

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

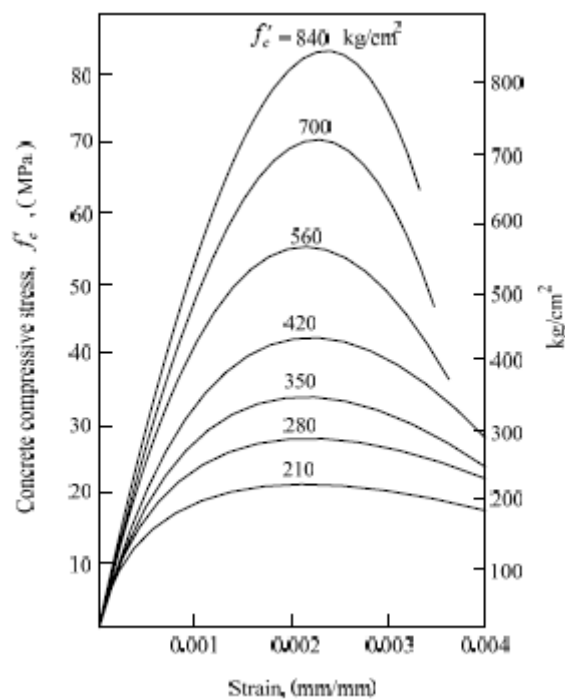
2.1 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้ก่อสร้างอาคาร เพราะสามารถสร้างให้มีรูปร่างและขนาดตามต้องการ และมีอายุการใช้งานได้นาน องค์ประกอบอาคารที่มักทำด้วยคอนกรีตได้แก่ เสา คาน พื้นเป็นต้น ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงอัด (compressive strength) สูง แต่กำลังรับแรงดึง (tensile strength) ต่ำ เพราะ ดูดซับพลังงานได้น้อย เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว (shrinkage) ส่วนของอาคารที่พบรอยแตกร้าวอยู่บ่อยๆ เช่น พื้นถนน คอนกรีตและฐานรองเครื่องจักร เป็นต้น นอกจากนี้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตยังมีปัญหาการใช้ งานบางประเภท เช่น รางระบายน้ำเสีย, บ่อพักบำบัดน้ำเสีย, การซ่อมแซมผิวถนนคอนกรีต, ผิว สะพานคอนกรีต และในโครงสร้างที่ต้องการความทนทานต่อการกัดกร่อน เนื่องจากข้อจำกัดของ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตคือ การแข็งตัวที่ใช้เวลาค่อนข้างมาก กำลังต่อน้ำหนักค่อนข้างน้อย ความ ทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีไม่ดีนัก คุณสมบัติเชิงกลของปอร์ตแลนด์คอนกรีตโดยทั่วไป สามารถสรุปได้ดังนี้

2.1.1) กำลังรับแรงอัด

คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดที่ต้องการของคอนกรีตเมื่อแข็งตัวแล้วคือ กำลัง ด้านทานแรงอัด (compressive strength) เนื่องจากพบว่า กำลังด้านทานหรือกำลังรับแรงแบบอื่นของ คอนกรีต เช่น กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงเฉือน และกำลังยึดเหนี่ยว รวมทั้งความ ทนทานและการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ล้วนเป็นสัดส่วนเทียบกับ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ทั้งสิ้น ซึ่งหมายความว่า เมื่อคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูง กำลังรับแรงอย่างอื่นหรือความทนทานก็จะ สูงตามไปด้วย การทดสอบหาลังรับแรงอัดของคอนกรีตให้ปฏิบัติตามวิธีของ ASTM C39 โดยการ กดหรืออัดแรงตามแนวแกนของแท่งทดสอบมาตรฐานอย่างช้าๆ ด้วยเครื่องทดสอบ จนกระทั่ง คอนกรีตถูกอัดแตก และเมื่อหารน้ำหนักกดอัดสูงสุดที่ได้ด้วยเนื้อที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่างที่รับแรง กระทำ จะเป็นค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุด (f'_c) ของแท่งคอนกรีตนั้น กำลังของคอนกรีตจะถือเป็น ที่ ยอมรับได้เมื่อผลเฉลี่ยกำลังอัดของการทดสอบ 3 ครั้งต่อเนื่องกันให้ค่าเท่ากับหรือมากกว่ากำลังรับ แรงกดอัดสูงสุดที่กำหนด โดยที่ค่ากำลังอัดของการทดสอบแต่ละครั้ง อาจให้ค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงกด อัดสูงสุดได้ไม่เกิน 3.5 MPa (35 kg/cm²) จากรูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับค่า ความเครียดของแท่งคอนกรีตมาตรฐานที่มีกำลังรับแรงอัดต่างๆ กัน เมื่อรับแรงกดอัดตามแนวแกน อย่างเดียว (uniaxial stress) จนกระทั่งคอนกรีตถูกอัดแตก จะเห็นได้ว่าจากจุดเริ่มต้นที่รับน้ำหนัก จนถึงระดับของหน่วยแรงอัดประมาณ 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 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดกดอัดของคอนกรีต (Wang, 1992)

2.1.2) กำลังรับแรงดัด

กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต (flexural strength) สามารถวัดจากโมดูลัสแตกร้าว (modulus of rupture), R ซึ่งได้แก่หน่วยแรงดึงสูงสุดในเนื้อคอนกรีต ณ จุดที่เกิดการแตกหัก โดยแรงดัด การหาโมดูลัสแตกร้าวให้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C78 โดยตัวอย่างทดสอบเป็นคาน ใช้น้ำหนักกดลงบนจุดที่แบ่งคานเป็นสามช่วง เพิ่มน้ำหนักกดลงให้สม่ำเสมอ โดยให้เกิดหน่วย

แรงที่ผิวหน้าประมาณ $8 - 10 \text{ kg/cm}^2$ ต่อหน้าที่ จากค่าน้ำหนักสูงสุดที่คานสามารถรับได้นำมา คำนวณหาค่าโมดูลัสแตกร้าว ดังแสดงในสมการที่ 2.1

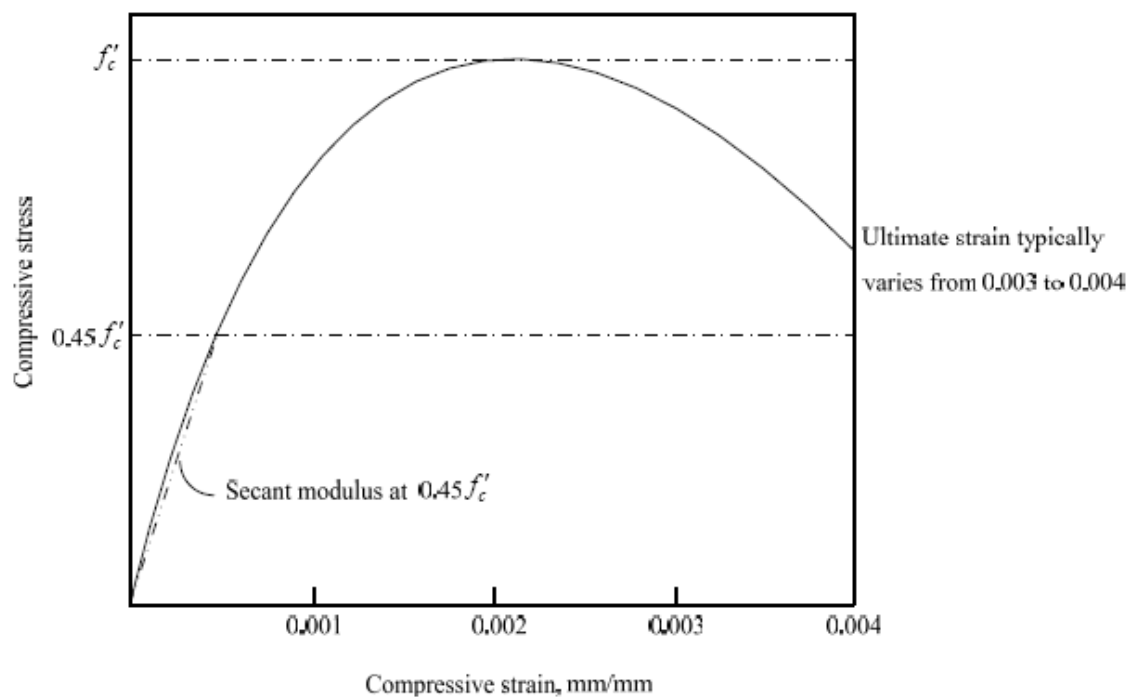
$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (2.1)$$

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), เป็นตัวแสดงถึงความต้านทานต่อการเสีย (deformation) ของคอนกรีตเมื่อมีแรงกดอัดมากระทำ จากการทดสอบจะพบว่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าแปรเปลี่ยนตามกำลังของคอนกรีต หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ตลอดจนขนาดและระยะเวลาที่รับน้ำหนักบรรทุก เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกอยู่ในช่วงใช้งาน และกระทำในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งอาจจะสมมติให้คอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่น (elastic materials) ได้โดยมีความเครียด (elastic strain) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงอัดที่กระทำ แต่เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกคงค้างเป็นเวลานานๆ (long-term loading) ต้องพิจารณารวมความเครียดแบบพลาสติก (plastic strain) ด้วยเพราะโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะลดลงทำให้คอนกรีตเกิดการเสียมากขึ้น

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต หาได้จากอัตราส่วนของหน่วยแรงอัดต่อความเครียดเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบหาลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยทั่วไปความสัมพันธ์นี้มีลักษณะเป็นโค้งพาราโบลา ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตนั้น มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. ใช้วิธี Secant Modulus ซึ่งคำนวณจากความลาดเอียงของเส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้นกับจุดใดๆ ที่ต้องการหา ซึ่งมักพิจารณาที่จุดซึ่งมีหน่วยแรงอัดเท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงอัดสูงสุด ($0.45 f'_c$) บนเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดโดยถือว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาโดยวิธีการนี้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แท้จริงของคอนกรีตในช่วงใช้งาน เนื่องจากได้พิจารณารวมถึงความเครียดแบบพลาสติกเข้าไปด้วย



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 วัสดุผสมที่มีความลดหลั่นของขนาดทำให้คอนกรีตเนื้อแน่นสม่ำเสมอต้องการน้ำผสมน้อย มีคุณภาพดีและทำงานง่าย
- 3) ปริมาณซีเมนต์และชนิดของซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์มีผลมาจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ มีปูนซีเมนต์ปริมาณมาก จะทำ

ให้คอนกรีตชื้นขึ้น การใช้ซีเมนต์ที่ละเอียดจะมีผลทำให้ได้คอนกรีตที่เทเข้าแบบได้ง่ายกว่าเพราะมีพื้นที่ผิวมาก แต่จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้เร็ว จึงทำให้คอนกรีตชื้นแข็งเร็ว

- 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 น้ำยางพารา อะครีลิคส์ (acrylics) และ ไวนิล เอสเตตส์ (vinyl acetates) เป็นต้น ลงในคอนกรีตสดร่วมกับสารป้องกันการเกิดฟองอากาศ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติแล้วพอลิเมอร์โมดิไฟด์คอนกรีตมีสมบัติด้านความคงทนและการยึดเกาะที่ดีกว่าแต่มีการกีดสูง พอลิเมอร์โมดิไฟด์คอนกรีตมักถูกนำมาใช้เฉพาะงานพิเศษ เช่น ส่วนของโครงสร้างสะพาน งานผนังสำเร็จรูป เป็นต้น ระยะเวลาก่อตัวของพอลิเมอร์โมดิไฟด์คอนกรีตเท่ากับคอนกรีตปกติ และด้านทานต่อสารเคมีได้ไม่มากจึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมเช่นกัน

พอลิเมอร์คอนกรีตเป็นวัสดุเชิงประกอบที่ใช้พอลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสานมวลรวมแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งแตกต่างจากพอลิเมอร์อิมเพกเนทคอนกรีต และพอลิเมอร์โมดิไฟด์คอนกรีตที่กล่าวข้างต้นซึ่งยังคงใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน โดยพอลิเมอร์คอนกรีตใช้พอลิเมอร์เรซิน (polymer resin) เป็นวัสดุประสาน พอลิเมอร์คอนกรีตประกอบด้วยพอลิเมอร์เรซิน

เช่น อีพอกซี (epoxy) พอลิเอสเตอร์ (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)

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

พอลิเมอร์คอนกรีตถูกพัฒนาเพื่อทดแทนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตสำหรับการใช้งานพิเศษที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตก็มีปัญหาการใช้งาน ปัญหาส่วนใหญ่ของคอนกรีต คือ มีความพรุนสูงเมื่อปรับส่วนผสมให้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์แข็งตัวเร็วซึ่งมักทำให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อของซีเมนต์ส่งผลให้อากาศและความชื้นสามารถผ่านเข้าไปได้ง่าย นอกจากนี้ความเปราะบางของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ส่งผลให้คอนกรีตที่ได้ไม่ทนต่อการรบกวน 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) และการหล่อเทในอาคารสาธารณะ งานท่อบำบัดน้ำเสีย งานบันไดโรงงาน เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ทำชิ้นงานที่ทนต่อการกัดกร่อนของกรดและสารละลาย รางระบายน้ำในโรงงาน อุตสาหกรรม พนักสำเร็จรูป เครื่องสุขภัณฑ์ ตลอดจนนำมาใช้ในงานเคลือบและงานซ่อมแซมโครงสร้างได้ (ACI Committee 548, 1998) รูปที่ 2.3 แสดงการใช้งานพอลิเมอร์คอนกรีตในงานประเภทต่าง ๆ

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

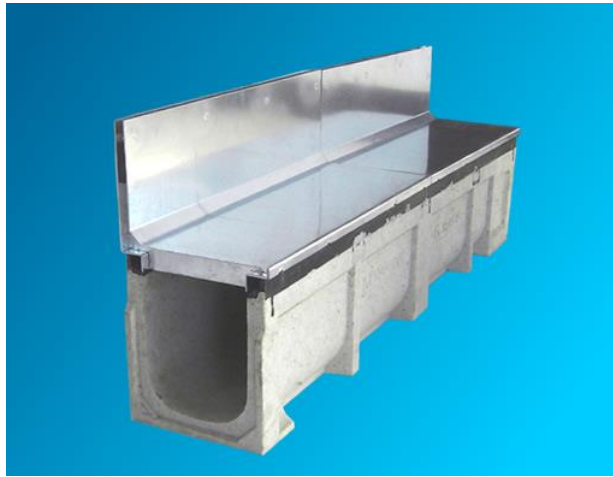
พอลิเมอร์คอนกรีตสามารถต้านทานสารเคมี และกรดไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) อัลคาไลค์ (alkali) และซัลเฟต (sulphate) ได้ดี กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตดังนั้นจึงสามารถลดขนาดหน้าตัดและน้ำหนักของโครงสร้างเมื่อนำมาทำเป็นชิ้นส่วนสำเร็จรูปได้ พอลิเมอร์เรซินมีกำลังสูงและมีการยึดเกาะกับมวลรวมดีดังนั้นกำลังของพอลิเมอร์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังของมวลรวม 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 มีความแข็งแรงสูงไม่งอ่าย มีความเสถียรเชิงมิติสูง มีความทนทานต่อการเกิดการคืบ (creep) มีน้ำหนักเบา และมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า พอลิเมอร์เรซินที่นำมาใช้ในการทำพอลิเมอร์คอนกรีตเป็นประเภทเทอร์โมเซตติงพลาสติก โดยพอลิเมอร์เรซินที่นิยมในงานก่อสร้าง ได้แก่ พอลิเอสเตอร์และอีพอกซี อีพอกซีมีข้อดีคือสามารถในการยึดเกาะกับมวลรวมได้ดี มีกำลังรับแรงอัดและแรงดึงสูง และต้านทานการกัดกร่อนดี แต่ข้อจำกัดที่นำมาใช้ในงานคอนกรีตเพราะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแตกต่างจากคอนกรีตมากทำให้เกิดปัญหาในการใช้งานร่วมกับคอนกรีตปกติ นอกจากนั้นแล้วยังมีกลิ่นที่รุนแรงทำให้ไม่เหมาะสมในการใช้งานในที่อับและบางส่วนผสมของอีพอกซีไม่สามารถใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่ชื้นได้ อีกทั้งคุณสมบัติต่าง ๆ ของอีพอกซียังแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ ส่วนพอลิเอสเตอร์เป็นวัสดุประสานที่มีความสามารถในการยึดเกาะที่ดี มีกำลังรับแรงอัดและแรงดึงสูง ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี อีกทั้งมีสมบัติที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก แต่อย่างไรก็ดีการหดตัวของพอลิเอสเตอร์อาจจะเป็นข้อจำกัดประการเดียวในการใช้งาน Weatherhead (1980) ได้เสนอคุณสมบัติทางวิศวกรรมโดยทั่วไปของพอลิเมอร์เรซินที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยอีพอกซีเรซินมีกำลังรับแรงดึงมากที่สุด รองลงมาคือพอลิเอสเตอร์เรซินและไวนิลเอสเตอร์เรซินตามลำดับ พอลิเอสเตอร์และอีพอกซีให้โมดูลัสแรงดึงและหน่วยน้ำหนักที่ไม่ต่างกันมากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมต่าง ๆ โดยเลือกใช้พอลิเอสเตอร์เรซินเป็นหลักเพราะมีราคาถูกกว่าอีพอกซีมาก อีกทั้งพอลิเอสเตอร์เรซินสามารถผลิตได้จากกระบวนการรีไซเคิลขยะขวดพลาสติกได้อีกด้วย



(a) การซ่อมแซมผิวถนนคอนกรีต (Tomasulo, 2009)

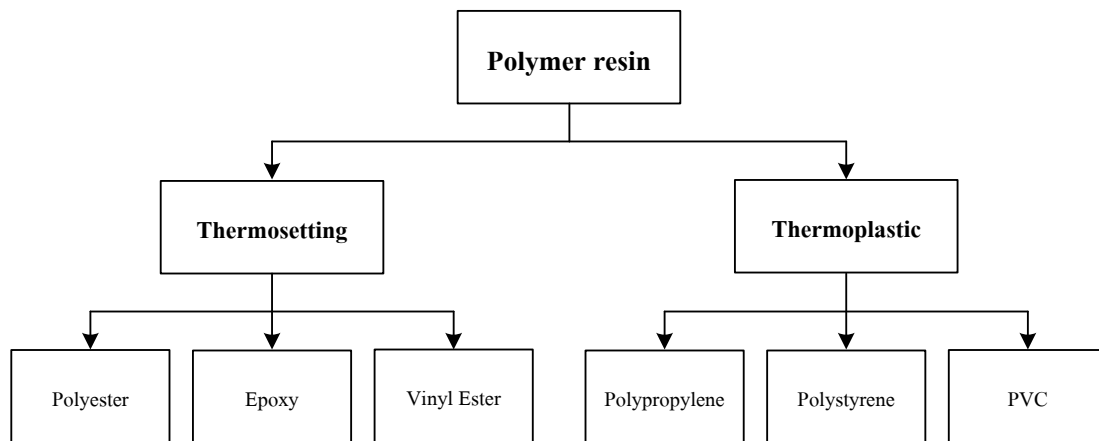


(b) รางระบายน้ำเสีย (Cangzhou Innovation Metalwork Co., 2012)



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

รูปที่ 2.3 การใช้งานพอลิเมอร์คอนกรีตในงานประเภทต่าง ๆ



รูปที่ 2.4 ประเภทของพอลิเมอร์เรซินที่นิยมนำมาใช้ในการก่อสร้าง

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเรซินประเภทเทอร์โมเซตติง (Weatherhead, 1980)

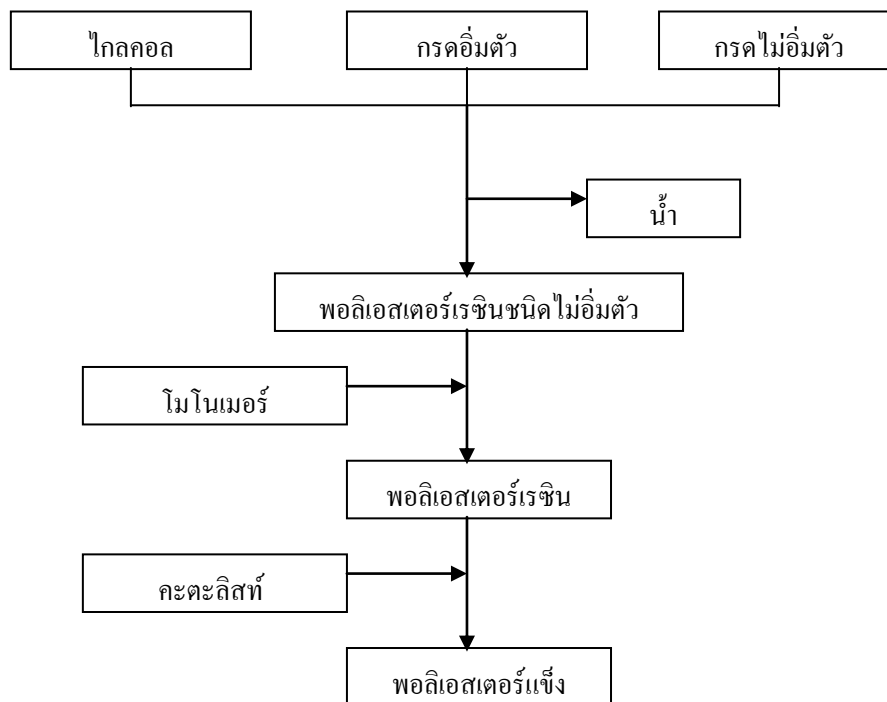
Resin	Polyester	Epoxy	Vinyl ester
Tension strength (MPa)	35-108	55-130	73-81
Modulus of elasticity (GPa)	2.1-4.1	2.8-4.1	3.0-3.5
Density (g/cm ³)	1.12-1.32	1.20-1.30	1.10-1.46

2.3 พอลิเอสเทอร์เรซิน

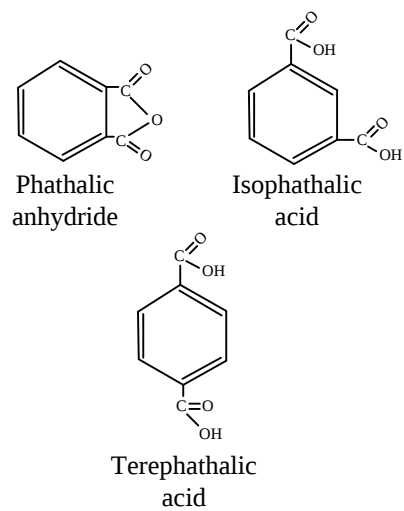
พอลิเอสเทอร์พอลิเมอร์เรซิน คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยเอสเทอร์หมู่ $\text{-}\overset{\text{O}}{\underset{\text{O}}{\text{C}}}\text{-O-}$ ตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป ซึ่งสังเคราะห์จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น (condensation polymerization) ระหว่างสารประกอบจำพวกไกลคอล (glycol) และกรดไดเบสิก (dibasic acid) พอลิเอสเทอร์เรซินแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดอิ่มตัว (saturated polyester resin) และพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated polyester resin) พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นเรซินเหลวมีสีเหลืองอ่อน ๆ และมีองศาของพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization) ต่ำประมาณ 8 ถึง 10 เรซินที่ยังไม่ได้ใช้งานจะมีสภาพเป็นของเหลวข้นสีเหลืองใส เมื่อใส่สารเคมีกระตุ้นปฏิกิริยาหรือได้รับการกระตุ้นจากฉายแสงอัลตราไวโอเลตจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้นและเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็งใส พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวโดยทั่วไปสังเคราะห์มาจากปฏิกิริยาปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) ของไกลคอลกับสารผสมของกรดอินทรีย์อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว (saturated and unsaturated dicarboxylic acid) ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาจะได้น้ำเป็นผลผลิต เมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุดจะต้องนำผลผลิตที่ได้ไปละลายในตัวทำละลายที่ไม่อิ่มตัว 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 กรดพาลิกสามารถเตรียมได้เป็นออโทพาทาลิกเรซิน (orthophthalic resin) กรดไอโซพาลิกสามารถเตรียมได้เป็นไอโซพาทาลิกเรซิน (isophthalic resin) เป็นต้น รูปแบบโมเลกุลของกรดที่ใช้ผลิตพอลิเอสเทอร์ไม่อิ่มตัวแสดงดังรูปที่ 2.6 พอลิเมอร์เรซินที่ใช้ผลิตพอลิเมอร์คอนกรีตโดยทั่วไปจะเป็นเทอร์โมเซตทั้งแบบที่ไม่อิ่มตัวเพราะสามารถผลิตได้ง่ายและราคาถูก นอกจากนี้ยังทนต่อสารเคมีและสามารถต้านทานแรงอัดสูง ส่วนความต้านทานแรงกระแทกจะใกล้เคียงกับพอลิเมอร์เรซินชนิดอื่น ๆ (Chanda and Ohama, 1994) ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือคะตะลิสต์ (catalyst) เป็นสารที่ช่วยให้พอลิเมอร์เรซินสามารถก่อตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง ส่วนใหญ่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นสารจำพวกเกลือของโลหะเช่น โคบอลแนฟทีเนต (cobalt naphthenate) เป็นต้น คะตะลิสต์เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์เรซินเปลี่ยนสภาพพอลิเมอร์เรซินจากของเหลวไปเป็นของแข็ง เช่น เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (MEKPO) เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการทำพอลิเอสเตอร์แข็ง (วิไลพร, 2540)



รูปที่ 2.6 ประเภทของกรดที่ใช้ผลิตพอลิเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว (Cassis and Talbot, 1998)

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตยังมีข้อจัดการใช้งานในหลายด้านซึ่งสามารถทดแทนได้โดยพอลิเมอร์คอนกรีต การใช้พอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีตในประเทศไทยนั้นยังมีไม่มากโดยส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาในเรื่องการนำเรซินไปผสมในคอนกรีตสดซึ่งเพิ่มกำลังในคอนกรีต ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมทางกลและสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตมากขึ้น การศึกษาผลของสัดส่วนผสมต่อพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์คอนกรีตจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ ในการศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งไปที่การศึกษาผลของส่วนผสมในการผลิตพอลิเมอร์คอนกรีตต่อพฤติกรรมทางกลภายใต้แรงอัดและแรงดัด เนื่องจากพอลิเอสเตอร์เรซินมีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมคือมีความแข็ง ความใส ความเงา สามารถใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงกว่าพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติกและทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี พอลิเอสเตอร์เรซิน จึงถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้พอลิเอสเตอร์เรซินเป็นวัสดุประสานและเลือกใช้สัดส่วนขนาดคละมวลรวมต่าง ๆ ดังจะนำเสนอรายละเอียดในบทต่อไป