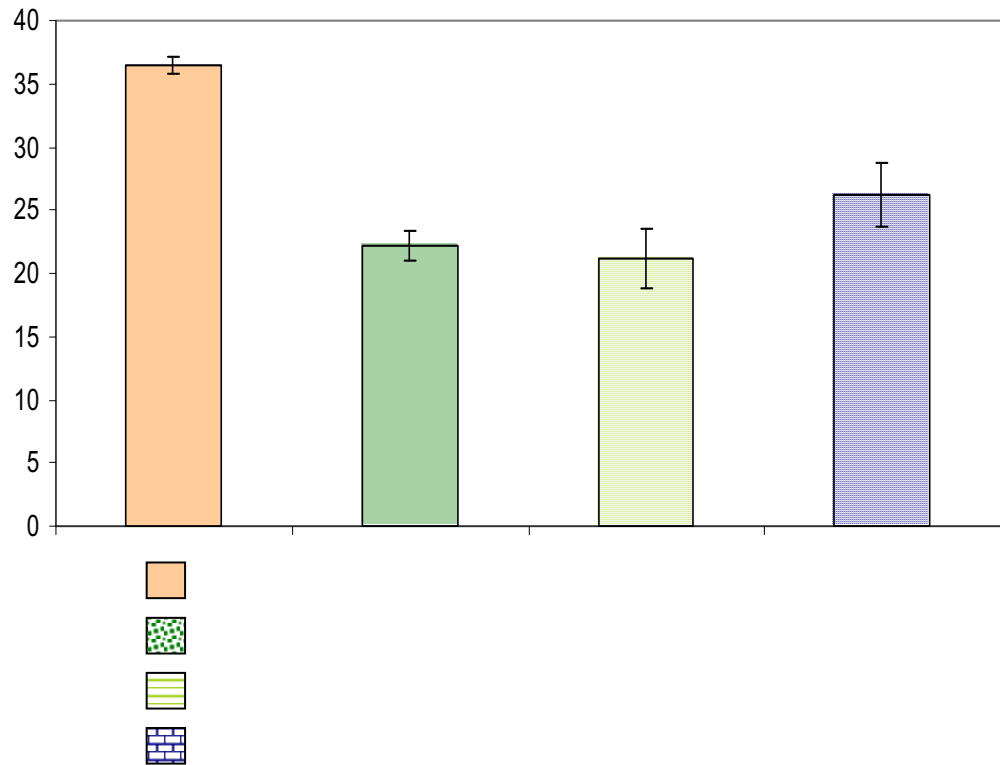
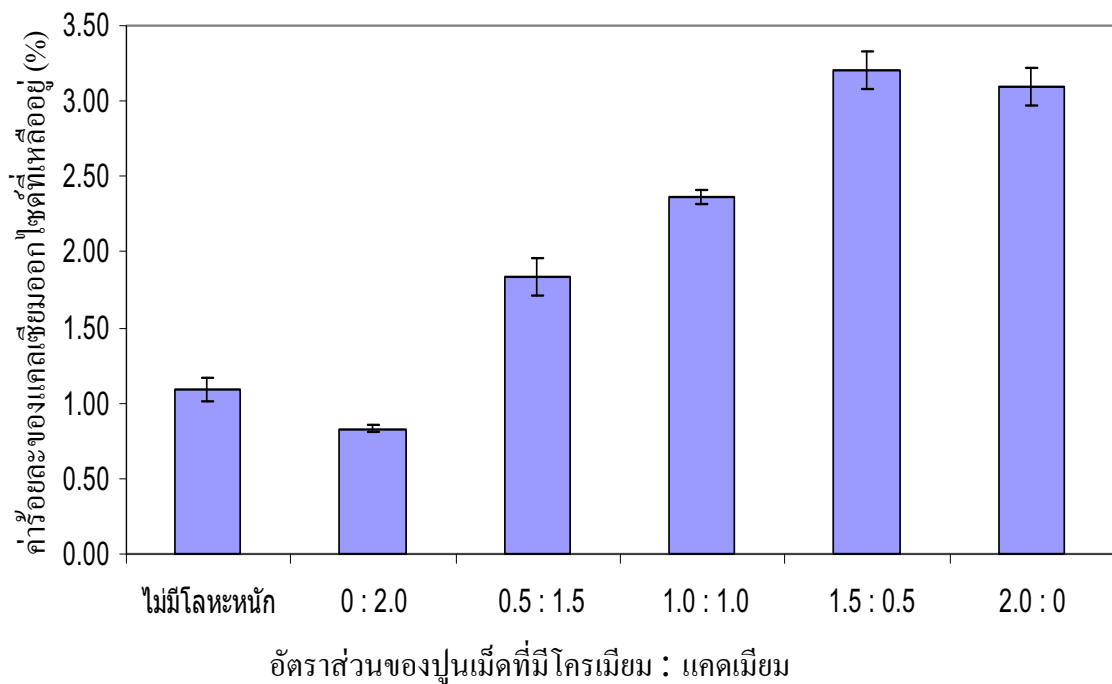




รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนัก กับมอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักชนิดเดียว และมอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักสองชนิด

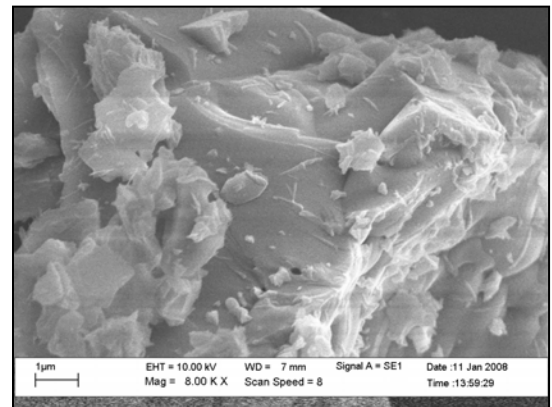
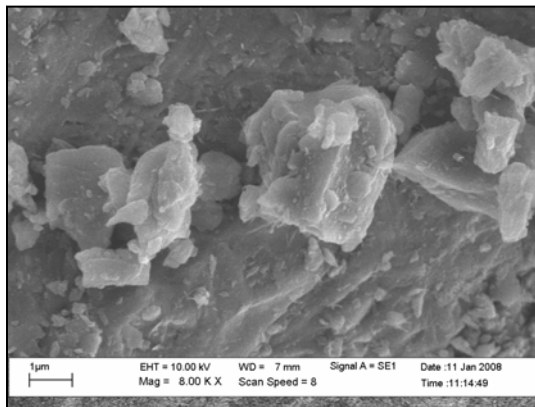
4.2.2.2 ลักษณะสมบัติของปูนเม็ดเมื่อมีโลหะหนักปนเปื้อนเป็น โครเมียมและแคดเมียม

ผลการทดสอบร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่มีแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โครเมียมและแคดเมียมผสมที่อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.5:1.5, 1.0:1.0 และ 1.5:0.5 โดยน้ำหนัก และโครเมียมความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.21 มีค่า 0.829, 1.837, 2.364, 3.203 และ 3.091 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการผสมกันระหว่างโครเมียมและแคดเมียมส่งผลกระทบต่อค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่โดยสังเกตได้ว่ายังอัตราส่วนของโครเมียมเพิ่มขึ้นแนวโน้มค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นโครเมียมน่าจะเป็นสารปนเปื้อนหลักที่ส่งผลกระทบต่อค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่

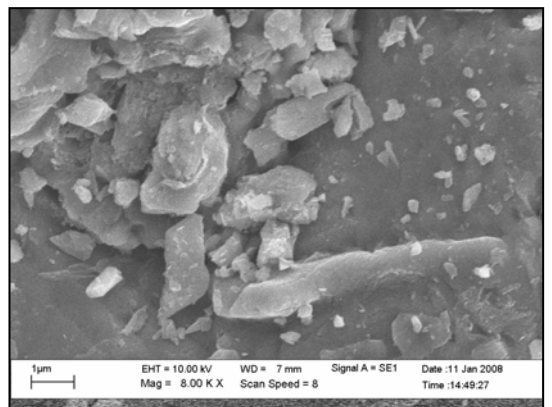
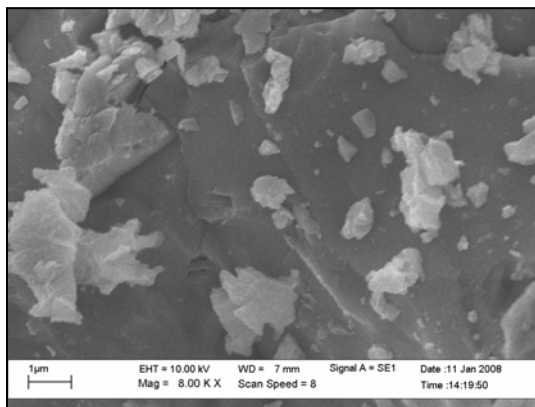


รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือยู่ของปุนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก กับ ปุนเม็ดที่มี โครเมียมและแคลเมียม

เมื่อทำการศึกษาลักษณะทางพื้นผิวเพื่อดูความแตกต่างของปุนเม็ดที่เกิดขึ้นเมื่อมีโลหะหนัก แต่ละชนิดปนเปื้อนด้วยเครื่อง SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.22 โดยทำการเปรียบเทียบปุนเม็ดที่มีโครเมียม และแคลเมียมผสมอยู่ในอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.5:1.5, 1.0:1.0 และ 1.5:0.5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับกับปุนเม็ดที่มีโครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักพบว่าลักษณะพื้นผิวของ ปุนเม็ดที่มีโครเมียมและแคลเมียมผสมอยู่ในอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 1.5:0.5, 1.0:1.0 มี ลักษณะใกล้เคียงกัน ในขณะที่เดียวกันกลับพบว่าปุนเม็ดที่มีโครเมียมและแคลเมียมผสมอยู่ใน อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.5:1.5 โดยน้ำหนักมีเฟสใหม่ลักษณะเป็นเส้นเพิ่มขึ้นอย่างเห็น ได้ชัด เนื่องจากมีแคลเมียมอยู่ในอัตราส่วนสูงกว่าโครเมียมแสดงให้เห็นว่าแคลเมียมส่งผลต่อลักษณะ พื้นผิวของปุนเม็ด



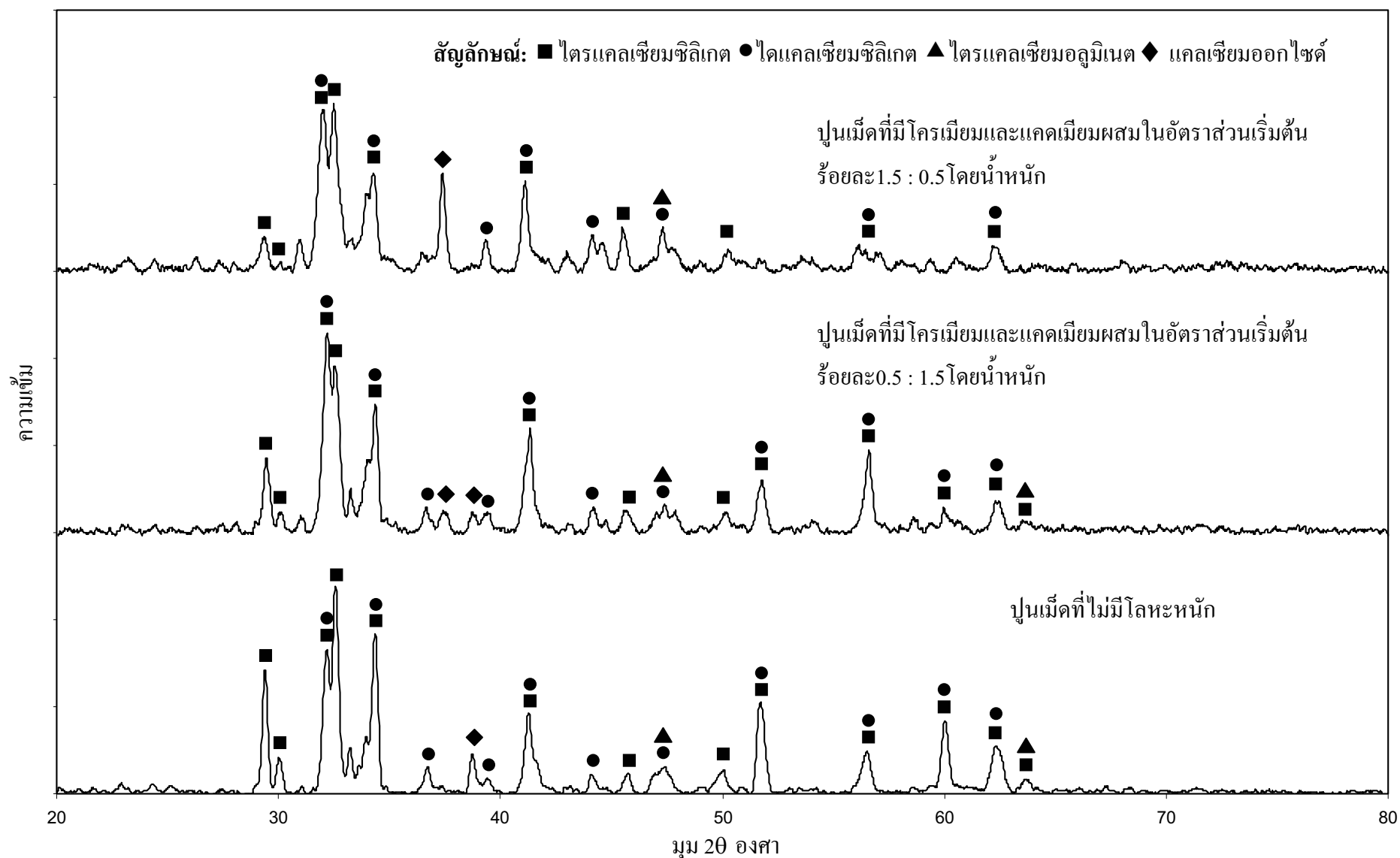
(ก) ปูนเม็ดยี่มีโครเมียมเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (ข) ปูนเม็ดยี่มีโครเมียม : แคลเมียม = 0.5 : 1.5



(ค) ปูนเม็ดยี่มีโครเมียม : แคลเมียม = 1.0 : 1.0 (ง) ปูนเม็ดยี่มีโครเมียม : แคลเมียม = 1.5 : 0.5

รูปที่ 4.22 แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดยี่จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องSEMเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดยี่มีโครเมียมผสมเพียงชนิดเดียวกับปูนเม็ดยี่มีโครเมียมผสมกับแคลเมียม

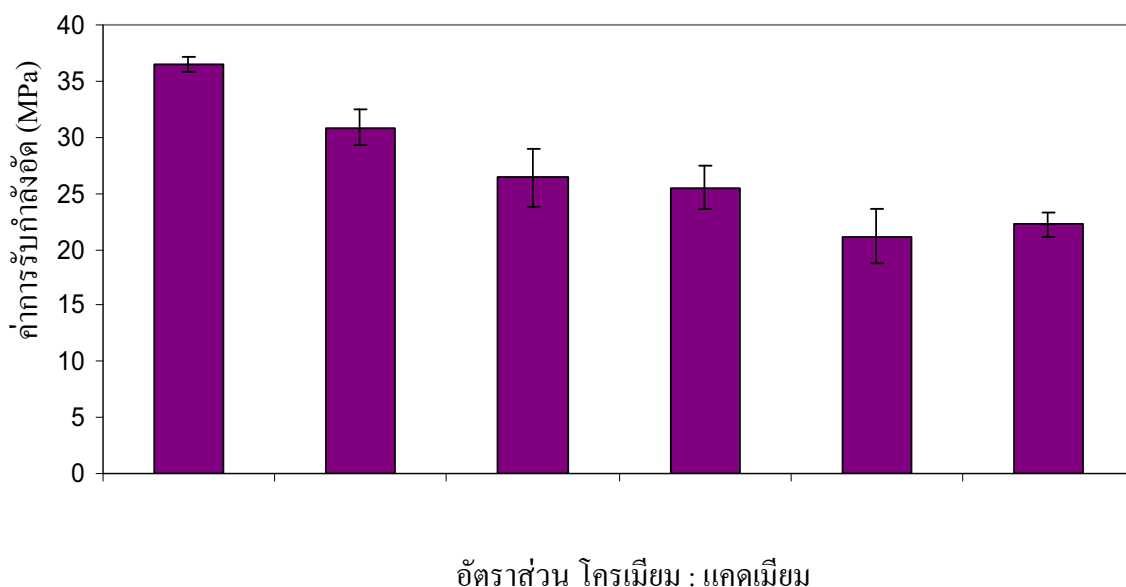
ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้าง ดังรูปที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดยี่ที่ไม่มีโลหะหนัก และปูนเม็ดยี่ที่มีโครเมียมและแคลเมียมผสมอยู่ในอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.5:1.5 และ 1.5:0.5 โดยน้ำหนักตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่าโครงสร้างของปูนเม็ดยี่ที่ได้จากการผสมโครเมียมและแคลเมียมในอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้น ร้อยละ 0.5:1.5 โดยน้ำหนักมีตำแหน่งของโครงสร้างหลักของปูนเม็ดยี่ปรากฏในตำแหน่งเดียวกันกับปูนเม็ดยี่ที่ไม่มีโลหะหนัก ในส่วนความสูงของพีคโครงสร้างหลักที่พิจารณาได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต และไตรแคลเซียมอลูมินेट ซึ่งแสดงโดยความเข้มของกราฟ XRD พบว่าความสูงของพีคที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงกับปูนเม็ดยี่ที่ไม่มีโลหะหนัก ในขณะที่ปูนเม็ดยี่ที่มีโครเมียมและแคลเมียมในอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 1.5:0.5 โดยน้ำหนักความสูงของพีคองค์ประกอบหลักของปูนเม็ดยี่โดยภาพรวมลดลง แสดงให้เห็นว่าโครเมียมน่าจะเป็นสารปนเปื้อนหลักที่ส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดยี่



รูปที่ 4.23 โครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และ ปูนเม็ดที่มีโครเมียมและแคลเซียมผสม จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

ผลของโครเมียมและแคดเมียมที่มี ต่อค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์

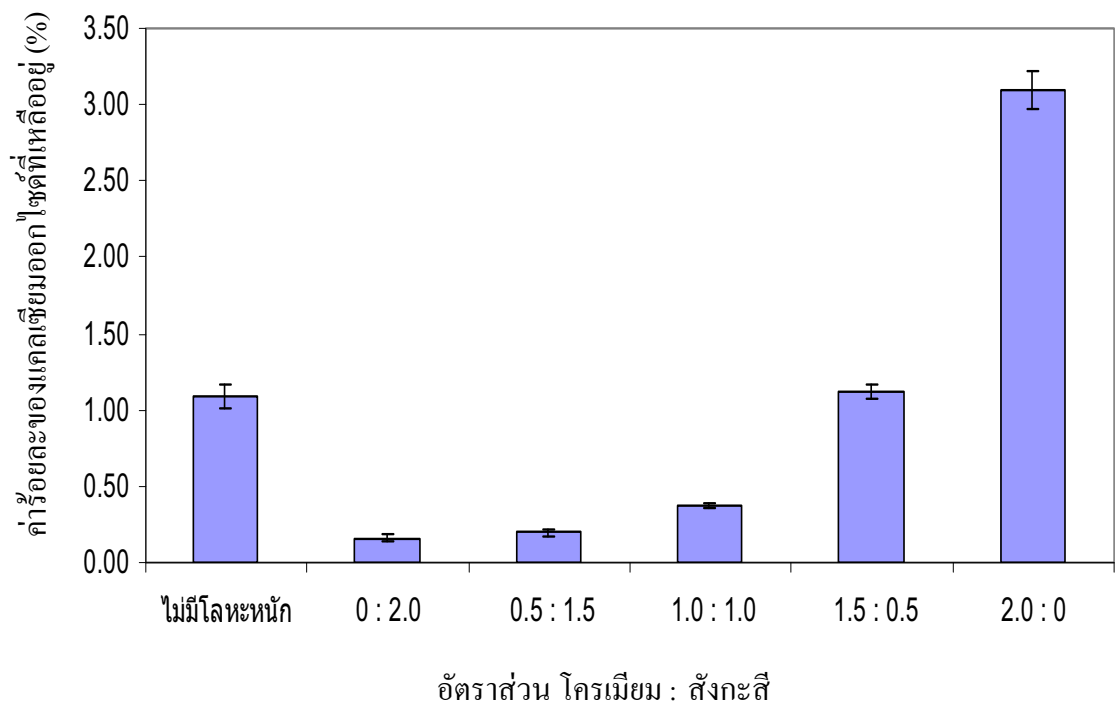
เมื่อพิจารณาค่าการรับกำลังอัดเปรียบเทียบระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนัก กับมอร์ตาร์ที่มีโครเมียมและแคดเมียมดังแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่ามอร์ตาร์ที่มีการผสมระหว่างโครเมียมและแคดเมียมในอัตราส่วน 0.5:1.5, 1.0:1.0 และ 1.5:0.5 โดยน้ำหนักตามลำดับมีค่าการรับกำลังอัด 26.4, 25.48 และ 21.16 MPa แสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์ที่มีการผสมระหว่างโครเมียมและแคดเมียมส่งผลกระทบต่อค่าการรับกำลังอัดโดยค่าการรับกำลังอัดมีแนวโน้มลดลง $33.17 \% \pm 7.680$ เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนัก และเมื่อสัดส่วนความเข้มข้นของโครเมียมเพิ่มขึ้นค่าการรับกำลังอัดลดลง ดังนั้นโครเมียมน่าจะเป็นสารปนเปื้อนหลักที่ส่งผลกระทบต่อค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนักและมอร์ตาร์ที่มีโครเมียมและแคดเมียมในแง่กับค่าการรับกำลังอัด

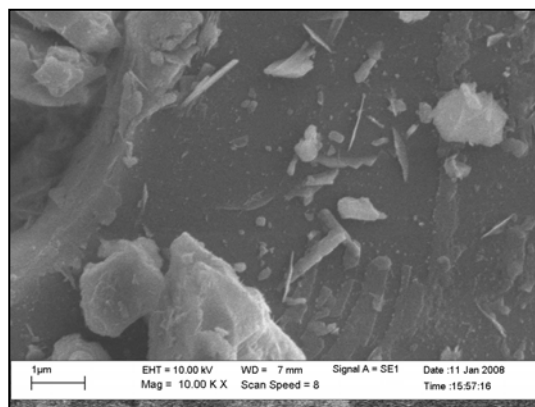
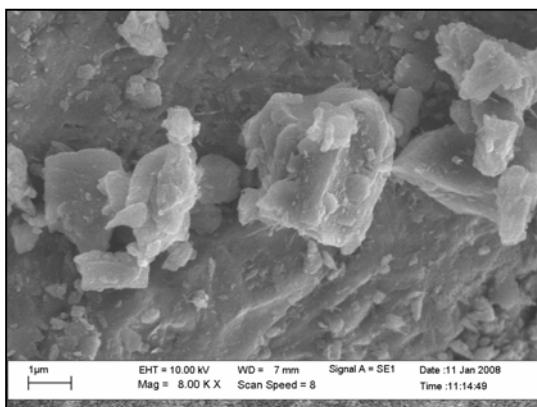
4.2.2.3 ลักษณะสมบัติของปูนเม็ดเมื่อมีโลหะหนักปนเปื้อนเป็น โครเมียมและสังกะสี

ผลการทดสอบร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่มีโครเมียมและสังกะสีผสมที่อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.5:1.5, 1.0:1.0 และ 1.5:0.5 โดยน้ำหนักดังรูปที่ 4.25 พบว่ามีค่า 0.199, 0.379 และ 1.118 ตามลำดับ สังเกตได้ว่าค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดเมื่อมีโครเมียมและสังกะสีปนเปื้อนในอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.5:1.5, 1.0:1.0 มีค่าน้อยกว่าปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก นอกจากนี้พบว่าเมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของโครเมียมเพิ่มขึ้นค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าโครเมียมมีผลต่อการขัดขวางการเปลี่ยนแคลเซียมออกไซด์ไปเป็นองค์ประกอบหลักของปูนเม็ด



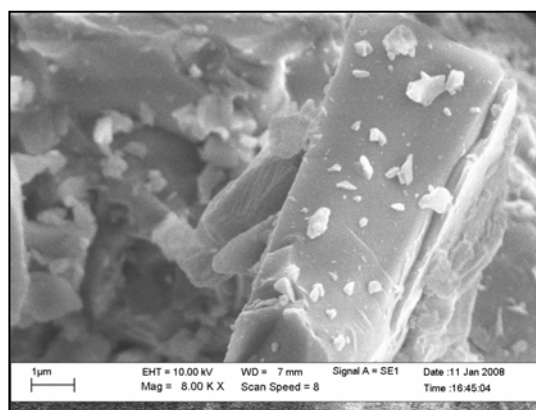
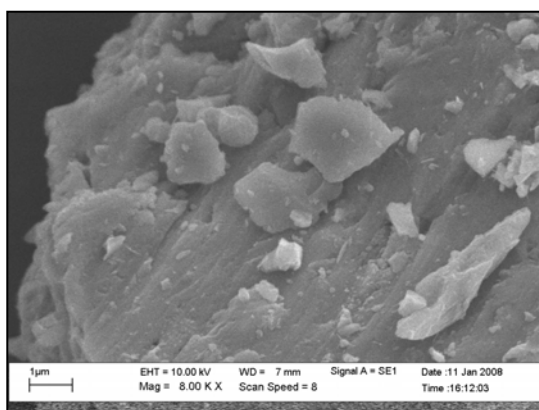
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือยู่ของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก กับ ปูนเม็ดที่มีโครเมียมและสังกะสี

เมื่อทำการศึกษาลักษณะทางพื้นผิวด้วยเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 4.26 โดยทำการเปรียบเทียบปูนเม็ดที่มีโครเมียมและสังกะสีผสมอยู่ในอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.5:1.5, 1.0:1.0 และ 1.5:0.5 โดยน้ำหนัก กับมีปูนเม็ดที่มีโครเมียมความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก พบว่าลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่มีโครเมียมและสังกะสีในทุกอัตราส่วนมีลักษณะใกล้เคียงกับปูนเม็ดที่มีโครเมียมเพียงชนิดเดียว แสดงว่า การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวไม่สามารถแสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างปูนเม็ดที่มีโครเมียมเพียงชนิดเดียว กับปูนเม็ดที่มีโครเมียมผสมกับสังกะสีได้



(ก) ปูนเม็ดที่มีโครเมียมเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

(ข) ปูนเม็ดที่มีโครเมียม : สังกะสี = 0.5 : 1.5

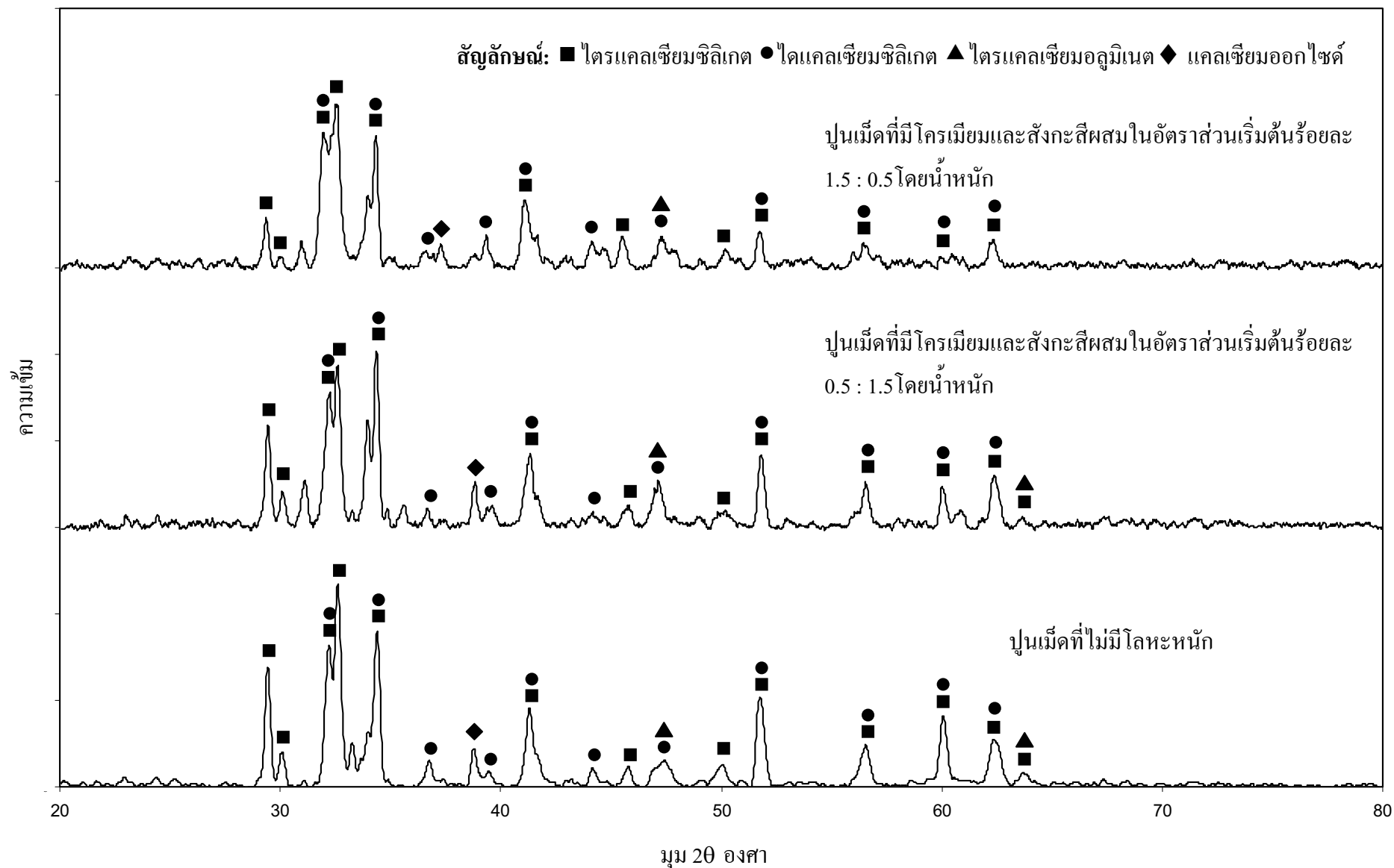


(ค) ปูนเม็ดที่มีโครเมียม : สังกะสี = 1.0 : 1.0

(ง) ปูนเม็ดที่มีโครเมียม : สังกะสี = 1.5 : 0.5

รูปที่ 4.26 แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องSEMเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่มีโครเมียมผสมเพียงชนิดเดียวกับปูนเม็ดที่มีโครเมียมผสมกับสังกะสี

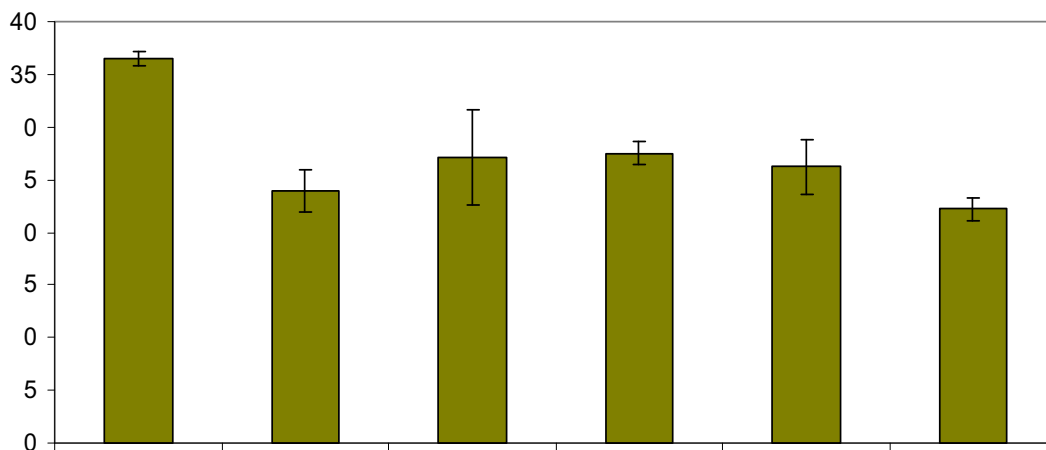
ในส่วนของการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและปูนเม็ดที่มีโครเมียมและสังกะสีผสมแสดงดังรูปที่ 4.27 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และปูนเม็ดที่มีโครเมียมและสังกะสีผสมอยู่ในอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.5:1.5 และ 1.5:0.5 โดยน้ำหนักตามลำดับ เมื่อพิจารณาปูนเม็ดที่ได้จากการผสมปูนเม็ดที่มีโครเมียมและสังกะสีผสมอยู่ในอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.5 : 1.5 โดยน้ำหนัก พบว่ามีตำแหน่งของโครงสร้างหลักเช่นเดียวกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและความสูงของพีคที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงกัน ในขณะที่ความสูงของพีคปูนเม็ดที่มีโครเมียมและสังกะสีผสมอยู่ในอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 1.5 : 0.5 โดยน้ำหนักโดยรวมลดลง แสดงว่าความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักโครเมียมส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดมากกว่าสังกะสี



รูปที่ 4.27 โครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และ ปูนเม็ดที่มีโครเมียมและสังกะสีผสม จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

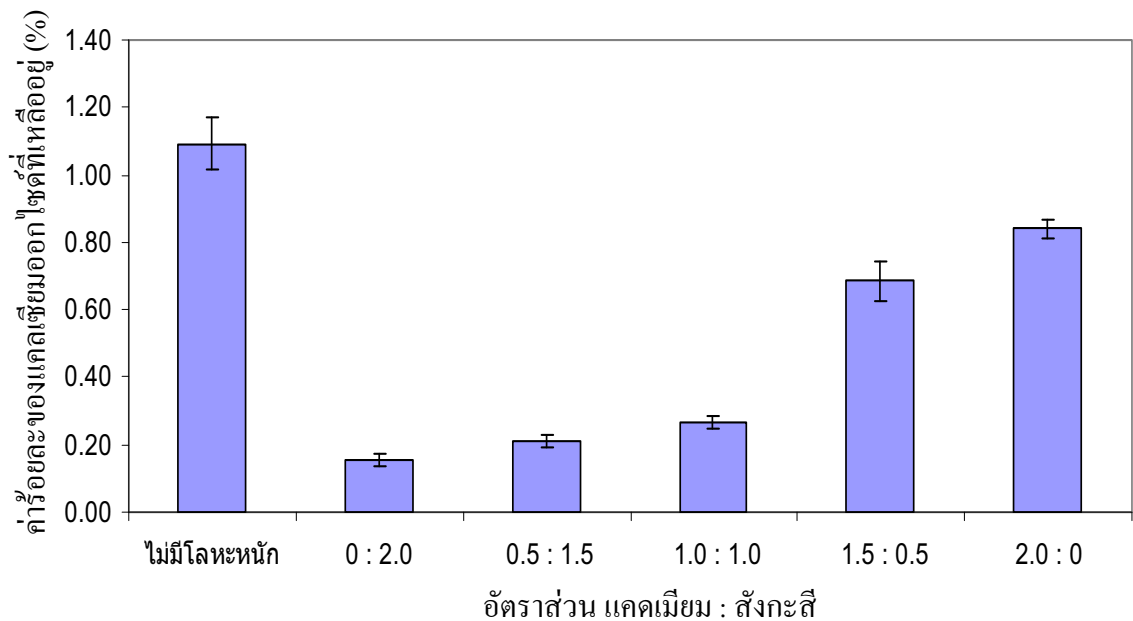
ผลของโลหะหนักโครเมียมและสังกะสีที่มี ต่อค่าการรับก้างอัดของมอร์ตาร์

เมื่อพิจารณาค่าการรับก้างอัดเปรียบเทียบระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนัก กับมอร์ตาร์ที่มีสังกะสีความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มอร์ตาร์ที่มีโครเมียมผสมกับสังกะสีในอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.5:1.5, 1.0:1.0 และ 1.5:0.5 โดยน้ำหนัก และมอร์ตาร์ที่มีโครเมียมความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.28 พบว่าค่าการรับก้างอัดมีค่า 36.43, 23.92, 27.16, 27.52, 26.6 และ 22.19 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์ที่มีโครเมียมผสมกับสังกะสีส่งผลกระทบท่อค่าการรับก้างอัดโดยทำให้ค่าการรับก้างอัดมีแนวโน้มลดลง $26\% \pm 1.873$ เมื่อเปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก แต่ในขณะเดียวกันหากทำการเปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่มีโครเมียมหรือสังกะสีกลับพบว่าค่าการรับก้างอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดจากโครเมียมและสังกะสีส่งผลให้ค่าการรับก้างอัดของมอร์ตาร์เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยทำให้ค่าการรับก้างอัดเพิ่มขึ้น



4.2.2.4 ลักษณะสมบัติของปูนเม็ดเมื่อมีโลหะหนักปนเปื้อนเป็นแคดเมียมและสังกะสี

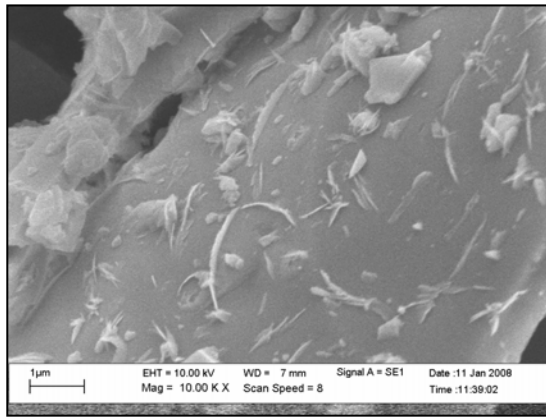
ผลการทดสอบร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่มีแคดเมียมและสังกะสีผสมที่อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.5:1.5, 1.0:1.0 และ 1.5:0.5 โดยน้ำหนักดังแสดงในรูปที่ 4.29 มีค่า 0.209, 0.263 และ 0.696 ตามลำดับสังเกตได้ว่าอัตราส่วนแคดเมียมเพิ่มขึ้นค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน สังเกตได้ว่าการผสมกันของโลหะหนักสองชนิดนี้ แคดเมียมน่าจะเป็นตัวหลักที่ส่งผลกระทบต่อยุทธศาสตร์ของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่



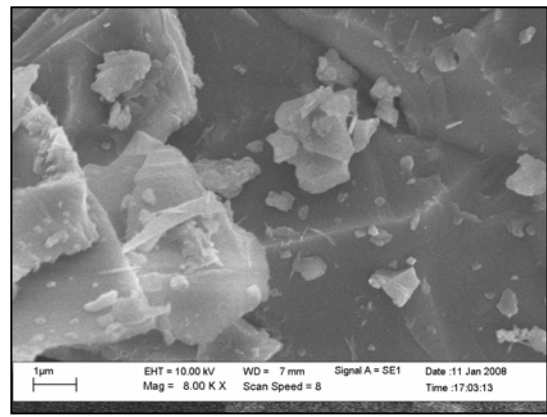
รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก กับ ปูนเม็ดที่มีแคลเซียมและสังกะสี

ในส่วนของการพิจารณาลักษณะพื้นผิวเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่มีแคลเซียมเพียงชนิดเดียวกับปูนเม็ดที่มีแคลเซียมผสมกับสังกะสีดังแสดงในรูปที่ 4.30 พบว่าลักษณะพื้นผิวแตกต่างกัน โดยมีลักษณะของเฟสใหม่เป็นเส้นเกิดขึ้นในปริมาณน้อยหากปูนเม็ดมีแคลเซียมผสมในอัตราส่วนต่ำ ดังนั้นสรุปได้ว่าแคลเซียมเป็นโลหะหนักที่ส่งผลให้เกิดเฟสใหม่ลักษณะเป็นเส้นในการพิจารณาลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ด

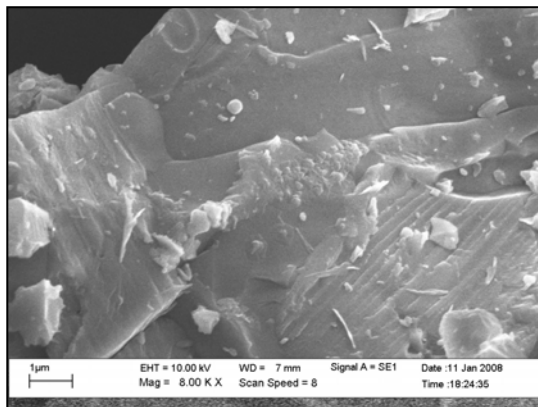
การเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและปูนเม็ดที่มีแคลเซียมและสังกะสีผสมแสดงดังรูปที่ 4.31 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะ โครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและปูนเม็ดที่มี แคลเซียมและสังกะสีผสมอยู่ในอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.5:1.5 และ 1.5:0.5 โดยน้ำหนักตามลำดับ จากการพิจารณาปูนเม็ดที่ได้จากการผสมปูนเม็ดที่มีแคลเซียมและสังกะสีผสมอยู่ทั้งสองอัตราส่วนพบว่ามีความแตกต่างของโครงสร้างหลักเช่นเดียวกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและความสูงของพีคที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง ไม่สามารถแสดงความแตกต่างระหว่างปูนเม็ดที่มีแคลเซียมผสมกับสังกะสี และปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักได้



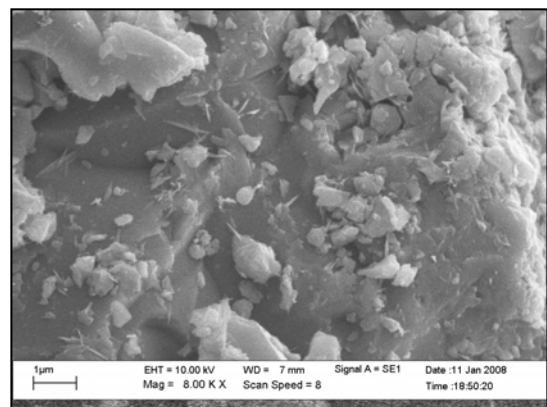
(ก) ปูนเม็ดยี่ที่มีแคดเมียมเริ่มต้น 2% โดยน้ำหนัก



(ข) ปูนเม็ดยี่ที่มีแคดเมียม : สังกะสี = 0.5 : 1.5

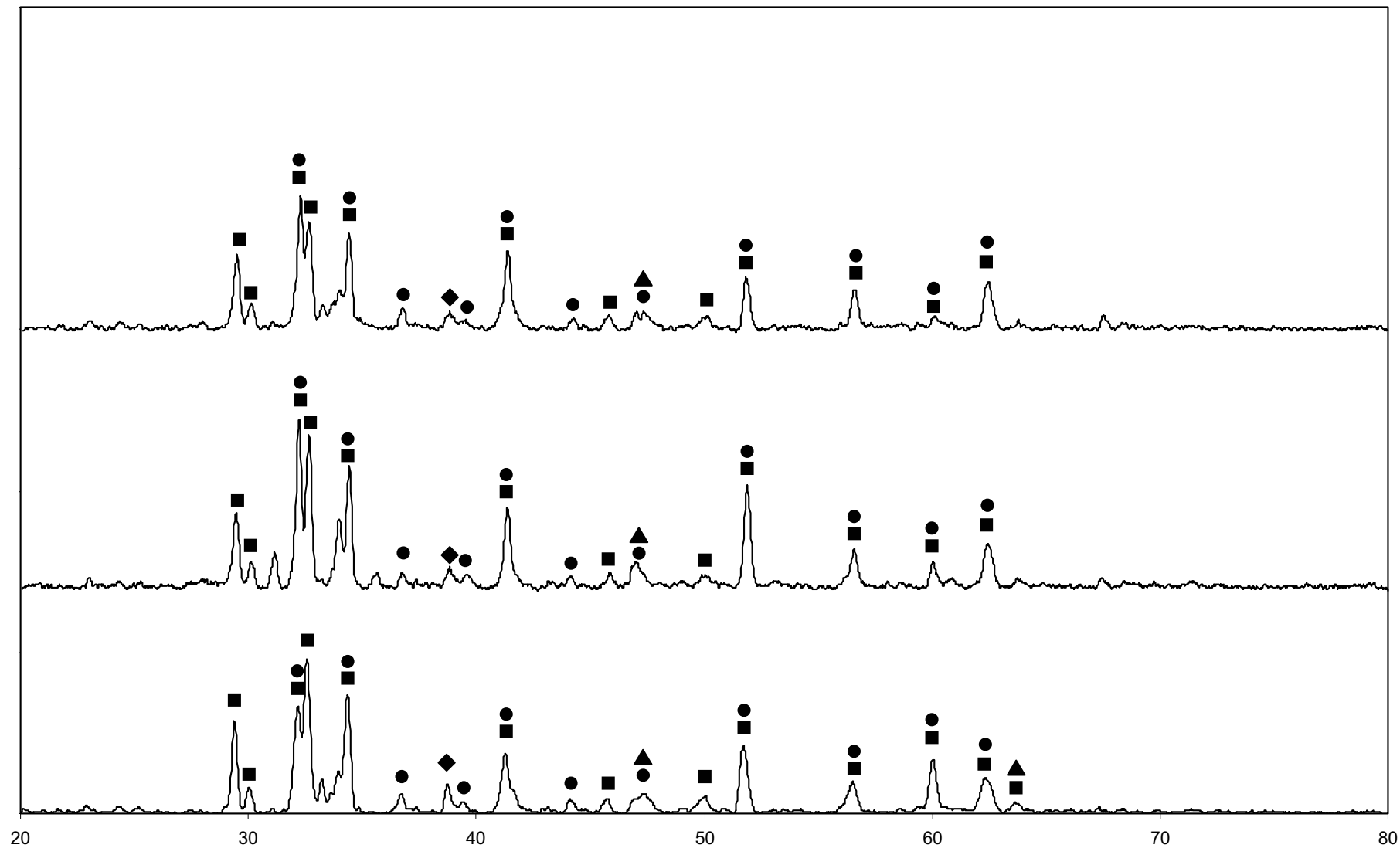


(ค) ปูนเม็ดยี่ที่มีแคดเมียม : สังกะสี = 1.0 : 1.0



(ง) ปูนเม็ดยี่ที่มีแคดเมียม : สังกะสี = 1.5 : 0.5

รูปที่ 4.30 แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดยี่จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องSEMเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดยี่ที่มีโครเมียมผสมเพียงชนิดเดียวกับปูนเม็ดยี่ที่มีโครเมียมผสมกับสังกะสี

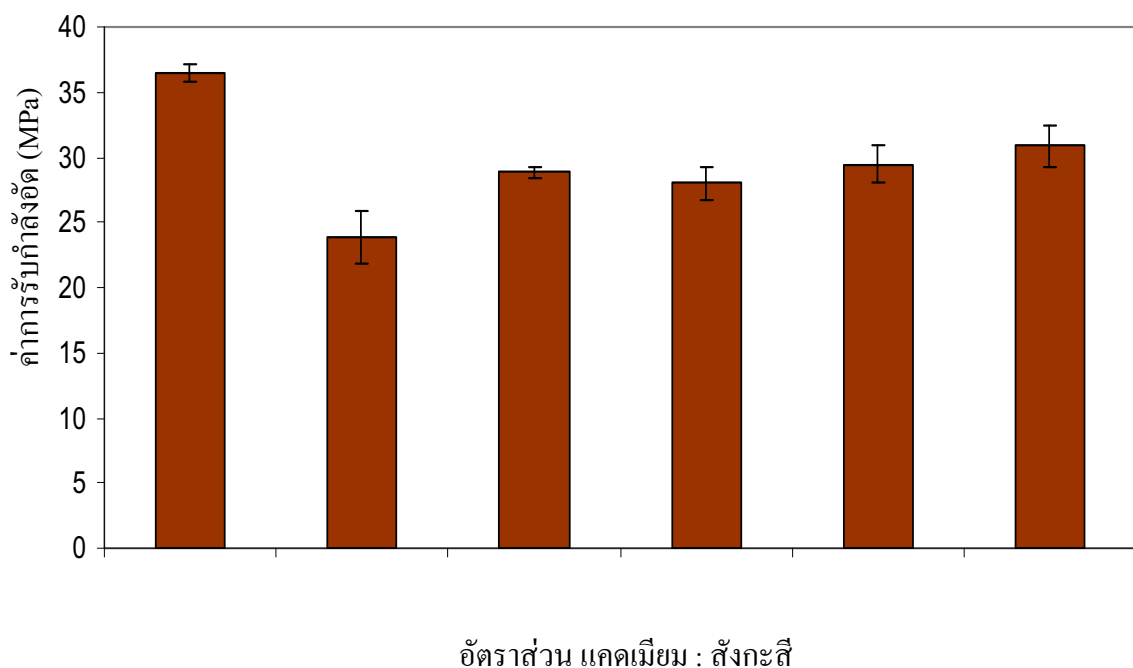


รูปที่ 4.31 โครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และ ปูนเม็ดที่มีแคดเมียมและสังกะสีผสม จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

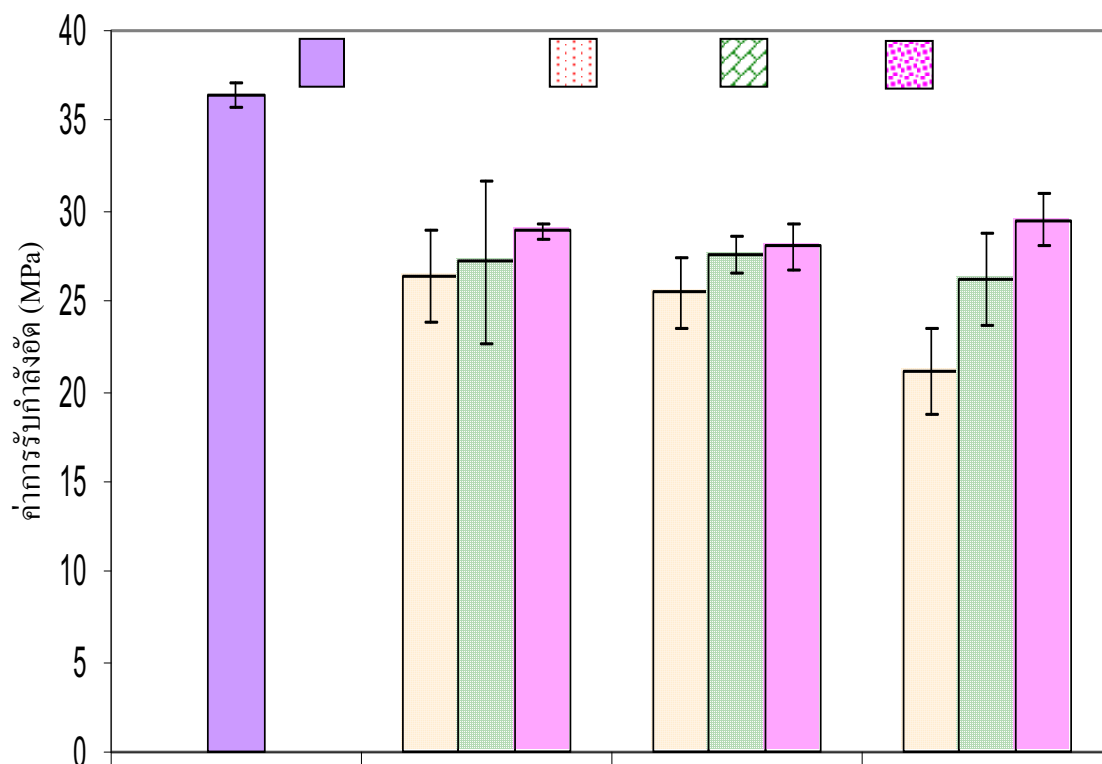
ผลของโลหะหนักแคดเมียมและสังกะสีที่มี ต่อค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์

เมื่อพิจารณาค่าการรับกำลังอัดเปรียบเทียบระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนัก กับมอร์ตาร์ที่มีแคดเมียมผสมกับสังกะสีดังแสดงในรูปที่ 4.32 พบว่ามอร์ตาร์ที่มีการผสมระหว่างแคดเมียมและสังกะสีในอัตราส่วน 0.5:1.5, 1.0:1.0 และ 1.5:0.5 ตามลำดับมีค่าการรับกำลังอัด 28.87, 28.04 และ 29.48 โดยค่าการรับกำลังอัดของซีเมนต์ที่มีโลหะหนักผสมทั้งสามอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกับค่าการรับกำลังอัดในกรณีที่มีมอร์ตาร์มีแคดเมียมปนเปื้อนเพียงชนิดเดียวและมีแนวโน้มต่ำกว่าซีเมนต์ที่ไม่มีโลหะหนัก $20.96\% \pm 1.984$

เมื่อเปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดระหว่างปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก กับปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสมสองชนิดดังแสดงในรูปที่ 4.33 พบว่าปูนเม็ดที่มีการผสมระหว่างโครเมียมและแคดเมียม ส่งผลกระทบบต่อค่าการรับกำลังอัดมากที่สุดโดยค่าการรับกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนความเข้มข้นของโครเมียมเพิ่มขึ้น รองลงมาคือ โครเมียมผสมกับสังกะสี และแคดเมียมผสมกับสังกะสีตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าโครเมียมเป็น โลหะหนักที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติการรับกำลังอัดของซีเมนต์มากที่สุด



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนักและมอร์ตาร์ที่มีแคดเมียมและสังกะสีในแง่กับค่าการรับกำลังอัด

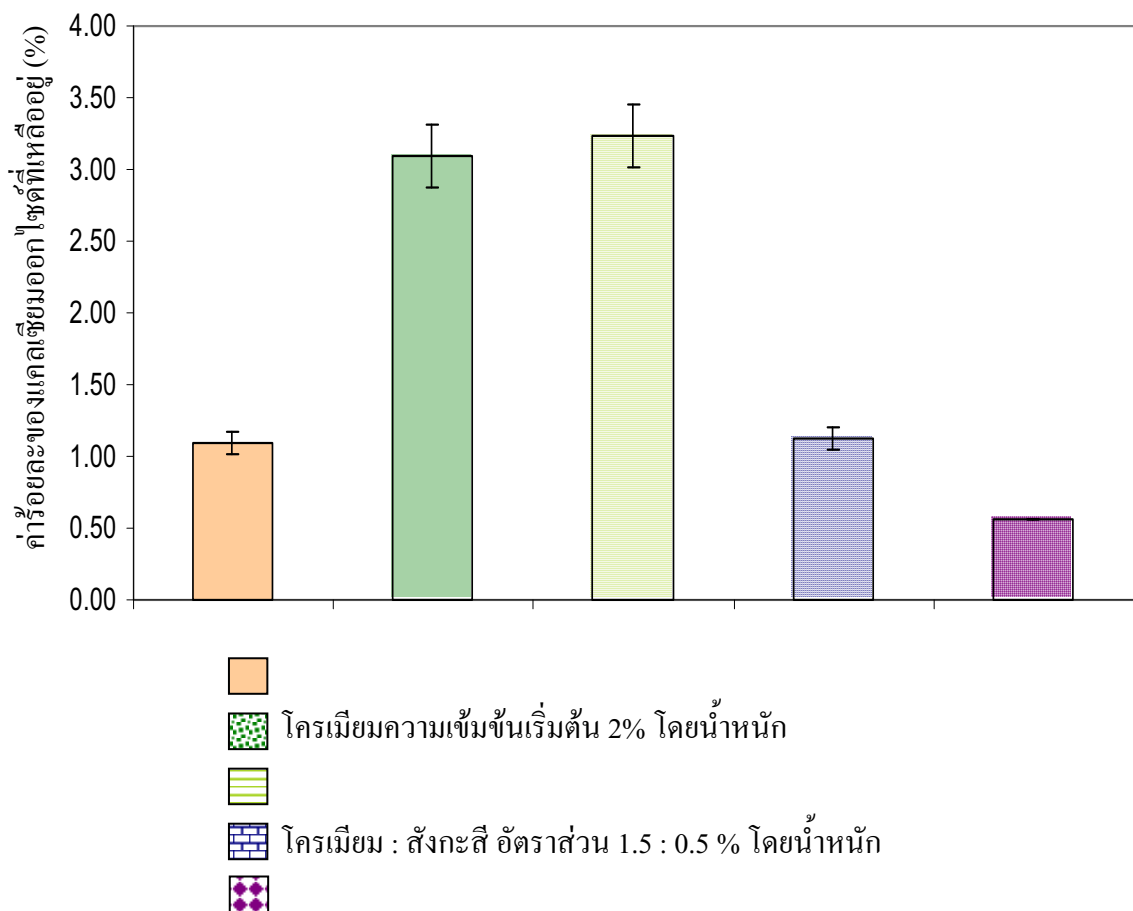


รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนักและมอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักสองชนิดปนเปื้อนกับค่าการรับกำลังอัด

4.2.3 ปูนเม็ดที่มีโลหะหนักปนเปื้อนหลายชนิด

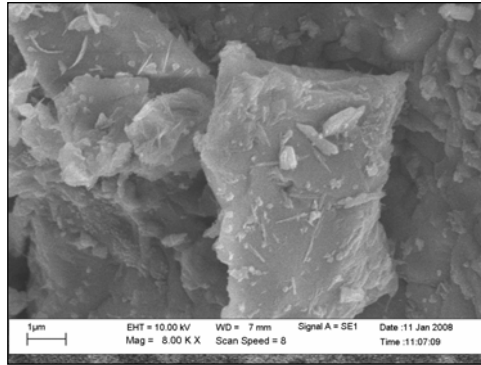
4.2.3.1 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของปูนเม็ดเมื่อไม่มีโลหะหนัก มีโลหะหนักชนิดเดียว มีโลหะหนักสองชนิด และมีโลหะหนักหลายชนิดปนเปื้อน

ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่มีโครเมียมเป็นสารปนเปื้อนหลักดังแสดงในรูปที่ 4.34 พบว่าเมื่อปูนเม็ดมีโครเมียมผสมเพียงชนิดเดียว ปูนเม็ดมีโครเมียมผสมกับแคดเมียมและปูนเม็ดมีโครเมียมผสมกับสังกะสี ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่มีค่า 3.091, 3.203 และ 1.118 ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่าสูงกว่าปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างที่พบว่าเฟสของไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกตลดลง แต่ในขณะเดียวกันกลับพบว่าปูนเม็ดที่มีโครเมียมผสมกับแคดเมียมและสังกะสี ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ลดลงมากกว่าปูนเม็ดอื่นๆ เนื่องจากโครเมียมเข้าไปขัดขวางการเปลี่ยนแคลเซียมออกไซด์ไปอยู่ในรูปของเฟสดังกล่าว และจากการพิจารณาค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักปนเปื้อนแสดงให้เห็นว่าโครเมียมมีแนวโน้มส่งผลต่อค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่มากที่สุด

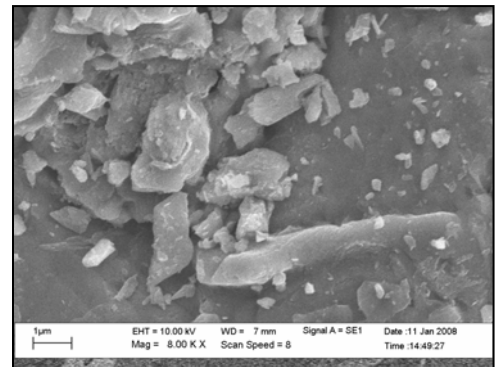
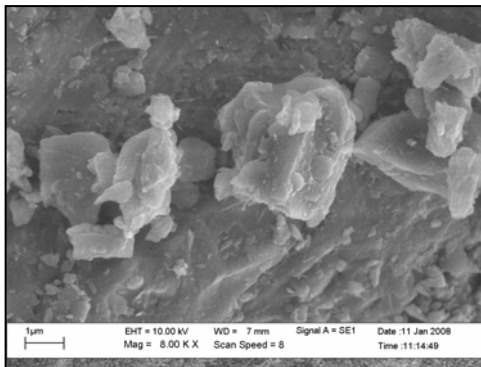


รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบค่าร้อยละของเซลล์เสื่อมออกไซด์ที่หลุดออกของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักกับปูนเม็ดที่มีโลหะหนักชนิดเดียว ปูนเม็ดที่มีโลหะหนักสองชนิดและปูนเม็ดที่มีโลหะหนักหลายชนิด

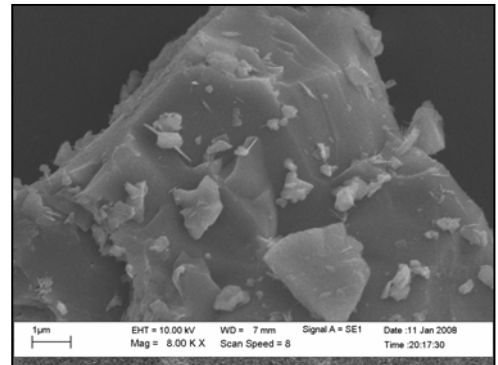
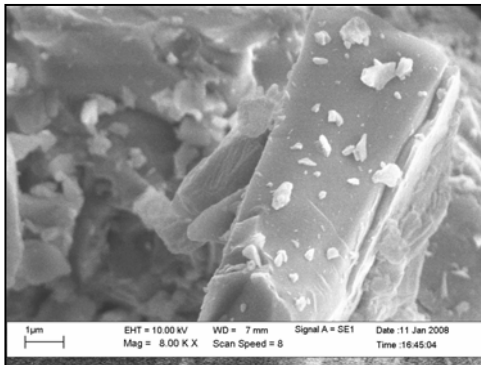
การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก กับปูนเม็ดที่มีโลหะหนักชนิดเดียว ปูนเม็ดที่มีโลหะหนักสองชนิด และปูนเม็ดที่มีโลหะหนักหลายชนิดปนเปื้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.35 พบว่าลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่มีโครเมียมปนเปื้อนเพียงชนิดเดียว ปูนเม็ดที่มีโครเมียมและแคดเมียม ปูนเม็ดที่มีแคดเมียมและสังกะสี และปูนเม็ดที่มีโครเมียม แคดเมียม และสังกะสีมีลักษณะใกล้เคียงกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวไม่สามารถแสดงความแตกต่างระหว่างปูนเม็ดที่มีโครเมียมเป็นสารปนเปื้อนหลักและปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักได้



(ก) ปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก



(ก) ปูนเม็ดที่มีโครเมียมเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (ข) ปูนเม็ดที่มีโครเมียม : แคดเมียม = 1.5 : 0.5



(ค) ปูนเม็ดที่มีโครเมียม : สังกะสี = 1.5 : 0.5

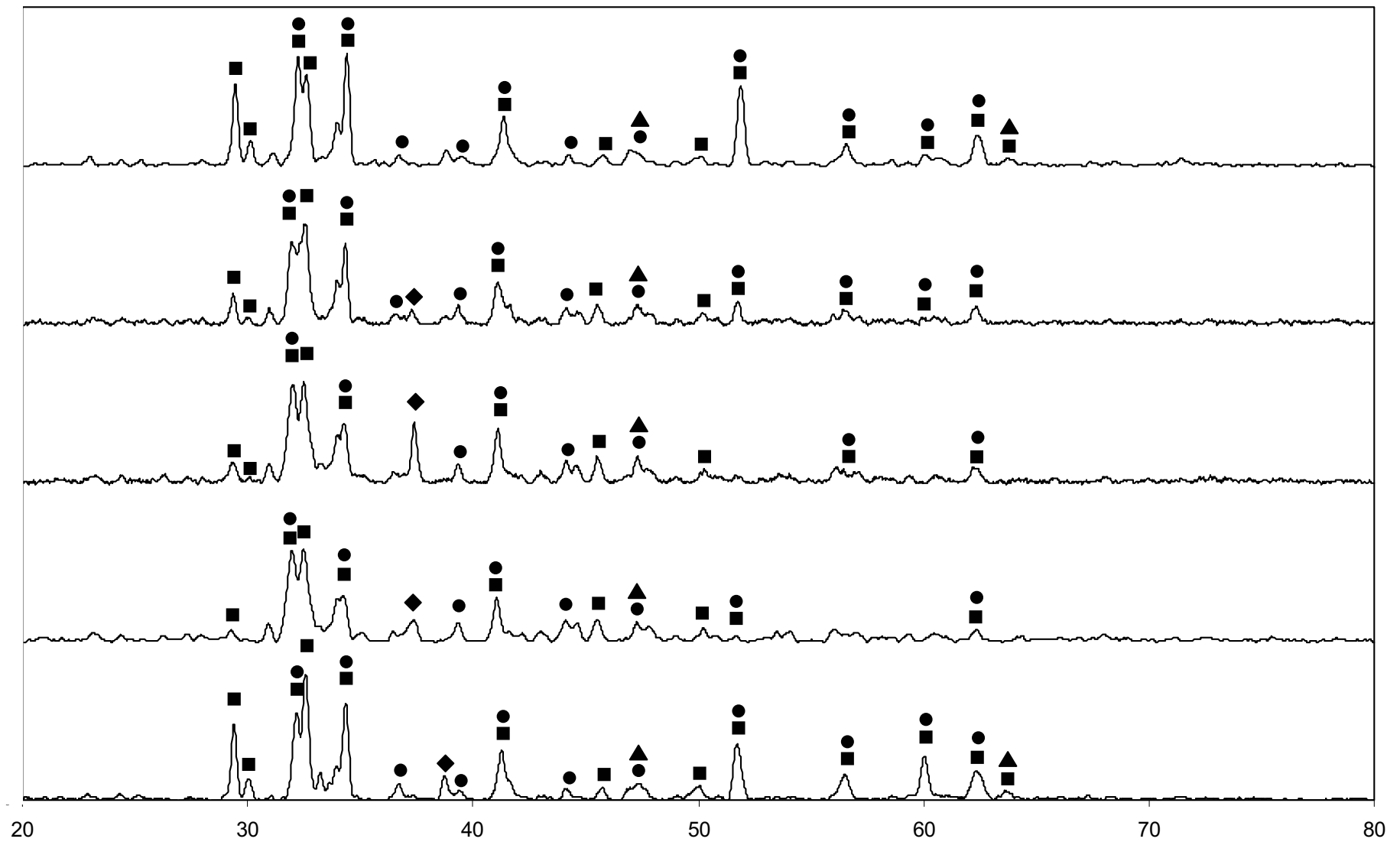
(ง) ปูนเม็ดที่มีโครเมียมต่อแคดเมียมต่อสังกะสี
อัตราส่วน 1.0 : 0.5 : 0.5

รูปที่ 4.35 แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องSEMเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก ปูนเม็ดที่มีโลหะหนักชนิดเดียว สองชนิด และหลายชนิดปนเปื้อน

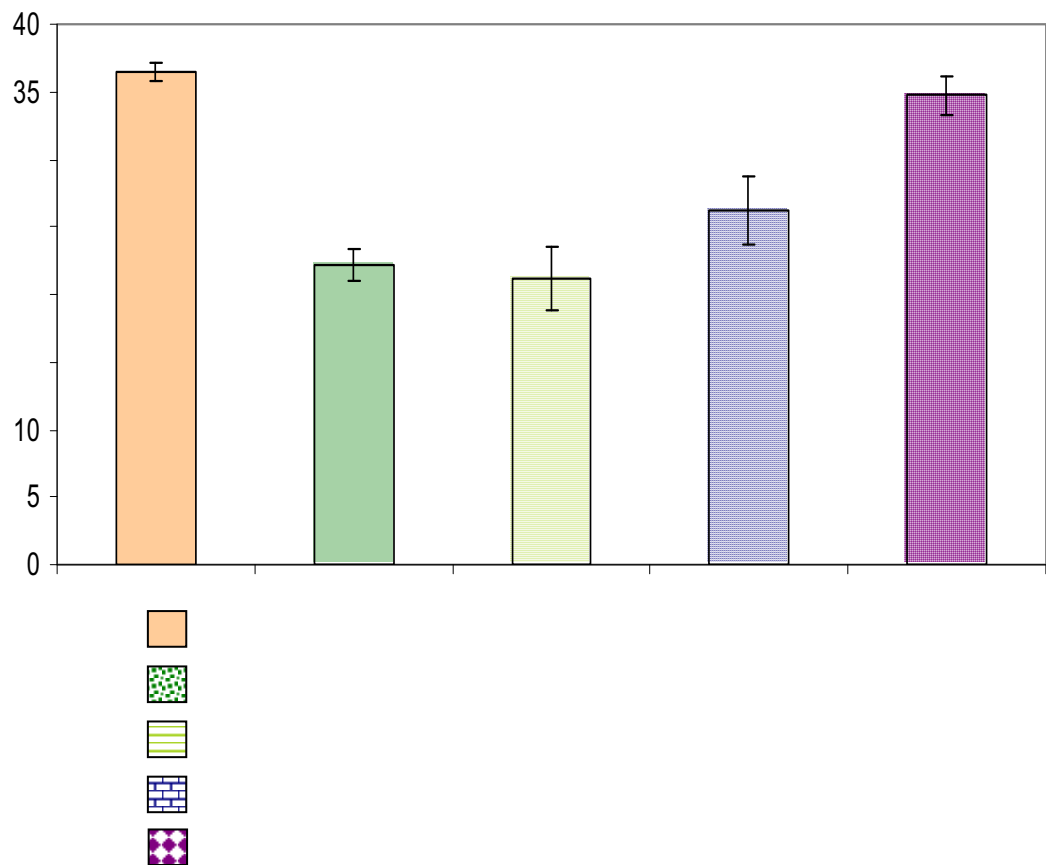
การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก กับปูนเม็ดที่มีโลหะหนักชนิดเดียว ปูนเม็ดที่มีโลหะหนักสองชนิด และปูนเม็ดที่มีโลหะหนักหลายชนิดดังแสดงในรูปที่ 4.36 พบว่าปูนเม็ดที่มีโลหะหนักหลายชนิดเมื่อเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักพบว่ามีความใกล้เคียงกัน จากนั้นเมื่อเปรียบเทียบปูนเม็ดที่มีโลหะหนักหลายชนิดกับปูนเม็ดที่มีโครเมียมเพียงชนิดเดียวพบว่าฟลักของเฟสไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกตเพิ่มขึ้น ส่วนการเปรียบเทียบปูนเม็ดที่มีโลหะหนักหลายชนิดกับปูนเม็ดที่มีโลหะหนักสองชนิดปนเปื้อนพบว่าฟลักของเฟส

ผลของโลหะหนักชนิดเดียว สองชนิด และหลายชนิดที่มี ค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์

การเปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนัก กับมอร์ตาร์ที่มีโลหะหนัก ชนิดเดียวมอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักสองชนิด และมอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักหลายชนิดดังแสดงในรูปที่ 4.37 พบว่าค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีโครเมียมความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โครเมียม ผสมกับแคดเมียมในอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 1.5:0.5 โดยน้ำหนัก โครเมียมผสมกับ สังกะสีในอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 1.5:0.5 โดยน้ำหนัก และมอร์ตาร์ที่มีการผสมระหว่าง โครเมียม แคดเมียม และสังกะสีในอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 1.0:0.5:0.5 โดยน้ำหนักมีค่า 22.19, 21.16, 26.6 และ 34.72 MPa ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักปนเปื้อนหลาย ชนิดส่งผลให้ค่าการรับกำลังลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนักปนเปื้อน และค่าการ รับกำลังอัดมีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักปนเปื้อนเพียงชนิดเดียว หรือสองชนิด



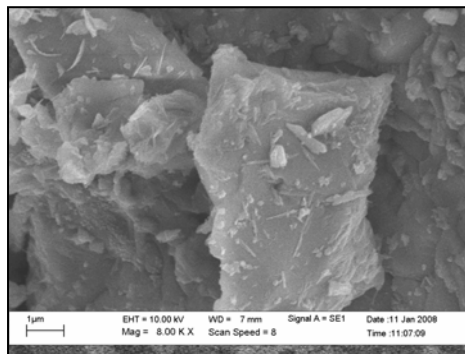
รูปที่ 4.36 โครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสมชนิดเดียว สองชนิด และหลายชนิด จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD



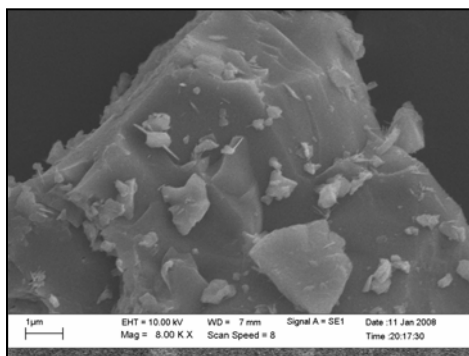
รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนัก กับมอร์ตาร์ที่มีโลหะหนัก ชนิดเดี่ยว สองชนิด และหลายชนิด

4.2.3.2 ลักษณะสมบัติของปูนเม็ดเมื่อมีโลหะหนักหลายชนิดปนเปื้อน

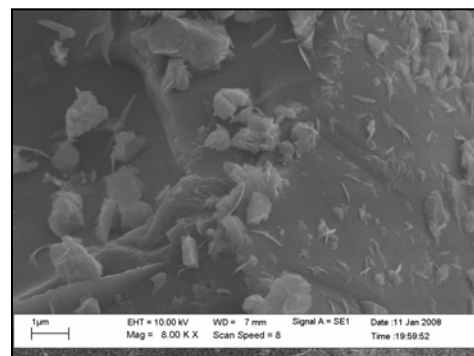
การศึกษาลักษณะทางพื้นผิวแสดงดังรูปที่ 4.38 โดยทำการเปรียบเทียบปูนเม็ดที่มีโครเมียม ต่อแคลเซียมต่อสังกะสีผสมอยู่ในอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 1.0:0.5:0.5, 0.5:1.0:0.5, 0.5:0.5:1.0 และ 0.667:0.667:0.667 โดยน้ำหนักตามลำดับกับมีปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักพบว่าลักษณะพื้นผิวทางกายภาพแตกต่างกัน โดยพบว่ามีเฟสใหม่ลักษณะเป็นเส้นเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของแคลเซียมในส่วนผสมเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมเป็นโลหะหนักที่ส่งผลกระทบต่อลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดมากที่สุด



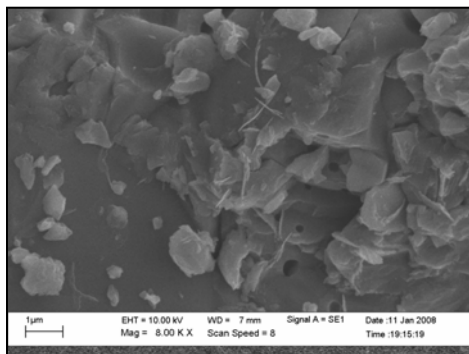
(ก) ปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก



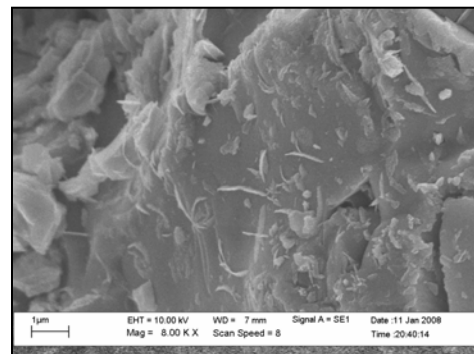
(ข) ปูนเม็ดที่มีโครเมียมต่อแคลเซียมต่อสังกะสี
อัตราส่วน 1.0 : 0.5 : 0.5



(ค) ปูนเม็ดที่มีโครเมียมต่อแคลเซียมต่อสังกะสี
อัตราส่วน 0.5 : 1.0 : 0.5



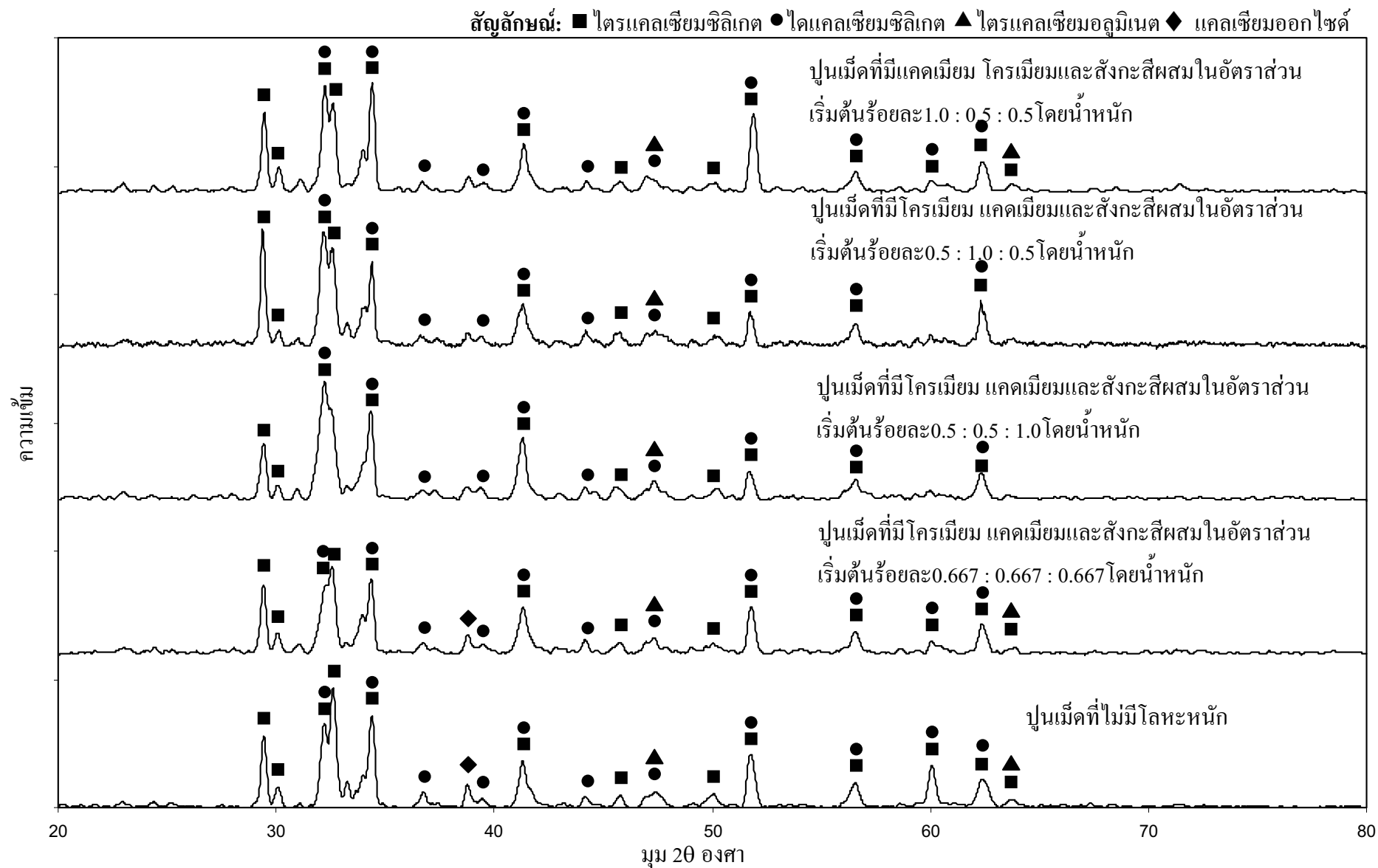
(ง) ปูนเม็ดที่มีโครเมียมต่อแคลเซียมต่อสังกะสี
อัตราส่วน 0.5 : 0.5 : 1.0



(จ) ปูนเม็ดที่มีโครเมียมต่อแคลเซียมต่อสังกะสี
อัตราส่วน 0.667 : 0.667 : 0.667

รูปที่ 4.38 แสดงพื้นผิวของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องSEMเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักกับปูนเม็ดที่มีโลหะหนักหลายชนิดปนเปื้อน

จากผลการศึกษาลักษณะโครงสร้าง ดังรูปที่ 4.39 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และปูนเม็ดที่มีโครเมียม แคดเมียมและสังกะสีในอัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 1.0:0.5:0.5, 0.5:1.0:0.5, 0.5:0.5:1.0 และ 0.667:0.667:0.667 โดยน้ำหนักตามลำดับ พบว่าโครงสร้างของปูนเม็ดที่ได้จากการผสมโครเมียม แคดเมียม และสังกะสีทั้งสี่อัตราส่วนมีตำแหน่งของโครงสร้างหลักของปูนเม็ดปรากฏในตำแหน่งเดียวกันกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก ในส่วนความสูงของพีคโครงสร้างหลักที่พิจารณาได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต และ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ซึ่งแสดงโดยความเข้มของกราฟ XRD พบว่าความสูงของพีคที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการผสมโลหะหนักทั้งสามชนิดเข้าด้วยกันไม่สามารถวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของลักษณะโครงสร้างได้



รูปที่ 4.39 โครงสร้างของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และ ปูนเม็ดที่มีโครเมียม แคลเซียมและสังกะสีผสม จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

4.3 การทำนายค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์เมื่อมีโลหะหนักหลายชนิดปนเปื้อน

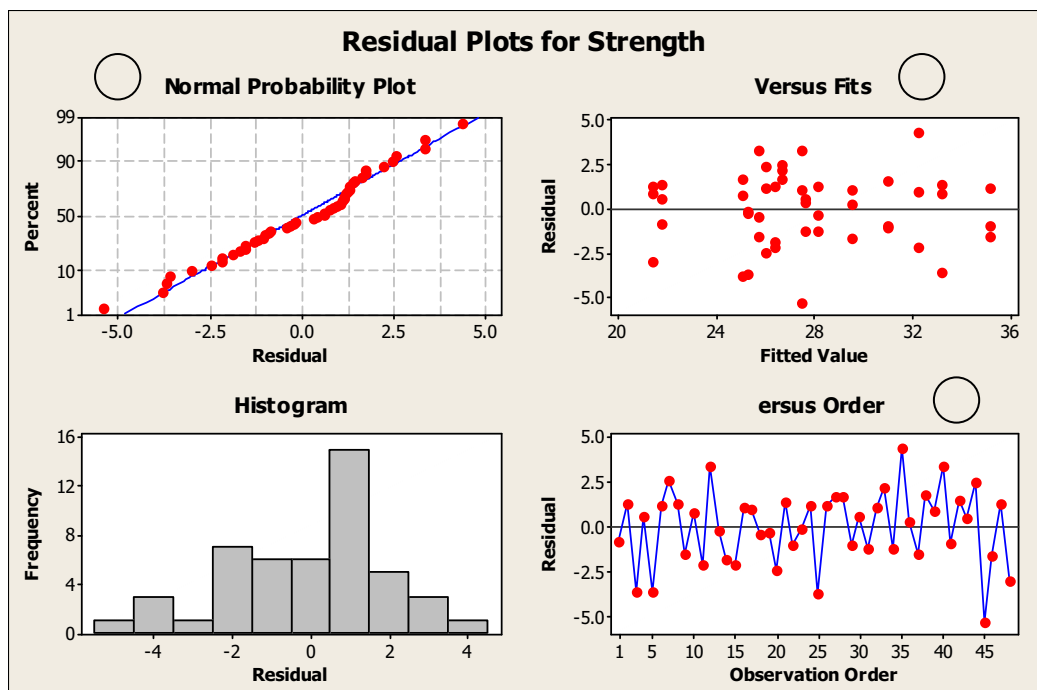
การวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองในส่วนของการรับกำลังอัดที่ได้จากปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสมสามชนิด ในการทดลองนี้ ใช้โปรแกรมมินิแทบ 15 เป็นเครื่องมือช่วยในการตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองแบบผสมเพื่อสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 โดยขั้นตอนการใช้โปรแกรมมินิแทบ 15 ในการวิเคราะห์ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ทำได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking)

การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.40 โดยทำการพิจารณาดังนี้

1. พิจารณาจากแผนภูมิ I (Individual หรือ X-MR) ซึ่งแสดงภาวะสุ่มของข้อมูลพบว่าข้อมูลเป็นแบบสุ่มอยู่ภายใต้พิกัดควบคุมและเป็นอิสระต่อกัน
2. พิจารณาจาก Normal plot พบว่า Normal plot แสดงเส้นตรง 1 เส้น ดังนั้นจึงอนุมานได้ว่าข้อมูลค่าการรับกำลังอัดที่ได้จากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ
3. พิจารณาความแปรปรวนของข้อมูลรอบจุดศูนย์พบว่าการกระจายของข้อมูลอย่างสม่ำเสมอ

จากการพิจารณาความถูกต้องของตัวแบบพบว่ากระบวนการทดลองอยู่ภายใต้การควบคุมและความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเกิดจากสาเหตุธรรมชาติ เช่น ขั้นตอนในการผสม การกด เป็นต้น



ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาผลการวิเคราะห์ห้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

จากการวิเคราะห์ด้วยแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าแบบทางคณิตศาสตร์มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ $R^2 = 76.63\%$ แสดงว่าแบบทางคณิตศาสตร์มีผลมาจากการกำหนดค่าปัจจัยของส่วนผสมอยู่ที่ 76.63% และมีผลจากความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 23.37%

ขั้นตอนที่ 3 พิจารณาความแปรปรวนของข้อมูล (ANOVA)

ในขั้นตอนนี้จะพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 4.2 โดยทำการพิจารณาค่า P-value ซึ่งถ้า P-value ที่ได้ต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าพจน์นั้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งค่าจากตารางสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ค่า P-value ของสมการถดถอย (Regression) น้อยกว่า 0.05 และองค์ประกอบของสมการถดถอยอื่น ได้แก่ สมการเส้นตรง สมการกำลังสอง และสมการกำลังสี่ แสดงค่า P-value น้อยกว่า 0.05 เช่นกัน แสดงว่ารูปแบบของสมการที่สามารถนำมาใช้ในการทำนายค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ เมื่อมีโลหะหนักทั้งสามชนิดปนเปื้อนได้จะประกอบด้วยเทอมทั้งสามรูปแบบ
2. พิจารณาความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมาจากความแตกต่างของข้อมูลการทดลองและความคลาดเคลื่อนจากความไม่สมบูรณ์ของสมการกับข้อมูล โดยพบว่าความคลาดเคลื่อนจากความไม่สมบูรณ์นั้นมีค่า P-value เท่ากับ 0.693 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวส่งผลต่อสมการที่นำมาใช้คาดการณ์การรับกำลังอัดอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ANOVA)

Source	Degree of Freedom	Sequential sums of squares (Seq.SS)	Adjusted sums of squares (Adj.SS)	Adjusted mean square (Adj.MS)	F	P
Regression	7	652.34	652.34	93.192	18.74	0.000
Linear	2	109.21	200.70	100.350	20.18	0.000
Quadratic	1	195.06	53.45	53.452	10.75	0.002
Special Quart	3	319.42	312.33	104.110	20.94	0.000
Full Quartic	1	28.65	28.65	28.649	5.76	0.021
Residual Error	40	198.91	198.91	4.973		
Lack-of-Fit	8	29.44	29.44	3.680	0.69	0.693
Pure Error	32	169.47	169.47	5.296		
Total	47	851.25				

$R^2 = 76.63\%$, $R^2_{adj} = 72.54\%$

ขั้นตอนที่ 4 พิจารณาค่าคงที่และตัวแปรในแต่ละเทอมของสมการ

ค่าคงที่และตัวแปรในแต่ละเทอมแสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าค่าคงที่และตัวแปรแต่ละเทอมนั้นมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรในเทอมนั้นส่งผลต่อค่าการรับกำลังอัดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ค่าคงที่และตัวแปรแต่ละเทอม

Term	Coefficient (Coef)	P
Cr	10.9051	*
Cd	15.4967	*
Zn	12.6345	*
Cr*Zn	4.06454	0.002
Cr*Cr*Cd*Zn	46.4033	0.000
Cr*Cd*Cd*Zn	-44.3671	0.000
Cr*Cd*Zn*Zn	20.3212	0.025
Cr*Cd*(Cr - Cd) ²	-3.59111	0.021

ซึ่งสมการที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นดังนี้

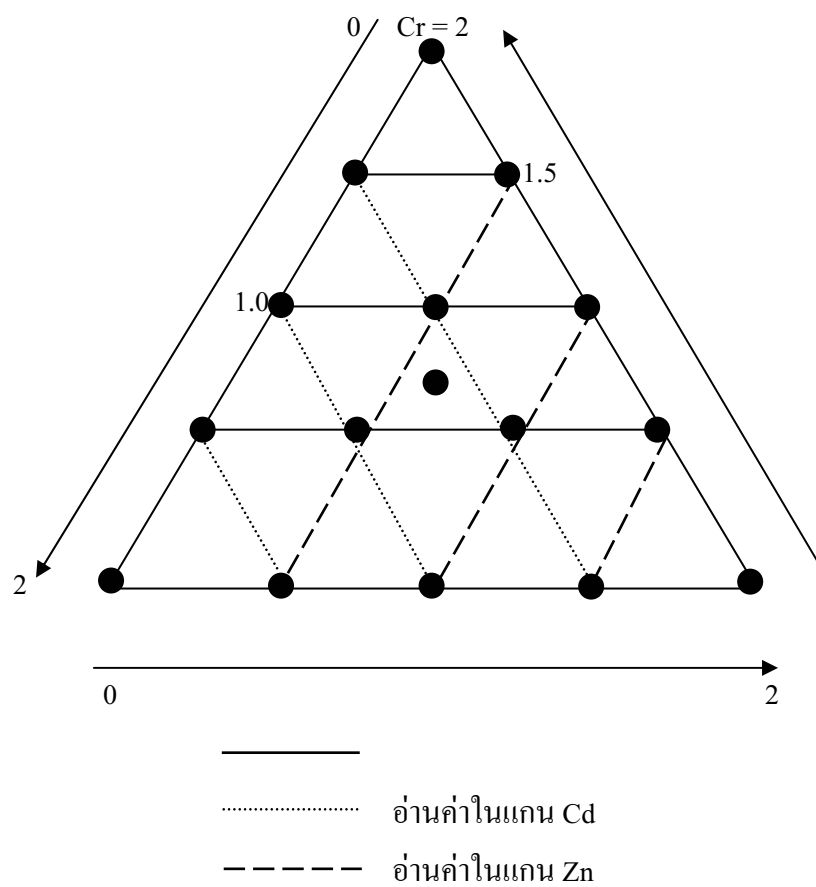
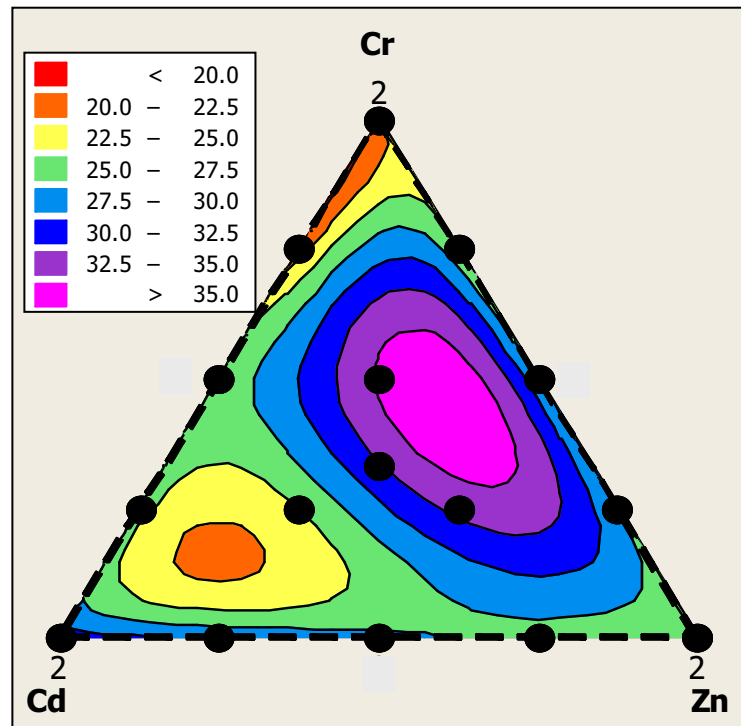
$$Y = 10.905Cr + 15.497Cd + 12.634Zn + 4.064CrZn + 46.403Cr^2CdZn - 44.367CrCd^2Zn + 20.321CrCdZn^2 - 3.591 CrCd(Cr-Cd)^2$$

โดยที่ Y = ค่าการรับกำลังอัด MPa

สมการนี้สามารถใช้ได้ภายใต้สภาวะ $0 \leq X_i \leq 2$; โดย $\sum X_i = 2$

ขั้นตอนที่ 5 การพิจารณากราฟความสัมพันธ์ในรูปคอนทัวร์พล็อต (Contour Plot)

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง โครเมียม แคลเซียมและสังกะสีกับค่าการรับกำลังอัดในรูปคอนทัวร์พล็อตแบบ 2 มิติแสดงในรูปที่ 4.41 พบว่าได้มีการแบ่งพื้นที่แสดงค่าการรับกำลังอัดครอบคลุมค่าการรับกำลังอัด 8 ช่วงดังนี้ น้อยกว่า 20, 20-22.5, 22.5-25, 25-27.5, 27.5-30, 30-32.5, 32.5-35 และมากกว่า 35 MPa โดยวิธีการอ่านค่าในกราฟแสดงดังรูปที่ 4.42 ซึ่งพบว่าตำแหน่งที่ค่ากำลังอัดมีค่าสูงสุดอยู่ประมาณช่วงที่ค่าร้อยละของโครเมียมเป็น 0.90 ค่าร้อยละของแคลเซียม 0.40 และค่าร้อยละของสังกะสี 0.70 ตามลำดับ และตำแหน่งที่ค่าการรับกำลังอัดต่ำสุดอยู่ประมาณช่วงที่ค่าร้อยละของโครเมียมเป็น 0.30 ค่าร้อยละของแคลเซียม 1.35 และค่าร้อยละของสังกะสี 0.35 ตามลำดับ



4.4 ตรวจสอบสมการ

ผลการทดลองสำหรับการผสมระหว่างโลหะหนักสองชนิด และหลายชนิดซึ่งสุ่มตรวจสอบจากความเข้มข้นต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าค่าการรับกำลังอัดที่ได้จากการทดลอง และค่าการรับกำลังอัดที่ได้จากสมการมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าไม่เกิน $\pm 3.7\text{MPa}$ แสดงให้เห็นว่าสมการที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาใช้ในการทำนายผลการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ได้ภายใต้ขอบเขตของงานวิจัยที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดลอง และจากการใช้สมการทำนายที่ความเข้มข้นของโลหะหนักแตกต่างกัน

ลำดับที่	อัตราส่วนความเข้มข้นของโลหะหนัก			ค่าการรับกำลังอัด (Mpa)		ความคลาดเคลื่อน
	Cr	Cd	Zn	ค่าจากการทดลอง	ค่าจากสมการ	
1	1.600	0.400	0.000	23.986	20.337	± 3.649
2	0.400	0.000	1.600	30.720	27.177	± 3.543
3	0.000	1.600	0.400	29.680	29.849	± 0.169
4	1.333	0.333	0.333	31.368	32.073	± 0.705

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลของโลหะหนักที่มีต่อคุณสมบัติของปูนเม็ด

1. การวิเคราะห์ร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่มีโลหะหนัก โครเมียม แคลเมียม และสังกะสี อย่างใดอย่างหนึ่ง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก พบว่าโครเมียม ส่งผลกระทบบต่อค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ มากที่สุดด้วยการขัดขวางการเปลี่ยนรูปของแคลเซียมออกไซด์ไปเป็นไตรแคลเซียมซิลิเกตหรือไดแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างที่พบว่าเฟสของไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกตลดลง

2. ผลการทดสอบร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่มีโครเมียมและแคลเมียมผสมที่อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.5:1.5 1.0:1.0 และ 1.5:0.5 โดยน้ำหนัก มีค่า 1.806 2.380 และ 3.234 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการผสมกันระหว่างโครเมียมและแคลเมียมส่งผลกระทบบต่อค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่โดยสังเกตได้ว่ายังอัตราส่วนของโครเมียมเพิ่มขึ้นแนวโน้มค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างที่พบว่าเฟสของไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกตลดลง

3. ผลการทดสอบร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่มีโครเมียมและสังกะสีผสมที่อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.5:1.5 1.0:1.0 และ 1.5:0.5 โดยน้ำหนัก มีค่า 0.196 0.392 และ 1.120 ตามลำดับและสังเกตได้ว่ายังอัตราส่วนของโครเมียมเพิ่มขึ้นแนวโน้มค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

4. ผลการทดสอบร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่มีแคลเมียมและสังกะสีผสมที่อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.5:1.5 1.0:1.0 และ 1.5:0.5 โดยน้ำหนัก มีค่า 0.210 0.266 และ 0.686 ตามลำดับ

5. ผลการทดสอบร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่มีโครเมียม แคลเมียม และสังกะสีผสมที่อัตราส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 1.0:0.5:0.5 0.5:1.0:0.5 0.5:0.5:1.0 และ 0.667:0.667:0.667 โดยน้ำหนัก มีค่า 0.56 0.77 0.332 และ 0.392 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการผสมกันระหว่างโครเมียม แคลเมียมและสังกะสี ส่งผลกระทบบต่อค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่

5.1.2 ผลของโลหะหนักที่มีต่อค่าการรับกำลังอัด

1. การวิเคราะห์ลักษณะของมอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักเพียงชนิดเดียวปนเปื้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก พบว่าโลหะหนักแต่ละชนิดส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติในการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ โดยมอร์ตาร์ที่มีโครเมียม มอร์ตาร์ที่มีสังกะสี และมอร์ตาร์ที่มีแคดเมียมส่งผลให้ค่าการรับกำลังอัดลดลง 39.09%, 34.34% และ 15.32% ตามลำดับ ซึ่งมอร์ตาร์ที่มีโครเมียมปนเปื้อนนั่นส่งผลให้ค่าการรับกำลังอัดลดลงมากที่สุด

2. การวิเคราะห์ค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักสองชนิดเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนัก พบว่ามอร์ตาร์ที่มีโครเมียมผสมกับแคดเมียม, โครเมียมผสมกับสังกะสี และแคดเมียมผสมกับสังกะสีส่งผลกระทบต่อค่าการรับกำลังอัดลดลง $33.17\% \pm 7.680$, $26\% \pm 1.873$ และ $20.96\% \pm 1.984$ ตามลำดับ

3. สมการที่ได้จากการทดลองนี้และสามารถนำไปใช้ทำนายผลของค่าการรับกำลังอัดเมื่อมีโลหะหนักทั้งสามชนิดปนเปื้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นไม่เกินร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ได้แก่

$$Y = 10.905Cr + 15.497Cd + 12.634Zn + 4.064CrZn + 46.403Cr^2CdZn - 44.367CrCd^2Zn + 20.321CrCdZn^2 - 3.591 CrCd(Cr-Cd)^2$$

โดยที่ Y = ค่าการรับกำลังอัด (MPa)

สมการนี้สามารถใช้ได้ภายใต้สภาวะ $0 \leq X_i \leq 2$; โดย $\sum X_i = 2$

5.1.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อค่าการรับกำลังอัดโดยเฉพาะขั้นตอนในการผสมเพื่อหล่อ ก่อน และขั้นตอนในการกด

2. ควรมีการศึกษาเชิงลึกถึงสาเหตุและกลไกความสัมพันธ์ที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติการรับกำลังอัดเมื่อมีการปนเปื้อนของโลหะหนักทั้งสามชนิด

เอกสารอ้างอิง

- [1] พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล และเอกชัย ทวีกิจวานิช, รายงานฉบับสมบูรณ์ เรื่อง “การศึกษาการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์ที่ใช้กากของเสียอุตสาหกรรมในกระบวนการผลิต” เสนอต่อ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จก.(มหาชน), 2548
- [2] พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล และสุรชาติพิย์ สิ้นยัง, รายงานฉบับสมบูรณ์ เรื่อง “ผลของวานาเดียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการวิเคราะห์การชะล้าง” เสนอต่อ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จก.(มหาชน), 2549
- [3] พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล และสุรชาติพิย์ สิ้นยัง, รายงานฉบับสมบูรณ์ เรื่อง “ผลของแคดเมียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการวิเคราะห์การชะล้าง” เสนอต่อ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จก.(มหาชน), 2550
- [4] Ottoboni, P.A., Souza, D.I., Menon, J.G. and Silva, J.R., 1998, “Efficiency of destruction of waste used in the co-incineration in the rotary kilns”, **Energy Conversion and Management**, Vol. 39, No. 16-18, pp. 1899-1909.
- [5] กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2538, “การกำจัดของเสียโดยการเผาไหม้ในหม้อเผาปูนซีเมนต์ในประเทศไทย”, บริษัทปูนซีเมนต์ไทย (แ่งคอย) จำกัด หน้า 1-8.
- [6] Taylor, H.F.W., 1990, **Cement Chemistry**, New York, Academic Press, pp. 65,66,69.
- [7] Mokrzycki, E. and Bochenczyk, U.A., 2003, “Alternative fuels for the cement industry”, **Applied Energy**, Vol. 74, No. 1-2, pp. 95-100.
- [8] ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2537 “คอนกรีตเทคโนโลยี [Concrete Technology]”, คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค, บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด หน้า 10-12.
- [9] ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 1, สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ หน้า 16-17 และ 46-52.

- [10] เจตพล เอมมณี, 2547, **การจัดการกากอุตสาหกรรม: การจัดการประเภทกากอุตสาหกรรมในมุมมองการเผากำจัดในอุตสาหกรรมซีเมนต์**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หน้า 10.
- [11] เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2546, **ของเสียอันตราย**, ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, หน้า 65 - 67 และ 109 - 110.
- [12] วิชัย มาชูตระกูล, 2538, **การหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียม โดยใช้ปูนซีเมนต์และซีเมนต์แกลบ**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 93.
- [13] Jacobs, J.H., 1992, "Treatment and Stabilization of a Hexavalent Chromium Containing Waste Material", **Environmental Progress**, Vol. 11, No. 2, pp. 123 - 126.
- [14] ณรงค์ อัครพัฒนากุล และ ภักดี ทองเจริญ, 2532, **พิษของสารต่างๆที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมอลูมิเนียม**, ข่าวสารธรณี, ปีที่ 34, ฉบับที่ 3, หน้า 49 - 54.
- [15] ปรีดา เมชาติพิย์ และสุชาดา มะแสง, 2534, **ปริมาณปรอทและแคดเมียมในอาหารทะเลกระป๋องส่งออก**, รายงานประจำปี 2534, กองพัฒนาอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ กรมประมง, หน้า 50-53.
- [16] Tashiro C., and Oba J., 1978, "The Effect of Cr_2O_3 , $\text{Cu}(\text{OH})_2$, ZnO and PbO on the Compressive Strength and the Hydrate of the Hardened Mortar", **Journal of Cement and Concrete Research**, Vol. 9, pp. 253-258.
- [17] Murat M., F. Sorrentino, 1996, "Effect of Large Additions of Cd, Pb, Cr, Zn, to Cement Raw Meal on the Composition and the Properties of the Clinker and the Cement", **Cement and Concrete Research**, 26, 377-385
- [19] Stephan D., H. Maleki, D. Knofel, B. Eber, R. Hardtl, 1999, "Influence of Cr, Ni, and Zn on the Properties of Pure Clinker Phase Part I. C_3S ", **Cement and Concrete Research**, 29, 545-552

- [20] Stephan D., R. Mallmann, D. Knofel, R. Hardtl, 1999, “High intake of Cr, Ni, and Zn in Clinker Part I. Influence on Burning Process and Formation of Phase” , **Cement and Concrete Research**, 29, 1949-1957
- [21] ปารเมศ ชูติมา, 2545, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, หน้า 51 - 59
- [22] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2548, สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 2, พิมพ์ครั้งที่ 6, กรุงเทพฯ, หน้า 281 – 283
- [23] Tsakiridis P.E., S. Agatzini-Leonardou, P. Oustadakis, 2004, “Red Mud Addition in the Raw Meal for the Production of Portland Cement Clinker” , **Journal of Hazardous Material**, B116, 103-110

ภาคผนวก ก ตารางแสดงข้อมูลการทดลอง

1. การวิเคราะห์คุณสมบัติของปูนเม็ด

ตารางที่ ก.1 การหาค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการ

การเผาปูนเม็ด ครั้งที่	ร้อยละ free lime	ร้อยละ free lime	ร้อยละ free lime	ร้อยละ free lime	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย	
1	1.147	1.148	1.149	1.150	± 0.001
2	0.900	1.000	1.100	1.000	± 0.100
3	1.120	1.140	1.100	1.120	± 0.020
				เฉลี่ย = 1.092	± 0.079

ตารางที่ ก.2 ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสมเพียงชนิดเดียว
ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

ชนิดของ โลหะหนัก	ค่าร้อยละของ free lime					ค่าเฉลี่ยร้อยละ ของ free lime	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
โครเมียม	3.248	2.940	3.108	3.164	2.996	3.091	± 0.125
แคดเมียม	0.820	0.860	0.812	0.812	0.840	0.829	± 0.021
สังกะสี	0.140	0.168	0.140	0.168	0.196	0.162	± 0.023

ตารางที่ ก.3 ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสมสองชนิด

อัตราส่วนความเข้มข้นของ โลหะหนักในปูนเม็ด			ค่าร้อยละของ free lime					ค่าเฉลี่ย ของร้อยละ free lime	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
โครเมียม	แคดเมียม	สังกะสี	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
0.5	1.5	0	1.652	1.960	1.792	1.904	1.876	1.837	± 0.120
1.0	1.0	0	2.352	2.408	2.298	2.38	2.382	2.364	± 0.042
1.5	0.5	0	3.388	3.080	3.108	3.192	3.248	3.203	± 0.123
0.5	0	1.5	0.224	0.168	0.196	0.213	0.196	0.199	± 0.021
1.0	0	1.0	0.392	0.392	0.381	0.353	0.375	0.379	± 0.016
1.5	0	0.5	1.064	1.176	1.092	1.15	1.11	1.118	± 0.045
0	0.5	1.5	0.196	0.224	0.213	0.196	0.218	0.209	± 0.013
0	1.0	1.0	0.252	0.280	0.274	0.241	0.269	0.263	± 0.016
0	1.5	0.5	0.644	0.728	0.7	0.689	0.717	0.696	± 0.033

ตารางที่ ก.4 ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสมสามชนิด

อัตราส่วนความเข้มข้นของ โลหะหนักในปูนเม็ด			ค่าร้อยละของ free lime					ค่าเฉลี่ย ของร้อยละ free lime	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
โครเมียม	แคดเมียม	สังกะสี	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
1.000	0.500	0.500	0.560	0.560	0.616	0.532	0.504	0.554	± 0.023
0.500	1.000	0.500	0.756	0.784	0.773	0.728	0.784	0.765	± 0.024
0.500	0.500	1.000	0.308	0.336	0.364	0.308	0.325	0.328	± 0.042
0.667	0.667	0.667	0.392	0.392	0.42	0.364	0.364	0.386	± 0.023

3. ผลของโลหะหนัก โครเมียม แคดเมียม และสังกะสีที่มีต่อค่าการรับกำลังอัด

ตาราง ก.5 ค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่มีโลหะหนักและมอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักผสมเพียงชนิดเดียวที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างปูนเม็ด	ค่าการรับกำลังอัด (MPa)			ค่าเฉลี่ยการรับกำลังอัด (MPa)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ไม่มีโลหะหนัก	36.320	35.840	37.120	36.430	± 0.647
โครเมียม	20.960	22.400	23.200	22.190	± 1.135
แคดเมียม	29.920	32.640	30.000	30.850	± 1.548
สังกะสี	21.600	25.040	25.120	23.920	± 2.010

ตารางที่ ก.6 ค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักสองชนิดปนเปื้อน

อัตราส่วนความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนเม็ด			ค่าการรับกำลังอัด (MPa)			ค่าเฉลี่ยการรับกำลังอัด (MPa)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
โครเมียม	แคดเมียม	สังกะสี	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0.5	1.5	0	27.200	23.520	28.480	26.400	± 2.575
1.0	1.0	0	27.680	24.520	24.240	25.480	± 1.910
1.5	0.5	0	22.720	22.360	18.400	21.160	± 2.397
0.5	0	1.5	28.600	30.800	22.080	27.160	± 4.535
1.0	0	1.0	28.200	26.320	28.040	27.520	± 1.042
1.5	0	0.5	29.080	25.320	24.200	26.200	± 2.556
0	0.5	1.5	29.240	28.920	28.440	28.870	± 0.403
0	1.0	1.0	27.800	26.920	29.400	28.040	± 1.257
0	1.5	0.5	30.680	29.880	27.880	29.480	± 1.442

ตารางที่ ก.7 ค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีโลหะหนักหลายชนิดปนเปื้อน

อัตราส่วนความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนเม็ด			ค่าการรับกำลังอัด (MPa)			ค่าเฉลี่ยการรับกำลังอัด(MPa)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
โครเมียม	แคดเมียม	สังกะสี	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1.000	0.500	0.500	33.600	36.320	34.240	34.720	±1.422
0.500	1.000	0.500	25.840	21.320	26.800	24.650	±2.926
0.500	0.500	1.000	29.600	34.080	34.640	32.770	±2.762
0.667	0.667	0.667	30.080	33.280	36.640	33.330	±3.280

ตารางที่ ก.8เปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์จากการทดลองกับมอร์ตาร์จากการทำนาย

ลำดับที่	อัตราส่วนความเข้มข้นของโลหะหนัก			ค่าการรับกำลังอัด (MPa)		ความคลาดเคลื่อน
	โครเมียม	แคดเมียม	สังกะสี	ค่าจากการทดลอง	ค่าจากสมการ	
1	0.000	0.500	1.500	29.240	26.700	-2.541
2	1.000	0.500	0.500	33.600	35.149	1.549
3	2.000	0.000	0.000	20.960	21.810	0.850
4	1.500	0.500	0.000	22.720	21.413	-1.307
5	0.500	1.500	0.000	27.200	26.005	-1.195
6	0.500	0.000	1.500	28.600	27.452	-1.149
7	0.000	1.500	0.500	30.680	29.563	-1.118
8	1.500	0.500	0.000	22.360	21.413	-0.947
9	1.000	1.000	0.000	27.680	26.402	-1.278
10	0.500	0.500	1.000	29.600	33.202	3.602
11	1.000	0.000	1.000	28.200	27.603	-0.597
12	0.000	0.500	1.500	28.920	26.700	-2.221
13	0.000	0.000	2.000	21.600	25.268	3.668
14	0.500	1.500	0.000	23.520	26.005	2.485
15	1.500	0.000	0.500	29.080	25.723	-3.358
16	0.000	1.000	1.000	27.800	28.131	0.331

ตารางที่ ก.8 เปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์จากการทดลองกับมอร์ตาร์จากการทำนาย
(ต่อ)

ลำดับที่	อัตราส่วนความเข้มข้นของโลหะหนัก			ค่าการรับกำลังอัด (MPa)		ความคลาดเคลื่อน
	โครเมียม	แคดเมียม	สังกะสี	ค่าจากการทดลอง	ค่าจากสมการ	
17	0.500	1.000	0.500	25.840	25.082	-0.758
18	1.000	0.500	0.500	36.320	35.149	-1.171
19	0.667	0.667	0.667	30.080	32.246	2.166
20	1.500	0.500	0.000	18.400	21.413	3.013
21	0.000	2.000	0.000	30.850	30.994	0.144
22	0.500	1.000	0.500	21.320	25.082	3.762
23	2.000	0.000	0.000	22.400	21.810	-0.590
24	2.000	0.000	0.000	23.200	21.810	-1.390
25	1.000	1.000	0.000	24.520	26.402	1.882
26	1.000	0.500	0.500	34.240	35.149	0.909
27	0.000	2.000	0.000	30.850	30.994	0.144
28	0.000	1.500	0.500	29.880	29.563	-0.317
29	0.000	0.500	1.500	28.440	26.700	-1.741
30	1.500	0.000	0.500	25.320	25.723	0.402
31	0.667	0.667	0.667	33.280	32.246	-1.034
32	0.500	0.500	1.000	34.080	33.202	-0.878
33	0.000	0.000	2.000	25.040	25.268	0.228
34	0.000	1.000	1.000	26.920	28.131	1.211
35	0.500	0.500	1.000	34.640	33.202	-1.438
36	0.500	0.000	1.500	30.800	27.452	-3.349
37	0.500	1.500	0.000	28.480	26.005	-2.475
38	1.500	0.000	0.500	24.200	25.723	1.523
39	0.000	2.000	0.000	30.850	30.994	0.144

ตารางที่ ก.8เปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์จากการทดลองกับมอร์ตาร์จากการทำนาย
(ต่อ)

ลำดับที่	อัตราส่วนความเข้มข้นของโลหะหนัก			ค่าการรับกำลังอัด (MPa)		ความคลาดเคลื่อน
	โครเมียม	แคดเมียม	สังกะสี	ค่าจากการทดลอง	ค่าจากสมการ	
40	1.000	0.000	1.000	26.320	27.603	1.283
41	0.000	1.000	1.000	29.400	28.131	-1.269
42	0.000	1.500	0.500	27.880	29.563	1.683
43	1.000	0.000	1.000	28.040	27.603	-0.437
44	0.667	0.667	0.667	36.640	32.246	-4.394
45	1.000	1.000	0.000	24.240	26.402	2.162
46	0.500	0.000	1.500	22.080	27.452	5.372
47	0.000	0.000	2.000	25.120	25.268	0.148
48	0.500	1.000	0.500	26.800	25.082	-1.718

ภาคผนวก ข บทความสำหรับการเผยแพร่

1. พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล และ จานุมาส บุญสนธิ “การสร้างหน่วยสเกลเพื่อใช้ในการคาดการณ์ผลกระทบของ โลหะหนัก (โครเมียม แคดเมียม และสังกะสี) ที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์” การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 7, 12-14 มีนาคม 2551

การสร้างหน่วยสเกลเพื่อใช้ในการคาดการณ์ผลกระทบของ โลหะหนัก (โครเมียม แคดเมียม และสังกะสี) ที่มีต่อคุณสมบัติของซีเมนต์

Development of Scale to Predict the Effect of Heavy Metal (Chromium, Cadmium, and Zinc) on Cement Properties

Jarnumas Boonsanit* Preecha Termsuksawad and Puangrat Kajitvichyanukul***

จานุมาส บุญสนธิ* ปรีชา เต็มสุขสวัสดิ์ และ พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล***

*ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

**สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ

10140

E-mail : janumas@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยศึกษาถึงผลกระทบของโลหะหนักสามชนิด ได้แก่ โครเมียม แคดเมียม และสังกะสีที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์ โลหะหนักทั้งสามชนิดในรูปโครเมียมออกไซด์ แคดเมียมออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ได้ถูกผสมกันตามสัดส่วนที่กำหนด โดยความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้นในช่วงร้อยละ 0.5 - 2 โดยน้ำหนัก ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการทดลองผสม (mixing experiment) ในการหาสมการ เพื่อใช้ในการคาดการณ์ผลกระทบของโลหะหนักทั้งสามชนิดที่มีต่อคุณสมบัติด้านการรับกำลังอัดของซีเมนต์ออร์ตาร์โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109-95 นอกจากนี้ได้แสดงผลกระทบของโลหะหนักต่อลักษณะสมบัติอื่นๆ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบของเฟสต่างๆ ของปูนเม็ดซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และ SEM จากผลการทดลองพบว่า แคดเมียมส่งผลให้ค่าการรับกำลังอัดเพิ่มขึ้น ส่วนโครเมียมและ สังกะสีส่งผลให้ค่าการรับกำลังอัดลดลง ผลการทดลองประมวลผลด้วยโปรแกรมมินิแทบ พบว่า $R^2 = 81.65\%$ และสมการที่มีความเป็นไปได้ในการที่จะนำมาสร้างเป็นหน่วยสเกลได้แก่ $Y = 11.2083 \text{ Cr} + 18.5620 \text{ Cd} + 11.3167 \text{ Zn} - 4.22715 \text{ CrCd} + 5.43984 \text{ CrZn} - 4.88958 \text{ CdZn}(\text{Cd} - \text{Zn}) + 55.0867 \text{ Cr}^2 \text{ CdZn} - 34.2028 \text{ CrCd}^2 \text{ Zn} - 3.98910 \text{ CrCd}(\text{Cr} - \text{Cd})^2$

คำสำคัญ : การทดลองผสม; พื้นผิวผลตอบ; โลหะหนัก; ค่าการรับกำลังอัด; ซีเมนต์

Abstract

In this study, effect of heavy metals (chromium, cadmium, and zinc) on cement properties was investigated. All studied heavy metals were in form of oxide compound as chromium oxide, cadmium oxide, and zinc oxide with initial concentration in the range of 0.5- 2%wt. Effect of heavy metals on compressive strength was determined following ASTM C109-95 standard method. For compressive strength prediction, the mixing experiment design and response surface methodology were used to develop the compressive strength scale for cement mortar. In addition, the phase change of cement composition was also monitored by XRD and SEM and reported in this paper. Results show that cadmium enhanced compressive strength capacity of cement mortar, while chromium and zinc decreased the compressive strength. Overall effect of heavy metals on compressive strength were analyzed by MINITAB with $R^2 = 81.65\%$ and the representative equation for compressive strength prediction was $Y = 11.2083 \text{ Cr} + 18.5620 \text{ Cd} + 11.3167 \text{ Zn} - 4.22715 \text{ CrCd} + 5.43984 \text{ CrZn} - 4.88958 \text{ CdZn} (\text{Cd} - \text{Zn}) + 55.0867 \text{ Cr}^2 \text{CdZn} - 34.2028 \text{ CrCd}^2 \text{Zn} - 3.98910 \text{ CrCd}(\text{Cr} - \text{Cd})^2$

Keywords : Mixing experiment; Response surface methodology; Heavy metal; Compressive strength; Cement

บทนำ

แนวความคิดการปล่อยมลพิษเป็นศูนย์ เป็นแนวความคิดที่ได้นำมาใช้กันมากในภาคอุตสาหกรรม โดยอยู่ในหลักการที่ว่าภาคอุตสาหกรรมจากโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งจะสามารถนำใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆได้ [1] จากแนวความคิดนี้เองทำให้อุตสาหกรรมหลายประเภทได้นำกากของเสียมากำจัดด้วยการเผา ร่วมกับการผลิตปูนซีเมนต์ โดยกากของเสียเหล่านั้นได้กลายเป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทน ตัวอย่างของกากของเสียเหล่านี้ เช่น กากสี กากตะกรันอลูมิเนียม ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย ขี้โลหะ (slag) แผลงจระ ยาง เป็นต้น โดยกากของเสียหลายชนิดมักมีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า [1,2] โลหะหนักหลายชนิดเช่น โครเมียม วานาเดียมส่งผลเชิงลบต่อลักษณะของซีเมนต์ และสามารถถูกชะล้างออกมาจากซีเมนต์ได้ อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นการศึกษาถึงผลกระทบของโลหะหนักแต่ละชนิด ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว การนำของเสียอุตสาหกรรมมาเผาร่วมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นจะเป็นการนำของเสียอุตสาหกรรมหลายประเภท ซึ่งมีโลหะหนักหลายชนิดมาเผาร่วมกัน งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาการนำของเสียที่มีโลหะหนักผสมทั้งสามชนิดโดยรู้สัดส่วนของความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดอย่างชัดเจนมาเผาร่วมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และศึกษาสมบัติของซีเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงไป แล้วนำข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาสร้างเป็นหน่วยสเกลของผลกระทบของโลหะหนักต่อลักษณะของซีเมนต์ โดยได้นำหลักการออกแบบการทดลองทางสถิติ ได้แก่การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) มาใช้ออกแบบการทดลองเพื่อหาสมการความสัมพันธ์มาสร้างเป็นหน่วยสเกลสำหรับใช้ในการคาดการณ์ผลกระทบของโลหะหนักทั้งสามชนิด ได้แก่ โครเมียม แคดเมียม และสังกะสี ต่อการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

แผนการวิจัย

การทดลองในงานวิจัยนี้ใช้ การทดลองผสม[3] ในการออกแบบการทดลองโดยกำหนดให้มีการสังเคราะห์ ปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสมแบบ ชนิดเดียว สองชนิด และสามชนิด ตามสัดส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นที่กำหนด โดยความเข้มข้นของโลหะหนักเมื่อมีการผสมสองและสามชนิดรวมกันต้องไม่เกินร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

วิธีการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยเตรียมมาจาก บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด(มหาชน) โดยส่วนประกอบของ วัตถุดิบแสดงดังตารางที่ 1 และโลหะหนักที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ โครเมียม แคดเมียม และสังกะสี ใช้อยู่ในรูปแบบ โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) แคดเมียมออกไซด์ (CdO) และสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.5, 0.667, 1.0, 1.5 และ 2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

วิธีการเตรียมปูนเม็ดที่มีโลหะหนักและการทดลอง

นำโลหะหนักชนิดเดียว สองชนิด และสามชนิด ตามสัดส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นที่กำหนดดังตารางที่2 ผสมกับวัตถุดิบโดยให้ได้ปริมาณรวมทั้งหมดประมาณ 150 กรัม บรรจุด้วยครุชชีเบลนำเข้าเตาเผาโดยเพิ่ม อุณหภูมิห้องจนกระทั่งถึง 1450°C โดยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10^\circ\text{C}/\text{min}$ [1, 4] เป็นเวลา 90 นาทีหลังจากนั้นนำออกจากเตาเผาเพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว นำปูนเม็ดที่ได้วิเคราะห์ ค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ (free lime), การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของส่วนประกอบและลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) และ Scanning Electron Microscopy (SEM)

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์สำหรับการทดลองนี้

สารประกอบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
SiO_2	14.165
Al_2O_3	3.360
Fe_2O_3	2.220
CaO	43.270
MgO	0.984
K_2O	0.457
Na_2O	0.069
SO_3	0.218
LOI	35.258
รวม	100

* LOI = การสูญเสียจากการเผา

การทดสอบการรับกำลังอัดของซีเมนต์

นำซีเมนต์ที่ได้มาทดสอบค่าการรับกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109-95 [6] ที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน

ตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนการผสมของโลหะหนัก โครเมียม แคดเมียม และสังกะสีในการทำการทดลอง

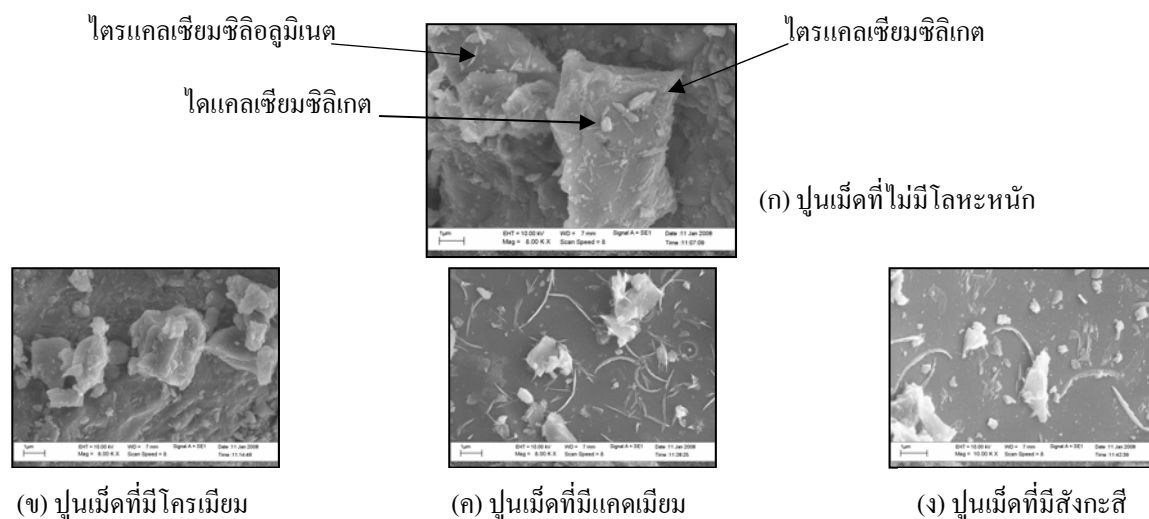
ลำดับที่	สัดส่วนการผสมของโลหะหนัก โครเมียม แคดเมียม และสังกะสี		
	Cr	Cd	Zn
1	1.500	0.500	0.000
2	1.000	0.000	1.000
3	1.000	1.000	0.000
4	0.667	0.667	0.667
5	0.500	0.000	1.500
6	2.000	0.000	0.000
7	0.000	1.500	0.500
8	1.000	0.500	0.500
9	0.000	2.000	0.000
10	0.000	1.000	1.000
11	0.000	0.500	1.500
12	0.500	1.500	0.000
13	1.500	0.000	0.500
14	0.000	0.000	2.000
15	0.500	0.500	1.000
16	0.500	1.000	0.500

หมายเหตุ : ตัวอย่างการทดลองทั้งหมด 48 การทดลองเนื่องจากในแต่ละสัดส่วนการผสมทำ 3 ซ้ำ

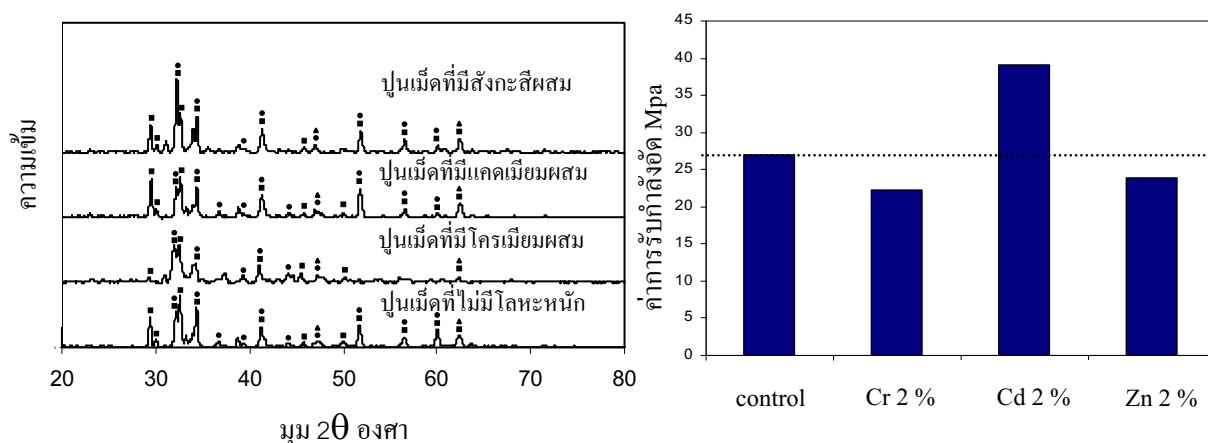
ผลการวิจัยและวิจารณ์

ลักษณะสมบัติของซีเมนต์เมื่อมีโลหะหนักปนเปื้อนเพียง 1 ชนิด

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักปนเปื้อนเพียง 1 ชนิดเปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 8000 เท่าแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งจากรูปจะพบว่าเมื่อมีโลหะหนัก โครเมียม แคดเมียม และสังกะสีที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพมีลักษณะแตกต่างจากปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก โดยปูนเม็ดที่มีโลหะหนักแต่ละชนิดมีเฟสของไตรแคลเซียมซิลิเกตลดลง ซึ่งสังเกตจากลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมดังรูปที่ 1(ก) และในส่วนของการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ซึ่งแสดงในรูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักแต่ละชนิดกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก พบว่าปูนเม็ดที่มีโครเมียมผสมทำให้พีคของโครงสร้างหลัก ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต และไตรแคลเซียมออลูมิเนต ลดลงซึ่งส่งผลให้การรับกำลังอัดดังรูปที่ 3 ลดลงเมื่อเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก สำหรับปูนเม็ดที่มีแคดเมียมผสมนั้นพบว่าพีคของไตรแคลเซียมซิลิเกตเพิ่มขึ้นในบางตำแหน่งทำให้ค่าการรับกำลังอัดสูงกว่าปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก และปูนเม็ดที่มีสังกะสีผสมพบว่าลักษณะของโครงสร้างหลักโดยรวมแล้วมีลักษณะใกล้เคียงกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก ส่วนค่าการรับกำลังอัดพบว่าต่ำกว่าปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก



รูปที่ 1 เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและปูนเม็ดที่มีโลหะหนักเพียง 1 ชนิด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก



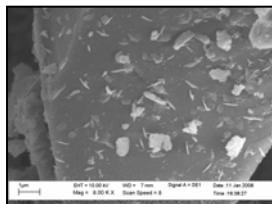
รูปที่ 2 ปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสมเพียงชนิดเดียวที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2% โดยน้ำหนัก

รูปที่ 3 เปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสมเพียง 1 ชนิดที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2% โดยน้ำหนัก

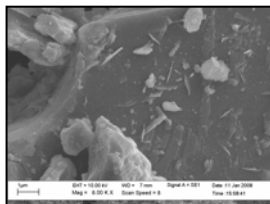
ลักษณะสมบัติของซีเมนต์เมื่อมีโลหะหนักปนเปื้อน 2 ชนิด

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักปนเปื้อน 2 ชนิดเปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 8000 เท่าแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งจากรูปจะพบว่าเมื่อมีโลหะหนักผสม 2 ชนิด ได้แก่ โครเมียมและแคดเมียม โครเมียมและสังกะสี และ แคดเมียมและสังกะสีที่อัตราส่วนความเข้มข้นร้อยละ 1.5 : 0.5 โดยน้ำหนัก พบว่า ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพมีลักษณะแตกต่างจากปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก โดยปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสม 2 ชนิดมีเฟสของไตรแคลเซียมซัลไฟต์ลดลง และเฟสของไตรแคลเซียมอลูมิเนตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าการรับกำลังอัดดังรูปที่ 5 พบว่าปูนเม็ดที่มีโครเมียมและสังกะสีเด่น ส่งผลให้ค่าการรับกำลังอัดลดลง

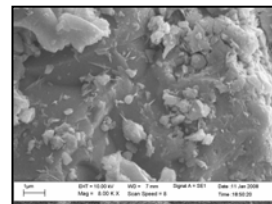
และในขณะเดียวกันในปูนเม็ดที่มีแคลเซียมเด่นส่งผลให้ค่าการรับกำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก



(ก) ปูนเม็ดที่มีโครเมียม : แคลเซียม
ในอัตราส่วน 1.5 : 0.5

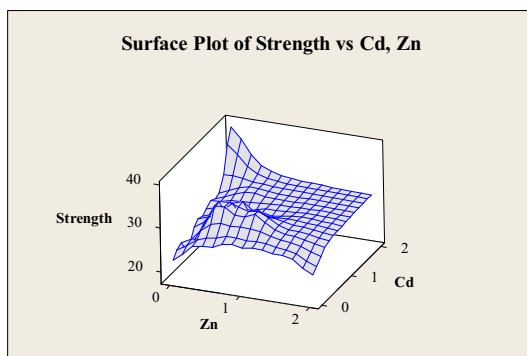
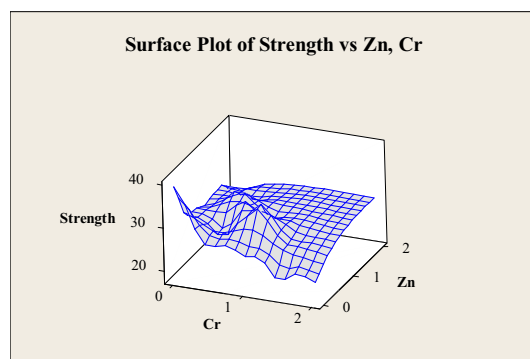
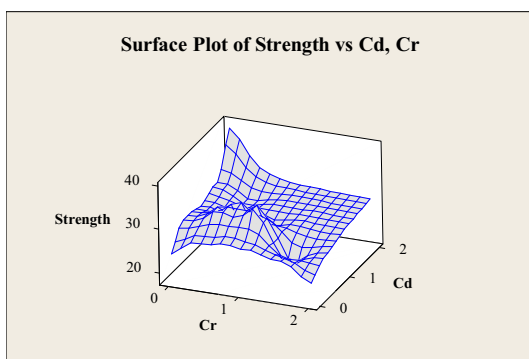


(ข) ปูนเม็ดที่มีโครเมียม : สังกะสี
ในอัตราส่วน 1.5 : 0.5



(ค) ปูนเม็ดที่มีแคลเซียม : สังกะสี
ในอัตราส่วน 1.5 : 0.5

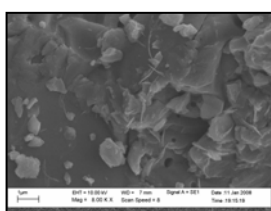
รูปที่ 4 เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสม 2 ชนิด



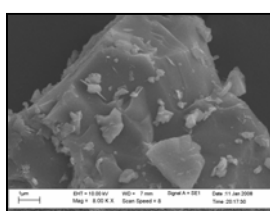
รูปที่ 5 กราฟ 3 มิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการรับกำลังอัดและปูนเม็ดที่มีโลหะหนัก 2 ชนิด
ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 0.5 - 2 โดยน้ำหนัก

ลักษณะสมบัติของซีเมนต์เมื่อมีโลหะหนักปนเปื้อน 3 ชนิด

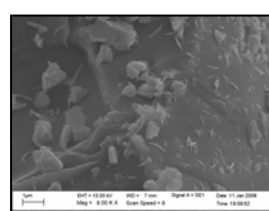
การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่มีโลหะหนักปนเปื้อน 3 ชนิดเปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 8000 เท่าแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งจากรูปจะพบว่าเมื่อมีโลหะหนักผสม 3 ชนิด ได้แก่ โครเมียม แคลเซียมและสังกะสี พบว่าลักษณะพื้นผิวทางกายภาพมีลักษณะแตกต่างจากปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนัก โดยปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสม 3 ชนิดมีเฟสของไตรแคลเซียมซิลิเกตลดลง



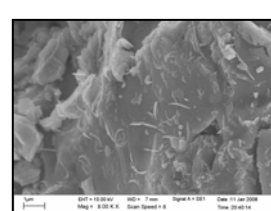
(ก) ปูนเม็ดที่มีโครเมียม
แคดเมียมและสังกะสีใน
อัตราส่วน 0.5 : 0.5 : 1.0



(ข) ปูนเม็ดที่มีโครเมียม
แคดเมียมและสังกะสีใน
อัตราส่วน 0.5 : 1.0 : 0.5



(ค) ปูนเม็ดที่มีโครเมียม
แคดเมียมและสังกะสีใน
อัตราส่วน 1.0 : 0.5 : 0.5



(ง) ปูนเม็ดที่มีโครเมียม
แคดเมียมและสังกะสีใน
อัตราส่วน 0.667 : 0.667 : 0.667

รูปที่ 6 เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดที่ไม่มีโลหะหนักและปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสม 3 ชนิด

จากข้อมูลค่าการรับก้างอัดที่ได้ในปูนเม็ดที่มีโลหะหนัก 1 ชนิด, ปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสม 2 ชนิด, และปูนเม็ดที่มีโลหะหนักผสม 3 ชนิด เมื่อทำการประมวลผลของข้อมูลทั้งหมดด้วยโปรแกรมมินิแทบในหมวดของการวิเคราะห์ผลการทดลองแบบผสม เพื่อสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ โดยกำหนดค่านัยสำคัญที่ 0.05 ได้ผลดังสมการ $Y = 11.2083 \text{ Cr} + 18.5620 \text{ Cd} + 11.3167 \text{ Zn} - 4.22715 \text{ CrCd} + 5.43984 \text{ CrZn} - 4.88958 \text{ CdZn}(\text{Cd} - \text{Zn}) + 55.0867 \text{ Cr}^2 \text{ CdZn} - 34.2028 \text{ CrCd}^2 \text{ Zn} - 3.98910 \text{ CrCd}(\text{Cr} - \text{Cd})^2$ และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแบบทางคณิตศาสตร์แสดงในตารางที่ 3 และได้กราฟแสดงลักษณะ contour plot ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักและค่าการรับก้างอัดดังรูปที่ 7

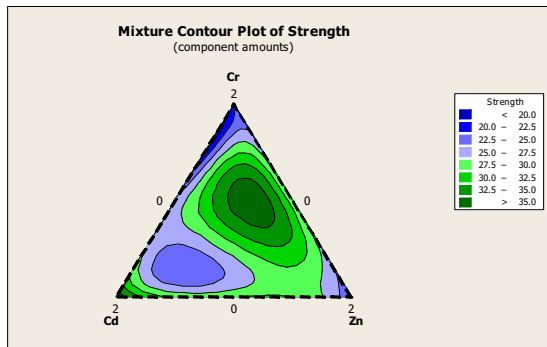
ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของข้อมูล

Source	DF	Seq.SS	Adj.SS	Adj.MS	F	P
Regression	8	973.2	973.32	121.650	21.69	0.000
Linear	2	272.35	547.10	273.552	48.78	0.000
Quadratic	2	275.23	153.40	76.700	13.68	0.000
Full Cubic	1	98.68	71.12	71.121	12.68	0.001
Special Quartic	2	296.98	256.24	128.118	22.85	0.000
Full Quartic	1	24.96	24.96	24.963	4.45	0.041
Residual Error	39	218.71	218.71	5.608		
Lack of Fit	7	53.37	53.37	7.624	1.48	0.029
Pure Error	32	165.34	165.34	5.167		
Total	47	1191.91				

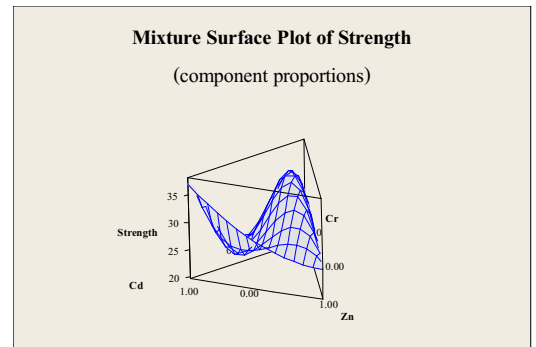
$$R^2 = 81.65\%, R^2_{\text{adj}} = 77.89\%$$

จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าตัวแบบทางคณิตศาสตร์ประกอบด้วยเทอมเชิงเส้นตรง พาราโบลา กำลังสาม และกำลังสี่ ที่ได้จากการทดลองมีค่า $R^2 = 81.65\%$ แสดงว่าตัวแบบทางคณิตศาสตร์มีผลมาจากการกำหนดค่าปัจจัยของส่วนผสมอยู่ที่ 81.65% และมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 18.35% โดยความสัมพันธ์ของผลกระทบของโลหะหนัก

ทั้งสามชนิดต่อค่าการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์แสดงในรูปหน่วยสเกลสามเหลี่ยมดังรูปที่ 7(ก)และ กราฟ 3 มิติรูปที่ 7(ข)เพื่อนำไปใช้งานในการพยากรณ์ ค่าการรับกำลังอัดของซีเมนต์ที่ปนเปื้อนโลหะหนักทั้งสามชนิดต่อไป



(ก) contour plot



(ข) กราฟ 3 มิติ

รูปที่ 7 กราฟ contour plot และกราฟ 3 มิติ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการรับกำลังอัดและปูนเม็ดที่มีโลหะหนักที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 - 2 โดยน้ำหนัก

สรุปผลการทดลอง

จากการวิจัยพบว่าปูนเม็ดที่มีโลหะหนักโครเมียม แคดเมียม และสังกะสี ผสมทั้งกรณีผสมชนิดเดียว สองชนิด และสามชนิดส่งผลต่อค่าการรับกำลังอัดของซีเมนต์โดยโลหะหนักแคดเมียมส่งผลกระทบต่อค่าการรับกำลังอัดมากที่สุด รองลงมาคือโครเมียมและสังกะสีตามลำดับ และจากการประมวลผลการทดลองทั้งหมดด้วยโปรแกรมมินิแทบ ได้ค่า $R^2 = 81.65\%$ และสมการที่มีความเป็นไปได้ในการที่จะใช้เป็นหน่วยสเกลในการคาดการณ์ผลกระทบของโลหะหนัก ได้แก่ $Y = 11.2083 \text{ Cr} + 18.5620 \text{ Cd} + 11.3167 \text{ Zn} - 4.22715 \text{ CrCd} + 5.43984 \text{ CrZn} - 4.88958 \text{ CdZn}(\text{Cd} - \text{Zn}) + 55.0867 \text{ Cr}^2 \text{ CdZn} - 34.2028 \text{ CrCd}^2 \text{ Zn} - 3.98910 \text{ CrCd}(\text{Cr} - \text{Cd})^2$ โดยแสดงความสัมพันธ์ของผลกระทบของโลหะหนักทั้งสามชนิดต่อการรับกำลังอัด เป็นกราฟ 3 มิติ และเป็นหน่วยสเกลในรูปสามเหลี่ยมเพื่อง่ายต่อการนำไปใช้งานต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล และเอกชัย ทวีกิจวานิช, รายงานฉบับสมบูรณ์ เรื่อง “การศึกษาการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์ที่ใช้กากของเสียอุตสาหกรรมในกระบวนการผลิต” เสนอต่อ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จก.(มหาชน), 2548
- [2] พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล และสุรชาติพิ์ สิ้นยัง, รายงานฉบับสมบูรณ์ เรื่อง “ผลของวานาเดียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการวิเคราะห์การชะล้าง” เสนอต่อ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จก. (มหาชน), 2549
- [3] ปารเมศ ชูติมา, 2545, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ : บริษัทสุทธการพิมพ์ จำกัด
- [4] David, G., Black, M., and Ward, M., The Fate of Trace Metals in the Wet Process Cement Kiln, Proceeding from Speciality Conference on Waste Combustion in Boiler and Industrial Furnacs, April, 1990
- [5] American Society for Testing and Materials, ASTM C109-99 : Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or [50mm.] Cube Specimens), Annual Book of ASTM Standard, 2001, Vol.04.01, Philadelphia.

ภาคผนวก ค ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ กิจกรรมที่ได้ดำเนินการ และผลที่ได้ตลอดโครงการ

ตารางที่ ค.1 ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ และผลที่ได้รับตลอดโครงการ

วัตถุประสงค์	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
1. เพื่อศึกษาผลของโลหะหนักชนิดเดียว สองชนิดและหลายชนิดที่มีต่อลักษณะ สมบัติของปูนเม็ด	ได้ลักษณะสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปขององค์ประกอบ ปูนเม็ดที่มีโลหะหนักชนิดเดียว สองชนิดและหลายชนิด ปนเปื้อน โดยกรณีที่มีโครเมียมเป็นสารปนเปื้อนหลัก ส่งผลต่อลักษณะสมบัติของปูนเม็ดมากที่สุด
2. เพื่อศึกษาผลของโลหะหนักชนิดเดียว สองชนิดและหลายชนิดที่มีต่อลักษณะ สมบัติของมอร์ตาร์	โครเมียมส่งผลกระทบต่อให้ค่าการรับกำลังอัดลดลง มากที่สุดในกรณีที่มีการปนเปื้อนเพียงชนิดเดียวและ สองชนิด ในขณะที่การปนเปื้อนหลายชนิด แคดเมียม เป็นสารปนเปื้อนหลักกลับส่งผลกระทบต่อให้ ค่าการรับกำลังอัดลดลงมากที่สุด และจากการประมวลผล ข้อมูลการรับกำลังอัดจากทั้งสามกรณีทำให้ได้สมการ ที่สามารถนำมาใช้ทำนายค่าการรับกำลังอัด เมื่อมี โลหะหนักทั้งสามชนิดปนเปื้อนในอัตราส่วนความ เข้มข้นเริ่มต้นไม่เกินร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ ค.2 ตารางเปรียบเทียบกิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ได้ดำเนินการ และผลที่ได้รับจากการดำเนินการ

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	กิจกรรมที่ได้ดำเนินการ	ผลที่ได้รับจากการ ดำเนินการ
1. การเตรียมปูนเม็ดที่มี ที่มีโลหะหนักปนเปื้อน เพียงชนิดเดียว	1. ได้ปูนเม็ดที่มี โครเมียม หรือแคดเมียม หรือสังกะสี ผสมอยู่	1. การเตรียมปูนเม็ดที่มี ที่มีโลหะหนักปนเปื้อน เพียงชนิดเดียว	1. ได้ปูนเม็ดที่มี โครเมียม หรือแคดเมียมหรือสังกะสี ผสมอยู่
2. การเตรียมปูนเม็ดที่มี ที่มีโลหะหนักปนเปื้อน สองชนิด	2. ได้ปูนเม็ดที่มี โครเมียม ผสมกับ แคดเมียม โครเมียมผสม กับสังกะสี และแคดเมียมผสมกับ สังกะสี ตามอัตราส่วน ความเข้มข้นที่กำหนด	2. การเตรียมปูนเม็ดที่มี ที่มีโลหะหนักปนเปื้อน สองชนิด	2. ได้ปูนเม็ดที่มี โครเมียม ผสมกับแคดเมียม โครเมียมผสมกับสังกะสี และแคดเมียมผสมกับ สังกะสี ตามอัตราส่วน ความเข้มข้นที่กำหนด
3. การเตรียมปูนเม็ดที่มี ที่มีโลหะหนักปนเปื้อน หลายชนิด	3. ได้ปูนเม็ดที่มีการผสม กันระหว่าง โครเมียม แคดเมียม และสังกะสี ในอัตราส่วนความ เข้มข้นที่กำหนด	3. การเตรียมปูนเม็ดที่มี ที่มีโลหะหนักปนเปื้อน หลายชนิด	3. ได้ปูนเม็ดที่มีการผสม กันระหว่าง โครเมียม แคดเมียม และสังกะสีใน อัตราส่วนความเข้มข้นที่ กำหนด
4. การทดสอบหา ลักษณะสมบัติของปูน เม็ดเมื่อมีโลหะหนัก ปนเปื้อนชนิดเดียว สอง ชนิด และหลายชนิด	4. ผลของลักษณะสมบัติ ของปูนเม็ดเมื่อมีโลหะ หนักปนเปื้อน ชนิดเดียว สองชนิด และหลาย ชนิด	4. การทดสอบหา ลักษณะสมบัติของปูน เม็ดเมื่อมีโลหะหนัก ปนเปื้อนชนิดเดียว สอง ชนิด และหลายชนิด	4. ผลของลักษณะสมบัติ ของปูนเม็ดเมื่อมีโลหะ หนักปนเปื้อน ชนิดเดียว สองชนิด และหลายชนิด

ตารางที่ ค.2 ตารางเปรียบเทียบกิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ได้ดำเนินการ และผลที่ได้รับจากการดำเนินการ (ต่อ)

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	กิจกรรมที่ได้ดำเนินการ	ผลที่ได้รับจากการดำเนินการ
5. การทดสอบหาค่าการรับกำลังอัดเมื่อมอร์ตาร์มีโลหะหนักปนเปื้อนชนิดเดียว สองชนิด และหลายชนิด	5. ได้ค่าการรับกำลังอัดเมื่อมอร์ตาร์มีโลหะหนักปนเปื้อนชนิดเดียว สองชนิด และหลายชนิด	5. การทดสอบหาค่าการรับกำลังอัดเมื่อมอร์ตาร์มีโลหะหนักปนเปื้อนชนิดเดียว สองชนิด และหลายชนิด	5. ได้ค่าการรับกำลังอัดเมื่อมอร์ตาร์มีโลหะหนักปนเปื้อนชนิดเดียว สองชนิด และหลายชนิด
7. การสร้างหน่วยสเกลคาดการณ์การรับกำลังอัดเมื่อมีโลหะหนักทั้งสามชนิดปนเปื้อนในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นไม่เกินร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก	7. ได้ หน่วยสเกลคาดการณ์การรับกำลังอัดเมื่อมีโลหะหนักทั้งสามชนิดปนเปื้อนในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นไม่เกินร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก	7. การสร้างหน่วยสเกลคาดการณ์การรับกำลังอัดเมื่อมีโลหะหนักทั้งสามชนิดปนเปื้อนในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นไม่เกินร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก	7. ได้ หน่วยสเกลคาดการณ์การรับกำลังอัดเมื่อมีโลหะหนักทั้งสามชนิดปนเปื้อนในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นไม่เกินร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก