



## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่เกิดจากกระบวนการเผาพร้อมกับกากอุตสาหกรรม สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 การเปลี่ยนแปลงที่สูงขึ้นของปริมาณของโลหะหนักในวัตถุดิบที่เข้าสู่ระบบการผลิตซีเมนต์ มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณโลหะหนักที่สูงขึ้นในสารประกอบของปูนเม็ดและฝุ่นปูน ดังเช่นจากการวิจัยที่พบว่าเมื่อมีความเข้มข้นของแมงกานีสสูงขึ้นในวัตถุดิบที่เข้าสู่ระบบ ส่งผลให้มีโลหะหนักอยู่ในรูปสารประกอบของแมงกานีสออกไซด์เพิ่มขึ้นด้วย

5.1.2 จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าโลหะหนักที่ปรากฏในปูนเม็ดและฝุ่นปูนนั้น มีอิทธิพลส่วนใหญ่มาจากวัตถุดิบหลัก วัตถุดิบทดแทนและเชื้อเพลิงทดแทน สำหรับวัตถุดิบทดแทนซึ่งมีที่มาจากกากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ถ้ำลอย ถ้ำหนัก และคะตะลิสต์ นั้นเป็นที่มาของโลหะหนักหลายชนิดที่สำคัญ จึงควรมีการควบคุมหรือตรวจสอบปริมาณที่เข้าระบบอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ไม่ให้เกิดการสะสมตัวอยู่ในปูนเม็ดหรือฝุ่นปูนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการผลิตปูนซีเมนต์มากเกินไป

5.1.3 ในการศึกษาชนิดของสารประกอบโลหะหนักที่พบในปูนซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าโลหะทุกชนิดที่ได้ทำการวิเคราะห์มีการกระจายตัวอยู่ในรูปสารประกอบโลหะหนักหลายชนิด แต่พบว่าโดยส่วนใหญ่เป็นสารประกอบที่อยู่ในรูปที่มีความเสถียรสูง (มากกว่าประมาณร้อยละ 60 ของสารประกอบทั้งหมด) ทำให้มีโอกาสชะละลายออกมาได้น้อย ส่วนแบเรียม โครเมียม ซีลีเนียม และ สตรอนเชียม สามารถพบได้ในรูปของสารประกอบที่มีความเสถียรต่ำ ซึ่งแม้จะมีในปริมาณไม่มาก เท่ากับสารประกอบที่มีความเสถียรที่สูงกว่า แต่เป็นจุดที่ควรให้ความระมัดระวังและควรมีการควบคุมความเข้มข้นของโลหะเหล่านี้ไม่ให้มีค่าสูงเกินไปในวัตถุดิบที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์

5.1.4 จากการเปรียบเทียบผลของสารประกอบทางเคมีทั้งในปูนเม็ดและฝุ่นปูน ที่มีการเก็บตัวอย่างในวันเดียวกัน พบว่าทั้งสองมีองค์ประกอบที่คล้ายคลึงกัน จึงสรุปได้ว่าปูนเม็ดและฝุ่นปูนที่ออกจากระบบ อาจจะมีลักษณะการชะละลายที่เหมือนกันเมื่ออยู่ในสภาวะเดียวกัน

5.1.5 ภายใต้การเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ได้มาซึ่งปูนเม็ดและฝุ่นปูนนั้น องค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นมีความหลากหลาย จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีการแยกสกัดสารประกอบ (Sequential Extraction) การตรวจสอบด้วยเครื่อง XRD และการตรวจสอบด้วยเครื่อง FTIR พบว่ามีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกัน โดยสารประกอบโลหะหนักที่พบเป็นส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแมงกานีสออกไซด์ และโลหะที่พบได้ในสารประกอบทั่วไป คือ ทองแดง โคโรเนียม สตรอนเชียม วาเนเดียม และซีลีเนียม วิธีการแยกสกัดสารประกอบสามารถตรวจสอบสารประกอบได้อย่างครอบคลุมมากกว่าการตรวจสอบด้วยเครื่อง XRD และ FTIR แต่ทั้งนี้การที่เครื่องมือทั้งสองไม่สามารถยืนยันและระบุชนิดสารประกอบของโลหะได้อย่างชัดเจน เป็นผลสืบเนื่องมาจากขีดความสามารถอันจำกัดของเครื่องในการแยกแยะความถี่ของกราฟที่อาจเกิดการซ้อนทับกัน หรือจากการถูกบดบังจากองค์ประกอบที่ชัดเจนกว่านั่นเอง

5.1.6 ในการศึกษาเรื่องสมดุลมวลของโลหะในระบบซีเมนต์ สามารถสรุปได้ว่ามวลของโลหะหนักแต่ละชนิดระหว่างก่อนและหลังกระบวนการเผาที่มีปริมาณที่ไม่ต่างกันมากนัก แสดงให้เห็นว่าส่วนที่ระเหยออกไปในรูปแก๊สมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่ออกมาในผลิตภัณฑ์ซีเมนต์

## 5.2 ความสำคัญทางด้านวิศวกรรมและการนำไปใช้ประโยชน์

จากการวิจัยในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่เกิดจากกระบวนการเผาพร้อมกับกากอุตสาหกรรม สามารถสรุปความสำคัญทางด้านวิศวกรรมและการนำไปใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

5.2.1 ทำให้ทราบภาพรวมของระบบการผลิตซีเมนต์ที่มีการใช้กากอุตสาหกรรมร่วมในการผลิต สามารถระบุที่มาของโลหะหนักจากวัตถุดิบที่เข้าระบบการผลิตได้อย่างชัดเจน และทราบอิทธิพลการส่งผ่านโลหะหนักจากวัตถุดิบต่างๆ ไปยังผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ได้ ซึ่งมีประโยชน์ต่อทางโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ที่จะพิจารณาลดปริมาณที่เข้าของวัตถุดิบบางประเภทที่อาจมีความเข้มข้นของโลหะต่างๆ มากเกินไปจนมีส่วนทำให้มีปริมาณโลหะนั้นออกมาสูงในผลิตภัณฑ์ซีเมนต์

5.2.2 จากการศึกษาเรื่องสารประกอบโลหะที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการเผาซีเมนต์ ทำให้สามารถทำนายความยากง่ายในการชะละลายออกมาของโลหะแต่ละชนิดได้ เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีสมบัติในด้านความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวที่ต่างกัน และจากงานวิจัยนี้พบว่าโลหะส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารประกอบที่มีความเสถียรสูง จึงเป็นการช่วยลดความกังวลต่อทั้งทางโรงงานผลิต และประชาชนทั่วไปในเรื่องการชะละลายที่อาจออกมาสู่สภาพแวดล้อมได้

5.2.3 งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาพภาพของโลหะหนักก่อนปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งสามารถเป็นพื้นฐานเพื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ โดยบอกได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นมาจากสาเหตุใดและปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนไปหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันมีผลอย่างไรต่อปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่เกิดจากกระบวนการเผาพร้อมกับกากอุตสาหกรรม มีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

5.3.1 ควรมีการศึกษาเรื่องสถานการณ์ภาพของโลหะหนักในผลิตภัณฑ์ซีเมนต์อย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากการผลิตซีเมนต์เป็นระบบที่ใหญ่ และมีความหลากหลายในเรื่องวัตถุดิบทดแทนและเชื้อเพลิงทดแทนที่นำมาใช้ร่วมในระบบการผลิต

5.3.2 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ โดยอาศัยเครื่องมือที่สามารถตรวจสอบโลหะหนักที่มีการกระจายตัวและมีปริมาณน้อยได้

5.3.3 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุดิบที่เข้าระบบกับผลิตภัณฑ์ที่ออกจากระบบ โดยต้องประกอบไปด้วยข้อมูลจากส่วนต่างๆ ของระบบการผลิตซีเมนต์ที่ครบถ้วน มีการเก็บตัวอย่างที่ต่อเนื่อง ชุดของตัวอย่างอยู่ในสายการผลิตเดียวกัน และมีปริมาณตัวอย่างที่มากพอ เพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือในทางสถิติ