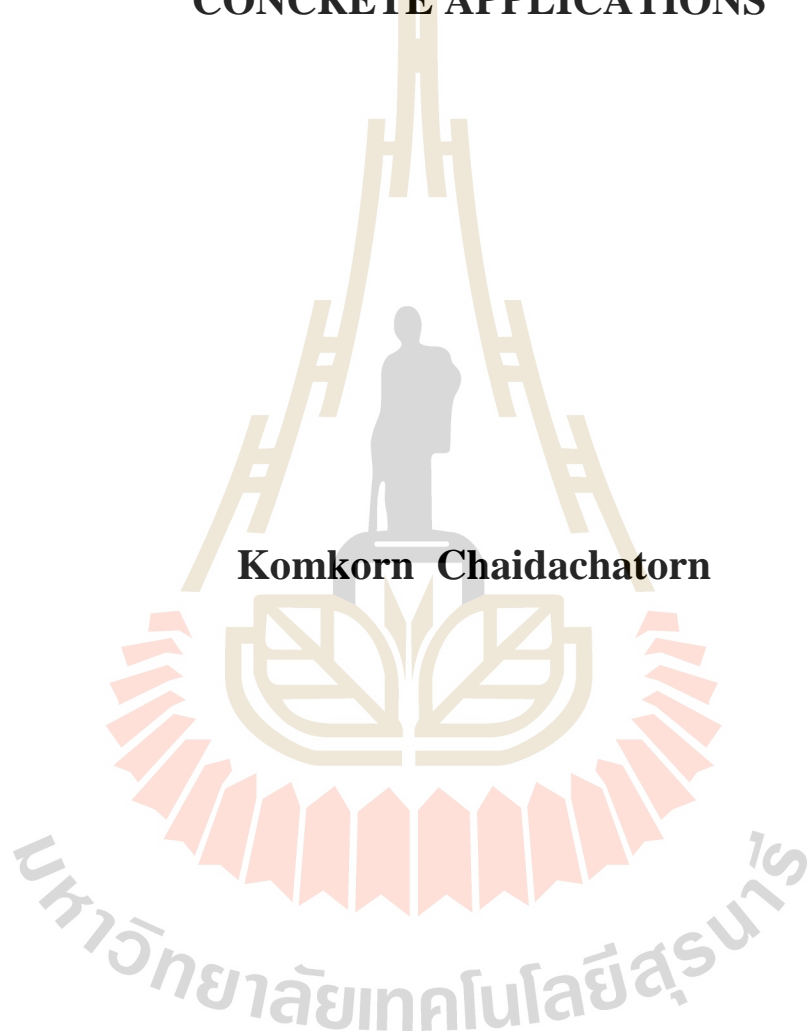


การประยุกต์ใช้ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลเป็นมวลรวมในงานคอนกรีต
ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**UTILIZATION OF RECYCLED ASPHALT PAVEMENT
AS AGGREGATES IN ENVIRONMENTAL-FRIENDLY
CONCRETE APPLICATIONS**

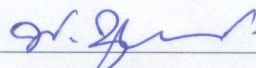


**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Construction
and Infrastructure Management
Suranaree University of Technology
Academic Year 2019**

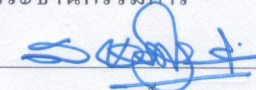
การประยุกต์ใช้ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลเป็นมวลรวมในงานคอนกรีต
ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิบัณฑิต

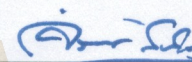
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(ศ. ดร.พานิช วุฒิพิภพ)

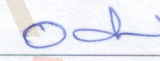
ประธานกรรมการ


(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)


กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)


(ผศ. ดร.จิระยุทธ สืบสุข)


กรรมการ


(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลจินิวัฒน์)

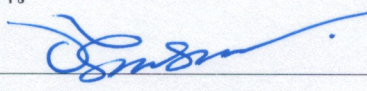
กรรมการ


(อ. ดร. Menglim Hoy)

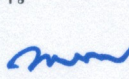
กรรมการ

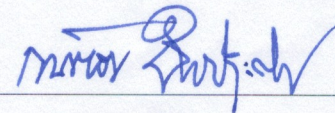

(ดร. อภิชาติ สุดดีพงษ์)

กรรมการ


(ดร. อธิกร ภูมิพันธ์)

กรรมการ


(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)


(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

คมนตรี ไชยเดชชาคร : การประยุกต์ใช้ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลเป็นมวลรวมในงานคอนกรีต
ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (UTILIZATION OF RECYCLED ASPHALT PAVEMENT AS
AGGREGATES IN ENVIRONMENTAL-FRIENDLY CONCRETE APPLICATIONS)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 124 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการนำเอาผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลมาแทนที่มวลรวมธรรมชาติใน
มอร์ตาร์และคอนกรีต การศึกษาการพัฒนากำลังอัดและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคนำเสนอ
โดยการปรับเปลี่ยนสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่มีส่วนผสมของผิวทางแอสฟัลต์
รีไซเคิล การเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่มีส่วนผสมของผิวทางแอสฟัลต์
รีไซเคิลคือเป้าหมายการศึกษาที่สำคัญของงานวิจัยนี้ งานวิจัยและการเก็บข้อมูลแบ่งออกเป็น
2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ศึกษาการพัฒนากำลังของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลแทนที่
มวลรวมละเอียดธรรมชาติโดยทดสอบกำลังอัด ทดสอบ X-ray diffraction (XRD) และการถ่ายภาพ
ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) จากนั้น
ทำการประเมินอิทธิพลของอัตราส่วนการแทนที่ด้วยผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล อัตราส่วนน้ำต่อ
ซีเมนต์ และอายุบ่มต่อการพัฒนากำลังอัด ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลมีการดูดซึมน้ำที่สูงอย่างชัดเจนที่
สถานะอิ่มตัวผิวแห้งแต่มีอัตราการดูดซึมน้ำที่ช้ากว่าทราย ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นเพื่อชดเชยสถานะอิ่มตัว
ผิวแห้งยังคงอยู่และกลายเป็นน้ำอิสระในส่วนผสมหลังจากการแข็งตัว ปริมาณการแทนที่ด้วย
ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลที่อัตราเหมาะสมเท่ากับร้อยละ 25 ช่วยเพิ่มผลิตภัณฑ์ซีเมนต์และกำลังอัด
สำหรับค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำกว่า 0.5 ซึ่งไม่น่าเพียงพอแก่ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์
การแทนที่ด้วยผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลเป็นผลให้เกิดความพรุนมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและปริมาณ
ผลิตภัณฑ์ซีเมนต์และกำลังอัดลดลงสำหรับค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มากกว่า 0.5 อัตราส่วนน้ำ
ต่อซีเมนต์ปรับปรุงได้รับการนำเสนอด้วยปริมาณน้ำรวม (Combined water, w^*) ซึ่งเป็นผลรวมของ
ปริมาณน้ำที่ทำปฏิกิริยา (Reacted water, w) และปริมาณน้ำที่ไม่ได้รับการดูดซับหลังจากแข็งตัว
(After-hardening unabsorbed water, w_u) ผลของตัวห่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันเนื่องจากแอสฟัลต์ถูก
นำมาพิจารณาในการพัฒนาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ส่วนขยายสำหรับทำนายนการพัฒนากำลังของ
มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล ผลการศึกษาส่วนแรกช่วยให้ การออกแบบส่วนผสม
ของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนการแทนที่ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลในมวลรวมธรรมชาติ อัตราส่วน
น้ำต่อซีเมนต์ และอายุบ่มใด ๆ มีความสะดวกมากขึ้น

ส่วนที่ 2 นำเสนอผลการแทนที่มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบด้วยผิวทางแอสฟัลต์
รีไซเคิลต่อกำลังอัดคอนกรีต ศึกษาโดยการปรับเปลี่ยนสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แทนที่ผิวทาง

แอสฟัลต์รีไซเคิล กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของการแทนที่ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลในมวลรวมธรรมชาติ การลดลงของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เนื่องจากน้ำอิสระและแอสฟัลต์เป็นผลให้กำลังอัดของคอนกรีตแทนด้วยผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลลดลง อย่างไรก็ตาม Modulus of resilience ของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล กฎอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ส่วนขยายถูกนำมาใช้อธิบายการพัฒนา กำลังของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล งานวิจัยส่วนนี้แนะนำแนวทางการออกแบบสำหรับคอนกรีตที่แทนที่ด้วยผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล บนพื้นฐานของการออกแบบตามวิธีของ ACI 211.1 วิธีการออกแบบนี้ได้รับการตรวจสอบเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากงานวิจัยในอดีต งานวิจัยนี้ช่วยสนับสนุนการออกแบบคอนกรีต ที่ใช้ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลแทนที่มวลรวมเพื่อเพิ่มการประยุกต์ใช้วัสดุรีไซเคิลนี้ในงานก่อสร้างทางวิศวกรรมโยธาได้อย่างยั่งยืน



สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

KOMKORN CHAIDACHATORN : UTILIZATION OF RECYCLED ASPHALT PAVEMENT AS AGGREGATES IN ENVIRONMENTAL-FRIENDLY CONCRETE APPLICATIONS. THESIS ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., 124 PP.

MORTAR/CONCRETE/RECYCLED ASPHALT PAVEMENT/AGGREGATE

This research is to study the utilization of recycled asphalt pavement (RAP) to replace the natural aggregate in mortar and concrete. The investigations on the strength development and microstructure change have been presented by varying the mix proportion of mortar and concrete containing RAP. The variation of strength of mortar and concrete containing RAP is the key study of this work. Research and data collection are divided into two parts:

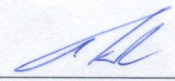
The first part investigated the strength development of cement mortar (CM) containing RAP as fine aggregate replacement for natural sand by means of strength, X-ray diffraction, and scanning electron microscopy (SEM) tests. The effect of RAP replacement ratio, water to cement ratio (w/C) and curing time on strength development was evaluated. RAP had noticeably higher water absorption at saturated surface dry (SSD) state and slower rate, of absorption than sand. The additional water to be compensated for the SSD state, remained as the free water in the mix after hardening. The RAP replacement at an optimum ratio of 25% increased the cementitious products and compressive strength for low w/C of less than 0.5, which was insufficient for cement hydration. The RAP replacement caused the most significant porosity and the lower cementitious product and compressive strength for high w/C of more than 0.5. The modified w/C has presented as the combined water

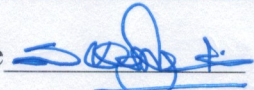
(w^*), defined as the sum of reacted water (w) and after-hardening unabsorbed water (w_u). The hydration retardant effect due to bitumen was considered in the development of the extended water to cement ratio law for prediction of strength development in RAP-CM. The outcome of the first part will facilitate the mix design of RAP-CM at various RAP replacement ratios, w/C ratios and curing times.


The second part introduced the effect of replacement of fine and coarse aggregates by RAP on the compressive strength concrete. The investigations on the mix proportion of concrete containing RAP was presented. The compressive strength of concrete tends to decrease with the increase of RAP replacement in natural aggregates. The reduction of cementation products due to free water and asphalt bitumen causes a decline in the strength of concrete containing RAP. However, the modulus of resilience of concrete increases according to the RAP replacement. The extended water to cement ratio law was used to explain the strength development of concrete containing RAP. The design guideline for concrete containing RAP has also been presented in this work, based on the conventional approach by ACI 211.1. This design approach was verified by previous works from the literature. The new findings from this research will promote the mix design of concrete containing RAP as an aggregate replacement, for moving towards increased applications of recycled materials in a sustainable manner in civil engineering construction.

School of Civil Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature 

Advisor's Signature 

Co-Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

การที่ได้มีโอกาสเข้ามาศึกษาในระดับปริญญาเอก หลักสูตรบริหารการก่อสร้างและ
สาธารณสุขปโทค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แห่งนี้ เพราะความสามารถของคณาจารย์ผู้สอน ใน
สถาบันแห่งนี้ซึ่งแต่ละท่านไม่ได้ทำหน้าที่เพียงแค่สอนเท่านั้น แต่ยังเป็นผู้ที่มีประสบการณ์ ทั้งใน
ด้านการผลิตผลงานทางด้านงานวิจัยจนเป็นที่ยอมรับในระดับโลก และยังมีคามเชี่ยวชาญเป็น
อย่างสูงในการเป็นที่ปรึกษาให้คำแนะนำวิธีการทำวิจัยที่ถูกต้องให้นักศึกษาทุกคนจนทำให้
ข้าพเจ้าสามารถที่จะค้นคว้าวิจัยจนงานสำเร็จลุล่วงไปได้ ในการนี้บุคคลที่ข้าพเจ้าจะต้อง
ขอขอบพระคุณเป็นที่สุด ได้แก่ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษาและ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระยุทธ สืบสุข อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ทั้งสองท่านนี้ได้ให้ความรู้และให้
แนวคิดในการดำเนินการวิจัยตั้งแต่ยังไม่เห็นวิถึว่า งานวิจัยที่ข้าพเจ้าทำอยู่จะดำเนินการ ให้สำเร็จ
ไปได้อย่างไร อีกทั้งยังให้ความเมตตา และมีความอดทนต่อข้าพเจ้าเป็นอย่างมากในการให้
คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และช่วยแก้ไขปัญหิต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำวิจัยกล่าวได้ว่า
หากไม่ได้สองท่านนี้แล้วข้าพเจ้าคงไม่สำเร็จการศึกษาได้อย่างแน่นอน และขอขอบพระคุณ
กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์
ฉบับนี้ มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และสำเร็จได้ด้วยดี

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ที่ได้ให้
การสนับสนุนทุนการศึกษา บิดา มารดา ที่คอยผลักดันและสนับสนุนในทุกด้าน ภรรยาและลูกที่
คอยให้กำลังใจและช่วยเป็นแรงผลักดันอย่างดี ที่คอยเป็นกำลังใจ หากประโยชน์และคุณค่าของ
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีบ้างก็ขอมอบเป็นกตัญญูตราบูชาคุณบิดา มารดา ครูบาอาจารย์ และผู้มีพระคุณ
ทุกท่าน

คมกร ไชยเดชาธร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	๗
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 รายการอ้างอิง.....	5
2 ปรีทัศน์วรรณกรรม.....	11
2.1 คอนกรีต.....	11
2.2 องค์ประกอบของคอนกรีต.....	11
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต.....	12
2.4 คุณภาพของส่วนผสมคอนกรีต.....	13
2.5 หลักการของปฏิกิริยาไฮเดรชันพื้นฐาน.....	14
2.6 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต.....	16
2.7 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์.....	20
2.8 ผลกระทบของอายุต่อกำลังของคอนกรีต.....	21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.9	ผลกระทบของมวลรวมหยาบต่อกำลังของคอนกรีต.....	22
2.10	แอสฟัลต์ซีเมนต์	23
2.11	การหมุนเวียนวัสดุเก่ามาใช้ใหม่	24
2.12	งานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ RAP	25
2.13	รายการอ้างอิง	27
3	กฎอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ส่วนขยายสำหรับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีผิวทาง	
	แอสฟัลต์รีไซเคิลเป็นมวลรวม	30
3.1	บทนำ.....	30
3.2	วัสดุและวิธีการทดลอง	31
3.3	ผลการทดสอบและการอภิปราย	38
3.3.1	วิเคราะห์ผลทดสอบของซีเมนต์มอร์ตาร์.....	38
3.3.2	โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์.....	44
3.4	น้ำอิสระในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	49
3.5	สรุปผลการทดสอบ	54
3.6	รายการอ้างอิง	55
4	การพัฒนากำลังและแนวทางออกแบบคอนกรีตที่ใช้ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล	
	เป็นมวลรวม	62
4.1	บทนำ.....	62
4.2	วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	63
4.2.1	ปูนซีเมนต์	63
4.2.2	วัสดุผสม	63
4.2.3	สารผสมเพิ่ม.....	64
4.2.4	สมบัติพื้นฐานของวัสดุ แบ่งการทดสอบเป็นดังนี้.....	65
4.2.5	สัญลักษณ์และปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีต	68
4.2.6	การทดสอบหาลำดับอัดของคอนกรีต	72
4.3	ผลการทดสอบและการอภิปราย	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1	ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสด.....72
4.3.2	หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต.....76
4.3.3	กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวม RAP แทนที่มวลรวม ธรรมชาติ.....77
4.3.4	การพัฒนากำลังอัดตามอายุบ่มของคอนกรีตที่ใช้มวลรวม RAP แทนที่มวลรวมธรรมชาติ.....89
4.4	แนวทางการทำนายกำลังอัดสำหรับคอนกรีตที่ใช้ RAP แทนที่ มวลรวมธรรมชาติ.....107
4.5	สรุปผลการทดลอง.....116
4.6	รายการอ้างอิง.....116
5	สรุปและข้อเสนอแนะ.....120
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....120
5.1.1	อิทธิพลการแทนที่ RAP ในมวลรวมละเอียดธรรมชาติ ต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัด และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง จุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์.....120
5.1.2	อิทธิพลการแทนที่ RAP ในมวลรวมธรรมชาติต่อ การเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของคอนกรีต.....121
5.2	ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อไป.....121
ภาคผนวก122
ประวัติผู้เขียน132

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ถึง 5 13
2.2	ค่าความยวบตัวของคอนกรีตที่ใช้สำหรับการก่อสร้างประเภทต่าง ๆ 17
2.3	ขนาดโตสุดของวัสดุผสมสำหรับงานก่อสร้างประเภทต่าง ๆ 17
2.4	ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับค่ายวบตัวและวัสดุผสมขนาดต่าง ๆ 18
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต 19
2.6	ปริมาณของวัสดุผสมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาณของคอนกรีต 20
2.7	อัตราการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต่างกัน 22
2.8	กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุอื่น ๆ เปรียบเทียบกับที่อายุ 28 วันเป็นเกณฑ์ 22
3.1	สมบัติมวลรวมของทรายและ RAP 33
3.2	องค์ประกอบทางเคมีของ ซีเมนต์ ทรายและ RAP 34
3.3	สัดส่วนผสม 36
3.4	ค่าการไหลของมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ 38
4.1	สมบัติพื้นฐานของมวลรวม 65
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ 67
4.3	สัดส่วนผสมคอนกรีต 68
4.4	ผลการเปรียบเทียบค่าทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าทดสอบกำลังอัด ของแต่ร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ที่อายุบ่ม 7 วัน 112
4.5	ผลการเปรียบเทียบค่าทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าทดสอบกำลังอัด ของแต่ร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ที่อายุบ่ม 28 วัน 113
4.6	ผลการเปรียบเทียบค่าทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าทดสอบกำลังอัด ของแต่ร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ที่อายุบ่ม 60 วัน 113
4.7	ผลการเปรียบเทียบค่าทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าทดสอบกำลังอัด ของแต่ร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ที่อายุบ่ม 7 วัน 114
4.8	ผลการเปรียบเทียบค่าทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าทดสอบกำลังอัด ของแต่ร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ที่อายุบ่ม 28 วัน 115

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

4.9	ผลการเปรียบเทียบค่าทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าทดสอบกำลังอัด ของเต็ร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ที่อายุบ่ม 60 วัน.....	115
4.10	ผลการเปรียบเทียบค่าทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าทดสอบกำลังอัด จากห้องปฏิบัติการของเต็ร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP จากงานวิจัยในอดีต	115

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	องค์ประกอบของคอนกรีต..... 12
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 20
3.1	ภาพถ่ายของทราย และ RAP (a) ภาพสเกลปกติ (b) ภาพ SEM 32
3.2	การกระจายขนาดผลของทราย RAP และมวลรวมผสม 33
3.3	ผลการวิเคราะห์ XRD (a) ทราย และ RAP (b) ปูนซีเมนต์ และ ซีเมนต์เพสต์..... 35
3.4	หน่วยน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์แทนที่ Fine RAP ในมวลรวมละเอียด ธรรมชาติ 40
3.5	กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์แทนที่ Fine RAP ในมวลรวมละเอียด ที่อายุบ่มต่าง ๆ 41
3.6	การดูดซึมน้ำของมวลรวมธรรมชาติและ RAP ที่ระยะเวลาต่าง ๆ 43
3.7	ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของมวลรวมธรรมชาติและ RAP ที่ระยะเวลาต่าง ๆ 43
3.8	ผลการทดสอบ XRD ของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ 45
3.9	ผลการทดสอบ XRD ของ ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน อัตราส่วนน้ำ ต่อซีเมนต์ 0.5 ที่ปริมาณ RAP ต่าง ๆ 46
3.10	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 (a) 0 % RAP (b) 100 % RAP 48
3.11	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.70 (a) 0 % RAP (b) 100 % RAP 49
3.12	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์..... 51
3.13	การพัฒนากำลังของซีเมนต์มอร์ตาร์แทนที่ RAP ร้อยละต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ..... 53
3.14	การพัฒนากำลังของมอร์ตาร์แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยมวลรวม RAP ร้อยละต่าง ๆ เทียบกับอายุบ่ม 28 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ..... 54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 มวลรวมละเอียด (a) มวลรวมละเอียดธรรมชาติ (b) มวลรวมละเอียดจาก RAP	64
4.2 มวลรวมหยาบ (a) มวลรวมหยาบธรรมชาติ (b) มวลรวมหยาบจาก RAP	64
4.3 กราฟแสดงการกระจายของอนุภาคทรายและ RAP	67
4.4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดที่ปริมาณการแทนที่ Coarse RAP ที่ปริมาณต่าง ๆ	73
4.5 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดที่ปริมาณการแทนที่ Fine RAP ที่ปริมาณต่าง ๆ	75
4.6 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่ปริมาณการแทนที่ Coarse RAP ที่ปริมาณต่าง ๆ	76
4.7 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่ปริมาณการแทนที่ Fine RAP ที่ปริมาณต่าง ๆ	77
4.8 ผลของการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ต่อกำลังอัดของคอนกรีต ขณะอายุบ่ม	78
4.9 ผลของการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ต่อกำลังอัดของคอนกรีต ขณะอายุบ่ม	80
4.10 ผลของปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ในคอนกรีตที่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ ขณะอายุบ่ม (a) 7 วัน (b) 28 วัน และ (c) 60 วัน	82
4.11 ผลของปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ในคอนกรีตที่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ ขณะอายุบ่ม (a) 7 วัน (b) 28 วัน และ (c) 60 วัน	84
4.12 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ปรับปรุง ที่อายุบ่มต่าง ๆ	86
4.13 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ปรับปรุงที่อายุบ่มต่าง ๆ	87
4.14 ผลของการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวม Coarse RAP ต่อการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตที่กำลังออกแบบต่างๆ	89
4.15 ผลของการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวม Fine RAP ต่อการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตที่กำลังออกแบบต่างๆ	93
4.16 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ของคอนกรีตแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ระหว่างกำลังอัดต่อกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน	97

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ของคอนกรีตแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Fine RAP ระหว่างกำลังอัดต่อกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน	101
4.18 ค่า Modulus of resilience ของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ร้อยละต่าง ๆ	106
4.19 ค่า modulus of resilience ของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ร้อยละต่าง ๆ	106
4.20 กำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ที่อายุบ่ม 7 28 และ 60 วันเทียบกับคอนกรีตอ้างอิงที่ปริมาณ RAP ต่างๆ	108
4.21 กำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมหยาบด้วย Fine RAP ที่อายุบ่ม 7 28 และ 60 วันเทียบกับคอนกรีตอ้างอิงที่ปริมาณ RAP ต่างๆ	109
4.22 ผลการเปรียบเทียบค่าทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าทดสอบกำลังอัด จากห้องปฏิบัติการของแต่ร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP จากงานวิจัยในอดีต	112

คำอธิบายและสัญลักษณ์ย่อ

มอก.	=	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
AC	=	Asphalt Cement
ACI	=	American Concrete Institute
AS	=	ปริมาณแอสฟัลต์
ASTM	=	American Society for Testing and Material
C	=	Concrete
C2S	=	Dicalcium Silicate
C3A	=	Tricalcium Aluminate
C3S	=	Tricalcium Silicate
C4AF	=	Tetracalcium Aluminoferrite
CAH	=	Calcium Aluminate Hydrate
CH	=	Calcium Hydroxide
Comps.	=	กำลังอัด
CSH	=	Calcium Silicate Hydrate
f'_c	=	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 28 วัน
FM	=	Fineness Modulus
FR	=	RAP ส่วนละเอียด (Fine)
GR	=	RAP ส่วนหยาบ (Coarse)
G_s	=	ค่าความถ่วงจำเพาะ
M	=	Mortar
OPC	=	Ordinary Portland Cement
PG	=	Performance Grade
RAP	=	วัสดุผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล
w	=	ปริมาณน้ำ
w/C	=	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์
SP	=	Superplasticizer

คำอธิบายและสัญลักษณ์ย่อ(ต่อ)

UTM = Universal Testing Machine

WA = Water Absorption



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ผิวทางแอสฟัลต์เป็นวัสดุจำพวกแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุผสมระหว่างยางแอสฟัลต์และมวลรวม คุณสมบัติของผิวทางแอสฟัลต์เมื่อถูกรื้อออกจากสนามเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเสื่อมสภาพตามสภาพอายุของวัสดุประสานและกระบวนการรื้อถอน การเสื่อมสภาพส่วนใหญ่อยู่ในรูปของการเสียดสีของแอสฟัลต์แต่มวลรวมรีไซเคิลยังคงมีสภาพดีอยู่การนำผิวทางเดิมที่ถูกรื้อนำกลับมาใช้ใหม่เรียกว่า “ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล (Recycled asphalt pavement, RAP)” วิธีการนี้ นิยมนำมาใช้ใหม่ในช่วงเวลาที่ผ่านมา เนื่องจากประหยัดค่าใช้จ่ายและเป็นการอนุรักษ์แหล่งวัสดุตามธรรมชาติ (Tia et al., 2012; Zaumanis and Mallick, 2015; Suebsuk et al., 2014 Suebsuk et al., 2019) RAP ถูกนำมาใช้แทนบางส่วนของวัสดุคัดเลือกในงานชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทาง (Watson et al., 2010; Copeland, 2011; Mangiafico et al., 2015; Zaumanis and Mallick, 2015) และ RAP สามารถใช้การแทนที่วัสดุมวลรวมใหม่สำหรับการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ได้ (Visintine et al., 2013; Zaumanis and Mallick, 2015, Bin et al., 2016) นอกจากนี้ RAP ยังถูกใช้เป็นมวลรวมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยการผสมกับเถ้าลอยเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Hoy et al. 2016a; 2016b; 2017; 2018)

RAP เพื่อการแทนที่มวลรวมที่ละเอียดและมวลหยาบตามธรรมเนียมมากในงานคอนกรีตทั่วไปรวมถึงพื้นถนนคอนกรีต (Hossiney et al., 2010; Bakash and Sowmith, 2012; Brand et al., 2012; Tia et al., 2012) จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่มวลรวมด้วย RAP กำลังอัดมีค่าลดลงแต่มีความเหนียวเพิ่มขึ้น (Huang et al., 2006) กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมด้วย RAP จะขึ้นอยู่กับการยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์และซีเมนต์เพสต์ (Sommer, 1994 Delwar et al., 1997 Hassan et al., 2000; Mathias et al., 2004; Huang et al., 2005; 2006; Katsakou and Kolias, 2007; Al-Oraimi et al., 2009; Topcu and Isikdag, 2009; Okafor, 2010) การเพิ่มประสิทธิภาพด้านการรับกำลังของซีเมนต์มอร์ตาร์ทำได้โดยการนำเถ้าลอยมาแทนที่ในซีเมนต์ที่เป็นวัสดุประสานเดิมของคอนกรีตทำให้เพิ่มความพรุนและความสามารถในการซึมผ่าน (Hassan et al., 2000) คอนกรีตที่มีส่วนผสมของแอสฟัลต์จะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากกว่าคอนกรีตทั่วไปซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการใช้งานพิเศษได้แก่ งานชั้นรองพื้นทางรถไฟ

(Li et al., 1998; Hassan et al., 2000; Tompkins et al., 2009) เป็นต้น ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมแอสฟัลต์นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานรองพื้นทางรถไฟแบบไม่มีหินบดลาสต์วัสดุผสมนี้สามารถช่วยลดการสั่นสะเทือนและลดความเสียหายของแผ่นพื้นคอนกรีตของชั้นโครงสร้างทางรถไฟได้ (Wang et al., 2014; Yang et al., 2014; Han et al., 2015; Qiang et al., 2011; Ma et al., 2015) คุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมแอสฟัลต์จะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากขึ้นตามอัตราส่วนแอสฟัลต์ต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น (Liu et al., 2009; Wang et al., 2008) ปัจจุบันกลไกการพัฒนากำลังอัด และการออกแบบส่วนผสมสำหรับคอนกรีตและซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้ RAP ซึ่งมีแอสฟัลต์ผสมอยู่แทนที่มวลรวมธรรมชาติยังไม่เป็นที่ชัดเจน จากรายงานสรุปเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมไทย ปี 2562 การจำหน่ายปูนซีเมนต์ในประเทศมีปริมาณ 34.76 ล้านตัน จากการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานและการเร่งดำเนินโครงการขนาดใหญ่ของของภาครัฐ รวมทั้งการลงทุนอสังหาริมทรัพย์ของภาคเอกชน โดยเฉพาะการก่อสร้างรถไฟฟ้าและการลงทุนในพื้นที่ EEC และแนวโน้มอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปี 2563 ที่คาดว่าจะสูงขึ้นเล็กน้อยตามภาวะเศรษฐกิจโลก ดังนั้นเมื่อความต้องการปริมาณปูนซีเมนต์ภายในประเทศสูงขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อภาคการผลิตคอนกรีต ซึ่งจะประกอบ ปูนซีเมนต์ ทราย หิน ซึ่งเป็นวัสดุหลักในการผลิตคอนกรีต แต่การได้มาซึ่งปูนซีเมนต์ ทราย และหิน จะเป็นสาเหตุหลักในการทำลายสิ่งแวดล้อมในวงกว้าง ส่งผลกระทบต่อชุมชน และชาวบ้านในพื้นที่ใกล้เคียง

ดังนั้น การวิจัยนี้จึงศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้ RAP แทนที่มวลรวมภายใต้ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัด ได้แก่ อัตราส่วนการแทนที่ RAP อัตราส่วนอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และระยะเวลาการบ่ม การพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ถูกตรวจสอบโดยการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของการแทนที่ RAP ในมวลรวมสำหรับงานคอนกรีตเพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตตามที่กำหนด โดยจะนำเสนอการพัฒนาวิธีออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ RAP เป็นส่วนผสมในมวลรวมซึ่งปรับปรุงจากวิธี ACI 211.1 (2009) และมีเป้าหมายที่จะนำไปใช้ในงานผิวทางและองค์ประกอบต่าง ๆ ในงานถนนซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือใช้และผลิตผิวทางคอนกรีตเขียวที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในมิติของการลดปริมาณวัสดุก่อสร้างจากธรรมชาติได้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลการแทนที่ RAP ในมวลรวมละเอียดธรรมชาติต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัด และโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์

1.2.2 เพื่อศึกษาผลการแทนที่ RAP ในมวลรวมธรรมชาติต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของคอนกรีตและแนวทางการออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ RAP ในมวลรวม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตการศึกษาของงานวิจัยนี้สรุปได้ดังนี้

1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

- ปูนซีเมนต์ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1-2547
- มวลรวมหยาบรีไซเคิลได้จากการรื้อผิวทางแอสฟัลต์ขนาดใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร และขนาดโตสุด 10 มิลลิเมตร การคัดขนาดกระทำโดยตะแกรง
- มวลรวมละเอียดรีไซเคิลได้จากการรื้อผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลมีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร
- วัสดุมวลรวมของส่วนผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้ในการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่
 - ก) ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด ใช้อักษรย่อ M
 - ข) ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้ผิวทางแอสฟัลต์แทนที่เป็นมวลรวมละเอียดใช้อักษรย่อ M-R ที่ร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยน้ำหนัก
- วัสดุมวลรวมของส่วนผสมคอนกรีต แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่
 - ก) คอนกรีตที่ใช้หินปูนจากธรรมชาติและทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียดใช้อักษรย่อ C
 - ข) คอนกรีตที่ใช้หินปูนจากธรรมชาติและผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลแทนที่มวลรวมละเอียดใช้อักษรย่อ C-FR ที่ร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยน้ำหนัก
 - ค) คอนกรีตที่ใช้ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบใช้อักษรย่อ C-CR ที่ร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยน้ำหนัก และทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด

1.3.2 การทดสอบ

1.3.2.1 การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวม

- ก) วิเคราะห์การกระจายขนาดและค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมด้วยตะแกรงตามมาตรฐาน ASTM C136/C136M-14 เพื่อวิเคราะห์การกระจายขนาดและขนาดโดยเฉลี่ยของมวลรวมโดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C33/C33M-16e1

ข) ทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 128-15

ค) ทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบตามมาตรฐาน ASTM C 127-15

ง) ทดสอบค่าการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบแรงเสียดทานตามมาตรฐาน ASTM C131/C131M 14 (เฉพาะมวลรวมหยาบ)

จ) ทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวม และปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM C29-16

1.3.2.2 ทดสอบวัดค่าการไหล (Flow) ของซีเมนต์มอร์ตาร์ก่อนเทลงแบบหล่อ และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 28 และ 60 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-16a ปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วน w/C ระหว่าง 0.40 และ 0.70

1.3.2.3 ควบคุมค่ายุบตัว (Slump) ของตามมาตรฐาน ASTM C143/C143M-15a ใช้สารลดน้ำ ประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C494/C494M-16 ช่วยในการปรับค่าการยุบตัวสำหรับคอนกรีตในส่วนผสมที่ค่าการยุบตัวต่ำกว่ามาตรฐาน

1.3.2.4 ตัวอย่างคอนกรีตเตรียมตามมาตรฐาน ASTM C31-16 โดยออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ระหว่าง 18 และ 44 เมกะปาสกาลตัวอย่างเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร เตรียมตัวอย่างคอนกรีตในแต่ละส่วนผสมจำนวนส่วนผสมละ 5 ตัวอย่าง

1.3.2.5 บ่มคอนกรีตเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำโดยใช้แผ่นกันความชื้นตามมาตรฐาน ASTM C171-16

1.3.2.6 ทดสอบคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39/C39M-16

1.4 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

โครงสร้างของวิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ บทนี้นำเสนอที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์รวมถึงสมมติฐานของงานวิจัยขอบเขตของการศึกษา และโครงสร้างของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทัศนัวรรณกรรม บทนี้นำเสนอเกี่ยวกับการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์

บทที่ 3 กฎอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ส่วนขยายสำหรับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลเป็นมวลรวม บทนี้นำเสนอเกี่ยวกับผลการแทนที่ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลในมวลรวม

ละเอียดธรรมชาติต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ และ โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์ตลอดจนการวิเคราะห์และทำนายกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์แทนที่มวลรวมด้วย RAP ตามกฎของ Abrams (1918)

บทที่ 4 การพัฒนากำลังและแนวทางออกแบบคอนกรีตที่ใช้ RAP เป็นมวลรวม บทนี้ นำเสนอเกี่ยวกับผลการแทนที่ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลในมวลรวมธรรมชาติต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของคอนกรีต และแนวทางการออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ RAP เป็นมวลรวม

บทที่ 5 บทสรุป บทนี้นำเสนอสรุปผลของงานวิจัย และข้อสรุปโดยรวมข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบผลการแทนที่ RAP ในมวลรวมละเอียดธรรมชาติต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัด และ โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์

1.5.2 ทราบผลการแทนที่ RAP ในมวลรวมธรรมชาติ ต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของคอนกรีตและแนวทางการออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ RAP เป็นมวลรวม

1.6 รายการอ้างอิง

มอก.15 เล่ม 1 -2547. 2555. พระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ.2551. มาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : เล่ม 129 ตอนพิเศษ 108.

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2562, รายงานภาพรวมเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมไทย ปี 2562 และแนวโน้ม ปี 2563, หน้า 27.

Abrams, D.A. (1918). **Design of Concrete Mixtures** . Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago. Bulletin 1: 20p.

ACI. (2009). **Standard practice for selecting proportions for normal, heavy weight, and mass concrete**. ACI 211.1-91, ACI Committee 211.

Al-Oraimi, S., Hossam, F., and Hago, H. A. (2009). **Recycling of reclaimed asphalt pavement in Portland cement concrete**. Journal of Engineering Research, 6(1), 37–45.

ASTM (2014). **Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the los angeles machine**. ASTM C131 / C131M - 14, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.

- ASTM (2014). **Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates.** ASTM C136/C136M-14, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2015). **Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate.** ASTM C127-15, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2015). **Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate.** ASTM C128-15, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2015). **Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete.** ASTM C143/C143M-15a, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2016). **Standard test method for bulk density (“unit weight”) and voids in aggregate.** ASTM C29-16, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2016). **Standard practice for making and curing concrete test specimens in the field.** ASTM C31-16, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2016). **Standard specification for concrete aggregates.** ASTM C33/C33M-16e1, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2016). **Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.** ASTM C39 / C39M-16, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2016b). **Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens).** ASTM C109/C109M-16a, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2016). **Standard specification for sheet materials for curing concrete.** American Society for Testing and Materials. ASTM C171-16, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.

- ASTM (2016). **Standard specification for chemical admixtures for concrete**. ASTM C494-16, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- Bakash, S. A., and Sowmith, C. (2012). **A review of the use of recycled materials in rigid pavements**. International Journal of Engineering Research and Technology, ESRSA Publications, 24, 213-220.
- Bin, Y. Xingyu, G. Ming, W. Fujian, N. (2016). **Application of a high percentage of reclaimed asphalt pavement in an asphalt mixture: blending process and performance investigation**. Road Materials and Pavement Design, 18(3), 753-765.
- Brand, S., Roesler, R., Al-Qadi, L., and Shangquan, P. (2012). **Fractionated reclaimed asphalt pavement (FRAP) as a coarse aggregate replacement in a ternary blended concrete pavement**. Illinois Center for Transportation.
- Copeland, A. (2011). **Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: state of the practice**. Office of Infrastructure Research and Development Federal Highway Administration.
- Delwar, M., Fahmy, M., and Taha, R. (1997). **Use of reclaimed asphalt pavement as an aggregate in Portland cement concrete**. ACI Materials Journal, 94(3), 251-256.
- Hassan, K.E., Brooks, J. J, and Erdman, M. (2000). **The use of reclaimed asphalt pavement (RAP) aggregates in concrete**. Waste Materials in Construction Wascon 2000 Proceedings of the International Conference on the Science and Engineering of Recycling for Environmental Protection, Harrogate, England 31 May, 1–2 June 2000, 1: 121-128.
- Han, J., Zhao, G.-T., Xiao, X.-B., Wen, Z.-F., Guan, Q.-H., and Jin, X.-S. (2015). **Effect of softening of cement asphalt mortar on vehicle operation safety and track dynamics**. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 16(12), 976–986.
- Hossiney, N., Tia, M., and Bergin, M. J. (2010). **Concrete containing RAP for use in concrete pavement**. International Journal of Pavement Research and Technology, 3(5), 251-258.
- Hoy, M., Horpibulsuk, S., and Arulrajah, A. (2016a). **Strength development of recycled asphalt pavement-fly ash geopolymer as a road pavement material**. Construction and Building Materials, 117, 209-219.
- Hoy, M., Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A., and Arulrajah, A. (2016b). **Recycled asphalt pavement-fly ash geopolymers as a sustainable pavement base material: Strength and toxic investigations**. Science of the Total Environment, 573, 19-26.

- Hoy, M., Rachan, R., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A. and Mirzababaei, M. (2017). **Effect of wetting-drying cycles on compressive strength and microstructure of recycled asphalt pavement-fly ash geopolymer.** Construction and Building Materials, 144, 624-634.
- Hoy, M., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A. and Mohajerani, A. (2018), **Strength and microstructural study of recycled asphalt pavement-slag geopolymer as a pavement base material.** Journal of Materials in Civil Engineering, 04018177-1-11.
- Huang, B., Shu, X., and Burdette, E. G. (2006). **Mechanical properties of concrete containing recycled asphalt pavements.** Magazine of Concrete Research, 58(5), 313-320.
- Huang, B., Shu, X., and Li, G. (2005). **Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavements.** Cement and Concrete Research, 35(10), 2008-2013.
- Katsakou, M., and Koliass, S. (2007). Mechanical properties of cement-bound recycled pavements. ACI Materials Journal, 160(4), 171-179.
- Li, G., Zhao, Y., Pang, S. S., and Huang, W. (1998). **Experimental study of cement-asphalt emulsion composite.** Cement and Concrete Research, 28 (5), 635-641.
- Liu, Y. L., Kong, X. M., Zou, Y., and Yan, P. Y. (2009). **Static and dynamic mechanical behavior of cement asphalt mortars.** China Railway Science and Engineering, 6(3), 1-7.
- Ma, T., Wang, H., Zhao, Y., Huang, X., and Pi, Y. (2015). **Strength mechanism and influence factors for cold recycled asphalt mixture.** Advances in Materials Science and Engineering, Volume 2015, 1-10.
- Mangiafico, S., Benedetto, H. D., Sauzéat, C., Olard, F., Pouget, S., Dupriet, S., Planque, L., and Van Rooijen, R. (2015). **Statistical analysis of the influence of RAP and mix composition on viscoelastic and fatigue properties of asphalt mixes.** Materials and Structures, 48, 1187-1205.
- Mathias, V., Sedran, T., and Larrard, F. (2004). **Recycling reclaimed asphalt pavement in concrete roads.** International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, Barcelona, Spain. 66-75.
- Okafor, F. O. (2010). **Performance of Recycled Asphalt Pavement as Coarse Aggregate in Concrete.** Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 47-58.

- Qiang, W., Peiyu, Y., Ruhan, A., Jinbo., Y., and Xiangming, K. (2011). **Strength mechanism of cement-asphalt mortar.** Journal of Materials in Civil Engineering, 23(9), 1353-1359.
- Sommer, H. (1994). **Recycling of concrete for the reconstruction of the concrete pavement of the motorway Vienna-Salzburg.** Proc., 7th International Concrete Roads Symposium.
- Suebsuk, J., Horpibulsuk, S., Suksan, A., Suksiripattanapong, C., Phoo-ngernkham, T., and Arulrajah, A. (2019). **Strength prediction of cement-stabilised reclaimed asphalt pavement and lateritic soil blends.** International Journal of Pavement Engineering, 20(3), 332-338.
- Suebsuk, J., Suksan, A., and Horpibulsuk, S. (2014). **Strength assessment of cement treated soil/reclaimed asphalt pavement (RAP) mixture.** International Journal of GEOMATE, 6(2), 878-884.
- Tia, M., Hossiney, N., Su, Y.-M., Chen, Y., and Do, T. A. (2012). **Use of reclaimed asphalt pavement in concrete pavement slabs.** Department of Civil and Coastal Engineering, Engineering School of Sustainable Infrastructure and Environment, College of Engineering, University of Florida, Gainesville, Florida.
- Tompkins, D., Khazanovich, L., Darter, M. I., and Walter, F. (2009). **Design and construction of sustainable pavement.** Transportation Research Board, Record No. 2098, 75-85.
- Topcu, I., and Isikdag, B. (2009). **Effects of crushed RAP on free and restrained shrinkage of mortars.** International Journal of Concrete Structures and Materials, 3(2), 91-95.
- Visintine, B., Khosla, N. P., and Tayebali, A. (2013). **Effects of higher percentage of recycled asphalt pavement on pavement performance.** Road Materials and Pavement Design, 14, 432-437.
- Wang, F. Z., Wang, T., and Hu, S. G. (2008). **Rheological behavior of cement asphalt mortar.** Engineering Journal of Wuhan University, 41(4), 69-72.
- Wang, P., Xu, H., and Chen, R. (2014). **Effect of cement asphalt mortar debonding on dynamic properties of CRTS II slab ballastless track.** Advances in Materials Science and Engineering, Volume 2014, 1-8.
- Watson, M., McGraw, J., Johnson, E., Linell, D., and Dai, S. (2010). **The effect of recycled asphalt materials on hot mixed asphalt pavement performance.** Green Streets and Highways, Denver, CO, United States, 323-336.

- Yang, S., Qiang, Z., Cheng, F., and Cai, B. (2014). **Damage evolution and dynamic response of cement asphalt mortar layer of slab track under vehicle dynamic load.** Science China Technological Sciences, 57(10), 1883–1894.
- Zaumanis, M., and Mallick, R. B. (2015). **Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art.** International Journal of Pavement Engineering, 16(1), 39-55.



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรม

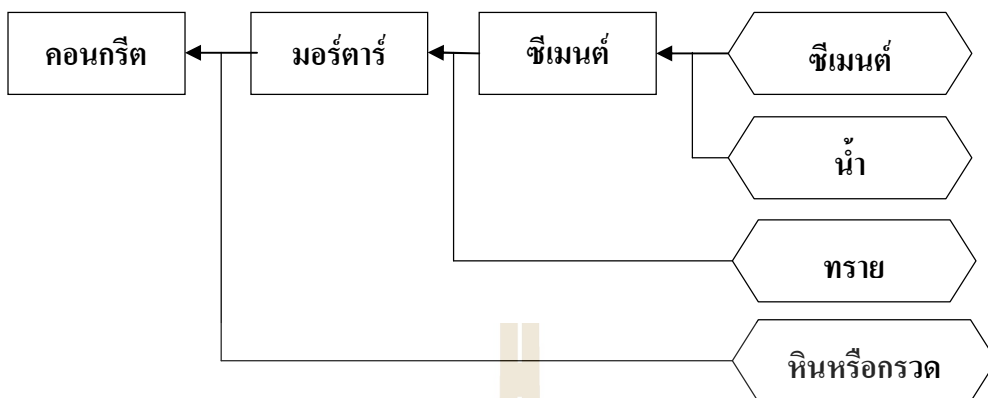
2.1 คอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุผสมที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนได้แก่ ปูนซีเมนต์ วัสดุผสม (เช่น หิน ททราย หรือ กรวด) และน้ำ โดยอาจจะมีสารเคมีเติมเพิ่มเข้าไป เพื่อเพิ่มคุณสมบัติ ด้านอื่น เมื่อผสมเสร็จคอนกรีตจะแข็งตัวอย่างช้า ๆ น้ำ และซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกัน เรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซีเมนต์จะเริ่มจับตัวกับวัสดุอื่นและแข็งตัว ในสถานะนี้เรียกว่า คอนกรีต ความแข็งแรงของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และยิ่งแข็งแรงขึ้นภายหลังจากการแข็งตัวแล้วจนถึง ประมาณ 28 วัน ความแข็งแรงจะเริ่มคงที่ คอนกรีตนิยมใช้ในงานก่อสร้างหลายชนิด ได้แก่ อาคาร ถนน เขื่อน สะพาน และงานก่อสร้างต่าง ๆ (ปริญญา และ ชัย, 2555) คุณสมบัติหลักของคอนกรีต คือ รับแรงอัดสูง ในขณะที่รับแรงดึงได้ต่ำ (ประมาณ 10 % ของแรงอัด) เมื่อต้องการให้คอนกรีต สามารถรับแรงดึง จะมีการเสริมวัสดุอื่นเพิ่มเข้าไปในคอนกรีต เรียกว่า คอนกรีตเสริมแรง หรือ คอนกรีตเสริมเหล็ก (ปริญญา และ ชัย, 2555) วัสดุเหล่านี้จะช่วยรับแรงดึงภายในคอนกรีต ซึ่งงาน โครงสร้างอาคารส่วนใหญ่นิยมใช้คอนกรีตเสริมแรงเหล็กแทนคอนกรีตเปลือย

2.2 องค์ประกอบของคอนกรีต

คอนกรีตประกอบด้วยปูนซีเมนต์ หิน ททราย และน้ำ โดยเมื่อนำส่วนผสมต่าง ๆ มาผสมกันสามารถเรียกชื่อได้ตามแผนภูมิดังแสดงในรูปที่ 2.1

ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) คือ ปูนซีเมนต์ผสมน้ำ ประโยชน์ใช้ในการทดลอง คุณสมบัติต่างๆของปูน เช่น การก่อตัว การไหลเท เป็นต้น มอร์ตาร์ (Mortar) คือ ปูนซีเมนต์ผสมน้ำ และทราย ประโยชน์ใช้ฉาบผนัง แต่งขอบปูน บัว คิ้วคอนกรีต และเทพรับระดับพื้นก่อนปูไม้ปาร์เก้ หรือปูกระเบื้อง



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของคอนกรีต

2.2.1 น้ำที่และคุณสมบัติของส่วนผสม

- 1) ซีเมนต์เพสต์ทำหน้าที่เสริมช่องว่างระหว่างมวลรวมห่อล้นคอนกรีตสดขณะเท ให้กำลังแก่คอนกรีตเมื่อคอนกรีตแข็งตัว รวมทั้งป้องกันการซึมผ่านของน้ำ
- 2) มวลรวมทำหน้าที่เป็นตัวแทรกประสานที่ถูกกระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์ มวลรวมช่วยให้คอนกรีตมีความคงทนปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก
- 3) น้ำใช้ล้างวัสดุมวลรวมต่าง ๆ ใช้ผสมคอนกรีต น้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์ และใช้บ่มคอนกรีต อีกทั้งยังทำหน้าที่หล่อลื่นเพื่อให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวสามารถเทได้ เคลือบ หิน ทราย ให้เปียกเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์สามารถเกาะได้โดยตรง

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต

ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลวช่วงเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นซีเมนต์เพสต์จะเริ่มแข็งตัวถึงแม้มันจะยังไม่สามารถลื่นไหลเข้าแบบได้แล้วจุดนี้เราเรียกว่าจุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial set) เวลาตั้งแต่ซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงจุดอิมตัวเริ่มต้นเรียกว่าเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์จะยังคงดำเนินต่อไปจนถึงสภาพที่เป็นของแข็งหรือจุดแข็งตัวสุดท้าย (Final setting time) ซีเมนต์เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไปและสามารถรับน้ำหนักได้ขบวนการทั้งหมดนี้เรียกว่าการแข็งตัว (Hardening)

ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์หรืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ในกรณีพิเศษวัสดุปอชโซลาน) อัตราส่วนเจลดต่อปริมาตร อายุของคอนกรีตชนิดของปูนซีเมนต์ ชนิดของมวลรวม วิธีการบ่มคอนกรีต เป็นต้น (Irassar et al., 2000) นอกจากนี้การทำให้คอนกรีตให้แน่นมีความสำคัญมากและส่งผลโดยตรงต่อกำลังของคอนกรีต (Irassar et al., 2000)

การที่คอนกรีตมีฟองอากาศหรือโพรงมากจะทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีต และกำลังอัดลดลง (Hassan et al., 2000) ดังนั้น การกระทุ้งหรือเขย่าคอนกรีตสดให้มีความหนาแน่นสูงเพื่อลดฟองอากาศในคอนกรีตจึงมีความจำเป็นอย่างมาก

2.4 คุณภาพของส่วนผสมคอนกรีต

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) คือปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (hydraulic cement) เมื่อผสมกับน้ำสะอาดตามอัตราส่วนที่เหมาะสมจะสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยมีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 1

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2555) องค์กรประกอบทางเคมี และการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่าง ๆ ตามมอก. 15 เล่ม 1 แสดง ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ถึง 5 (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555)

ส่วนประกอบ	ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์				
	1	2	3	4	5
C ₃ S	49	46	56	25	30
C ₂ S	25	29	15	50	46
C ₃ A	12	6	12	5	5
C ₄ AF	8	12	8	12	13
กำลังอัดที่อายุ 3 วัน (กก/ตร.ซม)*	180	150	310	80	120
ความร้อนปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ 28 วัน (จูล/กรัม)	400	330	430	270	310

หมายเหตุ : * คือ กำลังอัด วัดจากลูกบาศก์มอร์ตาร์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม.

มวลรวม คือ วัสดุเฉื่อย ได้แก่ ทราย กรวด หรือหินปูน ซึ่งเป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีต มวลรวมมีปริมาตรร้อยละ 70 ถึง 80 ของส่วนผสมทั้งหมด มวลรวมช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน (Durability) และปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก (Volume stability) รวมทั้งมวลรวมยังทำหน้าที่ต้านทานน้ำหนักที่กดลงบนคอนกรีต กำลังและสมบัติทางกายภาพอีกหลายประการของมวลรวมมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในสภาพที่เป็นคอนกรีตเหลวและคอนกรีตแข็งตัวแล้ว มวลรวมที่ดีส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานสูง (Hossiney et al., 2008) สมบัติพื้นฐานที่ดีของมวลรวม

ที่ดีได้แก่ ความคงทนไม่ทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อเสถียรภาพทางปริมาตรของคอนกรีต และไม่มีสิ่งเจือปนสารที่มีผลเสียต่อกำลังและความคงตัวของซีเมนต์เพสต์ สมบัติของคอนกรีตสด และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วขึ้นอยู่กับขบวนการย่อยแปรสภาพของมวลรวม ดังนั้นคุณภาพของมวลรวมจึงมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

น้ำ เป็นส่วนผสมที่สำคัญในการทำคอนกรีต เพราะนอกจากจะเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กับปูนซีเมนต์แล้ว น้ำยังมีผลต่อความสามารถในการเทได้ (Workability) ของคอนกรีตสดกำลังต้านทานแรงอัด และความทนทานของคอนกรีตเมื่อแข็งตัวแล้ว (Hossiney et al., 2010)

การผลิตคอนกรีตเพื่อให้มีคุณภาพดีจะต้องใช้น้ำที่มีคุณภาพดีและมีปริมาณที่เหมาะสมน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตคือเข้าผสมกับปูนซีเมนต์และทำปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิดความร้อน (Heat of hydration) ทำให้ผงซีเมนต์กลายเป็นวุ้น (Gel) และกลายเป็นซีเมนต์เหนียว ตลอดจนเป็นตัวประสานผิวระหว่างมวลรวมเพื่อให้สามารถยึดเกาะกันแน่นเมื่อแข็งตัวอีกทั้งยังทำหน้าที่เคลือบหินและทรายให้เปียกเพื่อให้ปูนซีเมนต์เกาะได้โดยรอบ นอกจากนี้ น้ำ ทำหน้าที่หล่อลื่นให้คอนกรีตเกิดความเหลวสามารถเทและกระทุ้ง หรือเขย่าเข้าสู่แบบหล่อให้ได้รูปตามต้องการ

สารผสมเพิ่มหมายถึงสารนอกเหนือจากน้ำ ปูนซีเมนต์ ทราย และหินที่ใช้เติมลงในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตที่เหลวหรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วให้ได้คุณสมบัติตรงตามลักษณะของการใช้งาน การใช้สารผสมเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อปรับปรุงความสามารถในการเทได้ ตลอดจนเร่งหรือหน่วงเวลาของการก่อตัวคุณสมบัติในการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต เพิ่มคุณสมบัติด้านการแตกร้าวเนื่องจากความร้อนการทนต่อกรดและซัลเฟต (Irassar et al., 2000)

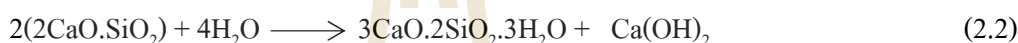
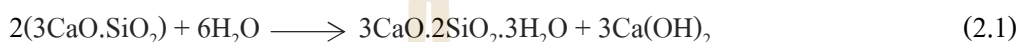
2.5 หลักการของปฏิกิริยาไฮเดรชันพื้นฐาน

การก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของซีเมนต์โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ การละลายของซีเมนต์ ซีเมนต์จะละลายในน้ำก่อให้เกิด Lons ในสารละลายและ Lons นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบขึ้นใหม่ และการเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็งโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลายปฏิกิริยานี้เรียกว่า “Solid state reaction”

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลายและในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ซีเมนต์ประกอบด้วย สารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างจากครั้งแรก ดังนั้นการพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของซีเมนต์สามารถแยกได้ดังนี้

1) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S) แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ และ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสานตามสมการดังนี้



ปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเกิด gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการคือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของ CSH ขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ $Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์เพสต์ มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมาก โดยมีค่า pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนจากเหล็กเสริมได้ดี

2) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดขึ้นทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ตามสมการดังนี้



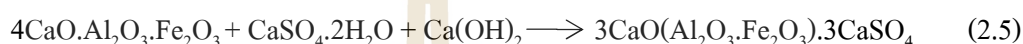
โดยปกติมักผสมยิปซัม ($CaSO_4.2H_2O$) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดซีเมนต์เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว ยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับ C_3A ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C_3A ตามสมการดังนี้



ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A ส่งผลให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_2S เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจาก การเพิ่มปริมาตรของของแข็งแรงดันนี้ทำให้ชั้นของ Ettringite แยกออกและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A แต่เมื่อเกิด

การแตกตัวจะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่ ซึ่งเป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดโดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate

3) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอลูมิเนียมเฟอไรท์ (C_4AF) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF นี้เกิดในช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซัมและ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ตามสมการดังนี้



ระยะเวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันร้อยละ 80 ของสารประกอบหลักทั้ง 4 คือ C_3S 10 วัน C_2S 100 วัน C_3A 6 วัน C_4AF 50 วัน

2.6 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2555) ได้สรุปการคำนวณหาปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตตามวิธีของ ACI 211 (2009) สมบัติเบื้องต้นต่าง ๆ ของวัสดุที่จะใช้ออกแบบคอนกรีต ได้แก่ ค่าความถ่วงจำเพาะ หน่วยน้ำหนัก โมดูลัสความละเอียด และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ และวัสดุผสมต้องมีส่วนขนาดละเอียดตามมาตรฐานที่กำหนดวิธีของ ACI 211.1 (2009) มี 9 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1) เลือกค่าความยวบตัวที่เหมาะสมกับประเภทของงาน ค่าความยวบตัวที่อยู่ในช่วงเหมาะสม และได้ความชื้นเหลวที่จะทำงานได้สะดวก กรณีที่มีได้กำหนดค่ายวบตัวให้ค่ายวบตัวเหมาะสมกับประเภทของงานสามารถเลือกใช้ได้จากตารางที่ 2.2

2) เลือกขนาดโตสุดของวัสดุผสม ขนาดต่ำสุดของวัสดุผสมไม่ควรเกิน $1/5$ ของส่วนที่แคบที่สุดของแบบ หรือความหนาของแผ่นพื้นหรือ $3/4$ ของขนาดความห่างของเหล็กเสริมที่น้อยที่สุด ขนาดโตสุดของวัสดุผสมหยาบที่เหมาะสมกับประเภทการใช้งานเลือกได้จากตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ค่าความยวบตัวของคอนกรีตที่ใช้สำหรับการก่อสร้างประเภทต่าง ๆ
(ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555)

ประเภทงาน	ค่าความยวบตัว (ซม.)	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
งานฐานรากกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก	8.0	2.0
งานฐานรากคอนกรีตไม่เสริมเหล็กงานก่อสร้างได้น้ำ	8.0	2.0
งานพื้นคานและผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก	10.0	2.0
งานเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	10.0	2.0
งานพื้นถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก	8.0	2.0
งานคอนกรีตขนาดใหญ่	8.0	2.0

ตารางที่ 2.3 ขนาดโตสุดของวัสดุผสมสำหรับงานก่อสร้างประเภทต่าง ๆ
(ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555)

ขนาดความ หนาของ โครงสร้าง (ซม.)	ขนาดโตสุดของวัสดุผสม							
	คานผนังและ เสา คสล.		ผนังคอนกรีตไม่ เสริมเหล็ก		พื้นถนนคสล.รับ น้ำหนักมาก		พื้นคอนกรีตรับ น้ำหนักน้อย	
	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.
5.0 - 15.0	$\frac{1}{2}$ - $\frac{3}{4}$	12.5 - 20	$\frac{3}{4}$	20	$\frac{3}{4}$ - 1	20.25	$\frac{3}{4}$ - 1 1/2	20 - 40
15.0 - 30.0	$\frac{3}{4}$ - 1 $\frac{1}{2}$	20 - 40	1 1/2	40	1 1/2	40	1 1/2 - 3	40 - 75
30.0 - 75.0	1 1/2 - 3	40 - 75	3	75	1 1/2 - 3	40-70	3	75.0
> 75.0	1 1/2 - 3	40 - 75	6	150	1 1/2 - 3	40-75	6	75 - 150

3) ประมาณค่าปริมาณน้ำที่ใช้ผสมและปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นตามตารางที่ 2.4 ตารางนี้แสดงค่าปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นในส่วนผสมของคอนกรีตไม่มีสารทำให้เกิดฟองอากาศ และปริมาณฟองอากาศที่ควรจะมีในส่วนผสมของคอนกรีตเมื่อใส่สารทำให้เกิดฟองอากาศ

4) เลือกอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะที่คอนกรีตนั้นถูกนำไปใช้งาน และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ต้องการ ในกรณีที่ไม่ มีข้อมูลเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตให้เลือกการใช้อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ตามตารางที่ 2.5

5) กำหนดปริมาณซีเมนต์ที่ต้องใช้เมื่อทราบปริมาณน้ำที่ต้องใช้ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีต และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนัก และปริมาณซีเมนต์ที่ต้องใช้ในคอนกรีตหนึ่งหน่วยปริมาตรหาได้จากขั้นตอนที่ 3 หาด้วยอัตราส่วนจากข้อ 4

6) กำหนดวัสดุผสมหยาบ ตารางที่ 2.6 แสดงปริมาณของวัสดุผสมหยาบที่อยู่ในสภาพแห้งและอัดแน่นในส่วนผสมต่อคอนกรีตหนึ่งหน่วยปริมาตร โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายที่ใช้และขนาด โทสุคของหิน ปริมาณของวัสดุผสมหยาบคิดเป็นน้ำหนักมีค่าเท่ากับปริมาณของวัสดุผสมหยาบคูณด้วยหน่วยน้ำหนักของวัสดุผสมหยาบ

ตารางที่ 2.4 ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับค่ายุบตัวและวัสดุผสมขนาดต่าง ๆ

(ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555)

ค่าความยุบตัว (ซม.)	ปริมาณน้ำเป็นลิตรต่อคอนกรีต 1 ม ³ สำหรับวัสดุผสมขนาดต่าง ๆ (มม.)							
	10	12.5	20	25	40	50	75	150
คอนกรีตที่ไม่มีสารกระจายกักฟองอากาศ (Non Air Entraining Concrete)								
3-5	205	200	85	180	160	155	145	125
8-10	225	215	200	195	175	170	160	140
15-18	240	230	210	205	185	180	170	-
ฟองอากาศ(%) โดยปริมาตร	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
ค่าความยุบตัว (ซม.)	ปริมาณน้ำเป็นลิตรต่อคอนกรีต 1 ม ³ สำหรับวัสดุผสมขนาดต่าง ๆ (มม.)							
	10	12.5	20	25	40	50	75	150
คอนกรีตที่มีสารกระจายกักฟองอากาศ (Air Entraining Concrete)								
3-5	180	175	165	160	145	140	135	120
8-10	200	190	180	175	160	155	150	135
15-18	215	205	190	185	170	165	160	-
ฟองอากาศ(%) โดยปริมาตร	8	7	6	5	4.5	4	3.5	3

7) กำหนดปริมาณวัสดุผสมละเอียด เมื่อได้ค่าต่าง ๆ ของส่วนผสมจนถึงขั้นตอนที่ 6 แล้ว ปริมาณของวัสดุผสมละเอียดสามารถหาได้จากปริมาณเนื้อแท้ของวัสดุผสมละเอียดเท่ากับปริมาตรของคอนกรีตลบออกด้วยปริมาตรเนื้อแท้ของส่วนผสมต่าง ๆ (ยกเว้นทราย) โดยที่ปริมาตรเนื้อแท้ (ซึ่งเป็นปริมาตรที่ไม่มีช่องว่างในเนื้อ) ของวัสดุคำนวณได้จากความถ่วงจำเพาะน้ำหนักของวัสดุ

8) ปรับส่วนผสมเนื่องจากความชื้นของวัสดุผสม ตามปกติวัสดุผสมที่ใช้ในการทำงานจริง ๆ จะมีความชื้นสูงกว่าในสภาวะแห้งและอิมตัว ดังนั้น จึงต้องแก้ส่วนผสมให้เข้ากับสภาพจริง โดยเพิ่มน้ำหนักของวัสดุผสมเท่ากับน้ำหนักที่คิดมา และลดน้ำในส่วนผสมเช่นเดียวกัน ในทางตรงกันข้าม

9) การปรับส่วนผสมด้วยการทดลองผสม สัดส่วนของส่วนผสมต่าง ๆ ที่คำนวณแล้ว เป็นเกณฑ์โดยประมาณทั้งสิ้น จึงต้องตรวจสอบทดลองผสมเพื่อผลลัพธ์ที่ได้ทั้งในด้านกำลังของคอนกรีตและความสามารถในการทำงาน และตรวจสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตปริมาตรที่ใช้ รวมถึงปริมาณอากาศแล้วจึงปรับส่วนผสมต่าง ๆ ให้เหมาะสมอีกครั้งหนึ่ง

ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (ปริญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555)

กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 28 วัน (กก./ตร.ซม.)	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนัก	
	คอนกรีตไม่กระจายกัก ฟองอากาศ	คอนกรีตกระจายกัก ฟองอากาศ
450	0.38	-
400	0.43	-
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.7	0.61
150	0.8	0.71

ตารางที่ 2.6 ปริมาณของวัสดุผสมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาณของคอนกรีต

(ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555)

ขนาดโตสุด ของหิน	ปริมาณของวัสดุหยาบในสภาพแห้งและอัดแน่นต่อหน่วยปริมาตร ของคอนกรีตสำหรับค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายต่าง ๆ กัน			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8 นิ้ว (10 มม.)	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2 นิ้ว (12.5 มม.)	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4 นิ้ว (20 มม.)	0.66	0.64	0.62	0.60
1 นิ้ว (25 มม.)	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2 นิ้ว (40 มม.)	0.76	0.74	0.72	0.70
2 นิ้ว (50 มม.)	0.78	0.76	0.74	0.72
3 นิ้ว (75 มม.)	0.81	0.79	0.77	0.75
6 นิ้ว (150 มม.)	0.87	0.85	0.83	0.81

2.7 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

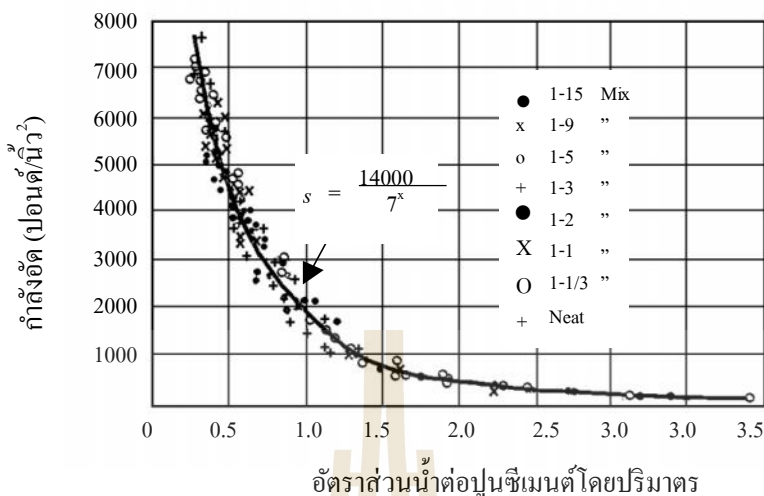
กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุเท่ากัน ผ่านการบ่มและการทำให้แน่นเหมือนกันจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์นำเสนอโดย อาบรัมส์ (Abrams) ในปี ค.ศ. 1918 โดยใช้ส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมตั้งแต่ 1:15 จนถึงซีเมนต์เพสต์ล้วน (ไม่มีมวลรวม) เป็นส่วนผสมและมีขนาดมวลรวมตั้งแต่ค้ำตะแกรงเบอร์ 14 (ช่องเปิด 1.17 มิลลิเมตร) จนถึงกรวดขนาด 1 1/2 นิ้ว ผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วันแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยกำลังอัดและอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำต่อปูนซีเมนต์มีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการดังนี้

$$S = \frac{A}{B^x} \quad (2.6)$$

เมื่อ S คือ กำลังอัดของคอนกรีต

X คือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำต่อปูนซีเมนต์

A และ B คือ ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของปูนซีเมนต์ อายุของคอนกรีตและวิธีการบ่มคอนกรีต



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
(ปริญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555)

กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเทเข้าแบบกระทุ้งหรือเขย่าให้แน่นและบ่มอย่างถูกวิธีจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม ขนาดคละ ผิวนของมวลรวม รูปร่าง ความแข็ง และกำลังของมวลรวมหยาบ (Huang et al., 2006) ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ จากการศึกษาพบว่าผลของอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมและขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบมีผลต่อกำลังของคอนกรีตไม่มากเท่ากับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (Bermel, 2012)

2.8 ผลของอายุต่อการพัฒนากำลังของคอนกรีต

คอนกรีตพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นตามปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อมีการบ่มอย่างสมบูรณ์ กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงแรกภายหลังจากการแข็งตัวแต่หลังจากอายุ 28 วัน (ปริญา และ ชัย, 2555) กำลังของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงดังแสดงในตารางที่ 2.7 ในช่วงอายุ 28 วันแรกการพัฒนากำลังอัดสูงมาก การพัฒนากำลังลดลง เมื่อมีอายุเกิน 28 วัน คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงมาก (w/C ratio มีค่าต่ำ) ร้อยละของการพัฒนากำลังอัดมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำ (w/C ratio มีค่าสูง) w/C ratio เท่ากับ 0.26 ที่อายุบ่ม 1 3 และ 7 วันกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าการพัฒนากำลังอัดเป็นร้อยละ 61 72.9 และ 86.2 ของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน คอนกรีตที่มี w/C ratio เท่ากับ 0.7 มีร้อยละการพัฒนากำลังอัดที่อายุเดียวกันเท่ากับ 22.7 54.1 และ 71.8 ตามลำดับ ตารางที่ 2.8 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตในช่วง 20 ถึง 60 เมกะปาสกาล เมื่อเทียบกับที่

อายุ 28 วัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณของคอนกรีตที่มีกำลังเท่ากับ 50 เมกะปาสกาล (w/C ratio ต่ำ) จะมีค่าต่ำกว่ากรณีของคอนกรีตที่มีกำลังอัด 20 ถึง 30 เมกะปาสกาล (w/C ratio สูง)

ตารางที่ 2.7 อัตราการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต่างกัน
(ปริญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555)

อายุ (วัน)	คอนกรีตกำลังสูง w/C ratio = 0.26		คอนกรีตกำลังธรรมดา w/C ratio = 0.70	
	เมกะปาสกาล	(%)	เมกะปาสกาล	(%)
1	44.2	61.0	8.2	22.7
3	52.8	72.9	19.6	54.1
7	62.4	86.2	26.0	71.8
14	65.6	90.6	30.4	84.0
28	67.1	92.7	32.0	88.4
60	71.9	99.3	34.8	96.0
90	72.4	100.0	36.2	100

ตารางที่ 2.8 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุอื่น ๆ เปรียบเทียบกับที่อายุ 28 วันเป็นเกณฑ์
(ปริญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555)

อายุของโครงสร้างที่ รับน้ำหนัก (เดือน)	สัมประสิทธิ์ตัวคูณเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ที่กำลังอัดต่าง ๆ		
	20-25 เมกะปาสกาล	30-40 เมกะปาสกาล	50 เมกะปาสกาล
1	1.00	1.00	1.00
2	1.10	1.10	1.08
3	1.15	1.15	1.11
6	1.20	1.19	1.15
12	1.25	1.24	1.20

2.9 ผลกระทบของมวลรวมหยาบต่อกำลังของคอนกรีต

จากการวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic pulse velocity) ของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่รับแรงอัดพบว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นทำให้เกิดการขยายตัวของรอยแตก ร้าว ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมวลรวมหยาบและการยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมหยาบและมอร์ตาร์

รอยแตกในคอนกรีตที่ทำจากหินย่อยเกิดที่ความเค้นสูงกว่าคอนกรีตที่ทำจากกรวด เนื่องจากหินย่อยมีผิวที่ขรุขระและมีการยึดเหนี่ยวที่ดีกว่า อิทธิพลของมวลรวมต่อการเกิดรอยแตกร้าวของคอนกรีตภายใต้แรงอัดและแรงคดมีลักษณะคล้ายกัน (Lawson et al., 2011)

คุณสมบัติของมวลรวม โดยเฉพาะรูปร่างและลักษณะของผิวมีอิทธิพลต่อกำลังคดหรือกำลังอัดที่เกิดรอยแตกมากกว่ากำลังอัดประลัย ทั้งนี้เนื่องจากภายใต้กำลังอัดการเกิดรอยแตกร้าวจะไม่นำไปสู่การวิบัติทันที นอกจากนี้ผลกระทบของชนิดของหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำอิทธิพลของชนิดของหินจะมีมากกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูง การใช้หินย่อยในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำกว่า 0.40 ให้กำลังอัดสูงกว่าการใช้กรวดได้ถึงกว่าร้อยละ 30 แต่ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.65 กำลังของคอนกรีตที่ทำจากหินย่อยหรือกรวดไม่แตกต่างกันมากนัก (Hossiney et al., 2008)

2.10 แอสฟัลต์ซีเมนต์

ยางมะตอย หรือแอสฟัลต์ (Asphalt) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ และสามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ เป็นผลิตภัณฑ์หลักสำหรับการก่อสร้างถนน และทางเท้า มีการใช้ทั้งในภาคอุตสาหกรรมในด้านคมนาคม และการก่อสร้าง รวมถึงการนำมาใช้ประโยชน์สำหรับภาคครัวเรือนที่เกี่ยวข้องกับถนนหรือทางเท้าการผลิตยางมะตอยที่ใช้ในปัจจุบันผลิตมาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบเป็นหลัก สำหรับภาคครัวเรือนสามารถหาซื้อได้ตามร้านขายวัสดุก่อสร้างทั่วไปซึ่งเป็นยางมะตอยสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมพร้อมใช้งานแอสฟัลต์ซีเมนต์เป็นยางมะตอยแท้ที่เป็นพื้นฐานของยางมะตอย อีกสองชนิด ผลิตได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ มีลักษณะเป็นสีดำหรือสีน้ำตาลปนดำ มีลักษณะเป็นกึ่งของแข็งประกอบด้วยบิทูเมนเป็นหลัก สามารถหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อนซึ่งก่อนใช้ต้องผ่านความร้อนประมาณ 140-150 องศาเซลเซียสก่อน เมื่อแห้งจะแข็งทำให้เป็นวัสดุประสาน และยึดเกาะวัสดุต่าง ๆ ได้ดี แบ่งเป็นเกรดต่าง ๆ ตามค่าเพนิเทรชันเป็น 5 เกรด คือ 40-50 60-70 80-100 120-150 และ 200-300 โดยเกรดที่มีค่าตัวเลขมากจะแสดงถึงความอ่อนของยางมะตอยที่มากด้วยซึ่งเกรด 200-300 จะอ่อนที่สุด โดยที่อุณหภูมิห้องเมื่อใช้นิ้วกดเบา ๆ จะเกิดรอยบุ๋มได้ง่าย ส่วนเกรด 40-50 เป็นเกรดที่แข็งที่สุด ต้องใช้แรงกดเพิ่มขึ้นจึงจะทำให้เกิดรอย นอกจากนั้น แอสฟัลต์ซีเมนต์ ยังแบ่งออกเป็น 3 เกรด ได้อีก คือ

- เกรดเพนิเทรชัน (Penetration grade) ได้แก่ AC 60/70 (AC หมายถึงยางมะตอยซีเมนต์ และ 60/70 หมายถึงค่าเพนิเทรชันที่อยู่ในช่วง 60-70 คือเข็มกดลงได้ 6-7 มิลลิเมตร)

- เกรดเป่า (Blown grade) คือ ยางมะตอยที่ได้จากการนำยางมะตอยเกรดเพนิเทรชันไปเป่าที่ความร้อน 250-300 องศาเซลเซียส จนยางมะตอยมีปริมาณของ asphaltances เพิ่มขึ้น ทำให้มีความแข็ง และทนความร้อนได้ดีขึ้น ยางมะตอยเกรดนี้ ได้แก่ R 85/25 R 85/40 R 115/15 R 138/10 และ R 155/7 เป็นต้น (R หมายถึง คุณลักษณะคล้ายยาง ตัวเลขด้านหน้า หมายถึง อุณหภูมิของยางมะตอยที่จุดอ่อนตัว และ ตัวเลขด้านหลัง หมายถึง ค่าเพนิเทรชันเฉลี่ยของยางมะตอย)

- เกรดแข็ง (Hard grade) คือ ยางมะตอยที่ได้จากการนำยางมะตอยเกรดเพนิเทรชันไปกลั่นในระบบสูญญากาศที่อุณหภูมิสูง ทำให้ยางมะตอยมีความแข็งมากขึ้น เกรดยางมะตอยชนิดนี้ ได้แก่ H 80/90 (H หมายถึง ยางมะตอยที่มีความแข็งสูง ตัวเลขด้านหน้า หมายถึง อุณหภูมิของยางมะตอยที่จุดอ่อนตัว และ ตัวเลขด้านหลัง หมายถึง ค่าเพนิเทรชันของยางมะตอย)

2.11 การหมุนเวียนวัสดุเก่ามาใช้ใหม่

ผิวทางแอสฟัลต์ที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่ (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) ที่ได้จากการบูรณะซ่อมแซมผิวทางแอสฟัลต์และมีการรีไซเคิล สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ได้ ซึ่งเป็นการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ โดยปกติการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตหรือ (Hot Mix Asphalt, HMA) เพื่อใช้ในการก่อสร้างถนนจะทำที่อุณหภูมิสูงซึ่งเป็นการใช้พลังงานความร้อนที่สูงเพื่อทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์เหลวพอที่จะเคลือบมวลรวมได้อย่างมีประสิทธิภาพและทั่วถึง การรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์ คือวิธีการที่มีประโยชน์ต่อเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม (Kennedy et al., 1988) การใช้ผิวทางเก่าได้รับความนิยมมากกว่าการใช้วัสดุธรรมชาติในแง่ของความขาดแคลนของมวลรวมธรรมชาติและการรักษาสิ่งแวดล้อม หน่วยงานของรัฐหลายแห่งได้รายงานความสำคัญนี้ เมื่อผิวทางเก่าถูกนำมาใช้ใหม่ (Page and Murphy, 1987) เมื่อพิจารณาวัสดุและต้นทุนการก่อสร้างแล้ว เป็นที่คาดการณ์กันว่า การใช้ผิวทางเก่าจะช่วยให้ประหยัดได้ประมาณร้อยละ 14 ถึง 34 สำหรับการนำผิวทางเก่ามาเป็นส่วนผสมอัตราส่วนระหว่างร้อยละ 20 ถึง 50 (Kandhal and Mallick, 1997)

การใช้ RAP ยังช่วยลดปริมาณขยะและช่วยแก้ไขปัญหาค่ากำจัดวัสดุการทางโดยเฉพาะในเมืองใหญ่ในปี 1996 มีการประเมินว่า ประมาณร้อยละ 33 ของผิวทางเก่าทั้งหมดในสหรัฐอเมริกาถูกรีไซเคิลเป็นแอสฟัลต์คอนกรีต (Sullivan, 1996) ในปี 2001 กรมการขนส่งรัฐอิลลินอยส์ (IDOT) ได้ใช้ RAP 623,000 ตัน ในการก่อสร้างทางหลวง และคาดการณ์ถึงการเพิ่มขึ้นในการใช้ผิวทางเก่าในอนาคต (Griffiths and Krstulovich, 2002) หลังจากกว่า 30 ปี นับตั้งแต่การทดลองใช้ครั้งแรกในรัฐเนวาดา และรัฐเท็กซัส ดูเหมือนว่าการใช้ RAP จะไม่เพียงแต่มีประโยชน์ในอนาคต

แต่ยังจะกลายเป็นความจำเป็นเพื่อให้มั่นใจในการแข่งขันทางเศรษฐกิจของการก่อสร้างผิวทางที่มีความยืดหยุ่น (Flexible pavement construction)

การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต (HMA) หลายรัฐใช้กราฟการผสมที่พัฒนาขึ้นเพื่ออำนวยความสะดวกในการผสม RAP สถาบันแอสฟัลต์ในช่วงปลายทศวรรษ 1980 (Asphalt Institute, 1989) ได้กำหนดค่าขีดจำกัดของร้อยละสูงสุดของ RAP ที่สามารถใช้ได้โดยทั่วไปอยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 50 อย่างไรก็ตามร้อยละของ RAP ที่สูงไม่ได้ถูกใช้กันทั่วไปในทางปฏิบัติ หน่วยงานเฉพาะด้าน RAP ของ Federal Highway Administration ได้พัฒนาแนวทางสำหรับการออกแบบ SuperPave™ HMA ผสมผิวทางเก่า RAP (Bukowski, 1997) วิธีการที่พัฒนาขึ้นนั้น คือการใช้วิธี Tiered approach เพื่อกำหนดระดับการทดสอบที่ต้องการในการออกแบบ HMA ที่มี RAP เป็นส่วนผสมจากวิจัย NCHRP 9-12 (McDaniel et al., 2001) แม้จะมีความก้าวหน้าในการออกแบบของ HMA ที่ใช้ RAP แต่หลาย ๆ รัฐรวมถึงรัฐอิลลินอยส์ก็ได้มีการกำหนดข้อจำกัดเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาความทนทานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุรีไซเคิล และในปี 2000 กรมการขนส่งของรัฐอิลลินอยส์ได้อนุญาตให้ใช้ RAP ใน SuperPave™ HMA โดยมีร้อยละแตกต่างกันระหว่างร้อยละ 0 ถึง 30 อนุญาตให้มีร้อยละของ RAP สูงสุดเท่ากับ 50 ใน HMA shoulders and stabilized sub-base มีการใช้ RAP มากถึงร้อยละ 80 ใน HMA และมีระดับประสิทธิภาพที่ยอมรับได้ (FHWA, 1993) อย่างไรก็ตามการสร้างความมั่นใจในขั้นตอนการออกแบบ และความสำเร็จของการใช้ RAP นั้นจำเป็นต้องมีการจัดการกับปัญหา ด้านความทนทานที่เกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัสดุบริสุทธิ์และวัสดุรีไซเคิล

2.12 งานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ RAP

Delwar et al., (1997) ทดสอบโดยการแทนที่ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลในมวลรวมละเอียดธรรมดา และมวลรวมหยาบธรรมดาในอัตราส่วน (0 25 50 75 และ 100) และซีเมนต์น้ำ (w/c) สองอัตราส่วน (0.4 และ 0.5) ผลลัพธ์คือสามารถใช้ RAP ได้มากถึงร้อยละ 20 ในงานคอนกรีต (มากกว่าร้อยละ 20) เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่ไม่ใช่โครงสร้างหลัก การศึกษาคิดตามผลโดย (Gillen and Brand, 2014) พบว่าการเพิ่มปริมาณการแทนที่ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลในมวลรวมหยาบของคอนกรีตสามารถเพิ่มขึ้นได้ร้อยละ 40 ถึง 50 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ RAP ในมวลรวมธรรมดาสามารถปรับปรุงได้โดยการลดค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ การศึกษาในห้องปฏิบัติการพบว่า การแทนที่ RAP ในอัตราส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ค่ากำลังอัดค่าแรงดึงและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลในมวลรวมธรรมดา

Hassan et al., (2000) ได้ทำการทดสอบ 3 ส่วน ส่วนแรกแทนที่ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลหยาบในมวลรวมหยาบธรรมชาติร้อยละ 100 ใช้ทรายธรรมชาติ ส่วนที่สองแทนที่ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลละเอียดในมวลรวมละเอียดธรรมชาติร้อยละ 100 ใช้หินธรรมชาติ ส่วนที่สามแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 แทนที่ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลหยาบในมวลรวมหยาบธรรมชาติร้อยละ 100 ใช้ทรายธรรมชาติ พบว่าในส่วนที่สองแทนที่ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลละเอียดในมวลรวมละเอียดธรรมชาติร้อยละ 100 ใช้หินธรรมชาติ มีค่ากำลังรับแรงอัด และค่ากำลังรับแรงดัด ค่าความพรุนและการซึมผ่านของออกซิเจนมากที่สุด ในส่วนที่สามแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 แทนที่ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลหยาบในมวลรวมหยาบธรรมชาติร้อยละ 100 พบว่าการผสมระหว่างมวลรวม RAP หยาบและมวลรวม RAP ละเอียด สามารถใช้เถ้าลอยในการปรับคุณสมบัติความพรุนและการซึมผ่านให้ดีขึ้น ทำให้คอนกรีตมีความเหนียว และรับความเครียดได้เพิ่มขึ้น

Hossiney et al., (2008) ได้ทำการทดสอบโดยการแทนที่ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลในมวลรวมธรรมชาติในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 10 20 และ 40 ทั้งแบบหยาบ และแบบละเอียด ค่ากำลังอัด และหน่วยน้ำหนักมีค่าลดลงทั้งสองแบบ เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ RAP ในมวลรวมธรรมชาติ ส่งผลให้โมดูลัสความยืดหยุ่นกำลังอัดแรงดัด และความต้านทานแรงดึงแยก

Hossiney et al., (2010) ได้ทำการทดสอบอีกครั้ง และใช้ RAP จากสองแหล่งที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกัน และปริมาณซีเมนต์ ผลที่ได้เหมือนกับการศึกษาก่อนหน้า และนอกจากนี้เขายังพบว่าผลของการแทนที่ RAP ต่อค่าการหดตัวอิสระ และสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเป็นตัวแปรแต่ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน

Okafor (2010) ได้ทำการทดสอบโดยการแทนที่ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลหยาบในมวลรวมหยาบธรรมชาติในอัตราส่วน 1:2:4 และ 1:3:5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ทราย และมวลรวม RAP อัตราส่วนน้ำซีเมนต์ 0.50 0.60 และ 0.70 พบว่าการแทนที่ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลหยาบในมวลรวมหยาบธรรมชาติ ค่ากำลังอัดและค่ากำลังรับแรงดัดลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ RAP หยาบ นอกจากนี้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อปริมาณ RAP หยาบที่มียางแอสฟัลต์เพิ่มขึ้น ในส่วนผสมส่งผลให้มีบริเวณพื้นผิวของ RAP หยาบเพิ่มขึ้นแอสฟัลต์ที่เคลือบอยู่บนผิวของมวลรวมนั้นมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์ที่ไม่แข็งแรงซึ่งส่งผลต่อกำลังอัดของก้อนตัวอย่างที่ลดลง

Bermel (2012) ได้ทำการทดสอบโดยการแทนที่ RAP หยาบในมวลรวมหยาบธรรมชาติร้อยละ 25 -100 และแทนที่ RAP ละเอียดในมวลรวมละเอียดธรรมชาติร้อยละ 0-50 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.35 และ 0.45 เป้าหมายต้องการค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 2,000 ปอนด์ต่อ

ตารางนํ้า ที่อายุบ่ม 7 วัน ค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 3,000 ปอนด์ต่อตารางนํ้า ที่อายุบ่ม 28 วัน และค่ากำลังรับแรงดัดเฉลี่ยเท่ากับ 500 ปอนด์ต่อตารางนํ้าที่อายุบ่ม 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีต และกำลังรับแรงดัดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ RAP แทนที่มวลรวมธรรมชาติ จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วันและ 28 วัน การแทนที่ RAP ละเอียดแทนที่มวลรวมละเอียดธรรมชาติ ค่ากำลังลดลงมากกว่าการแทนที่ RAP หยาบในมวลรวมหยาบธรรมชาติ

Huang et al., (2005) เสนอว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวม RAP หยาบแทนที่ในมวลรวมธรรมชาติอย่างเดียวมีความสามารถที่ดีขึ้นในเรื่องความเหนียว และด้านทานรอยแตกที่มวลรวมค่ากำลังของคอนกรีตลดลงน้อยกว่าการใช้มวลรวม RAP ละเอียดแทนที่ในมวลรวมธรรมชาติสำหรับคอนกรีตที่มีมวลรวม RAP แทนที่มวลรวมธรรมชาติ ปริมาณที่มากขึ้นมีการลดลงของค่ากำลังอัดอย่างเป็นระบบตามปริมาณมวลรวม RAP ที่เพิ่มขึ้นในเนื้อของคอนกรีต

Medina et al., (2015) บ่งชี้ให้เห็นถึงรอยเชื่อมประสานระหว่างเนื้อมอร์ตาร์และมวลรวมแอสฟัลต์ที่มีความต่อเนื่องของรอยเชื่อมประสานที่อ่อนแอกว่าวัสดุรีไซเคิลชนิดอื่นสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Hassan et al., 2000) ยังแสดงให้เห็นว่ามวลรวม RAP ลดการรับกำลังอัดของคอนกรีต และลดความแข็งแรงเป็นสัดส่วนตามร้อยละการแทนที่ และยังพบว่าการผสมระหว่างมวลรวม RAP หยาบและมวลรวม RAP ละเอียด สามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยในการปรับคุณสมบัติความพรุนและการซึมผ่านให้ดีขึ้น ทำให้คอนกรีตมีความเหนียวและรับความเครียดได้เพิ่มขึ้น รายงานวิจัยของ (Okafor, 2010) ได้สรุปว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ RAP จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงในการยึดเหนี่ยวระหว่างแอสฟัลต์และเนื้อมอร์ตาร์ โดยกำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของมวลรวม RAP จะลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ RAP

2.13 รายการอ้างอิง

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2555). **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต.** สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (ส.ค.ท.) กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, พิมพ์ครั้งที่ 7.

มอก.15 เล่ม 1 -2547. (2555). พระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ.2551. **มาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์** : เล่ม 129 ตอนพิเศษ 108.

Abrams, D.A. (1918). **Design of concrete mixtures.** Bulletin 1. Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago. Revised Edition.

ACI. (2009). **Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete.** ACI 211.1-91, ACI Committee211.

- Bermel, B. N. (2012). **Feasibility of reclaimed asphalt pavement as aggregate in Portland cement concrete pavement.** Doctoral dissertation, Montana State University-Bozeman, College of Engineering.
- Bukowski, J. R., (1997). **Guidelines for the Design of Superpave Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP).** Memorandum, ETG Meeting, FHWA Superpave Mixtures Expert Task Group, San Antonio, TX,
- Delwar, M., Fahmy, M., and Taha, R. (1997). **Use of reclaimed asphalt pavement as an aggregate in Portland cement concrete.** ACI Materials Journal, 94(3), 251-256.
- Federal Highway Administration, Recycling of Asphalt Pavements Using at Least 80 Percent Recycled Asphalt Pavement (RAP). (1993). **Engineering and Environmental Aspects of Recycled Materials for Highway Construction.** Report No. FHWA-RD-93-088, Environmental Protection Agency and Federal Highway Administration.
- Gillen, S. L., A. S. Brand. (2014). **Sustainable Long-Life Composite Concrete Pavement for the Illinois Tollway.** International Conference on Long-Life Concrete Pavement, Seattle, Washington.
- Griffiths, C. T., and J. M. Krstulovich. (2002). **Utilization of Recycled Materials in Illinois Highway Construction.** Report No. IL-PRR-142, Illinois Department of Transportation, Springfield, IL.
- Hassan, K., J. Brooks. (2000). **The use of reclaimed asphalt pavement (RAP) aggregates in concrete.** Waste Management Series 1: 121-128.
- Hossiney N, Wang G, Tia M, Bergin M J. (2008). **Evaluation of Concrete Containing Recycled Asphalt Pavement for Use in Concrete Pavement,** Transportation Research Board 87th Annual meeting, 08-2711, Washington, DC.
- Hossiney, N., Tia, M., and Bergin, M. J. (2010). **Concrete containing RAP for use in concrete pavement.** International Journal of Pavement Research and Technology, 3(5), 251-258.
- Huang, B., Shu, X., and Li, G. (2005). **Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavements.** Cement and Concrete Research, 35(10), 2008-2013.
- Huang, B., Shu, X., and Burdette, E. G. (2006). **Mechanical properties of concrete containing recycled asphalt pavements.** Magazine of Concrete Research, 58(5), 313-320.

- Irassar, E.F., Gonzalez, M. and Rahhal, V. (2000). **Sulfate Resistance of Type V Cement with Limestone Filler and Natural Pozzolana**. *Cement & Concrete Composites*, 361-368.
- Kandhal, P. S., and R. B. Mallick. (1997). **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments**. Participant's Reference Book. Report No. FHWA-SA-98-042, National Center for Asphalt Technology, Auburn, AL.
- Kennedy, T. W., W. O. Tam, and M. Solaimanian. (1998). **Optimizing Use of Reclaimed Asphalt Pavement with the SuperPave System**. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 67: 311-333.
- Lawson, K.A. Danso, H.C. Odoi, C.A. Adjei, F.K. and Quashie. (2011). **Non-Destructive Evaluation of Concrete using Ultrasonic Pulse Velocity**. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 3(6): 499-504
- McDaniel, R., and R. M. Anderson. (2001). **Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the SuperPave Mix Design Method: Technician's Manual**, NCHRP Report 452, TRB, Washington, D.C., 2001.
- Medina C., Zhu W., Howind T., Frias M. and Sanchez de Rojas M.I. (2015). **Effect of the constituents (asphalt, clay materials, floating particles and fines) of construction and demolition waste on the properties of recycled concretes**. *Construction and Building Materials*, 79, 22-33.
- Okafor, F. O. (2010). **Performance of recycled asphalt pavement as coarse aggregate in concrete**. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 17, 47-58.
- Park, R. and Paulay, T. (1975). **Reinforced Concrete Structures**. New York: John Wiley & Son.
- Rao, G. A. (2001) **Generalization of Abrams' law for cement mortars**. *Cement and Concrete Research*, 31(3), 495-502.
- Sullivan, J. (1996). **Pavement Recycling Executive Summary and Report**. FHWA-SA-95-060, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

บทที่ 3

กฎอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ส่วนขยายสำหรับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีผิวทาง แอสฟัลต์รีไซเคิลเป็นมวลรวม

3.1 บทนำ

ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล (Recycled asphalt pavement, RAP) ได้จากการรีไซเคิลผิวทางถนนแอสฟัลต์ที่ชำรุดจากภัยพิบัติตามธรรมชาติหรือหิมะถล่มจากโครงการซ่อมบำรุงผิวทางหลวง ในแต่ละปีมีการซ่อมบำรุงผิวทางหลวงมีเป็นจำนวนมาก ถ้าไม่มีการจัดการที่ดีจะเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ปัจจุบัน RAP เป็นที่นิยมนำกลับมาใช้ใหม่เนื่องจากประหยัดค่าใช้จ่ายและเป็นการอนุรักษ์แหล่งวัสดุตามธรรมชาติ (Tia et al., 2012; Zaumanis and Mallick, 2015; Suebsuk et al., 2014; 2017) นอกจากนี้ RAP ยังถูกนำมาใช้แทนบางส่วนของวัสดุคัดเลือกในงานชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทาง (Watson et al., 2010; Copeland, 2011; Mangiafico et al., 2015; Zaumanis and Mallick, 2015) และ RAP สามารถใช้การแทนที่วัสดุมวลรวมใหม่สำหรับการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ได้ (Visintine et al., 2013; Zaumanis and Mallick, 2015, Yu, 2017) ในปัจจุบัน RAP สามารถใช้เป็นมวลรวมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยการผสมกับเถ้าลอยเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Hoy et al. 2016a; 2016b; 2017 และ 2018)

นอกจากนี้ RAP ยังสามารถใช้เพื่อการแทนที่มวลรวมละเอียดและมวลหยาบธรรมชาติในงานคอนกรีตทั่วไปรวมถึงพื้นถนนคอนกรีต (Hossiney et al., 2010; Bakash and Sowmith, 2012; Brand et al., 2012; Tia et al., 2012) จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วย RAP กำลังอัดลดลงแต่มีความเหนียวเพิ่มขึ้น (Huang et al., 2006) โดยทั่วไปกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ RAP จะขึ้นอยู่กับการศึกษาเกี่ยวกับแอสฟัลต์และเนื้อมอร์ตาร์ (Sommer, 1994; Delwar et al., 1997; Hassan et al., 2000; Mathias et al., 2004; Huang et al., 2005 and 2006; Katsakou and Kolias, 2007; Al-Oraimi et al., 2009; Topcu and Isikdag, 2009; Okafor, 2010) การเพิ่มประสิทธิภาพด้านการรับกำลังของซีเมนต์มอร์ตาร์สามารถทำได้โดยการนำเถ้าลอยมาแทนที่ในซีเมนต์ที่เป็นวัสดุประสานเดิมทำให้เพิ่มความพรุนและความสามารถในการซึมผ่าน (Hassan et al., 2000) คอนกรีตผสมแอสฟัลต์มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากกว่าคอนกรีตทั่วไปซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการใช้งานพิเศษ เช่น งานรองพื้นทางรถไฟ (Li et al., 1998; Hassan et al., 2000; Tompkins et al., 2009) ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมแอสฟัลต์นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานรองพื้นทาง

รถไฟแบบไม่มีหินบดลาสต์ ซึ่งสามารถช่วยลดการสิ้นเปลืองและลดความเสียหายของแผ่นพื้นคอนกรีตของชั้นโครงสร้างทางรถไฟได้ (Wang et al., 2014; Yang et al., 2014; Han et al., 2015; Qiang et al., 2011; Ma et al., 2015) คุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมแอสฟัลต์จะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากขึ้นตามอัตราส่วนแอสฟัลต์ต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น (Liu et al., 2009; Wang et al., 2008) ปัจจุบันกลไกการพัฒนากำลังอัดและการออกแบบส่วนผสมสำหรับคอนกรีตและมอร์ตาร์ที่มีแอสฟัลต์ในส่วนผสมยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจน

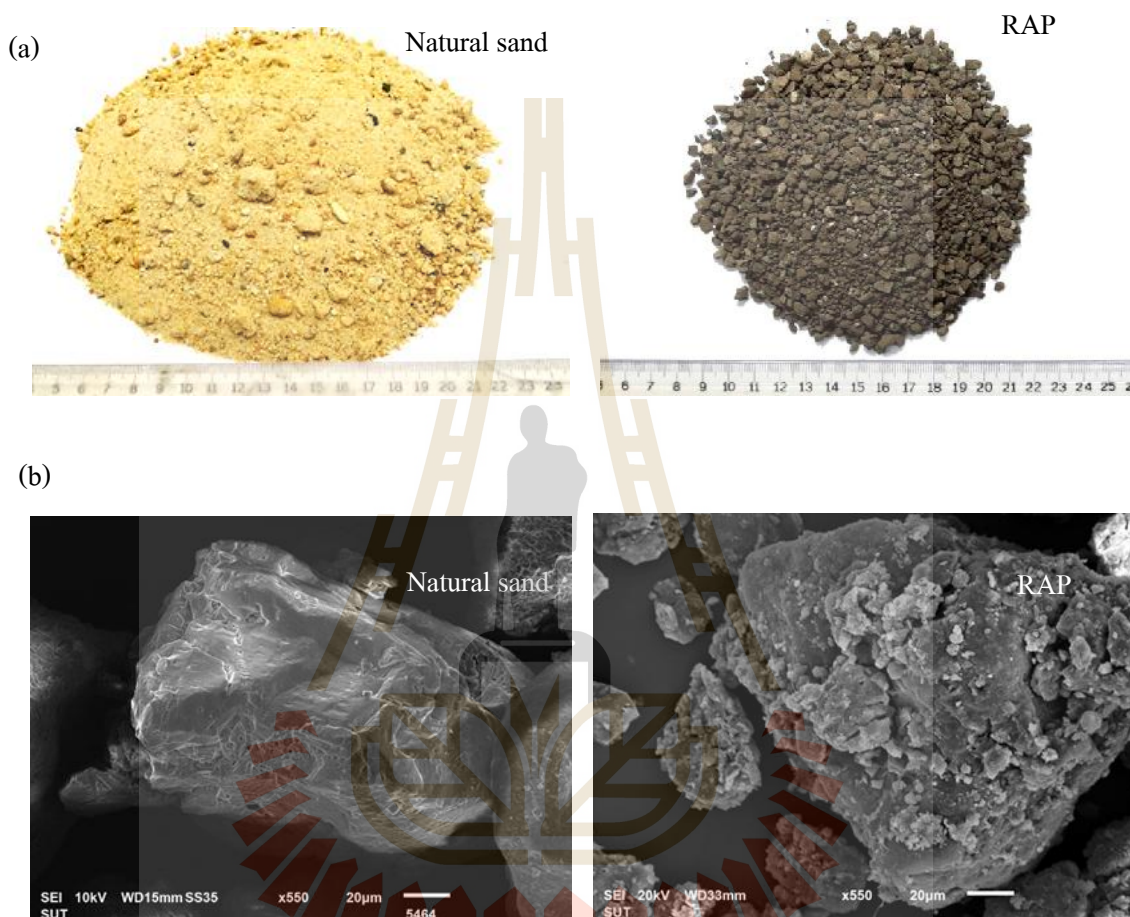
การวิจัยบทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของซีเมนต์มอร์ตาร์ภายใต้ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัด ได้แก่ อัตราส่วนการแทนที่ RAP อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และระยะเวลาการบ่ม ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัดถูกตรวจสอบโดยการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พร้อมทั้งเสนอสมการทั่วไปที่สามารถนำไปพัฒนาวิธีออกแบบกำลังอัดสำหรับคอนกรีตที่ใช้ RAP เป็นส่วนผสมตามกฎที่ปรับปรุงจาก Abrams' Law (Miura et al., 2001; Horpibulsuk et al., 2003; 2005)

3.2 วัสดุและวิธีการทดลอง

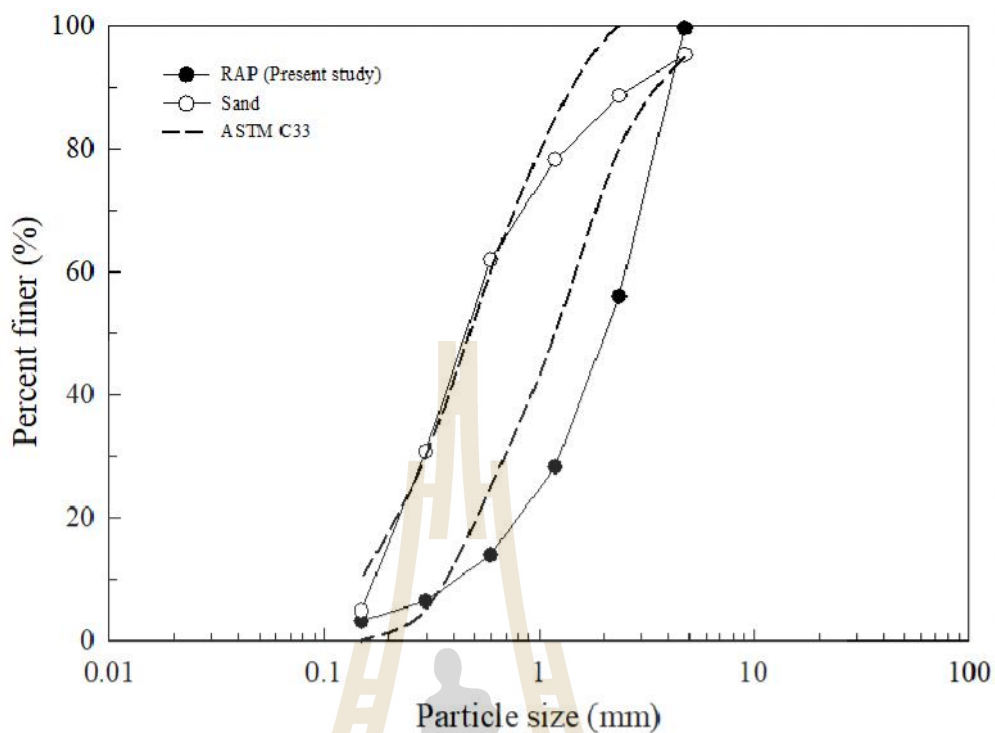
ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แทนที่ RAP แสดงด้วย M^*R^{**} เมื่อ * คืออัตราส่วนอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ ** คือ ร้อยละของการแทนที่ RAP

วัสดุซีเมนต์เป็นพอร์ตแลนด์ประเภท I ตามมาตรฐาน ASTM C150 / C150M (ASTM, 2016a) และมวลรวมเป็นทรายสะอาดตามธรรมชาติ การศึกษาครั้งนี้ RAP ถูกนำมาจากผิวทางแอสฟัลต์ที่รื้อจากโครงการซ่อมผิวทางหลวงของกรมทางหลวง RAP เป็นหินบะซอลต์จากภูเขาไฟมีสีเข้มประกอบไปด้วยแร่ Plagioclaz calcic และ Clinopyroxene และวัสดุประสานแอสฟัลต์ภาพถ่ายของทรายและ RAP แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 RAP ที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เรียกว่า Fine RAP ขนาดละเอียดของทราย RAP และมวลรวมผสมแสดงตามรูปที่ 3.2 ขนาดของ Fine RAP มีความละเอียดต่ำกว่าเส้นมาตรฐาน ASTM C33 Upper Bound ซึ่งแสดงว่า Fine RAP มีความหยาบมากกว่าค่าตามมาตรฐานของมวลรวมละเอียดที่นำมาใช้ในงานคอนกรีต แต่ขนาดของทรายแม่น้ำ มีเส้นขนาดละเอียดอยู่บนเส้นชั้นตามมาตรฐาน ASTM C33 Lower Bound การนำมวลรวมละเอียดที่มีความละเอียดสูงมาใช้ในงานคอนกรีตจะทำให้เกิดการแยกตัวได้ง่ายระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เฟสต่อขณะที่ยังเป็นคอนกรีตสด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำ RAP ที่มีขนาดละเอียดใหญ่กว่ามาแทนที่ทรายธรรมชาติที่มีขนาดเล็กกว่าเพื่อปรับขนาดละเอียดของมวลรวมผสมให้อยู่ในมาตรฐาน ASTM C33 (2016) การกระจายขนาดละเอียดของมวลรวมผสมระหว่างใช้ทรายร้อยละ 75 ต่อ RAP ร้อยละ 25 อยู่ในขอบเขตสำหรับมวลรวมตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C133 จากการ

ทดสอบตามวิธีการที่แนะนำโดย McDaniel and Anderson (2001) RAP ประกอบด้วยแอสฟัลต์
 ประมาณร้อยละ 8.1 องค์ประกอบทางเคมีของทรายและ RAP จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค
 X-ray Fluorescence แสดงไว้ตารางที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายของทราย และ RAP (a) ภาพสเกลปกติ (b) ภาพ SEM



รูปที่ 3.2 การกระจายขนาดคละของทราย RAP และมวลรวมผสม

ตารางที่ 3.1 สมบัติของทรายและ RAP

Properties	Test method	Sand	RAP	RAP without Asphalt *
Fineness modulus	ASTM C136	2.38	3.91	3.80
Specific gravity (G_s)	ASTM C128	2.62	2.66	2.82
Density (kg/m^3)	ASTM C29	1,647	1,442	1,632
Water absorption (%)	ASTM C128	1.15	2.56	2.31

* Determined by the extraction method recommended by McDaniel and Anderson (2001)

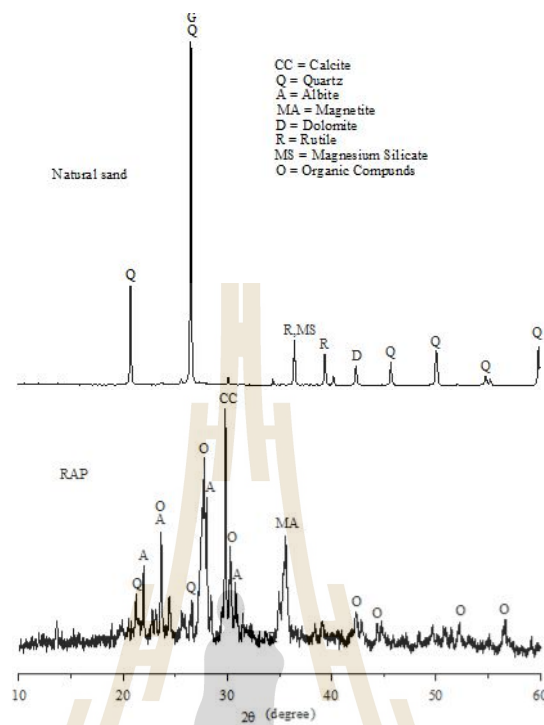
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของ ซีเมนต์ ทราย และ RAP

Chemical formula (%)	Cement	Sand	RAP
MgO	1.86	N.D.	4.89
Al ₂ O ₃	4.71	6.01	12.99
SiO ₂	24.14	92.06	53.20
SO ₃	5.54	0.15	3.89
K ₂ O	0.51	0.40	0.99
CaO	58.95	0.31	7.76
Fe ₂ O ₃	3.61	0.66	14.40

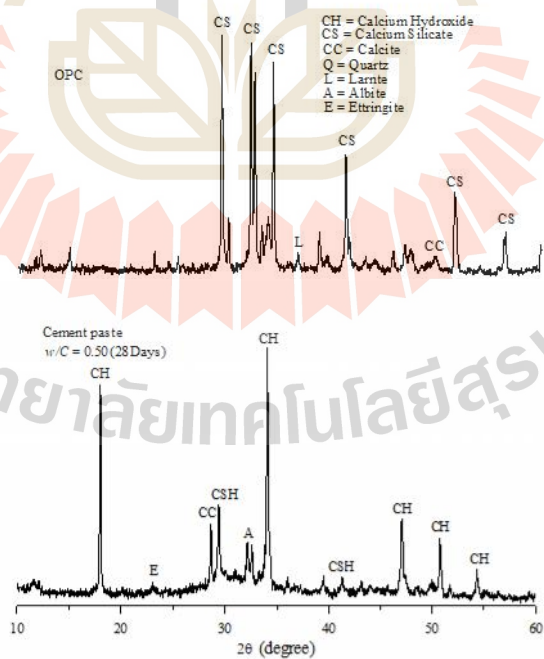
Remarks: N.D. Not detected

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของมวลรวมโดยใช้วิธี XRD แสดงในรูปที่ 3.3 ทรายธรรมชาติพบออกไซด์หลักที่ปริมาณสูง คือ Quartz (SiO₂) ซึ่งเป็นสารประกอบของซิลิกอนและออกซิเจน ซิลิกา มีลักษณะเป็นผลึกที่เชื่อมต่อกันโดยพันธะโควาเลนต์ ออกไซด์หลักของ RAP บีทูนินัสที่เป็นส่วนประกอบที่ผิวของ RAP และมีแรมธาตออินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ (Malonamide and Ammonium Copper Malonate) หินบะซอลต์ซึ่งเป็นวัสดุพื้นฐานประกอบด้วย Quartz (SiO₂) Albite (NaAlSi₃O₈) Magnetite (Fe₃O₄) และ Calcite (CaCO₃) โดยหินบะซอลต์มีซิลิกาไดออกไซด์สูง (SiO₂) ซึ่งเป็นซิลิกาชนิดอสัณฐานที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาเคมี ปริมาณออกไซด์ที่พบจากวัสดุมวลรวมทั้งขนาดและชนิด สอดคล้องกับผล XRF ดังแสดงในตารางที่ 3.2

(a)



(b)



รูปที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์ XRD (a) ทราย และ RAP (b) ปูนซีเมนต์ และซีเมนต์เพสต์

การหล่อก้อนตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ทำตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-16a (2016) โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ระหว่าง 0.40 ถึง 0.70 และอัตราส่วนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 2.75 จากนั้นแทนที่ Fine RAP ในมวลรวมละเอียดธรรมชาติที่ร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด ตัวอย่างทดสอบเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร เตรียมตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ในแต่ละการทดสอบจำนวน 5 ตัวอย่าง ต่อ 1 ส่วนผสม หลังจากผ่านไป 24 ชั่วโมงถอดแบบออกแล้วห่อด้วยแผ่นกันความชื้นและบ่มภายใต้อุณหภูมิห้อง ระยะเวลาในการบ่มเท่ากับ 7 28 และ 60 วัน เมื่อตัวอย่างที่ครบอายุนำมาถอดแผ่นกันความชื้นออกเพื่อวัดขนาด (กว้าง ยาว และสูง) และชั่งน้ำหนัก แล้วจึงทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ขนาด 600 กิโลนิวตัน ตามมาตรฐาน ASTM C 109 สัดส่วนผสมที่ศึกษาในงานวิจัยนี้แสดงตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสม

Sample ID	Absolute amount (g)					w/C
	Cement	Dry sand	Dry RAP	Reacted water (w)	Compensated water (w _{SSD})	
M0.40R0*	100	275.00	-	40	3.14	0.40
M0.40R25	100	206.25	68.75	40	4.18	0.40
M0.40R50	100	137.50	137.50	40	5.21	0.40
M0.40R75	100	68.75	206.25	40	6.24	0.40
M0.40R100	100	-	275.00	40	7.27	0.40
M0.45R0*	100	275.00	-	45	3.14	0.45
M0.45R25	100	206.25	68.75	45	4.18	0.45
M0.45R50	100	137.50	137.50	45	5.21	0.45
M0.45R75	100	68.75	206.25	45	6.24	0.45
M0.45R100	100	-	275.00	45	7.27	0.45
M0.50R0*	100	275.00	-	50	3.14	0.50
M0.50R25	100	206.25	68.75	50	4.18	0.50
M0.50R50	100	137.50	137.50	50	5.21	0.50

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสม (ต่อ)

Sample ID	Absolute amount (g)					w/C
	Cement	Dry sand	Dry RAP	Reacted water (w)	Compensated water (w_{SSD})	
M0.50R75	100	68.75	206.25	50	6.24	0.50
M0.50R100	100	-	275.00	50	7.27	0.50
M0.60R0*	100	275.00	-	60	3.14	0.60
M0.60R25	100	206.25	68.75	60	4.18	0.60
M0.60R50	100	137.50	137.50	60	5.21	0.60
M0.60R75	100	68.75	206.25	60	6.24	0.60
M0.60R100	100	-	275.00	60	7.27	0.60
M0.70R0*	100	275.00	-	70	3.14	0.70
M0.70R25	100	206.25	68.75	70	4.18	0.70
M0.70R50	100	137.50	137.50	70	5.21	0.70
M0.70R75	100	68.75	206.25	70	6.24	0.70
M0.70R100	100	-	275.00	70	7.27	0.70

Remarks: * Control mortar

โครงสร้างจุลภาคของก้อนตัวอย่างตามสัดส่วนผสมข้างต้นที่มีอายุ 7 และ 28 วัน ถูกเลือกมาตรวจสอบโดยการวิเคราะห์ด้วย XRD และ SEM การเตรียมตัวอย่าง XRD และ SEM ทำหลังจากทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์แล้วเก็บชิ้นส่วนก้อนตัวอย่างที่วิบัตินำไปอบไล่ความชื้นในตัวอย่างเพื่อหยุดปฏิกิริยาไฮเดรชันและเตรียมนำไปวิเคราะห์ การสแกน XRD ทำระหว่างที่ 5 ถึง 60° 2 θ โดยเพิ่มขึ้น 0.02 ต่อ Step การวิเคราะห์ SEM ใช้ชิ้นส่วนขนาดระหว่าง 3 ถึง 5 มิลลิเมตร ตัวอย่างถูกวางไว้บนที่ยึดแท่งทองเหลืองโดยใช้เทปกาวสองหน้า จากนั้นทำให้แห้งโดยใช้แสงอินฟราเรดเป็นเวลา 5 นาทีและเคลือบด้วยทองคำโดยใช้เครื่องเคลือบ ภาพ SEM ถูกบันทึกด้วยกำลังขยายระหว่าง 1000x และ 4000x

3.3 ผลการทดสอบและการอภิปราย

3.3.1 วิเคราะห์ผลทดสอบของซีเมนต์มอร์ตาร์

ค่าการไหลของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนผสม 25 อัตราส่วนแสดงในตารางที่ 3.4 ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40 ซีเมนต์มอร์ตาร์ไม่สามารถใช้งานได้ เนื่องจากผลทดสอบการไหลมีค่าเท่ากับศูนย์ ซีเมนต์มอร์ตาร์ควรมีการไหลเท่ากับ 110 ± 5 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109 การไหลของซีเมนต์มอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับอัตราอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และอัตราส่วนการแทนที่ RAP (Haach et al., 2011) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูงขึ้นทำให้ค่าการไหลเพิ่มขึ้น จากตารางที่ 3.4 แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ RAP ช่วยเพิ่มการไหลของซีเมนต์มอร์ตาร์แทนที่ด้วย RAP อัตราส่วน น้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 0.60 ที่ปริมาณ RAP ระหว่างร้อยละ 25 ถึง 50 ค่าการไหลมีค่าสูงเมื่อแทนที่ RAP มากกว่าร้อยละ 50 ค่าการไหลของมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.7 แทนที่ RAP มีค่ามากกว่าข้อกำหนดและไม่สามารถวัดค่าการไหลได้เมื่อแทนที่ RAP มากกว่าร้อยละ 75

ตารางที่ 3.4 ค่าการไหลของมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ

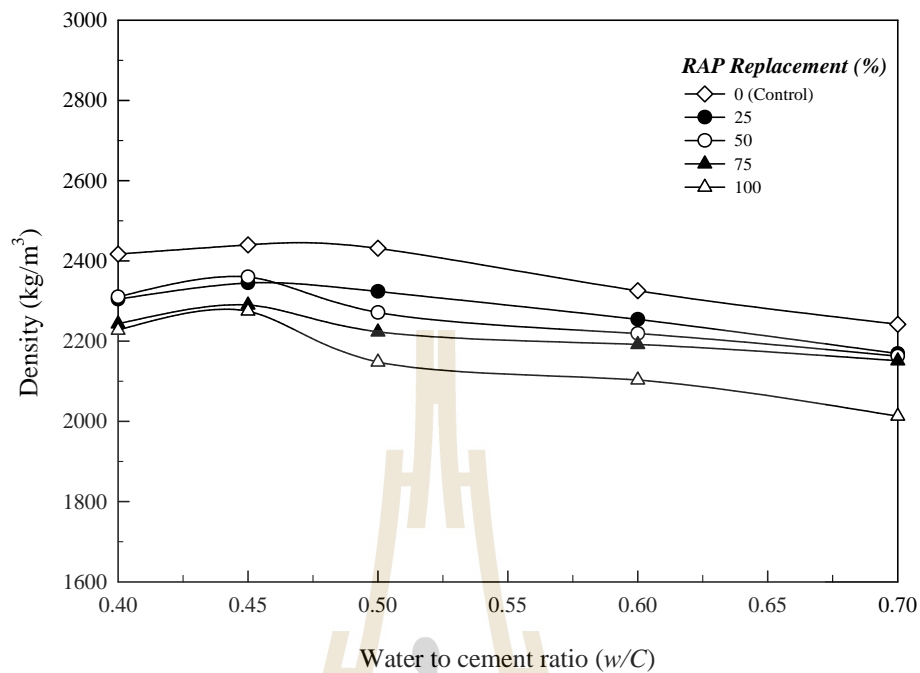
Sample ID	w/C	Percentage	Percentage	Flow (%)
		of sand by weight	of RAP by weight	
M0.40R0*	0.4	100	0	0
M0.40R25	0.4	75	25	0
M0.40R50	0.4	50	50	0
M0.40R75	0.4	25	75	0
M0.40R100	0.4	0	100	0
M0.45R0*	0.45	100	0	9.90
M0.45R25	0.45	75	25	12.24
M0.45R50	0.45	50	50	23.54
M0.45R75	0.45	25	75	34.33
M0.45R100	0.45	0	100	43.56
M0.50R0*	0.5	100	0	21.78
M0.50R25	0.5	75	25	35.21
M0.50R50	0.5	50	50	51.56

ตารางที่ 3.4 ค่าการไหลของมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ (ต่อ)

Sample ID	w/C	Percentage of sand by weight	Percentage of RAP by weight	Flow (%)
M0.50R75	0.5	25	75	63.43
M0.50R100	0.5	0	100	84.15
M0.60R50	0.6	50	50	110.45
M0.60R75	0.6	25	75	132.30
M0.60R100	0.6	0	100	142.57
M0.70R0*	0.7	100	0	135.44
M0.70R25	0.7	75	25	145.03
M0.70R50	0.7	50	50	**
M0.70R75	0.7	25	75	**
M0.70R100	0.7	0	100	**

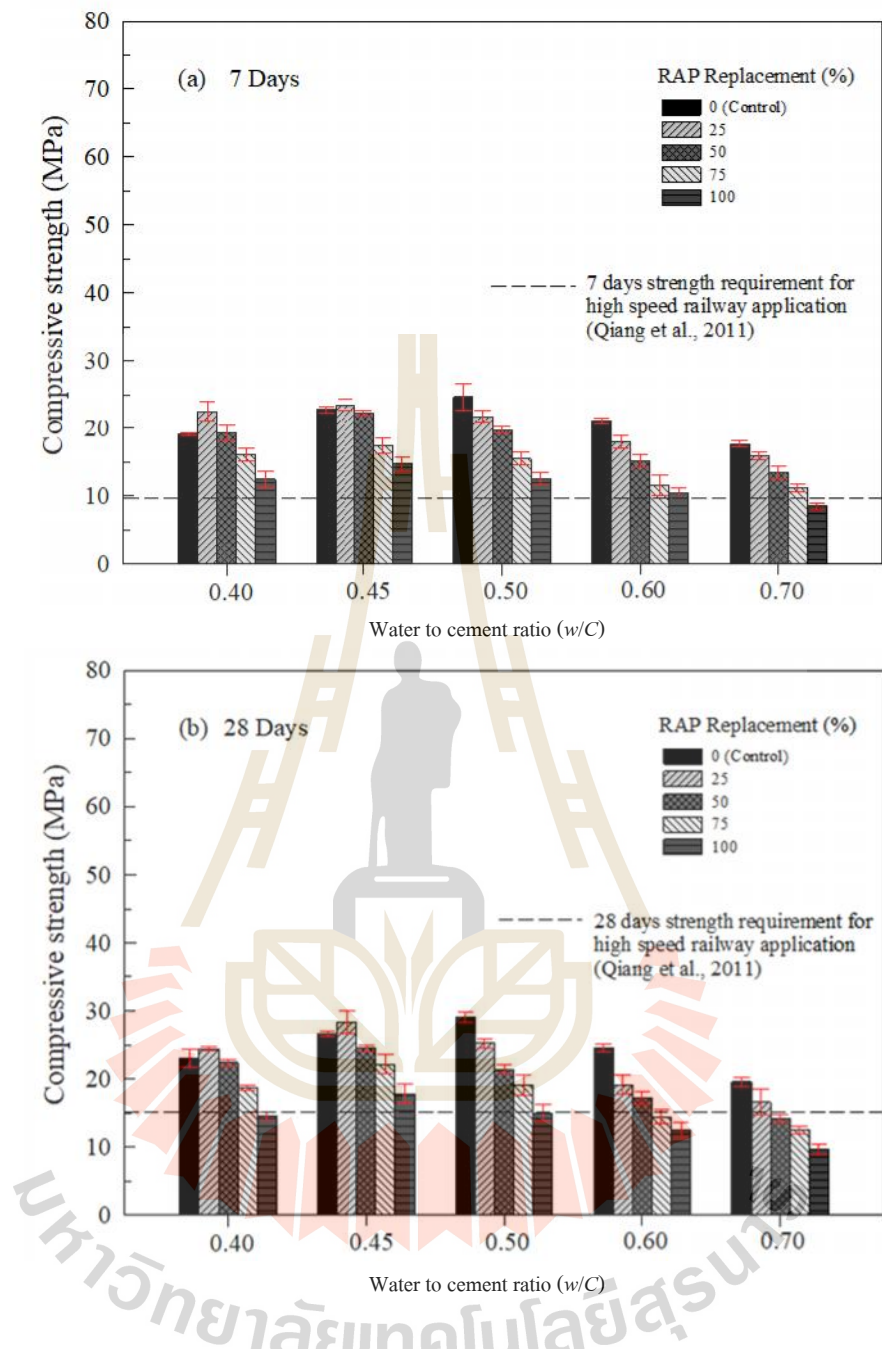
Remarks: * Control mortar, ** Large flow which cannot be measured by apparatus of ASTM C23

รูปที่ 3.4 แสดงหน่วยน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์แทนที่ Fine RAP ในมวลรวมธรรมชาติที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ระหว่าง 0.40 ถึง 0.70 ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ของซีเมนต์มอร์ตาร์มีแนวโน้มของหน่วยน้ำหนักสูงขึ้นเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40 และ 0.50 หน่วยน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสม RAP จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ Fine RAP เนื่องจากหน่วยน้ำหนักของ Fine RAP ต่ำกว่าทราย (ดูตารางที่ 3.1) หน่วยน้ำหนักแห้งกระทุ้งแน่นของ Fine RAP มีค่าต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติที่ปริมาตรเท่ากันที่เป็นเช่นนี้เพราะ Fine RAP มีลักษณะเหลี่ยมและมีช่องว่างมากกว่ามวลรวมธรรมชาติ ตลอดจน RAP ประกอบไปด้วยแอสฟัลต์ที่มีหน่วยน้ำหนักเบากว่ามวลรวมผสมอยู่ด้วย ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์แทนที่ Fine RAP ในมวลรวมธรรมชาติมีค่าลดลง

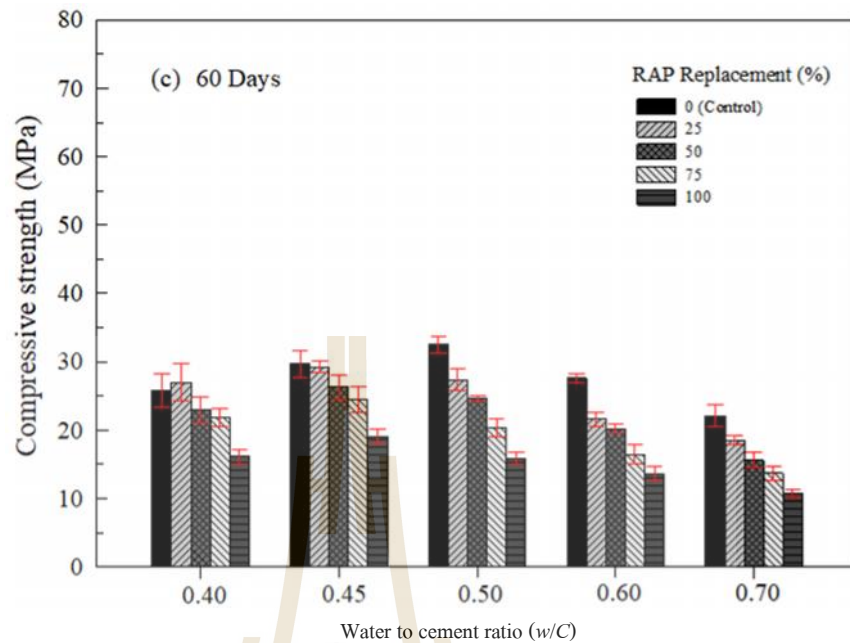


รูปที่ 3.4 หน่วยน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์แทนที่ Fine RAP ในมวลรวมละเอียดธรรมดา

กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์แทนที่ Fine RAP ในมวลรวมธรรมดาที่สัดส่วนและอายุบ่มต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.5 โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ระหว่าง 0.40 ถึง 0.70 อายุบ่ม 7 28 และ 60 วัน กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์แทนที่ Fine RAP ร้อยละ 25 ในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40 และ 0.45 มีค่าสูงกว่ากำลังอัดซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมเนื่องจากมอร์ตาร์ควบคุมมีปริมาณน้ำไม่เพียงพอส่งผลให้มีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อมีปริมาณน้ำเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมและซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ Fine RAP มีค่ากำลังอัดลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น การแทนที่ RAP ร้อยละ 100 มีค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ต่ำลดลงประมาณร้อยละ 33 ถึง 48 ค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่อายุบ่ม 7 วัน และ 28 วัน แทนที่ Fine RAP น้อยกว่าร้อยละ 75 สามารถใช้กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40 0.45 0.50 0.60 และ 0.70 ตามลำดับได้กำลังอัดเพียงพอ เมื่อพิจารณา ค่าการไหลและค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์แนะนำมีค่าเท่ากับ 0.6 ซึ่งเหมาะสมที่สุดในทางปฏิบัติ เนื่องจากมีความสามารถในการทำงานได้ดีและกำลังเพียงพอต่อการใช้งานรองรับโครงสร้างทางรถไฟสำหรับแผ่นพื้นคอนกรีตรองรับชั้นโครงสร้างทางรถไฟความเร็วสูง (Qiang et al., 2011)



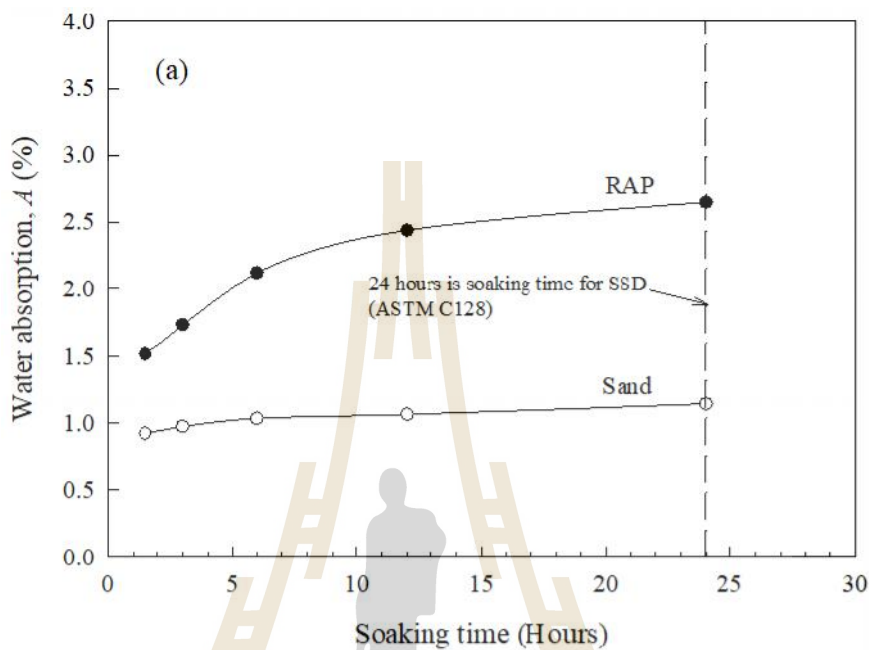
รูปที่ 3.5 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์แทนที่ Fine RAP ในมวลรวมละเอียดที่อายุบ่ม (a) 7 วัน
(b) 28 วัน และ (c) 60 วัน



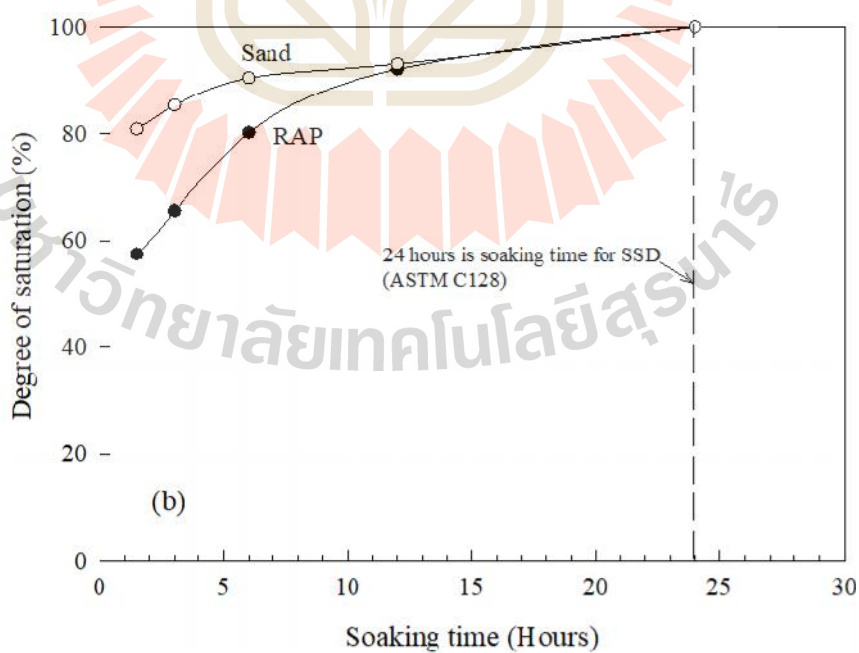
รูปที่ 3.5 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์แทนที่ Fine RAP ในมวลรวมละเอียดที่อายุบ่ม (a) 7 วัน (b) 28 วัน และ (c) 60 วัน (ต่อ)

ค่าการไหลของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้ Fine RAP เป็นมวลรวมมีอัตราการดูดซึมน้ำของวัสดุเป็นตัวแปรสำคัญ การทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำที่ระยะเวลาที่แตกกันซึ่งถูกดัดแปลงมาจากกระบวนการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C127 (2015) และ ASTM C 128 (2015) ถูกนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมที่พิเศษนี้โดยทำการแช่มวลรวมในน้ำที่เวลา 1.5 3 6 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ รูปที่ 3.6 แสดงค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมที่เวลาแช่น้ำต่าง ๆ Fine RAP มีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าของมวลรวมธรรมชาติทุกระยะเวลาการแช่เกือบ 1 เท่าตัว เมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมทรายธรรมชาติ การดูดซึมน้ำที่สูงกว่าเป็นผลมาจาก RAP ประกอบไปด้วยหินย่อยที่ผ่านการรื้อผิวทางส่งผลให้มีช่องว่างรอยแตกขนาดเล็ก (Micro crack) เกิดขึ้นในมวลรวมอีกทั้งลักษณะผิวของ RAP มีความขรุขระมากกว่าเมื่อเทียบกับผิวของมวลรวมธรรมชาติ (ดูรูปที่ 3.1) ดังนั้นพื้นที่ผิวมากกว่าจึงส่งผลต่อการดูดซึมน้ำที่สูงขึ้นกว่ามวลรวมปกติเมื่อพิจารณาระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำดังแสดงในรูปที่ 3.7 ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่ระยะเวลาต่าง ๆ เทียบกับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่ 24 ชั่วโมง พบว่า RAP ดูดซึมน้ำเข้าไปสู่มวลรวมช้ากว่ามวลรวมธรรมชาติ โดยเมื่อมาพิจารณาระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของวัสดุทั้ง 2 ชนิด ที่ระยะเวลาแช่น้ำ 1.5 ชั่วโมง (ระยะแรก) พบว่ามวลรวมธรรมชาติและ RAP ร้อยละ 82 และ 57 ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวสรุปได้ว่ามวลรวม RAP เป็นวัสดุที่มีการดูดซึมน้ำที่ระยะแรกช้ากว่ามวลรวมธรรมชาติ

แต่ที่ระยะเวลาแช่น้ำมากกว่า 12 ชั่วโมง (ระยะปลาย) RAP มีความสามารถดูดซึมน้ำได้ใกล้เคียงกับมวลรวมธรรมดา



รูปที่ 3.6 การดูดซึมน้ำของมวลรวมธรรมดาและ RAP ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

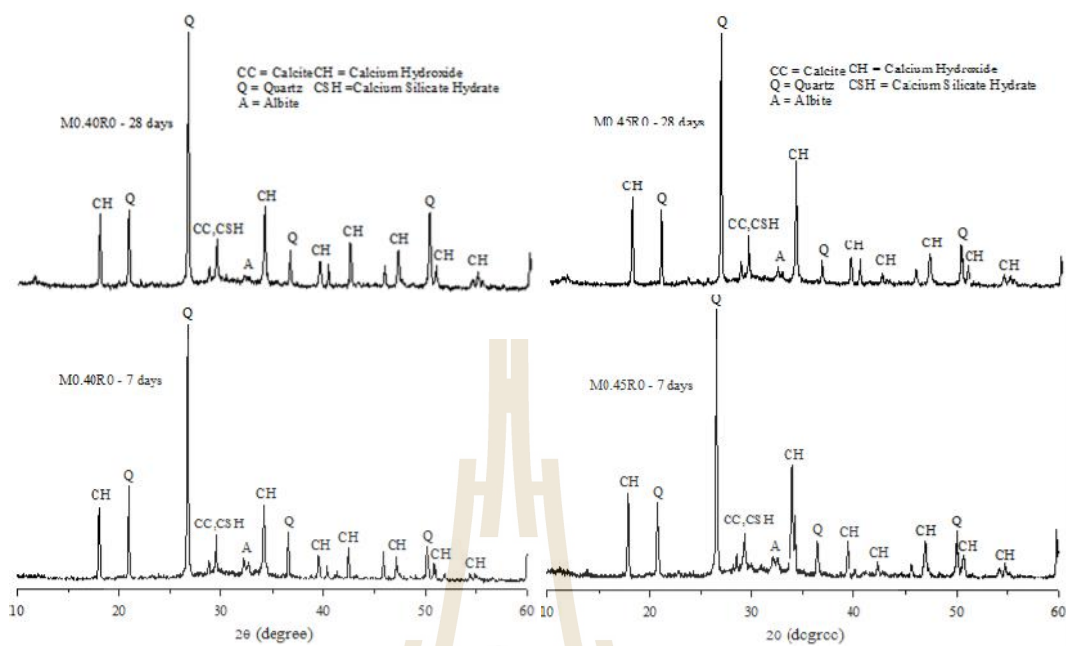


รูปที่ 3.7 ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของมวลรวมธรรมดาและ RAP ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

3.3.2 โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์

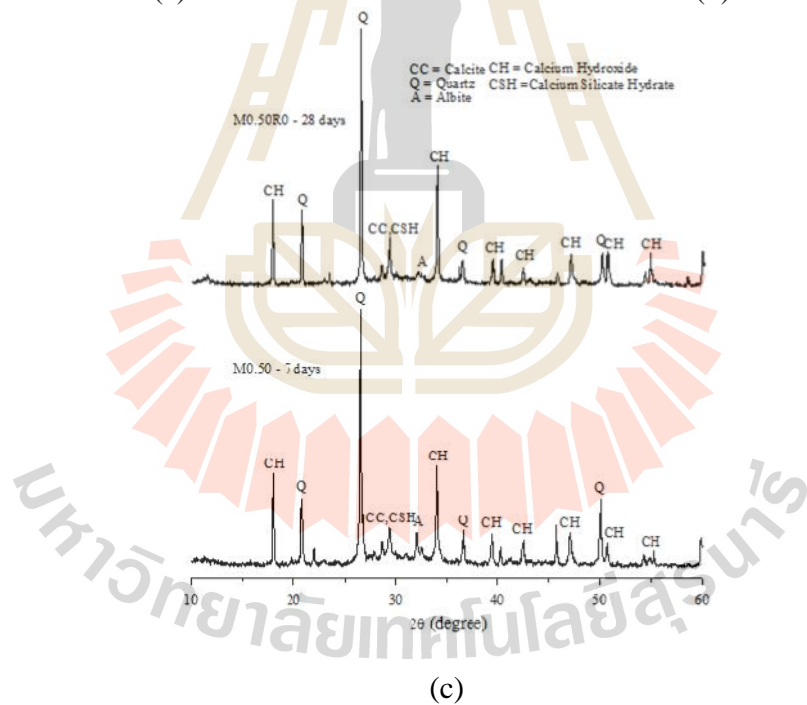
ผลการทดสอบ XRD ของซีเมนต์แสดงในรูปที่ 3.3(b) ออกไซด์หลัก (Major oxides) ของซีเมนต์มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์เป็นอย่างมาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณของออกไซด์เริ่มต้นสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบหลักซีเมนต์ทั่วไป แยกสารประกอบหลักออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ C_3S C_2S C_3A และ C_4AF จากผลการทดสอบ XRD พบสารประกอบหลัก (Major compounds) ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบประเภทแคลเซียมซิลิเกต (CS) และผลึกของซีเมนต์เป็นชนิดออสทรูอานดังแสดงในรูปที่ 3.3(b) สอดคล้องกับผลการทดสอบ XRF ตามปริมาณแคลเซียมออกไซด์ และซิลิกาที่มีปริมาณสูงผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวเป็นเวลา 28 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 แสดงดังรูปที่ 3.3(b) ที่มุม 2 θ ที่ 25-35° ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_2S เป็นปฏิกิริยาที่ให้ผลิตภัณฑ์สำคัญ ได้แก่ Calcium Silicate Hydrates ($C_3S_2H_3$) หรือ CSH และ Calcium Hydroxide ($Ca(OH)_2$) หรือ CH ซึ่งทั้งสองชนิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของซีเมนต์ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยากับซัลเฟตไอออนที่ได้มาจากยิปซั่มที่เป็นส่วนผสมของซีเมนต์ทำให้เกิด Sulforaluminate Hydrate หรือ Ettringite สังเกตได้จากมุม 2 θ เท่ากับ 29.5° ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 3.5)

ผลการทดสอบ XRD ของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40 0.45 และ 0.50 แสดงตามรูปที่ 3.8 พบว่าผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ทั้งที่อายุบ่ม 7 วัน และ 28 วัน แตกต่างกันว่าซีเมนต์มอร์ตาร์มีองค์ประกอบที่พบมากในทราย ได้แก่ ควอตซ์ (Q) ที่มุม 2 θ เท่ากับ 21° และ 26.6° แทรกอยู่ในผลการทดสอบ ผลของค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในปฏิกิริยาช่วงต้น (7 วัน) ไม่มีผลต่อปฏิกิริยามากนัก แต่ในช่วงปลาย (28 วัน) เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลงปฏิกิริยาจะลดลงด้วย และเมื่อซีเมนต์มอร์ตาร์มีอายุมากขึ้นผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลึกจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (CSH และ CH) จะขยายตัวและเบียดเข้าหากันทำให้พื้นที่ระหว่างอนุภาคซีเมนต์ซึ่งมีพื้นที่จำกัดมีพื้นที่น้อยลง ช่วยเพิ่มความแข็งแรงขึ้นตามอายุบ่มที่มากขึ้น



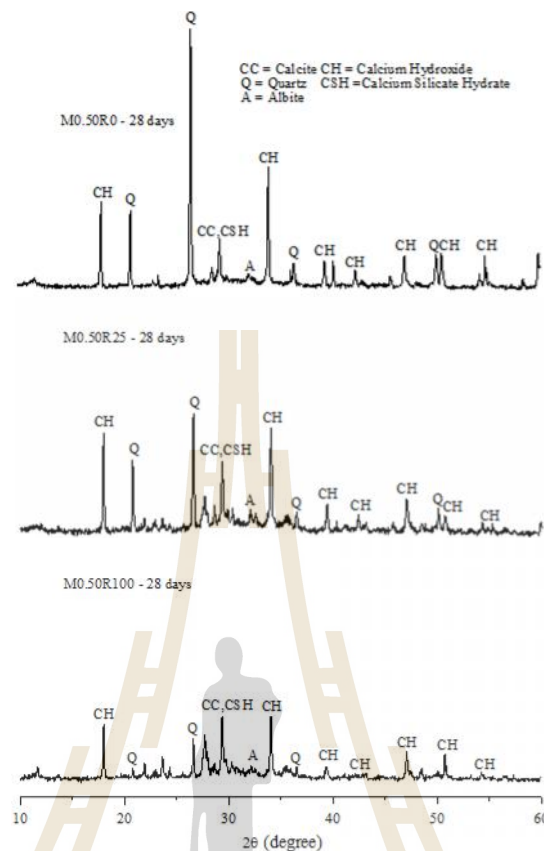
(a)

(b)



(c)

รูปที่ 3.8 ผลการทดสอบ XRD ของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน
 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ



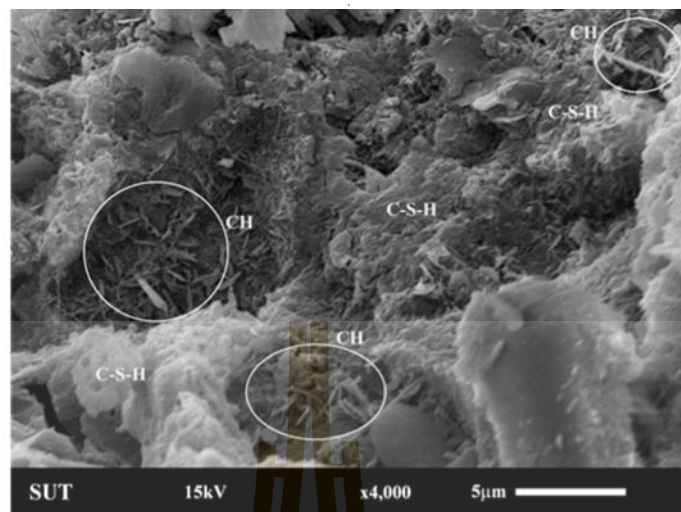
รูปที่ 3.9 ผลการทดสอบ XRD ของ ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุป้อม 28 วัน อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 ที่ปริมาณ RAP ต่าง ๆ

ผลการทดสอบ XRD ของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้ RAP แทนที่มวลรวมละเอียดธรรมชาติที่ร้อยละ 25 และ 100 ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.50 แสดงดังรูปที่ 3.9 เมื่อแทนที่ทรายด้วย RAP ปริมาณความเข้ม (Intensity) ของควอตซ์ (Q) ที่มุม 2θ เท่ากับ 21° และ 26.6° ค่าลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ RAP ในส่วนผสมเนื่องจากวัสดุมวลรวมตั้งต้นถูกแทนที่ด้วย RAP ที่มีปริมาณของควอตซ์ (Q) ที่ต่ำกว่า และสามารถสังเกตได้ว่าการใช้มวลรวม RAP แทนที่มวลรวมธรรมชาติในปริมาณที่เพิ่มขึ้นผลิตภัณฑ์สารเชื่อมประสาน (CH และ CSH) มีการลดลงเนื่องจากแอสฟัลต์ที่เคลือบที่ผิวของ RAP โดยที่ CH ที่มุม 2θ เท่ากับ 18° และ 34° มีปริมาณค่า Intensity ลดลงตามปริมาณการแทนที่ของมวลรวม RAP ในส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น CSH หรือแคลไซต์ (CC) ที่มุม 2θ เท่ากับ 29.5° ซึ่งเป็นมุมที่อยู่ในช่วงที่มีนัยสำคัญที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของซีเมนต์เพสต์นั้น มีปริมาณค่า Intensity ลดลงเช่นเดียวกับ CH

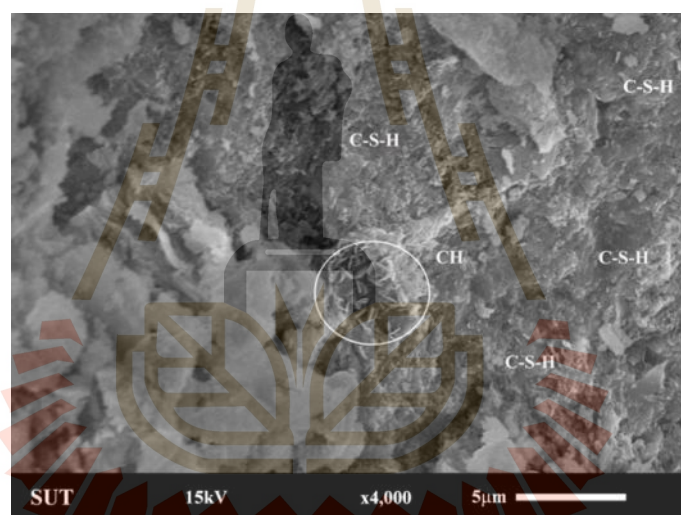
รูปที่ 3.10 แสดงภาพตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ก้อนตัวอย่างมีอายุบ่ม 28 วัน อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำเท่ากับ 0.50 ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แทนที่ Fine RAP ในมวลรวมธรรมชาติร้อยละ 100 มีความพรุนมากกว่า และมีความเป็นเนื้อเดียวกันน้อย Calcium Silicate Hydrates (CSH) มีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมยาง แอสฟัลต์เคลือบที่ผิว RAP ทำให้แรงยึดเหนี่ยวที่ผิวสัมผัสระหว่าง Fine RAP กับเนื้อซีเมนต์เพสต์ ค่อนข้างมวลรวมธรรมชาติซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการลดลงของกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

รูปที่ 3.11 แสดงภาพของตัวอย่างมอร์ตาร์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่อายุบ่ม 28 วัน อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงเท่ากับ 0.70 จากภาพพบว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ ควบคุมและซีเมนต์มอร์ตาร์แทนที่ Fine RAP ในมวลรวมธรรมชาติ พบปริมาณช่องว่างที่เกิดจาก ปริมาณน้ำที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์มากกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้ค่าอัตราส่วน น้ำต่อซีเมนต์ต่ำกว่า (w/c เท่ากับ 0.50) โพรงขนาดเล็กถูกพบมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และปริมาณ RAP ที่เพิ่มขึ้น

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์แสดงให้เห็นว่าแอสฟัลต์ใน RAP ทำให้ซีเมนต์ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง การดูดซึมน้ำที่สูงกว่าแต่ใช้ระยะเวลาการดูดซึมช้ากว่าของ RAP ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แทนที่ RAP มีค่าลดลง สำหรับ ก้อนตัวอย่างควบคุมปริมาณน้ำเพียงพอส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์สมบูรณ์ แต่ใน ตัวอย่างที่มี RAP น้ำที่ไม่มีการดูดซึมหลังจากการแข็งตัวของก้อนตัวอย่างมีปริมาณน้ำมากเกินไป ส่งผลให้มีความพรุนและกำลังอัดต่ำลงซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยในอดีต โดย Qiang et al. (2011) ที่ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ ปริมาณน้ำที่เกินจากการดูดซึมของ RAP ที่ดูดซึมช้ากว่ามวลรวม ธรรมชาติ ช่วยทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์สมบูรณ์มากขึ้น จากกำลังอัดที่อัตราการแทนที่ RAP ในมวลรวมธรรมชาติร้อยละ 25 จึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยสำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40 และ 0.45 แต่เมื่อมีน้ำส่วนเกินในระบบมากเกินไปสำหรับตัวอย่างที่แทนที่ RAP มากกว่าร้อยละ 25 ซีเมนต์มอร์ตาร์มีกำลังลดลงเนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในระบบจริงมีค่าเพิ่มขึ้น เกิดจุดเหมาะสม

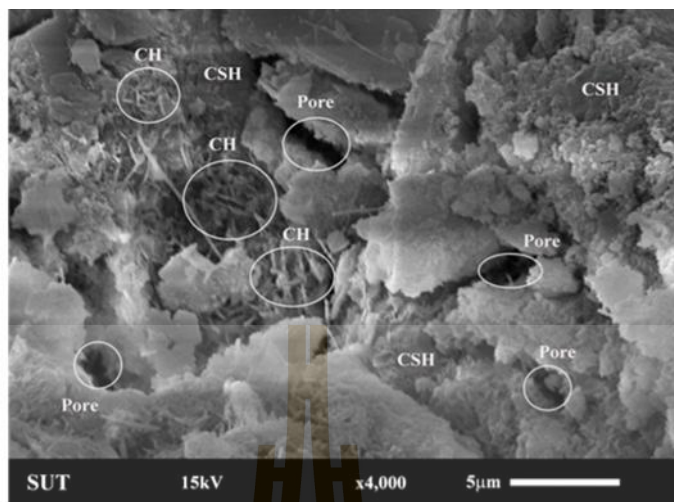


(a)

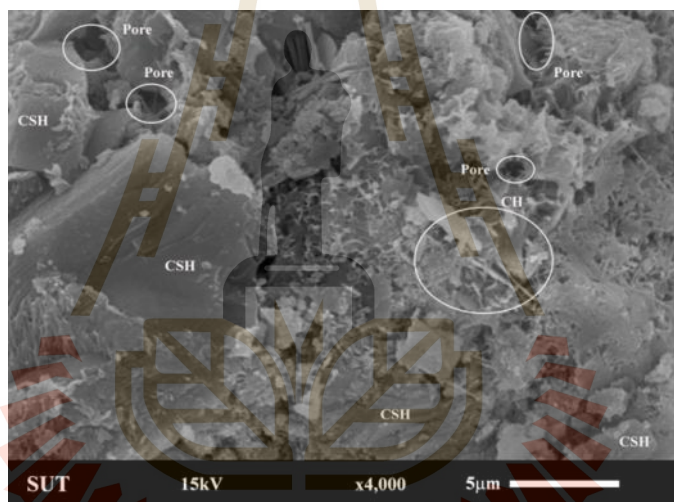


(b)

รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของซีเมนต์มอร์ตาร์
ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 (a) RAP ร้อยละ 0 (b) RAP ร้อยละ 100



(a)



(b)

รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของซีเมนต์มอร์ตาร์
ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.70 (a) RAP ร้อยละ 0 (b) RAP ร้อยละ 100

3.4 น้ำอิสระในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

ปริมาณน้ำอิสระที่เหลือจากการดูดซึม (Free water, w_u) ตามที่กล่าวแล้วในหัวข้อที่แล้ว เป็นปัจจัยสำคัญของการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ โดย w_u ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการแทนที่ Fine RAP ในมวลรวมธรรมชาติ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และระยะเวลาการบ่ม การพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์อธิบายโดยกฎของ Abrams ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Abrams, 1918; Rao, 2001) ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดมากขึ้น สำหรับซีเมนต์

มอร์ตาร์ w หมายถึงน้ำที่ผสมซีเมนต์ซึ่งถูกแยกออกจากน้ำที่ซดเซชสำหรับสถานะอิมตัวผิวแห้งของ RAP มีการดูดซึมน้ำมากกว่า แต่มีอัตราการดูดซึมน้ำต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติ w^* คือปริมาณน้ำรวมที่นี้เป็นผลรวมของ w ตาม ASTM C109 และ w_u

Suebsuk et al. (2017) และ Huang et al. (2005 ; 2006) พบว่าแอสฟัลต์ใน RAP จะลดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ การแทนที่ RAP ในมวลรวมธรรมชาติสามารถคำนวณปริมาณแอสฟัลต์ (AS) โดยน้ำหนักของแอสฟัลต์ตามวิธีการทดสอบ (McDaniel and Anderson, 2001) และน้ำหนักมวลรวมของทราย และ RAP (w_s) ตามสมการดังนี้

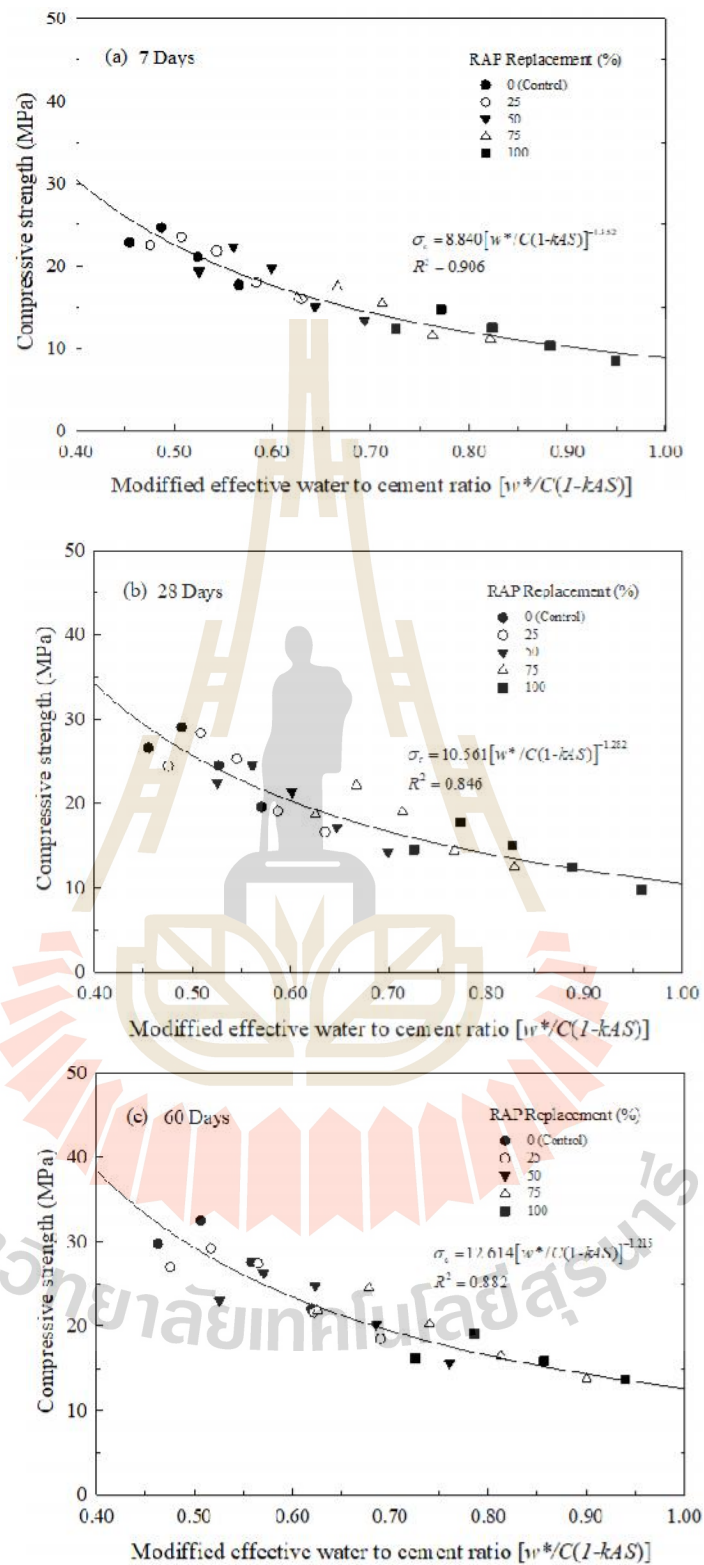
$$AS = \frac{W_{AS}}{W_s} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อพิจารณาปริมาณของแอสฟัลต์ที่เพิ่มขึ้นในระบบเท่ากับปริมาณซีเมนต์ที่ลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ สำหรับซีเมนต์มอร์ตาร์การพัฒนากำลังอัดขึ้นอยู่กับค่า w^*/C^* โดยที่ C^* คือปริมาณซีเมนต์ที่ลดลงจากแอสฟัลต์คำนวณได้จากปริมาณซีเมนต์เดิมคูณด้วยค่าคงที่และปริมาณแอสฟัลต์ $C[1-kAS]$ ดังนั้น กฎของ Abrams สามารถปรับปรุงเพื่อพิจารณาผลของแอสฟัลต์ในระบบได้ตามสมการที่ 3.2

$$f_c = \frac{A}{(w^*/C[1-kAS])^B} \quad (3.2)$$

โดยที่ A B และ k เป็นค่าคงที่ของวัสดุซึ่งสามารถคำนวณได้จากวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสม และกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ แสดงด้วยหน่วยเมกะปาสคาล การเพิ่มประสิทธิภาพนี้เป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อลดค่าความแตกต่างระหว่างค่าผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ และค่าการทำนายกำลังอัดเป็นตัวเลข เห็นได้ชัดว่าผลกระทบของการการแทนที่ RAP, ปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์ในเวลาบ่ม โดยเฉพาะสามารถอธิบายด้วยสมการ (3.2)

ค่าคงที่ของวัสดุสามารถหาได้จากผลทดสอบในห้องปฏิบัติการตามรูปที่ 3.12 ที่อายุบ่ม 7 วัน พบว่าค่า A เท่ากับ 8.840 B เท่ากับ 1.352 และ k เท่ากับ 0.027 และ R^2 เท่ากับ 0.906 ที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่าค่า A เท่ากับ 10.561 B เท่ากับ 1.282 และ k เท่ากับ 0.027 และ R^2 เท่ากับ 0.846 และที่อายุบ่ม 60 วัน พบว่าค่า A เท่ากับ 12.614 B เท่ากับ 1.215 และ k เท่ากับ 0.027 R^2 และ 0.952 สังเกตได้ว่าค่า A ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการบ่ม โดยที่ k มีค่าคงที่เท่ากับ 0.027 สำหรับระยะเวลาการบ่ม 7 วัน ถ้าสมมติค่า B เป็นค่าคงที่ทุกระยะเวลาในการบ่มเท่ากับ 1.28 กำลังอัดเริ่มต้นสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์
ปรับปรุงใหม่ตามกฎ Abrams

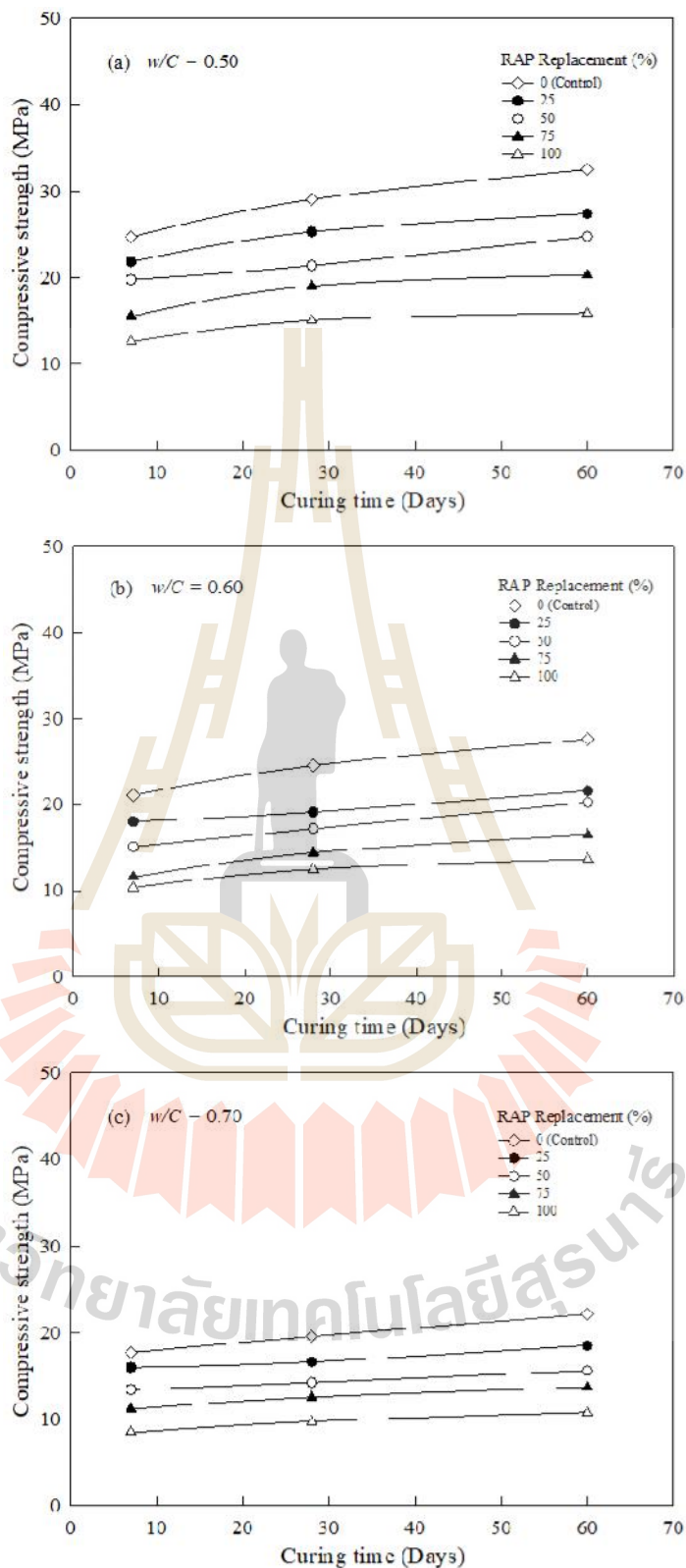
$$t_{c,7} = \frac{8.840}{(w^*/C*[1-0.027AS])^{1.352}} \quad (3.3)$$

สมการ (3.3) สามารถใช้ทำนายค่ากำลังอัดที่ 7 วันได้ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และปริมาณแอสฟัลต์ต่าง ๆ

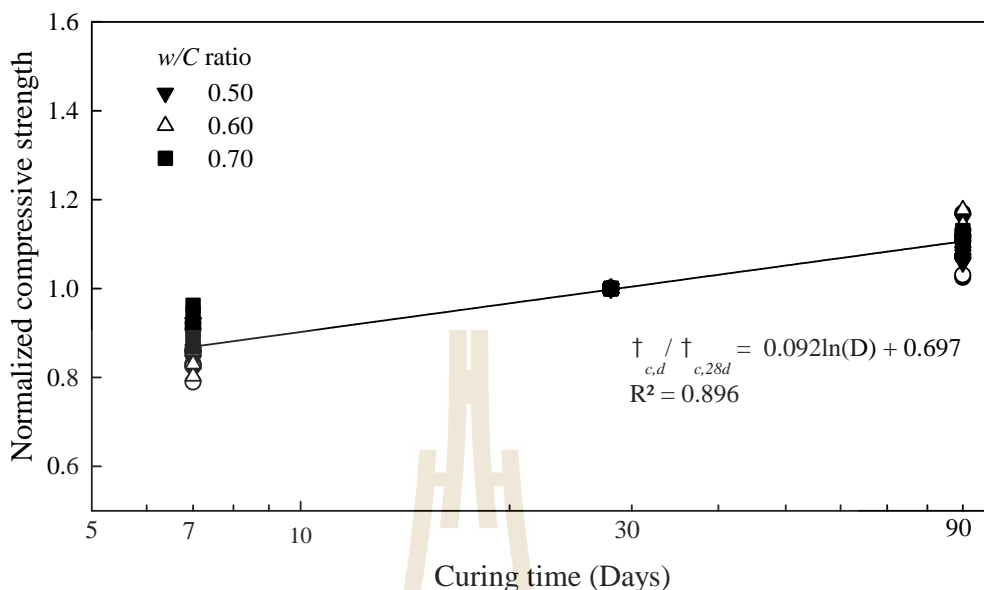
ผลกระทบของเวลาบ่มต่อความสามารถรับกำลังอัดจากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.13 การพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วช่วงต้นระหว่าง 7 ถึง 28 วันแล้วจึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงปลายระหว่าง 28 ถึง 60 วัน ความสัมพันธ์นี้สามารถแสดงด้วยฟังก์ชันลอการิทึม ตามรูปที่ 3.14 การพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วย RAP สามารถนำเสนอการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตอ้างอิงโดยใช้กำลังอัดที่ 28 วันของคอนกรีตอ้างอิงในการทำ Normalization ตามสมการดังนี้

$$\frac{t_{c,d}}{t_{c,28d}} = 0.092 \ln(D) + 0.697 \quad (3.4)$$

โดยที่ $t_{c,d}$ คือ กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุบ่มต่าง ๆ และ $t_{c,28d}$ คือ กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วย RAP ที่อายุบ่ม 28 วัน ค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 0.092 จากสมการที่ (3.4) ค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ภายใต้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/C) อัตราส่วนการแทนที่ RAP ในทรายธรรมชาติ และอายุการบ่ม จะสามารถทำนายกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 7 วัน ได้โดยตรงจากผลการทดสอบกำลังอัดหรือประมาณได้จากสมการที่ (3.3) จากสมการทำนายค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ สามารถสร้างได้จากผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แทนที่ RAP ในทรายธรรมชาติ ซึ่งสมการดังกล่าวจะตั้งอยู่บนพื้นฐานตามกฎของ Abrams ซึ่งเป็นกฎที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานของคอนกรีตเทคโนโลยี ผลกระทบของปัจจัยที่มีอิทธิพล เช่น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ การดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวม ปริมาณยางแอสฟัลต์ และอายุบ่มได้ถูกนำมาพิจารณาในสมการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ สมการดังกล่าวนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับทุกอัตราส่วนผสมที่ใช้ RAP แทนที่ทรายธรรมชาติโดยที่ยางแอสฟัลต์ และทรายธรรมชาติต่างชนิดกัน ค่าพารามิเตอร์คงที่ทั่วไปในสมการที่ (3.3) และ (3.4) สามารถพัฒนาให้ครอบคลุม มากยิ่งขึ้นถ้าจำนวนผลทดสอบมีมากขึ้น จากข้อมูลการทดสอบตามมาตรฐานผลการวิจัยนี้มีประโยชน์สำหรับงานด้านวิศวกรรม เช่น งานคอนกรีต และเสาเข็มดินซีเมนต์ (Modoni et al., 2016; Flora et al., 2013; Shen et al., 2013(a); 2013(b); 2017)



รูปที่ 3.13 การพัฒนากำลังของซีเมนต์มอร์ตาร์แทนที่ RAP ร้อยละต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ



รูปที่ 3.14 การพัฒนากำลังของมอร์ตาร์แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยมวลรวม RAP ร้อยละต่าง ๆ เทียบกับอายุบ่ม 28 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ

3.5 สรุปผลการทดสอบ

การศึกษานี้เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/C ratio) อัตราส่วนการแทนที่ RAP ในมวลรวมธรรมชาติ และอายุบ่ม การออกแบบส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ทำตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยใช้ส่วนผสมของ RAP และทรายธรรมชาติ การศึกษานี้ยังได้นำเสนอสมการสำหรับทำนายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่าง ๆ ต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ ผลการวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

(1) RAP มีค่าการดูดซึมน้ำที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) มากกว่าทรายธรรมชาติ แต่อัตรา การดูดซึมน้ำจะช้ากว่าทรายธรรมชาติ การเติมน้ำเพื่อชดเชยการดูดซึมน้ำที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ภายหลังจากซีเมนต์มอร์ตาร์แข็งตัว สำหรับที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ ($w/C < 0.5$) จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่สมบูรณ์ การแทนที่ RAP ในทรายธรรมชาติ จะเพิ่มกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์รวมทั้งเพิ่มผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เนื่องจากการเพิ่มของน้ำที่ทำให้ปฏิกิริยา ดังนั้นอัตราส่วนการแทนที่ RAP ในทรายธรรมชาติที่เหมาะสมคือร้อยละ 25 จะช่วยเพิ่มกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์เพิ่มสูงขึ้นสำหรับตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ ๆ

(2) สำหรับตัวอย่างของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง จะเพียงพอที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันสมบูรณ์ ปริมาณน้ำส่วนเกินภายหลังจากการแข็งตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์จะทำ

ปฏิกิริยากับซีเมนต์โดยส่งผลให้ซีเมนต์มอร์ตาร์มีความพรุนมากขึ้นในขณะที่ผลิตภัณฑ์ซีเมนต์และกำลังอัดจะมีค่าลดลง

(3) ผลของการแทนที่ RAP ในทรายธรรมชาติจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง และเป็นการเพิ่มน้ำหนักหลังจากที่ซีเมนต์มอร์ตาร์เกิดการแข็งตัว ซึ่งหลักการดังกล่าว จะนำมาใช้ในการพัฒนาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ส่วนขยายสำหรับซีเมนต์มอร์ตาร์ การพัฒนากำลังอัดเทียบกับเวลาจะนำเสนอโดยใช้ฟังก์ชันลอการิทึม และการเทียบ กำลังอัดที่อายุบ่มใด ๆ กับอายุบ่มที่ 28 วันจะถูกนำมาใช้ในทางปฏิบัติ จากกฎอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ส่วนขยาย และการเทียบกำลังอัดที่อายุบ่มใด ๆ กับอายุบ่ม 28 วัน สมการสำหรับการทำนายค่ากำลังอัดภายใต้การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ อัตราส่วนการแทนที่ RAP และอายุบ่ม ได้ถูกนำเสนอในบทนี้

(4) สมการทำนายกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ทำตามมาตรฐานที่มีอยู่ในปัจจุบัน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีปริมาณ RAP ต่างกันตามประเภทของแอสฟัลต์และมวลรวม ผลทดสอบจำนวนมากของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มี RAP จากแหล่งต่าง ๆ นั้น จำเป็นต่อการปรับเปลี่ยนค่าคงที่ของสมการที่เสนอสำหรับงานวิจัยในลำดับต่อไป

3.6 รายการอ้างอิง

- Abrams, D.A. (1918). **Design of concrete mixtures**. Bulletin 1. Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago. Revised Edition.
- Al-Oraimi, S., Hossam, F., and Hago, H. A. (2009). **Recycling of reclaimed asphalt pavement in Portland cement concrete**. Journal of Engineering Research, 6(1), 37-45.
- ASTM (2014). **Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates**. ASTM C136/C136M-14, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2015). **Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate**. ASTM C127-15, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2015). **Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate**. ASTM C128-15, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.

- ASTM (2016). **Standard test method for bulk density (unit weight) and voids in aggregate.** ASTM C29-16, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2016). **Standard specification for concrete aggregates.** american society for testing and materials. ASTM C33/C33M-16e1, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2016). **Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens).** ASTM C109/C109M-16a, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2016a). **Standard specification for Portland cement.** ASTM C150/C150M, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- Bakash, S. A., and Sowmith, C. (2012). **A review of the use of recycled materials in rigid pavements.** International Journal of Engineering Research and Technology, ESRSA Publications, 24, 213-220.
- Brand, S., Roesler, R., Al-Qadi, L., and Shangguan, P. (2012). **Fractionated reclaimed asphalt pavement (FRAP) as a coarse aggregate replacement in a ternary blended concrete pavement.** Illinois Center for Transportation.
- Copeland, A. (2011). **Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: state of the practice.** Office of Infrastructure Research and Development Federal Highway Administration.
- Delwar, M., Fahmy, M., and Taha, R. (1997). **Use of reclaimed asphalt pavement as an aggregate in Portland cement concrete.** ACI Materials Journal, 94(3), 251-256.
- Flora, A., Modoni, G., Lirer, S., and Croce, P. (2013). **The diameter of single, double and triple fluid jet grouting columns: Prediction method and field trial results.** Géotechnique, 63(11), 934-945.
- Haach, V. G., Vasconcelos, G., and Lourenço, P. B. (2011). **Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars.** Construction and Building Materials, 25, 2980-2987.
- Hassan, K.E., Brooks, J.J, and Erdman, M. (2000). **The use of reclaimed asphalt pavement (RAP) aggregates in concrete.** Waste Materials in Construction Wascon 2000 Proceedings of the International Conference on the Science and Engineering of

- Recycling for Environmental Protection, Harrogate, England 31 May, 1–2 June 2000, 1: 121-128.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., and Nagaraj, T. S. (2003). **Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis.** *Geotechnique*, 53(4), 439-444.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., Nagaraj, T.S. (2005). **Clay-water/cement ratio identity of cement admixed soft clay.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 131(2), 187-192.
- Hossiney, N., Tia, M., and Bergin, M. J. (2010). **Concrete containing RAP for use in concrete pavement.** *International Journal of Pavement Research and Technology*, 3(5), 251-258.
- Hoy, M., Horpibulsuk, S., and Arulrajah, A. (2016a). **Strength development of recycled asphalt pavement-fly ash geopolymer as a road pavement material.** *Construction and Building Materials*, 117, 209-219.
- Hoy, M., Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A., and Arulrajah, A. (2016b). **Recycled asphalt pavement-fly ash geopolymers as a sustainable pavement base material: Strength and toxic investigations.** *Science of the Total Environment*, 573, 19-26.
- Hoy, M., Rachan, R., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A. and Mirzababaei, M. (2017). **Effect of wetting-drying cycles on compressive strength and microstructure of recycled asphalt pavement-fly ash geopolymer.** *Construction and Building Materials*, 144, 624-634.
- Hoy, M., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A. and Mohajerani, A. (2018). **Strength and microstructural study of recycled asphalt pavement-slag geopolymer as a pavement base material.** *Journal of Materials in Civil Engineering*, 04018177-1-11.
- Huang, B., Shu, X., and Burdette, E. G. (2006). **Mechanical properties of concrete containing recycled asphalt pavements.** *Magazine of Concrete Research*, 58(5), 313-320.
- Huang, B., Shu, X., and Li, G. (2005). **Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavements.** *Cement and Concrete Research*, 35(10), 2008-2013.
- Katsakou, M., and Koliass, S. (2007). **Mechanical properties of cement-bound recycled pavements.** *ACI Materials Journal*, 160(4), 171-179.

- Kontoleontos, F., Tsakiridis, P., Marinos, A., Katsiotis, N., Kaloidas, V., and Katsioti, M. (2013). **Dry-grinded ultrafine cements hydration. physicochemical and microstructural characterization.** *Materials Research*, 16(2), 404-416.
- Li, G., Zhao, Y., Pang, S. S., and Huang, W. (1998). **Experimental study of cement-asphalt emulsion composite.** *Cement and Concrete Research*, 28 (5), 635-641.
- Liu, Y. L., Kong, X. M., Zou, Y., and Yan, P. Y. (2009). **Static and dynamic mechanical behavior of cement asphalt mortars.** *China Railway Science and Engineering*, 6(3), 1-7.
- Ma, T., Wang, H., Zhao, Y., Huang, X., and Pi, Y. (2015). **Strength mechanism and influence factors for cold recycled asphalt mixture.** *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 1-10.
- Mangiafico, S., Benedetto, H. D., Sauzéat, C., Olard, F., Pouget, S., Dupriet, S., Planque, L., and Van Rooijen, R. (2015). **Statistical analysis of the influence of RAP and mix composition on viscoelastic and fatigue properties of asphalt mixes.** *Materials and Structures*, 48, 1187-1205.
- Mathias, V., Sedran, T., and Larrard, F. (2004) **Recycling reclaimed asphalt pavement in concrete roads.** Proc., International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, 66-75.
- McDaniel, R. S., and Anderson, R. M. (2001). **Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method: technician's manual.** West Lafayette, IN: North Central Superpave Center, Report Number NCHRP 452.
- Miura, N., Horpibulsuk, S., and Nagaraj, T.S. (2001). **Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content,** *Soils and Foundations*, 41(5), 33-45.
- Modoni, G., Flora, A., Lirer, S., Ochman, M., ski., P. Croce. (2016) **Design of jet grouted excavation bottom plugs.** *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 142 (7) 04016018.
- Okafor, F. O. (2010). **Performance of recycled asphalt pavement as coarse aggregate in concrete.** *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 17, 47-58.
- Qiang, W., Peiyu, Y., Ruhan, A., Jinbo., Y., and Xiangming, K. (2011). **Strength mechanism of cement-asphalt mortar.** *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(9), 1353-1359.

- Rao, G. A. (2001). **Generalization of Abrams' law for cement mortars**. *Cement and Concrete Research*, 31(3), 495-502.
- Shen, S., Wang, Z., Yang, J., and Ho, C. (2013). **Generalized approach for prediction of jet grout column diameter**. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 139(12), 2060–2069.
- Shen, S.L., Wang, Z.F., Horpibulsuk, S., Kim, Y.H. (2013). **Jet-grouting with a newly developed technology: the Twin-Jet method**, *Eng. Geol.* 152 (1) 87–95
- Shen, S.L., Wang, Z.F., W.C. Cheng, W.C. (2017). **Estimation of lateral displacement induced by jet grouting in clayey soils**, *Geotechnique*, ICE 67 (7) 621–630
- Sommer, H. (1994). **Recycling of concrete for the reconstruction of the concrete pavement of the motorway Vienna-Salzburg**. *Proc., 7th International Concrete Roads Symposium*.
- Suebsuk, J., Horpibulsuk, S., Suksan, A., Suksiripattanapong, C., Phoo-ngernkham, T., and Arulrajah, A. (2017). **Strength prediction of cement-stabilised reclaimed asphalt pavement and lateritic soil blends**. *International Journal of Pavement Engineering* 332-338.
- Suebsuk, J., Suksan, A., and Horpibulsuk, S. (2014). **Strength assessment of cement treated soil/reclaimed asphalt pavement (RAP) mixture**. *International Journal of GEOMATE*, 6(2), 878-884.
- Tia, M., Hossiney, N., Su, Y.-M., Chen, Y., and Do, T. A. (2012). **Use of reclaimed asphalt pavement in concrete pavement slabs**. Department of civil and Coastal Engineering, Engineering School of Sustainable Infrastructure and Environment, College of Engineering, University of Florida, Gainesville, Florida.
- Topcu, I., and Isikdag, B. (2009). **Effects of crushed RAP on free and restrained shrinkage of mortars**. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 3 (2), 91-95.
- Visintine, B., Khosla, N. P., and Tayebali, A. (2013). **Effects of higher percentage of recycled asphalt pavement on pavement performance**. *Road Materials and Pavement Design*, 14, 432-437.
- Wang, F. Z., Wang, T., and Hu, S. G. (2008). **Rheological behavior of cement asphalt mortar**. *Engineering Journal of Wuhan University*, 41(4), 69-72.

- Wang, P., Xu, H., and Chen, R. (2014). **Effect of cement asphalt mortar debonding on dynamic properties of CRTS II slab ballastless track.** *Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2014, 1-8.
- Watson, M., McGraw, J., Johnson, E., Linell, D., and Dai, S. (2010). **The effect of recycled asphalt materials on hot mixed asphalt pavement performance.** *Green Streets and Highways*, Denver, CO, United States, 323-336.
- Yu, B. G., X, Wu, M and Ni, F., (2017). **Application of a high percentage of reclaimed asphalt pavement in an asphalt mixture: blending process and performance investigation.** *Road Materials and Pavement Design*, 18(3), 753-765.
- Zaumanis, M., and Mallick, R. B. (2015). **Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art.** *International Journal of Pavement Engineering*, 16(1), 39–55.



บทที่ 4

การพัฒนากำลังและแนวทางออกแบบคอนกรีตที่ใช้ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล เป็นมวลรวม

4.1 บทนำ

ผิวทางแอสฟัลต์เป็นวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุผสมระหว่างยางแอสฟัลต์และมวลรวม เมื่อถูกรื้อออกจากสนามคุณสมบัติของผิวทางแอสฟัลต์จะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเสื่อมสภาพตามสภาพตามอายุของวัสดุประสาน ตลอดจนลักษณะการรื้อถอน การเสื่อมสภาพส่วนใหญ่เกิดอยู่ในรูปถาวรของการเสียรูปของแอสฟัลต์ แต่มวลรวมรีไซเคิลยังคงมีสภาพคือผิวทางเดิมที่ถูกรื้อนำกลับมาใช้ใหม่เรียกว่า “ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล (Recycled asphalt pavement, RAP)” วัสดุนี้สามารถใช้แทนบางส่วนของวัสดุคัดเลือกลงงานชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทาง Suebsuk et al. (2014; 2016) ได้เสนอปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน RAP ในงานชั้นทางไม่ควรใช้เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลทั้งหมด อย่างไรก็ตามยังมีวัสดุที่เหลือทิ้งไม่ได้ถูกนำกลับมาใช้งานหรือไปใช้เป็นวัสดุถมที่ใช้ประโยชน์ไม่เหมาะสมกับคุณค่าของวัสดุจำนวนมาก วัสดุรีไซเคิลนี้สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ คอนกรีตเป็นหนึ่งในวัสดุก่อสร้างที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คอนกรีตประกอบไปด้วยวัสดุมวลรวมธรรมชาติอย่างน้อยร้อยละ 75 มวลรวมธรรมชาติที่นำมาใช้ในงานคอนกรีตแบ่งออกเป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบส่วนใหญ่เป็นหินย่อยจากการระเบิดภูเขาหินปูนหรือหินบะซอลต์แล้วนำไปย่อยให้ได้ขนาดตามต้องการ ส่วนมวลรวมละเอียดสามารถแบ่งได้ตามแหล่งที่มาได้ 2 ประเภท คือ ทรายแม่น้ำและทรายบก การใช้วัสดุทดแทนวัสดุมวลรวมธรรมชาติเป็นที่นิยมในงานคอนกรีตโดยส่วนใหญ่นั้นถูกนำไปใช้แทนมวลรวมหยาบในคอนกรีต (Huang et al., 2005, Al-Oraimi et al., 2009, Mahmoud et al., 2013)

ผลการวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลสามารถนำมาใช้แทนที่มวลรวมธรรมชาติในส่วนผสมคอนกรีตได้ โดยแทนที่บางส่วนหรือการแทนที่ทั้งหมดคอนกรีตที่ใช้ RAP หยาบเป็นมวลรวมเพียงอย่างเดียวนั้นมีประสิทธิภาพดีในด้านความเหนียว กำลังของคอนกรีตน้อยกว่าการใช้ RAP เป็นมวลรวมละเอียด สำหรับคอนกรีตที่มี RAP แทนที่มวลรวมธรรมชาติในปริมาณที่สูงมีการลดลงของการรับกำลังอัดอย่างเป็นระบบตามปริมาณ เมื่อแทนที่ RAP เพิ่มขึ้น

ในเนื้อของคอนกรีตความแข็งแรงของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ RAP ขึ้นอยู่กับการยึดเกาะระหว่างผิวแอสฟัลต์และซีเมนต์เพสต์

Chaidachatorn et al. (2019) ได้เสนอผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ RAP เป็นส่วนผสมแทนทรายโดยสรุปสาเหตุการลดลงของกำลังอัดของมอร์ตาร์ไว้ ดังนี้ (1) กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงเนื่องจาก RAP มีความสามารถดูดซึมน้ำสูงกว่าทรายแต่มีอัตราดูดซึมน้ำต่ำกว่าทรายมากเมื่อใช้วิธีการชดเชยน้ำสำหรับมวลรวมแห้งจะทำให้มอร์ตาร์ที่มี RAP ผสมอยู่มีปริมาณน้ำส่วนเกินที่ RAP ดูดซึมน้ำได้เข้าไปแทนกระบวนการเกิดปฏิกิริยา (2) ผลการทดสอบ SEM และ XRD แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (CSH และ CH) ลดลงเมื่อปริมาณ RAP ในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Qiang et al. (2011) ซึ่งพบว่าความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของมอร์ตาร์จะลดลงเมื่อมีแอสฟัลต์เพิ่มขึ้นในส่วนผสม

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นสรุปได้ว่า RAP สามารถนำมาใช้แทนมวลรวมธรรมชาติในคอนกรีตได้ แต่การนำ RAP ไปใช้เป็นมวลรวมในงานคอนกรีตในทางปฏิบัติได้จริงนั้น จำเป็นจะต้องมีทฤษฎีการออกแบบส่วนผสมรองรับเพื่อให้ได้กำลังอัดตามที่กำหนด ดังนั้นงานวิจัยส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการแทนที่ RAP เป็นมวลรวมในคอนกรีตและนำเสนอแนวทางการทำนายการพัฒนา กำลังอัดและวิธีออกแบบกำลังอัดสำหรับคอนกรีตที่ใช้ RAP เป็นส่วนผสมมวลรวมโดยปรับปรุงจากวิธีของ ACI 211.1 (2009) สำหรับการนำไปใช้ในงานผิวทางและอุปกรณ์งานถนน ซึ่งจะเน้นประโยชน์ในการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือใช้และผลิตผิวทางคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในมิติของการลดปริมาณวัสดุก่อสร้างจากธรรมชาติได้ต่อไป

4.2 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

4.2.1 ปูนซีเมนต์

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สมบัติพื้นฐานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1-2547

4.2.2 วัสดุผสม (Aggregate)

1) มวลรวมละเอียดธรรมชาติ (Fine aggregate) เป็นทรายแม่น้ำตามมาตรฐาน ASTM C33/C33M-16 (2016) แสดงดังรูปที่ 4.1(a)

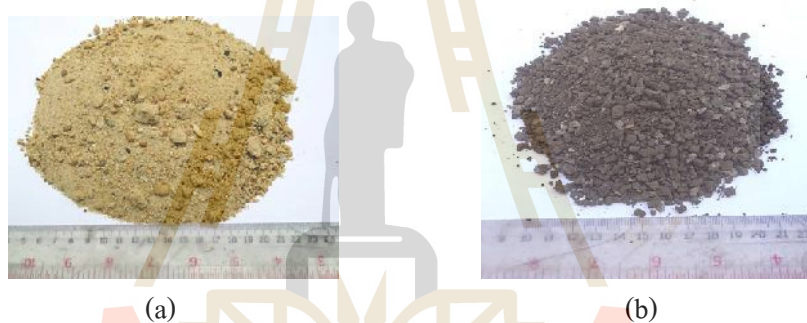
2) มวลรวมหยาบธรรมชาติ (Coarse aggregate) เช่น หินปูน ขนาดโตสุด 10 มิลลิเมตรมีลักษณะ แสดงดังรูปที่ 4.2(a)

3) มวลรวมละเอียดรีไซเคิล (Recycled fine aggregate) ได้จากการรื้อผิวทางแอสฟัลต์เดิมของกรมทางหลวงในเขตจังหวัดบุรีรัมย์ มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือสามารถลอดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ลักษณะแสดงดังรูปที่ 4.1(b)

4) มวลรวมหยาบรีไซเคิล (Recycled coarse aggregate) ได้จากการรื้อผิวทางแอสฟัลต์เดิมของกรมทางหลวงในเขตจังหวัดบุรีรัมย์ มีขนาดคล้อยข้างบนตะแกรงเบอร์ 4 และขนาดโตสุด 10 มิลลิเมตรลักษณะแสดงดังรูปที่ 4.2(b)

4.2.3 สารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่มที่ใช้ได้แก่สารลดน้ำคุณภาพสูง (High performance superplasticiser) มาตรฐาน ASTM C494/C494M-16 (2016) Type A&F ยี่ห้อ SIKA ผลิตภัณฑ์ Sika ViscoCrete-10 สำหรับใช้ปรับปรุงความสามารถในการเทระดับปานกลาง ที่อัตราร้อยละ 0.10 ถึง 0.30 ลูกบาศก์เซนติเมตร ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ สำหรับคอนกรีตที่ต้องการควบคุมความสามารถในการเทสูง จนถึงอัตราน้ำต่อซีเมนต์ต่ำมาก ๆ (Self compacting concrete) การศึกษานี้ใช้สารผสมเพิ่มร้อยละ 0.20 ถึง 0.30 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.1 มวลรวมละเอียด (a) มวลรวมละเอียดธรรมชาติ (b) มวลรวมละเอียดจาก RAP



รูปที่ 4.2 มวลรวมหยาบ (a) มวลรวมหยาบธรรมชาติ (b) มวลรวมหยาบจาก RAP

4.2.4 สมบัติพื้นฐานของวัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาได้ถูกศึกษาสมบัติพื้นฐาน ได้แก่ การทดสอบวิเคราะห์ขนาดมวลรวมละเอียดทำตามมาตรฐาน ASTM C136/C136M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (2014) สัดส่วนขนาดละเอียดและค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายที่ใช้ตามมาตรฐาน ASTM C33/C33M-16, Standard Specification for Concrete Aggregates (2016) การทดสอบวิเคราะห์ขนาดมวลรวมหยาบทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM C136/C136M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (2014) สัดส่วนขนาดละเอียดและค่าโมดูลัสความละเอียดของหินที่ใช้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33/C33M-16, Standard Specification for Concrete Aggregates (2016) การทดสอบวิเคราะห์ค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM C 128-15, Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Aggregates (2015) การทดสอบวิเคราะห์ค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM C 127-15, Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Aggregates (2015) การทดสอบค่าการสึกหรอของมวลรวมหยาบด้วยเครื่องลอสแอนเจลิสทำตามมาตรฐาน ASTM C131/C131M-14, Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine (2014) การทดสอบหน่วยน้ำหนักของมวลรวมและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM C29/C29M-16 สมบัติของมวลรวมที่ใช้ในการวิจัยแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติพื้นฐานของมวลรวม

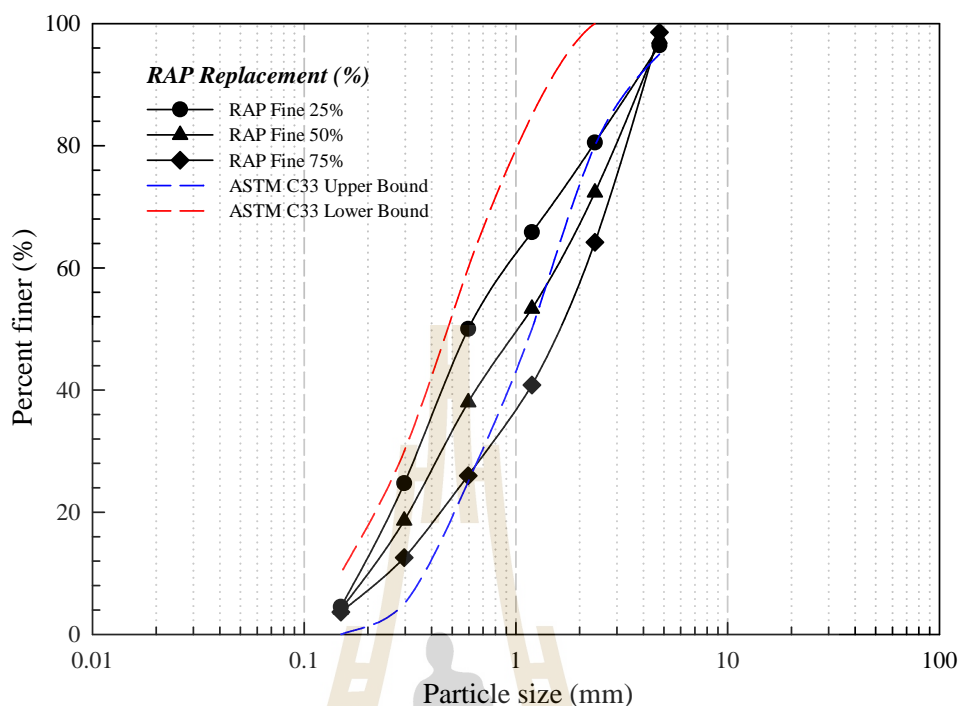
Properties	Sand	Rock	Fine RAP	Coarse RAP
Fineness modulus (FM)	2.38	5.71	3.91	6.00
Specific gravity (G_s)	2.62	2.71	2.54	2.59
Unit weight (kg/m^3)	1,669	1,490	1,442	1,372
Water absorption (WA , %)	1.15	0.55	2.56	1.43
Abrasion Test (%)	-	20.31	-	15.50
Asphalt content (AS, %)	-	-	8.10	4.64

หินธรรมชาติและ Coarse RAP มีค่าโมดูลัสความละเอียดใกล้เคียงกันตามตารางที่ 4.1 โดย Coarse RAP มีค่ามากกว่าเล็กน้อยเนื่องจากเป็นหินบะซอลต์ Coarse RAP เป็นวัสดุที่ได้จากการ

บรูณะผิวทางหลวงในเขต จ.บุรีรัมย์ เป็นวัสดุที่ผ่านการย่อยให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องจักรแล้ว ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 3/8 นิ้ว ค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ซึ่งมวลรวมทั้ง 2 ชนิด เป็นมวลรวมที่มีขนาดโตสุด 10 มิลลิเมตร และมีมวลรวมขนาดเบอร์ 3/8 นิ้ว มากเกินร้อยละ 50 จัดเป็นมวลรวมที่อยู่ในกลุ่มประเภทมวลรวมขนาดเดียว (Single-sized aggregate)

ทรายและ Fine RAP มีค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏต่างกัน 0.09 แต่มีค่าการดูดซึมน้ำต่างกันถึง 1.41 ส่วนมวลรวมหยาบธรรมชาติและ Coarse RAP มีค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏต่างกัน 0.12 แต่มีค่าการดูดซึมน้ำต่างกัน 0.88 ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม RAP มีค่าต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติ เนื่องจากมวลรวม RAP มีส่วนประกอบของยางแอสฟัลต์ Fine RAP และ Coarse RAP มีปริมาณยางแอสฟัลต์ร้อยละ 8.10 และ 4.64 ตามลำดับ ยางแอสฟัลต์โดยทั่วไปมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่ามวลรวมมาก (ถพ.ลดขนาด 1.0) เมื่อปริมาณยางแอสฟัลต์ในมวลรวม RAP มีปริมาณสูงทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะของ RAP ลดลงตามปริมาณยางแอสฟัลต์ที่เพิ่มขึ้น มวลรวมธรรมชาติมีหน่วยน้ำหนักสูงกว่า RAP นอกจากเป็นผลจากปริมาณยางแอสฟัลต์แล้วนั้น RAP ยังมีหินบะซอลต์เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งโดยทั่วไปหินบะซอลต์มีหน่วยน้ำหนักต่ำกว่าหินปูนซึ่งเป็นองค์ประกอบของมวลรวมธรรมชาติ

การทดสอบหาค่าการต้านทานการสึกกร่อน (Abrasion resistance) ของมวลรวมหยาบโดยวิธีการทดสอบลอสแอนเจลิส (Los Angeles test) พบว่ามีค่าการต้านทานการสึกกร่อนของหินและ Coarse RAP เท่ากับร้อยละ 20.31 และ 15.50 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Coarse RAP มีค่าการสึกกร่อนต่ำกว่าของมวลรวมหยาบธรรมชาติ เนื่องจาก RAP ประกอบไปด้วยยางแอสฟัลต์เคลือบที่ผิวของมวลรวมช่วยลดการสึกกร่อนจากกระบวนการทดสอบลอสแอนเจลิส ซึ่งสามารถอธิบายได้จากรายงานวิจัยในอดีต Neville (1995) ซึ่งพบว่าการต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวม หินปูนและหินบะซอลต์นั้น มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้น ความแตกต่างของค่าการต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบในตารางที่ 4.1 นั้น เป็นผลมาจากยางแอสฟัลต์เคลือบที่ผิวของ Coarse RAP การกระจายขนาดคละของมวลรวมทั้ง 4 ประเภทแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการกระจายของอนุภาคทรายและ RAP

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

Chemical formula (%)	Cement	Sand	Limestone	RAP
MgO	1.86	N.D.	1.32	4.89
Al ₂ O ₃	4.71	6.01	1.50	12.99
SiO ₂	24.14	92.06	3.25	53.20
SO ₃	5.54	0.15	-	3.89
K ₂ O	0.51	0.40	0.26	0.99
CaO	58.95	0.31	65.40	7.76
Fe ₂ O ₃	3.61	0.66	1.28	14.40

หมายเหตุ : N.D. หมายถึงไม่สามารถหาค่าได้

องค์ประกอบทางเคมีของมวลรวมและซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C188 (2015) จากผลการทดสอบ XRF (X-ray Fluorescence) แสดงดังตารางที่ 4.2 มวลรวมทรายธรรมชาติมีออกไซด์หลักประกอบไปด้วย ซิลิกา (SiO₂) และอลูมินา (Al₂O₃) เนื่องจากเป็นทรายแม่น้ำที่อยู่ตามธรรมชาติ และ RAP มีออกไซด์หลักคือ ซิลิกา (SiO₂) เฟอริก (Fe₂O₃) และ อลูมินา (Al₂O₃) เนื่องจาก RAP

ประกอบด้วยหินบะซอลต์และสารบิโทมินัส หินบะซอลต์มีซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) สูงเช่นเดียวกับทรายธรรมชาติซึ่งต่างจากหินปูน

4.2.5 สัญลักษณ์และปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต

ปฏิภาคส่วนผสมสำหรับคอนกรีตที่ศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.3 โดยที่ C หมายถึง คอนกรีตที่ออกแบบกำลังที่อายุ 28 วัน CR หมายถึง การแทนที่ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลในมวลรวม หยาบ FR หมายถึง การแทนที่ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลในมวลรวมละเอียด SP หมายถึง สารลดน้ำปริมาณสูง (High range water reducing agent) จำนวนร้อยละ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ กำลังอัดที่ศึกษาอยู่ในช่วงใช้งานปกติระหว่าง 18 ถึง 44 เมกะปาสกาล อย่างไรก็ตามการออกแบบทำตามมาตรฐาน ACI 211.1 (2009) ควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดเท่ากับ 10 ± 2.5 ดังนั้น คอนกรีตที่มีกำลังอัดระหว่าง 38 ถึง 44 เมกะปาสกาลจะมีการเติมสารลดน้ำ

ตารางที่ 4.3 สัดส่วนผสมคอนกรีต

สัญลักษณ์	ส่วนผสม (กก./ลบ.ม.)					น้ำ (%)	SP (%)
	ซีเมนต์	หิน	ทราย	Coarse RAP	Fine RAP		
C18	301	749	974	-	-	225	-
C18-CR25	301	562	974	187	-	225	-
C18-CR50	301	375	974	375	-	225	-
C18-CR75	301	187	974	562	-	225	-
C18-CR100	301	-	974	749	-	225	-
C21	326	749	954	-	-	225	-
C21-CR25	326	562	954	187	-	225	-
C21-CR50	326	375	954	375	-	225	-
C21-CR75	326	187	954	562	-	225	-
C21-CR100	326	-	954	749	-	225	-
C24	350	749	934	-	-	225	-
C24-CR25	350	562	934	187	-	225	-
C24-CR50	350	375	934	375	-	225	-
C24-CR75	350	187	934	562	-	225	-
C24-CR100	350	-	934	749	-	225	-
C28	384	749	905	-	-	225	-

ตารางที่ 4.3 สัดส่วนผสมคอนกรีต (ต่อ)

สัญลักษณ์	ส่วนผสม (กก./ลบ.ม.)						SP (%)
	ซีเมนต์	หิน	ทราย	Coarse RAP	Fine RAP	น้ำ	
C28-CR25	384	562	905	187	-	225	-
C28-CR50	384	375	905	375	-	225	-
C280-CR75	384	187	905	562	-	225	-
C28-CR100	384	-	905	749	-	225	-
C31	413	749	881	-	-	225	-
C31-CR25	413	562	881	187	-	225	-
C31-CR50	413	375	881	375	-	225	-
C31-CR75	413	187	881	562	-	225	-
C35	460	749	843	-	-	225	-
C35-CR25	460	562	843	187	-	225	-
C35-CR50	460	375	843	375	-	225	-
C35-CR75	460	187	843	562	-	225	-
C35-CR100	460	-	843	749	-	225	-
C38-SP0.20	492	749	816	-	-	225	0.20
C38-CR25-SP0.20	492	562	816	187	-	225	0.20
C38-CR50-SP0.20	492	375	816	375	-	225	0.20
C38-CR75-SP0.20	492	187	816	562	-	225	0.20
C38-CR100-SP0.20	492	-	816	749	-	225	0.20
C41-SP0.25	526	749	788	-	-	225	0.25
C41-CR25-SP0.25	526	562	788	187	-	225	0.25
C41-CR50-SP0.25	526	375	788	375	-	225	0.25
C41-CR75-SP0.25	526	187	788	562	-	225	0.25
C41-CR100-SP0.25	526	-	788	749	-	225	0.25
C44-SP0.30	565	749	756	-	-	225	0.30

ตารางที่ 4.3 สัดส่วนผสมคอนกรีต (ต่อ)

สัญลักษณ์	ส่วนผสม (กก./ลบ.ม.)					น้ำ	SP (%)
	ซีเมนต์	หิน	ทราย	Coarse RAP	Fine RAP		
C44-CR25-SP0.30	565	562	756	187	-	225	0.30
C44-CR50-SP0.30	565	375	756	375	-	225	0.30
C44-CR75-SP0.30	565	187	756	562	-	225	0.30
C44-CR100-SP0.30	565	-	756	749	-	225	0.30
C18	301	749	974	-	-	225	-
C18-FR25	301	659	770	-	257	225	-
C18-FR50	301	638	541	-	541	225	-
C18-FR75	301	580	258	-	854	225	-
C18-FR100	301	523	-	-	1194	225	-
C21	326	749	954	-	-	225	-
C21-FR25	326	659	755	-	251	225	-
C21-FR50	326	638	530	-	530	225	-
C21-FR75	326	580	280	-	838	225	-
C21-FR100	326	523	-	-	1174	225	-
C24	350	749	934	-	-	225	-
C24-FR25	350	659	740	-	247	225	-
C24-FR50	350	638	521	-	521	225	-
C24-FR75	350	580	275	-	824	225	-
C24-FR100	350	523	-	-	1154	225	-
C28	384	749	905	-	-	225	-
C28-FR25	384	695	718	-	239	225	-
C28-FR50	384	638	506	-	506	225	-
C28-FR75	384	580	267	-	802	225	-

ตารางที่ 4.3 สัดส่วนผสมคอนกรีต (ต่อ)

สัญลักษณ์	ส่วนผสม (กก./ลบ.ม.)						SP (%)
	ซีเมนต์	หิน	ทราย	Coarse RAP	Fine RAP	น้ำ	
C28-FR100	384	523	-	-	1124	225	-
C31	413	749	881	-	-	225	-
C31-FR25	413	695	700	-	233	225	-
C31-FR50	413	638	495	-	495	225	-
C31-FR75	413	580	261	-	784	225	-
C35-FR75	460	580	252	-	755	225	-
C35-FR100	460	523	-	-	1062	225	-
C38-SP0.20	492	749	816	-	-	225	0.20
C38-FR25-SP0.20	492	695	651	-	217	225	0.20
C38-FR50-SP0.20	492	638	462	-	462	225	0.20
C38-FR75-SP0.20	492	580	245	-	735	225	0.20
C38-FR100-SP0.20	492	523	-	-	1036	225	0.20
C41-SP0.25	526	749	788	-	-	225	0.25
C41-FR25-SP0.25	526	695	630	-	210	225	0.25
C41-FR50-SP0.25	526	638	448	-	448	225	0.25
C41-FR75-SP0.25	526	580	283	-	714	225	0.25
C41-FR100-SP0.25	526	523	-	-	1008	225	0.25
C44-SP0.30	565	749	756	-	-	225	0.30
C44-FR25-SP0.30	565	695	606	-	202	225	0.30
C44-FR50-SP0.30	565	638	432	-	432	225	0.30
C44-FR75-SP0.30	565	580	230	-	690	225	0.30
C44-FR100-SP0.30	565	523	-	-	975	225	0.30

หมายเหตุ: คอนกรีตที่ออกแบบกำลังที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน ACI 211.1 (2009) เท่ากับ 38-44 MPa

ใส่สารลดน้ำจางนร้อยละ 0.02 - 0.30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

4.2.6 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

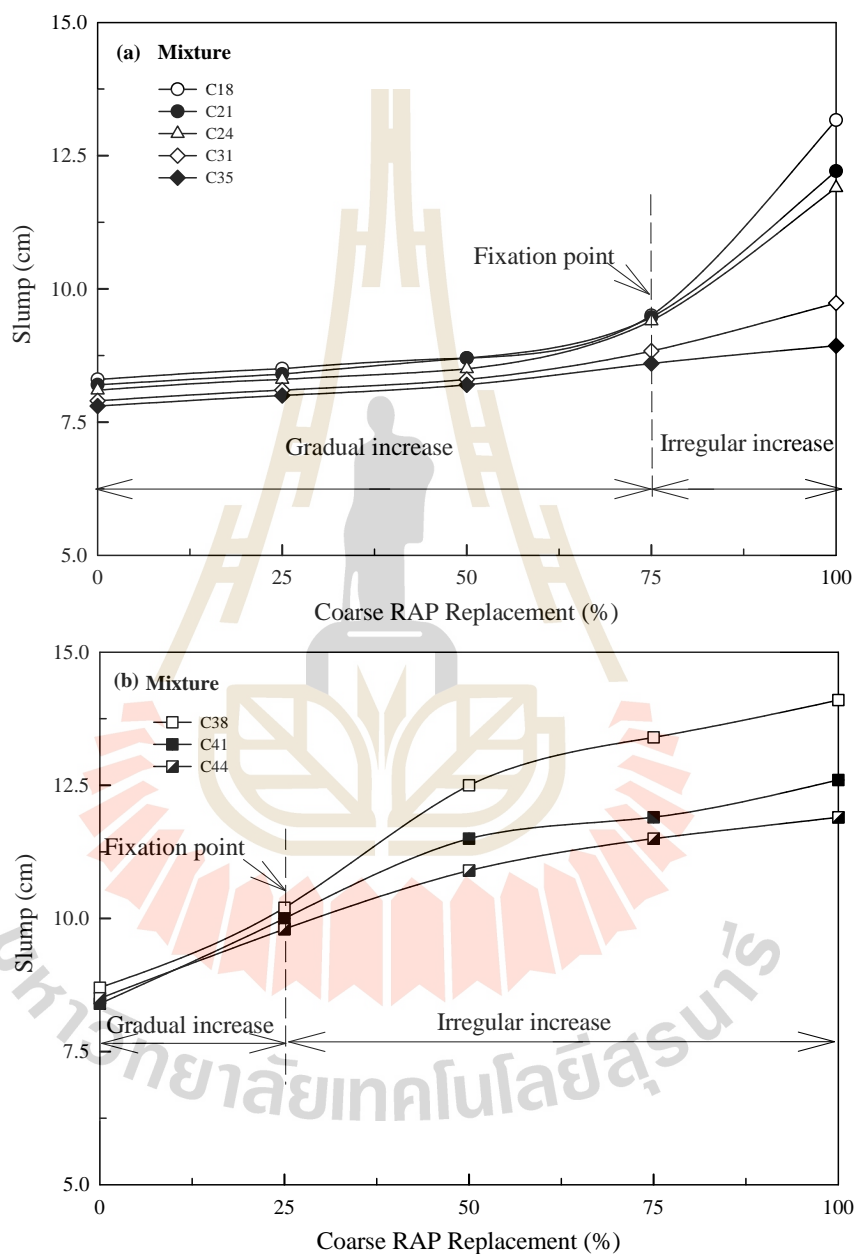
ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39/C39M-16, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens (2016) ด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด UTM ขนาด 2,000 กิโลนิวตัน ที่อายุบ่ม 7 28 และ 60 วัน ตามลำดับ

4.3 ผลการทดสอบและการอภิปราย

4.3.1 ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสด

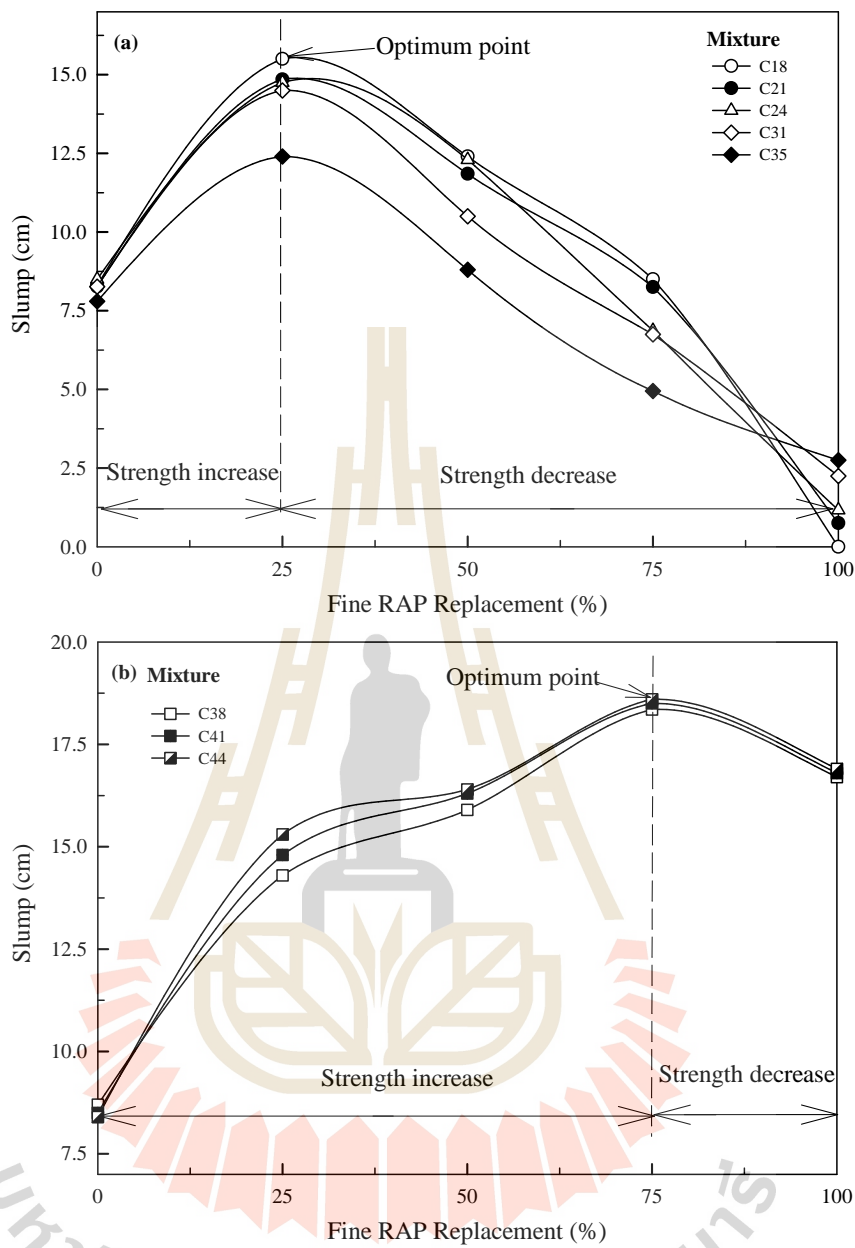
ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสดทดสอบโดยการหาค่ายุบตัวของคอนกรีตสด (Slump test) ตามมาตรฐาน C143/C143M-15a ผลการทดสอบแสดงตามรูปที่ 4.4(a) สำหรับคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดที่ 18 ถึง 35 เมกะปาสคาล ที่ปริมาณ Coarse RAP ต่าง ๆ เมื่อแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วย RAP พบว่าปริมาณ Coarse RAP ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยในทุกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดที่ใช้ Coarse RAP แทนที่มวลรวมหยาบที่ร้อยละ 100 มีค่ายุบตัวสูงสุดสำหรับคอนกรีตที่ไม่ได้เติมสารผสมเพิ่ม และรูปที่ 4.4(b) แสดงค่าการยุบตัวสำหรับคอนกรีตที่เติมสารผสมเพิ่ม (SP) กำลังอัดออกแบบที่ 38 ถึง 44 เมกะปาสคาล ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ค่ามีแนวโน้มค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดต่ำกว่าคอนกรีตสดที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณ Coarse RAP เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยในทุกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดที่ใช้ Coarse RAP แทนที่มวลรวมหยาบที่ร้อยละ 100 มีค่าสูงสุดที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสภาพทางกายภาพของวัสดุ Coarse RAP มีฟิล์มแอสฟัลต์บาง ๆ หุ้มอยู่รอบผิวของหินฝุ่น แม้ว่าแอสฟัลต์นี้ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นวัสดุประสานแล้ว แต่ฟิล์มแอสฟัลต์ที่หุ้มหินไว้ลดระยะเวลาการดูดซึมน้ำของมวลรวม ทำให้วัสดุ RAP มีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่ามวลรวมธรรมชาติ (ดูตารางที่ 4.1) แต่ในการผลิตก้อนตัวอย่างคอนกรีตโดยปกติทำตามมาตรฐาน ASTM C31-16 แต่ไม่ได้เตรียมมวลรวมที่สถานะอิ่มตัวผิวแห้ง แต่จะใช้วิธีการชดเชยค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมในส่วนผสมแทน ดังนั้นน้ำที่ถูกชดเชยจึงไม่สามารถซึมเข้าสู่วัสดุ RAP ในระยะเวลาที่เท่ากันกับมวลรวมธรรมชาติ เมื่อมีน้ำในส่วนผสมเท่ากับวัสดุที่ไม่มีแอสฟัลต์เคลือบ ส่งผลทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดหรือความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสดที่มี RAP เป็นส่วนผสมมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ RAP ที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสม การเพิ่มขึ้นของค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดแบ่งได้ 2 ช่วง คือ ช่วงการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอย่างเป็นระบบ (Gradual increase) และการเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นระบบอย่างชัดเจน (Irregular increase) โดยปริมาณ RAP เป็นจุดแบ่ง (Fixation point) เท่ากับร้อยละ 75

รูปที่ 4.4(b) แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดที่ 38 ถึง 44 เมกะปาสกาล ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสเปกแบ่งออกเป็น 2 ช่วงเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ไม่ได้เติมสารลดน้ำแต่จุด Fixation point ลดลงมามีค่าเท่ากับร้อยละ 25 โดยปริมาณ RAP



รูปที่ 4.4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ปริมาณการแทนที่ Coarse RAP ที่ปริมาณต่าง ๆ
(a) กำลังอัดที่ 18 ถึง 35 เมกะปาสกาล และ (b) กำลังอัดที่ 38 ถึง 44 เมกะปาสกาล

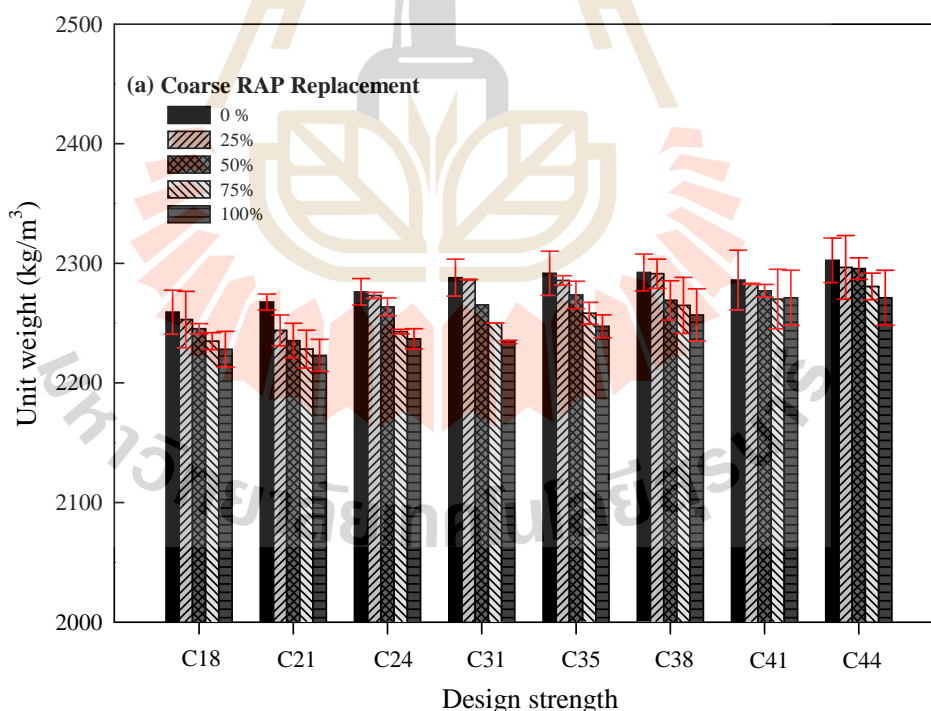
รูปที่ 4.5(a) แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดออกแบบกำลังอัดที่ 18 ถึง 35 เมกะปาสคาล ที่มีส่วนผสมของ Fine RAP แทนที่มวลรวมละเอียดที่ปริมาณต่าง ๆ การแทนที่ Fine RAP ที่ร้อยละ 25 และ 50 ของมวลรวมละเอียดธรรมชาติในส่วนผสมของคอนกรีตให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากสมบัติทางกายภาพของวัสดุ RAP ที่เป็นส่วนละเอียดมีการดูดซึมน้ำสูงกว่ามวลรวมละเอียดธรรมชาติ การดูดซึมน้ำของ Fine RAP ขึ้นอยู่กับขนาดและคุณภาพของ RAP หากมีปริมาณยางแอสฟัลต์สูงจะส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำต่ำลงและมีน้ำส่วนเกินในระบบ การแทนที่ Fine RAP ในปริมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณ RAP ในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดที่ใช้งานคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น แต่ค่าความสามารถในการทำงานได้กลับสูงขึ้น เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ในส่วนผสมของคอนกรีตมากกว่าร้อยละ 25 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดกลับต่ำลง ปริมาณ Fine RAP แทนที่มวลรวมละเอียดที่ร้อยละ 100 มีค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดต่ำสุดอาจกล่าวได้ว่าเมื่อปริมาณ RAP มากกว่าร้อยละ 25 ค่าการยุบตัวจะลดลงตามปริมาณ RAP ที่เพิ่มขึ้นผลของค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดที่ลดลงเนื่องจากการใช้ Fine RAP แทนที่มวลรวมธรรมชาติในอัตราส่วนที่มากกว่าร้อยละ 25 ส่งผลให้ค่าโมดูลัสความละเอียดของวัสดุมวลรวมละเอียดมีค่าเพิ่มขึ้นเกินมาตรฐานของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานคอนกรีต ที่เป็นเช่นนี้เป็นผลมาจากขนาดละเอียดของ Fine RAP มีขนาดโตกว่าทรายแม่น้ำและสภาพทางกายภาพที่ด้อยกว่า มีเหลี่ยมมุมมากและประกอบไปด้วยหินฝุ่นและยางแอสฟัลต์ที่ผ่านการย่อยโดยเครื่องจักรทำให้ผิวของ Fine RAP มีลักษณะไม่เรียบและขรุขระ ส่งผลทำให้คอนกรีตสดมีความกระด้างไม่เกาะกันดีเพราะมีส่วนผสมของวัสดุมวลรวมหยาบ (หินฝุ่น) ผสมอยู่ค่อนข้างมาก ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดที่ออกแบบกำลังอัดโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำจะมีค่าการยุบตัวต่ำกว่าคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง รูปที่ 4.5(b) แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดออกแบบที่ กำลังอัด 38 ถึง 44 เมกะปาสคาล และเติมสารผสมเพิ่ม (SP) ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดเพิ่มขึ้นทุกปริมาณการแทนที่ Fine RAP แม้ว่าจะใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำแต่มีสารเคมีผสมเพิ่ม (SP) ที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้จากการลดการใช้น้ำและลดความเสียดทานระหว่างผิวของ Fine RAP ขณะที่การทำงานร่วมคอนกรีตสด ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณการแทนที่ Fine RAP เท่ากับร้อยละ 75 แล้วจึงลดลง คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างกันเมื่อใช้สารผสมเพิ่มลดน้ำแล้วจะทำให้ค่าการยุบตัวที่ไม่แตกต่างกันดังสังเกตได้จากกราฟรูปที่ 4.5(b)



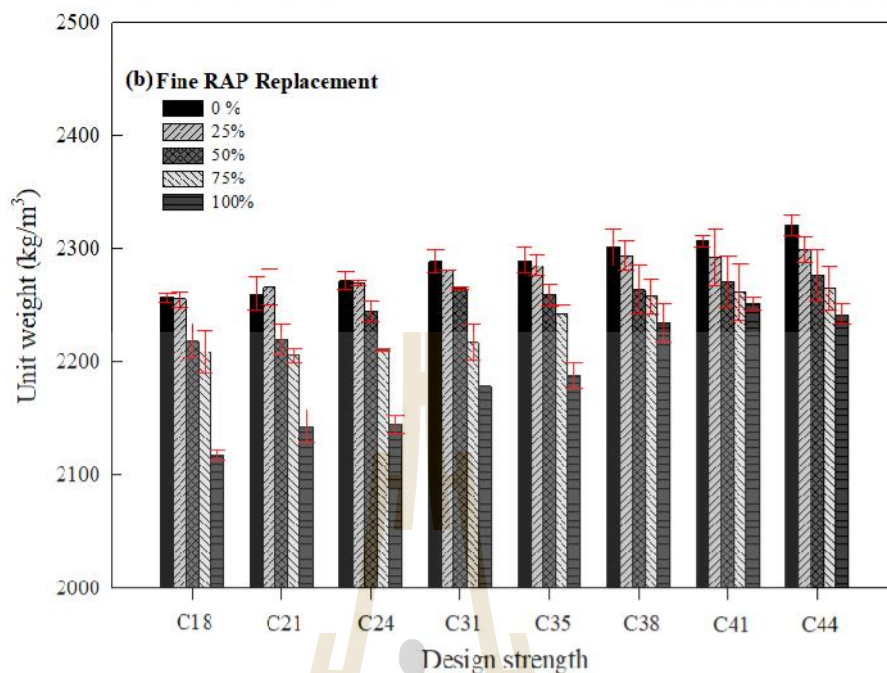
รูปที่ 4.5 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดที่ปริมาณการแทนที่ Fine RAP ที่ปริมาณต่าง ๆ
 (a) กำลังอัดที่ 18 ถึง 35 เมกะปาสกาล (b) กำลังอัดที่ 38 ถึง 44 เมกะปาสกาล

4.3.2 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต

รูปที่ 4.6 แสดงหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ Coarse RAP แทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติที่ปริมาณต่าง ๆ รูปที่ 4.7 แสดงหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ Fine RAP แทนที่มวลรวมละเอียดธรรมชาติที่ปริมาณต่าง ๆ เมื่อปริมาณ RAP เพิ่มขึ้นในส่วนผสมคอนกรีตส่งผลให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลดลงทุกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยลดลงประมาณร้อยละ 2 สำหรับมวลรวมหยาบ และร้อยละ 5 สำหรับมวลรวมละเอียด หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตขึ้นอยู่กับชนิดของมวลรวมและปริมาณซีเมนต์เมื่อพิจารณาค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง กระทั่งแน่นของมวลรวมหยาบทั้ง Coarse RAP และมวลรวมธรรมชาติจากหินปูนหน่วยน้ำหนักแห้ง กระทั่งแน่นของมวลรวมละเอียดทั้ง Fine RAP และทรายธรรมชาติในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าค่าหน่วยน้ำหนักแห้งกระทั่งแน่นของ RAP มีค่าต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติประมาณร้อยละ 5 สำหรับมวลรวมหยาบ และร้อยละ 10 สำหรับมวลรวมละเอียด ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากวัสดุตั้งต้นของ RAP ที่นำมาใช้เป็นหินบะชอลต์ซึ่งเป็นหินอณูเม็ดแข็งแต่มีเนื้อเป็นโพรงตาข่ายและมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าหินปูนและทราย



รูปที่ 4.6 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่ปริมาณการแทนที่ Coarse RAP ที่ปริมาณต่าง ๆ

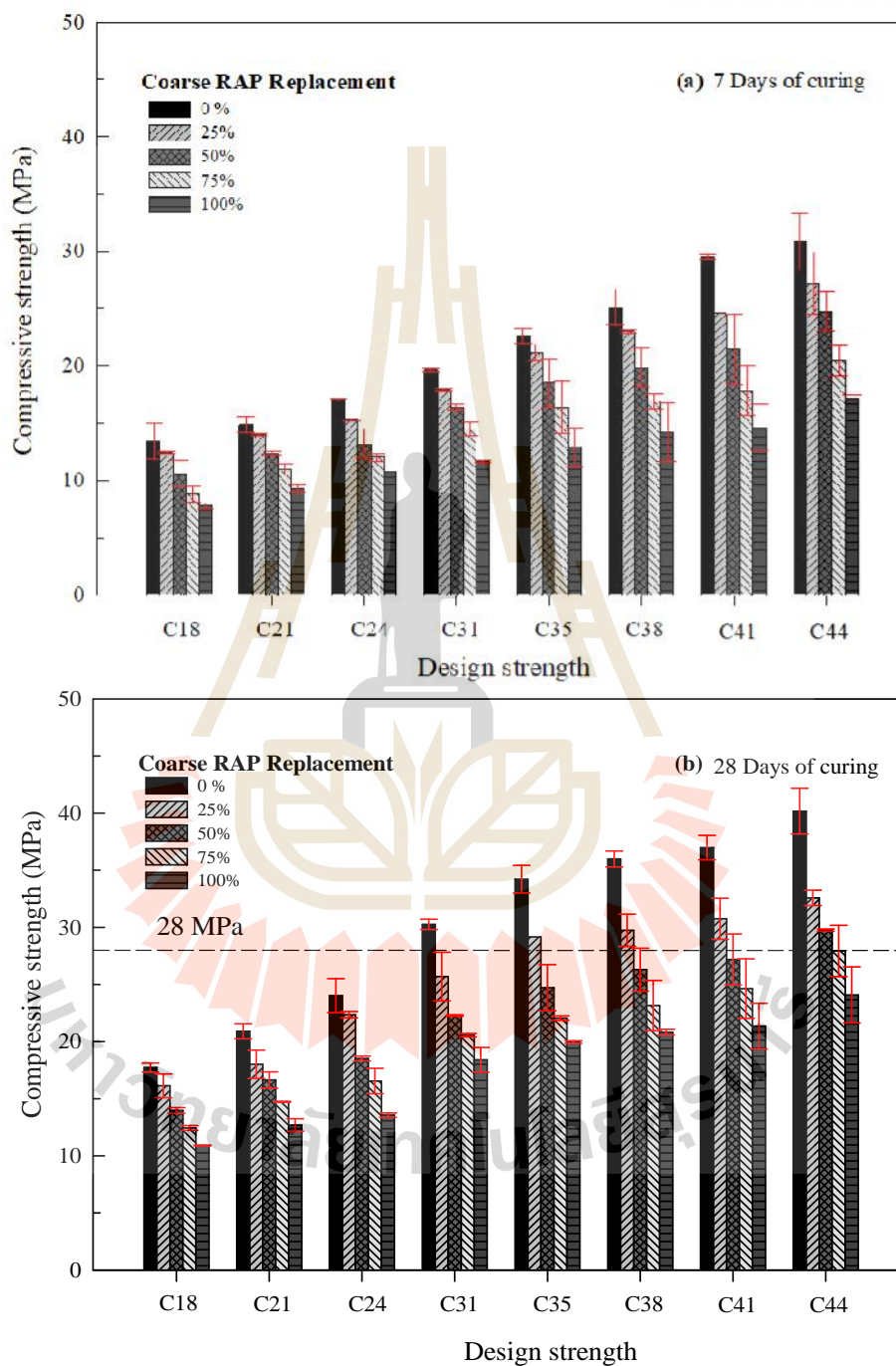


รูปที่ 4.7 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่ปริมาณการแทนที่ Fine RAP ที่ปริมาณต่าง ๆ

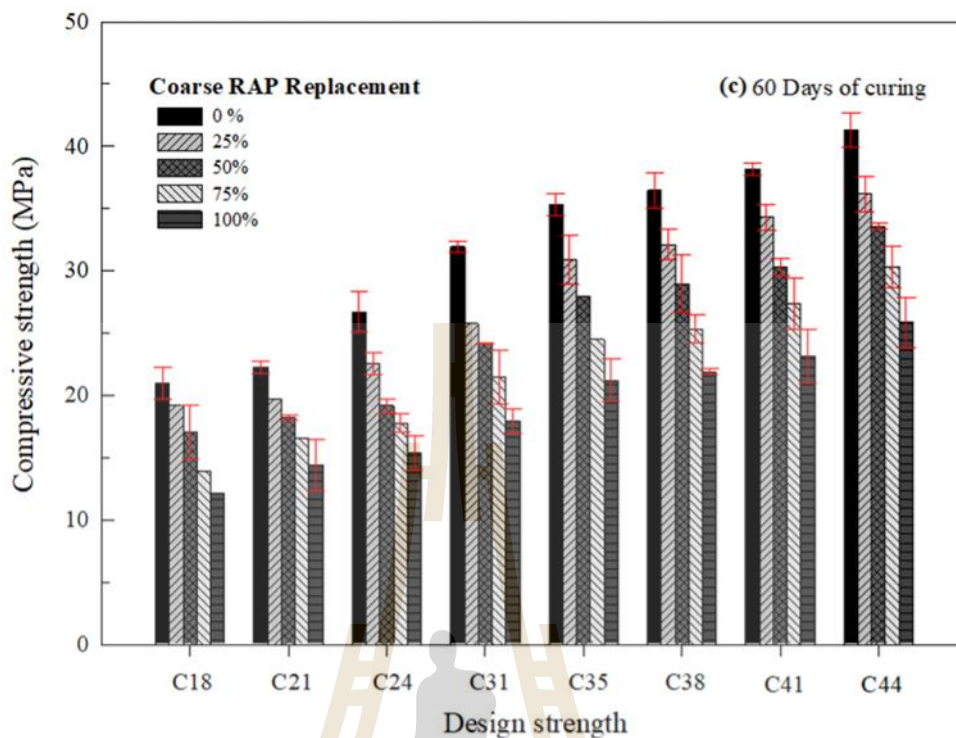
4.3.3 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ RAP แทนที่มวลรวมธรรมชาติ

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ RAP แทนที่มวลรวมธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ Coarse RAP แทนที่มวลรวมหยาบมีกำลังอัดลดลงตามปริมาณ RAP ที่เพิ่มในส่วนผสมที่อายุบ่ม 7 วัน กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ RAP ร้อยละ 7 19 28 และ 40 สำหรับอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 25 50 75 และ 100 ตามลำดับ ขณะที่อายุบ่ม 28 วัน กับ 60 วัน กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ RAP ร้อยละ 12 24 32 และ 41 สำหรับอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 25 50 75 และ 100 ตามลำดับ การลดลงของกำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ Coarse RAP แทนที่มวลรวมหยาบมีค่าคงที่ในช่วงอายุบ่มตอนกลาง (28 วัน) กับอายุบ่มปลาย (60 วัน) เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐานกรมทางหลวงสำหรับผิวทางเดิมเท่ากับ 28 เมกะปาสคาลที่อายุบ่ม 28 วัน คอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตรมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์/ทราย/หิน เท่ากับ 384/749/905 กิโลกรัม จากกราฟสามารถใช้ RAP แทนที่มวลรวมหยาบได้เท่ากับร้อยละ 25 ที่กำลังอัดเท่ากับ 35 เมกะปาสคาล มีส่วนผสมของ ปูนซีเมนต์/ทราย/หิน/RAP หยาบ เท่ากับ 460/562/843/187 กิโลกรัม การก่อสร้างถนนตามมาตรฐานกรมทางหลวงมีความกว้างไม่รวมไหล่ทางเท่ากับ 7.00 เมตร มีความหนาเท่ากับ 0.25 เมตร ที่ระยะทาง 1 กิโลเมตร 2 ช่องจราจร ใช้คอนกรีต 14,000 ลูกบาศก์เมตร สามารถใช้ RAP แทนที่หินธรรมชาติได้

2,618 ตัน คอนกรีตที่ใช้ RAP หยาบแทนที่หินธรรมชาติถือเป็นคอนกรีตเขียว เพราะสามารถลดปริมาณของหินธรรมชาติได้ถึงร้อยละ 25

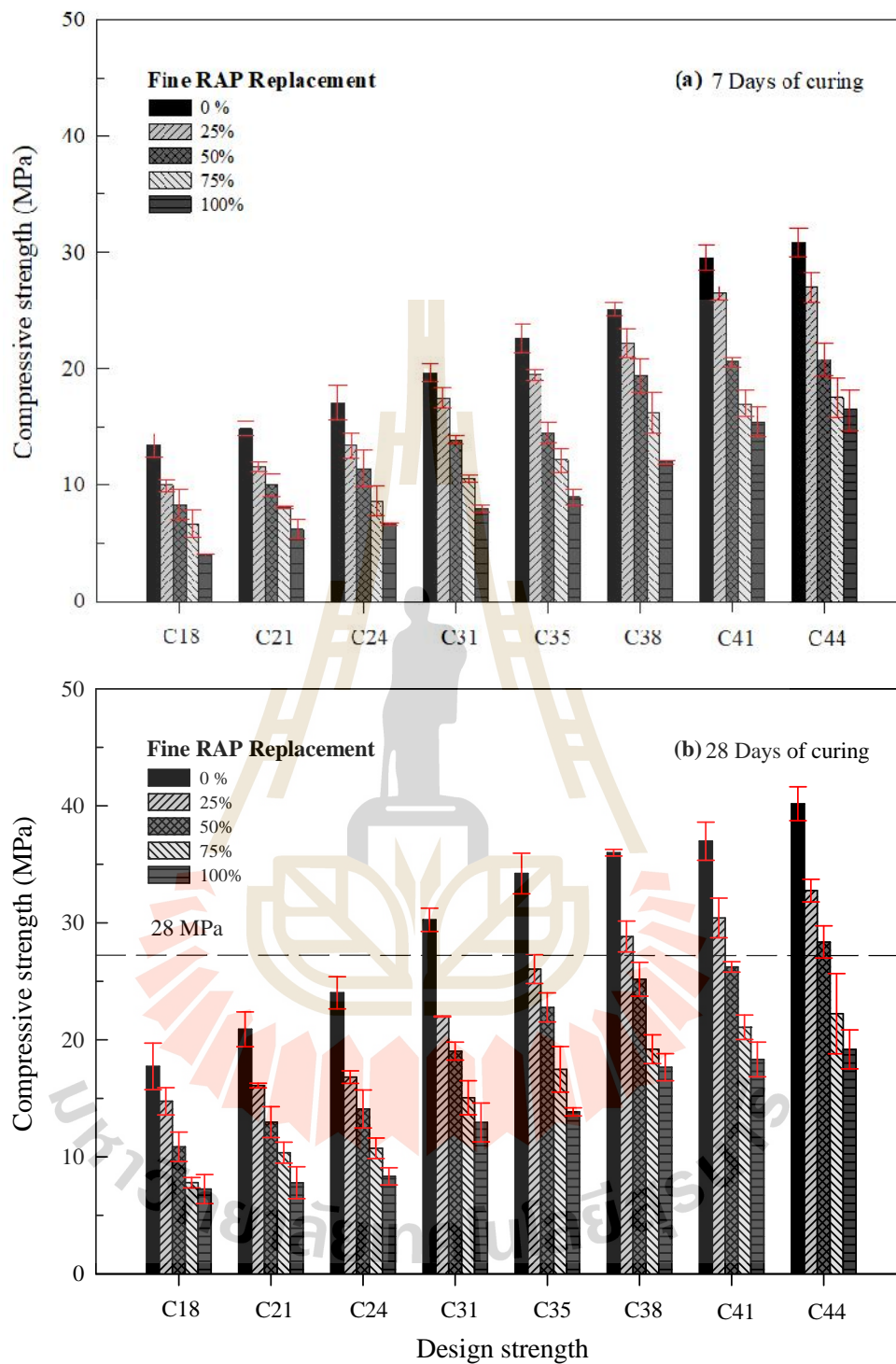


รูปที่ 4.8 ผลของการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อัดบ่ม (a) 7 วัน (b) 28 วัน และ (c) 60 วัน

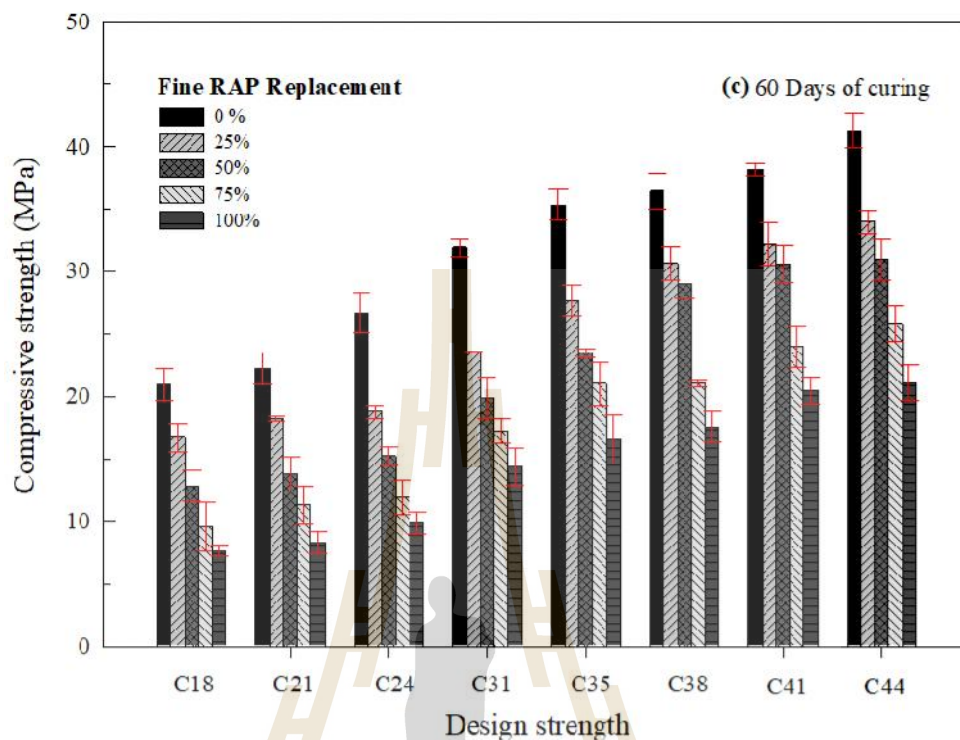


รูปที่ 4.8 ผลของการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุบ่ม (a) 7 วัน (b) 28 วัน และ (c) 60 วัน (ต่อ)

รูปที่ 4.9 แสดงผลของการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุบ่ม 7 28 และ 60 วัน จากผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลงตามปริมาณ Fine RAP ที่เพิ่มขึ้น เทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติลดลงมากที่สุด ที่อายุบ่ม 7 วัน ลดลงร้อยละ 18 ถึง 55 และที่อายุบ่ม 28 วัน กับ 60 วัน ลดลงร้อยละ 20 ถึง 60 การลดลงของกำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ Fine RAP แทนที่มวลรวมละเอียดมีค่าคงที่ 28 วัน และ 60 วัน เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐานกรมทางหลวงสำหรับผิวทางเดิมเท่ากับ 28 เมกะปาสคาลที่อายุบ่ม 28 วัน คอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตรมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์/ทราย/หิน เท่ากับ 384/749/905 กิโลกรัม จากกราฟสามารถใช้ RAP ละเอียดแทนที่ทรายธรรมชาติได้เท่ากับ ร้อยละ 25 ที่กำลังอัดเท่ากับ 38 เมกะปาสคาล มีส่วนผสมของ ปูนซีเมนต์/ทราย/หิน/RAP ละเอียด เท่ากับ 492/695/651/217 กิโลกรัม การก่อสร้างถนนคอนกรีตตามมาตรฐานกรมทางหลวงมีความกว้างไม่รวมไหล่ทางเท่ากับ 7.00 เมตร มีความหนาเท่ากับ 0.25 เมตร ที่ระยะทาง 1 กิโลเมตร 2 ช่องจราจร ใช้คอนกรีต 14,000 ลูกบาศก์เมตร สามารถใช้ RAP ละเอียดแทนที่ทรายธรรมชาติได้ 3,038 ตัน ถือเป็นคอนกรีตเขียว เพราะสามารถลดปริมาณของทรายธรรมชาติได้ถึงร้อยละ 25



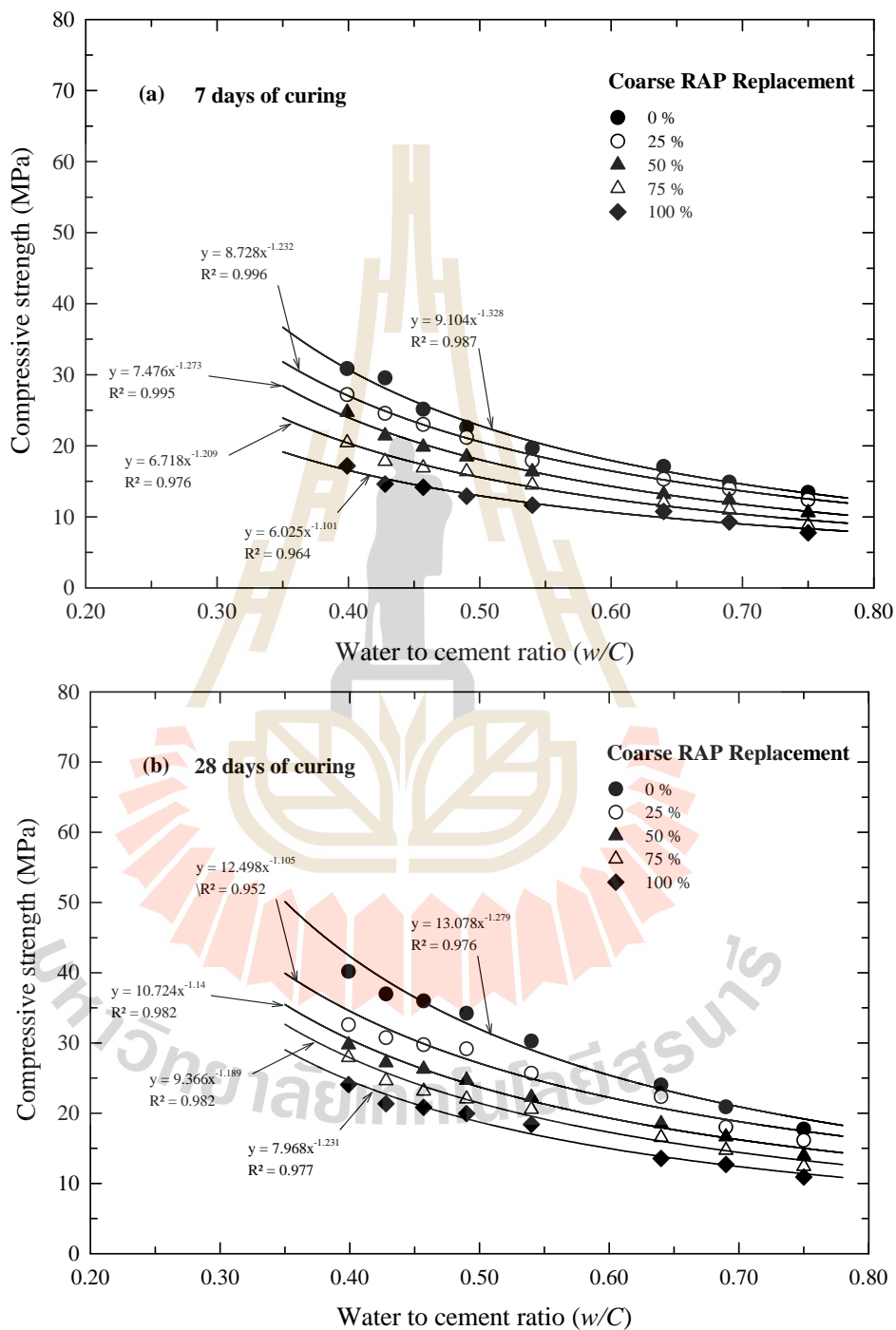
รูปที่ 4.9 ผลของการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ต่อกำลังอัดของคอนกรีต ที่อายุบ่ม (a) 7 วัน (b) 28 วัน และ (c) 60 วัน



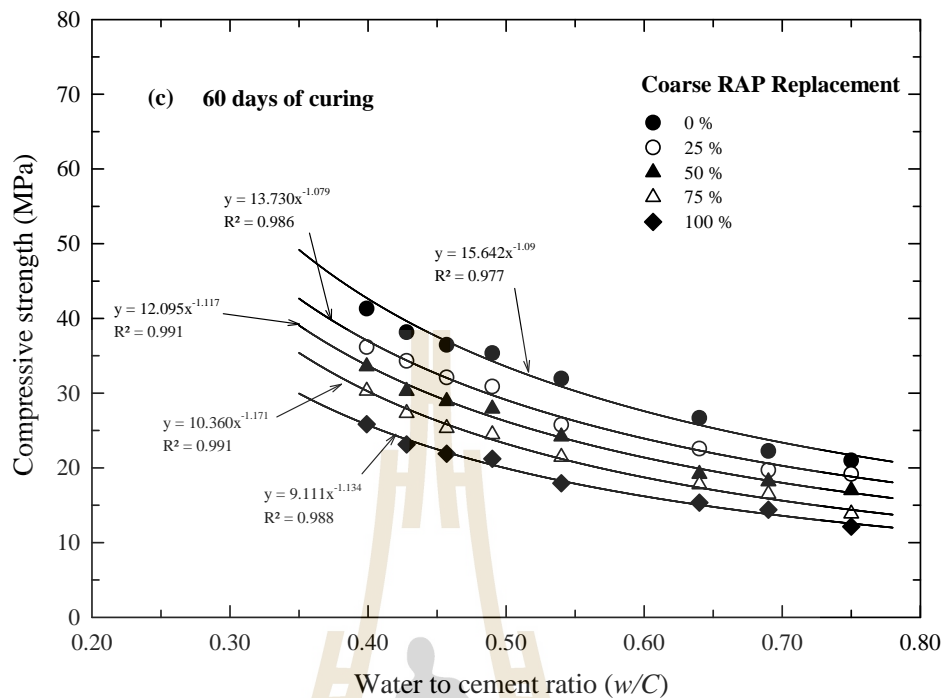
รูปที่ 4.9 ผลของการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ต่อกำลังอัดของคอนกรีต ที่อายุบ่ม (a) 7 วัน (b) 28 วัน และ (c) 60 วัน (ต่อ)

คอนกรีตที่อายุบ่มเท่ากันซึ่งผ่านการบ่มและการทำให้แน่นเหมือนกันกำลังอัดของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ กำลังอัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงจะมีค่าต่ำและกำลังอัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำจะมีค่าสูง ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ได้รับการเสนอโดย Abrams (1918) รูปที่ 4.10 แสดงผลของปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ การลดลงของกำลังอัดสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/C ratio) มีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงาย โดยที่ความชันมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เป็นไปตามความสัมพันธ์ตามกฎของ Abrams (1918) เมื่อสร้างสมการความสัมพันธ์โดยใช้ Regression ด้วยสมการกำลัง (Power function) ดังรูปที่ 4.10 ค่า R^2 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.9 ถึง 1.0 กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์และน้ำตลอดจนชนิดและขนาดละเอียดของมวลรวมที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต คอนกรีตที่ใช้ Coarse RAP

ในส่วนผสมพื้นผิวของ Coarse RAP จะมีแอสฟัลต์เคลือบอยู่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เฟสกับ RAP ไม่แข็งแรงเท่ากับพื้นผิวมวลรวมธรรมชาติจึงส่งผลต่อกำลังอัดลดลง



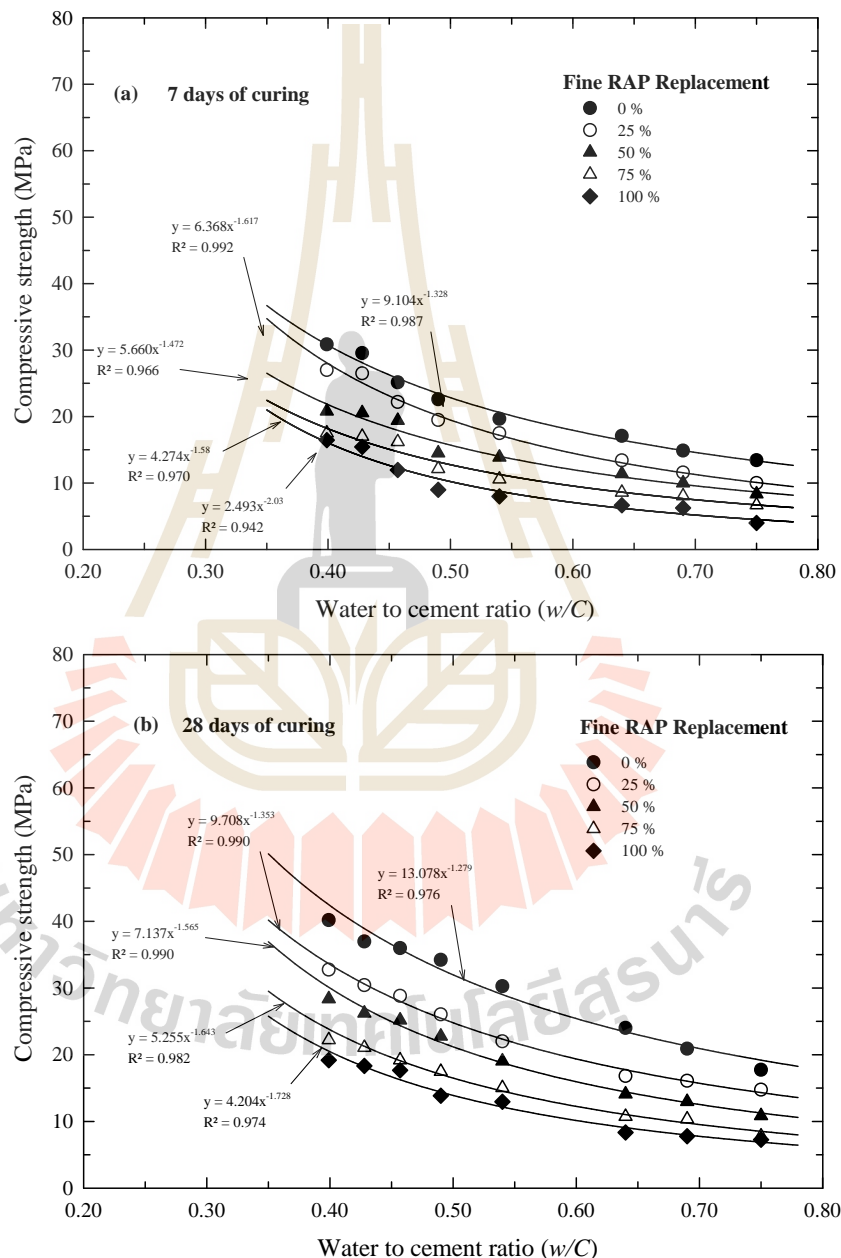
รูปที่ 4.10 ผลของปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ในคอนกรีต ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ ที่อายุบ่ม (a) 7 วัน (b) 28 วัน และ (c) 60 วัน



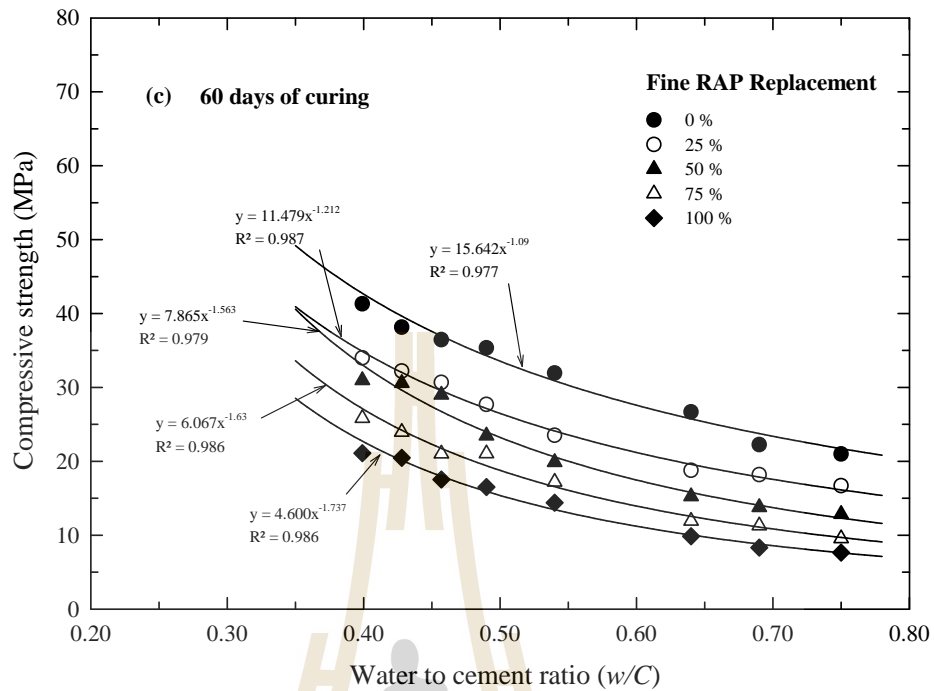
รูปที่ 4.10 ผลของปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ ที่อายุบ่ม (a) 7 วัน (b) 28 วัน และ (c) 60 วัน (ต่อ)

รูปที่ 4.11 แสดงผลของปริมาณมวลรวม Fine RAP แทนที่มวลรวมละเอียดต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ ที่อายุบ่ม 7 28 และ 60 วัน กำลังอัดของคอนกรีตอ้างอิงและคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ RAP แทนที่มวลรวมละเอียดลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นตามกฎของ Abrams (1918) เมื่อปริมาณมวลรวม Fine RAP เพิ่มขึ้นในส่วนผสมส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงอย่างเป็นระบบทุกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ การลดลงของกำลังอัดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณ Fine RAP ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ซึ่งมีน้ำหนักเบาและมีความละเอียดมากกว่ามวลรวมธรรมชาติ โมดูลัสความละเอียดของวัสดุมวลรวมละเอียดจึงมีค่าเพิ่มขึ้น อัตราส่วนปริมาตรมวลรวมหยาบต่อปริมาตรคอนกรีตจึงลดลงตามมาตรฐานการออกแบบปฏิบัติภาคส่วนผสมคอนกรีต ACI 211.1 (2009) ส่งผลทำให้ปริมาณวัสดุมวลรวมหยาบลดลงตาม นอกจากนี้ Fine RAP ที่เพิ่มขึ้นยังลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันให้น้อยลง (Chaidachatorn et al., 2019) ดังนั้นกำลังอัดที่ลดลงเป็นผลโดยตรงจากการยึดเหนี่ยววัสดุประสานกับมวลรวมที่ลดลง และปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ลดลงเมื่อปริมาณมวลรวม Fine RAP ในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวของมวลรวม Fine RAP เพิ่มขึ้น แต่แอสฟัลต์ที่เคลือบอยู่บนมวลรวม RAP ละเอียดมีแรงยึดเหนี่ยวกับซีเมนต์ไม่ดีเท่า

มวลรวมธรรมชาติได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นทำให้คอนกรีตสูญเสียกำลังอัด อย่างไรก็ตามก็คิดคอนกรีตที่ผสม Fine RAP แทนที่วัสดุคัดเลือกในคอนกรีตนั้นส่งผลให้คอนกรีตนั้นมีความสามารถที่ดีขึ้นในเรื่องความเหนียวและต้านทานรอยแตกที่มวลรวมซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตของ Huang et al. (2005)

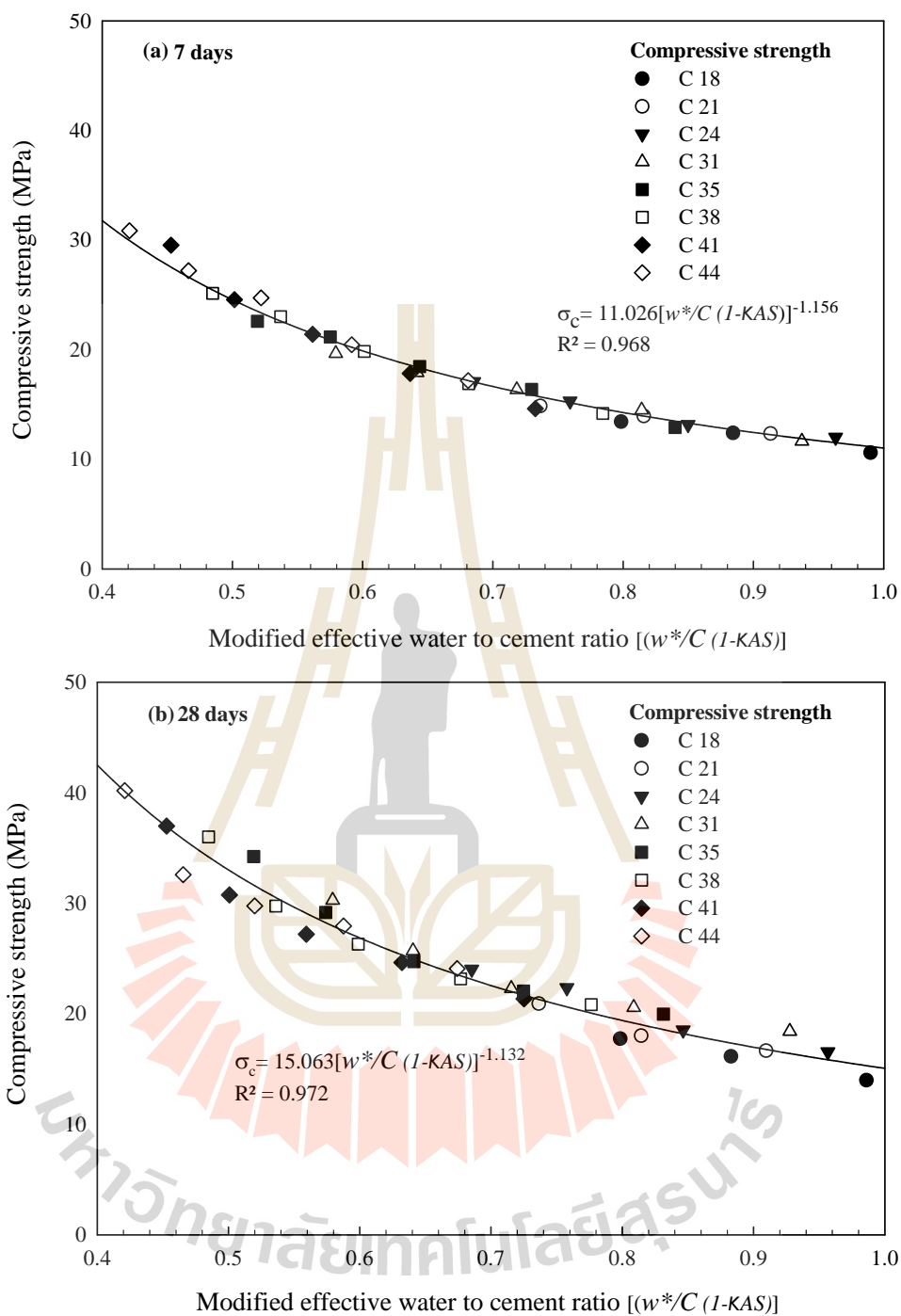


รูปที่ 4.11 ผลของปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ ที่อายุบ่ม (a) 7 วัน (b) 28 วัน และ (c) 60 วัน

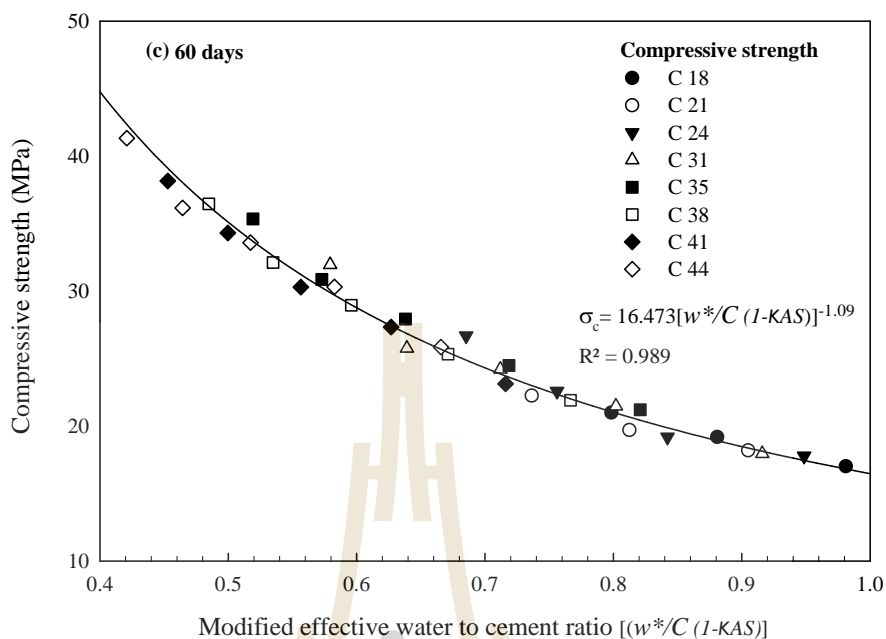


รูปที่ 4.11 ผลของปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ในคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ ที่อายุบ่ม (a) 7 วัน (b) 28 วัน และ (c) 60 วัน (ต่อ)

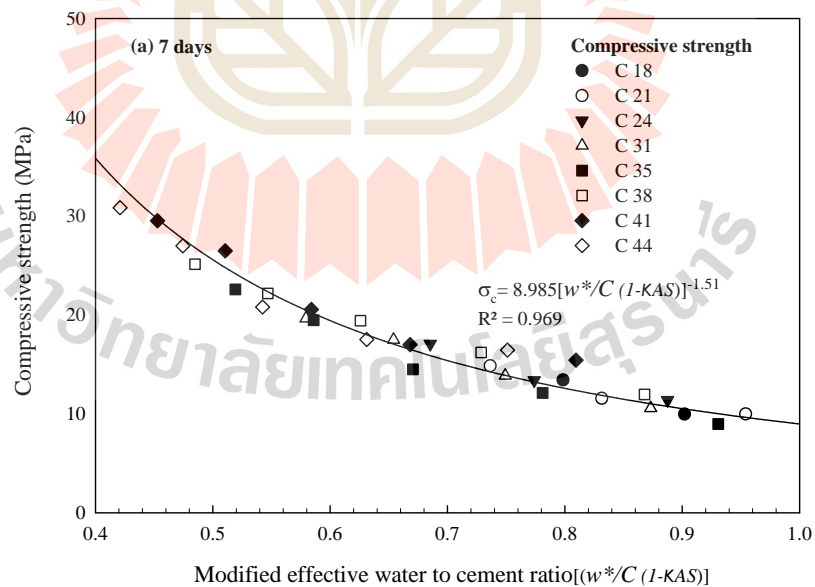
กำลังอัดของคอนกรีตที่ออกแบบที่กำลังอัดต่าง ๆ เมื่อแทนที่มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญตามรูปที่ 4.10 และ 4.11 ถ้าใช้สมมติฐานที่ว่า (1) RAP มีผิวสัมผัสยึดเกาะไม่ดีเท่ามวลรวมธรรมชาติและ (2) แอสฟัลต์ใน RAP ลดปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตการเพิ่มของ RAP ในคอนกรีตจะเสมือนการการลดลงของปริมาณซีเมนต์ (C)



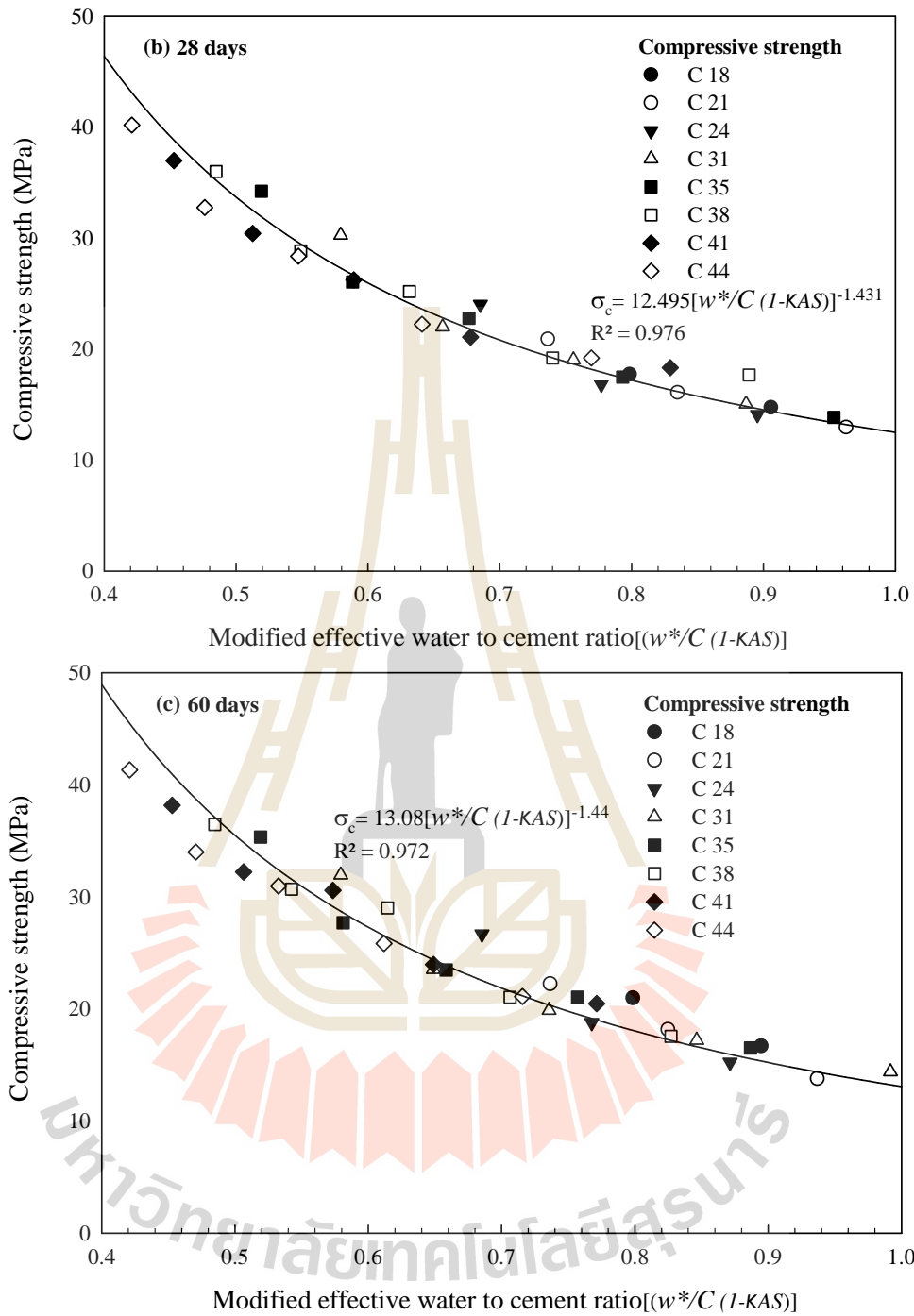
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ปรับปรุง ที่อายุบ่มต่าง ๆ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ปรับปรุงที่อายุบ่มต่าง ๆ (ต่อ)



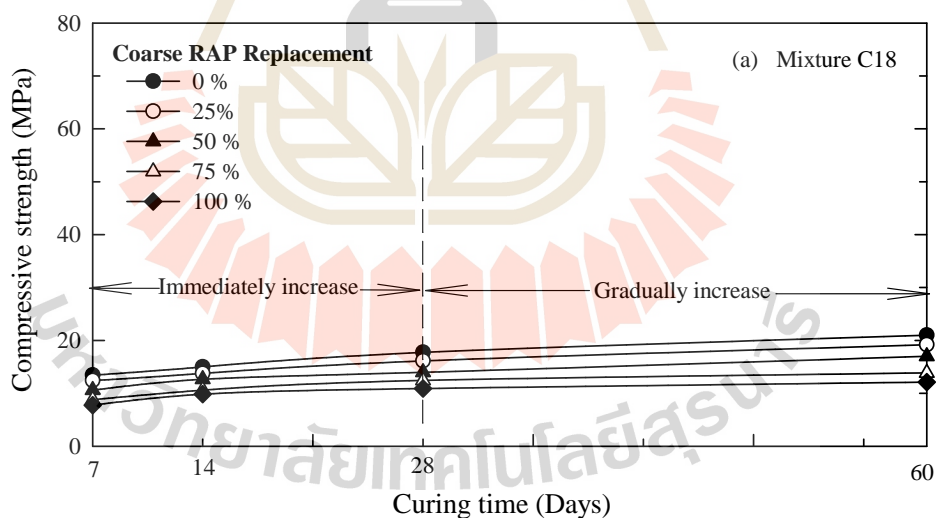
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ปรับปรุงที่อายุบ่มต่าง ๆ



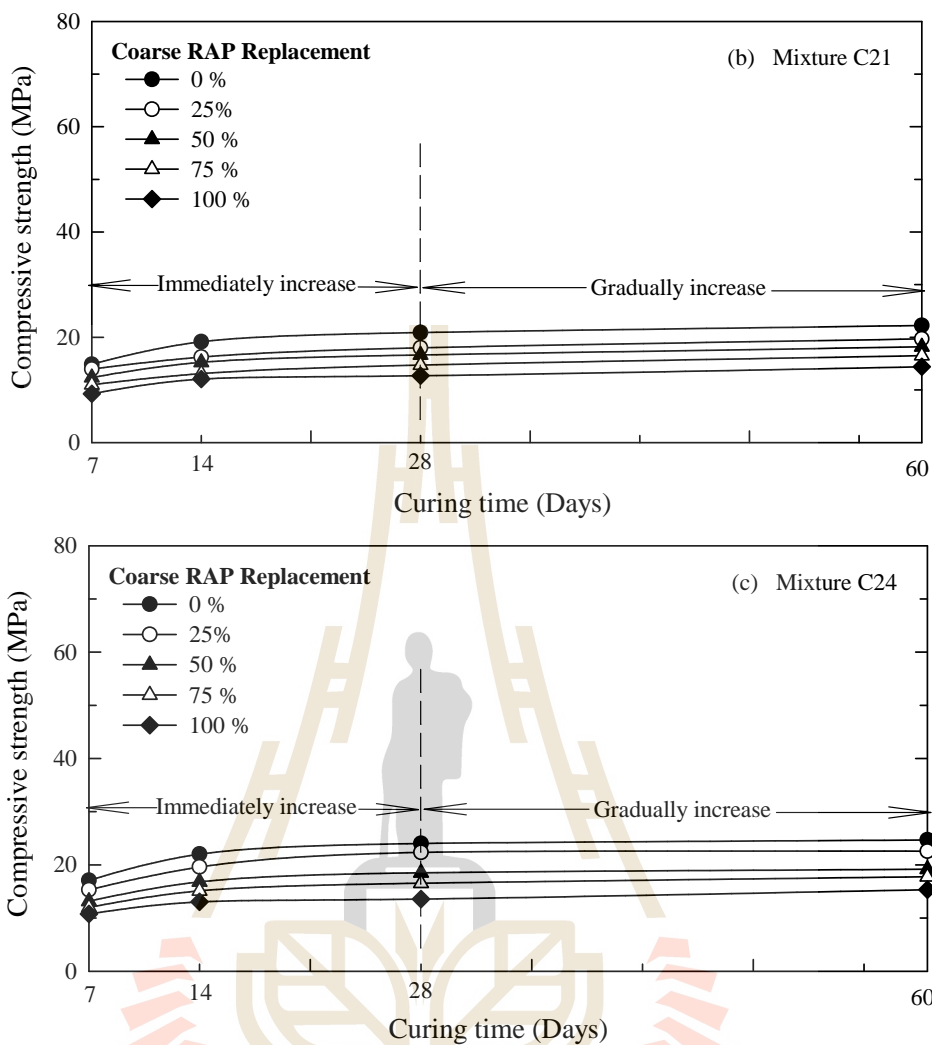
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ปรับปรุง ที่อายุบ่มต่าง ๆ (ต่อ)

4.3.4 การพัฒนากำลังอัดตามอายุบ่มของคอนกรีตที่ใช้ RAP แทนที่มวลรวมธรรมชาติ

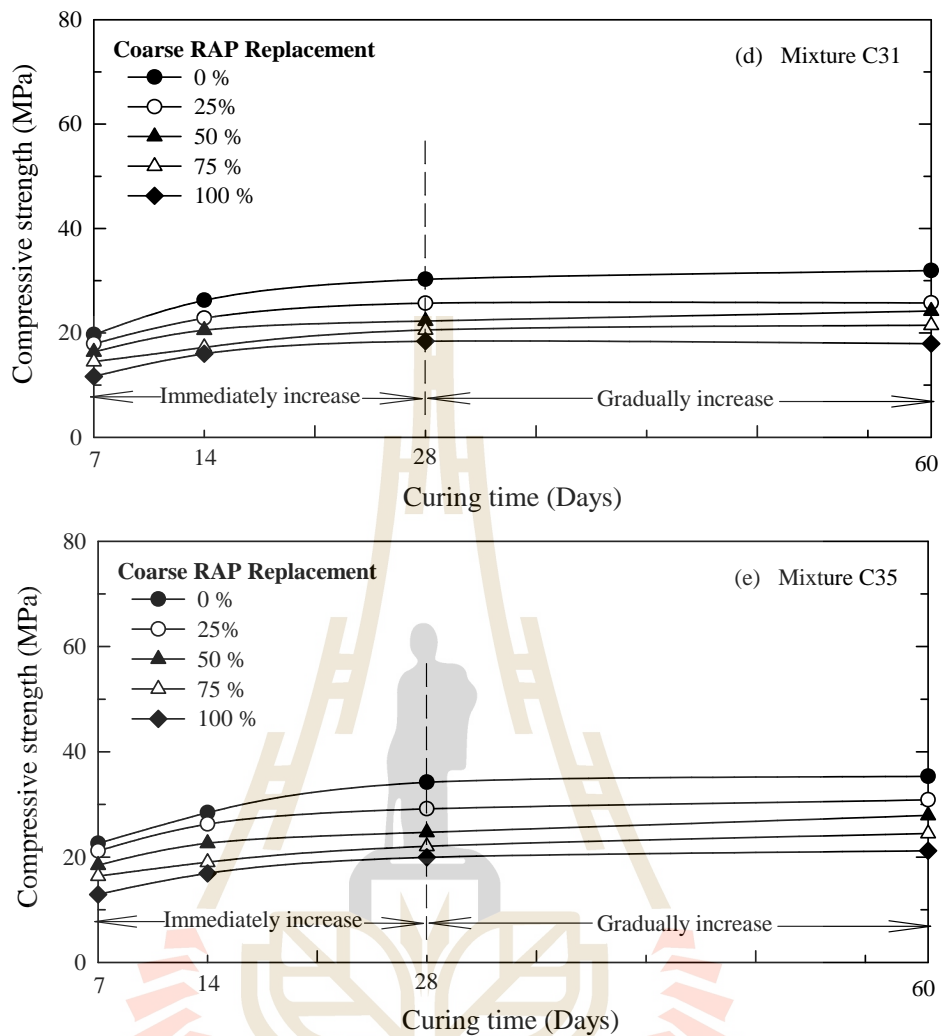
การพัฒนากำลังอัดตามอายุบ่มของคอนกรีตที่ใช้ RAP แทนที่มวลรวมธรรมชาติที่ กำลังอัดออกแบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.14 สำหรับการแทนที่มวลรวมหยาบและรูปที่ 4.15 สำหรับการแทนที่มวลรวมละเอียด กราฟการพัฒนากำลังอัดแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่คอนกรีต พัฒนากำลังอัดตามเวลาอย่างชัดเจน และช่วงที่กำลังอัดพัฒนาน้อย เมื่อเปรียบเทียบการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตอ้างอิง (ไม่มี RAP) กับคอนกรีตที่ใช้ RAP แทนที่มวลรวมธรรมชาติ จะพบ ลักษณะของกราฟที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเพิ่มปริมาณ RAP แทนที่มวลรวมลักษณะกราฟจะมีจุดตัด แกนแนวดิ่ง (Y) ต่ำลง แต่ยังคงมีความชันเท่าเดิม ลักษณะเช่นนี้เกิดกับทั้งการแทนที่ RAP ใน มวลรวมหยาบ (รูปที่ 4.14) และมวลรวมละเอียด (รูปที่ 4.15) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตของ Hassan et al. (2000) กราฟการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ปริมาณ RAP ต่าง ๆ สามารถทำ Normalization ได้เมื่อกราฟมีความชันใกล้เคียงกัน รูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ Normalization ระหว่างอัตราส่วนกำลังอัดที่อายุบ่มใด ๆ ต่อกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วันและเมื่อทำ Regression ข้อมูลแล้วจะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized strength และอายุบ่มอยู่ใน รูปสมการลอการิทึม



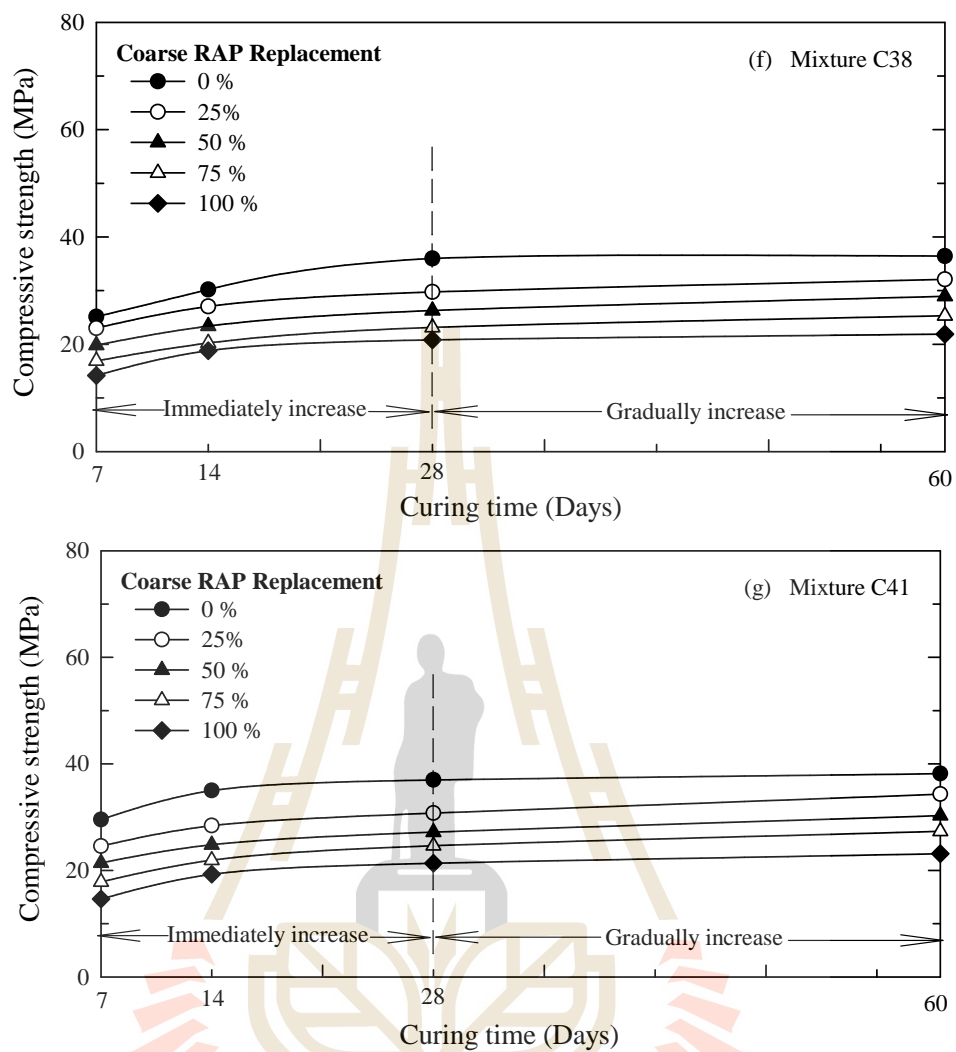
รูปที่ 4.14 ผลของการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ต่อการพัฒนากำลังอัดของ คอนกรีตที่กำลังออกแบบต่าง ๆ (a) C18 (b) C21 (c) C24 (d) C31 (e) C35 (f) C38 (g) C41 และ (h) C44



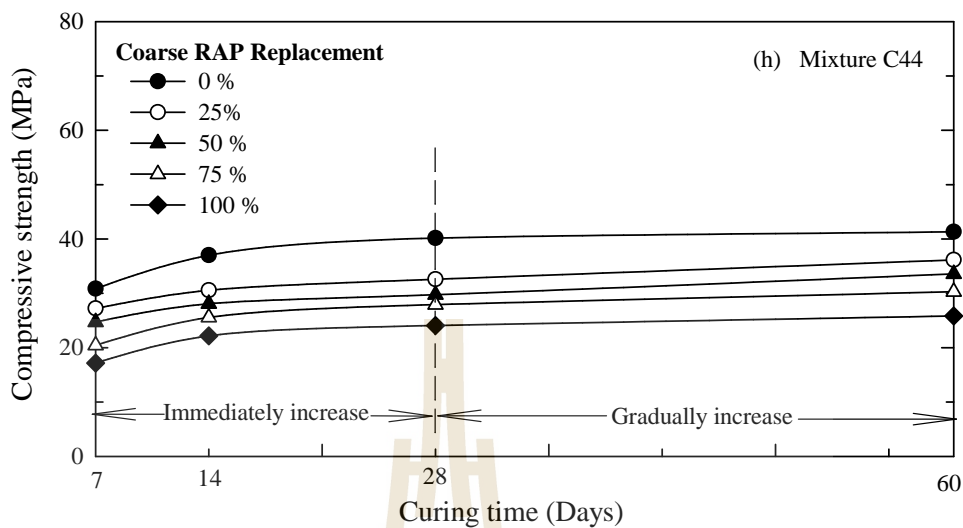
รูปที่ 4.14 ผลของการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่กำลังออกแบบต่าง ๆ (a) C18 (b) C21 (c) C24 (d) C31 (e) C35 (f) C38 (g) C41 และ (h) C44 (ต่อ)



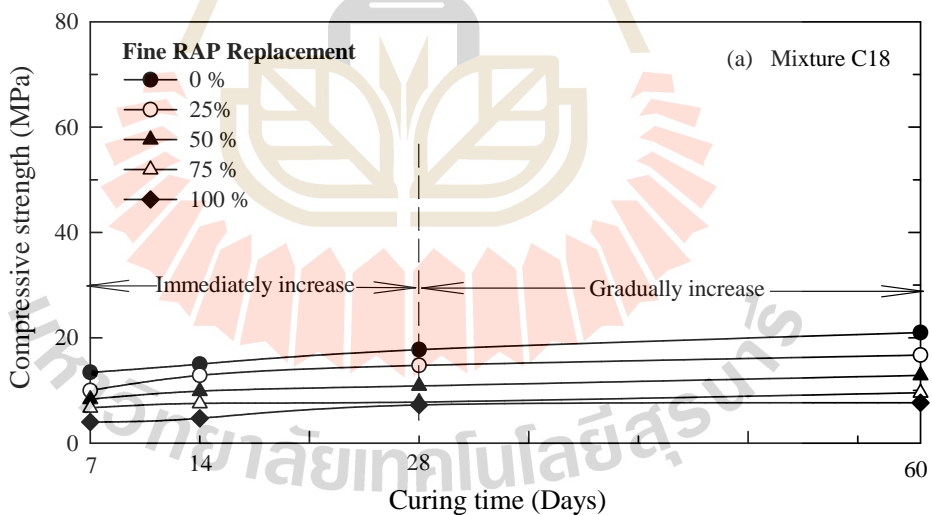
รูปที่ 4.14 ผลของการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่กำลั้งออกแบบต่าง ๆ (a) C18 (b) C21 (c) C24 (d) C31 (e) C35 (f) C38 (g) C41 และ (h) C44 (ต่อ)



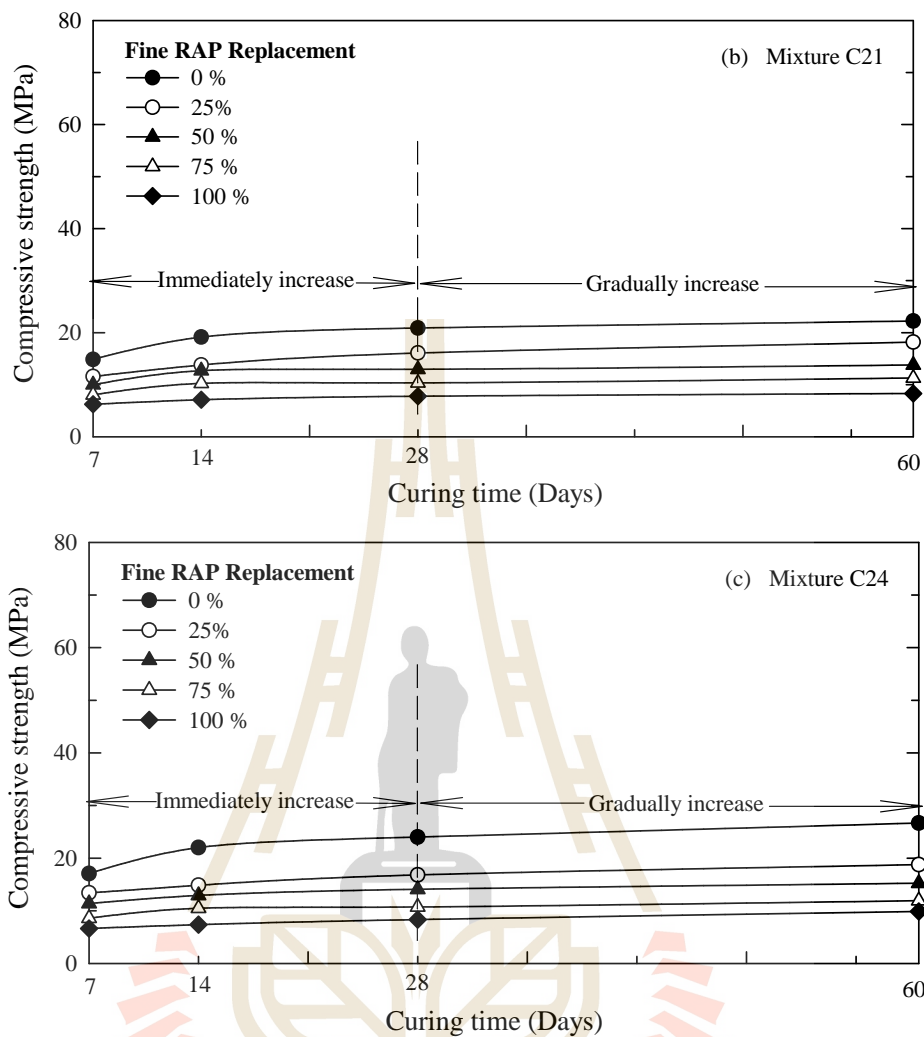
รูปที่ 4.14 ผลของการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่กำลังออกแบบต่าง ๆ (a) C18 (b) C21 (c) C24 (d) C31 (e) C35 (f) C38 (g) C41 และ (h) C44 (ต่อ)



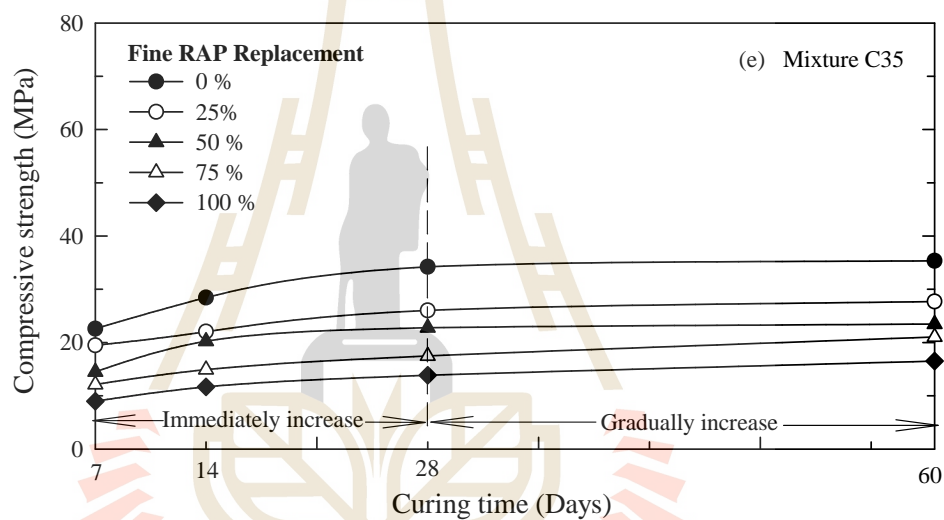
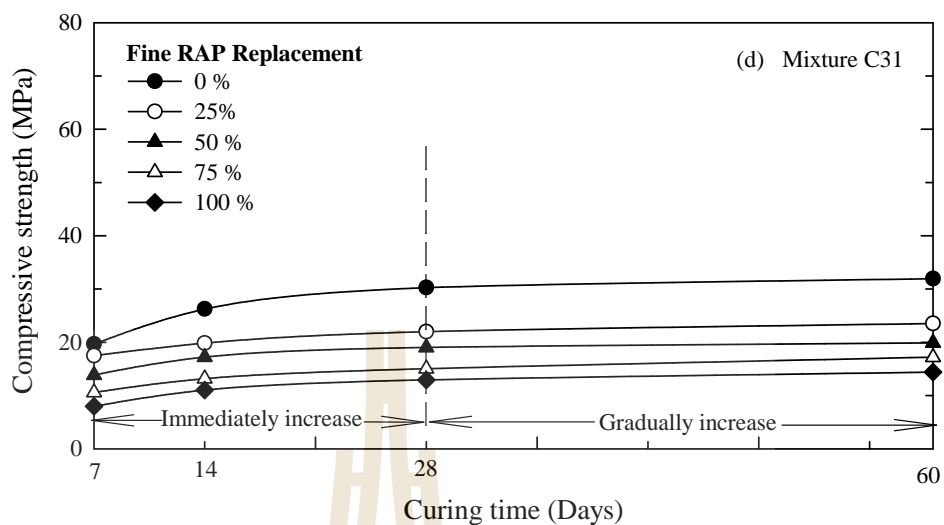
รูปที่ 4.14 ผลของการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่กำลังออกแบบต่าง ๆ (a) C18 (b) C21 (c) C24 (d) C31 (e) C35 (f) C38 (g) C41 และ (h) C44 (ต่อ)



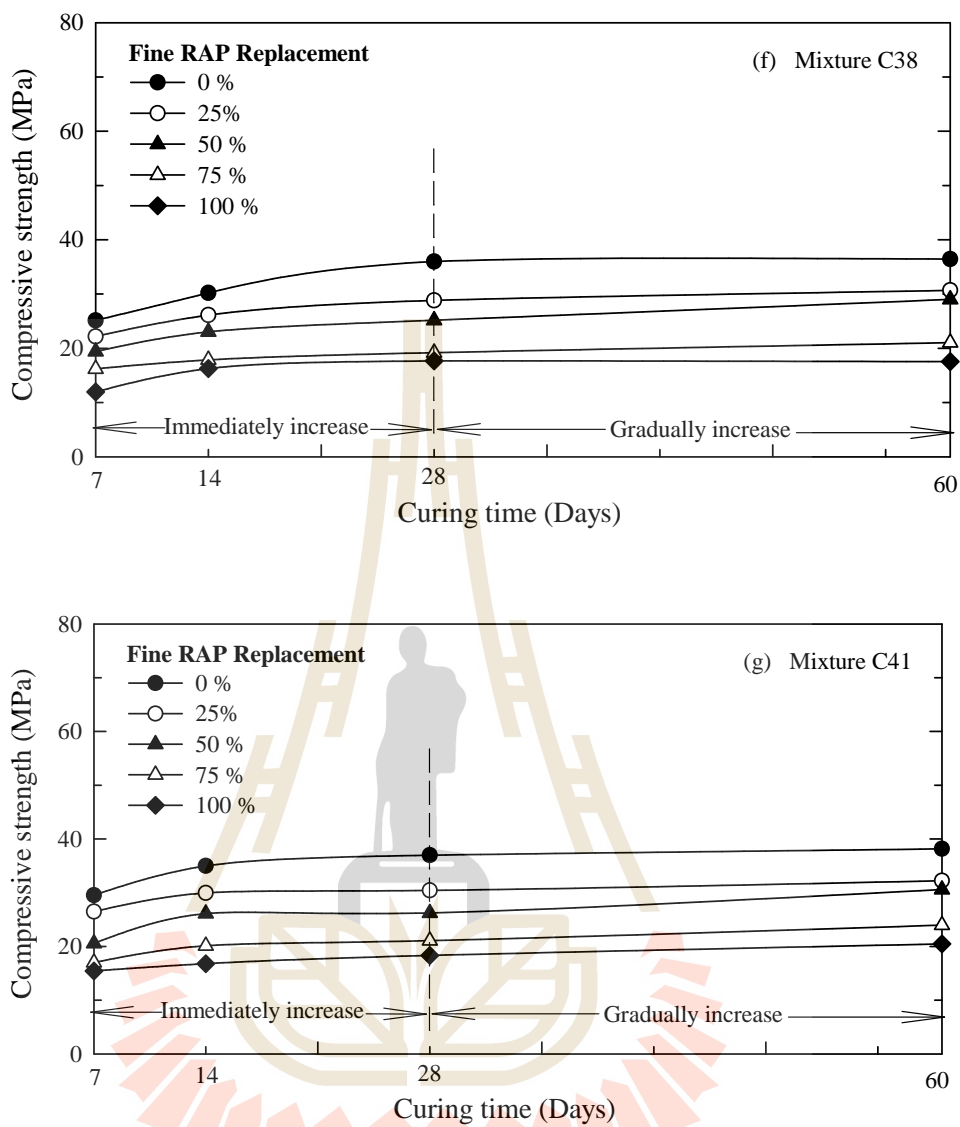
รูปที่ 4.15 ผลของการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่กำลังออกแบบต่าง ๆ (a) C18 (b) C21 (c) C24 (d) C31 (e) C35 (f) C38 (g) C41 และ (h) C44



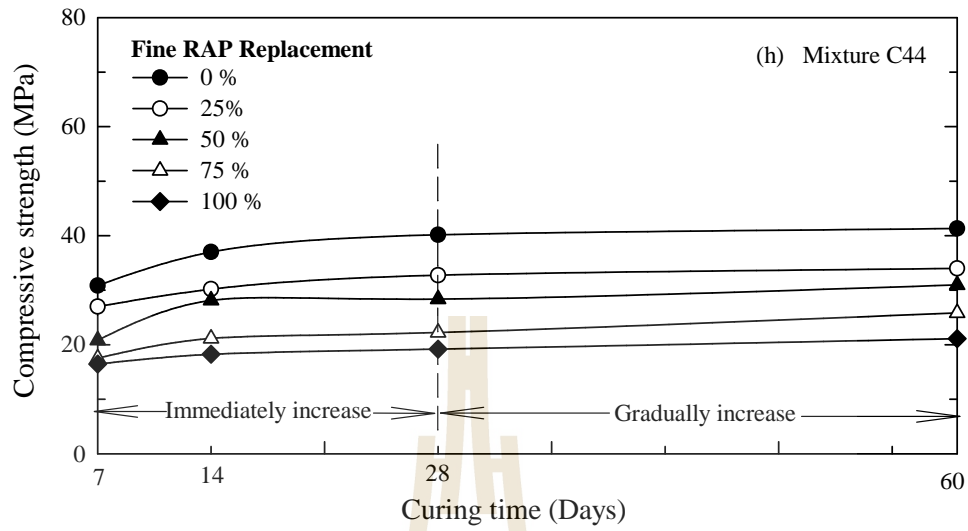
รูปที่ 4.15 ผลของการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่กำลังอบแบบต่าง ๆ (a) C18 (b) C21 (c) C24 (d) C31 (e) C35 (f) C38 (g) C41 และ (h) C44



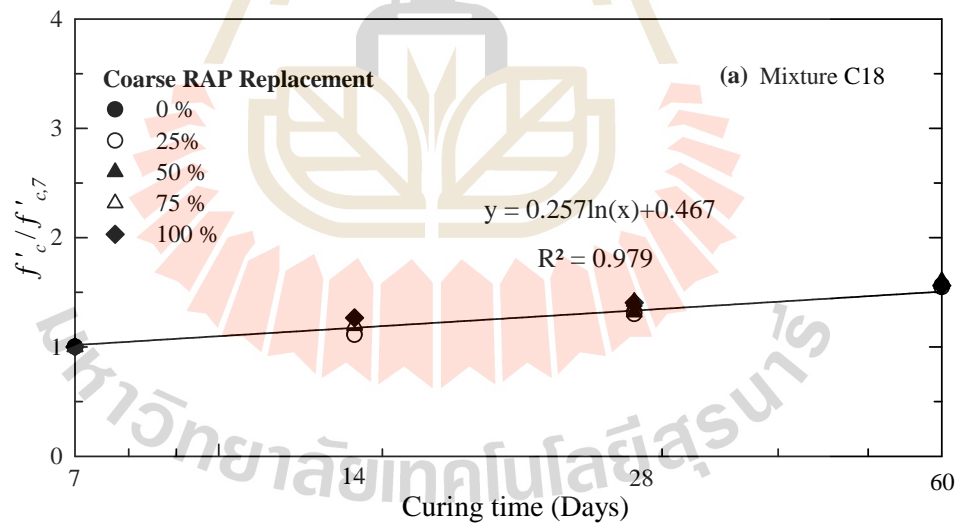
รูปที่ 4.15 ผลของการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่กำลั้งออกแบบต่าง ๆ (a) C18 (b) C21 (c) C24 (d) C31 (e) C35 (f) C38 (g) C41 และ (h) C44 (ต่อ)



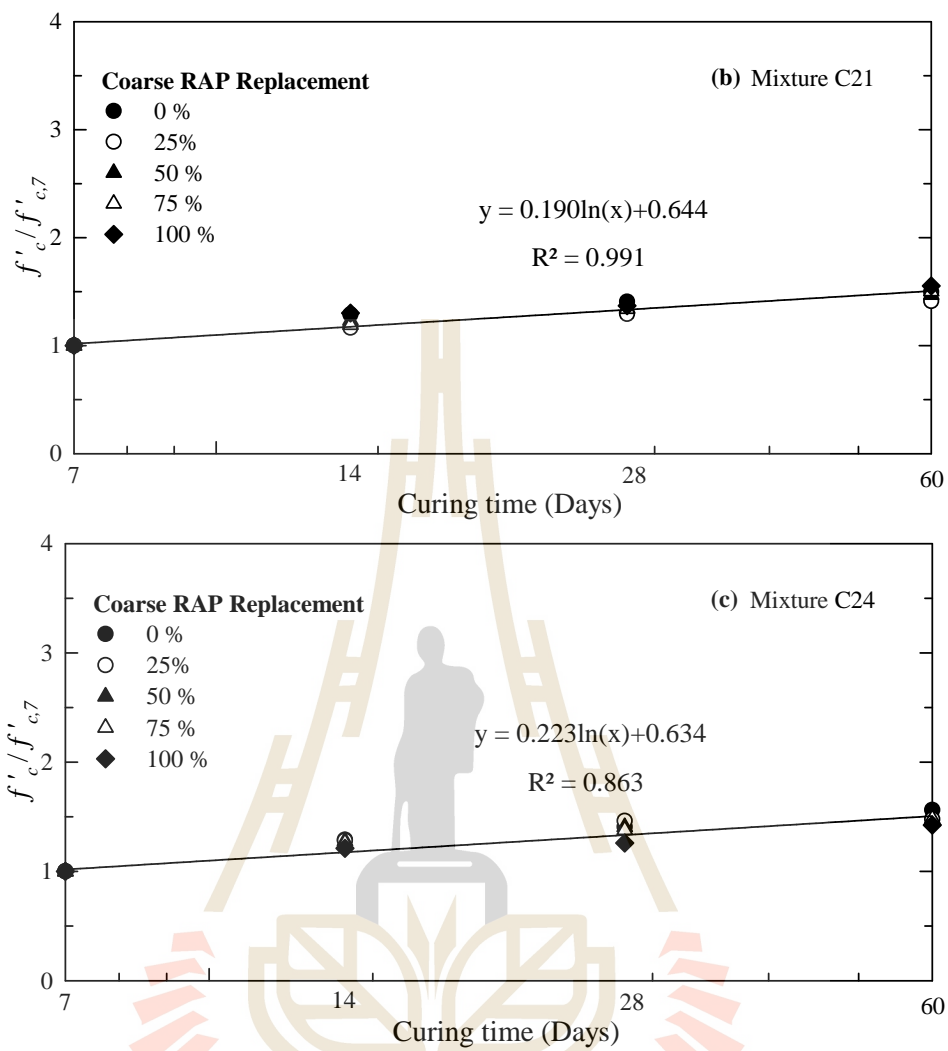
รูปที่ 4.15 ผลของการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่กำลั้งออกแบบต่าง ๆ (a) C18 (b) C21 (c) C24 (d) C31 (e) C35 (f) C38 (g) C41 และ (h) C44 (ต่อ)



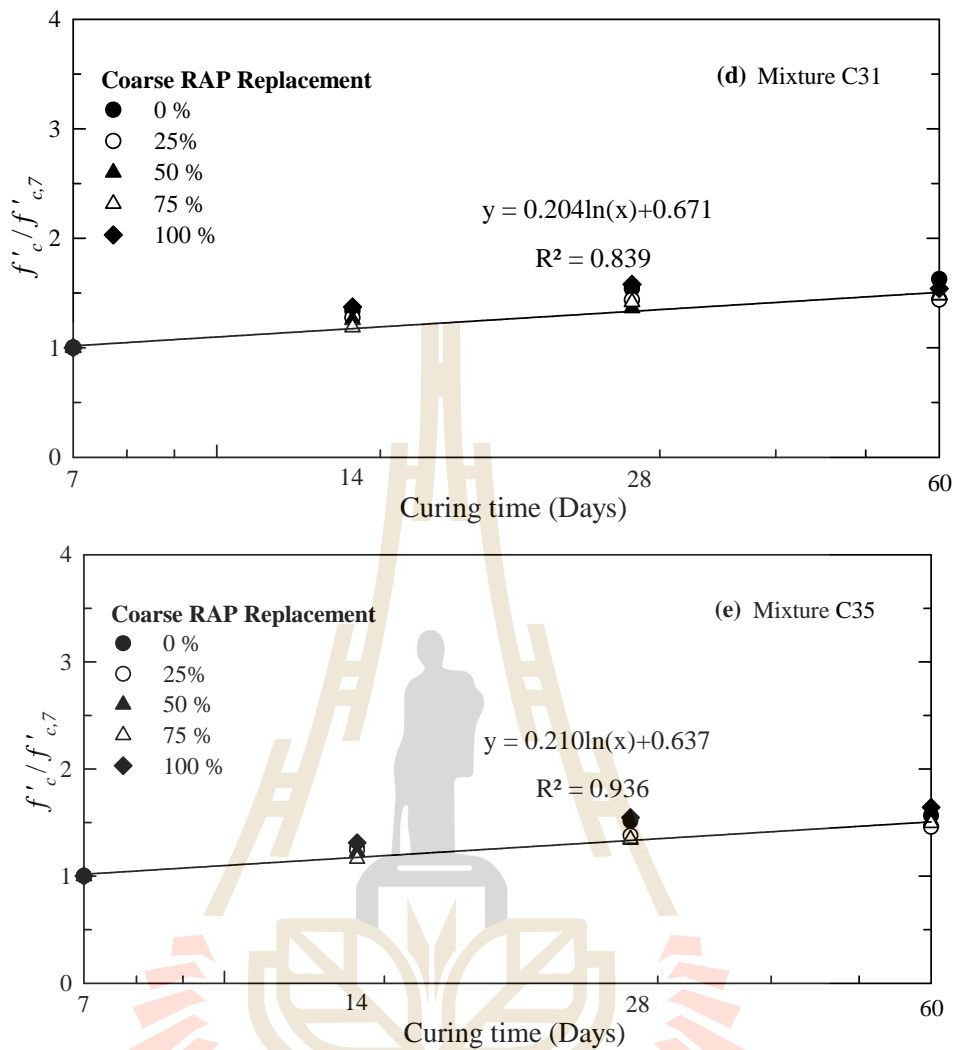
รูปที่ 4.15 ผลของการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่กำลังออกแบบต่าง ๆ (a) C18 (b) C21 (c) C24 (d) C31 (e) C35 (f) C38 (g) C41 และ (h) C44 (ต่อ)



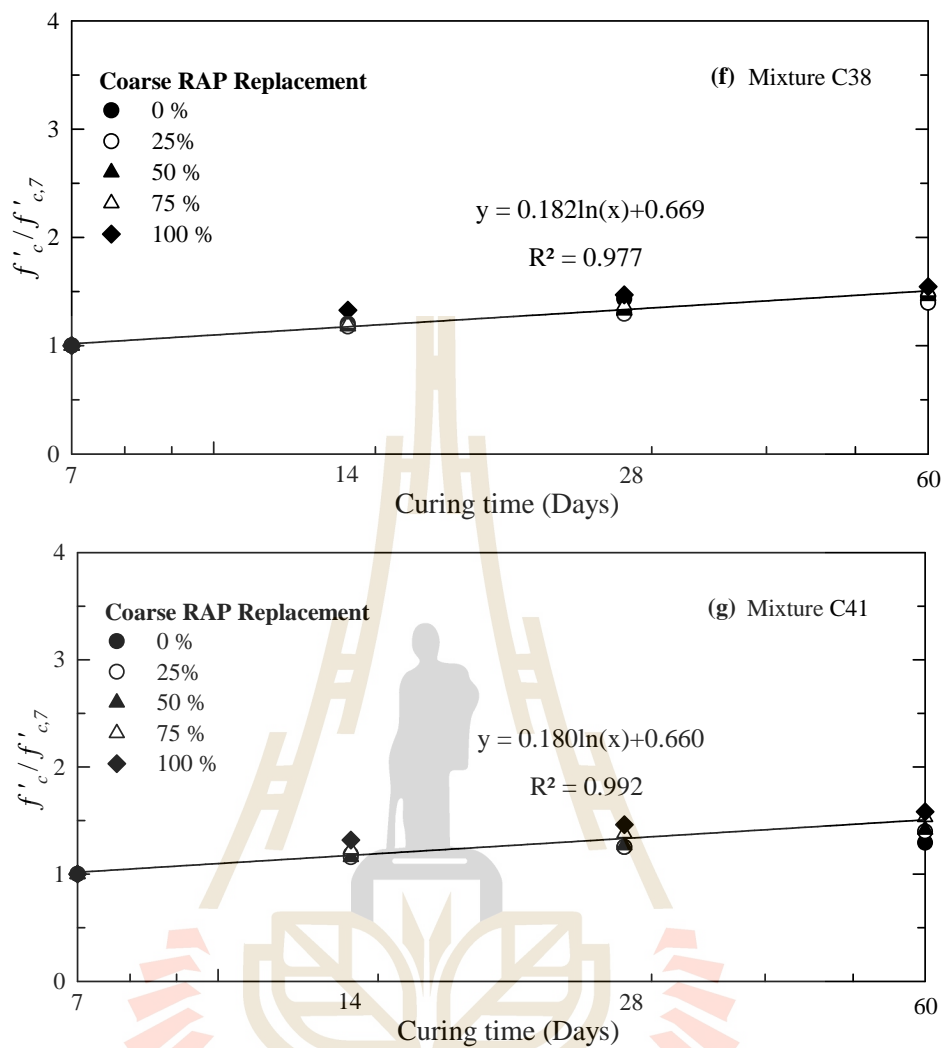
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ของคอนกรีตแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ระหว่างกำลังอัดต่อกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน



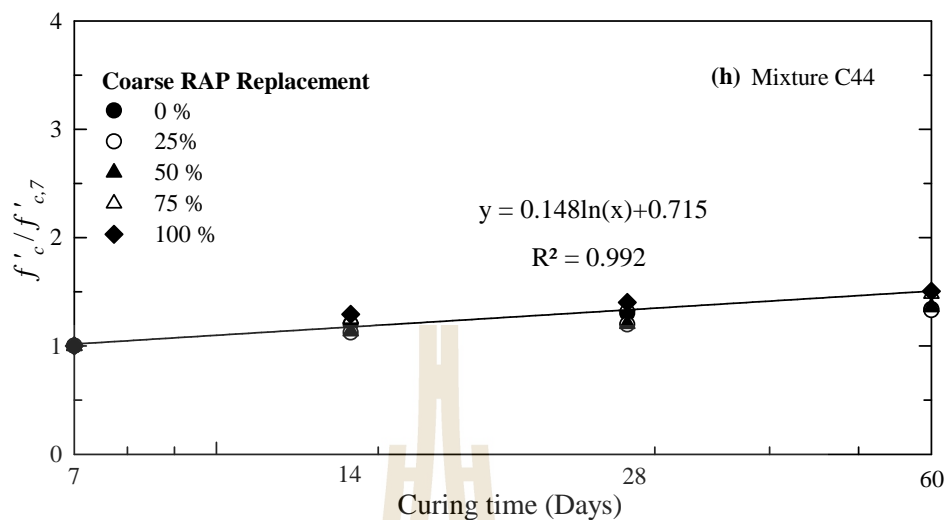
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ของคอนกรีตแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ระหว่างกำลังอัดต่อกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน (ต่อ)



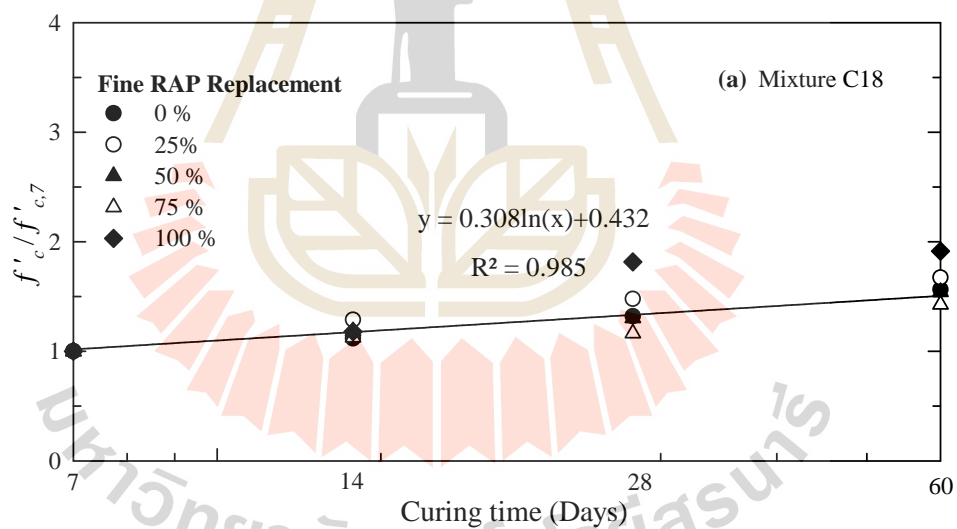
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ของคอนกรีตแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ระหว่างกำลังอัดต่อกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน (ต่อ)



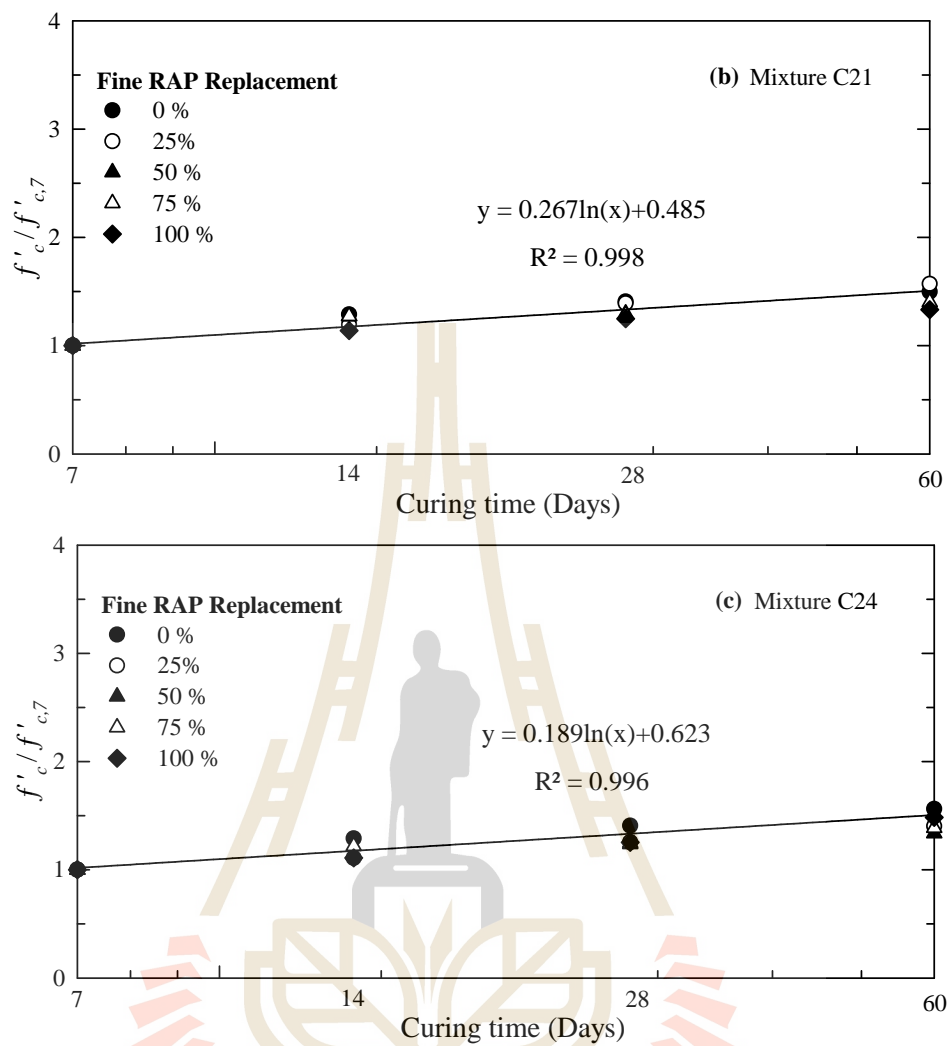
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ของคอนกรีตแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ระหว่างกำลังอัดต่อกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน (ต่อ)



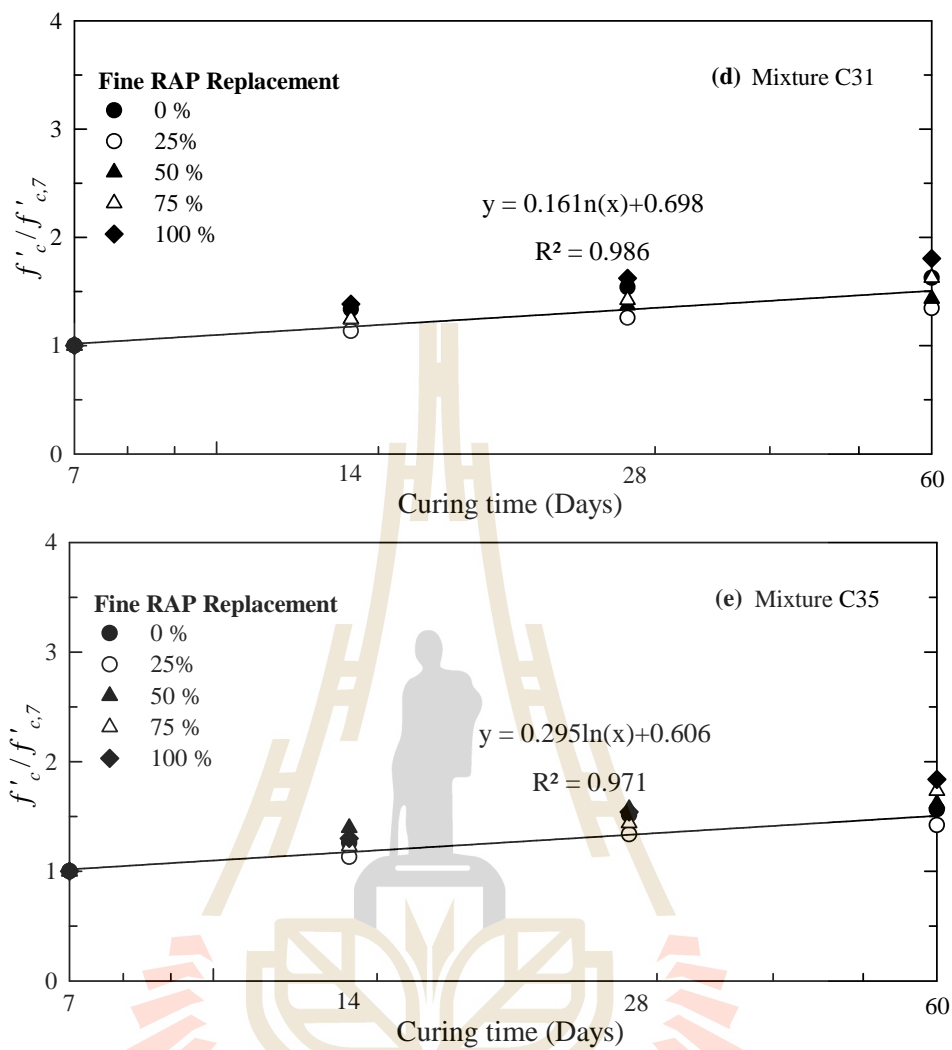
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ของคอนกรีตแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ระหว่างกำลังอัดต่อกำลังอัดที่อายุป้อม 7 วัน (ต่อ)



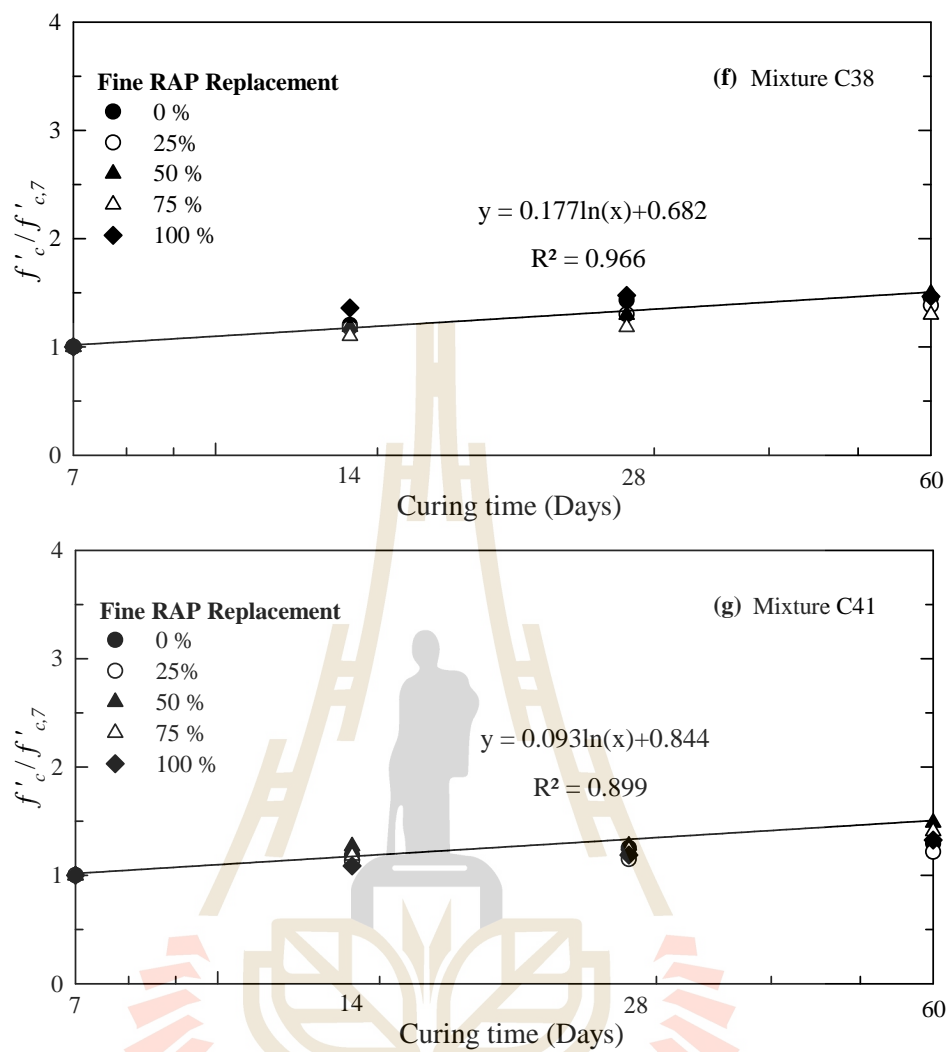
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ของคอนกรีตแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ระหว่างกำลังอัดต่อกำลังอัดที่อายุป้อม 7 วัน



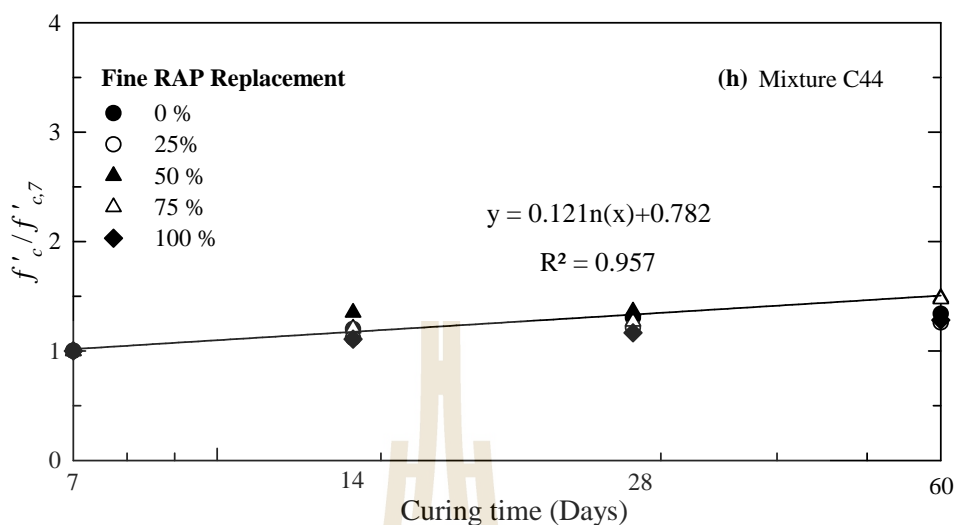
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ของคอนกรีตแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ระหว่างกำลังอัดต่อกำลังอัดที่อายุป่ม 7 วัน (ต่อ)



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ของคอนกรีตแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ระหว่างกำลังอัดต่อกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน (ต่อ)

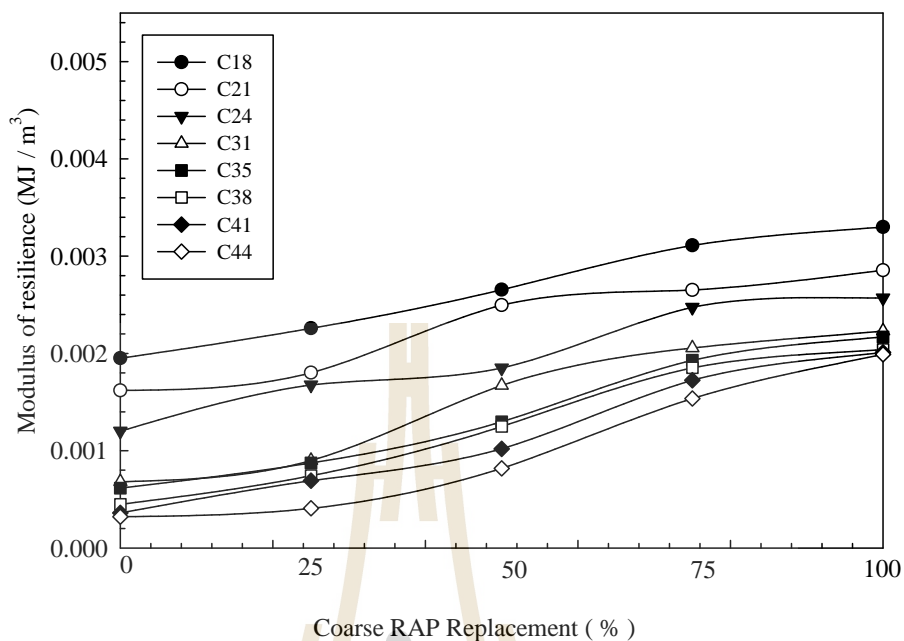


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ของคอนกรีตแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ระหว่างกำลังอัดต่อกำลังอัดที่อายุปม 7 วัน (ต่อ)

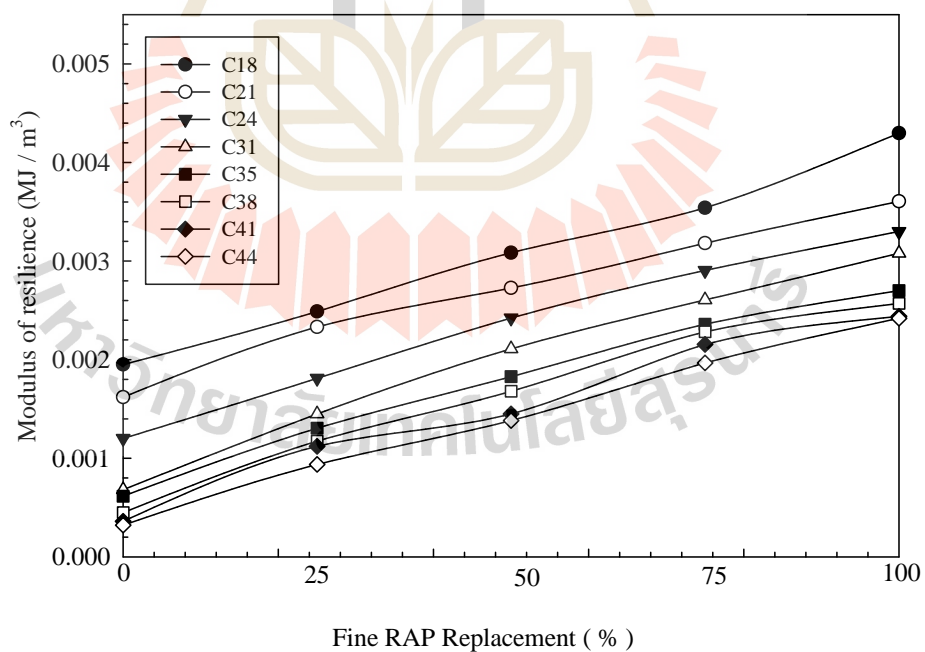


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ของคอนกรีตแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ระหว่างกำลังอัดต่อกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน (ต่อ)

รูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19 แสดงค่า Modulus of resilience ของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมด้วย RAP ร้อยละต่าง ๆ ค่า Modulus of resilience เป็นค่า Strain energy density ของวัสดุ เมื่อวัสดุมีค่าหน่วยแรงเท่ากับ Proportional limit พื้นที่ภายใต้ Stress-strain diagram ของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ร้อยละต่าง ๆ นี้จะบ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานโดยไม่มีการเสียรูปอย่างถาวร (Permanent Deformation) ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยการลากเส้นสัมผัสจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดที่มีความเค้นประมาณร้อยละ 40 ถึง 50 ของค่าความเค้นสูงสุดบนเส้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ซึ่งมาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. ได้ใช้ค่าโมดูลัสที่ได้จากวิธีนี้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแท้จริงในช่วงที่ใช้งาน เพราะเป็นค่าที่รวมผลเนื่องจากการล้าของคอนกรีตเรียบร้อยแล้ว จากการคำนวณโดยพื้นที่สามเหลี่ยมภายใต้ Stress-strain diagram ของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมธรรมชาติด้วย Coarse RAP และ Fine RAP ร้อยละต่าง ๆ มีค่า Modulus of resilience มากขึ้นตามร้อยละของการแทนที่ RAP เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมเนื่องจาก RAP นั้น มียางแอสฟัลต์เคลือบที่ผิวทำให้แรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพที่ผิวสัมผัสระหว่างมวลรวม RAP และซีเมนต์น้อยกว่ามวลรวมธรรมชาติจึงเป็นสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในช่วงที่ใช้งาน โมดูลัสของวัสดุผสมจึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ RAP ในส่วนผสม



รูปที่ 4.18 Modulus of resilience ของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ร้อยละต่าง ๆ



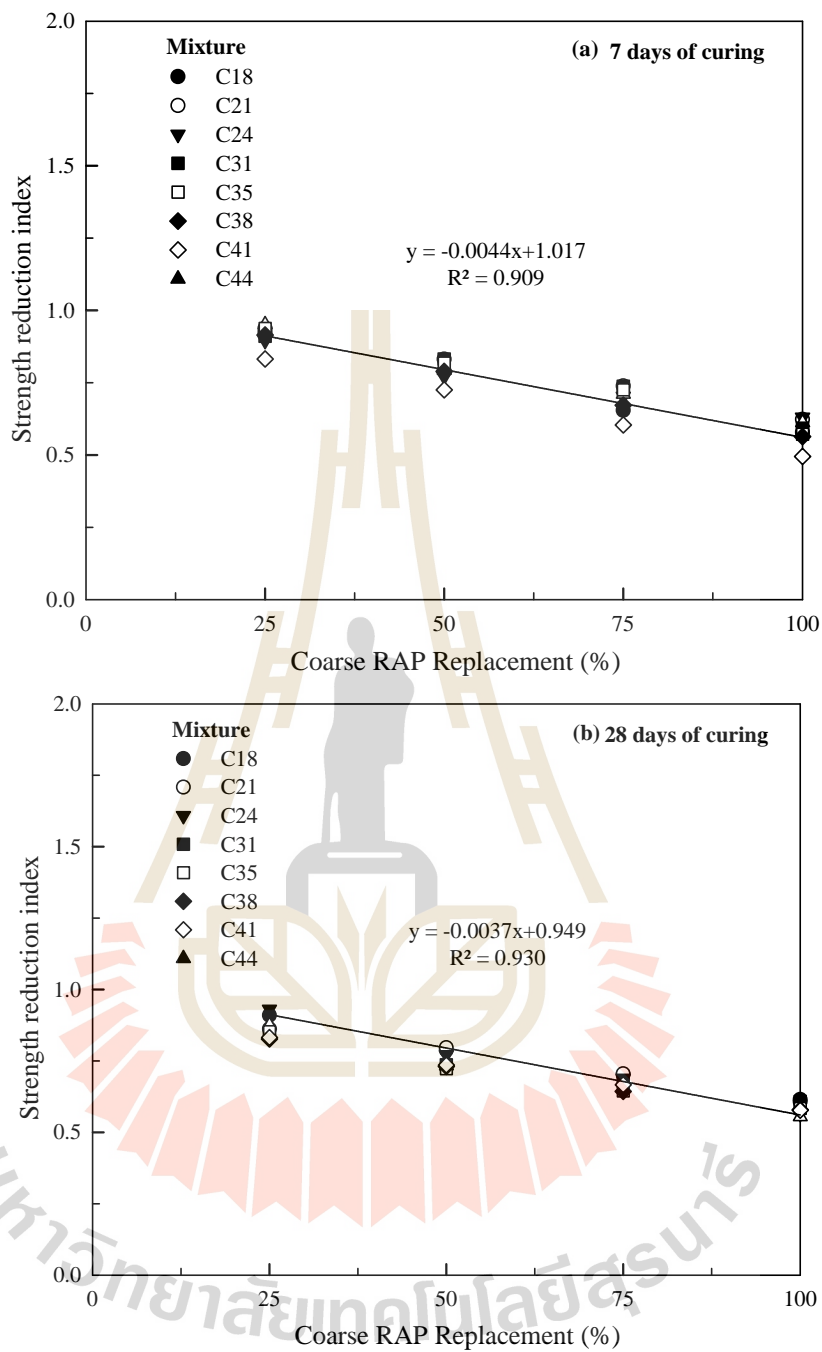
รูปที่ 4.19 Modulus of resilience ของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ร้อยละต่าง ๆ

4.4 แนวทางการทำนายกำลังอัดสำหรับคอนกรีตที่ใช้ RAP แทนที่มวลรวมธรรมชาติ

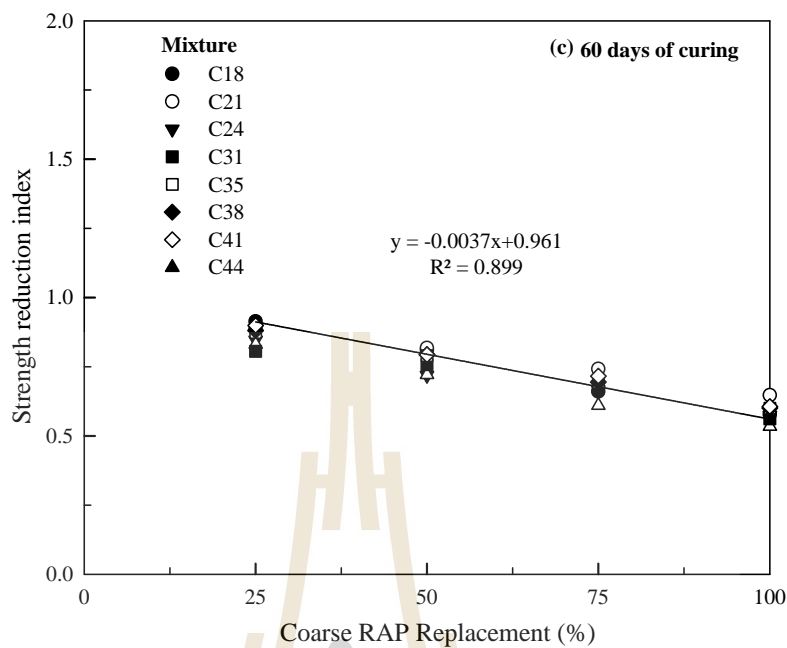
การออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตที่ตามมาตรฐาน ACI 211.1 (2009) จะพิจารณาขณะอายุบ่ม 28 วัน เมื่อปริมาณ RAP เพิ่มขึ้นในส่วนผสมส่งผลให้มีบริเวณพื้นผิวของ RAP สำหรับคอนกรีตที่ใช้ RAP แทนที่มวลรวมธรรมชาติซึ่งมียางแอสฟัลต์เคลือบอยู่บนผิวเพิ่มส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสที่ไม่แข็งแรง อย่างไรก็ตามก็ดีคอนกรีตที่มีส่วนผสมของยางแอสฟัลต์มีความสามารถที่ดีขึ้น ด้านความสามารถเทได้และความเหนียวซึ่งเหมาะสำหรับงานคอนกรีตบางประเภทที่ไม่ต้องการกำลังอัดที่สูงมากนักแต่ต้องการคอนกรีตที่มีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูง คอนกรีตที่ใช้มวลรวม RAP จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน เช่น งานผิวทางคอนกรีต เป็นต้นเมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ด้วย RAP ที่กำลังอัดต่าง ๆ ที่อายุบ่ม 28 วัน เทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 สำหรับการแทนที่มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดตามลำดับโดยที่ Strength reduction index คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ด้วย RAP ต่อกำลังอัดของคอนกรีตอ้างอิงที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ แนวโน้มของกำลังอัดที่ลดลงสามารถ Regression ได้โดยสมการเส้นตรงอย่างง่าย กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ RAP เป็นมวลรวมหยาบที่สัดส่วนต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากกำลังอัดของก้อนคอนกรีตที่ออกแบบตามมาตรฐาน ACI 211.1 (2009) และค่าคูณปรับลดค่า Strength reduction index ซึ่ง Regression ได้จากสมการเส้นตรงจากการ Regression ของผลการทดสอบในรูปที่ 4.20(b) และ 4.21(b) ที่อายุบ่ม 28 วัน

$$W_{CRAP} = -0.0037(CRAP) + 0.949 \quad (4.1)$$

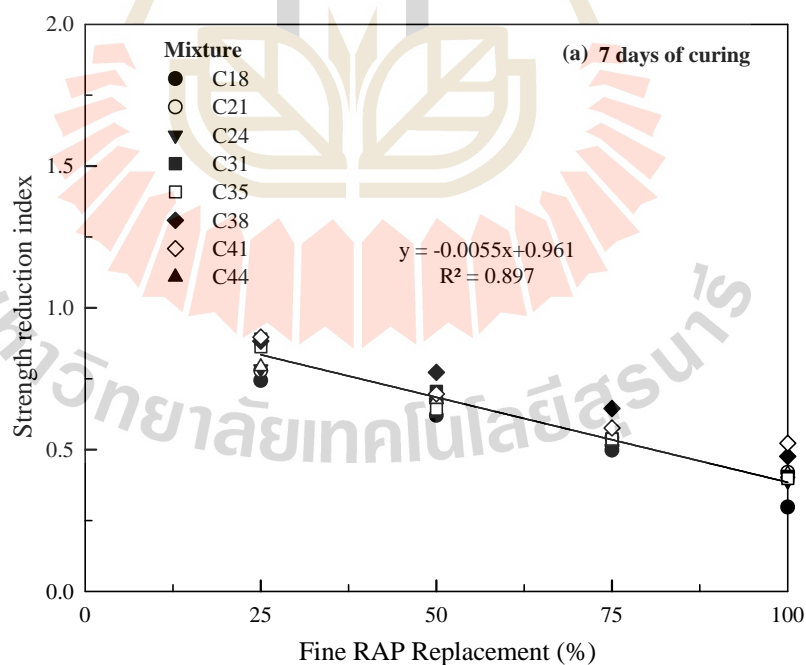
$$W_{FRAP} = -0.0048(FRAP) + 0.878 \quad (4.2)$$



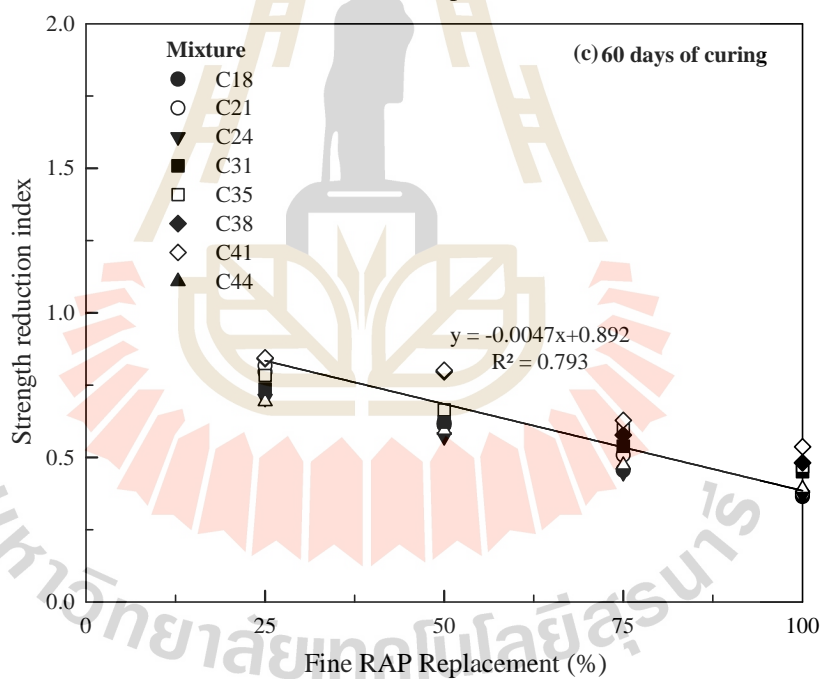
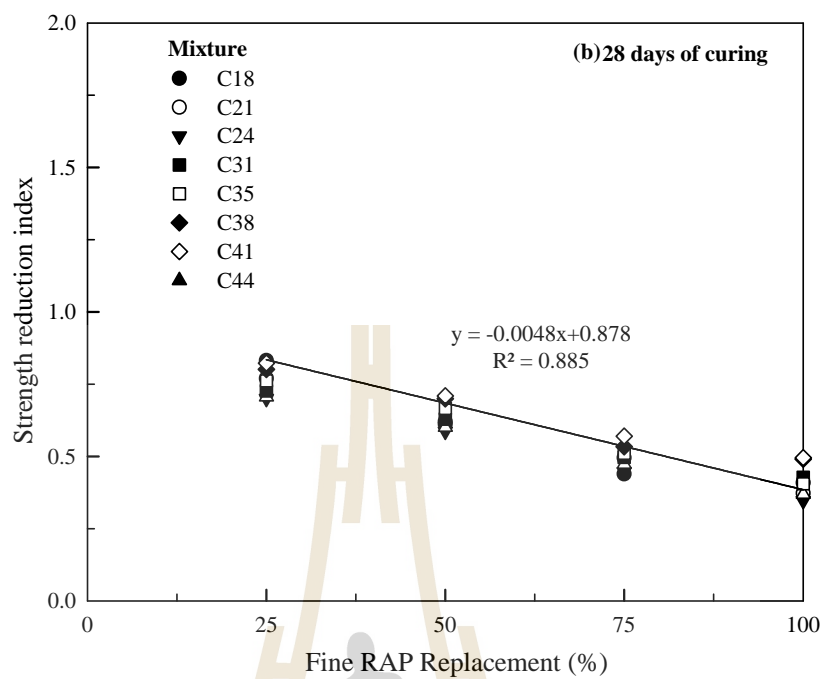
รูปที่ 4.20 กำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ที่อายุบ่ม 7 28 และ 60 วันเทียบกับคอนกรีตอ้างอิงที่ปริมาณ RAP ต่าง ๆ



รูปที่ 4.20 กำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ที่อายุบ่ม 7 28 และ 60 วันเทียบกับคอนกรีตอ้างอิงที่ปริมาณ RAP ต่าง ๆ (ต่อ)



รูปที่ 4.21 กำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ที่อายุบ่ม 7 28 และ 60 วันเทียบกับคอนกรีตอ้างอิงที่ปริมาณ RAP ต่าง ๆ



รูปที่ 4.21 กำลังอัดของคอนกรีตแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน เทียบกับคอนกรีตอ้างอิงที่ปริมาณ RAP ต่าง ๆ (ต่อ)

กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่มี Coarse RAP แทนที่มวลรวมหยาบที่อายุ 28 วันสามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$f'_{c,CRAP} = W_{CRAP} f'_{c,ACI} \quad (4.3)$$

$$f'_{c,CRAP} = [-0.0037(CRAP) + 0.9498] f'_{c,ACI} \quad (4.4)$$

เมื่อ	W_{CRAP}	คือ	ตัวคูณลดกำลังของคอนกรีตที่มีมวลรวม Coarse RAP แทนที่มวลรวมหยาบ (Strength reduction factor for Coarse RAP)
	$CRAP$	คือ	ปริมาณมวลรวม Coarse RAP แทนที่มวลรวมหยาบ (%)
	$f'_{c,ACI}$	คือ	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตอ้างอิงที่อายุ 28 วัน
	$f'_{c,CRAP}$	คือ	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่แทนที่ด้วย Coarse RAP ที่อายุบ่ม 28 วัน

ดังนั้น ในขั้นตอนการคำนวณออกแบบหาค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่แทนที่ด้วย RAP ที่อายุ 28 วันเพื่อให้ได้กำลังอัดที่ต้องการจะใช้การออกแบบสัดส่วนผสมได้ตามวิธีของ ACI 211.1 (2009) โดยเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตเป้าหมายขึ้นตามสมการคำนวณดังนี้

$$f'_{c,ACI} = \frac{f'_{c,CRAP}}{[-0.0037(CRAP) + 0.9498]} \quad (4.5)$$

ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการคอนกรีตที่ใช้ RAP แทนที่มวลรวมหยาบร้อยละ 25 เท่ากับ 24 เมกะปาสกาล ต้องเลือกกำลังอัดเป้าหมายตามวิธีของ ACI 211.1 (2009) เท่าไรเมื่อแทนที่ Coarse RAP แทนที่มวลรวมหยาบร้อยละ 25 กำลังอัดเป้าหมายตามวิธีของ ACI 211.1 ($f'_{c,ACI}$)

$$f'_{c,ACI} = \frac{f'_{c,CRAP}}{[-0.0037(CRAP) + 0.9498]} = \frac{24}{[-0.0037(25) + 0.9498]} = 28 \text{ เมกะปาสกาล}$$

ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่มี Fine RAP แทนที่มวลรวมหยาบที่อายุ 28 วันสามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$f'_{c,FRAP} = W_{FRAP} f'_{c,ACI} \quad (4.6)$$

$$f'_{c,FRAP} = [-0.0048(FRAP) + 0.878 f'_{c,ACI}] \quad (4.7)$$

เมื่อ	W_{FRAP}	คือ	ตัวคูณลดกำลังของคอนกรีตที่มีมวลรวม Fine RAP แทนที่มวลรวมละเอียด (strength reduction factor for Fine RAP)
	$FRAP$	คือ	ปริมาณ Fine RAP แทนที่มวลรวมละเอียด (%)
	$f'_{c,ACI}$	คือ	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน
	$f'_{c,FRAP}$	คือ	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่มี Fine RAP แทนที่มวลรวมละเอียดที่อายุ 28 วัน

สมการที่ 4.8 ใช้สำหรับการคำนวณหาค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ($f'_{c,FRAP}$) ที่ปรับค่ากำลังอัดแล้วเพื่อให้ได้กำลังอัดที่ต้องการสำหรับการใช้งานคอนกรีตที่ใช้ Fine RAP

$$f'_{c,ACI} = \frac{f'_{c,FRAP}}{[-0.0048(FRAP) + 0.878]} \quad (4.8)$$

ตารางที่ 4.4 ถึง 4.6 แสดงผลการเปรียบเทียบผลทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าจากผลทดสอบกำลังอัดของแร่ย่อยละการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ที่อายุ 7 28 และ 60 วัน

ตารางที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบค่าทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าทดสอบกำลังอัดของแร่ย่อยละการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ที่อายุบ่ม 7 วัน

No.	Design strength	Coarse RAP (%)	$f'_{c,predict}$	$f'_{c,test}$	Error %
1	C28-CR25	25	16.73	17.35	-3.58
2	C28-CR50	50	14.70	14.46	1.63
3	C28-CR75	75	12.67	12.96	-2.20
4	C28-CR100	100	10.65	11.16	-4.57

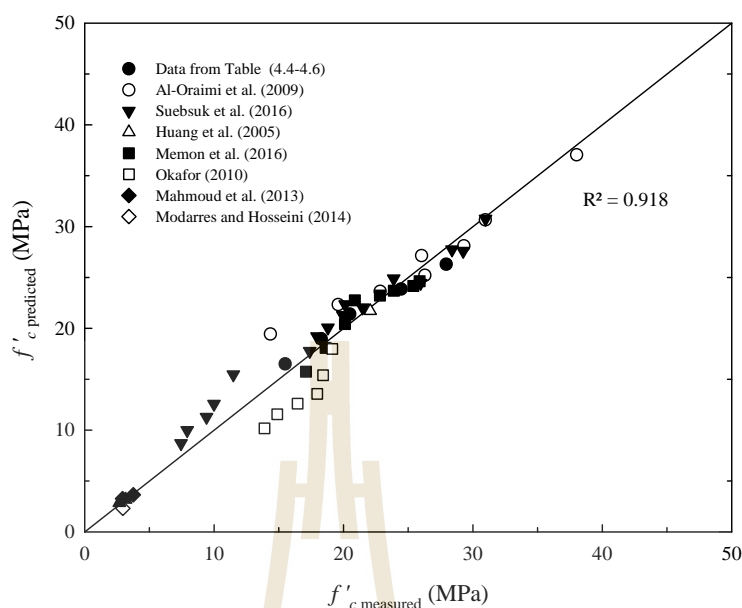
ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบค่าทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าทดสอบกำลังอัด
ของแร่ร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ที่อายุบ่ม 28 วัน

No.	Design strength	Coarse RAP (%)	$f'_{c,predict}$	$f'_{c,test}$	Error %
1	C28-CR25	25	24.00	24.45	-1.84
2	C28-CR50	50	21.41	20.49	4.50
3	C28-CR75	75	18.82	18.29	2.94
4	C28-CR100	100	16.23	15.50	4.77

ตารางที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบค่าทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าทดสอบกำลังอัด
ของแร่ร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP ที่อายุบ่ม 60 วัน

No.	Design strength	Coarse RAP (%)	$f'_{c,predict}$	$f'_{c,test}$	Error %
1	C28-CR25	25	24.56	24.99	-1.72
2	C28-CR50	50	21.97	21.70	1.27
3	C28-CR75	75	19.38	18.36	5.58
4	C28-CR100	100	16.79	16.06	4.52

นอกจากนี้สมการคำนวณค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่มี RAP แทนที่มวลรวมหยาบที่อายุ 28 วัน ถูกนำมาตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบผลทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าทดสอบกำลังอัดจากห้องปฏิบัติการของแร่ร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP จากงานวิจัยในอดีต ผลการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณจากสมการและผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.22 เปรียบเทียบจากการเปรียบเทียบพบว่าสมการทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของมวลรวม RAP เป็นมวลรวมหยาบนั้นสามารถยอมรับได้ในทางวิศวกรรมโดยมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ($R^2 = 0.918$)



รูปที่ 4.22 ผลการเปรียบเทียบค่าทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าทดสอบกำลังอัดจากห้องปฏิบัติการของแร่ร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบด้วย Coarse RAP จากงานวิจัยในอดีต

ตารางที่ 4.7 ถึง 4.9 แสดงผลการเปรียบเทียบผลทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าจากการทดสอบกำลังอัดของแร่ร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ที่อายุ 7 28 และ 60 วัน โดยเลือกกำลังอัดออกแบบตามวิธีของ ACI 211.1 (2009) เท่ากับ 28 เมกะปาสกาล

สมการที่ 4.7 ถูกนำมาตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบผลทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าทดสอบกำลังอัดจากห้องปฏิบัติการของแร่ร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP จากงานวิจัยในอดีตผลการเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 4.10 ซึ่งพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของสมการเมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยในอดีตประมาณร้อยละ 10 ถึง 24

ตารางที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบค่าทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าทดสอบกำลังอัดของแร่ร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ที่อายุป่ม 7 วัน

No.	Design strength	Fine RAP (%)	$f'_{c,predict}$	$f'_{c,test}$	Error %
1	C28-FR25	25	15.19	14.45	5.11
2	C28-FR50	50	12.66	12.33	2.64
3	C28-FR75	75	10.12	9.59	5.55
4	C28-FR100	100	7.59	7.56	0.38

ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบค่าทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าทดสอบกำลังอัด
ของแร่ร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ที่อายุป่ม 28 วัน

No.	Design strength	Fine RAP (%)	$f'_{c,predict}$	$f'_{c,test}$	Error %
1	C28-FR25	25	21.22	19.71	7.68
2	C28-FR50	50	17.86	16.79	6.40
3	C28-FR75	75	14.50	13.21	9.80
4	C28-FR100	100	11.14	10.31	8.09

ตารางที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบค่าทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าทดสอบกำลังอัด
ของแร่ร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP ที่อายุป่ม 60 วัน

No.	Design strength	Fine RAP (%)	$f'_{c,predict}$	$f'_{c,test}$	Error %
1	C28-FR25	25	21.69	20.85	4.05
2	C28-FR50	50	18.40	17.86	3.05
3	C28-FR75	75	15.11	14.21	6.36
4	C28-FR100	100	11.82	11.80	0.21

ตารางที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบค่าทำนายกำลังอัดของคอนกรีตและค่าทดสอบกำลังอัดจากห้อง
ปฏิบัติการของแร่ร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย Fine RAP จากงานวิจัย
ในอดีต

จากงานวิจัย	ร้อยละการแทนที่ Fine RAP	$f'_{c,predict}$ (MPa)	$f'_{c,test}$ (สมการที่ 4.7) (MPa)	ค่าความคลาด เคลื่อน (%)
Huang et al. (2005)	0	37.70	33.36	-11.50
	100	18.80	15.12	-19.55
Bida et al. (2013)	0	27.55	24.58	-10.77
	20	25.52	21.90	-14.20
	40	25.29	19.21	-24.05
	60	18.06	16.52	-8.53
	80	14.90	13.83	-7.17
	100	10.95	11.14	1.77

4.5 สรุปผลการทดสอบ

ผลทดสอบในการแทนที่มวลรวมธรรมชาติด้วยผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลส่งผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการแทนที่ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลทั้ง Coarse RAP และ Fine RAP ทุกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เมื่อเทียบกับคอนกรีตอ้างอิงโดยผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

(1) กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงประมาณระหว่างร้อยละ 12 ถึง 41 สำหรับการแทนที่ Coarse RAP และกำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงประมาณระหว่างร้อยละ 20 ถึง 60 สำหรับการแทนที่ Fine RAP

(2) การลดลงของค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ Fine RAP แทนที่มวลรวมละเอียดธรรมชาติมีค่ามากกว่าการใช้ Coarse RAP แทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติ

(3) การลดลงของค่ากำลังอัดที่เป็นผลโดยตรงจากการยึดเหนี่ยววัสดุประสานกับมวลรวมที่ลดลงเนื่องจากปริมาณแอสฟัลต์ที่บริเวณพื้นผิวของ Fine RAP มีปริมาณมากกว่าแอสฟัลต์ Coarse RAP และการลดลงของผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณแอสฟัลต์ในระบบ

(4) ผลของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมด้วย RAP ค่า Modulus of resilience มีค่าเพิ่มขึ้นตามร้อยละของการแทนที่ของ RAP

(5) สมการทำนายกำลังอัดของคอนกรีตมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามมาตรฐาน ACI และสามารถนำไปใช้ทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมธรรมชาติด้วย Coarse RAP และ Fine RAP ในทางปฏิบัติ

4.6 รายการอ้างอิง

มอก.15 เล่ม 1 -2547.(2555). พระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ.2551.

มาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : เล่ม 129 ตอนพิเศษ 108.

ACI. (2009). **Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete.** ACI 211.1-91, ACI Committee211.

Abrams, D.A. (1918). **Design of Concrete Mixtures.** Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago. Bulletin 1: 20p.

Al-Oraimi, S., Hossam, F., and Hago, H. A. (2009). **Recycling of reclaimed asphalt pavement in Portland cement concrete.** Journal of Engineering Research, 6(1), 37–45.

- ASTM (2014). **Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the los angeles machine.** ASTM C131 / C131M-14, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2014). **Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates.** ASTM C136/C136M-14, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2015). **Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate.** ASTM C127-15, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2015). **Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate.** ASTM C128-15, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2015). **Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete.** ASTM C143/C143M-15a, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2015). **Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement.** ASTM C188-95, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2016). **Standard test method for bulk density (unit weight) and voids in aggregate.** ASTM C29-16, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2016). **Standard practice for making and curing concrete test specimens in the field.** ASTM C31-16, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2016). **Standard specification for concrete aggregates** american society for testing and materials. ASTM C33/C33M-16e1, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2016). **Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.** ASTM C39 / C39M-16, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.

- ASTM (2016). **Standard specification for sheet materials for curing concrete.** american society for testing and materials. ASTM C171-16, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2016). **Standard specification for chemical admixtures for concrete.** ASTM C494-16, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- Bida, S. M., Danraka M., Ma'ali J. M. (2013). **Performance of reclaimed asphalt pavement (RAP) as a replacement of fine aggregate in concrete.** International Journal of Science and Research (IJSR), ISSN (Online), 65-67.
- Chaidachatorn, K. Suebsuk, J. Horpibulsuk, S. Arulrajah, A. (2019) **Extended water/cement ratio law for cement mortar containing recycled asphalt pavement.** Construction and Building Materials, 196, 457-467.
- Hassan, K.E., Brooks, J.J, and Erdman, M. (2000). **The use of reclaimed asphalt pavement (RAP) aggregates in concrete.** Waste Materials in Construction Wascon 2000 Proceedings of the International Conference on the Science and Engineering of Recycling for Environmental Protection, Harrogate, England 31 May, 1–2 June 2000, 1: 121-128.
- Huang, B., Shu, X., and Li, G. (2005). **Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavements.** Cement and Concrete Research, 35(10), 2008-2013.
- Mahmoud E., Ibrahim A., El-Chabib H. and Patibandla V.C (2013). **Self-consolidating concrete incorporating high volume of fly ash, slag, and recycled asphalt pavement.** International Journal of Concrete Structures and Materials, 7(2), 155-163.
- Memon N. A., Hassan D., Pathan A. (2016). **Rigid pavement design using recycled asphaltic materials.** Sindh Univ. Res. Jour. (Sci. Ser.), 48(2), 399-406.
- Modarres A. and Hosseini Z. (2014). **Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material.** Materials & Design, 64, 227-236.
- Okafor, F. O. (2010). **Performance of Recycled Asphalt Pavement as Coarse Aggregate in Concrete.** Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 47-58.

- Qiang, W., Peiyu, Y., Ruhan, A., Jinbo., Y., and Xiangming, K. (2011). **Strength Mechanism of Cement-Asphalt Mortar**. Journal of Materials in Civil Engineering, 23(9), 1353-1359.
- Suebsuk, J., Horpibulsuk, S., Suksan, A., Suksiripattanapong, C., Phoo-ngernkham, T., and Arulrajah, A. (2017). **Strength prediction of cement-stabilised reclaimed asphalt pavement and lateritic soil blends**. International Journal of Pavement Engineering 332-338.
- Suebsuk, J., Suksan, A., and Horpibulsuk, S. (2014). **Strength assessment of cement treated soil/reclaimed asphalt pavement (RAP) mixture**. International Journal of GEOMATE, 6(2), 878-884.



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้ RAP แทนที่มวลรวมภายใต้ปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัดได้แก่ อัตราส่วนการแทนที่ RAP อัตราส่วนอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และระยะเวลาการบ่มการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ถูกตรวจสอบโดยการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) นอกจากนี้จะศึกษาอิทธิพลของการแทนที่ RAP ในมวลรวมสำหรับงานคอนกรีตเพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตตามที่กำหนดโดยจะนำเสนอการพัฒนาวิธีออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ RAP เป็นส่วนผสมในมวลรวมซึ่งปรับปรุงจากวิธี ACI 211.1 (2009) งานวิจัยทั้ง 2 ส่วน สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 อิทธิพลการแทนที่ RAP ในมวลรวมละเอียดธรรมชาติต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัด และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์

จากผลการทดสอบยืนยันได้ว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ อัตราส่วนการแทนที่ RAP ในมวลรวมธรรมชาติ และอายุบ่ม RAP มีการดูดซึมน้ำมากกว่าทรายธรรมชาติที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง อัตราการดูดซึมน้ำช้ากว่าทรายธรรมชาติ การเติมน้ำเพื่อชดเชยการดูดซึมน้ำที่สถานะอิ่มตัวผิวแห้งทำให้เกิดน้ำอิสระซึ่งทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์สมบูรณ์มากขึ้นสำหรับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำและแทนที่ RAP ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 25 ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงจะมีปริมาณน้ำ ที่มากเกินไป การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำลดลง น้ำอิสระที่ไม่มีการดูดซึมหลังจากที่ซีเมนต์มอร์ตาร์แข็งตัวแล้วส่งผลให้เกิดความพรุนและกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ลดลง สมการทำนายกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ตามกฎของ Abrams ที่ปรับปรุงแล้วสามารถนำไปใช้กับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แทนที่ปริมาณ RAP ต่าง ๆ และมวลรวมที่แตกต่างกันได้ ข้อมูลกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แทนที่ RAP จากแหล่งต่าง ๆ นั้น จำเป็นต่อการปรับเปลี่ยนค่าคงที่ของสมการที่เสนอ

5.1.2 อิทธิพลการแทนที่ RAP ในมวลรวมธรรมชาติต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของคอนกรีต

การแทนที่มวลรวมธรรมชาติด้วย RAP ส่งผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการแทนที่ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลทั้ง Coarse RAP และ Fine RAP ในทุกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เมื่อเทียบกับคอนกรีตอ้างอิง กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงประมาณระหว่างร้อยละ 12 ถึง 41 สำหรับการแทนที่ Coarse RAP และกำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงประมาณระหว่างร้อยละ 20 ถึง 60 สำหรับการแทนที่ Fine RAP การลดลงของค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ Fine RAP แทนที่มวลรวมละเอียดธรรมชาติมีค่ามากกว่าการใช้ Coarse RAP การลดลงของค่ากำลังอัดเป็นผลโดยตรงจากการลดลงของแรงยึดเหนี่ยววัสดุประสานกับมวลรวมที่ลดลง เนื่องจากปริมาณแอสฟัลต์ที่บริเวณพื้นผิวของ Fine RAP มีปริมาณมากกว่า แอสฟัลต์ Coarse RAP ตลอดจนการลดลงของผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณแอสฟัลต์ในระบบคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมด้วย RAP มีค่า Modulus of resilience มากขึ้นตามร้อยละของการแทนที่ RAP สมการทำนายกำลังอัดของคอนกรีตที่นำเสนอมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามมาตรฐาน ACI และสามารถนำไปใช้ทำนายออกแบบค่ากำลังอัดของคอนกรีตจากหลายที่ใช้มวลรวมธรรมชาติแทนที่ด้วย Coarse RAP และ Fine RAP

5.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อไป

สมการทำนายกำลังอัดประลัยที่อายุบ่ม 28 วัน ของคอนกรีตที่มีมวลรวม RAP แทนที่มวลรวมธรรมชาติสำหรับการออกแบบปฏิกภาคส่วนผสมตามวิธี ACI 211.1 (2009) นั้นเป็นแนวทางการเลือกใช้มวลรวม RAP แบบ Coarse RAP หรือ Fine RAP สมการยังไม่รองรับการใช้ RAP แทนที่มวลรวมธรรมชาติทั้ง 2 ประเภท พร้อมกัน

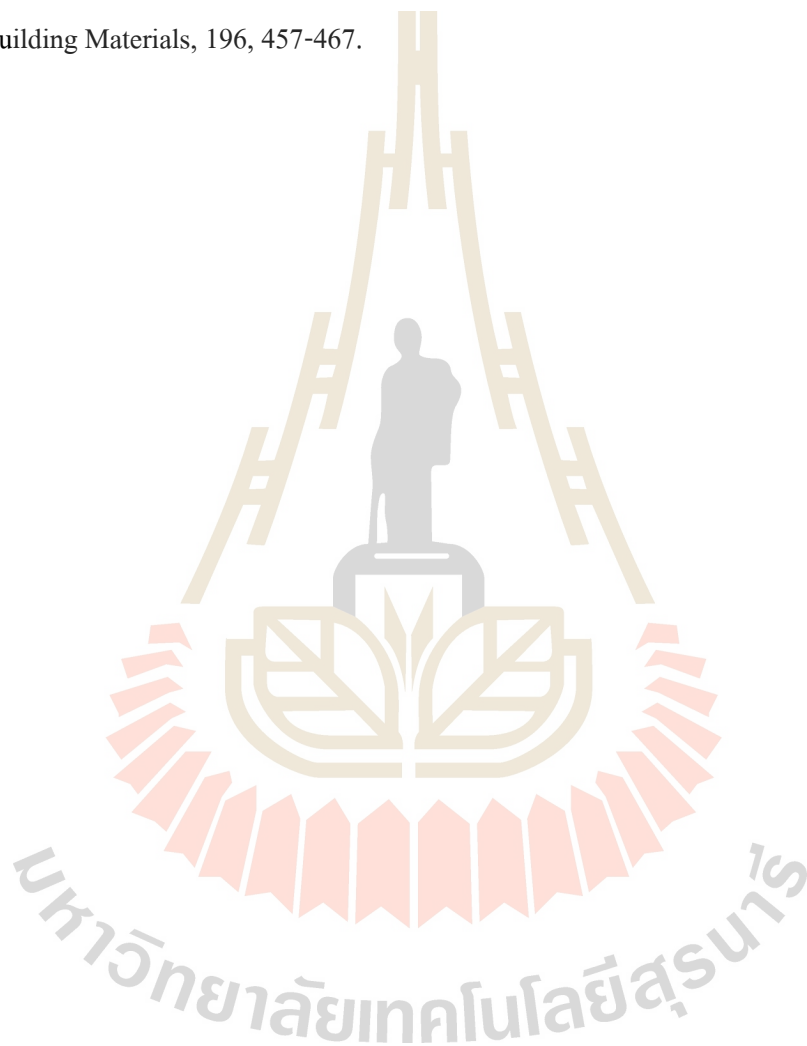


ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Chaidachatorn, K. Suebsuk, J. Horpibulsuk, S. Arulrajah, A. (2019) **Exteded water/cement ratio law for cement mortar containing recycled asphalt pavement.** Construction and Building Materials, 196, 457-467.



ประวัติผู้เขียน

นายคมกร ไชยเดชาธร เกิดเมื่อวันที่ 15 พฤศจิกายน พ.ศ. 2512 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-5 โรงเรียนพิมลวิทย์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร ชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนอัสสัมชัญ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-3 โรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย ชั้นประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างเทคนิค สถาปัตยกรรม ชั้นประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาช่างโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยี และอาชีวศึกษา จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์ เมื่อปี พ.ศ. 2535 จังหวัดกรุงเทพมหานคร โดยหลังจากการสำเร็จการศึกษาได้รับอนุญาตเป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาวิศวกรรมโยธา และเริ่มทำงานเป็นข้าราชการครู ที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล นครราชสีมา

ปี พ.ศ. 2549 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ปี พ.ศ. 2557 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่: Chaidachatom, K., Suebsuk, J., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., (2019). **Extended water/cement ratio law for cement mortar containing recycled asphalt pavement**. *Construction and Building Materials*, 196, pp. 457-467.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี