รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

(Basic Properties of Concrete with Fly Ash and Limestone Powder)

โดย

ผศ. ดร. ปิติศานต์ กร้ำมาตร

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

งบประมาณประจำปี 2553 ภายใต้โครงการเสริมสร้างความเข้มแข็งทางวิชาการ มทร. ธัญบุรี

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนนี้ ได้รับการสนับสนุนทุนจากโครงการเสริมสร้างความเข้มแข็งทางวิชาการ มทร.ธัญบุรี งบประมาณประจำปี 2553 ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบคุณไว้เป็นอย่างสูง และขอขอบคุณ ศ.ดร.สมนึก ตั้งเติมสิริกุล สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ความกรุณาเป็นนักวิจัยที่ปรึกษาของผู้วิจัย และได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างมากต่องานวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์บางส่วนสำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ด้วย

ผศ. ดร. ปิติศานต์ กร้ำมาตร
ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

ชื่อโครงการ: คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

ชื่อนักวิจัยและสถาบัน: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติศานต์ กร้ำมาตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail Address: pitisan.k@en.rmutt.ac.th , pkrammart@yahoo.com

ระยะเวลาโครงการ: 1 ปี (1 ตุลาคม 2552 - 30 กันยายน 2553)

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาความต้องการน้ำและการก่อตัวของตัวอย่างเพสต์ ค่าการไหลแผ่ ความพรุน ค่าการหดตัวแห้ง และกำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ต้าร์ และกำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีต ของวัสดุประสานที่ใช้เถ้าลอยและผงหินปูนเป็นส่วนผสม โดยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ผลการศึกษาพบว่าความต้องการน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่ามากกว่า ในขณะที่เพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย มีความต้องการน้ำน้อยกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการก่อตัว (ระยะต้นและระยะปลาย) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีค่ามากกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน สำหรับค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าลอยมีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความพรุนที่อายุ 28 วัน ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนและแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ (ทั้งกรณี 2 และ 3 วัสดุประสาน) มีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยที่การแทนที่ด้วยผงหินปูนขนาด 4 ไมโครเมตรจะส่งผลให้ค่าการหดตัวแห้งที่น้อยกว่าของผงหินปูนขนาด 14 ไมโครเมตร และสุดท้ายพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูน มีผลให้กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์และของคอนกรีตช่วงอายุต้นมีแนวโน้มมากกว่าหรือใกล้เคียง (ถ้าแทนในปริมาณที่เหมาะสม) แต่เมื่ออายุมากขึ้นกลับให้ค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์และคอนกรีตเถ้าลอยช่วงอายุต้นน้อยกว่า แต่เมื่ออายุมอร์ต้าร์มากขึ้นมีค่าใกล้เคียง เมื่อเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

คำหลัก: เถ้าลอย ผงหินปูน การก่อตัว ความพรุน ค่าการหดตัวแห้ง กำลังอัดประลัย

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
สารบัญ	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	9
2.2.2 วัสดุปอซโซลาน	13
2.2.3 เถ้าลอย	15
2.2.4 ผงหินปูน	18
\ 2.2.5 การหดตัวแบบแห้ง	19
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	21
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	21
3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา	21
3.2.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา	21
3.2.2 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูนเป็นส่วนผสม	23
3.3 สัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา	26
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์	30
4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา	30
4.1.1 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน	30
4.1.2 ความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสาน	30
4.1.3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสาน	31

4.1.4 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน 31
4.1.5 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน 33
4.2 คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่ศึกษาในครั้งนี้ 34
4.2.1 ปริมาณที่เหมาะสมของเพสต์ 34
4.2.2 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ 36
4.2.3 การไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ 37
4.2.4 ความพรุนของมอร์ต้าร์ 39
4.2.5 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ 41
4.2.6 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์และคอนกรีต 45
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา 51
บรรณานุกรม 52

บทที่ 1
บทนำ

สำหรับบทนำเป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากปัญหาสภาวะโลกร้อนและกระแสการอนุรักษ์พลังงานรวมถึงสภาวะการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจปัจจุบัน ทำให้มีการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น เป็นที่ทราบกันดีว่าในการผลิตปูนซีเมนต์ด้วยเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมากถึง 0.5 ตันในทุกๆ 1 ตันของน้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ผลิตขึ้น [1] หากพิจารณาประโยชน์จากการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์โดยเฉพาะกรณีวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่างๆ ย่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตและพัฒนาคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น รวมทั้งสามารถแก้ปัญหาการกำจัดของเสียและช่วยประหยัดพลังงานโดยรวมของประเทศ อาทิเช่น พลังงานที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ พลังงานที่ใช้ลำเลียงผลพลอยได้ไปทิ้งในบ่อกลบฝัง พลังงานที่ใช้ในการระเบิดภูเขาหินปูน และพลังงานที่ใช้ในการย่อยหินเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถยืดระยะเวลาในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ยาวนานยิ่งขึ้นอีกด้วย

สำหรับประเทศไทยได้มีการนำเถ้าลอยซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนมาใช้ผลิตคอนกรีตผสมเถ้าลอยอย่างแพร่หลาย ปริมาณเถ้าลอยที่มีอยู่ในประเทศไทยโดยเฉพาะเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีปริมาณสูงถึง 3 ล้านตันต่อปี [2, 3] หากนำมาใช้จะเกิดประโยชน์ต่อประเทศอย่างมาก ซึ่งในอดีตการใช้เถ้าลอยยังคงมีปัญหาเรื่องการควบคุมคุณภาพและความสม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ในปี พ.ศ. 2533 เป็นต้นมาได้มีการปรับปรุงคุณภาพและคุณสมบัติของเถ้าลอยให้มีความสม่ำเสมอทำให้เริ่มมีการนำเถ้าลอยมาใช้อย่างจริงจัง เถ้าลอยจึงกลายเป็นสินค้าที่ต้องสั่งข้ามปีและได้เข้ามามีบทบาทแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ประเทศลดการใช้ปูนซีเมนต์ปีละกว่า 2,000 ล้านตัน ประหยัดเงินได้ปีละนับ 1,000 ล้านบาท [3, 4]

นอกจากใช้เถ้าลอยผสมคอนกรีตแล้ว ปัจจุบันยังมีการนำผงหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) มาใช้ในในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ ผงหินปูนเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการย่อยหิน ซึ่งปกติแล้วจะถูกเก็บไว้ในบริเวณแหล่งย่อยหิน เนื่องจากผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ระกว่าง 1 ถึง 100 ไมโครเมตร จึงก่อให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อทางเดินหายใจของผู้อยู่อาศัยในบริเวณใกล้กับแหล่งย่อยหิน

นั้นๆ ผงหินปูนเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถหาได้ในประเทศไทย เมื่อแทนที่ผงหินปูนบางส่วนในปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะต้นและความคงทนบางชนิดให้แก่คอนกรีตได้ [5,6,7,8] จากข้อดีของผงหินปูนดังกล่าวทำให้มีแนวโน้มที่จะถูกนำมาใช้ในปริมาณมากขึ้น

อย่างไรก็ตามการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในระยะต้นจะค่อนข้างช้า แต่ในระยะยาวแล้วกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะดีและสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน [2, 9, 10, 11] ในทางตรงกันข้ามคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนจะมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดในระยะต้นเร็ว ดังนั้นการพัฒนาวัสดุประสานร่วมระหว่างปูนซีเมนต์ เถ้าลอยและผงหินปูน เป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ประโยชน์ซึ่งจะทำให้คอนกรีตที่ได้มีคุณสมบัติบางประการที่ดีกว่าการใช้เถ้าลอยหรือผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ซึ่งประเทศไทยยังมีข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มากกว่าหนึ่งชนิดน้อยมาก ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงได้ศึกษาถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการใช้งานเถ้าลอยและผงหินปูนในงานคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้มีจุดประสงค์ดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ต่อคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

12.3 เพื่อศึกษาผลของขนาดอนุภาคผงหินปูนต่อคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยละผงหินปูน

1.2.4 เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนให้เหมาะสมกับลักษณะงานโครงสร้างคอนกรีตต่อไป

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติวัสดุประสาน 3 ชนิดได้แก่ ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน ทั้งในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติเบื้องต้น โดยแต่ละคุณสมบัติมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ โดยคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูนที่ศึกษาในครั้งนี้ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ลักษณะอนุภาคโดยภาพถ่ายขยายกำลังสูง การกระจายตัวของอนุภาค และความละเอียดโดยวิธีเบลน

1.3.2 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน

1.3.3 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูนเป็นส่วนผสม ซึ่งได้แก่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสม และการก่อตัวของเพสต์ ค่าการไหล ความพรุน และการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ โดยในส่วนของกำลังอัดจะพิจารณาทั้งของมอร์ต้าร์และคอนกรีต

1.3.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี ของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน) รวมทั้งเปรียบเทียบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และ ผงหินปูนเป็นส่วนผสม

1.3.6 พิจารณาถึงผลของขนาดอนุภาคผงหินปูนต่อคุณสมบัติเบื้องต้น (บางประการ) ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยละผงหินปูน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่

1.4.1 เพื่อทราบถึงผลกระทบของการใช้เถ้าลอย และผงหินปูนในการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ ต่อ คุณสมบัติเบื้องต้นของเพสต์และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

1.4.2 เพื่อทราบถึงผลของขนาดอนุภาคผงหินปูนต่อคุณสมบัติเบื้องต้น (บางประการ) ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยละผงหินปูน

1.4.3 เพื่อให้สามารถ นำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้ เป็นแนวทางในการเลือกส่วนผสมที่มีเถ้าลอยและผงหินปูน สำหรับนำไปใช้ในงานคอนกรีตประเภทต่างๆได้อย่างมีคุณภาพ

บทที่ 2
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นจะกล่าวถึงความเป็นไปได้ในการนำผงหินปูนมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอย คุณสมบัติของเถ้าลอย คุณสมบัติของผงหินปูน และตัวแปรที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน

Paul (1976) ได้ศึกษาการผสมปูนขาว (lime) กับวัสดุปอซโซลาน (เถ้าแกลบ) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเถ้าแกลบมาใช้ในงานก่อสร้าง โดยทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของมอร์ต้าร์ปูนขาวผสมกับเถ้าแกลบ เปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมกับ ปูนขาว และเถ้าแกลบ ซึ่งมีการใช้สารผสมเพิ่มคือโซเดียมอลูมิเนต เพื่อช่วยเพิ่มกำลังรับน้ำหนัก จากผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนเถ้าแกลบต่อปูนขาวที่ทำปฏิกิริยาดีที่สุดในด้านการพัฒนากำลังรับน้ำหนักมีอัตราส่วนเท่ากับ 1 ต่อ 2 นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถนำเถ้าแกลบไปใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์และปูนขาวในการผลิตอิฐบล็อกได้ ซึ่งจะทำให้ต้นทุนลดลงถึงร้อยละ 13 ถึง 34 เมื่อเทียบกับอิฐบล็อกปูนซีเมนต์ผสมทรายที่ปริมาตรเท่ากัน

Wojciech G. (1990) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลและผลกระทบของผงหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมเต็มหรือวัสดุหล่อลื่น (filler) ต่อความต้านทานเกลือซัลเฟต เมื่อพิจารณาผลทางด้านกายภาพ พบว่าเมื่อผสมผงหินปูนลงในคอนกรีตจะส่งผลให้คอนกรีตมีช่องว่างลดลงทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นมากขึ้น ทำให้เกลือซัลเฟตเข้าไปทำลายยากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยให้ปริมาณน้ำอิสระน้อยลงถึงร้อยละ 20 ถึง 25 โดยน้ำหนักของน้ำอิสระที่อยู่ในคอนกรีต

วิศิษฏ์ เดชพันธ์ (2542) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงหินปูนเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบคอนกรีตผสมผงหินปูน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์เป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้นระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายจะเร็วขึ้น เนื่องจากผลของความเร่งทางกายภาพ (physical acceleration) เกิดขึ้นในกรณีที่ผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ ส่งผลให้อนุภาคปูนซีเมนต์กระจายตัวได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากความเร่งทางเคมี (chemical acceleration) เพราะผงหินปูนทำให้ค่าความเป็นด่างของน้ำสูงขึ้นทำให้การก่อตัวเร็วขึ้น จากผลการทดลองยังพบอีกว่า ค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าค่อนข้างต่ำเนื่องจากอนุภาคของผงหินปูนเป็นเหลี่ยมมาก อีกทั้งการแทนที่ด้วยผงหินปูนยังทำให้การก่อตัวเร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตผสมผงหินปูนจึงควรผสมสารลดน้ำพิเศษ (superplasticizer)

ปิติ เสรเมธากุล (2545) ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ และแนวทางการนำผงหินปูนเพื่อเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ และการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ มุ่งหมายเพื่อ

นำผงหินปูนมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ และ/หรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน ผลจากการศึกษาพบว่าคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุผงที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์มีบทบาทสำคัญต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น หรือเป็นผลมาจากปฏิกิริยาอื่นๆที่เกียวข้อง ซึ่งอาจสรุปได้เป็น 3 ปัจจัยด้วยกัน ปัจจัยแรกคือ ปริมาณร้อยละหรือความเข้มข้นของสารประกอบ ปัจจัยที่สองคือ ความสามรถในการทำปฏิกิริยา และ/หรือความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของสารประกอบ ปัจจัยสุดท้ายคือ ปริมาณความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี สารประกอบดังที่ได้กล่าวมาได้แก่ ปริมาณร้อยละหรือความเข้มข้นของ ซิลิกอนออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ ที่ว่องไวและอยู่ในสภาพที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ ซึ่งอาจมี แคลเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งในการทำปฏิกิริยาด้วย ซึ่งจากการทดสอบพบว่าปริมาณสารประกอบแมกนีเซียมออกไซด์ในสัดส่วนผสมระหว่างร้อยละ 0.5 ถึง 3.0 มีผลให้การพัฒนากำลังในช่วง 7 วันแรกดีขึ้น นอกจากนี้ยังสรุปแนวทางการประยุกต์ใช้ผงหินปูน และ/หรือ ผงหินปูนร่วมกับวัสดุปอซโซลานในงานประเภทต่างๆ ดังนี้

1. อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ ประยุกต์ใช้โดย ใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัตถุดิบ ใช้บดหรือผสมร่วมภายหลังเพื่อผลิตมอร์ต้าร์สำเร็จรูป และ/หรือเพื่อการผลิตปูนซีเมนต์ราคาถูกที่เหมาะแก่งานก่อสร้างขนาดเล็ก (dry mortar and/or economic – mixed cement)

2. อุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ ประยุกต์ใช้โดย ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณน้อยไม่เกินร้อยละ 35 เพื่อให้ทำหน้าที่วัสดุเติมเต็ม และ/หรือให้คุณสมบัติในการเชื่อมประสานในภายหลัง (filler and/or cementitious replacement material) หรืออาจใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก กล่าวคือปริมาณเกินกว่าร้อยละ 35 เพื่อให้ได้คุณสมบัติบางประการ เช่น คุณสมบัติคอนกรีตความร้อนต่ำ เป็นต้น

3. ประยุกต์ใช้งานในฐานะวัสดุปรับปรุงเสถียรภาพชั้นดินอ่อนและงานดินถมบดอัด

สุรชัย อำนวยพรเลิศ (2547) ได้ทำศึกษาผลของผงหินปูน และเถ้าลอยที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต โดยกำหนดปริมาณการแทนที่ผงหินปูน และ/หรือเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 18 ถึง 36 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.24, 0.27 และ 0.30 อัตราส่วนปริมาณเพสต์ต่อปริมาณช่องว่างต่ำสุดของมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.10, 1.20 และ 1.30 และค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตเท่ากับ 6.0 ± 2.0 ซ.ม. จากผลการทดลองพบว่า หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมฝุ่นหินปูน และ/หรือเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา เมื่อสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังรับแรงอัดที่อายุเริ่มต้นจนถึง 28 วัน มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันขึ้นไปจะให้กำลังเทียบเท่ากับคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมที่มีการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตผสมผงหินปูน และ/หรือเถ้าลอย มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาและมาตรฐาน ACI 318

Cengiz Duran Atis, Alaettin Kilic and Umur Korkut Sevim (2002) ได้ศึกษากำลัง รับแรงอัด และการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่มีแคลเซียมออกไซด์สูง โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.40 จากผลการศึกษาพบว่าการผสมเถ้าลอยทำให้การหดตัวแห้งลดลงประมาณร้อยละ 40 เมื่อเทียบกับมอร์ต้าซีเมนต์ล้วน และกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสม เถ้าลอยร้อยละ 10 และ 20 ให้ค่าเทียบเท่ามอร์ต้าร์ซีเมนต์ล้วน

P. Chindaprasirt, P. Kanchanda, A. Sathonsaowaphak and H.T. Cao (2005) ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมปอซโซลาน (เถ้าลอยชนิด F และเถ้าแกลบ) ใช้อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ตัวอย่างที่ใช้วัดการขยายตัวจะถูกแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 และทำการตรวจสอบค่า pH ของสารละลาย จากการศึกษาพบว่าเถ้าลอยและเถ้าแกลบช่วยลดการขยายตัวของมอร์ต้าร์และค่า pH นอกจากนี้ยังพบว่าเถ้าแกลบมีประสิทธิภาพมากกว่าเถ้าลอย จากผลการทดสอบ SEM ที่ผิวตัวอย่างที่แตกร้าวหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตชี้ให้เห็นว่าการทำลายโดยซัลเฟตของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสม เถ้าลอย หรือเถ้าแกลบถูกยับยั้งโดยการลดแคลเซียมออกไซด์ และอัตราส่วน C/S ของ CSH เจล เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าซีเมนต์ล้วนพบว่ามอร์ต้าซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบมีแคลเซียมซัลเฟตน้อยกว่า และเกิดแอททริงไจท์น้อยกว่าอย่างชัดเจน เช่นเดียวกันกับในกรณีมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยก็จะน้อยกว่ามอร์ต้าร์ซีเมนต์ล้วน แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีมากกว่ามอร์ต้าซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยปอซโซลานทั้งสองชนิดนี้ในอัตราการแทนที่ถึง ร้อยละ 40 เพื่อสร้างซีเมนต์ผสมที่มีความต้านทานซัลเฟตดี

E.F. Irassar (2005) ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตเมื่อผงหินปูนถูกใช้เป็นส่วนประกอบในปูนซีเมนต์ หรือถูกใช้แทนที่ทรายในคอนกรีตไหลเข้าแบบง่าย (SCC) โดยศึกษาตัวอย่าง เพสต์, มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ซึ่งถูกแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ($NaSO_4$) และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ที่มีความเข้มข้นต่างๆกัน และที่อุณภูมิต่างกัน โดยใช้ปูนซีเมนต์มีองค์ประกอบต่างๆกัน นอกจากนี้ส่วนผสมและอัตราการแทนที่ผงหินปูนยังถูกออกแบบให้แตกต่างกันอีกด้วย จากผลการศึกษาพบว่าการเสื่อมสภาพเนื่องจากซัลเฟตส่วนใหญ่ส่งผลมาจากอัตราส่วน W/C และปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ การแตกร้าวของผิวถูกควบคุมโดยการใช้อัตราส่วน W/C ต่ำ และมีปริมาณ C_3A ต่ำ ในส่วนสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตพบว่าอุณหภูมิต่ำส่งผลให้เพิ่มระดับความเสื่อมสภาพมากขึ้น

Kamile Tosun, Burak F., B. Baradan and I. Akin Altun (2009) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผงหินปูน ตัวอย่างถูกเตรียมด้วยปูนซีเมนต์ 2 ชนิดซึ่งอัตราส่วน C_3S/C_2S แตกต่างกัน ใช้อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5, 10, 20 และ 40 ตัวอย่างจะถูกแช่ในสารละลายซัลเฟต 3 สถานะคือ โซเดียมซัลเฟต ($NaSO_4$) ที่อุณหภูมิ 20°C และ 5°C แมกนีเซียมออกไซด์ ($MgSO_4$) ที่อุณหภูมิ 5°C ผลจากการทดสอบชี้ให้เห็นว่าอัตราส่วนการแทนที่ผงหินปูนและอุณหภูมิที่ต่ำส่งผลเสียต่อความต้านทานซัลเฟต นอกจากนี้

ปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วน C_3S/C_2S สูงมีแนวโน้มถูกซัลเฟตทำลายง่ายโดยจะถูกทำลายมากขึ้นเมื่อมีปริมาณผงหินปูนเพิ่มขึ้น ในตัวอย่างที่มีอัตราการแทนที่ผงหินปูนสูงการทดสอบ XRD และ SEM/EDS แสดงให้เห็นว่าแอททริงไจท์เป็นผลผลิตที่ส่งผลเสียต่อตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ส่วนยิปซั่ม และ เทอว์มาไซท์ (thaumasite) เป็นผลผลิตที่ส่งผลเสียต่อตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ธีรวัฒน์ สินศิริ (2548) ได้ศึกษาผลกระทบของความละเอียด รูปร่างของเถ้าลอยและวัสดุเฉื่อย ต่อกำลัง ขนาดโพรง การกระจายขนาดโพรง และการซึมผ่านอากาศในเพสต์ที่แข็งตัวแล้ว ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยนำเถ้าลอยทั้งที่ไม่ได้แยกขนาด และแยกขนาดมาแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อ วัสดุผงเท่ากับ 0.35 จากการศึกษาพบว่าเพสต์ผสมเถ้าลอยคัดขนาดให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าเพสต์ผสมเถ้าลอยที่ไม่คัดขนาด การแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยไม่ได้คัดขนาดในอัตราการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เพสต์มีปริมาณโพรงทั้งหมดเพิ่มขึ้นแต่ขนาดโพรงโดยเฉลี่ยจะลดลง ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยขนาดเล็กจะส่งผลให้ทั้งปริมาณโพรงทั้งหมด และขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลง เมื่อตรวจสอบปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์พบว่าการแทนที่เถ้าลอยที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในเพสต์ลดลงมากกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่หยาบกว่า นอกจากนี้ยังศึกษาเพสต์ที่ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.35 และเพสต์ที่ควบคุมให้มีปริมาณน้ำที่ความข้นเหลวปกติ ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และโรงไฟฟ้า COCO มาคัดแยก 3 ตัวอย่างคือ เถ้าลอยที่ไม่ คัดแยกขนาด เถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0-45 และ 0-10 ไมครอน ใช้ทรายแม่น้ำที่บดให้มีขนาดใกล้เคียงกับเถ้าลอย โดยนำเถ้าลอยหรือทรายแม่น้ำแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าปริมาณโพรงของเพสต์เถ้าลอยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ อัตราการแทนที่เถ้าลอยเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้เถ้าลอยขนาดเล็กลงจะส่งผลให้ปริมาณโพรงลดลง การซึมผ่านอากาศในเพสต์จะลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นและใช้เถ้าลอยมีความละเอียดขึ้น นอกจากนี้พบว่าเพสต์ที่ผสมเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า COCO มีปริมาณโพรงและการซึมผ่านอากาศสูงกว่าเพสต์ที่ผสมเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เนื่องจากเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า COCO มีรูปร่างเป็นเหลี่ยม มีความพรุน และความเป็นผลึกมากกว่า ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานน้อยกว่า นอกจากนี้แล้วยังพบว่าเพสต์ผสมวัสดุเฉื่อยที่มีขนาดเล็กจะส่งผลให้ปริมาณโพรงลดลงมากกว่าการผสมด้วยวัสดุเฉื่อยที่หยาบกว่า และเมื่อเทียบระหว่างการแทนที่ด้วยวัสดุเฉื่อยและเถ้าลอยแม่เมาะที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน และที่อัตราการแทนที่เดียวกัน พบว่าปริมาณโพรงและการซึมผ่านอากาศของเพสต์ผสมวัสดุเฉื่อยสูงกว่าเพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ ทังนี้เนื่องจากเถ้าลอยแม่เมาะเป็นวัสดุปอซโซลานจึงสามารถลดขนาดโพรงจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกและผลจากการอัดตัวแน่นของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ขณะที่วัสดุเฉื่อยสามารถลดปริมาณโพรงได้เนื่องจากการอัดตัวแน่นของอนุภาคที่มีขนาดเล็กเท่านั้น

ปิติศานต์ กร้ำมาตร และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล (2549) 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 ให้ค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบมอร์ต้ารปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้ค่าสูงกว่า ในทางกลับกัน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 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

ศักดิ์ประยุทธ สินธุภิญโญ และสุรชัย วังรัตนชัย (2552) ได้ตรวจสอบคุณสมบัติของผลผลิตปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่ผสมผงหินปูน เพื่อศึกษาโครงสร้างที่เปลี่ยนไประหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จากการศึกษาพบว่าผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และกลไกการเกิดปฏิกิริยามีข้อแตกต่างกัน โดยปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนทำให้เกิดเฟส Monocarboaluminate ซึ่งไม่พบในปูนซีเมนต์ปกติ เกิด Nucleation Effect ในระหว่างปฏิกิริยา ไฮเดรชั่น เกิดการเติมเต็มช่องว่างและการอัดตัวแน่น (filling/packing effect) ของผงหินปูนระหว่างเนื้อปูนซีเมนต์ ซึ่งจากผลทั้งสามส่วนดังกล่าวเป็นสาเหตุให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ในระยะต้นสูงกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามประโยชน์ที่ได้จากการหินปูนบดละเอียดนี้จะอยู่ในช่วงต้นของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเท่านั้น และข้อควรระวังในการใช้ผงหินปูนในปริมาณมากอาจจะทำให้เกิด false set ในปูนซีเมนต์ได้

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผงที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุปอซโซลาน เถ้าลอย และผงหินปูน รวมถึงทฤษฎีพื้นฐานทางด้านคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

2.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (portland cement) หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้จากการเผาส่วนผสมซึ่งประกอบด้วยหินปูน (calcareous) ดินเหนียวประเภท Argillaceous ออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็ก แล้วนำมาบดเป็นผงละเอียด

2.2.1.1 <u>ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์</u>

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีหลายประเภท แต่ละประเภทมีสารประกอบสำคัญได้แก่ C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF, CaO และ MgO ซึ่งจะมีอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน จึงทำให้ปูนซีเมนต์แต่ละประเภทมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ส่วนประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ แสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.1 ซึ่งปูนซีเมนต์ที่ผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่จะผลิตตามมาตรฐานของอเมริกา (ASTM C. 150) และของประเทศอังกฤษ (British Standard; B.S.) ซึ่งตามมาตรฐาน มอก. 15 ของไทยได้แบ่งปูนซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

ก. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (ordinary portland cement) ใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไปปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังสูงในระยะเวลาไม่รวดเร็วมากนัก และให้ความร้อนปานกลาง

ข. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 2

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 2 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (modified cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนไม่สูงมากนัก ความร้อนที่เกิดมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 และให้กำลังใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์ใดที่เกิดความร้อนและทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตปานกลาง

ค. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 3

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 3 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (rapid hardening portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรก ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสูงเพราะมี C_3S และความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาก ใช้ในการทำคอนกรีตที่ต้องการใช้งานหรือถอดแบบเร็ว

ง. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 4

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 4 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (low heat portland cement) ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่ำมากเพราะมีปริมาณ C_3S ต่ำ แต่มีปริมาณ C_2S ที่ค่อนข้างสูง ใช้ในงานคอนกรีตหลา เนื่องจากมีคุณสมบัติให้อุณหภูมิต่ำ

จ. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (sulfate resisting portland cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีปริมาณ C_3A ต่ำมาก ดังนั้นจึงมีการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยลง ใช้ในงานคอนกรีตที่สร้างอยู่ในที่มีเกลือหรือสารละลายซัลเฟต และบริเวณที่มีดินเค็ม

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่าง ๆ [12]

ชนิดของปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM	ส่วนประกอบทางเคมี (ร้อยละ)						
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	$CaSO_4$	CaO	MgO
Type I (Normal)	49	25	12	8	2.9	0.8	2.4
Type II (Modified)	45	29	6	12	2.8	0.6	3.0
Type III (High Early Strength)	56	15	12	8	3.9	1.4	2.6
Type IV (Low Heat)	30	46	5	13	2.9	0.3	2.7
Type V (Sulfate Resistant)	43	36	4	12	2.7	0.4	1.6

2.2.1.2 <u>องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์</u>

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยสารประกอบออกไซด์หลัก และสารประกอบออกไซด์รอง ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.2 ซึ่งสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีรายละเอียดดังนี้

ก. สารประกอบออกไซด์หลัก (major oxides)

สารประกอบออกไซด์หลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ออกไซด์กลุ่มนี้มีปริมาณรวมกันได้กว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ข. สารประกอบออกไซด์รอง (minor oxides)

สารประกอบออกไซด์รอง ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล ((Na_2O) และ(K_2O)) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)

นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจัดอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (insoluble residue)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [12]

สารประกอบประเภทออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ชื่อย่อ
แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide)	60.0 - 67.0	CaO
ซิลิกอนออกไซด์ (silicon oxide)	17.0 - 25.0	SiO_2
อลูมิเนียมออกไซด์ (aluminium oxide)	3.0 - 8.0	Al_2O_3
ไอออนออกไซด์ (ferric oxide)	0.5 - 6.0	Fe_2O_3
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (sulfer trioxide)	1.0 - 3.0	SO_3
แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide)	0.1 - 0.4	MgO
อัลคาไลท์ (alkalies)	0.2 - 1.3	Na_2O
ไททาเนียมออกไซด์ (titanium oxide)	0.2 - 1.3	K_2O

2.2.1.3 <u>สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์</u>

สารประกอบออกไซด์ของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมี และรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีรูปร่างต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบการเผา และการเย็นลงของเม็ดปูน ปริมาณสารประกอบสำคัญในปูนซีเมนต์มีปริมาณมากถึงกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ สารประกอบที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด ดังนี้

ก. ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO.SiO_2$ หรือ C_3S)

ไตรแคลเซียมซิลิเกต เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึกสีเทาแก่ คุณสมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกตนี้เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัว และแข็งตัวให้กำลังค่อนข้างดีโดยเฉพาะ 7 วันแรก โดยปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 45 ถึง 55

ข. ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO.SiO_2$ หรือ C_2S)

ไดแคลเซียมซิลิเกตมีหลายรูปแบบ โดยที่อุณภูมิปกติ C_2S จะอยู่ในรูปเบต้าไดแคลเซียมซิลิเกต (βC_2S) ไดแคลเซียมซิลิเกตมีลักษณะเป็นเม็ดกลม มีคุณสมบัติเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวและพัฒนากำลังอัดอย่างค่อนข้างช้าและช้ากว่า C_3S มาก แต่ในระยะยาวจะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับ C_3S โดยปริมาณไดแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 15 ถึง 35

ค. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3$ หรือ C_3A)

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมสีเทาอ่อน ทำปฏิกิริยากับน้ำมีความรุนแรงมากและทำให้ก่อตัวทันที (flash set) การพัฒนากำลังเร็วภายใน 1 ถึง 2 วัน แต่กำลัง

ค่อนข้างต่ำ ปริมาณมื่อเทียบกับ C_3S และ C_2S โดยปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 7 ถึง 15

ง. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ หรือ C_4AF)

เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์อยู่ในสภาพสารละลายแข็ง (solid solution) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็วภายในไม่กี่นาที แต่กำลังค่อนข้างต่ำ และต่ำกว่า C_3A โดยปริมาณของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 5 ถึง 10

การคำนวณปริมาณสารประกอบทั้ง 4 ชนิด ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถหาได้จากสูตรการคำนวณ Bogue's Equation โดยแบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1: $Al_2O_3/Fe_2O_3 \geq 0.64$

$$C_3S = 4.071CaO-7.600SiO_2-6.718Al_2O_3-1.430Fe_2O_3-2.852SO_3 \quad (2.1)$$

$$C_2S = 2.867SiO_2-0.7544C_3S \quad (2.2)$$

$$C_3A = 2.650Al_2O_3-1.692Fe_2O_3 \quad (2.3)$$

$$C_4AF = 3.043Fe_2O_3 \quad (2.4)$$

กรณีที่ 1: $Al_2O_3/Fe_2O_3 \geq 0.64$

$$C_3S = 4.071CaO-7.600SiO_2-4.479Al_2O_3-2.859Fe_2O_3-2.852SO_3 \quad (2.5)$$

$$C_2S = 2.867SiO_2-0.7544C_3S \quad (2.6)$$

$$C_3A = 0 \quad (2.7)$$

$$C_4AF = 2.100Al_2O_3+1.702Fe_2O_3 \quad (2.8)$$

2.2.1.4 <u>ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์</u>

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (hydration reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

ก. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกต ไฮเดรต (calcium silicate hydrate, $3CaO.2SiO_23H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide : $Ca(OH_2)$ หรือ CH) ดังสมการที่ 2.9

$$2\left(3CaO.SiO_2\right)+6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_23H_2O+3Ca\left(OH\right)_2 \quad (2.9)$$

ข. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH ดังสมการที่ 2.10

$$2(2CaO.SiO_2)+4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_23H_2O+Ca(OH)_2 \quad (2.10)$$

ค. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2.11

$$3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O \quad (2.11)$$

เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซั่มเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (clinker) โดยยิปซั่ม (gypsum : $CaSO4.2H_2O$) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนต ก่อให้เกิดชั้นบาง ๆของแอทริงไจท์ (ettringite : $3CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.31H_2O$) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต ดังสมการที่ 2.12

$$3CaO.Al_2O_3+Ca.SO_4.\ 2H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.31H_2O \quad (2.12)$$

ง. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซั่ม ดังสมการที่ 2.13

$$4CaO.Al_2O_3Fe_2O_3+Ca.SO_4.\ 2H_2O \longrightarrow CaO.(Al_2O_3.Fe_2O_3).3CaSO_4 \quad (2.13)$$

เนื่องจากปูนซีเมนต์มี C_3S เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ ซึ่งบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ C_3A ด้วย ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะลดลงเนื่องจากการเกิดชั้นเคลือบของแอทริงไจท์ และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของอิออนแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาลดลง และเพสต์มีสภาพพลาสติกช่วงหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึก และปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ทำให้เกิด CSH เพิ่มมากขึ้น ตามด้วยปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้แอทริงไจท์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมิเนตและเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต และซัลโฟเฟอไรท์แคลเซียมซิลิเกตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น และขยายเข้าไปในโพรงและเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.2.2 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (pozzolanic materials) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็น ซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ/หรือเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันเป็นปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุนั้น ๆ อาจจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้

แต่ต้องสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และถึงแม้ว่าปอซโซลานชนิดนั้นมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ในสัดส่วนผสมใดๆ ก็ตาม บางครั้งปอซโซลานบางส่วนไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้เนื่องจากองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยามีไม่เพียงพอต่อขบวนการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

2.2.2.1 <u>ชนิดของวัสดุปอซโซลาน</u>

ปอซโซลานมีสองชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (natural pozzolan) และปอซโซลานดัดแปลง (modify pozzolan) มีรายละเอียดดังนี้

ก. ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (natural pozzolan) ได้แก่ หินดินดาน (shales) เศษหินภูเขาไฟ (Tuff) เถ้าภูเขาไป (volcanic ash) หินภูมิไซท์ (pumisite) หินโอเพิลเหลือง (opaline) หินชั้น (shale) หินเชิร์ต (chert) หินปูน (limestone) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเมื่อต้องการนำไปใช้งาน จะต้องนำมาบดก่อน

ข. ปอซโซลานดัดแปลง (modify pozzolan)

ปอซโซลานดัดแปลงเกิดจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By Products) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้นซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบันปอซโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่ เถ้าลอย (fly ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซิลิกาฟูม (silica fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

2.2.2.1 <u>ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน</u>

วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) สรุปเป็นสมการทางเคมีได้ ดังสมการที่ 2.14 ถึง 2.15

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O \text{ หรือ (CSH)} \qquad (2.14)$$

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O \text{ หรือ (CAH)} \quad (2.15)$$

2.2.3 เถ้าลอย

เถ้าถ่านหิน หรือ เถ้าลอย (fly ash หรือ pulverized) จัดเป็นสารผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์จำพวกสารปอซโซลานสังเคราะห์หรือปอซโซลานดัดแปลงประเภทหนึ่ง เป็นผลพลอยได้ (by-product) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินที่ขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับฝุ่น (electrostatic precipiation) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนเนื่องจากจะเป็นมลภาวะต่อพื้นที่โดยรอบบริเวณโรงไฟฟ้า

2.2.3.1 <u>ชนิดของเถ้าลอย</u>

มาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

ก. เถ้าลอย ชนิด F (Class F)

เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (silica : SiO_2) และอลูมินา (alumina : Al_2O_3) และเฟอร์ริคออกไซด์ (ferric oxide : Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.3 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide : CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนียวและควอรตซ์ ถ่านหิน แอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี SiO_2 สูง

ข. เถ้าลอย ชนิด C (Class C)

เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.3 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 [12]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์ ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) อย่างต่ำ, ร้อยละ	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างสูง, ร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง, ร้อยละ	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na_2O, 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 จะมีลักษณะความเป็นซีเมนต์ มากกว่า เพราะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ สูงกว่าเถ้าถ่านหิน Class F

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ (มอก.) กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าลอยถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก โดยแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมีได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 [14]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด			
	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้นคุณภาพ 3
		ชนิด ก	ชนิด ข	
ปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อย่างต่ำ, ร้อยละ	30.0	30.0	30.0	30.0
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) , ร้อยละ	-	น้อยกว่า	น้อยกว่า	-
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างมาก, ร้อยละ	5.0	10.0	10.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด อย่างมาก, ร้อยละ	3.0	5.0	5.0	2.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างมาก, ร้อยละ	6.0	3.0	2.0	6.0
		6.0	6.0	

เถ้าลอยในประเทศไทยสามารถพบได้ทั้ง Class C และ Class F ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาและลักษณะการเผาถ่านหิน อย่างไรก็ดีต่างก็มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีต เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ มีองค์ประกอบทางเคมีโดย ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ [15]

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

2.2.3.2 <u>องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย</u>

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก และมี แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na_2O, K_2O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition : LOI) SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักมีปริมาณถึงร้อยละ 80-90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 ของเถ้าลอยไว้อย่างต่ำร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปใช้งานได้

2.2.3.3 <u>ปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอย</u>

ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะเริ่มจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (hydration) ดังสมการที่ 2.9 ถึง 2.10 ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_23H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$ หรือ CH) หลังจากนั้นวัสดุปอซโซลานในที่นี้คือเถ้าลอย ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ดังสมการที่ 2.14 และ/หรือสมการที่ 2.15 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) ผลผลิตของปฏิกิริยานี้จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

2.2.4 ผงหินปูน

ผงหินปูน (limestone powder) เป็นผลพลอยได้ (by product) จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของหินปูน จะประกอบด้วยสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (inert material) และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (reactive material) มีรายละเอียดดังนี้

2.2.4.1 <u>วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี</u>

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจาก คุณสมบัติของวัสดุเองที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี จึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตอีกด้วย ในขณะเดียวกันก็อาจส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนต์เพสต์ สารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี อย่างไรก็ตามสารประกอบดังกล่าวทั้งสองนั้นก็สามารถที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ ถ้าหากสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากเพียงพอ และ/หรือให้พลังงานความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ดังสมการที่ 2.16 และสมการที่ 2.17

$$CaCO_3 + H_2O + \text{heat} \longrightarrow Ca(OH)_2 + CO_2 \quad (2.16)$$

$$MgCO_3 + H_2O + \text{heat} \longrightarrow Mg(OH)_2 + CO_2 \quad (2.17)$$

2.2.4.2 <u>วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี</u>

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำ ดังสมการที่ 2.18

$$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 \quad (2.18)$$

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

การนำเอาผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานมาใช้ในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จึงมีความเป็นไปได้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาว อย่างไรก็ตามปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานจากแหล่งต่างๆ เมื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบถึงคุณสมบัติและ

พฤติกรรมของวัสดุเชื่อมประสาน ซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ที่มีส่วนผสมของวัสดุทั้งสองให้แน่ชัดก่อนการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2.2.5 การหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้ง (drying shrinkage) เกิดจากการที่คอนกรีตอยู่ในภาวะอากาศที่มีความชื้นต่ำ ทำให้คอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศสูญเสียน้ำและเกิดการหดตัว โดยที่การหดตัวที่เกิดขึ้นนั้น บางส่วนไม่อาจกลับคืนสู่สภาพเดิมได้แม้ว่าจะทำให้คอนกรีตเกิดการเปียกชื้นขึ้นมาใหม่

การหดตัวแบบแห้งและการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง มีกลไกการเกิดเช่นเดียวกับการเกิดรอยแตกร้าวแบบพลาสติก นั่นคือในคอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศมีความชื้นต่ำ ส่วนความชื้นในช่องคะปิลลารี (capillary pore) มาก จึงเกิดการหดตัวเนื่องจากสูญเสียน้ำอิสระ (free water) ไปสู่อากาศได้ด้วยการระเหย ทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในช่องว่างคะปิลลารี ประกอบกับปริมาตรของคอนกรีตลดลง หรือหดตัวลงเนื่องจากการสูญเสียน้ำ ถ้าการหดตัวนี้ถูกยึดรั้ง ไม่ว่าด้วยโครงสร้างที่อยู่รอบข้าง หรือด้วยเนื้อคอนกรีตภายในที่ไม่มีการสูญเสียความชื้น รอยแตกร้าวก็อาจเกิดขึ้นได้ถ้าการยึดรั้งนี้ก่อให้เกิดหน่วยแรงยึดรั้งที่มีค่าสูงกว่ากำลังแรงดึงของคอนกรีตในขณะนั้น การแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งจะแตกต่างกับการแตกร้าวแบบพลาสติกตรงที่ช่วงเวลาการเกิด การแตกร้าวแบบพลาสติก จะเกิดในช่วงที่คอนกรีตอยู่ในช่วงพลาสติก ส่วนการแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งจะเกิดหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว

2.2.5.1 <u>บริเวณที่มักจะเกิดรอยแตกร้าวและช่วงเวลาที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง</u>

การหดตัวแบบแห้งมักจะเกิดขึ้นให้เห็นตรงบริเวณผิวคอนกรีตสัมผัสกับอากาศ บางครั้งถ้าเป็นผนังบางก็อาจมีรอยแตกข้ามไปถึงพื้นผิวอีกด้านหนึ่งได้ ในกรณีของผิวถนนก็มักจะเห็นรอยแตกตามขวางหรือตามยาว ช่วงเวลาที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งมักจะเป็นช่วงเวลาที่หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มเป็นต้นไป รอยแตกร้าวนี้อาจจะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ แม้แต่อายุคอนกรีตจะมากจนเป็นปีแล้วก็ตาม แต่ส่วนมากแล้วจะเริ่มเกิดให้เห็นในช่วง 2-3 เดือนแรกหลังสิ้นสุดการบ่ม

2.2.5.2 <u>ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้ง</u>

ปัจจัยทั้งภายในและภายนอกที่มีผลต่อการสูญเสียความชื้นออกจากคอนกรีต จึงมีผลต่อการหดตัวแบบแห้งทั้งสิ้น ปัจจัยดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

ก. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงจะทำให้มีช่องว่างคะปิลลารีมาก ปริมาณน้ำอิสระก็จะมากไปด้วยการที่คอนกรีตมีช่องว่างคะปิลลารีมาก จะทำให้น้ำระเหยออกจากคอนกรีตได้สะดวก

ข. ปริมาณมวลรวม โดยปกติแล้วการหดตัวจะเกิดในซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นคอนกรีตที่มีปริมาณเพสต์น้อยหรือ อีกนัยหนึ่งมีปริมาณมวลรวมมาก ก็ทำให้เกิดการหดตัวน้อยลง

ค. ชนิดและคุณภาพของมวลรวม เนื่องจากมวลรวมมักจะเป็นส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในเรื่องของปริมาตร ดังนั้นมวลรวมจึงมีคุณสมบัติที่จะช่วยต่อต้านการหดตัวในคอนกรีตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามวลรวมมีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูง การแตะกันของมวลรวมเป็นกลไกหนึ่งของการต้านทานการหดตัวซึ่งเกิดจากซีเมนต์เพสต์ได้ มวลรวมที่มีการดูดซึมน้ำมาก ก็มักจะก่อให้เกิดการหดตัวแบบแห้งในคอนกรีตมากตามไปด้วย ขนาดคละของมวลรวมที่ดี ก็จะเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยให้การหดตัวของคอนกรีตลดลง เนื่องจากทำให้คอนกรีตต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยลง

ง. ชนิดและปริมาณของวัสดุผสม การใช้ปอซโซลาน หรือวัสดุผงบางชนิด ก็มีผลต่อการหดตัวของคอนกรีต เช่น เถ้าลอยสามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้ เนื่องจากช่วยลดความต้องการน้ำของคอนกรีต และเถ้าลอยบางชนิดก็ยังมีคุณสมบัติช่วยให้คอนกรีตขยายตัวเล็กน้อย ทำให้ชดเชยการหดตัวได้บางส่วน การใช้ผงซิลิกาฟูมก็สามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้เนื่องจากช่วยเพิ่มความแน่นให้คอนกรีต การใช้ผงหินปูนก็อาจสามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งด้วย

จ. อุณหภูมิและความชื้นของสิ่งแวดล้อม สิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะทำให้คอนกรีตสูญเสียน้ำได้เร็วขึ้น จึงทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้งมากขึ้น

ฉ. มิติและรูปร่างลักษณะของโครงสร้างคอนกรีต โครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากก็จะสูญเสียความชื้นได้เร็ว จึงทำให้เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งได้ง่าย

บทที่ 3
วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาจะกล่าวถึง วัสดุที่ใช้ในการศึกษา รายละเอียดวิธีการศึกษา และสัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย ผงหินปูน ทราย น้ำ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 80-2517 โดยเป็นปูนซีเมนต์ที่ใหม่ไม่จับตัวเป็นก้อน

2. เถ้าลอย ใช้เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

3. ผงหินปูน ใช้ผงหินปูนที่ได้รับการควบคุมคุณภาพในการผลิต มีสิ่งเจือปนน้อย และผลิตเพื่อจำหน่ายเป็นอุตสาหกรรม

4. ทราย ใช้ทรายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่าง ๆออกจนสะอาด นำไปอบและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และปรับทรายให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

5. หิน ใช้หินนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่าง ๆออกจนสะอาด นำไปอบและร่อนค้างตะแกรงเบอร์ 4 และปรับหินให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

6. น้ำ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้น้ำประปา

3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับรายละเอียดวิธีการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาหรือทดสอบคุณสมบัติในด้านต่าง ๆได้แก่ คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูนเป็นส่วนผสม

3.2.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน) ที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมี มีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

3.2.1.1 <u>คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา</u>

โดยคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานที่ศึกษาได้แก่

ก. ความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 188-95 โดยขวดมาตรฐานเลอชาเตอร์ลิเยร์ (Le Chatelier Flask) (รูปที่ 3.1)

รูปที่ 3.1 ขวดมาตรฐานเลอชาเตอร์ลิเยร์

ข. ลักษณะอนุภาคของวัสดุประสานโดยภาพถ่ายขยายกำลังสูง (scanning electric microscope: SEM)

ค. การกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน ทำการทดสอบด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคแขวนลอยโดยใช้เรเซอร์ (laser particle size analyzer: LPSA)

ง. ความละเอียดของวัสดุประสานโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 204-00 ด้วยเครื่องมือแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์ (air permeability apparatus) (รูปที่ 3.2)

รูปที่ 3.2 เครื่องมือหาความละเอียดโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์

3.2.1.2 <u>คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา</u>

สำหรับการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานนั้นได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

3.2.2 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูนเป็นส่วนผสม

สำหรับคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน เป็นส่วนผสม ที่ได้ศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วย ความข้นเหลวปกติของเพสต์ ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ ร้อยละการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ ความพรุนของมอร์ต้าร์ และกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์และคอนกรีต มีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

3.2.2.1 ความข้นเหลวปกติของเพสต์

ความข้นเหลวปกติของเพสต์ (normal consistency) กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 187-98 ด้วยเครื่องมือไวแคท (vicat apparatus) (รูปที่ 3.3)

3.2.2.2 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

ระยะเวลาการก่อตัว (setting time) ของเพสต์ ซึ่งทำการทดสอบหาระยะเวลาก่อตัวระยะต้น (initial setting ime) และระยะเวลาก่อตัวระยะปลาย (final setting time) กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 191-99 ด้วยเครื่องมือไวแคท

รูปที่ 3.3 เครื่องมือไวแคท

3.2.2.3 การไหลแผ่ของมอร์ต้าร์

การไหลแผ่ (flow value) ของมอร์ต้าร์ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 109-99 ด้วยโต๊ะทดสอบการไหล (flow table) (รูปที่ 3.4)

รูปที่ 3.4 โต๊ะทดสอบการไหล

3.2.2.3 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์และคอนกรีต

กำลังอัดประลัย (compressive strength) ของมอร์ต้าร์ ประยุกต์ใช้มาตรฐาน ASTM C 109 ที่อายุ 3, 7, 28 และ 91 วัน และกำลังอัดของคอนกรีตประยุกต์ใช้มาตรฐานอังกฤษ BS 1881 โดยใช้ตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 ซม.^{3} ที่อายุ 28 และ 365 วัน ด้วยเครื่อง UTM (universal testing machine) (รูปที่ 3.5)

รูปที่ 3.5 เครื่อง UTM (universal testing machine)

3.2.3.4 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์

การหดตัวแห้ง (drying shrinkage) ของมอร์ต้าร์ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 596-96 ด้วยเครื่องวัดความยาว (length comparator) (รูปที่ 3.6) โดยมีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความยาว

ก. การเตรียมตัวอย่าง

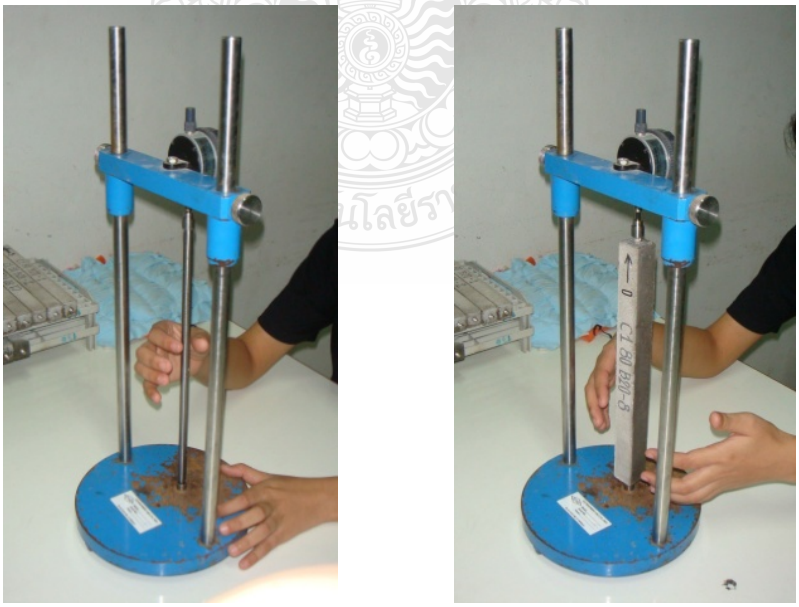
การทดสอบการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ใช้ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ซึ่งเตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 25x25x285 มม. ดังรูปที่ 3.7 โดยในแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ใช้ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์จำนวน 4 ชิ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ยการหดตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์

(ก) แบบหล่อ (ข) ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ทดสอบการหดตัวแห้ง

รูปที่ 3.7 แบบหล่อและชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ทดสอบการหดตัวแห้ง

ข. อายุการบ่มและอายุทดสอบการหดตัวแห้ง

หลังจากหล่อชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ โดยถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมงแล้วนำไปบ่มในน้ำ 7 วัน อุณหภูมิในระหว่างการบ่มเท่ากับ 30±2 °C เมื่อเสร็จสิ้นการบ่มในน้ำ นำชิ้นตัวอย่างทั้ง 4 ชิ้นของแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ขึ้นจากน้ำแล้วเช็ดผิวให้แห้งด้วยผ้า หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานดังรูปที่ 3.8 ซึ่งค่าที่วัดได้ ณ ขณะนี้จะใช้เป็นค่าความยาวเริ่มต้น เมื่อวัดค่าความยาวแล้ว นำชิ้นตัวอย่างบ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย 30±2 °C โดยวางชิ้นตัวอย่างบนโต๊ะให้มีระยะห่างของแต่ละชิ้นไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว ดังรูปที่ 3.9 หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุบ่มในอากาศต่างๆ คือ 1, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 42 และ 91 วัน เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวแห้งที่อายุบ่มต่างๆกัน



รูปที่ 3.8 การวัดความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน

รูปที่ 3.9 ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่บ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย 30±2 °C

ค. การคำนวณร้อยละของการหดตัวแห้ง

ค่าความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้น ที่ได้จากการวัดครั้งแรกหลังจากบ่มในน้ำ 7 วัน และค่าที่วัดได้ในช่วงอายุบ่มในอากาศที่อายุต่างๆ จะนำไปคำนวณค่าร้อยละของการหดตัวแห้ง ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (3.1)

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100 \qquad (3.1)$$

โดย ΔL คือ ค่าการหดตัวแห้ง (%)

L_x คือ ค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานหลังจากบ่มในอากาศที่อายุต่างๆ (มม.)

L_i คือ ค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้น (มม.)

L_g คือ ค่าความยาวของ Gauge Length หรือเท่ากับ 285 มม.

3.3 สัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

ตัวอย่างเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ใช้วัสดุประสานจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูนซึ่งในที่นี้ใช้ 2 ชนิด คือ ผงหินปูนที่มีความละเอียด 4 ไมครอนและ 14 ไมครอน และเถ้าลอย (fly ash) ของเถ้าถ่านหิน

การศึกษาครั้งนี้ใช้สัดส่วนของวัสดุประสาน (ยกเว้นกรณีคอนกรีต) ดังนี้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

2. ผงหินปูน (แต่ละชนิด) จะใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ซึ่งแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

3. เถ้าลอยจะใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ซึ่งแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก

4. ผงหินปูน (แต่ละชนิด) จะใช้แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

5. ผงหินปูน (แต่ละชนิด) จะใช้แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

6. ผงหินปูน (แต่ละชนิด) จะใช้แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

7. ผงหินปูน (แต่ละชนิด) จะใช้แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 15 และแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

สำหรับสัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้แยกตามคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ได้ศึกษา โดยมีรายละเอียดของสัดส่วนผสมต่าง ๆ ดังนี้

ก) สัดส่วนผสมของวัสดุประสานที่ใช้ในการหาค่าความข้นเหลวปกติและการก่อตัวของเพสต์ แสดงดังตารางที่ 3.2

ข) สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการหาค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ ความพรุน และกำลังอัด โดยใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) เท่ากับ 2.75 แสดงดังตารางที่ 3.3

ค) สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้หากำลังอัดของคอนกรีต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55 แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของเพสต์วัสดุประสานที่ใช้ในการหาค่าความข้นเหลวปกติและการก่อตัว

ที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ผงหินปูน	
				4μ	14μ
1	PC	1.00	-	-	-
2	PC-5LP4	0.95	-	0.05	-
3	PC-5LP14	0.95	-	-	0.05
4	PC-10LP4	0.90	-	0.10	-
5	PC-10LP14	0.90	-	-	0.10
6	PC-20FA	0.80	0.20	-	-
7	PC-40FA	0.60	0.40	-	-
8	PC-15FA -5LP4	0.80	0.15	0.05	-
9	PC-10FA -10LP4	0.80	0.10	0.10	-
10	PC-30FA -10LP4	0.60	0.30	0.10	-
11	PC-25FA -15LP4	0.60	0.25	0.15	-

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ผงหินปูน	
				4μ	14μ
12	PC-15FA -5LP14	0.80	0.15	-	0.05
13	PC-10FA -10LP14	0.80	0.10	-	0.10
14	PC-30FA -10LP14	0.60	0.30	-	0.10
15	PC-25FA -15LP14	0.60	0.25	-	0.15

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการหาค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ ความพรุน กำลังอัดมอร์ต้าร์ และการหดตัวแห้ง

ที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ผงหินปูน		ทราย	น้ำ
				4μ	14μ		
1	MC	1.00	-	-	-	2.75	0.55
2	MC-5LP4	0.95	-	0.05	-	2.75	0.55
3	MC-5LP14	0.95	-	-	0.05	2.75	0.55
4	MC-10LP4	0.90	-	0.10	-	2.75	0.55
5	MC-10LP14	0.90	-	-	0.10	2.75	0.55
6	MC-20FA	0.80	0.20	-	-	2.75	0.55
7	MC-40FA	0.60	0.40	-	-	2.75	0.55
8	MC-15FA -5LP4	0.80	0.15	0.05	-	2.75	0.55
9	MC-10FA -10LP4	0.80	0.10	0.10	-	2.75	0.55
10	MC-30FA -10LP4	0.60	0.30	0.10	-	2.75	0.55
11	MC-25FA -15LP4	0.60	0.25	0.15	-	2.75	0.55
12	MC-15FA -5LP14	0.80	0.15	-	0.05	2.75	0.55
13	MC-10FA -10LP14	0.80	0.10	-	0.10	2.75	0.55
14	MC-30FA -10LP14	0.60	0.30	-	0.10	2.75	0.55
15	MC-25FA -15LP14	0.60	0.25	-	0.15	2.75	0.55

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ที่ใช้สำหรับหากำลังอัดคอนกรีต

ที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กก.)					
		ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	ผงหินปูน 4 μ	ทราย	หิน	น้ำ
1	CC	332	-	-	970	1080	182
2	CC -30FA	233	99	-	970	1080	182
3	CC- 50FA	166	166	-	970	1080	182
4	CC-10 LP4	299	-	33	970	1080	182
5	CC- 20LP4	266	-	66	970	1080	182
6	CC -20FA -10LP4	233	66	33	970	1080	182
7	CC- 10FA-20LP4	233	33	66	970	1080	182
8	CC-40FA-10 LP4	166	133	33	970	1080	182
9	CC -30FA- 20LP4	166	99.5	66.5	970	1080	182

หมายเหตุ อัตราส่วนที่แสดงในตาราง เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแต่ละวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุประสานทั้งหมดในส่วนผสม

P	หมายถึง เพสต์
M	หมายถึง มอร์ต้าร์
C	หมายถึง คอนกรีตและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
LP4	หมายถึง ฝุ่นหินปูนความละเอียดประมาณ 4 ไมโครเมตร
LP14	หมายถึง ฝุ่นหินปูนความละเอียดประมาณ 14 ไมโครเมตร
FA	หมายถึง เถ้าลอยจากแหล่งโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
5LP4	หมายถึง แทนที่ฝุ่นหินปูนขนาดความละเอียดประมาณ 4 ไมโครเมตรเป็นปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณวัสดุประสานทั้งหมด
5LP14	หมายถึง แทนที่ฝุ่นหินปูนขนาดความละเอียดประมาณ 14 ไมโครเมตรปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปริมาณวัสดุประสานทั้งหมด
20FA	หมายถึง แทนที่เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของปริมาณวัสดุประสานทั้งหมด

บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิเคราะห์

สำหรับผลการศึกษาและการวิเคราะห์ในการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในครั้งนี้ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยดังกล่าวจึงได้ศึกษาและทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นบางประการของวัสดุประสานที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ด้วย คุณสมบัติดังกล่าวที่ศึกษาได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี ส่วนในด้านคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ได้ศึกษาคุณสมบัติดังกล่าว ได้แก่ ความข้นเหลวปกติของเพสต์ ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ ร้อยละการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ ความพรุนของมอร์ต้าร์ และกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์และคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูนขนาดความละเอียด 4 และ 14 ไมโครเมตร และเถ้าลอย โดยคุณสมบัติเบื้องต้นที่ได้ศึกษาในครั้งนี้ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาค และคุณสมบัติทางเคมี โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน

ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของวัสดุประสานที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้นั้น ได้แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.15 ส่วนผงหินปูนที่มีขนาดเฉลี่ย 4 และ 14 ไมโครเมตรนั้น มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.70 และ 2.71 ตามลำดับ ในขณะที่เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.44

4.1.2 ความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสาน

สำหรับผลการทดสอบความความละเอียดโดยวิธีเบลน (Blaine's fineness) ของวัสดุประสานที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้แสดงดังตารางที่ 4.1 คือของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความละเอียดโดยวิธีเบลนเท่ากับ 3,190 ซม.^{2}/ก. ในขณะของผงหินปูนขนาด 4 ไมโครเมตร และขนาด 14 ไมโครเมตร เท่ากับ 9,260 และ 3,320 ซม.^{2}/ก. ตามลำดับ โดยความละเอียดขนาด

4 ไมโครเมตรนั้นมากกว่าของปูนซีเมนต์ประมาณ 3 เท่า ส่วนของเถ้าลอยที่ใช้มีค่าความละเอียดต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือมีค่าท่ากับ 2,460 ซม.^{2}/ก.

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน และขนาดอนุภาคเฉลี่ย ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และเถ้าลอยที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้

คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1	ผงหินปูน		เถ้าลอย
		4 μm	14 μm	
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.70	2.71	2.44
ความละเอียด ; ซม.^{2}/ ก.	3,190	9,260	3,320	2,460
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ; μm	17.54	3.93	14.11	20.28

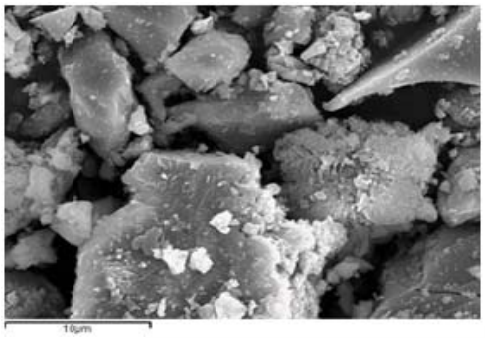
4.1.3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสาน

ในการถ่ายภาพขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสานในครั้งนี้ได้ใช้โดยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.1 จากภาพถ่ายขยายขนาด 3,500 เท่าของอนุภาคของวัสดุประสานพบว่า อนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะะเป็นเหลี่ยมกระจัดกระจายอยู่ทั่วๆ ไป ส่วนของผงหินปูนก็จะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมเช่นเดียวกับกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยที่ผงหินปูนขนาด 4 ไมโครเมตร นั้นจะมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าของปูนซีเมนต์ และเล็กกว่าของผงหินปูนความละเอียดขนาด 14 ไมโครเมตร ในขณะที่ลักษณะของอนุภาคของเถ้าลอยของแม่เมาะที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ จะมีลักษณะค่อนข้างกลมที่กระจัดกระจายอยู่ทั่วๆไปเช่นเดียวกัน

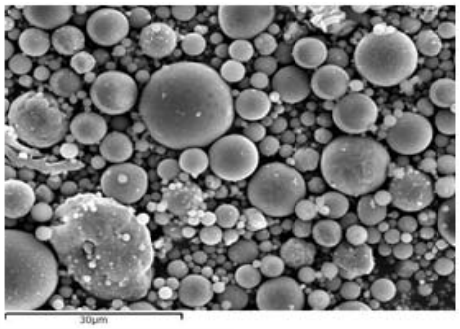
4.1.4 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน

ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ ได้แสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า การกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้นั้นมีลักษณะการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกัน แต่จะมีของเถ้าลอยที่แนวโน้มจะมีอนุภาคส่วนที่หยาบมากกว่าวัสดุตัวอื่น กล่าวคือกราฟส่วนสะสมที่ค้างตั้งแต่ร้อยละ 50 ขึ้นไปจะมีส่วนที่หยาบมากกว่าส่วนที่ละเอียด สำหรับค่าของขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ร้อยละค้างสะสมที่ 50) ของวัสดุประสานแต่ละชนิดเป็นดังนี้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 17.54 ไมโครเมตร ในขณะที่ของผงหินปูนความละเอียดขนาด 4 และ 14 ไมโครเมตร มีค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ย เท่ากับ 3.93 และ 14.11 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งฝุ่นหินปูนความละเอียดขนาด 4 ไมโครเมตรมีขนาดของอนุภาคเฉลี่ย

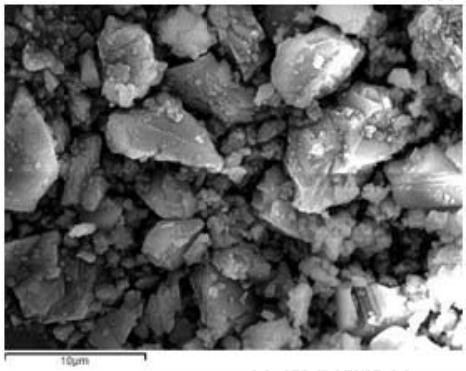
ค่อนข้างเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ ส่วนเถ้าลอยนั้นมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 20.28 ไมโครเมตรซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



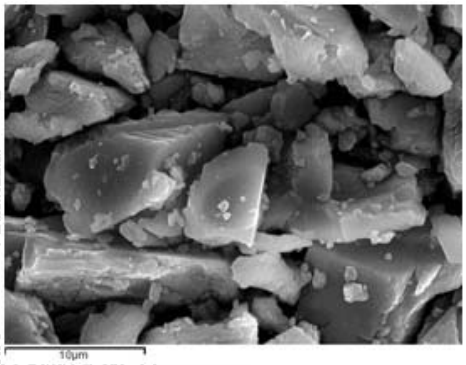
ก) ปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ประเภทที่ 1



ข) เถ้าลอย

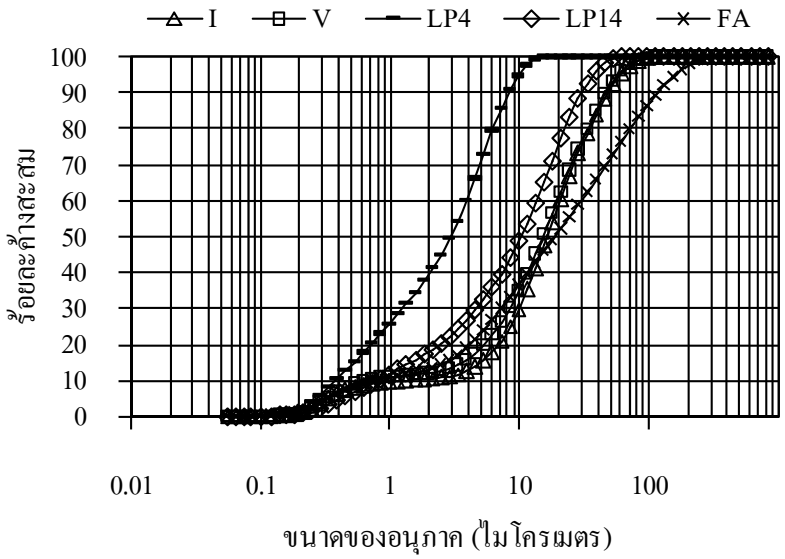


ค) ผงหินปูนขนาด 4 ไมโครเมตร



ง) ผงหินปูนขนาด 14 ไมโครเมตร

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (ขนาด 3,500 เท่า) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูนขนาด 4 และ 14 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.2 ลักษณะการกระจายสะสมของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผงหินปูนขนาด 4 และ 14 ไมโครเมตร และ เถ้าลอยในเทอมของร้อยละค้างสะสม

4.1.5 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูนขนาด 4 และ 14 ไมโครเมตร และ เถ้าลอย โดยใช้วิธี X - ray fluorescence spectrometry (XRF) แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า SiO_2 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับร้อยละ 20.61 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ของผงหินปูนมีน้อยมากคือน้อยกว่าร้อยละ 1 แต่ของเถ้าลอยมีมากถึงร้อยละ 36.10 ส่วนปริมาณของ Al_2O_3 และ Fe_2O_3นั้นพบว่าของปูนซีเมนต์มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 3-5 ของฝุ่นหินปูนไม่ถึงร้อยละ 1 แต่ของเถ้าลอยมีค่าเท่ากับร้อยละ 19.40 และ 15.10 ตามลำดับ ในส่วนปริมาณของ CaO นั้น ปรากฏว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 64.89 ซึ่งใกล้เคียงกับของผงหินปูน (ร้อยละ 54.80 และ 54.30) ในขณะเถ้าลอยจากแม่เมาะที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้นั้นมีปริมาณ CaO เท่ากับร้อยละ 17.40 โดยน้ำหนัก

ในส่วนของออกไซด์รอง ซึ่งได้แก่ MgO, Na_2O, K_2O หรือ SO_3 ในวัสดุประสานแต่ละชนิดที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ ปรากฏว่ามีค่าค่อนข้างน้อยและมีในปริมาณที่ไม่แตกต่างกัน แต่สำหรับปริมาณของ LOI (การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา) พบว่าของผงหินปูนนั้นมีค่าค่อนข้างสูงคือประมาณร้อยละ 43-44 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยนั้นน้อยมาก คือ ประมาณร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนักเท่านั้น

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูนขนาด 4 และ 14 ไมโครเมตร และเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ผงหินปูน		เถ้าลอย
		4 μm	14 μm	
Silicon Dioxide , SiO_2	20.61	0.06	0.27	36.10
Aluminum Oxide , Al_2O_3	5.03	0.09	0.18	19.40
Ferric Oxide , Fe_2O_3	3.03	0.04	0.08	15.10
Calcium Oxide , CaO	64.89	54.80	54.30	17.40
Magnesium Oxide , MgO	1.43	0.57	0.62	2.97
Sodium Oxide , Na_2O	0.22	-	-	-
Potassium Oxide , K_2O	0.46	-	-	-
Sulfur Trioxide , SO_3	2.70	-	-	0.77
Free Lime , CaO	0.79	-	-	-
Loss on Ignition, LOI	1.23	43.80	43.63	2.81

4.2 คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่ศึกษาในรั้งนี้

สำหรับผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่ศึกษาในครั้งนี้ ซึ่งได้แก่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ ร้อยละการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ ความพรุนของมอร์ต้าร์ และกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์และคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 ปริมาณที่เหมาะสมของเพสต์

ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน (ขนาด 4 และ 14 ไมโครเมตร) ร้อยละ 5 และ 10 เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 25 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 15 แสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.3 พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนมีค่าเท่ากับร้อยละ 24.25 และปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผงหินปูนขนาด 4 ไมโครเมตร ร้อยละ 5 และ 10 ได้เท่ากับร้อยละ 24.00 และ 25.00 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ซึ่งอาจเป็นเพราะผงหินปูนขนาด 4 ไมโครเมตร ช่วยในการลื่นไหลจึงทำให้ต้องการน้อยลง

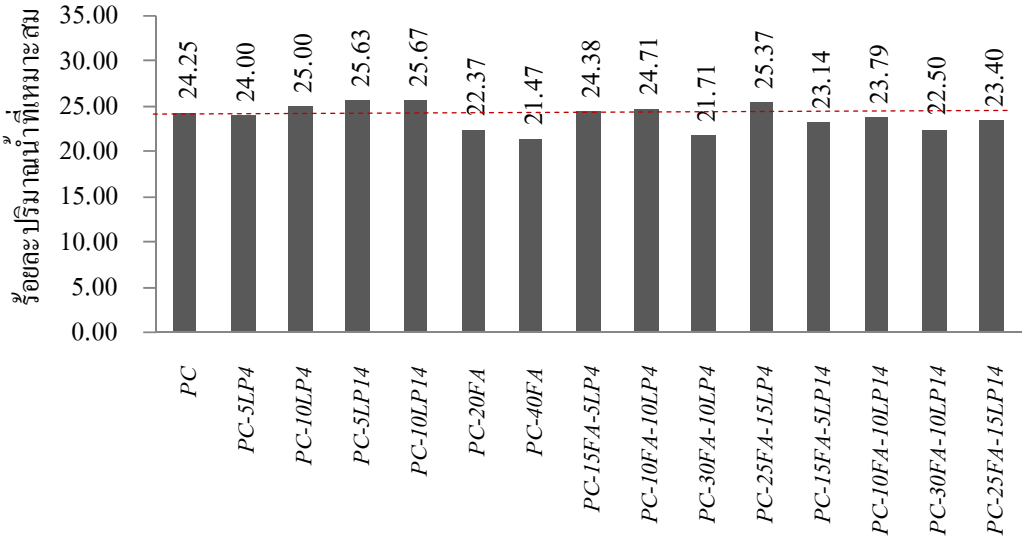
ส่วนปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผงหินปูนขนาด 14 ไมโครเมตร ร้อยละ 5 และ 10 ได้เท่ากับร้อยละ 25.63 และ 25.67 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ซึ่งในกรณีอาจเป็นเพราะความถ่วงจำเพาะของผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงทำให้เพิ่มปริมาณมากขึ้น พื้นที่ผิวมาก จึงต้องการน้ำมากในการเคลือบผิว

สำหรับเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ดังกล่าวน้อยกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ปริมาณเถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่กลมจึงช่วยในการลื่นไหล

กรณีเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่าให้ค่าในทิศทางที่สอดคล้องกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน กล่าวคือเพสต์ที่มีเถ้าลอยในปริมาณที่มากเป็นส่วนผสม จะทำให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมเพิ่มขึ้น ผลจากอนุภาคที่กลมของเถ้าลอย

ตารางที่ 4.4 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์และเวลาก่อตัวของเพสต์วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

ที่	เพสต์	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)	เวลาก่อตัว (นาที)	
			ระยะต้น	ระยะปลาย
1	PC	24.25	95	150
2	PC-5LP4	24.00	107	150
3	PC-10LP4	25.00	100	135
4	PC-5LP14	25.63	131	195
5	PC-10LP14	25.67	125	165
6	PC-20FA	22.37	147	195
7	PC-40FA	21.47	150	210
8	PC-15FA-5LP4	24.38	128	210
9	PC-10FA-10LP4	24.71	117	180
10	PC-30FA-10LP4	21.71	113	165
11	PC-25FA-15LP4	25.37	111	150
12	PC-15FA-5LP14	23.14	120	150
13	PC-10FA-10LP14	23.79	108	135
14	PC-30FA-10LP14	22.50	143	180
15	PC-25FA-15LP14	23.40	135	165



รูปที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์วัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน เป็นส่วนผสม

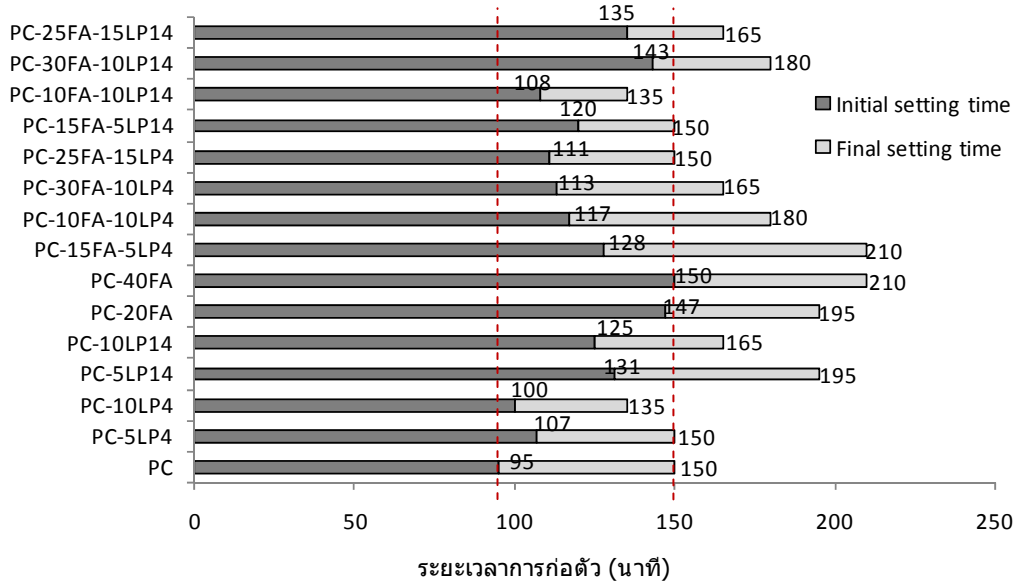
4.2.2 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

เวลาก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 แสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.4 พบว่าการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน (ทั้งขนาด 4 และ 14 ไมโครเมตร) ร้อยละ 5 และ 10 มีค่ามากกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ผงหินปูนไปลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงจึงทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง ทำให้การก่อตัวนานขึ้น ส่วนกรณีเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย พบว่าเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ทั้งหมดมีค่ามากกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อปริมาณเถ้าลอยมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยซึ่งเป็นสารปอซโซลานเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง การไฮเดรชันจึงเกิดได้น้อย รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดหลังหรือช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานต้องอาศัยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในการทำปฏิกิริยาโดยที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์นั้นเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน พบว่ายังมีค่ามากกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ต

แลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าลอยและผงหินปูนที่มีผลต่อเวลาการก่อตัวดังที่กล่าวมาแล้ว



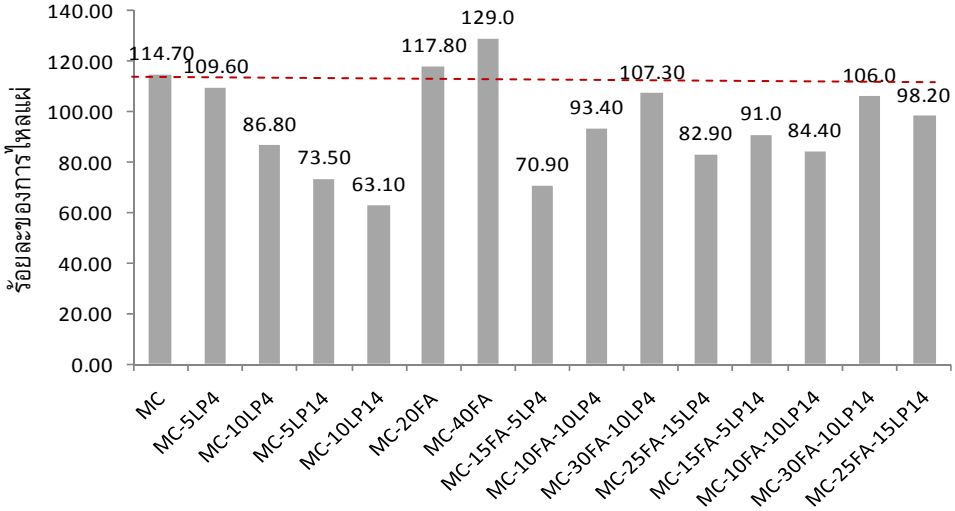
รูปที่ 4.4 เวลาการก่อตัวระยะต้นและเวลาการก่อตัวระยะปลายของเพสต์วัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูนเป็นส่วนผสม

4.2.3 การไหลแผ่ของมอร์ต้าร์

ค่าการไหลแผ่ (flow value) ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนและเถ้าลอย แสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.5 เมื่อใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่เท่ากัน คืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 พบว่าค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อปริมาณการแทนที่ผงหินปูนที่มากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผงหินปูนมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงทำให้พื้นที่ผิวมากขึ้น จึงต้องการน้ำไปเคลือบผิวมากขึ้น ในขณะที่การไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยนั้นกลับให้ค่าการไหลแผ่ที่มากกว่าของมอร์ต้ารีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าลอยที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะอนุภาคของเถ้าลอยที่กลมจึงช่วยในการลื่นไหลทำให้ค่าการไหลแผ่มากขึ้น ส่วนกรณีแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนก็ให้ผลสอดคล้องกับกรณีแทนที่ด้วยเถ้าลอยหรือผงหินปูนอย่างเดียว

ตารางที่ 4.5 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วนเถ้าลอยและผงหินปูน

ที่	มอร์ต้าร์	ค่าการไหล (ร้อยละ)
1	MC	114.70
2	MC-5LP4	109.60
3	MC-5LP4	86.80
4	MC-5LP14	73.50
5	MC-5LP14	63.10
6	MC-20FA	117.80
7	MC-40FA	129.00
8	MC-15FA -5LP4	70.90
9	MC-10FA -10LP4	93.40
10	MC-30FA -10LP4	107.30
11	MC-25FA -15LP4	82.90
12	MC-15FA -5LP14	91.00
13	MC-10FA -10LP14	84.40
14	MC-30FA -10LP14	106.00
15	MC-25FA -15LP14	98.20



รูปที่ 4.5 ค่าการไหลแผ่ ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน

4.2.4 ความพรุนของมอร์ต้าร์

ในการศึกษาความพรุนของตัวอย่างมอร์ต้าร์ซึ่งเป็นคุณสมบัติเบื้องต้นอีกอย่างหนึ่งของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ได้ทำการทดลองหาค่าความพรุน (Total porosity) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่บ่มในน้ำปูนขาวที่อายุ 28 วัน โดยกระทำตามมาตรฐาน ASTM C 642 ซึ่งผลจากการทดสอบหาค่าความพรุนของตัวอย่างมอร์ต้าร์นั้น ได้แสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.3

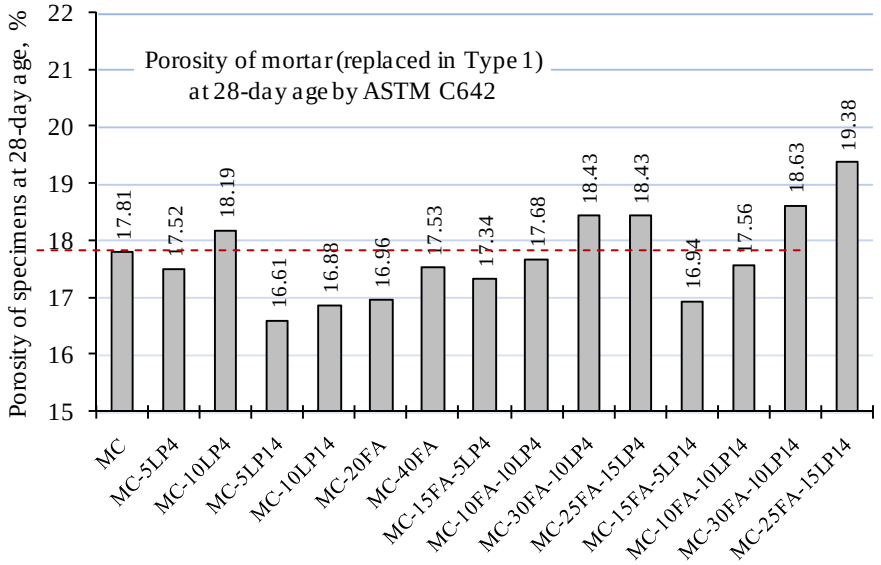
ตารางที่ 4.6 ความพรุนตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่บ่มในน้ำปูนขาวอายุ 28 วัน (มาตรฐาน ASTM C 642)

ที่	สัญลักษณ์	ความพรุน (%wt)
1	MC	17.81
2	MC-5LP4	17.52
3	MC-5LP4	17.75
4	MC-5LP14	16.61
5	MC-5LP14	16.88
6	MC-20FA	16.96
7	MC-40FA	17.53
8	MC-15FA -5LP4	17.34
9	MC-10FA -10LP4	17.68
10	MC-30FA -10LP4	18.43
11	MC-25FA -15LP4	18.04
12	MC-15FA -5LP14	16.94
13	MC-10FA -10LP14	17.56
14	MC-30FA -10LP14	18.63
15	MC-25FA -15LP14	19.38

รูปที่ 4.6 แสดงค่าความพรุนของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูน และทั้งเถ้าลอยและผงหินปูน พบว่าความพรุนของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เท่ากับร้อยละ 18.09 ในขณะที่ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน (ความละเอียดขนาด 4 และ 14 ไมโครเมตร) ทั้ง ร้อยละ 5 และ 10 มีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน นั่นแสดงว่าผงหินปูนมีผลต่อการเติมเต็มช่องว่างในมอร์ต้าร์ ซึ่ง

ประสิทธิภาพของการเติมเต็มขึ้นกับปริมาณที่เหมาะสมของผงหินปูน และเมื่อเปรียบเทียบกับผงหินปูนขนาด 4 ไมโครเมตร กับขนาด 14 ไมโครเมตร จากผลของความพรุนแสดงว่า ผงหินปูนขนาด 14 ไมโครเมตรมีผลในการไปเติมเต็มได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างปริมาณของการแทนที่ร้อยละ 5 กับร้อยละ 10 ไม่ว่าจะเป็นของผงหินปูนความละเอียดขนาด 4 หรือ 14 ไมโครเมตร พบว่า การแทนที่ร้อยละ 5 ให้ค่าความพรุนของตัวอย่างมอร์ต้าร์ต่ำกว่าเมื่อแทนที่ร้อยละ 10 นั่นก็แสดงว่าเป็นไปได้ว่า ปริมาณร้อยละ 5 ของการแทนที่น่าจะเป็นปริมาณที่เหมาะสมกว่าปริมาณร้อยละ 10 ในการไปเติมเต็มช่องว่างของตัวอย่างมอร์ต้าร์

สำหรับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นั้น พบว่า การแทนที่ในปริมาณร้อยละ 20 และ 40 ทำให้ความพรุนของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วัน ต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ร้อยละ 20 นั้นจะมีค่าความพรุนของตัวอย่างมอร์ต้าร์ต่ำกว่าเมื่อแทนที่ด้วยร้อยละ 40 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่ออายุ 28 วัน ปฏิกิริยาปอซโซลานบวกกับการเติมเต็มในช่องว่างช่วยส่งเสริมให้มอร์ต้าร์มีความแน่นสูงขึ้นจึงทำให้ความพรุนของตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าต่ำกว่า ส่วนการแทนที่ทั้งผงหินปูนละเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นั้นจะให้ผลในทิศทางของการแทนที่ด้วยผงหินปูนและเถ้าลอย ซึ่งแล้วแต่ปริมาณที่มากน้อยอย่างไรของการแทนที่ด้วยผงหินปูนและเถ้าลอย ซึ่งค่าความพรุนดังกล่าวได้แสดงดังรูปที่ 4.6



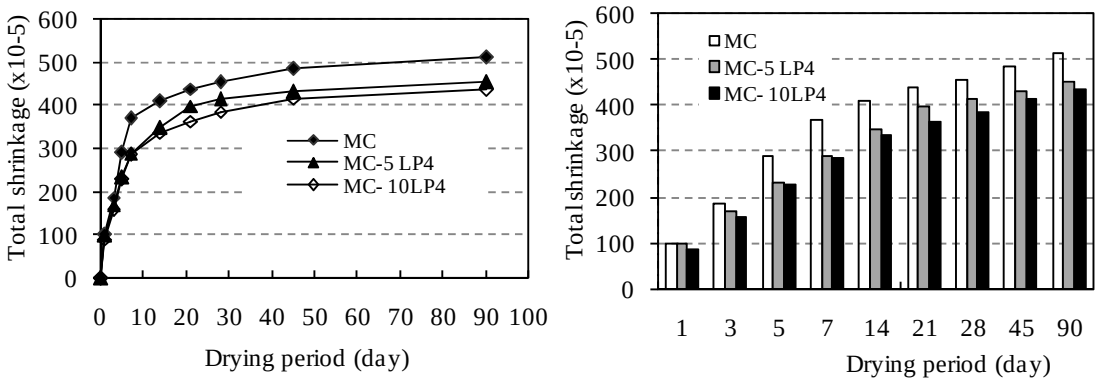
รูปที่ 4.6 ความพรุน (มาตรฐาน ASTM C 642) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนและเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่บ่มในน้ำปูนขาวที่อายุ 28 วัน

4.2.5 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์

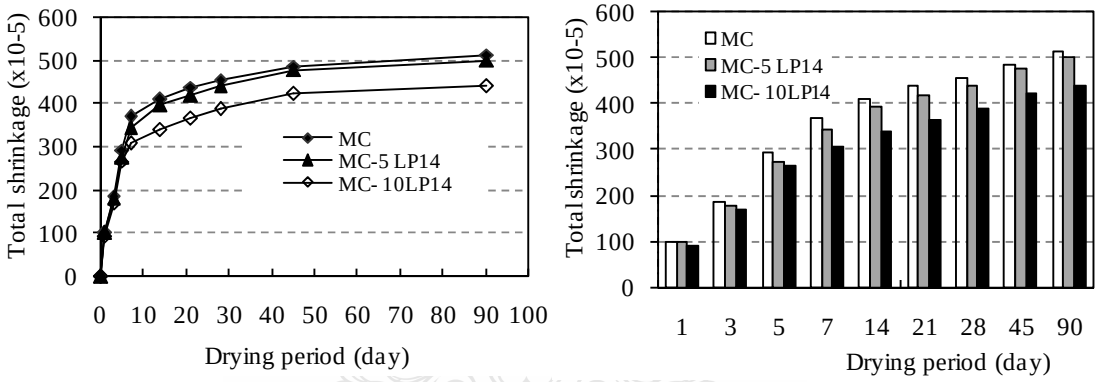
รูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.13 แสดงผลการศึกษาการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของการหดตัวแห้งที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 1, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 45 และ 90 วัน ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนดีประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนความละเอียด 4 ไมโครเมตร ร้อยละ 5 และ 10 พบว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนมีค่าร้อยละของการหดตัวแห้งมากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อย (inert material) ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ เป็นการเพิ่มมวลรวมละเอียด ซึ่งโดยทั่วไปการเพิ่มปริมาตรของมวลรวมทำให้ปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยลงและลดการหดตัวได้ [16,17] ประกอบกับผงหินปูนมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ จึงสามารถดูดซับน้ำไว้ที่ผิวของอนุภาคได้มาก ทำให้เหลือน้ำอิสระน้อยลง เนื้อมอร์ต้าร์จึงมีช่องว่างลดลง และด้วยอนุภาคที่เล็กมากของผงหินปูน ช่วยในการเติมเต็มช่องว่างในเพสต์ ส่งผลให้การสูญเสียความชื้นยากขึ้น และถ้าพิจารณาระหว่างการแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 5 และร้อยละ 10 นั้น พบว่าการแทนที่ด้วยร้อยละ 10 ของผงหินปูนให้ค่าการหดตัวแห้งที่น้อยกว่าเมื่อแทนที่ด้วยร้อยละ 5 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนด้วยปริมาณร้อยละ 10 ของผงหินปูนความละอียด 4 ไมโครเมตรนั้นเป็นปริมาณที่เหมาะสมกว่า ส่วนเมื่อพิจารณาถึงการแทนที่ของผงหินปูนความละเอียด 14 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.8 ก็ให้ผลในทิศทางเดียวกับของผงหินปูนความละเอียด 4 ไมโครเมตร ดังที่กล่าวมาแล้ว

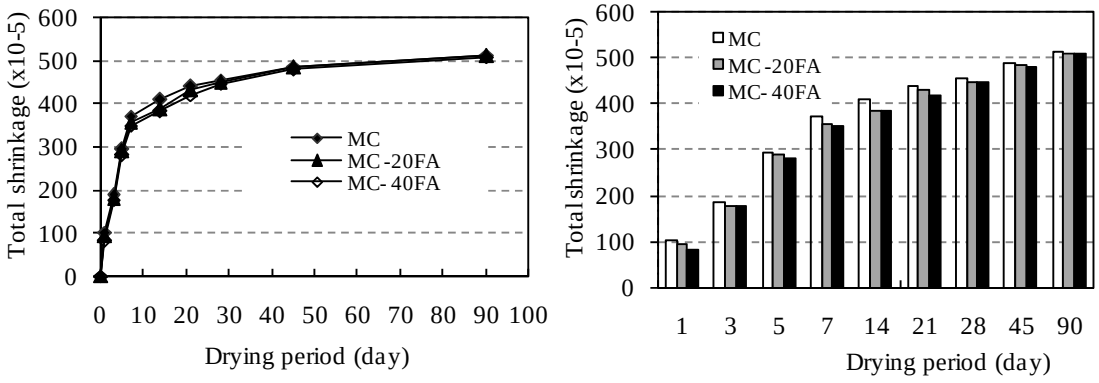
สำหรับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 (รูปที่ 4.9) พบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยให้ค่าร้อยละของการหดตัวแห้งน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย อาจทำให้ความพรุนมากขึ้น แต่ขนาดโดยเฉลี่ยของโพรงมีขนาดเล็กลง [17] ดังนั้นการสูญเสียความชื้นสู่สภาพแวดล้อมจึงเป็นไปได้ยากขึ้น ส่งผลให้การหดตัวแห้งน้อยลง และเมื่อเปรียบเทียบมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยกับการแทนที่ด้วยผงหินปูน ที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 1, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 45 และ 90 วัน ดังรูปที่ 4.10 พบว่าในช่วงระยะเวลาบ่มแห้งแรกๆ มีค่าร้อยละของการหดตัวแห้งใกล้เคียงกันหรือแนวโน้มว่าของมอร์ต้าร์เถ้าลอยจะน้อยหว่า แต่ที่อายุนานขึ้นกลับพบว่า มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยให้ค่าร้อยละของการหดตัวแห้งมากว่า



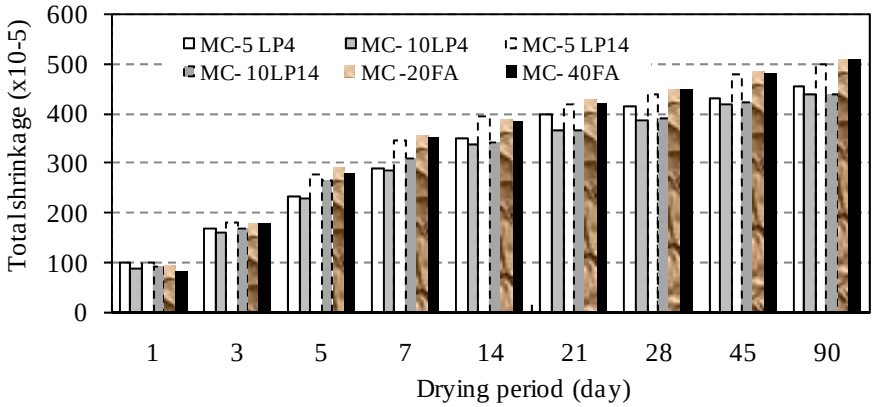
รูปที่ 4.7 การหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนความละเอียด 4 ไมโครเมตร ร้อยละ 5 และ 10



รูปที่ 4.8 การหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนความละเอียด 14 ไมโครเมตร ร้อยละ 5 และ 10



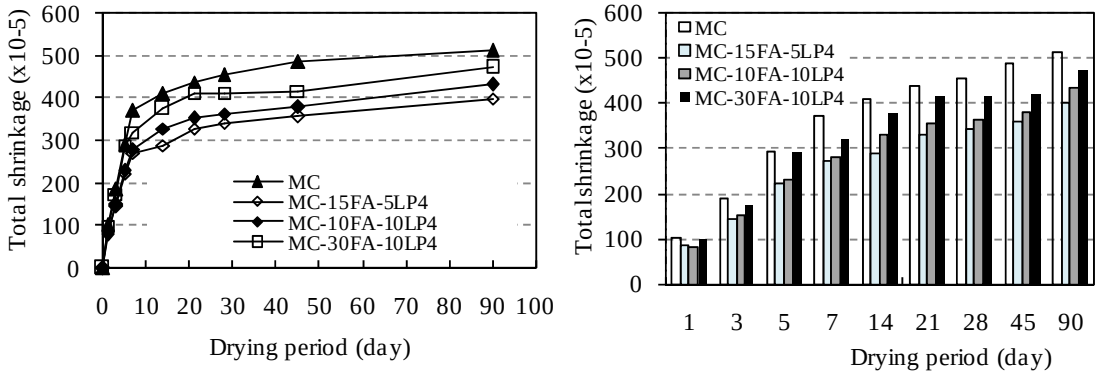
รูปที่ 4.9 การหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40



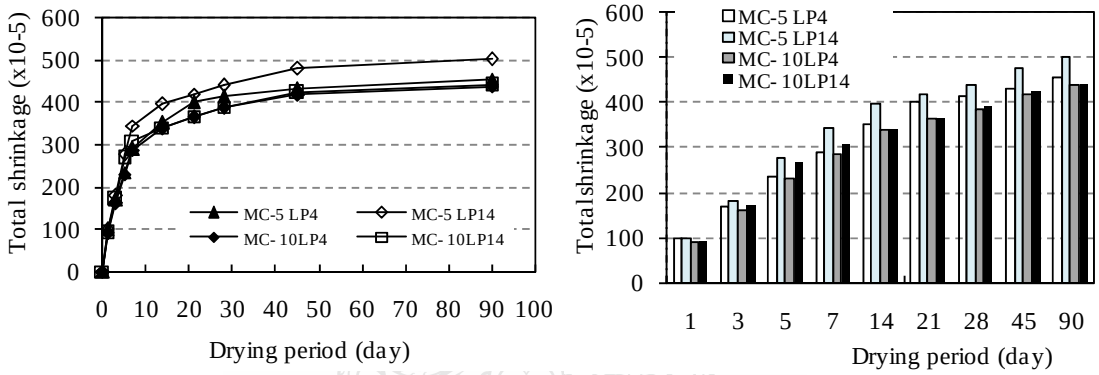
รูปที่ 4.10 การหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน

รูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงค่าร้อยละของการหดตัวแห้งที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 1, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 45 และ 90 วัน ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน พบว่าค่าร้อยละของการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนทั้งความละเอียด 4 และ 14 ไมโครเมตร ทุกสัดส่วนของการแทนที่ร่วม มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ดังเหตุผลที่กล่าวแล้ว กล่าวคือการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้โดยเฉลี่ยของโพรงมีขนาดเล็กลง ส่วนผงหินปูนที่มีความละเอียดมากกว่าจะช่วยเติมเต็มช่องว่าง มีผลให้ความทึบน้ำ หรือความพรุนน้อยลงการสูญเสียน้ำภายในเพสต์ยากขึ้น มีผลให้การหดตัวแห้งน้อยลง

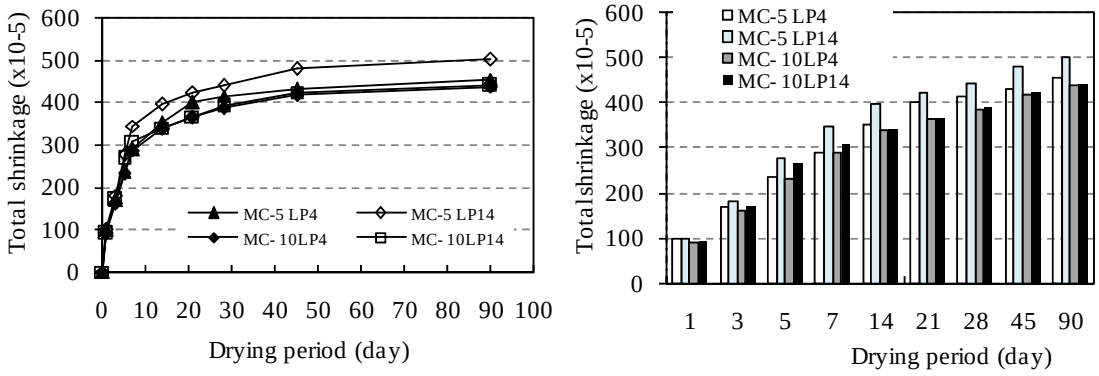
ส่วนรูปที่ 4.13 เป็นการแสดงเปรียบเทียบการหดตัวแห้งระหว่างของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนความละเอียด 4 ไมโครเมตร กับการแทนที่ด้วยผงหินปูนความละเอียด 14 ไมโครเมตร พบว่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนความละเอียด 4 ไมโครเมตร มีค่าน้อยกว่าของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนความละเอียด 14 ไมโครเมตร ทั้งการแทนที่ร้อยละ 5 และ 10 และทุกอายุที่ศึกษาในครั้งนี้ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผงหินปูนความละเอียดขนาด 4 ไมโครเมตรนั้นมีความละเอียดมากกว่า จึงสามารถเติมเต็มช่องว่างได้ดีกว่า ทำให้การสูญเสียน้ำได้ยากขึ้น ส่งผลให้การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์มีค่าน้อยลง



รูปที่ 4.11 การหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนความละเอียด 4 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.12 การหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนความละเอียด 14 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบการหดตัวแห้งระหว่างของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนความละเอียด 4 ไมโครเมตร กับผงหินปูนความละเอียด 14 ไมโครเมตร

4.2.6 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์และคอนกรีต

4.2.6.1 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์

ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.20 แสดงผลการศึกษากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และร้อยละ 40 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ผงหินปูน (ทั้ง 4 และ 14 ไมโครเมตร) ร้อยละ 5 และร้อยละ 10 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 25 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 15 เปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 อธิบายได้ดังนี้

ตารางที่ 4.7 กำลังอัดประลัยตัวอย่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยผสมผงหินปูนที่บ่มในน้ำปูนขาวอายุ 28 วัน

ที่	สัญลักษณ์	กำลังอัดประลัย (MPa)				
		3 วัน	7 วัน	28 วัน	56 วัน	90 วัน
1	MC	29.30	35.70	46.67	53.40	53.00
2	MC-5LP4	34.60	38.93	48.40	52.80	54.00
3	MC-5LP4	29.20	37.20	44.50	49.60	52.00
4	MC-5LP14	23.50	33.90	44.0	51.20	52.80
5	MC-5LP14	20.30	33.20	42.50	47.90	52.00
6	MC-20FA	22.80	30.90	42.00	44.80	48.00
7	MC-40FA	16.80	22.40	32.10	36.00	41.00
8	MC-15FA -5LP4	25.20	34.40	43.33	51.40	54.00
9	MC-10FA -10LP4	23.87	33.33	46.00	49.00	51.00
10	MC-30FA -10LP4	19.00	22.60	36.10	42.20	46.20
11	MC-25FA -15LP4	22.00	30.20	40.30	48.00	51.47
12	MC-15FA -5LP14	27.20	34.80	48.40	54.90	59.73
13	MC-10FA -10LP14	20.67	31.10	42.40	49.70	53.47
14	MC-30FA -10LP14	15.90	21.60	34.90	42.10	47.87
15	MC-25FA -15LP14	18.20	24.10	36.13	42.00	49.07

จากรูปที่ 4.14 พบว่ากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งร้อยละ 20 และ 40 ให้ค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ด้วยร้อยละ 40 จะให้ค่าค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง การไฮเดรชั่นจึงเกิดน้อย แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออายุมากขึ้น การพัฒนากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยจะมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

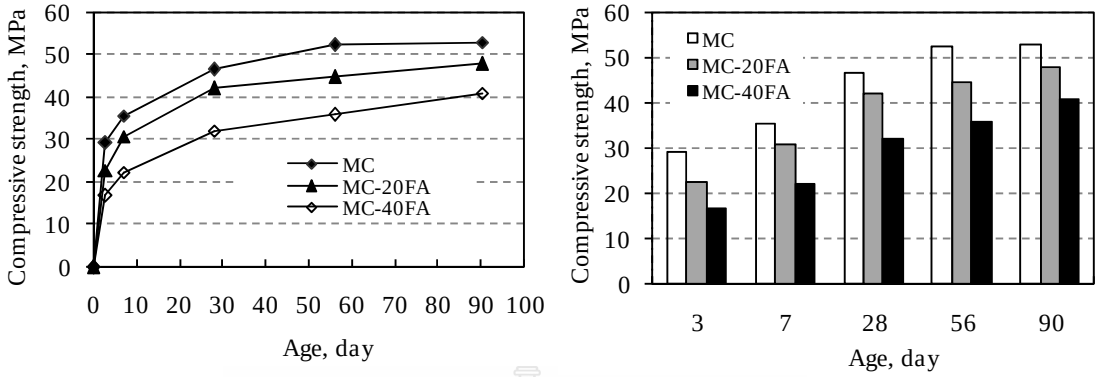
กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนขนาด 4 และ 14 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 พบว่ากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนขนาด 4 ไมโครเมตร (รูปที่ 4.15) เมื่อแทนที่ร้อยละ 5 มีค่าสูงกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนเล็กน้อย โดยเฉพาะในช่วงอายุต้นๆ ทั้งนี้เนื่องจากผงหินปูนขนาด 4 ไมโครเมตรที่แทนที่ปูนซีเมนต์มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมเต็ม (Filler) ลดปริมาณช่องว่างภายในเนื้อมอร์ต้าร์ทำให้แน่นขึ้น มอร์ต้าร์จึงมีกำลังอัดประลัยสูง แต่เมื่อแทนที่ด้วยร้อยละ 10 ส่งผลให้กำลังอัดประลัยมอร์ต้าร์ดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงหรือต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที 1 เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 อาจเป็นปริมาณที่สูงไป ทำให้เกินความต้องการในการเติมเต็ม รวมทั้งไปลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงมากขึ้น ส่วนในกรณีของผงหินปูนขนาด 14 ไมโครเมตร (รูปที่ 4.16) พบว่าการแทนทั้งร้อยละ 5 และ 10 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์มีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนด้วยปริมาณร้อยละ 20 ทั้งนี้เพราะผงหินปูนขนาด 14 ไมโครเมตรอาจเป็นขนาดที่ใหญ่ขึ้น จึงทำให้การเติมเต็มได้ไม่ดีเท่ากรณีของผงหินปูนขนาด 4 ไมโครเมตร

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยกับมอร์ต้าร์ผงหินปูน (รูปที่ 4.17) พบว่ากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผงหินปูนทั้งขนด 4 และ 14 ไมโครเมตร มีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์เถ้าลอย

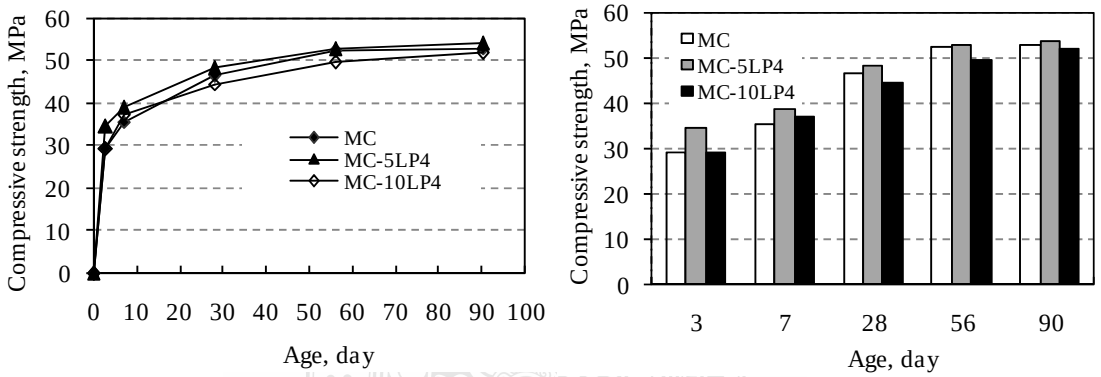
ส่วนรูปที่ 4.18 และ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน พบว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนทั้ง 4 และ 14 ไมโครเมตร ทุกสัดส่วนที่ศึกษาในครั้งนี้ ให้ค่ากำลังอัดประลัยที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ต์แลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ยกเว้นสัดส่วนที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 ร่วมด้วนผงหินปูนขนาด 14 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่ากำลังอัดประลัยมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ต์แลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะในอายุช่วงต้นๆ

ในส่วนของการเปรียบเทียบระหว่างผลของความละเอียดผงหินปูนขนาด 4 และ 14 ไมโครเมตร ที่มีผลกระทบต่อกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผงหินปูนนั้น (รูปที่ 4.20) พบว่ากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ที่ใช้ผงหินปูนขนาด 4 ไมโครเมตรนั้นจะให้ค่าที่มากกว่าของมอร์ต้าร์ที่ใช้ผง

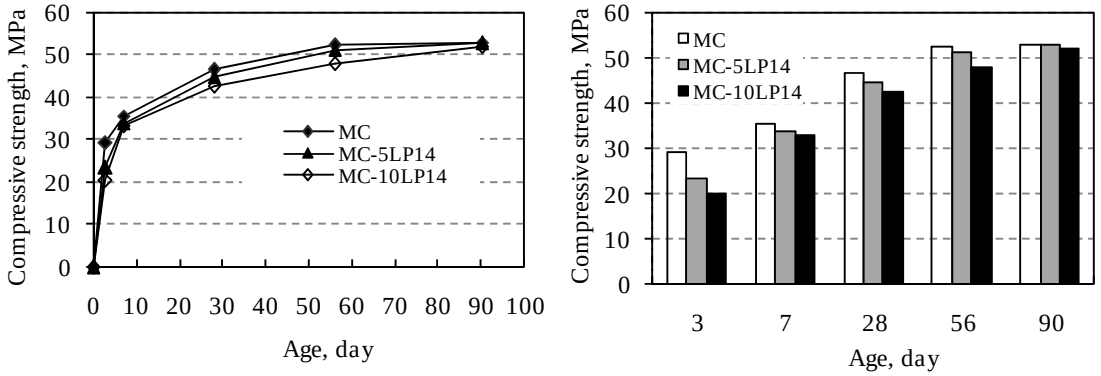
หินปูนขนาด 14 ไมโครเมตร ทั้งนี้เป็นเพราะผงหินปูนขนาด 4 ไมโครเมตรมีความละเอียดกว่า ทำให้สามารถไปเติมเต็มช่องว่างได้ดีกว่า จึงให้กำลังอัดประลัยมากกว่า



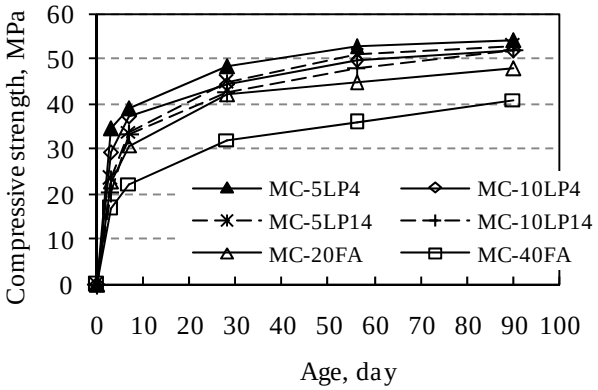
รูปที่ 4.14 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40



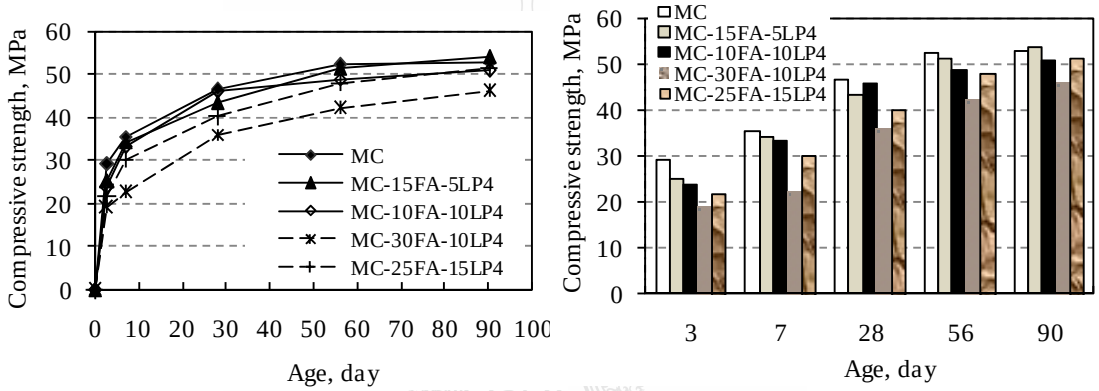
รูปที่ 4.15 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนขนาด 4 ไมโครเมตร ร้อยละ 5 และ 10



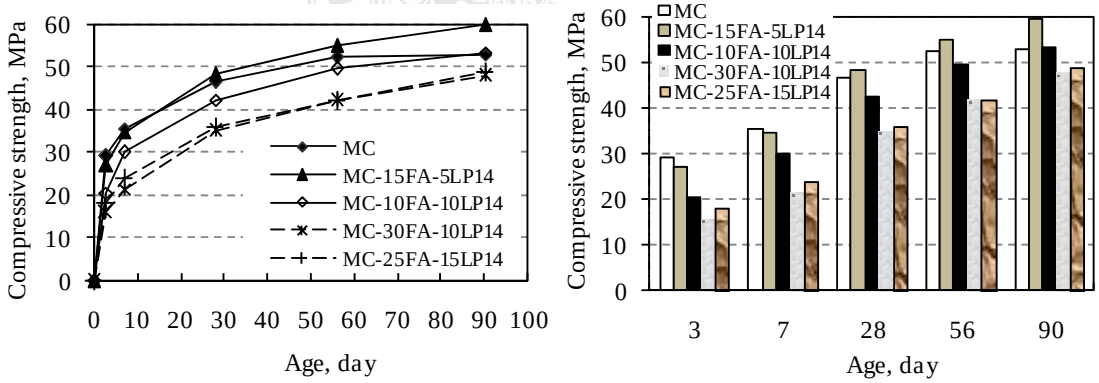
รูปที่ 4.16 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนขนาด 14 ไมโครเมตร ร้อยละ 5 และ 10



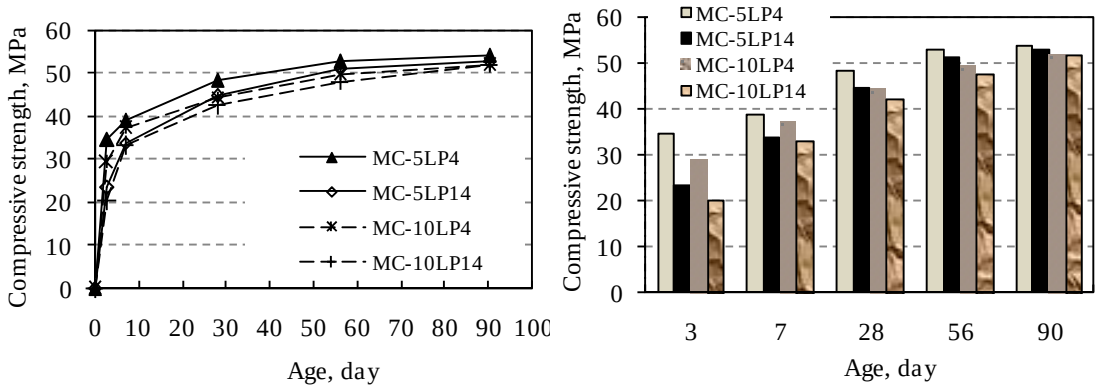
รูปที่ 4.17 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนขนาด



รูปที่ 4.18 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนขนาด 4 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.19 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนขนาด 14 ไมโครเมตร



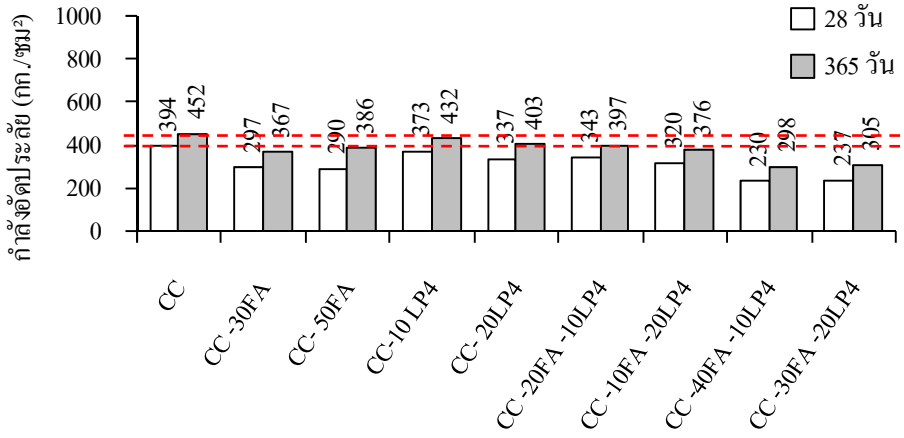
รูปที่ 4.20 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน ขนาด 4 และ 14 ไมโครเมตร ร้อยละ 5 และ 10

4.2.6.2 <u>กำลังอัดประลัยของคอนกรีต</u>

ตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.21 แสดงกำลังอัดประลัย (compressive strength) ของคอนกรีตที่ศึกษาในครั้งนี้ โดยศึกษากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต (ขนาด 10x10x10 ซม.^{3}) ซึ่งมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 โดยศึกษาที่อายุของตัวอย่างคอนกรีตที่ 28 วัน และ 365 วัน พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยมีแนวโน้มจะน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยปริมาณมาก (ร้อยละ 50) เป็นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดน้อยในคอนกรีตอายุน้อย สำหรับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูนที่มีความละเอียดมาก (4 ไมโครเมตร) ช่วยในการเติมเต็มช่องว่างในคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความแน่นขึ้น ส่วนเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน จะให้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตสอดคล้องกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน กล่าวคือถ้ามีเถ้าลอยผสมอยู่ในปริมาณมากแนวโน้มจะทำให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที 1 ล้วน และเช่นเดียวกันที่อายุ 365 วัน กำลังอัดประลัยของคอนกรีตจะให้ผลในทิศทางเดียวกับที่อายุ 28 วัน

ตารางที่ 4.8 กำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ที่อายุ 28 วัน และ 365 วัน

ลำดับที่	คอนกรีต	กำลังอัด (กก./ซม.^{2})	
		28 วัน	365 วัน
1	CC	394	452
2	CC -30FA	297	367
3	CC- 50FA	290	386
4	CC-10 LP4	373	432
5	CC- 20LP4	337	403
6	CC -20FA -10LP4	343	397
7	CC- 10FA-20LP4	320	376
8	CC-40FA-10 LP4	230	298
9	CC -30FA- 20LP4	237	305



รูปที่ 4.21 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 28 วัน และ 365 วัน

บทที่ 5
สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาตลอดการวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ความต้องการน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่ามากกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย มีความต้องการน้ำน้อยกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ล้วน

5.1.2 การก่อตัว (ระยะต้นและระยะปลาย) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีค่ามากกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.3 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยมีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.4 ค่าความพรุนที่อายุ 28 วัน ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนเมื่อแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนจะให้ค่าความพรุนที่ต่ำ และสูงแล้วแต่ปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยและผงหินปูน

5.1.5 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนและแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ (ทั้งกรณี 2 และ 3 วัสดุประสาน) มีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และผงหินปูนขนาด 4 ไมโครเมตรเมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะส่งผลให้ค่าการหดตัวแห้งที่น้อยกว่าของกรณีการแทนที่ด้วยผงหินปูนขนาด 14 ไมโครเมตร

5.1.6 การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูน มีผลให้กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์และของคอนกรีตช่วงอายุต้นมีแนวโน้มมากกว่าหรือใกล้เคียง (ถ้าแทนในปริมาณที่เหมาะสม) แต่เมื่ออายุมากขึ้นกลับให้ค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่การแทนที่ด้วยเถ้าลอย พบว่ามีกำลังอัดประลัยช่วงอายุต้นน้อยกว่า แต่เมื่ออายุมอร์ต้าร์มากขึ้นมีค่าใกล้เคียง เมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ส่งผลให้กำลังอัดประลัยทั้งอายุต้นและอายุปลายของมอร์ต้าร์น้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

บรรณานุกรม

[1] Pitisan Krammart, **Properties of cement made by partially replacing cement raw materials with municipal solid waste ash and calcium carbide waste, and sulfate resistance of fly ash concrete**, Ph. D. Thesis, Civil Engineering, School of Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology Thammasat University, 2005.

[2] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 2. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2552.

[3] **"เถ้าลอย" จากของไร้ค่า สู่อุตสาหกรรมพันล้าน** (ออนไลน์), 2003. Available: http://www.technologymedia.co.th/column/columnview.asp?id=66 (3 กันยายน 2552).

[4] บรรณาธิการ, "วิจัยเถ้าลอยฯ จับขยะมาทำประโยชน์," **Engineering Today**, ปีที่ 1, ฉบับที่ 02, 2546

[5] 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).

[6] จตุพร ชูตาภา และ วรพจน์ แสงราม, "แคลเซี่ยมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate : $CaCO_3$)," **วิหารแดง**, ปีที่ 1, ฉบับที่ 6 มิถุนายน, 2552. หน้า 5.

[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] LIN Zongshou and ZHAO Qian, "Strength of Limestone-based Non-calcined Cement and its Properties," **Journal of Wuhan University of Technolotgy-Mater**, 2009. p. 471.

[9] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต**. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย, 2547.

[10] บุรฉัตร ฉัตรวีระ, "คุณสมบัติด้านความต้านทานและกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ," **วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.**, ปีที่ 23, ฉบับที่ 2, 2543. หน้า 17.

[11] Cengiz D. A., Alaeettin k. and Umur K.S., "Strength and shrinkage properties of mortar containing a nonstandard high-calcium fly ash," **Cement and Concrete Research**(Electronic), 2005, Vol. 27, pp. 191-196. Available: Elsevier/Science Direct (3 may 2009).

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

[13] Neville, A.M., **Properties of Concrete**. Pittmen Book Limited, London, 1981.

[14] กระทรวงอุตสาหกรรม, "**กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต**," มาตรฐาน มอก.2135-2545. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2546. หน้า 3.

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

[16] เอกศักดิ์ ฤกษมหาลิขิต และคณะ, "การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยฝุ่นหินปูน และสารขยายตัว," **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี**, ครั้งที่ 5, 20-22 ตุลาคม 2552, นครราชสีมา, 2552. หน้า 4.

[17] 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. pp. 247.