ผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์

EFFECT OF BINDER TYPES ON SULFATE RESISTANCE OF MORTAR

นพคุณ ผลโพธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์

นพคุณ ผลโพธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ Effect of Binder Types on Sulfate Resistance of Mortar
ชื่อ - นามสกุล	นายนพคุณ ผลโพธิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติศานต์ กร้ำมาตร
ปีการศึกษา	2554

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต)

..... กรรมการ
(ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย สำราญวานิช)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติศานต์ กร้ำมาตร)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมหมาย ผิวสอาด)
วันที่ 9 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2554

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์
ชื่อ - นามสกุล	นายนพคุณ ผลโพธิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิติศานต์ กร้ำมาตร
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนเพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้ชนิดวัสดุประสานและปริมาณอย่างเหมาะสมสำหรับงานคอนกรีตที่สัมผัสสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

ในการทดลองการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ ใช้วิธีวัดค่าการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ผลการศึกษาพบว่า การขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะให้ค่ามากที่สุด ถัดมาเป็นโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ตามลำดับ และพบว่าทั้งการแทนที่และการบดผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้น ให้ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นกรณีของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และการแทนที่เถ้าลอย (ที่มีค่า CaO สูงๆ) ในปริมาณน้อยๆ ร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีค่าการขยายตัวใกล้เคียงหรือมากกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์มากกว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต นอกจากนี้พบว่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายโซเดียมซัลเฟตทั้งมอร์ต้าร์บดผสมและการแทนที่เถ้าลอยหรือผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีค่าน้อยหรือไม่แตกต่างเมื่อเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์เถ้าลอยไม่ว่าบดผสม หรือแทนที่ (เถ้าลอยปริมาณสูง) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ในขณะมอร์ต้าร์ผงหินปูนไม่ว่าบดผสม หรือแทนที่ หรือแทนที่ร่วมกับเถ้าลอย (เถ้าลอยปริมาณต่ำ) ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และสุดท้ายทราบสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตที่สัมผัสสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

คำสำคัญ : มอร์ต้าร์ เถ้าลอย ผงหินปูน การขยายตัว การสูญเสียน้ำหนัก การต้านทานซัลเฟต

Thesis Title	Effect of binder types on sulfate resistance of mortar
Name - Surname	Mr. Nopakun Ponpo
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Pitisan Krammart
Academic Year	2011

ABSTRACT

This thesis aims to study the effect of binder types on sulfate resistance of mortar with fly ash and limestone powder. A guideline in the selection of an appropriate type and quantity of binder in concrete exposed to sulfate environment was proposed.

In the experiment of the sulfate resistance of mortar specimens, the expansion and weight loss of specimens immersed in a sodium sulfate, magnesium sulfate and combined sodium and magnesium sulfate solution were considered.

The results indicate that the expansion of the mortar specimens in a sodium sulfate solution was the largest, following with that in a combined sodium sulfate and magnesium sulfate solution, and in a magnesium sulfate solution, respectively. The expansions of mortar specimens of Ordinary Portland Cement (OPC) partially replaced or intergrinded with fly ash or limestone powder or both fly ash and limestone powder in all of sulfate solutions were smaller than that of type 5 cement mortar specimens, except the specimens replaced with 10% by weight of limestone powder and specimens replaced with low quantity replacement of high CaO fly ash incorporate with limestone powder resulted in similar or higher expansion of type 1 cement specimens. Moreover, specimens in magnesium sulfate solution had a superior weight loss when compared with sodium sulfate solution. It was also seen that the weight loss of the mortar specimens in a sodium sulfate solution made from OPC partially replaced with fly ash or limestone powder or both fly ash and limestone powder had insignificantly different. In magnesium sulfate solution, the weight loss of OPC mortar specimens partially replaced with or intergrinded with limestone powder or incorporating both of limestone powder and low quantity of fly ash gave smaller or close to amount of weight loss when compared with OPC mortar specimens, while those partially replaced with or intergrinded with high quantity

of fly ash resulted in larger weight loss than those of OPC mortar specimens. Finally, a summary of appropriate mix for concrete with fly ash and limestone powder in sulfate environment were presented.

Keywords : mortar, fly ash, limestone powder, expansion, weight loss, sulfate resistance

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติศานต์ กร้ำมาตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาแนะนำและเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยจนสำเร็จ ขอขอบพระคุณ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย สำราญวานิช คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สมนึก ตั้งเติมสิริกุล จากสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่พันตรี อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลบางส่วนของงานวิจัยในครั้งนี้ และ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และประสบการณ์อันมีค่ายิ่งในการดำเนินชีวิต ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนช่วยในการทำวิจัยที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้ ผู้ทำวิจัยต้องกราบขออภัยเป็นอย่างสูง มา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสมัย ผลโพธิ์ คุณแม่กองแก้ว ผลโพธิ์ ที่อดทนด้วยความยากลำบากในการเลี้ยงดู ส่งเสียและคอยอบรมสั่งสอนให้ลูกคนนี้ได้เล่าเรียนตลอดจนให้แง่คิดที่ดีในการดำเนินชีวิต ขอบคุณพี่สาวและครอบครัวที่คอยให้กำลังใจมาโดยตลอด จนมีโอกาสจบการศึกษาถึงระดับนี้

นพคุณ ผลโพธิ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ญ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ฌ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 4

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 18

3 วิธีการศึกษา 21

3.1 วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา 21

3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา 24

3.3 การเตรียมสารละลายซัลเฟต 26

3.4 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา 27

4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ 32

4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน 32

4.2 คุณสมบัติทางด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน 37

4.3 การความต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ 49

4.4 สรุปผลการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ 103

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปและข้อเสนอแนะ	105
5.1 สรุป	105
5.2 ข้อเสนอแนะ	106
รายการอ้างอิง	107
ภาคผนวก	109
ภาคผนวก ก ตารางแสดงขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุที่ใช้ทดสอบ	110
ภาคผนวก ข ตารางและภาพแสดงการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์วัสดุประสาน และระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน	126
ภาคผนวก ค ตารางแสดงค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต	168
ภาคผนวก ง ตารางแสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต	178
ภาคผนวก จ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	180
ประวัติผู้เขียน	190

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่างๆ.....	7
2.2	ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618.....	10
2.3	ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก.2135-2545.....	11
2.4	องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ ระหว่างปี พ.ศ. 2528 – 2544.....	13
2.5	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ.....	14
3.1	ผสมของตัวอย่างเพสต์ ที่ใช้ในการศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและการก่อตัว.....	28
3.2	สัดส่วนผสมของตัวอย่างมอร์ต้าร์เพื่อทดสอบกำลังอัดประลัย ความพรุน และการต้านทานซัลเฟต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55.....	29
4.1	ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา..	33
4.2	คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา.....	37
4.3	ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ของสัดส่วนผสมต่างๆของวัสดุประสาน ที่ศึกษาในครั้งนี้.....	38
4.4	การก่อตัวของเพสต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา.....	41
4.5	การทดสอบค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์.....	43
4.6	กำลังอัดประลัยตัวอย่างมอร์ต้าร์ ที่อายุ 28 วันและ 365 วัน.....	45
4.7	ความพรุนของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55.....	48
4.8	สรุปผลการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์ เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	104
4.9	สรุปผลการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อ เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	104

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
3.1	เครื่องผสมมอร์ต้าร์	22
3.2	แบบหล่อชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์	22
3.3	เครื่องวัดความยาว	23
3.4	เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม	23
3.5	ถังสำหรับแช่ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์	24
4.1	ภาพถ่ายขยาย 3,500 เท่าของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา	34
4.2	การกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา	35
4.3	ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ของสัดส่วนผสมต่างๆของวัสดุประสาน	39
4.4	การก่อตัวของเพสต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา	42
4.5	ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55	44
4.6	กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ ที่อายุ 28 วัน และ 365วัน	46
4.7	ความพรุนที่อายุ 28 วัน ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ศึกษาในครั้งนี้โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55	49
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนล้วน	51
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน	52
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย	53
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วนและปูนซีเมนต์ปอซโซลานที่แทนที่ด้วยผงหินปูน	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ล้วน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10 และ 20 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย..... 55

4.13 เปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตระหว่างปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน..... 56

4.14 เปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตระหว่างปูนซีเมนต์ปอซโซลานกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย..... 57

4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน..... 58

4.16 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 76 สัปดาห์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต..... 59

4.17 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุ 76 สัปดาห์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต..... 59

4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน ล้วน..... 61

4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน... 62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย..... 66

4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10 และ ร้อยละ20 ล้วน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10 และร้อยละ 20 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย..... 64

4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน และปูนซีเมนต์ปอซโซลานที่แทนที่ด้วยผงหินปูน..... 65

4.23 เปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตระหว่างตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน..... 66

4.24 เปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตระหว่างตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย..... 66

4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน..... 68

4.26 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 76 สัปดาห์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต..... 69

4.27 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุ 76 สัปดาห์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต..... 69

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนล้วน..... 71

4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน..... 72

4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย..... 73

4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนล้วน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10 และร้อยละ 20 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย..... 74

4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ล้วน และปูนซีเมนต์ปอซโซลานที่แทนที่ด้วยผงหินปูน..... 75

4.33 เปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตระหว่างตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน..... 76

4.34 เปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตระหว่างตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย..... 76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน..... 77

4.36 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 76 สัปดาห์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต..... 78

4.37 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุ 76 สัปดาห์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต..... 79

4.38 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ล้วน..... 81

4.39 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย..... 83

4.40 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย..... 83

4.41 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ด้วยเถ้าลอย..... 84

4.42 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอย..... 84

4.43 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน..... 85

4.44 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยด้วยผงหินปูน..... 85

4.45 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน แทนที่ด้วยด้วยผงหินปูน..... 86

4.46 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน..... 87

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.47 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5แทนที่ด้วยด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน..... 88

4.48 เปรียบเทียบผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ศึกษา เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 900 วัน..... 90

4.49 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 900 วัน..... 90

4.50 เปรียบเทียบผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ศึกษา เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 900 วัน..... 93

4.51 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 900 วัน..... 94

4.52 เปรียบเทียบผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟคต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 900 วัน..... 96

4.53 ภาพถ่ายเปรียบเทียบระหว่างสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและลงหินปูนที่อายุการแช่ในสารละลายซัลเฟต 900 วัน..... 98

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

มอก.	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
Al_2O_3	Aluminium oxide
$CaCO_3$	Calcium Carbonate
$Ca(OH)_2$	Calcium hydroxide
CaO	Calcium Oxide
$CaSO_4$	Calcium sulfate
C_2S	Dicalcium Silicate
C_3A	Tricalcium Aluminate
C_3S	Tricalcium Silicate
C_4AF	Tetracalcium Alumino Ferrite
Fe_2O_3	Ferric Oxide
H_2O	Water
H_2SO_4	Sulfuric Acid
K_2O	Potassium Oxide
KCl	Potassium Chloride
MgO	Magnesium Oxide
$MgCO_3$	Magnesium Carbonate
$MgSO_4$	Magnesium Sulfate
NaCl	Sodium Chloride
NaOH	Sodium Hydroxide
Na_2O	Sodium Oxide
$NaSO_4$	Sodium Sulfate
SiO_2	Silicon Dioxide
SO_3	Sulfur Trioxide
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
B.S.	British Standards

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

CAH	Calcium Aluminate Hydrates
C-A-H	Calcium Aluminate Hydrates
CH	Calcium hydroxide
CSH	Calcium Silicate Hydrate
C-S-H	Calcium Silicate Hydrate
MH	Magnesium Hydroxide
M-S-H	Magnesium Silicate Hydrate
SEM	Scanning Electron Microscope
XRD	X-Ray Diffraction
XRF	X-Ray Fluorescence

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในปัจจุบันเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายดังนั้น คอนกรีตจึงเป็นวัสดุหลักที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ซึ่งที่ผ่านมาวิศวกรโยธาหรือผู้ออกแบบโครงสร้างมักจะคำนึงถึงการรับกำลังอัดประลัยที่ 28 วันของคอนกรีตเป็นหลักในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมักไม่คำนึงถึงความคงทนของคอนกรีตกันมากนัก แต่ในปัจจุบันสภาพแวดล้อมได้เปลี่ยนแปลงไป ทำให้อาคารคอนกรีตต้องเผชิญกับสภาพสิ่งแวดล้อมต่างๆที่รุนแรงมากขึ้น จึงทำให้อายุการใช้งานของคอนกรีตอาจจะลดลง ดังนั้นการนำคอนกรีตไปใช้งานนอกจากจะคำนึงถึงด้านกำลังอัดประลัยของคอนกรีตแล้ว ปัจจัยด้านความคงทนของคอนกรีตจึงเป็นสิ่งที่วิศวกรจะต้องคำนึงถึงในการนำคอนกรีตไปใช้ให้เหมาะสมในสภาพสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน สารละลายซัลเฟตเป็นสาเหตุหนึ่งที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีต เนื่องจากสารละลายซัลเฟตสามารถซึมผ่านสู่ภายในเนื้อคอนกรีตเข้าทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ ก่อให้เกิดการผุกร่อน พองตัว และแตกร้าว ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตไม่สามารถใช้งานตามที่ออกแบบไว้

โครงสร้างคอนกรีตโดยทั่วไปที่ต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีสารละลายซัลเฟต ซึ่งโดยทั่วไปจะพบในรูปสารละลายที่ปนอยู่ในดินหรือน้ำใต้ดิน น้ำเสียจากบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรม หรือจากโรงงานผลิตสารเคมีบางประเภท และน้ำทะเลที่มีซัลเฟตเป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างของซัลเฟตที่พบมากตามธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อคอนกรีต ได้แก่ โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟตและแคลเซียมซัลเฟต เป็นต้น ความเสียหายต่อคอนกรีตนั้นจะทำให้เกิดการผุกร่อน พองตัว และการแตกร้าวอย่างรุนแรง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของซัลเฟตและความชื้น

เถ้าลอยถือว่าเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งเมื่อแทนที่ในปริมาณที่เหมาะสมแล้วทำให้สามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น [1] โดยเถ้าลอยเป็นผลผลิตที่เหลือใช้จากการใช้ถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า แต่ข้อเสียของการแทนที่เถ้าลอยบางส่วนในปูนซีเมนต์นอกจากทำให้คอนกรีตก่อตัวช้าและกำลังอัดในระยะต้นลดลง [2] แล้วยังพบว่าการต้านทานซัลเฟตในกรณีสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตกลับลดลง [3] ในขณะที่การใช้ผงหินปูนซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อย (Inert Material) สามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างทำให้การรับกำลังอัดในระยะต้นมีค่าเพิ่มขึ้นและมีความทึบน้ำสูง[4] การพัฒนาวัสดุประสาน

ร่วมซึ่งได้แก่ปูนซีเมนต์เถ้าลอยและผงหินปูนเป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ร่วมกันเพื่อให้คอนกรีตมีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยเฉพาะการต้านทานสารละลายซัลเฟต

ในปัจจุบันประเทศไทยได้ผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหิน โดยมีผลผลิต (By Products) ที่เหลือใช้เป็นเถ้าลอยของเถ้าถ่านหิน (Fly Ash) ประมาณปีละ 3 ล้านตัน [4] ในขณะที่ผงหินปูน (Limestone Powder) เป็นผลพลอยได้จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมในการผลิตปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จหรือเป็นผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมการผลิตผง $CaCO_3$ โดยอนุภาคของผงหินปูนมีขนาดอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 ไมโครเมตร จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนในสัดส่วนที่เหมาะสมจะให้กำลังอัดระยะต้นที่สูงกว่ามอร์ต้าร์ที่ผสมสารปอซโซลานหลายชนิด [5-7] ดังนั้นจึงน่าจะนำเอาข้อดีดังกล่าวของผงหินปูนมาศึกษาในเรื่องการต้านทานซัลเฟต โดยเฉพาะในกรณีแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งเมื่อใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะให้ผลการต้านทานได้น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่แทนที่

ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์เมื่อใช้วัสดุประสานต่างชนิดกัน โดยประเมินความต้านทานซัลเฟตต้านการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนัก เพื่อศึกษาผลกระทบของชนิดของวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนัก ของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อใช้วัสดุประสานที่ต่างชนิดกันในสารละลายซัลเฟต

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของชนิดของวัสดุประสาน ต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ เมื่อใช้วัสดุประสานที่ต่างชนิดกันในสารละลายซัลเฟต

1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟต ต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต

1.2.4 เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตเมื่อสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในการศึกษาของงานวิจัยครั้งนี้มีขอบเขตงานวิจัยดังนี้

1.3.1 วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10และร้อยละ 20 ผงหินปูน และเถ้าลอย

1.3.2 ในการประเมินความต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตนั้น ใช้การวัดการขยายตัว (Expansion) การสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ที่อายุ 2, 3, 4, 8, 13 และ 16 สัปดาห์ของการแช่ในสารละลายซัลเฟต หลังจากนั้นให้ทำการวัดตัวอย่างทุกๆ อายุ 2 เดือนของการแช่ในสารละลายซัลเฟต

1.3.3 สารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ได้ใช้โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นสารละลายซัลเฟต

1.3.4 ทำการวัดการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟต

1.3.5 เปรียบเทียบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟต

1.3.6 วิเคราะห์ผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของตัวอย่าง มอร์ต้าร์

1.3.7 สรุปถึงสัดส่วนที่เหมาะสมของตัวอย่างมอร์ต้าร์เพื่อต้านทานสารละลายซัลเฟต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ในการศึกษาครั้งนี้ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ มีดังนี้

1.4.1 ทราบถึงการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อใช้วัสดุประสานต่างชนิดกันที่แช่ในสารละลายซัลเฟต

1.4.2 ทราบถึงผลกระทบของการใช้วัสดุประสานที่ต่างชนิดกันต่อคุณสมบัติในด้านการต้านทานซัลเฟต

1.4.3 ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุประสานเพื่อใช้ในส่วนผสมคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในที่นี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย และผงหินปูน และทฤษฎีที่เกี่ยวกับการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่ม คือออกไซด์หลัก (Major Oxides) และออกไซด์รอง (Minor Oxides) ออกไซด์หลักได้แก่แคลเซียมออกไซด์ (CaO)ซิลิกา(SiO_2)อะลูมินา (Al_2O_3) และเฟอริกออกไซด์ (Fe2O3)รวมกันได้กว่าร้อยละ 90 ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รอง(Minor Oxides) ได้แก่แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na_2O) และ (K_2O) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และยังมีส่วนประกอบของออกไซด์อื่นผสมอยู่บ้าง เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) และฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P2O5) นอกจากนี้ยังมีสิ่งที่แปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจะจัดรวมอยู่ในการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue) ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากัน และรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารละลายที่มีรูปร่างต่างๆ ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบการเผาแบะการเย็นลงของเม็ดปูนขนาดและรูปร่างของสารละลายประกอบสามารถใช้กล้องจุลทรรศน์ธรรมดาส่องดูได้

2.1.1.1 สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์

สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์มีอยู่ 4 ชนิดดังนี้

ก) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) $3CaO.SiO_2$(C_3S) ไตรแคลเซียมซิลิเกต ส่วนประกอบทางเคมีคือ $3CaO.SiO_2$ และมีตัวย่อว่า C_3S มีอยู่มากที่สุดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 45 ถึง 55 มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมสีเทาแก่ที่อุหภูมิในเตาเผา 1,250 องศาเซลเซียส C_3S สามารถสลายตัวได้ ซึ่งการสลายตัวนี้ค่อนข้างช้าและมีอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส C_3S จะมีเสถียรภาพและไม่เปลี่ยนแปรสภาพเมื่อผสม C_3S กับน้ำจะเกิดการก่อตัวและแข็งตัวและทำ

ให้กำลังค่อนข้างดีโดยเฉพาะในช่วง 7 วันแรก ปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำทำให้เกิดความร้อนปานกลางประมาณ 500 จูล/กรัม ความร้อนที่คายออกมาเรียกว่าความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of Hydration)

ข) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate) $2CaO.SiO_2(C_2S)$ไดแคลเซียมซิลิเกต ส่วนประกอบทางเคมีคือ $2CaO.SiO_2(C_2S)$ และมีตัวย่อว่า C_2S มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 15 ถึง 35 C_2S บริสุทธิ์ที่มีอยู่ 4 รูปแบบคือ $\propto C_2S$ ซึ่งเกิดที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส และเมื่อเย็นตัวลงจะแปลงสภาพเป็น $\propto 'C_2S$ ซึ่งเปลี่ยนเป็น βC_2S ที่อุณหภูมิต่ำลงและแปลงสภาพเป็น C_2S ที่อุณหภูมิปกติ แต่เนื่องจากในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ C_2S อยู่ในสภาพที่ไม่บริสุทธิ์ สารแปลกปลอมอื่นๆและอัตราการลดลงของอุณหภูมิทำให้แปลงสภาพจาก βC_2S เป็น C_2S ไม่เกิดขึ้น ดังนั้น βC_2S จะมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิปกติ C_2S มีลักษณะเป็นเม็ดกลมและแสดงลักษณะทวินนิง (Twinning) เมื่อผสมกับน้ำสามารถทำปฏิกิริยาเกิดความร้อนขึ้น ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_2S ค่อนข้างต่ำ มีค่าประมาณ 250 จูล/กรัมและการพัฒนากำลังของ C_2S ค่อนข้างช้าและช้ากว่า C_3S

ค ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) $3CaO.Al_2O_3(C_3A)$ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ส่วนประกอบทางเคมีคือ $3CaO.Al_2O_3$และมีตัวย่อว่า C_3A มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ดแลนด์ประมาณร้อยละ 7 ถึง 15 ลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยม มีสีเทาอ่อน ปฏิกิริยากับน้ำมีความรุนแรงมากและทำให้เพสต์ก่อตัวทันที ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าสูงมากคือ กว่า 880 จูล/กรัม การพัฒนากำลังของ C_3A จะเร็วมากคือสามารถพัฒนาได้ภายในวันเดียวแต่กำลังประลัยที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับ C_3S หรือ C_2S

ง) เตรตระแคลเซียมอลูมิเนต (Tretracalcium Aluminate) $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ (C_4AF) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ส่วนประกอบทางเคมีคือ $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ และมีตัวย่อว่า C_4AF มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 และอยู่ในสภาพของสารละลายแข็ง (Solid Solution) เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาและทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็วความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าปานกลางประมาณ 420 จูล/กรัม โดย C_4AF พัฒนากำลังได้เร็วมากเช่นเดียวกับ C_3A แต่กำลังประลัยที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำและต่ำกว่า C_3A เล็กน้อย

2.1.1.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีหลายประเภท แต่ละประเภทมีสารประกอบสำคัญได้แก่ C_3S, C_2S, C_3A และC_4AF ซึ่งจะมีอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน จึงทำให้ปูนซีเมนต์แต่ละประเภทมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ส่วนประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ชนิดต่างๆ แสดงให้เห็นดัง

ตารางที่ 2.1 ซึ่งปูนซีเมนต์ที่ผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่จะผลิตตามมาตรฐานของอเมริกา (ASTM C. 150) และของประเทศอังกฤษ (British Standard; B.S.) และสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 15) ของไทยได้แบ่งปูนซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) ใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไปปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังสูงในระยะเวลาไม่รวดเร็วมากนัก และให้ความร้อนปานกลาง

ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนไม่สูงมากนัก ความร้อนที่เกิดมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 และให้กำลังใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์ใดที่เกิดความร้อนและทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตปานกลาง

ค) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (Rapid Hardening Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรก ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสูงเพราะมี C_3S และความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาก ใช้ในการทำคอนกรีตที่ต้องการใช้งานหรือถอดแบบเร็ว

ง) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low heat Portland Cement) ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่ำมากเพราะมีปริมาณ C_3S ต่ำ แต่มีปริมาณ C_2S ที่ค่อนข้างสูง ใช้ในงานคอนกรีตหลา เนื่องจากมีคุณสมบัติให้อุณหภูมิต่ำ

จ) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulfate Resisting Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีปริมาณ C_3A ต่ำมาก ดังนั้นจึงมีการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยลง ใช้ในงานคอนกรีตที่สร้างอยู่ในที่มีเกลือหรือสารละลายซัลเฟต และบริเวณที่มีดินเค็ม

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่างๆ [8]

ประเภทของปูนซีเมนต์	ส่วนประกอบทางเคมี (ร้อยละ)						
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	$CaSO_4$	CaO	MgO
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland cement)	49	25	12	8	2.9	0.8	2.4
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง ดัดแปลง (Modified Portland cement)	45	29	6	12	2.8	0.6	3.0
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (High Early Strength)	56	15	12	8	3.9	1.4	2.6
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low Heat)	30	46	5	13	2.9	0.3	2.7
ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulfate Resistant)	43	36	4	12	2.7	0.4	1.6

2.1.1.3 ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

ก) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $3CaO.2SiO_23H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide : $Ca(OH_2)$ หรือ CH) ดังสมการที่ 2.1

$$2(3CaO.SiO_2)+6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_23H_2O+3Ca(OH)_2 \qquad (2.1)$$

ข) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH ดังสมการที่ 2.2

$$2(2CaO.SiO_2)+4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2 3H_2O+Ca(OH)_2 \quad (2.2)$$

ค) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2.3

$$3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O \quad (2.3)$$

เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซั่มเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (Clinker) โดยยิปซั่ม (Gypsum : $CaSO4.2H_2O$) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตก่อให้เกิดชั้นบางๆของแอทริงไจท์ (Ettringite : $3CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.31H_2O$) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต ดังสมการที่ 2.4

$$3CaO.Al_2O_3+Ca.SO_4.2H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.31H_2O \quad (2.4)$$

ง. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซั่ม ดังสมการที่ 2.5

$$4CaO.Al_2O_3Fe_2O_3+Ca.SO_4.2H_2O \longrightarrow CaO.(Al_2O_3.Fe_2O_3).3CaSO_4 \quad (2.5)$$

เนื่องจากปูนซีเมนต์มี C_3S เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ ซึ่งบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ C_3A ด้วย ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะลดลงเนื่องจากการเกิดชั้นเคลือบของแอทริงไจท์ และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของอิออนแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาลดลง และเพสต์มีสภาพพลาสติกช่วงหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของ

สารละลายสูงพอ CH จะตกผลึก และปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ทำให้เกิด CSH เพิ่มมากขึ้น ตามด้วยปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้แอทริงไจท์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมิเนตและเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต และซัลโฟเฟอไรท์ แคลเซียมซิลิเกตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น และขยายเข้าไปในโพรงและเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.1.2 เถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นผลพลอยได้ (By Products) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อนมาใช้ เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงก้นเตา จึงเรียกกันว่าเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึงประมาณ 200 ไมโครเมตร จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย (Fly Ash) เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบบริเวณโรงไฟฟ้า

เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ใช้ผสมปูนซีเมนต์ทำคอนกรีตได้ โดยตามมาตรฐาน ASTM C 618-80 ได้ให้คำนิยามของเถ้าลอยไว้ว่า เถ้าลอย คือวัสดุเม็ดละเอียดที่เหลือจากการเผาไหม้ของถ่านหิน โดยส่วนมากจะได้มาจากขบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหิน ถ่านหินที่ใช้ในการเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด เช่น แอนทราไซต์ (Anthracite) บิทูมินัส (Bituminous) ซับบิทูมินัส (Sub Bituminous) และลิกไนต์ (Lignite) โดยถ่านหินคุณภาพดีที่สุดได้แก่ แอนทราไซด์ สามารถให้ความร้อนสูงสุด และมีปริมาณความชื้นต่ำ ตามด้วยบิทูมินัส ซับบิทูมินัส และลิกไนต์ตามลำดับ โดยลิกไนต์ให้ความร้อนต่ำและมีความชื้นสูง นอกจากถ่านหินทั้ง 4 ชนิดแล้วยังมีพีท (Peat) ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุด ให้ความร้อนต่ำสุด และมีความชื้นสูงสุด จึงไม่นิยมใช้ในการเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า โดยเมื่อเผาถ่านหินลิกไนต์แล้วจะเหลือเถ้าถ่านหินประมาณร้อยละ 25 ของปริมาณถ่านหินที่เผา โดยสามารถแบ่งเถ้าถ่านหินลิกไนต์ได้ดังนี้

1) เถ้าลอย (Fly Ash or Pulverized Fuel Ash or Dry Ash)

เถ้าลอยเป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกไปสู่ปล่องควัน และถูกดักจับไว้ได้ในเครื่องดักจับ (Electrostatic Precipitator) โดยจะมีประมาณร้อยละ 82 ของปริมาณเถ้าทั้งหมด

2) เถ้าหนัก (Bottom Ash or Wet Ash)

เถ้าหนักเป็นเถ้าที่เกิดจากการปะทะกันของอนุภาคเถ้าในบริเวณสันดาป (Combustion Zone) โดยในบริเวณนี้อุณหภูมิจะสูงพอที่จะหลอมเถ้าที่เป็นเม็ดหรือก้อนตกลงสู่ก้นเตา โดยมีประมาณร้อยละ 18 ของเถ้าทั้งหมด

3) ขี้เถ้า (Slag)

ขี้เถ้าเป็นเถ้าที่ปะทะกับผนังเตาและหลอมติดกันรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ เมื่อรวมตัวกันจนมีน้ำหนักมากจะตกลงสู่ก้นเตา ซึ่งขี้เถ้ามีปริมาณน้อยมาก

2.1.2.1 ชนิดของเถ้าลอย

มาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด คือ

ก) เถ้าลอยชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica, SiO_2) อลูมินา (Alumina, Al_2O_3) และเฟอร์ริค-ออกไซด์ (Ferric Oxide, Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังแสดงในตารางที่ 2.2 วิธีการเก็บตัวอย่างและทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ

ข) เถ้าลอยชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูนัส เป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ ตั้งแต่ร้อยละ 50 ถึงร้อยละ 70 และปริมาณ CaO สูง โดยมีคุณสมบัติตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังในตารางที่ 2.2 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 [8]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์ (SiO2 + Al2O3 + Fe2O3) อย่างต่ำ, ร้อยละ	70	50
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO3) อย่างสูง, ร้อยละ	5	5
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3	3
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง, ร้อยละ	6	6
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na2O, ร้อยละ	1.5	1.5

นอกจากจะแบ่งแยกชนิดของเถ้าถ่านออกเป็น 2 ชนิดดังกล่าวมา ยังสามารถพิจารณาจากความแตกต่างของส่วนประกอบและคุณสมบัติในด้านความเป็นซีเมนต์ (Cementitious) และความเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) ได้ด้วย เนื่องจากเถ้าลอย Class C โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์เพิ่มขึ้น จากคุณสมบัติปอซโซลาน เพราะเถ้าถ่านหิน Class C มักจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าร้อยละ 10 ส่วน Class F มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 10 ดังนั้นการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ในงานคอนกรีตธรรมดาทั่วไป ACI 226 (1987) ได้แนะนำว่า ควรใช้เถ้าถ่านหิน Class F ในปริมาณร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และสามารถเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15 ถึง 35 ได้ในกรณีที่ใช้เถ้าถ่านหิน Class C เนื่องจากพบว่า เถ้าถ่านหิน Class C จะมีลักษณะความเป็นซีเมนต์มากกว่า เพราะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ สูงกว่าเถ้าถ่านหิน Class F

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก โดยแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมี ได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก.2135-2545 [9]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด			
	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้นคุณภาพ 3
		ชนิด ก	ชนิด ข	
ปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อย่างต่ำ, ร้อยละ	30	30	30	30
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) , ร้อยละ	-	น้อยกว่า 10.0	น้อยกว่า 10.0	-
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างมาก, ร้อยละ	5	5	5	5
ปริมาณความชื้นสูงสุด อย่างมาก, ร้อยละ	3	3	2	2
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างมาก, ร้อยละ	6	6	6	6

2.1.2.2 คุณสมบัติทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย SiO_2, Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และมี MgO, Na_2O, K_2O, SO_3 เป็นองค์ประกอบรอง ดังแสดงในตารางที่ 2.3 นอกจากนี้ยังประกอบด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) เถ้าลอยมี SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากรวมกันแล้วมีปริมาณถึงร้อยละ80–90 ดังนั้นจึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของถ่านหิน มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 ของเถ้าลอยไว้อย่างต่ำร้อยละ50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปใช้งานได้

2.1.2.3 คุณสมบัติทางกายภาพ

ก) ลักษณะของอนุภาคและรูปร่างของเถ้าลอยแตกต่างกันไปตามชนิดของถ่านหินที่เผา อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา สภาพในการเผา และวิธีการเก็บเถ้าลอย โดยรูปร่างของเถ้าลอยจะเป็นส่วนประกอบของแก้ว (Glassy) มีลักษณะกลมหรือกลวง โดยที่ทรงกลมกลวงจะเรียกว่า Cenospheres ส่วนทรงกลมที่ประกอบด้วยทรงกลมเล็กหลายอันรวมกันจะเรียกว่า Peripheries

ข) ค่าความละเอียด โดยทั่วไปเถ้าลอยจะมีขนาดตั้งแต่ 1 ไมโครเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร ค่าความละเอียดของเถ้าลอยจะวัดได้จากปริมาณผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐาน (Sieve Analysis) โดยทั่วไปปริมาณของเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงขนาด 80 ไมโครเมตร มีปริมาณร้อยละ 6 ถึงร้อยละ25 โดยน้ำหนัก ปริมาณเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงขนาด 50 ไมโครเมตร มีปริมาณร้อยละ 16 ถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และค้างบนตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร มีปริมาณร้อยละ 3 ถึงร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก ค่าความละเอียดจะมีผลอย่างมากต่อคุณภาพของคอนกรีต นั่นคือเถ้าลอยที่มีความละเอียดมากจะทำให้คอนกรีตมีความสามารถต้านทานแรงอัดสูงขึ้น

ค) ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ เถ้าลอยที่ได้จากการเก็บโดยเครื่องมือดักจับ (Electrostatic Precipitators) จะมีความละเอียดอยู่ในช่วง 4,000 ถึง 7,000 ซม^2/กรัม แต่เครื่องมือดักจับสมัยใหม่สามารถดักจับเถ้าลอยที่มีความละเอียดได้ถึง 12,000 ซม^2/กรัม โดยทั่วไปค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสามารถหาได้จากเครื่องมือทดสอบหาความซึมอากาศเบลน (Blaine Air Permeability Apparatus) โดยความละเอียดของเถ้าลอยจากวิธีนี้อยู่ในช่วง 2,500 ถึง 5,500 ซม^2/กรัม เมื่อเทียบค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะพบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากจะมีพื้นผิวมาก ส่งผลให้สามารถทำปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้เร็วกว่าเถ้าลอยที่มีความละเอียดน้อยกว่า

ง) ความถ่วงจำเพาะ เถ้าลอยปกติแล้วจะค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.2 ถึง 2.8 แต่อนุภาคที่มีลักษณะกลมและกลวง (Cenosheres) จะมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1.0 จึงสามารถลอยน้ำได้ เถ้าลอยที่มีปริมาณเหล็กสูงจะมีค่าความถ่วงจำเพาะแนวโน้มที่สูง แต่ถ้ามีปริมาณคาร์บอนสูงค่าความถ่วงจำเพาะจะมีแนวโน้มลดลง

จ) ความคงตัวเป็นความสามารถของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ที่สามารถต้านทานความเค้นภายใน ที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นโดยไม่เกิดการแตกร้าว หรืออาจจะกล่าวได้ว่า เมื่อส่วนผสมของปูนซีเมนต์แข็งตัวแล้วจะไม่เกิดการขยายตัวของเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้ปริมาตรเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

ฉ) สีของเถ้าลอย สีของเถ้าลอยจะขึ้นอยู่กับปริมาณของ Fe_2O_3 และปริมาณคาร์บอน โดยเถ้าลอยมีปริมาณคาร์บอนสูงจะมีสีดำและเทา ส่วนเถ้าลอยที่มีปริมาณ Fe_2O_3 สูงจะมีสีน้ำตาล

อย่างไรก็ตามเถ้าลอยในประเทศไทยสามารถพบได้ทั้ง Class C และ Class F ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา และลักษณะการเผาถ่านหิน อย่างไรก็ดีต่างก็มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีต เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย มีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 2.4 ส่วนตารางที่ 2.5 แสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีจากแหล่งต่างๆ

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2528 – 2544 [4]

ปี พ.ศ.	องค์ประกอบทางเคมี, %								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	LOI
2528	12.0	5.9	17.3	39.5	4.6	2.0	0.8	11.5	6.3
2533	37.8	20.5	14.2	17.4	3.3	0.9	2.1	3.9	0.8
2535	40.3	24.0	15.0	11.2	2.8	1.0	2.6	3.1	0.5
2540	41.5	28.1	12.3	10.0	1.2	0.6	3.3	2.0	0.8
2544	39.9	18.2	13.6	17.2	2.4	1.3	2.7	1.5	0.1

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ [10]

ตัวอย่างเถ้าลอย	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	LOI
แม่เมาะ	41.16	22.30	11.51	15.27	2.70	1.43	2.93	1.66	0.20
ระยอง	45.24	28.25	2.43	11.80	0.74	3.63	0.66	0.47	2.96
กาญจนบุรี	39.56	20.99	9.37	10.62	1.47	3.34	3.08	0.30	7.10
ราชบุรี	32.96	13.81	6.69	24.42	1.44	10.56	2.38	0.61	7.05
ปราจีนบุรี	42.03	18.97	4.44	4.91	1.01	19.68	0.28	0.72	3.65

2.1.2.4 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เถ้าลอยทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต กล่าวคือเมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในเถ้าลอย เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ปฏิกิริยาปอซโซลาน ของเถ้าลอยสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.6 และสมการที่ 2.7

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \longrightarrow 3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O \text{ หรือ (CSH)} \qquad (2.6)$$

$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO{\cdot}2Al_2O_3{\cdot}3H_2O \text{ หรือ (CAH)} \qquad (2.7)$$

2.1.3 ผงหินปูน

ผงหินปูน (Limestone Powder) เป็นผลพลอยได้จากการย่อยหิน เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยปกติแล้วผงหินปูนจำนวนมากเหล่านี้มักจะถูกกองเก็บไว้ในบริเวณแหล่งหินย่อย ๆ นั้น โดยอนุภาคของผงหินปูนมีขนาดเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 100 ถึง 1 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถก่อให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อม และยังส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของผู้ที่อยู่อาศัยในบริเวณใกล้เคียง

แหล่งย่อยหินเหล่านั้น สำหรับผงหินปูนในประเทศไทยมีเหมืองที่ทำการผลิตอยู่ 2 แหล่งใหญ่ด้วยกัน คือเหมืองหินปูนโดโลมิติกจังหวัดสระบุรี และผงหินปูนจากเหมืองหินปูนชนิดโดโลไมท์ จังหวัดกาญจนบุรี หินปูนชนิดโดโลมิติก (Dolomitic) และโดโลไมท์ (Dolomite) จัดอยู่ในจำพวกหินคาร์บอเนต (Carbonate Rock) โดยหินคาร์บอเนตที่มีองค์ประกอบของแร่โดโลไมท์อยู่ในปริมาณร้อยละ 10 ถึง 50 จะจัดเป็นหินปูนประเภทโดโลมิติก ในขณะที่มีปริมาณของแร่โดโลไมท์มากกว่าร้อยละ 50 จะจัดเป็นหินปูนประเภทโดโลไมท์ สำหรับองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของหินปูน จะประกอบด้วยสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (Inert Material) และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Reactive Material) มีรายละเอียดดังนี้

2.1.3.1 วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจาก คุณสมบัติของวัสดุเองที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี จึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตอีกด้วย ในขณะเดียวกันก็อาจส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนต์เพสต์ สารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี อย่างไรก็ตามสารประกอบดังกล่าวทั้งสองนั้นก็สามารถที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ ถ้าหากสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากเพียงพอ และ/หรือให้พลังงานความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ดังสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9

$$CaCO_3 - H_2O - heat \longrightarrow Ca(OH)_2 - CO_2 \quad (2.8)$$

$$MgCO_3 - H_2O - heat \longrightarrow Mg(OH)_2 - CO_2 \quad (2.9)$$

2.1.3.2 วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำ ดังสมการที่ 2.10

$$CaO - H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 \quad (2.10)$$

ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากสมการข้างต้นนี้ สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ เช่นเดียวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ดังสมการที่ 2.9 และสมการที่ 2.10

การนำเอาผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานมาใช้ในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จึงมีความเป็นไปได้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาว อย่างไรก็ตามปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานจากแหล่งต่างๆ เมื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุเชื่อมประสาน ซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ที่มีส่วนผสมของวัสดุทั้งสองให้แน่ชัดก่อนการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2.1.4 การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

สำหรับกลไกการทำลายของซัลเฟตต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Mechanisms of Sulfate Attack on Portland Cement) นั้น เนื่องจากเกลือซัลเฟต (SO_4^{-2}) ที่อยู่ในรูปของสารละลาย สามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ ตัวอย่างของเกลือซัลเฟต ที่พบมากในธรรมชาติและอันตรายต่อคอนกรีต เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) เป็นต้น เกลือซัลเฟตจะมีอยู่มากในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในบริเวณริมทะเลหรือในดินทั่วไป ในน้ำเสีย จากบ้านเรือนหรือตามน้ำพุร้อนธรรมชาติ เป็นต้น

ในการศึกษาเรื่องการทำลายโดยซัลเฟตสามารถทำได้โดยนำตัวอย่าง ไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟตหรือแคลเซียมซัลเฟต แต่เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อย ดังนั้นจึงใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตในการศึกษาครั้งนี้

2.1.4.1 กลไกการทำลายของโดยโซเดียมซัลเฟต (Mechanisms of Sodium Sulfate Attacks) [11]

กลไกการทำลายของโซเดียมซัลเฟตแสดงดังสมการที่ 2.11 ถึง 2.14 เริ่มต้นเมื่อโซเดียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, CH) ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาจากไฮเดรชัน ดังแสดงในสมการที่ 2.8 เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) มีความเป็นด่างสูงมาก (pH=13.5) จึงเป็นการรักษาสภาพทั้งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ Ettringite (C_6ASH_{32}) ไม่ทำให้ปฏิกิริยากลายเป็นผลอื่น โดยที่สารยิปซัม ($C\underline{S}H_2$) ที่ได้จากสมการที่ 2.8 จะทำปฏิกิริยากับผลผลิตไฮเดรชันบางตัว เช่น แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C_4AH_{13}) โมโนซัลเฟต ($C_4A\underline{S}H_{12}$) และไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ได้ Secondary

Ettringite ดังแสดงในสมการที่ 2.2 ถึง 2.4 โดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลิตผลปฏิกิริยาไฮเดรชั่นชนิดอื่นมาก จึงทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นการทำละลายโซเดียมซัลเฟตจึงเป็นการขยายตัวและแตกร้าวของคอนกรีต

$$CH + N\underline{S} + 2H \longrightarrow C\underline{S}H_2 + NH \quad (2.11)$$

$$C_4AH_{13} + 3C\underline{S}H_2 + 14H \longrightarrow C_6A\underline{S}H_{32} + CH \quad (2.12)$$

$$C_4A\underline{S}H_{12} + 2C\underline{S}H_2 + 16H \longrightarrow C_6A\underline{S}H_{32} \quad (2.13)$$

$$C_3A + 3C\underline{S}H_2 + 26H \longrightarrow C_6A\underline{S}H_{32} \quad (2.14)$$

โดยที่ $C = CaO$, $N = Na_2O$, $M = MgO$, $S = SiO_2$, $S = SO_3$ และ $H = H_2O$

2.1.4.2 กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟต (Mechanisms of Magnesium Sulfate Attacks) [11]

กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.15 ถึง 2.17 จะแตกต่างจากกรณีของโซเดียมซัลเฟต กล่าวคือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MH) หรือ Brucite มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก และค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่าประมาณ 10.5 ซึ่งมีความเป็นด่างที่ไม่สูง ดังนั้นจึงทำให้ทั้ง C-S-H และ Ettingite ไม่เสถียรภาพ นอกจากนี้ C-S-H จะถูกทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตดังแสดงในสมการที่ 2.13 จากสมการที่ 2.12 และ 2.13 ทั้ง $C\underline{S}H_2$ และ MH จะสะสมมากขึ้นโดย $C\underline{S}H_2$ จะถูกสะสมในช่องว่าง (Pores) ของคอนกรีต ส่วน MH จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล (S_2H) ดังแสดงในสมการที่ 2.14 ได้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (M-S-H) ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสานเลยดังนั้นการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตจึงเป็นการเปลี่ยนC-S-H เป็น M-S-H การทำลายดังกล่าวทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของซีเมนต์ที่แข็งตัวและจะเกิดการสะสม $C\underline{S}H_2$ โดยไม่เกิดการขยายตัวมากดังกรณีการทำลายของโซเดียมซัลเฟต

$$CH + M\underline{S} + 2H \longrightarrow C\underline{S}H_2 + MH \quad (2.15)$$

$$C_XS_YH_Z + xM\underline{S} + (3x+0.5y-z)H \longrightarrow xC\underline{S}H_2 + xMH + 0.5yS_2H \quad (2.16)$$

$$4MH + SH_{11} \longrightarrow M_4SH_{8.5} + (n-4.5)H \quad (2.17)$$

2.1.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายของซัลเฟต

ก) สิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟตตลอดจนความเข้มข้นของซัลเฟต

ข) ความทึบน้ำของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตเข้าไปได้ยาก ลดการทำลายขั้นรุนแรง

ค) ปริมาณ C_3A และ C_4AF ในปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และ C_4AF น้อยมีแนวโน้มต้านทานการทำลายของซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A และ C_4AF สูง และปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วน C_2A และ C_3S ต่ำก็มีความสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น

ง) ปริมาณ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีต ถ้าลดปริมาณของ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตก็ช่วยลดความรุนแรงลงได้ด้วย วิธีการลด $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตอาจทำได้โดยใช้สารวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

จ) วิธีการป้องกันการทำลายโดยซัลเฟต

1) ใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และอัตราส่วน C_2A และ C_3S ต่ำ นั่นคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

2) การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนซึ่งช่วยลดปริมาณบางส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) รวมทั้งลด C_3A และยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีต ได้ด้วย

3) ลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้ต่ำเพื่อให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้น

4) ออกแบบให้คอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์เพสต์ไม่มากเกินไป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นการศึกษางานวิจัยที่ผ่านซึ่งศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยและผงหินปูนมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ เพื่อต้านทานสารละลายซัลเฟต

Al-Amoudi at el., [1995] [12] พบว่า ปูนซีเมนต์ที่ผสมด้วยร้อยละ 25 ของเถ้าลอย หรือร้อยละ 10 ของซิลิกาฟูม หรือร้อยละ 70 ของตะกรันตาถลุงเหล็ก จะมีความต้านทานโซเดียมซัลเฟตได้ดีมาก แต่จะต้านทานซัลเฟตได้แย่ลงเมื่อเป็นกรณีของแมกนีเซียมซัลเฟต

Al-Amoudi, [1999] [11] รายงานกลไกการทำลายของซัลเฟตในปูนซีเมนต์ผสมโดยเฉพาะเมื่อผสมด้วยซิลิกาฟูม พบว่าสามารถต้านทานโซเดียมซัลเฟตได้ดีมาก เนื่องจากสามารถไปลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และยังช่วยเป็นตัวที่ไปแทรกในช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ทำให้เกิดความแน่นมากขึ้นจึงช่วยต้านทานซัลเฟตได้เป็นอย่างดี แต่ในกรณีของแมกนีเซียมซัลเฟตกลับ

พบว่าเมื่อใช้ซิลิกาฟูมหรือตะกรันเตาถลุงเหล็กแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ มีผลทำให้การต้านทานซัลเฟตที่แย่ลง เพราะแม้ว่าจะไปลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ก็ตาม แต่กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตจะไปเปลี่ยน CSH ให้เป็น MSH ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน จึงทำให้มีการลดค่ากำลังอัดของคอนกรีตลง

S.U. Al-Dulaijan , [2003] [13] ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต โดยปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 นอกจากนี้ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมซิลิกาฟูม จากการศึกษาพบว่าการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมซิลิกาฟูม ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีความสามารถใกล้เคียงกัน สามารถใช้ทดแทนกันได้ทั้งในสภาพแวดล้อมซัลเฟต

Pitisan Krammart and Somnuk Tangtermsirikul , [2004][14] ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แตกต่างกันสองระดับคือร้อยละ 8.28 และร้อยละ 17.28 จากการศึกษาพบว่าการขยายตัวเมื่อแช่ทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต รวมทั้งการลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 ให้ค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้ค่าสูงกว่า ในทางกลับกันมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 ส่งผลให้การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักแย่ลงกว่าเดิม แต่จะช่วยให้ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตทั้งสองชนิดลดลง การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 จะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น การใช้เถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่การลดลงจะไม่มีผลกระทบเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 นอกจากนี้ยังพบว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ค่าการขยายตัว ค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัด และค่าการสูญเสียน้ำหนักจะเป็นสัดส่วนกัน อย่างไรก็ตามในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีเพียงค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนักที่เป็นสัดส่วนกัน แต่การขยายตัวจะมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนัก

ปิติศานต์ กร้ำมาตร และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล , [2550][15] ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยบางส่วน โดยการวัดการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักตัวอย่างถูกแช่ในสารละลายซัลเฟต จากการศึกษาพบว่าทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตการขยายตัวของมอร์ต้าร์แทนที่ฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 68 สัปดาห์ ทุกส่วนผสมยังไม่มีการสูญเสียน้ำหนัก ในขณะที่การแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 ล้วน แต่ในกรณีมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 ล้วน

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

สำหรับในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการศึกษาโดยมีหัวข้อคือ วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา รายละเอียดของวิธีการศึกษา การเตรียมสารละลายซัลเฟต และสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย

3.1.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งมีคุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1 -2532 หรือมาตรฐานอเมริกา ASTM C150 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมด้วยผงหินปูนร้อยละ 20

3.1.1.2 ผงหินปูนขนาดความละเอียด 3 ไมโครเมตร

3.1.1.3 เถ้าลอย (Fly Ash) ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง

3.1.1.4 ทราย ใช้ทรายร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ แล้ว

3.1.1.5 สารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และสารละลายซัลเฟตที่ผสมกันระหว่างโซเดียมซัลเฟตกับแมกนีเซียมซัลเฟต โดยใช้ความเข้มข้นของปริมาณอิออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33,800 ppm

3.1.1.6 น้ำ ใช้น้ำประปา

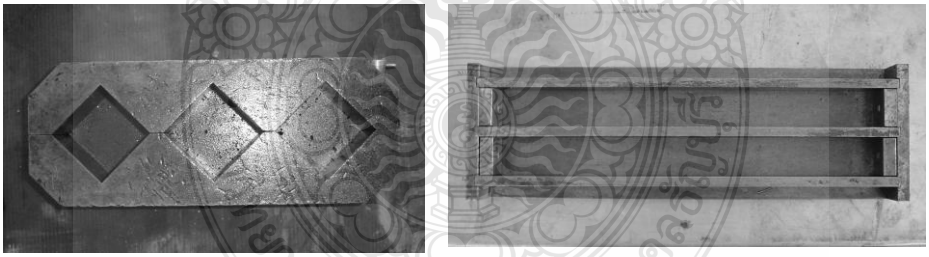
3.1.2 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

สำหรับเครื่องมืออุปกรณ์ที่สำคัญ ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ มีดังนี้

3.1.2.1 เครื่องผสมมอร์ต้าร์ (ภาพที่ 3.1)

ภาพที่ 3.1 เครื่องผสมมอร์ต้าร์

3.1.2.2 แบบหล่อชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ (ภาพที่ 3.2)



ภาพที่ 3.2 แบบหล่อชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์

3.1.2.3 เครื่องวัดความยาว (Length Comparator) (ภาพที่ 3.3)

ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดความยาว

3.1.2.4 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม (ภาพที่ 3.4)

ภาพที่ 3.4 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม

3.1.2.5 ถังสำหรับแช่ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ (ภาพที่ 3.5)

ภาพที่ 3.5 ถังสำหรับแช่ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์

3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับรายละเอียดของวิธีศึกษาได้ทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน และคุณสมบัติด้านการต้านทานซัลเฟตของวัสดุประสาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน

ในการศึกษาครั้งนี้คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ได้ทำการศึกษาได้แก่

3.2.1.1 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

3.2.1.2 ความละเอียดของวัสดุโดยใช้วิธีของเบลน (Blaine Fineness) ตามมาตรฐาน ASTM C204

3.2.1.3 ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน ตามมาตรฐาน ASTM C188

3.2.1.4 ถ่ายภาพอนุภาคของวัสดุประสาน โดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope (SEM)

3.2.1.5 การทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน โดยใช้เครื่อง Laser Particle Size Analyzer

3.2.2 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน

สำหรับคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์บดผสมด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมด้วยผงหินปูนร้อยละ 20 ปูนซีเมนต์ผสมปอซโซลาน เถ้าลอยและ ผงหินปูนความละเอียด 3 ไมโครเมตร) โดยศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานดังนี้

3.2.2.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสม(Normal Consistency) ของเพสต์ โดยกระทำตามมาตรฐาน ASTM C187

3.2.2.2 การก่อตัว (Setting Time) ของเพสต์ โดยศึกษาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) โดยกระทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C230

3.2.2.3 ค่าการไหลแผ่ (Flow Value) ของมอร์ต้าร์ โดยกระทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM 143

3.2.2.4 กำลังอัดประลัย (Compressive Strength) ของมอร์ต้าร์ ตามมาตรฐาน ASTM : C109 โดยทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ ขนาด 50x50x50 มม. ทดสอบที่อายุ 28 วัน และ 1 ปี

3.2.2.5 ความพรุน (Porosity) ของมอร์ต้าร์ โดยกระทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C642 โดยทดสอบความพรุนของมอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วัน

3.2.3 คุณสมบัติด้านการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์

สำหรับการคุณสมบัติด้านการต้านทานซัลฟตของมอร์ต้าร์เมื่อใช้วัสดุประสานที่ต่างชนิดกัน โดยทำการประเมินความต้านทานซัลเฟตใน 2 ลักษณะซึ่งได้แก่ การขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนัก

3.2.3.1 การขยายตัว

การทดสอบการขยายตัว (Expansion) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ใช้ตัวอย่าง ขนาด 25x25x285 มม. (ตามมาตรฐาน ASTM C1012) หลังจากที่แช่แท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ในน้ำปูนขาวที่อิ่มตัว (Saturate Limewater) เป็นเวลา 28 วันแล้วทำการวัดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดความยาว (Length Comparator) (ตามมาตรฐาน ASTM C490) ต่อจากนั้นนำตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ในอัตราส่วน 3 : 1 โดยน้ำหนัก) แล้วทำการวัดความยาวของตัวอย่างที่อายุ 2,4,8 และ 16 สัปดาห์และทุกๆ 2 เดือนของการแช่ในสารละลายซัลเฟต โดยเฉลี่ยการขยายตัว 3 แท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์คำนวณได้จากสมการ (3.1)

$$\text{การขยายตัว , \%} = [(L_t - L_i)/ L_g] \times 100 \qquad (3.1)$$

เมื่อ L_i คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างหลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน (มิลลิเมตร)

L_t คือ ค่าเฉลี่ยความยาวตัวอย่างที่แช่ในสารละลายซัลเฟต (มิลลิเมตร)

L_g คือ ค่าความยาวของ Gauge Length หรือเท่ากับ 285 มิลลิเมตร

3.2.3.2 การสูญเสียน้ำหนัก

การทดสอบการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม. โดยหลังจากที่แช่ลูกบาศก์ตัวอย่างมอร์ต้าร์ในน้ำปูนขาวที่อิ่มตัว เป็นเวลา 28 วัน แล้วทำการชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต สำหรับค่าการสูญเสียน้ำหนัก ของตัวอย่างมอร์ต้าร์คำนวณได้จากสมการ (3.2)

$$\text{การสูญเสียน้ำหนัก , \%} = [(W_i - W_t)/(W_t)]x100 \qquad (3.2)$$

เมื่อ W_i คือ น้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน (กรัม)

W_t คือ น้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตที่อายุต่างๆ (กรัม)

3.3 การเตรียมสารละลายซัลเฟต

สำหรับสารละลายซัลเฟตในการศึกษาครั้งนี้ ได้ใช้ 3 สารละลายซัลเฟต ได้แก่ สารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต และ สารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต ในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก

3.3.1 สารละลายโซเดียมซัลเฟต ใช้ โซเดียมซัลเฟต(N$\underline{S}$) เท่ากับ 50 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ปริมาณของอิออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33,800 ppm

3.3.2 สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ใช้ แมกนีเซียมซัลเฟต (M$\underline{S}$) เท่ากับ 42.36 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ปริมาณของอิออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33,800 ppm

3.3.3 สารละลายซัลเฟตที่ผสมกันระหว่างโซเดียมซัลเฟตกับแมกนีเซียมซัลเฟต โดยใช้ N$\underline{S}$ และ M$\underline{S}$ ใน N$\underline{S}$: M$\underline{S}$ เท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ซึ่งในที่นี้ใช้ N$\underline{S}$ เท่ากับ 37.5 กรัม และ M$\underline{S}$ เท่ากับ 10.59 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ปริมาณของอิออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากันคือ 33,800 ppm

3.4 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับสัดส่วนผสมของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือใช้เถ้าลอยและผงหินปูน แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 มีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 เถ้าลอย ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 , 30 และ50 โดยน้ำหนัก

3.4.2 ผงหินปูน ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ในอัตราส่วนร้อยละ 0 , 10 และ 20 โดยน้ำหนัก

3.4.3 เถ้าลอย ใช้แทนที่ในอัตราร้อยละ 20 และผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 10 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

3.4.4 เถ้าลอย ใช้แทนที่ในอัตราร้อยละ 10 และผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 20 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

3.4.5 เถ้าลอย ใช้แทนที่ในอัตราร้อยละ 40 และผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 10 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

3.4.6 เถ้าลอย ใช้แทนที่ในอัตราร้อยละ 30 และผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 20 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

สำหรับสัดส่วนผสมของเพสต์และมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ โดยในกรณีของมอร์ต้าร์นั้นใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55 และทรายต่อวัสดุประสาน 2.75

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของตัวอย่างเพสต์ ที่ใช้ในการศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและการก่อตัว

ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กรัม)						
		ปูนซีเมนต์					เถ้าลอย	ผงหินปูน
		ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5	CP	CL10	CL20		
1	PC1	1.00	-	-	-	-	-	-
2	PC1 FA30	0.70	-	-	-	-	0.30	-
3	PC1 FA50	0.50	-	-	-	-	0.50	-
4	PC1 LP10	0.90	-	-	-	-	-	0.10
5	PC1 LP20	0.80	-	-	-	-	-	0.20
6	PC1 FA20LP10	0.70	-	-	-	-	0.20	0.10
7	PC1 FA10LP20	0.70	-	-	-	-	0.10	0.20
8	PC1 FA40LP10	0.50	-	-	-	-	0.40	0.10
9	PC1 FA30LP20	0.50	-	-	-	-	0.30	0.20
10	PC5	-	1.00	-	-	-	-	-
11	PC5 FA30	-	0.70	-	-	-	0.30	-
12	PC5 FA50	-	0.50	-	-	-	0.50	-
13	PC5 LP10	-	0.90	-	-	-	-	0.10
14	PC5 LP20	-	0.80	-	-	-	-	0.20
15	PC5 FA20LP10	-	0.70	-	-	-	0.20	0.10
16	PC5 FA10LP20	-	0.70	-	-	-	0.10	0.20
17	PC5 FA40LP10	-	0.50	-	-	-	0.40	0.10
18	PC5 FA30LP20		0.50	-	-	-	0.30	0.20
19	PCP	-	-	1.00	-	-	-	-
20	PCP LP10	-	-	0.90	-	-	-	0.10
21	PCP LP20	-	-	0.80	-	-	-	0.20
22	PCL10	-	-	-	1.00	-	-	-

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของตัวอย่างเพสต์ ที่ใช้ในการศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและการก่อตัว(ต่อ)

ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กรัม)						
		ปูนซีเมนต์					เถ้าลอย	ผงหินปูน
		ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5	CP	CL10	CL20		
23	PCL10 FA30	-	-	-	0.70	-	0.30	-
24	PCL10 FA50	-	-	-	0.50	-	0.50	-
25	PCL20	-	-	1.00	-	-	-	-
26	PCL20 FA30	-	-	0.70	-	-	0.30	-
27	PCL20 FA50	-	-	0.50	-	-	0.50	-

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของตัวอย่างมอร์ต้าร์เพื่อทดสอบกำลังอัดประลัย ความพรุน และการต้านทานซัลเฟต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55

ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กรัม)								
		ปูนซีเมนต์					เถ้าลอย	ผงหินปูน	ทราย	น้ำ
		ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5	CP	CL10	CL20				
1	MC1	1.00	-	-	-	-	-	-	2.75	0.55
2	MC1 FA30	0.70	-	-	-	-	0.30	-	2.75	0.55
3	MC1 FA50	0.50	-	-	-	-	0.50	-	2.75	0.55
4	MC1 LP10	0.90	-	-	-	-	-	0.10	2.75	0.55
5	MC1 LP20	0.80	-	-	-	-	-	0.20	2.75	0.55
6	MC1 FA20LP10	0.70	-	-	-	-	0.20	0.10	2.75	0.55
7	MC1 FA10LP20	0.70	-	-	-	-	0.10	0.20	2.75	0.55
8	MC1 FA40LP10	0.50	-	-	-	-	0.40	0.10	2.75	0.55
9	MC1 FA30LP20	0.50	-	-	-	-	0.30	0.20	2.75	0.55

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของตัวอย่างมอร์ต้าร์เพื่อทดสอบกำลังอัดประลัย ความพรุน และการต้านทานซัลเฟต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55 (ต่อ)

ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กรัม)								
		ปูนซีเมนต์					เถ้าลอย	ผงหินปูน	ทราย	น้ำ
		ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5	CP	CL10	CL20				
10	MC5	-	1.00	-	-	-	-	-	2.75	0.55
11	MC5 FA30	-	0.70	-	-	-	0.30	-	2.75	0.55
12	MC5 FA50	-	0.50	-	-	-	0.50	-	2.75	0.55
13	MC5 LP10	-	0.90	-	-	-	-	0.10	2.75	0.55
14	MC5 LP20	-	0.80	-	-	-	-	0.20	2.75	0.55
15	MC5 FA20LP10	-	0.70	-	-	-	0.200	0.10	2.75	0.55
16	MC5 FA30LP20	-	0.70	-	-	-	0.10	0.20	2.75	0.55
17	MC5 FA40LP10	-	0.50	-	-	-	0.40	0.10	2.75	0.55
18	MC5 FA30LP20	-	0.50	-	-	-	0.30	0.20	2.75	0.55
19	MCP	-	-	1.00	-	-	-	-	2.75	0.55
20	MCP LP10	-	-	0.90	-	-	-	0.10	2.75	0.55
21	MCP LP20	-	-	0.80	-	-	-	0.20	2.75	0.55
22	MCL10	-	-	-	1.00	-	-	-	2.75	0.55
23	MCL10 FA30	-	-	-	0.70	-	0.30	-	2.75	0.55
24	MCL10 FA50	-	-	-	0.50	-	0.50	-	2.75	0.55
25	MCL20	-	-	-	-	1.00	-	-	2.75	0.55
26	MCL20 FA30	-	-	-	-	0.70	0.30	-	2.75	0.55
27	MCL20 FA50	-	-	-	-	0.50	0.50	-	2.75	0.55

ความหมายตัวสัญลักษณ์ของแต่ละส่วนผสมมีความหมายดังนี้

C1 หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้าง

C5 หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ตราช้างสีฟ้า

CP หมายถึง ปูนซีเมนต์ทนน้ำเค็ม ดินเค็ม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน ตราช้างสีน้ำตาล

CL10 หมายถึง ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10 ตราช้างสีส้ม

CL20 หมายถึง ปูนซีเมนต์ บดผสมผงหินปูนร้อยละ20

FA หมายถึง เถ้าลอย (Fly Ash) ที่เหลือจากการเผาไหม้ ของถ่านหิน จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง

LP หมายถึง ฝุ่นหินปูนขนาดความละเอียด 3 ไมโครเมตร

<u>การอ่านสัญลักษณ์</u> *

PC1	หมายถึง	เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
MC1	หมายถึง	มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
MC5	หมายถึง	มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน
PC1 L10	หมายถึง	เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10
MC1 LP10	หมายถึง	มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10
PC1 FA30	หมายถึง	เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30
MC1 FA30	หมายถึง	มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30
PC1 FA20 LP10	หมายถึง	เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10
MC1 FA20 LP10	หมายถึง	มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์

จากการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตในครั้งนี้ ได้พิจารณาผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลในหัวข้อดังต่อไปนี้คือ คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน และคุณสมบัติด้านการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์เมื่อใช้วัสดุประสานต่างชนิดกัน

4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ผงหินปูนขนาด 3 ไมโครเมตร และเถ้าลอย โดยคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับคุณสมบัติทางด้านกายภาพของวัสดุประสานที่ศึกษาได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน (Blaine fineness) ภาพถ่ายขยายของอนุภาคโดยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) และการกระจายตัวของอนุภาค (Size distribution)

4.1.1.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ผงหินปูน และเถ้าลอย พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ประเภทต่างๆที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงระหว่าง 3.11 ถึง 3.18 ซึ่งเป็นค่าทั่วไปของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยและผงหินปูนนั้นจะมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ โดยมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.46 และ 2.79 ตามลำดับ สำหรับความละเอียดโดยวิธีเบลนนั้นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (3,250 ซม.^{2}/ก.) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (3,340 ซม.^{2}/ก.) มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนความละเอียดของ

ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 มีค่าเท่ากับ 4,080 ซม.^{2}/ก. 5,150 ซม.^{2}/ก. และ 5,266 ซม.^{2}/ก. ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความละเอียดของเถ้าลอยมีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 5 คือเท่ากับ 3,550 ซม.^{2}/ก. ส่วนผงหินปูนจะมีความละเอียดมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประสานชนิดอื่น คือ 12,160 ซม.^{2} /ก.

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

ประเภทของวัสดุประสาน / รายการ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5	ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน	ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10	ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20	ผงหินปูน (3 ไมโครเมตร)	เถ้าลอย
ความถ่วงจำเพาะ	3.11	3.18	3.12	3.17	2.93	2.79	2.46
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ซม.^{2}/ ก.)	3,250	3,340	4,080	5,150	5,266	12,160	3,550

4.1.1.2 ภาพถ่ายขยายของอนุภาคโดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope : SEM

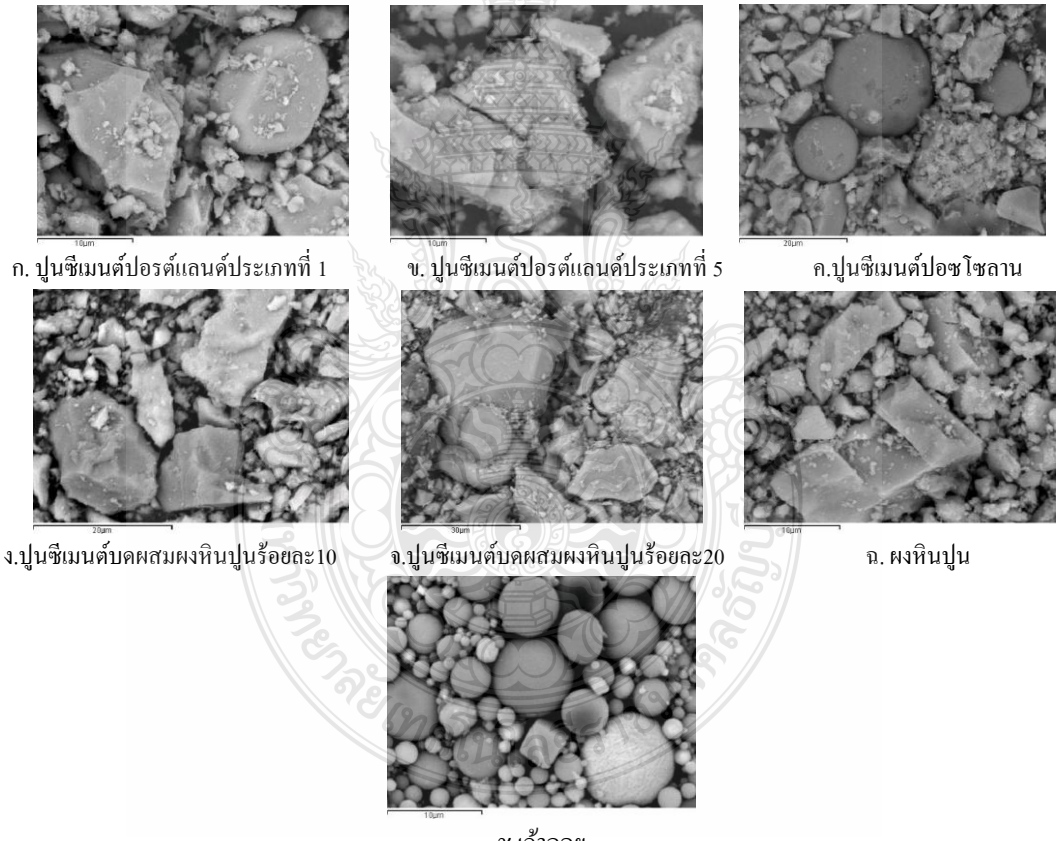
จากการถ่ายภาพขยายของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ โดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope : SEM ซึ่งขยาย 3,500 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 4.1 พบว่ารูปร่างของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 มีลักษณะคล้ายกันเป็นรูปเหลี่ยมคม ส่วนของปูนซีเมนต์ปอซโซลานนั้นจะมีลักษณะเหลี่ยมเล็กกระจายอยู่ทั่วโดยมีส่วนที่เป็นรูปร่างกลมซึ่งเป็นส่วนผสมของเถ้าลอยปนอยู่ด้วย ในขณะที่รูปร่างของอนุภาคขยายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 นั้นมีลักษณะเป็นเหลี่ยมซึ่งจะมีขนาดค่อนข้างเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 กระจายอยู่ทั่ว ทั้งนี้เพราะการบดผสมผงหินปูนซึ่งมีลักษณะเป็นรูปเหลี่ยมเช่นกัน สำหรับรูปร่างของอนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะกลมเรียบมีขนาดต่างๆกันกระจายอยู่เห็นได้ชัดเจน

4.1.1.3 การกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน

การกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ แสดงดังภาพที่ 4.2 พบว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ประมาณ 12 และ 13 ไมโครเมตร ตามลำดับและของปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ประมาณ 10 11 และ 15 ไมโครเมตร ตามลำดับ

ส่วนของเถ้าลอยมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคประมาณ 17 ไมโครเมตร ในขณะที่ของผงหินปูน มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคประมาณ 3 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่เล็กที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้

ส่วนลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสานที่ศึกษาในครั้งนี้พบว่าการกระจายของอนุภาคของผงหินปูนค่อนข้างสม่ำเสมอทั้งขนาดส่วนที่ละเอียด และส่วนที่หยาบใกล้เคียงกัน ส่วนกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน จะเห็นว่าค่อนข้างจับกลุ่มที่เหมือนกันคือ ส่วนอนุภาคส่วนที่ละเอียดมีแนวโน้มว่ามีมากกว่าส่วนที่หยาบ ยกเว้นกรณีของเถ้าลอยมีแนวโน้มว่าการกระจายตัวของอนุภาคส่วนที่หยาบจะมีมากกว่าส่วนละเอียด

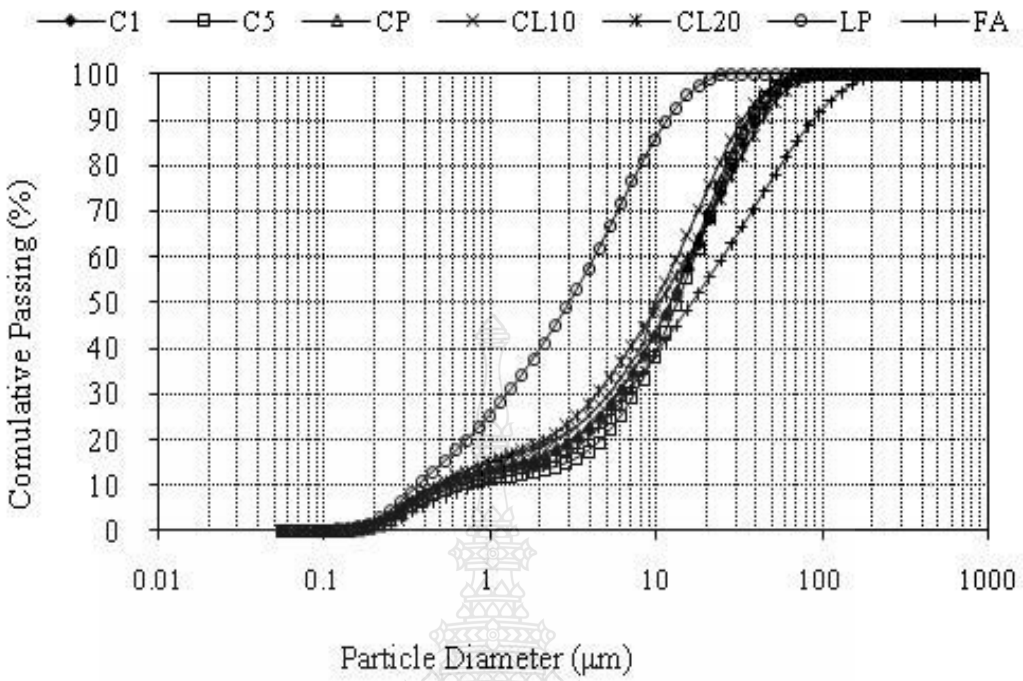


ก. ปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์ประเภทที่ 1 ข. ปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์ประเภทที่ 5 ค.ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน

ง.ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10 จ.ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ20 ฉ. ผงหินปูน

ช.เถ้าลอย

ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายขยาย 3,500 เท่าของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา



ภาพที่ 4.2 การกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

4.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

จากการทดสอบคุณสมบัติทางเคมี โดยวิธี X-ray fluorescence spectrometry : XRF ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ผงหินปูน และเถ้าลอย ดังตารางที่ 4.2 พบว่า SiO_2 ของเถ้าลอยมีค่าค่อนข้างสูงคือเท่ากับร้อยละ 40.93 เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ซึ่งเท่ากับร้อยละ 19.51 และ 21.87 ตามลำดับ ในขณะที่ของผงหินปูนมี SiO_2 น้อยมากคือเท่ากับร้อยละ 0.46 ในกรณีของ Al_2O_3 ก็เช่นกัน โดยที่ของเถ้าลอยเท่ากับร้อยละ 22.42 ในขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 และผงหินปูนเท่ากับร้อยละ 4.97 3.87 และ 0.06 ตามลำดับ และกรณีของ Fe_2O_3 ก็ทำนองเดียวกันคือ เถ้าลอย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และผงหินปูนมีค่าเท่ากับร้อยละ 13.64 3.78 4.34 และ 0.03 ตามลำดับ ส่วนในกรณี CaO นั้นพบว่าของเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และผงหินปูน โดย มีค่าเท่ากับร้อยละ 13.63 (เถ้าลอย) ร้อยละ 65.38 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) ร้อยละ 64.56 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5) และร้อยละ 55.25 ซึ่งเป็นของผงหินปูน

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงออกไซด์หลักทั้ง 4 (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO) ของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ซึ่งเป็นการผสมผงหินปูนและเถ้าลอยลงในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผลก็จะให้ค่าออกไซด์หลักไปในทิศทางของการเพิ่มเถ้าลอยหรือผงหินปูนกล่าวคือ เช่นกรณีปูนซีเมนต์ปอซโซลานซึ่งเป็นการผสมเถ้าลอยลงไป ดังนั้นจึงทำให้ SiO_2 ของปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทั้งนี้เป็นเพราะ SiO_2 ของเถ้าลอยมีมากจึงมีผลให้ SiO_2 ในปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีค่าสูงขึ้นเป็นต้น ในกรณีของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนจะให้ผลในทิศทางเดียวกันเช่น CaO ในผงหินปูน (ร้อยละ55.25) ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ร้อยละ 65.38) เล็กน้อย ดังนั้นเมื่อบดผสมเป็นปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนจึงทำให้ CaO ในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนมีค่าต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เล็กน้อยเช่นกัน คือของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 มี CaO เท่ากับร้อยละ 63.29 และ 62.67 ตามลำดับ

ในส่วนออกไซด์รองอื่นๆได้แก่ MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 , TiO_2 , P_2O_3 , Free Lime และสารที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue %) นอกเหนือจากออกไซด์หลักที่กล่าวมาแล้ว พบว่าของปูนซีเมนต์แต่ละชนิดรวมทั้งเถ้าลอยและผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ยกเว้นกรณีของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากเผา (Loss on Ignition ; LOI) ของผงหินปูนค่อนข้างสูงคือร้อยละ 43.79 ในขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และเถ้าลอยเท่ากับร้อยละ 2.27 , 1.59 และ 0.46 ตามลำดับ ดังนั้นจากการที่ LOI ของผงหินปูนมีค่อนข้างสูงจึงทำให้ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 มีค่าสูงตามไปด้วยคือร้อยละ 7.20 และ 9.93 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

สารประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5	ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน	ปูนซีเมนต์ บดผสมผงหินปูน ร้อยละ 10	ปูนซีเมนต์ บดผสมผงหินปูน ร้อยละ 20	ผงหินปูน (3 ไมโครเมตร □	เถ้าลอย
SiO_2	19.51	21.87	24.98	17.48	16.20	0.46	40.93
Al_2O_3	4.97	3.87	9.25	4.49	4.13	0.06	22.42
Fe_2O_3	3.78	4.34	5.97	3.36	3.01	0.03	13.64
CaO	65.38	64.56	52.65	63.29	62.67	55.25	13.63
MgO	1.08	1.11	1.62	1.02	0.98	0.37	2.93
Na_2O	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.89
K_2O	0.47	0.24	0.78	0.44	0.43	0.01	2.39
SO_3	2.16	2.08	2.48	2.35	2.37	<0.01	1.92
TiO_2	0.25	0.21	0.28	0.23	0.17	<0.01	0.43
P_2O_3	0.07	0.05	0.08	0.07	0.06	0.01	0.15
Free Lime	1.00	0.76	1.02	0.78	0.61	-	0.22
LOI	2.27	1.59	1.85	7.20	9.93	43.79	0.46
Insoluble Residue %	0.28	0.23	6.28	0.47	0.38	-	-

4.2 คุณสมบัติทางด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน

คุณสมบัติทางด้านซีเมนต์ (Cementitious properties) ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบไปด้วย ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal consistency) ของเพสต์ การก่อตัว (Setting time) ของเพสต์ การไหลแผ่ (Flow) ของมอร์ต้าร์ ความพรุน (Porosity) ที่อายุ 28 วันของมอร์ต้าร์ และกำลังอัดประลัย (Compressive strength; fc') ของมอร์ต้าร์ ที่อายุ 28 วัน และ 365 วัน

4.2.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

ผลการศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ของวัสดุประสานทั้งหมดจำนวน 27 ตัวอย่าง สัดส่วนผสม โดยได้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.3 และ ภาพที่ 4.3

จากการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 และประเภทที่ 5 มีค่าใกล้เคียงกันคือ ร้อยละ 25.20 และ 25.60 ตามลำดับ ส่วนปูนซีเมนต์ปอซโซลาน

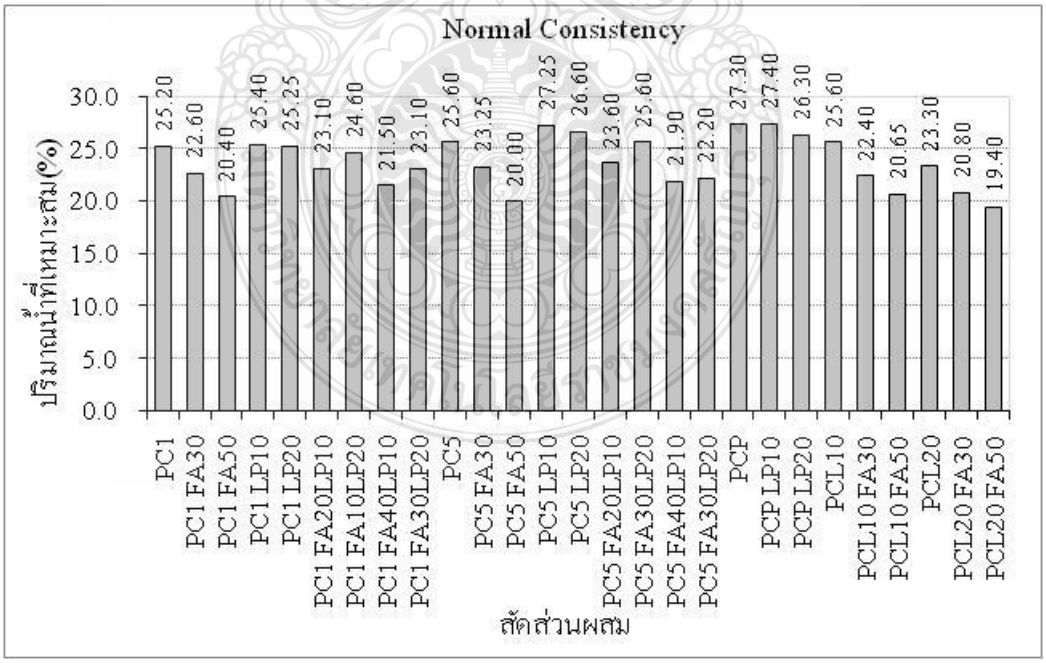
มีปริมาณน้ำที่เหมาะสมร้อยละ 27.30 ซึ่งมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 อาจเป็นเพราะปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีความละเอียดมากกว่าจึงทำให้มีพื้นที่ผิวมากกว่าทำให้มีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมมากกว่า โดยที่ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 มีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 25.60 และ 23.30 ตามลำดับซึ่งไม่แตกต่างจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มากนัก ส่วนกรณีของเพสต์เมื่อแทนที่เถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่อแทนที่เถ้าลอยจะได้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมต่ำกว่ากรณีไม่แทนที่โดยเฉพาะกรณีแทนที่ในปริมาณมากขึ้น จะได้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมยิ่งต่ำลง ทั้งนี้เป็นเพราะลักษณะของอนุภาคที่กลมของเถ้าลอยช่วยในการไหลลื่นจึงทำให้มีความต้องการน้ำน้อย ส่วนกรณีแทนที่ผงหินปูนทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลานพบว่าจะให้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมใกล้เคียงหรือมีแนวโน้มที่สูงขึ้นทั้งนี้เป็นเพราะผงหินปูนที่แทนที่มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้มีความต้องการน้ำมากขึ้น สำหรับปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์แทนที่ทั้งเถ้าลอยและผงหินปูนก็จะให้ผลสอดคล้องกับการแทนที่เถ้าลอย และแทนที่ผงหินปูน กล่าวคือถ้าปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยมากจะส่งผลให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มีค่าต่ำลง

ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ของสัดส่วนผสมต่างๆของวัสดุประสานที่ศึกษาในครั้งนี้

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (ร้อยละ)
1	PC1	25.20
2	PC1 FA30	22.60
3	PC1 FA50	20.40
4	PC1 LP10	25.40
5	PC1 LP20	25.25
6	PC1 FA20LP10	23.10
7	PC1 FA10LP20	24.60
8	PC1 FA40LP10	21.50
9	PC1 FA30LP20	23.10
10	PC5	25.60
11	PC5 FA30	23.25
12	PC5 FA50	20.00
13	PC5 LP10	27.25

ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ของสัดส่วนผสมต่างๆของวัสดุประสานที่ศึกษาในครั้งนี้ (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (ร้อยละ)
14	PC5 LP20	26.60
15	PC5 FA20LP10	23.60
16	PC5 FA30LP20	25.60
17	PC5 FA40LP10	21.90
18	PC5 FA30LP20	22.20
19	PCP	27.30
20	PCP LP10	27.40
21	PCP LP20	26.30
22	PCL10	25.60
23	PCL10 FA30	22.40
24	PCL10 FA50	20.65
25	PCL20	23.30
26	PCL20 FA30	20.80
27	PCL20 FA50	19.40



ภาพที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ของสัดส่วนผสมต่างๆของวัสดุประสาน

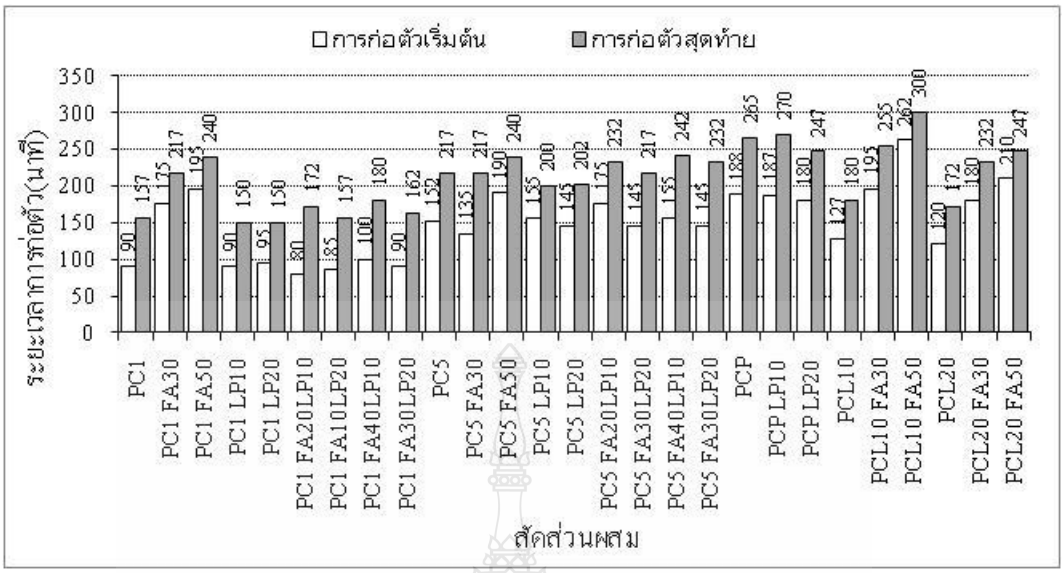
4.2.2 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

ตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.4 แสดงการก่อตัวของเพสต์ของวัสดุประสานที่ศึกษาในครั้งนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 27 สัดส่วนผสม โดยเปรียบเทียบระหว่างเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 และเพสต์ของการแทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์บดผสมปอซโซลานและปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน โดยศึกษาทั้งการก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) และการก่อตัวขั้นสุดท้าย (Final setting time)

จากการศึกษาพบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน เท่ากับ 104 และ 152 นาที ส่วนการก่อตัวขั้นสุดท้ายเท่ากับ 157 และ 217 นาที ตามลำดับ สำหรับปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 185 , 127 และ 120 นาที ส่วนการก่อตัวขั้นสุดท้ายเท่ากับ 180 และ 172 นาทีตามลำดับ ส่วนกรณีของเพสต์เมื่อแทนที่เถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อแทนที่เถ้าลอยจะได้ระยะเวลาการก่อตัวที่มากกว่ากรณีไม่แทนที่เช่นเดียวกับของปูนซีเมนต์ปอซโซลาน โดยเฉพาะกรณีแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวยิ่งเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่เถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง อีกทั้งเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานซึ่งการทำปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ส่วนกรณีแทนที่ผงหินปูนทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลานพบว่าจะได้ระยะเวลาการก่อตัวที่มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะผงหินปูนมีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้มีการกระจายตัวของวัสดุประสานดีขึ้นส่งผลให้มีการทำปฏิกิริยาดีขึ้น สำหรับการก่อตัวของเพสต์แทนที่ทั้งเถ้าลอยและผงหินปูนจะให้ผลสอดคล้องกับการแทนที่เถ้าลอยและแทนที่ผงหินปูน

ตารางที่ 4.4 การก่อตัวของเพสต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
1	PC1	90	157
2	PC1 FA30	175	217
3	PC1 FA50	195	240
4	PC1 LP10	90	150
5	PC1 LP20	95	150
6	PC1 FA20LP10	80	172
7	PC1 FA10LP20	85	157
8	PC1 FA40LP10	100	180
9	PC1 FA30LP20	90	162
10	PC5	152	217
11	PC5 FA30	135	217
12	PC5 FA50	190	240
13	PC5 LP10	155	200
14	PC5 LP20	145	202
15	PC5 FA20LP10	175	232
16	PC5 FA10LP20	145	217
17	PC5 FA40LP10	155	242
18	PC5 FA30LP20	145	232
19	PCP	188	265
20	PCP LP10	187	270
21	PCP LP20	180	247
22	PCL10	127	180
23	PCL10 FA30	195	255
24	PCL10 FA50	262	300
25	PCL20	120	172
26	PCL20 FA30	180	232
27	PCL20 FA50	210	247



ภาพที่ 4.4 การก่อตัวของเพสต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

4.2.3 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์

ตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.5 แสดงค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ที่ศึกษาในครั้งนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 27 สัดส่วนผสม โดยเปรียบเทียบระหว่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 และการแทนที่เถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ดังกล่าว โดยมอร์ต้าร์ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

จากการศึกษาพบว่าค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าใกล้เคียงกันคือ 112 และ 110 ตามลำดับ สำหรับปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 พบว่าค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์เท่ากับ 110.2 และ 115.4 ตามลำดับซึ่งมีค่าไม่แตกต่างจากค่าการไหลแผ่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนกรณีค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกล่าวคือ เมื่อแทนที่เถ้าลอยจะได้ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ที่มากกว่ากรณีไม่แทนที่ เช่นเดียวกับกรณีการไหลแผ่ของเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอซโซลาน โดยเฉพาะกรณีแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะลักษณะของอนุภาคที่กลมของเถ้าลอยช่วยในการไหลลื่นทำให้การยุบตัวเพิ่มขึ้น สำหรับกรณีแทนที่ผงหินปูนพบว่าทั้งในปูนซีเมนต์

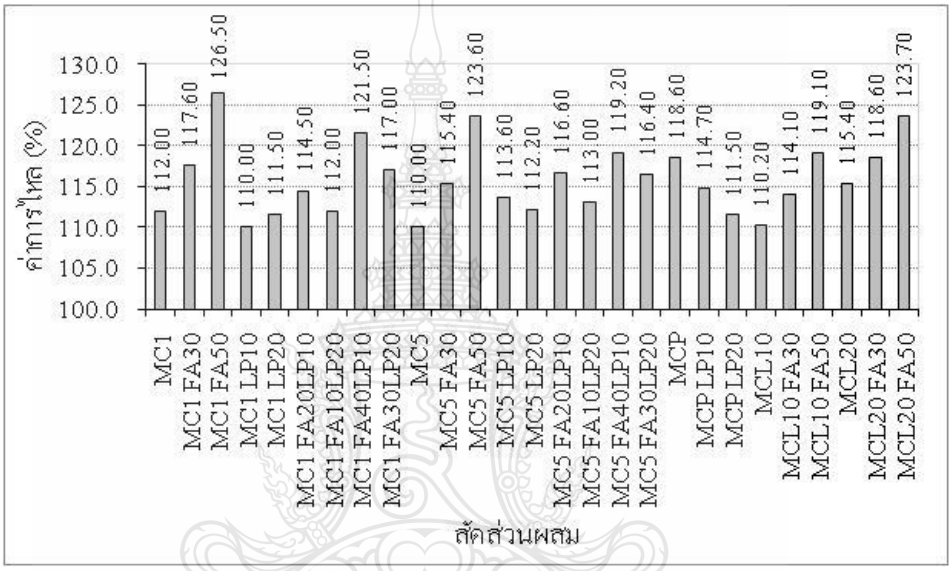
ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลาน จะให้ค่าใกล้เคียงหรือมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะผงหินปูนที่แทนที่มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ทำให้มีความต้องการน้ำมากขึ้นมอร์ต้าร์จึงมีสภาพเหนียว สำหรับค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์แทนที่ทั้งเถ้าลอยและผงหินปูนจะให้ผลสอดคล้องกับการแทนที่เถ้าลอย และแทนที่ผงหินปูน

ตารางที่ 4.5 การทดสอบค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	ค่าการไหลแผ่ (ร้อยละ)
1	MC1	112.0
2	MC1 FA30	117.6
3	MC1 FA50	126.5
4	MC1 LP10	110.0
5	MC1 LP20	111.5
6	MC1 FA20LP10	114.5
7	MC1 FA10LP20	112.0
8	MC1 FA40LP10	121.5
9	MC1 FA30LP20	117.0
10	MC5	110.0
11	MC5 FA30	115.4
12	MC5 FA50	123.6
13	MC5 LP10	113.6
14	MC5 LP20	112.2
15	MC5 FA20LP10	116.6
16	MC5 FA10LP20	113.0
17	MC5 FA40LP10	119.2
18	MC5 FA30LP20	116.4
19	MCP	118.6
20	MCP LP10	114.7
21	MCP LP20	111.5
22	MCL10	110.2
23	MCL10 FA30	114.1

ตารางที่ 4.5 การทดสอบค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	ค่าการไหลแผ่ (ร้อยละ)
24	MCL10 FA50	119.1
25	MCL20	115.4
26	MCL20 FA30	118.6
27	MCL20 FA50	123.7



ภาพที่ 4.5 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

4.2.4 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์

ตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.6 แสดงค่ากำลังอัดประลัย (Compressive strength) ของมอร์ต้าร์ที่ศึกษาในครั้งนี้ โดยศึกษากำลังอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 50x50x50 มม. ซึ่งมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลานปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 และการแทนที่เถ้าลอย และผงหินปูนในปูนซีเมนต์ดังกล่าว ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 โดยศึกษาที่อายุของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ 28 วัน และ 365 วัน

จากการศึกษาพบว่า กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วนที่อายุ 28 วัน มีค่า 447 และ 510 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ สำหรับปูนซีเมนต์ปอซโซลานปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 มีค่า 373 ,427 และ 383 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ

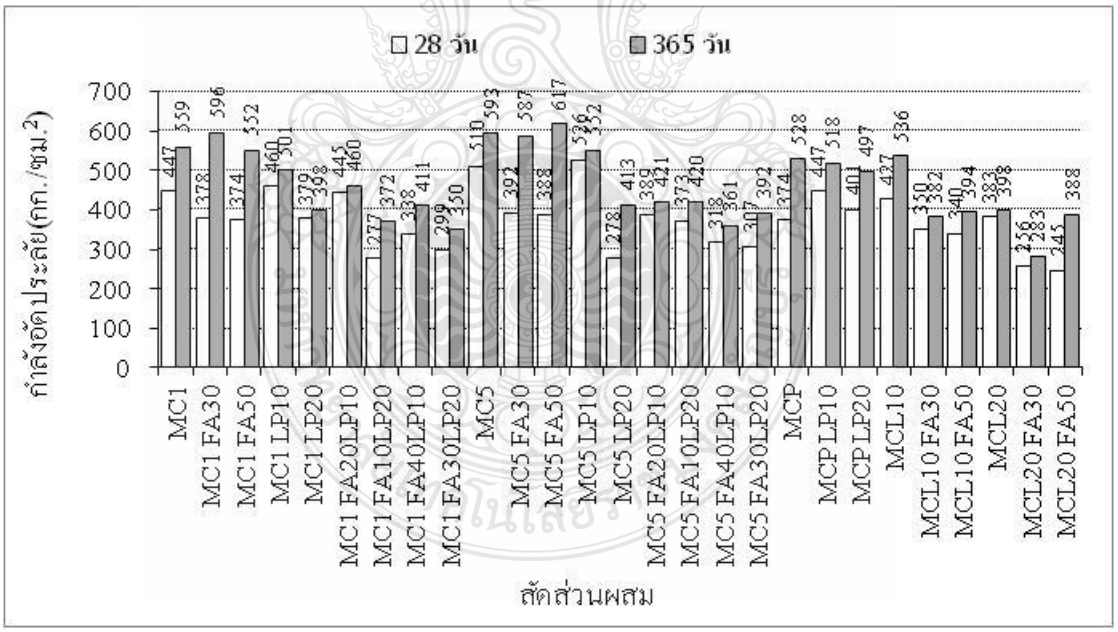
ส่วนกรณีของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่เถ้าลอยทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกล่าวคือ เมื่อแทนที่เถ้าลอยจะได้ค่ากำลังอัดที่น้อยกว่ากรณีไม่แทนที่โดยเฉพาะกรณีแทนที่ในปริมาณมากขึ้นค่ากำลังอัดยิ่งลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะการลดปริมาณปูนซีเมนต์ ส่วนกรณีแทนที่ผงหินปูนพบว่าทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลานได้ค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงหรือมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย สำหรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์แทนที่ทั้งเถ้าลอยและผงหินปูนจะให้ผลสอดคล้องกับการแทนที่เถ้าลอย และแทนที่ผงหินปูนในขณะที่กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 365 วัน ทุกสัดส่วนผสมมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันและมีการพัฒนากำลังอัดในอัตราที่สูงขึ้นในทุกสัดส่วนผสม โดยเฉพาะในตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 พบว่ามีแนวโน้มให้ค่าการพัฒนากำลังอัดประลัยในอัตราส่วนสูงขึ้นทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นมาก

ตารางที่ 4.6 กำลังอัดประลัยตัวอย่างมอร์ต้าร์ ที่อายุ 28 วันและ 365 วัน

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	กำลังอัดประลัย (กก./ซม.^{2})	
		28 วัน	365 วัน
1	MC1	447	559
2	MC1 FA30	378	596
3	MC1 FA50	374	552
4	MC1 LP10	460	501
5	MC1 LP20	379	398
6	MC1 FA20LP10	445	460
7	MC1 FA10LP20	277	372
8	MC1 FA40LP10	338	411
9	MC1 FA30LP20	299	350
10	MC5	510	593
11	MC5 FA30	392	587
12	MC5 FA50	388	617
13	MC5 LP10	526	552
14	MC5 LP20	278	413
15	MC5 FA20LP10	389	421
16	MC5 FA10LP20	373	320

ตารางที่ 4.6 กำลังอัดประลัยตัวอย่างมอร์ต้าร์ ที่อายุ 28 วันและ 365 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	กำลังอัดประลัย (กก./ซม.^{2})	
		28 วัน	365 วัน
17	MC5 FA40LP10	318	361
18	MC5 FA30LP20	307	392
19	MCP	374	528
20	MCP LP10	497	518
21	MCP LP20	401	497
22	MCL10	427	536
23	MCL10 FA30	350	282
24	MCL10 FA50	340	394
25	MCL20	383	398
26	MCL20 FA30	256	283
27	MCL20 FA50	245	388



ภาพที่ 4.6 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ ที่อายุ 28 วัน และ 365วัน

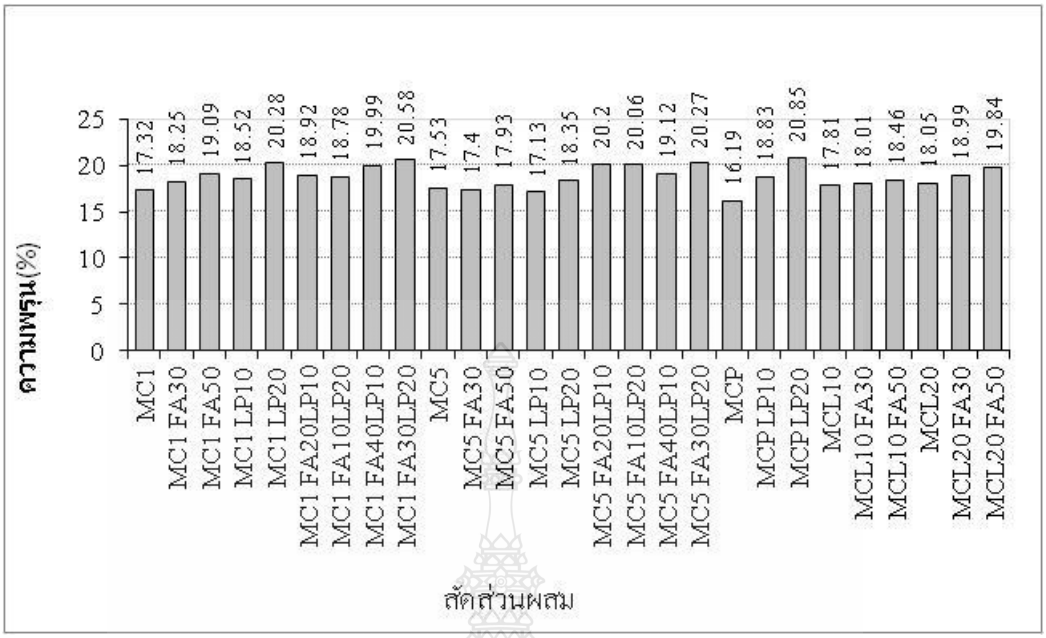
4.2.5 ความพรุน(Porosity) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์

ตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.7 แสดงความพรุนของมอร์ต้าร์ที่ศึกษาในครั้งนี้ โดยศึกษาความพรุนของตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 10x10x10 ซม.^{3} ซึ่งมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 และการแทนที่เถ้าลอย และผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ดังกล่าว ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55โดยศึกษาความพรุนของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วัน

จากการศึกษาพบว่า ความพรุนของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ล้วน และประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าใกล้เคียงกันคือ ร้อยละ 17.32 และ 17.53 ตามลำดับ สำหรับปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 พบว่าความพรุนของมอร์ต้าร์เท่ากับร้อยละ 16.19, 17.81 และ 18.05 เซนติเมตร ส่วนกรณีของมอร์ต้าร์มื่อแทนที่เถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อแทนที่เถ้าลอยจะได้ความพรุนสูงกว่ากรณีไม่แทนที่โดยเฉพาะกรณีแทนที่ในปริมาณมากขึ้น จะได้ค่าความพรุนยิ่งสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะความพรุนของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ศึกษานั้นใช้ที่อายุ 28 วัน ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยยังเกิดไม่เต็มที่ จึงทำให้มอร์ต้าร์มีช่องว่างมากกว่ากรณีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ส่วนกรณีแทนที่ผงหินปูนพบว่าทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลานจะให้ค่าความพรุนใกล้เคียงหรือมีแนวโน้มที่ลดลงทั้งนี้เป็นเพราะผงหินปูนที่แทนที่มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้มีการแทนที่ช่องว่างในมอร์ต้าร์ดีขึ้น สำหรับค่าความพรุนของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ทั้งเถ้าลอยและผงหินปูนจะให้ผลสอดคล้องกับการแทนที่ทั้งสอง กล่าวคือเมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าลอยมีแนวโน้มจะให้ค่าความพรุนมากกว่ากรณีไม่แทนที่โดยเฉพาะเมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้น แนวโน้มจะให้ค่าความพรุนที่สูงขึ้นเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว

ตารางที่ 4.7 ความพรุนของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	ความพรุน (ร้อยละ)
1	MC1	17.32
2	MC1 FA30	18.25
3	MC1 FA50	19.09
4	MC1 LP10	18.52
5	MC1 LP20	20.28
6	MC1 FA20LP10	18.92
7	MC1 FA10LP20	18.78
8	MC1 FA40LP10	19.99
9	MC1 FA30LP20	20.58
10	MC5	17.53
11	MC5 FA30	17.40
12	MC5 FA50	17.93
13	MC5 LP10	17.13
14	MC5 LP20	18.35
15	MC5 FA20LP10	20.20
16	MC5 FA10LP20	20.06
17	MC5 FA40LP10	19.12
18	MC5 FA30LP20	20.27
19	MCP	16.19
20	MCP LP10	18.83
21	MCP LP20	20.85
22	MCL10	17.81
23	MCL10 FA30	18.01
24	MCL10 FA50	18.46
25	MCL20	18.05
26	MCL20 FA30	18.99
27	MCL20 FA50	19.84



ภาพที่ 4.7 ความพรุนที่อายุ 28 วัน ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ศึกษาในครั้งนี้โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

4.3 การต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์

การต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในครั้งนี้จะพิจารณาถึงผลกระทบของชนิดและการแทนที่ของวัสดุประสาน และผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟต

4.3.1 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต

จากผลของการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อการขยายตัวคือ ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน และผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟต โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.3.1.1 ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน เถ้าลอยและผงหินปูน (3 ไมโครเมตร)โดยผงหินปูนใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

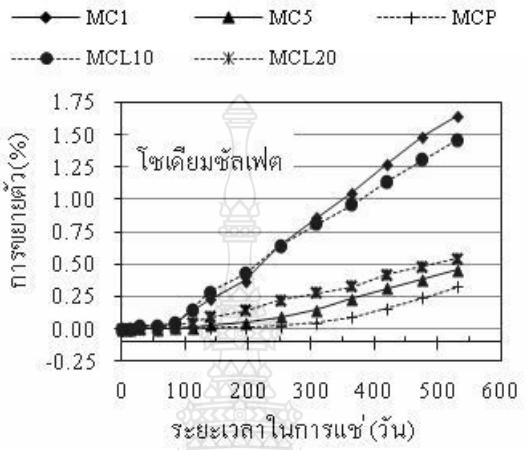
ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ซึ่งแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้าลอยจะใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน ในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก สำหรับการแทนที่ผงหินปูนร่วมกับเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 5 นั้น ได้ใช้อัตราส่วนเถ้าลอย ต่อ ผงหินปูนดังนี้ คือ เถ้าลอยร้อยละ10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ20 , เถ้าลอยร้อยละ20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ10 , เถ้าลอยร้อยละ40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ10 และ เถ้าลอยร้อยละ30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ20 (โดยทุกสัดส่วนการแทนที่ใช้แทนโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

ก) กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

- *พิจารณาในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และ ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนล้วน*

ภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์(ในที่นี้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน W/B เท่ากับ 0.55 ทุกอัตราส่วนผสม) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน(ร้อยละ10และร้อยละ20) ล้วน พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ล้วน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 จึงทำให้เกิดปริมาณยิบซั่มและ Ettringite น้อยกว่า ส่วนการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานจะมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และ ประเภทที่ 5 ล้วน เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีส่วนผสมของเถ้าลอยทำให้มีปริมาณ C_3A น้อยลงกว่าตัวอย่างของปูนซีเมนต์ล้วน รวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ มีผลให้เกิดปริมาณ ยิบซั่มที่น้อยลง ส่วนในกรณีของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10 ให้ค่าการขยายตัวน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนเล็กน้อย แต่มีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ในขณะที่ตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ให้ค่าการขยายตัวที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ การแทนที่ด้วยผงหินปูน เป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงจึงทำให้มีปริมาณ C_3A น้อย มีผลให้การขยายตัวน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนแต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างของมอร์ต้าร์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 พบว่าการบดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าของการบดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ค่อนข้างเด่นชัดทั้งนี้อาจเป็นเพราะการบดผสมด้วยร้อยละ 20 นั้นนอกจากจะช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงมากแล้วแต่ความพรุนยังมีค่ามากกว่าการบดผสมร้อยละ 10

กล่าวคือมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 18.05 ในขณะที่ของการบดผสมร้อยละ 10 มีค่าความพรุนเท่ากับร้อยละ 17.81 ดังนั้นทำให้มีว่างสำหรับการขยายตัวของยิบซั่มและ Ettringite ได้มากกว่ากรณีเมื่อบดผสมด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 อย่างชัดเจน



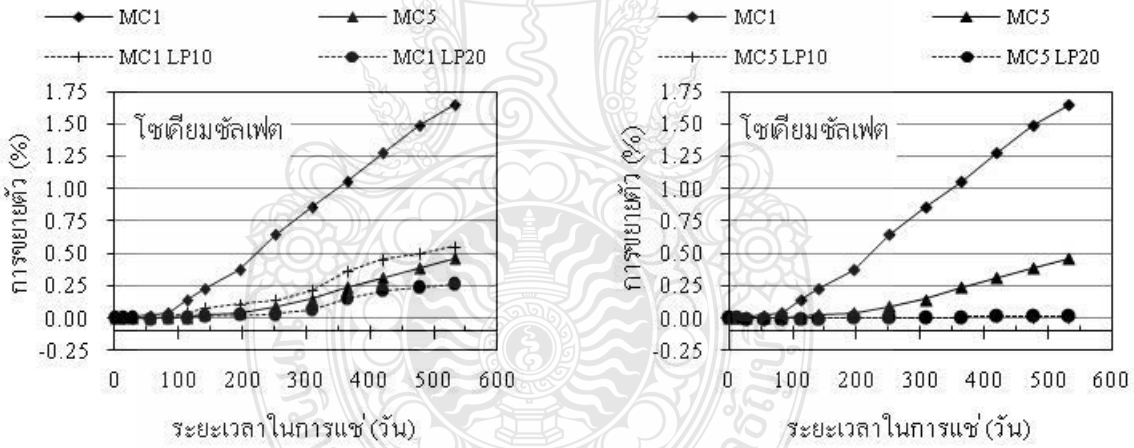
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน ล้วน

- *วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5*

ภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (ภาพที่ 4.9 ก.) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ล้วน โดยตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มีแนวโน้มใกล้เคียงหรือมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ในขณะที่แทนที่ร้อยละ 20 มีค่าการขยายตัวน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูนเป็นการเติมเต็มและลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง จึงทำให้สารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ยาก และลดปริมาณ C_3A ลง จึงทำให้เกิด Ettringite น้อยลง และในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการขยายตัวของ

ตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ก็ให้ผลในทิศทางเดียวกันกับการบดผสมผงหินปูน กล่าวคือการขยายตัวของการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าเมื่อแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 20 ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแล้วคือการแทนที่ร้อยละ 20 จะเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้มากกว่าพร้อมกับมีความพรุนมากกว่าคือเท่ากับร้อยละ 20.28 ในขณะที่แทนที่ร้อยละ 10 มีค่าความพรุนเท่ากับร้อยละ 18.52 ซึ่งน้อยกว่าจึงทำให้มีที่ว่างน้อยกว่าสำหรับการขยายตัวของยิบซั่มและ Ettringite การขยายตัวในการแทนที่ร้อยละ 10 จึงมากกว่า

สำหรับการแทนที่ด้วยผงหินปูนในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 (ภาพที่ 4.9 ข.) พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกับในการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กล่าวคือ การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผงหินปูนจะมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 5 ล้วน เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว รวมทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีปริมาณ C_3A น้อยด้วย จึงทำให้การขยายตัวมีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 หรือร้อยละ 20



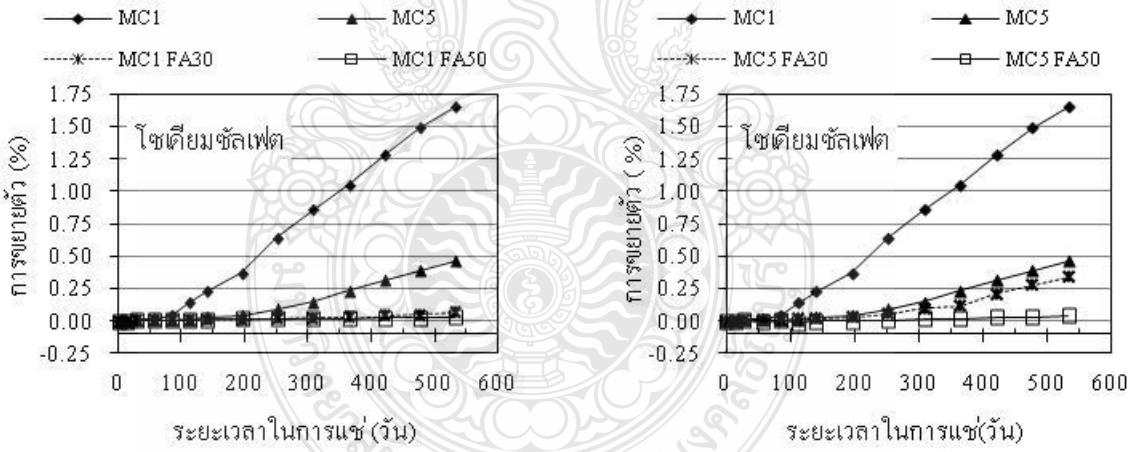
ก. แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข. แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน

- *วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5*

ภาพที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 50 (ภาพที่ 4.10 ก.)มีค่าน้อยกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ รวมทั้งการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงจึงเป็นการลดปริมาณ C_3A ด้วย

สำหรับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 (ภาพที่ 4.10 ข.) พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกับในการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กล่าวคือ การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยจะมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 5 ล้วน เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

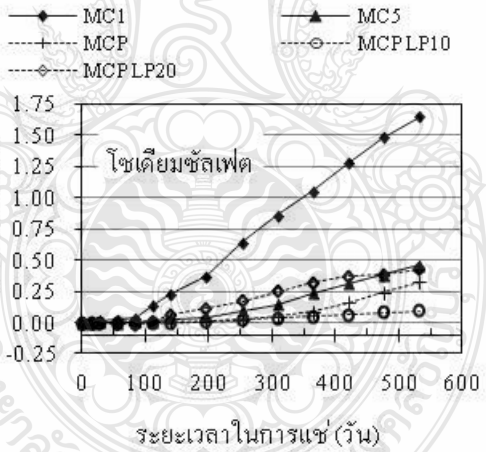


ก. แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข. แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย

- *วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอซโซลาน*

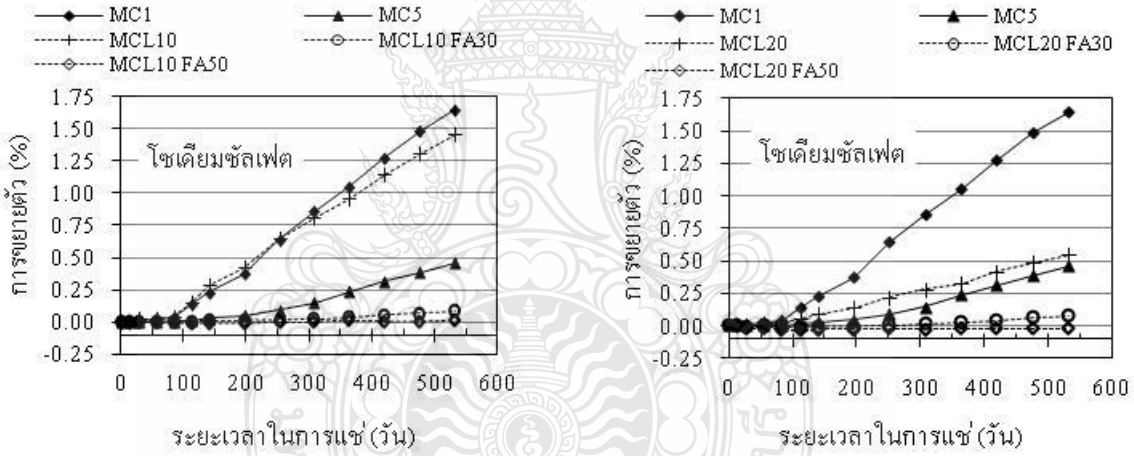
ภาพที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน และปูนซีเมนต์ปอซโซลานที่แทนที่ด้วยผงหินปูน พบว่า การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่ด้วยผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอซโซลานร้อยละ20 มีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วนเล็กน้อย โดยมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน แต่เมื่อแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 จะให้ค่าการขยายตัวน้อยกว่าทั้งของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูนเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงจำทำให้ลด ปริมาณ C_3A ลง จึงทำให้เกิด Ettringite น้อยลง โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้นจึงทำให้การขยายตัวน้อยลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งพร้อมทั้งปูนซีเมนต์ปอซโซลานก็ช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์แล้วด้วย รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานยังช่วยลด $Ca(OH)_2$ อีกด้วย



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วนและปูนซีเมนต์ปอซโซลานที่แทนที่ด้วยผงหินปูน

- *วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ ร้อยละ 20*

ภาพที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนล้วน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10 และ 20 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้งของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 50 จะมีค่าน้อยกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเป็นการลดปริมาณซีเมนต์ลงจึงช่วยลดปริมาณ C_3A และปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยลด $Ca(OH)_2$ จึงทำให้เกิด Ettringite น้อยลงดังที่กล่าวมาแล้ว

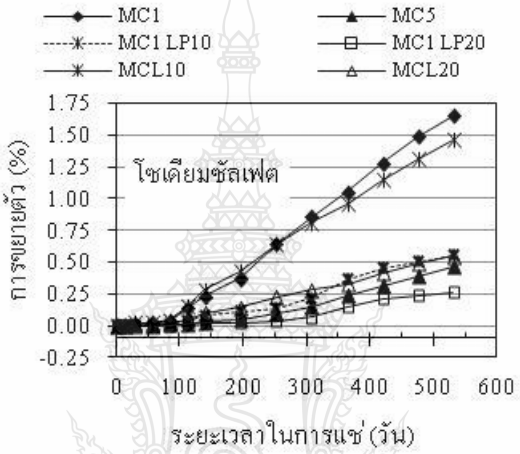


ก. แทนที่ในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10 ข. แทนที่ในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20

ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ล้วน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10 และ 20 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย

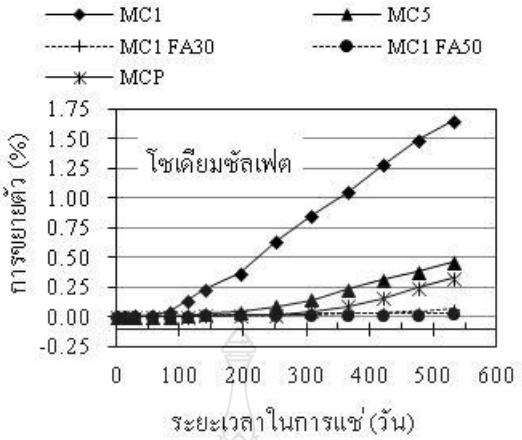
จากภาพที่ 4.13 เป็นการเปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ระหว่างการบดผสมผงหินปูนและการแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าการแทนที่ด้วยผงหินปูนมีแนวโน้มทำให้การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าน้อยกว่าเมื่อบดผสมผง

หินปูนโดยพิจารณาที่การบดผสมและการแทนที่ด้วยผงหินปูนในปริมาณที่เท่ากัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการบดผสมผงหินปูนกับการแทนที่ผงหินปูนในปริมาณเท่ากันส่งผลให้ค่าความพรุนที่บดผสมมีค่าน้อยกว่า กล่าวคือเมื่อบดผสมร้อยละ 10 มีค่าความพรุนเท่ากับร้อยละ 17.82 ในขณะที่การแทนที่ร้อยละ 10 มีค่าเท่ากับ 18.52 ซึ่งเช่นเดียวกันกับการบดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 มีค่าความพรุนร้อยละ 18.05 ซึ่งต่ำกว่าเมื่อแทนที่ร้อยละ 20 (ร้อยละ 20.28) ดังนั้นเมื่อความพรุนมีค่าน้อยกว่าจึงทำให้มีที่ว่างสำหรับการขยายตัวของยิบซั่มและ Ettringite น้อย การขยายตัวจึงเกิดขึ้นมากกว่า



ภาพที่ 4.13 เปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตระหว่างปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน

ส่วนภาพที่ 4.14 เป็นการเปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ระหว่างการบดผสมกับการแทนที่ของเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ดังกล่าวมีค่าไม่แตกต่างกันซึ่งไม่เหมือนกับกรณีของการบดผสมและการแทนที่ด้วยผงหินปูน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานส่งผลที่มากกว่าค่าความพรุนของตัวอย่างมอร์ต้าร์จึงทำให้การขยายตัวมาจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลาน มากกว่าซึ่งมีในปริมาณที่เท่ากับของระหว่างการบดผสมและการแทนที่ จึงทำให้ค่าการขยายตัวไม่แตกต่างกัน

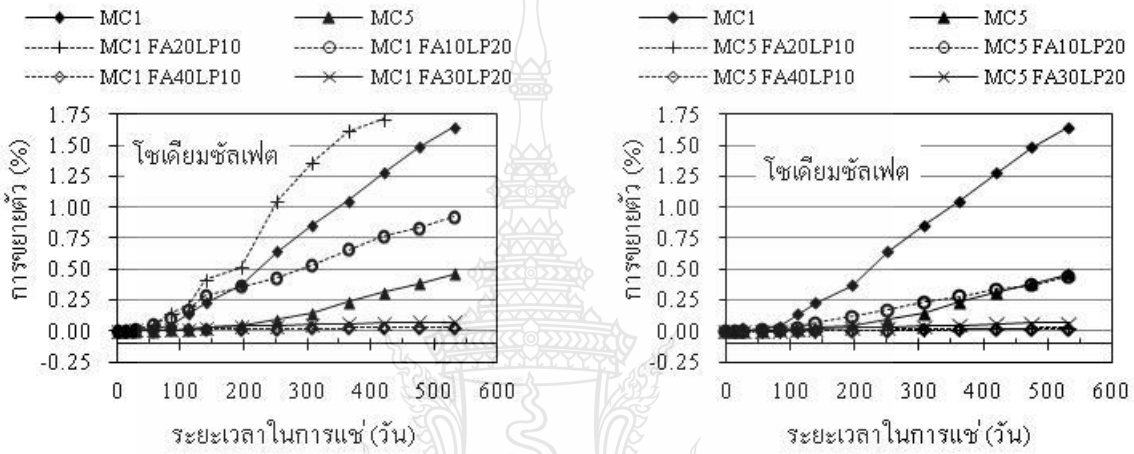


ภาพที่ 4.14 เปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตระหว่างปูนซีเมนต์ปอซโซลานกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย

- *วัสดุประสานร่วมสามชนิด (Ternary) เมื่อแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5*

ภาพที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน พบว่า (ภาพที่ 4.15ก) การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ที่แทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนปริมาณร้อยละ 10 และ ร้อยละ 20 (MC1FA20LP10 และ MC1FA10LP20) จะมีค่าค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์อื่นๆ โดยเฉพาะสัดส่วน MC1FA20LP10 มีค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ค่อนข้างมาก ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 13.63) ในปริมาณที่ต่ำผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่ช่วยลด $Ca(OH)_2$ ได้น้อย ในขณะที่การเพิ่ม $Ca(OH)_2$ จากเถ้าลอยที่มี CaO สูง จึงทำให้เกิด Ettringite มากขึ้น แต่เมื่อแทนที่เถ้าลอยดังกล่าวในปริมาณที่สูง(ร้อยละ 30 และ50) กลับให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์น้อยลง(ซึ่งน้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยลด $Ca(OH)_2$ได้มากซึ่งผลดังกล่าวก็สอดคล้องกับการศึกษาของปิติศานต์และคณะ[3] แต่ในส่วนของผงหินปูนที่แทนที่นั้นก็มีส่วนช่วยเติมเต็มช่องว่าง แต่อาจจะมีผลต่อกลไกการทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟตไม่เด่นชัดเท่ากับการแทนที่ด้วยเถ้าลอย ส่วนเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 (ภาพที่ 4.13 ข.) ก็มี

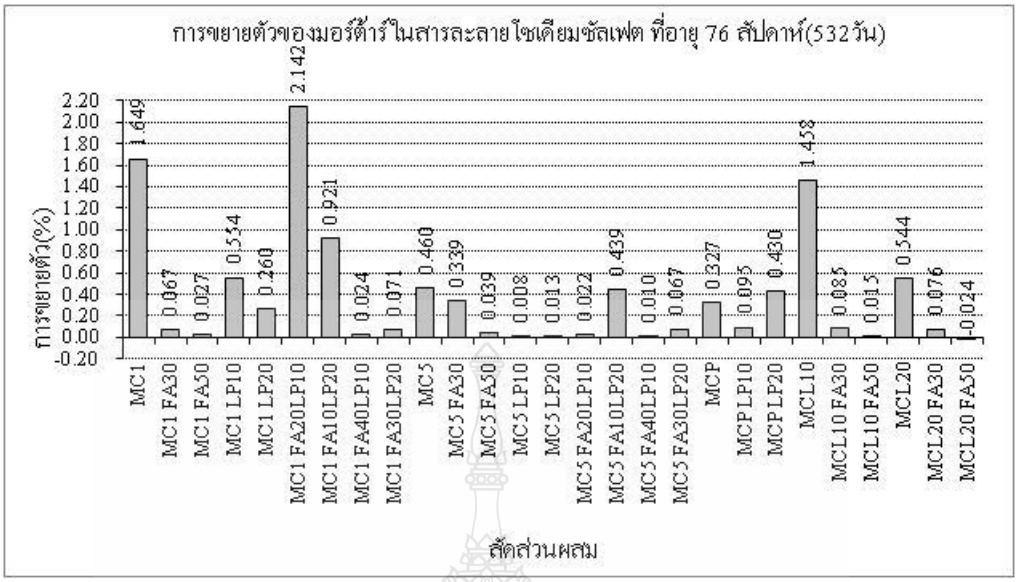
แนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่ทุกการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมีค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 5 ล้วน (หรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วนคือ MC5 FA10LP20) ซึ่งเหตุผลดังได้กล่าวมาแล้วเนื่องจากเถ้าลอยที่ใช้ในครั้งนี้มีปริมาณ CaO ค่อนข้างสูงคือร้อยละ 13.63



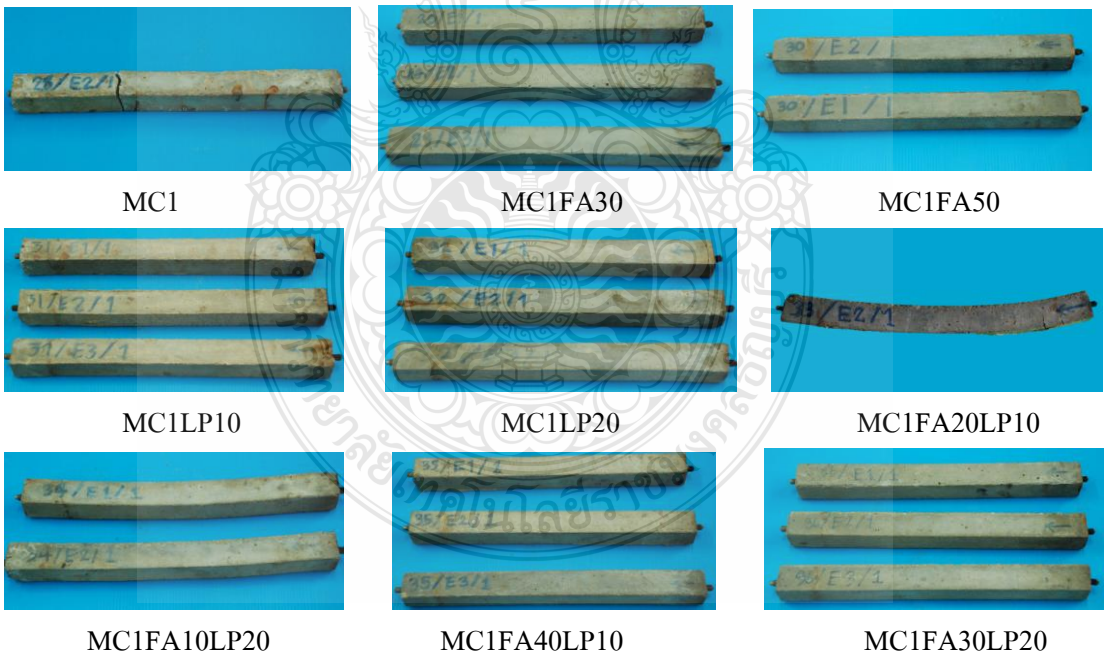
ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน

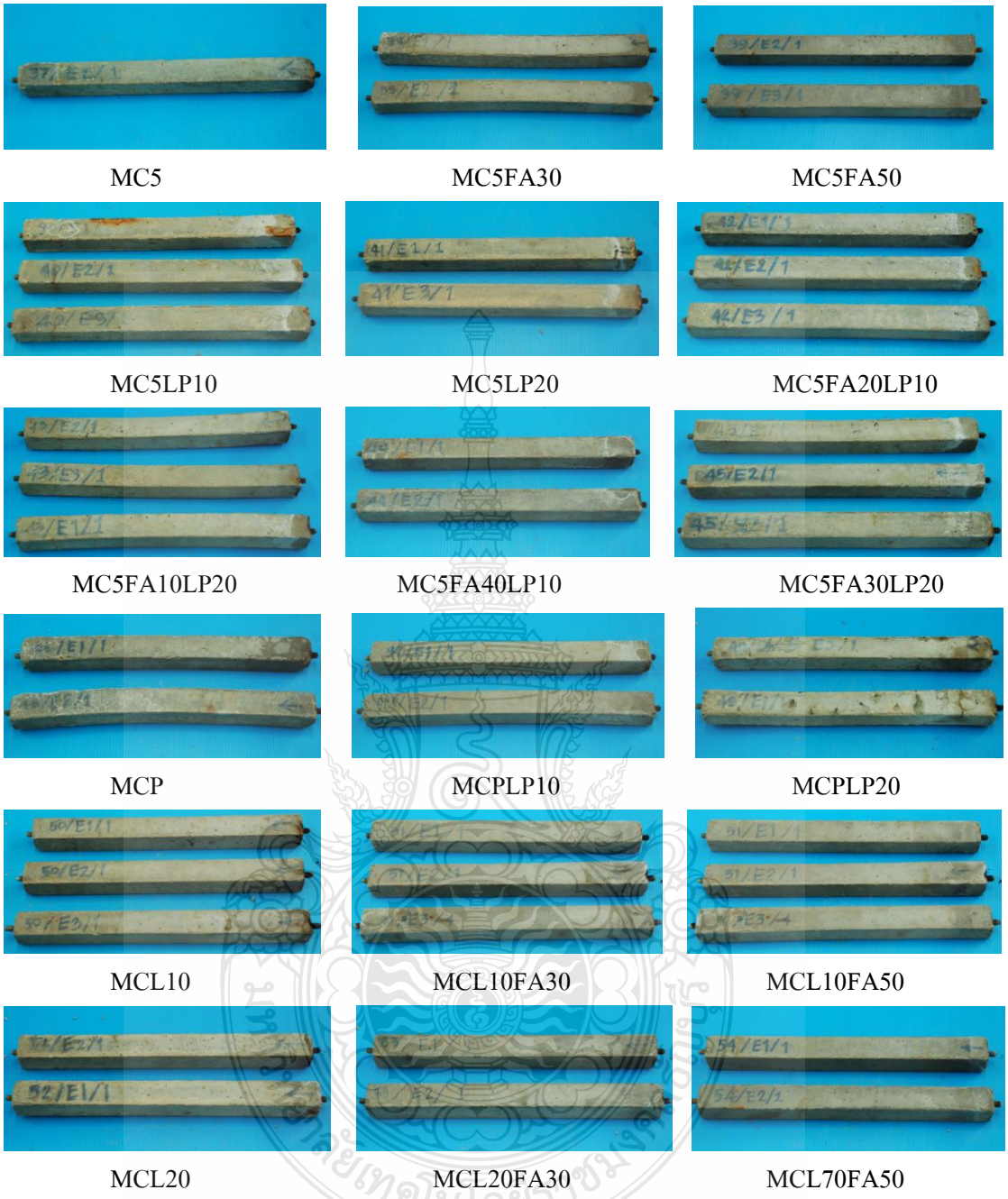
ภาพที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 76 สัปดาห์ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนถึงความแตกต่างของค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วนภาพที่ 4.17 แสดงถึงภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 76 สัปดาห์ ซึ่งลักษณะของภาพพอสังเกตได้ว่าจะไปในทิศทางเดียวกับการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วเช่นกัน ซึ่งสังเกตว่ากรณีของวัสดุประสานร่วม 3 ชนิดที่มีปริมาณเถ้าลอยค่อนข้างน้อย (MC1FA20LP10 และ MC1 FA10LP20) จะมีลักษณะการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ค่อนข้างมาก ในขณะที่เมื่อเถ้าลอยมีปริมาณสูงขึ้น การขยายตัวค่อนข้างน้อยลงเห็นได้ชัดเจนเช่นกัน



ภาพที่ 4.16 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 76 สัปดาห์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



ภาพที่ 4.17 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุ 76 สัปดาห์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

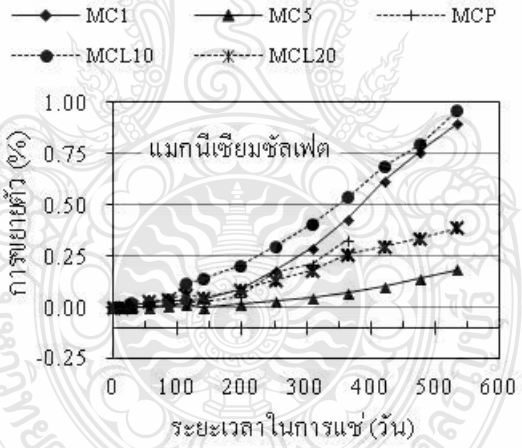


ภาพที่ 4.17 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุ 76 สัปดาห์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ต่อ)

ข) กรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

- *พิจารณาในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และ ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนล้วน*

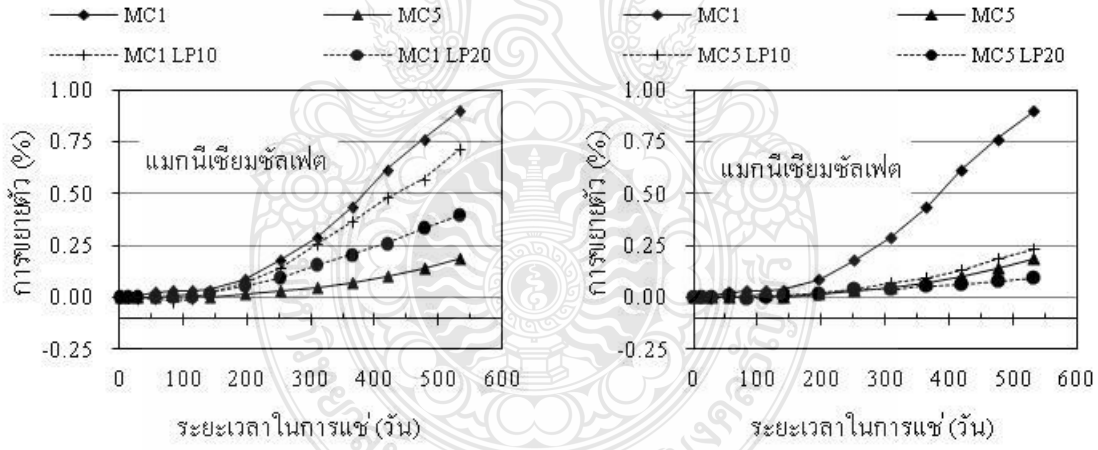
ภาพที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน ล้วน พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีแนวโน้มมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ล้วน จะมีค่าการขยายตัวค่อนข้างมากโดยมีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่เมื่อบดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน เช่นเดียวกับของปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน ซึ่งเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้วในกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟต



ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน ล้วน

- *วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5*

ภาพที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน จากภาพที่ 4.19 ก. พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และ20 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าน้อยกว่าในตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูนเป็นการเติมเต็มและลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง จึงทำให้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ยากและลดปริมาณ C_3A ลง จึงทำให้เกิด ยิบซั่มน้อยลง ในขณะที่ ภาพที่ 4.19 ข. เป็นการแทนที่ด้วยผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์มีแนวโน้มน้อยกว่าหรือไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณของ C_3A ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 น้อยจึงเป็นการช่วยลดปริมาณยิบซั่มลงได้มากขึ้น

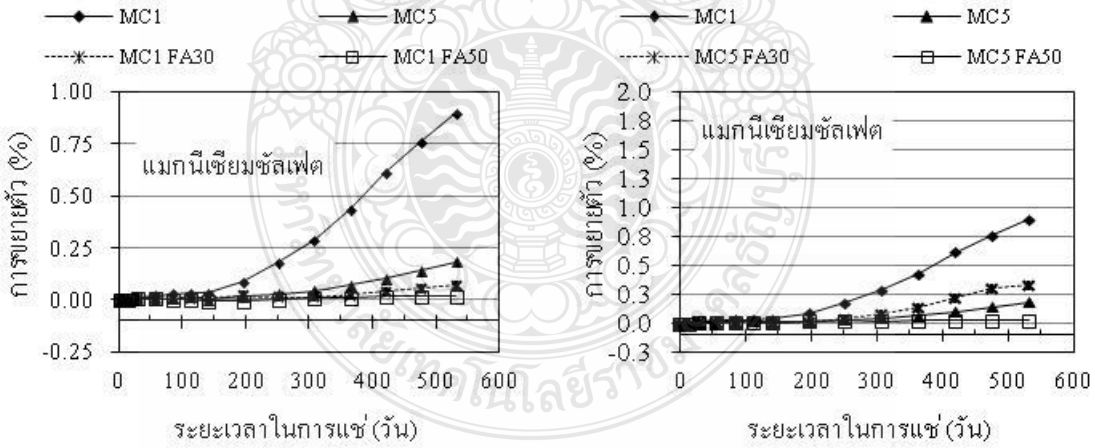


ก. แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข. แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน

- *วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5*

ภาพที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ไปในทิศทางทางเดียวกับกรณีในสารละลายโซเดียมซัลเฟต กล่าวคือ การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ของเถ้าลอยทั้งของการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยซึ่งเป็นสารปอซโซลานไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) ซึ่งเป็นผลผลิตของปฏิกิริยา ไฮเดรชั่น จึงทำให้เกิดยิบซัมน้อยลง และนอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยให้มอร์ต้าร์มีความทึบน้ำมากขึ้นเป็นผลให้การเข้าทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ยากขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณการแทนที่เถ้าลอยระหว่างร้อยละ 30 และ 50 พบว่าการขยายตัวไม่ค่อยแตกต่างกัน แต่เมื่ออายุมากขึ้นมีแนวโน้มว่าแทนที่ด้วยปริมาณที่น้อยกว่า (ร้อยละ 30) จะมีค่าการขยายตัวมากกว่าเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากกว่า (ร้อยละ 50) ทั้งนี้เพราะเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้มากกว่ารวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นมากกว่าด้วย

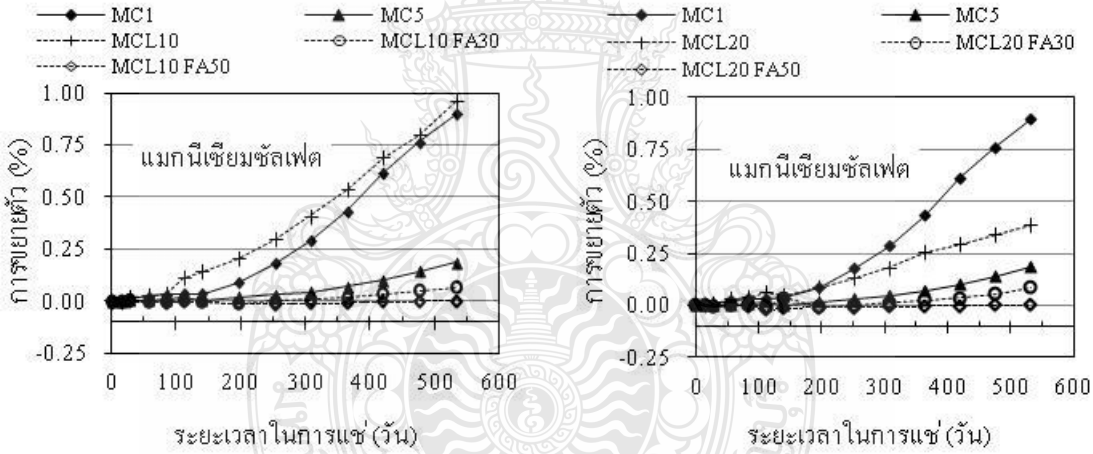


ก. แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข. แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย

- *วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ ร้อยละ 20*

ภาพที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10 และร้อยละ 20 ล้วน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10 และร้อยละ 20 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยมีค่าน้อยมากซึ่งน้อยกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนล้วนไม่ว่าจะแทนที่ด้วยร้อยละ 30 หรือ 50 ทั้งนี้เพราะนอกจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยลด $Ca(OH)_2$ แล้วยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำไปพร้อมๆกับการช่วยให้มีความทึบน้ำของการเติมเต็มของผงหินปูนให้กับตัวอย่างมอร์ต้าร์ รวมทั้งเป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลงในปริมาณที่มากขึ้น

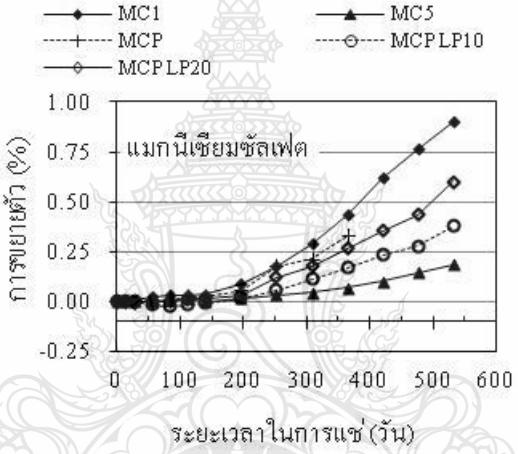


ก. แทนที่ในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10 ข. แทนที่ในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20

ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10 และร้อยละ 20 ล้วน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10 และร้อยละ 20 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย

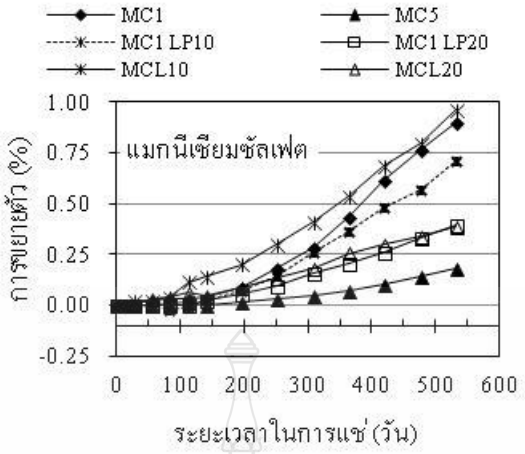
- *วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอซโซลาน*

ภาพที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน และปูนซีเมนต์ปอซโซลานที่แทนที่ด้วยผงหินปูน พบว่า การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่ด้วยผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอซโซลานจะมีการขยายตัวน้อยลงซึ่งไปในแนวทางเดียวกันกับในตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 5



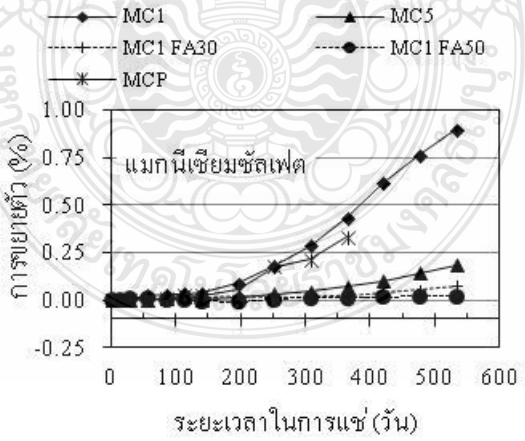
ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน และปูนซีเมนต์ปอซโซลานที่แทนที่ด้วยผงหินปูน

ส่วนภาพที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน พบว่าแนวโน้มการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่บดผสมผงหินปูนจะมีค่ามากกว่าของการแทนที่ด้วยผงหินปูนทั้งของบดผสมหรือการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ซึ่งไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว



ภาพที่ 4.23 เปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตระหว่างตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน

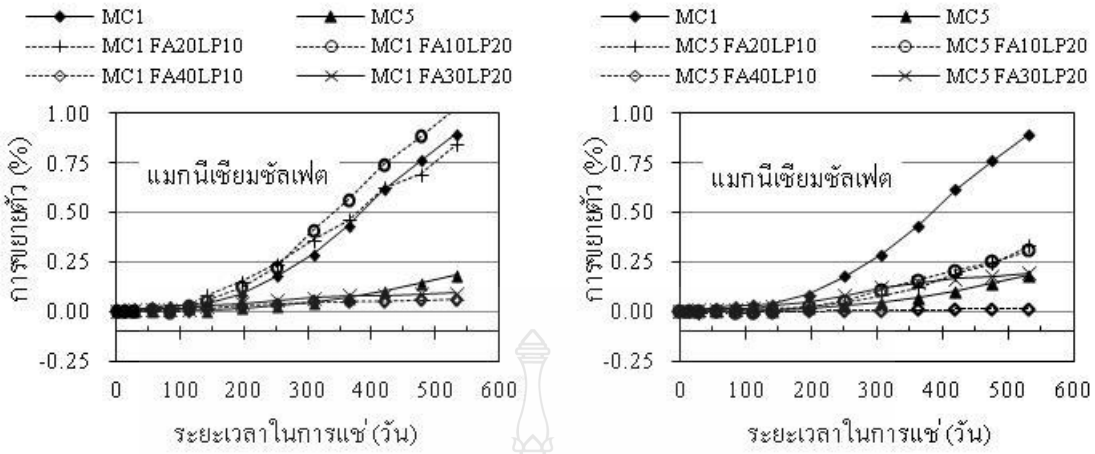
ส่วนภาพที่ 4.24 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์บดผสมเถ้าลอย (ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน) กับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งพบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังกล่าวไม่แตกต่างกันก็ไปในทิศทางเดียวกับกรณีในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว



ภาพที่ 4.24 เปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตระหว่างตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย

- *วัสดุประสานร่วมสามชนิด (Ternary) เมื่อแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5*

ภาพที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับกับผงหินปูน พบว่า (ภาพที่ 4.25 ก.) การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนปริมาณที่ต่ำๆ ไม่ว่าปริมาณของฝุ่นหินปูนร้อยละ10 หรือร้อยละ 20 (MC1FA20LP10 หรือ MC1FA10LP20) มีแนวโน้มทำให้การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน แต่เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูงขึ้น (MC1 FA40LP10 และ MC1 FA30LP20) กลับให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าน้อยกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อปริมาณเถ้าลอยที่สูงๆ ทั้งนี้เป็นเพราะเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูง เมื่อแทนที่ในปริมาณที่น้อยๆ จะมีค่าการขยายตัวมาก แต่เมื่อปริมาณของการแทนที่ที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าการขยายตัวน้อยลง แสดงว่าปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยมีผลมากกว่า โดยเป็นดังเช่นกรณีของโซเดียมซัลเฟต ซึ่งเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว ส่วนเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 (ภาพที่ 4.25 ข.) ก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่ทุกการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมีค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 5 ล้วน (หรือสูงกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เล็กน้อย)

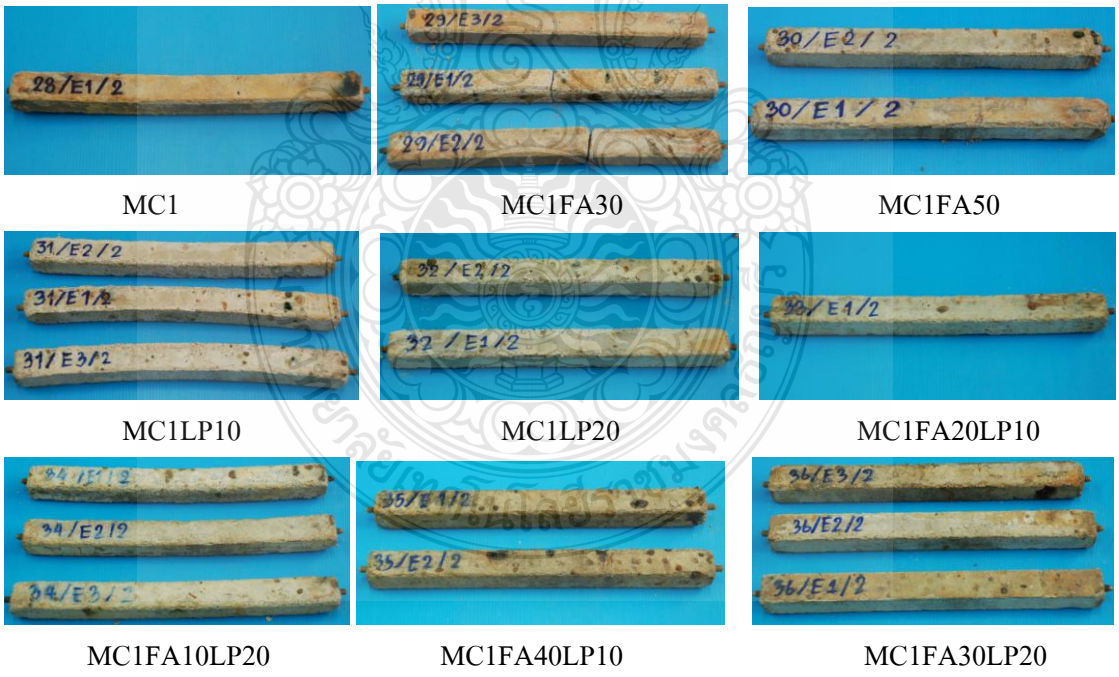


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน

ภาพที่ 4.26 ได้แสดงการเปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยผสมและผงหินปูนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 76 สัปดาห์ ซึ่งทำให้เห็นถึงความแตกต่างของการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ชัดเจนขึ้น ส่วนภาพที่ 4.27 แสดงถึงภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยและผงหินปูนที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 76 สัปดาห์ ซึ่งลักษณะของภาพสังเกตได้ว่าจะไปในทิศทางเดียวกับการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วเช่นกัน

ภาพที่ 4.26 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 76 สัปดาห์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

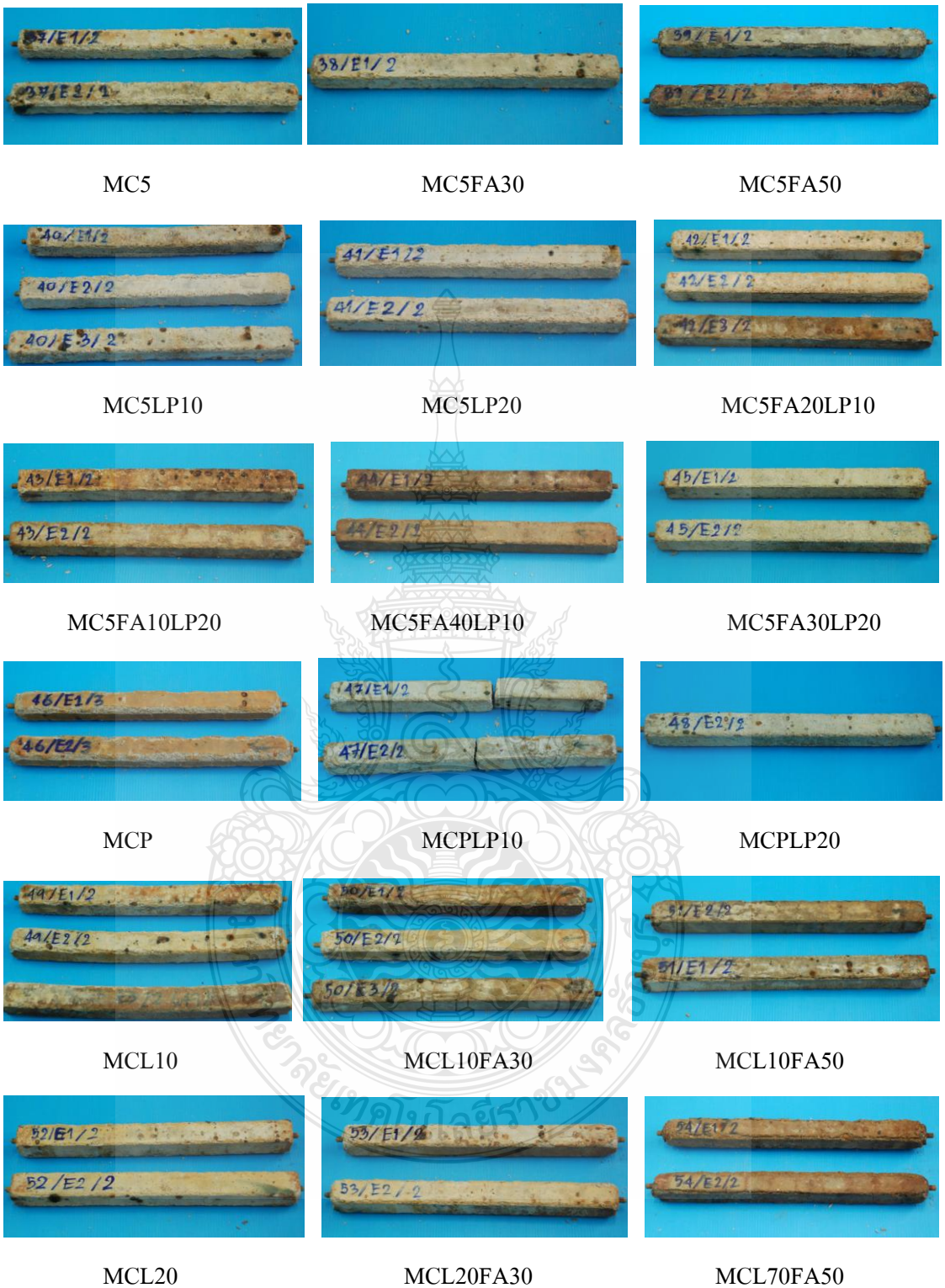


MC1 MC1FA30 MC1FA50

MC1LP10 MC1LP20 MC1FA20LP10

MC1FA10LP20 MC1FA40LP10 MC1FA30LP20

ภาพที่ 4.27 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุ 76 สัปดาห์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

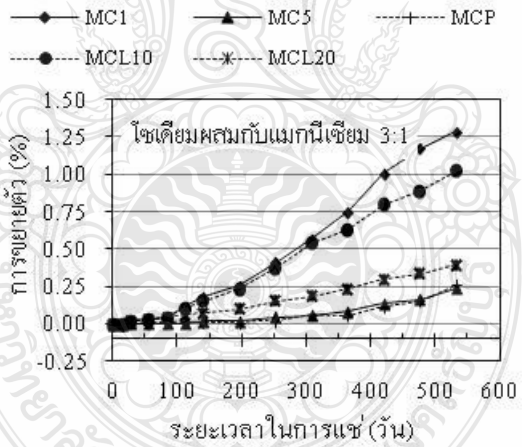


ภาพที่ 4.27 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุ 76 สัปดาห์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)

ค) กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต

- *พิจารณาในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และ ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนล้วน*

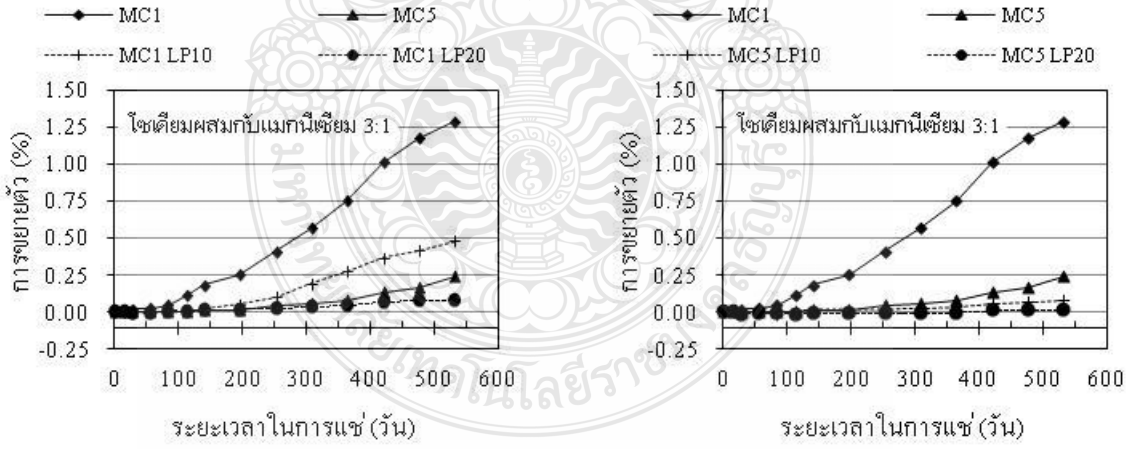
ภาพที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต(3:1) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนล้วน พบว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าการขยายตัวมากกว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน เช่นเดียวกับกรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ส่วนการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ล้วน มีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ขณะที่การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ซึ่งไปในทิศทางเดียวกับกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว



ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน ล้วน

- *วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5*

ภาพที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน พบว่า (ภาพที่4.29 ก.) ตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่าการขยายตัวน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20 ทำให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าค่อนข้างน้อยโดยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และในทำนองเดียวกันกับกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต จะเห็นว่าการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 จะมีค่าการขยายตัวมากกว่าเมื่อแทนที่ร้อยละ 20 ซึ่งเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว สำหรับเมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ภาพที่4.29 ข.) จะให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ไปในแนวทางเดียวกับการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อย่างไรก็ตามการขยายตัวของทุกการแทนที่ด้วยผงหินปูนในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีค่าการขยายตัวน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

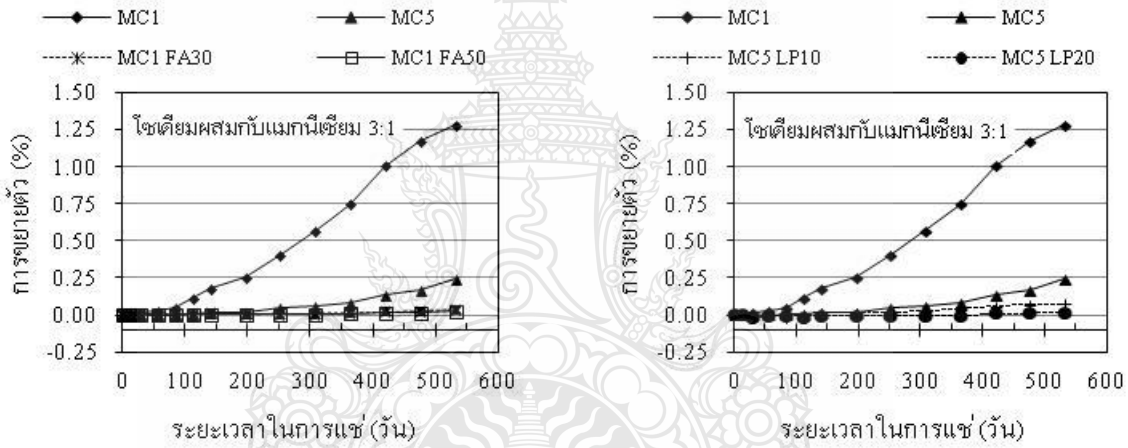


ก. แทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ข. แทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน

- *วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5*

ภาพที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยจะให้ค่าน้อยกว่าทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยลดทั้ง C_3A และลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) จึงทำให้เกิดยิบซั่มและ Ettringite น้อยลง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



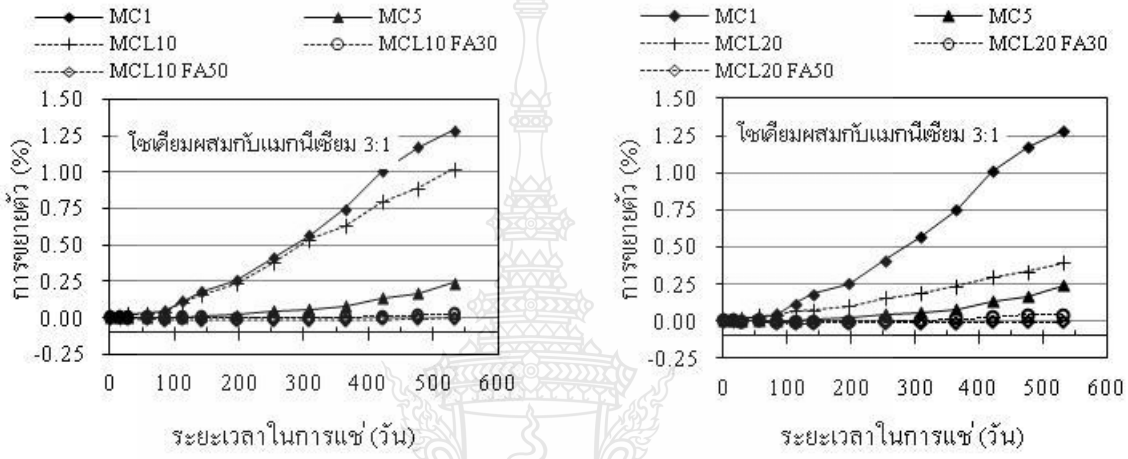
ก. แทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ข. แทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย

- *วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ ร้อยละ 20*

ภาพที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนล้วน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนที่แทนที่

ด้วยเถ้าลอย พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยไม่ว่าจะแทนที่ด้วยปริมาณร้อยละ 30 และ 50 มีค่าค่อนข้างน้อยโดยน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยลด ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) และเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงค่อนข้างมาก(ทั้งการการแทนที่ด้วยผงหินปูนจากการบดผสมและการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตอนผสมมอร์ต้าร์)

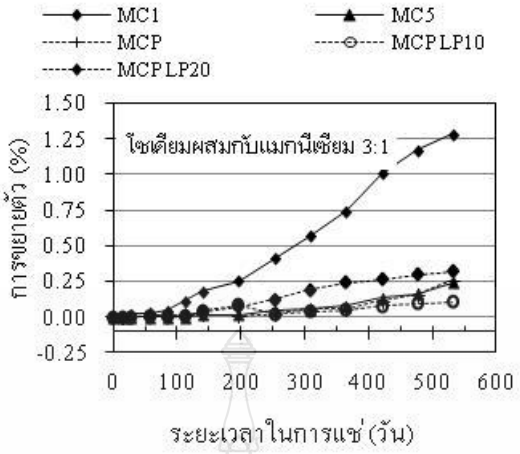


ก. แทนที่ในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10 ข. แทนที่ในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20

ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วนปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนล้วน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10 และร้อยละ 20 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย

- *วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอซโซลาน*

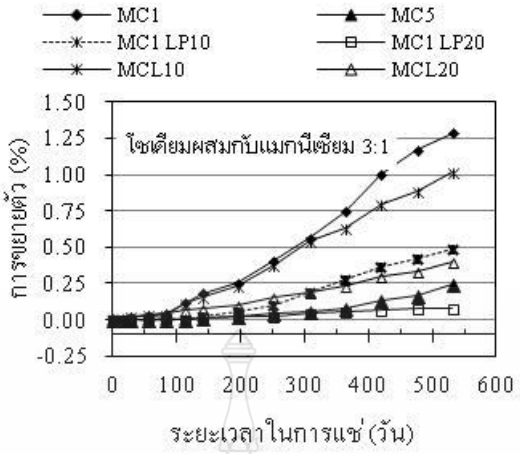
ภาพที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ล้วน พร้อมทั้งปูนซีเมนต์ปอซโซลานที่แทนที่ด้วยผงหินปูน พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่ด้วยผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีการขยายตัวจะน้อยลง ทั้งนี้เพราะการเติมผงหินปูนจะช่วยลดปูนซีเมนต์ลงและช่วยเติมเต็มให้ซีเมนต์เพสต์มีความทึบน้ำมากขึ้น



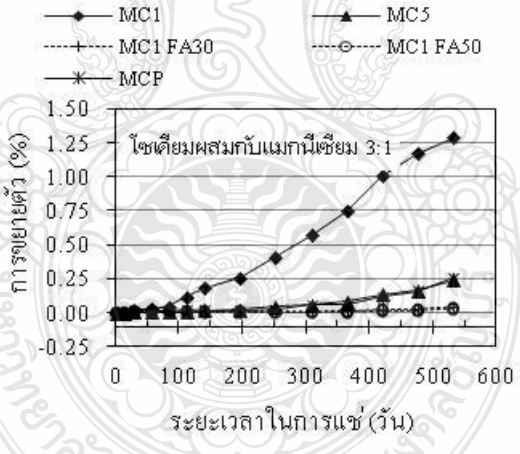
ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ล้วน และปูนซีเมนต์ปอซโซลานที่แทนที่ด้วยผงหินปูน

ส่วนภาพที่ 4.33 แสดงการเปรียบเทียบการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน พบว่าแนวโน้มการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่บดผสมผงหินปูนจะมีค่ามากกว่าของการแทนที่ด้วยผงหินปูนทั้งของบดผสมหรือการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันกับกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ส่วนภาพที่ 4.34 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์บดผสมเถ้าลอย (ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน) กับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งพบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังกล่าวไม่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันกับกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



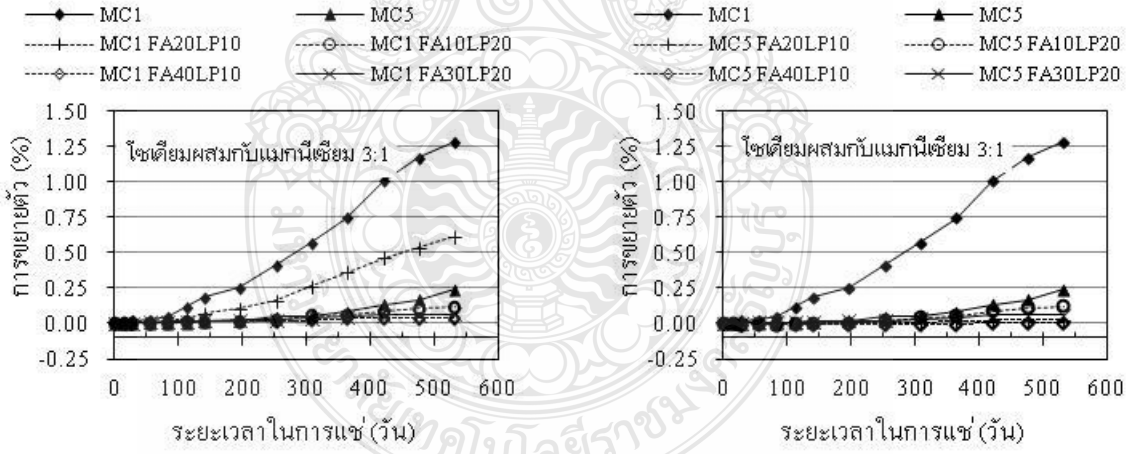
ภาพที่ 4.33 เปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตระหว่างตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน



ภาพที่ 4.34 เปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตระหว่างตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย

- *วัสดุประสานร่วมสามชนิด (Ternary) เมื่อแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5*

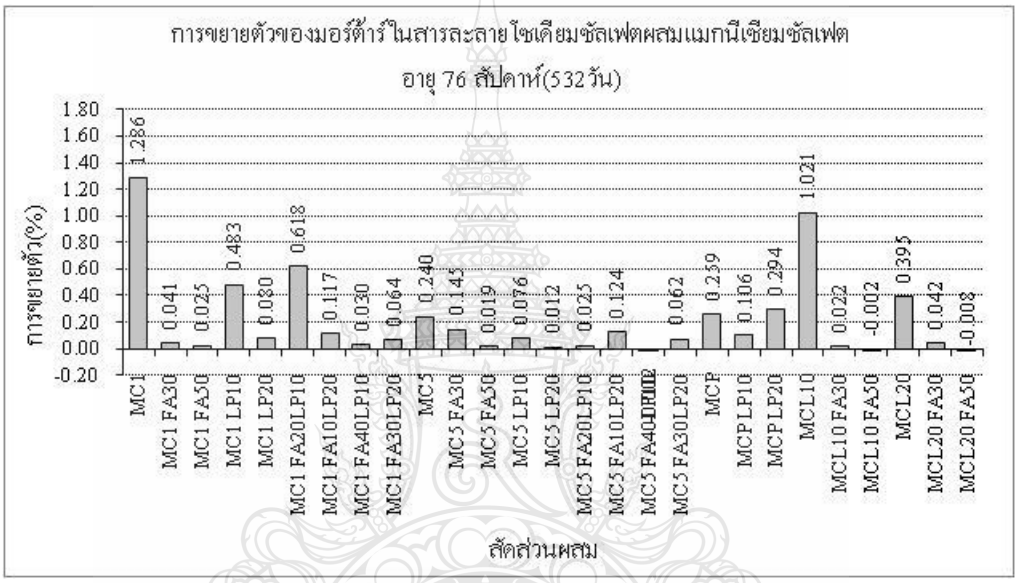
ภาพที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ให้ค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ก็มีแนวโน้มว่าทุกสัดส่วนของการใช้วัสดุร่วม 3 ชนิด (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน) จะมีค่าการขยายตัวน้อยกว่ากรณีตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยไม่แตกต่างกับค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นตัวอย่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1(MC1 FA20LP10) ซึ่งให้ค่าการขยายตัวค่อนข้างมากอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างมอร์ต้าร์สัดส่วนผสมอื่น ดังที่กล่าวมาแล้ว แต่อย่างไรก็ตามในกรณีแทนที่วัสดุร่วมสามชนิดในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 พบว่า การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังกล่าวมีค่าไม่แตกต่างกันและมีค่าใกล้เคียงกับกรณีมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ซึ่งเหตุผลเป็นดังที่กล่าวมาแล้ว



ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5

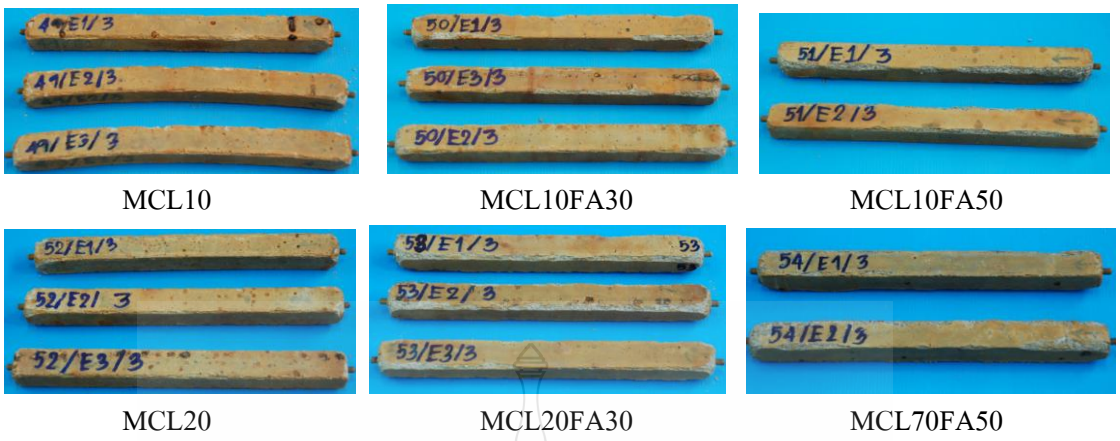
ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1และประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน

ภาพที่ 4.36 ได้แสดงการเปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 76 สัปดาห์ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนถึงความแตกต่างของค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ศึกษาในครั้งนี้ ส่วนภาพที่ 4.37 แสดงถึงภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 76 สัปดาห์ ซึ่งลักษณะของภาพสังเกตได้ว่าจะไปในทิศทางเดียวกับการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วเช่นกัน



ภาพที่ 4.36 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 76 สัปดาห์ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.37 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุ 76 สัปดาห์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต



ภาพที่ 4.37 ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุ 76 สัปดาห์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)

4.3.1.2 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์

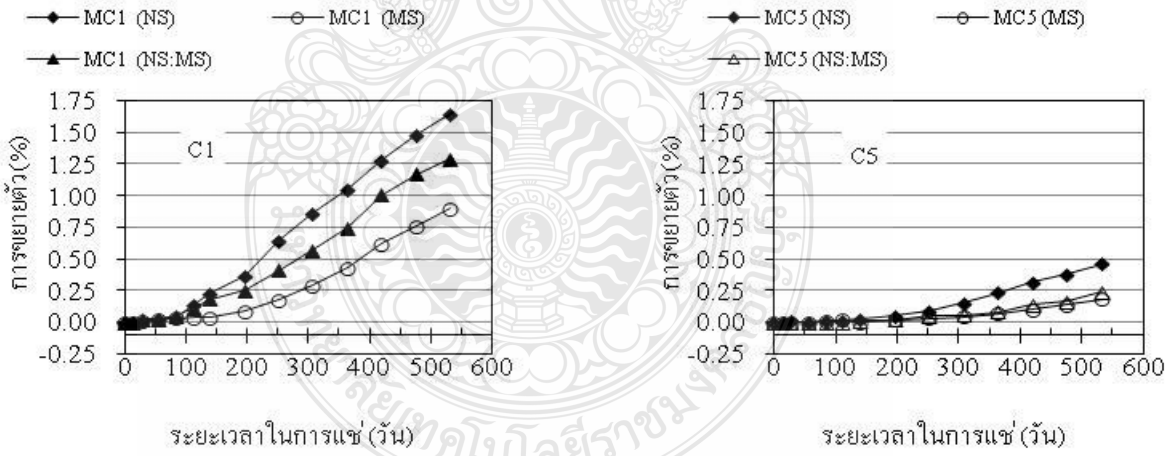
สารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้สารละลายซัลเฟต 3 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตในอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก ดังนั้นในการประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยวัดการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์นั้น จึงได้พิจารณาถึงผลกระทบของชนิดของสารละลายซัลเฟตทั้ง 3 กรณี ที่มีต่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต โดยมีรายละเอียดดังนี้

- *เมื่อวัสดุประสานเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน*

ภาพที่ 4.38 แสดงผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ ร้อยละ 20 ล้วน โดย ภาพที่ 4.38 ก. แสดงการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่ามากที่สุด รองลงมาเป็นในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต และในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะกลไกการทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะทำให้เกิด Ettringite ซึ่งมีคุณสมบัติในการขยายตัว ส่วนกลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น จะทำให้ไม่มีความเสถียรภาพภายในโครงสร้างของมอร์ต้าร์ โดยจะเปลี่ยนผลผลิตแคลเซียมซิลิ

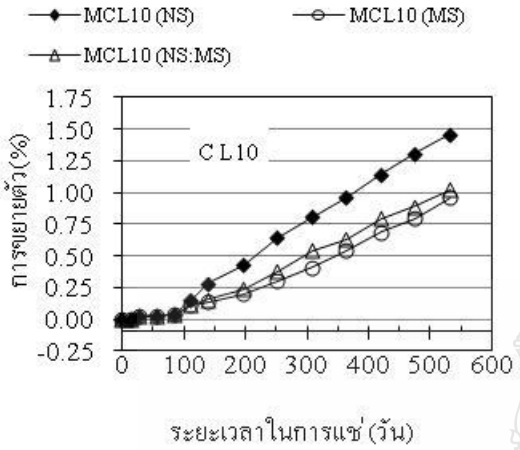
เกตไฮเดรต (CSH) ให้เป็น แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (MSH)ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน โดยจะทำให้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ยุ่ย มีการหลุดร่อนของผิวหรือโครงสร้างของตัวอย่าง มีการสูญเสียน้ำหนัก [8,14] จึงทำให้ชิ้นตัวอย่างมีการขยายตัวที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ส่วนการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น แนวโน้มของการถูกทำลายของตัวอย่างมีทั้งการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ดังนั้นค่าการขยายตัวของตัวอย่างจึงอยู่ระหว่างของในสารละลายโซเดียมซัลเฟต กับ สารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

เมื่อพิจารณาการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน (ภาพที่4.38 ข.) ในสารละลายซัลเฟตทั้ง 3 ชนิด ก็มีแนวโน้มให้ผลในทิศทางเดียวกับกรณีของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่ในส่วนของการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมกับในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตนั้นมีค่าไม่แตกต่างกัน อาจเป็นเพราะกลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตมีผลที่เด่นชัดกว่า ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 (ภาพที่ 4.38 ค. และ ภาพที่ 4.38 ง.) ตามลำดับ

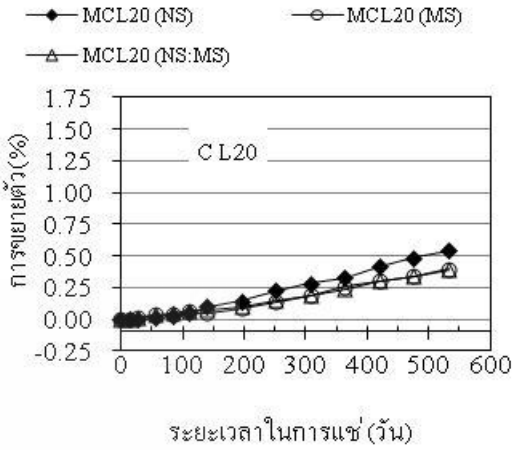


ก. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 4.38 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ล้วน



ค. ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10

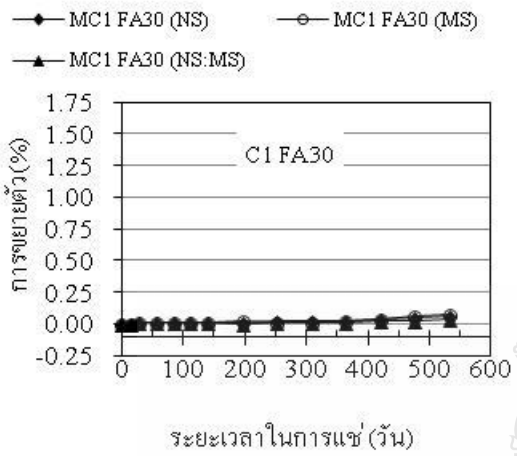


ง. ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20

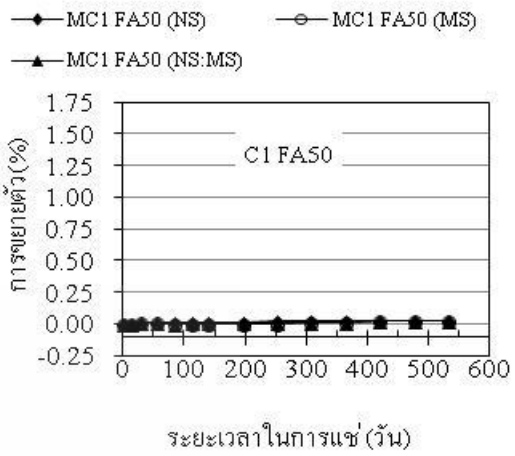
ภาพที่ 4.38 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ล้วน (ต่อ)

- *เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20*

ภาพที่ 4.39 ถึงภาพที่ 4.42 แสดงถึงผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และร้อยละ 50 พบว่าชนิดของสารละลายซัลเฟตมีผลกระทบต่อการขยายตัวของตัวอย่างน้อยมาก ทั้งนี้เป็นเพราะการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตทั้ง 3 ชนิด มีค่าน้อยมาก จึงทำให้การขยายตัวมีค่าไม่ค่อยแตกต่างกัน

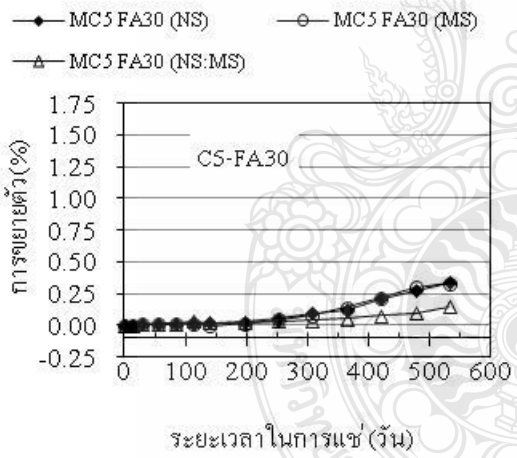


ก. แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30

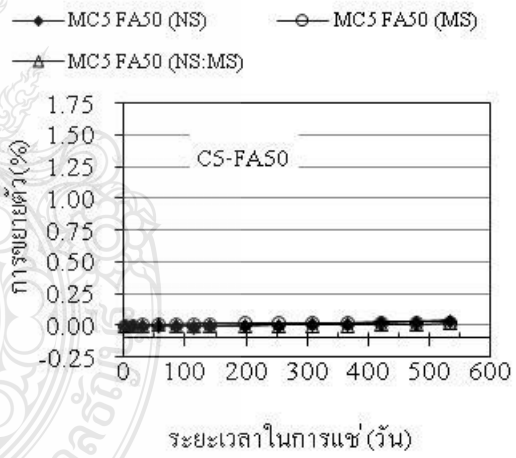


ข. แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50

ภาพที่ 4.39 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย

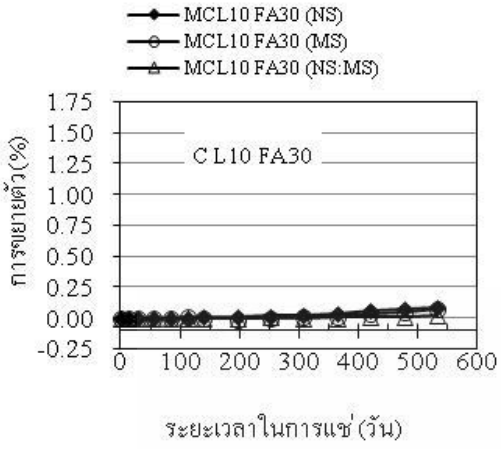


ก. แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30

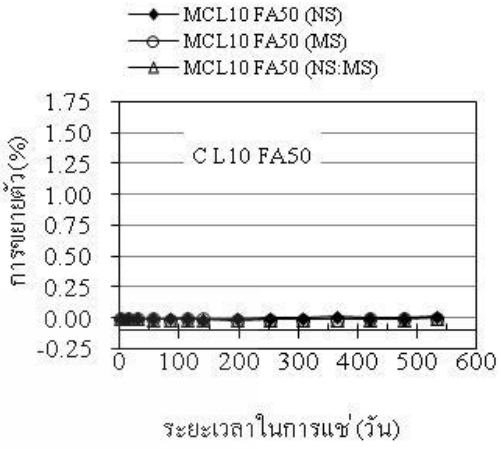


ข. แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 50

ภาพที่ 4.40 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย

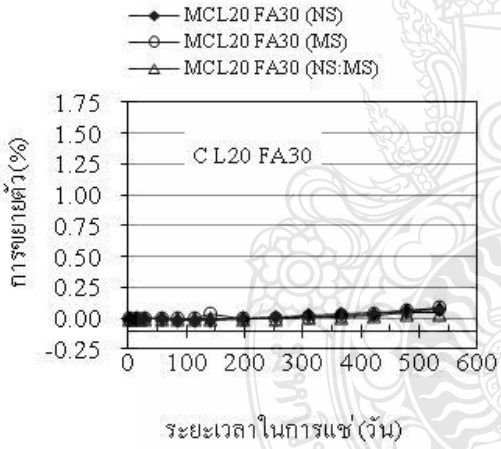


ก. แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30

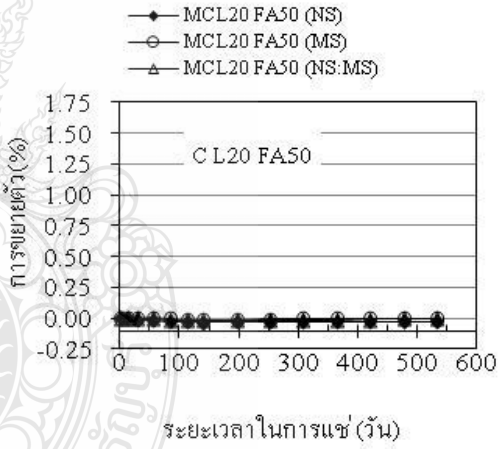


ข. แทนที่ด้วยเถ้าลอย อยละ 50

ภาพที่ 4.41 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ด้วยเถ้าลอย



ก. แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30



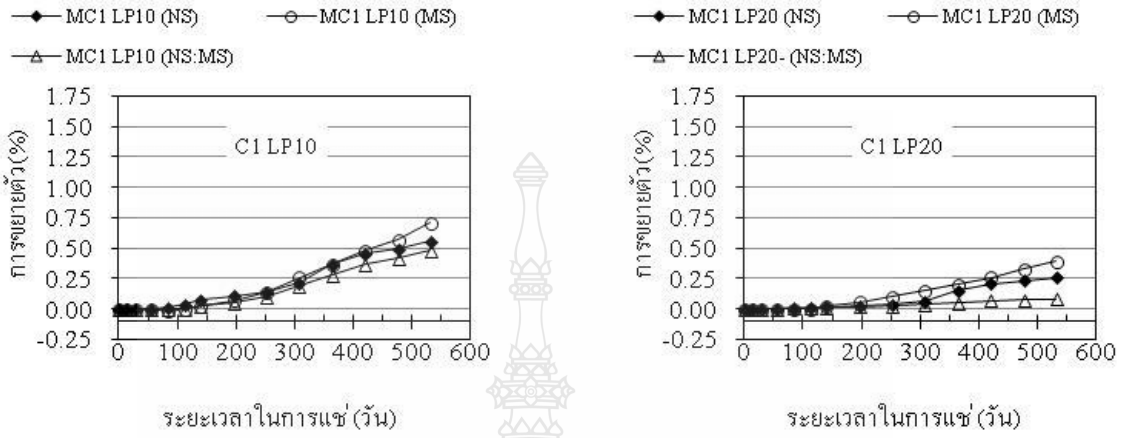
ข. แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 50

ภาพที่ 4.42 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอย

- *เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลาน*

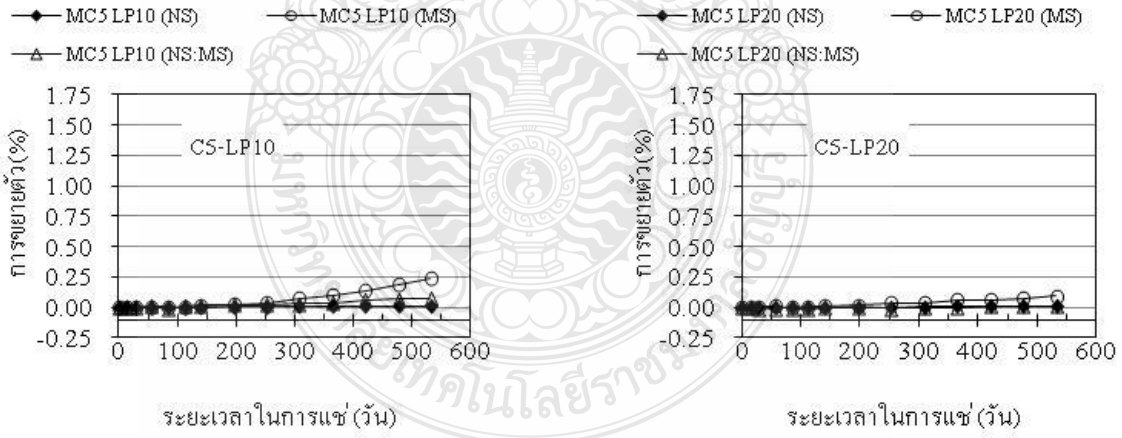
ภาพที่ 4.43 และภาพที่ 4.44 แสดงถึงผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย

ผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตทั้งสามมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก



ก. แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10 ข. แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 20

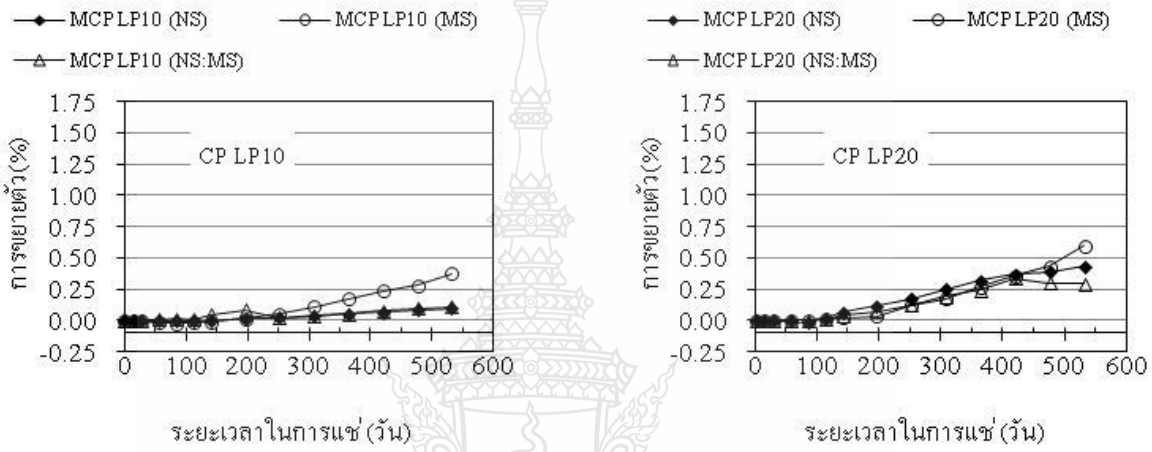
ภาพที่ 4.43 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน



ก. แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10 ข. แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 20

ภาพที่ 4.44 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยด้วยผงหินปูน

สำหรับภาพที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 พบว่าแนวโน้มการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่ามากที่กว่ากรณีสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (ซึ่งมีค่าการขยายตัวไม่ต่างกันเท่าไหร่นัก)



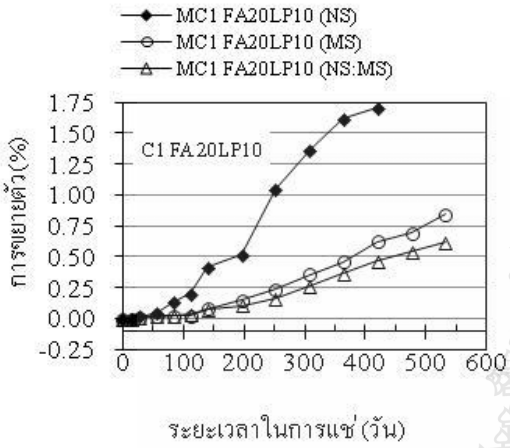
ก. แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10 ข. แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 20

ภาพที่ 4.45 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน แทนที่ด้วยด้วยผงหินปูน

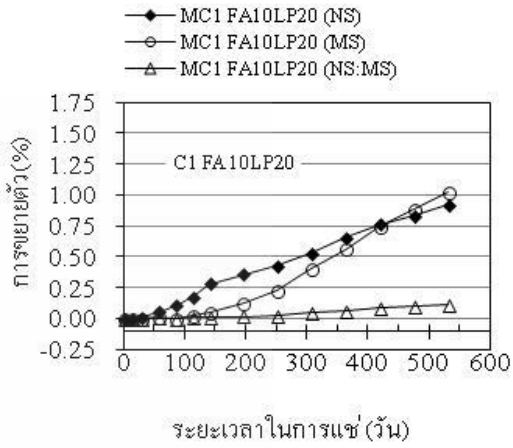
- *เมื่อแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5*

ภาพที่ 4.46 แสดงถึงผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูนร่วมกับเถ้าลอย โดยที่สัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ MC1 FA10 LP10 (ภาพที่ 4.46 ก.) การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่ามากที่สุด ตามไปด้วยในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต ส่วนสัดส่วนผสม MC1 FA10LP20 (ภาพที่ 4.46 ข.) การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าใกล้เคียงกับแมกนีเซียมซัลเฟต โดยที่มากกกว่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต และสำหรับสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ MC1FA40LP10 และ MC1FA30LP20 (ภาพที่ 4.46 ค. และ ภาพที่ 4.46 ง.) พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตทั้ง 3 ชนิด มี

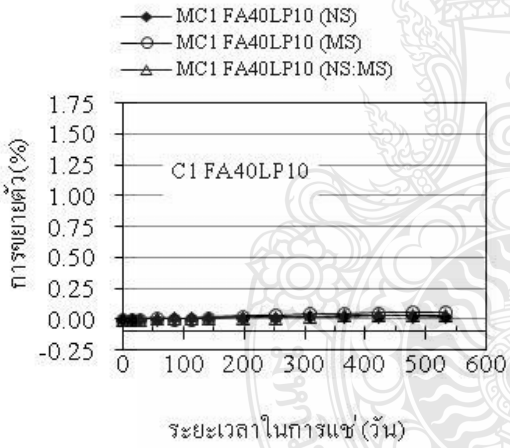
ค่าไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นเพราะการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตทั้ง 3 ชนิด มีค่าน้อยมาก แสดงว่าชนิดของสารละลายซัลเฟตไม่มีผลกระทบต่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่าง



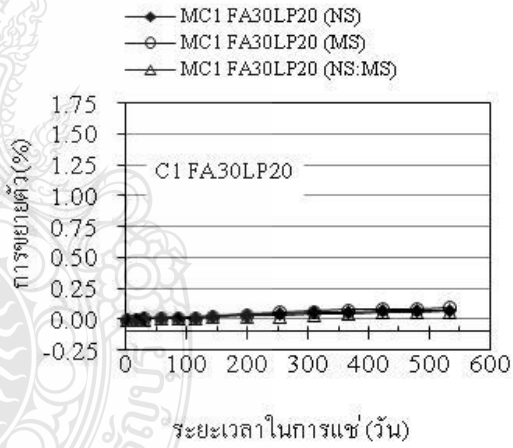
ก. แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



ข. แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20



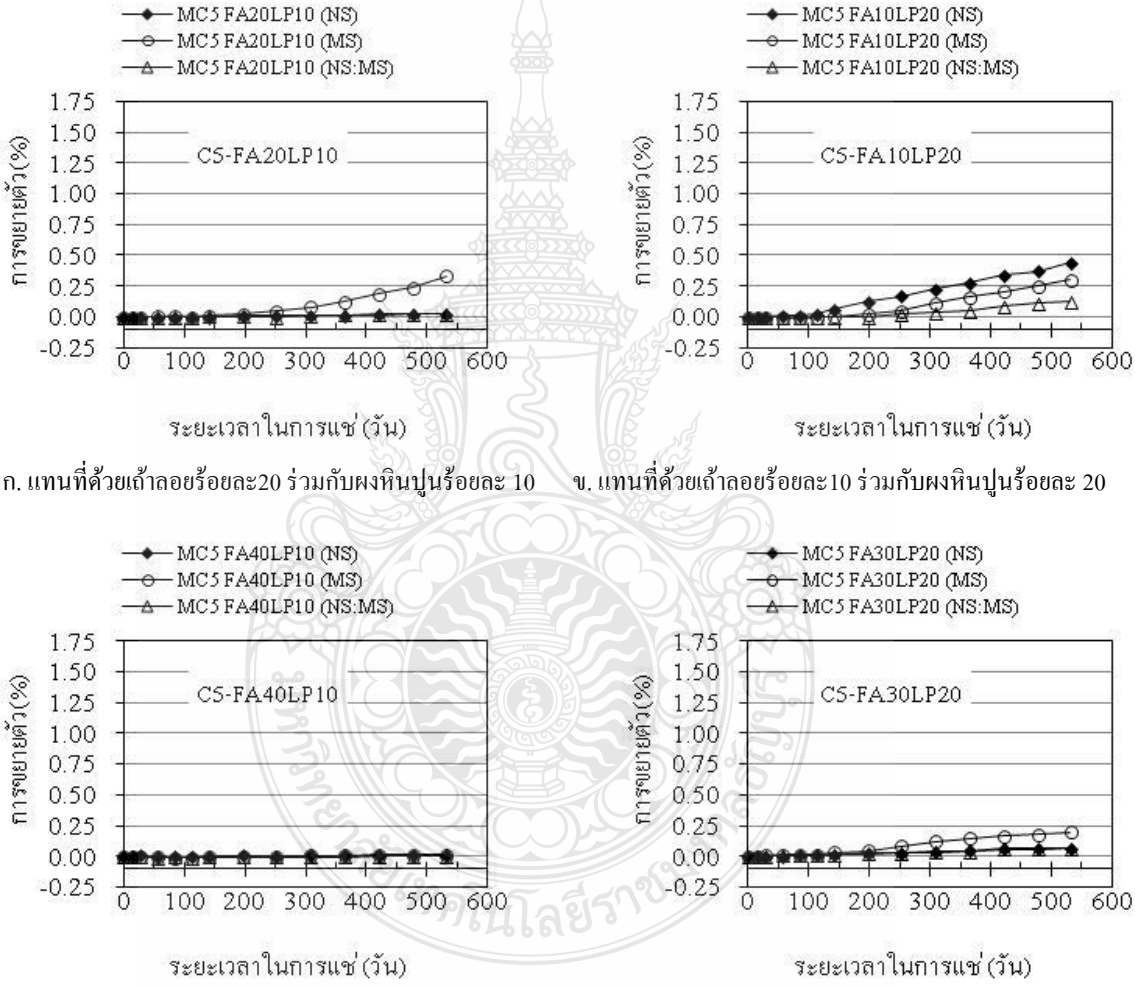
ค. แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



ง. แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20

ภาพที่ 4.46 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน

สำหรับผลกระทบของชนิดของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของกรณีตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร่วมกับเถ้าลอย ภาพที่ 4.47 พบว่าแนวโน้มการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตทั้งสามชนิดมีค่าใกล้เคียงกันหรือแทบจะไม่แตกต่างกันทั้งนี้เป็นเพราะการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าค่อนข้างน้อยนั่นแสดงว่าผลของชนิดสารละลายซัลเฟตมีผลกระทบต่อการขยายตัวน้อยหรือไม่มีผลกระทบต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์นั่นเอง



ก. แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ข. แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20

ค. แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ง. แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20

ภาพที่ 4.47 ผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5แทนที่ด้วยด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน

4.3.2 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต

การประเมินผลการต้านทานซัลเฟตโดยการวัดการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) ของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 50x50x50 มม.^{3} ซึ่งได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์แทนที่เถ้าลอย และผงหินปูน โดยแสดงผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่วัสดุประสาน และผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟตต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังรายละเอียดต่อไปนี้

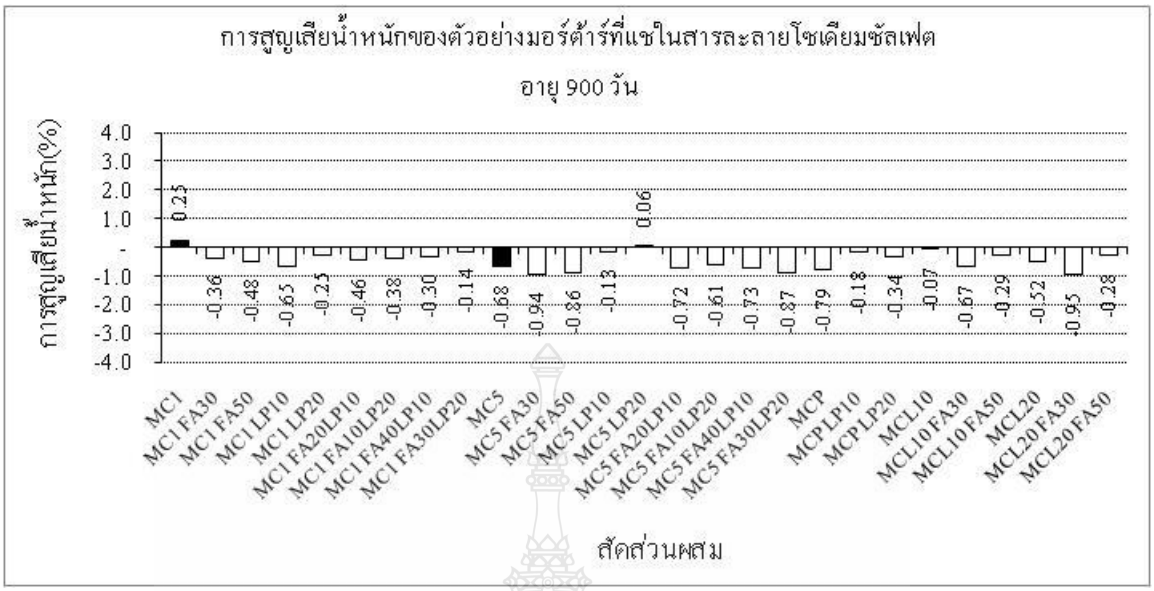
4.3.2.1 ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการสูญเสียน้ำหนัก

สำหรับชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน ที่ใช้พิจารณาถึงผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตนั้น วัสดุประสานใช้เหมือนกับกรณีของการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และ ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่ด้วยผงหินปูนและเถ้าลอย โดยการแทนที่นั้นใช้เหมือนกรณีของการขยายตัวทุกประการ

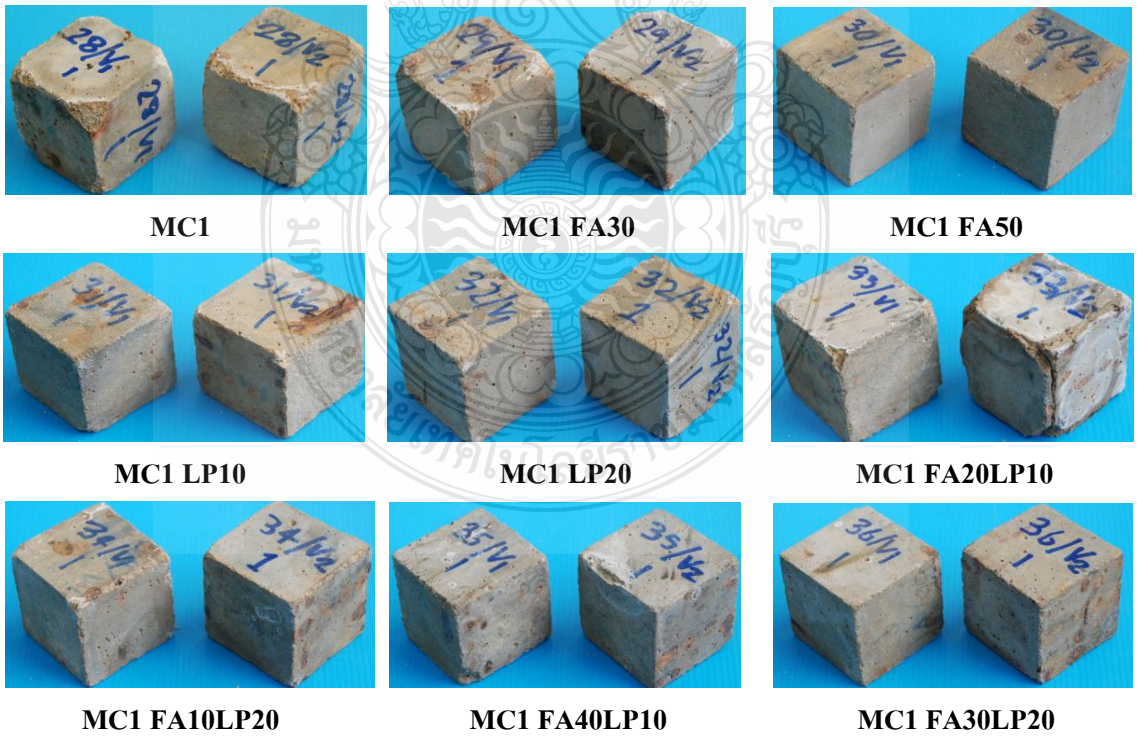
ก) กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.48 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ (W/B=0.55)ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่เถ้าลอยแทนที่ผงหินปูน และแทนที่ทั้งเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่ออายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 900 วัน พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ทุกสัดส่วน ต่างไม่มีการสูญเสียน้ำหนักเลย โดยเป็นการเพิ่มน้ำหนักที่มีค่าไม่แตกต่างกัน หรือแตกต่างกันน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างในแต่ละสัดส่วนทั้งนี้เป็นเพราะว่ากลไกการทำลายมิได้เป็นการทำให้สูญเสียเนื้อเพสต์ไป จึงทำให้ไม่มีการสูญเสียน้ำหนัก

ภาพที่ 4.49 แสดงภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ ที่อายุ 900 วัน ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ซึ่งจะเห็นถึงลักษณะของตัวอย่างมอร์ต้าร์ได้ชัดเจนว่าจะไม่มีการสูญเสียน้ำหนักหรือผิวของมอร์ต้าร์ไม่มีการผุกร่อนแต่อย่างใด จะมีก็จะเป็นลักษณะการแตกร้าวมากกว่าทั้งนี้เป็นเพราะเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว



ภาพที่ 4.48 เปรียบเทียบผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ศึกษา เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 900 วัน

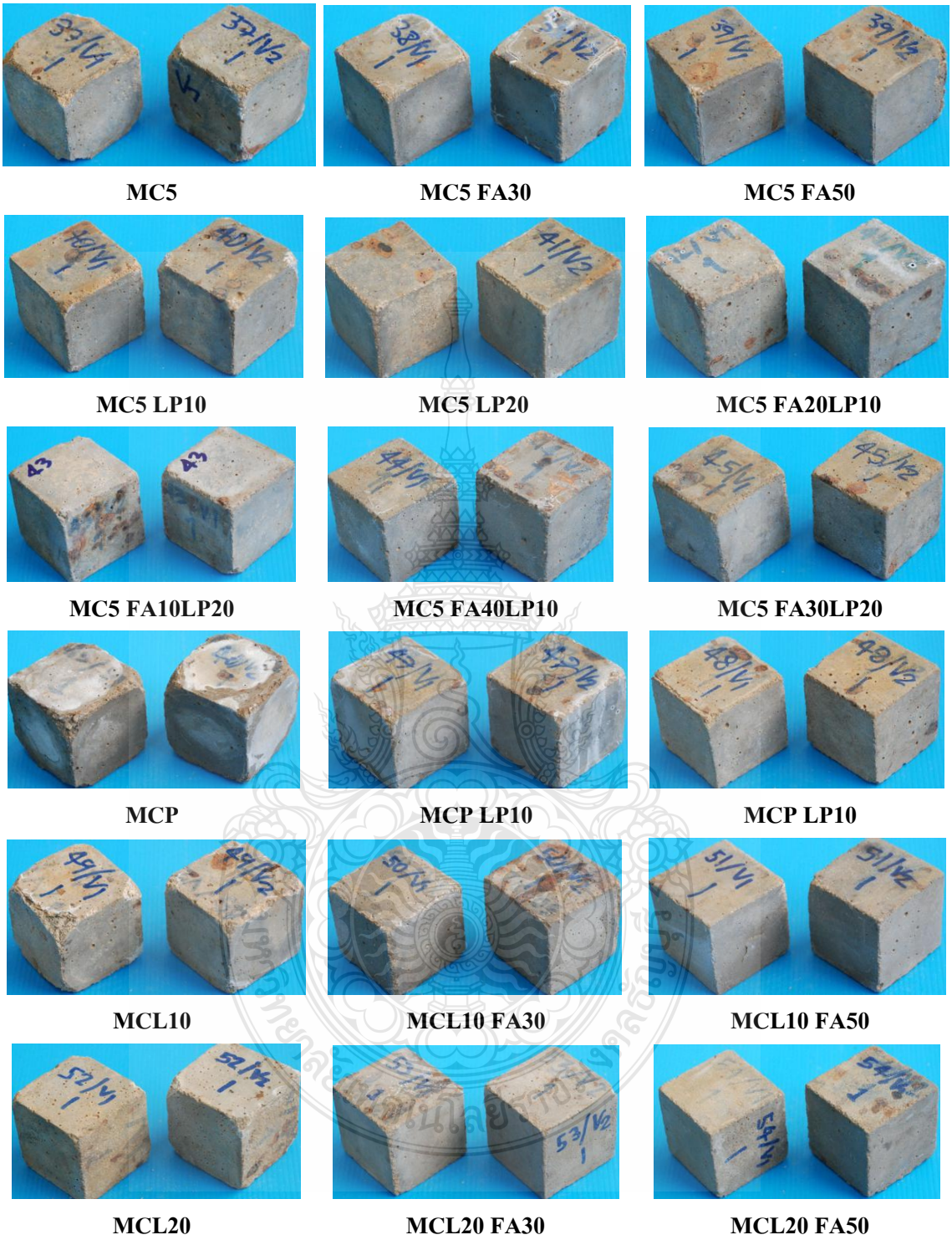


MC1 **MC1 FA30** **MC1 FA50**

MC1 LP10 **MC1 LP20** **MC1 FA20LP10**

MC1 FA10LP20 **MC1 FA40LP10** **MC1 FA30LP20**

ภาพที่ 4.49 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 900 วัน



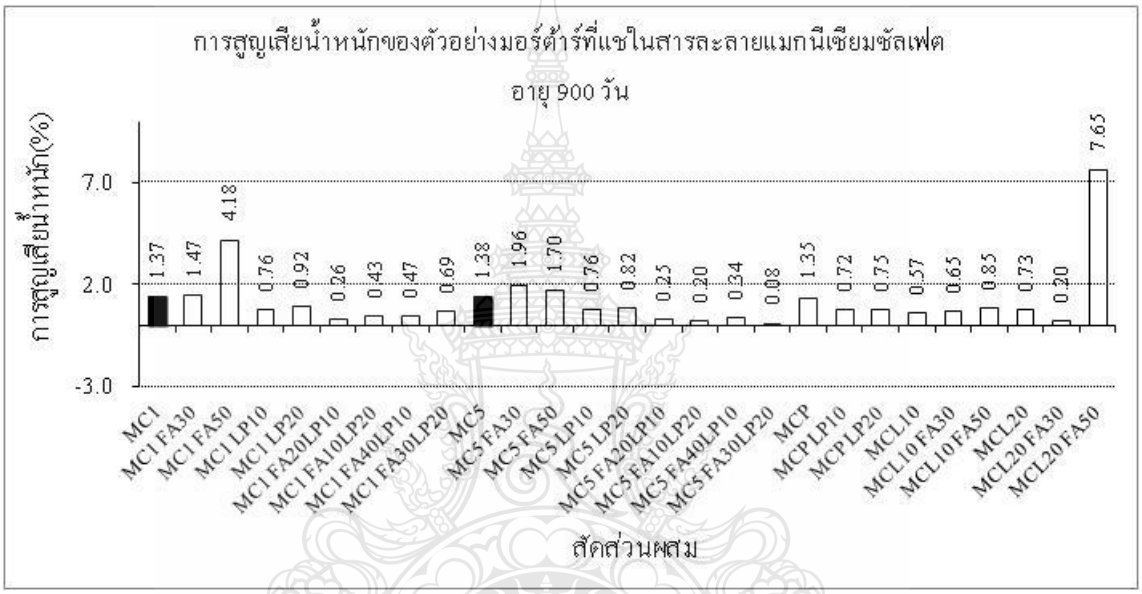
ภาพที่ 4.49 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 900 วัน (ต่อ)

ข) กรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.50 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่เถ้าลอย แทนที่ผงหินปูน และแทนที่ทั้งเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่ออายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 900 วัน พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยมีค่ามากกว่าเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะปริมาณที่น้อยของ C_3A ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่ากรณีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้ก็เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ความเป็นด่างในมอร์ต้าร์น้อยลง (ลด $Ca(OH)_2$) ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ จึงทำให้ CSH เปลี่ยนเป็น MSH ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้น ทั้งนี้การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ของเถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

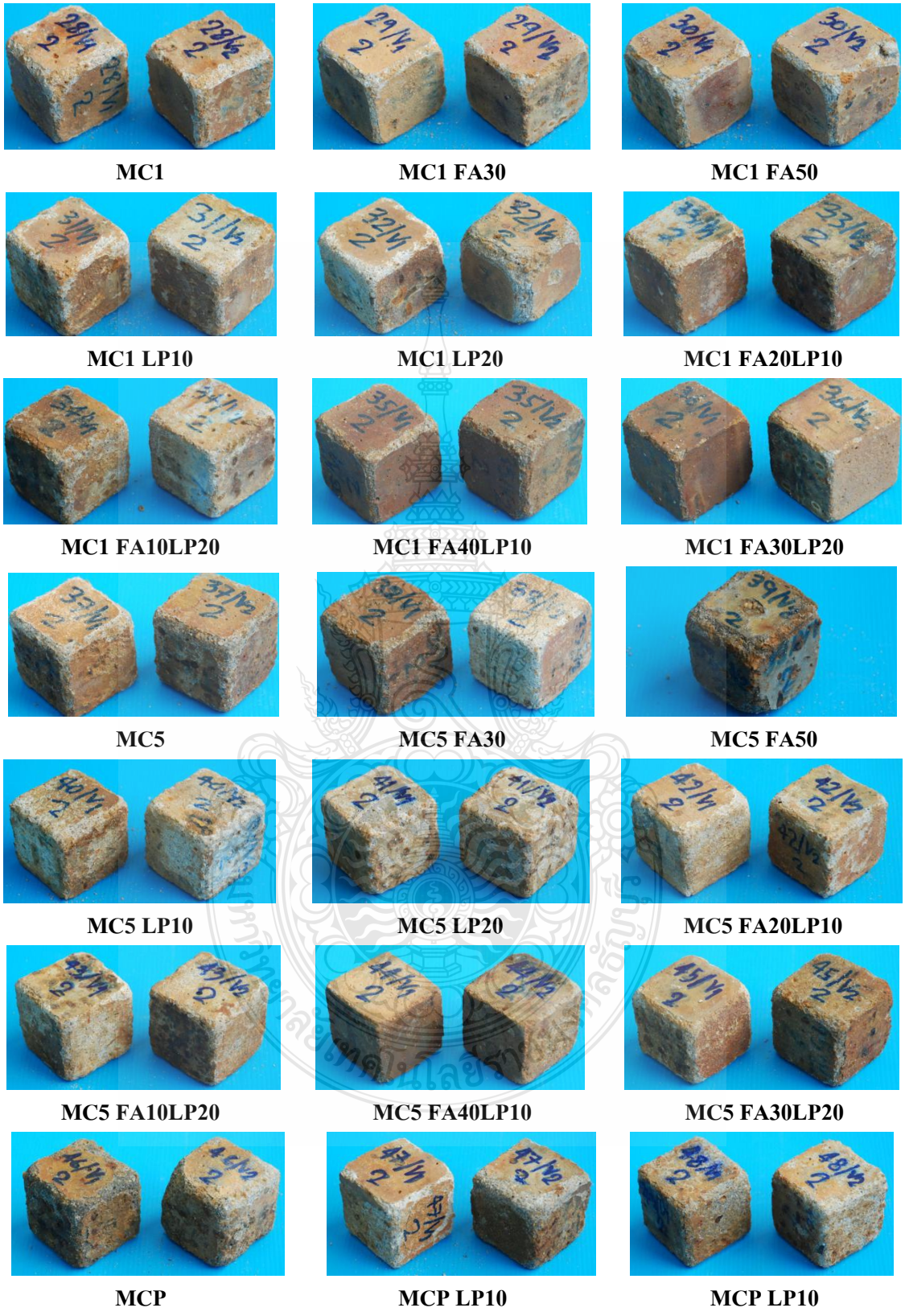
ส่วนการแทนที่ด้วยผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เป็นอาจเป็นเพราะการแทนที่ผงหินปูนสามารถไปเติมเต็มช่องว่างในมอร์ต้าร์ จึงทำให้สารละลายซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ยากขึ้น และในส่วนของปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีแนวโน้มว่าไม่แตกต่างจากการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 นั้น ก็มีค่าใกล้เคียงกับกรณีการแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 โดยมีค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ซึ่งเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

สำหรับการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อมีการบดผสมร่วมกับการแทนที่ หรือกรณีแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนนั้นพบว่า การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าน้อยกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นเมื่อแทนที่ด้วยปริมาณเถ้าลอยในปริมาณสูง แนวโน้มจะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักจะมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานจะมีผลจากต่อกรณีสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่ามากขึ้นดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



ภาพที่ 4.50 เปรียบเทียบผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ศึกษา เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 900 วัน

ภาพที่ 4.51 แสดงภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ที่อายุ 900 วัน ในการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับกรณีการสูญเสียน้ำหนัก (ภาพที่ 4.50) ที่กล่าวมาแล้ว



ภาพที่ 4.51 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 900 วัน

MCL10

MCL10 FA30

MCL10 FA50

MCL20

MCL20 FA30

MCL20 FA50

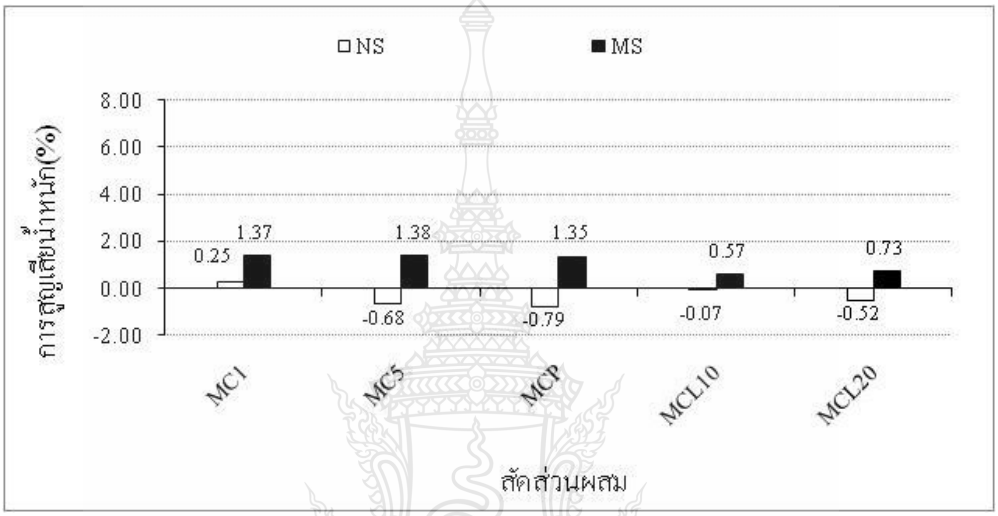
ภาพที่ 4.51 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 900 วัน (ต่อ)

4.3.2.2 ผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟตต่อการสูญเสียน้ำหนัก

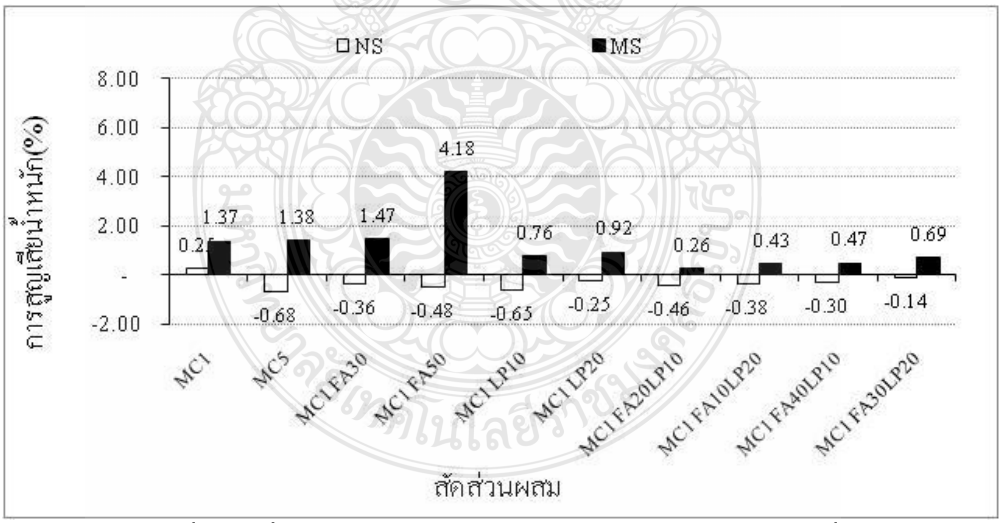
ในการประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ได้พิจารณาถึงผลกระทบของสารละลายซัลเฟตทั้ง 2 กรณีสารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เช่นเดียวกับการขยายตัวของชิ้นตัวอย่าง โดยมีรายละเอียดดังนี้

ภาพที่ 4.52 แสดงการเปรียบเทียบการการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลานปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่เถ้าลอยและ ผงหินปูน และแทนที่ทั้งเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่ออายุของการแช่ในสารละลายซัลเฟต 900 วัน ซึ่งจากพิจารณาผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ พบว่า การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต จะมีค่ามากกว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น โดยที่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้นแทบจะไม่มีการสูญเสียน้ำหนักแต่กลับมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะการถูกทำลายตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะมีลักษณะที่เสื่อมสภาพของผิวชิ้นตัวอย่าง เนื่องจากกลไกการทำลายจะไปลดความยึดประสานของโครงสร้างของเพสต์ ไม่เหมือนกับกรณีของโซเดียมซัลเฟตซึ่งจะทำให้เกิด Ettringite ในโครงสร้างของเพสต์ผลทำให้เกิดการขยายตัวในตัวอย่างอย่างเดียว ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ที่อายุ 900 วัน จากการแช่ในสารละลายซัลเฟต (ภาพที่ 4.53) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบลักษณะของการทำลายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ลักษณะการถูกทำลายของตัวอย่างมอร์ต้าร์จะไปในทิศทางเดียวกับการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ (ภาพที่ 4.52) ทั้งนี้ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว

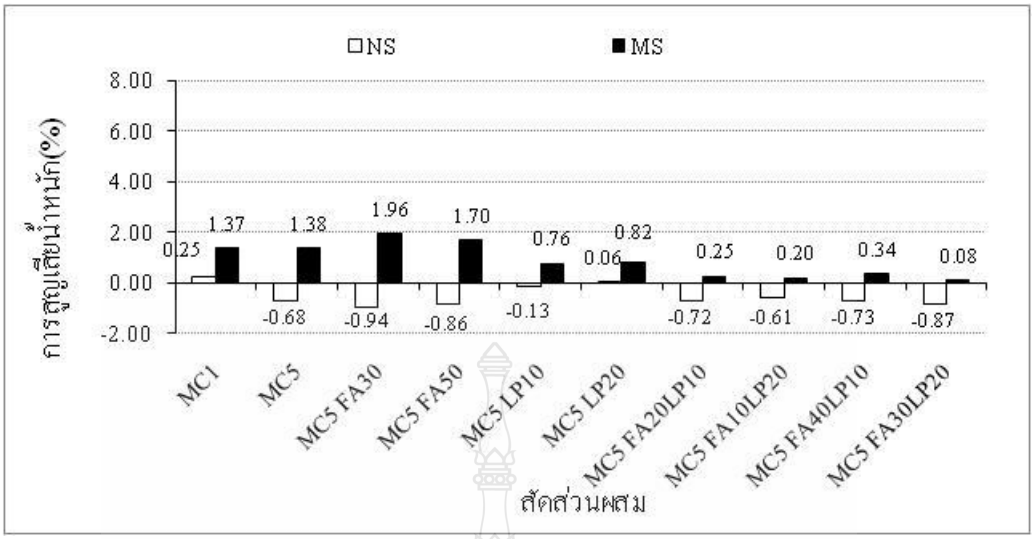


ก. เมื่อปูนซีเมนต์ล้วน

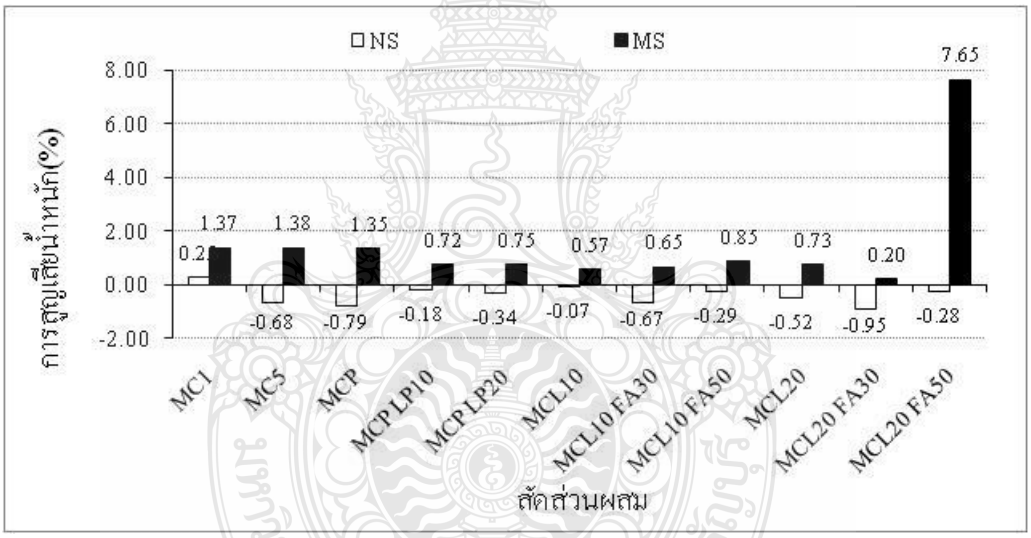


ข. เมื่อแทนที่เถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ภาพที่ 4.52 เปรียบเทียบผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 900 วัน



ค. เมื่อแทนที่เถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5



ง. เมื่อแทนที่เถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอซโซลานและปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน

ภาพที่ 4.52 เปรียบเทียบผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 900 วัน (ต่อ)

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

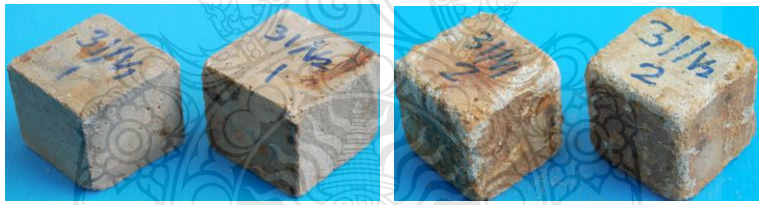
MC1

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MC1 FA30

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MC1 FA50



โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MC1 LP10

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MC1 LP20

ภาพที่ 4.53 ภาพถ่ายเปรียบเทียบระหว่างสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและลงหินปูนที่อายุการแช่ในสารละลายซัลเฟต 900 วัน

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MC1 FA20LP10

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MC1 FA10LP20

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MC1 FA40LP10

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MC1 FA30LP20

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MC5

ภาพที่ 4.53 ภาพถ่ายเปรียบเทียบระหว่างสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและลงหินปูนที่อายุการแช่ในสารละลายซัลเฟต 900 วัน (ต่อ)

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MC5 FA30

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MC5 FA50

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MC5 P10

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MC5 LP20

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MC5 FA20LP10

ภาพที่ 4.53 ภาพถ่ายเปรียบเทียบระหว่างสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและลงหินปูนที่อายุการแช่ในสารละลายซัลเฟต 900 วัน (ต่อ)

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MC5 FA10LP20

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MC5 FA40LP10

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MC5 FA30LP20

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MCP

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MCP LP10

ภาพที่ 4.53 ภาพถ่ายเปรียบเทียบระหว่างสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและลงหินปูนที่อายุการแช่ในสารละลายซัลเฟต 900 วัน (ต่อ)

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

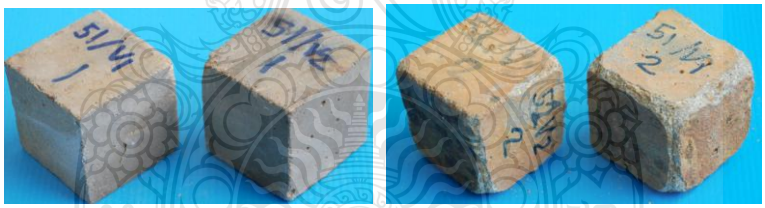
MCP LP20

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MCLP10

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MCLP10 FA30



โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MCLP10 FA50

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

MCLP20

ภาพที่ 4.53 ภาพถ่ายเปรียบเทียบระหว่างสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและลงหินปูนที่อายุการแช่ในสารละลายซัลเฟต 900 วัน (ต่อ)

โซเดียมซัลเฟต

แมกนีเซียมซัลเฟต

MCLP20 FA30

โซเดียมซัลเฟต

แมกนีเซียมซัลเฟต

MCLP20 FA50

ภาพที่ 4.53 ภาพถ่ายเปรียบเทียบระหว่างสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและลงหินปูนที่อายุการแช่ในสารละลายซัลเฟต 900 วัน (ต่อ)

4.4 สรุปผลการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์

จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปผลคุณสมบัติด้านซีเมนต์และผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่วัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์ และความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ดังตารางที่ 4.8 และ 4.9

ในกรณีการต้านทานซัลเฟตนั้นพบว่ากรณีสารละลายซัลเฟตแนะนำให้ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนในกรณีของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตแนะนำให้ใช้ผงหินปูนร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือใช้วัสดุประสานสามชนิดคือ เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อย่างไรก็แล้วแต่ถ้าจะให้สามารถต้านทานสารละลายซัลเฟตโดยรวมแนะนำให้ใช้เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (3 Binders)

ตารางที่ 4.8 สรุปผลการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

รายการ		ปริมาณน้ำที่เหมาะสม	การก่อตัว	ค่าการไหลแผ่	ความพรุน	กำลังอัดประลัย
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	แทนที่เถ้าลอย	น้อยกว่า	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า	น้อยกว่า
	แทนที่ผงหินปูน	เทียบเท่า	น้อยกว่า	เทียบเท่า	มากกว่า	น้อยกว่า
	แทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน	น้อยกว่า	น้อยกว่า	มากกว่า	มากกว่า	น้อยกว่า
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5	แทนที่เถ้าลอย	น้อยกว่า	มากกว่า	มากกว่า	เทียบเท่า	น้อยกว่า
	แทนที่ผงหินปูน	มากกว่า	น้อยกว่า	เทียบเท่า	เทียบเท่า	น้อยกว่า
	แทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน	น้อยกว่า	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า	น้อยกว่า
ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน	ล้วน	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า
	แทนที่ผงหินปูน	มากกว่า	มากกว่า	เทียบเท่า	มากกว่า	น้อยกว่า
ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10	ล้วน	เทียบเท่า	น้อยกว่า	เทียบเท่า	มากกว่า	น้อยกว่า
	แทนที่เถ้าลอย	น้อยกว่า	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า	น้อยกว่า
ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20	ล้วน	เทียบเท่า	น้อยกว่า	มากกว่า	มากกว่า	น้อยกว่า
	แทนที่เถ้าลอย	น้อยกว่า	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า	น้อยกว่า

ตารางที่ 4.9 สรุปผลการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน

รายการ		การต้านทานซัลเฟต (การขยายตัว)			การต้านทานซัลเฟต (การสูญเสียน้ำหนัก)		การต้านทานซัลเฟตโดยรวม
		NS	MS	NS:MS	NS	MS	
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	แทนที่เถ้าลอย	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น	แย่ลง	แย่ลง
	แทนที่ผงหินปูน	เทียบเท่า	เทียบเท่า	เทียบเท่า	เทียบเท่า	ดีขึ้น	เทียบเท่า
	แทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน	ดีขึ้น (*)	ดีขึ้น (*)	ดีขึ้น (*)	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5	แทนที่เถ้าลอย	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น	แย่ลง	แย่ลง
	แทนที่ผงหินปูน	ดีขึ้น	ดีขึ้น	เทียบเท่า	เทียบเท่า	ดีขึ้น	เทียบเท่า
	แทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น
ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน	ล้วน	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น	เทียบเท่า	เทียบเท่า	แย่ลง
	แทนที่ผงหินปูน	ดีขึ้น	แย่ลง	เทียบเท่า	เทียบเท่า	เทียบเท่า	เทียบเท่า
ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน	ล้วน	เทียบเท่า	เทียบเท่า	เทียบเท่า	เทียบเท่า	ดีขึ้น	เทียบเท่า
	แทนที่เถ้าลอย	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น	เทียบเท่า	แย่ลง	แย่ลง

(*) ยกเว้นกรณีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงๆในปริมาณที่น้อยๆ จะมีผลให้การต้านทานซัลเฟตได้น้อยลง

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

สำหรับการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตในครั้งนี้ มีข้อสรุปดังนี้

5.1.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะมีค่าน้อยลงเมื่อบดผสมหรือแทนที่ด้วยเถ้าลอยในขณะเมื่อบดผสมหรือแทนที่ผงหินปูนให้ค่าไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่แทนที่

5.1.2 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อบดผสมหรือแทนที่ด้วยเถ้าลอย ในขณะที่เมื่อบดผสมหรือแทนที่ด้วยผงหินปูนจะให้ค่าไม่แตกต่าง (หรือแนวโน้มจะน้อยลง) เมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ผสม

5.1.3 ค่าการไหลของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะให้ค่าในแนวโน้มที่ผกผันกับปริมาณน้ำที่เหมาะสมกล่าวคือ ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์น้อยจะให้ค่าการไหลของมอร์ต้าร์ที่มาก ในทำนองเดียวกันถ้าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มากจะให้ค่าการไหลของมอร์ต้าร์น้อย

5.1.4 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีแนวโน้มน้อยลงเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยในขณะที่การผสมด้วยผงหินปูนจะให้ค่าที่ไม่แตกต่าง(ต่ำกว่าเล็กน้อย)เมื่อเปรียบเทียบกับการไม่แทนที่

5.1.5 ความพรุนที่อายุ 28 วันของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีค่ามากขึ้นเมื่อมีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ในขณะที่มีค่าไม่แตกต่างหรือแนวโน้มจะน้อยกว่าเมื่อมีผงหินปูนเป็นส่วนผสมโดยเปรียบเทียบกับการไม่มีเถ้าลอยหรือผงหินปูนเป็นส่วนผสม

5.1.6 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่ามากที่สุด รองลงมาเป็นในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต และในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตตามลำดับ

5.1.7 การขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนมีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ในขณะที่การขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1และประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนล้วนเมื่อบดผสมร้อยละ 10 มีแนวโน้มว่าจะมากกว่าหรือใกล้เคียงกับ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนแต่เมื่อบดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 กลับให้ค่าที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน

5.1.8 การผสมเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่ว่าจะบดผสมหรือแทนที่ จะให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

5.1.9 การผสมผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่ว่าจะบดผสมหรือแทนที่ จะให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตที่ใกล้เคียงหรือไม่แตกต่างจากมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน แต่ถ้าผสมผงหินปูนในปริมาณมาก (ร้อยละ 20) มีแนวโน้มว่าจะให้ค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

5.1.10 การผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตมีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

5.1.11 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะให้น้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในขณะที่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้ตัวอย่างมอร์ต้าร์มีการสูญเสียน้ำหนัก

5.1.12 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้นการผสมผงหินปูนไม่ว่าจะบดผสมหรือแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยกว่าหรือใกล้เคียงเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่มีผงหินปูนเป็นส่วนผสม

5.1.13 การผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตโดยเฉพาะในกรณีแมกนีเซียมซัลเฟตจะส่งผลให้มีค่าน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

5.1.14 สัดส่วนผสมของเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมในการพิจารณานำไปใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟตได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ ดังนั้นควรพิจารณาใช้ตัวอย่างคอนกรีตเพื่อให้ได้ผลใกล้เคียงกับการใช้งานคอนกรีตในสภาพสิ่งแวดล้อมที่เป็นจริง

5.2.2 ในสิ่งแวดล้อมจริงมีสารละลายอื่นที่นอกเหนือจากสารละลายซัลเฟตเป็นส่วนผสมด้วย เช่น สารคลอไรด์ เป็นต้น ดังนั้นจึงควรพิจารณานำสารคลอไรด์มาเป็นส่วนผสมในสารละลายซัลเฟต

5.2.3 เพื่อลดระยะเวลาในการศึกษาควรพิจารณาเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต แต่ทั้งนี้ต้องศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายต่อผลการศึกษาด้วย

รายการอ้างอิง

[1] Krammart P., and Tangtermsirikul S., “Strength Reduction and Expansion of Mortars with Fly Ash,” Research and Development Journal of The Engineering Institute of Thailand, V.13, No.3, 2002, pp. 9-16.

[2] Voglis N.,Kakali G., Chanitakis E., Tsivilis S., 2005. Portland-Limestone cement Their properties and hydration compared to those of other composite cements. Cement & Concrete Composites, V.27:pp.191-196

[3] Krammart P., and Tangtermsirikul S. “Expansion, Strength Reduction and Weight Loss of Fly Ash Concrete in Sulfate Solution,” ASEAN Journal on SCIENCE & TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT, V 21, 2004.

[4] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ, “ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต,” พิมพ์ครั้งที่ 2, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2552.

[5] ปิติศานต์ กร้ำมาตร และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล, “การต้านทานซัลแฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูน,” การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี, ครั้งที่ 3, 24-26 ตุลาคม 2550, ชลบุรี, 2550.

[6] Vogelis et al., “Portland-limestone cement. Their properties and hydration compared to those of other composite cements,” Cement & Concrete Composites (Electronic), 2005, Vol. 27, pp. 191-196. Available: Elsevier/Science Direct (3 may 2009).

[7] Kadri et al., “Combined effect of chemical nature and fineness of mineral powders on Portland cement hydration,” RILEM (Electronic), 2009, pp. 5-6. Available: RILEM Union/RILEM (3 may 2009).

[8] American Society for Testing and Material, **Annual Book of ASTM Standard,** V 04.02, Easton, Md., USA., 1996.

[9] กระทรวงอุตสาหกรรม, “**กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต**,” มาตรฐาน มอก.2135-2545. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2546. หน้า 3.

[10] สหลาภ หอมวุฒิวงค์, ดิลก คูรัตนเวช และ ชัย จตุรพิทักษ์กุล, “การทดสอบและแปรผลการทดสอบต่อคุณสมบัติต่อเถ้าถ่านหิน,” **การสัมมนาทางวิชาการเรื่องการนำเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในงานคอนกรีต**, ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจุลจอมเกล้าธนบุรี.

[11] Al-Amoudi, O.S.B., “Mechanisms of Sulfate in Plain and Blended Cement. a Review,” Proceeding of the International Seminar, University of Dundee, Scotland, UK., 1999.

[12] Al-Amoudi O.S.B., Maslehuddin M., Saadi, M.M., 1995, “Effect of magnesium and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements, ACI Materials Journal 92: pp.15-24.

[13] Al-Dulaijan S.U., Maslehuddin M., Al-Zahrani M.M., Sharif A.M., Shameem M., Ibrahim M., 2003. “Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate,” Cement & Concrete Composites 25: Article in press.

[14] Pitisan Krammart and Somnuk Tangtermsirikul “Expansion, Strength Reduction and Weight Loss of Fly Ash Concrete in Sulfate Solution,” ASEAN Journal on Science & Technology for Delvelopment, V 21, 2004, pp. 373-390.

[15] ปิติศานต์ กร้ำมาตร และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล, “การต้านทานซัลแฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูน”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี, ครั้งที่ 3, 24-26 ตุลาคม 2550, ชลบุรี, 2550.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ ก.1 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
0.05	0.06	0.055	0.00	0.00
0.06	0.07	0.065	0.00	0.01
0.07	0.08	0.075	0.01	0.02
0.08	0.09	0.085	0.02	0.04
0.09	0.11	0.100	0.05	0.09
0.11	0.13	0.120	0.10	0.20
0.13	0.15	0.140	0.20	0.39
0.15	0.17	0.160	0.35	0.75
0.17	0.20	0.185	0.59	1.33
0.20	0.23	0.215	0.91	2.24
0.23	0.27	0.250	1.26	3.50
0.27	0.31	0.290	1.52	5.02
0.31	0.36	0.335	1.58	6.60
0.36	0.42	0.390	1.47	8.07
0.42	0.49	0.455	1.33	9.40
0.49	0.58	0.535	1.15	10.55
0.58	0.67	0.625	0.92	11.46
0.67	0.78	0.725	0.72	12.16
0.78	0.91	0.845	0.60	12.79
0.91	1.06	0.985	0.51	13.30
1.06	1.24	1.150	0.46	13.76
1.24	1.44	1.340	0.45	14.21
1.44	1.68	1.560	0.46	14.67
1.68	1.95	1.815	0.51	15.18
1.95	2.28	2.115	0.61	15.78
2.28	2.65	2.465	0.76	16.55
2.65	3.09	2.870	0.99	17.53
3.09	3.60	3.345	1.28	18.82
3.60	4.19	3.895	1.54	20.45
4.19	4.88	4.535	2.04	22.49

ตารางที่ ก.1 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
4.88	5.69	5.285	2.45	24.95
5.69	6.63	6.160	2.86	27.81
6.63	7.72	7.175	3.25	31.06
7.72	9.00	8.360	3.62	34.67
9.00	10.48	9.740	3.95	38.63
10.48	12.21	11.345	4.27	42.90
12.21	14.22	13.215	4.58	47.48
14.22	16.57	15.395	4.67	52.35
16.57	19.31	17.940	5.15	57.50
19.31	22.49	20.900	5.38	62.67
22.49	26.20	24.345	5.55	68.43
26.20	30.53	28.365	5.69	74.12
30.53	35.56	33.045	5.52	79.64
35.56	41.43	38.495	5.12	84.76
41.43	48.27	44.850	4.51	89.25
48.27	56.23	52.250	3.72	92.99
56.23	65.51	60.870	2.85	95.83
65.51	76.32	70.915	1.98	97.82
76.32	88.91	82.615	1.23	99.05
88.91	103.58	96.245	0.66	99.70
103.58	120.67	112.125	0.30	100.00
120.67	140.58	130.625	0.00	100.00
140.58	163.77	152.175	0.00	100.00
163.77	190.80	177.285	0.00	100.00
190.80	222.26	206.530	0.00	100.00
222.26	258.95	240.605	0.00	100.00
258.95	301.68	280.315	0.00	100.00
301.68	351.46	326.570	0.00	100.00
351.46	409.45	380.455	0.00	100.00
409.45	477.01	443.230	0.00	100.00

ตารางที่ ก.1 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
477.01	555.71	516.360	0.00	100.00
555.71	647.41	601.560	0.00	100.00
647.41	754.23	700.820	0.00	100.00
754.23	878.67	816.450	0.00	100.00

ตารางที่ ก.2 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
0.05	0.06	0.055	0.00	0.00
0.06	0.07	0.065	0.00	0.00
0.07	0.08	0.075	0.00	0.00
0.08	0.09	0.085	0.01	0.01
0.09	0.11	0.100	0.02	0.03
0.11	0.13	0.120	0.04	0.07
0.13	0.15	0.140	0.09	0.16
0.15	0.17	0.160	0.19	0.35
0.17	0.20	0.185	0.38	0.73
0.20	0.23	0.215	0.67	1.39
0.23	0.27	0.250	1.03	2.43
0.27	0.31	0.290	1.34	3.77
0.31	0.36	0.335	1.44	5.21
0.36	0.42	0.390	1.36	6.57
0.42	0.49	0.455	1.23	7.80
0.49	0.58	0.535	1.08	8.88
0.58	0.67	0.625	0.85	9.73
0.67	0.78	0.725	0.68	10.38
0.78	0.91	0.845	0.53	10.91
0.91	1.06	0.985	0.44	11.35

ตารางที่ ก.2 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
1.06	1.24	1.150	0.38	11.73
1.24	1.44	1.340	0.36	12.09
1.44	1.68	1.560	0.35	12.45
1.68	1.95	1.815	0.39	12.85
1.95	2.28	2.115	0.48	13.32
2.28	2.65	2.465	0.62	13.94
2.65	3.09	2.870	0.84	14.78
3.09	3.60	3.345	1.15	15.93
3.60	4.19	3.895	1.55	17.47
4.19	4.88	4.535	2.03	19.50
4.88	5.69	5.285	2.58	22.08
5.69	6.63	6.160	3.15	25.23
6.63	7.72	7.175	3.75	28.99
7.72	9.00	8.360	4.34	33.33
9.00	10.48	9.740	4.89	38.22
10.48	12.21	11.345	5.39	43.61
12.21	14.22	13.215	5.82	49.43
14.22	16.57	15.395	6.17	55.60
16.57	19.31	17.940	6.45	62.05
19.31	22.49	20.900	6.88	68.74
22.49	26.20	24.345	6.53	75.27
26.20	30.53	28.365	6.11	81.38
30.53	35.56	33.045	5.42	86.80
35.56	41.43	38.495	4.52	91.32
41.43	48.27	44.850	3.50	94.82
48.27	56.23	52.250	2.49	97.31
56.23	65.51	60.870	1.57	98.88
65.51	76.32	70.915	0.82	99.70
76.32	88.91	82.615	0.30	100.00
88.91	103.58	96.245	0.00	100.00

ตารางที่ ก.2 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
103.58	120.67	112.125	0.00	100.00
120.67	140.58	130.625	0.00	100.00
140.58	163.77	152.175	0.00	100.00
163.77	190.80	177.285	0.00	100.00
190.80	222.26	206.530	0.00	100.00
222.26	258.95	240.605	0.00	100.00
258.95	301.68	280.315	0.00	100.00
301.68	351.46	326.570	0.00	100.00
351.46	409.45	380.455	0.00	100.00
409.45	477.01	443.230	0.00	100.00
477.01	555.71	516.360	0.00	100.00
555.71	647.41	601.560	0.00	100.00
647.41	754.23	700.820	0.00	100.00
754.23	878.67	816.450	0.00	100.00

ตารางที่ ก.3 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอซโซลาน

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
0.05	0.06	0.055	0.00	0.00
0.06	0.07	0.065	0.00	0.00
0.07	0.08	0.075	0.00	0.00
0.08	0.09	0.085	0.00	0.01
0.09	0.11	0.100	0.01	0.02
0.11	0.13	0.120	0.03	0.05
0.13	0.15	0.140	0.07	0.12
0.15	0.17	0.160	0.17	0.29
0.17	0.20	0.185	0.35	0.64
0.20	0.23	0.215	0.66	1.29
0.23	0.27	0.250	1.08	2.37

ตารางที่ ก.3 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
0.27	0.31	0.290	1.46	3.83
0.31	0.36	0.335	1.60	5.43
0.36	0.42	0.390	1.54	6.96
0.42	0.49	0.455	1.43	8.40
0.49	0.58	0.535	1.30	9.70
0.58	0.67	0.625	1.07	10.76
0.67	0.78	0.725	0.88	11.65
0.78	0.91	0.845	0.76	12.41
0.91	1.06	0.985	0.69	13.09
1.06	1.24	1.150	0.65	13.74
1.24	1.44	1.340	0.66	14.41
1.44	1.68	1.560	0.70	15.11
1.68	1.95	1.815	0.77	15.88
1.95	2.28	2.115	0.89	16.77
2.28	2.65	2.465	1.07	17.84
2.65	3.09	2.870	1.31	19.15
3.09	3.60	3.345	1.61	20.76
3.60	4.19	3.895	1.97	22.73
4.19	4.88	4.535	2.35	25.08
4.88	5.69	5.285	2.73	27.83
5.69	6.63	6.160	3.13	30.96
6.63	7.72	7.175	3.53	34.49
7.72	9.00	8.360	3.93	38.41
9.00	10.48	9.740	4.34	42.75
10.48	12.21	11.345	4.76	47.52
12.21	14.22	13.215	5.19	52.71
14.22	16.57	15.395	5.61	58.32
16.57	19.31	17.940	5.99	64.31
19.31	22.49	20.900	6.35	70.66
22.49	26.20	24.345	6.27	76.93

ตารางที่ ก.3 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
26.20	30.53	28.365	5.86	82.79
30.53	35.56	33.045	5.13	87.92
35.56	41.43	38.495	4.18	92.10
41.43	48.27	44.850	3.15	95.25
48.27	56.23	52.250	2.17	97.42
56.23	65.51	60.870	1.35	98.77
65.51	76.32	70.915	0.73	99.85
76.32	88.91	82.615	0.34	100.00
88.91	103.58	96.245	0.15	100.00
103.58	120.67	112.125	0.00	100.00
120.67	140.58	130.625	0.00	100.00
140.58	163.77	152.175	0.00	100.00
163.77	190.80	177.285	0.00	100.00
190.80	222.26	206.530	0.00	100.00
222.26	258.95	240.605	0.00	100.00
258.95	301.68	280.315	0.00	100.00
301.68	351.46	326.570	0.00	100.00
351.46	409.45	380.455	0.00	100.00
409.45	477.01	443.230	0.00	100.00
477.01	555.71	516.360	0.00	100.00
555.71	647.41	601.560	0.00	100.00
647.41	754.23	700.820	0.00	100.00
754.23	878.67	816.450	0.00	100.00

ตารางที่ ก.4 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
0.05	0.06	0.055	0.00	0.00
0.06	0.07	0.065	0.00	0.00
0.07	0.08	0.075	0.00	0.00
0.08	0.09	0.085	0.01	0.01
0.09	0.11	0.100	0.02	0.03
0.11	0.13	0.120	0.05	0.18
0.13	0.15	0.140	0.11	0.19
0.15	0.17	0.160	0.23	0.42
0.17	0.20	0.185	0.45	0.87
0.20	0.23	0.215	0.79	1.66
0.23	0.27	0.250	1.24	2.90
0.27	0.31	0.290	1.62	4.52
0.31	0.36	0.335	1.76	6.27
0.36	0.42	0.390	1.68	7.95
0.42	0.49	0.455	1.57	9.52
0.49	0.58	0.535	1.42	10.94
0.58	0.67	0.625	1.17	12.11
0.67	0.78	0.725	0.97	13.08
0.78	0.91	0.845	0.85	13.93
0.91	1.06	0.985	0.76	14.69
1.06	1.24	1.150	0.72	15.41
1.24	1.44	1.340	0.73	16.14
1.44	1.68	1.560	0.76	16.90
1.68	1.95	1.815	0.83	17.73
1.95	2.28	2.115	0.95	18.68
2.28	2.65	2.465	1.13	19.82
2.65	3.09	2.870	1.38	21.20
3.09	3.60	3.345	1.70	22.90
3.60	4.19	3.895	2.07	24.97
4.19	4.88	4.535	2.47	27.44

ตารางที่ ก.4 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
4.88	5.69	5.285	2.86	30.29
5.69	6.63	6.160	3.23	33.52
6.63	7.72	7.175	3.58	37.10
7.72	9.00	8.360	3.90	41.00
9.00	10.48	9.740	4.20	49.68
10.48	12.21	11.345	4.48	54.43
12.21	14.22	13.215	4.75	59.43
14.22	16.57	15.395	5.00	64.67
16.57	19.31	17.940	5.24	70.13
19.31	22.49	20.900	5.46	75.58
22.49	26.20	24.345	5.45	80.83
26.20	30.53	28.365	5.25	85.65
30.53	35.56	33.045	4.83	89.86
35.56	41.43	38.495	4.21	93.32
41.43	48.27	44.850	3.45	95.96
48.27	56.23	52.250	2.64	97.82
56.23	65.51	60.870	1.86	99.00
65.51	76.32	70.915	1.18	99.67
76.32	88.91	82.615	0.00	100.00
88.91	103.58	96.245	0.00	100.00
103.58	120.67	112.125	0.00	100.00
120.67	140.58	130.625	0.00	100.00
140.58	163.77	152.175	0.00	100.00
163.77	190.80	177.285	0.00	100.00
190.80	222.26	206.530	0.00	100.00
222.26	258.95	240.605	0.00	100.00
258.95	301.68	280.315	0.00	100.00
301.68	351.46	326.570	0.00	100.00
351.46	409.45	380.455	0.00	100.00
409.45	477.01	443.230	0.00	100.00
477.01	555.71	516.360	0.00	100.00
555.71	647.41	601.560	0.00	100.00
647.41	754.23	700.820	0.00	100.00
754.23	878.67	816.450	0.00	100.00

ตารางที่ ก.5 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
0.05	0.06	0.055	0.00	0.00
0.06	0.07	0.065	0.00	0.00
0.07	0.08	0.075	0.00	0.00
0.08	0.09	0.085	0.01	0.01
0.09	0.11	0.100	0.02	0.04
0.11	0.13	0.120	0.06	0.10
0.13	0.15	0.140	0.13	0.23
0.15	0.17	0.160	0.27	0.51
0.17	0.20	0.185	0.50	1.01
0.20	0.23	0.215	0.83	1.83
0.23	0.27	0.250	1.21	3.05
0.27	0.31	0.290	1.53	4.58
0.31	0.36	0.335	1.41	6.24
0.36	0.42	0.390	1.22	7.85
0.42	0.49	0.455	1.05	9.38
0.49	0.58	0.535	0.95	10.79
0.58	0.67	0.625	0.88	12.00
0.67	0.78	0.725	0.94	13.06
0.78	0.91	0.845	1.05	14.01
0.91	1.06	0.985	1.23	14.89
1.06	1.24	1.150	1.47	15.74
1.24	1.44	1.340	1.78	16.62
1.44	1.68	1.560	2.14	17.56
1.68	1.95	1.815	2.52	18.60
1.95	2.28	2.115	2.88	19.83
2.28	2.65	2.465	3.18	21.30
2.65	3.09	2.870	3.40	23.08
3.09	3.60	3.345	3.55	25.22
3.60	4.19	3.895	3.69	27.74
4.19	4.88	4.535	3.76	30.62
4.88	5.69	5.285	3.85	33.80
5.69	6.63	6.160	3.99	37.20
6.63	7.72	7.175	4.18	40.75

ตารางที่ ก.5 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
7.72	9.00	8.360	4.40	44.38
9.00	10.48	9.740	4.62	48.07
10.48	12.21	11.345	4.75	51.83
12.21	14.22	13.215	4.71	55.68
14.22	16.57	15.395	4.44	59.67
16.57	19.31	17.940	3.94	63.85
19.31	22.49	20.900	3.27	68.25
22.49	26.20	24.345	2.49	72.88
26.20	30.53	28.365	1.71	77.63
30.53	35.56	33.045	1.04	82.33
35.56	41.43	38.495	0.54	86.77
41.43	48.27	44.850	0.23	90.71
48.27	56.23	52.250	0.00	93.98
56.23	65.51	60.870	0.00	96.46
65.51	76.32	70.915	0.00	98.18
76.32	88.91	82.615	0.00	99.22
88.91	103.58	96.245	0.00	99.77
103.58	120.67	112.125	0.00	100.00
120.67	140.58	130.625	0.00	100.00
140.58	163.77	152.175	0.00	100.00
163.77	190.80	177.285	0.00	100.00
190.80	222.26	206.530	0.00	100.00
222.26	258.95	240.605	0.00	100.00
258.95	301.68	280.315	0.00	100.00
301.68	351.46	326.570	0.00	100.00
351.46	409.45	380.455	0.00	100.00
409.45	477.01	443.230	0.00	100.00
477.01	555.71	516.360	0.00	100.00
555.71	647.41	601.560	0.00	100.00
647.41	754.23	700.820	0.00	100.00
754.23	878.67	816.450	0.00	100.00

ตารางที่ ก.6 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าลอย

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
0.05	0.06	0.055	0.00	0.00
0.06	0.07	0.065	0.00	0.00
0.07	0.08	0.075	0.00	0.00
0.08	0.09	0.085	0.01	0.01
0.09	0.11	0.100	0.02	0.03
0.11	0.13	0.120	0.04	0.07
0.13	0.15	0.140	0.09	0.16
0.15	0.17	0.160	0.19	0.35
0.17	0.20	0.185	0.34	0.69
0.20	0.23	0.215	0.56	1.25
0.23	0.27	0.250	0.83	2.07
0.27	0.31	0.290	1.05	3.13
0.31	0.36	0.335	1.15	4.28
0.36	0.42	0.390	1.14	5.42
0.42	0.49	0.455	1.11	6.53
0.49	0.58	0.535	1.06	7.59
0.58	0.67	0.625	0.94	8.53
0.67	0.78	0.725	0.84	9.37
0.78	0.91	0.845	0.75	10.13
0.91	1.06	0.985	0.69	10.81
1.06	1.24	1.150	0.64	11.46
1.24	1.44	1.340	0.63	12.08
1.44	1.68	1.560	0.64	12.73
1.68	1.95	1.815	0.70	13.43
1.95	2.28	2.115	0.82	14.25
2.28	2.65	2.465	1.01	15.26
2.65	3.09	2.870	1.28	16.54
3.09	3.60	3.345	1.62	18.16
3.60	4.19	3.895	2.00	20.16
4.19	4.88	4.535	2.38	22.54
4.88	5.69	5.285	2.72	25.26
5.69	6.63	6.160	2.99	28.25
6.63	7.72	7.175	3.19	31.44

ตารางที่ ก.6 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าลอย (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
7.72	9.00	8.360	3.32	34.76
9.00	10.48	9.740	3.38	38.14
10.48	12.21	11.345	3.41	41.55
12.21	14.22	13.215	3.43	44.98
14.22	16.57	15.395	3.46	48.44
16.57	19.31	17.940	3.50	51.94
19.31	22.49	20.900	3.56	55.50
22.49	26.20	24.345	3.62	59.12
26.20	30.53	28.365	3.69	62.82
30.53	35.56	33.045	3.76	66.58
35.56	41.43	38.495	3.82	70.40
41.43	48.27	44.850	3.87	74.27
48.27	56.23	52.250	3.85	78.12
56.23	65.51	60.870	3.75	81.87
65.51	76.32	70.915	3.28	85.43
76.32	88.91	82.615	2.91	88.72
88.91	103.58	96.245	2.48	91.62
103.58	120.67	112.125	2.04	94.10
120.67	140.58	130.625	1.61	96.14
140.58	163.77	152.175	1.18	97.75
163.77	190.80	177.285	0.75	98.93
190.80	222.26	206.530	0.32	99.68
222.26	258.95	240.605	0.00	100.00
258.95	301.68	280.315	0.00	100.00
301.68	351.46	326.570	0.00	100.00
351.46	409.45	380.455	0.00	100.00
409.45	477.01	443.230	0.00	100.00
477.01	555.71	516.360	0.00	100.00
555.71	647.41	601.560	0.00	100.00
647.41	754.23	700.820	0.00	100.00
754.23	878.67	816.450	0.00	100.00

ตารางที่ ก.7 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของผงหินปูน

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
0.05	0.06	0.055	0.00	0.00
0.06	0.07	0.065	0.01	0.01
0.07	0.08	0.075	0.02	0.03
0.08	0.09	0.085	0.04	0.07
0.09	0.11	0.100	0.07	0.15
0.11	0.13	0.120	0.14	0.29
0.13	0.15	0.140	0.25	0.54
0.15	0.17	0.160	0.44	0.98
0.17	0.20	0.185	0.72	1.70
0.20	0.23	0.215	1.11	2.80
0.23	0.27	0.250	1.57	4.38
0.27	0.31	0.290	1.98	6.35
0.31	0.36	0.335	2.18	8.53
0.36	0.42	0.390	2.22	10.75
0.42	0.49	0.455	2.27	13.02
0.49	0.58	0.535	2.32	15.34
0.58	0.67	0.625	2.30	17.64
0.67	0.78	0.725	2.36	20.01
0.78	0.91	0.845	2.49	22.49
0.91	1.06	0.985	2.65	25.14
1.06	1.24	1.150	2.84	27.97
1.24	1.44	1.340	3.05	31.02
1.44	1.68	1.560	3.24	34.26
1.68	1.95	1.815	3.40	37.66
1.95	2.28	2.115	3.55	41.22
2.28	2.65	2.465	3.72	44.93
2.65	3.09	2.870	3.91	48.84
3.09	3.60	3.345	4.14	52.98
3.60	4.19	3.895	4.38	57.36
4.19	4.88	4.535	4.59	61.95
4.88	5.69	5.285	4.76	66.71
5.69	6.63	6.160	4.90	71.60
6.63	7.72	7.175	4.84	76.44

ตารางที่ ก.7 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของผงหินปูน (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
7.72	9.00	8.360	4.65	81.09
9.00	10.48	9.740	4.33	85.42
10.48	12.21	11.345	3.88	89.30
12.21	14.22	13.215	3.33	92.62
14.22	16.57	15.395	2.70	95.32
16.57	19.31	17.940	2.04	97.37
19.31	22.49	20.900	1.42	98.79
22.49	26.20	24.345	0.88	99.66
26.20	30.53	28.365	0.34	100.00
30.53	35.56	33.045	0.00	100.00
35.56	41.43	38.495	0.00	100.00
41.43	48.27	44.850	0.00	100.00
48.27	56.23	52.250	0.00	100.00
56.23	65.51	60.870	0.00	100.00
65.51	76.32	70.915	0.00	100.00
76.32	88.91	82.615	0.00	100.00
88.91	103.58	96.245	0.00	100.00
103.58	120.67	112.125	0.00	100.00
120.67	140.58	130.625	0.00	100.00
140.58	163.77	152.175	0.00	100.00
163.77	190.80	177.285	0.00	100.00
190.80	222.26	206.530	0.00	100.00
222.26	258.95	240.605	0.00	100.00
258.95	301.68	280.315	0.00	100.00
301.68	351.46	326.570	0.00	100.00
351.46	409.45	380.455	0.00	100.00
409.45	477.01	443.230	0.00	100.00
477.01	555.71	516.360	0.00	100.00
555.71	647.41	601.560	0.00	100.00
647.41	754.23	700.820	0.00	100.00
754.23	878.67	816.450	0.00	100.00

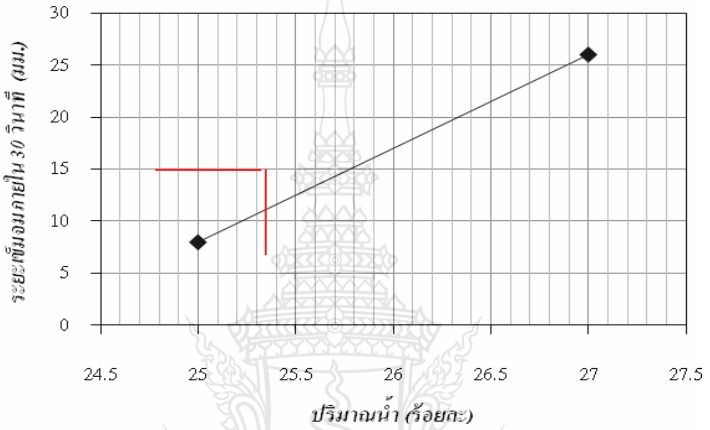
ภาคผนวก ข

ตารางและภาพแสดงการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์วัสดุประสาน

และระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน

ตารางที่ ข.1 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (PC1)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1(กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	100	-	-	25.0	8.0
2	100	-	-	27.0	26.0

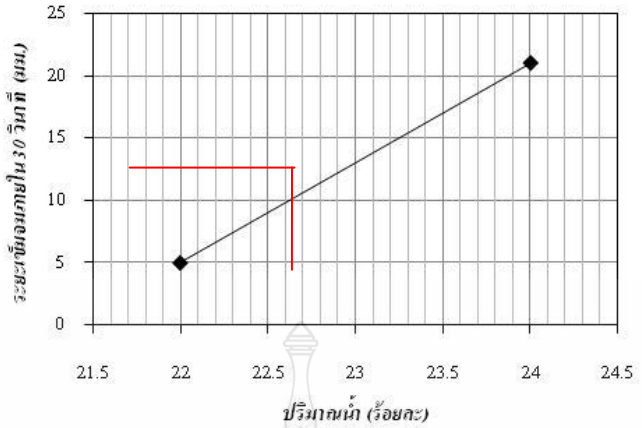


ภาพที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 25.20 %

ตารางที่ ข.2 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (PC1 FA30)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	70	30	-	22.0	5.0
2	70	30	-	24.0	21.0

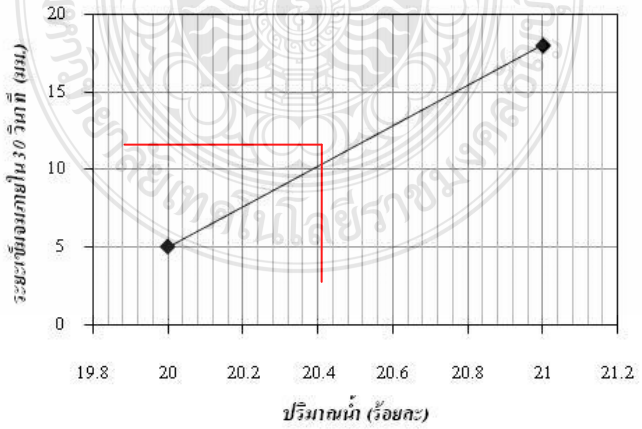


ภาพที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 22.60 %

ตารางที่ ข.3 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 (PC1 FA50)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1(กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน(กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	50	50	-	20.0	5.0
2	50	50	-	21.0	18.0

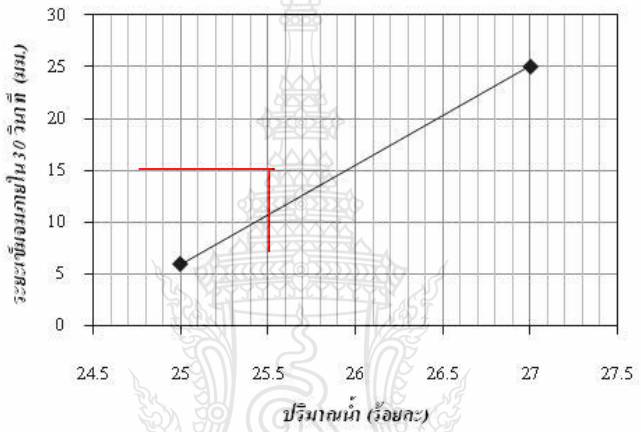


ภาพที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 20.40 %

ตารางที่ ข.4 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 (PC1 LP10)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	90	-	10	25.0	6.0
2	90	-	10	27.0	25.0

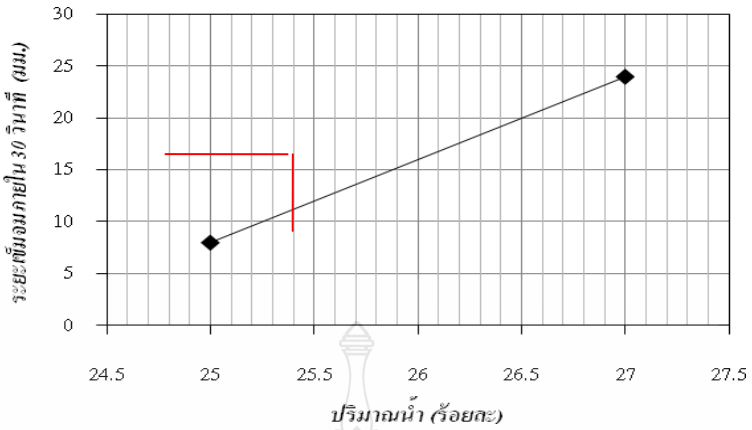


ภาพที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 25.40 %

ตารางที่ ข.5 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20 (PC1 LP20)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1(กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	80	-	20	25.0	8.0
2	80	-	20	27.0	24.0

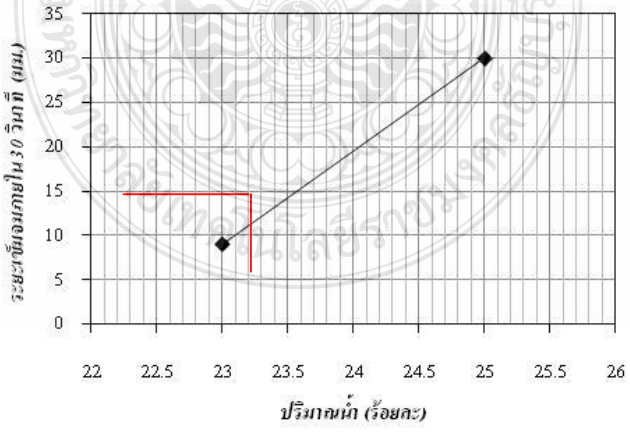


ภาพที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 25.25 %

ตารางที่ ข.6 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (PC1 FA20 LP10)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1(กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	70	20	10	23.0	9.0
2	70	20	10	25.0	30.0

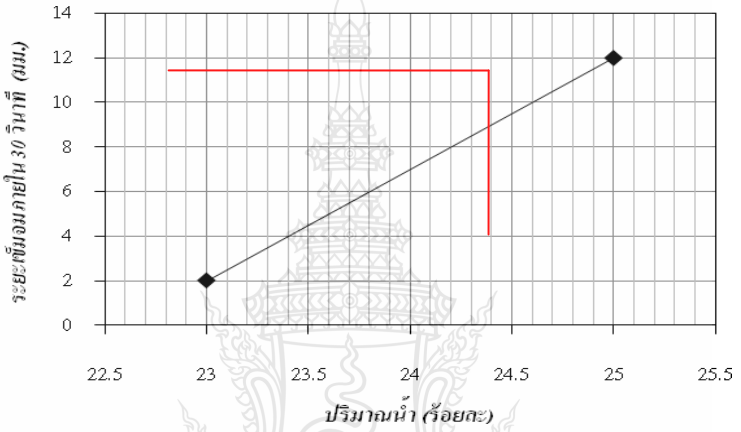


ภาพที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 23.10 %

ตารางที่ ข.7 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (PC1 FA10 LP20)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1(กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	70	10	20	23.0	2.0
2	70	10	20	25.0	12.0

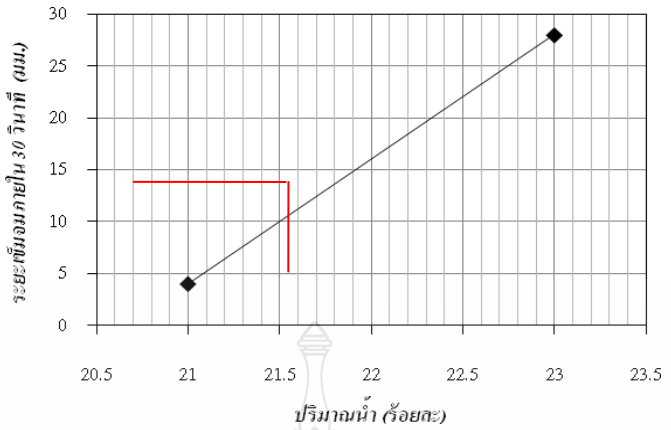


ภาพที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 24.60 %

ตารางที่ ข.8 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (PC1 FA40 LP10)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1(กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	50	40	10	21.0	4.0
2	50	40	10	23.0	28.0

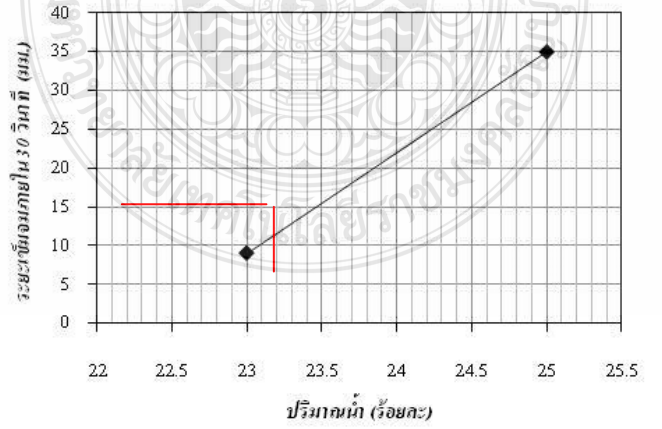


ภาพที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = **21.50** %

ตารางที่ ข.9 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (PC1 FA30 LP20)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1(กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	50	30	20	23.0	9.0
2	50	30	20	25.0	35.0

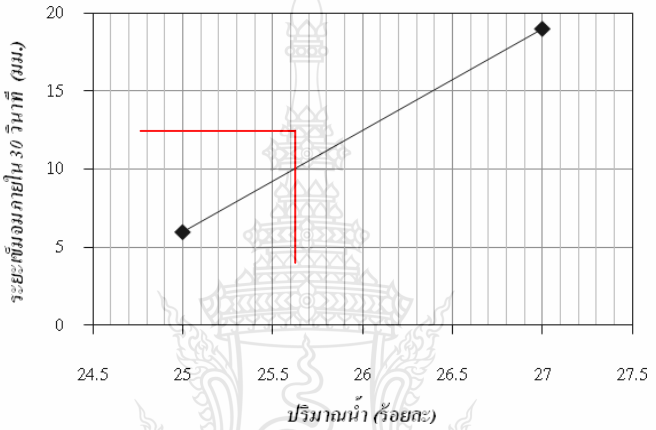


ภาพที่ ข.9 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 23.10 %

ตารางที่ ข.10 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน (PC5)

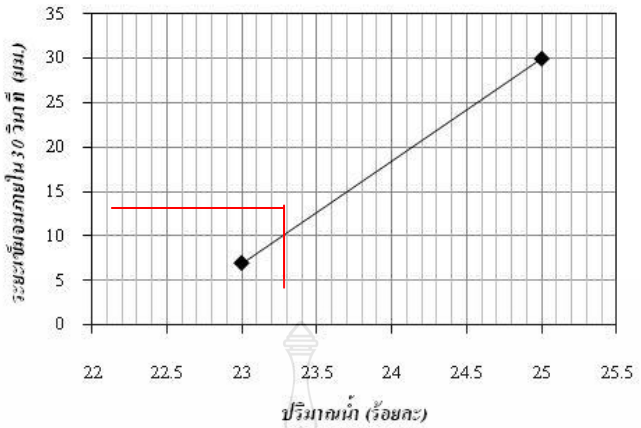
ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	100	-	-	25.0	6.0
2	100	-	-	27.0	19.0



ภาพที่ ข.10 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน
ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 25.60 %

ตารางที่ ข.11 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (PC5 FA30)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	70	30	-	23.0	7.0
2	70	30	-	25.0	30.0

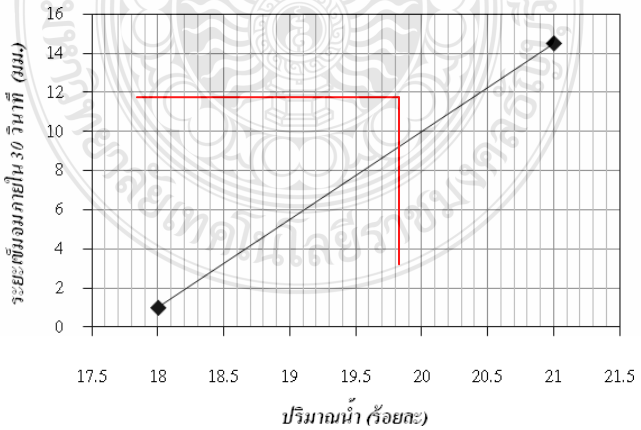


ภาพที่ ข.11 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 23.25 %

ตารางที่ ข.12 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 (PC5 FA50)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	50	50	-	18.0	1.0
2	50	50	-	21.0	14.50

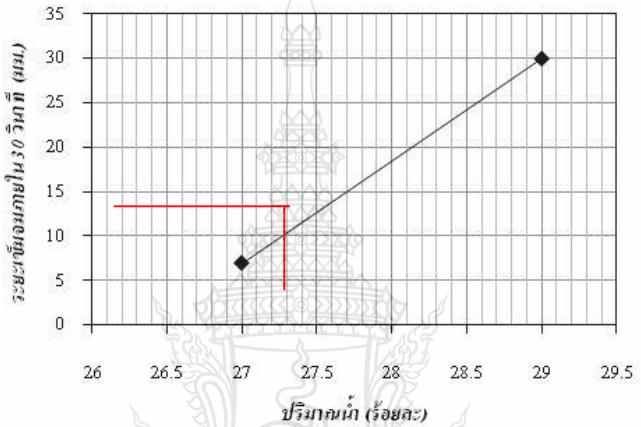


ภาพที่ ข.12 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 20.00 %

ตารางที่ ข.13 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 (PC5 LP10)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	90	-	10	27.0	7.0
2	90	-	10	29.0	30.0

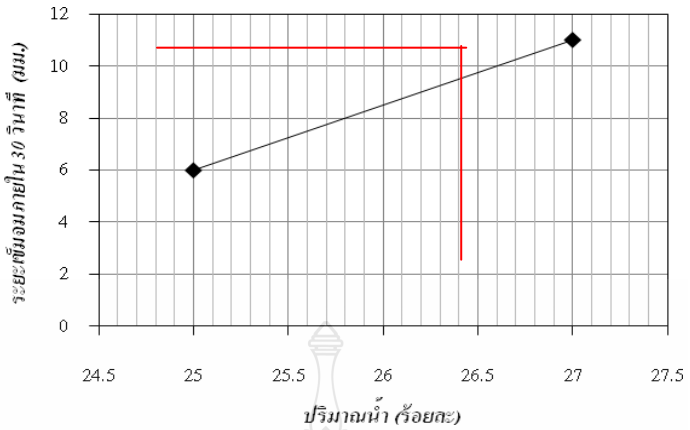


ภาพที่ ข.13 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 27.25 %

ตารางที่ ข.14 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20 (PC5 LP20)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	80	-	20	25.0	6.0
2	80	-	20	27.0	11.0

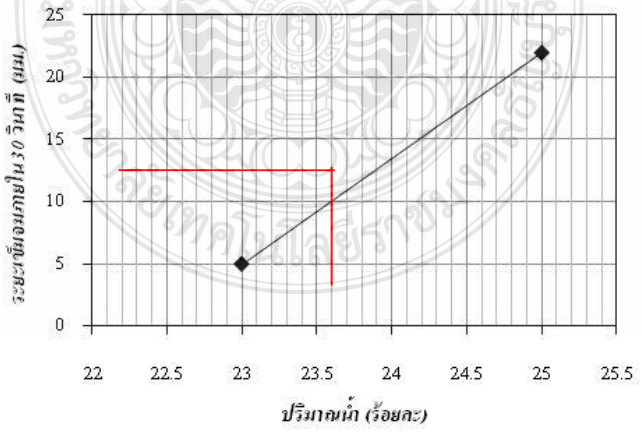


ภาพที่ ข.14 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 26.60 %

ตารางที่ ข.15 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (PC5 FA20 LP10)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	70	20	10	23.0	5.0
2	70	20	10	25.0	22.0

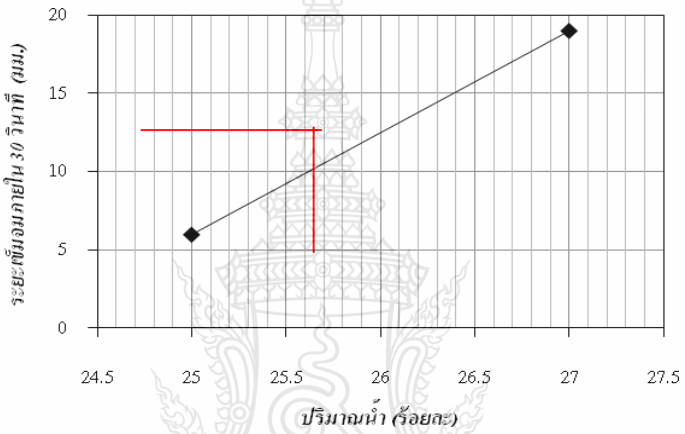


ภาพที่ ข.15 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 23.60 %

ตารางที่ ข.16 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (PC5 FA10 LP20)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	70	10	20	25.0	6.0
2	70	10	20	27.0	19.0

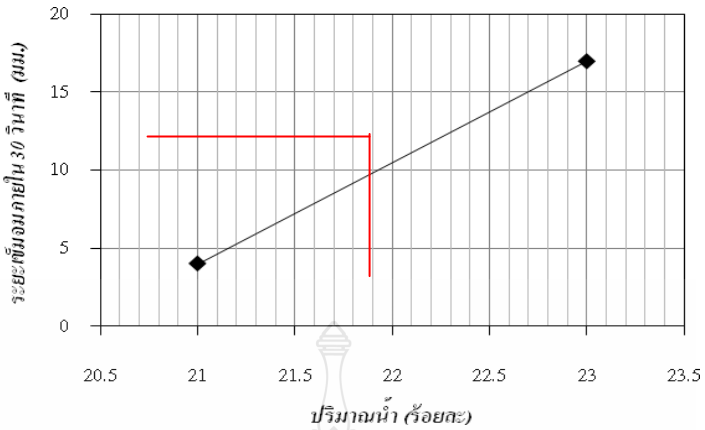


ภาพที่ ข.16 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 25.60 %

ตารางที่ ข.17 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (PC5 FA40 LP10)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	50	40	10	21.0	4.0
2	50	40	10	23.0	17.0

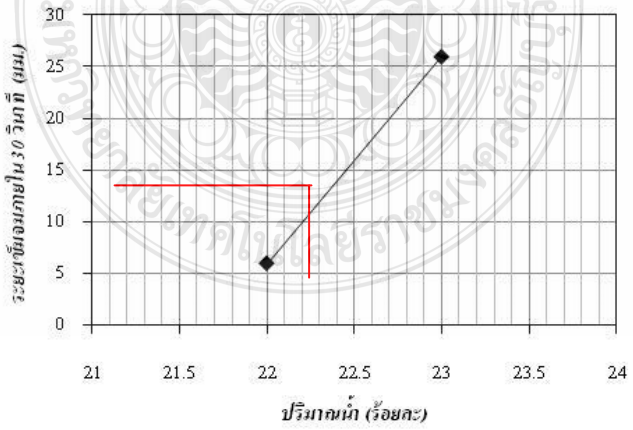


ภาพที่ ข.17 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 21.90 %

ตารางที่ ข.18 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (PC5 FA30 LP20)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	50	30	20	22.0	6.0
2	50	30	20	23.0	26.0

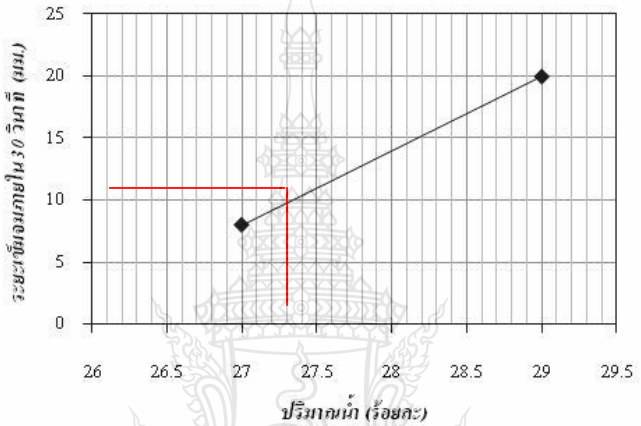


ภาพที่ ข.18 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 22.20 %

ตารางที่ ข.19 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน (PCP)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	100	-	-	27.0	8.0
2	100	-	-	29.0	20.0

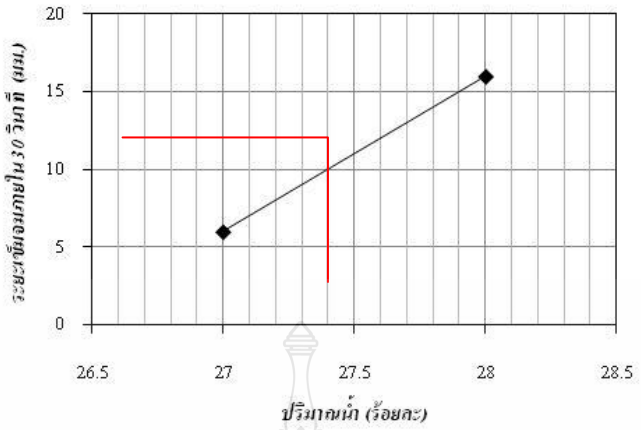


ภาพที่ ข.19 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 27.30 %

ตารางที่ ข.20 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 (PCP LP10)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	90	-	10	27.0	6.0
2	90	-	10	28.0	16.0

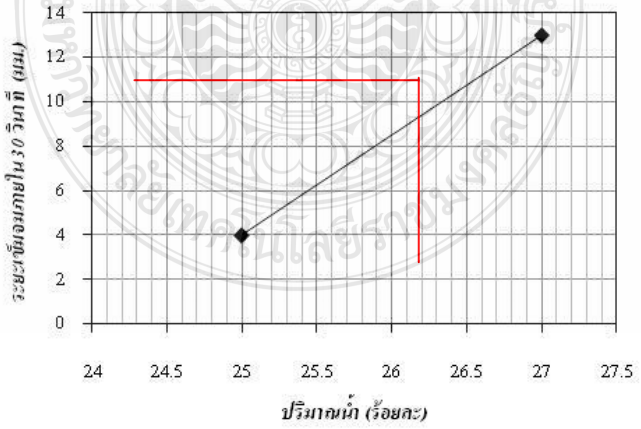


ภาพที่ ข.20 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 27.40 %

ตารางที่ ข.21 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20 (PCP LP20)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	80	-	20	25.0	4.0
2	80	-	20	27.0	13.0

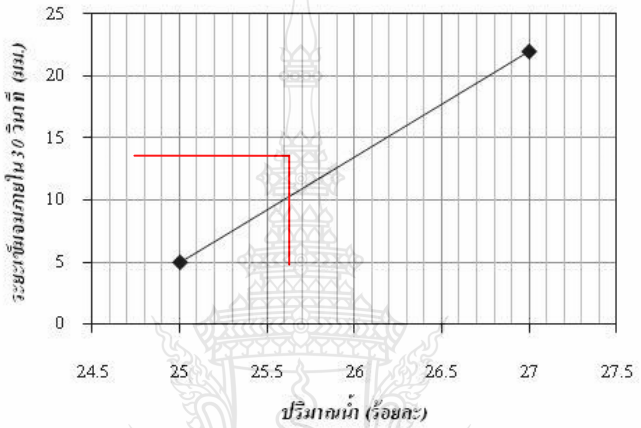


ภาพที่ ข.21 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 26.30 %

ตารางที่ ข.22 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ล้วน (PCL10)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	100	-	-	25.0	5.0
2	100	-	-	27.0	22.0

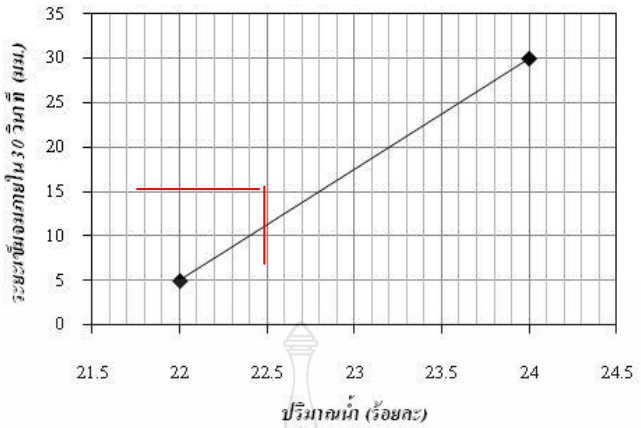


ภาพที่ ข.22 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ล้วน

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 25.60 %

ตารางที่ ข.23 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (PCL10 FA30)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	70	30	-	22.0	5.0
2	70	30	-	24.0	30.0

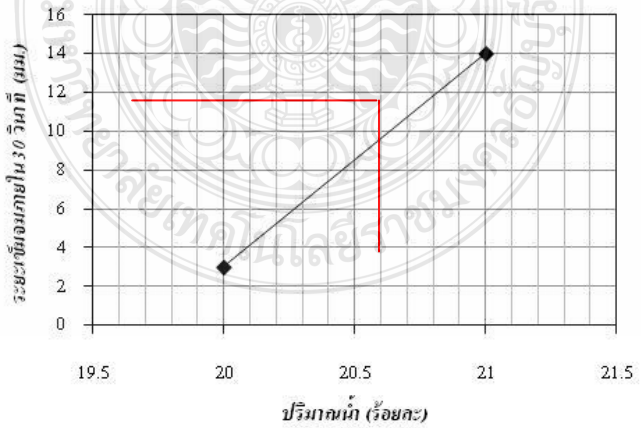


ภาพที่ ข.23 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 22.40 %

ตารางที่ ข.24 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 (PCL10 FA50)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	50	50	-	20.0	3.0
2	50	50	-	21.0	14.0

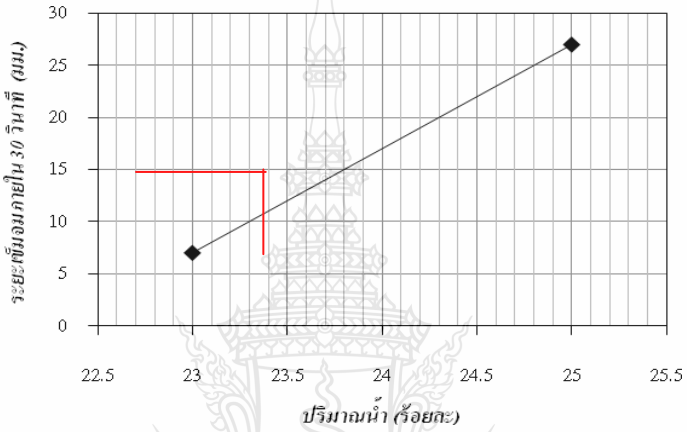


ภาพที่ ข.24 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน ร้อยละ 10 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 20.65 %

ตารางที่ ข.25 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน (PCL20)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	100	-	-	23.0	7.0
2	100	-	-	25.0	27.0

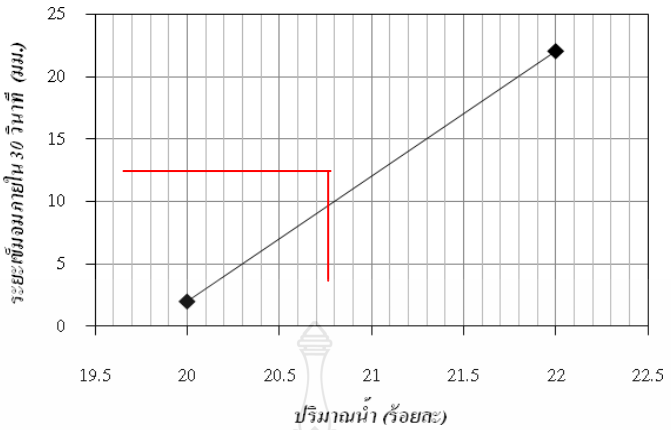


ภาพที่ ข.25 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 23.30 %

ตารางที่ ข.26 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (PCL20 FA30)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	70	30	-	20.0	2.0
2	70	30	-	22.0	22.0

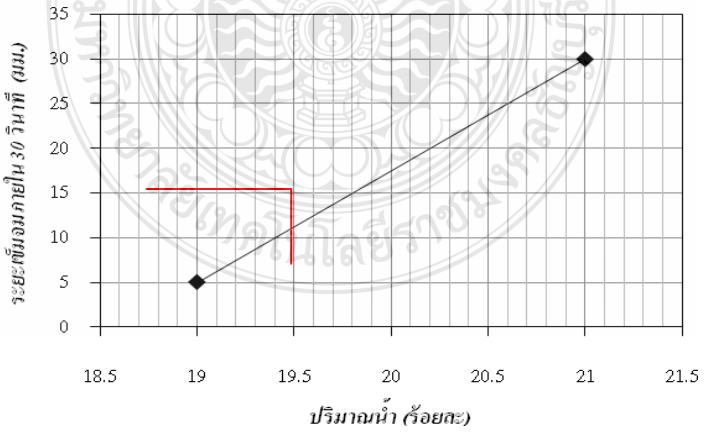


ภาพที่ ข.26 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 20.80 %

ตารางที่ ข.27 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 (PCL20 FA50)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	50	50	-	19.0	5.0
2	50	50	-	21.0	30.0



ภาพที่ ข.27 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 19.40

ตารางที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน

PC1		PC1 FA30		PC1 FA50	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
30	40	60	40	90	40
45	40	75	40	105	40
60	40	90	40	120	40
75	35	105	40	135	40
90	25	120	39	150	39
105	18	135	38	165	36
120	12	150	35	180	32
135	7	165	29	195	25
150	2	180	22	210	17
157	0	195	14	217	13
-	-	210	5	232	5
-	-	217	0	240	0

เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
90.00	157.00	175.50	217.00	195.00	240.00

ตารางที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

PC1 LP10		PC1 LP20		PC1 FA20 LP10	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
30	40	30	40	30	40
45	40	45	40	45	40
60	40	60	40	60	37
75	34	75	37	75	28
90	25	90	29	90	19
105	18	105	17	105	13
120	11	120	9	120	9
135	5	135	4	135	6
150	0	150	0	150	3
-	-	-	-	165	1
-	-	-	-	172	0
-	-	-	-	-	-

เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
90.00	150.00	95.00	150.00	80.00	172.00

ตารางที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

PC1 FA10 LP20		PC1 FA40 LP10		PC1 FA30 LP20	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
30	40	30	40	30	40
45	40	45	40	45	40
60	40	60	40	60	40
75	35	75	38	75	40
90	25	90	33	90	25
105	18	105	21	105	12
120	12	120	14	120	8
135	7	135	9	135	5
150	2	150	5	150	2
157	0	165	2	162	0
-	-	180	0	-	-
-	-	-	-	-	-

เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
85.00	157.00	100.00	180.00	90.00	162.00

ตารางที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

PC5		PC5 FA30		PC5 FA50	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
60	40	60	40	75	40
75	40	75	40	90	40
90	39	90	40	105	40
105	37	105	38	120	40
120	34	120	30	135	40
135	30	135	25	150	39
150	26	150	20	165	37
165	20	165	15	180	33
180	14	180	10	195	20
195	8	195	6	210	10
210	2	210	2	225	2
217	0	217	0	240	0

เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
152.00	217.00	135.00	217.00	190.00	240.00

ตารางที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

PC5 LP10		PC5 LP20		PC5 FA20 LP10	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
45	40	45	40	75	40
60	40	60	40	90	40
75	40	75	40	105	40
90	40	90	40	120	40
105	40	105	40	135	40
120	39	120	39	150	38.5
135	35	135	35	165	33.5
150	28	150	20	180	20
165	20	165	11	195	10
180	11	180	5	210	4
195	2	195	1	225	1
200	0	202	0	232	0

เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
155.00	200.00	145.50	202.00	175.00	232.00

ตารางที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

PC5 FA10 LP20		PC5 FA40 LP10		PC5 FA30 LP20	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
60	40	75	40	75	40
75	40	90	40	90	40
90	40	105	40	105	40
105	40	120	40	120	40
120	40	135	37	135	37
135	34	150	28	150	20
150	21	165	20	165	14
165	12	180	14	180	10
180	7	195	8	195	7
195	4	210	4	210	4
210	1	225	1	225	1
217	0	242	0	232	0

เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
145.00	217.00	155.00	242.00	145.00	232.00

ตารางที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

PCP		PCP LP10		PCP LP20	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
90	40	90	40	75	40
105	40	105	40	90	40
120	40	120	40	105	40
135	39	135	39	120	40
150	38	150	38	135	39
165	36	165	36	150	37
180	31	180	31	165	33
195	19	195	19	180	25
210	11	210	11	195	16
225	6	225	6	210	10
240	3	240	3	225	5
265	0	270	0	247	0

เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
188.00	265.00	187.00	270.00	180.00	247.00

ตารางที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

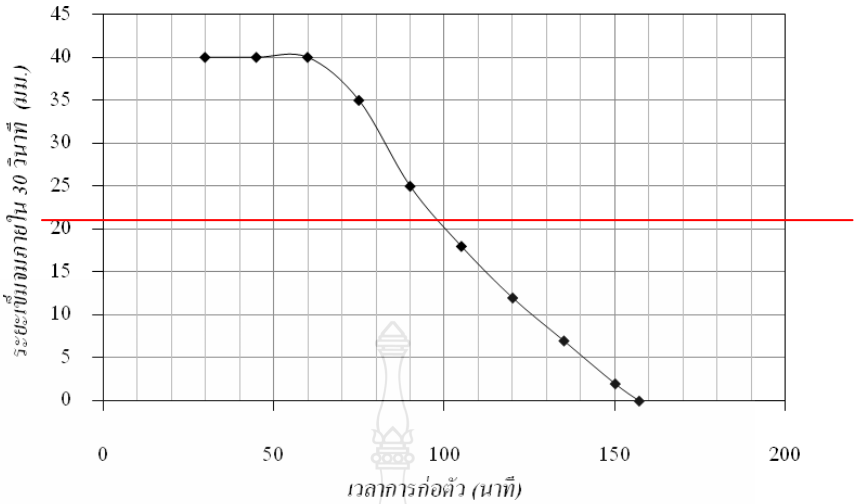
PCL10		PCL10 FA30		PCL10 FA50	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
30	40	90	40	135	40
45	40	105	40	150	40
60	40	120	40	165	40
75	40	135	39	180	39
90	40	150	38	195	38
105	37	165	36	210	37
120	30	180	32	225	36
135	19	195	25	240	33
150	12	210	15	255	26
165	6	225	8	270	12
180	0	240	4	285	3
-	-	255	0	300	0

เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
127.00	180.00	195.00	255.00	262.00	300.00

ตารางที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

PCL20		PCL20 FA30		PCL20 FA50	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
30	40	75	40	75	40
45	40	90	40	90	40
60	40	105	40	105	40
75	40	120	40	120	40
90	40	135	39	135	40
105	37	150	37	150	40
120	25	165	33	165	39
135	16	180	25	180	36
150	9	195	16	195	32
165	3	210	9	210	25
172	0	225	3	225	9
-	-	232	0	247	0

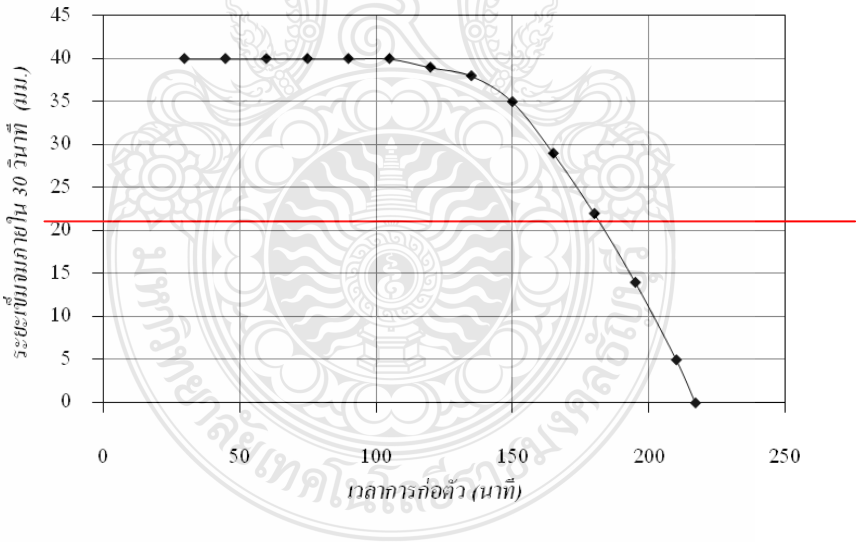
เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
120.00	172.00	180.00	232.00	210.00	247.00



ภาพที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (PC1)

การก่อตัวเริ่มต้น = 90.00 นาที

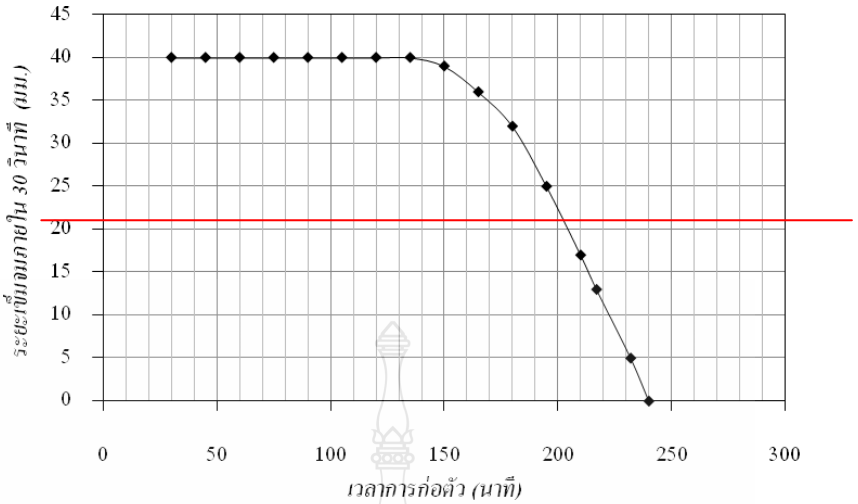
การก่อตัวสุดท้าย = 157.00 นาที



ภาพที่ ข.29 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (PC1 FA30)

การก่อตัวเริ่มต้น = 175.00 นาที

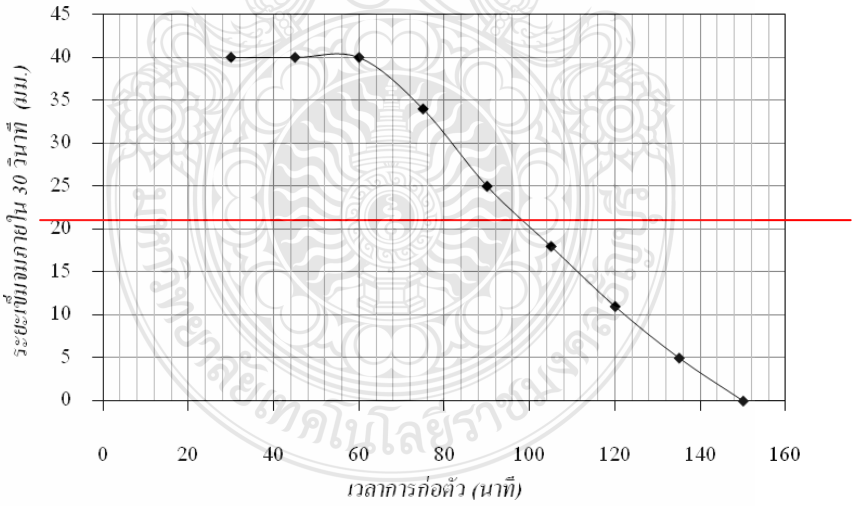
การก่อตัวสุดท้าย = 217.00 นาที



ภาพที่ ข.30 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 (PC1 FA50)

การก่อตัวเริ่มต้น = 195.00 นาที

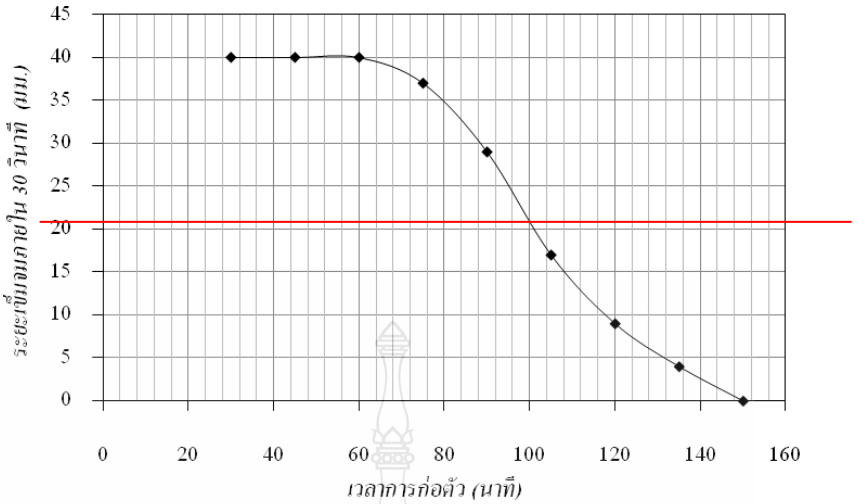
การก่อตัวสุดท้าย = 240.00 นาที



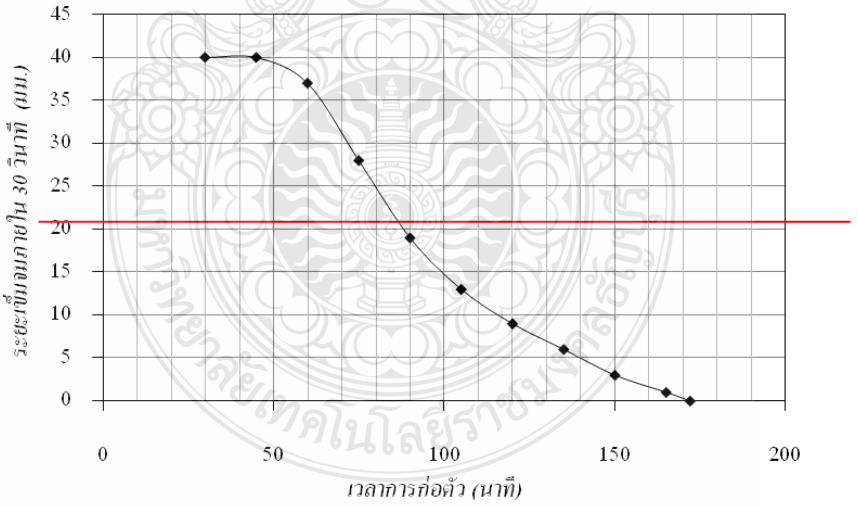
ภาพที่ ข.31 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 (PC1 LP10)

การก่อตัวเริ่มต้น = 90.00 นาที

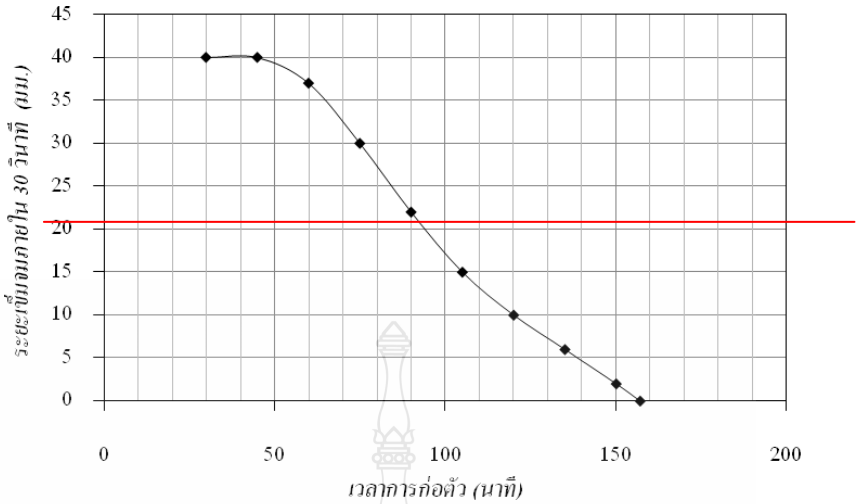
การก่อตัวสุดท้าย = 150.00 นาที



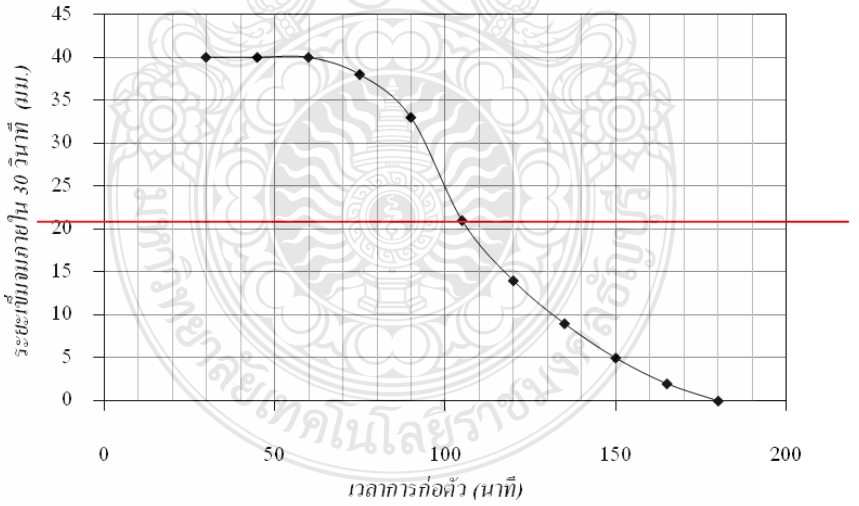
ภาพที่ ข.32 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20 (PC1 LP20)
การก่อตัวเริ่มต้น = 95.00 นาที
การก่อตัวสุดท้าย = 150.00 นาที



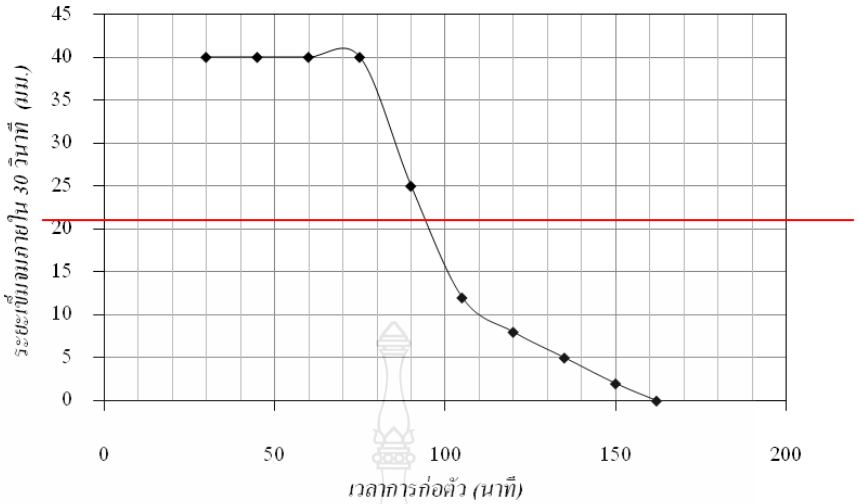
ภาพที่ ข.33 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (PC1 FA20 LP10)
การก่อตัวเริ่มต้น = 80.00 นาที
การก่อตัวสุดท้าย = 172.00 นาที



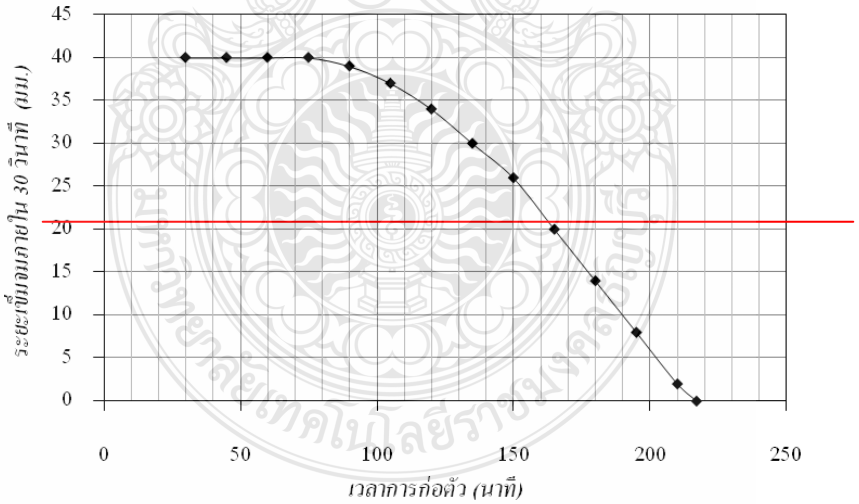
ภาพที่ ข.34 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (PC1 FA10 LP20)
การก่อตัวเริ่มต้น = 85.00 นาที
การก่อตัวสุดท้าย = 157.00 นาที



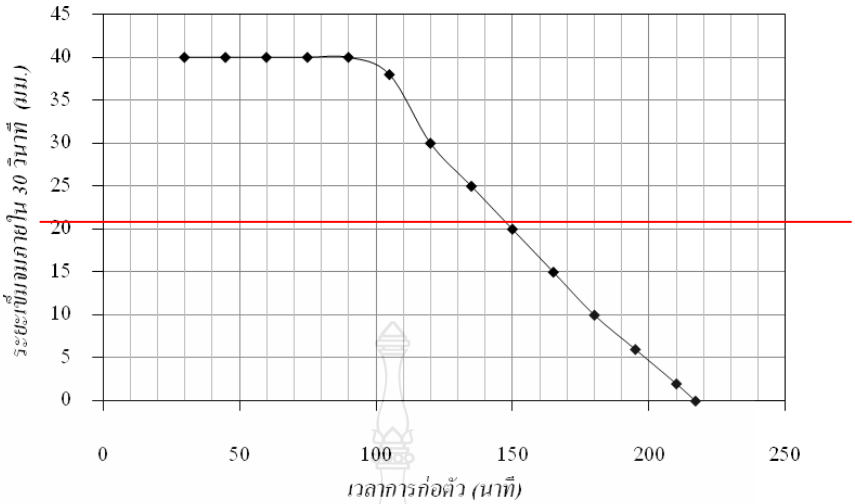
ภาพที่ ข.35 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (PC1 FA40 LP10)
การก่อตัวเริ่มต้น = 100.00 นาที
การก่อตัวสุดท้าย = 180.00 นาที



ภาพที่ ข.36 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (PC1 FA30 LP20)
การก่อตัวเริ่มต้น = 90.00 นาที
การก่อตัวสุดท้าย = 162.00 นาที



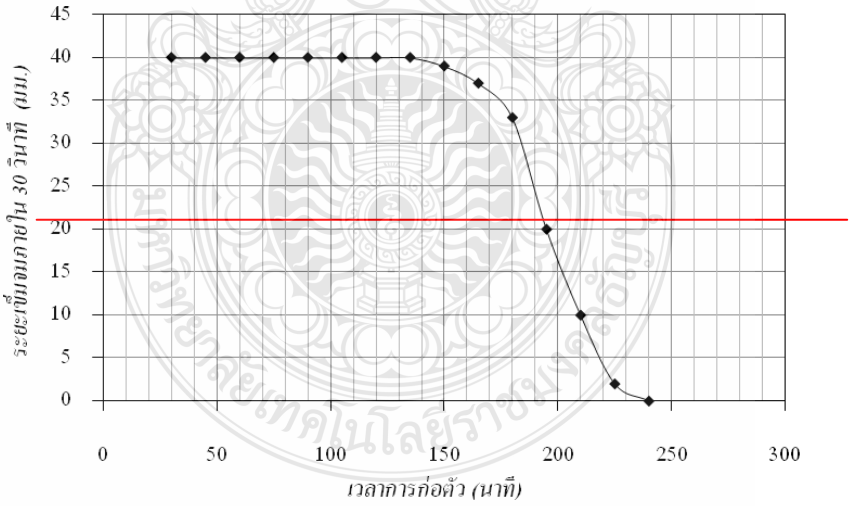
ภาพที่ ข.37 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน (PC5)
การก่อตัวเริ่มต้น = 152.00 นาที
การก่อตัวสุดท้าย = 217.00 นาที



ภาพที่ ข.38 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (PC5 FA30)

การก่อตัวเริ่มต้น = 135.00 นาที

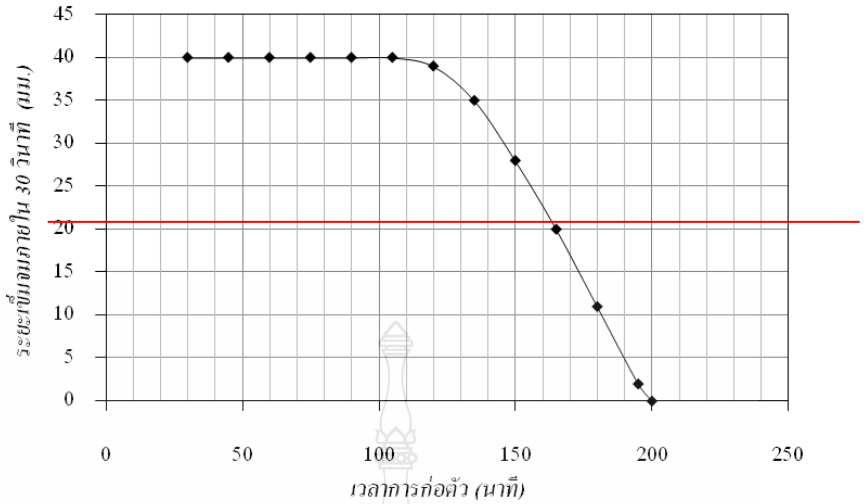
การก่อตัวสุดท้าย = 217.00 นาที



ภาพที่ ข.39 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 (PC5 FA50)

การก่อตัวเริ่มต้น = 190.00 นาที

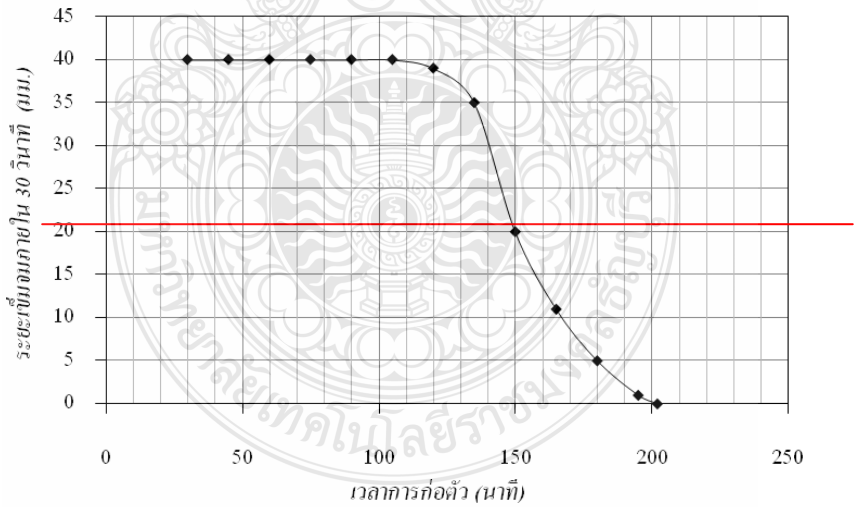
การก่อตัวสุดท้าย = 240.00 นาที



ภาพที่ ข.40 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 (PC5 LP10)

การก่อตัวเริ่มต้น = 155.00 นาที

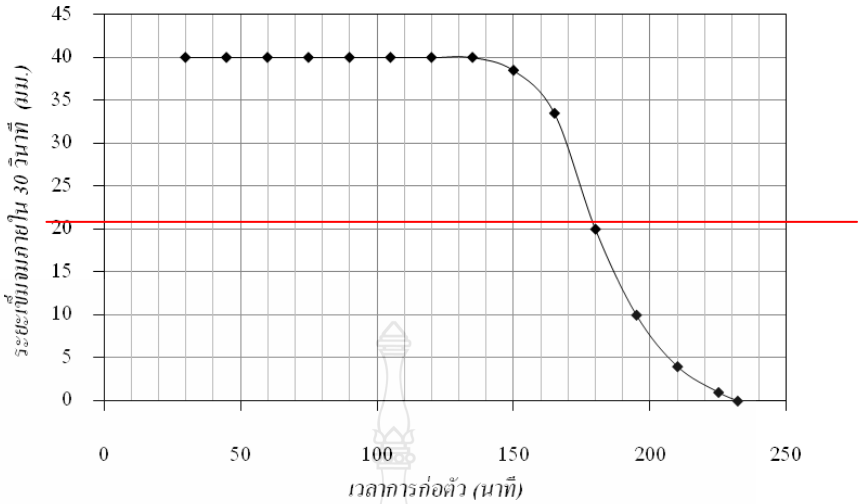
การก่อตัวสุดท้าย = 200.00 นาที



ภาพที่ ข.41 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20 (PC5 LP20)

การก่อตัวเริ่มต้น = 145.00 นาที

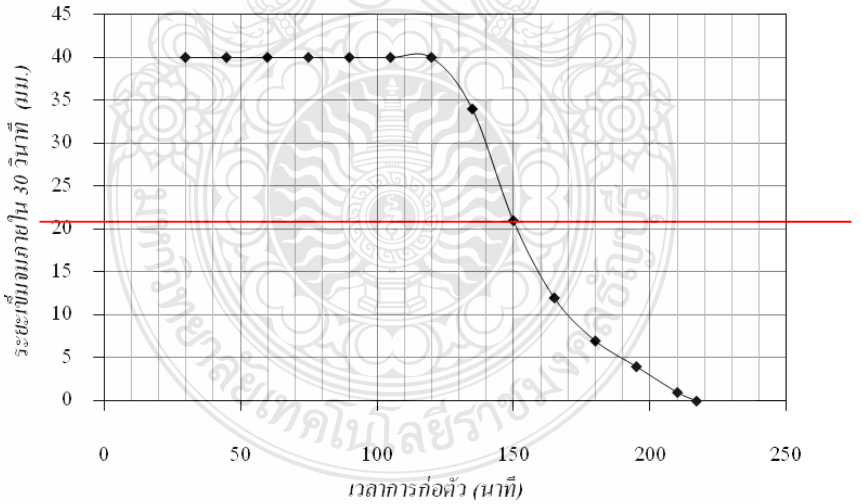
การก่อตัวสุดท้าย = 202.00 นาที



ภาพที่ ข.42 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (PC5 FA20 LP10)

การก่อตัวเริ่มต้น = 175.00 นาที

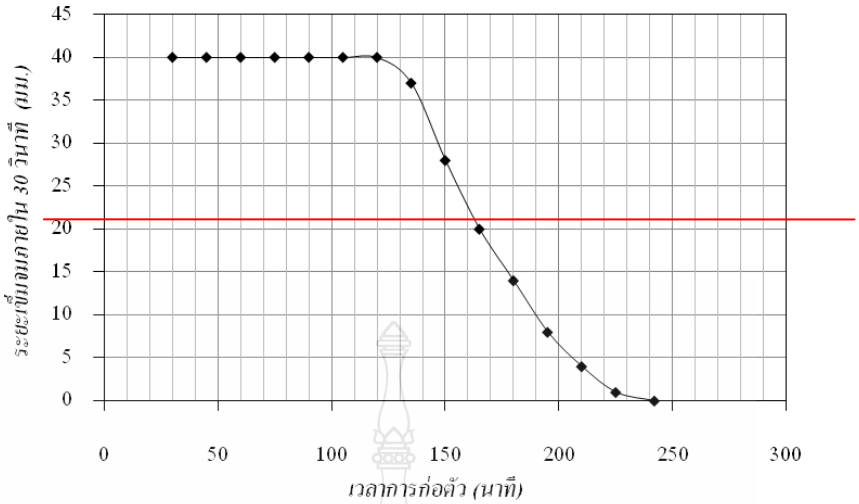
การก่อตัวสุดท้าย = 232.00 นาที



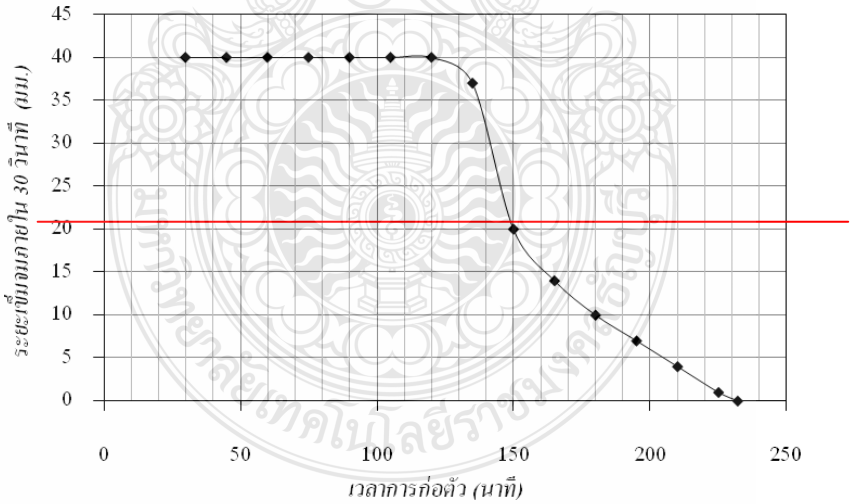
ภาพที่ ข.44 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (PC5 FA10 LP20)

การก่อตัวเริ่มต้น = 145.00 นาที

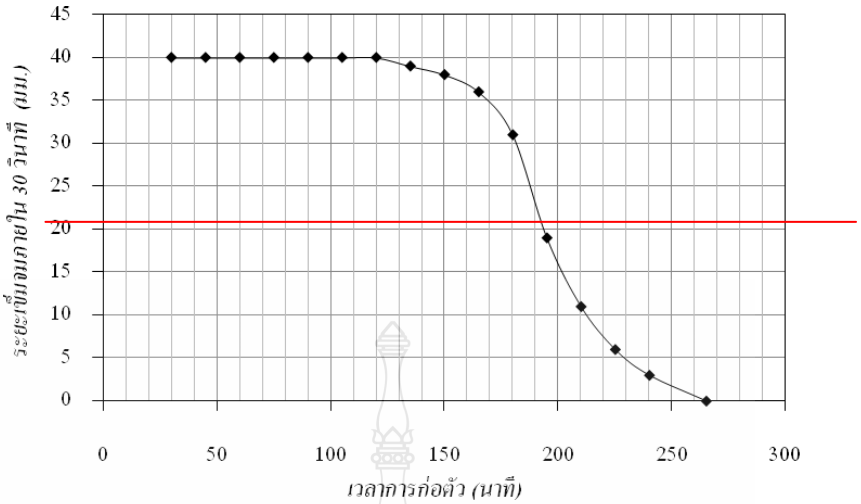
การก่อตัวสุดท้าย = 217.00 นาที



ภาพที่ ข.45 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5
แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (PC5 FA40 LP10)
การก่อตัวเริ่มต้น = 155.00 นาที
การก่อตัวสุดท้าย = 242.00 นาที



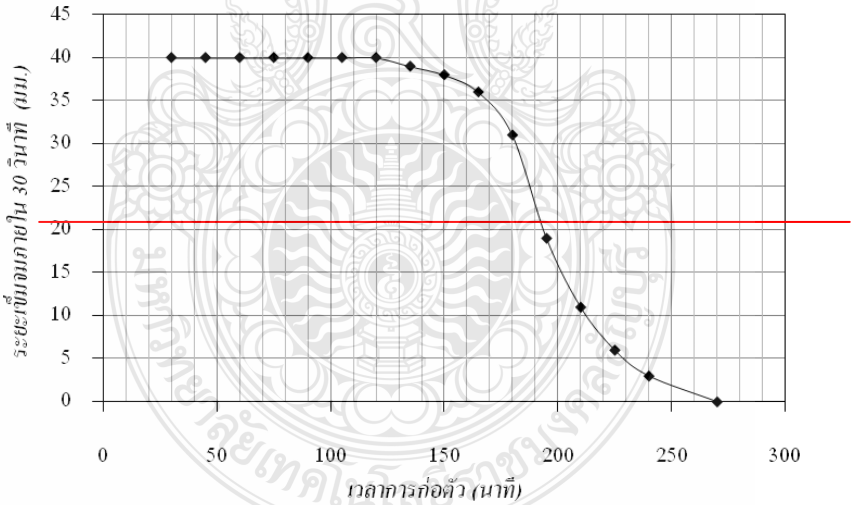
ภาพที่ ข.46 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5
แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (PC5 FA30 LP20)
การก่อตัวเริ่มต้น = 145.00 นาที
การก่อตัวสุดท้าย = 232.00 นาที



ภาพที่ ข.47 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน (PCP)

การก่อตัวเริ่มต้น = 188.00 นาที

การก่อตัวสุดท้าย = 256.00 นาที

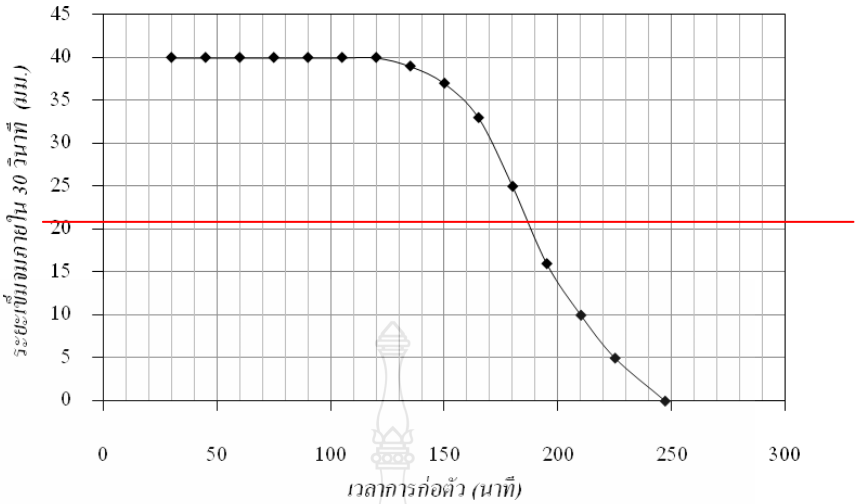


ภาพที่ ข.48 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน

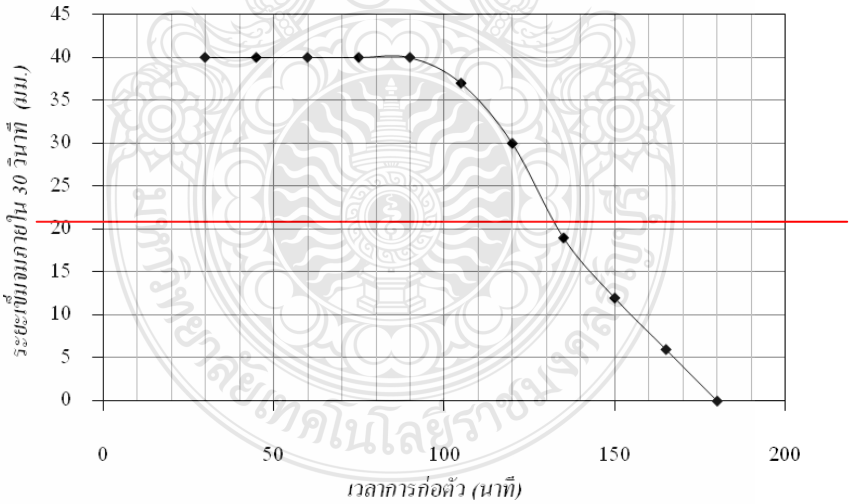
แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 (PCP LP10)

การก่อตัวเริ่มต้น = 187.00 นาที

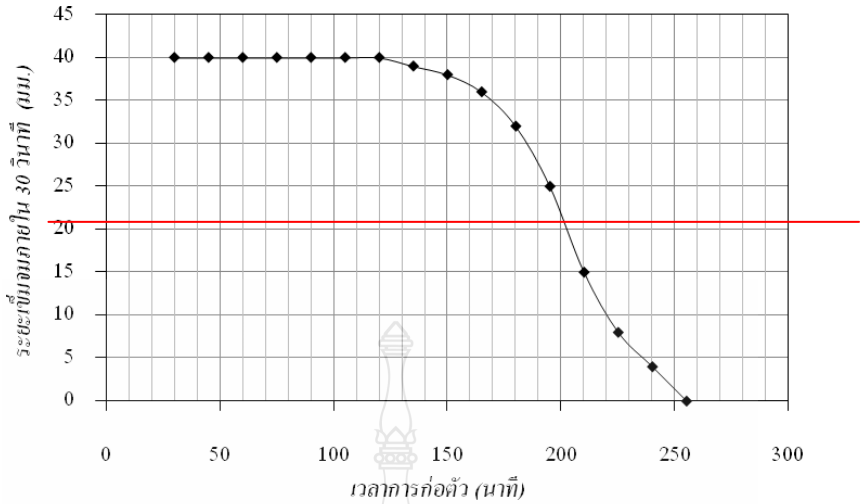
การก่อตัวสุดท้าย = 270.00 นาที



ภาพที่ ข.49 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน
แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20 (PCP LP20)
การก่อตัวเริ่มต้น = 180.00 นาที
การก่อตัวสุดท้าย = 247.00 นาที



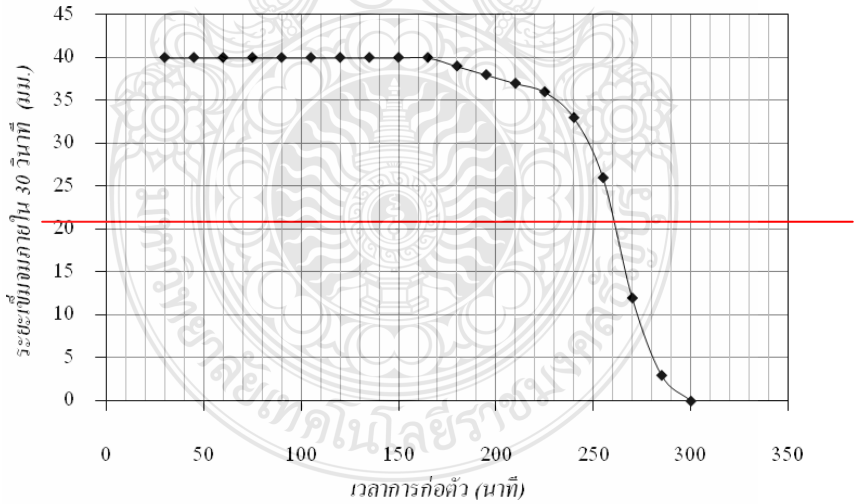
ภาพที่ ข.50 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ล้วน (PCL10)
การก่อตัวเริ่มต้น = 127.00 นาที
การก่อตัวสุดท้าย = 180.00 นาที



ภาพที่ ข.51 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (PCL10 FA30)

การก่อตัวเริ่มต้น = 195.00 นาที

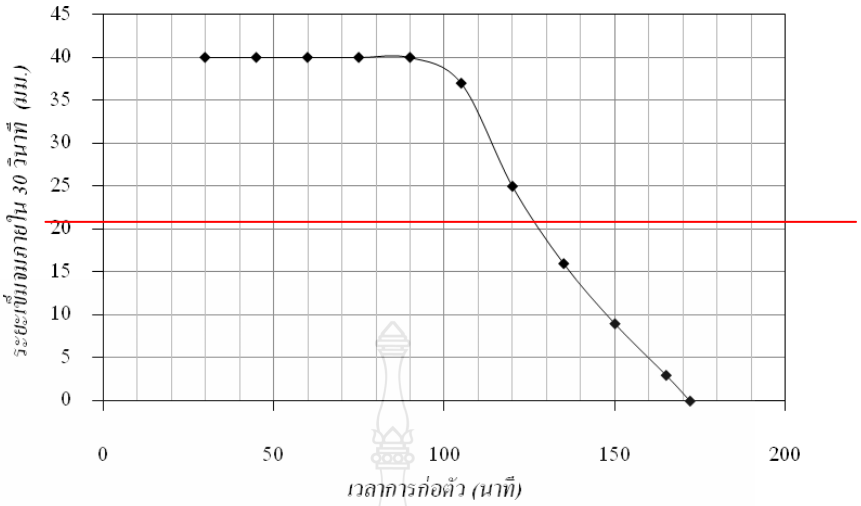
การก่อตัวสุดท้าย = 255.00 นาที



ภาพที่ ข.52 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 (PCL10 FA50)

การก่อตัวเริ่มต้น = 262.00 นาที

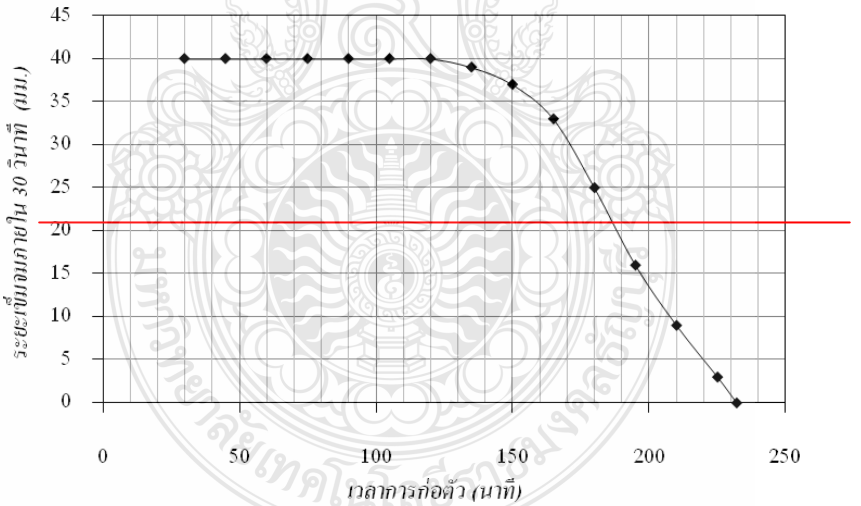
การก่อตัวสุดท้าย = 300.00 นาที



ภาพที่ ข.53 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน (PCL20)

การก่อตัวเริ่มต้น = 120.00 นาที

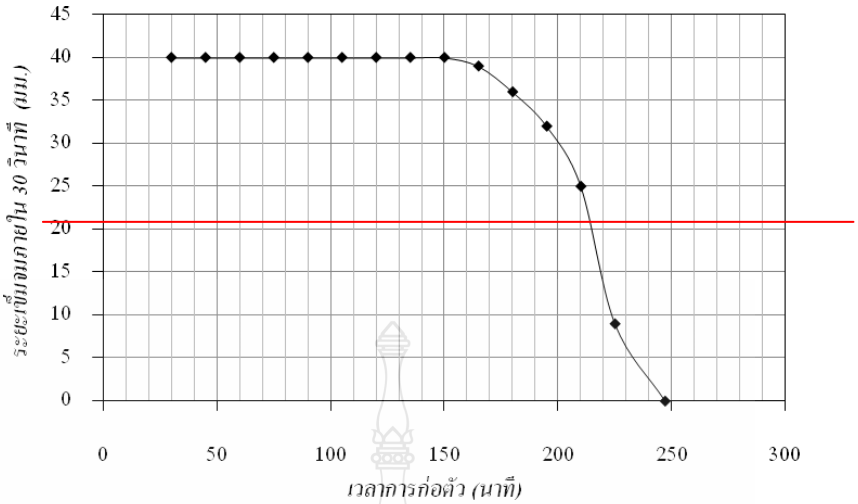
การก่อตัวสุดท้าย = 172.00 นาที



ภาพที่ ข.54 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (PCL20 FA30)

การก่อตัวเริ่มต้น = 180.00 นาที

การก่อตัวสุดท้าย = 232.00 นาที



ภาพที่ ข.55 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 (PCL20 FA50)

การก่อตัวเริ่มต้น = 210.00 นาที

การก่อตัวสุดท้าย = 247.00 นาที

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต

ตารางที่ ค.1 ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (วัน)													
	1	14	28	56	84	112	140	196	252	308	364	420	476	532
MC1	0.000	0.000	0.010	0.020	0.039	0.139	0.228	0.369	0.641	0.858	1.049	1.276	1.483	1.649
MC1 FA30	0.000	0.000	0.010	0.010	0.009	0.008	0.009	0.011	0.017	0.023	0.026	0.038	0.047	0.067
MC1 FA50	0.000	0.000	0.007	0.006	0.004	0.008	0.010	0.013	0.019	0.021	0.019	0.022	0.022	0.027
MC1 LP10	0.000	0.000	-0.002	0.002	0.014	0.036	0.078	0.108	0.138	0.216	0.363	0.454	0.498	0.554
MC1 LP20	0.000	0.000	0.001	-0.003	0.002	0.009	0.020	0.026	0.033	0.064	0.149	0.208	0.233	0.260
MC1 FA20LP10	0.000	0.000	0.017	0.044	0.141	0.204	0.413	0.514	1.050	1.362	1.615	1.711	2.114	2.142
MC1 FA10LP20	0.000	0.000	0.010	0.056	0.105	0.171	0.284	0.359	0.427	0.531	0.655	0.764	0.831	0.921
MC1 FA40LP10	0.000	0.000	0.001	0.003	0.008	0.009	0.012	0.015	0.014	0.019	0.017	0.025	0.025	0.024
MC1 FA30LP20	0.000	0.000	0.005	0.011	0.009	0.012	0.024	0.038	0.043	0.055	0.056	0.068	0.069	0.071

ตารางที่ ค.1 ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (วัน)													
	1	14	28	56	84	112	140	196	252	308	364	420	476	532
MC5	0.000	0.000	0.004	0.001	0.005	0.010	0.028	0.045	0.092	0.146	0.234	0.314	0.383	0.460
MC5 FA30	0.000	0.000	0.007	0.008	0.011	0.014	0.019	0.025	0.051	0.096	0.120	0.209	0.272	0.339
MC5 FA50	0.000	0.000	0.001	-0.006	0.000	-0.012	-0.003	0.000	0.004	0.013	0.016	0.025	0.029	0.039
MC5 LP10	0.000	0.000	-0.004	-0.003	-0.007	0.000	-0.002	0.002	0.002	0.006	0.005	0.011	0.006	0.008
MC5 LP20	0.000	0.000	-0.003	-0.006	-0.005	-0.006	-0.004	0.003	0.001	0.004	0.007	0.011	0.013	0.013
MC5 FA20LP10	0.000	0.000	-0.004	-0.006	0.001	-0.004	0.000	0.007	0.008	0.011	0.014	0.018	0.020	0.022
MC5 FA10LP20	0.000	0.000	0.001	0.009	0.016	0.025	0.067	0.121	0.169	0.231	0.278	0.335	0.372	0.439
MC5 FA40LP10	0.000	0.000	0.005	-0.008	-0.006	-0.007	-0.002	0.004	0.003	0.007	0.007	0.010	0.010	0.010
MC5 FA30LP20	0.000	0.000	0.001	0.002	0.004	0.005	0.011	0.025	0.029	0.040	0.046	0.060	0.064	0.067

ตารางที่ ค.1 ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (วัน)													
	1	14	28	56	84	112	140	196	252	308	364	420	476	532
MCP	0.000	0.000	0.005	0.001	0.003	0.006	0.010	0.013	0.022	0.050	0.091	0.158	0.242	0.327
MCP LP10	0.000	0.000	-0.002	-0.005	-0.004	-0.003	-0.003	0.013	0.022	0.036	0.050	0.065	0.082	0.095
MCP LP20	0.000	0.000	-0.004	-0.003	-0.015	0.013	0.065	0.116	0.172	0.249	0.316	0.371	0.386	0.430
MCL10	0.000	0.000	0.020	0.025	0.040	0.145	0.280	0.425	0.644	0.809	0.957	1.141	1.305	1.458
MCL10 FA30	0.000	0.000	-0.001	0.001	-0.002	0.000	0.011	0.012	0.015	0.023	0.034	0.055	0.068	0.085
MCL10 FA50	0.000	0.000	-0.006	-0.005	-0.005	-0.007	-0.009	-0.007	0.001	0.002	0.012	0.002	0.003	0.015
MCL20	0.000	0.000	0.000	0.011	0.023	0.049	0.093	0.141	0.220	0.279	0.325	0.417	0.483	0.544
MCL20 FA30	0.000	0.000	-0.007	-0.002	-0.012	-0.011	-0.011	-0.003	0.006	0.017	0.030	0.042	0.062	0.076
MCL20 FA50	0.000	0.000	-0.020	-0.014	-0.029	-0.033	-0.035	-0.031	-0.026	-0.029	-0.026	-0.026	-0.024	-0.024

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ตารางที่ ค.2 ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุในการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (วัน)													
	0	14	28	56	84	112	140	196	252	308	364	420	476	532
MC1	0.000	0.000	0.008	0.022	0.030	0.032	0.036	0.086	0.179	0.286	0.432	0.615	0.762	0.897
MC1 FA30	0.000	0.000	0.009	0.009	0.009	0.011	0.014	0.022	0.014	0.015	0.023	0.039	0.055	0.073
MC1 FA50	0.000	0.000	0.009	0.008	0.003	0.003	-0.005	-0.008	0.002	0.010	0.012	0.017	0.019	0.019
MC1 LP10	0.000	0.000	-0.004	-0.003	-0.021	-0.005	0.021	0.069	0.141	0.258	0.365	0.482	0.568	0.708
MC1 LP20	0.000	0.000	-0.001	-0.002	-0.002	-0.001	0.020	0.056	0.096	0.155	0.206	0.260	0.330	0.392
MC1 FA20LP10	0.000	0.000	0.009	0.019	0.021	0.028	0.081	0.149	0.237	0.360	0.461	0.625	0.693	0.844
MC1 FA10LP20	0.000	0.000	-0.001	0.011	-0.004	0.023	0.052	0.121	0.221	0.408	0.561	0.741	0.883	1.027
MC1 FA40LP10	0.000	0.000	0.002	0.014	0.000	0.001	0.015	0.029	0.035	0.048	0.049	0.052	0.055	0.060
MC1 FA30LP20	0.000	0.000	0.006	0.014	0.014	0.013	0.028	0.039	0.057	0.067	0.079	0.082	0.087	0.094

ตารางที่ ค.2 ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุในการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (วัน)													
	0	14	28	56	84	112	140	196	252	308	364	420	476	532
MC5	0.000	0.000	0.003	0.001	0.007	0.017	0.002	0.017	0.030	0.044	0.069	0.101	0.142	0.184
MC5 FA30	0.000	0.000	0.006	0.006	0.005	0.011	-0.006	0.011	0.042	0.079	0.138	0.218	0.297	0.330
MC5 FA50	0.000	0.000	0.005	0.009	0.009	0.014	0.014	0.017	0.019	0.017	0.021	0.023	0.025	0.024
MC5 LP10	0.000	0.000	-0.005	0.003	0.003	-0.002	0.006	0.024	0.038	0.069	0.093	0.134	0.184	0.234
MC5 LP20	0.000	0.000	0.002	0.006	-0.007	0.002	0.010	0.016	0.037	0.038	0.058	0.064	0.076	0.092
MC5 FA20LP10	0.000	0.000	-0.004	0.005	0.010	0.004	0.010	0.021	0.045	0.081	0.121	0.189	0.242	0.333
MC5 FA10LP20	0.000	0.000	0.000	0.003	-0.009	-0.006	0.005	0.023	0.054	0.111	0.158	0.207	0.251	0.308
MC5 FA40LP10	0.000	0.000	-0.008	-0.001	-0.009	-0.009	-0.003	-0.001	0.003	0.005	0.009	0.009	0.010	0.010
MC5 FA30LP20	0.000	0.000	0.006	0.011	0.012	0.016	0.030	0.047	0.082	0.120	0.147	0.164	0.178	0.194

ตารางที่ ค.2 ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุในการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (วัน)													
	0	14	28	56	84	112	140	196	252	308	364	420	476	532
MCP	0.000	0.000	0.002	0.004	0.005	0.026	0.025	0.054	0.175	0.213	0.332			
MCP LP10	0.000	0.000	-0.001	-0.014	-0.024	-0.017	-0.010	0.014	0.053	0.111	0.171	0.234	0.278	0.378
MCP LP20	0.000	0.000	-0.004	0.002	0.003	0.013	0.018	0.032	0.120	0.173	0.265	0.354	0.431	0.599
MCL10	0.000	0.000	0.019	0.026	0.036	0.114	0.140	0.201	0.298	0.409	0.536	0.687	0.795	0.960
MCL10 FA30	0.000	0.000	0.001	0.001	-0.002	0.004	-0.002	-0.009	-0.001	0.007	0.016	0.033	0.051	0.067
MCL10 FA50	0.000	0.000	-0.006	-0.005	-0.011	-0.005	-0.005	-0.014	-0.016	-0.012	-0.009	-0.005	-0.003	-0.004
MCL20	0.000	0.000	0.010	0.032	0.038	0.060	0.048	0.085	0.134	0.182	0.256	0.296	0.338	0.388
MCL20 FA30	0.000	0.000	-0.005	0.001	-0.001	-0.007	0.035	-0.005	0.003	0.012	0.023	0.036	0.057	0.084
MCL20 FA50	0.000	0.000	-0.003	0.002	-0.004	-0.021	-0.017	-0.012	-0.010	-0.009	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001

ตารางที่ ค.3 ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (วัน)													
	0	14	28	56	84	112	140	196	252	308	364	420	476	532
MC1	0.000	0.000	0.020	0.029	0.046	0.116	0.182	0.254	0.410	0.568	0.746	1.005	1.171	1.286
MC1 FA30	0.000	0.000	0.007	0.007	0.004	0.004	0.011	0.004	0.007	0.009	0.013	0.022	0.027	0.041
MC1 FA50	0.000	0.000	0.008	0.008	0.001	0.006	0.009	0.005	0.008	0.009	0.011	0.017	0.018	0.025
MC1 LP10	0.000	0.000	-0.004	-0.006	0.000	0.003	0.025	0.052	0.103	0.192	0.275	0.366	0.417	0.483
MC1 LP20	0.000	0.000	-0.002	-0.003	0.010	0.005	0.014	0.018	0.025	0.040	0.051	0.068	0.076	0.080
MC1 FA20LP10	0.000	0.000	0.014	0.018	0.024	0.033	0.073	0.106	0.164	0.264	0.360	0.464	0.538	0.618
MC1 FA10LP20	0.000	0.000	-0.002	0.004	0.002	0.007	0.015	0.017	0.026	0.052	0.058	0.085	0.104	0.117
MC1 FA40LP10	0.000	0.000	0.001	0.005	0.011	0.010	0.012	0.014	0.015	0.025	0.033	0.031	0.031	0.030
MC1 FA30LP20	0.000	0.000	0.002	0.010	0.014	0.015	0.020	0.025	0.025	0.039	0.049	0.060	0.062	0.064

ตารางที่ ค.3 ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (วัน)													
	0	14	28	56	84	112	140	196	252	308	364	420	476	532
MC5	0.000	0.000	0.003	0.001	0.002	0.002	0.015	0.018	0.046	0.056	0.081	0.134	0.165	0.240
MC5 FA30	0.000	0.000	0.010	0.011	0.016	0.031	0.019	0.021	0.035	0.040	0.049	0.078	0.098	0.145
MC5 FA50	0.000	0.000	0.002	0.009	-0.006	-0.002	-0.005	-0.003	-0.001	0.000	0.000	0.008	0.010	0.019
MC5 LP10	0.000	0.000	0.000	0.008	-0.018	0.009	0.015	0.017	0.018	0.028	0.035	0.059	0.067	0.076
MC5 LP20	0.000	0.000	-0.012	-0.010	-0.009	-0.014	-0.008	-0.006	-0.010	-0.006	-0.005	0.011	0.011	0.012
MC5 FA20LP10	0.000	0.000	-0.005	-0.003	-0.004	-0.004	0.005	0.004	0.002	0.007	0.018	0.021	0.023	0.025
MC5 FA10LP20	0.000	0.000	-0.005	-0.002	-0.007	-0.001	0.002	0.003	0.021	0.042	0.053	0.089	0.111	0.124
MC5 FA40LP10	0.000	0.000	-0.005	-0.011	-0.007	-0.011	-0.008	-0.006	-0.009	-0.008	-0.005	0.002	0.001	-0.002
MC5 FA30LP20	0.000	0.000	0.002	0.007	0.011	0.009	0.014	0.019	0.022	0.033	0.041	0.058	0.057	0.062

ตารางที่ ค.3 ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (วัน)													
	0	14	28	56	84	112	140	196	252	308	364	420	476	532
MCP	0.000	0.000	0.006	0.009	0.012	0.020	0.015	0.010	0.021	0.059	0.057	0.116	0.155	0.259
MCP LP10	0.000	0.000	0.004	0.007	0.013	0.007	0.042	0.086	0.023	0.038	0.051	0.078	0.094	0.106
MCP LP20	0.000	0.000	-0.006	0.003	0.001	0.007	0.038	0.074	0.122	0.191	0.241	0.264	0.298	0.320
MCL10	0.000	0.000	0.021	0.027	0.038	0.107	0.154	0.236	0.374	0.538	0.633	0.797	0.887	1.021
MCL10 FA30	0.000	0.000	0.001	0.002	-0.001	0.003	0.000	-0.003	0.004	-0.001	0.002	0.006	0.012	0.022
MCL10 FA50	0.000	0.000	-0.007	-0.011	-0.014	-0.011	-0.017	-0.018	-0.016	-0.015	-0.014	-0.012	-0.009	-0.002
MCL20	0.000	0.000	0.016	0.033	0.042	0.065	0.074	0.098	0.151	0.187	0.236	0.296	0.334	0.395
MCL20 FA30	0.000	0.000	-0.006	0.002	-0.004	-0.006	-0.006	-0.004	0.000	0.004	0.014	0.025	0.041	0.042
MCL20 FA50	0.000	0.000	-0.007	0.000	-0.014	-0.020	-0.018	-0.018	-0.017	-0.017	-0.013	-0.010	-0.005	-0.008

ภาคผนวก ง

ตารางแสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต

ตารางที่ ง.1 ค่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของคอนกรีตวัสดุประสาน

สัดส่วนผสม	NS	MS
MC1	0.25	1.37
MC1 FA30	-0.68	1.38
MC1 FA50	- 0.36	1.47
MC1 LP10	- 0.48	4.18
MC1 LP20	-0.65	0.76
MC1 FA20LP10	- 0.25	0.92
MC1 FA10LP20	- 0.46	0.26
MC1 FA40LP10	- 0.38	0.43
MC1 FA30LP20	- 0.30	0.47
MC5	- 0.14	0.69
MC5 FA30	0.25	1.37
MC5 FA50	-0.68	1.38
MC5 LP10	-0.94	1.96
MC5 LP20	-0.86	1.70
MC5 FA20LP10	-0.13	0.76
MC5 FA10LP20	0.06	0.82
MC5 FA40LP10	-0.72	0.25
MC5 FA30LP20	-0.61	0.20
MCP	-0.73	0.34
MCP LP10	-0.87	0.08
MCP LP20	0.25	1.37
MCL10	-0.68	1.38
MCL10 FA30	-0.79	1.35
MCL10 FA50	-0.18	0.72
MCL20	-0.34	0.75
MCL20 FA30	-0.07	0.57
MCL20 FA50	-0.67	0.65

ภาคผนวก จ

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่
ANNUAL CONCRETE CONFERENCE (ACC6)
6
กำหนดการ
คณะกรรมการ
บทความ
EXIT
ในวาระครบรอบ 50 ปี แห่งการสถาปนา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
20 - 22 ตุลาคม 2553
Grand Pacific Sovereign Resort & Spa
อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี
สคท.
TCA
aci
Thailand Chapter
SIRDC

MAT-73 การพัฒนา Ultra High Strength Mortar: อิทธิพลของปริมาณเส้นใยเหล็กและมวลรวมละเอียด
เอกพล บุญมาเลิศ บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ ณัฏฐ์ มากุล

MAT-74 ผลกระทบของการเติมแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอยต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายซัลเฟต
พร้อมพงศ์ ฉลาดธัญญกิจ ปิติศานต์ กร้ำมาตร กฤติยา แก้วมณี และ สมนึก ตั้งเติมสิริกุล

MAT-75 การขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายโซเดียมซัลเฟต
นพคุณ ผลโพธิ์ ปิติศานต์ กร้ำมาตร อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ และ สมนึก ตั้งเติมสิริกุล

MAT-76 EFFECT OF LIMESTONE POWDER ON PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE CONTAINING POLYCARBOXYLATE BASED SUPERPLASTICIZER
Wittawat Pattaranawic, Chalermchai Wanichlamlert, and Somnuk Tangtermsirikul

MAT-78 การบำบัดออกไซด์ของไนโตรเจนในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมลงในคอนกรีตบล็อกปูพื้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
ธีระวุฒิ มูฮำหมัด รุ่งโรจน์ ปิยะภานุวัตน์ คริษฐา เกยด่านกลาง และ ภพพนธ์ ศรนคร

MAT-79 บล็อกซีเมนต์ประสานที่ใช้เถ้าแกลบดำ เถ้าแกลบขาว หรือเถ้าชานอ้อยเป็นส่วนผสม
ชูชัย สุจิวรกุล และ พินัยศักดิ์ พรหมศร

MAT-80 การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงเร็วและคอนกรีตกำลังสูงสำหรับใช้งานในภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน
ธนบดี อินทรเพชร และ ชูชัย สุจิวรกุล

MAT-81 การศึกษาการใช้เปลือกหอยแมลงภู่แทนที่หินปูนในการผลิตปูนซีเมนต์เม็ด
รุ่งโรจน์ ปิยะภานุวัตน์ ธีระวุฒิ มูฮำหมัด กนกพร ฝั้นพรหมมินทร์ และ กีรติ ชูสิน

MAT-82 พฤติกรรมฐานรากชนิดเสาเข็มดินซีเมนต์ชั้นลึกภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา
ภิรมย์ พงษ์คำ วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ และ หมิง จิ๋ง

การขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

Expansion of Mortar with Fly Ash and Limestone Powder in Sodium Sulfate Solution

นพคุณ ผลโพธิ์ (Nopakun Ponpo)[1]

ปิติสานต์ กร้ำมาตร (Pitisan Krammart)[2]

อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ (Ittiporn Sirisawat)[3]

สมนึก ตั้งเติมสิริกุล (Somnuk Tangtermsirikul)[4]

[1]*นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี p.nopakun@hotmail.com*

[2]*ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*

[3]*นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*

[4]*ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา และศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*

บทคัดย่อ : การศึกษาครั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายโซเดียมซัลเฟต โดยจะเป็นการแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ผลการศึกษาพบว่า การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ในขณะที่การขยายตัวของปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน มีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ในกรณีการแทนที่ด้วยเถ้าลอย (ร้อยละ 30 และ 50) ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการแทนที่ผงหินปูน (ร้อยละ 10 และ 20) ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แนวโน้มการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน สำหรับการใช้วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอยและผงหินปูน) พบว่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์วัสดุประสานร่วม ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงๆ ในปริมาณต่ำ จะส่งผลให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มากขึ้น แต่ถ้าแทนที่ในปริมาณสูง จะให้ค่าการขยายตัวน้อยลง

ABSTRACT: This investigation was aimed to compare the expansion of fly ash and limestone mortars exposed to sodium sulfate solution. Fly ash and limestone powder were partially replaced in cement type I and cement type V. The study revealed that expansion of mortar bar made with cement type I was higher than those of cement type V. The length changes of mortar bar made from pozzolanic cement was lower than that of cement type V. In case fly ash replacement (30% and 50%) in all types of cement, it was showed that the expansion of the mortar samples were less than those mortars made with cement type I and type V while the limestone replacing cement (10 and 20 %) with cement type I and Type 5, showed lower expansion than cement type I and type V. For all binary binders (cement, fly ash and limestone powder), the expansion exposed to the sodium sulfate solution of mortar sample with the high CaO fly ash at low replacing content exhibited large expansion. On the contrary, at the high replacing content with fly ash, the expansion of mortar would reduce.

KEYWORDS: Sodium Sulfate, Expansion, Fly Ash , Limestone Powder

1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตโดยทั่วไปที่ต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีสารละลายซัลเฟต ซึ่งโดยทั่วไปจะพบในรูปสารละลายที่ปนอยู่ในดินหรือน้ำใต้ดิน น้ำเสียจากบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรม หรือจากโรงงานผลิตสารเคมีบางประเภท และน้ำทะเลที่มีซัลเฟตเป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างของซัลเฟตที่พบมากตามธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อคอนกรีต ได้แก่ โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต เป็นต้น ความเสียหายต่อคอนกรีตนั้นจะทำให้เกิดการผุกร่อน พองตัว และการแตกร้าวอย่างรุนแรง ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟตและความชื้น

เถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งซึ่งเมื่อใช้ แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสมแล้วทำให้สามารถต้านทานโซเดียมซัลเฟตได้ดีขึ้นโดยเถ้าลอยเป็นผลผลิตที่เหลือใช้จากการใช้ถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า แต่ข้อเสียของการแทนที่เถ้าลอยบางส่วนในปูนซีเมนต์นอกจากทำให้คอนกรีตก่อตัวช้าและกำลังอัดในระยะต้นลดลงแล้ว ยังพบว่า การต้านทานซัลเฟตในกรณีสารละลายแมกนีเซียซัลเฟตกลับลดลง [1] ในขณะที่การใช้ผงหินปูนซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อย (Inert Material) สามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างทำให้การรับกำลังอัดในระยะต้นมีค่าเพิ่มขึ้นและมีความทึบน้ำสูง [2] การพัฒนาวัสดุประสานร่วมซึ่งได้แก่ปูนซีเมนต์เถ้าลอยและผงหินปูน เป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ร่วมกันเพื่อให้คอนกรีตมีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยเฉพาะการต้านทานสารละลายซัลเฟต ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำเอาผงหินปูนและเถ้าลอยมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน แล้ววัดค่าการขยายตัว (Expansion) ของตัวอย่างมอร์ ต้าร์ เมื่อสัมผัสกับสารละลายโซเดียมซัลเฟต เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้คอนกรีตให้เหมาะสมกับสภาวะเมื่อคอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

2 วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

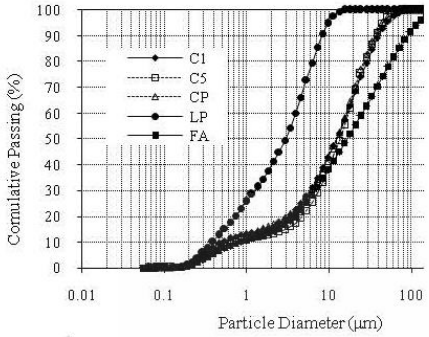
สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (ตราช้างแดง) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 (ตราช้าง ฟ้า) ปูนซีเมน ต์ปอซโซลาน (ตราช้าง น้ำตาล) เถ้าลอย (จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ .ลำปาง) และผงหินปูนความละเอียดขนาด 5 ไมโครเมตร มวลรวมใช้ทรายแม่น้ำ และสารโซเดียมซัลเฟต

คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ผงหินปูนและเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา ครั้งนี้แสดงดังใน***ตารางที่ 1***

ภาพที่ 1 แสดงการกระจายตัวสะสม (Size Distribution) ของขนาดอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา โดยพิจารณาที่การกระจายตัวร้อยละ 50 พบว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และเถ้าลอยมีขนาดอนุภาคของวัสดุที่ ไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนผงหินปูน จะมีขนาดละเอียดที่สุด

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

รายการ	ปูนซีเมนต์			ผงหินปูน (5 μ)	เถ้าลอย
	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5	ปอซโซลาน		
SiO_2 , %	19.51	21.87	24.98	0.46	40.93
Al_2O_3 , %	4.97	3.87	9.25	0.06	22.42
Fe_2O_3 , %	3.78	4.34	5.97	0.03	13.64
CaO , %	65.38	64.56	52.65	55.25	13.63
MgO , %	1.08	1.11	1.62	0.37	2.93
Na_2O , %	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.89
K_2O , %	0.47	0.24	0.78	0.01	2.39
SO_3 , %	2.16	2.08	2.48	<0.01	1.92
TiO_2 , %	0.25	0.21	0.28	<0.01	0.43
P_2O_5 , %	0.07	0.05	0.08	0.01	0.15
Free Lime , %	1.00	0.76	1.02	-	0.22
LOI , %	2.27	1.59	1.85	43.79	0.46
Insoluble Residue , %	0.28	0.23	6.28	-	-
ความละเอียดโดยวิธีเบลน , ซม.^{2}/ก.	3,550	3,830	4,470	2,460	8,840
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	3.18	3.12	2.46	2.79
สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ โดยสมการของ ***Bogue***					
C_3S , %	68.86	55.38		-	-
C_2S , %	3.98	20.92		-	-
C_3A , %	6.77	2.91		-	-
C_4AF , %	11.50	13.21		-	-



ภาพที่ 1 การกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน

2.2 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์

การศึกษาครั้งนี้ใช้สัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ทั้งหมด 21 สัดส่วนผสม โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และอัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1 : 2.75 โดยน้ำหนักตลอดการศึกษา ในส่วนของวัสดุประสานนั้นประกอบไปด้วยปูนซีเมนต์ล้วน 3 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลาน สำหรับวัสดุประสานร่วม 2 ชนิด ใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ร้อยละ 30 และ 50 ในขณะที่ ผงหินปูนแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 สุดท้ายสำหรับวัสดุประสานร่วม 3 ชนิด แทนที่ทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 คือ เถ้าลอยร้อ ยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 เถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 เถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และเถ้าล อยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 รายละเอียดของสัดส่วนผสมแสดงดัง*ตารางที่ 2*

2.3 สารละลายซัลเฟต

สารละลายซัลเฟตที่ใช้ การศึกษาครั้งนี้ได้แก่สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่มีความเข้มข้นของสารละลายร้อยละ 5 โดยน้ำหนักหรือปริมาณอิออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33,800 ppm โดยใช้โซเดียมซัลเฟต 50 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร

2.4 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างมอร์ต้าร์ (ขนาด 2.5x2.5x28.5 ซม.) เพื่อวัดค่าการขยายตัว กระทำตามมาตรฐาน ASTM C1012 หลังจากหล่อมอร์ต้าร์ลงแบบหล่อแล้วหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อกันน้ำระเหยออกจากตัวอย่าง และถอดแบบเมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมง หลังจากถอดแบบแล้วนำเอาตัวอย่างไปแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว เป็นเวลา 28 วัน

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษา

สัญลักษณ์	สัดส่วนผสม (โดยน้ำหนัก)					
	ปูนซีเมนต์		เถ้าลอย	ผงหินปูน	ทราย	น้ำ
C1	ประเภทที่ 1	1	-	-	2.75	0.55
C1 FA30		0.7	0.3	-	2.75	0.55
C1 FA50		0.5	0.5	-	2.75	0.55
C1 LP10		0.9	-	0.1	2.75	0.55
C1 LP20		0.8	-	0.2	2.75	0.55
C1 FA20LP10		0.7	0.2	0.1	2.75	0.55
C1 FA10LP20		0.7	0.1	0.2	2.75	0.55
C1 FA40LP10		0.5	0.4	0.1	2.75	0.55
C1 FA30LP20		0.5	0.3	0.2	2.75	0.55
C5	ประเภทที่ 5	1	-	-	2.75	0.55
C5 FA30		0.7	0.3	-	2.75	0.55
C5 FA50		0.5	0.5	-	2.75	0.55
C5 LP10		0.9	-	0.1	2.75	0.55
C5 LP20		0.8	-	0.2	2.75	0.55
C5 FA20LP10		0.7	0.2	0.1	2.75	0.55
C5 FA10LP20		0.7	0.1	0.2	2.75	0.55
C5 FA40LP10		0.5	0.4	0.1	2.75	0.55
C5 FA30LP20		0.5	0.3	0.2	2.75	0.55
CP	ปอซโซลาน	1	-	-	2.75	0.55
CP LP10		0.9	-	0.1	2.75	0.55
CP LP20		0.8	-	0.2	2.75	0.55

ความหมายของสัญลักษณ์

C1 คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน

C5 คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน

CP คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ล้วน

C1FA30 คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

C1LP10 คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

C1FA30LP20 คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

2.5 การทดสอบ

การศึกษาการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตในครั้งนี้มีรายละเอียดดังนี้ คือเมื่อแช่ตัวอย่างมอร์ต้าร์ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาวครบ 28 วัน แล้วจึงนำตัวอย่างไปวัดความยาวเริ่มต้นเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานด้วยเครื่องวัดความยาว (Length Comparator) หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายซัลเฟตที่เตรียมไว้

แล้ววัดค่าการขยายตัวข องตัวอย่างมอร์ต้าร์ เมื่ออายุการแช่ในสารละลายครบ 2, 4, 8 สัปดาห์ และทุกๆ 2 เดือน ด้วยเครื่องมือวัดการขยายตัว การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ หาได้โดยสมการที่ (1)

$$\text{การขยายตัว } (\%) = [(L_t - L_i)/L_i] \times 100 \qquad (1)$$

เมื่อ L_i คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่ม ต้นของตัวอย่างมอร์ต้าร์ (จำนวน 3 ตัวอย่าง) หลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้ว ยปูนขาว 28 วัน (มม.)

L_t คือ ค่าเฉลี่ยความยาวตัวอย่างตัวอย่าง มอร์ต้าร์ (จำนวน 3 ตัวอย่าง) ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (มม.)

3 ผลการศึกษาและวิเคราะห์

สำหรับผลการศึกษาการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีรายละเอียดดังนี้

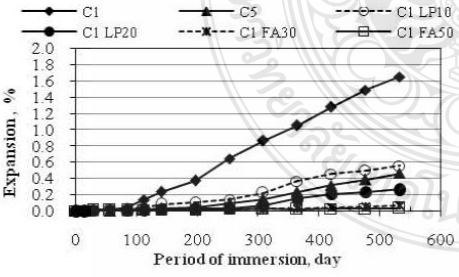
ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ล้วน และปูนซีเมนต์ทั้ง 3 ชนิด แทนที่ด้วยเถ้าลอย แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน

ภาพที่ 2 ก) เป็นการเปรียบเทียบการขยายตัวในสารละลาย โซเดียม ซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยเถ้าลอย พบว่าขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 ล้วน มีมากกว่าประเภท ที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ประเภท ที่ 5 (2.91%) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ประเภท ที่ 1 (6.77%) จึงทำให้เกิดปริมาณเอททริงไจท์ (Ettringite) น้อยกว่า ส่วนตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่ามีค่ามากกว่าหรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูนจะช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ จึงทำให้ปริมาณ C_3A ลดลง ขณะที่การแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20 มีผลให้การขยายตั วมีค่าน้อยกว่าทั้งปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน เพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20 ช่วยลดปริมาณ C_3A ได้มากกว่าจึงช่วยลดปฏิกิริยาเคมีของการเกิดเอททริงไจท์ได้มากขึ้น ในขณะที่การแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 50 นั้นพบว่ามีค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ค่อนข้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์อื่นๆ ทั้งนี้เพราะนอกจากจะลดปริมาณ C_3A แล้ว ปฏิกิริยาปอซโซลานยังไปลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ ลงได้อีก จึงทำให้เกิด เอททริงไจท์ น้อยลง ส่วนเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนและแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ประเภท 5 ***(ภาพที่2 ข))*** การขยายตัวของมอร์ต้าร์ให้แนวโน้มในทิศทางเดียวกับการแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 โดยที่ทุกตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน (ร้อยละ 10 และ 20) และแทนที่ด้วยเถ้าลอย (ร้อยละ 30 และ50) มีค่าการขยายตัวน้อยกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน

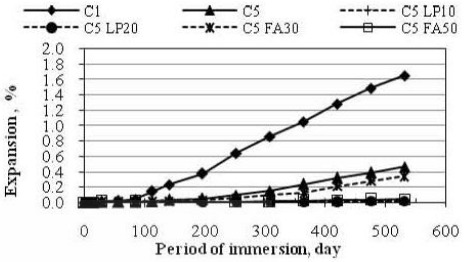
ส่วน ***ภาพที่ 2 ค)*** เป็นการเปรียบเทียบการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน และปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน พบว่า การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอซโซลานมี ค่าน้อยกว่า ทั้งปูนซีเมนต์ประเภท ที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจาก ปูนซีเมนต์ปอซโซลานนั้นถูกแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอยทำให้มีปริมาณ C_3A น้อยลง รวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งเป็นการลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จึงทำให้เกิดปริมาณ เอททริงไจท์น้อยลง ส่วนการแทนที่ด้วยผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอซโซลานร้อยละ 10 นั้นมีค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์น้อยกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน ทั้งนี้ อาจเป็นไปได้ว่าการเติมเต็มช่องว่างของผงหินปูนได้ดี รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานจึงทำให้ความทึบน้ำของตัวอย่างมอร์ต้าร์สูงมาก ทำให้สารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้าทำลายได้ยาก แต่เมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20 ในปูนซีเมนต์ปอซโซลานให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอซโซลานซึ่งอาจเป็นเพราะว่าปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นน้อยกว่าจึงลด $Ca(OH)_2$ ได้น้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตามก็ยังใกล้เคียงของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน

ภาพที่ 2 ง) และ***ภาพที่ 2 จ)*** เป็นการเปรียบเทียบการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด คือ เป็นการผสมร่วมของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (หรือประเภทที่ 5) ผงหินปูนและเถ้าลอย โดย

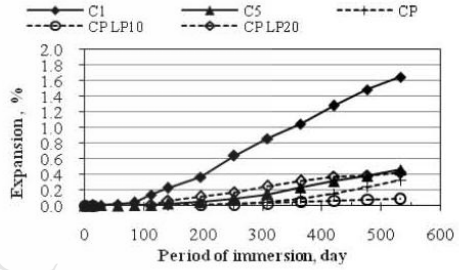
ภาพที่ 2 ง) เป็นการแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ค่อนข้างมาก เมื่อปริมาณการแทนที่ร่วมของเถ้าลอยต่ำคือร้อยละ 10 และ ร้อยละ 20 (C1FA20LP10 และ C1FA10LP20) โดยเฉพาะสัดส่วน C1FA20LP10 มีค่าการขยายตัวมากกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO ค่อนข้างสูง (13.63%) ในปริมาณที่ต่ำผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่ช่วยลด $Ca(OH)_2$ ได้น้อย แต่เมื่อแทนที่เถ้าลอยดังกล่าวในปริมาณที่สูง (ร้อยละ 30 และ50) กลับให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์น้อยลง (ซึ่งน้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน) ทั้งนี้เป็นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยลด $Ca(OH)_2$ ได้มาก ซึ่งผลดังกล่าวก็สอดคล้องกับการศึกษาของปิติสานต์ [3] โดยในส่วนของผงหินปูนที่แทนที่นั้นก็มีส่วนช่วยเติมเต็มช่องว่าง แต่อาจจะมีผลต่อกลไกการทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟตไม่เด่นชัดเท่ากับการแทนที่ด้วยเถ้าลอย ส่วนเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ***(ภาพที่ 2 จ))*** ก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 โดยการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ของทุกการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 5 ล้วน โดยสัดส่วน C5FA10LP20 มีแนวโน้มว่าจะมากกว่าสัดส่วนอื่นๆ ทั้งนี้ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว



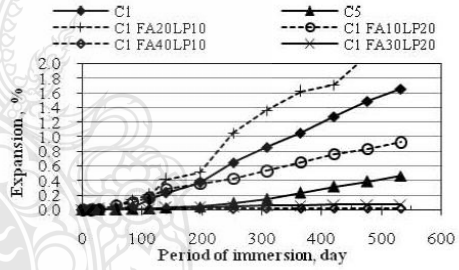
ก) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนและแทนที่ด้วยเถ้าลอย



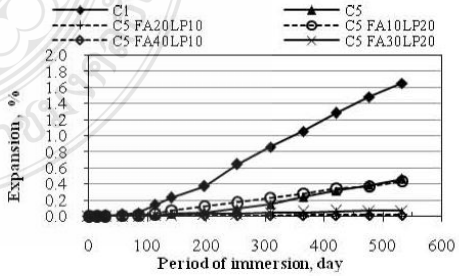
ข) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยเถ้าลอย



ค) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน และปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน



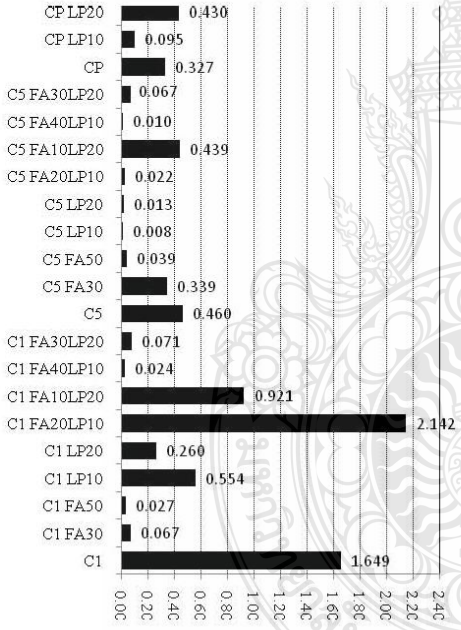
ง) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน



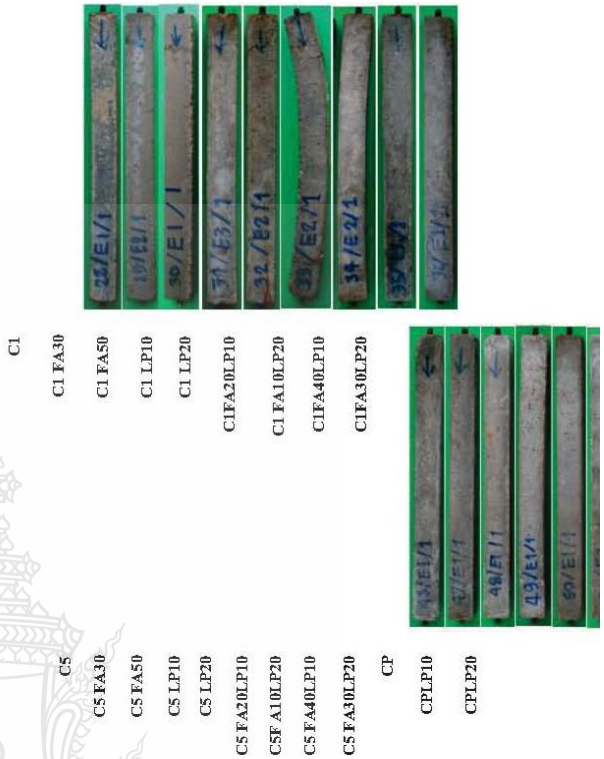
จ) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน

ภาพที่ 2 *ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน*

สำหรับ ***ภาพที่ 3*** ได้แสดงการเปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 76 สัปดาห์ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนถึงความแตกต่างหรือใกล้เคียงของค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วน ***ภาพที่ 4*** แสดงถึงภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 76 สัปดาห์ ซึ่งลักษณะของภาพพอสังเกตได้ว่าจะไปในทิศทางเดียวกับการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วเช่นกัน ซึ่งสังเกตว่ากรณีของวัสดุประสานร่วม 3 ชนิดที่มีปริมาณเถ้าลอยค่อนข้างน้อย (C1FA20LP10 และ C1 FA10LP20) จะมีลักษณะการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ค่อนข้างมากเห็นได้ชัดเจนจากภาพ (แท่งตัวอย่างคดงอ)



ภาพที่ 3 *การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 76 สัปดาห์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต*



ภาพที่ 4 *ภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่อายุ 76 สัปดาห์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต*

4. สรุป

จากการศึกษาการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในครั้งนี้นั้น สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต การขยายตัวของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน มีค่าการขยายตัวน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน

2. ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต การแทนที่ด้วยเถ้าลอย (ร้อยละ 30 และ 50) ทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ส่งผลให้การขยายตัวของมอร์ต้าร์ค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับของ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการแทนที่ผงหินปูน (ร้อยละ 10 และ 20) ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีแนวโน้มการขยายตัว

ของมอร์ต้าร์ดังกล่าว มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน หรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และเช่นเดียวกันกับการขยายตัวของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน (ร้อยละ 10 และ20) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน

3. การใช้วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน) ส่งผลให้การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย เช่น กรณีถ้าเถ้าลอยมี ปริมาณ CaO สูงๆ ถ้าแทนที่ร่วมในปริมาณต่ำๆ จะส่งผลให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มากขึ้น แต่ถ้าแทนที่ในปริมาณสูงขึ้นจะทำให้การขยายตัวน้อยลง เป็นต้น

4. ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต การบดผสมเถ้าลอยเข้าในปูนซีเมนต์ (ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน) มีผลให้ การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่ามากกว่าการแทนที่เถ้าลอยเข้าในปูนซีเมนต์ แต่ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ทั้งบดผสมเถ้าลอยและการแทนที่ด้วยเถ้าลอยน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัทสยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนทุนในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Krammart P., and Tangtermsirikul S., "Strength Reduction and Expansion of Mortars with Fly Ash," Research and Development Journal of The Engineering Institute of Thailand, V.13, No.3, 2002, pp. 9-16.

[2] Voglis N.,Kakali G., Chanitakis E., Tsivilis S., 2005. Portland-Limestone cement Their properties and hydration compared to those of other composite cements. Cement & Concrete Composites, V.27:pp.191-196

[3] Krammart P., and Tangtermsirikul S. "Expansion, Strength Reduction and Weight Loss of Fly Ash Concrete in Sulfate Solution," ASEAN Journal on SCIENCE & TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT, V 21, 2004.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	นายนพคุณ ผลโพธิ์
วัน เดือน ปีเกิด	10 กรกฎาคม 2511
ที่อยู่	42/99 หมู่ 5 ตำบลลาดสวาย อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12150
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมก่อสร้าง มหาวิทยาลัยศรีปทุม ปี พ.ศ. 2538
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ. 2538 – ปัจจุบัน วิศวกร โครงสร้างประจำ Wold Construction and Engineering Co.,LTD.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี