

สมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก

THE DURABILITY PROPERTIES OF CONCRETE MIXED WITH WET
FLY ASH



ดิษฐวัฒน์ แดงน้า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

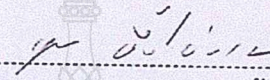
สมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก



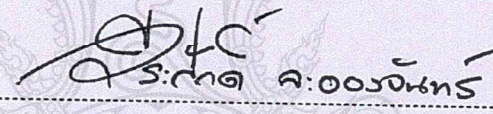
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก
 ชื่อ - นามสกุล นายดิษฐวัฒน์ แดงฉ่ำ
 สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
 อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ามาตร, ปร.ด.
 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์นิรชร นกแก้ว, วศ.ม.
 ปีการศึกษา 2562

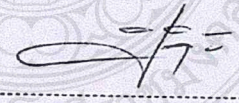
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญชัย ผึ้งไผ่งาม, ปร.ด.)

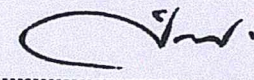
Waranghana S. กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรางคณา แสงสร้อย, Ph.D.)

 กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิระศักดิ์ ละอองจันทร์, Dr.-Ing.)

นิรชร นกแก้ว กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์นิรชร นกแก้ว, วศ.ม.)

 กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ามาตร, ปร.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

 คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
 วันที่ 18 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2563

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก
ชื่อ – นามสกุล	นายดิษฐวัฒน์ แดงฉำ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ามาตร, ปร.ด.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์นิรชร นกแก้ว, วศ.ม.
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

ปัจจุบันได้มีการนำเถ้าลอยในปริมาณที่มากมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีต อย่างไรก็ตามจะมีปริมาณเถ้าลอยบางส่วนที่ไม่มีการนำมาใช้ ถูกนำไปทิ้งใกล้บริเวณโรงไฟฟ้า โดยอาจสัมผัสกับความชื้นของสภาพแวดล้อมและน้ำฝน มีความเป็นไปได้ที่จะนำเอาเถ้าลอยเปียกกลับมาใช้ใหม่ โดยต้องศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยเปียกต่อสมบัติของคอนกรีต

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก เพื่อพัฒนาการนำเถ้าลอยเปียกไปใช้ประโยชน์ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า BLCF จังหวัดระยอง จำนวน 2 ชนิด โดยใช้เถ้าลอยทั้งสภาพแห้งและเปียก แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) แล้วทดสอบสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก

ผลการศึกษาพบว่า การขยายตัวออโตแคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอย (ทั้งสภาพแห้งและสภาพเปียก) ไม่มีการขยายตัวโดยมีแนวโน้มที่จะหดตัว ส่วนการหดตัวแบบออโตจิ้นส์และแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน โดยการหดตัวแบบออโตจิ้นส์และแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกมีค่าไม่แตกต่างกับของเถ้าลอยแห้ง ยกเว้นการหดตัวแบบออโตจิ้นส์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่ระยะสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ มีค่าน้อยกว่าของเถ้าลอยแห้ง ส่วนเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นต่างกันและระยะสัมผัสความชื้นที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อการหดตัวแบบออโตจิ้นส์และแบบแห้งของมอร์ตาร์ นอกจากนี้พบว่า การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่าของ OPC ล้วน โดยการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกมีค่าน้อยกว่าของเถ้าลอยแห้ง และปริมาณความชื้นที่ต่างกันและระยะสัมผัสความชื้นที่ต่างกันของเถ้าลอยเปียกไม่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต สุดท้ายความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าดีกว่าของ OPC ล้วน โดยความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกที่ระยะสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของ 1 เดือนมีค่าไม่แตกต่าง เมื่อเปรียบเทียบกับของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง โดยเถ้าลอยเปียกที่มีปริมาณความชื้นมากส่งผลให้มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ด้อยลง

คำสำคัญ : เพสต์ มอร์ตาร์ คอนกรีต เถ้าลอยเปียก ความคงทนของคอนกรีต

Thesis Title	The Durability Properties of Concrete Mixed with Wet Fly Ash
Name – Surname	Mr. Ditthawat Daengchum
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
Thesis Co-Advisor	Associate Professor Nirachon Nokkaew, M.Eng.
Academic Year	2019

ABSTRACT

Currently, large quantities of fly ash are being used in the concrete industry. However, some amount of fly ash dumped near the power plant area and exposed to humidity of the environment and rainwater has not been used yet. Therefore, it is possible to recycle this wet fly ash by studying the effect of wet fly ash on the properties of concrete.

The objective of this research is to study the durability of concrete mixed with wet fly ash to develop the utilization of wet fly ash. In this study, both dry and wet fly ashes from the BLCPP power plant in Rayong province were partially replaced Portland cement type 1 (OPC) and the durability properties of concrete mixed with wet fly ash were investigated.

The study results revealed that the autoclave expansion of paste in both dry and wet fly ashes was not found, but a tendency to shrinkage was shown. The autogenous and drying shrinkages of fly ash mortar were less than those of OPC mortar. The autogenous and drying shrinkages of wet fly ash mortar were not different from those of dry fly ash mortar. However, the autogenous shrinkage of wet fly ash mortar at the moisture contact of 1 week was less than that of dry fly ash mortar. The wet fly ash with different moisture content and different moisture contact showed no effect on the autogenous and drying shrinkages of fly ash mortar. Furthermore, the carbonation depth of fly ash concrete was greater than that of OPC concrete. The carbonation depth of wet fly ash concrete was less than that of dry fly ash concrete. Moreover, the different moisture content and different moisture contact of wet fly ash had no effect on carbonation depth of concrete. Finally, the chloride penetration resistance of fly ash concrete was better than that of OPC concrete. The chloride penetration resistance of wet fly ash concrete at the moisture contact of 1 week was less than that of dry fly ash concrete, while that at the moisture contact of 1 month was not different. Besides, the wet fly ash with high moisture content resulted in lower chloride penetration resistance of concrete.

Keywords: paste, mortar, concrete, wet fly ash, durability of concrete

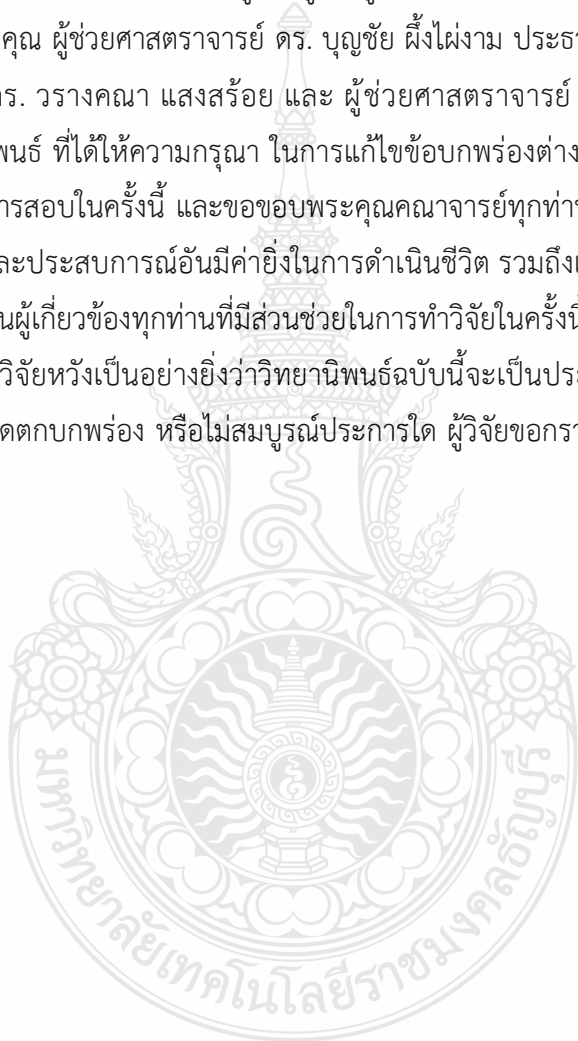
กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความกรุณาเป็นอย่างยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร. ปิติศานต์ กร้ามาต อธิการบดีที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์นิรชร นกแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความกรุณาให้คำแนะนำและติดตามการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ตลอดมา นับตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสำเร็จเรียบร้อยสมบูรณ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย ฝั่งไผ่งาม ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราจคณา แสงสร้อย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความกรุณา ในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัย รวมทั้งสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และประสบการณ์อันมีค่ายิ่งในการดำเนินชีวิต รวมถึงเพื่อนๆ ปริญญาโททุกคน ที่ได้ให้คำปรึกษาตลอดจนผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนช่วยในการทำวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจหากวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขออภัย ณ โอกาสนี้ด้วย

ดิษฐวัฒน์ แดงฉำ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(7)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ.....	17
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	17
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	19
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	19
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	19
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	21
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	44
บทที่ 3 วิธีการศึกษา.....	48
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	48
3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา.....	48
3.3 สัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต.....	58
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์.....	65
4.1 สมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยที่ใช้.....	65
4.2 สมบัติด้านความคงทนของเพสต์/มอร์ตาร์/คอนกรีต ผสมเถ้าลอยเปียก.....	68
4.3 การเปรียบเทียบสมบัติด้านความคงทนของเพสต์/มอร์ตาร์/คอนกรีต ผสมเถ้าลอยเปียก.....	95
บทที่ 5 สรุป.....	97
บรรณานุกรม.....	98

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	100
ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	101
ประวัติผู้เขียน.....	110



สารบัญตาราง (ตั้งหน้ากระดาษใหม่)

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปริมาณร้อยละของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่างๆ.....	24
ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์...	24
ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618.....	30
ตารางที่ 2.4 ร้อยละข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135 – 2545.....	31
ตารางที่ 2.5 สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ในระดับต่างๆ.....	42
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของเพสต์ ที่ใช้ทดสอบการหดตัวออโตแคลฟ.....	59
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ ที่ใช้ทดสอบการหดตัวแบบออโตจิ้นัส.....	61
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ ที่ใช้ทดสอบการหดตัวแบบแห้ง.....	62
ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของคอนกรีต ที่ใช้ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนขึ้นต่อวัสดุ ประสาน.....	64
ตารางที่ 3.5 สัดส่วนผสมของคอนกรีต ที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์	64
ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย.....	66
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยที่ใช้ ในการศึกษา.....	68
ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์.....	70
ตารางที่ 4.4 สมบัติด้านความคงทนของเพสต์/มอร์ตาร์/คอนกรีต ผสมเถ้าลอยเปียก เปรียบเทียบ กับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน.....	96
ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของเพสต์/มอร์ตาร์/คอนกรีต ระหว่างเถ้าลอยแห้งกับ เถ้าลอยเปียก.....	97

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเติมน้ำของคอนกรีตผสมเถ้าลอย.....	32
รูปที่ 2.2 ปริมาตรโพรงทั้งหมดของเพสต์ผสมเถ้าลอย.....	33
รูปที่ 2.3 โพรงของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยที่ W/B เท่ากับ 0.80.....	33
รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นในคอนกรีต.....	38
รูปที่ 2.5 ภาพจำลองแสดงสถานะของความชื้นของโพรงในคอนกรีต.....	38
รูปที่ 3.1 เถ้าลอยแห้ง.....	50
รูปที่ 3.2 เถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ.....	51
รูปที่ 3.3 เครื่องมือไวแคต (Vicat Apparatus).....	52
รูปที่ 3.4 เครื่องมือเปรียบเทียบความยาว (Length Comparator).....	52
รูปที่ 3.5 หม้อต้ม Autoclave.....	53
รูปที่ 3.6 ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 2.5 x 2.5 x 28.5 เซนติเมตร.....	54
รูปที่ 3.7 ชิ้นตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10 x 10 x 10 เซนติเมตร.....	55
รูปที่ 3.8 ตู้อบคาร์บอนชั่น.....	56
รูปที่ 3.9 เครื่อง UTM (Universal Testing Machine).....	56
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างคอนกรีตชนิดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน.....	56
รูปที่ 3.11 แท่งตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม.....	58
รูปที่ 3.12 ต่อบางจระ Cell ตัวอย่าง.....	58
รูปที่ 3.13 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า.....	59
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	67
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคเถ้าลอย HS.....	67
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคเถ้าลอย HM.....	68
รูปที่ 4.4 การขยายตัวอย่างอัตโนมัติของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และ เพสต์ผสมเถ้าลอย.....	71

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ดาร์ปุนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ดผสมแก้ลอยแห้ง เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อ วัสดุประสานที่ 0.35.....	72
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ดาร์ปุนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ดผสมแก้ลอยแห้ง เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อ วัสดุประสานที่ 0.55.....	72
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ดผสมแก้ลอย แห้งและมอร์ตาร์ดผสมแก้ลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35.....	73
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ดผสมแก้ลอยแห้ง และมอร์ตาร์ดผสมแก้ลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35.....	73
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ดผสมแก้ลอย แห้งและมอร์ตาร์ดผสมแก้ลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35.....	74
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ดผสมแก้ลอย แห้งและมอร์ตาร์ดผสมแก้ลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55.....	75
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ดผสมแก้ลอย แห้งและมอร์ตาร์ดผสมแก้ลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55.....	75
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ดผสมแก้ลอย แห้งและมอร์ตาร์ดผสมแก้ลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55.....	76

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย เปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลา สัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55.....	77
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย เปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลา สัมผัสความชื้น 1 เดือน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55.....	78
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย เปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลา สัมผัสความชื้น 3 เดือน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55.....	78
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 และ 0.55.....	79
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย แห้ง เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 และ 0.55.....	80
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย เปียกจากห้องปฏิบัติการ (ที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ทั้งที่ระยะเวลา สัมผัสความชื้น 1W) เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 และ 0.55.....	80
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้ง เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่ 0.55.....	81
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้ง และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55.....	82
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้ง และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55.....	83

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้งและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55.....	83
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1 สัปดาห์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55.....	84
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1 เดือน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55.....	85
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 3 เดือน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55.....	86
รูปที่ 4.26 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50.....	87
รูปที่ 4.27 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งและคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50.....	88
รูปที่ 4.28 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งและคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50.....	88
รูปที่ 4.29 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งและคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50.....	89
รูปที่ 4.30 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1 สัปดาห์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50.....	89

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.31 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณ ความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1 เดือน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสานที่ 0.50.....	90
รูปที่ 4.32 ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (หน่วยเป็น คูลอมป์) ของคอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง โดยแทนที่ เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 และ 50 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	91
รูปที่ 4.33 ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (หน่วยเป็น คูลอมป์) ของคอนกรีต ผสมเถ้าลอยแห้งและคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้น ร้อยละ 25 โดยแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 และ 50 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	92
รูปที่ 4.34 ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (หน่วยเป็น คูลอมป์) ของคอนกรีต ผสมเถ้าลอยแห้งและคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้น ร้อยละ 45 โดยแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 และ 50 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	93
รูปที่ 4.35 ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (หน่วยเป็น คูลอมป์) ของคอนกรีต ผสมเถ้าลอยแห้งและคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้น ร้อยละ 65 โดยแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 และ 50 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	94
รูปที่ 4.36 ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (หน่วยเป็น คูลอมป์) ของคอนกรีต ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55....	95
รูปที่ 4.37 ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (หน่วยเป็น คูลอมป์) ของคอนกรีต ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1 เดือน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55...	95

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.38 ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (หน่วยเป็น คูลอมบ์) ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลาสัมผัสดำเนิน 3 เดือน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55...	96



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C_3S	Tricalcium Silicate
C_2S	Dicalcium Silicate
C_3A	Tricalcium Aluminate
C_4AF	Tetracalcium Aluminoferrite
CaO	Calcium Oxide
SiO_2	Silicon Oxide
Al_2O_3	Aluminium Oxide
Fe_2O_3	Ferric Oxide
MgO	Magnesium Oxide
Na_2O	Sodium Oxide
K_2O	Potassium Oxide
SO_3	Sulfur Oxide
CSH	Calcium Silicate Hydrate
$Ca(OH)_2$	Calcium Hydroxide
CH	Calcium Hydroxide
CAH	Calcium Aluminate Hydrate
SEM	Scanning Electronic Microscope
XRF	X-ray Fluorescence
UTM	Universal Testing Machine
NaCl	Sodium Chloride
NaOH	Sodium Hydroxide

บทที่ 1

บทนำ

สำหรับบทนำกล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตของการศึกษาและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันได้เกิดปัญหาสภาวะโลกร้อนและการอนุรักษ์พลังงานรวมถึงการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจในปัจจุบัน ทำให้มีการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ในงานอุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น สามารถช่วยลดการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นที่ทราบกันดีว่าในการผลิตปูนซีเมนต์ด้วยเทคโนโลยีที่อยู่ในปัจจุบันก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากถึง 0.5 ตันในทุกๆ 1 ตัน ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ผลิตขึ้น [1] หากพิจารณาประโยชน์จากการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์โดยเฉพาะวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่างๆย่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตและพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น รวมทั้งยังสามารถช่วยแก้ปัญหาการกำจัดของเสียที่เกิดจากการผลิตอื่นๆ และช่วยประหยัดพลังงานโดยรวมของประเทศ ดังนั้นการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้กับงานคอนกรีตจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาเพื่อให้ได้ข้อมูลและวัสดุที่นำมาใช้ให้มากขึ้น

สำหรับในประเทศไทยได้มีการนำเถ้าลอยมาใช้ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้าโดยเถ้าลอยที่ได้มาจากการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้า ซึ่งผ่านกระบวนการผลิตโดยใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง ปัจจุบันมีปริมาณเถ้าลอยสูงถึง 3 ล้านตันต่อปี [2,3] ที่ผ่านมามีเถ้าลอยส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตโดยการนำเถ้าลอยมาแทนที่ปูนซีเมนต์ การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ ประการแรก พบว่า เถ้าลอยมีออกไซด์ของธาตุซิลิกา อลูมินา และเหล็กซึ่งออกไซด์เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม ประการที่สอง เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีตเถ้าลอยจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็กๆ ระหว่างปูนซีเมนต์และหินหรือทรายทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณเถ้าลอยที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตมีเพียงบางส่วนของปริมาณเถ้าลอย ทำให้ปริมาณเถ้าลอยมี มากเกินกว่าความต้องการ ช่วงที่ผ่านมามีเถ้าลอยที่เหลือจากการนำไปใช้จะถูกทิ้งและไม่มีการนำมาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพ โดยเถ้าลอยที่ไม่มีการนำมาใช้จะนำไปทิ้งใกล้บริเวณโรงไฟฟ้า โดยอาจสัมผัสกับความชื้นของสภาพแวดล้อมและน้ำฝน บางครั้งจะต้องมีการใส่น้ำเข้าไปก่อนที่จะนำไปทิ้งเพื่อไม่ให้เกิดการฟุ้ง

กระจาย จึงทำให้เถ้าลอยที่ไม่มีมีการนำมาใช้อยู่ในรูปแบบเถ้าลอยเปียกและไม่มีมีการนำกลับมาใช้ใหม่ ทำให้ต้องการพื้นที่เก็บเถ้าลอยเปียกขนาดใหญ่ เพื่อเป็นการจัดการเถ้าลอยเปียกอย่างถูกต้อง การใช้เถ้าลอยเปียกแทนที่วัสดุปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตดูเหมือนว่าจะเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ [4,5] โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ เพราะว่าเถ้าลอยที่มี CaO สูงบางส่วนจะมีคุณสมบัติทางด้านซีเมนต์เมื่อสัมผัสกับน้ำจะทำให้เกิดการแข็งตัว เมื่อนำมาใช้จะต้องอบให้แห้งและบดให้ละเอียดทำให้การผสมทำได้ยาก [6] และไม่คุ้มค่ากับการนำมาใช้ เพราะฉะนั้นความเป็นไปได้สำหรับการใช้เถ้าลอยเปียกในคอนกรีตคือเถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ

สำหรับการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในระยะต้นจะค่อนข้างช้า แต่ในระยะยาวแล้วกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะดีและสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน [7,8] ในทางตรงกันข้ามคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนจะมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดในระยะต้นเร็ว ดังนั้นการพัฒนาวัสดุประสานร่วมระหว่างปูนซีเมนต์ เถ้าลอยและผงหินปูน เป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ประโยชน์ซึ่งจะทำให้คอนกรีตที่ได้มีคุณสมบัติบางประการที่ดีกว่าการใช้เถ้าลอยหรือผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ซึ่งในประเทศไทยยังมีข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มากกว่าหนึ่งชนิดน้อยมาก

อย่างไรก็ตามการนำเถ้าลอยจากแหล่งในประเทศมาใช้งานในอุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าเถ้าลอยที่นำมาผสมคอนกรีตนั้นมีความไวต่อปฏิกิริยาปอซโซลานสูงและให้ผลดีต่อคุณสมบัติทั้งในเชิงคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเมื่อมีการใช้อย่างเหมาะสม ตลอดจนมีผลกระทบเชิงบวกในทางเศรษฐศาสตร์ และลดปัญหาสภาพแวดล้อมและการจัดการ จึงเป็นที่คาดการณ์ว่าความต้องการใช้เถ้าลอยจะเพิ่มขึ้นต่อไปอีกเป็นเวลานาน ในการนำเถ้าลอยเปียกในประเทศมาใช้งานนั้น มีหน่วยงานต่างๆหลายแห่งได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลในระยะสั้นหลายประการซึ่งรวมถึงกำลังต้านทานแรงอัด แรงดึง และ แรงบิดของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมมาแล้ว แต่ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติระยะยาวโดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติด้านความคงทนซึ่งมีผลต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตนั้นยังไม่แน่ชัดและมีการศึกษาไม่มากนัก ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงได้ศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกส่วนผสมมาใช้ในงานคอนกรีตได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย (แห้งและเปียก)

1.2.2 เพื่อศึกษาการขยายตัวของอิฐเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอย (แห้งและเปียก)

1.2.3 เพื่อศึกษาการหดตัวของอิฐและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย(แห้งและเปียก)

1.2.4 เพื่อศึกษาการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (แห้งและเปียก)

1.2.5 เพื่อศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (แห้งและเปียก)

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษานี้ ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติวัสดุประสานที่ใช้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย (แห้งและเปียก) โดยมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1.3.1 วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย (แห้งและเปียก) โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1.3.2 เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษานำมาจากโรงไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง

1.3.3 ทดสอบสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย (แห้งและเปียก) ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ภาพถ่ายขยายกำลังสูงสุดของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี

1.3.4 ทดสอบการขยายตัวโดยวิธีอิฐเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอย (แห้งและเปียก)

1.3.5 ทดสอบการหดตัวของอิฐและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย(แห้งและเปียก)

1.3.6 ทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (แห้งและเปียก)

1.3.7 ทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (แห้งและเปียก)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อทราบถึงสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย (แห้งและเปียก)

1.4.2 เพื่อทราบถึงการขยายตัวของอิฐเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอย (แห้งและเปียก)

- 1.4.3 เพื่อทราบถึงหัตถ์แบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ทผสมเถ้าลอย (แห้งและเปียก)
- 1.4.4 เพื่อทราบถึงการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (แห้งและเปียก)
- 1.4.5 เพื่อทราบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (แห้งและเปียก)



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แก้วลอย วัสดุพอลิโพรพิลีน รวมถึงทฤษฎีพื้นฐานทางด้านคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นผลผลิตที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ จนรวมตัวผสมกันสุกพอดี มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ แคลเซียมและอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) เมื่อผสมกับน้ำตามสัดส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์นั้น มีการทำปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ไฮเดรชัน (Hydration) ส่วนคำที่เรียกกันว่า “ปอร์ตแลนด์” ได้มาจากการตั้งชื่อของนายโจเซฟ แอสปดิน โดยในปี ค.ศ. 1824 เขาได้ทำการจดทะเบียนวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งได้จากการเผาส่วนผสมระหว่างหินปูนและดินเหนียว และเมื่อนำมาบดอัดจะได้เนื้อปูนซีเมนต์ที่มีสีเหลือง-เทา คล้ายกับหินในเกาะของเมืองปอร์ตแลนด์ประเทศอังกฤษ เขาจึงตั้งชื่อว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ในตอนแรกนี้ยังมีคุณภาพต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเผาส่วนผสมดังกล่าวใช้ความร้อนต่ำ ซึ่งทำให้หินปูนกับดินเหนียวยังรวมตัวไม่ดี

2.1.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรมในปัจจุบัน โดยเมื่อผสมกับหิน กรวด ทรายและน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งและทนทานคล้ายหิน ตัวอย่างสิ่งก่อสร้างคอนกรีตได้แก่ ฐานราก ตอม่อ เขื่อน กำแพงกันดิน พื้นและถนน เป็นต้น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับงานที่จะนำไปใช้ โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ตามมาตรฐาน ASTM C 150 และ มอก. 15 ดังนี้

1) ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีต หรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และสำหรับใช้ในงานก่อสร้างปกติทั่วไป ที่ไม่ได้อยู่ในภาวะอากาศที่รุนแรง หรือในที่ที่มีอันตรายจากซัลเฟตเป็นพิเศษ หรือความร้อนที่เกิดจากการรวมตัวกันกับน้ำจะไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงขั้นอันตรายที่

คอนกรีตจะแตกร้าวเสียหาย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราพญานาคสีเขียวและตราเพชรเม็ดเขียว

2) ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานสร้างเขื่อนคอนกรีต กำแพงกันดินหนาๆ หล่อท่อคอนกรีตขนาดใหญ่ ตอม่อสะพาน เป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังรับแรงต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราพญานาคเจ็ดเศียร

3) ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งเร็ว (High-early Strength Portland Cement) หรือที่เรียกว่าซูเปอร์ซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ให้กำลังรับแรงสูงในระยะแรก เร็วกว่าปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง มีเนื้อเป็นผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ผลิตโดยการเปลี่ยนสัดส่วนผสม (เพิ่ม C_3S และลด C_2S) หรือการเติมสารอื่น โดยการบดให้ละเอียดยิ่งขึ้น หรือโดยการเผาให้ดีขึ้น มีประโยชน์สำหรับทำคอนกรีตที่ต้องการจะใช้งานเร็ว หรือรีบอบเร็ว เช่น เสาเข็มคอนกรีต ถนน พื้นและคานที่ต้องถอดแบบเร็ว เป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ยังเหมาะกับการทำคอนกรีตในอากาศหนาว คอนกรีตที่หล่อด้วยปูนซีเมนต์ประเภทนี้เพียง 3 วัน จะมีกำลังเท่ากับคอนกรีตที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ธรรมดาที่หล่อไว้แล้วได้ 28 วัน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตราเอราวัณ ตราพญานาคสีแดงและตราสามเพชร

4) ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้ความร้อนต่ำ (Low-Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำสุด อัตราการเกิดกำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างช้าๆ ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ใช้มากในการก่อสร้างคอนกรีตหนา เช่น เขื่อน เนื่องจากให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นขณะก่อตัวและแข็งตัว

5) ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง (Sulfate-Resistant Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ต้านทานซัลเฟตได้สูงกว่าปูนซีเมนต์ประเภทอื่นๆ (มี C_3A ต่ำสุด) สำหรับใช้กับโครงสร้างที่อยู่ในที่ที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง เช่น น้ำหรือดินที่มีด่าง (Alkaline) สูง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีระยะเวลาการแข็งตัวช้ากว่าประเภทหนึ่ง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราช้างฟ้า

ตารางที่ 2.1 ปริมาณร้อยละของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่างๆ

สารประกอบ	ประเภท	ประเภท	ประเภท	ประเภท	ประเภท
	1	2	3	4	5
ไตรแคลเซียมซิลิเกต : C_3S	49	46	56	30	43
ไดแคลเซียมซิลิเกต : C_2S	25	29	15	46	36
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต : C_3A	12	6	12	5	4
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ : C_4AF	8	12	8	13	12

2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประกอบไปด้วยสารประกอบออกไซด์หลัก และสารประกอบออกไซด์รอง โดยมีสารประกอบดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) สารประกอบออกไซด์หลัก

สารประกอบออกไซด์หลัก (Major Oxides) ประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ออกไซด์กลุ่มนี้มีปริมาณรวมกันแล้วได้มากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

2) สารประกอบออกไซด์รอง

สารประกอบออกไซด์รอง (Minor Oxides) ประกอบด้วย แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), ออกไซด์ของอัลคาไลน์ (Na_2O), โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O), และ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)

นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอม และส่วนประกอบอื่นซึ่งจัดอยู่ในรูปของการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบประเภทออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ชื่อย่อ
แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide)	60.0 - 67.0	CaO
ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Oxide)	17.0 - 25.0	SiO_2
อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide)	3.0 - 8.0	Al_2O_3
เฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric Oxide)	0.5 - 6.0	Fe_2O_3
แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide)	0.1 - 0.4	MgO
อัลคาไลน์ (Alkalies)	0.2 - 1.3	Na_2O
โพแทสเซียมออกไซด์ (Potassium Oxide)	0.2 - 1.3	K_2O

ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ต่อ)

สารประกอบประเภทออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ชื่อย่อ
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulfer Oxide)	1.0 - 3.0	SO ₃

2.1.3 สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์

สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์จำปฏิกิริยาทางเคมี และรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีรูปร่างต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การเผา และการเย็นลงของเม็ดปูน ปริมาณสารประกอบสำคัญในปูนซีเมนต์มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดสมบัติของปูนซีเมนต์ โดยมีสารประกอบที่สำคัญอยู่ 4 ชนิดดังนี้

1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ หรือ C_3S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึกสี่เหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมคางหมู คุณสมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัว และแข็งตัวให้กำลังค่อนข้างดีในช่วง 7 วันแรก โดยปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 45 ถึง 55

2) ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ หรือ C_2S) ไดแคลเซียมซิลิเกตมีหลายรูปแบบ โดยที่อุณหภูมิปกติ C_2S จะอยู่ในรูปเบต้าไดแคลเซียมซิลิเกต ($\beta\text{C}_2\text{S}$) ไดแคลเซียมซิลิเกตมีลักษณะเป็นเม็ดกลมมีคุณสมบัติเมื่อทำปฏิกิริยา กับน้ำจะเกิดการก่อตัวและพัฒนากำลังอัดค่อนข้างช้าและช้ากว่า C_3S มากแต่ในระยะยาวจะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับ C_3S โดยปริมาณไดแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 15 ถึง 35

3) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ หรือ C_3A) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมสี่เหลี่ยม ทำปฏิกิริยากับน้ำมีความรุนแรงมากและทำให้ก่อตัวทันที (flash set) การพัฒนากำลังเร็วภายใน 1 ถึง 2 วัน แต่กำลังค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับ C_3S และ C_2S โดยปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 7 ถึง 15

4) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ หรือ C_4AF) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์อยู่ในสภาพสารละลายแข็ง (solid solution) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เฟสก่อตัวอย่างรวดเร็วภายในไม่กี่นาทีแต่กำลังค่อนข้างต่ำและต่ำกว่า C_3A โดยปริมาณของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 5 ถึง 10

โดยหลักการคำนวณหาปริมาณสารประกอบทั้ง 4 ชนิด ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถหาได้จากสูตรสมการคำนวณ Bogue's Equation โดยสามารถแบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

$$\text{กรณี 1 : } \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3 > 0.64$$

$$\text{C}_3\text{S} = 4.071\text{CaO} - 7.600\text{SiO}_2 - 6.718 \text{Al}_2\text{O}_3 - 1.430\text{Fe}_2\text{O}_3 - 2.852\text{SO}_3 \quad (2.1)$$

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

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

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

$$\text{กรณี 2 : } Al_2O_3 / Fe_2O_3 \leq 0.64$$

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

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

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

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

2.1.4 ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ (Hydration of Cement)

การทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

1) ปฏิกริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate, $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide : $Ca(OH)_2$ หรือ CH) ดังสมการที่ (2.9)



2) ปฏิกริยาไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH ดังสมการที่ (2.10)



3) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ (2.11)



เพื่อเป็นการหวังให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (clinker) โดยยิปซัม (gypsum : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตก่อให้เกิดชั้นบางๆของแอทริงไจท์ บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต ดังสมการที่ (2.12)



4) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซัม ดังสมการที่ (2.13)



เนื่องจากปูนซีเมนต์มี C_3S เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ ซึ่งบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ C_3A ด้วย ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะลดลงเนื่องจากการเกิดชั้นเคลือบของแอทริงไจท์ และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของไอออนแคลเซียม และไฮดรอกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาลดลง และเพสต์มีสภาพพลาสติกช่วงหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึก และปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ทำให้เกิด CSH เพิ่มมากขึ้นตามด้วยปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้แอทริงไจท์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตและเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต และซัลโฟเฟอไรท์ แคลเซียมซิลิเกตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น และขยายเข้าไปในโพรงและเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.1.5 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ/หรือเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันเป็นปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุชิ้นๆ อาจจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และถึงแม้ว่าปอซโซลานชนิดนั้นมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ในสัดส่วนผสมใดๆ ก็ตาม บางครั้งปอซโซลานบางส่วนไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้เนื่องจากองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยามีไม่เพียงพอต่อขบวนการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

2.1.5.1 ชนิดของวัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลานมี 2 ชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Pozzolan) และปอซโซลานดัดแปลง (Modify Pozzolan) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Pozzolan)

ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (natural pozzolan) ได้แก่ หินดินดาน (Shales) เศษหินภูเขาไฟ (Tuff) ถ้ำภูเขาไฟ (Volcanic ash) หินภูมิต (Pumisite) หินโอเพิลเหลือง (Opaline) หินชั้น (Shale) หินเชิร์ต (Chert) หินปูน (Limestone) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เมื่อต้องการนำไปใช้งาน จะต้องนำมาบดก่อน

2) ปอซโซลานดัดแปลง (Modify Pozzolan)

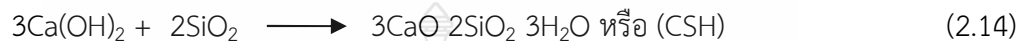
ปอซโซลานดัดแปลงเกิดจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By Products) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้นซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบันปอซโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่ ถ้ำลอย (Fly ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

2.1.5.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน

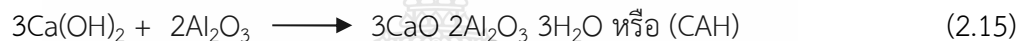
วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮ

เดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) สรุปเป็นสมการทางเคมีได้ ดังสมการที่ (2.14) ถึง (2.15)

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



2.1.6 เถ้าลอย

เถ้าลอยคือ ขี้เถ้าที่หลงเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินหรือลิกไนต์ มีขนาดเล็กและละเอียดมาก โดยจะปลิวปนไปกับก๊าซร้อนออกจากปล่องควันของโรงผลิตไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งถ้ามีปริมาณเถ้าลอยมากในชั้นบรรยากาศ ก็อาจก่อให้เกิดปัญหาภาวะของอากาศได้ จึงได้มีการศึกษาวิจัยโดยการติดตั้งเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแยกก๊าซร้อนและเถ้าลอยออกจากกัน เพื่อนำเอาเถ้าลอยกลับมาใช้ใหม่ เช่น การนำเอาเถ้าลอยมาใช้เป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในกระบวนการผลิตคอนกรีต เป็นต้น

2.1.6.1 ชนิดของเถ้าลอย

ตามมาตรฐาน ASTM C618 สามารถแบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด ได้ดังนี้

1) ชนิด F (Class F) เถ้าลอยที่ได้จากการเผาแอนทราไซต์ และบิทูมินัส ซึ่งมีปริมาณผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนักและมีคุณสมบัติอื่นตามมาตรฐาน ASTM C618 ดังแสดงในตารางที่ 2.3 วิธีการเก็บตัวอย่างและทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide : CaO) ต่ำ

2) ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านลิกไนต์ และซับบิทูมินัส เป็นส่วนใหญ่มีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ตั้งแต่ร้อยละ 50 ถึงร้อยละ 70 โดยน้ำหนักและปริมาณ CaO สูง โดยมีคุณสมบัติตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 ดังในตารางที่ 2.3 เถ้าลอยชนิด

นี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนท์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย

นอกจากจะแบ่งแยกชนิดของเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิดดังกล่าวแล้ว ยังสามารถพิจารณาจากความแตกต่างของส่วนประกอบและคุณสมบัติในด้านการเป็นซีเมนต์ (Cementitious) และความเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) ได้ด้วยเนื่องจากเถ้าลอย Class C โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์เพิ่มขึ้น จากคุณสมบัติปอซโซลาน เพราะเถ้าลอย Class C มักจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าร้อยละ 10 ส่วน Class F ต่ำกว่าร้อยละ 10 ดังนั้นการนำเถ้าลอยมาใช้งาน ACI 226 (1987) ได้แนะนำว่า ควรใช้เถ้าลอย Class F ในปริมาณร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และสามารถเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 15 ถึง 35 ได้กรณีที่ใช้เถ้าลอย Class C เนื่องจากพบว่าเถ้าลอย Class C จะมีลักษณะความเป็นซีเมนต์มากกว่า เพราะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ สูงกว่าเถ้าลอย Class F

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

ส่วนประกอบทางเคมี	เถ้าลอย	
	ชนิด F (ร้อยละ)	ชนิด C (ร้อยละ)
1. ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์ ($SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$) อย่างต่ำ	70.0	50.0
2. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างสูง	5.0	5.0
3. ปริมาณความชื้นสูงสุด	3.0	3.0
4. การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง	6.0	6.0
5. ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า (Na_2O)	1.5	1.5

2.1.6.2 ปฏิกริยาทางเคมีของเถ้าลอย

ในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะเริ่มจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$ หรือ CH) หลังจากนั้นวัสดุปอซโซลานในที่นี้คือเถ้าลอย ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน

(Pozzolanic Reaction) ซึ่งผลผลิตของปฏิกิริยานี้จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH)

โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์ (มอก.) กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าลอยถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก โดยแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมีได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพ (ดังตารางที่ 2.4)

ตารางที่ 2.4 ร้อยละข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135 - 2545

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

2.1.6.3 คุณสมบัติของซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

1) ความต้องการน้ำ

เถ้าลอยมีลักษณะเป็นเม็ดกลมและมีผิวเรียบทำให้ส่วนผสมทำงานได้ง่ายขึ้นและต้องการน้ำลดลงเมื่อกำหนดให้มีความสามารถในการเทเท่ากัน เถ้าลอยนอกจากสามารถลดปริมาณน้ำได้แล้ว ในหลายกรณียังพบว่าเพิ่มความสามารถในการทำงานของมอร์ตาร์และคอนกรีตได้โดยคงปริมาณน้ำไว้ ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ทำจากปูนซีเมนต์ผสม เถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 0, 20 และ 40 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 125, 135 และ 145 ตามลำดับ

2) ระยะเวลาการก่อตัว

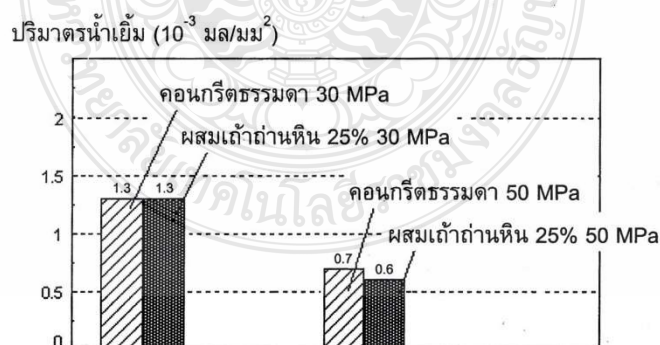
โดยทั่วไประยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง เถ้าลอยที่ละเอียดมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวเร็วขึ้นและในทางกลับกันเถ้าลอยที่หยาบมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวช้าลง เถ้าลอยที่มีปริมาณ SO₃ สูงจะมีระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นมากได้

3) การเยิ้ม น้ำ

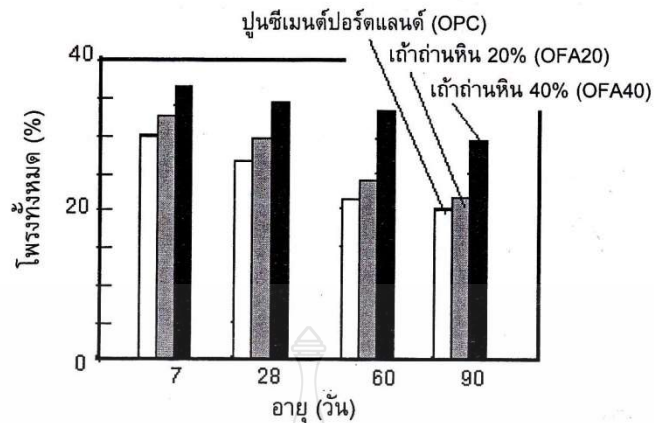
การผสมเถ้าลอยทำให้ปริมาณของวัสดุผสมเพิ่มขึ้นเนื่องจากเถ้าถ่านหินมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์และทำให้การเยิ้ม น้ำของเพสต์และมอร์ตาร์ลดลง การเยิ้ม น้ำของคอนกรีตต่ำกว่าเพสต์และมอร์ตาร์เนื่องจากมีปริมาณของเพสต์ต่ำกว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะมีการเยิ้ม น้ำลดลงเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แต่ก็มีรายงานเช่นกันว่า 6 จาก 11 ชนิดที่ทดสอบการเยิ้ม น้ำเมื่อผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากันโดยไม่ลดน้ำ คอนกรีตจะมีความสามารถทำงานได้ดีขึ้นเนื่องจากมีน้ำอิสระ (Free Water) มากทำให้การเยิ้ม น้ำเพิ่มขึ้นได้ การผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ยังทำให้ส่วนผสมเกาะตัวกันได้ดีเป็นผลทำให้โอกาสในการแยกตัว (Segregation) ของคอนกรีตน้อยลง

4) โพรง

การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ขนาดและโครงสร้างของโพรงเปลี่ยนไป ปฏิกริยาในช่วงต้นขึ้นอยู่กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การใส่เถ้าลอยทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปฏิกริยาไฮเดรชันในช่วงต้นลดลง เป็นผลให้โพรงของเพสต์มีมากขึ้นเมื่อเทียบกับเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 แต่ทั้งนี้การกระจายตัวของโพรงจะดีขึ้น เพราะเถ้าลอยมีลักษณะอนุภาคกลมทำให้สามารถกระจายตัวได้ดีในซีเมนต์เพสต์ และทำให้ขนาดเฉลี่ยของโพรงเล็กลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอย เมื่ออายุมากขึ้นการเกิดปฏิกริยาไฮเดรชันและปอซโซลานของเพสต์ยังคงมีต่อไป ผลผลิตจากปฏิกริยาไฮเดรชันและปอซโซลานเข้าไปแทรกตามโพรงทำให้ปริมาตรโพรงลดลง สำหรับส่วนผสมที่มีเถ้าลอยพอเหมาะประมาณร้อยละ 20 การลดลงของโพรงจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าส่วนผสมที่มีเถ้าลอยมาก ปริมาตรของโพรงผสมเถ้าลอยลดลงต่ำกว่าของเพสต์ธรรมดาได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3

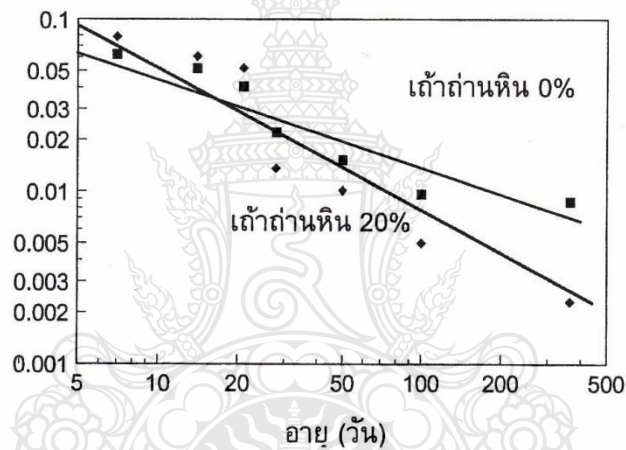


รูปที่ 2.1 การเยิ้ม น้ำของคอนกรีตผสมเถ้าลอย [9]



รูปที่ 2.2 ปริมาณโพรงทั้งหมดของเพสต์ผสมเถ้าลอย [9]

ปริมาณโพรง > 0.05 ไมครอน (ซม³/ก)



รูปที่ 2.3 โพรงของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยที่ W/B เท่ากับ 0.80 [9]

2.1.6.4 การขยายตัวของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

สิ่งที่จำเป็นสำหรับซีเมนต์เพสต์ที่ดีไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงในด้านของปริมาตรมากเกินไป สิ่งที่ทำให้เกิดการขยายตัวสำหรับซีเมนต์เพสต์คือ ปฏิกริยาระหว่างน้ำในซีเมนต์เพสต์กับสารประเภทหินปูน แมกนีเซียม และแคลเซียมซัลเฟต ซึ่งวิธีการทดสอบการขยายตัวในเตาอโตคลอว์ (Autoclave) จะทำการทดสอบโดยให้หล่อซีเมนต์เพสต์ แล้วบ่มในสภาพชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเร่งปฏิกิริยาโดยให้ความร้อนและเพิ่มความดัน โดยคงสภาพความร้อนและความดันในช่วงเวลาหนึ่ง จากนั้นทำการลดความร้อนและความดันให้อยู่ในสภาวะปกติ แล้ววัดการขยายตัวที่เกิดขึ้น ซึ่งสำหรับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่ควรมีการขยายตัวเกินร้อยละ 0.8 ของความยาวเดิม

ตัวอย่าง หาค่าการขยายตัวของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยคำนวณจากสมการ

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

โดยที่ l_1 = ความยาวหลังการให้ความร้อน, มม.

l_0 = ความยาวก่อนการให้ความร้อน, มม.

การคำนวณที่ได้ให้มีความละเอียดถึง 0.01 สำหรับความยาวหลังการให้ความร้อนลดลงให้ใช้เครื่องหมายลบหน้าค่าร้อยละ

2.1.7 การหดตัวของแบบอโตจีนัส

การหดตัวของแบบอโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) เป็นการหดตัวที่ส่วนหนึ่งเป็นการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Chemical Shrinkage) ที่เกิดหลังการก่อตัวระยะสุดท้ายของคอนกรีต และอีกส่วนหนึ่งที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นในช่องว่างคาпилลารี (Capillary Pores) ในเพสต์ เนื่องจากความชื้นบางส่วนถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยา ทำให้เกิดช่องว่างคาпилลารี (Capilla Section) ส่งผลให้คอนกรีตหดตัว การหดตัวของแบบอโตจีนัสแตกต่างจากการหดตัวของแบบแห้ง ตรงที่ไม่ได้มีการสูญเสียน้ำในคอนกรีตสู่บรรยากาศโดยรอบ แต่เป็นการสูญเสียน้ำภายในตัวของคอนกรีตเอง การหดตัวของแบบอโตจีนัสจะเกิดขึ้นทันทีหลังจากกระบวนการผสมคอนกรีตเสร็จ แต่ในทางปฏิบัติจะมีผลต่อปริมาตรของโครงสร้างที่จะเท และจะมีผลทางโครงสร้างหลังจากที่คอนกรีตก่อตัวแล้ว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก่อนการก่อตัวจะไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงในคอนกรีตดังนั้น จึงนิยามวัดค่าการหดตัวของแบบอโตจีนัสโดยเริ่มต้นจากระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นการหดตัวของแบบอโตจีนัสจะมีค่ามากขึ้นถ้าคอนกรีตมีความชื้นน้ำต่ำ เช่น คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูม หรือ วัสดุปอซโซลานที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดของปูนซีเมนต์มาก เช่น ถ้ำลอยที่ผ่านการคัดขนาด เป็นต้น คอนกรีตที่ใช้ถ้ำตะกรันเตาถลุงเหล็กซึ่งมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ ถ้าใช้ในปริมาณมากก็จะมี การหดตัวของแบบอโตจีนัสสูง มีการพบว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูง จะมีการหดตัวของแบบอโตจีนัสสูงโดยการแตกร้าเนื่องจากการหดตัวของแบบนี้ จะเกิดขึ้นต่อเมื่อมีการยัดรัง บางครั้งอาจจะพบการแตกร้าขึ้นภายในคอนกรีตโดยที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าจากบริเวณผิวของคอนกรีตได้ เนื่องจากคอนกรีตภายในเกิดการหดตัว แต่บริเวณผิวได้รับน้ำจากการบ่มที่เพียงพอไม่หดตัวในช่วงเวลาที่เกิดการหดตัวของแบบอโตจีนัส แต่จะเกิดการหดตัวขึ้นในช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำ จึงทำให้การหดตัวของแบบนี้มีอัตราสูงในช่วงวันแรกๆ โดยจะมีอัตราต่ำลง เมื่อระยะเวลาผ่านไปเรื่อยๆ

2.1.7.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวของแบบอโตจีนัส มีรายละเอียดดังนี้

1) อัตราความเร็วการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดขึ้นเร็วและทำให้การหดตัวของแบบอโตจีนัส เกิดความเร็วและสูงตามไปด้วย ดังนั้น การหดตัวของแบบอโตจีนัสจะสูงขึ้น ถ้าอุณหภูมิการบ่มสูงขึ้น ซึ่งองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นเร็ว คือ มีปริมาณ C_3A สูง

2) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ถ้ามีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ก็จะทำให้เกิดการหดตัวของแบบอโตจีนัสสูงขึ้น เนื่องจากความชื้นน้ำจะต่ำลง ขนาดช่องว่างคาปิลลารีจะเล็กลงด้วย

3) ลักษณะโครงสร้างช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ ยังมีขนาดเล็ก และมีความไม่ต่อเนื่องก็จะทำให้การหดตัวของแบบอโตจีนัสสูงขึ้น เนื่องจากน้ำอิสระเคลื่อนตัวไม่สะดวก และช่องว่างที่มีขนาดเล็กทำให้เกิดแรงดึงสูง

2.1.8 การหดตัวของแบบแห้ง

การหดตัวของแบบแห้ง (Drying Shrinkage) เกิดจากการที่น้ำภายในคอนกรีตระเหยออกมา ทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัว การหดตัวของแบบแห้งในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเป็นการหดตัวที่สำคัญยิ่งกว่าการหดตัวของแบบอโตจีนัส เพราะหากการออกแบบและการก่อสร้างคอนกรีตไม่ได้เผื่อการหดตัวของแบบแห้งไว้อย่างเพียงพอแล้ว จะส่งผลทำให้เกิดรอยแตกร้าว และการบิดตัวของคอนกรีต ซึ่งส่วนมากเกิดขึ้นเนื่องจากการยัดรีงของโครงสร้าง ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดในเรื่องนี้คือ รอยต่อเพื่อการหดตัว (Contraction Joint) และรอยต่อเพื่อการเคลื่อนตัวอย่างอิสระ (Isolation Joint or Expansion Joint) ในพื้นถนน หรือพื้นคอนกรีตสำหรับเผื่อการหดตัว และการขยายตัวของคอนกรีต เพื่อป้องกันการแตกร้าวที่เกิดขึ้นแบบไม่มีทิศทาง

2.1.8.1 กลไกของการหดตัวของแบบแห้ง

การหดตัวของแบบแห้งของคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราการหดตัวของซีเมนต์เพสต์เพราะโดยทั่วไปมวลรวมมีการหดตัวต่ำมาก แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของซีเมนต์เพสต์กับความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

1) การหดตัวของแบบแห้ง ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 การหดตัวในช่วงนี้ การการสูญเสียน้ำในช่องว่างคาปิลลารีเป็นหลัก ซึ่งในช่วงแรกน้ำในช่องว่างคาปิลลารีขนาดใหญ่จะถูกขับออกมาก่อนตามด้วยน้ำในช่องว่างคาปิลลารี จะมีขนาดเล็กลง การสูญเสียน้ำที่เหลืออยู่จะเกิดเป็นผิวโค้ง (Meniscus) และการเกิดแรงดึงผิว (Surface Tension) ซึ่งมีขนาดสูงขึ้นเมื่อโพรงมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้การสูญเสียน้ำดูดซับที่อยู่ในซอก (Hindered Adsorbed Water) หรือที่อยู่ในโพรงขนาดจิว

(Micropore) มีส่วนทำให้การหดตัว การหดตัวพบว่าแผ่น C-S-H ซึ่งการเคลื่อนตัวและยึดเกาะกันดังกล่าวเป็นส่วนของการหดตัวอย่างถาวรซึ่งคืนกลับไม่ได้ (Irreversible Shrinkage)

2) การหดตัวแบบแห้ง ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 ถึง 50 การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ในขณะนี้เกิดในอัตราที่ต่ำกว่าในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 40 ถึง 50 น้ำในช่องว่างคาปิลลารีถูกขจัดออกไป และแรงตึงผิวจะหมดไป ซึ่งการหดตัวในขณะนี้เกิดจากการสูญเสีย น้ำดูดซับ (Adsorbed Water) ที่ผิวของอนุภาคของเจลเป็นหลัก ซึ่งเริ่มมีความสำคัญเมื่อความหนาของชั้นน้ำลดลงเหลือเพียง 2 โมเลกุล มีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 50 การหดตัวจากการสูญเสียน้ำอาจยังคงมีอยู่แต่ไม่มากนักเมื่อความชื้นลดลงจะเกิดการสูญเสียน้ำที่ดูดซับชั้นสุดท้าย และทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้นการหดตัวในช่วงนี้เป็นการหดตัวแบบคืนกลับได้ (Reversible Shrinkage)

3) การหดตัวแบบแห้ง ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าร้อยละ 10 การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ในขณะนี้เกิดขึ้นในอัตราที่สูง การตากแห้งที่สภาวะนี้ทำให้น้ำระหว่างแผ่น C-S-H (Interlayer Water) ถูกขจัดออกไป การสูญเสียน้ำในช่วงนี้ทำให้แผ่น C-S-H เคลื่อนที่เข้าหากัน การหดตัวจะเป็นแบบคืนกลับได้ แต่ถ้าหากสภาวะแห้งรุนแรงและนานพอแผ่น C-S-H ที่เคลื่อนที่เข้าใกล้กันจะสามารถยึดเกาะกันได้ ซึ่งทำให้เกิดการหดตัวแบบถาวร

2.1.8.2 องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวแบบแห้ง

องค์ประกอบสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต ได้แก่ มวลรวมปริมาณของน้ำและปูนซีเมนต์ สมบัติของปูนซีเมนต์รูปร่าง ขนาดของคอนกรีต เป็นต้น การเสริมเหล็กในคอนกรีตสามารถลดการหดตัว เพราะเหล็กช่วยยึดไม่ให้คอนกรีตหดตัวแต่ทำให้เกิดแรงอัดในเหล็กและแรงดึงในคอนกรีตได้ คอนกรีตที่อยู่ในอุณหภูมิสูง ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะเกิดการหดตัวสูง

1) มวลรวม เนื่องจากซีเมนต์เพสต์เป็นต้นกำเนิดของการหดตัว ดังนั้นการเพิ่มปริมาตรของมวลรวมจึงลดปริมาณซีเมนต์เพสต์และการหดตัวได้ดี นอกจากนี้การหดตัวของคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมวลรวมได้คละมวลรวมที่แข็งแกร่งมีการดูดซึมน้ำน้อย และมีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงทำให้คอนกรีตมีการหดตัวน้อย

2) ปริมาณน้ำและปูนซีเมนต์ เนื่องจากปริมาณน้ำและปูนซีเมนต์เป็นตัวกำหนดปริมาณและสมบัติของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นการหดตัวของคอนกรีตจึงขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและปูนซีเมนต์เป็นอย่างมาก ส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำมากจะมีการหดตัวสูง และการหดตัวจะมีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้น เพราะการมีน้ำในส่วนผสมมากย่อมมีน้ำระเหยออกจากคอนกรีตมากขึ้น การหดตัวของไฮเดรตซีเมนต์ มีค่าสัดส่วนตรงกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในช่วงประมาณ 0.2 ถึง 0.6

3) ความชื้น อาจแบ่งออกได้เป็นความชื้นขนาดที่บ่มคอนกรีตและความชื้นของอากาศตอนตกแห้ง การบ่มมีผลต่อการหดตัวของคอนกรีตไม่มากนัก เพราะการบ่มที่ดีย่อมทำให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้มากขึ้น และจำนวนของเจลที่เพิ่มขึ้น เม็ดปูนจะทำปฏิกิริยากับน้ำจนเหลือเม็ดปูนที่ไม่ทำปฏิกิริยาอยู่น้อย ซึ่งเม็ดปูนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ด้านการหดตัวนอกจากนี้ การบ่มที่ดีย่อมทำให้ช่องว่างคาปิลลารีน้อยลงและคอนกรีตแข็งแรงขึ้น ดังนั้นการบ่มธรรมดา จึงมีผลต่อการหดตัวไม่มาก การใช้ความดันสูงในการบ่มสามารถลดการหดตัวได้มากเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเจล ถ้าทิ้งคอนกรีตไว้ในน้ำจะมีการขยายตัวแต่ถ้าทิ้งไว้ในอากาศแห้งจะเกิดการหดตัว ความชื้นสัมพัทธ์ที่ทำให้คอนกรีตอยู่ในสภาพสมดุลมีค่าประมาณร้อยละ 94 สำหรับคอนกรีตที่ตากแห้งแล้วนำเอามาใส่ในน้ำสามารถขยายตัวกลับคืนมาบางส่วนแต่มีบางส่วนเป็นการหดตัวแบบถาวร และถ้าเอาไปตากแห้งอีกคอนกรีตจะหดตัวได้อีก

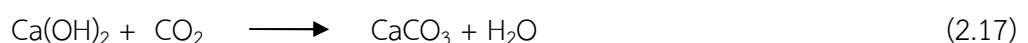
4) ขนาดและรูปร่างของแท่งทดสอบ อัตราการสูญเสียน้ำของคอนกรีตขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิว พื้นที่ผิวที่มากทำให้การสูญเสียน้ำเกิดได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของคอนกรีต กล่าวคือ คอนกรีตขนาดเล็กจะสูญเสียน้ำเร็วกว่าคอนกรีตขนาดใหญ่ คอนกรีตเมื่อสูญเสียน้ำจะเกิดการหดตัว การหดตัวเกิดขึ้นที่ผิวของคอนกรีตและขยายเข้าไปในส่วนของคอนกรีตซึ่งใช้เวลานานมากเมื่อเป็นคอนกรีตขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงเป็นที่ยอมรับกันว่าการหดตัวจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของคอนกรีต โดยการหดตัวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรของคอนกรีต

2.1.9 การเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น

คาร์บอนเนชั่นเป็นขบวนการที่เปลี่ยนผลผลิตบางชนิดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งโดยปกติมักจะเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ให้เป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอเนต โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อต้องมีความชื้นและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

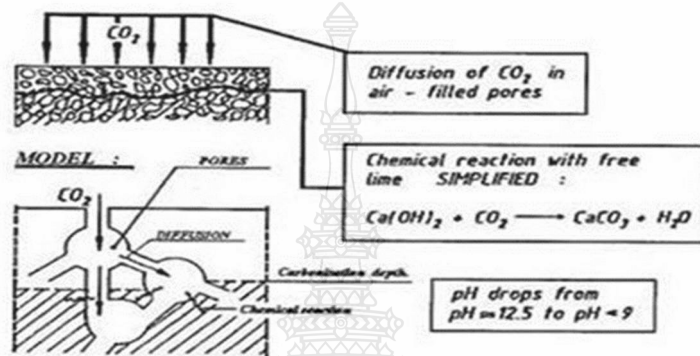
1) กลไกของการเกิดคาร์บอนเนชั่น

คาร์บอนเนชั่นเกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) บริเวณผิวหน้าของคอนกรีต ดังสมการที่ (2.17)



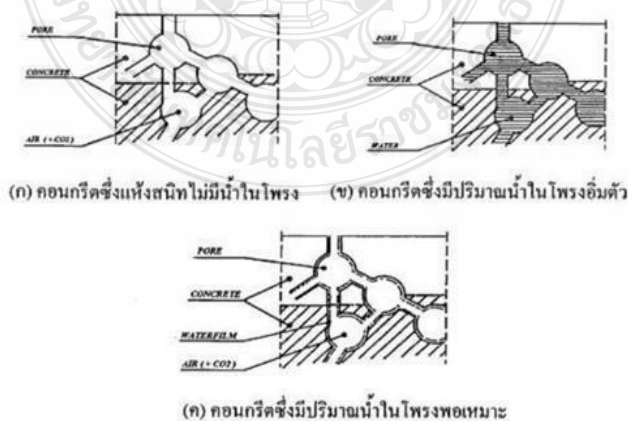
ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดในสภาพของสารละลาย ลักษณะของการทำปฏิกิริยาจะเกิดในบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศ

และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีต โดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Pores) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 คาร์บอนนั้นจะค่อยๆคืบหน้าเข้าไปในเนื้อคอนกรีตอย่างช้าๆ และมีอัตราช้าลงเรื่อยๆ เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องแพร่ผ่านโครงสร้างช่องว่าง (Pore Structure) ของคอนกรีตและผ่านส่วนที่ถูกคาร์บอนเตไปแล้ว ซึ่งจะมีความพรุนน้อยลง ทำให้ซึมผ่านเข้าไปได้ยากขึ้นเรื่อยๆแต่ก็มีอยู่อย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นในคอนกรีต

จากการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น ที่ต้องการทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำหรือคอนกรีตที่แห้งสนิท จึงไม่เกิดคาร์บอนชั่น เนื่องจากในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านเข้าไปได้มาก ส่วนในคอนกรีตที่แห้งสนิทก็จะมีน้ำใน การทำปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ดังนั้น คาร์บอนชั่นจะรุนแรงในกรณีที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อยู่ระหว่างกึ่งชื้นกึ่งแห้ง (Semi - Dry) นั่นคือ ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึงร้อยละ 60 และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศมาก



รูปที่ 2.5 ภาพจำลองแสดงสถานะของความชื้นของโพรงในคอนกรีต

2.1.9.1 ผลของการเกิดคาร์บอนเนชั่น

คาร์บอนเนชั่นทำให้เกิดผลที่สำคัญ 3 ประการ คือ

- 1) ทำให้ความพรุนของคอนกรีตบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชั่นลดลง
- 2) ทำให้ความแตกต่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชั่นต่ำลง เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น

3) ทำให้เกิดการหดตัว ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ภายใต้อิทธิพลของแรงอัดที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งหรือจากการที่ทำให้แคลเซียมซิลิเกต (C-S-H) เกิดเสียน้ำ (Dehydrate) ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการหดตัว

ผลของการเกิดคาร์บอนเนชั่นทั้ง 3 ประการนี้ ประการที่ 1 อาจเป็นผลดีต่อกอนกรีตในเรื่องของความคงทน แต่ในภาพรวมของงานคอนกรีตเสริมเหล็กแล้ว คาร์บอนเนชั่นจะมีผลเสียมากกว่าผลดี ประการที่ 2 จะมีผลเสียต่อความคงทนของคอนกรีตมากที่สุด ประการที่ 3 จะมีผลเสียรองลงมา

2.1.9.2 การทดสอบคาร์บอนเนชั่น

การทดสอบคาร์บอนเนชั่นสามารถทำได้หลายวิธี แต่สำหรับการทดสอบครั้งนี้ใช้วิธีที่แนะนำโดย RILEM คือการทำน้ำยาฟีนอล์ฟทาไลน์ในแอลกอฮอล์ฉีดลงบนผิวคอนกรีตที่แตกออกใหม่ๆ ที่ต้องการวัดระยะคาร์บอนเนชั่น คอนกรีตที่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์อยู่จะปรากฏเป็นสีชมพู ส่วนคอนกรีตที่เกิดคาร์บอนเนชั่นจะไม่มีสี

2.1.10 การเปลี่ยนแปลงสภาพของคอนกรีตที่มีต่อคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยไอออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) เป็นตัวกลางที่ทำให้ความแตกต่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิม และหลังถึงจุดวิกฤตแล้ว ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอจะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้

2.1.10.1 แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่นมีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย (โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทรายจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ที่มีมากมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว อย่างไรก็ตามได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์ที่ยอมรับได้ในคอนกรีตสด (วสท. 1014 - 40) แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน ซึ่งคลอไรด์อาจเข้าสู่คอนกรีตโดยวิธีดังต่อไปนี้

- 1) การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ เป็นส่วนประกอบ (Capillary Suction)

2) การแพร่ของอออนคลอไรด์ (Chloride Diffusion) จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าไปสู่ความเข้มข้นของคลอไรด์ภายในเนื้อคอนกรีต

3) การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยแรงดันของน้ำ โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณใกล้ผิวสัมผัส กับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เช่น ทะเลจะมีความเข้มข้นคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีตสูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อม ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Chloride Condensation จะมี 2 ลักษณะดังนี้

1. ในกรณีของสภาวะเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล ในขณะที่บริเวณผิวหน้าคอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาะน้ำซึ่งจะระเหยออกจากผิวคอนกรีต ทั้งเกลือไว้ในบริเวณผิวคอนกรีตที่แห้ง แต่พอคอนกรีตเข้าสู่สภาวะเปียก น้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว

2. ในกรณีของสภาวะเปียกตลอดเวลาในน้ำทะเลหรือน้ำใต้ดินที่มีเกลือ ในกรณีนี้คลอไรด์ในสิ่งแวดล้อม สามารถถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า เนื่องจากผิวของช่องว่างในคอนกรีตซึ่งมักจะเป็นผลผลิตทางไฮเดรชัน เช่น (C-S-H) จะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นบวกสามารถดึงคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีประจุลบเข้าไปได้ อย่างไรก็ตามในสภาพของสิ่งแวดล้อมที่เปียกตลอดเวลา ถึงแม้คลอไรด์จะเข้าไปในคอนกรีตได้ไม่มากก็มักไม่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริม เนื่องจากไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการเกิดสนิม ยกเว้นแต่ในบริเวณที่ติดกับคอนกรีต จะมีส่วนที่มีสภาวะแห้งได้ด้วย (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วสท. 2543)

2.1.10.2 กลไกการทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์

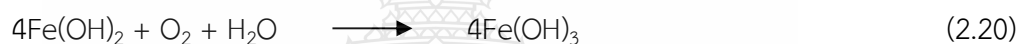
โดยปกติเหล็กเสริมในคอนกรีต จะมีชั้นของฟิล์มออกไซด์ (Protective Passivity Layer) บางๆเคลือบอยู่ที่ผิวของเหล็กเสริม เรียกว่า ฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก (γ - Fe_2O_3) แต่เมื่อใดก็ตามหากคลอไรด์อออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนถึงผิวของเหล็กเสริมได้ ชั้นของฟิล์มออกไซด์ดังกล่าวจะถูกทำลาย จนกระทั่งเมื่อใดที่ชั้นฟิล์มดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าระดับวิกฤต (Critical Value) เหล็กเสริมในบริเวณนั้นจะเกิดสนิม ซึ่งเรียกว่า (Depassivation) และในขณะเดียวกัน หากบริเวณดังกล่าวมีออกซิเจนและความชื้นในปริมาณที่พอเหมาะกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีจะเกิดขึ้น กล่าวคือ บริเวณที่ฟิล์มถูกทำลายจะมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วบวก (Anode) ซึ่งจะเกิด “ปฏิกิริยาอานอดิก” (Anodic Reaction) ดังสมการต่อไปนี้



อิเล็กตรอน (e^-) ที่เกิดขึ้น จะวิ่งผ่านไปยังฟิล์มที่ไม่ได้ถูกทำลาย ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วบวก (Cathode) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนจะเกิดเป็น ไฮดรอกไซด์ไอออน ($(\text{OH})^-$) เป็น “ปฏิกิริยาคาโธดิก” (Cathodic Reaction) ดังสมการต่อไปนี้



และในขณะเดียวกัน Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วลบ (Anode) ส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจน จนกระทั่งได้ เฟอริกไฮดรอกไซด์ (Ferric Hydroxide) ดังสมการต่อไปนี้



จากนั้น Fe^{2+} ที่เหลืออยู่อีกส่วนหนึ่งที่ขั้วลบนั้นจะทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดเป็น เฟอริกคลอไรด์ (Ferric Chloride) และเมื่อสารประกอบดังกล่าวทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดสนิมเพิ่มเติมขึ้นมา ดังสมการต่อไปนี้



โดยกระบวนการในการเกิดสนิม จากสาเหตุของการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนผ่านเนื้อคอนกรีตนั้น สามารถแบ่งได้ 2 ขั้นตอน คือ

1) Initial Period หรือ ระยะเวลาช่วงแรก (t_0) หมายถึง ระยะเวลาเริ่มตั้งแต่หล่อคอนกรีตเสร็จจนถึงเวลาที่เหล็กเสริมคอนกรีตเริ่มเกิดสนิม โดยในช่วงนี้คลอไรด์ไอออนจะแพร่ผ่านเข้ามาสะสมในเนื้อคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤต นอกจากนั้นออกซิเจนและน้ำจะซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปยังเหล็กเสริมแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น ซึ่งระยะเวลาช่วงแรก (t_0) นี้จะใช้เวลามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ความสามารถซึมผ่านได้ของคอนกรีต กำลังของคอนกรีต และความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม

2) Propagation Period หรือ ระยะเวลาช่วงขยายตัวต่อเนื่อง (t_1) หมายถึง ช่วงระยะเวลาของการพัฒนาการเกิดสนิมบนเหล็กเสริมภายในคอนกรีต เป็นช่วงที่เกิดกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมบนเหล็กอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งโครงสร้างอาคารเกิดการวิบัติ หรืออยู่ในสภาพที่ไม่ปลอดภัยในการใช้งาน จะเห็นได้ว่าคลอไรด์ไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำทะเลหรือน้ำกร่อยนั้นจะมีผลกระทบต่อการกระตุ้นให้เกิดสนิมบนเหล็กเสริมได้ แต่สนิมบนเหล็กกลับไม่มีคลอไรด์ไอออนเป็นส่วนประกอบเลย โดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้น จะทำให้เหล็กเสริมบริเวณขั้วลบกักตัวกร่อน ทำให้เหล็กมีขนาดหน้าตัดเล็กลง และเหล็กเสริมบริเวณขั้วบวกก็จะเกิดสนิม ซึ่งสนิมบนเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดขึ้น จะมีการพัฒนาเพิ่มปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ ประมาณ 4-6 เท่า ทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอยู่กะเทาะออก เมื่อการกัดกร่อนเกิดเพิ่มมากขึ้น คอนกรีตจะหลุดร่อนออกเป็นชั้นๆ (Delamination) ทำให้เกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต เป็นผลทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนี้สูญเสียความสามารถในการรับกำลังในที่สุด ส่งผลให้โครงสร้างขาดความมั่นคงแข็งแรงและความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลง อัตราการพัฒนากการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมโครงสร้างนั้นๆ

นอกจากการซึมผ่านของน้ำที่มีคลอไรด์ไอออนผ่านเนื้อคอนกรีต จะเป็นสาเหตุของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ปฏิริยาคาร์บอนชั้นยังเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสนิมขึ้นในเหล็กเสริมคอนกรีต ซึ่งปฏิริยาคาร์บอนชั้นนี้จะลดความเป็นด่างของคอนกรีตลง ซึ่งความเป็นด่างของคอนกรีตนี้จะเป็นตัวช่วยป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมเกิดสนิมโดยปกติ ค่า pH ของคอนกรีตจะอยู่ระหว่าง 12 -13 หากค่า pH ก็จะเป็นค่าที่สามารถบอกได้ว่ามีโอกาสเกิดสนิมได้มากน้อยเพียงใด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ในระดับต่างๆ

ค่า pH ของคอนกรีต	สภาพของสนิมภายในเหล็กเสริมคอนกรีต
ต่ำกว่า 9.5	เริ่มเกิดสนิมเล็กน้อยที่ผิว (ฟิล์มที่ผิวเหล็กยังไม่หาย)
8.0	ฟิล์มที่เคลือบผิวเหล็กหายไป
ต่ำกว่า 7.0	เกิดสนิมอย่างรุนแรงที่ตัวของเหล็กเสริม

2.1.12.3 ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต

การที่คลอไรด์ไอออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้นั้น จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ สภาพการบ่มคอนกรีต อุณหภูมิ ชนิดของแคตไอออน ความ

เข้มข้นของเกลือคลอไรด์ และสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างนั้นเผชิญ เป็นต้น โดยปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในเนื้อคอนกรีตนั้นจะเป็นผลรวมของคลอไรด์ 2 ประเภท ได้แก่

1) คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed Chloride) คือ คลอไรด์ที่ถูกยึดจับให้อยู่ในผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน (Hydration Products) เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Friedal's Salt) หรือ $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Calcium Chloroferrite) และเกิดปฏิกิริยา โดยเปลี่ยนไปในรูปของ Calcium Chloro-Aluminate Hydrate ที่เรียกว่า Friedel's Salt หรือคลอไรด์ถูกยึดจับไว้ที่ผิวของ Gel Pores และบางส่วนอาจถูกยึดจับไว้ที่ผิวของผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Production) ของเถ้าลอย (Fly Ash) ซึ่งคลอไรด์ประเภทนี้ไม่มีผลต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface Force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

2) คลอไรด์อิสระ (Free Chloride) คือ คลอไรด์ที่มีสภาพเป็นสารละลาย ซึ่งละลายอยู่ในน้ำ ภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore Solution) โดยคลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ซึ่งถ้ามีคลอไรด์ประเภทนี้ในปริมาณที่มากพอก็จะสามารถทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ สำหรับโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่เปียกสลับแห้ง เช่น บริเวณคลื่นละอองน้ำ (Splash Zone) หรือ บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Zone) จะได้รับผลกระทบจากการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนที่ค่อนข้างรุนแรงกว่า โครงสร้างที่อยู่ในสภาพเปียกตลอดเวลา เช่น บริเวณใต้ทะเล (Submerged Zone)

2.1.12.4 การแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต

เนื่องจากคลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำทะเล จึงทำให้การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตถือเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากคลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบต่างๆของคอนกรีตได้ ซึ่งจะมีผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยจะทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเสื่อมสภาพลง โดยการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถเกิดขึ้นได้จากสาเหตุต่างๆ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้น แรงดันน้ำ และประจุไฟฟ้า นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับแรงขับเคลื่อนของกลไก และธรรมชาติของสสารที่เคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้นกลไกสำคัญของการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปยังเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งได้ 4 ประเภท ดังนี้

1) การแพร่ (Diffusion) โดยการแพร่จะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนเข้าไปยังโพรงของคอนกรีตที่อึดตัว แรงขับเคลื่อนของคลอไรด์ไอออนในกลไกนี้จะเกิดจากความเข้มข้นของไอออน โดยคลอไรด์ไอออนจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนสูงไปยัง

บริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนต่ำ ซึ่งจะเป็นไปตามกฎข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's Second Law Of Diffusion) ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial C_t(x,t)}{\partial t} = - D_a \frac{\partial^2 C_f(x,t)}{\partial x^2} \quad (2.21)$$

โดยที่ $C_t(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)

$C_f(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)

D_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม.²/ปี)

x คือ ระยะทางจากผิวด้านนอกของคอนกรีต (ซม.)

t คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

ทั้งนี้ คำตอบของสมการที่ (2.21) สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (2.22) ซึ่งเป็นคำตอบที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันความผิดพลาด (Error Function)

$$C_d = \frac{(C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] + C_0}{B} \times 100 \quad (2.22)$$

โดยที่ C_d คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผิวเหล็กเสริม (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

C_s คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (กก./ม³)

C_0 คือ ปริมาณคลอไรด์ในปฏิกิริยาสวนผสม

C คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริม (ซม.)

D_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม.²/ปี)

t คือ อายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปี)

B คือ น้ำหนักวัสดุประสานในส่วนผสมคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (กก./ม.³)

2) การดึงดูดแบบคาปิลลารี (Capillary Suction) โดยการดึงดูดแบบคาปิลลารีนี้สามารถดึงน้ำเกลือผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กๆในเนื้อบริเวณผิวของคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลจะอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง เมื่อคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแห้งถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล น้ำทะเลจะถูกดึงเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กๆที่อยู่ในเนื้อของคอนกรีตโดยกลไกการดึงดูดแบบคาปิลลารี ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และใช้ระยะเวลาอันสั้น

3) การดึงดูดไอออน (Ion Adsorption) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลา พบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สารละลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับความเข้มข้นของคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดไอออนจะเกิดขึ้นเนื่องจาก บริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตที่มีประจุไฟฟ้าบวกบริเวณที่ผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีตจะดึงดูดคลอไรด์ไอออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่ในบริเวณนั้น

4) แรงดันน้ำ (Hydraulic Pressure) โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน อุโมงค์ เป็นต้น ความแตกต่างของ Hydraulic Head สามารถทำให้น้ำซึ่งมีคลอไรด์ไอออนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปภายในคอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic Head สูงไปยังบริเวณที่มี Hydraulic Head ต่ำและเนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ เช่น คอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเล จะเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการแพร่เป็นหลัก โดยที่ในคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอกที่คอนกรีตนั้นสัมผัสอยู่จะแพร่จากคอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์สูง ไปสู่คอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ต่ำ และเมื่อคลอไรด์เข้ามาอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตแล้ว คลอไรด์ก็จะแพร่จากที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงไปสู่ที่ที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ต่ำ จึงทำให้การกระจายตัวของความเข้มข้นคลอไรด์เป็นไปตามระดับความลึกจากผิวภายนอกของคอนกรีตเข้าไปภายในเนื้อของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นจะกล่าวถึงความเป็นไปได้ในการแทนที่เถ้าลอยเปียกในเพสต์มอร์ตาร์และคอนกรีต คุณสมบัติพื้นฐานและการรับกำลัง ความคงทนของคอนกรีต

2.2.1 คุณสมบัติพื้นฐานและการรับกำลัง

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ อินทรชัย หอวิจิตร (2528) พบว่า กำลังอัดระยะต้นของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่เกิด แต่เมื่อนานไปกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยจะดีขึ้น เพราะ

เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานแล้ว และการใช้เถ้าลอยมาเป็นส่วนผสมที่พอเหมาะ จะต้องผสม ไม่เกินร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

2.2.2 ความคงทนของคอนกรีต

Tazawa and Miyazawa [10] ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการหดตัวของคอนกรีต จากการศึกษาพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และอัตราส่วนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีผลต่อการหดตัวของคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่ง C_3A และ C_3AF เป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อการหดตัวของคอนกรีตอย่างมาก

Tangtermsirikul, 1998 [11] ศึกษาผลของเถ้าลอยที่มีองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน รวมถึงขนาดของอนุภาคและปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ ต่อการหดตัวของคอนกรีตของเพสต์ จากการศึกษาพบว่า เถ้าลอยที่มีปริมาณ SO_3 สูง การหดตัวจะต่ำ เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม มีการหดตัวสูงกว่าเพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าลอย ในทางตรงกันข้าม เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดต่ำกว่าปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม มีการหดตัวต่ำกว่าเพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าลอย จากผลการทดลองสรุปได้ว่าอนุภาคองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยที่มีผลต่อการหดตัวของเพสต์แล้ว ขนาดของอนุภาค ซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างของช่องว่าง (Pore Structure) ก็ยังส่งผลต่อการหดตัวเช่นกัน ดังนั้นโครงสร้างของช่องว่างจึงจำเป็นต่อการสร้างแบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม

Bissonnette, et al, 1999 [12] ศึกษาอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ ขนาดของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาณของเพสต์ ต่อการหดตัวของเพสต์และมอร์ต้า จากผลการทดสอบพบว่า การหดตัวของเพสต์มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ จากขนาดของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ (50x50x400 มม. และ 4x8x32 มม.) พบว่า ความชื้นสัมพัทธ์ไม่มีผลต่อค่าการหดตัวสูงสุดของตัวอย่าง จากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในช่วงที่ใช้ทดสอบ (0.35-0.50) พบว่า มีความสัมพันธ์เพียงเล็กน้อยกับการหดตัว ในขณะที่ปริมาณเพสต์ มีผลอย่างมากต่อการหดตัว

Chindapasirt และคณะ 2004 [13] พบว่า เถ้าลอยที่มีความละเอียดมากขึ้นจะมีค่ากำลังอัดเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน การใช้เถ้าลอยช่วยลดค่าการหดตัวของแบบแห้ง โดยเถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงช่วยลดการหดตัวได้ดีกว่าเถ้าลอยที่มีความละเอียดต่ำกว่า เถ้าลอยช่วยลดการขยายตัวของคอนกรีตจากผลของซัลเฟต

H.Al-Khayat ,M.N. Haque and N.I. Fattuhi [14] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Concrete Carbonation in Arid Climate มีการหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ดังนี้ 0.45-0.80 ทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชันในสภาพแวดล้อมจริง พบว่า อัตราการเกิดระยะคาร์บอนเนชันจะมีมาก

ขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงขึ้น และในส่วนของกำลังอัด พบว่า ระยะคาร์บอนเนชั่นมีค่าผกผันกับค่ากำลังอัด

N.I. Fattuhi [15] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Carbonation of Concrete as Affected By Mix Constituents and Initial Water Curing Period มีการหล่อคอนกรีตตัวอย่างทดสอบแบบเร่งในห้องปฏิบัติการโดยอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้ 0.7, 0.6 และ 0.4 ทำการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่นที่ 1, 3, 7, 21 และ 28 วัน พบว่า อัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นจะมีมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงขึ้น

J. Khunthongkeaw ,S. Tangtermsirikul and T. Leelawat [16] ได้ทำการศึกษาเรื่อง A Study on Carbonation Depth Prediction For Fly Ash Concrete มีการใช้เถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของปริมาณ C_2O ที่ต่างกันสำหรับการหล่อคอนกรีตทดสอบ โดยนำตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยไปทดสอบในสภาวะเร่งและในสภาวะแวดล้อมจริงต่างๆ คือ ในเขตเมือง ชนบท และชายทะเล พบว่า คอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ C_2O สูงจะมีการเกิดคาร์บอนเนชั่นต่ำกว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ C_2O ต่ำ ส่วนการเกิดคาร์บอนเนชั่นของสภาวะแวดล้อมในเมืองสูงกว่าสภาวะแวดล้อมอื่นๆนอกจากนี้ พบว่า การแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ก็ทำให้เกิดคาร์บอนเนชั่นได้เร็วกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าลอย

Thomas [17] ศึกษาประสิทธิภาพของคอนกรีตที่ให้เถ้าลอยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วน ที่เผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กเผชิญในสภาวะน้ำขึ้นน้ำลงในช่วงระยะเวลา 1 ถึง 4 ปี เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ตำแหน่งต่างๆ ของเหล็กเสริมในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เหล็กเสริมที่มีคุณภาพ และการใช้เถ้าลอยในปริมาณต่างๆ พบว่า ปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤตมีค่าที่ลดลงเมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอยสูงขึ้น โดยจะมีค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤต 0.70%, 0.65%, 0.50%, และ 0.20% โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 0%, 15%, 30% และ 50% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤต ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถป้องกันเหล็กเสริมภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลได้เนื่องจากเถ้าลอยจะเพิ่มความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์อออน

ยุงยุท วัฒนกุลและคณะ (2553) ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ (ทั้งประเภทที่ 1 และ 5) ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่ากรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ในขณะที่การก่อตัวของเพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างกับกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน สำหรับค่าการยุบตัวของคอนกรีตนั้น มีแนวโน้มที่จะผกผันกับค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ และนอกจากนี้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยจะมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนส่วน

กรณีแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนจะให้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตไม่แตกต่างกับกรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน สำหรับการขยายตัวในสารละลายไฮเดียมซัลเฟตของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มีแนวโน้มมากกว่ากรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการขยายตัวของคอนกรีตเถ้าลอยและคอนกรีตผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างจากกรณีปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน สำหรับการใช้วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน) พบว่า การขยายตัวของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงในปริมาณต่ำจะทำให้ค่าการขยายตัวของคอนกรีตมากขึ้น แต่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูงๆ จะให้ค่าการขยายตัวน้อยลง



บทที่ 3

วิธีการศึกษา

สำหรับวิธีการศึกษานี้ประกอบด้วย วัสดุที่ใช้ในการศึกษา รายละเอียดวิธีการศึกษา สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ เพสต์ และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C 150 โดยมีลักษณะเป็นปูนซีเมนต์ใหม่และไม่จับตัวเป็นก้อน

3.1.2 เถ้าลอย (Fly Ash) ที่ใช้ในการศึกษานี้ นำมาจากโรงไฟฟ้า BLCP จ. ระยอง คือ เถ้าลอยที่ได้จากถ่านหินที่ผสมระหว่าง Hunter Valley และ Spring Creek (HS) และ เถ้าลอยที่ได้จากถ่านหินที่ผสมระหว่าง Hunter Valley และ Melawan (HM) โดยเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิดมีปริมาณ CaO ต่ำ (Low CaO)

3.1.3 ทราย (Sand) ใช้ทรายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกจนสะอาด นำไปอบและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และปรับทรายให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

3.1.4 หิน (Stone) เลือกที่ไม่มีสิ่งเจือปน นำไปล้างด้วยน้ำสะอาดและร่อนค้ำตะแกรงเบอร์ 4 และปรับหินให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

3.1.5 น้ำ (Water) ในการศึกษาครั้งนี้ใช้น้ำประปาที่สะอาด

3.1.6 สารผสมเพิ่ม ที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ สารลดน้ำพิเศษ ประเภท F (Superplasticizer)

3.1.7 สารคลอไรด์ที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย โซเดียมคลอไรด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับรายละเอียดวิธีการศึกษาประกอบด้วย วิธีการเตรียมเถ้าลอย สมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ การขยายตัว การหดตัว การเกิดคาร์บอนชั่น ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 วิธีการเตรียมเถ้าลอย

สำหรับเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษามี 2 ลักษณะ คือเถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียก

3.2.1.1 เถ้าลอยแห้ง

ในส่วนของเถ้าลอยแห้งใช้เถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง คือ HS และ HM (ดังรูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 เถ้าลอยแห้ง

3.2.1.2 เถ้าลอยเปียก

ในส่วนของเถ้าลอยเปียกนั้นใช้เถ้าลอยเปียก 2 ลักษณะ คือ เถ้าลอยเปียกจากแหล่งผลิต และเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการโดยมีรายละเอียดดังนี้

1) เถ้าลอยเปียกจากแหล่งผลิต

โดยเถ้าลอยเปียกจากแหล่งผลิตเป็นเถ้าลอยที่ไม่มีการนำมาใช้ซึ่งถูกทิ้งใกล้บริเวณโรงไฟฟ้า อาจสัมผัสกับความชื้นของสภาพแวดล้อมและน้ำฝน บางครั้งจะต้องมีการใส่น้ำเข้าไปก่อนที่จะนำไปทิ้งเพื่อไม่ให้เกิดการฟุ้งกระจาย โดยเถ้าลอยเปียกจากแหล่งผลิตทั้ง 2 ชนิด (HS และ HM) ในครั้งนี้นั้นใช้เถ้าลอยที่ระยะสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ (1W) 1 เดือน (1M) และ 3 เดือน (3M) จากที่เถ้าลอยสัมผัสความชื้นดังกล่าวทำให้เถ้าลอย HS มีปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 10 29 และ 41 และเถ้าลอย HM มีปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 14 24 และ 40 ตามลำดับ

2) เถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ

สำหรับเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการทั้ง 2 ชนิด (HS และ HM) ได้เตรียมเถ้าลอยที่ระยะสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ (1W) 1 เดือน (1M) และ 3 เดือน (3M) โดยแต่ละความชื้นมีปริมาณความชื้น ร้อยละ 25 45 และ 65 (ดังรูปที่ 3.2) ตามลำดับ



(ก) ปริมาณความชื้นร้อยละ 25



(ข) ปริมาณที่ความชื้นร้อยละ 45



(ง) ปริมาณที่ความชื้นร้อยละ 65

รูปที่ 3.2 แก้วลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ

3.2.2 สมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์และแก้วลอยที่ใช้

สำหรับสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์และแก้วลอยประกอบด้วย

3.2.2.1 ความถ่วงจำเพาะ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C128

3.2.2.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงสุดของอนุภาค โดยใช้เครื่อง Scanning

Electronic Microscope (SEM)

3.2.2.3 องค์ประกอบทางเคมีทดสอบโดยวิธี X-ray Fluorescence

(XRF) ตามมาตรฐาน ASTM C311

3.2.3 การขยายตัวโดยวิธีอโตเคลฟของเพสต์

สำหรับการทดสอบการขยายตัวอโตเคลฟของเพสต์ ทำตามมาตรฐาน ASTM C151/C151M หรือมอก.15 เล่ม 11 โดยใช้ตัวอย่างเพสต์ขนาด 2.5 x 2.5 x 28.5 ซม. และใช้ปริมาณน้ำเท่ากับปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 187 ด้วยวิธีเข็มไวแคท (Vicat Apparatus) (รูปที่ 3.3) หลังจากนั้นให้นำตัวอย่างเพสต์ที่หล่อพร้อมบ่มเสร็จแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง \pm 30 นาที ออกมาจากอากาศชื้นแล้ววัดความยาวทันทีด้วยเครื่อง (Length Comparator) (รูปที่ 3.4) แล้วนำใส่อโตเคลฟที่อุณหภูมิห้อง (รูปที่ 3.5) โดยวางตัวอย่างเพสต์บนตะแกรงและให้ผิวทุกด้านของตัวอย่างเพสต์ถูกไอน้ำชนิดอิ่มตัวได้ (Saturated Steam) อโตเคลฟจะต้องมีน้ำเพียงพอที่จะระเหยเป็นไอน้ำชนิดอิ่มตัวได้ตลอดระยะเวลาหนึ่งโดยใส่น้ำในอโตเคลฟร้อยละ 7 ถึง 10 ของปริมาณอโตเคลฟ เพื่อไล่อากาศในอโตเคลฟออกในระยะแรกที่ทำให้ร้อน ให้เปิดลิ้นที่อากาศไว้จนกระทั่งไอน้ำเริ่มผ่านออกมาจึงปิดลิ้น แล้วเพิ่มอุณหภูมิของอโตเคลฟในอัตราที่ทำให้ความดันของไอน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 2 เมกะปาสคาล ภายในเวลา 45 ถึง 75 นาที หลังจากเริ่มให้ความร้อน ให้ควบคุมความดันอยู่ในระดับ 2 ± 0.07 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อครบ 3 ชั่วโมง หยุดให้ความร้อนแล้วปล่อยให้อโตเคลฟเย็นลงจนความดันลดต่ำกว่า 0.07 เมกะปาสคาล เมื่อครบ 1 1/2 ชั่วโมง จึงค่อยๆเปิดลิ้นระบายอากาศให้ความดันที่ค้างอยู่ในอโตเคลฟเท่าความดันบรรยากาศ ต่อจากนั้นให้เปิดฝาอโตเคลฟ นำตัวอย่างเพสต์ออกไปแช่ในน้ำที่มีอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แล้วทำให้

อุณหภูมิน้ำที่แช่ตัวอย่างเพสต์ลดลงในอัตราสม่ำเสมอจนถึง 23 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 15 นาที โดยค่อยๆเติมน้ำเย็นลงไป ปล่อยให้ตัวอย่างเพสต์ให้แช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ต่อไปอีก 15 นาที แล้วจึงทำให้ตัวอย่างเพสต์แห้งและวัดความยาวอีกครั้ง วิธีการคำนวณหาค่าการขยายตัวของปูนซีเมนต์ ให้คำนวณจากสมการดังนี้

$$\text{ร้อยละการขยายตัวของปูนซีเมนต์} : E = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่ l_1 = ความยาวหลังการให้ความร้อน, มม.

l_0 = ความยาวก่อนการให้ความร้อน, มม.

การคำนวณที่ได้ให้มีความละเอียดถึง 0.01 สำหรับความยาวหลังการให้ความร้อนลดลงให้ใช้เครื่องหมายลบหน้าค่าร้อยละ



รูปที่ 3.3 เครื่องมือไวแคต (Vicat Apparatus)



รูปที่ 3.4 เครื่องมือเปรียบเทียบความยาว (Length Comparator)



รูปที่ 3.5 หม้อต้ม Autoclave

3.2.4 การหัดตัวแบบบอโตจีนีสและแบบแห้งของมอร์ตาร์

3.2.4.1 สำหรับการทดสอบการหัดตัวแบบบอโตจีนีสของมอร์ตาร์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 157 โดยใช้แบบหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ ขนาด $2.5 \times 2.5 \times 28.5$ ซม. (ดังรูปที่ 3.6) และใช้ปริมาณน้ำ W/B เท่ากับ 0.35 และ 0.55 ตามลำดับ หลังจากหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์เสร็จแล้ว ทำการถอดแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำฟรอยด์เคลือบผิวตัวอย่างมอร์ตาร์ทั้งก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์แล้วหุ้มด้วย ฟรอยด์ นำตัวอย่างมอร์ตาร์วางไว้ในห้องปฏิบัติการ และทำการวัดการหัดตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อายุ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14, 28, 42, 56 และ 91 วัน และทุกๆอายุของการวัดการหัดตัวมีการชั่งน้ำหนักตัวอย่างเพื่อดูการระเหยออกของน้ำในมอร์ตาร์ วิธีการคำนวณหาค่าการหัดตัวแบบบอโตจีนีสให้คำนวณจากสมการดังนี้

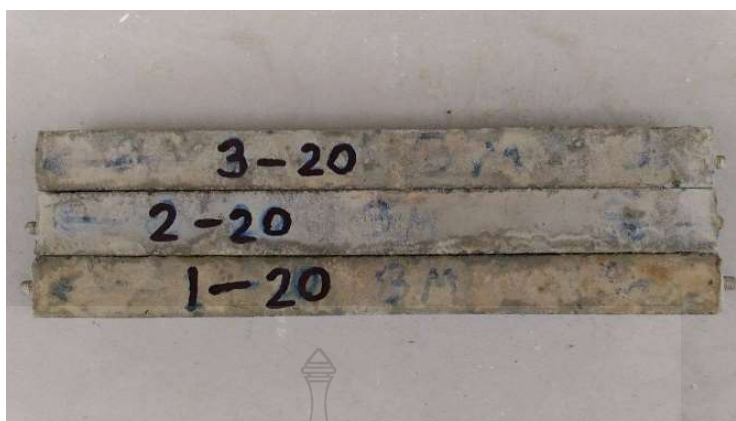
$$\text{ร้อยละการหัดตัวแบบบอโตจีนีส } \Delta L = \frac{L_i - L_x}{L_g} \times 100 \quad (3.2)$$

โดยที่ ΔL = ค่าการหัดตัวแบบบอโตจีนีส (ร้อยละ)

L_x = ค่าความยาวของตัวอย่างคอนกรีตเทียบกับแท่งโลหะ ความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุต่างๆ (มิลลิเมตร)

L_i = ค่าความยาวของตัวอย่างคอนกรีตเทียบกับแท่งโลหะ ความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้น (มิลลิเมตร)

L_g = ค่าความยาวของ gauge length หรือเท่ากับ 285 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 2.5 x 2.5 x 28.5 เซนติเมตร

3.2.4.2 สำหรับการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 596-96 โดยใช้แบบหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ ขนาด 2.5 x 2.5 x 28.5 ซม. และใช้ปริมาณน้ำ W/B เท่ากับ 0.35 และ 0.55 ตามลำดับ หลังจากหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์เสร็จแล้ว ทำการถอดแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 7 วัน โดยควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการบ่ม 30 ± 2 °C หลังจากครบอายุการบ่มในน้ำ นำชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ทำการทดสอบขึ้นจากน้ำ แล้วเช็ดผิวให้แห้งด้วยผ้า หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์วัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน (ดังรูปที่ 3.4) ซึ่งค่าที่วัดได้นี้จะเป็นค่าความยาวเริ่มต้น เมื่อวัดค่าความยาวเสร็จแล้ว นำชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์บ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย 30 ± 2 °C โดยวางชิ้นตัวอย่างบนโต๊ะมีระยะห่างของแต่ละชิ้นไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14, 28, 42, 56 และ 91 วัน วิธีการคำนวณหาค่าการหดตัวแบบแห้ง ให้คำนวณจากสมการดังนี้

$$\text{ร้อยละการหดตัวแบบแห้ง} \quad \Delta L = \frac{L_i - L_x}{L_g} \times 100 \quad (3.3)$$

โดยที่ ΔL = ค่าการหดตัวแบบแห้ง (ร้อยละ)

L_x = ค่าความยาวของตัวอย่างคอนกรีตเทียบกับแท่งโลหะ ความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุต่างๆ (มิลลิเมตร)

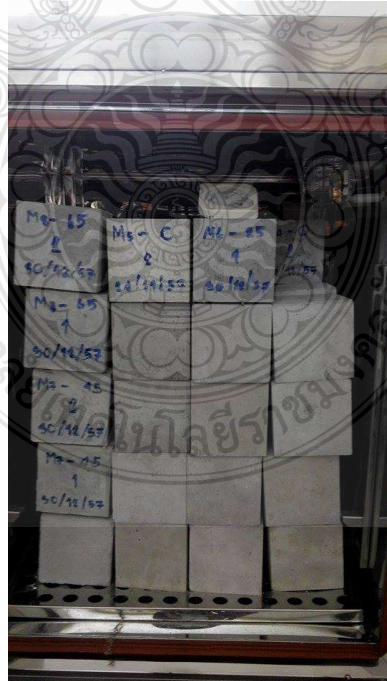
L_i = ค่าความยาวของตัวอย่างคอนกรีตเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้น (มิลลิเมตร)

L_g = ค่าความยาวของ gauge length หรือเท่ากับ 285 มิลลิเมตร

3.2.5 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต

สำหรับการทดสอบการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109 โดยใช้แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10 x 10 x 10 ซม. (ดังรูปที่ 3.7) หลังจากหล่อตัวอย่างคอนกรีตเสร็จแล้ว ทำการถอดแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมง แล้วไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 20 ± 2 °C เป็นเวลา 7 วัน และ 28 วัน อุณหภูมิในระหว่างการบ่มเท่ากับ 30 ± 2 °C หลังจากครบอายุการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 20 ± 2 °C แล้ว นำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่จะทำการทดสอบขึ้นจากน้ำ แล้วทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ที่ผิวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตออกแล้ว เช็ดผิวตัวอย่างคอนกรีตด้วยผ้าสะอาด และทิ้งไว้จนแห้ง

นำตัวอย่างคอนกรีตไปอบในตู้อบคาร์บอนชั้น (ดังรูปที่ 3.8) ที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ 40,000 ppm อุณหภูมิ 40 °C ความชื้นร้อยละ 55 โดยใช้ระยะเวลาในการอบ 28 วัน และ 56 วัน รอจนครบอายุที่กำหนด จึงนำไปทดสอบหาความลึกของการเกิดคาร์บอนชั้น เมื่อครบอายุที่กำหนดแล้วให้นำตัวอย่างคอนกรีตแบ่งออกเป็น 2 ชิ้น โดยใช้เครื่อง UTM (Universal Testing Machine) (ดังรูปที่ 3.9) จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตมาวางแล้วฉีดยาละลายฟีนอล์ฟทาลีน (ดังรูปที่ 3.10) ที่ก้อนตัวอย่างซึ่งจะปรากฏเป็นสีม่วง ปล่อยให้ทิ้งไว้จนแห้งประมาณ 5 นาที แล้วทำการวัดค่าความลึกบริเวณที่ไม่เกิดสีม่วง โดยใช้เวอร์เนียรวัดทั้ง 4 ด้าน ด้านละ 6 ค่า จดบันทึกค่าความลึกของการเกิดคาร์บอนชั้น แล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยกัน



รูปที่ 3.7 ชิ้นตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10 x 10 x 10 เซนติเมตร



รูปที่ 3.8 ตู้อบคาร์บอนเนชั่น



รูปที่ 3.9 เครื่อง UTM (Universal Testing Machine)



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างคอนกรีตฉีตสารละลายฟีนอล์ฟทาซีน

3.2.6 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

สำหรับการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1202 โดยใช้คอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม. โดยมีหลักในการทดสอบ คือ ป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีแรงดันคงที่ 60 VDC ระหว่างผิวหน้าทั้งสอง ทำการวัดและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งตัวอย่างในการทดสอบในหน่วยของมิลลิแอมแปร์ ไรต์ตลอดระยะเวลา 6 ชั่วโมง และอินทิเกรตเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เป็นค่าแอมแปร์ – วินาที (Ampere – Second) ให้มีหน่วยเป็นคูลอมป์ (Coulomb) ซึ่งจำนวนคูลอมป์ที่วัดได้สามารถใช้จำแนกคอนกรีตตามระดับความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

1) การเตรียมแท่งคอนกรีตให้เตรียมตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. (ดังรูปที่ 3.11) หลังจากแกะแบบแล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มน้ำ 28 วัน เมื่อครบกำหนดการบ่มให้นำออกมาเซ็ดผิวคอนกรีตแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วตัดด้วยเครื่องตัดคอนกรีตให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม.

2) การเตรียมสารละลายที่ใช้ในการทดสอบการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ สำหรับสารละลายโซเดียมคลอไรด์เตรียมโดยใช้โซเดียมคลอไรด์ 30 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ได้สารละลายที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เตรียมโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 กรัมละลายในน้ำกลั่นบริสุทธิ์ 1000 กรัม เพื่อให้ได้สารละลายที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์

3) ขั้นตอนการทดสอบให้นำแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่เซ็ดสะอาดมาประกอบเข้าไปใน Cell (ดังรูปที่ 3.12) เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ เข้าไปในช่องกักเก็บสารละลายแต่ละข้างของ Cell เชื่อมต่อโดยสายไฟระหว่าง Cell กับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (ดังรูปที่ 3.13) ที่มีอุปกรณ์ในการอ่านค่าและพร้อมทำการทดสอบ เปิด Power Supply ตั้งค่าแรงดันไฟฟ้า 60 ± 0.1 VDC ทำการจดบันทึกค่าเริ่มต้น ในระหว่างการทดสอบอุณหภูมิของห้องควรอยู่ที่ $20 - 25$ °C อ่านและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งตัวอย่างที่มีหน่วยเป็นมิลลิแอมแปร์ ทุกๆ 30 นาที เมื่อครบเวลาทำการทดสอบ 6 ชั่วโมง ให้ทำการปิดเครื่องทดสอบ นำค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำการจดบันทึกตลอดการทดสอบ 6 ชั่วโมง มาคำนวณหาปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งตัวอย่างคอนกรีต มีหน่วยเป็นคูลอมป์ โดยการคำนวณแสดงดังนี้

$$(Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + 2I_{360})) \quad (3.4)$$

โดยที่
(Coulomb)

Q = ค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งตัวอย่างคอนกรีต มีหน่วยเป็น คุลอมป์

แรงดันไฟฟ้า

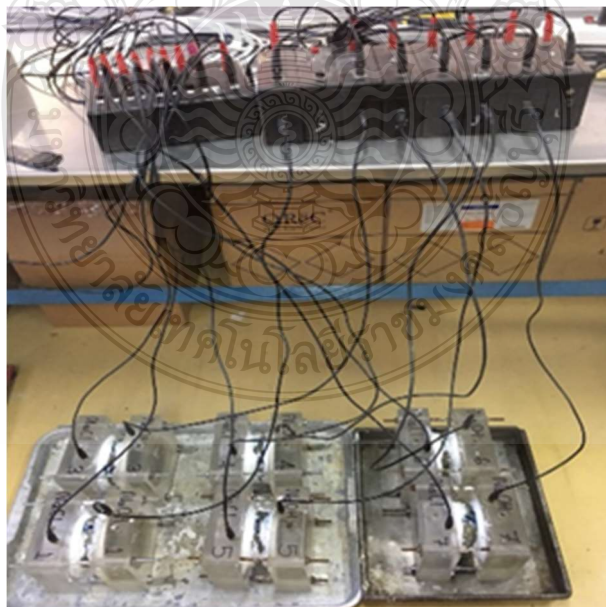
I_0 = แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (Amperes) ทันทีหลังจากที่เปิด

การทดสอบ

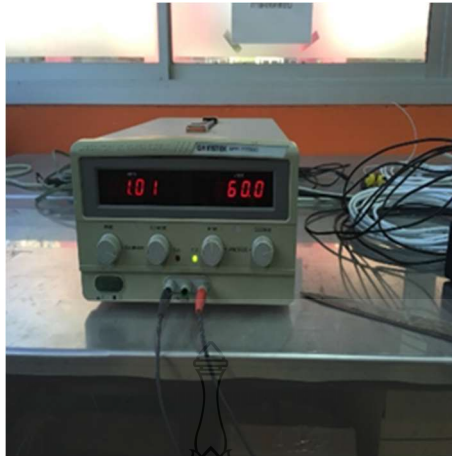
I_t = แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (Amperes) แต่ละช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 3.11 แท่งตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม.



รูปที่ 3.12 ต่อวงจร Cell ตัวอย่าง



รูปที่ 3.13 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

3.3 สัตว์ส่วนผสมของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต

สำหรับการศึกษาศักยภาพด้านความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปี้ยก ในครั้งนี้ได้ใช้ทั้ง สัตว์ส่วนของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต เพื่อใช้ในการศึกษาศักยภาพด้านความคงทนของคอนกรีตผสม เถ้าลอยเปี้ยก โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 สัตว์ส่วนผสมของเพสต์

ในส่วนของเพสต์นั้น ในการศึกษานี้ได้ทดสอบการขยายตัวของออตเคลฟ มี รายละเอียดดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัตว์ส่วนผสมของเพสต์ ที่ใช้ทดสอบการหดตัวของออตเคลฟ

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมของเพสต์ (กรัม)		
		น้ำ	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย
1	P	25.00	1.00	-
2	P-20HS	26.65	0.80	0.20
3	P-20HS-R1W	27.50	0.80	0.20
4	P-20HS-R1M	27.70	0.80	0.20
5	P-20HS-R3M	27.50	0.80	0.20
6	P-20HS-25W-L1W	28.90	0.80	0.20
7	P-20HS-45W-L1W	29.60	0.80	0.20

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของเพสต์ ที่ใช้ทดสอบการหดตัวของโตนเคลฟ (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมของเพสต์ (กรัม)		
		น้ำ	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย
8	P-20HS-65W-L1W	29.20	0.80	0.20
9	P-20HS-25W-L1M	27.40	0.80	0.20
10	P-20HS-45W-L1M	28.40	0.80	0.20
11	P-20HS-65W-L1M	27.90	0.80	0.20
12	P-20HS-25W-L3M	25.40	0.80	0.20
13	P-20HS-45W-L3M	25.90	0.80	0.20
14	P-20HS-65W-L3M	25.10	0.80	0.20
15	P-20HM	26.85	0.80	0.20
16	P-20HM-R1W	27.50	0.80	0.20
17	P-20HM-R1M	27.53	0.80	0.20
18	P-20HM-R3M	27.75	0.80	0.20
19	P-20HM-25W-L1W	29.10	0.80	0.20
20	P-20HM-45W-L1W	29.70	0.80	0.20
21	P-20HM-65W-L1W	29.60	0.80	0.20
22	P-20HM-25W-L1M	27.50	0.80	0.20
23	P-20HM-45W-L1M	28.20	0.80	0.20
24	P-20HM-65W-L1M	28.00	0.80	0.20
25	P-20HM-25W-L3M	25.60	0.80	0.20
26	P-20HM-45W-L3M	25.50	0.80	0.20
27	P-20HM-65W-L3M	24.70	0.80	0.20

หมายเหตุ ปริมาณน้ำที่ใช้เท่ากับปริมาณน้ำที่เหมาะสม

3.3.2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษา

ในส่วนของมอร์ตาร์นั้น ในการศึกษานี้ได้ทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนัส โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และ 0.55 มีรายละเอียดดังตารางที่ 3.2 และทดสอบการหดตัวแบบแห้ง โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 มีรายละเอียดดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ ที่ใช้ทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนัส

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมของมอร์ตาร์ (กรัม)			
		ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ทราย	น้ำ
1	M-0.35	1.00	-	2.75	0.35
2	M-0.35-30HM	0.70	0.30	2.75	0.35
3	M-0.35-30HM-25W-L1W	0.70	0.30	2.75	0.35
4	M-0.35-30HM-45W-L1W	0.70	0.30	2.75	0.35
5	M-0.35-30HM-65W-L1W	0.70	0.30	2.75	0.35
6	M-0.35-30HM-25W-L1M	0.70	0.30	2.75	0.35
7	M-0.35-30HM-45W-L1M	0.70	0.30	2.75	0.35
8	M-0.35-30HM-65W-L1M	0.70	0.30	2.75	0.35
9	M-0.35-30HM-45W-L3M	0.70	0.30	2.75	0.35
10	M-0.35-30HM-65W-L3M	0.70	0.30	2.75	0.35
11	M-0.55	1.00	-	2.75	0.55
12	M-0.55-30HM	0.70	0.30	2.75	0.55
13	M-0.55-30HM-25W-L1W	0.70	0.30	2.75	0.55
14	M-0.55-30HM-45W-L1W	0.70	0.30	2.75	0.55
15	M-0.55-30HM-65W-L1W	0.70	0.30	2.75	0.55
16	M-0.55-30HM-25W-L1M	0.70	0.30	2.75	0.55
17	M-0.55-30HM-45W-L1M	0.70	0.30	2.75	0.55
18	M-0.55-30HM-65W-L1M	0.70	0.30	2.75	0.55
19	M-0.55-30HM-25W-L3M	0.70	0.30	2.75	0.55
20	M-0.55-30HM-45W-L3M	0.70	0.30	2.75	0.55

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ ที่ใช้ทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนัส (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมของมอร์ตาร์ (กรัม)			
		ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ทราย	น้ำ
21	M-0.55-30HM-65W-L3M	0.70	0.30	2.75	0.55
22	M-0.55-30HS	0.70	0.30	2.75	0.55
23	M-0.55-30HS-25W-L1W	0.70	0.30	2.75	0.55
24	M-0.55-30HS-45W-L1W	0.70	0.30	2.75	0.55
25	M-0.55-30HS-65W-L1W	0.70	0.30	2.75	0.55
26	M-0.55-30HS-25W-L1M	0.70	0.30	2.75	0.55
27	M-0.55-30HS-45W-L1M	0.70	0.30	2.75	0.55
28	M-0.55-30HS-65W-L1M	0.70	0.30	2.75	0.55
29	M-0.55-30HS-25W-L3M	0.70	0.30	2.75	0.55
30	M-0.55-30HS-45W-L3M	0.70	0.30	2.75	0.55
31	M-0.55-30HS-65W-L3M	0.70	0.30	2.75	0.55

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ ที่ใช้ทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมของมอร์ตาร์ (กรัม)			
		ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ทราย	น้ำ
1	M-0.55	1.00	-	2.75	0.55
2	M-0.55-30HS	0.70	0.30	2.75	0.55
3	M-0.55-30HS-25W-L1W	0.70	0.30	2.75	0.55
4	M-0.55-30HS-45W-L1W	0.70	0.30	2.75	0.55
5	M-0.55-30HS-65W-L1W	0.70	0.30	2.75	0.55
6	M-0.55-30HS-25W-L1M	0.70	0.30	2.75	0.55
7	M-0.55-30HS-45W-L1M	0.70	0.30	2.75	0.55
8	M-0.55-30HS-65W-L1M	0.70	0.30	2.75	0.55

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ ที่ใช้ทดสอบการหดตัวแบบแห้ง (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมของมอร์ตาร์ (กรัม)			
		ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ทราย	น้ำ
9	M-0.55-30HS-25W-L3M	0.70	0.30	2.75	0.55
10	M-0.55-30HS-45W-L3M	0.70	0.30	2.75	0.55
11	M-0.55-30HS-65W-L3M	0.70	0.30	2.75	0.55
12	M-0.55-30HM	0.70	0.30	2.75	0.55
13	M-0.55-30HM-25W-L1W	0.70	0.30	2.75	0.55
14	M-0.55-30HM-45W-L1W	0.70	0.30	2.75	0.55
15	M-0.55-30HM-65W-L1W	0.70	0.30	2.75	0.55
16	M-0.55-30HM-25W-L1M	0.70	0.30	2.75	0.55
17	M-0.55-30HM-45W-L1M	0.70	0.30	2.75	0.55
18	M-0.55-30HM-65W-L1M	0.70	0.30	2.75	0.55
19	M-0.55-30HM-25W-L3M	0.70	0.30	2.75	0.55
20	M-0.55-30HM-45W-L3M	0.70	0.30	2.75	0.55
21	M-0.55-30HM-65W-L3M	0.70	0.30	2.75	0.55

3.3.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

ในส่วนของคอนกรีตนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 มีรายละเอียดดังตารางที่ 3.4 และทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 มีรายละเอียดดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของคอนกรีต ที่ใช้ในการทดสอบการการเกิดคาร์บอนเนชั่นต่อวัสดุประสาน

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมของคอนกรีตโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม)				
		ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ทราย	หิน	น้ำ
1	C-0.50	372.0	-	784	1003	186
2	C-0.50-30HM	249.5	112	784	1003	166
3	C-0.50-30HM-25W-L1W	249.5	140	784	1003	138
4	C-0.50-30HM-45W-L1W	249.5	162	784	1003	116
5	C-0.50-30HM-65W-L1W	249.5	185	784	1003	93
6	C-0.50-30HM-25W-L1M	249.5	140	784	1003	138
7	C-0.50-30HM-45W-L1M	249.5	162	784	1003	116
8	C-0.50-30HM-65W-L1M	249.5	185	784	1003	93

ตารางที่ 3.5 สัดส่วนผสมของคอนกรีต ที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมของคอนกรีตโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม)				
		ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ทราย	หิน	น้ำ
1	C-0.55	372	-	771	1003	205
2	C-0.55-30HM	260	112	771	1003	205
3	C-0.55-30HM-25W-L1W	260	140	771	1003	177
4	C-0.55-30HM-45W-L1W	260	162	771	1003	155
5	C-0.55-30HM-65W-L1W	260	185	771	1003	132
6	C-0.55-30HM-25W-L1M	260	140	771	1003	177
7	C-0.55-30HM-45W-L1M	260	162	771	1003	155
8	C-0.55-30HM-65W-L1M	260	185	771	1003	132

ตารางที่ 3.5 สัดส่วนผสมของคอนกรีต ที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมของคอนกรีตโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม)				
		ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ทราย	หิน	น้ำ
9	C-0.55-30HM-25W-L3M	260	140	771	1003	177
10	C-0.55-30HM-45W-L3M	260	162	771	1003	155
11	C-0.55-30HM-65W-L3M	260	185	771	1003	132
12	C-0.55-50HM	186	186	771	1003	205
13	C-0.55-50HM-25W-L1W	186	233	771	1003	158
14	C-0.55-50HM-45W-L1W	186	270	771	1003	121
15	C-0.55-50HM-65W-L3W	186	307	771	1003	84

กำหนดให้สัญลักษณ์ที่ใช้ในการแทนความหมายต่างๆ ในการทำวิจัย ดังนี้

- P คือ ตัวอย่างเพสต์ปูนซีเมนต์มาตรฐานปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
- M คือ ตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์มาตรฐานปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
- C คือ ตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์มาตรฐานปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
- 20HS คือ เถ้าลอย Hunter Valley/Spring Creek แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก
- 20HM คือ เถ้าลอย Hunter Valley/Melawan แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก
- 25W, 45W, 65W คือ ความชื้นที่ร้อยละ 25, 45 และ 65 ตามลำดับ
- R1W, R1M, R3M คือ เถ้าลอยที่ได้มาจากโรงไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยองที่สัมผัสความชื้นเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์, 1 เดือน และ 3 เดือน
- L1W, L1M, L3M คือ เถ้าลอยที่สัมผัสความชื้นจากห้องปฏิบัติการเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์, 1 เดือน และ 3 เดือน
- 0.50 คือ อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50
- 0.55 คือ อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์

จากการศึกษาสมบัติสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก ได้พิจารณาผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลโดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 สมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยที่ใช้

โดยเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า BLCP จ. ระยอง คือ เถ้าลอย HS และ HM โดยใช้ทั้งเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียก ในส่วนเถ้าลอยเปียกนั้นใช้เถ้าลอยเปียก 2 ลักษณะ คือ เถ้าลอยเปียกจากแหล่งผลิต และเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ

เถ้าลอยเปียกจากแหล่งผลิต ในครั้งนี้นั้นใช้เถ้าลอยที่ระยะสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ (1W) 1 เดือน (1M) และ 3 เดือน (3M) จากที่เถ้าลอยสัมผัสความชื้นดังกล่าวทำให้เถ้าลอย HS มีปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 10 29 และ 41 และเถ้าลอย HM มีปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 14 24 และ 40 ตามลำดับ ส่วนเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการนั้น เถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด (HS และ HM) ได้เตรียมเถ้าลอยที่ระยะสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ (1W) 1 เดือน (1M) และ 3 เดือน (3M) โดยแต่ละความชื้นมีปริมาณความชื้น ร้อยละ 25 45 และ 65 ตามลำดับ

4.1.1 ความถ่วงจำเพาะ

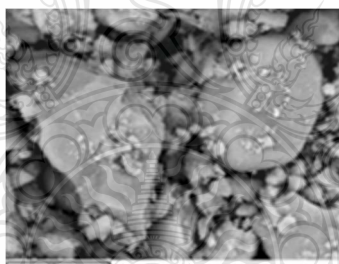
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยแห้งทั้ง HS และ HM พบว่า ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนเท่ากับ 3.15 ส่วนเถ้าลอย HS และ HM มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 และ 2.25 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย

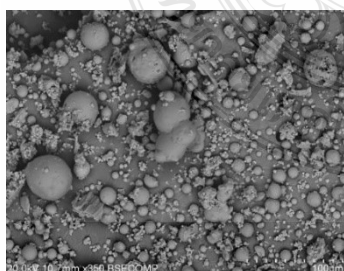
รายการ	ความถ่วงจำเพาะ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	3.15
เถ้าลอย HS	2.23
เถ้าลอย HM	2.25

4.1.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค

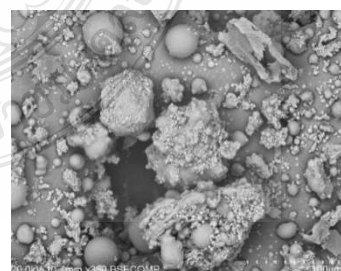
ในครั้งนี้นำวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) ในการถ่ายภาพขยายกำลังสูงของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย โดยรูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าลักษณะรูปร่างของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม มีมิติ ลักษณะผิวขรุขระ ขนาดคละกันไม่แน่นอนแตกต่างกันไปกระจายอยู่ทั่วไป ส่วนรูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคเถ้าลอย HS ทั้งแห้งและเปียก (จากแหล่งผลิตที่ระยะสัมผัสความชื้น 7 วัน) พบว่าลักษณะของอนุภาคของเถ้าลอย HS มีลักษณะกลม แต่มีลักษณะผิวขรุขระไม่เรียบ และมีขนาดของอนุภาคมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอนุภาคของเถ้าลอยแห้ง (รูปที่ 4.2 ก)) กับเถ้าลอยเปียก (รูปที่ 4.2 ข)) จะเห็นว่าเถ้าลอยเปียกอนุภาคจะมีลักษณะจับตัวกันเป็นก้อนและพื้นที่ผิวที่ขรุขระกว่าเถ้าลอยแห้ง ส่วนรูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคเถ้าลอย HM ทั้งแห้งและเปียก (จากแหล่งผลิตที่ระยะสัมผัสความชื้น 7 วัน) พบว่าลักษณะของอนุภาคของเถ้าลอย HM มีลักษณะเช่นเดียวกับอนุภาคของเถ้าลอย HS และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างอนุภาคของเถ้าลอยแห้ง (รูปที่ 4.3 ก)) กับเถ้าลอยเปียก (รูปที่ 4.3 ข)) จะเห็นว่าเถ้าลอยเปียกอนุภาคจะมีลักษณะจับตัวกันเป็นก้อนและพื้นที่ผิวที่ขรุขระกว่าเถ้าลอยแห้ง



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



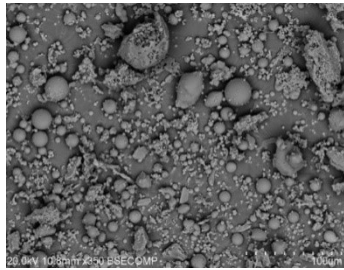
ก) แบบแห้ง



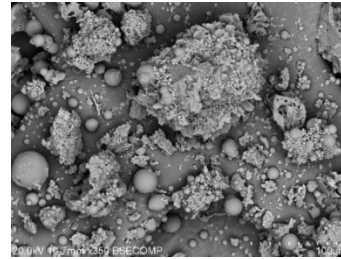
ข) แบบเปียก

(จากแหล่งผลิตที่ระยะสัมผัสความชื้น 30 วัน)

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคเถ้าลอย HS



ก) แบบแห้ง



ข) แบบเปียก

(จากแหล่งผลิตที่ระยะสัมผัสความชื้น 30 วัน)

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคเถ้าลอย HM

4.1.3 องค์ประกอบทางเคมี

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีใช้วิธี X-ray Fluorescence (XRF) โดยตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา สำหรับในครั้งนี้นั้นองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยนั้น ได้วิเคราะห์เถ้าลอยทั้ง HS และ HM โดยเป็นของเถ้าลอยแห้งและเปียก จากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ทั้งที่ระยะสัมผัสความชื้น 3 เดือน

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา

ร้อยละออกไซด์	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย (ระยะเวลาสัมผัสความชื้นที่ 3 เดือน)							
		HS			HM				
		แห้ง	25W	45W	65W	แห้ง	25W	45W	65W
SiO ₂	18.93	63.53	63.26	63.84	62.89	61.09	61.39	61.26	61.30
Al ₂ O ₃	5.51	20.81	21.14	20.26	20.75	20.35	19.99	20.11	20.06
Fe ₂ O ₃	3.31	4.06	4.04	4.07	4.12	5.20	5.32	5.19	5.14
CaO	65.53	1.84	1.85	1.92	1.92	2.32	1.75	1.83	1.90
MgO	1.24	1.00	0.92	0.96	0.98	1.35	1.36	1.35	1.37
SO ₃	2.88	0.15	0.21	0.20	0.17	0.28	0.28	0.21	0.25
Na ₂ O	0.15	0.95	0.87	1.13	1.15	0.79	1.16	1.33	1.03
K ₂ O	0.31	1.23	1.20	1.22	1.29	1.36	1.32	1.40	1.41

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา (ต่อ)

ร้อยละ ออกไซด์	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย (ระยะเวลาสัมผัสความชื้นที่ 3 เดือน)							
		HS				HM			
		แห้ง	25W	45W	65W	แห้ง	25W	45W	65W
TiO ₂	-	1.05	1.03	1.02	1.05	0.98	1.01	0.93	0.99
P ₂ O ₅	-	0.29	0.40	0.31	0.35	0.23	0.30	0.32	0.30
Free CaO	-	0.06	0.06	0.04	0.07	0.03	0.02	0.02	0.04
LOI	-	4.55	4.81	4.84	4.99	5.68	5.81	5.82	5.92

- 25W คือ ปริมาณความชื้นที่ร้อยละ 25

- 45W คือ ปริมาณความชื้นที่ร้อยละ 45

4.2 สมบัติด้านความคงทนของเพสต์/มอร์ตาร์/คอนกรีต ผสมเถ้าลอยเปียก

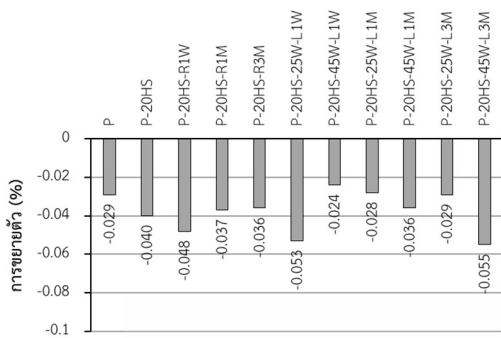
4.2.1 การขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์

ในการศึกษาการขยายตัวออโตเคลฟ (Autoclave) ของเพสต์นั้น ได้พิจารณาเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ของเถ้าลอยทั้ง HS และ HM โดยใช้ทั้งเถ้าลอยแห้งและเปียกจากแหล่งผลิต (ทั้งที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W 1M และ 3M) และเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 25 และ 45 ทั้งที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W 1M และ 3M) โดยแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ใช้น้ำเท่ากับปริมาณน้ำที่เหมาะสม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

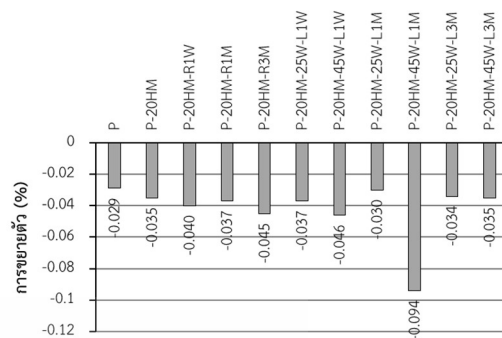
ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์และรูปที่ 4.4 แสดงการขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมเถ้าลอย โดยรูปที่ 4.4 ก) แสดงการขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอย HS พบว่า การขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอยทุกกรณีไม่มีการขยายตัว โดยมีแนวโน้มที่จะหดตัว ทั้งนี้เพราะเถ้าลอย HS นั้นมีปริมาณของ CaO, FreeCaO และ MgO ต่ำมาก จึงทำให้เพสต์ผสมเถ้าลอยไม่เกิดการขยายตัว ส่วนรูปที่ 4.4 ข) แสดงการขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอย HM พบว่า การขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอยไปในทิศทางเดียวกันกับของเพสต์ผสมเถ้าลอย HS กล่าวคือ ทั้งเถ้าลอยแห้งและเปียกไม่มีการขยายตัวออโตเคลฟ โดยมีแนวโน้มที่จะหดตัว เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว

ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

สัดส่วน	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม
PC	25.00
PC-20HS	26.65
PC-20HS-1W	27.50
PC-20HS-1M	27.70
PC-20HS-3M	27.50
PC-20HS-25W-1W	28.90
PC-20HS-45W-1W	29.60
PC-20HS-65W-1W	29.20
PC-20HS-25W-1M	27.40
PC-20HS-45W-1M	28.40
PC-20HS-65W-1M	27.90
PC-20HM-20W-3M	25.40
PC-20HM-45W-3M	25.90
PC-20HM-65W-3M	25.10
PC-20HM	26.85
PC-20HM-1W	27.50
PC-20HM-1M	27.53
PC-20HM-3M	27.75
PC-20HM-25W-1W	29.10
PC-20HM-45W-1W	29.70
PC-20HM-65W-1W	29.60
PC-20HM-20W-1M	27.50
PC-20HM-45W-1M	28.20
PC-20HM-65W-1M	28.00
PC-20HS-25W-3M	25.60



ก) แก้วลอย HS



ข) แก้วลอย HM

รูปที่ 4.4 การขยายตัวอัตโนมัติของเพสต์ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมแก้วลอย

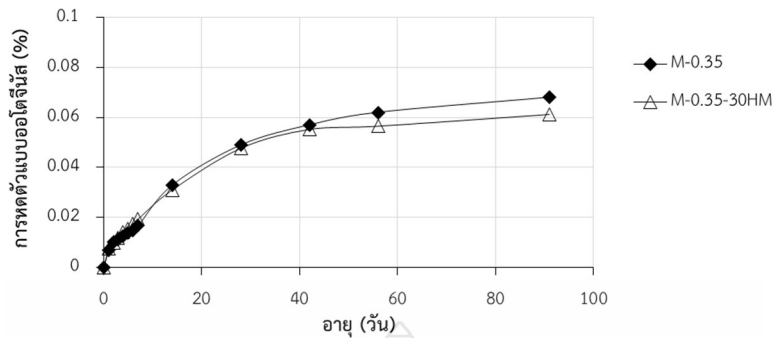
4.2.2 การหดตัวของบ่อโตนีส์ของมอร์ตาร์

ในการศึกษาผลกระทบการแทนที่แก้วลอยต่อการหดตัวของบ่อโตนีส์ (Autogenous Shrinkage) ของมอร์ตาร์นั้น ได้พิจารณาการหดตัวของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ของแก้วลอยทั้ง HS และ HM โดยใช้ทั้งแก้วลอยแห้งและเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ทั้งที่ระยะเวลาสัมผัสดังกล่าว 1W 1M และ 3M) โดยแทนที่แก้วลอยในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 และ 0.55 โดยพิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อการหดตัวของบ่อโตนีส์ คือ 1) ผลกระทบจากการแทนที่แก้วลอย 2) ผลกระทบจากระยะเวลาสัมผัสดังกล่าวของแก้วลอยเปียก 3) ผลกระทบจากปริมาณความชื้นของแก้วลอยเปียก และ 4) ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของแก้วลอย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ผลกระทบจากการแทนที่แก้วลอย

ก. เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35

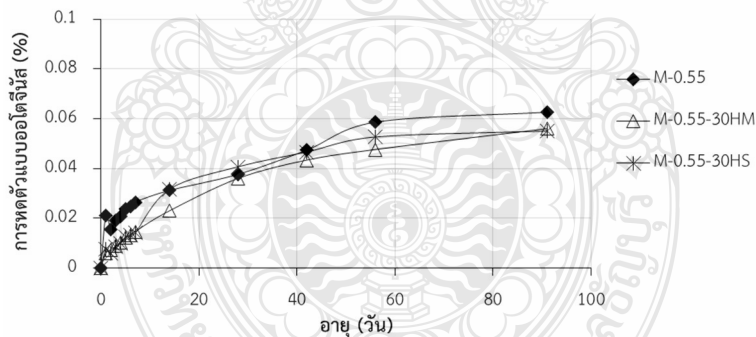
จากรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของบ่อโตนีส์และอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมแก้วลอยแห้ง เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 พบว่า การหดตัวของบ่อโตนีส์ของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอย HM แห้ง มีค่ามากกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการทำปฏิกิริยาปอซโซลานและการเติมเต็มช่องว่างของเพสต์ทำให้โครงสร้างของเพสต์แข็งแรงขึ้น ส่งผลให้การหดตัวน้อยลง



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้ง เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35

ข. เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55

จากรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้ง เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 พบว่า การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย HS แห้งและ HM แห้ง มีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการทำปฏิกิริยาปอซโซลานและการเติมเต็มช่องว่างของเพสต์ทำให้โครงสร้างของเพสต์แข็งแรงขึ้น จึงต้านการหดตัวได้ดีกว่า



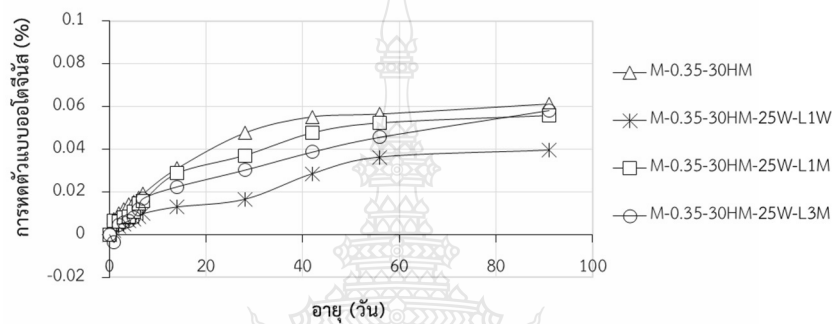
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้ง เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55

2) ผลกระทบจากระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียก

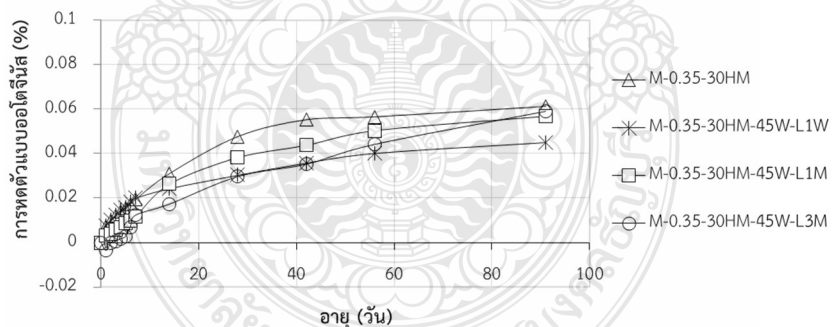
ก. เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35

จากรูปที่ 4.7 ถึง 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้งและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 พบว่า การหดตัวแบบออโต

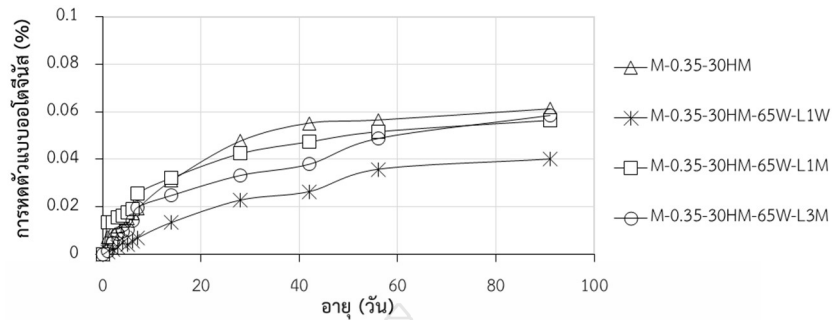
จีสของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย HM แห้งและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย HM เปียกทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่ระยะเวลาสัมผัสดำเนิน 1M และ 3M) มีค่าไม่แตกต่างกัน ในขณะที่การหดตัวแบบอโตจีสของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย HM เปียกที่ระยะเวลาสัมผัสดำเนิน 1W (ทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) มีค่าน้อยกว่าของระยะเวลาสัมผัสดำเนิน 1M และ 3M อย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอยเปียกที่ระยะสัมผัสดำเนินน้อย (1W) นั้นมีเวลาสัมผัสดำเนินน้อย จึงมีน้ำอิสระมากกว่าเถ้าลอยเปียกที่ระยะสัมผัสดำเนินนานกว่า (1M และ 3M) ส่งผลให้สามารถดึงน้ำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือปฏิกิริยาปอซโซลานได้มาก การหดตัวจึงน้อยกว่า



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีสและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้งและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35



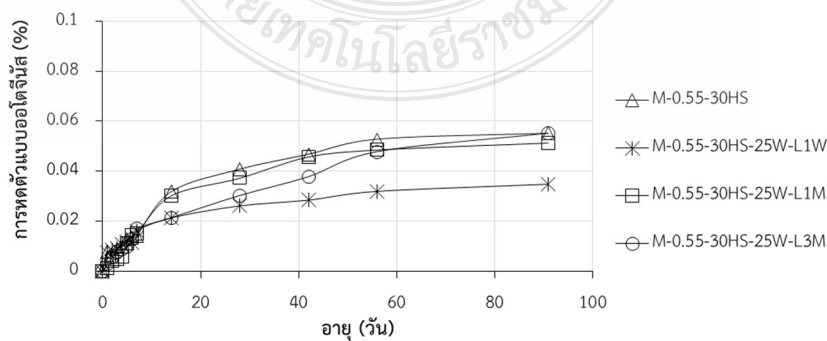
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีสและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้งและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35



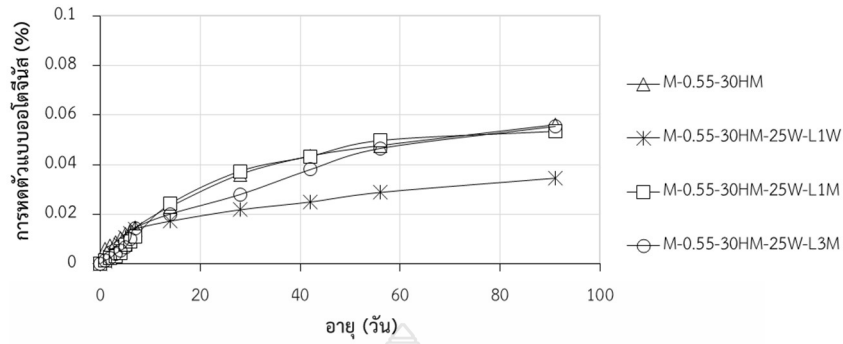
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้งและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35

ข. เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55

จากรูปที่ 4.10 ถึง 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้งและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 พบว่า การหดตัวแบบอโตจีนัสของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย HS และ HM แห้งและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย HS และ HM เปียกทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1M และ 3M) มีค่าไม่แตกต่างกัน ในขณะที่การหดตัวแบบอโตจีนัสของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย HS และ HM เปียกที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W (ทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) มีค่าน้อยกว่าของระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1M และ 3M อย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอยเปียกที่ระยะสัมผัสความชื้นน้อย (1W) นั้นมีเวลาสัมผัสความชื้นน้อย จึงมีน้ำอิสระมากกว่าเถ้าลอยเปียกที่ระยะสัมผัสความชื้นนานกว่า (1M และ 3M) ส่งผลให้สามารถดึงน้ำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือปฏิกิริยาพอซโซลานได้มาก การหดตัวจึงน้อยกว่า

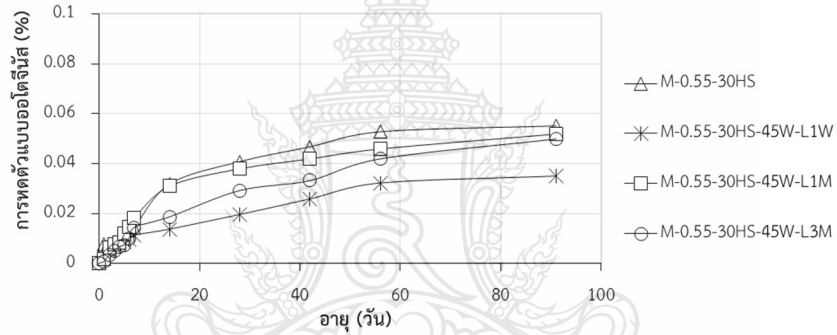


ก) เถ้าลอย HS

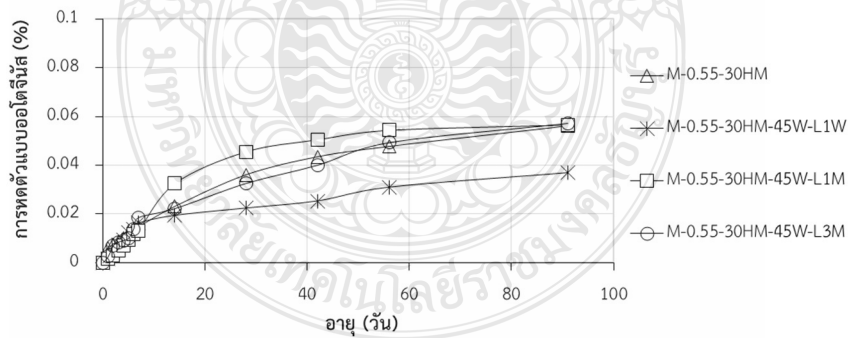


ข) เถ้ายอย HM

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบบอโตจีนีสและอายุของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยแห้งและมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยเปียจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55

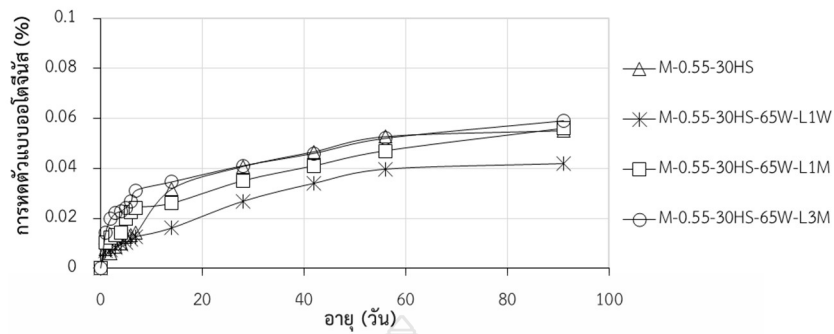


ก) เถ้ายอย HS

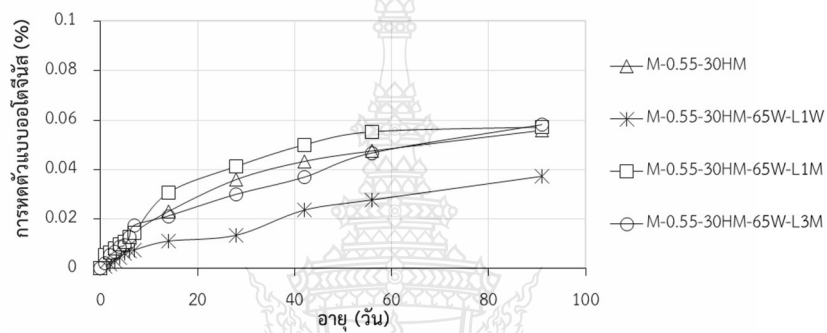


ข) เถ้ายอย HM

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบบอโตจีนีสและอายุของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยแห้งและมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยเปียจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55



ก) เถ้าลอย HS

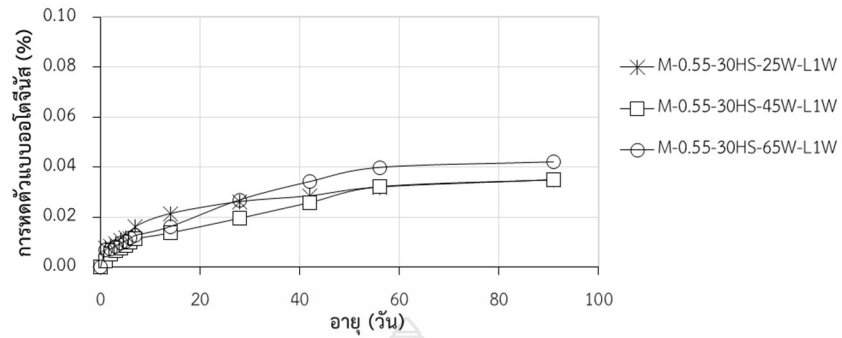


ข) เถ้าลอย HM

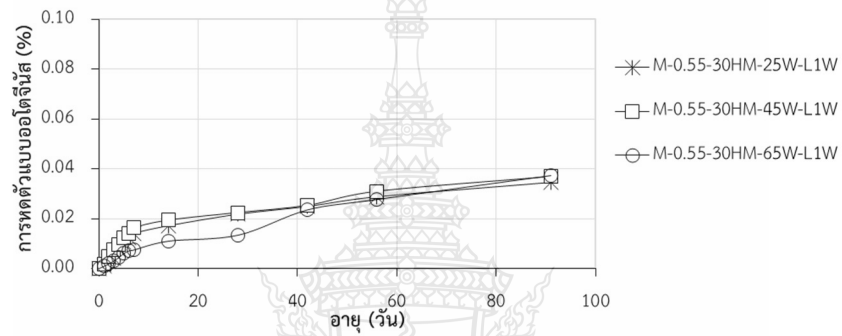
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนิสและอายุของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยแห้งและมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55

3) ผลกระทบจากปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียก

จากรูปที่ 4.13 ถึง 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนิสและอายุของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือน ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 พบว่า การหดตัวแบบอโตจีนิสของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอย HS และ HM เปียกทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W 1M และ 3M) มีค่าไม่แตกต่างกัน

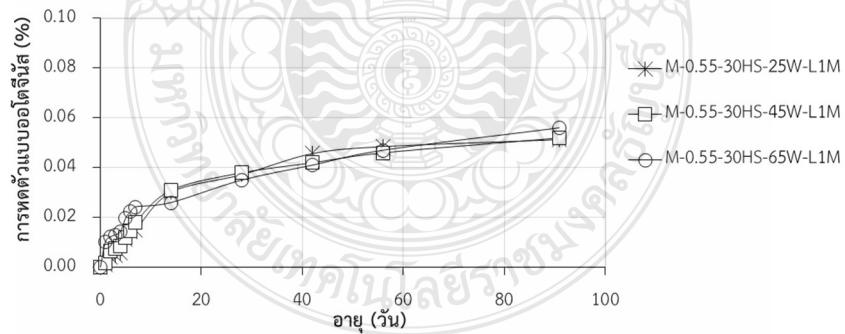


ก) แก้วลอย HS

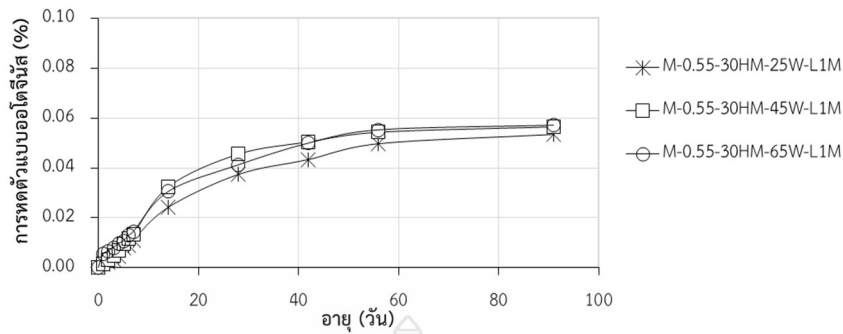


ข) แก้วลอย HM

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบบอโตจีนิสและอายุของมอร์ต้าผสมแก้วลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1 สัปดาห์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55

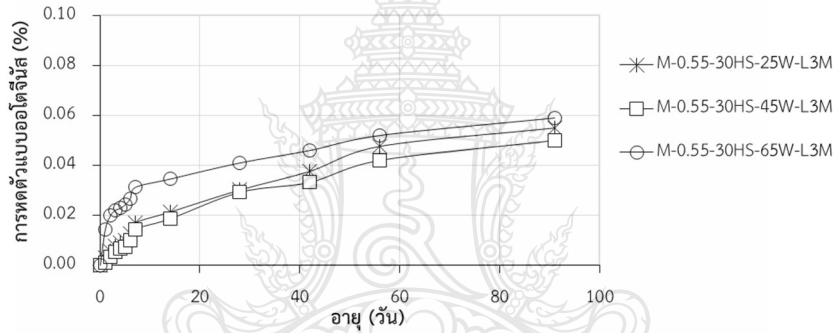


ค) แก้วลอย HS

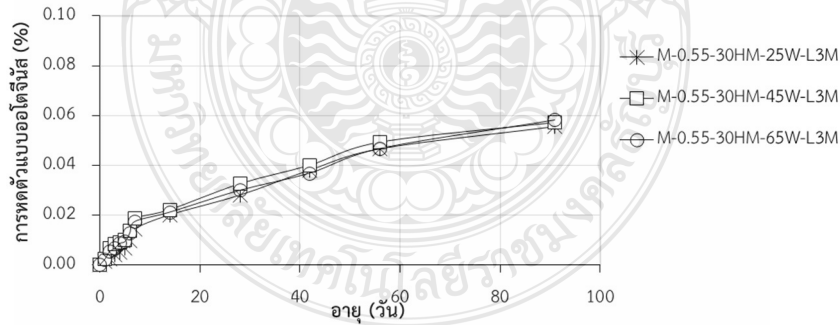


ข) เถ้าลอย HM

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1 เดือน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55



ก) เถ้าลอย HS



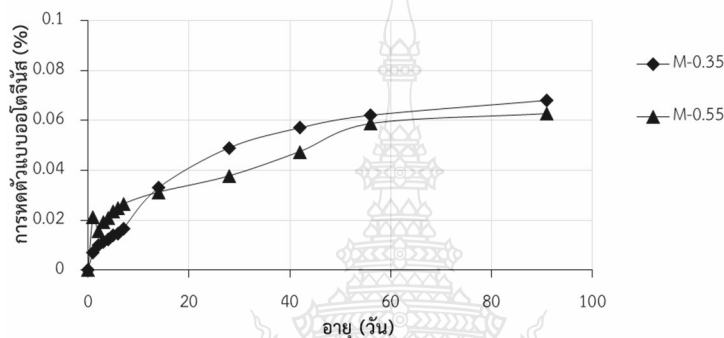
ข) เถ้าลอย HM

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 3 เดือน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55

4) ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของเถ้าลอย

ก. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

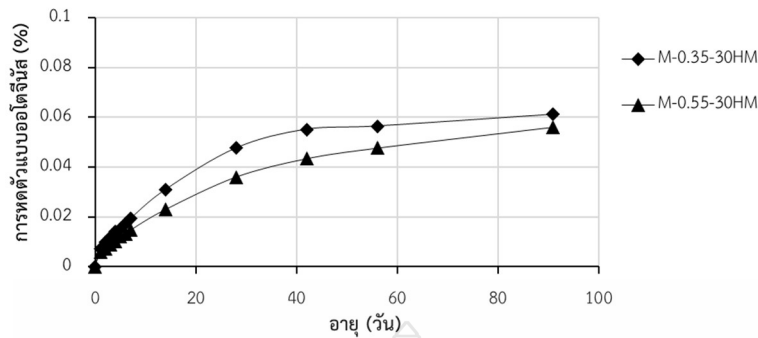
จากรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 และ 0.55 พบว่า การหดตัวแบบอโตจีนัส เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 มีค่าน้อยกว่า การหดตัวแบบอโตจีนัส เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณน้ำที่มากกว่า ส่งผลให้สามารถดึงน้ำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้มาก การหดตัวจึงน้อยกว่า



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 และ 0.55

ข. เถ้าลอยแห้ง

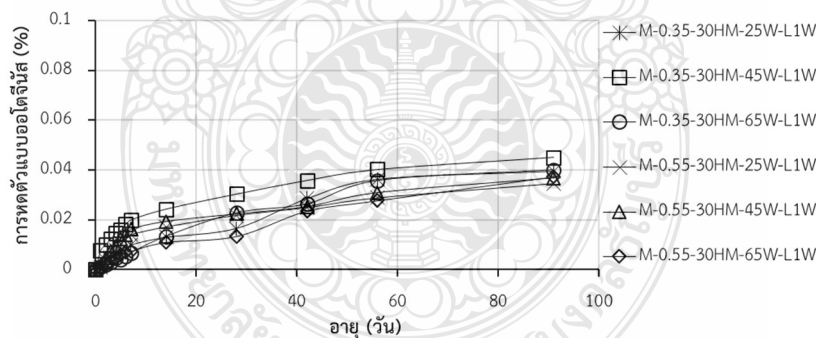
จากรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้ง เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 และ 0.55 พบว่า การหดตัวแบบอโตจีนัส เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 มีค่าน้อยกว่า การหดตัวแบบอโตจีนัส เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณน้ำที่มากกว่า ส่งผลให้สามารถดึงน้ำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้มาก การหดตัวจึงน้อยกว่า



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้ง เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 และ 0.55

ค) เถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ

จากรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ ปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W) เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 และ 0.55 พบว่า การหดตัวแบบออโตจีนัส เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 มีค่าน้อยกว่า การหดตัวแบบออโตจีนัส เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณน้ำที่มากกว่า ส่งผลให้สามารถดึงน้ำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้มาก การหดตัวจึงน้อยกว่า



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ทั้งที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W) เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 และ 0.55

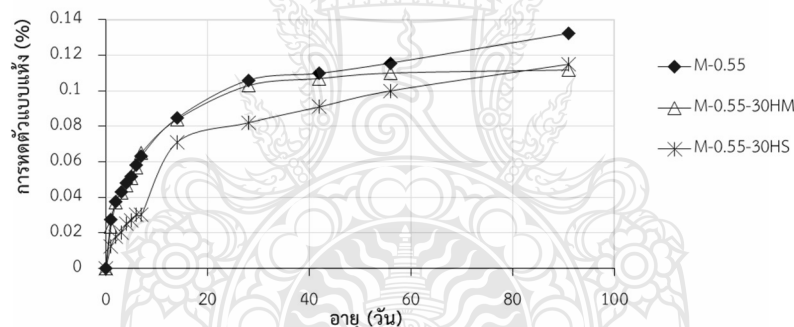
4.2.3 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์

ในการศึกษาผลกระทบการแทนที่เถ้าลอยต่อการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ของมอร์ตาร์นั้น ได้พิจารณามอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ของเถ้า

ลอยทั้ง HS และ HM โดยใช้ทั้งเถ้าลอยแห้งและเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ทั้งที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W 1M และ 3M) โดยแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 โดยพิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อการหดตัวแบบแห้ง คือ 1) ผลกระทบจากการแทนที่เถ้าลอย 2) ผลกระทบจากระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียก และ 3) ผลกระทบจากปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียก โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ผลกระทบจากการแทนที่เถ้าลอย

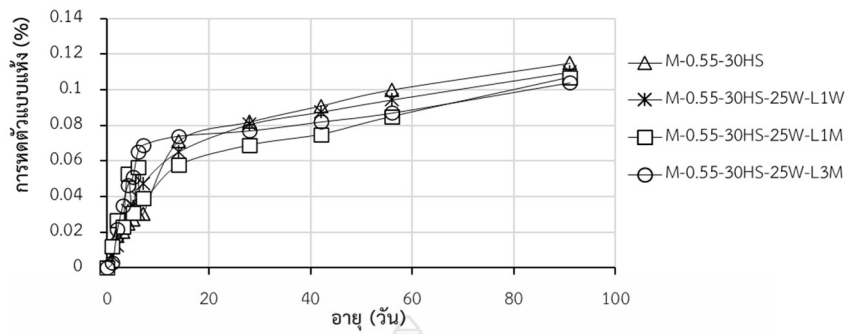
จากรูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้ง เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 พบว่า การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย HS แห้งและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย HM แห้ง มีค่าน้อยกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอยมีส่วนทำปฏิกิริยาปอซโซลานก่อให้เกิด CSH เพิ่มขึ้นซึ่ง CSH ช่วยอุดช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ให้มีความหนาแน่นขึ้น ทำให้น้ำในช่องว่างคาปิลลารีระเหยได้ยากขึ้น ส่งผลให้การหดตัวแบบแห้งน้อยลง



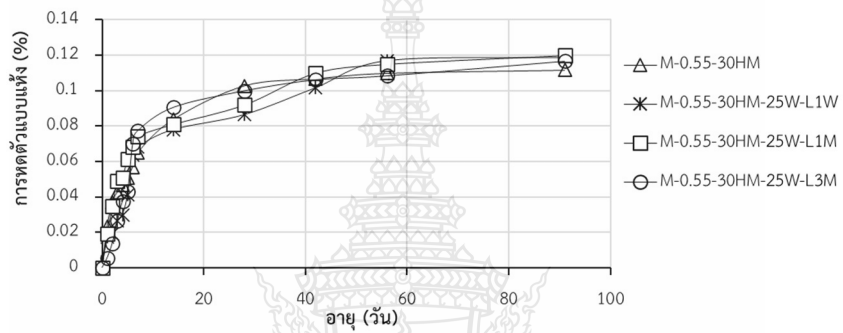
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้ง เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55

2) ผลกระทบจากระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียก

จากรูปที่ 4.20 ถึง 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้งและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียก จากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 พบว่า การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย HS และ HM แห้งและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย HS และ HM เปียกทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W 1M และ 3M) มีค่าไม่แตกต่างกัน

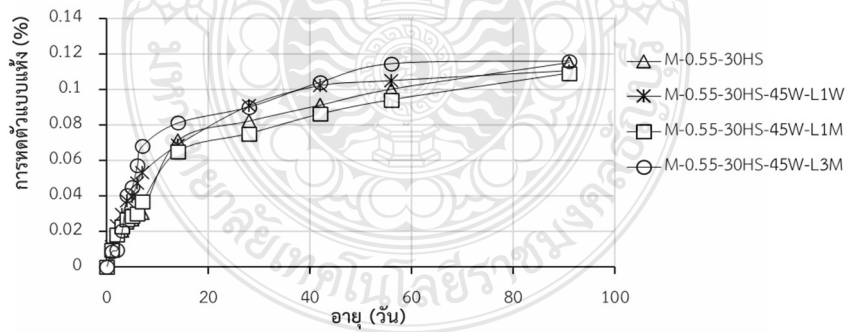


ก) แก้วลอย HS

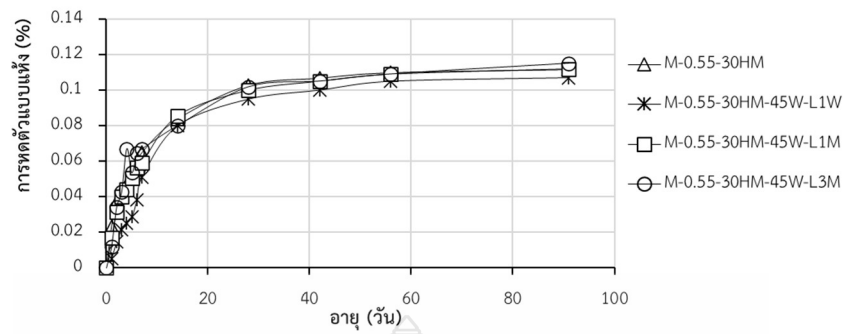


ข) แก้วลอย HM

รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยแห้งและมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55

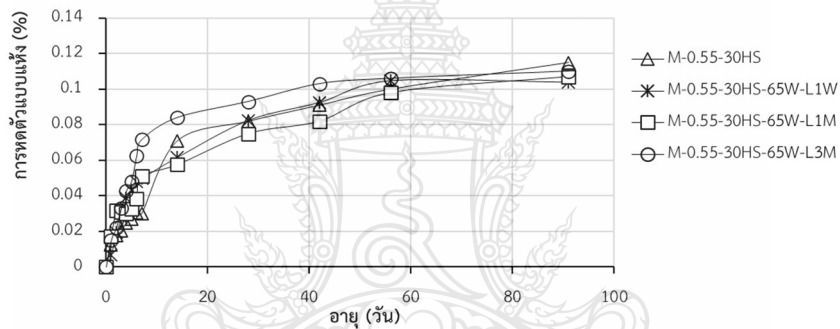


ค) แก้วลอย HS

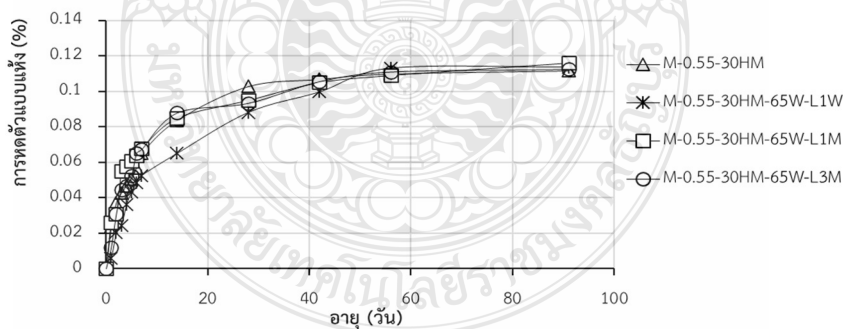


ข) เถ้าลอย HM

รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้งและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55



ก) เถ้าลอย HS

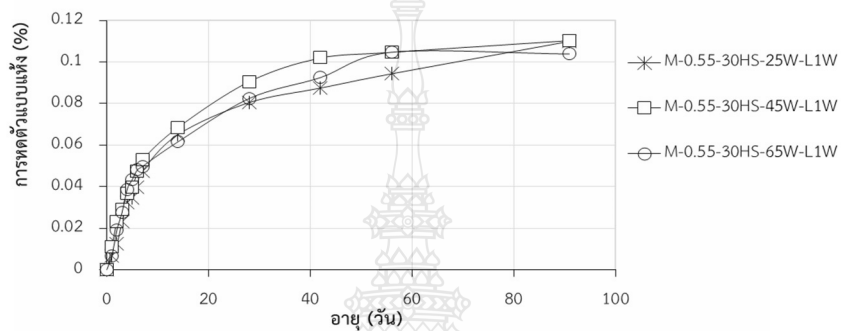


ข) เถ้าลอย HM

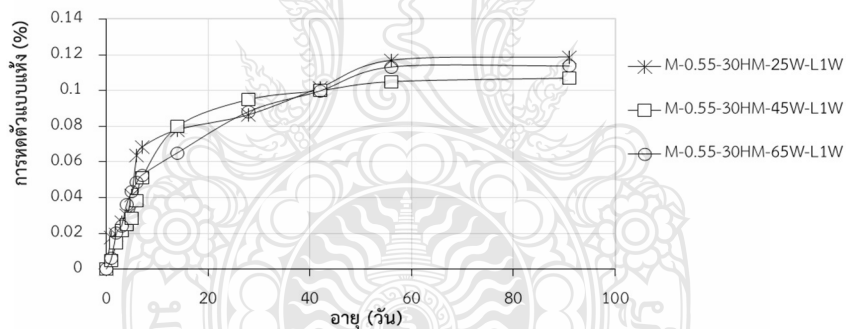
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้งและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55

3) ผลกระทบจากปริมาณความชื้นของแก๊ลลอยเปียก

จากรูปที่ 4.23 ถึง 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ต้าร์ผสมแก๊ลลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือน ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 พบว่า การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมแก๊ลลอย HS และ HM เปียกทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W 1M และ 3M) มีค่าไม่แตกต่างกัน

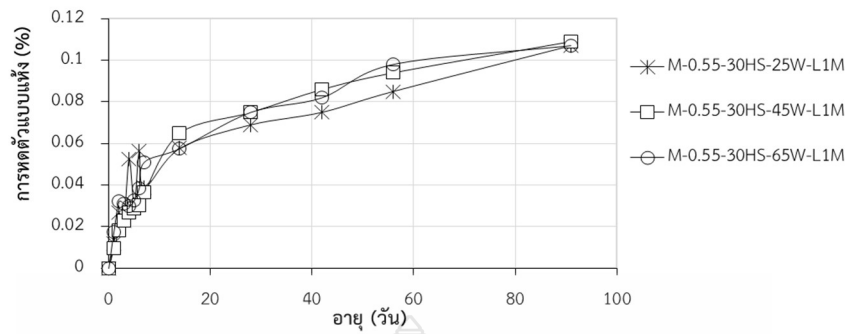


ก) แก๊ลลอย HS

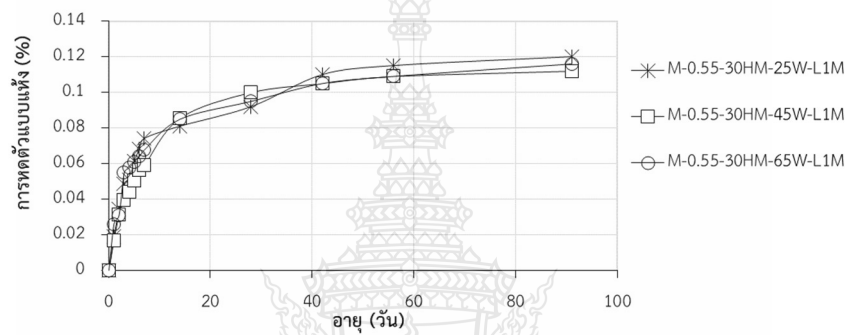


ข) แก๊ลลอย HM

รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ต้าร์ผสมแก๊ลลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55

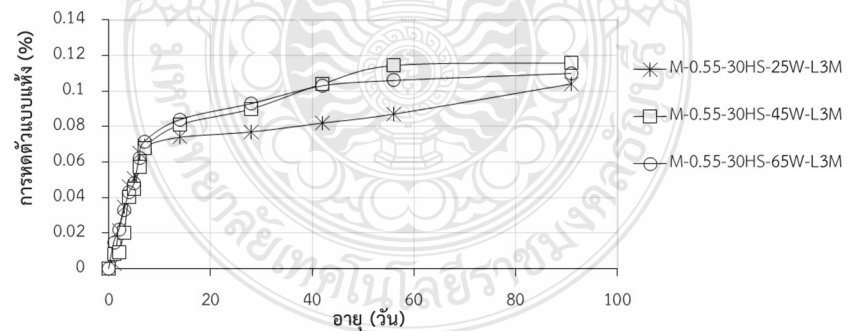


ก) โลหะ HS

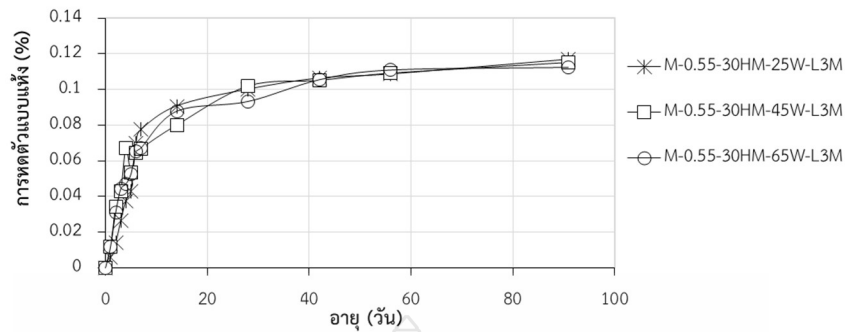


ข) โลหะ HM

รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ผสมโลหะเบี่ยงจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1 เดือน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55



ค) โลหะ HS



ข) ใ้ล้ลลย HM

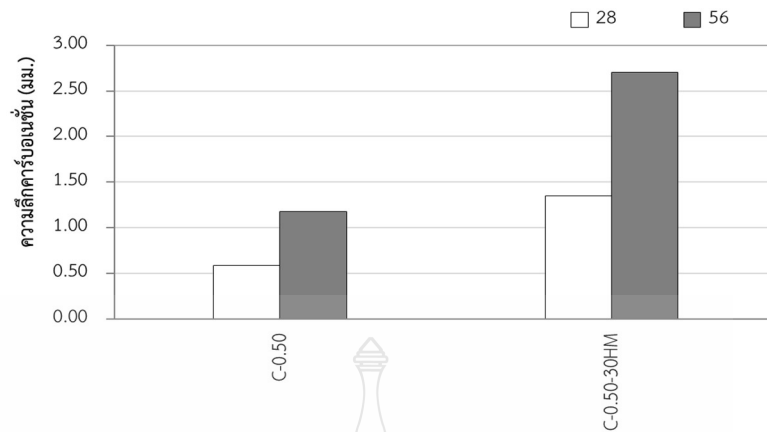
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ผสมใ้ล้ลลยเป็ยกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 3 เดือน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55

4.2.4 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต

ในการศึกษาผลกระทบการแทนที่ใ้ล้ลลยต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น (Carbonation) ของคอนกรีตนั้น ได้พิจารณาคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตของใ้ล้ลลย HM โดยใช้ทั้งใ้ล้ลลยแห้งและเป็ยกจากห้องปฏิบัติการ (ที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ทั้งที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W และ 1M) โดยแทนที่ใ้ล้ลลยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 โดยพิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต คือ 1) ผลกระทบจากการแทนที่ใ้ล้ลลย 2) ผลกระทบจากระยะสัมผัสความชื้นของใ้ล้ลลยเป็ยก และ 3) ผลกระทบจากปริมาณความชื้นของใ้ล้ลลยเป็ยก โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ผลกระทบจากการแทนที่ใ้ล้ลลย

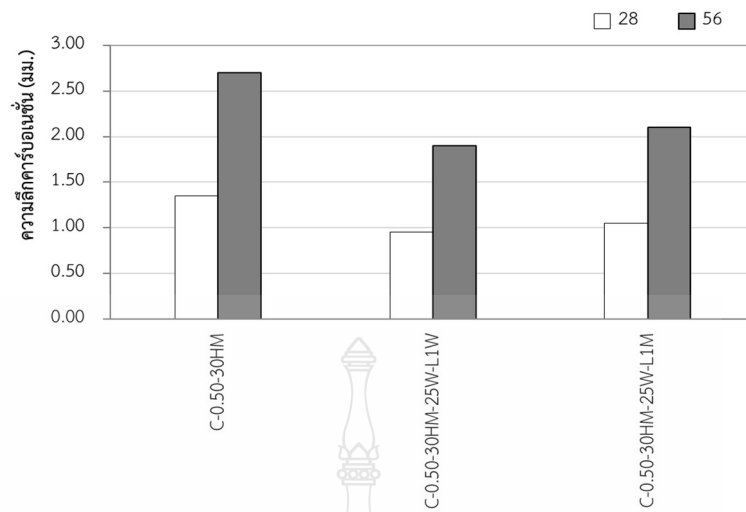
จากรูปที่ 4.26 แสดงการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและคอนกรีตผสมใ้ล้ลลยแห้ง เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 พบว่า การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมใ้ล้ลลย HM แห้ง มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ใ้ล้ลลยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงพร้อมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานต่างช่วยลดปริมาณ Ca(OH)_2 ทำให้เกิดคาร์บอนเนชั่นมากขึ้น



รูปที่ 4.26 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50

2) ผลกระทบจากระยะสัมพัทธ์ความชื้นของเถ้าลอยเปียก

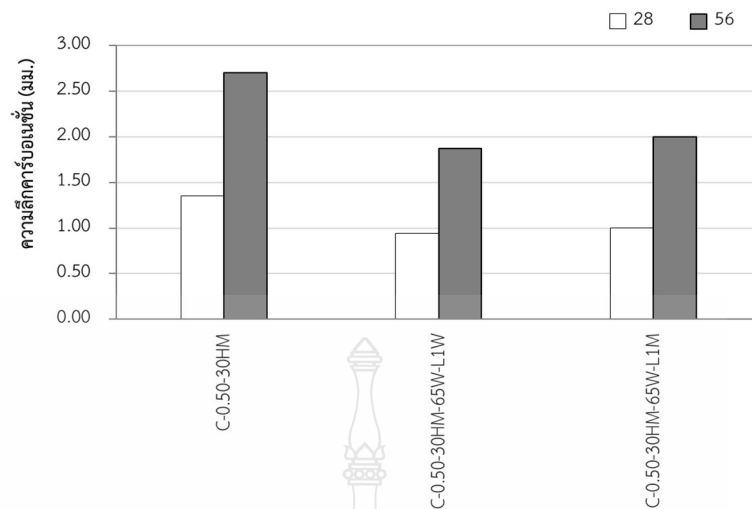
จากรูปที่ 4.27 ถึง 4.29 แสดงการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งและคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 พบว่า การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย HM เปียก (ทั้งที่ระยะสัมพัทธ์ความชื้น 1W และ 1M) มีค่าน้อยกว่าของเถ้าลอยแห้ง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ เถ้าลอยเปียกได้เข้าไปเคลือบผิวของมวลรวมก่อนทำให้บริเวณผิวของมวลรวมมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ และทำให้รอยต่อระหว่างวัสดุประสานกับมวลรวมมีกำลังอัดสูงขึ้น ส่งผลให้ความทึบมากขึ้น ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าได้ยากขึ้น ส่งผลให้เกิดคาร์บอนเนชั่นน้อยลง



รูปที่ 4.27 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งและคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50



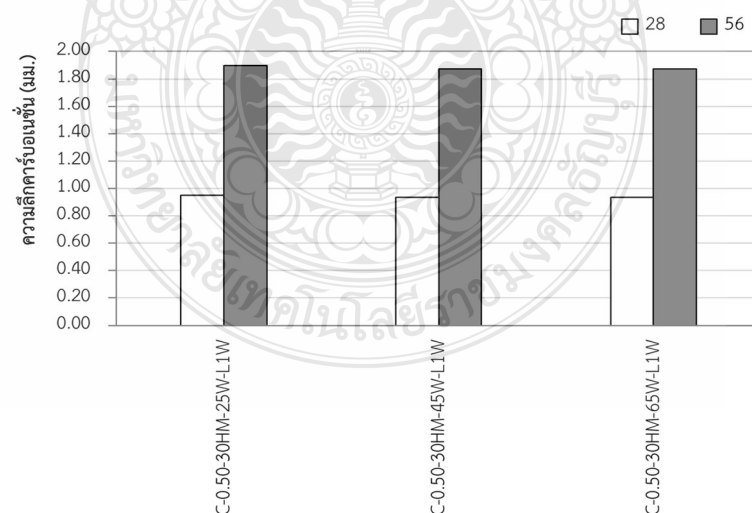
รูปที่ 4.28 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งและคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50



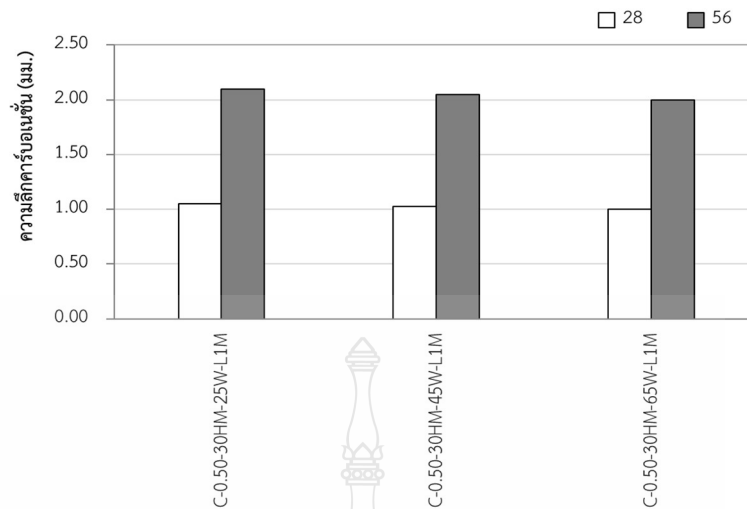
รูปที่ 4.29 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งและคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50

3) ผลกระทบจากปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียก

จากรูปที่ 4.30 ถึง 4.31 แสดงการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ระยะเวลาสัมผัสดำเนิน 1 สัปดาห์ และ 1 เดือน ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 พบว่า การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่ระยะเวลาสัมผัสดำเนิน 1W และ 1M) มีค่าไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.30 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ระยะเวลาสัมผัสดำเนิน 1 สัปดาห์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50



รูปที่ 4.31 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ระยะเวลาสัมผัสดำเนินการ 1 เดือน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50

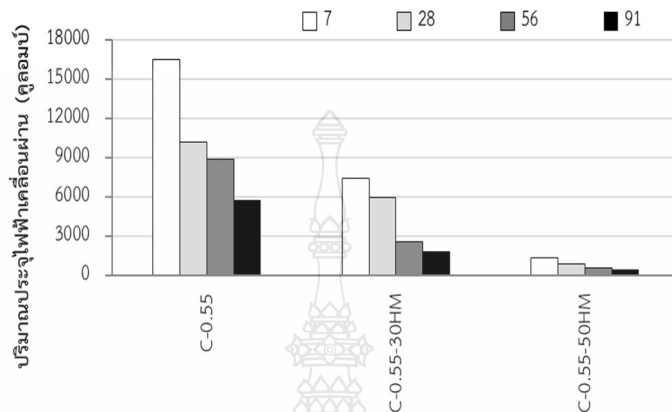
4.2.5 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

ในการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride) ของคอนกรีตนั้น ได้พิจารณาคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตของเถ้าลอย HM โดยใช้ทั้งเถ้าลอยแห้งและเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ทั้งที่ระยะเวลาสัมผัสดำเนินการ 1W 1M และ 3M) โดยแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 และ 50 ตามลำดับ โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 โดยพิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต คือ 1) ผลกระทบจากการแทนที่เถ้าลอย 2) ผลกระทบจากระยะสัมผัสดำเนินการของเถ้าลอยเปียก 3) ผลกระทบจากปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียก โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ผลกระทบจากการแทนที่เถ้าลอย

จากรูปที่ 4.32 แสดงความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (หน่วยเป็นคูลอมบ์) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง โดยแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 และ 50 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 พบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย HM แห้ง มีค่าดีกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอยทำปฏิกิริยาปอซโซลาน รวมทั้งเถ้าลอยที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ช่วยเติมเต็มช่องว่างของเพสต์ ซึ่งจากเหตุผลที่กล่าวมาส่งผลให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีความหนาแน่นหรือที่บ่มมากขึ้น จึงมีความสามารถในการ

ด้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่า ในขณะที่ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสม
 etailoy HM แห่ง ร้อยละ 50 มีค่าดีกว่าของคอนกรีตผสมetailoy HM แห่ง ร้อยละ 30 ทั้งนี้อาจเป็น
 เพราะการแทนที่etailoyในปริมาณที่มากกว่า ส่งผลให้etailoyทำปฏิกิริยาปอซโซลาน และช่วยเติมเต็ม
 ช่องว่างของเพสต์จึงมีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่า

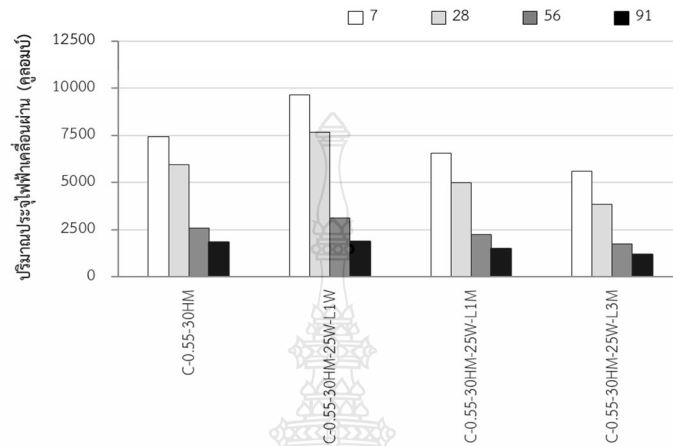


รูปที่ 4.32 ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (หน่วยเป็น คูลอมป์) ของคอนกรีต
 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมetailoyแห่ง โดยแทนที่
 etailoyในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 และ 50 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำ
 ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

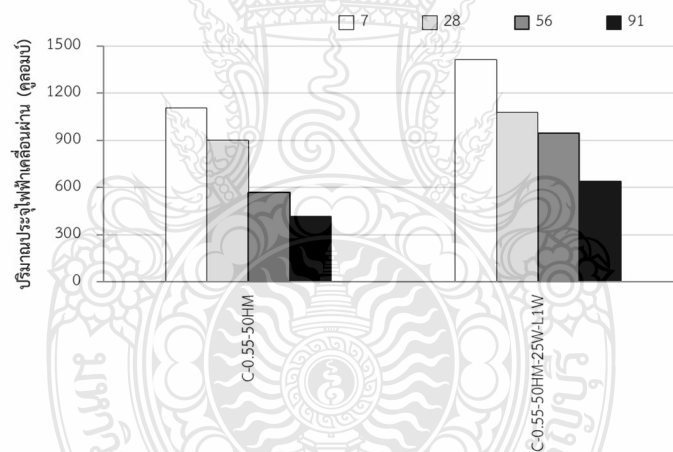
2) ผลกระทบจากระยะสัมผัสความชื้นของetailoyเปียก

จากรูปที่ 4.33 ถึง 4.35 แสดงความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์
 (หน่วยเป็น คูลอมป์) ของคอนกรีตผสมetailoyแห่งและคอนกรีตผสมetailoyเปียกจากห้องปฏิบัติการ
 ปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ตามลำดับ โดยแทนที่etailoyในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท
 ที่ 1 ร้อยละ 30 และ 50 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 พบว่า ความต้านทานการ
 แทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมetailoyเปียก โดยแทนที่etailoyร้อยละ 30 และ 50 (ทั้งปริมาณ
 ความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) ที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W มีค่าต่ำกว่าของคอนกรีตetailoy
 แห่ง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะetailoyเปียกที่ระยะสัมผัสความชื้นน้อย (1W) มีความพรุนมากกว่าetailoyแห่ง
 ซึ่งจากเหตุผลที่กล่าวมาส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นหรือที่บ่น้ำน้อย จึงมีความสามารถในการ
 ด้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่า ในขณะที่ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต
 ผสมetailoyเปียก โดยแทนที่etailoyร้อยละ 30 (ทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) ที่
 ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1M มีค่าไม่แตกต่างกับของคอนกรีตผสมetailoyแห่ง อย่างไรก็ตามความ
 ด้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมetailoyเปียก โดยแทนที่etailoyร้อยละ 30 (ทั้งปริมาณ

ความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) ที่ระยะเวลาสัมผัสมวลความชื้น 3M มีแนวโน้มดีกว่าของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกที่ระยะสัมผัสมวลความชื้น 1M ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอยเปียกที่สัมผัสมวลความชื้นเป็นเวลานานจะทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่า ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นหรือที่บ่มน้ำมากขึ้น จึงมีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่า

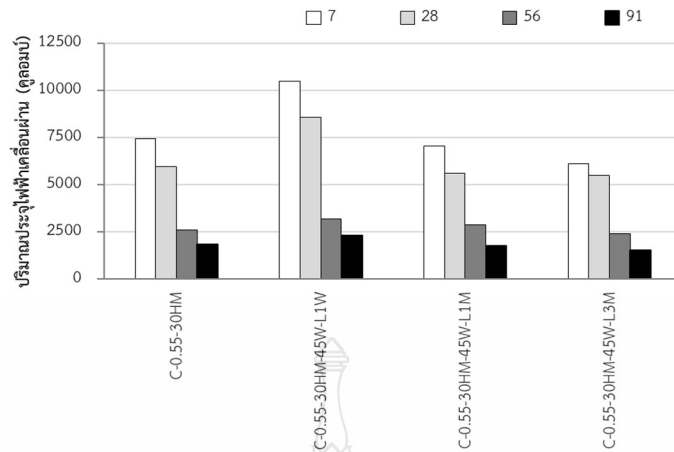


ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30

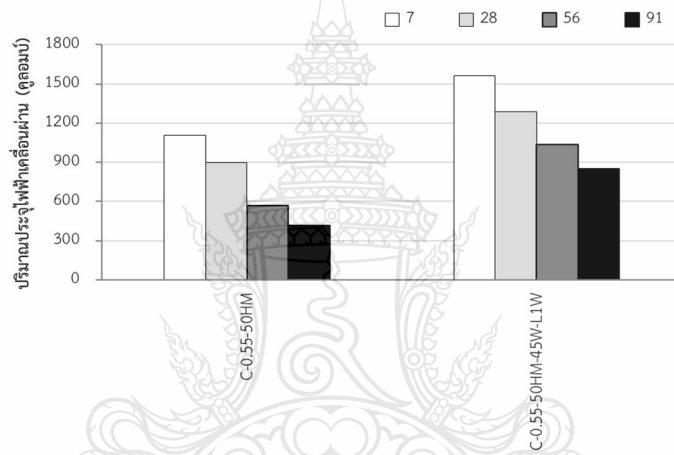


ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.33 ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (หน่วยเป็น คูลอมป์) ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งและคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 โดยแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 และ 50 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

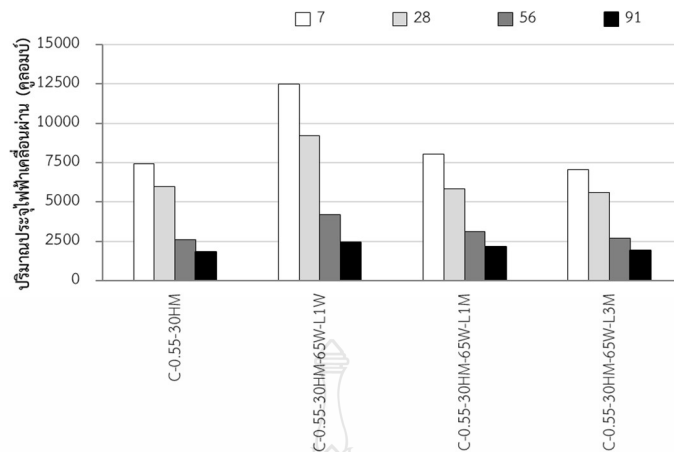


ก) แก้วลอย HM ร้อยละ 30

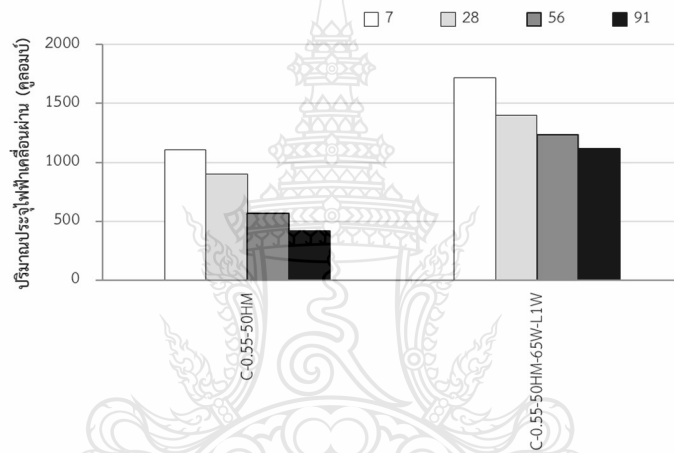


ข) แก้วลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.34 ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (หน่วยเป็น คูลอมป์) ของคอนกรีตผสมแก้วลอยแห้งและคอนกรีตผสมแก้วลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45 โดยแทนที่แก้วลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 และ 50 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55



ก) ถ้ำลอย HM ร้อยละ 30



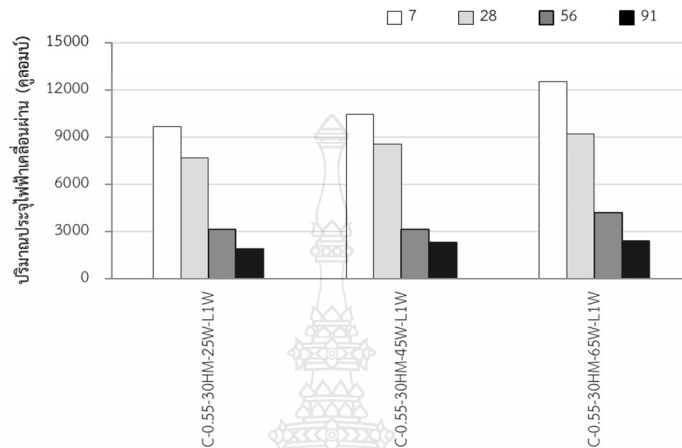
ข) ถ้ำลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.35 ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (หน่วยเป็น คูลอมป์) ของคอนกรีตผสมถ้ำลอยแห้งและคอนกรีตผสมถ้ำลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65 โดยแทนที่ถ้ำลอยในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 และ 50 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

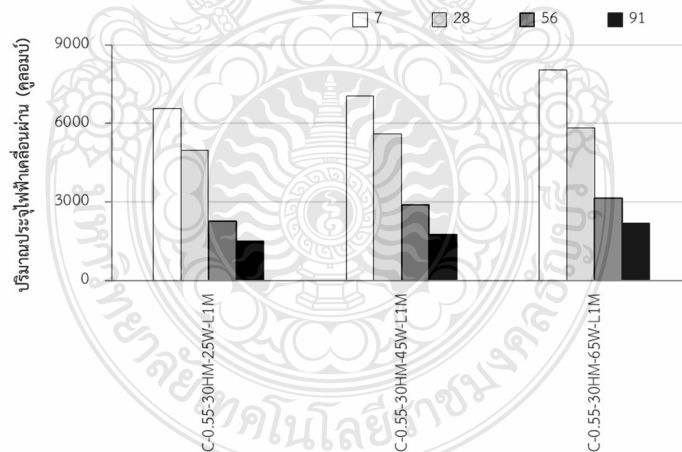
3) ผลกระทบจากปริมาณความชื้นของถ้ำลอยเปียก

จากรูปที่ 4.36 ถึง 4.38 แสดงความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (หน่วยเป็น คูลอมป์) ของคอนกรีตผสมถ้ำลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลาสัมผัสดัชนีความชื้น 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือน ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 พบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมถ้ำลอยเปียกปริมาณความชื้นร้อยละ 25 มีค่าดีกว่าของปริมาณความชื้นร้อยละ 45 และ 65 ตามลำดับ (ทั้งที่

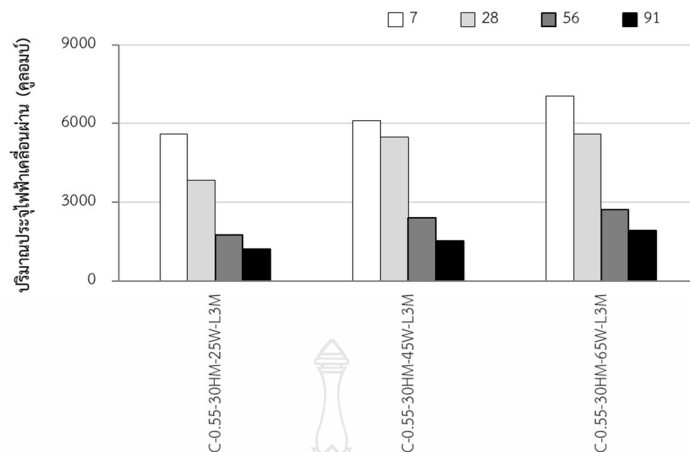
ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W 1M และ 3M) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะแก๊ลลอยเปือกที่มีปริมาณน้ำมากจะมีผลทำให้คอนกรีตมีความพรุนมาก ส่งผลให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ด้อยลง



รูปที่ 4.36 ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (หน่วยเป็น คูลอมป์) ของคอนกรีตผสมแก๊ลลอยเปือกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55



รูปที่ 4.37 ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (หน่วยเป็น คูลอมป์) ของคอนกรีตผสมแก๊ลลอยเปือกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1 เดือน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55



รูปที่ 4.38 ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (หน่วยเป็น คูลอมป์) ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ที่ระยะเวลาสัมผัสน้ำความชื้น 3 เดือน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

4.3 การเปรียบเทียบสมบัติด้านความคงทนของเพสต์/มอร์ตาร์/คอนกรีต ผสมเถ้าลอยเปียก

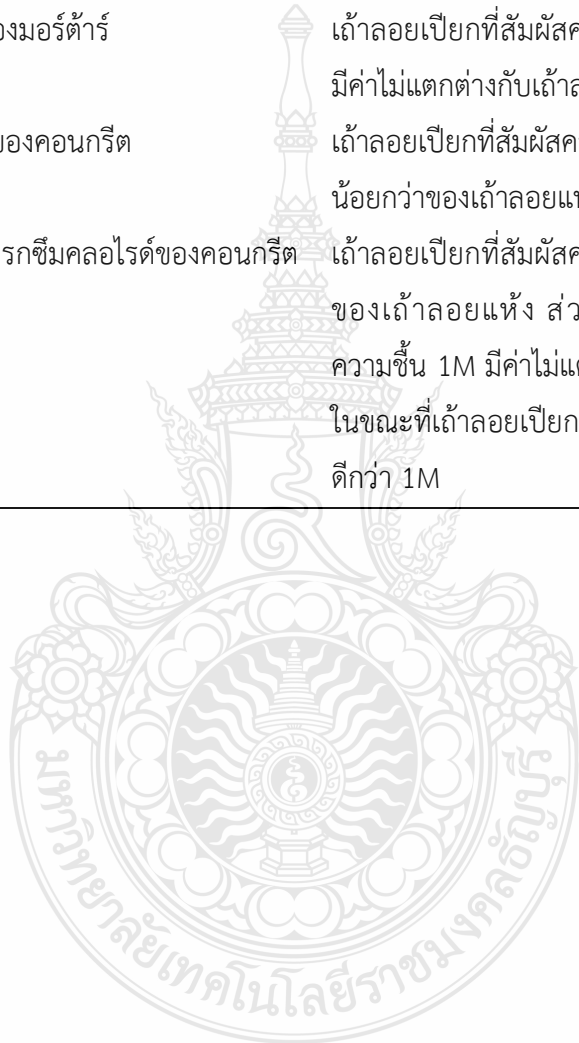
จากการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบถึงผลกระทบชนิดของเถ้าลอยเปียก โดยพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแต่ละชนิด และรวมถึงสมบัติด้านความคงทน ประกอบด้วย การขยายตัวออโตแคลฟของเพสต์ การหดตัวแบบออโตจิ้นส์และการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ การเกิดคาร์บอนขึ้นและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 สมบัติด้านความคงทนของเพสต์/มอร์ตาร์/คอนกรีต ผสมเถ้าลอยเปียก เปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

รายการ	HS		HM	
	แห้ง	เปียก	แห้ง	เปียก
การขยายตัวออโตแคลฟของเพสต์	ไม่มีผล	ไม่มีผล	ไม่มีผล	ไม่มีผล
การหดตัวแบบออโตจิ้นส์ของมอร์ตาร์	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า
การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า
การเกิดคาร์บอนขึ้นของคอนกรีต	-	-	มากกว่า	มากกว่า
ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต	-	-	ดีกว่า	ดีกว่า

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของเพสต์/มอร์ตาร์/คอนกรีต ระหว่างเถ้าลอยแห้งกับเถ้าลอยเปียก

รายการ	ผลการศึกษา
การขยายตัวออโตแคลฟของเพสต์	ไม่มีการขยายตัวออโตแคลฟ
การหดตัวแบบออโตจิ้นส์ของมอร์ตาร์	เถ้าลอยเปียกที่สัมพัทธ์ความชื้น 1W มีค่าน้อยกว่า 1M และ 3M ส่วนเถ้าลอยเปียกที่สัมพัทธ์ความชื้น 1M และ 3M มีค่าไม่แตกต่างกับของเถ้าลอยแห้ง
การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์	เถ้าลอยเปียกที่สัมพัทธ์ความชื้น 1W 1M และ 3M มีค่าไม่แตกต่างกับเถ้าลอยแห้ง
การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต	เถ้าลอยเปียกที่สัมพัทธ์ความชื้น 1W และ 1M มีค่าน้อยกว่าของเถ้าลอยแห้ง
ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต	เถ้าลอยเปียกที่สัมพัทธ์ความชื้น 1W มีค่าด้อยกว่าของเถ้าลอยแห้ง ส่วนเถ้าลอยเปียกที่สัมพัทธ์ความชื้น 1M มีค่าไม่แตกต่างกับของเถ้าลอยแห้ง ในขณะที่เถ้าลอยเปียกที่สัมพัทธ์ความชื้น 3M มีค่าดีกว่า 1M



บทที่ 5

สรุป

จากการศึกษาสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก สามารถสรุปโดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การขยายตัวออตเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอย (ทั้งสภาพแห้งและสภาพเปียก) ไม่มีการขยายตัวโดยมีแนวโน้มที่จะหดตัว

2) การหดตัวแบบออตจิ้นัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (ทั้งสภาพแห้งและสภาพเปียก) มีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการหดตัวแบบออตจิ้นัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกมีค่าไม่แตกต่างกับของเถ้าลอยแห้ง ยกเว้นการหดตัวแบบออตจิ้นัสของเถ้าลอยเปียกที่ระยะสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ มีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นต่างกันและระยะสัมผัสความชื้นที่ต่างกันไม่มีผลต่อการหดตัวแบบออตจิ้นัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์

3) การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (ทั้งสภาพแห้งและสภาพเปียก) มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกน้อยกว่าของเถ้าลอยแห้ง ส่วนเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นต่างกันและระยะสัมผัสความชื้นที่ต่างกันไม่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น

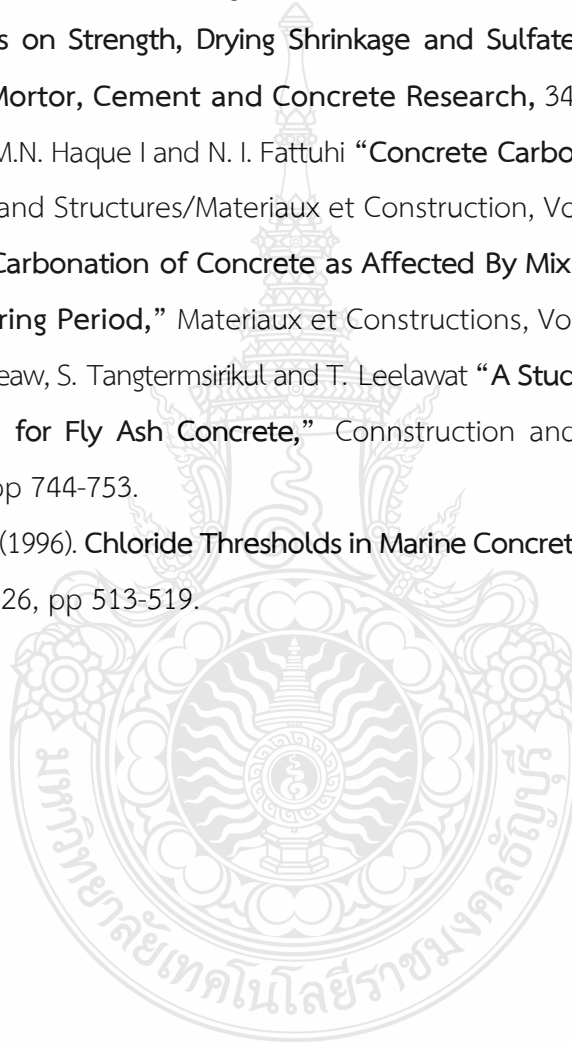
4) ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (ทั้งสภาพแห้งและสภาพเปียก) มีค่าดีกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกที่ระยะสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ 1 เดือน มีค่าไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง โดยเถ้าลอยเปียกที่มีปริมาณความชื้นมาก ส่งผลให้มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าต่ำกว่า

บรรณานุกรม

- [1] Pitisan Krammart, **Properties of cement made by partially replacing cement raw materials with municipal solid waste ash and calcium carbide waste, and sulfate resistance of fly ash concrete**, Ph.D. Thesis, Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology Thammasat University, 2005.
- [2] การนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ประโยชน์, <http://maemoh.egat.com/index.php/sarattt?id=89>
- [3] เถ้าลอย จากของไร้ค่า สู่อุตสาหกรรมพันล้าน, สืบค้นจาก <http://www.technologymedia.co.th/column/columnview.asp?id=66>
- [4] Haldive S.A., Kambekar A. R., 2013. **Experimental study on combined effect of fly ash and pond ash on strength and durability of concrete**. International journal of Scientific & Engineering Research Volume.
- [5] Andrew B.' & Aceves P.G., 2012. **The use of Non-Commercial Fly ash in Roller compacted concrete structures**. World of Coal Ash (WOCA) conference, Denver, CO, USA.
- [6] Raungrut Cheerarot a, Chai Jaturapitakku, 2004. **A study of disposed fly ash from landfill to replace Portland cement**. Accepted 2 February [7] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 2 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าธนบุรี, 2552
- [7] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 2 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าธนบุรี, 2552
- [8] บุรฉัตร ฉัตรวีระ, **คุณสมบัติด้านความต้านทานและกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยแม่เมาะ**, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 23 ฉบับที่ 2, 2543 หน้า 17
- [9] Tazawa, E., and Miyazawa, S. 1993. **Autogenous Shrinkage of Concrete and Its Importance in Concrete Technology**. Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium, Barcelona, Spain, pp 189-168
- [10] Tangtermsirikul, S. 1998. **Effect of Chemical Composition and Particle Size of Fly Ash on Autogenous Shrinkage of Paste**. Proceeding of the International Workshop organized by JCI (Japan Concrete Institute) on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan, pp 175-186.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] Bissonnette, B., Pierre, P., and Pigeon, M. 1999. **Influence of key Parameters on Drying Shrinkage of Cementitious Material, Cement and Concrete Research**, 29, pp 1655-1662.
- [12] Chindaprasit, P., Homwuttivong, S., and Sirivivatnanon, V. 2004. **Influence of Fly Ash Fineness on Strength, Drying Shrinkage and Sulfate Resistance of Blended Cement Mortar, Cement and Concrete Research**, 34, pp 1087-1092.
- [13] H. Al-Khayat I, M.N. Haque I and N. I. Fattuhi “**Concrete Carbonation in Arid Climate,**” *Materials and Structures/Materiaux et Construction*, Vol. 35,2002. pp 421-426.
- [14] N.I. Fattuhi, “**Carbonation of Concrete as Affected By Mix Constituents and Initial Water Curing Period,**” *Materiaux et Constructions*, Vol 19,1986.
- [15] J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul and T. Leelawat “**A Study on Carbonation Depth Prediction for Fly Ash Concrete,**” *Construction and Building Materials*, Vol 20,2006. pp 744-753.
- [16] Thomas M.D.A. (1996). **Chloride Thresholds in Marine Concrete. Cement and Concrete Research**, 26, pp 513-519.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



ความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก

DURABILITY OF CONCRETE MIXED WITH WET FLY ASH

ดิษฐวัฒน์ แดงฉ่ำ¹ (Ditthawat Daengchum)¹ปิติศานท์ กร้ามาตร์² (Pitisan Krammar)²นิรชร นกแก้ว³ (Nirachorn Nokkaew)³¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีEmail: pee_kung191@hotmail.com^{2,3}รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี²Email: pitisan.k@en.mutt.ac.th, ³Email: nirachorn.k@en.mutt.ac.th

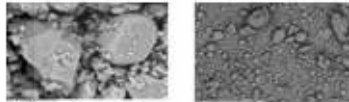
บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก เพื่อพัฒนาการนำเถ้าลอยเปียกไปใช้ประโยชน์ โดยใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง โดยเถ้าลอยใช้ทั้งสภาพแห้งและสภาพเปียกจากห้องปฏิบัติการที่มีปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 โดยสัมผัสความชื้นที่ระยะเวลา 1 สัปดาห์ (1W) 1 เดือน (1M) และ 3 เดือน (3M) โดยแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) แล้วทำการทดสอบสมบัติความคงทนของตัวอย่างเพสต์/มอร์ตาร์/คอนกรีต ผลการศึกษาพบว่า การขยายตัวของเถ้าลอยของเพสต์ผสมเถ้าลอย (ทั้งสภาพแห้งและสภาพเปียก) ไม่มีการขยายตัวโดยมีแนวโน้มที่จะหดตัว ส่วนการหดตัวของมอร์ตาร์และแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของ OPC ส่วน โดยการหดตัวของมอร์ตาร์และแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกมีค่าไม่แตกต่างกับของเถ้าลอยแห้ง ยกเว้นการหดตัวของมอร์ตาร์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่ระยะสัมผัสความชื้น 1W มีค่าน้อยกว่าของเถ้าลอยแห้ง ส่วนเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นต่างกันและระยะสัมผัสความชื้นที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อการหดตัวของมอร์ตาร์และแบบแห้งของมอร์ตาร์ นอกจากนี้พบว่า การเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่าของ OPC ส่วน โดยการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกมีค่าน้อยกว่าของเถ้าลอยแห้ง และปริมาณความชื้นที่ต่างกันและระยะสัมผัสความชื้นที่ต่างกันของเถ้าลอยเปียกไม่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีต สุดท้ายความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่าของ OPC ส่วน โดยความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกที่ระยะสัมผัสความชื้น 1W มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของ 1M มีค่าไม่แตกต่าง เมื่อเปรียบเทียบกับของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง โดยเถ้าลอยเปียกที่มีปริมาณความชื้นมากส่งผลให้มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าลดลง

ABSTRACT: This research was to study the durability properties of concrete mixed with wet fly ash to development for the utilization of wet fly ash. Fly ash from BLCP power plant in Rayong province was used. Wet fly ash from laboratories were prepared with a moisture content of 25, 45 and 65 percent which each moisture content exposed to moisture for a period of 1 week, 1 month, and 3 months. The partially replacing fly ash in cement Portland type 1 (OPC) were performed. The durability properties of paste/mortar/concrete were considered. The results showed that the autoclave expansion of fly ash paste, both dry and wet fly ashes was no expansion with a tendency to shrinkage. The autogenous and drying shrinkages of fly ash mortar had less than those of OPC mortar. The autogenous and drying shrinkages of wet fly ash mortar were not different from those of dry fly ash mortar, except the autogenous shrinkage of wet fly ash mortar at the moisture contact of 1 week was less than that of dry fly ash mortar. The wet fly ash with different moisture content and different moisture contact did not affect on the autogenous and drying shrinkages of fly ash mortar. Further, the carbonation depth of fly ash concrete was greater than that of OPC concrete. The carbonation depth of wet fly ash concrete was less than that of dry fly ash concrete. Moreover, the different moisture content and different moisture contact of wet fly ash had no effect on carbonation depth of concrete. Finally, the chloride penetration resistance of fly ash concrete was better than that of OPC concrete. The chloride penetration resistance of wet fly ash concrete at the moisture contact of 1 week was less, while that of 1 month was not different, when compared with that of dry fly ash concrete. Besides, the wet fly ash with high moisture content resulted on the chloride penetration resistance of concrete to be inferior.

KEYWORDS: Durability of concrete, Paste, Mortar, Wet fly ash

ลงปริมาณความชื้นให้สัมพันธ์ความชื้นที่ระยะเวลา 1 สัปดาห์ (1W) 1 เดือน (1M) และ 3 เดือน (3M)

ภาพที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา พบว่าลักษณะรูปร่างของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม มีมิติลักษณะผิวขรุขระ ขนาดค่อนข้างไม่แน่นอนแตกต่างกันไปกระจายอยู่ในขณะเถ้าลอยมีลักษณะกลม แต่มีลักษณะผิวที่ขรุขระไม่เรียบ และมีขนาดของอนุภาคมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ส่วนตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมี (วิเคราะห์โดยวิธี X-ray Fluorescence (XRF) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย



ก) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ข) เถ้าลอย

ภาพที่ 1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยที่ใช้

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยที่ใช้

ร้อยละออกไซด์	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย (T/M)			
		แห้ง	เปียก		
			25W	45W	65W
SiO ₂	18.93	61.09	61.39	61.26	61.30
Al ₂ O ₃	5.51	20.35	19.99	20.11	20.06
Fe ₂ O ₃	3.31	5.20	5.32	5.19	5.14
CaO	65.53	2.32	1.75	1.83	1.90
MgO	1.24	1.35	1.36	1.35	1.37
SO ₂	2.88	0.28	0.28	0.21	0.25
Na ₂ O	0.15	0.79	1.16	1.33	1.03
K ₂ O	0.31	1.36	1.32	1.40	1.41
TiO ₂	-	0.98	1.01	0.93	0.99
P ₂ O ₅	-	0.23	0.30	0.32	0.30
Free CaO	-	0.03	0.02	0.02	0.04
LOI	-	5.68	5.81	5.82	5.92

หมายเหตุ : 25W 45W 65W คือ เถ้าลอยเปียกที่มีปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ตามลำดับ

2.2.2 สมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

1) การขยายตัวโดยวิธีฮืออโตเคลฟของเพสต์

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C151/C151M โดยใช้ตัวอย่างเพสต์ขนาด 2.5x2.5x28.5 เซนติเมตร หลังจากนั้นให้นำตัวอย่างที่หล่อพร้อมบ่มเสร็จแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ± 30 นาที ออกมาจากอากาศชื้นแล้ววัดความยาวทันทีด้วยเครื่อง Length Comparator แล้วนำใส่ฮืออโตเคลฟที่อุณหภูมิห้องแล้วเพิ่มอุณหภูมิของฮืออโตเคลฟในอัตราที่ทำให้ความดันของไอน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 2 เมกะปาสคาล ภายในเวลา 45 ถึง 75 นาที ให้ควบคุมความดันอยู่ในระดับ 2±0.07 เมกะปาสคาลเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้ฮืออโตเคลฟเย็นจนจนความดันลดต่ำกว่า 0.07 เมกะปาสคาล เมื่อครบ 1 ½ ชั่วโมง นำตัวอย่างไปแช่ในน้ำที่มีอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แล้วทำให้อุณหภูมิ น้ำที่แช่ตัวอย่างลดลงในอัตราสม่ำเสมอจนถึง 23 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 15 นาที ปล่อยให้ตัวอย่างแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ต่อไปอีก 15 นาที แล้วจึงทำให้ตัวอย่างแห้งและวัดความยาวอีกครั้ง

2) การหดตัวแบบฮืออโตเจลิมัสของมอร์ตาร์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 157 โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ ขนาด 2.5x2.5x28.5 เซนติเมตร ถอดแบบที่ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำฟรอยด์เคลือบผิวตัวอย่างทั้งก้อนตัวอย่างแล้วหุ้มด้วยฟรอยด์ ทำการวัดการหดตัวของตัวอย่างที่อายุ 1 2 3 4 5 6 7 14 28 42 56 และ 91 วัน

3) การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 596 โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ ขนาด 2.5x2.5x28.5 เซนติเมตร ถอดแบบที่ 24 ชั่วโมง แล้วนำขึ้นตัวอย่างไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นนำขึ้นตัวอย่างวางไว้ในห้องปฏิบัติการ ทำการวัดการหดตัวแบบแห้งของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดความยาว ที่อายุ 1 2 3 4 5 6 7 14 28 42 56 และ 91 วัน

4) การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109 โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีต ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร ถอดแบบที่ 24 ชั่วโมง แล้วไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปอบในตู้อบคาร์บอนเนชั่น ที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ 40,000 ppm อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 โดยใช้ระยะเวลาในการเผชิญคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน และ 56 วัน จึงนำไปทดสอบหาความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่น นำตัวอย่างคอนกรีตแบ่งออกเป็น 2 ซีก โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine นำตัวอย่างคอนกรีตมาวางแล้วฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาไลนบนก้อนตัวอย่าง ปลดปล่อยไว้จนแห้งประมาณ 5 นาที ซึ่งถ้าเกิดสีม่วงแสดงว่าการเกิดคาร์บอนเนชั่น ถ้าไม่มีสีม่วงแสดงว่าไม่มีการเกิดคาร์บอนเนชั่น แล้วทำการวัดค่าความลึกบริเวณที่ไม่เกิดสี โดยใช้เวอร์เนียสวัดทั้ง 4 ด้าน ด้านละ 6 ค่า จุดบันทึกค่าความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่น แล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย

5) ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1202 โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 50 มิลลิเมตร หลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน นำตัวอย่างไปบ่มน้ำแล้วทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid Chloride Penetrability Test, RCPT) ของตัวอย่างที่อายุ 56 วัน โดยใช้ค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านขึ้นตัวอย่าง เพื่อนำไปประเมินความสามารถการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต โดยตารางที่ 2 แสดงระดับค่าการแทรกซึมผ่านคลอไรด์เมื่อพิจารณาผลการเคลื่อนที่ของประจุ ตามมาตรฐาน ASTM C1202

ตารางที่ 2 ระดับค่าการแทรกซึมผ่านคลอไรด์เมื่อพิจารณาผลการเคลื่อนที่ของประจุ ตามมาตรฐาน ASTM C1202

จำนวนประจุที่เคลื่อนที่ผ่าน (คูลอมป์)	ระดับการซึมผ่านได้
มากกว่า 4,000	สูง
2,000 ถึง 4,000	ปานกลาง
1,000 ถึง 2,000	ต่ำ
100 ถึง 1,000	ต่ำมาก
น้อยกว่า 100	ไม่มีผล

2.3 สัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตที่ใช้

สัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตผสม แก้วลอยที่ใช้ในการศึกษาความทนทานของคอนกรีต แสดงดังตารางที่ 3 ถึง 6

ตารางที่ 3 สัดส่วนของเพสต์ ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวออโตแคลฟ โดยใช้ปริมาณน้ำเท่ากับปริมาณน้ำที่เหมาะสม

สัญลักษณ์	ส่วนประกอบของเพสต์ (กรัม)		
	น้ำ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	แก้วลอย
P	0.25	1.00	-
P-20HM	0.27	0.80	0.20
P-20HM-25W-L1W	0.29	0.80	0.20
P-20HM-45W-L1W	0.30	0.80	0.20
P-20HM-25W-L1M	0.28	0.80	0.20
P-20HM-45W-L1M	0.28	0.80	0.20
P-20HM-25W-L3M	0.26	0.80	0.20
P-20HM-45W-L3M	0.26	0.80	0.20

ตารางที่ 4 สัดส่วนของมอร์ตาร์ ที่ใช้ทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้ง เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

สัญลักษณ์	ส่วนประกอบของมอร์ตาร์ (กรัม)			
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	แก้วลอย	ทราย	น้ำ
M	1.00	-	2.75	0.55
M-30HM	0.70	0.30	2.75	0.55
M-30HM-25W-L1W	0.70	0.30	2.75	0.55
M-30HM-45W-L1W	0.70	0.30	2.75	0.55
M-30HM-65W-L1W	0.70	0.30	2.75	0.55
M-30HM-25W-L1M	0.70	0.30	2.75	0.55
M-30HM-45W-L1M	0.70	0.30	2.75	0.55
M-30HM-65W-L1M	0.70	0.30	2.75	0.55
M-30HM-25W-L3M	0.70	0.30	2.75	0.55
M-30HM-45W-L3M	0.70	0.30	2.75	0.55
M-30HM-65W-L3M	0.70	0.30	2.75	0.55

ตารางที่ 5 สัดส่วนผสมของคอนกรีต ที่ใช้ในการทดสอบ การเกิดคาร์บอนขึ้นและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

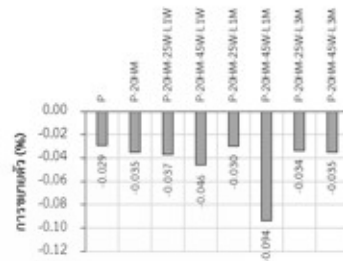
สัญลักษณ์	ส่วนผสมของคอนกรีตโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม)				
	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ทราย	หิน	น้ำ
C	372	-	771	1003	205
C-30HM	260	112	771	1003	205
C-30HM-25W-L1W	260	140	771	1003	177
C-30HM-45W-L1W	260	162	771	1003	155
C-30HM-65W-L1W	260	185	771	1003	132
C-30HM-25W-L1M	260	140	771	1003	177
C-30HM-45W-L1M	260	162	771	1003	155
C-30HM-65W-L1M	260	185	771	1003	132

หมายเหตุ: P คือ เพลสต์ M คือ มอร์ตาร์ C คือ คอนกรีต, 20HM คือเถ้าลอย Hunter Valley/Melawan แทนที่ปูนซีเมนต์แบบประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก, 25W 45W 65W คือ ความชื้นที่ร้อยละ 25 45 และ 65 ตามลำดับ, L1W L1M L3M คือ เถ้าลอยที่มียุทธศาสตร์ขึ้นจากห้องปฏิบัติการเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ (1W) 1 เดือน (1M) และ 3 เดือน (3M) ตามลำดับ

3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

3.1 การขยายตัวของโตนของเพลสต์

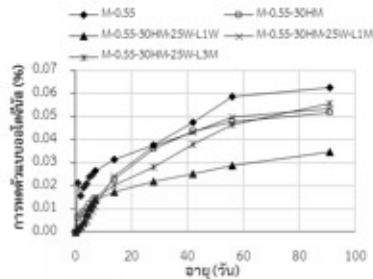
ภาพที่ 3 แสดงการขยายตัวของโตนของเพลสต์ OPC ล้วนและเพลสต์ผสมเถ้าลอย เมื่อใช้ปริมาณน้ำเท่ากับ ปริมาณน้ำที่เหมาะสม พบว่า การขยายตัวของโตนของเพลสต์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าเปียกทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 และ 45 (ทั้งที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1W 1M และ 3M) ไม่มีการขยายตัวและมีแนวโน้มที่จะหดตัว ทั้งนี้ เพราะเถ้าลอยดังกล่าวมีปริมาณของ CaO, Free CaO และ MgO ต่ำมากจึงทำให้เพลสต์ผสมเถ้าลอยไม่เกิดการขยายตัว



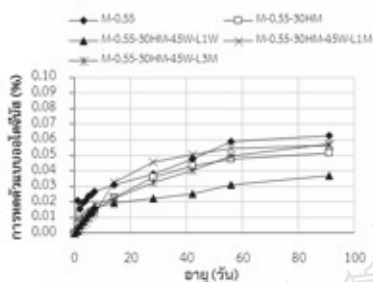
ภาพที่ 3 การขยายตัวของโตนของเพลสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ล้วนและเพลสต์ผสมเถ้าลอย

3.2 การหดตัวของบอโตจีนิกซ์ของมอร์ตาร์

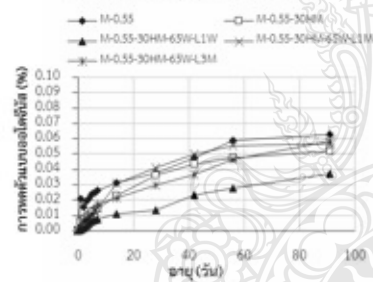
ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของบอโตจีนิกซ์และอายุของมอร์ตาร์ OPC ล้วนและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 พบว่า การหดตัวของบอโตจีนิกซ์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าเปียกทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1W 1M และ 3M) มีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์ OPC ล้วน ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะ การลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ทำให้มีการดึงน้ำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง ส่วนการหดตัวของบอโตจีนิกซ์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าเปียกทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ของระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1M และ 3M มีค่าไม่แตกต่างกัน ในขณะที่การหดตัวของบอโตจีนิกซ์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1W (ทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) มีค่าน้อยกว่าของระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1M และ 3M อย่างชัดเจน ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะเถ้าลอยเปียกที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้นน้อย (1W) นั้นมีเวลาสัมพัทธ์ความชื้นน้อยกว่า จึงมีน้ำอิสระมากกว่าเถ้าลอยเปียกที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้นนานกว่า (1M และ 3M) ส่งผลให้สามารถดึงน้ำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือปฏิกิริยาปอลิโซลันได้มาก การหดตัวจึงน้อยกว่า



ก) ปริมาณความชื้นร้อยละ 25



ข) ปริมาณความชื้นร้อยละ 45



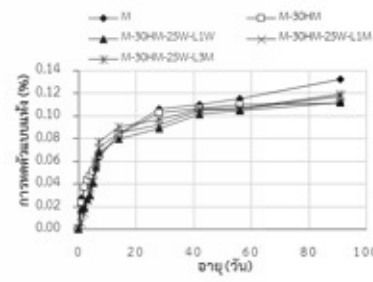
ค) ปริมาณความชื้นร้อยละ 65

ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัส และอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ส่วนผสมมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย

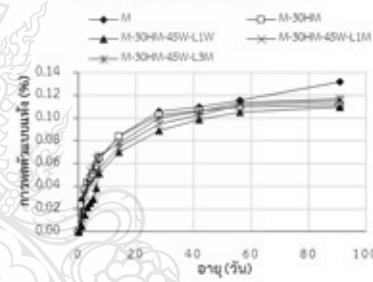
3.3 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์

ภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ OPC ส่วนผสมมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่ระยะเวลาสัมผัสดังกล่าว 1W 1M และ 3M) มีแนวโน้มน้อยกว่าของเพสต์ OPC ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอยมีส่วน

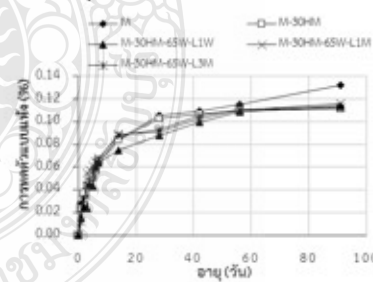
ทำปฏิกิริยาปอซโซลานก่อให้เกิด CSH เพิ่มขึ้นซึ่ง CSH ช่วยอุดช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ให้มีความหนาแน่นขึ้น ทำให้น้ำในช่องว่างคาปิลลารีระเหยได้ยากขึ้น ส่งผลให้การหดตัวแบบแห้งน้อยลง ส่วนการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่ระยะเวลาสัมผัสดังกล่าว 1W 1M และ 3M) มีค่าไม่แตกต่างกัน



ก) ปริมาณความชื้นร้อยละ 25



ข) ปริมาณความชื้นร้อยละ 45

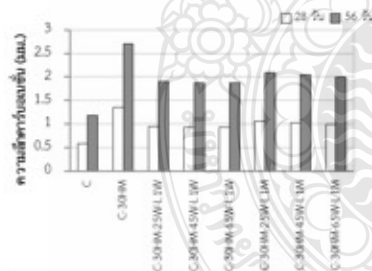


ค) ปริมาณความชื้นร้อยละ 65

ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ส่วนผสมมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย

3.4 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต

ภาพที่ 6 แสดงการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต OPC ล้วนและคอนกรีตผสมเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ที่อายุสัมพัทธ์คาร์บอนไดออกไซด์ 25 และ 56 วัน พบว่า การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1W และ 1M) มีค่ามากกว่าของคอนกรีต OPC ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่เถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง พร้อมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานต่างช่วยลดปริมาณ $C_2(OH)_2$ ทำให้เกิดคาร์บอนเนชั่นมากขึ้น ส่วนการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก (ทั้งที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1W และ 1M) มีค่าน้อยกว่าของเถ้าลอยแห้ง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอยเปียกได้เข้าไปเคลือบผิวของมวลรวมก่อนทำให้บริเวณผิวของมวลรวมมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานตัว และทำให้รอยต่อระหว่างวัสดุประสานกับมวลรวมมีกำลังอัดสูงขึ้น ส่งผลให้ความชื้นมากขึ้นทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าได้ยากขึ้น ส่งผลให้เกิดคาร์บอนเนชั่นน้อยลง ในขณะที่การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1W และ 1M) มีค่าไม่แตกต่างกัน

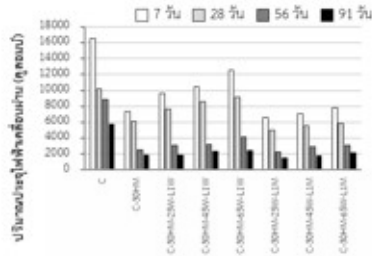


ภาพที่ 6 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ล้วนและคอนกรีตผสมเถ้าลอย

3.5 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

ภาพที่ 7 แสดงความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (หน่วยเป็น คูลอมบ์) ของคอนกรีต OPC ล้วน

และคอนกรีตผสมเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 พบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1W และ 1M) มีค่าต่ำกว่าของ OPC ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอยทำปฏิกิริยาปอซโซลาน รวมทั้งเถ้าลอยที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ช่วยเติมเต็มช่องว่างของพอร์ซ ซึ่งจากเหตุผลที่กล่าวมาส่งผลให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีความหนาแน่นหรือหีบแน่นมากขึ้น จึงมีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่า ส่วนความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก (ทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) ที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1W มีค่าต่ำกว่าของคอนกรีตเถ้าลอยแห้ง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอยเปียกที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้นน้อย (1W) มีความพรุนมากกว่าเถ้าลอยแห้ง ซึ่งจากเหตุผลที่กล่าวมาส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นหรือหีบแน่นน้อย จึงมีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ต่ำกว่า อย่างไรก็ตามความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก (ทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) ที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1M มีค่าไม่แตกต่างกับของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง แสดงว่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1M มีค่าต่ำกว่าของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1W ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอยเปียกที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้นเป็นเวลานานจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่า ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นหรือหีบแน่นมากขึ้น จึงมีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่า ในขณะที่ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 ตามลำดับ (ทั้งที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ความชื้น 1W และ 1M) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอยเปียกที่มีปริมาณน้ำมากจะมีผลทำให้คอนกรีตมีความพรุนมาก ส่งผลให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำลง



ภาพที่ 7 ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (หน่วยเป็น คูลอมบ์) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ส่วนและคอนกรีตผสมเถ้าลอย

4. สรุป

1) การขยายตัวของโพลีเมอร์ของเถ้าลอย (ทั้งเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยแฉะ) ไม่มีการขยายตัวโดยมีแนวโน้มที่จะหดตัว

2) การหดตัวของบ่อโตนีลแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (ทั้งเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้ง) มีค่าน้อยกว่าของ OPC ส่วน ส่วนการหดตัวของบ่อโตนีลแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียกมีค่าไม่แตกต่างกับของเถ้าลอยแห้ง ยกเว้นการหดตัวของบ่อโตนีลของเถ้าลอยเปียกที่ระยะสัมผัสความชื้น 1W มีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นต่างกันและระยะสัมผัสความชื้นที่ต่างกันไม่มีผลต่อการหดตัวของบ่อโตนีลแบบแห้งของมอร์ตาร์

3) การเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (ทั้งเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้ง) มีค่ามากกว่าของ OPC ส่วน โดยการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกน้อยกว่าของเถ้าลอยแห้ง ส่วนเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นต่างกันและระยะสัมผัสความชื้นที่ต่างกันไม่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชัน

4) ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (ทั้งเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้ง) มีค่าดีกว่าของ OPC ส่วน ส่วนความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกที่ระยะสัมผัสความชื้น 1W มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ 1M มีค่าไม่แตกต่าง

เมื่อเปรียบเทียบกับของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง โดยเถ้าลอยเปียกที่มีปริมาณความชื้นมาก ส่งผลให้มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าต่ำกว่า

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Pitkan Kammar, Properties of cement made by partially replacing cement raw materials with municipal solid waste ash and calcium carbide waste, and sulfate resistance of fly ash concrete, Ph.D. Thesis, Civil Engineering and Technology, Sindhon International Institute of Technology Thammasat University, 2005.
- [2] Warangkana Saengsoy, Thuy Bich Thi Nguyen and Somnuk Tangtermsirikul, 2014. A Study on basic properties of mortar made with wet fly ash. International Conference of Asian Concrete.
- [3] Haldive S.A, Kambekar A. R., 2013. Experimental study on combined effect of fly ash and pond ash on strength and durability of concrete. International Journal of Scientific & Engineering Research Volume.
- [4] Andrew B. & Acares P.G., 2012. The use of Non-Commercial Fly ash in Roller compacted concrete structures. World of Coal Ash (WOCA) conference, Denver, CO, USA.
- [5] Raungut Cheerarat a, Chai Jaturapitakku, 2004. A study of disposed fly ash from landfill to replace Portland cement. Accepted 2 February

ประวัติผู้เขียน

ประวัติผู้เขียน	นายดิษฐวัฒน์ แดงฉ่ำ
วัน เดือน ปีเกิด	9 ธันวาคม 2535
ที่อยู่	2/5 ซอยพหลโยธิน 54/1 แยก 6-8 แขวงคลองถนน เขตสายไหม จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10220
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประวัติการทำงาน	วิศวกร ระดับ 4 ส่วนแบบแผนและอาคาร ฝ่ายสนามบินและอาคาร ท่าอากาศยานดอนเมือง บริษัทท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน) ตั้งแต่ พ.ศ.2555 จนถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	092-265-5577
อีเมล	pee_kung191@hotmail.com, Ditthawat.d@airportthai.co.th

