

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากโครงสร้างบรรจุน้ำดื่มซึ่งทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาวิจัยได้ดังนี้

1. การศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในปูนเม็ดพบว่าโลหะหนักหลายชนิดที่ตรวจพบมากที่สุดคือ เหล็ก (Fe) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในปูนซีเมนต์ รองลงมาคือ แมงกานีส (Mn) สตรอนเชียม (Sr) แบเรียม (Ba) และ สังกะสี (Zn) ตามลำดับ ชนิดและปริมาณของโลหะหนักที่พบจะมีความแตกต่างกันเป็นช่วง ๆ ซึ่งมีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิต สำหรับตารางที่ 5.1 แสดงปริมาณเฉลี่ยของโลหะหนักชนิดต่างๆ และปริมาณที่ชะละลายออกมาคิดเป็นร้อยละ

ตารางที่ 5.1 ปริมาณเฉลี่ยของโลหะหนักในปูนเม็ดและปริมาณที่ชะละลายออกมาคิดเป็นร้อยละ

ธาตุ	ปริมาณที่พบในปูนเม็ดเฉลี่ย มก./กก.	ปริมาณที่ชะละลายออกมา คิดเป็นร้อยละ
Ba	130.424	2.834
Cd	0.359	33.371
Cr	42.525	0.669
Cu	86.701	0.016
Fe	16,644.58	0.00024
Mn	418.345	0.114
Ni	29.471	0.181
Pb	12.505	1.681
Sr	215.417	7.897
V	62.605	0.092
Zn	130.39	0.540

2. การศึกษากลไกการชะละลายโดยอิงมาตรฐานของ EA NEN 7375 พบว่ามีโลหะหนักหลายชนิดที่เกิดการชะละลายออกมา โดยโลหะหนักแต่ละชนิดจะแสดงลักษณะการชะละลายที่แตกต่างกันออกไป ตารางที่ 5.2 สรุปกลไกการชะละลายของโลหะ 5 ชนิด สำหรับโลหะหนักที่ชะละลายออกมาในระดับความเข้มข้นต่ำ (มคก./ล.) นั้นทำให้การสังเกตลักษณะการชะละลายเป็นไปได้ยาก

ตารางที่ 5.2 กลไกการชะละลายของโลหะทั้ง 5 ชนิด

ธาตุ	กลไกการชะละลาย
Al	Surface wash-off + Dissolution
Ba	Dissolution + Depletion
Ca	Diffusion + Depletion
Cr	Surface wash-off + Depletion
Sr	Delayed diffusion + Depletion

3. การศึกษาผลการชะละลายกับมาตรฐานน้ำดื่มพบว่าโลหะหนักอยู่หลายชนิดที่มีความเข้มข้นเกินมาตรฐาน มากที่สุดคือการชะละลายของอะลูมิเนียม (Al) ซึ่งส่วนใหญ่มาจากการทดสอบด้วยน้ำประปาและน้ำฝนกรดสังเคราะห์ชนิดเปิดฝาทดสอบ รองลงมาคือ แคดเมียม (Cd) และ ตะกั่ว (Pb) ซึ่งหากมีการวิจัยในขั้นต่อไปจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับโลหะหนักเหล่านี้เป็นพิเศษเพื่อศึกษาสาเหตุที่ทำให้เกิดการชะละลายที่มากเกินมาตรฐานเนื่องจากเป็นโลหะหนักที่มีความอันตราย

4. การศึกษาผลการชะละลายกับความแตกต่างของอัตราส่วนระหว่างสารชะละลายต่อพื้นที่ผิวสัมผัสพบว่า ที่ค่า L/S เท่ากับ 8 มีความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมาสูงสุด เนื่องจากโลหะหนักเกิดการสะสมความเข้มข้นใกล้กับบริเวณที่เกิดการชะละลาย ดังนั้นสารชะละลายที่มีปริมาตรน้อยที่สุดจะทำให้ตรวจพบโลหะหนักมากที่สุด

5. การศึกษาพีเอชกับการชะละลายพบว่า การชะละลายของ Ca(OH)_2 จากซีเมนต์เพสต์เป็นตัวควบคุมพีเอชในระบบ (มีผลมากกว่าพีเอชเริ่มต้นของสารชะละลาย) สำหรับโลหะหนักที่แสดงความเปลี่ยนแปลงในการชะละลายเมื่อพีเอชลดลง (การทดสอบด้วยฝนกรดสังเคราะห์ชนิดเปิดฝาท) ที่เห็นได้ชัดเจนคือ วาเนเดียม (V) ซึ่งแสดงการชะละลายที่เพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชของระบบลดลง

6. การศึกษาการชะละลายของโลหะหนักในสารชะละลายต่างชนิดกันพบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่แสดงลักษณะที่คล้ายกันในสารชะละลายต่าง ๆ ยกเว้น โบรอน (B) ที่จะเกิดการชะละลายได้มากในน้ำฝนกรดสังเคราะห์ และแมงกานีส (Mn) ไม่เกิดการชะละลายในน้ำประปา

7. การเกิดคาร์บอนเนชันในระบบมีผลทำให้ปริมาณแคลเซียมละลายในระบบลดลง เนื่องจากเกิดการตกตะกอนในรูปของหินปูน ซึ่งมีผลทำให้พีเอชของระบบลดลงโดยพบว่าช่วงท้ายของการทดสอบโลหะหนักต่างๆชะละลายออกมาในปริมาณต่ำซึ่งเป็นได้ 2 กรณีคือ 1. โลหะหนักเหล่านั้นเกิดการชะละลายลดลงหรือ 2. โลหะเหล่านั้นตกตะกอนร่วมกับหินปูน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง FT-IR และ XRD

8. สำหรับการศึกษาซีเมนต์เพสต์ด้วยเครื่อง FT-IR และ XRD นั้นไม่เป็นไปตามจุดประสงค์โดยเป้าหมายของการศึกษาเพื่อตรวจวัดความเปลี่ยนแปลงของสารประกอบในซีเมนต์เพสต์และโลหะหนักภายหลังการทดสอบการชะละลาย ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสารประกอบโลหะหนักนั้นมีปริมาณน้อยเกินกว่าที่จะเห็นความเปลี่ยนแปลงหรือตรวจพบ เช่นเดียวกับในตะกอนหินปูนที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบการชะละลาย การตรวจสอบด้วยเครื่อง FT-IR และเครื่อง XRD ไม่สามารถยืนยันว่ามีโลหะหนักตกตะกอนร่วมกับหินปูนหรือไม่เนื่องจากความเข้มของหินปูนที่สูงมากอาจบัง peak ของโลหะหนักซึ่งมีปริมาณน้อยมาก (ดูรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.3 หน้า 134 – 144)

9. สำหรับการศึกษาการชะละลายในระยะยาวที่อาจเกิดขึ้นมีความเป็นไปได้ว่าโลหะหนักส่วนใหญ่จะเกิดการชะละลายลดลงอันเนื่องมาจากผลของการเกิดคาร์บอนเนชันในระบบ (ดูรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.2.5 4.2.7 และ 4.3)

5.2 ข้อเสนอนแนะและปัญหาอุปสรรคที่พบในงานวิจัย

1. ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้ตัวอย่างปูนซีเมนต์จากกระบวนการผลิตจริง การศึกษาผลความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักที่มีต่อการชะละลายจึงทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากไม่สามารถควบคุมความเข้มข้นของโลหะหนักได้ตามต้องการและทำให้ผลการวิจัยในบางเรื่องทำได้ไม่ชัดเจน เช่น การวิเคราะห์ซีเมนต์เพสต์ด้วยเครื่อง XRD และ FT-IR เนื่องจากโลหะหนักมีปริมาณความเข้มข้นน้อยเกินไป ทำให้การตรวจวัดบางครั้งไม่สามารถตรวจวัดได้ ทำให้ผลการทดลองไม่สามารถสรุปผลออกมาได้อย่างชัดเจนเท่าที่ควร

2. นอกจากการศึกษาค่าผลของความเข้มข้นเริ่มต้นในปูนเม็ดของโลหะหนักที่ส่งผลต่อความสามารถในการชะละลายของโลหะหนักชนิดนั้นๆแล้ว ยังมีความจำเป็นต้องศึกษาผลที่มีต่อกันของโลหะหนักชนิดต่างๆในปูนเม็ดกับผลของการชะละลาย ซึ่งจำเป็นต้องควบคุมปริมาณโลหะหนักซึ่งเป็นไปได้ยากในการศึกษาจากปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตจริงเนื่องจากไม่สามารถ

ควบคุมปริมาณของโลหะหนักชนิดใดชนิดหนึ่งให้มีปริมาณคงที่และโลหะหนักชนิดที่สนใจให้มีปริมาณแตกต่างกันในแต่ละตัวอย่างอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักที่สังเคราะห์ขึ้นในห้องปฏิบัติการในขณะเตรียมซีเมนต์เพสต์ โดยผลที่ได้อาจแตกต่างกันเนื่องจากกระบวนการผลิตปูนเม็ดนั้นมีการให้ความร้อนที่สูง

3. ควรมีการจำลองเตาเผาปูนซีเมนต์ขนาดเล็กขึ้นมาใช้งาน เพื่อที่จะสามารถควบคุมการเติมวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในปริมาณที่ต้องการได้ อีกทั้งสามารถควบคุมปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการผลิตได้

4. ในขั้นตอนการลดขนาดปูนเม็ดสำหรับใช้ในการทดสอบการชะละลายนั้นใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการซึ่งทำให้ขนาดของอนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ได้มีความแตกต่างจากของจริงซึ่งอาจมีผลต่อการชะละลายของโลหะหนักบางชนิด

5. ในการศึกษาไม่สามารถสรุปได้ว่าธาตุที่เกิดการหมดไป (depletion) ในตอนหลังการทดสอบการชะละลายเกิดจากการที่ธาตุนั้นๆไม่ชะละลายออกมาแล้วหรือเกิดการตกตะกอนร่วมกับ CaCO_3 เนื่องจากในการทดสอบด้วยเครื่อง XRD ไม่ปรากฏสารประกอบของโลหะหนักอื่นๆเนื่องจากปริมาณของ CaCO_3 ที่มากซึ่งสามารถบดจนการมองเห็นของสารประกอบอื่นๆได้

6. อาจมีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อการชะละลายของธาตุต่างๆ พร้อมกัน ซึ่งยากต่อการพิจารณาว่า สาเหตุที่โลหะหนักเกิดการชะละลายออกมา มาก หรือ น้อย นั้นมีผลมาจากปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเป็นสำคัญ หรือเกิดจากหลายปัจจัยร่วมกัน

7. สำหรับการวิจัยในขั้นต่อไปควรมีการเก็บตัวอย่างจากการใช้งานจริงเพื่อศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักที่ชะละลายออกมาจากการใช้งานจริงในระยะยาวเนื่องจากการเก็บกักและการเปลี่ยนน้ำที่แตกต่างจากการทดลอง