



คุณสมบัติพื้นฐานของมอร์ต้าร์สำหรับงานพ่นเพื่อใช้ซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีต

BASIC PROPERTIES OF SHOTCRETE MORTAR FOR CONCRETE SURFACE REPAIR



ภัทรพล ไพจิตรวิจารณ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2563

คุณสมบัติพื้นฐานของมอร์ตาร์ท์สำหรับงานพื้นเพื่อใช้ซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีต



ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

BASIC PROPERTIES OF SHOTCRETE MORTAR FOR CONCRETE SURFACE REPAIR



PATTARAPON PAIJITVIJARN

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF ENGINEERING
(Civil Engineering)

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2020

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

คุณสมบัติพื้นฐานของมอร์ตาร์สำหรับงานพ่นเพื่อใช้ซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีต

ของ

ภัทรพล ไพจิตรวิจารณ์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วาที่ร้อยตรี ดร.ศุภชัย สິนถาวร) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วสันต์ ธีระเจตกุล)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพจน์ ศิริไพโรจน์)

ชื่อเรื่อง	คุณสมบัติพื้นฐานของมอร์ตาร์ดสำหรับงานพ่นเพื่อใช้ซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีต
ผู้วิจัย	ภัทรพล ไพจิตรวิจารณ์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2563
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วาทีร้อยตรี ดร. ศุภชัย สິนถาวร

งานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายเพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมอร์ตาร์ดพ่นพ่น และวัสดุปูนทรายธรรมดาสำหรับงานซ่อมแซม (มอร์ตาร์ดควบคุม) ศึกษาความเข้ากันได้ของงานซ่อมแซม จากการวิจัยพบว่ามอร์ตาร์ดพ่นพ่นเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติดีกว่าวัสดุมอร์ตาร์ดควบคุมในด้านกำลังอัด ด้านกำลังดึง ด้านความทนทานต่อการซึมผ่านน้ำ และโมดูลัสยืดหยุ่น ถึงแม้ว่าในช่วงอายุต้นวัสดุมอร์ตาร์ดพ่นพ่นจะมีคุณสมบัติด้านกำลังดัด และด้านการยึดหดตัวที่ต่ำกว่าวัสดุมอร์ตาร์ดควบคุมก็ตาม แต่โดยภาพรวมแล้ววัสดุมอร์ตาร์ดทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติที่ผ่านตามเกณฑ์ที่มาตรฐาน มยผ. 1901-51 กำหนด โดยมีค่ากำลังสูง มีความทึบน้ำอยู่ในเกณฑ์ปกติ มีค่าการหดตัวต่ำ ซึ่งเหมาะสำหรับงานซ่อมแซมคอนกรีต และจากการศึกษาความเข้ากันได้ของงานซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีตพบว่าวัสดุมอร์ตาร์ดซ่อมแซมทั้งสองชนิดมีความเข้ากันได้ดีกับวัสดุพื้นผิวคอนกรีตเดิมที่มีคุณสมบัติด้านกำลังอัด ด้านกำลังดึง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ต่ำกว่า จากผลการศึกษาพบว่าควรกำหนดค่ากำลังอัดของวัสดุมอร์ตาร์ดซ่อมแซมให้มีค่ามากกว่ากำลังอัดของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตอย่างน้อย 2.52 เท่าสำหรับมอร์ตาร์ดพ่นพ่น และอย่างน้อย 2.28 เท่าสำหรับมอร์ตาร์ดควบคุม เพื่อที่จะให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุซ่อมแซม (E_c) มีค่าไม่น้อยกว่าวัสดุพื้นผิวคอนกรีต (E_b)

คำสำคัญ : มอร์ตาร์ด, ปูนพ่น, วัสดุซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีต, ความเข้ากันได้ของงานซ่อมแซม, โมดูลัสยืดหยุ่น

Title	BASIC PROPERTIES OF SHOTCRETE MORTAR FOR CONCRETE SURFACE REPAIR
Author	PATTARAPON PAIJITVIJARN
Degree	MASTER OF ENGINEERING
Academic Year	2020
Thesis Advisor	Assistant Professor Acting Sub Lieutenant Suppachai Sinthaworn , D.Eng.

The aims of research are to study the basic properties of repairing mortars (shotcrete mortar and conventional mortar, which is controlled mortar) and the compatibility of the repair work. The research found that shotcrete mortar had better properties than controlled mortar material in terms of compressive strength, tensile strength, permeability coefficient and modulus of elasticity. At an early age, the shotcrete mortar shows flexural strength and shrinkage lower than that of controlled mortar. However, both types of mortars are ideally suited for repairing concrete and meet the criteria specified by the DPT: 1901-51 standard with high strength, normal low range of permeability and low shrinkage. The study showed that both repair mortars had a good compatibility with the concrete substrate which had lower compressive strength, tensile properties and modulus of elasticity. The results showed that the compressive strength of the shotcrete and the controlled mortar material should be at least 2.52 and 2.28 times, respectively, greater than the compressive strength of the concrete substrate in order to provide the elastic modulus of the repair material (E_r) is not less than the concrete substrate material (E_b).

Keyword : Mortar, Shotcrete, Repairing Material, Compatibility, Elastic Modulus

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการควบคุมปริญญาโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วสันต์ ธีระเจตกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพจน์ ศิริไพโรจน์ ที่ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินการแก้ไขจนปริญญาโทสำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ร้อยตรี ดร.ศุภชัย สິณถาวร ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ ให้การสนับสนุน ให้ความช่วยเหลือ และดูแลเอาใจใส่ในการจัดทำปริญญาโทฉบับนี้มาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากหน่วยวิจัยด้านนวัตกรรมที่ยั่งยืนในกรอบวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ตลอดจนขอขอบคุณ คุณมนตรีชัย อึ้ง วิจิตรอำไพ ผู้จัดการฝ่ายเทคนิคและขาย บริษัท ยูบาว (ประเทศไทย) จำกัด ที่สนับสนุนวัสดุปูนมอร์ตาร์สำเร็จรูปสำหรับการวิจัย

ขอขอบคุณท่านอาจารย์ทุกท่าน บุคคลากรเจ้าหน้าที่ทุกคน และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ นิสิตทุกคน ที่ให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษา และเสนอแนะแนวทางต่างๆ ให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณบิดามารดา ครอบครัว และครูอาจารย์ ที่อบรมสั่งสอน และเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยเสมอมา

ภัทรพล ไพจิตรวิจารณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ทั่วไป	1
ที่มาของปัญหา.....	2
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย	3
ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของมอร์ตาร์ทาร์	4
ศึกษาคุณสมบัติทางกลของมอร์ตาร์ทาร์.....	4
ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์ทาร์.....	5
ประโยชน์ของการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎี และการวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
ทั่วไป	6
การเลือกวัสดุ และคุณสมบัติที่สำคัญ.....	7
ความเข้ากันได้ของงานซ่อมแซม (Compatibility)	7
คุณสมบัติเชิงกล	8
คุณสมบัติทางกายภาพ.....	11

วัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซม	14
ปูนทรายธรรมดา (Conventional Mortar).....	16
ปูนทรายสูตรพิเศษ (Proprietary Repair Mortar).....	17
เทคนิคการพ่นคอนกรีต (Shotcrete)	17
ชนิดของวัสดุสำหรับพ่น	18
สัดส่วนของวัสดุพ่น	21
การเตรียมพื้นผิว	22
คุณสมบัติของวัสดุพ่น	23
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	28
วิธีวิจัย	28
วัสดุสำหรับการวิจัย	30
เครื่องมือ และอุปกรณ์ในงานวิจัย.....	32
ชุดเครื่องมือช่วยความปลอดภัย	32
เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการผสมมอร์ตาร์ และคอนกรีต	33
แบบหล่อสำหรับการขึ้นรูปตัวอย่าง.....	33
เครื่องมือ และอุปกรณ์ชุดทดสอบคุณสมบัติ	33
อุปกรณ์อื่นๆ	33
การเตรียมตัวอย่าง.....	34
การเตรียมส่วนผสมมอร์ตาร์.....	34
การเตรียมส่วนผสมคอนกรีต.....	35
วิธีการทดสอบ	36
การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์.....	36

การทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์.....	38
การทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์.....	39
การทดสอบการยึดหดตัวของมอร์ตาร์.....	41
การทดสอบความทนทานต่อการซึมผ่านของน้ำ.....	42
การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ.....	44
การทดสอบวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่น.....	46
การวิเคราะห์ความเข้ากันได้.....	48
บทที่ 4 ผลการวิจัย และวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	49
ผลการทดสอบวัดค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์.....	49
ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์.....	51
ผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์.....	52
ผลการทดสอบกำลังดัดของมอร์ตาร์.....	53
การเปรียบเทียบค่ากำลังของมอร์ตาร์.....	55
ผลทดสอบการยึดหดตัวของมอร์ตาร์.....	58
ผลทดสอบความทนทานต่อการซึมผ่านของน้ำ.....	60
ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ.....	62
ผลการทดสอบวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์.....	67
ผลการวิเคราะห์ความเข้ากันได้.....	73
การเปรียบเทียบผลทดสอบและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง.....	78
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	81
สรุปผลการวิจัย.....	81
อภิปรายผลการวิจัย.....	83
ข้อเสนอแนะ.....	86

ภาคผนวก ข้อมูล ผลทดสอบ และการคำนวณ	87
บรรณานุกรม	125
ประวัติผู้เขียน.....	130



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 ของเขตของการวิจัยและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง.....	4
ตาราง 2 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวและร้อยละการไหลแผ่ของคอนกรีต	13
ตาราง 3 ตารางค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตและระดับคุณภาพของคอนกรีต ...	14
ตาราง 4 ตารางวัสดุสำหรับซ่อมแซมและคุณสมบัติของวัสดุซ่อม.....	15
ตาราง 5 ข้อกำหนดคุณสมบัติของปูนทรายธรรมดาสำหรับงานซ่อมแซม.....	16
ตาราง 5 เปรียบเทียบชนิดผสมแบบเปียก (Wet-Mixed) และแบบแห้ง (Dry-Mixed).....	20
ตาราง 7 ข้อมูลการทดสอบและคุณสมบัติของ P. S. Mangat and F. J. O'Flaherty (1999)	26
ตาราง 8 การทดสอบและการกำหนดตัวแปร	29
ตาราง 9 ตัวอย่างขนาดของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ	31
ตาราง 10 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์.....	34
ตาราง 11 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต เพื่อจำลองเป็นวัสดุพื้นผิวเดิม	36
ตาราง 12 ผลการทดสอบวัดค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์	49
ตาราง 13 การเปรียบเทียบผลค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต	73
ตาราง 14 เปรียบเทียบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ และมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง.....	78
ตาราง 15 ผลการทดสอบวัดค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์	88
ตาราง 16 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนพื้น.....	89
ตาราง 17 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ควบคุม	91
ตาราง 18 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ปูนพื้น	93
ตาราง 19 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ควบคุม.....	95
ตาราง 20 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ปูนพื้น.....	97
ตาราง 21 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ควบคุม	99
ตาราง 22 ผลการทดสอบวัดค่าการยึดหดตัวของมอร์ตาร์ปูนพื้น รูปแบบที่ 1	101
ตาราง 23 ผลการทดสอบวัดค่าการยึดหดตัวของมอร์ตาร์ปูนพื้น รูปแบบที่ 2.....	102
ตาราง 24 ผลการทดสอบวัดค่าการยึดหดตัวของมอร์ตาร์ปูนพื้น รูปแบบที่ 3.....	103

ตาราง 25 ผลการทดสอบวัดค่าการยืดหดตัวของมอร์ตาร์ปูนพ่น รูปแบบที่ 4	104
ตาราง 26 ผลการทดสอบวัดค่าการยืดหดตัวของมอร์ตาร์ปูนพ่น รูปแบบที่ 5	105
ตาราง 27 ผลการทดสอบความทนทานต่อการซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนพ่น	106
ตาราง 28 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนพ่น	107
ตาราง 29 ผลการทดสอบความทนทานต่อการซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม	108
ตาราง 30 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม	109
ตาราง 31 ผลคุณภาพการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุซ่อมแซมและวัสดุพื้นผิวคอนกรีต	110
ตาราง 32 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุมอร์ตาร์ปูนพ่น อายุ 7 วัน ที่ความหนา 2.5 ซม.	111
ตาราง 33 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุมอร์ตาร์ปูนพ่น อายุ 7 วัน ที่ความหนา 5.0 ซม.	112
ตาราง 34 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุมอร์ตาร์ปูนพ่น อายุ 28 วัน ที่ความหนา 2.5 ซม.	113
ตาราง 35 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุมอร์ตาร์ปูนพ่น อายุ 28 วัน ที่ความหนา 5.0 ซม.	114
ตาราง 36 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุมอร์ตาร์ควบคุม อายุ 7 วัน ที่ความหนา 2.5 ซม.	115
ตาราง 37 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุมอร์ตาร์ควบคุม อายุ 7 วัน ที่ความหนา 5.0 ซม.	116
ตาราง 38 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุมอร์ตาร์ควบคุม อายุ 28 วัน ที่ความหนา 2.5 ซม.	117
ตาราง 39 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุมอร์ตาร์ควบคุม อายุ 28 วัน ที่ความหนา 5.0 ซม.	118
ตาราง 40 ผลการทดสอบวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุมอร์ตาร์ปูนพ่น ที่อายุ 28 วัน	119
ตาราง 41 ผลการทดสอบวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุ 28 วัน.....	120
ตาราง 42 ผลค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตที่ออกแบบกำลัง 90 กก./ตร.ซม.	121
ตาราง 43 ผลค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตที่ออกแบบกำลัง 110 กก./ตร.ซม.	121
ตาราง 44 ผลค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตที่ออกแบบกำลัง 150 กก./ตร.ซม.	122
ตาราง 45 ผลค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตที่ออกแบบกำลัง 240 กก./ตร.ซม.	122
ตาราง 46 ผลค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตที่ออกแบบกำลัง 320 กก./ตร.ซม.	123
ตาราง 47 อัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุมอร์ตาร์ปูนพ่นต่อวัสดุพื้นผิวคอนกรีต.....	124
ตาราง 48 อัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุมอร์ตาร์ควบคุมต่อวัสดุพื้นผิวคอนกรีต	124

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 ลักษณะความเสียหายจากการเป็นสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีต	2
ภาพประกอบ 2 ความเค้นต่อความเครียดของมวลรวม คอนกรีต และซีเมนต์เพสต์	10
ภาพประกอบ 3 การจำแนกขนาดการหดตัวสำหรับวัสดุซ่อมแซม	12
ภาพประกอบ 4 รูปแบบและชนิดของการพันวัสดุ	19
ภาพประกอบ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและการหดตัวอิสระ	27
ภาพประกอบ 6 แผนผังระเบียบวิธีการวิจัย	28
ภาพประกอบ 7 มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ	31
ภาพประกอบ 8 มวลรวมหยาบที่ใช้ในการทดสอบ	32
ภาพประกอบ 9 เครื่องผสมมอร์ตาร์	35
ภาพประกอบ 10 ตัวอย่างทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์	37
ภาพประกอบ 11 ตัวอย่างทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์	38
ภาพประกอบ 12 ตัวอย่างทดสอบกำลังดัดของมอร์ตาร์	40
ภาพประกอบ 13 ตัวอย่างทดสอบการยึดหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์	41
ภาพประกอบ 14 ตัวอย่างทดสอบการซึมผ่านของน้ำในมอร์ตาร์	43
ภาพประกอบ 15 การเตรียมพื้นผิวคอนกรีตสำหรับงานซ่อมแซม	44
ภาพประกอบ 16 ทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุซ่อมแซม	45
ภาพประกอบ 17 รูปแบบความเสียหายของการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ	46
ภาพประกอบ 18 การทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น	47
ภาพประกอบ 19 ค่าความชื้นสัมพัทธ์และค่าร้อยละการไหลแฉะของตัวอย่างมอร์ตาร์	51
ภาพประกอบ 20 ผลทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์	52
ภาพประกอบ 21 ผลทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์	53
ภาพประกอบ 22 ผลทดสอบกำลังดัดของมอร์ตาร์	54
ภาพประกอบ 23 ผลทดสอบกำลังดัดของมอร์ตาร์ช่วงอายุ 56 ถึง 180 วัน	54
ภาพประกอบ 24 การเปรียบเทียบร้อยละอัตราส่วนต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ปูนพื้น	55

ภาพประกอบ 25 การเปรียบเทียบร้อยละอัตราส่วนต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม	56
ภาพประกอบ 26 การเปรียบเทียบค่ากำลังของมอร์ตาร์	57
ภาพประกอบ 27 ผลการทดสอบการยึดหดตัวของมอร์ตาร์.....	59
ภาพประกอบ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุของมอร์ตาร์และระยะเวลาการซึมผ่านของน้ำ	60
ภาพประกอบ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์และระยะเวลาการซึมผ่านของน้ำ.....	61
ภาพประกอบ 30 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเปรียบเทียบกับกำลังอัดของมอร์ตาร์	62
ภาพประกอบ 31 คุณภาพของการซ่อมแซมด้วยวัสดุมอร์ตาร์ปูนพื้น ที่อายุ 7 วัน	63
ภาพประกอบ 32 คุณภาพของการซ่อมแซมด้วยวัสดุมอร์ตาร์ปูนพื้น ที่อายุ 28 วัน	63
ภาพประกอบ 33 คุณภาพของการซ่อมแซมด้วยวัสดุมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุ 7 วัน	64
ภาพประกอบ 34 คุณภาพของการซ่อมแซมด้วยวัสดุมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุ 28 วัน	64
ภาพประกอบ 35 กำลังยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์ปูนพื้นที่มีความหนา 2.5 ซม. บนพื้นผิวคอนกรีต....	65
ภาพประกอบ 36 กำลังยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์ปูนพื้นที่มีความหนา 5.0 ซม. บนพื้นผิวคอนกรีต....	66
ภาพประกอบ 37 กำลังยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์ควบคุมที่มีความหนา 2.5 ซม. บนพื้นผิวคอนกรีต ..	66
ภาพประกอบ 38 กำลังยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์ควบคุมที่มีความหนา 5.0 ซม. บนพื้นผิวคอนกรีต ..	67
ภาพประกอบ 39 ความเค้น และความเครียดของมอร์ตาร์ปูนพื้น	68
ภาพประกอบ 40 ความเค้น และความเครียดของมอร์ตาร์ควบคุม	68
ภาพประกอบ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของมอร์ตาร์.....	69
ภาพประกอบ 42 ความเค้น และความเครียดของคอนกรีต 90 กก./ตร.ซม.....	70
ภาพประกอบ 43 ความเค้น และความเครียดของคอนกรีต 110 กก./ตร.ซม.....	70
ภาพประกอบ 44 ความเค้น และความเครียดของคอนกรีต 150 กก./ตร.ซม.....	71
ภาพประกอบ 45 ความเค้น และความเครียดของคอนกรีต 240 กก./ตร.ซม.....	71
ภาพประกอบ 46 ความเค้น และความเครียดของคอนกรีต 320 กก./ตร.ซม.....	72
ภาพประกอบ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของคอนกรีต	72
ภาพประกอบ 48 ค่ากำลังอัดของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตและวัสดุมอร์ตาร์ปูนพื้น	74
ภาพประกอบ 49 ค่ากำลังอัดของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตและวัสดุมอร์ตาร์ควบคุม	74
ภาพประกอบ 50 ค่ากำลังดึงของวัสดุพื้นผิวคอนกรีต และวัสดุมอร์ตาร์ซ่อมแซม	75
ภาพประกอบ 51 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพื้นผิวคอนกรีต และวัสดุมอร์ตาร์ซ่อมแซม	76

ภาพประกอบ 52 อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่น (E_b / E_p) เปรียบเทียบอัตราส่วนกำลังอัด (σ_b / σ_p).. 77

ภาพประกอบ 53 วิธีพิจารณาความเข้ากันได้ที่ค้นพบจากการวิจัย..... 82



บทที่ 1

บทนำ

ทั่วไป

จากการสำรวจโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 150 สะพานทั่วประเทศไทย ในโครงการจัดทำฐานข้อมูลและแผนที่โครงข่ายทางหลวงในพื้นที่จังหวัดน่าน เพื่อจัดทำข้อมูล ความเสียหายพร้อมประเมินสภาพของโครงสร้างสะพานที่อยู่ในความรับผิดชอบของกรมทางหลวงชนบท พบสะพานมีลักษณะความเสียหายที่เกิดจากการเป็นสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เกิด การขยายตัว และดันให้คอนกรีตแตกออก ส่งผลให้ความสามารถในด้านการรับน้ำหนักบรรทุกของ โครงสร้างสะพานลดน้อยลงซึ่งไม่ปลอดภัยต่อผู้ใช้งานเนื่องจากการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของ คอนกรีต และเหล็กเสริม โดยหลักในการเกิดสนิมในคอนกรีตคือ ความชื้น และออกซิเจน ที่ซึมผ่าน คอนกรีตเข้าไปจนสามารถทำปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้ากับเหล็กเสริมเป็นผลให้เกิดการขยายตัวของเหล็ก เสริม รวมถึงการเสื่อมสภาพของคอนกรีตที่เกิดจากการใช้งาน หรือสภาพแวดล้อมที่รุนแรงจน คอนกรีตสูญเสียการป้องกันเหล็กเสริมได้ เช่น ระยะเวลาคอนกรีตไม่เพียงพอ กระแสน้ำไหลแรงกัด เสาหงคอนกรีต การปนเปื้อนของคลอไรด์ในน้ำและดิน ระดับของน้ำทะเลที่มีลักษณะแห้งสลับเปียก มีไอน้ำหรือมีความชื้นอยู่ตลอดเวลา เป็นต้น ขึ้นส่วนโครงสร้างหลักของสะพานที่ตรวจพบความ เสียหายอยู่ในระดับรุนแรง คือ ตอม่อ คานรัดหัวตอม่อ กำแพงกันดิน และพื้นสะพานด้านล่าง ซึ่ง จะต้องดำเนินการซ่อมแซมขึ้นส่วนของโครงสร้างดังกล่าวให้กลับมาสู่สภาวะปกติ จะสังเกตว่า ขึ้นส่วนที่เป็นตอม่อ คานรัดหัวตอม่อ และกำแพงกันดิน เป็นส่วนที่สามารถเข้าถึงเพื่อดำเนิน ซ่อมแซมได้โดยวิธีเทหล่อแบบปกติ ยกเว้นขึ้นส่วนที่เป็นพื้นสะพานด้านล่าง ซึ่งไม่สามารถใช้ วิธีการตั้งนั่งร้านหล่อคอนกรีตได้แบบปกติ เนื่องจากระดับน้ำในลำคลองมีอยู่ตลอดเวลาทำให้การ ทำงานยากลำบากมากขึ้น จะต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงในการป้องกันน้ำ ติดตั้งนั่งร้าน และค้ำยันลงใน ลำคลอง จากปัญหาดังกล่าวทำให้ต้องคัดเลือกวิธีการในการซ่อมแซมที่สะดวก เหมาะสม และคุม ค่าในการใช้จ่าย ซึ่งวิธีการพ่น (Shotcrete) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้แก้ปัญหาในลักษณะดังกล่าวได้ เนื่องจากในขั้นตอนการดำเนินการไม่ต้องใช้แบบหล่อ ไม่ต้องใช้อุปกรณ์ค้ำยันนั่งร้านที่รับน้ำหนัก ได้สูง สามารถพ่นได้หลายทิศทาง อย่างไรก็ตามปัญหาในการเลือกวิธีการพ่นสำหรับการซ่อมแซม นั้นไม่ใช่ปัญหาที่สำคัญสำหรับงานซ่อมแซมแต่เป็นปัญหาที่เกิดจากการเลือกวัสดุที่มีคุณสมบัติ ตรงตามความต้องการของโครงสร้าง มีความเหมาะสมต่อสภาพความเสียหาย มีความเข้ากันได้ ของวัสดุซ่อมแซมกับวัสดุพื้นผิวเดิม และเป็นวัสดุที่เหมาะสมกับวิธีการพ่นซ่อมแซมที่เลือกใช้⁽¹⁾



ภาพประกอบ 1 ลักษณะความเสียหายจากการเป็นสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีต

ที่มาของปัญหา

เนื่องด้วยปัจจุบันการพ่น (Shotcrete) เริ่มเข้ามามีบทบาทในงานซ่อมแซมโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น วัสดุที่จะใช้สำหรับงานพ่นซ่อมแซมมีทั้ง คอนกรีต และมอร์ตาร์ แต่โดยส่วนใหญ่จะนิยมใช้วัสดุมอร์ตาร์มากกว่าวัสดุคอนกรีตเนื่องจากว่ามอร์ตาร์ผสมได้ง่ายกว่า มีผลติในรูปแบบสำเร็จรูปสามารถหาได้ทั่วไปตามท้องตลาด อีกทั้งไม่ต้องกังวลในเรื่องขนาดของมวลที่จะเกินกว่าขนาดของหัวพ่น (Nozzle) แต่อย่างไรก็ตามในวัตุประสงค์ของการพ่นซ่อมแซมโครงสร้างคือต้องการให้โครงสร้างที่ถูกซ่อมแซมกลับมา มีสภาพปกติ มีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกได้ดั้งเดิมหรือไม่น้อยกว่าเดิม และมีอายุการใช้งานที่คงทนยาวนานมากขึ้น ดังนั้นคุณภาพของงานซ่อมแซมจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาเป็นอันดับแรก โดยปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของงานซ่อมแซมคือ

คุณสมบัติของวัสดุมอร์ตาร์ซ่อมแซมและคุณสมบัติของวัสดุพื้นผิวคอนกรีต ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซมบางส่วนได้ถูกกำหนดไว้ภายใต้ข้อกำหนดและมาตรฐานที่มีอยู่ในปัจจุบัน เช่น มาตรฐานปฏิบัติในการซ่อมแซมคอนกรีต มยผ. 1901-51⁽²⁾ มาตรฐานสมาคมทดสอบวัสดุแห่งอเมริกา (ASTM) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามข้อกำหนดในการเลือกวัสดุซ่อมแซมเหล่านี้โดยส่วนใหญ่สนใจเฉพาะคุณสมบัติของวัสดุซ่อมแซมเพียงอย่างเดียว น้อยครั้งที่จะพิจารณาถึงคุณสมบัติของพื้นผิวคอนกรีตเดิมที่มีความเสียหาย⁽³⁾ ซึ่งอาจส่งผลต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต และคุณสมบัติของงานซ่อมแซมในระยะยาวได้ ปัญหาที่สำคัญของการซ่อมแซม คือ ปัญหาด้านความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุซ่อมแซมและวัสดุพื้นผิวเดิม เช่น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ค่าการหดตัวที่เกิดขึ้น ค่ากำลังรับแรงต่างๆ เป็นต้น ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการคัดเลือกวัสดุในการซ่อมแซมด้วยข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุที่มีผลต่อ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ค่าการหดตัว และค่ากำลังรับแรงระหว่างวัสดุซ่อมแซมและวัสดุพื้นผิวที่มีจำกัด และบ่อยครั้งที่มีการศึกษาเฉพาะข้อมูลด้านคุณสมบัติของวัสดุซ่อมแซมเพียงอย่างเดียวมากกว่าการประเมินความเข้ากันระหว่างวัสดุซ่อมแซมและวัสดุพื้นผิว ซึ่งอาจนำไปสู่ความแตกต่างทางด้านคุณสมบัติ และความล้มเหลวของงานซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีต อย่างไรก็ตามการศึกษาวิจัยถึงคุณสมบัติของวัสดุซ่อมแซม และคุณสมบัติของวัสดุพื้นผิวที่จะซ่อมแซมก่อนที่จะเข้าดำเนินการซ่อมแซมมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อนำไปสู่งานซ่อมแซมที่มีประสิทธิภาพ และอายุการใช้งานของโครงสร้างที่ยาวนาน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมอร์ตาร์ปูนพ่น และวัสดุปูนทรายธรรมดาสำหรับงานซ่อมแซมตาม มยผ. 1901-51(มอร์ตาร์ควบคุม) เพื่อใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีต
2. ศึกษาความเข้ากันได้ของงานซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีต

ขอบเขตของการวิจัย

ทดสอบและวิเคราะห์ผลงานวิจัยเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุซ่อมประเภทปูนทรายธรรมดา (มอร์ตาร์) ภายใต้มาตรฐานปฏิบัติในการซ่อมแซมคอนกรีต มยผ. 1901-51⁽²⁾ มาตรฐานสมาคมทดสอบวัสดุแห่งอเมริกา (ASTM) และมาตรฐานอุตสาหกรรมเยอรมัน (DIN) ดังตาราง 1 โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานของปูนทรายธรรมดาสำหรับงานซ่อมแซม สำหรับงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาเรื่องคุณสมบัติของวัสดุและผลในระยะยาว

ตาราง 1 ของเขตของการวิจัยและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

คุณสมบัติของมอร์ตาร์	มาตรฐาน มยผ. 1901-51	มาตรฐานอ้างอิงเสริม
การไหลแผ่	หัวข้อ ผ.1.3	ASTM C1437 และ C109
กำลังรับแรงอัด	หัวข้อที่ 6.1.2	ASTM C109 และ C387
กำลังรับแรงดึง	ไม่มีข้อกำหนด	ASTM C307
กำลังรับแรงดัด	ไม่มีข้อกำหนด	ASTM C348 และ C887
การยึดหดตัว	หัวข้อที่ 6.1.5	ASTM C157 C490 C1012 และ C845
การซึมผ่านของน้ำ	ไม่มีข้อกำหนด	DIN 1048 part 5
แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ	หัวข้อที่ 6.7.1	ASTM C4541
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น	ไม่มีข้อกำหนด	ASTM C469

ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของมอร์ตาร์

1. การทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C1437⁽⁴⁾

ศึกษาคุณสมบัติทางกลของมอร์ตาร์

อายุของตัวอย่างสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกลของมอร์ตาร์ คือ อายุ 1 3 7 14 28 56 112 และ 180 วัน ซึ่งประกอบไปด้วยการทดสอบดังต่อไปนี้

1. การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C109⁽⁵⁾ ด้วยตัวอย่างขนาด 50 x 50 x 50 มม. โดยเปรียบเทียบผลกำลังอัดขั้นต่ำกับข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C387⁽⁶⁾

2. การทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C307⁽⁷⁾ ใช้ตัวอย่างแท่งปริศขนาด 45 x 75 x 25 มม. มีคอคอดกว้าง 25 มม. โดยเปรียบเทียบผลกับการค่าประมาณกำลังรับแรงดึงจากการคำนวณโดยใช้ค่ากำลังอัด

3. การทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C348⁽⁸⁾ ใช้ตัวอย่างคานขนาด 40 x 40 x 160 มม. โดยเปรียบเทียบค่ากำลังดัดกับข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C887⁽⁶⁾

4. การทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเมอร์ตาร์ทาร์ และวัสดุคอนกรีต ที่ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C469⁽⁹⁾ ด้วยตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มม. สูง 300 มม.ตามมาตรฐาน ASTM C39⁽¹⁰⁾ โดยเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับทฤษฎี และประยุกต์ใช้ค่าอัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นกับการจำลองงานซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีต เพื่อใช้ศึกษาความเข้ากันได้ของงานซ่อมแซม

5. การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ ASTM D4541⁽¹¹⁾ ที่อายุ 7 และ 28 วัน ด้วยตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม.ตามชั้นความหนาที่กำหนด โดยเปรียบเทียบผลกับข้อกำหนดตามมาตรฐานปฏิบัติในการซ่อมแซมคอนกรีต มยผ. 1901-51 ในหัวข้อที่ 6.7.1⁽²⁾

ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเมอร์ตาร์ทาร์

1. การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างเมอร์ตาร์ทาร์ตามมาตรฐาน DIN 1048 part 5⁽¹²⁾ ตัวอย่างขนาด 150 x 150 x 150 มม. ที่อายุ 28 56 112 และ 180 วัน โดยศึกษาจากระยะการซึมผ่านของน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างเมอร์ตาร์ทาร์

2. การทดสอบการยึดหดตัวของเมอร์ตาร์ทาร์ตามมาตรฐาน ASTM C157⁽¹³⁾ โดยใช้ตัวอย่างขนาด 25 x 25 x 285 มม.ตามมาตรฐาน ASTM C490⁽¹⁴⁾ ที่อายุ 1 3 7 14 28 56 112 และ 180 วัน โดยเปรียบเทียบผลการยึดหดตัวกับข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C845⁽¹⁵⁾

ประโยชน์ของการวิจัย

1. เป็นข้อมูลสำหรับงานซ่อมแซมพื้นผิวโครงสร้างคอนกรีต
2. เป็นข้อมูลเพื่อพิจารณาใช้ในการออกแบบงานซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีต
3. เป็นแนวทางในการพิจารณาความเข้ากันได้ของงานซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีต
4. เป็นแนวทางการศึกษาและวิจัยเพิ่มเติมในงานซ่อมแซมคอนกรีต

บทที่ 2

ทฤษฎี และการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทั่วไป

การออกแบบคอนกรีตที่ดี คือการออกแบบเพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างคอนกรีตที่มีความคงทนตลอดอายุการใช้งาน ในอดีตการออกแบบคอนกรีตมีพื้นฐานความคิดมาจากกำลังของคอนกรีตที่อายุใดๆ มีจุดด้อยตรงที่ไม่ได้คำนึงถึงการเสื่อมสภาพของคอนกรีตไปตามอายุการใช้งาน ซึ่งสามารถจำแนกสาเหตุของการเสื่อมสภาพไว้ทั้งหมด 5 ชนิด⁽¹⁶⁾ คือ การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกายภาพ (Physical Deterioration) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางเคมี (Chemical Deterioration) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกล (Mechanical Deterioration) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางชีวภาพ (Biological Deterioration) และการเสื่อมสภาพโดยสาเหตุรวม (Mixed Process) ด้วยสาเหตุเหล่านี้จะส่งผลให้คอนกรีตเกิดความเสียหายในรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถจำแนกรูปแบบความเสียหายออกเป็น 8 ลักษณะ⁽¹⁷⁾ คือ การแตกร้าว (Cracking) การหลุดกะเทาะ (Spalling) การหลุดลอก (Scaling) การหลุดออกเป็นแผ่น (Delamination) การเกิดรูพรุน (Honeycomb) การเกิดคราบเกลือ สุกงอก (Efflorescence) การสึกกร่อน (Erosion) และการเกิดสนิม (Corrosion)

เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเกิดความเสียหายจากการเสื่อมสภาพตามปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น ความเสียหายจากการเสื่อมสภาพอาจจะขยายความรุนแรงจนส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้งาน และมีผลต่อเนื่องถึงกระบวนการซ่อมแซมที่อาจจะต้องใช้เทคนิควิธีการที่ยุ่งยากมากขึ้น รวมถึงต้องใช้เวลา และงบประมาณในการดำเนินการสูงกว่าปกติ อย่างไรก็ตามเมื่อมีการตรวจพบสิ่งผิดปกติควรเร่งดำเนินการซ่อมแซมก่อนที่ความเสียหายจะลุกลามมากขึ้น โดยส่วนใหญ่ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตจะแสดงให้เห็นบริเวณผิวด้านนอก ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงอาการ หรือสภาพของคอนกรีตในขณะปัจจุบัน ดังนั้นเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตจึงต้องมีการบำรุงรักษาเพื่อฟื้นฟูสภาพของโครงสร้างให้กลับมาเป็นปกติ⁽¹⁾ ขั้นตอนในการซ่อมแซมจึงต้องเริ่มจากพื้นผิวด้านนอกสุดของส่วนที่เสียหายก่อน โดยการสกัดทำความสะอาด และแทนที่ด้วยวัสดุซ่อม อย่างไรก็ตามงานซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีตด้วยวัสดุใหม่เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่นิยมใช้กันมากกว่าการรื้อถอนแล้วก่อสร้างใหม่ เหตุผลเพราะว่าการซ่อมแซมพื้นผิวด้วยวัสดุใหม่ทดแทนมีความสะดวกรวดเร็ว ประหยัดเวลา และลดค่าใช้จ่ายโดยรวมได้มากกว่า

เทคนิคการซ่อมแซมพื้นผิวเป็นเรื่องที่ต้องการความรู้ความเข้าใจอย่างมากเพื่อให้ผลดำเนินการนั้นมีประสิทธิภาพ และคงทนยาวนานตลอดอายุการใช้งาน ซึ่งสามารถจำแนกขั้นตอนเกี่ยวกับการซ่อมแซมไว้ทั้งหมด 6 ขั้นตอน⁽¹⁾ คือ การวิเคราะห์การซ่อมแซม (Repair Analysis) การเลือกวัสดุ (Material Selection) การเตรียมพื้นผิว (Surface Preparation) การทำความสะอาดซ่อมแซม และป้องกันเหล็กเสริม (Reinforcing Steel Cleaning, Repair and Protection) การเชื่อมยึดการซ่อมแซมพื้นผิวกับวัสดุเดิม (Bounding Surface Repair to Existing Substrate) และเทคนิคการเทหล่อติดตั้ง (Placement Techniques) ซึ่งในมาตรฐานปฏิบัติในการซ่อมแซมคอนกรีต (มยผ.1901-51)⁽²⁾ ได้จำแนกขั้นตอนเกี่ยวกับการซ่อมแซมไว้ทั้งหมด 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือ การสกัดคอนกรีตที่เสียหาย และการเตรียมพื้นผิว ขั้นตอนต่อมาคือ วัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซม และขั้นตอนสุดท้ายคือ วิธีการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีต ซึ่งจากข้อมูลการจำแนกขั้นตอนเกี่ยวกับการซ่อมแซมตามที่ Peter H. Emmons⁽¹⁾ และ มยผ.1901-51⁽²⁾ ได้จำแนกไว้มีความคล้ายคลึงกันโดยมุ่งเน้นในกระบวนการเลือกวัสดุ (Material Selection) และเทคนิคการเทหล่อติดตั้ง (Placement Techniques)

การเลือกวัสดุ และคุณสมบัติที่สำคัญ

งานวิจัยนี้ใช้วัสดุ mortar เป็นวัสดุสำหรับซ่อมแซม สำหรับการเลือกวัสดุเพื่องานซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีตควรคำนึงถึงคุณสมบัติของวัสดุซ่อมแซมที่ตรงตามความต้องการของโครงสร้าง และเพื่อความเหมาะสมในการใช้ร่วมกันกับคอนกรีต คุณสมบัติของวัสดุซ่อมแซมที่ควรคำนึงถึง คือ ความเข้ากันได้ของคุณสมบัติในงานซ่อมแซม คุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติสำคัญที่ควรพิจารณาเป็นอันดับแรกในการเลือกวัสดุสำหรับซ่อมแซมคอนกรีต คือคุณสมบัติเชิงกลประกอบด้วย กำลังอัด กำลังดึง กำลังดัดหรือโมดูลัสแตกร้าว กำลังยึดเหนี่ยว และโมดูลัสยืดหยุ่น คุณสมบัติทางกายภาพประกอบด้วย การหดตัวการขยายตัวจากความชื้น และการไหลซึม ส่วนคุณสมบัติทางเคมี คือคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบภายในของสาร และการเกิดของวัสดุนั้น

ความเข้ากันได้ของงานซ่อมแซม (Compatibility)

คำว่าความเข้ากันได้ หมายถึง ความเหมือนกัน ความสอดคล้องกัน ความเป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับความเข้ากันได้ของวัสดุซ่อมแซมแสดงถึงปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับความเข้ากันได้ของมิติหรือขนาด ความเข้ากันได้ของพันธะการยึดเหนี่ยว ความเข้ากันได้ของโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกล ความเข้ากันได้ในการซึมผ่าน ความเข้ากันได้ของสารเคมี และความเข้ากันได้

ทางไฟฟ้าเคมี คือปัจจัยที่ควรพิจารณาในการออกแบบเลือกวัสดุสำหรับการซ่อมแซม สำหรับการทดสอบคุณสมบัติที่สำคัญในการเลือกวัสดุซ่อมแซม เช่น การคืบ การยืดหดตัว โมดูลัสยืดหยุ่น ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน และที่สำคัญความเข้ากันได้ของพันธะหรือการยึดเหนี่ยว เป็นสิ่งที่ควรพิจารณาในออกแบบวัสดุซ่อมแซม ดังนั้น การเลือกวัสดุซ่อมแซมควรเลือกวัสดุที่มีคุณสมบัติดีกว่าวัสดุพื้นผิวเดิม และควรมีการทดสอบคุณสมบัติดังที่กล่าวมาข้างต้นก่อนนำไปใช้งานจริง⁽¹⁸⁾

คุณสมบัติเชิงกล

1. กำลังอัด (Compressive Strength) เป็นคุณสมบัติเบื้องต้นที่สำคัญของวัสดุซ่อมแซมเพื่อใช้ในการรับแรงภายในของโครงสร้าง หากต้องการซ่อมแซมโครงสร้างทดแทนส่วนที่เป็นด้วยคอนกรีตด้วยวัสดุซ่อมแซม กำลังต้านทานแรงอัดของวัสดุซ่อมแซมควรมีค่าไม่ต่ำกว่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเดิม⁽¹⁹⁾ ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติการรับแรงอัดประกอบด้วย

1.1 อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน ส่วนนี้ส่งผลโดยตรงกับค่ากำลังรับแรงอัด ปริมาณน้ำในส่วนผสมมีหน้าที่ทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ ซึ่งบ่งชี้ถึงความชื้นเหลวของวัสดุซ่อมแซม โดยทั่วไปความชื้นเหลวของมอร์ตาร์จะกำหนดโดยการไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C109⁽⁵⁾ ในปฏิกิริยาไฮเดรชันปริมาณน้ำที่เพียงพอสำหรับทำปฏิกิริยาเป็นซีเมนต์เจลประมาณ ร้อยละ 23 ซึ่งน้ำส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ระเหยออกได้ยากเพราะเป็นกลายเป็นองค์ประกอบหนึ่งของซีเมนต์เจล และน้ำส่วนที่เหลือจะอยู่ในโพรงของเจลและในโพรงคาปิลารีเป็นน้ำส่วนที่สามารถระเหยออกมาได้ ซึ่งหากมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงขึ้นไปจะทำให้มีโพรงเพิ่มขึ้นและส่งผลให้กำลังของวัสดุซ่อมแซมลดลงด้วย⁽²⁰⁾

1.2 อายุและการบ่ม กำลังของวัสดุซ่อมแซมพัฒนาตามปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นไปตามอายุ อัตราการเพิ่มของกำลังจะแตกต่างกันตามชนิดของปูนซีเมนต์ การบ่ม และสัดส่วนการผสม สำหรับเวลาที่ใช้การบ่มวัสดุซ่อมแซมนั้นหากสามารถบ่มให้อยู่ในสภาวะที่ชื้นตลอดเวลาได้ยาวนานเท่าไรค่าการรับกำลังของวัสดุซ่อมแซมก็จะยิ่งเพิ่มขึ้นด้วย⁽²¹⁾

1.3 ชนิดของซีเมนต์ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลที่สำคัญมาก เพราะปูนซีเมนต์เป็นตัวประสานให้มวลรวมยึดติดกัน ทั้งนี้ชนิดของปูนซีเมนต์แต่ละประเภทจะก่อให้เกิดกำลังของวัสดุซ่อมแซมที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้แม้ว่าจะใช้ปูนซีเมนต์ชนิดเดียวกันแต่หากมีความละเอียดแตกต่างกันอัตราการพัฒนากำลังก็จะแตกต่างกันตามไปด้วย ถ้าใช้ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากก็จะให้กำลังสูงโดยเฉพาะหลังจากที่แข็งตัวไปแล้วไม่นาน⁽²²⁾

1.4 มวลรวม ในมอร์ตาร์จะมีมวลรวมเฉพาะส่วนที่เป็นทรายหรือที่เรียกว่ามวลรวมละเอียด ปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ ประกอบด้วยความละเอียดของทราย ความคละ และอัตราส่วนของซีเมนต์ต่อทราย หากทรายที่มีความละเอียดมากจะมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากส่งผลให้ใช้ปริมาณซีเมนต์เพื่อประสานระหว่างเม็ดทรายมากตามไปด้วย⁽²⁰⁾ ดังนั้นหากต้องการอัตราส่วนระหว่างทรายกับซีเมนต์คงที่ ทรายที่ละเอียดจะให้ค่าการไหลต่ำกว่า และถ้าต้องการจะให้มีการไหลเท่ากับมอร์ตาร์ซึ่งมีทรายเป็นส่วนผสมต้องใช้น้ำมากขึ้น ส่งผลทำให้กำลังอัดลดลงรวมทั้งการหดตัวเพิ่มมากขึ้นด้วย

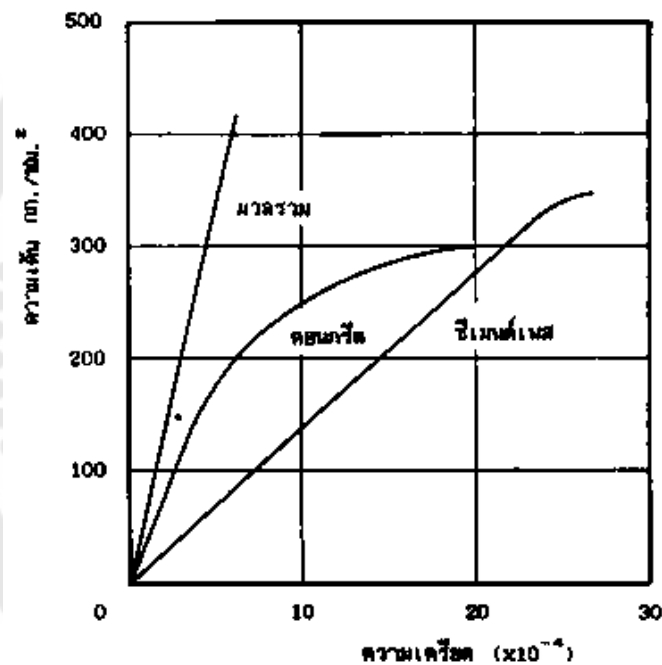
2. กำลังดึง (Tensile Strength) เป็นตัวควบคุมการแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีต เพื่อให้มีการต้านทานการแตกร้าวของโครงสร้างที่ซ่อมแซม วัสดุซ่อมแซมควรมีกำลังต้านทานการรับแรงดึงที่อย่างน้อยควรเท่ากับคอนกรีตเดิมหรือสูงกว่า⁽¹⁹⁾ โดยคุณสมบัติด้านการรับแรงดึงของมอร์ตาร์ และคอนกรีตมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถการรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงจะเป็นสัดส่วนกับกำลังรับแรงอัดโดยมีค่าประมาณร้อยละ 10 ของกำลังรับแรงอัดประลัย⁽²²⁾ การทดสอบกำลังดึงทำได้โดยวิธีดึงโดยตรง (Direct Tensile Test) ทดสอบแบบดึงแยก (Splitting Test) และทดสอบแบบดัด (Flexural Strength Test) โดยทั่วไปการทดสอบแบบแรงดัดจะให้กำลังดึงมากกว่าสองวิธีแรกประมาณร้อยละ 15⁽²³⁾

3. กำลังดัด (Flexural Strength) หรือโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture) เป็นคุณสมบัติการรับแรงสูงสุดของวัสดุก่อนที่วัสดุจะเกิดการวิบัติเนื่องจากการดัดงอ โครงสร้างหลักที่รับแรงดัดได้แก่ คาน พื้น ในบางครั้งโครงสร้างเสาก็อาจรับแรงดัดด้วยเช่นกัน ในการซ่อมแซมโครงสร้างที่ทดแทนคอนกรีตด้วยวัสดุซ่อมแซมควรมีค่ากำลังรับแรงดัดไม่น้อยกว่ากำลังดัดของวัสดุพื้นผิวเดิม

4. กำลังยึดเหนี่ยว โดยทั่วไปกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุซ่อมแซมกับคอนกรีตควรจะสูงกว่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตเดิม เพราะเมื่อมีแรงกระทำต่อโครงสร้างที่ถูกซ่อมแซมจะทำให้ไม่เกิดแรงดึงขึ้นในวัสดุซ่อมแซมก่อนที่จะเกิดในคอนกรีต⁽¹⁹⁾ ทั้งนี้กำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุซ่อมแซมกับคอนกรีต หรือเหล็กจะขึ้นอยู่กับกำลังอัดเช่นเดียวกับกำลังดึง กำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุซ่อมแซมคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับความสามารถซึมแทรกลงไปเนื้อคอนกรีตเดิม แม้ว่ากำลังอัดของวัสดุซ่อมแซมจะสูงก็ตามหากไม่สามารถไหลลื่นได้ดีพอก็จะไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปเนื้อคอนกรีตเดิมได้ ส่งผลให้กำลังยึดเหนี่ยวลดลง

5. โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ของวัสดุซ่อมแซมและคอนกรีตเดิมควรมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันเพื่อป้องกันการหลุดร่อนออกของวัสดุซ่อมแซม การใช้วัสดุซ่อมที่มีค่า

โมดูลัสยืดหยุ่นที่แตกต่างกันมารับแรงร่วมกันอาจทำให้โครงสร้างโดยรวมเกิดการเสียรูปปร่างแตกต่างกันเนื่องจากวัสดุที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าจะสามารถกระจายหน่วยแรง และทดต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดีกว่าวัสดุที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงต่ำกว่า⁽¹⁹⁾ สำหรับมอร์ตาร์ซึ่งเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยซีเมนต์เฟส และมวลรวม จะมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะอยู่ระหว่างโมดูลัสความยืดหยุ่นของซีเมนต์เฟส และของวัสดุมวลรวม⁽²⁰⁾ ดังภาพประกอบ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของมวล และซีเมนต์เฟสจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ส่วนของคอนกรีต หรือมอร์ตาร์จะมีความโค้ง เพราะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน



ภาพประกอบ 2 ความเค้นต่อความเครียดของมวลรวม คอนกรีต และซีเมนต์เฟส

ที่มา: ปริญา, 2549⁽²⁰⁾

สมการคำนวณหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 318-19⁽²⁴⁾

$$E_c = 15,100 \sqrt{f'c} \quad (1)$$

เมื่อ E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์, กก./ตร.ซม.

$f'c$ = กำลังอัดประลัย, กก./ตร.ซม.

สมการคำนวณหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน AIJ⁽²⁵⁾

$$E_c = 2.1 \times 10^5 \times \left(\frac{\gamma}{2.3}\right)^{1.5} \times \left(\frac{F_c}{200}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

เมื่อ E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต, กก./ตร.ซม.
 γ = หน่วยน้ำหนักของวัสดุ, ตัน
 F_c = กำลังของคอนกรีต, กก./ตร.ซม.

คุณสมบัติทางกายภาพ

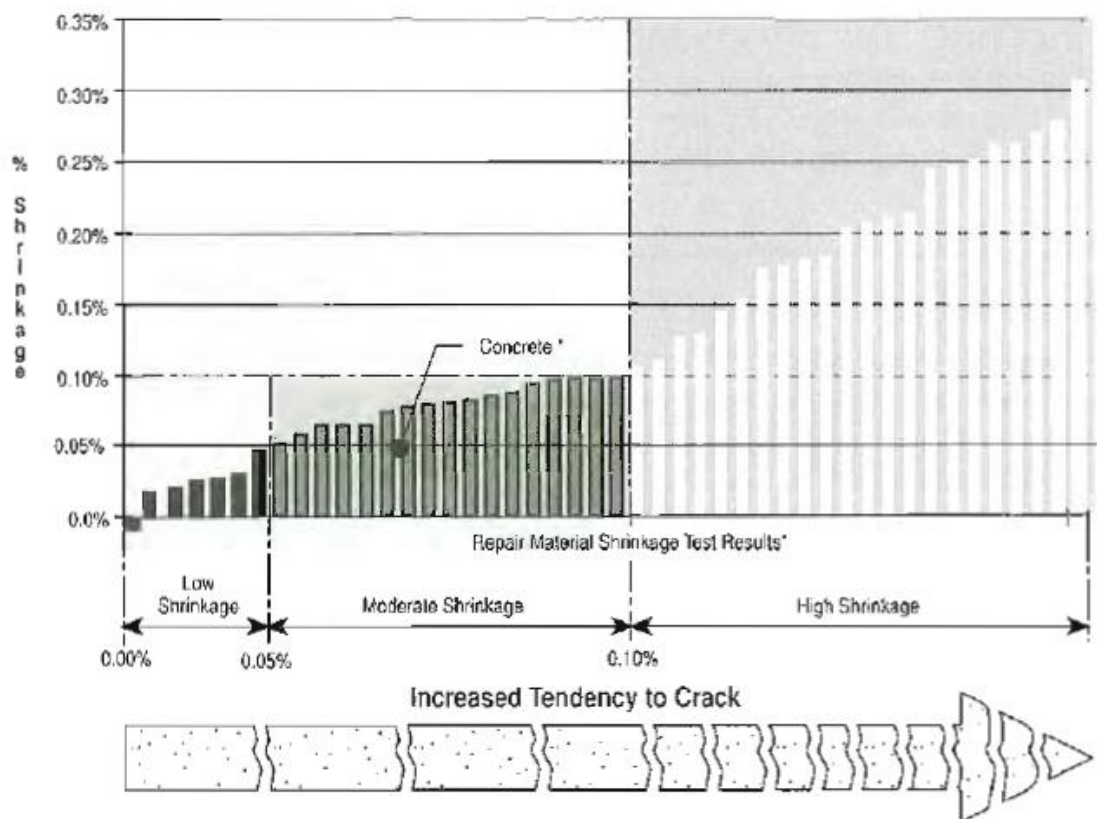
1. การหดตัว (Shrinkage) ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ และก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุที่มีผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวของผิวรอยต่อของวัสดุทั้ง 2 ที่สัมผัสกัน ซึ่งหากมีการยึดรั้งอาจนำไปสู่การแตกร้าวได้ ดังนั้นค่าการหดตัวของคอนกรีตเดิม และวัสดุซ่อมแซมควรมีค่าที่ใกล้เคียงกันเพื่อไม่ให้เกิดค่าความแตกต่างของการหดตัวระหว่างวัสดุทั้ง 2 วัสดุ ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวมีอยู่หลายปัจจัย เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อายุของวัสดุ ความชื้นในอากาศ และการบ่มวัสดุ เป็นต้น ซึ่งสภาวะการหดตัวสามารถแยกได้ 3 สภาวะดังนี้

1.1 การหดตัวในสภาวะพลาสติก (Plastic Shrinkage) การหดตัวเกิดขึ้นในขณะที่คอนกรีต หรือมอร์ตาร์ยังอยู่ในสภาวะพลาสติกการหดตัวในสภาวะพลาสติกมีประมาณร้อยละ 1 ของปริมาตรสัมบูรณ์ (Absolute Volume) ของเนื้อซีเมนต์แห้ง สาเหตุที่เกิดทำให้การหดตัวเป็นแบบนี้เพราะการเสียน้ำเนื่องจากการระเหยของน้ำจากผิวคอนกรีต และการดูดน้ำของไม้แบบการหดตัวแบบนี้ทำให้เกิดรอยร้าวที่ผิวของคอนกรีตได้⁽²⁶⁾

1.2 การหดตัวออโตจีนิส (Autogenous Shrinkage) แม้ว่าจะไม่มีการสูญเสียน้ำออกสู่ภายนอก แต่ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์กับน้ำ สามารถทำให้เกิดการหดตัวได้ อันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีของส่วนประกอบของซีเมนต์ โดยทั่วไปแล้วการหดตัวแบบนี้จะมีผลน้อย แต่จะมีผลมากต่อโครงสร้างจำพวกคอนกรีตหยา และทดสอบหาการหดตัวมักจะเป็นผลรวมของการหดตัวแบบออโตจีนิส กับการหดตัวจากการเสียน้ำ⁽²⁶⁾

1.3 การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) คอนกรีต หรือมอร์ตาร์เมื่อสูญเสีย น้ำจะเกิดการหดตัวปริมาณคอนกรีตที่หดลงกับปริมาณน้ำที่สูญเสียออกไปจะไม่เท่ากัน เพราะว่ น้ำที่ระเหยออกมาในตอนแรกเป็นน้ำที่ออกจากโพรงคาปิลารี ซึ่งทำให้เกิดการหดตัวน้อยมาก หลังจากทีน้ำออกจากโพรงคาปิลารีหมดแล้วต่อไปน้ำที่ออกมาจะเป็นน้ำในโพรงของเจล ปริมาตรของน้ำที่ระเหยออกจะมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ที่หดตัวลง⁽²⁰⁾ ซึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้ง คือผลรวมที่ผสมกับซีเมนต์เพสต์ หากอัตราส่วนระหว่างมวล

รวมต่อซีเมนต์เพสต์มาก จะทำให้การหดตัวลดลง เพราะว่ามวลรวมจะต้านการหดตัวด้วยเหตุนี้ คอนกรีต หรือมอร์ตาร์ที่มีความยืดหยุ่นของมวลรวมสูงกว่า สามารถต้านการหดตัวได้ดีกว่า ซึ่งจะ ทำให้การหดตัวลดลงอัตราส่วนน้ำในส่วนผสมมากส่งผลทำให้การหดตัวมากขึ้น เพราะมวลรวม ต่อปริมาตรลดลงทำให้การต้านการหดตัวของมวลรวมลดลง และการลดลงของกำลังของซีเมนต์ เพสต์ ทำให้การยึดเกาะระหว่างมวลรวมลดลงด้วย ซึ่งมีผลให้การต้านการหดตัวลดลง⁽²⁶⁾ สำหรับ ค่าการหดตัวของคอนกรีตทั่วไปจะอยู่ประมาณร้อยละ 0.050 และสำหรับค่าการหดตัวของมอร์ตาร์จะอยู่ในช่วงร้อยละ 0.050 ถึง 0.100⁽¹⁾ อย่างไรก็ตามจากข้อมูลการวิจัยพบว่ามอร์ตาร์ทั่วไปที่ ผลิตตามมาตรฐาน ASTM C109 มีค่าร้อยละการหดตัวสูงสุดเท่ากับ 0.0435 ที่อายุ 150 วัน⁽²⁷⁾



Shrinkage test results, Alberta Concrete Patch Evaluation Program,
Report No. ABTR/RD/RR-87/05

ภาพประกอบ 3 การจำแนกขนาดการหดตัวสำหรับวัสดุซ่อมแซม

ที่มา: Peter H. Emmons, 2008⁽¹⁾

2. ความลื่นไหล (Flow) ความสามารถในการไหลเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของวัสดุซ่อมแซม แม้ว่าวัสดุซ่อมแซมจะมีกำลังสูงเพียงใดหากไม่มีการไหลลื่นดีพอก็ไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปในรอยร้าวขนาดเล็กได้ ซึ่งจะทำให้กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับวัสดุซ่อมต่ำกว่าที่ควรเป็น สำหรับวัสดุซ่อมแซมประเภทมอร์ตาร์ ความสามารถไหลลื่นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และความละเอียดของทรายที่ผสม สำหรับมอร์ตาร์มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากัน และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากัน ทรายที่ละเอียดจะไหลลื่นได้ดีต่ำกว่าทรายที่หยาบ เพราะทรายละเอียดกว่าจะมีพื้นที่ผิวต่อปริมาณมากกว่าทรายที่หยาบ การเพิ่มการไหลลื่นสามารถทำได้โดยการผสมสารลดน้ำพิเศษเข้าในส่วนผสม⁽²⁸⁾

ตาราง 2 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวและร้อยละการไหลแผ่ของคอนกรีต

ความชื้น เหลว	การยุบตัว (ซม.)	การไหลแผ่ (ร้อยละ)	หมายเหตุ
แห้ง (Dry)	0 – 2.5	0 - 20	คอนกรีตไม่เกาะตัวกัน แยกเป็นส่วนๆ สามารถทำให้แน่นได้โดยการกระทุ้งอย่างรุนแรง
หยาบ (Stiff)	2.5 – 6.0	15 - 60	คอนกรีตเกาะตัวกันค่อนข้างดีทำให้แน่นโดยใช้เครื่องเขย่า
ปานกลาง (Medium)	6.0 – 14.0	50 - 100	คอนกรีตเกาะตัวกันดี มีความชื้นเหลวพอดี สามารถทำเป็นรูปร่างได้ง่ายถึงแม้ว่าบางทีจะต้องทำให้แน่นโดยใช้เครื่องเขย่า
เปียก (Wet)	12.5 – 20.0	90 - 120	ลักษณะคอนกรีตเมื่อทิ้งไว้จะไหลแผ่แบนราบลง สามารถเทเข้าแบบได้โดยไม่ต้องกระทุ้ง
เลอะ (Sloppy)	17.5 – 25.0	110 - 120	มีลักษณะมอร์ตาร์จะแยกตัวออกจากมวลรวมหยาบ

ที่มา: SlideShare from Scribd⁽²⁹⁾

3. การซึมผ่านได้ (Permeability) ค่าการซึมผ่านได้ไม่ว่าจะเป็นระยะการซึมของน้ำ หรือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของวัสดุที่นำมาใช้ซ่อมแซมควรจะมีค่าต่ำ เนื่องจากจะช่วย ป้องกันไม่ให้วัสดุหรือสิ่งที่เป็นอันตรายแทรกซึมเข้าไปภายในคอนกรีตได้ง่าย และป้องกันไม่ให้ คอนกรีตและเหล็กเสริมเสื่อมสภาพ แต่อย่างไรก็ตามมีข้อควรระวังหากใช้วัสดุที่มีค่าการซึมผ่านต่ำ มากๆ อาจทำให้เกิดการปิดกั้นการระเหยออกของน้ำจากด้านในของคอนกรีตเดิม ซึ่งทำให้เกิดเป็น แรงดันสูงและทำให้เกิดการหลุดร่อนระหว่างผิวของวัสดุซ่อมแซมและวัสดุคอนกรีตเดิมออกได้⁽¹⁹⁾ ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำจะถูกควบคุมโดยค่าความพรุนของเนื้อซีเมนต์เฟสโดยค่า ความพรุนจะมากขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งความสามารถในการซึมผ่านได้จะมีค่าต่ำลง เมื่อเฟสที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ⁽²²⁾

ตาราง 3 ตารางค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตและระดับคุณภาพของคอนกรีต

ระดับคุณภาพ	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (K) ในคอนกรีต (ม.วินาที)
แย่ (Poor)	$> 10^{-11}$
ปกติ (Normal)	$10^{-11} - 10^{-13}$
ดี (Good)	$< 10^{-14}$

ที่มา: Yang K., Nanukuttan S., McCarter W.J., Long A., Basheer M., 2018⁽³⁰⁾

วัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซม

การเลือกวัสดุซ่อมแซมมีความสำคัญอย่างมากต่อการซ่อมแซม วัสดุซ่อมแซมมีมากมาย หลากหลายชนิด ดังนั้นการซ่อมแซมงานโครงสร้างคอนกรีตควรกำหนดคุณสมบัติอย่างเจาะจง เพื่อให้ได้วัสดุที่เหมาะสมสำหรับการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตในกรณีนั้นๆ ได้อย่างแท้จริง การ คัดเลือกวัสดุซ่อมแซมขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น วิธีในการดำเนินการ การรับแรงของ โครงสร้าง และความต้องการทางด้านความคงทน การคัดเลือกวัสดุจะมีความยากเนื่องจากการ ผลิตไม่สามารถผลิตตามความต้องการอย่างเฉพาะเจาะจงของการซ่อมแซมในแต่ละงานได้

นอกจากนี้การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแต่ละงานซ่อมแซมยังคงแตกต่างกัน และมีเงื่อนไขในการทดสอบของแต่ละงานแตกต่างกันไปด้วย⁽¹⁹⁾ ดังนั้นการเข้าใจถึงสาเหตุและความต้องการของงานซ่อมแซมจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่สำคัญมากในการเลือกใช้วัสดุ

ตาราง 4 ตารางวัสดุสำหรับซ่อมแซมและคุณสมบัติของวัสดุซ่อม

วัสดุ	การใช้งาน		คุณสมบัติของวัสดุ					
	ความหนา (ซม.)	การบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)				การหดตัวแบบแห้ง (ร้อยละ)	โมดูลัสยืดหยุ่น (กก./ตร.ซม.)
			1 ซม.	1 วัน	3 วัน	28 วัน		
ซีเมนต์มอร์ตาร์	3.8 - 10	เป็ยก 7	0	45	172	345	0.05 - 0.10	230,000
คอนกรีต	> 4.4	เป็ยก 7	0	45	172	345	< 0.05	260,000
อีพอกซีมอร์ตาร์	0.4 - 1.2	4 ซม. - 2 วัน	N/A	N/A	N/A	82.7	< 0.05	150,000
ปูนพื้น	> 1.3	เป็ยก 7	0	45	172	345	0.05 - 0.10	260,000

ที่มา: Peter H. Emmons, 2008⁽¹⁾

ตามขอบเขตของงานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุปูนทรายธรรมดา (มอร์ตาร์ควบคุม) และปูนทรายสูตรพิเศษ (มอร์ตาร์ปูนพื้น) ในการศึกษาโดยเปรียบเทียบผลกับข้อกำหนดด้านคุณสมบัติของปูนทรายธรรมดาสำหรับงานซ่อมแซม ดังแสดงในตาราง 5 อย่างไรก็ตามยังมีวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซมคอนกรีตอื่น ๆ อีกหลากหลายชนิดให้เลือกตามความเหมาะสม สามารถศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมได้จากมาตรฐานปฏิบัติในการซ่อมแซมคอนกรีต มยผ.1901-51⁽²⁾

ตาราง 5 ข้อกำหนดคุณสมบัติของปูนทรายธรรมดาสำหรับงานซ่อมแซม

คุณสมบัติ	ค่าที่ยอมให้	มาตรฐานอ้างอิง
กำลังรับแรงอัด	ที่อายุ 3 วัน ≥ 20.0 MPa ที่อายุ 28 วัน ≥ 35.0 MPa	ASTM C387
กำลังรับแรงดัด	ที่อายุ 3 วัน ≥ 4.8 MPa ที่อายุ 28 วัน ≥ 5.5 MPa	ASTM C887
แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ	แรงยึดเหนี่ยว \geq ร้อยละ 10 กำลังอัด ประลัยของคอนกรีตเดิม	มยพ. 1901-51 ใน หัวข้อที่ 6.7.1
การยึดหดตัวในภาวะปกติ และภาวะที่มีไซเดียมซัลเฟต	ที่อายุ 7 วัน \leq ร้อยละ 0.100 ที่อายุ 28 วัน \leq ร้อยละ 0.115	ASTM C845

ปูนทรายธรรมดา (Conventional Mortar)

ปูนทราย หรือมอร์ตาร์เป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มวลรวมละเอียด น้ำ และสารผสมเพิ่มอื่นๆ เพื่อลดน้ำ และลดการหดตัว

ประโยชน์ของปูนทรายธรรมดา ประกอบด้วย

1. ปูนทรายธรรมดาสามารถหาได้ง่าย ประหยัด และมีคุณสมบัติเหมือนคอนกรีตดั้งเดิมที่จะซ่อมแซม
2. สามารถผลิต เท ตกแต่ง และบ่มได้ง่าย คอนกรีตธรรมดาสามารถเทได้น้ำได้ง่ายโดยอาศัยวิธีที่เป็นที่รู้จักกันกว้างขวาง แต่ต้องระมัดระวังให้คอนกรีตเป็นเนื้อเดียวกันโดยตลอด วิธีการเทคอนกรีตได้น้ำที่นิยมใช้ คือใช้ท่อเทคอนกรีตได้น้ำ (Trimie) หรือใช้เครื่องสูบล
3. ปูนทรายยังสามารถใช้กับหน้าต่างที่บางกว่าได้ และมีการใช้ปูนทรายสำเร็จรูปกันอย่างกว้างขวางซึ่งเหมาะกับการซ่อมโครงสร้างที่มีความเสียหายเล็กน้อย

ข้อจำกัดสำหรับปูนทรายธรรมดาจะเกิดการหดตัวเมื่อแห้งมากกว่าคอนกรีตเนื่องจากมีสัดส่วนของน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ และอัตราส่วนของซีเมนต์เฟสต่อมวลรวมสูงกว่าคอนกรีต รวมถึงการไม่มีมวลรวมหยาบด้วย

การใช้งานปูนทรายธรรมดาสามารถใช้ได้เมื่อต้องการซ่อมแซมหน้าตัดที่บางๆ (ความหนาอยู่ในช่วงประมาณ 10 ถึง 50 มม.) การใช้ซ่อมผิวจราจรซึ่งมีแรงกระทำเป็นวัฏจักร (Cyclic Loading) จำเป็นต้องมีการพิจารณาเป็นพิเศษ และต้องมีการทดสอบภายใต้สภาพการใช้งานจริงเพื่อยืนยันประสิทธิภาพของวัสดุ และการติดตั้ง

มาตรฐาน มยผ. 1201 ถึง มยผ. 1212⁽³¹⁾ และ ASTM C387⁽⁶⁾ ได้กล่าวถึงผลิตภัณฑ์คุณสมบัติ การบรรจุและการทดสอบวัสดุผสมคอนกรีต และปูนทราย นอกจากนี้ควรให้ความสนใจคุณสมบัติอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง เช่น การหดตัว และความทนทานเป็นพิเศษด้วย

ปูนทรายสูตรพิเศษ (Proprietary Repair Mortar)

ปูนทรายสูตรพิเศษ คือปูนทรายสำเร็จรูปเป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือปูนซีเมนต์พิเศษอื่นๆ สารผสมเพิ่ม สารลดน้ำ สารเพิ่มการขยายตัว สารทำให้แน่นตัว สารเร่งพอลิเมอร์ หรือมวลรวมละเอียด

ประโยชน์ของปูนทรายสูตรพิเศษ คือ ความสะดวกในการใช้ที่หน้างาน และมีผลิตภัณฑ์ให้เลือกใช้ได้หลายประเภทซึ่งเหมาะกับลักษณะทางกายภาพ หรือลักษณะทางกลที่ต้องการของแต่ละงาน เช่น การซ่อมแซมพื้นผิวในแนวตั้ง และเหนือหัวของโครงสร้างที่มีความหนาปานกลาง โดย ไม่ต้องใช้ไม้แบบ ซึ่งต้องการเวลาในการก่อตัว และการบ่มที่น้อยกว่าปกติ เป็นต้น

ข้อจำกัดสำหรับปูนทรายสูตรพิเศษมีคุณสมบัติทางกลที่แตกต่างกันมากกว่าคอนกรีต เพราะอาจผสมด้วยปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงกว่า และสารปรับคุณสมบัติอื่นๆ จึงทำให้หดตัวมากกว่าคอนกรีตธรรมดาทั่วไป การใช้งานปูนทรายสูตรพิเศษต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดของผู้ผลิตอย่างเคร่งครัด

การใช้งานปูนทรายพิเศษบางสูตรสามารถใช้ซ่อมกับขนาดตั้งแต่ 3 มม. ขึ้นไป การใช้ซ่อมผิวจราจรซึ่งมีแรงกระทำเป็นวัฏจักรจำเป็นต้องมีการพิจารณาเป็นพิเศษ และต้องมีการทดสอบภายใต้สภาพการใช้งานจริงเพื่อยืนยันประสิทธิภาพของวัสดุ และการติดตั้ง

มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับปูนทรายสูตรพิเศษ คือมาตรฐาน ASTM C928⁽³²⁾

เทคนิคการพ่นคอนกรีต (Shotcrete)

การพ่นคอนกรีต (Shotcrete) เป็นการพ่นวัสดุอมอร์ตาร์ หรือพ่นวัสดุคอนกรีตที่ทำงานผ่านชุดอุปกรณ์เครื่องพ่น ลำเลียงด้วยแรงดันลมความเร็วสูง และทำการฉีดพ่นไปยังพื้นที่ตามที่ต้องการ ซึ่งอาจมีการเสริมใยเหล็ก หรือไม่ก็ได้ เทคนิคการพ่นเป็นหนึ่งในวิธีที่สามารถใช้ในงานซ่อมแซมคอนกรีตได้ ข้อดีของการทำการพ่น มี 3 ข้อ⁽³³⁾

1. ความคงตัว และลักษณะการยึดติดที่ดีกับพื้นผิวคอนกรีต หิน เหล็ก และวัสดุอื่นๆ มีความแข็งแรงสูง การดูดซึมน้ำต่ำ และทนทานต่อสภาพแวดล้อม
2. ใช้แทนการหล่อคอนกรีตทั่วไปในส่วนที่มีพื้นที่ทำงานกว้าง เนื่องด้วยประหยัดต้นทุน และสะดวกสบาย การทำการพ่น มีข้อดีคือช่วยลดปริมาณการใช้ปูน ทราย และแบบหล่อ สามารถเข้าถึงพื้นที่ทำงานได้สะดวกแม้ในพื้นที่แคบหรือมีพื้นที่จำกัด ใช้พื้นที่ในการจัดวางเครื่องผลิตวัสดุพ่นน้อย
3. ความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพ่น และวัสดุพื้นผิวอื่นค่อนข้างดี ซึ่งเป็นเรื่องสำคัญในการออกแบบ แรงกระแทกของวัสดุพ่นที่ถูกขับพ่นด้วยปั๊มลมทำให้พื้นผิวของคอนกรีตอัดแน่น ส่งผลต่อการยึดติดกับพื้นผิวได้ดี วัสดุสำหรับพ่นเองสามารถพ่นอยู่ได้ในขณะพ่นในแนวตั้ง แนวตั้ง หรือแนวเหนือศีรษะ

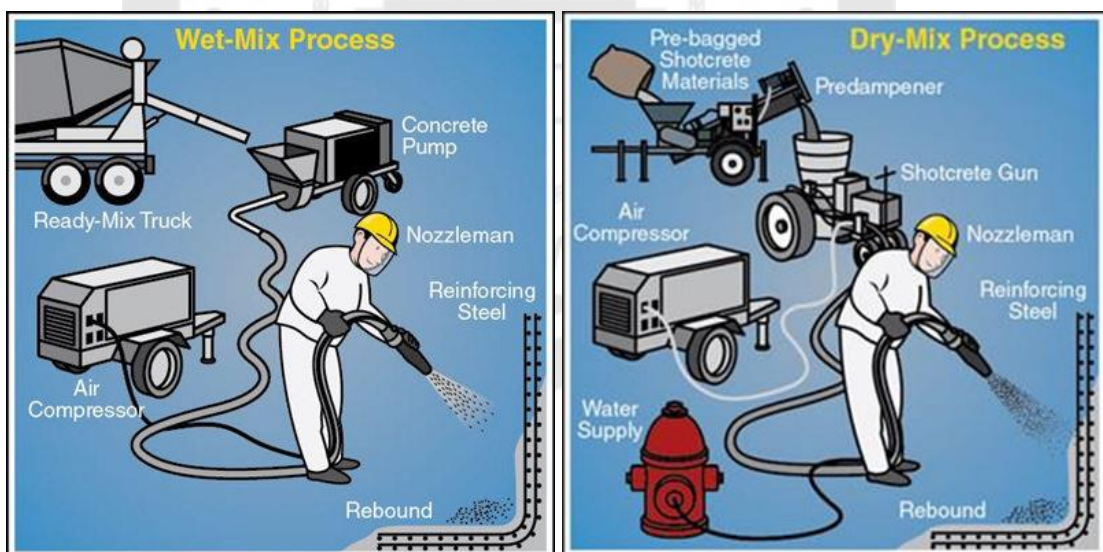
วัสดุที่ใช้ในงานพ่น ปัจจุบันมีทั้งการสังเคราะห์ผสมเสร็จ หรือมอร์ตาร์ผสมเสร็จ มากับรถขนส่งปูนสำเร็จรูป เป็นการผสมสำเร็จแบบเปียกจากโรงงาน ซึ่งอาจใส่หินเกล็ด เป็นมวลคละหยาบก็ได้ หรือวัสดุแห้งที่ต้องผสมเอง อันประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน (Pozzolan) ซึ่งคือวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบไปด้วย ซิลิกา และอลูมินา อยู่ในปริมาณสูง เมื่ออบเป็นผงละเอียด จะมีความสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิปกติ และเมื่อมีความชื้นแล้วเกิดเป็นสารประกอบซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ผสมกับมวลคละหยาบ หรือมวลคละละเอียด โดยขนาดของ มวลคละนี้จะเป็นตัวกำหนดว่า การพ่นจะใช้หัวพ่น (Nozzle) ขนาดเท่าใด ซึ่งงานปกติหัวพ่นจะมีขนาดไม่เกิน 1/2 นิ้ว วัสดุอาจมีการผสมสารเร่งการก่อตัว (Acceleration Admixtures) หรือเส้นใย (Fiber) ขึ้นอยู่กับการออกแบบ และความต้องการของผู้ใช้งานสามารถศึกษาได้จากมาตรฐาน ACI 506.2-95⁽³⁴⁾

ชนิดของวัสดุสำหรับพ่น

1. ชนิดผสมแบบเปียก (Wet-Mixed) ในการใช้งานวัสดุจะต้องผสมพร้อมน้ำให้เข้ากันในถังผสมก่อนที่จะส่งผ่านไปยังหัวพ่น สำหรับรูปแบบการผสมวัสดุสามารถใช้รูปแบบที่ผสมประจำจุดใช้งาน หรือรูปแบบที่ส่งจากโรงงานผสมเสร็จภายนอกก็ได้ตามความต้องการ เมื่อได้วัสดุเปียกมาแล้วต้องลำเลียงไปยังถังฮอปเปอร์ของระบบส่ง หลังจากนั้นจะมีระบบปั๊มแรงดันในการส่งวัสดุไปยังหัวพ่น ซึ่งระบบปั๊มปัจจุบันมีอยู่ 2 ระบบ คือ ปั๊มระบบเครื่องยนต์ ได้แก่ ปั๊มไฮดรอลิก (Piston Pump) และปั๊มระบบไฟฟ้า ได้แก่ ปั๊มสกรูมอเตอร์ (Rotor & Stator) ซึ่งระบบส่งจะดันวัสดุไปตามสายลำเลียงวัสดุ โดยจะมีสายลมคู่ขนานกับสายส่งวัสดุจากนั้น วัสดุ และลมจะรวมกันที่ปลายปืนพ่น เป็นการเพิ่มแรงอัดเพื่อเพิ่มความเร็วในการพ่นออกไปยังพื้นที่ที่ต้องการ ในส่วน

เครื่องผสมวัสดุสำหรับพ่น มีลักษณะเฉพาะสำหรับพ่นเท่านั้น โดยสามารถผสมปูนซีเมนต์ และ วัสดุผสมพร้อมน้ำเข้าด้วยกันในถังผสมก่อน จากนั้นจึงส่งวัสดุด้วยแรงดันลมผ่านไปยังหัวฉีด ระบบการผสม ระบบการส่ง และการควบคุมความเร็วในระบบนี้จะใช้แรงลมทั้งหมด สารเร่งการ ก่อตัวจะถูกส่งเข้าไปในท่อก่อนถึงหัวฉีด พร้อมกับเพิ่มแรงอัดลมเข้าไปเพื่อเพิ่มความเร็วในการฉีด พ่น ข้อสำคัญในการใช้งานวัสดุพ่นสำหรับการพ่นแบบเปียกจำเป็นต้องดำเนินการพ่นให้เสร็จ ภายใ 90 นาทีหลังจากผสม⁽³⁴⁾

2. ชนิดผสมแบบแห้ง (Dry-Mixed) ในการใช้ปูนซีเมนต์ และวัสดุผสม ผสมรวมกันใน เครื่องก่อนส่งผ่านไปยังท่อ และหัวฉีด ด้วยอัตราความเร็วสม่ำเสมอโดยใช้แรงลมอัด น้ำจะถูก ส่งผ่านท่อแยกต่างหาก ส่งไปผสมกับวัสดุแห้งที่บริเวณหัวฉีดก่อนทำการฉีด น้ำจะถูกฉีดเป็นฝอย ผ่านเข้าไปยังปูนซีเมนต์ และวัสดุผสม สารเร่งก่อตัว ถ้าเป็นชนิดผงจะถูกผสมพร้อมกับปูนซีเมนต์ และวัสดุผสม ถ้าเป็นชนิดน้ำจะถูกนำไปผสมกับน้ำในช่วงที่อยู่ใกล้ๆกับหัวฉีด หัวฉีดจะมีความยาว 20 - 30 ซม. ส่วนผสมทั้งหมดจะผสมกันแล้วจึงถูกฉีดอัดออกไป สำหรับเวลาในการใช้งานวัสดุพ่น สำหรับการพ่นแบบแห้งจำเป็นต้องดำเนินการพ่นให้เสร็จภายใน 45 นาทีหลังจากผสม⁽³⁴⁾



ภาพประกอบ 4 รูปแบบและชนิดของการพ่นวัสดุ

ที่มา: Zhengzhou Lead Equipment Co.,Ltd.⁽³⁵⁾

ตาราง 6 เปรียบเทียบชนิดผสมแบบเปียก (Wet-Mixed) และแบบแห้ง (Dry-Mixed)

ประเด็น	ผสมแบบเปียก (Wet-Mixed)	ผสมแบบแห้ง (Dry-Mixed)
เครื่องมือ และอุปกรณ์	- ค่าบำรุงรักษาต่ำ - ต้นทุนสูง	- ค่าบำรุงรักษาสูง - ต้นทุนต่ำ
การผสม	- ผสมในถังผลิตมีความแม่นยำ - สามารถเตรียมส่วนผสมล่วงหน้าได้ - ยอมรับมวลรวมเปียก	- ผสมที่สถานที่ปฏิบัติงาน ผสมในถังผลิต หรือเตรียมส่วนผสมล่วงหน้า และการส่งแบบถุงขนาดเล็ก หรือแบบถุงขนาดใหญ่จำนวนมาก - สมรรถนะที่ลดลงเมื่อใช้มวลรวมเปียก - ความชื้นจำกัดสูงสุดถึงร้อยละ 6 - ใช้แรงงานมากขึ้น
อัตราการแทนที่	- อัตราการพ่นอยู่ในช่วง ปานกลาง ถึงสูง ซึ่งมีความสามารถสูงกว่าเครื่องผสมแบบแห้ง (สำหรับหัวจับมือได้ 3 - 10 ลบ.ม. / ชม. สำหรับอุปกรณ์ยิงปืนที่ควบคุมด้วยระยะไกลได้ถึง 25 ลบ.ม. / ชม.)	- อัตราการพ่นอยู่ในช่วง ต่ำ ถึงปานกลาง (1 - 5 ลบ.ม. / ชม.)
การกระเด็นกลับ	- การกระเด็นกลับต่ำ มักอยู่ระหว่างร้อยละ 5 ถึง 15 ขึ้นอยู่กับการออกแบบผสม และการประยุกต์ใช้	- โดยทั่วไปการกระเด็นกลับ สูงกว่าส่วนผสมแบบเปียก (ไม่เกินร้อยละ 30) ขึ้นอยู่กับสภาวะของพื้นที่ และผู้ใช้งาน
ฝุ่น	- เกิดฝุ่นต่ำ	- เกิดฝุ่นสูงขึ้น
คุณภาพ	- มีคุณภาพที่สม่ำเสมอ	- มีความแปรปรวนในคุณภาพที่เกิดขึ้นสูงกว่า

ตาราง 5 เปรียบเทียบชนิดผสมแบบเปียก (Wet-Mixed) และแบบแห้ง (Dry-Mixed) (ต่อ)

ประเด็น	ผสมแบบเปียก (Wet-Mixed)	ผสมแบบแห้ง (Dry-Mixed)
การลำเลียง	- ระยะทางในการลำเลียงต่ำกว่า โดยได้ระยะสูงสุดไม่เกิน 200 ม.	- ระยะทางในการลำเลียงสูงกว่า โดยได้ระยะสูงสุดไม่เกิน 500 ม.
การใช้งาน	- เหมาะสมกับปริมาณการใช้งานที่สูงและมีขนาดใหญ่	- เหมาะสมกับปริมาณการใช้งานที่ต่ำ และไม่ต่อเนื่อง - เหมาะสำหรับสถานที่ห่างไกล และการเข้าถึง หรือการขนส่งคอนกรีตเป็นเรื่องยาก

ที่มา: Australian Shotcrete Society, 2010⁽³⁶⁾

สัดส่วนของวัสดุพื้น

ปัจจุบันเทคโนโลยีคอนกรีตถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานพื้น มีการคำนวณหาสัดส่วนของวัสดุสำหรับงานพื้นเพื่อให้ได้มาซึ่งสัดส่วนที่เหมาะสม มีสิ่งควรพิจารณาดังต่อไปนี้

1. พิจารณาความเหมาะสมของชนิดส่วนผสม เป็นแบบแห้ง (Dry-Mixed) หรือแบบเปียก (Wet-Mixed)

2. ลักษณะเฉพาะของงานสำหรับงานพื้น เช่น งานอุโมงค์ งานเขื่อน ทางระบายน้ำ งานโครงสร้าง และงานซ่อมแซม เป็นต้น

3. พิจารณาถึงข้อกำหนด และเงื่อนไขสำหรับงานพื้น เช่น ความต้องการของคุณสมบัติ ความต้องการของสภาพหน่วยแรงภายใน ความต้องการของประสิทธิภาพ

การปรับส่วนผสมระหว่างการทำงาน เนื่องจากการคุณภาพของงานพื้นขึ้นอยู่กับขั้นตอนการใช้งาน และการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ก่อนดำเนินการก็เป็นขั้นตอนสำคัญในการตรวจสอบสมรรถนะของส่วนผสม การปรับส่วนผสมสำหรับส่วนผสมแบบเปียก (Wet-Mixed) และส่วนผสมแบบแห้ง (Dry-Mixed) จะมีความแตกต่างกัน โดยส่วนผสมแบบเปียกจะปรับส่วนผสมคล้ายกับส่วนผสมคอนกรีตทั่วไปก่อนที่จะทำการพื้น แต่ส่วนผสมแบบแห้งจะได้รับการปรับส่วนผสมในขณะที่พ่นตามสภาพหน้างานโดยผู้ชำนาญการพื้น หรือผู้มีประสบการณ์ในการพ่น

แผนผังทดสอบเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งสำหรับงานพ่นแบบผสมแห้ง (Dry-Mixed) เพราะส่วนผสมในการทำงานจริงยากต่อการควบคุมที่จะให้เหมือนกับส่วนผสมในห้องปฏิบัติการได้ โดยปกติจะมีการระบุประสิทธิภาพของกำลังอัดที่อายุ 12 ชม. 7 วัน และ 28 วัน การปรับส่วนผสมทั้งแบบเปียก (Wet-Mixed) และแบบแห้ง (Dry-Mixed) จะมีการเพิ่มปริมาณซีเมนต์ให้สูงขึ้น และลดปริมาณมวลรวมหยาบลงเพื่อลดการกระเด็นกลับของมวลรวม

ปริมาณคลอไรด์สำหรับงานคอนกรีตเสริมลวดอัดแรง ต่อมามีผลรวมของคลอไรด์จากส่วนผสมทั้งหมดที่ปนเปื้อนมาไม่เกินร้อยละ 0.06 โดยน้ำหนักซีเมนต์ สำหรับงานอื่นในกรณีที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีการปนเปื้อนคลอไรด์จำกัดให้มีปริมาณคลอไรด์ไม่เกินร้อยละ 0.10 โดยน้ำหนักซีเมนต์ และในกรณีที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีการปนเปื้อนคลอไรด์จำกัดให้มีปริมาณคลอไรด์ไม่เกินร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนักซีเมนต์

ขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวม การเลือกขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งปัจจัยหลัก คือขนาดของหัวพ่น ประสิทธิภาพในการควบคุมการหดตัว พื้นที่การทำงาน และความแข็งของผิวเดิม สำหรับการกระเด็นกลับของวัสดุพ่นในขณะที่ทำงานขึ้นอยู่กับความสามารถของผิวเดิมที่ทำการพ่นลงไป การพ่นบนพื้นผิวชนิดที่เป็นหิน หรือคอนกรีตจะทำให้เกิดการกระเด็นกลับสูงกว่าพื้นผิวอื่นๆ ดังนั้นการพ่นบนพื้นผิวที่มีความแข็งต้องมีการจำกัดมวลรวมหยาบในส่วนผสมเพื่อลดการเด็นกลับ

อัตราส่วนผสมแบบเปียก (Wet-Mixed) โดยปกติจะใช้ขนาดมวลรวมโตสุดตามขนาดของหัวพ่นที่มวลรวมสามารถผ่านได้ ใช้ปูนซีเมนต์ตั้งแต่ 300 ถึง 420 กก./ลบ.ม. ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสำหรับงานพ่นไม่ต่ำกว่า 7.5 ซม. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์อยู่ในช่วงระหว่าง 0.3 – 0.4 และปริมาณอากาศในส่วนผสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 8 – 12

อัตราส่วนผสมแบบแห้ง (Dry-Mixed) ส่วนผสมจะมีความคล้ายคลึงกับส่วนผสมแบบเปียก (Wet-Mixed) จะแตกต่างกันที่กรรมวิธีในการผลิตในถังผสม อีกทั้งต้องทดสอบภาคสนาม ซึ่งการทดสอบจะขึ้นอยู่กับผู้ทำการพ่นเพื่อปรับคุณภาพให้เหมาะสม

การเตรียมพื้นผิว

การเตรียมพื้นผิวสำหรับการพ่นบนพื้นผิวคอนกรีตเดิม ผนังก่ออิฐ และพื้นผิวงานพ่นเดิม เมื่อต้องการความยึดเหนี่ยวที่ดีต้องขจัดวัสดุที่เสื่อมสภาพ และสิ่งปนเปื้อนออกให้หมด เพราะสิ่งเหล่านี้จะทำให้เกิดโพรงหรือช่องว่างระหว่างวัสดุพ่นกับวัสดุพื้นผิว ส่งผลให้เกิดการสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุไป ในบริเวณที่ต้องการพ่นหรือซ่อมแซมจำเป็นต้องสกัดผิวหน้าให้เสียหายออกโดยให้สกัดลึกเข้าไปจากผิวเดิมเล็กน้อยเพื่อเป็นการขจัดเศษขยะในการยึดเกาะให้

หนามากขึ้น ในกรณีที่มีเหล็กเสริมคอนกรีตควรถัดคอนกรีตผิวเดิมเข้าไปหลังเหล็กเสริมอย่างน้อยสามเท่าของขนาดมวลรวมที่ใหญ่ที่สุดเพื่อการเข้าถึงของเนื้อวัสดุพื้น ทั้งนี้ควรถัดสกัดบริเวณพื้นที่ที่ต้องการพ่นให้มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมเพื่อลดการเกิดหน่วยแรงสะสมบริเวณมุมของพื้นทำงานพ่น และการเตรียมสภาพพื้นผิวก่อนจะดำเนินการพ่นต้องมั่นใจว่าอยู่ในสภาพอิมมัวผิวแห้ง

คุณสมบัติของวัสดุพ่น

คุณสมบัติของวัสดุพ่นมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ ขนาดของมวลรวม คุณภาพของมวลรวม ประเภทของสารผสมเพิ่ม ชนิดของปูนซีเมนต์ และวิธีในการก่อสร้าง การใช้วัสดุผสม เส้นใย ซิลิกาฟลูมเมอร์ และพอลิเมอร์ที่เหมาะสม สำหรับคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุพ่นจะคล้ายกันกับคุณสมบัติของวัสดุซ่อมแซม ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อการเลือกวัสดุและคุณสมบัติที่สำคัญข้างต้น โดยคุณสมบัติที่สำคัญหลักๆ ของวัสดุพ่นประกอบไปด้วย

1. คุณสมบัติด้านกำลัง ในแง่ของกำลังอัดของวัสดุพ่นสามารถให้กำลังเทียบเท่ากับคอนกรีตทั่วไป จากตัวอย่างการทดสอบที่ผ่านมากำลังอัดของวัสดุพ่น เริ่มมีกำลังอัดสูงมากถึง 70 กก./ตร.ซม. ใน 5 ชม. และ 210 กก./ตร.ซม. ภายใน 24 ชม.

2. คุณสมบัติด้านการยึดเหนี่ยวของวัสดุ ด้านความแข็งแรงของพันธะกับวัสดุอื่นๆ จะสูงกว่าคอนกรีตทั่วไป ACI 506R ได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับจุดแข็งพันธะของวัสดุพ่นกับพื้นผิว

3. คุณสมบัติด้านการหดตัว การหดตัวแบบแห้งมีอิทธิพลมากที่สุดจากปริมาณน้ำในส่วนผสม การหดตัวจะลดลงก็ต่อเมื่อในส่วนผสมมีมวลรวมหยาบ แต่จะหดตัวมากขึ้นเมื่อไม่มีมวลรวมหยาบ หรือพื้นผิวที่พ่นเป็นพื้นผิวแบบแข็งทำให้เกิดการกระแตงกลับของมวลรวม

4. คุณสมบัติด้านความทึบ และการซึมผ่านของน้ำ ในส่วนผสมของวัสดุพ่นมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์อยู่ต่ำ อีกทั้งยังใช้ปริมาณในการพ่นอัดทำให้มีความแน่นในตัวเองสูง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Cabrera J. G.⁽³⁷⁾ ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุซ่อมแซมคอนกรีต เนื่องด้วยวัสดุซ่อมแซมมีราคาสูงและมีให้เลือกอย่างหลากหลาย อีกทั้งผู้ผลิตหลายรายไม่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับรายละเอียดของวัสดุที่สมบูรณ์ จึงทำการศึกษาคุณสมบัติที่แท้จริงของวัสดุซ่อมแซมเพื่อเป็นประโยชน์แก่วิศวกร และผู้ออกแบบได้มีแนวทางในการเลือกวัสดุซ่อมแซมมากขึ้นโดยขั้นตอนในการดำเนินการคือ กำหนดวัสดุซ่อมแซมที่ต้องการศึกษา กำหนดวัสดุที่เข้ามาเป็นส่วนผสมเพื่อเป็นมาตรฐานเดียวกัน ออกแบบอัตราส่วนผสมโดยใช้ค่าการยุบตัวเป็นตัวกำหนด ทำการบ่มแบบหล่อทั้งหมดด้วยแบบเดียวกัน อุณหภูมิเดียวกัน ทำการทดสอบกำลังอัด กำลังยึดเหนี่ยว ทดสอบความ

พรุณ ทดสอบการแทรกเข้าของอากาศ และทดสอบการแทรกเข้าของน้ำ โดยทำการทดสอบที่อายุการบ่ม 1 3 7 28 วัน 3 6 เดือน และ 1 ปี นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับงานที่ต้องการซ่อมแซม

พงศกร เพชรประดับ⁽³⁸⁾ ได้ศึกษาการซ่อมแซมพื้นสะพานบริเวณด้านบนของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีการปูทับ โดยทำการทดสอบการซ่อมแซมพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีการปูทับ (Overlay) ด้วยวัสดุหลาย ๆ ชนิด เป็นการวัดความเหมาะสมของวัสดุชนิดต่างๆ ทั้งแบบต้น และแบบลึก โดยจำลองหล่อพื้นขนาด 1.5 x 0.9 ม. จำนวน 6 ช่อง แบ่งเป็นความเสียหายแบบลึก 3 ช่อง ส่วนที่เหลือเป็นแบบต้นหลังจากการสกัดพื้นที่ซ่อมแซมดังกล่าว ทำความสะอาดเททับด้วยมอร์ตาร์สำหรับแบบต้น ด้วยคอนกรีตสำหรับแบบลึก แบ่งบ่มที่อายุ 1 3 และ 7 วัน เมื่อครบอายุทำการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุ เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเก่า และวัสดุใหม่โดยใช้วิธี Pull-Off Test ของวัสดุต่างชนิดที่อายุบ่มต่างกัน และเปรียบเทียบผลการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุซ่อมแซมในที่โดยใช้วิธี Pull-Out Test ของวัสดุต่างชนิดที่อายุบ่มต่างๆ ผลจากการศึกษาพบว่า การซ่อมแซมโดยวัสดุประเภทมอร์ตาร์ เหมาะสำหรับการซ่อมแซมแบบต้น ที่ความหนาประมาณ 3-5 ซม. โดยต้องมีอายุการบ่มที่ 3 วัน แรงยึดเหนี่ยว และกำลัง ถึงจะเพียงพอต่อการใช้งาน สำหรับการซ่อมแซมด้วยวัสดุประเภทคอนกรีต เหมาะสำหรับการซ่อมแซมแบบลึก ที่ความหนาประมาณ 5-10 ซม. โดยต้องมีอายุการบ่มที่ 3 วัน แรงยึดเหนี่ยว และกำลัง จึงจะเพียงพอต่อการใช้งาน และสำหรับการซ่อมแซมโดยวัสดุประเภทคอนกรีตผสมสารผสมเพิ่มเหมาะสำหรับการซ่อมแซมแบบต้น และแบบลึก โดยต้องมีอายุการบ่มที่ 1 วัน จะมีแรงยึดเหนี่ยว และกำลังของวัสดุที่เพียงพอต่อการใช้งาน

Oliveira Miguel José⁽³⁹⁾ ได้ศึกษาผลกระทบจากการบ่มต่อการหดตัวในคอนกรีตอัดแน่นเองที่มีกำลังต่ำ เพื่อเปรียบเทียบการบ่มที่มีผลต่อการหดตัวในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน คือห่อด้วยพลาสติก, ไม่บ่ม, บ่ม 3 วัน, บ่ม 7 วัน และบ่มในน้ำตลอดเวลา โดยผสมคอนกรีตทั้งหมด 6 ส่วนผสม ด้วยขนาด 40 x 40 x 160 มม. จากนั้นทำการเปรียบเทียบโดยวัดความยาวและชั่งน้ำหนักของตัวอย่างทุกๆ 1 2 3 5 7 14 และ 28 วัน จากการวิจัยพบว่าสภาพแวดล้อมที่ทำให้เกิดการหดตัวน้อยที่สุด คือบ่มในน้ำตลอดเวลา, ห่อด้วยพลาสติก, ไม่บ่ม, บ่ม 3 วัน และบ่ม 7 วัน ตามลำดับ ซึ่งทำให้เห็นว่าการบ่มนั้นมีผลต่อการหดตัวอย่างเห็นได้ชัด

J.S. Wall และ N.G. Shrive⁽⁴⁰⁾ ได้จำลองการทดสอบตัวอย่างด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โดยจำลองเป็นพื้นผิวคอนกรีตเก่าที่ซ่อมด้วยคอนกรีตใหม่โดยมีวัสดุประสานเป็นวัสดุซีเมนต์เพสต์หรือวัสดุมอร์ตาร์ และวัสดุพอลิไวนิลอะซิเตทโคพอลิเมอร์ โดยกำหนดให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ

คอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่มีค่าคงที่แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุประสาน พบว่าวัสดุประสานที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากกว่าคอนกรีตพื้นผิวจะทำให้มีการกระจายหน่วยแรง ภายในได้ดีกว่าส่งผลให้หน่วยแรงดึงระหว่างผิวสัมผัสในวัสดุประสานและวัสดุคอนกรีตพื้นผิวมีค่าน้อย ในทางกลับกันเมื่อวัสดุประสานที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยกว่าคอนกรีตพื้นผิวจะทำให้การกระจายหน่วยแรงในวัสดุประสานเกิดได้น้อยมีผลให้หน่วยแรงดึงระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุประสานและวัสดุคอนกรีตพื้นผิวมีค่ามากขึ้น และจากการจำลองในโปรแกรมวิเคราะห์พบว่าเมื่อความหนาของชั้นวัสดุประสานเพิ่มขึ้นส่งผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสในวัสดุประสานและวัสดุพื้นผิวคอนกรีตลดน้อยลง

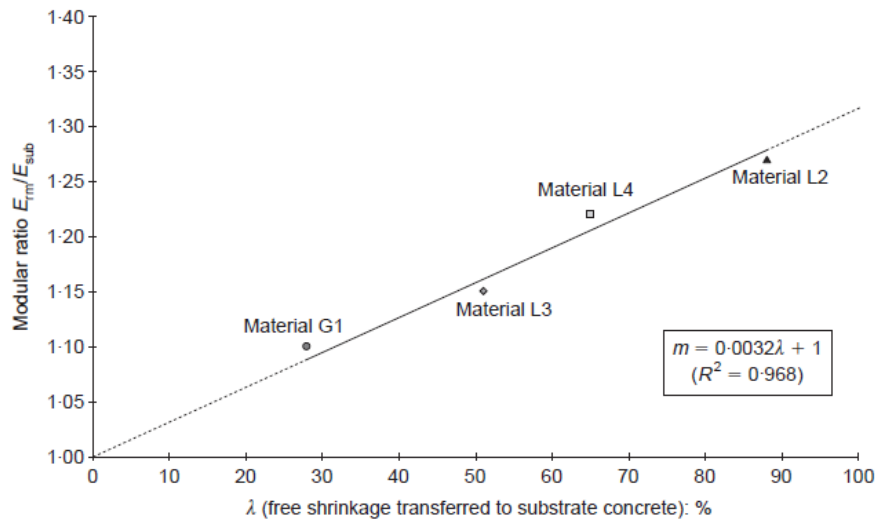
P. S. Mangat and F. J. O'Flaherty⁽⁴¹⁾ ได้ศึกษาประสิทธิภาพการซ่อมแซมสะพานบนทางหลวงในระยะยาว บนชิ้นส่วนของโครงสร้างสะพานที่ถูกซ่อมแซมและติดตั้งเครื่องมือสำหรับการตรวจสอบในระยะยาว โดยเน้นที่การซ่อมแซมด้วยวัสดุที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุซ่อมแซม (E_{rm}) ที่มีค่ามากกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพื้นผิว (E_{sub}) ด้วยวิธีการพ่นซ่อมแซมเนื่องจากไม่ต้องใช้ค้ำยัน ดำเนินการพ่นปะวัสดุซ่อมแซมบนชิ้นส่วนสะพานที่มีความเสียหายจากการเกิดสนิม โดยมีความหนาของงานซ่อมประมาณ 14 ซม. สะพานแรกคือ Lawns Lane Bridge ใช้ 5 วัสดุซ่อม (L1, L2, L3, L4 และ L5) แต่มีเพียง 3 วัสดุซ่อม (L2, L3 และ L4) ที่มีค่า $E_{rm} > E_{sub}$ และสะพานที่สอง Gunthorpe Bridge ใช้ 3 วัสดุซ่อม (G1, G2 และ G3) แต่มีเพียง 1 วัสดุซ่อม (G1) ที่มีค่า $E_{rm} > E_{sub}$ และมีการติดตั้งสเตรนเกจวัดการเปลี่ยนแปลง (Vibrating-wire strain gauges) ที่มีความยาวเกจ 140 มม. ไว้ในพื้นที่ซ่อมแซมของสะพานทั้งสองแห่ง เพื่อตรวจสอบการกระจายความเค้นในระยะยาวของงานซ่อมแซมและตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความยาวภายในวัสดุ โคนส่วนที่ติดตั้งประกอบด้วย ส่วนรอยต่อประสานพื้นผิว ส่วนเหล็กเสริม และส่วนวัสดุซ่อมแซม สำหรับวัสดุซ่อมแซมทั้ง 4 วัสดุ (L2, L3, L4 และ G1) ได้ทำการหล่อและมีการทดสอบให้ห้องปฏิบัติการเพื่อหาคุณสมบัติเบื้องต้น เช่น ค่ากำลังอัด ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ค่าการหดตัว เป็นต้น โดย L2 คือวัสดุซ่อม mortar ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยโพลีเมอร์ (Polymer-modified repair mortar) ใช้สำหรับงานพ่นแบบแห้ง L3 คือวัสดุซ่อม mortar ซ่อมแซมทั่วไป (Repair mortar) ใช้สำหรับงานพ่นแบบแห้งและแบบเปียก L4 คือวัสดุซ่อม mortar สำเร็จรูป (Factory-blended material) ใช้สำหรับงานพ่นแบบแห้ง และ G1 คือวัสดุซ่อม mortar ซีเมนต์พอร์ตแลนด์เข้มข้นแข็งตัวเร็ว (Rapid-hardening Portland cement) มีผลทดสอบและคุณสมบัติดังตาราง 7 ซึ่งจากอัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุซ่อมแซมต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพื้นผิวคอนกรีต (E_{rm} / E_{sub}) และจากค่าความแตกต่างของการหดตัวระหว่างผลจากห้องปฏิบัติการเทียบกับผลจากการติดตั้งสเตรนเกจ บริเวณส่วน

รอยต่อประสานพื้นผิวสะพาน (λ) ดังภาพประกอบ 5 ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{rm} / E_{sub} และ ค่าความแตกต่างของการหดตัวได้สมการ $E_{rm} / E_{sub} = 0.032 \lambda + 1$ ที่มีค่าความน่าเชื่อถืออยู่ที่ $R^2 = 0.97$ ด้วยสมการนี้ทำให้สามารถคำนวณขอบเขตของค่าอัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่จะไม่ทำให้เกิดการสูญเสียความแตกต่างของการหดตัวที่ $E_{rm} = 1.3 E_{sub}$

ตาราง 7 ข้อมูลการทดสอบและคุณสมบัติของ P. S. Mangat and F. J. O'Flaherty (1999)

วัสดุ	โมดูลัส ยืดหยุ่น (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)	$E_{rm} /$ E_{sub}	การหดตัว ในพื้นที่ข้อม ($\times 10^{-6}$)	การหด ตัวอิสระ ($\times 10^{-6}$)	λ (ร้อยละ)	สะพาน
คอนกรีต	242,692	428.3	-	-	-	-	
L2	308,974	611.8	1.27	120	136	88	Lawns Lane
L3	279,402	356.9	1.15	107	210	51	
L4	296,737	611.8	1.22	154	238	65	
คอนกรีต	286,540	458.9	-	-	-	-	Gunthorpe
G1	317,132	611.8	1.10	92	329	28	

ที่มา: P. S. Mangat and F. J. O'Flaherty, 1999⁽⁴¹⁾



ภาพประกอบ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและการหดตัวอิสระ

ที่มา: P. S. Mangat and F. J. O'Flaherty, 1999⁽⁴¹⁾

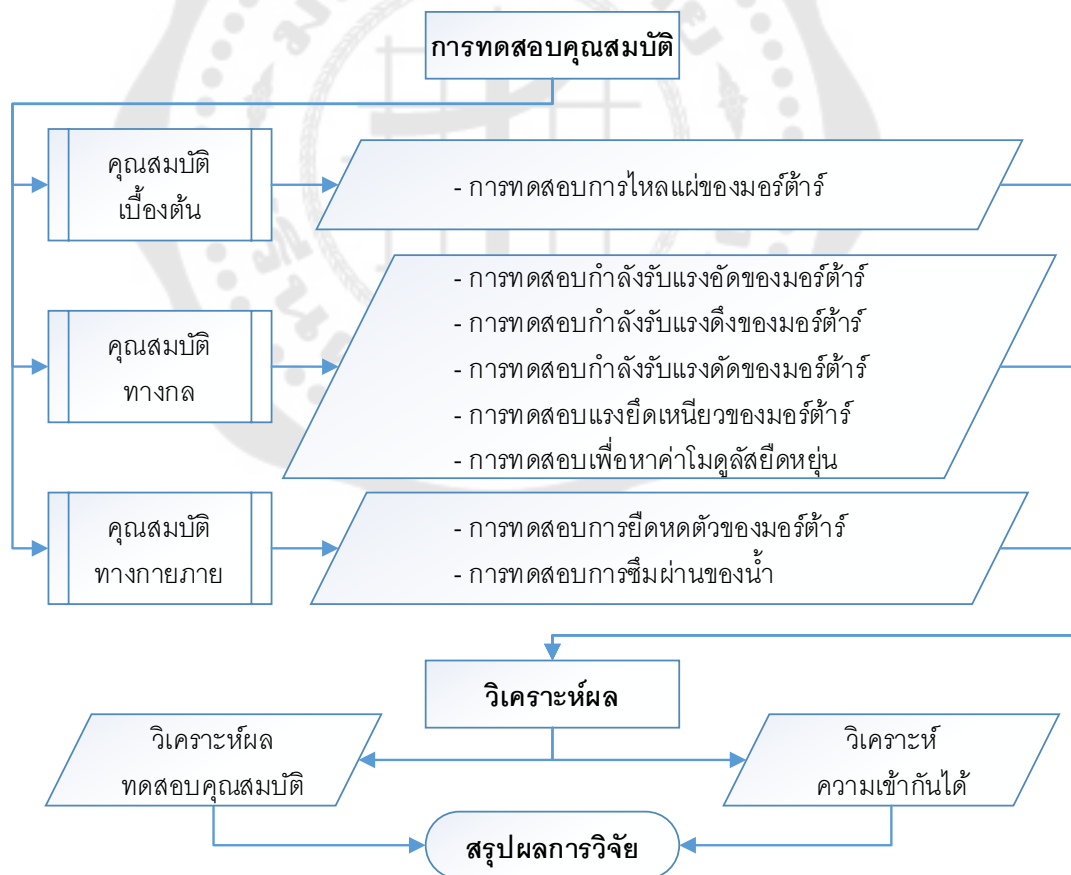
จากการศึกษาวิจัยของ P. S. Mangat and F. J. O'Flaherty สรุปได้ 4 ข้อดังนี้

- วัสดุซ่อมแซมที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากกว่าวัสดุพื้นผิวคอนกรีต ($E_{rm} > E_{sub}$) จะสามารถกระจายสัดส่วนสำหรับการเกิดการหดตัวของวัสดุพื้นผิวคอนกรีต ซึ่งจะช่วยลดความเครียดจากการหดตัวเนื่องจากหน่วยแรงดึงในการซ่อมแซม และลดความเสี่ยงที่จะเกิดการแตกร้าว
- ทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการซ่อมแซมแนะนำให้ใช้ $E_{rm} > 1.3 E_{sub}$ เนื่องจากข้อมูลจากการทดสอบยืนยันว่าสามารถส่งผ่านการหดตัวได้อย่างอิสระไปยังพื้นผิวคอนกรีตได้ในระดับที่สูง (มากกว่าร้อยละ 88) ซึ่งจะช่วยลดความเสี่ยงที่จะเกิดการแตกร้าวจากการหดตัวให้เหลือน้อย
- วัสดุซ่อมแซมที่มีค่า $E_{rm} > E_{sub}$ เมื่อใช้กับชิ้นส่วนที่รับหน่วยแรงอัดจะสามารถดูดซับน้ำหนักบรรทุกจากภายนอกผ่านเข้าสู่วัสดุซ่อมแซมได้ในระยะยาว
- ลักษณะการคืบของวัสดุซ่อมแซมมีค่าค่อนข้างต่ำซึ่งเป็นที่น่าพอใจ และสามารถยืนยันได้ว่าวัสดุซ่อมแซมที่มีค่า $E_{rm} > E_{sub}$ ทำให้สามารถการกระจายน้ำหนักกระทำจากภายนอกไปยังส่วนที่ซ่อมแซมได้อย่างมีประสิทธิภาพในระยะยาว

บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย

วิธีวิจัย

ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุอมอร์ทัลาร์ตามขอบเขตของงานวิจัย ประกอบไปด้วยการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของอมอร์ทัลาร์ ทดสอบคุณสมบัติทางกลของอมอร์ทัลาร์ ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของอมอร์ทัลาร์ และวิเคราะห์ผลตามทฤษฎีร่วมกับกับพฤติกรรมของงานซ่อมแซมจริง โดยใช้วัสดุอมอร์ทัลาร์ซ่อมแซมลงบนพื้นผิวคอนกรีต เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ของงานซ่อมแซมจากอัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ดังแสดงในแผนผังภาพประกอบ 6 ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดตัวแปรสำหรับการทดสอบขึ้นดังแสดงในตาราง 8



ภาพประกอบ 6 แผนผังระเบียบวิธีการวิจัย

ตาราง 8 การทดสอบและการกำหนดตัวแปร

การทดสอบ	ตัวแปรต้น (ตัวแปรอิสระ)	ตัวแปรตาม	ตัวแปรควบคุม
การไหลผ่านของมอร์ตาร์	-ชนิดของมอร์ตาร์ -ความชื้นสัมพัทธ์ ณ วันผสมตัวอย่าง	-ค่าร้อยละการไหลผ่าน ของมอร์ตาร์	-ส่วนผสมของมอร์ตาร์ -ขั้นตอนการผสม -ขั้นตอนการทดสอบ
กำลังรับแรงของวัสดุ	-ชนิดของมอร์ตาร์ -อายุของมอร์ตาร์	-ค่ากำลังรับแรงของ มอร์ตาร์	-ส่วนผสมของมอร์ตาร์ -ขั้นตอนการผสม -ขนาดของตัวอย่าง -วิธีการบ่ม -ขั้นตอนการทดสอบ
การยืดหดตัวของวัสดุ	-รูปแบบการบ่ม -อายุของมอร์ตาร์	-ค่าการยืดหดตัวของ มอร์ตาร์	-ส่วนผสมของมอร์ตาร์ -ขั้นตอนการผสม -ขนาดของตัวอย่าง -ขั้นตอนการทดสอบ
ความทนทานต่อการ ซึมผ่านของน้ำ	-ชนิดของมอร์ตาร์ -อายุของมอร์ตาร์	-ระยะการซึมของน้ำ -สัมประสิทธิ์การซึม ผ่านของน้ำ	-ส่วนผสมของมอร์ตาร์ -ขั้นตอนการผสม -ขนาดของตัวอย่าง -วิธีการบ่ม -การเตรียมตัวอย่าง ก่อนเข้าทดสอบ -ขั้นตอนการทดสอบ -ระยะเวลาการเข้า ทดสอบ

ตาราง 8 การทดสอบและการกำหนดตัวแปร (ต่อ)

การทดสอบ	ตัวแปรต้น (ตัวแปรอิสระ)	ตัวแปรตาม	ตัวแปรควบคุม
แรงยึดเหนี่ยวระหว่าง วัสดุ	-ชนิดของมอร์ตาร์ ช่อมแซม -ชนิดของพื้นผิว คอนกรีต -อายุของวัสดุ -ความหนาของการ ช่อมแซม	-ค่าแรงยึดเหนี่ยว ระหว่างวัสดุ -คุณภาพของการ ช่อมแซม	-ส่วนผสมของวัสดุ -ขั้นตอนการผสม -การเตรียมพื้นผิวของ คอนกรีต -วิธีการบ่ม -ขนาดของตัวอย่าง -ขั้นตอนการทดสอบ
หาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ของวัสดุ	-ชนิดของมอร์ตาร์ ช่อมแซม -ชนิดของพื้นผิว คอนกรีต	-ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ของวัสดุ -ค่าอัตราส่วนของ โมดูลัสยืดหยุ่น	-ส่วนผสมของวัสดุ -ขั้นตอนการผสม -อายุของวัสดุ -วิธีการบ่ม -ขนาดของตัวอย่าง -ขั้นตอนและกรอบ เวลาในการทดสอบ

วัสดุสำหรับการวิจัย

- ปูนซีเมนต์ สำหรับงานวิจัยนี้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้าง ตามมาตรฐาน ASTM C150⁽⁴²⁾
- มอร์ตาร์ปูนพ่นสำเร็จรูป สำหรับงานวิจัยนี้เป็นมอร์ตาร์สำหรับงานพ่น ตราผึ้ง รุ่น SC100 – TD เป็นมอร์ตาร์ประเภทปูนทรายสูตรพิเศษ ที่มีในมาตรฐาน มยผ.1901-51⁽²⁾ ข้อ 6.1.3
- มวลรวมละเอียด สำหรับวิจัยนี้คือ มวลรวมละเอียดจากธรรมชาติที่มีสภาพถมตัวผิวแห้ง โดยมีการคัดเลือกขนาดละเอียดอยู่ในช่วงขอบบน (C33-Max) และขอบล่าง (C33-Min) ตามมาตรฐาน ASTM C33⁽⁴³⁾ ดังในภาพประกอบ 7 และตัวอย่างขนาดคละดังแสดงในตาราง 9



ภาพประกอบ 7 มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ

ตาราง 9 ตัวอย่างขนาดของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ

ขนาดตะแกรง	ร้อยละค้ำ	น้ำหนักค้ำ (กิโลกรัม)
เบอร์ 4	2	2.7
เบอร์ 8	10	13.5
เบอร์ 16	20	27.0
เบอร์ 30	30	40.5
เบอร์ 50	24	32.4
ถาดรอง	14	18.9
รวมน้ำหนัก	100	135.0

ที่มา : ASTM C33 ⁽⁴³⁾

4. มวลรวมหยาบ สำหรับวิจัยนี้คือ มวลรวมหยาบทั่วไปที่ใช้ผสมในงานคอนกรีตที่มีขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว โดยก่อนจะทำการผสมให้นำมวลรวมหยาบแช่น้ำสะอาดไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมงแล้วจึงนำมาเช็ดผิวหน้าให้แห้ง เพื่อให้ทำอยู่ในสภาพอิมมัวผิวแห้ง ดังในภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 มวลรวมหยาบที่ใช้ในการทดสอบ

5. น้ำยาประสานคอนกรีต สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ผลิตภัณฑ์ CP-BOND (Polymer Latex Bonding Agent) เป็นน้ำยาประเภท Styrene Butadiene Polymer ชนิด ลาเทกซ์ ตามคำแนะนำของมาตรฐาน มยผ.1901-51⁽²⁾ ข้อ 6.4 เพื่อความมั่นใจในผลของการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยที่มุ่งเน้นศึกษาถึงคุณสมบัติของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตและวัสดุมอร์ตาร์ซ่อมแซม

6. น้ำ สำหรับงานวิจัยนี้เป็นน้ำสะอาด (น้ำประปา)

เครื่องมือ และอุปกรณ์ในงานวิจัย

ชุดเครื่องมือช่วยความปลอดภัย

1. ถุงมือยาง
2. รองเท้านิรภัย
3. แว่นนิรภัย
4. หน้ากากอนามัย

เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการผสมมอร์ต้าร์ และคอนกรีต

1. ชุดเครื่องมือผสมมอร์ต้าร์
2. ชุดเครื่องมือผสมคอนกรีต
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.01 กก.
4. กระบอกลงน้ำ
5. นาฬิกาจับเวลา

แบบหล่อสำหรับการขึ้นรูปตัวอย่าง

1. แบบหล่อขนาด 50 x 50 x 50 มม. สำหรับทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์
2. แบบหล่อแท่งปริมาตรขนาด 45 x 75 x 25 มม. มีคอคอดกว้าง 25 มม. สำหรับทดสอบกำลังดึงของมอร์ต้าร์
3. แบบหล่อคานขนาด 40 x 40 x 160 มม. สำหรับทดสอบกำลังดัดของมอร์ต้าร์
4. แบบหล่อขนาด 400 x 800 มม. สำหรับทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของมอร์ต้าร์เมื่อซ่อมแซมบนพื้นผิวคอนกรีต ตามความชันความหนาที่กำหนด
5. แบบหล่อขนาด 150x150x150 มม. สำหรับทดสอบความทนทานต่อการซึมผ่านของน้ำในมอร์ต้าร์
6. แบบหล่อขนาด 25 x 25 x 285 มม. สำหรับทดสอบการยึดหดตัวของมอร์ต้าร์
7. แบบหล่อทรงกระบอกรูปขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มม. สูง 300 มม. สำหรับการทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ต้าร์ และคอนกรีต

เครื่องมือ และอุปกรณ์ชุดทดสอบคุณสมบัติ

1. ชุดอุปกรณ์ผสมมอร์ต้าร์
2. ชุดอุปกรณ์ทดสอบกำลังอัด และกำลังดัดของมอร์ต้าร์
3. ชุดอุปกรณ์ทดสอบกำลังดึงของมอร์ต้าร์
4. ชุดอุปกรณ์ทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของมอร์ต้าร์
5. ชุดอุปกรณ์ทดสอบการซึมผ่านของน้ำ
6. ชุดอุปกรณ์ทดสอบการยึดหดตัวของมอร์ต้าร์
7. ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ต้าร์ และคอนกรีต

อุปกรณ์อื่นๆ

1. เกรียงแต่งหน้าผิวมอร์ต้าร์
2. พลาสติคหุ้มผิวหน้าของมอร์ต้าร์
3. บ่อบ่มตัวอย่างสำหรับรออายุทดสอบ

การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมส่วนผสมมอร์ตาร์

ส่วนผสมมอร์ตาร์สำหรับงานวิจัยนี้มี 2 ส่วนผสม คือ มอร์ตาร์ควบคุมตามมาตรฐาน ASTM C109 และมอร์ตาร์ปูนพื้นสำเร็จรูปมีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด ดังแสดงไว้ในตาราง 10

ตาราง 10 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์

วัสดุ	มอร์ตาร์ควบคุม ASTM C109	มอร์ตาร์ปูนพื้นสำเร็จรูป
ปูนซีเมนต์	1.00	1.00
ทราย	2.75	2.00
น้ำ	0.49	0.49
สารผสมเพิ่ม	-	0.24

หมายเหตุ : มอร์ตาร์ปูนพื้นสำเร็จรูปใช้ปริมาณน้ำ 7.5 ลิตร ต่อ ปูน 1 ถู (50 กิโลกรัม)

เตรียมอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการผสมให้อยู่ในสภาพพร้อมตัวผิวแห้งหมาด เตรียมวัสดุที่ใช้ในการผสมให้เรียบร้อย ขั้นตอนในการผสมมอร์ตาร์นั้นเป็นการประยุกต์ใช้มาตรฐาน ASTM C305 เริ่มต้นด้วยการนำน้ำที่ในการผสมมอร์ตาร์เทลงในเครื่องผสมก่อน กรณีที่เป็นมอร์ตาร์ควบคุมให้ใส่ปูนซีเมนต์ตามลงไปพร้อมกับเปิดเครื่องผสมมอร์ตาร์โดยใช้รอบการปั่นต่ำ 140 ± 5 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นค่อยๆ ใส่ทรายที่จัดเตรียมไว้ลงไปอย่างช้าๆ ปั่นต่อไปอีก 30 วินาที กรณีเป็นมอร์ตาร์สำเร็จรูปให้ใส่วัสดุสำเร็จรูปตามลงไปพร้อมกับเปิดเครื่องผสมมอร์ตาร์โดยใช้รอบการปั่นต่ำ 140 ± 5 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้นทั้งสองกรณีจะใช้ขั้นตอนการดำเนินการเหมือนกันคือ เริ่มปรับเพิ่มความเร็วของรอบการปั่นขึ้นเป็น 285 ± 10 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้นให้ทำการหยุดปั่นแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 1 นาที 30 วินาที ในขณะที่ให้ทำการชูดส่วนผสมที่ติดอยู่ด้านข้างของโมผสมลงไปในรวมกับส่วนผสมมอร์ตาร์ด้านล่างของโมโดยใช้เวลารอบภายในช่วง 15 วินาทีแรก เมื่อครบเวลา 1 นาที 30 วินาทีแล้ว ทำการเปิดเครื่องปั่นอีกครั้งโดยใช้ความเร็วรอบการปั่นสูง 285 ± 10 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นนำตัวอย่างมอร์ตาร์ออกจากเครื่องผสม จดบันทึกอุณหภูมิห้อง ความชื้นสัมพัทธ์ แล้ว

ดำเนินการวัดค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C1437 แล้วจึงใส่มอร์ตาร์ลงในแบบที่ได้จัดเตรียมไว้



ภาพประกอบ 9 เครื่องผสมมอร์ตาร์

ค่าร้อยละการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C1437 สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$f_r = \frac{R_A - 100}{100} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ f_r = ค่าร้อยละการไหลแผ่ของมอร์ตาร์, %

R_A = ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางของการไหลแผ่, มม.

นำค่าร้อยละการไหลแผ่ที่ได้จากการคำนวณมาแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์คู่กับความชื้นสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบของการผสม เพื่อศึกษาแนวโน้มและผลกระทบจากความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าร้อยละการไหลแผ่

การเตรียมส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตสำหรับงานวิจัยนี้จัดเตรียมเพื่อจำลองเป็นวัสดุพื้นผิวเดิมก่อนดำเนินการซ่อมแซมทับหน้าด้วยวัสดุมอร์ตาร์ โดยมีส่วนผสมคอนกรีตทั้งหมด 6 ส่วนผสม ซึ่งค่ากำลังอัดในการออกแบบบางส่วนได้มาจากมาตรฐานงานคอนกรีตและงานคอนกรีตเสริมเหล็ก (มยผ.1101-52)⁽⁴⁴⁾ ดังแสดงไว้ในตาราง 11

ตาราง 11 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต เพื่อจำลองเป็นวัสดุพื้นผิวเดิม

วัสดุ	กำลังอัด 90 ksc.	กำลังอัด 110 ksc	กำลังอัด 150 ksc (ค.1)	กำลังอัด 180 ksc (ค.2)	กำลังอัด 240 ksc (ค.4)	กำลังอัด 320 ksc (ค.7)
ปูนซีเมนต์	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ทราย	3.43	3.43	2.89	2.46	2.09	1.76
หิน	4.40	4.40	3.85	3.41	3.02	2.69
น้ำ	0.72	0.71	0.66	0.56	0.54	0.49

หมายเหตุ : กำลังอัดถูกออกแบบไว้สำหรับตัวอย่างทรงกระบอก

จัดเตรียมอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการผสมคอนกรีตให้อยู่ในสภาพพร้อมตัวผิวแห้ง หมด เตรียมวัสดุที่ใช้ในการผสมทั้งหมดให้เรียบร้อย ขั้นตอนในการผสมเริ่มจากนำมวลรวมหยาบ จำนวนครึ่งหนึ่งใส่ลงไปในโม้คอนกรีตก่อนแล้วตามด้วยมวลรวมละเอียด ปูนซีเมนต์ และมวลรวมหยาบส่วนที่เหลือลงไปตามลำดับ เริ่มเดินเครื่องผสมคอนกรีตด้วยความเร็ว 30 รอบต่อนาที พร้อมใส่น้ำสำหรับผสมคอนกรีตที่จัดเตรียมไว้ทั้งหมดตามลงไปอย่างช้าๆ หลังจากใส่น้ำลงไปทั้งหมดแล้วใช้เวลาปั่นอย่างน้อย 2 ถึง 3 นาที หรือจนกว่าส่วนผสมเข้ากันดีเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอ เมื่อหยุดเครื่องผสมแล้วให้เทคอนกรีตสกลงในกระบะคอนกรีต แล้วจึงนำคอนกรีตสดีใส่ลงในแบบหล่อที่ได้จัดเตรียมไว้

วิธีการทดสอบ

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

การทดสอบนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ มอร์ตาร์ควมคุม และ มอร์ตาร์ปูนพ่น โดยใช้แบบหล่อตามมาตรฐาน ASTM C109 ทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มม. โดยหลังจากผสมของมอร์ตาร์เรียบร้อยแล้ว นำส่วนผสมที่ได้มาเทหล่อลงใน โดยแบ่งการเทหล่อออกเป็น 2 ชั้น แล้วกระทุ้งแน่นด้วยแท่งพลาสติก จำนวนชั้นละ 20 ครั้งจนเต็มแบบหล่อ หลังจากเทจนเต็มแบบหล่อแล้วใช้เกรียงปาดตกแต่งผิวหน้าของตัวอย่างมอร์ตาร์ให้เรียบคลุมผิวหน้าด้วยพลาสติก ดังในภาพประกอบ 10 เมื่อครบอายุมอร์ตาร์ครบ 24 ชม.แล้วทำการถอดแบบหล่อด้วยระมัดระวัง

จากนั้นนำตัวอย่างดังกล่าวไปบ่มในถังบ่มมอร์ตาร์ที่อายุ 1 3 7 14 28 56 112 และ 180 วัน เมื่อครบอายุทดสอบของมอร์ตาร์แล้ว นำตัวอย่างทดสอบออกจากห้องบ่มให้ทำความสะดวกบิดเม็ดทราย และสะเก็ดที่ติดผิวออกให้หมด เช็ดผิวให้แห้ง วัดขนาด และชั่งน้ำหนักของตัวอย่างแต่ละก้อน แล้วทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยการนำตัวอย่างทดสอบไปวางให้อยู่ตรงจุดกึ่งกลางของแท่นเครื่องทดสอบแรงอัด และเคลื่อนแท่นกดให้สัมผัสกับผิวก้อนตัวอย่าง จากนั้นให้เพิ่มแรงอัดด้วยอัตราที่เหมาะสม และสม่ำเสมอ โดยใช้เวลาทดสอบระหว่าง 20-80 วินาที แล้วบันทึกผล



ภาพประกอบ 10 ตัวอย่างทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109 สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (4)$$

เมื่อ σ_c = ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์, กก/ตร.ซม.

P = ค่าแรงอัดสูงสุดที่จุดวิบัติ, กก.

A = ค่าเฉลี่ยพื้นที่หน้าตัดของมอร์ตาร์, ตร.ซม.

นำค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ได้จากการคำนวณมาแสดงความสัมพันธ์คู่กับอายุของมอร์ตาร์ เพื่อศึกษาแนวโน้มการพัฒนา กำลังรับแรงอัด และเปรียบเทียบกำลังของมอร์ตาร์

การทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์

ในการทดสอบนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ มอร์ตาร์ควบคุม และ มอร์ตาร์ปูนพื้น โดยใช้แบบหล่อตามมาตรฐาน ASTM C307 ตัวอย่างแท่งปริมาตรขนาด 45 x 75 x 25 มม. มีคอคอดกว้าง 25 มม. โดยหลังจากผสมของมอร์ตาร์เรียบร้อยแล้ว นำส่วนผสมที่ได้ใส่ลงในแบบหล่อให้พูนขึ้นมา ใช้นิ้วหัวแม่มือทั้งสองข้างกดลงไปจำนวน 12 ครั้ง ใส่ส่วนผสมมอร์ตาร์กลับลงไปจนพูนอีกครั้ง หลังจากนั้นใช้เกรียงปาดตกแต่งผิวหน้าของตัวอย่างมอร์ตาร์ให้เรียบคลุมผิวหน้าด้วยพลาสติก ดังในภาพประกอบ 11 เมื่อครบอายุมอร์ตาร์ครบ 24 ชม.แล้วทำการถอดแบบหล่อด้วยระมัดระวังจากนั้นนำตัวอย่างดังกล่าวไปบ่มในถังบ่มมอร์ตาร์ที่อายุ 1 3 7 14 28 56 112 และ 180 วัน เมื่อครบอายุทดสอบของมอร์ตาร์แล้ว นำตัวอย่างทดสอบออกจากห้องบ่มให้ทำความสะอาด บัดเม็ดทราย และสะเก็ดที่ติดผิวออกให้หมด เช็ดผิวให้แห้ง วัดขนาด และชั่งน้ำหนักของตัวอย่างแต่ละก้อน แล้วทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยสอดตัวอย่างทดสอบเข้าไปที่ขาจับ ให้ได้ศูนย์กลาง เครื่องทดสอบแรงดึง แบบปริมาตรเครื่องดึงทดสอบในอัตรา 600 ± 25 ปอนด์ต่อนาที และบันทึกค่ากำลังรับแรงดึงเมื่อถึงจุดขาด



ภาพประกอบ 11 ตัวอย่างทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์

ค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C307 สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\sigma_t = \frac{T}{A} \quad (5)$$

เมื่อ σ_t = ค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์, กก/ตร.ซม.

T = ค่าแรงดึงสูงสุดที่จุดวิบัติ, กก.

A = ค่าเฉลี่ยพื้นที่หน้าตัดบริเวณจุดขาดของมอร์ตาร์, ตร.ซม.

นำค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ที่ได้จากการคำนวณมาแสดงความสัมพันธ์เป็นกราฟเทียบกับอายุของมอร์ตาร์ เพื่อศึกษาแนวโน้มการพัฒนาำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์

การทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์

การทดสอบนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ มอร์ตาร์ควบคุม และ มอร์ตาร์ปูนพน โดยใช้แบบหล่อตามมาตรฐาน ASTM C348 ตัวอย่างคานขนาด 40 x 40 x 160 มม. โดยหลังจากผสมของมอร์ตาร์เรียบร้อยแล้ว นำส่วนผสมที่ได้ใส่ลงในแบบหล่อกระทั่งมอร์ตาร์ในแบบหล่อด้วยแท่งกระทุ้ง จำนวน 12 ครั้ง การกระทุ้งแต่ละครั้งให้ถือแท่งกระทุ้งในแนวระนาบเหนือผิวมอร์ตาร์ประมาณ 25 มม. และดันแท่งกระทุ้งลงไปตรงๆ เพื่อที่จะบีบให้มอร์ตาร์แน่น เติมส่วนผสมมอร์ตาร์อีกครั้งจนเต็มแบบหล่อ หลังจากนั้นใช้เกรียงปาดตกแต่งผิวหน้าของตัวอย่างมอร์ตาร์ให้เรียบคลุมผิวหน้าด้วยพลาสติก ดังในภาพประกอบ 12 เมื่อครบอายุมอร์ตาร์ครบ 24 ชม. แล้วทำการถอดแบบหล่อด้วยระมัดระวังจากนั้นนำตัวอย่างดังกล่าวไปบ่มในถังบ่มมอร์ตาร์ที่อายุ 1 3 7 14 28 56 112 และ 180 วัน เมื่อครบอายุทดสอบของมอร์ตาร์แล้ว นำตัวอย่างทดสอบออกจากห้องบ่มให้ทำความสะอาดปัดเม็ดทราย และสะเก็ดที่ติดผิวออกให้หมด เช็ดผิวให้แห้ง วัดขนาด และชั่งน้ำหนักของตัวอย่างแต่ละก้อน แล้วทดสอบกำลังดัดด้วยชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงดัดซึ่งจะใช้เครื่องทดสอบเดียวกันกับการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ติดตั้งตัวอย่างคานลงในชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงดัดแล้วนำชุดอุปกรณ์ทดสอบไปวางให้อยู่ตรงจุดกึ่งกลางของเบ้นเครื่องทดสอบแรงอัด และเคลื่อนเบ้นกดให้สัมผัสกับผิวก่อนตัวอย่าง จากนั้นให้เพิ่มแรงอัดด้วยอัตรา 600 ± 25 ปอนด์ต่อวินาที และบันทึกค่ากำลังอัดอ่านได้จากเครื่องทดสอบ



ภาพประกอบ 12 ตัวอย่างทดสอบกำลังดัดของมอร์ต้าร์

ค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ต้าร์ตามมาตรฐาน ASTM C348 สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\sigma_b = \frac{3FL}{2BH^2} \quad (6)$$

เมื่อ σ_b = ค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ต้าร์, กก/ตร.ซม.

F = ค่าแรงกระทำสูงสุดที่จุดวิบัติ, กก.

L = ระยะระหว่างจุดรองรับ, ซม.

B = ความกว้างของมอร์ต้าร์, ซม.

H = ความหนาของมอร์ต้าร์, ซม.

นำค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ต้าร์ที่ได้จากการคำนวณมาแสดงความสัมพันธ์เป็นกราฟเทียบกับอายุของมอร์ต้าร์ เพื่อศึกษาแนวโน้มการพัฒนาำลังรับแรงดัดของมอร์ต้าร์

การทดสอบการยึดหดตัวของมอร์ตาร์

การทดสอบการยึดหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์นั้นเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C490 ซึ่งมีแบบหล่อขนาด 25 x 25 x 285 มม. และใช้วิธีการบ่มแบบบ่มในอากาศตามมาตรฐาน ASTM C157 ซึ่งได้มีการปรับเปลี่ยนวิธีการบ่มเปียกในช่วงอายุต้นให้คล้ายคลึงกับสภาพการบ่มที่เกิดขึ้นจริงในงานก่อสร้างโดยแบ่งรูปแบบของการบ่มเปียกในช่วงอายุต้นออกเป็น 5 รูปแบบ คือ

รูปแบบที่ 1 บ่มตามมาตรฐาน ASTM C157 โดยใช้น้ำแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นเวลา 48 ชม. (รูปแบบควบคุม)

รูปแบบที่ 2 บ่มโดยใช้น้ำสะอาดเป็นเวลา 48 ชม. ที่เปลี่ยนทุก 12 ชม.

รูปแบบที่ 3 บ่มโดยใช้น้ำสะอาด เป็นเวลา 48 ชม.

รูปแบบที่ 4 ไม่มีการบ่มเปียก

รูปแบบที่ 5 บ่มน้ำตลอดการทดลอง

โดยหลังจากผสมของมอร์ตาร์เรียบร้อยแล้วนำส่วนผสมที่ได้ใส่ลงในแบบหล่อแยกเป็น 2 ชั้น หนาชั้นละเท่าๆ กัน และอัดแต่ละชั้นด้วยหัวแม่มือ หรือนิวซี โดยกดมอร์ตาร์ให้เข้าไปตามมุมแบบรอบๆ หมุดวัด และตามผิวของแบบหล่อจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นใช้เกรียงปาดตกแต่งผิวหน้าของตัวอย่างมอร์ตาร์ให้เรียบคลุมผิวหน้าด้วยพลาสติก เมื่อมอร์ตาร์มีอายุครบ 24 ชม. แล้วทำการนำตัวอย่างออกจากแบบหล่อซึ่งน้ำหนักของตัวอย่าง และวัดความยาวเริ่มต้น จากนั้นนำมาบ่มเปียกต่อเนื่องอีก 48 ชม. ในห้องบ่มที่มีสภาวะเปิดขนาด 230 x 380 x 80 มม. ที่ใส่น้ำเปล่าสะอาดประมาณ 5 ลิตร ดังในภาพประกอบ 13 หลังจากนั้นเมื่ออายุมอร์ตาร์ครบ 3 วัน แล้วนำออกจากห้องบ่มทำความสะอาดขีดผิวให้แห้ง บันทึกความยาวเริ่มต้น และชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่อายุ 3 7 14 28 56 112 และ 180 วัน



ภาพประกอบ 13 ตัวอย่างทดสอบการยึดหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์

ค่าการยืดหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ มาตรฐาน ASTM C157 สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\Delta L = \frac{L_1 - L_0}{G} \times 100 \quad (7)$$

เมื่อ ΔL = ค่าร้อยละการยืดหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์, %

L_1 = ความยาวของตัวอย่างที่วัดได้, มม.

L_0 = ความยาวเริ่มต้นของตัวอย่าง, มม.

G = ระยะประสิทธิผลมีค่าเท่ากับ 250, มม.

นำค่าร้อยละการยืดหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ที่ได้จากการคำนวณมาแสดงความสัมพันธ์เป็นกราฟเปรียบเทียบกับอายุ และ รูปแบบการบ่มของมอร์ตาร์ในแต่ละรูปแบบ เพื่อศึกษาแนวโน้มการยืดหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ในสภาวะการบ่มที่แตกต่างกัน

การทดสอบความทนทานต่อการซึมผ่านของน้ำ

การทดสอบความทนทานต่อการซึมผ่านของน้ำในมอร์ตาร์ ได้ประยุกต์ใช้วิธีตามมาตรฐานเยอรมัน DIN 1048: part 5 ทำได้โดยใช้แบบหล่อตามมาตรฐานอังกฤษ (BS 1881) ขนาด 150 x 150 x 150 มม. โดยตัดส่วนผสมที่ได้ลงในแบบเป็นจำนวน 3 ชั้น และตักชั้นละ 25 ครั้งจนเต็มแบบหล่อ หลังจากนั้นใช้เกรียงปาดตกแต่งผิวหน้าของตัวอย่างมอร์ตาร์ให้เรียบคลุมผิวหน้าด้วยพลาสติก เมื่อครบอายุมอร์ตาร์ครบ 24 ชม. แล้วทำการถอดแบบหล่อด้วยระมัดระวัง จากนั้นนำตัวอย่างดังกล่าวไปบ่มในถังบ่มมอร์ตาร์ที่อายุ 28 56 112 และ 180 วัน จากนั้นเมื่อได้เวลาตามที่กำหนดนำตัวอย่างออกจากห้องบ่มทำความสะอาดเช็ดผิวให้แห้งวัดขนาด และชั่งน้ำหนักของตัวอย่างแต่ละก้อนก่อนการทดสอบ นำตัวอย่างไปห่อหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นในตัวอย่าง ให้เปิดพลาสติกเฉพาะส่วนที่จะทดสอบอัดน้ำ จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบเข้าบลิ๊อคทดสอบอัดน้ำแล้วชั่งน้ำหนักให้แน่นเพื่อไม่ให้เกิดการรั่วซึมของน้ำขณะทดสอบ ก่อนทำการทดสอบให้ทำการไล่ฟองอากาศออกจากเครื่องทดสอบอัดน้ำแล้วคว่ำบลิ๊อคทดสอบให้สายยางอัดน้ำอยู่ด้านล่าง และส่วนทางกับแรงโน้มถ่วงของโลก หลังจากนั้นเปิดเครื่องทดสอบโดยใช้แรงดันน้ำ 5 บาร์ ทิ้งตัวอย่างทดสอบไว้เป็นเวลา 72 ชม. ดังในภาพประกอบ 14 เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดให้นำตัวอย่างทดสอบออกจากบลิ๊อคทดสอบแล้วดำเนินการแกะห่อพลาสติกออก เช็ดผิวให้แห้งนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักหลังทดสอบอัดน้ำ จากนั้นนำตัวอย่างไปทำการผ่าครึ่งเพื่อที่จะทำการวัดระยะการซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างทดสอบ แล้วบันทึกระยะการซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างทดสอบ



ภาพประกอบ 14 ตัวอย่างทดสอบการซึมผ่านของน้ำในมอร์ตาร์

ค่าการซึมผ่านของน้ำในมอร์ตาร์ สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$k = \frac{e^2 v}{2ht} \quad (8)$$

โดย $v = \frac{m}{Aep} \quad (9)$

เมื่อ k = ค่าการซึมผ่านของน้ำในมอร์ตาร์, ม./วินาที

e = ระยะการซึมของน้ำในตัวอย่าง, ม.

h = แรงดันของน้ำที่ 5 บาร์ เท่ากับ 50.99 ม., ม.

t = ระยะเวลาที่ทดสอบอัดน้ำ, วินาที

m = ผลต่างของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังทดสอบ, กก.

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่อัดน้ำ, ตร.ม.

ρ = ความหนาแน่นของน้ำที่ใช้ทดสอบ, กก./ลบ.ม.

นำค่าการซึมผ่านของน้ำในมอร์ตาร์ที่ได้จากการคำนวณมาแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์เทียบกับอายุของมอร์ตาร์ เพื่อศึกษาแนวโน้มการพัฒนาความทึบแน่นของมอร์ตาร์

การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ

การทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุของการจำลองงานซ่อมแซมพื้นผิวด้วยวัสดุ มอร์ตาร์ สามารถทำได้ตามมาตรฐาน ASTM D4541 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบนี้จะเป็นการแบ่ง ทดสอบตามชั้นความหนาทั้งหมด 3 รูปแบบ คือรูปแบบความหนา 25 มม. คือรูปแบบความหนา 50 มม. และรูปแบบความหนา 75 มม. กระทำการซ่อมทับหน้าด้วยมอร์ตาร์โดยเทลงบนแผ่น คอนกรีตพื้นผิวเดิมขนาด 400 x 800 มม. ที่มีอายุมากกว่า 28 วัน และผิวของคอนกรีตเดิมต้องอยู่ ในสภาพที่ถูกสกัดผิวหน้าออกพร้อมทำความสะอาดพื้นผิวและทาน้ำยาประสานคอนกรีต เรียบร้อยแล้ว ดังในภาพประกอบ 15 หลังจากเททับหน้าด้วยมอร์ตาร์ซ่อมแซมครบ 24 ชม. แล้วทำ การบ่มด้วยกระสอบป่านพรมน้ำเมื่อใกล้ถึงกำหนดอายุทดสอบดำเนินการเจาะ (Coring) แบบจำลองโดยเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. และลึกลงจากพื้นผิวคอนกรีตเดิมลงไป ประมาณ 25 มม. จากนั้นทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์ซ่อมผิวแต่ละชั้นความหนาที่อายุ 7 และ 28 วัน.ดังในภาพประกอบ 16 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของงานซ่อมแซม



ภาพประกอบ 15 การเตรียมพื้นผิวคอนกรีตสำหรับงานซ่อมแซม



ภาพประกอบ 16 ทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุเชื่อมแซม

ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

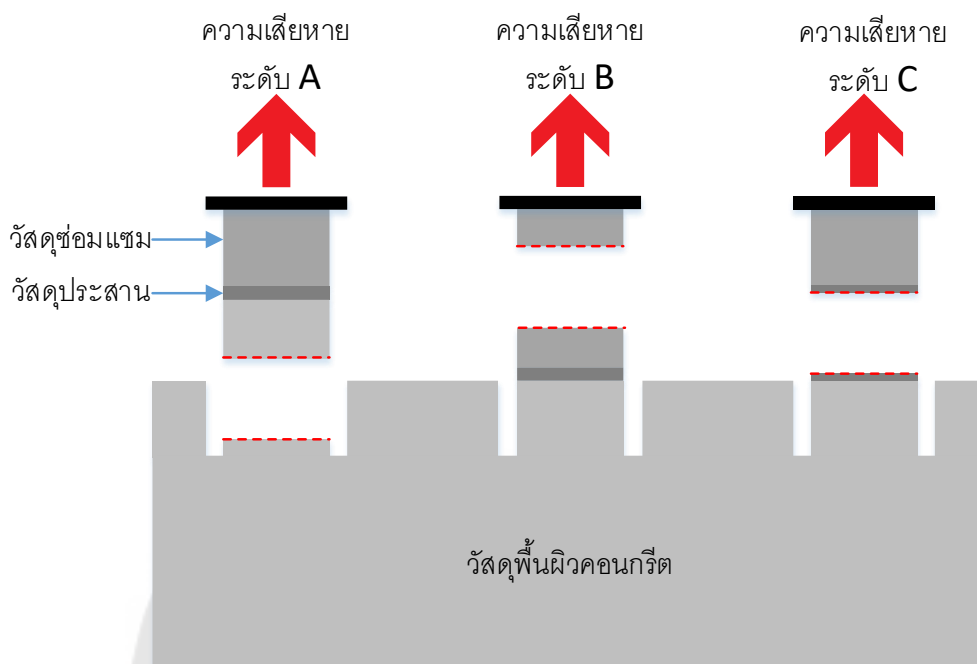
$$\sigma_t = \frac{T}{A} \quad (10)$$

เมื่อ σ_t = ค่ากำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุ, กก/ตร.ซม.

T = ค่าแรงดึงสูงสุดที่จุดวิบัติ, กก.

A = ค่าเฉลี่ยพื้นที่หน้าตัดบริเวณจุดเสียหาย, ตร.ซม.

เมื่อทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุจนวิบัติแล้วให้ดูที่ตำแหน่งของจุดที่ขาดเสียหายโดยใช้เกณฑ์ในการพิจารณาคุณภาพตามระดับความเสียหายออกเป็น 3 ระดับได้แก่ ระดับ A ระดับ B และ ระดับ C โดยที่ระดับ A หมายถึงความเสียหายเกิดขึ้นที่วัสดุพื้นผิวคอนกรีต ระดับ B หมายถึงความเสียหายเกิดขึ้นที่วัสดุมุมรัดอาร์เชื่อมแซม และ ระดับ C หมายถึงความเสียหายเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุ ดังภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 รูปแบบความเสียหายของการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ

การทดสอบวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

การทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุสำหรับงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ตัวอย่างมอร์ต้าร์ และตัวอย่างคอนกรีต โดยใช้แบบหล่อตามมาตรฐาน ASTM C39 ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มม. สูง 300 มม. หลังจากผสมวัสดุเรียบร้อยแล้ว นำส่วนผสมที่ได้ใส่ลงในแบบหล่อโดยแบ่งการใส่วัสดุออกเป็น 3 ชั้น ในแต่ละชั้นทำการกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งชั้นละ 25 ครั้ง การกระทุ้งแต่ละครั้งให้ถือแท่งกระทุ้งในแนวระนาบเหนือผิววัสดุประมาณ 25 มม. และดันแท่งกระทุ้งลงไปตรงๆ เติมส่วนผสมอีกครั้งจนเต็มแบบหล่อ หลังจากนั้นใช้เกรียงปาดตกแต่งผิวหน้าของตัวอย่างให้เรียบคลุมผิวหน้าด้วยพลาสติก เมื่ออายุของตัวอย่างครบ 24 ชม. แล้วทำการถอดแบบหล่อด้วยระมัดระวังจากนั้นนำตัวอย่างดังกล่าวไปบ่มในถังบ่มที่อายุ 28 วัน จากนั้นเมื่อได้เวลาตามที่กำหนดนำตัวอย่างออกจากห้องบ่มทำความสะอาดเช็ดผิวให้แห้งวัดขนาด และชั่งน้ำหนักของตัวอย่างแต่ละก้อนก่อนการทดสอบ จากนั้นแบ่งตัวอย่างทดสอบของแต่ละส่วนผสมมาอย่างละหนึ่งตัวอย่างนำไปทดสอบแบบทำลายเพื่อหาค่ากำลังสูงสุด เมื่อได้กำลังอัดสูงสุดแล้วนำตัวอย่างส่วนที่เหลือติดตั้งชุดอุปกรณ์วัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแล้วนำเข้าเครื่องทดสอบ ดังในภาพประกอบ 18 สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine เพื่อควบคุมให้แรงกดเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ โดยการทดสอบที่กำลังร้อยละ 40 ของ

กำลังอัดสูงสุด ตามวิธีที่มาตรฐาน ASTM C469 กำหนด งานวิจัยนี้มีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ระบบดิจิตอลได้แก่ อุปกรณ์วัดระยะ (Displacement Transducer) และอุปกรณ์วัดน้ำหนัก (Load Cell) เป็นการบันทึกผลผ่านระบบคอมพิวเตอร์



ภาพประกอบ 18 การทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (11)$$

โดย $\sigma = \frac{P}{A}$ (12)

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (13)$$

เมื่อ E = โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ, กก/ตร.ซม.

σ = ค่าความเค้นของวัสดุ, กก/ตร.ซม.

ϵ = ค่าความเครียดของวัสดุ

P = ค่าแรงอัด, กก.

A = ค่าเฉลี่ยพื้นที่หน้าตัด, ตร.ซม.

ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป, ซม.

L = ความยาวที่เดิม, ซม.

นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ คำนวณหาความชันของกราฟหรือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ เปรียบเทียบผลของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างวัสดุออร์ตาและวัสดุคอนกรีต เพื่อศึกษาอัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ส่งผลต่อความเข้ากันได้ของวัสดุซ่อมแซม และประสิทธิภาพในงานซ่อมแซม

การวิเคราะห์ความเข้ากันได้

เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบกำลังอัด การทดสอบกำลังดึง การทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ และการทดสอบวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตและวัสดุออร์ตาซ่อมแซมมาวิเคราะห์ร่วมกัน โดยแยกออกเป็น 3 ประเด็นคือ ประเด็นด้านกำลังรับแรงอัดระหว่างข้อมูลการทดสอบกำลังอัดของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตและกำลังอัดของวัสดุออร์ตาซ่อมแซม ประเด็นด้านกำลังดึงระหว่างข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตและกำลังรับแรงดึงของวัสดุออร์ตาซ่อมแซม และประเด็นด้านค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างข้อมูลการทดสอบของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตและวัสดุออร์ตาซ่อมแซม เพื่อวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติ และหาความสัมพันธ์ถึงผลของงานซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีตจากเกณฑ์ที่กำหนด คุณสมบัติของวัสดุซ่อมแซมต้องมีคุณสมบัติที่ดีกว่าวัสดุพื้นผิวคอนกรีตเดิม^(18, 41) โดยงานวิจัยนี้ยึดคุณสมบัติด้านความเท่ากันของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเป็นหลักเกณฑ์ในการพิจารณาความเข้ากันได้

บทที่ 4

ผลการวิจัย และวิเคราะห์ผลการวิจัย

ผลการทดสอบวัดค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์

จากการทดสอบวัดค่าการไหลแผ่ของตัวอย่างมอร์ตาร์พบว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศแปรผันโดยตรงต่อค่าการไหลแผ่ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนพื้นและตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุมทั้งสอง เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าร้อยละการไหลแผ่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยวัสดุคุมมอร์ตาร์ปูนพื้นมีค่าร้อยละการไหลแผ่เฉลี่ยอยู่ในช่วง 90.48 ± 12.87 ซึ่งน้อยกว่าวัสดุคุมมอร์ตาร์ควบคุมที่มีค่าร้อยละการไหลแผ่เฉลี่ยอยู่ในช่วง 99.43 ± 4.82 ดังข้อมูลในตาราง 12 และจากข้อมูลการบันทึกค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศประกอบกับผลทดสอบค่าการไหลแผ่ที่เกิดขึ้น ทำให้สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ และค่าร้อยละการไหลแผ่ที่เกิดขึ้น สำหรับส่วนผสมมอร์ตาร์ทั้งสองชนิดที่มีค่าอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันคือ 0.49 ได้ ดังแสดงในภาพประกอบ 19

ตาราง 12 ผลการทดสอบวัดค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์

ตัวอย่าง	ความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ)	ค่าการไหลแผ่ (ร้อยละ)	การไหลแผ่ เฉลี่ย (ร้อยละ)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
มอร์ตาร์ควบคุม	44	92.53	99.43	4.82
	42	92.07		
	60	100.43		
	64	104.00		
	59	103.63		
	53	104.03		
	51	99.30		

ตาราง 12 ผลการทดสอบวัดค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ)	ค่าการไหลแผ่ (ร้อยละ)	การไหลแผ่ เฉลี่ย (ร้อยละ)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
มอร์ตาร์ปูนพื้น	63	75.33	90.48	12.87
	65	80.00		
	65	82.97		
	63	77.50		
	66	93.57		
	68	95.73		
	82	106.97		
	84	111.73		

หมายเหตุ : ตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนพื้นถูกหล่อขึ้นในช่วง 18 ก.ค. 2562 - 19 ส.ค. 2562 และตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม ถูกหล่อขึ้นในช่วง 24 ก.พ. 2563 - 2 มี.ค. 2563

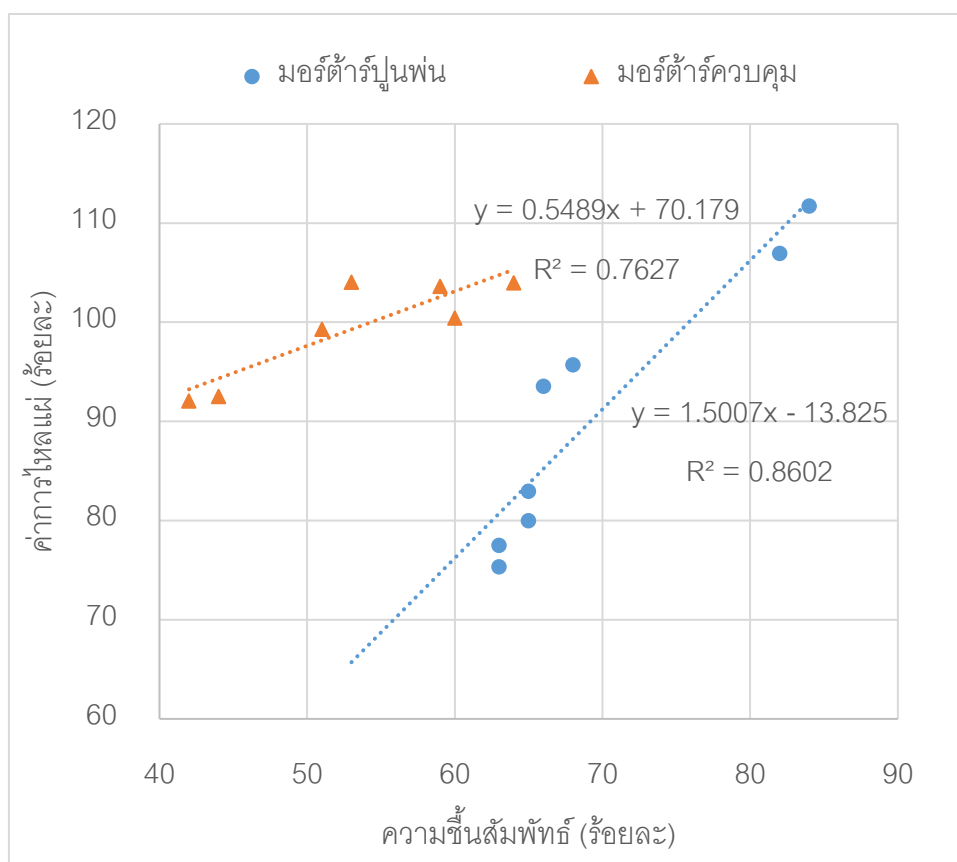
อย่างไรก็ตามตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุมมีเส้นแนวโน้มของข้อมูลที่มีค่าความชื้นน้อยกว่า ตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนพื้น หมายความว่ามอร์ตาร์ควบคุมจะมีความไวต่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศและค่าร้อยละการไหลแผ่ได้น้อยกว่า หรือสามารถควบคุมค่าร้อยละการไหลแผ่ได้ง่ายกว่า ตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนพื้น และจากข้อมูลดังกล่าวทำให้สามารถหาสมการสำหรับคาดการณ์ค่าร้อยละการไหลแผ่จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศได้ ซึ่งสมการที่ได้จากการทำเส้นแนวโน้มสำหรับตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุมคือสมการที่ 14 มีความน่าเชื่อถือ $R^2 = 0.76$ และสำหรับตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนพื้นคือสมการที่ 15 มีความน่าเชื่อถือ $R^2 = 0.86$ จากสมการดังกล่าวจะช่วยพิจารณาการใช้ปริมาณน้ำ และการควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในการทำงานได้

ค่าร้อยละการไหลแผ่จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสำหรับตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม

$$y = 0.5489x + 70.179 \quad (14)$$

ค่าร้อยละการไหลแผ่จากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสำหรับตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนพื้น

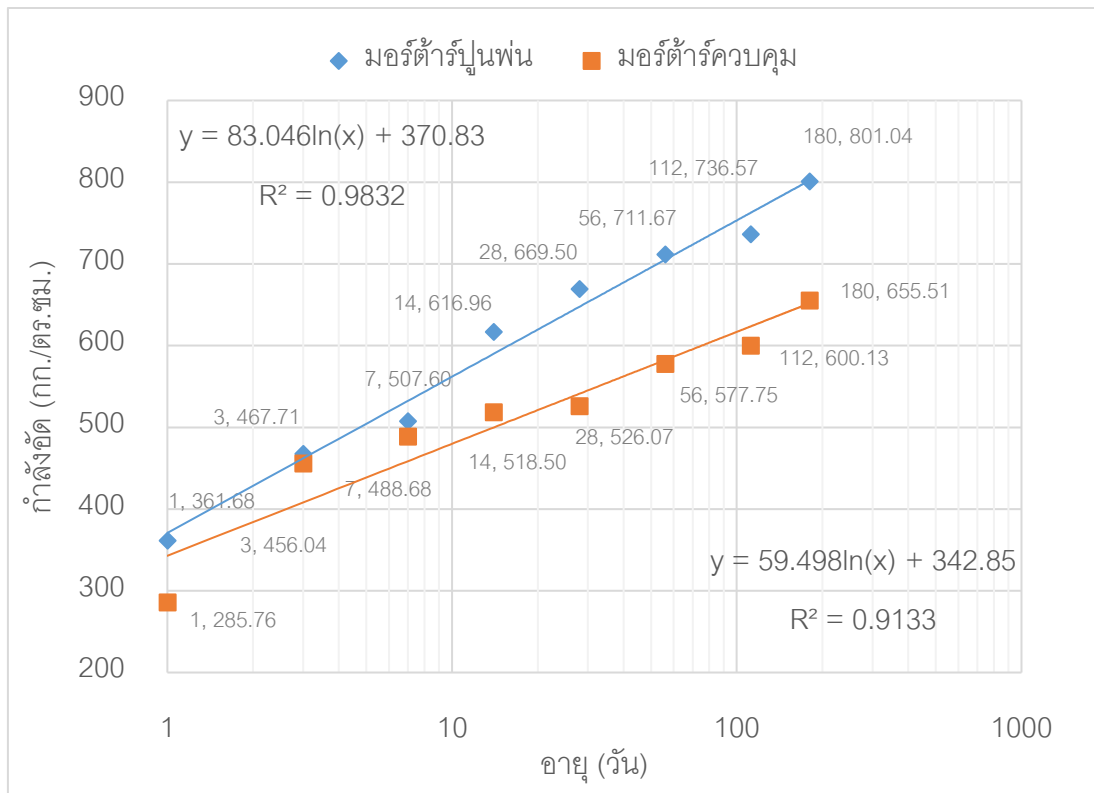
$$y = 1.5007x - 13.825 \quad (15)$$



ภาพประกอบ 19 ค่าความชื้นสัมพัทธ์และค่าร้อยละการไหลแผ่ของตัวอย่างมอर्टาร์

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอर्टาร์

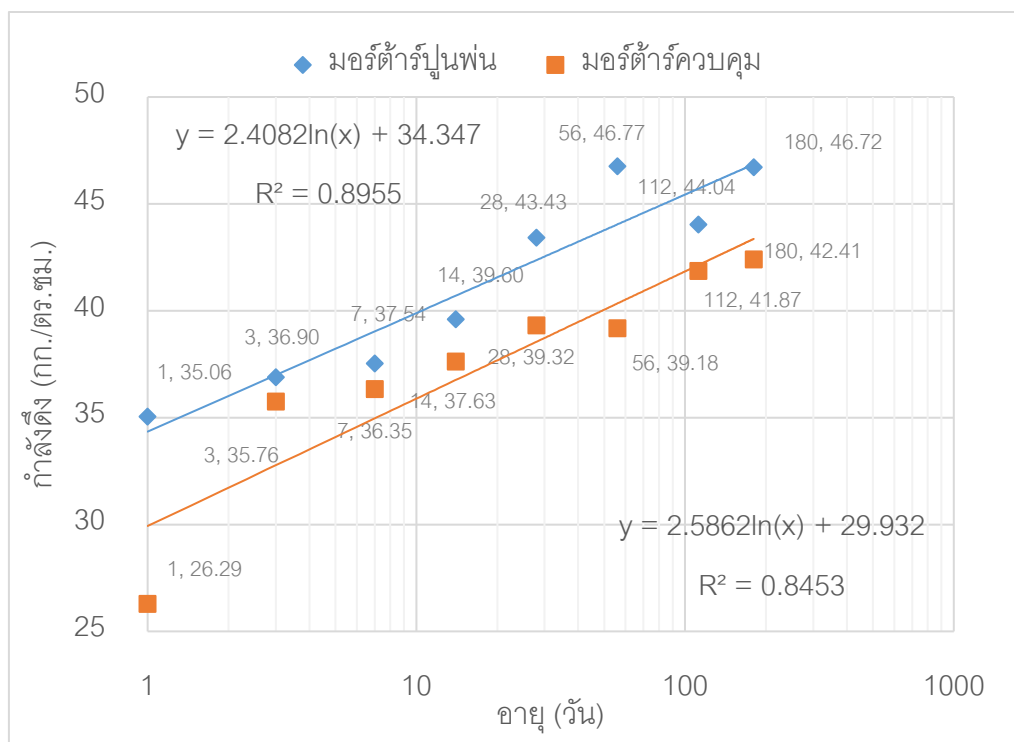
จากการทดสอบวัดค่ากำลังรับแรงอัดของมอर्टาร์พบว่าวัสดุอมอर्टาร์ทั้งสองชนิด มีอัตราการพัฒนากำลังอัดสูงในช่วงอายุต้น หลังจากนั้นอัตราการพัฒนากำลังจะลดน้อยลงเมื่ออายุอมอर्टาร์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเมื่ออายุของตัวอย่างประมาณ 14 วัน มอर्टาร์ปุ่นพน และมอर्टาร์ควบคุมเริ่มมีอัตราการพัฒนากำลังลดน้อยลง โดยอัตราการพัฒนากำลังสำหรับมอर्टาร์ปุ่นพน และมอर्टาร์ควบคุมในช่วง 1 ถึง 14 วัน มีค่าร้อยละ 70.6 และ 81.4 ตามลำดับ และอัตราการพัฒนากำลังสำหรับมอर्टาร์ปุ่นพน และมอर्टาร์ควบคุม ในช่วง 14 ถึง 180 วัน มีค่าร้อยละ 29.8 และ 26.4 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามวัสดุอมอर्टาร์ปุ่นพนมีค่าความชื้นของกราฟสูงกว่าวัสดุอมอर्टาร์ควบคุม โดยที่อายุ 28 วัน มอर्टาร์ปุ่นพนมีค่ากำลังอัด 669.5 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีค่าสูงกว่ามอर्टาร์ควบคุมที่มีค่ากำลังอัด 526.1 กก./ตร.ซม. ถือว่ามอर्टาร์ปุ่นพนนั้นเป็นมอर्टาร์ที่มีกำลังอัดสูงสามารถใช้ในการซ่อมแซมได้ จากภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 20 ผลทดสอบกำลังอัดของมอริตาร์

ผลการทดสอบกำลังดึงของมอริตาร์

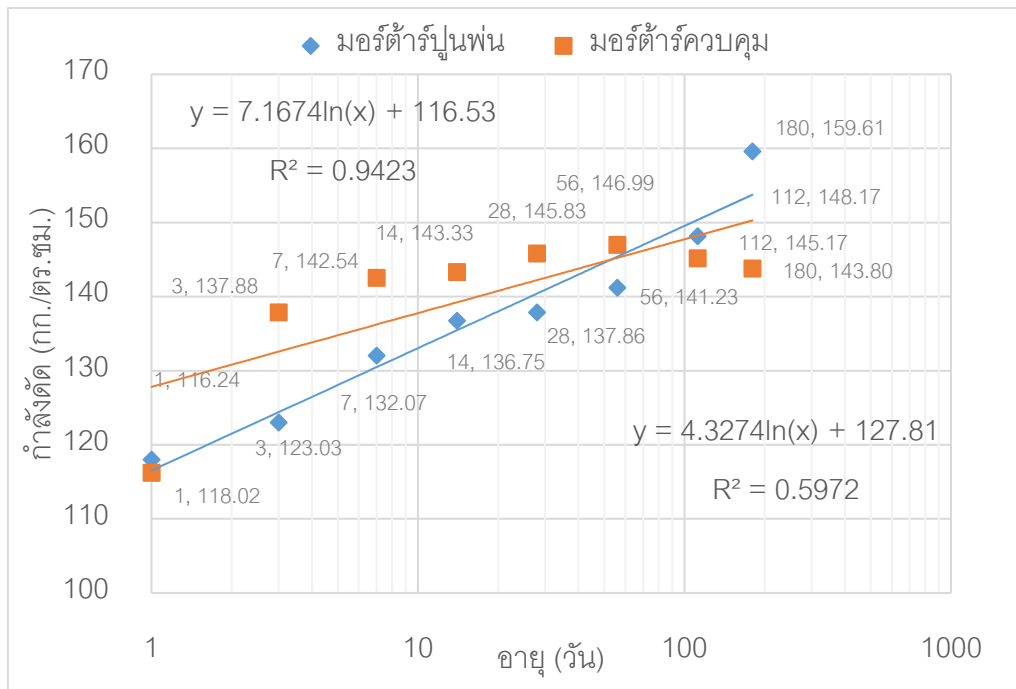
จากการทดสอบกำลังดึงของมอริตาร์พบว่าตัวอย่างมอริตาร์ปูนพ่นมีค่ากำลังดึงสูงกว่าตัวอย่างมอริตาร์ควบคุม โดยวัสดุมอริตาร์ทั้งสองชนิดมีอัตราการพัฒนากำลังดึงสูงในช่วงอายุต้น หลังจากนั้นอัตราการพัฒนากำลังจะลดน้อยลงเมื่ออายุมอริตาร์เพิ่มมากขึ้น มอริตาร์ควบคุมและมอริตาร์ปูนพ่นเริ่มมีอัตราการพัฒนากำลังลดน้อยลงจนเริ่มคงที่เมื่ออายุประมาณ 14 วัน ซึ่งมีทิศทางการพัฒนากำลังในลักษณะเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังอัดดังแสดงในภาพประกอบ 21 ซึ่งชี้ให้เห็นว่ามอริตาร์ปูนพ่นที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังดึง 43.43 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีค่ากำลังดึงสูงกว่ามอริตาร์ควบคุมที่มีค่ากำลัง 39.32 กก./ตร.ซม. คิดเป็นร้อยละ 10.5 อย่างไรก็ตามตัวอย่างมอริตาร์ปูนพ่นมีความชันของกราฟใกล้เคียงกันกับตัวอย่างมอริตาร์ควบคุม โดยอัตราการพัฒนากำลังสำหรับมอริตาร์ปูนพ่น และมอริตาร์ควบคุม ในช่วง 1 ถึง 14 วัน มีค่าร้อยละ 13.0 และ 43.1 ตามลำดับ และอัตราการพัฒนากำลังสำหรับมอริตาร์ปูนพ่น และมอริตาร์ควบคุม ในช่วง 14 ถึง 180 วัน มีค่าร้อยละ 18.0 และ 12.7 ตามลำดับ



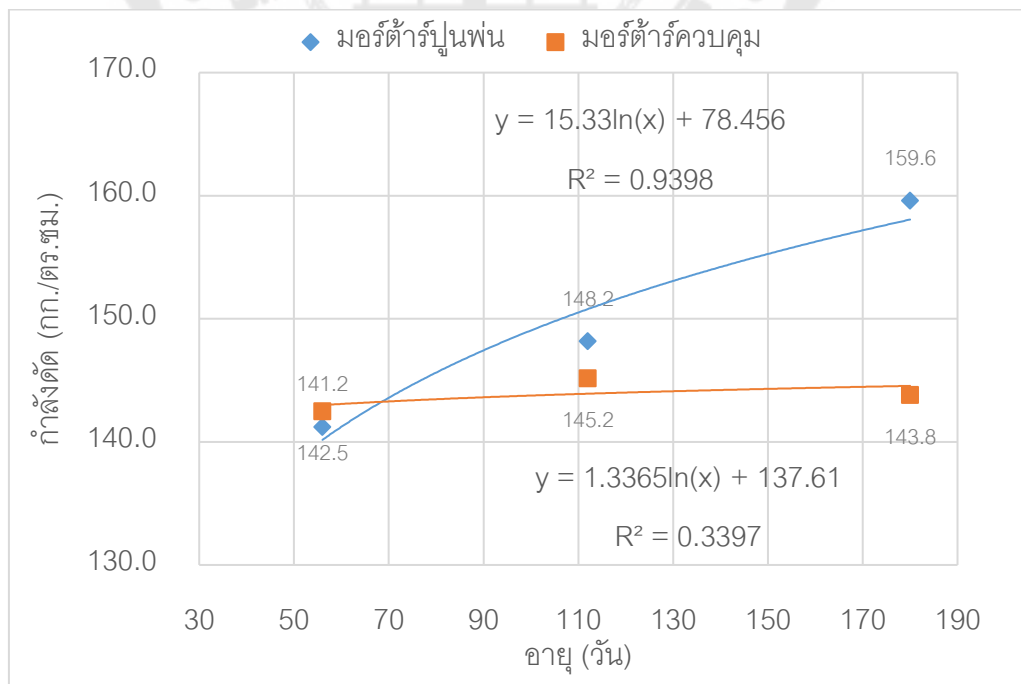
ภาพประกอบ 21 ผลทดสอบกำลังดึงของมอริตาร์ทึ้น

ผลการทดสอบกำลังดึงของมอริตาร์ทึ้น

จากการทดสอบกำลังดึงของมอริตาร์ทึ้นพบว่าตัวอย่างมอริตาร์ทึ้นทั้งสองชนิดมีอัตราการพัฒนากำลังในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบกำลังอัด และการทดสอบกำลังดึง ซึ่งมอริตาร์ทึ้นควบคุมและมอริตาร์ทึ้นพ่นเริ่มมีอัตราการพัฒนากำลังลดน้อยลงเมื่ออายุประมาณ 14 วัน โดยมอริตาร์ทึ้นควบคุมเริ่มมีกำลังดึงที่เมื่ออายุ 14 วัน ในขณะที่มอริตาร์ทึ้นพ่นยังสามารถพัฒนากำลังดึงเพิ่มมากขึ้นไปตามอายุถึงแม้ว่าจะพัฒนากำลังได้ช้าก็ตาม ดังแสดงในภาพประกอบ 22 จะเห็นว่าวัสดุของมอริตาร์ทึ้นพ่นมีค่าความชันของกราฟสูงกว่าวัสดุของมอริตาร์ทึ้นควบคุม โดยที่อัตราการพัฒนากำลังสำหรับมอริตาร์ทึ้นพ่น และมอริตาร์ทึ้นควบคุม ในช่วง 1 ถึง 14 วัน มีค่าร้อยละ 15.9 และ 23.3 ตามลำดับ และอัตราการพัฒนากำลังสำหรับมอริตาร์ทึ้นพ่น และมอริตาร์ทึ้นควบคุม ในช่วง 14 ถึง 180 วัน มีค่าร้อยละ 16.7 และ 0.3 ตามลำดับ ซึ่งในช่วงอายุต้นมอริตาร์ทึ้นพ่นมีค่ากำลังรับแรงดัดน้อยกว่ามอริตาร์ทึ้นควบคุมเล็กน้อยคิดเป็นช่วงร้อยละ 4.0 ถึง 10.0 ของมอริตาร์ทึ้นควบคุม และเมื่อถึงอายุ 112 และ 180 วัน มอริตาร์ทึ้นพ่นมีกำลังดึงขึ้นสูงกว่ามอริตาร์ทึ้นควบคุมคิดเป็นร้อยละ 2.1 และ 11.0 ของมอริตาร์ทึ้นควบคุมตามลำดับ ดังภาพประกอบ 23



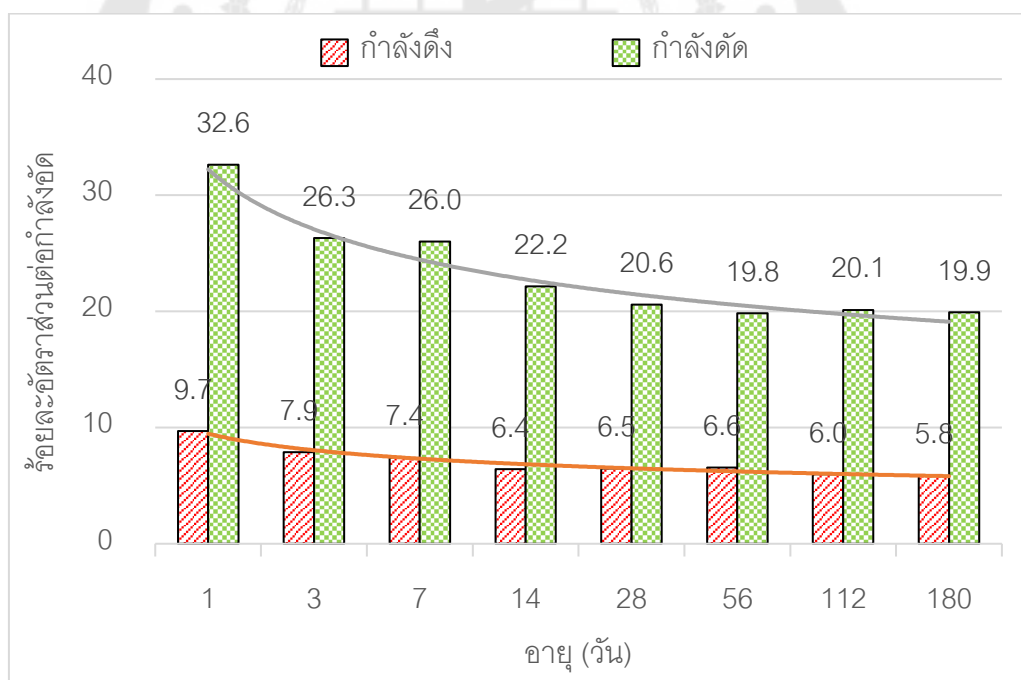
ภาพประกอบ 22 ผลทดสอบกำลังตัดของมอริตาร์



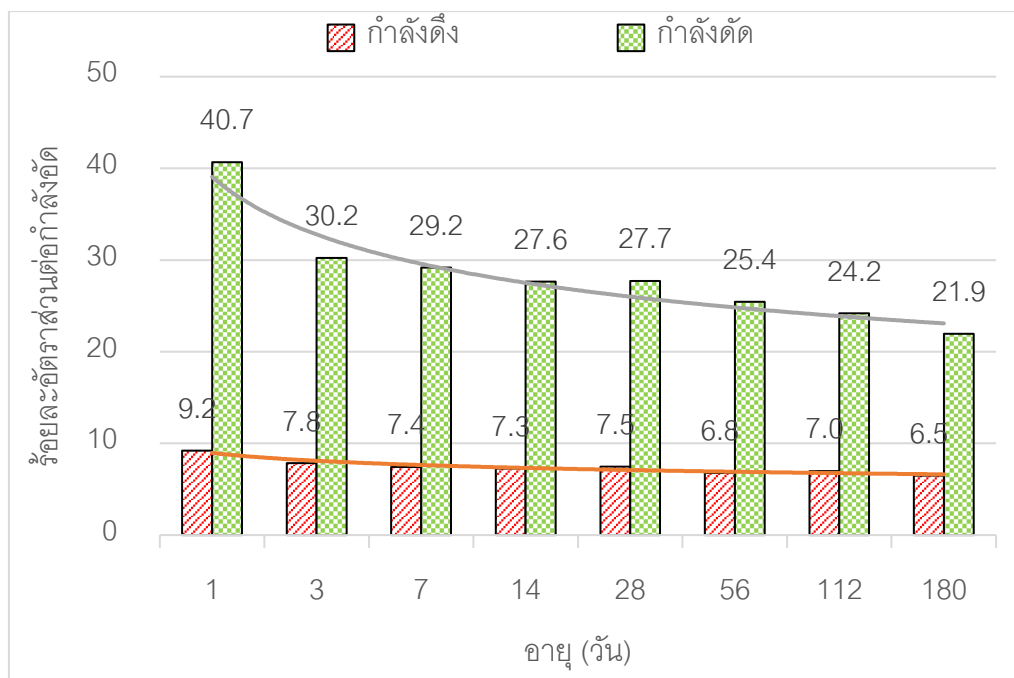
ภาพประกอบ 23 ผลทดสอบกำลังตัดของมอริตาร์ช่วงอายุ 56 ถึง 180 วัน

การเปรียบเทียบค่ากำลังของมอร์ตาร์

จากการทดสอบคุณสมบัติด้านการรับกำลังของวัสดุมอร์ตาร์ พบว่าอัตราการพัฒนากำลังของมอร์ตาร์มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน คือ เมื่ออายุเพิ่มมากขึ้นอัตราการพัฒนากำลังจะลดน้อยลง โดยอัตราการพัฒนากำลังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอายุต้น และเริ่มช้าลงเมื่ออายุได้ประมาณ 14 วัน ดังภาพประกอบ 24 และภาพประกอบ 25 สำหรับมอร์ตาร์ควบคุมมีค่ากำลังอัด กำลังดึง และกำลังดัดสูงสุดที่อายุ 180 วันเท่ากับ 655.5 42.4 และ 143.8 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ มีค่ากำลังดึงอยู่ในช่วงร้อยละ 6.5 ถึง 9.2 ของกำลังอัดมอร์ตาร์ควบคุม และมีค่ากำลังดัดอยู่ในช่วงร้อยละ 21.9 ถึง 40.7 ของกำลังอัดมอร์ตาร์ควบคุม สำหรับมอร์ตาร์ปูนพ่นมีค่ากำลังอัด กำลังดึง และกำลังดัดสูงสุดที่อายุ 180 วันเท่ากับ 801.0 46.7 และ 159.6 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ มีค่ากำลังดึงอยู่ในช่วงร้อยละ 5.8 ถึง 9.7 ของกำลังอัดมอร์ตาร์ปูนพ่น และมีค่ากำลังดัดอยู่ในช่วงร้อยละ 19.8 ถึง 32.6 ของกำลังอัดของมอร์ตาร์ปูนพ่น

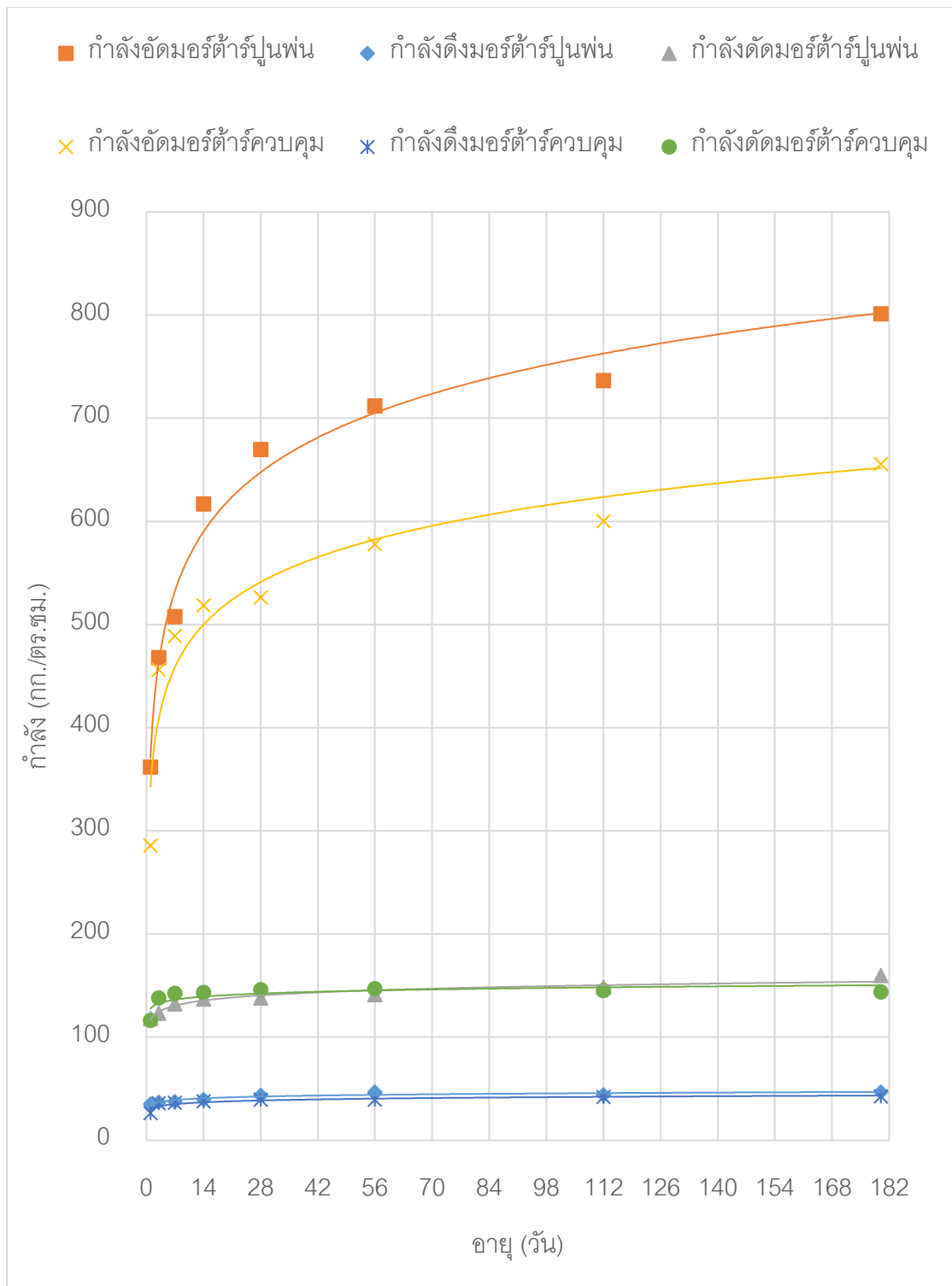


ภาพประกอบ 24 การเปรียบเทียบร้อยละอัตราส่วนต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ปูนพ่น



ภาพประกอบ 25 การเปรียบเทียบร้อยละอัตราส่วนต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม

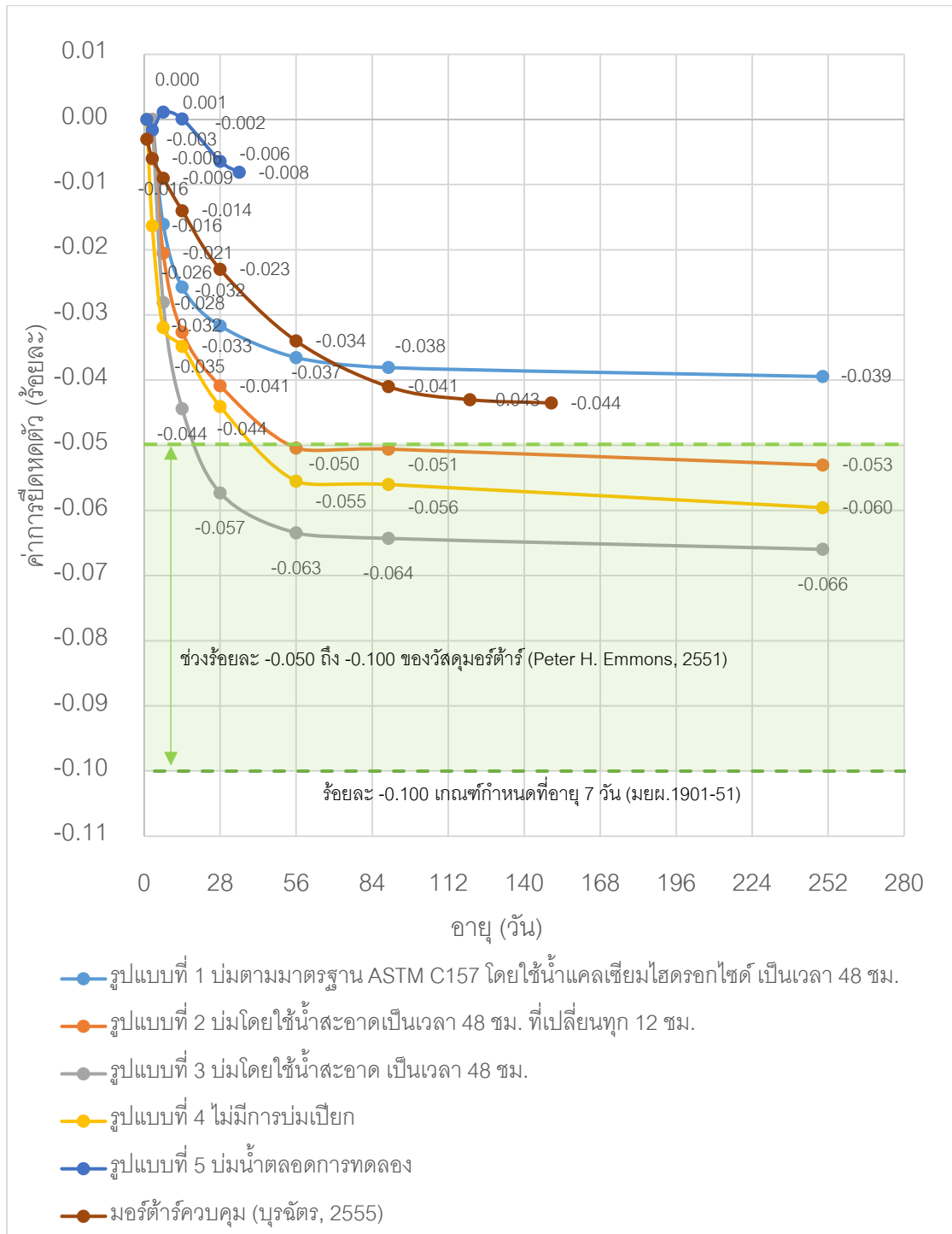
เมื่อนำข้อมูลด้านการรับกำลังของวัสดุมอร์ตาร์ทั้งสองชนิดมาเปรียบเทียบกันพบว่า คุณสมบัติด้านกำลังอัดของวัสดุมอร์ตาร์ปูนพื้น และวัสดุมอร์ตาร์ควบคุมแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ชัดเจนต่อคุณสมบัติด้านกำลังตั้ง และคุณสมบัติด้านกำลังตัด เนื่องจากคุณสมบัติด้านกำลังอัดเป็นคุณสมบัติด้านหนึ่งที่มีความโดดเด่นของมอร์ตาร์ ดังแสดงในภาพประกอบ 26 โดยที่อายุ 28 วัน มอร์ตาร์ปูนพื้นให้กำลังอัดสูงถึง 669.5 กก./ตร.ซม. ซึ่งมากกว่า (350 กก./ตร.ซม.) ที่มาตรฐาน มยพ.1901-51 หรือ ASTM C387 กำหนดไว้ และยังสามารถพัฒนา กำลังอัดได้สูงถึง 801.0 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 180 วัน ถือได้ว่าให้กำลังอัดสูง แต่สำหรับคุณสมบัติ ด้านกำลังตั้ง และกำลังตัดของวัสดุมอร์ตาร์ทั้งสองชนิดมีค่ากำลังไม่แตกต่างกันมาก จะเห็นได้ว่า เส้นแนวโน้มของข้อมูลด้านกำลังตั้ง และกำลังตัดของแต่ละเส้นมีความใกล้เคียงกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งผลด้านกำลังตั้งยังคงอยู่ในช่วงร้อยละ 5 ถึง 10 ของกำลังรับแรงอัด และกำลังตัดของมอร์ตาร์ที่ อายุ 28 วัน มีค่ามากกว่า (55 กก./ตร.ซม.) ที่มาตรฐาน ASTM C887 กำหนดไว้



ภาพประกอบ 26 การเปรียบเทียบค่ากำลังของมอร์ต้าร์

ผลทดสอบการยึดหดตัวของมอร์ตาร์

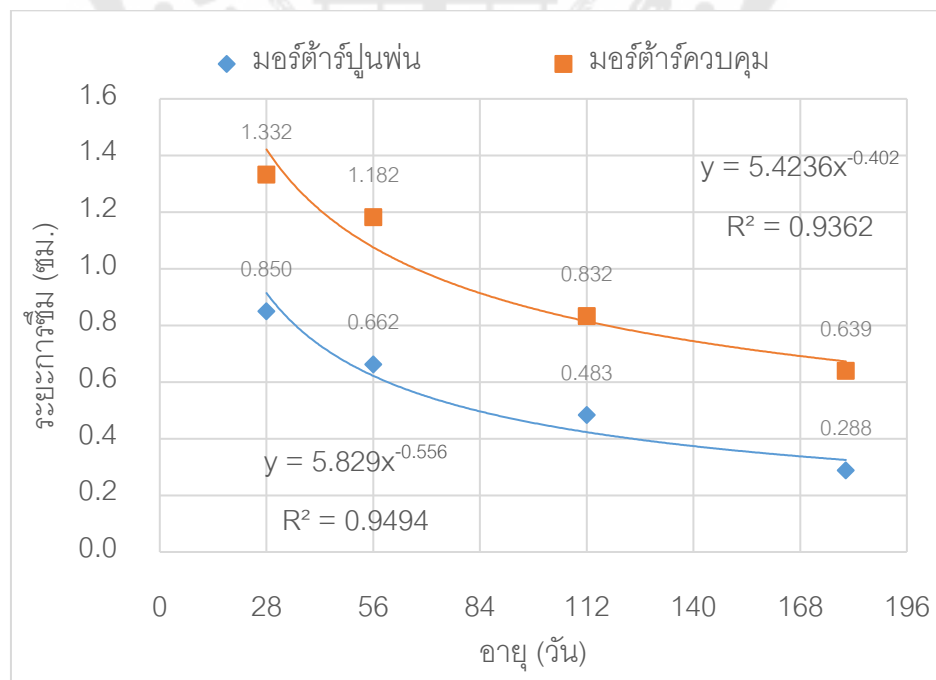
จากการทดสอบการยึดหดตัวของมอร์ตาร์พบว่าในช่วงอายุต้น หรือในช่วงอายุ 7 วันแรก หลังจากนำออกจากห้องบ่มเปียกตัวอย่างมอร์ตาร์เกิดการหดตัวสูง (มีความชื้นมาก) ในทุกรูปแบบของการบ่ม และหลังจากนั้นอัตราของการหดตัวจะลดลงจนเริ่มคงที่เมื่อมีอายุเพิ่มมากขึ้น ยกเว้นการบ่มรูปแบบที่ 5 คือบ่มน้ำ (แช่น้ำ) ตลอดเวลาพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงความยาวเพียงเล็กน้อย โดยรูปแบบที่มีการหดตัวมากที่สุดคือ รูปแบบที่ 3 (บ่มโดยใช้น้ำประปาสะอาด) รูปแบบที่ 4 (ไม่มีการบ่มน้ำ) รูปแบบที่ 2 (บ่มโดยใช้น้ำประปาสะอาดที่เปลี่ยนทุก 12 ชม.) และรูปแบบที่ 1 (บ่มตามมาตรฐาน ASTM C157 โดยใช้น้ำแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิ่มตัว) ตามลำดับ สำหรับการหดตัวของมอร์ตาร์ปูนพ่นที่บ่มตามรูปแบบมาตรฐาน ASTM C157 มีค่าการหดตัวต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม (บุรฉัตร, 2555)⁽²⁷⁾ อยู่ประมาณร้อยละ 10.3 ของมอร์ตาร์ควบคุม อย่างไรก็ตามค่าการหดตัวของมอร์ตาร์จากการทดสอบทุกรูปแบบมีค่าไม่เกินกว่าร้อยละ 0.100 ที่อายุ 7 วัน และมีค่าไม่เกินกว่าร้อยละ 0.150 ที่อายุ 28 วัน ตามที่มาตรฐาน มยผ.1901-51 ASTM C845 และ ASTM C928 ได้กำหนดไว้ ทั้งนี้ผลการหดตัวที่เกิดขึ้นตามการบ่มรูปแบบมาตรฐานของมอร์ตาร์ปูนพ่นและมอร์ตาร์ควบคุม (บุรฉัตร, 2555)⁽²⁷⁾ มีค่าไม่เกินกว่าช่วงการหดตัวของมอร์ตาร์ร้อยละ 0.050 ถึง 0.100 ตามที่ Peter H. Emmons⁽¹⁾ แนะนำ ดังภาพประกอบ 27 และจากการวัดค่าการหดตัวที่เกิดขึ้นพบว่าตัวอย่างในรูปแบบที่มีการบ่มน้ำสะอาด ยกเว้นรูปแบบที่ 1 เกิดการหดตัวสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้มีการบ่มน้ำในช่วงอายุต้น ซึ่งเป็นไปในทางตรงกันข้ามกับการทำงานจริง อย่างไรก็ตามการหดตัวของตัวอย่างดังกล่าวอาจมีสาเหตุมาจากโครงสร้างช่องว่างและโพรงในซีเมนต์เพสต์มีการสูญเสียแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในช่วงการบ่มเปียกออกไป ทำให้เกิดการแทนที่ของน้ำในช่องว่างภายในโครงสร้างโพรง เมื่อสิ้นสุดการบ่มเปียกในช่วงอายุต้นตัวอย่างจะสูญเสียน้ำภายในช่องว่างออกสู่สภาพแวดล้อมโดยจะเริ่มจากช่องว่างที่มีขนาดใหญ่ตามมาด้วยช่องว่างที่มีขนาดเล็กลงอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งมีการดึงน้ำในโพรงไปใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ด้วยสาเหตุเหล่านี้จึงทำให้เกิดแรงดึงผิวในโพรงของเจลและช่องว่างคาปิลลารี ส่งผลให้เกิดการหดตัวแบบแห้งมากขึ้น



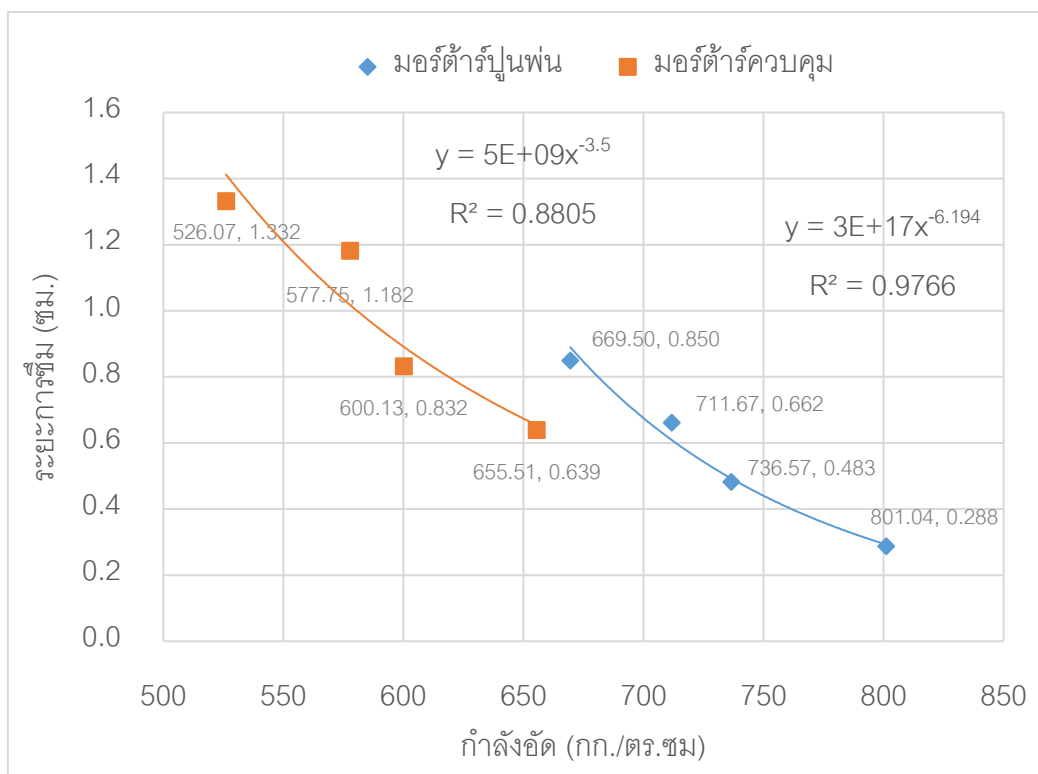
ภาพประกอบ 27 ผลการทดสอบการยัดหดตัวของมอร์ตาร์

ผลทดสอบความทนทานต่อการซึมผ่านของน้ำ

จากการทดสอบความทนทานต่อการซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างมอร์ตาร์ทั้งสองชนิดที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/C Ratio) เท่ากับ 0.49 พบว่าระยะเวลาการซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างมอร์ตาร์มีค่าลดน้อยลงเมื่ออายุของตัวอย่างมอร์ตาร์เพิ่มมากขึ้น โดยค่าความแตกต่างสำหรับระยะเวลาการซึมผ่านน้ำของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนพื้นมีค่าน้อยกว่าระยะเวลาการซึมผ่านน้ำของตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุ 28 56 112 และ 180 วัน คิดเป็นร้อยละ -36.2 -44.0 -41.9 และ -55.0 ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 28 และเมื่อนำข้อมูลด้านกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์จากการทดสอบมาแสดงความสัมพันธ์ร่วมกับค่าระยะเวลาการซึมผ่านของน้ำ พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติด้านความทึบน้ำหรือค่าระยะเวลาการซึมผ่านของน้ำ เมื่อวัสดุมอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงขึ้นตามอายุที่มากขึ้นจะทำให้ค่าระยะเวลาการซึมผ่านของน้ำลดน้อยลง ดังภาพประกอบ 29 เหตุผลเนื่องจากในองค์ประกอบของซีเมนต์ภายหลังการแข็งตัวยังมีปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างของแข็งเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา ซึ่งทำให้เกิดองค์ประกอบหลักของซีเมนต์ที่เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณ เพิ่มขึ้นทำให้ช่องว่างคาпилลารีแคบลงจนเกิดความไม่ต่อเนื่องของช่องว่างคาпилลารี ส่งผลให้มีความพรุนลดลง มีกำลังอัดสูงขึ้น และที่สำคัญมีความทึบน้ำแน่นเพิ่มมากขึ้น

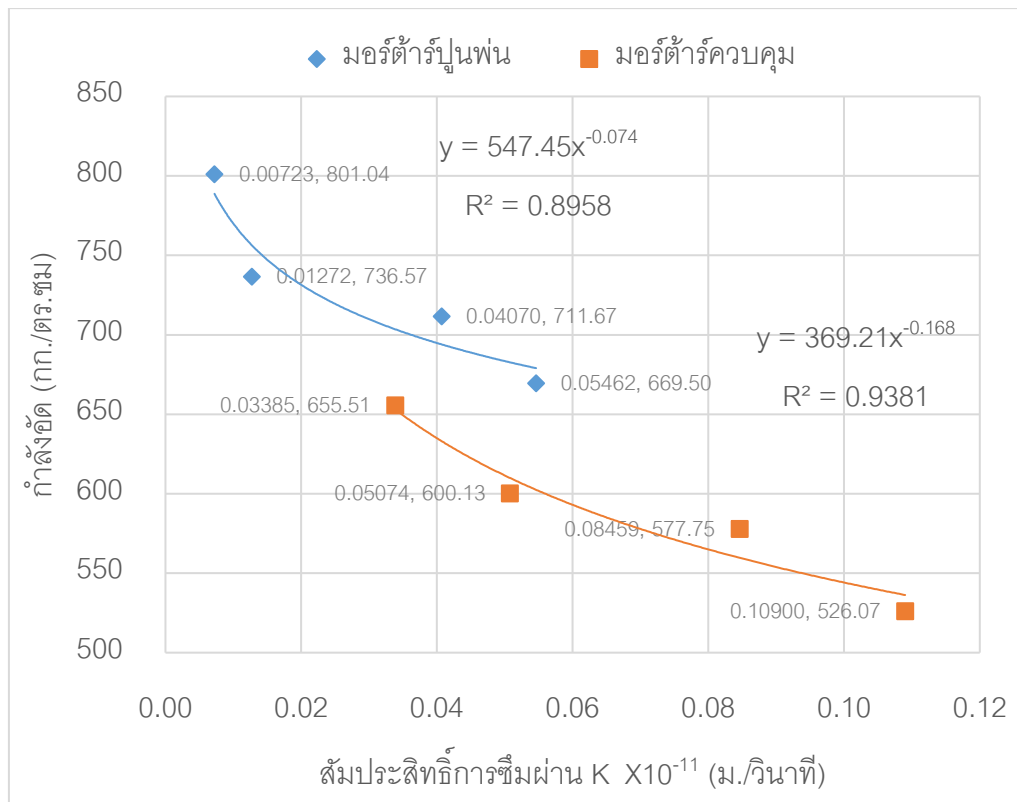


ภาพประกอบ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุของมอร์ตาร์และระยะเวลาการซึมผ่านของน้ำ



ภาพประกอบ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอรั้ด้าร์และระยะการซึมผ่านของน้ำ

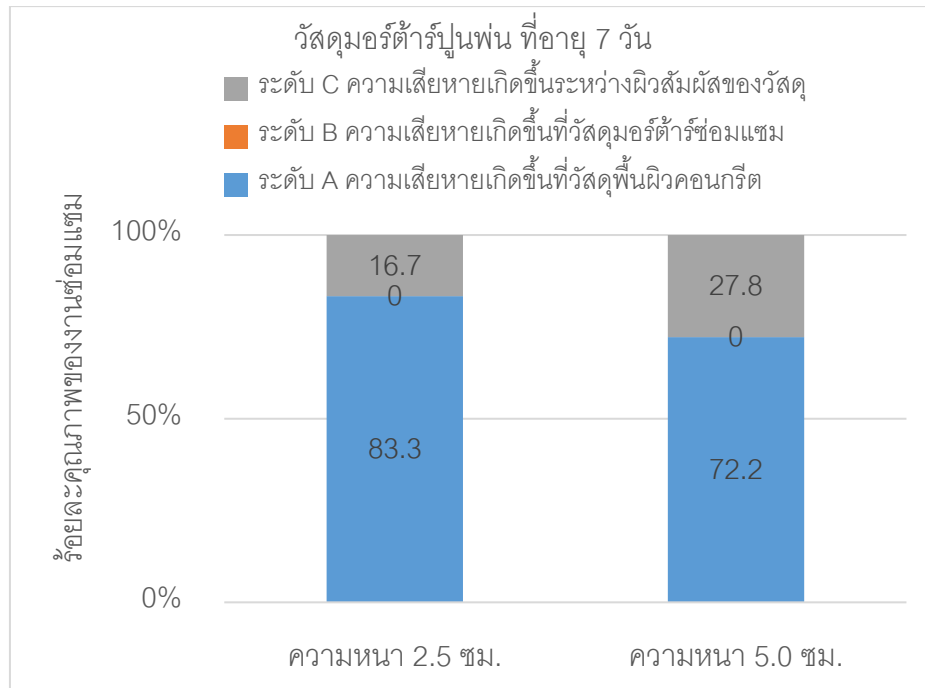
เมื่อนำข้อมูลจากการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวอย่างมอรั้ด้าร์มาแสดงความสัมพันธ์ร่วมกับค่ากำลังรับแรงอัดตัวอย่างมอรั้ด้าร์จากการทดสอบ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะลดน้อยลงเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มมากขึ้น สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวอย่างมอรั้ด้าร์ปุ้นพ่น ที่อายุ 28 56 112 และ 180 วัน มีค่าเท่ากับ 0.05462 0.04070 0.01272 และ 0.00723×10^{-11} ม./วินาที ตามลำดับ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวอย่างมอรั้ด้าร์ควบคุม ที่อายุ 28 56 112 และ 180 วัน มีค่าเท่ากับ 0.10900 0.08459 0.05074 และ 0.03385×10^{-11} ม./วินาที ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 30 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวอย่างมอรั้ด้าร์ปุ้นพ่นมีค่าความแตกต่างกันอยู่ที่ 0.50 0.48 0.25 และ 0.21 เท่าของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวอย่างมอรั้ด้าร์ควบคุม โดยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตปกติมีค่าอยู่ในช่วง 10^{-11} ถึง 10^{-13} ม./วินาที และคอนกรีตที่บ่มน้ำมีค่า $< 10^{-14}$ ม./วินาที (K.Yang, 2018)⁽³⁰⁾ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวอย่างมอรั้ด้าร์จากการทดสอบนี้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ปกติ



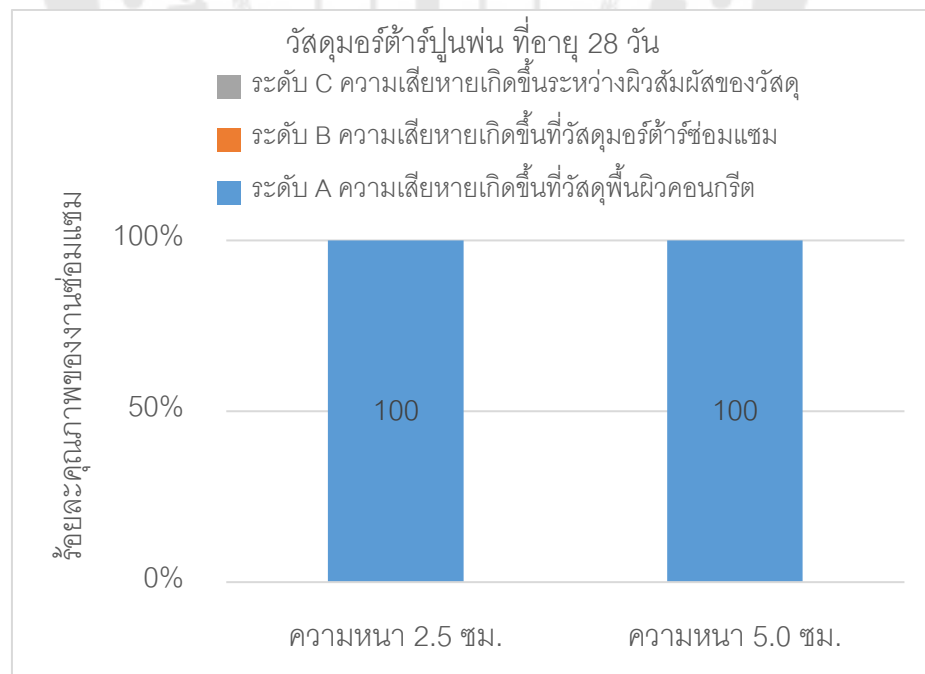
ภาพประกอบ 30 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเปรียบเทียบกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ทู

ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ

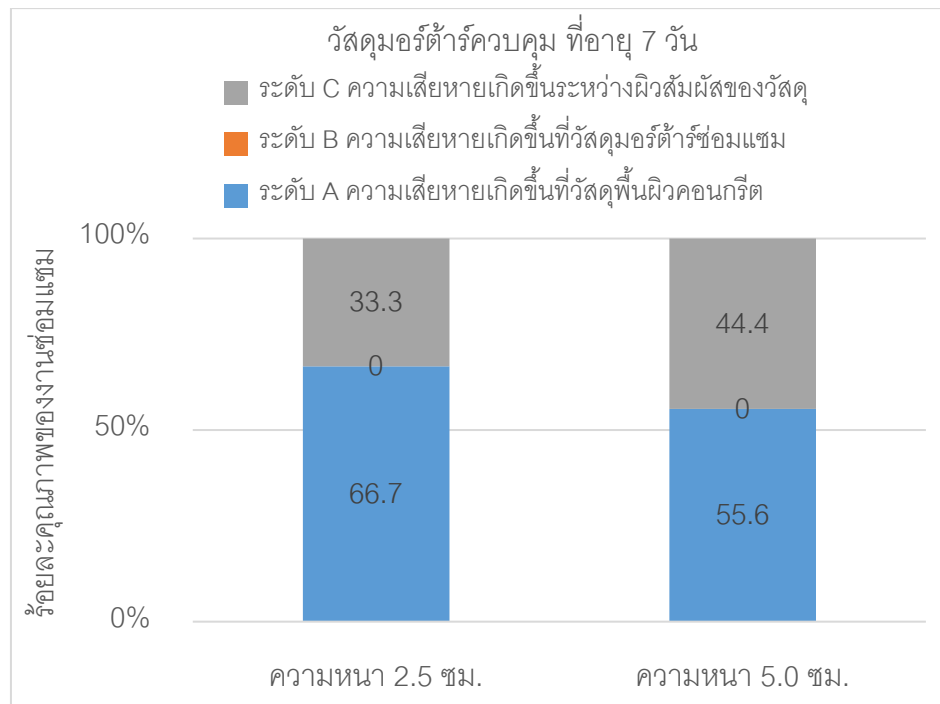
จากการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเพื่อหาค่าคุณภาพของการซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีตด้วยวัสดุมอร์ตาร์ทูโดยใช้เกณฑ์ความเสียหายที่ระดับ A เป็นตัวชี้วัด พบว่าวัสดุมอร์ตาร์ทูโพลีนฟีนอายุ 7 วัน ที่ความหนา 2.5 และ 5.0 ซม. มีค่าร้อยละคุณภาพของงานซ่อมแซมเท่ากับร้อยละ 83.3 และ 72.2 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าวัสดุมอร์ตาร์ทูควบคุมที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 66.7 และ 55.6 ตามลำดับ คิดเป็นค่าความแตกต่างร้อยละ 16.6 และ 16.6 ตามลำดับ หากสังเกตจากข้อมูลที่อายุ 28 วันพบว่าค่าร้อยละคุณภาพของงานซ่อมแซมด้วยวัสดุมอร์ตาร์ทูทั้งสองชนิดที่ชั้นความหนา 2.5 และ 5.0 ซม. มีค่าอยู่ที่ร้อยละ 100 หมายความว่าวัสดุมอร์ตาร์ทูสามารถยึดเกาะกับวัสดุพื้นผิวคอนกรีตได้ดีซึ่งถือว่าการซ่อมแซมมีประสิทธิภาพ ซึ่งผลดังกล่าวบ่งชี้ว่าชนิดของมอร์ตาร์ทู อายุของวัสดุซ่อมแซม และชั้นความหนาของงานซ่อมแซม ส่งผลต่อคุณภาพของงานซ่อมแซม ดังนั้นเมื่อชั้นความหนาของงานซ่อมแซมเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าคุณภาพของงานซ่อมแซมลดน้อยลง ดังในภาพประกอบ 31 ถึง ภาพประกอบ 34



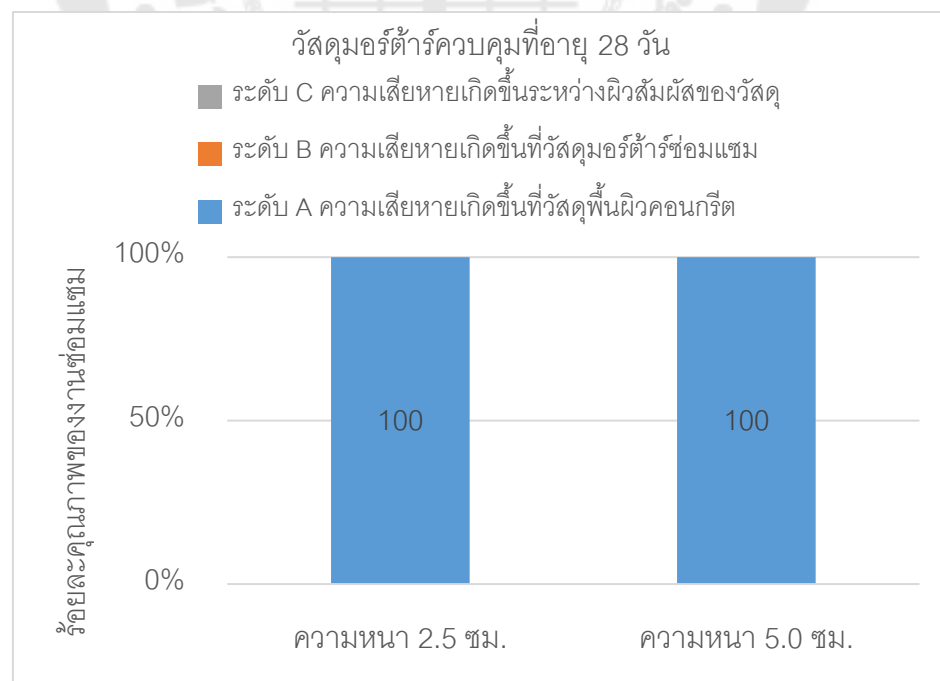
ภาพประกอบ 31 คุณภาพของการซ่อมแซมด้วยวัสดุอมอร์ต้าร์ปูนพ่น ที่อายุ 7 วัน



ภาพประกอบ 32 คุณภาพของการซ่อมแซมด้วยวัสดุอมอร์ต้าร์ปูนพ่น ที่อายุ 28 วัน

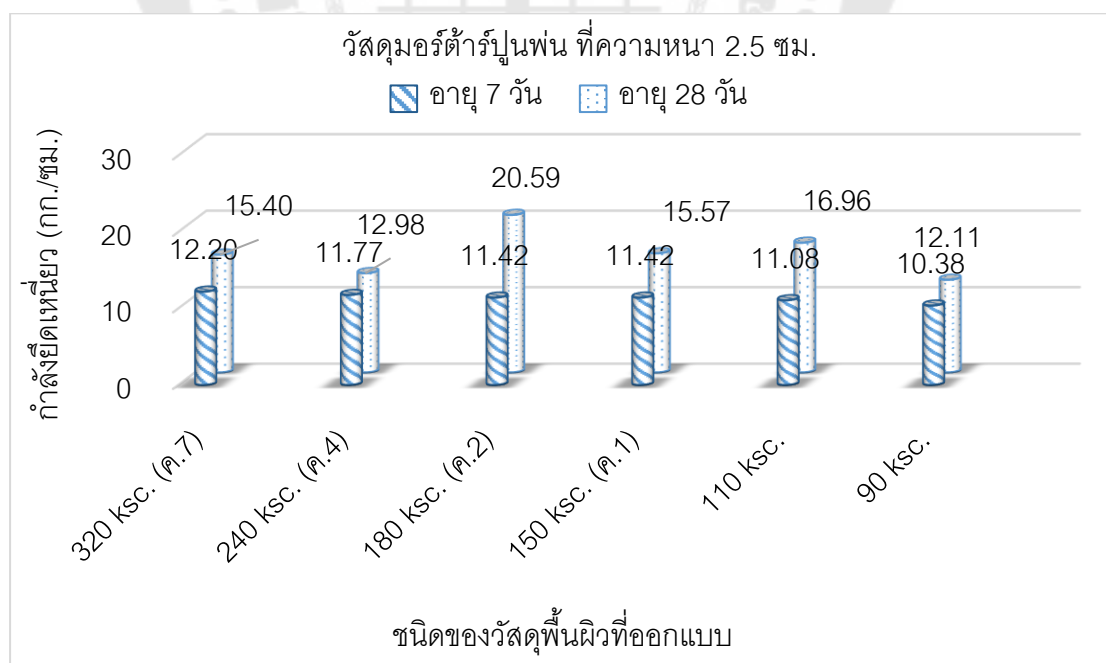


ภาพประกอบ 33 คุณภาพของการซ่อมแซมด้วยวัสดุอมอร์ทัลาร์ควบคุม ที่อายุ 7 วัน

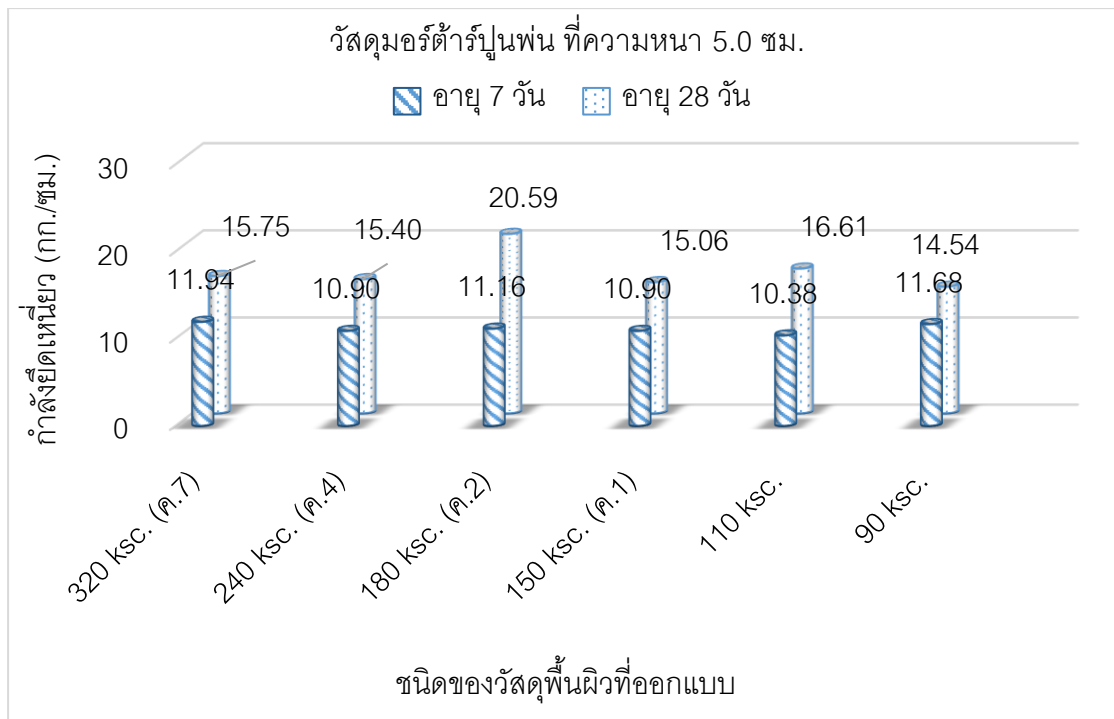


ภาพประกอบ 34 คุณภาพของการซ่อมแซมด้วยวัสดุอมอร์ทัลาร์ควบคุม ที่อายุ 28 วัน

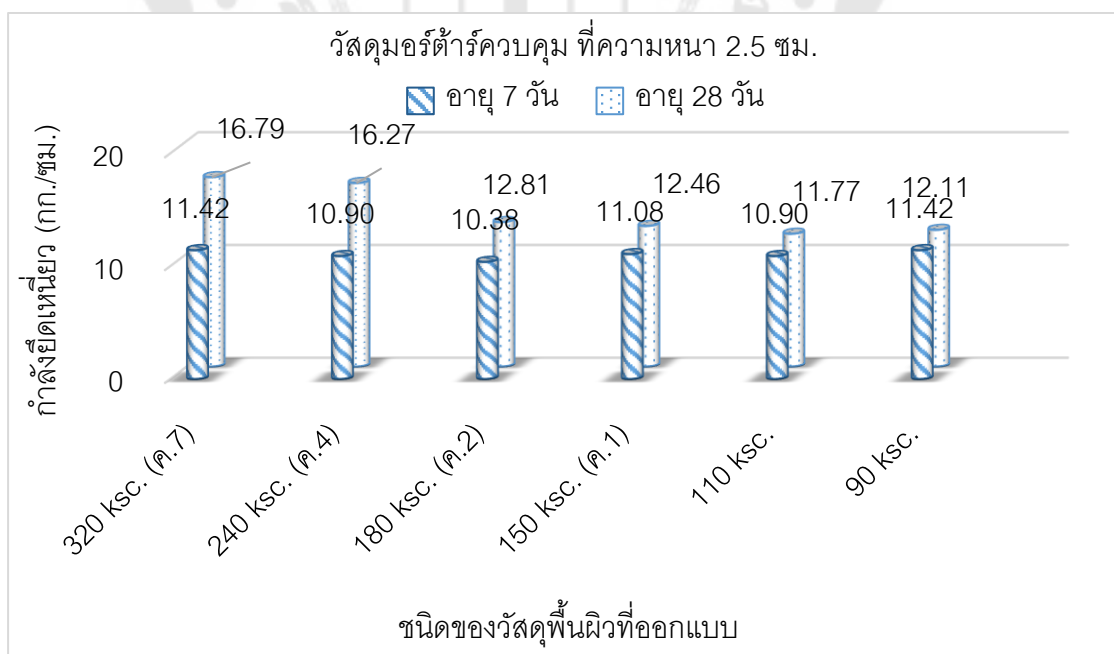
จากการทดสอบหาค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพบว่ากำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุจะสูงขึ้นเมื่ออายุเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันการทดสอบคุณสมบัติด้านการรับกำลังของวัสดุ แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลการทดสอบดังกล่าวเป็นการวิบัติที่วัสดุพื้นผิวคอนกรีต เป็นเพียงการทดสอบเพื่อศึกษากำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุมอร์ตาร์ซ่อมแซมหรือคุณภาพของงานซ่อมแซม ดังนั้นกำลังยึดเหนี่ยวที่แท้จริงของวัสดุมอร์ตาร์นั้นมีค่ากำลังรับแรงดึงที่สูงกว่าวัสดุพื้นผิวคอนกรีต โดยจากการสังเกตผลทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุพื้นผิวพบว่า กำลังยึดเหนี่ยวหรือกำลังรับแรงดึงของวัสดุพื้นผิวที่อายุมากกว่า 28 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 10.4 ถึง 20.6 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงดึงของวัสดุมอร์ตาร์จากการทดสอบที่มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 26.3 ถึง 46.7 กก./ตร.ซม. เป็นผลให้เกิดความเสียหายขึ้นในบริเวณพื้นผิวคอนกรีต ทั้งนี้ค่ากำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุมอร์ตาร์ทั้ง 2 ชนิดจะต้องมีค่ามากกว่า 20.6 กก./ตร.ซม. เป็นค่าสูงสุดที่ทดสอบได้ หากคิดเฉลี่ยเป็นร้อยละกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเดิมมีค่าเท่ากับร้อยละ 13.6 ซึ่งค่าแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์จะมีค่ามากกว่าร้อยละ 10 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเดิม (มยผ. 1901-51) ดังนั้นการซ่อมแซมด้วยวัสดุมอร์ตาร์ที่มีกำลังรับแรงดึงสูงกว่าวัสดุพื้นผิวจะส่งผลดีต่อประสิทธิภาพของการซ่อมแซม ดังแสดงในภาพประกอบ 35 ถึง ภาพประกอบ 38



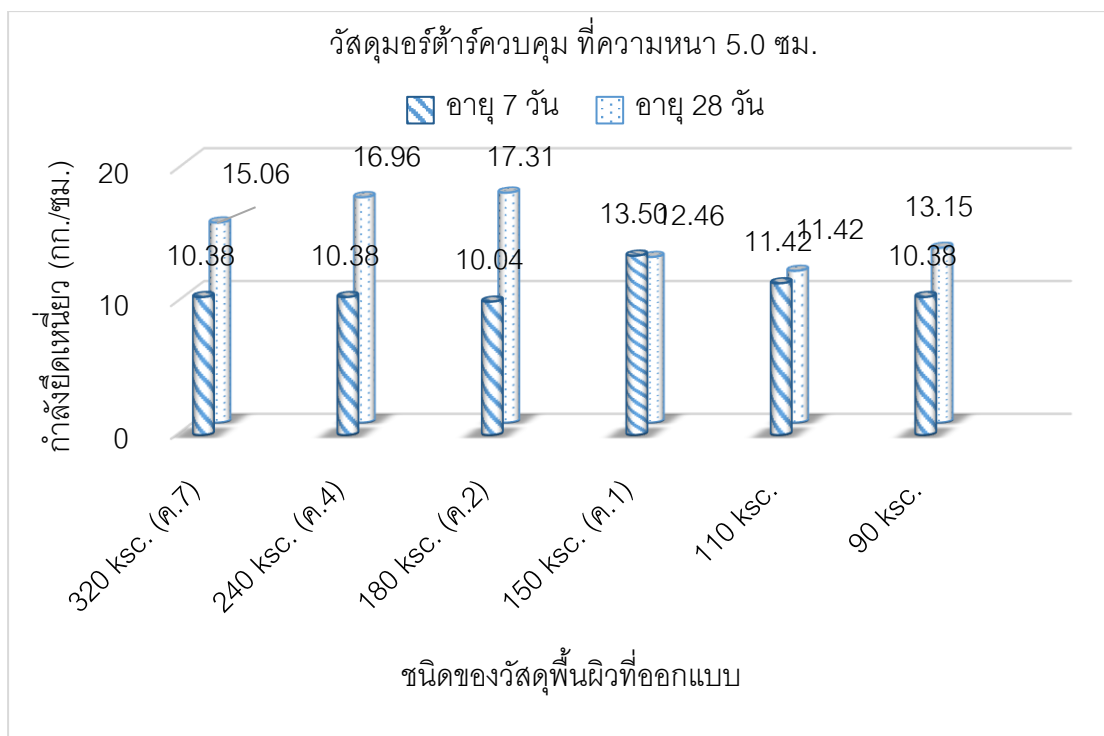
ภาพประกอบ 35 กำลังยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์ปูนพ่นที่ความหนา 2.5 ซม. บนพื้นผิวคอนกรีต



ภาพประกอบ 36 กำลังยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์ปูนพื้นที่มีความหนา 5.0 ซม. บนพื้นผิวคอนกรีต



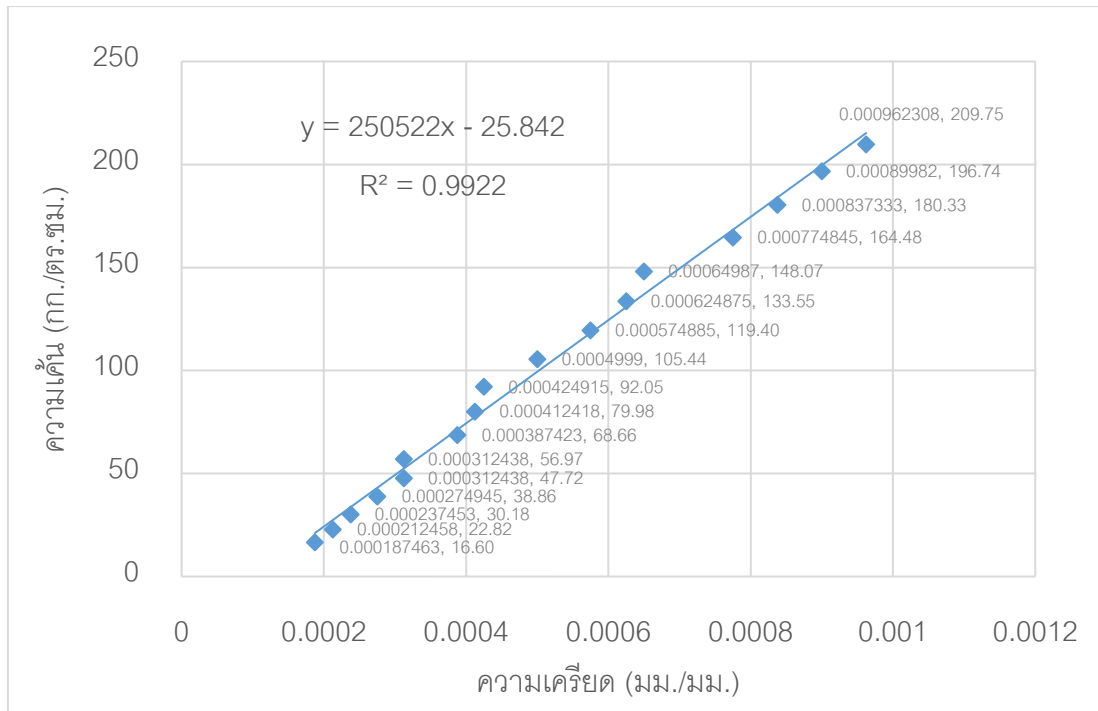
ภาพประกอบ 37 กำลังยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์ควบคุมที่มีความหนา 2.5 ซม. บนพื้นผิวคอนกรีต



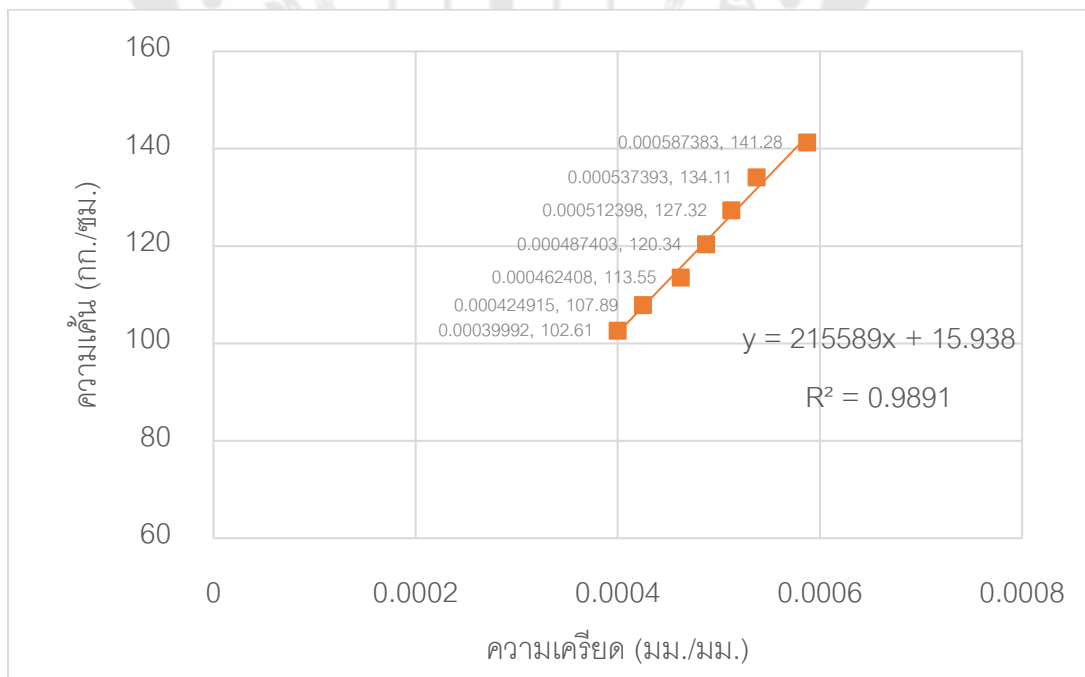
ภาพประกอบ 38 กำลังยึดเหนี่ยวของอมอร์ตาร์ควบคุมที่ความหนา 5.0 ซม. บนพื้นผิวคอนกรีต

ผลการทดสอบวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของอมอร์ตาร์

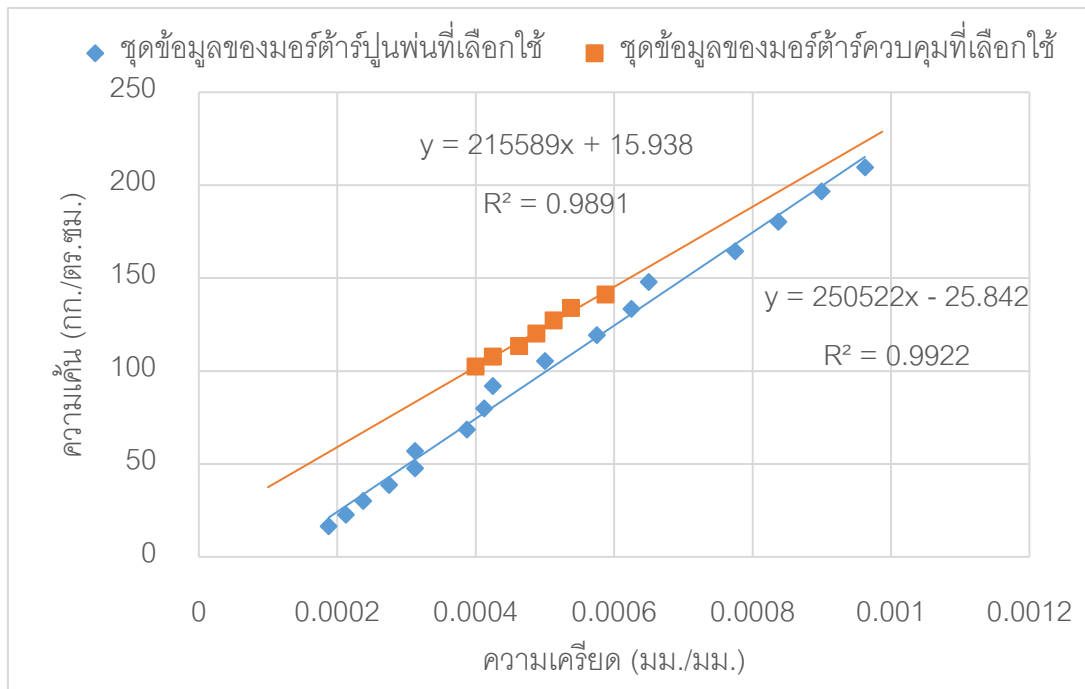
จากการทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของตัวอย่างอมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน มีจำเป็นต้องเลือกผลข้อมูลจากการทดสอบในช่วงที่มีความคงที่เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงความถูกต้อง ซึ่งจากการเลือกช่วงของข้อมูลแสดงให้เห็นว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของตัวอย่างอมอร์ตาร์ปูนพื้น และตัวอย่างอมอร์ตาร์ควบคุมมีค่าประมาณ 250,522 และ 215,589 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 39 และภาพประกอบ 40 และเมื่อนำผลข้อมูลการทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของตัวอย่างอมอร์ตาร์ทั้งสองชนิดมาแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบกันพบว่า เส้นแนวโน้มของข้อมูลทดสอบสำหรับวัสดุอมอร์ตาร์ปูนพื้นมีค่าความชันมากกว่าเส้นแนวโน้มของข้อมูลสำหรับวัสดุอมอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งหมายความว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุอมอร์ตาร์ปูนพื้นมีค่าสูงกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุอมอร์ตาร์ควบคุม คิดเป็นร้อยละ 16.2 ของวัสดุอมอร์ตาร์ควบคุม ดังภาพประกอบ 41



ภาพประกอบ 39 ความเค้น และความเครียดของมอร์ตาร์ทาร์ปูนพื้น

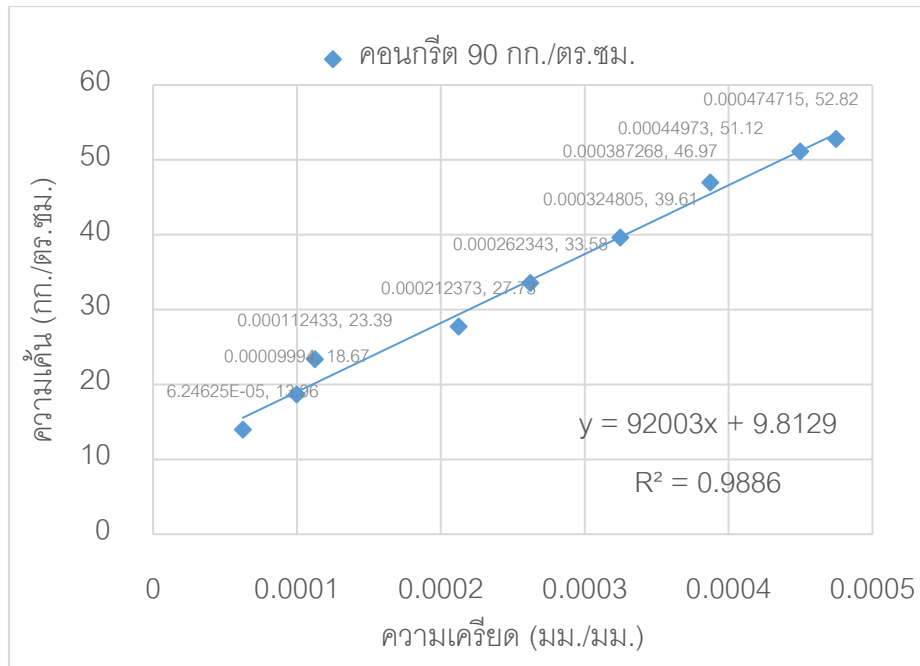


ภาพประกอบ 40 ความเค้น และความเครียดของมอร์ตาร์ทาร์ควบคุม

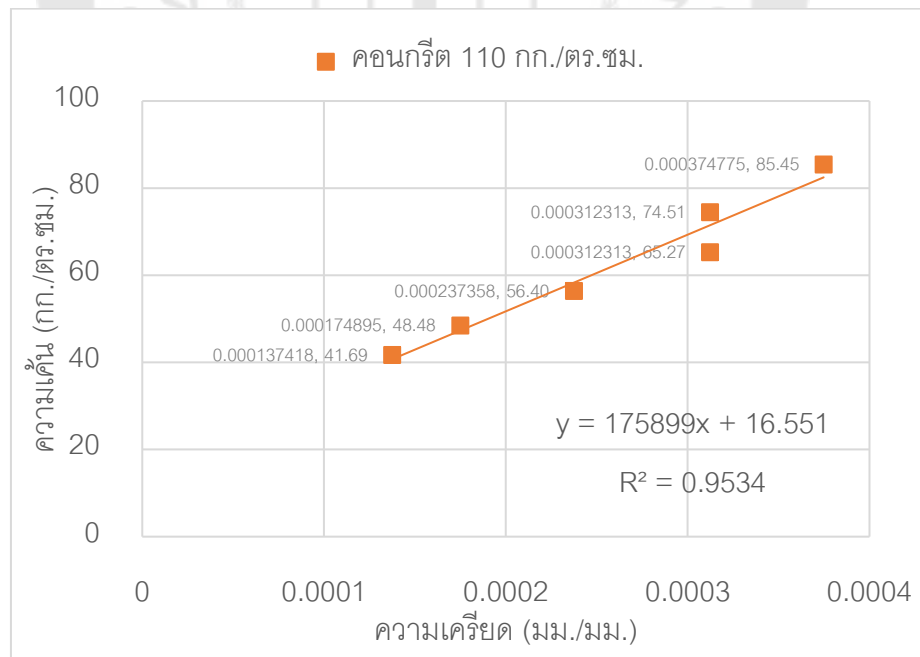


ภาพประกอบ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของมอร์ต้าร์

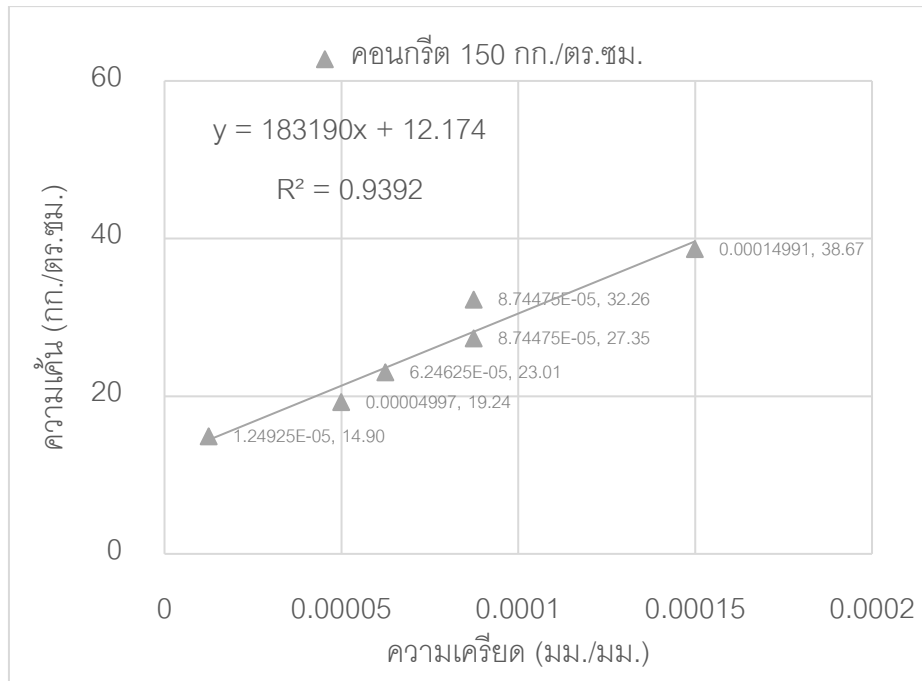
จากการทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตตามกำลังที่ ออกแบบไว้พบว่า ค่าความชันของข้อมูลการทดสอบวัสดุพื้นผิวคอนกรีตตามกำลังที่ออกแบบ 90 110 150 240 และ 320 กก./ตร.ซม. มีค่าความชันหรือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 92,003 175,899 183,190 225,664 และ 323,848.กก./ตร.ซม ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 42 ถึงภาพประกอบ 46 ซึ่งจะเห็นได้ว่าข้อมูลถูกเรียงจากค่าน้อยที่สุดไปยังค่าที่มากที่สุดตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าค่าความ ชันของข้อมูลหรือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังอัดที่ออกแบบ เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบที่ 47 และหากเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ ได้จากการทดสอบเทียบกับการใช้สมการที่ (1) ตามมาตรฐานการออกแบบ ACI 318-19⁽²⁴⁾ พบว่า ร้อยละความแตกต่างสำหรับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต 90 110 150 240 และ 320 กก./ตร. ซม. มีค่าเท่ากับร้อยละ -35.8 11.1 -0.9 -3.5 และ 19.9 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 13



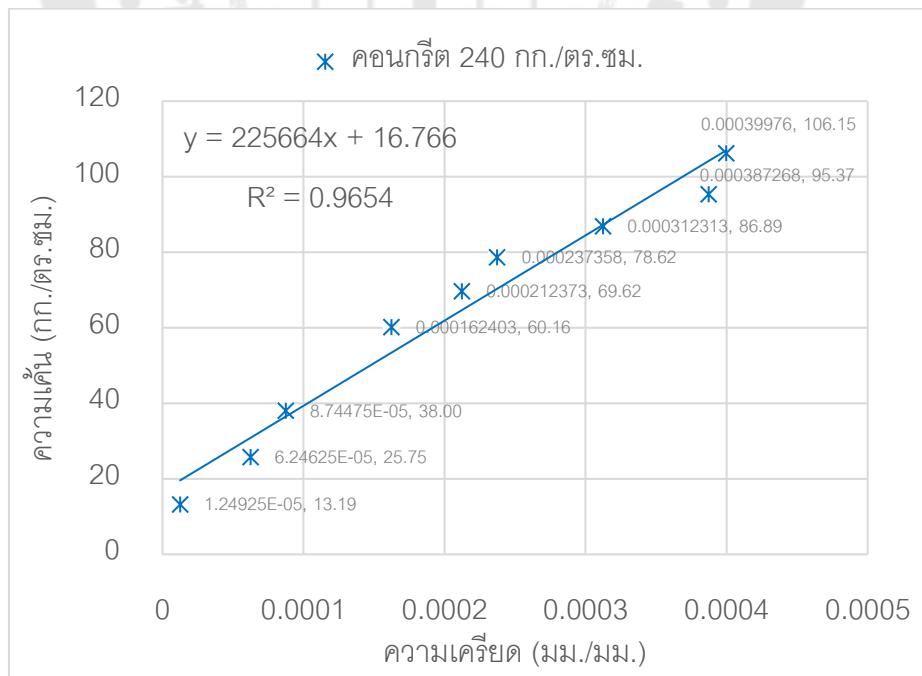
ภาพประกอบ 42 ความเค้น และความเคียวของคอนกรีต 90 กก./ตร.ซม.



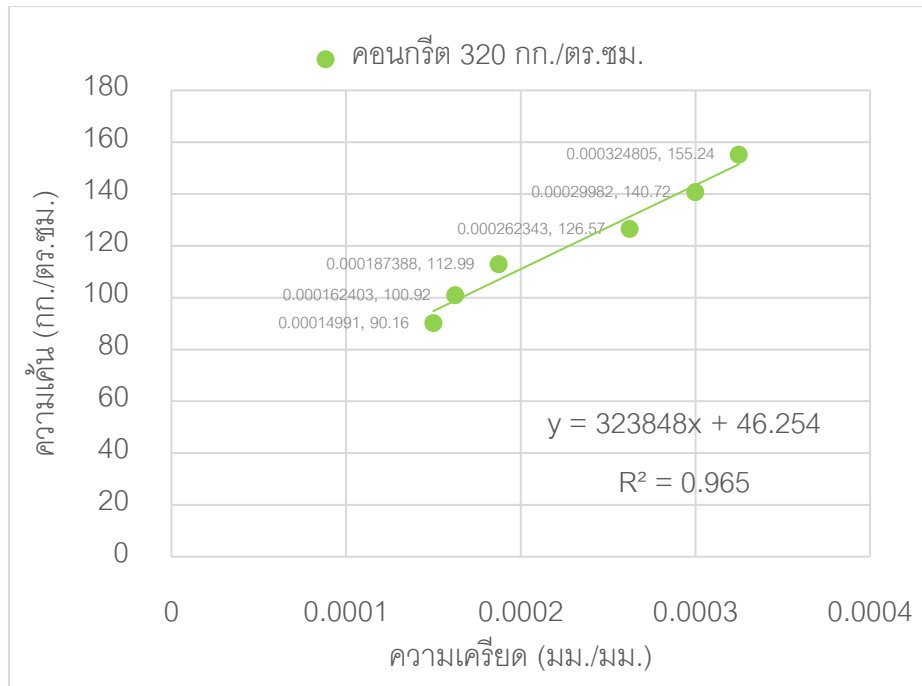
ภาพประกอบ 43 ความเค้น และความเคียวของคอนกรีต 110 กก./ตร.ซม.



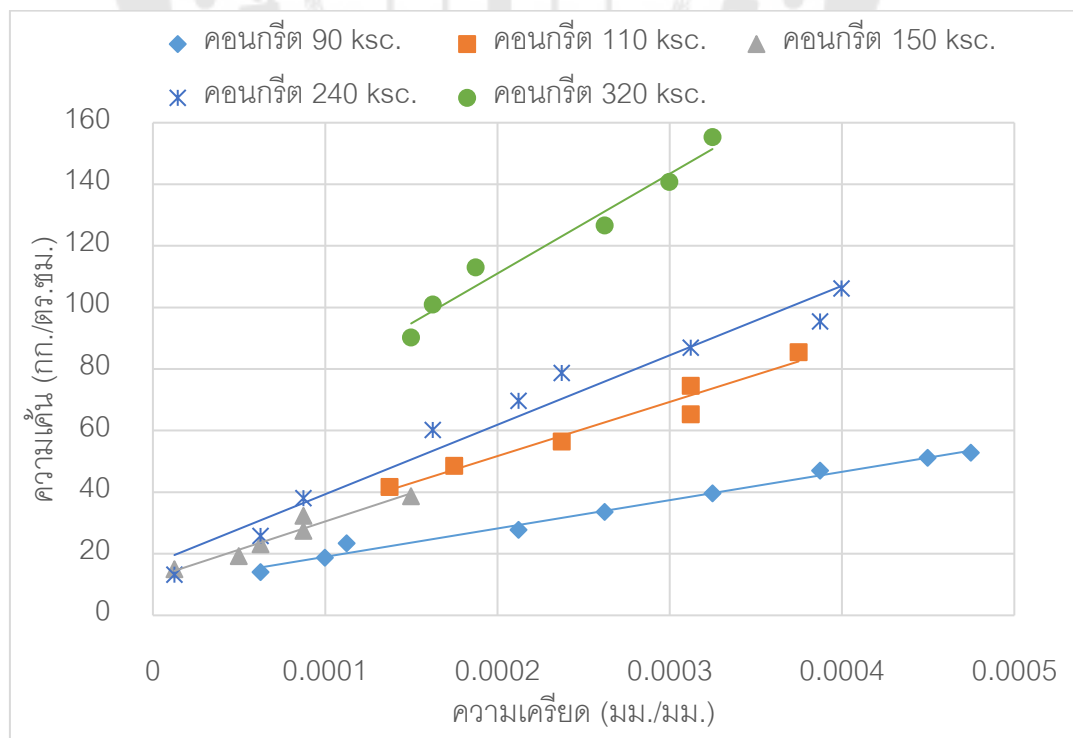
ภาพประกอบ 44 ความเค้น และความเคี้ยวของคอนกรีต 150 กก./ตร.ซม.



ภาพประกอบ 45 ความเค้น และความเคี้ยวของคอนกรีต 240 กก./ตร.ซม.



ภาพประกอบ 46 ความเค้น และความเครียดของคอนกรีต 320 กก./ตร.ซม.



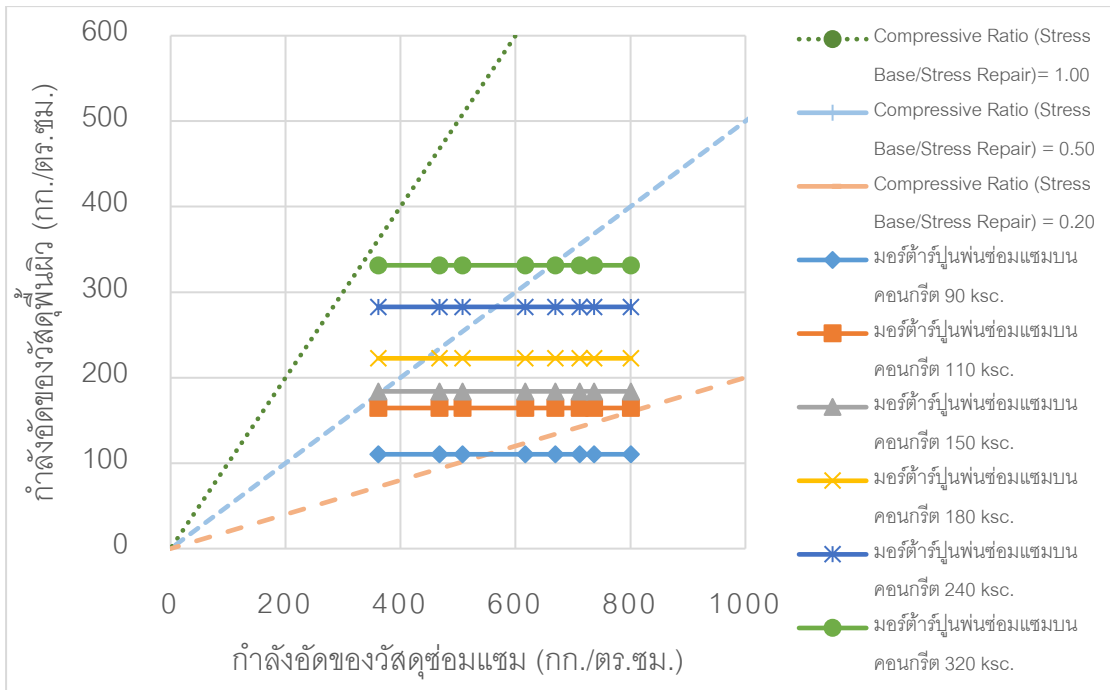
ภาพประกอบ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของคอนกรีต

ตาราง 13 การเปรียบเทียบผลค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

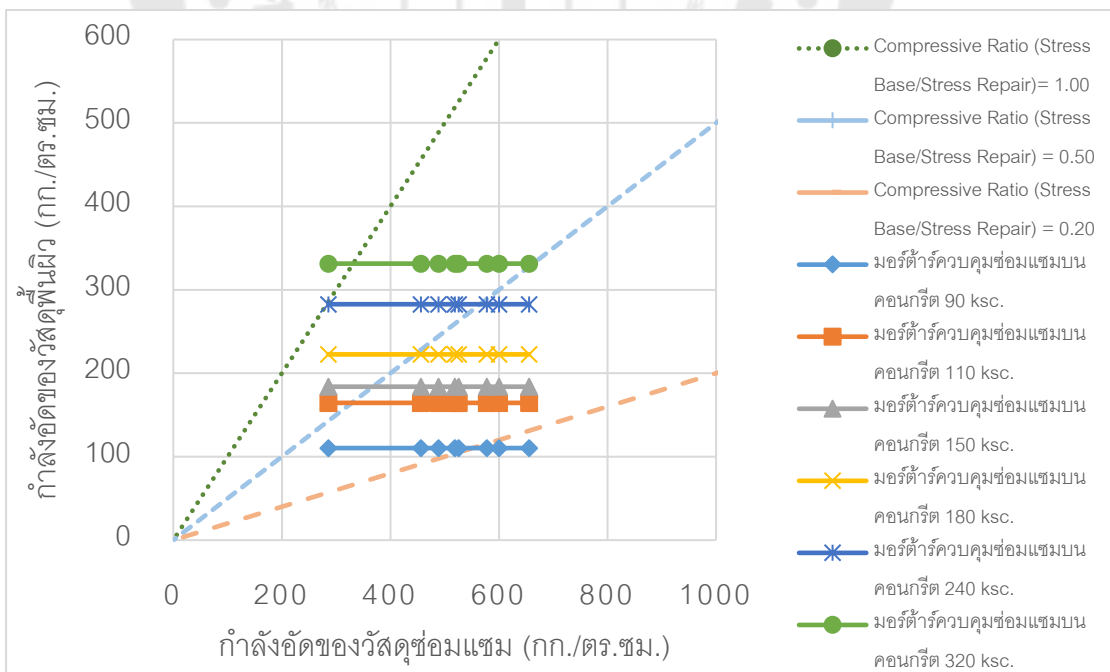
กำลังที่ใช้ในการ ออกแบบ (กก./ตร.ซม)	ค่ากำลังอัด	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น	ค่าโมดูลัส	ค่าความแตกต่าง (ร้อยละ)
	จากการ ทดสอบ (กก./ตร.ซม)	ตามมาตรฐาน ACI 318-19 ⁽²⁴⁾ (กก./ตร.ซม)	ยืดหยุ่นจากการ ทดสอบ (กก./ตร.ซม)	
90	110	143,251	92,003	-35.8
110	148	158,370	175,899	11.1
150 (ค.1)	182	184,936	183,190	-0.9
240 (ค.4)	273	233,928	225,664	-3.5
320 (ค.7)	331	270,117	323,848	19.9

ผลการวิเคราะห์ความเข้ากันได้

เมื่อนำข้อมูลจากการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุพื้นผิวคอนกรีต และข้อมูลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ซ่อมแซมมาเปรียบเทียบกัน พบว่ากำลังของคอนกรีตที่อายุ 28 วันมีค่ากำลังอัดต่ำสุดถึงค่าสูงสุดอยู่ในช่วง 110.3 ถึง 331.4 กก./ตร.ซม. มีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของวัสดุมอร์ตาร์ปูนพ่น และวัสดุมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 28 วัน ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 669.5 และ 526.1 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลการทดสอบกำลังอัดชี้ให้เห็นว่าค่ากำลังอัดของวัสดุมอร์ตาร์ปูนพ่นตั้งแต่อายุ 1 วัน (361.7 กก./ตร.ซม.) ขึ้นไป และค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุมตั้งแต่อายุ 3 วัน (456.0 กก./ตร.ซม.) ขึ้นไป สามารถใช้ในซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีตได้เนื่องจากมอร์ตาร์ดังกล่าวมีค่ากำลังอัดสูงกว่าค่ากำลังอัดของวัสดุพื้นผิวคอนกรีต ชี้ให้เห็นถึงความเข้ากันได้ทางด้านคุณสมบัติการรับกำลังอัดของวัสดุมอร์ตาร์เมื่อการซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีต ดังแสดงในภาพประกอบ 48 และภาพประกอบ 49

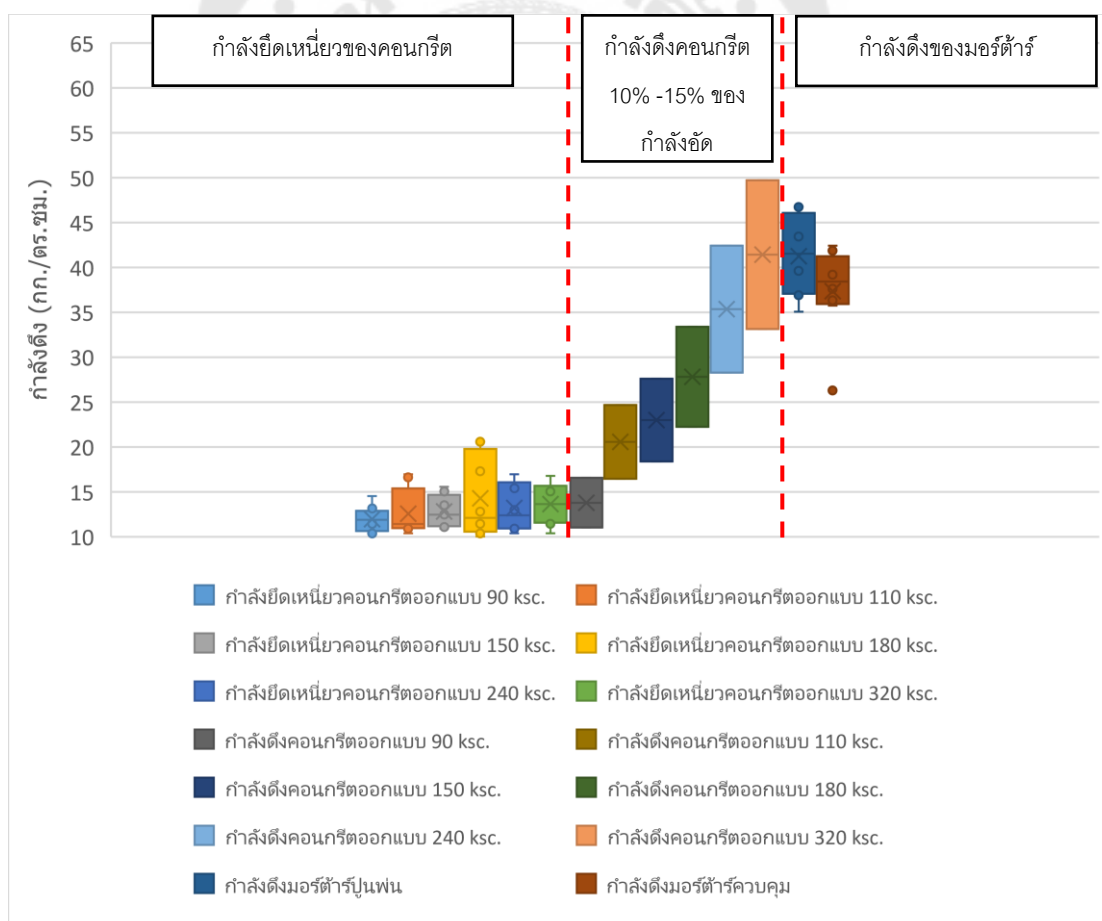


ภาพประกอบ 48 ค่ากำลังอัดของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตและวัสดุมอร์ตาร์ปูนพื้น



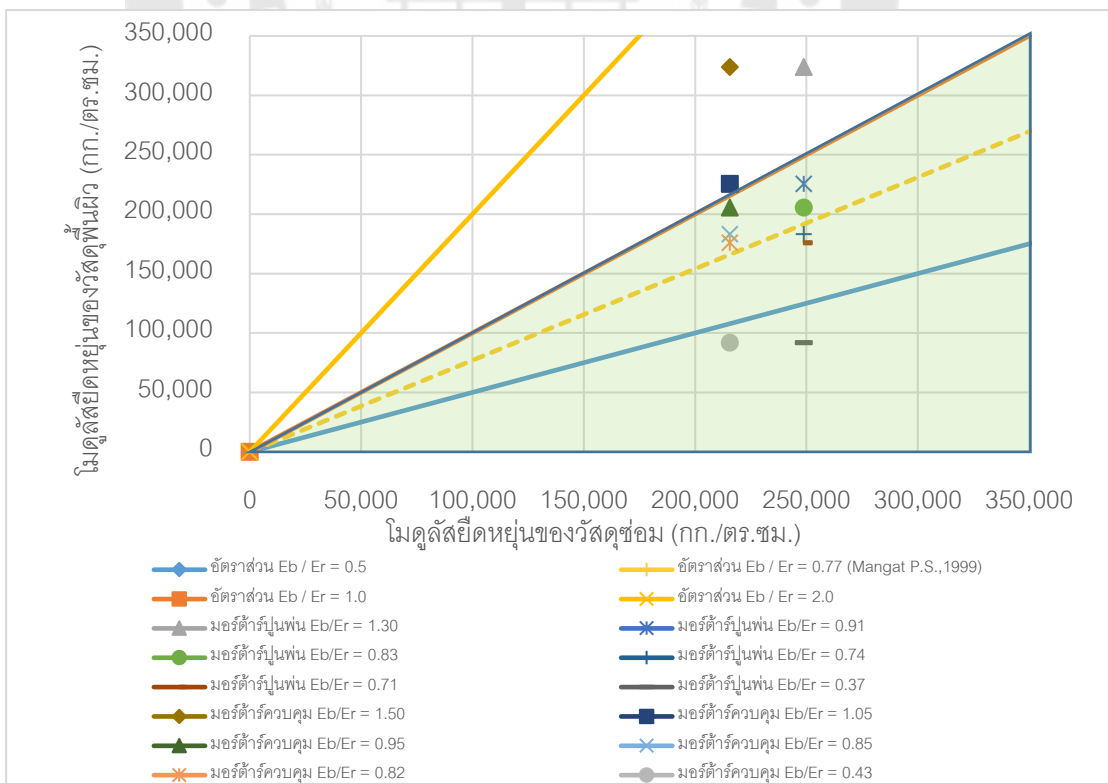
ภาพประกอบ 49 ค่ากำลังอัดของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตและวัสดุมอร์ตาร์ควบคุม

เมื่อนำข้อมูลจากการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ ข้อมูลกำลังดึงของคอนกรีตที่ร้อยละ 10 ถึง 15 ของกำลังอัด (กำลังดึงของคอนกรีต) และข้อมูลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ซ่อมแซมมาเปรียบเทียบกัน พบว่าวัสดุคอนกรีตซ่อมแซมทั้งสองชนิดมีค่ากำลังดึงเฉลี่ยสูงกว่ากำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตทั้งหมด และมีค่าสูงกว่ากำลังดึงเฉลี่ยของคอนกรีตทั้งหมด ยกเว้นแต่วัสดุคอนกรีตซ่อมแซมมีค่ากำลังดึงเฉลี่ยต่ำกว่ากำลังดึงเฉลี่ยของคอนกรีตออกแบบกำลังอัด 320 กก./ตร.ซม. โดยที่อายุ 28 วัน มอร์ตาร์ปูนพื้นและมอร์ตาร์ควบคุมมีค่ากำลังดึง 43.4 และ 39.3 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่ากำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตทั้งหมดที่มีค่าอยู่ในช่วง 10.4 ถึง 20.6 กก./ตร.ซม. และมีค่าสูงกว่ากำลังดึงของคอนกรีตบางส่วนที่มีค่าอยู่ในช่วง 11.0 ถึง 33.4 กก./ตร.ซม. (เฉพาะกำลังดึงของคอนกรีตออกแบบ 90 ถึง 180 กก./ตร.ซม.) ซึ่งถือว่าคุณสมบัติด้านกำลังดึงของมอร์ตาร์ทั้งสองชนิดมีความเข้ากันได้กับวัสดุพื้นผิวคอนกรีต ดังภาพประกอบ 50



ภาพประกอบ 50 ค่ากำลังดึงของวัสดุพื้นผิวคอนกรีต และวัสดุคอนกรีตซ่อมแซม

เมื่อนำข้อมูลจากการทดสอบวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมาแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุอมอร์ตาร์ซ่อมแซม พบว่าค่าอัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของอมอร์ตาร์ปูนพื้นผิวคอนกรีตมีค่าอยู่ในช่วง 0.37 ถึง 1.30 และค่าอัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของอมอร์ตาร์ควบคุมเมื่อซ่อมบนพื้นผิวคอนกรีตมีค่าอยู่ในช่วง 0.43 ถึง 1.50 ดังแสดงในภาพประกอบ 51 ซึ่งจากสมมติฐานที่ว่างานซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีตจะมีแนวโน้มที่ดีมีคุณภาพได้นั้นวัสดุซ่อมแซมควรมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_r) ไม่น้อยกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพื้นผิวคอนกรีต (E_b) หรือหากเทียบเป็นอัตราส่วนโดยใช้หลักการเดียวกันกับการคิดอัตราส่วนของหน่วยแรง (Stress Ratio) สำหรับการออกแบบโครงสร้างทั่วไป โดยเทียบเป็นอัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่น $E_b / E_r \leq 1.0$ ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่น $E_b / E_r > 1.0$ ความหมายคือมีโอกาสที่งานซ่อมแซมจะเกิดความล้มเหลว อย่างไรก็ตามงานซ่อมแซมที่มีประสิทธิภาพในระยะยาวควรมี $E_r \geq 1.3 E_b$ หรือค่าอัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นอยู่ที่ 0.77 (Mangat P.S., 1999)⁽⁴¹⁾ ดังนั้นข้อมูลที่มีอัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นอยู่ในช่วง $0.37 < E_b / E_r < 0.95$ ซึ่งมีค่า $E_b / E_r < 1.0$ (ส่วนที่แรเงา) ถือว่ามีแนวโน้มที่งานซ่อมแซมจะมีคุณภาพ

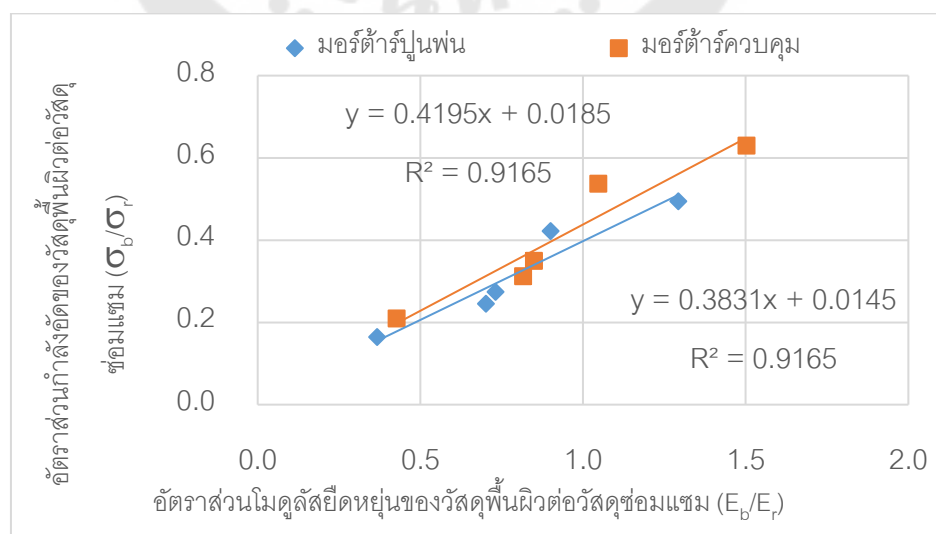


ภาพประกอบ 51 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพื้นผิวคอนกรีต และวัสดุอมอร์ตาร์ซ่อมแซม

เมื่อนำข้อมูลจากการทดสอบวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และข้อมูลจากการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุ mortar ตีร์และวัสดุพื้นผิวคอนกรีต มาหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพื้นผิวต่อวัสดุซ่อมแซม (E_b / E_r) เปรียบเทียบกันกับค่าอัตราส่วนกำลังอัดของวัสดุพื้นผิวต่อวัสดุซ่อมแซม (σ_b / σ_r) พบว่า เมื่อค่า E_b / E_r เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่า σ_b / σ_r มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยค่าความชันของกราฟสำหรับวัสดุ mortar ตีร์ปูนพ่นมีค่าต่ำกว่าวัสดุ mortar ตีร์ควบคุม ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวทำให้สามารถหาสมการที่มีค่าความน่าเชื่อถือของสมการเท่ากับ 0.92 สำหรับ mortar ตีร์ปูนพ่น และ mortar ตีร์ควบคุมได้สมการ 16 และสมการ 17 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 52 หากลองจำกัดให้วัสดุพื้นผิวและวัสดุซ่อมแซมมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากันโดยการแทนค่า E_b / E_r เท่ากับ 1 ในสมการดังกล่าว พบว่าวัสดุ mortar ตีร์ปูนพ่นมีค่า $\sigma_r \geq 2.52 \sigma_b$ และวัสดุ mortar ตีร์ควบคุมมีค่า $\sigma_r \geq 2.28 \sigma_b$ ดังนั้นหากต้องการให้งานซ่อมแซมมีคุณภาพ และเกิดความเข้ากันได้ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างวัสดุซ่อมแซมกับวัสดุพื้นผิว ต้องกำหนดให้ค่ากำลังอัดของวัสดุ mortar ตีร์ซ่อมแซมมีค่ามากกว่ากำลังอัดของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตอย่างน้อย 2.52 เท่าสำหรับ mortar ตีร์ปูนพ่น และอย่างน้อย 2.28 เท่าสำหรับ mortar ตีร์ควบคุม เพื่อให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุซ่อมแซมมีมากกว่าหรือเท่ากับวัสดุพื้นผิวคอนกรีต ($E_r \geq E_b$)

$$\text{สำหรับ mortar ตีร์ปูนพ่น} \quad \sigma_b / \sigma_r = 0.3831 (E_b / E_r) + 0.0145 \quad (16)$$

$$\text{สำหรับ mortar ตีร์ควบคุม} \quad \sigma_b / \sigma_r = 0.4195 (E_b / E_r) + 0.0185 \quad (17)$$



ภาพประกอบ 52 อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่น (E_b / E_r) เปรียบเทียบอัตราส่วนกำลังอัด (σ_b / σ_r)

การเปรียบเทียบผลทดสอบและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

ในภาพรวมจากการทดสอบสามารถสรุปเป็นตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ และมาตรฐานที่เกี่ยวข้องดังตาราง 14 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าในวัสดุอมอร์ตาร์ปูนพ่นมีคุณสมบัติโดยรวมที่ดีกว่าวัสดุอมอร์ตาร์ควบคุม และวัสดุอมอร์ตาร์ทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติของวัสดุผ่านตามเกณฑ์ที่มาตรฐานปฏิบัติในการซ่อมแซมคอนกรีต (มยผ. 1901-51) และมาตรฐานสมาคมทดสอบวัสดุแห่งอเมริกา (ASTM) กำหนดสามารถใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีตได้

ตาราง 14 เปรียบเทียบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ และมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

คุณสมบัติ (หน่วย)	วัสดุอมอร์ตาร์ ปูนพ่น	วัสดุอมอร์ตาร์ ควบคุม	มาตรฐาน มยผ. 1901- 51 กำหนด	มาตรฐาน ASTM กำหนด	ข้อมูลอ้างอิง จากแหล่ง อื่นๆ
การไหลแผ่ (ร้อยละ)	90.48 ± 12.87	99.43 ± 4.82	110 ± 5	110 ± 5 ASTM C109	50 ถึง 100 เกณฑ์ปาน กลาง Scribd ⁽²⁹⁾
กำลังรับ แรงอัด (กก./ตร. ซม.)	ที่อายุ 3 วัน มีค่า 467.7	ที่อายุ 3 วัน มีค่า 456.0	ที่อายุ 3 วัน ≥ 200	ที่อายุ 3 วัน ≥ 200	ที่อายุ 3 วัน ≥ 172
	ที่อายุ 28 วัน มีค่า 669.5	ที่อายุ 28 วัน มีค่า 526.1	ที่อายุ 28 วัน ≥ 350	ที่อายุ 28 วัน ≥ 350 ASTM C387	ที่อายุ 28 วัน ≥ 345 Emmons ⁽¹⁾
กำลังรับแรง ดึง (กก./ตร. ซม.)	ที่อายุ 28 วัน มีค่า 43.4	ที่อายุ 28 วัน มีค่า 39.3	ไม่มี ข้อกำหนด	ไม่มี ข้อกำหนด	มีค่าประมาณ ร้อยละ 10 ของกำลังอัด คอนกรีต ซีซวาลย์ ⁽²²⁾
	คิดเป็นร้อยละ ละ 6.5 กำลัง อัด	คิดเป็นร้อยละ ละ 7.5 กำลัง อัด			

ตาราง 14 เปรียบเทียบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ และมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

คุณสมบัติ (หน่วย)	วัสดุ mortars ปูนพื้น	วัสดุ mortars ควบคุม	มาตรฐาน มยผ. 1901- 51 กำหนด	มาตรฐาน ASTM กำหนด	ข้อมูลอ้างอิง จากแหล่ง อื่นๆ
กำลังรับแรง ดัด (กก./ตร. ซม.)	ที่อายุ 3 วัน มีค่า 123.0 ที่อายุ 28 วัน มีค่า 137.9	ที่อายุ 3 วันมี ค่า 137.9 ที่อายุ 28 วัน มีค่า 145.8	ไม่มี ข้อกำหนด	ที่อายุ 3 วัน ≥ 48 ที่อายุ 28 วัน ≥ 55 ASTM C887	มีค่าประมาณ ร้อยละ 10 ถึง 15 ของกำลัง อัดคอนกรีต ACI318- 19 ⁽²⁴⁾
การยืดหด ตัว (ร้อยละ)	ที่อายุ 7 วัน มีค่า 0.016 ที่อายุ 28 วัน มีค่า 0.032	ที่อายุ 7 วัน มีค่า 0.009 ที่อายุ 28 วัน มีค่า 0.023 บูรฉัตร ⁽²⁷⁾	ที่อายุ 7 วัน ≤ 0.100 ที่อายุ 28 วัน ≤ 0.115	ที่อายุ 7 วัน ≤ 0.100 ที่อายุ 28 วัน ≤ 0.115 ASTM C845	อยู่ในช่วง 0.050 ถึง 0.100 Emmons ⁽¹⁾
ความ ทนทานต่อ การซึมผ่าน น้ำ (ม./วินาที)	สัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน น้ำใน mortars ที่อายุ 28 วัน มีค่า 5.462 $\times 10^{-13}$ และที่อายุ 180 วันมีค่า 7.23×10^{-14}	สัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน น้ำใน mortars ที่อายุ 28 วัน มีค่า 1.090 $\times 10^{-12}$ และที่อายุ 180 วันมีค่า 3.385×10^{-13}	ไม่มี ข้อกำหนด	ไม่มี ข้อกำหนด	สัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน น้ำใน คอนกรีตปกติ มีค่าอยู่ ในช่วง 10^{-11} ถึง 10^{-13} และคอนกรีต ที่บ่มมีค่า $< 10^{-14}$ K.Yang ⁽³⁰⁾

ตาราง 14 เปรียบเทียบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ และมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

คุณสมบัติ (หน่วย)	วัสดุ-mortar ปูนพื้น	วัสดุ-mortar ควบคุม	มาตรฐาน มยผ. 1901- 51 กำหนด	มาตรฐาน ASTM กำหนด	ข้อมูลอ้างอิง จากแหล่ง อื่นๆ
แรงยึด เหนียว	ที่อายุ 28 วัน มีค่าเฉลี่ยร้อยละ	ที่อายุ 28 วัน มีค่าเฉลี่ยร้อยละ	แรงยึดเหนียว \geq ร้อยละ 10	ไม่มี ข้อกำหนด	มีค่าประมาณ ร้อยละ 10
ระหว่างวัสดุ (ร้อยละ)	ละ 13.63 ของกำลังอัด ประลัยของ คอนกรีตเดิม	ละ 11.46 ของกำลังอัด ประลัยของ คอนกรีตเดิม	กำลังอัด ประลัยของ คอนกรีตเดิม		ของกำลังอัด คอนกรีต ซีซาลาย ⁽²²⁾
ค่าโมดูลัส ยืดหยุ่นของ วัสดุ-mortar ต้ำร์ (กก./ตร. ซม.)	ที่อายุ 28 วัน มีค่าโมดูลัส 248,818	ที่อายุ 28 วัน มีค่าโมดูลัส 215,589	ไม่มี ข้อกำหนด	ไม่มี ข้อกำหนด	ค่าโมดูลัส ของซีเมนต์ มอร์ตาร์ เท่ากับ 230,000 และค่า โมดูลัสของ ปูนพื้น เท่ากับ 260,000 Emmons ⁽¹⁾

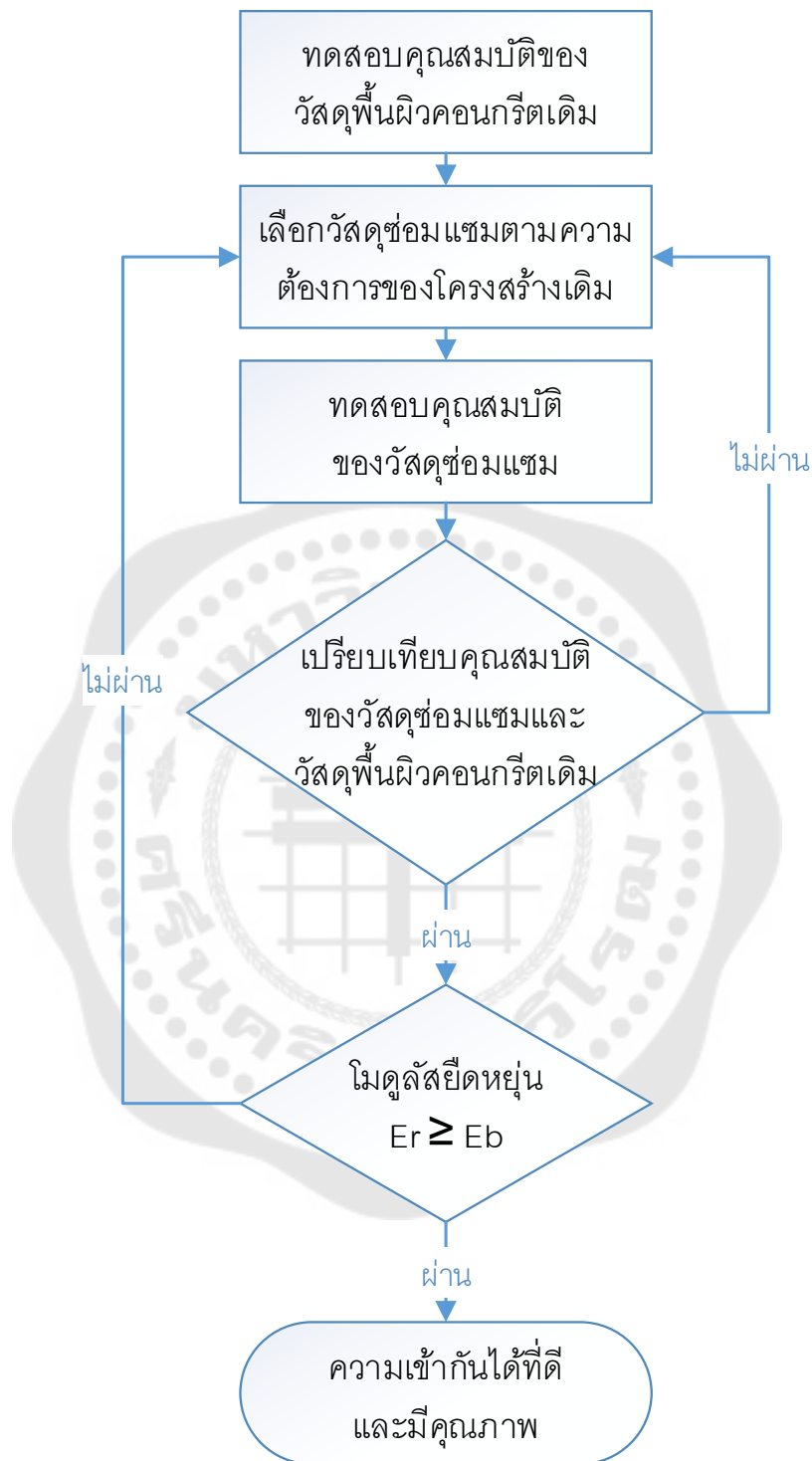
บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

มอร์ตาร์ปูนพ่นเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติดีกว่าวัสดุอมอร์ตาร์ควบคุมในด้านกำลังอัด ด้านกำลังดึง ด้านความทนทานต่อการซึมผ่านน้ำ และโมดูลัสยืดหยุ่น ถึงแม้ว่าในช่วงอายุต้นวัสดุอมอร์ตาร์ปูนพ่นจะมีคุณสมบัติด้านกำลังอัด และด้านการยึดหดตัวที่ต่ำกว่าวัสดุอมอร์ตาร์ควบคุมก็ตาม แต่โดยภาพรวมแล้ววัสดุอมอร์ตาร์ทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติที่ผ่านตามเกณฑ์ที่มาตราฐาน มยผ. 1901-51 กำหนด โดยมีค่ากำลังสูง มีความทึบน้ำอยู่ในเกณฑ์ปกติ มีค่าการหดตัวต่ำ ซึ่งเหมาะสมสำหรับงานซ่อมแซมคอนกรีต และจากการศึกษาความเข้ากันได้ของงานซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีตพบว่าวัสดุอมอร์ตาร์ซ่อมแซมทั้งสองชนิดมีความเข้ากันได้ดีกับวัสดุพื้นผิวคอนกรีตเดิมที่มีคุณสมบัติด้านกำลังอัด ด้านกำลังดึง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ต่ำกว่า จากผลการศึกษาพบว่าควรกำหนดค่ากำลังอัดของวัสดุอมอร์ตาร์ซ่อมแซมให้มีค่ามากกว่ากำลังอัดของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตอย่างน้อย 2.52 เท่าสำหรับมอร์ตาร์ปูนพ่น และอย่างน้อย 2.28 เท่าสำหรับมอร์ตาร์ควบคุม เพื่อที่จะให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุซ่อมแซม (E_r) มีค่าไม่น้อยกว่าวัสดุพื้นผิวคอนกรีต (E_b)

จากการศึกษาวิจัยนี้ค้นพบวิธีการพิจารณาความเข้ากันได้ของงานซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีต โดยการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตเดิมที่มีอยู่ เพื่อศึกษาคุณสมบัติเดิมหรือคุณสมบัติที่โครงสร้างต้องการ จากนั้นเลือกวัสดุซ่อมแซมที่มีคุณสมบัติที่ตอบสนองความต้องการของโครงสร้าง แล้วทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุซ่อมแซมดังกล่าวพร้อมการเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของวัสดุเดิม โดยใช้เกณฑ์ที่ว่าคุณสมบัติของวัสดุซ่อมแซมต้องมีคุณสมบัติดีกว่าหรือไม่น้อยกว่าวัสดุพื้นผิวคอนกรีตเดิม ทั้งนี้ให้ยึดคุณสมบัติด้านค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเป็นเกณฑ์สำคัญในการพิจารณาความเข้ากันได้ ดังภาพประกอบ 53



ภาพประกอบ 53 วิธีพิจารณาความเข้ากันได้ที่ค้นพบจากการวิจัย

อภิปรายผลการวิจัย

คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุเมอร์ตาร์ทาร์ปูนพ่น และวัสดุเมอร์ตาร์ทาร์ควบคุม เพื่อใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีต สามารถอภิปรายได้ดังนี้

1. คุณสมบัติด้านการไหลแผ่ของเมอร์ตาร์ทาร์ปูนพ่นมีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 77.6 ถึง 103.4 และเมอร์ตาร์ทาร์ควบคุมมีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 94.6 ถึง 104.3 โดยค่าการไหลแผ่ของเมอร์ตาร์ทาร์ทั้งสองมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ร้อยละ 105.0 ถึง 115.0 ตามมาตรฐาน มยผ.1901-51 เนื่องจากในการวิจัยนี้ได้มีการควบคุมน้ำในส่วนผสมโดยเมอร์ตาร์ทาร์ปูนพ่นใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานตามคู่มือที่ผู้ผลิตแนะนำ และสำหรับเมอร์ตาร์ทาร์ควบคุมใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานตามสัดส่วนที่มาตราฐาน มยผ.1901-51 กำหนด ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันที่ 0.49 เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างด้านคุณสมบัติของวัสดุเมอร์ตาร์ทาร์ จึงไม่สามารถเติม น้ำในส่วนจนกว่าจะได้ค่าร้อยละการไหลแผ่ 105.0 ถึง 115.0 ตามที่มาตราฐาน มยผ.1901-51 กำหนดได้ อย่างไรก็ตามค่าการไหลแผ่ของวัสดุเมอร์ตาร์ทาร์ทั้งสองชนิดยังมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 50 ถึง 100 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง คือมีความชื้นเหลวพอดี ทำเป็นรูปร่างได้ง่าย⁽²⁹⁾ สามารถใช้ในงานพ่นหรืองานซ่อมแซมได้

2. คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ของเมอร์ตาร์ทาร์ปูนพ่นมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 669.5 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีค่ากำลังสูงกว่าเมอร์ตาร์ทาร์ควบคุมที่มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 526.1 กก./ตร.ซม. เมอร์ตาร์ทาร์ปูนพ่นมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าเมอร์ตาร์ทาร์ควบคุมร้อยละ 27.3 เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มยผ.1901-51 และ ASTM C387 เมอร์ตาร์ทาร์ทั้งสองมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า 350 กก./ตร.ซม. ที่มาตรฐานกำหนด

3. คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงดึงที่อายุ 28 วัน ของเมอร์ตาร์ทาร์ปูนพ่นมีค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ 43.4 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีค่ากำลังสูงกว่าเมอร์ตาร์ทาร์ควบคุมที่มีกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 39.3 กก./ตร.ซม. เมอร์ตาร์ทาร์ปูนพ่นมีค่ากำลังรับแรงดึงสูงกว่าเมอร์ตาร์ทาร์ควบคุมร้อยละ 10.5 โดยค่ากำลังดึงเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดแล้วสำหรับเมอร์ตาร์ทาร์ปูนพ่นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 7.0 และสำหรับเมอร์ตาร์ทาร์ควบคุมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 7.4 ซึ่งเมอร์ตาร์ทาร์ปูนพ่นและเมอร์ตาร์ทาร์ควบคุมมีค่ากำลังดึงเฉลี่ยเทียบเท่าค่ากำลังอัดน้อยกว่าค่าประมาณร้อยละ 10 ของกำลังอัด⁽²²⁾ อยู่ร้อยละ 29.7 และ 25.7 ตามลำดับ

4. คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วัน ของเมอร์ตาร์ทาร์ปูนพ่นมีค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 137.9 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีค่ากำลังต่ำกว่าเมอร์ตาร์ทาร์ควบคุมที่มีกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 145.8 กก./ตร.ซม. เมอร์ตาร์ทาร์ปูนพ่นมีค่ากำลังรับแรงดัดต่ำกว่าเมอร์ตาร์ทาร์ควบคุมร้อยละ 5.5 อย่างไรก็ตาม

มอร์ตาร์ทปูนพ่นมีกำลังรับแรงดัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ทควบคุมในช่วงอายุ 1 ถึง 56 วัน และในระยะยาวมอร์ตาร์ทปูนพ่นจะมีค่ากำลังรับแรงดัดสูงกว่ามอร์ตาร์ทควบคุม เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C887 มอร์ตาร์ททั้งสองมีค่ากำลังรับแรงดัดสูงกว่า 55 กก./ตร.ซม. ที่มาตรฐานกำหนด และมอร์ตาร์ททั้งสองชนิดยังมีค่ากำลังดัดมากกว่าร้อยละ 15 ของกำลังอัดอีกด้วย

5. คุณสมบัติด้านการยึดหดตัวในสภาพการบ่มที่หดตัวสูงสุดคือ รูปแบบการบ่มในช่วงอายุต้นด้วยน้ำสะอาด และสภาพการบ่มที่หดตัวต่ำสุดคือ รูปแบบการบ่มน้ำตลอดเวลา อย่างไรก็ตามค่าการหดตัวของมอร์ตาร์ทปูนพ่นที่อายุ 7 และ 28 วัน ของมอร์ตาร์ทปูนพ่นในรูปแบบมีค่าร้อยละการหดตัวสูงสุดเท่ากับ 0.032 และ 0.057 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าร้อยละการยึดหดตัวไม่เกินกว่า 0.100 (อายุ 7 วัน) และ 0.115 (อายุ 28 วัน) เกณฑ์ที่มาตรฐาน มยผ.1901-51 และ ASTM C845 กำหนด อย่างไรก็ตามในสภาวะการบ่มตามมาตรฐาน ASTM C157 วัสดุอมอร์ตาร์ทปูนพ่นมีค่าการหดตัวสูงกว่าวัสดุอมอร์ตาร์ทควบคุม โดยที่อายุ 28 วันมอร์ตาร์ทปูนพ่นมีค่าร้อยละการหดตัวเท่ากับ 0.032 ซึ่งมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ทควบคุมที่มีค่าร้อยละการหดตัวเท่ากับ 0.023⁽²⁷⁾ ซึ่งมีค่าน้อยร้อยละ 0.115 เกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด และน้อยกว่าร้อยละ 0.050 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มีการหดตัวต่ำ (Low Shrinkage)⁽¹⁾ และสำหรับวัสดุอมอร์ตาร์ทปูนพ่นที่บ่มด้วยน้ำสะอาด มีค่าการยึดหดตัวสูงที่สุดอยู่ในช่วงร้อยละ 0.053 ถึง 0.066 ซึ่งอยู่ในช่วงร้อยละ 0.050 ถึง 0.100 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มีการหดตัวปานกลาง (Moderate Shrinkage)⁽¹⁾

6. คุณสมบัติด้านความทนทานต่อการซึมผ่านของน้ำในมอร์ตาร์ทที่อายุ 28 วัน สำหรับมอร์ตาร์ทปูนพ่นมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเท่ากับ 0.0546×10^{-11} ม./วินาที ซึ่งมีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ทควบคุมที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเท่ากับ 0.1090×10^{-11} ม./วินาที โดยมอร์ตาร์ทปูนพ่นมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่ามอร์ตาร์ทควบคุมร้อยละ 50.1 และเมื่ออายุเพิ่มมากขึ้นก็ยิ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยลงหรือมีความทึบน้ำมากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามมอร์ตาร์ททั้งสองชนิดมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำอยู่ในช่วง 10^{-11} ถึง 10^{-13} ม./วินาที ซึ่งหมายถึงอยู่ในเกณฑ์ปกติ (K.Yang, 2018)⁽³⁰⁾

7. คุณสมบัติด้านแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์ทเมื่อซ่อมแซมบนพื้นผิวคอนกรีตที่ชั้นความหนา 2.5 และ 5.0 ซม. ของมอร์ตาร์ททั้งสองชนิดสามารถใช้ในการซ่อมแซมได้เนื่องจากมีค่ากำลังรับแรงดึงที่สูงกว่าวัสดุพื้นผิวคอนกรีตเป็นผลให้เกิดความเสียหายขึ้นในบริเวณพื้นผิวคอนกรีต โดยกำลังยึดเหนี่ยวหรือกำลังรับแรงดึงของวัสดุพื้นผิวที่อายุมากกว่า 28 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 10.4 ถึง 20.6 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงดึงของวัสดุอมอร์ตาร์ทจากการทดสอบที่มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 26.3 ถึง 46.7 กก./ตร.ซม. ทั้งนี้ค่ากำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุอมอร์ตาร์ททั้งสอง

ชนิดจะต้องมีค่ามากกว่า 20.6 กก./ตร.ซม. เป็นค่าสูงสุดที่ทดสอบได้ หากคิดเฉลี่ยเป็นร้อยละ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเดิมมีค่าเท่ากับร้อยละ 13.6 ซึ่งค่าแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์จะมีค่ามากกว่าร้อยละ 10 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเดิม ตามที่มาตรฐาน มยผ. 1901-51 กำหนด

8. คุณสมบัติด้านโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน สำหรับมอร์ตาร์ปูนพ่นมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 250,522 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมที่มีค่าประมาณ 215,589 กก./ตร.ซม. โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนพ่นมีค่าสูงกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุมคิดเป็นร้อยละ 16.2 อย่างไรก็ตามมอร์ตาร์ปูนพ่นและมอร์ตาร์ควบคุมจากการวิจัยมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ใกล้เคียงกันกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุซ่อมแซมชนิดปูนพ่นและซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ Peter H. Emmons⁽¹⁾ แนะนำไว้เท่ากับ 260,000 และ 230,00 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ

ความเข้ากันได้ของงานซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีต พิจารณาดังนี้

1. พิจารณาจากคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของวัสดุมอร์ตาร์ปูนพ่นและมอร์ตาร์ควบคุมมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าวัสดุพื้นผิวคอนกรีต โดยที่อายุ 28 วันของมอร์ตาร์ปูนพ่นและมอร์ตาร์ควบคุมมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 669.5 และ 526.7 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าวัสดุพื้นผิวคอนกรีตที่ออกแบบไว้ทั้งหมด ตั้งแต่ 90 ถึง 320 กก./ตร.ซม.

2. พิจารณาจากคุณสมบัติด้านการรับแรงดึงของวัสดุมอร์ตาร์ปูนพ่นและมอร์ตาร์ควบคุมมีค่ากำลังรับแรงดึงสูงกว่าวัสดุพื้นผิวคอนกรีต โดยที่อายุ 28 วัน มอร์ตาร์ปูนพ่นและมอร์ตาร์ควบคุมมีค่ากำลังดึง 43.4 และ 39.3 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่ากำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตทั้งหมดที่มีค่าอยู่ในช่วง 10.4 ถึง 20.6 กก./ตร.ซม. และมีค่าสูงกว่ากำลังดึงของคอนกรีตบางส่วนที่มีค่าอยู่ในช่วง 11.0 ถึง 33.4 กก./ตร.ซม. (เฉพาะกำลังดึงของคอนกรีตออกแบบ 90 ถึง 180 กก./ตร.ซม.) ซึ่งถือว่าคุณสมบัติด้านกำลังดึงของมอร์ตาร์ทั้งสองชนิดมีความเข้ากันได้กับวัสดุพื้นผิวคอนกรีต

3. พิจารณาจากการเปรียบเทียบอัตราส่วนของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่าง E_b / E_r โดยค่าอัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์ปูนพ่นเมื่อซ่อมบนพื้นผิวคอนกรีตมีค่าอยู่ในช่วง 0.37 ถึง 1.30 หมายความว่ามอร์ตาร์ปูนพ่นจะซ่อมบนพื้นผิวคอนกรีตได้อย่างมีคุณภาพเมื่อมีอัตราส่วน E_b / E_r อยู่ในช่วง 0.37 ถึง 0.90 และค่าอัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์ควบคุมเมื่อซ่อมบนพื้นผิวคอนกรีตมีค่าอยู่ในช่วง 0.43 ถึง 1.50 หมายความว่ามอร์ตาร์ปูนพ่นจะซ่อมบนพื้นผิวคอนกรีตได้อย่างมีคุณภาพเมื่อมีอัตราส่วน E_b / E_r อยู่ในช่วง 0.43 ถึง 0.95 และสำหรับงานซ่อมแซมที่มีประสิทธิภาพในการรับหน่วยแรงระยะยาวควรมี $E_r \geq 1.3 E_b$ หรือค่าอัตราส่วนค่า

โมดูลัสยืดหยุ่นน้อยกว่า 0.77 (Mangat P.S.,1999)⁽⁴¹⁾ อย่างไรก็ตามสำหรับงานซ่อมแซมทั่วไป ควรมีค่า $E_r > E_b$ ซึ่งถือได้ว่ามีแนวโน้มที่งานซ่อมแซมจะมีคุณภาพ

4. จากผลวิเคราะห์อัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพื้นผิวต่อวัสดุซ่อมแซม (E_b / E_r) เปรียบเทียบกับกับค่าอัตราส่วนกำลังอัดของวัสดุพื้นผิวต่อวัสดุซ่อมแซม (σ_b / σ_r) สรุปได้ว่า วัสดุออร์ติธาร์ปุ่นพ่นควรมี $\sigma_r \geq 2.52 \sigma_b$ และวัสดุออร์ติธาร์ควบคุมควรมี $\sigma_r \geq 2.28 \sigma_b$ เพื่อให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุซ่อมแซมมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกับวัสดุพื้นผิวคอนกรีต ($E_r \geq E_b$) เกิดความเข้ากันได้ทางด้านคุณสมบัติ และส่งผลให้งานซ่อมแซมมีคุณภาพ

ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และกำลังรับแรงดึงของวัสดุออร์ติธาร์พบว่าค่ากำลังรับแรงดังกล่าวเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงจนเริ่มค่าคงที่ตั้งแต่อายุ 56 วัน ดังนั้นผลการทดสอบด้านการรับกำลังที่อายุ 56 วัน จึงถือเป็นข้อมูลที่เพียงพอแล้ว

สำหรับการทดสอบแรงยึดเหนี่ยว ในขั้นตอนการวางแผนการทดสอบได้กำหนดชั้นความหนาของงานซ่อมแซมไว้ทั้งหมด 3 ชั้นความหนาประกอบไปด้วยความหนาที่ 2.5 5.0 และ 7.0 ซม. แต่ในขณะที่ทำการเจาะตัวอย่างเพื่อเตรียมทดสอบแรงยึดเหนี่ยวปรากฏว่าตัวอย่างที่ซ่อมแซมด้วยชั้นความหนา 7.0 ซม. เกิดการขาดที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุซ่อมแซม และวัสดุพื้นผิวคอนกรีตทั้งหมดทุกการเจาะทำให้ไม่สามารถใช้ในทดสอบได้ อาจเนื่องจากการสั่นของเครื่องเจาะขณะดำเนินการและชั้นความหนาที่มากเกินไป และแนะนำเพิ่มเติมในส่วนขั้นตอนการเตรียมวัสดุพื้นผิวคอนกรีตต้องมั่นใจว่าได้สกัดผิวหน้าของพื้นผิวคอนกรีตออกทั้งหมดพร้อมทั้งทาน้ำยาประสานคอนกรีตอย่างทั่วถึงแล้ว

สำหรับข้อกำหนดในมาตรฐาน มยผ.1901-51 ในไทยที่ใช้ในการพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุสำหรับซ่อมแซมคอนกรีตที่มีอยู่ในปัจจุบัน ควรเพิ่มเติมข้อกำหนดในด้านคุณสมบัติให้ครอบคลุมคุณสมบัติของวัสดุในทุกด้าน อาทิเช่น กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงดัด สมบัติการซึมผ่านน้ำ สมบัติการหดขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น เป็นต้น เพื่อกำหนดกรอบคุณสมบัติของงานซ่อมแซมให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น เป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกวัสดุซ่อมแซมอย่างเหมาะสม และมีประสิทธิภาพ



ภาคผนวก

ข้อมูล ผลทดสอบ และการคำนวณ

ตาราง 15 ผลการทดสอบวัดค่าการไหลแฝงของมอร์ตาร์

ตัวอย่าง	ความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ)	การทดสอบ Table Flow (ซม.)				ค่าการไหลแฝง (ร้อยละ)	ค่าการไหลแฝงเฉลี่ย (ร้อยละ)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		R1	R2	R3	เฉลี่ย			
มอร์ตาร์ควบคุม	44	19.39	19.22	19.15	19.25	92.53		
	42	19.51	19.06	19.05	19.21	92.07		
	60	20.38	19.77	19.98	20.04	100.43		
	64	20.52	20.52	20.16	20.40	104.00	99.43	4.82
	59	20.38	20.29	20.42	20.36	103.63		
	53	20.48	20.04	20.69	20.40	104.03		
	51	19.84	20.22	19.73	19.93	99.30		
มอร์ตาร์ปูน	63	17.80	17.30	17.50	17.53	75.33		
	65	17.90	18.00	18.10	18.00	80.00		
	65	18.44	18.15	18.30	18.30	82.97		
	63	17.61	17.79	17.85	17.75	77.50	90.48	12.87
	66	19.32	19.30	19.45	19.36	93.57		
	68	19.71	19.21	19.80	19.57	95.73		
	82	20.77	20.52	20.80	20.70	106.97		
84	20.98	21.42	21.12	21.17	111.73			

หมายเหตุ : ตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนถูกหล่อขึ้นในช่วง 18 ก.ค. 2562 - 19 ส.ค. 2562 และตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม ถูกหล่อขึ้นในช่วง 24 ก.พ. 2563 - 2 มี.ค. 2563

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ} \quad \text{ร้อยละการไหลแฝง } [f_r] &= \frac{R_A - 100}{100} \times 100 \\
 &= \frac{211.7 - 100}{100} \times 100 \\
 &= 111.73
 \end{aligned}$$

ตาราง 16 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ารูปปูนพื้น

อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กก.)	ด้าน a (ซม.)	ด้าน b (ซม.)	ด้าน c (ซม.)	หน่วย น้ำหนัก (กก./ลบ. ม.)	พื้นที่รับ แรง [A] (ตร.ซม.)	แรงกด [P] (กก.นิว ตัน)	กำลัง [σ] (กก./ ตร.ซม.)	กำลัง เฉลี่ย (กก./ ตร.ซม.)
1	0.3070	5.07	5.11	5.12	2,316.67	25.88	103.93	409.31	361.68
	0.3011	5.02	5.10	5.03	2,338.13	25.60	89.49	356.30	
	0.2918	5.04	5.03	5.04	2,281.98	25.35	76.08	305.93	
	0.2988	5.06	5.08	5.03	2,310.99	25.70	94.61	375.18	
3	0.3054	5.07	5.20	5.01	2,312.17	26.36	139.03	537.57	467.71
	0.3047	5.24	5.19	5.14	2,179.77	27.20	131.20	491.76	
	0.3074	5.15	5.14	5.09	2,281.48	26.47	127.11	489.48	
	0.2863	5.01	5.01	5.06	2,254.22	25.10	86.68	352.04	
7	0.3091	5.14	5.22	5.08	2,267.78	26.83	149.34	567.38	507.60
	0.2878	5.08	5.01	5.01	2,257.10	25.45	95.33	381.82	
	0.3034	5.05	5.11	5.12	2,296.32	25.81	141.98	560.84	
	0.3054	5.06	5.21	5.20	2,227.81	26.36	134.57	520.36	
14	0.3110	5.21	5.17	5.06	2,281.82	26.94	135.64	513.30	616.96
	0.3042	5.03	5.21	5.16	2,249.59	26.21	149.07	579.85	
	0.3017	5.12	5.09	5.01	2,310.73	26.06	158.55	620.16	
	0.3082	5.10	5.24	5.12	2,252.48	26.72	170.19	649.18	
	0.3070	5.09	5.19	5.11	2,274.22	26.42	169.22	652.97	
	0.3018	5.13	5.08	5.06	2,288.69	26.06	175.45	686.29	
28	0.3067	5.18	5.06	5.10	2,294.37	26.21	161.41	627.76	669.50
	0.3077	5.12	5.15	5.03	2,319.97	26.37	184.63	713.76	
	0.3024	5.12	5.12	5.00	2,307.13	26.21	150.54	585.40	
	0.3101	5.11	5.10	5.10	2,333.14	26.06	192.02	751.09	

ตาราง 16 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนพื้น (ต่อ)

อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กก.)	ด้าน a (ซม.)	ด้าน b (ซม.)	ด้าน c (ซม.)	หน่วย น้ำหนัก (กก./ลบ. ม.)	พื้นที่รับ แรง [A] (ตร. ซม.)	แรงกด [P] (กก.นิว ตัน)	กำลัง อัด [σ_c] (กก./ ตร.ซม.)	กำลัง อัด เฉลี่ย (กก./ ตร.ซม.)
56	0.3098	5.05	5.25	5.13	2,277.64	26.51	199.39	766.61	711.67
	0.3043	5.11	5.18	5.05	2,276.09	26.47	180.92	696.74	
	0.2968	5.04	5.12	5.04	2,282.17	25.80	162.83	643.22	
	0.3073	5.10	5.09	5.19	2,281.20	25.96	188.48	740.11	
112	0.3093	5.22	5.08	5.06	2,305.13	26.52	183.13	703.96	736.57
	0.3047	5.10	5.05	5.12	2,310.69	25.76	190.71	754.82	
	0.3098	5.14	5.02	5.13	2,340.44	25.80	203.70	804.76	
	0.3091	5.10	5.10	5.06	2,348.60	26.01	181.12	709.84	
180	0.2979	5.11	5.05	5.03	2,295.04	25.81	179.61	709.49	801.04
	0.3079	5.12	5.16	5.18	2,249.03	26.42	222.23	857.46	
	0.3122	5.20	5.25	5.10	2,245.35	27.27	204.87	765.84	
	0.2947	5.03	5.11	5.04	2,272.62	25.71	183.39	727.14	
	0.3130	5.18	5.22	5.11	2,264.45	27.07	209.48	788.79	

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ} \quad \text{กำลังอัด } [\sigma_c] &= \frac{P}{A} \\
 &= \frac{192.02 \times 1000}{9.81 \times 26.06} \\
 &= 751.09 \quad \text{กก./ตร.ซม.}
 \end{aligned}$$

ตาราง 17 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ควบคุม

อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กก.)	ด้าน a (ซม.)	ด้าน b (ซม.)	ด้าน c (ซม.)	หน่วย น้ำหนัก (กก./ลบ. ม.)	พื้นที่รับ แรง [A] (ตร. ซม.)	แรงกด [P] (กก.นิว ตัน)	กำลัง อัด [σ] (กก./ ตร.ซม.)	กำลัง เฉลี่ย (กก./ ตร.ซม.)
1	0.3003	5.13	5.12	5.07	2,255.07	26.27	70.00	271.67	285.76
	0.2876	5.00	5.06	5.04	2,255.47	25.30	68.56	276.23	
	0.2969	5.14	5.10	5.02	2,256.18	26.21	76.56	297.73	
	0.2988	5.11	5.06	5.09	2,270.34	25.86	75.44	297.42	
3	0.2987	5.08	5.15	5.19	2,198.59	26.18	118.65	462.05	456.04
	0.2868	5.03	5.03	5.04	2,250.02	25.29	116.65	470.16	
	0.2854	5.03	5.06	5.05	2,216.60	25.48	111.79	447.21	
	0.2975	5.10	5.12	5.11	2,231.34	26.08	113.78	444.71	
7	0.3082	5.20	5.09	5.04	2,310.37	26.47	138.25	532.45	488.68
	0.3000	5.14	5.11	4.98	2,293.55	26.27	93.86	364.26	
	0.3002	5.14	5.11	5.00	2,285.90	26.27	131.36	509.80	
	0.2996	5.12	5.07	5.00	2,308.31	25.96	139.60	548.21	
14	0.3010	5.14	5.10	5.11	2,246.67	26.21	133.15	517.77	518.50
	0.2988	5.08	5.13	5.10	2,247.87	26.06	129.53	506.68	
	0.3025	5.09	5.16	5.10	2,257.96	26.26	127.84	496.17	
	0.3035	5.13	5.12	5.14	2,248.14	26.27	156.32	606.70	
	0.3009	5.09	5.13	5.11	2,255.03	26.11	127.20	496.57	
	0.3063	5.21	5.14	5.09	2,246.98	26.78	127.97	487.13	
28	0.2987	5.05	5.09	5.06	2,296.55	25.70	129.50	513.58	526.07
	0.3016	5.10	5.08	5.14	2,264.82	25.91	134.06	527.48	
	0.3003	5.14	5.12	5.19	2,199.07	26.31	141.97	550.01	
	0.3035	5.20	5.10	5.05	2,264.91	26.52	133.52	513.23	

ตาราง 17 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ควมคุม (ต่อ)

อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กก.)	ด้าน a (ซม.)	ด้าน b (ซม.)	ด้าน c (ซม.)	หน่วย น้ำหนัก (กก./ลบ. ม.)	พื้นที่รับ แรง [A] (ตร. ซม.)	แรงกด [P] (กก.นิว ตัน)	กำลัง อัด [σ] (กก./ ตร.ซม.)	กำลัง อัด เฉลี่ย (กก./ ตร.ซม.)
56	0.3098	5.05	5.25	5.13	2,277.64	26.51	199.39	766.61	711.67
	0.3043	5.11	5.18	5.05	2,276.09	26.47	180.92	696.74	
	0.2968	5.04	5.12	5.04	2,282.17	25.80	162.83	643.22	
	0.3073	5.10	5.09	5.19	2,281.20	25.96	188.48	740.11	
112	0.3093	5.22	5.08	5.06	2,305.13	26.52	183.13	703.96	736.57
	0.3047	5.10	5.05	5.12	2,310.69	25.76	190.71	754.82	
	0.3098	5.14	5.02	5.13	2,340.44	25.80	203.70	804.76	
	0.3091	5.10	5.10	5.06	2,348.60	26.01	181.12	709.84	
180	0.2979	5.11	5.05	5.03	2,295.04	25.81	179.61	709.49	801.04
	0.3079	5.12	5.16	5.18	2,249.03	26.42	222.23	857.46	
	0.3122	5.20	5.25	5.10	2,245.35	27.27	204.87	765.84	
	0.2947	5.03	5.11	5.04	2,272.62	25.71	183.39	727.14	
	0.3130	5.18	5.22	5.11	2,264.45	27.07	209.48	788.79	

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ} \quad \text{กำลังอัด } [\sigma_c] &= \frac{P}{A} \\
 &= \frac{209.48 \times 1000}{9.81 \times 27.07} \\
 &= 788.79 \quad \text{กก./ตร.ซม.}
 \end{aligned}$$

ตาราง 18 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ปูนพื้น

อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กก.)	คอคอดที่ จุดขาด (ซม.)	ความหนา ที่จุดขาด (ซม.)	พื้นที่รับ แรง [A] (ตร.ซม.)	แรงดึง [T] (กก./นิ้ว ตัน)	กำลังดึง [σ] (กก./ตร. ซม.)	กำลังดึง เฉลี่ย (กก./ตร. ซม.)
1	0.1514	2.52	2.62	6.60	2.14	33.04	35.06
	0.1455	2.48	2.54	6.30	2.56	41.43	
	0.1473	2.48	2.57	6.37	1.60	25.59	
	0.1480	2.46	2.62	6.45	2.54	40.17	
3	0.1521	2.51	2.64	6.63	2.44	37.54	36.90
	0.1456	2.44	2.52	6.15	2.68	44.43	
	0.1662	2.44	2.68	6.54	2.08	32.42	
	0.1687	2.53	2.67	6.76	2.20	33.20	
7	0.1476	2.40	2.56	6.14	2.20	36.50	37.54
	0.1543	2.51	2.63	6.60	2.64	40.77	
	0.1645	2.46	2.66	6.54	2.70	42.06	
	0.1499	3.08	2.62	8.07	2.44	30.82	
14	0.1642	2.80	2.61	7.31	2.20	30.69	39.60
	0.1525	2.52	2.58	6.50	2.64	41.39	
	0.1506	2.46	2.56	6.30	2.04	33.02	
	0.1498	2.41	2.59	6.24	2.86	46.71	
	0.1705	2.48	2.77	6.87	2.56	37.99	
	0.1643	2.42	2.66	6.44	3.02	47.82	
28	0.1474	2.45	2.60	6.37	3.50	56.01	43.43
	0.1506	2.46	2.55	6.27	2.30	37.38	
	0.1486	2.42	2.42	5.86	2.12	36.90	
	0.1486	2.43	2.43	5.90	3.42	59.04	

ตาราง 18 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ปูนพื้น (ต่อ)

อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กก.)	คอคอดที่ จุดขาด (ซม.)	ความหนา ที่จุดขาด (ซม.)	พื้นที่รับ แรง [A] (ตร.ซม.)	แรงดึง [T] (กก./นิ้ว ตัน)	กำลังดึง [σ] (กก./ตร. ซม.)	กำลังดึง เฉลี่ย (กก./ตร. ซม.)
56	0.1499	2.46	2.59	6.37	3.12	49.92	46.77
	0.1544	2.57	2.62	6.73	2.84	42.99	
	0.1492	2.42	2.56	6.20	3.12	51.34	
	0.1693	2.47	2.66	6.57	2.76	42.82	
112	0.1498	2.46	2.55	6.27	2.66	43.23	44.04
	0.1474	2.52	2.60	6.55	2.58	40.14	
	0.1455	2.44	2.55	6.22	3.12	51.12	
	0.1506	2.51	2.67	6.70	2.74	41.68	
180	0.1501	2.45	2.63	6.45	3.14	49.59	46.72
	0.1481	2.48	2.58	6.40	3.88	61.79	
	0.1535	2.67	2.68	7.15	2.92	41.61	
	0.1521	2.49	2.59	6.45	2.72	42.99	
	0.1514	2.57	2.66	6.83	2.52	37.59	

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ} \quad \text{กำลังดึง } [\sigma] &= \frac{T}{A} \\
 &= \frac{2.72 \times 1000}{9.81 \times 6.45} \\
 &= 42.99 \quad \text{กก./ตร.ซม.}
 \end{aligned}$$

ตาราง 19 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ควบคุม

อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กก.)	คอคอดที่ จุดขาด (ซม.)	ความหนา ที่จุดขาด (ซม.)	พื้นที่รับ แรง [A] (ตร.ซม.)	แรงดึง [T] (กก./นิ้ว ตัน)	กำลังดึง [σ] (กก./ตร. ซม.)	กำลังดึง เฉลี่ย (กก./ตร. ซม.)
1	0.1496	2.51	2.71	6.80	1.54	23.09	26.29
	0.1444	2.42	2.59	6.26	1.94	31.62	
	0.1442	2.50	2.57	6.44	1.90	30.07	
	0.1491	2.51	2.71	6.80	1.36	20.40	
3	0.1499	2.56	2.55	6.55	2.44	37.97	35.76
	0.1526	2.52	2.49	6.27	2.48	40.29	
	0.1525	2.58	2.67	6.89	2.04	30.19	
	0.1489	2.46	2.54	6.25	2.12	34.59	
7	0.1541	2.40	2.55	6.12	2.38	39.64	36.35
	0.1522	2.41	2.64	6.36	2.04	32.68	
	0.1556	2.62	2.68	7.02	2.58	37.46	
	0.1486	2.46	2.63	6.47	2.26	35.61	
14	0.1483	2.49	2.69	6.70	2.70	41.09	37.63
	0.1461	2.46	2.65	6.52	2.26	35.34	
	0.1455	2.55	2.62	6.68	2.20	33.57	
	0.1498	2.51	2.75	6.90	2.80	41.35	
	0.1452	2.47	2.58	6.37	2.30	36.79	
28	0.1544	2.52	2.63	6.63	2.24	34.43	39.32
	0.1474	2.49	2.63	6.56	2.20	34.19	
	0.1435	2.42	2.62	6.32	2.74	44.18	
	0.1471	2.47	2.44	6.00	2.62	44.48	

ตาราง 19 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ต้ารควบคุม (ต่อ)

อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กก.)	คอคอดที่ จุดขาด (ซม.)	ความหนา ที่จุดขาด (ซม.)	พื้นที่รับ แรง [A] (ตร.ซม.)	แรงดึง [T] (กก.นิว ตัน)	กำลังดึง [σ] (กก./ตร. ซม.)	กำลังดึง เฉลี่ย (กก./ตร. ซม.)
56	0.1487	2.42	2.55	6.18	2.36	38.95	39.18
	0.1525	2.45	2.68	6.57	2.84	44.08	
	0.1521	2.49	2.56	6.38	2.44	39.00	
	0.1583	2.58	2.71	6.99	2.38	34.70	
112	0.1498	2.50	2.59	6.46	2.60	41.01	41.87
	0.1542	2.42	2.64	6.40	2.96	47.14	
	0.1536	2.43	2.65	6.42	2.62	41.57	
	0.1499	2.47	2.54	6.26	2.32	37.77	
180	0.1642	2.59	2.54	6.58	3.02	46.80	42.41
	0.1499	2.49	2.58	6.42	2.40	38.08	
	0.1486	2.55	2.56	6.53	2.64	41.22	
	0.1442	2.44	2.59	6.32	2.70	43.55	

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ} \quad \text{กำลังดึง } [\sigma] &= \frac{T}{A} \\
 &= \frac{2.70 \times 1000}{9.81 \times 6.32} \\
 &= 43.55 \quad \text{กก./ตร.ซม.}
 \end{aligned}$$

ตาราง 20 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ปูนพื้น

อายุ (วัน)	น้ำหนักร (กก.)	ด้าน a [B] (ซม.)	ด้าน b [H] (ซม.)	ยาว c [L] (ซม.)	หน่วย น้ำหนัก (กก./ลบ. ม.)	พื้นที่รับ แรง [A] (ตร.ซม.)	แรงกด [F] (กก. นิวตัน)	กำลังดัด [σ_b] (กก./ตร. ซม.)	กำลังดัด เฉลี่ย (กก./ตร. ซม.)
1	0.6119	4.18	4.02	16.00	2,275.93	16.80	3.71	83.87	118.02
	0.5802	4.02	3.99	16.08	2,249.53	16.04	4.15	99.05	
	0.5991	4.12	4.02	15.98	2,263.60	16.56	5.67	130.19	
	0.5983	4.12	4.01	16.04	2,257.74	16.52	5.41	124.82	
3	0.6038	4.19	4.02	16.08	2,229.29	16.84	4.20	94.75	123.03
	0.5985	4.00	3.99	16.02	2,340.82	15.96	5.35	128.42	
	0.5989	4.08	4.01	16.00	2,287.86	16.36	5.05	117.64	
7	0.5926	4.09	4.00	16.01	2,262.49	16.36	4.45	103.90	132.07
	0.5968	4.15	4.01	16.01	2,239.98	16.64	5.84	133.79	
	0.6011	4.07	4.02	16.02	2,293.32	16.36	5.82	135.28	
	0.6083	4.15	4.01	16.04	2,278.88	16.64	5.55	127.14	
14	0.6029	4.10	4.01	16.04	2,286.19	16.44	5.23	121.25	136.75
	0.6074	4.09	4.03	16.19	2,276.14	16.48	6.58	151.48	
	0.6054	4.06	4.03	16.02	2,309.66	16.36	5.53	128.20	
	0.6014	4.07	4.01	16.05	2,295.88	16.32	6.09	142.28	
	0.6016	4.06	4.06	16.01	2,279.63	16.48	5.71	130.44	
	0.6390	4.12	4.28	16.01	2,263.44	17.63	6.75	136.77	
28	0.6019	4.08	4.04	16.02	2,279.40	16.48	5.99	137.53	137.86
	0.5947	4.04	4.04	16.01	2,275.85	16.32	5.53	128.20	
	0.5935	4.03	4.00	16.07	2,291.08	16.12	5.58	132.29	
	0.6033	4.03	4.12	16.04	2,265.31	16.60	6.34	141.72	
	0.6020	4.06	4.03	16.08	2,288.12	16.36	6.02	139.59	

ตาราง 20 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ปูนพื้น (ต่อ)

อายุ (วัน)	น้ำหนักร (กก.)	ด้าน a [B] (ซม.)	ด้าน b [H] (ซม.)	ยาว c [L] (ซม.)	หน่วย น้ำหนัก (กก./ลบ. ม.)	พื้นที่รับ แรง [A] (ตร.ซม.)	แรงกด [F] (กก./นิ้ว ตัน)	กำลังดัด [σ_b] (กก./ตร. ซม.)	กำลังดัด เฉลี่ย (กก./ตร. ซม.)
56	0.6004	4.04	4.00	16.01	2,320.64	16.16	5.87	138.84	141.23
	0.5997	4.06	4.01	16.09	2,289.33	16.28	6.27	146.85	
	0.6056	4.08	4.07	16.05	2,272.25	16.61	6.20	140.27	
	0.5913	3.97	4.03	16.03	2,305.57	16.00	5.86	138.95	
112	0.5966	4.01	4.02	16.05	2,305.89	16.12	6.44	151.96	148.17
	0.5930	4.02	4.01	16.04	2,293.40	16.12	5.96	140.96	
	0.5960	4.02	4.04	16.01	2,292.17	16.24	6.40	149.15	
	0.6031	4.06	4.04	16.06	2,289.48	16.40	6.54	150.92	
	0.5956	4.04	4.06	16.00	2,269.48	16.40	6.44	147.87	
	0.6090	4.06	4.06	16.08	2,297.63	16.48	5.97	136.39	
180	0.5934	4.00	4.01	16.02	2,309.46	16.04	6.92	164.53	159.61
	0.6001	3.99	4.08	16.05	2,296.84	16.28	6.77	155.88	
	0.5958	3.97	4.03	16.02	2,324.73	16.00	6.68	158.43	
	0.5983	4.01	4.02	16.00	2,319.68	16.12	7.06	166.62	

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } \text{ระยะระหว่างจุดรองรับ } [L_0] &= 10 \text{ ซม.} \\
 \text{จากสมการ } \text{กำลังดัด } [\sigma] &= \frac{3FL_0}{2BH^2} \\
 &= \frac{3 \times 6.68 \times 10 \times 1000}{2 \times 3.97 \times 4.03 \times 4.03 \times 9.81} \\
 &= 158.43 \text{ กก./ตร.ซม.}
 \end{aligned}$$

ตาราง 21 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ควบคุม

อายุ (วัน)	น้ำหนักร (กก.)	ด้าน a [B] (ซม.)	ด้าน b [H] (ซม.)	ยาว c [L] (ซม.)	หน่วย น้ำหนักร (กก./ลบ. ม.)	พื้นที่รับ แรง [A] (ตร.ซม.)	แรงกด [F] (กก.นิว ตัน)	กำลังดัด [σ_b] (กก./ตร. ซม.)	กำลังดัด เฉลี่ย (กก./ตร. ซม.)
1	0.5883	4.13	4.04	16.03	2,200.62	16.68	5.26	119.33	116.24
	0.5948	4.12	4.08	16.02	2,211.47	16.79	4.88	108.95	
	0.5931	4.02	4.08	16.02	2,260.02	16.38	5.24	119.95	
	0.6008	4.16	4.06	16.05	2,216.83	16.89	5.24	116.74	
3	0.6031	4.14	4.02	16.03	2,260.63	16.64	5.89	134.60	137.88
	0.5845	3.99	4.01	16.04	2,277.52	16.00	5.73	136.53	
	0.5930	4.13	4.00	16.00	2,243.49	16.52	6.01	139.06	
	0.6420	4.03	4.01	16.08	2,470.58	16.16	5.99	141.32	
7	0.5948	4.09	3.94	16.03	2,302.60	16.11	6.67	160.65	142.54
	0.5996	4.09	4.01	16.06	2,276.40	16.40	5.81	135.06	
	0.5944	4.01	4.04	16.00	2,293.15	16.20	6.08	142.03	
	0.5973	4.09	3.99	16.04	2,281.88	16.32	6.41	150.53	
14	0.5980	4.03	4.10	16.04	2,256.36	16.52	6.77	152.83	143.33
	0.6020	4.02	4.12	16.08	2,260.41	16.56	6.70	150.15	
	0.5920	4.02	4.12	16.05	2,227.02	16.56	5.95	133.31	
	0.5980	4.01	4.11	16.01	2,266.33	16.48	6.07	137.01	
	0.5990	4.00	4.18	16.08	2,227.95	16.72	5.75	125.78	
	0.6010	4.01	4.12	15.99	2,275.02	16.52	5.54	124.42	
28	0.5926	4.00	4.12	16.04	2,241.82	16.48	6.03	135.78	145.83
	0.5960	4.03	4.02	16.03	2,294.99	16.20	6.71	157.56	
	0.6003	4.07	4.01	16.04	2,293.11	16.32	6.17	144.15	
	0.5935	4.11	3.99	16.05	2,254.92	16.40	5.39	125.92	

ตาราง 21 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ควมคุม (ต่อ)

อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กก.)	ด้าน a [B] (ซม.)	ด้าน b [H] (ซม.)	ยาว c [L] (ซม.)	หน่วย น้ำหนัก (กก./ลบ. ม.)	พื้นที่รับ แรง [A] (ตร.ซม.)	แรงกด [F] (กก.นิว ตัน)	กำลังดัด [σ_b] (กก./ตร. ซม.)	กำลังดัด เฉลี่ย (กก./ตร. ซม.)
56	0.5958	4.03	4.00	16.08	2,298.53	16.12	6.37	151.06	142.48
	0.5884	4.02	4.03	16.09	2,257.84	16.20	6.61	154.86	
	0.6010	4.07	4.02	16.08	2,284.38	16.36	5.81	135.05	
	0.6019	4.08	4.08	16.01	2,260.12	16.63	5.72	128.94	
112	0.5787	3.96	4.04	16.07	2,250.93	16.00	6.74	159.47	145.17
	0.6033	4.06	4.10	16.10	2,251.11	16.65	5.97	133.74	
	0.5917	4.02	4.05	16.07	2,261.54	16.28	6.63	153.76	
	0.5928	4.05	4.05	16.06	2,250.36	16.40	5.81	133.71	
	0.5806	4.03	4.04	16.04	2,223.24	16.28	5.57	129.45	
180	0.6020	4.01	4.04	16.00	2,322.47	16.20	6.32	147.65	143.80
	0.5947	4.01	4.01	16.02	2,308.59	16.08	6.33	150.11	
	0.5971	4.08	4.08	16.05	2,237.06	16.63	6.09	137.37	
	0.5940	4.03	4.07	16.03	2,259.19	16.40	5.93	135.81	
	0.6029	4.00	4.02	16.02	2,340.44	16.08	6.26	148.07	

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } \text{ระยะระหว่างจุดรองรับ } [L_0] &= 10 \quad \text{ซม.} \\
 \text{จากสมการ } \text{กำลังดัด } [\sigma] &= \frac{3FL_0}{2BH^2} \\
 &= \frac{3 \times 6.26 \times 10 \times 1000}{2 \times 4.00 \times 4.02 \times 4.02 \times 9.81} \\
 &= 148.07 \quad \text{กก./ตร.ซม.}
 \end{aligned}$$

ตาราง 22 ผลการทดสอบวัดค่าการยืดหดตัวของมอร์ตาร์ปูนพื้น รูปแบบที่ 1

รูปแบบที่ 1 ป่มตามมาตรฐานโดยใช้น้ำปูนอิ่มตัว			
อายุ (วัน)	การเปลี่ยนแปลง ความยาว (มม.)	ร้อยละการ เปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยร้อยละ การเปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)
1	บ่มเปียก	-	-
	บ่มเปียก	-	-
3	-6.472	0.000	0.000
	-6.525	0.000	
7	-6.574	-0.016	-0.016
	-6.631	-0.016	
14	-6.692	-0.026	-0.026
	Fail	-	
28	-6.731	-0.032	-0.032
	Fail	-	
56	-6.763	-0.037	-0.037
	Fail	-	
90	-6.773	-0.038	-0.038
	Fail	-	
250	-6.782	-0.039	-0.039
	Fail	-	

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ} \quad \text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลง} &= \frac{L-L_0}{L_0} \\
 &= \frac{(-6.731)-(-6.472)}{-6.472} \\
 &= -0.032
 \end{aligned}$$

ตาราง 23 ผลการทดสอบวัดค่าการยืดหดตัวของมอร์ตาร์ปูนพ่น รูปแบบที่ 2

รูปแบบที่ 2 บ่มโดยใช้น้ำสะอาดที่เปลี่ยนทุก 12 ชม.			
อายุ (วัน)	การเปลี่ยนแปลง ความยาว (มม.)	ร้อยละการ เปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยร้อยละ การเปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)
1	บ่มเปียก	-	-
	บ่มเปียก	-	-
3	-5.382	0.000	0.000
	-4.514	0.000	
7	-5.494	-0.021	-0.021
	-4.606	-0.020	
14	-5.548	-0.031	-0.033
	-4.670	-0.035	
28	-5.593	-0.039	-0.041
	-4.707	-0.043	
56	-5.635	-0.047	-0.050
	-4.757	-0.054	
90	-5.634	-0.047	-0.051
	-4.760	-0.054	
250	-5.643	-0.048	-0.053
	-4.775	-0.058	

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ} \quad \text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลง} &= \frac{L-L_0}{L_0} \\
 &= \frac{(-4.775)-(-4.514)}{-4.514} \\
 &= -0.058
 \end{aligned}$$

ตาราง 24 ผลการทดสอบวัดค่าการยืดหดตัวของมอร์ตาร์ปูนพ่น รูปแบบที่ 3

รูปแบบที่ 3 ป่มโดยใช้น้ำสะอาด ไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำ			
อายุ (วัน)	การเปลี่ยนแปลง ความยาว (มม.)	ร้อยละการ เปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยร้อยละ การเปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)
1	บ่มเปียก	-	-
	บ่มเปียก	-	
3	-3.242	0.000	0.000
	-4.678	0.000	
7	-3.369	-0.039	-0.028
	-4.757	-0.017	
14	-3.429	-0.058	-0.044
	-4.823	-0.031	
28	-3.478	-0.073	-0.057
	-4.874	-0.042	
56	-3.495	-0.078	-0.063
	-4.907	-0.049	
90	-3.501	-0.080	-0.064
	-4.906	-0.049	
250	-3.507	-0.082	-0.066
	-4.913	-0.050	

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ} \quad \text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลง} &= \frac{L-L_0}{L_0} \\
 &= \frac{(-3.507)-(-3.242)}{-3.242} \\
 &= -0.082
 \end{aligned}$$

ตาราง 25 ผลการทดสอบวัดค่าการยืดหดตัวของมอร์ตาร์ปูนพ่น รูปแบบที่ 4

รูปแบบที่ 4 ไม่มีการบ่มน้ำ			
อายุ (วัน)	การเปลี่ยนแปลง ความยาว (มม.)	ร้อยละการ เปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยร้อยละ การเปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)
1	6.536	0.000	0.000
	2.944	0.000	
3	6.466	-0.011	-0.016
	2.879	-0.022	
7	6.397	-0.021	-0.032
	2.818	-0.043	
14	6.381	-0.024	-0.035
	2.809	-0.046	
28	6.343	-0.030	-0.044
	2.772	-0.059	
56	6.300	-0.036	-0.055
	2.724	-0.075	
90	6.302	-0.036	-0.056
	2.720	-0.076	
250	6.282	-0.039	-0.060
	2.708	-0.080	

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ} \quad \text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลง} &= \frac{L-L_0}{L_0} \\
 &= \frac{6.343 - 6.536}{6.536} \\
 &= -0.030
 \end{aligned}$$

ตาราง 26 ผลการทดสอบวัดค่าการยืดหดตัวของมอร์ตาร์ปูนพื้น รูปแบบที่ 5

รูปแบบที่ 5 บ่มน้ำตลอดการทดลอง			
อายุ (วัน)	การเปลี่ยนแปลง ความยาว (มม.)	ร้อยละการ เปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยร้อยละ การเปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)
1	4.282	0.000	0.000
	5.714	0.000	
3	4.282	0.000	-0.002
	5.695	-0.003	
7	4.294	0.003	0.001
	5.711	-0.001	
14	4.286	0.001	0.000
	5.710	-0.001	
28	4.244	-0.009	-0.006
	5.691	-0.004	
35	4.223	-0.014	-0.008
	5.700	-0.002	

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ} \quad \text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลง} &= \frac{L-L_0}{L_0} \\
 &= \frac{4.244 - 4.282}{4.282} \\
 &= -0.009
 \end{aligned}$$

ตาราง 27 ผลการทดสอบความทนทานต่อการซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนพ่น

อายุ (วัน)	ระยะเวลาซึมของน้ำในตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนพ่น (ซม.)										ระยะเวลา ซึมเฉลี่ย (ซม.)	เฉลี่ยรวม ทั้งหมด (ซม.)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
	0.61	0.83	0.77	1.02	0.99	1.08	0.80	0.87	1.16	0.82	0.895	
28	0.95	1.00	0.73	0.68	0.70	0.99	0.80	0.73	0.68	0.65	0.791	0.850
	0.84	0.81	0.82	1.24	0.86	0.74	0.88	0.79	0.82	0.84	0.864	
	0.83	0.74	0.81	0.83	0.68	0.85	0.47	0.55	0.70	0.97	0.743	
56	0.51	0.47	0.57	0.49	0.74	0.66	0.53	0.41	0.51	0.86	0.575	0.662
	0.60	0.50	0.38	0.68	0.85	0.65	0.72	0.64	0.73	0.93	0.668	
	0.51	0.48	0.49	0.47	0.47	0.46	0.47	0.47	0.49	0.50	0.481	
112	0.49	0.47	0.47	0.49	0.48	0.47	0.48	0.50	0.49	0.49	0.483	0.483
	0.50	0.49	0.49	0.47	0.48	0.48	0.49	0.49	0.47	0.49	0.485	
	0.36	0.32	0.31	0.31	0.30	0.32	0.33	0.30	0.31	0.34	0.320	
180	0.22	0.22	0.20	0.17	0.18	0.19	0.20	0.22	0.20	0.19	0.199	0.288
	0.35	0.33	0.35	0.35	0.34	0.34	0.32	0.34	0.35	0.37	0.344	

ตาราง 28 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างมอร์ตาร์รูปวงรี

เวลาอัดน้ำ [t] = 259200 วินาที (72 ชม.)		ค่าความพรุน [v = m / Adp]					
แรงดันน้ำที่อัด 5 บาร์ [h] = 50.987 ม.		ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน [k = d ² v / 2ht]					
หน้าตัดตัวอย่าง [A] = 0.023 ตร.ม.							
อายุ	น้ำหนัก ก่อนอัด น้ำ	น้ำหนัก หลังอัด น้ำ	น้ำหนัก ที่เพิ่มขึ้น [m]	ระยะ การซึม [d]	ความ พรุน [v]	สัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน [k] x10 ⁻¹¹	สัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน เฉลี่ย x10 ⁻¹¹
(วัน)	(กก.)	(กก.)	(กก.)	(ม.)	-	(ม./วินาที)	(ม./วินาที)
	7.632	7.671	0.039	0.00895	0.194	0.05869	
28	7.683	7.714	0.031	0.00791	0.174	0.04123	0.05462
	7.675	7.719	0.044	0.00864	0.226	0.06392	
	7.705	7.743	0.038	0.00743	0.227	0.04748	
56	7.681	7.721	0.040	0.00575	0.309	0.03867	0.04070
	7.723	7.755	0.032	0.00668	0.213	0.03594	
	7.659	7.674	0.015	0.00481	0.139	0.01213	
112	7.758	7.775	0.017	0.00483	0.156	0.01381	0.01272
	7.642	7.657	0.015	0.00485	0.137	0.01223	
	7.673	7.608	-0.065	0.00320	-0.906	-0.03508	
180	7.721	7.737	0.016	0.00199	0.366	0.00549	0.00723
	7.658	7.674	0.015	0.00344	0.200	0.00897	

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ} \quad \text{ความพรุน [v]} &= \frac{m}{Adp} \\
 &= \frac{0.038}{0.023 \times 0.00743 \times 1000} \\
 &= 0.227
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน [k]} &= \frac{d^2v}{2ht} \\
 &= \frac{0.00743 \times 0.00743 \times 0.227}{2 \times 50.987 \times 259200} \\
 &= 0.04748 \times 10^{-11} \text{ ม./วินาที}
 \end{aligned}$$

ตาราง 29 ผลการทดสอบความทนทานต่อการซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม

อายุ (วัน)	ระยะเวลาซึมของน้ำในตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม (ซม.)										ระยะเวลา ซึมเฉลี่ย (ซม.)	เฉลี่ยรวม ทั้งหมด (ซม.)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
	1.47	1.33	1.22	1.35	1.44	1.40	1.34	1.21	1.35	1.48	1.359	
28	1.35	1.33	1.31	1.32	1.32	1.32	1.29	1.32	1.28	1.38	1.322	1.332
	1.52	1.22	1.20	1.21	1.39	1.44	1.19	1.20	1.25	1.54	1.316	
	1.31	1.09	1.12	1.20	1.28	1.28	1.23	1.20	1.07	1.27	1.205	
56	1.42	1.11	1.17	1.20	1.41	1.45	1.24	1.19	1.08	1.43	1.270	1.182
	1.12	1.00	0.96	0.99	1.20	1.14	1.07	1.11	0.98	1.15	1.072	
	0.87	0.79	0.72	0.81	0.96	0.91	0.88	0.79	0.78	0.90	0.841	
112	0.80	0.81	0.75	0.75	0.82	0.85	0.79	0.77	0.82	0.82	0.798	0.832
	0.90	0.82	0.81	0.80	0.83	0.90	0.91	0.84	0.81	0.95	0.857	
	0.67	0.66	0.61	0.63	0.59	0.58	0.65	0.63	0.63	0.66	0.631	
180	0.72	0.68	0.68	0.67	0.69	0.70	0.63	0.61	0.61	0.69	0.668	0.639
	0.65	0.57	0.56	0.63	0.69	0.68	0.60	0.58	0.59	0.64	0.619	

ตาราง 30 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม

เวลาอัดน้ำ [t] = 259200 วินาที (72 ชม.)		ค่าความพรุน [v = m / Adp]					
แรงดันน้ำที่อัด 5 บาร์ [h] = 50.987 ม.		ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน [k = d ² v / 2ht]					
หน้าตัดตัวอย่าง [A] = 0.023 ตร.ม.							
อายุ	น้ำหนัก ก่อนอัด น้ำ	น้ำหนัก หลังอัด น้ำ	น้ำหนัก ที่เพิ่มขึ้น [m]	ระยะ การซึม [d]	ความ พรุน [v]	สัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน [k] x10 ⁻¹¹	สัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน เฉลี่ย x10 ⁻¹¹
(วัน)	(กก.)	(กก.)	(กก.)	(ม.)	-	(ม./วินาที)	(ม./วินาที)
	7.542	7.589	0.047	0.01359	0.154	0.10740	
28	7.611	7.663	0.052	0.01322	0.175	0.11559	0.10900
	7.594	7.641	0.047	0.01316	0.159	0.10400	
	7.537	7.576	0.039	0.01205	0.144	0.07902	
56	7.602	7.645	0.043	0.01270	0.150	0.09183	0.08459
	7.593	7.639	0.046	0.01072	0.191	0.08292	
	7.575	7.612	0.037	0.00841	0.196	0.05232	
112	7.598	7.637	0.039	0.00798	0.217	0.05233	0.05074
	7.602	7.635	0.033	0.00857	0.171	0.04755	
	7.610	7.639	0.029	0.00631	0.204	0.03077	
180	7.547	7.585	0.038	0.00668	0.253	0.04268	0.03385
	7.582	7.609	0.027	0.00619	0.194	0.02810	

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ} \quad \text{ความพรุน [v]} &= \frac{m}{Adp} \\
 &= \frac{0.027}{0.023 \times 0.00619 \times 1000} \\
 &= 0.194
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน [k]} &= \frac{d^2 v}{2ht} \\
 &= \frac{0.00619 \times 0.00619 \times 0.194}{2 \times 50.987 \times 259200} \\
 &= 0.02810 \times 10^{-11} \quad \text{ม./วินาที}
 \end{aligned}$$

ตาราง 31 ผลคุณภาพการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุซ่อมแซมและวัสดุพื้นผิวคอนกรีต

ชนิดของ วัสดุซ่อม	อายุ (วัน)	ความหนา งานซ่อม (ซม.)	ระดับ A	ระดับ B	ระดับ C	
			เสียหายที่ คอนกรีต (ร้อยละ)	เสียหายที่ วัสดุซ่อม (ร้อยละ)	เสียหายที่รอยต่อ ระหว่างวัสดุ (ร้อยละ)	
มอร์ตาร์ปูนผง	7	2.5	15/18 (83.3)	0/18 (0.0)	3/18 (16.7)	
		5.0	13/18 (72.2)	0/18 (0.0)	5/18 (27.8)	
	28	2.5	18/18 (100.0)	0/18 (0.0)	0/18 (0.0)	
		5.0	18/18 (100.0)	0/18 (0.0)	0/18 (0.0)	
	มอร์ตาร์ควบคุม	7	2.5	12/18 (66.7)	0/18 (0.0)	6/18 (33.3)
			5.0	10/18 (55.6)	0/18 (0.0)	8/18 (44.4)
28		2.5	18/18 (100.0)	0/18 (0.0)	0/18 (0.0)	
		5.0	18/18 (100.0)	0/18 (0.0)	0/18 (0.0)	

ตาราง 32 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุออร์ตาอิมพ่น อายุ 7 วัน ที่ความหนา 2.5 ซม.

วัสดุ พื้นผิว คอนกรีต	พื้นที่รับ แรง (ตร.ซม.)	รูปแบบ ความ เสียหาย	ความลึก จุดเสียหาย (ซม.)	แรงดึง (กก./นิวตัน)	กำลังดึง (กก./ตร. ซม.)	ค่าเฉลี่ย กำลังดึง (กก./ตร. ซม.)
320		C	-	1.5	7.79	
ksc. (ค.7)	19.63	A	2.1	2.5	12.98	12.20
		A	1.8	2.2	11.42	
240		A	0.5	2.2	11.42	
ksc. (ค.4)	19.63	A	0.9	2.2	11.42	11.77
		A	1.3	2.4	12.46	
180		A	1.1	2.2	11.42	
ksc. (ค.2)	19.63	A	1.5	2.2	11.42	11.42
		C	-	1.5	7.79	
150		A	0.8	2.2	11.42	
ksc. (ค.1)	19.63	A	0.7	2.4	12.46	11.42
		A	1.8	2.0	10.38	
110		A	2.0	2.0	10.38	
ksc.	19.63	A	2.2	2.2	11.42	11.08
		A	1.0	2.2	11.42	
90		C	-	1.5	7.79	
ksc.	19.63	A	1.7	2.0	10.38	10.38
		A	0.5	2.0	10.38	

ตาราง 33 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุออร์ตาโรพอน อายุ 7 วัน ที่ความหนา 5.0 ซม.

วัสดุ พื้นผิว คอนกรีต	พื้นที่รับ แรง (ตร.ซม.)	รูปแบบ ความ เสียหาย	ความลึก จุดเสียหาย (ซม.)	แรงดึง (กก./นิวตัน)	กำลังดึง (กก./ตร. ซม.)	ค่าเฉลี่ย กำลังดึง (กก./ตร. ซม.)
320		C	-	2.0	10.38	
ksc.	19.63	A	0.8	2.2	11.42	11.94
(ค.7)		A	1.9	2.4	12.46	
240		C	-	0.8	4.15	
ksc.	19.63	A	2.0	1.8	9.34	10.90
(ค.4)		A	1.5	2.4	12.46	
180		C	-	1.6	8.31	
ksc.	19.63	A	1.3	2.0	10.38	11.16
(ค.2)		A	1.6	2.3	11.94	
150		C	-	2.0	10.38	
ksc.	19.63	A	2.2	2.2	11.42	10.90
(ค.1)		A	0.5	2.0	10.38	
110		A	1.4	1.0	5.19	
ksc.	19.63	A	0.5	2.4	12.46	10.38
		A	1.9	2.6	13.50	
90		C	-	2.0	10.38	
ksc.	19.63	A	2.2	2.0	10.38	11.68
		A	2.1	2.5	12.98	

ตาราง 34 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุออร์ตาอิมพ่น อายุ 28 วัน ที่ความหนา 2.5 ซม.

วัสดุ พื้นผิว คอนกรีต	พื้นที่รับ แรง (ตร.ซม.)	รูปแบบ ความ เสียหาย	ความลึก จุดเสียหาย (ซม.)	แรงดึง (กก./นิวตัน)	กำลังดึง (กก./ตร. ซม.)	ค่าเฉลี่ย กำลังดึง (กก./ตร. ซม.)
320 ksc. (ค.7)	19.63	A	2.5	2.5	12.98	15.40
		A	1.0	2.6	13.50	
		A	0.7	3.8	19.73	
240 ksc. (ค.4)	19.63	A	1.2	2.1	10.90	12.98
		A	1.0	2.6	13.50	
		A	1.7	2.8	14.54	
180 ksc. (ค.2)	19.63	A	1.5	4.0	20.77	20.59
		A	1.5	4.1	21.29	
		A	2.0	3.8	19.73	
150 ksc. (ค.1)	19.63	A	1.0	3.0	15.57	15.57
		A	0.5	3.2	16.61	
		A	1.2	2.8	14.54	
110 ksc.	19.63	A	1.4	3.2	16.61	16.96
		A	2.0	3.2	16.61	
		A	0.9	3.4	17.65	
90 ksc.	19.63	A	0.6	2.5	12.98	12.11
		A	0.7	2.0	10.38	
		A	0.5	2.5	12.98	

ตาราง 35 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุออร์ตาอิมพ่น อายุ 28 วัน ที่ความหนา 5.0 ซม.

วัสดุ พื้นผิว คอนกรีต	พื้นที่รับ แรง (ตร.ซม.)	รูปแบบ ความ เสียหาย	ความลึก จุดเสียหาย (ซม.)	แรงดึง (กก./นิวตัน)	กำลังดึง (กก./ตร. ซม.)	ค่าเฉลี่ย กำลังดึง (กก./ตร. ซม.)
320		A	1.3	3.0	15.57	
ksc. (ค.7)	19.63	A	1.0	3.2	16.61	15.75
		A	0.7	2.9	15.06	
240		A	2.0	2.8	14.54	
ksc. (ค.4)	19.63	A	1.5	3.1	16.09	15.40
		A	1.7	3.0	15.57	
180		A	2.1	4.1	21.29	
ksc. (ค.2)	19.63	A	1.8	3.5	18.17	20.59
		A	0.5	4.3	22.32	
150		A	1.0	4.0	20.77	
ksc. (ค.1)	19.63	A	1.5	2.0	10.38	15.06
		A	0.9	2.7	14.02	
110		A	0.8	3.9	20.25	
ksc.	19.63	A	1.0	2.5	12.98	16.61
		A	0.8	3.2	16.61	
90		A	0.4	3.2	16.61	
ksc.	19.63	A	0.9	2.2	11.42	14.54
		A	1.1	3.0	15.57	

ตาราง 36 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุออร์ตาวิคคอม อายุ 7 วัน ที่ความหนา 2.5 ซม.

วัสดุ พื้นผิว คอนกรีต	พื้นที่รับ แรง (ตร.ซม.)	รูปแบบ ความ เสียหาย	ความลึก จุดเสียหาย (ซม.)	แรงดึง (กก./นิวตัน)	กำลังดึง (กก./ตร. ซม.)	ค่าเฉลี่ย กำลังดึง (กก./ตร. ซม.)
320		C	-	1.0	5.19	
ksc.	19.63	C	-	1.5	7.79	11.42
(ค.7)		A	1.3	2.2	11.42	
240		C	-	1.5	7.79	
ksc.	19.63	A	1.0	2.0	10.38	10.90
(ค.4)		A	0.7	2.2	11.42	
180		C	-	1.5	7.79	
ksc.	19.63	A	1.2	2.0	10.38	10.38
(ค.2)		A	0.7	2.0	10.38	
150		A	0.6	2.0	10.38	
ksc.	19.63	A	1.3	2.2	11.42	11.08
(ค.1)		A	1.5	2.2	11.42	
110		C	-	1.4	7.27	
ksc.	19.63	A	2.2	1.8	9.34	10.90
		A	1.1	2.4	12.46	
90		C	-	1.0	5.19	
ksc.	19.63	A	1.0	2.2	11.42	11.42
		A	0.4	2.2	11.42	

ตาราง 37 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุออร์ตาวิคคอม อายุ 7 วัน ที่ความหนา 5.0 ซม.

วัสดุ พื้นผิว คอนกรีต	พื้นที่รับ แรง (ตร.ซม.)	รูปแบบ ความ เสียหาย	ความลึก จุดเสียหาย (ซม.)	แรงดึง (กก./นิวตัน)	กำลังดึง (กก./ตร. ซม.)	ค่าเฉลี่ย กำลังดึง (กก./ตร. ซม.)
320		C	-	1.0	5.19	
ksc.	19.63	A	1.7	2.0	10.38	10.38
(ค.7)		A	1.2	2.0	10.38	
240		C	-	1.0	5.19	
ksc.	19.63	C	-	1.2	6.23	10.38
(ค.4)		A	0.5	2.0	10.38	
180		A	0.9	2.0	10.38	
ksc.	19.63	A	1.0	2.0	10.38	10.04
(ค.2)		A	2.5	1.8	9.34	
150		C	-	2.0	10.38	
ksc.	19.63	A	0.7	2.4	12.46	13.50
(ค.1)		A	1.4	2.8	14.54	
110		C	-	2.0	10.38	
ksc.	19.63	C	-	2.0	10.38	11.42
		A	2.0	2.2	11.42	
90		C	-	1.0	5.19	
ksc.	19.63	C	-	1.5	7.79	10.38
		A	1.8	2.0	10.38	

ตาราง 38 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุออร์ตาวิคคอม อายุ 28 วัน ที่ความหนา 2.5 ซม.

วัสดุ พื้นผิว คอนกรีต	พื้นที่รับ แรง (ตร.ซม.)	รูปแบบ ความ เสียหาย	ความลึก จุดเสียหาย (ซม.)	แรงดึง (กก./นิวตัน)	กำลังดึง (กก./ตร. ซม.)	ค่าเฉลี่ย กำลังดึง (กก./ตร. ซม.)
320		A	0.5	3.5	18.17	
ksc. (ค.7)	19.63	A	1.0	3.2	16.61	16.79
		A	1.2	3.0	15.57	
240		A	0.8	3.6	18.69	
ksc. (ค.4)	19.63	A	0.5	3.2	16.61	16.27
		A	0.5	2.6	13.50	
180		A	0.8	2.2	11.42	
ksc. (ค.2)	19.63	A	1.0	2.8	14.54	12.81
		A	1.8	2.4	12.46	
150		A	0.3	2.5	12.98	
ksc. (ค.1)	19.63	A	0.5	2.2	11.42	12.46
		A	0.7	2.5	12.98	
110		A	1.2	1.8	9.34	
ksc.	19.63	A	0.5	2.5	12.98	11.77
		A	0.7	2.5	12.98	
90		A	0.4	2.0	10.38	
ksc.	19.63	A	0.0	2.5	12.98	12.11
		A	0.9	2.5	12.98	

ตาราง 39 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุออร์ตาอาร์ทิคูแลอร์ อายุ 28 วัน ที่ความหนา 5.0 ซม.

วัสดุ พื้นผิว คอนกรีต	พื้นที่รับ แรง (ตร.ซม.)	รูปแบบ ความ เสียหาย	ความลึก จุดเสียหาย (ซม.)	แรงดึง (กก./นิวตัน)	กำลังดึง (กก./ตร. ซม.)	ค่าเฉลี่ย กำลังดึง (กก./ตร. ซม.)
320 ksc. (ค.7)	19.63	A	0.3	2.5	12.98	15.06
		A	0.5	3.2	16.61	
		A	1.0	3.0	15.57	
240 ksc. (ค.4)	19.63	A	1.2	3.8	19.73	16.96
		A	0.5	3.1	16.09	
		A	0.8	2.9	15.06	
180 ksc. (ค.2)	19.63	A	2.0	2.5	12.98	17.31
		A	1.5	4.0	20.77	
		A	1.9	3.5	18.17	
150 ksc. (ค.1)	19.63	A	0.5	2.4	12.46	12.46
		A	0.3	2.8	14.54	
		A	0.5	2.0	10.38	
110 ksc.	19.63	A	0.7	2.0	10.38	11.42
		A	1.0	2.4	12.46	
		A	1.1	2.2	11.42	
90 ksc.	19.63	A	1.5	1.5	7.79	13.15
		A	0.7	3.6	18.69	
		A	0.8	2.5	12.98	

ตาราง 40 ผลการทดสอบวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุอมอร์ฟาร์บูนพ่น ที่อายุ 28 วัน

แรงกด [P] (กก.)	การเคลื่อนตัว แนวราบ [Δx] (มม.)	การเคลื่อนตัว แนวตั้ง [Δy] (มม.)	ความเค้น [ϵ] (กก./ตร.ซม.)	ความเครียด [σ] (มม./มม.)
2933.33	0.044973	0.037493	16.60	0.000187
4033.33	0.049970	0.042492	22.82	0.000212
5333.33	0.059964	0.047491	30.18	0.000237
6866.67	0.054967	0.054989	38.86	0.000275
8433.33	0.054967	0.062488	47.72	0.000312
10066.67	0.074955	0.062488	56.97	0.000312
12133.33	0.059964	0.077485	68.66	0.000387
14133.33	0.064961	0.082484	79.98	0.000412
16266.66	0.084949	0.084983	92.05	0.000425
18633.33	0.079952	0.099980	105.44	0.000500
21100.00	0.069958	0.114977	119.40	0.000575
23600.00	0.074955	0.124975	133.55	0.000625
26166.66	0.099940	0.129974	148.07	0.000650
29066.66	0.084949	0.154969	164.48	0.000775
31866.66	0.089946	0.167467	180.33	0.000837
34766.66	0.099940	0.179964	196.74	0.000900
37066.66	0.109934	0.192462	209.75	0.000962

ตาราง 41 ผลการทดสอบวัดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุออร์ตาอาร์ทิกคิวลัม ที่อายุ 28 วัน

แรงกด [P] (กก.)	การเคลื่อนตัว แนวราบ [Δx] (มม.)	การเคลื่อนตัว แนวตั้ง [Δy] (มม.)	ความเค้น [ε] (กก./ตร.ซม.)	ความเครียด [σ] (มม./มม.)
18,133.15	0.039976	0.079984	102.61	0.000400
19,066.48	0.049970	0.084983	107.89	0.000425
20,066.47	0.064961	0.092482	113.55	0.000462
21,266.46	0.074955	0.097481	120.34	0.000487
22,499.78	0.089946	0.102480	127.32	0.000512
23,699.76	0.099940	0.107479	134.11	0.000537
24,966.42	0.109934	0.117477	141.28	0.000587
26,233.07	0.119928	0.119976	148.45	0.000600

ตัวอย่างการคำนวณ

เมื่อ	พื้นที่หน้าตัด [A]	=	176.71	ตร.ซม.
	ระยะพิงัดเริ่มต้น [L ₀]	=	200	มม.
จากสมการ	ความเค้น [ε]	=	$\frac{P}{A}$	
		=	$\frac{20,066.47}{176.71}$	
		=	113.55	กก./ตร.ซม.
จากสมการ	ความเครียด [ε]	=	$\frac{\Delta y}{L_0}$	
		=	$\frac{0.092482}{200}$	
		=	0.000462	มม./มม.

ตาราง 42 ผลค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตที่ออกแบบกำลัง 90 กก./ตร.ซม.

แรงกด [P] (กก.)	การเคลื่อนตัว แนวราบ [Δx] (มม.)	การเคลื่อนตัว แนวตั้ง [Δy] (มม.)	ความเค้น [ϵ] (กก./ตร.ซม.)	ความเครียด [σ] (มม./มม.)
2,466.67	-0.009998	0.012493	13.96	0.000062
3,300.00	0.004999	0.019988	18.67	0.000100
4,133.33	0.029994	0.022487	23.39	0.000112
4,900.00	0.039992	0.042475	27.73	0.000212
5,933.33	0.059988	0.052469	33.58	0.000262
7,000.00	0.074985	0.064961	39.61	0.000325
8,300.00	0.099980	0.077454	46.97	0.000387
9,333.33	0.099980	0.094943	52.82	0.000475
9,033.33	0.124975	0.089946	51.12	0.000450

ตาราง 43 ผลค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตที่ออกแบบกำลัง 110 กก./ตร.ซม.

แรงกด [P] (กก.)	การเคลื่อนตัว แนวราบ [Δx] (มม.)	การเคลื่อนตัว แนวตั้ง [Δy] (มม.)	ความเค้น [ϵ] (กก./ตร.ซม.)	ความเครียด [σ] (มม./มม.)
7,366.67	0.014997	0.027484	41.69	0.000137
8,566.67	0.019996	0.034979	48.48	0.000175
9,966.67	0.019996	0.047472	56.40	0.000237
11,533.33	0.014997	0.062463	65.27	0.000312
13,166.67	0.034993	0.062463	74.51	0.000312
15,100.00	0.039992	0.074955	85.45	0.000375

ตาราง 44 ผลค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตที่ออกแบบกำลัง 150 กก./ตร.ซม.

แรงกด [P] (กก.)	การเคลื่อนตัว แนวราบ [Δx] (มม.)	การเคลื่อนตัว แนวตั้ง [Δy] (มม.)	ความเค้น [ϵ] (กก./ตร.ซม.)	ความเครียด [σ] (มม./มม.)
2,633.33	-0.004999	0.002499	14.90	0.000012
3,400.00	-0.009998	0.009994	19.24	0.000050
4,066.67	-0.009998	0.012493	23.01	0.000062
4,833.33	-0.004999	0.017490	27.35	0.000087
5,700.00	0.004999	0.017490	32.26	0.000087
6,833.33	-0.004999	0.029982	38.67	0.000150

ตาราง 45 ผลค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตที่ออกแบบกำลัง 240 กก./ตร.ซม.

แรงกด [P] (กก.)	การเคลื่อนตัว แนวราบ [Δx] (มม.)	การเคลื่อนตัว แนวตั้ง [Δy] (มม.)	ความเค้น [ϵ] (กก./ตร.ซม.)	ความเครียด [σ] (มม./มม.)
2,331.00	0.029994	0.0024985	13.19	0.000012
4,551.00	0.019996	0.0124925	25.75	0.000062
6,715.50	0.019996	0.0174895	38.00	0.000087
10,631.33	0.019996	0.0324805	60.16	0.000162
12,302.50	0.024995	0.0424745	69.62	0.000212
13,893.50	0.039992	0.0474715	78.62	0.000237
15,355.00	0.049990	0.0624625	86.89	0.000312
16,853.50	0.049990	0.0774535	95.37	0.000387
18,759.00	0.044991	0.079952	106.15	0.000400

ตาราง 46 ผลค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพื้นผิวคอนกรีตที่ออกแบบกำลัง 320 กก./ตร.ซม.

แรงกด [P] (กก.)	การเคลื่อนตัว แนวราบ [Δx] (มม.)	การเคลื่อนตัว แนวตั้ง [Δy] (มม.)	ความเค้น [ε] (กก./ตร.ซม.)	ความเครียด [σ] (มม./มม.)
15,933.33	-0.084983	0.029982	90.16	0.000150
17,833.33	-0.079984	0.032481	100.92	0.000162
19,966.66	-0.074985	0.037478	112.99	0.000187
22,366.66	-0.079984	0.052469	126.57	0.000262
24,866.66	-0.079984	0.059964	140.72	0.000300
27,433.33	-0.064987	0.064961	155.24	0.000325

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ} \quad & \text{พื้นที่หน้าตัด [A]} = 176.71 \quad \text{ตร.ซม.} \\
 & \text{ระยะพิกัดเริ่มต้น [y}_0\text{]} = 200 \quad \text{มม.} \\
 \text{จากสมการ} \quad & \text{ความเค้น } [\sigma] = \frac{P}{A} \\
 & = \frac{22,366.66}{176.71} \\
 & = 126.57 \quad \text{กก./ตร.ซม.} \\
 \text{จากสมการ} \quad & \text{ความเครียด } [\epsilon] = \frac{\Delta y}{y_0} \\
 & = \frac{0.052469}{200} \\
 & = 0.000262 \quad \text{มม./มม.}
 \end{aligned}$$

ตาราง 47 อัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุออร์ตาโรพลาสติกต่อวัสดุพื้นผิวคอนกรีต

กำลังที่ใช้ในการ ออกแบบ (กก./ตร.ซม)	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ วัสดุพื้นผิวคอนกรีต [E_b] (กก./ตร.ซม)	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ วัสดุออร์ตาโรพลาสติก [E_r] (กก./ตร.ซม)	อัตราส่วนค่าโมดูลัส ยืดหยุ่น [E_b/E_r]
90	92,003	248,818	0.37
110	175,899	248,818	0.71
150	183,190	248,818	0.74
240	225,664	248,818	0.91
320	323,848	248,818	1.30

ตาราง 48 อัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุออร์ตาโรพลาสติกต่อวัสดุพื้นผิวคอนกรีต

กำลังที่ใช้ในการ ออกแบบ (กก./ตร.ซม)	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ วัสดุพื้นผิวคอนกรีต [E_b] (กก./ตร.ซม)	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ วัสดุออร์ตาโรพลาสติก [E_r] (กก./ตร.ซม)	อัตราส่วนค่าโมดูลัส ยืดหยุ่น [E_b/E_r]
90	92,003	215,589	0.43
110	175,899	215,589	0.82
150	183,190	215,589	0.85
240	225,664	215,589	1.05
320	323,848	215,589	1.50

$$\begin{aligned}
 \text{ตัวอย่างการคำนวณ} \quad \text{อัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่น} &= \frac{E_b}{E_r} \\
 &= \frac{183,190}{248,818} \\
 &= 0.74
 \end{aligned}$$

บรรณานุกรม

1. Emmons PH. การซ่อมแซมคอนกรีตและการบำรุงรักษา. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัทเอสซีจี ซีเมนต์; 2551.
2. กรมโยธาธิการและผังเมือง. มาตรฐานปฏิบัติในการซ่อมแซมคอนกรีต (มยผ. 1901-51). 2551.
3. Pattnaik RR, Rangaraju PR. Analysis of compatibility between repair material and substrate concrete using simple beam with third point loading. Journal of Materials in Civil Engineering. 2007;19(12):1060-9.
4. Annual Book of ASTM Standards. ASTM C1437. Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. 2015.
5. Annual Book of ASTM Standards. ASTM C109. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars. 2016.
6. Annual Book of ASTM Standards. ASTM C387. Standard specification for packaged, dry, combined materials for concrete and high strength mortar. 2017.
7. Annual Book of ASTM Standards. ASTM C307. Standard test method for tensile strength of chemical-resistant mortar, grouts, and monolithic surfacings. 2018.
8. Annual Book of ASTM Standards. ASTM C348. Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars. 2018.
9. Annual Book of ASTM Standards. ASTM C469. Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression. 1994.
10. Annual Book of ASTM Standards. ASTM C39. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. 1999.
11. Annual Book of ASTM Standards. ASTM D4541. Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers. 2017.
12. DIN 1048 part 5. Concrete harden determination of the depth of penetration of water under pressure. 1991.
13. Annual Book of ASTM Standards. ASTM C157. Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete. 2017.

14. Annual Book of ASTM Standards. ASTM C490. Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete. 2017.
15. Annual Book of ASTM Standards. ASTM C845. Standard specification for expansive hydraulic cement. 2018.
16. คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา. ความคงทนของคอนกรีต. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์; 2543.
17. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Manual for bridge maintenance. 1994.
18. V.Logeswaran, G.Ramakrishna. A study on compatibility of concrete repair materials. Xi'an University of Architecture & Technology. 2020;12(6):1123-43.
19. วันชัย ยอดสุดใจ. การเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก : การวิบัติ การประเมิน การป้องกันและการฟื้นฟูสภาพ. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา; 2561.
20. ปริญญา จินดาประเสริฐ. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 3 (ฉบับปรับปรุง). กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย ส.ค.ท.; 2549.
21. วินิต ช่อวิเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา 2544.
22. ชัชวาลย์ เศรษฐบุตตร. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด, ศูนย์วิชาการคอนกรีต; 2543.
23. ศุภชัย สีนถาวร. คอนกรีตเทคโนโลยี วัสดุ 251 : เอกสารประกอบการสอน. นครนายก: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา 2553.
24. American Concrete Institute. ACI 318-19. Building code requirements for structural concrete. 2019.
25. Tomosawa F, Noguchi T. Relationship between compressive strength and modulus of elasticity of high-strength concrete. Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ). 1995;60.

26. นิพนธ์ เนยเมืองปักษ์. การพัฒนาซีเมนต์มอร์ตาร์เพื่อใช้ซ่อมโครงสร้างคอนกรีตโดยใช้สารลดน้ำพิเศษ. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2532.
27. บุรฉัตร ฉัตรวีระ, ณัฐรัฐ มากุล. ผลกระทบของขนาดผงหินปูนต่อสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมและเก้าแกลบ. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา. 2555;23(1):10-7.
28. สุวิมล สัจจวาณิชย์. คอนกรีตเทคโนโลยีขั้นสูง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา; 2561.
29. Slideshare [Internet]. San Francisco USA: SlideShare from Scribd; c2015. การทดสอบหาปริมาณส่วนผสมของคอนกรีต; 2015 [cited 2021 Jul 17]; [about 19 p.]. Available from: <https://www.slideshare.net/maprangkwunjai/party-1-present-c3-1>
30. Yang K, Nanukuttan S, McCarter WJ, Long A, Basheer M. Challenges and opportunities for assessing transport properties of high-performance concrete. Revista ALCONPAT. 2018;8(3):246 - 63.
31. กรมโยธาธิการและผังเมือง. มาตรฐานกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุใช้ในงาน (มยผ. 1101-52 ถึง 1106-52). 2552.
32. Annual Book of ASTM Standards. ASTM C928. Standard specification for packaged, dry, rapid-hardening cementitious materials for concrete repairs. 2013.
33. US Army Corps of Engineers. Standard practice for shotcrete. 1993.
34. American Concrete Institute. ACI Committee 506.2-95. Specification for shotcrete. 1995.
35. Lec trust relationship growth [Internet]. Henan China: Zhengzhou Lead Equipment Co.,Ltd.; c2019. The differences of dry-mix and wet-mix process shotcrete; 2019 [cited 2021 Jul 17]; [about 1 p.]. Available from: <https://www.leadcrete.com/news/dry-and-wet-mix-process-shotcrete.html>
36. Australian Shotcrete Society. Shotcreting in australia. Second edition. Australia: Concrete Institute of Australia; 2010.
37. Cabrera JG, Al-Hasan AS. Performance properties of concrete repair materials. Construction and Building Materials. 1997;11(5):283-90.
38. พงศกร เพชรประดับ, วิศรุต อุไรรัตน์, พุทธิภูมิ พงศภากรณ์, วสันต์ ธีระเจตกุล. การซ่อมแซมพื้นสะพานด้านบนของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีการปูทับ. โครงการงานวิศวกรรมศาสตร์

สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ; 2551.

39. Oliveira MJ, Ribeiro AB, Branco FG. Curing effect in the shrinkage of a lower strength self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2015;93:1206-15.
40. Wall JS, Shrive NG. Factors affecting bond between new and old concrete. *ACI MATERIALS JOURNAL*. 1988;80.
41. P. S. Mangat, F. J. O'Flaherty. Long-term performance of high-stiffness repairs in highway structures. *Magazine of Concrete Research*. 1999;51(5):325-39.
42. Annual Book of ASTM Standards. ASTM C150. Standard specification for portland cement. 2000.
43. Annual Book of ASTM Standards. ASTM C33. Standard specification for concrete aggregates. 2018.
44. กรมโยธาธิการและผังเมือง. มาตรฐานงานคอนกรีตและงานคอนกรีตเสริมเหล็ก (มยผ.1101-52). 2552.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ภัทรพล ไพจิตรวิจารณ์
วัน เดือน ปี เกิด	6 กรกฎาคม 2535
สถานที่เกิด	จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
วุฒิการศึกษา	วศ.บ.วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	111/108 ต.เขาน้อย อ.ปราณบุรี จ.ประจวบคีรีขันธ์
ผลงานตีพิมพ์	Bongkodsupapa, K., Paijitvijarn, P., Duangkaeo, C., Sinthaworn, S., & Teerajetkul, W. (2016, 28-30 June 2016). Experimental Investigation of The Effect of Aggregate Type Properties of Concrete Paper presented at the In Proceedings of the 21th National Convention on Civil Engineering (NCCE21), Songkhla, Thailand, 7 p. Sinthaworn, S., Pinpradub, T., Kongpukdee, K., Jaroenmit, S., Paijitvijarn, P., & Bongkodsupapa, K. (2017). Experimental and Analytical Study on Deflections of Steel Bridge: Effect of Member and Joint Stiffness. Rangsit University Journal of Engineering and Technology (RSUJET), 20(1), 9-16. Paijitvijarn, P., & Sinthaworn, S. (2019, 20-21 March 2019). Effect of Curing Method on Shrinkage of Shotcrete Mortar Specimen Paper presented at the In Proceedings of The 12th Srinakharinwirot University Research Conference 2019, Bangkok, Thailand, 12 p. Paijitvijarn, P., & Sinthaworn, S. (2020, 25-26 March 2020). Properties of Repair Mortar and Compatibility of Concrete Surface Repair Paper presented at the In Proceedings of The 13th Srinakharinwirot University Research Conference 2020, Bangkok, Thailand, 12 p.