

การนำความร้อนของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมน้ำยางพารา



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2560

การนำความร้อนของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมน้ำยาพารา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงงาน

(ศ.ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน)

(ดร.อภิชาติ สุกดีพงษ์)

กรรมการ

(ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์)

กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชยพล มุลาดี : การนำความร้อนของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมน้ำยางพารา (THERMAL CONDUCTIVITY OF CONCENTRATED LATEX MIXED CEMENT MORTAR)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำยางพาราต่อกำลังอัด ค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่ผสมยางพารา ใช้อัตราส่วนน้ำยางพาราต่อปริมาณน้ำร้อยละ 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 และ 4.0 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.5 และ 0.6 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดและการทดสอบค่าการนำความร้อนที่อายุบ่ม 28 วัน และวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) เพื่อดูโครงสร้างของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมน้ำยางพาราที่อายุ 28 วัน ผลที่ได้พบว่า กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมน้ำยางพาราทุกตัวอย่างให้กำลังอัดสูงกว่าค่ามาตรฐานอุตสาหกรรมประเภทมอร์ตาร์งานปูนฉาบและงานปูนฉาบผนังก่ออิฐ อย่างไรก็ตาม ค่าการไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมน้ำยางพาราที่ผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรม พบที่ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำยางพาราต่อปริมาณน้ำร้อยละ 4.0 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.5 ซีเมนต์มอร์ตาร์มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนลดลงเมื่อปริมาณน้ำยางพาราเพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้น้ำยางพาราเข้มข้นสำหรับผสมในซีเมนต์มอร์ตาร์สำหรับงานฉาบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านการใช้งานเพื่อเป็นฉนวนกันความร้อน

CHAYAPON MULALEE : THERMAL CONDUCTIVITY OF
CONCENTRATED LATEX MIXED CEMENT MORTAR.

ADVISOR : ASSOC. PROF. AVIRUT CHINKULKIJNIWAT, Ph.D.

This study aims to investigate the effect of concentrated latex on the compressive strength and thermal conductivity of concentrated latex mixed cement mortar. Concentrated latex/water ratios were 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 and 4.0% by weight and water/cement ratios were 0.5 and 0.6 by weight. After 28 days of curing, compressive strength and thermal conductivity were investigated. Scanning electron microscope (SEM) was used for microstructure analysis between standard and latex mixed cement mortar. The results show that compressive strength of all the samples met the specified requirement of dry mortar plastering of Thai Industrial Standard Institute (TISI). However, flow value of only latex/water = 4.0% and water/cement ratio = 0.5 sample met the TISI requirement. The thermal conductivity of latex mixed cement mortar decreases as latex/water ratios increases. The outcome of this work therefore, identifies and indicates the level of efficiency and importance of using appropriate quantity of concentrated latex in the modification process of dry mortar plastering, especially in the fields of thermal protection.

School of Construction and Infrastructure Management Student's Signature_____

Academic Year 2017

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการที่ปรึกษาโครงการมหาวิทยาลัย ที่ได้ทุ่มเทเวลา อบรมพร่ำสอนทั้งด้านคุณวุฒิและคุณธรรม ซึ่งแนวทางในการศึกษาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นทางด้านวัสดุที่ใช้ทดสอบ การเตรียมการทดสอบ วิธีการทดสอบ รวมถึงการสรุปและการจัดทำเอกสารจนเป็นโครงการมหาวิทยาลัยฉบับนี้ ตลอดจนการสนับสนุนในด้านต่าง ๆ จนโครงการมหาวิทยาลัยครั้งนี้สำเร็จไปด้วยดี ซึ่งผู้เขียนมีความซาบซึ้งใจเป็นอย่างดี นอกจากนี้ผู้เขียนยังขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ และ ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์ กรรมการที่ปรึกษาร่วมโครงการมหาวิทยาลัย ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ รวมถึงความกรุณาที่ให้กับผู้เขียนมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) และเจ้าหน้าที่ ที่ได้เอื้อเฟื้อเครื่องมือ Scanning Electron Microscope และคำแนะนำด้านวิชาการต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์กับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีประจำห้องปฏิบัติการคอนกรีตและเทคโนโลยี และห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์เครื่องมือในการทดสอบ รวมถึงเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดสอบตลอดระยะเวลาในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้

ผู้เขียนขอโน้มรำลึกในพระคุณของคุณพ่อ คุณแม่ที่ได้อบรมสั่งสอน ปลูกฝังจิตใจของผู้เขียนได้ฝึกฝนในการศึกษา รวมถึง เพื่อน พี่ น้อง ที่ให้กำลังใจอันยิ่งใหญ่แก่ผู้เขียนเสมอมา

ผู้เขียนสำนึกในคุณค่าของตำราของคณาจารย์ทุกท่านที่นำมากล่าวอ้างไว้ด้วยความเคารพอย่างสูงความอนุเคราะห์จากทุกท่านที่ได้กล่าวมาและไม่ได้กล่าวมาในครั้งนี้ ยังคงจารึกไว้ในใจของผู้เขียนและโน้มรำลึกไว้ตลอดไป

ชยพล มุลาดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาของปัญหาและความสำคัญของการศึกษา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	2
2 ปรัชณั้วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ปรัชณั้วรรณกรรม.....	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2.1 ปูนซีเมนต์.....	4
2.2.2 ประเภทของปูนซีเมนต์.....	5
2.2.3 มวลรวม.....	8
2.2.4 สารผสมเพิ่ม.....	9
2.2.5 น้ำ.....	11
2.2.6 คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต.....	12
2.2.7 ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต.....	20
2.2.8 คุณสมบัติของน้ำยางธรรมชาติ.....	21
2.2.9 การนำความร้อน (Thermal conductivity, k).....	25
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	30
3.1 การหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุ.....	30
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	30

4	ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล.....	31
4.1	คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ทดสอบ.....	31
4.1.1	ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์.....	31
4.1.2	คุณสมบัติของทราย.....	32
4.2	การทดสอบค่าการไหลแผ่ (Flow ability).....	32
4.3	การหลอมอร์ต้าร์ลงแบบ.....	33
4.4	การทดสอบหาค่าลึงอัด.....	34
4.5	การทดสอบค่าการนำความร้อน.....	36
4.6	การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมน้ำยางพารา.....	36
5	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	39
5.1	สรุปผลการศึกษา.....	39
5.1.1	กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมน้ำยางพารา.....	39
5.1.2	ค่าการไหลแผ่ (Flowability).....	39
5.1.3	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน.....	39
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	40
	เอกสารอ้างอิง.....	41
	ภาคผนวก ก.....	42
	ภาคผนวก ข.....	54
	ประวัติผู้เขียน.....	60

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณของสารอนินทรีย์ในน้ำผสมคอนกรีต.....	12
2.2 ปริมาณคลอไรด์ ซัลเฟต และค่า pH ของน้ำทะเลอ่าวไทย.....	12
2.3 เกณฑ์ทดสอบน้ำสำหรับผสมคอนกรีตตาม ASTM C 94.....	12
4.1 ค่าการไหลแผ่ (Flow ability) ของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมน้ำยางพารา.....	33
ก.1 ส่วนผสมและกำลังอัด W/C เท่ากับ 0.5.....	43
ก.2 ส่วนผสมและกำลังอัด W/C เท่ากับ 0.6.....	44
ก.3 ค่าการไหลแผ่ (Flowability) ของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมน้ำยางพารา.....	46
ก.4 ค่าการยวบตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่ W/C เท่ากับ 0.5 P 2 %.....	46
ก.5 ค่าการยวบตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่ W/C เท่ากับ 0.5 P 3 %.....	47
ก.6 ค่าการยวบตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่ W/C เท่ากับ 0.5 P 4 %.....	49
ก.7 ค่าการยวบตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่ W/C 0.6 เท่ากับ P 2 %.....	50
ก.8 ค่าการยวบตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่ W/C เท่ากับ 0.6 P 3 %.....	51
ก.9 ค่าการยวบตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่ W/C เท่ากับ 0.6 P 4 %.....	52
ก.10 ค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานความร้อน.....	52

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดกับความเครียดกดอัดของคอนกรีต.....	13
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต.....	15
2.3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตามชนิดและอายุของคอนกรีต.....	17
2.4 กำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆระหว่างการบ่ม.....	17
2.5 วิธีการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต.....	19
2.6 โครงสร้างของน้ำยางธรรมชาติ.....	22
2.7 ขั้นตอนการก่อตัวของชั้นฟิล์มจากน้ำยางในคอนกรีต.....	25
2.8 ส่วนประกอบของเครื่อง Heat flow meter.....	27
2.9 ช่วงของเครื่องมือที่เหมาะสมในการวัดค่าสภาพการนำความร้อน.....	28
2.10 เปรียบเทียบค่า thermal conductivity ที่วัดจากวิธี GHP และ HFM.....	29
4.1 ขั้นตอนการคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์.....	32
4.2 (ก) ตัวอย่างก่อนทำการบ่มขึ้น (ข) นำตัวอย่างบ่มขึ้น.....	34
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ารับแรงกดและการยุบตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่มีค่า W/C เท่ากับ 0.5 และ 0.6.....	35
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาตรยาง.....	35
4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) W/C เท่ากับ 0.5 และ 0.6.....	36
4.6 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่พบในตัวอย่างทดสอบ.....	37
4.6 (ต่อ) ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่พบในตัวอย่างทดสอบ.....	38

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของปัญหาและความสำคัญของการศึกษา

วัสดุคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโยธา การคิดค้นและหาแนวทางในการนำวัสดุธรรมชาติมาเป็นส่วนผสมในคอนกรีตเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมจึงมีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย เกษตรกรปลูกกันอย่างแพร่หลายทั่วทุกภาค ซึ่งปัจจุบันยางพาราล้นตลาดและราคาตกต่ำ ยางพารามีคุณสมบัติยืดหยุ่นและเหนียวคล้ายกาวเหมือนซีเมนต์เพสต์ (cement paste) การนำน้ำยางพารามาประยุกต์ใช้กับงานคอนกรีตจึงเป็นทางเลือกที่ดีต่องานวิศวกรรมโยธา ในด้านการต้านทานแรงกระทำซ้ำ และการทนความร้อน

ยางเป็นโพลิเมอร์ชนิดหนึ่ง ที่มีสมบัติเด่นหลายประการที่วัสดุอื่น ไม่สามารถเทียบเคียงได้ โดยเฉพาะสมบัติความยืดหยุ่น (elasticity) คือ เมื่อให้แรงดึง ยางจะสามารถยืดตัวได้หลายเท่าของความยาวเดิม และเมื่อปล่อยแรงออก ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและความยาวเดิม นอกจากนี้ยางยังมีสมบัติเด่นอื่นๆ อีก เช่น ความเหนียว (toughness) และความทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) ความต้านทานการซึมผ่านของน้ำและอากาศได้ และความสามารถในการยึดติดกับวัสดุอื่น เช่น โลหะและสิ่งทอ ทำให้สามารถนำไปใช้ในงานวิศวกรรมได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น (บทความจาก เทคโนโลยีสารสนเทศ เพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย : กันยายน 2556)

การศึกษาปริมาณน้ำยางพาราที่เหมาะสมสำหรับการผสมคอนกรีตและทดสอบการนำความร้อน ทำให้สามารถทราบอัตราส่วนและความต้านทานความร้อนของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา ซึ่งผลที่ได้จะเป็นแนวทางในการพัฒนาคอนกรีตและเป็นทางเลือกใหม่ในงานวิศวกรรมโยธา อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่ายางพาราในประเทศอีกด้วยจาก ประเด็นข้างต้นผู้วิจัยจึงจะ ศึกษาอิทธิพลของน้ำยางพาราที่เหมาะสมคอนกรีตและต่อกำลังรับแรงอัด และของความทนทานความร้อน

ดังนั้น การวิจัยในครั้งนี้ จึงเลือกยางพารา (น้ำยางพาราตามมาตรฐานเอสพีลด์คอนกรีตปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ ทล.-416/2556) นำมาผสมกับคอนกรีต ซึ่งผลที่ได้จะเป็นแนวทางในการพัฒนาคอนกรีตและเป็นทางเลือกใหม่ในงานวิศวกรรมโยธา อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่ายางพาราในประเทศอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำยางพาราต่อกำลังอัด
- 1.2.2 ศึกษาค่าการนำความร้อนของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมน้ำยางพารา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาคุณสมบัติของยางพาราและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.3.2 กำหนดให้ใช้น้ำยางพารา โดยการคำนวณเพื่อแปรปริมาณจะอยู่บนฐานของค่า ร้อยละ TSC (Total Solid Content) เป็นหลัก แล้วผสมกับมอร์ตาร์สัดส่วน ร้อยละ 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 และ 4.0 โดยใช้น้ำหนักน้ำ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I
- 1.3.3 น้ำยางพาราผสมสารผสมเพิ่ม (NR-Preblend) สำหรับงานดินซีเมนต์ น้ำยางข้น (Concentrated Latex) ผสมกับสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ณ โรงงานผสม เพื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติบางประการของน้ำยางพารา โดยทำหน้าที่ช่วยป้องกันไม่ให้อนุภาคของยางพาราจับตัวกันก่อนที่จะทำการผสมกับวัสดุมวลรวมได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ เพื่อใช้สำหรับงานดินซีเมนต์ผสมยางพารา
- 1.3.4 เมื่อผสมมอร์ตาร์ตามที่กำหนดแล้ว ทำการทดสอบการยุบไหลแผ่และหล่อเข้าแบบมาตรฐาน (รูปลูกบาศก์และรูปทรงกระบอก) ทำการบ่มขึ้นเป็นเวลา 7 วัน ทุกตัวอย่าง จากนั้นบ่มแห้งในอากาศต่อ กำหนดให้บ่มในอากาศเพิ่มเป็นเวลา 28 วันตามลำดับ แล้วทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดและค่าการนำความร้อน เปรียบเทียบกับตัวอย่างมาตรฐานที่ไม่ผสมกับน้ำยางพาราด้วย

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1.3.1 ทราบคุณสมบัติการรับแรงเมื่อผสมน้ำยางพารา ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน
- 1.3.2 ทราบค่าการนำความร้อนของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ปริมาณน้ำยางพาราค่าต่างๆ

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปรีทัศน์วรรณกรรม

Neville and Brooks (1990) ได้ทำการศึกษา คอนกรีตผสมน้ำยางพารา มีชื่อเรียกเฉพาะว่า “Latex Modified Concrete” หรือ “LMC” คอนกรีตที่ผสมน้ำยางเข้าไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับ คอนกรีตทั่วไปพบว่า คอนกรีตที่ผสมน้ำยางพาราสามารถรับแรงดึงได้สูงขึ้น น้ำซึมผ่านได้ยาก มีความทนทานต่อการกัดกร่อนโดนสารเคมีได้ดี สามารถยึดเกาะกับคอนกรีตเก่าที่แข็งตัวและได้ดี เหมาะกับงานซ่อมแซม น้ำยางที่ใช้ผสมจะไม่เป็นพิษกับมนุษย์และไม่ติดไฟ

สิทธิชัย สิริพันธุ์ และคณะ (2547) พบว่า น้ำยางผสมกับคอนกรีตได้ด้วยการผสมสารลดแรงดึงผิว ชนิดไม่มีประจุ (Nonionic Surfactants) สัดส่วนร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของซีเมนต์โดยเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ Lutensol[®] XL 80 (C10 – Guerbet Alcohol Alkoxylylate) ทั้งนี้สารแอมโมเนียเหลว (NH₃) ที่ผสมในน้ำยาง ไม่ทำให้กำลังคอนกรีต ลดลงด้านความสามารถพบว่ามีคอนกรีตผสมน้ำยาง จะยุบตัวแบบสวบ (Collapse Slump) ทั้งหมด ขณะที่คอนกรีตปกติจะมีการยุบตัวที่ 7 เซนติเมตร ในด้านกำลัง พบว่า คอนกรีตผสมน้ำยาง จะมีกำลังรับ แรงอัดลดลงประมาณร้อยละ 60 และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต มีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณน้ำยางเพิ่ม ขึ้น โดยลักษณะการวิบัติของคอนกรีตที่มีปริมาณน้ำยางสูง จะมีเส้นขนาดเล็ก (Micro Fibers) สีขาว ยึดรั้งไว้สำหรับกำลังรับแรงอัดพบว่าลดลงประมาณร้อยละ 10 ในแต่ละ ค่า P/C ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อระยะเวลา การบ่มแห้งในอากาศเพิ่มเป็น 14 และ 28 วัน ที่ P/C = 0.15 และ 0.20 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะสูง ขึ้นมากกว่าคอนกรีตปกติเนื่องจากอนุภาคน้ำยางเกาะตัวกันเป็นชั้นฟิล์ม (Film) ที่แข็งแรงขึ้น

ธีระศักดิ์ เขียวรัตน์ และคณะ (2018) บททความการใช้ประโยชน์จากการรวมคอนกรีต รีไซเคิล (RCA) การศึกษาโพลีไวนิล แอลกอฮอล์ (PVA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ละลายน้ำได้ถูกนำมาใช้ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงรับแรงดึงของคอนกรีต RCA การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วน PVA ต่อซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ออัตราส่วนกำลังรับแรงอัดและแรงดึงของคอนกรีต RCA – PVR ได้ผ่านการตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าฟิล์มโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ทำให้กระบวนการ hydration process ทำให้กระบวนการ hydration ล่าช้าส่งผลให้ความล่าช้าในการเริ่มต้นและครั้งสุดท้ายในการบ่มซีเมนต์ - PVA ทำให้ลดแรงอัดของคอนกรีต RCA - PVA สำหรับอัตราส่วนทั้งหมดที่วัดได้กำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน P/C เพิ่มขึ้นจนถึงอัตราส่วน P/C ที่เหมาะสมซึ่งให้ความแข็งแรงรับแรงดึงสูงสุดตามด้วยการลดลงภายหลังค่าที่ได้นี้ อัตราส่วนของค่า P/C ที่เหมาะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

เมื่ออัตราส่วน W/C เพิ่มขึ้น 0.5, 0.5, 1.0 และ 1.5 สำหรับอัตราส่วน W/C เท่ากับ 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 ตามลำดับ ขึ้นอยู่กับความต้องการของกรมทางหลวงประเทศไทย $P/C \leq 1$ ที่ $W/C \leq 0.5$ พบว่าเหมาะสำหรับการพัฒนาคอนกรีต RCA-PVA สำหรับทางเดินแบบแข็ง ผลของการวิจัยนี้ยืนยันความเป็นไปได้ในการใช้ PVA เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงรับแรงดัดของคอนกรีต RCA เพื่อใช้เป็นวัสดุทางเดินแบบแข็งแบบยั่งยืน

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ปูนซีเมนต์ (Cement)

เป็นสารเคมีหรือวัสดุเซรามิกส์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีเกิด การรวมตัวกันระหว่างอนุภาคเกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่พบคือปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) หรือซีเมนต์อาจหมายถึงสารที่สามารถยึดหรือประสานของแข็งให้เกิดเป็น ขึ้นเดียวกันกลุ่มของวัสดุที่มีสมบัติเหมือนซีเมนต์ที่สำคัญ มี 3 กลุ่มคือ ปูนซีเมนต์ ปูน - ปลาสเตอร์ และปูนขาว (อนันตภักดิ์ โชตมมงคล, 2538, หน้า 55) โดยปูนซีเมนต์เป็นกลุ่มที่สำคัญมากในการนำไปใช้งานด้านการก่อสร้างที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานปูนซีเมนต์ที่ใช้งานทั่วไปได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเกิดจากการเผาส่วนผสมจากวัตถุดิบต่าง ๆ ได้แก่ หินปูน (limestone) หรือหินปูนขาว (marl) กับดินเหนียว (clay) หรือดินดาน (shale) ในสัดส่วนที่ถูกต้องเหมาะสม อาจมีการเติมแร่เหล็ก (iron ore) หรือยิปซัม (gypsum) ตามความจำเป็นเพื่อปรับปรุงให้มีสมบัติตามความต้องการ เมื่อนำปูนซีเมนต์ผสมกับวัสดุผสม กละจำพวกหินย่อย กรวด หรือทรายหยาบ และน้ำ ในสัดส่วนที่เหมาะสมจะเป็นคอนกรีต ซึ่ง เมื่อแข็งตัวแล้วจะมีความแข็งแรงและความทนทานคล้ายหิน จึงนิยมนำไปใช้ในงานก่อสร้าง ประเภทต่าง ๆ หรือเมื่อผสมกับทรายและปูนขาวก็จะเป็นปูนก่อหรือปูนฉาบที่ใช้กับงานก่ออิฐ หรือก่อคอนกรีตบล็อก (cement block) ซึ่งซีเมนต์จะมีสภาพเป็นก้อนแข็งภายในเวลา 2 – 3 ชั่วโมงหลังผสมกับน้ำ การแข็งตัวนี้จะค่อยๆ เป็นไปเรื่อยๆ จนซีเมนต์แข็งเหมือนหินระยะแรกที่ซีเมนต์เริ่มแข็งตัวเรียกว่าระยะก่อตัว (setting) และซีเมนต์จะค่อยๆ เปลี่ยนไปจนแข็งตัว (hardwork) ซีเมนต์ที่มีคุณภาพดีจะมีการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตรไม่มากนักเมื่อแข็งตัว ซีเมนต์ที่แข็งตัวอยู่ในน้ำจะมีการขยายตัวเล็กน้อย ในทางตรงข้ามหากปล่อยให้ซีเมนต์แข็งตัวในที่แห้ง จะหดตัว การหดตัวนี้จะทำให้เกิดแรงเค้นดึงในคอนกรีตซึ่งอาจทำให้คอนกรีตร้าว ในกรณีที่ใช้ ส่วนผสมที่ไม่เหมาะสมหรือในงานที่มีพื้นที่กว้างใหญ่เกินไปจะสังเกตได้จากการทำพื้นคอนกรีตเช่น ถนนคอนกรีต มักจะแบ่งเป็นช่วง ๆ และรอยต่อระหว่างช่วงจะอัดด้วยยางมะตอยเพื่อป้องกันการหดตัวและขยายตัวของคอนกรีตนั่นเอง ความแตกต่างของซีเมนต์แต่ละชนิดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนในการผสม ส่วนสีของซีเมนต์ ขึ้นอยู่กับปริมาณของแร่เหล็ก (Fe_2O_3) ที่ใช้ในส่วนผสม

ซีเมนต์ที่มีแร่เหล็กผสมอยู่มากจะมีสีเข้ม ถ้ามีน้อยจะมีสีอ่อน ทั้งนี้จากกรรมวิธีการผลิตอาจจะทำให้สีของซีเมนต์เปลี่ยนไปได้บ้างเล็กน้อย แร่เหล็กในซีเมนต์ส่วนมากเป็นส่วนผสมที่อยู่ในวัตถุดิบ ไม่ได้ตั้งใจใส่ลงไปเพื่อให้มีสี ยกเว้นซีเมนต์ชนิดที่ต้องการเน้นสีเป็นพิเศษ เช่น พวกโอโรนอร์ซีเมนต์ (iron ore cement) เป็นซีเมนต์ที่ใช้แร่เหล็กแทนบางส่วนของดินประมาณ ร้อยละ 8 ทำให้เกิดเป็นสีน้ำตาลและซีเมนต์บางชนิดที่ต้องการสมบัติเป็นพิเศษ เช่น เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของสารเคมีเป็นต้นแต่โดยภาพรวมแล้วซีเมนต์ที่ที่จะต้องมียสมบัติดังนี้ (เกลียว โพธิ์พรุฬห์, ม.ป.ป., หน้า 33 – 34)

ในปี ค.ศ. 1824 (พ.ศ. 2367) โจเซฟแอสปดิน (Joseph Aspdin) ได้รับสิทธิบัตรสำหรับการผลิตปูนซีเมนต์ (improve cement) โดยการเผาส่วนผสมของหินปูนและดินเหนียว แล้วนำมาบดให้เป็นผงละเอียด โจเซฟ เรียกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) เพราะปูนซีเมนต์ชนิดนี้เมื่อแข็งตัวแล้วสีจะเป็นสีเหลืองปนเทา มีลักษณะคล้ายก้อนหินที่พบในเหมืองต่าง ๆ บนเกาะเล็ก ๆ ของเมืองปอร์ตแลนด์ (Portland) ประเทศอังกฤษ ดังนั้นนาย โจเซฟ แอสปดิน จึงเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าเป็นบิดาของอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ต – แลนด์และปูนซีเมนต์ชนิดนี้เองที่ใช้มากที่สุดในปัจจุบัน

ปีค.ศ. 1905 (พ.ศ. 2447) มีการจัดตั้งสมาคมควบคุมคุณภาพขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing Material, ASTM) และได้มีการวิวัฒนาการด้านการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จนถึงปัจจุบัน โดยอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ของไทยได้เริ่มก่อตั้ง ขึ้นครั้งแรกเมื่อวันที่ 8 ธันวาคม พ.ศ. 2456 โดยพระราชดำริและพระราชประสงค์ของพระบาทสมเด็จพระมงกุฎเกล้าเจ้าอยู่หัว ทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ ให้เจ้าพระยาหม่อมราช (ปั้น สุขุม) เป็นผู้ดำเนินการจัดตั้งโรงงานขึ้นที่บางซื่อ ซึ่งเป็นที่มาของบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ปัจจุบัน โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทยมีอยู่หลายแห่ง เช่นที่อำเภอท่าหลวงและอำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ที่อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่อำเภอตาคลี จังหวัดนครสวรรค์ ที่อำเภอชะอำ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เป็นต้น

2.2.2 ประเภทของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์แบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 3 ประเภท ได้แก่ ปูนซีเมนต์ธรรมดา ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ชนิดอื่นๆ โดยปูนซีเมนต์แต่ละชนิดมีลักษณะสมบัติและความเหมาะสมต่อการใช้งานตามรายละเอียดดังต่อไปนี้ (ประณต กุลประสูตร, 2536, หน้า 27 – 30; สุรศักดิ์ โกสียพันธ์, ม.ป.ป., หน้า 9 – 20; Banerjee, 1980, pp. 2 – 7)

2.2.2.1 ปูนซีเมนต์ธรรมชาติ

ปูนซีเมนต์ธรรมชาติเป็นปูนซีเมนต์ที่ได้จากการเผาซีเมนต์ธรรมชาติหรือ หินซีเมนต์ (cement rock) โดยตรง ผลิตโดยนำหินปูนซีเมนต์ไปเผาให้ใกล้ถึงจุดหลอม (sintering) และ นำไปบดให้ละเอียด ซีเมนต์ชนิดนี้สามารถแข็งตัวได้เร็วมากโดยเฉพาะในน้ำ จึงไม่เหมาะที่จะใช้ทำงานคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่เหมาะที่จะใช้ทำงานคอนกรีตล้วน เช่น สร้างทำนบ ฐานราก เป็นต้น ซีเมนต์ชนิดนี้เดิมมีการผลิตกันในประเทศสหรัฐอเมริกา แต่ในปัจจุบันไม่นิยมผลิตจะมีบ้างที่เป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กย้อมเท่านั้นเนื่องจากไม่ค่อยนิยมใช้เพราะมีสมบัติไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับสมบัติของหินซีเมนต์

2.2.2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นซีเมนต์ที่ใช้กันแพร่หลายมาก ที่มีชื่อเรียกเช่นนี้ เพราะทำขึ้น ได้ก่อน ณ เมืองปอร์ตแลนด์ ประเทศอังกฤษ ซีเมนต์ชนิดนี้มีสารประกอบรวมกันอยู่หลายชนิด แต่มีสารประกอบพื้นฐาน 4 ชนิดคือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (tricalcium silicate, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) แทนด้วยสัญลักษณ์ C_3S , ไดแคลเซียมซิลิเกต (dicalcium silicate, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) แทนด้วยสัญลักษณ์ C_2S , ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (tricalcium aluminate, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) แทนด้วยสัญลักษณ์ C_3A , เตตระแคลเซียมเฟอร์โรอะลูมิเนต (tetracalcium ferro aluminate, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) แทนด้วยสัญลักษณ์ C_4AF

สัญลักษณ์ที่ใช้แทนสารประกอบดังกล่าวนี้ถูกกำหนดขึ้นโดยสมาคมซีเมนต์ (Cement Association) ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ผลิตมีสองสีคือสีเทาและสีขาว สีเทาเกิดจากสารพวกเหล็ก และแมงกานีสออกไซด์ ถ้ามีสารทั้งสองชนิดนี้มากจะมีสีเข้ม สำหรับสีขาวหรือซีเมนต์ขาว (white Portland cement) จะมีเหล็กออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 0.5 และแมงกานีสออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 0.02 จำนวนร้อยละของสารประกอบแต่ละชนิดที่เป็นสารประกอบพื้นฐานนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามแต่ละชนิดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่จำแนกตามมาตรฐานของสมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (ASTM) เป็น 4 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์รหัส ซี – 150 (C – 150 Portland cement)
ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้เป็นปูนซีเมนต์ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปมากที่สุดในปัจจุบัน จำแนกออกได้ เป็น 5 ประเภทคือ
2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Type – 1 normal Portland cement)
หรือ standard Portland cement หรือ ordinary Portland cement หรือ OPC จัดเป็นปูนซีเมนต์มาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างทั่วไปที่ไม่ต้องการสมบัติ พิเศษนอกเหนือไปกว่าธรรมดา ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้กับงานคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น งานก่อสร้าง คานคอนกรีต

ทางเท้า ถนนอาคาร สะพาน ถังน้ำ บ่อน้ำ ท่อระบายน้ำ และอื่นๆ ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ไม่เหมาะกับการใช้งานที่ต้องสัมผัสกับซัลเฟตจากดิน หรือน้ำและไม่ทนทานต่อปฏิกิริยาเคมี

3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Type – II modified Portland cement หรือ moderate heat Portland cement หรือ MHPC) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ดัดแปลงให้มีความต้านทานต่อซัลเฟตปานกลาง ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างปูน – ซีเมนต์กับน้ำจะต่ำกว่าและเพิ่มได้ช้ากว่าประเภทแรกดังนั้นจึงสามารถช่วยลดอุณหภูมิของคอนกรีตในอากาศร้อนได้ดี ปูนซีเมนต์ประเภทนี้เหมาะสมกับการใช้งานที่เป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น ตอม่อขนาดใหญ่ สะพานเทียบเรือ เขื่อน หรือกำแพงกันดินในบริเวณที่สัมผัสน้ำเค็มเป็นครั้งคราว
4. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดแรงสูงเร็ว (Type – III high – early strength Portland cement หรือ rapid hardening Portland cement หรือ RHC หรือ HESC) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้เนื้อปูนจะบดละเอียดกว่าปูนซีเมนต์แบบธรรมดาเป็นผลทำให้แข็งตัวและรับแรงได้เร็วกว่าแบบธรรมดาแต่จะต้องบ่มให้ดี โดยปกติจะสามารถรับแรงได้เมื่อคอนกรีตมีอายุเพียงประมาณ 1 ถึง 3 วัน จึงนิยมนำไปใช้กับงานเร่งด่วนที่ต้องทำแข่งกับเวลา หรือในกรณี ที่ต้องการถอดหรือรื้อแบบเร็วกว่าปกติ นอกจากนั้นยังนิยมนำไปใช้กับงานที่ จำเป็นต้องทำในช่วงอากาศหนาวเย็นเนื่องจากคอนกรีตจะแข็งตัวก่อนที่น้ำซึ่งใช้ผสมจะแข็งตัวเสียก่อนและขณะเกิดปฏิกิริยาจะมีความร้อนสูง (heat of hydration) เพราะความร้อนนี้เองจึง ไม่เหมาะสมกับการก่อสร้างที่มีขนาดใหญ่ (mass concrete)
5. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดความร้อนต่ำ (Type – IV low – heat Portland cement หรือ LHC) จัดเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เหมาะสมกับงานซึ่งต้องการควบคุมทั้งปริมาณและอัตราความร้อนให้เกิดขึ้นน้อยที่สุดการเกิดกำลัง (strength) ของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะต่ำไปอย่างช้าๆ จึงนิยมนำไปใช้กับงานขนาดใหญ่ เช่น เขื่อนกั้นน้ำ ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีตถ้ามากเกินไปจะเป็นอันตรายอย่างมากกับ ตัวเขื่อนเนื่องจากจะทำให้เกิดการแตกหรือร้าวได้

แต่ในระยะยาวความแข็งแรงของคอนกรีตจะมีเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาและทนทานต่อสารเคมีมากกว่า

6. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้านทานซัลเฟตได้สูง (Type-V Sulphateresistance Portland cement หรือ SRC) จัดเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีสมบัติในการต้านทานซัลเฟตได้สูงจึงเหมาะที่จะใช้กับงานก่อสร้างในบริเวณที่มีการสัมผัสกับซัลเฟตที่เข้มข้น เช่น ในบริเวณดินหรือน้ำที่มีความเป็นด่างสูง ระยะเวลาในการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ประเภทนี้ จะช้ากว่าประเภทอื่น ๆ ในการผสมไม่ควรใช้น้ำที่มีสารแคลเซียมคลอไรด์ (calcium chloride, CaCl_2) หรือเกลือเพราะจะทำให้คอนกรีตไม่ทนต่อซัลเฟต

2.2.3 มวลรวม (Aggregate)

มวลรวม คือ วัสดุที่ใช้สำหรับผสมกับซีเมนต์เพสต์ทำให้ผลผลิตที่ได้ออกมาเป็นคอนกรีต มวลรวมที่ใช้มากที่สุดคือ หิน และ ทรายคอนกรีตทั่วไปจะมีหินและทรายผสมอยู่ประมาณ 70%-80% ของปริมาตรคอนกรีต คุณภาพหินและทรายที่ใช้ต้องพิจารณาอย่างพิถีพิถันเนื่องจากจะมีผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเป็นอย่างมาก

2.2.3.1 ประเภทของมวลรวม

- แบ่งตามแหล่งกำเนิด จากธรรมชาติ (Natural Mineral Aggregate) เกิดจากขบวนการกัดกร่อนและเสียดสีตามธรรมชาติ ได้แก่ หินย่อย (Crushed Stone) กรวดแม่น้ำ (Pebble) และทราย (Sand) ที่มนุษย์ทำขึ้น (Artificial Aggregate) ได้แก่ ดินเหนียวเผา (Burnt Clay)
- แบ่งตามน้ำหนัก หน่วยมวลรวมน้ำหนักเบา (Light Weight Agg.) มวลรวมน้ำหนักปกติ (Normal Weight Agg.) มวลรวมน้ำหนักมาก (Heavy Weight Agg.) มวลรวมน้ำหนักเบา (Light Weight Agg.) ความหนาแน่น 300 - 1,100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น Diatomite, Pumice, Scoria, Volcanic Cinder, Tuff มีการเผาวัสดุธรรมชาติ จนขยายตัวเนื่องจากก๊าซที่ดันออกมา เช่น การเผาดินเหนียว (clay), ดินดาน (shale), หินชนวน

1) มวลรวมน้ำหนักปกติ (Normal Weight Aggregate)

ใช้ในการผลิตคอนกรีตสำหรับอาคารคอนกรีตทั่วไป ความหนาแน่น 1,500 – 1,800 กก/ม³ และความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.5 - 2.8 ได้แก่ หินปูน หินแกรนิต หินทราย ทรายบก ทรายแม่น้ำ

2) มวลรวมน้ำหนักมาก (Heavy Weight Aggregate)

ใช้ในการผลิตคอนกรีตสำหรับอาคารป้องกันการแพร่กระจายกัมมันตภาพรังสี เช่น เตาปฏิกรณ์ปรมาณู ใช้หินธรรมชาติและความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 4 ขึ้นไป เช่น Barite, Hematite, Magnetite, Limonite ความหนาแน่น 2,400 - 3,100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

- การแบ่งขนาดเม็ดของมวลรวม

1) มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate)

นิยมใช้ทั่วไปมีขนาด 10 มิลลิเมตร (3/8 นิ้ว) ถึง 25 มิลลิเมตร (1 นิ้ว) ส่วนใหญ่เป็นหินย่อย (Crushed Stone) ที่ได้จากการระเบิดภูเขาหิน แล้วนำไปย่อยให้เล็กลงตามขนาดที่ต้องการ

มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)

ขนาดเม็ดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร แต่มีขนาดใหญ่กว่า 0.074 มิลลิเมตร ที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ ทรายแม่น้ำ ทรายบก หรือทรายเหมืองที่ผ่านการล้างสะอาดแล้ววัสดุที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่า 0.074 มิลลิเมตร ที่อาจจะปนอยู่ในทราย แบ่งเป็น 2 ชนิด เช่น ดินตะกอน หรือ หินฝุ่น (Silt) ขนาดเม็ด 0.074 มิลลิเมตร - 0.002 มิลลิเมตร ดินเหนียว (Clay) ขนาดเม็ดเล็กกว่า 0.002 มิลลิเมตร

2.2.4 สารผสมเพิ่ม (Admixture)

สารผสมเพิ่ม หมายถึง สารเคมีอื่นๆ นอกเหนือไปจาก ปูนซีเมนต์ วัสดุมวลรวม และน้ำที่ใช้เติมลงในส่วนผสมของคอนกรีต ด้วยจุดประสงค์เพื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต สารผสมเพิ่มจะให้ผลแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ที่ใช้ ขนาด รูปร่าง และส่วนขนาดของวัสดุมวลรวม น้ำ และอุณหภูมิ ดังนั้น การใช้สารผสมเพิ่ม จึงควรได้ทราบถึงข้อมูล ตลอดจนข้อแนะนำในการใช้ของบริษัทผู้ผลิตโดยละเอียด นอกจากนี้สารผสมเพิ่มจะให้ผลดีต่อเมื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสม สารผสมเพิ่มที่นิยมใช้กันทั่วไปได้แก่

2.2.4.1 สารเร่งการก่อตัว (ACCELERATORS)

สารเร่งการก่อตัวจะทำให้คอนกรีต ก่อตัวและแข็งตัวเร็วขึ้นกว่าปกติ นอกจากนี้ผลพลอยได้ของการใช้สารเร่งการก่อตัว คือ จะทำให้คอนกรีตมีกำลังในระยะแรกสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยทั่วไปแล้ว สารเร่งการก่อตัวจะใช้เมื่อต้องการเร่งเวลาในการถอดแบบหล่อ หรือเมื่อต้องการให้คอนกรีตรับแรงได้เร็วกว่าปกติ เช่น การทำเสาเข็มธรรมดา และเสาคอนกรีตอัดแรง ใช้อุดรูรั่วในเนื้อคอนกรีตสารที่นิยมใช้เป็นตัวเร่งการก่อตัวคือ แคลเซียมคลอไรด์ และโซเดียมซิลิเกต เป็นต้น

2.2.4.2 สารหน่วงการก่อตัว (RETARDERS)

สารหน่วงการก่อตัว มีคุณสมบัติช่วยให้คอนกรีตก่อตัวช้ากว่าธรรมดา (เกินกว่า 1 ½ ชั่วโมง) ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ในกรณีที่ต้องเสียเวลาเคลื่อนย้ายคอนกรีตที่ผสมแล้วไปยังจุดเทที่อยู่ไกลๆ หรือในกรณีที่ต้องใช้เวลาในการเคลื่อนย้าย และการเทงานๆ ข้อเสียของการใช้สารหน่วงการก่อตัว คือจะทำให้กำลังคอนกรีตลดต่ำไปในช่วง 3 วันแรก แต่ผลพลอยได้คือ ช่วยลดปริมาณน้ำได้ประมาณร้อยละ 5 – 15 ซึ่งเป็นผลทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงในระยะเวลาหลัง และมีกำลังเท่ากับหรือสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาเมื่อ อายุ 28 วัน สารชนิดนี้ได้แก่ แคลเซียม หรือยิบซัม ซึ่งบริษัทผู้ผลิตปูนซีเมนต์ทั้งหลายก็ได้ใช้ปนอยู่แล้วในปูนซีเมนต์ที่ผลิต

2.2.4.3 สารลดปริมาณน้ำ (WATER REDUCING ADMIXTURE)

สารลดปริมาณน้ำ ช่วยลดปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในส่วนผสมคอนกรีต แต่ยังคงได้ความชื้นเหลวเทียบเท่ากับคอนกรีตธรรมดา เมื่อใช้น้ำในส่วนผสมคอนกรีตน้อยลง (อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยลง) จะมีผลในการเพิ่มกำลังของคอนกรีตสารชนิดนี้เป็นสารอินทรีย์ ส่วนใหญ่ทำมาจากเกลือลิกโนซัลโฟนิค (Lignosulfonic acid) หรือเกลือและสารประกอบของกรดไฮดรอกซีคาร์บอกซิลิก (Hydroxycarboxylic Acid) หรือสารประกอบโพลีเมอร์บางชนิด เช่น โพลีเมอร์ ไฮดรอกซีเลต (Hydroxylated Polymers)

2.2.4.4 สารป้องกันน้ำ (WATERPROOFING)

สารป้องกันน้ำจะทำให้คอนกรีตทึบน้ำ กันน้ำไม่ให้น้ำซึมผ่านได้ สารป้องกันน้ำจะเข้าไปแทรกอุดรูเล็กๆ ในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตทึบน้ำ ถ้าสามารถออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้พอดี และสามารถผสมคอนกรีตได้ตามที่ออกแบบ เมื่อนำคอนกรีตไปหล่อแล้วคอนกรีตจะแน่นทึบน้ำ แต่ในกรณีไม่สามารถทำได้ก็จำเป็นต้องใช้สารชนิดนี้ช่วย สารป้องกันน้ำมักจะใช้กับคอนกรีตที่ต้องกันน้ำซึมผ่านได้ เช่น โครงสร้างที่กั้นน้ำห้องใต้ดิน อุโมงค์ ระบายน้ำ หลังคา พื้นห้องน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้สารป้องกันน้ำยังสามารถนำมาใช้กับมอร์ต้า (ปูน+ทราย+น้ำ) ที่ใช้โบกกำแพง หรือเทพื้นเพื่อกันมิให้ความชื้นซึมเข้าไปได้ และป้องกันราขึ้น สารชนิดนี้เป็นพวกอัลคาไลน์ซิลิเกต (Alkaline Silicates) เช่น โซเดียมซิลิเกต หรืออลูมิเนียม และสังกะสีซัลเฟต (Zinc Sulphates)

2.2.4.5 สารกระจายกักฟองอากาศ (AIR-ENTRAINING ADMIXTURES)

สารกระจายกักฟองอากาศจะช่วยให้เกิดฟองอากาศเล็กๆ มองด้วยตาเปล่าไม่เห็น แต่ปนอยู่ทั่วเนื้อคอนกรีต โดยฟองเหล่านี้จะไม่ทะลุถึงกันได้ ในคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร อาจมีฟองอากาศเล็กๆ นี้ ประมาณ 3 – 6 % ของเนื้อคอนกรีตทั้งหมดโดยปริมาตร การที่ในเนื้อคอนกรีตมีฟองอากาศขนาดเล็กๆ เหล่านี้จะช่วยทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้มากขึ้น

แม้ว่าจะมีปริมาณน้ำน้อย ก็ตาม เพราะฟองอากาศเหล่านี้จะช่วยทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นแทนน้ำ นอกจากนี้ช่วยมิให้น้ำในคอนกรีตแข็งเป็นน้ำแข็ง ก่อนที่คอนกรีตจะก่อตัว ซึ่งเป็นประโยชน์ในการหล่อคอนกรีตในฤดูหนาว หรือในเมืองที่มีอากาศหนาวเย็นมากสารกระจายกักฟองอากาศยังช่วยลดการแยกตัว การสูญเสียน้ำ ไม่รั่วซึม รวมทั้งเพิ่มความต้านทานซัลเฟตด้วย ข้อเสียของการใช้สารนี้ก็คือ ทำให้คอนกรีตมีกำลังต่ำลง เนื่องจากคอนกรีตมีรูพรุนมาก และในการใช้เครื่องเขย่าคอนกรีตเพื่อทำให้คอนกรีตแน่นตัว ต้องระวังให้มากกว่าเดิมเพราะถ้าเขย่ามากเกินไป จะทำให้จำนวนฟองอากาศลดน้อยลงไปเกือบ 50 เปอร์เซ็นต์ สารกระจายกักฟองอากาศมีหลายชนิดซึ่งอาจทำมาจากยางไม้ ไขมัน น้ำมันสัตว์ – พืช นอกจากการใช้สารเคมีกระจายกักฟองอากาศมาผสมในคอนกรีตแล้ว ปัจจุบันยังมีคอนกรีตกระจายกักฟองอากาศ ซึ่งผลิตขึ้น โดยใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดกระจายกักฟองอากาศ (Air Entraining Cement) ซึ่งให้คุณสมบัติเช่นเดียวกันกับการเติมสารดังกล่าวมาแล้ว

2.2.5 น้ำ (Water)

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญยิ่งในการทำคอนกรีต น้ำในที่นี้อาจแบ่งได้ออกเป็น น้ำสำหรับผสมคอนกรีตให้มีความชื้นเหลวทำงานง่าย น้ำสำหรับบ่มคอนกรีตให้แข็งตัว และมีกำลังรับแรงได้ตามต้องการ น้ำสำหรับล้างวัสดุผสมที่จะใช้ผสมคอนกรีตให้สะอาด น้ำสำหรับผสมคอนกรีต (Mixing water) น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ต้องสะอาด มีความขุ่นไม่เกิน 2,000 ppm. (สวนในลาน) ปราศจาก กรด ด่าง น้ำมันและสารอินทรีย์อื่นๆ ในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีตหรือเหล็กเสริม โดยปกติน้ำประปาและน้ำจืดตามธรรมชาติส่วนใหญ่ซึ่งไม่มีส่วนผสมของน้ำทิ้งจากอาคาร บ้านเรือน หรือโรงงานอุตสาหกรรมถือว่ามีความปลอดภัยสำหรับงานคอนกรีต ในกรณีที่สงสัยให้ทำแท่งทดสอบโดยใช้น้ำที่สงสัยและเปรียบเทียบกับกำลังอัดแท่งทดสอบที่ทำจากน้ำที่มีคุณภาพดี น้ำที่ของน้ำสำหรับงานคอนกรีต มี 3 ประการ คือ

- 1) ใช้ล้างวัสดุมวลรวมต่างๆ
- 2) ใช้ผสมทำคอนกรีต
- 3) ใช้บ่มคอนกรีต

หน้าที่หลักของน้ำในฐานะที่ใช้ผสมทำคอนกรีตยังแบ่งได้อีก 2 ประการ

- 1) ก่อให้เกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์
- 2) ทำหน้าที่หล่อลื่นเพื่อให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวสามารถเทได้ เคลือบ หิน

ทราย ให้เปียกเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์จะสามารถเข้าเกาะได้โดยรอบ

ตารางที่ 2.1 ปริมาณของสารอนินทรีย์ในน้ำผสมคอนกรีต

สารอนินทรีย์	ปริมาณสูงสุด (ส่วนในล้าน)
คลอไรด์	500
ซัลเฟต	1000
อัลคาไลคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต	1000

ตารางที่ 2.2 ปริมาณคลอไรด์ ซัลเฟต และค่า pH ของน้ำทะเลอ่าวไทย (โดยประมาณ)

เกลือ	ส่วนต่อล้าน
คลอไรด์	18000
ซัลเฟต	2500
pH	8.0

ตารางที่ 2.3 เกณฑ์ทดสอบน้ำสำหรับผสมคอนกรีตตาม ASTM C 94

คุณสมบัติเปรียบเทียบกับส่วนควบคุม	เกณฑ์	วิธีการทดสอบ
กำลังอัดที่อายุ 7 วัน (ร้อยละ)	ไม่ต่ำกว่า 90	ASTM C109
การก่อตัว (ชั่วโมง, นาที)	เร็วขึ้นไม่เกิน 1 ชั่วโมง และช้าไม่เกิน 1 ชั่วโมง 30 นาที	ASTM C191

หมายเหตุ ส่วนผสมควบคุมใช้น้ำสะอาดหรือน้ำกลั่น

2.2.6 คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต

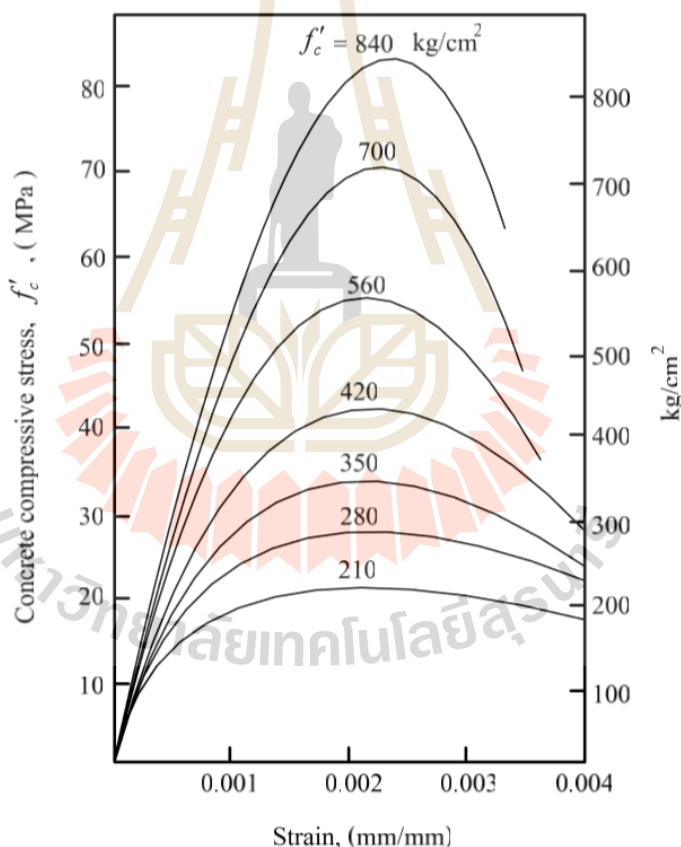
คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่สนใจในการศึกษา ได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงคดและโมดูลัสยืดหยุ่น

2.2.6.1 กำลังรับแรงอัด

คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดที่ต้องการของคอนกรีตเมื่อแข็งตัวแล้วคือ กำลังต้านทานแรงอัด (Compressive strength) เนื่องจากพบว่า กำลังต้านทานหรือแรงรับแบบอื่นของคอนกรีต เช่น กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงคด กำลังรับแรงเฉือน และกำลังยึดเหนี่ยว รวมทั้งความทนทานและการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ล้วนเป็นสัดส่วนเทียบได้กับกำลังรับแรงอัดคอนกรีต

ทั้งสิ้น ซึ่งหมายความว่า เมื่อคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูง กำลังรับแรงอย่างอื่นหรือความทนทานก็จะสูงตามไปด้วย

การทดสอบหากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตให้ปฏิบัติตามวิธีของ ASTM C39 โดยการกดหรืออัดแรงตามแนวแกนของแท่งทดสอบมาตรฐานอย่างช้าๆ ด้วยเครื่องทดสอบจนกระทั่งคอนกรีตถูกอัดแตก และเมื่อหารน้ำหนักกดอัดสูงสุดที่ได้ด้วยเนื้อที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่างที่รับแรงกระทำ จะเป็นค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุด (f'_c) ของแท่งคอนกรีตนั้น กำลังของคอนกรีตจะถือเป็นที่ยอมรับได้เมื่อผลเฉลี่ยกำลังอัดของการทดสอบ 3 ครั้งต่อเนื่องกันให้ค่าเท่ากับหรือมากกว่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุดที่กำหนด โดยที่กำลังอัดของการทดสอบแต่ละครั้ง อาจให้ค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุดได้ไม่เกิน $3.5 \text{ MPa (kg/cm}^2\text{)}$



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดกับความเครียดกดอัดของคอนกรีต (Wang,1992)

จากรูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับค่าความเครียดของแท่งคอนกรีตมาตรฐานที่มีกำลังรับแรงอัดต่างกัน เมื่อได้รับแรงกดอัดตามแนวแกนอย่างเดียว (uniaxial stress) จนกระทั่งคอนกรีตถูกอัดแตก จะเห็นได้ว่าจากจุดเริ่มต้นที่รับน้ำหนักจนถึง

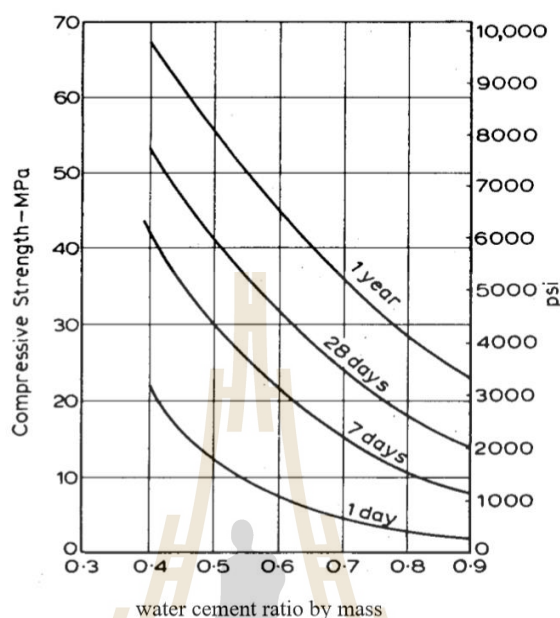
ระดับของหน่วยแรงอัดประมาณร้อยละ 40-50 ของกำลังแรงกดอัดสูงสุด ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นเส้นโค้งเล็กน้อยซึ่งดูเหมือนเป็นเส้นตรง อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติเมื่อคอนกรีตได้รับน้ำหนักอยู่ในช่วงใช้งานและกระทำในช่วงระยะเวลาสั้นๆ (short-time loading) มักจะสมมุติว่าคอนกรีตมีค่าความเครียดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงอัดที่กระทำ

เมื่อหน่วยแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นเส้นโค้งคล้ายพาราโบลาซึ่งพบว่าที่หน่วยแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตจะมีค่าความเครียด 0.002 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร และแท่งคอนกรีตยังสามารถต้านแรงอัดต่อไปได้ในขณะที่ความเครียดมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่หน่วยแรงอัดจะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งวิธีที่ค่าความเครียดสูงสุดประมาณ 0.003 – 0.004 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร (มาตรฐาน ว.ศ.ท.1008-38กำหนดให้ใช้ความเครียดสูงสุดของคอนกรีตเท่ากับ 0.003 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร) จากรูปตาราง 2.1 จะสังเกตได้ว่าคอนกรีตที่กำลังต้านทานแรงอัดสูง หน่วยแรงอัดจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเลยจากหน่วยแรงอัดสูงสุดไปแล้วแต่คอนกรีตที่มีกำลังแรงอัดต่ำกว่าหน่วยแรงอัดจะลดลงอย่างช้าๆและมีค่าความเครียดสูงสุดมากขึ้น แสดงว่าคอนกรีตที่มีกำลังต่ำกว่าจะมีความเหนียว (ductility) มากกว่าคอนกรีตที่มีกำลังสูง

ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด

1. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c)

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตส่วนใหญ่ จะถูกควบคุมโดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะลดรูพรุนของคอนกรีตที่แข็ง และช่วยเพิ่มความสามารถในการประสานกันของของแข็งในคอนกรีต ซึ่งโพรงอากาศที่เกิดในคอนกรีตจะลดกำลังของคอนกรีต เช่น $W/C = 0.45$ ที่อายุ 28 วัน จะมีกำลัง 27.59 – 34.48 เมกะปาสกาล (4,000 - 5,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) สำหรับคอนกรีตฟองอากาศ แต่จะมีกำลัง 34.48 ถึง 44.82 เมกะปาสกาล (5,000 - 6,500) เมื่อไม่มีฟองอากาศ และที่ $W/C = 0.65$ ที่อายุ 28 วันจะมีกำลัง 17.24 – 22.76 เมกะปาสกาล (2,500 – 3,300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และ 22.76 – 31.03 เมกะปาสกาล (3,300-4,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ตามลำดับ (MacGregor,1991) กำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงขึ้นดังแสดงรูปที่ 2.2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆกัน



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Neville, 1981)

2. ประเภทและลักษณะของซีเมนต์

ความละเอียดของปูนซีเมนต์และองค์ประกอบของสารเคมีของปูนซีเมนต์ มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อคอนกรีตมีอายุน้อยกว่า ดังแสดงในรูป 2.3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะมีค่าแตกต่างกันตามประเภทของของปูนซีเมนต์ที่อายุเท่ากัน และเมื่ออายุมากขึ้นเกิน 1 ปี กำลังรับแรงอัดจะมีค่าแตกต่างกันน้อย

3. อายุของคอนกรีต

กำลังของคอนกรีตจำเพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในช่วงอายุ 28 วันแรก กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะเพิ่มอย่างรวดเร็ว และเพิ่มขึ้นน้อยลงเมื่ออายุเพิ่มขึ้น ยังพบว่าที่อายุ 7 วัน จะมีกำลังเป็นร้อยละ 65 ถึง 70 ของกำลังที่อายุ 28 วัน (MacGregor)

4. วัสดุผสม (aggregate)

วัสดุผสมหรือมวลรวมได้แก่ ทราย หินหรือกรวด เป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีต เนื่องจากวัสดุผสมมีปริมาตรร้อยละ 70 – 80 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด

คุณสมบัติของวัสดุผสมจะช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน (durability) และปริมาตรที่ไม่เปลี่ยนแปลงมาก (volume stability) ทั้งยังทำหน้าที่ต้านทานน้ำหนักรีดที่กดลงบนคอนกรีตกำลังและคุณสมบัติทางกายภาพยังมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในสภาพที่เป็นคอนกรีตเหลวและคอนกรีตแข็งตัวแล้ว วัสดุผสมที่ดีซึ่งจะทำให้คอนกรีตมีความคงทนสูงควรมีคุณสมบัติที่ดีดังนี้ คือ ต้องมีความคงทนไม่ทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบในซีเมนต์ ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดผลเสียต่อเสถียรภาพทางปริมาตรของคอนกรีต และวัสดุผสมจะต้องไม่มีสิ่งเจือปนที่มีผลเสียต่อกำลังและความคงตัวของซีเมนต์พลัส การยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุผสมกับซีเมนต์พลัสจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีต ซึ่งการยึดเหนี่ยวที่ดีจะขึ้นกับขนาดและลักษณะขอบมุมของวัสดุผสม วัสดุผสมที่ดีต้องมีรูพรุนน้อย

5. ปริมาณความชื้นและอุณหภูมิระหว่างการบ่ม

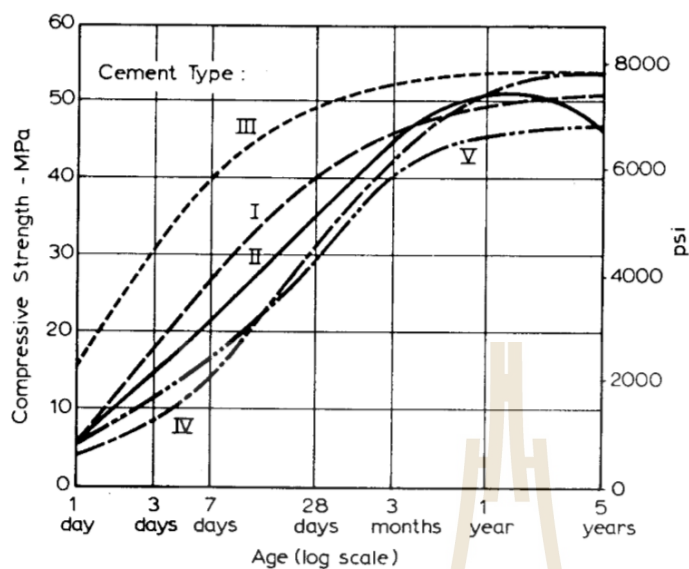
กำลังของคอนกรีตจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นระหว่างการบ่ม การเพิ่มความชื้นและการให้ความชื้นอย่างต่อเนื่องในการบ่มจะทำให้กำลังของคอนกรีตดีขึ้นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเมื่อบ่มด้วยความชื้นอย่างต่อเนื่องจะมีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่บ่มในอากาศ ดังแสดงในรูป 2.4 และถ้าอุณหภูมิที่บ่มมีค่าสูงขึ้นแล้ว คอนกรีตจะมีกำลังสูงขึ้น

6. ปริมาณความชื้นในแท่งทดสอบขณะทำการทดสอบ

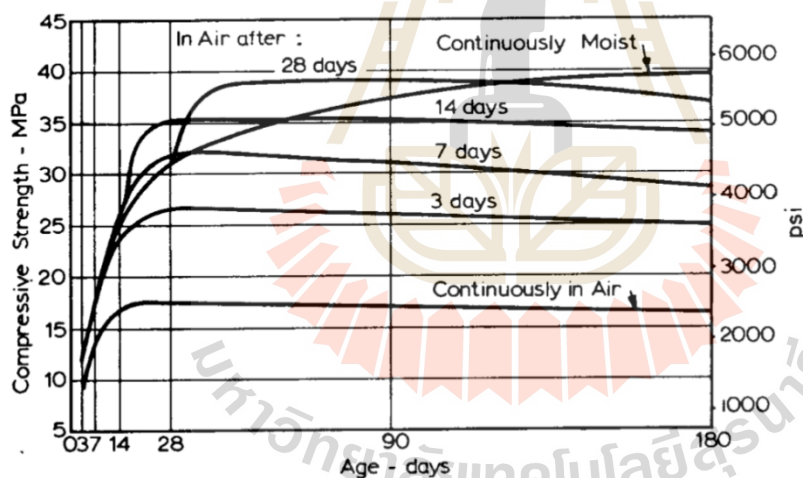
ถ้ามีปริมาณความชื้นในแท่งทดสอบขณะทำการทดสอบมีค่าสูงแล้ว กำลังของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าต่ำลง

7. อัตราของแรงกระทำ

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออัตราของแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น ในการทดสอบที่ใช้แท่งตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกใช้แรงกระทำประมาณ 0.24 MPa/sec ในเวลา 1.5 – 2 นาที จะให้แรงกระทำสูงสุดในการทดสอบ ถ้าให้อัตราแรงกระทำอย่างช้าๆ กำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตจะลดลงประมาณร้อยละ 75 ของการทดสอบ ด้วยแรงกระทำ 0.24 MPa/sec และถ้าให้อัตราแรงกระทำอย่างรวดเร็วกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 115 ของการทดสอบเดิม (MacGregor)



รูปที่ 2.3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตามชนิดและอายุของคอนกรีต (Neville, 1981)



รูปที่ 2.4 กำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆระหว่างการบ่ม (Neville, 1981)

2.2.6.2 กำลังรับแรงดัด

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (flexural strength) สามารถวัดจากโมดูลัสแตกร้าว (modulus of rupture), R ซึ่งได้แก่อนุรักษ์แรงดึงสูงสุดในเนื้อคอนกรีต ณ จุดที่เกิดการแตกหักโดยแรงดัด การหาค่าโมดูลัสแตกร้าวให้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C78 โดยตัวอย่างทดสอบเป็นคาน ใช้น้ำหนักกดลงบนจุดที่แบ่งคานเป็นสามช่วง เพิ่มน้ำหนักกดลงให้สม่ำเสมอ

โดยให้เกิดหน่วยแรงที่ผิวนอกประมาณ $8 - 10 \text{ kg/cm}^2$ ต่อนาที จากค่าน้ำหนักสูงสุดที่คานสามารถรับได้นำมาคำนวณหาค่าโมดูลัสแตกร้าว ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad \dots\dots(2.1)$$

เมื่อ P คือ น้ำหนักสูงสุด

L คือ ระยะห่างระหว่างฐานรองรับ

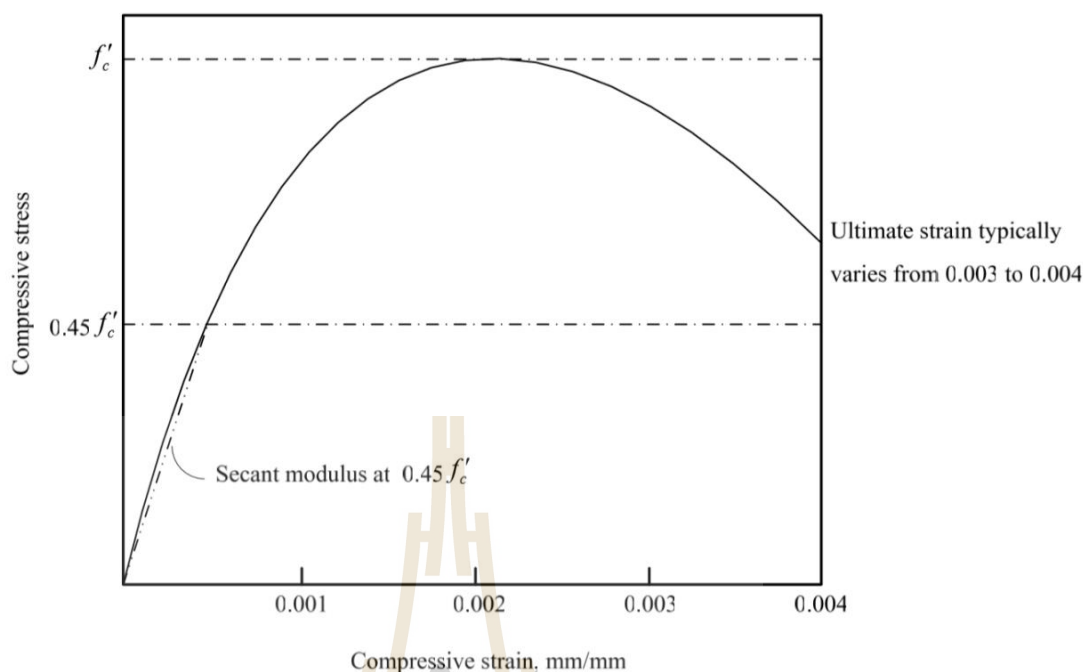
b, d คือ ความกว้างและความลึกของคานตัวอย่างทดสอบ

พบว่า กำลังรับแรงค้ำของคอนกรีตสูงกว่ากำลังรับแรงค้ำประมาณร้อยละ 60 ถึง 100 ค่าโมดูลัสของการแตกหักอยู่ในช่วงร้อยละ 11 ถึง 23 ของกำลังรับแรงอัด การใช้วัสดุผสมที่มีผิวหยาบขรุขระและมีเหลี่ยมมุม จะทำให้กำลังรับแรงค้ำสูงขึ้น

2.2.6.3 โมดูลัสยืดหยุ่น

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (modulus of elasticity) E_c เป็นตัวแสดงถึงความต้านทานต่อการเสีย (deformation) ของคอนกรีตเมื่อมีแรงกดดันอัดมากระทำ จากการทดสอบจะพบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าแปรเปลี่ยนตามกำลังของคอนกรีต หน่วยของน้ำหนักของคอนกรีตตลอดจนขนาดและระยะเวลาที่รับน้ำหนักบรรทุก เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกอยู่ในช่วงใช้งานและกระทำในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งอาจจะสมมติให้คอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่น (elastic materials) ได้โดยมีความเครียด (elastic strain) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงอัดที่กระทำ แต่เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกคงค้างเป็นเวลานานๆ (long-time loading) ต้องพิจารณารวมความเครียดแบบพลาสติก (plastic strain) ด้วยเพราะโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะลดลงทำให้คอนกรีตเกิดการเสียมากขึ้น

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต หาได้จากอัตราส่วนของหน่วยแรงอัดต่อความเครียดเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบหาลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยทั่วไปความสัมพันธ์นี้มีลักษณะเป็น โค้งพาราโบลา ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตนั้น มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. ใช้วิธี Secant Modulus ซึ่งคำนวณจากความลาดเอียงของเส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้นกับจุดใดๆ ที่ต้องการหา ซึ่งมักพิจารณาที่จุดซึ่งมีหน่วยแรงอัดกับความเครียดโดยถือว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาโดยวิธีการนี้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แท้จริงของคอนกรีตในช่วงใช้งาน เนื่องจากได้พิจารณา รวมถึงความเครียดแบบพลาสติกเข้าไปด้วย



รูปที่ 2.5 วิธีการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Wang, 1992)

มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 กำหนดสูตรสำหรับหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตโดยให้ขึ้นกับกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ดังสมการที่ 2.2

$$E_c = 4,270 w_c^{1.5} \sqrt{f'_c}, \text{ kg/cm}^2 \quad \text{.....(2.2)}$$

$$\text{หรือ } E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f'_c}, \text{ MPa}$$

E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (kg/cm^2)

w_c คือ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (ton/m^3)

f'_c คือ กำลังอัดสูงสุดของคอนกรีตทรงกระบอกเมื่ออายุ 28 วัน (kg/cm^2)

ดังนั้น สำหรับคอนกรีตธรรมดา ที่มีหน่วยน้ำหนัก $w_c = 2,323 \text{ kg/cm}^3$ จะได้ตามสมการที่ 2.3

$$E_c = 15,100 \sqrt{f'_c}, \text{ kg/cm}^2 \quad \text{.....(2.3)}$$

$$\text{หรือ } E_c = 4,700 \sqrt{f'_c}, \text{ MPa}$$

สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีต สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้จากอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงกดอัดกับความเครียดกดอัดบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและความเครียดกดอัดของคอนกรีต ในช่วงคอนกรีตมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิง

เส้น (linear elastic) ซึ่งมาตรฐาน ASTM C469-94 ได้กำหนดสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตไว้ดังสมการที่ 2.4

$$E_c = (S_2 - S_1) / (\epsilon_2 - 0.000050) \quad \dots(2.4)$$

เมื่อ S_1 คือ หน่วยแรงที่ตัวอย่างทดสอบเกิดความเครียดคดอัดเท่ากับ 50×10^{-6} mm/mm

S_2 คือ หน่วยแรงที่มีค่าประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงคดอัดสูงสุด

ϵ_2 คือ ความเครียดคดอัดที่เกิดจากหน่วยแรง S_2

2.2.7 ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต

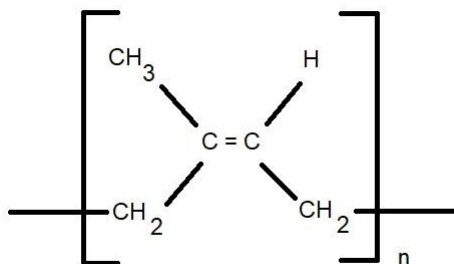
ความสามารถทำงานได้ (Workability) เป็นคุณสมบัติที่ต้องการอย่างหนึ่งของคอนกรีตหมายถึง การที่คอนกรีตสามารถ ขน เท ไหลเข้าแบบได้ดี ทำให้แน่นได้ง่าย และคอนกรีตที่หล่อได้ปราศจากรูพรุน ไม่เกิดการแยกตัวของคอนกรีต ความสามารถทำงานได้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของคอนกรีตคือ

- 1) ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ซึ่งอยู่ในรูปของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ คือ ถ้าใช้น้ำมากเกินไป คอนกรีตจะเหลวและเทลงแบบได้ง่าย แต่กำลังของคอนกรีตจะลดลง ในทางกลับกันการมีน้ำอยู่น้อยไปจะทำให้คอนกรีตแห้ง การผสมจะเข้ากันไม่หมดและการอัดแน่นทำได้ยากขึ้น คอนกรีตอาจมีโพรงอยู่ภายใน ทำให้ความแข็งแรงลดลง ดังนั้นควรใช้ปริมาณน้ำที่เหมาะสม
- 2) รูปร่างและลักษณะของผิวของวัสดุผสม ถ้าใช้วัสดุผสมที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมจะทำให้ความสามารถทำงานได้ดีกว่าวัสดุผสมที่มีเหลี่ยมมุม วัสดุที่มีความลดหลั่นของขนาดทำให้คอนกรีตเนื้อแน่นสม่ำเสมอต้องการน้ำผสมน้อย มีคุณภาพดีและทำงานง่าย
- 3) ปริมาณซีเมนต์และชนิดของซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์มีผลมาจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ มีปูนซีเมนต์ปริมาณมาก จะทำให้คอนกรีตข้นขึ้น การใช้ซีเมนต์ที่ละเอียดจะมีผลทำให้ได้คอนกรีตที่เทเข้าแบบได้ง่ายกว่าเพราะมีพื้นผิวมาก แต่จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้เร็ว จึงทำให้คอนกรีตขึ้นแข็งเร็ว
- 4) ปริมาณสารกระจายกักฟองอากาศ ถ้าใช้ปริมาณที่เหมาะสม คอนกรีตจะทำงานได้ง่ายแต่ถ้าใช้มากเกินไปจะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง

- 5) สารเคมีผสมเพิ่มบางชนิด เช่น fly ash จะช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้ดีขึ้นและช่วยแก้การแตกร้าวที่ผิวหน้าของคอนกรีต
- 6) เวลาและอุณหภูมิ ถ้าทิ้งคอนกรีตที่เพิ่งผสมเสร็จไว้นานเกิน 15 นาที คอนกรีตจะมีความสามารถทำงานได้ต่ำลง หรืออาจแข็งตัวไปเลยหากใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยเกินไป

2.2.8 คุณสมบัติของน้ำยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea Brazillensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณร้อยละ 30 แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นั้น ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีประมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 60 เรียกว่าน้ำยางข้น (concentrated latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางข้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมถุงมือยางและถุงยางอนามัย แต่เมื่อนำน้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมาเติมกรดเพื่อให้ อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็รีดยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด (two-roll mill) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60 - 70°C เวลา 3 วัน เราก็จะได้ยางแผ่นรมควัน นอกจากยางแผ่นรมควันแล้ว อุตสาหกรรมส่วนใหญ่เริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบ ทั้งนี้เนื่องจากยางแท่ง เป็นยางมีคุณภาพที่สม่ำเสมอกว่ายางแผ่นรมควัน ผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ วัตถุดิบของการ ผลิตยางแท่ง ได้แก่ น้ำยางหรือน้ำยางแผ่นขึ้นอยู่กับเกรดของยางแท่งที่ต้องการผลิต เช่น ถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR 5L ซึ่งมี สีจางมาก จำเป็นต้องใช้น้ำยางเป็นวัตถุดิบ หรือถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR 20 ซึ่งเป็นเกรดที่มี สีเงาปนสูงและมีสีเข้ม ก็อาจใช้น้ำยางแผ่นหรือน้ำยางเป็นวัตถุดิบ ส่วนกระบวนการผลิตยางแท่งค่อนข้างจะยุ่งยากต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีราคาแพงและต้องมีการควบคุมคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นราคายางแท่งจึงสูงกว่ายางแผ่นรมควัน



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

(ปรับปรุงภาพจาก ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และศูนย์วิจัยเทคโนโลยียาง)

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene กล่าวคือ มี isoprene (C_5H_8) โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15-20,000 เนื่องจาก ส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด จึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจาก อุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) สูง

2.2.8.1 ประเภทของน้ำยางที่ใช้ในงานคอนกรีต

การศึกษาเพื่อนำน้ำยางมาใช้ในการงานคอนกรีต พบว่า ได้มีการศึกษามาแล้วตั้งแต่ ค.ศ. 1923 โดย Cresson ซึ่งเป็นคนแรกในประเทศอังกฤษที่จดสิทธิบัตร (Patent) ในการนำน้ำยางธรรมชาติ มาใช้เป็นส่วนผสมของมอร์ต้า (Mortar) และคอนกรีตสด สำหรับใช้ในการปูผิวทาง (Paving Material) (Cresson, 1923) และใน ค.ศ. 1932 ได้มีการศึกษาโดยใช้ยางสังเคราะห์ โดย Bond ซึ่งได้ขอจดสิทธิบัตรในการนำน้ำยางที่ได้จากการสังเคราะห์ (Synthetic Rubber Latex) เพื่อใช้เป็นส่วนผสมของมอร์ต้า และคอนกรีตเช่นกัน (Bond, 1932)

ในต่างประเทศพบว่า ส่วนใหญ่จะมีการพัฒนาโยการนำน้ำยางพาราสังเคราะห์มาใช้กันมาก เช่น Polychloroprene Rubber Latex (Neoprene) , Polyacrylic – Ester Latex, Polyvinyl Acetate-Latex และ Styrene-Butadiene Rubber Latex (SBR) ในบางประเทศ เช่น ญี่ปุ่น ได้เล็งเห็นความสำคัญของการใช้น้ำยางในงานคอนกรีต จึงมีการออกมาตรฐานเกี่ยวกับ

การทดสอบและควบคุมคุณภาพของน้ำยาง ที่จะนำมาใช้ในงานก่อสร้าง โดย Japanese Industrial Standard (JIS)

ในส่วนของน้ำยาง (Latex) ที่สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต แบ่งได้ เป็น 5 ประเภท (Walters,1987) ดังต่อไปนี้

1. Polymer Latex ซึ่งแยกได้ 5 ชนิด คือ Elastomeric Latex, Thermoplastic Latex, Thermosetting Latex, Bituminous Latex และ Mixed Latex
2. Powdered Emulsion
3. Water Soluble Emulsion
4. Liquid Resins
5. Monomer

จากน้ำยางทั้ง 5 ประเภท ดังกล่าว มีเพียงประเภทที่ 1 เพียงประเภทเดียว ที่ผลิตขึ้นมาเพื่อการค้า สำหรับผสมคอนกรีต และปัจจุบัน จะใช้อยู่เพียง 2 ชนิด คือ Elastomeric Latex และ Thermoplastic Latex โดยแต่ละชนิด จะมีรายละเอียด (Panek and Cook, 1984 และ Budinski, 1979) ดังนี้

1. Elastomeric Latex สามารถแบ่งออกได้เป็น
 - a. Natural Rubber (NR)
 - b. Styrene-Butadiene (SB)
 - c. Styrene-Butadiene Rubber (SBR)
 - d. Polychloroprene (Neoprene)
 - e. Acrylonitrile-Butadiene Rubber (NBR)
2. Thermoplastic Latex สามารถแบ่งออกได้เป็น
 - a. Polyacrylic Ester (PAE)
 - b. Styrene-Acrylic (SA)
 - c. Ethylene Vinyl Acetate (EVA)
 - d. Vinyl Acetate-Ethylene (VAE)
 - e. Polyvinyl Acetate (PVAC)
 - f. Polyvinylidene Chloride (PVDC)
 - g. Vinyl Acetate-acrylic Copolymer (VAC)
 - h. Polyvinyl Propionate

i. Polyvinylene

j. Pure Acrylic

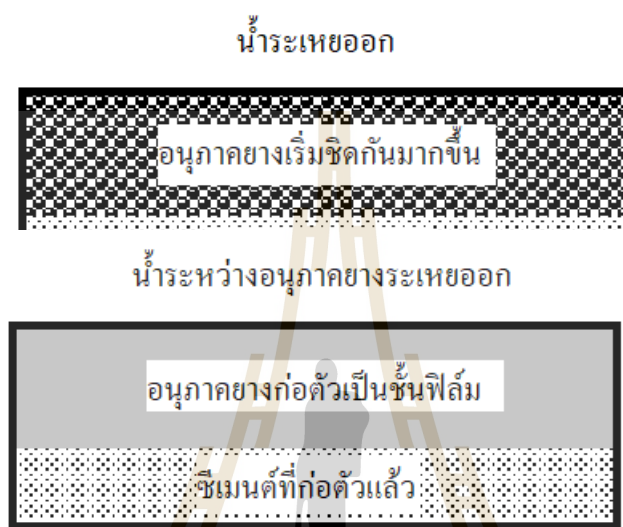
จากประเภทและชนิดของน้ำยางข้างต้น จะเห็นว่ายางธรรมชาติ (Natural Rubber) ถูกจัดเป็นยางชนิดหนึ่งในกลุ่มของ Elastomeric Latex ซึ่งเป็นประเภทของน้ำยาง ที่นิยมใช้สำหรับผสมคอนกรีตในทางการค้า อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่า ในต่างประเทศได้พัฒนา น้ำยางสังเคราะห์มากกว่าที่จะพัฒนาน้ำยางจากธรรมชาติ เหตุผลหนึ่งอาจเกิดจากข้อจำกัดด้านทรัพยากรธรรมชาติที่ไม่เอื้ออำนวยของต่างประเทศ แต่สำหรับประเทศไทยแล้ว ทรัพยากรน้ำยางธรรมชาติมีมากเพียงพอ จึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่ประเทศไทยจะได้หันมาพัฒนาน้ำยางธรรมชาติสำหรับงานคอนกรีตมากขึ้น

2.2.8.2 กลไกการทำงานของน้ำยางในคอนกรีต

จากการศึกษา ใน ค.ศ. 1987 โดย Ohama ได้มีการอธิบายการก่อตัว ของคอนกรีตผสมน้ำยาง (Ohama,1987) ว่าน้ำยางที่ใช้ผสมจะอยู่ในรูปของสารแขวนลอย (Emulsion) โดยอนุภาคของ Polymer จะแขวนลอยอยู่ในน้ำยางเหลว ซึ่งเมื่อผสมน้ำยางเข้ากับคอนกรีตแล้ว จะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้น 2 ส่วน คือ 1. ปฏิกิริยา Hydration จากซีเมนต์ผสมกับน้ำ และ 2. ปฏิกิริยาก่อตัวเป็นฟิล์ม (Film) ที่เกิดจากอนุภาค Polymer มารวมตัวกัน (Coalesce) ซึ่งการก่อตัวของชั้นฟิล์มนี้ จะเกิดขึ้นในช่วงใดนั้น ขึ้นอยู่กับการระเหยออกไปของน้ำในเนื้อคอนกรีต กล่าวคือ ถ้าน้ำระเหยออกไปเร็ว ชั้นฟิล์มนี้จะเกิดก่อนปฏิกิริยา Hydration ได้ ทั้งนี้ ผลจากทั้ง 2 ปฏิกิริยาดังกล่าว จะเกิดขึ้นปะปนกัน เสมือนเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นวัสดุประสานหรือตัวยึด (Binder) ระหว่างมวลรวมละเอียด (ทราย) และมวลรวมหยาบ (หิน) เข้าด้วยกัน (ดังรูปที่ 2.2 แสดงขั้นตอนการก่อตัวของชั้นฟิล์มจากน้ำยางในคอนกรีต)

อนุภาคน้ำยาง (Latex Particles) และน้ำ





รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการก่อตัวของชั้นฟิล์มจากน้ำยางในคอนกรีต
(ปรับปรุงภาพจาก การใช้ยางธรรมชาติเพื่อพัฒนางานคอนกรีต สิทธิชัย ศิริพันธุ์ และคณะ, 2548)

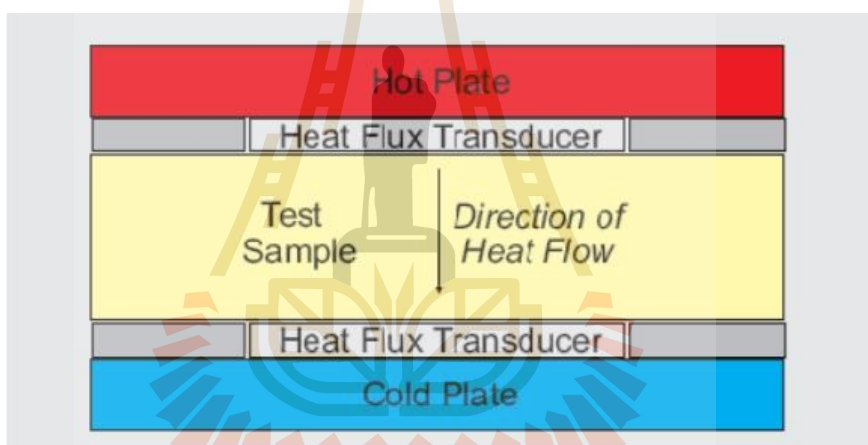
2.2.9 การนำความร้อน (Thermal conductivity, k)

เป็นที่ทราบกันดีว่าการถ่ายเทความร้อนของวัสดุโดยทั่วไปมีสามลักษณะคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน การนำความร้อน (Heat conduction) ซึ่งการนำความร้อนเป็นปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนมีการถ่ายเทภายในวัสดุใดๆหรือระหว่างวัสดุสองชิ้นที่สัมผัสกันโดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ในการวัดสมบัติการนำความร้อนของวัสดุจะมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของวัสดุคือค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity, k) ซึ่งเป็นการวัดอัตราการไหลของความร้อนที่จุดใดๆผ่านมวลวัสดุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันระหว่างพื้นผิวของวัสดุโดยจะมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของวัสดุถ้าวัสดุสามารถนำความร้อนได้ดีก็จะมีค่า k ที่สูงเราจะเรียกวัดคุณสมบัตินี้ว่า “ตัวนำความร้อน” ตัวอย่างเช่น โลหะ แต่ถ้าวัสดุใดสามารถนำความร้อนได้น้อยหรือมีค่า k ต่ำวัสดุประเภทนี้จะเรียกว่า “ฉนวนความร้อน” มีสมบัติในการป้องกันการถ่ายเทความร้อนได้ดีดังนั้นจึงนิยมนำมาใช้ในการหุ้มท่อในระบบต่างๆ

เพื่อให้ประหยัดการใช้พลังงานโดย การวัดค่าสภาพการนำความร้อนสามารถแบ่งตามเทคนิคของการวัดได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆคือ (<http://www.ndted.org>)

1. การวัดแบบสภาวะไม่คงที่ (Transient method) เป็นการวัดในขณะที่มีการให้ความร้อนเข้าไป เป็นการวัดแบบเป็น function กับเวลาซึ่งการวัดแบบนี้มีข้อดีคือไม่จำเป็นต้องรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่จึงทำให้ใช้เวลาในการวัดที่รวดเร็ว แต่ในขณะเดียวกันก็มีข้อจำกัดอยู่บ้างคือการคำนวณจะยุ่งยากใช้สมการที่ซับซ้อนตัวอย่างวิธีการวัดแบบสภาวะไม่คงที่ เช่น - Hot wire probe (ขดลวดความร้อน) การวัดแบบนี้จะใช้แหล่งความร้อนที่เป็นเส้นลวดที่ยาวมาก ๆ เป็นตัวให้ความร้อน โดยลวดนั้นต้องไม่มีการหดหรือขยายตัวที่อุณหภูมิใดๆ ขณะใช้งานโดยทั่วไปจะนิยมใช้ลวดทองแดงการวัดการนำความร้อนวิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลายสะดวกรวดเร็วใช้เวลาในการวัดน้อยไม่จำกัดขนาดชิ้นงานในการวัดและสามารถวัดได้ตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ RT ถึง 1500°C - Laser flash method วิธีนี้จะวัดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของชิ้นงานแผ่นบางเมื่อมีการให้พลังงาน laser เข้าไป แบบ pulse การวัดแบบนี้มีความรวดเร็วเหมาะกับวัสดุหลายชนิดประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายเนื่องจากช่วงอุณหภูมิของการวัดที่กว้างตั้งแต่ประมาณ -120 ถึง 2800°C วิธี laser flash นี้นอกจากจะวัดค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุแล้วยังสามารถวัดค่า Thermal diffusivity ได้อีกด้วย(en.wikipedia.org)
2. การวัดแบบสภาวะคงที่ (Steady-state method) นิยมใช้เมื่ออุณหภูมิของวัสดุที่ทำการวัดไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในการวัด เช่น วัสดุประเภทนวนความร้อนซึ่งในการวัดค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนความร้อนมี 2 วิธีหลักๆ คือ
 - Guard hot plate (GHP) เป็นวิธีการวัดแบบ absolute method คือการวัด heat flux โดยตรง จึงไม่ต้องมีการ calibration มีความแม่นยำสูงมีช่วงของอุณหภูมิการวัดที่กว้างตั้งแต่ -160 ถึง 650°C แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือใช้เวลาในการวัดที่นานโดยในการวัดต้องใช้ตัวอย่างในการทดสอบ 2 ชิ้นเพื่อยืนยันว่ามีการถ่ายเทความร้อนอย่างสมมาตรวิธีแบบ GHP นี้เป็นการวัดตามมาตรฐาน ISO 8302 และ ASTM C177
 - Heat flow meter (HFM) เป็นวิธีการวัดแบบ comparative method โดยการวัด heat flow เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็วใช้ชิ้นงานทดสอบแค่ชิ้นเดียวแต่เครื่อง HFM ต้องมีการออกแบบเครื่องมือที่ดีเพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อน

ไปในทิศทางเดียวเครื่อง HFM ประกอบไปด้วย plate 2 อันที่มี อุณหภูมิแตกต่างกันคือ hot plate และ cold plate ตัวอย่างที่ทดสอบจะถูกใส่ระหว่าง plate (ดังแสดงในรูปที่ 2.8) โดยความร้อนจะมีการถ่ายเทจากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ (hot plate ไปยัง cold plate) และในตัวเครื่องจะใช้ sensor ในการวัด heat flow ดังนั้นเมื่อเครื่องเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady-state) นั่นคือมี temperature gradient เป็นศูนย์เครื่องจะคำนวณเป็นสภาพการนำความร้อนการวัดค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนโดยวิธี Heat flow meter นี้จะเป็นการวัดตาม มาตรฐาน ASTM C518 ISO 8301 JISA 1412 และ DINEN 13163 เป็นต้น (ASTM C518: Standard Test Method for Steady-State)



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของเครื่อง Heat flow meter

การคำนวณค่าสภาพการนำความร้อนของการวัด แบบ Heat flow meter จะใช้สมการการถ่ายเทความร้อนของ Fourier's law แบบ 1 มิติ คือ

$$q = -k \frac{dt}{dx} \quad \text{.....(2.5)}$$

เมื่อ

q = heat flux (W/m^2)

k = ค่าสภาพการนำความร้อน (W/m-K)

$\frac{dt}{dx}$ = temperature gradient (K/m)

ส่วนค่าความต้านทานการนำความร้อนของวัสดุ (R) สามารถคำนวณได้จาก

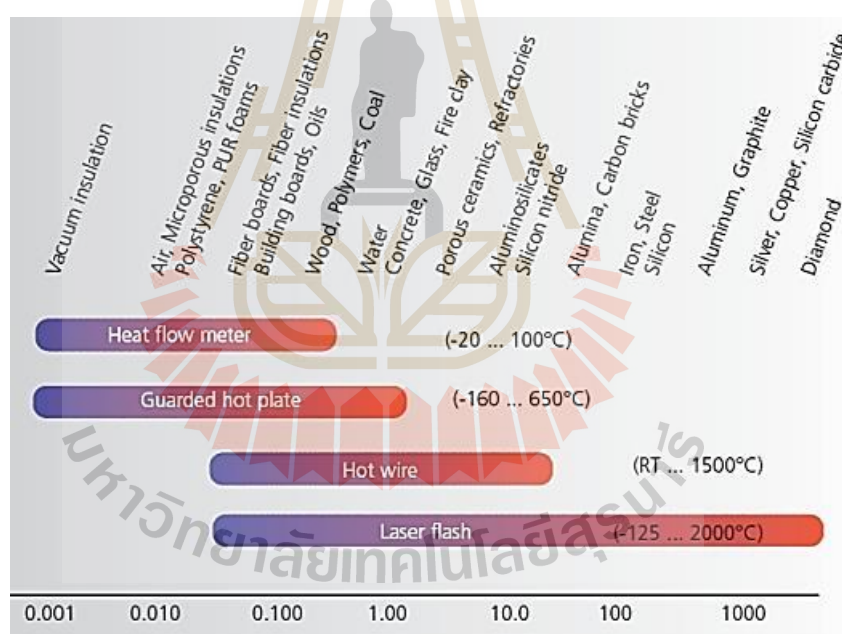
$$R = \frac{\Delta x}{k} \quad \dots(2.6)$$

เมื่อ

Δx = ความหนาของวัสดุ (m)

R = ความต้านทานความร้อน ($\text{m}^2 \text{K/W}$)

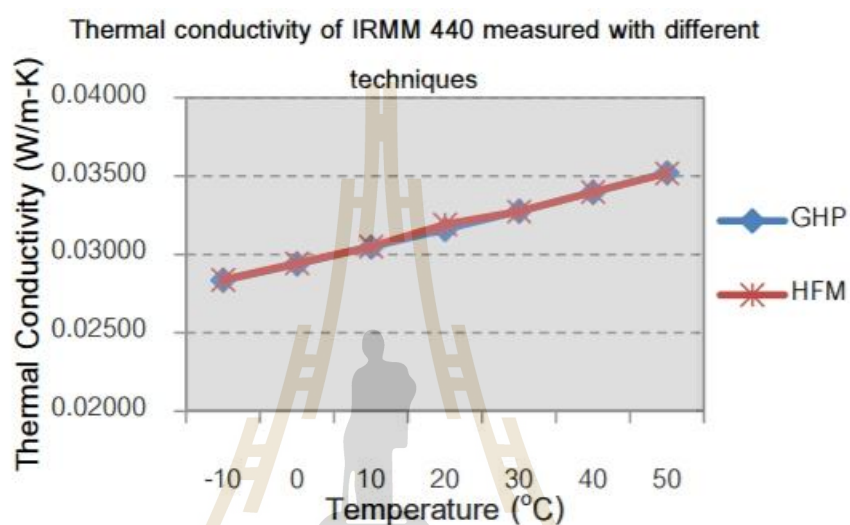
จากสมการ (2.5) ค่าความต้านทานความร้อนจะขึ้นอยู่กับความหนาและค่าสภาพการนำความร้อน โดยเมื่อความหนามากขึ้นค่าความต้านทานความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามด้วยจะเห็นได้ว่าการวัดค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุมีหลายวิธีการเลือกเครื่องมือจึงควรเลือกให้เหมาะสมกับ ช่วงค่าการนำความร้อนของวัสดุซึ่งถ้าเป็นวัสดุประเภทฉนวนจะนิยมใช้เครื่อง Guard hot plate และ Heat flow meter เนื่องจากเครื่องมือนี้เหมาะกับวัสดุที่มีค่าสภาพการนำความร้อนที่ต่ำซึ่งจากรูปที่ 2.9 จะแสดงถึงช่วงของเครื่องมือวัดที่เหมาะสมกับการวัดค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุแต่ละประเภท



รูปที่ 2.9 ช่วงของเครื่องมือที่เหมาะสมในการวัดค่าสภาพการนำความร้อน

นอกจากนี้การวัดการนำความร้อนด้วยวิธี Guard hot plate (GHP) และ Heat flow meter (HFM) ยังมีข้อแตกต่าง กันอยู่บ้างกล่าวคือ การไหลของความร้อนโดยวิธี Heat flow meter มีการไหลแบบทิศทางเดียว ในขณะที่วิธี Guard hot plate ซึ่งใช้ตัวอย่างจำนวน 2 ชิ้น ความร้อนจะถ่ายเททั้ง ทิศทางขึ้นและลงแต่หลังจากทำการทดลองเปรียบเทียบค่าสภาพการนำความร้อนที่วัดได้

จากทั้งสองวิธีโดยใช้ Resinbonded glass fiber board ซึ่งเป็น Certified reference material (IRMM-440 S137) ในช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยตั้งแต่ -10 ถึง $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ผลการทดลองพบว่าค่าสภาพการนำความร้อนจากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการวัด Heat flow meter มีการถ่ายเทความร้อนไปในทิศทางเดียวค่าสภาพการนำความร้อนที่ได้ก็มีความถูกต้อง แม่นยำสูง ไม่แตกต่างจากวิธีการแบบ Guard hot plate (www.netzsch-thermal-analysis.com)



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบค่า thermal conductivity ที่วัดจากวิธี GHP และ HFM

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน ซึ่งประกอบด้วย การหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุ การหาค่าความชื้นเหมาะสมของตัวอย่าง การบดอัดตัวอย่าง การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละหัวข้อ ดังต่อไปนี้

3.1 การหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุ

การหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้ใช้มาตรฐานและข้อกำหนดการทดสอบของ American Society for Testing and Materials (ASTM) ดังต่อไปนี้

- 3.1.1 ทำการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของซีเมนต์ ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ตามมาตรฐาน ASTM C 188
- 3.1.2 ทำการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C128-93 Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate และทดสอบการกระจายขนาดและโมดูลัสความละเอียดของทราย ตามมาตรฐาน ASTM C136-95a Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates
- 3.1.3 น้ำยางพาราชั้นผสมสารผสมเพิ่ม (Per-Blend) เรียกว่า (Original Number Para Slurry) ตามมาตรฐานกรมทางหลวง

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

เมื่อผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ตามที่กำหนดแล้ว ทำการทดสอบการหาค่าอัตราการไหลแผ่ และหล่อเข้าแบบมาตรฐาน (รูปลูกบาศก์และรูปทรงกระบอก) ทำการบ่มขึ้นเป็นเวลา 7 วัน ทุกตัวอย่าง จากนั้นบ่มแห้งในอากาศต่อ กำหนดให้บ่มในอากาศเพิ่มเป็นเวลา 28 วัน แล้วทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดและการทดสอบความร้อน เปรียบเทียบกับตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์มาตรฐานที่ไม่ผสมกับน้ำยางพาราด้วย พร้อมวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) เพื่อดูโครงสร้างของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมน้ำยางพาราที่อายุ 28 วัน

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

บทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาซึ่งประกอบไปด้วย การทดสอบหาค่าอัตราการไหลของมอร์ตาร์ที่ผสมน้ำยางพารา กำลังรับแรงอัดและการทดสอบหาค่าการนำความร้อนของตัวอย่างซีเมนต์ผสมน้ำยางพาราโดยใช้ค่า W/C เท่ากับ 0.5 และ 0.6 และแทนที่น้ำด้วยน้ำยางพาราร้อยละ 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 และ 4.0 โดยน้ำหนัก แล้วนำตัวอย่างมาเทเข้าแบบหล่อขนาด 5 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร บ่มขึ้น 7 วันและนำตัวอย่างมาทดสอบกำลังรับแรงอัดเมื่อมีอายุครบ 28 วัน และเก็บตัวอย่างนำมาวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ทดสอบ

4.1.1 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์

ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ คือ อัตราส่วนของน้ำหนักปูนซีเมนต์ต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับปูนซีเมนต์ ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะมีค่าประมาณ 3.00 ถึง 3.20 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของเนื้อปูนซีเมนต์และความละเอียดของปูนซีเมนต์ด้วย ค่าความถ่วงจำเพาะบ่งถึงส่วนประกอบของเนื้อปูนซีเมนต์และความละเอียดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมาก จะมีความถ่วงจำเพาะสูง ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่ จะนำไปใช้ในการคำนวณออกแบบส่วนผสมคอนกรีต (Mixed Design) นอกจากนี้แล้วยังใช้เป็นข้อมูลในการหาความละเอียดของปูนซีเมนต์และยังเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของปูนซีเมนต์อีกด้วยปูนซีเมนต์ชนิดเดียวกันที่เสื่อมคุณภาพจะมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ที่มีคุณภาพดี ในการวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ทรานกอินทรีย์ จากการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ พบว่ามีค่าประมาณ 3.15



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์

4.1.2 คุณสมบัติของทราย

ทรายที่ใช้ในการหลอมอร์ต้าร์ตลอดการทดสอบเป็นทรายแม่น้ำ (River sand) ค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 1.77 ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry; SSD)

4.2 การทดสอบค่าการไหลแผ่ (Flow ability)

จากทดสอบค่าการไหลแผ่ ของซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมน้ำยางพารา ที่ค่า W/C เท่ากับ 0.5 และ 0.6 แสดงค่าดังตารางที่ 4.1 พบว่าในทุกอัตราส่วนผสมค่า W/C เท่ากับ 0.6 จะมีค่าอัตราการไหลแผ่มีค่าสูงกว่า W/C เท่ากับ 0.5 ที่ W/C เท่ากับ 0.5 ค่าการไหลแผ่ที่ค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำยางมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 1.5 หลังจากนั้นค่าการไหลแผ่มีค่าลดลง เมื่อปริมาณน้ำยางมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับอัตราการไหลในส่วนของ W/C เท่ากับ 0.6 ค่าการไหลแผ่จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำยางที่ค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานอุตสาหกรรมมอร์ต้าร์สำหรับฉาบ มอก. 1776-2542 ที่กำหนดค่าการไหลแผ่ประมาณ 110 ± 5 มิลลิเมตร พบว่าค่าการไหลแผ่ของตัวอย่างที่มีค่า W/C เท่ากับ 0.6 เติมน้ำยางร้อยละ 4.0 มีค่าใกล้เคียงกันที่ 105 ± 5

ตารางที่ 4.1 ค่าการไหลแผ่ (Flow ability) ของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมน้ำยางพารา

ปริมาณน้ำยาง, P (%)	W/C	อัตราการไหลแผ่ (มิลลิเมตร)
P = 0	0.5	150
P = 0.5	0.5	155
P = 1	0.5	161
P = 1.5	0.5	160
P = 2	0.5	144
P = 3	0.5	132
P = 4	0.5	105
P = 0	0.6	220
P = 0.5	0.6	210
P = 1	0.6	190
P = 1.5	0.6	180
P = 2	0.6	173
P = 3	0.6	165
P = 4	0.6	155

4.3 การหลอมมอร์ตาร์ลงแบบ

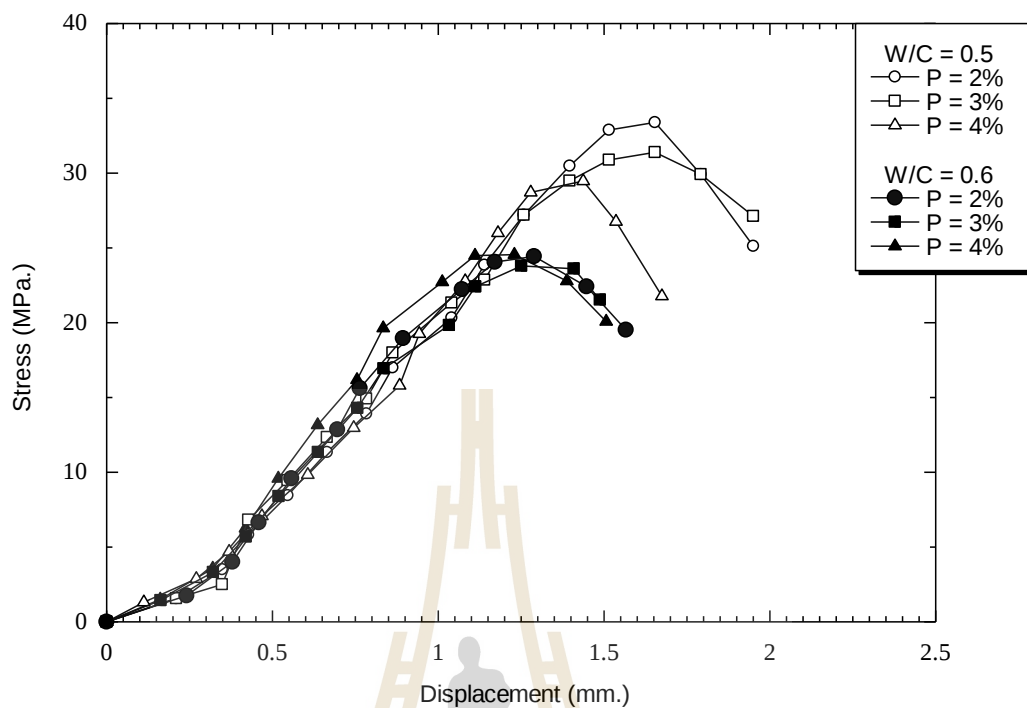
เมื่อทดสอบการไหลแผ่แล้วเสร็จนำส่วนผสมจากการนำตัวอย่างที่ทดสอบการไหลปาดเข้ามาผสมในชามผสมอีกครั้งหนึ่งโดยใช้เวลาผสมอีก 15 วินาที เพื่อให้เข้ากัน แล้วจึงเทเข้าแบบหล่อขนาด 5 เซนติเมตร× 5 เซนติเมตร×5 เซนติเมตร โดยการแบ่งตัวอย่างออกเป็น 3 ชั้น ทำการกระทุ้งโดยแท่งกระทุ้งมาตรฐาน ชั้นละ 32 ครั้ง เมื่อครบ 3 ชั้นแล้วทำการปาดตกแต่งผิวหน้าให้เรียบ จากนั้นให้ตัวอย่างเซตตัวที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 8 - 10 ชั่วโมง จึงทำการแกะแบบและทำการชั่งน้ำหนักก่อนที่จะนำไปบ่มขึ้นต่อ จนครบอายุ 7 วัน แล้วนำตัวอย่างขึ้นตากในที่ร่ม (Air dry) ใช้เวลาประมาณ 30 – 40 นาที แล้วหุ้มด้วยพลาสติก (Plastic wrap) เพื่อไม่ให้ตัวอย่างสัมผัสอากาศภายนอกอีก ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน ลักษณะตัวอย่างและการบ่มตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.2



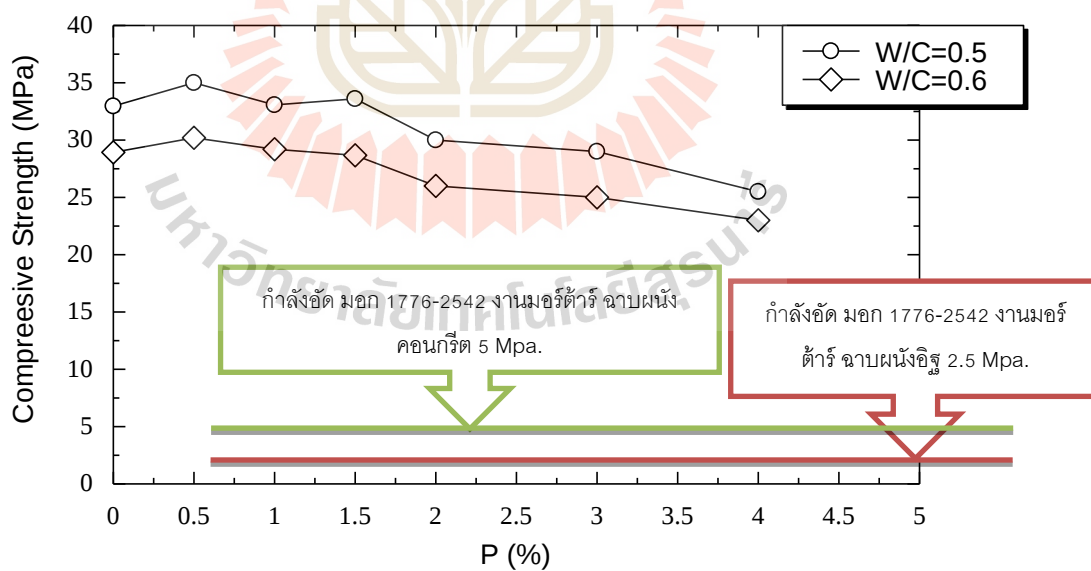
รูปที่ 4.2 (ก) ตัวอย่างก่อนทำการบ่มชื้น (ข) นำตัวอย่างบ่มชื้น

4.4 การทดสอบกำลังอัด

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกดและการยุบตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ค่า W/C เท่ากับ 0.5 และ 0.6 ปริมาณน้ำยางพาราร้อยละ 2.0, 3.0 และ 4.0 พบว่า ค่าความเค้นกดมีค่าเพิ่มขึ้นตามการยุบตัวของตัวอย่างจนกระทั่งมีค่าสูงสุดหลังจากนั้นค่าความเค้นกดมีค่าลดลงเมื่อการยุบตัวมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ รูปที่ 4.4 แสดงผลทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ไม่ได้ผสมยางพาราเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมยางพาราร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 และ 4.0 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ในช่วงของ W/C เท่ากับ 0.5 และ 0.6 เมื่อเติมน้ำยางร้อยละ 0.5 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าประมาณคงที่จนกระทั่งปริมาณน้ำยางเท่ากับร้อยละ 1.5 หลังจากนั้นกำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อน้ำยางมีปริมาณเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าการใส่ยางพาราในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 ถึง ร้อยละ 1.5 ช่วยเพิ่มกำลังอัดของตัวอย่างทดสอบ เมื่อนำค่ากำลังอัดมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดที่ยอมรับให้ของ มาตรฐาน มอก.1776-2542 ประเภทมอร์ตาร์งานปูนฉาบ งานปูนฉาบผนังก่ออิฐ ที่กำหนดให้มีค่าไม่น้อยกว่า 2.5 เมกะปาสกาล และงานปูนฉาบผนังคอนกรีตไม่น้อยกว่า 5 เมกะปาสกาล พบว่า การเติมน้ำยางพาราในปริมาณไม่เกินร้อยละ 4.0 ให้กำลังอัดสูงกว่าค่ามาตรฐานอุตสาหกรรมทั้งงานปูนฉาบผนังก่ออิฐและงานปูนฉาบผนังคอนกรีต



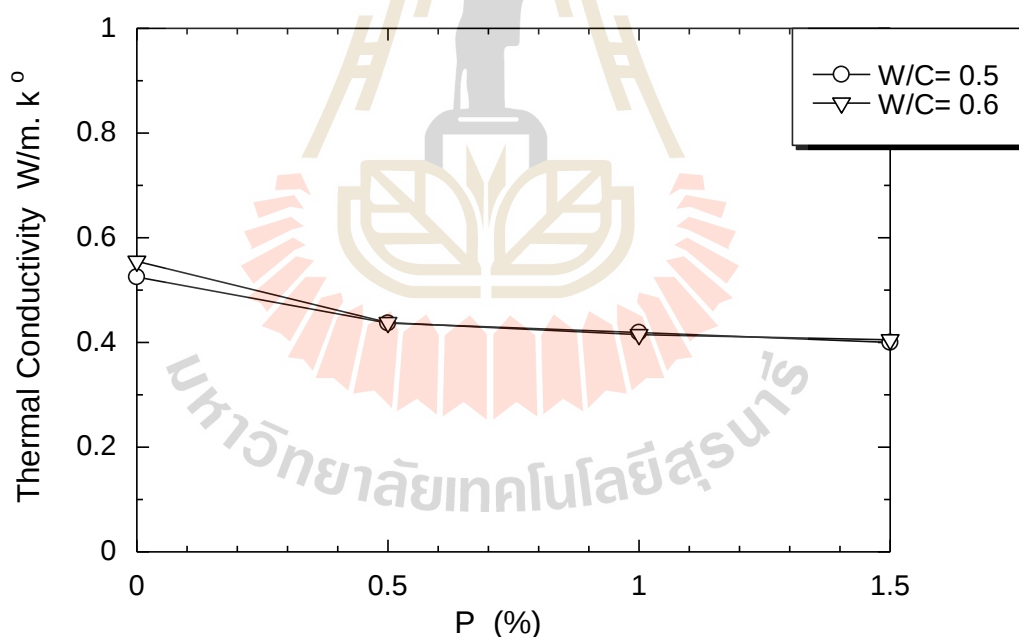
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ารับแรงกดและการยุบตัวของซีเมนต์มอร์ต้าร์
ที่มีค่า W/C เท่ากับ 0.5 และ 0.6



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณยาง

4.5 การทดสอบค่าการนำความร้อน

ผลการทดสอบค่าการนำความร้อนที่ปริมาณน้ำยางพาราค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าเมื่อค่า W/C เท่ากับ 0.5 และ 0.6 ที่ปริมาณน้ำยางร้อยละ 0 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) มีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อเติมน้ำยางพาราในส่วนผสม ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของซีเมนต์มอร์ต้ามีค่าลดลงอย่างชัดเจน และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าลดลงตามปริมาณน้ำยางที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างที่มีค่า W/C ต่างกันค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าเท่ากันเมื่อใช้ปริมาณน้ำยางพาราเท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวอย่างทดสอบที่มีค่า W/C เท่ากับ 0.5 ที่ไม่ได้ผสมน้ำยางพารากับตัวอย่างที่ผสมน้ำยางพาราร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.5 จะเห็นว่าการใช้น้ำยางพาราสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนได้ถึงร้อยละ 17, 24 และ 27 ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างที่มีค่า W/C เท่ากับ 0.6 การใช้น้ำยางพาราร้อยละ 0.5, 1 และ 1.5 สามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนได้ร้อยละ 21, 25 และ 27 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการผสมน้ำยางพาราจะทำให้มอร์ต้ามีสภาพเป็นฉนวนมากขึ้น

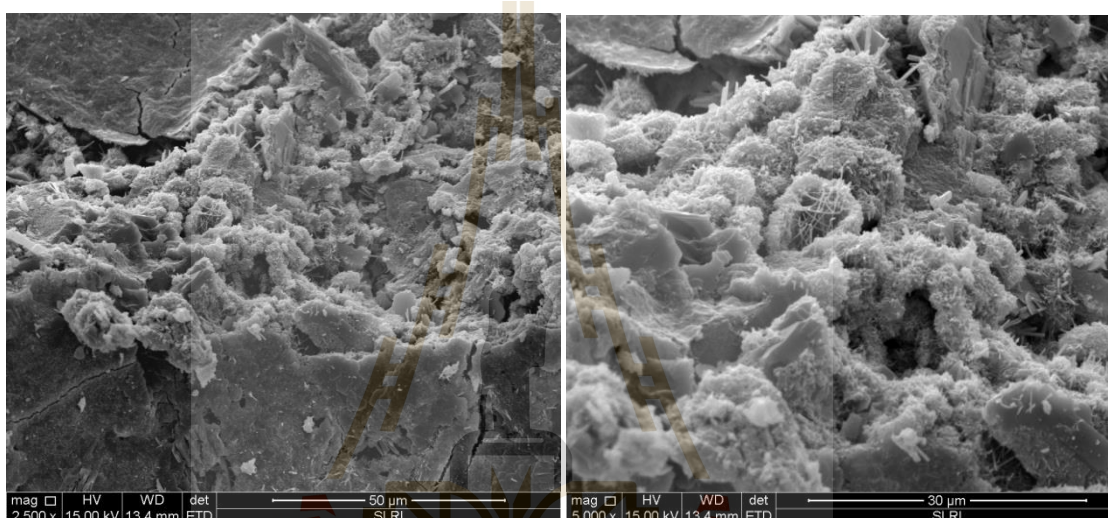


รูปที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) W/C เท่ากับ 0.5 และ 0.6

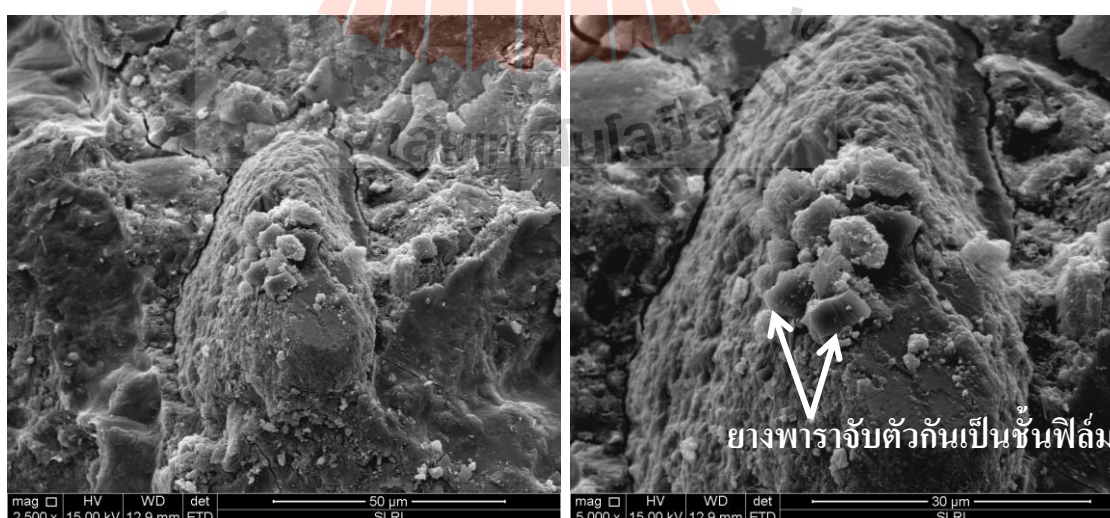
4.6 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ต้าผสมน้ำยางพารา

จากการศึกษาภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) เพื่อดูโครงสร้างของซีเมนต์มอร์ต้าผสมน้ำยางพาราที่อายุ 28 วัน พบว่า ตัวอย่างทดสอบที่มีค่า W/C เท่ากับ 0.5 การใช้น้ำยางพาราเพียงเล็กน้อย (ร้อยละ 0.5)

ยางพาราสามารถเข้าไปแทรกช่องว่างของซีเมนต์มอร์ตาร์ทำให้ตัวอย่างมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ขณะที่ปฏิกิริยาไฮเดรชันยังเกิดได้อย่างสมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 4.6 (ก) ซึ่งทำให้ค่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณารูปที่ 4.6 (ข) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการใช้น้ำยางพาราร้อยละ 4.0 ส่งผลให้เกิดชั้นฟิล์มแทรกตัวในซีเมนต์มอร์ตาร์เป็นจำนวนมากทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรใช้น้ำยางพาราเพียงร้อยละ 0.5 สอดคล้องกับผลทดสอบกำลังอัดที่ลดลงเมื่อใช้น้ำยางพาราสูงกว่าร้อยละ 1.5 รูปที่ 4.6 (ค) และ (ง) แสดงผลในลักษณะเดียวกันของตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีค่า W/C เท่ากับ 0.6

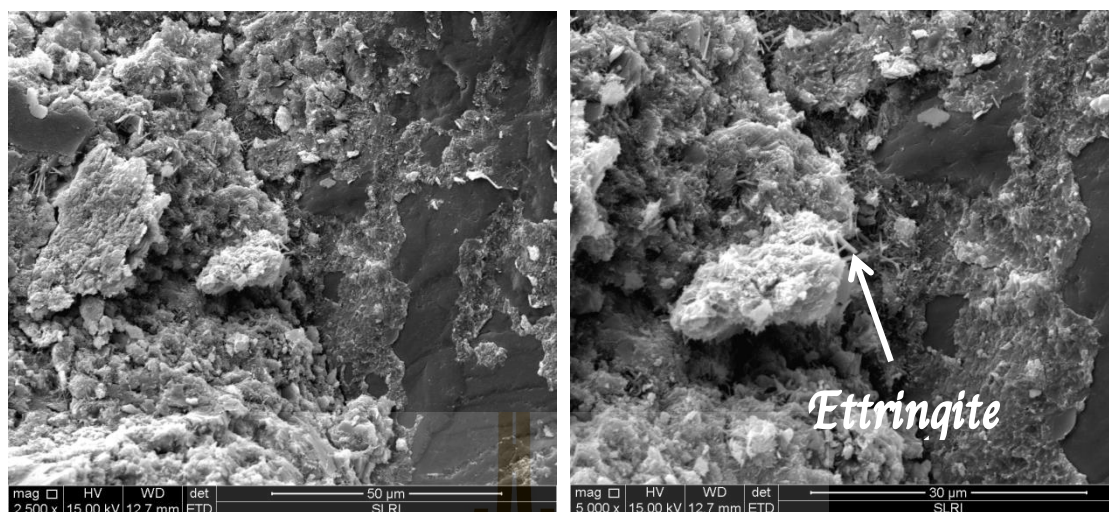


ภาพ SME มอร์ตาร์ค่า W/C เท่ากับ 0.5 ผสมยางพาราร้อยละ 0.5
(ขยายภาพ 2500 และ 5000 เท่า)

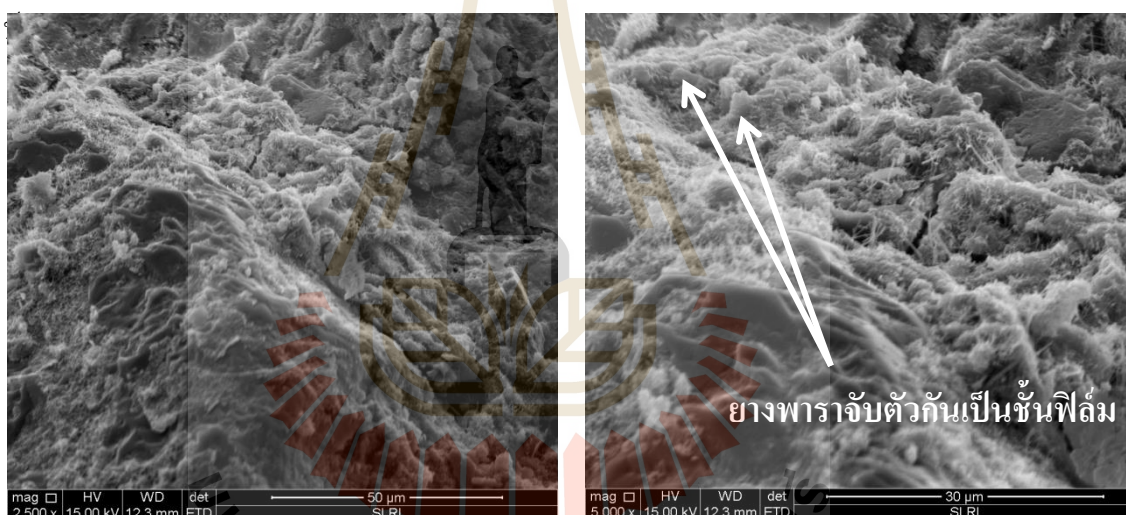


ภาพ SME มอร์ตาร์ค่า W/C เท่ากับ 0.5 ผสมยางพาราร้อยละ 4 (ขยายภาพ 2500 และ 5000 เท่า)

รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่พบในตัวอย่างทดสอบ



ภาพ SME มอร์ต้ารค่า W/C เท่ากับ 0.6 ผสมยางพาราร้อยละ 0.5 (ขยายภาพ 2500 และ 5000 เท่า)



ภาพ SME มอร์ต้ารค่า W/C เท่ากับ 0.6 ผสมยางพาราร้อยละ 4 (ขยายภาพ 2500 และ 5000 เท่า)

รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่พบในตัวอย่างทดสอบ (ต่อ)

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตของการศึกษาการต้านทานความร้อนของคอนกรีตผสมน้ำยางพารา เพื่อนำมาปรับปรุงและพัฒนาออกแบบส่วนผสมเพื่อให้ได้กำลังรับแรงอัดสูงสุดและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ โดยประเด็นการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการศึกษา

กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมน้ำยางพารา

กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมน้ำยางพารา ที่ค่า W/C เท่ากับ 0.5 และ 0.6 ที่ผสมน้ำยางพาราร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 และ 4.0 ให้กำลังอัดที่สูงกว่าค่ามาตรฐาน มอก. 1776-2542 ประเภทมอร์ตาร์งานปูนฉาบ งานปูนฉาบผนังก่ออิฐ กำหนดให้มีค่าไม่น้อยกว่า 2.5 เมกะปาสกาล และงานปูนฉาบผนังคอนกรีตไม่น้อยกว่า 5 เมกะปาสกาล

ค่าการไหลแผ่ (Flowability)

ค่าการไหลแผ่ ของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมน้ำยางพาราพบว่าเมื่อผสมน้ำยางพาราเข้าไปจะทำให้เข้าไปจะทำให้ค่าการไหลแผ่ลดลง ที่ W/C เท่ากับ 0.5 ที่ ยางพาราร้อยละ 4 โดยมีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 105 ± 5 มิลลิเมตรใกล้เคียงกับ มาตรฐานอุตสาหกรรมประเภทมอร์ตาร์งานปูนฉาบ 110 ± 5 มิลลิเมตร

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

หลังจากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ค่า W/C เท่ากับ 0.5 และ 0.6 ยางพาราร้อยละ 0.5, 1 และ 1.5 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ไม่ได้ผสมน้ำยางพารา และยังพบว่าเมื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนลดลงเมื่อปริมาณน้ำยางมีค่าเพิ่มขึ้น และที่ปริมาณน้ำยางค่าเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าเท่ากันในทุกอัตราส่วน W/C ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมน้ำยางพาราจะทำให้มอร์ตาร์มีสภาพเป็นฉนวนมากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในอนาคตควรเลือกใช้สารกักกระจายฟองอากาศ (Air-Entraining Admixture) มาผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมน้ำยางพารา เพื่อสร้างฟองอากาศที่มีขนาดเล็กมากกระจายและคงตัวอยู่ในซีเมนต์มอร์ตาร์ เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ลดลง ป้องกันความร้อนได้ดีขึ้น พร้อมค่าการไหลแผ่ที่มากขึ้น ควรมีการศึกษาทดสอบการหดตัวและการรับแรงดัดในคานของคอนกรีตเนื่องจากเมื่อนำน้ำยางพารามาผสมในซีเมนต์ทำให้มอร์ตาร์ในซีเมนต์เกิดความยืดหยุ่นหรือมีค่า Elastic เปลี่ยนไปจากเดิม



เอกสารอ้างอิง

ธีระศักดิ์ เขาวรัตน์ และคณะ. (2018). **Compressive and Flexural Strength of Polyvinyl Alcohol-Modified Pavement Concrete Using Recycled Concrete Aggregates**. American Society of Civil Engineers.

เจลิยว โพธิพิรุฬห์. (ม.ป.ป.). **งานปูน – ก่อสร้าง**. กรุงเทพฯ: รุ่งเรืองธรรม.

ประณต กุลประสูตร. (2536). **ประเภทปูนซีเมนต์**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร.

_____. (2541). **เทคนิคงานปูน-คอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์อมรินทร์พรินต์ติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง.

สุรศักดิ์ โกสียพันธ์. (2540). **วัสดุศาสตร์มูลฐาน**. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สิทธิชัย ศิริพันธุ์ และคณะ. (2548). **การใช้ยางธรรมชาติเพื่อพัฒนาคอนกรีต**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตสงขลา.

สำนักมาตรฐานและประเมินผล . **มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ**.

ทล416/2556 : <http://km.doh.go.th/doh/preview.php?tableName>

=TB_KNOWLEDGE&tableId=10099&fieldName_show=KNOWLEDGE_NAME&id_text=KNOWLEDGE_ID . [13 พฤษภาคม 2561].

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม . **มอ์ต้าสำหรับฉาบ มอก.1776-25420.1-6**.

อนันตศักดิ์ โชติมงคล. (2538). **คุณรู้จักเซรามิกส์ดีแค่ไหน**. เซรามิกส์, 1 (5), มกราคม –เมษายน 2538, 52-55.

Neville, A.M.; Brooks, J.J. (1990). **Concrete Technology**.

Panek, Julian R. and Cook, John Philip. (1984) . Construction Sealants and. **Thermal Conductivity** Available at http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Physical_Chemical/ThermalConductivity.htm [Online]

[16 พฤษภาคม 2561].

ASTM C518: **Standard Test Method for Steady-State** :www.netzsch-thermal-analysis.com

[16 พฤษภาคม 2561].



ตาราง ก.1 ส่วนผสมและกำลังอัด W/C เท่ากับ 0.5

			Q1	Q2	กำลังอัด
% ยางพารา	W/C 0.5	(g)	weight (g)	weight (g)	Ksc
P=0.5%	cement	500	264.52	267.61	34.80
	sand	1375	262.41	264.93	38.00
	water	250	264.30	266.45	33.20
	P=0.5%	1.25	263.74	266.33	35.33
	water-P=0.5%	248.75			
P=1%	cement	500	264.62	266.27	34.00
	sand	1375	266.06	268.42	32.00
	water	250	265.84	267.13	33.20
	P=1%	2.5	265.51	267.27	33.07
	water-P=1%	247.5			
P=1.5%	cement	500	264.92	266.88	33.60
	sand	1375	263.21	265.33	33.60
	water	250	263.81	266.13	33.60
	P=1.5%	3.75	263.98	266.11	33.60
	water-P=1.5%	246.25			
P=2%	cement	500	260.7	264.42	30
	sand	1375	261.2	266.82	30
	water	250	261.88	265.11	30
	P=2%	5	261.26	265.45	30
	water-P=2%	245			
P=3%	cement	500	263.84	266.89	29.00
	sand	1375	261.24	263.06	29.00
	water	250	263.59	265.75	29.00
	P=3%	7.5	262.89	265.23	29.00
	water-P=3%	242.5			

ตาราง ก -1 (ต่อ)

			Q1	Q2	กำลังอัด
% ยางพารา	W/C 0.5	(g)	weight (g)	weight (g)	Ksc
P=4%	cement	500	264.15	265.96	24
	sand	1375	259.52	260.87	24
	water	250	262.45	264.6	24
	P=4%	10	262.04	263.81	24
	water-P=4%	240			
P=0%	cement	500	266.01	267.44	25.6
	sand	1375	268.98	269.7	32.8
	water	250	268.31	269.47	19.47
			267.77	268.87	25.96

ตาราง ก -2 ส่วนผสมและกำลังอัด W/C เท่ากับ 0.6

			Q1	Q2	กำลังอัด
% ยางพารา	w/c 0.6	(g)	weight (g)	weight (g)	Ksc
P=0.5%	cement	500	262.05	263.17	28.80
	sand	1375	264.12	264.90	31.20
	water	300	264.43	264.12	33.60
	P=0.5%	1.5	263.53	264.06	31.20
	water-P=0.5%	298.5			
P=1%	cement	500	264.62	266.27	29.60
	sand	1375	266.06	268.42	27.60
	water	250	265.84	267.13	30.40
	P=1%	2.5	265.51	267.27	29.20
	water-P=1%	247.5			

ตาราง ก.2 (ต่อ)

			Q1	Q2	กำลังอัด
% ยางพารา	W/C 0.6	(g)	weight (g)	weight (g)	Ksc
P=1.5%	cement	500	264.92	266.88	28.40
	sand	1375	263.21	265.33	29.60
	water	250	263.81	266.13	28.00
	P=1.5%	3.75	263.98	266.11	28.67
	water-P=1.5%	246.25			
P=2%	cement	500	260.7	264.42	23
	sand	1375	261.2	266.82	23
	water	250	261.88	265.11	23
	P=2%	5	261.26	265.45	23
	water-P=2%	245			
P=3%	cement	500	263.84	266.89	24.00
	sand	1375	261.24	263.06	24.00
	water	250	263.59	265.75	24.00
	P=3%	7.5	262.89	265.23	24.00
	water-P=3%	242.5			
P=4%	cement	500	264.15	265.96	23
	sand	1375	259.52	260.87	23
	water	250	262.45	264.6	23
	P=4%	10	262.04	263.81	23
	water-P=4%	240			
P=0%	cement	500	276.43	263.17	28.80
	sand	1375	277.06	264.9	29.20
	water	300	276.34	264.12	28.80
			276.61	264.06	28.93

ตาราง ก.3 ค่าการไหลแผ่ (Flowability) ของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมน้ำยางพารา

ปริมาณน้ำยาง, P (%)	W/C	อัตราการไหลแผ่ (มิลลิเมตร)
P = 0	0.5	150 ± 5
P = 0.5	0.5	155 ± 5
P = 1	0.5	161 ± 5
P = 1.5	0.5	160 ± 5
P = 2	0.5	144 ± 5
P = 3	0.5	132 ± 5
P = 4	0.5	105 ± 5
P = 0	0.6	220 ± 5
P = 0.5	0.6	210 ± 5
P = 1	0.6	190 ± 5
P = 1.5	0.6	180 ± 5
P = 2	0.6	173 ± 5
P = 3	0.6	165 ± 5
P = 4	0.6	155 ± 5

ตาราง ก. 4 ค่าการยุบตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่ W/C เท่ากับ 0.5 P 2 %

W/C0.5	P2%	ตัวอย่าง 1	W/C0.5	P2%	ตัวอย่าง 2	W/C0.5	P2%	ตัวอย่าง 3
แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)	แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)	แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
675.40	0.10	0.10	383.63	0.10	0.10	598.52	0.08	0.10
1,474.38	0.14	0.20	859.60	0.17	0.20	1,381.92	0.12	0.20

ตาราง ก – 4 (ต่อ)

W/C0.5	P2%	ตัวอย่าง 1	W/C0.5	P2%	ตัวอย่าง 2	W/C0.5	P2%	ตัวอย่าง 3
แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)	แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)	แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)
2,428.11	0.21	0.30	1,428.09	0.21	0.30	2,350.77	0.18	0.30
3,305.97	0.26	0.40	2,073.92	0.27	0.40	3,320.84	0.27	0.40
4,261.94	0.30	0.50	2,781.88	0.33	0.50	4,091.60	0.32	0.50
5,419.88	0.38	0.60	3,413.43	0.39	0.60	4,971.16	0.37	0.60
6,548.50	0.43	0.70	4,168.88	0.43	0.70	5,851.67	0.43	0.70
7,787.08	0.50	0.80	4,986.80	0.52	0.80	6,779.54	0.49	0.80
8,934.34	0.56	0.90	5,851.90	0.57	0.90	7,723.91	0.54	0.90
9,694.84	0.62	1.00	6,671.49	0.63	1.00	8,622.80	0.62	1.00
9,446.44	0.74	1.10	7,476.40	0.70	1.10	9,088.10	0.67	1.10
8,004.01	0.76	1.20	8,065.07	0.76	1.20	8,948.49	0.73	1.20
			8,189.05	0.83	1.30	8,095.75	0.81	1.30
			7,337.03	0.90	1.40			
			6,161.09	0.98	1.50			

ตาราง ก.5 ค่าการยุบตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่ W/C เท่ากับ 0.5 P 3 %

W/C0.5	P3%	ตัวอย่าง 1	W/C0.5	P3%	ตัวอย่าง 2	W/C0.5	P3%	ตัวอย่าง 3
แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)	แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)	แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
291.49	0.07	0.10	644.91	0.15	0.10	291.49	0.07	0.10

ตาราง ก.5 (ต่อ)

W/C0.5	P3%	ตัวอย่าง 1	W/C0.5	P3%	ตัวอย่าง 2	W/C0.5	P3%	ตัวอย่าง 3
แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)	แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)	แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)
521.70	0.12	0.20	1,382.63	0.20	0.20	521.70	0.12	0.20
844.11	0.17	0.30	2,213.42	0.25	0.30	844.11	0.17	0.30
1,197.39	0.24	0.40	3,075.91	0.32	0.40	1,197.39	0.24	0.40
1,627.69	0.32	0.50	3,908.50	0.34	0.50	1,627.69	0.32	0.50
2,119.77	0.37	0.60	4,942.73	0.40	0.60	2,119.77	0.37	0.60
2,673.72	0.42	0.70	5,947.33	0.48	0.70	2,673.72	0.42	0.70
3,228.08	0.47	0.80	6,984.10	0.54	0.80	3,228.08	0.47	0.80
3,782.82	0.52	0.90	7,929.12	0.60	0.90	3,782.82	0.52	0.90
4,337.96	0.57	1.00	8,425.28	0.67	1.00	4,337.96	0.57	1.00
4,955.22	0.64	1.10	7,929.12	0.72	1.10	4,955.22	0.64	1.10
5,572.96	0.69	1.20	6,426.87	0.80	1.20	5,572.96	0.69	1.20
6,144.78	0.74	1.30				6,144.78	0.74	1.30
6,639.64	0.81	1.40				6,639.64	0.81	1.40
7,103.84	0.87	1.50				7,103.84	0.87	1.50
7,258.63	0.97	1.60				7,258.63	0.97	1.60
6,686.05	1.03	1.70				6,686.05	1.03	1.70
5,542.06	1.10	1.80				5,542.06	1.10	1.80

ตาราง ก.6 ค่าการยุบตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่ W/C เท่ากับ 0.5 P 4 %

W/C0.5	P4%	ตัวอย่าง 1	W/C0.5	P4%	ตัวอย่าง 2	W/C0.5	P4%	ตัวอย่าง 3
แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)	แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)	แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
352.86	0.06	0.10	322.19	0.06	0.10	568.87	0.08	0.10
782.66	0.14	0.20	705.94	0.14	0.20	1,199.74	0.15	0.20
1,274.16	0.20	0.30	1,151.33	0.18	0.30	1,938.96	0.21	0.30
1,827.48	0.25	0.40	1,735.34	0.23	0.40	2,601.78	0.25	0.40
2,473.54	0.30	0.50	2,412.13	0.30	0.50	3,450.36	0.34	0.50
3,104.73	0.36	0.60	3,181.93	0.37	0.60	4,299.84	0.38	0.60
3,690.19	0.42	0.70	3,875.40	0.44	0.70	5,103.78	0.44	0.70
4,337.78	0.46	0.80	4,723.79	0.47	0.80	5,738.20	0.52	0.80
5,078.53	0.56	0.90	5,588.52	0.54	0.90	6,078.82	0.57	0.90
5,850.86	0.61	1.00	6,376.83	0.59	1.00	5,769.16	0.65	1.00
6,577.51	0.67	1.10	7,042.07	0.64	1.10	4,732.63	0.75	1.10
7,149.99	0.74	1.20	7,227.81	0.72	1.20			
7,211.91	0.79	1.30	6,562.43	0.77	1.30			
6,623.91	0.86	1.40	5,341.36	0.84	1.40			
5,758.14	0.92	1.50						

ตาราง ก.7 ค่าการยุบตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่ W/C 0.6 เท่ากับ P 2 %

W/C0.6	P2%	ตัวอย่าง 1	W/C0.5	P2%	ตัวอย่าง 2	W/C0.5	P2%	ตัวอย่าง 3
แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)	แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)	แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
429.74	0.12	0.10	522.63	0.06	0.10	306.85	0.05	0.10
982.64	0.19	0.20	1,153.33	0.12	0.20	659.89	0.13	0.20
1,628.20	0.23	0.30	1,830.75	0.17	0.30	1,105.26	0.17	0.30
2,351.25	0.28	0.40	2,462.51	0.22	0.40	1,597.02	0.24	0.40
3,152.02	0.35	0.50	3,218.21	0.30	0.50	2,212.15	0.30	0.50
3,830.23	0.45	0.60	3,990.06	0.36	0.60	2,873.98	0.37	0.60
4,647.92	0.44	0.70	4,654.43	0.41	0.70	3,536.36	0.43	0.70
5,450.99	0.54	0.80	5,056.40	0.48	0.80	4,137.61	0.48	0.80
5,899.20	0.59	0.90	5,040.93	0.53	0.90	4,770.19	0.54	0.90
5,991.96	0.64	1.00	4,623.51	0.61	1.00	5,310.58	0.60	1.00
5,497.35	0.72	1.10				5,511.38	0.64	1.10
4,786.86	0.78	1.20				5,604.08	0.72	1.20
						5,665.89	0.78	1.30
						5,387.80	0.84	1.40
						4,816.49	0.92	1.50

ตาราง ก. 8 ค่าการยุบตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่ W/C เท่ากับ 0.6 P 3 %

W/C0.6	P3%	ตัวอย่าง 1	W/C0.5	P3%	ตัวอย่าง 2	W/C0.5	P3%	ตัวอย่าง 3
แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)	แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)	แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
306.87	0.07	0.10	352.90	0.08	0.10	521.94	0.12	0.10
629.22	0.14	0.20	813.45	0.16	0.20	1,090.35	0.20	0.20
967.08	0.20	0.30	1,397.23	0.21	0.30	1,751.47	0.24	0.30
1,320.45	0.24	0.40	2,058.37	0.26	0.40	2,490.14	0.29	0.40
1,689.36	0.32	0.50	2,781.65	0.32	0.50	3,198.69	0.32	0.50
2,058.45	0.36	0.60	3,505.61	0.38	0.60	4,000.43	0.40	0.60
2,458.50	0.42	0.70	4,153.12	0.42	0.70	4,911.06	0.40	0.70
2,827.96	0.48	0.80	4,862.90	0.52	0.80	5,668.12	0.54	0.80
3,120.57	0.56	0.90	5,496.04	0.56	0.90	6,101.04	0.58	0.90
3,305.44	0.62	1.00	5,835.98	0.63	1.00	6,008.25	0.65	1.00
3,659.88	0.66	1.10	5,789.62	0.70	1.10	5,343.58	0.72	1.10
4,076.17	0.73	1.20	5,279.79	0.74	1.20			
4,538.97	0.77	1.30						
4,816.78	0.82	1.40						
4,755.04	0.90	1.50						
4,245.84	0.96	1.60						

ตาราง ก. 9 ค่าการยุบตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่ W/C เท่ากับ 0.6 P 4 %

W/C0.6	P4%	ตัวอย่าง 1	W/C0.5	P4%	ตัวอย่าง 2	W/C0.5	P4%	ตัวอย่าง 3
แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)	แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)	แรง (N)	dis (mm.)	Time (s)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
368.22	0.08	0.10	414.24	0.06	0.10	521.91	0.14	0.10
874.83	0.16	0.20	951.56	0.13	0.20	1,151.75	0.19	0.20
1,535.47	0.21	0.30	1,535.37	0.21	0.30	1,889.80	0.23	0.30
2,350.53	0.26	0.40	2,227.31	0.25	0.40	2,705.55	0.30	0.40
3,228.08	0.32	0.50	2,935.27	0.31	0.50	3,414.26	0.36	0.50
3,967.83	0.38	0.60	3,613.06	0.37	0.60	4,262.45	0.39	0.60
4,816.30	0.42	0.70	4,183.46	0.42	0.70	5,080.65	0.48	0.70
5,572.96	0.51	0.80	4,754.28	0.48	0.80	5,698.70	0.54	0.80
6,005.65	0.56	0.90	5,201.95	0.54	0.90	5,621.42	0.60	0.90
6,021.11	0.61	1.00	5,387.27	0.59	1.00	5,157.88	0.68	1.00
5,588.41	0.69	1.10	5,279.16	0.66	1.10			
4,924.35	0.75	1.20	4,939.49	0.73	1.20			

ตาราง ก. 10 ค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานความร้อน

No.	Mix Description	Age (Day)	k_s				$k_{Reference}$			
			(W / m.°C)		(W / m.°K)		(W / m.°C)		(W / m.°K)	
1	W/C0.5-P0	28	142.76	143.94	0.521	0.525	6834.5	6834.5	24.9	24.9
2	W/C0.5-P0	28	145.13		0.529		6834.5		24.9	
3	W/C0.5-P0.5	28	137.95	119.85	0.503	0.437	6834.5	6834.5	24.9	24.9
4	W/C0.5-P0.5	28	101.75		0.371		6834.5		24.9	

ตาราง ก – 10 (ต่อ)

No.	Mix Description	Age (Day)	k_s				$k_{Reference}$			
			(W / m.°C)		(W / m.°K)		(W / m.°C)		(W / m.°K)	
5	W/C0.5-P1.0	28	95.72	114.82	0.349	0.419	9112.7	7973.6	33.2	29.1
6	W/C0.5-P1.0	28	133.92		0.488		6834.5		24.9	
7	W/C0.5-P1.5	28	112.35	109.74	0.410	0.400	9112.7	9112.7	33.2	33.2
8	W/C0.5-P1.5	28	107.14		0.391		9112.7		33.2	







รูปที่ ข.1 การผสมตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์



รูปที่ ข. 2 การวัดอัตราการไหลแผ่น



รูปที่ ข.3 เทตัวอย่างเข้าแบบหล่อ



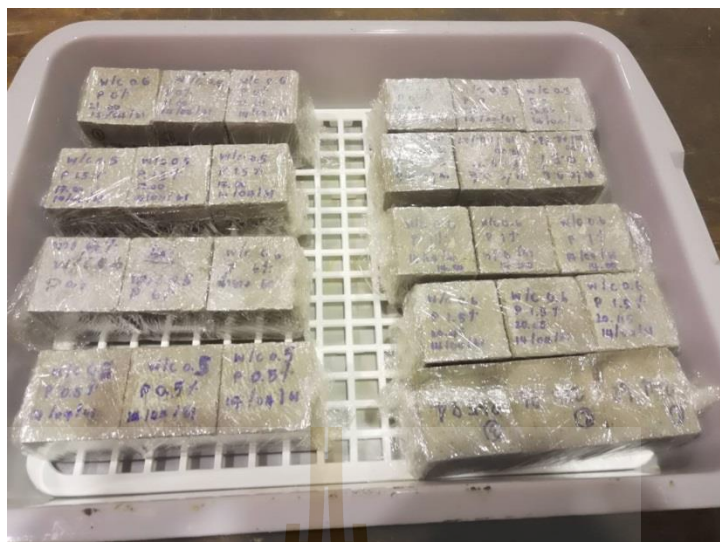
รูปที่ ข. 4 ตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมน้ำยางพารา



รูปที่ ข. 5 บ่มตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมน้ำยางพารา



รูปที่ ข. 6 บ่มตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมน้ำยางพารา อายุ 7 วัน



รูปที่ ข. 7 ห่อพลาสติกซีทตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมน้ำยางพารา



รูปที่ ข. 8 ภาพตัวอย่างหลังการทดสอบรับแรงอัด



รูปที่ ข.9 เก็บตัวอย่างเพื่อส่งวิเคราะห์ภาพถ่ายทางจุลภาค



รูปที่ ข.10 ตัวอย่างหลังการทดสอบกำลังอัด

ประวัติผู้เขียน

นายชยพล มุลาดี เกิดวันที่ 20 เมษายน 2524 ที่อยู่ปัจจุบัน เลขที่ 4 ซอย 5 ถนนเทวภิบาล ตำบลในเมือง อำเภอเมืองร้อยเอ็ด จังหวัดร้อยเอ็ด การศึกษาปวส.สาขาเทคนิคก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคร้อยเอ็ด การศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ปี 2549 เข้าทำงานในตำแหน่ง วิศวกรโครงการ บริษัท พیمانพัฒนา จำกัด ปี 2557 ถึง ปัจจุบันปฏิบัติงานเป็นพนักงานรัฐวิสาหกิจ การประปาส่วนภูมิภาค เขต 2 จัง หวัดสระบุรี

