ต้องใช้ในการทำให้ก้อนซิลิโคจาโรไซท์มีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานแสดงดังตารางที่ 4.1

ตาราง 4.1 สรุปอัตราส่วนผสมเบื้องต้นที่ทำให้ก้อนซิลิโคจาโรไซท์มีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

วัสดุประสาน / วัสดุประสานคละ	อัตราส่วนวัสดุประสาน / วัสดุประสานคละ เบื้องต้น (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	
	เวลาบ่ม 14 วัน	เวลาบ่ม 28 วัน
ปูนขาว	5	5
หินปูน	> 50	> 50
ขี้เถ้าลอย	> 50	> 50
ขี้เถ้าลิกไนต์	> 50	> 50
ปูนซีเมนต์	5	5
ปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ (1:1)	5	5
ปูนขาวผสมหินปูน (1:1)	10	10
ปูนขาวผสมขี้เถ้าลอย (1:1)	10	10
ปูนขาวผสมขี้เถ้าลิกไนต์ (1:1)	10	10
ปูนซีเมนต์ผสมหินปูน (1:1)	10	10
ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย (1:1)	10	10
ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลิกไนต์ (1:1)	10	10

4.2 การทดสอบอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม

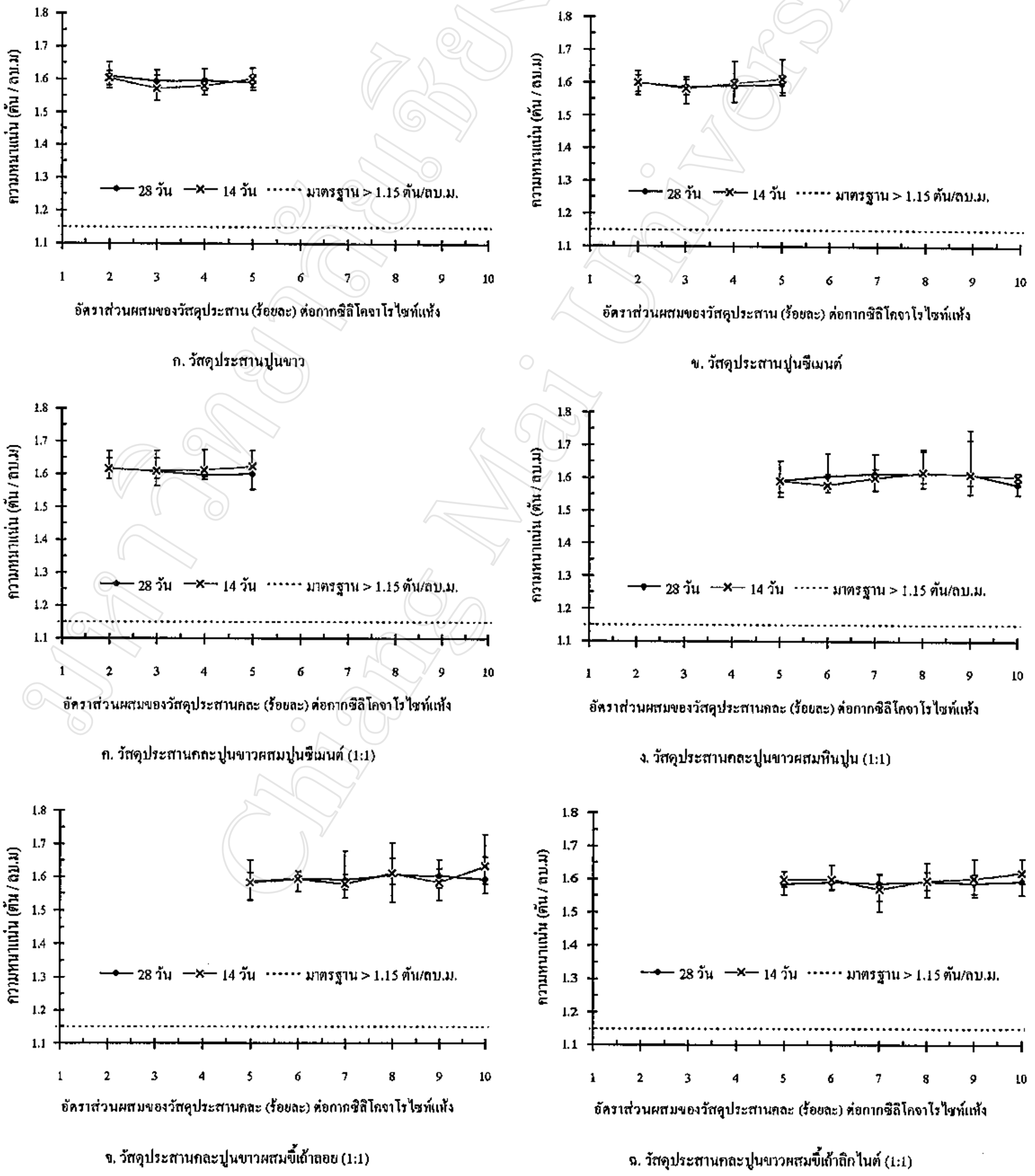
จากผลการทดสอบอัตราส่วนผสมเบื้องต้น พบว่ามีวัสดุประสานและวัสดุประสานคละจำนวน 9 ชนิดคือ ปูนขาว ปูนซีเมนต์ ปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ (1:1) ปูนขาวผสมหินปูน(1:1) ปูนขาวผสมขี้เถ้าลอย (1:1) ปูนขาวผสมขี้เถ้าลิกไนต์(1:1) ปูนซีเมนต์ผสมหินปูน (1:1) ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย (1:1) และปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลิกไนต์ (1:1) สามารถทำให้ก้อนซิลิโคจาโรไซท์มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดได้

ดังนั้นในการทดลองขั้นตอนที่ 2 นี้จึงนำวัสดุประสานและวัสดุประสานคละทั้ง 9 ชนิดมาทดลองอีกครั้งเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำให้ก้อนตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าหรือเท่ากับ 3.5 กก./ตร.ซม. โดยใช้วัสดุประสานที่น้อยที่สุด ทำการทดลองเพื่อหาค่าความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง ได้ผลการทดลองดังหัวข้อที่ 4.2.1 – 4.2.2 หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างจากก้อนซิลิโคจาโรไซท์ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าหรือเท่ากับ 3.5 กก./ตร.ซม. มาทำ

การสกัดสารตามวิธีการของกระทรวงอุตสาหกรรม น้ำสกัดที่ได้วิเคราะห์ค่าโลหะหนักได้ผลการทดลองดังหัวข้อที่ 4.2.3 และมีการประเมินค่าใช้จ่ายดังหัวข้อ 4.2.4

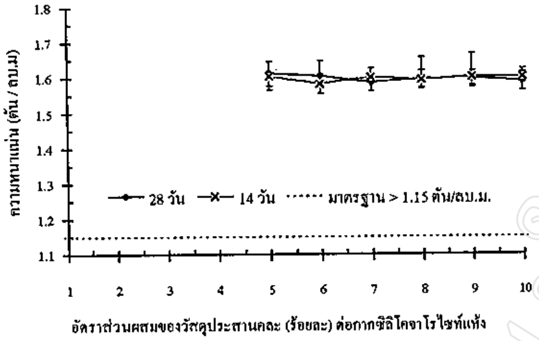
4.2.1 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของก้อนซิลิโคจาโรไซท์เมื่อใช้วัสดุประสานและวัสดุประสานคละชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.3

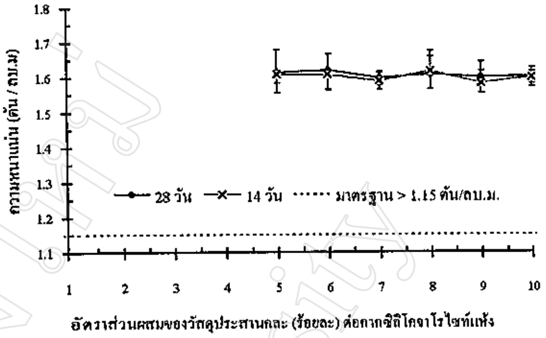


รูป 4.3 ความหนาแน่นของก้อนซิลิโคจาโรไซท์จากการทดสอบอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม

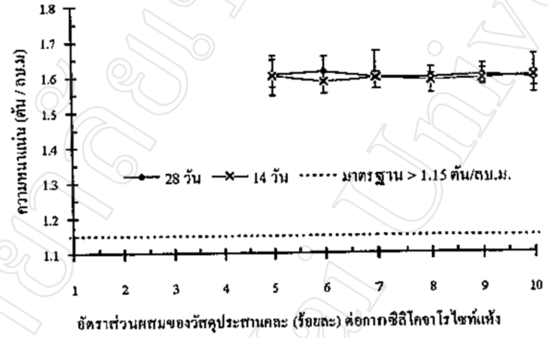
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University



ช. วัสดุประสานคละปูนซีเมนต์ผสมหินปูน (1:1)



ซ. วัสดุประสานคละปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย (1:1)



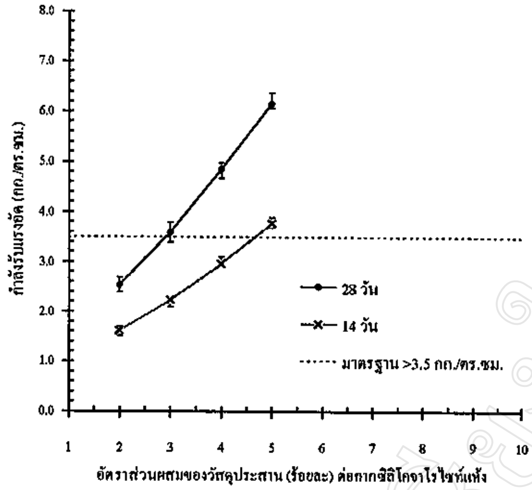
ฌ. วัสดุประสานคละปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลิกไนต์ (1:1)

รูป 4.3 ความหนาแน่นของก้อนซิลิโคจาโรไซท์จากการทดสอบอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม (ต่อ)

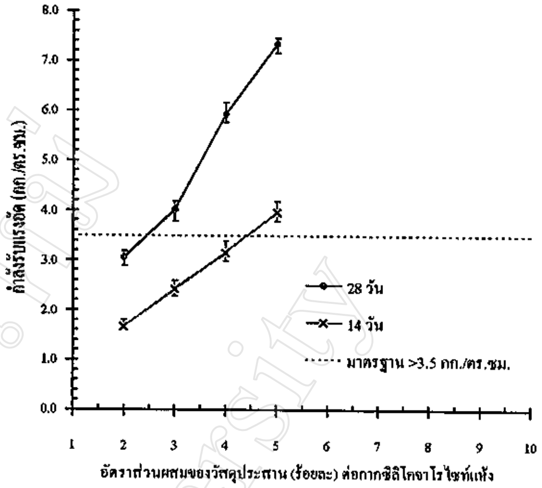
จากรูป 4.3 ก้อนซิลิโคจาโรไซท์ที่ได้จากการใช้วัสดุประสาน และวัสดุประสานคละทุกชนิดมีความหนาแน่นประมาณใกล้เคียงกัน คือมีค่าอยู่ในช่วง 1.57 – 1.63 ตัน/ลบ.ม. ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดคือ 1.15 ตัน/ลบ.ม. ทุกการทดลอง จากผลการทดลองที่ได้แสดงว่าชนิดของวัสดุประสาน หรือวัสดุประสานคละที่ใช้ไม่มีผลโดยตรงต่อค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง การบ่ม 14 วัน และ 28 วัน พบว่าก้อนตัวอย่างมีความหนาแน่นใกล้เคียง ทั้งนี้เพราะบ่มในสภาพที่มีความชื้น 100% ดังนั้นมวลของก้อนตัวอย่างจึงยังคงมีค่าเท่าเดิม ส่วนปริมาตรของก้อนตัวอย่างพบว่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนไม่มีผลต่อความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.2 กำลังรับแรงอัด

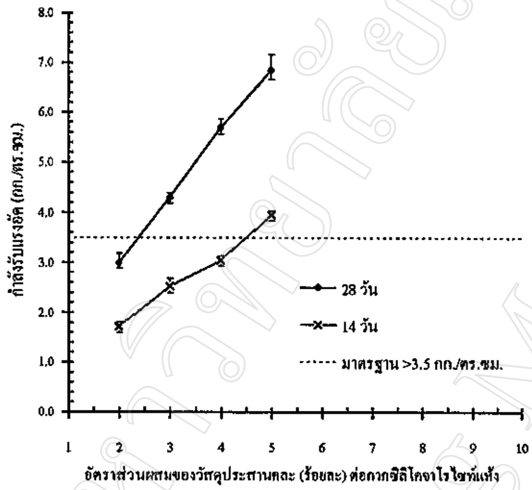
ก้อนซิลิโคจาโรไซท์มีค่ากำลังรับแรงอัดดังรูปที่ 4.4 จากค่าที่ได้สามารถสรุปปริมาณวัสดุประสานหรือวัสดุประสานคละขั้นต่ำที่ต้องใช้ในการทำให้ก้อนซิลิโคจาโรไซท์มีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 4.2



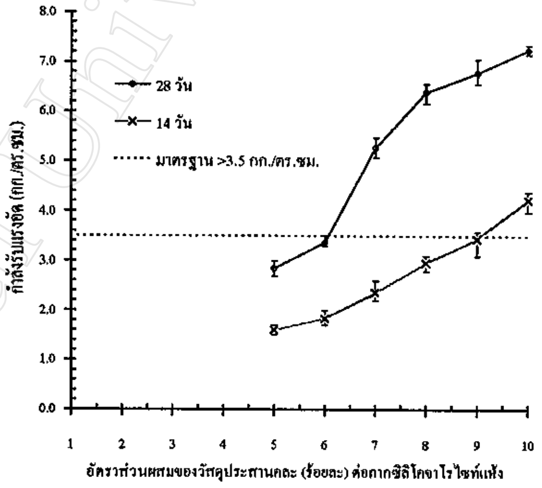
ก. วัสดุประสานปูนขาว



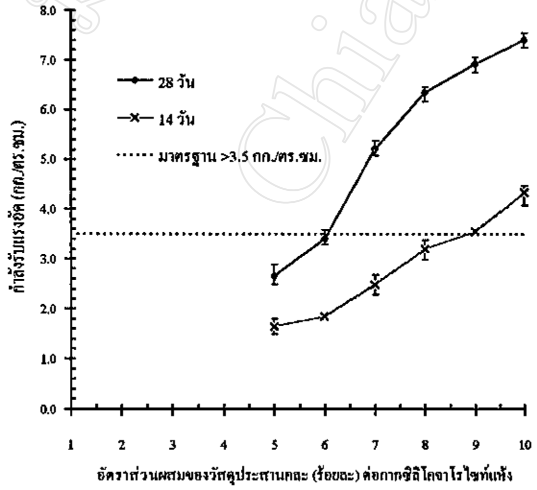
ข. วัสดุประสานปูนซีเมนต์



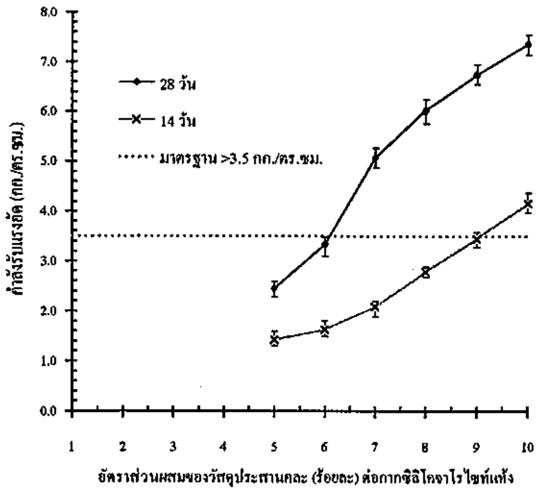
ค. วัสดุประสานคละปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ (1::1)



ง. วัสดุประสานคละปูนขาวผสมหินปูน (1::1)

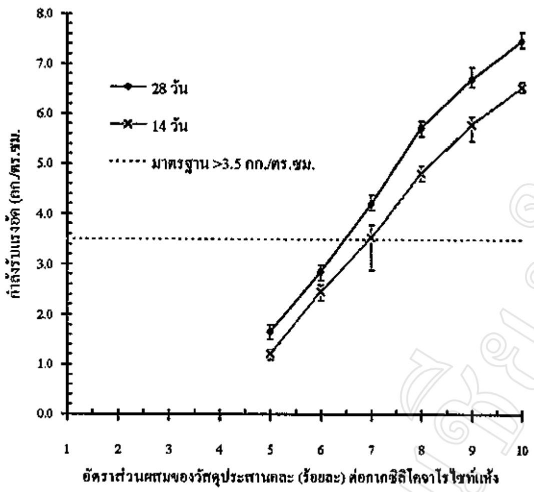


จ. วัสดุประสานคละปูนขาวผสมขี้เถ้าลอย (1::1)

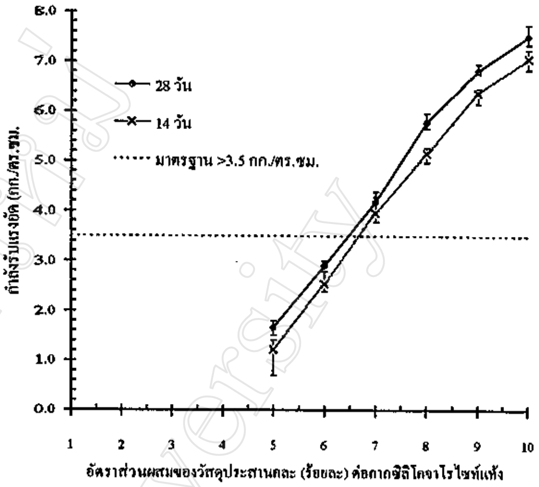


ฉ วัสดุประสานคละปูนขาวผสมขี้เถ้าลิกไนต์ (1::1)

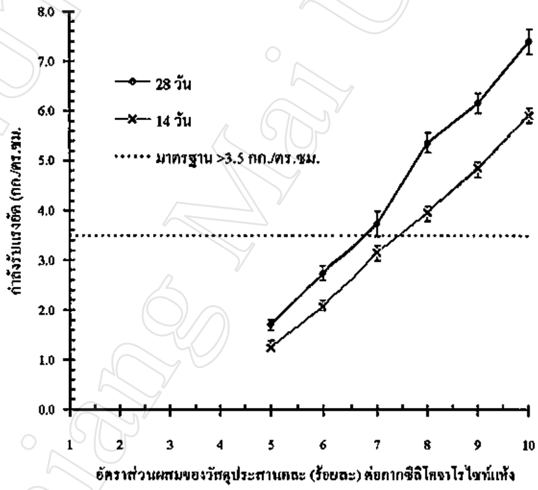
รูป 4.4 กำลังรับแรงอัดของก้อนซิลิโคจาโรไซท์จากการทดสอบอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม



ช. วัสดุประสานคละปูนซีเมนต์ผสมหินปูน (1::1)



ซ. วัสดุประสานคละปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย (1::1)



ฌ. วัสดุประสานคละปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลิกไนต์ (1::1)

รูป 4.4 กำลังรับแรงอัดของก้อนซิลิโคจาโรไซท์จากการทดสอบอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม (ต่อ)

จากรูปที่ 4.4 พบว่าปูนซีเมนต์มีอัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างได้สูงที่สุดคือ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันจะมีอัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1.43 กก./ตร.ซม. ต่อร้อยละ 1 ของวัสดุประสานที่เติม รองลงมาคือปูนขาวผสมปูนซีมนต์ (1:1) และปูนขาวตามลำดับ โดยมีอัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างเท่ากับ 1.29 และ 1.21 กก./ตร.ซม. ต่อร้อยละ 1 ของวัสดุประสานหรือวัสดุประสานคละที่เติม ส่วนวัสดุประสานคละปูนซีเมนต์ผสมกับหินปูน ขี้เถ้าลอย หรือขี้เถ้าลิกไนต์พบว่ามีอัตราการพัฒนาของกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างเท่ากับ 1.16

กก./ตร.ซม. ต่อร้อยละ 1 ของวัสดุประสานคละที่เติม วัสดุประสานคละที่มีส่วนผสมของปูนขาวผสมกับหินปูน ขี้เถ้าลอย หรือขี้เถ้าลิกไนต์พบว่าเมื่อบ่ม 14 วัน ก้อนตัวอย่างจะมีอัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพียง 0.54 กก./ตร.ซม. ต่อร้อยละ 1 ของวัสดุประสานคละที่เติม แต่เมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้นเป็น 28 วัน อัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มเป็น 0.94 กก./ตร.ซม. ต่อร้อยละ 1 ของวัสดุประสานคละที่เติม ทั้งนี้เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของวัสดุประสานหรือวัสดุประสานคละขั้นต่ำที่ต้องใช้ในการทำให้ก้อนซิลิโคจาโรไซท์มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า 3.5 กก./ตร.ซม. สรุปผลได้ดังตารางที่ 4.2

ตาราง 4.2 สรุปอัตราส่วนผสมขั้นต่ำที่ทำให้ก้อนซิลิโคจาโรไซท์มีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านในเกณฑ์มาตรฐาน

วัสดุประสาน / วัสดุประสานคละ	อัตราส่วนวัสดุประสาน / วัสดุประสานคละ ขั้นต่ำ (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	
	เวลาบ่ม 14 วัน	เวลาบ่ม 28 วัน
ปูนขาว	5	4
ปูนซีเมนต์	5	3
ปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ (1:1)	5	3
ปูนขาวผสมหินปูน (1:1)	10	7
ปูนขาวผสมขี้เถ้าลอย (1:1)	10	7
ปูนขาวผสมขี้เถ้าลิกไนต์ (1:1)	10	7
ปูนซีเมนต์ผสมหินปูน (1:1)	9	7
ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย (1:1)	7	7
ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลิกไนต์ (1:1)	8	8

4.2.3 ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัด

ได้นำตัวอย่างจากก้อนซิลิโคจาโรไซท์ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า 3.5 กก./ตร.ซม. นำมาทดสอบการสกัดสารตามวิธีที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด น้ำสกัดที่ได้มีค่าโลหะหนักแสดงดังตารางที่ 4.3

ตาราง 4.3 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำสกัดของกากซิลิโคจาโรไซท์ที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

การทดลองที่	วัสดุประสาน / วัสดุประสานคละ	อัตราส่วนของวัสดุประสาน/วัสดุประสานคละ (ร้อยละ) เทียบกับน้ำหนักกากซิลิโคจาโรไซท์แห้ง	กำลังรับแรงอัดที่เวลาบ่ม 28 วัน (กก./ตร.ซม.)	ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด (มก./ล)		
				แคดเมียม	สังกะสี	แมงกานีส
มาตรฐานของน้ำสกัดที่จัดเป็นของเสียอันตราย[1]				≥ 1.0	-	-
กากซิลิโคจาโรไซท์ที่ยังไม่ผ่านการทำให้เป็นก้อน			< 3.5	2.09	81	4.86
2.1	ปูนขาว	4	4.84	0.01	0.14	0.01
		5	6.15	0.01	0.11	0.01
2.2	ปูนซีเมนต์	3	4.01	0.01	0.09	0.01
		4	5.93	0.01	0.14	0.01
		5	7.34	0.01	0.09	0.01
2.3	ปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ (1:1)	3	4.29	0.01	0.09	0.01
		4	5.68	0.01	0.09	0.01
		5	6.84	0.01	0.08	0.01
2.4	ปูนขาวผสมหินปูน (1:1)	7	5.27	0.01	0.14	0.02
		8	6.40	0.01	0.13	0.02
		9	6.79	0.01	0.09	0.03
		10	7.26	0.01	0.05	0.01
2.5	ปูนขาวผสมขี้เถ้าลอย (1:1)	7	5.20	0.01	0.10	0.03
		8	6.35	0.01	0.15	0.04
		9	6.93	0.01	0.12	0.04
		10	7.41	0.01	0.16	0.01
2.6	ปูนขาวผสมขี้เถ้าลิกไนต์ (1:1)	7	5.07	0.01	0.09	0.04
		8	6.03	0.01	0.12	0.04
		9	6.76	0.01	0.12	0.01
		10	7.37	0.01	0.09	0.01
2.7	ปูนซีเมนต์ผสมหินปูน (1:1)	7	4.21	0.01	0.09	0.01
		8	5.73	0.01	0.19	0.01
		9	6.71	0.01	0.12	0.01
		10	7.49	0.01	0.05	0.01
2.8	ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย (1:1)	7	4.18	0.03	0.21	0.05
		8	5.78	0.02	0.18	0.04
		9	6.83	0.01	0.14	0.01
		10	7.52	0.01	0.07	0.01
2.9	ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลิกไนต์ (1:1)	8	5.35	0.01	0.15	0.02
		9	6.16	0.01	0.20	0.01
		10	7.41	0.01	0.11	0.01

เอกสารอ้างอิง : (1) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (ฉบับที่6) พ.ศ.2540

จากผลการสกัดสาร พบว่าก้อนซิลิโคจาโรไซท์ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า 3.5 กก./ตร.ซม. มีความเข้มข้นของแคดเมียม สังกะสี และแมงกานีสต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่จัดเป็นสารอันตรายทุกก้อน ทั้งนี้แสดงว่าอัตราส่วนของวัสดุประสานหรือวัสดุประสานคละขั้นต่ำที่ใช้ในการทำให้ก้อนซิลิโคจาโรไซท์มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า 3.5 กก./ตร.ซม. นั้นเพียงพอที่สามารถทำให้โลหะหนักในกากซิลิโคจาโรไซท์ถูกทำให้เสถียรและถูกยึดจับติดกับโครงสร้างของสารประกอบพวกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตหรือแคลเซียมอลูมิเนไฮเดรตที่แข็งแรงภายในก้อนตัวอย่าง ดังนั้นโลหะหนักจะถูกชะละลายออกมาได้น้อยมาก ก้อนซิลิโคจาโรไซท์นี้จึงไม่จัดเป็นสารอันตรายประเภทสารที่ถูกชะล้างได้อีกต่อไป

4.2.4 การประเมินค่าใช้จ่าย

การประเมินค่าใช้จ่ายของวัสดุประสานหรือวัสดุประสานคละนั้นอ้างอิงราคาวัสดุประสานที่ทำการซื้อ-ขาย ของ บมจ. ผาแดงอินดัสทรี จ.ตาก ปี พ.ศ. 2543 คือราคาปูนขาว 1,830 บาทต่อตัน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (ตราช้าง) 2,300 บาทต่อตัน หินปูน 220 บาทต่อตัน ขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าลิกไนต์ 260 บาทต่อตัน

จากหัวข้อ 4.2.3 จะได้ปริมาณการใช้วัสดุประสานหรือวัสดุประสานคละในอัตราส่วนผสมที่ต้องการต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าใช้จ่ายดังตารางที่ 4.4

ตาราง 4.4 ค่าใช้จ่ายของวัสดุประสานหรือวัสดุประสานคละ

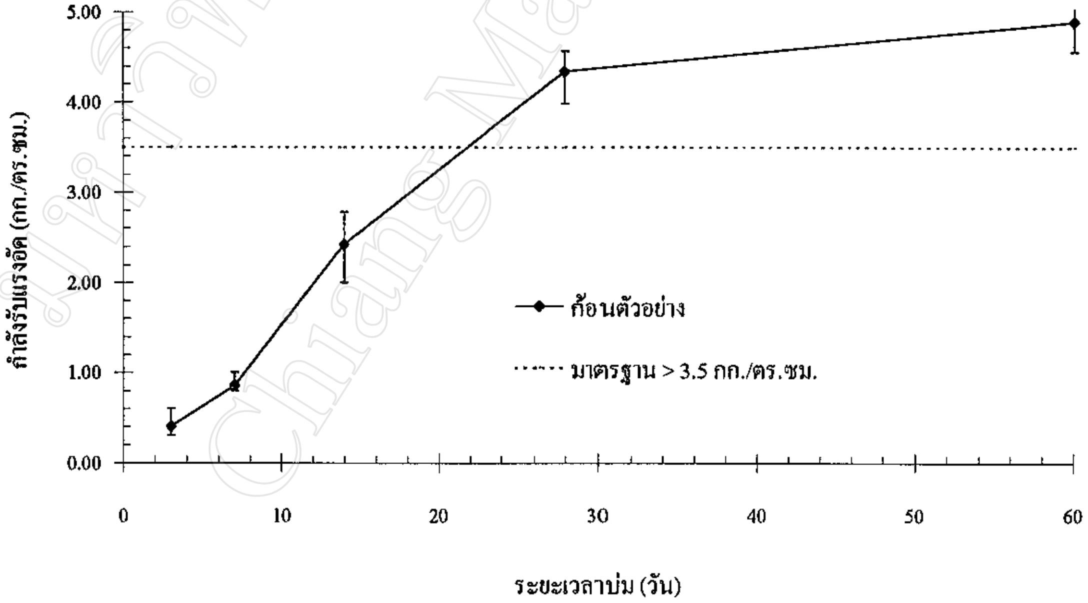
การทดลองที่	วัสดุประสาน / วัสดุประสานคละ	อัตราส่วนของวัสดุประสาน / วัสดุประสานคละ (ร้อยละ) เทียบกับน้ำหนักกากซิลิโคจาโรไซท์แห้ง	ราคาของวัสดุประสาน / วัสดุประสานคละ (บาท/ตันกากซิลิโคจาโรไซท์แห้ง)
2.1	ปูนขาว	4	73.20
2.2	ปูนซีเมนต์	3	69.00
2.3	ปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ (1:1)	3	61.95
2.4	ปูนขาวผสมหินปูน (1:1)	7	71.75
2.5	ปูนขาวผสมขี้เถ้าลอย (1:1)	7	73.15
2.6	ปูนขาวผสมขี้เถ้าลิกไนต์ (1:1)	7	73.15
2.7	ปูนซีเมนต์ผสมหินปูน (1:1)	7	88.20
2.8	ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย (1:1)	7	89.60
2.9	ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลิกไนต์ (1:1)	8	102.40

จากการประเมินค่าใช้จ่าย พบว่าในการทำกากซิลิโคจาโรไซท์ให้เป็นก้อนเพื่อให้มีคุณสมบัติตามที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด โดยมีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดนั้น ควรเลือกใช้วัสดุประสานคละที่เป็นปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ (ผสมกันในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก) นำมาผสมกับกากซิลิโคจาโรไซท์ในอัตราส่วนร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง ทำการบ่ม 28 วัน คิดเป็นค่าใช้จ่ายของวัสดุประสานคละที่ต้องใช้เท่ากับ 61.95 บาทต่อตันกากซิลิโคจาโรไซท์แห้ง

4.3 การทดสอบการชะละลายในระยะยาว

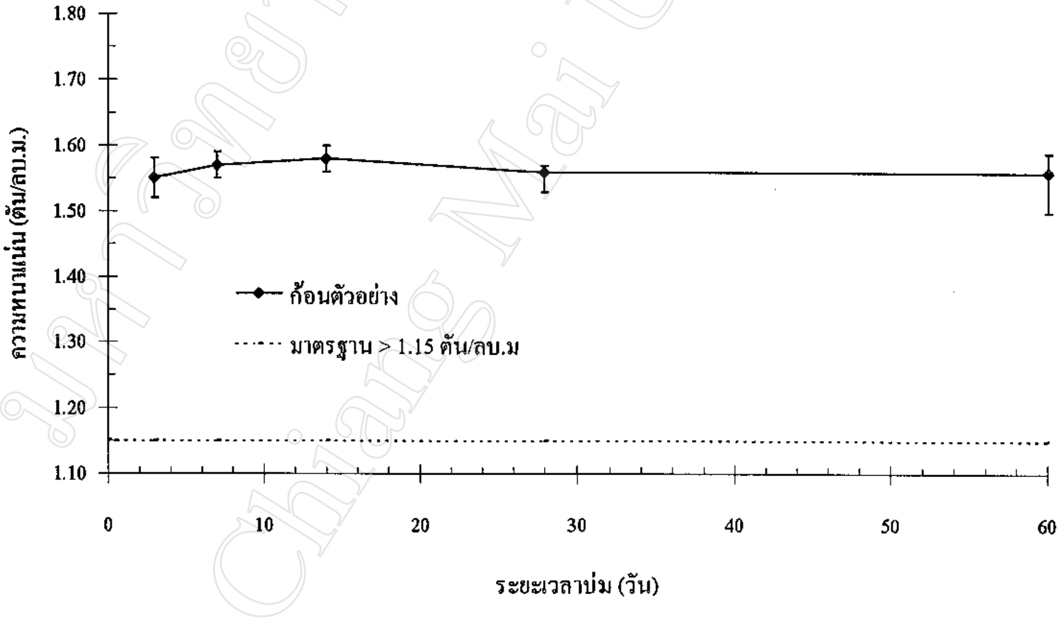
4.3.1 ผลของระยะเวลาในการบ่ม

การศึกษาผลของระยะเวลาในการบ่มที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัด ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง และปริมาณโลหะหนักที่สามารถถูกสกัดได้ โดยเลือกทำการทดสอบกับก้อนซิลิโคจาโรไซท์ที่ใช้วัสดุประสานคละปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ (1:1) ในอัตราส่วนรวมร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5, 4.6 และตารางที่ 4.5



รูป 4.5 กำลังรับแรงอัดของก้อนซิลิโคจาโรไซท์เมื่อแปรผันระยะเวลาบ่ม

จากรูป 4.5 จะสังเกตได้ว่าการทำกากซิลิโคจาโรไซท์ให้เป็นก้อนโดยใช้วัสดุประสานคละปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ในอัตรารวมร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง ต้องทำการบ่มอย่างน้อย 21 วันจึงจะทำให้ก้อนตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (3.5 กก./ตร.ซม.) และพบว่าในช่วง 7 วันแรกของการบ่ม ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าค่อนข้างต่ำ มีอัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 0.11 กก./ตร.ซม.ต่อวัน แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาบ่ม 7-14 วัน คือมีอัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 0.22 กก./ตร.ซม.ต่อวัน หลังจากนั้นในช่วงเวลา 14-28 วันอัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดจะน้อยลงเหลือ 0.13 กก./ตร.ซม.ต่อวัน และหลังจากระยะเวลาบ่ม 28 วันเป็นต้นไป อัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดจะมีค่าน้อยมากคือมีค่าเพียง 0.02 กก./ตร.ซม.ต่อวัน ถ้าสมมติให้กำลังรับแรงอัดที่ 60 วัน มีค่ามากที่สุดของก้อนตัวอย่าง จะได้ว่าเมื่อเวลาบ่มผ่านไป 3, 7, 14 และ 28 วัน ก้อนตัวอย่างมีการพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดได้ 8, 17, 49 และ 89% ของกำลังรับแรงอัดทั้งหมด



รูป 4.6 ความหนาแน่นของก้อนซิลิโคจาโรไซท์เมื่อแปรผันระยะเวลาบ่ม

จากรูปที่ 4.6 พบว่าระยะเวลาในการบ่มไม่มีผลต่อความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน ก้อนตัวอย่างมีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน คือมีค่าเท่ากับ 1.55, 1.57, 1.58, 1.56 และ1.56 ตัน/ลบ.ม ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากได้ทำการบ่มในสภาพที่มีความชื้นอิ่มตัว ดังนั้นน้ำหนักของก้อนตัวอย่างจึงมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง ส่วนปริมาตรของก้อนตัวอย่างพบว่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนไม่มีผลทำให้ค่าความหนาแน่นเปลี่ยนแปลง

ตาราง 4.5 ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดจากก้อนซิลิโคจาโรไซท์ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ

เวลาบ่ม (วัน)	น้ำสกัดจากก้อนซิลิโคจาโรไซท์			
	pH	แคดเมียม (มก./ล)	สังกะสี (มก./ล)	แมงกานีส (มก./ล)
มาตรฐานของน้ำสกัดที่จัดเป็นของเสียอันตราย (1)		≥ 1.0	-	-
3	9.14	0.01	0.38	0.01
7	9.80	0.01	0.33	0.01
14	9.06	0.01	0.27	0.01
28	9.82	0.01	0.19	0.01
60	9.53	0.01	0.19	0.01

หมายเหตุ: (1) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (ฉบับที่6) พ.ศ.2540

เมื่อพิจารณาปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัด พบว่าแคดเมียมและแมงกานีสไม่ถูกสกัดจากก้อนตัวอย่าง ตลอดระยะเวลาที่ทำการบ่ม 60 วัน ส่วนปริมาณสังกะสีเมื่อบ่มก้อนตัวอย่าง 3 วันจะถูกสกัดออกมาเพียง 0.38 มก./ล และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาบ่มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้สันนิษฐานว่าเมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น โลหะหนักจะถูกยึดติดกับโครงสร้างของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตภายในก้อนตัวอย่างได้อย่างแข็งแรงมากขึ้น ทำให้ถูกชะละลายออกมาได้ยากขึ้น

4.3.2 การทดสอบการชะละลายระยะยาวของหลุมฝังกลบจำลองระดับห้องปฏิบัติการ

ก้อนซิลิโคจาโรไซท์ที่ได้จากการผสมกับวัสดุประสานคละที่เป็นปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณรวมร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง ทำการบ่มเป็นเวลา 28 วัน นำมาทดสอบการชะละลายระยะยาวในหลุมฝังกลบจำลองระดับห้องปฏิบัติการที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 เซนติเมตร และสูง 2 เมตร โดยทดลองเปรียบเทียบกับกากซิลิโคจาโรไซท์ที่ยังไม่ผ่านการทำให้เป็นก้อน จากการทดลองเติมน้ำฝนในปริมาณวันละ 36 ลบ.ซม. ทุกวัน ปล่อยให้น้ำชะละลายไหลออกจากหลุมฝังกลบตลอดเวลา และเก็บน้ำตัวอย่างสัปดาห์ละครั้ง พบว่าน้ำชะละลายที่ได้มีปริมาณโลหะหนักแสดงดังตารางที่ 4.6 - 4.7 และรูปที่ 4.7

ตาราง 4.6 ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลายจากหลุมฝังกลบซิลิโคจาโรไซท์ที่ยังไม่ผ่านการทำให้เป็นก้อน และมีการสูบน้ำออกจากหลุมฝังกลบตลอดเวลา

สัปดาห์ที่	ปริมาตรน้ำชะละลายที่ไหลออกจากหลุมฝังกลบ (มิลลิลิตร)	กากซิลิโคจาโรไซท์ก่อนทำให้เป็นก้อน								
		แคดเมียม			สังกะสี			แมงกานีส		
		ความเข้มข้น (มก./ล)	มวลสารที่ถูกชะละลาย (มิลลิกรัม)	อัตราการชะละลายของมวลสาร (มก./กก.กาก)	ความเข้มข้น (มก./ล)	มวลสารที่ถูกชะละลาย (มิลลิกรัม)	อัตราการชะละลายของมวลสาร (มก./กก.กาก)	ความเข้มข้น (มก./ล)	มวลสารที่ถูกชะละลาย (มิลลิกรัม)	อัตราการชะละลายของมวลสาร (มก./กก.กาก)
มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม [(1)]		≤ 0.03	-	-	≤ 5.0	-	-	≤ 5.0	-	-
8	230	33.53	7.71	2.20	2,030	466.90	133.40	96.2	22.13	6.37
9	250	12.15	3.04	0.86	1,548	387.00	110.54	80.5	20.13	5.70
10	260	3.87	1.01	0.28	1,126	292.76	83.64	50.6	13.16	3.79
11	250	4.19	1.05	0.29	758	189.50	54.14	36.6	9.15	2.63
12	250	4.03	1.01	0.28	730	182.50	52.14	29.6	7.40	2.13
13	255	3.89	0.99	0.28	630	160.65	45.90	25.6	6.53	1.81
14	245	3.80	0.93	0.26	587	143.82	41.09	20.3	4.97	1.40

หมายเหตุ : กากซิลิโคจาโรไซท์สูง 2 เมตร รวมน้ำหนัก 3.5 กิโลกรัม

(1) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2539

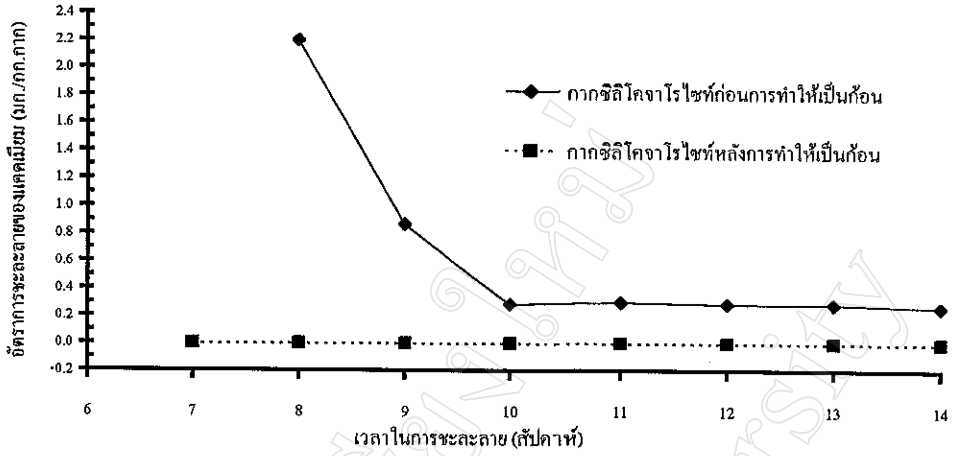
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

ตาราง 4.7 ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลายจากหลุมฝังกลบซิลิโคจาโรไซท์ที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน และมีการสูบน้ำออกจากหลุมฝังกลบตลอดเวลา

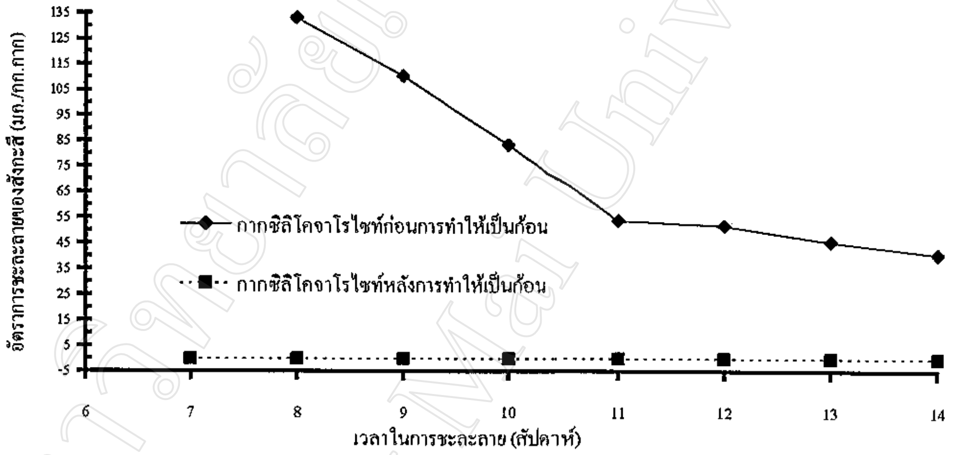
สัปดาห์ที่	ปริมาตรน้ำชะละลายที่ไหลออกจากหลุมฝังกลบ (มิลลิลิตร)	กากซิลิโคจาโรไซท์ที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน								
		แคดเมียม			สังกะสี			แมงกานีส		
		ความเข้มข้น (มก./ล)	มวลสารที่ถูกชะละลาย (มิลลิกรัม)	อัตราการชะละลายของมวลสาร (มก./กก.กาก)	ความเข้มข้น (มก./ล)	มวลสารที่ถูกชะละลาย (มิลลิกรัม)	อัตราการชะละลายของมวลสาร (มก./กก.กาก)	ความเข้มข้น (มก./ล)	มวลสารที่ถูกชะละลาย (มิลลิกรัม)	อัตราการชะละลายของมวลสาร (มก./กก.กาก)
มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม [1]		≤ 0.03	-	-	≤ 5.0	-	-	≤ 5.0	-	-
7	200	0.01	0.0020	0.0006	0.53	0.1060	0.0303	0.13	0.0260	0.0074
8	250	0.01	0.0025	0.0007	0.34	0.0850	0.0243	0.12	0.0300	0.0086
9	250	0.01	0.0025	0.0007	0.38	0.0950	0.0271	0.08	0.0200	0.0057
10	245	0.01	0.0025	0.0007	0.17	0.0417	0.0119	0.03	0.0074	0.0021
11	240	0.01	0.0024	0.0007	0.26	0.0624	0.0178	0.04	0.0096	0.0027
12	230	0.01	0.0023	0.0007	0.24	0.0552	0.0158	0.05	0.0115	0.0033
13	255	0.01	0.0026	0.0007	0.15	0.0383	0.0109	0.05	0.0128	0.0036
14	255	0.01	0.0026	0.0007	0.15	0.0383	0.0109	0.04	0.0102	0.0029

หมายเหตุ : กากซิลิโคจาโรไซท์สูง 2 เมตร รวมน้ำหนัก 3.5 กิโลกรัม

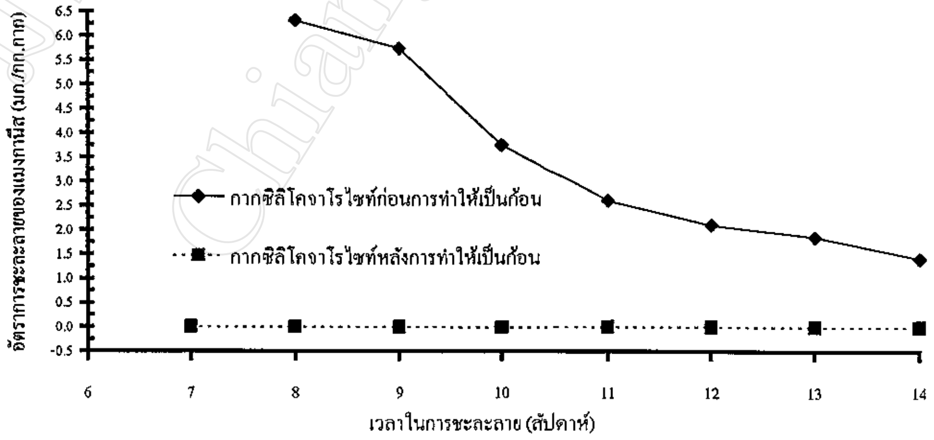
(1) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2539



ก. แคดเมียม



ข. สังกะสี



ค. แมงกานีส

รูป 4.7 อัตราการชะละลายของโลหะหนักในหลุมฝังกลบจำลองที่มีการสูบน้ำชะละลายออกจากระบบตลอดเวลา

จากการเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายระหว่างกากซิลิโคจาโรไซท์ก่อนและหลังการทำให้เป็นก้อน ในสภาวะที่มีการสูบน้ำออก จากด้านล่างหลุมฝังกลบตลอดเวลา พบว่า

เมื่อมีฝนตกบนหลุมฝังกลบของกากซิลิโคจาโรไซท์ที่ยังไม่ผ่านการทำให้เป็นก้อน น้ำฝนจะใช้เวลาซึมผ่านชั้นตัวอย่างสูง 2 เมตรเป็นเวลาประมาณ 8 สัปดาห์ จึงเริ่มไหลออกทางด้านล่างของหลุมฝังกลบดังกล่าว ปริมาตรน้ำชะละลายที่เก็บได้ในช่วง 1 สัปดาห์มีปริมาตร 230-260 มิลลิลิตร/สัปดาห์ (น้ำฝนที่เติม 252 มิลลิลิตร/สัปดาห์) น้ำชะละลายที่เก็บได้ในสัปดาห์แรกนับจากเวลาที่น้ำเริ่มไหลออกจากก้นหลุมมีความเข้มข้นของโลหะหนักสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งมาก คือมีความเข้มข้นของแคดเมียม 33.53 มก./ล สังกะสี 2,030 มก./ล และแมงกานีส 96.2 มก./ล ตามลำดับ คิดเป็นอัตราการชะละลายของแคดเมียม 2.20 มก./กก.กากซิลิโคจาโรไซท์ สังกะสี 133.40 มก./กก.กากซิลิโคจาโรไซท์ และแมงกานีส 6.32 มก./กรัมกก.ซิลิโคจาโรไซท์ จากผลการทดลองพบว่าแนวโน้มของความเข้มข้นของโลหะหนักและอัตราการชะละลายของโลหะหนักในน้ำชะละลายที่ไหลออกจากหลุมฝังกลบมีค่าน้อยลงเมื่อเวลาการชะละลายผ่านไปนานขึ้น จากการวิเคราะห์น้ำชะละลายที่เก็บเมื่อเวลาผ่านไป 6 สัปดาห์หลังจากการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งแรก พบว่ามีความเข้มข้นของแคดเมียม สังกะสี และแมงกานีสน้อยลงเหลือเพียง 3.80, 143.82 และ 4.97 มก./ล คิดเป็นอัตราการชะละลายของแคดเมียม สังกะสี และแมงกานีสเท่ากับ 0.27, 41.09 และ 1.42 มก./กก.กากซิลิโคจาโรไซท์ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าน้ำชะละลายที่ได้มีความเข้มข้นของแคดเมียม สังกะสี และแมงกานีสเกินมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมตลอดเวลาที่ทดลอง 14 สัปดาห์

ในหลุมฝังกลบของกากซิลิโคจาโรไซท์ที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนพบว่าน้ำชะละลายที่เก็บจากด้านล่างของหลุมฝังกลบมีความเข้มข้นของแคดเมียม สังกะสี และแมงกานีสต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งตลอดระยะเวลาที่ทดสอบ 14 สัปดาห์ อัตราการชะละลายของแคดเมียมพบว่ามีค่าต่ำใกล้ศูนย์ ส่วนสังกะสี และแมงกานีสพบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาชะละลายผ่านไปนานขึ้น คือในอาทิตย์แรกที่มีน้ำไหลออกจากหลุมฝังกลบ น้ำชะละลายที่ได้มีความเข้มข้นของแคดเมียม สังกะสี และแมงกานีสเท่ากับ 0.01, 0.53 และ 0.13 มก./ล คิดเป็นอัตราการชะละลายของแคดเมียม สังกะสี และแมงกานีสเท่ากับ 0.0006, 0.0303 และ 0.0074 มก./กก.กากซิลิโคจาโรไซท์ หลังจากนี้อีก 7 สัปดาห์ จะพบว่าน้ำชะละลายที่เก็บในรอบสัปดาห์มีความเข้มข้นของแคดเมียม สังกะสี และแมงกานีสน้อยลงเหลือเพียง 0.01, 0.15 และ 0.04 มก./ล คิดเป็นอัตราการชะละลายของแคดเมียม สังกะสี และแมงกานีสเท่ากับ 0.0006, 0.0109 และ 0.0029 มก./กก.กากซิลิโคจาโรไซท์ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นว่าน้ำฝนที่ไหลผ่านกากซิลิโคจาโรไซท์ที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนจะมีความเข้มข้นของแคดเมียม สังกะสี และแมงกานีส ต่ำมาก น้ำชะละลายดังกล่าวมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม สามารถระบายทิ้งออกนอกโรงงานได้ สำหรับการทดลองที่มีการเติมน้ำฝนให้ท่วมขังตัวอย่างในหลุมฝังกลบจำลองตลอดเวลา พบว่าน้ำชะละลายที่ได้มีปริมาณโลหะหนักแสดงดังตารางที่ 4.8-4.9 และรูปที่ 4.8

ตาราง 4.8 ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลายจากหลุมฝังกลบซิลิโคจาโรไซท์ที่ยังไม่ผ่านการทำให้เป็นก้อน และมีน้ำท่วมขังหลุมฝังกลบตลอดเวลา

สัปดาห์ที่	กากซิลิโคจาโรไซท์ก่อนทำให้เป็นก้อน								
	แคดเมียม			สังกะสี			แมงกานีส		
	ความเข้มข้น (มก./ล)	มวลสารที่ถูกชะละลาย [2] (มิลลิกรัม)	อัตราการชะละลายของมวลสาร [2] (มก./กก.กาก)	ความเข้มข้น (มก./ล)	มวลสารที่ถูกชะละลาย [2] (มิลลิกรัม)	อัตราการชะละลายของมวลสาร [2] (มก./กก.กาก)	ความเข้มข้น (มก./ล)	มวลสารที่ถูกชะละลาย [2] (มิลลิกรัม)	อัตราการชะละลายของมวลสาร [2] (มก./กก.กาก)
มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม [1]	≤ 0.03	-	-	≤ 5.0	-	-	≤ 5.0	-	-
2	37.2	130	37.20	1,464	5124	1464	79.6	279	79.60
4	39.0	137	39.00	1,804	6314	1804	85.4	299	85.40
6	39.8	139	39.80	1,830	6405	1830	83.4	292	83.40
8	39.2	137	39.20	1,880	6580	1880	86.5	303	86.50
10	40.8	143	40.80	1,950	6825	1950	87.0	305	87.00
12	39.6	139	39.60	2,020	7070	2020	87.3	306	87.30
14	40.0	140	40.00	2,150	7525	2150	87.0	305	87.00

หมายเหตุ : กากซิลิโคจาโรไซท์สูง 2 เมตร รวมน้ำหนัก 3.5 กิโลกรัม ปริมาตรน้ำที่ท่วมขังหลุมฝังกลบ 3,500 มิลลิลิตร

(1) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2539

(2) คำนวณกรณีน้ำท่วมขังทั้งหมดถูกระบายทิ้ง

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

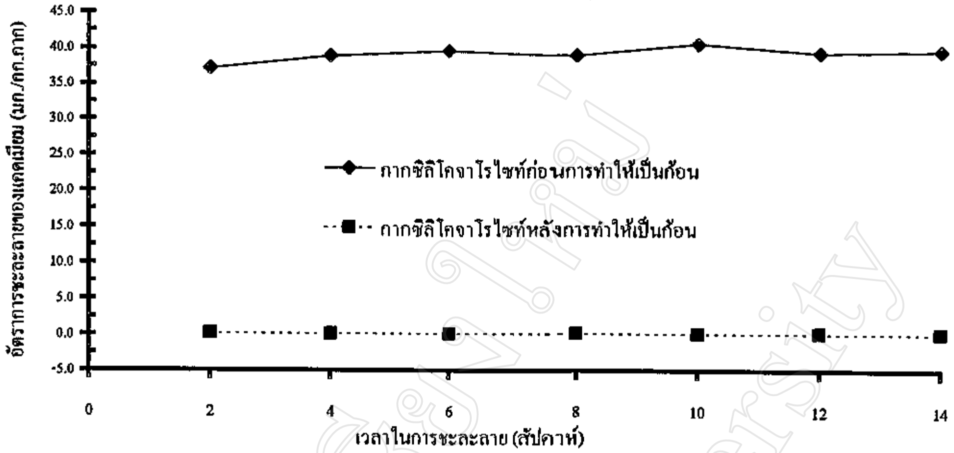
ตาราง 4.9 ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลายจากหลุมฝังกลบซิลิโคจาโรไซท์ที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน และมีน้ำท่วมขังหลุมฝังกลบตลอดเวลา

สัปดาห์ที่	กากซิลิโคจาโรไซท์ที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน								
	แคดเมียม			สังกะสี			แมงกานีส		
	ความเข้มข้น (มก./ล)	มวลสารที่ถูกชะละลาย [2] (มิลลิกรัม)	อัตราการชะละลายของมวลสาร [2] (มก./กก.กาก)	ความเข้มข้น (มก./ล)	มวลสารที่ถูกชะละลาย [2] (มิลลิกรัม)	อัตราการชะละลายของมวลสาร [2] (มก./กก.กาก)	ความเข้มข้น (มก./ล)	มวลสารที่ถูกชะละลาย [2] (มิลลิกรัม)	อัตราการชะละลายของมวลสาร [2] (มก./กก.กาก)
มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม [1]	≤ 0.03	-	-	≤ 5.0	-	-	≤ 5.0	-	-
2	0.01	0.0350	0.0100	0.2	0.7000	0.2000	0.07	0.2450	0.0700
4	0.01	0.0350	0.0100	0.14	0.4900	0.1400	0.05	0.1750	0.0500
6	0.01	0.0350	0.0100	0.16	0.5600	0.1600	0.05	0.1750	0.0500
8	0.01	0.0350	0.0100	0.2	0.7000	0.2000	0.05	0.1750	0.0500
10	0.01	0.0350	0.0100	0.15	0.5250	0.1500	0.07	0.2450	0.0700
12	0.01	0.0350	0.0100	0.2	0.7000	0.2000	0.07	0.2450	0.0700
14	0.01	0.0350	0.0100	0.2	0.7000	0.2000	0.06	0.2100	0.0600

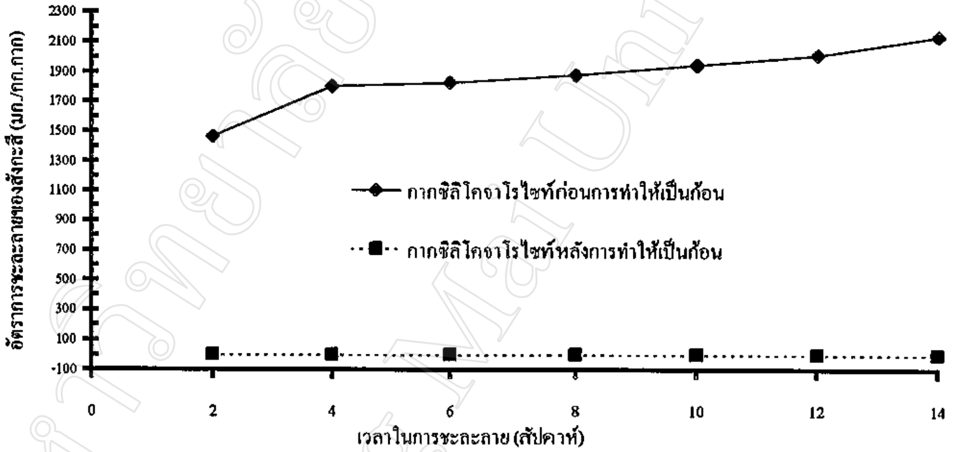
หมายเหตุ : กากซิลิโคจาโรไซท์สูง 2 เมตร รวมน้ำหนัก 3.5 กิโลกรัม ปริมาตรน้ำที่ท่วมขังหลุมฝังกลบ 3,500 มิลลิลิตร

(1) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2539

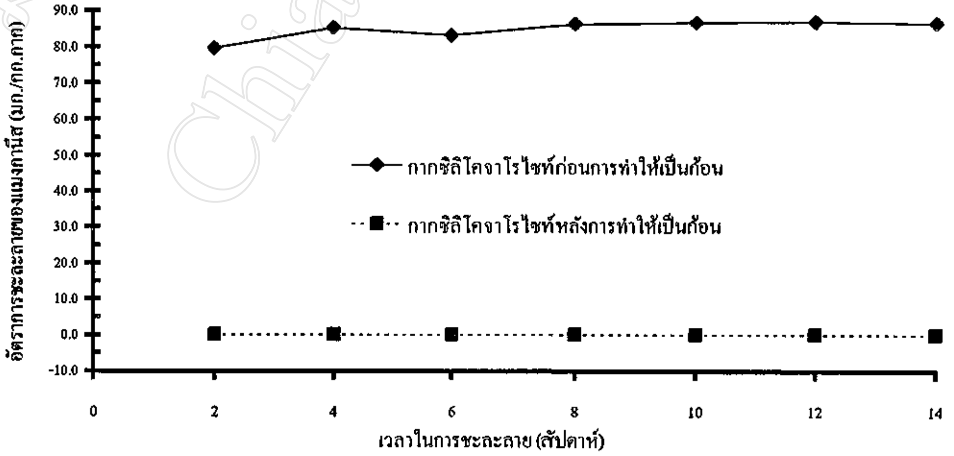
(2) คำนวณกรณีน้ำท่วมขังทั้งหมดถูกระบายทิ้ง



ก. แคดเมียม



ข. สังกะสี



ค. แมงกานีส

รูป 4.8 อัตราการชะละลายของโลหะหนักในหลุมฝังกลบจำลองที่มีน้ำท่วมขังตลอดเวลา

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

ในสภาวะที่ไม่มีการสูบน้ำออกจากหลุมฝังกลบ แต่ปล่อยให้น้ำท่วมขังตลอดเวลา ทำการเปรียบเทียบระหว่างกากซิลิโคจาโรไซท์ก่อนและหลังการทำให้เป็นก้อน พบว่า

หลุมฝังกลบของกากซิลิโคจาโรไซท์ที่ยังไม่ผ่านการทำให้เป็นก้อน เมื่อเกิดน้ำท่วมขังหลุมฝังกลบตลอดเวลาพบว่าโลหะหนักในกากซิลิโคจาโรไซท์จะถูกชะละลายออกมาสูงมากในเวลาที่รวดเร็วคือหลังจากที่น้ำท่วมขังหลุมฝังกลบเพียง 2 สัปดาห์ กากซิลิโคจาโรไซท์มีอัตราการถูกชะละลายของแคดเมียม สังกะสี และแมงกานีสเท่ากับ 37.2, 1,426 และ 79.6 มก./กก.กากซิลิโคจาโรไซท์ เมื่อเวลาที่น้ำท่วมขังหลุมฝังกลบนานขึ้นเป็นเวลา 14 สัปดาห์ อัตราการถูกชะละลายของแคดเมียม สังกะสี และแมงกานีสจะเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยเป็น 40.0, 2,150 และ 87.0 มก./กก.กากซิลิโคจาโรไซท์ จากผลการทดลองนี้จะสังเกตพบว่าโลหะหนักถูกชะละลายออกมาสูงมากในช่วงเวลา 2 สัปดาห์แรกที่น้ำท่วมแต่หลังจากนั้นอัตราการถูกชะละลายของโลหะหนักจะเพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างช้าๆ เมื่อระยะเวลาท่วมขังนานขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะกากซิลิโคจาโรไซท์มีสารละลายจากกระบวนการผลิตสังกะสีติดมาด้วย ซึ่งโลหะหนักเช่นพวกแคดเมียม สังกะสี และแมงกานีสนี้จะอยู่ในรูปของเกลือซัลเฟต เกาะติดกับกากซิลิโคจาโรไซท์ เมื่อสัมผัสกับน้ำจึงถูกชะละลายออกมาได้โดยง่ายในเวลาอันรวดเร็ว ส่วนโลหะหนักที่อยู่ในรูปของสารประกอบต่างๆ ภายในโครงสร้างของกากซิลิโคจาโรไซท์จะถูกชะละลายได้ยาก ต้องใช้เวลาชะละลายนาน จึงทำให้อัตราการถูกชะละลายของโลหะหนักในส่วนนี้ค่อนข้างช้า

หลุมฝังกลบของกากซิลิโคจาโรไซท์ที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน พบว่าน้ำที่ท่วมขังอยู่ในหลุมฝังกลบมีค่าความเข้มข้นของแคดเมียม สังกะสี และแมงกานีสต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมตลอดระยะเวลาที่น้ำท่วมขัง 14 สัปดาห์ และอัตราการถูกชะละลายของโลหะหนักจากหลุมฝังกลบในช่วงเวลา 14 สัปดาห์มีค่าใกล้เคียงกัน โดยอัตราการชะละลายของแคดเมียมมีค่าน้อยกว่า 0.01 มก./กก.กากซิลิโคจาโรไซท์ อัตราการชะละลายของสังกะสี และแมงกานีสมีค่าเฉลี่ย 0.18 และ 0.06 มก./กก.กากซิลิโคจาโรไซท์ จากผลดังกล่าวจะเห็นว่าหลังจากที่ทำการบำบัดกากซิลิโคจาโรไซท์ให้เป็นก้อน โลหะหนักจะถูกทำให้เสถียรและยึดติดกับโครงสร้างที่แข็งแรงของก้อนตัวอย่างทำให้โลหะหนักเหล่านี้ถูกชะละลายยากขึ้น

จากการทดลองการชะละลายในระยะยาวในหลุมฝังกลบจำลองทั้ง 2 แบบสรุปได้ว่าหากนำกากซิลิโคจาโรไซท์ทำการฝังกลบโดยไม่มีการทำเสถียรภาพโดยทำให้เป็นก้อนก่อน เมื่อมีฝนตกหรือมีน้ำท่วมขังหลุมฝังกลบ น้ำฝนจะชะละลายโลหะหนักในกากซิลิโคจาโรไซท์ออกมาในปริมาณที่สูงมากจนทำให้น้ำที่ท่วมขังในหลุมฝังกลบ หรือน้ำที่ไหลออกจากด้านล่างของหลุมฝังกลบมีความเข้มข้นของแคดเมียม สังกะสี และแมงกานีสสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ซึ่งไม่สามารถปล่อยให้น้ำนี้ทิ้งได้ ต้องนำน้ำไปทำการบำบัดต่อไป และถ้าน้ำชะละลายนี้เกิดรั่วไหลลงสู่

แหล่งน้ำผิวดิน หรือรั่วซึมลงสู่น้ำใต้ดินจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมาก เนื่องจากมีปริมาณแคดเมียม สังกะสี และแมงกานีสสูง แต่ถ้านำกากซิลิโคจาโรไซท์มาทำให้เป็นก้อนด้วยวัสดุประสานคละปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ (1:1)ในปริมาณรวมร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง แล้วจึงทำการฝังกลบพบว่าเมื่อมีฝนตกหรือมีน้ำท่วมขังหลุมฝังกลบดังกล่าว โลหะหนักคือแคดเมียม สังกะสี และแมงกานีสจะถูกชะละลายออกมาน้อยมาก ซึ่งอยู่ในมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมตลอดเวลา ดังนั้นน้ำชะละลายจากหลุมฝังกลบนี้สามารถสูบทิ้งโดยไม่ต้องผ่านระบบบำบัดน้ำอีกครั้ง และถ้าหากต้องการไม่ให้น้ำชะละลายจากหลุมฝังกลบซึมลงไปปนเปื้อนกับน้ำใต้ดิน ต้องปูพื้นหลุมฝังกลบด้วยวัสดุกันซึมเช่น PVC Sheet หรือ HDPE Sheet ก่อนทำการฝังกลบกากซิลิโคจาโรไซท์ที่ทำให้เป็นก้อนแล้ว

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University