

สมบัติทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงอัดและแรงดัด

นางสาวนันทพร กาญจนวัฒนาวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2554

**MECHANICAL PROPERTIES OF POLYESTER
POLYMER CONCRETE UNDER COMPRESSIVE
AND FLEXURAL LOADS**

Nantaporn Kanjanawattanawong

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2011**

สมบัติทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงอัดและแรงดัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศ. ดร.สุชนันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ ลินศิริ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นันทพร กาญจนวัฒนวงศ์ : สมบัติทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้
แรงอัดและแรงคด (MECHANICAL PROPERTIES OF POLYESTER POLYMER
CONCRETE UNDER COMPRESSIVE AND FLEXURAL LOADS) อาจารย์ที่ปรึกษา :
รองศาสตราจารย์ ดร. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 110 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้การรับแรงอัดและแรงคดโดยการปรับเปลี่ยนสัดส่วนผสมต่าง ๆ เพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมซึ่งมีกำลังสูงและคุณสมบัติในการเทได้ดี นอกจากนี้ยังศึกษาผลของส่วนผสมต่าง ๆ ต่อพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีต อันได้แก่ ปริมาณเรซิน โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียด ปริมาณมวลรวมหยาบและปริมาณเส้นใยแก้ว ตัวอย่างการทดสอบการรับแรงอัดเป็นทรงกระบอก ส่วนตัวอย่างสำหรับการทดสอบการรับแรงคดเป็นแบบคานซึ่งเตรียมตามมาตรฐาน ASTM การเตรียมและการบ่มตัวอย่างทำที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศโดยใช้เวลาบ่มตัวอย่าง 7 วันก่อนการทดสอบ

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่ผสมมวลรวมหยาบ คือ ปริมาณเรซินต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 4.6 โดยน้ำหนัก (หรือประมาณ 1 ต่อ 3.3 โดยปริมาตร) ซึ่งมีกำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 75.8 เมกะปาสกาล สัดส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมมวลรวมหยาบ คือ ปริมาณเรซินต่อทรายต่อหินเท่ากับ 1 ต่อ 3.7 ต่อ 3.7 โดยน้ำหนัก (หรือประมาณ 1 ต่อ 2.6 ต่อ 2.1 โดยปริมาตร) ซึ่งมีกำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 80.6 เมกะปาสกาล กำลังอัดและกำลังคดถูกควบคุมได้โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณเรซิน จุดเหมาะสมของปริมาณเรซินแปรเปลี่ยนอยู่ระหว่าง 12 ถึง 18 เปอร์เซ็นต์ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณมวลรวมหยาบที่ใช้ในส่วนผสม โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดมีผลต่อกำลังอัดน้อยแต่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังคดอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มมวลรวมหยาบในส่วนผสมที่ปริมาณเหมาะสมช่วยเพิ่มความแกร่งและกำลังอัดของพอลิเมอร์คอนกรีต การเพิ่มเส้นใยแก้วช่วยเพิ่มความเหนียวให้แก่พอลิเมอร์คอนกรีตอย่างชัดเจน แต่เส้นใยแก้วจะส่งผลต่อการเทเข้าแบบซึ่งส่งผลให้กำลังอัดและกำลังคดลดลงเล็กน้อย

NANTAPORN KANJANAWATTANAWONG : MECHANICAL
PROPERTIES OF POLYESTER POLYMER CONCRETE UNDER
COMPRESSIVE AND FLEXURAL LOADS. THESIS ADVISOR : ASSOC.
PROF. SITTICHAIR SEANGATITH, Ph.D., 110 PP.

POLYMER CONCRETE/POLYESTER RESIN/COMPRESSIVE/FLEXURAL

This research studies the mechanical properties of polyester polymer concrete under compressive and flexural loads by varying the mix proportions for searching the optimal proportion, which provides the high strength and good workability. Moreover the effects of each composition on the mechanical behavior and properties of polymer concrete have been studied. Those are resin content, fineness modulus of fine aggregate, coarse aggregate content and glass fiber content. The cylindrical and beam specimens were prepared according to ASTM standard for the compression and the flexural tests, respectively. The preparing and curing of specimens were performed under room temperature and atmospheric pressure. The specimens were curing for 7 days before testing.

Based on the test results, it is seen that the optimal proportion of the polymer concrete without coarse aggregate is the ratio between resin and sand of 1 : 4.6 by weight (or 1 : 3.3 by volume), which provides the average compressive strength of 75.8 MPa. The optimal proportion of the polymer concrete with coarse aggregate is the ratio between resin, sand and crushed rock of 1 : 3.7 : 3.7 by weight (or 1 : 2.6 : 2.1 by volume), which provides the average compressive strength of 80.6 MPa. The compressive and flexural strengths are mainly controlled by the varying resin content.

The optimal resin content is varying from 12 to 18 percent which depends on the amount of coarse aggregate in the mix composition. The fineness modulus of fine aggregate has no influence on the compressive strength but it enhances the flexural strength, significantly. The stiffness and compressive strength are obviously increasing by admixing the coarse aggregate at the optimal content. The glass fiber increases the ductility of polymer concrete but they reduce the molding ability which drops off slightly the compressive and flexural strengths.

School of Civil Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์อย่างสูงที่ได้สละเวลาดูแลให้คำปรึกษาจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงลงได้ และขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ ลินศิริ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและสละเวลาแก้ไขตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.จิระยุทธ สืบสุข มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สละเวลาให้คำปรึกษาและแนะนำเกี่ยวกับวัสดุพอลิเมอร์คอนกรีตตลอดการทำวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้เลยถ้าข้าพเจ้าไม่ได้รับความรู้ทางวิชาการและแนวคิดของการทำงานที่ดีจากคณาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่านตลอดจนการอำนวยความสะดวกจากเจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ข้าพเจ้าได้ติดต่อประสานงาน รวมถึงทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณ กำลังใจ คำติชม พร้อมกับข้อคิดดี ๆ จากเพื่อนร่วมเรียนระดับบัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ช่วยให้ข้าพเจ้ามีแรงกำลังมุ่งมั่นทำงานจนสำเร็จลงได้

ท้ายนี้ข้าพเจ้าต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดู อบรมส่งเสริมการศึกษา และเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดให้ข้าพเจ้าเสมอมา

นนทพร กาญจนวัฒนวงศ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
2 ปฏิทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 พอลิเมอร์ในงานคอนกรีต.....	5
2.1.1 พอลิเอสเตอร์เรซิน.....	10
2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีต.....	15
2.2.1 ระยะเวลาและวิธีการบ่ม.....	15
2.2.2 สัดส่วนผสม.....	18
2.2.3 อุณหภูมิใช้งาน.....	24
2.2.4 ลักษณะของการให้แรงกระทำ.....	25
2.2.5 ความคงทนต่อกรดหรือด่าง.....	27
2.3 บทสรุป.....	28

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	วิธีดำเนินการวิจัย	29
3.1	บทนำ	29
3.2	วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	29
3.2.1	พอลิเอสเทอร์พอลิเมอร์เรซิน	29
3.2.2	มวลรวม	34
3.3	การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ	35
3.3.1	พอลิเมอร์เรซิน	35
3.3.2	มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ	35
3.4	การเตรียมตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีต	36
3.5	การทดสอบทางกล	37
3.5.1	การทดสอบการรับแรงอัด	37
3.5.2	การทดสอบการรับแรงดัด	38
4	ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล	40
4.1	คุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมและพอลิเอสเทอร์เรซิน	40
4.2	พฤติกรรมทั่วไปของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้การรับแรงอัดและแรงดัด	43
4.3	ผลของอายุบ่ม	46
4.4	ผลของปริมาณเรซิน	48
4.5	ผลของขนาดกะมวลรวมละเอียด	53
4.6	ผลของปริมาณมวลรวมหยาบ	58
4.7	ผลของปริมาณเส้นใย	61
4.8	ปัจจัยควบคุมพฤติกรรมของพอลิเมอร์คอนกรีต	65
4.8.1	กำลังรับแรงอัด	65
4.8.2	ความแกร่ง	67
4.8.3	กำลังรับแรงดัด	67
4.8.4	หน่วยน้ำหนัก	68

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.9	แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับหน่วยแรงและความเครียดภายใต้การรับแรงอัด.....	68
4.10	การออกแบบส่วนผสมของพอลิเมอร์คอนกรีตสำหรับกำลังอัดต่าง ๆ.....	73
5	บทสรุป.....	74
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	74
5.2	ข้อเสนอแนะและการต่อขอผลการวิจัย.....	76
	รายการอ้างอิง.....	77
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. คุณสมบัติทางกลของตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตที่ส่วนผสมต่าง ๆ	
	ภายใต้แรงอัดและแรงดัด.....	83
	ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	91
	ประวัติผู้เขียน.....	110

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต (ศิริชัย และต่อศักดิ์, 2547).....	6
2.2 คุณสมบัติของเรซินประเภทเทอร์โมเซตติง (Weatherhead, 1980).....	10
2.3 คุณลักษณะทั่วไป และการใช้งานของผลิตภัณฑ์คอนกรีตพอลิเมอร์ (แปลจาก Browne et al., 1975).....	14
2.4 การออกแบบสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับทำพอลิเมอร์คอนกรีต (Muthukumar et al., 2003).....	19
2.5 โมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์คอนกรีตผสมเถ้าลอย (Gorninski et al., 2004).....	22
3.1 ส่วนประกอบของพอลิเมอร์คอนกรีต.....	31
3.2 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง.....	32
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวม.....	40
4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของพอลิเมอร์เรซิน.....	40
4.3 พารามิเตอร์สำหรับสมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่มใด ๆ.....	70
4.4 พารามิเตอร์สำหรับสมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาตรเรซินใด ๆ.....	70
4.5 อัตราส่วนเรซินต่อทรายเพื่อให้ได้กำลังอัดต่าง ๆ สำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่ผสมมวลรวมหยาบ.....	73
4.6 อัตราส่วนเรซินต่อทรายเพื่อให้ได้กำลังอัดต่าง ๆ สำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมมวลรวมหยาบ.....	73

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การใช้งานพอลิเมอร์คอนกรีตในงานประเภทต่าง ๆ.....	9
2.2 ประเภทของพอลิเมอร์เรซินที่นิยมนำมาใช้ในงานก่อสร้าง.....	10
2.3 ขั้นตอนการทำพอลิเอสเตอร์แข็ง (วิไลพร, 2540).....	12
2.4 ประเภทของกรดที่ใช้ผลิตพอลิเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว (Cassis and Talbot, 1998).....	12
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิและเวลาขณะพอลิเอสเตอร์เรซินแข็งตัว (รัตน์, 2541).....	15
2.6 การเปลี่ยนแปลงกำลัง ความเครียดที่จุดวิบัติ และโมดูลัสตามระยะเวลาบ่มสำหรับ พอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอนกรีต (Vipulanandan and Paul, 1993).....	16
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ คอนกรีตที่บ่มที่อุณหภูมิสูง (Vipulanandan and Paul, 1993).....	17
2.8 ผลของขนาดมวลรวมและการกระจายขนาดผลต่อกำลังรับแรงอัดของอิพอกซี พอลิเมอร์คอนกรีต (Vipulanandan and Paul, 1990).....	20
2.9 ผลของสัดส่วนผสมต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของ รีไซเคิลพอลิเมอร์ที่ปริมาณเรซิน 9 เปอร์เซ็นต์ (Jo et al., 2008).....	21
2.10 ผลของประเภทเรซินและปริมาณเถ้าลอยที่ผสมเพิ่มต่อกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์ คอนกรีต (Gorninski et al., 2004).....	22
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผสม เส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว (Sett and Vipulanandan, 2002).....	23
2.12 ผลของอุณหภูมิขณะใช้งานต่อพฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดของพอลิเมอร์ และพอลิเมอร์คอนกรีต (Vipulanandan and Paul, 1993).....	24
2.13 การขยายและหดตัวเนื่องจากความร้อน Rebiez (1995).....	25
2.14 ผลของอัตราความเครียดต่อพฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดของพอลิเมอร์ และพอลิเมอร์คอนกรีต (Vipulanandan and Paul, 1993).....	26

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.15 ความเครียดจากการล้าของพอลิเมอร์คอนกรีตที่หน่วยแรงอัดต่าง ๆ Vipulanandan and Paul (1993).....	27
3.1 กรอบการดำเนินงานวิจัย	30
3.2 พอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์เรซินเหลว	31
3.3 การกระจายขนาดของมวลรวมละเอียดที่ขนาดคละต่าง ๆ	34
3.4 เส้นใยแก้วดัดสั้น	35
3.5 ขนาดตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงดัด	36
3.6 แบบหล่อตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีต	37
3.7 เครื่องทดสอบการรับแรงอัดขนาด 5,000 กิโลนิวตัน	39
3.8 ชุดทดสอบการรับแรงดัด	39
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดภายใต้การรับแรงอัดของ พอลิเมอร์เรซินแข็ง	41
4.2 การพัฒนากำลังอัดตามอายุบ่มของพอลิเมอร์เรซินแข็ง	42
4.3 การพัฒนากำลังตามน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์เรซิน (Hallam et al. 2003)	43
4.4 พฤติกรรมทั่วไปภายใต้แรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีต	45
4.5 พฤติกรรมทั่วไปภายใต้แรงดัดแบบคานของพอลิเมอร์คอนกรีต	45
4.6 การวิบัติของตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตแบบต่าง ๆ	46
4.7 พฤติกรรมของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้การรับแรงอัดที่อายุบ่มต่าง ๆ	47
4.8 ผลของอายุบ่มต่อค่าเฉลี่ยของกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่น โมดูลัสยืดหยุ่นและหน่วยน้ำหนัก	48
4.9 พฤติกรรมการรับแรงอัดที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ	49
4.10 ผลของปริมาณเรซินต่อค่าเฉลี่ยกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่จุดคราก ความเครียด ที่กำลังรับแรงอัดประลัยและหน่วยน้ำหนัก	51
4.11 ผลของปริมาณเรซินต่อเปอร์เซ็นต์การไหลของพอลิเมอร์ผสมทราย	52
4.12 ผลของปริมาณเรซินต่อค่าเฉลี่ยกำลังดัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นของการดัด	52
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้ การรับแรงอัดที่โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมต่าง ๆ	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 ผลของโมดูลัสความละเอียดต่อค่าเฉลี่ยของกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่น และหน่วยน้ำหนักที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ.....	55
4.15 ผลของโมดูลัสความละเอียดต่อความเครียดที่กำลังอัดประลัยสำหรับพอลิเมอร์คอนกรีต ที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ.....	56
4.16 ผลของโมดูลัสความละเอียดต่อค่าเฉลี่ยกำลังดัดและโมดูลัสยืดหยุ่น ที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ.....	57
4.17 พฤติกรรมการรับแรงอัดสำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบ ที่สัดส่วนต่าง ๆ.....	58
4.18 ผลของปริมาณมวลรวมหยาบต่อกำลังรับแรงอัดประลัย กำลังรับแรงอัดที่พิกัดยืดหยุ่น และหน่วยน้ำหนัก.....	59
4.19 พฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบคงที่ เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมละเอียดและมีปริมาณเรซินต่าง ๆ.....	60
4.20 ผลของปริมาณเรซินต่อกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่น ความเครียดที่ กำลังอัดประลัยและหน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณมวลรวม หยาบคงที่เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมทั้งหมด.....	61
4.21 พฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบคงที่ เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมละเอียดและมีปริมาณเส้นใยต่าง ๆ.....	62
4.22 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าเฉลี่ยกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่น ความเครียดที่ กำลังอัดประลัยและหน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณมวลรวมหยาบคงที่ เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมทั้งหมด.....	63
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของกำลังดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ..	64
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเสียรูปที่กึ่งกลางคานของ การทดสอบการรับแรงดัดแบบคานที่ปริมาณเส้นใยต่าง ๆ.....	65
4.25 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนกำลังอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตต่อพอลิเมอร์เรซินและ ปริมาณเรซินต่าง ๆ.....	66
4.26 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนกำลังอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตต่อพอลิเมอร์เรซินและ อัตราส่วนปริมาณเรซินต่อทรายต่าง ๆ.....	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 ผลการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ p ต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดภายใต้แรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีต.....	69
4.28 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดจากผลการทดสอบและผลทำนายสำหรับพอลิเมอร์เรซินแข็ง.....	70
4.29 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดจากผลการทดสอบและผลทำนายสำหรับอายุบ่มต่าง ๆ.....	71
4.30 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดจากผลการทดสอบและผลทำนายสำหรับปริมาณเรซินต่าง ๆ.....	72

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ACI	=	American Concrete Institute
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
BS	=	British Standard
b	=	ความกว้างของตัวอย่าง
C_u	=	สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (coefficient of uniformity)
CV	=	สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (coefficient of variation)
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของตัวอย่าง
d	=	ความลึกของตัวอย่าง
D_{10}	=	ขนาดมวลรวมที่เปอร์เซ็นต์ผ่านเท่ากับ 10
D_{60}	=	ขนาดมวลรวมที่เปอร์เซ็นต์ผ่านเท่ากับ 60
E_s	=	โมดูลัสยืดหยุ่นแบบ Secant
GPa	=	กิกะปาสคาล
L	=	ความกว้างของช่วงคาน
M_2	=	ความชันของกราฟน้ำหนักบรรทุกและการเสียรูปที่กลางคานตัวอย่าง
MEKPO	=	เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (methyl ethyl ketone peroxide)
MPa	=	เมกะปาสคาล
mm	=	มิลลิเมตร
P	=	แรงกระทำ
P_m	=	แรงกระทำสูงสุด
p	=	พารามิเตอร์ของวัสดุสำหรับสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด
PET	=	โพลีเอทิลีนเทอพทาเลท (polyethylene terephthalate)
PC	=	พอลิเมอร์คอนกรีต (polymer concrete)
PIC	=	พอลิเมอร์อิมแพกเมนต์คอนกรีต (polymer impregnated concrete)
PMC	=	พอลิเมอร์โมดิไฟด์คอนกรีต (polymer modified concrete)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

SEM	=	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
S, SD	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)
S	=	กำลังรับแรงดัด
S_{∞}	=	กำลังของวัสดุที่เวลาอนันต์
$\bar{X}$	=	ค่าเฉลี่ย
σ	=	หน่วยแรง
σ_m	=	หน่วยแรงสูงสุด
σ_{pl}	=	หน่วยแรงที่พิกัดยืดหยุ่น
σ_u	=	หน่วยแรงประลัย
ε	=	ความเครียด
ε_m	=	ความเครียดที่หน่วยแรงสูงสุด
ε_u	=	ความเครียดที่หน่วยแรงประลัย
Δ	=	การเสียรูป ณ ตำแหน่งที่พิจารณา
Δ_m	=	การเสียรูป ณ ตำแหน่งแรงกระทำสูงสุด

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาการวิจัย

วัสดุคอนกรีตถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างเป็นเวลานานนับพันปี วัสดุคอนกรีตประกอบด้วย วัสดุประสานและมวลรวม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) นับเป็นวัสดุประสานที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตคอนกรีตยุคใหม่โดยมีใช้งานมานานมากกว่า 100 ปี (ปริญญญา และชัย, 2547) ข้อดีของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่มีเนื้อวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ คือ มีราคาต่ำ หาซื้อง่ายดูแลรักษาง่าย ทำให้เป็นรูปร่างลักษณะและขนาดที่ต้องการได้ง่าย ทนทานต่อเปลวไฟ มีมวลมากและความแข็งแรงสูง แต่อย่างไรก็ตามปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตมีข้อจำกัดในการใช้งานหลายประการ เพราะมีระยะเวลาการก่อตัวที่ค่อนข้างช้า สึกกร่อนง่ายเมื่อใช้งานในสภาวะกรดหรือด่าง และมีกำลังต่อน้ำหนักค่อนข้างต่ำ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตมักมีปัญหาในการนำมาใช้งานหลายประเภท เช่น งานซ่อมที่ต้องการระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็ว งานโครงสร้างสำเร็จรูป (precast structure) ที่ต้องการความทนทานและกำลังวัสดุที่สูง โครงสร้างที่ต้องการความทนทานพิเศษต่อสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรดหรือด่างสูง ด้วยข้อจำกัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตในงานพิเศษดังกล่าว ข้างต้นวัสดุพอลิเมอร์จึงเข้ามามีบทบาทเพิ่มมากขึ้นในการนำมาใช้เป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีตพิเศษ (Fowler, 1989) พอลิเมอร์ในงานคอนกรีตสามารถแบ่งออกตามลักษณะการใช้งานได้ 3 ประเภท (ACI Committee 548, 1997) อันได้แก่ การอัดพอลิเมอร์เรซินเหลวเข้าไปในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วทำให้แข็งตัวด้วยความร้อน หรือพอลิเมอร์อิมเพกเนตคอนกรีต (polymer impregnated concrete, PIC) การใช้พอลิเมอร์เรซินเป็นส่วนผสมในการผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตหรือพอลิเมอร์โมดิไฟด์คอนกรีต (polymer modified concrete, PMP) และการใช้พอลิเมอร์เรซินแทนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นวัสดุประสานทั้งหมดหรือพอลิเมอร์คอนกรีต (polymer concrete, PC)

พอลิเมอร์คอนกรีตเป็นวัสดุชนิดใหม่ซึ่งเกิดขึ้นครั้งแรกที่ประเทศสหรัฐอเมริกาเมื่อ ค.ศ. 1958 และปัจจุบันได้ถูกผลิตขึ้นเพื่อประยุกต์ใช้งานพิเศษตามที่กล่าวข้างต้นโดยเริ่มใช้กันอย่างแพร่หลายขึ้นในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา (Fowler, 1999) พอลิเมอร์คอนกรีตผลิตจากส่วนผสมระหว่างพอลิเมอร์เรซิน (polymer resin) เช่น พอลิเอสเทอร์ และอีพอกซี เป็นต้น และวัสดุมวลรวม เช่น ทราย หิน และถั่วลอย เป็นต้น จากผลการทดสอบของนักวิจัยหลายท่านแสดงให้เห็นแล้วว่า

วัสดุผสมชนิดนี้มีกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดที่สูง ทนทานต่อสารเคมี มีน้ำหนักเบา และใช้ระยะเวลาก่อตัวที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตมาก (Krauss and Wyman, 2010) งานวิจัยในอดีตจำนวนมากได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบส่วนใหญ่จากการศึกษาที่ผ่านมาพอลิเมอร์คอนกรีตแสดงพฤติกรรมทางกลที่ซับซ้อนซึ่งเป็นผลจากปัจจัยหลายประการ ตัวอย่างเช่น ปริมาณเรซิน ขนาดและมวลรวมที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน ตลอดจนปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อพฤติกรรมทางกล (Helal, 1978; Maksimav et al., 1999; Mebarkia, 1993; Ohama and Nishimura, 1979; Vipulanandan et al., 1988; Vipulanandan and Paul, 1990; Vipulanandan and Paul, 1993) อย่างไรก็ตามยังไม่มีเกณฑ์ปฏิบัติในการประเมินกำลังของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ชัดเจนเหมือนกับการออกแบบสัดส่วนผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตซึ่งสามารถทำนายกำลังอัดได้โดยพิจารณาที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Abrams, 1918) ดังนั้นจากความสำคัญและปัญหาการวิจัยข้างต้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการหาสัดส่วนที่เหมาะสมของพอลิเมอร์คอนกรีตสำหรับการใช้งานจริง และถูกต้องตามหลักวิศวกรรม โดยศึกษาผลของปริมาณเรซินและสัดส่วนผสมของมวลรวมต่อพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีต ลักษณะการวิบัติของพอลิเมอร์คอนกรีต งานวิจัยนี้ทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่สัดส่วนปริมาณเรซินและสัดส่วนมวลรวมต่างๆ เพื่อนำเสนอปัจจัยควบคุมกำลังของพอลิเมอร์คอนกรีตซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบส่วนผสมของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาหาส่วนผสมของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตที่เหมาะสมในการรองรับแรงอัดและแรงดัด
- 2) เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงอัดและแรงดัด
- 3) เพื่อศึกษาผลกระทบการเสริมเส้นใย ต่อพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมที่เหมาะสมภายใต้แรงอัดและแรงดัด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของการศึกษานี้มุ่งที่การปรับเปลี่ยนปริมาณสัดส่วนผสม ได้แก่ ปริมาณเรซิน มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ และเส้นใย เพื่อให้ได้ตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตที่สัดส่วนผสมแตกต่างกันโดยใช้เรซิน มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบและเส้นใยชนิดเดียวกัน รายละเอียดขอบเขตการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) พอลิเมอร์เรซินที่ใช้เป็นพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์เรซินสำเร็จรูปชนิด Isophthalic มีชื่อทางการค้า คือ ESTAR R289TPN นำเข้าและจัดจำหน่ายโดยบริษัท เจ เอ็น ทรานสอส (ประเทศไทย) โดยเรซินดังกล่าวผสมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Cobalt naphthenate ซึ่งสัดส่วนผสมเป็นความลับทางการค้า
- 2) มวลรวมละเอียดที่ใช้ได้แก่ ทรายธรรมชาติ และมวลรวมหยาบที่ใช้ได้แก่ หินปูนบด โดยมวลรวมที่ใช้เป็นมวลรวมที่หาได้ในจังหวัดนครราชสีมา ทรายและหินดังกล่าวถูกล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา และอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงทดสอบตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง
- 3) เส้นใยที่ใช้คือเส้นใยแก้วตัดสั้น (chopped glass fiber) ประเภท E-glass ขนาดยาวระหว่าง 3 ถึง 4 มิลลิเมตร การใช้ทำตามขั้นตอนที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง เส้นใยแก้วนำเข้าและจัดจำหน่ายโดยบริษัท เจ เอ็น ทรานสอส (ประเทศไทย)
- 4) ปริมาณเรซินที่ใช้ในการศึกษานี้อยู่ระหว่าง 8 ถึง 22 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำหนักพอลิเมอร์คอนกรีตรวม
- 5) สัดส่วนการแทนที่มวลรวมหยาบในมวลรวมทั้งหมดอยู่ระหว่าง 25 ถึง 75 เปอร์เซ็นต์
- 6) การเตรียมตัวอย่าง การบ่ม และการทดสอบกระทำที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง
- 7) การทดสอบทางกลแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การทดสอบการรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C579 (2001) โดยตัวอย่างทดสอบจะใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร และการทดสอบการรับแรงคดแบบคานตามมาตรฐาน ASTM C580 (2002) โดยตัวอย่างทดสอบจะใช้ตัวอย่างแบบคาน กว้าง 50 มิลลิเมตร สูง 50 มิลลิเมตร ยาว 304 มิลลิเมตร ตัวอย่างทั้งสองแบบจะถูกถอดออกจากแบบหล่อเมื่ออายุ 24 ชั่วโมง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) เข้าใจพฤติกรรมทางกล และลักษณะการวิบัติของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีต ภายใต้สัดส่วนผสมของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตที่เหมาะสม
- 2) ทราบถึงผลกระทบจากเปลี่ยนแปลงปริมาณส่วนผสมในการผลิตพอลิเมอร์คอนกรีต และปัจจัยที่ใช้ในควบคุมกำลังของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบส่วนผสมของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตต่อไปได้
- 3) สามารถประยุกต์ใช้วัสดุพอลิเมอร์กับงานที่ต้องการระยะเวลาก่อตัวของวัสดุที่รวดเร็ว งานโครงสร้างสำเร็จรูปที่ต้องการความทนทานและกำลังวัสดุที่สูง โครงสร้างที่ต้องการความทนทานพิเศษต่อสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรดหรือด่างสูงได้อย่างเหมาะสม

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเมอร์ในงานคอนกรีต

วัสดุพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในงานคอนกรีตสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท (ACI Committee 548, 1997) คือ พอลิเมอร์อิมเพกเนทคอนกรีต (polymer impregnated concrete, PIC) พอลิเมอร์โมดิไฟด์คอนกรีต (polymer modified concrete, PMC) และพอลิเมอร์คอนกรีต (polymer concrete, PC) พอลิเมอร์อิมเพกเนทคอนกรีตได้จากการอัดพอลิเมอร์เรซินเหลวเข้าไปในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยแรงดันสูง จากนั้นทำให้แข็งตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 105 ถึง 150 องศาเซลเซียส หรือการฉายด้วยรังสีแกมมา (γ) วัสดุพอลิเมอร์คอนกรีตประเภทนี้มีค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดึงสูงกว่าคอนกรีตปกติ 3 ถึง 5 เท่า และมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่าคอนกรีตปกติประมาณ 2 เท่า แต่เนื่องจากขบวนการผลิตพอลิเมอร์อิมเพกเนทคอนกรีต มีขั้นตอนที่ยุ่งยากจึงไม่ค่อยได้รับความนิยมมากนัก พอลิเมอร์ประเภทนี้จึงมักนำมาใช้ในงานบางประเภทเท่านั้น พอลิเมอร์โมดิไฟด์ได้จากการเติมพอลิเมอร์หรือโมโนเมอร์ เช่น น้ำยางพารา อะคริลิกส์ (acrylics) และ ไวนิลเอสเตตส์ (vinyl acetates) เป็นต้น ลงในคอนกรีตสกร่วมกับสารป้องกันการเกิดฟองอากาศ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติแล้วพอลิเมอร์โมดิไฟด์คอนกรีตมีสมบัติด้านความคงทนและการยึดเกาะที่ดีกว่าแต่มีการคืบสูง พอลิเมอร์โมดิไฟด์คอนกรีตมักถูกนำมาใช้เฉพาะงานพิเศษ เช่น ส่วนของโครงสร้างสะพาน งานผนังสำเร็จรูป เป็นต้น ระยะเวลาก่อตัวของพอลิเมอร์โมดิไฟด์คอนกรีตเท่ากับคอนกรีตปกติ และด้านทานต่อการเคมีได้ไม่มากจึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมเช่นกัน

พอลิเมอร์คอนกรีตเป็นวัสดุเชิงประกอบที่ใช้พอลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสานมวลรวมแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งแตกต่างจากพอลิเมอร์อิมเพกเนทคอนกรีต และพอลิเมอร์โมดิไฟด์คอนกรีตที่กล่าวข้างต้นซึ่งยังคงใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน โดยพอลิเมอร์คอนกรีตใช้พอลิเมอร์เรซิน (polymer resin) เป็นวัสดุประสาน พอลิเมอร์คอนกรีตประกอบด้วยพอลิเมอร์เรซิน เช่น อีพอกซี (epoxy) พอลิเอสเตอ์ (polyester) เป็นต้น มวลรวม (aggregate) ประเภทวัสดุเนื้อย และวัสดุเติมช่องว่าง (filled material) เช่น เถ้าลอย (fly ash) แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) เส้นใย (fiber) เป็นต้น คุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตประเภทต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.1 เมื่อเปรียบเทียบกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตแล้วพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าคุณสมบัติต่าง ๆ สูงกว่าคอนกรีตปกติอย่างน้อย 2 เท่ายกเว้นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต
(ศิริชัย และต่อศักดิ์, 2547)

ชนิดของ ตัวเชื่อม ประสาน	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำ (%)	กำลังรับ แรงอัด (MPa)	กำลังรับ แรงดึง (MPa)	กำลังรับ แรงดัด (MPa)	โมดูลัสความ ยืดหยุ่น (GPa)	อัตราส่วน โพของ
พอลิเมธิลเมทรา ไซค์เตลท	2.0-2.4	0.05-0.60	7-210	9-11	30-35	35-40	0.22-0.33
พอลิเอสเตอร์	2.0-2.4	0.30-1.00	50-150	8-25	15-45	20-40	0.16-0.30
อีพอกซี	2.0-2.4	0.02-1.00	50-150	8-25	15-50	20-40	0.30
ฟูเร็น พอลิเมอร์	1.6-1.7	0.20	48-64	7-8	-	-	-
ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์	1.9-2.5	5-8	13-35	1.5-3.5	2-8	20-30	0.15-0.20

พอลิเมอร์คอนกรีตถูกพัฒนาเพื่อทดแทนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตสำหรับการใช้งานพิเศษที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตมักมีปัญหาการใช้งาน ปัญหาส่วนใหญ่ของคอนกรีต คือ มีความพรุนสูงเมื่อปรับส่วนผสมให้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์แข็งตัวเร็วซึ่งมักทำให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อของซีเมนต์ส่งผลให้อากาศและความชื้นสามารถผ่านเข้าไปได้ง่าย นอกจากนี้ความเป็นด่างของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ส่งผลให้คอนกรีตที่ได้ไม่ทนต่อการกรด ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยการเลือกใช้พอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานแทนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ พอลิเมอร์สามารถรวมตัวกันแน่นทำให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อวัสดุน้อยและพอลิเมอร์เรซินส่วนมากจะเป็นพวกไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) จึงสามารถทนทานต่อน้ำและสารเคมีต่าง ๆ ได้ดี

ในปัจจุบันนักวิจัยได้ทำการพัฒนาพอลิเมอร์คอนกรีตอย่างต่อเนื่อง จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต (ตัวอย่างเช่น Helal, 1978; Maksimav et al., 1999; Mebarkia, 1993; Mebarkia and Vipulanandan, 1990; Ohama and Nishimura, 1979; Vipulanandan et al., 1988; Vipulanandan and Paul, 1990; Vipulanandan and Paul, 1993) สามารถสรุปได้ว่าสมบัติทางกลที่สำคัญของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ดีกว่าคอนกรีตปกติ คือ ระยะเวลาแข็งตัวที่เร็ว อัตราส่วนกำลังค่อน้ำหนักสูง ความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี และการซึมผ่านของน้ำต่ำ การนำพอลิเมอร์คอนกรีตไปใช้งานก่อสร้างมีหลากหลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น การซ่อมแซมคอนกรีตโดยเฉพาะอย่างยิ่งการซ่อมแซมผิวถนนคอนกรีต (Marsh et al., 1985) และผิวสะพานคอนกรีต (Fowler, 1999; Sprinkel et al., 1993) รวมถึงในงานประเภทชิ้นส่วนสำเร็จรูป (Helal, 1978; Rebeiz, 1996; Rebiez et al., 1993) และการหล่อเทในอาคารสาธารณะ งานท่อน้ำบาดาล งานบันไดโรงงาน เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ทำชิ้นงานที่ทนต่อการกัดกร่อนของกรดและสารละลาย รางระบายน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม

ผนังสำเร็จรูป เครื่องสุญญากาศ ตลอดจนนำมาใช้ในงานเคลือบและงานซ่อมแซมโครงสร้างได้ (ACI Committee 548, 1998) รูปที่ 2.1 แสดงการใช้งานพอลิเมอร์คอนกรีตในงานประเภทต่าง ๆ

การใช้พอลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสานในงานคอนกรีตจะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัด (Vipulanandan and Paul, 1993) และกำลังรับแรงดัด (Vipulanandan and Dharmarajan, 1987) ของพอลิเมอร์คอนกรีตให้สูงกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติ และเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี (Ribeiro et al., 2002) และมีระยะเวลาในการก่อตัวที่เร็ว (Krauss and Wyman, 2010) แต่อย่างไรก็ตามวัสดุพอลิเมอร์มักจะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำและการคืบสูง (Hsu and Fowler, 1985) สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (Rebiez, 1995) หรือได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นเวลานาน ดังนั้น การเลือกใช้พอลิเมอร์ชนิดที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานแต่ละประเภทรวมถึงการใช้สารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์จึงมีความสำคัญมาก ในปัจจุบันอุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศไทยยังขาดความรู้ความเข้าใจในคุณสมบัติของพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมต่าง ๆ ส่งผลให้การใช้งานจึงอยู่ในวงจำกัด

การผลิตพอลิเมอร์คอนกรีตเริ่มจากการเตรียมสารตั้งต้นโมโนเมอร์และส่วนประกอบอื่น ๆ ที่ผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการไหลื่น และการต้านทานเปลวไฟ บางครั้งการใช้สารในกลุ่มพาราฟินซิลิกอนไฮไดรด์ (paraffin silicon hydride) เพื่อเพิ่มการยึดเหนี่ยว ความแข็งแรงระหว่างพันธะพอลิเมอร์กับมวลรวมเวลาการก่อตัวสามารถเกิดได้อย่างรวดเร็ว โดยตัวแปรที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของพอลิเมอร์คอนกรีต ได้แก่ อุณหภูมิ และส่วนผสม และปริมาณวัสดุประสานพอลิเมอร์เรซิน ปกติอัตราส่วนของพอลิเมอร์จะอยู่ระหว่าง 5 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักรวม แต่ถ้าวัสดุมวลรวมมีความละเอียดมากอาจจะต้องใช้พอลิเมอร์เรซินมากขึ้น

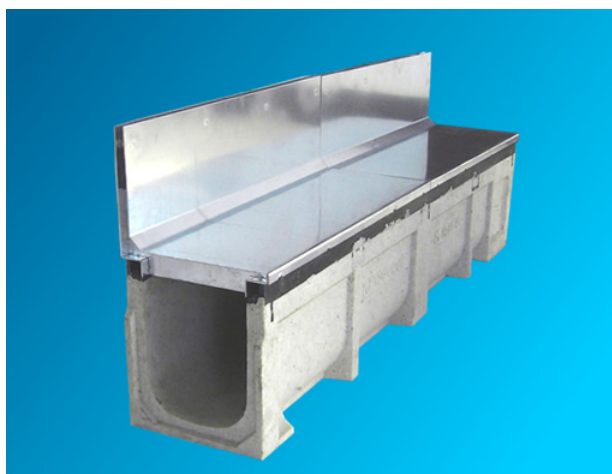
พอลิเมอร์คอนกรีตสามารถต้านทานสารเคมี และกรดไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) อัลคาไลค์ (alkali) และซัลเฟต (sulphate) ได้ดี กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตดังนั้นจึงสามารถลดขนาดหน้าตัดและน้ำหนักของโครงสร้างเมื่อนำมาทำเป็นชิ้นส่วนสำเร็จรูปได้ พอลิเมอร์เรซินมีกำลังสูงและมีการยึดเกาะกับมวลรวมดีดังนั้นกำลังของพอลิเมอร์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังของมวลรวม กำลังของพอลิเมอร์เรซินและความชื้นในมวลรวม ถ้าความชื้นในมวลรวมมีค่ามากกว่า 1 เปอร์เซ็นต์จะทำให้กำลังของพอลิเมอร์คอนกรีตลดลง พอลิเมอร์ที่มีใช้ในงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ พลาสติก (plastics) และอีลาสโตเมอร์ (elastomers) พลาสติกคือพอลิเมอร์ที่มีพฤติกรรมขึ้นอยู่กับโครงสร้างพันธะเคมีที่กระทำต่อกันซึ่งที่มีลักษณะเฉพาะเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ได้แก่ เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) และเทอร์โมเซตติงพลาสติก (thermosetting plastic) อีลาสโตเมอร์คือพอลิเมอร์ประเภทยางที่มีลักษณะยืดหยุ่นได้มาก เมื่อออกแรงดึงจะยืดออกแต่จะสามารถกลับอยู่ในสภาพเดิมเมื่อปล่อยแรงดึง เทอร์โมพลาสติกคือพลาสติกที่สามารถทำให้หลอมเหลวหรือเปลี่ยนรูปร่างได้ด้วย

ความร้อน แต่จะแข็งตัวเมื่อเย็นลง พลาสติกชนิดนี้สามารถรีไซเคิลได้โดยคุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลง เทอร์โมเซตติงพลาสติกคือพลาสติกที่ไม่สามารถทำให้หลอมเหลวได้ด้วยความร้อน พลาสติกชนิดนี้จะคงรูปถาวรด้วยปฏิกิริยาเคมีหรือด้วยความร้อนเมื่อให้ความร้อนอีกครั้งที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการสลายตัวหรือไหม้จึงไม่สามารถรีไซเคิลพลาสติกชนิดนี้ได้ พอลิเมอร์แต่ละประเภทแสดงดังรูปที่ 2.2

เทอร์โมเซตติงพลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่นิยมสำหรับงานทางวิศวกรรมเพราะมีความเสถียรต่อความร้อนสูง มีความแข็งแรงสูงไม่บวมง่าย มีความเสถียรเชิงมิติสูง มีความทนทานต่อการเกิดการคืบ (creep) มีน้ำหนักเบา และมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า พอลิเมอร์เรซินที่นำมาใช้ในการทำพอลิเมอร์คอนกรีตเป็นประเภทเทอร์โมเซตติงพลาสติก โดยพอลิเมอร์เรซินที่นิยมในงานก่อสร้าง ได้แก่ พอลิเอสเตอร์และอีพอกซี อีพอกซีมีข้อดีคือสามารถในการยึดเกาะกับมวลรวมได้ดี มีกำลังรับแรงอัดและแรงดึงสูง และต้านทานการกัดกร่อนดี แต่ข้อจำกัดที่นำมาใช้ในงานคอนกรีตเพราะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแตกต่างจากคอนกรีตมากทำให้เกิดปัญหาในการใช้งานร่วมกับคอนกรีตปกติ นอกจากนั้นแล้วยังมีกลิ่นที่รุนแรงทำให้ไม่เหมาะสมในการใช้งานในที่อับและบางส่วนผสมของอีพอกซีไม่สามารถใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่ชื้นได้ อีกทั้งคุณสมบัติต่าง ๆ ของอีพอกซียังแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ ส่วนพอลิเอสเตอร์เป็นวัสดุประสานที่มีความสามารถในการยึดเกาะที่ดี มีกำลังรับแรงอัดและแรงดึงสูง ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี อีกทั้งมีสมบัติที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก แต่อย่างไรก็ดีการหดตัวของพอลิเอสเตอร์อาจจะเป็นข้อจำกัดประการเดียวในการใช้งาน Weatherhead (1980) ได้เสนอคุณสมบัติทางวิศวกรรมโดยทั่วไปของพอลิเมอร์เรซินที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยอีพอกซีเรซินมีกำลังรับแรงดึงมากที่สุด รองลงมาคือพอลิเอสเตอร์เรซินและไวโนเอสเตอร์เรซินตามลำดับ พอลิเอสเตอร์และอีพอกซีให้โมดูลัสแรงดึงและหน่วยน้ำหนักที่ไม่ต่างกันมากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมต่าง ๆ โดยเลือกใช้พอลิเอสเตอร์เรซินเป็นหลักเพราะมีราคาถูกกว่าอีพอกซีมาก อีกทั้งพอลิเอสเตอร์เรซินสามารถผลิตได้จากกระบวนการรีไซเคิลขยะขวดพลาสติกได้อีกด้วย



(a) การซ่อมแซมผิวถนนคอนกรีต (Tomasulo, 2009)

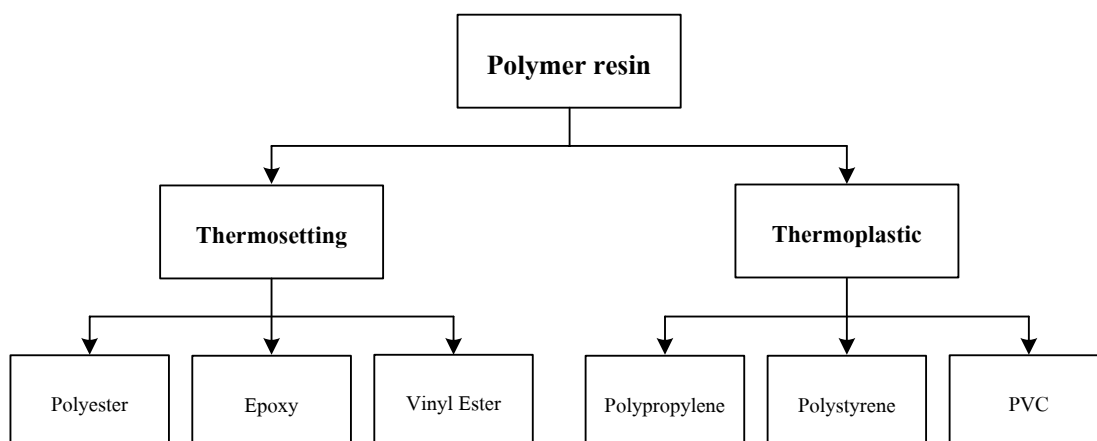


(b) รางระบายน้ำเสียบ (Cangzhou Innovation Metalwork Co., 2012)



(c) บ่อพักระบบท่อบำบัดน้ำเสียบ (Shijiazhuang Yinxing Sand Production Co., 2000)

รูปที่ 2.1 การใช้งานพอลิเมอร์คอนกรีตในงานประเภทต่าง ๆ



รูปที่ 2.2 ประเภทของพอลิเมอร์เรซินที่นิยมนำมาใช้งานก่อสร้าง

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเรซินประเภทเทอร์โมเซตติง (Weatherhead, 1980)

Resin	Polyester	Epoxy	Vinyl ester
Tension strength (MPa)	35-108	55-130	73-81
Modulus of elasticity (GPa)	2.1-4.1	2.8-4.1	3.0-3.5
Density (g/cm ³)	1.12-1.32	1.20-1.30	1.10-1.46

2.1.1 พอลิเอสเตอร์เรซิน

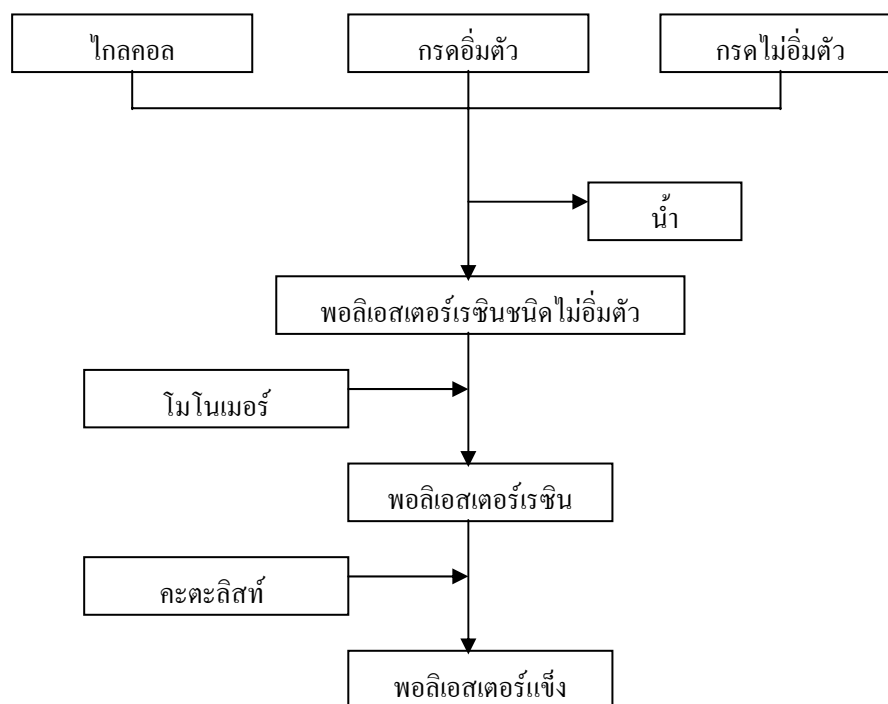
พอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์เรซิน คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยเอสเทอร์หมู่ $\text{-}\overset{\text{O}}{\underset{|}{\text{C}}}\text{-O-}$ ตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป ซึ่งสังเคราะห์จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น (condensation polymerization) ระหว่างสารประกอบจำพวกไกลคอล (glycol) และกรดไดเบสิก (dibasic acid) พอลิเอสเตอร์เรซินแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดอิ่มตัว (saturated polyester resin) และพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated polyester resin) พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นเรซินเหลวมีสีเหลืองอ่อน ๆ และมีองศาของพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization) ต่ำประมาณ 8 ถึง 10 เรซินที่ยังไม่ได้ใช้งานจะมีสภาพเป็นของเหลวข้นสีเหลืองใส เมื่อใส่สารเคมีกระตุ้นปฏิกิริยาหรือได้รับการกระตุ้นจากฉายแสงอัลตราไวโอเลตจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้นและเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็งใส พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวโดยทั่วไปสังเคราะห์มาจากปฏิกิริยาปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) ของไกลคอลกับสารผสมของกรดอินทรีย์อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว (saturated and unsaturated dicarboxylic acid) ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาจะได้น้ำเป็นผลผลิต เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดจะต้องนำผลผลิตที่ได้ไปละลายในตัวทำละลาย

ที่ไม่อิ่มตัว เช่น สไตรีน (styrene) เป็นต้น เพื่อให้อยู่ในสภาพที่เป็นของเหลวและยังเป็นส่วนหนึ่งในการเกิดปฏิกิริยาแข็งตัว (curing reaction) ภายหลังที่ได้รับความร้อนหรือภายหลังที่เติมตัวเริ่มปฏิกิริยาลงไปแล้ว พอลิเอสเทอร์เมื่อละลายอยู่ในโมโนเมอร์ที่ไม่อิ่มตัวพันธะที่ไม่อิ่มตัวจะทำปฏิกิริยากับพันธะที่ไม่อิ่มตัวของโมโนเมอร์บางส่วน ส่วนที่เหลือจะเข้าทำปฏิกิริยาขณะพอลิเอสเทอร์แข็งตัว รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพการทำพอลิเอสเทอร์แข็ง พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวมีโมโนเมอร์ที่ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวทำละลายและเป็นตัวที่ทำให้โมเลกุลของพอลิเอสเทอร์มีความหนืดสูงก่อนเกิดการแข็งตัว และเมื่อได้รับความร้อนหรือภายหลังการเติมคะตะลิสต์ (catalyst) โมโนเมอร์จะถูกใช้เพื่อทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของพอลิเอสเทอร์ทำให้มีโครงสร้างเป็นร่างแหเทอร์โมเซตพอลิเอสเทอร์เรซินจะเกิดการแข็งตัว การเติมโมโนเมอร์ที่มีความหนืดต่ำ เช่น สไตรีน เป็นต้น พอลิเมอร์เรซินจะสามารถผสมกับมวลรวมได้ง่ายและให้ของผสมที่พร้อมจะแข็งตัวเป็นคอนกรีตที่แน่นมีรูพรุนน้อย และใช้สารยึดเกาะในปริมาณต่ำ นอกจากนี้พบว่า การผสมโมโนเมอร์ที่มีความหนืดต่ำจะสามารถแทรกซึมเข้าไปตามรอยแยกและช่องว่างในอนุภาคของมวลรวมได้ดีด้วย (Hirano, 1992) โมโนเมอร์ที่นิยมใช้มากที่สุดในงานพอลิเมอร์คอนกรีตคือสไตรีนเนื่องจากราคาถูกและมีสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดี

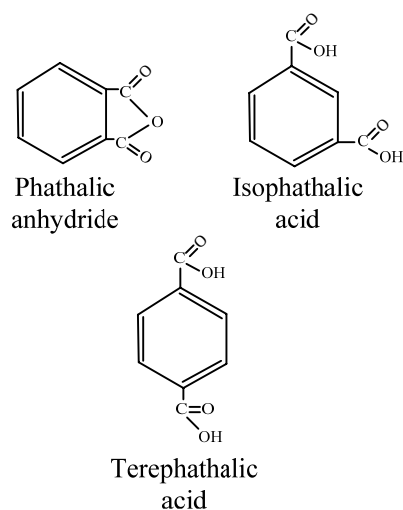
พอลิเอสเทอร์เรซินไม่อิ่มตัวยังสามารถแบ่งประเภทตามชนิดของกรดตั้งต้น กระบวนการ ได้แก่ กรดฟาลิกสามารถเตรียมได้เป็นออโทฟาตาลิเรซิน (orthophthalic resin) กรดไอโซฟาลิกสามารถเตรียมได้เป็นไอโซฟาตาลิเรซิน (isophthalic resin) เป็นต้น รูปแบบโมเลกุลของกรดที่ใช้ผลิตพอลิเอสเทอร์ไม่อิ่มตัวแสดงดังรูปที่ 2.4

พอลิเมอร์เรซินที่ใช้ผลิตพอลิเมอร์คอนกรีตโดยทั่วไปจะเป็นเทอร์โมเซตทั้งแบบที่ไม่อิ่มตัวเพราะสามารถผลิตได้ง่ายและราคาถูก นอกจากนี้ยังทนต่อสารเคมีและสามารถต้านทานแรงอัดสูง ส่วนความต้านทานแรงกระแทกจะใกล้เคียงกับพอลิเมอร์เรซินชนิดอื่น ๆ (Chanda and Ohama, 1994) ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือคะตะลิสต์ (catalyst) เป็นสารที่ช่วยให้พอลิเมอร์เรซินสามารถก่อตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง ส่วนใหญ่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นสารจำพวกเกลือของโลหะเช่น โคบอลแนฟทีเนต (cobalt naphthenate) เป็นต้น คะตะลิสต์เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเรซินเปลี่ยนสภาพพอลิเมอร์เรซินจากของเหลวไปเป็นของแข็ง เช่น เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (MEKPO) เป็นต้น คุณสมบัติทั่วไปของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากพอลิเมอร์เรซินชนิดต่าง ๆ ไว้ดังตารางที่

2.3



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการทำพอลิเอสเตอร์แข็ง (วิไลพร, 2540)



รูปที่ 2.4 ประเภทของกรดที่ใช้ผลิตพอลิเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว (Cassis and Talbot, 1998)

การกระตุ้นให้พอลิเอสเตอร์เรซินก่อตัวสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาและความร้อน ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวกระตุ้นปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง แสงอัลตราไวโอเลต และลำอิเล็กตรอน วิธีที่ง่าย สะดวก และนิยมมากที่สุด คือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและกะตะลิสต์ที่

อุณหภูมิห้อง สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะพอลิเอสเตอร์แข็งตัวคือ ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างสไตรีนโมโนเมอร์และพันธะที่ไม่อิ่มตัวของพอลิเอสเตอร์ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาและคะตะลิสต์คอยกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิห้องจะไม่เกิดปฏิกิริยาต้องอาศัยความร้อนกระตุ้นให้ทำงาน โดยทั่วไปการแข็งตัวของพอลิเอสเตอร์แบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกคือระยะเวลาหลังจากเติมคะตะลิสต์แล้วจนเรซินเริ่มแข็งตัวเป็นวุ้น ระยะเวลานี้อาจเรียกว่าระยะเวลาที่เป็นวุ้น (gel time) ค่าระยะเวลาที่เป็นวุ้นคือค่าที่บ่งบอกถึงระยะเวลาในการทำงานสำหรับพอลิเอสเตอร์จะต้องทำงานให้เสร็จก่อนที่พอลิเอสเตอร์จะแข็งตัว ช่วงหลังคือระยะเวลาหลังจากเรซินเริ่มแข็งตัวเป็นวุ้นจนเรซินแข็งตัวเต็มที่ ระยะเวลาช่วงนี้อาจเรียกว่าระยะเวลาบ่ม (cure time) ซึ่งบ่งบอกถึงช่วงการทำงาน เมื่อผ่านช่วงนี้ไปแล้วพอลิเอสเตอร์จะแข็งตัวเต็มที่และสามารถจะถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้โดยชิ้นงานไม่เสียรูปทรง

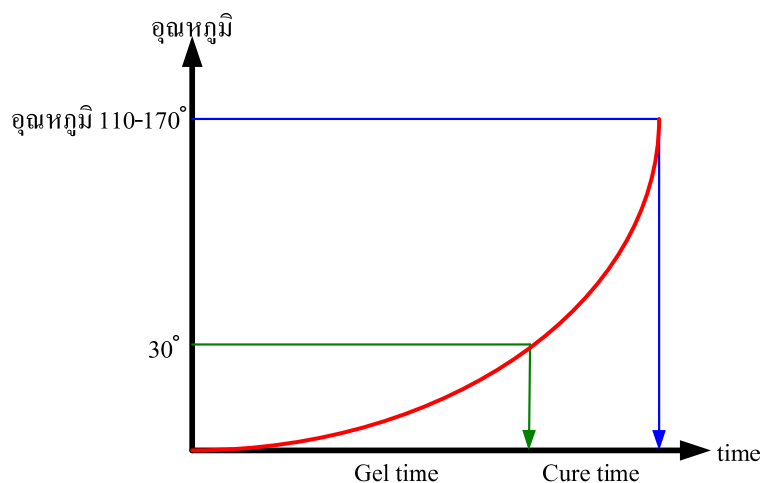
ปฏิกิริยาแข็งตัวของพอลิเมอร์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) โดยความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาภายหลังจากการเติมคะตะลิสต์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ขณะที่พอลิเอสเตอร์แข็งตัวกำลังของเรซินจะเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิสูงสุด เรซินจะแข็งตัวประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์จากนั้นเรซินจะแข็งตัวต่อไปเรื่อย ๆ การป้องกันไม่ให้พอลิเอสเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแข็งตัวไม่เต็มที่ในกระบวนการผลิตมักจะนำผลิตภัณฑ์ไปทำการบ่มต่อ (post cure) ส่วนใหญ่ทำโดยการต้มที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 30 นาที หรืออบที่อุณหภูมิประมาณ 100 ถึง 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ถึง 6 ชั่วโมง

จากผลการศึกษางายวิชัยที่ผ่านมามองค์ประกอบที่มีผลต่อการแข็งตัวของพอลิเอสเตอร์เรซินประกอบด้วย อุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณเรซิน ปริมาณความชื้นและปริมาณออกซิเจน ที่อุณหภูมิสูงพอลิเอสเตอร์จะแข็งตัวได้เร็วกว่าอุณหภูมิต่ำ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาถ้าปริมาณมากจะแข็งตัวเร็วกว่า ปริมาณเรซินมากจะแข็งตัวได้เร็วกว่าปริมาณน้อย ถ้าความชื้นสูงการแข็งตัวของพอลิเอสเตอร์จะช้าโดยปกติปริมาณน้ำที่มีอยู่ในพอลิเอสเตอร์จะต้องมีค่าไม่เกิน 0.05 เปอร์เซ็นต์ ออกซิเจนเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยา (inhibitor) ถ้าปริมาณออกซิเจนสูง เช่น การรบกวนตัวอย่างโดยการกวนจะทำให้ ออกซิเจนเข้าสู่เรซินได้มากการแข็งตัวจะช้าลง

ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะทั่วไป และการใช้งานของผลิตภัณฑ์คอนกรีตพอลิเมอร์

(แปลจาก Browne et al., 1975)

ชนิดของสารพอลิเมอร์ในคอนกรีต	คุณลักษณะโดยทั่วไป	ลักษณะการใช้งาน
พอลิเมธิลเมทาไครเลต poly(methyl methacrylate)	ดูดซึมน้ำต่ำ ด้านทานการทำลายจากผิวหนังน้ำแข็งสูง อัตราการหดตัวจากการร้าวภายหลังหล่อแบบต่ำ ด้านทนสารเคมีได้ดี ทนทานต่อการใช้งานสภาพภายนอก	ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมสำหรับส่วนบันได แผ่นผลิตภัณฑ์งานสุขาภิบาลที่เป็นกันกัน
พอลิเอสเตอร์ (polyester)	มีความแข็งแรง ยึดติดได้ดีกับวัสดุอื่น ๆ สามารถต้านทานสารเคมีและการทำลายจากผิวหนังน้ำแข็ง แต่ขณะเปลี่ยนสภาพแข็งตัวมีรอยร้าวจากการหดตัวมาก	เนื่องจากราคาถูกและเป็นที่นิยมใช้สำหรับในอาคารสาธารณะและราชการ เช่น งานพื้น งานท่อระบายน้ำ บันไดโรงงาน และงานต่าง ๆ สำหรับการหล่อในที่ในการก่อสร้าง
อีพอกซี (epoxy)	มีการยึดเกาะที่ดีมากและแข็งแรงกว่าวัสดุประเภทอื่น ๆ การหดตัวต่ำ ทนทานต่อสารเคมีดีมาก และมีการต้านทานการก๊อปปี้และการแตกร้าวที่ผิวดีมีการดูดซึมน้ำต่ำ	เนื่องจากราคาค่าใช้จ่ายสูง การใช้งานจึงจำเป็นต้องใช้เฉพาะงาน โดยใช้ผสมมอร์ต้า สำหรับซ่อมแซมพื้นโรงงานอุตสาหกรรม ผิวการทาง ปิดซ่อมผิวกำแพงภายนอก สำหรับโครงสร้างที่มีปัญหาการถูกทำลาย
พอลิเมอร์กลุ่มสารฟูเรน (furan-base polymer)	เป็นวัสดุประกอบสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานสารเคมีประเภทกรดหรือเบสเข้มข้น และสามารถต้านทานได้ดีกับเคมีอินทรีย์สารในลักษณะของเหลว เช่น หัวเชื้อน้ำหอม ไฮโดรคาร์บอน และส่วนประกอบของสารคลอไรด์	ใช้สำหรับอุดซ่อมเป็นเนื้อมอร์ต้าในก้อนอิฐประเภท อิฐคาร์บอน อิฐแดง เป็นต้น งานพื้นและปรับผิวหน้า ที่ต้องการต้านทานสารเคมี และแรงดัน เนื่องจากการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยทันทีทันใด

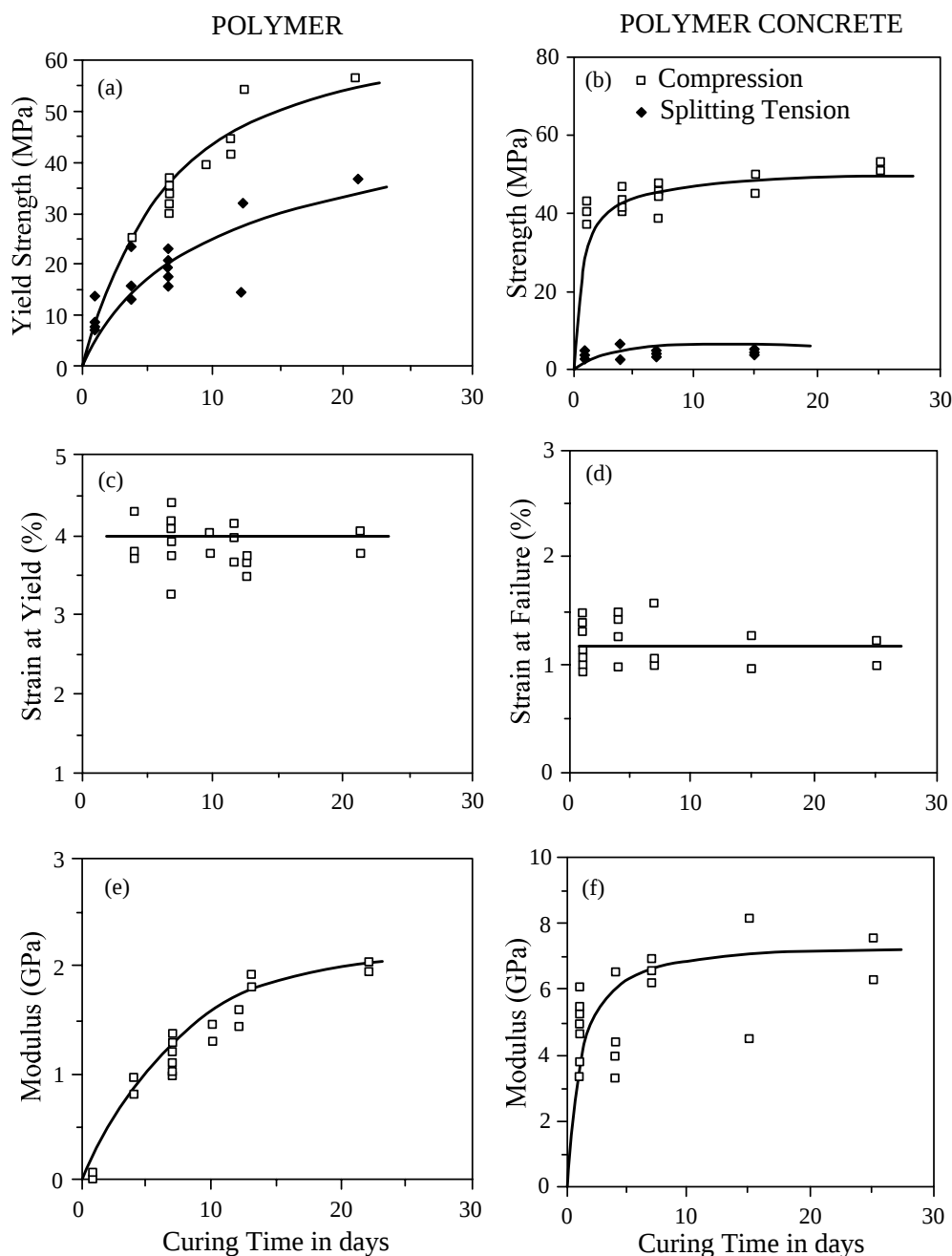


รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิและเวลาขณะพอลิเอสเตอร์เรซินแข็งตัว (รัตนา, 2541)

2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีต

2.2.1 ระยะเวลาและวิธีการบ่ม

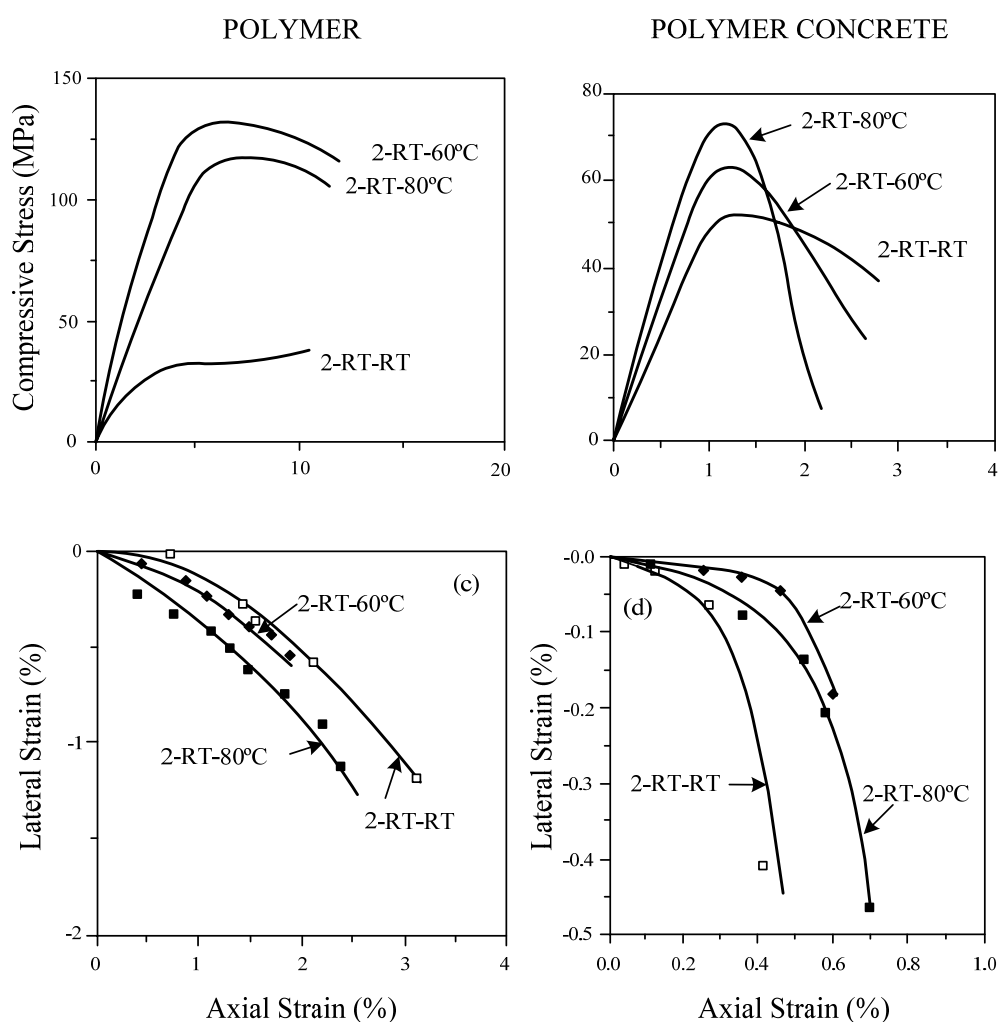
พอลิเมอร์เรซินเมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันเมื่อเคมิตัวเริ่มปฏิกิริยา ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันพัฒนาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตามระยะเวลา กำลังของพอลิเมอร์เรซินพัฒนาตามระยะเวลาบ่มดังอธิบายได้ตามผลการทดสอบโดย Vipulanandan and Paul (1993) ซึ่งทดสอบและบ่มที่อุณหภูมิห้องดังแสดงในรูปที่ 2.6 (a), (c) และ (e) สำหรับกำลังรับแรงอัดที่จุดคราก ความเครียดที่จุดคราก และโมดูลัสยืดหยุ่นตามลำดับ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบการพัฒนากำลังของพอลิเมอร์เรซินและพอลิเมอร์คอนกรีตซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.6 (b), (d) และ (f) จะเห็นได้ว่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงกำลัง ความเครียดที่จุดยวบ และ โมดูลัสตามระยะเวลาบ่มสำหรับ พอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอนกรีต (Vipulanandan and Paul, 1993)

อย่างไรก็ตามวัสดุพอลิเมอร์เมื่อบ่มที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันจะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์ขึ้นซึ่งยืนยันได้จากผลการทดสอบของ Vipulanandan and Paul (1993) ซึ่งทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยบ่ม 1 วันและบ่มต่อที่อุณหภูมิต่าง ๆ อีก 1 วัน

Vipulanandan and Paul (1993) สรุปว่าอุณหภูมิเหมาะสมสำหรับการบ่มตัวอย่างพอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอนกรีตจากผลการทดสอบ คือ 60 และ 80 องศาเซลเซียสตามลำดับ นอกจากนี้การบ่มอุณหภูมิสูงยังส่งผลต่ออัตราส่วนโพซอลซึ่งสังเกตได้จากความเครียดในแนวนอน (lateral strain) ที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยซึ่งพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มที่อุณหภูมิจะมีอัตราส่วนโพซอลต่ำกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้จากผลการทดสอบการฉีกของ Vipulanandan and Paul (1993) ยังสามารถสรุปได้ว่าการบ่มที่อุณหภูมิสูงช่วยลดการฉีกของวัสดุพอลิเมอร์คอนกรีตได้อย่างมาก



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มที่อุณหภูมิสูง (Vipulanandan and Paul, 1993)

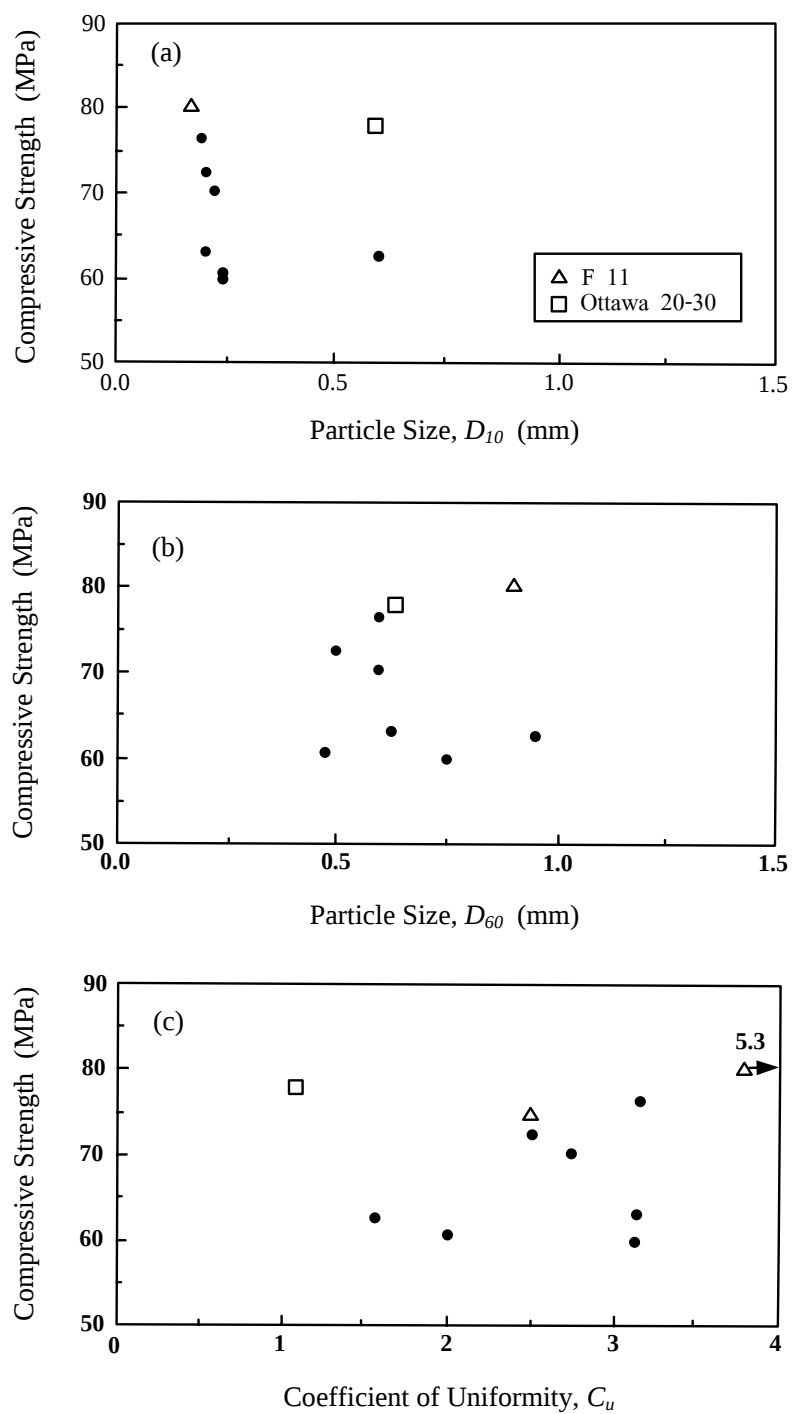
2.2.2 สัดส่วนผสม

มวลรวมที่ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์คอนกรีตจะต้องแห้งไม่มีสิ่งเจือปนเช่นเดียวกับมวลรวมที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตปกติ จากการศึกษางานวิจัยพบว่าการใช้ทรายปน (blasting sand aggregate) จะช่วยให้ค่าโมดูลัสแรงดัด (flexural modulus) ของพอลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์ ทรายละเอียดที่มีสัดส่วนคละที่ดีจะให้สมบัติด้านการแตกร้าวดีกว่า พอลิเอสเทอร์พอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายขนาดมาตรฐาน (Ottawa) (Vipulanandan and Dharmarajan, 1989) ในทางปฏิบัติส่วนผสมของพอลิเมอร์คอนกรีตควรมีมวลรวมประมาณ 85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนผสมที่มีมวลรวมน้อยจะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีผิวเรียบแต่ราคาจะมีราคาสูง หากส่วนผสมที่มีมวลรวมมากจะทำให้มีปริมาณสารยึดเกาะน้อย ไม่พอที่จะยึดเกาะมวลรวมเข้าด้วยกัน ลักษณะมวลรวมที่ดีควรมีขนาดคละต่าง ๆ กัน เพื่อให้ส่วนผสมแน่น อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณการใช้สารยึดเกาะได้ นอกจากนี้มวลรวมควรมีกำลังสูงและมีความชื้นต่ำเพราะว่าความชื้นจะทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างสารยึดเกาะกับมวลรวมลดลง (Chanda and Ohama, 1994) นอกจากนี้ Bares (1978) ได้ทำการสรุปอัตราส่วนระหว่างปริมาณพอลิเมอร์กับมวลรวมโดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 1 : 7 และ 1 : 12 ที่ทำให้คุณสมบัติมีความเหมาะสม โดยขึ้นอยู่กับ ขนาดอนุภาค ความพรุน ลักษณะของผิวอนุภาค และความสามารถเท่าได้ วิลโลพร (2540) ได้ศึกษาเรื่องการทำพอลิเมอร์คอนกรีตจากพอลิเมอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ผลการศึกษพบว่าปริมาณพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เหมาะสมคือ 20 เปอร์เซ็นต์ (โดยใช้ MEKPO 1 เปอร์เซ็นต์ และ Co-octoate 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของเรซิน) กรวด 44 เปอร์เซ็นต์ ทราย 23 เปอร์เซ็นต์ และขี้เถ้าลอย 13 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก โดยสามารถต้านทานแรงกดอัดได้ 78.30 เมกะปาสกาล และต้านทานแรงดัดได้ 26.86 เมกะปาสกาลโดยใช้เวลาในการบ่มเป็นเวลา 3 วัน อภิสิทธิ์ (2538) ได้ศึกษากำลังของมอร์ตาร์พอลิเอสเทอร์เรซินซึ่งพบว่าอัตราส่วนผสมที่จะนำไปใช้งานคือพอลิเอสเทอร์ 1 ส่วน ทราย 3 ส่วน โดยน้ำหนัก ตัวอย่างทดสอบสามารถต้านทานแรงกดอัดได้ 55.01 เมกะปาสกาล ค่าความต้านทานแรงดึงได้ 5 เมกะปาสกาลและค่าความต้านทานแรงดัดได้ 15.79 เมกะปาสกาล ความหนาแน่น 1.812 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น 2.147×10^3 เมกะปาสกาล โดยใช้ระยะเวลาในการทำบ่ม 28 วัน Vipulanandan and Paul (1993) เสนอว่าการเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์ เรซินในพอลิเมอร์คอนกรีตทำให้พอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังรับแรงดัดและความแกร่งเชิงดัดมีค่าสูงขึ้น แต่จะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง โดยจุดเหมาะสมจะเป็นจุดที่อัตราส่วนของกำลังรับแรงอัดต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าสูงสุด จากผลการทดสอบพบว่าจุดดังกล่าวเป็นจุดที่อัตราส่วนของน้ำหนักพอลิเมอร์ต่อพอลิเมอร์คอนกรีตอยู่ในช่วง 12 ถึง 14 เปอร์เซ็นต์ และให้กำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 60 ถึง 70 เมกะปาสกาล

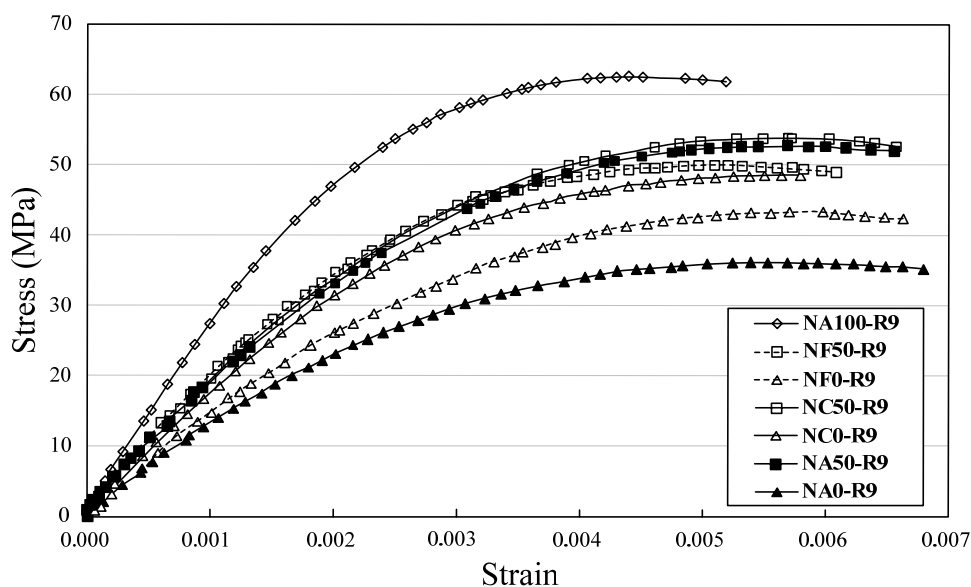
นอกจากปริมาณเรซินแล้วขนาดกะของมวลยังมีผลต่อพฤติกรรมทางกลของ พอลิเมอร์คอนกรีต Muthukumar et al. (2003) ได้ศึกษาผลการกระทบของสัดส่วนของมวลรวมต่อปริมาตรช่องว่างในพอลิเมอร์คอนกรีต และได้เสนอวิธีการออกแบบโดยสัดส่วนเหมาะสมที่ปริมาตรช่องว่างที่น้อยที่สุด จำนวน 6 สัดส่วน ดังแสดงในตารางที่ 2.4 Vipulanandan and Paul (1990) ได้ศึกษาผลของขนาดมวลรวมและการกระจายขนาดต่อกำลังรับแรงอัดของอีพอกซีพอลิเมอร์คอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 2.8 ขนาดกะของมวลรวมถูกพิจารณาผ่านตัวแปร D_{10} D_{60} และ C_u ซึ่งปรับเปลี่ยนระหว่าง 0.2 ถึง 0.75 มิลลิเมตร 0.5 ถึง 1.5 มิลลิเมตร และ 1.4 ถึง 5.3 ตามลำดับ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวแปรการกระจายขนาดกะทั้ง 3 ไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตสำหรับช่วงของตัวแปรที่ทำการศึกษา สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกก็ให้ผลการทดสอบในทิศทางเดียวกัน Jo et al. (2008) เสนอผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของรีไซเคิลพอลิเอสเทอร์พอลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากมวลรวมขนาดต่าง ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 แต่อย่างไรก็ตาม Jo et al. ยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจนเกี่ยวกับขนาดของมวลรวมต่อกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีต

ตารางที่ 2.4 การออกแบบสัดส่วนกะเหมาะสมสำหรับทำพอลิเมอร์คอนกรีต
(Muthukumar et al., 2003)

No.	Grade	Particle size, mm	
		Min	Max
1	A	4.76	9.52
2	B	2.38	4.76
3	C	1.19	2.38
4	D	0.60	1.19
5	E	0.30	0.60
6	F	0.15	0.30

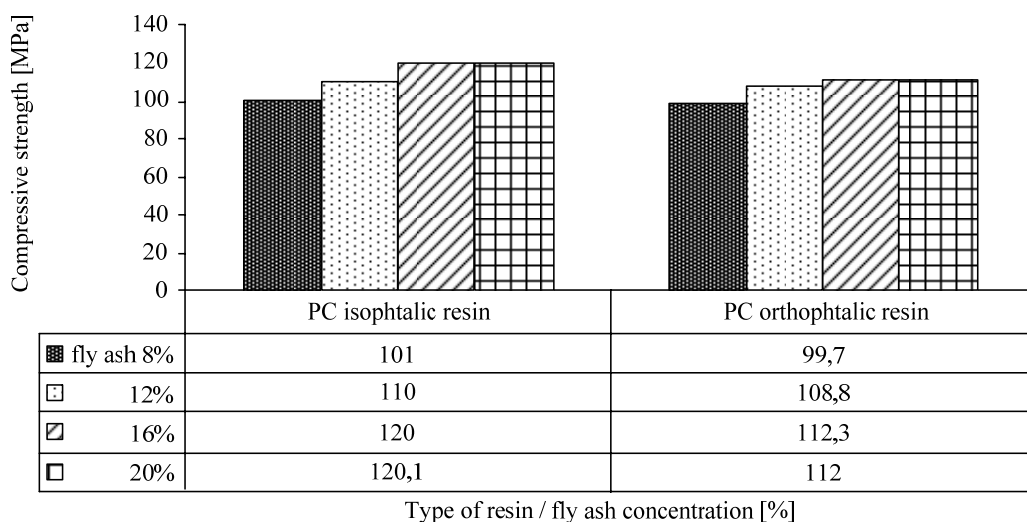


รูปที่ 2.8 ผลของขนาดมวลรวมและการกระจายขนาดผลต่อกำลังรับแรงอัดของอีพอกซีพอลิเมอร์คอนกรีต (Vipulanandan and Paul, 1990)



รูปที่ 2.9 ผลของสัดส่วนผสมต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของ ไรโซเคลฟอลิเมอร์ที่ปริมาณเรซิน 9 เปอร์เซ็นต์ (Jo et al., 2008)

นอกจากส่วนผสมระหว่างมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดแล้วในบางกรณีการ ผสมพอลิเมอร์ยังสามารถเติมวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการ เช่น การเติมวัสดุ ประเภทเถ้าลอย (fly ash) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) เพื่อลดช่องว่าง (void) ใน พอลิเมอร์คอนกรีต การเติมเส้นใย (fiber) เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดึง Gorninski et al. (2004) ได้ นำเสนอผลการทดสอบของพอลิเอสเทอร์พอลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยที่ปริมาณ 8 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2.10 Gorninski et al. สรุปว่าเมื่อเพิ่ม ปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสมก่อนตัวอย่างจะมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเพราะสัญญาณกลมของเถ้าลอย ช่วยให้การจัดเรียงตัวของมวลรวมในพอลิเมอร์คอนกรีตดีขึ้น ข้อสรุปนี้สามารถยืนยันได้โดยผลการ ทดสอบโดยภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเถ้าลอย เข้าไปเติมเต็มลดช่องว่างในพอลิเมอร์คอนกรีต (Gorninski, 2002) โมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยก็มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเพื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ไม่ผสมเถ้าลอย อีกทั้งยังมีค่า สูงกว่าปอร์แลนด์ซีเมนต์คอนกรีตกำลังสูงปกติมาก โดยโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย ดังแสดงในตารางที่ 2.5



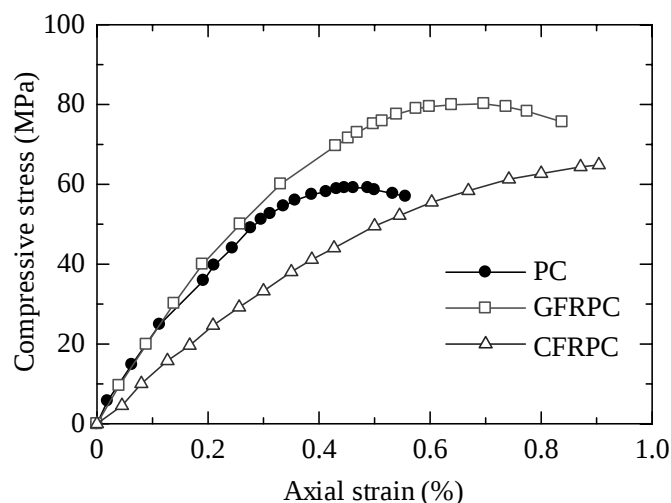
รูปที่ 2.10 ผลของประเภทเรซินและปริมาณเถ้าลอยที่ผสมเพิ่มต่อกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีต (Gorninski et al., 2004)

ตารางที่ 2.5 โมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์คอนกรีตผสมเถ้าลอย (Gorninski et al., 2004)

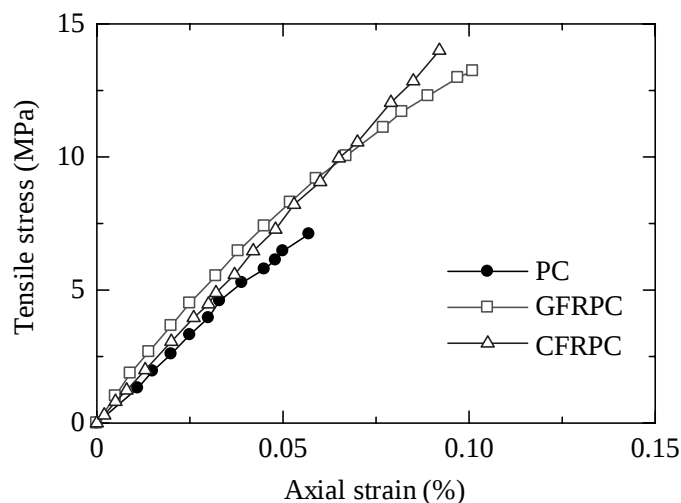
Test specimen Resin-ash (%)	Elastic modulus (GPa)				S (GPa)	CV (%)
	Individual values			Mean		
I-8	23.94	25.00	25.05	24.66	0.62	2.51
I-12	26.42	28.69	26.72	27.28	1.23	4.50
I-16	31.70	29.73	29.69	30.37	1.15	3.78
I-20	28.20	28.59	28.40	28.40	0.20	0.69
O-8	22.70	22.31	26.13	23.71	2.10	8.86
O-12	25.30	23.59	23.80	24.23	0.93	3.84
O-16	27.16	28.35	26.62	27.38	0.88	3.21
O-20	28.77	28.70	29.38	28.95	0.37	1.25

สำหรับการเติมเส้นใยเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดึงเส้นใยที่นิยมนำมาผสมในพอลิเมอร์คอนกรีต ได้แก่ เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว และเส้นใยเหล็ก เป็นต้น การใส่เส้นใยแก้วจะช่วยเพิ่มค่ากำลังรับแรงดัด และความต้านทานต่อการแตกร้าว (toughness fracture) แก่พอลิเมอร์คอนกรีต นอกจากนั้นแล้วการเคลือบเส้นใย (treatment fiber glass) ด้วยสารประสานคู่ควบ (coupling agent) จะช่วยเพิ่มสมบัติดังกล่าวให้ดีขึ้นอีก (Mebarkia and Vipulanandan, 1990) และ Omaha and Nishimura (1979) เสนอผลการทดสอบการใช้เส้นใยเหล็กขนาดต่าง ๆ ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเส้นใยเหล็กสามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัด แรงดัด และแรงกระแทกของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตได้ดี Sett and Vipulanandan (2002) ได้ศึกษาเรื่องคุณสมบัติของแรงกดอัดและแรงดึงของพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใย จากการศึกษาพบว่าที่เส้นใยคาร์บอน 6 เปอร์เซ็นต์ ใช้ปริมาณพอลิเมอร์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเส้นใยแก้ว 6 เปอร์เซ็นต์ ใช้ปริมาณพอลิเมอร์ 18

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แม้ว่าเส้นใยคาร์บอนจะเพิ่มความเครียดที่จุดวิบัติ (failure strain) ของพอลิเมอร์คอนกรีต แต่กำลังรับแรงอัดและโมดูลัสความยืดหยุ่นจะลดลงในการทดสอบแรงกดอัด ส่วนในการทดสอบแรงดึงพบว่าเส้นใยคาร์บอน และเส้นใยแก้วจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกล ของความเครียดที่จุดวิบัติ กำลังและโมดูลัสความยืดหยุ่นดังรูปที่ 2.11



(a) Compressive stress versus axial strain of various PC

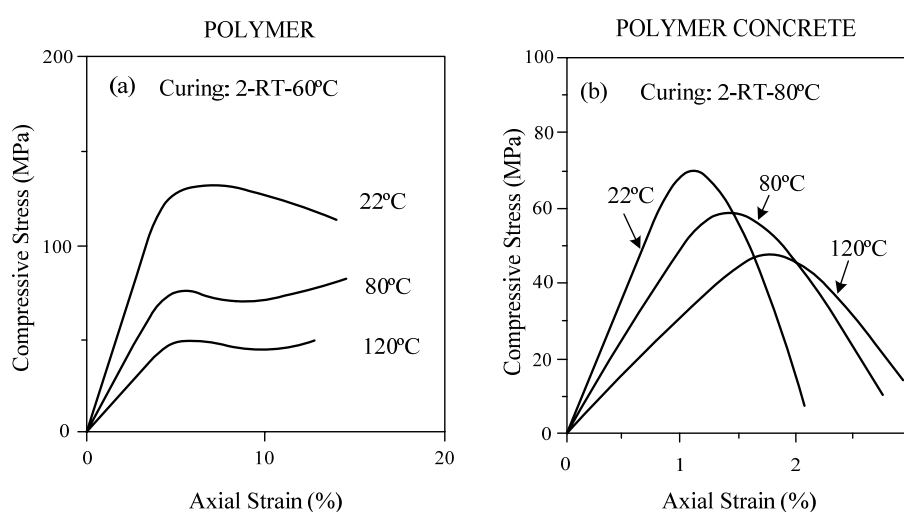


(b) Tensile stress versus axial strain of various PC

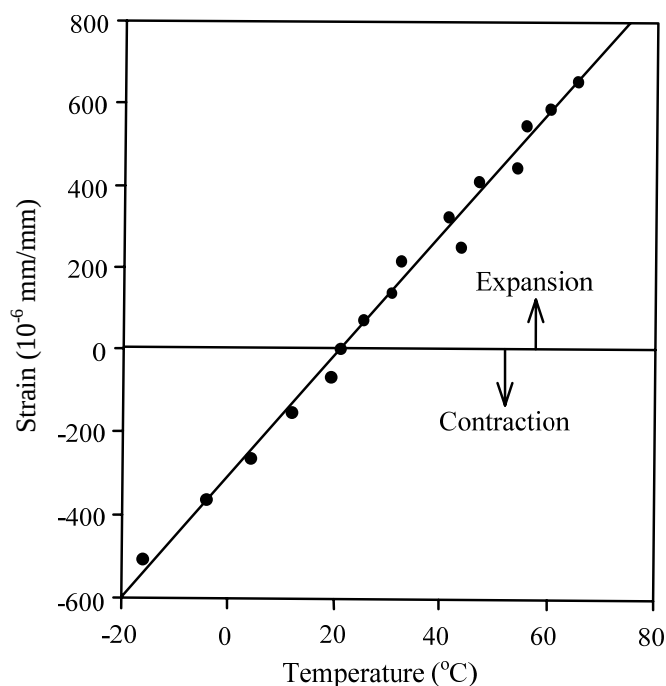
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว (Sett and Vipulanandan, 2002)

2.2.3 อุณหภูมิใช้งาน

แม้ว่าคุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอนกรีตจะมีค่าสูงมากในการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่ออุณหภูมิขณะทดสอบ (อุณหภูมิใช้งาน) เพิ่มขึ้นมักจะกระทบต่อพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอนกรีต Vipulanandan and Paul (1993) ได้เสนอผลการทดสอบพอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอนกรีตที่ทดสอบภายใต้อุณหภูมิใช้งานต่าง ๆ ระหว่าง 22 ถึง 120 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.12 สำหรับพอลิเมอร์เรซินที่ไม่ผสมมวลรวม (ดูรูปที่ 2.12a) กำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์เรซินลดลงประมาณครึ่งหนึ่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิใช้งานจาก 22 เป็น 80 องศาเซลเซียส และลดลงประมาณสองในสามส่วนเมื่อเพิ่มอุณหภูมิใช้งานจาก 22 เป็น 120 องศาเซลเซียส จากผลการทดสอบพอลิเมอร์เรซินค่ากำลังรับแรงอัดลดลงค่อนข้างมาก แต่เมื่อเพิ่มส่วนผสมมวลรวมเป็นพอลิเมอร์คอนกรีตจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดลดลงประมาณ 14 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์สำหรับอุณหภูมิใช้งานที่ 80 และ 120 องศาเซลเซียสตามลำดับ Rebiez (1995) ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่คล้ายกันนี้แต่ใช้พอลิเอสเตอร์เรซินจากกระบวนการรีไซเคิลพลาสติก PET ซึ่งจากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์จากรีไซเคิล PET ให้การทดสอบที่สอดคล้องกันกับผลทดสอบของ Vipulanandan and Paul (1993) Rebiez (1995) ยังได้ศึกษาถึงคุณสมบัติการขยายและหดตัวเนื่องจากความร้อนของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์ภายใต้อุณหภูมิ -20 ถึง 80 องศาเซลเซียส จากผลการทดสอบพบว่าพอลิเมอร์คอนกรีตจะขยายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 20 องศาเซลเซียสและหดตัวเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.13



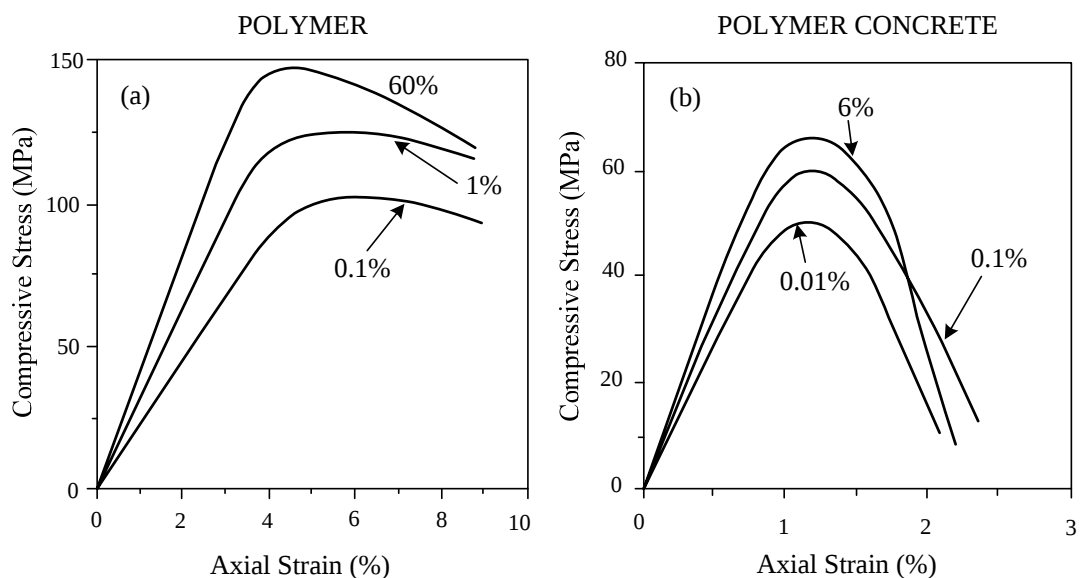
รูปที่ 2.12 ผลของอุณหภูมิขณะใช้งานต่อพฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอนกรีต (Vipulanandan and Paul, 1993)



รูปที่ 2.13 การขยายและหดตัวเนื่องจากความร้อน (Rebiez, 1995)

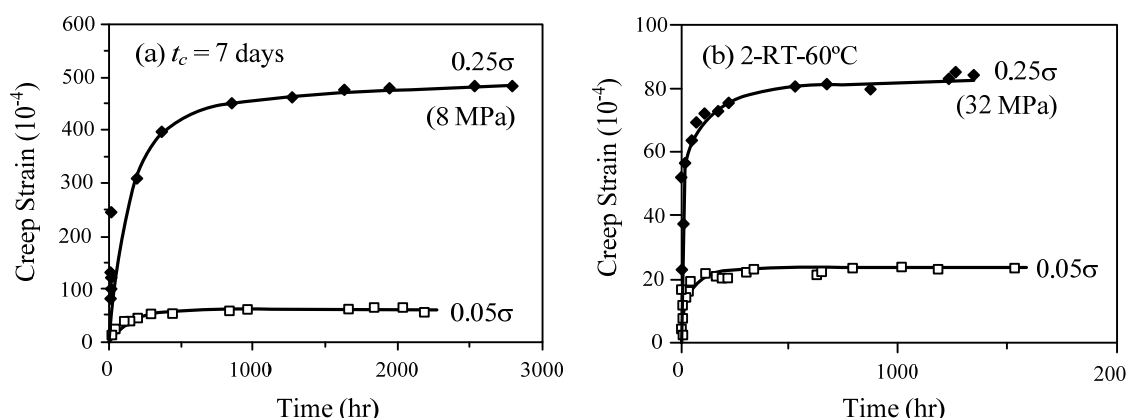
2.2.4 ลักษณะของการให้แรงกระทำ

อัตราการให้น้ำหนักบรรทุกหรืออัตราความเครียด (strain rate) ซึ่งตัวแปรที่ควบคุมได้ขณะทำการทดสอบเพื่อให้ผลการทดสอบมีสถานะเหมือนสภาพจริง แต่เป็นที่ทราบกันดีว่ากำลังของวัสดุขึ้นอยู่กับอัตราการให้น้ำหนักบรรทุก จากผลการศึกษาผลของอัตราความเครียดต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเมอร์เรซินและพอลิเมอร์คอนกรีตของ Vipulanandan and Paul (1993) โดยปรับเปลี่ยนอัตราความเครียดระหว่าง 0.1 ถึง 60 เปอร์เซนต์ สำหรับตัวอย่างพอลิเมอร์และอัตราความเครียดระหว่าง 0.01 ถึง 6 เปอร์เซนต์ สำหรับตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีต ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.14 กำลังรับแรงอัดและโมดูลัสของทั้งพอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอัตราการให้น้ำหนักบรรทุก



รูปที่ 2.14 ผลของอัตราความเครียดต่อพฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอนกรีต (Vipulanandan and Paul, 1993)

คุณสมบัติที่สำคัญอีกประการซึ่งเป็นผลของน้ำหนักบรรทุกคือการล้า การล้าของวัสดุคือเมื่อน้ำหนักบรรทุกคงค้างน้ำหนักไว้ช่วงระยะเวลาหนึ่ง วัสดุจะเกิดการเสียรูปตามทิศทางของการให้น้ำหนักบรรทุกและเกิดความเครียดขึ้นซึ่งจะมีค่าแปรผันตรงกับระยะเวลา วัสดุพอลิเมอร์คอนกรีตเป็นวัสดุที่มักเกิดการล้าเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกเป็นเวลานาน Vipulanandan and Paul (1993) ได้เสนอผลการทดสอบการล้าของพอลิเมอร์คอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 2.15 การล้าจะสูงขึ้นเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น แต่สามารถลดการล้าได้โดยการบ่มตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตที่อุณหภูมิสูง ดังจะเป็นได้จากรูปที่ 2.15b เมื่อบ่มตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตที่อุณหภูมิห้อง 1 วัน แล้วบ่มต่อที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสอีก 1 วัน ความเครียดจากการล้าจะลดลงอย่างมาก



รูปที่ 2.15 ความเครียดจากการล้าของพอลิเมอร์คอนกรีตที่หน่วยแรงอัดต่าง ๆ

(Vipulanandan and Paul, 1993)

2.2.5 ความคงทนต่อกรดหรือด่าง

ความคงทนต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดหรือด่างเป็นคุณสมบัติเด่นที่สำคัญสำหรับการเลือกใช้วัสดุพอลิเมอร์คอนกรีต การทดสอบความคงทนต่อกรดหรือด่างสำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตทำการทดสอบเช่นเดียวกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต Yamamoto (1977) ได้ทดสอบโดยการแช่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์กับพอลิเอสเทอร์เรซินมอร์ตาร์ในกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ และกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ที่ 28 วัน จากการทดสอบพบว่าพอลิเมอร์มอร์ตาร์นั้นไม่มีการสูญเสียน้ำหนักแต่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์มีการสูญเสียน้ำหนัก 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเริ่มต้น Ohama et al. (1986) ได้ศึกษาผลของสารเคมีผสมจำนวน 11 ชนิดที่อาจมีผลต่อกำลังของพอลิเมอร์คอนกรีตเมื่อแช่ตัวอย่างทดสอบในสารเคมีเหล่านั้น จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์มีกำลังลดลงมากเมื่อแช่ในสารเคมีจำพวกอะซิโตน (acetone) และเทอร์ีน (toluene) แต่สารจำพวกกรดมีผลต่อกำลังของพอลิเมอร์คอนกรีตเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์มีความคงทนต่อสารจำพวกอัลคาไล (alkali) เกลือ (salt) คีโรซีน (kerosene) น้ำมัน และน้ำมันสกัด (rapeseed oil) Ribeiro et al. (2002) ได้เสนอผลการศึกษาการต้านทานต่อกรดและเกลือของอีพอกซีและพอลิเอสเทอร์พอลิเมอร์คอนกรีตเพื่อเป็นการยืนยันความสามารถของพอลิเมอร์คอนกรีตในการนำไปใช้งานพื้นที่ชายทะเล ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังดัดของอีพอกซี พอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกและโซเดียมคลอไรด์ ส่วนพอลิเอสเทอร์พอลิเมอร์คอนกรีตก็มีกำลังลดลงมากกว่าอีพอกซี กำลังรับแรงดัดที่ลดลงมากขึ้นตามระยะเวลาที่ตัวอย่างแช่ในสารละลาย นอกจากงานวิจัยข้างต้นแล้วยังมีงานวิจัยอื่น ๆ จำนวนมากที่ศึกษาความทนทานของพอลิเมอร์คอนกรีตต่อสภาพแวดล้อม เช่น

Ohama (1977) Mebarkia (1993) Mebarkia and Vipulanandan (1995) และ Maksimov et al. (2003) เป็นต้น ซึ่งยืนยันตรงกันว่าพอลิเมอร์คอนกรีตมีความทนทานต่อกรดหรือด่างสูงกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตมาก และความทนทานยังขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์เรซิน

2.3 บทสรุป

จากการทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการใช้พอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตในประเทศไทยนั้นยังมีไม่มากโดยส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาในเรื่องการนำเรซินไปผสมในคอนกรีตสดซึ่งเพิ่มกำลังในคอนกรีต ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมทางกลและสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตมากขึ้น การศึกษาผลของสัดส่วนผสมต่อพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ ในการศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งไปที่การศึกษาผลของส่วนผสมในการผลิตพอลิเมอร์คอนกรีตต่อพฤติกรรมทางกลภายใต้แรงอัดและแรงดัด

เนื่องจากพอลิเอสเตอร์เรซินมีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมคือมีความแข็งแรง ความใส ความเงา สามารถใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงกว่าพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติกและทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี พอลิเอสเตอร์เรซิน จึงถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้พอลิเอสเตอร์เรซินเป็นวัสดุประสานและเลือกใช้สัดส่วนขนาดกลมมวลรวมต่าง ๆ ดังจะนำเสนอรายละเอียดในบทที่ 3

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

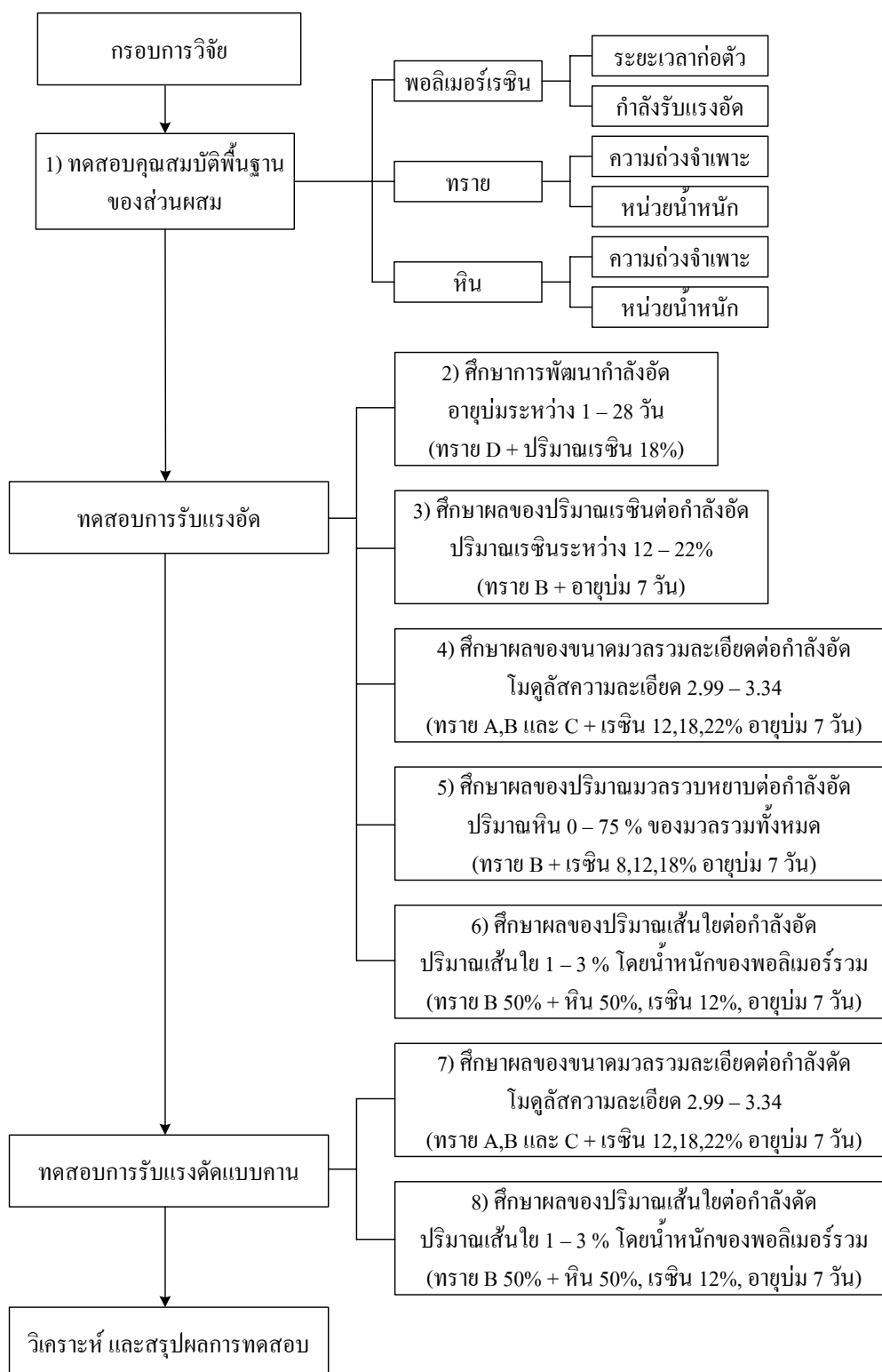
3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของส่วนผสมต่อพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีต งานวิจัยแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดสอบคุณสมบัติวัสดุผสม และการทดสอบพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีต กรอบการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดแสดงรูปที่ 3.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ได้แก่ พอลิเอสเตอร์เรซินและมวลรวมที่ใช้เป็นส่วนผสม คุณสมบัติที่ได้ในการทดสอบไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบตัวอย่างทดสอบให้สอดคล้องกับเครื่องมือ และอุปกรณ์ทดสอบที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ การศึกษาพฤติกรรมทางกลของตัวอย่างทดสอบทำโดยปรับเปลี่ยนตัวแปรอิสระ ได้แก่ ปริมาณเรซิน ขนาดของมวลรวมละเอียด ปริมาณมวลรวมหยาบ และปริมาณเส้นใย เพื่อศึกษาผลของส่วนผสมต่าง ๆ ต่อพฤติกรรมทางกลอันประกอบด้วย การทดสอบการรับแรงอัด และการรับแรงคด การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบทำภายใต้ตัวแปรควบคุมเดียวกัน ได้แก่ ระยะเวลาและขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง ปริมาณตัวเริ่มปฏิกิริยา อายุบ่ม อุณหภูมิการบ่มและขั้นตอนการทดสอบ เป็นต้น การวิเคราะห์ผลจะเปรียบเทียบพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ได้กับพอลิเมอร์เรซินแข็ง และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ทั่วไป วิธีการทดสอบและจำนวนตัวอย่างทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.2 โดยรายละเอียดแต่ละขั้นตอนจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 พอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์เรซิน

ตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ พอลิเอสเตอร์เรซินที่ใช้นำเข้าและจัดจำหน่ายโดยบริษัท เจ เอ็น ทรานสอส (ประเทศไทย) จำกัด มีชื่อทางการค้า คือ ESTAR R289TP(N) ชนิดไอโซพาทาเลท และเป็นพอลิเอสเตอร์เรซินแบบพร้อมใช้ที่มีส่วนผสมตัวเร่งปฏิกิริยา คือ โคบอลต์แนฟเทเนต (cobalt naphthenate) มีลักษณะเป็นของเหลวใสสีชมพูอ่อนและมีความหนืดคล้ายน้ำมันเครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 กรอบการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3.2 พอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์เรซินเหลว

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของพอลิเมอร์คอนกรีต

Constituents	Details
Resin	Unsaturated polyester resin, Commercial name: ESTAR R289TP(N), Isophthalate type
Catalyst	Methyl Ethyl Ketone Peroxide (MEKPO) with 1% by weight
Promoter	Cobalt napthenate
Aggregate	Natural sand, crushed lime stone (maximum size 10 mm) and chopped glass fiber (length 3 – 4 mm)

ตารางที่ 3.2 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง

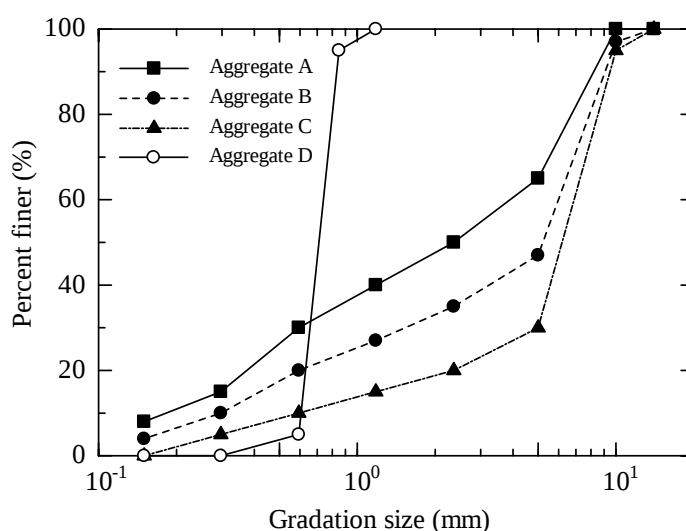
ประเภทมวลรวม	การทดสอบ/อายุ บ่ม	ปริมาณเรซินโดย น้ำหนักรวมของ พอลิเมอร์คอนกรีต	จำนวน (ตัวอย่าง)	หมายเลข ตัวอย่าง
ทราย 20-30 (aggregate D)	แรงอัด/1 วัน	18%	6	G2D1
	แรงอัด/7 วัน		6	G2D7
	แรงอัด/14 วัน		6	G2D14
	แรงอัด/28 วัน		6	G2D28
ทรายโมดูลัสความละเอียด 3.20 (aggregate B)	แรงอัด/7 วัน	12%	6	G3B12
		14%	6	G3B14
		16%	6	G3B16
		18%	6	G3B18
		20%	6	G3B20
		22%	6	G3B22
ทรายโมดูลัสความละเอียด 2.99 (aggregate A)	แรงอัด/7 วัน	12%	6	G4A12
		18%	6	G4A18
		22%	6	G4A22
ทรายโมดูลัสความละเอียด 3.20 (aggregate B)	แรงอัด/7 วัน	12%	6	G4B12
		18%	6	G4B18
		22%	6	G4B22
ทรายโมดูลัสความละเอียด 3.40 (aggregate C)	แรงอัด/7 วัน	12%	6	G4C12
		18%	6	G4C18
		22%	6	G4C22
ทราย (aggregate B) 75% และหิน 25%	แรงอัด/7 วัน	12%	6	G5B75R12
ทราย (aggregate B) 50% และหิน 50%	แรงอัด/7 วัน	8%	6	G5B50R8
		12%	6	G5B50R12
		18%	6	G5B50R18
ทราย (aggregate B) 25% และหิน 75%	แรงอัด/7 วัน	12%	6	G5B25R12

ตารางที่ 3.2 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง (ต่อ)

ประเภทมวลรวม	การทดสอบ/อายุ ปม	ปริมาณเรซินโดย น้ำหนักรวมของ พอลิเมอร์คอนกรีต	จำนวน (ตัวอย่าง)	หมายเลข ตัวอย่าง
ทราย (aggregate B) 50% หิน 50% และ เส้น ใยแก้ว 1% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ คอนกรีตรวม	แรงอัด/7 วัน	12%	6	G6B50F1
ทราย (aggregate B) 50% หิน 50% และ เส้น ใยแก้ว 2% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ คอนกรีตรวม	แรงอัด/7 วัน	12%	6	G6B50F2
ทราย (aggregate B) 50% หิน 50% และ เส้น ใยแก้ว 3% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ คอนกรีตรวม	แรงอัด/7 วัน	12%	6	G6B50F3
ทรายโมดูลัสความละเอียด 2.99 (aggregate A)	แรงดัด/7 วัน	12%	3	G7A12
		18%	3	G7A18
		22%	3	G7A22
ทรายโมดูลัสความละเอียด 3.20 (aggregate B)	แรงดัด/7 วัน	12%	3	G7B12
		18%	3	G7B18
		22%	3	G7B22
ทรายโมดูลัสความละเอียด 3.40 (aggregate C)	แรงดัด/7 วัน	12%	3	G7C12
		18%	3	G7C18
		22%	3	G7C22
ทราย (aggregate B) 50% หิน 50% และ เส้น ใยแก้ว 1% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ คอนกรีตรวม	แรงดัด/7 วัน	12%	3	G8B50F1
ทราย (aggregate B) 50% หิน 50% และ เส้น ใยแก้ว 2% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ คอนกรีตรวม	แรงดัด/7 วัน	12%	3	G8B50F2
ทราย (aggregate B) 50% หิน 50% และ เส้น ใยแก้ว 3% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ คอนกรีตรวม	แรงดัด/7 วัน	12%	3	G8B50F3
รวมจำนวนชุดตัวอย่าง			198	

3.2.2 มวลรวม

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แก่ ทรายธรรมชาติจากอำเภอฟิมาย จังหวัด นครราชสีมา ซึ่งเป็นมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตโดยทั่วไปใน พื้นที่จังหวัดนครราชสีมาและพื้นที่ใกล้เคียง ทรายถูกนำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา และ อบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงนำมาคัดขนาดเพื่อใช้ในส่วนผสมต่อไป มวลรวมหยาบที่ใช้คือหินปูนบด ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษานี้เท่ากับ 10 มิลลิเมตร ขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษานี้ได้ถูกปรับให้มีขนาดละเอียดต่างกัน จำนวน 4 แบบดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยมวลรวมละเอียด A B และ C มีขนาดละเอียดเป็นไปตาม มาตรฐาน BS 882 (1992) สำหรับมวลรวมแบบหลายขนาด (all-in aggregate) แต่ละสัดส่วนละเอียดมี ค่าโมดูลัสความละเอียดที่แตกต่างกัน คือ 2.99 3.20 และ 3.34 ตามลำดับ มวลรวม D เป็นมวลรวม ขนาดเดียว (ทราย 20-30) ตามมาตรฐาน ASTM C778 (2006) เส้นใยที่ใช้ผสมเพิ่มเป็นเส้นใยแก้ว (glass fiber) ตัดสั้น โดยมีขนาดความยาวทั่วไประหว่าง 3 ถึง 4 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 การกระจายขนาดของมวลรวมละเอียดที่ขนาดละเอียดต่าง ๆ



รูปที่ 3.4 เส้นใยแก้วตัดสั้น

3.3 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

3.3.1 พอลิเมอร์เรซิน

ก) ระยะเวลาก่อตัวและหน่วยน้ำหนัก

ภายหลังจากการผสมพอลิเมอร์เรซินกับตัวเริ่มปฏิกิริยา พอลิเมอร์เรซินจะเริ่มก่อตัว การทดสอบเวลาก่อตัวของพอลิเมอร์เรซินประยุกต์ใช้การทดสอบของซีเมนต์เพสต์โดยวิธีไวแกตตามมาตรฐาน ASTM C191 (2008)

ข) กำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังอัดของพอลิเมอร์เรซินแข็งทำเพื่อให้ทราบกำลังอัดประลัย และการพัฒนากำลังตามอายุบ่มของวัสดุประสาน การทดสอบทำโดยหล่อตัวอย่างพอลิเมอร์เรซินทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร สูง 50 มิลลิเมตร จากนั้นทำการบ่มตัวอย่างที่อายุบ่ม 1 7 14 และ 28 วัน ตามลำดับ การทดสอบกำลังอัดทำที่อายุบ่มต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASTM C579 (2001)

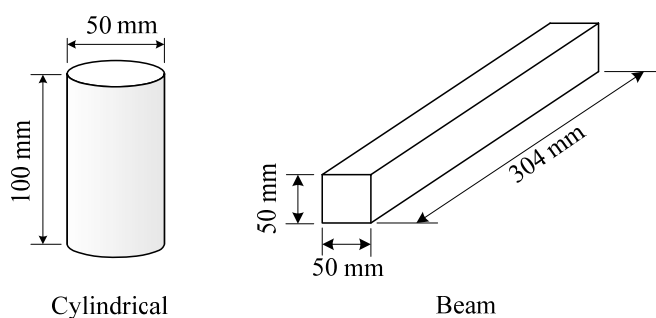
3.3.2 มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ

คุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมที่ทำการทดสอบมี 3 ประเภท คือ ความถ่วงจำเพาะรวม หน่วยน้ำหนัก และความทนทานต่อการขัดสี การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะรวมทำตามมาตรฐาน ASTM C128 (2007) สำหรับมวลรวมละเอียดและ ASTM C127 (2007) สำหรับมวลรวมหยาบ การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวมทำตามมาตรฐาน ASTM C29 (2009) สำหรับมวลรวมหยาบจะทดสอบความทนทานต่อการขัดสีด้วยซึ่งทำตามมาตรฐาน ASTM C131 (2006) (มวลรวมขนาดเล็กกว่า 1.5 นิ้ว)

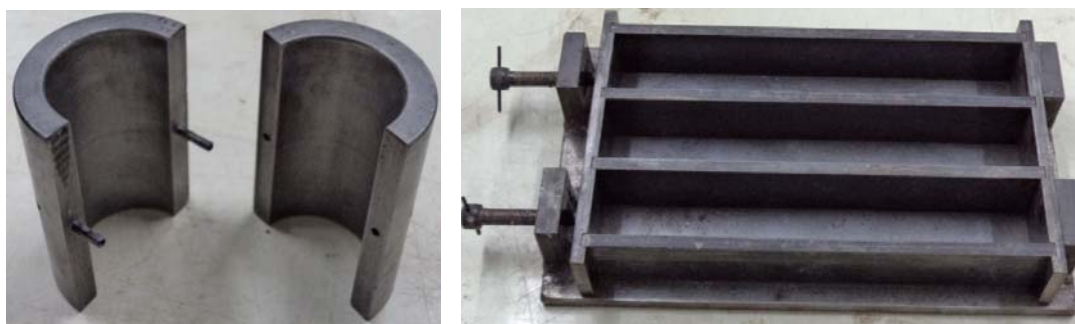
3.4 การเตรียมตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีต

การเตรียมตัวอย่างกระทำตามมาตรฐาน ASTM C579 (2001) และ ASTM C580 (2002) สำหรับการรับแรงอัดและการรับแรงดัดตามลำดับ ตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ตัวอย่างทรงกระบอกสำหรับทดสอบการรับแรงอัด และตัวอย่างแบบคานสำหรับการรับแรงดัด ขนาดของตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 แบบแสดงดังรูปที่ 3.5 แบบหล่อสำหรับตัวอย่างทรงกระบอกและแบบคานทำจากโลหะที่แข็งแรง การติดตั้งแบบหล่อทั้ง 2 แบบทำตามรูปที่ 3.6 การทดสอบการรับแรงอัดจะเตรียมตัวอย่างจำนวน 6 ตัวอย่างต่อหนึ่งส่วนผสม การทดสอบการรับแรงดัดจะเตรียมตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งส่วนผสม ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตสามารถสรุปโดยย่อได้ดังนี้

- 1) เตรียมแบบหล่อโดยทำความสะอาดและทาขี้ผึ้งถอดแบบ
- 2) เตรียมมวลรวมตามส่วนผสมที่ต้องการ ผสมกะตะลิสท์กับเรซินแล้วนำมาผสมกับมวลรวมด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 5 นาที โดยแบ่งผสมเรซินครั้งละครึ่งหนึ่ง ระยะเวลาในการเตรียมตัวอย่างก่อนเทลงแบบหล่อไม่เกิน 10 นาที
- 3) เทพอลิเมอร์คอนกรีตเหลวลงแบบหล่อ โดยแบ่งออกเป็น 3 ชั้นแต่ละชั้นบดอัดด้วยเหล็กกระทุ้งปลายกลมมนขนาดมาตรฐานเพื่อไล่ฟองอากาศจำนวนชั้นละ 25 ครั้ง สำหรับตัวอย่างทรงกระบอก และ 60 ครั้ง จำนวน 2 ชั้นสำหรับตัวอย่างแบบคาน
- 4) แต่งผิวหน้าให้เรียบ
- 5) ทิ้งตัวอย่างในแบบหล่อไว้ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงถอดแบบหล่อออกแล้วนำตัวอย่างไปบ่มต่อตามระยะเวลาให้ได้อายุบ่มตามต้องการก่อนทดสอบ



รูปที่ 3.5 ขนาดตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงดัด



(a) แบบหล่อทรงกระบอก

(b) แบบหล่อนาน

รูปที่ 3.6 แบบหล่อตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีต

3.5 การทดสอบทางกล

3.5.1 การทดสอบการรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตในงานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงอัด อันได้แก่ กำลังสูงสุด ความแข็งแรง และรูปแบบการวิบัติ การทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM C 579 (2001) method C สำหรับขนาดตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และสูง 100 มิลลิเมตร คุณสมบัติทางกลของวัสดุภายใต้แรงกดอัดที่สนใจ ได้แก่ หน่วยแรงที่พิกัดยืดหยุ่น (stress at proportional limit) หน่วยแรงประลัย (ultimate stress) และความเครียดที่หน่วยแรงอัดประลัย (strain at ultimate stress) การทดสอบกำลังอัดจะทำเมื่อบ่มตัวอย่างได้อายุ 7 วัน โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- 1) ชั่งน้ำหนัก วัดส่วนสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางตัวอย่างให้ละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตรด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์
- 2) นำตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตเข้าเครื่องทดสอบการรับแรงอัดขนาด 5,000 กิโลนิวตัน ยี่ห้อ Chunyen ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยให้หน้าตัดตัวอย่างสัมผัสกับหัวกดโดยสมบูรณ์และใช้อัตราในการให้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบควบคุมหน่วยแรงเท่ากับ 41 เมกะปาสกาลต่อนาที
- 3) บันทึกค่าน้ำหนักบรรทุกและระยะการเคลื่อนที่ของหัวกด
- 4) กำลังรับแรงอัดคำนวณได้ตามสมการที่ 3.1

$$\sigma_u = (4P) / (\pi \times D^2) \quad (3.1)$$

เมื่อ σ_u คือ กำลังรับแรงอัดประลัย (เมกะปาสกาล) P คือ น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (นิวตัน) และ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างที่วัดได้ (มิลลิเมตร)

3.5.2 การทดสอบการรับแรงดัด

การทดสอบกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตทำได้ยากดังนั้นงานวิจัยจึงทำการทดสอบการรับแรงดัดแบบคานตามมาตรฐาน ASTM C580 (2002) ตัวอย่างทดสอบจะมีขนาดหน้าตัด 50x50 มิลลิเมตร ยาว 304 มิลลิเมตร การทดสอบการรับแรงดัดทำที่อายุบ่ม 7 วัน คุณสมบัติทางกลของวัสดุภายใต้แรงดัดที่สนใจ ได้แก่ หน่วยแรงดัดสูงสุด (flexural stress) และ โมดูลัสยืดหยุ่นของการรับแรงดัด การทดสอบการรับแรงดัดมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- 1) ชั่งน้ำหนัก วัดขนาดหน้าตัดบริเวณกึ่งกลางคานตัวอย่างและความยาวให้ละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตรด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์
- 2) วางตัวอย่างคานบนเครื่องทดสอบการดัดดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งให้น้ำหนักบรรทุกทุกโดยเครื่องทดสอบการกดขนาด 5,000 กิโลนิวตันเช่นเดียวกับการทดสอบแรงอัด ใช้ด้านเรียบซึ่งสัมผัสกับแบบหล่อวางสัมผัสกับจุดรองรับ โดยใช้ความกว้างของช่วงคานในการทดสอบเท่ากับ 254 มิลลิเมตร
- 3) ใช้อัตราในการให้น้ำหนักบรรทุกจากห้วงคานแบบควบคุมอัตราความเครียดคงที่เท่ากับ 2.15 มิลลิเมตรต่อนาที
- 4) บันทึกค่าน้ำหนักบรรทุกที่ห้วงคานและระยะการเสีรูปที่กึ่งกลางคาน
- 5) กำลังรับแรงอัดคำนวณได้ตามสมการที่ 3.2

$$S = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ S คือ กำลังรับแรงดัด (เมกะปาสกาล) P คือ น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (นิวตัน) L คือ ความกว้างของช่วงคาน (มิลลิเมตร) b คือ ความกว้างของคานที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน (มิลลิเมตร) และ d คือ ความลึกของคานที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน (มิลลิเมตร)

- 6) โมดูลัสยืดหยุ่นแบบ Secant คำนวณได้ตามสมการที่ 3.3

$$E_s = \frac{L^3 M_2}{4bd^3} \quad (3.3)$$

เมื่อ E_s คือ โมดูลัสยืดหยุ่นแบบ Secant (กิกะปาสคาล) M_2 คือ ความชันของกราฟน้ำหนักบรรทุก และการเสยรูปกลางคานที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของการเสยรูปมากที่สุด (นิวตันต่อมิลลิเมตร) L คือ ความกว้างของช่วงคาน (มิลลิเมตร) b คือ ความกว้างของคานที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน (มิลลิเมตร) และ d คือ ความลึกของคานที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน (มิลลิเมตร)



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบการรับแรงอัดขนาด 5,000 กิโลนิวตัน



รูปที่ 3.8 ชุดทดสอบการรับแรงค้ำ

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมและพอลิเอสเทอร์เรซิน

มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ใช้ในการทดสอบมีคุณสมบัติพื้นฐานแสดงตามตารางที่ 4.1 พอลิเอสเทอร์พอลิเมอร์เรซินมีคุณสมบัติพื้นฐานแสดงตามตารางที่ 4.2 โดยพอลิเมอร์เรซินเมื่อผสมตัวเริ่มปฏิกิริยา (ปริมาณตัวเริ่มปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์ของเรซินโดยน้ำหนัก) จะก่อตัวในเวลา 20 ± 2 นาที ระยะเวลาก่อตัวของพอลิเมอร์เรซินจะเพิ่มขึ้นเมื่อผสมพอลิเมอร์เรซินกับมวลรวม

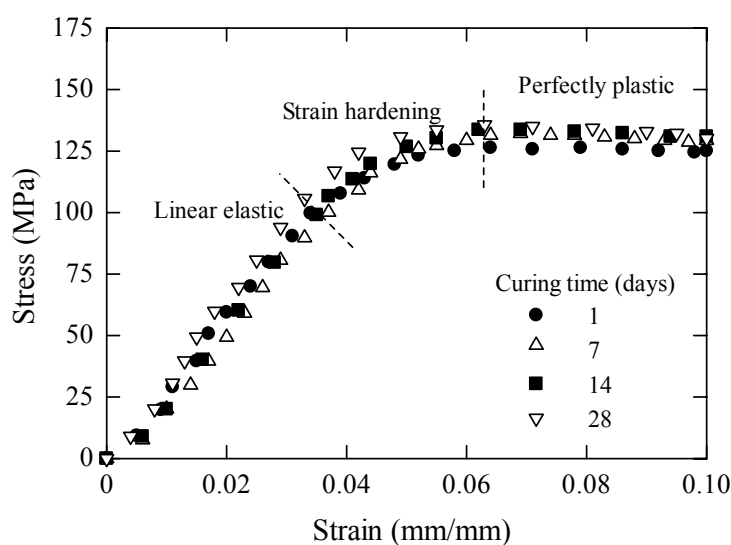
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวม

Description	Aggregate type	
	Fine (< 5 mm)	Coarse (< 10 mm)
Specific gravity	2.65	2.70
Bulk unit weight (kg/m^3)	1,670	1,560
Ratio of abrasion (%)	-	20.7

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของพอลิเมอร์เรซิน (ผลทดสอบจากบริษัท เจ เอ็น ทรานสอส (ประเทศไทย))

Description	Values
Liquid properties - Viscosity (poise)	4.0
Solid properties - Compressive strength (MPa) - Modulus of Elasticity (GPa) - Flexural strength (MPa) and Modulus of elasticity (GPa)	137.3 4.0 117.7, 3.4

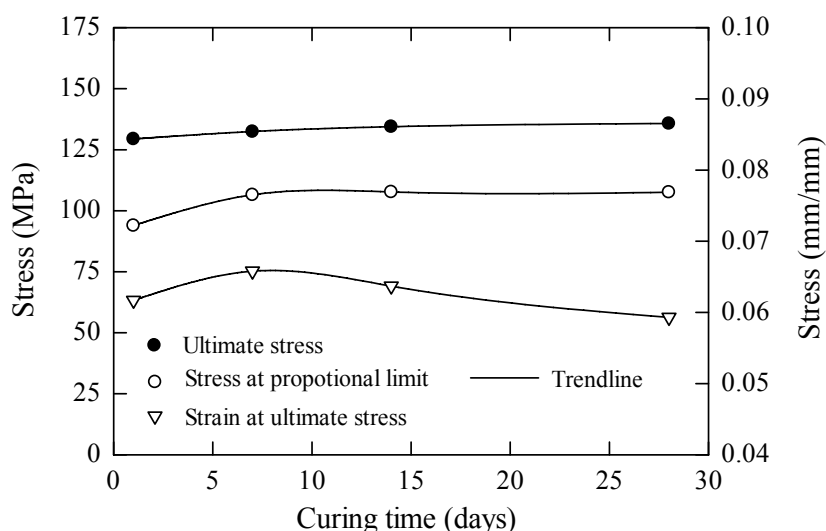
พฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดของพอลิเมอร์เรซินแข็งที่อายุบ่มต่าง ๆ มีลักษณะคล้ายกันดังแสดงในรูปที่ 4.1 พฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตเรซินแข็งแบ่งออกเป็น 3 ช่วงอย่างชัดเจน คือ ช่วงยืดหยุ่นเส้นตรง (linear elastic) ช่วงแข็งขึ้นด้วยความเครียด (strain hardening) และช่วงพลาสติกสมบูรณ์ (perfectly plastic) กำลังรับแรงอัดสูงสุดเกิดที่ความเครียด 6 เปอร์เซ็นต์ กำลังรับแรงอัดที่พิกัดยืดหยุ่น (proportional limit) เกิดที่ความเครียด 3 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นพอลิเมอร์เรซินจะมีพฤติกรรมแบบพลาสติกสมบูรณ์ (perfectly plastic) ช่วงยืดหยุ่นเส้นตรงคือช่วงที่วัสดุที่วัสดุสามารถคืนกลับสู่รูปร่างเดิมได้อย่างสมบูรณ์เมื่อถอนน้ำหนักบรรทุก ช่วงแข็งขึ้นด้วยความเครียดคือช่วงที่วัสดุเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอนุภาคภายในหรือเกิดการจัดโครงสร้างใหม่ส่งผลให้เกิดการเสียรูปแบบถาวรบางส่วน ช่วงพลาสติกสมบูรณ์คือช่วงที่วัสดุมีพฤติกรรมแบบพลาสติกสมบูรณ์แบบ เมื่อถอนน้ำหนักบรรทุกจะไม่สามารถคืนรูปเดิมได้ แต่ยังคงรับน้ำหนักบรรทุกนั้นได้ต่อไปโดยไม่เพิ่มขึ้น ลักษณะพิเศษนี้เป็นข้อดีของวัสดุพลาสติกเหนียว



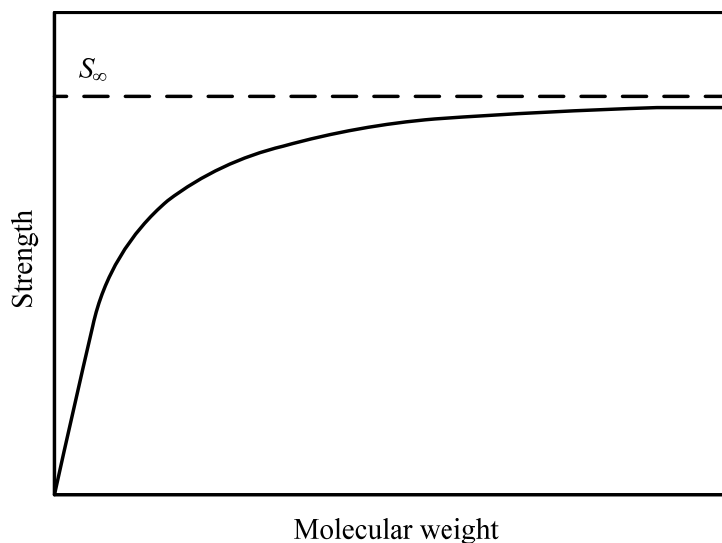
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดภายใต้การรับแรงอัดของพอลิเมอร์เรซินแข็ง

การพัฒนากำลังอัดตามอายุบ่มของพอลิเมอร์เรซินแข็งแสดงดังรูปที่ 4.2 เมื่ออายุบ่มที่เพิ่มขึ้นกำลังอัดประลัยและกำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เรซินเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยมีค่าเริ่มคงที่เมื่ออายุบ่ม 7 วัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Vipulanandan and Paul (1993) โดยมีกำลังอัดประลัยที่ 7 วัน เท่ากับ 132.5 เมกะปาสกาล นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าหน่วยแรงที่พิกัดยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและเริ่มคงที่โดยมีค่าเท่ากับ 106.5 เมกะปาสกาลเมื่ออายุบ่ม 7 วันเช่นกัน ค่าพิกัดยืดหยุ่น

มีค่าใกล้เคียงกันที่อายุบ่มต่าง ๆ ความเครียดที่กำลังอัดประลัยซึ่งแสดงถึงความแรงของพอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามอายุบ่มหรืออาจกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์คอนกรีตมีความแรงเพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังของพอลิเมอร์คอนกรีตอธิบายได้โดยความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์กับเวลา พอลิเมอร์จะมีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น (องศาของพอลิเมอร์ไรเซชันเพิ่มขึ้น) โมเลกุลมีน้ำหนักมากขึ้นตามระยะเวลาบ่ม (Abedi et al., 2006) กำลังของพอลิเมอร์เรซินมีความสัมพันธ์โดยตรงกับน้ำหนักโมเลกุลดังแสดงในรูปที่ 4.3 (Hallam et al., 2003) ส่งผลให้กำลังของวัสดุพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มตามน้ำหนักโมเลกุล หน่วยน้ำหนักจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มและคงที่เมื่อปฏิกิริยาสมบูรณ์ หน่วยน้ำหนักเฉลี่ยของพอลิเมอร์เรซินแข็งที่อายุบ่ม 28 วันจากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 4.2 การพัฒนากำลังอัดตามอายุบ่มของพอลิเมอร์เรซินแข็ง



รูปที่ 4.3 การพัฒนากำลังตามน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์เรซิน (Hallam et al., 2003)

4.2 พฤติกรรมทั่วไปของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้การรับแรงอัดและแรงดัด

จากผลการทดสอบพฤติกรรมกรรมการรับแรงอัดทั่วไปของตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตสามารถสรุปได้ตามแผนภาพดังรูปที่ 4.4 โดยสามารถแบ่งพฤติกรรมออกได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงยืดหยุ่นเส้นตรง (linear elastic) ช่วงแข็งขึ้นด้วยความเครียด (strain hardening) และช่วงอ่อนลงจากการแตกหักเฉพาะจุด (localization softening) พฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตคล้ายกับผลการทดสอบวัสดุเปราะ (brittle material) โดยทั่วไป แต่มีความเครียดเกิดขึ้นมากกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติ ช่วงเส้นตรง คือ ช่วงพฤติกรรมที่หน่วยแรงเพิ่มขึ้นแล้ววัสดุเกิดการเสียรูปแต่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ทันทีหากลดหน่วยแรงลง พฤติกรรมช่วงนี้โครงสร้างอนุภาคภายในวัสดุยังคงเหมือนเดิม ช่วงแข็งขึ้นด้วยความเครียด คือ ช่วงพฤติกรรมที่วัสดุรับหน่วยแรงมากเกินกว่าหน่วยแรงที่พิกัดยืดหยุ่น วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติกซึ่งเมื่อหน่วยแรงลดลงความเครียดหรือการเสียรูปนั้นยังคงอยู่ การทดสอบพอลิเมอร์คอนกรีตจะมีช่วงแข็งขึ้นด้วยความเครียดปรากฏในผลการทดสอบส่วนใหญ่แต่จะมีลักษณะแตกต่างกันตามสัดส่วนผสมของวัสดุ ขณะเกิดพฤติกรรมนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุ สำหรับในพอลิเมอร์คอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุผสมจะเกิดการวิบัติเฉพาะจุดภายใต้ตัวอย่างทดสอบแต่ตัวอย่างยังคงสามารถรับแรงได้อยู่จนถึงจุดที่หน่วยแรงสูงสุด การวิบัติเฉพาะจุดภายใต้ตัวอย่างทดสอบนี้จะพัฒนาไปเป็นระนาบการวิบัติ (failure plane) ต่อไปหลังจากจุดหน่วยแรงสูงสุด ซึ่งหน่วยแรงจะลดลงอย่างชัดเจน เรียกว่า ช่วงอ่อนลงจากการแตกหักเฉพาะจุด กำลังของตัวอย่างที่ยังคงรับได้หลังจุดสูงสุดของหน่วยแรง (residual strength) เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างรอยแตกของตัวอย่างตามแนวระนาบการวิบัติ

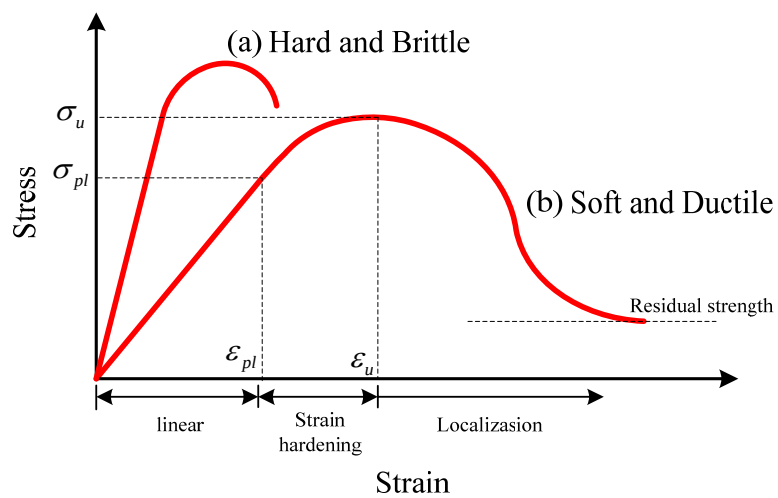
พฤติกรรมของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงอัดอธิบายได้โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่กลางคาน (P) และการเสียรูปที่กึ่งกลางคาน (Δ) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ลักษณะผลทดสอบโดยทั่วไปคล้ายความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียด สำหรับวัสดุเปราะกราฟจะไม่มีช่วงอ่อนลง ซึ่งแตกต่างจากวัสดุเหนียวซึ่งจะมีช่วงอ่อนลงด้วยความเครียดหลังจากจุดแรงกระทำสูงสุด คุณสมบัติทางกลของตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตที่ส่วนผสมต่าง ๆ แสดงได้ในภาคผนวก ก ลักษณะการวิบัติของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงอัดและแรงดัดแตกต่างกันตามส่วนผสม ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

4.2.1 การวิบัติของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงอัด

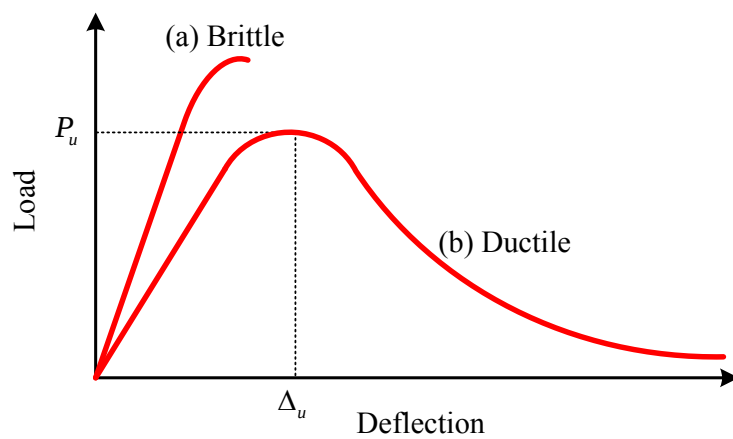
การวิบัติของตัวอย่างพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตที่พบภายใต้การทดสอบการรับแรงมี 2 แบบ คือ การวิบัติแบบการเฉือน (shear failure) และการวิบัติแบบผสม (combination shear and splitting failure) ลักษณะการวิบัติแต่ละแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ก่อนตัวอย่างภายใต้แรงอัดจะขยายตัวด้านข้าง ในขณะที่คอนกรีตด้านบนและล่างติดกับแท่นเครื่องทดสอบ ก่อนตัวอย่างบริเวณใกล้หัวกดจะไม่สามารถขยายตัวได้เนื่องจากความฝืดของหัวกดจึงทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือนอย่างมากที่บริเวณมุมของก้อนตัวอย่างขณะกด การวิบัติจึงเกิดเป็นแรงแยกและขยายตัวขึ้นเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น จากการสังเกตผลการทดสอบพอลิเมอร์คอนกรีตก่อนตัวอย่างที่สมบูรณ์เรียบและมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูงมากกว่า 2 เท่าจะวิบัติแบบการเฉือนซึ่งจะให้กำลังค่อนข้างสูง การวิบัติแบบผ่าซีกและแบบผสมจะเกิดกับก้อนตัวอย่างที่มีส่วนผสมไม่เหมาะสม เนื้อพอลิเมอร์กับมวลรวมไม่เป็นเนื้อเดียวกันและจะให้กำลังลดลงต่ำกว่าการวิบัติแบบเฉือน

4.2.2 การวิบัติของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงดัด

การวิบัติของตัวอย่างแบบคานรับแรงดัดแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ แบบวัสดุเปราะและแบบวัสดุเหนียว พฤติกรรมแบบวัสดุเปราะวัสดุจะมีลักษณะของความสัมพันธ์ของแรงกระทำและการทรุดตัวที่กึ่งกลางคานคล้ายกับการทดสอบปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต ตัวอย่างทดสอบจะแตกหักทันทีหลังจากน้ำหนักบรรทุกมีค่ามากกว่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเล็กน้อย พฤติกรรมแบบวัสดุเหนียววัสดุจะแสดงพฤติกรรมแบบอ่อนลงด้วยความเครียดอย่างชัดเจนซึ่งจะแตกหักหลังจากเสียรูปมาก พฤติกรรมแบบเหนียวจะพบในตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตผสมเส้นใย การวิบัติของคานคานตัวอย่างทดสอบมีลักษณะเหมือนกันทั้งหมดคือแตกร้าวที่กึ่งกลางคานดังแสดงในรูปที่ 4.6c



รูปที่ 4.4 พฤติกรรมทั่วไปภายใต้แรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีต



รูปที่ 4.5 พฤติกรรมทั่วไปภายใต้แรงคดแบบคานของพอลิเมอร์คอนกรีต



(a) การวิบัติแบบเฉือน



(b) การวิบัติแบบผสม



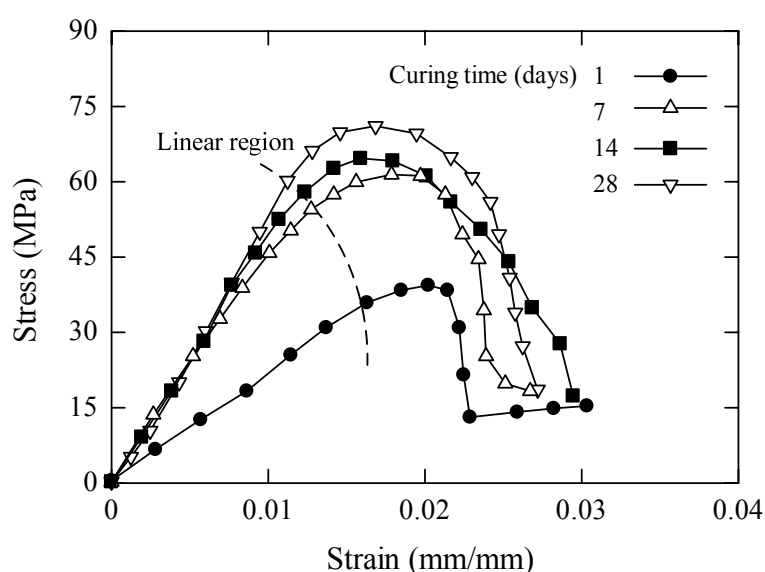
(c) การวิบัติของตัวอย่างภายใต้แรงดัด

รูปที่ 4.6 การวิบัติของตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตแบบต่าง ๆ

4.3 ผลของอายุบ่ม

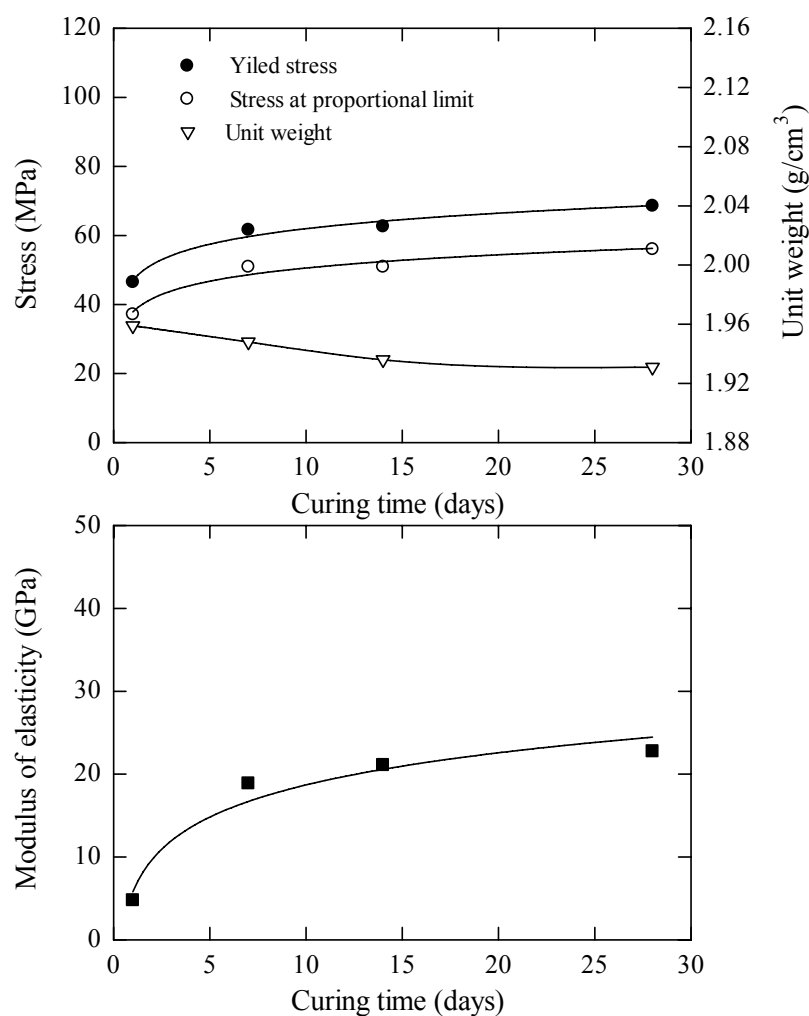
พอลิเมอร์เรซินถูกใช้เป็นวัสดุประสานในวัสดุผสมพอลิเมอร์คอนกรีต ดังนั้นการพัฒนากำลังของวัสดุผสมจึงขึ้นกับการพัฒนากำลังของวัสดุประสานเช่นเดียวกับในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต (ปริญญาและชัย, 2547) แต่อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันมีผลต่อการพัฒนากำลังของพันธะระหว่างโมเลกุลได้รวดเร็วกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ปกติ แต่ใกล้เคียงกับคอนกรีตกำลังสูง ดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบดังรูปที่ 4.7 โดยที่อายุบ่ม 1 วัน พอลิเมอร์คอนกรีตสามารถพัฒนากำลังได้มากกว่าครึ่งหนึ่งของกำลังที่อายุบ่ม 28 วัน อายุบ่มที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีต รูปที่ 4.7 แสดงกราฟหน่วยแรงและความเครียดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่มต่าง ๆ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะกราฟของหน่วยแรงและความเครียดทั่วไปที่ได้อธิบายแล้วในหัวข้อ 4.2 หน่วยแรงอัดสูงสุดและความแรงแรงที่อายุบ่ม ต่าง ๆ แตกต่างกันเนื่องจากการพัฒนาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันซึ่ง

เพิ่มขึ้นตามเวลา (อายุบ่ม) (Abedi et al., 2006) ที่อายุบ่มจาก 7 วันถึง 28 วันกำลังอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตเปลี่ยนแปลงน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 7 จึงอาจสรุปได้ว่าที่อายุบ่ม 7 วันกำลังอัดเริ่มคงที่ ข้อสรุปนี้สอดคล้องกับอายุบ่มก่อนทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C579 (2001) และ ASTM C580 (2002) สำหรับการทดสอบการรับแรงอัดและการรับแรงดัด ตามลำดับ ซึ่งกำหนดให้ทดสอบตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 7 วัน



รูปที่ 4.7 พฤติกรรมของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้การรับแรงอัดที่อายุบ่มต่าง ๆ

ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่น หน่วยน้ำหนักและโมดูลัสยืดหยุ่นการอัดที่อายุบ่มต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.8 กำลังอัดประลัยและกำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม โดยกำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นมีค่าประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของกำลังอัดประลัย กำลังอัดประลัยและกำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับหน่วยน้ำหนักที่ลดลง โดยที่หน่วยน้ำหนักเริ่มคงที่เมื่ออายุบ่มมากกว่า 14 วัน และมีค่าลดลงประมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยน้ำหนักที่อายุบ่ม 1 วัน โมดูลัสยืดหยุ่นที่คำนวณจากมาตรวัดความเครียดเฉพาะจุด (local strain gauge) มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มเช่นกัน โดยมีค่าคงที่ประมาณ 20 กิกะปาสคาลที่อายุบ่ม 7 วัน โมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เรซินแข็ง (กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.1) ประมาณ 5.8 เท่าซึ่งอัตราส่วนนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Vipulanandan and Paul (1993)

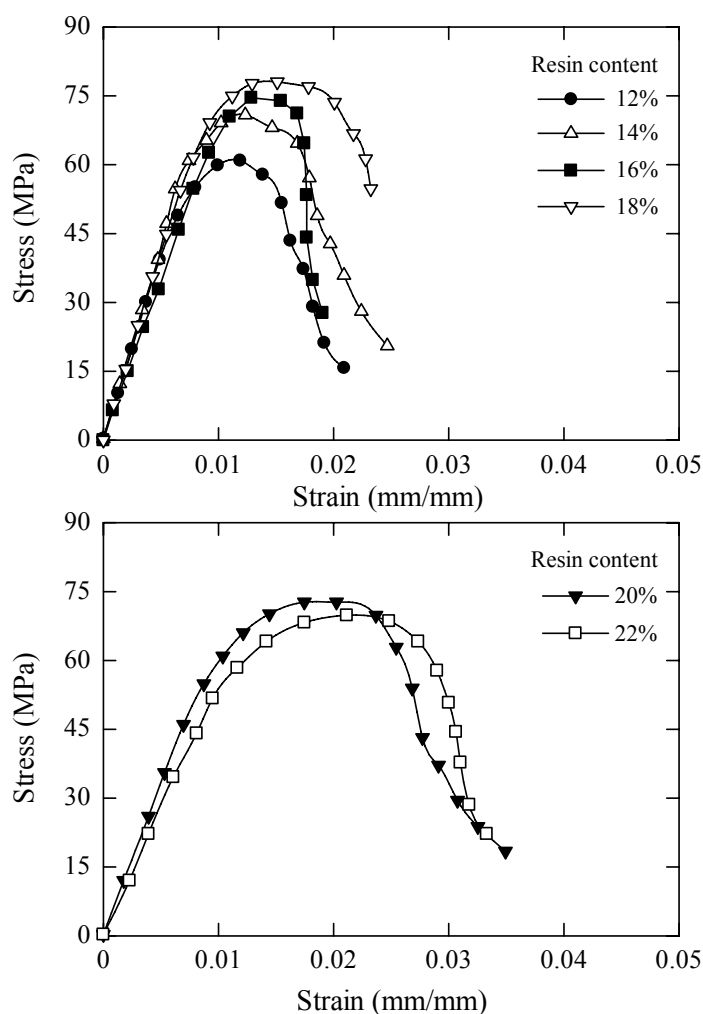


รูปที่ 4.8 ผลของอายุบ่มต่อค่าเฉลี่ยของกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่น โมดูลัสยืดหยุ่น และหน่วยน้ำหนัก

4.4 ผลของปริมาณเรซิน

เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณเรซินต่าง ๆ และควบคุมตัวแปรอื่น ๆ ให้เหมือนกันสำหรับแต่ละปริมาณเรซินความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่สัดส่วนปริมาณเรซินต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.9 ความแรงของพอลิเมอร์คอนกรีตสังเกตได้จากความชันของกราฟ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าความแรงมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่สัดส่วนปริมาณเรซินระหว่าง 12 ถึง 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มปริมาณเรซินขึ้นมากกว่า 18 เปอร์เซ็นต์ค่าความแรงจะลดลงดังสังเกตได้จากความชันที่ลดลงของกราฟที่ปริมาณเรซิน 20 และ 22 เปอร์เซ็นต์ ค่าหน่วยแรงอัดสูงสุดจะเกิดที่ความเครียดระหว่าง 1.0 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์สำหรับปริมาณเรซินระหว่าง 12 ถึง 18 เปอร์เซ็นต์ โดยความเครียดที่กำลังอัดสูงสุดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ

เรซิน ความเครียดที่กำลังอัดสูงสุดสำหรับปริมาณเรซินสูงกว่า 18 เปอร์เซ็นต์พบว่ามีความมากกว่า 1.5 เปอร์เซ็นต์ การเพิ่มปริมาณเรซินจะส่งผลต่อการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบอย่างชัดเจน ปริมาณเรซินสูงจะเกิดการเสียรูปมากเพราะโดยปกติแล้วพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์จะมีการยืดตัว (elongation) ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์เมื่อรับน้ำหนักบรรทุก เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมแล้วมีค่าสูงกว่ามาก เมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุประสานแล้วนั้นค่าการยืดหรือการเสียรูปโดยรวมจึงถูกควบคุมโดยปริมาณเรซินเป็นหลัก



รูปที่ 4.9 พฤติกรรมการรับแรงอัดที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ

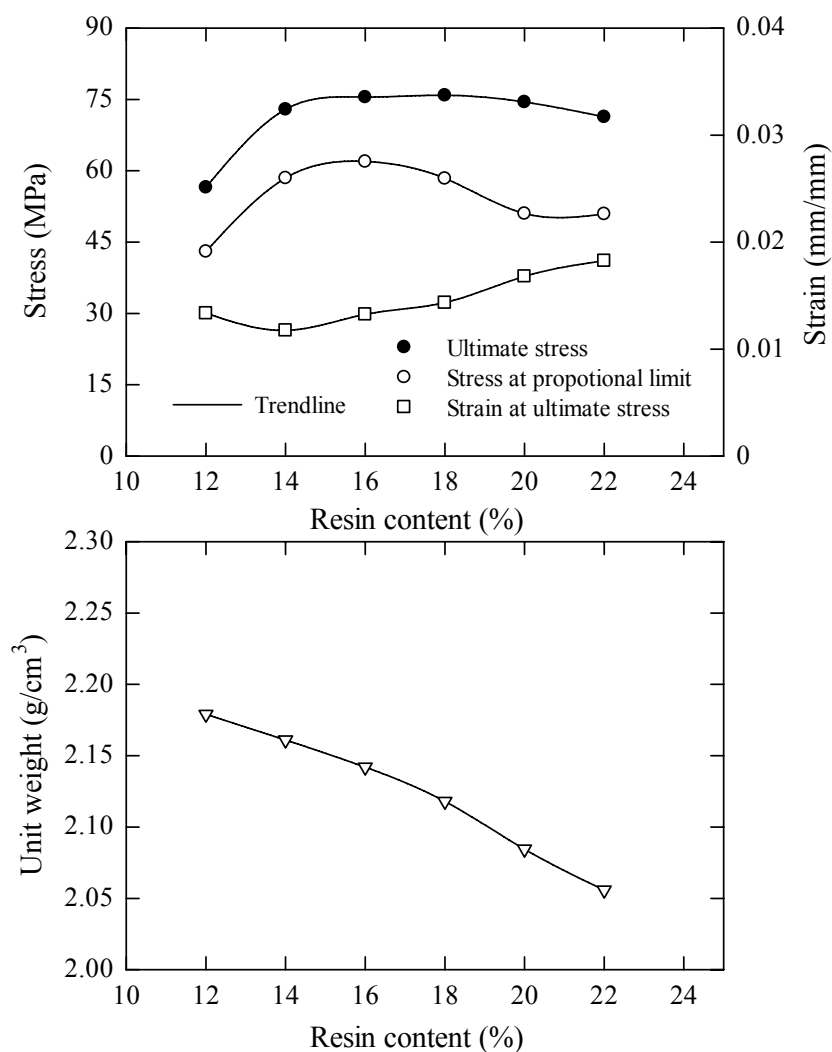
ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่น ความเครียดที่กำลังอัดประลัย และหน่วยน้ำหนักที่ประมาณเรซินต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.10 กำลังอัดประลัยและกำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเรซินจนถึงจุดสูงสุดที่ปริมาณเรซินประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ หลังจาก

จุดสูงสุดกำลังอัดประลัยและกำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นลดลงอย่างชัดเจนตามปริมาณเรซินที่เพิ่มขึ้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อปริมาณเรซินมากขึ้นพอลิเมอร์เรซินซึ่งเป็นวัสดุประสานมีมากขึ้นทำให้ความหนาของชั้นพอลิเมอร์ที่เคลือบวัสดุมวลรวมมีความหนาเพิ่มขึ้น เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกพอลิเมอร์เรซินจึงเสียรูปมากขึ้นแต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีความเหนียวมากดังนั้นกำลังอัดจึงเพิ่มขึ้นในช่วงแรก แต่เมื่อปริมาณเรซินมากเกินไปจนเหมาะสมการวิบัติของตัวอย่างจึงเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมกับพอลิเมอร์แทนการวิบัติที่วัสดุประสานจึงทำให้กำลังลดลง ค่ากำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นมีค่า 75 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ของกำลังอัดประลัยที่ปริมาณเรซินน้อยกว่า 18 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อปริมาณเรซินมากขึ้นกำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นมีค่าลดลงเหลือ 70 เปอร์เซ็นต์ของกำลังอัดประลัย การเปลี่ยนแปลงกำลังอัดต้องอธิบายข้างต้นสัมพันธ์กับหน่วยน้ำหนักเชิงปริมาตรที่ลดลงเมื่อปริมาณเรซินเพิ่มขึ้นด้วย เพราะหน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์เรซินต่ำกว่ามวลรวม เมื่อสัดส่วนปริมาณเรซินเพิ่มขึ้นหน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตจึงลดลง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.18 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่ปริมาณเรซิน 12 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าลดลงเหลือ 2.06 ที่ปริมาณเรซิน 22 เปอร์เซ็นต์

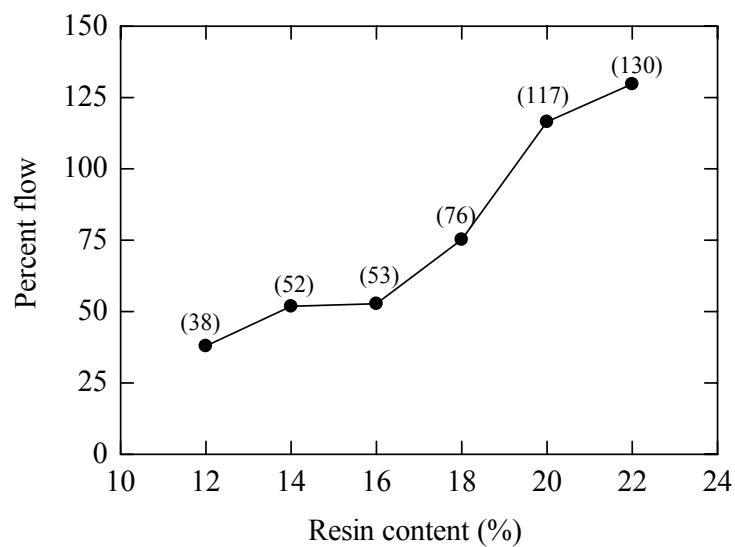
อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในมิติของความสามารถในการเทได้ของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ ผลของปริมาณเรซินต่อเปอร์เซ็นต์การไหลของพอลิเมอร์คอนกรีตแสดงดังรูปที่ 4.11 ที่ปริมาณเรซินต่ำกว่า 18 เปอร์เซ็นต์ การไหลมีค่าต่ำกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นส่วนผสมที่พอลิเมอร์คอนกรีตที่มีความหนืดสูงจึงยากแก่การเทเข้าแบบ ดังนั้น การเลือกส่วนผสมที่ปริมาณเรซินสูงจะเป็นการเหมาะสมมากกว่าที่ปริมาณเรซินต่ำ เมื่อพิจารณาในมิติของกำลังอัดและความสามารถในการเทได้ร่วมกันปริมาณเรซินเหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่ผสมมวลรวมหยาบและสามารถทำงานได้ในการหล่อเข้าแบบในโรงงาน คือ ปริมาณเรซินเท่ากับ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตรวมหรือที่อัตราส่วนพอลิเมอร์เรซินต่อทรายเท่ากับ 1 : 4.6 โดยน้ำหนักซึ่งจะให้ค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 75.9 เมกะปาสกาลและมีการไหลเท่ากับ 76 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดสอบการรับแรงดัดของตัวอย่างทดสอบแบบคานกำลังรับแรงดัดและ โมดูลัสยืดหยุ่นแสดงดังรูปที่ 4.12 เมื่อปริมาณเรซินมากโมดูลัสยืดหยุ่นจะต่ำเพราะพอลิเมอร์เรซินเป็นวัสดุเหนียว เมื่อเพิ่มปริมาณเรซินในส่วนผสมมากขึ้นความเคียวของวัสดุเมื่อรับหน่วยแรงเท่าเดิมย่อมมีค่าสูงขึ้นตาม ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าต่ำเมื่อปริมาณเรซินสูงขึ้น ความเป็นวัสดุอ่อนแต่เหนียว (soft – ductile) ของพอลิเมอร์เรซินจึงส่งผลให้กำลังรับแรงดัดสูงขึ้น ซึ่งแนวโน้มเมื่อปริมาณเรซินสูงขึ้น (มวลรวมน้อยลง) พฤติกรรมการรับแรงดัดของวัสดุผสมพอลิเมอร์คอนกรีตจะมีค่าเข้าใกล้พอลิเมอร์เรซินแข็งมากขึ้น กำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเรซินแต่อย่างไรก็ตามยังคงมีค่าต่ำเพียง 25 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงดัดของพอลิเมอร์เรซิน ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่น

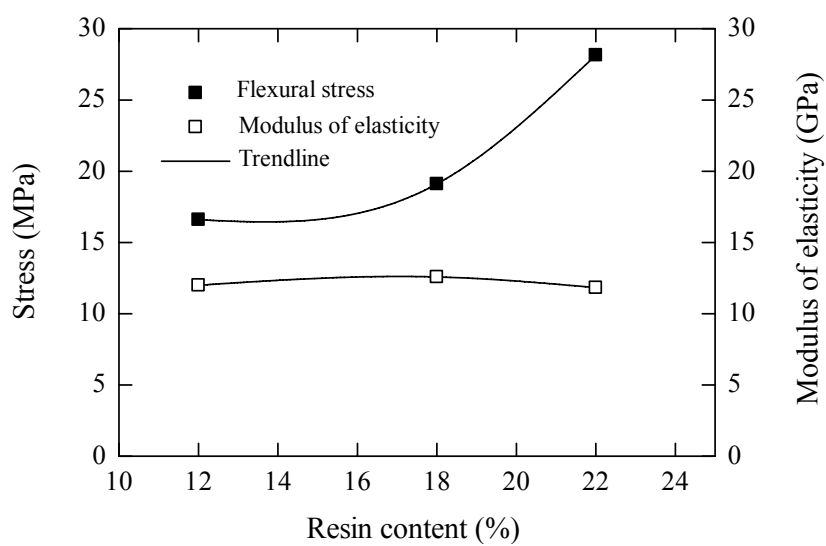
แสดงจุดเหมาะสมที่ปริมาณเรซินระหว่าง 16 ถึง 18 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีค่าสูงกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เรซินประมาณ 3.6 เท่า จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณเรซินที่จุดเหมาะสม (18 เปอร์เซ็นต์) มีค่าโมดูลัสการยืดหยุ่นสูงสุดเช่นกัน แต่อย่างไรก็ดีถ้าต้องการค่ากำลังคดที่สูงขึ้นจะต้องเพิ่มปริมาณเรซินขึ้นด้วย



รูปที่ 4.10 ผลของปริมาณเรซินต่อค่าเฉลี่ยกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่จุดคราก ความเครียดที่ กำลังอัดประลัยและหน่วยน้ำหนัก



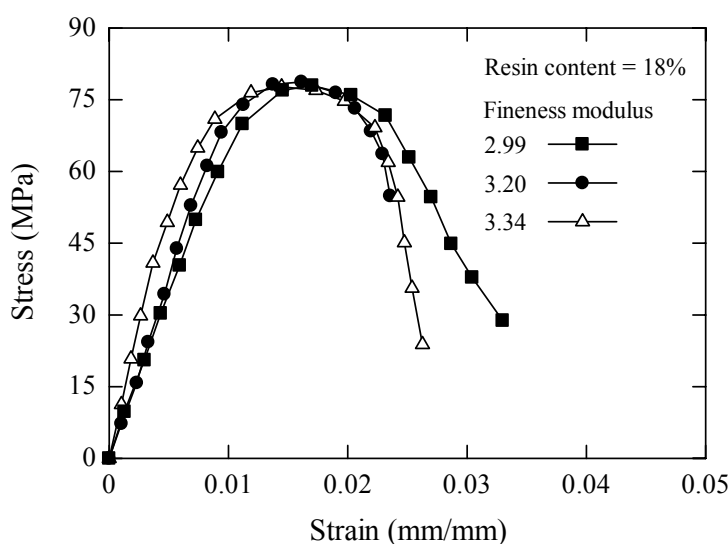
รูปที่ 4.11 ผลของปริมาณเรซินต่อเปอร์เซ็นต์การไหลของพอลิเมอร์ผสมทราย



รูปที่ 4.12 ผลของปริมาณเรซินต่อค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นของการดัด

4.5 ผลของขนาดกะมวลรวมละเอียด

ผลของขนาดกะมวลรวมละเอียดแสดงผ่านค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมที่แตกต่างกันจำนวน 3 ค่า ดังแสดงในรูปที่ 4.13 สำหรับปริมาณเรซินคงที่เท่ากับ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปริมาณเรซินรวม พอลิเมอร์คอนกรีตที่มีโมดูลัสความละเอียดสูง (มวลรวมมีขนาดกะใหญ่กว่า) จะมีกราฟหน่วยแรงและความเครียดที่มีความชันสูงกว่าที่ปริมาณเรซินเดียวกันซึ่งแสดงถึงความแกร่งของวัสดุที่สูงกว่าด้วย โมดูลัสความละเอียดไม่ส่งผลต่อกำลังอัดสูงสุดและความเครียดที่ กำลังอัดสูงสุดแต่ส่งผลต่อความแกร่งเล็กน้อย พอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายหยาบจะมีความแกร่งสูงกว่าทรายละเอียด



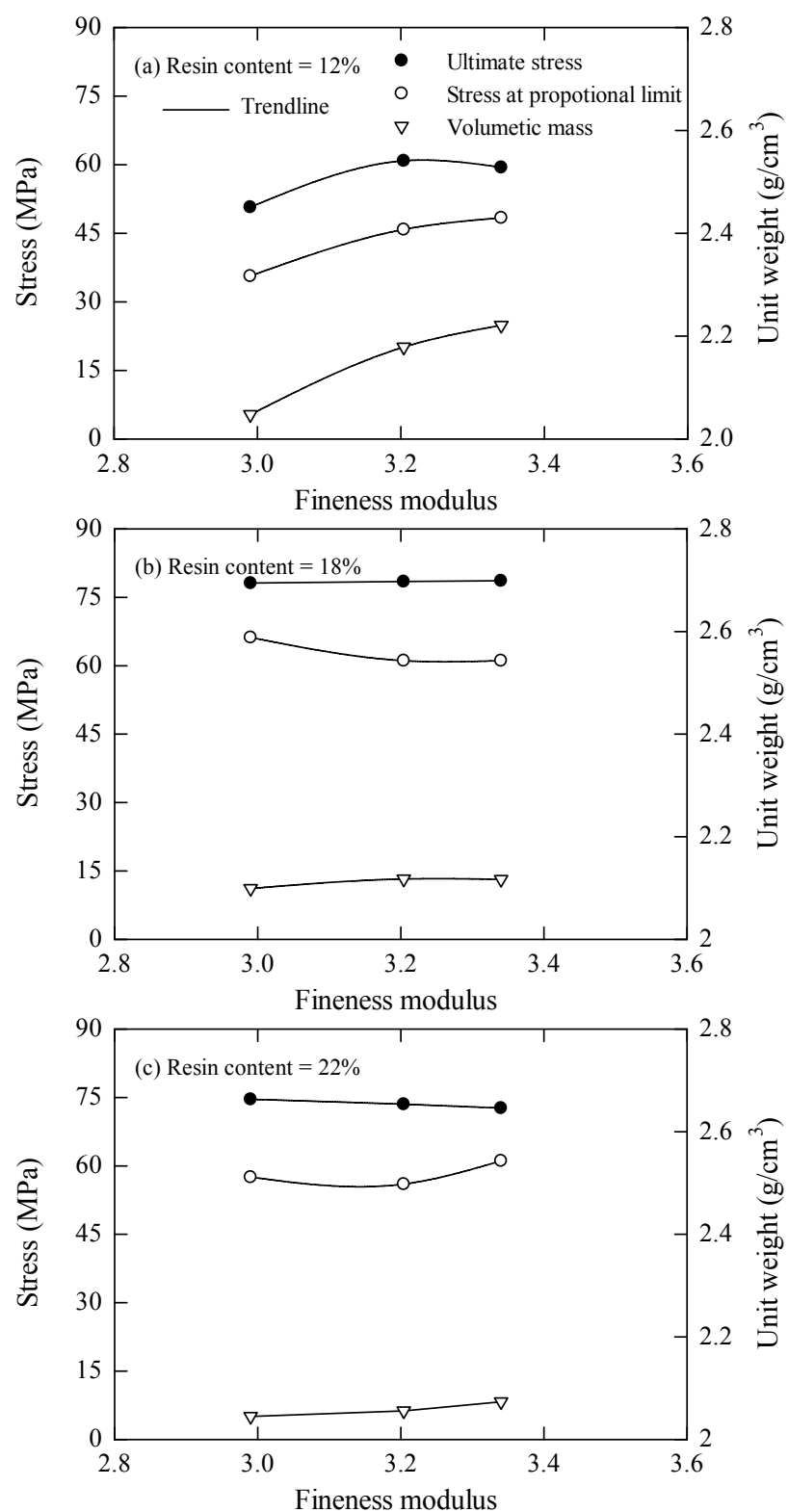
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้การรับแรงอัดที่มีโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมต่าง ๆ

ผลของขนาดกะมวลรวมละเอียดที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ ต่อค่าเฉลี่ยกำลังอัดเฉลี่ย กำลังรับแรงอัดที่พิกัดยืดหยุ่น และหน่วยน้ำหนักแสดงดังรูปที่ 4.14 สำหรับปริมาณเรซิน 12 18 และ 22 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ปริมาณเรซิน 12 เปอร์เซ็นต์ (มวลรวมมากพอลิเมอร์เรซินน้อย) (ดูรูปที่ 4.14a) โมดูลัสความละเอียดมีผลต่อกำลังอัดและหน่วยน้ำหนักมาก กำลังอัดเฉลี่ยและกำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นตามโมดูลัสความละเอียด แต่จะเริ่มคงที่เมื่อโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.20 ที่ปริมาณเรซินเท่ากับ 18 และ 22 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาณมวลรวมน้อยลงปริมาณเรซินเพิ่มมากขึ้น) (ดูรูป 4.14b และ 4.14c) โมดูลัสความละเอียดไม่มีผลต่อกำลังอัดเมื่อเทียบกับปริมาณเรซินเท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งโมดูลัสความละเอียดที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อหน่วยน้ำหนักมากนักเมื่อเทียบกับ

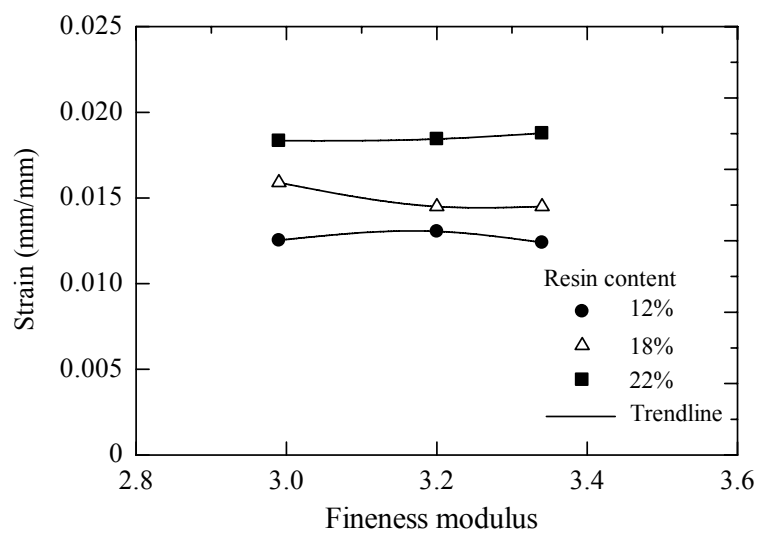
ปริมาณเรซินที่ 12 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีโมดูลัสความเค้นสูงจะมีหน่วยน้ำหนักสูง เพราะมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่าและมีพื้นที่ผิว (specific surface) ต่ำกว่าที่น้ำหนักรวมเท่ากันจึงส่งผลให้ความสามารถในการเทได้ของพอลิเมอร์คอนกรีตดีกว่าด้วย (พื้นที่ผิวมวลรวมมาก ความหนืดของพอลิเมอร์คอนกรีตจะสูง) ดังนั้นเมื่อเทพอลิเมอร์คอนกรีตลงแบบหล่อจะมีความหนาแน่นสูงและมีหน่วยน้ำหนักสูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามถ้าผลของปริมาณเรซินต่อหน่วยน้ำหนักจะมีน้อยลงเมื่อปริมาณเรซินเพิ่มสูงขึ้น

ผลของโมดูลัสความเค้นต่อความเครียดที่กำลังอัดประลัย (ความแรงของตัวอย่างทดสอบ) ของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.15 จากผลทดสอบจะเห็นว่าโมดูลัสความเค้นไม่มีผลต่อความเครียดที่กำลังอัดประลัยสำหรับทุกปริมาณเรซินมากนัก เมื่อพิจารณาที่โมดูลัสความเค้นเดียวกันปริมาณเรซินสูงขึ้นความเครียดที่กำลังอัดประลัยสูงขึ้นเล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบในหัวข้อที่ 4.4 โดยความเครียดที่กำลังอัดประลัยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.25 ถึง 1.90 เปอร์เซ็นต์

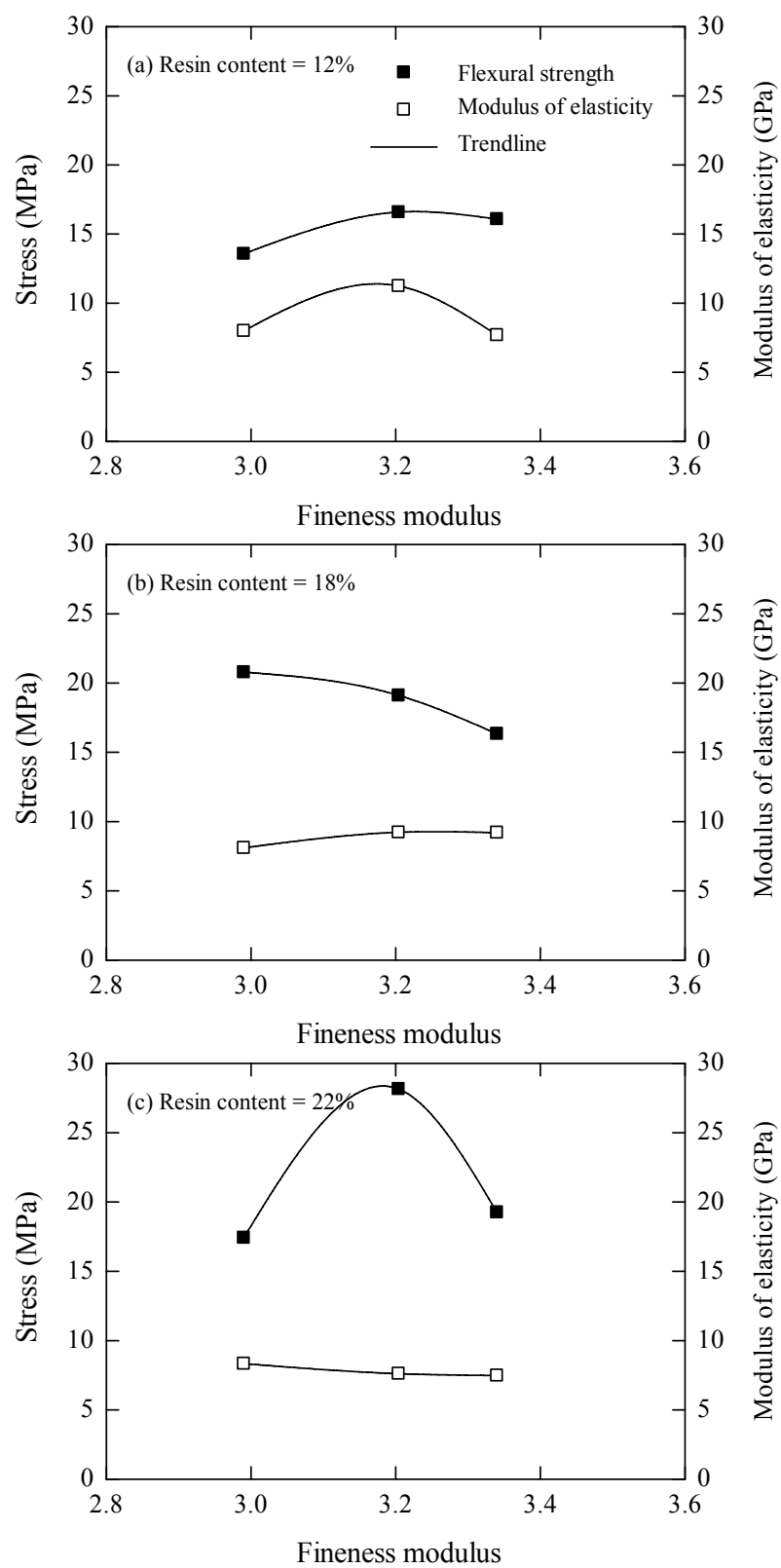
ผลของโมดูลัสความเค้นต่อกำลังคดของพอลิเมอร์คอนกรีตแสดงดังรูปที่ 4.16 สำหรับปริมาณเรซิน 12 18 และ 22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าโมดูลัสความเค้นมีผลต่อกำลังคดค่อนข้างมาก ค่ากำลังคดจะแปรผกผันกับโมดูลัสความเค้น (โมดูลัสความเค้นเพิ่มกำลังรับแรงคดมีแนวโน้มลดลง) ตัวอย่างเช่นที่ปริมาณเรซินเท่ากับ 18 เปอร์เซ็นต์ กำลังคดลดลงตามโมดูลัสความเค้นที่เพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 4.14b) แต่อย่างไรก็ดีที่แต่ละปริมาณเรซินผลทดสอบแสดงจุดเหมาะสมที่โมดูลัสความเค้นเท่ากับ 3.20 โมดูลัสยืดหยุ่นของการคดมีผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนโมดูลัสความเค้นของมวลรวมน้อยมากดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบซึ่งมีค่าค่อนข้างคงที่สำหรับทุกปริมาณเรซิน



รูปที่ 4.14 ผลของโมดูลัสความละเอียดต่อค่าเฉลี่ยของกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นและหน่วยน้ำหนักที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ



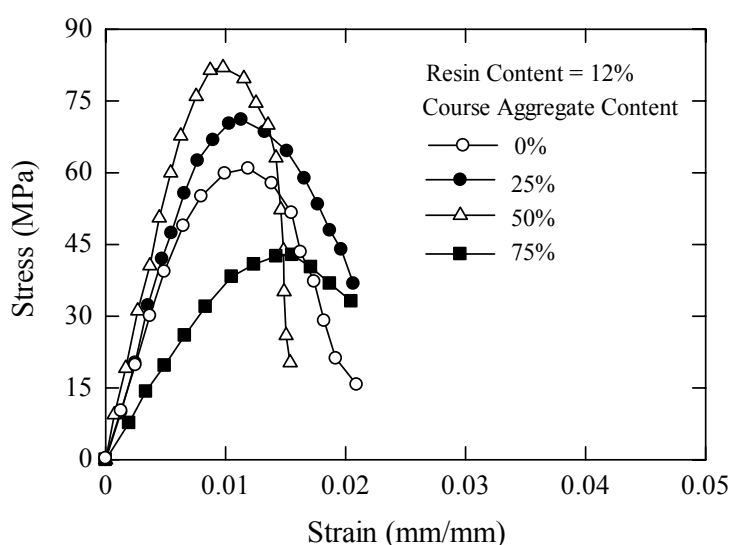
รูปที่ 4.15 ผลของโมดูลัสความละเอียดต่อค่าเฉลี่ยของความเครียดที่กำลังอัดประลัยสำหรับ
พอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ



รูปที่ 4.16 ผลของโมดูลัสความละเอียดต่อค่าเฉลี่ยกำลังดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ

4.6 ผลของปริมาณมวลรวมหยาบ

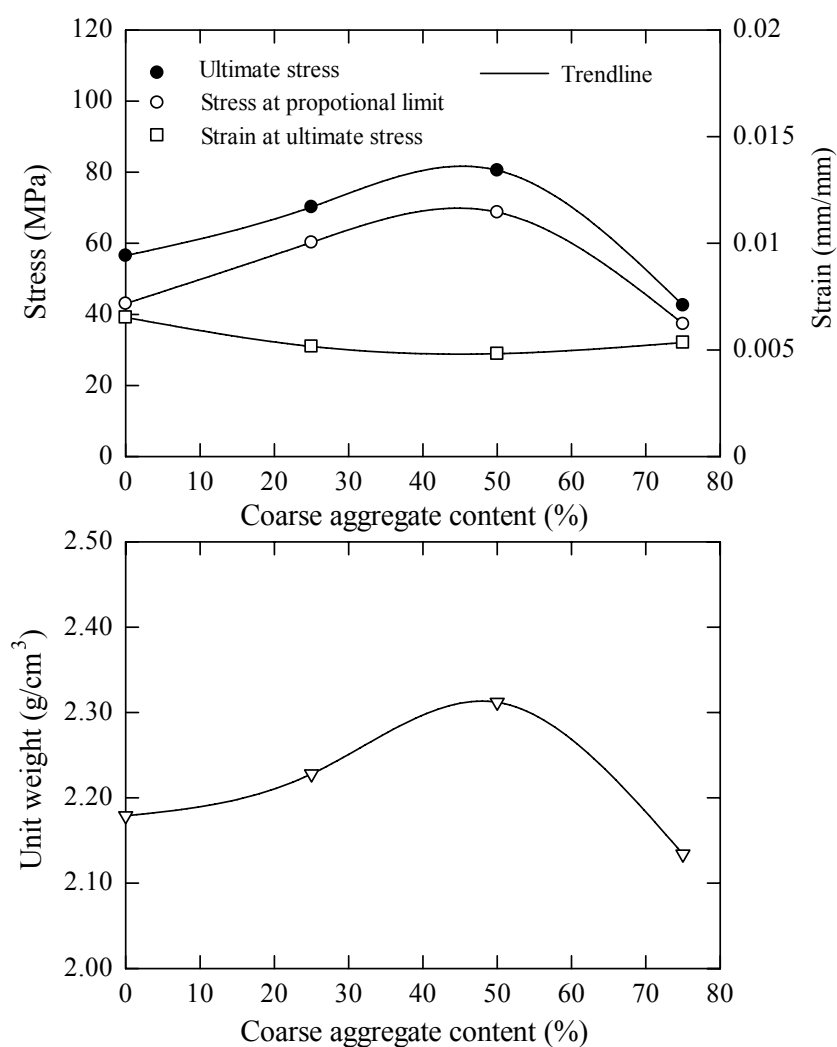
มวลรวมหยาบส่งผลต่อพฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดของพอลิเมอร์คอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 4.17 เมื่อใช้ปริมาณเรซินคงที่เท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตรวม และใช้มวลรวมหยาบแทนที่มวลรวมละเอียดระหว่าง 0 ถึง 75 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด กำลังอัดและความแกร่งของพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณมวลรวมหยาบที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต (ปริญญญาและชัย, 2552) โดยจุดเหมาะสมคือปริมาณมวลรวมหยาบ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลทั้งหมดจะทำให้กำลังอัดเท่ากับ 80.6 เมกะปาสกาล เมื่อปริมาณมวลรวมหยาบเกินจุดเหมาะสม (มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมทั้งหมด) ความชันของกราฟหน่วยแรงและความเครียดลดลงอย่างชัดเจนซึ่งแสดงถึงกำลังอัดและความแกร่งที่ลดลง



รูปที่ 4.17 พฤติกรรมการรับแรงอัดสำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบที่สัดส่วนต่าง ๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นและหน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณมวลรวมหยาบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.18 กำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นและหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามปริมาณมวลรวมหยาบจนถึงที่ปริมาณมวลรวมหยาบเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด เมื่อเพิ่มปริมาณมวลรวมหยาบอัตราส่วนระหว่างกำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นต่อกำลังอัดประลัยจะลดลงเนื่องจากสัดส่วนของวัสดุเปราะ (มวลรวมหยาบ) ในวัสดุผสม (พอลิเมอร์คอนกรีต) มีมากขึ้น วัสดุจึงวิบัติคล้ายวัสดุเปราะ หน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตมีการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับกำลังอัดประลัยของพอลิเมอร์คอนกรีตโดยที่

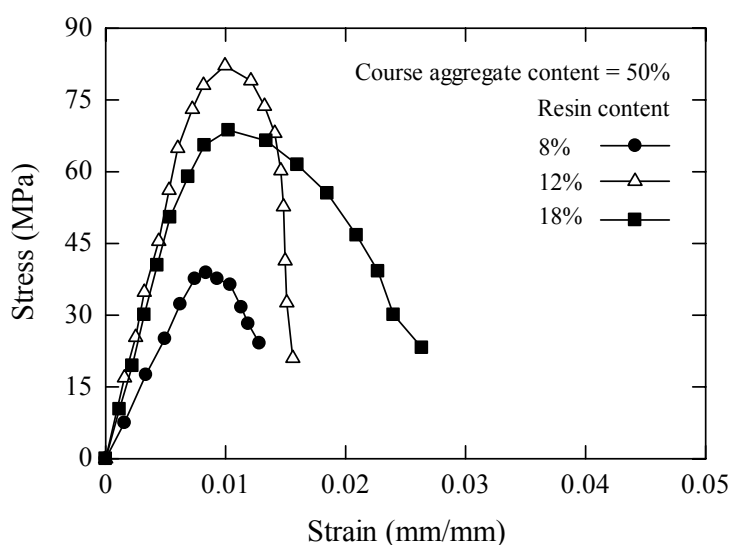
หน่วยน้ำหนักมากจะทำให้กำลังอัดสูงและหน่วยน้ำหนักน้อยจะทำให้กำลังอัดประลัยต่ำกว่า ที่เป็นเช่นนี้ เพราะปริมาณมวลรวมหยาบส่งผลต่อการเทเข้าแบบอย่างมาก ที่ปริมาณเรซินคงที่เท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด ปริมาณมวลรวมหยาบเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมทั้งหมด พอลิเมอร์คอนกรีตจะมีความหนาแน่นมากที่สุดและมีกำลังอัดสูงสุดด้วยซึ่งเท่ากับ 2.31 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและ 80.6 เมกะปาสกาล ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 ผลของปริมาณมวลรวมหยาบต่อกำลังรับแรงอัดประลัย กำลังรับแรงอัดที่จุดครากและหน่วยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาปริมาณมวลรวมหยาบคงที่เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด ปริมาณเรซินที่เปลี่ยนแปลงยังส่งผลต่อพฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดที่แตกต่างกันดังแสดง

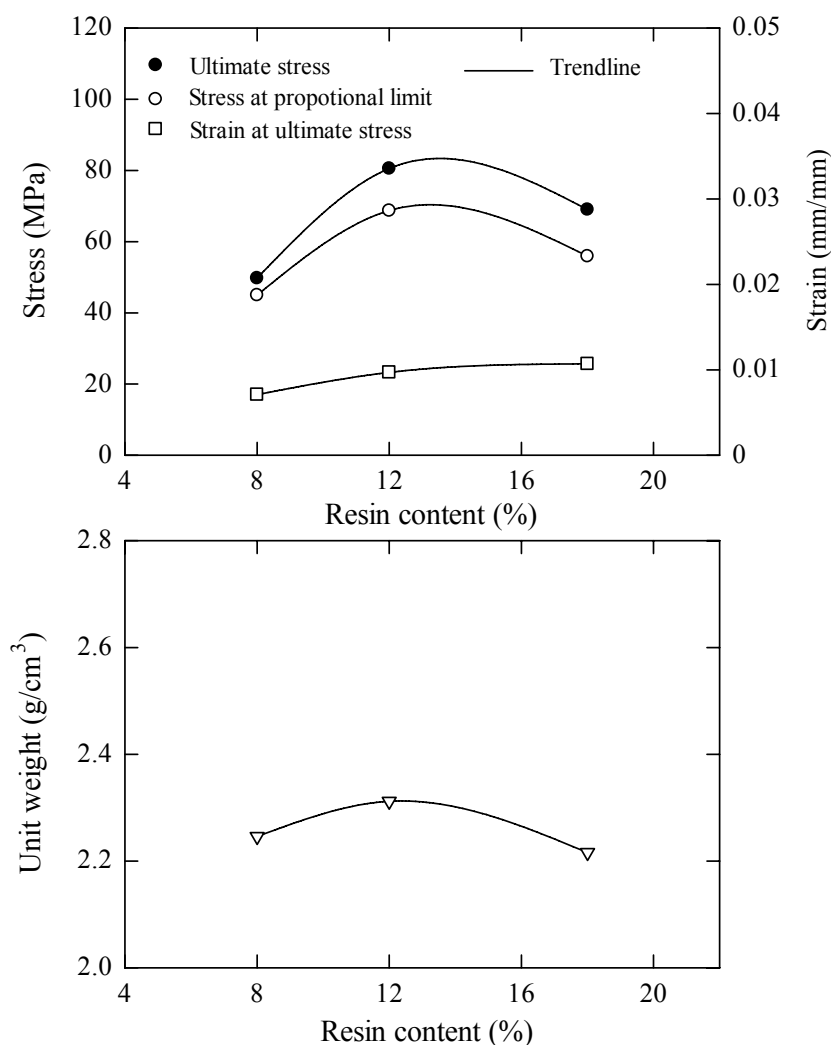
ในรูปที่ 4.19 ปริมาณเรซินลดลงส่งผลให้การยึดประสานระหว่างมวลรวมลดลง กำลังอัดและความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอนกรีตจึงลดต่ำลงด้วย อย่างไรก็ตามปริมาณเรซินสูงตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตไม่ได้มีกำลังอัดสูงสุด แต่จุดเหมาะสมของกำลังอัดและความแข็งแรงยังขึ้นอยู่กับความแน่นของพอลิเมอร์คอนกรีตด้วย ดังจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณเรซิน 12 เปอร์เซ็นต์ มีกำลังอัดประลัยและความแข็งแรงสูงสุด



รูปที่ 4.19 พฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบคงที่เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมละเอียดและมีปริมาณเรซินต่าง ๆ

ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่น ความเครียดที่กำลังอัดประลัยและหน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีปริมาณมวลรวมหยาบคงที่เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมทั้งหมดและปริมาณเรซินต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.20 กำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นและหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามปริมาณเรซินจนถึงจุดเหมาะสมระหว่าง 12 ถึง 14 เปอร์เซ็นต์หลังจากนั้นมีค่าลดลง ความสัมพันธ์ดังกล่าวคล้ายกับรูปแบบของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่ผสมมวลรวมหยาบตามที่ได้กล่าวถึงแล้วในหัวข้อที่ 4.4 และ 4.5 อัตราส่วนกำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นต่อกำลังอัดประลัยมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยซึ่งแสดงถึงวัสดุมีพฤติกรรมเป็นแบบแข็งขึ้นตามความเครียดที่กว้างขึ้น โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.31 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่ตำแหน่งปริมาณเรซินเหมาะสมซึ่งสอดคล้องกับในกรณีที่ไม่ผสมมวลรวมหยาบ (ดูรูปที่ 4.10) หน่วยน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด กล่าวคือกำลังอัดสูงหน่วยน้ำหนักมาก ปริมาณเรซินไม่ส่งผลต่อความเครียดที่กำลังอัด

สูงสุดมากนัก โดยความเครียดที่กำลังอัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยตามปริมาณเรซิน โดยมีค่าระหว่าง 0.8 ถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์

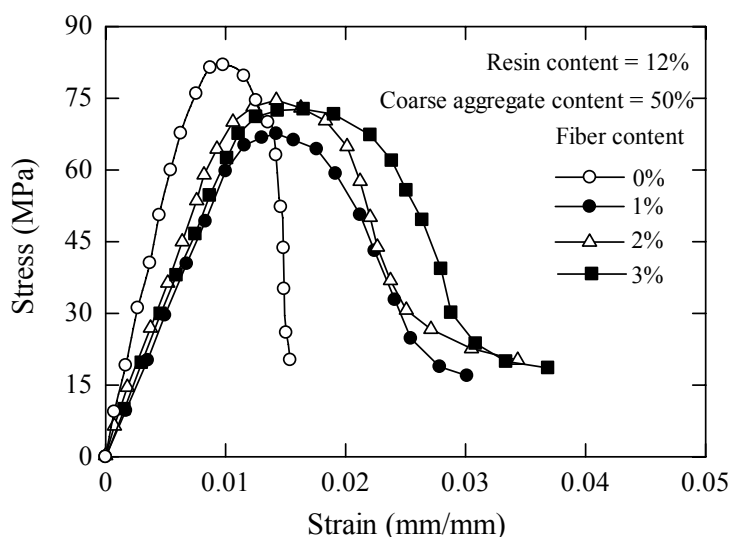


รูปที่ 4.20 ผลของปริมาณเรซินต่อกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่น ความเครียดที่กำลังอัดประลัยและหน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณมวลรวมหยาบคงที่เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมทั้งหมด

4.7 ผลของปริมาณเส้นใย

เมื่อเพิ่มเส้นใยแก้วลงในส่วนผสมของพอลิเมอร์คอนกรีตส่งผลต่อพฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดดังแสดงในรูปที่ 4.21 ความแกร่งของวัสดุมีค่าลดลงเมื่อผสมเส้นใยแต่วัสดุจะมีพฤติกรรมที่เหนียวขึ้นและวัสดุสามารถดูดซับพลังงานได้ดีกว่าเดิม (โมดูลัสความแข็งแรงสูงขึ้น)

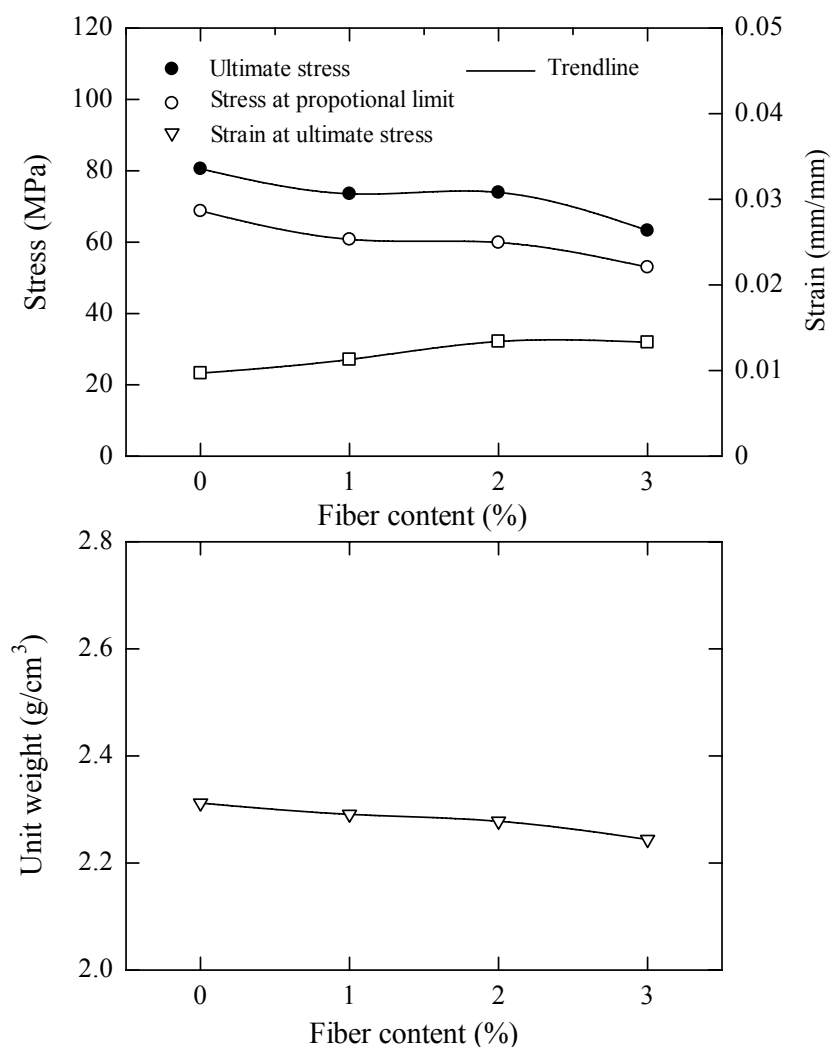
จากผลการทดสอบปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อกำลังอัดเล็กน้อยโดยกำลังอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตผสมเส้นใยมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ปริมาณเส้นใยเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักพอลิเมอร์คอนกรีตรวม อย่างไรก็ตามกำลังอัดเฉลี่ยของพอลิเมอร์คอนกรีตผสมเส้นใยจะลดลงจากเดิม (ซึ่งไม่ผสมเส้นใย) ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.21 พฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบคงที่เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมละเอียดและมีปริมาณเส้นใยต่าง ๆ

ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดเฉลี่ย กำลังอัดที่พิคกชืดหยุ่น ความเครียดที่กำลังอัดเฉลี่ย และหน่วยน้ำหนัก ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณเส้นใยต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.22 กำลังอัดเฉลี่ย กำลังอัดที่พิคกชืดหยุ่นและหน่วยน้ำหนักลดลงตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น กำลังของพอลิเมอร์คอนกรีตขึ้นอยู่กับความสามารถในการทะลุเข้าแบบและความแน่นของการบดอัดแต่ละชั้น พอลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมเส้นใยที่ปริมาณเรซินเท่าเดิมจะมีความสามารถในการทะลุได้ลดลงเพราะเส้นใยแก้วมีพื้นที่ผิวมากคล้ายกับมวลรวมละเอียดเมื่อผสมกับเรซินซึ่งมีความหนืดสูงกว่าน้ำถึง 400 เท่า จึงทะลุเข้าแบบได้ไม่แน่นเท่าเดิมซึ่งส่งผลให้กำลังอัดและหน่วยน้ำหนักลดลง อย่างไรก็ตามผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ (Sett and Vipulanandan, 2002) ที่ผ่านมาซึ่งชี้ให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตผสมเส้นใยอาจเพิ่มขึ้นหรืออาจลดลงตามชนิดของเส้นใยและกระบวนการเตรียมตัวอย่างที่อาจต้องใช้วิธีที่แตกต่างกัน เส้นใยที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้มีความยาวค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ซึ่งความยาวของเส้นใยนี้ส่งผลต่อความสามารถในการทะลุเข้าแบบ และ

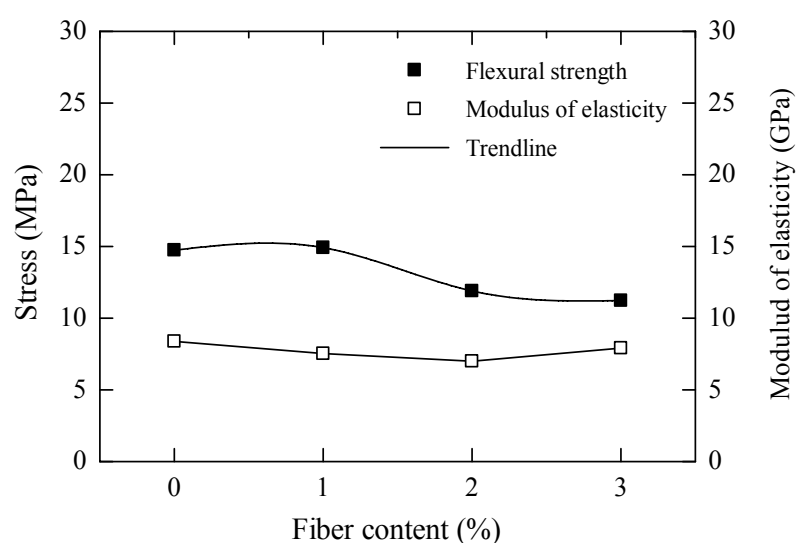
ความแน่นของตัวอย่างอย่างมากดังจะเห็นได้จากเมื่อปริมาณเส้นใยแก้วเพิ่มขึ้นหน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์เรซินกลับลดลงอย่างชัดเจน



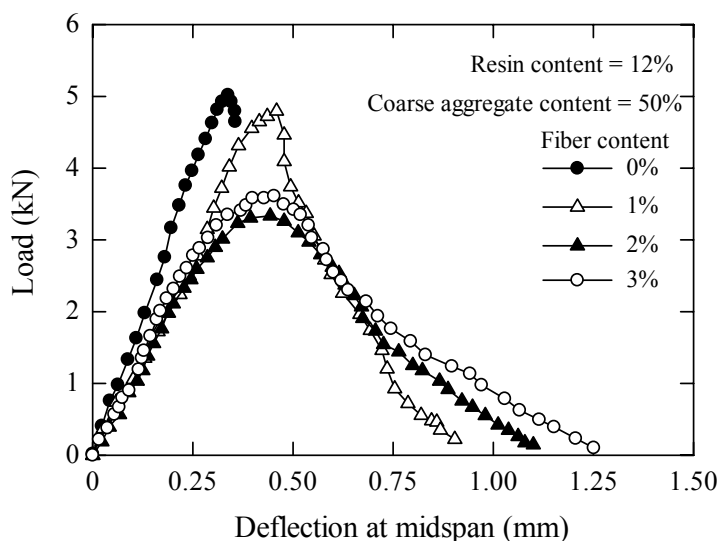
รูปที่ 4.22 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าเฉลี่ยกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่น ความเครียดที่ กำลังอัดประลัยและหน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณมวลรวมหายบกึ่งที่เท่ากับ 50 เปอร์เซนต์ของมวลรวมทั้งหมด

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการดัดแบบคานค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดของพอลิเมอร์คอนกรีตผสมเส้นใยก็ลดลงตามปริมาณเส้นใยเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 4.23 แต่โมดูลัสยืดหยุ่นของการดัดมีค่าค่อนข้างคงที่แม้จะเพิ่มปริมาณเส้นใย อย่างไรก็ตามการเพิ่มเส้นใยในพอลิเมอร์คอนกรีตยังคงมีประโยชน์เมื่อต้องการพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีความเหนียวเพิ่มขึ้น (โมดูลัสความแข็งแรงสูง) หรือมี

กำลังคงค้างหลังจากจุดสูงสุด ซึ่งเหมาะกับโครงสร้างสำหรับต้านทานแรงกระแทกหรือสั่นสะเทือน ดังแสดงได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเสียรูปที่ตำแหน่งกลางคานของการทดสอบการรับแรงดัดแบบคานในรูปที่ 4.24 จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใยมีพฤติกรรมแบบวัสดุเปราะอย่างชัดเจนโดยไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้หลังจากน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ซึ่งต่างกับตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมเส้นใยใช้อย่างชัดเจน พอลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมเส้นใยมีกำลังคงค้างในช่วงการอ่อนลงจนมีการเสียรูปที่กึ่งกลางคานมากกว่า 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของกำลังดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเสียรูปที่กึ่งกลางคานของการทดสอบการรับแรงดัดแบบคานที่ปริมาณเส้นใยต่าง ๆ

4.8 ปัจจัยควบคุมพฤติกรรมของพอลิเมอร์คอนกรีต

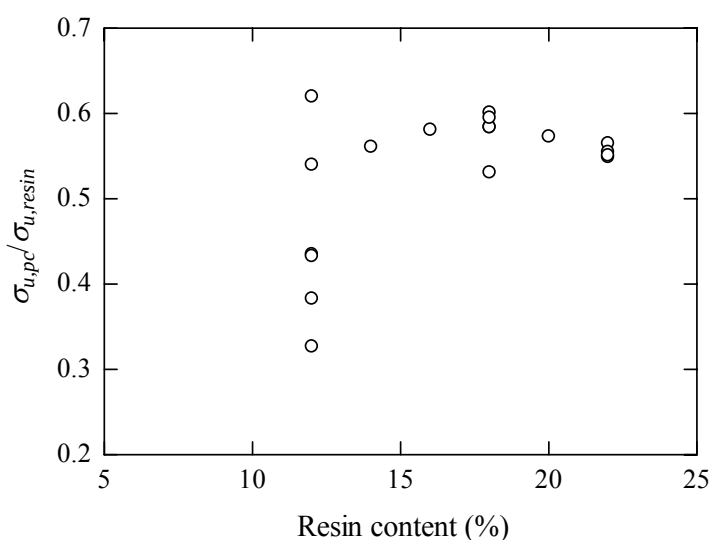
4.8.1 กำลังรับแรงอัด

เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่แต่ละอัตราส่วนผสมจากการทดสอบที่ได้นำเสนอแล้วในหัวข้อ 4.3 ถึง 4.6 จะพบว่าปริมาณเรซินจะส่งผลต่อกำลังอัดอย่างชัดเจน แต่เมื่อนำผลการทดสอบกำลังอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณต่าง ๆ มาพิจารณาดังแสดงในรูปที่ 4.25 จะเห็นว่ากำลังอัดที่แต่ละปริมาณเรซินไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณเรซินที่เปลี่ยนแปลงไม่สามารถใช้อธิบายอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดที่แตกต่างกันได้ ผลการทดสอบตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตพบว่าพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ปริมาณเรซินเหมาะสมดังได้อธิบายแล้วในหัวข้อ 4.4 ลักษณะของตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีปริมาณเรซินต่ำกว่าจุดเหมาะสมความหนาของวัสดุประสาน (พอลิเมอร์เรซิน) จะมีน้อยกว่าตัวอย่างที่ปริมาณเรซินเหมาะสม การวิบัติของพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีปริมาณเรซินน้อยจะวิบัติที่เนื้อพอลิเมอร์ เพราะความหนาของพอลิเมอร์เรซินน้อย จึงเกิดหน่วยแรงอัดมีความเข้มข้นมากขึ้น (stress concentration) ที่ชั้นพอลิเมอร์เรซินที่เป็นวัสดุประสาน ซึ่งมีค่าเกินกำลังรับแรงอัดประลัยของพอลิเมอร์เรซิน ดังนั้นความหนาของวัสดุประสานจึงส่งผลโดยตรงต่อกำลังของพอลิเมอร์คอนกรีต ถ้าความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์น้อยกำลังอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตจะต่ำ วัสดุผสมที่มีความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นจะเป็นผลให้อัตราส่วนกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตต่อกำลังรับแรงอัดของเรซินเพิ่มตาม เพราะเมื่อความหนาเพียงพอฟิล์มพอลิเมอร์สามารถรับกำลังได้ดีขึ้น ดังนั้น

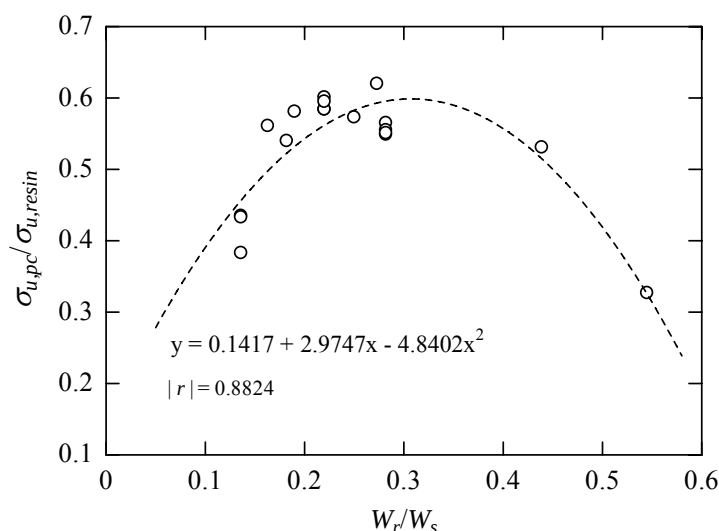
เมื่อความหนาฟิล์มพอลิเมอร์เรซินมากตัวอย่างจะวัดที่ผิวสัมผัสระหว่างเรซินและมวลรวม อย่างไรก็ตามความหนาของชั้นพอลิเมอร์เป็นสัดส่วนผกผันกับพื้นที่ผิวของวัสดุมวลรวม เมื่อพิจารณาที่คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุแล้วจะเห็นได้ว่าโดยปกติแล้วทรายจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าหินถึง 400 เท่า ดังนั้นปริมาณทรายจึงควรเป็นตัวแปรควบคุมกำลังของพอลิเมอร์คอนกรีต รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังอัดของพอลิเมอร์คอนกรีต ($\sigma_{u,pc}$) ต่อพอลิเมอร์เรซิน ($\sigma_{u,resin}$) และอัตราส่วนน้ำหนักของพอลิเมอร์เรซิน (W_r) ต่อทราย (W_s) จากกราฟจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะแสดงจุดเหมาะสม กล่าวคือจุดเหมาะสมของอัตราส่วนน้ำหนักของพอลิเมอร์เรซินต่อทรายเท่ากับ 0.3 ซึ่งให้อัตราส่วนกำลังอัดสูงที่สุด ดังนั้นการประมาณกำลังอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตสามารถพิจารณาจากอัตราส่วนน้ำหนักของพอลิเมอร์เรซินต่อทรายได้เช่นกัน จากการวิเคราะห์แบบถดถอยอัตราส่วนกำลังอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตต่อเรซินและอัตราส่วนน้ำหนักพอลิเมอร์เรซินต่อทรายแสดงดังสมการดังนี้

$$\frac{\sigma_{u,pc}}{\sigma_{u,resin}} = b_0 + b_1 \left(\frac{W_r}{W_s} \right) - b_2 \left(\frac{W_r}{W_s} \right)^2 \quad (4.1)$$

เมื่อ b_0 b_1 และ b_2 คือ พารามิเตอร์ของสมการ จากผลการทดสอบ b_0 มีค่าเท่ากับ 0.1417 b_1 มีค่าเท่ากับ 2.9747 และ b_2 มีค่าเท่ากับ 4.8402



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนกำลังอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตต่อพอลิเมอร์เรซินและปริมาณเรซินต่าง ๆ



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนกำลังอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตต่อพอลิเมอร์เรซินและอัตราส่วนปริมาณเรซินต่อทรายต่าง ๆ

4.8.2 ความแข็งแรง

จากผลการทดสอบความเครียดที่กำลังอัดจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณเรซิน พอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ปริมาณเรซินน้อยจะมีแนวโน้มเป็นวัสดุเปราะซึ่งเกิดความเครียดต่ำที่กำลังอัดประลัย โดยพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณเรซิน 12 เปอร์เซ็นต์จะมีความเครียดที่กำลังอัดประลัยประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ปริมาณเรซินมากจะมีแนวโน้มเป็นวัสดุเหนียว คือ ความเครียดที่กำลังอัดประลัยเพิ่มขึ้น ถ้าต้องการออกแบบส่วนผสมที่ต้องการความแข็งแรงสูงอาจต้องเพิ่มมวลรวมหยาบเพราะจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมมวลรวมหยาบจะมีความแข็งแรงสูงกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่ผสมมวลรวมหยาบที่ปริมาณเรซินเท่ากัน

4.8.3 กำลังรับแรงดัด

กำลังรับแรงดัดแบบคานถูกควบคุมโดยกำลังรับแรงดึงของตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตที่ตำแหน่งกลางคาน จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่ากำลังดัดแปรผันโดยตรงกับกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีต ความชันของกราฟกำลังดัดต่อกำลังอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตแสดงถึงอัตราส่วนกำลังดัดต่อกำลังอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่สูงกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติมากกว่า 1.5 เท่า เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังดัดต่อกำลังของพอลิเมอร์เรซินและอัตราส่วนน้ำหนักพอลิเมอร์เรซินต่อน้ำหนักทราย จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนกำลังดัดต่อกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำหนักพอลิเมอร์เรซินต่อน้ำหนักทราย การพิจารณาสัดส่วนเหมาะสมสำหรับ

การรับแรงคดจึงควรใช้อัตราส่วนเหมาะสมเดียวกับการรับแรงอัดโดยใช้อัตราส่วนปริมาณเรซินต่อทรายเป็นตัวแปรควบคุมกำลัง

4.8.4 หน่วยน้ำหนัก

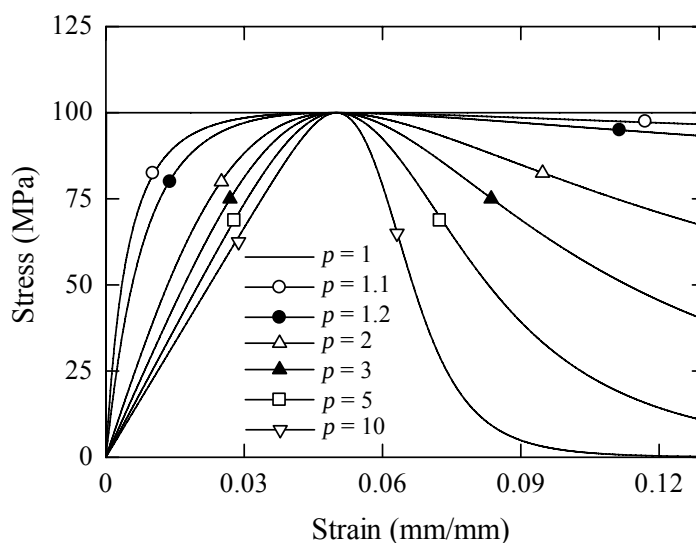
หน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตที่สัดส่วนผสมเดียวกันจะบ่งบอกถึงความแน่นของการเทเข้าแบบ สัดส่วนผสมของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ต่างกันส่งผลต่อประสิทธิภาพการเข้าแบบที่ต่างกันด้วย ดังนั้นที่สัดส่วนผสมใด ๆ ของพอลิเมอร์คอนกรีตหน่วยน้ำหนักที่สูงจะสัมพันธ์กับกำลังอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่สูงขึ้นด้วย การควบคุมคุณภาพของ พอลิเมอร์คอนกรีตสามารถนำหน่วยน้ำหนักมาใช้ในการควบคุมคุณภาพของพอลิเมอร์คอนกรีตก่อนการทดสอบได้

4.9 แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับหน่วยแรงและความเครียดภายใต้การรับแรงอัด

จากศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ส่วนผสมต่าง ๆ แบบจำลองพฤติกรรมระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดสำหรับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตซึ่งเสนอโดย Chen et al. (1985) ได้ถูกนำมาปรับใช้สำหรับทำนายพฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตโดยแบบจำลองดังกล่าวเป็นไปตามสมการดังนี้

$$\sigma = \frac{p \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_u} \right)}{(p-1) + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} \right)^p} \sigma_m \quad (4.2)$$

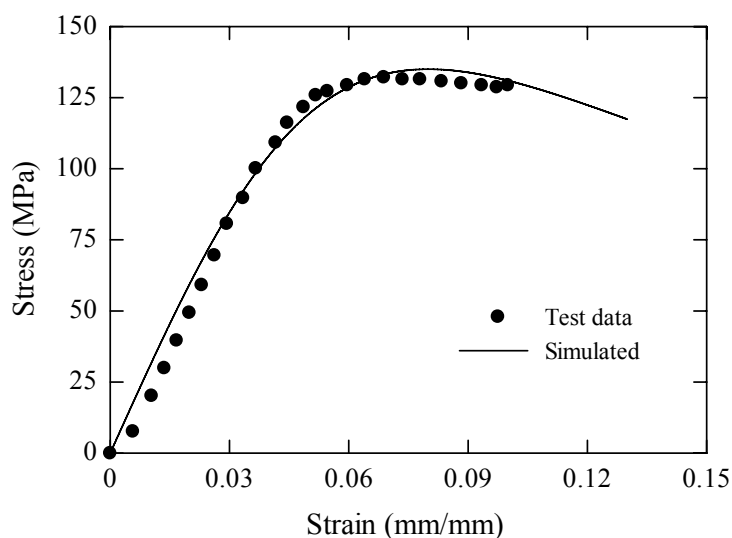
เมื่อ p คือ พารามิเตอร์ของวัสดุซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 σ คือ หน่วยแรง ε คือ ความเครียด σ_m คือ หน่วยแรงอัดสูงสุด (มีค่าเท่ากับกำลังอัดประลัย) และ ε_m คือ ความเครียดที่หน่วยแรงอัดสูงสุด การศึกษาผลของการเปลี่ยนพารามิเตอร์ p ต่อลักษณะของหน่วยแรงและความเครียดแสดงดังรูปที่ 4.27 เมื่อใช้ σ_m เท่ากับ 100 เมกะปาสกาลและ ε_m เท่ากับ 0.05 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าเมื่อ p เท่ากับ 1 หน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดเมื่อไม่มีความเครียดเกิดขึ้นเลย (ความแกร่งมีค่าเท่ากับ ∞) เมื่อเพิ่มค่าพารามิเตอร์ p ความแกร่งของวัสดุจะลดลง พารามิเตอร์ p ควบคุมทั้งความแกร่งของวัสดุก่อนและหลังกำลังรับแรงอัดประลัย



รูปที่ 4.27 ผลการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ p ต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ภายใต้แรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีต

หน่วยแรงและความเครียดของพอลิเมอร์เรซินแข็งภายใต้การรับแรงอัดสามารถอธิบายได้โดยสมการที่ 4.2 โดยใช้พารามิเตอร์ p เท่ากับ 2.2 ดังแสดงในรูปที่ 4.28 จากผลการเปรียบเทียบจะเห็นว่าสมการที่น่าเสนอสามารถใช้ทำนายผลการทดสอบพอลิเมอร์เรซินแข็งได้โดยใช้พารามิเตอร์วัสดุเพียงค่าเดียว พอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณเรซิน 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตรวมและมีอายุบ่มต่าง ๆ สามารถใช้สมการที่ 4.2 ทำนายพฤติกรรมได้เช่นกันดังแสดงในรูปที่ 4.29 โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์ p มีค่าคงที่เมื่ออายุมากกว่า 7 วัน

ค่าพารามิเตอร์ p สำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณเรซินใด ๆ เป็นไปตามตารางที่ 4.4 และผลการทำนายพฤติกรรมการรับแรงอัดเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.30 จากการศึกษาพบว่าสำหรับมวลรวมชนิดเดียวกันค่าสำหรับพารามิเตอร์ p แปรผกผันกับปริมาณเรซิน พารามิเตอร์ p มีค่าลดลงเมื่อปริมาณสูงขึ้น หรืออาจอธิบายได้ว่าพารามิเตอร์ p ยิ่งมากความแกร่งยิ่งลดลง



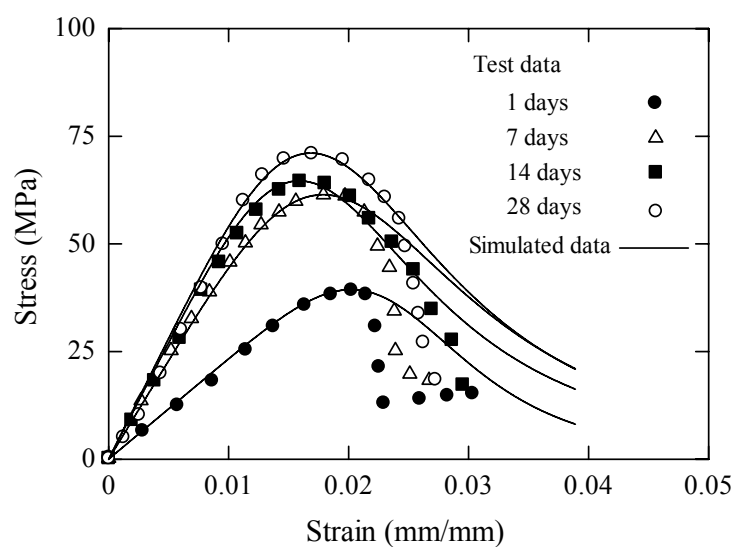
รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดจากผลการทดสอบ และผลทำนายสำหรับพอลิเมอร์เรซินแข็ง

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์สำหรับสมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดของ พอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่มใด ๆ

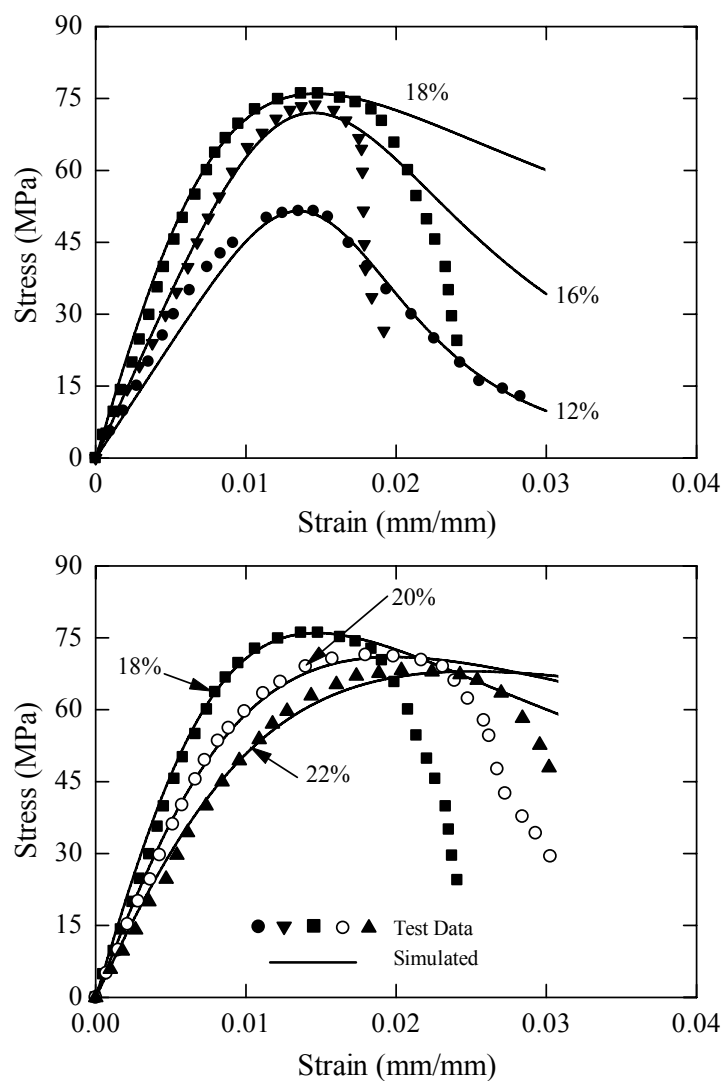
Parameters	Curing times			
	1 days	7 days	14 days	28 days
σ_m	39.38	61.42	64.64	71.08
ε_m	0.0202	0.0179	0.0159	0.0169
p	6	4	4	4

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์สำหรับสมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดของ พอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณเรซินใด ๆ

Parameters	Resin content				
	12%	16%	18%	20%	22%
σ_m	52.5	72	76	71	68
ε_m	0.0125	0.0145	0.0147	0.0198	0.025
p	4.5	3.5	2.5	2	1.7



รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดจากผลการทดสอบ และผลทำนายสำหรับอายุป่มต่าง ๆ



รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดจากผลการทดสอบ และผลทำนายสำหรับปริมาณเรซินต่าง ๆ

4.10 การออกแบบส่วนผสมของพอลิเมอร์คอนกรีตสำหรับกำลังอัดต่าง ๆ

จากผลการศึกษาตัวแปรควบคุมกำลังอัดที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์คอนกรีต คือ อัตราส่วนปริมาณเรซินต่อทรายโดยน้ำหนัก อัตราส่วนเรซินต่อทรายและกำลังอัดจากการทดสอบมีความสัมพันธ์แบบแสดงจุดเหมาะสมคล้ายกราฟโค้งคว่ำซึ่งอธิบายได้โดยสมการที่ 4.1 การออกแบบส่วนผสมเพื่อให้ได้กำลังอัดที่ต้องการสามารถทำได้ตามขั้นตอนดังนี้

- 1) กำหนดกำลังอัดประลัยของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ต้องการ ($\sigma_{u,pc}$) สิ่งที่ต้องทราบ คือ กำลังของพอลิเมอร์เรซิน ($\sigma_{u,resin}$)
- 2) คำนวณหาค่า $\frac{\sigma_{u,pc}}{\sigma_{u,resin}}$ และแทนค่าลงในสมการที่ 4.1 เพื่อหาค่า $\frac{W_r}{W_s}$ โดยการแก้สมการกำลังสองและเลือกค่าผลคำตอบที่มีค่าต่ำเพื่อเป็นการประหยัดปริมาณเรซินที่สุด
- 3) นำค่า $\frac{W_r}{W_s}$ ที่ได้ไปคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างเรซินและทรายที่ต้องการต่อไป

จากขั้นตอนวิธีการออกแบบส่วนผสมข้างต้นอัตราส่วนผสมที่กำลังอัดต่าง ๆ สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 4.5 และ 4.6 สำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่ผสมมวลรวมหยาบ และผสมมวลรวมหยาบ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 อัตราส่วนเรซินต่อทรายเพื่อให้ได้กำลังอัดต่าง ๆ สำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่ผสมมวลรวมหยาบ

Design strength $\sigma_{u,pc}$ (MPa)	60.0	62.5	65.0	67.5	70.0	72.5	75.0
W_r/W_s	0.1255	0.1355	0.1475	0.1595	0.1725	0.1875	0.2045
$W_r:W_s$	1:7.97	1:7.38	1:6.78	1:6.27	1:5.80	1:5.33	1:4.89

ตารางที่ 4.6 อัตราส่วนเรซินต่อทรายเพื่อให้ได้กำลังอัดต่าง ๆ สำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมมวลรวมหยาบ

Design strength $\sigma_{u,pc}$ (MPa)	65.0	67.5	70.0	72.5	75.0	77.5	80.0
W_r/W_s	0.1475	0.1595	0.1725	0.1875	0.2045	0.2245	0.252
$W_r:W_s:W_{cr}$	1:6.78: 6.78	1:6.27: 6.27	1:5.80: 5.80	1:5.33: 5.33	1:4.89: 4.89	1:4.45: 4.45	1:3.97: 3.97

บทที่ 5

บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสม พฤติกรรมทางกล และคุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีต พร้อมทั้งได้นำเสนอปัจจัยควบคุมกำลังของพอลิเมอร์คอนกรีตซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบส่วนผสมของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีต การทดสอบทำโดยการแปรผันปริมาณเรซิน ขนาดมวลรวมละเอียด ปริมาณมวลรวมหยาบและปริมาณเส้นใย ซึ่งจากผลการศึกษาพบข้อสรุปที่สำคัญดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1) สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่ผสมมวลรวมหยาบในการรองรับแรงอัดและแรงคั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกปริมาณเรซินที่ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักรวมของพอลิเมอร์คอนกรีต โดยที่สัดส่วนนี้มีกำลังอัด และความสามารถในการเทได้ ซึ่งเหมาะกับการใช้งาน มีปริมาณเรซินต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 4.6 โดยน้ำหนัก กำลังอัดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 75.8 เมกะปาสกาล

5.1.2) สัดส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมมวลรวมหยาบ คือ ปริมาณเรซิน 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักรวมของพอลิเมอร์คอนกรีต น้ำหนักทรายต่อหินเท่ากับ 50:50 หรือปริมาณเรซินต่อทรายต่อหินเท่ากับ 1 ต่อ 3.7 ต่อ 3.7 โดยน้ำหนัก ซึ่งประหยัดปริมาณเรซินลงเมื่อมีการแทนที่ของมวลรวมหยาบ กำลังอัดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 80.6 เมกะปาสกาล

5.1.3) การศึกษาพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงอัดและแรงคั้นพบว่าพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงกดอัดนั้น จะสามารถอธิบายพฤติกรรมได้ 3 ช่วง โดยช่วงแรกคือช่วงเส้นตรง ช่วงที่ 2 คือช่วงแข็งขึ้นด้วยความความเครียด และช่วงที่ 3 คือช่วงอ่อนจากการแตกหักเฉพาะจุด ซึ่งกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของพอลิเมอร์คอนกรีตอยู่ที่ 75.8 เมกะปาสกาล ค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่พิกัดยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 58.4 เมกะปาสกาลและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 20 กิกะปาสกาลที่อายุบ่ม 7 วัน ลักษณะการวิบัติเป็นแบบเฉือนระนาบซึ่งมีลักษณะการวิบัติเช่นเดียวกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติ พฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงคั้นมีพฤติกรรมแบบวัสดุเปราะ คล้ายกับการทดสอบปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตสำหรับตัวอย่างที่ไม่ผสมเส้นใย ตัวอย่างทดสอบจะแตกหักทันทีหลังจากน้ำหนัก

บรรทุกมีค่าเท่ากับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ค่ากำลังรับแรงดัดเฉื่อยของพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่าง 17 ถึง 28 เมกะปาสกาล และมีค่าโมดูลัสแบบ Secant อยู่ระหว่าง 8 ถึง 12 กิกะปาสกาล

5.1.4) การศึกษาผลกระทบของการเสริมเส้นใยต่อพฤติกรรมทางกล และคุณสมบัติทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตพบว่าเมื่อเพิ่มเส้นใยแก้วลงในส่วนผสมพอลิเมอร์คอนกรีตส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดและความแกร่ง กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์คอนกรีตจะสามารถดูดซับพลังงาน(โมดูลัสความแข็งแรงสูงขึ้น) ได้ดีกว่า โดยค่ากำลังอัดสูงสุดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมเส้นใยแก้วจะพบที่ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักพอลิเมอร์คอนกรีตรวม

5.1.5) ปัจจัยที่ควบคุมกำลังของพอลิเมอร์คอนกรีต ที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบส่วนผสมของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตประกอบด้วย

ปริมาณพอลิเมอร์เรซิน มีผลโดยตรงกับกำลังอัดและกำลังดัด ปริมาณพอลิเมอร์เรซินมากส่งผลต่อกำลังอัดที่เปลี่ยนแปลงแบบแสดงจุดเหมาะสม ปริมาณเรซินมากพอลิเมอร์คอนกรีตจะมีความแกร่งลดลง

ขนาดมวลรวม (โมดูลัสความละเอียด) มีผลต่อกำลังอัดและความแกร่งน้อย โมดูลัสความละเอียดสูงพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มกำลังอัดเพิ่มเล็กน้อย แต่จะส่งผลต่อกำลังดัดอย่างชัดเจน ค่ากำลังรับแรงดัดแปรผกผันกับโมดูลัสความละเอียด (โมดูลัสความละเอียดเพิ่มกำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มลดลง) กำลังรับแรงดัดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีโมดูลัสความละเอียดต่างกันจะแตกต่างกันมาก และมีผลของปริมาณเรซินเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

ปริมาณมวลรวมหยาบสามารถใช้ทดแทนมวลรวมละเอียดเพิ่มกำลังอัดและความแกร่งของพอลิเมอร์คอนกรีต และลดราคาพอลิเมอร์คอนกรีตลงได้เมื่อใช้ในปริมาณเหมาะสม ผลของการเพิ่มปริมาณมวลรวมหยาบแสดงจุดเหมาะสมแบบโค้งคว่ำ

ปริมาณเส้นใยสามารถเพิ่มความเหนียวภายใต้การรับแรงดัดได้ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบจากงานวิจัยอื่น ๆ แต่เส้นใยจะลดความสามารถในการเทเข้าแบบหล่อคอนกรีตอย่างมาก หน่วยน้ำหนักของตัวอย่างลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยซึ่งอาจมาจากน้ำหนักของเส้นใยน้อยกว่าเรซินและมวลรวม และการบดอัดตัวอย่างทำได้ประสิทธิภาพน้อยลงจากการบวมของปริมาณเส้นใยเมื่อผสมเรซิน

5.2 ข้อเสนอแนะและการต่อยอดการวิจัย

5.2.1) การศึกษาคุณสมบัติทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตนี้เป็นการศึกษาโดยใช้ชนิดของพอลิเมอร์เรซินเพียงชนิดเดียว ซึ่งใช้พอลิเมอร์เรซินชนิด Isophthalate ดังนั้นจึงควรศึกษาเช่นเดียวกันนี้กับพอลิเมอร์เรซินชนิดอื่นเพิ่มเติม

5.2.2) กำลังรับแรงดัดยังคงมีค่าต่ำดังนั้นจึงควรทำการวิจัยเพิ่มเติมโดยการเสริมเหล็กเส้นเพื่อช่วยเพิ่มกำลังดัด

5.2.3) การวิจัยเพิ่มเติมในส่วนของการผสมเส้นใย โดยอาจเลือกขนาดความยาวของเส้นใยแก้วขนาดอื่น ๆ หรือเลือกใช้เส้นใยชนิดอื่น ๆ เพิ่มเติม เพื่อหาส่วนผสมที่ช่วยเพิ่มกำลังอัดและกำลังดัด

5.2.4) การวิจัยของวัสดุผสมในระดับโครงสร้างเชิงจุลภาคไม่สามารถสรุปผลได้โดยผลการทดสอบจากงานวิจัยนี้ ดังนั้นจึงควรศึกษาเพิ่มเติมด้านโครงสร้างเชิงจุลภาคของวัสดุผสมบนระนาบการวิบัติที่ปริมาณเรซินใด ๆ

รายการอ้างอิง

- ปริญญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตไทย.
- รัตนา จิตต์ลดาพิทักษ์. (2541). การพัฒนาคอนกรีตพอลิเมอร์และมอร์ตาร์พอลิเมอร์จากขวดเพทที่
ใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิไลพร โสทธิธรรมรักษ์. (2540). การทำพอลิเมอร์คอนกรีตจากพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิริชัย ขำสุวรรณ และต่อศักดิ์ ศรีสกุลรัตน์. (2547). คอนกรีตพอลิเมอร์. วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสยาม. 5(2): 15-20.
- อภิสิทธิ์ พงษ์สวัสดิ์. (2538). กำลังของมอร์ตาร์พอลิเอสเตอร์เรซิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- Abedil, S., Hosseinzadeh, M., Kazemzadeh1, M.A., and Daftari-Besheli, M. (2006). **Effect of polymerization time on the molecular weight and molecular weight distribution of polypropylene.** Journal of Applied Polymer Science. 100(1): 368–371.
- Abrams, D.A. (1918). Design of Concrete Mixtures. **Bulletin 1, Structural Material Research Laboratory.** Chicago: Lewis Institute.
- ACI Committee 548 (1997). **Guide for the Use of Polymers in Concrete.** American Concrete Institute.
- ACI Committee 548 (1998). **Guide for Polymer Concrete Overlays.** American Concrete Institute.
- American Society for Testing and Materials (2001). **Standard test methods for compressive strength of chemical-resistant Mortars, grouts, monolithic surfacing, and polymer concretes (ASTM C 579).**
- American Society for Testing and Materials (2002). **Standard test methods for flexural strength and modulus of chemical-resistant Mortars, grouts, monolithic surfacing, and polymer concretes (ASTM C 580).**

- American Society for Testing and Materials (2006). **Standard Specification for Standard Sand (ASTM C778)**.
- American Society for Testing and Materials (2006). **Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine (ASTM C131)**.
- American Society for Testing and Materials (2007). **Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate (ASTM C128)**.
- American Society for Testing and Materials (2007). **Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate (ASTM C127)**.
- American Society for Testing and Materials (2009). **Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate (ASTM C29/C29M)**.
- American Society for Testing and Materials (2008). **Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle (ASTM C191)**.
- Baliga, S., and Wong, T. (1989). Depolymerization of Poly(ethylene terephthalate) Recycled from Post-Consumer Soft-Drink Bottles. **Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry**, 27: 2071-2082.
- Bares, R.A. (1978). Furane resin concrete and its application to large diameter sewer pipes. **SP58-4** (pp. 71-74). Detroit, MI: American Concrete Institute.
- British Standard Institute (1992). **Specification for Aggregate from natural sources for concrete (BS882)**.
- Browne, R.D., Adams, M., and French, E.L. (1975). Experience in the use of Polymer Concrete in the Building and Construction Industry. In **First International Congress on Polymers in Concretes**. London.
- Cangzhou Innovation Metalwork Co., L. (2012). **Polymer Drainage Channel** [Online]. Available: <http://www.made-in-china.com/showroom/stamping-part/product-detailsojQyVlrlBWg/China-Polymer-Drainage-Channel.html>
- Cassis, F.A., and Talbot, R.C. (1998). Polymer and Vinyl Ester Resins. In S.T. Peter ed. **Handbook of Composites** (pp. 34-47). London: Chapman & Hall.

- Chanda, S., and Ohama, Y. (1994). **Polymers in Concrete**. Boca Raton: CRC Press.
- Chen, V.L., Chen, E.S., and Vivatrat, V. (1985). Constitutive modeling of sea ice. In **Proceeding of Offshore Technology Conference**. Society of Petroleum Engineers. 343-351.
- DeMaio, A.J. (1991). Engineering high performance thermoset polyesters from PET. In **Recycling Plas VI-Conference: Plastics Recycling as a Future Business Opportunity** (pp. 58-71). Washington DC.
- Draffin, J.O. (1943). A Brief History of Lime, Cement, Concrete and Reinforce Concrete. **Journal of Western Society of Engineers**. 48: 14-47.
- Fowler, D.W. (1989). Future trends in polymer concrete, **ACI Special Publication, SP116-8**. 129-143.
- Fowler, D. W. (1999). Polymers in concrete: a vision for the 21st century. **Cement and Concrete Composite**. 21: 449-452.
- Gorninski, J.P. (2002). **Estudo da influencia das resinas poliester isoftalica e ortoftalica e de teor de cinza volante nas propriedades mecanicas e durabilidada do concreto pilmero**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brazil.
- Gorninski, J.P., Dal Molin, D.C., and Kazmierczak, C.S. (2004). Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and Portland cement concrete. **Cement and Concrete research**. 34: 2091-2095.
- Hallam, M.A., Pollard, G. and Ward, I.M. (2003). **Relationship between tensile strength and molecular weight of highly drawn polyethylenes**. Journal of Materials Science Letters. 22(24): 975-976.
- Helal, M. S. (1978). **Experimental study of mechanical properties and structural applications of polymer concrete**. Ph.D. thesis, Rice University, Houston, Texas.
- Hsu, M., and Fowler, D.W. (1985). Creep and fatigue of polymer concrete. In J.T. Dikeou and D.W. Fowler, eds. **Polymer concrete: uses, materials, and properties** (pp. 323-342). American Concrete Institute.
- Jo, B.W., Park, S.K., and Kim, C.H. (2006). Mechanical properties of polyester polymer concrete using Recycled Polyethylene Terephthalate. **ACI Structural Journal**. 103(2): 219-225.

- Jo, B.W., Park, S.K., and Park, J.C. (2008). Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**. 22: 2281-2291.
- Krauss, P.D., and Wyman, R. (2010). Rapid curing polymers reduce repair time and improve pavement performance. In **First International Conference on Pavement Preservation** (pp. 493-501). Newport Beach, CA.
- Maksimav, R.D., Jirgens, L., Jansons, J., and Plume, E. (1999). Mechanical properties of polyester polymer-concrete. **Mechanics of Composite Materials**. 35(2): 99-110.
- Maksimov, R.D., Jirgens, L.A., Plume, E.Z., and Jansons, J.O. (2003). Water resistance of polyester polymer concrete. **Mechanics of Composite Materials**. 39(2): 99-110.
- Marsh, D., Simonsen, W.J., and Fowler, D.W. (1985). Machine application of polymer concrete for highway repairs. In J.T. Dikeou and D.W. Fowler, eds. **Polymer concrete: use, materials, and properties** (pp. 1-18). American Concrete Institute.
- Mebarkia, S. (1993). **Mechanical and fracture properties of high strength polymer concrete under various loading conditions and corrosive environment**. Doctoral Dissertation. Faculty of the Department of Civil and Environmental Engineering, University of Houston.
- Mebarkia, S., and Vipulanandan, C. (1990). Aggregates, Fibers and Coupling Agent in Polyester PC. In **Material Engineering Congress, ASCE**. Denver, Colorado.
- Mebarkia, S., and Vipulanandan, C. (1995). Mechanical properties and water diffusion in polyester polymer concrete. **Journal of Engineering Mechanics**. 121(12): 1359-1365.
- Muthukumar, M., Mohan, D., and Rajendran, M. (2003). Optimization of mix proportions of mineral aggregates using Box Behnken design of experiments. **Cement and Concrete Composite**. 25: 751-758.
- Ohama, Y. (1977). Hot water resistance of polyester resin concrete. In **Proceeding of 5th International Congress on Polymer in Concrete** (pp. 395-398).
- Ohama, Y., Kobayashi, T., Takeuchi, K., and Nawata, K. (1986). Chemical resistance of polymerethyl methacrylate concrete. **International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**. 8(2): 87-91.

- Ohama, Y., and Nishimura, T. (1979). Properties of Steel Fiber Reinforced Polyester Resin Concrete. In **Proceeding of the 22th Congress on Material Research**. Kyoto, Japan: Society of Material Science.
- Rebeiz, K.S. (1996). Precast use of polymer concrete using unsaturated polymer resin based on recycled PET waste. **Construction and Building Materials**. 10(3): 215-220.
- Rebiez, K.S. (1995). Time-temperature properties of polymer concrete using recycled PET. **Cement and Concrete Composite**. 17: 119-124.
- Rebiez, K.S., Fowler, D.W., and Paul, D.R. (1993). Recycling plastics in polymer concrete for construction applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 5(2): 237-248.
- Ribeiro, M.C.S., Tavares, C.M.L., and Ferreira, A.J.M. (2002). Chemical resistance of epoxy and polyester polymer concrete to acids and salts. **Journal of Polymer Engineering**. 22: 22-44.
- Sett, K., and Vipulanandan, C. (2002). Compressive and Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Concrete. In **CIGMAT Conference and Exhibition Proceeding**. Texas: University of Houston.
- Shijiazhuang Yinxing Sand Production Co., Ltd. (2000). **Resin Sand Trough, Drainage, Liner Channel, Polymer Concrete Channel** [Online]. Available: http://www.ectrade.com/Auction/FreeSample/1559411721/RESIN_SAND_TROUGH,DRAINAGE,_LINER_CHANNEL,_POLYMER_CONCRETE_CHANNEL.html
- Sprinkel, M.M., Sellars, A.R., and Weyers, R.E. (1993). **Rapid concrete bridge deck: protection, repair and rehabilitation**. Washington DC: Strategic Highway Research Program, National Research Council.
- Syunyi, G. K. (1976). **Road-Building Plastoconcretes**. Moscow: Transport.
- Tomasulo, K. (2009). **Polycon Promotes Green Paving Solution** [Online]. Available: <http://www.ecohomemagazine.com/news/polycon-promotes-greener-paving-solution.aspx>
- Vaidya, U.R., and Nadkarni, V.M. (1987). Unsaturated polyester resins from poly(ethylene terephthalate) waste 1: Synthesis and Characterization. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 26(2): 194-198.

- Vaidya, U.R., and Nadkarni, V.M. (1988). Unsaturated Polymer Resins from Poly(ethylene terephthalate) waste 2: Mechanical and Dynamic Mechanical Properties. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 27: 2056-2060.
- Vipulanandan, C., and Dharmarajan, N. (1987). Flexural behavior of polyester polymer concrete. **Cement and Concrete Research**. 17: 219-230.
- Vipulanandan, C., and Dharmarajan, N. (1989). Influence of Aggregate on the Fracture Properties of Polyester Polymer Concrete. **ACI Special Publication**. 116: 83-94.
- Vipulanandan, C., Dharmarajan, N., and Ching, E. (1988). Mechanical behaviour of polymer concrete systems. **Materials and Structure**. 21: 268-277.
- Vipulanandan, C., and Paul, E. (1990). Performance of epoxy and polyester polymer concrete. **ACI Material Journal**. 87(3): 241-251.
- Vipulanandan, C., and Paul, E. (1993). Characterization of polyester polymer and polymer concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 5(1): 62-82.
- Weatherhead, R.G. (1980). **FRP Technology – Fiber Reinforced Resin Systems**. Applied Science Publishers Ltd.

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติทางกลของตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตที่ส่วนผสมต่าง ๆ
ภายใต้แรงอัดและแรงดัด

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติทางกลสำหรับศึกษาการพัฒนากำลังต่อกำลังอัด

SAMPLE ID	Properties	Sample No.						$\bar{X}$	SD
		1	2	3	4	5	6		
G2D1	σ_u (MPa)	39.24	51.46	48.92	47.20	45.29	46.60	46.45	3.77
	σ_{pl} (MPa)	33.12	39.75	38.73	33.50	37.43	36.55	36.51	2.48
	ε_u (mm/mm)	0.0195	0.0189	0.0169	0.0189	0.0169	0.0192	0.0184	0.0011
G2D7	σ_u (MPa)	61.66	67.77	63.23	64.56	68.34	61.20	64.46	2.77
	σ_{pl} (MPa)	50.96	53.50	50.50	53.50	50.12	49.90	51.41	1.51
	ε_u (mm/mm)	0.0188	0.0197	0.0195	0.0189	0.0193	0.0184	0.0191	0.0004
G2D14	σ_u (MPa)	64.71	51.97	71.34	68.23	66.99	58.24	63.58	6.56
	σ_{pl} (MPa)	50.96	45.86	56.05	51.30	52.30	50.40	51.14	3.00
	ε_u (mm/mm)	0.0161	0.0147	0.0145	0.0143	0.0156	0.0155	0.0151	0.0007
G2D28	σ_u (MPa)	71.34	63.18	71.34	72.11	70.01	n/a	69.60	3.2760
	σ_{pl} (MPa)	61.15	50.96	56.05	55.40	57.20	n/a	56.15	3.2749
	ε_u (mm/mm)	0.0159	0.0188	0.0163	0.0170	0.0169	n/a	0.0170	0.0010

ตาราง ก.2 คุณสมบัติทางกลสำหรับศึกษาผลของปริมาณเรซินต่อกำลังอัด

SAMPLE ID	Properties	Sample No.						$\bar{X}$	SD
		1	2	3	4	5	6		
G3B12	σ_u (MPa)	60.21	60.88	56.60	56.18	52.32	53.08	56.54	3.22
	σ_{pl} (MPa)	40.75	45.85	45.85	43.30	41.77	40.75	43.05	2.16
	ε_u (mm/mm)	0.0133	0.0113	0.0132	0.0132	0.0161	0.0131	0.0134	0.0014
G3B14	σ_u (MPa)	70.78	71.03	75.81	76.15	71.45	72.46	72.95	2.21
	σ_{pl} (MPa)	55.02	58.58	65.21	60.11	50.94	61.13	58.50	4.54
	ε_u (mm/mm)	0.0118	0.0116	0.0118	0.0115	0.0119	0.0119	0.0118	0.0002
G3B14	σ_u (MPa)	77.07	74.98	77.58	68.18	80.01	75.31	75.52	3.67
	σ_{pl} (MPa)	66.23	62.15	60.11	61.13	61.13	61.13	61.98	1.99
	ε_u (mm/mm)	0.0142	0.0135	0.0141	0.0120	0.0118	0.0139	0.0133	0.0010
G3B14	σ_u (MPa)	78.50	77.24	75.23	76.32	73.63	74.47	75.90	1.65
	σ_{pl} (MPa)	61.13	61.13	56.04	60.11	56.04	56.04	58.41	2.40
	ε_u (mm/mm)	0.0141	0.0142	0.0157	0.0147	0.0150	0.0124	0.0144	0.0010
G3B14	σ_u (MPa)	73.13	75.81	73.89	75.81	75.90	72.37	74.49	1.42
	σ_{pl} (MPa)	50.94	50.94	50.94	52.47	60.11	40.75	51.03	5.63
	ε_u (mm/mm)	0.0176	0.0181	0.0174	0.0166	0.0148	0.0163	0.0168	0.0011
G3B14	σ_u (MPa)	69.35	73.55	70.28	71.32	72.20	71.45	71.36	1.34
	σ_{pl} (MPa)	56.04	50.94	45.85	50.94	50.94	50.94	50.94	2.94
	ε_u (mm/mm)	0.0184	0.0169	0.0199	0.0182	0.0178	0.0184	0.0183	0.0009

ตาราง ก.3 คุณสมบัติทางกลสำหรับศึกษาผลของขนาดมวลรวมละเอียดต่อกำลังอัด

SAMPLE ID	Properties	Sample No.						$\bar{X}$	SD
		1	2	3	4	5	6		
G4A12	σ_u (MPa)	54.23	n/a	46.94	56.75	50.71	47.27	51.18	3.84
	σ_{pl} (MPa)	30.56	n/a	38.20	48.38	35.65	35.65	37.69	5.90
	ε_u (mm/mm)	0.0119	n/a	0.0116	0.0127	0.0131	0.0135	0.0126	0.0007
G4A18	σ_u (MPa)	78.14	77.64	79.15	74.20	78.14	77.89	77.53	1.56
	σ_{pl} (MPa)	62.13	61.12	61.12	60.10	66.21	66.21	62.81	2.47
	ε_u (mm/mm)	0.0157	0.0159	0.0160	0.0149	0.0164	0.0153	0.0157	0.0005
G4A22	σ_u (MPa)	73.10	73.94	71.51	73.27	74.62	74.36	73.47	1.03
	σ_{pl} (MPa)	56.02	56.02	56.02	57.04	57.55	50.93	55.60	2.17
	ε_u (mm/mm)	0.0186	0.0189	0.0173	0.0180	0.0181	0.0188	0.0183	0.0006
G4B12	σ_u (MPa)	60.19	60.86	56.58	56.17	52.30	53.07	56.53	3.22
	σ_{pl} (MPa)	40.74	45.84	45.84	43.29	41.76	40.74	43.04	2.16
	ε_u (mm/mm)	0.0128	0.0109	0.0129	0.0132	0.0158	0.0127	0.0131	0.0014
G4B18	σ_u (MPa)	78.48	77.22	75.21	76.30	73.61	74.45	75.88	1.65
	σ_{pl} (MPa)	61.12	61.12	56.02	60.10	56.02	56.02	58.40	2.40
	ε_u (mm/mm)	0.0148	0.0139	0.0160	0.0141	0.0148	0.0132	0.0145	0.0009
G4B22	σ_u (MPa)	69.34	73.53	70.26	71.30	72.18	71.43	71.34	1.33
	σ_{pl} (MPa)	56.02	50.93	45.84	50.93	50.93	50.93	50.93	2.94
	ε_u (mm/mm)	0.0201	0.0161	0.0209	0.0193	0.0184	0.0183	0.0189	0.0015
G4C12	σ_u (MPa)	59.02	52.89	49.53	57.17	52.98	59.43	55.17	3.62
	σ_{pl} (MPa)	45.84	40.74	35.65	48.38	40.74	45.84	42.87	4.27
	ε_u (mm/mm)	0.0112	0.0132	0.0116	0.0114	0.0140	0.0122	0.0123	0.0010
G4C18	σ_u (MPa)	77.81	77.47	78.65	78.31	77.47	74.37	77.34	1.40
	σ_{pl} (MPa)	61.12	50.93	61.12	60.10	61.12	61.12	59.25	3.74
	ε_u (mm/mm)	0.0158	0.0148	0.0140	0.0132	0.0149	0.0144	0.0145	0.0008
G4C22	σ_u (MPa)	70.34	72.69	70.76	72.36	71.52	71.94	71.60	0.83
	σ_{pl} (MPa)	61.12	56.02	56.02	61.12	61.12	60.10	59.25	2.31
	ε_u (mm/mm)	0.0170	0.0185	0.0193	0.0205	0.0175	0.0199	0.0188	0.0012

ตารางที่ ก.4 คุณสมบัติทางกลสำหรับศึกษาผลของปริมาณมวลรวมหยาบต่อกำลังอัด

SAMPLE ID	Properties	Sample No.						$\bar{X}$	SD
		1	2	3	4	5	6		
G5B75R12	σ_u (MPa)	31.58	36.61	42.57	42.91	42.24	27.80	37.28	5.88
	σ_{pl} (MPa)	28.01	33.10	37.18	38.20	36.67	25.46	33.10	4.82
	ε_u (mm/mm)	0.0100	0.0075	0.0097	0.0137	0.0087	0.0093	0.0098	0.0019
G5B50R8	σ_u (MPa)	39.13	51.81	46.94	56.84	45.51	54.83	49.18	6.01
	σ_{pl} (MPa)	38.20	41.76	40.74	50.93	43.29	48.38	43.88	4.41
	ε_u (mm/mm)	0.0077	0.0068	0.0063	0.0073	0.0072	0.0074	0.0071	0.0005
G5B50R12	σ_u (MPa)	82.08	79.57	76.39	81.25	83.59	80.41	80.55	2.25
	σ_{pl} (MPa)	71.30	71.30	63.66	71.30	71.30	63.66	68.75	3.60
	ε_u (mm/mm)	0.0097	0.0105	0.0101	0.0089	0.0094	0.0093	0.0097	0.0005
G5B50R18	σ_u (MPa)	69.00	69.68	66.23	67.75	68.84	72.61	69.02	1.95
	σ_{pl} (MPa)	50.93	58.57	57.04	50.93	57.04	61.12	55.94	3.79
	ε_u (mm/mm)	0.0100	0.0113	0.0107	0.0111	0.0109	0.0104	0.0107	0.0004
G5B25R12	σ_u (MPa)	69.51	70.51	70.77	72.86	72.44	65.23	70.22	2.51
	σ_{pl} (MPa)	61.12	61.12	61.12	61.12	61.12	56.02	60.27	1.90
	ε_u (mm/mm)	0.0108	0.0106	0.0107	0.0098	0.0104	0.0097	0.0103	0.0004

ตารางที่ ก.5 คุณสมบัติทางกลสำหรับศึกษาผลของปริมาณเส้นใยต่อกำลังอัด

SAMPLE ID	Properties	Sample No.						$\bar{X}$	SD
		1	2	3	4	5	6		
G6B50F1	σ_u (MPa)	72.52	73.70	67.66	66.82	67.24	74.45	70.40	3.22
	σ_{pl} (MPa)	60.10	61.12	61.12	56.02	56.02	61.12	59.25	2.31
	ε_u (mm/mm)	0.0111	0.0112	0.0133	0.0115	0.0113	0.0115	0.0117	0.0008
G6B50F2	σ_u (MPa)	72.94	71.85	74.54	75.79	74.54	n/a	73.93	1.38
	σ_{pl} (MPa)	61.12	50.93	61.12	61.12	65.19	n/a	59.89	4.75
	ε_u (mm/mm)	0.0132	0.0148	0.0132	0.0130	0.0126	n/a	0.0134	0.0008
G6B50F3	σ_u (MPa)	63.97	60.19	73.20	64.14	63.80	64.30	64.93	3.96
	σ_{pl} (MPa)	56.02	45.84	66.21	58.57	45.84	58.57	55.17	7.30
	ε_u (mm/mm)	0.0139	0.0129	0.0159	0.0112	0.0146	0.0138	0.0137	0.0014

ตารางที่ ก.6 คุณสมบัติทางกลสำหรับศึกษาผลของขนาดมวลรวมละเอียดต่อกำลังค้ำ

SAMPLE ID	Properties	Sample No.			$\bar{X}$	SD
		1	2	3		
G7A12	S (MPa)	17.10	16.09	n/a	16.60	n/a
	E_s (GPa)	7.57	7.52	7.98	7.69	0.21
G7A18	S (MPa)	22.13	21.12	19.11	20.79	1.25
	E_s (GPa)	6.67	9.55	11.38	9.20	1.94
G7A22	S (MPa)	18.11	14.57	19.60	17.42	2.11
	E_s (GPa)	7.07	7.65	7.72	7.48	0.29
G7B12	S (MPa)	17.10	16.09	n/a	16.60	n/a
	E_s (GPa)	7.89	8.11	n/a	8.00	n/a
G7B18	S (MPa)	19.11	n/a	19.11	19.11	n/a
	E_s (GPa)	8.32	n/a	8.46	8.39	n/a
G7B22	S (MPa)	n/a	28.65	27.65	28.15	n/a
	E_s (GPa)	n/a	8.65	7.13	7.89	n/a
G7C12	S (MPa)	16.58	15.58	16.09	16.08	0.41
	E_s (GPa)	10.82	11.45	11.47	11.25	0.30
G7C18	S (MPa)	13.08	19.60	n/a	16.34	n/a
	E_s (GPa)	7.01	10.31	n/a	8.66	n/a
G7C22	S (MPa)	15.09	16.09	17.59	16.26	1.03
	E_s (GPa)	7.65	7.60	7.60	7.61	0.02

ตารางที่ ก.7 คุณสมบัติทางกลสำหรับศึกษาผลของปริมาณเส้นใยต่อกำลังดัด

SAMPLE ID	Properties	Sample No.			$\bar{X}$	SD
		1	2	3		
G6B50F1	S (MPa)	15.09	15.09	14.57	14.91	0.24
	E_s (GPa)	6.92	8.10	7.57	7.53	0.48
G6B50F2	S (MPa)	11.06	11.55	13.08	11.90	0.86
	E_s (GPa)	7.42	6.98	7.01	7.14	0.20
G6B50F3	S (MPa)	11.55	13.08	9.05	11.23	1.66
	E_s (GPa)	8.47	8.10	7.72	8.10	0.31

ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



ผลของเรซินและมวลรวมละเอียดต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของ พอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีต

Influences of Resin and Fine Aggregate on Compression Behavior of Polyester Polymer Concrete

นันทพร กาญจนพัฒนางค์^{1,*} และสิทธิชัย แสงอาทิตย์²

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

nantaporn@g.sut.ac.th

² รองศาสตราจารย์ ดร. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี sitichai@g.sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาอิทธิพลของปริมาณเรซินและขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียดต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีต (PPC) จากการทดสอบพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดสูงสุดและปริมาณเรซินมีลักษณะเป็นโค้งพาราโบลาคว่ำ ซึ่งทำให้สามารถหาจุด optimum resin content (ORC) ที่เป็นจุดยอดของเส้นโค้งที่แสดงถึงจุดที่วัสดุมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ปริมาณเรซินเหมาะสม นอกจากนั้นแล้ว ยังพบว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตถูกควบคุมโดยปริมาณเรซิน การปรับเปลี่ยนขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียดมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดน้อยมาก แต่ส่งผลต่อโมดูลัสยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญ ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้การรับแรงอัดสำหรับปริมาณเรซินต่างๆ สามารถทำนายได้โดยสมการเชิงประพจน์ มีพารามิเตอร์ p เป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุมพฤติกรรมระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดของพอลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งขึ้นกับปริมาณเรซิน

ABSTRACT

This paper presents the experimental study on the influence of resin contents and fine aggregate gradation on the compression behaviors of polyester polymer concrete (PPC). Based on the test results, it was found that the relationships between the compressive strength and the resin content are in the form of concaved parabolic curve. The optimum resin content (ORC) point, providing the maximum compressive strength with proper resin contents, have been identified. In addition, the compressive strength of the PPC is mainly controlled by the resin content. Varying the fine aggregate gradation does not affect the compressive strength, but influences the modulus of elasticity significantly. Finally, the stress-

* ผู้ติดต่อหลัก (Corresponding author)



strain responses of the PPC under various resin contents can be predicted by using the proposed empirical equation. The material parameter p , which controls the effect of resin content on stress-strain responses, has been proposed and discussed.

คำสำคัญ: Polymer concrete, Polyester resin, Compression test, Flexural test

1. บทนำ

พอลิเมอร์คอนกรีต (polymer concrete, PC) เป็นวัสดุที่ผลิตโดยมีสัดส่วนผสมคล้ายกับคอนกรีตทั่วไป แต่ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยวัสดุพอลิเมอร์ พอลิเมอร์คอนกรีตเป็นวัสดุชนิดใหม่ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในงานที่ต้องการระยะเวลาก่อตัวที่รวดเร็ว หรือสภาวะที่ต้องการความทนทานต่อสารเคมีกัดกร่อน หรือนงานที่มีข้อจำกัดเรื่องพื้นที่ทำงานหรือขนาดของชิ้นงาน แต่มีความจำเป็นต้องการวัสดุที่มีความแข็งแรงมาก ทำให้มีความต้องการคุณสมบัติของวัสดุที่เกินกว่าคุณสมบัติปกติของคอนกรีตที่มีการใช้งานทั่วไป (Fowler, 1990; Rebiez et al., 1993) จากผลการทดสอบพอลิเมอร์คอนกรีต (Helal, 1978; Vipulanandan and Dharmarajan, 1987; Vipulanandan and Pual, 1993) พบว่า วัสดุชนิดนี้มีกำลังรับแรงอัดสูง สามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี มีน้ำหนักเบา และมีระยะเวลาก่อตัวที่รวดเร็ว โดยทั่วไปอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์เรซินกับมวลรวมโดยน้ำหนักมีค่าอยู่ระหว่าง 1 : 7 ถึง 1 : 12 โดยอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค ความพรุน และลักษณะของผิวอนุภาคของวัสดุที่ใช้เป็นมวลรวม รวมไปถึงความสามารถได้ที่ต้องการ (Bares, 1978) การศึกษาอิทธิพลของขนาดผลของมวลรวมที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตยังมีจำกัด อีกทั้งยังไม่มีการศึกษาข้อมูลคุณสมบัติทางกลพื้นฐานสำหรับนำไปออกแบบส่วนผสมสำหรับมวลรวมที่มีใช้ในประเทศไทย จึงทำให้ความนิยมของการประยุกต์ใช้พอลิเมอร์คอนกรีตภายในประเทศยังมีไม่มากนัก ดังนั้น เพื่อก่อให้เกิดความเข้าใจในวัสดุชนิดนี้ที่มากขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณเรซินและขนาดผลของมวลรวมละเอียดต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีต โดยการทดสอบแรงอัดของตัวอย่างพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตที่มีสัดส่วนผสมของปริมาณเรซินต่างๆ และมวลรวมละเอียดที่มีขนาดผลที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียด (stress-strain response), กำลังรับแรงอัด (compressive strength), โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) และลักษณะการวิบัติ รวมไปถึงการพิจารณาเปรียบเทียบกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติ นอกจากนี้ งานวิจัยในส่วนท้ายยังได้นำเสนอแบบจำลองสำหรับทำนายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตอีกด้วย

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1 พอลิเมอร์คอนกรีต

ตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ โดยพอลิเอสเตอร์เรซินที่ใช้มีชื่อทางการค้า คือ ESTAR R289TP(N) ชนิด isophthalate ซึ่งเป็นพอลิเอสเตอร์เรซินแบบพร้อมใช้ โดย



ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีต

Polymeric matrix constituent	Composition
Resin	Unsaturated polyester resin, Commercial name: ESTAR R289TP(N), Isophthalate type
Initiator	Methyl Ethyl Ketone Peroxide (MEKPO)
Promoter	Cobalt naphthenate
Aggregate	River sand and lime stone (Maximum size 10 mm)

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของพอลิเมอร์เรซินและมวลรวมโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตรวม

Mix		1A	1B	1C	2A	2B	2C	3A	3B	3C	4A	4B	4C	5A	5B	5C
Polyester polymer resin (%)		12	12	12	16	16	16	18	18	18	20	20	20	22	22	22
Aggregate, %	Type A	88	-	-	84	-	-	82	-	-	80	-	-	78	-	-
	Type B	-	88	-	-	84	-	-	82	-	-	80	-	-	78	-
	Type C	-		88	-	-	84	-	-	82	-		80	-	-	78

มีส่วนผสมตัวเร่งปฏิกิริยา คือ Cobalt Napthenate แล้ว พอลิเอสเตอร์เรซินนี้มีลักษณะเป็นของเหลวข้น สีชมพูอ่อน โดยมีสมบัติที่สำคัญคือ ค่าความหนืด 3.0-5.0 poise ระยะเวลาในการก่อตัว (jel time) 20-45 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และมีความถ่วงจำเพาะ 1.07 มีตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา (initiator) คือ Methyl Ethyl Ketone Peroxide (MEKPO) โดยใช้ที่ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปริมาณพอลิเมอร์เรซิน

มวลรวมที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ หินแม่น้ำ จากอำเภอฟิมาย จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นมวลรวมที่ใช้เป็นมวลรวมละเอียดในการผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตโดยทั่วไปในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา และพื้นที่ใกล้เคียง โดยมีหน่วยน้ำหนักแห้ง (dry unit weight) 2,750 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าโมดูลัสความละเอียดตามธรรมชาติน้อยกว่า 2.0 หินดังกล่าวถูกนำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา และอบแห้งที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส หลังจากนั้น ถูกนำมาคัดขนาด และเพิ่มมวลรวมขนาด 10 มิลลิเมตรซึ่งผ่านตะแกรงเบอร์ 1/2 แต่ค้างตะแกรงเบอร์ 3/8 ทั้งนี้เพื่อให้ขนาดคละของมวลรวมเป็นไปตามมาตรฐานของมวลรวมแบบหลายขนาด (all-in aggregate) มวลรวมที่เพิ่มเข้าไปดังกล่าว คือ หินปูนบดซึ่งมีหน่วยน้ำหนักแห้ง 2,710 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขนาดโตสุดของมวลรวมที่ใช้ในการศึกษานี้เท่ากับ 10 มิลลิเมตร ขนาดคละของมวลรวมที่ใช้ในการศึกษานี้ได้ถูกปรับให้มีปริมาณส่วนละเอียด (ผ่านตะแกรงเบอร์ 4) แตกต่างกันจำนวน 3 ขนาดคละ ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยมวลรวมทั้ง 3 ขนาดคละยังคงเป็นไปตามมาตรฐาน BS 882 ของมวลรวมแบบหลายขนาด

2.2 สัดส่วนผสม

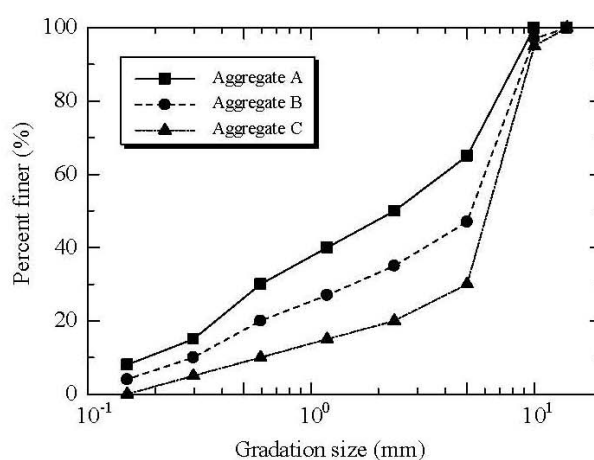
เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณพอลิเมอร์เรซิน และมวลรวมละเอียด งานวิจัยนี้จะใช้สัดส่วนปริมาณพอลิเมอร์เรซินและมวลรวมโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตรวมที่แตกต่างกัน จำนวน 15 แบบ



ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 2 โดยที่พอลิเมอร์คอนกรีตตามสัดส่วนดังกล่าวถูกเตรียมขึ้นโดยใช้มวลรวมที่ขนาดคละส่วนแตกต่างกัน 3 ขนาดคละ (ตามหัวข้อ 2.1)

2.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบการรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตกระทำตามมาตรฐาน ASTM C 579-01 Method C สำหรับขนาดคละของมวลไม่เกิน 10 มิลลิเมตร ตัวอย่างทดสอบเป็นแบบทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และความสูง 100 มิลลิเมตร ใช้ระยะเวลาบ่ม 7 วัน การบ่มและการทดสอบกระทำที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ การทดสอบการรับแรงอัดกระทำโดยเครื่อง Universal testing machine ยี่ห้อ Chunyen รุ่น CY-6040A12 โดยใช้ความเร็วในการให้น้ำหนักบรรทุก 0.41 เมกะปาสคาลต่อวินาที นอกจากนั้นแล้ว ตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตมอร์ต้าได้ถูกทดสอบหาค่าความสามารถในการเทได้ (workability) โดยอ้างอิงวิธีการทดสอบจากการทดสอบความสามารถในการเทได้ของซีเมนต์มอร์ตาร์ แบบโต๊ะการไหล (flow table) ตามมาตรฐาน ASTM C 109-08



ภาพที่ 1 กระดาษขนาดของมวลรวมที่ขนาดคละต่างๆ

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 กำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น

ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดสูงสุดกับปริมาณเรซินสำหรับมวลรวมขนาดคละต่างๆ จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อสัดส่วนปริมาณเรซินเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดสูงสุดของพอลิเมอร์คอนกรีตจะเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณเรซินที่ 18 เปอร์เซ็นต์ จากนั้น กำลังรับแรงอัดสูงสุดของพอลิเมอร์คอนกรีตจึงเริ่มมีค่าลดลง โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นโค้งคว่ำ โดยมีจุดสูงสุดแสดงถึงจุดที่พอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ปริมาณเรซินเหมาะสม (optimum resin content, ORC) นอกจากนั้นแล้ว ยังพบอีกว่า ขนาดคละของมวลรวมละเอียดไม่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่



ปริมาณเรซินเหมาะสม ดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบสำหรับมวลรวมประเภท A, B และ C ที่มีค่าปริมาณเรซินเหมาะสมที่ใกล้เคียงกันที่ 18 เปอร์เซ็นต์ และกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 75.2 เมกะปาสกาล กำลังของวัสดุประกอบ (composite material) ถูกควบคุมโดยกำลังของวัสดุประสาน (strength of matrix material), กำลังของมวลรวมหรือวัสดุเสริมแรง (strength of reinforcement material) และหน้าสัมผัส (interface) ซึ่งขึ้นอยู่กับสัดส่วนผสมของวัสดุนั้น ๆ กำลังของพอลิเอสเตอร์เรซินโดยทั่วไปมีค่าต่ำกว่ากำลังของมวลรวมละเอียดซึ่งเป็นพวกซิลิกา (silica) โดยทั่วไปกำลังของพอลิเมอร์คอนกรีตถูกควบคุมโดยหน้าสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์เรซินกับมวลรวมซึ่งมีค่าต่ำกว่ากำลังของพอลิเอสเตอร์เรซินและมวลรวมมาก สำหรับพอลิเมอร์เรซินที่ปริมาณเรซินด้านซ้ายของจุด ORC สัดส่วนปริมาณเรซินต่อมวลรวมน้อยส่งผลให้หน้าสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์เรซินกับมวลรวมเกิดได้อย่างไม่สมบูรณ์ จึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดต่ำ แต่สำหรับปริมาณเรซินด้านขวาของจุด ORC สัดส่วนปริมาณเรซินต่อมวลรวมมีเกินพอ หน้าสัมผัสเกิดอย่างสมบูรณ์ แต่มวลรวมซึ่งเป็นส่วนที่แข็งแรงที่สุดมีปริมาณลดลง ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดโดยรวมของพอลิเมอร์คอนกรีตลดลงด้วย

จากการ fit curve ผลการทดสอบ พบว่า เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดสูงสุดและปริมาณเรซินสามารถแสดงอยู่ในรูปพาราโบลาได้ว่า ตามสมการดังนี้

$$\sigma_c = a \times \text{resin content}^2 + b \times \text{resin content} + c \quad (1)$$

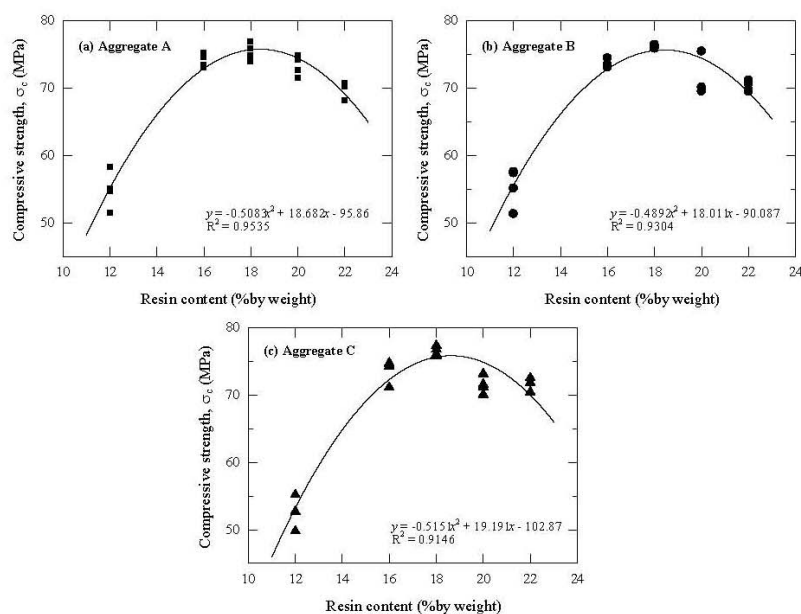
โดยที่ σ_c คือ กำลังรับแรงอัด, resin content คือ ปริมาณเรซินโดยน้ำหนักของน้ำหนักพอลิเมอร์คอนกรีต (เปอร์เซ็นต์) และ a , b , c คือ พารามิเตอร์ของวัสดุสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดสูงสุดและปริมาณเรซิน โดยมีค่าดังที่แสดงในภาพที่ 2

ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและปริมาณเรซิน จากรูปพบว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์คอนกรีตถูกควบคุมโดยขนาดผลของมวลรวม โดยปริมาณเรซินเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับโมดูลัสยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อปริมาณเรซินสูงกว่าจุด ORC แล้ว โมดูลัสยืดหยุ่นจะลดลง โดยขนาดผลมวลรวมที่มีส่วนละเอียดมากกว่า (ประเภท A) จะมีโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่ามวลรวมที่มีส่วนละเอียดน้อยกว่า (ประเภท C) กำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณเรซินด้านซ้ายของจุด ORC ถูกควบคุมโดยกำลังรับแรงเฉือนของหน้าสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์เรซินและมวลรวม กำลังรับแรงเฉือนของหน้าสัมผัสเกิดจากแรงเสียดทานของวัสดุสองชนิด โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อหน้าสัมผัสของวัสดุทั้งสองเคลื่อนที่หรือตัวอย่างทดสอบเกิดการเสียรูป เมื่อพื้นที่ของหน้าสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์เรซินและมวลรวมมีมากในกรณีของขนาดผลมวลรวมที่มีส่วนละเอียดมากกว่า (พื้นที่ผิวมาก) การเสียรูปของตัวอย่างหรือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจึงมีค่ามากด้วยที่ปริมาณเรซินต่อมวลรวมเท่ากัน สำหรับกรณีที่เมื่อเพิ่มสัดส่วนปริมาณเรซินขึ้นแล้วโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงนั้น เป็นผลจากเมื่อสัดส่วนปริมาณเรซินมากกว่าจุด ORC แล้ว มวลรวมซึ่งมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าพอลิเมอร์เรซินมีปริมาณลดลง ส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์คอนกรีตโดยรวมมีค่าลดลงด้วย

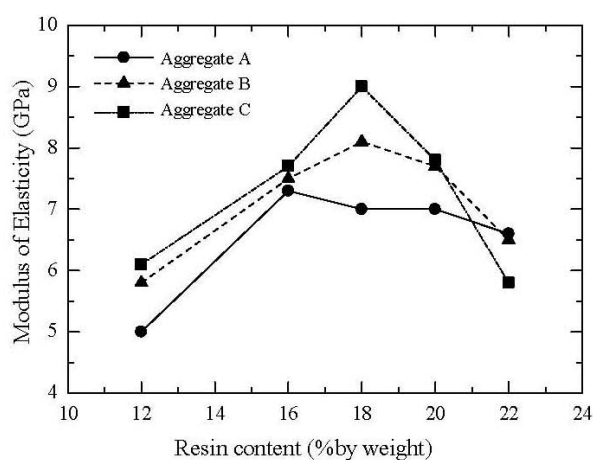


3.2 หน่วยแรงอัดและความเครียดภายใต้แรงอัด

ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดภายใต้แรงอัดของตัวอย่างพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตสำหรับมวลรวมขนาดกะประเภท B จากผลการทดสอบด้านซ้ายของจุด ORC (ภาพที่ 4a) พบว่า เมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบจากมวลรวมที่มีขนาดกะชนิดเดียวกัน



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด และปริมาณพอลิเมอร์เรซินสำหรับมวลรวมขนาดกะต่างๆ (a) ขนาดกะประเภท A, (b) ขนาดกะประเภท B, และ (c) ขนาดกะประเภท C

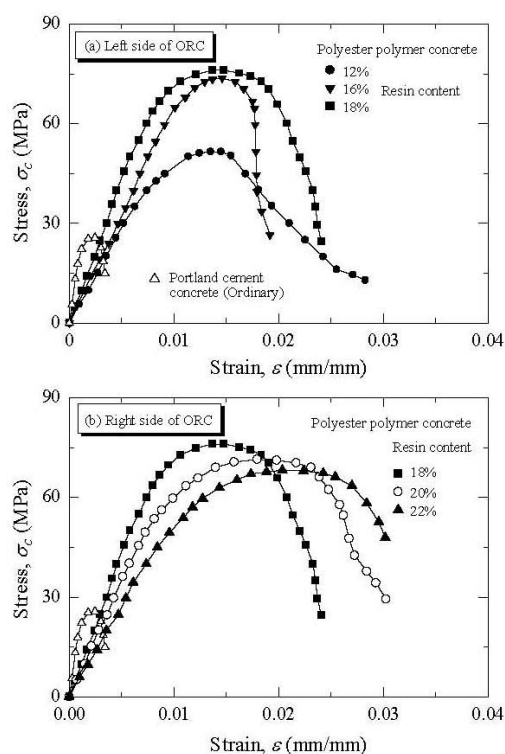


ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นจากการทดสอบการรับแรงอัดและปริมาณเรซิน



(ประเภท B) กำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นจะเพิ่มตามปริมาณเรซิน โดยกำลังรับแรงอัดสูงสุดเกิดที่ความเครียดระหว่าง 0.0136-0.0147 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร ซึ่งเพิ่มขึ้นตามปริมาณเรซิน ขอให้สังเกตด้วยว่า สำหรับตัวอย่างทดสอบที่ปริมาณเรซิน 16 และ 18 เปอร์เซ็นต์ เมื่อหน่วยแรงผ่านจุดยอดของความสัมพันธ์แล้ว เส้นกราฟจะมีลักษณะลดลงอย่างทันทีทันใด (abrupt softening) หรือวัสดุแสดงพฤติกรรมแบบเปราะ ซึ่งแตกต่างจากตัวอย่างทดสอบที่ปริมาณเรซิน 12 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผลการทดสอบทางด้านขวาของจุด ORC (ภาพที่ 4b) กำลังรับแรงอัดสูงสุดลดลงเมื่อปริมาณเรซินเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับความเครียด ณ กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเรซิน

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดของพอลิเมอร์คอนกรีตกับปอร์ตแลนด์คอนกรีตปกติ พบว่า พอลิเมอร์คอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน มีกำลังอัดและความเครียดที่จุดวิบัติสูงกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติประมาณ 2.5-3 เท่า และประมาณ 6-7 เท่า ตามลำดับ แต่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติประมาณ 2.3-3.4 เท่า จากภาพที่ 4 จะเห็นว่าพอลิเมอร์คอนกรีตมีความสามารถในการดูดซับพลังงานก่อนการวิบัติมากกว่าคอนกรีตปกติสูงมากดังจะเห็นได้จากค่าโมดูลัสความเหนียว (Modulus of toughness) ที่สูงกว่าคอนกรีตปกติมาก ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญอีกข้อหนึ่งในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้าง



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดภายใต้แรงอัดของตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตสำหรับมวลรวมขนาดละเอียดประเภท B



3.3 การทำนายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียด

จากศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณเรซิน 12-22 เปอร์เซ็นต์ และมวลรวมประเภท B แบบจำลองพฤติกรรมระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดสำหรับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตซึ่งเสนอโดย Chen et al. (1985) ได้ถูกนำมาปรับใช้สำหรับทำนายพฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์ แบบจำลองดังกล่าวเป็นไปตามสมการดังนี้

$$\sigma_c = \frac{p \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} \right)}{(p-1) + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} \right)^p} \sigma_m \quad (2)$$

โดยที่ p คือ พารามิเตอร์ของวัสดุ σ_c คือ หน่วยแรงอัด ε คือ ความเครียด σ_m คือ หน่วยแรงอัดสูงสุด และ ε_m คือ ความเครียดที่หน่วยแรงอัดสูงสุด จากการศึกษาพบว่า สำหรับมวลประเภทเดียวกันค่าสำหรับพารามิเตอร์ p แปรผันโดยตรงกับปริมาณเรซิน ค่าพารามิเตอร์ p สำหรับพอลิเมอร์คอนกรีต และมวลรวมประเภท B เป็นไปตามตารางที่ 3 ผลการทำนายพฤติกรรมการรับแรงอัดโดยสมการที่ (2) นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่นำเสนอสามารถทำนายพฤติกรรมของพอลิเมอร์คอนกรีตช่วงก่อนความเค้นสูงสุดได้ดี แต่ยังมีข้อจำกัดในการทำนายพฤติกรรมหลังความเค้นสูงสุด

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์สำหรับทำนายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดของพอลิเมอร์คอนกรีตซึ่งผลิตจากมวลรวมประเภท B

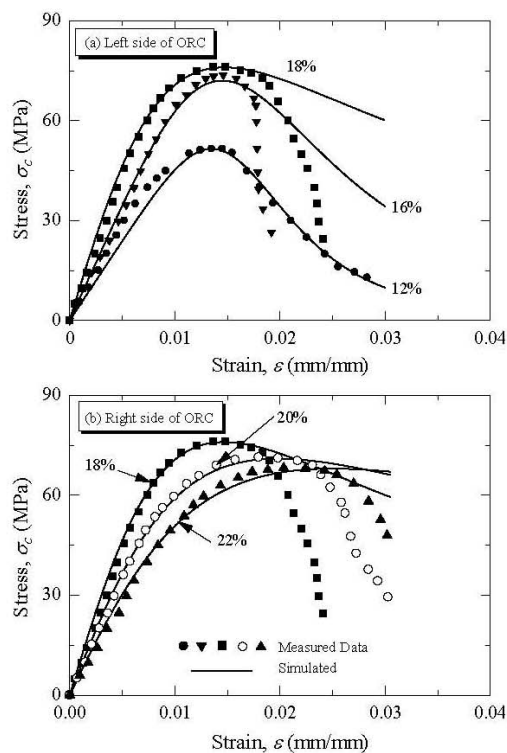
Parameters	Resin content				
	12%	16%	18%	20%	22%
σ_m	52.5	72	76	71	68
ε_m	0.0125	0.0145	0.0147	0.0198	0.025
p	4.5	3.5	2.5	2	1.7

3.4 ค่าความสามารถการเทได้

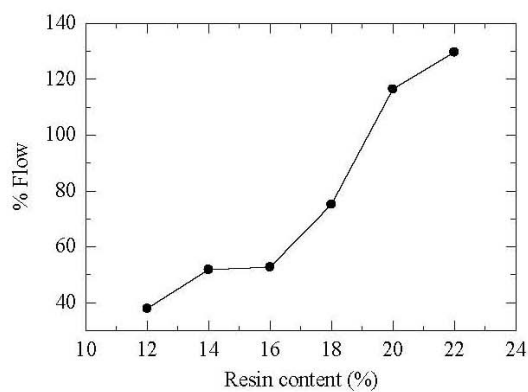
ภาพที่ 6 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณเรซินต่างๆ จากผลการทดสอบพอลิเมอร์คอนกรีตที่มวลรวมประเภท B พบว่า เปอร์เซ็นต์การไหลแผ่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเรซินมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ที่ได้กับค่ามาตรฐานของซีเมนต์มอร์ตาร์ ซึ่งมีค่าระหว่าง 110 ± 5 พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีปริมาณเรซินต่ำกว่า ORC มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐาน แต่เมื่อปริมาณเรซินสูงกว่า ORC ค่าเปอร์เซ็นต์



การไหลแผ่จะสูงกว่ามาตรฐาน โดยปริมาณเรซินที่ 20 เปอร์เซนต์มีค่าเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ 116 ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงมาตรฐานที่สุด



ภาพที่ 5 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดจากผลการทดสอบและผลทำนายจากสมการที่ 2



ภาพที่ 6 ค่าเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณเรซินต่างๆ



4. สรุปผลการทดสอบ

ในการศึกษานี้ พอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณเรซินและขนาดคละมวลรวมต่างๆ ได้ถูกทดสอบแรงอัดและความสามารถในการเทได้ จากการทดสอบ พบว่า ปริมาณเรซินเหมาะสมที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดคือ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์คอนกรีตรวม ความแตกต่างของขนาดคละมวลรวมละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 10 มิลลิเมตรไม่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของกำลังรับแรงอัดและปริมาณเรซินเหมาะสม แต่มีผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของการรับแรงอัดสำหรับมวลรวมที่มีขนาดคละต่างกัน (ภาพที่ 2 และ 3) ปัจจัยหลักที่ควบคุมพฤติกรรมของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากมวลรวมละเอียด คือ ปริมาณเรซิน (ภาพที่ 4) โดยความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดสามารถทำนายได้โดยสมการเชิงประพจน์ (สมการที่ 2) โดยมีพารามิเตอร์ p ซึ่งขึ้นกับปริมาณเรซินเป็นพารามิเตอร์ของวัสดุที่แสดงถึงความแข็งแรงของพันธะยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวม ปริมาณเรซินที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับพารามิเตอร์ p ที่ต่ำลง (ตารางที่ 3) ความสามารถในการเทได้จากการทดสอบโตะการไหลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานของซีเมนต์มอร์ตาร์คอนกรีต

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีสำหรับการสนับสนุนงบประมาณในการวิจัย

6. บรรณานุกรม

- Bares, R. A. (1978). Furane resin concrete and its application to large diameter sewer pipes. SP58-4. Detroit, Mich., American Concrete Institute: 41-74.
- Chen, V. L., E. S. Chen, et al. (1985). Constitutive modeling of sea ice Proc. Offshore Tech. Conf. 5057, Society of Petroleum Engineers: 343-351.
- Fowler, D. (1990). Future trends in polymer concrete. SP116. Detroit, Micg., American Concrete Institute: 129-143.
- Helal, M. S. (1978). Experimental study of mechanical properties and structural applications of polymer concrete. Houston, Texas, Rice University
- Rebiez, K. S., D. W. Fowler, et al. (1993). Recycling plastics in polymer concrete for construction applications. Journal of Materials in Civil Engineering 5(2): 237-248.
- Vipulanandan, C. and N. Dharmarajan (1987). Flexural behaviour of polyester polymer concrete. Cement and Concrete research 17(2): 219-230.
- Vipulanandan, C. and E. Pual (1993). Characterization of polyester polymer and polymer concrete. Journal of Materials in Civil Engineering 5(1): 62-82.



ผลของขนาดมวลรวมต่อกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีต

EFFECTS OF AGGREGATE SIZES ON THE STRENGTH OF POLYMER CONCRETE

นันทพร กาญจนวัฒนาวงศ์¹, จิระยุทธ สืบสุข², สิทธิชัย แสงอาทิตย์³

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี nantaporn@g.sut.ac.th

² อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

jirayut.su@rmuti.ac.th

³ รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี sittichai@sut.ac.th

บทคัดย่อ: บทความนี้นำเสนอผลของขนาดมวลรวมต่อกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีต การทดสอบกำลังรับแรงอัดทำกับของตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตทรงกระบอกที่เตรียมโดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนผสมระหว่างปริมาณพอลิเมอร์เรซิน มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบที่อัตราส่วนต่าง ๆ ผลการทดสอบทั่วไปของการรับแรงอัดที่นำเสนอได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดภายใต้แรงอัด กำลังรับแรงอัดและโมดูลัสความละเอียด กำลังรับแรงอัดและปริมาณมวลรวมหยาบ จากผลการทดสอบพบว่าที่สัดส่วนมวลรวมใด ๆ การเพิ่มปริมาณเรซินมากขึ้นเกินกว่าจุดเหมาะสมทำให้กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบลดลง โมดูลัสความละเอียด (ขนาดของมวลรวมละเอียด) ไม่มีนัยสำคัญต่อกำลังรับแรงอัดประลัย การเพิ่มมวลรวมหยาบช่วยเพิ่มความแกร่งและกำลังรับแรงอัดแก่พอลิเมอร์คอนกรีตเมื่อใช้แทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนที่เหมาะสมซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 50 ของมวลรวมละเอียดโดยน้ำหนัก

คำสำคัญ: พอลิเมอร์คอนกรีต, พอลิเอสเตอ์เรซิน, กำลังรับแรงอัด, มวลรวมละเอียด, มวลรวมหยาบ

Abstract: This paper presents the effect of aggregate size on the compressive strength of the polymer concrete (PC). The compression tests were carried out on a number of cylindrical PC samples prepared under various mix proportions between resin, fine aggregate and coarse aggregate. The general results of compression test have presented: those are axial stress versus vertical strain, strength versus fineness modulus and strength versus coarse aggregate content. Based on the tested result, it is found that the compressive strength of PC sample for any mix proportions drop down when the resin content increases over the optimum point. The fineness modulus (size) of fine aggregate has no significant on the ultimate compressive strength. The addition of coarse aggregate can enhance the stiffness and ultimate strength of PC when it replaces the fine aggregate at the optimum proportion which is the 50 percent of the fine aggregate by weight.

Keywords: polymer concrete, polyester resin, compressive strength, fine aggregate, coarse aggregate

² ผู้ติดต่อหลัก (Corresponding author)



1. บทนำ

วัสดุคอนกรีตถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างเป็นเวลานานนับพันปี [1] วัสดุคอนกรีตประกอบด้วยวัสดุประสานและมวลรวม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) นับเป็นวัสดุประสานที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตคอนกรีตยุคใหม่โดยมีใช้งานมานานมากกว่า 100 ปี [2] ข้อดีของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่มีเหนือวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ คือ มีราคาต่ำ หาซื้อง่ายดูแลรักษาง่าย ทำให้เป็นรูปร่างลักษณะและขนาดที่ต้องการได้ง่าย ทนทานต่อเปลวไฟ มีมวลมากและความแข็งแรงสูง แต่อย่างไรก็ตามปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตมีข้อจำกัดในการใช้งานหลายประการเพราะมีระยะเวลาการก่อตัวที่ค่อนข้างช้า สักการ่อนง่ายเมื่อใช้งานในสภาวะกรดหรือต่าง และมีกำลังต่อน้ำหนักค่อนข้างต่ำ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตมักมีปัญหาในการนำมาใช้ในงานหลายประเภท เช่น งานซ่อมที่ต้องการระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็ว งานโครงสร้างสำเร็จรูป (precast structure) ที่ต้องการความทนทานและกำลังวัสดุที่สูง โครงสร้างที่ต้องการความทนทานพิเศษต่อสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรดหรือต่างสูง ด้วยข้อจำกัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตในงานพิเศษดังกล่าวข้างต้นวัสดุพอลิเมอร์จึงเข้ามามีบทบาทเพิ่มมากขึ้นในการนำมาใช้เป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีตพิเศษ [3] พอลิเมอร์ในงานคอนกรีตสามารถแบ่งออกตามลักษณะการใช้งานได้ 3 ประเภท [4] อันได้แก่ การนำซีเมนต์คอนกรีตแช่ในพอลิเมอร์เรซินหรือพอลิเมอร์อิมเพกเนทคอนกรีต (polymer impregnated concrete) การใช้พอลิเมอร์เรซินเป็นส่วนผสมในการผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตหรือพอลิเมอร์โมดิไฟด์คอนกรีต (polymer modified concrete) และการใช้พอลิเมอร์เรซินแทนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นวัสดุประสานทั้งหมดหรือพอลิเมอร์คอนกรีต (polymer concrete)

พอลิเมอร์คอนกรีตเป็นวัสดุชนิดใหม่ซึ่งเกิดขึ้นครั้งแรกที่ประเทศสหรัฐอเมริกาเมื่อ ค.ศ.1958 และปัจจุบันได้ถูกผลิตขึ้นเพื่อประยุกต์ใช้ในงานพิเศษตามที่กล่าวข้างต้นโดยเริ่มใช้กันอย่างแพร่หลายขึ้นในช่วง 20 ปีที่

ผ่านมา [5] พอลิเมอร์คอนกรีตผลิตจากส่วนผสมระหว่างพอลิเมอร์เรซิน (polymer resin) เช่น พอลิเอสเตอร์ อีพอกซี เป็นต้น และวัสดุมวลรวม เช่น หิน ทราย หินเกล็ดลอย เป็นต้น จากผลการทดสอบของนักวิจัยหลายท่านแสดงให้เห็นแล้วว่าวัสดุผสมชนิดนี้มีกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดที่สูง ทนทานต่อสารเคมี มีน้ำหนักเบา และใช้ระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตมาก [6] งานวิจัยในอดีตจำนวนมากได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยมีจุดประสงค์เพื่อหาปริมาณเรซินต่ำสุดที่พอลิเมอร์คอนกรีตมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมสูงสุดในมิติของกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่นและความคงทน ผลการทดสอบส่วนใหญ่จากการศึกษาที่ผ่านมาแสดงพฤติกรรมทางกลที่ซับซ้อนซึ่งเป็นผลจากปัจจัยหลายประการ ตัวอย่างเช่น ปริมาณเรซิน ขนาดคละมวลรวมที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน ตลอดจนปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อพฤติกรรมทางกล [7-13] อย่างไรก็ตามยังไม่มีเกณฑ์ปฏิบัติในการประเมินกำลังของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ชัดเจนเหมือนกับในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตซึ่งสามารถทำนายกำลังรับแรงอัดได้โดยพิจารณาที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ [14]

นันทพร และสิทธิชัย [15] ได้ศึกษาผลของปริมาณเรซินและขนาดคละมวลรวมละเอียดต่อกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีต จากการศึกษาพบว่าปริมาณเรซินมีผลโดยตรงกับกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากมวลรวมละเอียดเพียงอย่างเดียว ปริมาณเรซินเหมาะสมที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดคือ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์คอนกรีตรวม อย่างไรก็ตามวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้พิจารณาขนาดและปริมาณมวลรวมหยาบที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต

ดังนั้น งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของมวลรวมต่อกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีต งานวิจัยนี้ทดสอบกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่สัดส่วนปริมาณเรซิน มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบต่างๆ เพื่อศึกษาหาปัจจัยควบคุมกำลังของพอลิเมอร์



คอนกรีตที่เหมาะสมในการนำไปใช้ในการออกแบบ ส่วนผสมพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีพฤติกรรมทางกลตามต้องการได้ต่อไป

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1. พอลิเมอร์เรซิน

พอลิเอสเตอร์เรซินที่ใช้มีชื่อทางการค้า คือ ESTAR R289TP(N) ชนิดไอโซพาทาลาต และเป็นพอลิเอสเตอร์เรซินแบบพริวมที่ใช้มีส่วนผสมตัวเร่งปฏิกิริยา คือ Cobalt Napthenate ตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้

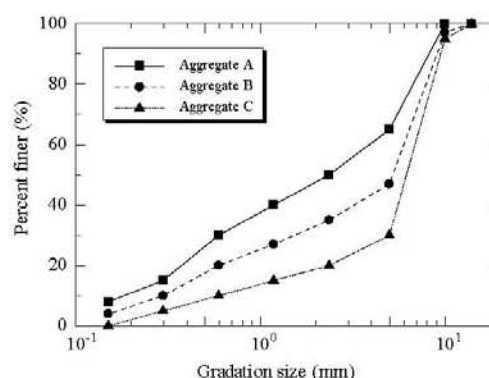
ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีต

Constituent	Details
Resin	Unsaturated polyester resin, Commercial name: ESTAR R289TP(N), Isophthalate type
Catalyst	Methyl Ethyl Ketone Peroxide (MEKPO) with 1% by weight
Promoter	Cobalt napthenate
Aggregate	Natural sand and Crushed lime stone (Maximum size 10 mm)

2.2. มวลรวม

มวลรวมละเอียดรวมที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ ทรายธรรมชาติจากอำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นมวลรวมที่ใช้เป็นมวลรวมละเอียดในการผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตโดยทั่วไปในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาและพื้นที่ใกล้เคียง ทรายตัวอย่างมีหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 1,670 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าโมดูลัสความละเอียดตามธรรมชาติน้อยกว่า 2.0 ก่อนใช้งานทรายถูกนำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา และอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงนำมาคัดขนาดเพื่อใช้ในการทดสอบต่อไป มวลรวมหยาบที่ใช้คือหินปูนบดซึ่งมีหน่วยน้ำหนักแห้ง 1,560 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

โดยขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษานี้เท่ากับ 10 มิลลิเมตร ขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษานี้ได้ถูกปรับให้มีขนาดละเอียดแตกต่างกันจำนวน 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมวลรวมทั้ง 3 ขนาดละเอียดยังคงเป็นไปตามมาตรฐาน BS 882 ของมวลรวมแบบหลายขนาด (all-in aggregate) แต่ละสัดส่วนละเอียดมีค่าโมดูลัสความละเอียดที่แตกต่างกัน คือ 2.99 3.20 และ 3.34 ตามลำดับ



รูปที่ 1 กระจายขนาดของมวลรวมละเอียดที่มีโมดูลัสความละเอียดต่าง ๆ

2.3. สัดส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดมวลรวม งานวิจัยนี้ใช้สัดส่วนปริมาณพอลิเมอร์เรซิน มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตรวมที่แตกต่างกัน โดยปรับเปลี่ยนปริมาณเรซินระหว่าง 8 ถึง 22 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักพอลิเมอร์คอนกรีต รวมถึงการใช้มวลรวมละเอียดที่มีโมดูลัสความละเอียดแตกต่างกันระหว่าง 2.99 ถึง 3.34 ปริมาณมวลรวมหยาบที่ใช้แทนมวลละเอียดอยู่ระหว่าง 0 ถึง 75 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวมละเอียด การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบการรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตกระทำตามมาตรฐาน ASTM C 579-01 Method C สำหรับขนาดละเอียดของมวลไม่เกิน 10 มิลลิเมตร ตัวอย่างทดสอบเป็นแบบทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และความสูง



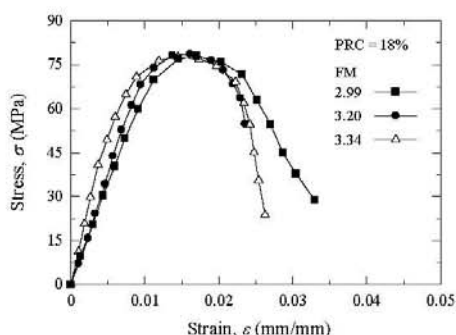
100 มิลลิเมตร การบ่มและการทดสอบกระทำที่อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศ และระยะเวลาบ่ม 7 วันก่อนการทดสอบ

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

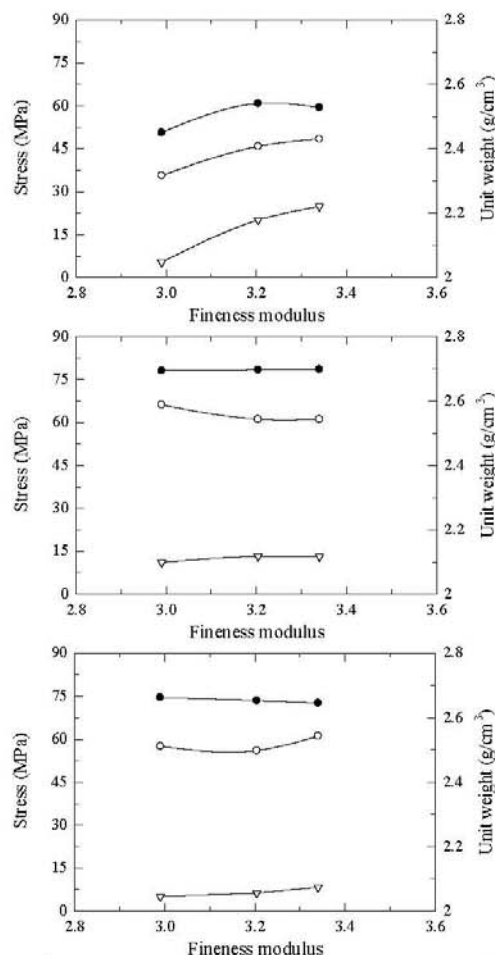
3.1. ผลของโมดูลัสความละเอียด

ผลของของขนาดคละมวลรวมละเอียดซึ่งมีค่าโมดูลัสความละเอียดที่ต่างกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 ที่ปริมาณมวลรวมคงที่และปริมาณเรซินเท่ากับ 18 เปอร์เซ็นต์ พอลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของมวลรวมที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดสูงแสดงกราฟหน่วยแรงและความเครียดที่มีความแข็งแรงสูงกว่า ที่ปริมาณเรซินเดียวกันโมดูลัสความละเอียดไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดสูงสุดและความเครียดที่ก้ำกึ่งรับแรงอัดสูงสุด

ปริมาณเรซิน 18 และ 22 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาณมวลรวมน้อยลงปริมาณเรซินเพิ่มมากขึ้น) โมดูลัสความละเอียดมีผลน้อยต่อกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตเมื่อเทียบกับปริมาณเรซิน 12 เปอร์เซ็นต์ ก้ำกึ่งรับแรงอัดประลัยและก้ำกึ่งรับแรงอัดที่จุดครากคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อโมดูลัสความละเอียดเพิ่มขึ้น โมดูลัสความละเอียดสูงขึ้นไม่ส่งผลต่อหน่วยน้ำหนักมากนักเมื่อเทียบกับปริมาณเรซินที่ 12 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 พฤติกรรมการรับแรงอัดสำหรับมวลรวมที่มีโมดูลัสความละเอียดต่าง ๆ



รูปที่ 3 ผลของโมดูลัสความละเอียดต่อกำลังอัดประลัย ก้ำกึ่งที่จุดครากและหน่วยน้ำหนักที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ

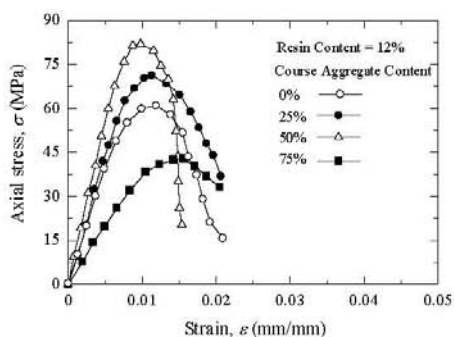
3.2. ผลของมวลรวมหยาบ

มวลรวมหยาบส่งผลต่อพฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดที่ต่างกันของพอลิเมอร์คอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 4 สำหรับปริมาณเรซินเท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณมวลรวมหยาบแทนที่มวลรวมละเอียดระหว่าง 0 ถึง 75 เปอร์เซ็นต์ ก้ำกึ่งรับแรงอัดและความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้นตามปริมาณมวลรวมหยาบที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต แต่เมื่อปริมาณมวลรวมหยาบแทนที่เกินจุดเหมาะสม (จากผลการทดสอบมี

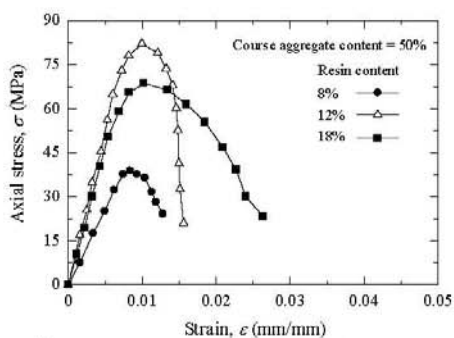


ค่าประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์) ความแกร่งหรือความชันของกราฟหน่วยแรงและความเครียดจะลดลงอย่างชัดเจนที่จุดเหมาะสมซึ่งมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์เรซิน (กำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์เรซินเท่ากับ 130 เมกะปาสคาล)

เมื่อปริมาณมวลรวมหยาบคงที่เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ปริมาณเรซินที่เปลี่ยนยังส่งผลต่อพฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดที่แตกต่างกันของพอลิเมอร์คอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 5 ปริมาณเรซินต่ำส่งผลให้วัสดุยึดเกาะระหว่างมวลรวมมีแรงต่ำ หน่วยแรงสูงสุดและความแกร่งของพอลิเมอร์คอนกรีตจึงต่ำลงด้วย แต่ปริมาณเรซินไม่ส่งผลต่อความเครียดที่กำลังอัดสูงสุดมากนักโดยที่ความเครียดที่หน่วยแรงสูงสุดมีค่าประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ความเครียด



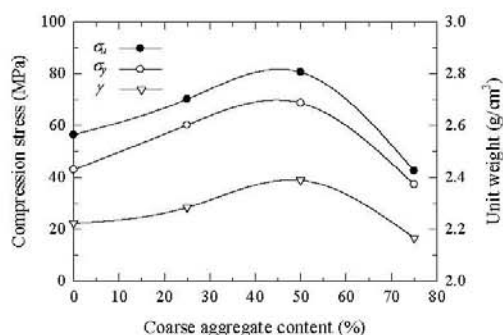
รูปที่ 4 พฤติกรรมการรับแรงอัดสำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบที่สัดส่วนต่าง ๆ



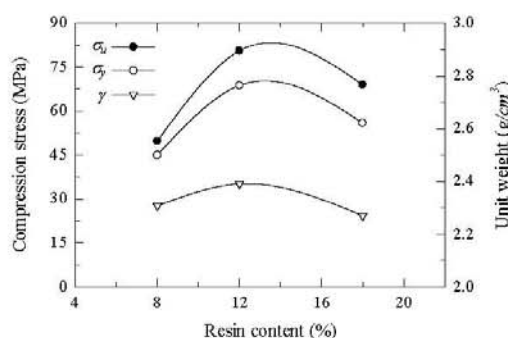
รูปที่ 5 พฤติกรรมการรับแรงอัดสำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบ 50 เปอร์เซ็นต์ที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดประลัย กำลังอัดที่จุดครากและหน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณเรซิน 12 เปอร์เซ็นต์และปริมาณมวลรวมหยาบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 6 กำลังอัดรับแรงอัดประลัย กำลังรับแรงอัดที่จุดครากและหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามปริมาณมวลรวมหยาบจนถึงที่ปริมาณมวลรวมหยาบประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มปริมาณมวลรวมหยาบอัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงอัดที่จุดครากต่อกำลังรับแรงอัดประลัยจะลดลงเพราะพื้นที่ผิวยึดเกาะของวัสดุประสานลดลง

กำลังรับแรงอัดประลัย กำลังรับแรงอัดที่จุดครากและหน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณมวลรวมหยาบคงที่เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์และปริมาณเรซินต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดประลัย กำลังรับแรงอัดที่จุดครากและหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามปริมาณเรซินจนถึงจุดเหมาะสมที่ 12 ถึง 14 เปอร์เซ็นต์ จึงลดลง รูปแบบความสัมพันธ์ดังกล่าวคล้ายกับรูปแบบของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่ผสมมวลรวมหยาบ แต่อัตราส่วนกำลังรับแรงอัดที่จุดครากต่อกำลังรับแรงอัดประลัยมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย พอลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมมวลรวมหยาบมีพฤติกรรมเป็นแบบแข็งขึ้นตามความเครียด (strain hardening) สูงขึ้น หน่วยน้ำหนักเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับกำลังอัด คือ กำลังรับแรงอัดสูงหน่วยน้ำหนักมาก



รูปที่ 6 ผลของปริมาณมวลรวมหยาบต่อกำลังอัดประลัยกำลังอัดที่จุดครากและหน่วยน้ำหนัก



รูปที่ 7 ผลของปริมาณเรซินต่อกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่จุดครากและหน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีปริมาณมวลรวมหยาบคงที่เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์

4. บทสรุป

จากผลการศึกษาผลของขนาดมวลรวมต่อกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

- 1) ขนาดของมวลรวมละเอียดโมดูลัสความละเอียด 2.99 ถึง 3.20 ไม่นับสำคัญต่อกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตดังแสดงได้จากการเพิ่มค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมแล้วกำลังรับแรงอัดเปลี่ยนแปลงน้อยมาก
- 2) พอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบแทนที่มวลรวมละเอียดในส่วนผสมกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างไม่ขึ้นกับปริมาณเรซินเพียงอย่างเดียว แต่มีผลของปริมาณมวลรวมหยาบด้วย
- 3) การแทนที่มวลรวมหยาบลงในส่วนผสมพอลิเมอร์คอนกรีตช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดและความแกร่งของตัวอย่างทดสอบ โดยค่าที่เหมาะสม คือ ใช้มวลรวมหยาบแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัย^{1,3} ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการสนับสนุนงบประมาณและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Draffin, J. O. (1943). A Brief History of Lime, Cement, Concrete and Reinforce Concrete. Journal of Western Society of Engineers, Vol. 48, pp. 14-47.
- [2] ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตไทย.
- [3] Fowler, D. W. (1989). Future trends in polymer concrete. SP116-8, ACI Special Publication, Detroit, Micg., pp. 129-143.
- [4] ACI Committee 548 (1997). Guide for the Use of Polymers in Concrete - ACI 548.1R-97. American Concrete Institute.
- [5] Fowler, D. W. (1999). "Polymers in concrete: a vision for the 21st century." Cement and Concrete Composite, Vol. 21, pp. 449-452.
- [6] Krauss, P. D., and Wyman, R. (2010). Rapid curing polymers reduce repair time and improve pavement performance. First International Conference on Pavement Preservation, Newport Beach, CA., pp. 493-501.
- [7] Helal, M. S. (1978). Experimental study of mechanical properties and structural applications of polymer concrete," Ph.D. thesis, Rice University Houston, Texas.
- [8] Maksimav, R. D., Jirgens, L., Jansons, J., and Plume, E. (1999). Mechanical properties of polyester polymer-concrete. Mechanics of Composite Materials, Vol. 35, No.2, pp. 99-110.
- [9] Mebarkia, S. (1993). Mechanical and fracture properties of high strength polymer concrete under various loading conditions and corrosive environment, Faculty of the department of Civil and Environmental Engineering, University of Houston.



- [10] Ohama, Y. and T. Nishimura (1979). Properties of Steel Fiber Reinforced Polyester Resin Concrete. In Proceeding of the 22th Congress on Material Research, Society of Material Science, Kyoto, Japan.
- [11] Vipulanandan, C., Dharmarajan, N., and Ching, E. (1988). Mechanical behaviour of polymer concrete systems. Materials and Structure, Vol. 21, pp. 268-277.
- [12] Vipulanandan, C., and Paul, E. (1990). Performance of epoxy and polyester polymer concrete. ACI Material Journal, Vol. 87, No. 3, pp. 241-251.
- [13] Vipulanandan, C., and Paul, E. (1993). Characterization of polyester polymer and polymer concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 5. No. 1, pp. 62-82.
- [14] Abrams, D. A. (1918). Design of Concrete Mixtures, Lewis Institute, Chicago.
- [15] นันทพร กาญจนวัฒน์ นาววงศ์ และสิทธิชัย แสงอาทิตย์. (2554). ผลของเรซินและมวลรวมละเอียดต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีต. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16, จังหวัดระยอง.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวนันทพร กาญจนวัฒนวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 1 สิงหาคม พ.ศ.2525 สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2547 จากนั้นผู้เขียนได้มีโอกาสดำรงงานเป็นผู้ช่วยสอนที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นเวลา 2 ปี หลังจากทำงานด้านการสอนระยะเวลาหนึ่ง ผู้เขียนเกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อเพิ่มเติมในระดับปริญญาโทด้านวิศวกรรมโยธา จึงได้เข้าศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2550 ในขณะที่ศึกษาอยู่ผู้เขียนได้มีโอกาสดำรงงานเป็นผู้ช่วยสอนและผู้ช่วยวิจัยของสาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันผู้เขียนประกอบอาชีพทำธุรกิจส่วนตัวด้านวัสดุก่อสร้าง

โดยมีบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 2 บทความ จากการการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16 และจากการการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 17 ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข