



การประยุกต์ใช้เทคนิคการถมกลับในโครงการเหมืองโปแตชใต้ดิน  
**Application of Backfill Techniques in Underground Potash Mine Project**

เอกภพ แก้วเอียด

**Akkaphop Kaew-iod**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Mining Engineering  
Prince of Songkla University**

2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์                      การประยุกต์ใช้เทคนิคการถมกลับในโครงการเหมืองโปแตชใต้ดิน  
ผู้เขียน                                      นายเอกภพ แก้วเอียด  
สาขาวิชา                                  วิศวกรรมเหมืองแร่

---

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนูญ มาศนิยม)

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ์ บุญนวล)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนูญ มาศนิยม)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพรัช จรุงพัฒนพงศ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเหมืองแร่

.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้เทคนิคการถมกลับในโครงการเหมืองโปแตชใต้ดิน
ผู้เขียน	นายเอกภพ แก้วเอียด
สาขาวิชา	วิศวกรรมเหมืองแร่
ปีการศึกษา	2554

### บทคัดย่อ

ศึกษาการประเมินสมบัติของหางแร่โปแตช เถ้าลอย และยิปซัมเทียม เพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ และหาสมบัติที่เหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุถมกลับในเหมืองโครงการโปแตชใต้ดิน โดยศึกษาสมบัติทางเคมี (เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์) การวิเคราะห์ขนาดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ความชื้นเหลือปกติของเพสต์วัสดุถมกลับ ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุถมกลับ ความสามารถในการไหล โดยวิธีการวัดค่าการยุบของวัสดุถมกลับ นำไปหล่อเป็นก้อนวัสดุถมกลับขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อทดสอบความสามารถในการรับแรงอัด ซึ่งแบ่งการทดสอบเป็นสองชุดการทดสอบคือ ชุดที่หนึ่งใช้หางแร่โปแตชร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุถมกลับ ใช้วัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักวัสดุถมกลับ ในอัตราส่วนเถ้าลอยร้อยละ 30 และ FGD Gypsum ร้อยละ 15, 17 และ 19 ตามลำดับ และปูนซีเมนต์ร้อยละ 5, 3 และ 1 ตามลำดับ และชุดที่สองเพิ่มหางแร่โปแตชเป็นร้อยละ 70 โดยน้ำหนักวัสดุถมกลับ ใช้วัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักวัสดุถมกลับ ในอัตราส่วนเถ้าลอยลดลงเหลือร้อยละ 20 และ FGD Gypsum ลดลงเหลือร้อยละ 5, 7 และ 9 ตามลำดับ และปริมาณปูนซีเมนต์คงที่ที่ร้อยละ 5, 3 และ 1 ตามลำดับ การทดสอบทั้งสองชุดใช้อายุบ่มที่ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ โดยศึกษาความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ ความถ่วงจำเพาะ การหดตัวและการขยายตัว กำลังอัดของก้อนวัสดุถมกลับหลังหมดยุบม จำลองและเปรียบเทียบการพิบัติของอุโมงค์รูปเหลี่ยมแบบไม่ถมกลับและแบบถมกลับด้วยโปรแกรม UDEC พบว่าอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยที่สามารถใช้เป็นวัสดุถมกลับได้ที่ร้อยละ 20 - 30 และ FGD Gypsum มีอัตราส่วนผสมที่สามารถใช้เป็นวัสดุถมกลับได้ที่ร้อยละ 5-15 เหมาะสมสำหรับเป็นส่วนผสมของวัสดุถมกลับที่มีกำลังอัดต่ำ 2 ถึง 8 เมกะพาสคัล และพบว่าการถมกลับในเหมืองใต้ดินช่วยลดอัตราการเกิดการพังทลายของอุโมงค์เหมืองใต้ดินหลังจากการทำเหมืองหรือหยุดการทำเหมืองใต้ดินได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มความปลอดภัยและเสถียรภาพโครงสร้างของเหมืองใต้ดิน และไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณเขตพื้นที่การทำเหมืองใต้ดิน

**คำหลัก** การถมกลับ, เถ้าลอย, หางแร่โปแตช

**Thesis Title**                    Application of Backfill Techniques in Underground Potash Mine Project  
**Author**                            Mr.Akkaphop Kaew-iod  
**Major Program**                Mining Engineering  
**Academic Year**                2011

### **Abstract**

This study evaluated the properties of tailing potash, fly ash and FGD gypsum to replace the cement and find suitable properties backfill materials in the underground potash mines project. Chemical study X-ray fluorescence (XRF), sieve analysis and fineness modulus, bulk density, specific gravity, consistency, setting times and final setting slump of backfill materials. Using cast of backfill materials to test the ability of compressive strength in box size 5x5x5 cm<sup>3</sup>. Therefore, the experiments is divided into two series: Series 1, using tailing potash 50% by weight, fly ash 30% by weight, FGD gypsum 15%, 17% and 19% and cement 5%, 3% and 1% with water - binder ratios (w/b) of 0.5, 0.6 and 0.7, respectively; and Series 2, tailing potash 70% by weight, fly ash 20% by weight, FGD gypsum 5%, 7% and 9% and cement 5%, 3% and 1% with water - binder ratios (w/b) of 0.5, 0.6 and 0.7. The investigated parameter of backfill materials box, bulk density, absorption, specific gravity, length change and compressive strength of backfill materials box. All parameter were measured after 7, 28 and 90 days of curing in water. Disaster simulation and comparison backfill and not backfill in polygon tunnel to the UDEC program. Found, mixing ratio of fly ash can be used as backfill material ranging from 20 to 30% and mixing ratio of FGD gypsum can be used as backfill material ranging from 5-15% mixture of backfill materials suitable for low compressive strength 2-8 MPa and found, backfill reduce collapse rate in the underground mines. The increasing the safety and structural stability of underground mines was investigated and contributes to the environmental impact of underground mining area.

**Keyword** Backfill, Fly ash, Potash tailing

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้เกี่ยวข้องทุกท่านเป็นอย่างสูง ทั้งที่ออกนามและไม่ได้ออกนาม ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกด้านไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนูญ มาศนิยม ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สนับสนุนในด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดี ไม่ว่าจะเป็นการจัดหาเงินทุนทำการวิจัย การให้ความรู้ คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหา คำแนะนำในการเขียนวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการตรวจสอบเนื้อหาและรูปแบบของวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. พิษณุ บุญนวล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพรัช จรุงพัฒนพงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร. วิษณุ ราชเพ็ชร ที่ได้แนะนำและขอเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย รวมถึงภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ สถาบันวิจัยวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านห้องปฏิบัติการและชุดอุปกรณ์เครื่องมือการทดสอบ รวมถึงบริษัท เอเชียแปซิฟิกโปแตช คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์หางแร่โปแตช และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง ที่ให้ความอนุเคราะห์ถ้ำลอย และ FGD Gypsum เพื่อใช้สำหรับทำวิจัย รวมไปถึงเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ และบุคคลที่ไม่ได้กล่าวไว้ในที่นี้ ที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้สิ่งสำคัญที่สุด ผู้เขียนขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดามารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนมาโดยจนสำเร็จการศึกษา ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์ สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนบุคคลทั่วไปที่สนใจ หากมีข้อบกพร่องประการใด ผู้เขียนก็ขออภัยไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

เอกภพ แก้วเอียด

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการรูป	(10)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(14)
บทที่	
<b>1 บทนำ</b>	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย	1
1.2 ทฤษฎีและหลักการ	3
1.2.1 แร่โปแตช	3
1.2.2 วัสดุยึดประสาน	6
1.2.3 เสถียรภาพและการยุบตัวของเหมืองใต้ดิน	20
1.2.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพผนังเหมืองใต้ดิน	23
1.2.5 ชนิดของการทรุดตัวและรูปแบบของการพิบัติ	24
1.2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีการจำลองทางตัวเลข	26
1.2.7 การถมกลับ	26
1.3 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ	32
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	33
1.6 ขอบเขตของการวิจัย	33
1.7 สถานที่ทำการวิจัย	34
<b>2 การดำเนินการวิจัย</b>	35
2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองวัสดุถมกลับ	35
2.1.1 หางแร่โปแตช	35
2.1.2 ฝ้ายลอย	35
2.1.3 ยิปซั่มเทียม	36
	(6)

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.4 ปูนซีเมนต์	36
2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย	37
2.2.1 การออกแบบชุดการทดลอง	37
2.2.1.1 การออกแบบและวัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อ	37
2.2.2 การทดสอบสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุผสมกลับ	39
2.2.2.1 การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุผสมกลับ	39
2.2.2.2 การทดสอบสมบัติของเพสต์วัสดุผสมกลับ	42
2.2.3 การออกแบบและทดสอบสมบัติเชิงกลของก้อนวัสดุผสมกลับ	48
2.2.3.1 การออกแบบและการหล่อก้อนวัสดุผสมกลับ	49
2.2.3.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของก้อนวัสดุผสมกลับ	54
2.2.4 การจำลองการพิบัติของอุโมงค์รูปเหลี่ยมแบบไม่ถล่มกลับและถล่มกลับ	57
2.2.4.1 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง	58
<b>3 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล</b>	<b>60</b>
3.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุผสมกลับ	60
3.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมกลับ	60
3.1.2 องค์ประกอบทางกายภาพของวัสดุผสมกลับ	62
3.2 สมบัติเชิงกลของก้อนวัสดุผสมกลับ	70
3.3 การจำลองการพิบัติของอุโมงค์รูปเหลี่ยมแบบไม่ถล่มกลับและแบบถล่มกลับ	91
3.3.1 การจำลองการพิบัติของอุโมงค์รูปเหลี่ยมแบบไม่ถล่มกลับ	91
3.3.2 การจำลองการพิบัติของอุโมงค์รูปเหลี่ยมแบบถล่มกลับ	95
<b>4 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ</b>	<b>99</b>
4.1 สรุปผลการศึกษา	99
4.2 ข้อเสนอแนะ	100
เอกสารอ้างอิง	101
ภาคผนวก	105
การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์	115
ประวัติผู้เขียน	123

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	13
1.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	14
1.3 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จร้อยละ 80	19
2.1 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมกลับ	49
2.2 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมกลับ	50
2.3 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมกลับที่เผ้าลอยร้อยละ30 หางแร่โปแตช ร้อยละ 50 ซีเมนต์ร้อยละ 1, 3 และ 5 ยิปซั่ม (FGD Gypsum) ร้อยละ 19, 17, และ 15 ตามลำดับ อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5	50
2.4 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมกลับที่เผ้าลอยร้อยละ30 หางแร่โปแตช ร้อยละ 50 ซีเมนต์ร้อยละ 1, 3 และ 5 ยิปซั่ม (FGD Gypsum) ร้อยละ 19, 17, และ 15 ตามลำดับ อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6	50
2.5 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมกลับที่เผ้าลอยร้อยละ30 หางแร่โปแตช ร้อยละ 50 ซีเมนต์ร้อยละ 1, 3 และ 5 ยิปซั่ม (FGD Gypsum) ร้อยละ 19, 17, และ 15 ตามลำดับ อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7	51
2.6 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมกลับที่เผ้าลอยร้อยละ20 หางแร่โปแตช ร้อยละ 70 ซีเมนต์ร้อยละ 1, 3 และ 5 ยิปซั่ม (FGD Gypsum) ร้อยละ 9, 7, และ 5 ตามลำดับ อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5	51
2.7 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมกลับที่เผ้าลอยร้อยละ20 หางแร่โปแตช ร้อยละ 70 ซีเมนต์ร้อยละ 1, 3 และ 5 ยิปซั่ม (FGD Gypsum) ร้อยละ 9, 7, และ 5 ตามลำดับ อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6	51
2.8 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมกลับที่เผ้าลอยร้อยละ20 หางแร่โปแตช ร้อยละ 70 ซีเมนต์ร้อยละ 1, 3 และ 5 ยิปซั่ม (FGD Gypsum) ร้อยละ 9, 7, และ 5 ตามลำดับ อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7	52
3.1 องค์ประกอบออกไซด์ทางเคมีของวัสดุผสมกลับ	60
3.2 องค์ประกอบทางเคมีของหางแร่โปแตช	61
3.3 สมบัติพื้นฐานของวัสดุผสมกลับ	63



## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1 การวิเคราะห์ขนาดการกระจายตัวของอนุภาคหางแร่โปแตช	106
2 การวิเคราะห์ขนาดการกระจายตัวของอนุภาคเถ้าลอย	106
3 การวิเคราะห์ขนาดการกระจายตัวของอนุภาค FGD Gypsum	107
4 การวิเคราะห์ขนาดการกระจายตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์	107
5 ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น และโมดูลัสความละเอียด ของวัสดุถมกลับ	108
6 ความเข้มข้นปรกติของเพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยร้อยละเถ้าลอย 20 กีบ ร้อยละ FGD Gypsum 5, 7 และ 9 ตามลำดับ	108
7 ความเข้มข้นปรกติของเพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยร้อยละเถ้าลอย 30 กีบ ร้อยละ FGD Gypsum 15, 17 และ 19 ตามลำดับ	108
8 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและก่อตัวสุดท้ายของเพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยร้อยละเถ้าลอย 20 กีบ ร้อยละ FGD Gypsum 5, 7 และ 9 ตามลำดับ	109
9 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและก่อตัวสุดท้ายของเพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยร้อยละเถ้าลอย 30 กีบ ร้อยละ FGD Gypsum 15, 17 และ 19 ตามลำดับ	109
10 การยุบตัวของวัสดุถมกลับที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5, 0.6 และ 0.7	110
11 ความหนาแน่นรวมของวัสดุถมกลับ	110
12 การดูดซึมน้ำของวัสดุถมกลับ	111
13 การหดตัวและการขยายตัวของวัสดุถมกลับ	112
14 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุถมกลับ	113
15 กำลังอัดของวัสดุถมกลับ	114

## รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า	
1.1	ผลึกแร่โปแตช	3
1.2	โครงสร้างทางธรณีของชั้นเกลือหินและโปแตชในหมวดหินมหาสารคาม	5
1.3	ภาพตัดขวางโครงสร้างรูปแอ่งในพื้นที่บ่อน้ำหนึ่งจนรังค์	5
1.4	ทางแร่โปแตช	6
1.5	ภาพถ่ายขยายของเถ้านหินจากโรงไฟฟ้าที่ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง	11
1.6	Plerospheres เป็นเถ้านหินที่มีรูพรุนและมีเถ้านหินเม็ดเล็กๆ อยู่ภายใน	11
1.7	รูปร่างลักษณะของ $C_3S$ ซึ่งเป็นผลึกรูป 6 เหลี่ยม และ $C_2S$ เป็นเม็ดกลมสีดำ	12
1.8	การพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลัก	13
1.9	แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	14
1.10	ภาพขยาย Monosulphate และ Ettringite	19
1.11	แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	20
1.12	การยุบตัวของแผ่นดิน	21
1.13	การยุบตัวของมวลหินในเหมืองใต้ดิน	21
1.14	การจำลองการทรุดตัวของโครงการทำเหมืองโปแตชในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	22
1.15	การถมกลับอุโมงค์ใต้ดินด้วยวัสดุถมกลับ	22
1.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำต่อวัตถุและการเสียรูปของวัตถุที่เกิดขึ้น	23
1.17	แสดงผลของปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง ปูนซีเมนต์ประเภทสอง และความเข้มข้นของซัลเฟตในการพัฒนาความแข็งแรง และค่าใช้จ่ายของวัสดุถมกลับ	29
2.1	วัสดุที่ใช้เป็นวัสดุถมกลับ	36
2.2	แบบหล่อวัสดุถมกลับ	38
2.3	อุปกรณ์ไวแคต	43
2.4	รูปแบบการยุบตัว	47
2.5	วัสดุถมกลับ	52
2.6	ลักษณะการแตกของก้อนวัสดุถมกลับ	56
2.7	ผังการศึกษาวัสดุถมกลับในเหมืองโปแตชใต้ดิน	59

## รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า	
3.1	ขนาดอนุภาคและร้อยละข้างสะสมของเถ้าลอย FGD Gypsum ปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์ประเภท 1 และหางแร่โปแตช	62
3.2	ปริมาณน้ำสภาวะความเข้มข้นเหลวปกติของเพสต์วัสดุผสมกลับที่ใช้เถ้าลอย ร้อยละ 20 และ FGD Gypsum แทนที่ซีเมนต์	64
3.3	ปริมาณน้ำสภาวะความเข้มข้นเหลวปกติของเพสต์วัสดุผสมกลับที่ใช้เถ้าลอย ร้อยละ 30 และ FGD Gypsum แทนที่ซีเมนต์	65
3.4	อิทธิพลของเถ้าลอยร้อยละ 20 กับ FGD Gypsum แทนที่ปูนซีเมนต์โดย น้ำหนักต่อระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุผสมกลับ	65
3.5	อิทธิพลของเถ้าลอยร้อยละ 20 กับ FGD Gypsum แทนที่ปูนซีเมนต์โดย น้ำหนักต่อระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุผสมกลับ	66
3.6	อิทธิพลของปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานและเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์โดย น้ำหนักต่อค่ายุบตัวของวัสดุผสมกลับ	67
3.7	อิทธิพลของ FGD Gypsum และเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักต่อ ค่ายุบตัวของวัสดุผสมกลับ ที่ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน 0.6	68
3.8	อิทธิพลของ FGD Gypsum และเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักต่อ ค่ายุบตัวของวัสดุผสมกลับ ที่ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7	69
3.9	การยุบตัวของวัสดุผสมกลับ	70
3.10	ความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุผสมกลับที่ $w/b = 0.5$	71
3.11	ความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุผสมกลับที่ $w/b = 0.6$	72
3.12	ความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุผสมกลับที่ $w/b = 0.7$	73
3.13	รูโพรงของก้อนวัสดุผสมกลับ	74
3.14	อิทธิพลของอายุบ่มต่อการดูดซึมน้ำของก้อนวัสดุผสมกลับที่ $w/b = 0.5$	75
3.15	อิทธิพลของอายุบ่มต่อการดูดซึมน้ำของก้อนวัสดุผสมกลับที่ $w/b = 0.6$	76
3.16	อิทธิพลของอายุบ่มต่อการดูดซึมน้ำของก้อนวัสดุผสมกลับที่ $w/b = 0.7$	77
3.17	อิทธิพลของอายุบ่มต่อความถ่วงจำเพาะของวัสดุผสมกลับที่ $w/b = 0.5$	78
3.18	อิทธิพลของอายุบ่มต่อความถ่วงจำเพาะของวัสดุผสมกลับที่ $w/b = 0.6$	79
3.19	อิทธิพลของอายุบ่มต่อความถ่วงจำเพาะของวัสดุผสมกลับที่ $w/b = 0.7$	79

## รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า	
3.20	อิทธิพลของอายุบ่มต่อการหดตัวและขยายตัวของก้อนวัสดุถมกลับที่ $w/b = 0.5$	82
3.21	อิทธิพลของอายุบ่มต่อการหดตัวและขยายตัวของก้อนวัสดุถมกลับที่ $w/b = 0.6$	82
3.22	อิทธิพลของอายุบ่มต่อการหดตัวและขยายตัวของก้อนวัสดุถมกลับที่ $w/b = 0.7$	83
3.23	ภาพร่างการจำลองการหดตัวของก้อนวัสดุถมกลับ	83
3.24	อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดของก้อนวัสดุถมกลับที่ $w/b = 0.5$	85
3.25	อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดของก้อนวัสดุถมกลับที่ $w/b = 0.6$	85
3.26	อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดของก้อนวัสดุถมกลับที่ $w/b = 0.7$	86
3.27	รูปทรงของก้อนวัสดุถมกลับและการก่อตัวใหม่ของผลึก	88
3.28	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความหนารวมแน่นของก้อนวัสดุถมกลับ	89
3.29	การจำลองโครงสร้างของเหมืองใต้ดินด้วย UDEC แบบไม่ถมกลับ	91
3.30	ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดงโครงสร้างความเสถียรของเหมืองใต้ดินแบบไม่มีการถมกลับ	91
3.31	ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดงการพิบัติของโครงสร้างเหมืองใต้ดินที่ไม่มีการถมกลับเมื่อมีการ Run โปรแกรมครั้งที่ 4,100	92
3.32	ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดงการพิบัติของโครงสร้างเหมืองใต้ดินที่ไม่มีการถมกลับเมื่อมีการ Run โปรแกรมครั้งที่ 10,002	92
3.33	ผลการทำนายการทรุดตัวของอุโมงค์เหมืองใต้ดิน โครงการเหมืองแร่โปแตช แหล่งอุครใต้ปีที่ 5	93
3.34	ผลการทำนายการทรุดตัวของอุโมงค์เหมืองใต้ดิน โครงการเหมืองแร่โปแตช แหล่งอุครใต้ปีที่ 10	94
3.35	ผลการทำนายการทรุดตัวของอุโมงค์เหมืองใต้ดิน โครงการเหมืองแร่โปแตช แหล่งอุครใต้ปีที่ 20	94
3.36	ผลการทำนายการทรุดตัวของอุโมงค์เหมืองใต้ดิน โครงการเหมืองแร่โปแตช แหล่งอุครใต้ปีที่ 30	95
3.37	การจำลองโครงสร้างของเหมืองใต้ดินด้วย UDEC แบบถมกลับ	96
3.38	ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดงโครงสร้างของจุดรับแรงของเหมืองใต้ดินแบบมีการถมกลับ	96

## รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
3.39 ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดงการพิบัติของ โครงสร้างเหมืองใต้ดินที่มี การถล่มกลับ เมื่อมีการ Run โปรแกรมครั้งที่ 11,190	97
3.40 ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดงการพิบัติของ โครงสร้างเหมืองใต้ดินที่ ไม่มีการถล่มกลับ เมื่อมีการ Run โปรแกรมครั้งที่ 16,780	97

## สัญลักษณ์ค่าย่อและตัวย่อ

A	พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่างทดสอบ ( $m^3$ )
C	ค่าความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน
E	โมดูลัสยืดหยุ่น
L	ความยาว
P	แรงกดสูงสุดที่ทำให้ตัวอย่างพิบัติ (N)
Wa	น้ำหนักก้อนวัสดุถมกลับอบแห้งซึ่งในอากาศ (g)
Ws	น้ำหนักก้อนวัสดุถมกลับสภาพอิ่มตัวผิวแห้งซึ่งในอากาศ (g)
Ww	น้ำหนักก้อนวัสดุถมกลับสภาพอิ่มตัวผิวแห้งซึ่งในน้ำ (g)
w/b	ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน
Sc	การทรุดตัวหลัก
Si	การทรุดตัวที่เกิดขึ้นในทันที
Ss	การทรุดตัวรอง
S <sub>total</sub>	การทรุดตัวทั้งหมด
x	ความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุถมกลับ ( $kg/m^3$ )
y	กำลังอัดของก้อนวัสดุถมกลับ (MPa)
$\epsilon$	หน่วยแรงเครียดตามแนวแกน
$\tau$	หน่วยแรงเฉือนที่กระทำบนระนาบที่พิจารณา
$\sigma$	กำลังอัด (Pa)
$\sigma_n$	หน่วยแรงเค้นตั้งฉากที่กระทำบนระนาบที่พิจารณา
$\emptyset$	มุมเสียดทานภายในมวลดิน
UDEC	Universal Distinct Element Code
5BF20	ร้อยละ FGD Gypsum 5 และ ร้อยละเถ้าลอย 20
7BF20	ร้อยละ FGD Gypsum 7 และ ร้อยละเถ้าลอย 20
9BF20	ร้อยละ FGD Gypsum 9 และ ร้อยละเถ้าลอย 20
15BF30	ร้อยละ FGD Gypsum 15 และ ร้อยละเถ้าลอย 30
17BF30	ร้อยละ FGD Gypsum 17 และ ร้อยละเถ้าลอย 30
19BF30	ร้อยละ FGD Gypsum 19 และ ร้อยละเถ้าลอย 30

### สัญลักษณ์ค่าย่อและตัวย่อ

50TP30FA15FGD	ร้อยละหางแร่โปแตช 50 ร้อยละเถ้าลอย 30 ร้อยละ Gypsum 15 ร้อยละซีเมนต์ 5	FGD
50TP30FA17FGD	ร้อยละหางแร่โปแตช 50 ร้อยละเถ้าลอย 30 ร้อยละ Gypsum 17 ร้อยละซีเมนต์ 3	FGD
50TP30FA19FGD	ร้อยละหางแร่โปแตช 50 ร้อยละเถ้าลอย 30 ร้อยละ Gypsum 19 ร้อยละซีเมนต์ 1	FGD
70TP20FA5FGD	ร้อยละหางแร่โปแตช 70 ร้อยละเถ้าลอย 20 ร้อยละ Gypsum 5 ร้อยละซีเมนต์ 5	FGD
70TP20FA7FGD	ร้อยละหางแร่โปแตช 70 ร้อยละเถ้าลอย 20 ร้อยละ Gypsum 7 ร้อยละซีเมนต์ 3	FGD
70TP20FA9FGD	ร้อยละหางแร่โปแตช 70 ร้อยละเถ้าลอย 20 ร้อยละ Gypsum 9 ร้อยละซีเมนต์ 1	FGD

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

แร่โปแตช (Potash) เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตปุ๋ยโปแตชเชียม ซึ่งเป็นหนึ่งในธาตุอาหารหลักของพืชผลทางการเกษตรและยังไม่มีสารอื่นมาทดแทนสารชนิดนี้ได้ ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่สามารถส่งออกผลิตผลทางการเกษตรได้เป็นอันดับที่ 15 ของโลก ขณะเดียวกันสามารถส่งออกข้าว มันสำปะหลัง และอื่น ๆ ได้เป็นอันดับต้น ๆ (ข้อมูลจากสถานการณด้านเศรษฐกิจ,กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2553) ขณะนี้รัฐบาลได้มีนโยบายผลิตพืชอาหารและพืชพลังงานทดแทนให้มากขึ้น ทำให้จำเป็นต้องใช้ปุ๋ยในงานเกษตรมากขึ้นอีก ในปัจจุบันประเทศไทยต้องนำเข้าโปแตชประมาณ 300,000 ตันต่อปี มีราคาประมาณ 140 เหรียญสหรัฐต่อตัน จากต่างประเทศทั้งสิ้น (แคนาดา,เยอรมนี) โดยนำโปแตชมาผสมกับธาตุ N ธาตุ P และธาตุ K เพื่อให้ได้ปุ๋ยมาตรฐาน NPK ออกมา (ข้อมูลจากฐานเศรษฐกิจ: ไทยไร้เครดิตอาเซียนอนาคตโปแตชขึ้นอยู่กับนักลงทุน, <http://www.thannews.th.com>) แม้ว่าจะมีการค้นพบมาหลายสิบปีแล้วก็ตามประเทศไทยมีแร่โปแตชซึ่งเป็นกลุ่มแร่เกลือระเหยอยู่ใต้พื้นดินทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือจำนวนมหาศาล โดยมีทั้งปริมาณและคุณภาพระดับต้นๆ ของโลก แหล่งเกลือระเหยของประเทศไทยปรากฏในแอ่งย่อยๆ 2 แอ่ง บนที่ราบสูงอีสาน ได้แก่แอ่งสกลนครทางด้านเหนือที่มีขอบเขตต่อเนื่องเข้าไปในเขตประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาวเล็กน้อย กับแอ่งโคราชทางตอนใต้ที่มีขอบเขตอยู่ในประเทศไทยทั้งหมด ซึ่งจำเป็นต้องพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เกิดประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ ในระยะเวลาที่ผ่านมาได้มีความพยายามจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อให้มีการพัฒนาแหล่งแร่นี้ให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์กับเกษตรกรทั่วทั้งประเทศ ซึ่งจะได้รับอานิสงค์จากการใช้ปุ๋ยโปแตชเชียมภายในประเทศที่มีราคาถูกลง อีกทั้งสามารถผลิตแร่เพิ่มเติมเพื่อส่งออกไปยังประเทศใกล้เคียงซึ่งส่วนใหญ่ก็เป็นประเทศเกษตรกรรมด้วยเช่นกัน แต่ความพยายามดังกล่าวยังไม่เกิดผลสำเร็จอันเนื่องมาจากการขาดการวางแผนพัฒนา การศึกษาวิจัย และการจัดทำแนวทางการบริหารจัดการแร่โปแตชและผลกระทบจากกิจกรรมการดำเนินงานของการแต่งแร่โปแตช ที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการศึกษาวิจัยผลกระทบของหางแร่โปแตชที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทำเหมืองและกระบวนการแต่งแร่หลังจากการเปิดทำเหมืองในอนาคต โดยให้เกิดผลกระทบน้อยที่สุด

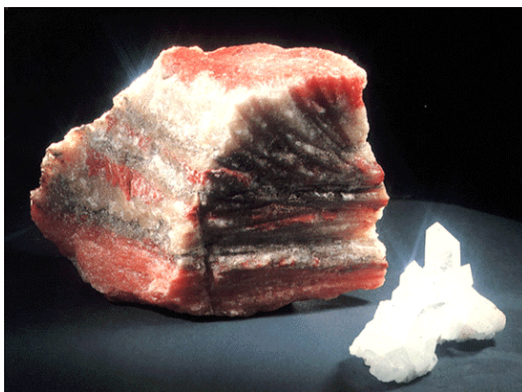


เพื่ออำนวยความสะดวกให้แก่ประเทศชาติทั้งทางด้านสังคม สิ่งแวดล้อม และเศรษฐกิจ จนไปถึงชุมชนบริเวณพื้นที่การทำเหมือง

สภาพโครงสร้างทางธรณีส่วนใหญ่ของแหล่งแร่โปแตชของประเทศไทยจะอยู่ลึกลงไปจากใต้ดินประมาณ 150 – 350 เมตร ซึ่งถ้าหากคำนวณทางเศรษฐศาสตร์เหมืองแร่แล้วไม่คุ้มทุนที่จะทำเหมืองแบบเหมืองเปิด จำเป็นต้องทำเหมืองแร่โปแตชแบบเหมืองใต้ดิน ซึ่งปัจจุบันได้ดำเนินการขอประทานบัตรไปบางส่วน (ข้อมูลจากกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2545) แต่การดำเนินการที่จะพยายามเปิดเหมืองใต้ดินก็ยังไม่เป็นผลมากนัก เพราะในการทำเหมืองใต้ดินเพื่อการผลิตแร่โปแตชในประเทศไทยนั้น จะเกิดปัญหาที่ตามมามากมายได้แก่ ปัญหาเรื่องความปลอดภัยในด้านของชีวิตและทรัพย์สินของคนงานเหมืองและรวมไปถึงชาวบ้านอาศัยและทำมาหากินอยู่บนที่ดินบนพื้นที่การทำเหมืองใต้ดินด้านล่าง ก็อาจเกิดได้รับผลกระทบจากการทำเหมืองใต้ดินนี้ด้วย ซึ่งผลกระทบดังกล่าวนี้อาจจะเกิดจากความไม่เสถียรของดินหรือหินที่โครงสร้างของเหมืองใต้ดิน ซึ่งอาจจะเกิดถล่มหรือเกิดการยุบตัวของผนังโครงสร้างเหมืองใต้ดินลงมาได้ และปัญหาการจัดการเปลือกดิน (Burden) และหางแร่โปแตชซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการแต่งแร่โปแตชที่มีจำนวนมาก โดยทั่วไปแร่ที่ขุดมาแต่ละลูกบาศก์เมตรจะก่อให้เกิดหางแร่ประมาณ 1.35 ตัน (ข้อมูลจากโครงการเหมืองแร่โปแตช จังหวัดอุดรธานี 14 มิถุนายน 2547) ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อมบริเวณข้างเคียง เช่น ปัญหาการเกิดดินเค็มอันเนื่องมาจากการซึมผ่านหรือการรั่วไหลของหางแร่ที่ละลายจากกองเก็บหางแร่ หรือการปนเปื้อนลงในแม่น้ำธรรมชาติ และจะส่งผลเสียต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในบริเวณพื้นที่การทำเหมือง ซึ่งการนำเทคนิคการถมกลับ (Backfill) มาใช้ถือว่าเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับเหมืองใต้ดินในตอนนี้ การนำเทคนิคการถมกลับมาใช้ในการทำเหมืองใต้ดินนอกจากจะช่วยค้ำยันโครงสร้างของเหมืองใต้ดินให้มีความปลอดภัยภายหลังจากการเลิกทำเหมืองไปแล้ว ยังช่วยกำจัดหางแร่และวัสดุที่ไม่ต้องการจากการทำเหมืองในอีกทางหนึ่งด้วย ซึ่งช่วยลดปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย และจะช่วยให้การเก็บแร่ได้มากขึ้นอีกด้วย เพราะแร่ส่วนหนึ่งที่เคยเป็นเสาหรือส่วนค้ำยันในเหมืองใต้ดินซึ่งมีเปอร์เซ็นต์แร่สูงอยู่ก็สามารถนำออกมาใช้ประโยชน์ได้หมดโดยไม่ต้องกังวลว่าจะเกิดการถล่มของโครงสร้างบ่อเหมืองลงมา เพราะมีส่วนของวัสดุถมกลับช่วยทำหน้าที่ค้ำยันแทนส่วนที่นำแร่ออกไปแทน ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของการเก็บได้มากขึ้น ทั้งนี้งานวิจัยทางด้านเทคนิคการถมกลับในเหมืองใต้ดินของประเทศไทยยังมีน้อยอยู่ หากมีการวิจัยที่แพร่หลายมากขึ้นจะทำให้เป็นประโยชน์ต่อโครงการทำเหมืองใต้ดินในประเทศไทยต่อไป และยังสามารถสร้างความมั่นใจให้กับชาวบ้านที่กำลังหวาดระแวงหรือกลัวว่าจะเกิดแผ่นดินยุบอันเนื่องมาจากการทำเหมืองใต้ดินและการจัดการปัญหาสิ่งแวดล้อมแบบครบวงจร

## 1.2 ทฤษฎีและหลักการ

### 1.2.1 แร่โปแตช



รูปที่ 1.1 ผลึกแร่โปแตช (Terri Bennett and David Ferris, 2007)

#### การกำเนิดของแหล่งแร่โปแตช

แร่โปแตชเป็นชื่อสามัญที่ใช้เรียกสารประกอบที่มีธาตุโปแตสเซียม (K) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยแหล่งโปแตชตามธรรมชาติเกิดขึ้นจากการที่น้ำทะเลถูกขังอยู่ในแอ่ง เป็นเวลานานนับล้านปี เมื่อน้ำทะเลถูกระเหยไปจนหมดคงเหลือแต่ชั้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และแร่ธาตุหลายชนิดรวมทั้งโปแตช หลังจากนั้นได้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเปลือกโลก ผืนแผ่นดินได้เคลื่อนตัวมาทับถมแอ่งเหล่านั้น จนทำให้เกิดแหล่งเกลือหินและโปแตชอยู่ใต้ผิว

#### 1.2.1.1 ชนิดของแร่โปแตช

- ซิลไวท์ (Sylvite: KCl) เป็นแร่โปแตชที่สำคัญที่สุด

ส่วนประกอบ ได้แก่โปแตสเซียมร้อยละ 52.44 K หรือ 100 KCl หรือ 63.17 K<sub>2</sub>O ซิลไวท์ ที่เกิดปนกับเกลือหินเรียกว่า ซิลวิไนท์ (Sylvinit)

สมบัติ มีสีคล้ายเกลือหิน แตกต่างกับเกลือหินตรงที่อ่อนกว่าและมีรสฝาดหรือฝื่อน สีของซิลไวท์จะมีตั้งแต่ขาวขุ่นใส ไม่มีสี จนถึงสีแดงหรืออมแดง

- คาร์นัลไลต์ (Carnallite :  $\text{KCl}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )

ส่วนประกอบ ได้แก่โปแตสเซียมคลอไรด์ (KCl) ร้อยละ 26.83 แมกนีเซียมคลอไรด์ ( $\text{MgCl}_2$ ) ร้อยละ 34.72 และน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ร้อยละ 38.90 คิดเป็น  $\text{K}_2\text{O}$  จะเท่ากับร้อยละ 16.95 แร่คาร์นัลไลต์ที่มีเกลือ หินปน เรียกว่า Carnallitite

สมบัติ มีสีต่าง ๆ ตั้งแต่ใส ไม่มีสี สีขาว และสีแสดอมแดงของแร่เหล็กเข้ามาปน บางครั้งจะมีสีชมพูอมม่วง ละลายน้ำได้ง่ายกว่าซิลิไท์มาก มีรสฝื่อนมากกว่า ซิลิไท์

- เคนไนท์ (Kainite:  $\text{MgSO}_4\cdot\text{KCl}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )

ส่วนประกอบ ได้แก่โปแตสเซียมคลอไรด์ (KCl) ร้อยละ 29.94 แมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) ร้อยละ 48.35 และน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ร้อยละ 21.71 โดยเมื่อคิดเป็น  $\text{K}_2\text{O}$  จะได้เท่ากับร้อยละ 18.92

สมบัติ มีสีต่างๆ และบางครั้งใส ไม่มีสี ละลายน้ำได้ง่าย มักจะเกิดแทนที่แร่อื่น ๆ เช่น Carnallite

- แลงบิไนท์ (Langbenite:  $\text{K}_2\text{SO}_4\cdot 2\text{MgSO}_4$ )

ส่วนประกอบ ได้แก่ โปแตสเซียมซัลเฟต ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) ร้อยละ 41.99 แมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) ร้อยละ 58.01 และน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ร้อยละ 21.71 โดยเมื่อคิดเป็น  $\text{K}_2\text{O}$  จะได้เท่ากับร้อยละ 18.92

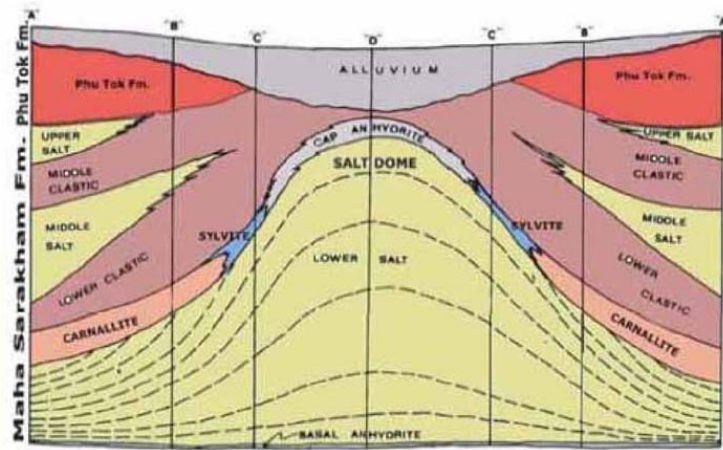
สมบัติ ไม่มีสี ใส บางครั้ง มีสีแดงและเหลือง มักจะเกิดกับเกลือหินหรือแอนไฮไดรต์

### 1.2.1.2 แหล่งแร่โปแตช

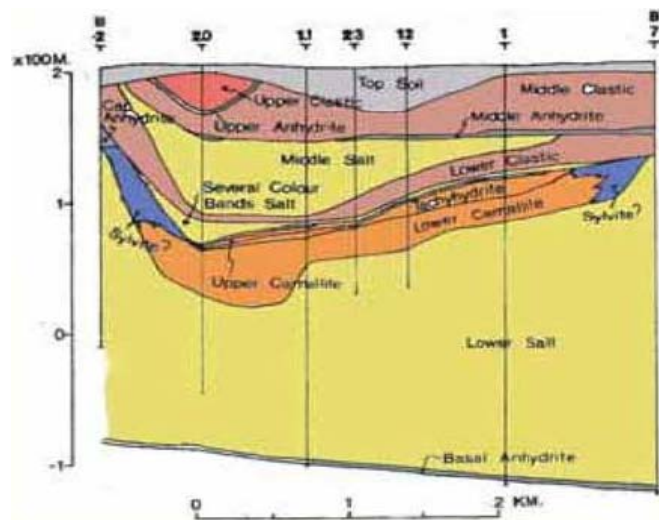
จากการสำรวจแหล่งน้ำบาดาลในภาคตะวันออกเฉียงเหนือทำให้พบแร่เกลือหิน และแร่โปแตชชนิดคาร์นัลไลต์จำนวนมาก บริเวณที่พบแร่เกลือหินและแร่โปแตช สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แห่ง คือ

1) แอ่งเหนือ หรือ แอ่งสกลนคร (Sakonnakhon Basin) อยู่ทางตอนเหนือของที่ราบสูงโคราช ครอบคลุมพื้นที่ของจังหวัดอุดรธานี หนองคาย สกลนคร และนครพนม เป็นเนื้อที่ประมาณ 17,000 ตารางกิโลเมตร เป็นพื้นที่ที่มีแหล่งแร่โปแตชศักยภาพสูงสุดของประเทศ และอยู่ในอันดับต้นๆ ของโลก โครงสร้างทางธรณีวิทยาโดยปรากฏมีแร่โปแตชอยู่ชั้นเดียว พบที่ระหว่างความลึก 200 – 400 เมตร จากผิวดิน ลักษณะชั้นเอียงเตลด้วยความลาดเอียงน้อยกว่าร้อยละ 15 ชั้นแร่โปแตชจะวางตัวอยู่บนเกลือหินด้านล่าง ที่ประกอบด้วยชั้นแร่คาร์นัลไลต์ ถัดขึ้นมาเป็นชั้นซิลิไท์ในชั้นคุณภาพสูง (กรมทรัพยากรธรณี, 2552)

2) แอ่งใต้ หรือ แอ่งโคราช (Khorat Basin) อยู่ทางตอนใต้ ของที่ราบสูงโคราช ครอบคลุมพื้นที่ของจังหวัดขอนแก่น มหาสารคาม กาฬสินธุ์ ร้อยเอ็ด ยโสธร อุบลราชธานี นครราชสีมา ชัยภูมิ สุรินทร์ และบุรีรัมย์ เป็นเนื้อที่ประมาณ 33,000 ตารางกิโลเมตร ลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาจะมีลักษณะเป็นแอ่งและโดมเกลือ โดยยอดโดมของเกลือจะปรากฏอยู่ค่อนข้างตื้น ถัดจากโดมเกลือไปด้านข้างจะมีลักษณะเป็นแอ่ง ศักยภาพของแร่โปแตชในแหล่งนี้คือ บริเวณกลางแอ่งเป็นแร่คาร์เนลไลต์หรือดังแสดงในรูปที่ 1.2 ต่อเรื่อยขึ้นมาถึงบริเวณไหล่ของโดมเกลือจะปรากฏเป็นแร่ซิลไวต์ (กรมทรัพยากรธรณี, 2552)



รูปที่ 1.2 โครงสร้างทางธรณีของชั้นเกลือหินและโปแตชในหมวดหินมหาสารคาม (Suwanich, 1986)



รูปที่ 1.3 ภาพตัดขวางโครงสร้างรูปแอ่งในพื้นที่บ่อน้ำหนึ่งณรงค์ (Suwanich, 1986)

### 1.2.1.3 หางแร่โปแตช



รูปที่ 1.4 หางแร่โปแตช

หางแร่โปแตช โดยทั่วไปแร่ที่ขุดมาแต่ละลูกบาศก์เมตรจะก่อให้เกิดหางแร่ประมาณ 1.35 ตัน หางแร่ประกอบด้วยเกลือที่มีขนาดต่าง ๆ กันตั้งแต่ 2.4 มิลลิเมตรไปจนถึงขนาดเล็กมากหางแร่โปแตชส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในขั้นตอนการลอยแร่

ส่วนประกอบ ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ร้อยละ 46.1 โปแตชเซียมคลอไรด์ (KCl) ร้อยละ 2.2 แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl<sub>2</sub>) ร้อยละ 0.2 Unsoluteabled Material ร้อยละ 51.5

สมบัติ มีสีต่างๆ คละกัน ความหนาแน่น 2,160 kg/m<sup>3</sup> ความพรุนร้อยละ 10 ขนาดต่าง ๆ กันตั้งแต่ 2.4 มิลลิเมตรไปจนถึงขนาดเล็กมาก และมีเศษหิน ดิน ทราย ปะปนอยู่

## 1.2.2 วัสดุยึดประสาน

### 1.2.2.1 ปอซโซลาน (pozzolan)

เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่าย

ขึ้น เป็นต้น วัสดุปอซโซลานที่จะกล่าวถึงในบทนี้ได้แก่ เถ้าถ่านหิน ซิลิกาฟูม เถ้าแกลบ นอกจากนี้ยังมีตะกรันเตาถลุงเหล็ก ซึ่งเป็นวัสดุกึ่งปอซโซลานและกึ่งซีเมนต์

ตาม ASTM C618 (1991) ได้จำแนกปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

1) ชั้นคุณภาพ N (Class N) เป็นปอซโซลานจากธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านขบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการ

2) ชั้นคุณภาพ F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) โดยมีปริมาณผลรวมของซิลิกาออกไซด์ (Silica Oxide,  $\text{SiO}_2$ ) อลูมินาออกไซด์ (Alumina Oxide,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric Oxide,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มากกว่าร้อยละ 70 ซึ่งโดยทั่วไปเถ้าลอย ชั้นคุณภาพ F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide,  $\text{CaO}$ ) ที่ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ  $\text{SiO}_2$  มาจากรังดินเหนียวและควอร์ตซ์ เนื่องจากถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีรังดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี  $\text{SiO}_2$  สูง

3) ชั้นคุณภาพ C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) หรือซับบิทูมินัส (Subbituminous) เป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณผลรวมของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 50 มีปริมาณ  $\text{CaO}$  สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618, (1991) เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มาจากรังดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่ำ ทำให้เถ้าลอย Class C มี  $\text{SiO}_2$  ต่ำและ ยังมี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่ำด้วย เถ้าลอย Class C นอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานแล้ว ยังมีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง เนื่องจากมีปริมาณ  $\text{CaO}$  สูง เถ้าลอยแม่เมาะในระยะแรกส่วนใหญ่เป็นเถ้าลอยแคลเซียมสูง โดยมีปริมาณ  $\text{CaO}$  สูงถึงร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง (ปริญญา และคณะ, 2547)

วัสดุจำพวกปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีที่มาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ ปอซโซลานที่ได้จากขบวนการผลิต (Artificial Pozzolan) และปอซโซลานจากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ปอซโซลานที่มาจากธรรมชาติ ได้แก่ ไดอะตอมมาเซียสเอิร์ธ (Diatomaceous Earth) เถ้าภูเขาไฟ เปลือกหอย หินภูเขาไฟ วัสดุเหล่านี้เมื่อนำไปใช้งานจะต้องนำไปผ่านขบวนการต่าง ๆ ก่อนจึงจะนำไปใช้งานได้ เช่น การเผา การบด และการทำให้แห้ง เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำเอาปอซโซลานจากธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเขื่อนและสะพาน เพื่อช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ ช่วยเพิ่มความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากซัลเฟต และช่วยในการควบคุมปฏิกิริยาระหว่างต่างกับซิลิกา นอกจากนี้ยังมีผลพลอยได้ในการลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอีกทางหนึ่งด้วย

### 1) การนำวัสดุปอซโซลานมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ คือผลผลิตส่วนหนึ่งที่ได้จากกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งถูกปล่อยให้เป็นอิสระในระหว่างการก่อตัวของปูนซีเมนต์ตามทฤษฎีพื้นฐานปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นเมื่อสารประกอบซิลิกาในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระเพื่อที่จะเปลี่ยนรูปเป็นสารซีเมนต์ สำหรับปฏิกิริยานี้ซิลิกาต้องอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ถ้าอยู่ในรูปผลึกจะมีผลต่อปฏิกิริยาช้ามาก ดังนั้นอัตราการเพิ่มกำลังรับแรงอัดจึงขึ้นอยู่กับความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับวัสดุปอซโซลาน โดยทั่วไปอัตราส่วนของวัสดุปอซโซลานที่ใช้จะอยู่ระหว่างร้อยละ 15-50 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ทั้งหมด

การประยุกต์ใช้วัสดุปอซโซลานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้น จะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัด โดยอนุภาคของวัสดุปอซโซลานซึ่งมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคเม็ดปูนซีเมนต์ เมื่อแพร่กระจายเข้าไปในเพสต์แล้วจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลаниค ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตแทรกตามอนุภาคของเม็ดปูนซีเมนต์ ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้เพสต์มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มากขึ้นและเพิ่มความหนาแน่นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต นอกเหนือจากปฏิกิริยาปอซโซลаниคแล้วยังเกิดการแทรกซึมของสารปอซโซลานที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาเข้าไปในรูพรุนด้วย

### 2) ปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดต่อเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาไดรอกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ ซิลิกาฟูม และซีโอไลต์ เป็นต้น ผลที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งเป็นสารที่ให้กำลังแก่คอนกรีตเช่นเดียวกับที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

#### 1.2.2.2 เถ้าลอย (Fly ash)

เถ้าลอย หรือเถ้าถ่านหิน เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินจะถูกพัดออกมาตามลมร้อนเพื่อออกไปสู่ปล่องควัน จากนั้นตัวดักจับ (Electrostatic Precipitator) จะรวบรวมเถ้าถ่านหินเพื่อเก็บไว้ในไซโลต่อไป ส่วนประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอยประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  ซึ่งสารเหล่านี้เป็นสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้น เถ้าลอยจึงมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานเมื่อผสมน้ำ เถ้าลอยนิยมนำมาใช้งานคอนกรีต

มากกว่าในงานชนิดอื่นด้วยเหตุผลสองประการ คือ ประการแรกพบว่าเถ้าลอยมีออกไซด์ของธาตุซิลิกา, อะลูมินา และเหล็ก ซึ่งออกไซด์เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม ประการที่สอง เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็ก และส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีตเถ้าลอยจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างปูนซีเมนต์และหิน หรือทรายทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นและลักษณะทรงกลมของเถ้าลอยจะช่วยให้คอนกรีตมีการลื่นไหลได้ดีขึ้น (ปริญาและชัย, 2547)

การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการได้แก่ เพิ่มความสามารถในการเทได้ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ลดการหดตัว ลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และที่สำคัญคือ เพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น แต่ทั้งนี้การใช้เถ้าลอยจะมีข้อเสียคือ ทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น ลดความต้านทานต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันไป และทำให้ต้องใช้สารเพื่อเพิ่มฟองอากาศมากขึ้น เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศตามต้องการในระดับเดียวกับคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าลอยผสมอยู่ (Lane and Best, 1982)

ในทางปฏิบัติจะใช้เถ้าลอยผสมกับปูนซีเมนต์ ซึ่งเถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นสารปอซโซลานและจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ ปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้กำลังรับแรงที่อายุมากขึ้นดีขึ้น และเนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์และการลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จึงทำให้คุณสมบัติด้านความคงทนต่อการทำลายของเกลือซัลเฟตและคลอไรด์ดีขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยมีรูปร่างทรงกลม เมื่อผสมทดแทนปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มความสามารถทำงานได้ของส่วนผสมหรือทำให้ส่วนผสมต้องการน้ำลดลง ซึ่งทำให้ส่วนผสมมีความทึบน้ำสูงขึ้น และความคงทนดีขึ้นด้วยจึงนิยมใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตที่ต้องการความทนทานต่อการกัดกร่อนของสภาพแวดล้อม

เนื่องจากข้อดีของการใช้เถ้าลอยดังที่กล่าวไว้ข้างต้นจึงได้มีการใช้ประโยชน์จากเถ้าลอยอย่างแพร่หลาย เช่น งานสร้างเขื่อนกักเก็บน้ำและผลิตไฟฟ้า งานทอคอนกรีตสำเร็จรูป หรืองานคอนกรีตที่ต้องใช้ปริมาณคอนกรีตในปริมาณมากเพื่อลดค่าใช้จ่ายของโครงการให้ลดลง และเนื่องจากเถ้าลอยมีสมบัติด้านความคงทนต่อการทำลายของเกลือซัลเฟตและคลอไรด์ที่ดี จึงได้มีการนำเถ้าลอยมาแทนที่ปูนซีเมนต์ผสมกับหางแร่ไปเศษทำเป็นวัสดุถมกลับกำลังอัดต่ำ เพื่อใช้ในการค้ำยันในโครงการทำเหมืองใต้ดิน



### 1) องค์ประกอบทางเคมี

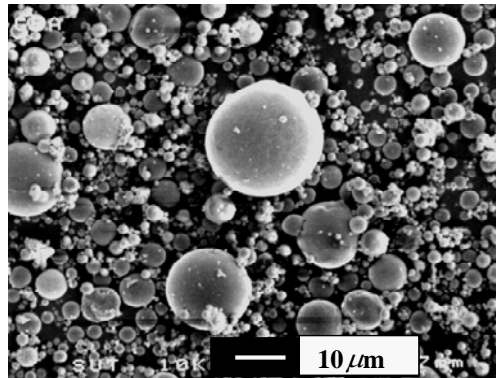
องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอยคือ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมขณะเผา ดังนั้น ASTM C 618 จึงแยกเถ้าลอยออกเป็น 2 ประเภท คือ Class F และ Class C โดยเถ้าลอย Class F มีประมาณ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และเถ้าลอย Class C มีปริมาณออกไซด์ดังกล่าวระหว่างร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก สำหรับโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นวัตถุดิบในการให้ความร้อน เถ้าลอยที่ได้เป็นทั้ง Class F และ Class C เนื่องจากถ่านหินเป็นวัสดุธรรมชาติและมีเนื้อไม้สม่ำเสมอ ดังนั้นคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีจึงต่างกัน (วารกรณ์ , 2536)

### 2) ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย

ความสามารถของเถ้าลอยในการรวมตัวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลานจะขึ้นอยู่กับความละเอียดและคุณสมบัติของเถ้าลอย เถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีส่วนประกอบที่มีสถานะที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) อยู่ประมาณร้อยละ 70-80 โดยเถ้าลอยที่ละเอียดจะมีความไม่เป็นผลึกสูงกว่าเถ้าลอยที่หยาบ เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงจึงสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าเถ้าลอยที่มีความละเอียดต่ำ นอกจากนี้เถ้าลอยที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำสามารถพัฒนากำลังได้เร็วเช่นกัน (Chindapasirt, 2001) ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ หลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันซิลิกาและอลูมินาออกไซด์ที่อยู่ในเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยากับ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีคุณสมบัติในการยึดประสานทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้น และเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุระหว่าง 7-14 วัน และมีปฏิกิริยาไปเรื่อย ๆ

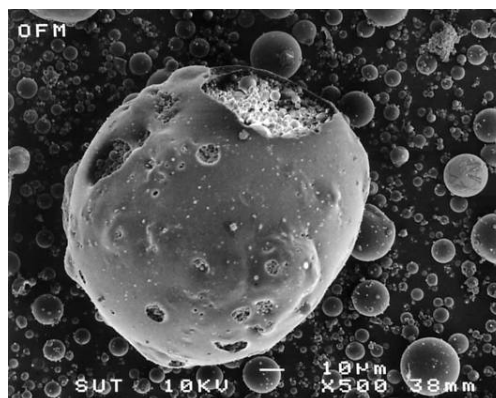
เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินที่ถูกบดในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าลอยประกอบด้วยอนุภาคทรงกลม ซึ่งมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบที่สำคัญประมาณร้อยละ 66-68 เถ้าลอยบางชนิดสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับปูนขาวและต่าง เกิดเป็นสารประกอบที่มีแรงยึดประสาน แต่เถ้าลอยบางชนิดก็สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและแข็งตัวได้เช่นเดียวกัน ถ้าถ่านหินโดยทั่วไปแล้วจะมีความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์เพียงเล็กน้อยโดยลักษณะทั่วไปจะเป็นรูปทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึง 0.15 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1.5 ถ่านหินที่กลวงมีน้ำหนักเบาและอาจลอยน้ำได้เรียกว่าถ่านหินกลวง (Cenospheres) และในบางครั้งภายในถ่านหินที่มีรูพรุนอาจมีถ่านหินขนาดเล็ก ๆ อยู่ภายในก็

ได้เรียกว่า Plerospheres ดังรูปที่ 1.6 ความละเอียดของเก้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินจะขึ้นอยู่กับกระบวนการบดถ่านหิน ชนิดของเครื่องบด และชนิดของเตาเผา ถ้ำถ่านหินละเอียดมากขึ้นและเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเตาเผา จะได้เก้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงและมีทรงกลม แต่ในกรณีที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์รูปร่างของเก้าถ่านหินจะไม่แน่นอน



รูปที่ 1.5 ภาพถ่ายขยายของเก้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าที่ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง

(ธีรวัฒน์ และคณะ, 2548)

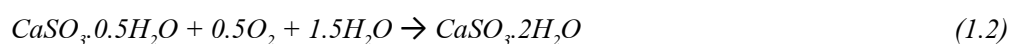
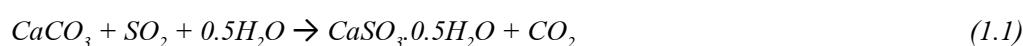


รูปที่ 1.6 Plerospheres เป็นเก้าถ่านหินที่มีรูพรุนและมีเก้าถ่านหินเม็ดเล็ก ๆ อยู่ภายใน

(ธีรวัฒน์ และคณะ, 2548)

### 1.2.2.3 แอฟไซด์ ยิปซัม (FGD Gypsum) หรือยิปซัมเทียม

Flue Gas Desulfurization Gypsum หรือ FGD Gypsum หรือยิปซัมเทียม เกิดจากการสังเคราะห์ของก๊าซไอเสียจากกระบวนการดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Desulfurization) โดยใช้ น้ำหินปูนเป็นวัตถุดิบตั้งต้นทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจน ดังสมการที่ 1.1-1.2 (Li and Sadakata, 1999)



ซึ่งสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ใน FGD gypsum มีคุณสมบัติช่วยแข็งตัวของคอนกรีตเป็นส่วนใหญ่ โดยทั่วไปแล้วกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะใส่ยิปซัมลงไปในช่วงตอนของการบดปูนเม็ด (Clinker) เพื่อให้ปูนซีเมนต์ที่ได้มีอัตราส่วนของลูมิเนตไอออน (ในสารประกอบไตรแคลเซียมลูมิเนต) ต่อซัลเฟตไอออน (ในสารประกอบแคลเซียมซัลเฟต) ในสัดส่วนที่เหมาะสมที่จะทำให้ปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้เมื่อนำไปใช้งานแล้วมีการก่อตัวแบบปกติรวมถึงให้กำลังอัดที่มีค่าสูงสุด (Maximum Cement Strength) และการหดตัวที่ได้มีค่าน้อยสุด (Minimum Shrinkage) ด้วย ASTM C618 ได้กำหนดปริมาณของแคลเซียมซัลเฟตในซีเมนต์เพสต์ที่มีค่าได้ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ถ้าปริมาณยิปซัมที่ใส่มีปริมาณมากเกินไปหรือน้อยเกินไปจะทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ได้เมื่อนำไปใช้งานจะมีพฤติกรรมในด้านต่าง ๆ อาทิเช่น กำลังอัด ระยะเวลาการก่อตัว หรือการหดตัวเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

ในซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีซัลเฟตไอออน ( $SO_4^{2-}$ ) หรือมีในปริมาณที่น้อยกว่าลูมิเนตไอออน ( $AlO_4^-$ ) สารประกอบไตรแคลเซียมลูมิเนต  $3(CaO \cdot Al_2O_3)$  เมื่อโดนน้ำจะสามารถละลายน้ำและทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำได้ทันที ทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ได้จากการใช้ปูนซีเมนต์ที่ไม่มีซัลเฟตไอออนเกิดการก่อตัวอย่างฉับพลัน (Flash Set) ภายในระยะเวลาไม่ถึง 10 นาที อีกทั้งยังมีความร้อนเกิดขึ้นด้วยหลังจากที่ไตรแคลเซียมลูมิเนตได้ทำปฏิกิริยากับน้ำ ซีเมนต์เพสต์ที่ได้ไม่สามารถนำไปใช้ในการทำงานได้เนื่องจากการสูญเสียความสามารถในการไหลของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นในกระบวนการผลิตซีเมนต์เพสต์จึงต้องใส่สารประกอบแคลเซียมซัลเฟตที่มีซัลเฟตไอออนอยู่ได้แก่ ยิปซัม ซึ่งสามารถละลายน้ำได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับสารประกอบอื่น ๆ ในปูนซีเมนต์ เพื่อในยิปซัมทำหน้าที่เป็นตัวหน่วงในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมลูมิเนตทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ได้มีการก่อตัวแบบปกติ (Normal Set) สามารถใช้งานได้ปกติ

### 1.2.2.4 ปูนซีเมนต์ (Cement)

ปูนซีเมนต์เป็นผลผลิตที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่าง ๆ (หินปูนกับดินเหนียว) จนรวมตัวผสมกันสุกพอดี มีส่วนผสมทางเคมีที่สำคัญ คือแคลเซียมและอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์นั้น การทำปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) อัตราการก่อตัวและแข็งตัวตลอดจนปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับความละเอียดและส่วนประกอบของผงปูน ส่วนความแข็งแรงและความทนทานเมื่อแข็งตัวแล้วขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสมและการให้ความชื้นในขณะที่เริ่มแข็งตัว

#### 1) องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

วัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้จาก หินปูน ททราย ดินเหนียว ศิลาแลง วัตถุดิบเหล่านี้ให้ปริมาณออกไซด์ของธาตุที่แตกต่างกัน เช่น หินปูนให้ออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ดินเหนียวและทราयीให้ออกไซด์ของธาตุซิลิกา ศิลาแลงให้ออกไซด์ของธาตุเหล็ก เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ค่าออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญญา, 2547)

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60-67
SiO <sub>2</sub>	17-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5-6.0
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1-5.5
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	0.5-1.3
TiO <sub>2</sub>	0.1-0.4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1-0.2
SO <sub>3</sub>	1-3

ออกไซด์หลักจะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนซีเมนต์เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 1.2

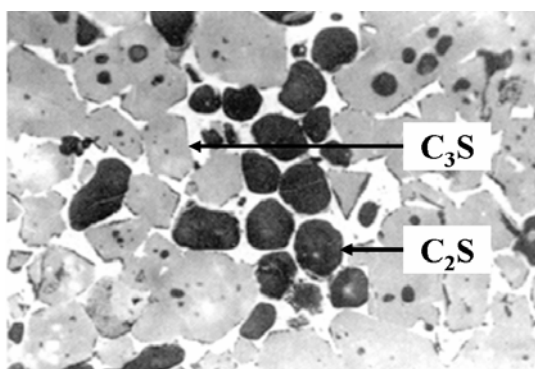
ตารางที่ 1.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญญา, 2547)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
ไตรแคลเซียมอะลูมิเนียม	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
เตตราแคลเซียมอะลูโนเฟอร์ไรท์	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

## 2) สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

- ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_3\text{S}$ )

$\text{C}_3\text{S}$  เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 1.7 สมบัติของ  $\text{C}_3\text{S}$  เหมือนกับสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ  $\text{C}_3\text{S}$  ถูกกระทบโดยปริมาณยิปซัมปริมาณ  $\text{C}_3\text{S}$  ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 35-55



รูปที่ 1.7 รูปร่างลักษณะของ  $\text{C}_3\text{S}$  ซึ่งเป็นผลึกรูป 6 เหลี่ยม และ  $\text{C}_2\text{S}$  เป็นเม็ดกลมสีดำ (ปริญญา, 2547)

- ไคแคลเซียมซัลไฟด์ ( $C_2S$ )

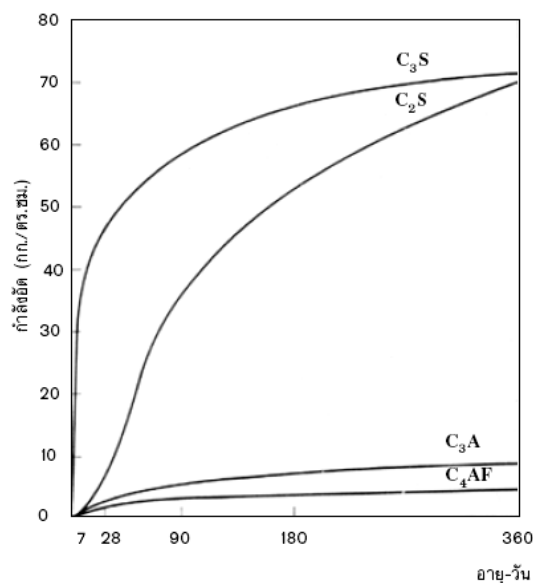
$C_2S$  เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม  $C_2S$  มีอยู่หลายรูปแบบแต่มีเพียง  $C_2S$  เท่านั้นที่อยู่ตัว ณ อุณหภูมิทั่วไป  $C_2S$  มีสมบัติยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้า ๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ  $C_3S$  ซึ่งปริมาณ  $C_2S$  ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 15-35

- ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ )

$C_3A$  เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน  $C_3A$  จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิปซัมลงไประหว่างการบดซีเมนต์ กำลังอัดของ  $C_3A$  จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี  $C_3A$  อยู่ในปริมาณร้อยละร้อยละ 7-15

- เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ( $C_4AF$ )

$C_4AF$  ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ  $C_4AF$  ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี  $C_4AF$  อยู่ในปริมาณร้อยละ 5-10 สมบัติที่สำคัญของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด สรุปได้ดังตารางที่ 1.3 และกราฟรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 การพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลัก (ปริญาญา, 2547)

### 3) สารประกอบรองในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

- ยิปซั่ม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

ยิปซั่มถูกใส่เข้าไปในระหว่างบดปูนเม็ด เพื่อทำหน้าที่ควบคุมเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ปริมาณยิปซั่มที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์เกิดกำลังอัดสูงที่สุดและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิปซั่มที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับ

- อัลคาไลท์ออกไซด์ อัน ได้แก่  $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{K}_2\text{O}$
- ปริมาณ  $\text{C}_3\text{A}$
- ความละเอียดของปูนซีเมนต์

- Free Lime ( $\text{CaO}$ )

Free Lime จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้า ๆ หลังจากที่ซีเมนต์แข็งตัวแล้วซึ่งอาจก่อให้เกิดการแตกร้าวเสียหายได้หรือที่เรียกว่าซีเมนต์ไม่อยู่ตัว เนื่องจาก Free Lime เกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ

- เมื่อวัตถุดิบมี Lime มากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยา  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ได้หมด
- ปริมาณ Lime มีไม่มากแต่ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ต่าง ๆ ไม่สมบูรณ์

- แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ )

วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่จะมี  $\text{MgCO}_3$  ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้  $\text{MgO}$  และ  $\text{CO}_2$  แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ดที่เหลือจะอยู่ในรูปของ  $\text{MgO}$  และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเหมือนกับ  $\text{CaO}$  คือปริมาณจะเพิ่มขึ้นซึ่งก่อให้เกิดการไม่อยู่ตัว ซึ่งการขยายตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

- ปริมาณของ  $\text{MgO}$  ในปูนซีเมนต์
- ขนาดของ  $\text{MgO}$  ถ้าขนาดเล็กมาก ๆ จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็ว โดยไม่ก่อให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์ที่แข็งตัว

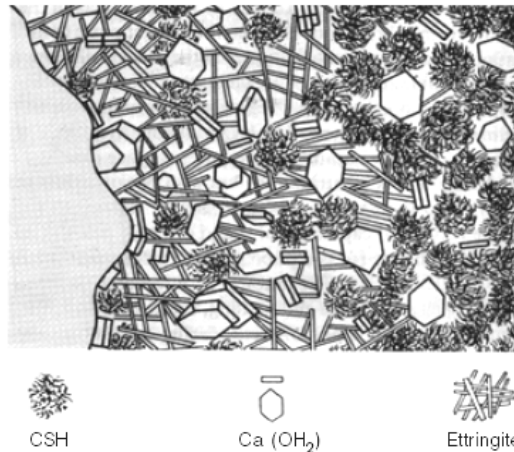
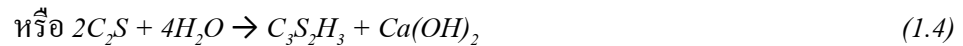
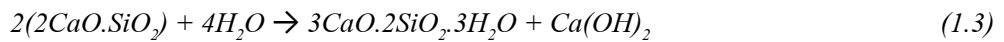
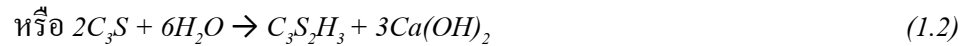
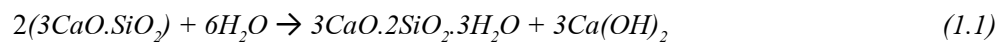
- อัลคาไลท์ออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ )

อัลคาไลท์ออกไซด์ที่อยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสียในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลท์มาผสมเป็นคอนกรีต ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย ในกรณีที่จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลท์ ควรเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลท์ต่ำ

#### 4) ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

- ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ,  $C_2S$ )

แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ดังแสดงในรูปที่ 1.9 และสมการการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้ (ปริญญา, 2547)



รูปที่ 1.9 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (ปริญญา, 2547)

จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเกิดเจลซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate) จะขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในที่นี้จะใช้ตัวย่อ CSH แทนแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะมีองค์ประกอบและโครงสร้างเป็นอย่างไร แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ซีเมนต์



เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมาก คือมีค่า pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดี

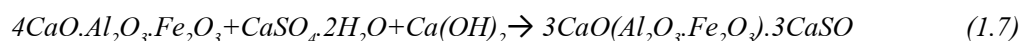
- ปฏิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ )

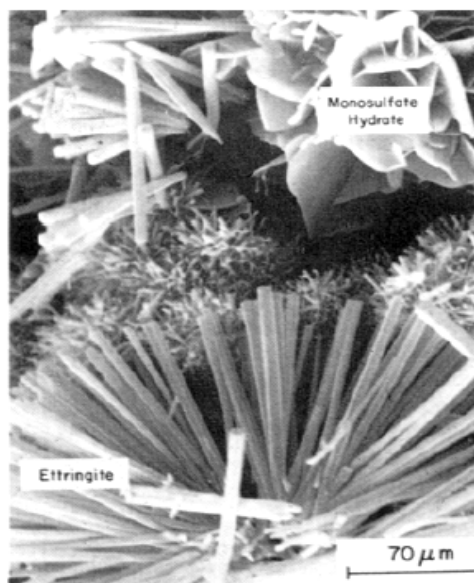
ปฏิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  จะเกิดขึ้นที่ทันใด และส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 1.5 และ 1.6



เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิริยานี้อย่างรวดเร็วจึงใส่ยิปซัม ( $CaSO_4.2H_2O$ ) เข้าไปในระหว่างการบดซีเมนต์ยิปซัมจะทำปฏิริยากับ  $C_3A$  ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค  $C_3A$  ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ  $C_3A$  และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิริยาไฮเดรชันของ  $C_3S$  และ  $C_2S$  เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  กล่าวคือเมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจาก การเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออกและเกิดปฏิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  แต่เมื่อเกิดการแตกตัวจะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่งซัลเฟตไอออน (Sulphate Ions) มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็นโมโนซัลเฟต (Monosulphate) ดังแสดงในรูปที่ 1.10

ปฏิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ( $C_4AF$ ) ปฏิริยาไฮเดรชันของ  $C_4AF$  นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย  $C_4AF$  จะทำปฏิริยากับยิปซัมและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของซัลเฟอร์ออลูมิเนต (Sulphoaluminate) และซัลเฟอร์เฟอร์ไรต์ (Sulphoferrite) ดังสมการที่ 1.7





รูปที่ 1.10 ภาพขยาย Monosulphate และ Ettringite (ปริญญา, 2547)

เวลาที่ใช้เพื่อให้บรรลุปฏิกิริยาไฮเดรชันร้อยละ 80 ของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิดแสดงในตารางที่ 1.4

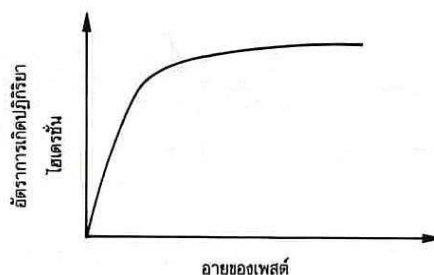
ตารางที่ 1.3 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จร้อยละ 80 (ปริญญา, 2547)

สารประกอบหลัก	เวลา (วัน)
$C_3S$	10
$C_2S$	100
$C_3A$	6
$C_4AF$	50

##### 5) ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วจะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมีผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันได้แก่

1) อายุของเพสต์ ยกเว้นช่วง Dormant Period อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากที่สุดในช่วงแรก และจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังแสดงในรูปที่ 1.11



รูปที่ 1.11 แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (ปริญญา, 2547)

2) องค์ประกอบของซีเมนต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละตัวในซีเมนต์จะแตกต่างกัน

3) ความละเอียดของซีเมนต์ ซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูง จะมีพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับน้ำได้มาก ผลก็คือปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดในอัตราที่เร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกของปฏิกิริยา

4) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในช่วงต้นอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในช่วงหลังอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง ถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ลดลง ผลก็คือทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยเฉลี่ยและอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง

5) อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มขึ้นนี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของเพสต์

6) น้ำยาผสมคอนกรีต น้ำยาหน่วงหรือน้ำยาเร่งการก่อตัว จะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยจะลดและเพิ่มอัตราตามลำดับ

### 1.2.3 เสถียรภาพและการยุบตัว (Subsidence) ของเหมืองใต้ดิน

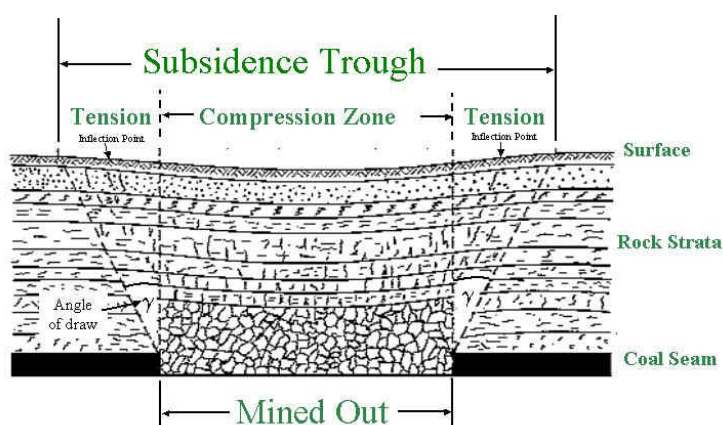
แผ่นดินทรุดหรือแผ่นดินยุบ เกิดจากหลายสาเหตุมีทั้งกรณีแผ่นดินทรุด (Subsidence) ที่เกิดจากกระบวนการชะล้างของบริเวณพื้นที่มีหินปูนที่มีน้ำหนักของชั้นตะกอนที่ทับถมอยู่ด้านบนหรือเกิดจากมวลดินหรือมวลหินที่ประกอบเป็นผนังและเพดานของโพรงค่อย ๆ เคลื่อนตัวเข้ามาปิด

ช่องว่างด้านล่างแล้วมวลดินหรือมวลหินจึงเคลื่อนที่มาแทนที่กันตามลำดับ จึงเกิดเป็นหลุมยุบที่ไม่ได้เกิดจากกิจกรรมทางด้านการทำเหมืองแร่ การเกิดแผ่นดินยุบแบบนี้มักจะเกิดในบริเวณกว้างเป็นการทรุดตัวที่ไม่ลึกมาก และเกิดอย่างค่อยเป็นค่อยไป ดังแสดงในรูปที่ 1.12



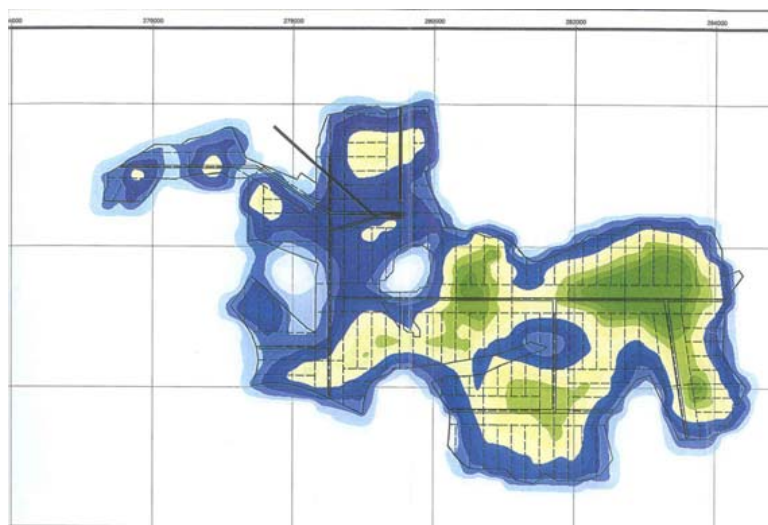
รูปที่ 1.12 การยุบตัวของแผ่นดิน (www.bloggang.com)

การทรุดตัวของแผ่นดินที่เกี่ยวข้องกับการทำเหมืองใต้ดินหรือเหมืองละลายแร่จะมีลักษณะการเกิดเป็นเฉพาะที่จากการที่หลังคาอุโมงค์ใต้ดินหักพังหล่นลงไปในช่วงของอุโมงค์อย่างฉับพลันหรือภายในระยะเวลารวดเร็วทั้งนี้เนื่องจากชั้นหินเหนืออุโมงค์ไม่สามารถแบกรับน้ำหนักของตัวผนังอุโมงค์ได้เพราะความกว้างของอุโมงค์มีขนาดมากเกินไป โครงสร้างของผนังอุโมงค์ไม่มีเสถียรภาพที่จะรับแรงกดจากมวลดินหรือหินข้างบนอุโมงค์ได้ หรือผนังอุโมงค์เคลื่อนตัวออกจากรันจนที่ไม่สามารถค้ำยันหลังคาอุโมงค์เอาไว้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 1.13 และ 1.14



รูปที่ 1.13 การยุบตัว (subsidence) ของมวลหินในเหมืองใต้ดิน

(Hill and Price, 1983)



รูปที่ 1.14 การจำลองการทรุดตัวของโครงการทำเหมืองโปแตชในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (โครงการเหมืองแร่โปแตช บริษัท เอเชียแปซิฟิกโปแตชคอร์ปอเรชั่น จำกัด)

ดังนั้นได้มีการศึกษาและออกแบบการป้องกันการเคลื่อนที่ของหลังคาอุโมงค์และผนังค้ำยัน โดยวิธีการเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้าง ตลอดจนการลดอุโมงค์หรือช่องว่างใต้ดินด้วยการนำเอาวัสดุที่เหลือการกระบวนการต่าง ๆ ในกระบวนการทำเหมืองแร่และอุตสาหกรรมเข้าไปถมกลับภายในช่องว่างอุโมงค์ ดังแสดงในรูปที่ 1.15 หรือมีการนำของเหลวเข้าไปบรรจุอัดไว้เพื่อเป็นการลดโอกาสหรือขนาดของการยุบตัวของพื้นดินด้านบนอุโมงค์



รูปที่ 1.15 การถมกลับอุโมงค์ใต้ดินด้วยวัสดุถมกลับ (กรมทรัพยากรธรณี, 2552)

## 1.2.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพผนังเหมืองใต้ดิน

### 1.2.4.1 ลักษณะทางธรณีวิทยาของแหล่งแร่

ลักษณะทางธรณีวิทยา เช่น ลักษณะการวางตัว ความหนา ตลอดจนชนิดหรือประเภทของชั้นดิน หิน และสินแร่ เป็นต้น ลักษณะทางธรณีวิทยาเหล่านี้จะมีส่วนช่วยในการกำหนดลักษณะของเหมือง ทิศทางของการเดินหน้าเหมืองและวิธีการในการทำเหมือง

### 1.2.4.2 ธรณีวิทยาของโครงสร้างเหมืองใต้ดิน

ลักษณะการวางตัว และความต่อเนื่องของธรณีวิทยาโครงสร้าง (Defects) หรือ (Discontinuity Planes) จะมีส่วนอย่างมากต่อเสถียรภาพของบ่อเหมือง และมีส่วนในการกำหนดลักษณะการพังทลาย (Failure Mode) ที่จะเกิดขึ้นธรณีวิทยาโครงสร้างที่สำคัญเหล่านี้ ได้แก่ รอยเลื่อน (Faults) แนวแตก (Joints) และแนวชั้นหิน (Bedding Planes) เป็นต้น

### 1.2.4.3 ความแข็งแรงเฉือนของชั้นดินและหิน (Shear Strength of Soils and Rocks)

ความแข็งแรงเฉือนของชั้นดินและหินเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบความลาดชันของผนังบ่อเหมืองในแหล่งแร่หนึ่ง ๆ ค่าความแข็งแรงเฉือนที่ควรพิจารณา จะประกอบด้วยค่าความแข็งแรงเฉือนของเนื้อดินและหิน (Intact Shear Strength) และค่าความแข็งแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ตามแนวธรณีวิทยาโครงสร้าง (Defects Shear Strength) ค่าความแข็งแรงเฉือนนี้จะเป็นส่วนของแรงต้านการพังทลายของผนังบ่อเหมือง ซึ่งถ้าหากมีค่าสูงก็จะทำให้สามารถออกแบบให้ผนังบ่อเหมืองชันมากได้

### 1.2.4.4 ระดับน้ำใต้ดิน (Groundwater Condition)

น้ำใต้ดินเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อ โครงสร้างของผนังบ่อเหมือง กล่าวคือ น้ำใต้ดินจะมีผลต่อการเพิ่มแรงดันของน้ำที่แทรกอยู่ในเนื้อดินหรือหินหรือตามแนวโครงสร้างทางธรณีวิทยาต่าง ๆ ซึ่งจะทำให้ค่าความแข็งแรงเฉือนของชั้นดินและหินลดลง

### 1.2.4.5 แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว (Seismicity)

แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวจะมีผลต่อการเพิ่มแรงจุดที่กระทำต่อผนังบ่อเหมืองในแนวระนาบ จึงทำให้เสถียรภาพของบ่อเหมืองลดลง

## 1.2.5 ชนิดของการทรุดตัวและรูปแบบของการพิบัติ

### 1.2.5.1 การทรุดตัวที่เกิดขึ้นในทันที (Immediate Settlement, $S_i$ )

จะเกิดขึ้นทันทีเมื่อมีน้ำหนักกดทับเป็นไปตามคุณสมบัติอีลาสติก (Elastic) ของมวลดินหรือมวลหิน

### 1.2.5.2 การทรุดตัวหลัก (Primary Consolidation Settlement, $S_c$ )

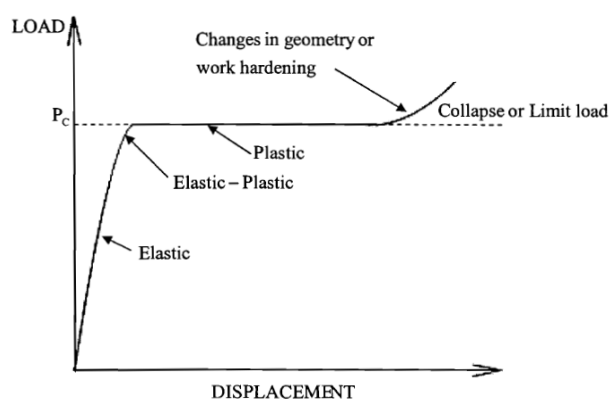
อนุภาคของมวลดินหรือมวลหินถูกแรงเค้นรวมกระทำให้เกิดแรงเค้นในดิน จึงเกิดการยุบอัดตัวของมวลดินหรือมวลหิน

### 1.2.5.3 การทรุดตัวรอง (Secondary Consolidation, $S_s$ )

เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคของดินการล้า (Creep) ดังนั้นจะได้สมการการทรุดตัวรวมดังสมการที่ 1.8

$$S_{total} = S_i + S_c + S_s \quad (1.8)$$

การพิบัติของมวลดินมักจะมีตัวแปรที่สำคัญได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำต่อวัตถุและการเคลื่อนตัวของวัตถุที่เกิดขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำต่อวัตถุและการเคลื่อนตัวของวัตถุที่เกิดขึ้นที่ได้มีการทดสอบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับมวลดิน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมของมวลดิน เมื่อพิจารณาเส้นโค้งที่ได้จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าสามารถแบ่งเส้นโค้งน้ำหนักกระทำและการเคลื่อนตัวออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 คือช่วงยืดหยุ่น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่เกิดขึ้นจะสอดคล้องกับกฎของฮุก ดังสมการที่ 1.10 ช่วงที่ 2 คือช่วงที่มวลดินเกิดการเปลี่ยนพฤติกรรมจากพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นไปเป็นพฤติกรรมแบบพลาสติก ช่วงที่ 3 คือช่วงพลาสติก ในช่วงนี้เมื่อมีแรงกระทำเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยก็ทำให้มวลดินเกิดการเคลื่อนตัวอย่างมาก และช่วงสุดท้าย คือช่วงที่มวลดินเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและเกิดการวิบัติของโครงสร้างมวลดินดังแสดงในรูปที่ 1.16



รูปที่ 1.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำต่อวัตถุและการเสียรูปของวัตถุที่เกิดขึ้น

ฟังก์ชันขอบเขตการพิบัติแบบมอร์-คูลอมบ์ (Mor-Coulomb) เป็นฟังก์ชันขอบเขตการพิบัติที่ถูกใช้มากที่สุดในงานทางด้านปฐพีกลศาสตร์ ซึ่งฟังก์ชันขอบเขตการพิบัติแบบมอร์-คูลอมบ์สามารถเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันของ  $\tau$  และ  $\sigma_n$  ดังสมการ 1.9

$$f(\tau, \sigma_n) = \tau - \sigma_n \tan \phi - C = 0 \quad (1.9)$$

โดยที่  $\tau$  = หน่วยแรงเฉือนที่กระทำบนระนาบที่พิจารณา  
 $\sigma_n$  = หน่วยแรงเค้นตั้งฉากที่กระทำบนระนาบที่พิจารณา  
 $C$  = ค่าความเชื่อมั่นระหว่างเม็ดดิน  
 $\phi$  = มุมเสียดทานภายในมวลดิน

รูปที่ 1.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำต่อวัตถุและการเสียรูปของวัตถุที่เกิดขึ้น ซึ่งในช่วงที่ 1 คือช่วงยืดหยุ่นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่เกิดขึ้นจะสอดคล้องกับกฎของฮุก โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ 1.10



$$E = \frac{\sigma_n}{\epsilon} \quad (1.10)$$

โดยที่  $E$  = โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus)

$\sigma_n$  = หน่วยแรงเค้นตั้งฉากที่กระทำบนระนาบที่พิจารณา (Stress)

$\epsilon$  = หน่วยแรงเครียดตามแนวแกน (Strain)

### 1.2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีการจำลองทางตัวเลข

การวิเคราะห์ทางตัวเลข (Numerical Method) เป็นการจำลองพฤติกรรมของสิ่งที่สนใจ เพื่ออธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นจริงได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีวิเคราะห์ทางตัวเลขอย่างหนึ่งที่ใช้หลักการแบ่งโครงสร้างที่เป็นแบบต่อเนื่อง (Continuum) ออกเป็นหน่วยย่อย (Element) ที่มีรูปร่างและขอบเขตที่แน่นอน โดยแต่ละหน่วยจะมีจุดโยงยึดกับหน่วยข้างเคียง เรียกว่า “โหนด” (Node) และมีตัวแปรอื่นที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของโครงสร้าง (Field Variables) โดยจะถูกสร้างให้มีลักษณะการกระจายตัวในหน่วยย่อยในรูปของฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial Function) และเมื่อนำความสัมพันธ์ของแต่ละฟังก์ชันที่มีสมการความสัมพันธ์ระหว่างการกระทำ (Action) กับค่าตัวแปร (Field Variable) มาประกอบรวมกันเป็นเมตริกซ์รวมของสมการความสัมพันธ์ของโครงสร้างทั้งระบบ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรตามตำแหน่งใด ๆ ในโครงสร้างเมื่อโครงสร้างนั้นถูกกระทำ ซึ่งการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ส่วนใหญ่มักจะเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนตัวและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นตำแหน่งต่าง ๆ ในมวลดินหรือหิน ขั้นตอนที่สำคัญในการวิเคราะห์จึงเป็นการจำลองคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นและความเครียด (Stress-Strain Properties) ของมวลดินหรือหินด้วยสมการคณิตศาสตร์สำหรับนำไปสร้างเป็นเมตริกซ์ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวที่โหนดต่างๆ

### 1.2.7 การถมกลับ (Backfill)

การถมกลับ หมายถึง การถมกลับหรือการเติมเต็มของวัสดุใน ช่องว่างของอุโมงค์ใต้ดิน โดยการนำเอาหางแร่ หิน ดิน ทราย และของเสียดจากของโรงงานอุตสาหกรรม มาบดผสมรวมกัน ซึ่งมักจะนำมาผสมกับตัวช่วยประสาน เช่น ปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยส่วนมากมักจะอยู่ในรูปของของผสม (Slurry) ซึ่งจะถูกลำเลียงไปยังท่อส่งวัสดุถมกลับ ซึ่ง

มักจะมีความดันประมาณ 1 เมกะพาสคัล ถึง 5 เมกะพาสคัล เมื่อฉีดเข้าไปในช่องว่างวัสดุถมกลับจะทำให้หน้าที่ได้รับแรงอัด ที่เกิดมาจากความไม่เสถียรของผนังอุโมงค์ใต้ดินเนื่องจากการประกอบกิจกรรมต่าง ๆ ในเหมืองใต้ดิน ซึ่ง Grice (1998) ได้ศึกษาวัสดุถมกลับที่ผสมกับปูนซีเมนต์สามารถรับน้ำหนักของโครงสร้างผนังบ่อเหมืองตั้งแต่ 0.5-4 เมกะพาสคัล การใช้วัสดุถมกลับในงานเหมืองแร่ใต้ดินนั้น วัสดุถมกลับจะใช้ต้นทุนค่าใช้จ่ายเพียง 2 ดอลลาร์ ถึง 20 ดอลลาร์ต่อลูกบาศก์เมตร และค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานต่าง ๆ อยู่ระหว่าง 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุน ซึ่งจะลดต้นทุนค่าใช้จ่ายของปูนซีเมนต์ลงได้ถึง 75 เปอร์เซ็นต์

### 1.2.7.1 ประเภทของวัสดุถมกลับ

- 1) วัสดุถมกลับแบบไฮดรอลิก (Hydraulic Backfill) คือของเหลวที่เป็นโคลนหางแร่ที่มีความหนาแน่นมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- 2) วัสดุถมกลับแบบเพสต์ (Paste Backfill) คือหางแร่บดกรองที่ความเข้มข้นของของเหลวประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- 3) วัสดุถมกลับจำพวกหิน (Rock Backfill) คือหินหรือเศษหินที่ได้จากการทำเหมืองโดยผ่านการบดให้ขนาดปกติประมาณ 40 มิลลิเมตร

### 1.2.7.2 วัสดุที่ใช้เป็นถมกลับ

ของเสียจากการทำเหมืองแร่ เช่น หางแร่จากโรงแต่ง เศษดินหรือหินที่เกิดจากกระบวนการพัฒนาในการทำเหมืองแร่ และผงหินปูนหรือหินชนิดอื่นที่ได้จากโรงโม่หินของเสียจากอุตสาหกรรมอื่น เช่น ถ้ำลอยจากการเผาไหม้ของถ่านหินในโรงงานไฟฟ้า ผงถ่านหิน และถ่านกลบ ยิปซัมที่ยืมจากกระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยถ่านหิน เป็นต้น

## 1.3 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1.3.1 การนำของเสียจากการทำเหมืองแร่มาเป็นวัสดุถมกลับ

Yogarajah et al. (1998) พบว่าในประเทศแถบภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น สิงคโปร์ มาเลเซีย รวมทั้งประเทศไทย ได้นำเอาเม็ดดินที่มีขนาดละเอียดหรือที่เรียกว่าดินที่มีแรงเชื่อมแน่น (Cohesive Soil) มาแทนเม็ดดินขนาดหยาบสำหรับใช้ในการถมกลับในกำแพงกันดินที่มี

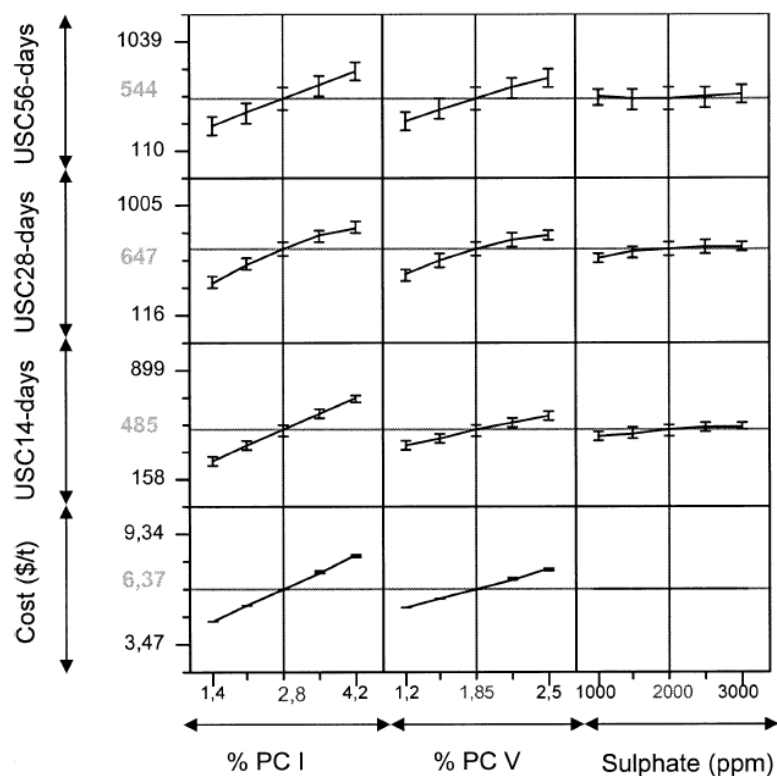
ราคาสูง มาเป็นวัสดุถมกลับในการก่อสร้างกำแพงดินเสริมกำลังทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้ถึงร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 80 เมื่อเทียบกับเม็ดยดินหยาบสำหรับการถมกลับ

Mostafa et al. (2004) ได้ศึกษาถึงผลกระทบจากหางแร่จำพวกไฟไรต์และแร่อาร์ซีโนไฟไรต์ที่นำมาเป็นวัสดุถมกลับในเมืองทองคำในทวีปยุโรป โดยมีวัตถุประสงค์หลักของโครงการเพื่อศึกษาพฤติกรรมธรณีเคมีของหางแร่ทั้งก่อนและหลังการการผสมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุถมกลับ ด้วยการวิเคราะห์แบบสแกนนิ่งและจุลวิเคราะห์เพื่อศึกษาระดับการกระจายตัว ขนาด และรูปร่างของตัวอย่างก้อนวัสดุถมกลับ(SEM-EDS)วิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน(XRD) เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างเนื้อและการเปลี่ยนแปลงของวัฏภาคแร่เกิดในก้อนวัสดุถมกลับและวิเคราะห์วัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์(XRF) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวอย่างวัสดุถมกลับ และได้ศึกษาการควบคุมสารหนูที่เกิดจากการละลายจากวัสดุถมกลับ โดยการควบคุมปริมาณสารหนูโดยการเติมแคลเซียมชนิดปูนขาว เพื่อปรับค่า พีเอส ให้เป็นกลางใกล้เคียงกับธรรมชาติมากที่สุด และไปยับยั้งอาร์ซีโนไฟไรต์เกิดการออกซิเดชันเป็นสารหนู ซึ่งการใช้แคลเซียมชนิดปูน แม้ว่าจะก่อความเป็นรูพรุนของวัสดุถมกลับจะเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลต่อการรับแรงของวัสดุถมกลับ

Mostafa et al. (2004) ได้ศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งแรงของซีเมนต์ถมกลับ โดยการศึกษาจากเหมืองแร่ที่มีการใช้เทคนิคการถมกลับในประเทศแคนาดาจากสี่เหมือง ซึ่งใช้ตัววัสดุถมกลับเป็นตัวประสาน(Binder)ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (T10) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท V (T50) ถ้ำลอย ตะกรันแร่เตาหลอมเหล็ก (Slag) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซิลิกาสูง (HSF) โดยการศึกษาพฤติกรรมของปูนซีเมนต์ในสภาพวัสดุถมกลับ (Paste/fill) ผลกระทบทางเคมีของหางแร่ ผลกระทบของการกระจายขนาดอนุภาคของหางแร่ ผลกระทบจากส่วนผสมของตัวประสาน ผลกระทบของอัตราส่วนผสมของตัวประสาน ผลกระทบของปริมาณน้ำ ที่มีผลต่อความสามารถรับแรงกดของวัสดุถมกลับ

Fall et al. (2005) ได้ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองของวัสดุถมกลับโดยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการรับกำลังแรงอัดของวัสดุถมกลับ โดยการใช้หางแร่จากเหมืองแร่ ปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง และปูนซีเมนต์ประเภทสอง จากผลการศึกษาได้แสดงว่าปริมาณน้ำที่มีเปอร์เซ็นต์เฟตแตกต่างกันมีอิทธิพลต่อแรงอัดของวัสดุถมกลับชนิดเพสต์ (Paste Backfill) เล็กน้อย ในระยะเวลาการบ่มที่มากขึ้นจะมีอิทธิพลต่อการเพิ่มกำลังแรงอัดของวัสดุถมกลับชนิดเพสต์ การเพิ่มปริมาณของปูนซีเมนต์จะส่งผลต่อการเพิ่มกำลังแรงอัดของวัสดุถมกลับชนิดเพสต์แต่มีผลต่อค่าใช้จ่ายที่เพิ่มมากขึ้นด้วย และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ก็อิทธิพลต่อกำลังแรงอัด โดย

ที่ปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่งให้กำลังอัดแรงที่สูงกว่าปูนซีเมนต์ประเภทสอง ดังตารางแสดงผลการทดลองรูปที่ 1.17



รูปที่ 1.17 แสดงผลของปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง (PC I) ปูนซีเมนต์ประเภทสอง (PC V) และความเข้มข้นของซัลเฟต ในการพัฒนาความแข็งแรง และค่าใช้จ่ายของวัสดุถมกลับ (Fall et al., 2004)

Ouellet et al. (2005) ได้ศึกษาผลการตอบสนองของหางแร่ซัลฟิดิก (Sulphidic) ที่มีแร่ไพไรต์อยู่ร้อยละ 53 ที่ใช้ในการเป็นวัสดุถมกลับชนิดซีเมนต์เพสต์ (Cemented Paste Backfill, CPB) ซึ่งใช้สถานที่ศึกษาที่เหมือง Laronde (ควิเบก แคนาดา) โดยการทดสอบใช้ออกซิเจน (Oxygen Consumption, OC) ได้ดำเนินการโดยการฉีดอัดวัสดุถมกลับในช่องว่างภายในอุโมงค์ ผลการทดสอบพบอัตราการออกซิเดชันจะมีค่าสูงในช่วงต้นการทดสอบเฉลี่ยประมาณ 2.4 โมลออกซิเจนต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน อย่างไรก็ตามอัตราการเกิดออกซิเดชันมีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างต่อเนื่อง 0.2 โมลออกซิเจนต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน หลังจาก 80 วัน การลดลงของอัตราออกซิเดชันสำหรับวัสดุถมกลับชนิดซีเมนต์เพสต์ (CPB) ในเหมือง Laronde นี้จะเกี่ยวข้องกับระดับของการรักษาความอึดตัวของวัสดุ และการสร้างของการรวมตัวกับออกซิเจนในชั้นมีความพรุนลดลงและ

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายลดลงด้วย และสำหรับการใช้เครื่องผสมวัสดุถมกลับแบบไฮดรอลิก (Hydraulic Binders) จะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเชิงในเชิงบวกในพฤติกรรมโต้ตอบของวัสดุถมกลับกับสิ่งแวดล้อม

Fall et al. (2005) ได้ศึกษาทดลองเพื่อทำการประเมินผลของขนาดอนุภาคและความหนาแน่นของหางแร่บนคุณภาพของวัสดุซีเมนต์ถมกลับ โดยใช้หางแร่จากเหมืองทองในตะวันออกของประเทศแคนาดาที่แบ่งเป็นชั้นความละเอียดใช้หางแร่ขนาด 20 ไมโครเมตร ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ขนาดปานกลางใช้หางแร่ขนาด 20 ไมโครเมตร ร้อยละ 35-60 โดยน้ำหนัก และขนาดหยาบใช้หางแร่ขนาด 20 ไมโครเมตร ร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนัก โดยมีปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง ปูนซีเมนต์ประเภทสอง ตะกรันจากเตาหลอมเหล็ก และน้ำประปา ใช้เกณฑ์การทดสอบตรวจสอบคุณภาพของวัสดุซีเมนต์ถมกลับ โดยประสิทธิภาพของกำลังแรงอัด ค่าใช้จ่าย ปริมาณความต้องการน้ำ และโครงสร้างระดับนาโนของความพรุนและการกระจายขนาดรู ซึ่งความละเอียดและความหนาแน่นของหางแร่มีอิทธิพลมากต่อคุณสมบัติของกำลังแรงอัด ค่าใช้จ่าย โครงสร้างระดับนาโน และความต้องการน้ำของวัสดุซีเมนต์ถมกลับ โดยที่การพัฒนา กำลังแรงอัดสอดคล้องกับความต้องการน้ำและยังปรากฏว่าความเป็นรูพรุนโดยรวมไม่มีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุซีเมนต์ถมกลับ แต่การกระจายของขนาดรูมีบทบาทในการพัฒนาความแข็งแรงของวัสดุซีเมนต์ถมกลับ และการเพิ่มความหนาแน่นของหางแร่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มปริมาตรวัสดุผสมถมกลับที่สูงขึ้น และโดยทั่วไปการใช้เครื่องผสมวัสดุถมกลับแรงสูงจะให้กำลังแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ถมกลับสูงขึ้น

Mostafa et al. (2005) ได้ทำการศึกษานี้เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมทางกลและสิ่งแวดล้อมของเทคนิคการถมกลับในเหมืองใต้ดินในประเทศแคนาดา ใช้วัสดุหางแร่จากเหมือง LaRonde ในประเทศแคนาดา ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และตะกรันจี้แร่ ผลการศึกษาพบว่ากรณีของสารช่วยประสานตะกรันจี้แร่และโคลนของหางแร่สีแดงช่วยในการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุถมก่อนข้างสูงที่ร้อยละ 5 และ 7 ตามลำดับ และมีผลกระทบต่อเชิงลบที่ร้อยละ 2 ทั้งนี้ความแข็งแรงขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการบ่มที่ยาวขึ้นด้วย และในแง่ของการละลายผลแสดงว่าปูนซีเมนต์ (PC) และตะกรันแร่ (Slag) ที่ใช้สารช่วยผสม (Binders) ได้มีประสิทธิภาพในการลดการปล่อย Zn และ Mn แม้ที่สัดส่วนสารช่วยผสมจะต่ำก็ตาม และการเติมร้อยละ 0.15 และ 0.30 ตามลำดับ ของโคลนหางแร่ในวัสดุถมกลับไม่มีผลกระทบต่ออัตราการชะละลายของวัสดุถมกลับ

### 1.3.2 การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุถมกลับ

Horiuchi et al. (1984) ได้ศึกษาเกี่ยวกับความเหมาะสมในการนำเถ้าลอยเหลวไปใช้ในการทำเกาะกลางทะเล (Man-Made Island) Horiuchi et al. ได้มีการแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นการศึกษาเพิ่มหาส่วนผสมของเถ้าลอย ที่ประกอบไปด้วย เถ้าลอย เถ้าภูเขาไฟ (Volcanic Ash) ปูนซีเมนต์ และน้ำทะเล เป็นการศึกษาที่เน้นการศึกษาเถ้าลอยที่อยู่ในสภาพเหลวหลังจากการผสม 5 นาที ทดสอบความเข้มข้นเหลวปกติและระยะเวลาก่อตัวของเถ้าลอยเหลว จากการทดสอบพบว่าเถ้าลอยที่อยู่ในสภาพเหลวจะต้องมีค่ายุบตัว 15 เซนติเมตร ความหนาแน่นไม่น้อยกว่า 1.7 เมกกะกรัม/ลูกบาศก์เมตร และมีการยืมเท่ากับร้อยละ 3 ส่วนที่ 2 จะศึกษาเถ้าลอยที่ส่วนแข็งตัวแล้ว ที่ได้จากการหล่อเถ้าลอยเหลวเป็นแท่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร จะต้องมีความแข็งแรงเหนียวไม่น้อยกว่า 100 กิโลพาสคาล แต่กำลังอัดทางเดียวไม่เกิน 2 เมกกะพาสคาล เพื่อสามารถที่จะขุดได้ในอนาคต นอกจากนี้ยังได้ศึกษาวิธีการถมกลับได้นำโดยจำลองการถมใน Test Tank ขนาดปริมาตร 6 ลูกบาศก์เมตร จากการทดลองดังกล่าวพบว่าส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือการใช้เถ้าลอยผสมเถ้าภูเขาไฟร้อยละ 40 ผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 1-2 มีค่ายุบ 10-11 เซนติเมตร และจากการการศึกษายังพบว่าการใช้เถ้าลอยเหลวเป็นวัสดุถมกลับแทนทรายถมสามารถลดแรง โมเมนต์คัต และการเสียรูปของมวลดินได้

Funston et al. (1984) ได้ศึกษาถึงการนำเถ้าลอยเหลวมาใช้ในการถมพื้นที่ที่อยู่ในหลุมที่มีน้ำ ซึ่งได้มีการใช้ส่วนผสมของเถ้าลอยเหลวที่ประกอบด้วยซีเมนต์ประมาณร้อยละ 5 และน้ำร้อยละ 35 – 45 โดยน้ำหนักโดยควบคุมความเข้มข้นของมวลที่ผสมไว้ที่ค่าการยุบตัว (Slump) ประมาณ 6.5 นิ้ว เมื่อมีการผสมส่วนผสมแล้วจะมีสภาพเป็นของเหลวที่เหนียว นำไปทดลองถมในน้ำที่ไหลช้า ๆ ผลที่ได้ก็คือวัสดุยังคงสภาพเดิมเป็นมวลเนื้อเดียวกัน โดยไม่มีสภาพการแยกตัวของวัสดุ และยังคงสภาพความชื้นของผิวในการถมได้ถึง 1:2 (ระยะทางราบ : ระยะทางตั้ง) และมีการขุดเพื่อที่จะตรวจสอบหลังจากการถมไปแล้ว 6 เดือน ในความลึกของหลุมประมาณ 4 เมตร พบว่าสามารถทรงตัวอยู่ในแนวตั้งของหลุมได้ และลักษณะการจับตัวของเถ้าลอยยังคงจับตัวเป็นเนื้อเดียวกัน และแข็งแรงมากโดยไม่สามารถกดให้ยุบด้วยมือได้ นอกจากนี้ Funston et al. (1984) ยังมีการรายงานว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้เป็นอย่างมาก

### 1.3.3 การใช้วัสดุปอซโซลานแทนปูนซีเมนต์

Pekmezci and Akyz (2004) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณปอซโซลานธรรมชาติที่มีต่อคอนกรีต ศึกษาโดยการทดสอบคอนกรีตทั้งหมด 15 ส่วนผสม โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตควบคุมที่มีปริมาณซีเมนต์ 300, 350 และ 400 kg/m<sup>3</sup> และได้ดัดแปลงส่วนผสมเพื่อศึกษาเปรียบเทียบโดยลดปริมาณซีเมนต์ลงเป็น 250, 300 และ 350 kg/m<sup>3</sup> ของคอนกรีตควบคุม และได้เพิ่มปริมาณปอซโซลานธรรมชาติเข้าไปแทนที่ปูนซีเมนต์ 40, 50, 75 และ 100 kg/m<sup>3</sup> และได้พบว่า การเพิ่มปริมาณสารปอซโซลานธรรมชาติที่มากเกินไปจะส่งผลทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตลดต่ำลง จึงควรใช้ในปริมาณที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตที่สูงที่สุด และยังพบอีกว่า ในกรณีที่ลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม แล้วแทนที่ด้วยปอซโซลานธรรมชาตินั้น ส่งผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง เนื่องจากปอซโซลานธรรมชาติไม่มีคุณสมบัติในการเป็นสารซีเมนต์ (Cementitious Material) และเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าปอซโซลานธรรมชาติจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเกิดจากผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเช่นกัน ในกรณีนี้ถ้าต้องการเพิ่มปริมาณปอซโซลานในส่วนผสมก็จะส่งผลทำให้การใช้ปริมาณปอซโซลานในปริมาณที่มากมีประสิทธิภาพได้ โดยที่อัตราส่วนระหว่าง Pozzolan/Cement,(P/C) Ratio ที่ 0.28 เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ได้คอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด

Brink and Halstead (1956) ได้ทดสอบตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อัตราส่วนร้อยละ 0-50 โดยน้ำหนัก พบว่าการผสมเถ้าลอยมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดในช่วงอายุเริ่มแรกต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ผสมเถ้าลอย ซึ่งที่อายุเริ่มแรกนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นน้อยไม่เพียงพอที่จะชดเชยกำลังที่ลดลงเนื่องจากส่วนผสมมีปริมาณของปูนซีเมนต์ลดน้อยลง และจะลดลงมากขึ้นเมื่อมีปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออายุมากขึ้นการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์ที่ไม่ผสมเถ้าลอย

### 1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ศึกษาการนำเทคโนโลยีการถมกลับมาใช้ในเหมืองโปแตชใต้ดิน เพื่อประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการถมกลับเพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้กับการทำเหมืองใต้ดินในอนาคต และเพื่อหาตัวแปรและผลกระทบจากการนำเอาวัสดุที่เหลือใช้จากการทำเหมืองใต้ดินและผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เป็นประโยชน์ต่อการถมกลับในเหมืองใต้ดิน

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถหาอัตราส่วนของวัสดุที่ทำเป็นวัสดุผสมกลับที่เหมาะสมกับพื้นที่เหมืองใต้ดิน เพื่อให้รักษาเสถียรภาพและความปลอดภัยของเหมืองใต้ดินได้ระหว่างการทำเหมืองและหลังจากการทำเหมืองไปแล้ว
- 1.5.2 การนำหางแร่และวัสดุที่ไม่ใช้แล้วกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และสามารถลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากหางแร่ และวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมได้
- 1.5.3 เป็นแนวทางในการใช้เทคโนโลยีการถมกลับมาใช้ในเหมืองใต้ดินในประเทศไทย โดยอย่างยิ่งโครงการเหมืองโปแตชในแถบภาคอีสานของประเทศไทย

## 1.6 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะศึกษาสมบัติพื้นฐานทางด้านกายภาพและทางด้านเคมีของวัสดุที่เหลือใช้หรือของเสียจากการแต่งแร่ที่ได้จากการทำเหมืองแร่ เช่น หางแร่จากการทำเหมืองแร่โปแตชที่ได้ตัวอย่างจากบริษัท เอเชียแปซิฟิก โพรแตสคอร์ปอเรชัน จำกัด และวัสดุที่เหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมที่อยู่ในพื้นที่การทำเหมือง เช่น ยิปซัมเทียมจากกระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยถ่านหิน และเถ้าลอยจากการเผาไหม้ของถ่านหินในโรงงานไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง) เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุผสมกลับ ซึ่งแบ่งการทดสอบเป็นสองชุดการทดสอบคือ ชุดที่หนึ่งใช้หางแร่โปแตชร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุผสมกลับ ใช้วัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักวัสดุผสมกลับ ในอัตราส่วนเถ้าลอยร้อยละ 30 และ FGD Gypsum ร้อยละ 15, 17 และ 19 ตามลำดับ และปูนซีเมนต์ร้อยละ 5, 3 และ 1 ตามลำดับ และชุดที่สองเพิ่มหางแร่โปแตชเป็นร้อยละ 70 โดยน้ำหนักวัสดุผสมกลับ ใช้วัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักวัสดุผสมกลับ ในอัตราส่วนเถ้าลอยลดลงเหลือร้อยละ 20 และ FGD Gypsum ลดลงเหลือร้อยละ 5, 7 และ 9 ตามลำดับ และปริมาณปูนซีเมนต์คงที่ที่ร้อยละ 5, 3 และ 1 ตามลำดับ การทดสอบทั้งสองชุดใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5, 0.6 และ 0.7 ก้อนวัสดุผสมกลับมีขนาด 5x5x5 ซม.<sup>3</sup> บ่มในน้ำที่มีอุณหภูมิห้อง (25°C) ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 60 เป็นระยะเวลา 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ทดสอบสมบัติพื้นฐานและทางกล (ทดสอบกำลังแรงอัด) ของก้อนวัสดุผสมกลับ และสร้างแบบจำลองการบีบอัดของโครงสร้างอุโมงค์เหมืองใต้ดิน เพื่อเปรียบเทียบระหว่างอุโมงค์เหมืองใต้ดินที่ไม่มีการถมกลับและการมีการถมกลับโดยใช้โปรแกรม UDEC



## 1.7 สถานที่ทำการวิจัย

- 1.7.1 ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุและภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- 1.7.2 สถานีวิจัยวิศวกรรมวัสดุ(อาคารวิจัยวิศวกรรมประยุกต์สิรินธร ชั้น 4) คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

## บทที่ 2

### การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยเพื่อให้งานวิจัยบรรลุตามเป้าหมายที่ได้วางไว้ โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินการวิจัยตั้งแต่การเริ่มทำการทบทวนความรู้ต่าง ๆ และทำการค้นคว้าหาข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการทำการวิจัย เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิจัย ซึ่งเนื้อหาการดำเนินการวิจัยจะกล่าวถึงวิธีการดำเนินการวิจัย ประกอบไปด้วยวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และรวมถึงขั้นตอนการดำเนินการ โดยจะแบ่งการดำเนินการออกเป็น 4 กิจกรรม ประกอบด้วย

กิจกรรมที่ 1: การออกแบบชุดการทดลอง

กิจกรรมที่ 2: การทดสอบสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุผสมกลับ

กิจกรรมที่ 3: การออกแบบและทดสอบสมบัติเชิงกลของก้อนวัสดุผสมกลับ

กิจกรรมที่ 4: การจำลองการพิบัติของอุโมงค์รูปเหลี่ยมแบบไม่ถล่มกลับและแบบถล่มกลับ

#### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองวัสดุผสมกลับ

##### 2.1.1 หางแร่โปแตช (Tailing Potash)

หางแร่โปแตชจาก บริษัท เอเชียแปซิฟิก โปแตชคอร์ปอเรชั่น จำกัด(รูปที่ 2.1 ก) ขนาดเฉลี่ย 1 มิลลิเมตร ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ด มีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ ที่ประกอบด้วยดินปนหิน สีนํ้าตาลถึงนํ้าตาลเข้ม รสเค็ม ทำปฏิกิริยากับความชื้นได้ดี

##### 2.1.2 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอยจากการเผาไหม้ของถ่านหินในโรงงานไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง (รูปที่ 2.1 ข) ขนาดเฉลี่ย 0.7 มิลลิเมตร ลักษณะเป็นเม็ด ขนาดสม่ำเสมอ สีนํ้าตาลดำ

### 2.1.3 ยิปซั่ม (FGD Gypsum)

ยิปซั่ม (FGD Gypsum) จากกระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยถ่านหินในโรงงานไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง (รูปที่ 2.1 ค) ขนาดเฉลี่ย 0.7 มิลลิเมตร มิลลิเมตร ลักษณะเป็นเม็ด ขนาดสม่ำเสมอ สีน้ำตาล

### 2.1.4 ปูนซีเมนต์ (Cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ตราช้าง) (รูปที่ 2.1 ง) และน้ำประปา



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2.1 วัสดุที่ใช้เป็นวัสดุถมกลับ ก) หางแร่โปแตช ข) ถ้ำลอย ค) FGD Gypsum และ ง) ปูนซีเมนต์

## 2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

### 2.2.1 กิจกรรมที่ 1: การออกแบบชุดการทดลอง

การทดสอบหล่อวัสดุผสมกลับด้วยแบบหล่อคอนกรีตขนาด 5x5x5 ตารางเซนติเมตร ซึ่งแบบหล่อคอนกรีตเดิมส่วนมากจะเป็นวัสดุที่ผลิตจากเหล็ก งานวิจัยชิ้นนี้วัสดุผสมกลับใช้หางแร่โปแตชเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีสมบัติเป็นเกลือ และจะเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนกับเหล็ก ซึ่งเป็นต้นเหตุของการเกิดสนิมเหล็ก ทำให้แบบหล่อเกิดการชำรุดเร็วขึ้น จึงได้ศึกษาและออกแบบการทำแบบหล่อให้เหมาะสมกับงานวิจัยชิ้นนี้และเป็นไปตาม ASTM C109 โดยอาศัยหลักการเลือกวัสดุดังนี้

ด้านความมั่นคงแข็งแรง แบบหล่อต้องมั่งคั่งแข็งแรง สามารถรับเพสต์วัสดุผสมกลับที่เทบรรจุได้โดยไม่เคลื่อนไหว โกงหรือปอง และเบี้ยว นอกจากจะให้สามารถรองรับน้ำหนักของเพสต์วัสดุผสมกลับที่จะเทได้แล้วยังต้องเผื่อน้ำหนักอื่น ๆ

ความสะดวกในการทำงานและถอดแบบ การออกแบบแบบหล่อเพสต์วัสดุผสมกลับควรพิจารณาให้เกิดความสะดวกในการทำงานและการถอดแบบของก้อนวัสดุผสมกลับหลังจากการแข็งตัวแล้ว ซึ่งจะต้องเป็นวัสดุที่ถอดก้อนวัสดุผสมกลับได้ง่าย ไม่ทำให้เนื้อเพสต์วัสดุผสมกลับเกาะติดแบบหล่อจนเกิดการเสียหายไป

รูปร่างของวัสดุผสมกลับเมื่อเทเสร็จแล้ว วัสดุผสมกลับเมื่อเสร็จแล้วจะต้องผิวเรียบดูสวยงาม กรณีที่ผิวหน้าของแบบหล่อถ้าไม่เรียบหรือต่อไม่ดีจะทำให้เกิดรอยบนวัสดุผสมกลับ และแบบหล่อต้องไม่มีรอยร้าว หรือไม่บิดเบี้ยวง่าย แบบหล่อวัสดุผสมกลับจะต้องติดตั้งได้แนวและระดับที่ต้องการ มีความมั่นคงแข็งแรง

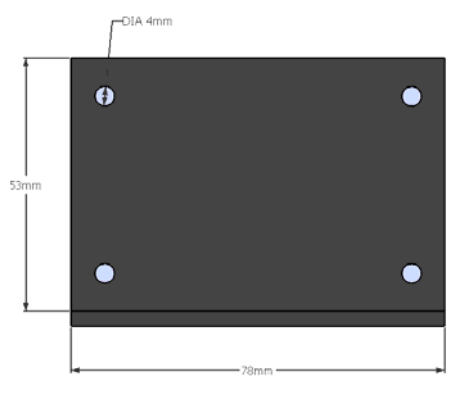
ด้านความประหยัดและประสิทธิภาพ การเลือกใช้วัสดุในการทำแบบหล่อวัสดุผสมกลับต้องมีราคาที่เหมาะสม และระยะเวลาการใช้งานที่มากเพียงพอกับการทดสอบ หลีกเลียงวัสดุประเภทเหล็ก เนื่องจากเกลือจะเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนกับเหล็ก ก่อให้เกิดสนิมเหล็ก และเกิดความเสียหายของแบบหล่อได้

#### 2.2.1.1 การออกแบบและวัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อ

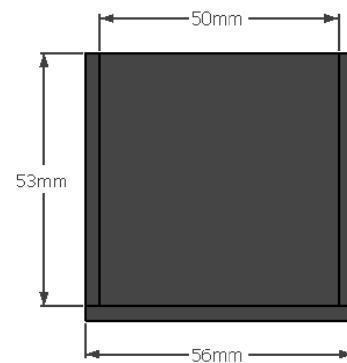
แบบหล่อก้อนวัสดุผสมกลับที่ออกแบบได้ปรับปรุงและอ้างอิงมาจาก ASTM C109 โดยการศึกษาเบื้องต้นเพื่อให้ได้แบบหล่อที่เป็นไปตาม ASTM C109 มากที่สุด โดยมีวัสดุและขั้นตอนที่สำคัญดังนี้

## 1) วัสดุและอุปกรณ์

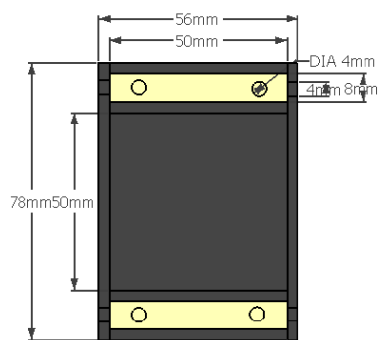
- แผ่นพลาสติกอะคริลิก ขนาดความหนา 3 มิลลิเมตร
- น็อต 4 แจกยาว เกลียวละเอียด ขนาด 3.5 มิลลิเมตร
- ไม้อัดแข็ง ขนาดความหนา 8 มิลลิเมตร
- กาวติดแผ่นพลาสติกอะคริลิก
- มีดตัดแผ่นพลาสติกอะคริลิก
- กระดาษทราย
- สว่านไฟฟ้า



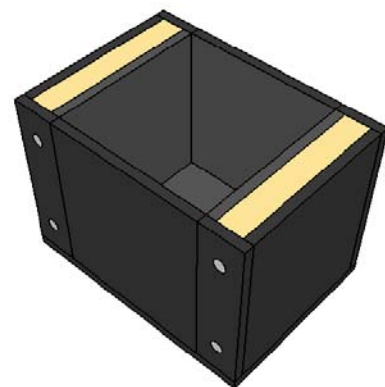
ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 2.2 แบบหล่อวัสดุกลับ ก) ภาพมุมมองด้านหน้า ข) ภาพมุมมองด้านข้าง ค) ภาพมุมมองด้านบน และ ง) ภาพแบบหล่อวัสดุกลับมุมมอง 3 มิติ

## 2) การออกแบบและการสร้างแบบหล่อวัสดุผสมกลับ

การออกแบบแบบหล่อวัสดุผสมกลับในหนึ่งบล็อกจะประกอบไปด้วยแผ่นพลาสติกอะคริลิกหนา 3 มิลลิเมตร ขนาดความกว้าง 53x78 มิลลิเมตร เจาะรูด้วยสว่านไฟฟ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร (รูปที่ 2.2 ก) จำนวน 2 แผ่น เพื่อเป็นฝาด้านหน้าและด้านหลัง แผ่นพลาสติกอะคริลิกหนา 3 มิลลิเมตร ขนาดความกว้าง 50x53 มิลลิเมตร จำนวน 4 แผ่น ทากาวประกบกับไม้อัดแข็งหนา 8 มิลลิเมตร ขนาดความกว้าง 50x53 มิลลิเมตร เจาะรูด้วยสว่านไฟฟ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น เพื่อเป็นฝาด้านข้างทั้ง 2 ข้าง (รูปที่ 2.2 ข และ รูปที่ 2.2 ค) และพื้นที่รองรับน้ำหนักของวัสดุผสมกลับ ใช้แผ่นพลาสติกอะคริลิกหนา 3 มิลลิเมตร ขนาดความกว้าง 78x56 มิลลิเมตร ทากาวประกบกับแผ่นพลาสติกอะคริลิกหนา 3 มิลลิเมตร ขนาดความกว้าง 50x50 มิลลิเมตร อย่างละแผ่น เจาะรูด้วยสว่านไฟฟ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร (รูปที่ 2.2 ค) เพื่อใช้น็อต 4 แฉก ยาว เกือบจะเอียง ขนาด 3.5 มิลลิเมตร ยึดเกาะให้เป็นบล็อกแบบหล่อวัสดุผสมกลับ (รูปที่ 2.2 ง)

## 2.2.2 กิจกรรมที่ 2: การทดสอบสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุผสมกลับ

### 2.2.2.1 การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุผสมกลับ

การวิจัยนี้จะทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของวัสดุผสมกลับเพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจในการเลือกอัตราส่วนผสมในการหล่อก้อนวัสดุผสมกลับ เพื่อให้ได้ก้อนวัสดุที่สามารถรับแรงอัดได้มากที่สุด และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้มากที่สุดด้วย ซึ่งมีหัวข้อการทดสอบวิจัยดังนี้

- การวิเคราะห์ขนาดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค
- การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบกึ่งปริมาณ
- ความถ่วงจำเพาะ
- ความหนาแน่น

## 1) การวิเคราะห์ขนาดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

การวิเคราะห์ขนาดการกระจายตัวของขนาดอนุภาควัสดุถมกลับเป็นไปตามตามมาตรฐาน ASTM C 136

### 1. วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

- ชุดตะแกรงมาตรฐาน ASTM C 136 ในช่วง 4-200 เมช
- เครื่องชั่งความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- เครื่องสั่นตะแกรง

### 2. ขั้นตอนการทดสอบ

- นำวัสดุถมกลับแต่ละชนิด (หางแร่ไปแตช, ฝ้าลอย และFGD Gypsum) มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนวัสดุถมกลับมีน้ำหนักคงที่
- นำวัสดุถมกลับแต่ละชนิดใส่ในชุดตะแกรงมาตรฐาน ในช่วง 4-200 เมช โดยเรียงให้ขนาดเล็กกว่าอยู่ด้านล่าง
- ล้างวัสดุจะรองรับด้วยกรด และปิดฝาด้านบนตะแกรงที่บรรจุวัสดุวัสดุถมกลับ
- วางชุดตะแกรงบนเครื่องสั่นตะแกรงเชิงกลและเดินเครื่องเป็นเวลา 20 นาที นำวัสดุในแต่ละชนิดที่ค้างบนตะแกรงแต่ละตะแกรง และนำไปชั่งหาค่าน้ำหนักที่ค้างตะแกรง
- ทดสอบวัสดุถมกลับแต่ละชนิดจนเสร็จสิ้น

### 3. โมดูลัสความละเอียด (Fineness modulus)

โมดูลัสความละเอียดเป็นค่าที่บอกความละเอียดของวัสดุถมกลับหาได้โดยการรวมค่าร้อยละค้างสะสม (Cumulative Percentages Retained) บนตะแกรงเบอร์ 4, 8, 16, 30, 50, 100 และ 200 แล้วหารด้วย 100 ตามมาตรฐาน ASTM เช่นเดียวกับคอนกรีตมวลรวม

$$\text{ค่าโมดูลัสความละเอียด} = \frac{\text{ผลรวมของร้อยละค้างสะสมแต่ละตะแกรง}}{100} \quad (2.1)$$

ค่านี้สำหรับมวลรวมละเอียดอยู่ประมาณ 2.25-3.25 ส่วนมวลรวมหยาบอยู่ที่ประมาณ 5.5-7.5

## 2) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบกึ่งปริมาณ

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง โดยใช้การวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence) ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง

โดยการวิเคราะห์วัสดุผสมกลับในงานวิจัยชิ้นนี้ ได้มีการส่งการวิเคราะห์วัสดุผสมกลับเพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีแบบกึ่งปริมาณ โดยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ยี่ห้อ Philips รุ่น PW 2400 ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมกลับและเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และความเป็นไปได้ที่จะใช้วัสดุผสมกลับเป็นตัวประสานแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเพสต์วัสดุผสมกลับ เพื่อลดค่าใช้จ่ายอันเนื่องมาจากการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

## 3) ความถ่วงจำเพาะ

การวิเคราะห์หาความถ่วงจำเพาะของอนุภาควัสดุผสมกลับเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 127

### 1. วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

- วัสดุผสมกลับ (หางแร่โปแตช, เถ้าลอย และ FGD Gypsum)
- ขวดพิคโนมิเตอร์
- เครื่องชั่ง (Weight and Weighting Device) ความละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง

### 2. ขั้นตอนการทดสอบ

- ออบขวดพิคโนมิเตอร์พร้อมฝาให้แห้งสนิท ชั่งน้ำหนักบันทึกน้ำหนักเป็น  $P$  (g)
- เติมน้ำกลั่นบันทึกอุณหภูมิของน้ำกลั่นเป็น  $T_1$  (องศาเซลเซียส) ปิดฝาและชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักเป็น  $W_1$  (g)
- เทน้ำกลั่นทิ้ง ออบขวดขวดพิคโนมิเตอร์ให้แห้ง
- นำวัสดุผสมกลับแต่ละชนิด (หางแร่โปแตช, เถ้าลอย และ FGD Gypsum) ออบให้แห้งประมาณ 8 - 12 กรัม ใส่ลงในขวดขวดพิคโนมิเตอร์ ปิดฝาชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักเป็น  $W$  (g)



- เติมน้ำกลั่นบันทึกอุณหภูมิของน้ำกลั่นเป็น  $T_2$  (องศาเซลเซียส) ปิดฝาและชั่งน้ำหนักบันทึกน้ำหนักเป็น  $W_2$  (g) (อุณหภูมิ  $T_1$  และ  $T_2$  ควรแตกต่างกันไม่เกิน 5 องศาเซลเซียส)
- ทดสอบวัสดุกลับแต่ละชนิดจนเสร็จสิ้น

### 3. การคำนวณ

ความถ่วงจำเพาะ = น้ำหนักของตัวอย่าง / น้ำหนักของน้ำกลั่น ที่ปริมาตรเท่ากัน

$$S.G. = \frac{W-P}{(W_2-P)-(W_1-W)} \quad (2.2)$$

เมื่อ S.G. = ความถ่วงจำเพาะปรากฏ

$P$  = น้ำหนักของขวดพิกโนมิเตอร์ และฝาปิด (g)

$W$  = น้ำหนักของขวดพิกโนมิเตอร์ ฝาปิดและตัวอย่าง (g)

$W_1$  = น้ำหนักของขวดพิกโนมิเตอร์ ฝาปิดและน้ำกลั่น (g)

$W_2$  = น้ำหนักของขวดพิกโนมิเตอร์ ฝาปิด ตัวอย่าง และน้ำกลั่น (g)

#### 2.2.2.2 การทดสอบสมบัติของเพสต์วัสดุผสมกลับ

การทดสอบสมบัติของเพสต์วัสดุผสมกลับเป็นอีกแนวทางในการตัดสินใจในการเลือกอัตราส่วนผสมในการหล่อก้อนวัสดุผสมกลับ เพื่อหาความเหมาะสมของการใช้ผสมกลับในเหมืองโปแตช ได้ดินมากที่สุด ซึ่งมีหัวข้อการทดสอบวิจัยเพสต์วัสดุผสมกลับดังนี้

- การทดสอบหาความชื้นเหลือปกติของเพสต์วัสดุผสมกลับ
- การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายของเพสต์วัสดุผสมกลับ
- การทดสอบหาความสามารถในการไหล โดยวิธีวัดค่าการยุบ

#### 1) การทดสอบหาความชื้นเหลือปกติ

การทดสอบหาความชื้นเหลือปกติของเพสต์วัสดุผสมกลับเป็นไปตามหลักการทดสอบการทดสอบหาความชื้นเหลือปกติของคอนกรีต ASTM: C 187-71 เมื่อผสมวัสดุผสมกลับกับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาเคมี มีความร้อนเกิดขึ้น และได้วัสดุผสมกลับที่มีสภาพชื้นเหนียว ซึ่งเรียกว่าเพสต์วัสดุผสม

กลับ หลังจากนั้นช่วงระยะเวลาหนึ่งวัสดุผสมกลับจะเริ่มก่อตัว และแข็งตัวในที่สุด ระยะเวลาในการก่อตัวของเพสต์วัสดุผสมกลับนี้เป็นคุณสมบัติสำคัญประการหนึ่ง ที่กำหนดขึ้นไว้เพื่อที่จะให้ทราบระยะเวลาที่จะต้องทำงานให้แล้วเสร็จ ก่อนเพสต์วัสดุผสมกลับจะเริ่มก่อตัวและแข็งตัว ซึ่งจะมีผลเกี่ยวข้องกับการเพิ่มกำลังของเพสต์วัสดุผสมกลับ

ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมกับวัสดุผสมกลับมีอิทธิพลมากต่อระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัว ซีเมนต์ผสมเปียกจะก่อตัวช้ากว่าซีเมนต์ผสมแห้ง ดังนั้นในการทดสอบหาระยะเวลาในการก่อตัวจึงกำหนดให้ทำการทดสอบเพสต์วัสดุผสมกลับมีสภาพความชื้นเหลว (Normal Consistency) เป็นมาตรฐานสากล โดยกำหนดว่าสภาพความชื้นเหลวปกติคือสถานะที่เพสต์วัสดุผสมกลับยอมให้เข็มไวแคตขนาดมาตรฐานจมนลง 10 มิลลิเมตร ภายในเวลา 30 วินาที

#### 1. วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

- ส่วนผสมวัสดุผสมกลับ(หางแร่โปแตช, เถ้าลอย, FGD Gypsum และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์) น้ำหนักประมาณ 1000 กรัม
- น้ำสะอาด
- อุปกรณ์ไวแคต (Vicat Apparatus)
- เครื่องชั่ง ความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- กระบอบกดวงขนาด 100 มิลลิเมตร
- นาฬิกาจับเวลา
- ภาชนะรอง
- ถังมือยาง



รูปที่ 2.3 อุปกรณ์ไวแคต (Vicat Apparatus)

## 2. ขั้นตอนการทดสอบ

### 2.1 การเตรียมเพสต์วัสดุผสมกลับ

- เตรียมวัสดุผสมกลับตามอัตราส่วนที่ต้องการ
- ใช้เครื่องเหล็กทำการผสมวัสดุผสมกลับ (หางแร่โปแตช, ฝ้าลอย และFGD Gypsum) กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ให้ส่วนผสมและเข้ากันดีก่อน
- ค่อย ๆ เทน้ำลงในวัสดุผสมกลับที่ผสมเข้ากันดีแล้ว ปล่อยให้ทิ้งไว้ 30 วินาที เพื่อให้วัสดุผสมกลับดูดน้ำ
- ใช้เครื่องเหล็กผสมเพสต์วัสดุผสมกลับ เป็นเวลาประมาณ 30 วินาที
- นำเพสต์วัสดุผสมกลับไปใช้งาน

### 2.2 การหาความชื้นเหลว

- นำเพสต์วัสดุผสมกลับเทใส่ใน Mold ให้เต็ม ขนาด 10 มิลลิเมตร ของเครื่องมือไวแคตเลื่อนให้เต็มอยู่ตรงกลาง
- เลื่อนปลายเข็มให้แตะผิวของเพสต์วัสดุผสมกลับ และปรับเข็มขึ้นบนสเกลให้อยู่ที่ขีดศูนย์ หรืออ่านค่าที่เข็มชี้ครั้งแรก
- ปล่อยให้เข็มทันทีหลังจากผสมเพสต์วัสดุผสมกลับเสร็จ 30 วินาที
- ทำการอ่านค่าสเกลอีกครั้งเมื่อปล่อยให้ทิ้งไว้ 30 วินาที และคำนวณหาระยะจมของเข็ม ถ้าเข็มจมลงเป็นระยะ 10 มม. ให้ถือว่าซีเมนต์นั้น อยู่ในภาวะความชื้นเหลวปกติ

## 2) การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายของเพสต์วัสดุผสมกลับ

การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายของเพสต์วัสดุผสมกลับ เป็นไปตามหลักการทดสอบการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีต ASTM : C 187-71 ซึ่งระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุผสมกลับ เป็นระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมส่วนผสมวัสดุผสมกลับกับน้ำจนกระทั่งเพสต์วัสดุผสมกลับเริ่มก่อตัว หรือแข็งตัวไม่สามารถคืนสภาพเดิมได้ ปกติระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุผสมกลับก็มีความคล้ายกับการก่อตัวของปูนซีเมนต์ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ระยะคือ การก่อตัวระยะต้น (Initial Setting Time) และการก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time) การก่อตัวระยะต้น คือระยะเวลาจากเริ่มผสมส่วนผสมวัสดุผสมกลับกับน้ำจนกระทั่งเพสต์วัสดุผสมกลับเริ่มก่อตัวสามารถรับน้ำหนักของเข็มมาตรฐาน ไวแคตได้ โดยเข็มไม่จมลงในซีเมนต์เพสต์เลย 25 มิลลิเมตร ในเวลา 30 วินาที การก่อตัวระยะปลาย คือ ระยะเวลาจากเริ่ม

ผสมส่วนผสมวัสดุผสมกลับกับน้ำจนกระทั่งเพสต์วัสดุผสมกลับเริ่มก่อตัวสามารถรับน้ำหนักได้บ้าง โดยทั่วไปการก่อตัวจะเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพราะอุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง ส่วนผสมวัสดุผสมกลับกับน้ำ ปริมาณของน้ำที่ใช้ในการผสมมีอิทธิพลมากต่อระยะเวลาการก่อตัว และแข็งตัว นอกจากนี้ ส่วนผสมและขนาดอนุภาคของวัสดุผสมกลับยังมีผลต่อระยะเวลาการก่อตัว อีกด้วย

### 1. วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

- ส่วนผสมวัสดุผสมกลับ(หางแร่โปแตช, เถ้าลอย, FGD Gypsum และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์) น้ำหนักประมาณ 1000 กรัม
- น้ำสะอาด
- อุปกรณ์ไวแคต (Vicat Apparatus)
- เครื่องชั่ง ความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- กระบอกตวงขนาด 100 มิลลิเมตร
- นาฬิกาจับเวลา
- ภาชนะรอง
- ถู่มือยาง

### 2. ขั้นตอนการทดสอบ

#### 2.1 การเตรียมเพสต์วัสดุผสมกลับ

- เตรียมวัสดุผสมกลับตามอัตราส่วนที่ต้องการ
- ใช้เกรียงเหล็กทำการผสมวัสดุผสมกลับ (หางแร่โปแตช, เถ้าลอย และ FGD Gypsum) กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ให้ส่วนผสมคละและเข้ากันดีก่อน
- ค่อย ๆ เทน้ำลงในวัสดุผสมกลับที่ผสมเข้ากันดีแล้ว ปล่อยให้ทิ้งไว้ 30 วินาที เพื่อให้วัสดุผสมกลับดูดน้ำ
- ใช้เกรียงเหล็กผสมเพสต์วัสดุผสมกลับ เป็นเวลาประมาณ 30 วินาที
- นำเพสต์วัสดุผสมกลับไปใช้งาน

#### 2.2 การหาระยะเวลาในการก่อตัว

- นำเพสต์วัสดุผสมกลับเทใส่ใน Mold ให้เต็ม ขนาด 10 มิลลิเมตร ของ เครื่องมือไวแคตเลื่อนให้เข็มอยู่ตรงกลาง
- เลื่อนปลายเข็มให้แตะผิวของเพสต์วัสดุผสมกลับ และปรับเข็มขึ้นบนสเกลให้อยู่ที่ขีดศูนย์ หรืออ่านค่าที่ เข็มชี้ครั้งแรก

- ทำซ้ำเช่นเดียวกันทุกๆ 30 นาที จนกว่าจะได้ระยะการจมของเข็มเท่ากับ 25 มิลลิเมตร
- การปล่อยเข็มแต่ละครั้ง ปลายเข็มจะต้องอยู่ห่างจากรอยเข็มเก่าไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร และห่างจากขอบ Mold ไม่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร
- ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนกระทั่งถึงเวลาที่ทดลองที่เข็มไวแควจจมลงในเพสต์วัสดุผสมกลับ 25 มิลลิเมตร คือค่าการก่อตัวระยะต้น (Initial Setting Time)

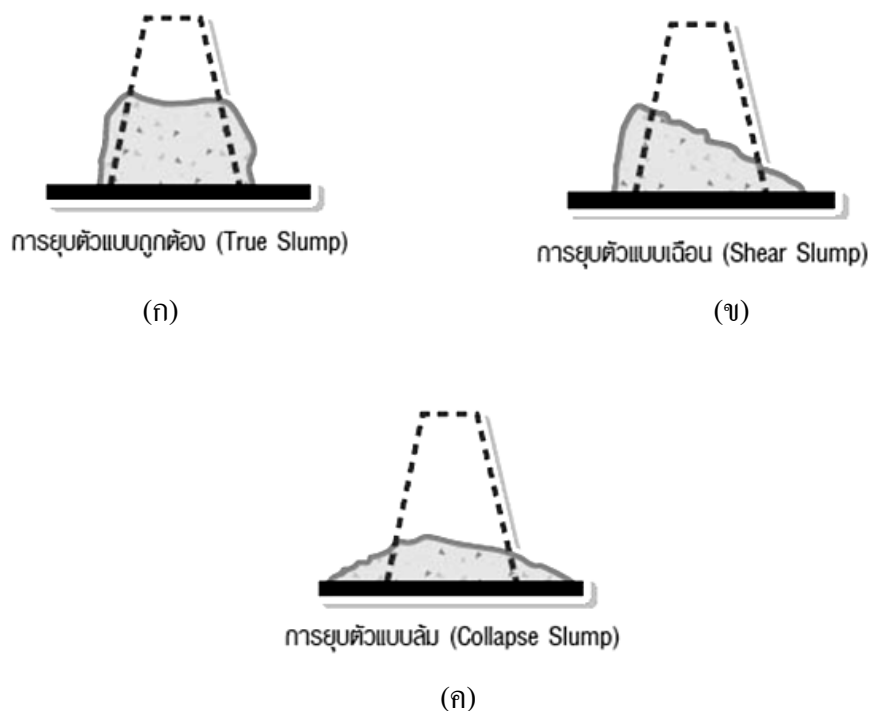
### 3) การทดสอบหาความสามารถในการไหล โดยวิธีวัดค่าการยุบ (Slump Test)

สำหรับการทดสอบหาค่ายุบตัวของเพสต์วัสดุผสมกลับทำตามมาตรฐาน ASTM : C143-90 เช่นเดียวกับการทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต การทดสอบค่ายุบตัว (Slump Test) ไม่ได้เป็นค่าที่วัดความสามารถไหลของเพสต์วัสดุผสมกลับโดยตรง แต่เป็นการวัดความชื้นเหลวของเพสต์วัสดุผสมกลับ(Consistency)หรือลักษณะการไหลตัวของเพสต์วัสดุผสมกลับ(Flow Characteristic) แม้วิธีนี้จะไม่เหมาะสมสำหรับทดสอบเพสต์วัสดุผสมกลับที่เหลว หรือแห้งมากแต่ก็มีประโยชน์อย่างมากและสะดวกสำหรับการควบคุมความสม่ำเสมอของการผลิตเพสต์วัสดุผสมกลับ เช่น ในกรณีที่ค่ายุบตัวของเพสต์วัสดุผสมกลับมีค่ามากกว่าปกติที่ออกแบบไว้ แสดงให้เห็นว่าจะต้องมีความผิดปกติเกิดขึ้นในสัดส่วนผสม หรือความชื้นในวัสดุผสมกลับซึ่งจะช่วยให้สามารถตรวจสอบและแก้ไขได้

สำหรับรูปแบบการยุบตัวของวัสดุผสมกลับ จะมีรูปแบบการยุบตัวเช่นเดียวกับคอนกรีตซึ่งโดยทั่วไปมี 3 แบบคือ

1. การยุบตัวแบบถูกต้อง (True Slump) เป็นการยุบตัวของวัสดุผสมกลับภายใต้น้ำหนักของคอนกรีตเอง (รูปที่ 2.4 ก)
2. การยุบตัวแบบเฉือน (Shear Slump) เป็นการยุบตัวแบบเฉือนซึ่งเป็นการยุบตัวที่เกิดจากการเลื่อนไถลของวัสดุผสมกลับ ส่วนบน ในลักษณะเฉือนลงไปด้านข้าง (รูปที่ 2.4 ข)
3. การยุบตัวแบบล้ม (Collapse Slump) เป็นการยุบตัวที่เกิดจากวัสดุผสมกลับ ที่มี ความเหลวมาก (รูปที่ 2.4 ค)

หากวัสดุผสมกลับ มีการยุบตัวแบบเฉือน หรือแยกตัวเพราะเหลวมากเกินไป ให้ทำการทดสอบใหม่โดยใช้วัสดุผสมกลับที่ยังไม่ได้ใช้ในการทดสอบ ถ้าหากพังลง 2 ครั้งติดต่อกันแสดงว่า Slump Test อาจไม่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นวัสดุผสมกลับ มาตรฐานทั่วไปกำหนดให้ค่าคลาดเคลื่อนในการยุบตัวมีค่า  $\pm 2.5$  เซนติเมตร เช่นถ้าต้องการค่ายุบตัว 7.5 เซนติเมตร ค่าที่ยอมรับได้คือ  $7.5 \pm 2.5$  เซนติเมตร หรือ 5-10 เซนติเมตร



รูปที่ 2.4 รูปแบบการยุบตัว ก) การยุบตัวแบบถูกต้อง (True Slump) ข) การยุบตัวแบบเฉือน (Shear Slump) ค) การยุบตัวแบบล้ม (Collapse Slump)

### 1. วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

- แบบวัดการยุบตัว (Slump Mold) เป็นแบบรูปกรวยตัด เปิดหัวท้าย ทำด้วยโลหะ ตอนล่างมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 8 นิ้ว ตอนบนมีเส้นศูนย์กลางภายใน 4 นิ้ว และสูง 12 นิ้ว ด้านข้างภายนอกมีที่สำหรับเท้าเหยียบและหูยกทั้งสองข้าง
- เหล็กกระทุ้ง (Tamping Rod) เป็นแท่งเหล็กกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 60 เซนติเมตร
- ถาดเหล็ก
- ตลับเมตร

### 2. ขั้นตอนการทดสอบ

#### 2.1 การเตรียมเพสต์วัสดุผสมกลับ

- เตรียมวัสดุผสมกลับตามอัตราส่วนที่ต้องการ (Water / Binder Ratio ที่ 0.5, 0.6 และ 0.7)
- ใช้เกรียงเหล็กทำการผสมวัสดุผสมกลับ (หางแร่โปแตช, เถ้าลอย และ FGD Gypsum) กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ให้ส่วนผสมคละและเข้ากันดีก่อน

- ค่อย ๆ เทน้ำ (Water / Binder Ratio ที่ 0.5, 0.6 และ 0.7) ลงในวัสดุถมกลับที่ผสมเข้ากันดีแล้ว ปล่อยให้ทิ้งไว้ 30 วินาที เพื่อให้วัสดุถมกลับดูดน้ำ
- ใช้เกรียงเหล็กผสมเพสต์วัสดุถมกลับ เป็นเวลาประมาณ 30 วินาที
- นำเพสต์วัสดุถมกลับไปใช้งาน

## 2.2 การทดสอบการยุบตัวของวัสดุถมกลับ

- นำแบบไปชุบน้ำเพื่อให้ผิวเปียก แล้วนำไปวางบนพื้นเรียบที่ไม่ดูดซับน้ำ ใช้เท้าทั้งสองข้างเหยียบไว้ให้แน่น
- ตักวัสดุถมกลับแต่ละอัตราส่วนผสมใส่ลงในแบบให้ได้ 3 ชั้น โดยให้แต่ละชั้นมีปริมาตรเท่ากัน ๆ ใช้เหล็กกระทง (Tamping Rod) กระทง 25 ครั้ง ทุกชั้น ชั้นล่างให้กระทงจนสุดส่วนชั้นที่สองและชั้นที่สามให้กระทงจนเหล็กผ่านไปบนชั้นเดิมเล็กน้อย
- แต่งผิวหน้าให้เรียบ โดยใช้เหล็กกระทงกลิ้งดันวัสดุถมกลับส่วนเกินปากขอบแบบออกไป
- ค่อย ๆ ยกแบบขึ้นตามแนวตั้งอย่างระมัดระวังไม่ให้มีการปิดหรือดันด้านข้างใช้เวลาประมาณ 5 วินาที
- ทำการวัดระยะการยุบตัวของวัสดุถมกลับรูปกรวยและบันทึกค่าการยุบตัวดังรูปที่ 2.4

### 2.2.3 กิจกรรมที่ 3: การออกแบบและทดสอบสมบัติเชิงกลของก้อนวัสดุถมกลับ

หลังจากการทดสอบสมบัติของวัสดุถมกลับและเพสต์วัสดุถมกลับ นำผลที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์เพื่อออกแบบอัตราส่วนผสมของก้อนวัสดุถมกลับเพื่อความเหมาะสมของการใช้ถมกลับในเหมืองโปแตชได้ดินมากที่สุด ซึ่งมีหัวข้อการหล่อก้อนวัสดุถมกลับและทดสอบสมบัติของก้อนวัสดุถมกลับดังนี้

- การออกแบบและการหล่อก้อนวัสดุถมกลับ
- การทดสอบความหนาแน่นรวมและการดูดซึมน้ำของวัสดุถมกลับ
- การทดสอบกำลังแรงอัดของวัสดุถมกลับ

### 2.2.3.1 การออกแบบและการหล่อก้อนวัสดุถมกลับ

#### 1) การออกแบบก้อนวัสดุถมกลับ

การออกแบบก้อนวัสดุถมกลับเพื่อใช้ในงานถมกลับในโครงการเหมืองโปแตชใต้ดิน ทำการออกแบบตามขนาดมาตรฐานของ ACI 221-177 โดยก้อนวัสดุถมกลับมีขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5, 0.6 และ 0.7 (Saha et. al. 2004) ใช้วัสดุถมกลับเป็นหางแร่โปแตชจาก บริษัท เอเชียแปซิฟิก โปแตชคอปอเรชั่น จำกัด เป็นวัสดุถมกลับหลัก ใช้เถ้าลอยจากการเผาไหม้ของถ่านหินในโรงงานไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นปอชโซลาน (Pekmezci et. al. 2004) เพื่อเป็นวัสดุที่ไ้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยิปซัม (FGD Gypsum) จากกระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยถ่านหินในโรงงานไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ซึ่งปริมาณ CaO ในยิปซัม (FGD Gypsum) เป็นสารเริ่มต้นในการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ตราช้าง) และน้ำประปา การออกแบบเป็นการออกแบบวัสดุถมกลับที่ใช้ในงานถมกลับในโครงการเหมืองโปแตชใต้ดิน ซึ่งอัตราส่วนของการผสมมีดังตารางที่ 2.1-2.8 โดยในแต่ละอัตราส่วนผสมของวัสดุถมกลับมีระยะเวลาบ่มที่ 7, 28 และ 90 วัน

ตารางที่ 2.1 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุถมกลับ

ร้อยละ				สัญลักษณ์
Tailing Potash	Fly ash	FGD Gypsum	Cement	
50	30	19	1	50TP30FA19FGD
50	30	17	3	50TP30FA17FGD
50	30	15	5	50TP30FA15FGD



ตารางที่ 2.2 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุถมกลับ

ร้อยละ				สัญลักษณ์
Tailing Potash	Fly ash	FGD Gypsum	Cement	
70	20	9	1	70TP20FA9FGD
70	20	7	3	70TP20FA7FGD
70	20	5	5	70TP20FA5FGD

ตารางที่ 2.3 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุถมกลับที่เถ้าลอยร้อยละ30 หางแร่โปแตชร้อยละ 50 ซีเมนต์ร้อยละ 1, 3 และ 5 ยิปซั่ม (FGD Gypsum) ร้อยละ 19, 17, และ 15 ตามลำดับ อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5

วัสดุถมกลับ	น้ำหนักของวัสดุถมกลับ (กก./ลบ.ม.)		
หางแร่โปแตช	0.90	0.88	0.85
เถ้าลอย	0.39	0.39	0.39
FGD Gypsum	0.17	0.15	0.13
ซีเมนต์	0.01	0.04	0.07
น้ำ	0.40	0.41	0.43

ตารางที่ 2.4 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุถมกลับที่เถ้าลอยร้อยละ30 หางแร่โปแตชร้อยละ 50 ซีเมนต์ร้อยละ 1, 3 และ 5 ยิปซั่ม (FGD Gypsum) ร้อยละ 19, 17 และ 15 ตามลำดับ อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6

วัสดุถมกลับ	น้ำหนักของวัสดุถมกลับ (กก./ลบ.ม.)		
หางแร่โปแตช	0.90	0.88	0.85
เถ้าลอย	0.39	0.39	0.39
FGD Gypsum	0.17	0.15	0.13
ซีเมนต์	0.01	0.04	0.07
น้ำ	0.40	0.42	0.43

ตารางที่ 2.5 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมกลับที่ถ้ำลอยร้อยละ30 หางแร่โปแตชร้อยละ 50 ซีเมนต์ร้อยละ 1, 3 และ 5 ยิปซั่ม (FGD Gypsum) ร้อยละ 19, 17 และ 15 ตามลำดับ อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7

วัสดุผสมกลับ	น้ำหนักของวัสดุผสมกลับ (กก./ลบ.ม.)		
	หางแร่โปแตช	0.90	0.88
ถ้ำลอย	0.39	0.39	0.39
FGD Gypsum	0.17	0.15	0.13
ซีเมนต์	0.01	0.04	0.07
น้ำ	0.40	0.42	0.44

ตารางที่ 2.6 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมกลับที่ถ้ำลอยร้อยละ20 หางแร่โปแตชร้อยละ 70 ซีเมนต์ร้อยละ 1, 3 และ 5 ยิปซั่ม (FGD Gypsum) ร้อยละ 9, 7 และ 5 ตามลำดับ อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5

วัสดุผสมกลับ	น้ำหนักของวัสดุผสมกลับ (กก./ลบ.ม.)		
	หางแร่โปแตช	1.03	1.01
ถ้ำลอย	0.26	0.26	0.26
FGD Gypsum	0.10	0.07	0.05
ซีเมนต์	0.01	0.04	0.07
น้ำ	0.27	0.28	0.29

ตารางที่ 2.7 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมกลับที่ถ้ำลอยร้อยละ20 หางแร่โปแตชร้อยละ 70 ซีเมนต์ร้อยละ 1, 3 และ 5 ยิปซั่ม (FGD Gypsum) ร้อยละ 9, 7 และ 5 ตามลำดับ อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6

วัสดุผสมกลับ	น้ำหนักของวัสดุผสมกลับ (กก./ลบ.ม.)		
	หางแร่โปแตช	1.03	1.01
ถ้ำลอย	0.26	0.26	0.26
FGD Gypsum	0.10	0.07	0.05
ซีเมนต์	0.01	0.04	0.07
น้ำ	0.27	0.29	0.30

ตารางที่ 2.8 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมที่ถ้ำลอยร้อยละ 20 หางแร่โปแตชร้อยละ 70 ซีเมนต์ร้อยละ 1, 3 และ 5 ยิปซั่ม (FGD Gypsum) ร้อยละ 9, 7 และ 5 ตามลำดับ อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7

วัสดุผสม	น้ำหนักของวัสดุผสม (กก./ลบ.ม.)		
หางแร่โปแตช	1.03	1.01	0.98
ถ้ำลอย	0.26	0.26	0.26
FGD Gypsum	0.10	0.07	0.05
ซีเมนต์	0.01	0.04	0.07
น้ำ	0.27	0.29	0.31

## 2) การหล่อก้อนวัสดุผสม

การหล่อก้อนวัสดุผสมเพื่อการทดสอบการรับกำลังแรงอัดของก้อนวัสดุผสม ต้องคำนึงถึงการผสมของเนื้อวัสดุผสม เนื้อต้องแน่นสม่ำเสมอ ผิวเรียบสม่ำเสมอไม่แยกตัว ไม่เป็นรูโพรง มีรอยร้าวน้อยที่สุด (รูปที่ 2.5) ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นตัวชี้วัดอีกประการหนึ่งนอกเหนือจากอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมที่มีผลต่อการรับกำลังแรงอัด



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.5 วัสดุผสม ก) เพสต์วัสดุผสม และ ข) ตัวอย่างก้อนวัสดุผสม

### 1. เครื่องมือและวัสดุ

- แบบหล่อแท่งทดสอบ ตามมาตรฐานอังกฤษเป็นแบบหล่อรูป  
ลูกบาศก์ มีขนาด 5x5x5 ตารางเซนติเมตร
- แท่งกระทุ้ง (Tamping rod)

### 2. ขั้นตอนการทำการวิจัย

- ประกอบแบบหล่อเข้าด้วยกัน ชันน็อตให้ยึดแน่น ใช้ผ้าชุบน้ำมันทา ภายใน  
บาง ๆ เพื่อป้องกันไม่ให้เพสต์วัสดุอมกลับติดกับแบบ แล้วนำแบบหล่อนี้  
ไปวางบนพื้นราบ
- เทเพสต์วัสดุอมกลับที่ผสมแล้ว (ตามส่วนผสมที่คำนวณได้) ใส่ลงในแบบ  
หล่อโดยแบ่งใส่เป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นมีปริมาตรประมาณ 1/3 ของปริมาตร  
ของแบบหล่อรูปลูกบาศก์กระทุ้งคอนกรีตชั้นละ 25 ครั้ง โดยใช้ด้านปลาย  
มนของเหล็กกระทุ้งให้ทั่วพื้นที่หน้าตัดของเพสต์วัสดุอมกลับและให้เหล็ก  
เข้าไปในเพสต์วัสดุอมกลับชั้นล่างเล็กน้อย ชั้นบนต้องใส่เพสต์วัสดุอมกลับ  
ให้สูงกว่าขอบแบบตลอดเวลาที่กระทุ้งหลังจากนั้นปาดผิวหน้าเพสต์วัสดุอม  
กลับให้เรียบ แล้วปิดด้วยกระดาษอาบน้ำมัน เพื่อป้องกันน้ำระเหยทิ้งไว้ 24  
ชั่วโมง จึงถอดแบบหล่อออก

### 3) การบ่มก้อนวัสดุอมกลับ

การบ่มก้อนวัสดุอมกลับเป็นการควบคุมและป้องกันไม่ให้น้ำในก้อนวัสดุอม  
กลับระเหยออกจากก้อนวัสดุอมกลับที่แข็งตัวแล้วเร็วเกินไป ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับ  
การบ่มคอนกรีต เนื่องจากน้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญที่สุดสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่ง  
จะส่งผลต่อกำลังของก้อนวัสดุอมกลับโดยตรง ดังนั้น หลังจากที่ผิวหน้าก้อนวัสดุอม  
กลับแข็งตัวแล้ว จะต้องบ่มก้อนวัสดุอมกลับให้มีความชื้นอยู่เสมอ เป็นเวลาอย่างน้อย 7  
วัน กำลังของคอนกรีตจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทรายเท่าที่ยังมีความชื้นให้ปูนซีเมนต์  
ในก้อนวัสดุอมกลับที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้กำหนดระยะเวลาการบ่มเป็น 3  
ระยะ คือ 7 วัน, 28 วัน และ 90 วัน ตามลำดับ โดยใช้การบ่มแบบเพิ่มน้ำ เป็นการเพิ่มน้ำ  
ให้ผิวหน้าก้อนวัสดุอมกลับในระยะเริ่มแข็งตัวโดยตรงอย่างต่อเนื่อง

### 2.2.3.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลของก้อนวัสดุถมกลับ

#### 1) การทดสอบหาค่าความหนาแน่น และความถ่วงจำเพาะ

ตามทฤษฎีที่กล่าวว่า ความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างค่าความหนาแน่นของวัตถุกับค่าความหนาแน่นของของไหลมาตรฐาน ซึ่งในการทดสอบก้อนวัสดุถมกลับ ของไหลมาตรฐานที่ใช้ได้แก่น้ำ โดยที่น้ำมีความหนาแน่นประมาณ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นค่าความถ่วงจำเพาะของวัตถุใด ๆ ที่ใช้ค่าความหนาแน่นของน้ำเป็นของไหลมาตรฐานในการเปรียบเทียบ จึงมีค่าใกล้เคียงที่สุด หรือถือได้ว่าเท่ากับค่าความหนาแน่นของวัตถุนั้น ๆ ดังนี้

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของวัตถุ} = \frac{\text{ความหนาแน่นของวัตถุ}}{\text{ความหนาแน่นของน้ำ}} = \frac{\text{ความหนาแน่นของวัตถุ}}{1} \quad (2.3)$$

ดังนั้น ความถ่วงจำเพาะของวัตถุ = ความหนาแน่นของวัตถุ และค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดสอบจึงหมายถึง ค่าความถ่วงจำเพาะ

#### 1. อุปกรณ์

- เครื่องชั่ง (Balance) ที่สามารถอ่านได้ละเอียดถึง 0.5 กรัม
- ตะกร้าสำหรับชั่งหินในน้ำ (Wire Basket)
- เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
- เตาอบ (Oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส

#### 2. วิธีการทดสอบ

- นำก้อนวัสดุถมเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักของหินคงที่ หลังจากนั้นปล่อยให้ตัวอย่างเย็นลงที่อุณหภูมิห้อง
- นำก้อนวัสดุถมกลับแช่ลงในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา  $24 \pm 4$  ชั่วโมง
- นำก้อนวัสดุถมกลับขึ้นจากน้ำและเช็ดผิวของตัวอย่างให้แห้งด้วยผ้าจนตัวอย่างอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry) แล้วนำมาชั่งน้ำหนักจะได้ค่า  $W_s$  (g)
- ชั่งน้ำหนักของตะกร้าในน้ำและชั่งน้ำหนักของตะกร้าพร้อมตัวอย่างที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งในน้ำ โดยควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ระดับ  $23 \pm 1.7$  องศาเซลเซียส ผลต่างของน้ำหนักทั้งสองค่า คือ น้ำหนักก้อนวัสดุถมกลับในสภาพ

อิมตัวผิวแห้งที่ชั่งในน้ำ แล้วบันทึกเป็นค่า  $W_w$  (g)

- อบก้อนวัสดุกลมกลับจนน้ำหนักคงที่ ที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส แล้วปล่อยให้ตัวอย่างที่เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง (จนอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส) แล้วนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก คือน้ำหนักของก้อนวัสดุกลมกลับในสภาพอบแห้งบันทึกเป็นค่า  $W_a$  (g)

### 3. การคำนวณ

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{W_a}{W_a - W_w} \quad (2.4)$$

$$\text{การดูดซึมน้ำ} = \frac{W_s - W_a}{W_a} \times 100 \quad (2.5)$$

เมื่อ  $W_a$  = น้ำหนักก้อนวัสดุกลมกลับอบแห้งชั่งในอากาศ (g)

$W_s$  = น้ำหนักก้อนวัสดุกลมกลับสภาพอิมตัวผิวแห้งชั่งในอากาศ (g)

$W_w$  = น้ำหนักก้อนวัสดุกลมกลับสภาพอิมตัวผิวแห้งชั่งในน้ำ (g)

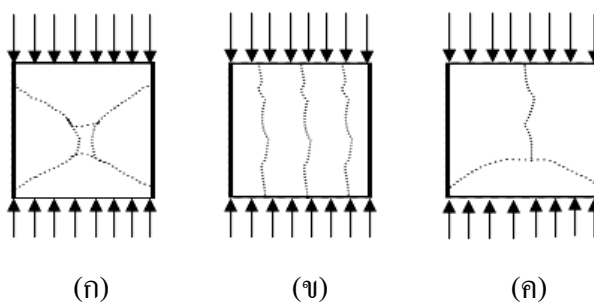
## 2) การทดสอบกำลังแรงอัดของวัสดุกลมกลับ

ทดสอบตาม ASTM C109/C109M-02 การทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงอัดแกนเดียว (Uniaxial Compression Test) ของก้อนวัสดุกลมกลับทำได้โดยการกดหรืออัดแท่งทดสอบรูปลูกบาศก์ตามมาตรฐานอังกฤษเช่นเดียวกับการทดสอบการรับกำลังแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งป่มขึ้นตามระยะเวลาที่กำหนด นำก้อนวัสดุกลมกลับมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ Compressive Strength กระทั่งแตกแล้วทำการคำนวณหาค่าความต้านทานแรงอัดประลัย มีหน่วยเป็น กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร หรือ ปอนด์/ตารางนิ้ว

### ลักษณะการแตกของก้อนวัสดุกลมกลับ

ลักษณะการชำรุดแตกหักของก้อนวัสดุกลมกลับที่รับแรงอัด มักแตกออกเป็นรูปกรวยคู่ (Shear Failure) โดยมีปลายกรวยอยู่ที่กึ่งกลางของทรงกระบอก (รูปที่ 2.7 ก) โดยเกิดจากการถูกเฉือนในระนาบที่เอียงกับแรงกด อันเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง วัสดุผสมและความเสียดทานภายใน ลักษณะการแตกของก้อนวัสดุกลมกลับ อาจเป็นการแตกแบบแยกออก (Splitting Failure)

(รูปที่ 2.6 ข) หรืออาจเป็นการรวมของลักษณะการแตกของทั้ง 2 แบบ (Combination Shear and Splitting Failure) (รูปที่ 2.6 ค)



รูปที่ 2.6 ลักษณะการแตกของก้อนวัสดุกลมกลับ ก) Shear Failure ข) Splitting Failure ค) Combination Shear and Splitting Failure

## 1. อุปกรณ์

เครื่องทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Compression Test Machine) ของ ELE International ซึ่งสามารถให้กำลังอัดสูงสุดที่  $272 \times 10^3$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และสามารถเพิ่มกำลังกดได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งอัตราที่เหมาะสมอยู่ราว 140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที

## 2. การทดสอบ

- นำก้อนวัสดุกลมกลับที่ครบระยะบ่มตามกำหนดแล้วมาทำความสะอาดเช็ดให้แห้ง แล้วทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัด 2 ครั้ง ในแนวตั้งฉากกัน พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของแท่งทดสอบ
- วางก้อนวัสดุกลมกลับบนแท่นกดด้านล่าง โดยวางในตำแหน่งที่อยู่กึ่งกลางของแท่นกด (แผ่นของแท่นกดทั้งด้านบนและด้านล่างต้องสะอาด)
- เปิดเครื่องทดสอบ โดยเพิ่มแรงกดอย่างสม่ำเสมอด้วยอัตรา 140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาทีจนกระทั่งก้อนวัสดุกลมกลับวิบัติ ทำการบันทึกค่าสูงสุด

### 3. การคำนวณ

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\sigma$  = กำลังอัด หน่วยเป็นพาสคาล (Pa)

$P$  = แรงกดสูงสุดที่ทำให้ตัวอย่างพืบัติ หน่วยเป็นนิวตัน (N)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่างทดสอบ หน่วยเป็น ตารางเมตร ( $m^2$ )

#### 2.2.3 กิจกรรมที่ 4: การจำลองการรับแรงของวัสดุคอมกรีต

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์เป็นสิ่งจำเป็นในการอธิบายพฤติกรรมของโครงสร้างเหมือนได้ดินในเชิงกลศาสตร์ เช่นพฤติกรรมในเชิงความเค้น ความเครียด และการรับแรง เป็นต้น โดยอาศัยคุณสมบัติเชิงยืดหยุ่น และความเป็นพลาสติก ซึ่งโปรแกรมส่วนใหญ่จะอาศัยหลักการวิเคราะห์แบบระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและใช้กฎเกณฑ์พฤติกรรมโครงสร้างหินหรือดินในเชิงกลศาสตร์เป็นสมการหลักในการคำนวณ เพื่อการง่ายในการวิเคราะห์ สะดวกรวดเร็ว และสามารถคาดคะเนพฤติกรรมทั้งในระยะเวลานั้นและระยะเวลายาวนานได้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การจำลองการรับแรงของวัสดุคอมกรีตในงานวิจัยนี้คือโปรแกรม UDEC (4.01)

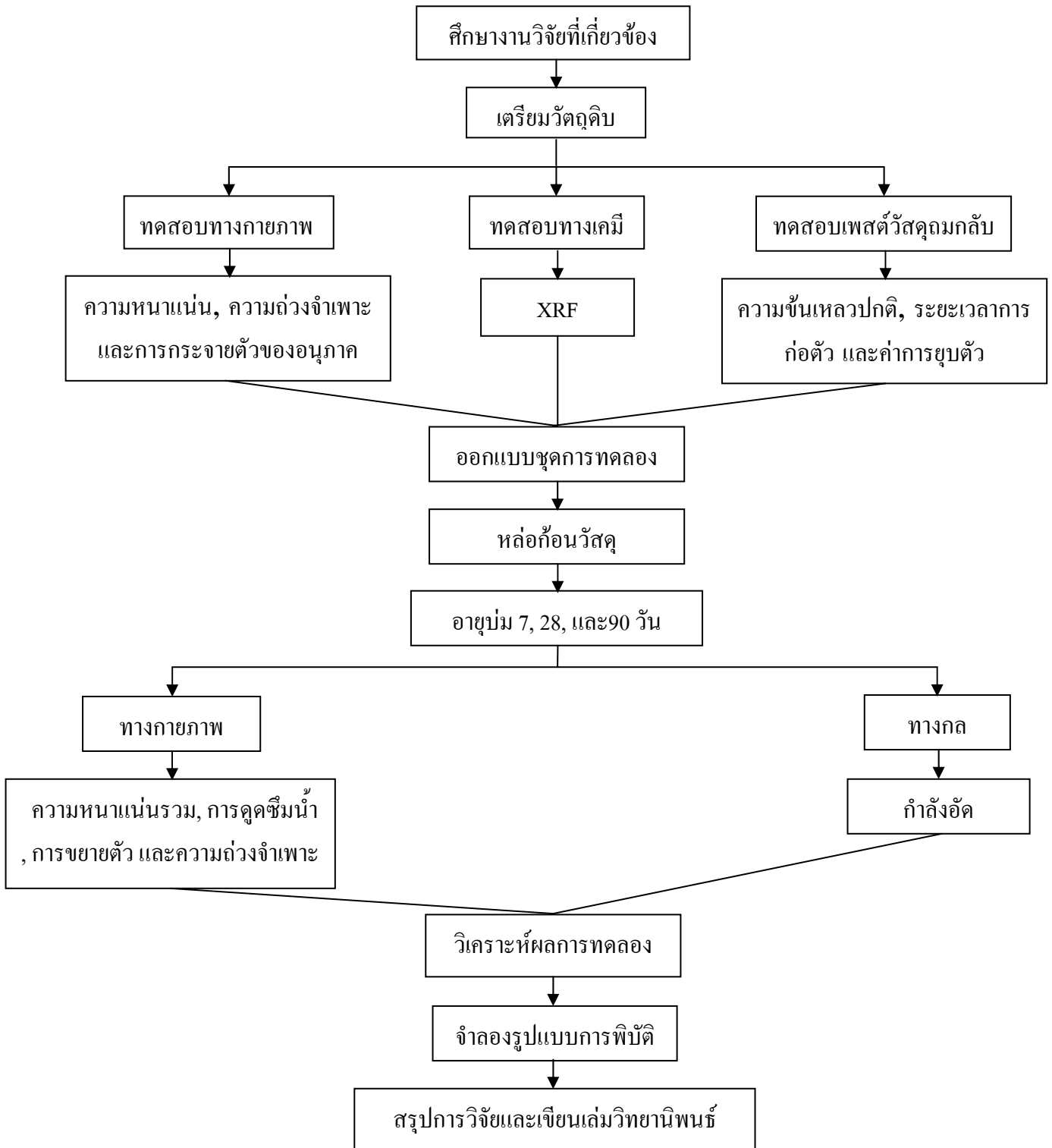
โปรแกรม UDEC มีการใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในงาน วิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมธรณีเทคนิค และงาน โครงสร้างทางธรณีอื่น ๆ เช่น Chen et al. (1998) ใช้โปรแกรม UDEC ศึกษารอยแตกของมวลหินอันเนื่องมาจากคลื่นแรงอัดระเบิด Martin et al. (2003) ศึกษาลักษณะโครงสร้างมวลหินในอุโมงค์ใต้ดิน โดยใช้โปรแกรม UDEC ช่วยในการออกแบบจำลอง ซึ่งโปรแกรม UDEC เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Finite Difference Analysis) ใน 2 มิติที่ใช้จำลองพฤติกรรมของดิน หิน หรือวัสดุอื่น ๆ ที่อยู่ภายใต้สภาวะ Plastic เมื่อถึงจุด Yield และสามารถคาดคะเนพฤติกรรมของหินในอนาคต โปรแกรมนี้โปรแกรมนี้เขียนขึ้นมาจากโครงสร้างทางด้านคณิตศาสตร์เพื่อจำลองคุณสมบัติของวัตถุแบบ Elasticity, Plasticity, Visco-Elasticity, Visco-plasticity, Brittle และ Ductile โดยวัสดุที่จำลองในโปรแกรมจะถูกแทนที่ด้วยอิลิเมนต์ (Element) ซึ่งจะเหมาะสมสำหรับงานธรณีเทคนิค และงานวิศวกรรมเหมืองแร่



### 2.2.3.1 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง

การจำลองเพื่อจะเปรียบเทียบให้เห็นภาพของการทรุดตัวของมวลหินและพฤติกรรมการพังทลายบริเวณหลังคาและการเคลื่อนตัวของระบบรอยแตก (Joint System) อุโมงค์เหมืองใต้ดินแบบไม่มีการถมกลับและแบบมีการถมกลับและการคาดคะเนลักษณะของการทรุดตัวที่เกิดขึ้นหลังจากการปิดทำเหมืองไปในระยะเวลานาน ซึ่งการจำลองการเคลื่อนตัวของมวลหินที่มีรอยแตกบริเวณหลังคาอุโมงค์เหมืองใต้ดินโดยการวิเคราะห์ Discrete Element ในโปรแกรม UDEC ได้มีการกำหนดตัวแปรภายใต้ความกดดันที่ระยะ 300 เมตร จากระยะพื้นดินด้านบนเหมืองใต้ดิน กำหนดความกว้างของอุโมงค์เหมืองใต้ดิน 7 เมตร ความสูงของหน้าเหมือง 5 เมตร (โครงการเหมืองแร่โพแทช จังหวัดอุดรธานี, 2547) ทิศทางการวางตัวของแนวแตก 45 องศา และค่ามุมเสียดทาน 20 องศา ระยะห่างระหว่างรอยแตกเท่ากับ 8 เมตร (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2552) และให้ความดันเท่ากันทุกทิศทางทุกแบบการจำลอง ซึ่งสำหรับการจำลองชุดแรกนั้นเป็นการวิเคราะห์จากตัวแปรที่กล่าวมา โดยการวิเคราะห์พฤติกรรมการพังทลายบริเวณหลังคาและการเคลื่อนตัวของระบบรอยแตก (Joint System) อุโมงค์เหมืองใต้ดินแบบไม่มีการถมกลับ และในการจำลองชุดที่ 2 เป็นการวิเคราะห์จากตัวแปรที่กล่าวมาภายใต้เงื่อนไขการวิเคราะห์พฤติกรรมการพังทลายบริเวณหลังคาและการเคลื่อนตัวของระบบรอยแตก (Joint System) อุโมงค์เหมืองใต้ดินแบบการถมกลับ

### 2.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยสรุป



รูปที่ 2.7 ฟังการศึกษาวัสดุผสมกลับในเหมืองโปแตซใต้ดิน

### บทที่ 3

#### ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

#### 3.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุผสมกลับ

##### 3.1.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุผสมกลับ

##### 3.1.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมกลับ

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมกลับ โดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrometer - XRF) จากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้ผลทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2

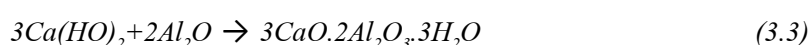
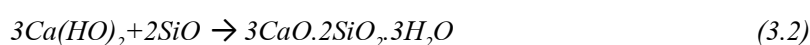
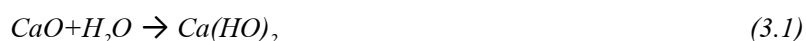
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบออกไซด์ทางเคมีของวัสดุผสมกลับ

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมี		
	ถ้ำลอย	FGD Gypsum	ปูนซีเมนต์
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	13.52	0.51	5.22
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> )	24.01	1.27	20.84
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	26.08	42.12	66.28
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	21.28	0.35	3.2
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> )	7.25	49.38	2.41
โพแทสเซียมออกไซด์ (K <sub>2</sub> O)	2.39	0.02	0.22
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.63	0.41	1.24
โซเดียมออกไซด์ (Na <sub>2</sub> O)	1.68	-	-
น้ำหนักสูญเสียหลังการเผา (LOI) (%)	2.16	5.94	0.59

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของหางแร่โปแตช

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมี
โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)	46.1
โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)	2.2
แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl <sub>2</sub> )	0.2
Unsoluble Material	51.5

จากตารางที่ 3.1 พบว่าถ้ำลอยจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ในโรงงานไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง มีองค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) รวมกันได้ร้อยละ 58.81 มีน้ำหนักสูญเสียหลังการเผา (LOI) ร้อยละ 2.16 และเมื่อพิจารณาจากผลรวมของปริมาณออกไซด์ทั้งสามชนิดสามารถจัดถ้ำลอยที่นำมาเป็นวัสดุถมกลับนี้ได้เป็นวัสดุปอซโซลานประเภท C ตามมาตรฐานวัสดุปอซโซลาน ASTM C 618 ได้ ซึ่งถ้ำลอยประเภท C มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานิก และมีสมบัติวัสดุประสานในซีเมนต์ (ASTM C 618, 1991) สามารถนำมาเป็นวัสดุปอซโซลานมาใช้แทนปูนซีเมนต์ได้ (Pekmezci and Akyc, 2004) นอกจากนี้พบว่า FGD Gypsum มีปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) น้อยกว่าร้อยละ 50 และปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) เกินกว่าร้อยละ 5 ซึ่งไม่จัดเป็นสารปอซโซลาน แต่ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สูงก็เป็นปัจจัยหลักในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน เพราะซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) กับน้ำ ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดสารเชื่อมประสานดังสมการ 3.1 - 3.3

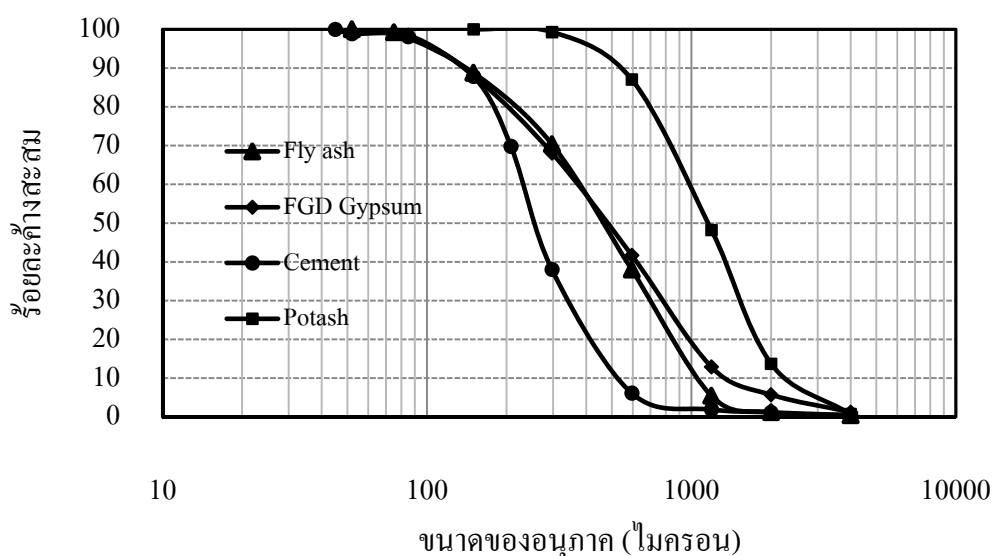


จากสมการทางเคมีข้างต้นหากต้องการให้ได้สารประสานที่ดี จำเป็นต้องมี CaO ใน FGD Gypsum ที่มีมากถึงร้อยละ 42.12 มาทำปฏิกิริยาเคมีกับ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ในเถ้าลอย เพื่อให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ในวัสดุผสมกลับที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์น้อย และตารางที่ 3.2 แสดงร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของหางแร่ไปเตชจากบริษัท เอเชียแปซิฟิก โปเตชคอปอเรชั่น จำกัด ที่นำมาเป็นวัสดุผสมหลักในวัสดุผสมกลับ เห็นได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของหางแร่ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยเกลือคลอไรด์ ซึ่งเกลือคลอไรด์มีผลต่อไปรบกวนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน และทำให้กำลังอัดของก้อนวัสดุผสมกลับมีค่าลดลง

### 3.1.1.2 องค์ประกอบทางกายภาพของวัสดุผสมกลับ

#### 1) ผลการวิเคราะห์ขนาดการกระจายตัวของอนุภาค

ผลการวิเคราะห์ขนาดการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าลอยพบว่าการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าลอยอยู่ในช่วง 37 ไมครอน ถึง 595 ไมครอน เฉลี่ยแล้วมีขนาดอนุภาคของเถ้าลอย 700 ไมครอน และพบว่าการกระจายตัวของอนุภาคของ FGD Gypsum พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคของ FGD Gypsum อยู่ในช่วง 37 ไมครอน ถึง 1190 ไมครอน เฉลี่ยแล้วมีขนาดอนุภาคของ FGD Gypsum 700 ไมครอน และขนาดอนุภาคของหางแร่ไปเตชอยู่ในช่วง 150 ไมครอน ถึง 2000 ไมครอน เฉลี่ยแล้วมีขนาดอนุภาคของหางแร่ไปเตช 1190 ไมครอน



รูปที่ 3.1 ขนาดอนุภาคและร้อยละค้ำสะสมของเถ้าลอย FGD Gypsum ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 และหางแร่ไปเตช

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าขนาดการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าลอยและ FGD Gypsum มีการกระจายตัวใกล้เคียงกับขนาดการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ส่งผลดีต่อการใช้เป็นวัสดุช่วยประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานถมกลับในเหมืองโปแตชใต้ดิน สอดคล้องกับงานวิจัยของ เจริญผล อินัน (2552) พบว่าขนาดการกระจายตัวของอนุภาคที่ใกล้เคียงกันสามารถผสมเข้ากันได้ง่าย การแทนที่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันและโอกาสการทำปฏิกิริยาพอกัน

## 2) ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุถมกลับ

จากผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุถมกลับ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 พบว่าความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นของวัสดุถมกลับมีค่าดังต่อไปนี้ ความถ่วงจำเพาะหางแร่โปแตชมีค่าเท่ากับ 2.16 ความถ่วงจำเพาะเถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 2.19 ความถ่วงจำเพาะของ FGD Gypsum มีค่าเท่ากับ 2.25 ความถ่วงจำเพาะปูนซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 3.10 และหางแร่โปแตชมีความหนาแน่นเท่ากับ 2,160 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เถ้าลอยมีความหนาแน่น 2,190 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร FGD Gypsum มีความหนาแน่นเท่ากับ 2,250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปูนซีเมนต์มีความหนาแน่น 3,190 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งในการทดสอบความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 127 โดยใช้ของไหลมาตรฐานเป็นน้ำ โดยที่น้ำมีความหนาแน่นประมาณ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่น และพบว่าโมดูลัสความละเอียดของหางแร่โปแตชมีค่าเท่ากับ 3.48 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงอยู่ในประเภทมวลรวมละเอียดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย สำหรับมวลรวมละเอียดอยู่ประมาณ 2.25 - 3.25 ส่วนมวลรวมหยาบอยู่ที่ประมาณ 5.5 - 7.5

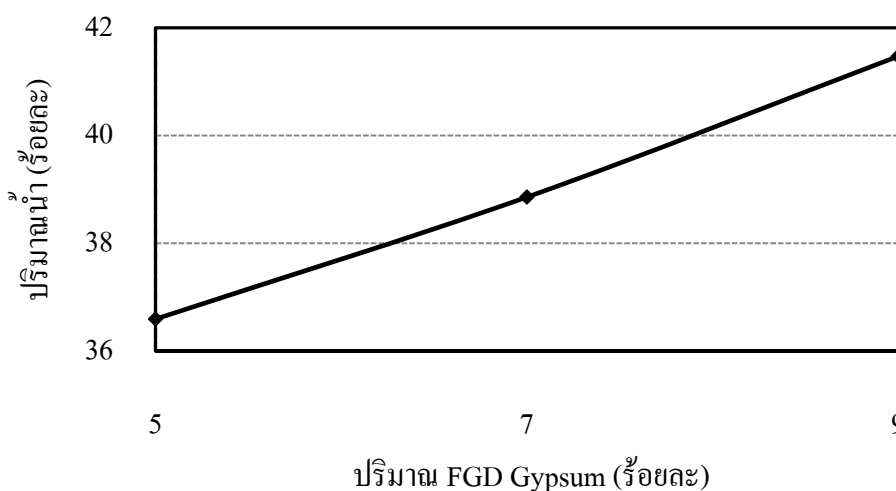
ตารางที่ 3.3 สมบัติพื้นฐานของวัสดุถมกลับ

วัสดุถมกลับ	สมบัติพื้นฐาน		
	ความถ่วงจำเพาะ	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	โมดูลัสความละเอียด
หางแร่โปแตช	2.16	2,160	3.48
เถ้าลอย	2.19	2,190	1.44
FGD Gypsum	2.25	2,250	1.68
ปูนซีเมนต์	3.10	3,190	1.48

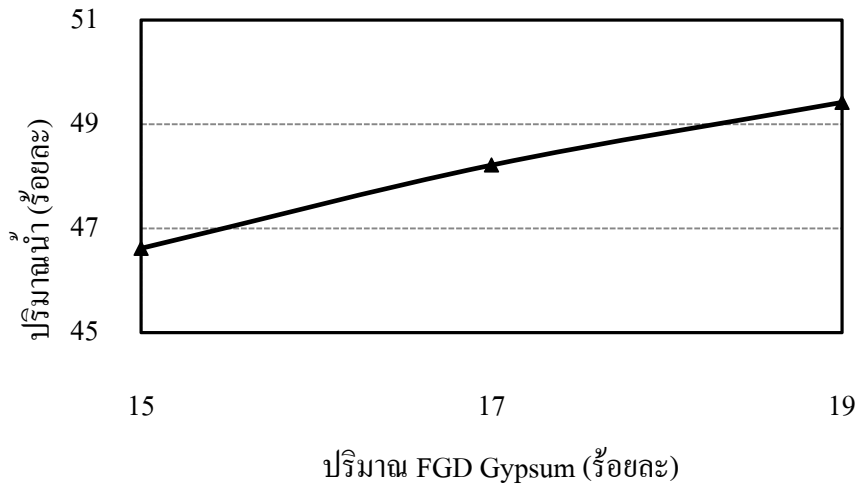
### 3.1.2 สมบัติของเพสต์วัสดุถมกลับ

#### 3.1.2.1 ความชื้นเหลือปกติของเพสต์วัสดุถมกลับ

จากผลการทดสอบความชื้นเหลือปกติของเพสต์วัสดุถมกลับ (Normal Consistency) พบว่าเมื่อปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และเพิ่มปริมาณ FGD Gypsum แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 5, 7 และ 9 ตามลำดับ ซึ่งผลของการเพิ่มปริมาณ FGD Gypsum ที่มากขึ้น มีผลทำให้เพสต์วัสดุถมกลับต้องการน้ำมากขึ้นไปด้วยที่ร้อยละ 36.59, 38.85 และ 41.47 ตามลำดับ (รูปที่ 3.2) และเมื่อปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 และเพิ่มปริมาณ FGD Gypsum แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15, 17 และ 19 ตามลำดับ ซึ่งมีผลทำให้เพสต์วัสดุถมกลับต้องการน้ำที่ร้อยละ 46.61, 48.21 และ 49.41 ตามลำดับ (รูปที่ 3.3) เนื่องจากเถ้าลอยและ FGD Gypsum มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนมากกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นเมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลง และถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยและ FGD Gypsum ที่เพิ่มมากขึ้นเพื่อให้น้ำหนักรวมเท่าเดิม ส่งผลทำให้ปริมาตรโดยรวมและพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมากขึ้น ทำให้เพสต์วัสดุถมกลับต้องการน้ำมากขึ้นไปด้วย



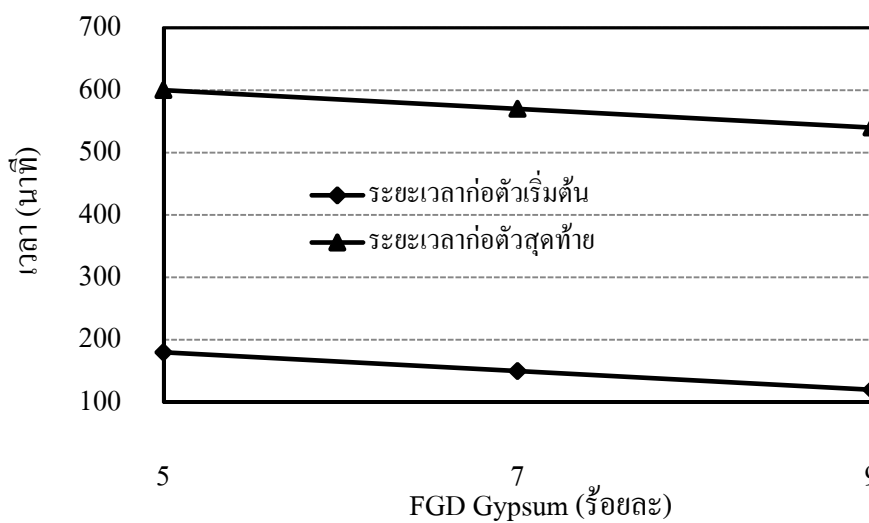
รูปที่ 3.2 ปริมาณน้ำสภาวะความชื้นเหลือปกติของเพสต์วัสดุถมกลับที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 และ FGD Gypsum แทนที่ซีเมนต์



รูปที่ 3.3 ปริมาณน้ำสภาวะความเข้มข้นเหลวปกติของเพสต์วัสดุผสมกลับที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 และ FGD Gypsum แทนที่ซีเมนต์

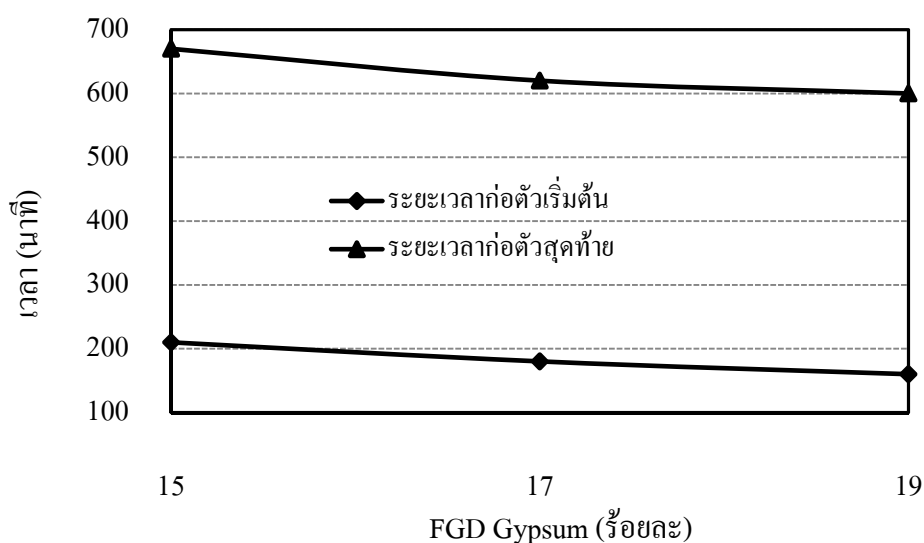
### 3.1.2.2 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุผสมกลับ

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุผสมกลับ ที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 กับ FGD Gypsum ร้อยละ 5, 7 และ 9 ตามลำดับ และใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 กับ FGD Gypsum ร้อยละ 15, 17 และ 19 ตามลำดับ (รูปที่ 3.4 - 3.5)



รูปที่ 3.4 อิทธิพลของเถ้าลอยร้อยละ 20 กับ FGD Gypsum แทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักต่อ ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุผสมกลับ





รูปที่ 3.5 อิทธิพลของเถ้าลอยร้อยละ 30 กับ FGD Gypsum แทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักต่อระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุผสมกลับ

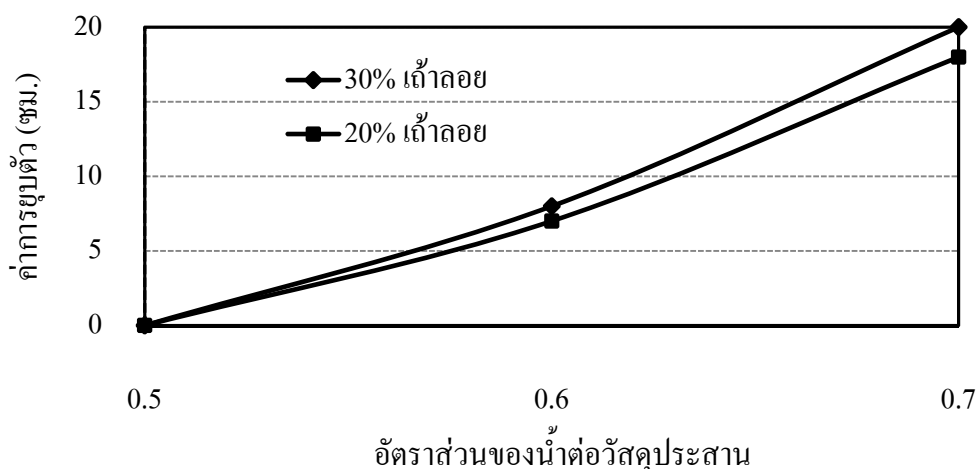
จากผลการทดสอบพบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น โดยประมาณของเพสต์วัสดุผสมกลับที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ FGD Gypsum ร้อยละ 5, 7 และ 9 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมีค่าลดลงเท่ากับ 180, 150 และ 120 นาที ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นโดยประมาณของเพสต์วัสดุผสมกลับที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และ FGD Gypsum ร้อยละ 15, 17 และ 19 ที่พบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมีค่าลดลงเท่ากับ 210, 180 และ 160 นาที ตามลำดับ และพบว่าระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายโดยประมาณของเพสต์วัสดุผสมกลับที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ FGD Gypsum ร้อยละ 5, 7 และ 9 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายมีค่าลดลงเท่ากับ 600, 570 และ 540 นาที ตามลำดับ และพบว่าระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายโดยประมาณของเพสต์วัสดุผสมกลับที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และ FGD Gypsum ร้อยละ 15, 17 และ 19 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายมีค่าลดลงเท่ากับ 670, 620 และ 600 นาที ตามลำดับ สังเกตได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบของปริมาณเถ้าลอยที่ร้อยละ 20 และร้อยละ 30 พบว่าปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้นจะแปรผันตรงกับระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของเพสต์วัสดุผสมกลับ เนื่องจากการแทนที่ของเถ้าลอยที่มากขึ้นทำให้เพสต์วัสดุผสมกลับต้องการน้ำที่มากขึ้น น้ำที่เพิ่มขึ้นจะถูกกักเก็บไว้ในอนุภาคของเถ้าลอย ซึ่งมีช่องว่างคล้ายโพรงฟองน้ำ ที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันในเพสต์วัสดุผสมกลับ จึงทำให้เพสต์วัสดุผสมกลับแข็งตัวช้า ในทางกลับกันพบว่า การแทนที่โดยการเพิ่มปริมาณ FGD Gypsum ในเพสต์วัสดุผสมกลับส่งผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของเพสต์วัสดุผสมกลับมีการแข็งตัวเร็ว

ขึ้น ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการใช้เป็นวัสดุถมกลับในเหมืองโปแตชใต้ดินที่ต้องการเพสต์วัสดุถมกลับที่มีการแข็งตัวเร็ว เพื่อการไหลเอี่ยมของวัสดุถมกลับ

การที่ระยะเวลาการต่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของเพสต์วัสดุถมกลับมีการแข็งตัวเร็วขึ้น เนื่องจากปริมาณ FGD Gypsum เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น การสูญเสียน้ำจากร้อนเนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันก็มากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลทำให้ระยะเวลาการต่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของเพสต์วัสดุถมกลับลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุวัฒนา (2553) ที่ได้ศึกษาการก่อตัวของเพสต์ยิปซัมเทียม

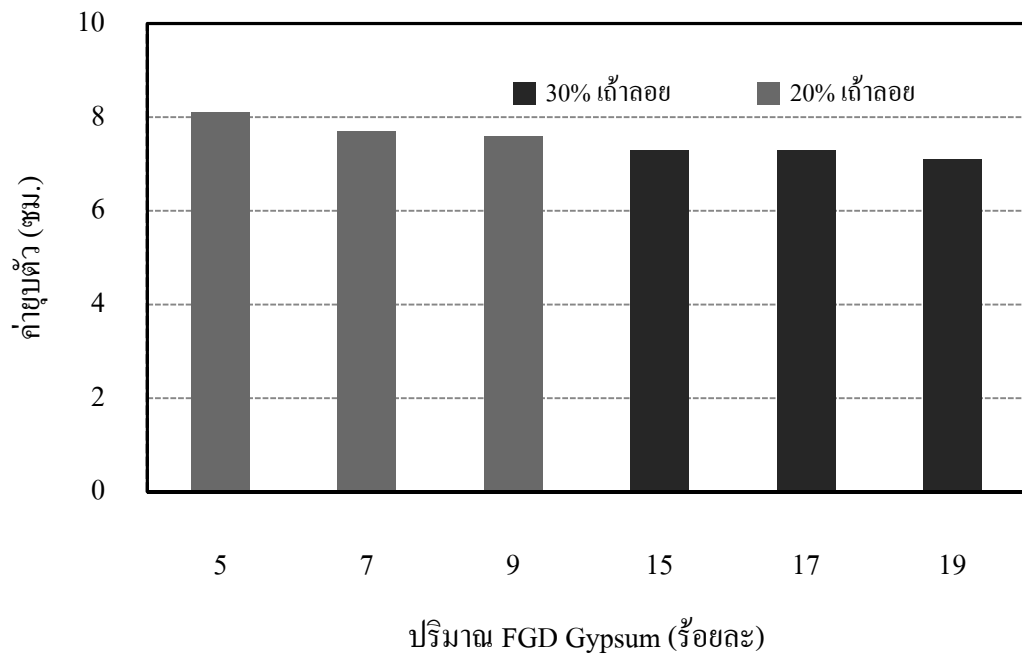
### 3.1.2.3 การทดสอบหาความสามารถในการไหล โดยวิธีวัดค่าการยุบ

การทดสอบค่ายุบตัว (Slump Test) ไม่ได้เป็นค่าที่วัดความสามารถเทได้ของเพสต์วัสดุถมกลับโดยตรง แต่เป็นการวัดความชื้นเหลวของเพสต์วัสดุถมกลับ (Consistency) หรือลักษณะการไหลตัวของเพสต์วัสดุถมกลับ (Flow Characteristic) หรือเป็นการทดสอบหาปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่เหมาะสมกับการใช้งานในด้านงานคอนกรีตปั๊ม ซึ่งการใช้วัสดุถมกลับในงานรักษาเสถียรภาพโครงสร้างของหลังคาและผนังอุโมงค์ของเหมืองใต้ดิน จำเป็นต้องใช้เครื่องปั๊มคอนกรีตปั๊มวัสดุถมกลับ ซึ่งความชื้นเหลวของเพสต์วัสดุถมกลับ และการไหลตัวของเพสต์วัสดุถมกลับ เป็นตัวแปรที่สำคัญมากในการปั๊มวัสดุถมกลับ โดยที่ตัวแปรที่กล่าวมานี้แปรผันตามค่าปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (รูปที่ 3.6)

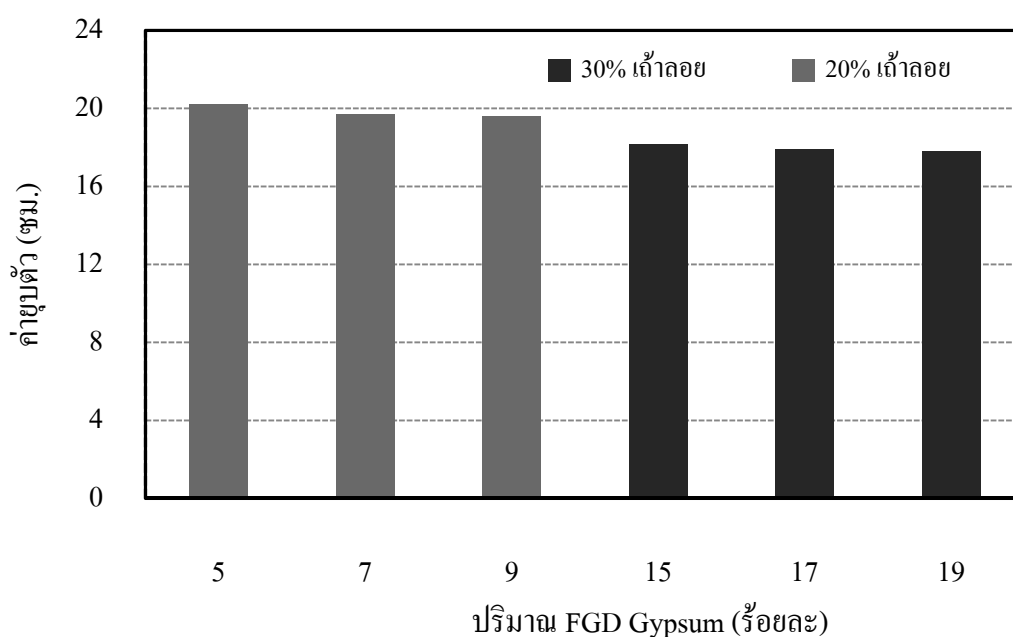


รูปที่ 3.6 อิทธิพลของปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานและเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักต่อค่ายุบตัวของวัสดุถมกลับ

เมื่อปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเปลี่ยนแปลงที่มากขึ้น ที่ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ ค่าการทดสอบการยุบตัว (Slump Test) ของเพสต์วัสดุถมกลับมีค่าเพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 3.7) เนื่องจากปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มมากขึ้นทำให้มีปริมาณน้ำเหลือเพื่อเคลือบอนุภาควัสดุประสานและหางแร่โปรแตชเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อนุภาคของวัสดุประสานและหางแร่โปรแตชสามารถไหลคล่องตัวได้มากขึ้น ดังนั้นค่าการยุบตัวจึงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 3.7 อิทธิพลของ FGD Gypsum และใ้ลลอยแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหน้กต่อค่ายุบตัวของวัสดุถมกลับ ที่ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน 0.6



รูปที่ 3.8 อิทธิพลของ FGD Gypsum และเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักต่อค่าดูดตัวของวัสดุผสมกลับ ที่ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7

เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 FGD Gypsum ร้อยละ 5, 7 และ 9 ตามลำดับ และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 FGD Gypsum ร้อยละ 15, 17 และ 19 ตามลำดับ ที่ใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน 0.6 และ 0.7 ผลการทดสอบพบว่าเมื่อใช้เถ้าลอยและ FGD Gypsum แทนที่ปูนซีเมนต์ค่าการดูดตัวของเพสต์วัสดุผสมกลับมีค่าลดลง เนื่องจากเถ้าลอยและ FGD Gypsum มีพื้นที่จำเพาะและความพรุนมากกว่าซีเมนต์ (เจริญผล, 2553) ดังนั้นในปริมาณน้ำหนักรวมของวัสดุประสานและปริมาณน้ำเท่าเดิม แต่ปริมาตรพื้นที่ผิวมากขึ้น และความพรุนมากขึ้น ส่งผลทำให้เพสต์วัสดุผสมกลับต้องการปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำเหลือเพื่อเคลือบอนุภาคของวัสดุประสานและหางแร่ไปแต่ขได้น้อยลง ส่งผลทำให้เพสต์วัสดุผสมกลับเกิดการแห้งตัวและมีค่าการดูดตัวน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 3.9



(ก)



(ข)



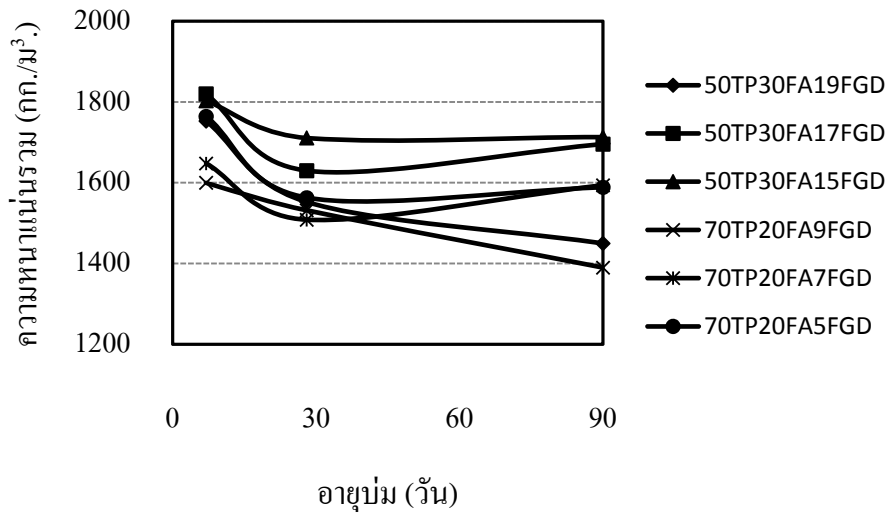
(ค)

รูปที่ 3.9 การยู่ตัวของวัสดุถมกลับ ก) Water/Binder Ratio ที่ 0.5 ข) Water/Binder Ratio ที่ 0.6 ค) Water/Binder Ratio ที่ 0.7

### 3.2 สมบัติเชิงกลของก้อนวัสดุถมกลับ

#### 3.2.1 ความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุถมกลับ

ผลการทดสอบความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุถมกลับขนาด 5x5x5 เซนติเมตร โดยใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ ซึ่งแบ่งการทดสอบเป็น 2 ชุด การทดสอบคือ ชุดที่ 1 ใช้หางแร่ไปเตชร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุถมกลับ ใช้วัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยโดยน้ำหนักวัสดุถมกลับ ในอัตราส่วนแฉะร้อยละ 30 และ FGD Gypsum ร้อยละ 15, 17 และ 19 ตามลำดับ และปูนซีเมนต์ร้อยละ 5, 3 และ 1 ตามลำดับ และชุดที่ 2 เพิ่มหางแร่ไปเตชเป็นร้อยละ 70 โดยน้ำหนักวัสดุถมกลับ ใช้วัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักวัสดุถมกลับ ในอัตราส่วนแฉะลดเหลือร้อยละ 20 และ FGD Gypsum ลดเหลือร้อยละ 5, 7 และ 9 ตามลำดับ และปริมาณปูนซีเมนต์คงที่ที่ร้อยละ 5, 3 และ 1 ตามลำดับ อายุบ่มทั้งสองชุดที่ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

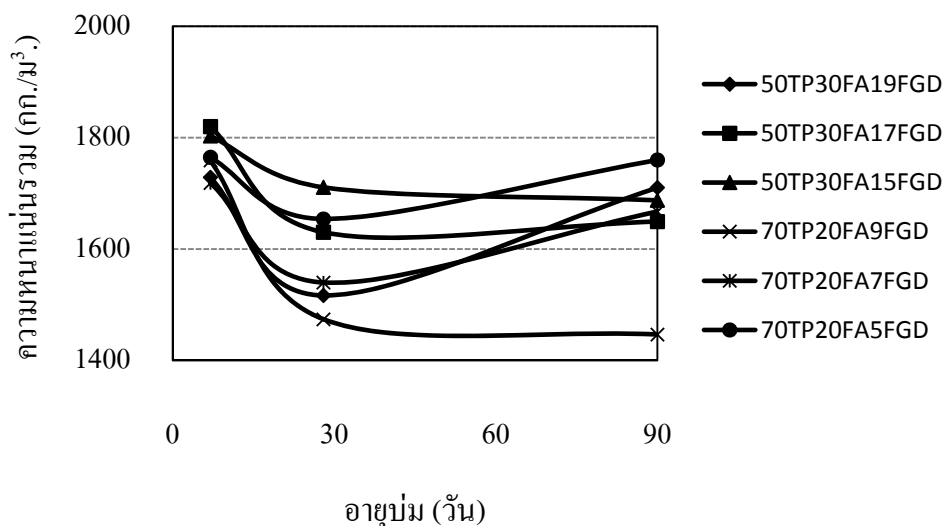


รูปที่ 3.10 ความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุถมกลับที่  $w/b = 0.5$

จากผลทดสอบความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุถมกลับพบว่าอายุบ่มที่ 7 วัน ความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุถมกลับที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 มีค่า 1,819, 1,803, 1,764, 1,753, 1,674 และ 1,599 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่า 1,710, 1,630, 1,563, 1,552, 1,531 และ 1,508 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่า 1,713, 1,695, 1,594, 1,588, 1,499 และ 1,390 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณโดยน้ำหนักหางแร่โปแตชที่มากขึ้นทำให้วัสดุถมกลับมีความหนาแน่นรวมลดลงทุก ๆ อายุบ่ม และอายุบ่ม 7 วัน จะมีค่าความหนาแน่นรวมสูงสุด เนื่องจากหางแร่โปแตชมีการป่นเปื้อนของอนุภาคที่อยู่ในรูปของเกล็ด เมื่อมีการเพิ่มปริมาณโดยน้ำหนักหางแร่โปแตช หมายถึงการเพิ่มอนุภาคเกล็ดที่มากขึ้นด้วย ซึ่งอนุภาคของเกล็ดที่สะสมอยู่ในหางแร่โปแตชจะละลายเมื่อมีการสัมผัสกับน้ำในเวลาที่แตกต่างกันออกไป จึงก่อให้เกิดจำนวนโพรงระหว่างหางแร่โปแตชกับเพสต์วัสดุประสานที่มากขึ้น เห็นได้ว่าที่อายุบ่ม 7 การละลายของอนุภาคเกล็ดน้อย (รูปที่ 3.10) และหลังจากอายุบ่มที่ 28 วัน การละลายของอนุภาคเกล็ดเกิดขึ้นน้อยหรือไม่มีการละลายเลย จึงทำให้ความหนาแน่นรวมของวัสดุถมกลับมีค่าลดลงหลังจากอายุบ่ม 7 วัน ขึ้นไปและจะมีแนวโน้มคงที่หลังจาก 28 วัน ขึ้นไปและพบว่าเมื่อใช้เถ้าลอย และ FGD Gypsum แทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก ทำให้ความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุถมกลับลดลง เนื่องจากเถ้าลอย และ FGD Gypsum มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำหนักระหว่างเถ้าลอย และ FGD Gypsum กับปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน พบว่าเถ้าลอย และ FGD Gypsum มีปริมาณมากกว่า และเมื่อนำไปผสมกับหางแร่โปแตชเป็นวัสดุถมกลับโดยจำกัดน้ำหนักวัสดุประสานเท่าเดิม พบว่าปริมาณของ

ก้อนวัสดุถมกลับที่ใช้วัสดุประสานเถ้าลอย และ FGD Gypsum แทนที่ปูนซีเมนต์จะมีค่าปริมาตรมากขึ้นตามร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ของก้อนวัสดุถมกลับ ส่งผลทำให้ก้อนวัสดุถมกลับมีความหนาแน่นรวมลดลง

ผลทดสอบความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุถมกลับที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.6 พบว่าที่อายุบ่มที่ 7 วัน ความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุถมกลับมีค่า 1,820, 1,803, 1,765, 1,759, 1,728 และ 1,718 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่า 1,710, 1,654, 1,630, 1,540, 1,516 และ 1,474 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่า 1,760, 1,710, 1,687, 1,667, 1,649 และ 1,446 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยเฉพาะที่อายุบ่ม 28 วัน เห็นการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นรวมก้อนวัสดุถมกลับอย่างชัดเจน

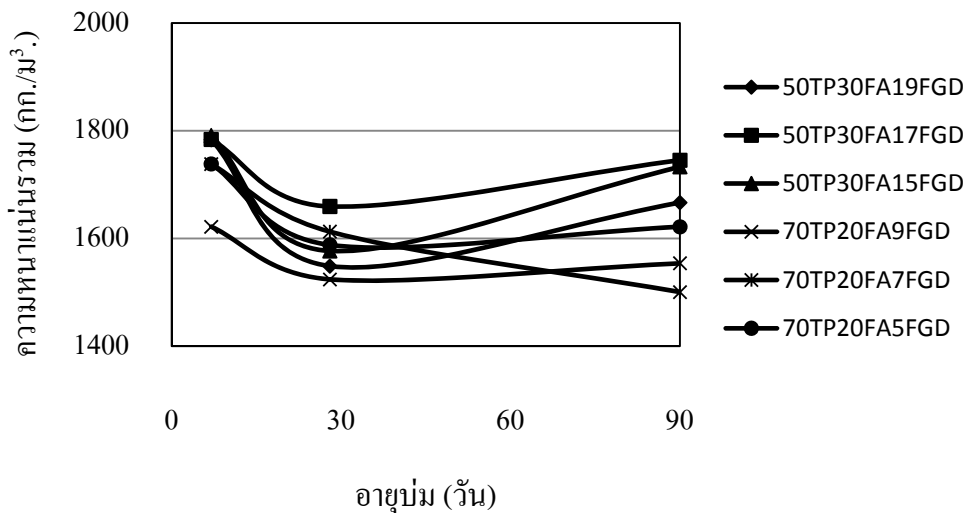


รูปที่ 3.11 ความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุถมกลับที่  $w/b = 0.6$

จากผลการทดสอบความหนาแน่นรวมของวัสดุถมกลับที่ใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.6 พบว่าการเพิ่มปริมาณโดยน้ำหนักหางแร่ไปเตชยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการลดลงของความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุถมกลับ และที่อายุบ่ม 28 วัน ความหนาแน่นรวมทุก ๆ อัตราส่วนผสมจะมีค่าลดลงต่ำที่สุด และมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นรวมที่เพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มหลัง 28 วัน เนื่องจากอิทธิพลจากเถ้าลอย และ FGD Gypsum ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ในก้อนวัสดุถมกลับ เกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ได้ผลเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) ทำให้ช่องว่างภายในก้อนวัสดุถมกลับ

ลดลง อย่างไรก็ตามยังมีบางอัตราส่วน (50TP30FA15FDG, 50TP30FA17FDG และ 70TP20FA9FDG) ที่มีความหนาแน่นรวมของวัสดุผสมที่คงตัว

ผลทดสอบความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุผสมพบว่าที่อายุบ่มที่ 7 วัน ความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7 มีค่า 1,791, 1,784, 1,783, 1,738, 1,739 และ 1,621 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่า 1,659, 1,612, 1,588, 1,576, 1,548 และ 1,500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่า 1,745, 1,733, 1,666, 1,621, 1,649 และ 1,553 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งทุก ๆ อายุบ่มหลัง 28 วัน พบว่าความหนาแน่นรวมของวัสดุผสมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุผสมที่  $w/b = 0.7$

จากผลการทดสอบความหนาแน่นรวมของวัสดุผสมที่ใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.7 พบว่าการเพิ่มปริมาณโดยน้ำหนักของแรโปแตซยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการลดลงของความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุผสม ที่อายุบ่มหลังจาก 7 วัน ไปจนถึงอายุบ่ม 28 วัน เนื่องจากอิทธิพลการละลายของอนุภาคเกลือที่สะสมตัวในทางแรโปแตซ และพบว่าการใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7 ที่อายุบ่มหลัง 28 วัน ค่าความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุผสมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอิทธิพลจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ในก้อนวัสดุผสม เกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ได้ผลเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮดรต (CAH) ทำให้ช่องว่างภายในก้อนวัสดุผสมลดลง ความหนาแน่นรวมก้อนวัสดุผสมจึงเพิ่มมากขึ้น และอย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราส่วนของ



ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.7 ส่งผลทำให้ปริมาณน้ำที่เหลือจากกระบวนการไฮเดรชัน (Hydration) มากขึ้น จึงก่อให้เกิดจำนวนโพรงในเพสต์และโพรงที่เกิดขึ้นระหว่างทางแร่โปแตช กับเพสต์วัสดุประสานเพิ่มมากขึ้น เมื่อก่อนวัสดุผสมกลับแข็งตัวจะทำให้เกิดรูโพรงมากขึ้น ส่งผลทำให้ก้อนวัสดุผสมกลับบางอัตราส่วนผสมมีค่าความหนาแน่นลดลง

ดังนั้นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นรวมของวัสดุผสมกลับ คือการเพิ่มขึ้นของปริมาณโดยน้ำหนักของทางแร่โปแตชมากขึ้น และการใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่อัตราส่วนที่มากขึ้น ทำให้เกิดโพรงภายในก้อนวัสดุผสมกลับส่งผลให้ความหนาแน่นรวมก้อนวัสดุผสมกลับลดลง การแทนที่ปูนซีเมนต์ของเถ้าลอย และ FGD Gypsum ส่งผลทำให้ก้อนวัสดุผสมกลับมีความหนาแน่นรวมลดลง และอายุบ่มหลังจาก 28 วัน การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่าง เถ้าลอย และ FGD Gypsum กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ทำให้ความหนาแน่นรวมมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นหรือคงที่



ก)



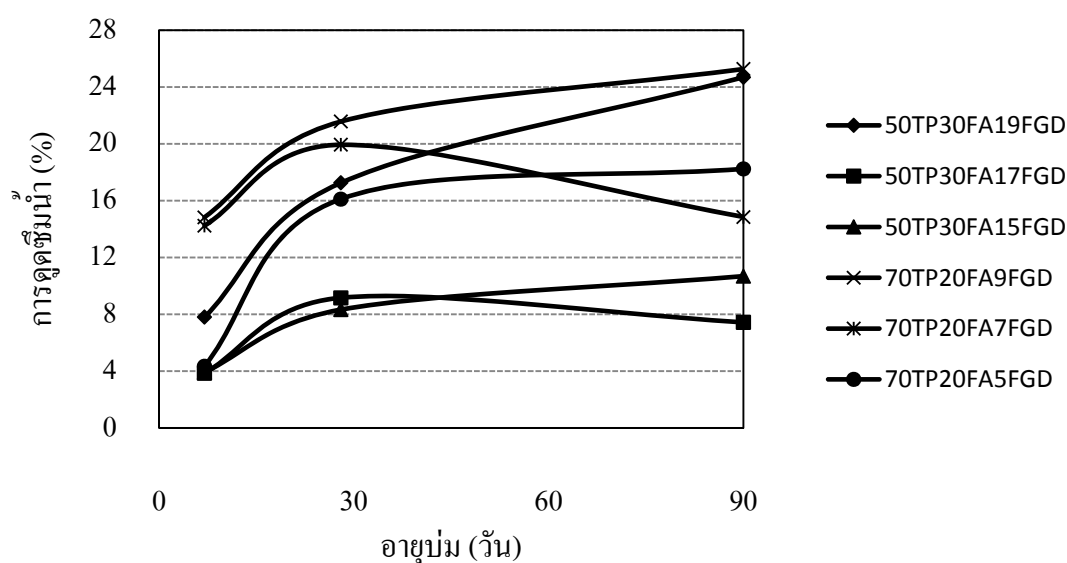
ข)

รูปที่ 3.13 รูโพรงของก้อนวัสดุผสมกลับ ก) ภาพถ่ายก้อนวัสดุผสมกลับที่อายุบ่ม 7 วัน ข) ภาพถ่ายก้อนวัสดุผสมกลับที่อายุบ่ม 28 วัน

### 3.2.2 การดูดซึมน้ำของก้อนวัสดุผสมกลับ

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของก้อนวัสดุผสมกลับขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ซึ่งแบ่งการทดสอบเป็นสองชุดการทดสอบคือ ชุดแรกใช้ทางแร่โปแตชร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุผสมกลับ ใช้วัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์โดยโดยน้ำหนักวัสดุผสมกลับ ในอัตราส่วนเถ้าลอยร้อยละ 30 และ FGD Gypsum ร้อยละ 15, 17 และ 19 ตามลำดับ และปูนซีเมนต์ร้อยละ 5, 3 และ 1 ตามลำดับ และชุดหลังเพิ่มทางแร่โปแตชเป็นร้อยละ 70 โดยน้ำหนักวัสดุผสมกลับ ใช้วัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์

โดยน้ำหนักวัสดุผสมกลับ ในอัตราส่วนเถ้าลอยลดลงเหลือร้อยละ 20 และ FGD Gypsum ลดลงเหลือร้อยละ 5, 7 และ 9 ตามลำดับ และปริมาณปูนซีเมนต์คงที่ ที่ร้อยละ 5, 3 และ 1 ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ อายุบ่มทั้งสองชุดที่ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 3.14-3.16

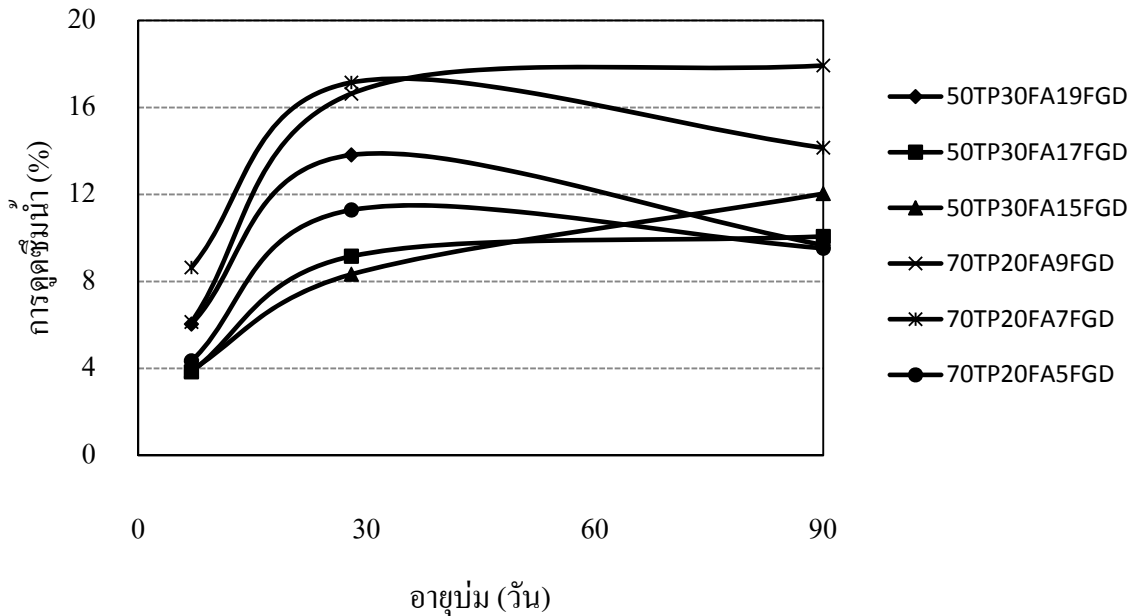


รูปที่ 3.14 อิทธิพลของอายุบ่มต่อการดูดซึมน้ำของก้อนวัสดุผสมกลับที่  $w/b = 0.5$

จากการแสดงผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของก้อนวัสดุผสมกลับในรูปที่ 3.14 พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของก้อนวัสดุผสมกลับที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 อายุบ่ม 7 วัน มีค่าร้อยละ 14.83, 14.24, 7.81, 4.35, 3.92 และ 3.85 ตามลำดับ ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าร้อยละ 21.57, 19.94, 17.26, 16.12, 9.16 และ 8.33 ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่าร้อยละ 25.26, 24.69, 18.24, 14.85, 10.68 และ 7.43 ตามลำดับ

ผลการทดสอบพบว่าเมื่อการใช้เถ้าลอยที่มีสมบัติเป็นปอซโซลานิก ประเภท C และ FGD Gypsum ที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สูงซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน มาแทนที่ปริมาณโดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ สังเกตได้ว่าค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของก้อนวัสดุผสมกลับเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากเถ้าลอยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ได้อย่างช้า ๆ เห็นได้จากการแสดงรูปที่ 3.11 ที่การเปลี่ยนแปลงอายุบ่มจาก 7 วัน เป็น 28 วัน ค่าการดูดซึมน้ำมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และหลังจากอายุบ่มจะเกิดการเปลี่ยนแปลงการดูด

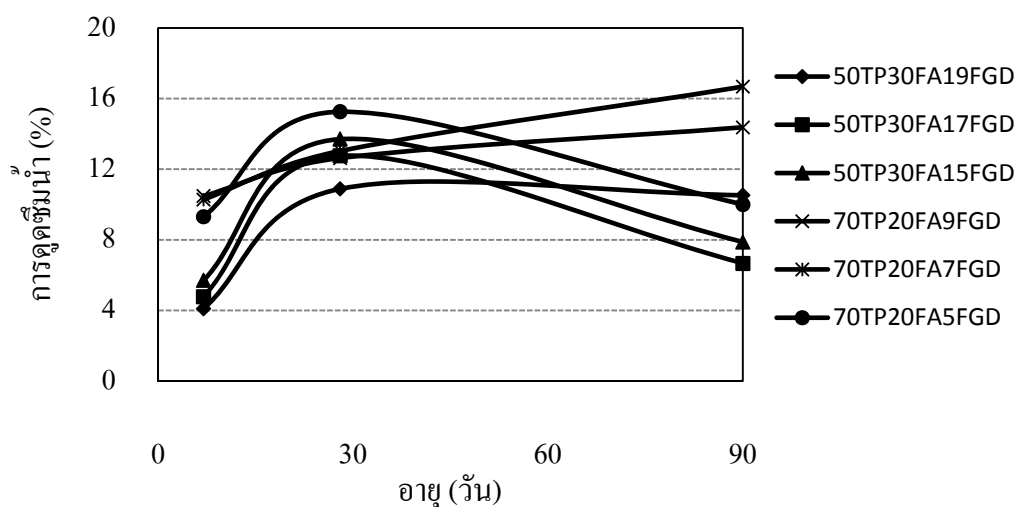
ซีเมนต์ที่ค่อนข้างน้อยหรือคงที่ อย่างไรก็ตามยังมีบางอัตราส่วน (70TP20FA9FGD) ที่มีค่าการดูดซีเมนต์ของวัสดุผสมกลับที่ลดลง



รูปที่ 3.15 อิทธิพลของอายุบ่มต่อการดูดซีเมนต์ของก้อนวัสดุผสมกลับที่  $w/b = 0.6$

จากผลการทดสอบการดูดซีเมนต์ของก้อนวัสดุผสมกลับที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.6 (รูปที่ 3.15) อายุบ่ม 7 วัน มีค่าร้อยละ 8.65, 6.14, 6.04, 4.45, 3.92 และ 3.84 ตามลำดับ ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าร้อยละ 17.15, 16.64, 13.82, 11.29, 9.16 และ 8.32 ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่าร้อยละ 17.93, 14.15, 12.04, 10.08, 9.68 และ 9.53 ตามลำดับ

ผลการทดสอบการดูดซีเมนต์ของก้อนวัสดุผสมกลับที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.6 พบว่าเมื่อมีการใช้เถ้าลอยแทนที่ปริมาณโดยน้ำหนักปูนซีเมนต์มากขึ้น ส่งผลทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลทำให้ค่าการดูดซีเมนต์มีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ที่ไม่สมบูรณ์ และก้อนวัสดุผสมกลับมีรูโพรงเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเติมปริมาณโดยน้ำหนักของ FGD Gypsum ที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สูง มาแทนที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปูนซีเมนต์ ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นที่อายุบ่มหลัง 28 วัน ทำให้เกิดผลึกของแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) ช่วยอุดช่องรูว่างในโพรงของเนื้อก้อนวัสดุผสมกลับมากขึ้น ทำให้ค่าการดูดซีเมนต์ของก้อนวัสดุผสมกลับลดลง



รูปที่ 3.16 อิทธิพลของอายุบ่มต่อการดูดซึมน้ำของก้อนวัสดุผสมที่  $w/b = 0.7$

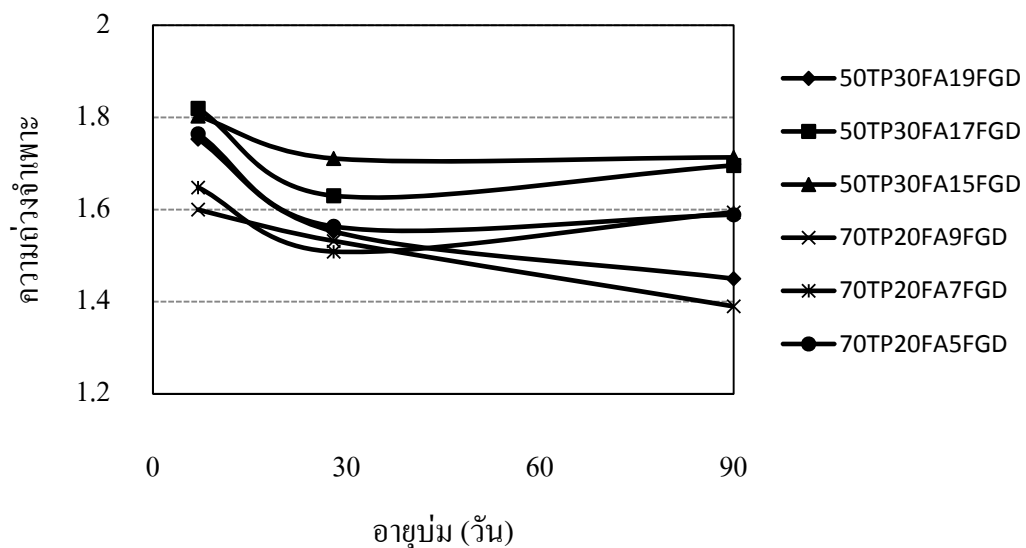
จากผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของก้อนวัสดุผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7 อายุบ่ม 7 วัน มีค่าร้อยละ 10.48, 10.28, 9.31, 5.70, 4.78 และ 4.10 ตามลำดับ ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าร้อยละ 15.25, 13.70, 13.03, 12.76, 12.63 และ 10.88 ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่าร้อยละ 16.68, 14.39, 10.52, 10.00, 7.87 และ 6.66 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.16

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของก้อนวัสดุผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7 พบว่าวัสดุผสมที่อายุบ่มหลัง 28 วัน ขึ้นไปการดูดซึมน้ำของก้อนวัสดุผสม (70TP20FA9FGD, 70TP20FA7FGD และ 50TP30FA19FGD) มากขึ้นหรือคงที่เมื่อเทียบกับอายุบ่มก่อน 28 วัน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานส่งผลทำให้วัสดุผสมมีปริมาณน้ำที่เหลือจากกระบวนการปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) มากขึ้น ทำให้องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินาไดรอกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) อยู่อย่างอิสระ ส่งผลทำให้การพัฒนาของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) ลดน้อยลง และการละลายของอนุภาคเกลือในเนื้อก้อนวัสดุผสม ทำให้เกิดช่องว่างมากขึ้นส่งผลให้การดูดซึมน้ำมากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามยังมีบางอัตราส่วน (50TP30FA15FGD, 50TP30FA17FGD และ 70TP20FA5FGD) ที่มีการดูดซึมน้ำที่ลดลง เนื่องจากผลของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของวัสดุผสม ทำให้เกิดผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) ช่วยอุดช่องว่างในโพรงของเนื้อก้อนวัสดุผสมมากขึ้น ทำให้ค่าดูดซึมน้ำของก้อนวัสดุผสมลดลง

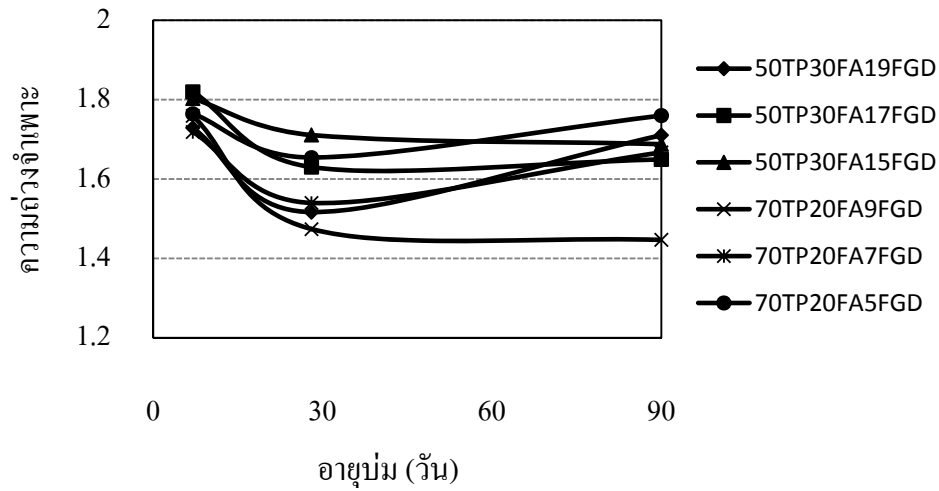
ผลของการทดสอบการดูดซึมน้ำของก้อนวัสดุถมกลับที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการดูดซึมน้ำของก้อนวัสดุถมกลับเพิ่มขึ้น ที่อายุบ่ม 7 วัน ไปจนถึง อายุบ่ม 28 วัน และพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดซึมน้ำที่อายุบ่มหลัง 28 วันขึ้นไปมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

### 3.2.3 ความถ่วงจำเพาะของก้อนวัสดุถมกลับ

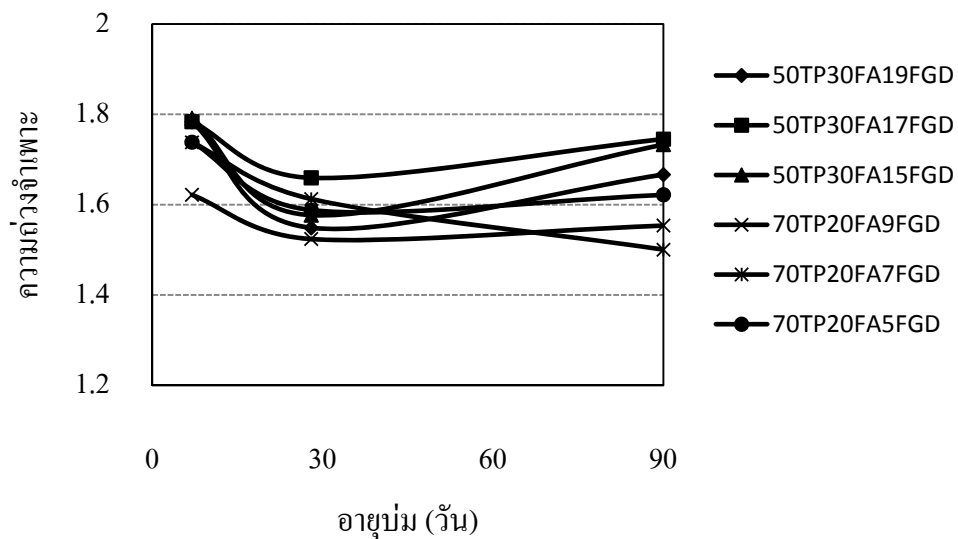
จากผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของก้อนวัสดุถมกลับขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ซึ่งแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ชุดการทดสอบคือ ชุดที่ 1 ใช้หางแร่โปแตชร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุถมกลับ ใช้วัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์โดยโดยน้ำหนักวัสดุถมกลับ ในอัตราส่วนแฉะลอยร้อยละ 30 และ FGD Gypsum ร้อยละ 15, 17 และ 19 ตามลำดับ และปูนซีเมนต์ร้อยละ 5, 3 และ 1 ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ และชุดที่ 2 เพิ่มหางแร่โปแตชเป็นร้อยละ 70 โดยน้ำหนักวัสดุถมกลับ ใช้วัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักวัสดุถมกลับ ในอัตราส่วนแฉะลอยลดลงเหลือร้อยละ 20 และ FGD Gypsum ลดลงเหลือร้อยละ 5, 7 และ 9 ตามลำดับ และปริมาณปูนซีเมนต์คงที่ที่ร้อยละ 5, 3 และ 1 ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ และอายุบ่มทั้งสองชุดที่ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 3.17-3.19



รูปที่ 3.17 อิทธิพลของอายุบ่มต่อความถ่วงจำเพาะของวัสดุถมกลับที่  $w/b = 0.5$



รูปที่ 3.18 อิทธิพลของอายุบ่มต่อความถ่วงจำเพาะของวัสดุผสมกลับที่  $w/b = 0.6$



รูปที่ 3.19 อิทธิพลของอายุบ่มต่อความถ่วงจำเพาะของวัสดุผสมกลับที่  $w/b = 0.7$

ความถ่วงจำเพาะของก้อนวัสดุผสมกลับที่อัตราส่วนปริมาตรน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่า 1.82, 1.80, 1.76, 1.75, 1.65 และ 1.60 ตามลำดับ ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่า 1.71, 1.63, 1.56, 1.55, 1.53 และ 1.51 ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่า 1.71, 1.70, 1.59, 1.59, 1.45 และ 1.39 ตามลำดับ (รูปที่ 3.17)

ความถ่วงจำเพาะของก้อนวัสดุถมกลับที่อัตราส่วนปริมาตรน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.6 ที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่า 1.82, 1.80, 1.76, 1.76, 1.73 และ 1.72 ตามลำดับ ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่า 1.71, 1.65, 1.63, 1.54, 1.52 และ 1.47 ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่า 1.76, 1.71, 1.69, 1.67, 1.65 และ 1.45 ตามลำดับ (รูปที่ 3.18)

ความถ่วงจำเพาะของก้อนวัสดุถมกลับที่อัตราส่วนปริมาตรน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่า 1.79, 1.78, 1.78, 1.74, 1.74 และ 1.62 ตามลำดับ ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่า 1.66, 1.61, 1.59, 1.58, 1.55 และ 1.52 ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่า 1.75, 1.73, 1.67, 1.62, 1.55 และ 1.50 ตามลำดับ (รูปที่ 3.19)

จากผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของก้อนวัสดุถมกลับพบว่า การเปลี่ยนแปลงความถ่วงจำเพาะเกิดขึ้นในช่วงอายุบ่มแรก ๆ (7-28 วัน) หลังจากนั้นแนวโน้มการเปลี่ยนความถ่วงจำเพาะของก้อนวัสดุถมกลับค่อนข้างที่จะคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ความถ่วงจำเพาะของก้อนวัสดุถมกลับในอายุบ่มที่ 7 วัน มีการกระจายตัวอยู่ที่ 1.82-1.60 ความถ่วงจำเพาะของก้อนวัสดุถมกลับในอายุบ่มที่ 28 วัน มีการกระจายตัวอยู่ที่ 1.71-1.47 ซึ่งพบว่าความถ่วงจำเพาะของก้อนวัสดุถมกลับที่อายุบ่มที่ 28 วัน มีค่าลดลงร้อยละ 8.84 ของความถ่วงจำเพาะของก้อนวัสดุถมกลับที่อายุบ่มที่ 7 วัน และความถ่วงจำเพาะของก้อนวัสดุถมกลับในอายุบ่มที่ 28 วัน มีการกระจายตัวอยู่ที่ 1.76-1.39 การเปลี่ยนแปลงความถ่วงจำเพาะที่ลดลง เนื่องมาจากการเกิดรูโพรงที่มากขึ้นจากปัจจัยหลักของการละลายของอนุภาคเกลือที่สะสมตัวในทางแร่โปแตชที่ใช้เป็นวัสดุถมกลับ การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ที่ไม่สมบูรณ์ และการเพิ่มอัตราส่วนปริมาตรน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้นจะส่งผลทำให้เนื้อของก้อนวัสดุถมกลับเกิดรูโพรงที่มากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tommy et al. (2007) พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้น ทำให้เกิดรูโพรงภายในพืดมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตตัวอย่างให้ลดลงได้ แต่อย่างไรก็ตามในบางอัตราส่วนผสมก็มีการเปลี่ยนแปลงความถ่วงจำเพาะอย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างวัสดุประสานกับน้ำ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ได้จนเกือบสมบูรณ์ ส่งผลทำให้ก้อนวัสดุถมกลับเกิดรูโพรงน้อยลง ความถ่วงจำเพาะจึงเพิ่มขึ้น

### 3.2.4 การหดตัวและการขยายตัวของก้อนวัสดุถมกลับ

จากผลการทดสอบการหดตัวและการขยายตัวของก้อนวัสดุถมกลับขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ซึ่งแบ่งการทดสอบการหดตัวและการขยายตัวออกเป็นสองชุดการทดสอบคือ ชุดแรกใช้ทางแร่โปแตชร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุถมกลับ ใช้วัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักวัสดุถมกลับ ในอัตราส่วนแฉะร้อยละ 30 และ FGD Gypsum ร้อยละ 15, 17 และ 19 ตามลำดับ และ

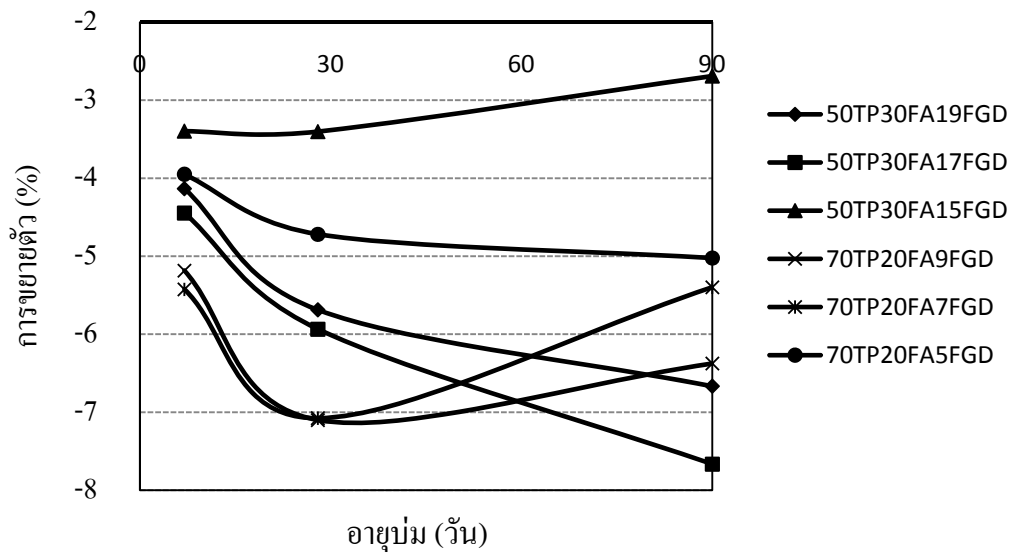
ปูนซีเมนต์ร้อยละ 5, 3 และ 1 ตามลำดับโดยใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ และชุดทดสอบการหดตัวและการขยายตัวหลังเพิ่มหางแร่ไปแต่ละเป็นร้อยละ 70 โดยน้ำหนักวัสดุผสมกลับ ใช้วัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักวัสดุผสมกลับ ในอัตราส่วนแก้ลดยลลดลงเหลือร้อยละ 20 และ FGD Gypsum ลดลงเหลือร้อยละ 5, 7 และ 9 ตามลำดับ และปริมาณปูนซีเมนต์คงที่ ที่ร้อยละ 5, 3 และ 1 ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ และอายุบ่มทั้งสองชุดที่ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

ผลการทำทดสอบการหดตัวและการขยายตัวของก้อนวัสดุผสมกลับที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 จากรูปที่ 3.18 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของขนาดวัสดุผสมกลับของก้อนตัวอย่างก่อนบ่มและหลังบ่ม พบว่าก้อนวัสดุผสมกลับมีการหดตัวทุก ๆ อัตราส่วนผสม ที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่าร้อยละการหดตัว 5.42, 5.18, 4.44, 4.13, 3.95 และ 3.40 ตามลำดับ ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าร้อยละการหดตัว 7.70, 7.08, 5.93, 5.69, 4.72 และ 3.40 ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่าร้อยละการหดตัว 7.66, 6.67, 6.37, 5.40, 5.02 และ 2.69 ตามลำดับ (รูปที่ 3.20)

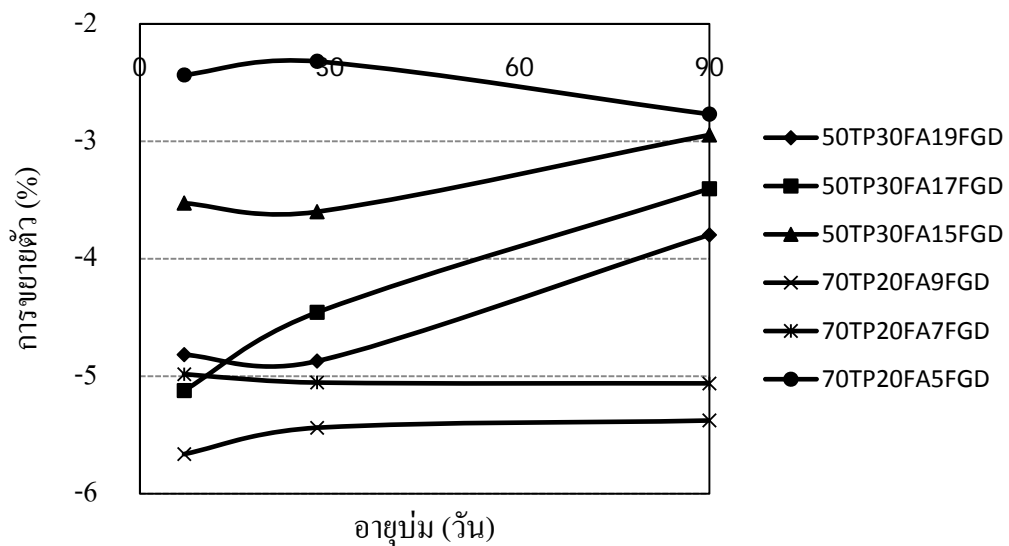
ผลการทำทดสอบการหดตัวและการขยายตัวของก้อนวัสดุผสมกลับที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.6 ที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่าร้อยละการหดตัว 5.66, 5.12, 4.98, 4.82, 3.53 และ 2.43 ตามลำดับ ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าร้อยละการหดตัว 5.44, 5.05, 4.87, 4.46, 2.60 และ 2.32 ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่าร้อยละการหดตัว 5.38, 5.06, 3.80, 3.40, 2.95 และ 2.77 ตามลำดับ (รูปที่ 3.21)

ผลการทำทดสอบการหดตัวและการขยายตัวของก้อนวัสดุผสมกลับที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.7 ที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่าร้อยละการหดตัว 4.32, 4.02, 3.43, 3.22, 3.18 และ 3.04 ตามลำดับ ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าร้อยละการหดตัว 4.61, 4.32, 4.27, 3.97, 3.85 และ 3.56 ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่าร้อยละการหดตัว 5.42, 5.02, 4.00, 3.95, 3.92 และ 3.81 ตามลำดับ (รูปที่ 3.22)





รูปที่ 3.20 อิทธิพลของอายุบ่มต่อการหดตัวและขยายตัวของก้อนวัสดุผสมที่  $w/b = 0.5$



รูปที่ 3.21 อิทธิพลของอายุบ่มต่อการหดตัวและขยายตัวของก้อนวัสดุผสมที่  $w/b = 0.6$

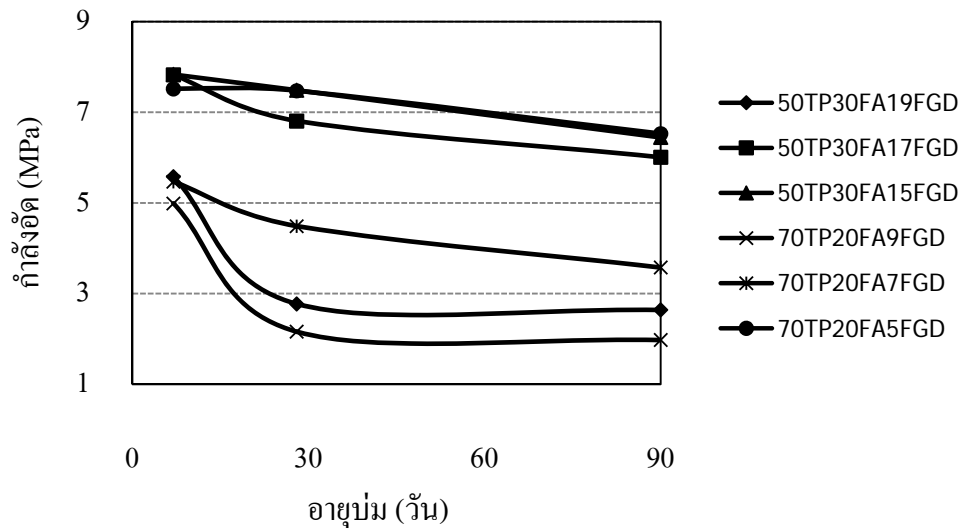


ผลการทดสอบการหดตัวและการขยายตัวของก้อนวัสดุถมกลับมีค่าร้อยละที่เป็นค่าลบ นั้นหมายถึงก้อนวัสดุถมกลับไม่มีการขยายตัวหลังจากการบ่มเมื่อเปรียบเทียบกับก้อนวัสดุถมกลับก่อนบ่ม เนื่องจากช่องว่างภายในเนื้อก้อนวัสดุถมกลับที่เกิดจากการละลายของอนุภาคเกลือ และการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลทำให้ก้อนวัสดุถมกลับเกิดการหดตัว ถึงแม้ว่าบางอัตราส่วนผสมของก้อนวัสดุถมกลับได้มีการพัฒนาการขยายตัวที่ดีขึ้นในอายุบ่มที่มากกว่า 28 วัน แต่อย่างไรก็ตามการขยายที่เกิดขึ้นก็ไม่ส่งผลทำให้ก้อนวัสดุถมกลับเกิดการขยายตัวได้เท่ากับขนาดก่อนบ่มได้

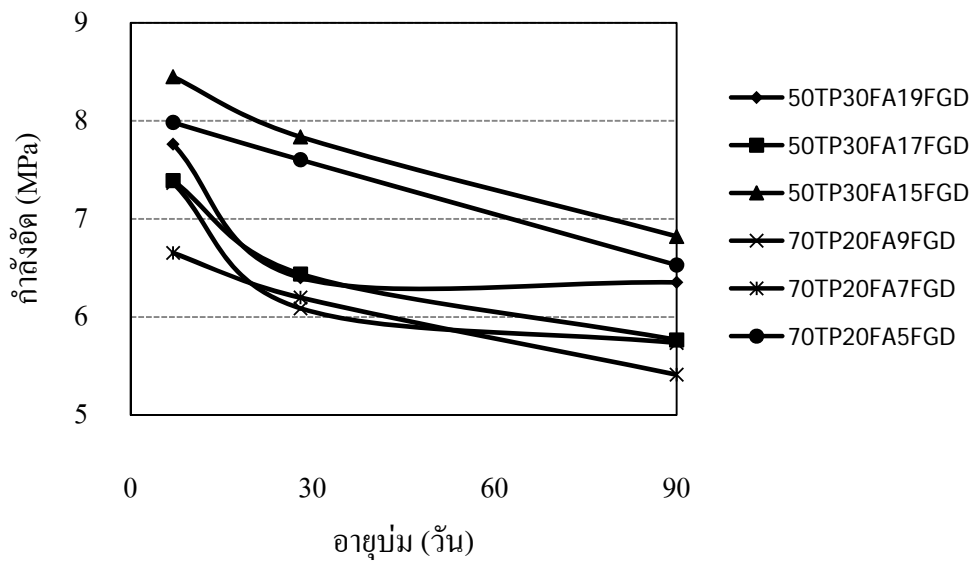
### 3.2.5 กำลังอัดของก้อนวัสดุถมกลับ

จากผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Uniaxial Compression Test) ของก้อนวัสดุถมกลับขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ซึ่งแบ่งการทดสอบออกเป็นสองชุดการทดสอบคือ ชุดแรกใช้หางแร่โปแตชร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุถมกลับ ใช้วัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์โดยใช้น้ำหนักวัสดุถมกลับ ในอัตราส่วนถั่วลอยร้อยละ 30 และ FGD Gypsum ร้อยละ 15, 17 และ 19 ตามลำดับ และปูนซีเมนต์ร้อยละ 5, 3 และ 1 ตามลำดับโดยใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ และชุดทดสอบหลังเพิ่มหางแร่โปแตชเป็นร้อยละ 70 โดยน้ำหนักวัสดุถมกลับ ใช้วัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักวัสดุถมกลับ ในอัตราส่วนถั่วลอยลดลงเหลือร้อยละ 20 และ FGD Gypsum ลดลงเหลือร้อยละ 5, 7 และ 9 ตามลำดับ และปริมาณปูนซีเมนต์คงที่ ที่ร้อยละ 5, 3 และ 1 ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ และอายุบ่มทั้งสองชุดที่ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.24 - 3.26

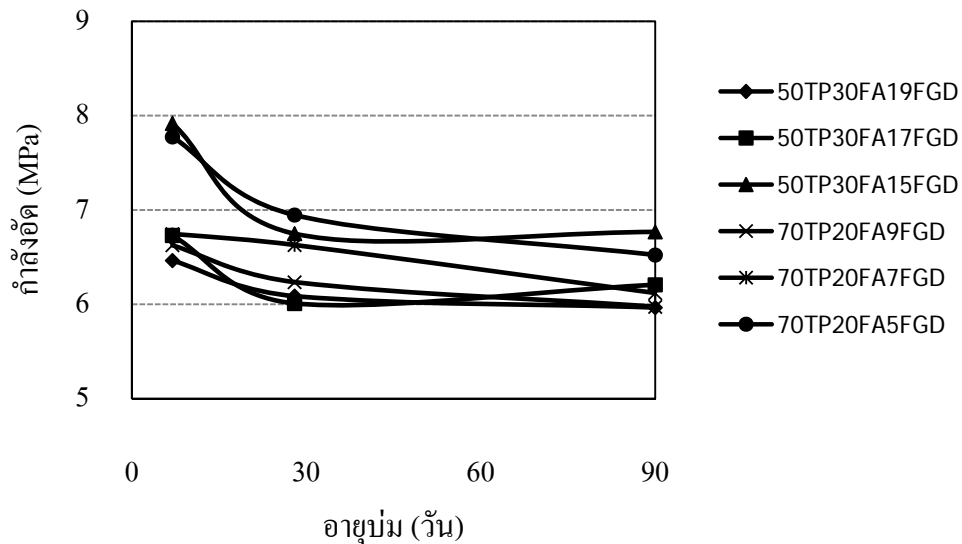
กำลังอัดของก้อนวัสดุถมกลับที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่า 7.83, 7.83, 7.52, 5.58, 3.47 และ 4.99 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่า 7.48, 7.47, 6.81, 4.49, 2.77 และ 2.16 เมกะพาสคัล ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่า 6.53, 6.45, 6.01, 3.58, 2.64 และ 1.98 เมกะพาสคัล ตามลำดับ (รูปที่ 3.24) พบว่ากำลังอัดของก้อนวัสดุถมกลับที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่าลดลงจนถึงอายุบ่ม 90 วัน และกำลังอัดบางอัตราส่วน (70TP20FA7FGD และ 50TP30FA19FGD) เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงน้อยหลังจากอายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 3.24 อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดของก้อนวัสดุผสมกัลป์ที่  $w/b = 0.5$



รูปที่ 3.25 อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดของก้อนวัสดุผสมกัลป์ที่  $w/b = 0.6$



รูปที่ 3.26 อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดของก้อนวัสดุผสมกลับที่  $w/b = 0.7$

กำลังอัดของก้อนวัสดุผสมกลับที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่า 8.45, 7.98, 7.76, 7.39, 7.37 และ 6.65 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่า 7.84, 7.60, 6.44, 6.40, 6.20 และ 6.09 เมกะพาสคัล ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่า 6.82, 6.53, 6.35, 5.77, 5.74 และ 5.41 เมกะพาสคัล ตามลำดับ (รูปที่ 3.25) พบว่ากำลังอัดของก้อนวัสดุผสมกลับที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดจนถึงอายุบ่ม 90 วัน และกำลังอัดบางอัตราส่วน (70TP20FA7FGD และ 50TP30FA19FGD) เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงน้อยหลังจากอายุบ่ม 28 วัน

กำลังอัดของก้อนวัสดุผสมกลับที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่า 7.92, 7.78, 6.74, 6.73, 6.62 และ 6.46 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่า 6.95, 6.75, 6.63, 6.23, 6.09 และ 6.01 เมกะพาสคัล ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่า 6.77, 6.52, 6.21, 6.12, 5.97 และ 5.96 เมกะพาสคัล ตามลำดับ (รูปที่ 3.26) พบว่ากำลังอัดของก้อนวัสดุผสมกลับที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่าลดลงจนถึงอายุบ่ม 28 วัน และกำลังเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่อายุบ่ม 90 วัน

จากผลการทดสอบกำลังอัดของก้อนวัสดุผสมกลับสามารถจำแนกปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อกำลังอัดของก้อนวัสดุผสมกลับได้ดังนี้

### 3.2.5.1 ผลกระทบจากเถ้าลอยของก้อนวัสดุถมกลับ

พบว่าเมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 30 ส่งผลให้กำลังอัดของก้อนวัสดุถมกลับมีกำลังอัดเป็นที่น่าพอใจว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 20 ยกเว้นบางอัตราส่วน (50TP30FA19FGD) เนื่องจากเถ้าลอยมีสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolan) มีส่วนประกอบหลักที่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้ อยู่ในรูปสารประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมิเนียมไตรออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ในสภาพที่มีความชื้นในระยะแรก น้ำกับปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) เกิดเป็นสารเชื่อมประสานที่แข็งแรง แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) อีสารอยู่ในโพรงของเนื้อก้อนวัสดุถมกลับ เถ้าลอยจะเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) เกิดเป็นสารเชื่อมประสานชนิดเดียวกันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตเหลือปริมาณ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) น้อยลง มีความแข็งแรงในระยะยาวเพิ่มขึ้น และความต้านทานการเกิดปฏิกิริยาของเกลือซัลเฟต ทำให้การเพิ่มปริมาณร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยส่งผลดีต่อกำลังอัดของก้อนวัสดุถมกลับ ในขนาดเดียวกันการเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มากเกินไป ส่งผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ลดลง ทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำปฏิกิริยากับวัสดุปอซโซลานได้น้อยลงและปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรตลดน้อยลงตามไปด้วย (Khelafi, 2006) จะส่งผลกระทบต่อกำลังอัดของก้อนวัสดุถมกลับลดลง Toledo Filho et al. (2007) พบว่าการแทนที่วัสดุปอซโซลานในคอนกรีตที่เหมาะสมที่ควรอยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 20 และไม่ควรเติมเกินร้อยละ 30 เพราะจะทำให้กำลังที่เกิดขึ้นลดลง

### 3.2.5.2 ผลกระทบจาก FGD Gypsum ของก้อนวัสดุถมกลับ

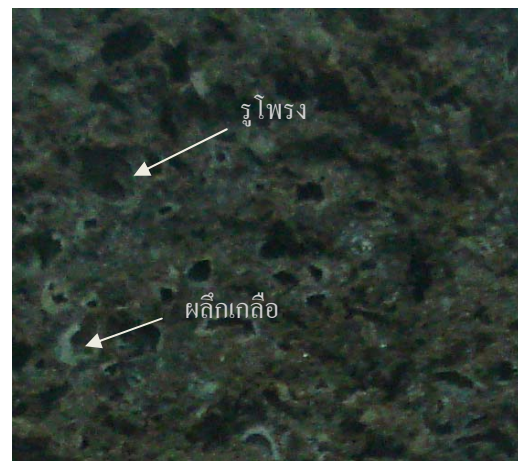
หากพิจารณาผลกระทบจาก FGD Gypsum ต่อกำลังอัดก้อนวัสดุถมกลับการแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักวัสดุถมกลับ พบว่าการเพิ่มขึ้นของ FGD Gypsum ที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) สูงถึงร้อยละ 42.12 ในวัสดุถมกลับ ส่งผลทำให้ก้อนวัสดุถมกลับมีการปริมาณแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ที่หายไปจากการลดลงของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักวัสดุถมกลับ ซึ่งเกิดผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบการทำงานของ FGD Gypsum กับปูนซีเมนต์แล้ว การลดลงของปูนซีเมนต์เมื่อมีการแทนที่ด้วย FGD Gypsum ส่งผลทำให้กำลังอัดของก้อนวัสดุถมกลับลดลงอย่างเห็นได้ชัด

### 3.2.5.3 ผลกระทบจากความพรุนของก้อนวัสดุถมกลับ

ความพรุนของก้อนวัสดุถมกลับมีสาเหตุหลักมาจากการละลายของอนุภาคเกลือที่มีการสะสมตัวมาในทางแร่โปแตช เกิดเป็นรูพรุนในเนื้อก้อนวัสดุถมกลับในช่วงระยะเวลาบ่มช่วงแรก ส่งผลทำให้กำลังอัดในแรก (28 วัน) ลดลงจากระยะการบ่ม 7 วัน อย่างเห็นได้ชัด และมีการเกิดผลึกเกลือใหม่ในช่วงระยะเวลาบ่มที่นานออกไป (90 วัน) ทำให้เกิดการแทนที่รูโพรงในเนื้อก้อนวัสดุถมกลับของผลึกเกลือใหม่ ส่งผลทำให้ก้อนวัสดุถมกลับมีการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดที่น้อยลงหรือคงที่ ความพรุนของก้อนวัสดุถมกลับยังส่งผลกระทบต่อความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และการขยายของก้อนวัสดุถมกลับ ซึ่ง Farrell et al. (2001) พบว่ากำลังอัดจะมีความสัมพันธ์กับช่องว่าง โดยที่รูโพรงภายในมอร์ต้าจะเป็นตัวชี้วัดกำลังอัด



ก)



ข)

รูปที่ 3.27 รูโพรงของก้อนวัสดุถมกลับและการก่อตัวใหม่ของผลึกเกลือ ก) ภาพถ่ายภายนอกก้อนวัสดุถมกลับ ข) ภาพถ่ายภายในก้อนวัสดุถมกลับ

### 3.2.5.4 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

จากการศึกษาการถมกลับ (Backfill) วัสดุถมกลับพบว่าการเลือกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เป็นสิ่งจำเป็นมากในการตัดสินใจในการถมกลับ ซึ่งการเลือกใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสม ( $w/b = 0.5$  และ  $0.6$ ) ส่งผลทำให้กำลังอัดก้อนวัสดุถมกลับมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น และเกิดการเอียงของเพสต์วัสดุถมกลับที่น้อยลงเห็นได้จากการทดสอบการยุบตัว (Slump





เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความหนาแน่นรวมและกำลังอัดของก้อนวัสดุถมกลับ ดังรูปที่ 3.28 ซึ่งจากการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นมีความสัมพันธ์ดังสมการ 3.4 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดล้นใจ 0.427

$$y = 0.008x - 8.008 \quad (3.4)$$

เมื่อ  $x$  คือ ความหนาแน่นรวมของก้อนวัสดุถมกลับ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$y$  คือ กำลังอัดของก้อนวัสดุถมกลับ (เมกะพาสคัล)

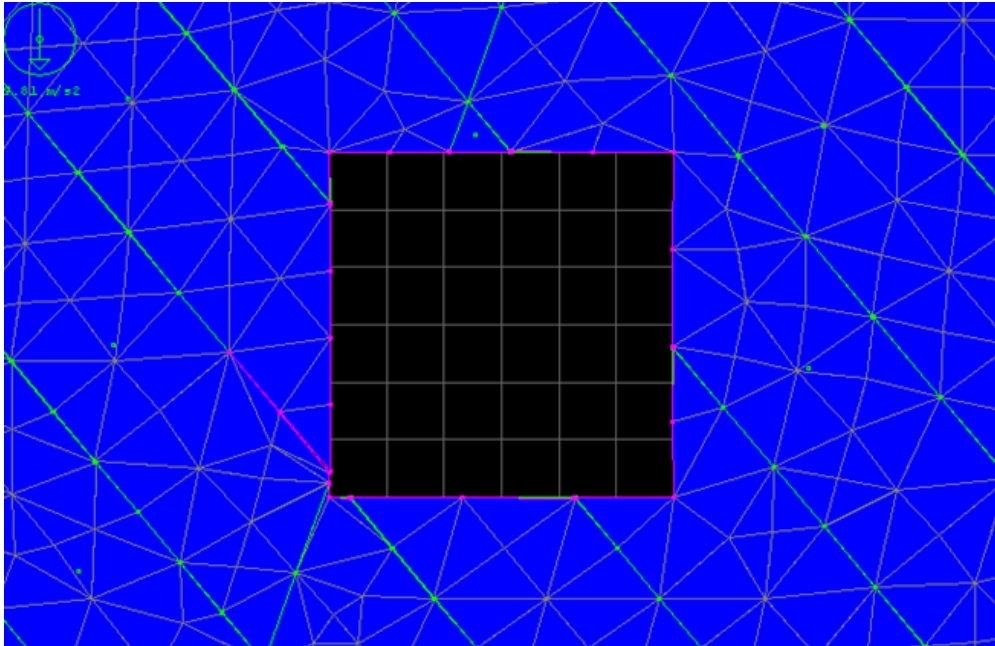
### 3.2.5.6 ผลกระทบจากอายุบ่มของก้อนวัสดุถมกลับ

โดยทั่วไปการเพิ่มอายุบ่มที่มากขึ้นจะส่งผลดีต่อกำลังอัดที่มากขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทั้งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ และเกิดจากการทำปฏิกิริยาของวัสดุปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ที่ทำให้เกิดเป็นผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดก้อนวัสดุถมกลับ ดังนั้นการเพิ่มอายุบ่มที่มากขึ้นย่อมส่งผลดีต่อกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการบ่มก้อนวัสดุถมกลับในระยะแรก (7-28 วัน) จะเห็นได้ว่า (รูปที่ 3.24-3.26) กำลังอัดของก้อนวัสดุถมกลับมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากอิทธิพลของการละลายของอนุภาคเกลือในทางแร่โปแตช ทำให้ผลของการทดสอบกำลังอัดขัดแย้งกับ เจริญผล อินัน (2009) ที่พบว่า การเพิ่มอายุบ่มที่มากขึ้นจะส่งผลดีต่อกำลังอัดที่มากขึ้น

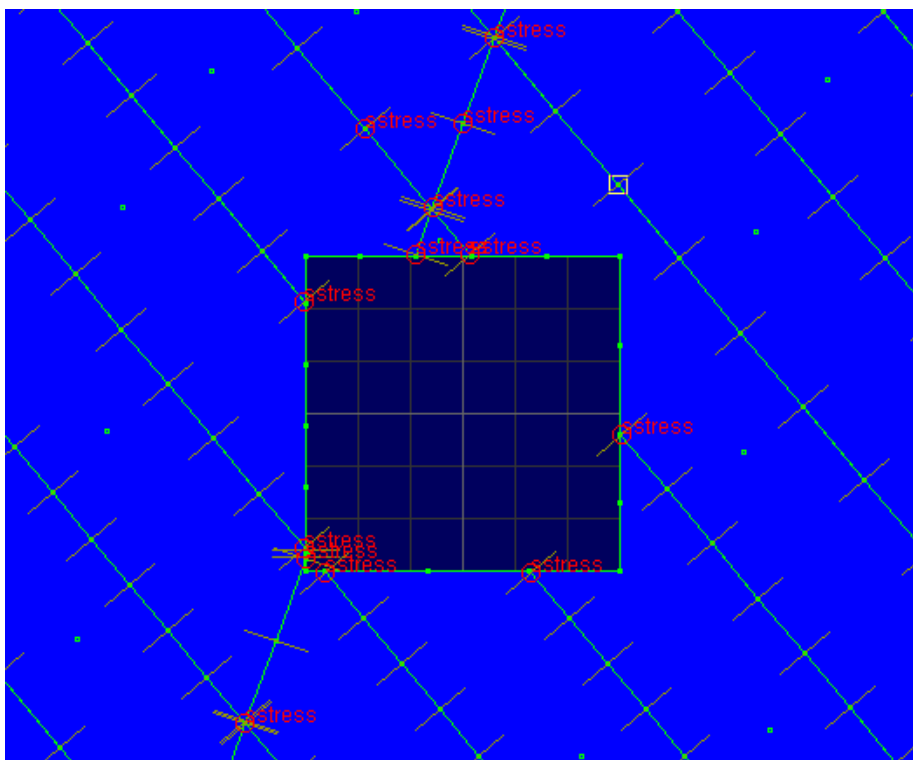
## 3.3 การจำลองการพิบัติของอุโมงค์รูปเหลี่ยมแบบไม่ถมกลับและแบบถมกลับ

### 3.3.1 การจำลองการพิบัติของอุโมงค์รูปเหลี่ยมแบบไม่ถมกลับ

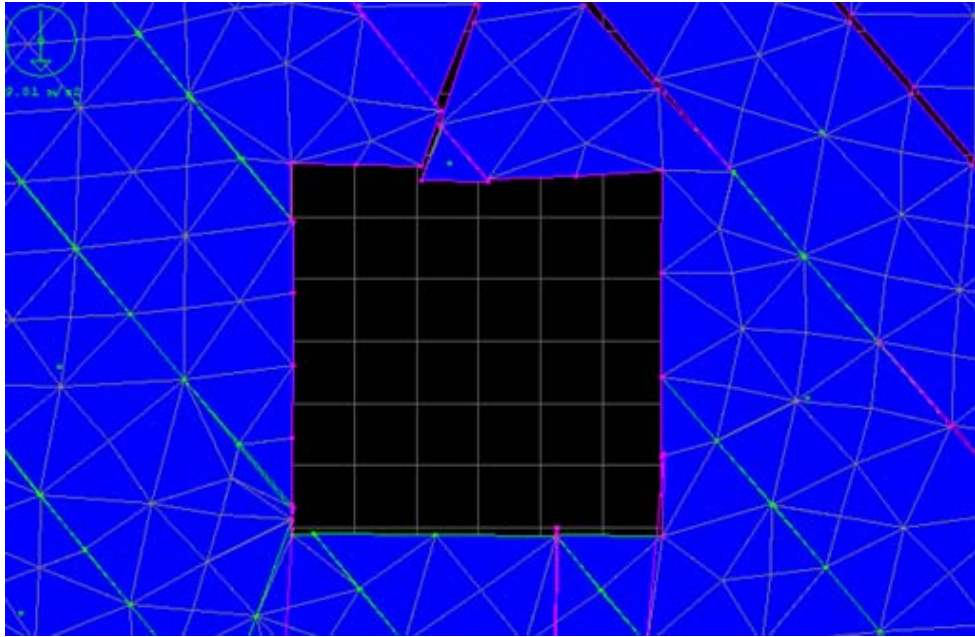
จากผลการจำลองการพิบัติของอุโมงค์รูปเหลี่ยมแบบไม่ถมกลับ ภายใต้อุณหภูมิที่ระยะ 300 เมตร จากระยะพื้นดินด้านบนเหมือนใต้ดิน ความกว้างของอุโมงค์เหมือนใต้ดิน 7 เมตร ความสูงของหน้าเหมือง 5 เมตร ทิศทางการวางตัวของแนวแตก 45 องศา และค่ามุมเสียดทาน 20 องศา ระยะห่างระหว่างรอยแตกเท่ากับ 8 เมตร ดังแสดงในรูปดังต่อไปนี้



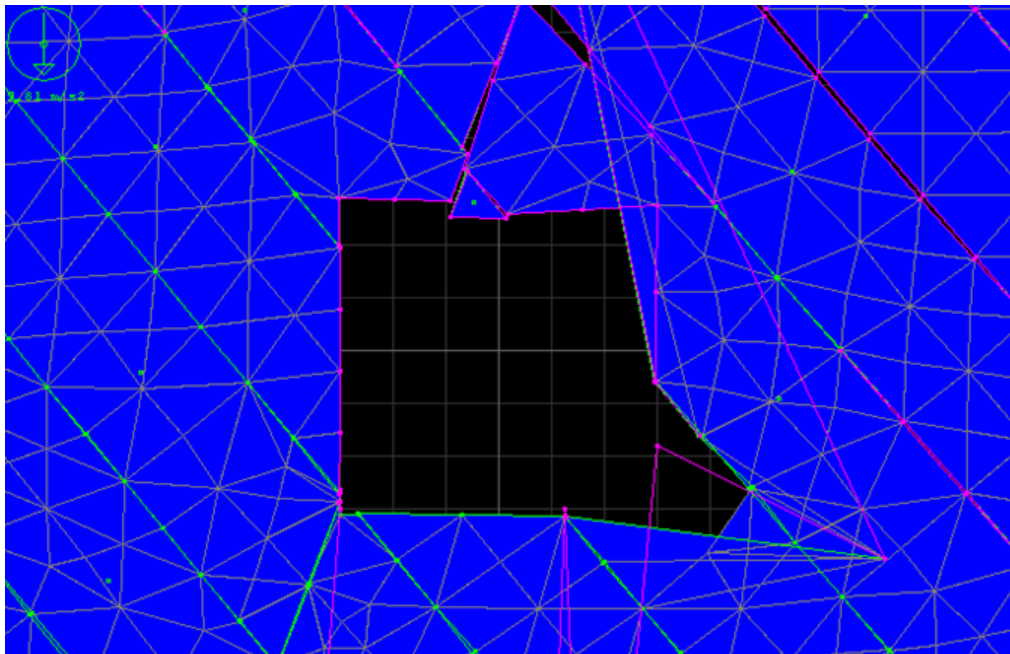
รูปที่ 3.29 การจำลองโครงสร้างของเหมืองใต้ดินด้วย UDEC แบบไม่ถล่มกลับ



รูปที่ 3.30 ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดง โครงสร้างของจุดรับแรงของเหมืองใต้ดินแบบไม่มี  
การถล่มกลับ



รูปที่ 3.31 ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดงการบิดของโครงสร้างเหมือนได้ดินที่ไม่มีการถมกลับ เมื่อมีการ Run โปรแกรมครั้งที่ 4,100



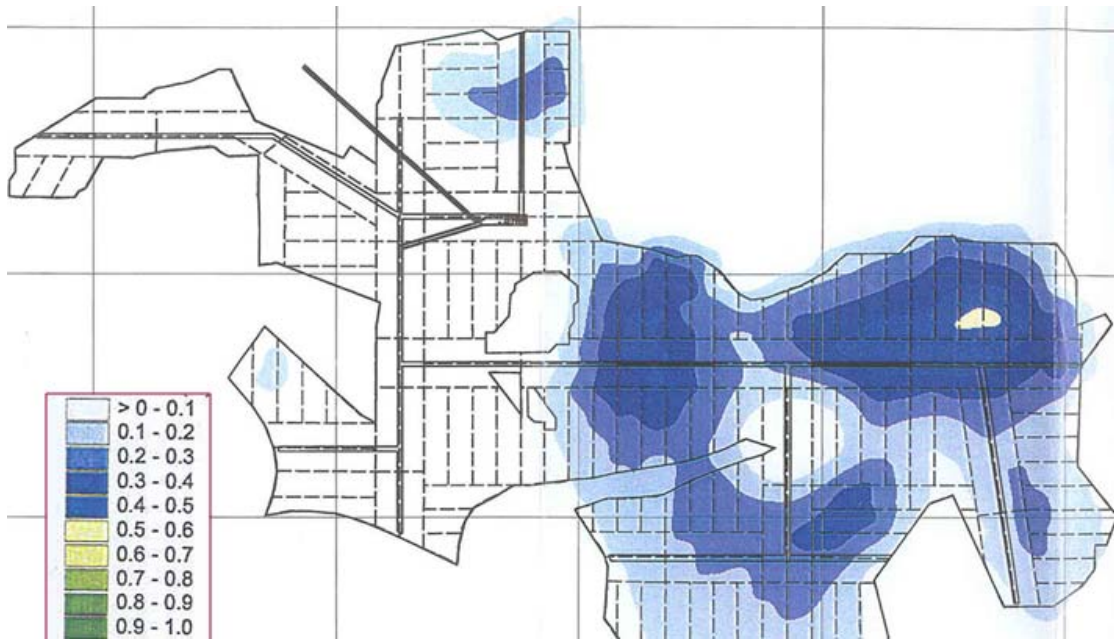
รูปที่ 3.32 ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดงการบิดของโครงสร้างเหมือนได้ดินที่ไม่มีการถมกลับ เมื่อมีการ Run โปรแกรมครั้งที่ 10,002

จากผลการจำลองการพิบัติของอุโมงค์รูปเหลี่ยมแบบไม่ถมกลับด้วยโปรแกรม UDEC พบว่าโครงสร้างอุโมงค์เหมืองใต้ดินสามารถต้านทานแรงที่มากระทำต่อโครงสร้างเหมืองใต้ดินได้ ในช่วงระยะเวลาแรกเท่านั้น จากรูปที่ 3.31 เห็นได้ว่าเมื่อมีการประเมินผลโปรแกรมไปถึงครั้งที่ 4,100 จะสังเกตเห็นการเริ่มพังละลายของโครงสร้างหลังคาอุโมงค์เหมืองดิน และเมื่อมีการประเมินผลโปรแกรมไปถึงครั้งที่ 10,002 อุโมงค์เหมืองใต้ดินไม่สามารถรองรับการกระทำของแรงต่อโครงสร้างอุโมงค์ จึงเป็นผลทำให้เกิดการพังละลายของอุโมงค์เหมืองใต้ดิน

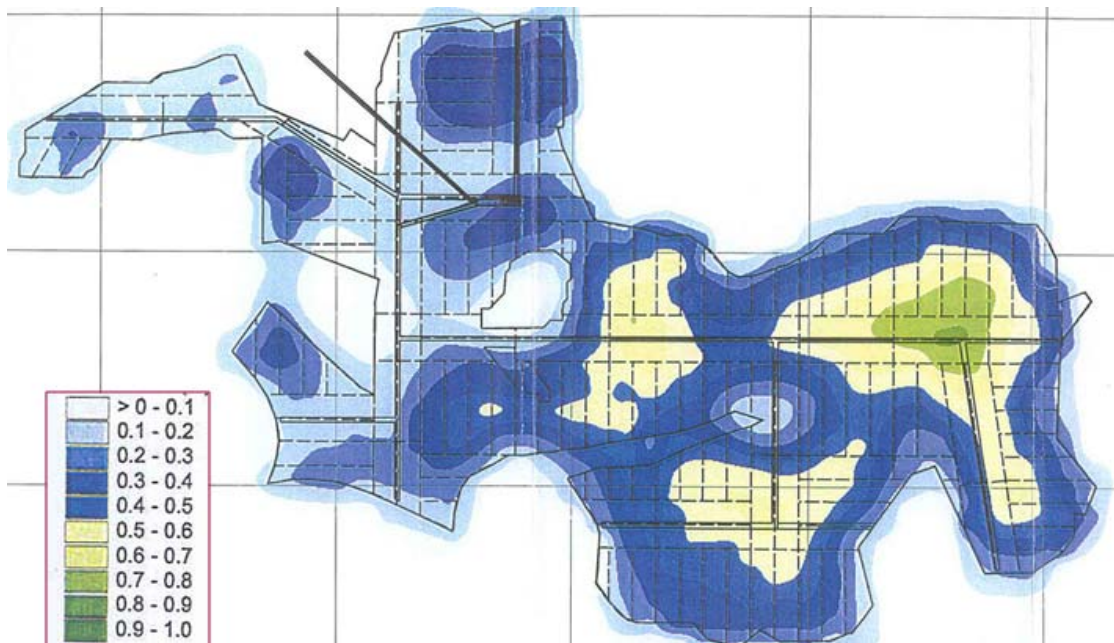
สอดคล้องกับการทำนายการทรุดตัวของอุโมงค์เหมืองใต้ดิน โครงการเหมืองแร่โปแตช แหล่งอุดรใต้ จังหวัดอุดรธานีของบริษัท เอเซียแปซิฟิคโปแตชคอร์ปอเรชั่น จำกัด ซึ่งพบว่าในระยะเวลาการทำเหมืองใต้ดินที่นานออกไป ความเสถียรของโครงสร้างอุโมงค์เหมืองใต้ดินต่ำลง ส่งผลให้อุโมงค์เกิดการทรุดตัวไปตามระยะเวลาที่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.33-3.36



รูปที่ 3.33 ผลการทำนายการทรุดตัวของอุโมงค์เหมืองใต้ดิน โครงการเหมืองแร่โปแตชแหล่งอุดรใต้ปีที่ 5 (โครงการเหมืองแร่โปแตช บริษัท เอเซียแปซิฟิคโปแตชคอร์ปอเรชั่น จำกัด)

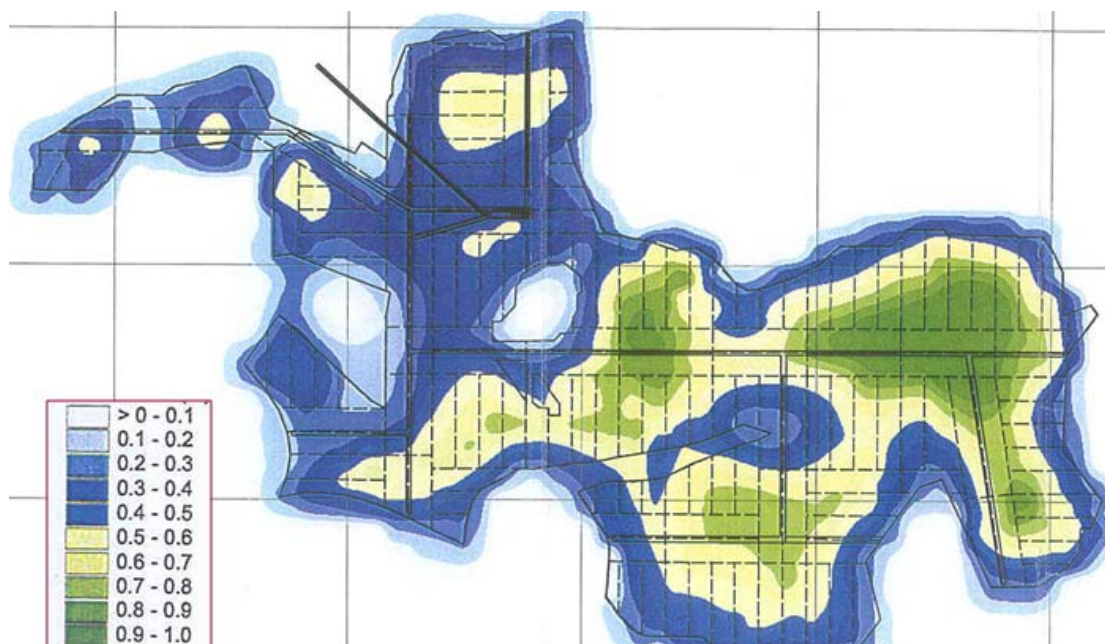


รูปที่ 3.34 ผลการทำนายการทรุดตัวของอุโมงค์เหมืองใต้ดิน โครงการเหมืองแร่โปแตชแหล่งอุดร  
ใต้ปีที่ 10 (โครงการเหมืองแร่โปแตช บริษัท เอเชียแปซิฟิกโปแตชคอร์ปอเรชั่น จำกัด)



รูปที่ 3.35 ผลการทำนายการทรุดตัวของอุโมงค์เหมืองใต้ดิน โครงการเหมืองแร่โปแตชแหล่งอุดร  
ใต้ปีที่ 20 (โครงการเหมืองแร่โปแตช บริษัท เอเชียแปซิฟิกโปแตชคอร์ปอเรชั่น จำกัด)



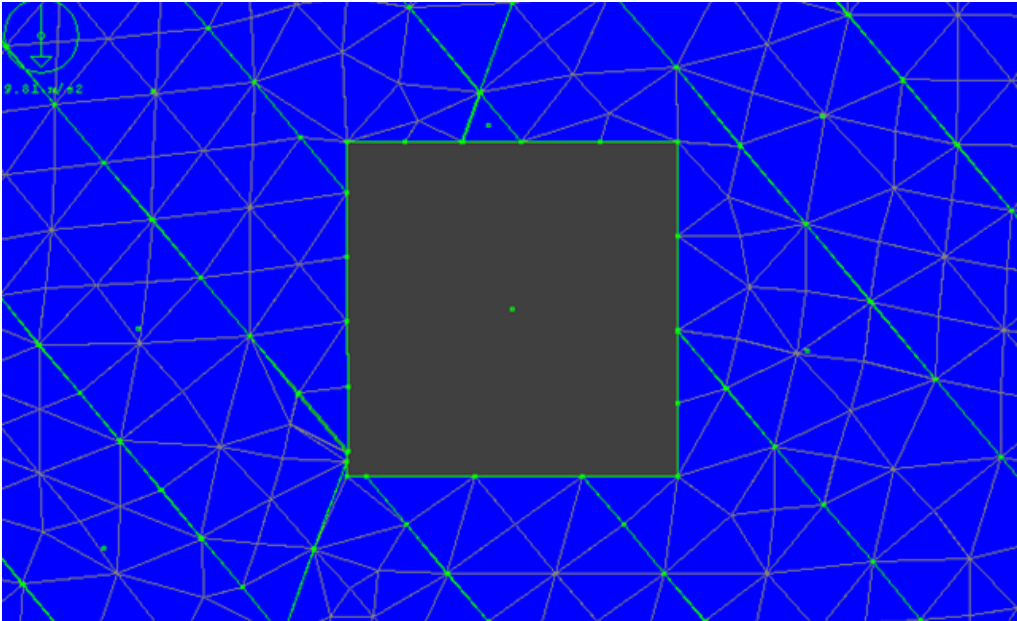


รูปที่ 3.36 ผลการทำนายการทรุดตัวของอุโมงค์เหมืองใต้ดิน โครงการเหมืองแร่โปแตชแหล่งอุดร  
ใต้ปีที่ 30 (โครงการเหมืองแร่โปแตช บริษัท เอเชียแปซิฟิกโปแตชคอร์ปอเรชั่น จำกัด)

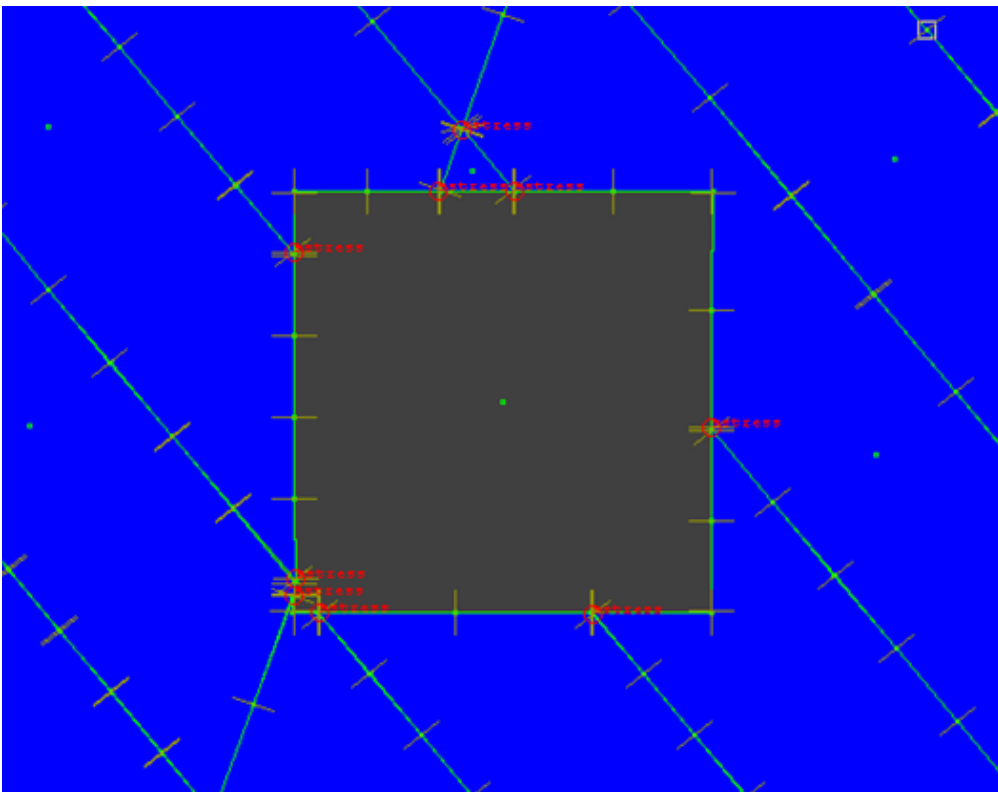
### 3.3.2 การจำลองการพิบัติของอุโมงค์รูปเหลี่ยมแบบถมกลับ

จากผลการจำลองการพิบัติของอุโมงค์รูปเหลี่ยมแบบถมกลับ ภายใต้ความกดดันที่ระยะ 300 เมตร จากระยะพื้นดินด้านบนเหมืองใต้ดิน ความกว้างของอุโมงค์เหมืองใต้ดิน 7 เมตร ความสูงของหน้าเหมือง 5 เมตร ทิศทางการวางตัวของแนวแตก 45 องศา และค่ามุมเสียดทาน 20 องศา ระยะห่างระหว่างรอยแตกเท่ากับ 8 เมตร

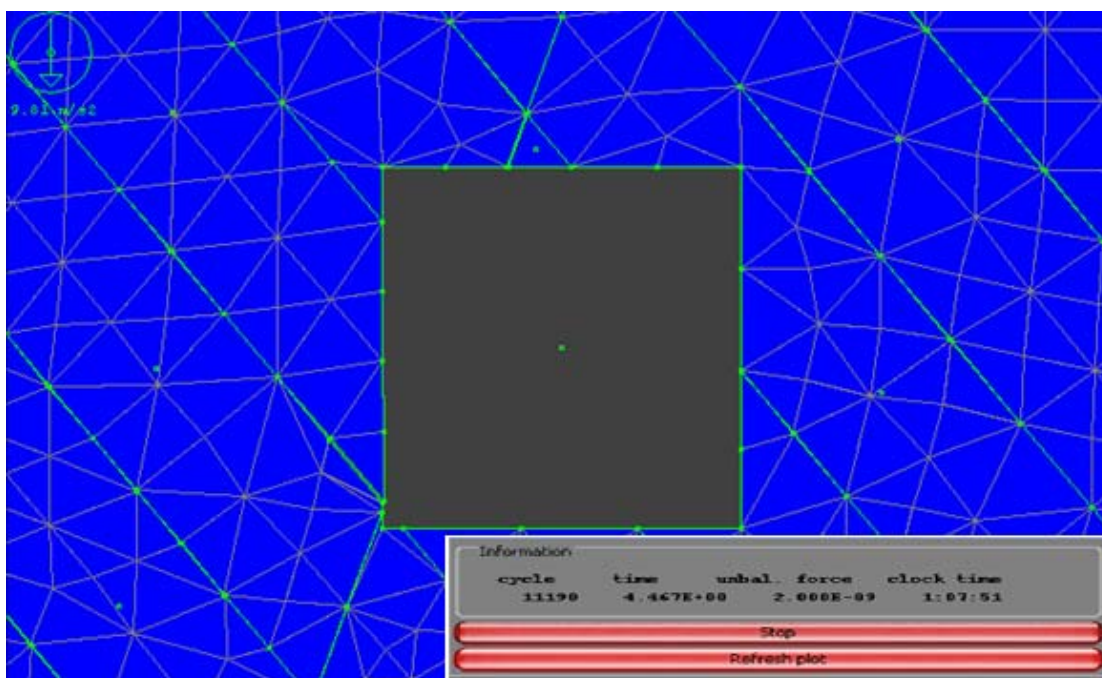
เมื่อพิจารณาผลการจำลองการพิบัติของอุโมงค์รูปเหลี่ยมแบบถมกลับด้วยโปรแกรม UDEC พบว่าโครงสร้างอุโมงค์เหมืองใต้ดินสามารถต้านทานแรงที่มากระทำต่อโครงสร้างเหมืองใต้ดินได้ดีจนหมดขอบเขตการทำงานของโปรแกรม UDEC จากรูปที่ 3.40 เห็นได้ว่าเมื่อมีการประเมินผลโปรแกรมไปถึงครั้งที่ 16,780 อุโมงค์เหมืองใต้ดินยังสามารถรองรับการกระทำของแรงต่อโครงสร้างอุโมงค์ใต้เป็นอย่างดี



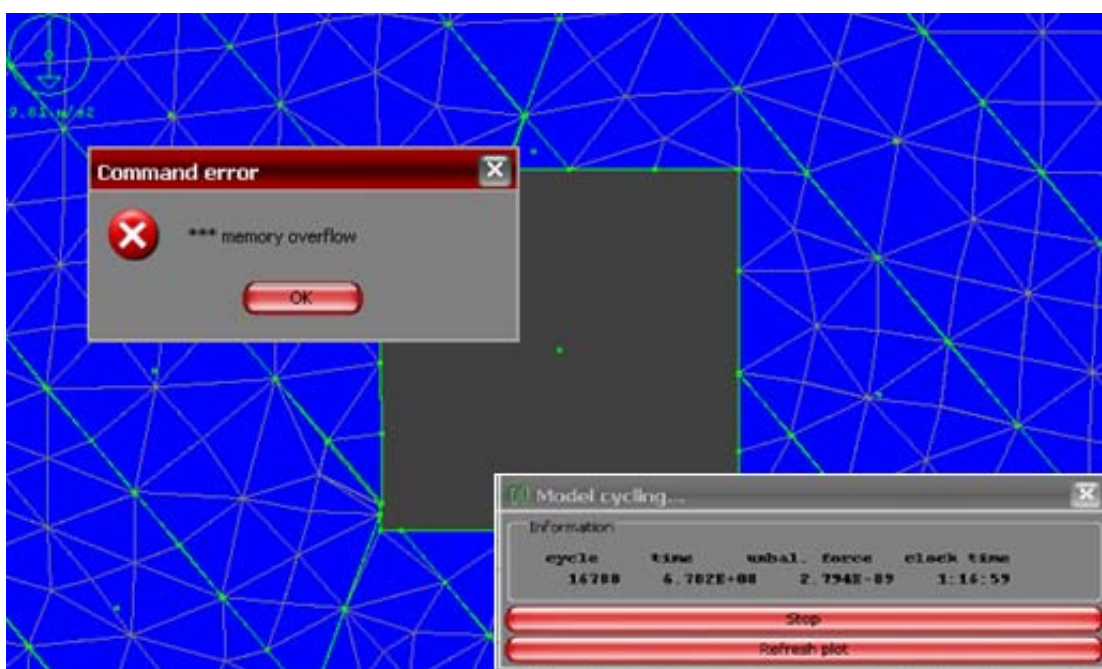
รูปที่ 3.37 การจำลองโครงสร้างของเหมืองใต้ดินด้วย UDEC แบบถมกลับ



รูปที่ 3.38 ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดงโครงสร้างของจุดรับแรงของเหมืองใต้ดินแบบถมกลับ



รูปที่ 3.39 ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดงการบิดของโครงสร้างเมืองใต้ดินที่มีการถล่มกลับ  
เมื่อมีการ Run โปรแกรมครั้งที่ 11,190



รูปที่ 3.40 ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดงการบิดของโครงสร้างเมืองใต้ดินที่ไม่มีการถล่ม  
กลับ เมื่อมีการ Run โปรแกรมครั้งที่ 16,780



ดังนั้นผลการจำลองการพิบัติด้วยโปรแกรม UDEC ของโครงสร้างอุโมงค์เหมืองใต้ดิน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการไม่มีการถล่มกลับและการมีการถล่มกลับในอุโมงค์เหมืองใต้ดิน พบว่าการถล่มกลับในเหมืองใต้ดินช่วยลดอัตราการเกิดการพังทลายของอุโมงค์เหมืองใต้ดินหลังจากการทำเหมืองและหยุดการทำเหมืองใต้ดินไปนานหลายสิบปี ส่งผลที่ก่อให้เกิดการทรุดตัวของภาคพื้นดินที่ใช้ประโยชน์ทางด้านเกษตรกรรม อุตสาหกรรม ที่อยู่อาศัย และคมนาคม

## บทที่ 4

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 4.1 สรุปการศึกษา

จากการศึกษาการนำทางแร่โปแตชที่ได้จากการแต่งแร่โปแตชจากเหมืองใต้ดิน และการนำวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้ามาใช้ในการถมกลับในเหมืองใต้ดิน เพื่อเพิ่มมูลค่าและลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่อาจจะเกิดขึ้นจากการทำเหมืองแร่โปแตชในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีการถมกลับเพื่อเพิ่มความปลอดภัย และลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมในการทำเหมืองใต้ดินในอนาคตได้เป็นอย่างดี โดยการนำเอาวัสดุที่เหลือใช้จากการทำเหมืองใต้ดินและผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เป็นประโยชน์ต่อการถมกลับในเหมืองใต้ดิน

2) การเพิ่มขึ้นของร้อยละทางแร่โปแตชต่ออัตราส่วนผสมของวัสดุถมกลับส่งผลทำให้กำลังอัดแกนเดียว (Uniaxial Compression Test) ของวัสดุถมกลับลดลง เนื่องจากการละลายของอนุภาคเกลือที่สะสมตัวมากับทางแร่โปแตชในก้อนวัสดุถมกลับ

3) ถ้ำถ่านหินลิกไนต์ในโรงงานไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง เมื่อพิจารณาจากผลรวมของปริมาณออกไซด์ทั้งสามชนิดสามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลานประเภท C ตามมาตรฐานวัสดุปอซโซลาน ASTM C 618 ซึ่งอัตราส่วนผสมที่สามารถใช้เป็นวัสดุถมกลับได้ที่ร้อยละ 20 - 30 และ FGD Gypsum มีอัตราส่วนผสมที่สามารถใช้เป็นวัสดุถมกลับได้ที่ร้อยละ 5-15 ตามลำดับ ซึ่งเหมาะสมสำหรับเป็นส่วนผสมของวัสดุถมกลับที่มีกำลังอัดต่ำ ที่สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นตัวประสานในวัสดุถมกลับ เพื่อลดค่าใช้จ่ายของวัสดุถมกลับที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน

4) ค่าการยุบตัวของเพสต์วัสดุถมกลับเป็นปัจจัยสำคัญถึงการพิจารณาเลือกใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมกับการถมกลับ ซึ่งพบว่าการเลือกใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากเกินไป ส่งผลทำให้ก้อนวัสดุถมกลับเกิดการเอื่อม และค่าการยุบตัวจะเพิ่มมากขึ้นจนไม่สามารถคงสภาพความเป็นผลึกก้อนเอาไว้ได้

5) ความพรุนของก้อนวัสดุถมกลับที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้ก้อนวัสดุถมกลับมีกำลังอัด แขนเดียว ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และการขยายตัวของก้อนวัสดุถมกลับมีค่าลดลง ซึ่งสาเหตุหลักมาจากการละลายของอนุภาคเกลือที่มีการสะสมตัวมาในทางแร่โปแตช เกิดเป็นรูพรุน ในเนื้อก้อนวัสดุถมกลับในช่วงระยะเวลาบ่มช่วงแรก ส่งผลทำให้กำลังอัดในช่วงแรก (28 วัน) ลดลงจากระยะการบ่ม 7 วัน อย่างเห็นได้ชัด และมีการเกิดผลึกเกลือใหม่ในช่วงระยะเวลาบ่มที่นานออกไป (90 วัน) ทำให้เกิดการแทนที่รูโพรงในเนื้อก้อนวัสดุถมกลับของผลึกเกลือใหม่ ส่งผลทำให้ก้อนวัสดุถมกลับมีกำลังอัดความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และการขยายตัวที่เพิ่มขึ้นหรือคงที่

6) การจำลองการบีบอัดของโครงสร้างอุโมงค์เหมืองใต้ดิน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอุโมงค์เหมืองใต้ดินที่ไม่มีการถมกลับและการมีการถมกลับ พบว่าการถมกลับในเหมืองใต้ดินช่วยลดอัตราเกิดการพังทลายของอุโมงค์เหมืองใต้ดินหลังจากการทำเหมืองหรือหยุดการทำเหมืองใต้ดินได้ อย่างเห็นได้ชัด

#### 4.2 ข้อเสนอแนะ

1) ข้อมูลของก้อนวัสดุถมกลับจะเห็นได้ว่ายังมีค่าที่ค่อนข้างแกว่ง (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างสูง) อยู่บางส่วน เป็นเพราะว่าจำนวนตัวอย่างของทางแร่โปแตชที่มีอยู่อย่างจำกัด

2) การใช้โปรแกรม UDEC ไม่ได้ใช้บอกถึงขีดจำกัดการรับแรงที่มากที่สุด หรือระยะเวลาการรับน้ำหนักของโครงสร้างอุโมงค์ใต้ดิน แต่เป็นเพียงการจำลองเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นภาพของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอุโมงค์ใต้ดินที่มีการถมกลับและไม่มีการถมกลับ

3) การใช้เถ้าลอยที่จัดเป็นวัสดุปอซโซลาน และ FGD Gypsum ที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูง จากไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง เป็นเพียงงานวิจัยการใช้วัสดุถมกลับตัวอย่าง ที่สามารถเปลี่ยนแปลงวัสดุปอซโซลานประเภทอื่น ๆ จากการอุตสาหกรรมใกล้เคียงพื้นที่ปฏิบัติงานจริง เช่น เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย เถ้าชีวมวล เป็นต้น เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัสดุปอซโซลานจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ไกลออกไป

## เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. ความรู้เกี่ยวกับแร่โปแตช  
พฤษภาคม 2552. จาก <http://www.dmr.go.th>.
- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. สถานการณ์ด้านเศรษฐกิจ 2553. จาก <http://www.moac.go.th>.
- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม. กลุ่มอุตสาหกรรมโปแตชและ  
เกลือหิน 2545. จาก <http://www.dpim.go.th>.
- กิตติเทพ เพ็องขจร (2552). การพัฒนาคอมพิวเตอร์โปรแกรมเพื่อใช้คำนวณขนาด รูปร่าง และความ  
ลึกของโพรงเกลือ โดยใช้ข้อมูลการทรุดตัวของผิวดิน. สาขาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชา  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. สิงหาคม 2552.
- เจริญผล อินจัน และคนุพล ตันนโยภาส (2552). ผลกระทบของเศษดินเผาบาดและอายุบ่มที่มีต่อ  
คอนกรีตมวลรวมจากหินบะซอลต์เนื้อโพล่งขำย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา  
แห่งชาติครั้งที่ 14. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 13-15 พฤษภาคม 2552.
- ธีรวัฒน์ สีนศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2548). ผลกระทบของขนาด  
อนุภาคและรูปร่างเม็ดถ่านหินต่อความพรุนและการซึมผ่านอากาศของเพสต์. การ  
ประชุม วิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1. สมาคมคอนกรีตไทย. กรุงเทพฯ, หน้า 22-  
29.
- ณัฐกานต์ ช่างชิง (2548). คุณสมบัติและความเป็นไปได้ของเถ้าลอยเหลวในการเป็นวัสดุกลับ.  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เมษายน  
2548.
- บริษัท เอเชียแปซิฟิกโปแตชคอร์ปอเรชั่น จำกัด (2547). โครงการเหมืองแร่โปแตชแหล่งอุดรใต้  
จังหวัดอุดรธานี. 14 มิถุนายน 2547.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2547). Cement Pozzolan and Concrete. บริษัท  
ปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ
- วินิต ช่อวิเชียร (2539). คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 8. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วารภรณ์ คุณวานากิจ (2536). คุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยลิกไนต์. เอกสารประกอบการสัมมนา  
เรื่องศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์. สำนักงานวิจัยและพัฒนา การ  
ไฟฟ้า ฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, หน้า 1-15.

สุวัฒนา นิคม และคนุพล ตันนโยภาส (2552). คุณลักษณะของสมบัติบางประการของวัสดุ  
ยิปซั่มเทียมผสมเถ้าลอยขางพารา. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14.  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 13-15 พฤษภาคม 2552.

หนังสือพิมพ์ฐานเศรษฐกิจ. ไทยไร้เครดิตอาเซียนอนาคตไปแต่ชั่งขึ้นอยู่กับนักลงทุน 2553. จาก  
<http://www.thannews.th.com>

American Society for Testing and Materials. (1991). Standard Specification for Fly Ash and Raw  
or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement  
Concrete. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C618-91).

ASTM C 128 (1998). Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate. In  
Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C 136 (1998). Method of Test for Sieve or Screen Analysis of Fine and Coarse Aggregate.  
In Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C 143 (1998). Method of Test for Slump of Portland Cement Concrete. In Annual Book of  
ASTM Standards.

ASTM C 191 (1998). Method of Test for Test for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat  
Needle. In Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C 340 (1998). Specification for Portland-Pozzolan Cement. In Annual Book of ASTM  
Standards.

ASTM C 340 (1998). Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Used  
as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. In Annual Book of ASTM  
Standards.

Bennett T. and Ferris D. (2007). Digging for Potash, Mining Companies Encounter an Iron Will.  
Common Language Project, January 22, 2007.

Brink R.H. and Halstead W.J. (1956) Studies Relating to the Testing of Fly Ash for Use in  
Concrete. Proceedings, ASTM, Vol. 56, pp 1161-1206.

Chindaprasirt P., Ruangsiriyakul S., Cao HT. and Bucea L. (2001). Influence of Mae Moh Fly  
Ash Fineness on Characteristics, Strength and Drying Shrinkage Development of  
Blended Cement Mortars. The Eighth East Asia-Pacific Conference on Structural  
Engineering and Construction. Singapore. 5-7 December 2001, pp.1191.

- Fall M. and Mostafa B. (2005). Modeling the Effect of Sulphate on Strength Development of Paste Backfill and Binder Mixture Optimization. Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp. 301–314.
- Fall M., Mostfa B. and Ouellet S. (2005). Experimental Characterization of the Influence of Tailings Fineness and Density on the Quality of Cemented Paste Backfill. Minerals Engineering, Vol. 18, pp. 41–44.
- Farrell M.O., Wild S. and Sabir B.B. (2001). Pore Size Distribution and Compressive Strength of Waste Clay Brick Mortar. Cement and Concrete Composites. 23, pp.81-91.
- Funston J.J., Krell W.C. and Zimmer F.V. (1984). Flowable Fly-Ash : A New Cement Stabilized Backfill. Civil Engineering., ASCE, Vol.54, No. 3, pp.48-51.
- Grice T. (1998). Underground Mining with Backfill. Australian Mining Consultants. Vol. 2.
- Hill J.G., and Price D.R. (1983). The Impact of Deep Mining on an Overlying Aquifer in Western Pennsylvania. Ground Water Monitoring Review, Vol. 3, No.1, pp. 138-143.
- Horiuchi S., Taketsuka M., Odawara T. and Kawasaki H. (1992). Fly Ash Slurry Island : Theoretical and Experimental Investigations. Journal of Materials in Civil Engineering., ASCE, Vol. 4, No. 2, pp.117-133.
- Jaturapitakku C., Kaittikomol K., Sata V. and Leekeeratikul T. (2004). Use of Ground Coarse Fly Ash as a Replacement of Condensed Silica Fume in Producing High-Strength Concrete. Cement and Concrete Research. 34, pp.549-555.
- Kesimal A., Yilmaz E. and Ercikdi B.(2004). Evaluation of Paste Backfill Mixtures Consisting of Sulphide-Rich Mill Tailings and Varying Cement Contents. Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp. 1817–1822.
- Lane, R. O. and Best, J.F. (1982). Properties and Use of Fly Ash in Portland cement Concrete. Concrete International : Design&Construction, Vol. 4, pp. 81- 92.
- Li Y. and Sadaat M. (1999). Study of Gypsum Formation for Appropriate Dry Desulfurization Process of Flue Gas. Fuel 78(9), pp.1089-1095.
- Metha, J.L., Smit, L.A., Nehring, K.W., Brauning, S.E.,Gavaskar, A.R. and Sass, B.M.(1995). The Application of Solidification/Stabilization to Waste Materials, London, Lewis Publishers, pp. 107-108.

- Mostafa B., Fall M and Belem T. (2004). A Contribution to Understanding the Hardening Process of Cemented Pastefill. Minerals Engineering, Vol. 17, pp. 141–152.
- Mostafa B., Fiset J.F., Bussier B., Villeneuve M. and Plante B. (2005). Sludge Recycling Within Cemented Paste Backfill: Study of the Mechanical and Leachability Properties. Minerals Engineering.
- Ouellet S., Bussiere B., Mbonimpa M., Mostafa B. and Aubertin M. (2005). Reactivity and Mineralogical Evolution of an Underground Mine Sulphidic Cemented Paste Backfill. Minerals Engineering.
- Pekmezci B.Y. and Akyuz S. (2002). Optimum Usage of a Natural Pozzolan for the Maximum Compressive Strength of Concrete. Cement and Concrete Research Vol. 34 pp. 2175–2179
- Saha S., Badger S., haulow N. and Lee R.J. (2004). Determination of Water-Cement Ratio of Hardened Concrete By Scanning Electron Microscopy. Cement and Concrete Composites, Vol. 26, pp. 987- 992.
- Suwanich P. (1986). Potash and Rock Salt in Thailand : Nonmetallic Minerals Bull. Economic Geology Division, No2.
- Tesarika DR., Seymoura J.B. and Yanske T.R. (2003). Post-Failure Behavior of Two Mine Pillars Confined With Backfill. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 40, pp. 221–232.
- Toledo Filho R.D., Goncalves J.P., Americano B.B. and Fairbarin E.M.R. (2007). Potential for Use of Crushed Waste Calcined-Clay Brick as a Supplementary Cementations Material in Brazil. Cement and Concrete Research. 37, pp. 1357-1365
- Tommy, Y.Lo. Tang, W.C. and Cui, H.Z. (2007). The Effects of Aggregate Properties on Lightweight Concrete. Building and Environment. 42, pp. 3025-3029.

## ภาคผนวก

ผลการทดสอบสมบัติของวัสดุผสมกลับและก้อนวัสดุผสมกลับ



ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ขนาดการกระจายตัวของอนุภาคหางแร่โปแตช

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน (เมช)	น้ำหนักค้าง ตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้าง ตะแกรง	ร้อยละค้าง ตะแกรงสะสม	ร้อยละผ่าน ตะแกรงสะสม
4	0.00	0.72	0.72	99.28
8	0.04	12.95	13.67	86.33
16	0.10	34.53	48.20	51.80
30	0.11	38.85	87.05	12.95
50	0.03	12.23	99.28	0.72
100	0.00	0.72	100.00	0.00
PAN	0.00	0.00	-	-
โมดูลัสความละเอียด = 3.49				

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ขนาดการกระจายตัวของอนุภาคเถ้าลอย

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน (เมช)	น้ำหนักค้าง ตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้าง ตะแกรง	ร้อยละค้าง ตะแกรงสะสม	ร้อยละผ่าน ตะแกรงสะสม
30	0.00	0.39	0.39	99.61
50	0.00	0.78	1.16	98.84
100	0.02	4.26	5.43	94.57
200	0.17	32.56	37.98	62.02
270	0.17	32.36	70.35	29.65
325	0.10	18.41	88.76	11.24
400	0.05	10.47	99.22	0.78
PAN	0.00	0.78	100.00	0.00

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ขนาดการกระจายตัวของอนุภาค FGD Gypsum

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน (เมช)	น้ำหนักค้าง ตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้าง ตะแกรง	ร้อยละค้าง ตะแกรงสะสม	ร้อยละผ่าน ตะแกรงสะสม
16	0.01	1.20	1.20	98.80
30	0.03	4.50	5.70	94.30
50	0.05	7.20	12.89	87.11
100	0.19	28.79	41.68	58.32
200	0.18	26.39	68.07	31.93
270	0.13	19.94	88.01	11.99
325	0.07	10.49	98.50	1.50
400	0.00	0.60	99.10	0.90
PAN	0.01	0.90	100.00	0.00

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ขนาดการกระจายตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน (เมช)	น้ำหนักค้าง ตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้าง ตะแกรง	ร้อยละค้าง ตะแกรงสะสม	ร้อยละผ่าน ตะแกรงสะสม
16	0.00	0.38	0.38	99.62
30	0.00	0.76	1.14	98.86
50	0.00	0.76	1.90	98.10
70	0.02	4.18	6.08	93.92
100	0.17	31.94	38.02	61.98
200	0.17	31.75	69.77	30.23
270	0.10	18.06	87.83	12.17
325	0.05	10.27	98.10	1.90
400	0.00	0.76	98.86	1.14
PAN	0.01	1.14	100.00	0.00

ตารางที่ 5 ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น และโมดูลัสความเค้นของวัสดุถมกลับ

วัสดุถมกลับ	สมบัติพื้นฐาน		
	ความถ่วงจำเพาะ	ความหนาแน่น (ก.ก./ลบ.ม.)	โมดูลัสความเค้น
หางแร่โปแตช	2.16	2,160	3.48
เถ้าลอย	2.19	2,190	1.44
FGD Gypsum	2.25	2,250	1.68
ปูนซีเมนต์	3.10	3,100	1.48

ตารางที่ 6 ความเข้มข้นปรกติของเพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยร้อยละเถ้าลอย 20 กับ ร้อยละFGD Gypsum 5, 7 และ 9 ตามลำดับ

ปริมาณน้ำสถานะความชื้นเหลวปกติของวัสดุถมกลับ				
น้ำที่ต้องการ (กรัม)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	FGD Gypsum (กรัม)	ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)
207.36	355	100	45	41.47
194.30	365	100	35	38.86
182.97	375	100	25	36.60

ตารางที่ 7 ความเข้มข้นปรกติของเพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยร้อยละเถ้าลอย 30 กับ ร้อยละFGD Gypsum 15, 17 และ 19 ตามลำดับ

ปริมาณน้ำสถานะความชื้นเหลวปกติของวัสดุถมกลับ				
น้ำที่ต้องการ (กรัม)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	FGD Gypsum (กรัม)	ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)
247.09	255	150	95	49.42
241.08	265	150	85	48.22
233.09	275	150	75	46.62

ตารางที่ 8 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและก่อตัวสุดท้ายของเพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยร้อยละเถ้าลอย 20 กับ ร้อยละFGD Gypsum 5, 7 และ 9 ตามลำดับ

สถานะก่อตัว	ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและก่อตัวสุดท้ายของเพสต์วัสดุถมกลับ (นาที)		
	5BF20	7BF20	9BF20
ก่อตัวเริ่มต้น	180	150	120
ก่อตัวสุดท้าย	600	570	540

ตารางที่ 9 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและก่อตัวสุดท้ายของเพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยร้อยละเถ้าลอย 30 กับ ร้อยละ FGD Gypsum 15, 17 และ 19 ตามลำดับ

สถานะก่อตัว	ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและก่อตัวสุดท้ายของเพสต์วัสดุถมกลับ (นาที)		
	15BF20	17BF20	19BF20
ก่อตัวเริ่มต้น	210	180	160
ก่อตัวสุดท้าย	670	620	600

หมายเหตุ

5BF20 = ร้อยละ FGD Gypsum 5 และ ร้อยละเถ้าลอย 20

7BF20 = ร้อยละ FGD Gypsum 7 และ ร้อยละเถ้าลอย 20

9BF20 = ร้อยละ FGD Gypsum 9 และ ร้อยละเถ้าลอย 20

15BF30 = ร้อยละ FGD Gypsum 15 และ ร้อยละเถ้าลอย 30

17BF30 = ร้อยละ FGD Gypsum 17 และ ร้อยละเถ้าลอย 30

19BF30 = ร้อยละ FGD Gypsum 19 และ ร้อยละเถ้าลอย 30

ตารางที่ 10 การยุบตัวของวัสดุถมกลับที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5, 0.6 และ 0.7

วัสดุถมกลับ	ค่าการยุบตัวของวัสดุถมกลับ (ซม.)		
	w/b = 0.5	w/b = 0.6	w/b = 0.7
ร้อยละเถ้าลอย 20	0	7	18
ร้อยละเถ้าลอย 30	0	8	20

ตารางที่ 11 ความหนาแน่นรวมของวัสดุถมกลับ

วัสดุถมกลับ	อายุบ่ม (วัน)	ความหนาแน่นรวม (กก. /ลบ.ม.)		
		w/b = 0.5	w/b = 0.6	w/b = 0.7
50TP30FA15FGD	7	1803.00	1803.00	1791.33
	28	1710.86	1710.86	1576.88
	90	1713.23	1687.60	1733.16
50TP30FA17FGD	7	1819.79	1819.79	1784.04
	28	1630.11	1630.11	1659.50
	90	1695.94	1649.56	1745.45
50TP30FA19FGD	7	1753.00	1728.89	1783.48
	28	1552.64	1516.62	1548.83
	90	1449.93	1710.35	1666.75
70TP20FA5FGD	7	1764.57	1764.57	1738.62
	28	1563.28	1654.15	1588.09
	90	1588.88	1760.06	1621.95
70TP20FA7FGD	7	1647.95	1718.68	1738.33
	28	1508.57	1539.90	1612.80
	90	1594.10	1667.29	1500.66
70TP20FA9FGD	7	1599.86	1759.20	1621.97
	28	1531.95	1473.84	1524.17
	90	1390.07	1446.60	1553.93

ตารางที่ 12 การดูดซึมน้ำของวัสดุถมกลับ

วัสดุถมกลับ	อายุบ่ม (วัน)	ร้อยละการดูดซึมน้ำ		
		w/b = 0.5	w/b = 0.6	w/b = 0.7
50TP30FA15FGD	7	3.92	3.92	5.70
	28	8.33	8.33	13.70
	90	10.68	12.04	7.87
50TP30FA17FGD	7	3.85	3.85	4.78
	28	9.16	9.16	12.76
	90	7.43	10.08	6.66
50TP30FA19FGD	7	7.81	6.04	4.10
	28	17.26	13.82	10.88
	90	24.69	9.68	10.52
70TP20FA5FGD	7	4.35	4.35	9.31
	28	16.12	11.29	15.25
	90	18.24	9.53	10.00
70TP20FA7FGD	7	14.24	8.65	10.28
	28	19.94	17.15	13.03
	90	14.85	14.15	16.68
70TP20FA9FGD	7	14.83	6.14	10.48
	28	21.57	16.64	12.63
	90	25.27	17.93	14.37

ตารางที่ 13 การหดตัวและการขยายตัวของวัสดุถมกลับ

วัสดุถมกลับ	อายุบ่ม (วัน)	ร้อยละหดตัวและการขยายตัว		
		w/b = 0.5	w/b = 0.6	w/b = 0.7
50TP30FA15FGD	7	-3.40	-3.53	-4.02
	28	-3.40	-3.60	-4.27
	90	-2.69	-2.95	-3.81
50TP30FA17FGD	7	-4.44	-5.12	-4.32
	28	-5.93	-4.46	-3.97
	90	-7.66	-3.40	-3.92
50TP30FA19FGD	7	-4.13	-4.82	-3.04
	28	-5.69	-4.87	-3.56
	90	-6.67	-3.80	-3.95
70TP20FA5FGD	7	-3.95	-2.43	-3.18
	28	-4.72	-2.32	-3.85
	90	-5.02	-2.77	-4.00
70TP20FA7FGD	7	-5.42	-4.98	-3.22
	28	-7.08	-5.05	-4.32
	90	-5.40	-5.06	-5.42
70TP20FA9FGD	7	-5.18	-5.66	-3.43
	28	-7.10	-5.44	-4.61
	90	-6.37	-5.38	-5.02

หมายเหตุ      + การขยายตัว                      - การหดตัว

ตารางที่ 14 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุถมกลับ

วัสดุถมกลับ	อายุบ่ม (วัน)	ความถ่วงจำเพาะ		
		w/b = 0.5	w/b = 0.6	w/b = 0.7
50TP30FA15FGD	7	1.80	1.80	1.79
	28	1.71	1.71	1.58
	90	1.71	1.69	1.73
50TP30FA17FGD	7	1.82	1.82	1.78
	28	1.63	1.63	1.66
	90	1.70	1.65	1.75
50TP30FA19FGD	7	1.75	1.73	1.78
	28	1.55	1.52	1.55
	90	1.45	1.71	1.67
70TP20FA5FGD	7	1.76	1.76	1.74
	28	1.56	1.65	1.59
	90	1.59	1.76	1.62
70TP20FA7FGD	7	1.65	1.72	1.74
	28	1.51	1.54	1.61
	90	1.59	1.67	1.50
70TP20FA9FGD	7	1.60	1.76	1.62
	28	1.53	1.47	1.52
	90	1.39	1.45	1.55



ตารางที่ 15 กำลังอัดของวัสดุผสมกลับ

วัสดุผสมกลับ	อายุบ่ม (วัน)	กำลังอัด (MPa)		
		w/b = 0.5	w/b = 0.6	w/b = 0.7
50TP30FA15FGD	7	7.83	8.45	7.92
	28	7.48	7.84	6.75
	90	6.45	6.82	6.77
50TP30FA17FGD	7	7.83	7.39	6.73
	28	6.81	6.44	6.01
	90	6.01	5.77	6.21
50TP30FA19FGD	7	5.58	7.76	6.46
	28	2.77	6.40	6.09
	90	2.64	6.35	5.96
70TP20FA5FGD	7	7.52	7.98	7.78
	28	7.47	7.60	6.95
	90	6.53	6.53	6.52
70TP20FA7FGD	7	5.47	6.65	6.74
	28	4.49	6.20	6.63
	90	3.58	5.41	6.12
70TP20FA9FGD	7	4.99	7.37	6.62
	28	2.16	6.09	6.23
	90	1.98	5.74	5.97

### การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์

การประชุมวิชาการด้านเหมืองแร่ โลหการ และปิโตรเลียม ครั้งที่ 9  
เรื่อง การสำรวจและใช้ประโยชน์จากทรัพยากรธรณีเพื่อสิ่งแวดล้อมที่ดี  
โรงแรมมณเฑียรวิเวอร์ไซด์ กรุงเทพฯ 13-14 มกราคม 2554

## การประยุกต์ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นวัสดุถมกลับในเหมืองใต้ดิน

### Application of Fly Ash from the Mae Moh Power Plant as Underground Mine Backfill

เอกภพ แก้วเอียด<sup>1</sup> และ มนูญ มาณินยม<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

email: lookake\_05@hotmail.com

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

e-mail: manoon.ma@psu.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มความปลอดภัยและเสถียรภาพโครงสร้างของเหมืองใต้ดินภายหลังการทำเหมือง นอกจากนี้ยังสามารถนำวัสดุเหลือใช้จากการทำเหมืองและโรงไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ โดยนำหางแร่ไปแทนจากการทำเหมืองใต้ดินและวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้า เช่น เถ้าลอย เป็นต้น ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย เพื่อนำมาผสมกับหางแร่ไปแทนและปูนซีเมนต์ จากนั้นศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้เถ้าลอย หางแร่ไปแทน และซีเมนต์ เพื่อนำไปใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุถมกลับ โดยนำวัสดุถมกลับมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 99, 97, และ 95 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เพื่อนำไปหล่อซีเมนต์เพสต์ขนาด 5x5x5 ซม.<sup>3</sup> จากนั้นศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางกลของก้อนตัวอย่าง เมื่ออายุทดสอบที่เวลา 7, 28, และ 90 วัน ผลการวิจัยสรุปดังนี้การประยุกต์ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นวัสดุถมกลับในเหมืองใต้ดินสามารถนำไปใช้ผสมเป็นวัสดุถมกลับได้ ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ถมกลับในงานเหมืองใต้ดินที่มีความเสถียรของโครงสร้างเสาและผนัง ที่มีความไม่แข็งแรงของแต่ละสภาพหน้าเหมืองและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวางแผนการนำวัสดุไปถมกลับในเหมืองใต้ดินให้เหมาะสมต่อไป

**คำหลัก** การถมกลับ, เถ้าลอย, หางแร่ไปแทน

#### Abstract

The increasing the safety and structural stability of underground mines was investigated. In addition can using the residues from mining and power utilization by the potash tailings from underground mining and materials that are by products of power plants such as fly ash. Determination of physical and chemical properties of fly ash for mixed with potash tailings and cement. Then study the various ratios of fly ash, tailings potash and cement to use as a mixture in the materials backfilled. The materials backfill to replace Portland cement of type 1 was 99, 97, and 95 % by weight binder and using cement box 5x5x5 cm<sup>3</sup>. After curing times of 7, 28, and 90 days then investigate the chemical and mechanical properties of all specimens. These results can be concluded that the fly ash from Mae Moh power plant is a filling material to the underground mine and used to mix the material to be filled. In addition it can use to filling of underground mine back in a stable structure of pillars and walls and use as materials backfill in the underground mines

**Keyword** Backfill, Fly ash, Potash tailing

## 1 บทนำ

โรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งได้ถ่านหินหรือถ่านล่อยเป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้า พบว่ามีปริมาณถ่านหินประมาณวันละ 7,200 ตัน ปัจจุบันมีการนำถ่านหินไปใช้ผสมในคอนกรีตอย่างแพร่หลายทำให้มีมูลค่าทางเศรษฐกิจเนื่องจากถ่านหินที่ผสมในคอนกรีตจะช่วยทำให้ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ช่วยเพิ่มกำลังอัดที่อายุช่วงปลาย ช่วยเพิ่มการทำงานของคอนกรีตให้ดีขึ้น [1] และที่สำคัญคือทำให้ราคาของคอนกรีตถูกลง การทำเหมืองใต้ดินที่มีสภาพโครงสร้างของหินไม่แข็งแรง จะส่งผลกระทบต่อเสาผนัง หรือโครงสร้างของเหมืองใต้ดินที่เหลืทิ้งไว้เป็นส่วนค้ำยัน ซึ่งการถมกลับ (Backfill) ในอุโมงค์เหมืองใต้ดินจะมีความคงทนต่อแรงอัดในหนึ่งมิติ (The Uniaxial Compressive Strength) ของเสาผนัง หรือโครงสร้างค้ำยันอุโมงค์เหมืองใต้ดินมากขึ้น เนื่องจากมีแรงอัดเกิดขึ้นทั้งสามมิติ (Triaxial Condition) โดยจะมีความคงทนต่อแรงอัดเพิ่มขึ้นประมาณ 3 - 5 เท่าตัวของค่าความคงทนต่อแรงอัดในหนึ่งมิติของเสาถ่านหิน [2] ดังนั้นการใช้ถ่านล่อย (Fly Ash) เป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ที่ประกอบด้วยออกไซด์ของธาตุซิลิกอนและอลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ [3] ซึ่งจะมีคุณสมบัติเป็นตัวประสานและเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต คอนกรีตผสมถ่านล่อย (Fly Ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ช่วยให้การเพิ่มความคงทนของคอนกรีตต่อการกัดกร่อนของเกลือซัลเฟต การสูญเสียเนื้อคอนกรีตมีค่าน้อยลงในด้านผลกระทบต่อการกัดกร่อนจากเกลือซัลเฟต เกลือคลอไรด์ อัตราการเกิดคาร์บอนขึ้น การป้องกันการเกิดสนิมเหล็ก ผลกระทบต่อกำลังอัดในระยะยาวตลอดจนผลของถ่านล่อยต่อการพัฒนาสภาพโครงสร้างภายในของคอนกรีต ซึ่งมีอิทธิพลโดยตรงต่อคุณสมบัติระยะยาวและพฤติกรรมต่อสภาพแวดล้อม [4] การนำถ่านล่อยมาใช้เป็นวัสดุถมกลับเพื่อใช้ในการทำเหมืองใต้ดินในประเทศไทยยังเป็นสิ่งที่ค่อนข้างใหม่ อยู่งานวิจัยในเรื่องนี้ยังมีน้อยมาก ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเอาหางแร่โปแตชมาผสมกับถ่านล่อยและปูนซีเมนต์ เนื่องจากการคาดการณ์หางแร่โปแตชที่ได้จากการแตงแร่มีจำนวนมาก ต้องใช้พื้นที่ในการจัดเก็บเป็นบริเวณกว้าง การควบคุมดูแลหางแร่โปแตชก็ต้องใช้ค่าดูแลที่ค่อนข้างสูง ละลายน้ำง่ายเมื่อมีฝนตกหรืออากาศชื้น ซึ่งหางแร่โปแตชที่ละลายน้ำอาจไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ได้อีกด้วย การนำหางแร่โปแตชมาถมกลับในเหมืองโปแตชใต้ดินจะช่วย

เสริมเสถียรภาพของโครงสร้างเสา ผนัง และโครงสร้างเหมืองใต้ดินในมีความทนทานต่อแรงอัดของน้ำหนักเหมืองใต้ดินได้ นอกจากนี้ยังช่วยปัญหาสามารถลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากหางแร่โปแตช และวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมได้

## 2 การดำเนินการวิจัย

### 2.1 วัสดุที่ใช้

หางแร่โปแตชจากบริษัทเอเชียแปซิฟิกโปแตชคอปอเรชั่น จำกัด ขนาดเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) 1 มิลลิเมตร (รูปที่ 1 ก) ซึ่งมีลักษณะเป็นเศษดินเศษหินสีน้ำตาล รสเค็ม ถ่านล่อยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ขนาดเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) 0.7 มิลลิเมตร (รูปที่ 1 ข) สีน้ำตาลดำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และน้ำประปา



ก)

ข)

รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ ก) หางแร่โปแตช และ ข) ถ่านล่อย

### 2.2 การเตรียมและอัตราส่วนผสมก้อนตัวอย่าง

นำหางแร่โปแตชมาทดสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคตามเกณฑ์ ASTM C 136 - 84 มีขนาดเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) 1 มิลลิเมตร ส่วนถ่านล่อยจากถ่านหินลิกไนต์ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ มาทดสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคตามเกณฑ์ ASTM C 136 - 84 มีขนาดเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) 0.7 มิลลิเมตร การเลือกการออกแบบหล่อก้อนตัวอย่างตามเกณฑ์ ACI 211.1-70 ดังแสดงในตารางที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6

ตารางที่ 1 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุถมกลับที่ 30% ถ่านล่อย และอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5

วัสดุถมกลับ	น้ำหนักของวัสดุถมกลับ (กก./ลบ.ม.)		
	1%ซีเมนต์	3%ซีเมนต์	5%ซีเมนต์
หางแร่โปแตช	0.90	0.88	0.85
ถ่านล่อย	0.39	0.39	0.39
ซีเมนต์	0.01	0.04	0.07
น้ำ	0.40	0.41	0.43

ตารางที่ 2 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมที่ 30% เถ้าลอย และอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6

วัสดุผสม	น้ำหนักของวัสดุผสม (กก./ลบ.ม.)		
	1%ซีเมนต์	3%ซีเมนต์	5%ซีเมนต์
หางแร่โปแตช	0.90	0.88	0.85
เถ้าลอย	0.39	0.39	0.39
ซีเมนต์	0.01	0.04	0.07
น้ำ	0.40	0.42	0.43

ตารางที่ 3 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมที่ 30% เถ้าลอย และอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7

วัสดุผสม	น้ำหนักของวัสดุผสม (กก./ลบ.ม.)		
	1%ซีเมนต์	3%ซีเมนต์	5%ซีเมนต์
หางแร่โปแตช	0.90	0.88	0.85
เถ้าลอย	0.39	0.39	0.39
ซีเมนต์	0.01	0.04	0.07
น้ำ	0.40	0.42	0.44

ตารางที่ 4 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมที่ 20% เถ้าลอย และอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5

วัสดุผสม	น้ำหนักของวัสดุผสม (กก./ลบ.ม.)		
	1%ซีเมนต์	3%ซีเมนต์	5%ซีเมนต์
หางแร่โปแตช	1.03	1.01	0.98
เถ้าลอย	0.26	0.26	0.26
ซีเมนต์	0.01	0.04	0.07
น้ำ	0.27	0.28	0.29

ตารางที่ 5 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมที่ 20% เถ้าลอย และอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6

วัสดุผสม	น้ำหนักของวัสดุผสม (กก./ลบ.ม.)		
	1%ซีเมนต์	3%ซีเมนต์	5%ซีเมนต์
หางแร่โปแตช	1.03	1.01	0.98
เถ้าลอย	0.26	0.26	0.26
ซีเมนต์	0.01	0.04	0.07
น้ำ	0.27	0.29	0.30

ตารางที่ 6 การออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมที่ 20% เถ้าลอย และอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7

วัสดุผสม	น้ำหนักของวัสดุผสม (กก./ลบ.ม.)		
	1%ซีเมนต์	3%ซีเมนต์	5%ซีเมนต์
หางแร่โปแตช	1.03	1.01	0.98
เถ้าลอย	0.26	0.26	0.26
ซีเมนต์	0.01	0.04	0.07
น้ำ	0.27	0.29	0.31

ใช้อัตราส่วนหางแร่โปแตชที่ 50 และ 70 อัตราส่วนเถ้าลอยที่ 20 และ 30 อัตราส่วนซีเมนต์ 1, 3 และ 5 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5, 0.6 และ 0.7 ก่อนตัวอย่างผสมกลับมีขนาด 5x5x5 ซม. บ่มในน้ำที่มีอุณหภูมิห้อง (25°C) ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 60% เป็นระยะเวลา 7, 28 และ 90 วัน

### 2.3 วิธีการทดสอบก่อนตัวอย่าง

ทดสอบสมบัติของวัสดุผสมที่ใช้ผสมในก้อนตัวอย่าง ได้แก่ การทดสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของหางแร่โปแตช และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ตามมาตรฐาน ASTM C136-84 ทดสอบความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะตามมาตรฐาน ASTM C127-88 ทดสอบหาความหนาแน่นของเถ้าลอยโดยใช้เครื่องมือ He-Pycnometer วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะโดยใช้เครื่องมือเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (XRF) ทดสอบสมบัติของเพสต์ ได้แก่ ความเข้มข้นเหลวปกติของวัสดุผสมผสมเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วน 20% และ 30% ตามมาตรฐาน ASTM C187-66 ทหาระยะการก่อตัวเริ่มต้นและระยะก่อตัวสิ้นสุดตามมาตรฐาน ASTM C191 ทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีตวัสดุผสมกลับ (Slump Test) ตามมาตรฐาน ASTM C143-89 ทดสอบสมบัติทางคอนกรีตของก้อนวัสดุผสมกลับ ได้แก่ ทดสอบหาความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำของก้อนวัสดุผสมกลับโดยเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C127-88 และทดสอบกำลังอัดของก้อนวัสดุผสมกลับโดยเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C109M-01

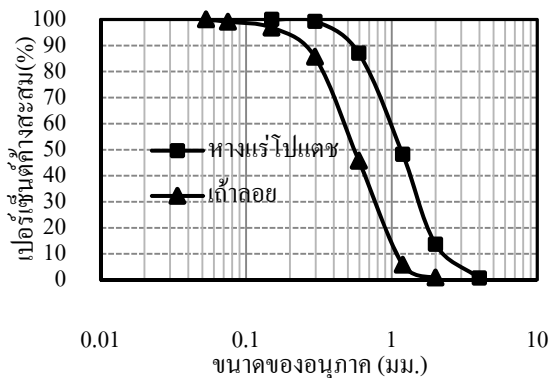


รูปที่ 2 ก) ซีเมนต์เพสต์ถมกลับ และ ข) คอนกรีตถมกลับ

### 3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

#### 3.1 สมบัติวัสดุถมกลับ

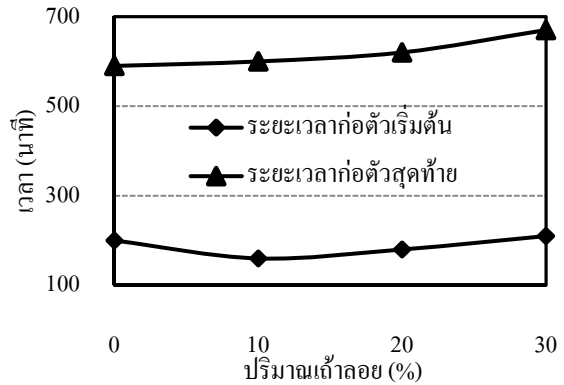
การทดสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคหางแร่โปแตชพบว่า มีขนาดเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) 1 มิลลิเมตร ถ้าวัดจากเส้นกราฟในรูปที่ 3 ปรากฏว่า การกระจายตัวของขนาดอนุภาคหางแร่โปแตช ( $D_{50}$ ) 0.7 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3 ความถ่วงจำเพาะหางแร่โปแตช 2.16 ความถ่วงจำเพาะถั่วลอย 2.19 ความถ่วงจำเพาะปูนซีเมนต์ 3.10 หางแร่โปแตชมีความหนาแน่น 2,160 กก./ลบ.ม. ถั่วลอยมีความหนาแน่น 2,200 กก./ลบ.ม. ปูนซีเมนต์มีความหนาแน่น 3,190 กก./ลบ.ม. และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบกึ่งปริมาณของถั่วลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ พบว่า ถั่วลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีร้อยละของปริมาณ CaO เท่ากับ 26.08% ทำให้มีความสามารถเป็นวัสดุประสานในคอนกรีตถมกลับ และปริมาณ  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  และ  $Fe_2O_3$  รวมกันร้อยละ 58.81% ค่า LOI เท่ากับ 2.16% และจัดเป็นปอซโซลานประเภท C ดังแสดงในตารางที่ 7



รูปที่ 3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคสำหรับผสมวัสดุถมกลับ

#### 3.2 ความเข้มข้นเหลวปกติและระยะเวลาก่อตัวของเพสต์วัสดุถมกลับ

ผลการทดสอบความเข้มข้นเหลวปกติของวัสดุถมกลับผสมถั่วลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วน 0%, 10%, 20% และ 30% ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นพบว่าเมื่อแทนที่ถั่วลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะในปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นต้องใช้ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น 200, 160, 180 และ 210 นาที ตามลำดับ และระยะเวลาก่อตัวขึ้นปลาย 590, 600, 620 และ 670 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4



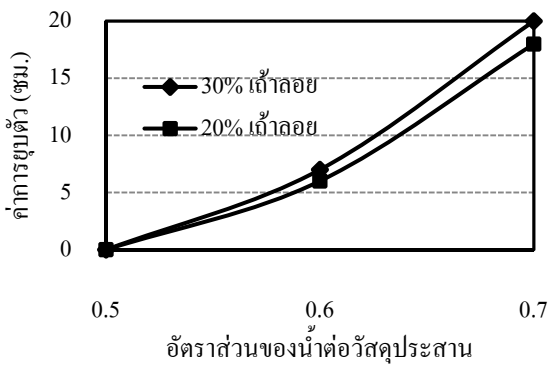
รูปที่ 4 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและก่อตัวครั้งสุดท้ายของเพสต์วัสดุถมกลับแทนที่ถั่วลอยโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ตารางที่ 7 สมบัติทางเคมีของวัสดุถมกลับ

องค์ประกอบทางเคมี	ความเข้มข้น (%)		
	หางแร่โปแตช	ถั่วลอย	ปูนซีเมนต์
Na <sub>2</sub> O	-	1.68	0.10
MgO	-	1.63	1.24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	13.52	5.22
SiO <sub>2</sub>	-	24.01	20.84
SO <sub>3</sub>	-	7.25	2.41
K <sub>2</sub> O	-	2.39	0.22
CaO	-	26.08	66.28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	21.28	3.20
NaCl	46.1	-	-
KCl	2.2	-	-
MgCl <sub>2</sub>	0.2	-	-
LOI	51.5	2.16	0.96

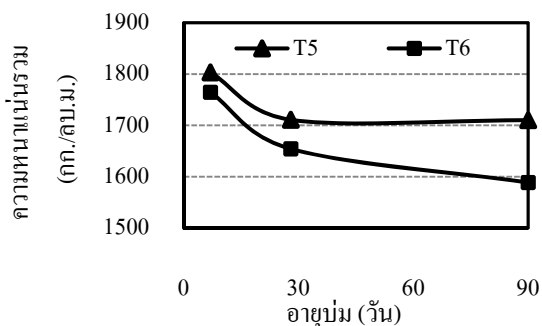
### 3.3 ค่าการยุบตัว ความหนาแน่นรวมและการดูดซึมน้ำ

ผลการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump Test) วัสดุผสมกลับที่ 30% เถ้าลอย 0.5, 0.6 และ 0.7 ของอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน มีค่าการยุบตัวเท่ากับ 0, 7 และ 20 ตามลำดับ วัสดุผสมกลับที่ 20% เถ้าลอย 0.5, 0.6 และ 0.7 ของอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 0, 6 และ 18 ซึ่งพบว่าที่ 30% และ 20% เถ้าลอย และอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.6 ความสามารถในการเทของงานคอนกรีตปัมได้ (ASTM C 143) และค่าการยุบตัวของเพสท์วัสดุผสมกลับแปรผันตรงกับอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน ดังแสดงในรูปที่ 5



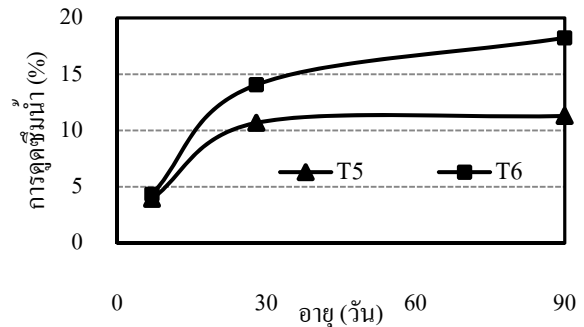
รูปที่ 5 ค่าการยุบตัวของเพสท์วัสดุผสมกลับที่มีต่ออัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน

ความหนาแน่นรวมของคอนกรีตผสมกลับจะมีค่าลดลงจนถึงอายุบ่มที่ 28 วัน และมีความเปลี่ยนแปลงน้อยที่ร้อยละของเถ้าลอยเท่ากับ 30% ที่อายุการบ่มหลัง 28 ขึ้นไป ซึ่งในขณะที่ร้อยละของเถ้าลอยเท่ากับ 20% ที่อายุการบ่มหลัง 28 ขึ้นไป ยังเห็นการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นรวมลดลง ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 อิทธิพลของอายุบ่มที่มีต่อความหนาแน่นรวมของวัสดุผสมกลับ

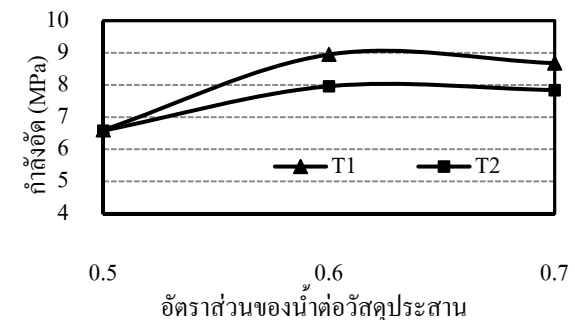
การดูดซึมน้ำของคอนกรีตผสมกลับจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงอายุบ่มที่ 28 วัน และมีความเปลี่ยนแปลงน้อยที่ร้อยละของเถ้าลอยเท่ากับ 30% ที่อายุการบ่มหลัง 28 ขึ้นไป ซึ่งในขณะที่ร้อยละของเถ้าลอยเท่ากับ 20% ที่อายุการบ่มหลัง 28 ขึ้นไป ยังเห็นการเปลี่ยนแปลงของการดูดซึมน้ำยังค่าการเปลี่ยนแปลงที่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 อิทธิพลของอายุบ่มที่มีต่อการดูดซึมน้ำของวัสดุผสมกลับ

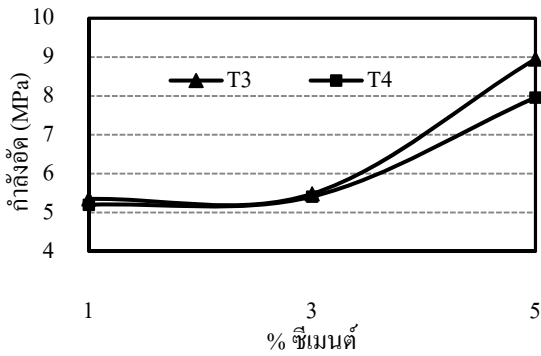
### 3.4 กำลังอัด

กำลังอัดของวัสดุผสมกลับที่มีต่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6 มีค่ากำลังอัดสูงสุด 8.95 เมกะพาสกาล เมื่อกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 และ 0.7 มีความสามารถในการเทในงานคอนกรีตปัม (ASTM C 143) ดังแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 8



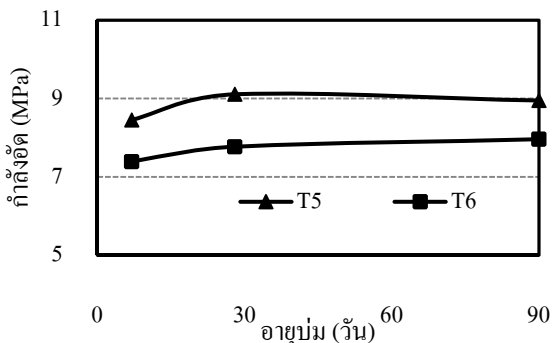
รูปที่ 8 อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีตผสมกลับ

ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้น้ำที่ประสานวัสดุผสมกลับมีความสามารถก่อตัวให้คอนกรีตผสมกลับมีกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 อิทธิพลของปูนซีเมนต์ที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีตผสมถม

อายุการบ่มของคอนกรีตผสมถมมีแนวโน้มของกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มตั้งแต่ศูนย์วันจนถึง 28 วัน หลังจากนั้นกำลังอัดเริ่มคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 อิทธิพลของอายุการบ่มที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีตผสมถม

#### 4 สรุปผล

การประยุกต์ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นวัสดุผสมถมในเหมืองใต้ดิน โดยร้อยละ 20 และ 30 ของเถ้าลอยสามารถนำไปใช้ผสมเป็นวัสดุผสมถมได้ ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.6 มีความสามารถในการเทที่ใช้การงานคอนกรีตปี้มได้ ซึ่งเหมาะสมกับอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมถมที่ใช้ในงานเหมืองใต้ดินได้ การเพิ่มอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ที่มากขึ้นทำให้ช่วยเพิ่มตัวประสานของวัสดุผสมถมในคอนกรีตผสมถมให้มีความสามารถในการรับแรงอัดมากขึ้นที่มากขึ้น และช่วงระยะบ่มคอนกรีตผสมถมที่อายุการบ่มน้อยกว่า 28 วัน เป็นช่วงการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมถม และหลังจาก 28 วันเป็นต้นไปกำลังอัดของคอนกรีตจะเริ่มคงที่ และมีแนวโน้มไม่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดในเวลาผ่านไปเป็นระยะเวลานาน ซึ่งเหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุผสมถมในงาน

เหมืองใต้ดินที่มีความเสถียรของโครงสร้างเสา และผนัง ที่มีความไม่แข็งแรงของแต่ละสภาพหน้าเหมืองได้

#### 5 สัญลักษณ์

T1 = อัตราส่วนผสมวัสดุผสมถมที่ร้อยละ 5 ของปูนซีเมนต์, ร้อยละ 65 ของหางแร่โปแตชร้อยละ 30 ของเถ้าลอย และอายุการบ่มที่ 90 วัน

T2 = อัตราส่วนผสมวัสดุผสมถมที่ร้อยละ 5 ของปูนซีเมนต์, ร้อยละ 75 ของหางแร่โปแตชร้อยละ 20 ของเถ้าลอย และอายุการบ่มที่ 90 วัน

T3 = อัตราส่วนผสมวัสดุผสมถมที่ร้อยละ 65 ของหางแร่โปแตชร้อยละ 30 ของเถ้าลอย อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6 และอายุการบ่มที่ 90 วัน

T4 = อัตราส่วนผสมวัสดุผสมถมที่ร้อยละ 75 ของหางแร่โปแตชร้อยละ 20 ของเถ้าลอย อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6 และอายุการบ่มที่ 90 วัน

T5 = อัตราส่วนผสมวัสดุผสมถมที่ร้อยละ 5 ของปูนซีเมนต์ ร้อยละ 65 ของหางแร่โปแตชร้อยละ 30 ของเถ้าลอย และอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6

T6 = อัตราส่วนผสมวัสดุผสมถมที่ร้อยละ 5 ของปูนซีเมนต์ ร้อยละ 75 ของหางแร่โปแตชร้อยละ 20 ของเถ้าลอย และอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6

#### 6 กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุวิศวกรรมโยธา และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ยืมอุปกรณ์และอนุญาตให้ใช้เครื่องมือทดสอบ รวมถึงบริษัท เอเชียแปซิฟิกโปรดักส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์หางแร่โปแตชสำหรับการทดสอบ และการไฟฟ้าผลิตแห่งประเทศไทย (โรงไฟฟ้าแม่เมาะ) ที่ให้ความอนุเคราะห์เถ้าลอยในการทำวิจัยในครั้งนี้

#### เอกสารอ้างอิง

[1] ทรงลักษณ์ วิโรจน์รัตน์ “ระดับปฏิบัติการไฮดรชันและปฏิบัติการปิโซลานของซีเมนต์พสต์ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าถ่านโดยวิธีวิเคราะห์ภาพถ่าย” สำนักวิทยบริการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2551



- [2] วินิต ช่อวิเชียร “คอนกรีตเทคโนโลยี” ห้างหุ้นส่วน  
จำกัด ป.สัมพันธพาณิชย์ พ.ศ. 2539
- [3] สุวิมล สัจจาณิษฐ์, ประเสริฐ สุวรรณวิทยา และชัยมี อิศายะ  
“คุณสมบัติระยะยาวของคอนกรีตผสมเถ้าลอย” ศูนย์วิจัย  
คอนกรีตและคอนกรีตผสมเถ้าลอย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ.2545
- [4] C. Donald, “Slop and pillar Design,” in *Hard Rock Miner’s  
Handbook Rules of Thumb*, 2nd ed., Arisona USA:  
Mcintosh Engineering, June. 2003, pp. 3.
- [5] M. Fall, B. Mostafa and S. Ouellet, “Experimental  
characterization of the influence of tailings fineness and  
density on the quality of cemented paste backfill,”  
*Minerals Engineering*, Vol. 18, 2005, pp. 41–44.
- [6] S. Saha, S. Badger, N. Thaulow and R.J. Lee,  
“Determination of Water-Cement Ratio of Hardened  
Concrete By Scanning Electron Microscopy,” *Cement  
and Concrete Composites*, Vol. 26, 2004, pp. 987- 992.
- [7] B. Mostafa, M. Fall and T. Belem , “A contribution to  
understanding the hardening process of cemented  
paste fill,” *Minerals Engineering*, Vol. 17, 2004, pp. 141–  
152.
- [8] DR. Tesarika, J.B. Seymoura and T.R. Yanske, “Post-  
failure behavior of two mine pillars confined with  
backfill,” *International Journal of Rock Mechanics &  
Mining Sciences*, Vol. 40, 2003, pp.221–232.
- [9] A. Kesimal, E. Yilmaz and B. Ercikdi, “Evaluation of paste  
backfill mixtures consisting of sulphide-rich mill tailings  
and varying cement contents,” *Cement and Concrete  
Research*, Vol. 34, 2004, pp. 1817–1822.
- [10] M. Fall and B. Mostafa, “ Modeling the effect of sulphate  
on strength development of paste backfill and binder  
mixture optimization,” *Cement and Concrete Research*,  
Vol. 35, 2005, pp. 301–314.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายเอกภพ แก้วเอียด  
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 5210120151  
 วุฒิกการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเหมืองแร่)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2552

## ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนศึกษย์กัณฑ์คุณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

เอกภพ แก้วเอียด และมนูญ มาศนิคม (2554). การประยุกต์ใช้ถ้ำลอกจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นวัสดุถมกลับในเหมืองใต้ดิน. การประชุมวิชาการด้านเหมืองแร่ โลหการ และปิโตรเลียม ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ, หน้า 55-61.

دنุพล ตันนโยภาส และเอกภพ แก้วเอียด (2554). ผลกระทบของชนิดมวลรวมหินปูนในพ้ทลุงและอายุบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีต. การประชุมวิชาการด้านเหมืองแร่ โลหการ และปิโตรเลียม ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ, หน้า 107-112.