



# รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

## โครงการวิจัยเรื่อง

วัสดุประสานชนิดใหม่จากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์

(New cementitious materials from fly ash and calcium hydroxide solution)

## หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาติ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 170296

สัญญาเลขที่ 99/2558

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

วัสดุประสานชนิดใหม่จากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์

(New cementitious materials from fly ash and calcium hydroxide solution)

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิเชียร ชาติ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ธันวาคม 2558

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558  
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตามที่ นายวิเชียร ชาลี พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “วัสดุประสานชนิดใหม่จากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์” จากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มีงบประมาณทั้งโครงการ 469,000 บาท ขณะนี้ผลการดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว

รายละเอียดของโครงการวิจัย

ผู้เสนอ : นายวิเชียร ชาลี  
หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา  
ระยะเวลาดำเนินการ : 12 เดือน  
งบประมาณ : 469,000 บาท

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ปูนขาวละลายน้ำ) และเถ้านหินเป็นวัสดุประสาน โดยใช้ น้ำที่อุณหภูมิห้องและน้ำที่อุณหภูมิ 60° ซ ในการละลายปูนขาว ส่วนผสมใช้ปูนขาวแทนที่เถ้านหินในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ทดสอบความชื้นเหลือปกติ การก่อตัวต้น และการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ ตลอดจนทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน ผลการศึกษา พบว่าปริมาณปูนขาวที่มากขึ้นส่งผลให้ความต้องการน้ำที่ทำให้เพสต์มีความชื้นเหลือปกติ และระยะเวลาก่อตัวมีแนวโน้มมากขึ้น นอกจากนี้พบว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์ทุกส่วนผสมสูงขึ้นตามระยะเวลาของการบ่ม การพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นอย่างชัดเจนในช่วง 14 วัน ถึง 60 วัน การใช้ปูนขาวที่มากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง และเห็นผลชัดเจนในช่วงอายุต้น ส่วนที่อายุนานขึ้นพบว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนขาวในช่วงร้อยละ 30 ถึง 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีแนวโน้มสูงขึ้น

คำสำคัญ : ปูนขาว เถ้านหิน แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เพสต์ มอร์ตาร์

## Abstract

This research aimed to utilize calcium hydroxide (lime solution) and fly ash as a cementitious material. The lime solution was prepared by using water at room temperature and 60 °C as a solvent. For the mix proportion, lime was used as a partial replacement of fly ash at 10, 20, 30, 40 and 50% by weight of binder. The normal consistency, initial setting time and mortar flow were tested. The compressive strength of mortar was also tested at 3, 7, 14, 28 and 60 days of water curing. The results showed that the water required for normal consistency and setting times of paste increased with the increase of lime in the paste. The compressive strength of mortar for all mixes found to develop with curing time, especially at the age of 14 to 60 days. In addition, the compressive strength of mortar decreases as the amount of lime replacement increases, especially at an early age. However, for longer period, the use of lime replacement level of 30% to 40% by weight of binder resulted in the increase of compressive strength of mortar.

**Keywords:** Lime, Fly ash, Calcium hydroxide, Paste, Mortar.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 99/2558

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูล เพื่อส่งเสริมการใช้งานวัสดุประสานทางเลือกที่ทำจากเถ้าถ่านหิน ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสม ให้สามารถใช้งานก่อสร้างอย่างเป็นรูปธรรมมากขึ้น

## สารบัญ

### สารบัญเนื้อหา

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญเนื้อหา	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 ปูนขาว	4
2.2 เล้าถ่านหิน	7
2.3 ปฏิกริยาไฮเดรชันและปฏิกริยาปอซโซลาน	11
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
<b>บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย</b>	<b>19</b>
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	19
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	19
3.3 วิธีการศึกษา	23
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล</b>	<b>30</b>
4.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้วิจัย	30

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ่าถ่านหิน	31
4.3 ระยะเวลาการก่อกำเนิด	31
4.4 ความชื้นเหลวปกติของเพสต์	36
4.5 ความสามารถในการไหลตัวของมอร์ตาร์	39
4.6 กำลังของมอร์ตาร์	42
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>51</b>
5.1 สรุปผล	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	52
เอกสารอ้างอิง	53
ภาคผนวก ก ผลผลิต (Output)	56
ภาคผนวก ข รายงานการเงิน	63
ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย	65



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ส่วนผสมเพศ	26
3.2 ส่วนผสมมอร์ตาร์	28
4.1 สมบัติทางกายภาพของเถ้านหินและปูนขาว	41
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหินแม่เมาะ	31
4.3 ระยะเวลาก่อตัวต้นและก่อตัวปลาย	32
4.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ให้ความชื้นเหลือปกติ	37
4.5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ให้ค่าการไหลแผ่ตามมาตรฐาน	40
4.6 กำลังอัดของมอร์ตาร์	43

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
3.1	19
3.2	20
3.3	20
3.4	21
3.5	21
3.6	22
3.7	22
3.8	22
3.9	23
3.10	24
3.11	25
3.12	26
3.13	27
3.14	28
3.15	29
3.16	29
4.1	33
4.2	35
4.3	36
4.4	38
4.5	38
4.6	39
4.7	41

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ผลของอุณหภูมิความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนขาวต่อน้ำต่อวัสดุประสานที่ให้ค่าการไหลตัวตามมาตรฐานของมอร์ตาร์กลุ่มที่ใช้น้ำอุณหภูมิ 60 °ซ ละลายปูนขาว	41
4.9 ผลของอุณหภูมิต่อความต้องการน้ำที่ให้ค่าการไหลตัวตามมาตรฐานของมอร์ตาร์	42
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์กับระยะเวลาบ่ม (ก) ผสมด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง (ข) ผสมด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 60 ° ซ	44
4.11 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการละลายปูนขาวต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วัน	46
4.12 ผลของปริมาณปูนขาวต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์จากปูนขาวและเถ้าถ่านหิน	48
4.13 ผลของอุณหภูมิน้ำที่ใช้ละลายปูนขาวต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ (ก) อายุ 14 วัน (ข)อายุ 28 วัน (ค) อายุ 60 วัน	50

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีทางด้านวัสดุคอนกรีตที่ผ่านมา จึงได้มีการคิดค้นวัสดุทดแทนเพื่อลดการใช้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ให้น้อยลง โดยการใช่วัสดุของเหลือใช้ หรือจากจากโรงงานอุตสาหกรรมมาแทนที่บางส่วนในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ซึ่งก็ได้ผลดีทั้งทางด้านการเพิ่มคุณสมบัติบางอย่างให้คอนกรีตดีขึ้น และลดมลภาวะจากการทิ้งกากเหลือใช้ดังกล่าว เถ้าถ่านหิน (fly ash) เป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้รับความนิยมในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Cheewaket et al., 2012; Chindaprasirt et al., 2005 ; Chalee et al., 2010) พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในปริมาณที่เหมาะสมให้ผลที่ดีทั้งคุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติด้านความคงทน อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าถ่านหินในคอนกรีตดังกล่าวสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้บางส่วนเท่านั้น เนื่องจากเถ้าถ่านหินไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานได้ด้วยตัวเอง และถ้าใช้ในปริมาณสูงจะมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลในระยะแรก ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินยังคงต้องอาศัยปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเป็นส่วนใหญ่ เพื่อให้ได้สารประกอบที่ให้ความแข็งแรงและได้ค้างเพื่อไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานต่อเนื่องกับเถ้าถ่านหินต่อไป

ปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่นิยมใช้ในคอนกรีตในรูปของการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น มาตรฐาน ASTM C618 ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกาหรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก” วัสดุปอซโซลานเมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีสมบัติเป็นวัสดุประสาน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวกับปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ (Neville, 1996) แม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำแต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้ากว่า เพราะต้องอาศัยสารตั้งต้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งถ้ามีการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากแหล่งอื่นทำปฏิกิริยากับซิลิกาจากวัสดุปอซโซลาน โดยไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ ดังนั้นการวิจัยนี้ จึงได้ศึกษาการทำวัสดุประสานจากวัสดุปอซโซลานซึ่งใช้เถ้าถ่านหิน และสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปูนขาว โดยมุ่งประเด็นไปที่สมบัติเบื้องต้นที่ศึกษาในซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ เพื่อให้ได้ฐานข้อมูล

ในการพัฒนาการใช้วัสดุประสานนี้ในงานคอนกรีตต่อไป ตลอดจนใช้เป็นข้อมูลทางเลือกในการออกแบบ ส่วนผสมคอนกรีตที่ดี โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม มาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ให้มากขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของปริมาณปูนขาวที่ใช้ในการเตรียมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อระยะเวลาการก่อตัว และความชื้นเหลือปกติ ของวัสดุซีเมนต์จากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อระยะเวลาการก่อตัว และความชื้นเหลือปกติ ของวัสดุซีเมนต์จากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของปริมาณปูนขาวที่ใช้ในการเตรียมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อการไหลตัว และกำลังอัดของมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์

1.2.4 เพื่อศึกษาผลของผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อการไหลตัว และกำลังอัดของมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการทำวัสดุประสานชนิดใหม่จากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือปูนขาว เพื่อพัฒนาวัสดุประสานชนิดใหม่ให้สามารถใช้งานได้เหมือนกับปูนซีเมนต์ โดยจะศึกษาคุณสมบัติต่างๆของเพสต์และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นส่วนผสม (ไม่ใช้ปูนซีเมนต์) โดยทำการเตรียมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปูนขาว และผสมกับเถ้าถ่านหินโดยใช้ปูนขาวแทนที่เถ้าถ่านหิน ร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก และแบ่งตัวอย่างทดสอบเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ละลายปูนขาวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง และละลายปูนขาวด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 60 °ซ ก่อนนำมาผสมกับเถ้าถ่านหิน ทำการทดสอบคุณสมบัติของพสต์ได้แก่ ระยะเวลาการก่อตัว และความชื้นเหลือปกติ ตลอดจนทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์สดและมอร์ตาร์แข็งตัวได้แก่ การไหลตัว และกำลังอัดหลังบ่มตัวอย่างในน้ำที่อายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1) ทราบถึงคุณสมบัติของวัสดุประสานที่ใช้เถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นวัสดุประสาน เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการพัฒนาวัสดุประสานทางเลือกชนิดใหม่ ให้สามารถนำมาใช้งานก่อสร้างได้ ภายใต้งานความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และความปลอดภัยตามหลักวิศวกรรม

1.4.2) ได้มีการใช้ประโยชน์จากวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมในเชิงพาณิชย์มากขึ้น โดยให้เป็นไปตามหลักวิศวกรรมคือ แข็งแรง ทนทาน ปลอดภัย และประหยัด ตลอดจนเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งส่งผลให้ลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยลดปัญหาโลกร้อนได้อีกทางหนึ่งด้วย

## บทที่ 2

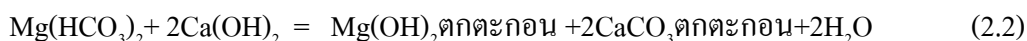
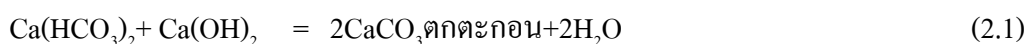
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึง ปูนขาว เถ้าถ่านหิน การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปฏิกิริยาปอซโซลาน และงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการใช้เถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์

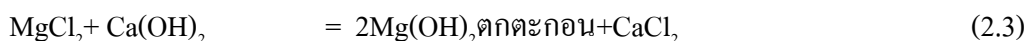
#### 2.1 ปูนขาว

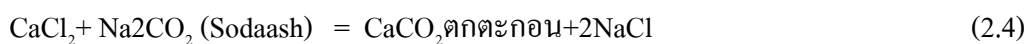
ปูนไลม์ (Lime) หมายถึง ปูนสุก (Quicklime: CaO) ปูนขาว (Hydrated lime: Ca(OH)<sub>2</sub>) และปูนไลม์ไฮดรอลิกซึ่งอยู่ในรูปลักษณะต่างๆกันทั้งทางเคมีและกายภาพ ส่วนหินปูน (Limestone) หมายถึงหินชั้น หรือหินตะกอนที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>) เป็นส่วนใหญ่ เมื่อนำหินปูนมาเผาจะได้ปูนสุกที่มีขนาดต่างๆ ขึ้นกับชนิดหินปูน เตาเผาที่ใช้ และวิธีปฏิบัติต่อจากการเผา เมื่อนำปูนสุกมาทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ปูนขาว (lime) ยังเป็นเป็นส่วนประกอบสำคัญในการทำปูนสอ (mortar) ปูนฉาบ (plaster) และปูนปั้น (stucco) ซึ่งได้รับความนิยมและมีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในงานด้านสถาปัตยกรรมในสมัยโบราณอีกทั้งปูนขาวยังสามารถนำมาใช้อุณหภูมิโบราณสถานแทนที่พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ซึ่งมีความแข็งและที่บดตันสูงรวมทั้งมีความหดตัวมากและไม่ยืดหยุ่น ด้านการเกษตรปูนไลม์ช่วยปรับค่าความเป็นกรด-ด่างในดิน ทำให้แบคทีเรียบางชนิดในดินเปลี่ยนไนโตรเจนให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และช่วยยับยั้งจุลินทรีย์ที่ทำให้โทษซึ่งชอบเจริญในดินกรด รวมทั้งช่วยปรับโครงสร้างดินให้ร่วนใหลพรวนได้ง่ายขึ้น มาตรฐานปูนไลม์ที่ใช้ในการเกษตร คือ มอก. 223-2520 เรื่องวัสดุพวกปูนไลม์เพื่อการเกษตร ด้านการบำบัดน้ำช่วยแก้ปัญหาน้ำกระด้าง โดยปูนไลม์เข้าไปทำปฏิกิริยากับสารเคมี ที่เป็นสาเหตุให้เกิดน้ำกระด้าง กลายเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำตกตะกอนออกมา ตามสมการดังนี้

กรณีน้ำกระด้างชั่วคราวที่เกิดจากไบคาร์บอเนตของแคลเซียมและแมกนีเซียม



กรณีน้ำกระด้างถาวรที่เกิดจากสารประกอบคลอไรด์ สารประกอบซัลเฟต และสารประกอบไนเตรตของแคลเซียมและแมกนีเซียม[10]





อุตสาหกรรมก่อสร้าง หินปูนและปูนไลม์นำไปใช้ในการก่อสร้างโดยตรง เช่น การสร้างถนน ใช้เป็นสารตัวเติมในยางแอสฟัลต์สำหรับลาดถนน เพื่อให้ผิวถนนมีความแข็งแรงขึ้นจากการศึกษาพบว่า การเพิ่มวัสดุเหล่านี้ลงไปในส่วนผสมผิวจราจรคอนกรีตแอสฟัลต์จะทำให้ค่าบำรุงรักษาลดลงอย่างเห็นได้ชัดซึ่งในการศึกษาได้ผสมปูนขาว ร้อยละ 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 และ 3.5 ของน้ำหนักมวลรวม สำหรับซีเมนต์ที่ใช้ปริมาณเดียวกัน ปริมาณยางแอสฟัลต์ที่ใช้ทั้ง 2 กรณี คือ ร้อยละ 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0 และ 6.5 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ปริมาณยางแอสฟัลต์ ร้อยละ 5 ซีเมนต์ ร้อยละ 1 หรือปูนขาว ร้อยละ 2.5 คือ ปริมาณที่เหมาะสม ที่สุดตามลำดับ ซึ่งค่าเสถียรภาพของคอนกรีตแอสฟัลต์ ธรรมดา มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือปูนขาวประมาณ ร้อยละ 38.98 10.81 ตามลำดับ ค่าช่องว่างอากาศของคอนกรีต แอสฟัลต์ธรรมดา มีค่าสูงกว่าคอนกรีตแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือ ปูนขาวประมาณ ร้อยละ 97.51 31.47 ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นของ คอนกรีตแอสฟัลต์ธรรมดา มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตแอสฟัลต์ ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือปูนขาวประมาณ ร้อยละ 4.77 1.79 ตามลำดับ และค่า VMA (Voidin Mineral Aggregate) ของคอนกรีตแอสฟัลต์ ธรรมดา มีค่าสูงกว่าคอนกรีตแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือ ปูนขาว ประมาณ ร้อยละ 26.72 7.91 ตามลำดับ (บัญชา, 2539) และยังใช้ผสมทราย ทำปูนฉาบ ปูนสอ สำหรับงานก่อ ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ มีมาตรฐานกำหนดคุณสมบัติของปูนไลม์ที่ใช้อยู่หลายมาตรฐานทั้งในและต่างประเทศ เช่น มอก. 241-2520 ปูนไลม์เพื่อการก่อสร้าง

อุตสาหกรรมกระดาษ ปูนไลม์ใช้ในการผลิตสารที่ใช้ในการผลิต เช่น ใช้ผลิตโซดาไฟ ที่ใช้ในกระบวนการย่อย ใช้ผลิตสารฟอกขาว โดยเติมคลอรีนผสมกับน้ำปูนไลม์ ใช้ผลิต เกลือโดยผสมอลูมิเนียม เซอพอส กับน้ำปูนไลม์ และใช้ผลิตซอลต์ตกตะกอน หรือ แคลเซียมคาร์บอเนตตกตะกอนที่ใช้เคลือบกระดาษ โดยการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในน้ำปูนไลม์

อุตสาหกรรมเคมี ปูนไลม์ถูกใช้ในกระบวนการผลิตสารเคมีหลายชนิด เช่น โซดาไฟ โดยปูนไลม์ทำปฏิกิริยากับโซดาแอช ได้โซดาไฟและแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน แคลเซียมคาร์ไบด์ ได้จากการผสมปูนขาวกับถ่านโค้กแล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 2000 °ซ การทำให้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ขึ้น โดยเติมปูนขาวในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่กรองแล้ว ทำให้ แคลเซียมซัลเฟต ตกตะกอนออกมา นำตะกอนนั้นไปทำปฏิกิริยากับ กรดซัลฟิวริก อีกทีหนึ่ง ผลิตโซดาแอช ซึ่งเป็นสารที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแก้ว สบู่ สิ่งทอ และสารเคมี



อุตสาหกรรมอาหาร ยา เครื่องสำอาง ปูนโลม่เข้าไปมีบทบาททั้งทางตรงและทางอ้อม ใช้ปูนขาวดูดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่פקและผลไม้สดปล่อยออกมา เพื่อยืดอายุการเก็บ การผลิตน้ำตาล เติมน้ำปูนโลม่ลงในน้ำเชื่อม เพื่อสะเทินกรด ทำให้สิ่งเจือปนที่ละลายในน้ำเชื่อมตกตะกอน ใช้ผลิตสารที่ใช้เติมในผลิตภัณฑ์ เช่น แคลเซียมฟอสเฟต ที่เป็น อาหารเสริมแคลเซียมแลคเตท แคลเซียมมาเดรท ที่ใช้ผลิตยา ปูนโลม่ที่ใช้ต้องมีความบริสุทธิ์สูง ตามมาตรฐานที่กำหนดเช่น อุตสาหกรรมเหล็ก และเหล็กกล้า ต้องใช้ปูนโลม่ที่มีความบริสุทธิ์สูง เป็นตัวช่วยดึงสารเจือปนต่างๆ เพื่อผลิตเหล็กคุณภาพสูง นอกจากนี้ยังมีอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่ปูนโลม่เข้าไปเกี่ยวข้องเช่น ปูนโลม่เป็นสารตัวกลาง ในการผลิตสีข้อม เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมยาง เซรามิกส์ เป็นต้น (Stowel, 1963)

### 2.1.1 วัสดุที่นำมาผลิตปูนขาว

วัสดุที่นำมาใช้ผลิตเป็นปูนขาว มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ได้แก่ หินปูน หินอ่อน และ เปลือกหอย เป็นต้น

หินปูน คือหินตะกอนชนิดหนึ่ง ซึ่งมีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่า ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักได้แก่แคลเซียม อาจมีหรือไม่มีโคโลไมต์ก็ได้ โดยทั่วไปหินตะกอนชนิดคาร์บอเนต ประกอบด้วยแคลไซต์ ร้อยละ 95 และโคโลไมต์ ร้อยละ 5 หินปูนอาจเกิดจากการทับถมของซากเปลือกหอย หรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆที่อาศัยอยู่ทะเล หรือการตกตะกอนทางเคมีการตกผลึกการเกิดผลึกใหม่ หินปูนที่พบส่วนมากจะมีซากดึกดำบรรพ์ปรากฏอยู่ หินปูนมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของ ส่วนประกอบ ปริมาณแร่ธาตุและอายุเช่นหินปูนออริไทด์ มีองค์ประกอบเป็นแบบไขปلاميการ จัดรูปแบบหินเป็นชั้นเล็กๆ, หินปูนประการัง เป็นหินปูนที่เกิดจากโครงกระดูกของสัตว์ทะเลจำพวก ตัวหลอด, โคโลไมต์ เป็นหินปูนที่ประกอบด้วยแร่แมกนีเซียม, หินปูน เป็นหินปูนที่อยู่ในมหาสมุทร, หินปูน คือ หินอ่อน, หินชอล์กคือหินที่ประกอบด้วยแคลไซต์ แต่อัดไม่แน่นเกิดรูพรุนหรือเกิดจาก ปฏิกิริยาของสิ่งมีชีวิตแต่มีปริมาณน้อยกว่าหินชอล์ก ที่เกิดจากการตกตะกอนและการกระทำทางเคมี และหินมาร์ล ประกอบด้วยแคลไซต์ ที่มีดินเหนียวปนอยู่เป็นต้นหินปูน มีความไวต่อการกัดกร่อนชะล้างของน้ำฝน (พิศมัย และอรุณ, 2546)

หินอ่อน (marble) คือ หินแปรชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วยแคลไซต์ หรือโคโลไมต์ ที่เกิดผลึกใหม่มีขนาดละเอียดถึงหยาบโดยปกติจะมีเนื้อผลึกสม่ำเสมอ โดยกำเนิดจากหินปูน ซึ่งมีการเปลี่ยนรูปแบบโดยความร้อนและความกดดัน หินอ่อน ประกอบด้วยแคลไซต์ และโคโลไมต์ ที่มีสีขาวยและไม่มีสิ่งเจือปน เมื่อมีแร่อื่นๆมาประกอบจะให้ผลเป็นสีดำ สีน้ำตาล สีชมพู สีเขียวเป็นลายจุดต่าง หรือเป็นลายหินอ่อนที่มีความแข็งสม่ำเสมอ สามารถนำมาใช้แกะสลักได้ดีกว่าหินปูน

เปลือกหอย (shell) ได้มาจากหอยซึ่งเป็นสัตว์พวกไม่มีกระดูกสันหลังในไฟลัมมอลลัสคา มีร่างกายอ่อนนุ่มแต่สามารถสร้างเปลือกแข็งที่เป็นสารประกอบพวกหินปูนหุ้มอยู่รอบตัว บางชนิดไม่มีเปลือกหุ้มแต่สร้างส่วนแข็งไว้ภายใน เช่น ปลาหมึก หอยที่มีเปลือกพบทั้งในทะเล ห้วย บึง คลอง แม่น้ำ และบนบก หินของหอยที่เป็นหินปูนแคลเซียมคาร์บอเนต มีการจัดเรียงเป็นชั้น ชั้นนอกมักมีสีส้มและลวดลายต่างๆ ส่วนชั้นในมีลักษณะเป็นมุกเคลือบมัน เปลือกหอยที่นำมาผลิตเป็นปูนขาว มีหลายชนิด เช่น หอยนางรม หอยมุก หอยแครง หอยกาบ และหอยโข่ง เป็นต้น (สุขกมล, 2545)

### 2.1.2 ขั้นตอนการผลิตปูนขาว

2.1.2.1 นำวัสดุที่มีส่วนประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เช่น หินปูนหินอ่อน และเปลือกหอยที่กล่าวมาข้างต้น เผาด้วยอุณหภูมิ  $700-900^\circ\text{C}$ . จากนั้นแคลเซียมคาร์บอเนต จะถูกเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) เรียกว่า ปูนดิบ ปูนดิบที่ได้จะมีสีขาว มีลักษณะเป็นก้อน หรือเป็นผง หรือมีรูปร่างไม่แน่นอน

2.1.2.2 นำปูนดิบที่ได้มาแช่น้ำ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาปูนแตกตัวอย่างรุนแรง น้ำ และปูนร้อนจัดจนอุณหภูมิถึงจุดเดือด เมื่อปฏิกิริยาหยุด น้ำจะแห้งสิ่งที่ได้ คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือ ปูนสุก ปูนสุกที่ได้นี้มีลักษณะเหนียวคล้ายแป้งเปียก หรือมีลักษณะเป็นของเหลวคล้ายนม ประกอบด้วยน้ำที่ทำให้ห่อตัว โดยถ้าเพิ่มน้ำให้มากขึ้นจะได้เป็นน้ำปูนขาวที่ใช้ทำเป็นสีขา ในขั้นตอนนี้สามารถนำปูนสุกที่ได้มาผสมกับน้ำทราย หรือเส้นใยต่างๆ ใช้ทำเป็นปูนสอ, ปูนฉาบ และปูนปั้น ต่อไป

2.1.2.3 เมื่อปูนสุกทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในอากาศ น้ำจะระเหยออกไปได้เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีความแข็ง และทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ให้อิฐ หรือหินติดกัน โดยปูนสุกเท่านั้นจะทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นในขั้นตอนที่ 2 คือ การแช่น้ำ จะต้องใช้เวลาานเพื่อให้ปูนดิบทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างสมบูรณ์ (สุขกมล, 2545)

## 2.2 เถ้าถ่านหิน (ปริญา และชัย, 2547 ; ปริญา, 2547)

เถ้าถ่านหิน หมายถึง ส่วนที่เหลือจากการเผาถ่านหินบดละเอียด เพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าที่เกิดจากการเผาถ่านหินมี 2 ชนิดด้วยกัน คือ เถ้าถ่านหิน ซึ่งเป็นเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อน เถ้าถ่านหินนี้จะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อน และเป็นมลภาวะต่อพื้นที่บริเวณรอบโรงไฟฟ้า และเถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังก้นเตา เรียกว่า เถ้าก้นเตา (Bottom ash) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 290 ไมครอน หรือใหญ่กว่าเถ้าถ่านหินประมาณ 16 เท่า ถ่านหินที่ใช้ในการเผาผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด ได้แก่

- แอนทราไซต์ (anthracite)

- บิทูมินัส (bituminous)
- ซับบิทูมินัส (sub-bituminous)
- ลิกไนต์ (lignite)

ถ่านหินคุณภาพดีที่สุด ได้แก่ แอนทราไซต์ สามารถให้ความร้อนได้สูงสุด และมีปริมาณความชื้นต่ำ ตามด้วยบิทูมินัส ซับบิทูมินัส และลิกไนต์ ตามลำดับ โดยลิกไนต์ให้ความร้อนต่ำและมีความชื้นสูง นอกจากถ่านหินทั้ง 4 ชนิดนี้แล้วยังมีพีท (Peat) ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุด ให้ความร้อนต่ำสุดและมีความชื้นสูงสุด จึงไม่นิยมเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า

### 2.2.1 การเผาถ่านหิน

การเผาถ่านหินชนิดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีใช้กันอยู่ 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่ การเผาความร้อนสูง การเผาความร้อนปานกลาง และการเผาความร้อนต่ำ

#### การเผาความร้อนสูง

ในการเผาความร้อนสูง อุณหภูมิจะสูงถึง 1,500-1,700 °ซ. เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้แรงลม (Cyclone Combustion) ที่อุณหภูมิสูง ถ่านหินส่วนใหญ่จะหลอมละลาย และรวมกันเป็นเม็ด หรือก้อน ถ่านหินส่วนที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าก้อนเตา และตกลงในอ่างน้ำข้างล่าง ถ่านหินขนาดเล็กจะเป็นเถ้าลอยซึ่งในระบบการเผาจะมีปริมาณค่อนข้างน้อย ถ่านหินที่ได้จะมีลักษณะเป็นแก้ว เม็ดออกใสๆ

#### การเผาความร้อนปานกลาง

อุณหภูมิของการเผาถ่านหินชนิดในเตาเผาความร้อนปานกลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1,100-1,400 °ซ. เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized Coal Combustion) ถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าลอยที่เหลือจะเป็นเถ้าหนัก หรือเถ้าก้อนเตา เถ้าลอยที่ได้จากการเผาประมาณ ร้อยละ 70-90 มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน เป็นเถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อทำคอนกรีต

#### การเผาความร้อนต่ำ

การเผาความร้อนต่ำเป็นการเผาในเตาแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized-bed Combustion) อุณหภูมิของการเผาถ่านหินจะค่อนข้างต่ำคือไม่เกิน 900 °ซ. ถ่านหินที่ได้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูงเนื่องจากถ่านหินที่ได้ไม่ได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่สูงพอ แม้จะสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานได้แต่ไม่ดีเท่าเถ้าลอยที่ได้จากการเผาความร้อนปานกลาง แต่วิธีนี้ก็เริ่มใช้กันมากขึ้นสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กในโรงงานต่างๆ

### 2.2.2 ชนิดของแก้วถ่านหิน

แก้วถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อนมาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งแก้วถ่านหินออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1) ชนิด F (Class F) เป็นแก้วถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณรวมของซิลิกา (Silica) อะลูมินา (Alumina) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferricoxide) มากกว่า ร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 วิธีการเก็บตัวอย่าง และวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311 โดยทั่วไปแก้วถ่านหินชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CalciumOxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า แก้วถ่านหินแคลเซียมต่ำสำหรับซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) มาจากแร่ดินเหนียว และควอร์ตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้แก้วถ่านหิน มีซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) สูง

2) ชนิด C (Class C) เป็นแก้วถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มากกว่า ร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CalciumOxide, CaO) สูงและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 แก้วถ่านหินชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า แก้วถ่านหินแคลเซียมสูงสำหรับอลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) มาจากแร่ดินเหนียวโดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ต่ำทำให้แก้วถ่านหินชนิด C นอกจากมีซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ต่ำแล้วยังมีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ต่ำด้วย

แก้วถ่านหินทั้ง 2 ชนิดมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน นอกจากนี้แก้วถ่านหินชนิด C ยังมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเองจากการมีปริมาณ CaO สูง แก้วถ่านหินแม่เมาะในระยะแรกส่วนใหญ่เป็นแก้วถ่านหินแคลเซียมสูงโดยมีปริมาณ CaO สูงถึง ร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเองในปัจจุบันแก้วถ่านหินแม่เมาะมีปริมาณ CaO ต่ำลงโดยมีสารนี้อยู่ประมาณ ร้อยละ 10

### 2.2.3 รูปร่างและลักษณะของแก้วถ่านหิน

เมื่อแก้วถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้ ถ่านหินจะสันดาป และหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง แก้วถ่านหินจะเริ่มเย็นลงหลังจากออกจากเตาเผา ผลจากการที่หลอมละลายทำให้แก้วถ่านหินที่ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะทรงกลมและอยู่ในสถานะแก้ว (Glassy Phase) แก้วถ่านหินส่วนหนึ่งเกิดจากการปะทะกันของแก้วถ่านหินขนาดเล็กทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ขนาดยังคงไม่ใหญ่มากนัก จึงสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ ทั้งนี้แก้วถ่านหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูเล็กๆที่ผิว เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอน (Carbon) สูงแก้วถ่านหินขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า และจะมีทรงกลม และผิวเรียบ

แก้วถ่านหินยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกกันว่าซีโนสเฟีย ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในแก้วถ่านหิน และยังมีแก้วถ่านหินกลวงที่มีอนุภาคแก้ว

ถ่านหินเล็กๆ อยู่ภายในเรียกว่าฟลิโรสเฟีย ถ่านหินกลวงมีตั้งแต่ขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายร้อยไมครอน องค์ประกอบหลักของถ่านหินกลวง คือ แก้วลูมิโนซิลิเกต เนื่องจากถ่านหินกลวงเป็นถ่านหินที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงดังนั้นจึงมีคุณสมบัติด้านการทนไฟและมีน้ำหนักเบา จึงได้มีการศึกษาเพื่อนำถ่านหินกลวงมาใช้ประโยชน์ในด้านคอนกรีตน้ำหนักเบา และคอนกรีตที่มีคุณสมบัติด้านการทนไฟ และการเก็บเสียง

ถ่านหินที่ได้จากการเผาในระบบฟลูอิดไดซ์เบดมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน และผิวขรุขระ เนื่องจากอุณหภูมิในการเผาไม่สูงพอถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน ถ่านหินกันเตาเกิดจากการปะทะกันของอนุภาคถ่านหินจึงมีรูปร่างไม่แน่นอน และผิวขรุขระเช่นกัน

#### 2.2.4 ขนาดและความละเอียด

อนุภาคถ่านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15–30 ไมครอน ถ่านหินแม่เหาะมีขนาด และความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความละเอียดของถ่านหินนิยมนำมาวัดโดยใช้การวัดพื้นที่ผิว โดยถ่านหินส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 2,500–5,000 ซม.<sup>2</sup>/ก. เมื่อวัดโดยวิธีของเบลน (Blaine) และเมื่อวัดโดยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) ซึ่งเป็นการวัดการดูดซับของก๊าซความละเอียดของถ่านหินเมื่อวัดโดยวิธีนี้จะได้ค่าที่แตกต่างกันมาก เนื่องจากวิธีนี้วัดพื้นที่ผิวทั้งหมดที่ก๊าซสามารถแทรกเข้าถึงได้ทั้งผิวที่ขรุขระเป็นรูพรุนและที่เป็นโพรงค่าที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 5,000-89,000 ซม.<sup>2</sup>/ก. โดยค่าเฉลี่ยจะประมาณ 35,000 ซม.<sup>2</sup>/ก.

การวัดความละเอียดของถ่านหินยังนิยมใช้การวัดแบบง่ายโดยการร่อนเปียก ผ่านบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มาตรฐาน ASTM C 618 แนะนำให้ใช้บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 45 ไมครอน) โดยระบุจำนวนถ่านหินที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 ถ่านหินโดยทั่วไปมีปริมาณค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงประมาณ ร้อยละ 8-30

#### 2.2.5 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) ของถ่านหินสามารถวัดได้โดยการทดสอบ เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C 188 ถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 1.9-2.9 ซึ่งต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความถ่วงจำเพาะของถ่านหินที่สูงส่วนใหญ่มาจากถ่านหินที่มีธาตุเหล็ก และแคลเซียมออกไซด์ผสมอยู่มาก ความถ่วงจำเพาะของถ่านหินที่ได้จากการเผาครั้งเดียวกันยังขึ้นอยู่กับความละเอียดถ่านหิน ส่วนที่ละเอียดจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่า

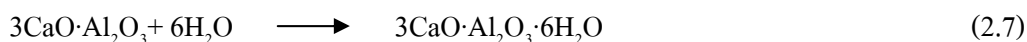
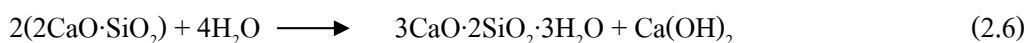
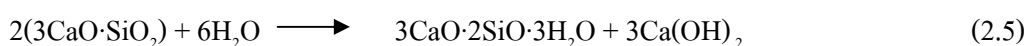
เถาถ่านหินส่วนที่หยาบ ทั้งนี้เนื่องจากเถาถ่านหินหยาบจะมีผิวขรุขระเป็นรูโพรง และยังมีเถาถ่านหิน กลวงผสมอยู่มากกว่าเถาถ่านหินละเอียด

### 2.2.6 องค์ประกอบทางเคมี

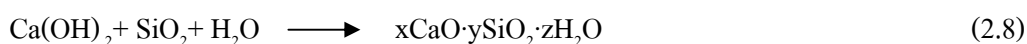
องค์ประกอบทางเคมีของเถาถ่านหินโดยทั่วไปจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  เป็นองค์ประกอบหลัก และ  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$  เป็น องค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น ( $\text{H}_2\text{O}$ )

## 2.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน (ปริญญา และชัย, 2547 ; ปริญญา, 2547)

เมื่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) และมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  หรือ C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ( $3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  หรือ C-A-H) ดังแสดงในสมการที่ (2.5) ถึง (2.7)



ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลังจากการทำ ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่เกิดจากสมการที่ (2.5) และ (2.6) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาไตรออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในวัสดุปอซโซลานผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ดังแสดงในสมการที่ (2.8) และ (2.9)



ค่า  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ในสมการที่ (2.8) และ (2.9) เป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมินไฮดรต (C-A-H) ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น และการซึมผ่านของน้ำได้ยากขึ้น

#### 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของเถ้าถ่านหินเพื่อใช้ในงานคอนกรีตค่อนข้างมาก ทำให้เถ้าถ่านหินในประเทศไทยถูกนำมาใช้งานเพื่อลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงคุณสมบัติในด้านต่างๆ ของคอนกรีต ดังจะเห็นได้จากโครงการใหญ่ๆ หลายโครงการได้ใช้เถ้าถ่านหินมาเป็นส่วนผสม เช่น โครงการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จังหวัดนครนายก พลังอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน แท่นฐานรากรถไฟ BTS เป็นต้น ซึ่งดังที่ทราบมาแล้วในข้างต้นว่าวัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่ประกอบไปด้วยซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก โดยทั่วไปแล้วจะไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสานได้ แต่เมื่อเข้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำจะได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานและสามารถใช้ในงานคอนกรีตได้ การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดได้ช้ากว่าปฏิกิริยาไฮดรชันเนื่องจากต้องอาศัยแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮดรชัน ซึ่งถ้ามีการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากแหล่งอื่นการทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาจากวัสดุปอซโซลานโดยไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะทำให้เป็นทางเลือกที่น่าสนใจ และเป็นที่ยอมรับว่าเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีมากในประเทศ และมีศักยภาพในการนำมาใช้งานในเชิงวิศวกรรมได้เป็นอย่างดี ทั้งในด้านการปรับปรุงสมบัติเชิงกล และสมบัติด้านความคงทนให้ดีขึ้น

งานวิจัยของ วิรุจ พัฒนาศิริรัตน์ (2544) ซึ่งได้ศึกษาผลกระทบของความละเอียดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าถ่านหิน ต่อคุณสมบัติในด้านกำลังอัดและการกัดกร่อนของมอร์ตาร์ที่แช่ในน้ำประปา และน้ำเสียนุมน โดยนำเถ้าถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ ที่ไม่ผ่านแยกขนาดและที่ผ่านการแยก ขนาดละเอียด แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 บางส่วน ในอัตราส่วนร้อยละ 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้จะแปรเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน,  $W/(C+F)$ , เท่ากับ 0.500, 0.575, 0.650 (สำหรับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และ 0.575 (สำหรับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5) ตามลำดับ และเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และ 5 มอร์ตาร์ทั้งหมด ทำการบ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นแบ่งมอร์ตาร์ออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกนำไป แช่ในน้ำประปา และอีกกลุ่มนำไปแช่ในน้ำเสียนุมนในสภาพเปียกและแห้งสลับกัน และทำการเก็บตัวอย่างมอร์ตาร์ทั้งสองกลุ่ม

เพื่อทดสอบกำลังอัดและการกักกร่อนในรูปการสูญเสีย น้ำหนักที่อายุมอร์ต้าร์ 120 240 365 และ 540 วัน (18 เดือน) ผลการศึกษาในด้านกำลังอัดพบว่า มอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และ 5 ที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่แยกขนาดทุกส่วนผสมจะมีกำลังอัดที่ต่ำกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานที่ทุกอายุการทดสอบ และกำลังอัดจะมีค่าต่ำลง เมื่อการแทนที่เถ้าถ่านหินที่ไม่ผ่านการแยกขนาดมากขึ้น ส่วนการใช้เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และ 5 ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 35 สามารถทำให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์มีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานที่ทุกอายุการทดสอบ และเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าสูงขึ้น มีแนวโน้มว่าสามารถแทนที่เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้มอร์ต้าร์ที่มีกำลังอัดสูงสุด สำหรับผลการทดสอบมอร์ต้าร์ ที่แช่ในน้ำเสียนชุมชนจนถึงอายุ 540 วัน พบว่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ส่วนใหญ่ ยังมีค่า ใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำประปา และมอร์ต้าร์มีการกักกร่อนเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้า เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

วันชัย นูรพา (2543) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าถ่านหินหยาบที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่ำมาทำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน โดยนำเถ้าถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าที่อำเภอแม่เมาะมาคัดแยกขนาดละเอียดออกด้วยเครื่องคัดแยกขนาดด้วยลม จากนั้นนำเถ้าถ่านหินหยาบที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 962 ซม<sup>2</sup>/ก. มาบดผสมร่วมกับปูนเม็ดหรือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จากนั้นบดส่วนผสมที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 3250 3850 4450 และ 5050 ซม<sup>2</sup>/ก. แล้วนำส่วนผสมมาศึกษาคุณสมบัติทางด้านกายภาพและเคมี กำลังอัดของมอร์ต้าร์ ขนาด 5x5x5 ซม. ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานทั้ง 2 วิธี ทำการทดสอบที่อายุ 1 3 7 14 28 60 และ 90 วัน รวมทั้งทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ ค่าการไหลของมอร์ต้าร์ และเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ผสมเถ้าถ่านหินกับมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานที่ได้จากการบดเถ้าถ่านหินหยาบกับปูนเม็ดหรือบดร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท I ผลการทดสอบพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานที่ได้จากการบดปูนเม็ดผสมเถ้าถ่านหินหยาบมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานที่ได้จากการบดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท I กับเถ้าถ่านหินหยาบ ในการบดร่วมกับปูนเม็ดหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท I สามารถผสมเถ้าถ่านหินหยาบได้ถึงร้อยละ 35 เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานที่ได้จากการบดเถ้าถ่านหิน หยาบร่วมกับปูนเม็ดหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 พบว่ามีกำลังอัดของมอร์ต้าร์ในช่วง อายุต้นสูงกว่าของมอร์ต้าร์ที่ได้จากการผสมเถ้าถ่านหินกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เพราะการบดเถ้าถ่านหินหยาบร่วมกับปูนเม็ดหรือปูนซีเมนต์



ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 จะทำให้ ปูนซีเมนต์บางส่วนถูกบดจนมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 จึง สามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่า

กาญจนา ต่วนเทศ (2542) ได้ศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิลจากการชุบโลหะที่ได้จากโรงงานผลิตเพิ่มโดยใช้ปูนขาวเป็นวัสดุประสาน และการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนขาวผสมแกลลอลิกไนต์เป็นวัสดุประสาน ทำการทดลองหาอัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนที่เหมาะสมในการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อน โดยพิจารณาจากสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างนั้นคือกำลังรับแรงอัดและประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายโลหะนิกเกิล โดยในการทำเสถียรได้ทำการแปรอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปูนขาวต่อตะกอนที่ 0.25 0.35 0.50 0.75 และ 1.00 รวมทั้งแปรอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 0.50 0.60 และ 0.75 ส่วนในการทำให้เป็นก้อนทำการแปรอัตราส่วนวัสดุประสานนั้นคือปูนขาวผสมแกลลอลิกไนต์ต่อตะกอนที่ 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 รวมทั้งแปรอัตราส่วนปูนขาวต่อแกลลอลิกไนต์ที่ 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 และ 1.50 ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำเสถียรได้แก่อัตราส่วนปูนขาวต่อตะกอนเป็น 0.50 โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.75 ส่วนอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำให้เป็นก้อนคือที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอน 0.75 และอัตราส่วนปูนขาวต่อแกลลอลิกไนต์เป็น 1.00 เมื่อแปรค่าระยะเวลาบ่ม พบว่าระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้นไม่ช่วยให้สมบัติทางกายภาพรวมถึงการลดการชะละลายโลหะหนักเพิ่มขึ้นเมื่อแปรอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมในการทำให้เป็นก้อนเป็น 0.60 จากการทดสอบการชะละลายระยะยาวพบว่าโลหะหนักนิกเกิลถูกชะละลายออกมามากในช่วง 20 วันแรกและลดลงต่ำกว่า 1 มก./ล. จนตลอดการทดลอง ประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายโลหะนิกเกิลในการทำเสถียรและทำให้เป็นก้อนเป็นร้อยละ 97.04 และ 63.46 ตามลำดับ

แนวคิดในการพัฒนาวัสดุประสานโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ ได้พยายามที่จะทำสารซีเมนต์ที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ใช้สารปอซโซลานที่ประกอบด้วยสารซิลิกา และอะลูมินาเป็นองค์ประกอบในการทำวัสดุซีเมนต์ที่เรียกว่า “จีโอพอลิเมอร์” จีโอพอลิเมอร์เป็นสารเชื่อมประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ โดยใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียม โดยการชะซิลิกอนและอะลูมินาในสารละลายเบสความเข้มข้นสูงและใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา ทำให้ซิลิกอนและอะลูมินาเกิดปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชันเป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ โดยสารจำพวกซิลิกอนและอะลูมินาสามารถพบได้จากวัสดุปอซโซลาน ซึ่งในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาว่าเป็นสารที่ถูกชะออกมาจากปอซโซลานอาจไม่เพียงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้สมบูรณ์และส่งผลให้เกิดการยึดเหนี่ยวอย่างเต็มที่จึงจำเป็นต้องใช้สารเคมีที่มีองค์ประกอบของซิลิกอนผสมเพิ่มเข้าไปด้วย แต่วัสดุดังกล่าวอยู่ในขั้นตอนของการศึกษาวิจัยเพื่อเพิ่ม

ความมั่นใจในการนำไปใช้งานจริงให้ได้มีประสิทธิภาพ โดย วิเชียร และ กิรติ (2555) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต ( $Na_2SiO_3$ ) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กลุ่มแรกใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ กำหนดอัตราส่วนของ Si/Al คงที่ กลุ่มที่ 2 ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH คงที่เท่ากับ 14 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของ Si/Al เท่ากับ 2.2 2.4 2.6 และ 2.8 หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. ทำการบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วในอากาศ และแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 และ 180 วัน ตลอดจนทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศที่อายุ 7 14 28 60 90 และ 180 วัน ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของ NaOH ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีค่าสูงขึ้น การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH และอัตราส่วน Si/Al

การพัฒนาวัสดุประสานทางเลือกสำหรับใช้ในงานก่อสร้างเริ่มจากการแทนที่วัสดุปอชโซลานบางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยพิจารณาทั้งสมบัติเชิงกล และสมบัติด้านความคงทนของวัสดุประสานดังกล่าว ซึ่งพบว่า วัสดุปอชโซลานำพวกเถ้าชีวมวล เช่น เถ้าแกลบ เถ้าแกลบเปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าชานอ้อย เป็นต้น มีสมบัติเชิงกลเบื้องต้นและสมบัติด้านความคงทนไปในทิศทางที่ดี ซึ่งสามารถพัฒนาเพื่อใช้งานในเชิงพาณิชย์ได้ อย่างไรก็ตาม เถ้าชีวมวลที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรงมีอนุภาคค่อนข้างหยาบ มีความพรุนสูง จึงส่งผลให้การทำปฏิกิริยาปอชโซลานเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ดังนั้นการนำเถ้าเหล่านี้มาใช้งานจึงจำเป็นต้องบดให้ละเอียดก่อน ซึ่งจะเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบดด้วย และปัจจุบันเถ้าเหล่านี้ก็ยังไม่มีการนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์อย่างจริงจัง งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าชีวมวลในงานคอนกรีต เช่น Sata et al., 2012 ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการเกิดปฏิกิริยาปอชโซลานในมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุชีวมวลบดละเอียดที่เป็น เถ้าแกลบเปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยผลการศึกษาพบว่า ที่ระดับการแทนที่เถ้าชีวมวลที่เท่ากัน ระดับการเกิดปฏิกิริยาปอชโซลานเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน พบว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอชโซลานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่มากขึ้น และการแทนที่เถ้าชีวมวลในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มากขึ้น ส่วนสมบัติด้านความคงทน Chalee et al., 2013 ได้ศึกษาผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็น

เวลา 5 ปี พบว่า การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้นแต่ไม่เกินร้อยละ 35 ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง แต่การแทนที่สูงถึงร้อยละ 50 กลับส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กมีแนวโน้มสูงขึ้น

เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพดีและมีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์เนื่องจากไม่ต้องผ่านการบดให้ละเอียดเหมือนวัสดุปอซโซลานที่เป็นเถ้าชีวมวล งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้งานของเถ้าถ่านหินมีจำนวนมากทั้งในและต่างประเทศ ซึ่งเป็นข้อมูลที่สามารถเพิ่มความมั่นใจในการนำเถ้าถ่านหินไปใช้งานในเชิงพาณิชย์ได้อย่างดี โดยการศึกษาเกี่ยวกับเถ้าถ่านหินในช่วงหลังจะเน้นไปที่สมบัติด้านความคงทน ซึ่งมีการทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและการเก็บข้อมูลในภาคสนาม โดย Chalee et al., 2010 ได้เก็บข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีตที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในน้ำทะเลถึง 10 ปี ซึ่งพบว่า ผลการศึกษาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้การเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต และปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลลดลงอย่างชัดเจน แต่การผสมเถ้าถ่านหินที่สูงขึ้นถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานจะมีผลทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลงและไม่เหมาะสมที่จะใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเล ดังนั้นผลการวิจัยจึงแนะนำให้ใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เพราะจะมีผลทำให้ได้คอนกรีตที่มีสมบัติเชิงกลและความคงทนที่ดี

นอกจากนั้นได้มีการศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมผลิตก๊าซอะเซทีลีน โดยจะอยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวเนื่องจากผสมกับน้ำ มีสภาพความเป็นด่างสูง มีลักษณะเป็นสีเทาอมขาวขุ่น และเมื่อนำมาผสมกับวัสดุปอซโซลาน เช่นเถ้าถ่านหิน สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ทำให้ได้วัสดุประสานได้ แต่การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจำเป็นต้องใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดสูงประกอบกับใช้วัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพดี จึงจะได้วัสดุประสานที่ดี โดยไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยการศึกษาที่ผ่านมาของปิติสานต์ และคณะ (2539) ได้นำเสนอแนวทางการนำส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินมาใช้เป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ โดยจากการวิจัยพบว่า ส่วนอัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 30 กับเถ้าถ่านหินร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ให้กำลังอัดของมอร์ต้า ที่อายุ 90 วัน สูงถึง 209 กก./ซม<sup>2</sup> และยังแนะนำว่าส่วนผสมของวัสดุทั้งสองชนิดนี้มีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาให้เป็นประโยชน์ในการก่อสร้าง โดยควรมีการวิจัยเพิ่มเติม นอกจากนี้ ฌ็องกร และวิเชียร (2555) ได้ศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบดในงานคอนกรีต พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนของเถ้าถ่านหิน:แคลเซียมคาร์ไบด์:ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เท่ากับ 40:30:30 มีกำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน

เท่ากับ 224 กก./ชม.<sup>2</sup> (ร้อยละ 51 ของคอนกรีตควบคุม) และพัฒนากำลังอัดต่อเนื่องเป็น 262 กก./ชม.<sup>2</sup> ที่อายุ 90 วัน (ร้อยละ 52 ของคอนกรีตควบคุม) นอกจากนี้พบว่า คอนกรีตที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทุกส่วนผสมมีความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาเพื่อนำเถ้านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ มาใช้เป็น วัสดุประสานในงานคอนกรีต โดยเถ้านหิน จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า องค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหิน และกาก แคลเซียมคาร์ไบด์ มีองค์ประกอบที่สำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ใน การศึกษาของ ธนพล เหล่าสมาธิกุล (2551) ได้นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาตากแดดให้แห้ง แล้วบดให้ ขนาดอนุภาค ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 สำหรับเถ้านหินนำมาแยกขนาดด้วย เครื่องแยกขนาดเพื่อให้ความละเอียดสูงขึ้น จากนั้นผสมเถ้านหินกับกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ใน อัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก เพื่อหล่อเป็น คอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. โดยแบ่งคอนกรีตเป็น 4 กลุ่ม ตามปริมาณวัสดุประสานคือ 300 375 450 และ 600 กก./ม.<sup>3</sup> ซึ่ง ได้จากการออกแบบกำลังอัด ที่อายุ 28 วัน เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุ ประสาน คอนกรีตแต่ละ กลุ่มจะแปรค่าแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งใช้เป็นสารผสมเพิ่มในปริมาณร้อยละ 0, 1 3 5 และ 10 โดยน้ำหนักของปริมาณวัสดุประสาน นอกจากนี้ยังใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อเป็นวัสดุผสมเพิ่มในการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต บ่มคอนกรีต ทั้งหมด ในน้ำและทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1 3 7 14 28 60 และ 90 วัน พร้อมกับหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ที่อายุ 28 วัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เถ้านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถนำมา ใช้ เป็นวัสดุประสานชนิดใหม่อีกชนิดหนึ่งในงานคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังที่สูงมากนักในช่วงอายุ ต้นๆ

ปฏิกิริยาเคมีระหว่างซีเมนต์กับน้ำซึ่งเรียกกันว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันจะให้ผลผลิตคือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) และเมื่อมีเถ้านหินในส่วนผสมของ ซีเมนต์ สารเคมีในเถ้านหินจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมากขึ้น เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ เกิดขึ้นทั้งหมดจะทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น ใน งานวิจัยของ ชรินทร์ นมรัช (2544) ได้ทำการทดสอบหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นตาม อายุของปฏิกิริยาทางเคมี โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ด้วยการวัดความร้อนภายใต้แรงสูญญากาศ (TGA) แล้ว นำมาคำนวณหาปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งคำนวณจากมวลโมเลกุลของสมการเคมี เพื่อ อธิบายผลกระทบของเถ้านหินต่อกำลังและพฤติกรรมทางกายภาพ ทั้งนี้จะเปรียบเทียบกับปฏิกิริยา ทางเคมีของซีเมนต์เพสต์ธรรมดา การวิจัยนี้จะศึกษาอัตราการเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์และนำไป

กำหนดหาปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตโดยใช้การทดแทนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินปริมาณ ร้อยละ 15-35 ด้วยส่วนผสมของคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์ 500 กก./ม.<sup>3</sup> และศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วตามอายุ ผลการทดสอบพบว่าในซีเมนต์เพสต์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเพิ่มขึ้นตามอายุจากปฏิกิริยาไฮเดรชันแต่เมื่อผสมเถ้าถ่านหิน แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกจากเถ้าลอย โดยจะเห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดเพิ่มขึ้นตามเวลา และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินจะลดลงต่ำกว่าในซีเมนต์เพสต์ธรรมดาที่อายุต้น และเมื่อเพิ่มเถ้าถ่านหินปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสม แคลเซียมซิลิเกตไฮดรตในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหิน จะมีปริมาณมากกว่าในซีเมนต์เพสต์ธรรมดาประมาณ ร้อยละ 5 ที่อายุ 28 วัน และประมาณ ร้อยละ 10 ที่อายุ 56 วัน แสดงว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นตามเวลา ส่งผลให้คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินมีการพัฒนากำลังอัดในระยะยาว และกำลังอัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตในส่วนผสม ซึ่งกำลังอัดจะลดลงในอัตราเดียวกันกับแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต จากผลการศึกษาพบว่ากำลังของคอนกรีตจะลดลงประมาณ ร้อยละ 10 จากการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินทุก ๆ ร้อยละ 10 การผสมเถ้าถ่านหินในซีเมนต์สามารถปรับปรุงความสามารถของคอนกรีตได้

การศึกษานี้จึงเป็นอีกความพยายามที่จะพัฒนาวัสดุประสานโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยอาศัยปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างวัสดุปอซโซลานที่ใช้เถ้าถ่านหิน กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมจากปูนขาว เพื่อให้ได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้น จึงได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเตรียมไฮดรอกไซด์ที่จะส่งผลต่อสมบัติของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ด้วย

## บทที่ 3

### ระเบียบวิธีวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย วิธีการเตรียมตัวอย่างรวมทั้งการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ, ทางเคมีของปูนขาว และเถ้าถ่านหิน รวมทั้งการทดสอบหาความชื้นเหลือ การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวระยะต้น และระยะปลาย การทดสอบความสามารถในการไหลตัว และการทดสอบกำลังรับแรงอัด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

##### 3.1.1 ปูนขาว

3.1.2 เถ้าถ่านหิน ใช้เถ้าถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยไม่ผ่านการแยกขนาด

3.1.3 ทรายแห้งด้วยอากาศที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้ำที่ตะแกรงเบอร์ 200

3.1.4 น้ำสะอาดที่ใช้ในการผสมและบ่มตัวอย่างทดสอบ

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

##### 3.2.1 ตะแกรงวิเคราะห์ขนาดอนุภาค



รูปที่ 3.1 ตะแกรงวิเคราะห์ขนาดอนุภาค

### 3.2.2 ขวดแก้วทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ (Le Chatelier)



รูปที่ 3.2 ขวดแก้ว Le Chatelier

### 3.2.3 อุปกรณ์ทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบระยะการก่อตัวของคอนกรีต

### 3.2.4 เครื่องทดสอบกำลังอัด



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

### 3.2.5 เครื่องชั่งน้ำหนัก



รูปที่ 3.5 เครื่องชั่งความละเอียด 0.02 กก.





รูปที่ 3.6 เครื่องชั่งละเอียด 0.0002 กก.

3.2.6 แบบหล่อแท่งคอนกรีต ขนาด 50x50x50 มม.<sup>3</sup>



รูปที่ 3.7 แบบหล่อคอนกรีตขนาด 50x50x50 มม.

3.2.7 บีกเกอร์ใช้ในการหาปริมาตรและตวง

3.2.8 แก๊ส หม้อ ใช้ในการต้มน้ำ



รูปที่ 3.8 เครื่องให้ความร้อนแก่น้ำ

3.2.9 เทอร์โมมิเตอร์

3.2.10 กะละมัง ใช้ในการผสมอัตราส่วนของเพสต์ และมอร์ตาร์

3.2.11 อุปกรณ์ทดสอบหาอัตราการไหลตัว



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบการไหลแผ่

### 3.3 วิธีการศึกษา

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1) การเตรียมตัวอย่างปูนขาว

งานวิจัยนี้ใช้ปูนขาวที่หาได้ตามท้องตลาด โดยนำมาใช้ในสภาพแห้ง ไม่จับตัวเป็นก้อน

2) การเตรียมตัวอย่างเถ้าถ่านหิน

นำเถ้าถ่านหินโดยตรงจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง โดยไม่ผ่านการแยกขนาด

3) การเตรียมตัวอย่างทราย

ใช้ทรายแห้งในอากาศ โดยไม่ผ่านการแยกขนาด ซึ่งมีอนุภาคประมาณ 3 ไมครอน และนำมาใช้งานในสภาพแห้ง ที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และต้องค้างบนตะแกรงเบอร์ 200

3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

(ก) ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

ทดสอบความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหิน โดยใช้ขวดทดลอง Le Chatelier ตามมาตรฐาน ASTM C 188 ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของเหลวที่มี

ปริมาณเท่ากับวัสดุนั้น การทดสอบนี้ใช้น้ำมันก๊าดเป็นของเหลวในการทดสอบเนื่องจากไม่ทำปฏิกิริยากับวัสดุที่ใช้ทดสอบ

ทดสอบน้ำหนักข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (มีขนาดช่องเปิดเท่ากับ 45 ไมโครเมตร) ของตัวอย่างเถ้าถ่านหิน ด้วยวิธี Wet Sieve Analysis ตามมาตรฐาน ASTM C 430 โดยนำตัวอย่างมา ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานด้วยน้ำ เมื่อนำไปอบให้แห้งจะได้ส่วนที่เหลือบนตะแกรง ซึ่งเป็นน้ำหนัก ที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325

(จ) ทดสอบคุณสมบัติทางเคมี

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการทดสอบ

3.3.3 การเตรียมและทดสอบวัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ศึกษาการทำวัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือปูนขาว เพื่อพัฒนาวัสดุประสานให้สามารถใช้งานได้เหมือนกับปูนซีเมนต์ โดยจะศึกษาคุณสมบัติต่างๆของ เพสต์และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นส่วนผสม โดยทำการ เตรียมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปูนขาว และผสมกับเถ้าถ่านหินโดยใช้ปูนขาวแทนที่เถ้า ถ่านหิน ร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ละลายปูนขาวด้วย น้ำที่อุณหภูมิห้อง และละลายปูนขาวด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 60 °ซ. ก่อนนำมาผสมกับเถ้าถ่านหิน การ เตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบเพสต์และมอร์ตาร์ แสดงดังรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ



รูปที่ 3.10 การเตรียมตัวอย่างก่อนผสม



รูปที่ 3.11 การผสมทำตัวอย่างเพื่อการทดสอบเพสต์และมอร์ตาร์

### การทดสอบในเพสต์

ส่วนผสมของเพสต์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ แสดงดังตารางที่ 3.1 และมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

1) การทดสอบความชันเหลวปกติ โดยใช้เครื่องมือไวแคต (Vicat Apparatus) เป็นวิธีการทดสอบหาปริมาณน้ำที่พอเหมาะสำหรับเพสต์ โดยพิจารณาจากการจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. เป็นระยะ 10 มม. ในเวลา 30 วินาที ตาม ASTM C 187 (แสดงดังรูปที่ 3.12) ซึ่งวิธีการผสมเพสต์เป็นไปตาม ASTM C 305 โดยทดสอบเป็น 2 กลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 ในการผสมต้องละลายปูนขาวในน้ำที่อุณหภูมิห้องก่อนผสมกับเถ้าถ่านหิน

กลุ่มที่ 2 ในการผสมต้องละลายปูนขาวในน้ำที่อุณหภูมิ 60 °ซ. ก่อนผสมกับเถ้าถ่านหิน





รูปที่ 3.12 การทดสอบหาความชื้นเหลวปกติ

2) การทดสอบหาระยะเวลาการก่อดัว ทำการทดสอบระยะเวลาการก่อดัวระยะต้นและระยะปลาย ตาม ASTM C 191 โดยใช้ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ ซึ่งการก่อดัวระยะต้นคือระยะเวลาที่การจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. เป็นระยะ 25 มม. ในเวลา 30 วินาที และการก่อดัวระยะปลายคือระยะเวลาที่เพสต์แข็งตัวแล้วจนทำให้เข็มมาตรฐานไม่สามารถจมลงด้วยน้ำหนักของตัวเองซึ่งจะเกิดรอยบนซีเมนต์เพสต์ แต่ขอบตัดไม่เกินรอย โดยทดสอบการจม เริ่มต้น 5 15 30 45 60 75 ลักษณะการทดสอบระยะเวลาการก่อดัวต้นและก่อดัวปลายแสดงดังรูปที่ 3.13 โดยทดสอบเป็น 2 กลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 ในการผสมต้องละลายปูนขาวในน้ำที่อุณหภูมิห้องก่อนผสมกับเถ้าถ่านหิน

กลุ่มที่ 2 ในการผสมต้องละลายปูนขาวในน้ำที่อุณหภูมิ 60 °ซ ก่อนผสมกับเถ้าถ่านหิน

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมเพสต์

ส่วนผสม	เถ้าถ่านหิน:ปูนขาว	เถ้าถ่านหิน	ปูนขาว	น้ำ
L:F 10:90 (R)	90:10	90	10	ปริมาณน้ำอุณหภูมิห้อง ที่ละลายปูนขาวที่ทำให้เพสต์มีความชื้นเหลวปกติ
L:F 20:80 (R)	80:20	80	20	
L:F 30:70 (R)	70:30	70	30	
L:F 40:60 (R)	60:40	60	40	
L:F 50:50 (R)	50:50	50	50	
L:F 10:90 (60)	90:10	90	10	ปริมาณน้ำอุณหภูมิ 60 °ซ. ที่ละลายปูนขาว ที่ทำให้เพสต์มีความชื้นเหลวปกติ
L:F 20:80 (60)	80:20	80	20	
L:F 30:70 (60)	70:30	70	30	
L:F 40:60 (60)	60:40	60	40	
L:F 50:50 (60)	50:50	50	50	



รูปที่ 3.13 การทดสอบหาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลาย

### การทดสอบในมอร์ต้าร์

ส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ แสดงดังตารางที่ 3.2 และมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

1) การหาความสามารถในการไหลตัว ทดสอบความสามารถในการไหลตัวของมอร์ต้าร์ โดยใช้ปูนขาวแทนที่เถ้าถ่านหิน ร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนผสมวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก หาปริมาณน้ำที่ทำให้มอร์ต้าร์มีค่าการไหลแผ่ระหว่าง ร้อยละ 105 ถึง 115 ตามมาตรฐาน ASTM C 230 โดยทดสอบเป็น 2 กลุ่มดังนี้ (ดังรูปที่ 3.14)

ขั้นตอนปฏิบัติและการเตรียมของมอร์ต้าร์ซีเมนต์สด

- 1) ทำการผสมปูนขาวเข้ากับน้ำก่อน
- 2) จากนั้นถึงนำทรายมาผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันโดยทำการผสมด้วยมือ โดยใช้อัตราส่วนดังตารางที่ 3.2
- 3) นำส่วนผสมที่ได้ลงในแบบหล่อ เป็น 2 ชั้น ชั้นแรกสูงประมาณ 25 มม. กระทบ 20 ครั้ง แล้วใส่อีก 1 ชั้นให้เต็มพอดี กระทบ 20 ครั้ง แล้วใช้เกรียงปาดให้เรียบ
- 4) ดึงแบบหล่อ ออก แล้วหมุนโต๊ะ 25 ครั้งในเวลา 15 วินาที

$$\text{เปอร์เซ็นต์การไหลแผ่} = (D1 - D0) \times 100 / D0$$

$D1$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของการไหลหลังการหมุน

$D0$  = เส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น



รูปที่ 3.14 การทดสอบหาความสามารถในการไหลตัว

2) การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ หล่อมอร์ต้าร์ขนาด  $50 \times 50 \times 50$  มม.<sup>3</sup> ตาม ASTM C 109 โดยใช้ปริมาณน้ำและส่วนผสมในข้อ 3 (ตารางที่ 3.2) ซึ่งวิธีการผสมมอร์ต้าร์เป็นไปตาม ASTM C 305 แกะแบบที่อายุ 24 ชม. และบ่มตัวอย่างทดสอบในน้ำจนถึงอายุที่ทำการทดสอบ ซึ่งต้องทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน โดยแต่ละอายุทดสอบ จะใช้กำลังอัดเฉลี่ยจาก 3 ก้อน โดยทดสอบเป็น 2 กลุ่มดังนี้ การเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังอัดและการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ แสดงดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมมอร์ต้าร์

ส่วนผสม	เถ้าถ่านหิน: ปูนขาว	เถ้าถ่าน หิน	ปูน ขาว	ทราย	น้ำ
L:F 10:90 (R)	90:10	90	10	275	ปริมาณน้ำอุณหภูมิห้อง ที่ละลายปูนขาวที่ทำให้การไหลแผ่ระหว่างร้อยละ 105 ถึง 115
L:F 20:80 (R)	80:20	80	20	275	
L:F 30:70 (R)	70:30	70	30	275	
L:F 40:60 (R)	60:40	60	40	275	
L:F 50:50 (R)	50:50	50	50	275	
L:F 10:90 (60)	90:10	90	10	275	ปริมาณน้ำอุณหภูมิ 60 °ซ. ที่ละลายปูนขาวที่ทำให้การไหลแผ่ระหว่างร้อยละ 105 ถึง 115
L:F 20:80 (60)	80:20	80	20	275	
L:F 30:70 (60)	70:30	70	30	275	
L:F 40:60 (60)	60:40	60	40	275	
L:F 50:50 (60)	50:50	50	50	275	



รูปที่ 3.15 การบ่มมอร์ต้าร์ในอากาศ



รูปที่ 3.16 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์



## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ได้แก่ การทดสอบความชื้นเหลือปกติของเพสต์ การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว การหาความสามารถในการไหลตัวของมอร์ตาร์ และการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ ที่อายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน โดยทดสอบเป็น 2 กลุ่ม คือ การผสมต้องละลายปูนขาวในน้ำที่อุณหภูมิห้อง ก่อนผสมกับเถ้าถ่านหิน และการผสมต้องละลายปูนขาวในน้ำที่อุณหภูมิ 60 °ซ ก่อนผสมกับเถ้าถ่านหิน

#### 4.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้วิจัย

##### 4.1.1 รูปร่างและลักษณะของปูนขาว

ปูนขาวมีลักษณะเป็นผงสีขาว และรูปร่างกลมขนาดใหญ่ ปูนขาว (Hydrated lime:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และปูนไฮดรอกไซด์ซึ่งอยู่ในรูปลักษณะต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.1 กันทั้งทางเคมีและกายภาพ ส่วนหินปูน (Limestone) หมายถึงหินชั้น หรือหินตะกอนที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เป็นส่วนใหญ่ เมื่อนำหินปูนมาเผาจะได้ปูนสุกที่มีขนาดต่างๆ ขึ้นกับชนิดหินปูน เตาเผาที่ใช้ และวิธีปฏิบัติต่อการเผา คือนำปูนสุกมาทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ปูนขาว (lime)

##### 4.1.2 รูปร่างและลักษณะของเถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินมีสีน้ำตาลแดง และมีรูปร่างกลมตันเป็นส่วนใหญ่ เมื่อพิจารณารูปร่างของเถ้าถ่านหินจะมีขนาดเล็กจะมีทรงกลมตัน ผิวเรียบ และเถ้าถ่านหินส่วนหนึ่งเกิดจากการปะทะกันของเถ้าถ่านหินขนาดเล็กทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ขนาดยังคงไม่ใหญ่มากนัก จึงสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ ทั้งนี้เถ้าถ่านหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูเล็กๆ ที่ผิว

##### 4.1.3 ขนาดและความละเอียด

งานวิจัยนี้ใช้เถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ไม่ผ่านการแยกขนาด แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งมีขนาด และมีความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยความละเอียดของเถ้าถ่านหินมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการทำปฏิกิริยา โดยเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงมีพื้นที่ผิวมากขึ้น และสามารถชะเอาซิลิกา และอลูมินาออกมาได้ง่ายขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ไปกำลังกับวัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหินและปูนขาว

คุณสมบัติทางกายภาพ	เถ้าถ่านหิน	ปูนขาว
Specific Gravity	2.23	2.73
Retained on Sieve No. 200 (%)	81.6	42

#### 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  เป็นองค์ประกอบหลัก แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ (%)	
Silicon Dioxide, $\text{SiO}_2$	44.95
Aluminum Oxide, $\text{Al}_2\text{O}_3$	23.7
Iron Oxide, $\text{Fe}_2\text{O}_3$	10.8
Calcium Oxide, $\text{CaO}$	13.8
Magnesium Oxide, $\text{MgO}$	3.47
Sodium Oxide, $\text{Na}_2\text{O}$	0.07
Potassium Oxide, $\text{K}_2\text{O}$	2.38
Sulfur Trioxide, $\text{SO}_3$	1.31
Loss On Ignition, LOI	0.52

แคลเซียมออกไซด์ผสมอยู่มาก ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาครั้งเดียวกัน ยังขึ้นอยู่กับความละเอียดเถ้าถ่านหิน ส่วนที่ละเอียดจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าเถ้าถ่านหินส่วนที่หยาบ ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าถ่านหินหยาบจะมีผิวขรุขระเป็นรูโพรง และยังมีเถ้าถ่านหินกลวงผสมอยู่มากกว่าเถ้าถ่านหินละเอียด

#### 4.3 ระยะเวลาการก่อตัว

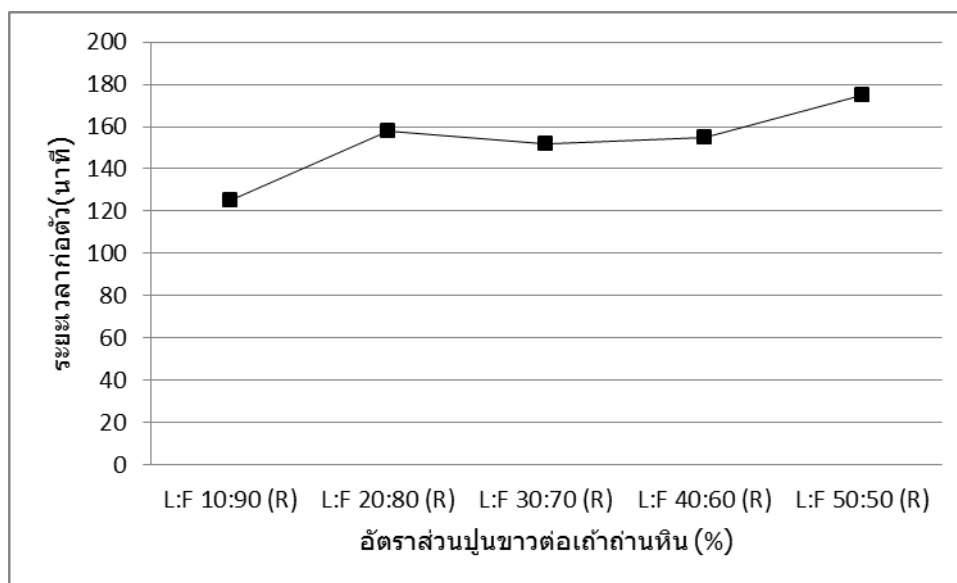
##### 4.3.1 ผลของปูนขาวต่อระยะเวลาการก่อตัว

ระยะเวลาก่อตัวต้นและระยะเวลาก่อตัวปลายของเพสต์ที่ใช้วัสดุประสานจากปูนขาวและเถ้าถ่านหินแสดงดังตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาผลของปูนขาวต่อระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายดังรูปที่ 4.1(ก) และ 4.1(ข) ตามลำดับ พบว่าเมื่อผสมปูนขาวในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวต้นของเพสต์มีแนวโน้มมากขึ้น(การก่อตัวช้าลง) เช่น เพสต์ผสมกับน้ำที่อุณหภูมิห้องที่ผสมปูนขาว

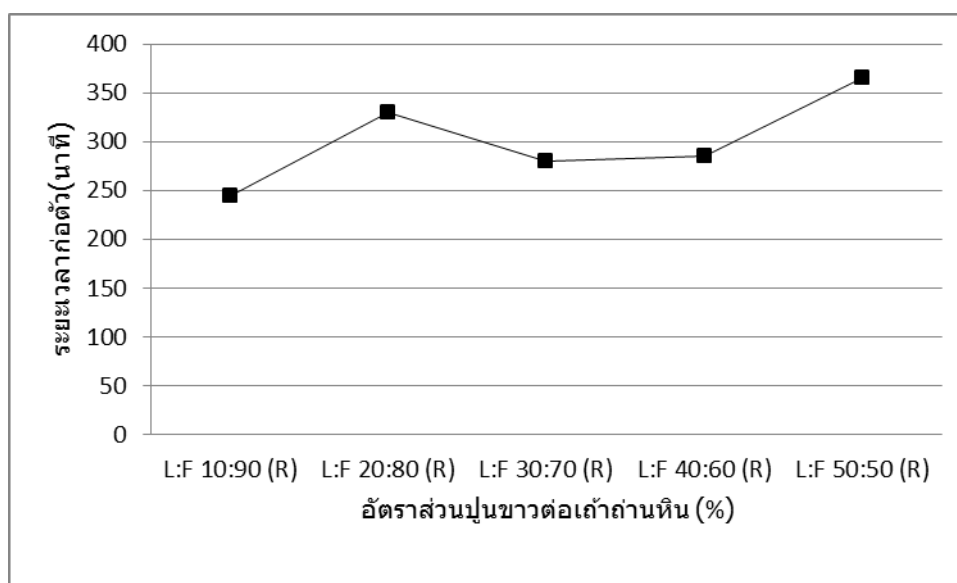
ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก มีระยะเวลาการก่อตัวต้นเท่ากับ 125 158 152 155 และ 175 นาที ตามลำดับ และมีระยะเวลาก่อตัวปลายเท่ากับ 245 330 280 285 และ 365 นาที ตามลำดับ สังเกตว่าตัวอย่าง L:F 10:90 (R) จะมีการก่อตัวไวที่สุด ก่อตัวต้นเท่ากับ 125 นาที และก่อตัวปลายเท่ากับ 245 นาที และตัวอย่าง L:F 50:50 (R) จะมีการก่อตัวช้าที่สุด ก่อตัวต้นเท่ากับ 175 นาที และก่อตัวปลายเท่ากับ 365 นาที การที่ระยะเวลาก่อตัวต้นและก่อตัวปลายของเพสต์ที่ใช้ปูนขาวมากขึ้นและเถ้านหินน้อยลง มีแนวโน้มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่า การเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปูนขาวกับซิลิกา และอลูมินาจากเถ้านหิน เกิดขึ้นช้าเมื่อใช้ปูนขาวในปริมาณที่สูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากสมบัติของปูนขาวที่ละลายน้ำและเกิดเป็นสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้านหินไม่สมบูรณ์เหมือนกับปฏิกิริยาที่ได้จากปูนซีเมนต์-ปอร์ตแลนด์กับเถ้านหิน อย่างไรก็ตามการศึกษาครั้งนี้ พบว่าการใช้ปูนขาวผสมเถ้านหินร้อยละ 30 ถึง 40 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ระยะเวลาก่อตัวต้นและก่อตัวปลายลดลง(การก่อตัวเร็วขึ้น) ซึ่งอาจเกิดจากสัดส่วนผสมดังกล่าวมีความเหมาะสมที่เข้าทำปฏิกิริยา จึงส่งผลให้ลดระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายลง อย่างไรก็ตามระยะเวลาก่อตัวของเพสต์จากปูนขาวและเถ้านหินที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ สูงกว่าเพสต์ที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีระยะเวลาก่อตัวประมาณ 40 ถึง 90 นาที (Neville, 1996) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจากวัสดุประสานชนิดใหม่นี้ช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำก่อนข้างชัดเจน

ตารางที่ 4.3 ระยะเวลาก่อตัวต้นและก่อตัวปลาย

ส่วนผสม	ระยะเวลาก่อตัว (นาที)	
	ก่อตัวต้น	ก่อตัวปลาย
L:F 10:90 (R)	125	245
L:F 20:80 (R)	158	330
L:F 30:70 (R)	152	280
L:F 40:60 (R)	155	285
L:F 50:50 (R)	175	365
L:F 10:90 (60)	119	260
L:F 20:80 (60)	152	330
L:F 30:70 (60)	135	270
L:F 40:60 (60)	160	300
L:F 50:50 (60)	170	350



(ก) ระยะก่อตัวต้น

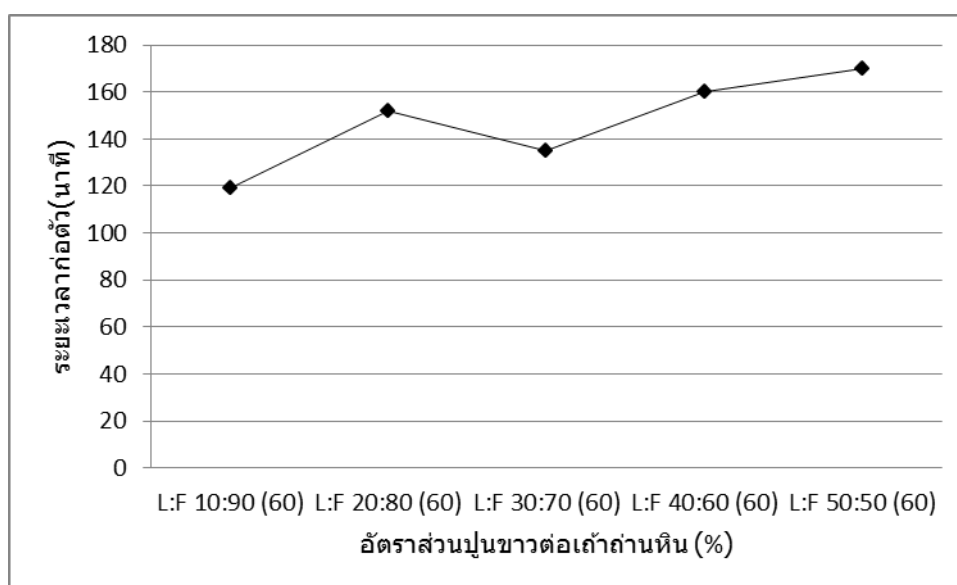


(ข) ระยะก่อตัวปลาย

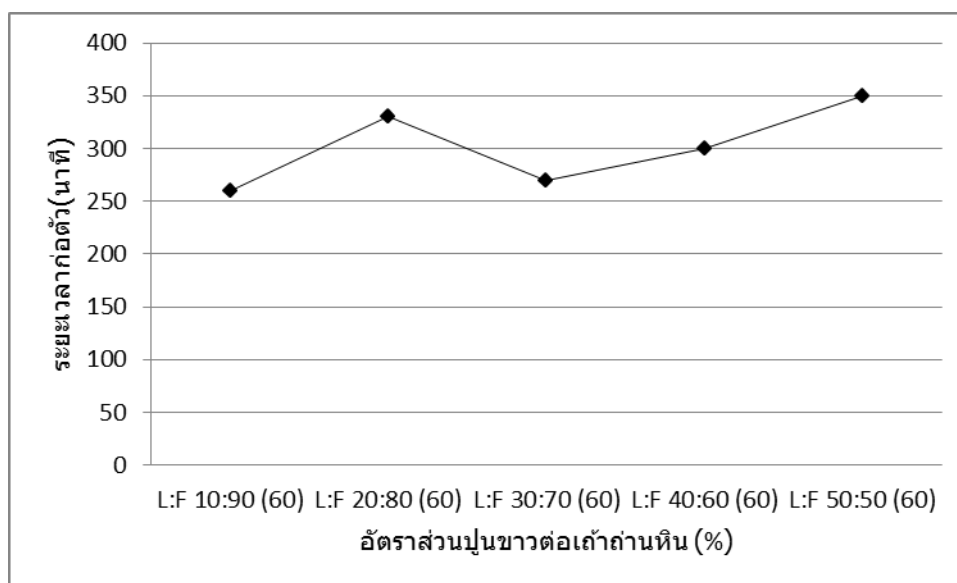
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปุนขาวที่ผสมน้ำที่อุณหภูมิห้องกับ (ก) ระยะเวลาก่อตัวต้น  
(ข) ระยะเวลาก่อตัวปลาย

เมื่อพิจารณาเพศจากปุนขาวและเถ้าถ่านหินผสมกับน้ำที่อุณหภูมิ 60 °ซ ที่ผสมปุนขาวในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่ามีระยะเวลาการก่อตัวต้นเท่ากับ 119, 152, 135, 160 และ 170 นาที ตามลำดับ และมีระยะเวลาก่อตัวปลายเท่ากับ 260 330 270 300 และ 350

นาที่ ตามลำดับ สังเกตว่าตัวอย่าง L:F 10:90 (60) จะมีการก่อตัวไวที่สุด ก่อตัวต้นเท่ากับ 119 นาที และก่อตัวปลายเท่ากับ 170 นาที และตัวอย่าง L:F 50:50 (60) จะมีการก่อตัวช้าที่สุด ก่อตัวต้นเท่ากับ 260 นาที และก่อตัวปลายเท่ากับ 350 นาที ดังรูปที่ 4.2(ก) และ 4.2(ข) ซึ่งระยะเวลาในการก่อตัวทั้งระยะเวลาก่อตัวต้นและระยะเวลาก่อตัวปลายนานกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์โดยทั่วไปค่อนข้างมาก และมีแนวโน้มเหมือนกับกลุ่มที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องผสมปูนขาว กล่าวคือ เมื่อใช้ปูนขาวในปริมาณที่มากขึ้น แสดงให้เห็นว่า การเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากปูนขาวกับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินเกิดขึ้นช้า ซึ่งอาจเกิดจากการทำปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากปูนขาวกับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหิน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ ธนพล (2551) ได้ศึกษาการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหินไม่บดและบด เท่ากับ 30:70 โดยน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานในการหล่อคอนกรีตโดยไม่มีปูนซีเมนต์ในส่วนผสม และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65, 0.53 และ 0.45 ตามลำดับ ทำการทดสอบระยะเวลาในการก่อตัวของคอนกรีตสด ผลการทดสอบพบว่าระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน มีระยะเวลาการก่อตัวนานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามระยะเวลาการก่อตัวมีค่าลดลง(ก่อตัวไวขึ้น) เมื่อค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าลดลง ซึ่งจะเห็นได้ว่างานวิจัยดังกล่าว มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้



(ก) ระยะก่อตัวต้น



(ข) ระยะเวลาก่อตัวปลาย

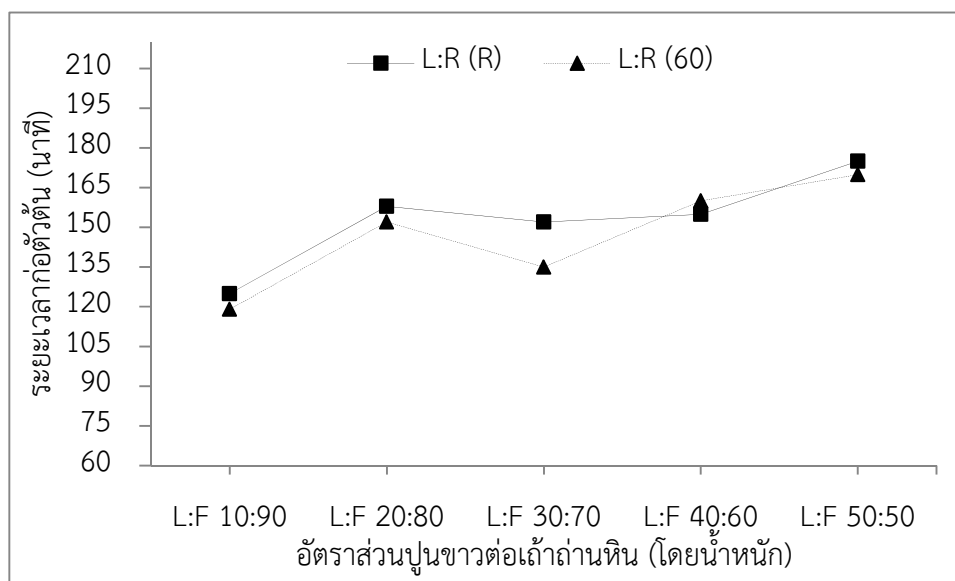
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปุ๋ยน้ำที่ผสมน้ำที่อุณหภูมิ 60 °ซ กับ (ก) ระยะเวลาก่อตัวต้น

(ข) ระยะเวลาก่อตัวปลาย

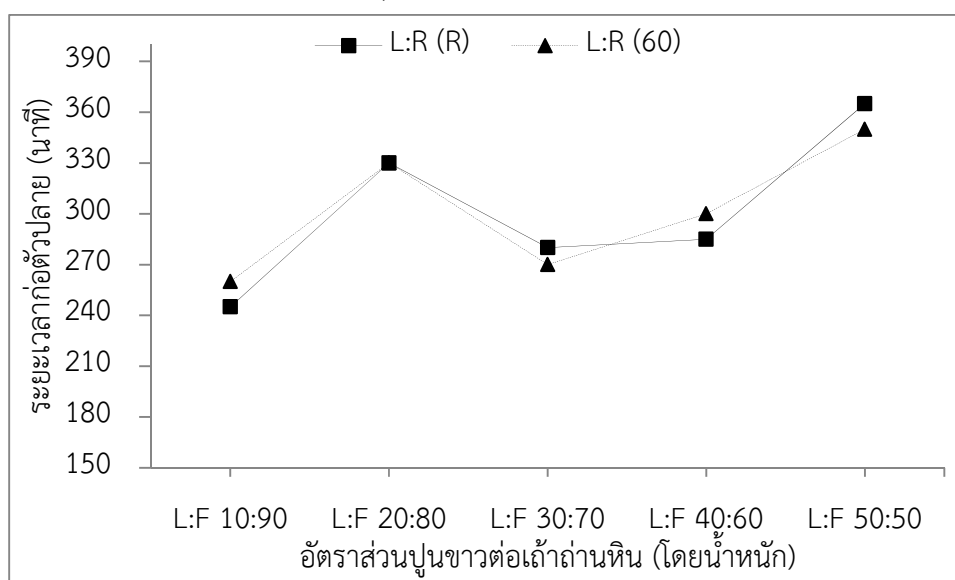
#### 4.3.2 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ละลายปุ๋ยน้ำต่อระยะเวลาการก่อตัว

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ใช้ละลายปุ๋ยน้ำต่อระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายดังรูปที่ 4.3(ก) และ 4.3(ข) ตามลำดับ พบว่า ที่อุณหภูมิ 60 °ซ ทำให้ก่อตัวต้นได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็นตัวเร่งให้ปุ๋ยน้ำละลายน้ำได้ดีขึ้น เมื่อปุ๋ยน้ำละลายน้ำเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ดี จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาและอลูมินาจากถั่วถ่านหิน ได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และ แคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (CAH) ที่มีสมบัติในการเชื่อมประสานได้มากขึ้น (Neville, 1996) จึงเป็นผลให้มีการก่อตัวต้นเร็วขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ใช้ละลายปุ๋ยน้ำต่อการก่อตัวปลายของเพสต์ ดังรูปที่ 4.3(ข) พบว่าระยะเวลาก่อตัวปลายของกลุ่มที่ใช้ น้ำที่อุณหภูมิห้องละลายปุ๋ยน้ำกับกลุ่มที่ใช้ น้ำที่อุณหภูมิ 60 °ซ ละลายปุ๋ยน้ำใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจเกิดจากระยะเวลาการก่อตัวปลาย เป็นช่วงที่เพสต์มีการแข็งตัวแล้ว ซึ่งอุณหภูมิจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาก่อตัวในช่วงต้นเป็นหลัก จึงทำให้อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ละลายปุ๋ยน้ำ ไม่มีผลต่อการก่อตัวปลายของเพสต์อย่างชัดเจน



ก) ระยะเวลาก่อตัวต้น



ข) ระยะเวลาก่อตัวปลาย

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนขาวกับ (ก) ระยะเวลาก่อตัวต้นของเพลสต์ และ (ข) ระยะเวลาก่อตัวปลายของเพลสต์

#### 4.4 ความชื้นเหลือปกติของเพลสต์

##### 4.4.1 ผลของปูนขาวต่อปริมาณน้ำที่ให้ความชื้นเหลือปกติ

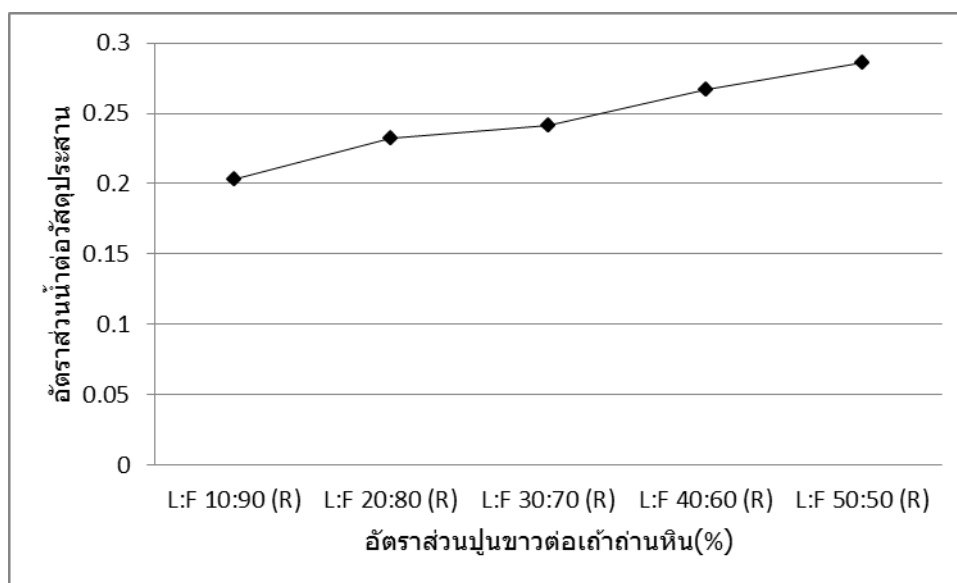
ปริมาณน้ำที่ให้ความชื้นเหลือปกติของเพลสต์จากปูนขาวและเถาถ่านหินแสดงดังตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาผลของปูนขาวที่มีผลต่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่ให้ค่าความชื้นเหลือปกติเป็นไปตามมาตรฐาน ในกลุ่มที่ใช้ใช้อุณหภูมิห้องและกลุ่มที่ใช้ใช้อุณหภูมิ 60 °ซ ละลายปูนขาวแสดง

ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ พบว่า ปริมาณปูนขาวที่มากขึ้นส่งผลให้ความต้องการน้ำที่ทำให้เพสต์มีความชื้นเหลวปกติ มีแนวโน้มมากขึ้น เช่น เพสต์ที่มีปูนขาวผสมเพิ่มในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ให้ค่าความชื้นเหลวปกติเท่ากับ 0.20 0.23 0.24 0.27 และ 0.29 ตามลำดับ ซึ่งน่าจะมีผลมาจากปริมาณปูนขาวที่มากขึ้น ทำให้ปริมาณเถ้าถ่านหินลดลง ซึ่งสมบัติของเถ้าถ่านหินแม่เมาะจะกลมตัน (Tangpagasit et al., 2005; ปริญญา, 2547) ไม่คูดน้ำ ในขณะที่ปูนขาวจะมีความพรุนสูงและอาจมีการคูดน้ำมากขึ้น ถ้าใช้ปูนขาวในปริมาณที่สูงขึ้นจึงต้องใช้น้ำในการทำละลายที่มากขึ้น

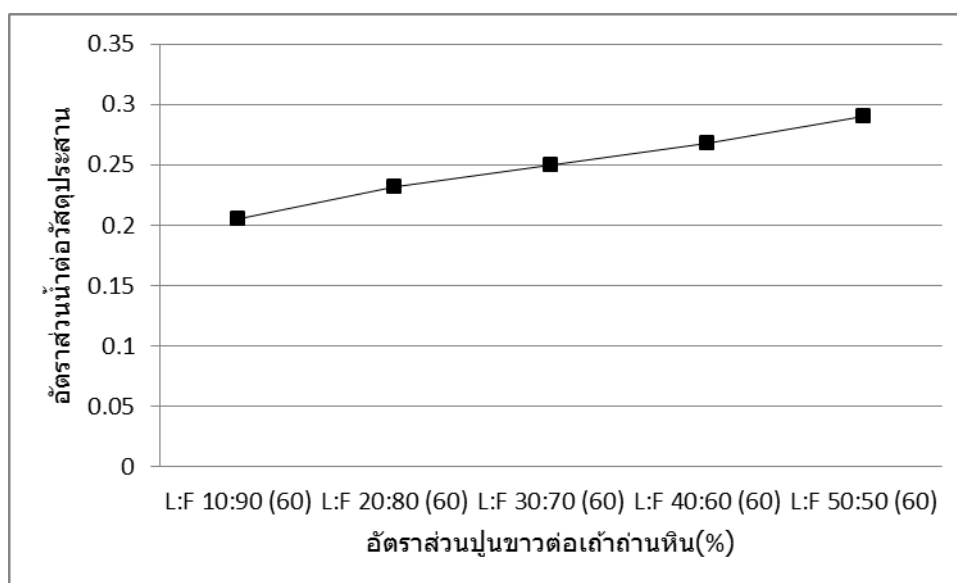
ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ให้ค่าความชื้นเหลวปกติ

ส่วนผสม (%)	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B)
L:F 10:90 (R)	0.20
L:F 20:80 (R)	0.23
L:F 30:70 (R)	0.24
L:F 40:60 (R)	0.27
L:F 50:50 (R)	0.29
L:F 10:90 (60)	0.21
L:F 20:80 (60)	0.23
L:F 30:70 (60)	0.25
L:F 40:60 (60)	0.27
L:F 50:50 (60)	0.29





รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณปุ๋ยน้ำต่อปริมาณน้ำที่ให้ความเข้มข้นเหลวปกติของกลุ่มที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิห้อง ละลายปุ๋ยน้ำ



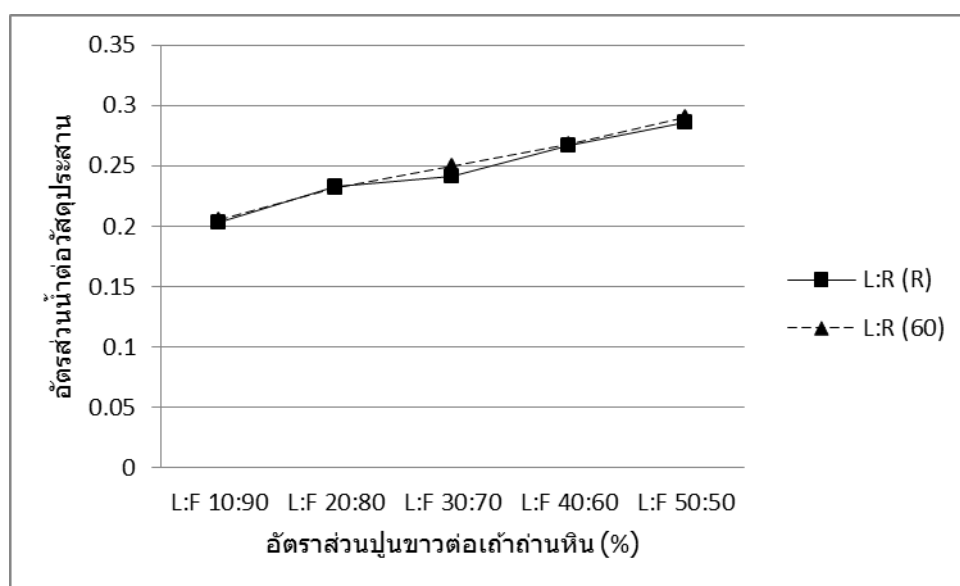
รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณปุ๋ยน้ำต่อปริมาณน้ำที่ให้ความเข้มข้นเหลวปกติของกลุ่มที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิ 60 °ซ ละลายปุ๋ยน้ำ

ผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ กาญจนา (2542) ซึ่งได้ศึกษาเพื่อเปรียบเทียบ การทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิดจากการชุบโลหะที่ได้จากโรงงานผลิตเพิ่ม โดยใช้ปุ๋ยน้ำผสมแอมโมเนียม ลิกไนต์เป็นวัสดุประสาน ทำการทดลองหาอัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนที่เหมาะสม ซึ่งได้ พิจารณาจากสมบัติทางกายภาพของตัวอย่าง คือ กำลังรับแรงอัด และประสิทธิภาพในการลดการถูก

ชะละลายโลหะ निकิล โดยในการทำเสถียรได้ทำการแปรอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปูนขาวต่อตะกอนที่ 0.25 0.35 0.50 0.75 และ 1.00 รวมทั้งแปรอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 0.50 0.60 และ 0.75 ส่วนในการทำให้เป็นก้อน ทำการแปรอัตราส่วนวัสดุประสาน คือปูนขาวผสมเถ้าลอยลิกไนต์ต่อตะกอนที่ 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 รวมทั้งแปรอัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าลอยที่ 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 และ 1.50 ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นเมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่า ในทุกตัวอย่างที่ผสมด้วยปูนขาวจะทำให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเทียบกับงานวิจัยนี้ก็มีส่วนที่สอดคล้อง คือ เมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้นจะต้องการน้ำเพิ่มขึ้น

#### 4.4.2 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ละลายปูนขาวต่อปริมาณน้ำที่ใช้ในความชื้นเหลือปกติ

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ละลายปูนขาวต่อความต้องการน้ำของเพสต์ดังรูปที่ 4.6 พบว่า ความต้องการน้ำของทั้งสองกลุ่มใกล้เคียงกันมาก และอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ละลายปูนขาวไม่มีผลต่อความต้องการน้ำของเพสต์ ซึ่งอาจเกิดจากความต้องการน้ำของเพสต์ขึ้นกับสมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหินและปูนขาว เช่น ความพรุน การดูดซึมน้ำ ขนาดของอนุภาค เป็นต้น ดังนั้นการใช้อุณหภูมิต่างกันของน้ำที่ใช้ละลายปูนขาว จึงไม่มีผลต่อความต้องการน้ำที่ให้ความชื้นเหลือปกติ



รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำที่ให้ความชื้นเหลือปกติ

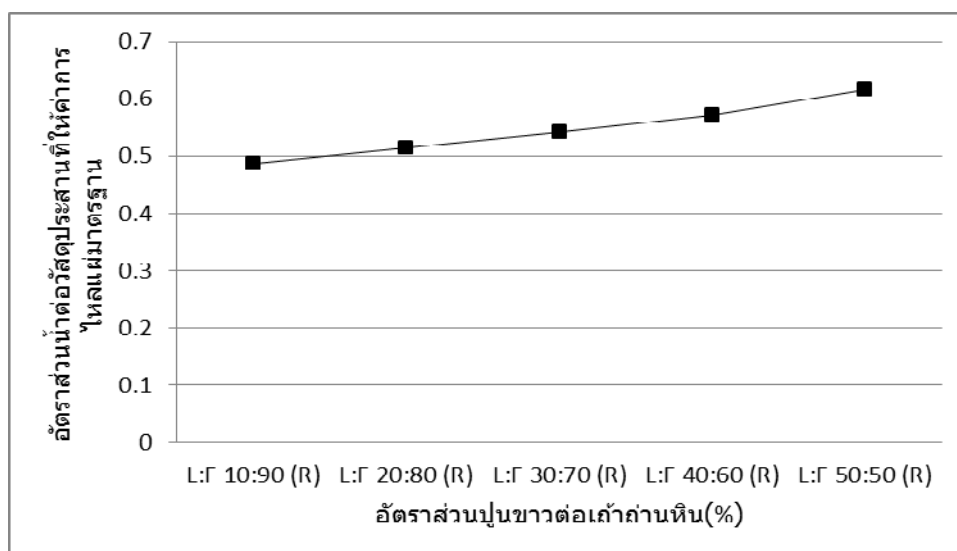
#### 4.5 ความสามารถในการไหลตัวของมอร์ต้าร์

##### 4.5.1 ผลของปูนขาวต่อปริมาณน้ำที่ให้การไหลตัวมาตรฐาน

ผลการศึกษาผลของปูนขาวต่อปริมาณน้ำที่ให้ค่าการไหลตัวตามมาตรฐานแสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่า เมื่อใช้ปูนขาวในส่วนผสมที่มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ทำให้มอร์ต้าร์มีค่าการไหลตัวตามมาตรฐานเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.7 เช่น เมื่อผสมปูนขาวในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก จะมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ให้ค่าการไหลตัวมาตรฐานเท่ากับ 0.486 0.514 0.543 0.571 และ 0.617 ตามลำดับ ซึ่งน่าจะมีผลมาจากปริมาณปูนขาวที่มากขึ้น ทำให้ปริมาณเถ้าถ่านหินลดลง ซึ่งดังที่กล่าวมาแล้วในข้อ 4.4.1 ว่าด้วยคุณสมบัติทางกายภาพของปูนขาว จึงส่งผลให้มีความต้องการน้ำที่ใช้ในการไหลตัวตามมาตรฐานมากขึ้น โดยค่าการไหลตัวตามมาตรฐานปกติเท่ากับร้อยละ  $110 \pm 5$

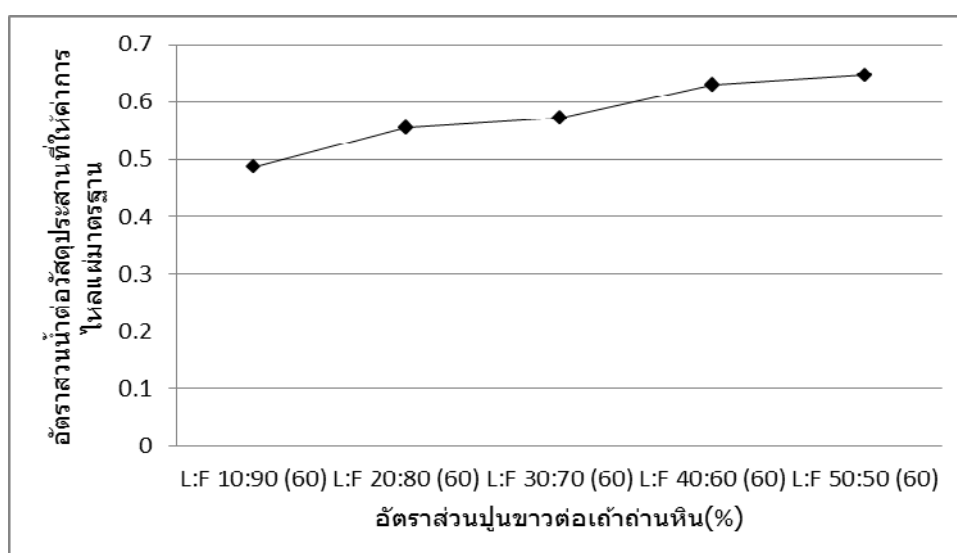
ตารางที่ 4.5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ให้ค่าการไหลตัวตามมาตรฐาน

ส่วนผสม (%)	ปริมาณ W/B ที่ให้ค่าการไหลตัวตามมาตรฐาน
L:F 10:90 (R)	0.486
L:F 20:80 (R)	0.514
L:F 30:70 (R)	0.543
L:F 40:60 (R)	0.571
L:F 50:50 (R)	0.617
L:F 10:90 (60)	0.486
L:F 20:80 (60)	0.554
L:F 30:70 (60)	0.571
L:F 40:60 (60)	0.629
L:F 50:50 (60)	0.646



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนขาวต่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ให้ค่าการไหลตัวตามมาตรฐานของมอร์ตาร์กลุ่มที่ใช้น้ำอุณหภูมิห้องละลายปูนขาว

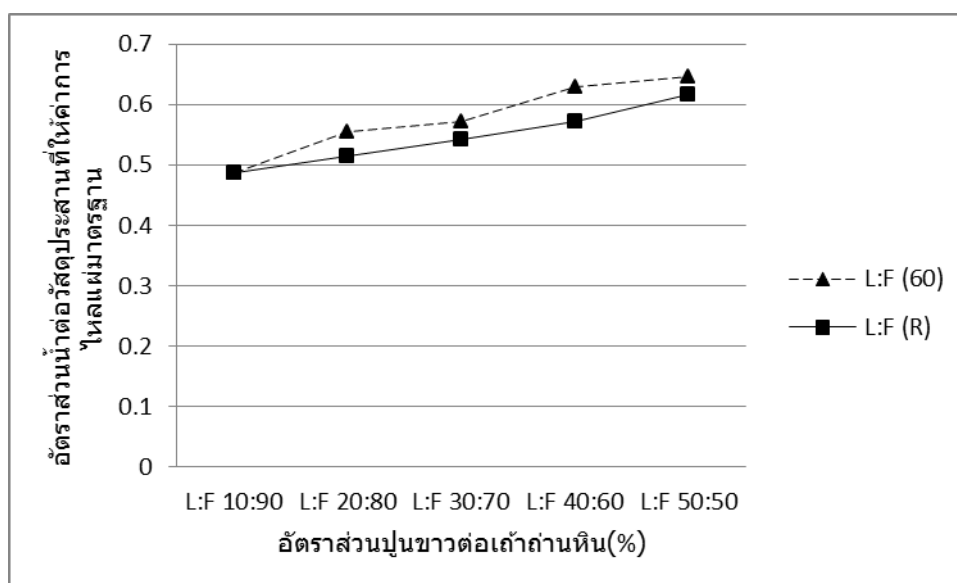
พิจารณาเพสต์ที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิ 60 °ซ ดังรูปที่ 4.8 พบว่า มีแนวโน้มเหมือนกันกับกลุ่มที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องละลายปูนขาว กล่าวคือ เมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ให้ค่าการไหลตัวตามมาตรฐานเพิ่มขึ้นด้วยในทุกๆส่วนผสม ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณน้ำที่ให้ค่าความชื้นเหลวปกติของเพสต์ ดังที่กล่าวมาข้างต้น เช่น เมื่อผสมปูนขาวในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก จะมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ให้ค่าการไหลตัวมาตรฐานอยู่ที่ 0.486 0.554 0.571 0.629 และ 0.646 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนขาวต่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ให้ค่าการไหลตัวตามมาตรฐานของมอร์ตาร์กลุ่มที่ใช้น้ำอุณหภูมิ 60 °ซ ละลายปูนขาว

#### 4.5.2 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำที่ให้การไหลตัวมาตรฐาน

เมื่อพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิต่อหน้าที่ให้ค่าการไหลตัวตามมาตรฐานของมอร์ตาร์ดังรูปที่ 4.9 พบว่า ความต้องการน้ำของทั้งสองกลุ่มแตกต่างกันเล็กน้อยโดยกลุ่มที่ผสมน้ำอุณหภูมิห้องต้องการน้ำที่ให้การไหลตัวมาตรฐานของมอร์ตาร์น้อยกว่า ซึ่งอาจเกิดจากผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเป็นตัวเร่งให้ปูนขาวละลายกับน้ำได้เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ดีขึ้น จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหิน ได้เป็นสารที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้มากขึ้น จึงเป็นผลให้การก่อตัวไวขึ้นและการไหลตัวลดลง



รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิต่อความต้องการน้ำที่ให้การไหลตัวตามมาตรฐานของมอร์ตาร์

#### 4.6 กำลังของมอร์ตาร์

ผลทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เศษจากปูนขาวและเถ้าถ่านหินแสดงดังตารางที่ 4.6 โดยพิจารณาผลการทดสอบในแต่ละประเด็นดังนี้

##### 4.6.1 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์

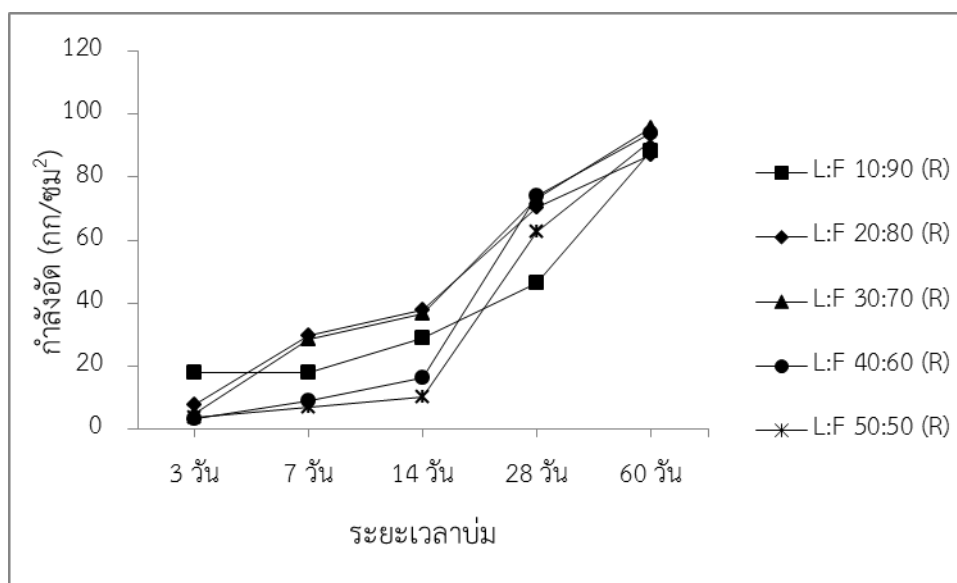
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์กับระยะเวลาบ่ม ในกลุ่มที่ละลายปูนขาวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้องและน้ำที่อุณหภูมิ 60° ซ ดังรูปที่ 4.10(ก) และ 4.10(ข) ตามลำดับ พบว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์ทุกส่วนผสมสูงขึ้นตามระยะเวลาของการบ่ม โดยเห็นได้ว่าในช่วงอายุบ่มที่ 14 ถึง 60 วัน มีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยสังเกตได้จากความชันของกราฟที่เพิ่มขึ้น อาจเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่ทำให้มีการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุมากขึ้น (Jaturapitakkul et al., 2007; Neville, 1996) โดยการผสมเถ้าถ่านหินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการละลายปูนขาว

จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหิน ได้เป็น CSH และ CAH ซึ่งมีผลให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงขึ้นในระยะยาว

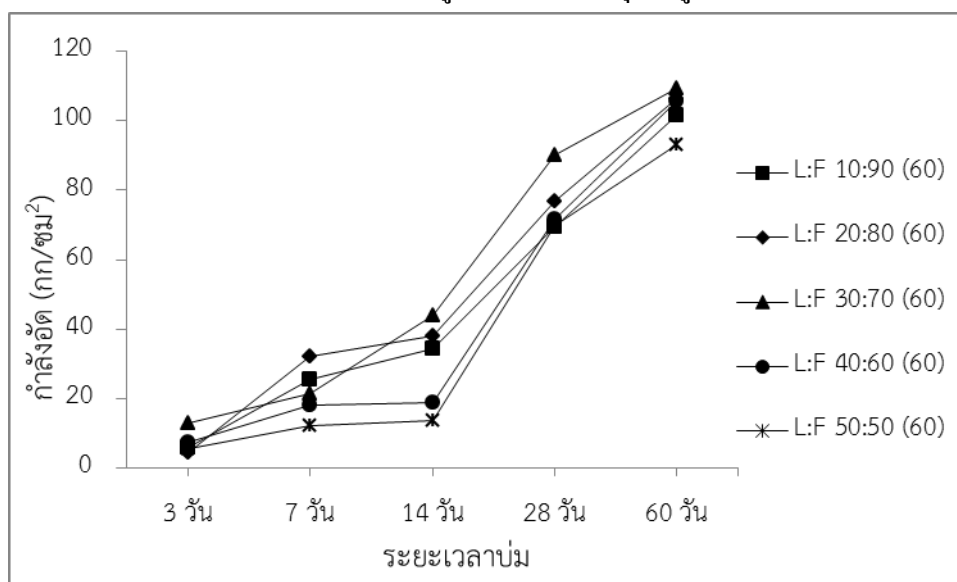
การละลายปูนขาวด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 60 °ซ ก่อนผสมมอร์ตาร์ พบว่าให้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและระยะเวลาบ่ม คล้ายกับกลุ่มที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิห้อง (ดังรูปที่ 4.10(ข)) แต่มีการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์มากกว่ากลุ่มที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิห้อง โดยสังเกตได้จากความชันของกราฟในช่วงอายุบ่ม 14 ถึง 60 วัน ของมอร์ตาร์กลุ่มนี้ มีแนวโน้มมากกว่ากลุ่มที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิห้อง ทั้งนี้จะเป็นผลจากอุณหภูมิของน้ำที่สูง สามารถละลายปูนขาวให้เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ดี และส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่สมบูรณ์มากขึ้น

ตารางที่ 4.6 กำลังอัดของมอร์ตาร์

ส่วนผสม (%)	กำลังอัด (กก/ซม <sup>2</sup> )				
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน
L:F 10:90 (R)	18.1	18.1	29.2	46.5	88.3
L:F 20:80 (R)	7.7	29.6	37.9	70.5	87.1
L:F 30:70 (R)	5.2	28.7	36.5	73.3	95.8
L:F 40:60 (R)	3.5	9.0	16.3	74.1	95.8
L:F 50:50 (R)	3.7	6.9	10.4	62.7	91.5
L:F 10:90 (60)	6.0	25.7	34.4	69.5	101.4
L:F 20:80 (60)	4.3	32.2	38.1	76.7	106.2
L:F 30:70 (60)	13.0	21.5	43.9	90.1	109.5
L:F 40:60 (60)	7.6	18.1	19.0	71.8	105.7
L:F 50:50 (60)	5.7	12.2	13.9	70.0	93.1



(ก) ละลายปูนขาวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง



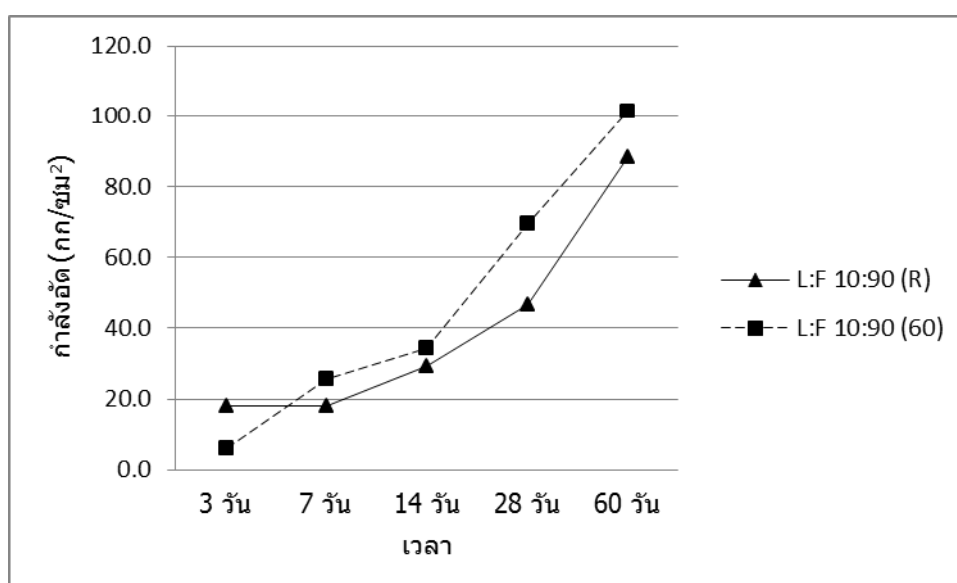
(ข) ละลายปูนขาวด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 60° ซ

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ต้าร์กับระยะเวลาบ่ม (ก) ผสมด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง (ข) ผสมด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 60° ซ

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในส่วนผสมที่มีปริมาณปูนขาวน้อยมาก (ส่วนผสม L:F 10:90) ดังรูปที่ 4.11(ก) พบว่า ในช่วงอายุบ่มที่ 3 ถึง 14 วัน ตามลำดับ มีค่ากำลังค่อนข้างแปรปรวน และเมื่อพิจารณาในช่วงอายุบ่ม 14 ถึง 60 วัน เห็นได้ชัดเจนว่า กลุ่มที่ผสมน้ำอุณหภูมิ 60° ซ มีกำลังสูงกว่ากลุ่มที่ผสมน้ำอุณหภูมิห้องอย่างชัดเจน อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้แคลเซียมไดออกไซด์จากปูนขาวละลายและทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินได้ดี เป็นผลให้เกิดแคลเซียมซิลิ

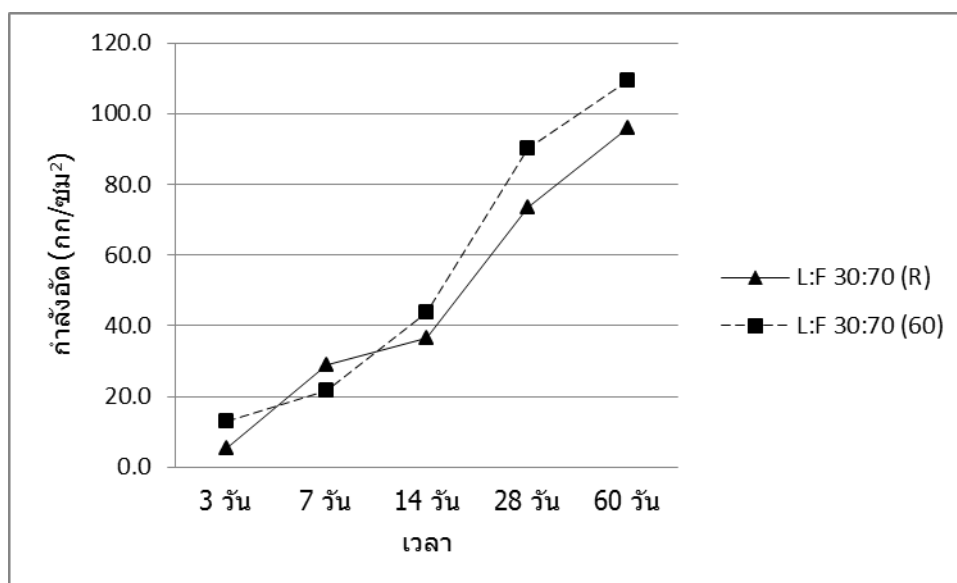
เกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมออลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสานและทำให้มอร์ตาร์แข็งแรงขึ้น (Neville, 1996)

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในส่วนผสมที่มีปริมาณปูนขาวมากขึ้น ดังรูปที่ 4.11(ข) และ 4.11(ค) พบว่า มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับกลุ่มที่มีปริมาณปูนขาวต่ำ กล่าวคือ อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลดีต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ทุกอายุทดสอบ และมีแนวโน้มในการพัฒนากำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้ น้ำที่อุณหภูมิห้อง (สังเกตจากความชันของกราฟ) นอกจากนี้การศึกษาค้างนี้ยังสังเกตได้ว่า การใช้ปูนขาวปริมาณสูงขึ้นอุณหภูมิที่ใช้ละลายปูนขาวมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดน้อยลง โดยสังเกตจากการาฟของ กลุ่มที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 60° ซ ชิดกันมากขึ้น (ดังรูปที่ 4.11(ข) และ 4.11(ค)) อาจเป็นผลจากการที่ปริมาณปูนขาวมาก แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากการละลายปูนขาวมีมากอยู่แล้ว ถึงแม้จะใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการละลายปูนขาวก็เพียงพอที่จะใช้ทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับเถ้าถ่านหิน จึงส่งผลให้กำลังอัดของทั้ง 2 กลุ่มไม่แตกต่างกันมากนัก โดยเฉพาะที่อายุมอร์ตาร์นานขึ้น

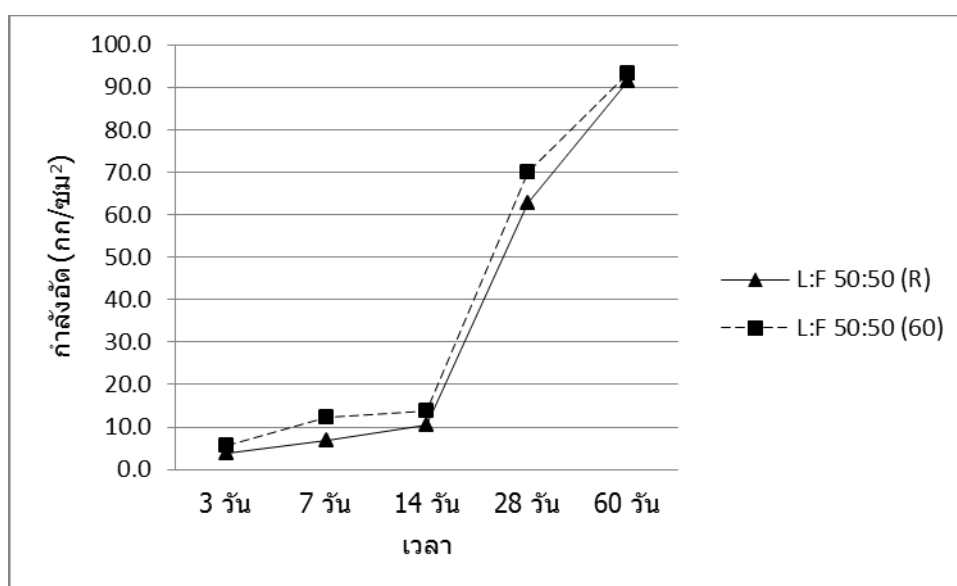


(ก) ส่วนผสม L:F 10:90





(ข) ส่วนผสม L:F 30:70



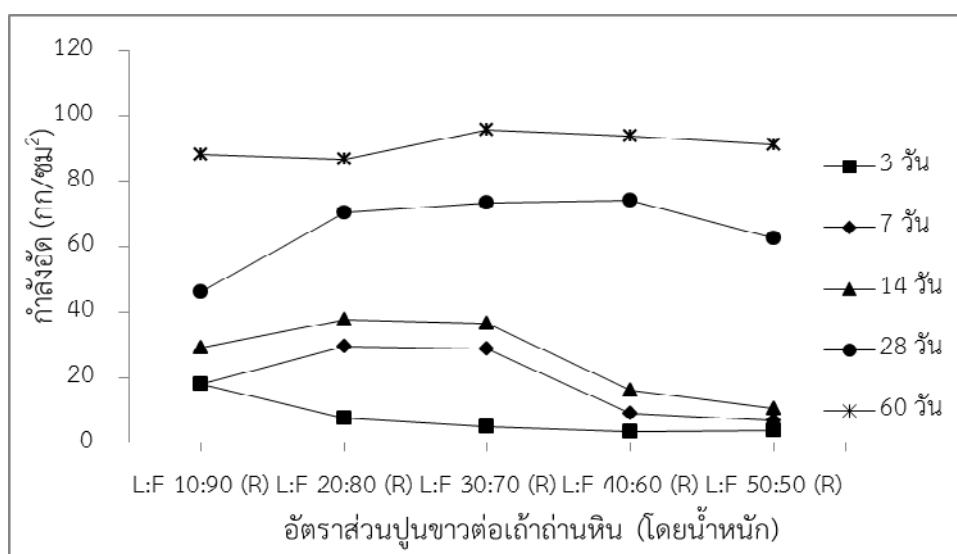
(ค) ส่วนผสม L:F 50:50

รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการละลายปุ๋ยชีวภาพต่อกำลั้งอัดของมอร์ตาร์ด ที่อายุบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วัน

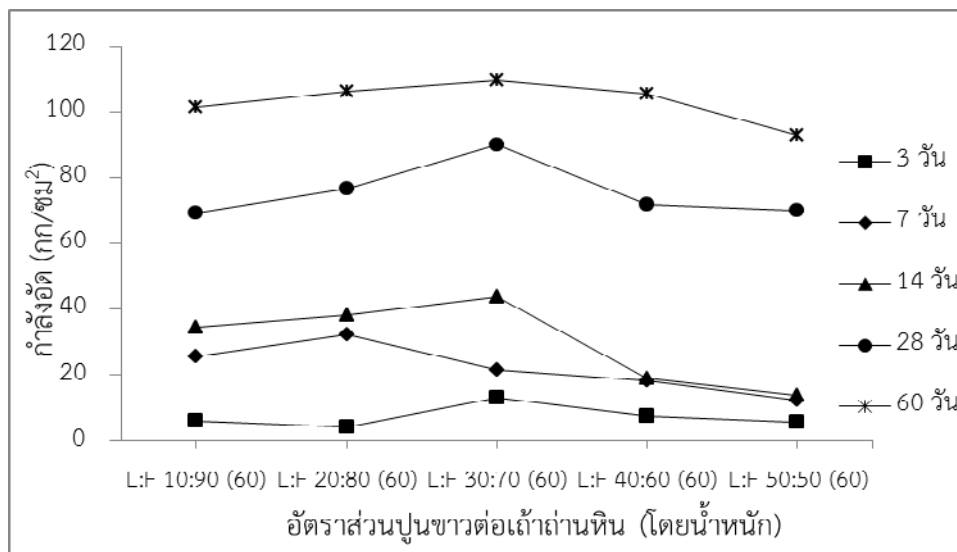
#### 4.6.2 ผลของปริมาณปุ๋ยชีวภาพต่อกำลั้งอัดของมอร์ตาร์ด

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณปุ๋ยชีวภาพต่อกำลั้งอัดของมอร์ตาร์ดจากปุ๋ยชีวภาพและเถ้าถ่านหิน ที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องและน้ำที่อุณหภูมิ 60 °ซ ละลายปุ๋ยชีวภาพดังรูปที่ 4.12(ก) และ 4.12(ข) ตามลำดับ โดยพิจารณากลุ่มที่ละลายปุ๋ยชีวภาพด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้องดังรูปที่ 4.12(ก) พบว่า อายุที่บ่มมอร์ตาร์ดต่ำกว่า 14 วัน กำลั้งอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้ปุ๋ยชีวภาพสูงถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้น กำลั้งอัดของ

มอร์ตาร์ดมีแนวโน้มลดลง และลดลงอย่างชัดเจนเมื่อใช้ปูนขาวเพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในช่วงต้น ยังไม่ส่งผลต่อการให้กำลังของมอร์ตาร์ด ซึ่งเห็นผลชัดเจนมากขึ้นในกลุ่มที่ใช้ปูนขาวถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เช่น มอร์ตาร์ดที่ใช้ปูนขาวร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ให้กำลังอัดที่อายุ 7 วัน เท่ากับ 18.1 29.6 28.7, 9.0 และ 6.9 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ เมื่ออายุมอร์ตาร์ดนานขึ้น พบว่า ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานเริ่มชัดเจนมากขึ้น โดยกลุ่มที่ใช้ปูนขาวปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 เริ่มมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นจากอายุ 14 วัน ก่อนข้างชัดเจน และการใช้ปูนขาวในช่วงร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงกว่ากลุ่มอื่น ซึ่งอาจเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาที่ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ดมีค่าสูง การที่มอร์ตาร์ดของปูนขาวและเถ้าถ่านหินมีกำลังอัดสูงขึ้นได้ ที่อายุการบ่มนานขึ้น เมื่อใช้ปูนขาวในปริมาณมากขึ้น อาจเกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปูนขาว มีปริมาณที่มากพอที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาที่ได้จากเถ้าถ่านหิน ทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่เพิ่มกำลังให้กับมอร์ตาร์ดได้ ซึ่งเห็นผลชัดเจนในช่วงอายุบ่มมากกว่า 28 วัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่อายุนานถึง 60 วัน พบว่า กลุ่มที่ใช้ปูนขาวในปริมาณต่ำ (ร้อยละ 10) ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ดเพิ่มสูงขึ้นใกล้เคียงกับกลุ่มอื่นได้ ซึ่งถือเป็นส่วนผสมที่ดีเพราะใช้ปูนขาวในปริมาณต่ำ แต่ใช้เถ้าถ่านหินปริมาณสูงขึ้นก็สามารถให้กำลังอัดสูงได้ เนื่องจากปูนขาวมีราคาสูงกว่าเถ้าถ่านหิน ดังนั้นการใช้ปูนขาวในปริมาณต่ำได้จึงถือเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุประสานชนิดนี้ ให้เกิดความประหยัดและสามารถรับแรงได้ ส่วนกลุ่มที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิ 60° ซ ละลายปูนขาว ดังรูปที่ 4.12(ข) พบว่า มีแนวโน้มเหมือนกับกลุ่มที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิห้อง กล่าวคือ การใช้ปูนขาวประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน และ 60 วันสูงที่สุด



(ก) กลุ่มที่ละลายปูนขาวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง

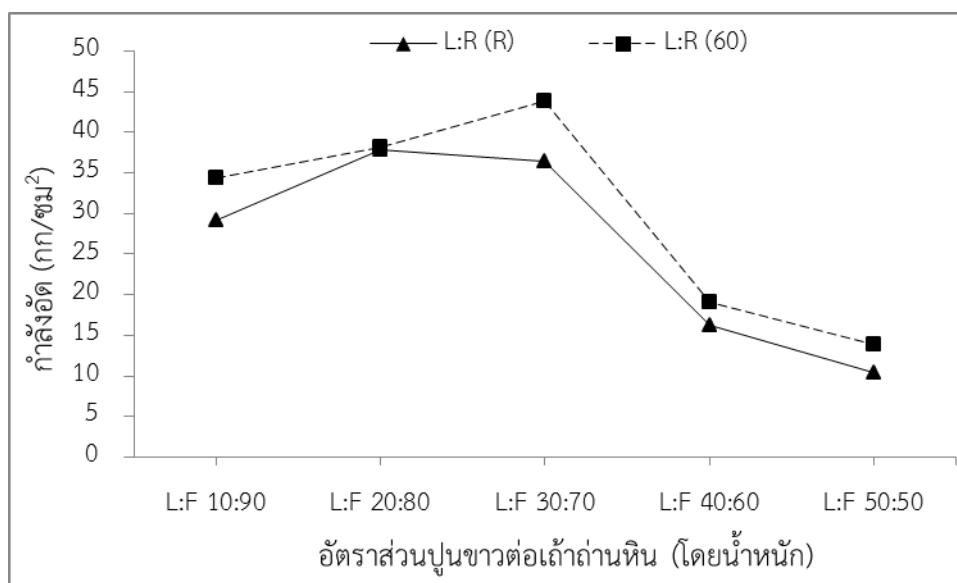


(ข) กลุ่มที่ละลายปฐขาวด้วยน้ําที่อุณหภูมิ 60° ซ

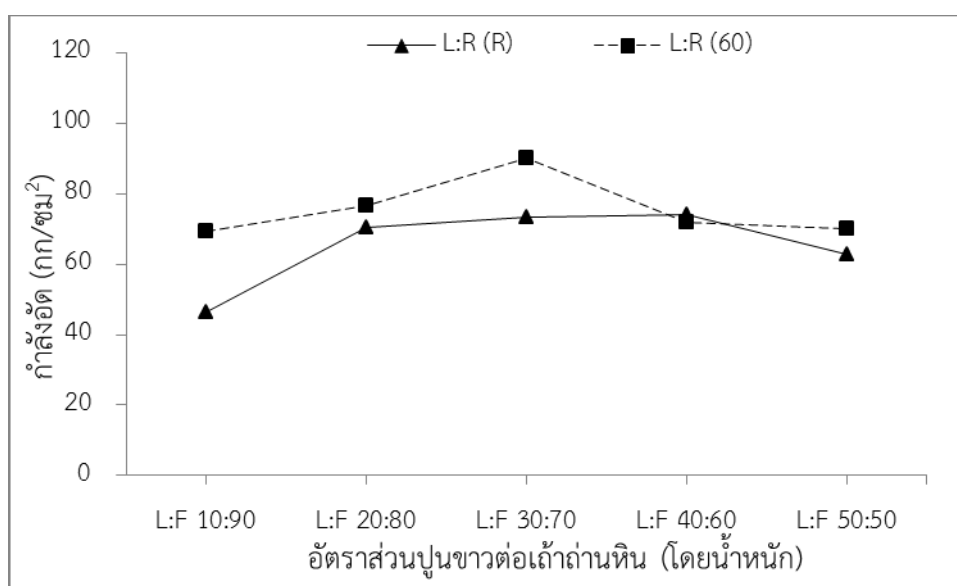
รูปที่ 4.12 ผลของปริมาณปฐขาวต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์จากปฐขาวและถ้ำถ่านหิน

#### 4.6.3 ผลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์

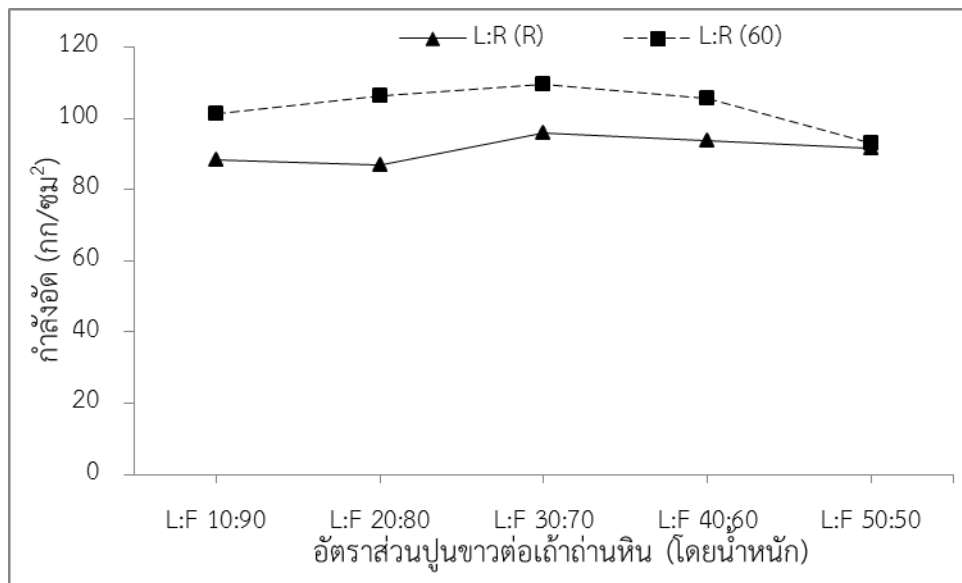
ผลของอุณหภูมิของน้ําที่ใช้ละลายปฐขาวต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปฐขาวและถ้ำถ่านหินเป็นวัสดุประสาน ที่อายุ 14 28 และ 60 วันแสดงดังรูปที่ 6(ก) 6(ข) และ 6(ค) ตามลำดับ พบว่า กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้น้ําที่อุณหภูมิ 60° ซ มีกำลังอัดที่สูงกว่ากลุ่มที่ใช้น้ําที่อุณหภูมิต่ำกว่า เช่น กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้น้ําที่อุณหภูมิต่ำกว่าละลายปฐขาว และผสมปฐขาวร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 46.5 70.5 73.3 74.1 และ 62.7 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันมอร์ต้าร์กลุ่มเดียวกันนี้เมื่อใช้อุณหภูมิน้ํา 60° ซ ในการละลายปฐขาวมีกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 69.5 76.7 90.1 71.8 และ 70.0 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ การที่อุณหภูมิน้ําที่ใช้ผสมมอร์ต้าร์ที่สูงกว่ามีผลให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์สูงกว่ากลุ่มที่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า อาจเกิดจากน้ําที่อุณหภูมิ 60° ซ สามารถละลายปฐขาวให้เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ได้ดีกว่าจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ได้สมบูรณ์มากกว่ากลุ่มที่ใช้น้ําที่อุณหภูมิต่ำกว่า (Pei-ming Wang and Xian-ping Liu, 2011)



(ก) อายุ 14 วัน



(ข) อายุ 28 วัน



(ค) อายุ 60 วัน

รูปที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ละลายปุ๋ยขาวต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ (ก) อายุ 14 วัน (ข)อายุ 28 วัน (ค) อายุ 60 วัน

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

5.1.1 ปริมาณปูนขาวที่มากขึ้น ส่งผลให้ความต้องการน้ำที่ทำให้เพสต์มีความชื้นเหลวปกติ มีแนวโน้มมากขึ้น โดยมีทิศทางเดียวกันทั้งกลุ่มที่ใช้น้ำอุณหภูมิห้องและกลุ่มที่ใช้น้ำอุณหภูมิ 60°ซ ละลายปูนขาว

5.1.2 เมื่อผสมปูนขาวในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ทำให้การก่อตัวต้นและก่อตัวปลายของเพสต์มีแนวโน้มช้าลง และอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ละลายปูนขาวที่สูงขึ้น ทำให้การก่อตัวต้นได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิห้อง

5.1.3 กำลังอัดของมอร์ตาร์ทุกส่วนผสมสูงขึ้นตามระยะเวลาของการบ่ม โดยเห็นได้ว่าในช่วงอายุบ่มที่ 14 ถึง 60 วัน มีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นอย่างชัดเจน

5.1.4 กำลังอัดมอร์ตาร์ช่วงต้น (อายุบ่มน้อยกว่า 14 วัน) มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้ปูนขาวสูงถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้น กำลังอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง และลดลงอย่างชัดเจนเมื่อใช้ปูนขาวเพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เมื่ออายุของมอร์ตาร์มากขึ้น ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานเริ่มชัดเจนมากขึ้น โดยกลุ่มที่ใช้ปูนขาวปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 มีกำลังอัดสูงขึ้นจาก 14 วัน อย่างชัดเจน และการใช้ปูนขาวในช่วงร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มให้กำลังอัดที่อายุ 28 และ 60 วัน สูงกว่ากลุ่มอื่น

5.1.5 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิ 60° ซ ละลายปูนขาวมีกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิห้อง

5.1.6 วัสดุประสานจากปูนขาวและเถ้าถ่านหินที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ ให้กำลังอัดค่อนข้างต่ำ จึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นวัสดุประสานในคอนกรีตสำหรับงานโครงสร้าง แต่สามารถพัฒนาเพื่อใช้ในงานที่ไม่ต้องการกำลังรับแรงสูง เช่น งานคอนกรีตบดอัด อิฐบดอัด และงานก่อฉาบ เป็นต้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปูนขาวผสมกับซิลิกา และอลูมินาที่ได้จากเถ้านหินเป็นวัสดุประสาน ให้ค่ากำลังอัดในช่วงต้นของมอร์ตาร์ที่ต่ำและระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ที่นาน เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน ดังนั้นควรมีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้สารผสมเพิ่ม เช่นการนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือสารเคมีอื่นๆ ใช้เป็นสารเร่งในการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปูนขาวผสมกับซิลิกา และอลูมินาที่ได้จากเถ้านหินเป็นวัสดุประสาน

5.2.2 ควรทำการเปรียบเทียบราคาระหว่างมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปูนขาวผสมกับซิลิกา และอลูมินาที่ได้จากเถ้านหินเป็นวัสดุประสาน เพื่อเป็นแนวทางเลือกในการนำแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปูนขาวผสมกับซิลิกา และอลูมินาที่ได้จากเถ้านหินเป็นวัสดุประสาน มาใช้งาน

5.2.3 ปูนขาวที่จะนำมาใช้ควรนำไปบดก่อน เพื่อจะได้มีพื้นที่ผิวสัมผัสเยอะขึ้น ทำปฏิกิริยาคีขึ้นเกิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น ซึ่งอาจจะส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้นได้

5.2.4 ในการนำไปใช้งานจริง ควรคำนึงถึงผลของอุณหภูมิของน้ำที่ผสมกับปูนขาวด้วย ซึ่งถ้าหากใช้น้ำที่อุณหภูมิสูงขึ้นก็จะมีต้นทุนในส่วนของพลังงานมาเกี่ยวข้อง ดังนั้นต้นทุนก็สูงขึ้นด้วย ถึงแม้กำลังอัดจะมากขึ้นก็ตาม

## เอกสารอ้างอิง

- กาญจนา ต่วนเทศ. (2542). การเปรียบเทียบการทำเสถียรตะกอนที่มีนิกเกิดด้วยปูนขาวและการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนขาวผสมเถ้าลอยลิกไนต์. *วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)*, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชรินทร์ นมรักษ์. (2544). ผลกระทบของปริมาณวัสดุประสานและแคลเซียมคลอไรด์ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์. *วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมโยธา)*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ณัฐกร แนบทอง และ วิเชียร ชาลี. (2555). การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบดในงานคอนกรีต. *Burapha Sci. J.* 17 (2), 38-49
- ชนพล เหล่าสมาธิกุล. (2551). สมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานเป็นวัสดุประสาน. *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 4*, อุบลราชธานี, MAT88-MAT95
- บัญชา เอกกัณหา. (2539). การเปรียบเทียบเสถียรภาพของคอนกรีตแอสฟัลท์ผสมปูนขาว กับคอนกรีตแอสฟัลท์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. *วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต (วิศวกรรมโครงสร้าง)*, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต. ครั้งที่ 3, สมาคมคอนกรีตไทย
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2547). เถ้าลอยในงานคอนกรีต, ครั้งที่ 1, สมาคมคอนกรีตไทย
- ปิตินันต์ กร้ามาตร สุภิชาติ มาตย์ภูธร ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิมล เกาพิศดาร. (2539). การศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหิน. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา* 7(2), 65-75.
- พิศมัย เลิศวัฒน์พะงษ์ชัย และอรุณ คงแก้ว. (2546). กรรมวิธีการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตในเชิงพาณิชย์. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ* 51, หน้า 16.
- วิเชียร ชาลี และ กิรติกร เจริญพร้อม. (2555). การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตของจีไอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน. *วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี* 35 (2), 157-170



- วิรุจ พัฒนาศิริรัตน์. (2544). การกักร่อนเนื่องจากน้ำเสียนุ้มนตอ่ก่าล้งอัดของมอ่ร่ต่าร์ที่ผสมเก้าถ่านหินแม่เมาะ. *วิทยานิพนธ์มหาบัณทิต วิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมโยธา)*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วันชัย บุรพา. (2543). การนำเก้าถ่านหินหยาบมาใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ปอ่รต์แลนค้ปอชโซลาณ. *วิทยานิพนธ์มหาบัณทิต วิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมเคมี)*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุขกมล วงศ์สวรรค์. (2545). การวิเคราะห์ห้ปูนขาวจากเปลือกหอยที่แหล่งโบราณคดีวังไฝ่ อำเภอบ้านหมี่ จังหวัดลพบุรี. *วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาศิลปศาสตรมหาบัณทิต โบราณคดีสมัยประวัติศาสตร์*, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2520). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนไลม่ วัสดุจำพวกปูนไลม่เพื่อการเกษตร มอก. 223-2520, หน้า 1-6.
- ASTM C311. (2008). Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.02.*
- ASTM C618. (1997). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, fly ash, natural pozzolan, pozzolans. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*
- ASTM C188. (1997). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*
- ASTM C430. (2015). Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- $\mu\text{m}$  (No. 325) Sieve. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*
- ASTM C187. (2008). Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.02.*
- ASTM C305-12. (2012). Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.02.*
- ASTM C305-13. (2013). Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*
- ASTM C230-14. (2014). Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*

- ASTM C109. (2013). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01*.
- Chalee W., Ausapanit P., Jaturapitakkul C. (2010). Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis. *Materials and Design* 31, 1242-1249.
- Chalee W., Sasakul T., Suwanmaneechot P., and Jaturapitakkul C. (2013). Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment. *Cement and concrete composites*, 37, 47–53.
- Cheewaket C., Jaturapitakkul C. and Chalee W. (2012). Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site. *Construction and Building Materials*, 37, 693-698.
- Chindaprasirt P., Jaturapitakkul C. and Sinsiri T. (2005). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 27, 425-428.
- Jaturapitakkul C., Kiattikomol K., Tangchirapat W. and Saeting T. (2007). Evaluation of the sulfate resistance of concrete containing palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 21, 1399–1405.
- Neville A.M., 1996, *Properties of Concrete*, 4<sup>th</sup> ed., Longman, Malaysia, pp. 563-575.
- Pei-ming Wang, and Xian-ping Liu. (2011). Effect of temperature on the hydration process and strength development in blends of Portland cement and activated coal gangue or fly ash. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 21, 162–170.
- Stowel, F. P., 1963, *Limestone as a raw material in industry*. London: Oxford University Press, pp. 30-52.
- Sata V., Tangpagasit J., Jaturapitakkul C., Chindaprasirt P. (2012). Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix. *Cement and Concrete Composites* 34, 94 -100.
- Tangpagasit J., Cheerarot R., Jaturapitakkul C., Kiattikomol K. (2005). Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar. *Cement and Concrete Research* 35, 1145–1151.

## ภาคผนวก ก

### ผลผลิต (Output)

#### บทความประกอบการประชุมสัมมนาทางวิชาการระดับชาติ

- 1) ณีรัฐวุฒิ ธารเนตร ธรรมชาติ มูลสาร และ วิเชียร ชาลี. (2558). วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์. การประชุมวิชาการ โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, ชลบุรี, 1-6.



## วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์

### Cementitious materials from fly ash and calcium hydroxide solution

ณัฐวุฒิ ธารเนตร<sup>1</sup> ธรรมชาติ มูลสาร<sup>2</sup> วิเชียร ชาลี<sup>3\*</sup>

<sup>1, 2, 3.</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ปูนขาวละลายน้ำ) และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน โดยใช้ น้ำที่อุณหภูมิห้องและน้ำที่อุณหภูมิ 60° ซ ในการละลายปูนขาว ส่วนผสมใช้ปูนขาวแทนที่เถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ทดสอบความชื้นเหลวปกติ การก่อตัวต้น และการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ ตลอดจนทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน ผลการศึกษา พบว่าปริมาณปูนขาวที่มากขึ้นส่งผลให้ความต้องการน้ำที่ทำให้เพสต์มีความชื้นเหลวปกติ และระยะเวลาก่อตัวมีแนวโน้มมากขึ้น นอกจากนั้น พบว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์ทุกส่วนผสมสูงขึ้นตามระยะเวลาของการบ่ม การพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นอย่างชัดเจนในช่วง 14 วัน ถึง 60 วัน การใช้ปูนขาวที่มากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง และเห็นผลชัดเจนในช่วงอายุต้น ส่วนที่อายุมากขึ้นพบว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนขาวในช่วงร้อยละ 30 ถึง 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีแนวโน้มสูงขึ้น

คำสำคัญ: ปูนขาว, เถ้าถ่านหิน, แคลเซียมไฮดรอกไซด์, เพสต์, มอร์ตาร์

#### Abstract

This research aimed to utilize calcium hydroxide (lime solution) and fly ash as a cementitious material. The lime solution was prepared by using water at room temperature and 60 °C as a solvent. For the mix proportion, lime was used as a partial replacement of fly ash at 10, 20, 30, 40 and 50% by weight of binder. The normal consistency, initial setting time and mortar flow were tested. The compressive strength of mortar was also tested at 3, 7, 14, 28 and 60 days of water curing. The results showed that the water required for normal consistency and setting times of paste increased with the increase of lime in the paste. The compressive strength of

mortar for all mixes found to develop with curing time, especially at the age of 14 to 60 days. In addition, the compressive strength of mortar decreases as the amount of lime replacement increases, especially at an early age. However, for longer period, the use of lime replacement level of 30% to 40% by weight of binder resulted in the increase of compressive strength of mortar.

Keywords: lime, fly ash, calcium hydroxide, paste, mortar.

#### 1. คำนำ

เทคโนโลยีทางด้านวัสดุคอนกรีตที่ผ่านมามีการคิดค้นวัสดุทดแทนเพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้น้อยลง โดยการใช้วัสดุของเหลือใช้หรือกากจากโรงงานอุตสาหกรรมมาแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งได้ผลดีด้านการเพิ่มสมบัติบางอย่างของคอนกรีตให้ดีขึ้น และลดมลภาวะจากการทิ้งกากเหลือใช้ดังกล่าวด้วย เถ้าถ่านหิน (fly ash) เป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้รับความนิยมในการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมา [1-3] พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในปริมาณที่เหมาะสมให้ผลที่ดีทั้งสมบัติเชิงกล และสมบัติด้านความคงทน อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าถ่านหินในคอนกรีตดังกล่าวสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้บางส่วนเท่านั้น เนื่องจากเถ้าถ่านหินไม่มีสมบัติเชื่อมประสานได้ด้วยตัวเอง และถ้าใช้ในปริมาณสูงจะมีผลต่อสมบัติเชิงกลในระยะแรก ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินยังคงต้องอาศัยปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเป็นส่วนใหญ่ เพื่อให้ได้สารประกอบที่ให้ความแข็งแรง และได้ต่างเพื่อไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานต่อเนื่องกับเถ้าถ่านหินต่อไป

ปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่นิยมใช้ในคอนกรีตในรูปของการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่ม

ความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับสมบัติของคอนกรีตเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น มาตรฐาน ASTM C 618 [4] ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกาหรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก” วัสดุปอซโซลานเมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีสมบัติเป็นวัสดุประสาน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวกับปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ [5] แม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้ากว่า เพราะต้องอาศัยสารตั้งต้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งถ้ามีการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากแหล่งอื่นทำปฏิกิริยากับซิลิกาจากวัสดุปอซโซลานโดยไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ ดังนั้นการวิจัยนี้ จึงได้ศึกษาการทำวัสดุประสานจากวัสดุปอซโซลานซึ่งใช้เถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเตรียมได้จากปูนขาว โดยมุ่งประเด็นไปที่สมบัติเบื้องต้นที่ศึกษาในซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ เพื่อให้ได้ฐานข้อมูลในการพัฒนาการใช้วัสดุประสานนี้ในงานคอนกรีตต่อไป ตลอดจนใช้เป็นข้อมูลทางเลือกในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ดี โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม มาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ให้มากขึ้น

## 2. วิธีการศึกษา

### 2.1 วัสดุ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการทำวัสดุประสานชนิดใหม่จากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือปูนขาว วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยปูนขาวมีลักษณะเป็นผงสีขาว มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.73 และมีร้อยละค่าบนตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับ 42 เถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 มีอนุภาคที่ค่าบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 [4] ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 30.4 ไมครอน สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีผลรวมของสารประกอบหลัก  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เท่ากับร้อยละ 70.91 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.11 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [4] โดยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแสดงดังตารางที่ 1

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.72 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.01

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เถ้าถ่านหิน
Silicon Dioxide, $\text{SiO}_2$	34.10
Aluminum Oxide, $\text{Al}_2\text{O}_3$	19.90
Iron Oxide, $\text{Fe}_2\text{O}_3$	16.91
Calcium Oxide, CaO	18.75
Magnesium Oxide, MgO	-
Sodium Oxide, $\text{Na}_2\text{O}$	0.69
Potassium Oxide, $\text{K}_2\text{O}$	2.38
Sulfur Trioxide, $\text{SO}_3$	2.21
Loss On Ignition, LOI	0.11

### 2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

ทำการเตรียมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปูนขาว เพื่อผสมกับเถ้าถ่านหินโดยใช้ปูนขาวแทนที่เถ้าถ่านหิน ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก และแบ่งตัวอย่างทดสอบเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ละลายปูนขาวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง และละลายปูนขาวด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C ก่อนนำมาผสมกับเถ้าถ่านหิน

#### 2.2.1 การทดสอบในเพสต์

ก) ทดสอบความชื้นเหลือปกติ โดยใช้เครื่องมือไวแคต เป็นวิธีการทดสอบหาปริมาณน้ำที่พอเหมาะสำหรับเพสต์ โดยพิจารณาจากการจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. เป็นระยะ 10 มม. ในเวลา 30 วินาที ตาม ASTM C 187 [6] ซึ่งวิธีการผสมเพสต์เป็นไปตาม ASTM C 305 [7]

ข) ทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวตามมาตรฐาน ASTM C 191 [8] โดยใช้ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติ ซึ่งการก่อตัวระยะต้นคือระยะเวลาที่การจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. เป็นระยะ 25 มม. ในเวลา 30 วินาที และการก่อตัวระยะปลายคือระยะเวลาที่เพสต์แข็งตัวแล้วจนทำให้เข็มมาตรฐานไม่สามารถจมลงด้วยน้ำหนักของตัวเองได้ (รูปที่ 1(ก)) โดยส่วนผสมของเพสต์ที่ใช้ในการศึกษารุ่นนี้แสดงดังตารางที่ 2

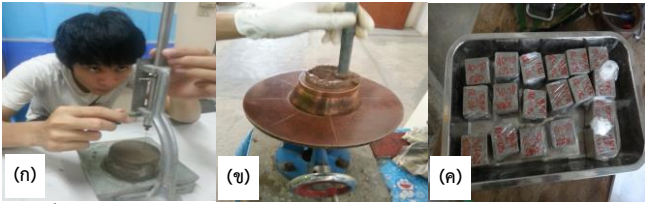
ตารางที่ 2 ส่วนผสมของเพสต์

ส่วนผสม	ปูนขาว : เถ้าถ่านหิน	เถ้าถ่าน หิน (กรัม)	ปูนขาว (กรัม)	น้ำ (กรัม)
L:F 10:90(R)	10:90	900	100	ปริมาณน้ำอุณหภูมิห้อง ที่ละลายปูนขาวที่ทำให้ เพสต์มีความชื้นเหลือ ปกติ
L:F 20:80(R)	20:80	800	200	
L:F 30:70(R)	30:70	700	300	
L:F 40:60(R)	40:60	600	400	
L:F 50:50(R)	50:50	500	500	
L:F 10:90(60)	10:90	900	100	ปริมาณน้ำอุณหภูมิ 60 ° ซ. ที่ละลายปูนขาว ที่ทำ ให้เพสต์มีความชื้นเหลือ ปกติ
L:F 20:80(60)	20:80	800	200	
L:F 30:70(60)	30:70	700	300	
L:F 40:60(60)	40:60	600	400	
L:F 50:50(60)	50:50	500	500	

#### 2.2.1 การทดสอบในมอร์ตาร์

ก) ทดสอบความสามารถในการไหลตัวของมอร์ตาร์ โดยใช้ปูนขาวแทนที่เถ้าถ่านหิน ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนผสมวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก หาปริมาณน้ำที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่ระหว่างร้อยละ 105 ถึง 115 ตามมาตรฐาน ASTM C 230 [9] (รูปที่ 1(ข))

ข) ทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ หล่อมอร์ตาร์ขนาด 50x50x50 มม.<sup>3</sup> ตาม ASTM C 109 [10] โดยใช้ปริมาณน้ำและส่วนผสมในข้อ (ก) ซึ่งวิธีการผสมมอร์ตาร์เป็นไปตาม ASTM C 305 [7] แกะแบบที่อายุ 24 ชม. และปมตัวอย่างทดสอบในอากาศจนถึงอายุที่ทำการทดสอบ (รูปที่ 1(ค)) โดยทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28, และ 60 วัน โดยแต่ละอายุทดสอบ ส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ ก) ทดสอบหาระยะเวลาการก่อดัว ข) ทดสอบความสามารถในการไหลตัว และ ค) มอร์ตาร์ดสำหรับทดสอบกำลังอัด

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ด

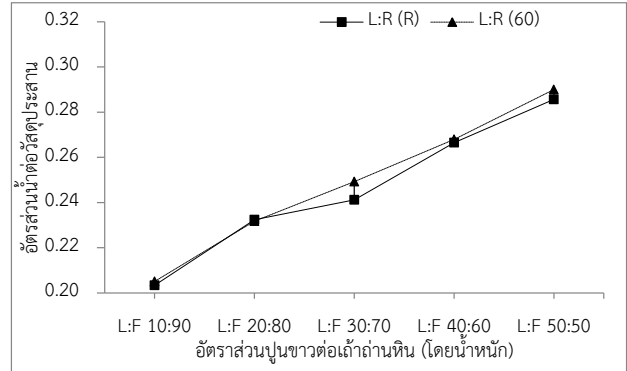
ส่วนผสม	เถ้าถ่านหิน(กรัม)	ปูนขาว(กรัม)	ทราย(กรัม)	น้ำ (กรัม)
L:F 10:90(R)	900	100	2750	ปริมาณน้ำ
L:F 20:80(R)	800	200	2750	อุณหภูมิห้องที่ละลาย
L:F 30:70(R)	700	300	2750	ปูนขาวที่ทำให้การไหล
L:F 40:60(R)	600	400	2750	แผ่ระหว่างร้อยละ
L:F 50:50(R)	500	500	2750	105 ถึง 115
L:F 10:90(60)	900	100	2750	ปริมาณน้ำอุณหภูมิ
L:F 20:80(60)	800	200	2750	60 °ซ. ที่ละลายปูน
L:F 30:70(60)	700	300	2750	ขาวที่ทำให้การไหลแผ่
L:F 40:60(60)	600	400	2750	ระหว่างร้อยละ 105
L:F 50:50(60)	500	500	2750	ถึง 115

### 3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

#### 3.1 ความชันเหลวปกติของเพสต์

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณปูนขาวต่อปริมาณน้ำที่ทำให้ความชันเหลวปกติ ในกลุ่มที่ใช้ น้ำอุณหภูมิห้องและกลุ่มที่ใช้ น้ำอุณหภูมิ 60 °ซ ละลายปูนขาวดังรูปที่ 2 พบว่า ปริมาณปูนขาวที่มากขึ้น ส่งผลให้ความต้องการน้ำที่ทำให้เพสต์มีความชันเหลวปกติ มีแนวโน้มมากขึ้น โดยมีทิศทางเดียวกันทั้งกลุ่มที่ใช้ น้ำอุณหภูมิห้องและกลุ่มที่ใช้ น้ำอุณหภูมิ 60 °ซ ละลายปูนขาว เช่น เพสต์ที่มีปูนขาวแทนที่เถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของกลุ่มที่ใช้ น้ำที่อุณหภูมิห้องละลายปูนขาว ที่ให้ค่าความชันเหลวปกติเท่ากับ 0.20, 0.23, 0.24, 0.27 และ 0.29 ตามลำดับ ซึ่งน่าจะมีผลจากปริมาณปูนขาวที่มากขึ้น ทำให้ปริมาณเถ้าถ่านหินลดลง ซึ่งสมบัติของเถ้าถ่านหินแม้จะกลมตัน [1, 2] ไม่ดูตัวในขณะที่ยังมีความพรุนสูงและอาจมีการดูดน้ำมากขึ้น ถ้าใช้ปูนขาวในปริมาณที่สูงขึ้นจึงต้องใช้ น้ำในปริมาณที่มากขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ละลายปูนขาวต่อความต้องการน้ำของเพสต์ดังรูปที่ 2 พบว่า ความต้องการน้ำของทั้งสองกลุ่มใกล้เคียงกันมาก และอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ละลายปูนขาว ไม่มีผลต่อความต้องการน้ำของเพสต์ ซึ่งอาจเกิดจากความต้องการน้ำของเพสต์ขึ้นกับสมบัติทางกายภาพของเถ้าถ่านหินและปูนขาว เช่น ความพรุน การดูดซึมน้ำ ขนาดของอนุภาค เป็นต้น ดังนั้นการใช้ อุณหภูมิที่ต่างกันของน้ำที่ใช้ละลายปูนขาว จึงไม่มีผลต่อความต้องการน้ำที่ทำให้ความชันเหลวปกติ



รูปที่ 2 ผลของปริมาณปูนขาวและอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการละลายปูนขาวต่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ทำให้ความชันเหลวปกติ

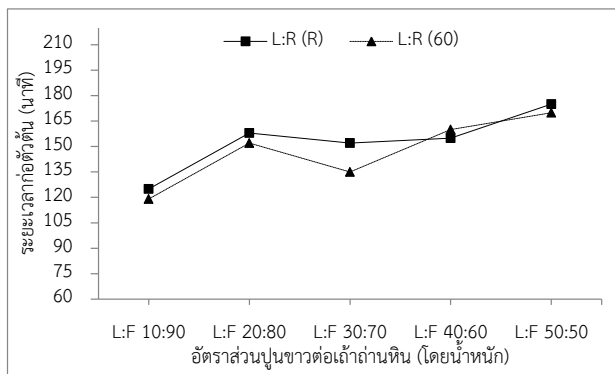
#### 3.2 ระยะเวลาการก่อดัวของเพสต์

เมื่อพิจารณาผลของปูนขาวต่อระยะเวลาการก่อดัวต้นและก่อดัวปลายของเพสต์ ดังรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) ตามลำดับ พบว่าเมื่อผสมปูนขาวในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ระยะเวลาการก่อดัวต้นของเพสต์มีแนวโน้มมากขึ้น (การก่อดัวช้าลง) เช่น เพสต์ผสมกับน้ำที่อุณหภูมิห้องที่ผสมปูนขาวในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40, และ 50 โดยน้ำหนัก มีระยะเวลาการก่อดัวต้นเท่ากับ 125, 158, 152, 155 และ 175 นาที ตามลำดับ และมีระยะเวลาการก่อดัวปลายเท่ากับ 245, 330, 280, 285 และ 365 นาที ตามลำดับ สังเกตว่าตัวอย่าง L:F 10:90 (R) มีการก่อดัวเร็วที่สุด โดยมีระยะเวลาการก่อดัวต้นเท่ากับ 125 นาที และก่อดัวปลายเท่ากับ 245 นาที และตัวอย่าง L:F 50:50 (R) จะมีการก่อดัวช้าที่สุด โดยมีระยะเวลาการก่อดัวต้นเท่ากับ 175 นาที และระยะเวลาการก่อดัวปลายเท่ากับ 365 นาที การที่ระยะเวลาการก่อดัวต้นและก่อดัวปลายของเพสต์ที่ใช้ปูนขาวมากขึ้น มีแนวโน้มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่า การเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปูนขาวกับซิลิกา และอลูมินาจากเถ้าถ่านหินเกิดขึ้นช้า เมื่อใช้ปูนขาวในปริมาณที่สูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากสมบัติของปูนขาวที่ละลายน้ำและเกิดเป็นสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหินไม่สมบูรณ์ เหมือนกับปฏิกิริยาที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับเถ้าถ่านหิน อย่างไรก็ตามการศึกษานี้พบว่าการใช้ปูนขาวผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 30 ถึง 40 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ระยะเวลาการก่อดัวต้นและก่อดัวปลายลดลง (การก่อดัวเร็วขึ้น) ซึ่งอาจเกิดจากส่วนผสมดังกล่าวมีความเหมาะสมที่เข้าทำปฏิกิริยา จึงส่งผลให้ระยะเวลาการก่อดัวต้นและก่อดัวปลายลงได้ อย่างไรก็ตามระยะเวลาการก่อดัวของเพสต์จากปูนขาวและเถ้าถ่านหินที่ได้จากการศึกษานี้ สูงกว่าเพสต์ที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีระยะเวลาการก่อดัวประมาณ 45 ถึง 90 นาที [5] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจากวัสดุประสานชนิดนี้ช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำค่อนข้างชัดเจน

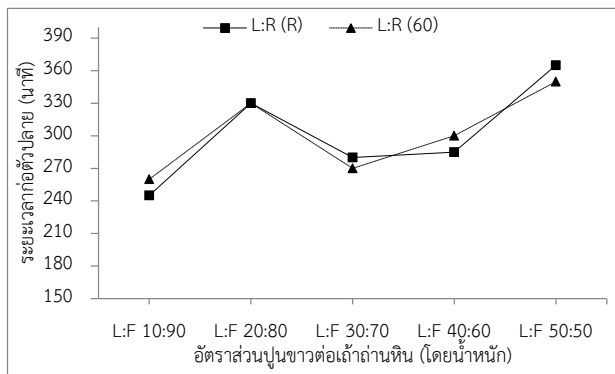
เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ละลายปูนขาวต่อระยะเวลาการก่อดัวต้นและก่อดัวปลายดังรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) ตามลำดับ พบว่า ที่อุณหภูมิ 60 °ซ ทำให้ก่อดัวต้นได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็นตัวเร่งให้ปูนขาวละลายน้ำได้ดีขึ้น เมื่อปูนขาวละลายน้ำเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ดี จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหิน ได้เป็น

แคลเซียมซิติเลตไฮดรอกไซด์ (CSH) และ แคลเซียมอลูมิเนตไฮดรอกไซด์ (CAH) ที่มีสมบัติในการเชื่อมประสานได้มากขึ้น [5, 11] จึงเป็นผลให้มีการก่อตัวเร็วขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ใช้ละลายปูนขาวต่อการก่อตัวของผลึกของเพสต์ ดังรูปที่ 3(ข) พบว่าระยะเวลาการก่อตัวของผลึกของปูนขาวที่อุณหภูมิห้องละลายปูนขาวกับกลุ่มที่ใช้ที่อุณหภูมิ 60 °ซ ละลายปูนขาวใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจเกิดจากระยะเวลาการก่อตัวของผลึก เป็นช่วงที่เพสต์มีการแข็งตัวแล้ว ซึ่งอุณหภูมิจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาก่อตัวในช่วงต้นเป็นหลัก จึงทำให้อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ละลายปูนขาว ไม่มีผลต่อการก่อตัวของผลึกอย่างชัดเจน



ก) ระยะเวลาการก่อตัวต้น



ข) ระยะเวลาการก่อตัวปลาย

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนขาวกับ (ก) ระยะเวลาการก่อตัวต้นของเพสต์ และ (ข) ระยะเวลาการก่อตัวปลายของเพสต์

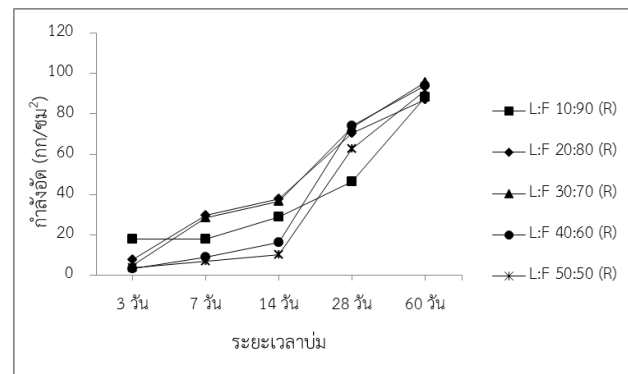
### 3.3 กำลังอัดของมอร์ตาร์

#### 3.3.1 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์

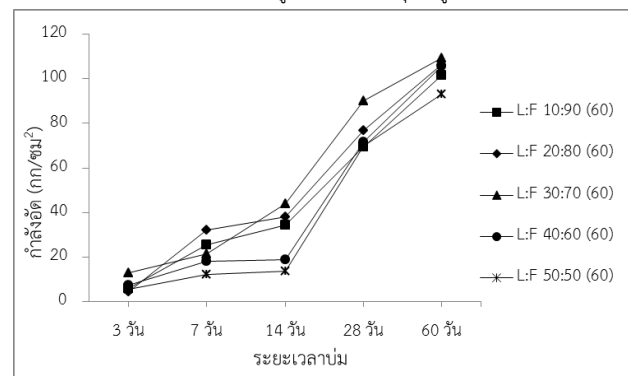
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์กับระยะเวลาบ่ม ในกลุ่มที่ละลายปูนขาวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้องและน้ำที่อุณหภูมิ 60° ซ ดังรูปที่ 4(ก) และ 4(ข) ตามลำดับ พบว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์ทุกส่วนผสมสูงขึ้นตามระยะเวลาของการบ่ม โดยเห็นได้ว่าในช่วงอายุบ่มที่ 14 ถึง 60 วัน มีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยสังเกตได้จากความชันของกราฟที่เพิ่มขึ้น อาจเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่ทำให้มีการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุมากขึ้น [5, 11] โดยการผสมเถ้าถ่านหินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการละลายปูนขาว จะเกิดปฏิกิริยา

ปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าถ่านหิน ได้เป็น CSH และ CAH ซึ่งมีผลให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงขึ้นในระยะยาว

การละลายปูนขาวด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 60 °ซ ก่อนผสมมอร์ตาร์ พบว่าให้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและระยะเวลาบ่ม คล้ายกับกลุ่มที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิห้อง (ดังรูปที่ 4(ข)) แต่มีการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์มากกว่ากลุ่มที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิห้อง โดยสังเกตได้จากความชันของกราฟในช่วงอายุบ่ม 14 ถึง 60 วัน ของมอร์ตาร์กลุ่มนี้ มีแนวโน้มมากกว่ากลุ่มที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิห้อง ทั้งนี้จะเป็นผลจากอุณหภูมิของน้ำที่สูง สามารถละลายปูนขาวให้เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ดี และส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่สมบูรณ์มากขึ้น



(ก) ละลายปูนขาวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง



(ข) ละลายปูนขาวด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 60° ซ

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์กับระยะเวลาบ่ม (ก) ผสมด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง (ข) ผสมด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 60° ซ

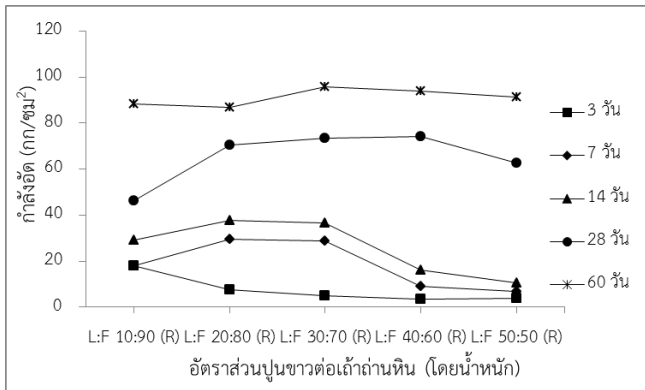
#### 3.3.2 ผลของปริมาณปูนขาวต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณปูนขาวต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์จากปูนขาวและเถ้าถ่านหิน ที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องและน้ำที่อุณหภูมิ 60° ซ ละลายปูนขาวดังรูปที่ 5(ก) และ 5(ข) ตามลำดับ โดยพิจารณากลุ่มที่ละลายปูนขาวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้องดังรูปที่ 5(ก) พบว่า อายุที่บ่มมอร์ตาร์ต่ำกว่า 14 วัน กำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้ปูนขาวสูงถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้น กำลังอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง และลดลงอย่างชัดเจนเมื่อใช้ปูนขาวเพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในช่วงต้น ยังไม่ส่งผลต่อการให้กำลังของมอร์ตาร์ ซึ่งเห็นผลชัดเจนมากขึ้นในกลุ่มที่ใช้น้ำสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เช่น มอร์ตาร์ที่ใช้น้ำสูงร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ให้

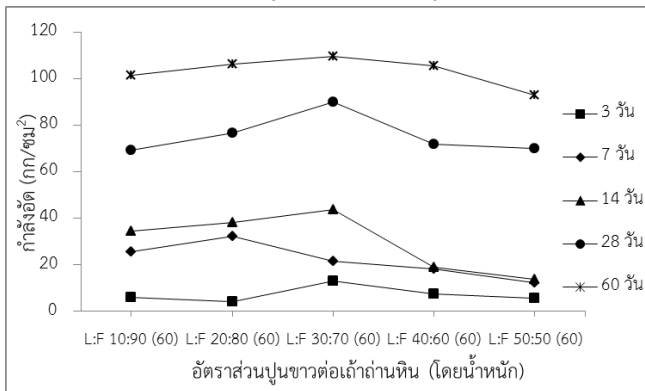
กำลังอัดที่อายุ 7 วัน เท่ากับ 18.1, 29.6, 28.7, 9.0 และ 6.9 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ เมื่ออายุมอร์ตาร์นานขึ้น พบว่า ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานเริ่มชัดเจนมากขึ้น โดยกลุ่มที่ใช้ปูนขาวปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 เริ่มมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นจากอายุ 14 วัน ค่อนข้างชัดเจน และการใช้ปูนขาวในช่วงร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงกว่ากลุ่มอื่น ซึ่งอาจเป็นส่วนที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาที่ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าสูง การที่มอร์ตาร์ของปูนขาวและเถ้าถ่านหินมีกำลังอัดสูงขึ้นได้ ที่อายุการบ่มนานขึ้น เมื่อใช้ปูนขาวในปริมาณมากขึ้น อาจเกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปูนขาว มีปริมาณที่มากพอที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาที่ได้จากเถ้าถ่านหิน ทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่เพิ่มกำลังให้กับมอร์ตาร์ได้ ซึ่งเห็นผลชัดเจนในช่วงอายุบ่มมากกว่า 28 วัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่อายุนานถึง 60 วัน พบว่ากลุ่มที่ใช้ปูนขาวในปริมาณต่ำ (ร้อยละ 10) ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับกลุ่มอื่นได้ ซึ่งถือเป็นส่วนผสมที่ดีเพราะใช้ปูนขาวในปริมาณต่ำ แต่ใช้เถ้าถ่านหินปริมาณสูงขึ้นก็สามารถให้กำลังอัดสูงได้ เนื่องจากปูนขาวมีราคาสูงกว่าเถ้าถ่านหิน ดังนั้นการใช้ปูนขาวในปริมาณต่ำได้จึงถือเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุประสานชนิดนี้ ให้เกิดความประหยัด และสามารถรับแรงได้ ส่วนกลุ่มที่ใช้ น้ำที่อุณหภูมิ 60° ซ ละลายปูนขาว ดังรูปที่ 5(ข) พบว่า มีแนวโน้มเหมือนกับกลุ่มที่ใช้ น้ำที่อุณหภูมิห้อง กล่าวคือ การใช้ปูนขาวประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน และ 60 วัน สูงที่สุด

3.3.3 ผลของอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ละลายปูนขาวต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

ผลของอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ละลายปูนขาวต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนขาวและเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน ที่อายุ 18 และ 60 วัน แสดงดังรูปที่ 6(ก) และ 6(ข) ตามลำดับ พบว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ น้ำที่อุณหภูมิ 60° ซ มีกำลังอัดที่สูงกว่ากลุ่มที่ใช้ น้ำที่อุณหภูมิห้อง เช่น กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ น้ำที่อุณหภูมิห้องละลายปูนขาว และผสมปูนขาว ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 46.5, 70.5, 73.3, 74.1 และ 62.7 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันมอร์ตาร์กลุ่มเดียวกันนี้เมื่อใช้อุณหภูมิของน้ำ 60° ซ ในการละลายปูนขาวมีกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 69.5, 76.7, 90.1, 71.8 และ 70.0 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ การที่อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ผสมมอร์ตาร์ที่สูงกว่ามีผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงกว่ากลุ่มที่ใช้ อุณหภูมิต่ำกว่า อาจเกิดจากน้ำที่อุณหภูมิ 60° ซ สามารถละลายปูนขาวให้เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ได้ดีกว่าจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ได้สมบูรณ์มากกว่ากลุ่มที่ใช้ น้ำที่อุณหภูมิห้อง [12]

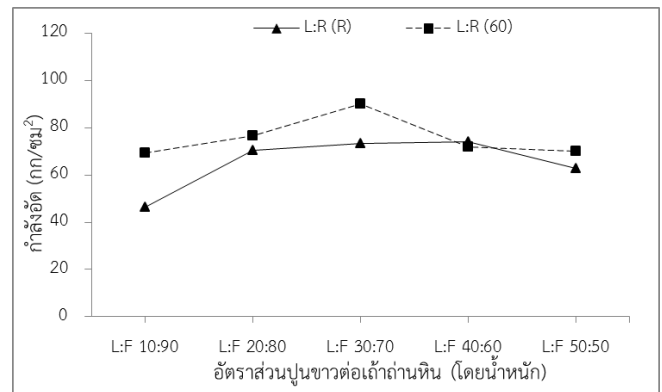


(ก) ละลายปูนขาวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง

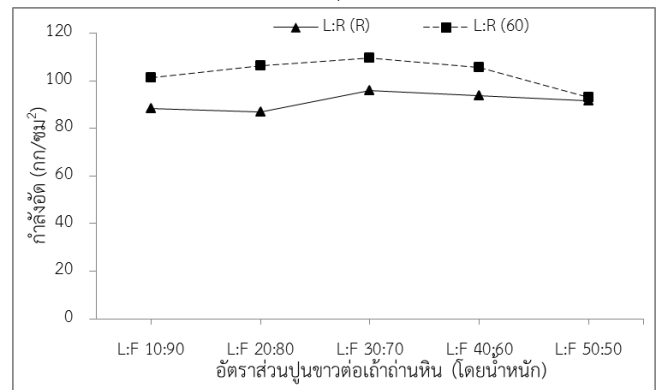


(ข) กลุ่มที่ละลายปูนขาวด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 60° ซ

รูปที่ 5 ผลของปริมาณปูนขาวต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์จากปูนขาวและเถ้าถ่านหิน



(ก) อายุ 28 วัน



(ข) อายุ 60 วัน

รูปที่ 6 ผลของอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ละลายปูนขาวต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ (ก) อายุ 28 วัน และ (ข) อายุ 60 วัน

4. สรุปผล

- 1) ปริมาณปูนขาวที่มากขึ้น ส่งผลให้ความต้องการน้ำที่ทำให้เพสต์มีความชื้นเหลวปกติ มีแนวโน้มมากขึ้น โดยมีทิศทางการเดียวกันทั้งกลุ่มที่ใช้ น้ำอุณหภูมิห้องและกลุ่มที่ใช้ น้ำอุณหภูมิ 60° ซ ละลายปูนขาว



- 2) เมื่อผสมปูนขาวในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ทำให้การก่อตัวต้นและก่อตัวปลายของเพสต์มีแนวโน้มช้าลง และอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ละลายปูนขาวที่สูงขึ้น ทำให้การก่อตัวต้นได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิห้อง
- 3) กำลังอัดของมอร์ตาร์ทุกส่วนผสมสูงขึ้นตามระยะเวลาของการบ่ม โดยเห็นได้ว่า ในช่วงอายุบ่มที่ 14 ถึง 60 วัน มีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นอย่างชัดเจน
- 4) กำลังอัดมอร์ตาร์ช่วงต้น (อายุบ่มน้อยกว่า 14 วัน) มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้ปูนขาวสูงถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้น กำลังอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง และลดลงอย่างชัดเจนเมื่อใช้ปูนขาวเพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เมื่ออายุของมอร์ตาร์มากขึ้น ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานเริ่มชัดเจนมากขึ้น โดยกลุ่มที่ใช้ปูนขาวปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 มีกำลังอัดสูงขึ้นจาก 14 วัน อย่างชัดเจน และการใช้ปูนขาวในช่วงร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มให้กำลังอัดที่อายุ 28 และ 60 วัน สูงกว่ากลุ่มอื่น
- 5) กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ น้ำที่อุณหภูมิ 60° ซ ละลายปูนขาวมีกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้ น้ำที่อุณหภูมิห้อง
- 6) วัสดุประสานจากปูนขาวและเถ้าถ่านหินที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ ให้กำลังอัดค่อนข้างต่ำ จึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นวัสดุประสานในคอนกรีตสำหรับงานโครงสร้าง แต่สามารถพัฒนาเพื่อใช้ในงานที่ไม่ต้องการกำลังรับแรงสูง เช่น งานคอนกรีตบดอัด อิฐบล็อก และงานก่อฉาบ เป็นต้น

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทูสนับสุนนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 99/2558

## เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Chalee, P. Ausapanit and C. Jaturapitakkul "Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis". *Mater Design*, 3, 2010, pp. 1242-1249.
- [2] J. Tangpagasit, R. Cheerarat, C. Jaturapitakkul and K. Kiattikomol "Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar". *Cement and Concrete Research*, 35, 2005, pp. 1145-1151.
- [3] P. Chindapasirt, C. Chotithorm, HT. Cao and V. Sirivatnanon "Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete". *Construction and Building Materials*, 21, 2007, pp. 356-361.
- [4] ASTM C618 - 12a. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.02 2012.
- [5] A.M. Neville. *Properties of Concrete*. 4<sup>th</sup> ed., England, Addison Wesley, 1996.
- [6] ASTM C187-98. Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement. *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.01 1998.
- [7] ASTM C305-14. Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.01 2014.
- [8] ASTM C191-13. Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.01 2013.
- [9] ASTM ASTM C230 / C230M-14. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.01 2014.
- [10] ASTM ASTM C109 / C109M - 13. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.01 2013.
- [11] C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, W. Tangchirapat and T. Saeting "Evaluation of the sulfate resistance of concrete containing palm oil fuel ash". *Construction and Building Materials*, 21, 2007, pp. 1399-1405.
- [12] Pei-ming Wang, and Xian-ping Liu "Effect of temperature on the hydration process and strength development in blends of Portland cement and activated coal gangue or fly ash". *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 21, 2011, pp. 162-170.

**ภาคผนวก ข**  
**รายงานการเงิน**

รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย (NRPM 13 หลัก) 2558A10802313 สัญญาเลขที่ 99/2558  
โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ  
พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ...วัสดุประสานชนิดใหม่จากเก้าอี้หนังและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัย (ศ. /รศ. /ผศ. /ดร. /อ.) ...ผศ.ดร.วิเชียร ชาลี...

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ (วัน/ เดือน/ ปี)...1 ตุลาคม 2557 ถึงวันที่ (วัน/ เดือน/ ปี) ...30 กันยายน 2558

ระยะเวลาดำเนินการ จำนวน ..1...ปี...- .เดือน

**รายรับ**

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50%) จำนวน ...234,500.....บาท เมื่อ ...พฤศจิกายน พ.ศ. 2557...

งวดที่ 2 (40%) จำนวน ...187,600.....บาท เมื่อ ...พฤษภาคม พ.ศ. 2558.....

งวดที่ 3 (10%) จำนวน ...-.....บาท เมื่อ ...-.....

รวม ...422,100.....บาท

**รายจ่าย**

หมวด	งบประมาณที่ตั้งไว้ (บาท)	งบประมาณที่ใช้ จริง (บาท)	จำนวนเงิน คงเหลือ/เกิน (บาท)
1. ค่าตอบแทน	0	0	0
2. ค่าจ้าง	90,000	90,000	0
3. ค่าวัสดุ	101,000	101,000	0
4. ค่าใช้สอย	231,100	231,100	0
5. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ค่าเงินทุนอุดหนุนการวิจัยของ มหาวิทยาลัยเป็นค่าสาธารณูปโภค 10%	46,900	46,900	0
<b>รวม</b>	<b>469,000</b>	<b>469,000</b>	<b>0</b>

(ผศ.ดร.วิเชียร ชาลี)

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

ภาคผนวก ก  
ประวัตินักวิจัย

## ประวัติผู้วิจัย

### หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ – นามสกุล (ภาษาไทย)	นายวิเชียร ชาลี
ชื่อ – นามสกุล (ภาษาอังกฤษ)	Mr. Wichian Chalee
ตำแหน่งปัจจุบัน	ผู้ช่วยศาสตราจารย์
หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131  
โทรศัพท์ 038-102-222 ต่อ 3356  
โทรสาร 038-102-222 ต่อ 3355  
E-mail wichian@buu.ac.th

### ประวัติการศึกษา

- ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2541
- ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2546
- ปริญญาเอก วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2550

### สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

วัสดุก่อสร้าง, คอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานและเถ้าชีวมวล, ความคงทนของคอนกรีต

## ผลงานวิชาการ

### บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิจัยระดับนานาชาติ

- 1) T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee, “Concrete durability presented by acceptable chloride level and chloride diffusion coefficient in concrete—10-year results in marine site”, *Materials and Structures* (2014) 47:1501–1511
- 2) P. Chindaprasirt and W. Chalee, “Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site”, *Construction and Building Materials* 63, 2014, pp. 303–310
- 3) W. Chalee1, T. Sasakul, P. Suwanmaneechot, and C. Jaturapitakkul, “Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment”, *Cement and concrete composites* 37, 2013, pp. 47–53
- 4) T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee, “Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site”, *Construction and Building Materials* 37, 2012, pp. 693–698
- 5) Rattapon Somna, Chai Jaturapitakkul, Pokpong Rattanachu, Wichian Chalee, “Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete”, *Materials and Design* 36, 2012, pp. 597–603
- 6) Rattapon Somna, Chai Jaturapitakkul, Wichian Chalee, Pokpong Rattanachu, “Effect of W/B ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate”, *ASCE's Journal of Materials in Civil Engineering*, 24, 2012, pp. 16-22
- 7) T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee, 2010, “Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment”, *Construction and Building Materials* 24 (2010) 1352–1357
- 8) W. Chalee, P. Ausapanit and C. Jaturapitakkul, 2010, “Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis”, *Materials and Design* (2010) 31 : pp. 1242-1249
- 9) C. Sanawong and W. Chalee, 2010, “Water permeability in fly ash based geopolymer concrete”, *J. of Civil engineering and architecture* 4 (2010) 15-19

- 10) W. Chalee and C. Jaturapitakkul\*, 2009, "Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment", *Materials and Structures* (2009) 42 : pp. 505-514
- 11) W. Chalee, C. Jaturapitakkul\*, and P. Chindaprasirt' 2009 "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater" *Marine Structures*, 22, 2009, pp.341-353
- 12) Prinya Chindaprasirt, Wichian Chalee, Chai Jaturapitakkul, and Ubolluk Rattanasak\*, 2009, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers ," *Waste Management*, Vol.29, No. 2, pp 539-543. (Impact factor = 1.338)
- 13) Chalee, W., Teekavanit, M., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A., and Jaturapitakkul, C.\*, 2007, "Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment," *Construction and Building Materials*, Vol.21, No.5, pp. 965-971 (Impact factor = 2.293)

#### บทความประกอบการประชุมสัมมนาทางวิชาการระดับนานาชาติ

- 14) W. Chalee, P. Suwanmaneechot and C. Jaturapitakkul (2011). CORROSION PERFORMANCE OF CONCRETE CONTAINING RICE HUSK-BARK ASH UNDER 5-YEAR EXPOSURE IN MARINE SITE. *Modern Methods and Advances in Structural Engineering and Construction ISEC-6*, Zurich, June 21-26, 21-28.
- 15) Koonthong, S., Chawkitchareon, P., and Chalee, W. (2010). Compressive strength and thermal conductivity of concrete masonry block containing plastic label waste. *The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference, TISD 2010*, Thailand, pp.801-804
- 16) Yimsiri, S. and Chalee, W. (2010). Damage of reinforced concrete building due to adjacent deep excavation. *3<sup>rd</sup> ASEAN Civil Engineering Conference, 3ACEC*, Manila, Philippine
- 17) Suwanmaneechot, P., Jaturapitakkul, C., and Chalee, W. (2009). Chloride penetration of concrete containing rice husk-bark ash in marine exposure site. *4th International Conference in Construction Materials: Performance, Innovstions and Structural Implications*, Nagoya, Japan, pp. 725-730, 725-730.
- 18) Chalee, W. and Jaturapitakkul, C. (2008). Long Term Performance of Fly Ash Concrete in Marine Environment. *The 8th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*, Bangkok, Thailand, 11th-14th November 2008, pp. 178-182

- 19) T. Klabprasit, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, P. Chindaprasirt and S. Songpiriyakij (2008). Influence of Si/A1 ratio on Compressive Strength of Rice Husk-Bark Ashes and Fly Ash-based Geopolymer Paste. The 3rd ACF international conference ACF/VCA, Rex Hotel, Ho Chi Minh City, Vietnam, November 11-13, 2008, pp 151-157

#### บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิจัยระดับชาติ

- 20) มณเฑียร ทิฆมาณิช, ประสิทธิ์ อุตส่าห์พานิช, วิเชียร ชาลี, เอนก ศิริพานิชกร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2549, “ผลกระทบของน้ำทะเลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน” วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 17, ฉบับที่ 2
- 21) วิเชียร ชาลี, มณเฑียร ทิฆมาณิช, ประสิทธิ์ อุตส่าห์พานิช และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2550, “ผลกระทบ1 ถ่านหินที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี” วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 30, ฉบับที่ 1, หน้า 153-166.
- 22) อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, วิเชียร ชาลี, และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2549, “การศึกษาการชะเถ้าถ่านหิน ลิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน”, วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 29, ฉบับที่ 4, หน้า 437-446.
- 23) ปิยพงษ์ สุวรรณมณี โชติ, ธวัชชัย ศาสกุล, วิเชียร ชาลี และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, “ผลกระทบของน้ำทะเล ต่อคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินจากระบบฟลูอิดไคซ์เบด”, วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ปีที่ 31, ฉบับที่ 2, หน้า 357-370.
- 24) วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2552, “การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้า ถ่านหิน”, Burapha Sci., J.14 (1) หน้า 47-55
- 25) ชรินทร์ เสนาวงษ์, เกียรติสุดา สมณา และ วิเชียร ชาลี, 2553, “กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน”, Burapha Sci., J.15 (1) หน้า 13-22
- 26) ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ วิเชียร ชาลี, 2554, “การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่าน หินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”,วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 21 (2) : 187-195
- 27) กิรติกร เจริญพร้อม และ วิเชียร ชาลี, 2554, “ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ใน สิ่งแวดล้อมทะเล”,วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 21 (3) : 257-266
- 28) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, “ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้า แกลบเปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”,วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี 34 (3) : 203-213



- 29) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, “ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล”, วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2554 หน้า 21-28
- 30) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, “การปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลโดยใช้เถ้าถ่านหิน”, *Burapha Sci. J.* 16 (2) : 51-62
- 31) ปิยพงษ์ สุวรรณฉวีโชติและ วิเชียร ชาลี, 2555, “การแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนเหล็กในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดและพูลเวอร์ไรซ์ ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล”, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 22 (3), 2555: 1-13
- 32) วิเชียร ชาลี และ กิรติกร เจริญพร้อม, 2555, “การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน”, วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 35(2), หน้า 157-170
- 33) ณัฐกร แนนทอง, วิเชียร ชาลี, 2555, “การใช้กากเคลือบเคลือบคาร์ไบด์ที่ไม่ผ่านการบดในงานคอนกรีต”, *Burapha Sci. J.* 17(2) : 38-49
- 34) วิเชียร ชาลี และ ชีรพงศ์ เชื้อพลบ, 2556, “การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก”, วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี -36(2), หน้า 197-213
- 35) วิเชียร ชาลี, 2556, “ระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 18(2), หน้า 132-143
- 36) กิรติกร เจริญพร้อม, วิเชียร ชาลี, 2556 “ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 10 ปี”, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 23 (1),: 107-119
- 37) กนกนตร ชื่นนกลุ่ม วริศรา โกระวิโยชิน และ วิเชียร ชาลี, 2557 “ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออัตราการไหลของน้ำและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูนจากเถ้าถ่านหิน” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 24(1)
- 38) ปุณยวีร์ นิลรัตน์ วัฒนา พุทธิธา และ วิเชียร ชาลี, 2558 “การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 20(1), หน้า 35-50
- 39) ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ชาลี, 2559 “การทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 26(1).

**บทความประกอบการประชุมสัมมนาทางวิชาการระดับชาติ**

- 40) PONHSAMPATEA LY กิรติกร เจริญพร้อม เทียง ชีวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี “ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, 8-10 กรกฎาคม 2558 พัทยา ชลบุรี หน้า 1-6.
- 41) REAKSMEY SOEURT PONHSAMPATEA LY และ วิเชียร ชาลี “กำลังอัดและการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลา 15 ปี”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, 8-10 กรกฎาคม 2558 พัทยา ชลบุรี หน้า 1-6.
- 42) ณัฐวุฒิ ธารเนตร ธรรมชาติ มูลสาร และ วิเชียร ชาลี “วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินและสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, 8-10 กรกฎาคม 2558 พัทยา ชลบุรี หน้า 1-6.
- 43) ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ และ วิเชียร ชาลี “ระยะเวลากัดกร่อนเริ่มต้นของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19, 14-16 พฤษภาคม 2557 อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น หน้า 831-836.
- 44) นำพล บุตรเชื้อไทย เทียง ชีวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี, 2556, “การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”การประชุมวิชาการ โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, 8-10 พฤษภาคม 2556 อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ หน้า MAT113-MAT118.
- 45) วิชย พรหมรักษ์, อภิชาติ ทุมสุด และ วิเชียร ชาลี, 2556, “การป้องกันการกัดกร่อนของคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลโดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์”การประชุมวิชาการ โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, 8-10 พฤษภาคม 2556 อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ หน้า MAT107-MAT112
- 46) กิรติกร เจริญพร้อม เทียง ชีวะเกตุ วิเชียร ชาลี, 2556, “ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล”การประชุมวิชาการ โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, 8-10 พฤษภาคม 2556 อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ หน้า MAT234-MAT238
- 47) กิรติกร เจริญพร้อม เทียง ชีวะเกตุ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ชาลี, 2554, “การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล”การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 7, 19-21 ตุลาคม 2554 อำเภอเมือง จังหวัดระยอง หน้า MAT94-MAT100.

- 48) วิเชียร ชาลี, ปิยพงษ์ สุวรรณมณี โชติ,ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ธวัชชัย ศาสกุล 2553, “ผลของเถ้านหิน 3 แหล่งต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล”,การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 6, 20-22 ตุลาคม 2553 อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี หน้า 40-48.
- 49) ชรินทร์ เสนาวงษ์ อธิธิพล วิไลลักษณ์และ วิเชียร ชาลี, 2552, “การทำคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากเถ้านกั้นเตาระบบฟลูอิดไดซ์เบด”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, 13-15 พฤษภาคม 2552, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หน้า 1587-1592
- 50) ชรินทร์ เสนาวงษ์ เกียรติสุดา สมณา ปริญญา จินดาประเสริฐ และ วิเชียร ชาลี, “คุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้านหิน”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5, 20-22 ตุลาคม 2552
- 51) ศิขณ คุณทอง เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ และ วิเชียร ชาลี, “ขนาดของเสี้ยนประเภทพลาสติกที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตมวลเบา”, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์ วิศวกรรม และการจัดการสิ่งแวดล้อมครั้งที่ 1, 22-23 กันยายน 2552, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 39-44
- 52) ศิขณ คุณทอง เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ และ วิเชียร ชาลี, “ปริมาณของเสี้ยนประเภทพลาสติกที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตมวลเบา”, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยครั้งที่ 35, 15-17 ตุลาคม 2552, เดอะไทด์รีสอร์ท ชลบุรี
- 53) P. Suwanmaneechot , C. Jaturapitakkul and W. Chalee , 2551, “Water permeability of fly ash concrete in marine environment”, การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอพอลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2, 5-6 กันยายน 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 49-55.
- 54) รัฐพล สมณา วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, “ผลกระทบของเถ้านหิน 3 แหล่ง ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต”, การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอพอลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2, 5-6 กันยายน 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 107-112.
- 55) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, “ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีเร่งกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต”, การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอพอลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 2, 5-6 กันยายน 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 66-72.
- 56) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2550, “สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 3, 24-26 ตุลาคม 2550, โรงแรมลองบีช การ์เด้น โฮเทล แอนด์ สปา, พัทยา ชลบุรี หน้า 103-109

- 57) รัชชัย ศาสกุล , ปิยพงษ์ สุวรรณมณี โชติ, วิเชียร ชาลี, ชัย จาตุรพิทักษ์กุลและ เอกชัย ภัทรวงษ์  
ไพบูรณ์, 2550, “กำลังอัดและการซึมผ่านคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
ประเภทที่ 5 ในสภาพแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, 2-4 พฤษภาคม 2550,  
โรงแรมอมรินทร์ลา구나 จ. พิษณุโลก หน้า 41-46
- 58) Wichian Chalee, Prasit Ausapanit and Chai Jaturapitakkul, “A model for predicting the required cover  
depth of fly ash concrete in marine environment, Annual Concrete Conference 2, Udon Thani, 2006.
- 59) Chalee, W., Teekavanit, M., and Jaturapitakkul, C., “Compressive Strength and Chloride Penetration  
Profile of Fly Ash Concrete under 4-Year Exposure in Sea Water”, International Conference on Pozzolan,  
Concrete and Geopolymer, May 24-25, 2006, Khon Kaen, Thailand, pp. 180-188.
- 60) Smith Songpiriyakij, Wichian Chalee, Chai Jaturapitakkul, “Model for Predicting Compressive Strength  
of Fly Ash Concrete from Fly Ash Fineness,” Proceeding of 8th National Convention on Civil  
Engineering, Khon Kean, 2003.
- 61) ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ, วิเชียร ชาลี, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2546, "ผลกระทบของความ  
ละเอียดแก่ลดยต่อกำลังอัดและโครงสร้างโพรงในเพสต์", การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 1,  
14-16 พฤษภาคม, กาญจนบุรี, หน้า 225-232.
- 62) วิเชียร ชาลี, มณฑิยา ภิรมวณิช, ประสิทธิ์ อุตส่าห์พานิช, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ  
ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2548, “ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและระยะหุ้มเหล็กต่อการกัดกร่อนใน  
คอนกรีตผสมเถ้าลอยในสภาวะแวดล้อมทะเล”, การประชุมวิชาการเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการ  
พัฒนาอย่างยั่งยืน, 25-26 มกราคม 2549, ขอนแก่น, หน้า 527-532.
- 63) อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, ชาญชัย พลตรี, และ วิเชียร ชาลี, 2548, “การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุซีโอ  
พอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน”, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม 2548, โรงแรมแอม  
บาสซาเดอร์ซิตี จอมเทียน พัทยา ชลบุรี

### บทความวิชาการ

- 1) วิเชียร ชาลี และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2552, “คอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล” โยธาสาร (วิศวกรรมสถาน  
แห่งประเทศไทย), ปีที่ 20, ฉบับที่ 6. หน้า 82-89.
- 2) วิเชียร ชาลี, 2552, “ความคงทนของคอนกรีตในสภาพแข็งตัว” พัฒนาเทคนิคศึกษา, มจพ, ปีที่ 21, ฉบับที่ 69.  
หน้า 11-17.

- 3) วิเชียร ชาติ, 2554, “อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล” โยธาสาร (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย), ปีที่ 23, ฉบับที่ 2, หน้า 1-6.