



รายงานการวิจัย

สมบัติทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงอัดและแรงดัด (Mechanical Properties of Polyester Polymer Concrete under Compressive and Flexural Loads)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

สมบัติทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงอัดและแรงดัด (Mechanical Properties of Polyester Polymer Concrete under Compressive and Flexural Loads)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

สิทธิชัย แสงอาทิตย์

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ.2551-52

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤศจิกายน 2556

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินโครงการวิจัย เรื่อง สมบัติทางกลของโพลีเอสเตอร์โพลีเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงอัดและแรงดัด (Mechanical Properties of Polyester Polymer Concrete under Compressive and Flexural Loads) ได้รับการสนับสนุนงบประมาณโดยทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551 ซึ่งได้รับการจัดสรรมาจากงบประมาณแผ่นดินโดยผ่านการประเมินข้อเสนอโครงการจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณต่อสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นอย่างสูง นอกจากนั้นแล้ว ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณนางสาวนันทพร กาญจนวัฒนาวงศ์ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา และนายจิระยุทธ สืบสุข บัณฑิตปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาที่ได้ช่วยเหลือในการจัดทำตัวอย่างทดสอบและทดสอบอย่างขยันขันแข็งและอดทน สุดท้าย ขอขอบคุณในความอนุเคราะห์ของสถานวิจัย สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนา และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สิทธิชัย แสงอาทิตย์

หัวหน้าโครงการวิจัย

พฤศจิกายน 2556



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้การรับแรงอัดและแรงคด โดยการปรับเปลี่ยนสัดส่วนผสมต่าง 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

Abstract

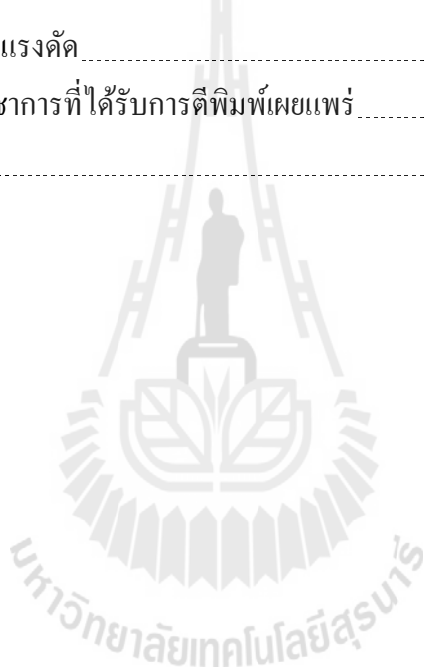
This research studies the mechanical properties of polyester polymer concrete under compressive and flexural loads by varying the mix proportions for searching the optimal proportion, which provides the high strength and good workability. Moreover the effects of each composition on the mechanical behavior 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.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต.....	4
2.2 พอลิเมอร์ในงานคอนกรีต.....	8
2.3 พอลิเอสเทอร์เรซิน.....	13
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	17
3.2 การทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสม.....	23
3.3 การเตรียมตัวอย่าง.....	24
3.4 การทดสอบทางกล.....	25
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	
4.1 สมบัติพื้นฐานของมวลรวมและพอลิเอสเทอร์เรซิน.....	26
4.2 กำลังอัดและพฤติกรรมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต (ตัวอย่างอ้างอิง).....	28
4.3 พฤติกรรมทั่วไปของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้การรับแรงอัดและแรงดัด.....	30
4.4 ผลของปริมาณเรซิน.....	34
4.5 ผลของขนาดคละมวลรวมละเอียด.....	39
4.6 ผลของปริมาณมวลรวมหยาบ.....	44
4.7 ผลของปริมาณเส้นใย.....	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทสรุป	
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	51
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	53
เอกสารอ้างอิง.....	54
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ส่วนผสมต่าง ๆ ภายใต้ แรงอัดและแรงค้ำ.....	57
ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	64
ประวัติผู้วิจัย.....	66



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต (ศิริชัย และต่อศักดิ์, 2547).....	9
2.2 คุณสมบัติของเรซินประเภทเทอร์โมเซตติง (Weatherhead, 1980).....	13
3.1 ส่วนประกอบของพอลิเมอร์คอนกรีต.....	19
3.2 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง.....	20
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวม.....	26
4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของพอลิเมอร์เรซิน.....	26
4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต.....	28



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดกดอัดของคอนกรีต.....	5
2.2 วิธีการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต.....	7
2.3 การใช้งานพอลิเมอร์คอนกรีตในงานประเภทต่าง ๆ.....	12
2.4 ประเภทของพอลิเมอร์เรซินที่นิยมนำมาใช้ในงานก่อสร้าง.....	13
2.5 ขั้นตอนการทำพอลิเอสเตอร์แข็ง (วิไลพร, 2540).....	15
2.6 ประเภทของกรดที่ใช้ผลิตพอลิเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว (Cassis and Talbot, 1998).....	15
3.1 กรอบการดำเนินงานวิจัย.....	18
3.2 พอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์เรซินเหลว.....	19
3.3 การกระจายขนาดของมวลรวมละเอียดที่ขนาดคละต่าง ๆ.....	22
3.4 เส้นใยแก้วตัดสั้น.....	23
3.5 ขนาดตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงดัด.....	24
3.6 แบบหล่อตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีต.....	24
3.7 การติดตั้งตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตสำหรับการทดสอบการรับแรงดัด.....	25
4.1 การพัฒนากำลังอัดตามอายุบ่มของพอลิเมอร์เรซินแข็ง.....	27
4.2 พฤติกรรมทั่วไปภายใต้แรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีต.....	29
4.3 พฤติกรรมทั่วไปภายใต้แรงดัดแบบคานของพอลิเมอร์คอนกรีต.....	29
4.4 การวิบัติของตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตแบบต่าง ๆ.....	30
4.5 พฤติกรรมการรับแรงอัดที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ.....	32
4.6 ผลของปริมาณเรซินต่อค่าเฉลี่ยกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่จุดคราก ความเครียดที่ กำลังรับแรงอัดประลัยและหน่วยน้ำหนัก.....	32
4.7 ผลของปริมาณเรซินต่อเปอร์เซ็นต์การไหลของพอลิเมอร์ผสมทราย.....	33
4.8 ผลของปริมาณเรซินต่อค่าเฉลี่ยกำลังดัดประลัยและ โมดูลัสยืดหยุ่นของการดัด.....	34
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้ การรับแรงอัดที่โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมต่าง ๆ.....	35
4.10 ผลของโมดูลัสความละเอียดต่อค่าเฉลี่ยของกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่น และ หน่วยน้ำหนักที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ.....	37
4.11 ผลของโมดูลัสความละเอียดต่อความเครียดที่กำลังอัดประลัยสำหรับพอลิเมอร์คอนกรีต ที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ.....	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ผลของโมดูลัสความละเอียดต่อค่าเฉลี่ยกำลังตัดและโมดูลัสยึดหยุ่น ที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ.....	38
4.13 พฤติกรรมการรับแรงอัดสำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบ ที่สัดส่วนต่าง ๆ.....	39
4.14 ผลของปริมาณมวลรวมหยาบต่อกำลังรับแรงอัดประลัย กำลังรับแรงอัดที่พิกัดยึดหยุ่น และหน่วยน้ำหนัก.....	41
4.15 พฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบคงที่ เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมละเอียดและมีปริมาณเรซินต่าง ๆ.....	42
4.16 ผลของปริมาณเรซินต่อกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยึดหยุ่น ความเครียดที่ กำลังอัดประลัยและหน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณมวลรวม หยาบคงที่เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมทั้งหมด.....	43
4.17 พฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบคงที่ เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมละเอียดและมีปริมาณเส้นใยต่าง ๆ.....	44
4.18 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าเฉลี่ยกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยึดหยุ่น ความเครียดที่ กำลังอัดประลัยและหน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณมวลรวมหยาบคงที่ เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมทั้งหมด.....	45
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของกำลังตัดและ โมดูลัสยึดหยุ่นที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ.....	46
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเสียรูปที่กึ่งกลางคานของ การทดสอบการรับแรงค้ำแบบคานที่ปริมาณเส้นใยต่าง ๆ.....	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

วัสดุคอนกรีตถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างเป็นเวลานานนับพันปี วัสดุคอนกรีตประกอบด้วยวัสดุประสานและมวลรวม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) นับเป็นวัสดุประสานที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตคอนกรีตยุคใหม่โดยมีใช้งานมานานมากกว่า 100 ปี (ปริญญา และชัย, 2547) ข้อดีของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่มีเหนือวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ คือ มีราคาต่ำ หาซื้อง่ายดูแลรักษาง่าย ทำให้เป็นรูปร่างลักษณะและขนาดที่ต้องการได้ง่าย ทนทานต่อเปลวไฟ มีมวลมากและความแข็งแรงสูง แต่อย่างไรก็ตามปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตมีข้อจำกัดในการใช้งานหลายประการเพราะมีระยะเวลาการก่อตัวที่ค่อนข้างช้า สึกกร่อนง่ายเมื่อใช้งานในสภาวะกรดหรือด่าง และมีกำลังต่อน้ำหนักค่อนข้างต่ำ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตมักมีปัญหาในการนำมาใช้งานหลายประเภท เช่น งานซ่อมที่ต้องการระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็ว งานโครงสร้างสำเร็จรูป (precast structure) ที่ต้องการความทนทานและกำลังวัสดุที่สูง โครงสร้างที่ต้องการความทนทานพิเศษต่อสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรดหรือด่างสูง ด้วยข้อจำกัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตในงานพิเศษดังกล่าวข้างต้นวัสดุพอลิเมอร์จึงเข้ามามีบทบาทเพิ่มมากขึ้นในการนำมาใช้เป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีตพิเศษ (Fowler, 1989) พอลิเมอร์ในงานคอนกรีตสามารถแบ่งออกตามลักษณะการใช้งานได้ 3 ประเภท (ACI Committee 548, 1997) อันได้แก่ การอัดพอลิเมอร์เรซินเหลวเข้าไปในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วทำให้แข็งตัวด้วยความร้อน หรือพอลิเมอร์อิมเพกเนทคอนกรีต (polymer impregnated concrete, PIC) การใช้พอลิเมอร์เรซินเป็นส่วนผสมในการผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตหรือพอลิเมอร์โมดิไฟด์คอนกรีต (polymer modified concrete, PMP) และ การใช้พอลิเมอร์เรซินแทนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นวัสดุประสานทั้งหมดหรือพอลิเมอร์คอนกรีต (polymer concrete, PC)

พอลิเมอร์คอนกรีตเป็นวัสดุชนิดใหม่ซึ่งเกิดขึ้นครั้งแรกที่ประเทศสหรัฐอเมริกาเมื่อ ค.ศ. 1958 และปัจจุบันได้ถูกผลิตขึ้นเพื่อประยุกต์ใช้ในงานพิเศษตามที่กล่าวข้างต้น โดยเริ่มใช้กันอย่างแพร่หลายขึ้นในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา (Fowler, 1999) พอลิเมอร์คอนกรีตผลิตจากส่วนผสมระหว่างพอลิเมอร์เรซิน (polymer resin) เช่น พอลิเอสเทอร์ และอีพอกซี เป็นต้น และวัสดุมวลรวม เช่น ทราย หิน และเถ้าลอย เป็นต้น จากผลการทดสอบของนักวิจัยหลายท่านแสดงให้เห็นแล้วว่าวัสดุผสมชนิดนี้มีกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดที่สูง ทนทานต่อสารเคมี มีน้ำหนักเบา และใช้ระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตมาก (Krauss and Wyman, 2010) งานวิจัยในอดีตจำนวนมากได้ทำการศึกษาคูณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบส่วนใหญ่จากการศึกษาที่ผ่านมาพอลิเมอร์คอนกรีตแสดงพฤติกรรมทางกล

ที่ซับซ้อนซึ่งเป็นผลจากปัจจัยหลายประการ ตัวอย่างเช่น ปริมาณเรซิน ขนาดคละมวลรวมที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน 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 งานวิจัยนี้ทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่สัดส่วนปริมาณเรซินและสัดส่วนมวลรวมต่าง ๆ เพื่อนำเสนอปัจจัยควบคุมกำลังของพอลิเมอร์คอนกรีตซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบสัดส่วนผสมของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาหาส่วนผสมของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตที่เหมาะสมในการรองรับแรงอัดและแรงดัด โดยพิจารณาจากปริมาณที่น้อยที่สุดของพอลิเอสเตอร์ที่ใช้แล้วให้อัตราส่วนของกำลังรับแรงอัดต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มีค่าสูงสุด โดยยังคงมี workability ที่ดีเป็นเกณฑ์
- 2) เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงอัดและแรงดัด และเปรียบเทียบกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติ
- 3) เพื่อศึกษาผลกระทบการเสริมเส้นใย ต่อพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมที่เหมาะสมภายใต้แรงอัดและแรงดัด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของส่วนผสมต่างๆ ต่อพฤติกรรมทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีต ดังนั้นจึงทำการปรับเปลี่ยนปริมาณสัดส่วนผสม ได้แก่ ปริมาณเรซิน มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ และเส้นใย เพื่อให้ได้ตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตที่ได้มีสัดส่วนผสมแตกต่างกัน โดยใช้เรซิน มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบและเส้นใยชนิดเดียวกัน รายละเอียดขอบเขตการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) พอลิเมอร์เรซินที่ใช้เป็นพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์เรซินสำเร็จรูปชนิด Isophthalic มีชื่อทางการค้า คือ ESTAR R289TPN นำเข้าและจัดจำหน่ายโดยบริษัท เจ เอ็น ทรานสออส (ประเทศไทย) โดยเรซินดังกล่าวผสมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Cobalt naphthenate ซึ่งสัดส่วนผสมเป็นความลับทางการค้า
- 2) มวลรวมละเอียดที่ใช้ได้แก่ ทรายธรรมชาติ และมวลรวมหยาบที่ใช้ได้แก่ หินปูนบด โดยมวลรวมที่ใช้เป็นมวลรวมที่หาได้ในจังหวัดนครราชสีมา ทรายและหินดังกล่าวถูกล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา และอบแห้ง
- 3) เส้นใยที่ใช้คือเส้นใยแก้วตัดสั้น (chopped glass fiber) ประเภท E-glass ขนาดยาวระหว่าง 3 ถึง 4 มิลลิเมตร
- 4) ปริมาณเรซินที่ใช้ในการศึกษานี้อยู่ระหว่าง 8 ถึง 22 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำหนักพอลิเมอร์คอนกรีตรวม และปรับสัดส่วนการแทนที่มวลรวมหยาบในมวลรวมทั้งหมดอยู่ระหว่าง 25 ถึง 75 เปอร์เซ็นต์
- 5) การเตรียมตัวอย่าง การบ่ม และการทดสอบกระทำที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง
- 6) 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 การทดสอบทำที่อายุบ่ม 7 วัน
- 7) ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ใช้ในการทำตัวอย่างทดสอบเพื่ออ้างอิง ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 ตราช้างของบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

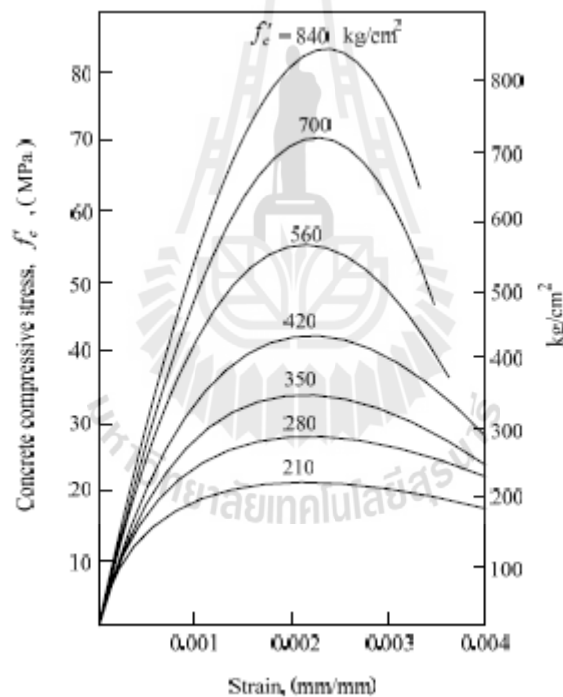
2.1 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้ก่อสร้างอาคาร เพราะสามารถสร้างให้มีรูปร่างและขนาดตามต้องการ และมีอายุการใช้งานได้นาน องค์ประกอบอาคารที่มักทำด้วยคอนกรีตได้แก่ เสา คาน พื้น เป็นต้น ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงอัด (compressive strength) สูง แต่กำลังรับแรงดึง (tensile strength) ต่ำ เพราะ จุดรับพลังงานได้น้อย เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว (shrinkage) ส่วนของอาคารที่พบรอยแตกร้าวอยู่บ่อยๆ เช่น พื้นถนน คอนกรีตและฐานรองเครื่องจักร เป็นต้น นอกจากนี้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตยังมีปัญหาการใช้งานบางประเภท เช่น รางระบายน้ำเสีย, บ่อพักบำบัดน้ำเสีย, การซ่อมแซมผิวถนนคอนกรีต, ผิวสะพานคอนกรีต และในโครงสร้างที่ต้องการความทนทานต่อการกัดกร่อน เนื่องจากข้อจำกัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตคือ การแข็งตัวที่ใช้เวลาก่อนข้างมาก กำลังต่อน้ำหนักก่อนข้างน้อย ความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีไม่ดีนัก คุณสมบัติเชิงกลของปอร์ตแลนด์คอนกรีตโดยทั่วไปสามารถสรุปได้ดังนี้

2.1.1) กำลังรับแรงอัด

คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดที่ต้องการของคอนกรีตเมื่อแข็งตัวแล้วคือ กำลังต้านทานแรงอัด (compressive strength) เนื่องจากพบว่า กำลังต้านทานหรือกำลังรับแรงแบบอื่นของคอนกรีต เช่น กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงคด กำลังรับแรงเฉือน และกำลังยึดเหนี่ยว รวมทั้งความทนทานและการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ล้วนเป็นสัดส่วนเทียบกับ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทั้งสิ้น ซึ่งหมายความว่า เมื่อคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูง กำลังรับแรงอย่างอื่นหรือความทนทานก็จะสูงตามไปด้วย การทดสอบหากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตให้ปฏิบัติตามวิธีของ ASTM C39 โดยการกดหรืออัดแรงตามแนวแกนของแท่งทดสอบมาตรฐานอย่างช้าๆ ด้วยเครื่องทดสอบ จนกระทั่งคอนกรีตถูกอัดแตก และเมื่อหารน้ำหนักกดอัดสูงสุดที่ได้ด้วยเนื้อที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่างที่รับแรงกระทำ จะเป็นค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุด (f'_c) ของแท่งคอนกรีตนั้น กำลังของคอนกรีตจะถือเป็นที่ยอมรับได้เมื่อผลเฉลี่ยกำลังอัดของการทดสอบ 3 ครั้งต่อเนื่องกัน ให้ค่าเท่ากับหรือมากกว่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุดที่กำหนด โดยที่ค่ากำลังอัดของการทดสอบแต่ละครั้ง อาจให้ค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุดได้ไม่เกิน 3.5 MPa (35 kg/cm²) จากรูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับค่าความเครียดของแท่งคอนกรีตมาตรฐานที่มีกำลังรับแรงอัดต่างๆ กัน เมื่อรับแรงกดอัดตามแนวแกนอย่างเดียว (uniaxial stress) จนกระทั่งคอนกรีตถูกอัดแตก จะเห็นได้ว่าจากจุดเริ่มต้นที่รับน้ำหนักจนถึงระดับของหน่วยแรงอัดประมาณ 40-50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด ความสัมพันธ์

ดังกล่าวจะเป็นเส้นโค้งเล็กน้อยซึ่งดูเหมือนเป็นเส้นตรง อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักอยู่ในช่วงใช้งานและกระทำในช่วงระยะเวลาสั้นๆ (short-time loading) มักจะสมมติว่าคอนกรีตมีค่าความเครียดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงอัดที่กระทำเมื่อหน่วยแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นเส้นโค้งคล้ายพาราโบลาซึ่งพบว่าที่หน่วยแรงอัดสูงสุดคอนกรีตจะมีความเครียดประมาณ 0.002 mm/mm และแท่งคอนกรีตยังสามารถต้านแรงอัดต่อไปได้ ในขณะที่ความเครียดมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่หน่วยแรงอัดจะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งวิบัติที่ค่าความเครียดสูงสุดประมาณ 0.003-0.004 mm/mm (มาตรฐาน ว.ส.ท.1008-38 กำหนดให้ใช้ค่าความเครียดสูงสุดของคอนกรีตเท่ากับ 0.003 mm/mm) และจากรูปที่ 2.1 จะสังเกตเห็นว่า คอนกรีตที่มีกำลังต้านทานแรงอัดสูง หน่วยแรงอัดจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเลยจากหน่วยแรงอัดสูงสุดไปแล้ว แต่คอนกรีตที่มีกำลังต้านทานแรงอัดต่ำกว่าหน่วยแรงอัดจะลดลงอย่างช้าๆและมีค่าความเครียดสูงสุดมากกว่า ซึ่งแสดงว่าคอนกรีตที่มีกำลังต่ำกว่าจะมีความเหนียว (ductility) มากกว่าคอนกรีตที่มีกำลังสูงกว่า



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดคดอัดของคอนกรีต (Wang, 1992)

2.1.2) กำลังรับแรงดัด

กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต (flexural strength) สามารถวัดจากโมดูลัสแตกร้าว (modulus of rupture), R ซึ่งได้แก่หน่วยแรงดึงสูงสุดในเนื้อคอนกรีต ณ จุดที่เกิดการแตกหักโดยแรงดัด การหาค่าโมดูลัสแตกร้าวให้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C78 โดยตัวอย่างทดสอบเป็นคาน ใช้น้ำหนักกดลงบนจุดที่แบ่งคานเป็นสามช่วง เพิ่มน้ำหนักกดลงให้สม่ำเสมอ โดยให้เกิดหน่วย

แรงที่ผิวหน้าประมาณ 8 – 10 kg/cm² ต่อหน้าที่ จากค่าน้ำหนักสูงสุดที่คานสามารถรับได้นำมา คำนวณหาค่าโมดูลัสแตกร้าว ดังแสดงในสมการที่ 2.1

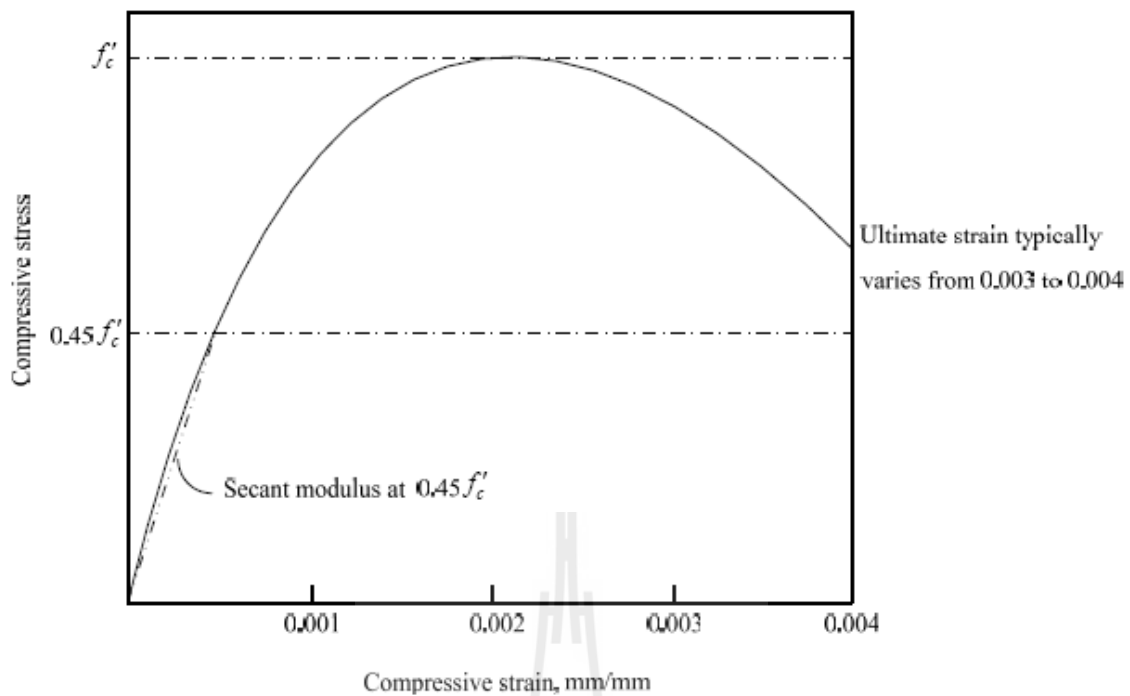
$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (2.1)$$

เมื่อ P คือ น้ำหนักกดสูงสุด L คือ ระยะห่างระหว่างฐานรองรับ b, d คือ ความกว้างและความลึกของ คานตัวอย่างทดสอบพบว่า กำลังรับแรงค้ำของคอนกรีตสูงกว่ากำลังรับแรงดึงประมาณร้อยละ 60 ถึง 100 ค่าโมดูลัสของการแตกหักอยู่ในช่วงร้อยละ 11 ถึง 23 ของกำลังรับแรงอัด การใช้วัสดุผสมที่มีผิว หยาบขรุขระและมีเหลี่ยมมุมจะทำให้กำลังรับแรงค้ำสูงขึ้น

2.1.3 โมดูลัสยืดหยุ่น

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (modulus of elasticity), เป็นตัวแสดงถึงความ ต้านทานต่อการเสีย (deformation) ของคอนกรีตเมื่อมีแรงกดอัดมากกระทำ จากการทดสอบจะพบว่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าแปรเปลี่ยนตามกำลังของคอนกรีต หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ตลอดจนขนาดและระยะเวลาที่รับน้ำหนักบรรทุก เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกอยู่ในช่วงใช้งาน และกระทำในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งอาจจะสมมติให้คอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่น (elastic materials) ได้โดยมี ความเครียด (elastic strain) เป็นสัดส่วน โดยตรงกับหน่วยแรงอัดที่กระทำ แต่เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนัก บรรทุกคงค้างเป็นเวลานานๆ (long-term loading) ต้องพิจารณารวมความเครียดแบบพลาสติก (plastic strain) ด้วยเพราะ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะลดลงทำให้คอนกรีตเกิดการเสียมากขึ้น

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต หาได้จากอัตราส่วนของหน่วยแรงอัดต่อ ความเครียดเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดของคอนกรีตที่ได้จากการ ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยทั่วไปความสัมพันธ์นี้มีลักษณะเป็นโค้งพาราโบลา ดัง แสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตนั้น มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. ใช้วิธี Secant Modulus ซึ่งคำนวณจากความลาดเอียงของเส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้นกับจุดใดๆ ที่ต้องการหา ซึ่ง มักพิจารณาที่จุดซึ่งมีหน่วยแรงอัดเท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงอัดสูงสุด ($0.45f'_c$) บนเส้น สัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียด โดยถือว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาโดยวิธีการนี้เป็นค่า โมดูลัสยืดหยุ่นที่แท้จริงของคอนกรีตในช่วงใช้งาน เนื่องจากได้พิจารณารวมถึงความเครียดแบบ พลาสติกเข้าไปด้วย



รูปที่ 2.2 วิธีการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Wang, 1992)

2.1.4 ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต

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

- 1) ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ซึ่งอยู่ในรูปของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ คือ ถ้าใช้น้ำมากเกินไป คอนกรีตจะเหลวและเทลงแบบได้ง่าย แต่กำลังของคอนกรีตจะลดลง ในทางกลับกันการมีน้ำอยู่น้อยไปจะทำให้คอนกรีตแห้ง การผสมจะเข้ากันไม่หมด และการอัดแน่นทำได้ยากขึ้นคอนกรีตอาจมีโพรงอยู่ภายใน ทำให้ความแข็งแรงลดลง ดังนั้นควรใช้ปริมาณน้ำที่เหมาะสม
- 2) รูปร่างและลักษณะผิวของวัสดุผสม ถ้าใช้วัสดุผสมที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมจะทำให้ความสามารถทำงานได้ดีกว่าวัสดุผสมที่มีเหลี่ยมมุม วัสดุผสมที่มีความลดหล่นของขนาดทำให้คอนกรีตเนื้อแน่นสม่ำเสมอต้องการน้ำผสมน้อย มีคุณภาพดีและทำงานง่าย
- 3) ปริมาณซีเมนต์และชนิดของซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์มีผลมาจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ มีปูนซีเมนต์ปริมาณมาก จะทำ

ให้คอนกรีตชั้นขึ้น การใช้ซีเมนต์ที่ละเอียดจะมีผลทำให้ได้คอนกรีตที่เทเข้าแบบได้ง่ายกว่าเพราะมีพื้นที่ผิวมาก แต่จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้เร็ว จึงทำให้คอนกรีตชั้นแข็งเร็ว

- 4) ปริมาณสารกระจายกักฟองอากาศ ถ้าใช้ปริมาณที่เหมาะสม คอนกรีตจะทำงานได้ง่ายแต่ถ้าใช้มากเกินไปจะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง
- 5) สารเคมีผสมเพิ่มบางชนิด เช่น fly ash จะช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้ดีขึ้นและช่วยแก้การเยิ้มที่ผิวหน้าของคอนกรีต
- 6) เวลาและอุณหภูมิ ถ้าทิ้งคอนกรีตที่เพิ่งผสมเสร็จไว้นานเกิน 15 นาที คอนกรีตจะมีความสามารถทำงานได้ต่ำลง หรืออาจแข็งตัวไปเลยหากใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยเกินไป

2.2 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 น้ำยาพารา อะคริลิกส์ (acrylics) และ ไวนิล เอสเตตส์ (vinyl acetates) เป็นต้น ลงในคอนกรีตสกร่วมกับสารป้องกันการเกิดฟองอากาศ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติแล้วพอลิเมอร์โมดิไฟด์คอนกรีตมีสมบัติด้านความคงทนและการยึดเกาะที่ดีกว่าแต่มีการคืบสูง พอลิเมอร์โมดิไฟด์คอนกรีตมักถูกนำมาใช้เฉพาะงานพิเศษ เช่น ส่วนของโครงสร้างสะพาน งานผนังสำเร็จรูป เป็นต้น ระยะเวลาก่อตัวของพอลิเมอร์โมดิไฟด์คอนกรีตเท่ากับคอนกรีตปกติ และต้านทานต่อสารเคมีได้ไม่มากจึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมเช่นกัน

พอลิเมอร์คอนกรีตเป็นวัสดุเชิงประกอบที่ใช้พอลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสานมวลรวมแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งแตกต่างจากพอลิเมอร์อิมเพกเนทคอนกรีต และพอลิเมอร์โมดิไฟด์คอนกรีตที่กล่าวข้างต้นซึ่งยังคงใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน โดยพอลิเมอร์คอนกรีตใช้พอลิเมอร์เรซิน (polymer resin) เป็นวัสดุประสาน พอลิเมอร์คอนกรีตประกอบด้วยพอลิเมอร์เรซิน

เช่น อีพอกซี (epoxy) พอลิเอสเตอ์ (polyester) เป็นต้น มวลรวม (aggregate) ประเภทวัสดุเนื้อย และ วัสดุเติมช่องว่าง (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)

ชนิดของตัวเชื่อมประสาน	ความหนาแน่น (g/cm ³)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	กำลังรับแรงอัด (MPa)	กำลังรับแรงดึง (MPa)	กำลังรับแรงดัด (MPa)	โมดูลัสความยืดหยุ่น (GPa)	อัตราส่วนโพซง
พอลิเมธิลเมทราไซค์เคลท	2.0-2.4	0.05-0.60	7-210	9-11	30-35	35-40	0.22-0.33
พอลิเอสเตอ์	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
ฟูเริน พอลิเมอร์	1.6-1.7	0.20	48-64	7-8	-	-	-
ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	1.9-2.5	5-8	13-35	1.5-3.5	2-8	20-30	0.15-0.20

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

ในปัจจุบันนักวิจัยได้ทำการพัฒนาพอลิเมอร์คอนกรีตอย่างต่อเนื่อง จากการศึกษา งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต (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 อัตราส่วนกำลังต่อ

น้ำหนักสูง ความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี และการซึมผ่านของน้ำต่ำ การนำพอลิเมอร์คอนกรีตไปใช้ในงานก่อสร้างมีหลากหลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น การซ่อมแซมคอนกรีตโดยเฉพาะอย่างยิ่งการซ่อมแซมผิวถนนคอนกรีต (Marsh et al., 1985) และผิวสะพานคอนกรีต (Fowler, 1999; Sprinkel et al., 1993) รวมถึงในงานประเภทชิ้นส่วนสำเร็จรูป (Helal, 1978; Rebeiz, 1996; Rebiez et al., 1993) และการหล่อเทในในอาคารสาธารณะ งานท่อบำบัดน้ำเสีย งานบันไดโรงงาน เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ทำชิ้นงานที่ทนต่อการกัดกร่อนของกรดและสารละลาย รางระบายน้ำในโรงงาน อุตสาหกรรม พนักสำเร็จรูป เครื่องสุขภัณฑ์ ตลอดจนนำมาใช้ในงานเคลือบและงานซ่อมแซมโครงสร้างได้ (ACI Committee 548, 1998) รูปที่ 2.3 แสดงการใช้งานพอลิเมอร์คอนกรีตในงานประเภทต่าง ๆ

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

การผลิตพอลิเมอร์คอนกรีตเริ่มจากการเตรียมสารตั้งต้น โมโนเมอร์และส่วนประกอบอื่น ๆ ที่ผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการไหลลื่น และการต้านทานเปลวไฟ บางครั้งการใช้สารในกลุ่มพาราฟินซิลิกอนไฮไดรด์ (paraffin silicon hydride) เพื่อเพิ่มการยึดเหนี่ยว ความแข็งแรงระหว่างพันธะพอลิเมอร์กับมวลรวมเวลาการก่อตัวสามารถเกิดได้อย่างรวดเร็ว โดยตัวแปรที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของพอลิเมอร์คอนกรีต ได้แก่ อุณหภูมิ และสัดส่วนผสม และปริมาณวัสดุประสานพอลิเมอร์เรซิน ปกติอัตราส่วนของพอลิเมอร์จะอยู่ระหว่าง 5 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักรวม แต่ถ้าวัสดุมวลรวมมีความละเอียดมากอาจจะต้องใช้พอลิเมอร์เรซินมากขึ้น

พอลิเมอร์คอนกรีตสามารถต้านทานสารเคมี และกรดไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) อัลคาไลค์ (alkali) และซัลเฟต (sulphate) ได้ดี กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงค้ำของพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตดังนั้นจึงสามารถลดขนาดหน้าตัดและน้ำหนักของโครงสร้างเมื่อนำมาทำเป็นชิ้นส่วนสำเร็จรูปได้ พอลิเมอร์เรซินมีกำลังสูงและมีการยึดเกาะกับมวลรวมดีดังนั้นกำลังของพอลิเมอร์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังของมวลรวม กำลังของพอลิ

เมอร์เรซิน และความชื้นในมวลรวม ถ้าความชื้นในมวลรวมมีค่ามากกว่า 1 เปอร์เซ็นต์จะทำให้กำลังของพอลิเมอร์คอนกรีตลดลง พอลิเมอร์ที่มีใช้ในงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ พลาสติก (plastics) และอีลาสโตเมอร์ (elastomers) พลาสติกคือพอลิเมอร์ที่มีพฤติกรรมขึ้นอยู่กับโครงสร้างพันธะเคมีที่กระทำต่อกันซึ่งที่มีลักษณะเฉพาะเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ได้แก่ เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) และเทอร์โมเซตติงพลาสติก (thermosetting plastic) อีลาสโตเมอร์คือพอลิเมอร์ประเภทยางที่มีลักษณะยืดหยุ่นได้มาก เมื่อออกแรงดึงจะยืดออกแต่จะสามารถกลับอยู่ในสภาพเดิมเมื่อปล่อยแรงดึง เทอร์โมพลาสติกคือพลาสติกที่สามารถทำให้หลอมเหลวหรือเปลี่ยนรูปร่างได้ด้วยความร้อน แต่จะแข็งตัวเมื่อเย็นลง พลาสติกชนิดนี้สามารถรีไซเคิลได้โดยคุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลง เทอร์โมเซตติงพลาสติกคือพลาสติกที่ไม่สามารถทำให้หลอมเหลวได้ด้วยความร้อน พลาสติกชนิดนี้จะคงรูปถาวรด้วยปฏิกิริยาเคมีหรือด้วยความร้อนเมื่อให้ความร้อนอีกครั้งที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการสลายตัวหรือไหม้จึงไม่สามารถรีไซเคิลพลาสติกชนิดนี้ได้ พอลิเมอร์แต่ละประเภทแสดงดังรูปที่ 2.4

เทอร์โมเซตติงพลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่นิยมสำหรับงานทางวิศวกรรมเพราะมีความเสถียรต่อความร้อนสูง มีความแข็งสูงไม่งอง่าย มีความเสถียรเชิงมิติสูง มีความทนทานต่อการเกิดการคืบ (creep) มีน้ำหนักเบา และมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า พอลิเมอร์เรซินที่นำมาใช้ในการทำพอลิเมอร์คอนกรีตเป็นประเภทเทอร์โมเซตติงพลาสติก โดยพอลิเมอร์เรซินที่นิยมในงานก่อสร้าง ได้แก่ พอลิเอสเทอร์และอีพอกซี อีพอกซีมีข้อดีคือสามารถยึดเกาะกับมวลรวมได้ดี มีกำลังรับแรงอัดและแรงดึงสูง และต้านทานการกัดกร่อนดี แต่ข้อจำกัดที่นำมาใช้ในงานคอนกรีตเพราะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแตกต่างจากคอนกรีตมากทำให้เกิดปัญหาในการใช้งานร่วมกับคอนกรีตปกติ นอกจากนั้นแล้วยังมีกลิ่นที่รุนแรงทำให้ไม่เหมาะสมในการใช้งานในที่อับและบางส่วนของผสมของอีพอกซีไม่สามารถใช้งานในสถานะแวดล้อมที่ชื้นได้ อีกทั้งคุณสมบัติต่าง ๆ ของอีพอกซียังแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ ส่วนพอลิเอสเทอร์เป็นวัสดุประสานที่มีความสามารถในการยึดเกาะที่ดี มีกำลังรับแรงอัดและแรงดึงสูง ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี อีกทั้งมีสมบัติที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก แต่อย่างไรก็ดีการหดตัวของพอลิเอสเทอร์อาจจะเป็นข้อจำกัดประการเดียวในการใช้งาน Weatherhead (1980) ได้เสนอคุณสมบัติทางวิศวกรรมโดยทั่วไปของพอลิเมอร์เรซินที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยอีพอกซีเรซินมีกำลังรับแรงดึงมากที่สุด รองลงมาคือพอลิเอสเทอร์เรซินและไวโนเอสเทอร์เรซินตามลำดับ พอลิเอสเทอร์และอีพอกซีให้โมดูลัสแรงดึงและหน่วยน้ำหนักที่ไม่ต่างกันมากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผลต่าง ๆ โดยเลือกใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นหลักเพราะมีราคาถูกกว่าอีพอกซีมาก อีกทั้งพอลิเอสเทอร์เรซินสามารถผลิตได้จากกระบวนการรีไซเคิลขยะขวดพลาสติกได้อีกด้วย



(a) การซ่อมแซมผิวถนนคอนกรีต (Tomasulo, 2009)

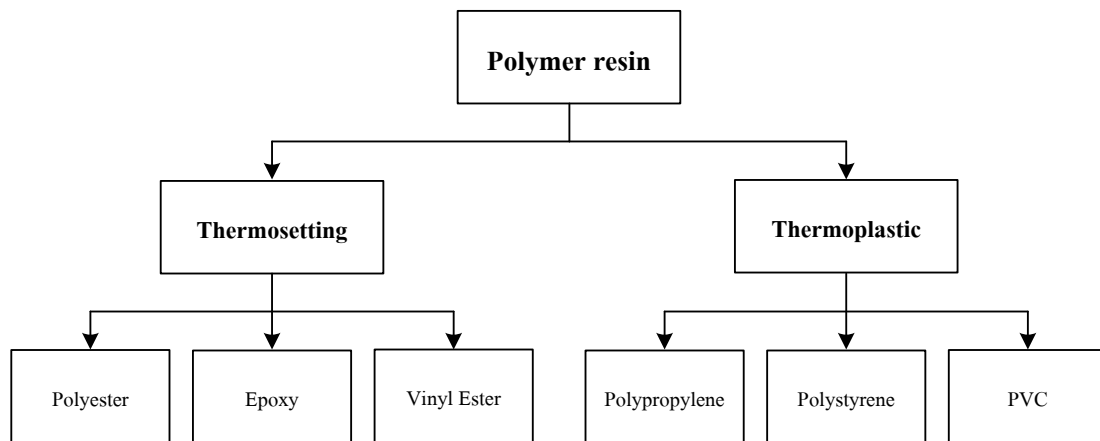


(b) รางระบายน้ำเสีย (Cangzhou Innovation Metalwork Co., 2012)



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

รูปที่ 2.3 การใช้งานพอลิเมอร์คอนกรีตในงานประเภทต่าง ๆ



รูปที่ 2.4 ประเภทของพอลิเมอร์เรซินที่นิยมนำมาใช้ในงานก่อสร้าง

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเรซินประเภทเทอร์โมเซตติง (Weatherhead, 1980)

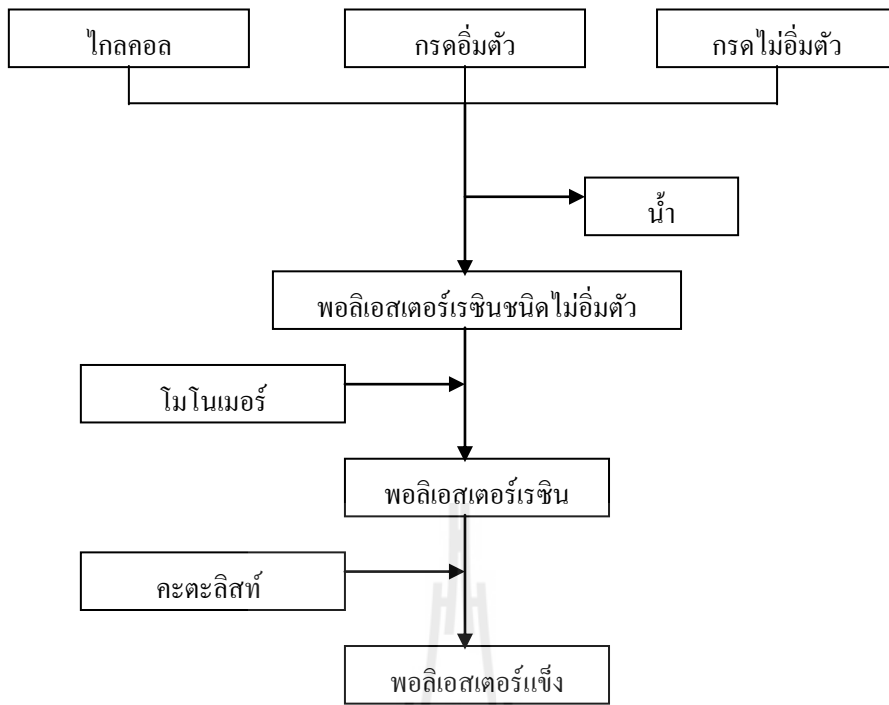
Resin	Polyester	Epoxy	Vinyl ester
Tension strength (MPa)	35-108	55-130	73-81
Modulus of elasticity (GPa)	2.1-4.1	2.8-4.1	3.0-3.5
Density (g/cm ³)	1.12-1.32	1.20-1.30	1.10-1.46

2.3 พอลิเอสเทอร์เรซิน

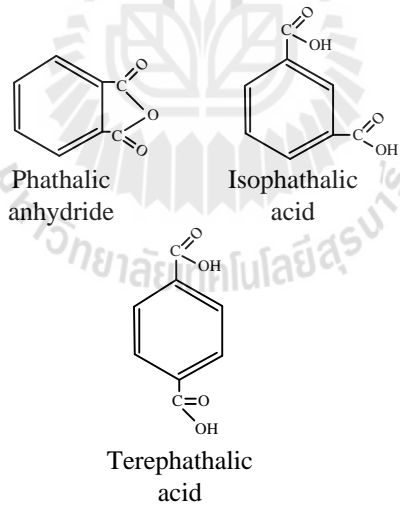
พอลิเอสเทอร์พอลิเมอร์เรซิน คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยเอสเทอร์หมู่ -C-O- ตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป ซึ่งสังเคราะห์จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น (condensation polymerization) ระหว่างสารประกอบจำพวกไกลคอล (glycol) และกรดไดเบสิก (dibasic acid) พอลิเอสเทอร์เรซินแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดอิ่มตัว (saturated polyester resin) และพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated polyester resin) พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นเรซินเหลวมีสีเหลืองอ่อน ๆ และมีองศาของพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization) ต่ำประมาณ 8 ถึง 10 เรซินที่ยังไม่ได้ใช้งานจะมีสภาพเป็นของเหลวชั้นสีเหลืองใส เมื่อใส่สารเคมีกระตุ้นปฏิกิริยาหรือได้รับการกระตุ้นจากฉายแสงอุลตราไวโอเลตจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้นและเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็งใส พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวโดยทั่วไปสังเคราะห์มาจากปฏิกิริยาปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) ของไกลคอลกับสารผสมของกรดอินทรีย์อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว (saturated and unsaturated dicarboxylic acid) ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาจะได้น้ำเป็นผลผลิต เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดจะต้องนำผลผลิตที่ได้ไปละลายในตัวทำละลายที่ไม่อิ่มตัว เช่น สไตรีน (styrene)

เป็นต้น เพื่อให้อยู่ในสภาพที่เป็นของเหลวและยังเป็นส่วนหนึ่งในการเกิดปฏิกิริยาแข็งตัว (curing reaction) ภายหลังจากที่ได้รับความร้อนหรือภายหลังจากที่เติมตัวเริ่มปฏิกิริยาลงไปแล้ว พอลิเอสเทอร์เมื่อละลายอยู่ในโมโนเมอร์ที่ไม่อิ่มตัวพันธะที่ไม่อิ่มตัวจะทำปฏิกิริยากับพันธะที่ไม่อิ่มตัวของโมโนเมอร์บางส่วน ส่วนที่เหลือจะเข้าทำปฏิกิริยาขณะพอลิเอสเทอร์แข็งตัว รูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพการทำพอลิเอสเทอร์แข็ง พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวมีโมโนเมอร์ที่ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวทำละลายและเป็นตัวที่ทำให้โมเลกุลของพอลิเอสเทอร์มีความหนืดสูงก่อนเกิดการแข็งตัว และเมื่อได้รับความร้อนหรือภายหลังจากการเติมคะตะลิสต์ (catalyst) โมโนเมอร์จะถูกใช้เพื่อทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของพอลิเอสเทอร์ทำให้มีโครงสร้างเป็นร่างแหเทอร์โมเซตพอลิเอสเทอร์เรซินจะเกิดการแข็งตัว การเติมโมโนเมอร์ที่มีความหนืดต่ำ เช่น สไตรีน เป็นต้น พอลิเมอร์เรซินจะสามารถผสมกับมวลรวมได้ง่ายและให้ของผสมที่พร้อมจะแข็งตัวเป็นคอนกรีตที่แน่นมีรูพรุนน้อย และใช้สารยึดเกาะในปริมาณต่ำ นอกจากนี้พบว่า การผสมโมโนเมอร์ที่มีความหนืดต่ำจะสามารถแทรกซึมเข้าไปตามรอยแยกและช่องว่างในอนุภาคของมวลรวมได้ดีด้วย (Hirano, 1992) โมโนเมอร์ที่นิยมใช้มากที่สุดในงานพอลิเมอร์คอนกรีตคือสไตรีนเนื่องจากราคาถูกและมีสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดี

พอลิเอสเทอร์เรซินไม่อิ่มตัวยังสามารถแบ่งประเภทตามชนิดของกรดตั้งต้น กระบวนการ ได้แก่ กรดพาลิกสามารถเตรียมได้เป็นออร์ทอพาทาลิกเรซิน (orthophthalic resin) กรดไอโซพาทาลิกสามารถเตรียมได้เป็นไอโซพาทาลิกเรซิน (isophthalic resin) เป็นต้น รูปแบบโมเลกุลของกรดที่ใช้ผลิตพอลิเอสเทอร์ไม่อิ่มตัวแสดงดังรูปที่ 2.6 พอลิเมอร์เรซินที่ใช้ผลิตพอลิเมอร์คอนกรีตโดยทั่วไปจะเป็นเทอร์โมเซตทั้งแบบที่ไม่อิ่มตัวเพราะสามารถผลิตได้ง่ายและราคาถูก นอกจากนี้ยังทนต่อสารเคมีและสามารถต้านทานแรงอัดสูง ส่วนความต้านทานแรงกระแทกจะใกล้เคียงกับพอลิเมอร์เรซินชนิดอื่น ๆ (Chanda and Ohama, 1994) ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือคะตะลิสต์ (catalyst) เป็นสารที่ช่วยให้พอลิเมอร์เรซินสามารถก่อตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง ส่วนใหญ่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นสารจำพวกเกลือของโลหะเช่น โคบอลแทนฟิเนต (cobalt naphthenate) เป็นต้น คะตะลิสต์เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์เรซินเปลี่ยนสภาพพอลิเมอร์เรซินจากของเหลวไปเป็นของแข็ง เช่น เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (MEKPO) เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการทำพอลิเอสเตอร์แข็ง (วิลพร, 2540)



รูปที่ 2.6 ประเภทของกรดที่ใช้ผลิตพอลิเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว (Cassis and Talbot, 1998)

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตยังมีข้อจัดการใช้งานในหลายด้านซึ่งสามารถทดแทนได้โดยพอลิเมอร์คอนกรีต การใช้พอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตในประเทศไทยนั้นยังมีไม่มาก โดยส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาในเรื่องการนำเรซินไปผสมในคอนกรีตสดซึ่งเพิ่มกำลังในคอนกรีต ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมทางกลและสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตมากขึ้น การศึกษาผลของสัดส่วนผสมต่อพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ ในการศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งไปที่การศึกษาผลของส่วนผสมในการผลิตพอลิเมอร์คอนกรีตต่อพฤติกรรมทางกลภายใต้แรงอัดและแรงดัด เนื่องจากพอลิเอสเตอร์เรซินมีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมคือมีความแข็ง ความใส ความเงา สามารถใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงกว่าพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติกและทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี พอลิเอสเตอร์เรซิน จึงถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้พอลิเอสเตอร์เรซินเป็นวัสดุประสานและเลือกใช้สัดส่วนขนาดคละมวลรวมต่าง ๆ คั้งจะนำเสนอรายละเอียดในบทต่อไป



บทที่ 3

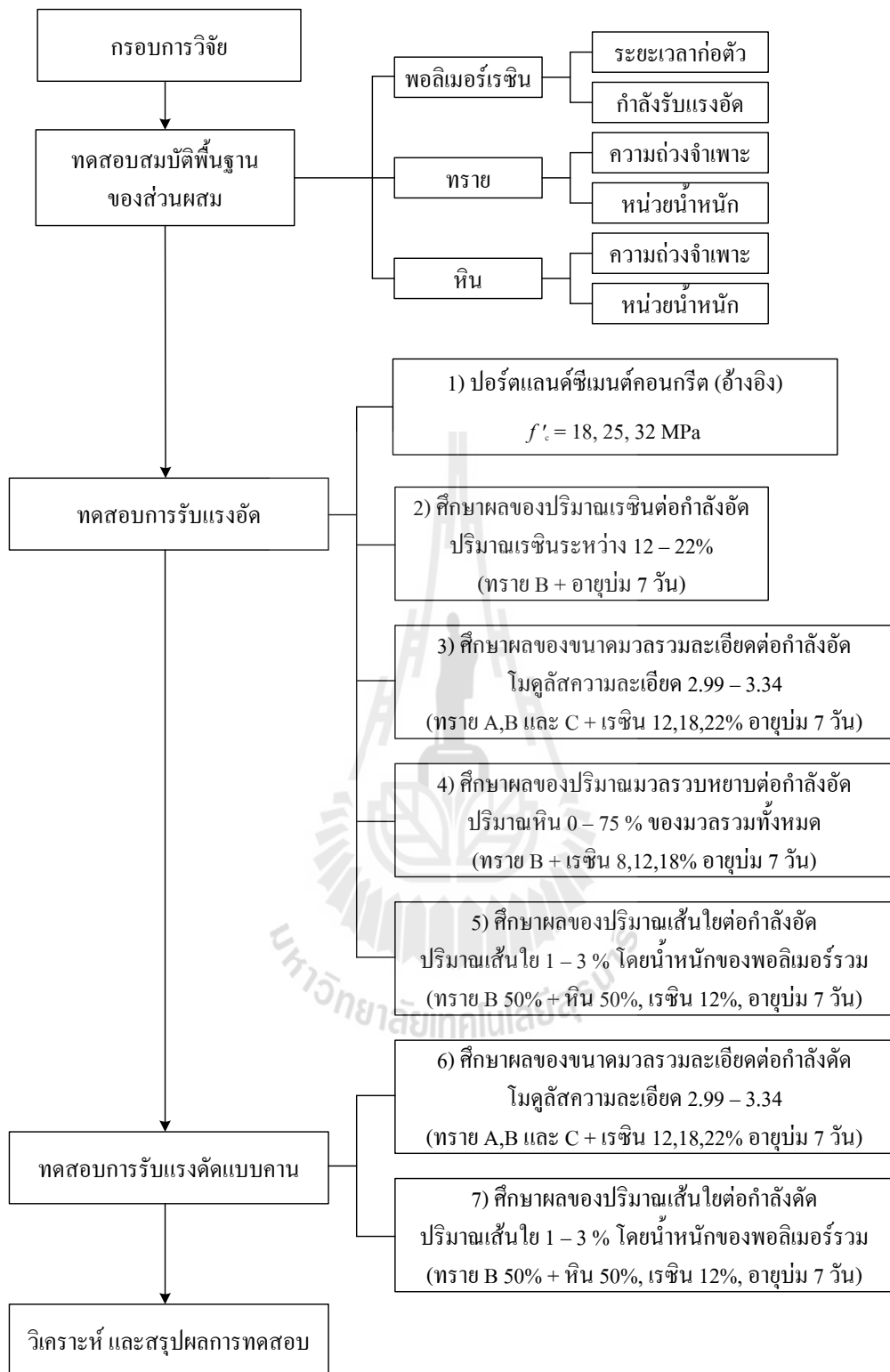
วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของส่วนผสมต่อพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีต งานวิจัยแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนได้แก่ การทดสอบคุณสมบัติวัสดุผสม และการทดสอบพฤติกรรมทางกลของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต (อ้างอิง) และพอลิเมอร์คอนกรีต กรอบการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดแสดงรูปที่ 3.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ได้แก่ พอลิเอสเตอร์เรซินและมวลรวมที่ใช้เป็นส่วนผสม คุณสมบัติที่ได้ในการทดสอบไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบตัวอย่างทดสอบให้สอดคล้องกับเครื่องมือ และอุปกรณ์ทดสอบที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ การศึกษาพฤติกรรมทางกลของตัวอย่างทดสอบทำโดยปรับเปลี่ยนตัวแปรอิสระ ได้แก่ ปริมาณเรซิน ขนาดของมวลรวมละเอียด ปริมาณมวลรวมหยาบ และปริมาณเส้นใย เพื่อศึกษาผลของส่วนผสมต่าง ๆ ต่อพฤติกรรมทางกลอันประกอบด้วย การทดสอบการรับแรงอัดและการรับแรงคด งานวิจัยนี้จะเตรียมตัวอย่างและทดสอบภายใต้ตัวแปรควบคุมเดียวกัน ได้แก่ ระยะเวลาและขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง ปริมาณตัวเริ่มปฏิกิริยาอายุบ่ม อุณหภูมิการบ่มและลำดับขั้นตอนการทดสอบ เป็นต้น การวิเคราะห์ผลจะเปรียบเทียบพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ได้กับพอลิเมอร์เรซินแข็ง และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ทั่วไป วิธีการทดสอบและจำนวนตัวอย่างทดสอบจะอธิบายโดยละเอียดแต่ละขั้นตอนในรายงานบทนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 พอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์เรซิน

ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ พอลิเอสเตอร์เรซินที่ใช้นำเข้าและจัดจำหน่ายโดยบริษัท เจ เอ็น ทรานสอส (ประเทศไทย) จำกัด มีชื่อทางการค้า คือ ESTAR R289TP(N) ชนิดไอโซพาทาเทส และเป็นพอลิเอสเตอร์เรซินแบบพร้อมใช้ที่มีส่วนผสมตัวเร่งปฏิกิริยา คือ โคบอลต์แนพเทเนต (cobalt naphthenate) มีลักษณะเป็นของเหลวใสสีชมพูอ่อนและมีความหนืดคล้ายน้ำมันเครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 กรอบการดำเนินงานวิจัย

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 naphthenate
Aggregate	Natural sand, crushed lime stone (maximum size 10 mm) and chopped glass fiber (length 3 – 4 mm)



รูปที่ 3.2 พอลิเอสเทอร์พอลิเมอร์เรซินเหลว

ตารางที่ 3.2 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง

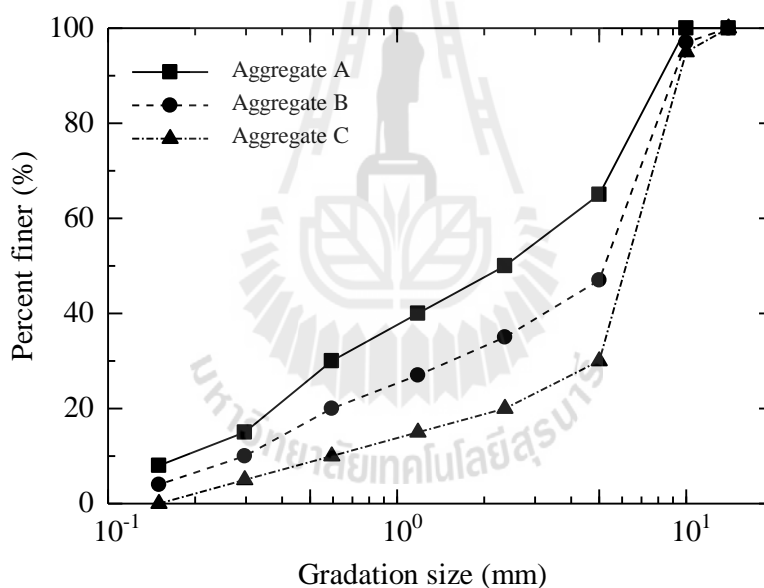
ประเภทมวลรวม	การทดสอบ	ปริมาณเรซินโดย น้ำหนักรวมของ พอลิเมอร์คอนกรีต	จำนวน (ตัวอย่าง)	หมายเลข ตัวอย่าง
หิน + ทราย	แรงอัด	ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ คอนกรีต $f'_c = 18 \text{ MPa}$	3	G1-180
		$f'_c = 25 \text{ MPa}$	3	G1-240
		$f'_c = 32 \text{ MPa}$	3	G1-320
ทรายโมดูลัสความละเอียด 3.20 (aggregate B)	แรงอัด	12%	6	G2B12
		14%	6	G2B14
		16%	6	G2B16
		18%	6	G2B18
		20%	6	G2B20
		22%	6	G2B22
ทรายโมดูลัสความละเอียด 2.99 (aggregate A)	แรงอัด	12%	6	G3A12
		18%	6	G3A18
		22%	6	G3A22
ทรายโมดูลัสความละเอียด 3.20 (aggregate B)	แรงอัด	12%	6	G3B12
		18%	6	G3B18
		22%	6	G3B22
ทรายโมดูลัสความละเอียด 3.40 (aggregate C)	แรงอัด	12%	6	G3C12
		18%	6	G3C18
		22%	6	G3C22
ทราย (aggregate B) 75% และหิน 25%	แรงอัด	12%	6	G4B75R12
ทราย (aggregate B) 50% และหิน 50%	แรงอัด	8%	6	G4B50R8
		12%	6	G4B50R12
		18%	6	G4B50R18
ทราย (aggregate B) 25% และหิน 75%	แรงอัด	12%	6	G4B25R12
ทราย (aggregate B) 50% หิน 50% และ เส้นใยแก้ว 1% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตรวม	แรงอัด	12%	6	G5B50F1
ทราย (aggregate B) 50% หิน 50% และ เส้นใยแก้ว 2% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตรวม	แรงอัด	12%	6	G5B50F2

ตารางที่ 3.2 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง (ต่อ)

ประเภทมวลรวม	การทดสอบ	ปริมาณเรซินโดย น้ำหนักรวมของ พอลิเมอร์คอนกรีต	จำนวน (ตัวอย่าง)	หมายเลข ตัวอย่าง
ทราย (aggregate B) 50% หิน 50% และ เส้น ใยแก้ว 3% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ คอนกรีตรวม	แรงอัด	12%	6	G5B50F3
ทรายโมดูลัสความละเอียด 2.99 (aggregate A)	แรงค้ำ	12%	3	G6A12
		18%	3	G6A18
		22%	3	G6A22
ทรายโมดูลัสความละเอียด 3.20 (aggregate B)	แรงค้ำ	12%	3	G6B12
		18%	3	G6B18
		22%	3	G6B22
ทรายโมดูลัสความละเอียด 3.40 (aggregate C)	แรงค้ำ	12%	3	G6C12
		18%	3	G6C18
		22%	3	G6C22
ทราย (aggregate B) 50% หิน 50% และ เส้น ใยแก้ว 1% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ คอนกรีตรวม	แรงค้ำ	12%	3	G7B50F1
ทราย (aggregate B) 50% หิน 50% และ เส้น ใยแก้ว 2% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ คอนกรีตรวม	แรงค้ำ	12%	3	G7B50F2
ทราย (aggregate B) 50% หิน 50% และ เส้น ใยแก้ว 3% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ คอนกรีตรวม	แรงค้ำ	12%	3	G7B50F3
รวมจำนวนชุดตัวอย่าง			174	

3.1.2 มวลรวม

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แก่ ทรายธรรมชาติจากอำเภอฟิมมาย จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตโดยทั่วไปในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาและพื้นที่ใกล้เคียง ทรายถูกนำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา และอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงนำมาคัดขนาดเพื่อใช้ในส่วนผสมต่อไป มวลรวมหยาบที่ใช้คือหินปูนบด ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษานี้เท่ากับ 10 มิลลิเมตร ขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษานี้ได้ถูกปรับให้มีขนาดละเอียดแตกต่างกันจำนวน 3 แบบดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยมวลรวมละเอียด A B และ C มีขนาดละเอียดเป็นไปตามมาตรฐาน BS 882 (1992) สำหรับมวลรวมแบบหลายขนาด (all-in aggregate) แต่ละสัดส่วนละเอียดมีค่าโมดูลัสความละเอียดที่แตกต่างกัน คือ 2.99 3.20 และ 3.34 ตามลำดับ เส้นใยที่ใช้ผสมเพิ่มเป็นเส้นใยแก้ว (glass fiber) ตัดสั้นโดยมีขนาดความยาวทั่วไประหว่าง 3 ถึง 4 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 การกระจายขนาดของมวลรวมละเอียดที่ขนาดละเอียดต่าง ๆ



รูปที่ 3.4 เส้นใยแก้วตัดสั้น

3.2 การทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสม

3.2.1 พอลิเมอร์เรซิน

ก) ระยะเวลาก่อตัวและหน่วยน้ำหนัก

ภายหลังจากการผสมพอลิเมอร์เรซินกับตัวเริ่มปฏิกิริยา พอลิเมอร์เรซินจะเริ่มก่อตัว การทดสอบเวลาก่อตัวของพอลิเมอร์เรซินประยุกต์ใช้การทดสอบของซีเมนต์เพสต์โดยวิธีไวแคตตามมาตรฐาน ASTM C191 (2008)

ข) กำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังอัดของพอลิเมอร์เรซินแข็งทำเพื่อให้ทราบกำลังอัด ประสิทธิภาพและการพัฒนากำลังตามอายุบ่มของวัสดุประสาน การทดสอบทำโดยหล่อตัวอย่างพอลิเมอร์เรซิน ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร สูง 50 มิลลิเมตร จากนั้นทำการบ่มตัวอย่างที่อายุบ่ม 1 7 14 และ 28 วัน ตามลำดับ การทดสอบกำลังอัดทำที่อายุบ่มต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASTM C579 (2001)

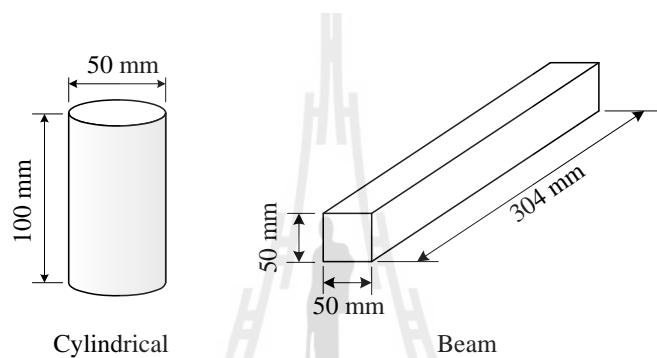
3.2.2 มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ

คุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมที่ทำการทดสอบมี 3 ประเภท คือ ความถ่วงจำเพาะรวม หน่วยน้ำหนัก และความทนทานต่อการขัดสี การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะรวมทำตามมาตรฐาน ASTM C128 (2007) สำหรับมวลรวมละเอียดและ ASTM C127 (2007) สำหรับมวลรวมหยาบ การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวมทำตามมาตรฐาน ASTM C29 (2009) สำหรับ

มวบรวมหยาบจะทดสอบความทนทานต่อการขีดสีด้วยซึ่งทำตามมาตรฐาน ASTM C131 (2006) (มวบรวมขนาดเล็กกว่า 1-1/2 นิ้ว)

3.3 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างกระทำตามมาตรฐาน ASTM C579 (2001) และ ASTM C580 (2002) สำหรับการรับแรงอัดและการรับแรงค้ำตามลำดับ ตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ตัวอย่างทรงกระบอกสำหรับทดสอบการรับแรงอัด และตัวอย่างแบบคานสำหรับการรับแรงค้ำ ขนาดของตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 แบบแสดงดังรูปที่ 3.5 แบบหล่อสำหรับตัวอย่างทรงกระบอกและแบบคานทำจากโลหะที่แข็งแรง การติดตั้งแบบหล่อทั้ง 2 แบบทำตามรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ขนาดตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงค้ำ



(a) แบบหล่อทรงกระบอก



(b) แบบหล่อคาน

รูปที่ 3.6 แบบหล่อตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีต

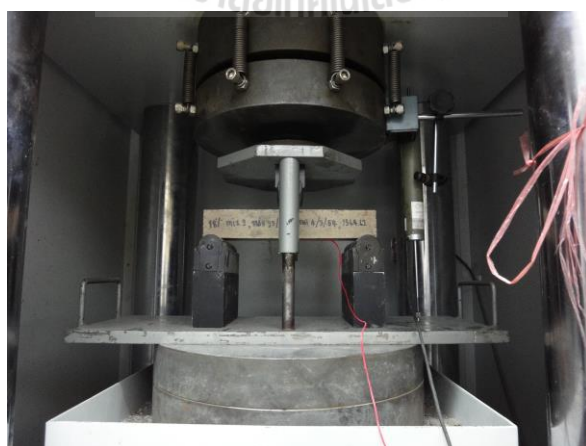
3.4 การทดสอบทางกล

3.4.1 การทดสอบการรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตในงานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงอัด อันได้แก่ กำลังสูงสุด ความแกร่ง 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) จากผลการศึกษาเบื้องต้นของการพัฒนากำลังรับแรงอัดเบื้องต้นในหัวข้อ 3.2.1 แม้ว่าพอลิเมอร์เรซินเมื่อเติมตัวเริ่มปฏิกิริยาจะเกิดการก่อตัวและสามารถพัฒนากำลังได้มากกว่าร้อยละ 90 ใน 1 วัน แต่เมื่อพอลิเมอร์เรซินผสมมวลรวมแล้วการพัฒนากำลังอัดจะเริ่มคงที่เมื่ออายุบ่ม 7 วัน ดังนั้น การทดสอบกำลังอัดจะทำเมื่อบ่มตัวอย่างได้อายุ 7 วัน

3.4.2 การทดสอบการรับแรงดัด

เนื่องจากข้อจำกัดด้านเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงดึงของตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีต ดังนั้นงานวิจัยจึงทำการทดสอบการรับแรงดัดแบบคานตามมาตรฐาน ASTM C580 (2002) ตัวอย่างทดสอบจะมีขนาดหน้าตัด 50x50 มิลลิเมตร ยาว 304 มิลลิเมตร การทดสอบการรับแรงดัดทำที่อายุบ่ม 7 วัน เช่นเดียวกับการทดสอบการรับแรงอัด ระยะห่างของจุดรองรับเท่ากับ 254 มิลลิเมตร น้ำหนักบรรทุกกระทำที่กึ่งกลางคาน คุณสมบัติทางกลของวัสดุภายใต้แรงดัดที่สนใจ ได้แก่ หน่วยแรงดัดสูงสุด (flexural strength) และโมดูลัสยืดหยุ่นของการรับแรงดัด



รูปที่ 3.7 การติดตั้งตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตสำหรับการทดสอบการรับแรงดัด

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมและพอลิเอสเทอร์เรซิน

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

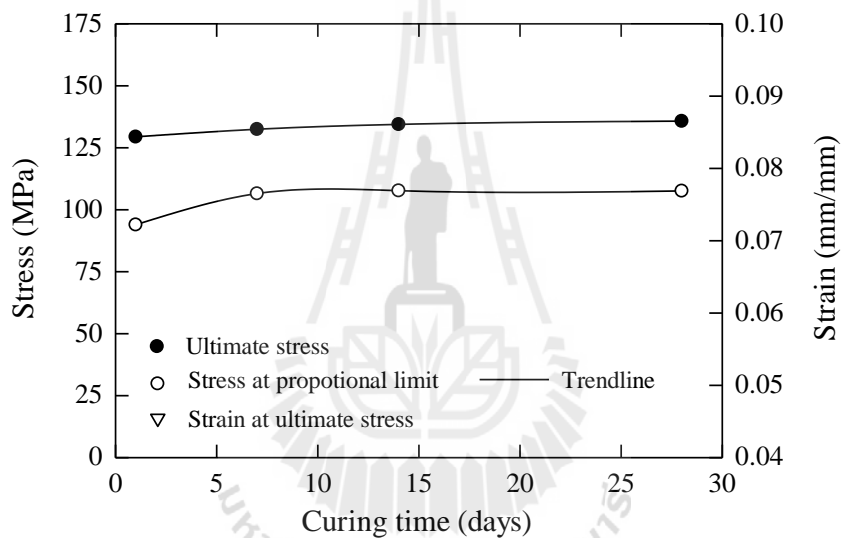
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวม

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)	137.3
- Modulus of Elasticity (GPa)	4.0
- Flexural strength (MPa) and Modulus of elasticity (GPa)	117.7, 3.4

การพัฒนากำลังอัดตามอายุบ่มของพอลิเมอร์เรซินแข็งแสดงดังรูปที่ 4.1 เมื่ออายุบ่มที่เพิ่มขึ้นกำลังอัดประลัยและกำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นของพอลิเมอร์เรซินเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยมีค่าเริ่มคงที่เมื่ออายุบ่ม 7 วัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Vipulanandan and Paul (1993) โดยมีกำลังอัดประลัยที่ 7 วัน เท่ากับ 132.5 เมกะปาสกาล นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าหน่วยแรงที่พิกัดยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและเริ่มคงที่โดยมีค่าเท่ากับ 106.5 เมกะปาสกาลเมื่ออายุบ่ม 7 วันเช่นกัน ค่าพิกัดยืดหยุ่นมีค่าใกล้เคียงกันที่อายุบ่มต่าง ๆ ความเครียดที่กำลังอัดประลัยซึ่งแสดงถึงความแกร่งของพอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามอายุบ่มหรืออาจกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์คอนกรีตมีความแกร่งเพิ่มขึ้น หน่วยน้ำหนักเฉลี่ยของพอลิเมอร์เรซินแข็งที่อายุบ่ม 28 วันจากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 4.1 การพัฒนากำลังอัดตามอายุบ่มของพอลิเมอร์เรซินแข็ง

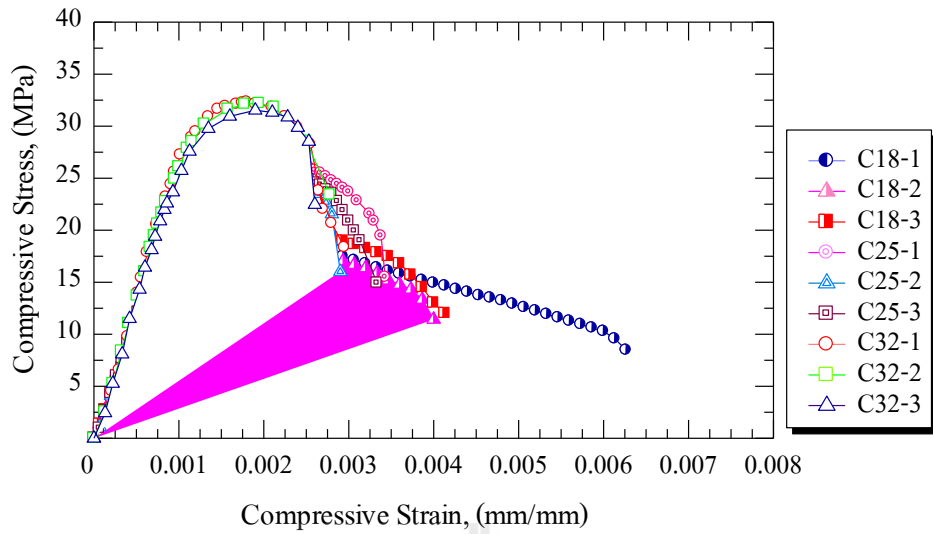
4.2 กำลังอัดและพฤติกรรมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต (ตัวอย่างอ้างอิง)

4.2.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต

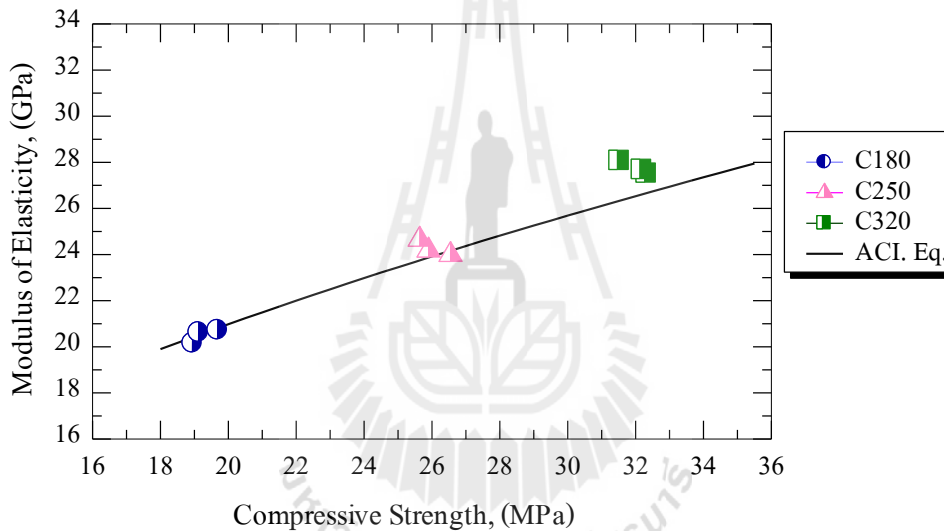
จากผลของการทดสอบแรงกดอัดแท่งคอนกรีตทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C39 - 96 และ ASTM C469 - 94 โดยคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยเป็นคอนกรีตผสมเสร็จ ของ บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด (CPAC) กำลังรับแรงกดอัดออกแบบ 18 25 และ 32 เมกะ ปาสกาล ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.3 ค่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุดเฉลี่ย 19.26 26.03 และ 32.02 เมกะปาสกาล และมีค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 20.50 24.28 และ 27.75 กิกะปาสกาล ตามลำดับ โดยที่กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและค่าความเครียดกดอัด ดังแสดง ในรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต

ตัวอย่าง	No.	กำลังรับแรงกดอัดสูงสุด, f'_c (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น, E_c (GPa)
C18	1	18.95	20.15
	2	19.13	20.62
	3	19.69	20.72
	เฉลี่ย	19.26	20.50
C25	1	26.55	23.99
	2	25.90	24.18
	3	25.64	24.65
	เฉลี่ย	26.03	24.28
C32	1	32.33	27.51
	2	32.19	27.67
	3	31.53	28.06
	เฉลี่ย	32.02	27.75



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและค่าความเครียดของคอนกรีต



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต

เมื่อนำค่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุดและโมดูลัสยืดหยุ่นที่คำนวณได้ จากการทดสอบมา เปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ดังกล่าวที่คำนวณได้จากสมการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ACI ($E_c = 0.043w_c^{1.5}\sqrt{f'_c}$) พบว่าความสัมพันธ์ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.3

ในส่วนของลักษณะการวิบัติ พบว่าคอนกรีตเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงกดอัดและแรงเฉือนร่วมกันโดยรอยแตกริ้วของตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 3 กลุ่มทำมุม $50^\circ - 60^\circ$ กับแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งสาเหตุมาจากว่าคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกันจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในเนื้อของวัสดุ รวมทั้งแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ส่วนของผิวสัมผัสระหว่างห้วกดและตัวอย่างทดสอบเนื่องจากการขยายตัวทางด้านข้าง ซึ่งผลของทั้ง 2 สาเหตุดังกล่าวนี้จะทำให้สถานะของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในวัสดุเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.4 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีต

4.3 พฤติกรรมทั่วไปของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้การรับแรงอัดและแรงดัด

จากผลการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดทั่วไปของตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตสามารถสรุปได้ตามแผนภาพดังรูปที่ 4.5 โดยสามารถแบ่งพฤติกรรมออกได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงยืดหยุ่นเส้นตรง (linear elastic) ช่วงแข็งขึ้นด้วยความเครียด (strain hardening) และช่วงอ่อนลงจากการแตกหักเฉพาะจุด (localization softening) พฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตคล้ายกับผลการทดสอบวัสดุเปราะ (brittle material) โดยทั่วไป แต่มีความเครียดเกิดขึ้นมากกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติ ช่วงเส้นตรง คือ ช่วงพฤติกรรมที่หน่วยแรงเพิ่มขึ้นแล้ววัสดุเกิดการเสียรูปแต่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ทันทีหากลดหน่วยแรงลง พฤติกรรมช่วงนี้โครงสร้างอนุภาคภายในวัสดุยังคงเหมือนเดิม ช่วงแข็งขึ้นด้วยความเครียด คือ ช่วงพฤติกรรมที่วัสดุรับหน่วยแรงมากกว่าหน่วยแรงที่พิกัดยืดหยุ่น วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติกซึ่งเมื่อหน่วยแรงลดลงความเครียดหรือการเสียรูปนั้นยังคงอยู่ การทดสอบพอลิเมอร์คอนกรีตจะมีช่วงแข็งขึ้นด้วยความเครียดปรากฏในผลการทดสอบส่วนใหญ่แต่จะมีลักษณะแตกต่างกันตามสัดส่วนผสมของวัสดุขณะเกิดพฤติกรรมนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุ สำหรับในพอลิเมอร์คอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุผสมจะเกิดการวิบัติเฉพาะจุดภายใต้ตัวอย่างทดสอบแต่ตัวอย่างยังคงสามารถรับแรงได้อยู่จนถึงจุดที่หน่วยแรงสูงสุด การวิบัติเฉพาะจุดภายใต้ตัวอย่างทดสอบนี้จะพัฒนาไปเป็นระนาบการวิบัติ (failure plane) ต่อไปหลังจากจุดหน่วยแรงสูงสุด ซึ่งหน่วยแรงจะลดลงอย่างชัดเจน เรียกว่า ช่วงอ่อนลงจากการแตกหักเฉพาะจุด กำลังของตัวอย่างที่ยังคงรับได้หลังจุดสูงสุดของหน่วยแรง (residual strength) เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างรอยแตกของตัวอย่างตามแนวระนาบการวิบัติ พฤติกรรมของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงดัดอธิบายได้โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่กึ่งกลางคาน (P) และการเสียรูปที่กึ่งกลางคาน (Δ) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ลักษณะผลทดสอบโดยทั่วไปคล้ายความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียด สำหรับวัสดุเปราะกราฟจะไม่มีช่วงอ่อนลง ซึ่งแตกต่างจากวัสดุเหนียวซึ่งจะมีช่วงอ่อนลงด้วยความเครียดหลังจากจุดแรงกระทำสูงสุด คุณสมบัติทางกลของตัวอย่างพอลิเมอร์

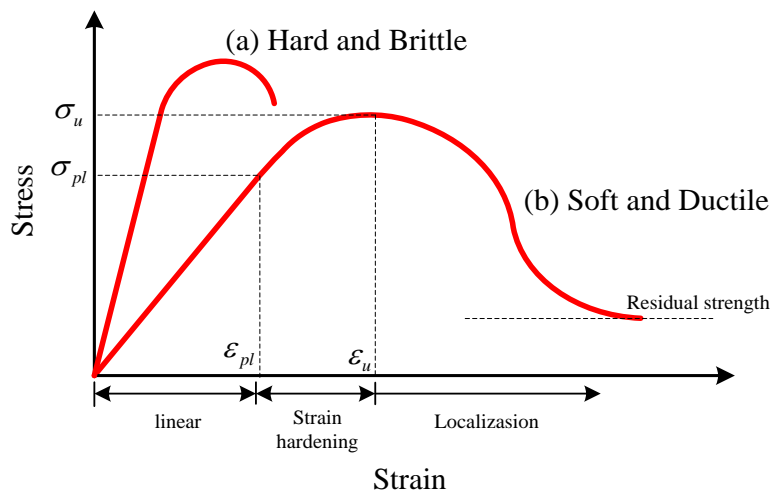
คอนกรีตที่ส่วนผสมต่าง ๆ แสดงได้ในภาคผนวก ก ลักษณะการวิบัติของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงอัดและแรงค้ำแตกต่างกันตามส่วนผสม ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

4.3.1 การวิบัติของพอลิเอสเทอร์พอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงอัด

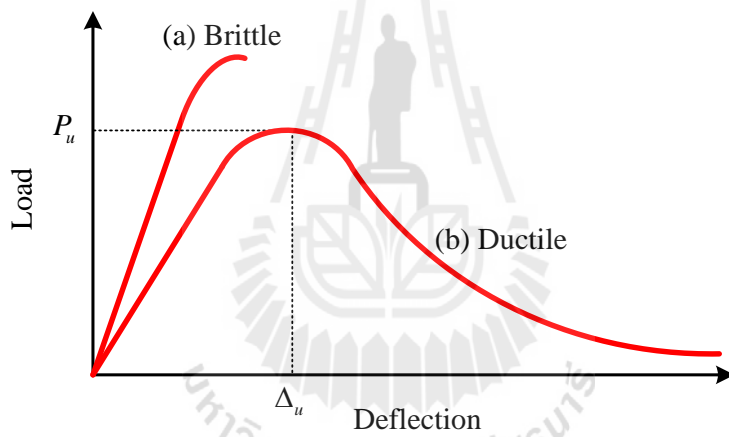
การวิบัติของตัวอย่างพอลิเอสเทอร์พอลิเมอร์คอนกรีตที่พบภายใต้การทดสอบการรับแรงมี 2 แบบ คือ การวิบัติแบบการเฉือน (shear failure) และการวิบัติแบบผสม (combination shear and splitting failure) ลักษณะการวิบัติแต่ละแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ก่อนตัวอย่างภายใต้แรงอัดจะขยายตัวด้านข้าง ในขณะที่คอนกรีตด้านบนและล่างติดกับแท่นเครื่องทดสอบ ก่อนตัวอย่างบริเวณใกล้หัวกดจะไม่สามารถขยายตัวได้เนื่องจากความฝืดของหัวกดจึงทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือนอย่างมากที่บริเวณมุมของก้อนตัวอย่างขณะกด การวิบัติจึงเกิดเป็นแรงแยกและขยายตัวขึ้นเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น จากการสังเกตผลการทดสอบพอลิเมอร์คอนกรีตก่อนตัวอย่างที่สมบูรณ์เรียบและมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูงมากกว่า 2 เท่าจะวิบัติแบบการเฉือนซึ่งจะให้กำลังค่อนข้างสูง การวิบัติแบบผ่าซีกและแบบผสมจะเกิดกับก้อนตัวอย่างที่มีส่วนผสมไม่เหมาะสมเนื้อพอลิเมอร์กับมวลรวมไม่เป็นเนื้อเดียวกันและจะให้กำลังลดลงต่ำกว่าการวิบัติแบบเฉือน

4.3.2 การวิบัติของพอลิเอสเทอร์พอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงค้ำ

การวิบัติของตัวอย่างแบบคานรับแรงค้ำแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ แบบวัสดุเปราะ และแบบวัสดุเหนียว พฤติกรรมแบบวัสดุเปราะวัสดุจะมีลักษณะของความสัมพันธ์ของแรงกระทำและการทรุดตัวที่กึ่งกลางคานคล้ายกับการทดสอบปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต ตัวอย่างทดสอบจะแตกหักทันทีหลังจากน้ำหนักบรรทุกมีค่ามากกว่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเล็กน้อย พฤติกรรมแบบวัสดุเหนียววัสดุจะแสดงพฤติกรรมแบบอ่อนลงด้วยความเครียดอย่างชัดเจนซึ่งจะแตกหักหลังจากเสียรูปมาก พฤติกรรมแบบเหนียวจะพบในตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตผสมเส้นใย การวิบัติของคานคานตัวอย่างทดสอบมีลักษณะเหมือนกันทั้งหมดคือแตกร้าวที่กึ่งกลางคานดังแสดงในรูปที่ 4.7c



รูปที่ 4.5 พฤติกรรมทั่วไปภายใต้แรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีต



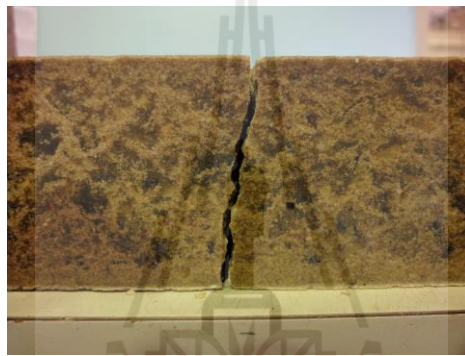
รูปที่ 4.6 พฤติกรรมทั่วไปภายใต้แรงคดแบบคานของพอลิเมอร์คอนกรีต



(a) การวิบัติแบบเฉือน



(b) การวิบัติแบบผสม

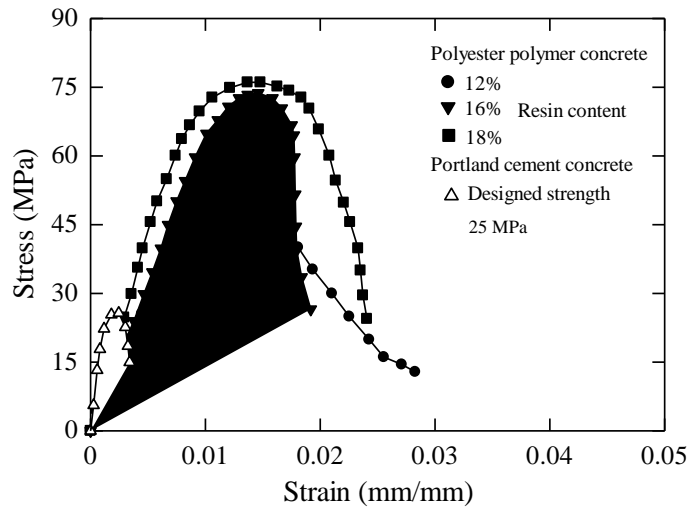


(c) การวิบัติของตัวอย่างภายใต้แรงคด

รูปที่ 4.7 การวิบัติของตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตแบบต่าง ๆ

4.3.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านกำลังและพฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต

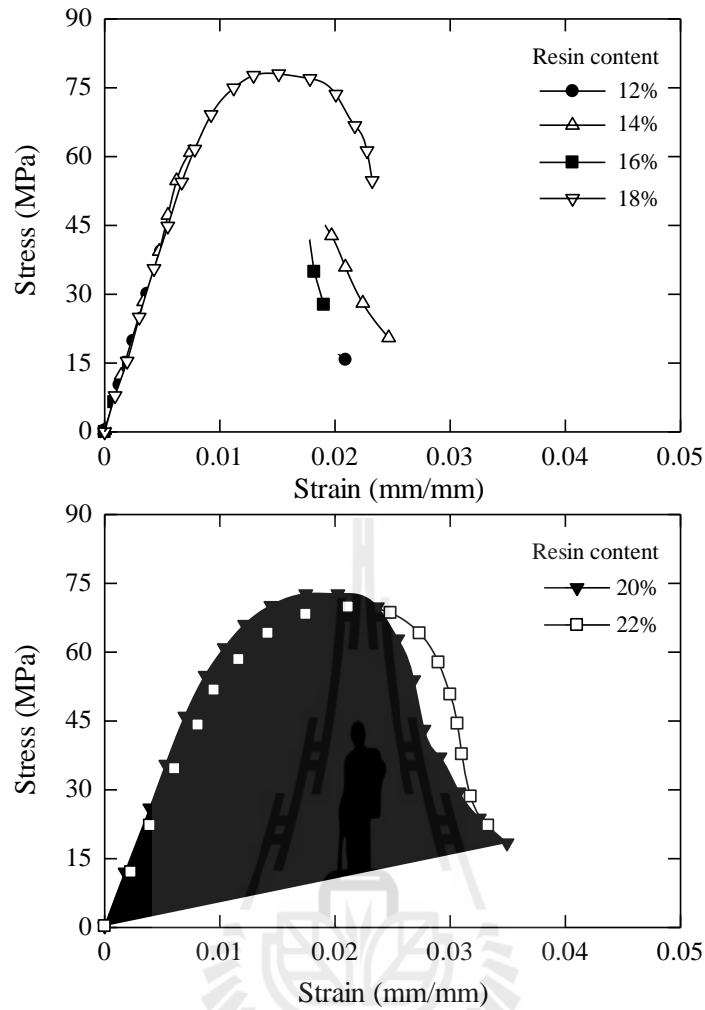
เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 7 วัน และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่า พอลิเมอร์คอนกรีตที่ระยะบ่มเวลาบ่ม 7 วัน มีกำลังอัดและความเครียดที่จุดวิบัติสูงกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน ประมาณ 2.5-3 เท่า และประมาณ 6-7 เท่า ตามลำดับ แต่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติประมาณ 2.3-3.4 เท่า จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์คอนกรีตมีความสามารถในการดูดซึมพลังงานก่อนการวิบัติมากกว่าคอนกรีตปกติสูงมาก ดังจะเห็นได้จากค่าโมดูลัสความเหนียว (Modulus of toughness) ที่สูงกว่าคอนกรีตปกติมาก ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญอีกข้อหนึ่งในการนำไปประยุกต์ใช้ในงาน โครงสร้าง



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตและ
ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต

4.4 ผลของปริมาณเรซิน

เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณเรซินต่าง ๆ และควบคุมตัวแปรอื่น ๆ ให้เหมือนกันสำหรับแต่ละปริมาณเรซินความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่สัดส่วนปริมาณเรซินต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.9 ความแกร่งของพอลิเมอร์คอนกรีตสังเกตได้จากความชันของกราฟ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าความแกร่งมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่สัดส่วนปริมาณเรซินระหว่าง 12 ถึง 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มปริมาณเรซินขึ้นมากกว่า 18 เปอร์เซ็นต์ค่าความแกร่งจะลดลงดังสังเกตได้จากความชันที่ลดลงของกราฟที่ปริมาณเรซิน 20 และ 22 เปอร์เซ็นต์ ค่าหน่วยแรงอัดสูงสุดจะเกิดที่ความเครียดระหว่าง 1.0 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์สำหรับปริมาณเรซินระหว่าง 12 ถึง 18 เปอร์เซ็นต์ โดยความเครียดที่กำลังอัดสูงสุดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเรซิน ความเครียดที่กำลังอัดสูงสุดสำหรับปริมาณเรซินสูงกว่า 18 เปอร์เซ็นต์พบว่ามีความมากกว่า 1.5 เปอร์เซ็นต์ การเพิ่มปริมาณเรซินจะส่งผลต่อการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบอย่างชัดเจน ปริมาณเรซินสูงจะเกิดการเสียรูปมากเพราะ โดยปกติแล้วพอลิเอสเตอ์พอลิเมอร์จะมีการยืดตัว (elongation) ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์เมื่อรับน้ำหนักบรรทุก เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมแล้วมีค่าสูงกว่ามาก เมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุประสานแล้วนั้นค่าการยืดหรือการเสียรูปโดยรวมจึงถูกควบคุมโดยปริมาณเรซินเป็นหลัก



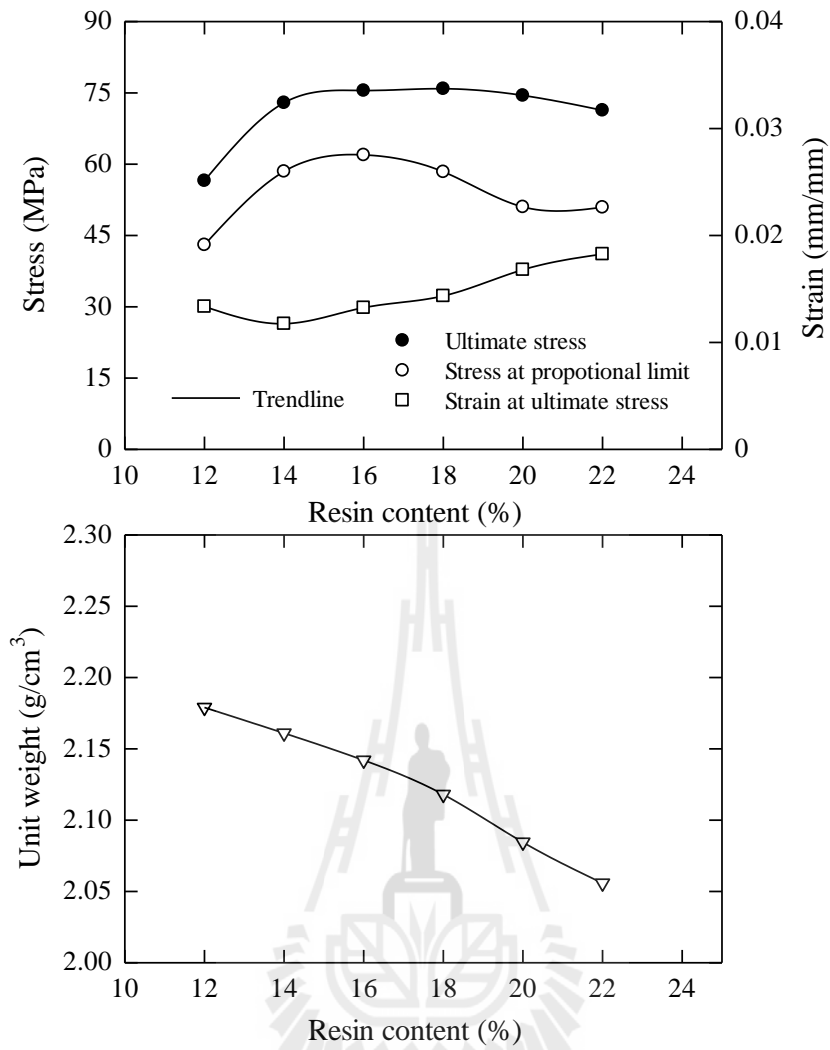
รูปที่ 4.9 พฤติกรรมการรับแรงอัดที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ

ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่น ความเครียดที่กำลังอัดประลัย และหน่วยน้ำหนักที่ประมาณเรซินต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.10 กำลังอัดประลัยและกำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเรซินจนถึงจุดสูงสุดที่ปริมาณเรซินประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นจุดสูงสุดกำลังอัดประลัยและกำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นลดลงอย่างชัดเจนตามปริมาณเรซินที่เพิ่มขึ้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อปริมาณเรซินมากขึ้นพอลิเมอร์เรซินซึ่งเป็นวัสดุประสานมีมากขึ้นทำให้ความหนาของชั้นพอลิเมอร์ที่เคลือบวัสดุมวลรวมมีความหนาเพิ่มขึ้น เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกพอลิเมอร์เรซินจึงเสียดรูปมากขึ้นแต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีความเหนียวมากดังนั้นกำลังอัดจึงเพิ่มขึ้นในช่วงแรก แต่เมื่อปริมาณเรซินมากเกินไปจนจุดเหมาะสมการวิบัติของตัวอย่างจึงเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมกับพอลิเมอร์แทนการวิบัติที่วัสดุประสานจึงทำให้กำลังลดลง ค่ากำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นมีค่า 75 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ของกำลังอัดประลัยที่ปริมาณเรซินน้อยกว่า 18 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อ

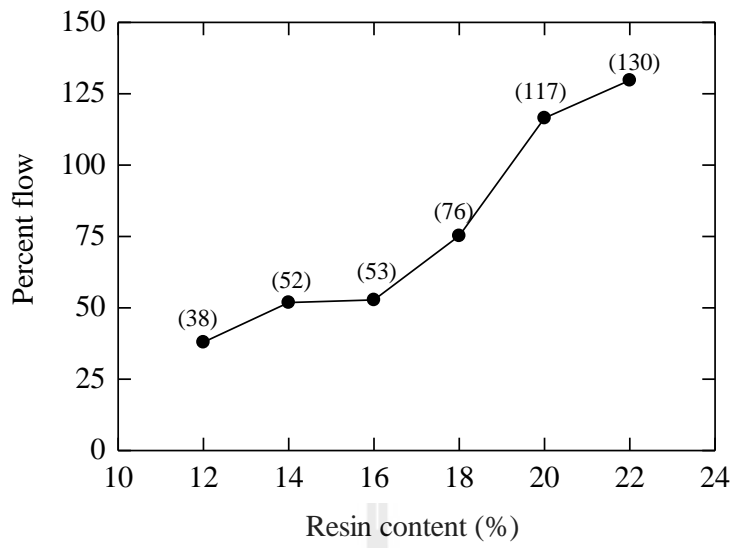
ปริมาณเรซินมากขึ้นกำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นมีค่าลดลงเหลือ 70 เปอร์เซ็นต์ของกำลังอัดประลัย การเปลี่ยนแปลงกำลังอัดคงอธิบายข้างต้นสัมพันธ์กับหน่วยน้ำหนักเชิงปริมาตรที่ลดลงเมื่อปริมาณเรซินเพิ่มขึ้นด้วย เพราะหน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์เรซินต่ำกว่ามวลรวม เมื่อสัดส่วนปริมาณเรซินเพิ่มขึ้น หน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตจึงลดลง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.18 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่ ปริมาณเรซิน 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 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตรวมหรือที่อัตราส่วนพอลิเมอร์เรซินต่อทรายเท่ากับ 1 : 4.6 โดยน้ำหนักซึ่งจะให้ค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 75.9 เมกะปาสกาลและการไหลเท่ากับ 76 เปอร์เซ็นต์

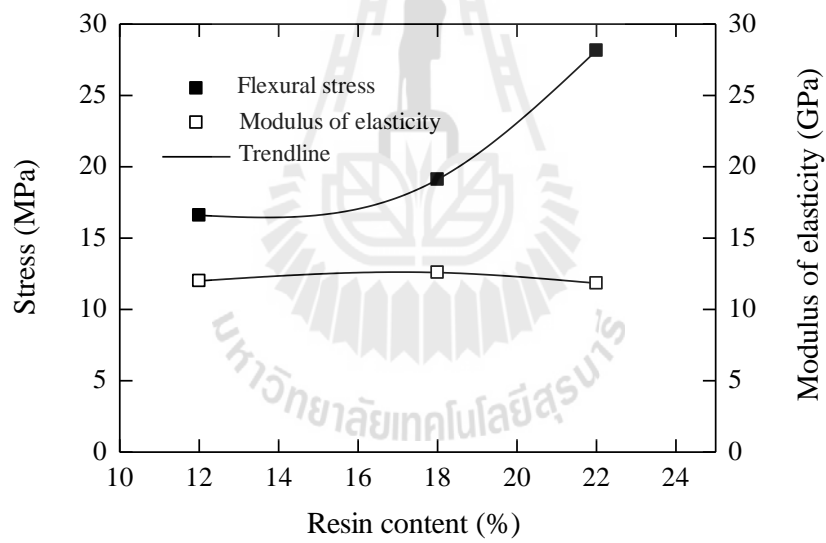
จากผลการทดสอบการรับแรงดัดของตัวอย่างทดสอบแบบคานกำลังรับแรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นแสดงดังรูปที่ 4.12 เมื่อปริมาณเรซินมาก โมดูลัสยืดหยุ่นจะต่ำเพราะพอลิเมอร์เรซินเป็นวัสดุเหนียว เมื่อเพิ่มปริมาณเรซินในส่วนผสมมากขึ้นความเครียดของวัสดุเมื่อรับหน่วยแรงเท่าเดิมย่อมมีค่าสูงขึ้นตาม ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าต่ำเมื่อปริมาณเรซินสูงขึ้น ความเป็นวัสดุอ่อนแต่เหนียว (soft – ductile) ของพอลิเมอร์เรซินจึงส่งผลให้กำลังรับแรงดัดสูงขึ้น ซึ่งแนวโน้มเมื่อปริมาณเรซินสูงขึ้น (มวลรวมน้อยลง) พฤติกรรมการรับแรงดัดของวัสดุผสมพอลิเมอร์คอนกรีตจะมีค่าเข้าใกล้พอลิเมอร์เรซินแข็งมากขึ้น กำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเรซินแต่อย่างไรก็ตามยังคงมีค่าต่ำเพียง 25 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงดัดของพอลิเมอร์เรซิน ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นแสดงจุดเหมาะสมที่ปริมาณเรซินระหว่าง 16 ถึง 18 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีค่าสูงกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ พอลิเมอร์เรซินประมาณ 3.6 เท่า จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณเรซินที่จุดเหมาะสม (18 เปอร์เซ็นต์) มีค่าโมดูลัสการยืดหยุ่นสูงสุดเช่นกัน แต่อย่างไรก็ดีถ้าต้องการค่ากำลังดัดที่สูงขึ้นจะต้องเพิ่มปริมาณเรซินขึ้นด้วย



รูปที่ 4.10 ผลของปริมาณเรซินต่อค่าเฉลี่ยกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่จุดคราก ความเครียดที่ กำลังอัดประลัยและหน่วยน้ำหนัก



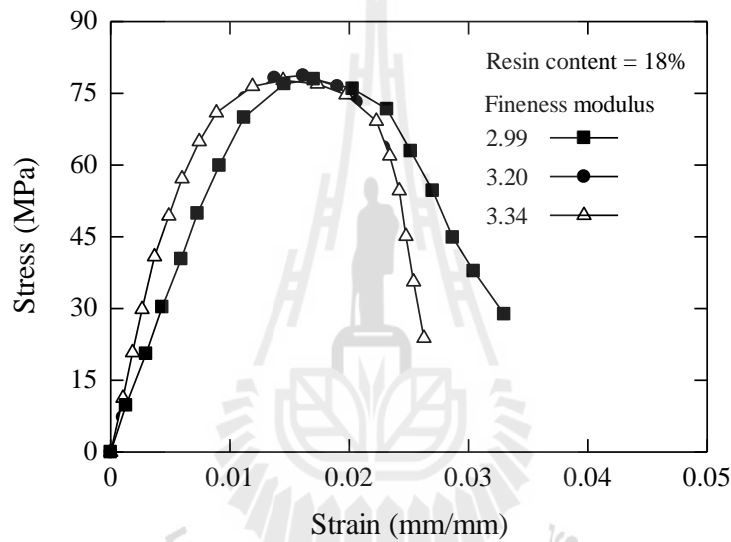
รูปที่ 4.11 ผลของปริมาณเรซินต่อเปอร์เซ็นต์การไหลของพอลิเมอร์ผสมทราย



รูปที่ 4.12 ผลของปริมาณเรซินต่อค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดประลัยและ โมดูลัสยืดหยุ่นของการดัด

4.5 ผลของขนาดคละมวลรวมละเอียด

ผลของขนาดคละมวลรวมละเอียดแสดงผ่านค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมที่แตกต่างกันจำนวน 3 ค่า ดังแสดงในรูปที่ 4.13 สำหรับปริมาณเรซินคงที่เท่ากับ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปริมาณเรซินรวม พอลิเมอร์คอนกรีตที่มีโมดูลัสความละเอียดสูง (มวลรวมมีขนาดคละใหญ่กว่า) จะมีกราฟหน่วยแรงและความเครียดที่มีความชันสูงกว่าที่ปริมาณเรซินเดียวกันซึ่งแสดงถึงความแกร่งของวัสดุที่สูงกว่าด้วย โมดูลัสความละเอียดไม่ส่งผลต่อกำลังอัดสูงสุดและความเครียดที่ กำลังอัดสูงสุดแต่ส่งผลต่อความแกร่งเล็กน้อย พอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายหยาบจะมีความแกร่งสูงกว่าทรายละเอียด



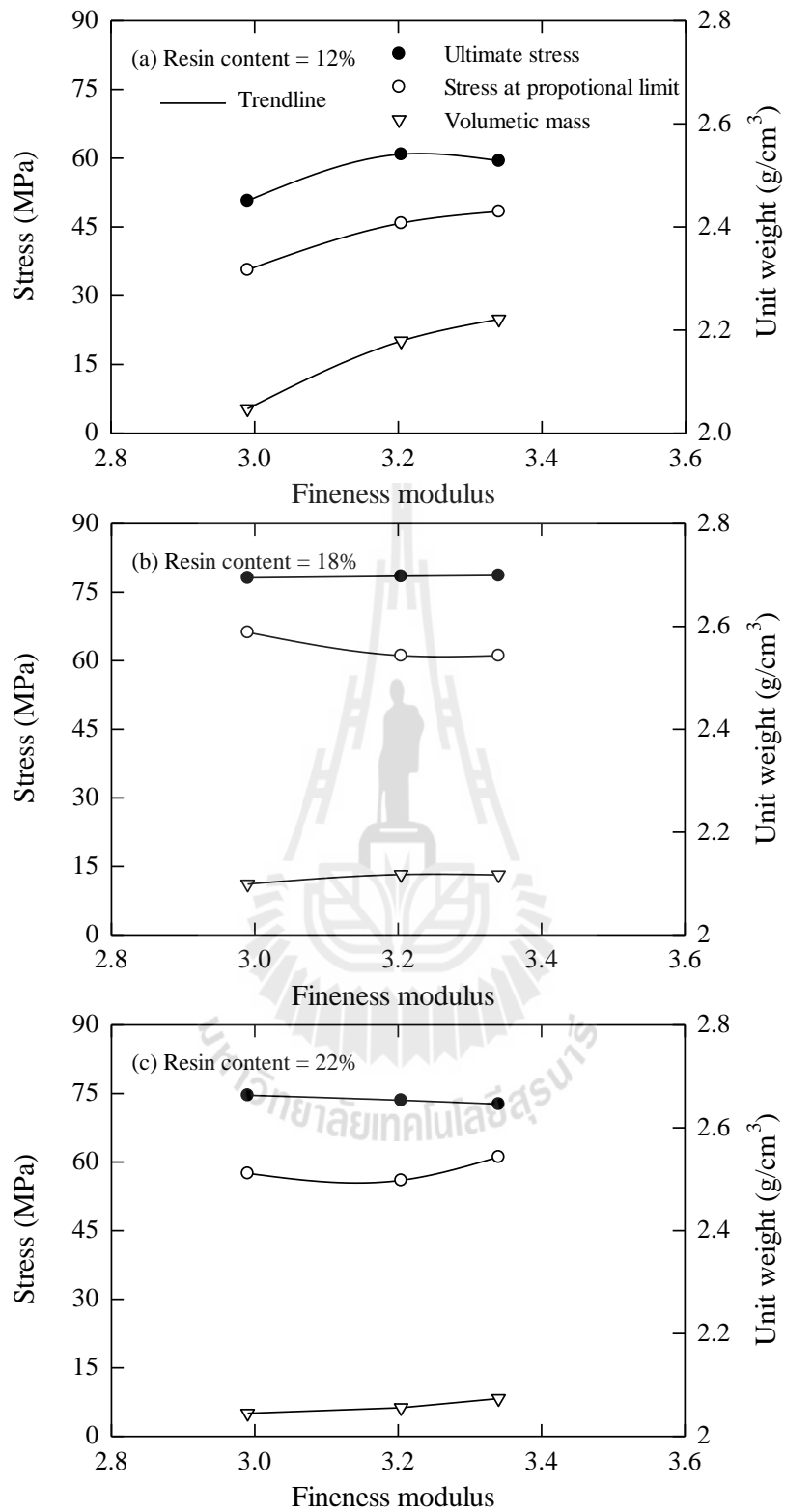
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้การรับแรงอัดที่โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมต่าง ๆ

ผลของขนาดคละมวลรวมละเอียดที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ ต่อค่าเฉลี่ยกำลังอัดประลัย กำลังรับแรงอัดที่พิกัดยืดหยุ่น และหน่วยน้ำหนักแสดงดังรูปที่ 4.14 สำหรับปริมาณเรซิน 12 18 และ 22 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ปริมาณเรซิน 12 เปอร์เซ็นต์ (มวลรวมมากพอลิเมอร์เรซินน้อย) (ดูรูปที่ 4.14a) โมดูลัสความละเอียดมีผลต่อกำลังอัดและหน่วยน้ำหนักมาก กำลังอัดประลัยและกำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นตามโมดูลัสความละเอียด แต่จะเริ่มคงที่เมื่อ โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.20 ที่ปริมาณเรซินเท่ากับ 18 และ 22 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาณมวลรวมน้อยของปริมาณเรซินเพิ่มมากขึ้น) (ดูรูป 4.14b และ 4.14c) โมดูลัสความละเอียดไม่มีผลต่อกำลังอัดเมื่อเทียบกับปริมาณเรซินเท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งโมดูลัสความละเอียดที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อหน่วยน้ำหนักมากนักเมื่อเทียบกับ

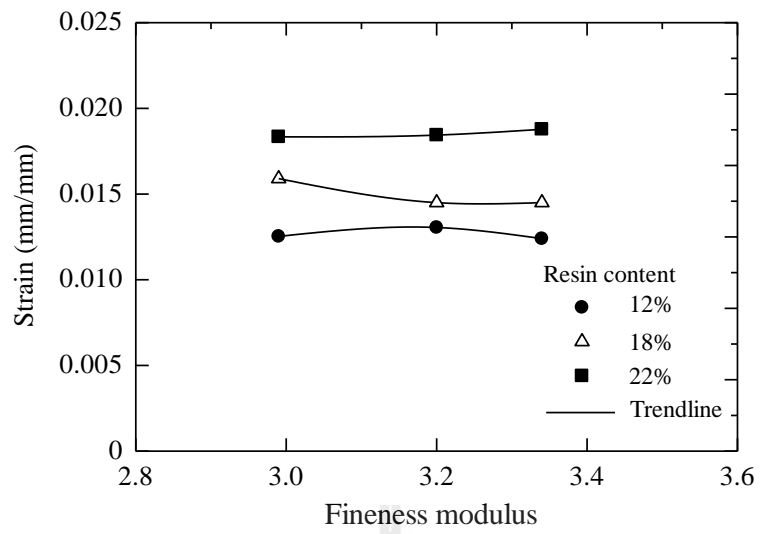
ปริมาณเรซินที่ 12 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีโมดูลัสความเค้นสูงจะมีหน่วยน้ำหนักสูง เพราะมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่าและมีพื้นที่ผิว (specific surface) ต่ำกว่าที่น้ำหนักรวมเท่ากันจึงส่งผลให้ความสามารถในการเทได้ของพอลิเมอร์คอนกรีตดีกว่าด้วย (พื้นที่ผิวมวลรวมมาก ความหนืดของพอลิเมอร์คอนกรีตจะสูง)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

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

ผลของโมดูลัสความเค้นต่อกำลังค้ำของพอลิเมอร์คอนกรีตแสดงดังรูปที่ 4.16 สำหรับปริมาณเรซิน 12 18 และ 22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าโมดูลัสความเค้นมีผลต่อกำลังค้ำค่อนข้างมาก ค่ากำลังค้ำจะแปรผกผันกับโมดูลัสความเค้น (โมดูลัสความเค้นเพิ่มกำลังรับแรงค้ำมีแนวโน้มลดลง) ตัวอย่างเช่นที่ปริมาณเรซินเท่ากับ 18 เปอร์เซ็นต์ กำลังค้ำลดลงตามโมดูลัสความเค้นที่เพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 4.16b) แต่อย่างไรก็ตามแต่ละปริมาณเรซินผลทดสอบแสดงจุดเหมาะสมที่โมดูลัสความเค้นเท่ากับ 3.20 โมดูลัสยืดหยุ่นของการค้ำมีผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนโมดูลัสความเค้นของมวลรวมน้อยมากดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบซึ่งมีค่าค่อนข้างคงที่สำหรับทุกปริมาณเรซิน

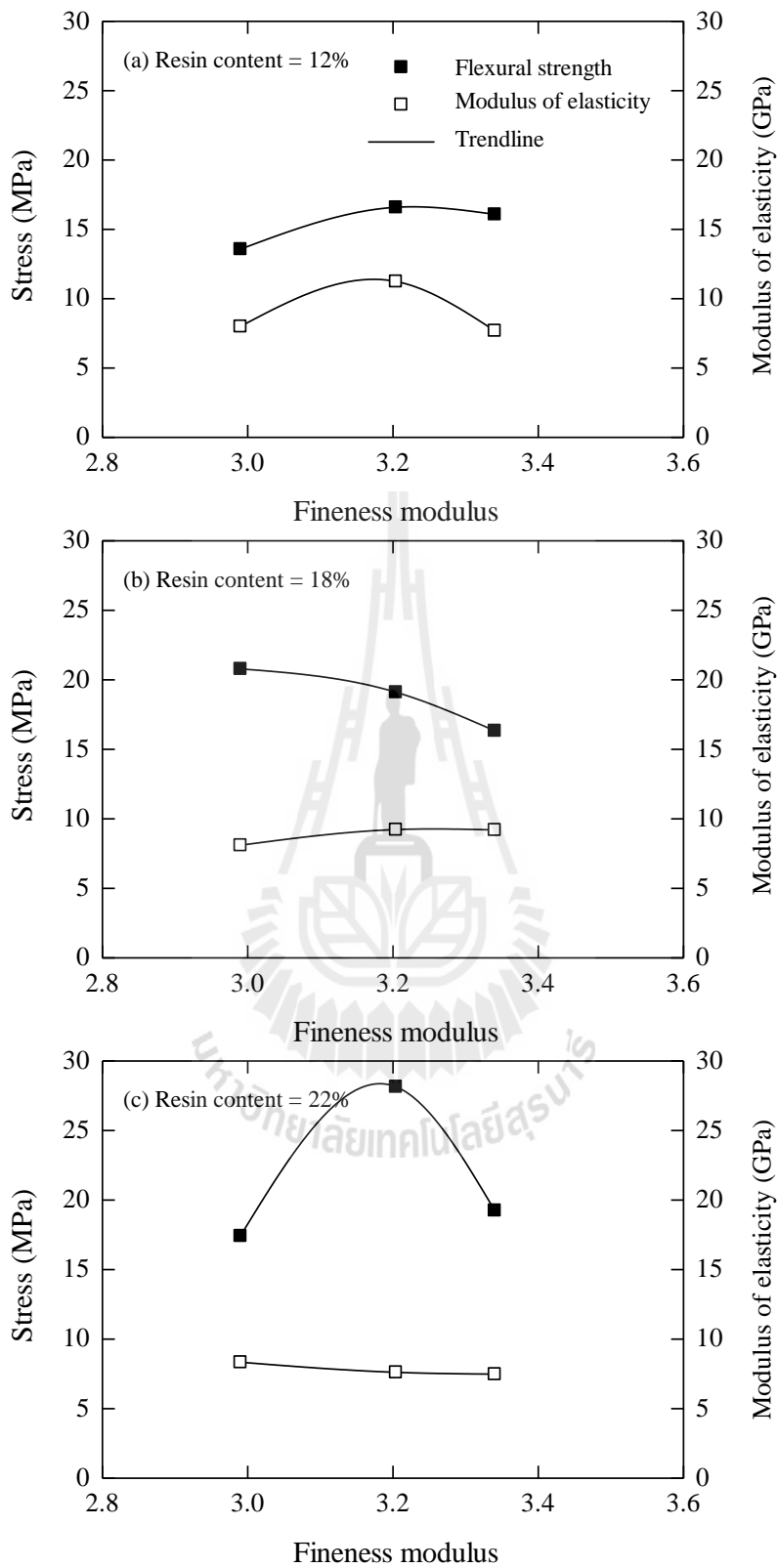


รูปที่ 4.14 ผลของโมดูลัสความละเอียดต่อค่าเฉลี่ยของกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นและหน่วยน้ำหนักที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ



รูปที่ 4.15 ผลของโมดูลัสความละเอียดต่อค่าเฉลี่ยของความเครียดที่กำลังอัดประลัยสำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ

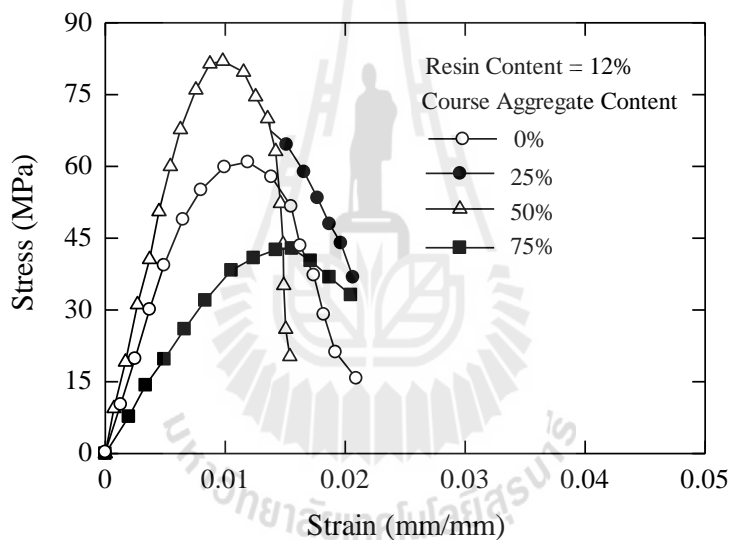




รูปที่ 4.16 ผลของ โมดูลัสความละเอียดต่อค่าเฉลี่ยกำลังตัดและ โมดูลัสยืดหยุ่นที่ปริมาณ เรซินต่าง ๆ

4.6 ผลของปริมาณมวลรวมหยาบ

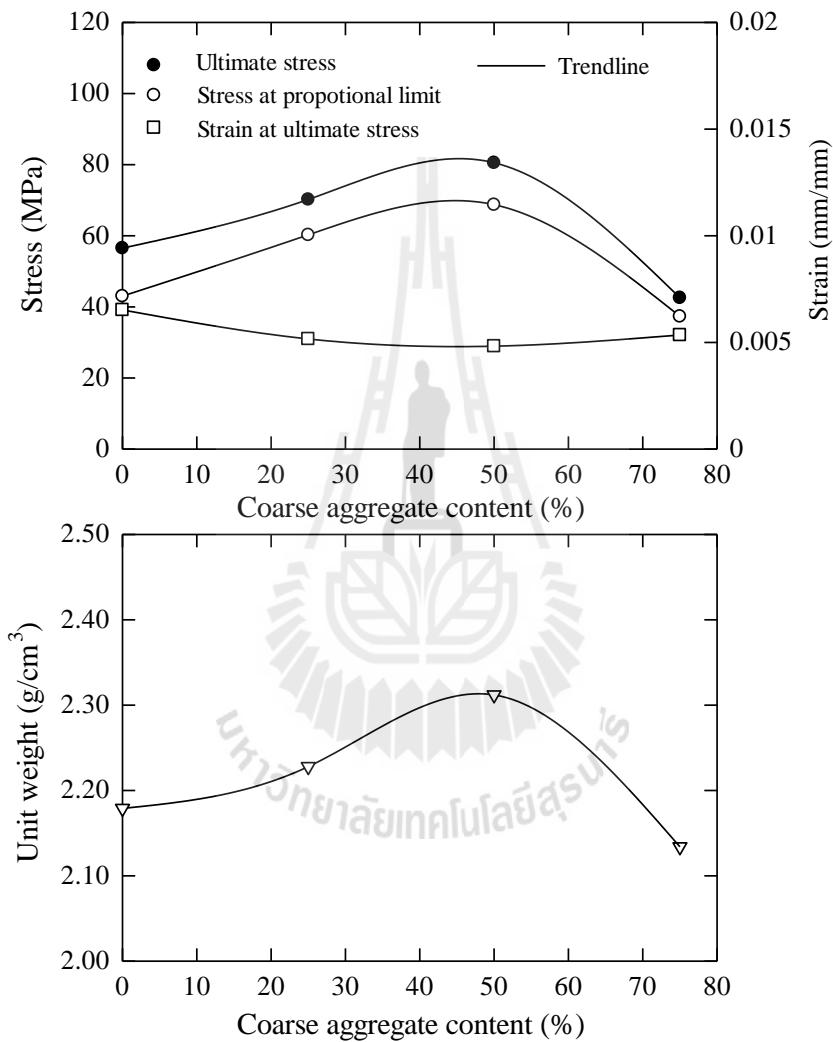
มวลรวมหยาบส่งผลต่อพฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดของพอลิเมอร์คอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4.17 เมื่อใช้ปริมาณเรซินคงที่เท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตรวม และใช้มวลรวมหยาบแทนที่มวลรวมละเอียดระหว่าง 0 ถึง 75 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด กำลังอัดและความแกร่งของพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณมวลรวมหยาบที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต (ปริญญาและชัย, 2552) โดยจุดเหมาะสมคือปริมาณมวลรวมหยาบ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลทั้งหมดจะให้อัดเท่ากับ 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 หน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตมีการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับกำลังอัดประลัยของพอลิเมอร์คอนกรีต โดยที่

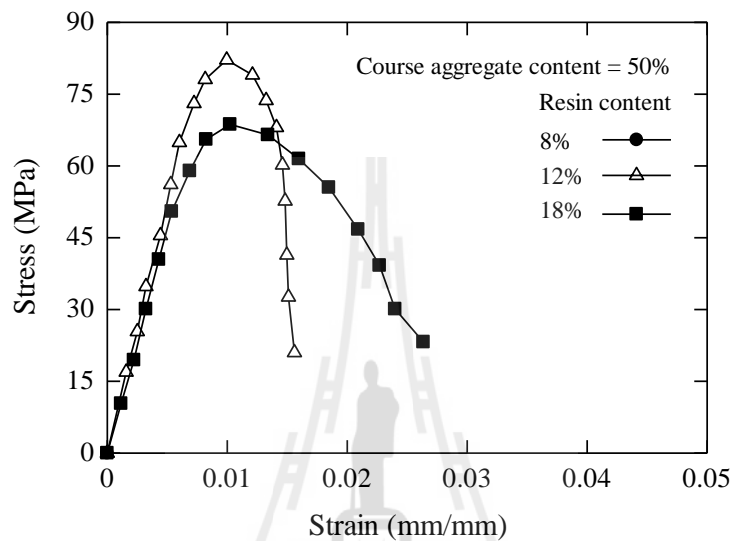
หน่วยน้ำหนักมากจะให้กำลังอัดสูงและหน่วยน้ำหนักน้อยจะให้กำลังอัดประลัยต่ำกว่า ที่เป็นเช่นนี้ เพราะปริมาณมวลรวมหยาบส่งผลต่อการเทเข้าแบบอย่างมาก ที่ปริมาณเรซินคงที่เท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด ปริมาณมวลรวมหยาบเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมทั้งหมด พอลิเมอร์คอนกรีตจะมีความหนาแน่นมากที่สุดและมีกำลังอัดสูงสุดด้วยซึ่งเท่ากับ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



รูปที่ 4.18 ผลของปริมาณมวลรวมหยาบต่อกำลังรับแรงอัดประลัย กำลังรับแรงอัดที่จุดครากและหน่วยน้ำหนัก

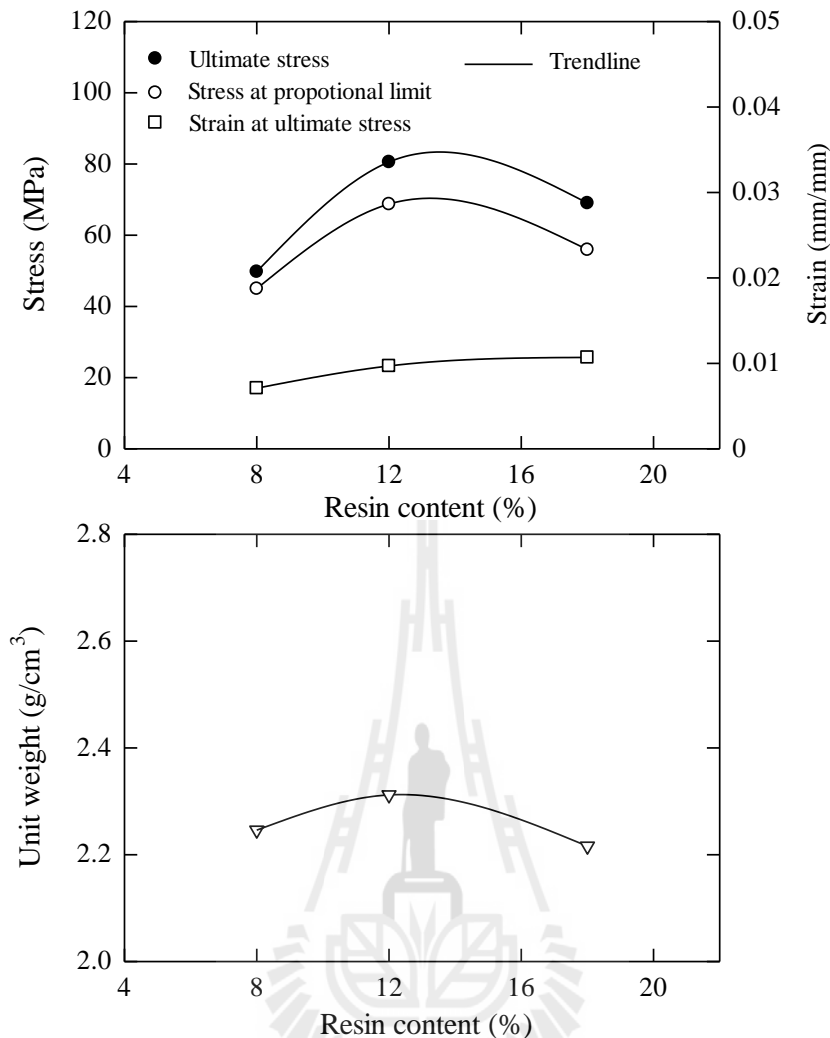
เมื่อพิจารณาปริมาณมวลรวมหยาบคงที่เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด ปริมาณเรซินที่เปลี่ยนแปลงยังส่งผลต่อพฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดที่แตกต่างกันดัง

แสดงในรูปที่ 4.19 ปริมาณเรซินลดลงส่งผลให้การยึดประสานระหว่างมวลรวมลดลง กำลังอัดและความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอนกรีตจึงลดต่ำลงด้วย อย่างไรก็ตามปริมาณเรซินสูงตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตไม่ได้มีกำลังอัดสูงสุด แต่จุดเหมาะสมของกำลังอัดและความแข็งแรงยังขึ้นอยู่กับความแน่นของพอลิเมอร์คอนกรีตด้วย ดังจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณเรซิน 12 เปอร์เซ็นต์ มีกำลังอัดประลัยและความแข็งแรงสูงสุด



รูปที่ 4.19 พฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบคงที่เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมละเอียดและมีปริมาณเรซินต่าง ๆ

ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่น ความเครียดที่กำลังอัดประลัย และหน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีปริมาณมวลรวมหยาบคงที่เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมทั้งหมดและปริมาณเรซินต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.20 กำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่น และหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามปริมาณเรซินจนถึงจุดเหมาะสมระหว่าง 12 ถึง 14 เปอร์เซ็นต์หลังจากนั้นมีค่าลดลง ความสัมพันธ์ดังกล่าวคล้ายกับรูปแบบของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่ผสมมวลรวมหยาบตามที่ได้กล่าวถึงแล้วในหัวข้อที่ 4.4 และ 4.5 อัตราส่วนกำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นต่อกำลังอัดประลัยมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยซึ่งแสดงถึงวัฏศุนีพฤติกรรมเป็นแบบแข็งขึ้นตามความเครียดที่กว้างขึ้น โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.31 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่ตำแหน่งปริมาณเรซินเหมาะสมซึ่งสอดคล้องกับในกรณีที่ไม่ผสมมวลรวมหยาบ (ดูรูปที่ 4.10) หน่วยน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด กล่าวคือกำลังอัดสูงหน่วยน้ำหนักมาก ปริมาณเรซินไม่ส่งผลต่อความเครียดที่กำลังอัดสูงสุดมากนักโดยความเครียดที่กำลังอัดประลัยเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยตามปริมาณเรซิน โดยมีค่าระหว่าง 0.8 ถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์

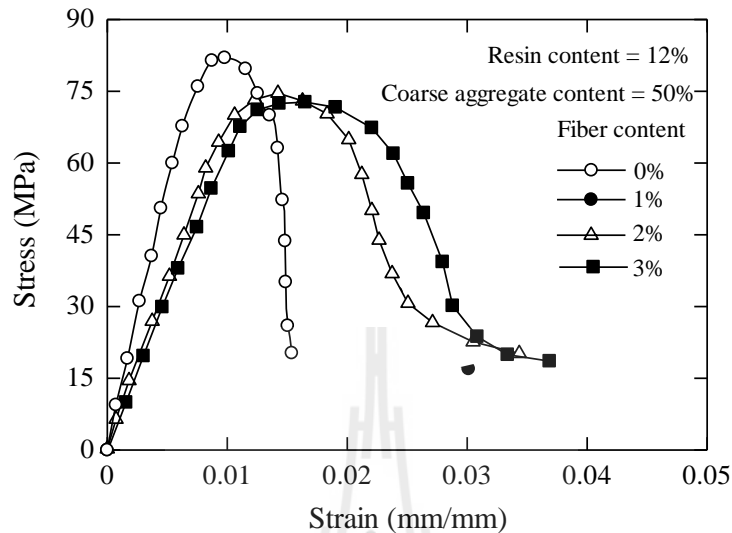


รูปที่ 4.20 ผลของปริมาณเรซินต่อกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่น ความเครียดที่กำลังอัดประลัยและหน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณมวลรวมหายบคงที่เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมทั้งหมด

4.7 ผลของปริมาณเส้นใย

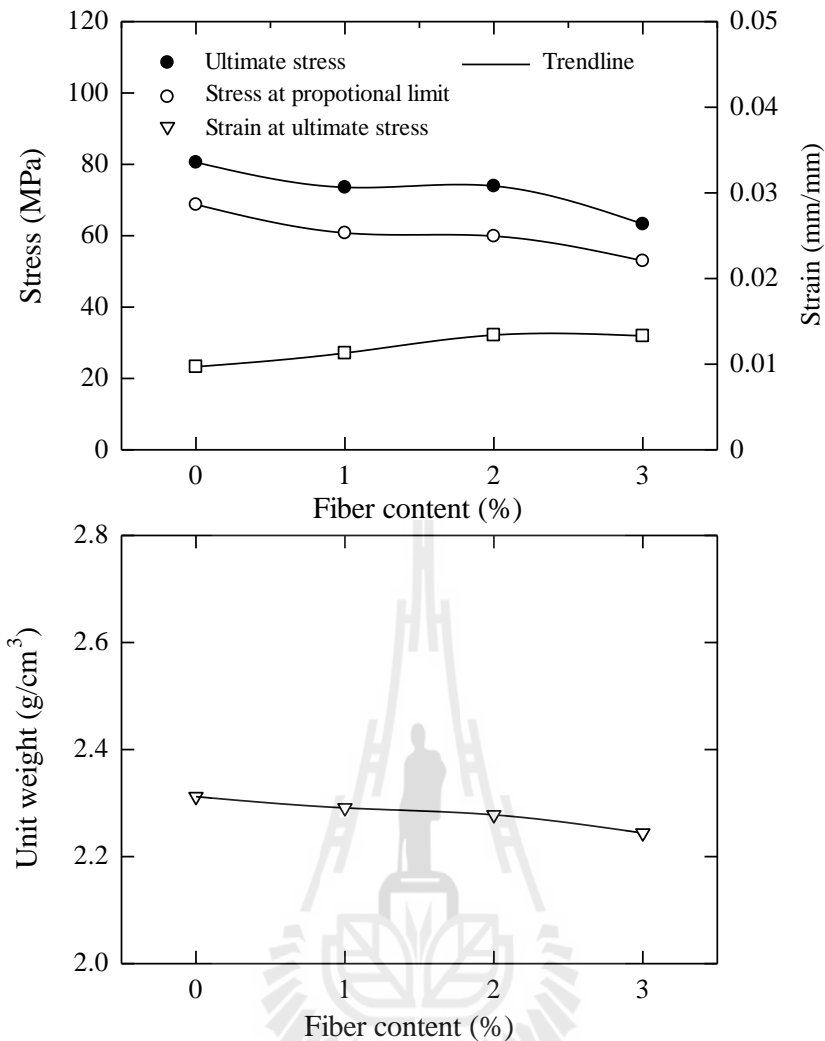
เมื่อเพิ่มเส้นใยแก้วลงในส่วนผสมของพอลิเมอร์คอนกรีตส่งผลต่อพฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดดังแสดงในรูปที่ 4.21 ความแรงของวัสดุมีค่าลดลงเมื่อผสมเส้นใยแต่วัสดุจะมีพฤติกรรมที่เหนียวขึ้นและวัสดุสามารถดูดซับพลังงานได้ดีกว่าเดิม (โมดูลัสความแข็งแรงสูงขึ้น) จากผลการทดสอบปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อกำลังอัดเล็กน้อยโดยกำลังอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตผสมเส้นใยมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ปริมาณเส้นใยเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักพอลิเมอร์คอนกรีตรวม

อย่างไรก็ตามกำลังอัดเฉลี่ยของพอลิเมอร์คอนกรีตผสมเส้นใยจะลดลงจากเดิม (ซึ่งไม่ผสมเส้นใย) ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.21 พฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบคงที่เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมละเอียดและมีปริมาณเส้นใยต่าง ๆ

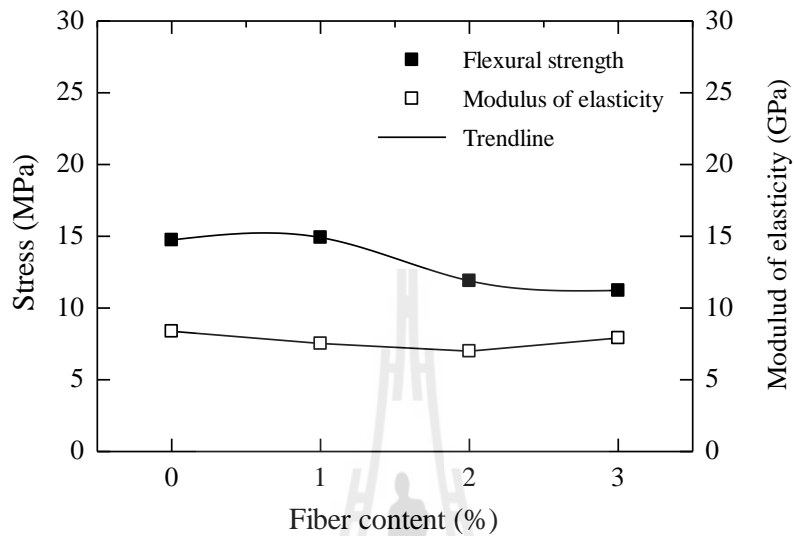
ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดเฉลี่ย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่น ความเครียดที่กำลังอัดเฉลี่ย และหน่วยน้ำหนัก ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณเส้นใยต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.22 กำลังอัดเฉลี่ย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่นและหน่วยน้ำหนักลดลงตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น กำลังของพอลิเมอร์คอนกรีตขึ้นอยู่กับความสามารถในการเทเข้าแบบและความแน่นของการบดอัดแต่ละชั้น พอลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมเส้นใยที่ปริมาณเรซินเท่าเดิมจะมีความสามารถในการเทได้ลดลงเพราะเส้นใยแก้วมีพื้นที่ผิวมากคล้ายกับมวลรวมละเอียดเมื่อผสมกับเรซินซึ่งมีความหนืดสูงกว่าน้ำถึง 400 เท่า จึงเทเข้าแบบได้ไม่แน่นเท่าเดิมซึ่งส่งผลให้กำลังอัดและหน่วยน้ำหนักลดลง อย่างไรก็ตามผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ (Sett and Vipulanandan, 2002) ที่ผ่านมาซึ่งชี้ให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีตผสมเส้นใยอาจเพิ่มขึ้นหรืออาจลดลงตามชนิดของเส้นใยและกระบวนการเตรียมตัวอย่างที่อาจต้องใช้วิธีที่แตกต่างกัน เส้นใยที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้มีความยาวค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ซึ่งความยาวของเส้นใยนี้ส่งผลต่อความสามารถในการเทเข้าแบบ และความแน่นของตัวอย่างอย่างมากดังจะเห็นได้จากเมื่อปริมาณเส้นใยแก้วเพิ่มขึ้นหน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์เรซินกลับลดลงอย่างชัดเจน



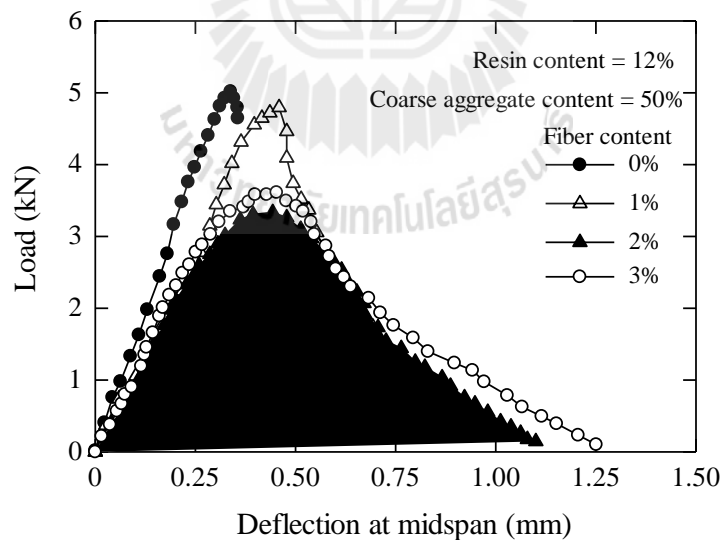
รูปที่ 4.22 ผลของปริมาณเส้นใยต่อค่าเฉลี่ยกำลังอัดประลัย กำลังอัดที่พิกัดยืดหยุ่น ความเครียดที่กำลังอัดประลัยและหน่วยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ปริมาณมวลรวมหยาบคงที่เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมทั้งหมด

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการดัดแบบคานค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดของพอลิเมอร์คอนกรีตผสมเส้นใยก็ลดลงตามปริมาณเส้นใยเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 4.23 แต่โมดูลัสยืดหยุ่นของการดัดมีค่าค่อนข้างคงที่แม้จะเพิ่มปริมาณเส้นใย อย่างไรก็ตามการเพิ่มเส้นใยในพอลิเมอร์คอนกรีตยังคงมีประโยชน์เมื่อต้องการพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีความเหนียวเพิ่มขึ้น (โมดูลัสความแข็งแรงสูง) หรือมีกำลังคงค้างหลังจากจุดสูงสุด ซึ่งเหมาะกับโครงสร้างสำหรับต้านทานแรงกระแทกหรือสั่นสะเทือน ดังแสดงได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเสียรูปที่ตำแหน่งกลางคานของการทดสอบการรับแรงดัดแบบคานในรูปที่ 4.24 จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใยมีพฤติกรรมแบบวัสดุเปราะอย่างชัดเจน โดยไม่สามารถรับน้ำหนัก

บรรทุกได้หลังจากน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ซึ่งต่างกับตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมเส้นใยใช้อย่างชัดเจนพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมเส้นใยมีกำลังค้ำในช่วงการอ่อนลงจนมีการเสีรูปที่กึ่งกลางคานมากกว่า 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของกำลังค้ำและโมดูลัสยืดหยุ่นที่ปริมาณเรซินต่าง ๆ



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเสีรูปที่กึ่งกลางคานของการทดสอบการรับแรงค้ำแบบคานที่ปริมาณเส้นใยต่าง ๆ

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนส่วนผสมต่าง ๆ ต่อพฤติกรรมและสมบัติทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีต เพื่อจะได้ทราบส่วนผสมเหมาะสมของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ปริมาณพอลิเอสเตอร์ที่น้อยที่สุด แต่มีอัตราส่วนของกำลังต่อความแข็งแรงสูงสุด การทดสอบทำโดยการแปรผันปริมาณเรซิน ขนาดคละมวลรวมละเอียด ปริมาณมวลรวมหยาบและปริมาณเส้นใย ซึ่งจากผลการศึกษาค้นคว้าสรุปที่สำคัญดังนี้

5.1 สรุปผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

5.1.1) สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่ผสมมวลรวมหยาบในการรองรับแรงอัดและแรงคัตนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกปริมาณเรซินที่ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักรวมของพอลิเมอร์คอนกรีต โดยที่สัดส่วนนี้มีกำลังอัดและความสามารถในการเทได้ ซึ่งเหมาะกับการใช้งาน มีปริมาณเรซินต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 4.6 โดยน้ำหนัก กำลังอัดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 75.8 เมกะปาสคาล

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

5.1.3) การศึกษาพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงอัดและแรงคัตพบว่าพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงกดอัดนั้น จะสามารถอธิบายพฤติกรรมได้ 3 ช่วง โดยช่วงแรกคือช่วงเส้นตรง ช่วงที่ 2 คือช่วงแข็งขึ้นด้วยความความเครียด และช่วงที่ 3 คือช่วงอ่อนจากการแตกหักเฉพาะจุด ซึ่งกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของพอลิเมอร์คอนกรีตอยู่ที่ 75.8 เมกะปาสคาล ค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่พิกัดยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 58.4 เมกะปาสคาลและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 20 กิกะปาสคาลที่อายุบ่ม 7 วัน ลักษณะการวิบัติเป็นแบบเนือมนราบซึ่งมีลักษณะการวิบัติเช่นเดียวกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติ พฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้แรงคัตมีพฤติกรรมแบบวัสดุเปราะ คล้ายกับการทดสอบปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตสำหรับตัวอย่างที่ไม่ผสมเส้นใย ตัวอย่างทดสอบจะแตกหักทันทีหลังจากน้ำหนัก

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

5.1.4) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 7 วัน มีกำลังอัดและความเครียดที่จุดวิบัติสูงกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต (กำลังอัดออกแบบ 25 เมกะปาสกาล) ที่อายุบ่ม 28 วัน ประมาณ 2.5-3 เท่า และประมาณ 6-7 เท่า ตามลำดับ แต่พอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตประมาณ 2.3-3.4 เท่า

5.1.5) การศึกษาผลกระทบของการเสริมเส้นใยต่อพฤติกรรมทางกล และคุณสมบัติทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตพบว่าเมื่อเพิ่มเส้นใยแก้วลงในส่วนผสมพอลิเมอร์คอนกรีต ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดและความแกร่ง กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์คอนกรีตจะสามารถดูดซับพลังงาน(โมดูลัสความแข็งแรงสูงชัน) ได้ดีกว่า โดยค่ากำลังอัดสูงสุดของพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมเส้นใยแก้วจะพบที่ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักพอลิเมอร์คอนกรีตรวม

5.1.6) ปัจจัยที่ควบคุมกำลังของพอลิเมอร์คอนกรีต ที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบส่วนผสมของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตประกอบด้วย

ปริมาณพอลิเมอร์เรซิน มีผลโดยตรงกับกำลังอัดและกำลังดัด ปริมาณพอลิเมอร์เรซินมากส่งผลต่อกำลังอัดที่เปลี่ยนแปลงแบบแสดงจุดเหมาะสม ปริมาณเรซินมากพอลิเมอร์คอนกรีตจะมีความแกร่งลดลง

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

ปริมาณมวลรวมหยาบสามารถใช้ทดแทนมวลรวมละเอียดเพิ่มกำลังอัดและความแกร่งของพอลิเมอร์คอนกรีต และลดราคาพอลิเมอร์คอนกรีตลงได้เมื่อใช้ในปริมาณเหมาะสม ผลของการเพิ่มปริมาณมวลรวมหยาบแสดงจุดเหมาะสมแบบโค้งคว่ำ

ปริมาณเส้นใยสามารถเพิ่มความเหนียวภายใต้การรับแรงดัด ได้ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบจากงานวิจัยอื่น ๆ แต่เส้นใยจะลดความสามารถในการทะลุเข้าแบบหล่อคอนกรีตอย่างมาก หน่วยน้ำหนักของตัวอย่างลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยซึ่งอาจมาจากน้ำหนักของเส้นใยน้อยกว่าเรซินและมวลรวม และการบดอัดตัวอย่างทำได้ประสิทธิภาพน้อยลงจากการบวมของปริมาณเส้นใยเมื่อผสมเรซิน

5.2 ข้อเสนอแนะการใช้งาน

5.2.1) การศึกษาคุณสมบัติทางกลของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตนี้เป็นการศึกษาโดยใช้ชนิดของพอลิเมอร์เรซินเพียงชนิดเดียวซึ่งใช้พอลิเมอร์เรซินชนิด Isophthalate อย่างไรก็ตามสำหรับพอลิเมอร์เรซินชนิดอื่นๆ ควรมีการทดสอบเพิ่มเติม

5.2.2) การเสริมเส้นใยในพอลิเมอร์คอนกรีตสามารถช่วยเพิ่มความเหนียวของวัสดุหลังจุดวิบัติได้อย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ดีการเตรียมตัวอย่างวัสดุทั้งในการทดสอบมักเกิดปัญหาในขั้นตอนการนำเส้นใยเข้าผสมกับเรซินและมวลรวม วัสดุผสมมักแยกตัวและเทเข้าแบบได้ไม่ดีนัก การแก้ไขอาจทำได้โดยการเพิ่มเรซินให้มากกว่าปริมาณเดิม การเสริมเส้นใยในพอลิเมอร์คอนกรีตจำเป็นต้องปรับสัดส่วนผสมให้เหมาะสมกับความสามารถในการเทเข้าแบบของวัสดุผสม การเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงค้ำในการการวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ซึ่งค่อนข้างมีปัญหาในการเทวัสดุผสมเส้นใยเข้าแบบให้ได้การกระจายตัวของเส้นใยที่สม่ำเสมอ ดังนั้นในการวิจัยเพิ่มเติมอาจมีการเพิ่มขนาดของตัวอย่างทดสอบเพื่อลดผลจากการเทเข้าแบบได้ไม่ดีของตัวอย่างทดสอบขนาดเล็ก



เอกสารอ้างอิง

- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตไทย.
- วิไลพร โสคติธรรมรักษ์. (2540). การทำพอลิเมอร์คอนกรีตจากพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิริชัย ขำสุวรรณ และต่อศักดิ์ ศรีสกุลรัตน์. (2547). คอนกรีตพอลิเมอร์. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม. 5(2): 15-20.
- 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 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)**.
- Cangzhou Innovation Metalwork Co., L. (2012). **Polymer Drainage Channel** [Online]. Available: <http://www.made-in-china.com/showroom/stamping-part/product-detailsojQyVrlBWg/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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Tomasulo, K. (2009). **Polycon Promotes Green Paving Solution** [Online]. Available: <http://www.ecohomemagazine.com/news/polycon-promotes-greener-paving-solution.aspx>
- Vipulanandan, C., and Dharmarajan, N. (1987). Flexural behavior of polyester polymer concrete. **Cement and Concrete Research**. 17: 219-230.
- 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

สมบัติทางกลของตัวอย่างพอลิเมอร์คอนกรีตที่ส่วนผสมต่าง ๆ
ภายใต้แรงอัดและแรงดัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตาราง ก.1 สมบัติทางกลสำหรับศึกษาผลของปริมาณเรซินต่อกำลังอัด

SAMPLE ID	Properties	Sample No.						\bar{X}	SD
		1	2	3	4	5	6		
G2B12	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
G2B14	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
G2B14	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
G2B14	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
G2B14	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
G2B14	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.2 สมบัติทางกลสำหรับศึกษาผลของขนาดมวลรวมละเอียดต่อกำลังอัด

SAMPLE ID	Properties	Sample No.						\bar{X}	SD
		1	2	3	4	5	6		
G3A12	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
G3A18	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
G3A22	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
G3B12	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
G3B18	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
G3B22	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
G3C12	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
G3C18	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
G3C22	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.3 สมบัติทางกลสำหรับศึกษาผลของปริมาณมวลรวมหยาบต่อกำลังอัด

SAMPLE ID	Properties	Sample No.						\bar{X}	SD
		1	2	3	4	5	6		
G4B75R12	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
G4B50R8	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
G4B50R12	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
G4B50R18	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
G4B25R12	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.4 สมบัติทางกลสำหรับศึกษาผลของปริมาณเส้นใยต่อกำลังอัด

SAMPLE ID	Properties	Sample No.						\bar{X}	SD
		1	2	3	4	5	6		
G5B50F1	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
G5B50F2	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
G5B50F3	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.5 สมบัติทางกลสำหรับศึกษาผลของขนาดมวลรวมละเอียดต่อกำลังค้ำ

SAMPLE ID	Properties	Sample No.			\bar{X}	SD
		1	2	3		
G6A12	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
G6A18	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
G6A22	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
G6B12	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
G6B18	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
G6B22	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
G6C12	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
G6C18	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
G6C22	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.6 สมบัติทางกลสำหรับศึกษาผลของปริมาณเส้นใยต่อกำลังตัด

SAMPLE ID	Properties	Sample No.			\bar{X}	SD
		1	2	3		
G7B50F1	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
G7B50F2	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
G7B50F3	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



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

นันทพร กาญจนวัฒนาวงศ์ และสิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2554). ผลงานเรซินและมวลรวมละเอียดต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีต. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16, 18-20 พฤษภาคม 2554, พัทยา จ.ชลบุรี.

นันทพร กาญจนวัฒนาวงศ์, จิระยุทธ สืบสุข และสิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2555). ผลงานขนาดมวลรวมต่อกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีต. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 17, 9-11 พฤษภาคม 2554, อ.เมือง จ.อุตรธานี.



ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ-สกุล นายสิทธิชัย แสงอาทิตย์
Mr. Sittichai Seangatith
2. ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์
3. สถานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
E-mail: sitichai@sut.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

Ph.D. in Civil Engineering (1997), University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, USA

M.Eng. in Civil Engineering (1993), University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, USA

B.Eng. in Civil Engineering (1990), Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญ

Structural Engineering - Experimental and Applied Mechanics on Civil Engineering Fiber Reinforced Plastic Composite Materials and Structures, Reinforced Concrete, Masonry, and Steel. Finite Element Analysis.

6. ผลงานทางวิชาการ (ย้อนหลัง 3 ปี 2552-2554)

6.1 บทความวิจัย

1. หวังแก้ว บุญสวน สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และสงวน วงษ์ชวลิตกุล “พฤติกรรมและคุณสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบฟัลทรอดที่ผลิตในประเทศไทยภายใต้การอัด การเหือน และการตัด ,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, นครราชสีมา, 13-15 พฤษภาคม 2552. เล่มที่ 4 หน้า 1625-1632.
2. จักขดา ชำรงวุฒิ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และหวังแก้ว บุญสวน “TUBED CONCRETE COLUMN หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่าและสมการออกแบบของเสาเชิงประกอบ,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, นครราชสีมา, 13-15 พฤษภาคม 2552. เล่มที่ 6 หน้า 1931-1937.
3. Duangjaras, C., Seangatith, S. and Apichatvullop, A., “Failure Characteristics of Full Depth Precast Slabs with Loop Joints,” The Fourteenth National Convention on Civil Engineering, Nakhon Ratchasima, Thailand, May 13-15, 2009. Vol. 6, pp. 2275-2279.

4. Seangatith, S. and Thumrongvut, J., "Experimental Investigation on Square Steel Tubed RC Columns under Axial Compression," Suranaree Journal of Science and Technology, Vol. 16, No. 3, July-September 2009, pp. 205-220.
5. จักขดา ชำรงวุฒิ วรรณ คำลือ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และวินัย มณีรัตน์ "การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนสำเร็จรูป," การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5, สมาคมคอนกรีตไทย, นครราชสีมา, 20-22 ตุลาคม 2552. paper no. STR-07. (in CD-Rom format)
6. Namvijitr, N., Seangatith, S., Thumrongvut, J. and Sukprasert, S., "Axial Compressive Capacity of Circular Steel Tubed Concrete Specimens Preconfined with Steel Jackets," The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2010), Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Royal Mekong Nongkhai Hotel, Nong Khai, March 4-6, 2010, paper A3_005. (Best paper presentation award)
7. ชุติพร อู๋ยืนยงค์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และศาสน์ สุขประเสริฐ "การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, อุบลราชธานี, 12-14 พฤษภาคม 2553. paper no. STR-41. (in CD-Rom format)
8. Seangatith, S., "Experimental Study on PFRP Box Columns with Different Supports under Axial Compression," The Third International Conference Advanced Composite Materials Engineering (COMAT2010), Transylvania University of Brasov, Brasov, Romania, October 27-29, 2010.
9. Seangatith, S. and Thumrongvut, J., "Behaviors of Square Thin-walled Steel Tubed RC Columns under Direct Axial Compression on RC Core," The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12), Hong Kong SAR, China, January 26-28, 2011. (Procedia Engineering 14 (2011) 513-520 doi:10.1016/j.proeng.2011.07.064)
10. Thumrongvut, J. and Seangatith, S., "Experimental Study on Lateral-Torsional Buckling of PFRP Cantilevered Channel Beams," The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12), Hong Kong SAR, China, January 26-28, 2011. (Procedia Engineering 14 (2011) 2438-2445 doi:10.1016/j.proeng. 2011.07.306)
11. Thumrongvut, J. and Seangatith, S., "Responses of PFRP Cantilevered Channel Beams under Tip Point Loads," Key Engineering Materials, Trans Tech Publications, Switzerland, Vols.

- 471-472 (Composite Science and Technology), February 2011, pp. 578-583.
(doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.471-472.578)
12. นันทิกา นามวิจิตร สิทธิชัย แสงอาทิตย์ จักษดา ชำรงวุฒิ และศาสน์ สุขประเสริฐ “พฤติกรรมและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก,” วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, ปีที่ 4, ฉบับที่ 1, มกราคม-มิถุนายน 2554, หน้า 1-15
 13. ชุติพร อู๋ยืนยงค์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ จักษดา ชำรงวุฒิ และศาสน์ สุขประเสริฐ “พฤติกรรมการรับแรงอัดของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16, พัทยา ชลบุรี, 18-20 พฤษภาคม 2554. paper no. STR-0053. (in CD-Rom format)
 14. นันทพร กาญจนวัฒน์นางค์และสิทธิชัย แสงอาทิตย์ “ผลของเรซินและมวลรวมละเอียดต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์ค้คอนกรีต,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16, พัทยา ชลบุรี, 18-20 พฤษภาคม 2554. paper no. MAT-0069. (in CD-Rom format)
 15. Thumrongvut, J. and Seangatith, S., “Flexural-Torsional Buckling Behaviors of Simply Supported PFRP Channel Beams Subjected to Three-point Loading,” The Sixteenth National Convention on Civil Engineering, Pattaya, Chonburi, Thailand, May 18-20, 2011. paper no. STR-0078. (in CD-Rom format)
 16. กรรณ คำลือ จักษดา ชำรงวุฒิ และสิทธิชัย แสงอาทิตย์ “การตรวจสอบคานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบต่อเนื่องภายใต้แรงกระทำตามขวาง,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16, พัทยา ชลบุรี, 18-20 พฤษภาคม 2554. paper no. STR-0079. (in CD-Rom format)
 17. Thumrongvut, J. and Seangatith, S., “On the Structural Responses of Simply Supported PFRP Channel Beams under Three-point Loading,” International Journal of Civil & Environmental Engineering, IJENS Publishers, Vol. 11, No. 04, August 2011, pp. 13-17.
 18. Thumrongvut, J. and Seangatith, S., “Experimental Evaluation on Fixed End Supported PFRP Channel Beams and LRFD Approach,” Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications, Switzerland, Vols. 105-107 (Vibration, Structural Engineering and Measurement I), September 2011, pp. 1671-1676. (doi:10.4028/ www.scientific.net/ AMM.105-107.1671)
 19. Seangatith, S. and Thumrongvut, J., “Experimental Investigation on Simply Supported PFRP Channel Beams Subjected to Three-point Loading,” Advanced Materials Research, Trans

- Tech Publications, Switzerland, Vols. 335-336 (Advanced Materials and Structures), September 2011, pp. 1321-1326. (doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.335-336.1321).
20. นันทพร กาญจนพัฒน์ นาวาศ์ จิระยุทธ สืบสุข และสิทธิชัย แสงอาทิตย์ “ผลของขนาดมวลรวมต่อกำลังรับแรงอัดของพอลิเมอร์คอนกรีต,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17, อุตรธานี, 9-11 พฤษภาคม 2555. paper no. MAT-0039. (in CD-Rom format)
 21. Chatwivat, C., Seangatith, S. and Thumrongvut, J., “An Experimental Study on PFRP Built-up Columns with Double C-section under Axial Compression,” The Seventeenth National Convention on Civil Engineering, Udonthani, Thailand, May 9-11, 2012. paper no. STR-0034. (in CD-Rom format)
 22. Thumrongvut, J. and Seangatith, S., “Structural Characteristics of Fixed-end Supported PFRP Channel Beams under Bending,” The Seventeenth National Convention on Civil Engineering, Udonthani, Thailand, May 9-11, 2012. paper no. STR-035. (in CD-Rom format)
 23. จักษดา ชำรงวุฒิ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และกรรณ คำลือ “การทดสอบคานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบต่อเนื่องที่ถูกระดมรอยต่อเพิ่มด้วยลวดเกลียวอัดแรง,” การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 8, สมาคมคอนกรีตไทย, พัทยา, ชลบุรี 22-24 ตุลาคม 2555. paper no. STR-10. (in CD-Rom format)
 24. Thumrongvut, J. and Seangatith, S., “An Experimental Study on the Performance of Fixed-End Supported PFRP Channel Beams under Flexure,” Advanced Materials Research, Trans Tech Publications, Switzerland, Vols. 702 (Vibration, Structural Engineering and Measurement I), January 2013, pp. 31-36. (doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.702.31)
 25. Seangatith, S. and Namvijitr, N., “Preconfined Circular Steel Tubed Concrete under Axial Compression,” Design Fabrication and Economy of Metal Structures, Jarmai, K. and Farkas, J. Editor, University of Miskolc, Miskolc, Hungary, April 24-26, 2013, Springer Science, pp. 591-99.
 26. ชานนท์ ฉัตรวิวัฒน์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และจักษดา ชำรงวุฒิ “พฤติกรรมทางโครงสร้างของชิ้นส่วนรับแรงอัดพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปรางน้ำ,” วิศวกรรมสาร มข., ปีที่ 40, ฉบับที่ 3, กรกฎาคม-กันยายน 2556. หน้า 355-369.

6.2 บทความทั่วไป

1. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “สิ่งที่นักศึกษาใหม่ควร “รู้” บนพื้นฐานของอัตลักษณ์ มทส.,” เรียนอย่าง Smile ใน มทส., วีรพงษ์ พลนิกรกิจ บรรณาธิการ, พิมพ์ครั้งที่ 8 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ. 2552, หน้า 1-20.

2. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “ตัวบ่งชี้การประกันคุณภาพการศึกษาและภาวการณ์เป็นมหาวิทยาลัยในกำกับของรัฐ,” วารสาร สอ. ประเทศไทย (ASAIHL-Thailand Journal), สมาคมสถาบันการศึกษาชั้นอุดมแห่งภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ประจำประเทศไทย, ปีที่ 12, ฉบับที่ 2, พฤศจิกายน 2552, หน้า 66-78 และ 60-65.

6.3 รายงานวิจัย

1. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ จักษดา ชำรงวุฒิ และภรณ์ คำลือ, “การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนสำเร็จรูปที่ถูกเสริมกำลังด้วยเหล็กเสริมสั้น,” รายงานการวิจัย, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2552. (แหล่งทุน: บริษัท ไทย แมค ฟริแชนท์ จำกัด, สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 50%)
2. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ จักษดา ชำรงวุฒิ และภรณ์ คำลือ, “การทดสอบคานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบต่อเนื่องภายใต้แรงกระทำตามขวาง,” รายงานการวิจัย, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2554. (แหล่งทุน: บริษัท เอส-คอน คอนกรีต จำกัด, สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 50%)
3. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “การศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกโอบรัดก่อนภายใต้แรงอัดในแนวแกน,” รายงานการวิจัยหมายเลข SUT7-712-52-24-63, สถาบันวิจัยและพัฒนา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2554. (แหล่งทุน: สำนักงบประมาณโดยการพิจารณาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 100%)

6.4 ตำราและเอกสารคำสอน

1. เอกสารคำสอนวิชา Engineering Statics
2. ตำราวิชา Mechanics of Materials
3. เอกสารคำสอนวิชา Material Testing
4. คู่มือปฏิบัติการวิชา Material Testing
5. เอกสารคำสอนวิชา Theory of Structures
6. ตำราวิชา Structural Analysis
7. เอกสารคำสอนวิชา Structural Steel Design
8. เอกสารคำสอนวิชา Advanced Mechanics of Materials (ภาษาอังกฤษ)
9. ตำราวิชา Advanced Theory of Structures