

ผลกระทบบของชนิดเ้าลอยต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต

**EFFECT OF FLY ASH TYPE ON PROPERTIES OF PASTE,  
MORTAR AND CONCRETE**

อรรณดิทธิ แสงระยับ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

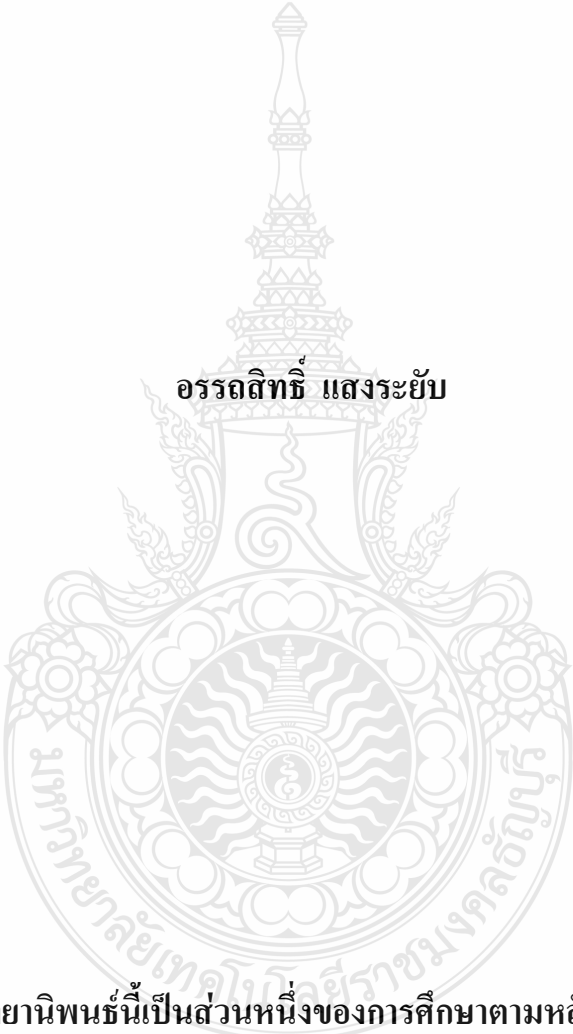
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผลกระทบบของชนิดถ้ำล่อยต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ท์ และคอนกรีต



อรรถสิทธิ์ แสงระยับ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต  
Effect of Fly Ash Type on Properties of Paste, Mortar and Concrete  
ชื่อ - นามสกุล นายอรรถสิทธิ์ แสงระยับ  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, ปร.ค.  
ปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  
อ.ต.พล ตั้งปกาศิต  
..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ค.)

.....  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์อุดมวิทย์ ไชยสกุลเกียรติ, คอ.ค.)

.....  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จินดารัตน์ มณีเจริญ, ปร.ค.)

.....  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, ปร.ค.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 17 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ต้า และคอนกรีต
ชื่อ - นามสกุล	นายอรรถสิทธิ์ แสงระยับ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติศักดิ์ กร้ามาตร, ปร.ค.
ปีการศึกษา	2560

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของชนิดเถ้าลอยที่มีต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้เถ้าลอยต่างชนิดกัน

ในการศึกษาผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ประกอบด้วย ปริมาณน้ำที่เหมาะสม การก่อตัว และการขยายตัวในเตาอบโตเคลฟของเพสต์ การหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ต้าร์ และค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยใช้เถ้าลอย 4 ชนิด (เถ้าลอยจากแม่เมาะ 3 ชนิด และจาก BLCP อีก 1 ชนิด) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของเพสต์ผสมเถ้าลอย BLCP มีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยเร็วกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน โดยเถ้าลอยที่มีปริมาณ free lime สูง ส่งผลให้การก่อตัวของเพสต์ที่เร็วขึ้น ส่วนการขยายตัวในเตาอบโตเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอยที่มีปริมาณ free lime สูงให้ค่าที่มากกว่า ในขณะที่ของเถ้าลอยที่มีปริมาณ free lime ต่ำมีค่าใกล้เคียง เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน นอกจากนี้พบว่า การหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน โดยการหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ต้าร์เถ้าลอย BLCP มีค่าที่มากกว่าของเถ้าลอยแม่เมาะ ส่วนค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีค่ามากกว่า ในขณะที่ของเถ้าลอย BLCP มีค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน โดยเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่น้อย ทำให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีแนวโน้มที่ไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น เถ้าลอยที่มีผลรวมของปริมาณ  $\text{SiO}_2$  กับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มาก ส่งผลให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่มากกว่า

**คำสำคัญ:** ชนิดเถ้าลอย การก่อตัว การขยายตัวในเตาอบโตเคลฟ การหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้ง กำลังอัดประลัย



<b>Thesis Title</b>	Effect of Fly Ash Type on Properties of Paste, Mortar and Concrete
<b>Name - Surname</b>	Mr. Adthasith Sangrayab
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2017

## ABSTRACT

This research aimed to study the effect of fly ash type on properties of paste, mortar and concrete that could be applied as a guideline in using different types of fly ash in paste, mortar and concrete.

The normal consistency of paste, the setting time of paste, the autoclave expansion of paste, the autogenous and drying shrinkages of mortar, and the slump and compressive strength ( $f_c'$ ) of concrete were studied. Four types of fly ash were used in ordinary Portland cement (OPC) – three were from Mae Moh power plant and one was from BLCP power plant.

The results indicated that the normal consistency of the paste with fly ash from Mae Moh power plant (FAM) was less than that of OPC paste while the normal consistency of the paste with fly ash from BLCP power plant (FAR) was greater than that of OPC paste. Moreover, the setting time of the fly ash paste was shorter than that of OPC paste. The setting time of the paste with fly ash containing high free lime (fCaO) showed a faster setting time than one with less fCaO content. Furthermore, the autoclave expansion of the paste with fly ash containing high fCaO content gave higher values while the autoclave expansion of paste with low fCaO fly ash was similar to that of OPC paste. In addition, the autogenous and drying shrinkages of the fly ash mortar were very small compared to that of OPC mortar. Besides, the autogenous and drying shrinkages of FAR mortar were greater than those of FAM mortar. Finally, the slump of FAM concrete was higher, while the slump of FAR concrete was less comparing to the OPC concrete. The  $f_c'$  of fly ash concrete was less than that of OPC concrete. When small quantities of fly ash were used, the  $f_c'$  of each fly ash concrete was not different. However, when large quantities of fly ash were used, the concrete with fly ash containing a great amount of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  resulted in more  $f_c'$ .

**Keywords:** fly ash type, setting time, autoclave expansion, autogenous and drying shrinkages, compressive strength

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติสาคดิ์ กร้ามาตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่เสียสละเวลาส่วนตัว ให้ความกรุณาชี้แนะ และคำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น ติดตามการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ นับแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสำเร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณท่าน ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินดารัตน์ มณีเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ จากภาควิชากรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และขอขอบพระคุณท่าน รองศาสตราจารย์ ดร.อุดมวิทย์ ไชยสกุลเกียรติ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ จากภาควิชากรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่กรุณาเสียสละเวลาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้สั่งสอนประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ขอขอบคุณแผนกวิชาช่างก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคอ่างทอง โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาบางมณี ฝ่ายวิศวกรรม กรมชลประทาน แขวงทางหลวงอยุธยา ฝ่ายวิศวกรรม กรมทางหลวง และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย ให้ผู้วิจัยมีความรู้ความสามารถ นำมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อละออ คุณแม่สมพิศ และครอบครัวแสงระยับ ที่ให้กำลังใจคอยดูแลส่งเสริมให้ประสบความสำเร็จในการศึกษาครั้งนี้ และขอบคุณเพื่อน M-CE56 ที่ให้กำลังใจตลอดจนเป็นแรงผลักดันในการทำวิจัยให้สำเร็จ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจ หากการทำวิจัยในครั้งนี้มี ขาดตกบกพร่องหรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

อรรถสิทธิ์ แสงระยับ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(12)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	15
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3 วิธีการศึกษา.....	37
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	37
3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา.....	38
3.3 สัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา.....	43
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์.....	48
4.1 สมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา.....	48
4.2 สมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต.....	51
4.3 การเปรียบเทียบสมบัติของเพสต์มอร์ตาร์ และคอนกรีตผสมแก้าลอยแต่ละชนิด.....	93

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	95
บรรณานุกรม.....	96
ภาคผนวก.....	98
ภาคผนวก ก สัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต ที่ใช้ในการศึกษา.....	99
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดสอบ.....	103
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	112
ประวัติผู้เขียน.....	139



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่าง ๆ .....	17
ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	18
ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C 618 .....	26
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งผลิตที่ใช้ในการศึกษา.....	26
ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545.....	27
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของวัสดุประสานที่ใช้ในการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม ค่าการก่อตัว และการขยายตัวในเตาออคซิเจนของเพสต์.....	43
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบออคซิเจนและแบบ แห้ง โดยใช้อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 และ 0.55.....	44
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อ วัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 และ 0.55.....	45
ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และเถ้าลอยที่ใช้.....	49
ตารางที่ 4.2 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย.....	51
ตารางที่ 4.3 ร้อยละปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์.....	52
ตารางที่ 4.4 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์.....	54
ตารางที่ 4.5 ร้อยละการขยายตัวในเตาออคซิเจนของเพสต์.....	55
ตารางที่ 4.6 ร้อยละความต้องการน้ำของมอร์ตาร์.....	57
ตารางที่ 4.7 สมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต ผสมเถ้าลอยแต่ละชนิดเปรียบเทียบกับ สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน.....	94
ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ และ คอนกรีต.....	94

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 3.1 แก้วลอมที่ใช้ในการศึกษา.....	37
รูปที่ 3.2 เครื่องมือแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์ (Air Permeability Apparatus).....	38
รูปที่ 3.3 เครื่องมือวัดค่าการหดตัว (Length Capacity) ของมอร์ตาร์เทียบกับแท่งโลหะที่มี ความยาวมาตรฐาน.....	41
รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบกำลังอัดประลัย (Universal Testing Machine).....	42
รูปที่ 3.5 การทดสอบกำลังดึงของคอนกรีต โดยวิธี Splitting Tensile Strength.....	42
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคขนาด 3,500 เท่า ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท ที่ 1 และแก้วลอม.....	50
รูปที่ 4.2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์.....	53
รูปที่ 4.3 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์.....	54
รูปที่ 4.4 การขยายตัวในเตาอบ โดแคลฟ.....	56
รูปที่ 4.5 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์เพื่อให้ค่าการไหล (Flow) เท่ากับร้อยละ $110 \pm 5$ .....	57
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอม เมื่อ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40.....	60
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอม เมื่อ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	62
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอมทั้ง 4 ชนิด เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40.....	64
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอมทั้ง 4 ชนิด เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	65
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ตาร์ เมื่อใช้อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55.....	68

## สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาค่าแบบเทียบกับอายุของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอย เมื่อใช้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40.....	70
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาค่าแบบเทียบกับอายุของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอย เมื่อใช้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	72
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาค่าแบบเทียบกับอายุของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40.....	74
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาค่าแบบเทียบกับอายุของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	75
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาค่าแบบเทียบกับอายุของมอร์ตาร์ด อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55.....	77
รูปที่ 4.16 การยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอย.....	79
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เมื่อใช้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40.....	81
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เมื่อใช้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	83
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40.....	85
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	86
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55.....	89

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.22 กำลังดึงของคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55.....	90
รูปที่ 4.23 กำลังดึงของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 .....	92
รูปที่ 4.24 กำลังดึงของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	93





## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

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

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

SEM	Scanning Electron Microscope
XRD	X-Ray Diffraction
Fly Ash	เถ้าลอย
FA	เถ้าลอยจากแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
FB	เถ้าลอยจากแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
FC	เถ้าลอยจากแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
FR	เถ้าลอยจาก BLCP จังหวัดระยอง
มอก.	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยมีสภาพทางเศรษฐกิจที่ขยายตัวเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้างมีโครงการก่อสร้างต่างๆ เพิ่มขึ้นมากมาย จึงส่งผลทำให้คอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างมีความต้องการสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และส่งผลให้กระบวนการผลิตคอนกรีตมีต้นทุนสูงขึ้นตาม โดยเฉพาะวัสดุหลักในการผลิตคอนกรีต คือ ปูนซีเมนต์ เพราะต้องสิ้นเปลืองพลังงานตั้งแต่เริ่มการระเบิดภูเขาหินปูน การลำเลียง การย่อยบด และกระบวนการเผาเม็ดปูนนั้นต้องใช้อุณหภูมิที่สูง 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส ส่งผลทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซเรือนกระจกโดยมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและธรรมชาติอย่างมาก จึงมีแนวคิดเรื่องวัสดุเหลือทิ้งผสมในคอนกรีต

การนำวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้ในการผลิตคอนกรีตนั้น เพื่อวัตถุประสงค์ในการลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่เป็นส่วนผสมหลักของคอนกรีต โดยเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งผสมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ที่ใช้การผลิตคอนกรีต โดยที่คอนกรีตยังคงสมบัติไม่ต่างจากเดิมหรือมีคุณสมบัติที่ดีกว่าเดิม โดยการที่นำวัสดุเหลือทิ้งมาผสมลงในคอนกรีต เรียกว่า คอนกรีตสีเขียว [1] แบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ คอนกรีตที่ผสมของเสียหรือผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม คอนกรีตที่ผสมจากมวลรวมที่ถูกใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ และคอนกรีตที่ผสมวัสดุเหลือทิ้งที่สามารถนำมาใช้เพื่อพัฒนาสมบัติของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีราคาถูกลง และยังเป็นการช่วยลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย

วัสดุเหลือทิ้งอีกชนิดหนึ่งของภาคการผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ ใช้ถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะเป็นเชื้อเพลิง ประมาณวันละกว่า 40,000 ตัน เกิดเป็นขี้เถ้าที่ปลิวปนไปกับก๊าซร้อนออกจากปล่องควันหลงเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์จะได้ เถ้าลิกไนต์ออกมาประมาณวันละ 10,000 ตัน ในจำนวนนี้จะเป็นเถ้าลอยโดยประมาณ 6,000 ตัน [2] ซึ่งเถ้าลอย (Fly Ash) มีขนาดละเอียดมากโดยมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึงประมาณ 200 ไมโครเมตร โดยประมาณ โดยเถ้าลอยมีสมบัติเป็นสารปอซโซลานสูงซึ่งสารนี้เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยสารซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก [3] โดยส่งผลดีต่อคุณสมบัติทั้งในเชิงคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเมื่อมีการใช้ตามอัตราส่วนที่เหมาะสม จึงมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตอย่างแพร่หลายเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าเถ้าลอยที่นำมาใช้นั้นมีที่มาจากแหล่งผลิตที่

แตกต่างกัน และยังมีสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีที่แตกต่างกันอีกด้วย ซึ่งการจะนำถ้ำลอยไปใช้งานผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ ในของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตนั้น ย่อมส่งผลให้สมบัติที่แตกต่างตามกันไปด้วย

ดังนั้น ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญการศึกษาถึงผลกระทบของชนิดถ้ำลอยต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต ประกอบด้วย ปริมาณน้ำที่เหมาะสม การก่อตัว และการขยายตัวของเพสต์ การหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ ค่าการยุบตัว และกำลังอัดประลัย ของคอนกรีต เพื่อได้เป็นแนวทางในการเลือกใช้ถ้ำลอยได้อย่างเหมาะสมและถูกต้อง โดยสามารถนำไปใช้กับงานคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีจุดประสงค์ดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และถ้ำลอยที่ใช้ในการศึกษา

1.2.2 เพื่อศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสม การก่อตัว และการขยายตัวในเตาอบ โตเคลฟของเพสต์ผสมถ้ำลอยที่ใช้ในการศึกษา

1.2.3 เพื่อศึกษาการหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมถ้ำลอยที่ใช้ในการศึกษา

1.2.4 เพื่อศึกษาค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงของคอนกรีตผสมถ้ำลอยที่ใช้ในการศึกษา

1.2.5 เพื่อศึกษาผลกระทบของชนิดถ้ำลอยที่มีผลต่อปริมาณน้ำที่เหมาะสม การก่อตัว และการขยายตัวของเพสต์ การหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ และค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงของคอนกรีต

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จะทำการศึกษาโดยจะมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1.3.1 วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่

1.3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1.3.1.2 ถ้ำลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง จำนวน 3 ชนิด (FA FB และ FC) และจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า BLCF จังหวัดระยอง จำนวน 1 ชนิด (FB) โดยที่ถ้ำลอย

แต่ละชนิดผสมแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55

1.3.2 ทดสอบสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูง และองค์ประกอบทางเคมี

1.3.3 ทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสม ระยะการก่อตัว และการขยายตัวในเตาอบโทเคลฟของเพสต์

1.3.4 ทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์

1.3.5 ทดสอบค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงของคอนกรีต

1.3.6 วิเคราะห์ผลการศึกษา

1.3.7 สรุปผลการศึกษา

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา

1.4.1 ทราบสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา

1.4.2 ทราบปริมาณน้ำที่เหมาะสม ค่าการก่อตัว และการขยายตัวในเตาอบโทเคลฟของเพสต์

1.4.3 ทราบการหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์

1.4.4 ทราบค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงของคอนกรีต

1.4.5 ทราบผลกระทบของชนิดเถ้าลอยที่มีต่อปริมาณน้ำที่เหมาะสม การก่อตัว และการขยายตัวของเพสต์ การหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ และค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงของคอนกรีต

1.4.6 เพื่อสามารถนำเถ้าลอยไปใช้ได้อย่างถูกต้อง และมีประสิทธิภาพต่อภาคอุตสาหกรรม การก่อสร้างในปัจจุบันเพื่อประโยชน์สูงสุดต่อไป

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงสมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต ที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับเถ้าลอย ตลอดจนการทบทวนเอกสาร งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากการศึกษาตำรา เอกสารวารสาร และงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศ

##### 2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) มีส่วนผสมประกอบไปด้วย หินปูน (Calcareous) ดินเหนียว (Argillaceous) ประเภทออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็ก แล้วนำมาสู่กระบวนการเผา และบดเป็นผงละเอียด ซึ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีหลายประเภท แต่ละประเภทมีสารประกอบสำคัญ ได้แก่  $C_3S$   $C_2S$   $C_3A$  และ  $C_4AF$  ซึ่งจะมีอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน จึงทำให้แต่ละประเภทมีสมบัติแตกต่างกันไป ซึ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่จะผลิตตามมาตรฐานอเมริกา ASTM C 150 และประเทศอังกฤษ British Standard BS 1881 ซึ่งตามมาตรฐานมอก.15 ของไทยได้แบ่งประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท และมีส่วนประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่าง ๆ

ชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มาตรฐาน ASTM C 150	Type	ส่วนประกอบทางเคมี (ร้อยละ)						
		$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$	$CaSO_4$	CaO	MgO
Ordinary Portland Cement	I	49	25	12	8	2.9	0.8	2.4
Modified Portland Cement	II	45	29	6	12	2.8	0.6	3.0
High-early Strength Portland Cement	III	56	15	12	8	3.9	1.4	2.6
Low-heat Portland Cement	IV	30	46	5	13	2.9	0.3	2.7
Sulfate-resistant Portland Cement	V	43	36	4	12	2.7	0.4	1.6

## 2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะประกอบไปด้วยสารประกอบออกไซด์หลัก และสารประกอบออกไซด์รอง โดยมีสารประกอบดังรายละเอียดต่อไปนี้

### 2.1.2.1 สารประกอบออกไซด์หลัก

สารประกอบออกไซด์หลัก (Major Oxides) ประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ออกไซด์กลุ่มนี้มีปริมาณรวมกันแล้วได้มากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

### 2.1.2.2 สารประกอบออกไซด์รอง

สารประกอบออกไซด์รอง (Minor Oxides) ประกอบด้วย แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na<sub>2</sub>O) โพแทสเซียมออกไซด์ (K<sub>2</sub>O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>)

นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอม และส่วนประกอบอื่นซึ่งจัดอยู่ในรูปของการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบประเภทออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ชื่อย่อ
แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide)	60.0 - 67.0	CaO
ซิลิกอนออกไซด์ (Silicon Oxide)	17.0 - 25.0	SiO <sub>2</sub>
อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide)	3.0 - 8.0	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
เฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric Oxide)	0.5 - 6.0	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulfur Oxide)	1.0 - 3.0	SO <sub>3</sub>
แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide)	0.1 - 0.4	MgO
อัลคาไล (Alkalies)	0.2 - 1.3	Na <sub>2</sub> O
ไททาเนียมออกไซด์ (Titanium Oxide)	0.2 - 1.3	K <sub>2</sub> O

### 2.1.3 สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์

สารประกอบออกไซด์ปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมี และรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีรูปร่างต่าง ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การเผา และการเย็นลงของเม็ดปูน ปริมาณสารประกอบสำคัญในปูนซีเมนต์มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดสมบัติของปูนซีเมนต์ สารประกอบที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด ดังนี้

#### 2.1.3.1 ไตรแคลเซียมซิลิเกต

มีลักษณะเป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึกสี่เหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า สมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  หรือ  $\text{C}_3\text{S}$ ) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัว และแข็งตัวให้กำลังค่อนข้างดีในช่วง 7 วันแรก โดยปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีปริมาณร้อยละ 45 ถึง 55

#### 2.1.3.2 ไดแคลเซียมซิลิเกต

มีลักษณะหลายรูปแบบ แต่ที่อุณหภูมิปกติ  $\text{C}_2\text{S}$  จะอยู่ในรูปเบต้าไดแคลเซียมซิลิเกต ( $\beta\text{C}_2\text{S}$ ) มีลักษณะเป็นเม็ดกลม สมบัติของไดแคลเซียมซิลิเกต ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  หรือ  $\text{C}_2\text{S}$ ) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัว และพัฒนากำลังอัดประลัยอย่างค่อนข้างช้า โดยช้ากว่า  $\text{C}_3\text{S}$  มาก แต่เมื่อในระยะยาวจะให้กำลังอัดประลัยที่ใกล้เคียงกับ  $\text{C}_2\text{S}$  โดยปริมาณไดแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีปริมาณร้อยละ 15 ถึง 35

#### 2.1.3.3 ไตรแคลเซียมอลูมิเนต

มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมสี่เหลี่ยมผืนผ้า สมบัติของไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  หรือ  $\text{C}_3\text{A}$ ) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะมีความรุนแรงมาก และทำให้เกิดการก่อตัวทันที (Flash Set) และการพัฒนากำลังเร็วภายในช่วง 1 ถึง 2 วัน แต่ให้กำลังอัดประลัยค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับ  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  โดยปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 7 ถึง 15

#### 2.1.3.4 เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์

มีลักษณะอยู่ในสภาพสารละลายแข็ง (Solid Solution) สมบัติของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  หรือ  $\text{C}_4\text{AF}$ ) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำส่งผลทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาไม่กี่นาที แต่กำลังค่อนข้างต่ำ และต่ำกว่า  $\text{C}_3\text{A}$  โดยปริมาณของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ในปูนซีเมนต์จะมีปริมาณร้อยละ 5 ถึง 10



โดยหลักการคำนวณหาปริมาณสารประกอบทั้ง 4 ชนิด ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สามารถหาได้จากสูตรสมการคำนวณ Bogue's Equation โดยสามารถแบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 :  $Al_2O_3 / Fe_2O_3 \geq 0.64$

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

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

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

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

กรณีที่ 2 :  $Al_2O_3 / Fe_2O_3 \geq 0.64$

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

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

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

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

#### 2.1.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ทำให้เกิดความร้อน มีการก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ โดยจะส่งผลดังนี้

2.1.4.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate) คือ  $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$  หรือ CSH และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) คือ  $Ca(OH)_2$  หรือ CH (สมการที่ 2.9)



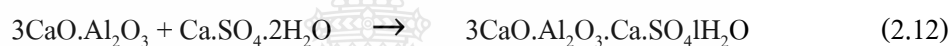
2.1.4.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CHS และ CH (สมการที่ 2.10)



2.1.4.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต เมื่อไตรแคลเซียมอลูมิเนต ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนตอย่างทันทีทันใด และทำให้ เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว (สมการที่ 2.11)



เพื่อต้องการหน่วงเวลาของการเกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิต ปูนซีเมนต์จึงผสมกับยิปซัม ลงไปในระหว่างกระบวนการบดเม็ดปูนซึ่ง ยิปซัม ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) จะทำ ปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนต ก่อให้เกิดชั้นบางๆ ของเอทริงไจท์ (Ettringite) บนผิวของอนุภาคไตร แคลเซียมอลูมิเนต (สมการที่ 2.12)



2.1.4.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์

มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยา  $\text{C}_3\text{A}$  แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำ ปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำให้ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น ซึ่งทำปฏิกิริยากับยิปซัม (สมการที่ 2.13)



โดยปูนซีเมนต์จะมี  $\text{C}_3\text{S}$  เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้น เมื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่าง ปูนซีเมนต์กับน้ำจะมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยา  $\text{C}_3\text{S}$  กับน้ำ ซึ่งบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยา  $\text{C}_3\text{A}$  ด้วย โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะค่อยๆ ลดลงเพราะเกิดชั้นเคลือบของเอทริง ไจท์ และการที่สารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มของ อีออนแคลเซียม และไฮดร ออกไซด์ทำปฏิกิริยาลดลง โดยเพสต์จะมีสภาพพลาสติกช่วงเวลาหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย สูงพอ CH จะตกผลึก และปฏิกิริยาของ  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ทำให้เกิด CSH เพิ่มมากขึ้น ตามด้วยปฏิกิริยา  $\text{C}_3\text{A}$  และ  $\text{C}_4\text{AF}$  ทำให้เอทริงไจท์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโน ซัลโฟลูมิเนต และเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต และซัลโฟเฟอร์ไรท์แคลเซียมซิติเกต ยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น จะขยายเข้าไปในโพรง เมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะ เชื่อม โยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

### 2.1.5 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) รวมกันเป็นปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุ อาจจะมีสมบัติในการเชื่อมประสาน หรือไม่ก็ได้แต่ต้องสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และหรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) แม้ว่าวัสดุปอซโซลานชนิดนั้นมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ในสัดส่วนผสมใด ๆ ก็ตาม บางครั้งปอซโซลานบางส่วนไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ เนื่องจากองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยามีไม่เพียงพอต่อขบวนการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

โดยชนิดของวัสดุปอซโซลาน มี 2 ชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และปอซโซลานคัดแปลง มีรายละเอียดดังนี้

#### 2.1.5.1 ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

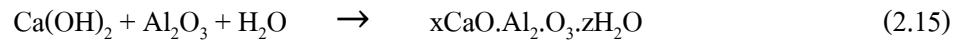
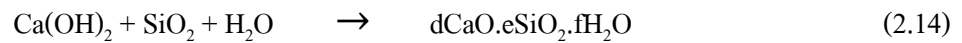
โดยปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เมื่อต้องการนำไปใช้งานต้องนำมาบดให้ละเอียดก่อน ได้แก่ หินดินดาน (Shales) เศษหินภูเขาไฟ (Tuff) เถ้าภูเขาไฟ (Volcanic ash) หินภูมิไซท์ (Pumisite) หินโอเพิลเหลือง (Opaline) หินชั้น (Shale) หินเชิร์ต (Chert) และหินปูนปอซโซลาน (Limestone)

#### 2.1.5.2 ปอซโซลานคัดแปลง

เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตหรือเป็นวัสดุเหลือทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม โดยปอซโซลานคัดแปลง (Modify Pozzolan) เป็นผลพลอยได้หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้น ซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบันปอซโซลานคัดแปลงที่พบได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) ได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

### 2.1.6 ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction) เกิดขึ้นหลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้วเพราะ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำปฏิกิริยารวมกับ  $\text{SiO}_2$  ที่มีอยู่แล้วในถ่านหินทำให้ได้สารแคลเซียมซิลิเกตและ  $\text{Ca(OH)}_2$  และอีกส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  จะได้สารแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (สมการที่ 2.14 และ 2.15)



ซึ่งสารประกอบทั้ง 2 ตัว คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต เป็นสารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสาน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีกำลังอัดที่ดีขึ้นเมื่อรวมกับ ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดก่อนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน จะทำให้ได้ค่าการอัดตัวของซีเมนต์เพสต์

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เกิดขึ้นตามหลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้วโดยปฏิกิริยาปอซโซลานไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยอิสระ เพราะต้องอาศัยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ ASTM C 618 ได้นิยามสารปอซโซลานหมายถึง สารซิลิเซียส หรือ สารอลูมิโนซิลิเซียส โดยทั่วไปสารปอซโซลาน จะมีสมบัติเป็นวัสดุประสานน้อยมาก แต่ในกรณีที่มีสารปอซโซลานที่มีความละเอียดสูงและมีความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีที่อุณหภูมิปกติกับด่างอัลคาไลด์ เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสาน โดยมาตรฐานได้กำหนดค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุปอซโซลานร้อยละ 20 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุ 7 หรือ 28 วัน โดยมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุม และกำหนดให้ขนาดของวัสดุปอซโซลานมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 34 เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 20 และมีอัตราส่วนน้ำหนักต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.485

### 2.1.7 เถ้าถ่านหิน

ซึ่งทราบกันดีว่า เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (Pulverized or Fly Ash) เป็นวัสดุที่เหลือจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์ เพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน ได้แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะดังนี้

2.1.7.1 เถ้าหนัก (Bottom Ash) คือ เถ้าถ่านหินที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วตกอยู่บริเวณก้นเตาเผาจะถูกลำเลียง ด้วยระบบสายพานออกมามีขนาดค่อนข้างใหญ่ที่สุด จะมีขนาดประมาณ 0.50 ถึง 10.00 มิลลิเมตร มีประมาณร้อยละ 18 ของเถ้าถ่านหินทั้งหมด

2.1.7.2 เถ้าตะกรัน (Slag Ash) คือ เถ้าถ่านหินที่หลอมละลายรวมตัวเกาะติดเป็นตะกรัน บริเวณผนังของเตาเผา จะมีปริมาณน้อยมาก

2.1.7.3 เถ้าลอย (Fly Ash) คือ เถ้าถ่านหินที่มีขนาดเม็ดละเอียดมาก ลอยปะปนมากับก๊าซความร้อนจากปล่องควันไปสู่ชั้นบรรยากาศเนื่องจากเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมมีประมาณ ร้อยละ 80 ของเถ้าถ่านหินทั้งหมด ด้วยเหตุนี้เถ้าลอยมีปริมาณจำนวนมาก จึงมุ่งเน้นนำเถ้าลอยมาเพื่อศึกษาสมบัติเบื้องต้นที่จะสามารถนำมาแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ เพื่อพัฒนาให้เกิดประโยชน์สูงสุด

## 2.1.8 ชนิดของเถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly Ash) ตามมาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

### 2.1.8.1 เถ้าลอย ชนิด F หรือ Class F

เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) และบิทูมินัส (Bituminous) มีส่วนประกอบของซิลิกา (Silica :  $\text{SiO}_2$ ) อลูมินา (Alumina :  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide :  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มากกว่าร้อยละ 70 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F จะเป็นเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ โดยมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide :  $\text{CaO}$ ) ต่ำ สำหรับซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ได้มาจากแร่ดินเหนียว และควอร์ตซ์ โดยถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส ดังนั้นจะว่าพบมีแร่ดินเหนียวสูง ส่งผลทำให้เถ้าลอยที่มีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) สูง (ตารางที่ 2.3)

### 2.1.8.2 เถ้าลอย ชนิด C หรือ Class C

เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัส เป็นส่วนใหญ่ โดยมีผลรวมปริมาณของซิลิกา (Silica :  $\text{SiO}_2$ ) อลูมินา (Alumina :  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide :  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มากกว่าร้อยละ 50 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด C จะมีปริมาณ  $\text{CaO}$  สูง เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง และสำหรับ อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) มาจากแร่ดินเหนียว ถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ต่ำ (ตารางที่ 2.3)

## 2.1.9 ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย

ความถ่วงจำเพาะ เถ้าลอยโดยปกติแล้วจะมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.2 ถึง 2.8 แต่อนุภาคที่มีลักษณะกลมและกลวง (Cenospheres) จะมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1.0 จึงสามารถลอยน้ำได้เถ้าลอยที่มีปริมาณเหล็กสูงจะมีค่าความถ่วงจำเพาะแนวโน้มที่สูง แต่ถ้ามีปริมาณคาร์บอนสูงค่าความถ่วงจำเพาะจะมีแนวโน้มลดลง

### 2.1.10 ความละเอียดของเถ้าลอย

โดยทั่วไปเถ้าลอยจะมีขนาดความละเอียดตั้งแต่ 1 ไมโครเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร โดยค่าความละเอียดของเถ้าลอยวัดได้จากปริมาณผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐาน (Sieve Analysis) ซึ่งทั่วไปปริมาณของเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงขนาด 80 ไมโครเมตร มีปริมาณร้อยละ 6 ถึง 25 โดยน้ำหนัก ปริมาณเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงขนาด 50 ไมโครเมตร มีปริมาณร้อยละ 16 ถึง 40 โดยน้ำหนักและค้างบนตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร มีปริมาณร้อยละ 3 ถึง 14 โดยน้ำหนักค่าความละเอียดจะมีผลอย่างมากต่อคุณภาพของคอนกรีต นั่นคือเถ้าลอยที่มีความละเอียดมากจะทำให้คอนกรีตมีความสามารถต้านทานแรงอัดสูงขึ้น

### 2.1.11 พื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอย

เถ้าลอยที่ได้จะลอยปะปนมากับก๊าซความร้อนจากปล่องควัน และจะถูกจับโดยเครื่องดักจับผงฝุ่น (Electrostatic Precipitator) โดยจะมีความละเอียดอยู่ในช่วง 4,000 ถึง 7,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม โดยการดักจับสมัยใหม่สามารถดักจับเถ้าลอยที่มีความละเอียดได้ถึง 12,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งทั่วไปค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสามารถหาได้จากเครื่องมือทดสอบหาความซึมอากาศเบลน (Blaine Air Permeability Apparatus) โดยความละเอียดของเถ้าลอยจากวิธีนี้อยู่ในช่วง 2,500 ถึง 5,500 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม เมื่อเทียบค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะพบว่า มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากจะมีพื้นที่ผิวมาก ส่งผลให้สามารถทำปฏิกิริยาต่างๆ ได้ดีกว่าเถ้าลอยที่มีความละเอียดน้อยกว่า

### 2.1.12 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

เถ้าลอยโดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีนั้นจะคล้ายๆ กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เฟอริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก และมีแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ออกไซด์ของอัลคาไล ( $\text{Na}_2\text{O}$   $\text{K}_2\text{O}$ ) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วย ความชื้น ( $\text{H}_2\text{O}$ ) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition : LOI)  $\text{SiO}_2$   $\text{Al}_2\text{O}_3$   $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  เป็นองค์ประกอบหลักมีปริมาณถึงร้อยละ 80 ถึง 90 เป็นตัวกำหนดสมบัติของเถ้าลอยได้ตามมาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดผลรวมของ  $\text{SiO}_2$   $\text{Al}_2\text{O}_3$   $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ของเถ้าลอยไว้ร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปใช้งานได้

**ตารางที่ 2.3** ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C 618

ส่วนประกอบทางเคมี	เถ้าลอย	
	ชนิด F (ร้อยละ)	ชนิด C (ร้อยละ)
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และไอออน-ออกไซด์ ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) อย่างต่ำ	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) อย่างสูง	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	1.5	1.5

เถ้าลอยที่ผ่านการเผาถ่านหินซึ่งได้จากแหล่งที่ผลิตนั้น มีลักษณะโดยมีองค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 2.4

**ตารางที่ 2.4** องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งผลิต

เถ้าลอย	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)								
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	LOI
แม่เมาะ	41.16	22.30	11.51	15.27	2.70	1.43	2.93	1.66	0.20
ระยอง	45.24	28.25	2.43	11.80	0.74	3.63	0.66	0.47	2.96

2.1.13 ปฏิกริยาทางเคมีของเถ้าลอย

ในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะเริ่มจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  หรือ CH) หลังจากนั้นวัสดุปอซโซลานในเถ้าลอยซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ซึ่งผลผลิตของปฏิกิริยานี้จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH)

โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์ (มอก.) กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าลอยถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก โดยแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมีได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพ (ดังตารางที่ 2.5)

ตารางที่ 2.5 ร้อยละข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545

ส่วนประกอบทางเคมี	ชนิดชั้นคุณภาพเถ้าลอย			
	ชั้น 1	ชั้น 2		ชั้น 3
		ชนิด ก	ชนิด ข	
ปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> )	30.0	30.0	30.0	30.0
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO)	-	> 10.0	> 10.0	-
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> )	5.0	5.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด	3.0	3.0	2.0	2.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	6.0	6.0	6.0	6.0

#### 2.1.14 ความต้องการน้ำของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

เถ้าลอยมีลักษณะเป็นเม็ดกลมและมีผิวเรียบทำให้ส่วนผสมทำงานได้ง่ายขึ้น และต้องการน้ำลดลง เมื่อกำหนดให้มีความสามารถในการเทเท่ากัน เถ้าลอยนอกจากสามารถลดปริมาณน้ำได้แล้ว ในหลายกรณียังพบว่าเพิ่มความสามารถของการทำงานของมอร์ตาร์ และคอนกรีตได้โดยคงปริมาณน้ำไว้ ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ ทำจากปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

#### 2.1.15 ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

โดยทั่วไประยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง เถ้าลอยที่ละเอียดมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวเร็วขึ้น และในทางกลับกันเถ้าลอยที่หยาบมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวช้าลง เถ้าลอยที่มีปริมาณ SO<sub>3</sub> สูงจะมีระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นมากได้ [10]



### 2.1.16 การขยายตัวของปูนซีเมนต์ผสมเกล็ดลอย

เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับซีเมนต์เพสต์ที่ดีแล้วไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงในด้านของปริมาตรมากเกินไป สิ่งที่ทำให้เกิดการขยายตัวสำหรับซีเมนต์เพสต์ คือ ปฏิกริยาระหว่างน้ำในซีเมนต์เพสต์กับสารประเภทหินปูน แมกนีเซียม และแคลเซียมซัลเฟต ซึ่งวิธีการทดสอบการขยายตัวในเตาอโตคลอว์ (Autoclave) จะทำการทดสอบโดยให้หล่อซีเมนต์เพสต์ แล้วบ่มในสภาพชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะเร่งปฏิกิริยาโดยให้ความร้อนและเพิ่มความดัน โดยคงสภาพความร้อนและความดันในช่วงเวลาหนึ่ง จากนั้นทำการลดความร้อนและความดันให้อยู่ในสภาวะปกติ แล้ววัดการขยายตัวที่เกิดขึ้น ซึ่งสำหรับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์แล้ว ไม่ควรมีการขยายตัวเกินร้อยละ 0.8 ของความยาวเดิม [15]

ตัวอย่าง หาค่าการขยายตัวของซีเมนต์พอร์ตแลนด์โดยคำนวณจากสมการ (ร้อยละ)

$$E, \% = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100 \quad (2.16)$$

โดยที่  $l_1$  = ความยาวหลังการให้ความร้อน, mm

$l_0$  = ความยาวก่อนการให้ความร้อน, mm

ให้การคำนวณที่ได้มีความละเอียดถึง 0.01% สำหรับความยาวหลังการให้ความร้อนลดลงให้ใช้เครื่องหมายลบหน้าค่าร้อยละ

### 2.1.17 การหดตัวของแบบอโตจีนัส

การหดตัวของแบบอโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) เป็นการหดตัวที่ส่วนหนึ่งเป็นการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Chemical Shrinkage) ที่เกิดหลังการก่อตัวระยะสุดท้ายของคอนกรีต และอีกส่วนหนึ่งที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นในช่องว่างคาปิลลารี (Capillary Pores) ในเพสต์ เนื่องจากความชื้นบางส่วนถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยา ทำให้เกิดช่องว่างคาปิลลารี (Capilla Section) ส่งผลให้คอนกรีตหดตัว การหดตัวของแบบอโตจีนัสแตกต่างจากการหดตัวของแบบแห้ง ตรงที่ไม่ได้มีการสูญเสียน้ำในคอนกรีตสู่บรรยากาศโดยรอบ แต่เป็นการสูญเสียน้ำภายในตัวคอนกรีตเอง การหดตัวของแบบอโตจีนัสจะเกิดขึ้นทันทีหลังจากกระบวนการผสมคอนกรีตเสร็จ แต่ในทางปฏิบัติจะมีผลต่อปริมาตรหลังจากเทคอนกรีตเสร็จแล้ว เนื่องจากการหดตัวในช่วงก่อนการเทคอนกรีตจะไม่มีผลต่อปริมาตรของโครงสร้างที่จะเท และจะมีผลทางโครงสร้างหลังจากที่คอนกรีตก่อตัวแล้ว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก่อนการก่อตัวจะไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงในคอนกรีต ดังนั้น จึงนิยามวัดค่าการหดตัวของแบบอโตจีนัสโดยเริ่มต้นจากระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น

การหดตัวแบบอโตจีนัสจะมีความมากขึ้นถ้าคอนกรีตยังมีความชื้นน้ำต่ำ เช่น คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูม หรือ วัสดุปอซโซลานที่เป็นขนาดเล็กกว่าขนาดของปูนซีเมนต์มาก เช่น ถ้า ลอยที่ผ่านการคัดขนาดเป็นต้น คอนกรีตที่ใช้เถ้าตะกั่วเหล็กซึ่งมักมีความละเอียดมากกว่า ปูนซีเมนต์ ในปริมาณมากมักจะมีการหดตัวแบบอโตจีนัสสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งตะกั่วละเอียด มากสำหรับปูนซีเมนต์ ได้มีการพบว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ  $C_3A$  สูง จะมีการหดตัวแบบอโตจีนัสสูง โดยการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบนี้ จะเกิดขึ้นต่อเมื่อมีการยัดรีด ดังนั้นบางครั้งอาจจะพบการ แตกร้าวขึ้นภายในคอนกรีตโดยที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าจากบริเวณผิวของคอนกรีตได้ เนื่องจากคอนกรีตภายในเกิดการหดตัว แต่บริเวณผิวได้รับน้ำจากการบ่มที่เพียงพอไม่หดตัว ในช่วงเวลาที่เกิดการหดตัวแบบอโตจีนัส จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสาน กับน้ำ จึงทำให้การหดตัวแบบนี้มีอัตราสูงในช่วงวันแรกๆ โดยมีอัตราต่ำลง เมื่อระยะเวลาผ่านไปเรื่อยๆ ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบอโตจีนัส มีดังต่อไปนี้

ก) อัตราความเร็วการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดเร็วและทำให้การหดตัวแบบอโต จินัส เกิดความเร็วและสูงตามไปด้วย ดังนั้น การหดตัวแบบอโตจีนัสจะสูงขึ้น ถ้าอุณหภูมิการบ่ม สูงขึ้น ซึ่งองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นเร็ว คือ มีปริมาณ  $C_3A$  สูง

ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ถ้ามีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ก็จะทำให้เกิด การหดตัวแบบอโตจีนัสสูงขึ้น เนื่องจากความชื้นน้ำจะต่ำลง ขนาดช่องว่างคัปิลลารี ก็จะเล็กลงด้วย

ค) ลักษณะ โครงสร้างช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ ยังมีขนาดเล็ก และมีความไม่ต่อเนื่อง ก็จะทำให้การหดตัวแบบอโตจีนัสสูงขึ้น เนื่องจากน้ำอิสระเคลื่อนตัวไม่สะดวก และช่องว่างมีขนาด เล็กจะทำให้เกิดแรงดึงสูง

#### 2.1.18 การหดตัวแบบแห้ง

กระบวนการเกิดการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) เกิดจากการที่น้ำภายใน คอนกรีตเกิดระเหยออกมา ทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัว การหดตัวแบบแห้งในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เป็นการหดตัวที่สำคัญ ยิ่งกว่าการหดตัวแบบอโตจีนัส เพราะหากการออกแบบและการก่อสร้าง คอนกรีตไม่ได้เผื่อการหดตัวแบบแห้งไว้อย่างเพียงพอแล้ว จะส่งผลทำให้เกิดรอยแตกร้าว และการบิด ตัวของคอนกรีตได้ ซึ่งส่วนมากเกิดขึ้นเนื่องจากการยัดรีดของโครงสร้าง ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดในเรื่องนี้ คือ รอยต่อเพื่อการหดตัว (Contraction Joint) และรอยต่อเพื่อการเคลื่อนตัวอย่างอิสระ (Isolation Joint or Expansion Joint) ในพื้นถนน หรือพื้นคอนกรีตสำหรับเพื่อการหดตัว และการขยายตัวของคอนกรีต เพื่อป้องกันการแตกร้าวที่เกิดขึ้นแบบไม่มีทิศทาง

### 2.1.16.1 กลไกของการหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตขึ้นอยู่กับ การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ เพราะโดยทั่วไปมวลรวมมีการหดตัวต่ำมาก แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของซีเมนต์เพสต์กับความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนด้วยกัน

ก) การหดตัวแบบแห้ง ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 การหดตัวในช่วงนี้เกิดการสูญเสียน้ำในช่องว่างคาปิลลารีเป็นหลัก ซึ่งในช่วงแรกน้ำในช่องว่างคาปิลลารีขนาดใหญ่จะถูกขับออกมาก่อนตามด้วยน้ำในช่องว่างคาปิลลารี จะมีขนาดเล็กลง การสูญเสียที่เหลือนั้นจะเกิดเป็นผิวโค้ง (Meniscus) และการเกิดแรงตึงผิว (Surface Tension) ซึ่งมีขนาดสูงขึ้นเมื่อโพรงมีขนาดเล็กนอกจากนี้การสูญเสียที่ดูดซับที่อยู่ในซอก (Hindered Adsorbed Water) หรือที่อยู่ในโพรงขนาดจิ๋ว (Micropore) มีส่วนทำให้เกิดการหดตัว การหดพบว่าแผ่น CSH ซึ่งการเคลื่อนตัวและยึดเกาะกันดังกล่าวเป็นส่วนของการหดตัวอย่างถาวรซึ่งคืนกลับไม่ได้ (Irreversible Shrinkage)

ข) การหดตัวแบบแห้ง ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 ถึง 50 การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ในช่วงนี้เกิดในอัตราที่ต่ำกว่าในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 40 ถึง 50 น้ำในช่องว่างคาปิลลารีถูกขับออกไป และแรงตึงผิวจะหมดไป ซึ่งการหดตัวในช่วงนี้เกิดจากการสูญเสียที่ดูดซับ (Adsorbed Water) ที่ผิวของอนุภาคของเจลเป็นหลัก ซึ่งเริ่มมีความสำคัญเมื่อความหนาของชั้นน้ำลดลงเหลือเพียง 2 โมเลกุล มีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 50 การหดตัวจากการสูญเสียน้ำอาจยังคงมีอยู่แต่ไม่มากนักเมื่อความชื้นลดลงจะเกิดสูญเสียที่ดูดซับขั้นสุดท้าย และทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้นการหดตัวในช่วงนี้เป็นการหดตัวแบบคืนกลับได้ (Reversible Shrinkage)

ค) การหดตัวแบบแห้ง ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าร้อยละ 10 การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ในช่วงนี้เกิดขึ้นในอัตราที่สูง การตากแห้งที่สภาวะนี้ทำให้น้ำระหว่างแผ่น C-S-H (Interlayer Water) ถูกขับออกไป การสูญเสียน้ำในช่วงนี้ทำให้แผ่น C-S-H เคลื่อนที่เข้าหากัน การหดตัวจะเป็นแบบคืนกลับได้ แต่ถ้าหากสภาวะแห้งรุนแรงและนานพอแผ่น C-S-H ที่เคลื่อนที่เข้าใกล้กันจะสามารถยึดเกาะกันได้ ซึ่งทำให้เกิดการหดตัวแบบถาวร

### 2.1.16.2 องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวแบบแห้ง

องค์ประกอบสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวแบบแห้ง ของคอนกรีต ได้แก่ มวลรวมปริมาณของน้ำและปูนซีเมนต์ สมบัติของปูนซีเมนต์รูปร่าง ขนาดของคอนกรีต เป็นต้น การเสริมเหล็กในคอนกรีตสามารถลดการหดตัว เพราะเหล็กช่วยยึดไม่ให้คอนกรีตหดตัวแต่ทำให้เกิดแรงอัดในเหล็กและแรงดึงในคอนกรีตได้ คอนกรีตที่อยู่ในอุณหภูมิสูง ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะเกิดการหดตัวสูง

ก) มวลรวม เนื่องจากซีเมนต์เพสต์เป็นต้นกำเนิดของการหดตัว ดังนั้นการเพิ่มปริมาตรของมวลรวมจึงลดปริมาณซีเมนต์เพสต์และการหดตัวได้อย่างดี นอกจากนี้การหดตัวของคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมวลรวมได้คละมวลรวมที่แข็งแรงมีการดูดซึมน้ำน้อย และมีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงทำให้คอนกรีตมีการหดตัวน้อย ส่วนกำลังของมวลรวมนั้น

ข) ปริมาณน้ำและปูนซีเมนต์ เนื่องจากปริมาณน้ำและปูนซีเมนต์เป็นตัวกำหนดปริมาณและสมบัติของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นการหดตัวของคอนกรีตจึงขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและปูนซีเมนต์เป็นอย่างมาก ส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำมากจะมีการหดตัวสูง และการหดตัวจะมีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้น เพราะการมีน้ำในส่วนผสมมากย่อมมีน้ำระเหยออกจากคอนกรีตมากขึ้น การหดตัวของไฮดรตซีเมนต์ มีค่าสัดส่วนตรงกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในช่วงประมาณ 0.2 ถึง 0.6

ค) ความชื้น อาจแบ่งออกได้เป็นความชื้นขนาดที่บ่มคอนกรีตและความชื้นของอากาศตอนตกแห้ง การบ่มมีผลต่อการหดตัวของคอนกรีตไม่มากนักเพราะการบ่มที่ดีย่อมทำให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้มากขึ้น และจำนวนของเจลที่เพิ่มขึ้น เม็ดปูนจะทำปฏิกิริยากับน้ำจนเหลือเม็ดปูนที่ไม่ทำปฏิกิริยาอยู่น้อย ซึ่งเม็ดปูนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ต้านการหดตัว นอกจากนี้การบ่มที่ดีย่อมทำให้ช่องว่างคาปิลลารีน้อยลงและคอนกรีตแข็งแรงขึ้น ดังนั้นการบ่มธรรมดา จึงมีผลต่อการหดตัวไม่มาก การใช้ความดันสูงในการบ่มสามารถลดการหดตัวได้มาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเจล ถ้าทั้งคอนกรีตไว้ในน้ำจะมีการขยายตัวแต่ถ้าทิ้งไว้ในอากาศแห้งจะเกิดการหดตัว ความชื้นสัมพัทธ์ที่ทำให้คอนกรีตอยู่ในสภาพสมดุลมีค่าประมาณร้อยละ 94 สำหรับคอนกรีตที่ตากแห้งแล้วนำเอามาใส่ในน้ำสามารถขยายตัวกลับคืนมาบางส่วนแต่มีบางส่วนเป็นการหดแบบถาวร และถ้าเอาไปตากแห้งอีกคอนกรีตจะหดตัวได้อีก

ง) ขนาดและรูปร่างของแท่งทดสอบ อัตราการสูญเสียน้ำของคอนกรีตขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิว พื้นที่ผิวที่มากทำให้การสูญเสียน้ำเกิดได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของคอนกรีต กล่าวคือ คอนกรีตขนาดเล็กจะสูญเสียน้ำเร็วกว่าคอนกรีตขนาดใหญ่ คอนกรีตเมื่อสูญเสียน้ำจะเกิดการหดตัว การหดตัวเกิดขึ้นที่ผิวของคอนกรีตและขยายเข้าไปในส่วนของคอนกรีตซึ่งใช้เวลานานมากเมื่อเป็นคอนกรีตขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงเป็นที่ยอมรับกันว่าการหดตัวจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของคอนกรีต โดยการหดตัวจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับอัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรของคอนกรีต

### 2.1.19 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยในอายุต้นขึ้นขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าลอย โดยความละเอียดสูงจะให้กำลังในระยะต้นสูงเนื่องจากความไวต่อการทำปฏิกิริยา ส่วนเถ้าลอยซึ่งได้จากการเผาโดยตรงจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำเพราะเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลาน ดังนั้นต้องใช้ค่าที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มาทำปฏิกิริยาจึงทำให้กำลังในช่วงอายุต้นต่ำ แต่เมื่ออายุมากขึ้นกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยสามารถมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยได้ โดยเฉพาะกรณีที่เถ้าลอยมีความละเอียดสูง เช่น การใช้เถ้าลอยบดละเอียดซึ่งมีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1 แทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อทำคอนกรีตคุณภาพสูงโดยมีสารลดน้ำพิเศษเพื่อปรับความสามารถในการเท พบว่าในช่วงอายุต้น 3 ถึง 7 วัน คอนกรีตผสมเถ้าลอยบดละเอียดมีกำลังต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมแต่เมื่ออายุ 28 และ 56 วัน พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยบดละเอียดร้อยละ 30 มีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่การแทนที่เถ้าลอยบดละเอียดในปริมาณที่สูงกว่านี้จะให้กำลังอัดต่ำทั้งอายุต้นและอายุปลาย

การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลดีต่อกำลังอัดประลัยซึ่งแสดงถึงกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย ที่มีส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนักให้กำลังอัดค่อนข้างสูง แต่การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์มากเกินไปทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เก่งพงศ์ อ้อสปอนพันธ์ (2554) วิจัยนี้ได้ศึกษาการพัฒนากำลังของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยใน ปริมาณสูงร่วมกับนาโนซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตร ซึ่งการศึกษาค้นคว้านี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ส่วนแรกศึกษาผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูง ในสัดส่วนร้อยละ 40 50 และ 60 ส่วนที่สองเป็นการประยุกต์ใช้ใน โนซิลิการ่วมกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงและแปรเปลี่ยนปริมาณนาโนซิลิการ้อยละ 47 และ 10 ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าเมื่อปริมาณเถ้าลอยและปริมาณน้ำ ต่อวัสดุประสานสูงขึ้น กำลังอัดของคอนกรีตจะลดลง อย่างไรก็ตามการพัฒนากำลังของคอนกรีต ผสมเถ้าลอยจะดีขึ้นที่อายุปลาย ที่ปริมาณการแทนที่เถ้าลอยในคอนกรีต ร้อยละ 40 ปริมาณน้ำต่อ วัสดุประสาน 0.35 จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 90 วัน เท่ากับ 0.97 เท่าของคอนกรีตควบคุมการเติมอนุภาคนาโนซิลิกาในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยอยู่ในปริมาณสูงจะช่วยพัฒนากำลังของคอนกรีตให้สูงมากขึ้นได้ การใช้นาโนซิลิกา ร้อยละ 47 และ 10 ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 ให้ค่ากำลังอัดที่ อายุ 28 วันมากกว่าคอนกรีตควบคุม 1.09 1.39 และ 1.42 เท่า

ตามลำดับ แสดงให้เห็นผลของปริมาณนาโนซิลิกา การเพิ่มปริมาณของนาโนซิลิกาส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง เมื่อพิจารณาต้นทุนพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง และใช้นาโนซิลิกา ช่วยในการพัฒนากำลังจะมีต้นทุนสูงขึ้น

บุรฉัตร และพิชัย (2553) วิจัยนี้ได้ศึกษาการออกแบบคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ โดยทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3 วัน และ 28 วัน เถ้าลอยถูกแทนที่ในวัสดุผสมซีเมนต์ โดยน้ำหนักเท่ากับ 0 15 25 35 และ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยมวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำธรรมชาติผ่านตะแกรงขนาด 5 มิลลิเมตร ความถ่วงจำเพาะมีค่า เท่ากับ 2.56 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินปูนขนาด 10 มิลลิเมตร ความถ่วงจำเพาะของทรายมีค่า เท่ากับ 2.67 อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมดมีค่า เท่ากับ 0.36 จากการศึกษาพบว่าเถ้าลอยแทนที่ในซีเมนต์ได้สูงสุดประมาณ 39 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสมซีเมนต์ที่เหมาะสม เท่ากับ 0.42 เถ้าลอยแทนที่ในซีเมนต์เกินกว่า 39 เปอร์เซ็นต์ กำลังอัดจะลดลงทันที และปริมาณเถ้าลอยที่ 35 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีค่าสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 340 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

เสกสรรค์ ชูทับทิม และวชิร สามวัง (2554) วิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ต้าผสมเถ้าถ่านหินที่มีอายุการบ่มต่างกัน โดยทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 14 28 63 91 และ 182 วัน ของตัวอย่างมอร์ต้าขนาดทรงลูกบาศก์ 50 มิลลิเมตร เมื่อใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0 15 30 50 และ 70 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.55 และบ่มด้วยน้ำเป็นเวลา 0 3 7 14 28 และ 182 ผลการวิจัยพบว่า การบ่มด้วยน้ำเป็นวิธีการที่จะช่วยให้การพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าเป็นไปอย่างต่อเนื่องได้โดยมอร์ต้าผสมเถ้าถ่านหินที่บ่มด้วยน้ำตลอดเวลาจะมีกำลังอัดสูงขึ้นเมื่ออายุมากขึ้น และมอร์ต้าที่ใช้เถ้าถ่านหินในส่วนผสมน้อยกว่าจะมีกำลังสูงกว่ามอร์ต้าที่ใช้เถ้าถ่านหินในส่วนผสมมากกว่า แต่กำลังอัดของมอร์ต้าผสมเถ้าถ่านหินทั้งหมดยังคงมีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าควบคุมทุกอายุการทดสอบ เมื่อดูถึงผลกระทบจากระยะเวลาในการบ่มพบว่า เมื่อใช้เถ้าถ่านหินในส่วนผสมที่เท่ากัน มอร์ต้าที่บ่มนานกว่าจะมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าที่บ่มน้อยกว่า ซึ่งอาจกล่าวได้ว่ามอร์ต้าที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณมากขึ้นต้องการระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น เพื่อให้มีกำลังอัดที่ใกล้เคียงกับมอร์ต้าที่มีการบ่มตลอดเวลา

คม บัวคี่ และบุญไชย สถิตมั่นในธรรม (2554) บทความนี้เสนอผลการทดลองเกี่ยวกับกระบวนการผสมคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบวิธีการผสม และระยะเวลาของการผสมที่เหมาะสมที่จะให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัวมากที่สุด โดยเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตปกติ และคอนกรีตที่ใส่เถ้าลอยเป็นหลัก จากผลการทดลองพบว่าเถ้าลอยช่วยลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้การผสมลดลงเนื่องจากรูปร่างที่กลม และผิวสัมผัสที่ลื่นทำให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคมีค่าต่ำ แต่สำหรับระยะเวลาการผสมที่เหมาะสมนั้น มีค่าต่ำกว่าระยะเวลาการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตปกติเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงสรุปได้ว่าสามารถทำการผสมคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย โดยใช้ระยะเวลาการผสมที่เหมาะสมเดียวกับคอนกรีตปกติได้ตามข้อเสนอแนะของ ACI โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่ได้

ธีรดี ศรีจันทร์ และคณะ (2554) วิจัยนี้ศึกษาผลของการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานร่วม ปูนซีเมนต์กับเถ้าลอย ปูนซีเมนต์กับผงหินปูน และปูนซีเมนต์กับเถ้าลอยกับผงหินปูน ได้ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 3 และ 5 ตามมาตรฐาน ASTM C 150 เพื่อศึกษาผลของความละเอียด องค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกันของปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย ประเภท 2 ก และ 2 ข (ตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1014) ซึ่งผลของชนิดของเถ้าลอย ผงหินปูนที่ใช้ในการทดสอบมีความละเอียด 5 ไมครอน สภาพการบ่มที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ การบ่มด้วยน้ำ และบ่มในอากาศ กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยน้ำหนัก เท่ากับ 0.35 และ 0.55 การศึกษาได้ประเมินอิทธิพลของการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยใช้ดัชนีวัดผลต่อการบ่ม เป็นอัตราส่วนของความแตกต่างด้านกำลังอัดของตัวอย่างที่ใช้บ่มในน้ำกับการบ่มในอากาศ เทียบกับกำลังอัดของตัวอย่างที่บ่มในน้ำ ในกรณีที่คอนกรีตมีค่า CSI สูง แสดงว่าการบ่มมีอิทธิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีตนั้น ๆ สูง จากการศึกษาพบว่า การบ่มมีอิทธิพลอย่างมากต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต คอนกรีตที่ได้รับการบ่มน้ำจะมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่บ่มในอากาศ เมื่อเปรียบเทียบผลตามชนิดของปูนซีเมนต์พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 จะมีผลต่อการบ่มน้ำมากที่สุด ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 3 มีค่า CSI ลดลงตามลำดับ การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตทำให้ CSI สูงขึ้น โดยเถ้าลอยประเภทที่ 2 ก จะมีค่า CSI มากกว่าเถ้าลอยประเภทที่ 2 ข การใช้ผงหินปูนในคอนกรีตสามารถลด CSI ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอยได้

L. B. Andrade และคณะ (2552) ศึกษานี้ศึกษาผลของเถ้านเตาต่อคุณสมบัติของคอนกรีตโดยใช้แทนที่มวลรวมละเอียด ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต และการหดตัวแบบพลาสติก ใช้เถ้านเตาในปริมาณร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียดตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่ามีความเป็นไปได้ที่ลักษณะอนุภาคของเถ้านเตาที่เป็นรูพรุน ทำให้สามารถมีการดูดและกักเก็บน้ำไว้ในได้ การใช้เถ้านเตามีผลต่อระยะเวลาการก่อตัว การสูญเสียเนื่องจากความชื้น กำลังอัด และการหดตัวแบบพลาสติกของคอนกรีต โดยระยะเวลาการก่อตัว และการสูญเสียเนื่องจากความชื้นของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น กำลังอัด และการหดตัวแบบพลาสติกของคอนกรีตมีค่าลดลง ตามปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้านเตาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้านเตามีลักษณะเป็นรูพรุนเมื่อผสมในคอนกรีต จะมีผลต่อการดูดซึมน้ำและการสูญเสียความชื้นภายในคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้านเตาจะมีการซึมน้ำไว้ในรูพรุนของคอนกรีต ทำให้ลดการเกิดแรงดึงภายในช่องว่างคาпилลารี ส่งผลให้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงต่ำ

S. Tongaroonsri และคณะ (2555) ศึกษานี้ศึกษาผลของการกักเก็บน้ำของเถ้านเตาที่ไม่ผ่านการบดและใช้เป็นวัสดุป้อนภายใน ต่อระยะเวลาการก่อตัว การหดตัวแบบออสโตจีนัสและการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต โดยใช้เถ้านเตา 3 ชนิด ที่มีความสามารถในการกักเก็บน้ำในปริมาณร้อยละที่แตกต่างกัน ได้แก่ 18.8 21.1 และ 29.6 ตามลำดับ เถ้านเตาถูกใช้แทนที่มวลรวมละเอียด ร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และ 0.55 จากผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตผสมเถ้านเตา มีระยะเวลาการก่อตัวนานกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้านเตา คอนกรีตผสมเถ้านเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำสูง มีระยะเวลาการก่อตัวนานกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้านเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำต่ำ โดยระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นตามการแทนที่ของเถ้านเตาที่เพิ่มขึ้น คอนกรีตผสมเถ้านเตาช่วยลดการหดตัวแบบออสโตจีนัสและการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต การหดตัวลดลงตามการแทนที่ของเถ้านเตาที่เพิ่มขึ้น คอนกรีตผสมเถ้านเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำสูงมีการหดตัวต่ำกว่าคอนกรีตผสมเถ้านเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำต่ำ อาจเนื่องจากการเถ้านเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำสูงและใช้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะมีปริมาณน้ำอิสระภายในคอนกรีตมากขึ้น จึงทำให้การหดตัวลดลง และน้ำที่กักเก็บอยู่ในรูพรุนของเถ้านเตาจะค่อย ๆ ถูกนำมาใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างช้าๆ ทำให้แรงดึงคาпилลารีที่เกิดขึ้นในช่องว่างคาпилลารีลดลง เถ้านเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำสูงสามารถปลดปล่อยน้ำออกมาได้มากและยาวนานกว่าเถ้านเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำต่ำ การหดตัวแบบออสโตจีนัสจึงเกิดขึ้นน้อยลง และช่วงที่บ่มคอนกรีตในน้ำเป็นระยะเวลา 7 วัน ของการศึกษากการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต พบว่า คอนกรีตมรชีการขยายตัวในทุกส่วนผสม โดยการขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้น



ตามปริมาณเถ้านเตาที่เพิ่มขึ้น และการขยายตัวเพิ่มขึ้นตามค่าการกักเก็บน้ำที่เพิ่มขึ้นของเถ้านเตา การขยายตัวนี้จะชดเชยการหดตัวที่เกิดขึ้นภายหลัง ดังนั้นการหดตัวที่ลดลงนอกจากจะเกิดจากการที่เถ้านเตาปลดปล่อยความชื้นอย่างช้าๆ ให้กับคอนกรีตแล้ว ยังเกิดการที่คอนกรีตผสมเถ้านเตามีการขยายตัวในช่วงแรกอีกด้วย นอกจากนี้ น้ำที่ปลดปล่อยออกมายังช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้โครงสร้างของเนื้อคอนกรีตแน่นและแข็งแรง การหดตัวจึงลดลง



## บทที่ 3

### วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาจะกล่าวถึง วัสดุที่ใช้ในการศึกษา รายละเอียดวิธีการศึกษา และสัดส่วนผสมของ เพลสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้ประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย ทราฮิน และน้ำ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) ตามมาตรฐาน ASTM C 150 โดยมีลักษณะเป็นปูนซีเมนต์ใหม่และไม่จับตัวเป็นก้อน

3.1.2 เถ้าลอย (Fly Ash) ที่ใช้ในการศึกษาจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง จำนวน 3 ชนิด (FA FB และ FC) และ โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง จำนวน 1 ชนิด (FR)



รูปที่ 3.1 เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา

3.1.4 ทราฮิน (Sand) ใช้ทรายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกจนสะอาด นำไปอบและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และปรับทรายเป็นให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

3.1.5 หิน (Stone) เลือกที่ไม่มีสิ่งเจือปน นำไปล้างด้วยน้ำสะอาดและร่อนค้ำตะแกรงเบอร์ 4 และนำไปอบแห้ง

3.1.6 น้ำ (Water) ในการศึกษาคั้งนี้ใช้น้ำประปาที่สะอาด

### 3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับรายละเอียดวิธีการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาหรือทดสอบสมบัติในด้านต่างๆ ได้แก่ สมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานและคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 สมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเส้นลวดที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

3.2.1.1 ความถ่วงจำเพาะ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188 โดยใช้ขวดมาตรฐานเลอชาเตอรัลเยร์ (Le Chatelier Flask) หาอัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรแทนที่ในน้ำมันก๊าด

3.2.1.2 ความละเอียดโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 204 ด้วยเครื่องมือแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์ (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 เครื่องมือแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์ (Air Permeability Apparatus)

3.2.1.3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค ด้วยการทดสอบภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค กระทำโดยวิธี Scanning Electric Microscope (SEM)

3.2.1.4 องค์ประกอบทางเคมี กระทำโดยวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุ องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF)

3.2.2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสม การก่อตัว และการขยายตัวในเตาอโตเคลฟของเพสต์ โดยมีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

3.2.2.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 187 ด้วยวิธีเข็มไวแคท (Vicat Apparatus)

3.2.2.2 การก่อตัว (Setting Time) โดยการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 191 ซึ่งทำการก่อตัวระยะต้นและระยะเวลาก่อตัวระยะปลายตัวของซีเมนต์เพสต์ ด้วยเครื่องมือไวแคท

3.2.2.3 การขยายตัวในเตาอโตเคลฟ (Autoclave Expansion) ของเพสต์ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 151 โดยมีขั้นตอนดังนี้ ทำความสะอาดหม้อผสม (Mixer) ทำให้แห้งใสน้ำที่คำนวณได้เทลงในหม้อผสมใส่ปูนซีเมนต์ผสมเข้าตามอัตราส่วนที่ขังไว้ เมื่อส่วนผสมเข้ากันดีแล้ว ทำการหล่อแบบตัวอย่างขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยหล่อเป็น 2 ชั้น ชั้นละเท่าๆ กัน และทำการอัดแต่ละชั้น โดยใช้เครื่องสั่นสะเทือน เพื่อให้ซีเมนต์เพสต์ไหลเข้าตามมุมและขอบ หลังจากนั้นก็ใช้เกรียงแต่งผิวหน้าให้เรียบ เมื่อหล่อแห้งทดสอบเสร็จแล้วครบ 24 ชั่วโมง ทำการบ่มแห้งทดสอบ ให้รับน้ำหนักทดสอบไปเก็บไว้ในตู้ขึ้นหรือห้องขึ้นทันที โดยต้องเก็บไว้ในตู้ขึ้นหรือห้องขึ้นที่อุณหภูมิห้องโดยวางขึ้นทดสอบบนตะแกรงโดยให้ผิวทุกด้านของขึ้นทดสอบถูกไอน้ำอิ่มตัวเตาอโตเคลฟ จะต้องมือน้ำเพียงพอที่จะระเหยเป็นไอน้ำชนิดอิ่มตัวได้ตลอดระยะเวลาหนึ่ง โดยใสน้ำในเตาอโตเคลฟ ที่ระดับ 7 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณที่เตาอโตเคลฟ มีได้เปิดลิ้นที่อากาศไว้เพื่อให้อากาศในเตาอโตเคลฟ ออกในช่วงแรกที่ทำให้ร้อนจนกระทั่งไอน้ำเริ่มผ่านออกจึงปิดลิ้น และเพิ่มอุณหภูมิของเตาอโตเคลฟ ในอัตราที่ทำให้ความดันของไอน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 2 MPa ภายในเวลา 45 ถึง 75 นาที หลังจากเริ่มให้ความร้อน ให้ควบคุมความดันให้อยู่ในระดับ  $2 \pm 0.07$  MPa เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นหยุดให้ความร้อนแล้วปล่อยให้เตาอโตเคลฟ เย็นลงจนความดันลดต่ำกว่า 0.07 MPa เมื่อครบ 1 ชั่วโมง 30 นาทีแล้ว จึงค่อยๆเปิดลิ้นระบายอากาศให้ความดันที่ค้างอยู่ภายในเตาอโตเคลฟ เท่าความดันบรรยากาศ แล้วเปิดฝาเตาอโตเคลฟ นำแท่งทดสอบออกไปแช่ในน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส แล้วทำให้อุณหภูมิ น้ำที่แช่แท่งทดสอบลดลงในอัตราสม่ำเสมอจนถึง 23 องศาเซลเซียส ในเวลา 15 นาที โดยค่อยๆเติมน้ำเย็นลงไปปล่อยแท่งทดสอบให้แช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ต่อไปอีก 15 นาที เช็ดแท่งทดสอบให้แห้งและวัดความยาวอีกครั้ง

3.2.3 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ การหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ โดยมีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

3.2.3.1 ความต้องการน้ำ (Water Requirement) ของมอร์ตาร์ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1437

3.2.3.2 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์

ในการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) ของมอร์ตาร์ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 157 โดยใช้ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ ซึ่งเตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชิ้นด้วยกัน เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยของการหดตัวเมื่อหล่อขึ้นงานเสร็จแล้วให้นำมาหุ้มด้วยพลาสติก เพื่อไม่ให้น้ำระเหยออกเมื่อครบ 1 วัน แกะแบบออกแล้วหุ้มด้วยพลาสติกและห่อด้วยฟอยอีกชั้นหนึ่ง แล้ววัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะที่มีความยาวคงที่มาตรฐาน ซึ่งค่าที่วัดได้นั้นจะเป็นค่าความยาวเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่างในแต่ละสัดส่วนการผสม เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ จะเก็บชิ้นตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยจัดวางชิ้นตัวอย่างไว้บนโต๊ะให้มีระยะห่างแต่ละชิ้นไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับเหล็กโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุ 1 7 14 28 56 และ 91 วัน แต่ละอายุการทดสอบจะมีตัวอย่างที่ทดสอบ จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวที่อายุบ่มต่างๆ กัน

3.2.3.3 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์

ในการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ของมอร์ตาร์ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 596 โดยใช้ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ ซึ่งเตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร โดยในแต่ละสัดส่วนการผสมคอนกรีตที่ใช้งานวิจัยจะใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีต จำนวน 3 ชิ้นด้วยกัน เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยของการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ หลังจากที่ได้หล่อขึ้นตัวอย่างคอนกรีตโดยถอดออกจากแบบหล่อตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 7 วัน เมื่อเสร็จสิ้นการบ่ม จะนำชิ้นตัวอย่างทั้ง 3 ชิ้นขึ้นจากน้ำ เช็ดด้วยผ้าแห้งแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิบรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา จะเข้าสู่กระบวนการชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งและวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะที่มีความยาวมาตรฐาน (รูปที่ 3.3) ซึ่งค่าที่วัดได้นั้นจะเป็นค่าความยาวเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่างในแต่ละสัดส่วนการผสม เมื่อสิ้นสุดกระบวนการวัดต่าง ๆ จะเก็บชิ้นตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยจัดวางชิ้นตัวอย่างไว้บนโต๊ะให้มีระยะห่างของแต่ละชิ้นไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับเหล็กโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุ 1 7 14 28 56 และ 91 วัน แต่ละอายุการทดสอบจะมีตัวอย่างที่ทดสอบ จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวที่อายุบ่มต่าง ๆ กัน



รูปที่ 3.3 เครื่องมือวัดหาค่าการหดตัว (Length Capacity) ของมอร์ตาร์ เทียบกับแท่งโลหะที่มีความยาวมาตรฐาน

3.2.4 ค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

3.2.4.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 143 ด้วยกรวยทดสอบการยุบตัว (Slump Cone)

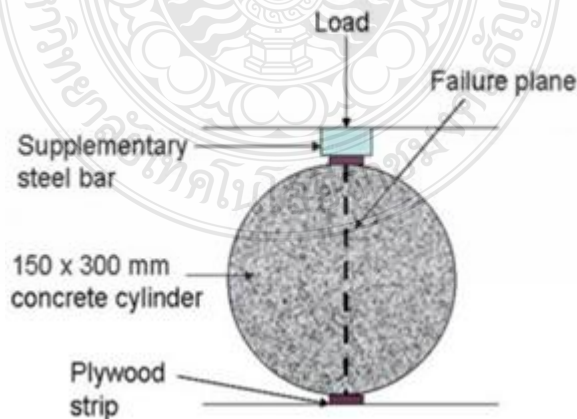
3.2.4.2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน BS 1881 ด้วยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 100x100x100 มิลลิเมตร และทำการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดประลัย (Universal Testing Machine) (รูปที่ 3.4) นำคอนกรีตเทลงในแบบหล่อแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นการทำให้เป็น เมื่อคอนกรีตอายุ 24 ชั่วโมง นำออกจากแบบและนำไปบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่อายุ 1 7 14 28 56 และ 91 วัน





รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบกำลังอัดประลัย (Universal Testing Machine)

3.2.4.3 กำลังดึงของคอนกรีตโดยวิธี Splitting Tensile Test ตามมาตรฐานมาตรฐาน ASTM C 496 ใช้แบบหล่อตัวอย่าง เส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร นำคอนกรีตเทลงในแบบหล่อแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นการทำให้เป็น แต่งผิวหน้าให้เรียบ เมื่อคอนกรีตอายุ 24 ชั่วโมง นำออกจากแบบและนำไปบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่อายุ 28 และ 91 วัน โดยการทดสอบแรงดึงคอนกรีต จะวางตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกในแนวนอนเครื่องทดสอบ แล้วกดด้วยแรงที่เป็นเส้น (Line Load) จนกระทั่งชิ้นตัวอย่างแยกออกจากกันเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน (รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 การทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตโดยวิธี Splitting Tensile Strength

### 3.3 สัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับสัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดของสัดส่วนผสมต่างๆ ดังนี้

3.3.1 การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม การก่อตัว และการขยายตัวในเตาอบโตเคลฟของเพสต์โดยแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 (ตารางที่ 3.1)

3.3.2 การทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์โดยแทนที่เถ้าลอยผสมคอนกรีตประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยใช้ทรายต่อวัสดุประสาน (s/b) เท่ากับ 2.75 และอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 และ 0.55 นำไปบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่อายุ 1 7 14 28 56 และ 91 วัน (ตารางที่ 3.2)

3.3.3 การทดสอบหาค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงของคอนกรีต ในอัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 20 และ 40 และตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 และ 0.55 นำไปบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่อายุ 1 7 14 28 56 และ 91 วัน (ตารางที่ 3.3)

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของวัสดุประสานที่ใช้ในการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม ค่าการก่อตัว และการขยายตัวในเตาอบโตเคลฟของเพสต์

ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสม โดยน้ำหนัก (กรัม)				
		ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอยแม่เมาะ			เถ้าลอยระยะของ
			FA	FB	FC	
1	PC	1.00	-	-	-	-
2	PC-20FA	0.80	0.20	-	-	-
3	PC-40FA	0.60	0.40	-	-	-
4	PC-20FB	0.80	-	0.20	-	-
5	PC-40FB	0.60	-	0.40	-	-
6	PC-20FC	0.80	-	-	0.20	-
7	PC-40FC	0.60	-	-	0.40	-
8	PC-20FR	0.80	-	-	-	0.20
9	PC-40FR	0.60	-	-	-	0.40



ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวของแบบบ่อโตนี้น้ำและแบบแห้ง โดยใช้อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 และ 0.55

ที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กรัม)				ทราย	น้ำ
			เกล็ดลอย					
			แม่เมาะ		ระยอง			
FA	FB	FC	FR					
1	MC-0.40	1.00	-	-	-	-	2.75	0.40
2	MC-0.55	1.00	-	-	-	-	2.75	0.55
3	MC-20FA-0.40	0.80	0.20	-	-	-	2.75	0.40
4	MC-20FA-0.55	0.80	0.20	-	-	-	2.75	0.55
5	MC-40FA-0.40	0.60	0.40	-	-	-	2.75	0.40
6	MC-40FA-0.55	0.60	0.40	-	-	-	2.75	0.55
7	MC-20FB-0.40	0.80	-	0.20	-	-	2.75	0.40
8	MC-20FB-0.55	0.80	-	0.20	-	-	2.75	0.55
9	MC-40FB-0.40	0.60	-	0.40	-	-	2.75	0.40
10	MC-40FB-0.55	0.60	-	0.40	-	-	2.75	0.55
11	MC-20FC-0.40	0.80	-	-	0.20	-	2.75	0.40
12	MC-20FC-0.55	0.80	-	-	0.20	-	2.75	0.55
13	MC-40FC-0.40	0.60	-	-	0.40	-	2.75	0.40
14	MC-40FC-0.55	0.60	-	-	0.40	-	2.75	0.55
15	MC-20FR-0.40	0.80	-	-	-	0.20	2.75	0.40
16	MC-20FR-0.55	0.80	-	-	-	0.20	2.75	0.55
17	MC-40FR-0.40	0.60	-	-	-	0.40	2.75	0.40
18	MC-40FR-0.55	0.60	-	-	-	0.40	2.75	0.55

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ  
ประสาน เท่ากับ 0.40 และ 0.55

ที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	ส่วนผสมของวัสดุต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)						
			ถั่วลอย				ทราย	หิน	น้ำ
			แม่เมาะ		ระยอง				
FA	FB	FC	FR						
1	CC-0.40	332	-	-	-	-	970	1,080	132
2	CC -0.55	332	-	-	-	-	970	1,080	182
3	CC -FA20-0.40	266	66	-	-	-	970	1,080	133
4	CC-FA20-0.55	266	66	-	-	-	970	1,080	182
5	CC-FA40-0.40	199	133	-	-	-	970	1,080	133
6	CC-FA40-0.55	199	133	-	-	-	970	1,080	182
7	CC-FB20-0.40	266	-	66	-	-	970	1,080	133
8	CC-FB20-0.55	266	-	66	-	-	970	1,080	182
9	CC-FB40-0.40	199	-	133	-	-	970	1,080	133
10	CC-FB40-0.55	199	-	133	-	-	970	1,080	182
11	CC-FC20-0.40	266	-	-	66	-	970	1,080	133
12	CC-FC20-0.55	266	-	-	66	-	970	1,080	182
13	CC-FC40-0.40	199	-	-	133	-	970	1,080	133
14	CC-FC40-0.55	199	-	-	133	-	970	1,080	182
15	CC-FR20-0.40	266	-	-	-	66	970	1,080	133
16	CC-FR20-0.55	266	-	-	-	66	970	1,080	182
17	CC-FR40-0.40	199	-	-	-	133	970	1,080	133
18	CC-FR40-0.55	199	-	-	-	133	970	1,080	182

กำหนดให้สัญลักษณ์ที่ใช้ในการแทนความหมายต่างๆ ในการทำวิจัย ดังนี้

PC หมายถึง ตัวอย่างเพสต์ปูนซีเมนต์มาตรฐานปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

MC หมายถึง ตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์มาตรฐานปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

CC หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์มาตรฐานปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

20FA หมายถึง ถ้าวาลูจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะชนิด FA แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

20FB หมายถึง ถ้าวาลูจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะชนิด FB ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานทั้งหมด

20FC หมายถึง ถ้าวาลูจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะชนิด FC ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานทั้งหมด

20FR หมายถึง ถ้าวาลูจากโรงงานไฟฟ้าระยองชนิด FR ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานทั้งหมด

40FA หมายถึง ถ้าวาลูจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะชนิด FA ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสานทั้งหมด

40FB หมายถึง ถ้าวาลูจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะชนิด FB ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสานทั้งหมด

40FC หมายถึง ถ้าวาลูจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะชนิด FC ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสานทั้งหมด

40FR หมายถึง ถ้าวาลูจากโรงงานไฟฟ้าระยองชนิด FR ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสานทั้งหมด

0.40 หมายถึง อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40

0.55 หมายถึง อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55

ตัวอย่าง การอ่านค่าสัญลักษณ์ที่ใช้ในการแทนความหมายต่างๆ ดังนี้

PC-20FA หมายถึง เพสค์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอย FA ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

MC-20FB-0.40 หมายถึง มอร์ต้าร์ผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอย FB ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

CC-40FC-0.55 หมายถึง คอนกรีตผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอย FB ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55



## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิเคราะห์

สำหรับการศึกษาผลกระทบของชนิดแก้วลอยต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต ในครั้งนี้ได้พิจารณาผลการศึกษาและวิเคราะห์ สมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา และสมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต ผสมแก้วลอย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 สมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และแก้วลอยจำนวน 4 ชนิด ได้แก่ แก้วลอยแม่เมาะ จังหวัดลำปาง จำนวน 3 ชนิด (FA FB และ FC) และแก้วลอย BLCP จังหวัดระยอง จำนวน 1 ชนิด (FR) โดยสมบัติของวัสดุประสานที่ศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน และภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค Scanning Electronic Microscope (SEM) และองค์ประกอบทางเคมี X-ray Fluorescence (XRF) โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.1.1 ความถ่วงจำเพาะ

จากผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา โดยแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 3.14 ส่วนแก้วลอยแม่เมาะ ชนิด FB FC และ FA มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.57 2.55 และ 2.21 ตามลำดับ และแก้วลอยของ BLCP ชนิด FR มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.17

##### 4.1.2 ความละเอียดโดยวิธีเบลน

ผลการทดสอบความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา โดยแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าความละเอียดโดยวิธีเบลน เท่ากับ 3,190 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม สูงกว่าแก้วลอยที่ใช้ในการศึกษา โดยแก้วลอยแม่เมาะ ชนิด FA FB และ FC มีค่าความละเอียดโดยวิธีเบลน เท่ากับ 2,867 2,820 และ 2,722 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และแก้วลอย BLCP ชนิด FR มีค่าความละเอียดโดยวิธีเบลนเท่ากับ 2,723 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และเถ้าลอยที่ใช้

รายการ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย			
		FA	FB	FC	FR
ความถ่วงจำเพาะ	3.14	2.21	2.57	2.55	2.17
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ซม. <sup>2</sup> /ก.)	3,190	2,867	2,820	2,722	2,723

#### 4.1.3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค

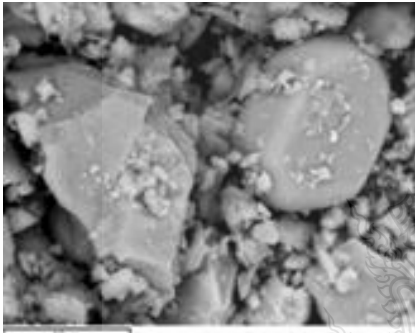
ในการถ่ายภาพขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสานในครั้งนี้ใช้วิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) โดยลักษณะของอนุภาคของวัสดุประสานซึ่งเป็นภาพถ่าย กำลังขยาย 3,500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าลักษณะรูปร่างของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (รูปที่ ก) มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม มีมิติ ลักษณะผิวขรุขระ ขนาดคละกันไม่แน่นอนแตกต่างกันไปกระจายอยู่ทั่ว ๆ ไป ในขณะที่ลักษณะของอนุภาคของเถ้าลอยแม่เมาะ FA (รูปที่ ข) จะมีลักษณะรูปร่างแตกต่างกับอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ซึ่งมีลักษณะของอนุภาคที่ค่อนข้างกลมมน ไม่มีเหลี่ยมมุม มีขนาดคละกันกระจัดกระจายอยู่ทั่ว ๆ ไป และส่วนอนุภาคของเถ้าลอย BLCF (รูปที่ ค) จะมีลักษณะเช่นเดียวกับเถ้าลอยแม่เมาะ แต่มีลักษณะผิวขรุขระไม่เรียบ และเมื่อเปรียบเทียบที่ขนาดของอนุภาคมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน และพบว่าเถ้าลอย BLCF จะมีความพรุนและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่ามากกว่าเถ้าลอยแม่เมาะ

#### 4.1.4 องค์ประกอบทางเคมี

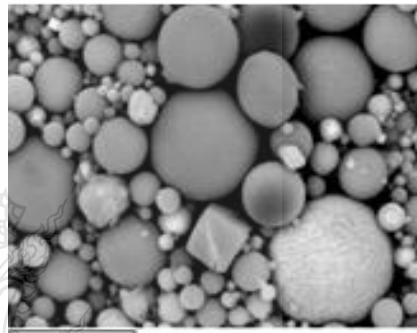
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี X-ray Fluorescence (XRF) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าปริมาณ SiO<sub>2</sub> ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าเท่ากับร้อยละ 18.93 โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้าลอยแม่เมาะ ทั้งหมด 3 ชนิด คือ FA FB และ FC มีค่าเท่ากับร้อยละ 35.71 26.61 และ 25.22 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนเถ้าลอย BLCF ชนิด FR มีค่ามากที่สุด คือเท่ากับร้อยละ 61.46 ในส่วนปริมาณของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> นั้นพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยมีค่าน้อยกว่าเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา เท่ากับร้อยละ 5.51 และ 3.31 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วน Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ของเถ้าลอย FA FB FC และ FR เท่ากับร้อยละ 20.44 13.60 13.88 และ 20.27 ตามลำดับ และปริมาณของ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ของเถ้าลอย FA FB FC และ FR เท่ากับร้อยละ 15.54 18.34 17.39 และ 5.56 ตามลำดับ FA แต่ค่าปริมาณ CaO ที่

พบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน กับมีค่ามากกว่าเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา มีค่าเท่ากับ 65.53 โดยน้ำหนัก

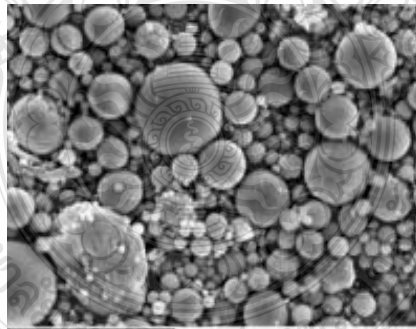
ในส่วนของการออกไซด์รองอื่นๆ  $MgO$   $Na_2O$   $K_2O$  และ  $SO_3$  พบว่าในวัสดุประสานแต่ละชนิดที่ใช้ในการศึกษามีค่าค่อนข้างน้อยและมีปริมาณที่ไม่แตกต่างกันมาก โดยเถ้าลอย FR มีค่าของ  $SO_3$  มีค่าค่อนข้างต่ำร้อยละ 0.38 ซึ่งส่งผลต่อการขยายตัวและอาจทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ง่าย และมีค่า LOI การสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการเผาไหม้ เถ้าลอย FR มีค่าค่อนข้างสูงประมาณร้อยละ 5.38 เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยของแม่เมาะทั้ง 3 ชนิด



ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน



ข) เถ้าลอยแม่เมาะชนิด FA จังหวัดลำปาง



ค) เถ้าลอย BLCP ชนิด FR จังหวัดระยอง

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคขนาด 3,500 เท่า ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย

ตารางที่ 4.2 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย

รายการ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย			
		FA	FB	FC	FR
SiO <sub>2</sub>	18.93	35.71	26.61	25.22	61.46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.51	20.44	13.60	13.88	20.27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.31	15.54	18.34	17.39	5.56
CaO	65.53	16.52	24.97	26.25	1.73
MgO	1.24	2	2.33	2.38	0.96
Na <sub>2</sub> O	0.15	1.15	1.75	1.4	0.73
K <sub>2</sub> O	0.31	2.41	1.77	1.92	1.36
SO <sub>3</sub>	2.88	4.26	8.53	9.44	0.38
LOI	-	0.49	0.53	0.56	5.38
Free Lime	-	1.71	3.93	3.06	0.03

#### 4.2 สมบัติของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต

โดยสมบัติของเพสต์ประกอบด้วย ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) และการขยายตัวในเตาอโอโตคลอฟ (Autoclave Expansion) สมบัติของมอร์ต้าร์ประกอบด้วย ความต้องการน้ำ (Water Requirement) การหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) และการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) และสมบัติของคอนกรีตประกอบด้วย ค่าการยุบตัว (Slump) กำลังอัดประลัย (Compressive strength) และกำลังดึง (Splitting Tensile Strength) โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.2.1 สมบัติของเพสต์

##### 4.2.1.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.2 แสดงปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด คือ FA FB FC และFR โดยแทนที่เถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 พบว่าเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยแม่เมาะชนิด FA FB และ FC

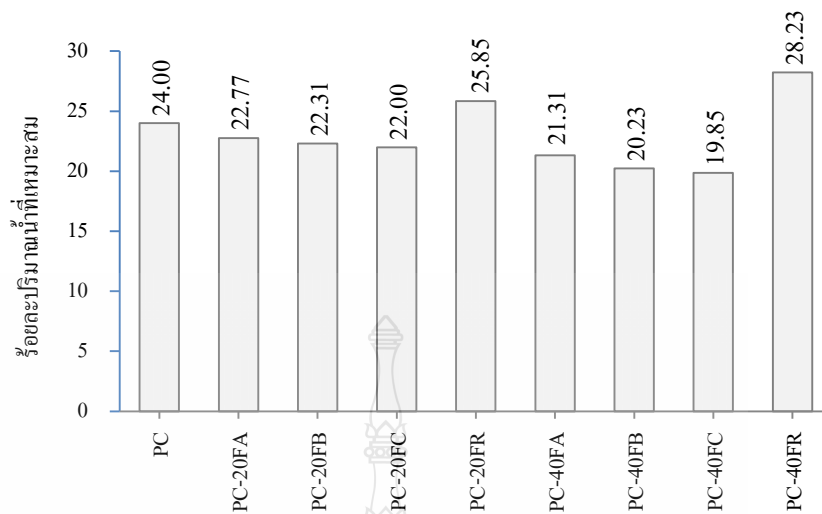


ในอัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 20 และ 40 มีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์น้อยกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ปริมาณเถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยแม่เมาะมีลักษณะอนุภาคที่ค่อนข้างกลมมนช่วยในการลื่นไหล ทำให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมน้อยลง ส่วนเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย BLCF ชนิด FR ในอัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 20 และ 40 ผลของปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มีค่ามากกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ซึ่งในกรณีนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอย BLCF ชนิด FR มีลักษณะพื้นผิวที่ไม่เรียบไม่ช่วยในการลื่นไหล และยังมีค่าความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่งผลให้ปริมาณเถ้าลอยมีมากขึ้น ทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นตามปริมาณ จึงมีความต้องการปริมาณน้ำที่เหมาะสมเพิ่มมากขึ้น

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ ทั้ง 3 ชนิด ทั้งอัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 20 และ 40 พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ที่ผสมเถ้าลอยชนิด FA มีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมมากกว่าของชนิด FB และ FC ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยชนิด FA ค่าความละเอียดของอนุภาคที่มีค่าที่มากกว่าทำให้มีพื้นที่ผิวมาก ส่งผลทำให้มีความต้องการปริมาณน้ำที่เหมาะสมมากขึ้น รวมทั้งค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยชนิด FA มีค่าที่น้อยกว่า (แทนที่โดยน้ำหนัก) ยังส่งผลทำให้มีปริมาณที่มากขึ้นความต้องการน้ำที่เหมาะสมก็มากตามเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.3 ร้อยละปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

สัดส่วน	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม
PC	24.00
PC-20FA	22.77
PC-20FB	22.31
PC-20FC	22.00
PC-20FR	25.85
PC-40FA	21.31
PC-40FB	20.23
PC-40FC	19.85
PC-40FR	28.23



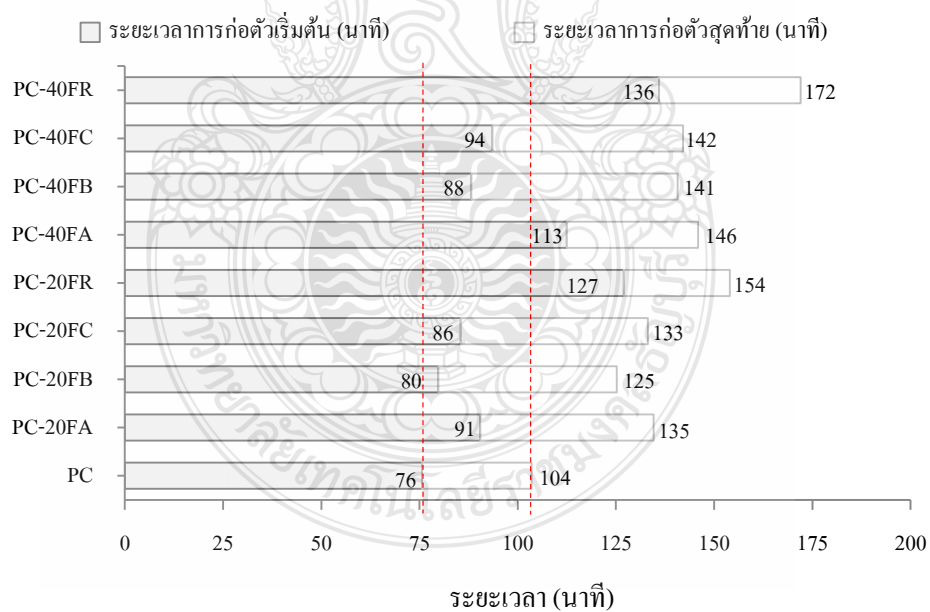
รูปที่ 4.2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

#### 4.2.1.2 ระยะเวลาการก่อตัว

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.3 แสดงระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ของเพสต์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด คือ FA FB FC และ FR โดยแทนที่เถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 พบว่าเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ ชนิด FA FB FC และเถ้าลอย BLCF ชนิด FR ในอัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 20 และ 40 มีค่าระยะเวลาการก่อตัวที่ช้ากว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ปริมาณเถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้เถ้าลอย ซึ่งเป็นสารปอซโซลานเมื่อผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะส่งผลให้ลดปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้น้อยลง และการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดหลังและช้ากว่า เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานต้องอาศัยแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ในการทำปฏิกิริยาโดยที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นผลผลิตจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อพิจารณาระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา ทั้ง 4 ชนิด ในอัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 20 พบว่ามีค่าระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์เร็วกว่าอัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 40 และเพสต์ที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะชนิด FB มีแนวโน้มว่าการก่อตัวเร็วกว่าชนิด FC FA และเพสต์ที่ผสมเถ้าลอย BLCF ชนิด FR ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยชนิด FB มีค่า Free Lime ที่สูงกว่า ดังตารางที่ 4.2 ส่งผลให้ Free Lime ทำปฏิกิริยากับน้ำเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากขึ้นให้ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์เร็วกว่า

ตารางที่ 4.4 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

สัปดาห์	ระยะเวลาการก่อตัว	
	เริ่มต้น (นาที)	สุดท้าย (นาที)
PC	76	104
PC-20FA	91	135
PC-20FB	80	125
PC-20FC	86	133
PC-20FR	127	154
PC-40FA	113	146
PC-40FB	88	141
PC-40FC	94	142
PC-40FR	136	172



รูปที่ 4.3 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

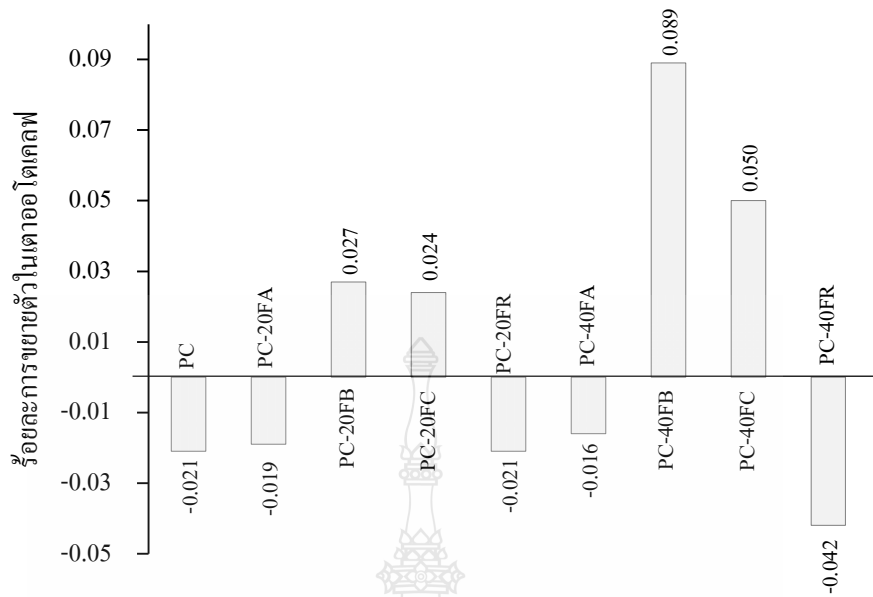
#### 4.2.1.3 การขยายตัวในเตาอโตเคลฟ

ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.4 แสดงการขยายตัวในเตาอโตเคลฟ (Autoclave Expansion) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมเถ้าลอย พบว่าเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ไม่เกิดการขยายตัว กลับมีแนวโน้มเกิดการหดตัว ในขณะที่เพสต์ผสมเถ้าลอย FB และ FC มีค่าการขยายตัว ซึ่งการขยายตัวในเตาอโตเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ที่มากกว่า (ปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า) ผลทำให้การหดตัวที่มากกว่า และมีการขยายตัวที่น้อยกว่า ส่วนเพสต์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด คือ FA FB FC และ FR โดยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 พบว่าเพสต์ผสมเถ้าลอย FB และ FC มีการขยายในเตาอโตเคลฟมีค่ามากกว่าของเพสต์ FA และ FR ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณ Free Lime ที่มีมากกว่า (FB เท่ากับ 3.93 และ FC เท่ากับ 3.06) อย่างไรก็ตามการขยายตัวในเตาอโตเคลฟของเพสต์ทั้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และของเพสต์ผสมเถ้าลอย มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 0.8 ซึ่งไม่เกินค่าตามมาตรฐาน ASTM C 618

ตารางที่ 4.5 ร้อยละการขยายตัวในเตาอโตเคลฟของเพสต์

สัดส่วน	ค่าการขยายตัวในเตาอโตเคลฟ
C	-0.02
PC-20FA	-0.019
PC-20FB	0.027
PC-20FC	0.02
PC-20FR	-0.021
PC-40FA	-0.016
PC-40FB	0.089
PC-40FC	0.050
PC-40FR	-0.042

หมายเหตุ เครื่องหมาย ดิคลบ หมายถึง การหดตัว



รูปที่ 4.4 การขยายตัวในเตาอบโทเคลฟ

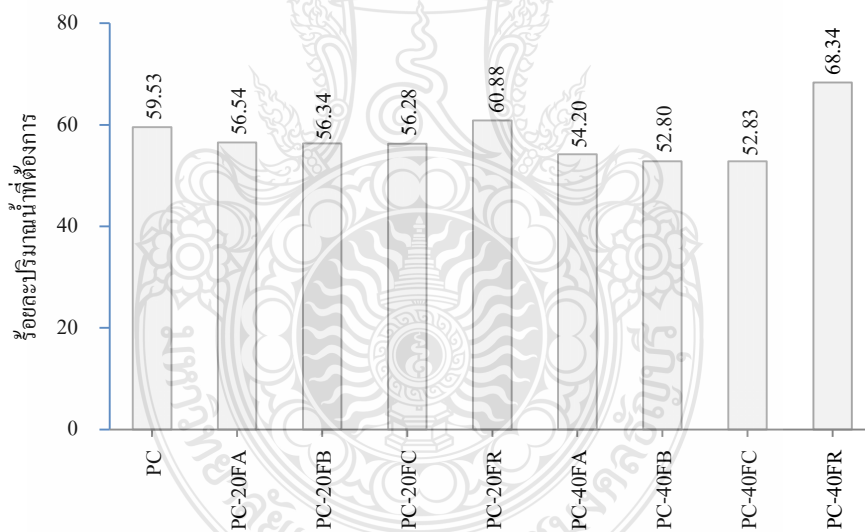
#### 4.2.2 สมบัติของมอร์ตาร์

##### 4.2.2.1 ความต้องการน้ำ

ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.5 แสดงความต้องการน้ำ (Water Requirement) ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด พบว่าปริมาณน้ำที่ต้องการเพื่อให้ค่าการไหล (Flow) เท่ากับร้อยละ  $110 \pm 5$  ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด มีผลไปในทิศทางเดียวกับปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ กล่าวคือ เมื่อเพสต์มีปริมาณน้ำที่เหมาะสมมาก จะส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ตาร์มาก ในทำนองกลับกันถ้าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์น้อยจะส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ตาร์น้อย เหตุผลดังที่กล่าวมาแล้วซึ่งจะเห็นได้ว่าความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ ทั้ง 3 ชนิด (FA FB และ FC) นั้นมีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย BLCF ชนิด (FR) มีค่าความต้องการน้ำที่มากกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

ตารางที่ 4.6 ร้อยละความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ท

ตัวอย่างเพสต์	ปริมาณน้ำที่ต้องการ
PC	59.53
PC-20FA	56.54
PC-20FB	56.34
PC-20FC	56.28
PC-20FR	60.88
PC-40FA	54.20
PC-40FB	52.80
PC-40FC	52.83
PC-40FR	68.34



รูปที่ 4.5 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ทเพื่อให้ค่าการไหล (Flow) เท่ากับร้อยละ  $110 \pm 5$

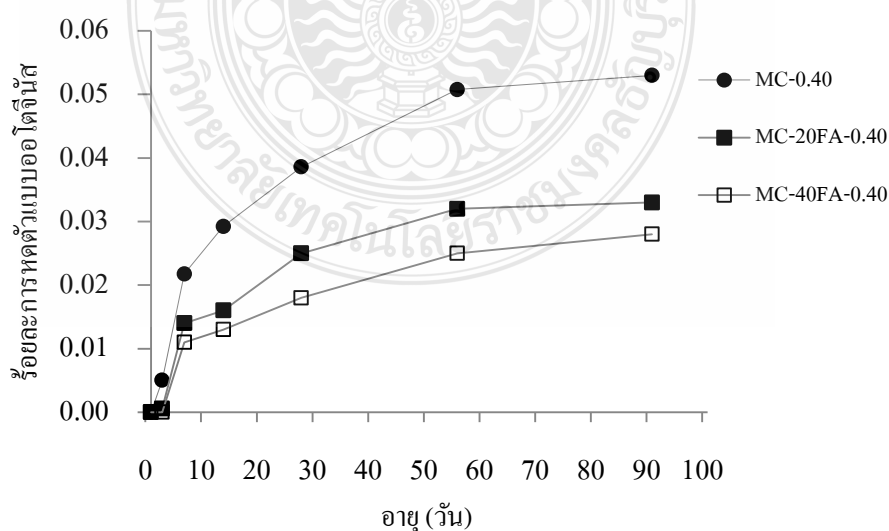
#### 4.2.2.2 การหดตัวของแบบอโตจีนัส

สำหรับการศึกษากการหดตัวของแบบอโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) ของมอร์ต้าร์ ในครั้งนี้ ประกอบด้วยมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด คือ FA FB FC และ FR ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยผสมแทนที่ในอัตราส่วน ร้อยละ 20 และ 40 ได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อการหดตัวของแบบอโตจีนัสของมอร์ต้าร์ 1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน 2) ผลกระทบจากชนิดของเถ้าลอย และ 3) ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

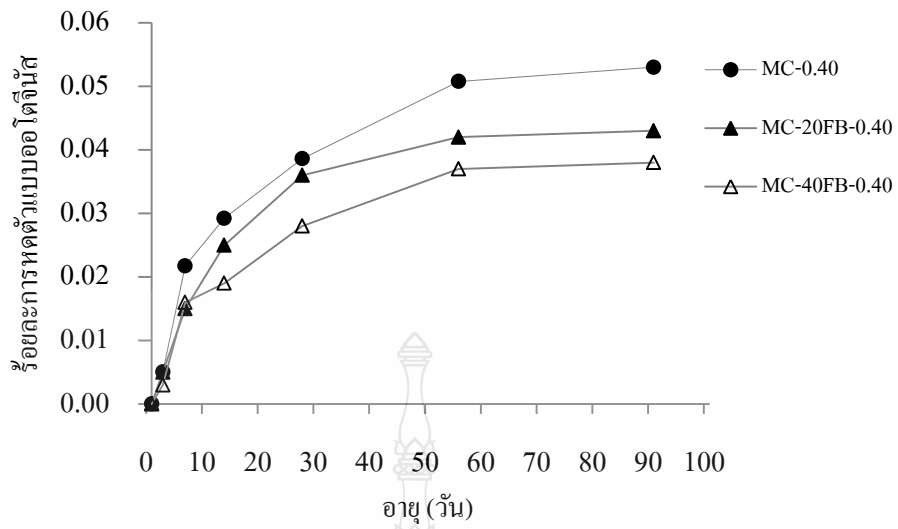
1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

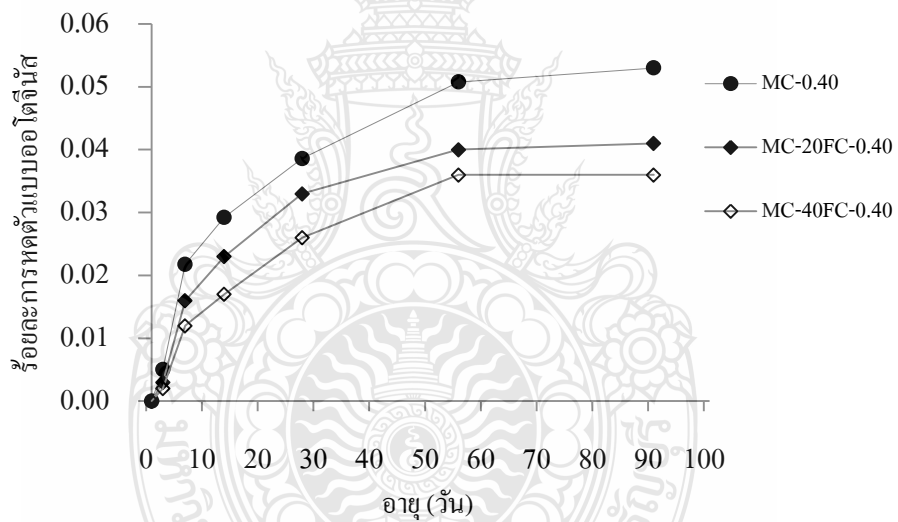
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของแบบอโตจีนัสและอายุ ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด โดยผสม แทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยใช้อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 พบว่า การขยายตัวของแบบอโตจีนัสของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น (ร้อยละ 40) ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่เถ้าลอยเป็นการลด ปริมาณปูนซีเมนต์ลง และเถ้าลอยยังช่วยเพิ่มปริมาณน้ำอิสระให้แก่ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ ปูนซีเมนต์มากขึ้น ซึ่งการหดตัวของแบบอโตจีนัสเป็นผลจากการใช้น้ำในกระบวนการปฏิกิริยา ไฮเดรชันหมายความว่า หากมีปริมาณน้ำอิสระมากจะสามารถลดการหดตัวได้มากขึ้น



ก) เถ้าลอย FA

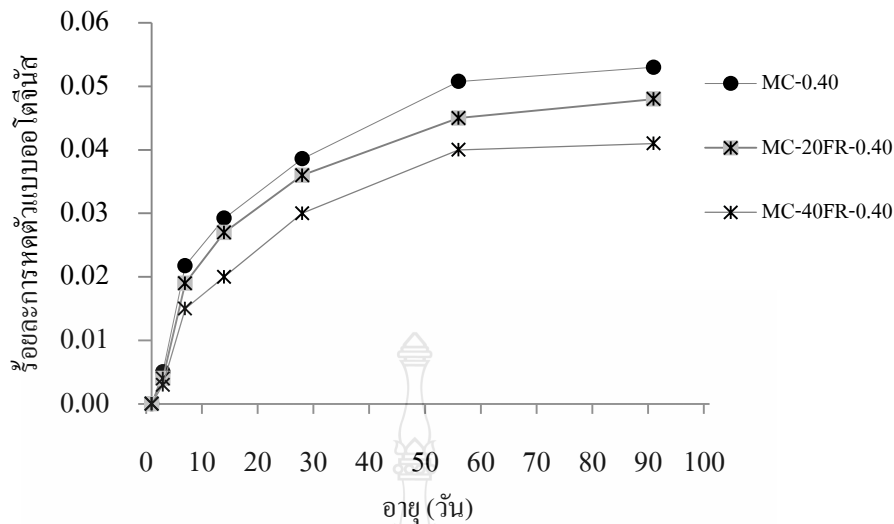


บ) เถ้าลอย FB



ค) เถ้าลอย FC



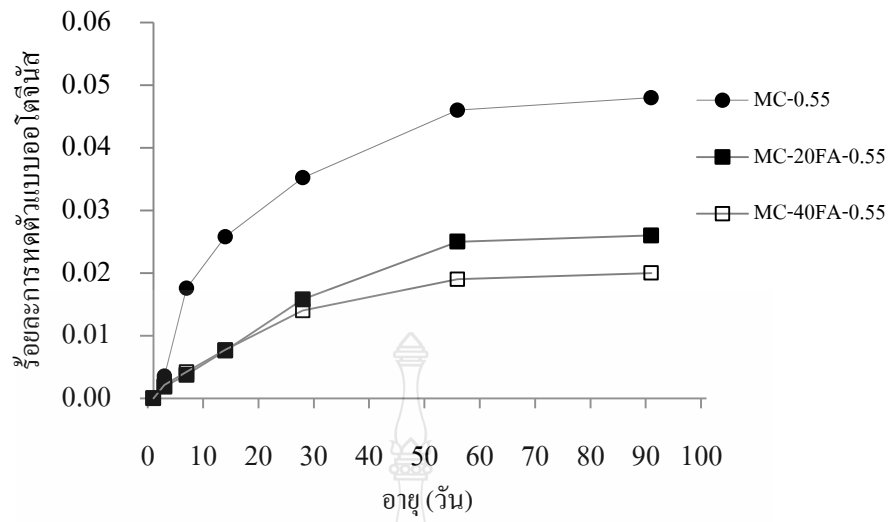


ง) เถ้าลอย FR

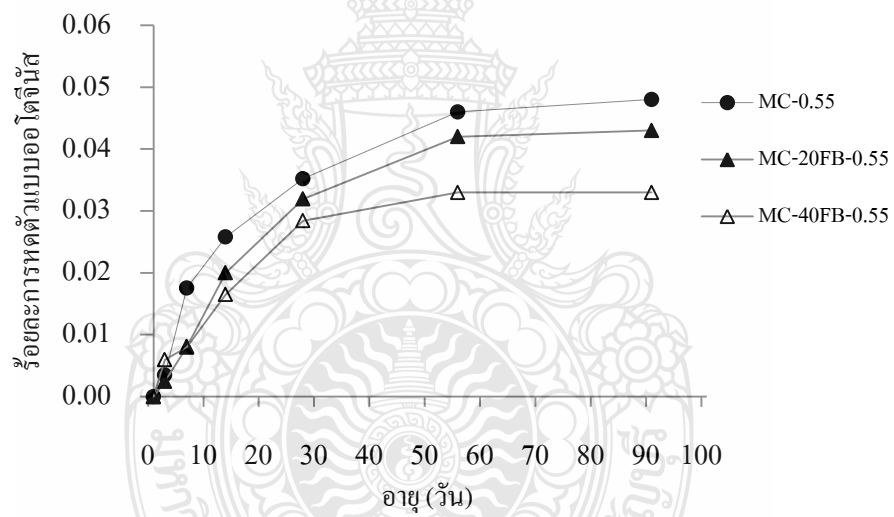
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของคอนกรีตกับอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

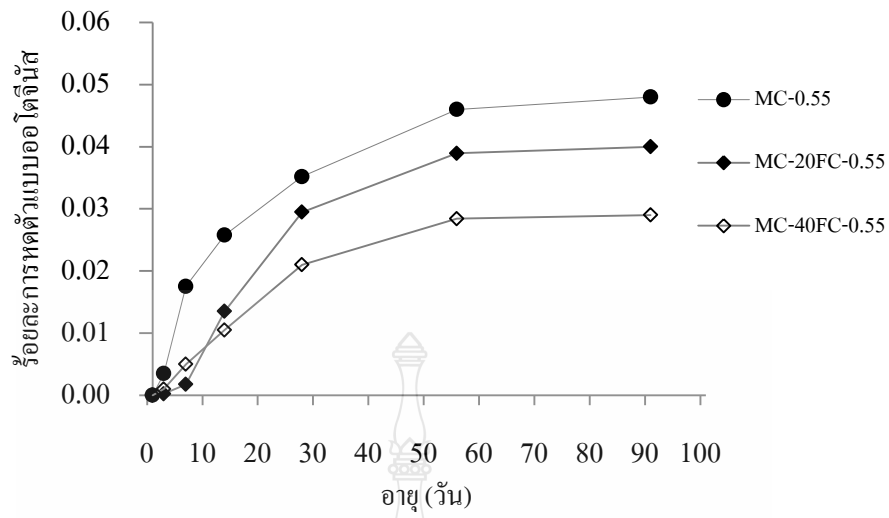
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของคอนกรีตและอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด โดยผสมแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 พบว่า ผลที่ได้ไปในทิศทางเดียวกับของกรณีของมอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 กล่าวคือ การหดตัวของคอนกรีตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย 4 ชนิด (ทั้ง ร้อยละ 20 และ 40) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้ตามเหตุผลดังที่กล่าวข้างต้น



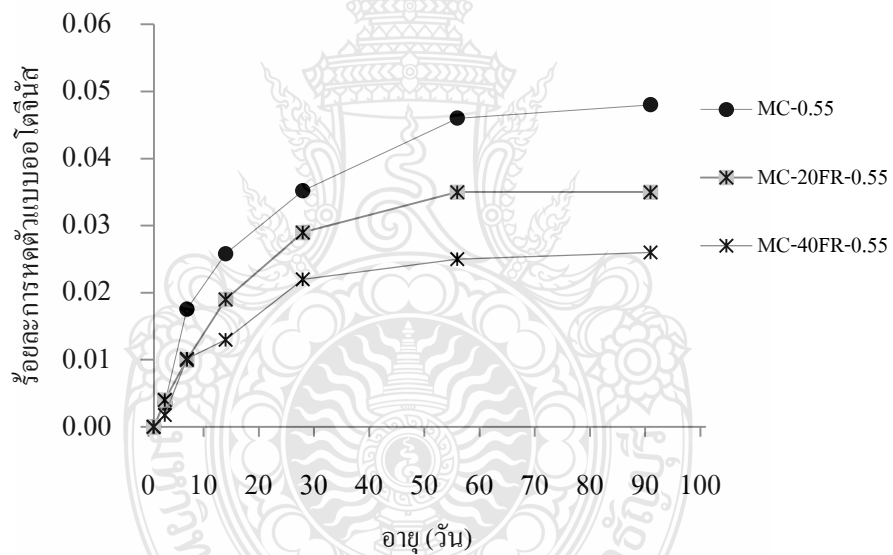
ก) เถ้าลอย FA



ข) เถ้าลอย FB



ค) ฝ้าล้อย FC

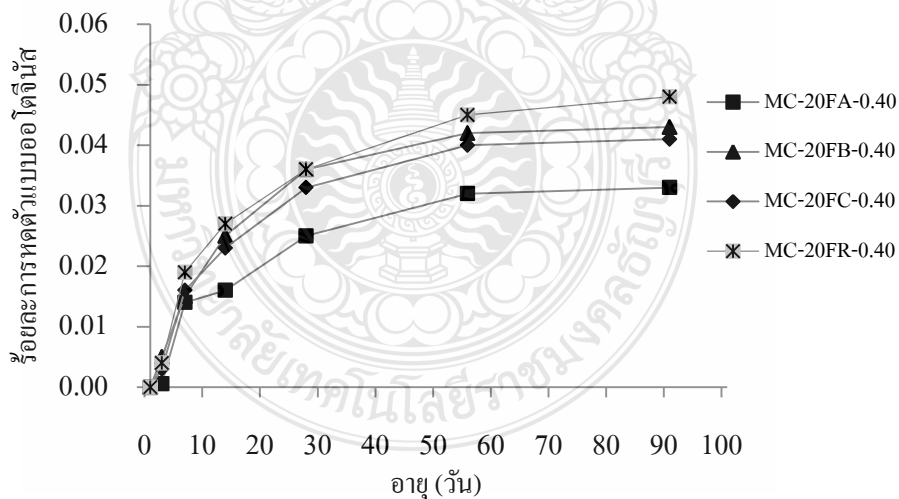


ง) ฝ้าล้อย FR

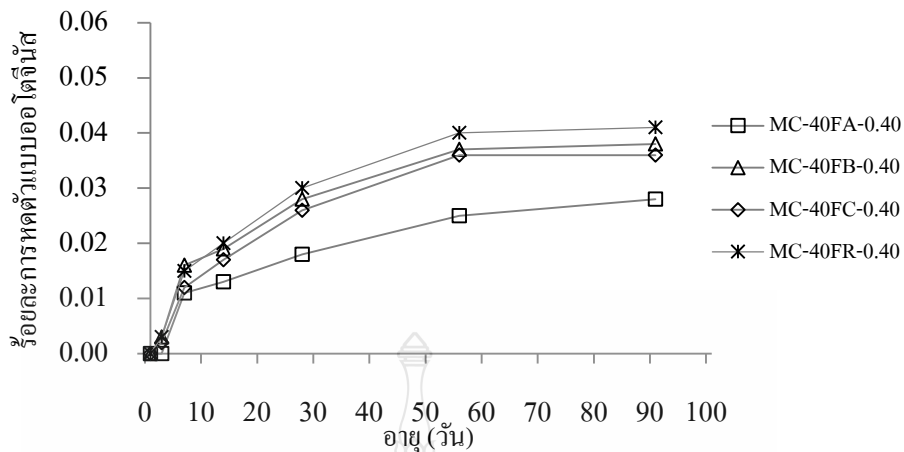
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ตาร์ผสมฝ้าล้อย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

## 2) ผลกระทบจากชนิดของเถ้าลอย

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 โดยแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 พบว่า เมื่อแทนที่เถ้าลอย อัตราส่วนร้อยละ 20 (รูปที่ 4.8 ก)) นั้น การหดตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย BLCP คือ FR มีค่ามากกว่าของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะทั้ง 3 ชนิด คือ FB FC และ FA ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอย BLCP มีความต้องการน้ำมากกว่าของเถ้าลอยแม่เมาะ ทำให้ปริมาณอิสระของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย BLCP มีน้อยกว่า ส่งผลให้การหดตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย BLCP มากกว่า และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบถึงการหดตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะทั้ง 3 ชนิดนั้น พบว่าการหดตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย FB มีค่ามากที่สุด ตามไปด้วยของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย FC และ FA ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณ Free Lime ในเถ้าลอยที่มากกว่า จึงการน้ำที่มากขึ้น (ทำปฏิกิริยาปอซโซลาน) ส่งผลให้การหดตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมากขึ้น (Free Lime ของเถ้าลอย FB FC และ FA เท่ากับร้อยละ 3.93 3.06 และ 1.71 ตามลำดับ) ส่วนเมื่อแทนที่เถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด ที่อัตราส่วนร้อยละ 40 (รูปที่ 4.8 ข)) พบว่าการหดตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด มีค่าไม่แตกต่างกัน นั้นแสดงว่าเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มาก (ร้อยละ 40) ไม่มีผลกระทบต่อการหดตัวของมอร์ตาร์



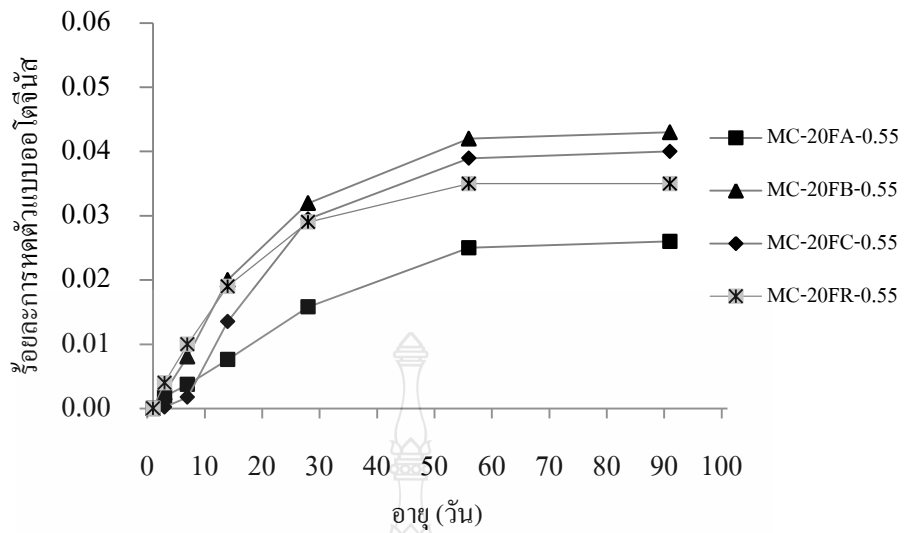
ก) เถ้าลอยร้อยละ 20



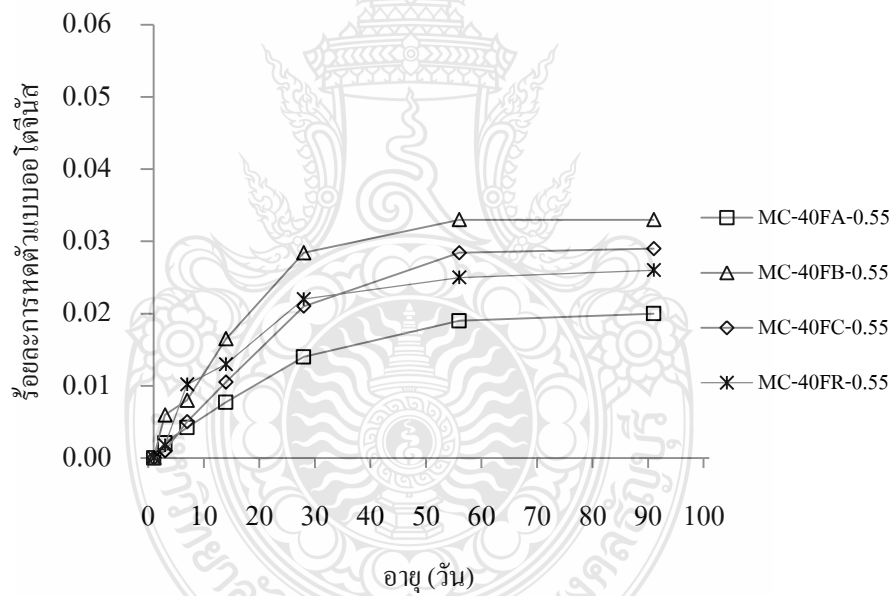
ข) เถ้าลอยร้อยละ 40

**รูปที่ 4.8** ความสัมพันธ์ระหว่างการหาคั่วแบบอโตจินัสกับอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหาคั่วแบบอโตจินัสกับอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยแทนที่เถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดร้อยละ 20 และ 40 พบว่า ให้ค่าการหาคั่วแบบอโตจินัสของมอร์ตาร์ไปในทิศทางเดียวกับของกรณี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 กล่าวคือ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณ Free Lime ในเถ้าลอยที่มากกว่า ทำให้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่า ส่งผลให้โครงสร้างเพสต์แข็งแรงมากขึ้น สามารถต้านทานการหาคั่วได้ดีขึ้น (Free Lime ของเถ้าลอย FB FC และ FA เท่ากับร้อยละ 3.93 3.06 และ 1.71 ตามลำดับ) ส่วนเมื่อแทนที่เถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด ที่อัตราส่วนร้อยละ 40 พบว่า การขยายตัวของอโตจินัสของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด มีค่าไม่แตกต่างกัน นั้นแสดงว่า เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มาก (ร้อยละ 40) ไม่มีผลกระทบต่อค่าการหาคั่วแบบอโตจินัส



ก) ถ้ำลอยร้อยละ 20

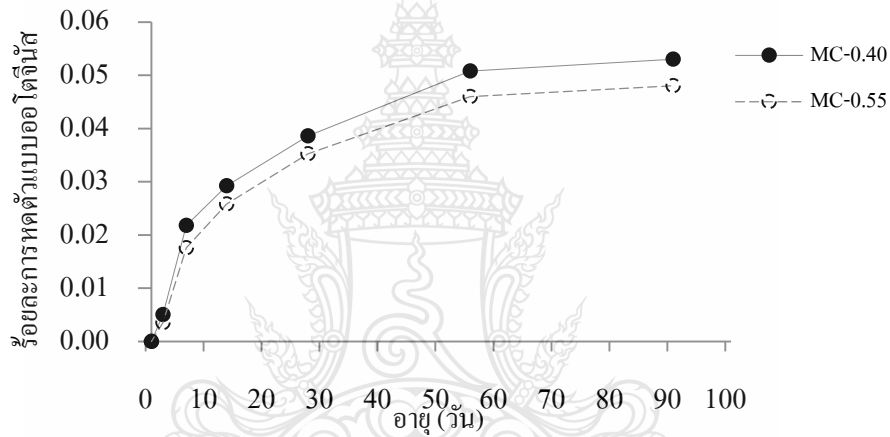


ข) ถ้ำลอยร้อยละ 40

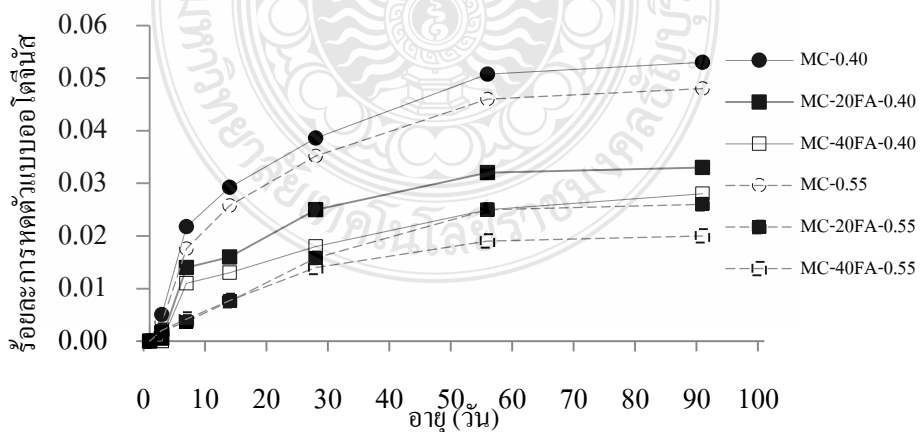
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโอดีนิสกับอายุของมอร์ต้าผสมถ้ำลอยทั้ง 4 ชนิด เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

### 3) ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

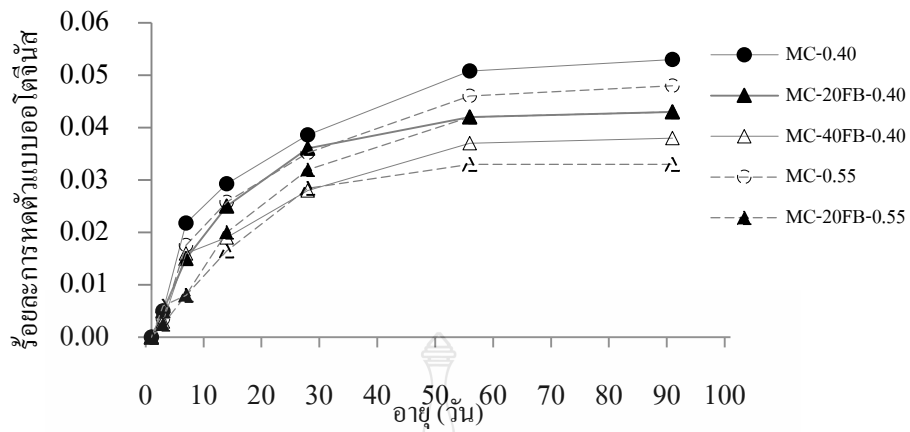
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด โดยผสมแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 พบว่า การหดตัวแบบอโตจีนัสของมอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มาก (ร้อยละ 0.55) มีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อย (ร้อยละ 0.40) ทั้งนี้เพราะการใช้ปริมาณน้ำที่มากทำให้ปริมาณน้ำอิสระในมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นมอร์ตาร์ สามารถมีน้ำในการทำทั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน ส่งผลทำให้การหดตัวลดลง



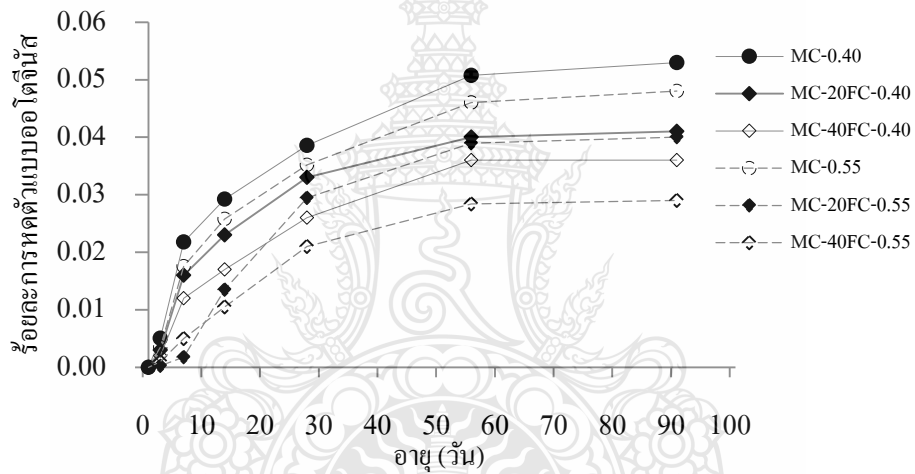
ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน



ข) เถ้าลอยแม่เมาะ FA

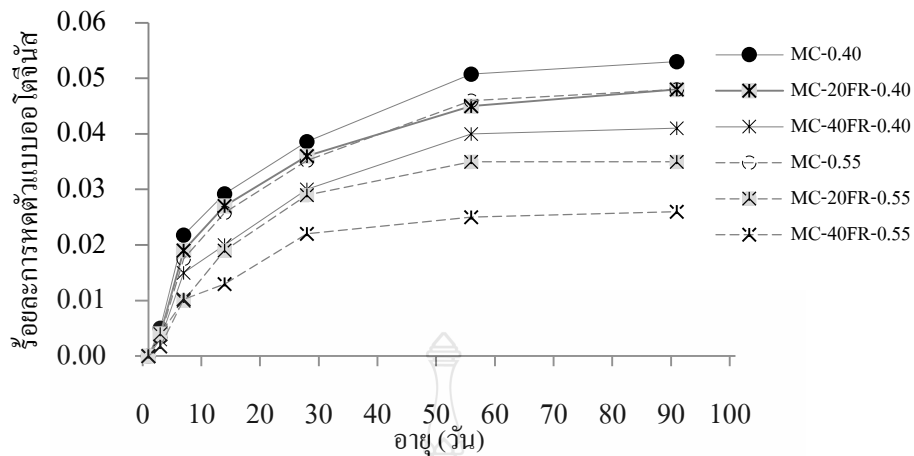


ค) ถ้าวลอยแม่เมาะ FB



ง) ถ้าวลอยแม่เมาะ FC





จ) เถ้าลอยแม่เมาะ FR

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโดจินัสกับอายุของมอร์ตาร์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55

#### 4.2.2.3 การหดตัวแบบแห้ง

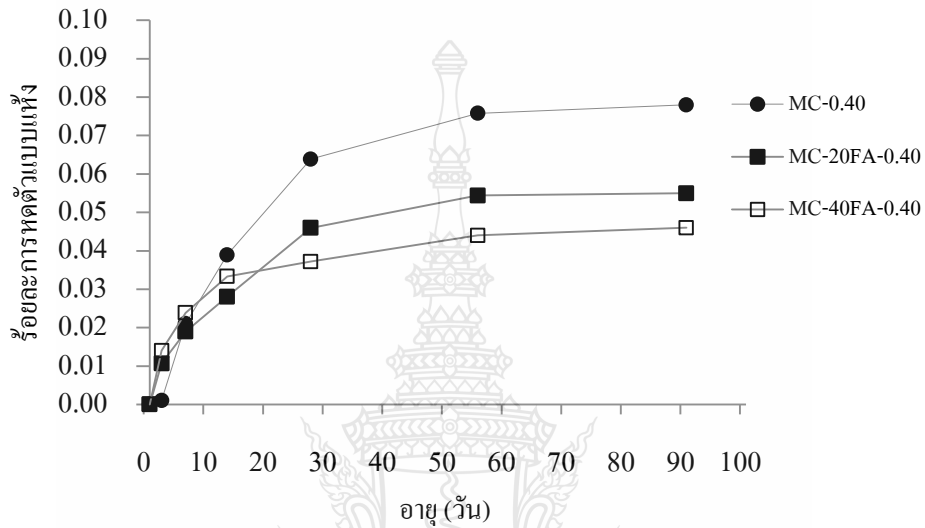
สำหรับการศึกษาการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ของมอร์ตาร์ในครั้งนี้ ประกอบด้วยมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถ้วน และมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด คือ FA FB FC และ FR ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 ซึ่งในครั้งนี้ได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ ได้แก่ 1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน 2) ผลกระทบจากชนิดเถ้าลอย 3) ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย

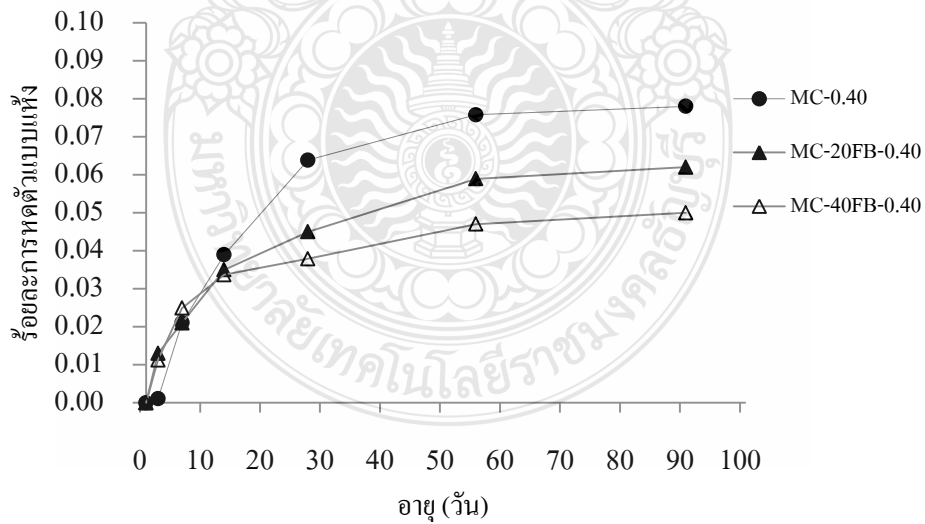
ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถ้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด โดยผสมแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 พบว่า การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย 4 ชนิด (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถ้วน โดยเฉพาะแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่เถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง และเถ้าลอย (เฉพาะเถ้าลอยแม่เมาะ) ซึ่งการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์เป็นผลจากการใช้น้ำในกระบวนการปฏิกิริยาไฮเดรชันหมายความว่า

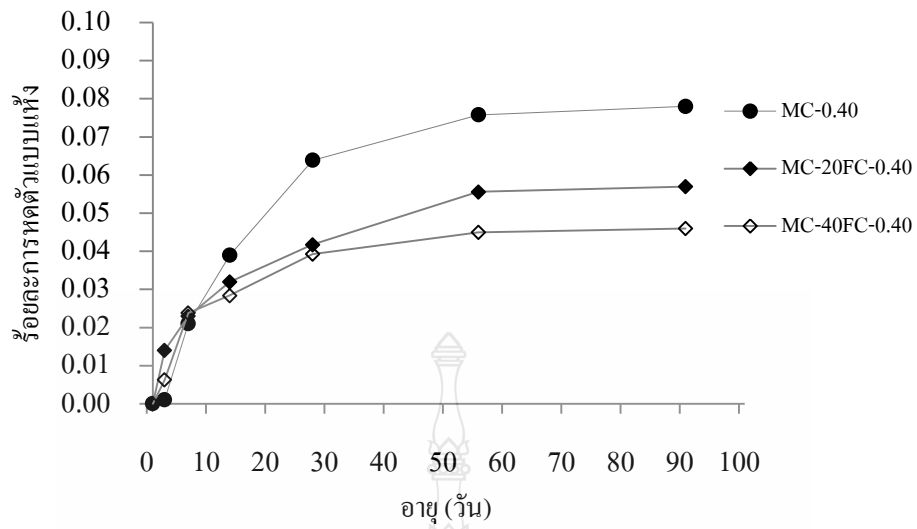
ว่า หากมีปริมาณน้ำอิสระมากจะสามารถลดการหดตัวได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามแม้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต้องการน้ำแต่จะเกิดขึ้นในระยะยาว ซึ่งซีเมนต์เพสต์ก็มีความแข็งแรงมากขึ้นในระยะยาวทำให้ทนต่อการหดตัว ที่พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ในปูนซีเมนต์มีผลทำให้การหดตัวในคอนกรีตลดลง



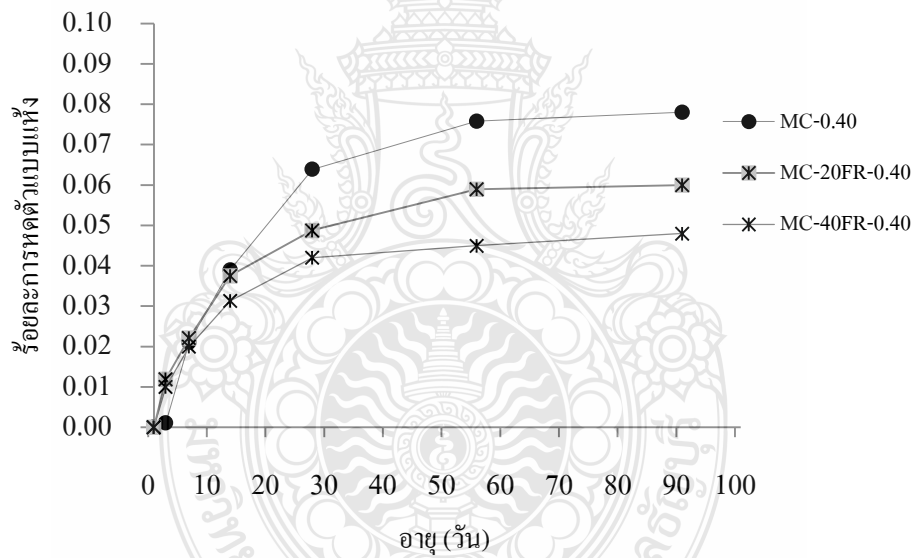
ก) เถ้าลอย FA



ข) เถ้าลอย FB



ค) เถ้าลอย FC

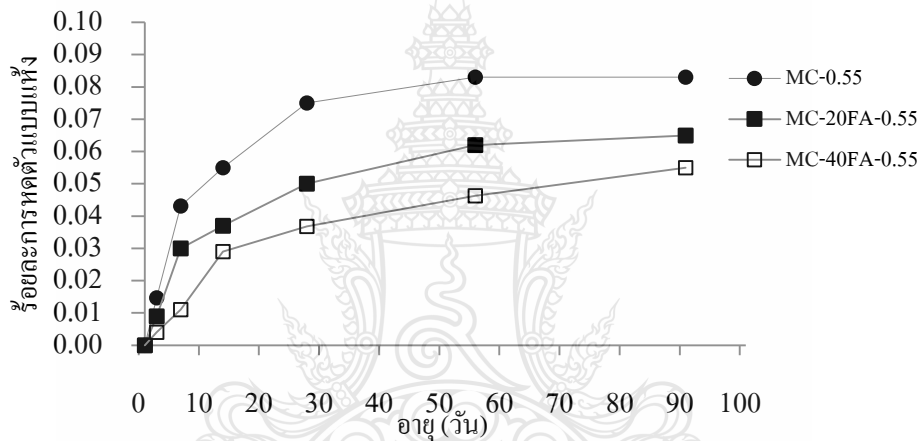


ง) เถ้าลอย FR

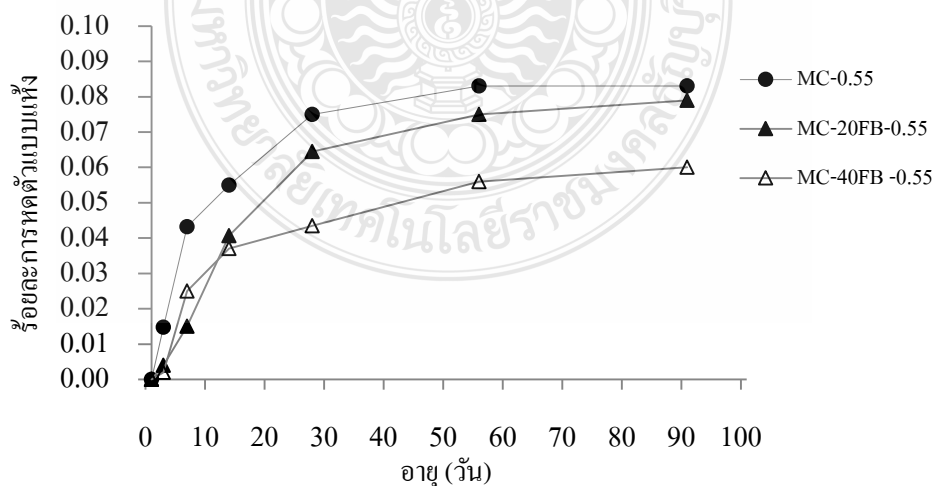
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

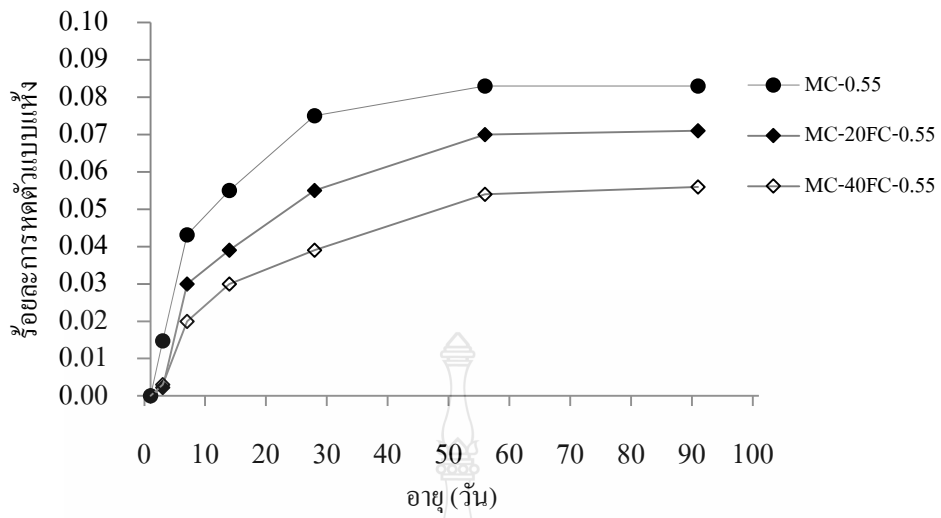
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด โดยผสมแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 พบว่า ให้ผลในทิศทางเดียวกับของกรณีมอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย 4 ชนิด (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว



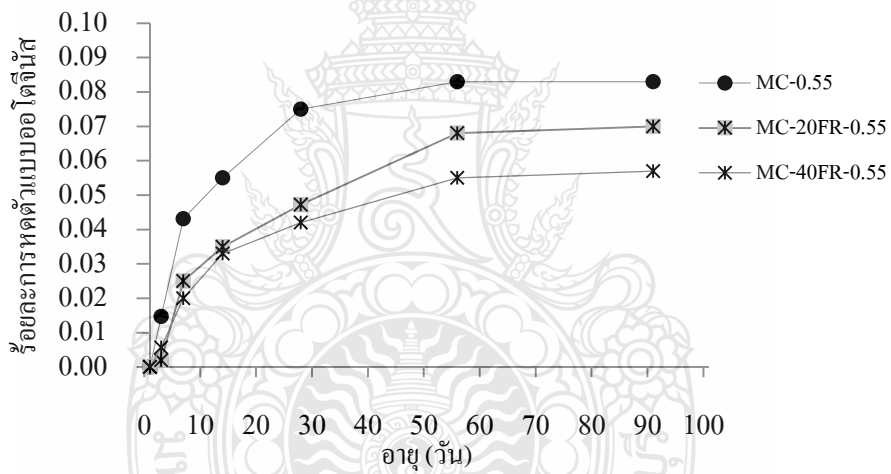
ก) เถ้าลอย FA



ข) เถ้าลอย FB



ค) ถั่วลอถอย FC

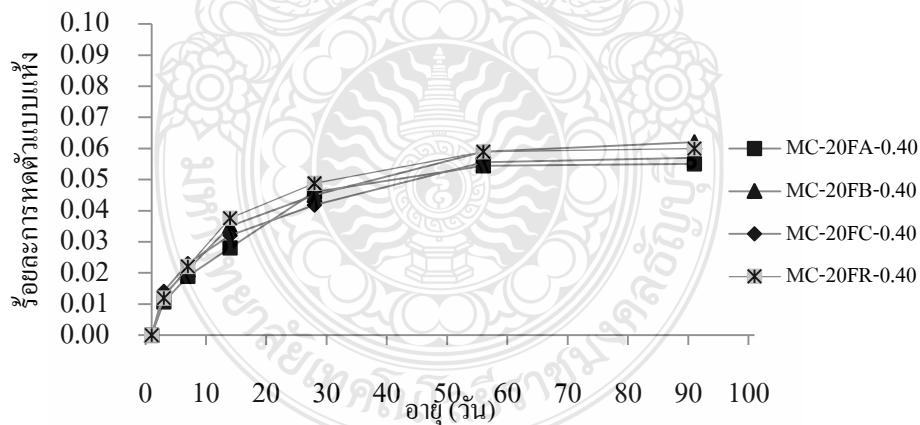


ง) ถั่วลอถอย FR

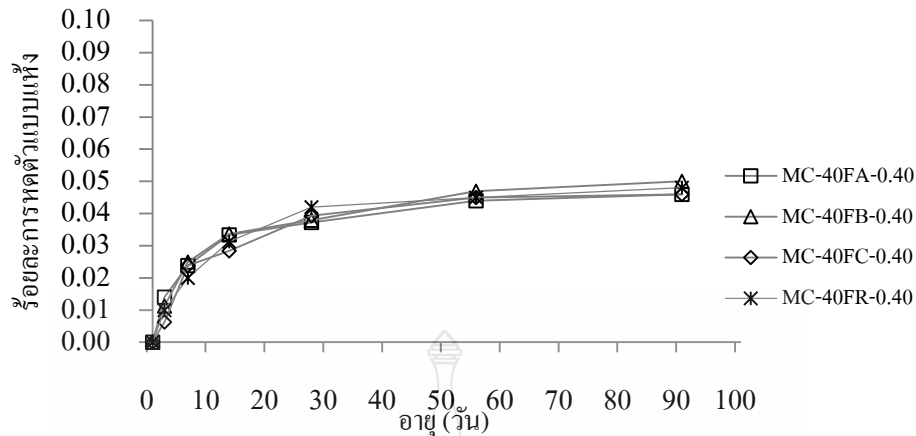
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์ผสมถั่วลอถอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

## 2) ผลกระทบจากชนิดถั่วลอ่ย

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของแบบแห้งอายุของมอร์ตาร์ผสมถั่วลอ่ยทั้ง 4 ชนิด เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 โดยแทนที่ถั่วลอ่ยทั้ง 4 ชนิดร้อยละ 20 และ 40 พบว่า เมื่อแทนที่ถั่วลอ่ยร้อยละ 20 (รูปที่ 4.13 ก)) นั้น การหดตัวของแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมถั่วลอ่ยระยะของ FR มีค่ามากกว่าของมอร์ตาร์ผสมถั่วลอ่ยแม่เมาะทั้ง 3 ชนิด คือ FA FB และ FC ทั้งนี้อาจเป็นเพราะถั่วลอ่ยระยะของมีความต้องการน้ำมากกว่าของถั่วลอ่ยแม่เมาะ ทำให้ปริมาณอิสระของมอร์ตาร์ผสมถั่วลอ่ยแม่เมาะมีมากกว่า ส่งผลให้การหดตัวของแบบแห้งมีค่าน้อยกว่า และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบถึงการหดตัวของแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมถั่วลอ่ยแม่เมาะทั้ง 3 ชนิดนั้น พบว่าการหดตัวของแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมถั่วลอ่ย FB มีค่ามากที่สุด ตามไปด้วยของมอร์ตาร์ผสมถั่วลอ่ย FC และ FA ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณ Free Lime ในถั่วลอ่ยที่มากกว่า ทำให้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่า ส่งผลให้โครงสร้างเพสต์แข็งแรงมากขึ้น สามารถต้านทานการหดตัวได้ดีขึ้น Free Lime ของถั่วลอ่ย FB FC และ FA เท่ากับร้อยละ 3.93 3.06 และ 1.71 ตามลำดับ ส่วนเมื่อแทนที่ถั่วลอ่ยทั้ง 4 ชนิด ร้อยละ 40 (รูปที่ 4.8 ข)) พบว่า การหดตัวของแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมถั่วลอ่ยทั้ง 4 ชนิด มีค่าไม่แตกต่างกัน นั้นแสดงว่า เมื่อแทนที่ถั่วลอ่ยในปริมาณที่มากขึ้น ไม่มีผลกระทบต่อการหดตัวของแบบแห้ง



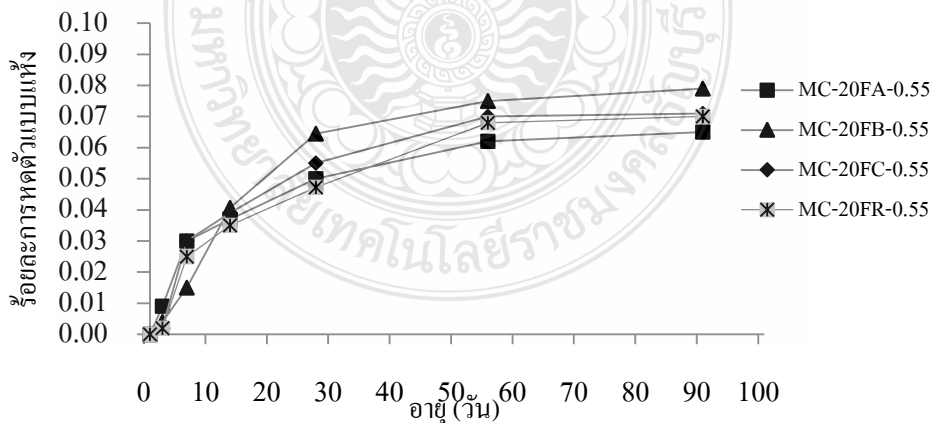
ก) ถั่วลอ่ยร้อยละ 20



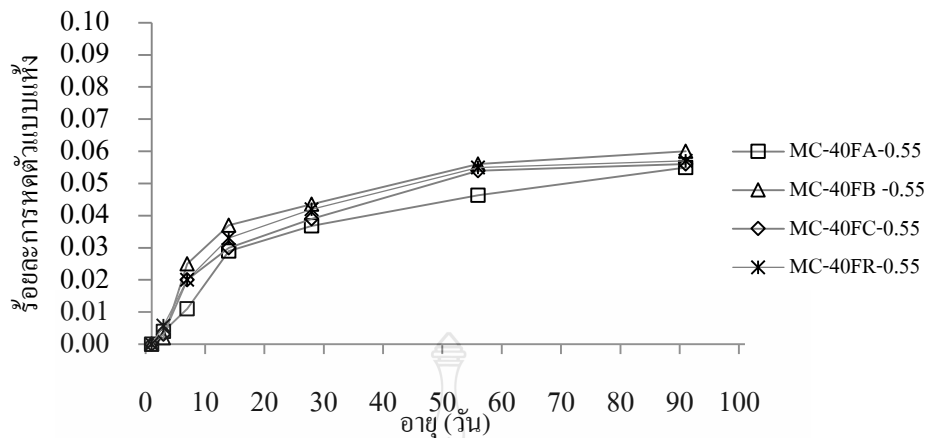
ข) เถ้าลอยร้อยละ 40

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยแทนที่เถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด ร้อยละ 20 และ 40 พบว่า ให้ค่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ไปในทิศทางเดียวกับของกรณีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว



ก) เถ้าลอยร้อยละ 20



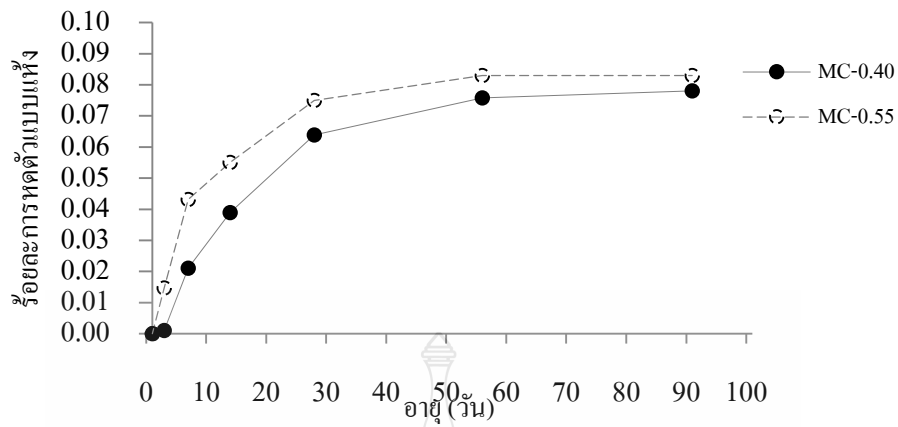
ข) เถ้าลอยร้อยละ 40

**รูปที่ 4.14** ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

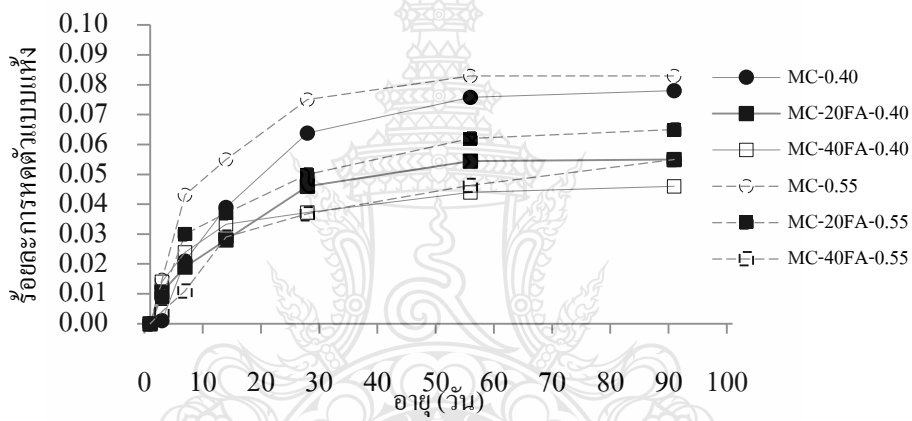
### 3) ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด โดยผสมแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 พบว่า การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ร้อยละ 0.55 มีค่ามากกว่าของมอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ร้อยละ 0.40 ทั้งนี้เพราะมีปริมาณน้ำให้มีสูญเสียน้ำสู่ภายนอกที่มากกว่า การใช้ปริมาณน้ำที่มากทำให้ปริมาณน้ำอิสระในมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ มีค่าที่มากกว่าตามไปด้วยแต่ในกระบวนการทำทั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน

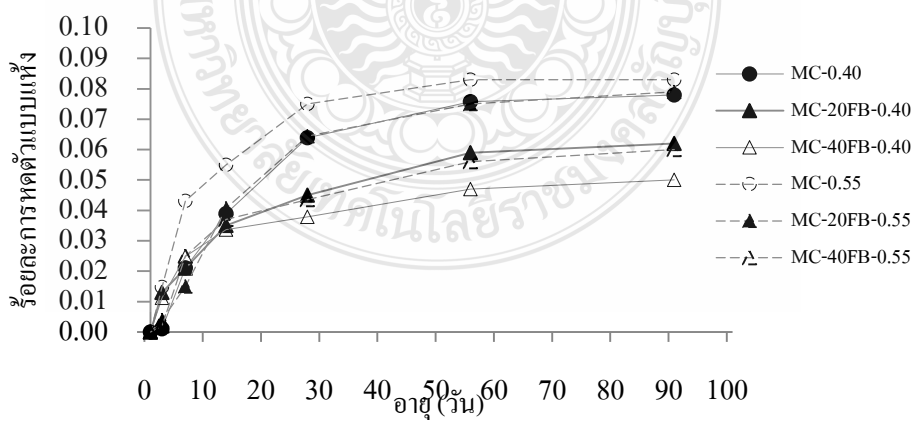




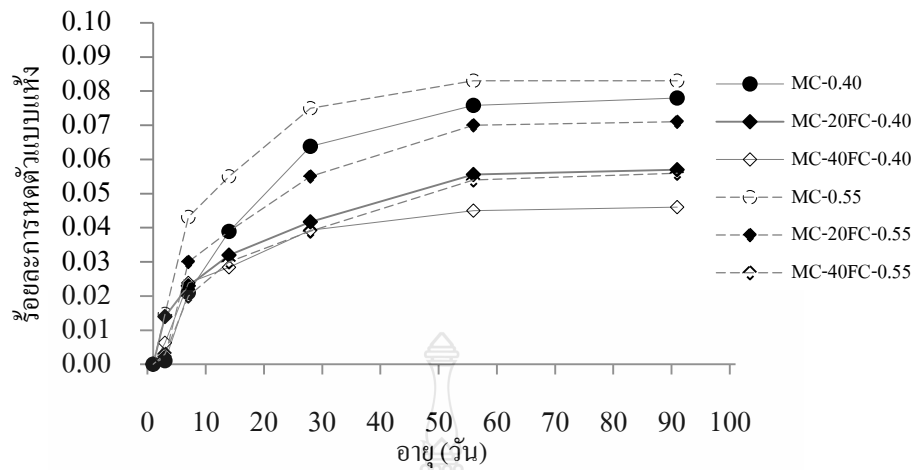
ก) ปู้นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 1 ล้าน



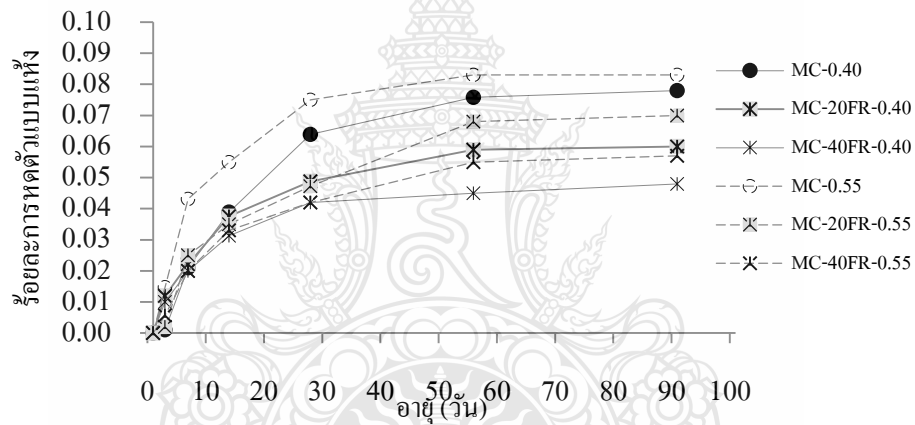
ข) ถั่วลยแม่เมาะ FA



ค) ถั่วลยแม่เมาะ FB



ง) ถังลอยแม่เมาะ FC



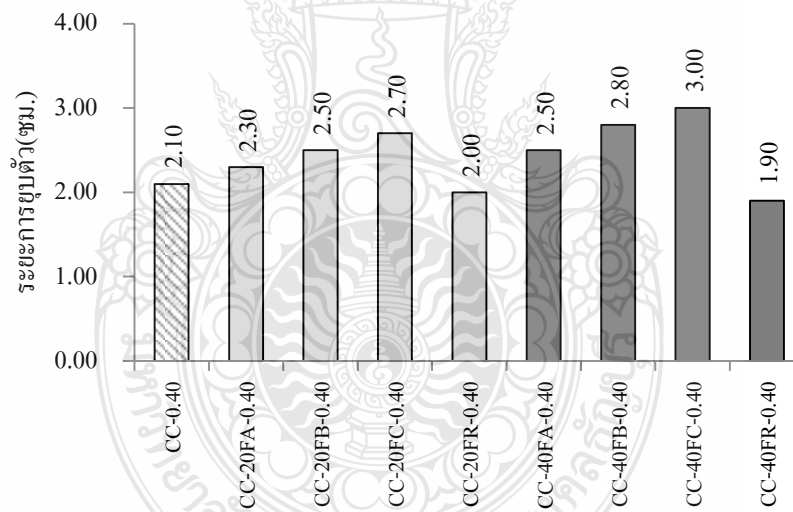
จ) ถังลอยแม่เมาะ FR

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55

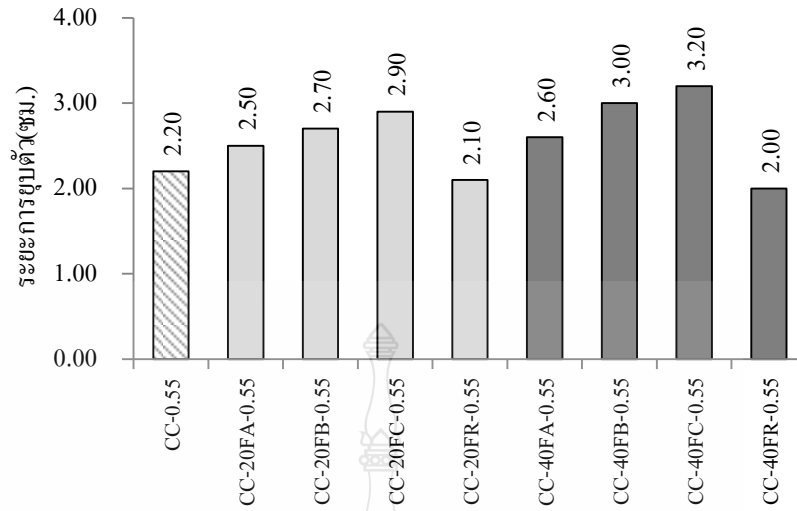
### 4.2.3 สมบัติของคอนกรีต

#### 4.2.3.1 ค่าการยุบตัว

รูปที่ 4.16 แสดงการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด โดยผสมแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 พบว่า เมื่อเพสต์มีปริมาณน้ำที่เหมาะสมมาก จะส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตน้อย และถ้าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์น้อย จะส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมาก ดังนั้น ผลของค่าการยุบต่อของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน อาจเป็นเพราะ มีค่า LOI ที่น้อยส่งผลทำให้ความต้องการน้ำมาก ทำให้มีค่าการยุบสูงกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะมีปริมาณของ  $SO_3$  ค่อนข้างสูง ซึ่งไปขัดขวางการเกิดไฮเดรชัน ของ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ส่งผลให้การสูญเสียค่าการยุบตัวเกิดขึ้น



ก) การยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 อัตราส่วนต่อน้ำที่ 0.40



ข) การยวบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 อัตราส่วนต่อน้ำที่ 0.55

#### รูปที่ 4.16 การยวบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

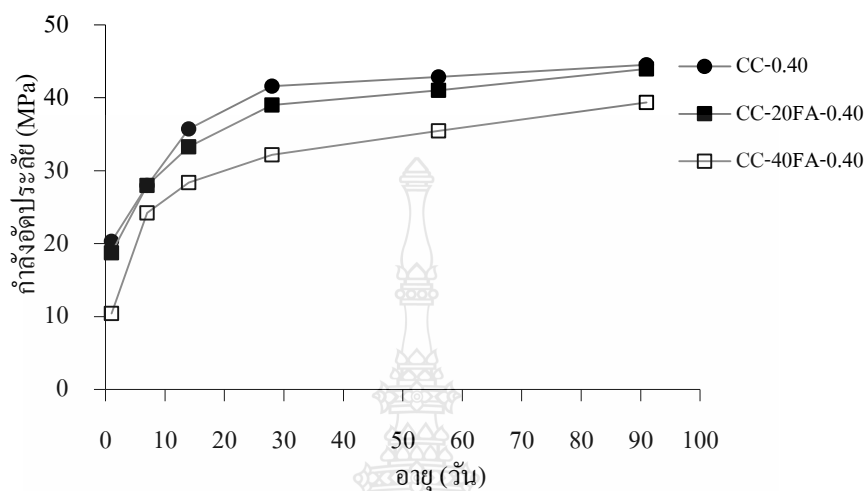
##### 4.2.3.2 กำลังอัดประลัย

สำหรับการศึกษากำลังอัดประลัยของคอนกรีต (Compressive Strength) ในครั้งนี้ ประกอบด้วยคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด คือ FA FB FC และ FR ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 ซึ่งในครั้งนี้ได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ได้แก่ 1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน 2) ผลกระทบจากชนิดเถ้าลอย และ 3) ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

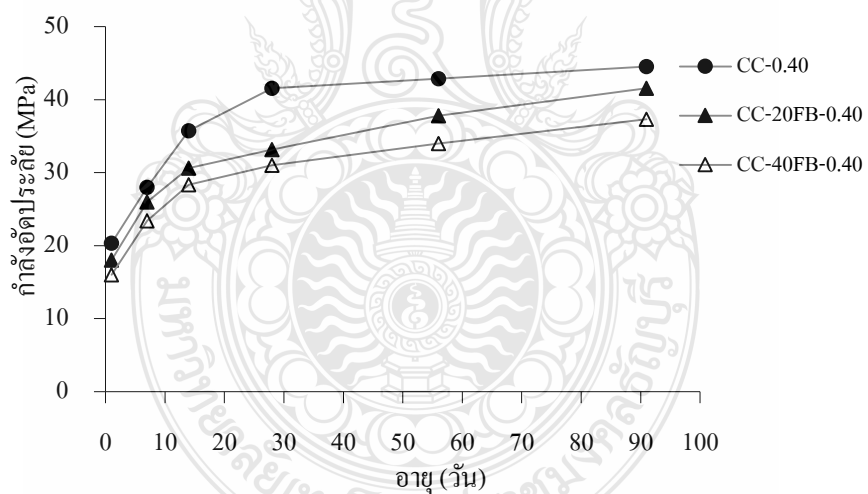
##### 1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย

รูปที่ 4.17 และ รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด (FA FB FC และ FR) ในอัตราส่วนแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 ตามลำดับ พบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่เถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่เป็นตัวแปรสำคัญในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีต จึงส่งผลให้กำลังอัดประลัยในช่วงต้นลดต่ำลง อย่างไรก็ตามเมื่ออายุมากขึ้น คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีการพัฒนากำลังอัดประลัยที่มีแนวโน้มสูงขึ้นมี

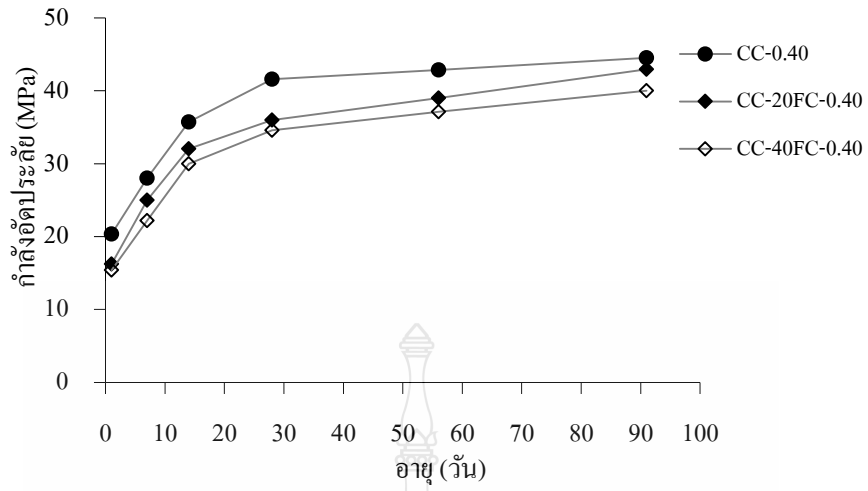
แนวโน้มนีมีค่าที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากผลของกระบวนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้น



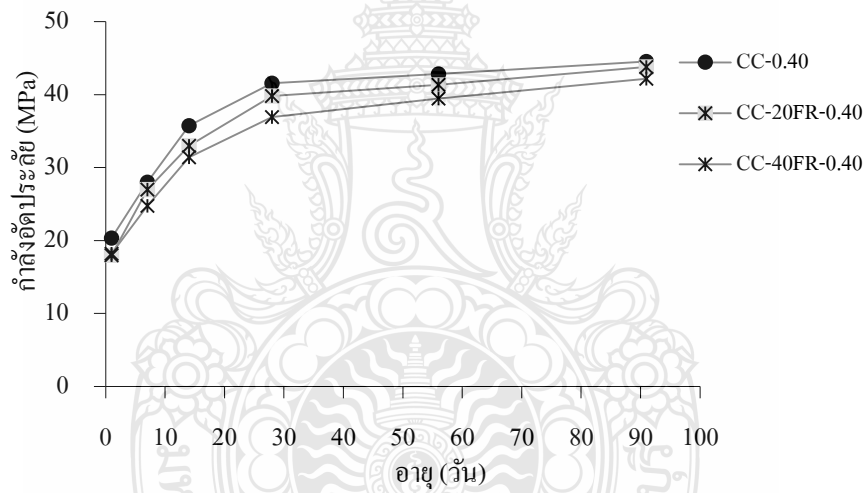
ก) เถ้าลอย FA



ข) เถ้าลอย FB

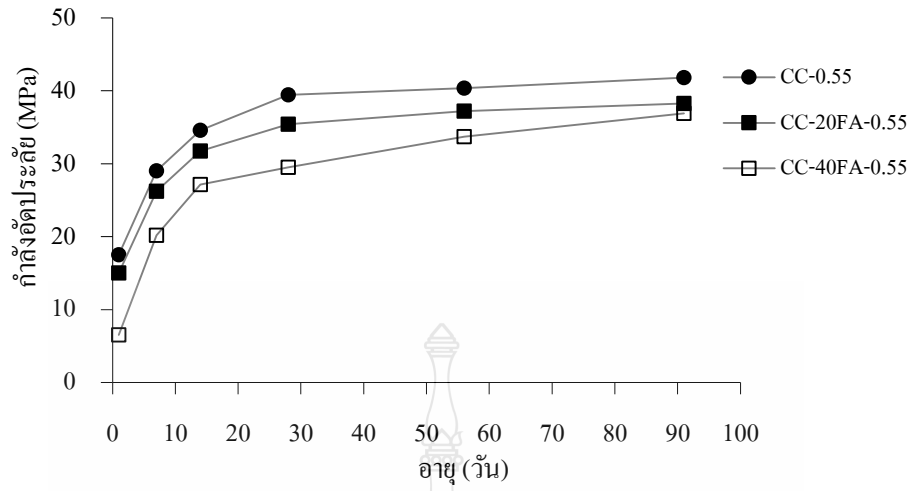


ค) ใ้ลย FC

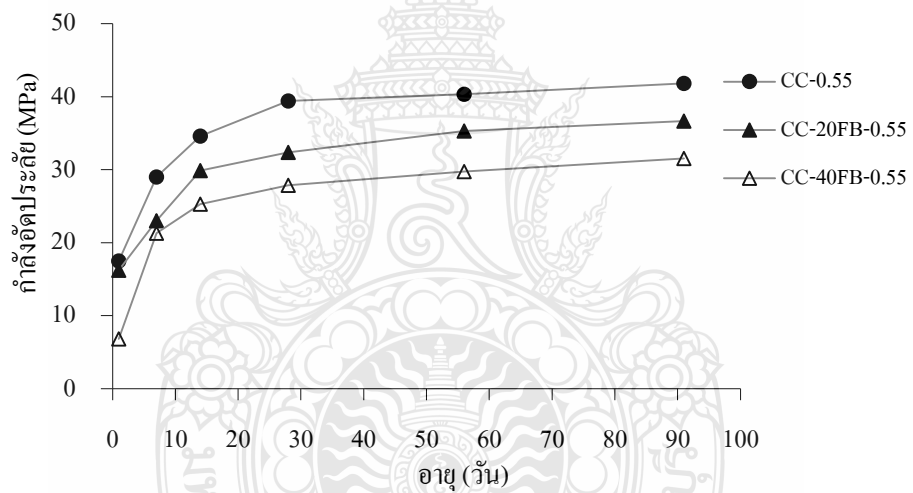


ง) ใ้ลย FR

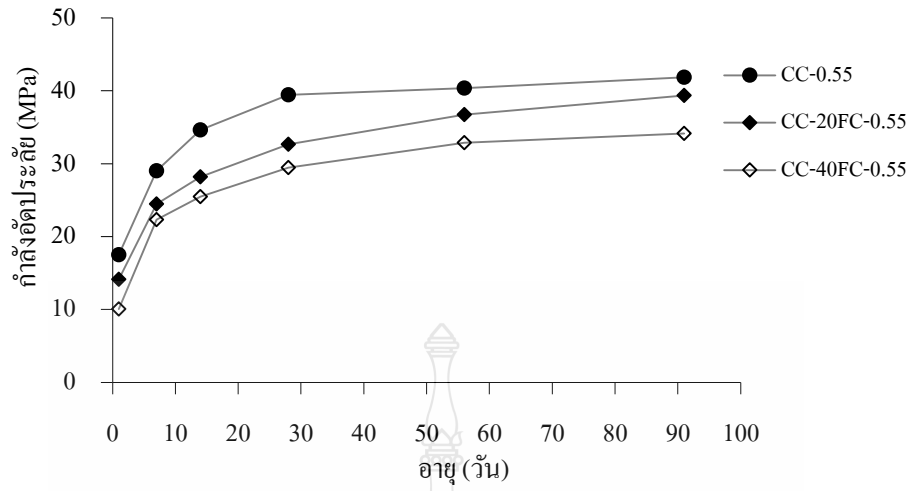
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีตผสมใ้ลย เมื่อใ้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



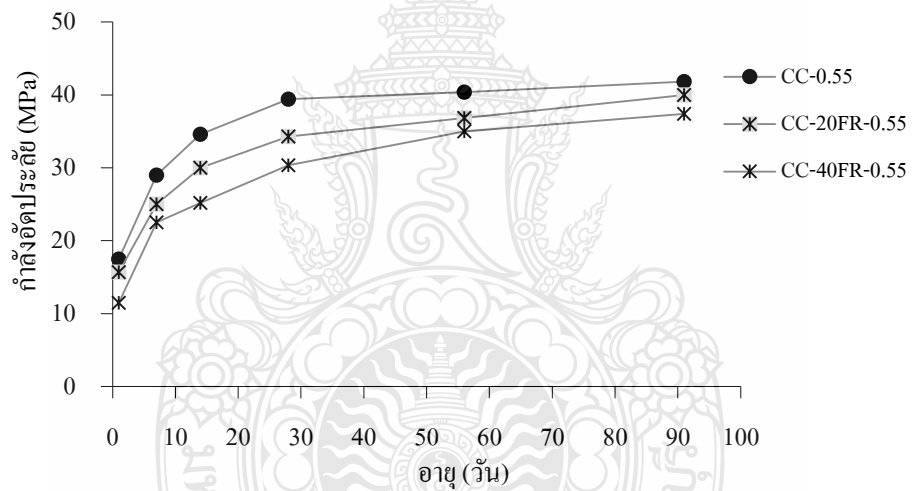
ก) เถ้าลอย FA



ข) เถ้าลอย FB



ค) เถ้าลอย FC



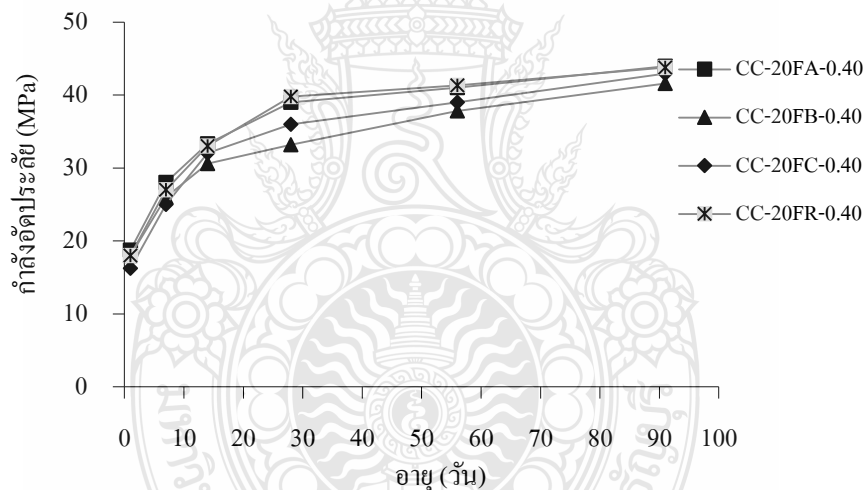
ง) เถ้าลอย FR

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

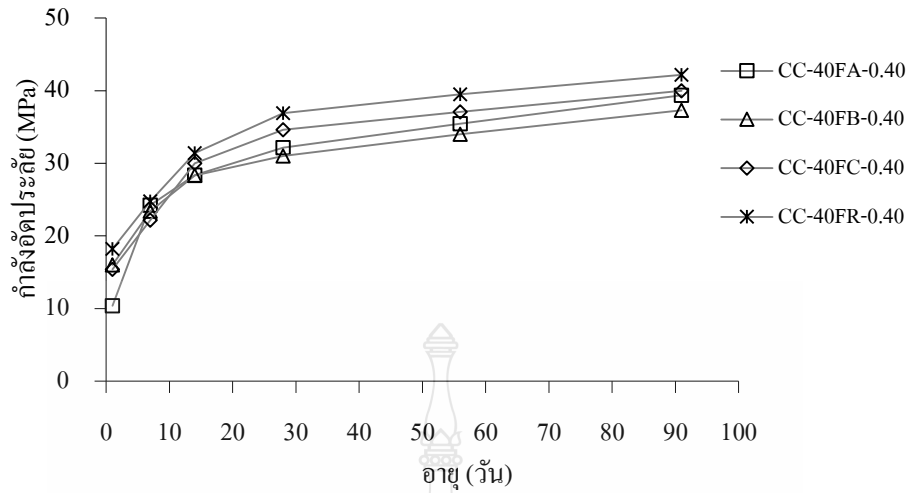


## 2) ผลกระทบจากชนิดของเถ้าลอย

รูปที่ 4.19 และ รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด (FA FB FC และ FR) ในอัตราส่วนแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 ตามลำดับ พบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตชนิด FR (ซึ่งเป็นเถ้าลอยจาก BLCP) มีแนวโน้มมากกว่าของ FA FB และ FC (ซึ่งเป็นเถ้าลอยจากแม่เมาะ) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอย FR มีปริมาณผลรวมของ  $\text{SiO}_2$  กับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ก่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับของเถ้าลอย FA FB และ FC ส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่มากกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาระหว่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยจากแม่เมาะทั้ง 3 ชนิด จะเห็นว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอย FA และ FC มีค่าที่ไม่แตกต่างกัน ในขณะที่กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอย FB มีแนวโน้มที่น้อยกว่าของเถ้าลอย FA และ FC ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผลรวมของ  $\text{SiO}_2$  กับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ของเถ้าลอย FA มีค่ามากกว่าของ FB ส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่มากกว่า

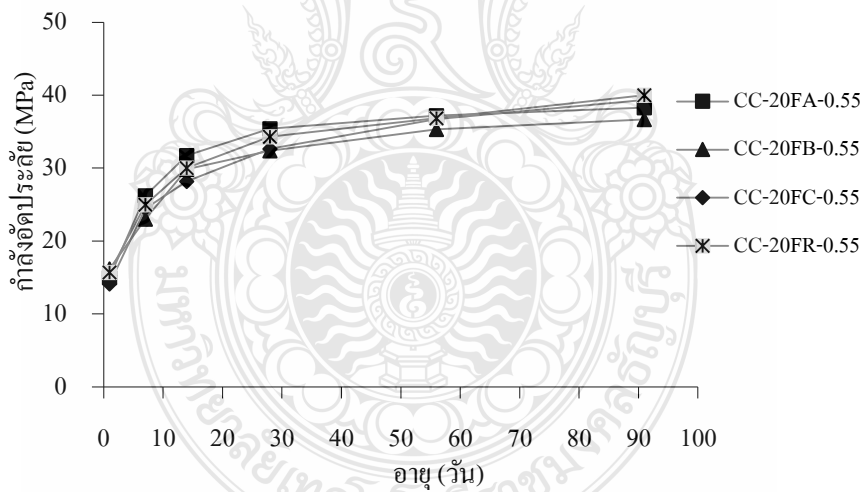


ก) เถ้าลอยร้อยละ 20

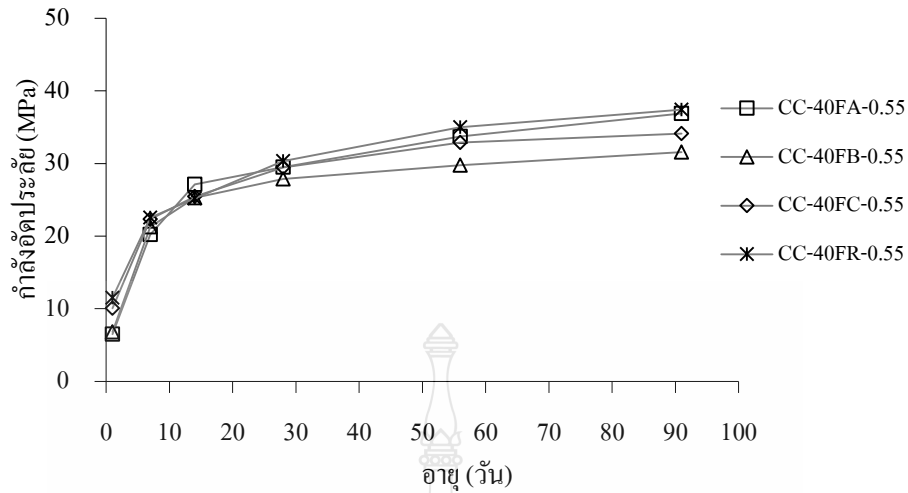


ข) เถ้าลอยร้อยละ 40

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ค) เถ้าลอยร้อยละ 20

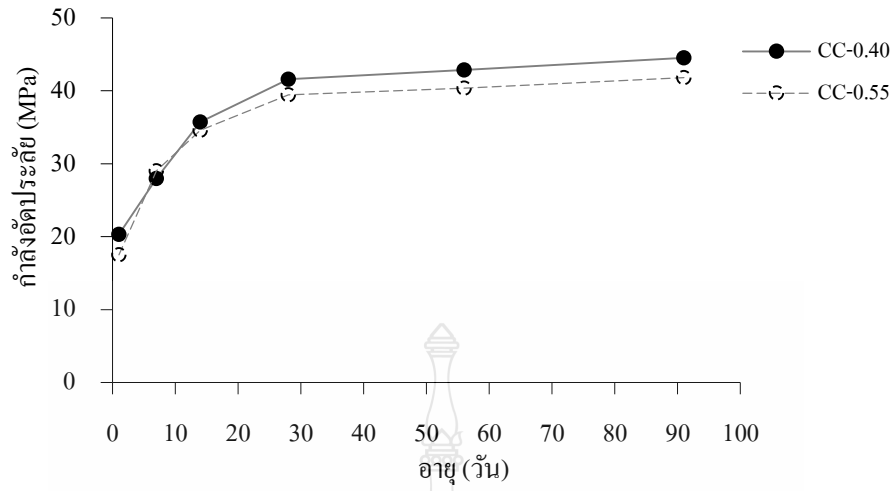


ข) เถ้าลอยร้อยละ 40

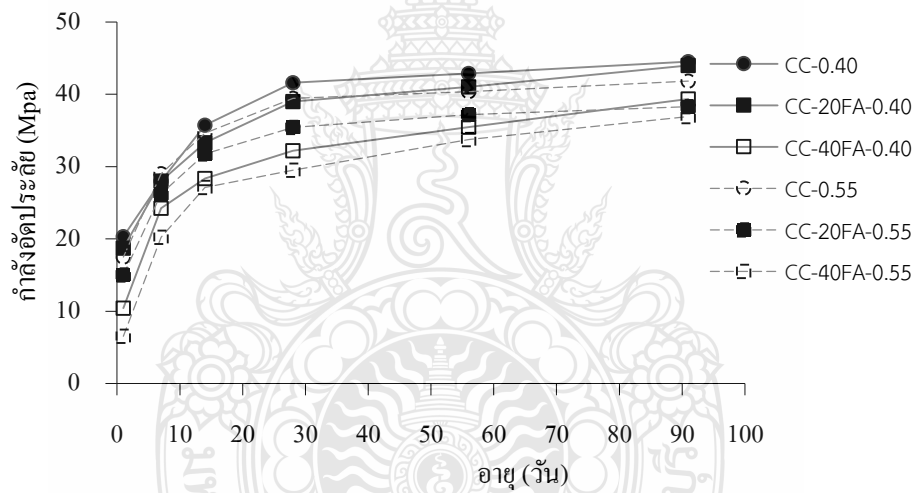
**รูปที่ 4.20** ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

### 3) ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

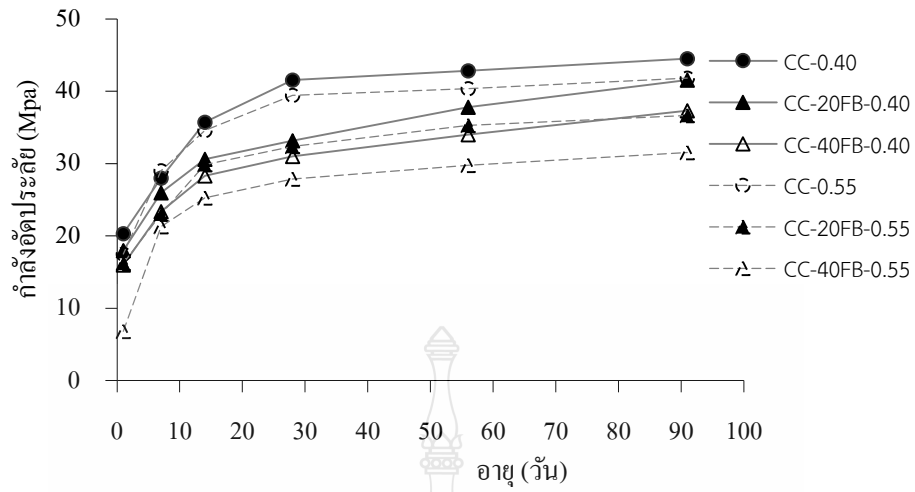
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด (FA FB FC และ FR) ในอัตราส่วนแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 พบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (ทุกสัดส่วนผสม) ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ มีค่าที่มากกว่าของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง ทั้งนี้เพราะคอนกรีตที่ใช้ปริมาณน้ำที่น้อย จะมีความพรุนที่น้อยกว่า ซึ่งมีความทึบน้ำที่สูงกว่า ส่งผลให้กำลังอัดประลัยที่มากกว่า



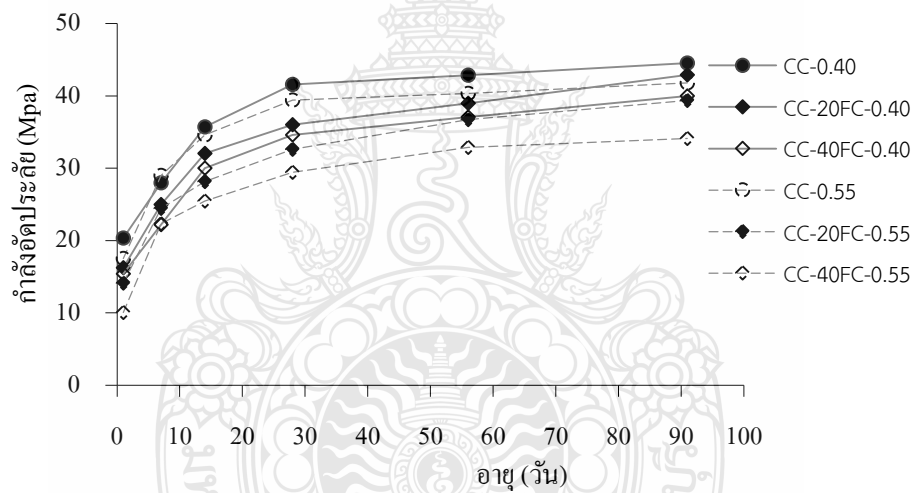
ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน



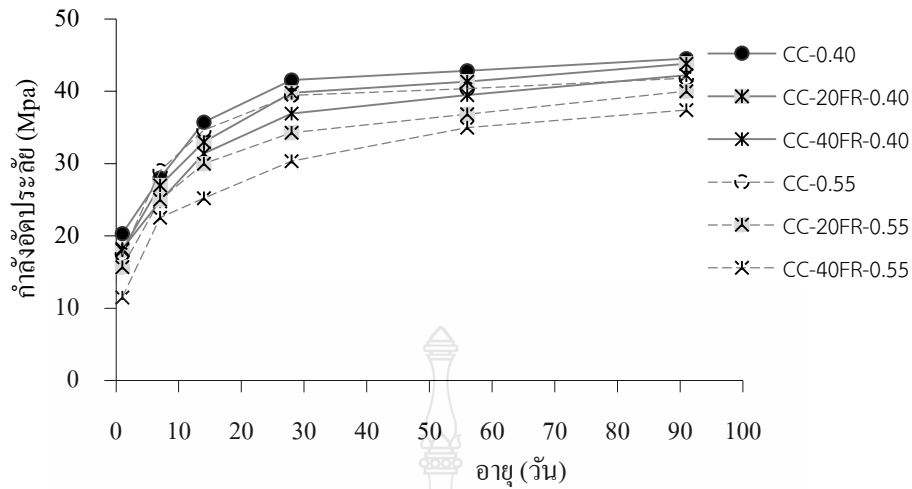
ข) ใ้ลยแม่เมาะ FA



ค) ถ้ำลอยแม่เมาะ FB



ง) ถ้ำลอยแม่เมาะ FC



จ) แก้วลอยแม่เมาะ FR

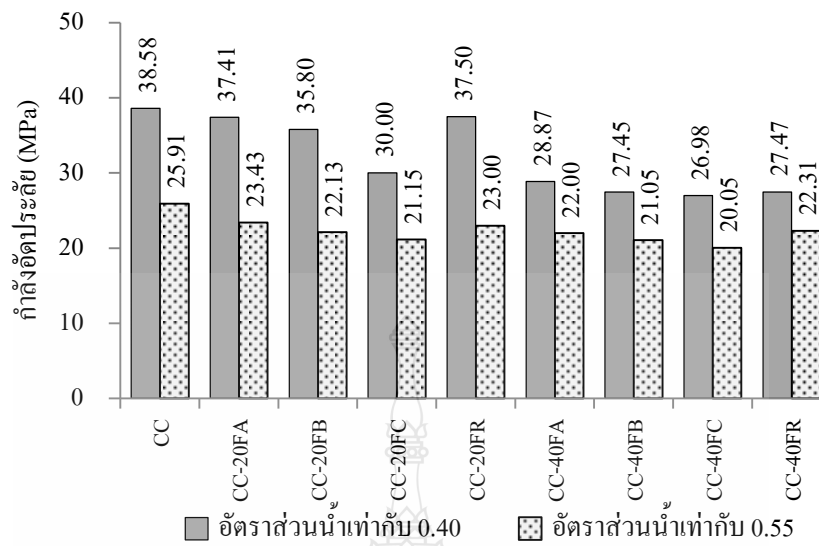
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 และ 0.55

#### 4.2.3.3 กำลังดึง

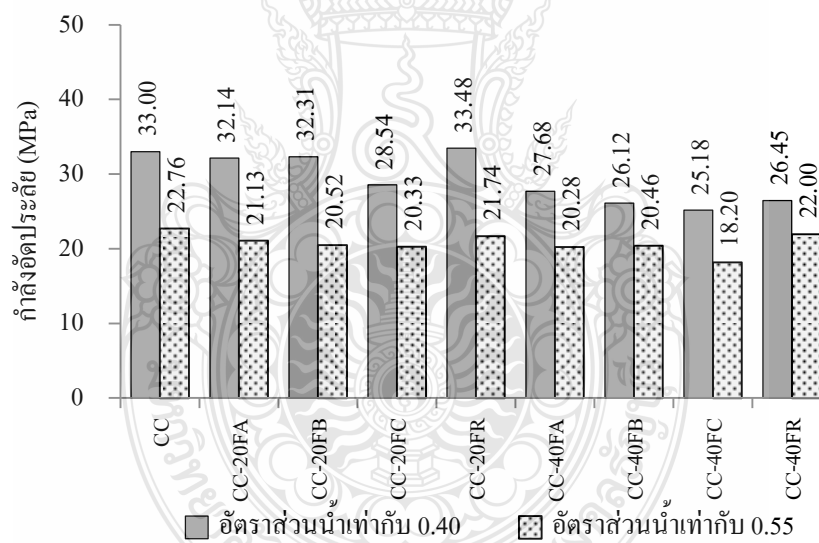
สำหรับการศึกษากำลังดึงของคอนกรีต (Splitting Tensile Strength) ในครั้งนี้ ประกอบด้วยคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตที่ผสมแก้วลอยทั้ง 4 ชนิด คือ FA FB FC และ FR ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 ซึ่งในครั้งนี้ได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ได้แก่ 1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน 2) ผลกระทบจากชนิดแก้วลอย และ 3) ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของแก้วลอย

รูปที่ 4.22 แสดงกำลังดึงกับอายุที่ 28 วัน (รูปที่ 4.22 ก) และ 91 วัน (รูปที่ 4.22 ข) ของคอนกรีตผสมแก้วลอยทั้ง 4 ชนิด (FA FB FC และ FR) ในอัตราส่วนแทนที่แก้วลอยร้อยละ 20 และ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 พบว่า กำลังดึงของคอนกรีตผสมแก้วลอยทั้ง 4 ชนิด (ทั้งร้อยละ 20 และ 40 และทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55) ให้ผลในทิศทางเดียวกับกำลังประลัย กล่าวคือ กำลังดึงของคอนกรีตผสมแก้วลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว



ก) อายุบ่มน้ำ 28 วัน

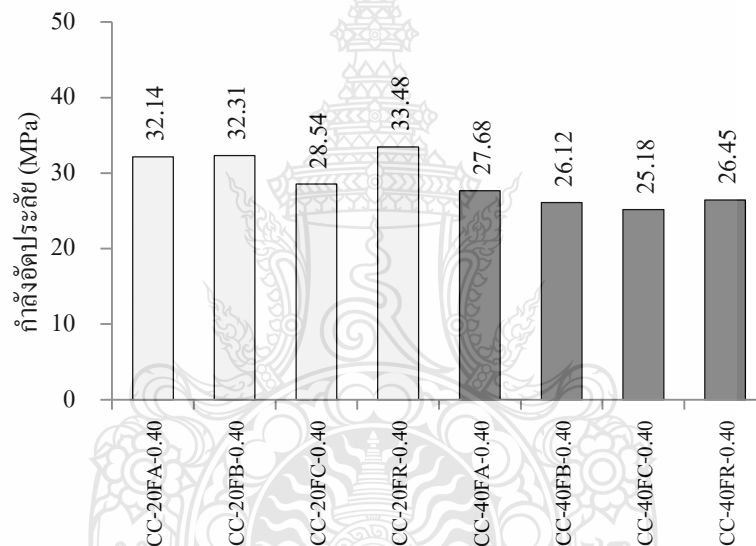


ข) อายุบ่มน้ำ 91 วัน

รูปที่ 4.22 กำลังดึงของคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55

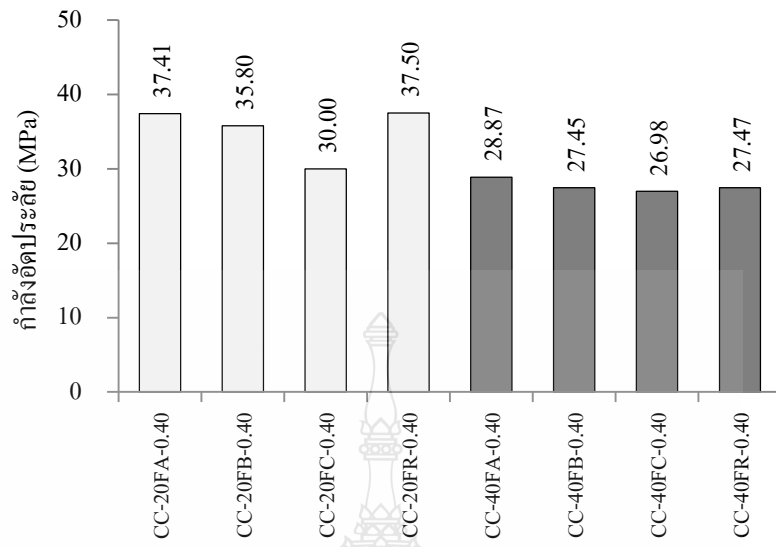
## 2) ผลกระทบจากชนิดของเถ้าลอย

รูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24 แสดงกำลังดึงที่อายุ 28 และ 91 วันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด (FA FB FC และ FR) ในอัตราส่วนแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 ตามลำดับ พบว่ากำลังดึงของคอนกรีตให้ผลในทิศทางเดียวกับกำลังอัดประลัย กล่าวคือ กำลังดึงของคอนกรีตชนิด FR (ซึ่งเป็นเถ้าลอยจาก BLCP) มีแนวโน้มมากกว่าของ FA FB และ FC และ กำลังดึงของคอนกรีตผสมเถ้าลอย FA และ FC มีค่าที่ไม่แตกต่างกัน ในขณะที่กำลังดึงของคอนกรีตผสมเถ้าลอย FB มีแนวโน้มที่น้อยกว่าของเถ้าลอย FA เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว



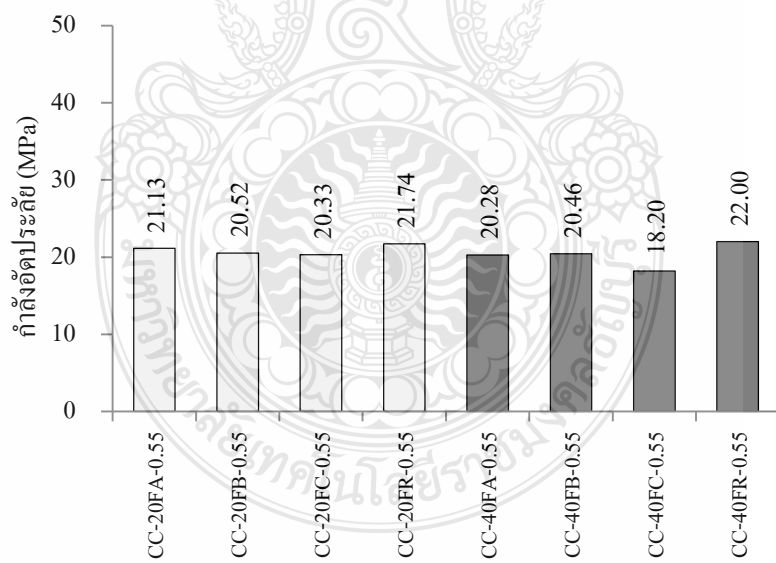
ก) ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน



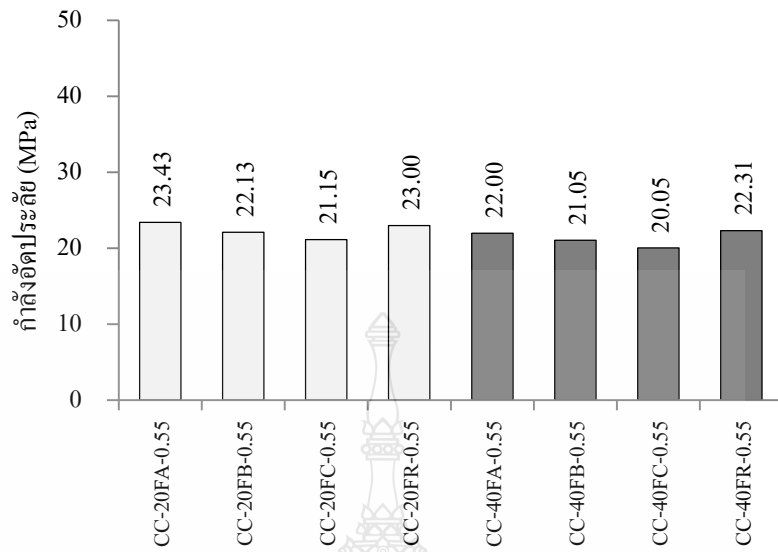


ข) ที่อายุบ่มน้ำ 91 วัน

รูปที่ 4.23 กำลังดึงของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เมื่อ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ก) อายุบ่มน้ำ 28 วัน



ข) อายุบ่มน้ำ 91 วัน

รูปที่ 4.24 กำลังดึงของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

### 3) ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.22 โดยแสดงกำลังดึงของคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 แสดงว่า เมื่อกำลังดึงของคอนกรีต (ทุกสัดส่วนผสม) ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ มีค่าที่มากกว่าของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูง ทั้งนี้ เพราะคอนกรีตที่ใช้ปริมาณน้ำที่น้อย จะมีความพรุนที่น้อยกว่า ซึ่งมีความทึบน้ำที่สูงกว่า ส่งผลให้กำลังอัดประลัยที่มากกว่า

## 4.3 การเปรียบเทียบสมบัติของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตผสมเถ้าลอยแต่ละชนิด

จากการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบถึงผลกระทบชนิดของเถ้าลอย โดยพิจารณาจากแหล่งที่มาของเถ้าลอย องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแต่ละชนิด และรวมถึงสมบัติของเพสต์ ประกอบด้วย ปริมาณน้ำที่เหมาะสม ระยะเวลาการก่อตัว และการขยายตัวในเตาอบโตเคลฟ สมบัติของมอร์ต้าร์ประกอบด้วย ความต้องการน้ำ การหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้ง และสมบัติของคอนกรีตประกอบด้วย ค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึง โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.7 สมบัติของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ผสมเถ้าลอยแต่ละชนิดเปรียบเทียบกับสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถ้วน

รายการ	เถ้าลอยแม่เมาะ			เถ้าลอย BLCF
	FA	FB	FC	FR
ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	มากกว่า
ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์	ช้ากว่า	ช้ากว่า	ช้ากว่า	ช้ากว่า
ความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	มากกว่า
การหดตัวแบบบอโตจีนัสของมอร์ต้าร์	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า
การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า
ค่าการยุบตัวของคอนกรีต	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	มากกว่า
กำลังอัดประลัยของคอนกรีต	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า
กำลังดึงของคอนกรีต	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต

รายการ	ผลการศึกษา
ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์	เถ้าลอยแม่เมาะมีค่าน้อยกว่าของเถ้าลอย BLCF
ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์	ปริมาณ Free Lime สูงในเถ้าลอย มีแนวโน้มให้ค่าที่เร็วขึ้น
การขยายตัวในเตาอบโตเคลฟของเพสต์	ปริมาณ Free Lime สูงในเถ้าลอย มีแนวโน้มให้ค่าที่มากขึ้น
ความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์	เถ้าลอย BLCF ต้องการมากกว่าของเถ้าลอยแม่เมาะ
การหดตัวแบบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ต้าร์	เถ้าลอยแม่เมาะมีค่าน้อยกว่าของเถ้าลอย BLCF
ค่าการยุบตัวของคอนกรีต	เถ้าลอยแม่เมาะมีค่ามากกว่าของเถ้าลอย BLCF
กำลังอัดประลัยและกำลังดึงของคอนกรีต	เถ้าลอยที่มีผลรวมของปริมาณ $\text{SiO}_2$ กับ $\text{Al}_2\text{O}_3$ มาก ส่งผลให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่มากกว่า

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษา สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของเพสต์ผสมเถ้าลอย BLCP มีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
- 2) การก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยนานกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยที่มีปริมาณ Free Lime สูง มีแนวโน้มให้ค่าการตัวที่เร็วกว่า
- 3) การขยายตัวในเตาอบ โตเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอยที่มีปริมาณ Free Lime สูง ให้ค่าที่มากกว่า ในขณะที่ของเถ้าลอยที่มีปริมาณ Free Lime ต่ำ มีค่าใกล้เคียง เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
- 4) การหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยการหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์เถ้าลอย BLCP มีค่าที่มากกว่าของเถ้าลอยแม่เมาะ
- 5) ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีค่ามากกว่า ในขณะที่ของเถ้าลอย BLCP มีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอย BLCP มีค่ายุบตัวน้อยกว่าของเถ้าลอยแม่เมาะ
- 6) กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยการแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่น้อย มีแนวโน้มกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น เถ้าลอยที่มีผลรวมของปริมาณ  $\text{SiO}_2$  กับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มาก ส่งผลให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่มากกว่า
- 7) กำลังดึงของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และกำลังดึงของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีผลรวมของปริมาณ  $\text{SiO}_2$  กับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มาก ส่งผลให้กำลังดึงของคอนกรีตที่มากกว่า
- 8) สามารถสรุปเปรียบเทียบผลกระทบของชนิดของเถ้าลอยต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตได้

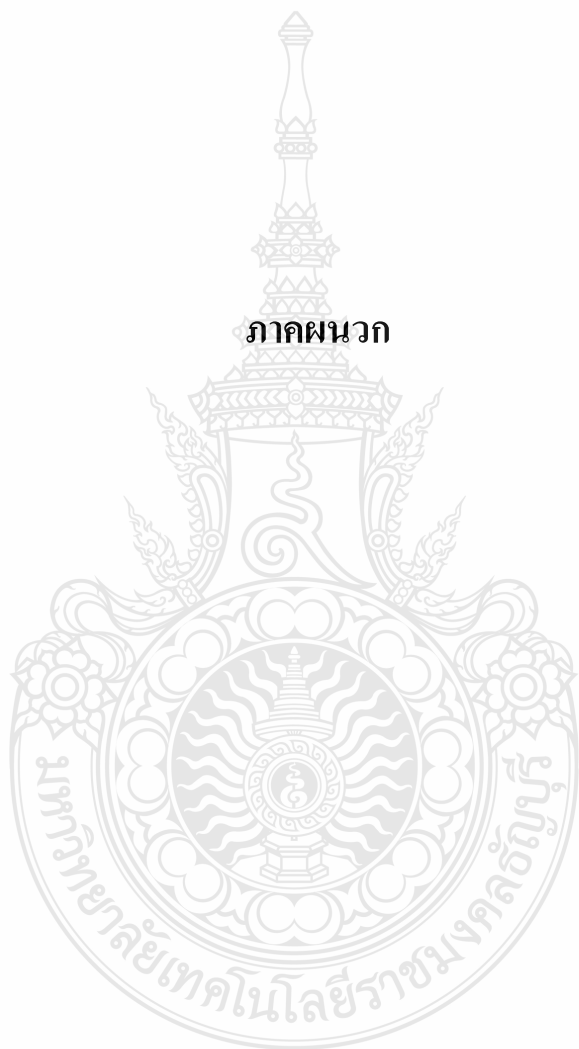
## บรรณานุกรม

- [1] เดชขจร เจริญรัตนภิรมย์, “GREENCON CRETE คอนกรีตสีเขียวเพื่อสิ่งแวดล้อม,” วารสารคอนกรีต TCA e-magazine ฉบับที่ 16 ประจำเดือน สิงหาคม 2548.
- [2] การนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ประโยชน์ (ออนไลน์), สืบค้นจาก [http://maemoh.egat.com/index\\_maemoh.php?content=sara&topic=2](http://maemoh.egat.com/index_maemoh.php?content=sara&topic=2)
- [3] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2553). **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต.** พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.
- [4] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, (2543). **ความคงทนของคอนกรีต.1: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์**
- [5] วินิต ช่อวิเชียร. 2539. **คอนกรีตเทคโนโลยี.** ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [6] ASTM C 150, **Standard Specification for Portland Cement.** ,American Society for Testing and Materials.
- [7] สุรพล พุกขานุกุล. 2546. **กรรมวิธีการผลิตและชนิดของเถ้าถ่านหินที่มีในประเทศไทย.** เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง การนำเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในการงานคอนกรีต. สำนักวิจัยและพัฒนา, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- [8] ASTM C618, **Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**
- [9] Krammart P. and Tangtermsirikul S., (2002). **Strength Reduction and Expansion of Mortars with Fly Ash,** (Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand), V.13, No.3 pp. 9-16.
- [10] Chindaprasirt, P., Cao, T., and Sirivivatnanom V., **Blended Cement Technology for Durable Concrete Structures,** Proceeding of the First Asia/Pacific conference on Harmonization of Durability Standard and performance Tests for Component in Building and Infrastructure,

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] เสกสรร เรื่องศิริปิยะกุล 2544. การศึกษาการหดตัวแบบบอโตจีนัสของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยค้ดขนาดไมโครซิลิกาและสารลดน้ำพิเศษ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.
- [12] ปิติสานต์ กร้ามาตร.ม.ป.ท. ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ASTM C187, Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste
- [13] ASTM C191, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle
- [14] Kriwood Kiattikomol, Chai Jaturapitakkul, Smith Songpiriyakij, and Seksun Chutubtim, (2001). **A Study of Ground Coarse Fly Ashes with Difference Fineness From Various Sources as Pozzolan Materials**, Cement and Concrete Composite, Vol. 23,
- [15] ASTM C1437, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar
- [16] ASTM C109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)
- [17] ASTM C151, Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement
- [18] ASTM C157, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement, Mortar, and Concrete
- [19] ACI 305 R-91, (2000). **Hot Weathering Concrete**. ACI Manual of Concrete Practice. Part2. Michigan.
- [20] ASTM C596, Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement
- [21] ASTM C856, Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete
- [22] ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration

ภาคผนวก



**ภาคผนวก ก**

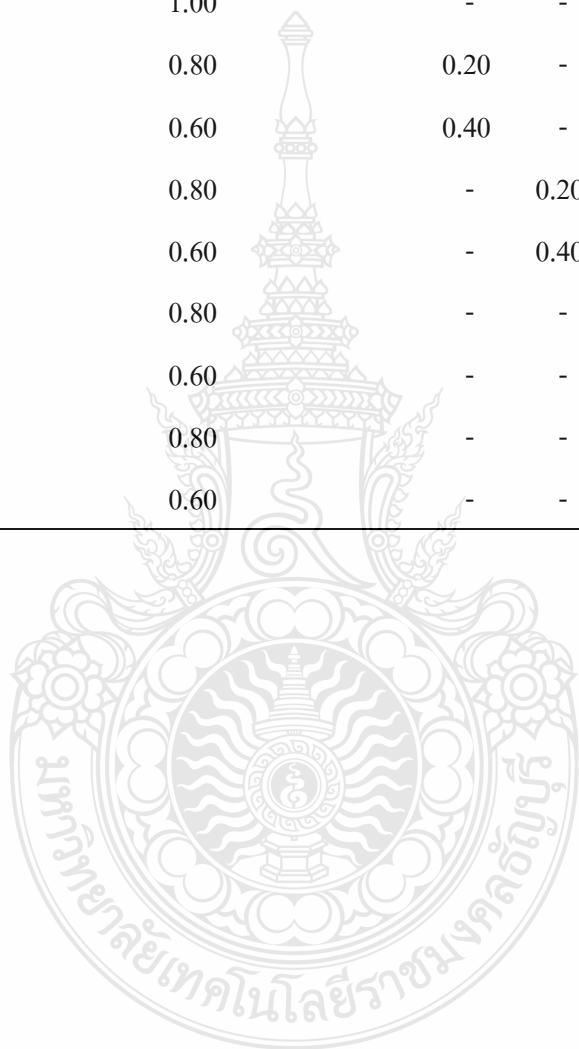
สัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา





ตารางที่ ก.1 สัดส่วนผสมของวัสดุประสานที่ใช้ในการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม ค่าการก่อดัว และการขยายตัวในเตาอบโทเคลฟของเพสต์

ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กรัม)					
		ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอยแม่เมาะ			เถ้าลอยระยอง	
			FA	FB	FC		
1	PC	1.00	-	-	-	-	
2	PC-20FA	0.80	0.20	-	-	-	
3	PC-40FA	0.60	0.40	-	-	-	
4	PC-20FB	0.80	-	0.20	-	-	
5	PC-40FB	0.60	-	0.40	-	-	
6	PC-20FC	0.80	-	-	0.20	-	
7	PC-40FC	0.60	-	-	0.40	-	
8	PC-20FR	0.80	-	-	-	0.20	
9	PC-40FR	0.60	-	-	-	0.40	



ตารางที่ ก.2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้ง โดยใช้อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 และ 0.55

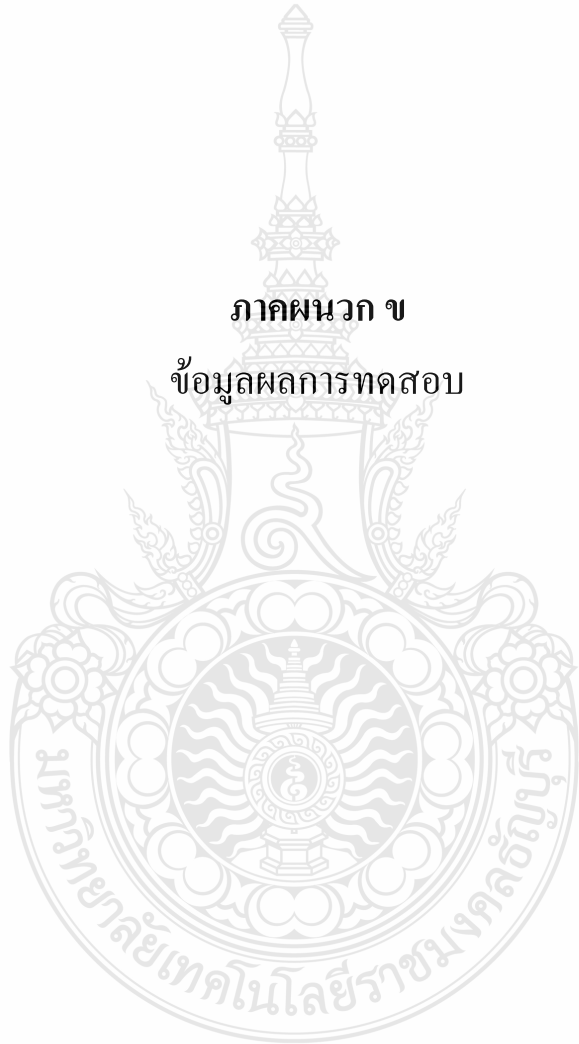
ที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กรัม)				ทราย	น้ำ
			เกล็ดลอย					
			แม่เมาะ		ระยอง			
			FA	FB	FC	FR		
1	MC-0.40	1.00	-	-	-	-	2.75	0.40
2	MC-0.55	1.00	-	-	-	-	2.75	0.55
3	MC-20FA-0.40	0.80	0.20	-	-	-	2.75	0.40
4	MC-20FA-0.55	0.80	0.20	-	-	-	2.75	0.55
5	MC-40FA-0.40	0.60	0.40	-	-	-	2.75	0.40
6	MC-40FA-0.55	0.60	0.40	-	-	-	2.75	0.55
7	MC-20FB-0.40	0.80	-	0.20	-	-	2.75	0.40
8	MC-20FB-0.55	0.80	-	0.20	-	-	2.75	0.55
9	MC-40FB-0.40	0.60	-	0.40	-	-	2.75	0.40
10	MC-40FB-0.55	0.60	-	0.40	-	-	2.75	0.55
11	MC-20FC-0.40	0.80	-	-	0.20	-	2.75	0.40
12	MC-20FC-0.55	0.80	-	-	0.20	-	2.75	0.55
13	MC-40FC-0.40	0.60	-	-	0.40	-	2.75	0.40
14	MC-40FC-0.55	0.60	-	-	0.40	-	2.75	0.55
15	MC-20FR-0.40	0.80	-	-	-	0.20	2.75	0.40
16	MC-20FR-0.55	0.80	-	-	-	0.20	2.75	0.55
17	MC-40FR-0.40	0.60	-	-	-	0.40	2.75	0.40
18	MC-40FR-0.55	0.60	-	-	-	0.40	2.75	0.55

ตารางที่ ก.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ  
ประสาน เท่ากับ 0.40 และ 0.55

ที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	ส่วนผสมของวัสดุต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)						
			เถ้าลอย				ทราย	หิน	น้ำ
			แม่เมาะ		ระยอง				
			FA	FB	FC	FR			
1	CC-0.40	332	-	-	-	-	970	1,080	132
2	CC -0.55	332	-	-	-	-	970	1,080	182
3	CC -FA20-0.40	266	66	-	-	-	970	1,080	133
4	CC-FA20-0.55	266	66	-	-	-	970	1,080	182
5	CC-FA40-0.40	199	133	-	-	-	970	1,080	133
6	CC-FA40-0.55	199	133	-	-	-	970	1,080	182
7	CC-FB20-0.40	266	-	66	-	-	970	1,080	133
8	CC-FB20-0.55	266	-	66	-	-	970	1,080	182
9	CC-FB40-0.40	199	-	133	-	-	970	1,080	133
10	CC-FB40-0.55	199	-	133	-	-	970	1,080	182
11	CC-FC20-0.40	266	-	-	66	-	970	1,080	133
12	CC-FC20-0.55	266	-	-	66	-	970	1,080	182
13	CC-FC40-0.40	199	-	-	133	-	970	1,080	133
14	CC-FC40-0.55	199	-	-	133	-	970	1,080	182
15	CC-FR20-0.40	266	-	-	-	66	970	1,080	133
16	CC-FR20-0.55	266	-	-	-	66	970	1,080	182
17	CC-FR40-0.40	199	-	-	-	133	970	1,080	133
18	CC-FR40-0.55	199	-	-	-	133	970	1,080	182

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดสอบ



ตารางที่ ข.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ถ้วน และเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา

รายการ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย			
		FA	FB	FC	FR
ความถ่วงจำเพาะ	3.14	2.21	2.57	2.55	2.17
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ชม. <sup>2</sup> /ก.)	3,190	2,867	2,820	2,722	2,723

ตารางที่ ข.2 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย

รายการ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย			
		FA	FB	FC	FR
SiO <sub>2</sub>	18.93	35.71	26.61	25.22	61.46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.51	20.44	13.60	13.88	20.27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.31	15.54	18.34	17.39	5.56
CaO	65.53	16.52	24.97	26.25	1.73
MgO	1.24	2	2.33	2.38	0.96
Na <sub>2</sub> O	0.15	1.15	1.75	1.4	0.73
K <sub>2</sub> O	0.31	2.41	1.77	1.92	1.36
SO <sub>3</sub>	2.88	4.26	8.53	9.44	0.38
LOI	-	0.49	0.53	0.56	5.38
Free Lime	-	1.71	3.93	3.06	0.03

ตารางที่ ข.3 ร้อยละปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

สัดส่วน	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม
PC	24.00
PC-20FA	22.77
PC-20FB	22.31
PC-20FC	22.00
PC-20FR	25.85
PC-40FA	21.31
PC-40FB	20.23
PC-40FC	19.85
PC-40FR	28.23

ตารางที่ ข.4 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

สัดส่วน	ระยะเวลาการก่อตัว	
	เริ่มต้น (นาที)	สุดท้าย (นาที)
PC	76	104
PC-20FA	91	135
PC-20FB	80	125
PC-20FC	86	133
PC-20FR	127	154
PC-40FA	113	146
PC-40FB	88	141
PC-40FC	94	142
PC-40FR	136	172

ตารางที่ ข.5 ร้อยละการขยายตัวในเตาออตเคลฟของเพสต์

สัดส่วน	ค่าการขยายตัวในเตาออตเคลฟ
C	-0.02
PC-20FA	-0.019
PC-20FB	0.027
PC-20FC	0.02
PC-20FR	-0.021
PC-40FA	-0.016
PC-40FB	0.089
PC-40FC	0.050
PC-40FR	-0.042

ตารางที่ ข.6 ร้อยละความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์

ตัวอย่างเพสต์	ปริมาณน้ำที่ต้องการ
PC	59.53
PC-20FA	56.54
PC-20FB	56.34
PC-20FC	56.28
PC-20FR	60.88
PC-40FA	54.20
PC-40FB	52.80
PC-40FC	52.83
PC-40FR	68.34

ตารางที่ ข.7 ระยะการหดตัวของแบบอโตจีนัสกับอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

ตัวอย่างมอร์ตาร์	อายุ (วัน)						
	1	3	7	14	28	56	91
MC-0.40	0.000	0.005	0.022	0.029	0.039	0.051	0.053
MC-20FA-0.40	0.000	0.001	0.014	0.016	0.025	0.032	0.033
MC-20FB-0.40	0.000	0.005	0.015	0.025	0.036	0.042	0.043
MC-20FC-0.40	0.000	0.003	0.016	0.023	0.033	0.040	0.041
MC-20FR-0.40	0.000	0.004	0.019	0.027	0.036	0.045	0.048
MC-40FA-0.40	0.000	0.000	0.011	0.013	0.018	0.025	0.028
MC-40FB-0.40	0.000	0.003	0.016	0.019	0.028	0.037	0.038
MC-40FC-0.40	0.000	0.002	0.012	0.017	0.026	0.036	0.036
MC-40FR-0.40	0.000	0.003	0.015	0.020	0.030	0.040	0.041

ตารางที่ ข.8 ระยะการหดตัวของแบบอโตจีนัสกับอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

ตัวอย่างมอร์ตาร์	อายุ (วัน)						
	1	3	7	14	28	56	91
MC-0.55	0.000	0.004	0.018	0.026	0.035	0.046	0.048
MC-20FA-0.55	0.000	0.002	0.004	0.008	0.016	0.025	0.026
MC-20FB-0.55	0.000	0.002	0.008	0.020	0.032	0.042	0.043
MC-20FC-0.55	0.000	0.000	0.002	0.014	0.029	0.039	0.040
MC-20FR-0.55	0.000	0.004	0.010	0.019	0.029	0.035	0.035
MC-40FA-0.55	0.000	0.002	0.004	0.008	0.014	0.019	0.020
MC-40FB-0.55	0.000	0.006	0.008	0.016	0.028	0.033	0.033
MC-40FC-0.55	0.000	0.001	0.005	0.011	0.021	0.028	0.029
MC-40FR-0.55	0.000	0.002	0.010	0.013	0.022	0.025	0.026



ตารางที่ ข.9 ระยะการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ  
ประสานเท่ากับ 0.40

ตัวอย่างมอร์ตาร์	อายุ (วัน)						
	1	3	7	14	28	56	91
MC-0.40	0.000	0.001	0.021	0.039	0.064	0.076	0.078
MC-20FA-0.40	0.000	0.011	0.019	0.028	0.046	0.054	0.055
MC-20FB-0.40	0.000	0.013	0.021	0.035	0.045	0.059	0.062
MC-20FC-0.40	0.000	0.014	0.023	0.032	0.042	0.056	0.057
MC-20FR-0.40	0.000	0.012	0.022	0.038	0.049	0.059	0.060
MC-40FA-0.40	0.000	0.014	0.024	0.033	0.037	0.044	0.046
MC-40FB-0.40	0.000	0.011	0.025	0.034	0.038	0.047	0.050
MC-40FC-0.40	0.000	0.006	0.024	0.028	0.039	0.045	0.046
MC-40FR-0.40	0.000	0.010	0.020	0.031	0.042	0.045	0.048

ตารางที่ ข.10 ระยะการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ  
ประสานเท่ากับ 0.55

ตัวอย่างมอร์ตาร์	อายุ (วัน)						
	1	3	7	14	28	56	91
MC-0.55	0.000	0.015	0.043	0.055	0.075	0.083	0.083
MC-20FA-0.55	0.000	0.009	0.030	0.037	0.050	0.062	0.065
MC-20FB-0.55	0.000	0.004	0.015	0.041	0.064	0.075	0.079
MC-20FC-0.55	0.000	0.002	0.030	0.039	0.055	0.070	0.071
MC-20FR-0.55	0.000	0.002	0.025	0.035	0.047	0.068	0.070
MC-40FA-0.55	0.000	0.004	0.011	0.029	0.037	0.046	0.055
MC-40FB-0.55	0.000	0.002	0.025	0.037	0.044	0.056	0.060
MC-40FC-0.55	0.000	0.003	0.020	0.030	0.039	0.054	0.056
MC-40FR-0.55	0.000	0.006	0.020	0.033	0.042	0.055	0.057

ตารางที่ ข.11 ระยะการยุบตัวของคอนกรีต

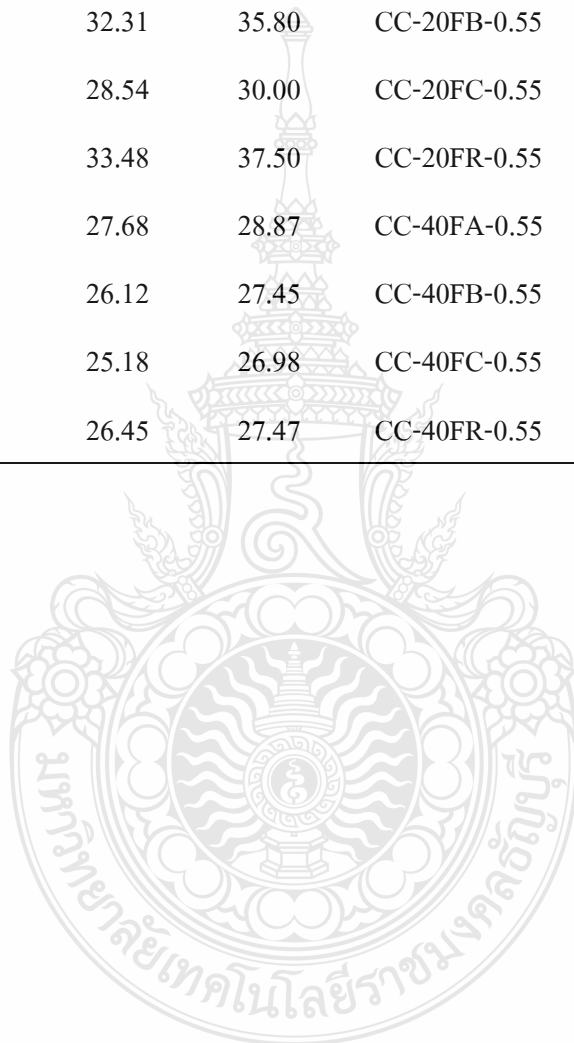
ตัวอย่างคอนกรีต	ค่ายุบตัว (cm.)
CC-0.40	1.50
CC-20FA-0.40	2.30
CC-20FB-0.40	2.50
CC-20FC-0.40	2.70
CC-20FR-0.40	1.80
CC-40FA-0.40	2.50
CC-40FB-0.40	2.80
CC-40FC-0.40	3.00
CC-40FR-0.40	2.20
CC-0.55	2.20
CC-20FA-0.55	2.50
CC-20FB-0.55	2.70
CC-20FC-0.55	2.90
CC-20FR-0.55	2.40
CC-40FA-0.55	2.60
CC-40FB-0.55	3.00
CC-40FC-0.55	3.20
CC-40FR-0.55	2.50

ตารางที่ ข.12 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต

ตัวอย่างคอนกรีต	อายุ (วัน)					
	1	7	14	28	56	91
CC-0.40	20.33	28.00	35.73	41.58	42.86	44.53
CC-20FA-0.40	18.73	28.00	33.30	39.01	41.01	43.97
CC-20FB-0.40	18.00	26.00	30.61	33.17	37.81	41.57
CC-20FC-0.40	16.23	25.00	32.05	36.00	39.00	42.93
CC-20FR-0.40	18.00	27.00	33.00	39.80	41.34	43.80
CC-40FA-0.40	10.41	24.24	28.36	32.18	35.45	39.35
CC-40FB-0.40	16.00	23.39	28.33	31.00	34.00	37.32
CC-40FC-0.40	15.40	22.19	30.00	34.60	37.10	40.00
CC-40FR-0.40	18.20	24.77	31.40	36.92	39.48	42.20
CC-0.55	17.50	29.02	34.61	39.43	40.36	41.83
CC-20FA-0.55	15.00	26.23	31.75	35.41	37.20	38.28
CC-20FB-0.55	16.20	23.00	29.86	32.38	35.31	36.68
CC-20FC-0.55	14.14	24.47	28.17	32.64	36.72	39.36
CC-20FR-0.55	15.70	25.00	30.00	34.29	36.83	40.00
CC-40FA-0.55	6.52	20.21	27.13	29.51	33.72	36.90
CC-40FB-0.55	6.80	21.28	25.29	27.86	29.76	31.56
CC-40FC-0.55	10.08	22.33	25.48	29.44	32.87	34.13
CC-40FR-0.55	11.49	22.53	25.20	30.35	35.00	37.41

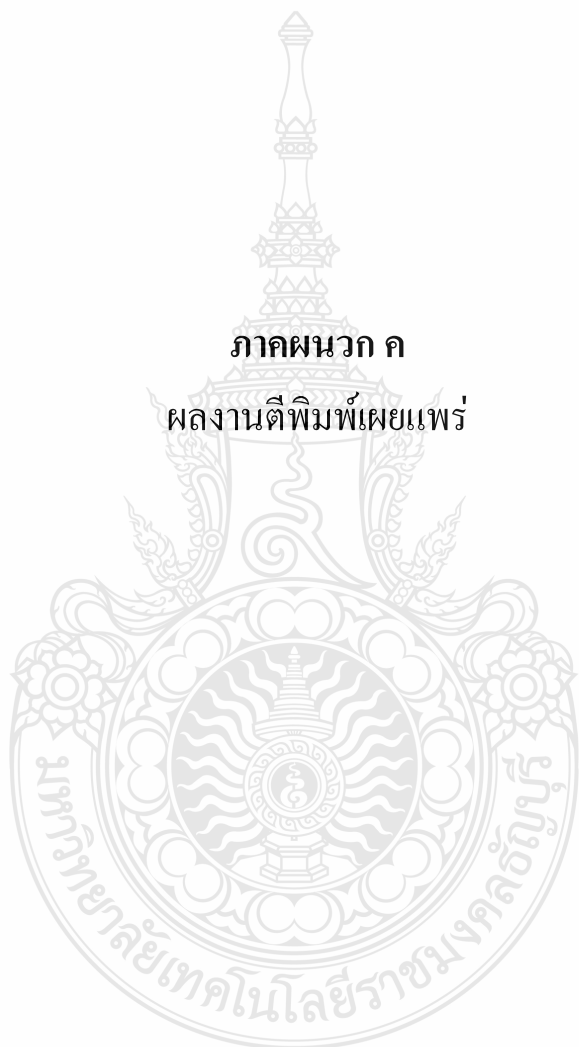
ตารางที่ ข.13 ค่ากำลังดึงของคอนกรีต

อัตราส่วนน้ำเท่ากับ 0.40			อัตราส่วนน้ำเท่ากับ 0.55		
ตัวอย่างคอนกรีต	อายุ 28 วัน	อายุ 91 วัน	ตัวอย่างคอนกรีต	อายุ 28 วัน	อายุ 91 วัน
CC-0.40	33.00	38.58	CC-0.55	22.76	25.91
CC-20FA-0.40	32.14	37.41	CC-20FA-0.55	21.13	23.43
CC-20FB-0.40	32.31	35.80	CC-20FB-0.55	20.52	22.13
CC-20FC-0.40	28.54	30.00	CC-20FC-0.55	20.33	21.15
CC-20FR-0.40	33.48	37.50	CC-20FR-0.55	21.74	23.00
CC-40FA-0.40	27.68	28.87	CC-40FA-0.55	20.28	22.00
CC-40FB-0.40	26.12	27.45	CC-40FB-0.55	20.46	21.05
CC-40FC-0.40	25.18	26.98	CC-40FC-0.55	18.20	20.05
CC-40FR-0.40	26.45	27.47	CC-40FR-0.55	22.00	22.31



ภาคผนวก ค

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



# ANNUAL CONCRETE CONFERENCE 13



งานประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 13

นวัตกรรมคอนกรีต  
เพื่อการพัฒนาาระบบโครงสร้างพื้นฐาน  
ด้านการขนส่งของประเทศไทย

7-9 March 2018  
The Zign Hotel  
Pattaya



จัดโดย สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย  
ร่วมกับ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
และศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น





## สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

ขอมอบประกาศนียบัตรฉบับนี้ไว้แก่

คุณอรุณสิทธิ์ แสงระยับ คุณนิติศานต์ กวีรามাত্র และ คุณสมโชค สุขแย้ม

ในโอกาสนำเสนอบทความเรื่อง

“ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต”

EFFECT OF FLY ASH TYPE ON PROPERTIES OF PASTE MORTAR AND CONCRETE

ภายในงาน

“การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 13 Annual Concrete Conference (ACC13)”

วันที่ 7-9 มีนาคม 2561

ให้ไว้ ณ วันที่ 9 มีนาคม 2561

จันทร์ สิมะพันธุ์

นาวาอากาศเอก

(รองศาสตราจารย์ จันทกร พิระพันธ์)

นายกสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

**เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ**  
**การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 13**  
**Annual Concrete Conference 13 (ACC13)**

บทความ

- ❖ บทความโดยองค์ปาฐก (Keynote)
- ❖ บทความวิจัยรับเชิญ (IVT)
- ❖ บทความวิจัย สาขาคอนกรีตและวัสดุ (MAT)
- ❖ บทความวิจัย สาขาโครงสร้างคอนกรีต (STR)
- ❖ บทความวิจัย สาขาบำรุงรักษา ซ่อมแซม และเสริมกำลังคอนกรีต(REP)
- ❖ บทความวิจัยสาขาคอนกรีตเพื่อสิ่งแวดล้อมและการอนุรักษ์พลังงาน (ENV)
- ❖ บทความวิจัย สาขาการปรับปรุงคุณสมบัติของดินด้วยวัสดุซีเมนต์ (GTE)
- ❖ บทความวิจัย สาขาผลงานและนวัตกรรมงานคอนกรีตของผู้ประกอบการ (ICM)

7-9 มีนาคม 2561

โรงแรมเดอะ ชายนท์ พัทยา  
จังหวัดชลบุรี

จัดทำโดย

- ❖ สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

ร่วมกับ

- ❖ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- ❖ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สงวนลิขสิทธิ์ ©ตาม พรบ.ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2521 โดยสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทยพิมพ์ครั้งที่ 1 พ.  
2561จำนวน 300 เล่ม



## คำนำ

การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ถือได้ว่าเป็นเวทีที่สำคัญมากเวทีหนึ่งในวงการคอนกรีตของประเทศไทย ซึ่งในแต่ละปีมีนักวิชาการ วิศวกร นักศึกษา ผู้ใช้และผู้ผลิตคอนกรีตเข้าร่วมประชุมเป็นจำนวนมาก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้มีการแลกเปลี่ยนความรู้ ตลอดจนจนประสบการณ์ทำงานด้านคอนกรีตและวัสดุก่อสร้างที่มีการใช้ปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดการพัฒนางานองค์ความรู้ทางด้านนี้อย่างต่อเนื่องในประเทศ

การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 13 เป็นความร่วมมือทางวิชาการระหว่าง สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น จัดขึ้นในระหว่างวันที่ 7-9 มีนาคม 2561 ณ โรงแรมเดอะ ซายน์ พัทยา จังหวัดชลบุรี เป็นการเตรียมความพร้อมให้กับผู้เข้าร่วมงานได้ตระหนักถึงความสำคัญของการสร้างนวัตกรรมจากวัสดุคอนกรีตและวัสดุก่อสร้างที่มีการใช้ปูนซีเมนต์ เพื่อรองรับระบบโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งของประเทศไทย ในยุคไทยแลนด์ 4.0

ในการประชุมครั้งนี้มีองค์ปาฐกรับเชิญที่มาจาก American Concrete Institute ประเทศสหรัฐอเมริกา จากประเทศจีน และจากบริษัทก่อสร้างที่สำคัญในประเทศ อีกทั้งยังมีวิทยากรรับเชิญจากหน่วยงานภาครัฐ รัฐวิสาหกิจ และบริษัทก่อสร้างที่สำคัญในประเทศ ที่มีการทำงานที่เกี่ยวข้องกับระบบโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่ง และวิทยากรรับเชิญจากผู้ผลิตมอร์ตาร์ที่มีการทำงานที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีมอร์ตาร์ ซึ่งเชื่อว่าผู้เข้าร่วมประชุมจะได้รับประโยชน์จากการประชุมครั้งนี้อย่างมาก นอกเหนือจากการนำเสนอเนื้อหาของงานวิจัยทางด้านคอนกรีตและวัสดุก่อสร้างที่มีการใช้ปูนซีเมนต์

เอกสารประกอบการประชุมในครั้งนี้เป็นเอกสารที่ได้รับการจัดทำเป็นรูปเล่มที่มีเนื้อหาของบทความฉบับเต็มสำหรับบทความวิจัย และเนื้อหาที่มีการนำเสนอในรูปแบบของ PowerPoint สำหรับโครงการก่อสร้างที่มาจากหน่วยงานภาครัฐ รัฐวิสาหกิจและ ภาคเอกชน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการใช้อ้างอิงต่อไป

ในฐานะของคณะผู้จัดการประชุมครั้งนี้ ขอขอบคุณ องค์ปาฐกรับเชิญ วิทยากรรับเชิญ ผู้เขียนบทความ ผู้นำเสนอบทความ ผู้เข้าร่วมประชุม บริษัทและห้างร้านต่างๆ ที่ได้สนับสนุนการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 13 เป็นอย่างยิ่ง ทำให้การประชุมครั้งนี้ ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

- สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

## สารบัญ

	หน้า
คณะกรรมการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย	III
คณะกรรมการวิชาการและกรรมการสมทบ สาขาโครงสร้างคอนกรีต	IV
คณะกรรมการวิชาการและกรรมการสมทบ สาขาคอนกรีต วัสดุและการก่อสร้าง	V
คณะกรรมการวิชาการและกรรมการสมทบ สาขาบำรุงรักษา ซ่อมแซม และเสริมกำลังคอนกรีต	VII
สำนักเลขาธิการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย	IX
คณะกรรมการอำนวยการจัดประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	IX
คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 13	X
กำหนดการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 13	XII
สารบัญบทความ	XIX
ผู้สนับสนุน	

คณะกรรมการที่ปรึกษา สมาคมคณกริตแห่งประเทศไทย ประจำปี 2561-2562

รศ.ดร.พิชัย	นิมิตยงสกุล	ที่ปรึกษา
ศ.ดร.สมนึก	ตั้งเต็มสิริกุล	ที่ปรึกษา
ศ.ดร.ชัย	จาดุรพิทักษ์กุล	ที่ปรึกษา
อ.สีบศักดิ์	พรหมบุญ	ที่ปรึกษา
ศ.ดร.เอกสิทธิ์	ลี้มสุวรรณ	ที่ปรึกษา
ดร.ชเนศ	วีระศิริ	ที่ปรึกษา
ศ.ดร.ปริญญา	จินดาประเสริฐ	ที่ปรึกษา
รศ.ดร.ไกรวุฒิ	เกียรติโกมล	ที่ปรึกษา
รศ.ดร.บุญไชย	สถิตมั่นในธรรม	ที่ปรึกษา
รศ.เอนก	ศิริพานิชกร	ที่ปรึกษา
ดร.การุญ	จันทรางศุ	ที่ปรึกษา
คุณเกษตร	วิเศษศักดิ์สันติ	ที่ปรึกษา
คุณชัยรัตน์	อมาดยกุล	ที่ปรึกษา
คุณณรงค์	ทัศนนิพันธ์	ที่ปรึกษา
คุณปริญญา	ยมะสมิต	ที่ปรึกษา
คุณมณฑล	สุดประเสริฐ	ที่ปรึกษา
คุณมานิตย์	กตัญญูวิวัฒน์	ที่ปรึกษา
คุณวรัช	กุศลมนมัย	ที่ปรึกษา
คุณศานิต	เกษสุวรรณ	ที่ปรึกษา
คุณสมชาย	เมฆวิวัฒน์ธากุล	ที่ปรึกษา
คุณสมยศ	อุดมสินกุล	ที่ปรึกษา
คุณสรณีย์	ดีพันธ์พงษ์	ที่ปรึกษา
คุณสุเมธ	สุรบถโสภณ	ที่ปรึกษา
คุณสุวัฒน์	เชาว์ปรีชา	ที่ปรึกษา
คุณอนุชิต	เจริญศุภกุล	ที่ปรึกษา

คณะกรรมการอำนวยการ ประจำปี 2561-2562

น.อ.รศ.ดร.ชนากกร	พีระพันธ์ุ	นายกสมาคม
รศ.ดร.สมิตร	สงพิริยะกิจ	อุปนายก ฝ่ายวิชาการ
คุณอนุชิต	เจริญศุภกุล	อุปนายก ฝ่ายวิชาชีพ
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์	มกระรัช	เลขาธิการ
คุณบุญรอด	คุปดีทัฬหี	เหรียญก
ผศ.ดร.รัฐภูมิ	ปรีชาตปรีชา	นายทะเบียน
ดร.นนทพัฒน์	นิมิตยงสกุล	ปฏิคม และประชาสัมพันธ์
รศ.ดร.วันชัย	ยอดสุดใจ	สาราณียากร(รักษาการแทน)
คุณสรภมม	คงสวัสดิ์วรกุล	กรรมการกลาง
คุณจักรกฤษณ์	ตันเถา	กรรมการกลาง
คุณสุวิทย์ชัย	ภูวพัฒนชาติ	กรรมการกลาง
ดร.วิชากร	เองษฎ์กุล	กรรมการกลาง
ผศ.ดร.ประวีณ	ชมปรีดา	ประธานกรรมการวิชาการ สาขาโครงสร้างฯ
ผศ.ดร.ภาณุวัฒน์	จ้อยกลัด	ประธานกรรมการวิชาการ สาขาคอนกรีต วัสดุฯ
รศ.ดร.วันชัย	ยอดสุดใจ	ประธานกรรมการวิชาการ สาขาบำรุงรักษาฯ

คณะกรรมการวิชาการและกรรมการสมทบ  
สาขาโครงสร้างคอนกรีต ประจำปี 2561-2562

ศ.อรุณ	ชัยเสรี	ที่ปรึกษา
ศ.ดร.เอกสิทธิ์	ลิมสุวรรณ	ที่ปรึกษา
รศ.เอนก	ศิริพานิชกร	ที่ปรึกษา
รศ.ดร.สถาพร	โภาค	ที่ปรึกษา
ดร.เสถียร	เจริญเหรียญ	ที่ปรึกษา
คุณอนุชิต	เจริญศุภกุล	ที่ปรึกษา
คุณณรงค์	ทัศนนิพันธ์ุ	ที่ปรึกษา
Mr.Gan	Cheng Chian	ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.ชูชัย	สุจิวรกุล	ที่ปรึกษา

**คณะกรรมการวิชาการและกรรมการสมทบ**  
**สาขาโครงสร้างคอนกรีต ประจำปี 2561-2562(ต่อ)**

ผศ.ดร.ประวีณ	ชมปรีดา	ประธานกรรมการวิชาการ
รศ.ดร.สุทัศน์	ลีลาทวีวัฒน์	กรรมการวิชาการ
รศ.ดร.วิทิต	ปานสุข	กรรมการวิชาการ
ผศ.นัฐวุฒิ	ทิพย์โยธา	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.วิรัช	เลิศไพฑูรย์พันธ์	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์	แก้วกุลชัย	กรรมการวิชาการ
ดร.วรศักดิ์	จักราปิยะนันท์	กรรมการวิชาการ
ดร.ธิดารัตน์	จิระวัฒนาสมกุล	กรรมการวิชาการ
คุณสุเมธ	เกียรติเมธา	กรรมการวิชาการ
คุณศิริชัย	วรรณบูรณ์	กรรมการวิชาการ
คุณวิเชียร	แก้วคำปา	กรรมการวิชาการ
คุณปรีดี	งามสันติกุล	กรรมการวิชาการ
คุณธนบดี	หฤทัยถาวร	กรรมการวิชาการ
คุณจำรัส	คงศิริ	กรรมการวิชาการ
คุณคมกฤษ	สุทธิไวยกิจ	กรรมการวิชาการ
รศ.ดร.สิทธิชัย	แสงอาทิตย์	กรรมการวิชาการสมทบ
ดร.สุรัชย์	อำนาจพรเลิศ	กรรมการวิชาการสมทบ
ดร.นิพนธ์	จงพิทักษ์ศิลป์	กรรมการวิชาการสมทบ
คุณกมล	สิงห์โตแก้ว	กรรมการวิชาการสมทบ

**คณะกรรมการวิชาการและกรรมการสมทบ**  
**สาขาคอนกรีต วัสดุและการก่อสร้าง ประจำปี 2561-2562**

รศ.ดร.พิชัย	นิมิตยงสกุล	ที่ปรึกษา
ศ.ดร.สมนึก	ตั้งเต็มสิริกุล	ที่ปรึกษา
ศ.ดร.ชัย	จาดุรพิทักษ์กุล	ที่ปรึกษาและกรรมการกลุ่มมอ์ดาร์
น.อ.รศ.ดร.ชนากร	พีระพันธ์	ที่ปรึกษาและกรรมการกลุ่มมอ์ดาร์



คณะกรรมการวิชาการและกรรมการสมทบ

สาขาคอนกรีต วัสดุและการก่อสร้าง ประจำปี 2561-2562 (ต่อ)

ศ.ดร.ปิติ	สุคนธ์สุขกุล	ที่ปรึกษา
คุณสุรพล	พฤกษานุกุล	ที่ปรึกษา
คุณวราภรณ์	คุณวานากิจ	ที่ปรึกษา
คุณสุรเชษฐ์	จิ่งเกษมโชคชัย	ที่ปรึกษา
คุณสุรพล	พฤกษานุกุล	ที่ปรึกษา
รศ.ดร.อุดมวิทย์	ไชยสกุลเกียรติ	ที่ปรึกษา
คุณวิมลศรี	รัตนะคุณชัย	ที่ปรึกษาและกรรมการกลุ่มมอर्टาร์
ผศ.ดร.ภาณุวัฒน์	จ้อยกลัด	ประธานกรรมการวิชาการ
รศ.ดร.สมิตร	ส่งพิริยะกิจ	รองประธานกรรมการวิชาการ
คุณบุญรอด	คุปดีทัพพิ	รองประธานกรรมการวิชาการ
รศ.ดร.วิทิต	ปานสุข	กรรมการวิชาการ
รศ.ดร.มาโนช	สรรพกิจทิพากร	กรรมการวิชาการ
รศ.ดร.บวร	อิศรางกูร ณ อยุธยา	กรรมการวิชาการ
รศ.ดร.ณัฐพงศ์	ดำรงวิริยาณูภาพ	กรรมการวิชาการ
รศ.ดร.กิตติภูมิ	รอดสิน	กรรมการวิชาการ
รศ.จรรยา	เจริญเนตรกุล	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.วีระชาติ	ตั้งจิรภัทร	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.วัจน์วงศ์	กรีพละ	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.วรางคณา	แสงสร้อย	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.พงษ์ธร	จุฬพันธ์ทอง	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.ปิติตานต์	กร้ามาต	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.ทวีชัย	สำราญวานิช	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์	มกระธัช	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.ชยานนท์	หรรษภิญโญ	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.กริสน์	ชัยมูล	กรรมการวิชาการ
ดร.อาภามาศ	จันทร์เมฆา	กรรมการวิชาการ
ดร.อนุวัฒน์	อรรถไชยวุฒิ	กรรมการวิชาการ
ดร.สนทยา	ทองอรุณศรี	กรรมการวิชาการ
ดร.ปานเทพ	จูลนิพิฐวงษ์	กรรมการวิชาการ

**คณะกรรมการวิชาการและกรรมการสมทบ**  
**สาขาคอนกรีต วัสดุและการก่อสร้าง ประจำปี 2561-2562 (ต่อ)**

ดร.ปัทม์	ปานถาวร	กรรมการวิชาการ
ดร.ปวีณา	จริยธิตีพงศ์	กรรมการวิชาการ
ดร.นนทพัฒน์	นิมิตยงสกุล	กรรมการวิชาการ
ดร.ธิดาพร	เชื้อสวัสดิ์	กรรมการวิชาการ
ดร.ทองศักดิ์	อิมใจ	กรรมการวิชาการ
ดร.ชวิต	ทองโยธี	กรรมการวิชาการ
ดร.จักรพันธ์	วงษ์พา	กรรมการวิชาการ
ดร.กฤติยา	แก้วมณี	กรรมการวิชาการ
คุณอ้อมใจ	ปิ่นทะแพทย์	กรรมการวิชาการและกรรมการกลุ่มมอर्टาร์
คุณสุวิมลชัย	ภูวพัฒนาชาติ	กรรมการวิชาการ
คุณสุรศักดิ์	ภูสันติพงษ์	กรรมการวิชาการ
คุณสุรชัย	สุทธิธรรมมา	กรรมการวิชาการ
คุณสรภมม	คงสวัสดิ์วรกุล	กรรมการวิชาการ
คุณเศกสรรค์	ชูทับทิม	กรรมการวิชาการ
คุณวุฒินันท์	เจียวิทย์นันท์	กรรมการวิชาการและกรรมการกลุ่มมอर्टาร์
คุณเฉลิมวุฒิ	สงวนญาติ	กรรมการวิชาการ
คุณจีรภัทร์	เดชะสกุลชัยนันท์	กรรมการวิชาการ
คุณณัฐวุฒิ	วัชรานุกเคราะห์	กรรมการวิชาการและเลขานุการ
ผศ.ดร.รัฐภูมิ	ปรีชาตปรีชา	กรรมการวิชาการสมทบ

**คณะกรรมการวิชาการและกรรมการสมทบ**  
**สาขาบำรุงรักษา ซ่อมแซม และเสริมกำลังคอนกรีต ประจำปี 2561-2562**

รศ.ดร.พิชัย	นิมิตยงสกุล	ที่ปรึกษา
ศ.ดร.สมนึก	ตั้งเต็มสิริกุล	ที่ปรึกษา
รศ.ดร.สุวิมล	สัจจวาณิชย์	ที่ปรึกษา
ดร.ธเนศ	วีระศิริ	ที่ปรึกษา
รศ.ดร.บุญไชย	สถิตมันไนธรรม	ที่ปรึกษา

**คณะกรรมการวิชาการและกรรมการสมทบ**  
**สาขาบำรุงรักษา ซ่อมแซม และเสริมกำลังคอนกรีต ประจำปี 2561-2562(ต่อ)**

รศ.ดร.วันชัย	ยอดสุดใจ	ประธานกรรมการวิชาการ
คุณมนตรี	เชื้อคล้ายวรรณ	รองประธานกรรมการวิชาการ
รศ.ดร.ทวิช	พูลเงิน	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.สรินทร์	เหมะวิบูลย์	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.รักติพงษ์	สหมิตรมงคล	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.ปิติวัฒน์	วิวัฒน์ชัย	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.ธวัชวีร์	ลีละวัฒน์	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร.ชยานนท์	หรรษาภิญโญ	กรรมการวิชาการ
ดร.สนธยา	ทองอรุณศรี	กรรมการวิชาการ
ดร.เมธี	เชี่ยวชาญณิชย์กร	กรรมการวิชาการ
ดร.ฟองจันทร์	จิราสิต	กรรมการวิชาการ
ดร.พุทธิพงศ์	เหล็ห์รัตนวัฒนา	กรรมการวิชาการ
ดร.นรินทร์	เผ่าวณิช	กรรมการวิชาการ
ดร.นนทวัฒน์	ชมหวาน	กรรมการวิชาการ
ดร.ณัฐวัฒน์	จุฑารัตน์	กรรมการวิชาการ
คุณสมหมาย	คำมิ่งษ์	กรรมการวิชาการ
คุณสดสวย	สุจิตธรรมกุล	กรรมการวิชาการ
คุณศุภสิทธิ์	ศิริศักดิ์	กรรมการวิชาการ
คุณวีรชัย	ไชยสระแก้ว	กรรมการวิชาการ
คุณยุทธ	ปณิธานวงศ์	กรรมการวิชาการ
คุณนนทฉัตร	กุลประภา	กรรมการวิชาการ
คุณธรรมาชาติ	กุลประภา	กรรมการวิชาการ
คุณธนวรรณ	มาประจง	กรรมการวิชาการ
คุณณัฐมนต์	กัมปนาพันธ์	กรรมการวิชาการ
คุณณเรเดช	ทักษพาณิชย์	กรรมการวิชาการ
คุณชาติรี	พานิชอุดม	กรรมการวิชาการ
คุณเกียรติ	นิติโชติ	กรรมการวิชาการ
ดร.จักรพันธ์	เทือกตะ	กรรมการวิชาการ และเลขานุการ



สำนักเลขาธิการสมาคมฯ

ศ.ดร.ชัย	จาดูรพิทักษ์กุล	ที่ปรึกษาสำนักเลขาธิการสมาคมฯ
ดร.การุญ	จันทร์รางศุ	ที่ปรึกษาสำนักเลขาธิการสมาคมฯ
รศ.ดร.สมิตร	ส่งพิริยะกิจ	ที่ปรึกษาสำนักเลขาธิการสมาคมฯ
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์	มกระชัช	เลขาธิการสมาคมฯ
ว่าที่ร้อยตรีเมธา	ไชโย	กรรมการในสำนักเลขาธิการสมาคมฯ
ผศ.ดร.รุ่งโรจน์	ปิยะภาณุวัฒน์	กรรมการในสำนักเลขาธิการสมาคมฯ
ดร.อำนาจ	คำพานิช	กรรมการในสำนักเลขาธิการสมาคมฯ
ดร.จิตติกร	โพธิ์ศรีบั้ง	กรรมการในสำนักเลขาธิการสมาคมฯ
ดร.กนกพัฒน์	ชาญไววิทย์	กรรมการในสำนักเลขาธิการสมาคมฯ
คุณสมภพ	พันธ์เฟื่อง	กรรมการในสำนักเลขาธิการสมาคมฯ
คุณยศพงศ์	วงศ์ระวีกุล	กรรมการในสำนักเลขาธิการสมาคมฯ
คุณประภิต	แก้วเคารพ	กรรมการในสำนักเลขาธิการสมาคมฯ
คุณวิภาวี	จันทพันธ์	เลขานุการในสำนักเลขาธิการสมาคมฯ

คณะกรรมการอำนวยการจัดประชุมวิชาการ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ผศ.ศิวะ	วสุนทรภาวิวัฒน์	ที่ปรึกษา
รศ.ดร.อุดมวิทย์	ไชยสกุลเกียรติ	ที่ปรึกษา
ดร.รัฐศักดิ์	พรหมมาศ	ที่ปรึกษา
รศ.ดร.สำเร็จ	รักซ้อน	กรรมการฝ่ายวิชาการ
ผศ.ดร.ชูศักดิ์	ศิรีรัตน์	กรรมการฝ่ายวิชาการ
ผศ.สาโรจน์	ดำรงศิลป์	กรรมการฝ่ายวิชาการ
ดร.สุธรรม	โรจนเมฆา	กรรมการฝ่ายวิชาการ
ดร.รณรงค์	เทพวงษ์	กรรมการฝ่ายวิชาการ
ดร.สำเนียง	องสุพันธ์กุล	กรรมการฝ่ายวิชาการ
ดร.สันติ	ไทยยีนวงษ์	กรรมการฝ่ายวิชาการ
นายประพัฒน์	สีใส	กรรมการฝ่ายพิธีการและต้อนรับ

**คณะกรรมการอำนวยการจัดประชุมวิชาการ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์(ต่อ)**

นายอภิเสฏฐ์	สุวรรณสะอาด	กรรมการฝ่ายพิธีการและต้อนรับ
นายพงศ์ภูมิ	ศรชมแก้ว	กรรมการฝ่ายพิธีการและต้อนรับ
นางสาวสุกัญญา	ทรัพย์ยอดแก้ว	กรรมการฝ่ายพิธีการและต้อนรับ
นายประพัฒน์	สีใส	กรรมการฝ่ายประชาสัมพันธ์
นายอภิเสฏฐ์	สุวรรณสะอาด	กรรมการฝ่ายประชาสัมพันธ์
นางสาววารภรณ์	คงเจริญ	กรรมการฝ่ายเลขาและการเงิน
นางสาววรรณรัตน์	ประทุมสุวรรณ	กรรมการฝ่ายเลขาและการเงิน
นางสาววัลลภา	แสงจันทร์	กรรมการฝ่ายเลขาและการเงิน

**คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 13**

ศ.ดร.ชัย	จาดรุพิทักษ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.สุวิมล	สังจาวณิชย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สำเร็จ	รักซ้อน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รศ.ดร.สมิตร	สงพิริยะกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.วิทิต	ปานสุข	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.วิเชียร	ชาลี	มหาวิทยาลัยบูรพา
รศ.ดร.วันชัย	ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.กิตติภูมิ	รอดสิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.อุดมวิทย์	ไชยสกุลเกียรติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.วีรชาติ	ตั้งจิรภัทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.วัจนวงศ์	กริพละ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติจังหวัดสกลนคร
ผศ.ดร.วรางคณา	แสงสร้อย	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ผศ.ดร.รุ่งโรจน์	ปิยะภาณุวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.รักติพงษ์	สหมิตรมงคล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 13(ต่อ)

ผศ.ดร.ภาณุวัฒน์	จ้อยกลัด	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.ปิติศักดิ์	กร้ามาตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ธีรวัฒน์	สินสิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผศ.ดร.ทวีชัย	สำราญวานิช	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์	มกระธัช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ชูชัย	สุจิรวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.เกียรติสุดา	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์	แก้วกุลชัย	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ศักดิ์สิทธิ์	พันธ์วี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.รัฐพล	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.ภักดิ์วัฒน์	แสนเจริญ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ดร.นันทวัฒน์	ขมหวาน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.นันทชัย	ชูศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.ธนากร	ภูเงินขำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.จิตติกร	โพธิ์ศรีบั้ง	สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวงชนบท
ดร.จักรพันธ์	วงษ์พา	มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
ดร.กนกพัฒน์	ชาญไวยุทธ์	บริษัท บวิค-ไทย จำกัด
คุณสมภาพ	พันธ์พิ่ง	บริษัท บวิค-ไทย จำกัด

กำหนดการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 13  
The 13<sup>th</sup> Annual Concrete Conference (ACC13)  
โรงแรม เดอะ ซายน์ พัทยา จังหวัดชลบุรี  
วันที่ 7-9 มีนาคม พ.ศ. 2561

วันที่ 7 มีนาคม พ.ศ. 2561

10.30 – 13.00 น.	ลงทะเบียน
13.00 – 13.30 น.	<b>พิธีเปิดการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 13 (ห้อง Fineen Ballroom)</b> - กล่าวรายงาน โดย อธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี - กล่าวเปิดงาน โดย ท่านผู้ว่าราชการจังหวัดชลบุรี - นายกสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย ขอขอบคุณผู้สนับสนุนการจัดงาน และมอบรางวัล TCA Concrete Practice Awards - การแสดงชุด Proud RMUTR
13.30 น. เป็นต้นไป	<b>การบรรยายพิเศษ (Keynote Speaker) (ห้อง Fineen Ballroom)</b>
13.30 – 14.30 น.	“Innovation in Concrete Technology in Virginia's Transportation Infrastructure” By: <i>H. Celik Ozyildirim, Ph.D., P.E. (ACI Ambassador Speaker)</i> <i>Principal Research Scientist, Virginia Transportation Research Council</i>
14.30 – 15.30 น.	“Precast Concrete Technology for Red Line Project” โดย ดร. วิรัช รุ่งโรจน์สารทิศ รองกรรมการผู้จัดการอาวุโส ฝ่ายวิศวกรรมและก่อสร้าง บริษัท ยูนิค เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด (มหาชน)
15.30 – 16.30 น.	“Use of Geopolymer for Infrastructure: Current Status and Future Perspectives” By: <i>Caijun Shi, Ph.D., P.Eng., F.ACI, F.RILEM</i>
16.30 – 17.15 น.	นำเสนอผลงาน TCA Concrete Practice Awards
17.15 – 17.45 น.	“Mortar Applications in Thailand” โดย นายกสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย น้ำชา-กาแฟ (ตามอัธยาศัย)
19.00 น. เป็นต้นไป	งานเลี้ยงรับรอง แนะนำเจ้าภาพจัดงาน ACC14 ณ ห้อง (ห้อง Fidella Ballroom) การแสดงชุด Thai Advance

STR-006	การศึกษาการเพิ่มผลิตภาพงานก่อสร้างโครงสร้างพื้นคอนกรีตของอาคารอยู่อาศัยรวมกรณีศึกษา อาคารอยู่อาศัยรวมโครงการ ลุมพินีพาร์ค เพชรเกษม 98 <i>Nuntawat Suwannaart</i>
MAT-016	การศึกษาเสาะไฟฟ้าโดยเพิ่มแผ่นเหล็กเสริมกำลังภายในเพื่อช่วยลดการหักโค่นของเสาไฟฟ้า <i>Nattapong Chanthananon</i>
MAT-018	Development of Water Based Expansive Additive Slurry for Shrinkage Compensation in Concrete <i>Chailai van Kampen, Masataka Ushiro, Akihiro Hori, Raktipong Sahamitmongkol</i>

วันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2561

09.00 – 10.30 น. การนำเสนอบทความวิจัย (Magenta Room)

ประธานภาค : ผศ.ดร.ชูศักดิ์ ศรีรัตน

รองประธานภาค : อ.สุชน รุ่งเรือง

MAT-015	ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต <i>อรรภสิทธิ์ แสงระยับ, บัณฑิต กร้ามาตว</i>
MAT-017	อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัตขนาด <i>Withit Pansuk, Nareemal Skuldiyoh</i>
MAT-022	ความต้านทานคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ที่ผสมด้วยเถ้าลอยต่างชนิดกัน <i>Surachart Rerkhara, Aunchana Kijjanon, ทวีชัย สาราญวานิช, Thidaporn Chuosavasdi</i>
MAT-023	การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตภายหลังการซ่อมแซมด้วยคอนกรีตผสมเถ้าลอยและวัสดุสร้างผลึก <i>Lyna Prak, Narakorn Rungkeerati, Ponpawit Kintawee, ทวีชัย สาราญวานิช, Thidaporn Chuosavasdi, ศ.ดร.สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล</i>
MAT-026	การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตสดและที่แข็งตัวแล้วที่ทำจากเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมสูง <i>Totsapon Musikasiri, Weerachart Tangchirapat, Smith Songpiriyakij, Chai Jaturapitakkul</i>
STR-004	การประยุกต์ใช้ไมไฟเคลือบผิวด้วยชั้นในคานคอนกรีตเสริมแรง <i>อเนก ชมวงษ์</i>
STR-007	อิทธิพลของขนาดมวลรวมที่มีผลต่อการไหลตัวและกำลังของคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ไหลตัวด้วยตนเอง <i>Chuchai Sujivorakul, Pattapol Silakul</i>

10.30 – 10.45 น. พักน้ำชา-กาแฟ



บทความวิจัย สาขาคอนกรีต วัสดุและการก่อสร้าง (MAT)		หน้า
MAT-002	Effect of Cement Content on Unit Weight and Compressive Strength of Lightweight Fly Ash Geopolymer Mortar <i>Piyathida Yoosuk</i>	MAT-1
MAT-003	Unit Weight and Compressive Strength of Cellular Lightweight Bottom Ash Geopolymer Mortar <i>Kitsada Krosoongnern, chersak Suksiripattanapong</i>	MAT-7
MAT-004	Development of High Strength Lightweight Concrete Using Broken Bricks as Coarse Aggregate. <i>khwanchiwa yongsata, chookiat choosakul, Watchara Srisakul, Nuanan Kurakaew</i>	MAT-13
MAT-005	การศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้พอลิโพรพิลีนที่ใช้แล้วในส่วนผสม <i>Rattapon Somna, เฉลิมเกียรติ อิทธิเดชพงศ์, จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร</i>	MAT-18
MAT-008	Effects of Ground Bottom Ash on Compressive Strength and Water Permeability of Concrete Containing Coarse Recycled Concrete Aggregates <i>Nanthasak Thanakat</i>	MAT-24
MAT-009	Effect of Bottom Ash Particle Sizes on Strength Activity Index of Mortar <i>Chondarong Charoenwaiyachet</i>	MAT-30
MAT-010	Improvement of Fly Ash Concrete Surface by Coating with Sodium Silicate Solution <i>Thitipong Tuantong</i>	MAT-36
MAT-011	Lightweight Geopolymer Concrete Containing Bottom Ash, Crushed Clay Brick and Pumice as Aggregate <i>Ampol Wongsa, Vanchai Sata, Prinya Chindapasirt</i>	MAT-43
MAT-012	A Study of Compressive Strength and Sulfuric acid Resistances of Fly Ash Geopolymer Mortar <i>Kantiya Sothornchaiwit</i>	MAT-49
MAT-014	Influence of Fly Ash on Flowing Performances and Autogenous shrinkage of Self-Compacting Concrete <i>Jakkrit Paisansopon, Sompong Rujirasenee, Mongkhon Narmluk</i>	MAT-55
MAT-015	ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต <i>อรรณสิทธิ์ แสงระยับ, ปิติศานต์ กร้ามาตร</i>	MAT-63
MAT-017	อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินบิทูมินัสคัดขนาด <i>Withit Pansuk, Nareemal Skuldiyoh</i>	MAT-72

## ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต

## EFFECT OF FLY ASH TYPE ON PROPERTIES OF PASTE MORTAR AND CONCRETE

อรรถสิทธิ์ แสงระยับ<sup>1</sup> ปิติศานต์ กร้ามาต<sup>2</sup> และ สมโชค สุขแย้ม<sup>3</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท<sup>1</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์<sup>2</sup> และ นักวิจัย<sup>3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

adthasith\_s@mail.mutt.ac.th<sup>1</sup>, pitisan.k@en.mutt.ac.th<sup>2</sup>

บทคัดย่อ : บทความนี้ศึกษาผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต ประกอบด้วย ปริมาณน้ำที่เหมาะสม การก่อตัว และการขยายตัวในเตาอบโตเคลฟของเพสต์ การหดตัวแบบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ และค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยใช้เถ้าลอย 4 ชนิด (เถ้าลอยจากแม่เมาะ 3 ชนิด และจาก BLCF อีก 1 ชนิด) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของเพสต์ผสมเถ้าลอย BLCF มีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของ OPC ล้วน และการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยนานกว่าของ OPC ล้วน โดยการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยที่มีปริมาณ free lime สูง มีแนวโน้มให้ค่าการตั้งที่เร็วกว่า ส่วนการขยายตัวในเตาอบโตเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอยที่มีปริมาณ free lime สูงให้ค่าที่มากกว่า ในขณะที่ของเถ้าลอยที่มีปริมาณ free lime ต่ำมีค่าใกล้เคียง เมื่อเปรียบเทียบกับของ OPC ล้วน ในขณะที่การหดตัวแบบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน โดยการหดตัวแบบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์เถ้าลอย BLCF มีค่าที่มากกว่าของเถ้าลอยแม่เมาะ สุดท้ายพบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีค่ามากกว่า ในขณะที่ของเถ้าลอย BLCF มีค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของ OPC ล้วน ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน โดยการแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่น้อยมีแนวโน้มกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น เถ้าลอยที่มีผลรวมของปริมาณ  $SiO_2$  กับ  $Al_2O_3$  มาก ส่งผลให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่มากกว่า

คำสำคัญ : ชนิดเถ้าลอย, การก่อตัว, การขยายตัวในเตาอบโตเคลฟ, การหดตัวแบบบอโตจีนัสและแบบแห้ง, กำลังอัดประลัย

**ABSTRACT:** This research aims to study the effect of fly ash type on properties of paste, mortar and concrete, including normal consistency and setting time of paste, autoclave expansion of paste, autogenous and drying shrinkages of mortar, and slump and compressive strength ( $f_c$ ) of concrete. In this study used four types of fly ash, three types from Mae Moh power plant and one type from BLCF power plant, partially replaced each fly ash in OPC only. The results indicated that the normal consistency of paste with fly ash from Mae Moh power plant (FAM) was less than that of OPC paste, while the normal consistency of paste with fly ash from BLCF power plant (FAR) was greater than that of OPC paste. Likewise, the setting time of fly ash paste was longer than that of OPC paste. The setting time of paste with fly ash containing high free lime (fCaO) showed a faster setting time than that of fly ash having less fCaO content. Moreover, the autoclave expansion of paste with fly ash containing high fCaO content gave higher values, while the autoclave expansion of paste with fly ash containing low fCaO content was similar when compared to that of OPC paste. In addition, the autogenous and drying shrinkages of fly ash mortar were very small when compared to that of OPC mortar, while the autogenous and drying shrinkages of FAR mortar were greater than those of FAM mortar. Finally, the slump of FAM concrete was higher, while the slump of FAR concrete was less when compared to that of OPC concrete. The  $f_c$  of fly ash concrete was less than that of OPC concrete. In terms of low fly ash replacement, the  $f_c$  of concrete of each fly ash was no different. But when replacing fly ash in large quantities, fly ash containing a large amount of  $SiO_2$  and  $Al_2O_3$  resulted in more  $f_c$  of concrete.

**KEYWORDS:** Fly ash type, Setting time, Autoclave expansion, Autogenous and drying shrinkages, Compressive Strength

## 1. บทนำ

เนื่องจากปัญหาสภาวะโลกร้อนและกระแสการอนุรักษ์พลังงานรวมถึงสภาวะการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจปัจจุบัน ทำให้มีการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น เป็นที่ทราบกันดีว่าในการผลิตปูนซีเมนต์ด้วยเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในปริมาณมากถึง 0.5 ตัน ในทุกๆ 1 ตันของน้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ผลิตขึ้นหากพิจารณาประโยชน์จากการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะกรณีวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่างๆ ย่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ [1] รวมทั้งสามารถแก้ปัญหาการกำจัดของเสียและช่วยประหยัดพลังงานโดยรวมของประเทศ อาทิเช่น พลังงานที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ และพลังงานที่ใช้ในการย่อยหินเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น

เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นวัสดุเหลือใช้อีกชนิดหนึ่งที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อน เถ้าลอยมีสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ซึ่งสารนี้เป็นวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินา เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งจากงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีตในรูปแบบของการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน การนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีต ทำให้ความสามารถที่ได้ของคอนกรีตดีขึ้น ทำให้ลดอุณหภูมิของคอนกรีต ลดความสามารถในการซึมผ่าน อัตราการแพร่กระจายของความชื้นและสารละลายเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตมากขึ้น ลดการกัดกร่อนของซัลเฟต เพิ่มความทนทานและกำลังอัดประลัยในระยะยาว เป็นต้น อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าเถ้าลอยที่นำมาใช้นั้นมีที่มาจากแหล่งผลิตที่แตกต่างกัน และมีสมบัติไม่ว่าทางกายภาพหรือทางเคมีที่แตกต่างกัน การจะนำเถ้าลอยไปใช้งานผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ในของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตนั้น ย่อมส่งผลให้สมบัติที่แตกต่างกันด้วย

ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญการศึกษาถึงผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต ประกอบด้วย ปริมาณน้ำที่เหมาะสม

การก่อตัว และการขยายตัวของเพสต์ การหดตัวแบบออโตจินัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ ค่าการยุบตัว และกำลังอัดประลัย ของคอนกรีต เพื่อได้เป็นแนวทางในการเลือกใช้เถ้าลอยได้อย่างเหมาะสมและถูกต้อง โดยสามารถนำไปใช้กับงานคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ตามมาตรฐาน ASTM C150 และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง จำนวน 3 ชนิด (FA FB และ FC) และโรงไฟฟ้า BLCP จ.ระยอง จำนวน 1 ชนิด (FR) ส่วนมวลรวมละเอียดใช้ทรายน้ำจืด และหินที่ได้จากการย่อยหิน และใช้น้ำประปา

### 2.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

2.2.1 สมบัติเบื้องต้นของ OPC และเถ้าลอย ประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188, ความละเอียดโดยวิธีเบลน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 204, องค์ประกอบทางเคมี โดยวิธีทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF) และภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคโดยวิธี Scanning Electric Microscope (SEM)

2.2.2 สมบัติของเพสต์ ประกอบด้วย ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 187, การก่อตัวของเพสต์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 191 และการขยายตัวแบบออโตเคลพของเพสต์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 151

2.2.3 สมบัติของมอร์ตาร์ ในที่นี้ในส่วนของมอร์ตาร์นั้น เป็นการทดสอบการหดตัวแบบออโตจินัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ โดยใช้ชิ้นตัวอย่างขนาด 2.5x2.5x28.5 ซม. ใช้จำนวน 3 ตัวอย่างต่อสัดส่วนผสม โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 157 เมื่อแกะตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วหุ้มด้วยพลาสติกและหุ้มฟอยล์อีกชั้น เพื่อไม่ให้น้ำระเหยออก วัดความยาวเริ่มต้น แล้ววางตัวอย่างไว้ในบรรยากาศปกติ จากนั้นวัดการหดตัวที่อายุ 1 7 14 28 56 และ 91 วัน



ในขณะที่การทดสอบการหดตัวแบบแห้งของตัวอย่างมอร์ตาร์นั้น ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 596 เมื่อแกะตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบกำหนด วัดความยาวเริ่มต้น แล้ววางตัวอย่างไว้ในบรรยากาศปกติ จากนั้นวัดการหดตัวที่อายุ 1 7 14 28 56 และ 91 วัน

2.2.4 สมบัติของคอนกรีต ประกอบด้วยค่าการยุบตัวของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 143 และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐานอังกฤษ BS 1881 โดยใช้ขนาดตัวอย่าง 10x10x10 ซม. แล้วทดสอบกำลังอัดประลัยที่อายุ 1 7 14 28 56 และ 91 วัน

2.3 สัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตที่ใช้

สำหรับส่วนผสมของเพสต์ เพื่อใช้ในการทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสม การก่อตัว และการหดตัวแบบบอโตเคลฟ แสดงดังตารางที่ 1 ส่วนสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ เพื่อใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40 และ 0.55 แสดงดังตารางที่ 2 ในขณะที่สัดส่วนผสมของคอนกรีต เพื่อใช้ในการทดสอบค่าการยุบตัว และกำลังอัดประลัย โดยใช้ w/b เท่ากับ 0.55 แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของเพสต์ที่ใช้ในการทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสม การก่อตัว และการหดตัวแบบบอโตเคลฟ

ที่	สัญลักษณ์	OPC	อัตราส่วนผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
			น้ำ			
			แม่เมาะ	ทราย	หิน	น้ำ
1	PC	100	-	-	-	-
2	PC-20FA	80	20	-	-	-
3	PC-40FA	60	40	-	-	-
4	PC-20FB	80	-	20	-	-
5	PC-40FB	60	-	40	-	-
6	PC-20FC	80	-	-	20	-
7	PC-40FC	60	-	-	40	-
8	PC-20FR	80	-	-	-	20

รายการ	OPC	FA	FB	FC	FR	ทราย	หิน	น้ำ
9	PC-40FR	60	-	-	-	-	-	40

หมายเหตุ PC หมายถึง เพสต์ OPC ล้วน, PC-40FA หมายถึง เพสต์ผสมเถ้าลอย FA ร้อยละ 40 เป็นต้น

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีนัสและแบบแห้ง

รายการ	OPC	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)				ทราย	น้ำ
		เถ้าลอย					
		FA	FB	FC	FR		
MC-0.40	100	-	-	-	-	275	40
MC-20FA-0.40	80	20	-	-	-	275	40
MC-40FA-0.40	60	40	-	-	-	275	40
MC-20FB-0.40	80	-	20	-	-	275	40
MC-40FB-0.40	60	-	40	-	-	275	40
MC-20FC-0.40	80	-	-	20	-	275	40
MC-40FC-0.40	60	-	-	40	-	275	40
MC-20FR-0.40	80	-	-	-	20	275	40
MC-40FR-0.40	60	-	-	-	40	275	40
MC-0.55	100	-	-	-	-	275	50
MC-20FA-0.55	80	20	-	-	-	275	50
MC-40FA-0.55	60	40	-	-	-	275	50
MC-20FB-0.55	80	-	20	-	-	275	50
MC-40FB-0.55	60	-	40	-	-	275	50
MC-20FC-0.55	80	-	-	20	-	275	50
MC-40FC-0.55	60	-	-	40	-	275	50
MC-20FR-0.55	80	-	-	-	20	275	50
MC-40FR-0.55	60	-	-	-	40	275	50

หมายเหตุ MC-0.40 หมายถึง มอร์ตาร์ OPC ล้วน โดยใช้ w/b เท่ากับ 0.40, MC-40FR-0.55 หมายถึง มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย FR ร้อยละ 40 โดยใช้ w/b เท่ากับ 0.55 เป็นต้น

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของคอนกรีตในปริมาณ 1 ลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต ที่ใช้ในการทดสอบค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัย

รายการ	OPC	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)				ทราย	หิน	น้ำ
		น้ำ						
		แม่เมาะ	ทราย	หิน	น้ำ			
CC-0.55	332	-	-	-	-	970	1008	182
CC-20FA-0.55	266	66	-	-	-	970	1008	182
CC-40FA-0.55	199	133	-	-	-	970	1008	182
CC-20FB-0.55	266	-	66	-	-	970	1008	182
CC-40FB-0.55	199	-	133	-	-	970	1008	182
CC-20FC-0.55	266	-	-	66	-	970	1008	182
CC-40FC-0.55	199	-	-	133	-	970	1008	182
CC-20FR-0.55	266	-	-	-	66	970	1008	182

CC-40FR-0.55 199 - - - 133 970 1008 182

หมายเหตุ CC-0.55 หมายถึง คอนกรีต OPC ล้วน โดยใช้ w/b เท่ากับ 0.55, CC-20FC-0.55 หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าลอย FC ร้อยละ 20 โดยใช้ w/b เท่ากับ 0.55 เป็นต้น

**3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์**

3.1 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน และองค์ประกอบทางเคมี

ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของ OPC และเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด แสดงดังตารางที่ 4 ในขณะที่องค์ประกอบทางเคมีแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของ OPC และเถ้าลอย

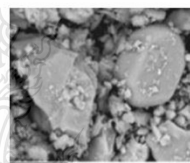
รายการ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย			
		FA	FB	FC	FR
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.21	2.57	2.55	2.17
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ซม. <sup>2</sup> /ก.)	3,190	2,867	2,820	2,722	2,723

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของ OPC และเถ้าลอย

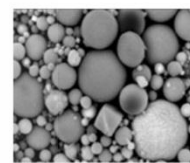
รายการ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย			
		FA	FB	FC	FR
SiO <sub>2</sub>	18.93	35.71	26.61	25.22	61.46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.51	20.44	13.6	13.88	20.27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.31	15.54	18.34	17.39	5.56
CaO	65.53	16.52	24.97	26.25	1.73
MgO	1.24	2.00	2.33	2.38	0.96
Na <sub>2</sub> O	0.15	1.15	1.75	1.40	0.73
K <sub>2</sub> O	0.31	2.41	1.77	1.92	1.36
SO <sub>3</sub>	2.88	4.26	8.53	9.44	0.38
LOI	-	0.49	0.53	0.56	5.38
Free Lime	-	1.71	3.93	3.06	0.03

**3.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค**

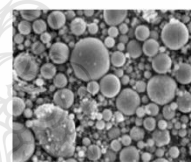
ภาพที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของ OPC และเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด โดยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) พบว่า ลักษณะรูปร่างของอนุภาคของ OPC (ภาพที่ 1 ก)) มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมมีมิติ ลักษณะผิวขรุขระ ขนาดคละกันไม่แน่นอนแตกต่างกันไปกระจายอยู่ทั่วไป ในขณะที่ลักษณะของอนุภาคของเถ้าลอยแม่เมาะ FA (ภาพที่ 1 ข) จะมีลักษณะของอนุภาคที่ค่อนข้างกลมมนไม่มีเหลี่ยมมุม มีขนาดคละกันกระจัดกระจายอยู่ทั่วไป ส่วนอนุภาคของเถ้าลอย BLCP (FR) (ภาพที่ 1 ค) จะมีลักษณะผิวขรุขระไม่เรียบ กระจัดกระจายอยู่ทั่วไป ไม่กลมเท่ากับเถ้าลอยแม่เมาะ FA



ก) OPC



ข) เถ้าลอยแม่เมาะ (FA)



ค) เถ้าลอย BLCP (FR)

ภาพที่ 1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค

**3.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์**

ภาพที่ 2 แสดงปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ OPC ล้วน และเพสต์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด (FA FB FC และ FR) พบว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะทั้ง 3 ชนิด (FA FB และ FC) มีค่าน้อยกว่าของเพสต์ OPC ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มาก ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยแม่เมาะมีลักษณะกลมช่วยในการลื่นไหล ทำให้ปริมาณน้ำที่

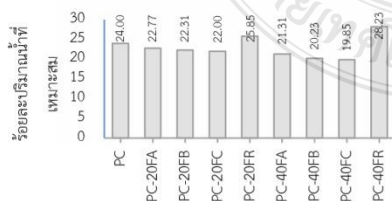
เหมาะสมน้อยลง ในขณะที่เพสต์ของเถ้าลอย FR มีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมมากกว่าของ OPC ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอย FR มีลักษณะขรุขระ ผิวไม่เรียบ ส่วนเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเพสต์ของเถ้าลอย FA FB และ FC นั้น ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ของเถ้าลอยทั้ง 3 ชนิด มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

### 3.4 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

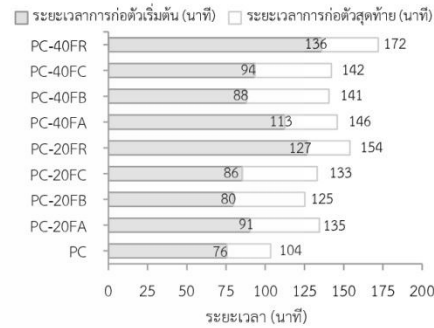
ภาพที่ 3 แสดงระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ของเพสต์ พบว่า เพสต์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด มีค่าระยะเวลาการก่อตัวที่ช้ากว่าของเพสต์ OPC ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ปริมาณเถ้าลอยในปริมาณที่มาก ทั้งนี้เพราะการแทนที่เถ้าลอยเป็นการลดปูนซีเมนต์ลง ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้น้อยลง และผลปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดช้ากว่า โดยเพสต์ผสมเถ้าลอย FB มีแนวโน้มก่อตัวเร็วกว่าของ FC FA และ FR ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณ Free Lime ที่มากกว่าเป็นการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เกิดเร็วขึ้น

### 3.5 การขยายตัวในเตาอบโตเคลฟของเพสต์

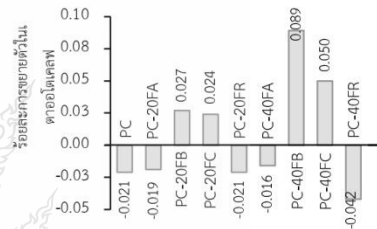
ภาพที่ 4 แสดงการขยายตัวในเตาอบโตเคลฟ (Autoclave Expansion) ของเพสต์ พบว่าการขยายตัวในเตาอบโตเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอย FB และ FC มีค่ามากกว่าของเพสต์ OPC (โดยเพสต์ของ OPC ล้วน เป็นการหดตัว) ในขณะที่การขยายตัวในเตาอบโตเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอย FA และ FR (เป็นการหดตัว) มีแนวโน้มไม่แตกต่างจากของเพสต์ OPC ล้วน ทั้งนี้เพราะเถ้าลอย FB มีปริมาณ Free Lime มากกว่าของ FC FA และ FR ตามลำดับ ซึ่งทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการขยายตัวมากกว่า [3]



ภาพที่ 2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์



ภาพที่ 3 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

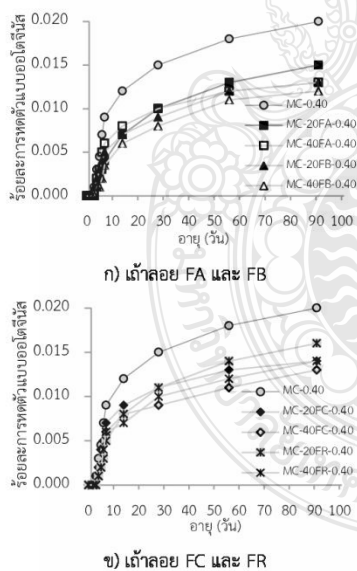


ภาพที่ 4 การขยายตัวในเตาอบโตเคลฟของเพสต์

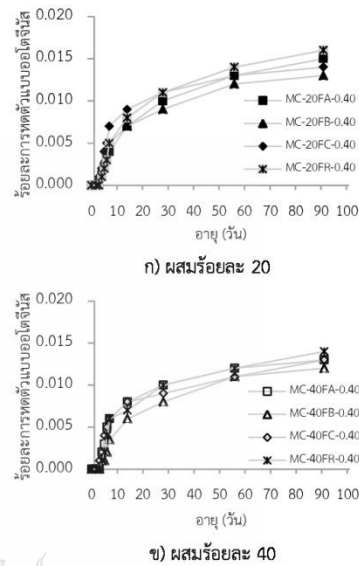
### 3.6 การหดตัวแบบบอบโตจัสของมอร์ตาร์

ภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบบอบโตจัส (Autogenous Shrinkage) กับอายุของมอร์ตาร์ โดยใช้ w/b เท่ากับ 0.40 พบว่า การหดตัวแบบบอบโตจัสของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด มีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มาก เนื่องจากการใช้เถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง การสูญเสียน้ำในช่องว่างคาปิลลารีจึงลดลงตามไปด้วย รวมทั้งการใช้เถ้าลอยทำให้ปริมาณน้ำอิสระในมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น ซึ่งการหดตัวแบบบอบโตจัสเกิดจากการสูญเสียน้ำจากปฏิกิริยาไฮเดรชันออกจากช่องว่างคาปิลลารี [4] ดังนั้นเมื่อมีน้ำอิสระเพิ่มขึ้นการหดตัวจึงลดลง

เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อการหดตัวของคอนกรีตของมอร์ตาร์นั้น พบว่า เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 20 (ภาพที่ 6 ก)) นั้น การหดตัวของคอนกรีตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย FR มีค่ามากกว่าของเถ้าลอยแม่เมาะทั้ง 3 ชนิด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอย FR มีความต้องการน้ำมากกว่าของเถ้าลอยแม่เมาะ ทำให้ปริมาณอิสระของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีมากกว่า ส่งผลให้การหดตัวของคอนกรีตมีค่าน้อยกว่า ส่วนการหดตัวของคอนกรีตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะนั้น เถ้าลอย FB มีค่าน้อยที่สุด ตามด้วย FC และ FA ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณ Free Lime ในเถ้าลอย FB ที่มากกว่า ทำให้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่า สามารถต้านทานการหดตัวได้ดีขึ้น ส่วนเมื่อแทนที่เถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด (FA FB FC และ FR) ที่อัตราส่วนร้อยละ 40 (ภาพที่ 6 ข)) พบว่า การหดตัวของคอนกรีตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด มีค่าไม่แตกต่างกัน



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของคอนกรีตกับอายุของมอร์ตาร์



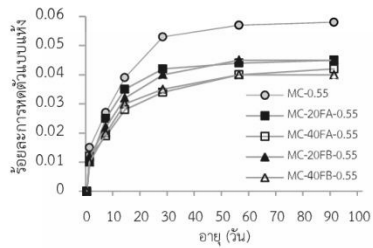
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของคอนกรีตกับอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด

### 3.7 การหดตัวของมอร์ตาร์

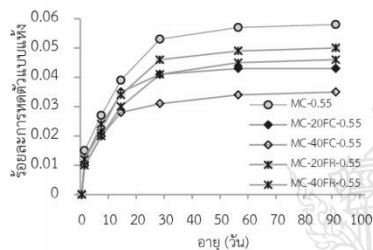
ภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของมอร์ตาร์แห้ง (Drying Shrinkage) กับอายุของมอร์ตาร์ โดยมอร์ตาร์ใช้  $w/b$  เท่ากับ 0.55 พบว่า การหดตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด มีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มาก ทั้งนี้เนื่องจากการใช้เถ้าลอยจะมีส่วนทำปฏิกิริยาและไม่ทำปฏิกิริยา โดยเถ้าลอยที่ทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ก่อให้เกิด CSH เพิ่มขึ้นซึ่ง CSH และอุดช่องว่างซีเมนต์เพสต์ ให้มีความหนาแน่นขึ้น ส่วนเถ้าลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยาทำหน้าที่เหมือน Micro Aggregates ในการช่วยลดช่องว่างของมอร์ตาร์ ทำให้มอร์ตาร์มีความหนาแน่นขึ้นสามารถต้านทานการหดตัวได้

เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อการหดตัวของมอร์ตาร์นั้น พบว่าการหดตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย FR มีค่ามากกว่าของเถ้าลอยแม่เมาะทั้ง 3 ชนิด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอย FR มีความต้องการ

น้ำมากกว่า ทำให้ปริมาณน้ำอิสระของมอร์ตาร์มีค่าน้อยกว่า ส่งผลให้การหดตัวแบบแห้งมีค่ามากกว่า

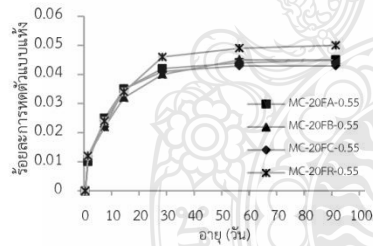


ก) etailloy FA และ FB

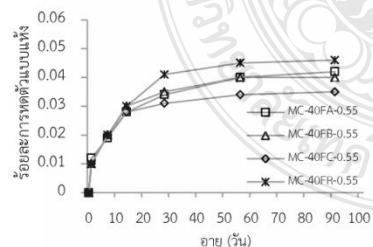


ข) etailloy FC และ FR

ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์



ก) ผสมร้อยละ 20



ข) ผสมร้อยละ 40

ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบถึงการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะทั้ง 3 ชนิด พบว่าเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 20 (ภาพที่ 8 ก)) นั้น การหดตัวของมอร์ตาร์เถ้าลอยแม่เมาะทั้ง 3 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกัน ส่วนเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 40 (ภาพที่ 8 ข)) พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ FA มีค่ามากที่สุด ตามไปด้วย FC และ FB ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะปริมาณ Free Lime ที่มาก ในเถ้าลอยทำให้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่า ส่งผลให้โครงสร้างของเพสต์แข็งแรงขึ้น

### 3.8 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

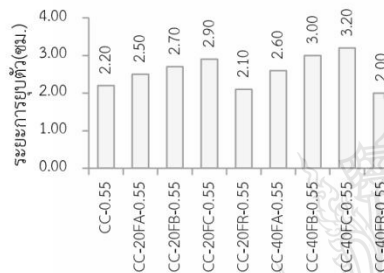
ภาพที่ 9 แสดงค่าการยุบตัว (Slump) ของคอนกรีต พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีต ให้ผลไปในทิศทางผกผันกับปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ กล่าวคือ เมื่อเพสต์มีปริมาณน้ำที่เหมาะสมมาก จะส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตน้อย และถ้าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์น้อย จะส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมาก ทั้งนี้ตั้งเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว

### 3.9 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

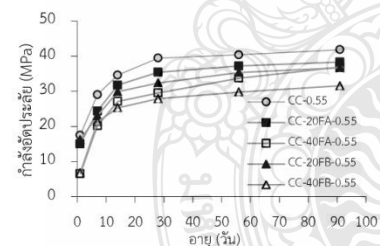
ภาพที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกำลังอัดประลัย (Compressive strength) กับอายุของคอนกรีต โดยใช้ w/b เท่ากับ 0.55 พบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) มีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มาก ทั้งนี้เพราะการแทนที่เถ้าลอยเป็นการลดปูนซีเมนต์ลงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง [5] อย่างไรก็ตามเมื่ออายุมากขึ้น (91 วัน) กำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีการพัฒนากำลังใกล้เคียงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากผลปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย

เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตนั้น พบว่า เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 20 (ภาพที่ 11 ก)) กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

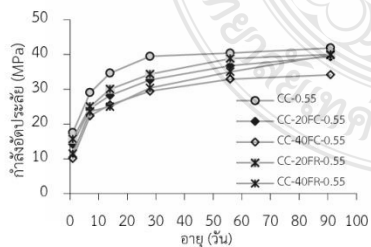
ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด ให้ค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม กำลังอัดประลัยของคอนกรีตชนิด FR และ FA มีแนวโน้มมากกว่าของ FB และ FC และเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น (ร้อยละ 40) (ภาพที่ 11 ข) จะเห็นได้ชัดเจนว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอย FR และ FA มีค่ามากกว่าของ FB และ FC ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอย FR และ FA มีปริมาณผลรวมของ SiO<sub>2</sub> กับ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ค่อนข้างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับของเถ้าลอย FB และ FC ส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่มากกว่า



ภาพที่ 9 ค่าการดูดตัวของคอนกรีต

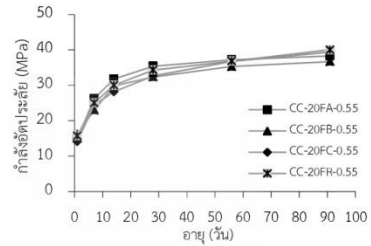


ก) เถ้าลอย FA และ FB

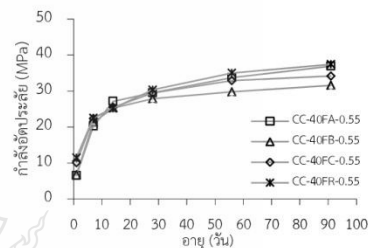


ข) เถ้าลอย FC และ FR

ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีต



ก) ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20



ข) ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40

ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

#### 4. สรุปผล

จากการศึกษา สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอยแม่แม่มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของเพสต์ผสมเถ้าลอย BLCP มีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของ OPC ล้วน
- 2) การก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยนานกว่าของ OPC ล้วน โดยการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยที่มีปริมาณ free lime สูง มีแนวโน้มให้ค่าการตัวที่เร็วกว่า
- 3) การขยายตัวในเตาอบโตเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอยที่มีปริมาณ free lime สูง ให้ค่าที่มากกว่า ในขณะที่ของเถ้าลอยที่มีปริมาณ free lime ต่ำ มีค่าใกล้เคียง เมื่อเปรียบเทียบกับของ OPC ล้วน
- 4) การหดตัวของบ่อโตนี้นสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน โดยการหดตัว

แบบบอโตจีนีสและแบบแห้งของมอร์ตาร์เถ้าลอย BLCP มีค่าที่มากกว่าของเถ้าลอยแม่เมาะ

5) ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีค่ามากกว่า ในขณะที่ของเถ้าลอย BLCP มีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของ OPC ล้วน โดยค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอย BLCP มีค่ายุบตัวน้อยกว่าของเถ้าลอยแม่เมาะ

6) กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน โดยการแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่น้อยมีแนวโน้มกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น เถ้าลอยที่มีผลรวมของปริมาณ  $SiO_2$  กับ  $Al_2O_3$  มากส่งผลให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่มากกว่า

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้สนับสนุนทุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 ในครั้งนี้ และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

#### เอกสารอ้างอิง

[1] ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ และ มานิจ ทองประเสริฐ, 2550. การลดก๊าซเรือนกระจก งานวิจัยและพัฒนาด้านเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วารสาร *Engineering Today*, คอลัมน์ World Watch, มีนาคม: หน้าที่ 5-51.

[2] กระทรวงอุตสาหกรรม, 2546. กำหนดมาตรฐานฯ ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต, มาตรฐาน มอก.2135-2545. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. หน้าที่ 3.

[3] Kritiya Kaewmanee, Pitisan Krammart, Ta weechai Sumranwanich, Pongsak Choktaweekarn and Somnuk tangtermsirikul, 2556. Effect of free

lime content on properties of cement – fly ash mixtures. *Construction and Building materials*. No.38: 829-836.

[4] สนธยา ทองอรุณศรี และคณะ, 2558. ผลกระทบของเถ้าลอยก้นเตาต่อการหดตัวของแบบบอโตจีนีสของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานร่วมสองชนิด. วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, Vol.3, No.1, Jan-Jun 2015.

[5] ปริญา จินดาประเสริฐ, และ ชัย จตุรพิทักษ์กุล, 2555. ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, พิมพ์ครั้งที่ 7.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	นายอรรถสิทธิ์ แสงระยับ
วัน เดือน ปีเกิด	26 กรกฎาคม 2523
ที่อยู่	70 หมู่ 2 ตำบลทางพระ อำเภอโพธิ์ทอง จังหวัดอ่างทอง
การศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกร โยธา THAI TAKENAKA INTERNATIONAL LTD. ครูอัตราจ้าง แผนกวิชาช่างก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคอ่างทอง นายช่างชลประทาน โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษายางมณี สำนักงานชลประทานที่ 12 กรมชลประทาน นายช่างโยธาปฏิบัติงาน แขวงทางหลวงอยุธยา สำนักงานทางหลวงที่ 13 กรมทางหลวง ปี พ.ศ. 2560 – ปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์ต่อ	09-8556-5584
ติดต่อ	E-Mail: adthasith_s@mail.rmutt.ac.th, adsit.ut68@gmail.com

