



ผลของวัสดุอีพ็อกซีชีวภาพและคาร์บอกซีเลตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตต่อการเตรียมและ
สมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีออร์ตาเร และอีพ็อกซีออร์ตาเรดัดแปร



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

ผลของวัสดุอีพ็อกซีซีวีภาพและคาร์บอกซีเลตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตต่อการเตรียมและ
สมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "ผลของวัสดุอีพ็อกซีชีวภาพและคาร์บอกซีเลตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตต่อการเตรียมและสมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีอิมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีอิมอร์ตาร์ดัดแปร"

ของ วันวิสา สิงห์ทอง

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พลพัฒน์ รวบรวมเจริญ)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.ช.วยากรณ์ เพ็ชฌุไพศิษฏ์)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรินทร์ เหมะวิบูลย์)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(รองศาสตราจารย์ ดร.เมธา รัตนกรพิทักษ์)

อนุมัติ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรองกาญจน์ ชูทิพย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	ผลของวัสดุอีพ็อกซีชีวภาพและคาร์บอกซิเลตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตต่อการเตรียมและสมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปร
ผู้วิจัย	วันวิสา สิงห์ทอง
ประธานที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ช.วยากรณ์ เพ็ชฌัญไพศิษฏ์
กรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรณ์กร เหมะวิบูลย์
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. เคมีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2565
คำสำคัญ	อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์, อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปร, พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต, น้ำมันพืชอีพ็อกซีไดซ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปรจากอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้า อีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ชีวภาพจากน้ำมันปาล์มอีพ็อกซีไดซ์ (EPO) สารทำให้แข็งเอมีน และสารทำให้แข็งร่วมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตดัดแปรหรือพีดีดัดแปรที่มีหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่ตำแหน่งปลาย (PET-COOH) โดยงานวิจัยนี้ได้เตรียม EPO ผ่านการทำปฏิกิริยาอีพ็อกซีเดชันที่ตำแหน่งพันธะคู่ของไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันปาล์ม (PO) และเตรียม PET-COOH ผ่านการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิสและปฏิกิริยาการเปิดวงแอนไฮไดรด์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) โดย PET-COOH ที่เตรียมได้มีจำนวนหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่ตำแหน่งปลายแตกต่างกัน 3 ชนิด คือ P-T-PA ซึ่งมีหมู่ -COOH 4 หมู่ P-ET-PA ซึ่งมีหมู่ -COOH 3 หมู่ และ P-EG-PA ซึ่งมีหมู่ -COOH 2-3 หมู่ตามลำดับ และศึกษาผลของชนิดและอัตราส่วนของ PET-COOH ต่อเอมีนทางการค้า และอัตราส่วนของ EPO ต่ออีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้าต่อสมบัติความหยุ่นเหนียว สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปรเทียบกับการใช้อีพ็อกซีทางการค้า พบว่า PET-COOH ในอัตราส่วน 25% และ 16.7% ในอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปร ส่งผลต่อสมบัติความหยุ่นเหนียวทั้งค่ามอดูลัสสะสมที่สถานะคล้ายแก้ว ค่ามอดูลัสสะสมที่สถานะคล้ายยาง และอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีกับสารตัวเติมทรายเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้เอมีนทางการค้าเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังพบว่าสมบัติการกระจายพลังงานและค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วแบบไดนามิกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติม PET-COOH ในขณะที่การผสมร่วมกับ EPO ในทุกอัตราส่วนให้สมบัติทุกด้านของความหยุ่นเหนียวของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปรลดลง

นอกจากนี้ยังพบว่าการผสมร่วมกับ PET-COOH และเอมีน ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมขวางร่วมระหว่างหมู่เอมีน หมู่เอไมด์ และหมู่เอสเทอร์ยังช่วยให้ชิ้นงานมีค่าความต้านแรงดัดโค้ง และความ

ทนแรงอัดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผสมร่วมกับ PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH 4 หมู่ ในขณะที่การผสมร่วมกับ EPO จะช่วยให้ชิ้นงานมีการยึดตัวได้มากขึ้น แต่รับแรงดัดโค้ง และแรงอัดได้ลดลง นอกจากนี้ยังศึกษาผลของการดูดซึ่มสารละลายของชิ้นงานอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรหลังแช่ในน้ำ ตัวทำละลายกรด (10% H₂SO₄) เบส (10% NaOH) และเกลือ (10% NaCl) และการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุสำหรับงานซ่อม โดยศึกษาค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์กับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และซีเมนต์กับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรตามลำดับ



Title	EFFECT OF BIO-EPOXY MATERIAL AND CARBOXYLATED POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) ON PREPARATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY MORTAR AND EPOXY MODIFIED MORTAR.
Author	Wanwisa Singtong
Advisor	Associate Professor Dr. Chor. wayakron Phetphaisit
Co-Advisor	Assistant Professor Dr. Saranagon Hamavibool
Academic Paper	M.S. Thesis in Industrial Chemistry, Naresuan University, 2022
Keywords	Epoxy mortar, Epoxy modified mortar, Poly(ethylene terephthalate), Epoxidized plant oil

ABSTRACT

This research investigated the preparation of epoxy mortar and modified epoxy mortar using commercial epoxy oligomers, bio-epoxy material from epoxidized palm oil (EPO), amine hardener and carboxyl-terminated polyethylene terephthalate (PET-COOH) co-hardener. The EPO was prepared by epoxidizing palm oil (PO) on double bond of triglyceride, and the PET-COOH was obtained through glycolysis and ring opening of anhydride. Three types of PET-COOH hardeners, namely P-T-PA (with COOH 4 groups), P-ET-PA (with COOH 3 groups), and P-EG-PA (with COOH 2-3 groups), were used in this research. The effect of types and amounts of CPET to commercial amine and the ratio of EPO to commercial epoxy oligomer on viscoelastic properties, mechanical and physical properties of epoxy mortar and modified epoxy mortar have been investigated. It was observed that compared to commercial epoxy, PET-COOH in the ratios of 25% and 16.7% in the epoxy mortar and modified epoxy mortar increased both storage modulus at glassy state (E'_G) and storage modulus at rubber state, (E'_R) and improved the interaction between epoxy with sand. Additionally, the damping properties and the glass transition temperature (T_g) were enhanced with the addition of PET-COOH. However, the combination of EPO with all ratios resulted in decreased viscoelastic properties of the epoxy mortar and modified

epoxy

mortar.

The study also revealed that mixing PET-COOH and amine hardeners resulted in mixing linkage between amine, amide and ester groups, which improved the flexural strength and compressive strength, especially when adding PET-COOH with COOH 4 groups. In contrast, mixing with EPO increased the elongation but decreased the flexural strength and compressive strength. In addition, the results of absorption of epoxy mortar and modified epoxy mortar after immersed in water, acid (10% H_2SO_4), base (10% NaOH) and salt (10% NaCl) were observed. This research also investigated their potential application as repairing materials by studying bonding strength between cement and epoxy mortar, and cement and modified epoxy mortar, respectively.



ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความเอาใจใส่ดูแลเป็นอย่างดีจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ช. วยากรณ์ เพ็ชฌุไพศิษฏ์ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา และแนะนำแนวคิดในการทำวิจัยนี้แก่ผู้วิจัยด้วยดีมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอขอบคุณในความกรุณาของอาจารย์เป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรินทร์ เหมะวิบูลย์ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา และแนะนำแนวคิดในด้านวิศวกรรมตลอดการทำวิจัย

ขอขอบคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบไปด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พลพัฒน์ รวมเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.เมธา รัตนกรพิทักษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์นี้ด้วยความเอาใจใส่ จนมาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่าน ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาที่ผู้วิจัยเข้ารับการศึกษา ณ สถาบันการศึกษาแห่งนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือกลางทุกท่าน โดยเฉพาะนายสุชาติ สุปัทฒผล ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ ของอีพ็อกซีเมอร์และอีพ็อกซีเมอร์ดัดแปร

ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้สถานที่ และเครื่องมือในการวิจัยครั้งนี้

เหนือสิ่งอื่นใดขอขอบคุณ บิดา มารดา และพี่ชายของผู้วิจัยที่ให้อำนาจใจ และให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา

วันวิสา สິงห์ทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
ประกาศคุณูปการ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ด
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
ความเป็นมาของปัญหา.....	1
จุดมุ่งหมายของการศึกษา.....	2
ขอบเขตการวิจัย.....	3
บทที่ 2.....	4
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พอลิเมอร์มอร์ตาร์ (Polymer mortar) และพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดัดแปร (Polymer modified mortar).....	4
2.2 อีพ็อกซีพอลิเมอร์ (Epoxy polymer).....	5
2.2.1 อีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ (Epoxy oligomer).....	6
2.2.2 สารทำให้แข็ง (Hardener).....	10
2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร.....	14

2.3 อีพ็อกซีโพลิโเมอร์ชีวภาพ	22
2.3.1 น้ำมันอีพ็อกซีไคซ์	22
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับน้ำมันอีพ็อกซีไคซ์.....	24
2.4 สารทำให้แข็งร่วม	28
2.4.1 พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต (Polyethylene terephthalate; PET).....	28
2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ PET และมอร์ตาร์.....	29
บทที่ 3.....	38
วิธีดำเนินงานวิจัย.....	38
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	40
3.2 สารเคมี.....	41
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	42
3.3.1 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตที่มีหมู่ปลายเป็นหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (PET-COOH).....	42
3.3.2 การสังเคราะห์น้ำมันปาล์มอีพ็อกซีไคซ์ (EPO).....	44
3.3.3 การเตรียมอีพอกซีมอร์ตาร์ (Epoxy mortar).....	45
3.3.4 การเตรียมอีพอกซีมอร์ตาร์ดัดแปร (Epoxy modified mortar)	48
3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติกายภาพของอีพอกซีมอร์ตาร์และอีพอกซีมอร์ตาร์ดัดแปร	51
3.4.1 สมบัติทางความร้อน	51
3.4.2 สมบัติเชิงกล	51
3.4.2.1 สมบัติความต้านแรงดัดโค้ง	51
3.4.2.2 สมบัติความทนแรงอัด	52

3.4.2.3 สมบัติแรงยึดเหนี่ยว.....	53
3.4.3 สมบัติทางกายภาพ	54
3.4.3.1 สมบัติการดูดซึมน้ำ	54
3.4.3.2 สมบัติความต้านทานต่อตัวทำละลายกรด เบส และเกลือ.....	55
3.4.3.3 ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์ (Setting time of cement)	55
บทที่ 4.....	57
ผลการวิจัย.....	57
4.1 สมบัติความยุบหนืดของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร	57
4.1.1 อีพ็อกซีมอร์ตาร์ (Epoxy Mortar).....	57
4.1.1.1 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม (Co-hardener) ต่อสมบัติความยุบหนืดของอีพ็อกซีมอร์ตาร์	57
4.1.1.2 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารอีพ็อกซีร่วม (Co-epoxy oligomer) ต่อสมบัติความยุบหนืดของอีพ็อกซีมอร์ตาร์.....	63
4.1.2 อีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร (Epoxy Modified Mortar)	65
4.1.2.1 ผลของซีเมนต์และทรายผลต่อสมบัติความยุบหนืดของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร.....	65
4.1.2.2 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม (Co-hardener) ต่อสมบัติความยุบหนืดของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร	66
4.1.2.3 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารอีพ็อกซีร่วมต่อสมบัติความยุบหนืดของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร	71
4.2 สมบัติความความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร	73
4.2.1 อีพ็อกซีมอร์ตาร์ (Epoxy Mortar).....	73

4.2.1.1	ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม (Co-hardener) ต่อสมบัติความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีมอร์ตาร์.....	73
4.2.1.2	ผลของอัตราส่วนของสารอีพ็อกซีร่วม (Co-epoxy oligomer) ต่อสมบัติความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีมอร์ตาร์.....	76
4.2.2	อีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร (Epoxy Modified Mortar)	78
4.2.2.1	ผลของซีเมนต์กับทราย และผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม (Co-hardener) ต่อสมบัติความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร.....	78
4.3	สมบัติความทนแรงอัดของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร	82
4.3.1	อีพ็อกซีมอร์ตาร์ (Epoxy mortar).....	82
4.3.1.1	ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม (Co-hardener) ต่อสมบัติความทนแรงอัด (Compressive strength) ของอีพ็อกซีมอร์ตาร์.....	82
4.3.1.2	ผลของอัตราส่วนของสารอีพ็อกซีร่วม (Co-epoxy oligomer) ต่อสมบัติความทนแรงอัด (Compressive strength) ของอีพ็อกซีมอร์ตาร์.....	83
4.3.2	อีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร (Epoxy Modified Mortar)	84
4.3.2.1	ผลของซีเมนต์กับทราย และผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม (Co-hardener) ต่อสมบัติความทนแรงอัด (Compressive strength) ของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร.....	84
4.3.2.2	ผลของอัตราส่วนของสารอีพ็อกซีร่วม (Co-epoxy oligomer) ต่อสมบัติความทนแรงอัด (Compressive strength) ของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร.....	86
4.4	สมบัติแรงยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร.....	87
4.4.1	อีพ็อกซีมอร์ตาร์ (Epoxy Mortar).....	88
4.4.1.1	สมบัติความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัสและแรงยึดเหนี่ยว (Bond strength) ของซีเมนต์	88

4.4.1.2 สมบัติแรงยึดเหนี่ยว (Bond strength) ระหว่างซีเมนต์และอีพ็อกซีมอร์ตาร์	89
4.4.2 อีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร (Epoxy Modified Mortar)	94
4.4.2.1 สมบัติแรงยึดเหนี่ยว (Bond strength) ของซีเมนต์และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรทางการค้า	94
4.4.2.2 สมบัติแรงยึดเหนี่ยว (Bond strength) ระหว่างซีเมนต์และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร	94
4.4.4.3 สมบัติแรงยึดเหนี่ยว (Bond strength) ระหว่างอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร	98
4.5 สมบัติการดูดซึมน้ำ และสารละลายของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร	103
4.5.1 อีพ็อกซีมอร์ตาร์ (Epoxy Mortar)	103
4.5.1.1 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วมต่อสมบัติการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของอีพ็อกซีมอร์ตาร์	103
4.5.1.2 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วมต่อสมบัติการดูดซึมสารละลาย กรด เบส และเกลือของอีพ็อกซีมอร์ตาร์	104
4.5.1.3 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติความต้านทานต่อตัวทำละลาย (Weight loss)	109
4.5.1.4 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารอีพ็อกซีร่วม (Co-epoxy oligomer) ต่อสมบัติการดูดซึมน้ำ กรด เบส และเกลือของอีพ็อกซีมอร์ตาร์	112
4.5.1.5 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติความต้านทานต่อตัวทำละลาย (Weight loss)	114
4.5.2 อีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร (Epoxy Modified Mortar)	116
4.5.2.1 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วมต่อสมบัติการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร	116

4.5.2.2 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วมต่อสมบัติการดูดซึมน้ำ สารละลายกรด เบส และเกลือของอีพ็อกซีอิมอร์ตาร์ดัดแปร	119
4.5.2.3 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติความต้านทานต่อตัวทำละลาย (Weight loss)	126
4.5.2.4 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารอีพ็อกซีร่วม (Co-epoxy oligomer) ต่อสมบัติการดูดซึมน้ำ กรด เบส และเกลือของอีพ็อกซีอิมอร์ตาร์ดัด แปร	129
4.5.2.5 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติความต้านทานต่อตัวทำละลาย (Weight loss)	130
4.6 ระยะเวลาการก่อตัวของอีพ็อกซีอิมอร์ตาร์ดัดแปร	132
4.6.1 ผลของซีเมนต์ ททราย และอีพ็อกซีโพลิเมอร์ต่อสมบัติระยะเวลาการก่อตัว ของซีเมนต์ และอีพ็อกซีอิมอร์ตาร์ดัดแปร	132
4.6.2 ผลของอีพ็อกซีโพลิโเมอร์ร่วม (Co-epoxy oligomer) ต่อสมบัติระยะเวลาการก่อ ตัวของอีพ็อกซีอิมอร์ตาร์ดัดแปร	135
บทที่ 5	137
บทสรุป	137
สรุปผลการวิจัย	137
บรรณานุกรม	141
ประวัติผู้วิจัย	147

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ร้อยละของกรดไขมันในน้ำมันชนิดต่าง ๆ [30].....	23
ตาราง 2 สูตรและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย [37].....	32
ตาราง 3 ค่าการทนต่อแรงดัดโค้งของมอร์ตาร์เมื่อใช้สารทำให้แข็งเอมีนที่แตกต่างกัน [1]	36
ตาราง 4 ค่าความทนแรงอัดของมอร์ตาร์เมื่อใช้สารทำให้แข็งเอมีนที่แตกต่างกัน [1].....	36
ตาราง 5 อัตราส่วนสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมอีพ็อกซีมอร์ตาร์ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของสารทำให้แข็งเอมีนต่อ PET-COOH	46
ตาราง 6 อัตราส่วนสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมอีพ็อกซีมอร์ตาร์ เมื่อทำการปรับเปลี่ยน อัตราส่วนของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ M103 ต่อ EPO.....	47
ตาราง 7 อัตราส่วนสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อทำการ ปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งเอมีนต่อ PET-COOH.....	49
ตาราง 8 อัตราส่วนสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อทำการ ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ C100 ต่อ EPO.....	50
ตาราง 9 ค่ามอดุลัสสะสม ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ที่ปรับเปลี่ยนชนิด และ อัตราส่วนของ PET-COOH.....	63
ตาราง 10 ค่ามอดุลัสสะสม ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ EPO	65
ตาราง 11 ค่ามอดุลัสสะสม ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ PET-COOH.....	71

ตาราง 12 ค่ามอดุลัสสะสม ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยน อัตราส่วนของ EPO	73
ตาราง 13 ค่าความต้านแรงดัดโค้ง ค่าการยืดตัวเมื่อดัดโค้ง และค่าความทนแรงอัดของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ PET-COOH.....	76
ตาราง 14 ค่าความต้านแรงดัดโค้ง ค่าการยืดตัวเมื่อดัดโค้ง และค่าความทนแรงอัดของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอีพ็อกซีโพลิโกลิเมอร์:EPO	78
ตาราง 15 ค่าความต้านแรงดัดโค้ง และค่าความทนแรงอัดของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของ PET-COOH.....	80
ตาราง 16 ค่าความต้านแรงดัดโค้ง และค่าความทนแรงอัดของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยน อัตราส่วนของอีพ็อกซีโพลิโกลิเมอร์:EPO.....	82
ตาราง 17 OM images (5x) บริเวณหล่อร่วมของซีเมนต์เก่าและซีเมนต์ใหม่ (C ₁ :C ₂) ก่อนและหลังการทดสอบความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัส	89
ตาราง 18 OM images (5x) บริเวณหล่อร่วมของซีเมนต์เก่าและอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร ก่อนและหลังการทดสอบความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัส เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH.....	92
ตาราง 19 ค่าความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัสบริเวณหล่อร่วมของซีเมนต์เก่าและอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH..	93
ตาราง 20 OM images (5x) บริเวณหล่อร่วมของซีเมนต์เก่าและอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร ก่อนและหลังการทดสอบความต้านแรงดัดโค้งเมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH	97
ตาราง 21 ค่าความต้านแรงดัดโค้งบริเวณหล่อร่วมของซีเมนต์เก่าและอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH	98
ตาราง 22 OM images (5x) บริเวณหล่อร่วมของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร (M-EA) และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร (C-EA) ก่อนและหลังการทดสอบความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัสเมื่อปรับเปลี่ยนชนิดของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH	101

ตาราง 23 ค่าความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัสบริเวณหล່อร่วมของฟ็อกซิมอร์ตาร์ (M-EA) และอีฟ็อกซิมอร์ตาร์ดัดแปร (C-EA) เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH.....	102
ตาราง 24 ค่าการดูดซึ่มสารละลาย (%) ของอีฟ็อกซิมอร์ตาร์หลังแช่ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของเอมีน:PET-COOH.....	109
ตาราง 25 ภาพถ่ายชิ้นงาน ก่อน-หลัง แช่อีฟ็อกซิมอร์ตาร์ ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของเอมีน:PET-COOH...	111
ตาราง 26 ลักษณะทางกายภาพ และน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (%) ของอีฟ็อกซิมอร์ตาร์ หลังแช่ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของเอมีน:PET-COOH.....	112
ตาราง 27 ค่าการดูดซึ่มสารละลาย (%) ของอีฟ็อกซิมอร์ตาร์หลังแช่ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของอีฟ็อกซีโอล์ โกลเมอร์:EPO.....	114
ตาราง 28 ภาพถ่ายชิ้นงาน ก่อน-หลัง แช่อีฟ็อกซิมอร์ตาร์ ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของอีฟ็อกซีโอล์โกลเมอร์: EPO.....	115
ตาราง 29 ลักษณะทางกายภาพ และน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (%) ของอีฟ็อกซิมอร์ตาร์ หลังแช่ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของอีฟ็อกซีโอล์โกลเมอร์:EPO.....	116
ตาราง 30 ค่าการดูดซึ่มสารละลาย (%) ของซีเมนต์ และอีฟ็อกซิมอร์ตาร์ดัดแปรหลังแช่ในตัวทำละลาย(น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วน ของ เอมีน:PET-COOH.....	124
ตาราง 31 ภาพถ่ายชิ้นงาน ก่อน-หลัง แช่อีฟ็อกซิมอร์ตาร์ดัดแปร ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของเอมีน:PET-COOH.....	127

ตาราง 32 ลักษณะทางกายภาพ และน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (%) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรหลังแช่ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของเอมีน:PET-COOH.....	128
ตาราง 33 ค่าการดูดซึ่มสารละลาย (%) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรหลังแช่ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของเอมีน:PET-COOH.....	130
ตาราง 34 ภาพถ่ายชิ้นงาน ก่อน-หลัง แช่อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์:EPO.....	131
ตาราง 35 ลักษณะทางกายภาพ และน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (%) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรหลังแช่ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์:EPO.....	132
ตาราง 36 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรสูตรต่าง ๆ ที่ปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม เอมีน:PET-COOH.....	135
ตาราง 37 ระยะเวลาการก่อตัวของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของสารอีพ็อกซีร่วม อีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้า:EPO.....	136

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 โครงสร้างและสมบัติทางกายภาพของไคและพอลิเออลที่ใช้ในการสังเคราะห์อีพ็อกไซด์ [14].....	8
ภาพ 2 โครงสร้างและสมบัติทางกายภาพของไคและพอลิเออลที่ใช้ในการสังเคราะห์อีพ็อกไซด์ [14].....	9
ภาพ 3 การสังเคราะห์อีพอกซีเรซินบิสฟีนอล เอ (DGEBA) [10].....	10
ภาพ 4 กลไกการเกิดการปฏิกิริยาของสารทำให้แข็งระบบเอมีน [15].....	11
ภาพ 5 โครงสร้างทางเคมีของสารทำให้แข็งระบบเอมีน [2]	11
ภาพ 6 กลไกการเกิดการปฏิกิริยาของสารทำให้แข็งระบบแอนไฮไดรด์กับอีพอกซีเรซินเมื่อใช้ตัวยุทิมเอมีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [17]	12
ภาพ 7 กลไกการเกิดการปฏิกิริยาของสารทำให้แข็งระบบแอนไฮไดรด์กับสารที่มีหมู่ไฮดรอกซิล เกิดเป็นสารที่มีหมู่กรดคาร์บอกซิลิกในการทำปฏิกิริยากับอีพอกซีเรซิน [15].....	12
ภาพ 8 โครงสร้างทางเคมีของสารทำให้แข็งระบบแอนไฮไดรด์ [16]	13
ภาพ 9 กลไกการเกิดการปฏิกิริยาของสารทำให้แข็งระบบแอซิด [18].....	13
ภาพ 10 โครงสร้างทางเคมีของสารทำให้แข็งแอซิด [19]	14
ภาพ 11 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เมื่อใช้อัตราส่วนของพอลิเมอร์อีมีลชันต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกัน [11].....	15
ภาพ 12 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของซีเมนต์ที่ทำการบ่มในน้ำ และแบบบ่มในอากาศ เป็นเวลา 28 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนของพอลิเมอร์อีมีลชันต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกัน [11].....	16
ภาพ 13 ความทนแรงอัดของซีเมนต์ที่ทำการบ่มในน้ำ และแบบบ่มในอากาศ เป็นเวลา (a) 28 วัน และ (b) 90 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนของพอลิเมอร์อีมีลชันต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกัน [11]	17

ภาพ 14 การดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์อิมัลชันที่ทำการบ่มแบบในอากาศ เมื่อใช้อัตราส่วนของพอลิเมอร์อิมัลชันต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกัน [11].....	17
ภาพ 15 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อเติมอีพ็อกซีเรซินในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน [20]	18
ภาพ 16 ค่าความทนแรงอัดของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อเติมอีพ็อกซีเรซินในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน [20].....	19
ภาพ 17 ร้อยละการดูดซึมน้ำของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อเติมอีพ็อกซีเรซินในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน [20].....	19
ภาพ 18 ระยะเวลาการก่อตัวของอีพ็อกซีซีเมนต์มอร์ตาร์ดัดแปร [20]	19
ภาพ 19 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรเมื่อเติมอีพ็อกซีเรซินอิมัลชันในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน [21].....	21
ภาพ 20 ค่าความทนแรงอัดของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรเมื่อเติมอีพ็อกซีเรซินอิมัลชัน ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน [21]	21
ภาพ 21 ค่าแรงยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรเมื่อเติมอีพ็อกซีเรซินอิมัลชัน ในอัตราส่วน ต่าง ๆ กัน [21].....	22
ภาพ 22 ปฏิกริยาการสังเคราะห์น้ำมันพีอีพ็อกซีไดซ์ [10].....	23
ภาพ 23 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมอีพ็อกซีพอลิเมอร์จาก ESO และ AESO [33]	25
ภาพ 24 DSC เทอร์มोगรามของอีพ็อกซีพอลิเมอร์ผสม (ESO และ AESO) เมื่อใช้สารทำให้แข็งที่แตกต่างกัน 3 ชนิด (TCHMDA, HMDA และ LYS) [33]	25
ภาพ 25 ค่ามอดุลัสสะสมและค่า Tan δ ของอีพ็อกซีพอลิเมอร์ผสม (ESO และ AESO) เมื่อใช้สารทำให้แข็งที่แตกต่างกัน 3 ชนิด (TCHMDA, HMDA และ LYS) [33]	25
ภาพ 26 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมอีพ็อกซีพอลิเมอร์จาก ESO เมื่อใช้สารทำให้แข็ง OPAs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน [3].....	26
ภาพ 27 DSC เทอร์มोगรามของ ESO เมื่อใช้สารทำให้แข็ง OPAs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน [3].....	26

ภาพ 28 ค่ามอดุลัสสะสมและค่า $\tan \delta$ ของ ESO เมื่อใช้สารทำให้แข็ง OPAs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน [3].....	27
ภาพ 29 กราฟความเค้น-ความเครียด ของ ESO เมื่อใช้สารทำให้แข็ง OPAs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน [3].....	27
ภาพ 30 ปฏิกริยาการเกิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือ PET [34].....	28
ภาพ 31 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของมอร์ตาร์ที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่างทราย:PET [36]	30
ภาพ 32 ค่าความทนแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่าง ทราย:PET [36]	30
ภาพ 33 ค่าความทนแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสม ทราย:PET ในอัตราส่วน 3:1 และทำการบ่มโดยใช้เวลาที่แตกต่างกัน [36]	31
ภาพ 34 ค่าความทนแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสม ทราย:PET ในอัตราส่วน 3:1 และทำการบ่มที่อุณหภูมิแตกต่างกัน [36].....	31
ภาพ 35 ไกลคอลลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิส [37].....	32
ภาพ 36 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของมอร์ตาร์ที่ผสม ทราย:PET ไกลโคไลซิส ในอัตราส่วน ทราย (a) 75%, (b) 80 และ (c) 85% [37]	33
ภาพ 37 ค่าความทนแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสม ทราย:PET ไกลโคไลซิส ในอัตราส่วนทราย (a) 75%, (b) 80 และ (c) 85% [37].....	34
ภาพ 38 ชนิดของสารทำให้แข็งเอมีน 3 ชนิดที่ใช้ในงานวิจัย [1].....	35
ภาพ 39 ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของของมอร์ตาร์เมื่อใช้สารทำให้แข็งเอมีนที่แตกต่างกัน [1]	37
ภาพ 40 ภาพรวมของงานวิจัย.....	39
ภาพ 41 โครงสร้างของ PET-OH ที่เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิส PET เมื่อ (a) P-EG (b) P-ET และ (c) P-T	43

ภาพ 42 โครงสร้างของ PET-COOH ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาการเปิดวงของแอนไฮไดรด์ เมื่อ (a) P-EG-PA ชนิด 2-3 หมู่ COOH (b) P-ET-PA ชนิด 3 หมู่ COOH และ (c) P-T-PA ชนิด 4 หมู่ COOH.....	44
ภาพ 43 ปฏิกิริยาอีพ็อกซิเดชันของน้ำมันปาล์ม.....	45
ภาพ 44 ขั้นตอนการผสมอีพ็อกซิเมอร์ตาร์ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ สารทำให้แข็งเอมีนต่อ PET-COOH	46
ภาพ 45 ขั้นตอนการผสมอีพ็อกซิเมอร์ตาร์ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอีพ็อกซิโ อลิโกเมอร์ M103 ต่อ EPO	47
ภาพ 46 ขั้นตอนการผสมอีพ็อกซิเมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อทำการปรับเปลี่ยนชนิด และ อัตราส่วนของสารทำให้แข็งเอมีนต่อ PET-COOH.....	48
ภาพ 47 ขั้นตอนการผสมอีพ็อกซิเมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ อีพ็อกซิโอลิโกเมอร์ M101 ต่อ EPO	50
ภาพ 48 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงกลแบบไดนามิก โหมด Dual cantilever.....	51
ภาพ 49 โมเดลตัวอย่างชิ้นงานอีพ็อกซิเมอร์ตาร์ และอีพ็อกซิเมอร์ตาร์ดัดแปร สำหรับ ทดสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงกลแบบไดนามิก โหมด Dual cantilever.....	51
ภาพ 50 โมเดลตัวอย่างและเครื่องมือสำหรับการทดสอบสมบัติความต้านแรงดัดโค้งของ อีพ็อกซิเมอร์ตาร์	52
ภาพ 51 โมเดลตัวอย่างและเครื่องมือสำหรับการทดสอบสมบัติความต้านแรงดัดโค้งของ อีพ็อกซิเมอร์ตาร์ดัดแปร	52
ภาพ 52 โมเดลตัวอย่างสำหรับการทดสอบสมบัติความทนแรงอัด	53
ภาพ 53 โมเดลตัวอย่างชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของซีเมนต์ทางการค้า และ อีพ็อกซิเมอร์ตาร์ ซีเมนต์ทางการค้ากับอีพ็อกซิเมอร์ตาร์ดัดแปร และอีพ็อกซิเมอร์ตาร์กับ อีพ็อกซิเมอร์ตาร์ดัดแปร	54
ภาพ 54 โมเดลตัวอย่างสำหรับทดสอบการดูดซับสารละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) ของ (a) อีพ็อกซิเมอร์ตาร์ และ (b) อีพ็อกซิเมอร์ตาร์ดัดแปร.....	55

ภาพ 55 การทดสอบการก่ตัวของคอนกรีต โดยวิธีการทดสอบด้วยเทคนิค Vicat needle	56
ภาพ 56 ค่ามอดุลัสสะสมของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทที่เตรียมจากสารทำให้แข็งร่วม เอมีน:PET-COOH ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เมื่อผสมร่วมกับ PET-COOH (a) M-EA-EG (b) M-EA-ET และ (c) M-EA-T	61
ภาพ 57 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทที่เตรียมจากสารทำให้แข็งร่วม เอมีน:PET-COOH ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เมื่อผสมร่วมกับ PET-COOH (a) M-EA-EG (b) M-EA-ET และ (c) M-EA-T	62
ภาพ 58 DMA เทอร์โมแกรมของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทที่เตรียมจากสารอีพ็อกซีรวม อีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้า:EPO ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เมื่อ (a) ค่ามอดุลัสสะสมที่สถานะคล้ายแก้ว (E'_{g}) และ (b) ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$)	64
ภาพ 59 ค่ามอดุลัสสะสม และค่าการสูญเสียแทนเจนต์ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทัดแปรสูตรที่ใช้สารเคมีทั้งหมดจากบริษัท (C-EAc) และสูตรที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ (C-EA) เมื่อ (a) ค่ามอดุลัสสะสมที่สถานะคล้ายแก้ว (E'_{g}) และ (b) ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$)	66
ภาพ 60 ค่ามอดุลัสสะสมของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทัดแปรที่เตรียมจากสารทำให้แข็งร่วม เอมีน:PET-COOH ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เมื่อผสมร่วมกับ PET-COOH (a) C-EA-EG (b) C-EA-ET และ (c) C-EA-T	69
ภาพ 61 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทัดแปรที่เตรียมจากสารทำให้แข็งร่วม เอมีน:PET-COOH ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เมื่อผสมร่วมกับ PET-COOH (a) C-EA-EG (b) C-EA-ET และ (c) C-EA-T	70
ภาพ 62 ค่ามอดุลัสสะสม และค่าการสูญเสียแทนเจนต์ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทัดแปรที่เตรียมจากสารอีพ็อกซีรวม อีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้า:EPO ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เมื่อ (a) ค่ามอดุลัสสะสมที่สถานะคล้ายแก้ว (E'_{g}) และ (b) ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$)	72
ภาพ 63 (a) ค่าความต้านแรงดัดโค้ง และ (b) ค่าการยึดตัวเมื่อดัดโค้ง ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทที่ปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ PET-COOH	75
ภาพ 64 (a) ค่าความต้านแรงดัดโค้ง และ (b) ค่าการยึดตัวเมื่อดัดโค้ง ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์:EPO	77

ภาพ 65 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ PET-COOH.....	80
ภาพ 66 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอีพ็อกซีโพลิโกลิเมอร์:EPO	81
ภาพ 67 ค่าความทนแรงอัดของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ที่ปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ PET-COOH.....	83
ภาพ 68 ค่าความทนแรงอัดของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอีพ็อกซีโพลิโกลิเมอร์:EPO.....	84
ภาพ 69 ค่าความทนแรงอัดของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ PET-COOH	86
ภาพ 70 ค่าความทนแรงอัดของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอีพ็อกซีโพลิโกลิเมอร์:EPO	87
ภาพ 71 ภาพถ่ายชิ้นงานที่เตรียมจากการหล่อร่วมระหว่างซีเมนต์เก่า (C ₁) และซีเมนต์ใหม่ (C ₂) เพื่อใช้ในการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุซ่อมชนิดซีเมนต์.....	89
ภาพ 72 ภาพถ่ายชิ้นงานที่เตรียมจากการหล่อร่วมระหว่างซีเมนต์เก่า (C ₁) และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ เพื่อใช้ในการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH.....	91
ภาพ 73 ค่าความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัสบริเวณหล่อร่วมของซีเมนต์เก่าและอีพ็อกซีมอร์ตาร์ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH..	93
ภาพ 74 ภาพถ่ายชิ้นงานที่เตรียมจากการหล่อร่วมระหว่างซีเมนต์เก่า (C ₁) และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร เพื่อใช้ในการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH.....	96
ภาพ 75 ค่าความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัสบริเวณหล่อร่วมของซีเมนต์เก่าและอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH.....	98

ภาพ 76 ภาพถ่ายชิ้นงานที่เตรียมจากการหลอมระหว่างอีพ็อกซีโมรตาร์ทาร์ (M-EA) และอีพ็อกซีโมรตาร์ทาร์ดัดแปร (C-EA) เพื่อใช้ในการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH	100
ภาพ 77 ค่าความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัสบริเวณหลอมร่วมของอีพ็อกซีโมรตาร์ทาร์ (M-EA) และอีพ็อกซีโมรตาร์ทาร์ดัดแปร (C-EA) เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH.....	102
ภาพ 78 ค่าการดูดซึมน้ำของอีพ็อกซีโมรตาร์ทาร์ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของ (a) PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA) (b) P-EG-PA (c) P-ET-PA และ (d) P-T-PA	104
ภาพ 79 ค่าการดูดซึ่มสารละลายกรด (10% H ₂ SO ₄) ของอีพ็อกซีโมรตาร์ทาร์ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของ (a) PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA) (b) P-EG-PA (c) P-ET-PA และ (d) P-T-PA.....	106
ภาพ 80 ค่าการดูดซึ่มสารละลายเบส (10% NaOH) ของอีพ็อกซีโมรตาร์ทาร์ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของ (a) PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA) (b) P-EG-PA (c) P-ET-PA และ (d) P-T-PA.....	107
ภาพ 81 ค่าการดูดซึ่มสารละลายเกลือ (10% NaCl) ของอีพ็อกซีโมรตาร์ทาร์ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของ (a) PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA) (b) P-EG-PA (c) P-ET-PA และ (d) P-T-PA.....	108
ภาพ 82 ค่าการดูดซึ่มสารละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) ของอีพ็อกซีโมรตาร์ทาร์ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ เอมีน:PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA)	109
ภาพ 83 ค่าการดูดซึ่มสารละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) ของอีพ็อกซีโมรตาร์ทาร์ที่ปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์:EPO ระยะเวลาแช่น้ำ 7 วัน	113
ภาพ 84 ค่าการดูดซึ่มสารละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) ของอีพ็อกซีโมรตาร์ทาร์ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์:EPO.....	114
ภาพ 85 ค่าการดูดซึมน้ำของ (a) ซีเมนต์ (C) และอีพ็อกซีโมรตาร์ทาร์ดัดแปรทางการค้า (C-EA) และอีพ็อกซีโมรตาร์ทาร์ดัดแปร เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ	

(b) PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA) (c) P-EG-PA (d) P-ET-PA และ (e) P-T-PA 118

ภาพ 86 ค่าการดูดซึมสารละลายกรด (10% H₂SO₄) ของ (a) ซีเมนต์ (C) และอีพ็อกซีเมอร์
 ตาร์ัดัดแปรทางการค้า (C-EAc และ C-EA) และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ัดัดแปร เมื่อปรับเปลี่ยน
 ชนิดและอัตราส่วนของ (b) PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA) (c) P-EG-PA
 (d) P-ET-PA และ (e) P-T-PA 121

ภาพ 87 ค่าการดูดซึมสารละลายเบส (10% NaOH) ของ (a) ซีเมนต์ (C) และอีพ็อกซีเมอร์
 ตาร์ัดัดแปรทางการค้า (C-EAc และ C-EA) และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ัดัดแปร เมื่อปรับเปลี่ยน
 ชนิดและอัตราส่วนของ (b) PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA) (c) P-EG-PA
 (d) P-ET-PA และ (e) P-T-PA 122

ภาพ 88 ค่าการดูดซึมสารละลายเกลือ (10% NaCl) ของ (a) ซีเมนต์ (C) และอีพ็อกซีเมอร์
 ตาร์ัดัดแปรทางการค้า (C-EAc และ C-EA) และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ัดัดแปร เมื่อปรับเปลี่ยน
 ชนิดและอัตราส่วนของ (b) PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA) (c) P-EG-PA
 (d) P-ET-PA และ (e) P-T-PA 123

ภาพ 89 ค่าการดูดซึมสารละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) ของ (a) ซีเมนต์ (C) และ
 อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ัดัดแปรทางการค้า (C-EAc และ C-EA) และ (b) อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ัดัดแปร
 เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ เอมีน:PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA)
 125

ภาพ 90 ค่าการดูดซึมสารละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ัดัดแปรที่
 ปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของอีพ็อกซีโพลิโกลิเมอร์:EPO ระยะเวลาแช่น้ำ 7 วัน 129

ภาพ 91 ค่าการดูดซึมสารละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ัดัดแปร
 เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ เอมีน:PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA)
 130

ภาพ 92 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ัดัดแปรสูตรต่าง ๆ ที่
 ปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม เอมีน:PET-COOH..... 134

ภาพ 93 ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ัดัดแปรสูตรต่าง ๆ ที่
 ปรับเปลี่ยน ชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม เอมีน:PET-COOH 134

ภาพ 94 ระยะเวลาการก่อตัวของอีพ็อกซิมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วน
ของสารอีพอกซีร่วม อีพอกซีโพลิเมอร์ทางการค้า:EPO 136



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของปัญหา

ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างสมัยใหม่มีการผสมรวมของวัสดุเช่นอะกรีเกต (หิน/ทราย) หรือซีเมนต์ร่วมกับพอลิเมอร์ โดยวัสดุที่เกิดจากการรวมกันของอะกรีเกต (ทราย) กับพอลิเมอร์ จะเรียกว่าพอลิเมอร์มอร์ตาร์ (Polymer mortar, PM) ในขณะที่วัสดุที่เกิดจากการรวมกันของซีเมนต์ อะกรีเกต (ทราย) และพอลิเมอร์ จะเรียกว่าพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดัดแปร (Polymer modified mortar, PMM) หรือพอลิเมอร์ซีเมนต์ (Polymer modified cement, PMC) โดย PMM/PMC จะมีความซับซ้อนมากกว่า PM เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องสามารถละลายน้ำได้ หรืออยู่ในสถานะอิมัลชัน/ลาเท็กซ์ เพื่อให้สามารถเข้ากับซีเมนต์ และน้ำได้ ซึ่งทั้ง PM และ PMM/PMC จะมีสมบัติพิเศษเหนือกว่ามอร์ตาร์และคอนกรีตทั่วไป โดยพอลิเมอร์ที่เลือกใช้จะมีทั้งแบบเทอร์มอพลาสติก และเทอร์มอเซต เช่นพอลิเมอร์กลุ่มอีลาสโตเมอร์ พอลิอะคริลิก หรืออีพ็อกซีพอลิเมอร์ ซึ่งพอลิเมอร์แต่ละกลุ่มจะช่วยให้ PM และ PMM/PMC มีสมบัติพิเศษที่หลากหลายแตกต่างกัน [1]

อีพ็อกซีพอลิเมอร์เป็นเทอร์มอเซตพอลิเมอร์ที่สำคัญตัวหนึ่งที่นิยมใช้ในการเตรียมมอร์ตาร์ดัดแปร โดยอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่ได้จะมีความแข็งแรงของการยึดเกาะร่วมระหว่างทรายและซีเมนต์ผ่านเครือข่าย 3 มิติของอีพ็อกซีสูง ทนต่อการขีดสี ลดการดูดซึมน้ำ และทนต่อการเคี้ยวได้ดี [2] นอกจากนี้จากโครงสร้างทางเคมีที่หลายหลายของสารทำให้แข็งตัว (Hardener) ซึ่งเป็นสารเคมีในการทำให้เกิดโครงร่าง 3 มิติร่วมกับอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ ยังช่วยให้อีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร มีสมบัติด้านความเหนียว-เปราะ (Toughness-Brittleness) ที่หลากหลาย ซึ่งเกิดจากความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง และโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันของสารทำให้แข็งที่เลือกใช้ [1]

สารทำให้แข็ง (Hardener) สำหรับเตรียมอีพ็อกซีพอลิเมอร์มีหลายกลุ่ม เช่นสารทำให้แข็งกลุ่มเอมีน แอนไฮไดรด์ อัลคาไลด์ และกรด เป็นต้น โดยสารทำให้แข็งกลุ่มเอมีน โดยเฉพาะชนิด 1° เอมีน เป็นสารทำให้แข็งที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์สูง รวมถึงให้โครงร่าง 3 มิติที่มีความหนาแน่นสูง ส่งผลให้ได้มอร์ตาร์ดัดแปรที่มีสมบัติด้านความแข็งแรงสูง ทนต่อความชื้น และสารเคมีได้ดี แต่อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของโครงร่าง 3 มิติที่สูง รวมถึงขนาดโมเลกุลของสารทำให้แข็งเอมีนที่มีขนาดเล็ก ทำให้ตำแหน่งของการเชื่อมขวางอยู่ใกล้กัน (short linkage) ส่งผลให้ชิ้นงานมีความเปราะเพิ่มขึ้น ตามความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้น ได้เป็นมอร์ตาร์ดัดแปรที่มีลักษณะแข็งแต่เปราะ (Hard and Brittle) ดังนั้นการผสมรวมกับสารทำให้แข็งที่มีสายโซ่ที่ยาว หรือมีหมู่ฟังก์ชันที่ยืดหยุ่น จะช่วยให้ได้โครงร่าง 3 มิติที่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ซึ่งน่าจะช่วยให้ได้มอร์ตาร์ดัดแปรที่มีความแข็งแรงและเหนียวเพิ่มขึ้น (Hard and Tough) [3]

ในปัจจุบันพลาสติกถือเป็นวัสดุที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย เพราะมีราคาถูก ทั้งยังสามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ และบรรจุภัณฑ์ได้ง่าย และหลายหลายประเภท อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ได้มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเหล่านี้ไม่สามารถย่อยสลายได้ จึงทำให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกจำนวนมาก

โดยขยะพลาสติกในประเทศไทยมีปริมาณมาก คิดอันดับ 5 ของโลก คิดเป็น 2 ล้านตันจากปริมาณขยะทั้งหมด ซึ่งขยะพลาสติกดังกล่าวสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้ปีละ 0.5 ล้านตัน ในขณะที่ขยะพลาสติกที่เหลืออีกกว่า 1 ล้านตัน จะถูกนำไปกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ และเผาทำลาย และยังมีขยะพลาสติกอีกจำนวนมากที่ตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อม ทั้งบนบกและในแหล่งน้ำ โดยเฉพาะในแหล่งน้ำทั้งแหล่งน้ำจืด และมหาสมุทร พบขยะพลาสติกลอยอยู่บนน้ำเป็นจำนวนมาก ส่งผลเสียต่อสัตว์น้ำที่อาจกินขยะพลาสติกเหล่านั้นลงไป [4] ในบรรดาพลาสติกที่ใช้ในปัจจุบัน โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) เป็นพลาสติกตัวหนึ่งที่ยิยมใช้ในการผลิตขวดน้ำดื่ม โดยในประเทศไทยมีการผลิตขวดน้ำดื่มจาก PET มากกว่า 4,000 ล้านขวดต่อปี [5] ซึ่งหมายถึงขยะพลาสติกจำนวนมากที่จะออกสู่สิ่งแวดล้อม

โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือเพ็ต (PET) เป็นพอลิเมอร์กลุ่มพอลิเอสเทอร์ที่สามารถดัดแปรโครงสร้างเพื่อปรับเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันที่ตำแหน่งปลายได้ง่าย ได้เป็นเพ็ตดัดแปร ทั้ง PET มีสมบัติด้านความเหนียว และความต้านทานต่อความชื้นและสารเคมีที่ดี ดังนั้นจากแนวคิดของการพัฒนาที่ยั่งยืน และการทำให้เกิดการหมุนเวียนของการใช้ทรัพยากรให้เกิดมูลค่าสูงที่สุด งานวิจัยนี้จึงสนใจดัดแปรขยะพลาสติก PET ให้มีหมู่ปลายเป็นหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (PET-COOH) และหมู่คาร์บอกซิเลต (PET-COO⁻) เพื่อนำมาใช้เป็นสารทำให้แข็งสำหรับการเตรียมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร (หมู่คาร์บอกซิเลตจะช่วยให้ PET สามารถเข้ากับซีเมนต์ในสถานะสารละลายได้) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของอัตราส่วนของการใช้สารทำให้แข็งระหว่างเอมีนและเพ็ตดัดแปร และจำนวนหมู่ฟังก์ชันที่ตำแหน่งปลายของเพ็ตดัดแปร ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ ที่ศึกษาจะส่งผลต่อความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง 3 มิติที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรที่มีสมบัติที่แตกต่างกัน

นอกจากการศึกษาในส่วนของการทำให้แข็ง (เอมีนและเพ็ตดัดแปร) งานวิจัยนี้ยังสนใจศึกษาในส่วนของการใช้ไอพ็อกซีโกลิโกลเมอร์ โดยสนใจศึกษาผลของการใช้ไอพ็อกซีโกลิโกลเมอร์ชีวภาพในการเตรียมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร เพื่อลดปริมาณการใช้ไอพ็อกซีโกลิโกลเมอร์ทางการค้า เนื่องจากไอพ็อกซีโกลิโกลเมอร์ทางการค้าที่ยิยมใช้ในปัจจุบันเตรียมมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างจากอีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) และบิสฟีนอล เอ (Bisphenol A) ซึ่งสารตั้งต้นเหล่านี้มีความเป็นพิษสูง ทั้งกับผู้ผลิต และผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างไอพ็อกซีโกลิโกลเมอร์ชีวภาพที่เตรียมจากการดัดแปรพันธะคู่ของน้ำมันพืชให้เป็นหมู่ไอพ็อกไซด์ (Epoxidized palm oil, EPO) ต่อไอพ็อกซีโกลิโกลเมอร์ทางการค้า ต่อสมบัติของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรที่เตรียมได้ เพื่อหาความเป็นไปได้และอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้งานอีพ็อกซีโกลิโกลเมอร์ชีวภาพต่อไป

จุดมุ่งหมายของการศึกษา

เพื่อศึกษาผลของเพ็ตดัดแปร และน้ำมันพืชดัดแปรต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร

ขอบเขตการวิจัย

1. สังเคราะห์ PET-OH จากการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิสด้วยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่แตกต่างกัน
2. สังเคราะห์ PET-COOH จากการทำปฏิกิริยาการเปิดวงด้วยสารแอนไฮไดรด์
3. สังเคราะห์น้ำมันปาล์มอีพ็อกซีไดซ์ จากการทำปฏิกิริยาอีพ็อกซีเดชัน
4. ศึกษาการเตรียมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรโดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างสารทำให้แข็งเอมีน และพีดีดีเอ และอัตราส่วนระหว่างอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้า และน้ำมันพืชดัดแปร
5. ศึกษาสมบัติความหยุ่นเหนียว สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร
 - 5.1. ศึกษาสมบัติความหยุ่นเหนียว (Viscoelastic properties) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วัสดุเชิงกลแบบไดนามิก (Dynamic Mechanical Analysis; DMA)
 - 5.2. ศึกษาสมบัติเชิงกล โดยการทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural strength) ความทนแรงอัด (Compressive strength) และแรงยึดเหนี่ยว (Bond strength)
 - 5.3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ โดยการทดสอบการดูดซึมน้ำ และความต้านทานต่อตัวทำละลายกรด เบส และเกลือ
6. ศึกษาการเตรียมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรโดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างสารทำให้แข็งเอมีน และพีดีดีเอ และอัตราส่วนระหว่างอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้า และน้ำมันพืชดัดแปร
7. ศึกษาสมบัติความหยุ่นเหนียว สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร
 - 7.1. ศึกษาสมบัติความหยุ่นเหนียว (Viscoelastic properties) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วัสดุเชิงกลแบบไดนามิก (Dynamic Mechanical Analysis; DMA)
 - 7.2. ศึกษาสมบัติเชิงกล โดยการทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural strength) ความทนแรงอัด (Compressive strength) และแรงยึดเหนี่ยว (Bond strength)
 - 7.3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ โดยการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์ การดูดซึมน้ำ และความต้านทานต่อตัวทำละลายกรด เบส และเกลือ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเมอร์มอร์ตาร์ (Polymer mortar) และพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดัดแปร (Polymer modified mortar)

มอร์ตาร์เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้หลากหลาย เช่นงานฉาบ ก่อ เท และใช้เป็นวัสดุซ่อมแซม นอกจากมอร์ตาร์ทั่วไปแล้ว ในปัจจุบันได้มีการนำมอร์ตาร์มาปรับปรุงสมบัติให้มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยการผสมร่วมกับพอลิเมอร์เรซิน เช่นพอลิเมอร์มอร์ตาร์ (พอลิเมอร์เรซิน + ทราย) และพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดัดแปร (พอลิเมอร์เรซิน + ทราย + ปูนซีเมนต์ + น้ำ) (ภาพ 1) ซึ่งนอกจากพอลิเมอร์จะช่วยเสริมความแข็งแรงแล้ว ยังช่วยให้มอร์ตาร์สามารถทนต่อ สารเคมี และการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมในการใช้งาน เช่นโครงสร้างอาคารที่อยู่บริเวณที่มีความชื้นและการกัดกร่อนของไอทะเลสูง ได้ดีขึ้น



ภาพ 1 องค์ประกอบของ (a) อีพ็อกซีมอร์ตาร์ และ (b) อีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร

ประเภทของพอลิเมอร์เรซิน (Polymer resins) [6]

1. วัสดุยืดหยุ่น (Elastomers)

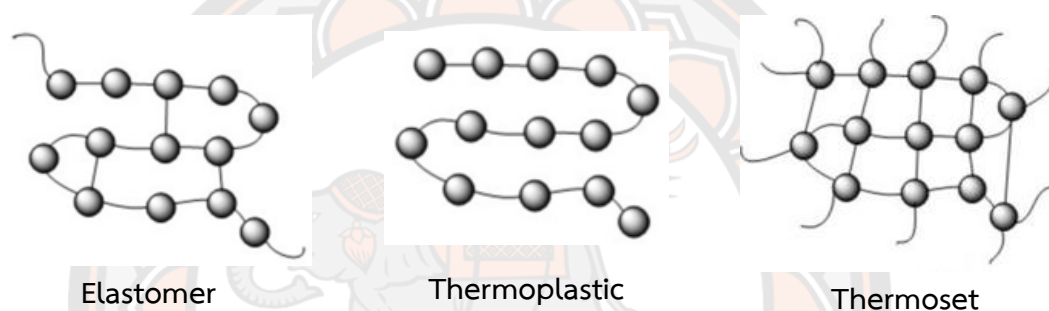
อีลาสโตเมอร์ มักจะเป็นเทอร์โมเซต (ต้องอาศัยกระบวนการวัลคาไนเซชัน) แต่สามารถเป็นเทอร์โมพลาสติกได้เช่นกัน โดยพอลิเมอร์โซ่ยาวถูกเชื่อมกันระหว่างผลิต เช่นผ่านกระบวนการ วัลคาไนเซชัน สมบัติยืดหยุ่นนั้นได้มาจากการที่โซ่พอลิเมอร์นั้นสามารถขยับตัวได้เพื่อกระจายความเค้น พันธะจากการเชื่อมขวางช่วยให้วัสดุยืดหยุ่นสามารถกลับสู่สภาพตั้งต้นได้ (Recovery) เมื่อความเค้นถูกเอาออกไป ในทางตรงกันข้ามถ้าไม่มีการเชื่อมขวางวัสดุจะเปลี่ยนรูปร่างแบบถาวร เนื่องจากไม่มีอะไรมาหยุดไม่ให้สายพอลิเมอร์ให้เคลื่อนออกจากกัน นอกจากนี้อุณหภูมิก็มีผลกับความยืดหยุ่น โดยเมื่อวัสดุยืดหยุ่นถูกลดอุณหภูมิลงต่ำจนทำให้เปลี่ยนสถานะเป็นแก้ว จะทำให้โซ่พอลิเมอร์นั้นเคลื่อนไหวได้น้อยลงจึงมีสมบัติยืดหยุ่นน้อยกว่าการใช้งานที่อุณหภูมิที่สูงกว่า

2. พอลิเมอร์ประเภทเทอร์มอพลาสติก (Thermoplastic polymer)

เทอร์มอพลาสติกเป็นพลาสติกที่มีโครงสร้างแบบโซ่ตรง หรือโครงสร้างแบบกิ่งเป็นสายยาว เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวและหลอมเหลว แต่หากอุณหภูมิลดลงจะกลับไปแข็งตัวตามเดิม อีกทั้งยังสามารถหลอมซ้ำ และทำให้เป็นรูปร่างเดิมหรือรูปร่างใหม่โดยที่สมบัติของพลาสติกยังคงเดิม เช่น พอลิเอทิลีน พอลิสไตรีน และพอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น

3. พอลิเมอร์ประเภทเทอร์มอเซต (Thermosetting polymer)

เทอร์มอเซตเป็นพลาสติกที่มีโครงสร้างแบบตาข่ายหรือร่างแห หากได้รับความร้อนจะไม่อ่อนตัว เมื่อขึ้นรูปแล้วจะแข็งตัว และมีความแข็งแรง ทนต่อความร้อน และความกดดัน กรณีที่เกิดการแตกหักหรือได้รับความร้อนจะกลายเป็นขี้เถ้า ไม่สามารถนำกลับไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้ เช่น พอลิยูรีเทน ฟีนอลิกเรซิน และอีพ็อกซีพอลิเมอร์ เป็นต้น



ภาพ 2 โครงสร้างของพอลิเมอร์เรซิน [7]

ในงานวิจัยนี้สนใจพอลิเมอร์เรซินที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง และทนต่อสารเคมี จึงเลือกใช้อีพ็อกซีพอลิเมอร์ เนื่องจากอีพ็อกซีพอลิเมอร์มีโครงสร้างร่างแห 3 มิติ (3D network polymer) ซึ่งจะช่วยเสริมความแข็งแรง และความทนต่อสารเคมีให้กับมอร์ตาร์ (Mortar) และ มอร์ตาร์ดัดแปร (Modified mortar) ได้

2.2 อีพ็อกซีพอลิเมอร์ (Epoxy polymer)

อีพ็อกซีเป็นพอลิเมอร์กลุ่มเทอร์มอเซต มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการเคลือบผิว เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และลดการผุกร่อนของเหล็ก ไม้ ซีเมนต์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรืออุตสาหกรรมการยึดติด เช่น กาวที่ต้องการความแข็งแรงของการยึดติดสูง อีพ็อกซีเป็นเทอร์มอเซตพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นในเรื่องการทนต่อแรงกระทำสูง ทนต่อสารเคมี และตัวทำละลายได้ดี ทนต่อแรงกระแทก และเป็นฉนวนที่ดี [1,8]

ในปัจจุบันมีการนำอีพ็อกซีมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง [1] เช่น การเตรียมเป็นอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร หรือที่เรียกว่าอีพ็อกซีซีเมนต์ ซึ่งอีพ็อกซีมอร์ตาร์จะมีจุดเด่นเรื่องการทนต่อแรงอัดสูง จึงนิยมใช้ในการเสริมแรงให้คอนกรีตสำหรับพื้นผิวที่ต้องการการรับแรงสูง

ในขณะที่อีพ็อกซีซีเมนต์จะมีจุดเด่นเรื่องการทำทานทานการผ่านของตัวทำละลายหรือความชื้นได้ดี จึงนิยมใช้กับโครงสร้างอาคารที่ต้องการการผ่านของความชื้นหรือตัวทำละลายได้ดีต่ำ เช่นโครงสร้างอาคารที่อยู่บริเวณที่มีความชื้นและการกัดกร่อนของไอทะเลสูง ซึ่งความชื้นและไอทะเลจะส่งผลต่อการผุกร่อนของคอนกรีตและเหล็กของโครงสร้างอาคารให้เกิดได้เร็วยิ่งขึ้น หรือใช้เททับพื้นผิวคอนกรีตของอาคารที่มีการปลูกสร้างบริเวณที่ดินมีความชื้นสูง ซึ่งหากไม่มีการปูอีพ็อกซีซีเมนต์ปิดทับความชื้นดังกล่าวจะผ่านช่องว่างของคอนกรีตขึ้นมาที่พื้นผิวของคอนกรีตได้ง่าย ส่งผลให้สารเคลือบหรือวัสดุที่ใช้เคลือบคอนกรีตเกิดการบวมพองขึ้นได้

อีพ็อกซีพอลิเมอร์เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาของสาร 2 ชนิด คืออีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin) หรืออีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ (Epoxy oligomer) ซึ่งเป็นสารที่มีหมู่อีพ็อกไซด์มากกว่า 2 หมู่ในโครงสร้าง และสารทำให้แข็ง (Hardener) ซึ่งเป็นสารที่มีหมู่ฟังก์ชันเอมีน แอนไฮไดรด์ ฟีนอลไซโคอะลิฟาติกเอมีน อะลิฟาติกเอมีน หรือไทออล มากกว่า 2 หมู่ในโครงสร้าง [8-9]

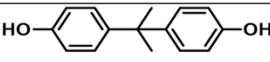
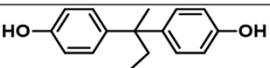
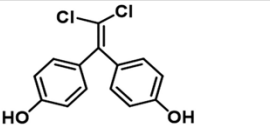
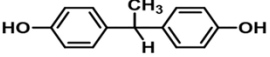
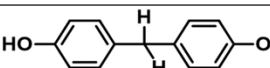
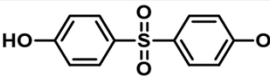
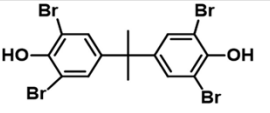
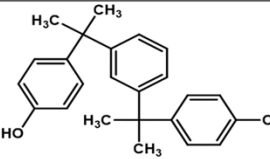
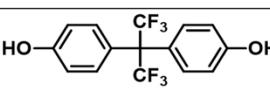
2.2.1 อีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ (Epoxy oligomer)

อีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ ประกอบด้วยมอนอเมอร์ (Monomer) หรือพอลิเมอร์กลุ่มอีพ็อกไซด์ที่มีวงแหวนออกซิเรน (Oxirane) เช่นอีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) ไกลซิโดล (Glycidol) และ 1,2,7,8-ไดอีพ็อกซีออกเทน (1,2,7,8-Diepoxyoctane) เป็นต้น (ภาพ 3) ทำปฏิกิริยาร่วมกับไต และพอลิออลสำหรับสังเคราะห์อีพ็อกไซด์ เช่นบิสฟีนอล เอ (Bisphenol A) บิสฟีนอล เอฟ (Bisphenol F) และโนโวลาค (Novolac) เป็นต้น (ภาพ 4-5)

สารเคมีร้อยละ 90 ที่ใช้ในการเตรียมอีพ็อกซีเรซินในปัจจุบัน เกิดจากการทำปฏิกิริยาของอีพิคลอโรไฮดรินกับบิสฟีนอล เอ ในอัตราส่วนที่ใช้อีพิคลอโรไฮดริน 2 โมลต่อโมลของฟีนอล [3, 10-11] ได้เป็นอีพ็อกซีเรซินบิสฟีนอลเอ หรือ บิสฟีนอล เอ ไดไกลซิไดลอีเทอร์ (Bisphenol A diglycidyl ether; (DGEBA)) [10] (ภาพ 6) มีสูตรโมเลกุล คือ $C_{21}H_{24}O_4$ และมีน้ำหนักโมเลกุล คือ 340.4 มีลักษณะเป็นของเหลว ไม่มีสี เหนียว มีกลิ่นอีพ็อกซีเล็กน้อย อีกทั้งยังมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ $40-44^{\circ}C$ และมีจุดเดือดที่อุณหภูมิ $210^{\circ}C$ [12-13]

<i>Name</i>	<i>Structure</i>	<i>Reactant</i>
Epichlorohydrin		$\text{Cl}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}_2$ or $\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_2-\text{OH}$
Glycidol		$\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}_2$
1,2,7,8-Diepoxyoctane		$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}_2$
1,1,1-Tris(hydroxymethyl)propane triglycidyl ether		$\text{HO}-\text{CH}_2-\text{C}(\text{OH})_2-\text{CH}_2-\text{OH}$ and $\text{Cl}-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{O})-\text{CH}_2$
Diglycidyl ethers of aliphatic glycols		$\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$ and $\text{Cl}-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{O})-\text{CH}_2$
Diepoxyphenol		$\text{HO}-\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH})_2-\text{CH}_2-\text{OH}$ and $\text{Cl}-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{O})-\text{CH}_2$
DGEBA		$\text{HO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{OH}$ and $\text{Cl}-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{O})-\text{CH}_2$

ภาพ 3 สารประกอบที่มีวงแหวนออกซิเรน (Oxirane) และสารตั้งที่สอดคล้องกัน (Oxirane Ring-Containing Compounds and Their Corresponding Reactants) [14]

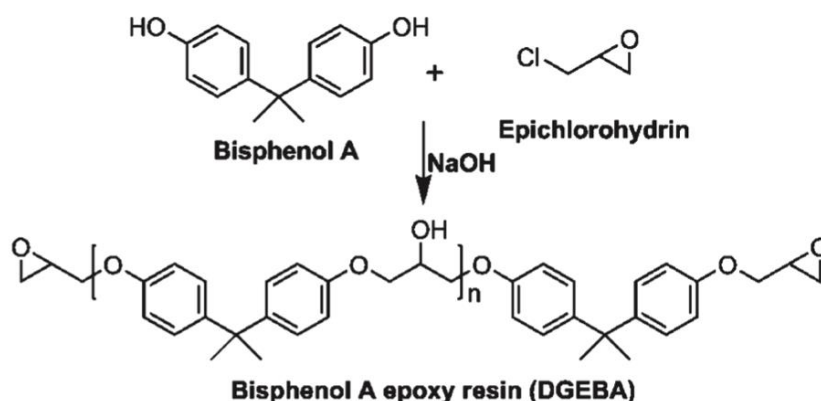
Name	Structure	Melting Point (°C)	Boiling Point (°C)	Density (g/cm ³)	Application
BPA		158–159	220	1.20	High-performance general-purpose epoxies
Bisphenol B		124–125	412	1.19	High-performance waterproof epoxy coatings
Bisphenol C		213–217	239	1.28	Flame-retardant high-performance epoxies
Bisphenol E		123–127	224	1.19	Resin-injection repair of advanced epoxy composites
Bisphenol F		159–161	314	1.17	High-performance solvent-free epoxy coatings
Bisphenol S		245–250	505.3	1.43	Thermostable and flame-retardant epoxies
TBPA		178	250	2.12	Electronic enclosures, flame-retardant epoxies
Bisphenol M		135–139	495.9	1.107	High-performance tough epoxies
Bisphenol AF		159–163	316–664	1.37	High-solids-content coatings, adhesives, laminates, and low-dielectric materials

ภาพ 1 โครงสร้างและสมบัติทางกายภาพของไดและพอลิออลที่ใช้ในการสังเคราะห์อีพ็อกไซด์ [14]

Name	Structure	Melting Point (°C)	Boiling Point (°C)	Density (g/cm ³)	Application
Novolac		77–93	Decomposed	1.24–1.21	High-performance thermostable low-dielectric epoxies
Monoglycerides of vegetable oils ^a		32–89	190–320	0.91–0.95	Flexible and biodegradable epoxies
Fatty amide diols of vegetable oils ^a		36–96	195–340	0.92–0.96	Tough and biodegradable epoxies
Aliphatic diols	$(n = 0-8)$	-10 to 60	195–280	0.91–1.12	Low-viscosity flexible epoxies
Hydrogenated bisphenol A		168–171	230–234	1.048	Weather-resistant and color-stable epoxy coatings
Pentaerythritol		256–258	276 at 30 m mHg	1.39	High-performance multifunctional epoxies with low dielectric constants
Glycerol		17.8	290	1.261	High-performance biocompatible hyperbranched epoxies
1,1,1-Tris(hydroxymethyl)ethane		193–195	219–220 at 10 m mHg	1.159	Hyperbranched epoxies
Sorbitol		94–96	295	1.49	Biodegradable hyperbranched epoxies

^aIn the structure, R represents the hydrocarbon part of the fatty acid.

ภาพ 2 โครงสร้างและสมบัติทางกายภาพของโพลีเอพอกซีและพอลิเอพอกซีที่ใช้ในการสังเคราะห์อีพอกซี [14]



ภาพ 3 การสังเคราะห์อีพอกซีเรซินบิสฟีนอล เอ (DGEBA) [10]

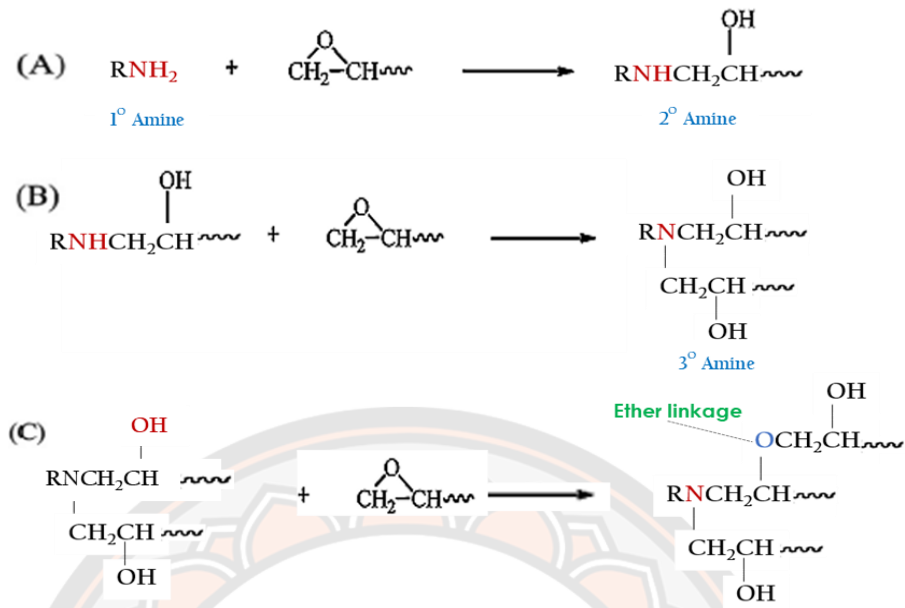
2.2.2 สารทำให้แข็ง (Hardener)

อีพอกซีพอลิเมอร์เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาของสาร 2 ชนิด คืออีพอกซีเรซิน หรืออีพอกซีโอลิโกเมอร์ (Epoxy oligomer) ซึ่งเป็นสารที่มีหมู่อีพอกไซด์มากกว่า 2 หมู่ในโครงสร้าง และสารทำให้แข็ง (Hardener) ซึ่งเป็นสารที่มีหมู่ฟังก์ชันเอมีน แอนไฮไดรด์ ฟีนอล ไฮโคอะลิฟาติกเอมีน อะลิฟาติกเอมีน หรือไทออล มากกว่า 2 หมู่ในโครงสร้าง [8-9]

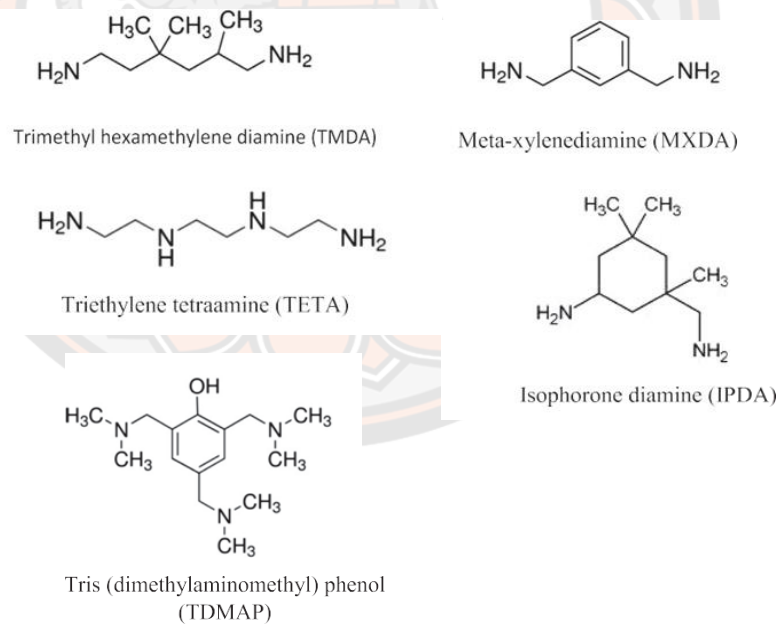
1. สารทำให้แข็งระบบเอมีน (Amine Hardener) [14-15]

ปฏิกิริยาของสารทำให้ระบบแข็งเอมีน นิยมใช้สารทำให้แข็งชนิดเอมีนปฐมภูมิ (1° Amine) ในการทำปฏิกิริยากับหมู่อีพอกไซด์ของอีพอกซีโอลิโกเมอร์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอมีนทุติยภูมิ (2° Amine) (ภาพ 7 (A)) หลังจากนั้นเมื่อ 2° Amine ทำปฏิกิริยากับอีพอกไซด์ จะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นเอมีนตติยภูมิ (3° Amine) (ภาพ 7 (B)) ซึ่งนอกจากพันธะเอมีนแล้ว หมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดจากปฏิกิริยาการเปิดวงของหมู่อีพอกไซด์ยังสามารถทำปฏิกิริยากับอีพอกซีโอลิโกเมอร์ เกิดการเชื่อมขวางเป็นอีเทอร์ (Eter linkage) เกิดขึ้นในโครงสร้าง (ภาพ 7 (C)) ทั้งนี้โดยทั่วไปแล้วสารประกอบเอมีนแบบปฐมภูมิจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด รองลงไปคือเอมีนแบบทุติยภูมิ และเอมีนตติยภูมิตามลำดับ (1° Amine > 2° Amine > 3° Amine)

ตัวอย่างสารทำให้แข็งระบบเอมีนที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ไตรเมทิลเฮกซะเมทิลีนไดเอมีน (Trimethyl hexamethylene diamine; TMTD) ไตรเอทิลเตตระเอมีน (Triethylenetetramine; TETA) เมตาไซลีนไดเอมีน (Meta-xylenediamine; MXDA) ไอโซฟิโรนไดเอมีน (Isophorone diamine; IPDA) และตรีส (ไดเมทิลอมีโนเมทิล) ฟีนอล (Tris (dimethylamino methyl) phenol; TDMAP) ซึ่งสูตรโครงสร้างทางเคมีของสารทำให้แข็งระบบเอมีนแสดงดังภาพ 8 [2]



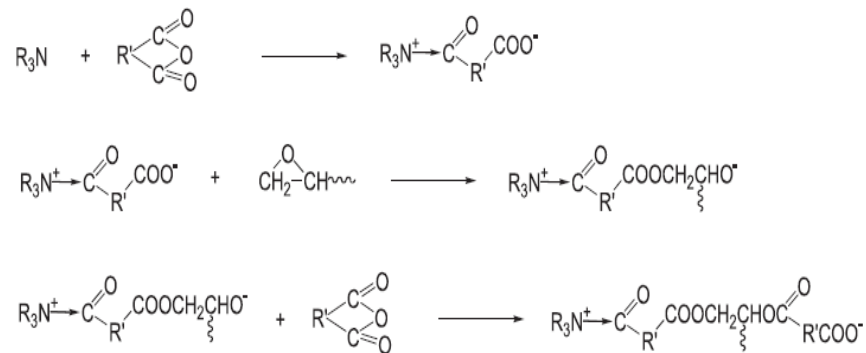
ภาพ 4 กลไกการเกิดการปฏิกิริยาของสารทำให้แข็งระบบเอมีน [15]



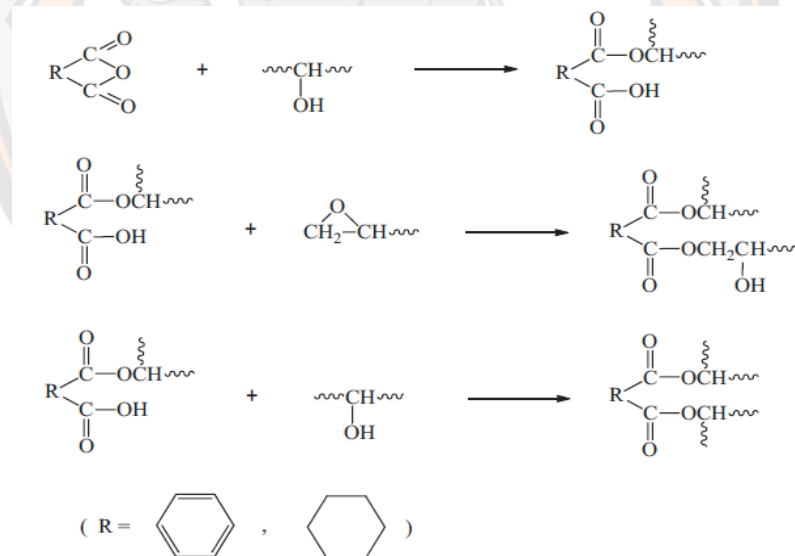
ภาพ 5 โครงสร้างทางเคมีของสารทำให้แข็งระบบเอมีน [2]

2. สารทำให้แข็งระบบแอนไฮไดรต์ (Anhydride Hardener) [16]

การทำปฏิกิริยาร่วมกับสารทำให้แข็งในกลุ่มแอนไฮไดรต์ จะสามารถทำได้ 2 วิธี คือการทำปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างอีพอกซีเรซินกับสารแอนไฮไดรต์ [17] (ภาพ 9) หรือนำสารแอนไฮไดรต์ไปทำปฏิกิริยาร่วมกับสารที่มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลเกิดเป็นหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่ตำแหน่งปลายก่อนนำไปทำปฏิกิริยาร่วมกับอีพอกซีเรซิน [15-18] (ภาพ 10)

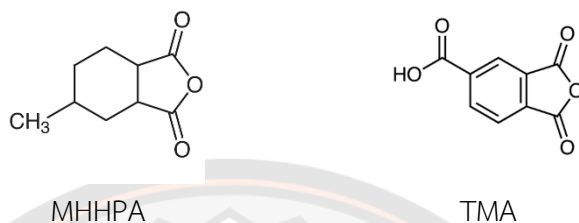


ภาพ 6 กลไกการเกิดการปฏิกิริยาของสารทำให้แข็งระบบแอนไฮไดรต์กับอีพอกซีเรซิน เมื่อใช้เตตติลามีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [17]



ภาพ 7 กลไกการเกิดการปฏิกิริยาของสารทำให้แข็งระบบแอนไฮไดรต์กับสารที่มีหมู่ไฮดรอกซิล เกิดเป็นสารที่มีหมู่กรดคาร์บอกซิลิกในการทำปฏิกิริยากับอีพอกซีเรซิน [15]

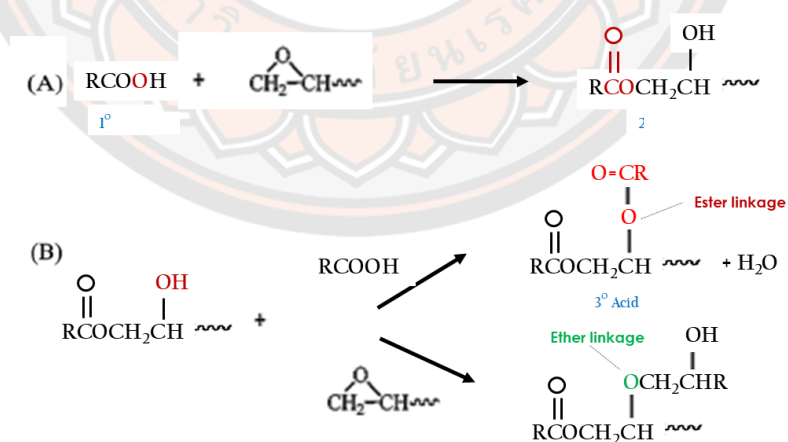
ตัวอย่างสารทำให้แข็งแอนไฮไดรด์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ เฮกซะไฮโดร-4-เมทิลพทาสิกแอนไฮไดรด์ (Hexahydro-4-methylphthalic anhydride; MHHPA) และ ไตรเมลลิติกแอนไฮไดรด์ (Trimellitic anhydride; TMA) เป็นต้น (ภาพ 11) [16]



ภาพ 8 โครงสร้างทางเคมีของสารทำให้แข็งระบบแอนไฮไดรด์ [16]

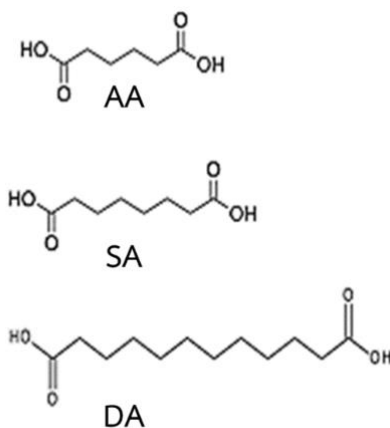
3. สารทำให้แข็งระบบแอซิด (Acid Hardener) [18]

การทำปฏิกิริยาร่วมกับสารทำให้แข็งในกลุ่มแอซิด จะเกิดปฏิกิริยาได้ 2 ขั้นตอน คือการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่แอซิดกับหมู่อีพอกไซด์ของอีพอกซีเรซินเกิดการเชื่อมขวางชนิดเอสเทอร์ (Ester linkage) และหมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดจากการเปิดวงอีพอกไซด์ (ภาพ 12 (A)) จากนั้นหมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดจากการเปิดวงจะสามารถไปเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งหมู่แอซิดของสารทำให้แข็ง และหมู่อีพอกไซด์ของอีพอกซีเรซิน เกิดเป็นการเชื่อมขวางชนิดเอสเทอร์ (Ester linkage) หรือการเชื่อมขวางแบบอีเทอร์ (Ether linkage) (ภาพ 12 (B)) ตามลำดับ



ภาพ 9 กลไกการเกิดการปฏิกิริยาของสารทำให้แข็งระบบแอซิด [18]

ตัวอย่างสารทำให้แข็งระบบแอซิดที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ อะดิพิกแอซิด (Adipic acid; AA) เซบาซิกแอซิด (Sebacic acid; SA) และ 1,12-โดดีเคนไดคาร์บอกซีลิกแอซิด (1,12-dodecanedicarboxylic acid; DA) เป็นต้น แสดงดังภาพ 13 [19]



ภาพ 10 โครงสร้างทางเคมีของสารทำให้แข็งแอซิด [19]

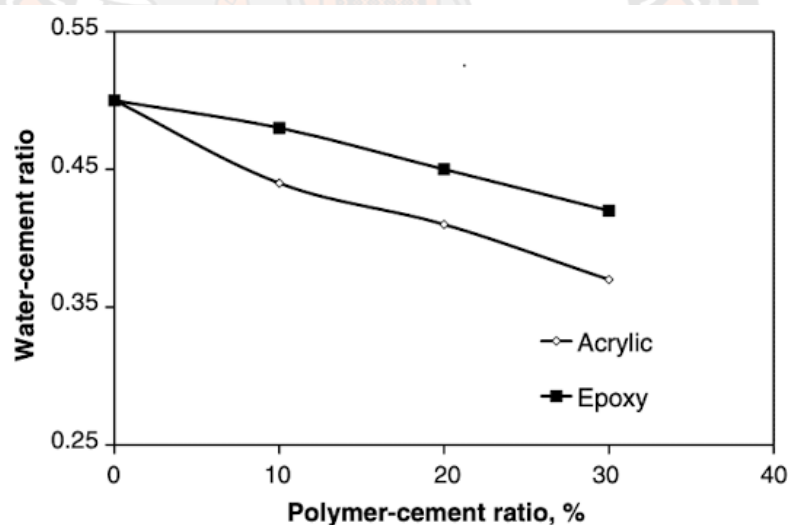
2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร

ปี ค.ศ. 2007 Aggarwal และคณะ [11] ศึกษาผลของพอลิเมอร์อิมัลชันที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คืออีพ็อกซีอิมัลชัน และอะคริลิกอิมัลชัน ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน (0% ถึง 30% โดยมวลของซีเมนต์) ในการเตรียมพอลิเมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (เกรด 43) ต่อทรายควอทซ์ (เบอร์ 10) ในอัตราส่วนซีเมนต์ต่อทราย เท่ากับ 1:3 โดยส่วนผสมทั้งหมดจะมีการปรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ให้มีค่าการไหลอยู่ระหว่าง 110 ถึง 120 mm โดยอีพ็อกซีอิมัลชันที่ใช้ในงานวิจัยนี้เตรียมจากบิสฟีนอลเอ (อีพ็อกซีโอลิโกเมอร์) และอะมิโนเอไมด์ (สารทำให้แข็ง) ที่กระจายตัวอยู่ในน้ำ โดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุเป็นสารช่วยกระจายตัว หลังจากเทส่วนผสมลงในแม่พิมพ์ที่กำหนด วางชิ้นงานเพื่อให้เกิดการบ่ม (Cure) หรือเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้ผ้าเปียกคลุมชิ้นงาน (Wet covering) และป้องกันการระเหยของน้ำโดยใช้แผ่นพอลิเอทิลีนคลุมทับอีกชั้น เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำชิ้นงานไปเก็บที่ห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ และ $50 \pm 5\% \text{RH}$ (Air cure) เป็นเวลา 27 วัน สำหรับศึกษาความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural strength) และ 27 และ 89 วัน สำหรับศึกษาความทนแรงอัด (Compressive strength) รวมระยะเวลาในการบ่มชิ้นงานคือ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ซึ่งจะเรียกว่าการบ่มในอากาศ (Acrylic (Air cured) และ Epoxy (Air cured) ที่อัตราส่วนพอลิเมอร์ต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0) นอกจากนี้ยังศึกษาผลของการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน (Water absorption) เทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผสมร่วมกับพอลิเมอร์ โดยการนำชิ้นงานไปบ่มในน้ำ (Water cure)

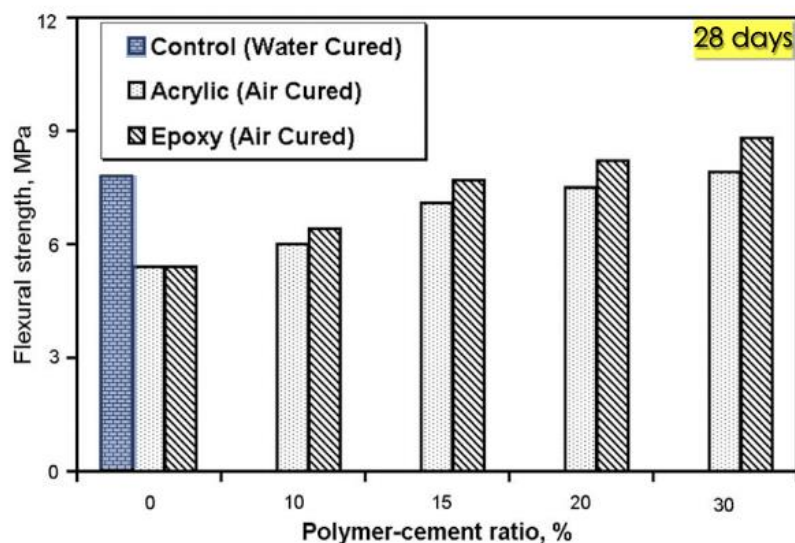
จากผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีค่าลดลงตามอัตราส่วนของพอลิเมอร์อิมัลชันที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้การใช้น้ำที่ลดลงอาจเนื่องมาจากสารลดแรงตึงผิวในพอลิเมอร์อิมัลชัน และแรงตึงผิวที่ต่ำกว่าของโมเลกุลพอลิเมอร์ ส่งผลให้การไหลของของผสมง่ายขึ้น ดังนั้นเมื่อควบคุมค่าการไหลที่คงที่

(110-120 mm) ปริมาณน้ำที่ใช้จึงลดลงตามอัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการผสมร่วมกับอะคริลิกอิมัลชันมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำกว่าการผสมร่วมกับอีพ็อกซีอิมัลชัน (ภาพ 14)

จากผลการทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง พบว่ารูปแบบการบ่มมีผลต่อสมบัติความต้านแรงดัดโค้งของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่ไม่ผสมร่วมกับพอลิเมอร์ และทำการบ่มในน้ำ (Water cure) เป็นเวลา 28 วัน มีค่าความต้านแรงดัดโค้งสูงกว่าการบ่มในอากาศ (Air cure) โดยมีค่าความต้านแรงดัดโค้งของชิ้นงานที่บ่มในน้ำ 7.8 MPa ในขณะที่การบ่มในอากาศมีค่าน้อยกว่าประมาณ 20% การผสมร่วมกับพอลิเมอร์ทั้งอีพ็อกซีอิมัลชัน และอะคริลิกอิมัลชัน พบว่าช่วยให้ชิ้นงานมีค่าความต้านแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น โดยการผสมร่วมกับพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดในอัตราส่วน 30% โดยมวลของซีเมนต์ ให้ค่าความต้านแรงดัดโค้งสูงสุด และมีค่าสูงกว่าสูตรที่ไม่ผสมพอลิเมอร์และทำการบ่มในน้ำ และในทุกอัตราส่วนการผสมร่วมกับอีพ็อกซีอิมัลชันให้ค่าความต้านแรงดัดโค้งสูงกว่าการผสมร่วมกับอะคริลิกอิมัลชัน โดยเมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่ผสมพอลิเมอร์และทำการบ่มในอากาศ (Air cure) พบว่าการผสมร่วมกับอีพ็อกซีอิมัลชันในอัตราส่วน 30% โดยมวลของซีเมนต์ ชิ้นงานมีค่าความต้านแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น 60% ในขณะที่การผสมร่วมกับอะคริลิกอิมัลชันมีค่าเพิ่มขึ้น 40% (ภาพ 15)



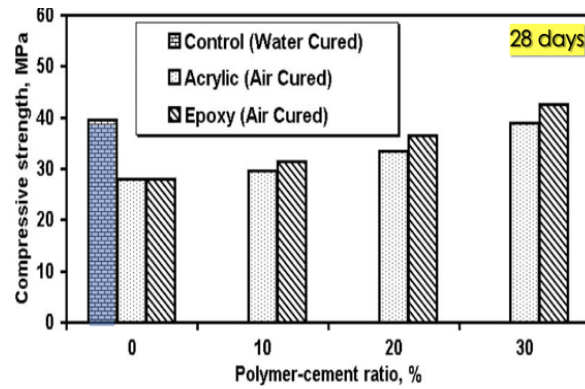
ภาพ 11 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เมื่อใช้อัตราส่วนของพอลิเมอร์อิมัลชันต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกัน [11]



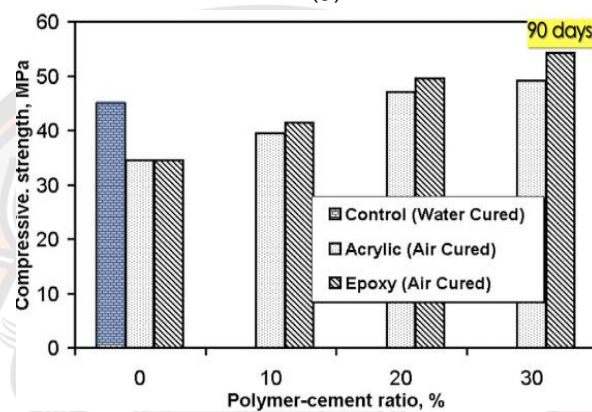
ภาพ 12 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของซีเมนต์ที่ทำการบ่มในน้ำ และแบบบ่มในอากาศ เป็นเวลา 28 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนของพอลิเมอร์อิมัลชันต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกัน [11]

ผลการทดลองเป็นไปในทำนองเดียวกันกับการทดสอบความทนแรงอัด ที่พบว่า การบ่มในน้ำ ให้ค่าการทนแรงอัดสูงกว่าการบ่มในอากาศ (Air cure) การผสมร่วมกับพอลิเมอร์ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นช่วยให้ชิ้นงานมีค่าความทนแรงอัดเพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานที่ผสมร่วมกับพอลิเมอร์เพียง 20% โดยมวลของซีเมนต์ พบว่าสามารถช่วยให้ชิ้นงานมีค่าความทนแรงอัดสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ผสมพอลิเมอร์ และทำการบ่มในน้ำ ซึ่งผลดังกล่าวมีประโยชน์ต่อการใช้งานจริงในงานซ่อม ซึ่งการบ่มโดยการแช่น้ำ ตลอดระยะเวลาในการบ่ม ในความเป็นจริงเป็นการทำที่ยาก นอกจากนี้ยังพบว่า การผสมร่วมกับอีพ็อกซีอิมัลชันให้ค่าการทนแรงอัดสูงกว่าการผสมร่วมกับอะคริลิกอิมัลชัน และเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น จาก 28 วัน เป็น 90 วัน ช่วยให้ชิ้นงานมีค่าความทนแรงอัดเพิ่มขึ้น (ภาพ 16)

ศึกษาผลการดูดซึมน้ำของชิ้นงานพบว่า ชิ้นงานมีการดูดซึมน้ำลดลงตามอัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนผสม 30% การผสมร่วมกับอีพ็อกซีอิมัลชัน และอะคริลิกอิมัลชันมีค่าการดูดซึมน้ำลดลง 55% และ 45% ตามลำดับ ซึ่งการลดลงดังกล่าวหมายถึงรูพรุนของวัสดุที่ลดลง เนื่องจากการปิดรูพรุนของพอลิเมอร์ที่ผสมร่วม ส่งผลให้ลดการดูดซึมน้ำได้เป็นอย่างดี (ภาพ 17)

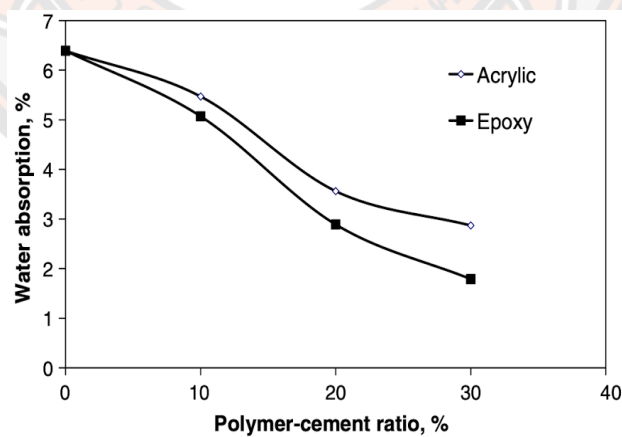


(a)



(b)

ภาพ 13 ความทนแรงอัดของซีเมนต์ที่ทำการบ่มในน้ำ และแบบบ่มในอากาศ เป็นเวลา (a) 28 วัน และ (b) 90 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนของพอลิเมอร์อิมัลชันต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกัน [11]

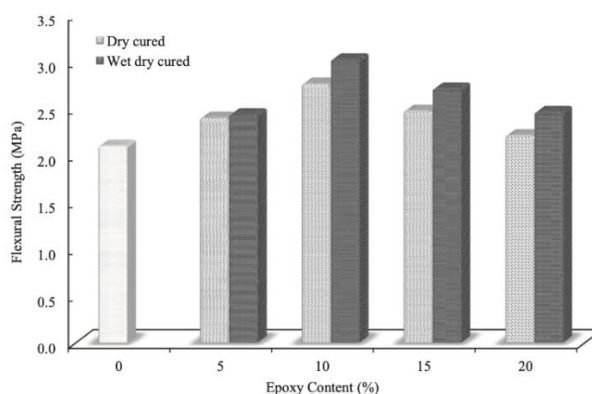


ภาพ 14 การดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์อิมัลชันที่ทำการบ่มแบบในอากาศ เมื่อใช้อัตราส่วนของพอลิเมอร์อิมัลชันต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกัน [11]

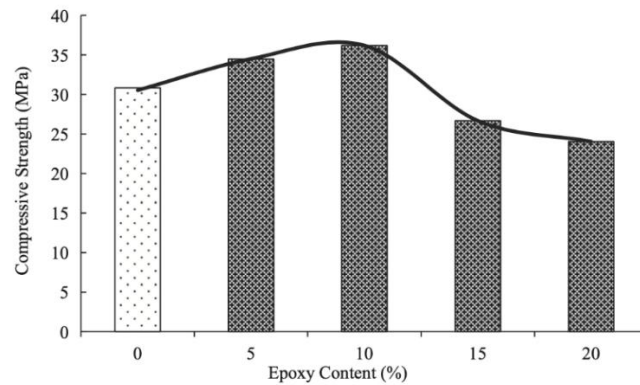
ปี คศ. 2015 Ariffin และคณะ [20] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของอีพ็อกซีอีพ็อกซีเรซินดัดแปร โดยเตรียมชิ้นงานจากการผสมระหว่างทรายและปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วน 3:1 โดยใช้ น้ำในอัตราส่วน 0.48 ส่วน โดยน้ำหนักของซีเมนต์ และอีพ็อกซีเรซินในอัตราส่วน 5-20% โดยน้ำหนัก ทำการบ่มชิ้นงานที่แตกต่างกัน 2 แบบคือการบ่มแบบเปียก-แห้ง (Wet-dry curing) และการบ่มแบบแห้ง (Dry curing) โดยการบ่มแบบเปียก-แห้ง จะนำผ้าเปียกมาปกคลุมชิ้นงานเป็นเวลา 2 วัน จากนั้นนำไปแช่น้ำ เป็นเวลา 5 วัน เมื่อครบกำหนดเวลา นำชิ้นงานมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 21 วัน (ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน) ในขณะที่การบ่มแบบแห้ง จะคลุมชิ้นงานด้วยผ้าเปียกเป็นเวลา 2 วัน จากนั้น ชิ้นงานมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 26 วัน (ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน) ผลการทดลองเทียบกับชิ้นงานซีเมนต์ที่ไม่ผสมอีพ็อกซีเรซินและแช่ในน้ำตลอดระยะเวลาของการบ่ม (ตัวควบคุม)

จากผลการศึกษาค่าความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีอีพ็อกซีเรซินดัดแปร พบว่าชิ้นงานที่ผสมอีพ็อกซีเรซินทุกอัตราส่วนมีค่าความต้านแรงดัดโค้งสูงกว่าตัวควบคุม และการบ่มแบบเปียกให้ชิ้นงานที่มีค่าความต้านแรงดัดโค้งสูงกว่าการบ่มแบบแห้ง (ภาพ 18) ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะเปียกไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxyl ions) จากซีเมนต์ไฮเดรตสามารถทำปฏิกิริยากับอีพ็อกซีเรซินได้ดีกว่าในสภาวะแห้ง จึงทำให้มอร์ตาร์มีความหนาแน่น และความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยการผสมร่วมกับอีพ็อกซีเรซินในอัตราส่วน 5% ให้ผลการต้านแรงดัดโค้งดีที่สุด ผลการทดสอบความทนแรงอัดเป็นไปในทำนองเดียวกับค่าความต้านแรงดัดโค้ง คือชิ้นงานที่ผสมอีพ็อกซีเรซินมีค่าความทนแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของอีพ็อกซีเรซินที่เพิ่มขึ้น (0%-5%) อย่างไรก็ตามอีพ็อกซีเรซินที่มากเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการไฮเดรชันของ Ca(OH)_2 ของซีเมนต์ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความทนแรงอัดลดลง (ภาพ 19)

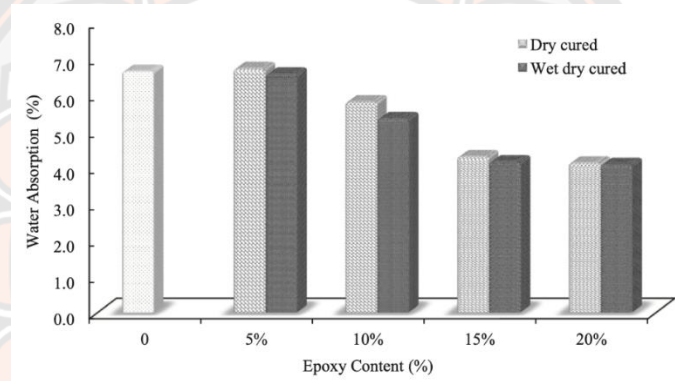
นอกจากนี้จากสภาพความเป็นเทอร์มอเซตของอีพ็อกซีพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ พบว่าส่งผลต่อการต้านการซึมผ่านของน้ำได้ดีขึ้นตามอัตราส่วนของอีพ็อกซีเรซินที่เพิ่มขึ้น (ภาพ 20) รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาการพอลิเมอไรเซชันของอีพ็อกซีพอลิเมอร์ระหว่างอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์กับสารทำให้แข็ง พบว่ามีส่วนเร่งกระบวนการแข็งตัวของอีพ็อกซีอีพ็อกซีเรซินดัดแปร โดยพบว่าชิ้นงานมีเวลาการการก่อตัวลดลงตามอัตราส่วนของอีพ็อกซีเรซินที่เพิ่มขึ้น (ภาพ 21)



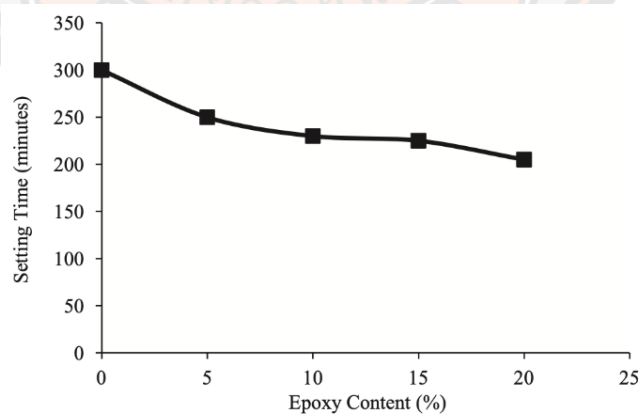
ภาพ 15 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีอีพ็อกซีเรซินดัดแปร เมื่อเติมอีพ็อกซีเรซินในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน [20]



ภาพ 16 ค่าความทนแรงอัดของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อเติมอีพ็อกซีเรซินในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน [20]



ภาพ 17 ร้อยละการดูดซึมน้ำของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อเติมอีพ็อกซีเรซินในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน [20]

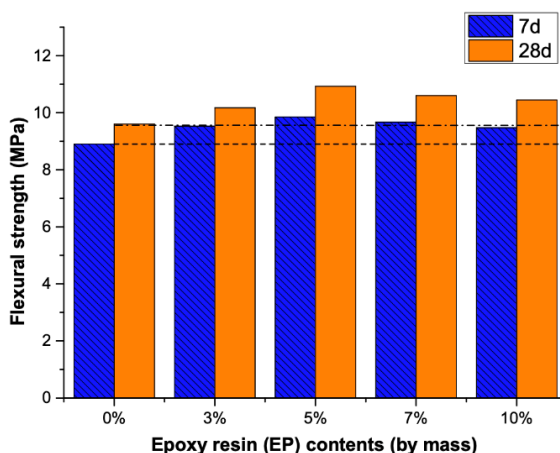


ภาพ 18 ระยะเวลาการก่อตัวของอีพ็อกซีซีเมนต์เมอร์ตาร์ดัดแปร [20]

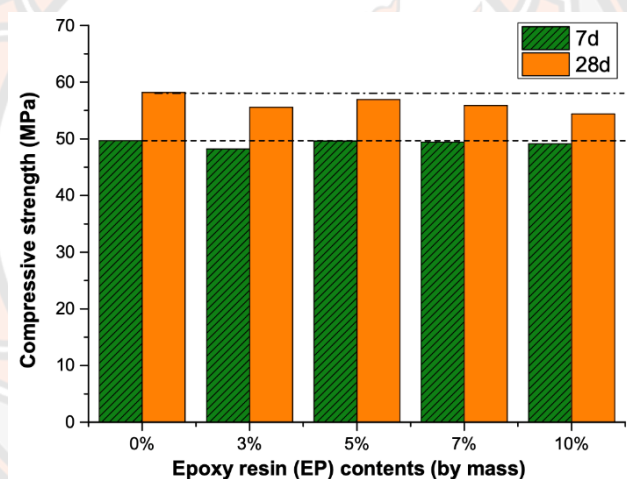
ปี ค.ศ. 2007 GuO และคณะ [21] ศึกษาผลของอิพ็อกซีเรซินชนิดน้ำต่อสมบัติเชิงกล และแรงยึดเหนี่ยวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับงานซ่อม โดยขึ้นงานเตรียมจากการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย (Fly ash) ในอัตราส่วนมวลซีเมนต์ต่อเถ้าลอย เท่ากับ 90:10 โดยมวล จากนั้นผสมร่วมกับอิพ็อกซีเรซินอีพ็อกซีอินทรีย์ ในอัตราส่วน 3%, 5%, 7% และ 10% ตามลำดับ โดยอิพ็อกซีเรซินอีพ็อกซีอินทรีย์เป็นการผสมระหว่าง อิพ็อกซีโอลิโกเมอร์:สารทำให้แข็ง:สารเชื่อมประสานไซเลน (KH550):อะซิโตน:เพอร์ฟลูไรด์ ในอัตราส่วน 100:100:5:5:15 โดยมวล ทำการบ่มขึ้นงานโดยการคลุมด้วยแผ่นพลาสติก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ ความชื้น 95%RH เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลานำขึ้นงานมอร์ตาร์ไปบ่มในน้ำ อีก 5 วัน (รวมเป็น 7 วัน) จากนั้นให้นำขึ้นงานไปเก็บขึ้นไว้ที่อุณหภูมิ $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ ความชื้น 60%RH เป็นเวลา 21 วัน (รวมเป็น 28 วัน) นำขึ้นงานไปทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง และความทนแรงอัด และการทดสอบแรงยึดเหนี่ยว

จากการทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง พบว่าขึ้นงานสามารถต้านแรงดัดโค้งหลังการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ดีกว่าขึ้นงานที่ไม่ได้ผสมร่วมกับอิพ็อกซีเรซิน (ตัวควบคุม) โดยขึ้นงานมีค่าความต้านแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของอิพ็อกซีเรซินที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าที่เพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากอิพ็อกซีพอลิเมอร์และการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายแบบ 3 มิติ ช่วยในการยึดระหว่างอิพ็อกซีและมวลรวมละเอียด (ทราย) ทำให้ขึ้นงานสามารถรับแรงดัดโค้งได้เพิ่มขึ้น โดยขึ้นงานมีค่าความต้านแรงดัดโค้งสูงสุดเมื่อเติมอิพ็อกซีเรซิน 5% อย่างไรก็ตามการเติมอิพ็อกซีเรซินที่มากเกินไป (7%–10%) ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของการรับแรงดัดโค้งมากนัก (ภาพ 22)

อย่างไรก็ตามแม้ว่าอิพ็อกซีพอลิเมอร์จะช่วยให้การยึดติดของทรายและซีเมนต์ และส่งผลให้ขึ้นงานเกิดการดัดโค้งได้ดีขึ้น แต่ช่องว่างที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแข็งของซีเมนต์พบว่ายังเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการรับแรงอัด โดยพบว่าขึ้นงานที่ผสมอิพ็อกซีเรซินอีพ็อกซีอินทรีย์ทุกอัตราส่วนมีค่าความทนแรงอัดลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสูตรควบคุมหรือสูตรที่ไม่ได้ผสมอิพ็อกซีเรซิน (ภาพ 23) โดยสูตรควบคุมมีค่าความทนแรงอัด หลังบ่ม 7 วัน และ 28 วัน คือ 49.67 MPa และ 58.17 MPa ในขณะที่ขึ้นงานที่ผสมอิพ็อกซีเรซิน มีค่าความทนแรงอัด หลังบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ระหว่าง 48.22-49.60 MPa และ 55.55-56.94 MPa ซึ่งค่าที่ลดลงดังกล่าวอาจเนื่องมาจากความหนืดของอิพ็อกซีพอลิเมอร์ขณะเกิดปฏิกิริยาส่งผลต่อขนาดของช่องว่างที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขึ้นงานทนต่อแรงอัดได้ลดลง

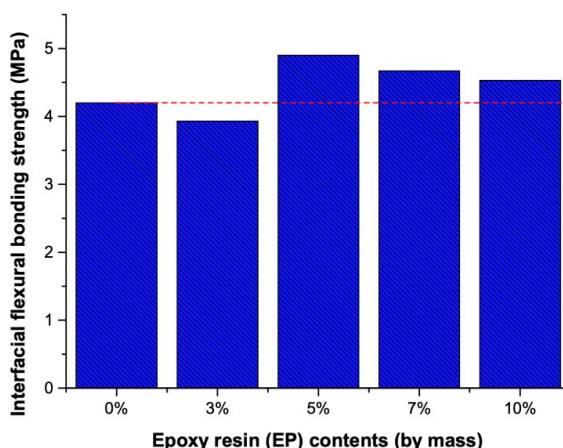


ภาพ 19 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรเมื่อเติมอีพ็อกซีเรซินอีมีลชัน ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน [21]



ภาพ 20 ค่าความทนแรงอัดของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรเมื่อเติมอีพ็อกซีเรซินอีมีลชัน ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน [21]

ทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร โดยศึกษาความต้านแรงดัดโค้งระหว่างรอยต่อ (Interfacial flexural bonding strength) ของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์เก่ากับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่ผสมร่วมกับอีพ็อกซีเรซินอีมีลชันในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน พบว่าค่าความต้านแรงดัดโค้งระหว่างรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของอีพ็อกซีเรซินอีมีลชันที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดเมื่อผสมร่วมกับอีพ็อกซีเรซินอีมีลชันในอัตราส่วน 5% จากนั้นจึงมีค่าลดลง ซึ่งการลดลงดังกล่าวอาจเนื่องมาจากการเกิดช่องว่าง และความหนาของพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น อาจไปลดการยึดเกาะในเมทริกซ์ระหว่างอีพ็อกซีเรซินกับทราย ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันลดลง (ภาพ 24)



ภาพ 21 ค่าแรงยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรเมื่อเติมอีพ็อกซีเรซินอีมีลชัน ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน [21]

2.3 อีพ็อกซีโพลิโกลเมออร์ชีวภาพ

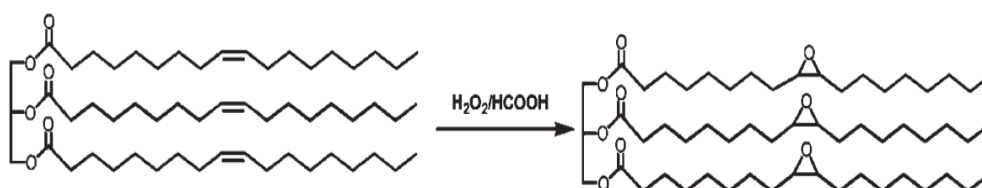
2.3.1 น้ำมันอีพ็อกซีไดซ์

ในปัจจุบันมีการใช้บิสฟีนอล เอ ไดโกลซิดิลอีเทอร์ (DGEBA) กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เพราะ DGEBA เป็นส่วนประกอบสำคัญในการผลิตพอลิเมอร์ที่สำคัญหลายชนิด เช่น พอลิคาร์บอนเนต และอีพ็อกซีเรซิน [22] เนื่องจากมีสมบัติช่วยให้ผลิตภัณฑ์พลาสติก มีความแข็งแรงใส ยึดหยุ่น ไม่แตกง่าย อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของบิสฟีนอล เอ คือเป็นสารก่อมะเร็งและสร้างความผิดปกติให้กับเซลล์ในร่างกาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับทารกและเด็ก [23-24] ซึ่งในปัจจุบันส่วนประกอบหลักที่ใช้เตรียมอีพ็อกซีพอลิเมอร์คือ DGEBA ซึ่งมาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วหมดไป ทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม และสุขภาพของมนุษย์ พอลิเมอร์ชีวภาพจึงได้รับความสนใจมากขึ้นในการนำมาใช้เตรียมเป็นสารตั้งต้นอีพ็อกซีโพลิโกลเมออร์ น้ำมันจากพืชเป็นวัสดุชีวภาพตัวหนึ่งที่มีความสนใจในการเตรียมเป็นอีพ็อกซีโพลิโกลเมออร์ชีวภาพ เนื่องจากน้ำมันมีพันธะคู่ของไตรกลีเซอไรด์ที่สามารถดัดแปรได้ง่าย

ปัจจุบันประเทศไทยมีจำนวนเกษตรกรที่ผลิตน้ำมันปาล์มสูง และมีพื้นที่ปลูกในประเทศไทยมากกว่า 4 ล้านไร่ ปาล์มเป็นสินค้าเกษตรสำคัญอันดับ 5 รองจากข้าว ยางพารา อ้อย และมันสำปะหลัง นอกจากนี้ยังเป็นประเทศที่ผลิตน้ำมันปาล์มหลัก ลำดับที่ 3 ของโลก [25-26] น้ำมันปาล์มจึงเป็นวัตถุดิบหาได้ง่าย ราคาถูก ทั้งยังมีพันธะคู่แบบเดี่ยว (Monounsaturated acid) ในโครงสร้างของกลีเซอไรด์เป็นจำนวนมาก น้ำมันปาล์มประกอบด้วยกรดปาล์มมิติก 45% (Palmitic acid, C16:0) และกรดโอเลอิก 40% (Oleic acid, C18:1) (ตาราง 1) ซึ่งพันธะคู่ดังกล่าวสามารถดัดแปรเป็นหมู่อีพอกไซด์ได้โดยการทำปฏิกิริยาเพียงครั้งเดียวด้วยการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับกรดฟอร์มิคผ่านการทำปฏิกิริยาอีพอกซีเดชัน (ภาพ 25) [27-30]

ตาราง 1 ร้อยละของกรดไขมันในน้ำมันชนิดต่าง ๆ [30]

Oil or Fat	Unsat./Sat. ratio	Saturated					Mono	Poly	
		Capric acid C10:0	Lauric Acid C12:0	Myristic Acid C14:0	Palmitic Acid C16:0	Stearic Acid C18:0	Oleic Acid C18:1	Linoleic Acid (ω 6) C18:2	Alpha Linolenic Acid (ω 3) C18:3
Almond Oil	9.7	-	-	-	7	2	69	17	-
Beef Tallow	0.9	-	-	3	24	19	43	3	1
Butterfat (Cow)	0.5	3	3	11	27	12	29	2	1
Butterfat (Goat)	0.5	7	3	9	25	12	27	3	1
Butterfat (Human)	1.0	2	5	8	25	8	35	9	1
Canola Oil	15.7	-	-	-	4	2	62	22	10
Cocoa Butter	0.6	-	-	-	25	38	32	3	-
Cod Liver Oil	2.9	-	-	8	17	-	22	5	-
Coconut Oil	0.1	6	47	18	9	3	6	2	-
Corn Oil (MaizeOil)	6.7	-	-	-	11	2	28	58	1
Cottonseed Oil	2.8	-	-	1	22	3	19	54	1
Flaxseed Oil	9.0	-	-	-	3	7	21	16	53
Grape seed Oil	7.3	-	-	-	8	4	15	73	-
Illipe	0.6	-	-	-	17	45	35	1	-
Lard (Pork fat)	1.2	-	-	2	26	14	44	10	-
Olive Oil	4.6	-	-	-	13	3	71	10	1
Palm Oil	1.0	-	-	1	45	4	40	10	-
Palm Olein	1.3	-	-	1	37	4	46	11	-
Palm Kernel Oil	0.2	4	48	16	8	3	15	2	-
Peanut Oil	4.0	-	-	-	11	2	48	32	-
Safflower Oil *	10.1	-	-	-	7	2	13	78	-
Sesame Oil	6.6	-	-	-	9	4	41	45	-
Shea nut	1.1	-	1	-	4	39	44	5	-
Soybean Oil	5.7	-	-	-	11	4	24	54	7
Sunflower Oil *	7.3	-	-	-	7	5	19	68	1
Walnut Oil	5.3	-	-	-	11	5	28	51	5



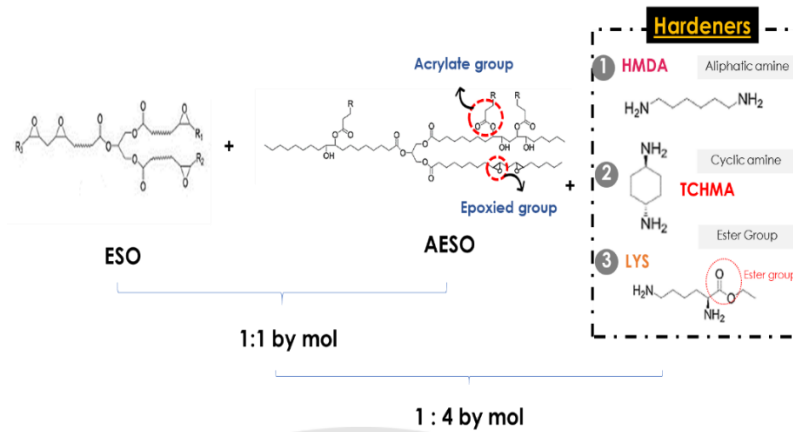
ภาพ 22 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์น้ำมันพืชไฮดรอกซีไดซ์ [10]

2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับน้ำมันอีพ็อกซีไดซ์

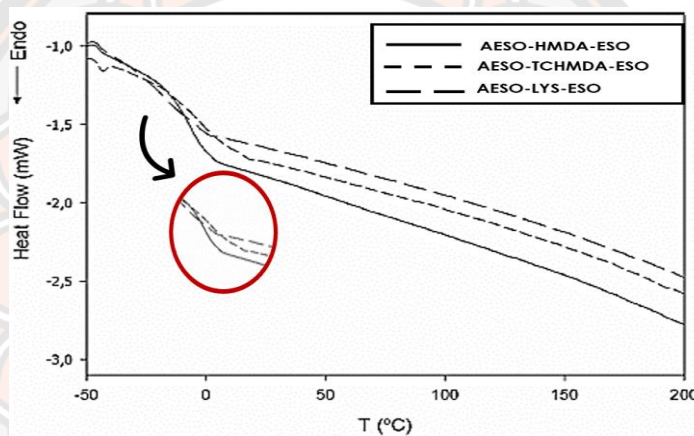
น้ำมันอีพ็อกซีไดซ์ (Epoxidized oil, EO) เป็นสารสารอีพ็อกซีไดซ์ชีวภาพตัวหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในการใช้เตรียมเทอร์โมเซตอีพ็อกซีพอลิเมอร์ เพื่อ แทน/ลด การใช้อีพ็อกซีเรซินกลุ่ม บิสฟีนอลซึ่งมีความเป็นพิษสูง

จากสถานการณ์ปัจจุบัน ในปี พ.ศ. 2566 เหตุการณ์ประเทศไทยประสบปัญหาภาวะราคาน้ำมันและวัสดุก่อสร้างที่มีราคาสูงเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากสถานการณ์โลกจากสงครามระหว่าง ประเทศ ยูเครนและรัสเซีย ทำให้วัตถุดิบมีราคาสูงขึ้น [31] อีกทั้งแนวโน้มอีพ็อกซีเรซินในตลาดโลกมี แนวโน้มสูงขึ้นทุก ๆ ปี จากรายงานพบว่า ในปี พ.ศ.2562 ตลาดอีพ็อกซีเรซินมีมูลค่าอยู่ที่ประมาณ 7.4 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ และมีรายงานแนวโน้มที่จะสูงถึง 10.7 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ ภายในปี 2569 [32] อย่างไรก็ตามยังไม่เคยมีการใช้น้ำมันอีพ็อกซีไดซ์ในการเตรียมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทและอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทดัดแปร ดังนั้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะเกี่ยวกับการใช้น้ำมันอีพ็อกซีไดซ์ในการเตรียมอีพ็อกซี ไดซ์พอลิเมอร์เท่านั้น

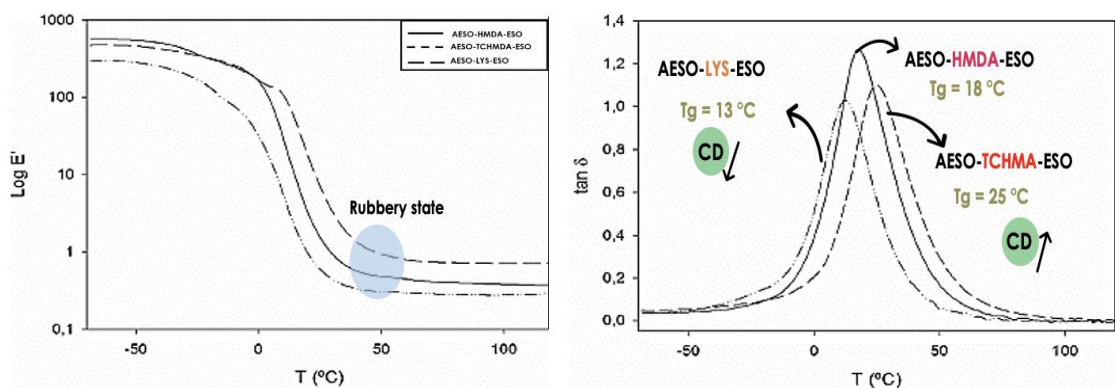
ปี ค.ศ. 2017 Frias และคณะ [33] ศึกษาผลของสารทำให้แข็งที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือไซคลิก เอมีน (trans-1,4-cyclohexamine, TCHMDA) อะลิฟาติกเอมีน (1,6-hexamethylene diamine, HMDA) และเอมีนที่มีหมู่เอสเทอร์ในโครงสร้าง (L-lysine ethyl ester dihydrochloride, LYS) ต่อ สมบัติของอีพ็อกซีพอลิเมอร์ผสมระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกซีไดซ์ (ESO) และน้ำมันถั่วเหลืองอีพ ออกซีไดซ์อะไซโคลเลต (AESO) (ภาพ 26) จากผลการทดลองพบว่าสารทำให้แข็งที่ต่างกันส่งผลต่อ พฤติกรรมทางความร้อน และสมบัติด้านความยืดหยุ่น (Elastic behavior) ที่ต่างกัน โดยการเกิดการ เชื่อมขวางร่วมกับเอมีนที่มีโครงสร้างแข็งเกร็ง (ไซคลิกเอมีน, TCHMDA) ขึ้นงานอีพ็อกซีพอลิเมอร์มี ค่าการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และค่าอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature) สูงกว่าการเชื่อมขวางร่วมกับเอมีนที่มีโครงสร้างที่เป็นเส้นตรง หรือโครงสร้างที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ขยับโซ่ได้ ง่าย (HMDA และ LYS) รวมถึงมีค่า โมดูลัสสะสม (Storage modulus) ที่สูงกว่า ซึ่งแสดงถึงสมบัติ ด้านความยืดหยุ่นที่ดีกว่า (ภาพ 27 และ 28)



ภาพ 23 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมอีพ็อกซีพอลิเมอร์จาก ESO และ AESO [33]



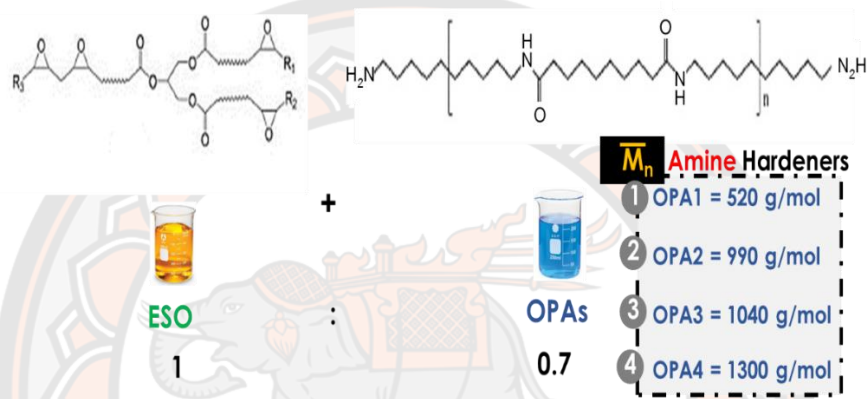
ภาพ 24 DSC เทอร์โมแกรมของอีพ็อกซีพอลิเมอร์ผสม (ESO และ AESO) เมื่อใช้สารทำให้แข็งที่แตกต่างกัน 3 ชนิด (TCHMDA, HMDA และ LYS) [33]



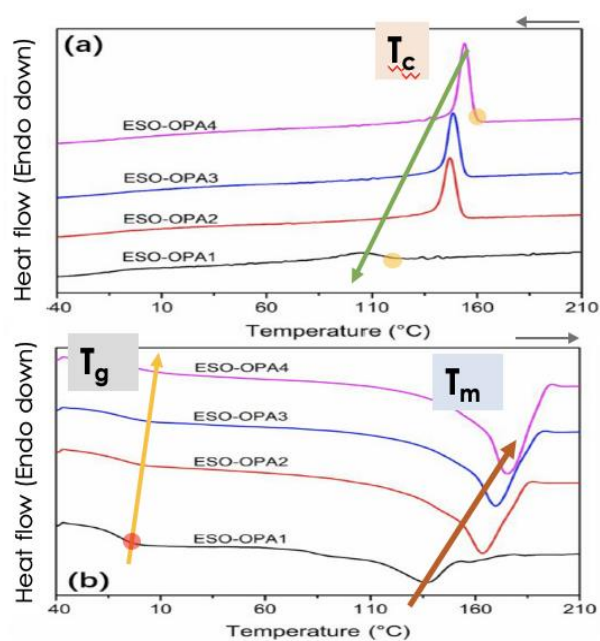
ภาพ 25 ค่ามอดูลัสสะสมและค่า Tan δ ของอีพ็อกซีพอลิเมอร์ผสม (ESO และ AESO) เมื่อใช้สารทำให้แข็งที่แตกต่างกัน 3 ชนิด (TCHMDA, HMDA และ LYS) [33]

นอกจากการเชื่อมขวางร่วมกับเอมีนขนาดเล็ก ในปี 2018 Li และคณะ [3] ได้ศึกษาผลของความยาวโซ่หรือน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกันของสารทำให้แข็งพอลิเอไมด์ที่มีหมู่ปลายเป็น 1° เอมีน (520, 990, 1040 และ 1,300 g/mol) ต่อสมบัติของอีพ็อกซีพอลิเมอร์ที่เตรียมจากน้ำมันถั่วเหลืองอีพ็อกไซด์ (ESO) (ภาพ 29)

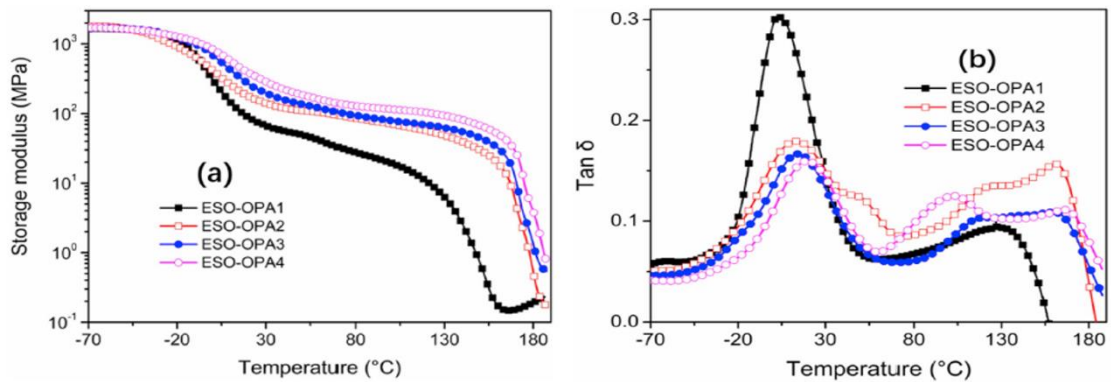
จากผลการทดลองพบว่าความยาวโซ่ของสารทำให้แข็งพอลิเอไมด์ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน การเกิดผลึก และสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน โดยสารทำให้แข็งที่มีสายโซ่ยาวจะสามารถเหนี่ยวนำให้อีพ็อกซีพอลิเมอร์เกิดผลึกได้ง่าย (ภาพ 30-31) และมีความอดุลัสสะสม และสมบัติการทนต่อแรงดึงสูงกว่าการผสมร่วมกับสารทำให้แข็งที่มีสายโซ่สั้น (ภาพ 32)



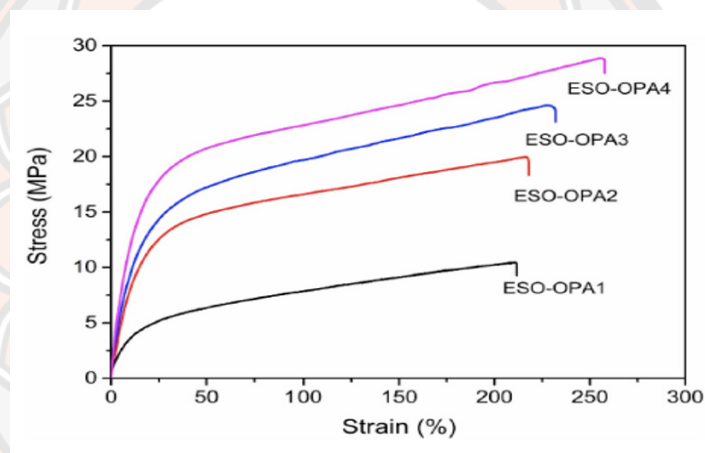
ภาพ 26 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมอีพ็อกซีพอลิเมอร์จาก ESO เมื่อใช้สารทำให้แข็ง OPAs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกัน [3]



ภาพ 27 DSC เทอร์โมแกรมของ ESO เมื่อใช้สารทำให้แข็ง OPAs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกัน [3]



ภาพ 28 ค่ามอดุลัสสะสมและค่า Tan δ ของ ESO เมื่อใช้สารทำให้แข็ง OPAs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน [3]



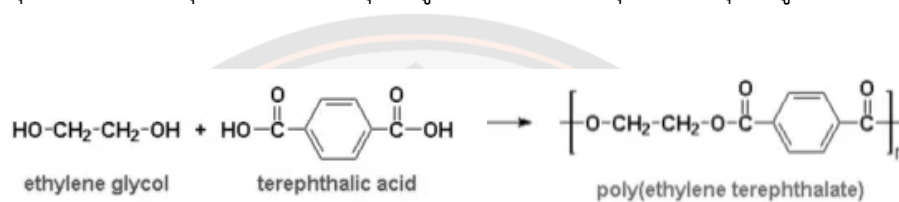
ภาพ 29 กราฟความเค้น-ความเครียด ของ ESO เมื่อใช้สารทำให้แข็ง OPAs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน [3]

จากงานวิจัยทั้งหมดอาจกล่าวได้ว่าชนิด และความยาวโซ่ของสารทำให้แข็งส่งผลต่อสมบัติของอีพ็อกซีเรซินที่เตรียมจากน้ำมันอีพ็อกซีไดซ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจการเชื่อมขวางระบบแอซิด เพื่อลดการใช้สารทำให้แข็งระบบเอมีน ซึ่งมีกลิ่นรุนแรง โดยงานวิจัยนี้สนใจดัดแปรโครงสร้างของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต (Polyethylene terephthalate; PET) ให้มีหมู่ปลายเป็นหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (PET-COOH) ซึ่ง PET-COOH ที่ได้มีความยาวของโซ่มากกว่าสารเอมีน และมีหมู่อะโรมาติกในโครงสร้าง นอกจากนี้ PET ยังมีสมบัติเด่นด้านความยืดหยุ่น และความทนทานสูง จึงคาดหวังว่าการใช้ EPO และ PET-COOH น่าจะช่วยให้ได้อีพ็อกซีเมอร์ตาร์และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรที่มีสมบัติด้านความยืดหยุ่น การรับแรง และการทนต่อการกัดกร่อนที่ดี

2.4 สารทำให้แข็งร่วม

2.4.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate; PET) [34-35]

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือ PET เตรียมจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) ระหว่างกรดเทเรฟทาลิก (Terephthalic acid; TPA) กับเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol; EG หรือ ethanediol) (ภาพ 33) โดยมีน้ำเกิดขึ้นในปฏิกิริยา หรือเกิดจากมอนอเมอร์ซึ่งได้จากปฏิกิริยาระหว่างไดเมทิลเทเรฟทาเลต (Dimethyl terephthalate) กับเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) โดยมีเมทานอลเกิดขึ้นในปฏิกิริยา ซึ่งสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิต PET นั้นได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี สูตรโมเลกุล $(C_{10}H_8O_4)_n$ จุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ $250^{\circ}C$ และมีจุดเดือดที่อุณหภูมิ $350^{\circ}C$



ภาพ 30 ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือ PET [34]

PET แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่มีเนื้อใส (A-PET) จะมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน และกลุ่มที่มีเนื้อขุ่น (C-PET) ซึ่งเกิดจากส่วนของผลึก โดยที่ PET มีสมบัติที่สามารถทำเป็นพลาสติกที่มีลักษณะกึ่งแข็งไปจนถึงเป็นของแข็งได้ โดยการปรับความหนา นอกจากนี้ PET ยังมีน้ำหนักเบา อีกทั้งยังสามารถกันก๊าซและแอลกอฮอล์ได้เป็นอย่างดี ในอุตสาหกรรมนิยมใช้ A-PET ในรูปของฟิล์ม ถาด และขวดบรรจุภัณฑ์ ยกเว้นบรรจุภัณฑ์สำหรับการใช้งานในไมโครเวฟ ที่ต้องทนอุณหภูมิสูงถึง $220^{\circ}C$ จะผลิตจาก C-PET นอกจากนี้ยังได้มีการกำหนดสัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องกับ PET เพื่อระบุถึงที่มาและโครงสร้างทางเคมีที่จำเพาะมากขึ้น เช่น PET (พลาสติก PET ที่ผ่านการรีไซเคิล) PETG (พลาสติกจากโคพอลิเมอร์ของ PET ที่มีการดัดแปรโครงสร้างไกลคอล)

สมบัติของ PET

1. แข็งแรงและน้ำหนักเบา
2. ป้องกันความชื้นได้ดี
3. คุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม
4. ช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่หลากหลาย ตั้งแต่ -60 ถึง $130^{\circ}C$
5. การซึมผ่านของก๊าซต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
6. ไม่แตกหักหรือแตกหัก ทนทานต่อการแตกร้าว
7. สามารถรีไซเคิลได้
8. ได้รับการรับรองว่าปลอดภัยสำหรับการสัมผัสกับอาหารและเครื่องดื่มโดย FDA, Health Canada, EFSA และหน่วยงานด้านสุขภาพอื่น ๆ
9. สมบัติทางเคมี

- ทนทานต่อแอลกอฮอล์ อะซิฟาทิกไฮโดรคาร์บอน น้ำมัน จาระบี และกรดเจือจางได้เยี่ยม
 - ต้านทานปานกลางต่อต่างเจือจาง อะโรมาติก และฮาโลเจนไฮโดรคาร์บอน
10. อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PET จะแตกต่างกันไปตามระดับของผลึก โดยมีค่า T_g อยู่ระหว่าง 65-80°C มีอุณหภูมิหลอมละลายระหว่าง 240-270°C PET โดยอสังฐาน PET มีค่า T_g เท่ากับ 65°C และมีค่า T_g เพิ่มขึ้นตามระดับความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้น
 11. การตกผลึกเกิดขึ้นด้วยอัตราการตกผลึกสูงสุดที่ 178°C ที่ช่วงอุณหภูมิ 10°C เหนือ T_g และต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวถึง 10°C โดยปกติจะมีค่าความเป็นผลึกอยู่ที่ 40-50% นอกจากนี้ยังสามารถรวมตัวเป็นพอลิเมอร์ร่วมที่ไม่สามารถตกผลึกได้

2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ PET และมอร์ตาร์

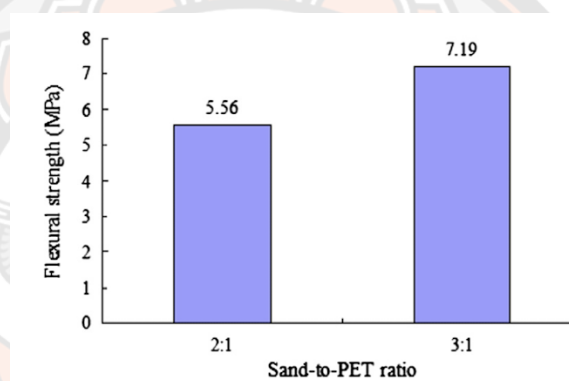
ทั้งนี้ประเทศไทยมีการสร้างขยะพลาสติกต่อประชากรสูงเป็นอันดับที่ 5 ของโลก โดยมีปริมาณขยะพลาสติก 4,796,494 ตัน/ปี (หรือราว 69.54 กิโลกรัม/ปี/คน) และมีสัดส่วนขยะพลาสติกในขยะทั่วไปมากเป็นอันดับที่ 3 ของโลก ปริมาณพลาสติกในประเทศไทยที่เป็นขวดพลาสติก สูงถึง 0.40 ล้านตัน ทำให้เป็นอีกหนึ่งเหตุที่นำขวด PET มาใช้เป็นสารทำให้แข็งร่วมในงานวิจัยนี้ เพื่อเป็นการลดปริมาณขยะขวดพลาสติก และเป็นการสร้างมูลค่าให้กับขยะที่ไม่ได้ใช้งาน โดยงานวิจัยนี้สนใจดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของ PET ให้เป็นสารทำให้แข็งตัวที่มีหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่ตำแหน่งปลายผ่านการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิส เพื่อลดน้ำหนักโมเลกุลของ PET และเปลี่ยนโครงสร้าง PET ให้อยู่ในรูปของเพ็ตพอลิออล (PET-OH) จากนั้นจึงนำไปทำปฏิกิริยากับแอนไฮไดรด์ ได้เป็นเพ็ตแอซิด (PET-COOH) ซึ่งมีหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่ตำแหน่งปลายที่พร้อมจะไปทำปฏิกิริยากับอีพ็อกซีเรซินต่อไป

แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ PET ในการเตรียมอีพ็อกซีมอร์ตาร์จนถึงปัจจุบัน จะมี 2 แบบ คือการผสม PET ร่วมกับทรายโดยตรง และการผสม PET ที่ผ่านการดัดแปรโดยลดน้ำหนักโมเลกุล และทำให้หมู่ปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิสได้เป็น PET-OH และใช้ PET-OH ผสมร่วมกับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ ซึ่งการใช้ PET โดยตรงพบว่าให้ผลการทดสอบที่ไม่ดีนักเมื่อเทียบกับการใช้ PET ดัดแปร

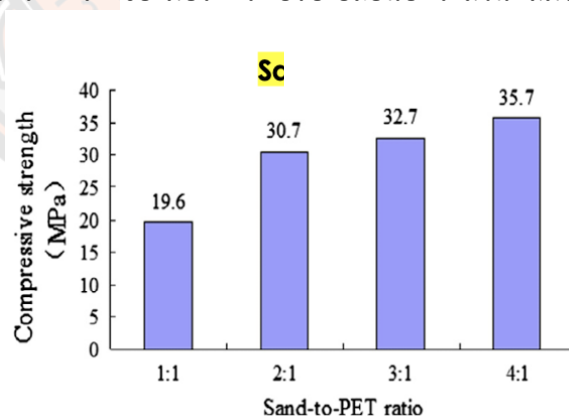
นอกจากนี้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ PET ดัดแปร เป็นเพียงการใช้ PET-OH ร่วมกับอีพ็อกซีสังเคราะห์และสารทำให้แข็งระบบเอมีนเท่านั้น แต่ยังไม่เคยมีงานวิจัยใดทำปฏิกิริยา PET-OH กับสารแอนไฮไดรด์เพื่อใช้เป็นสารทำให้แข็งเพื่อแทน/ลด การใช้สารทำให้แข็งระบบเอมีน ดังนั้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะผลของการผสมร่วมของ PET กับมอร์ตาร์ และ PET-OH กับอีพ็อกซีมอร์ตาร์เท่านั้น

ปี ค.ศ. 2013 Ge และคณะ [36] ศึกษาผลของการผสม PET ร่วมกับทราย โดยการหลอม PET ที่อุณหภูมิ 280-290°C เป็นเวลา 40 นาที จากนั้นนำพอลิเมอร์หลอมที่ได้มาผสมร่วมกับทรายใน

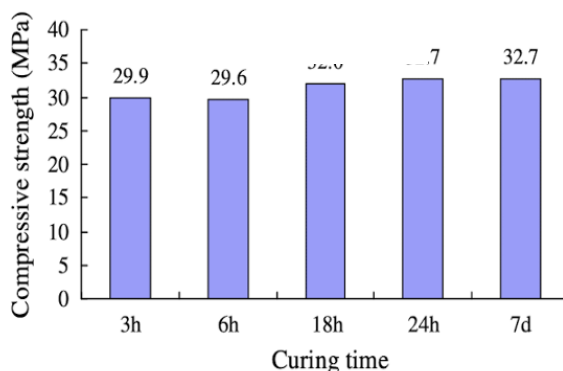
อัตราส่วนที่กำหนด (Sand:PET = 1:1, 2:1, 3:1 และ 4:1) เทล่งแม่พิมพ์ จากนั้นนำชิ้นงานมาศึกษาผลของการเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง (RT) เป็นเวลาต่าง ๆ กัน (3-24 ชั่วโมง และ 7 วัน) และผลของอุณหภูมิการเคียว (RT, 100, 140 และ 180°C) ต่อสมบัติของมอร์ตาร์ที่เตรียมได้ พบว่าหลังผสมทรายร่วมกับ PET หลอม และเก็บชิ้นงานไว้ที่ RT ชิ้นงานมีค่าความทนแรงอัดเพิ่มขึ้นตามเวลาในการเก็บชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าความทนแรงอัดเพิ่มจาก 29.9 MPa เป็น 32.7 MPa เมื่อเก็บชิ้นงานไว้ 3 ชั่วโมง และ 7 วัน และชิ้นงานมีค่าความทนแรงอัดเพิ่มขึ้นหากเพิ่มอุณหภูมิในการเคียว โดยมีค่าความทนแรงอัดเพิ่มจาก 32.7 MPa เป็น 34.9 MPa เมื่อเก็บชิ้นงานไว้ที่ RT เป็นเวลา 7 วัน และการบ่มชิ้นงานที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามลำดับ ในขณะที่ชิ้นงานมีค่าความทนแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของทรายที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าความทนแรงอัด เพิ่มจาก 19.6 MPa เป็น 35.7 MPa เมื่อใช้อัตราส่วนผสมทราย:PET = 1:1 และ 4:1 ตามลำดับ (ภาพ 34-37)



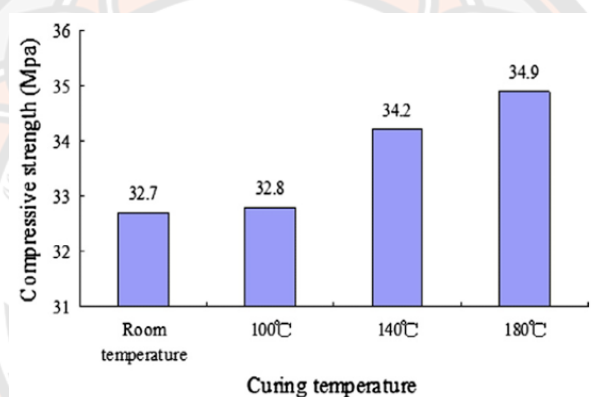
ภาพ 31 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของมอร์ตาร์ที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่าง ทราย:PET [36]



ภาพ 32 ค่าความทนแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่าง ทราย:PET [36]



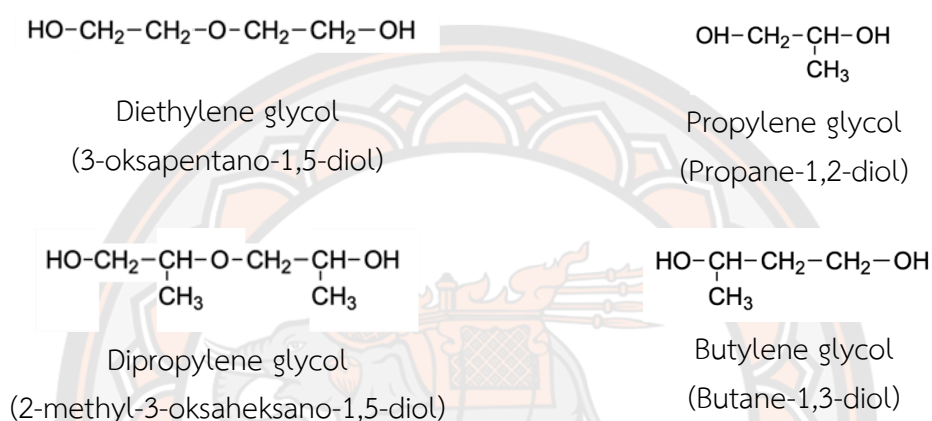
ภาพ 33 ค่าความทนแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสม ทราเย:PET ในอัตราส่วน 3:1 และทำการบ่มโดยใช้เวลาที่แตกต่างกัน [36]



ภาพ 34 ค่าความทนแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสม ทราเย:PET ในอัตราส่วน 3:1 และทำการบ่มที่อุณหภูมิแตกต่างกัน [36]

ปี ค.ศ. 2015 Debska และ Licholai [37] ได้ศึกษาผลของการผสม PET ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิสได้เป็น PET-OH ด้วยไกลคอลที่แตกต่างกัน (ภาพ 38) กับอีพ็อกซีเรซินที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของ Epidian 5 epoxy resin และสารทำให้แข็งกลุ่มพอลิเอมีน (triethylenetetramine, Z-1) และทราเยซิลิกา ซึ่งเป็นส่วน Aggregate ในการทำอีพ็อกซีมอร์ตาร์ โดยใช้สัดส่วนผสมอีพ็อกซีเรซินต่อ Aggregate เท่ากับ 0.14:0.36 และใช้ PET-OH แทนที่อีพ็อกซีเรซินในอัตราส่วน 0-14% โดยน้ำหนัก ทำการผสมอีพ็อกซีเรซินกับ PET-OH ที่อุณหภูมิ 85°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาสู่อุณหภูมิห้องก่อนเติม Z-1 ผสมส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากัน จากนั้นจึงเติมทราเยตามลำดับ (ตาราง 2) เทสารผสมทั้งหมดลงแม่พิมพ์เหล็กสำหรับเตรียมชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง และความทนแรงอัด จากผลการทดลองพบว่าอีพ็อกซีมอร์ตาร์ มีค่าความต้านแรงดัดโค้ง 21.0-21.7 MPa การผสมร่วมกับ PET-OH ที่ไกลโคไลซ์ด้วยไกลคอลต่างชนิดกันให้ค่าความต้านแรงดัดโค้งที่ต่างกัน โดยมีค่าประมาณ 31.1-33.8 MPa โดยเมื่อ

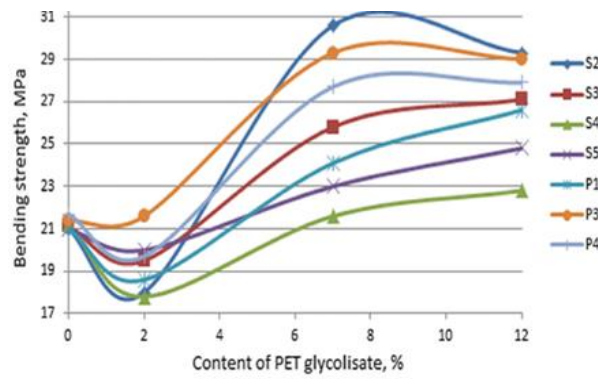
ใช้ diethylene glycol และ propylene glycol เป็นสารไกลโคไลซ์ และผสมแทนที่อีพ็อกซีเรซินในอัตราส่วน 7% โดยน้ำหนัก และผสมร่วมกับทราย 75-80% ซึ่งงานมีค่าความต้านแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นสูงที่สุด เช่นเดียวกับผลทดสอบค่าความทนแรงอัดที่พบว่าการผสมอีพ็อกซีช่วยให้มอร์ตาร์มีค่าการทนต่อแรงกดสูงกว่าค่ามาตรฐานซีเมนต์มอร์ตาร์ จาก 15-60 MPa เป็น 97-110 MPa และการผสม PET-OH แทนที่อีพ็อกซี เรซินในอัตราส่วน 7% โดยน้ำหนัก ช่วยให้ค่าความทนแรงอัดเพิ่มขึ้นเป็น 110-117 MPa ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของไกลคอลล (ภาพ 39-40)



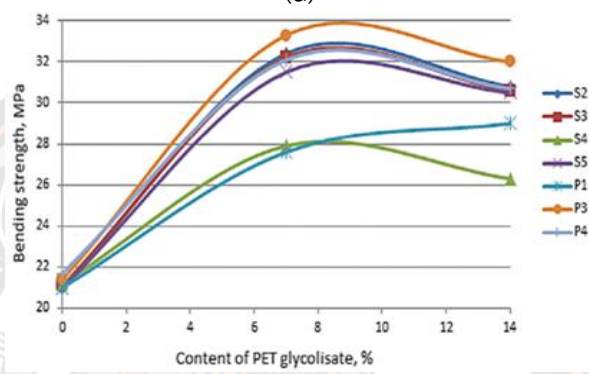
ภาพ 35 ไกลคอลลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิส [37]

ตาราง 2 สูตรและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย [37]

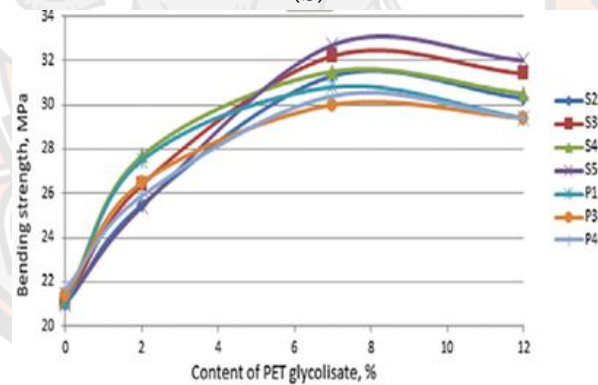
สูตร	ชนิดของสารไกลคอลลที่ใช้ ในการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิส	อัตราส่วน (โมล)	
		PET	Glycol
P1	Mixture of diethylene and propylene glycols	-	-
P3	Propylene	1	2
P4	Diethylene	1	2
S2	Diethylene	1	1.7
S3	Propylene	1	1.7
S4	Dipropylene	1	1.7
S5	Butylene	1	1.7



(a)

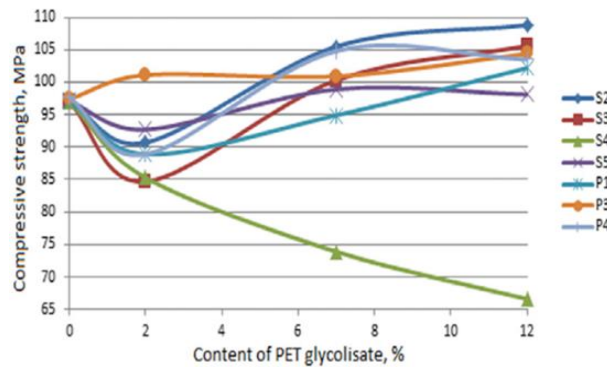


(b)

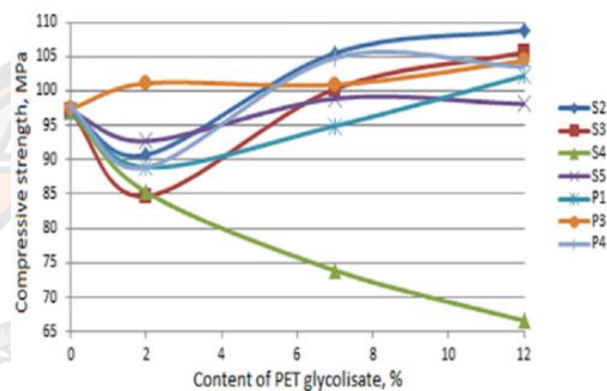


(c)

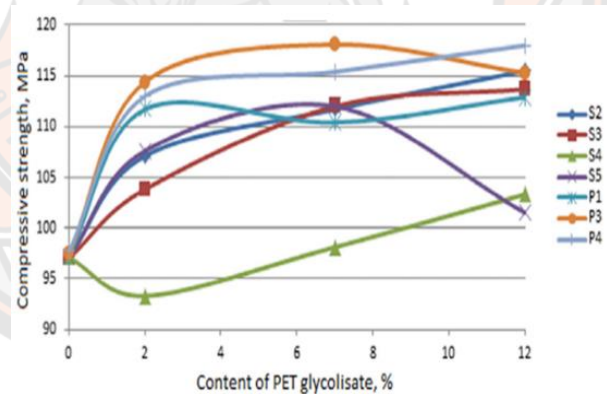
ภาพ 36 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของมอร์ตาร์ที่ผสม ทราย:PET โกลโคไลซิส ในอัตราส่วนทราย (a) 75%, (b) 80 และ (c) 85% [37]



(a)



(b)

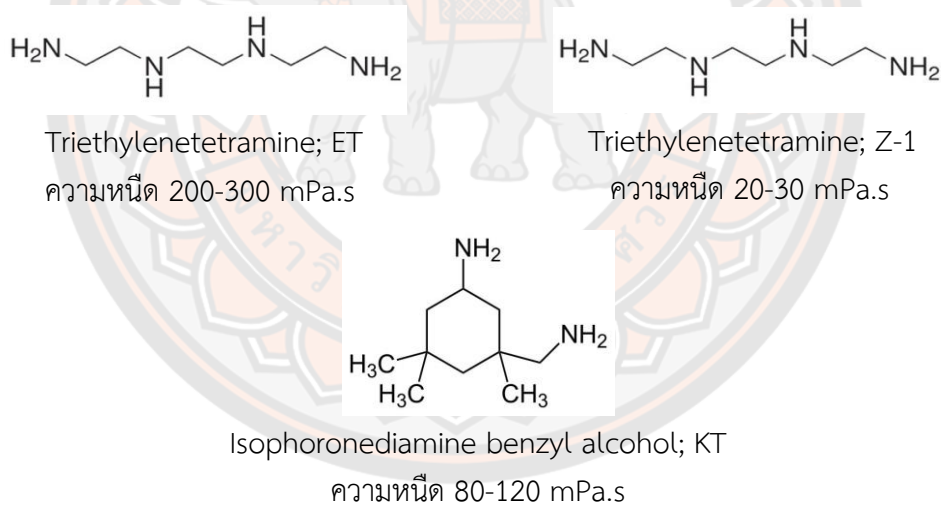


(c)

ภาพ 37 ค่าความทนแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสม ทราย:PET ไกลโคไลซิส ในอัตราส่วนทราย (a) 75%, (b) 80 และ (c) 85% [37]

นอกจากนี้ในปี ค.ศ. 2016 Debska และ Licholai [1] ยังได้ศึกษาผลของอีพ็อกซีมอร์ตาร์จากการผสมร่วมกันของอีพ็อกซีเรซิน PET-OH และทราย โดยทำการปรับเปลี่ยนชนิดของสารทำให้แข็งเอมีน (triethylenetetramine ความหนืดสูง, ET; isophoronediamine benzyl alcohol, KT และ triethylenetetramine ความหนืดต่ำ, Z-1) (ภาพ 41) จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนของ

PET-OH และชนิดของเอมีนที่แตกต่างกันส่งผลต่อค่าการดูดซึมน้ำ ค่าความต้านแรงดัดโค้ง และค่าความทนแรงอัดที่แตกต่างกัน โดยพบว่าการผสม PET-OH แทนอีพ็อกซีเรซินในอัตราส่วน 7-15% โดยน้ำหนัก ร่วมกับสารทำให้แข็ง ET ให้ค่าความต้านแรงดัดโค้งสูงกว่าการผสมร่วมกับ KT และ Z-1 โดยการผสมร่วมกับสารทำให้แข็ง ET มีค่าความต้านแรงดัดโค้ง 22-39 MPa รองลงมาเป็น Z-1 มีค่า 20-32 MPa และ KT มีค่า 18-25 MPa ตามลำดับ ในขณะที่การผสมร่วมกับ Z-1 ให้ชิ้นงานอีพ็อกซีมอร์ตาร์ที่มีค่าความทนแรงอัดสูงที่สุด คือ 85-116 MPa รองลงไปคือ ET มีค่า 76-105 MPa และ KT มีค่า 28-54 MPa ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าอีพ็อกซีมอร์ตาร์ที่ผสมร่วมกับ ET มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด (ประมาณ 0.3% 14 วัน) รองลงไปคือ Z-1 (ประมาณ 0.8%) และ KT (ประมาณ 1.4%) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการผสมร่วมกับ KT ให้ชิ้นงานที่มีค่าความต้านแรงดัดโค้งและความทนแรงอัดต่ำที่สุด (ตาราง 3-4) โดยมีค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการตกตะกอน (Sedimentation) ของส่วนผสมขณะเตรียมชิ้นงาน ซึ่งส่งผลต่อความหนาแน่นของการเชื่อมขวางและความแข็งแรงของชิ้นงานที่ลดลง นอกจากนี้สารทำให้แข็งชนิดเดียวกันแต่มีความหนืด (น้ำหนักโมเลกุล) ที่แตกต่างกัน พบว่าส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ที่แตกต่างกัน (ภาพ 42)



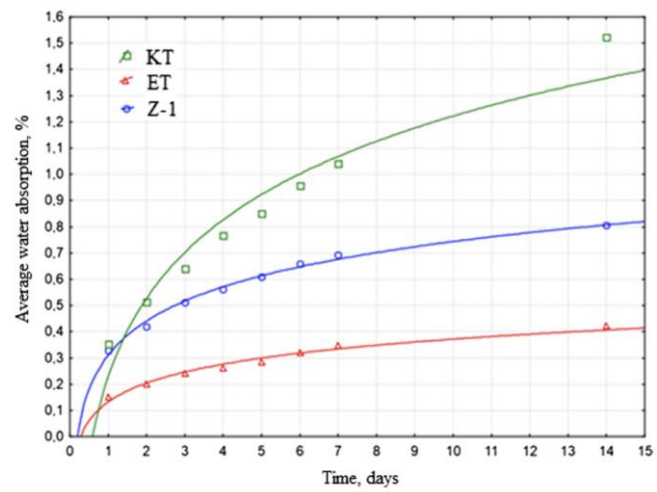
ภาพ 38 ชนิดของสารทำให้แข็งเอมีน 3 ชนิดที่ใช้ในงานวิจัย [1]

ตาราง 3 ค่าการทนต่อแรงดัดโค้งของมอร์ตาร์เมื่อใช้สารทำให้แข็งเอมีนที่แตกต่างกัน [1]

No.	PET glycolysate (%)	Resin:Aggregate	Flexural strength		
			Curing agents		
			KT MPa	ET MPa	Z-1 MPa
1	7.03	0.36	25.39±2.65	32.49±0.97	25.77±1.15
2	2.06	0.33	18.08±0.95	23.06±2.28	19.53±0.49
3	0.00	0.25	20.79±0.54	22.32±1.20	21.10±0.26
4	7.03	0.14	25.14±0.15	25.80±1.73	32.17±0.32
5	7.03	0.25	19.53±0.24	36.32±0.11	32.20±1.06
6	7.03	0.25	19.05±0.74	38.85±0.86	32.13±0.99
7	12.00	0.18	21.83±0.28	34.96±0.47	31.43±1.07
8	12.00	0.33	17.70±0.83	36.11±1.83	27.03±2.33
9	14.06	0.25	21.22±0.83	35.82±2.17	30.57±0.29
10	2.06	0.18	25.12±1.58	33.50±1.42	26.37±1.11

ตาราง 4 ค่าความทนแรงอัดของมอร์ตาร์เมื่อใช้สารทำให้แข็งเอมีนที่แตกต่างกัน [1]

No.	PET glycolysate (%)	Resin:Aggregate	Compressive strength		
			Curing agents		
			KT MPa	ET MPa	Z-1 MPa
1	7.03	0.36	54.42±3.35	85.67±1.40	100.73±1.32
2	2.06	0.33	31.37±2.05	75.70±3.54	84.67±2.08
3	0.00	0.25	32.40±1.75	83.10±1.86	96.95±2.08
4	7.03	0.14	53.67±2.89	103.25±3.29	111.98±3.86
5	7.03	0.25	28.70±0.88	93.08±3.69	115.73±1.49
6	7.03	0.25	27.74±0.36	92.58±3.63	114.52±2.15
7	12.00	0.18	42.08±2.96	105.22±1.24	112.95±1.86
8	12.00	0.33	30.58±1.28	95.87±1.05	105.60±2.33
9	14.06	0.25	28.20±0.25	95.48±2.11	112.52±2.20
10	2.06	0.18	47.80±3.13	103.82±2.71	103.77±3.73



ภาพ 39 ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของของมอร์ตาร์เมื่อใช้สารทำให้แข็งเอมีนที่แตกต่างกัน [1]



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ (PM) และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร/อีพ็อกซีซีเมนต์ (PMM/PMC) โดยวัสดุชีวภาพ และขยะพลาสติก ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำมันปาล์มอีพ็อกซีไดซ์ (EPO) และขยะขวดพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตดัดแปร (เพ็ดดัดแปร, PET-COOH) โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้

1. การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตที่มีหมู่ปลายเป็นหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (PET-COOH)
2. การสังเคราะห์น้ำมันปาล์มอีพ็อกซีไดซ์ (EPO)
3. ศึกษาการเตรียมอีพ็อกซีมอร์ตาร์โดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างสารทำให้แข็งเอมีน และ PET-COOH และอัตราส่วนระหว่างอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้าและน้ำมันปาล์มอีพ็อกซีไดซ์
4. ศึกษาสมบัติความหนืด สมบัติเชิงกล (ความต้านแรงดัดโค้ง ความทนแรงอัด และแรงยืดเหนียว) และสมบัติทางกายภาพ (การดูดซับน้ำ และความต้านทานต่อตัวทำละลายกรด เบส และเกลือ) ของอีพ็อกซีมอร์ตาร์
5. ศึกษาการเตรียมอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรโดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างสารทำให้แข็งเอมีน และ PET-COOH และอัตราส่วนระหว่างอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้า และน้ำมันปาล์มอีพ็อกซีไดซ์
6. ศึกษาสมบัติความหนืด สมบัติเชิงกล (ความต้านแรงดัดโค้ง ความทนแรงอัด และแรงยืดเหนียว) และสมบัติทางกายภาพ (ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์ การดูดซับน้ำ ความต้านทานต่อตัวทำละลายกรด เบส และเกลือ) ของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร

ซึ่งขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นดังแสดงในภาพ 43

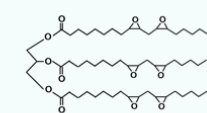
เตรียมเพ็ดดัดแปรที่มีหมู่คาร์บอกซิลิกที่ตำแหน่งปลาย (PET-COOH) ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ P-EG-PA P-ET-PA และ P-T-PA เพื่อเตรียมเป็นสารทำให้แข็งร่วม (Co-hardener)

เตรียมน้ำมันปาล์มดัดแปรที่มีหมู่อีพอกไซด์ในโครงสร้าง เพื่อเตรียมเป็นสารอีพอกซีโพลิโอมเมอร์ร่วม (Co-epoxy oligomer)

P-EG-PA

P-ET-PA

P-T-PA



Epoxidized palm oil (EPO)

1

อีพอกซีโอมเมอร์

- + Com. Epoxy oligomer
- + Com. Amine
- + ทราย

2

อีพอกซีโอมเมอร์ดัดแปร

- + Com. Epoxy oligomer
- + Com. Amine
- + ซีเมนต์/ทราย/น้ำ

ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วน

- เอมีน : PET COOH
- Epoxy commercial : EPO

การวิเคราะห์

- ▶ DMA
- ▶ Flexural strength
- ▶ Compressive strength
- ▶ Bonding strength
- ▶ Water and Chemicals absorption
- ▶ Weight loss

ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วน

- เอมีน : PET COOH
- Epoxy commercial : EPO

การวิเคราะห์

- ▶ DMA
- ▶ Flexural strength
- ▶ Compressive strength
- ▶ Bonding strength
- ▶ Water and Chemicals absorption
- ▶ Weight loss
- ▶ Setting time

ภาพ 40 ภาพรวมของงานวิจัย

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. ไมโครปิเปต (Autoclavable Micropipettes) บริษัท BOECO, Germany
2. กระดาษกรอง เบอร์ 1 (Filter Papers No.1); บริษัท Whatman
3. กระดาษวัดค่าพีเอช (pH paper indicator strips); บริษัท Merch, Germany
4. หลอด NMR ขนาด 5 mm (5 mm NMR tube); บริษัท NORELL
5. ตะแกรงร่อนทราย (Tyler Sieves) ขนาด 8, 16, 50 และ 100 mesh
6. ขวดก้นกลม 3 คอ (3-neck Round bottom flask) ขนาด 1000 mL
7. ขวดก้นกลม 2 คอ (Round bottom flask) ขนาด 2000 mL
8. กรวยแยกสาร (Separatory funnel) ขนาด 250 mL
9. กรวยกรองแก้ว (Glass funnel)
10. ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50 100 600 และ 2000 mL
11. กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 10 25 50 100 และ 300 mL
12. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) 100 และ 300°C
13. เครื่องวัดขนาด (Vernier Caliper); บริษัท TONAN ASIA AUTOTECH CO., LTD
14. เครื่องกวนสารละลายแบบใช้มอเตอร์; ยี่ห้อ IKA รุ่น RCT basic
15. เครื่องให้ความร้อนพร้อมกวนสารละลาย; ยี่ห้อ IKA รุ่น RW 20 Digital
16. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง; ยี่ห้อ Sartorius
17. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง; ยี่ห้อ DENVER INSTRUMENT รุ่น SI-64.1
18. ตู้อบความร้อน (Hot Air Oven); ยี่ห้อ BINDER รุ่น ED 115
19. อ่างน้ำมัน (Oil bath)
20. ห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น
21. เครื่องทดสอบการไหล (Flow table)
22. เครื่องตัดคอนกรีต
23. เครื่องปั่นกวนซีเมนต์แบบมอเตอร์; ยี่ห้อ HUA MIN MACHINE HONOUR PRODUCT
24. เครื่องทดสอบกำลังกดอัด (Compression machine); ยี่ห้อ MODENA-ITALY
25. เครื่องทดสอบการทนต่อแรงดึง (Mode: Three-point blending); ยี่ห้อ BPS INSTRUMENT รุ่น HY-600F)
26. เครื่องทดสอบการทนต่อแรงดึง (Mode: Three-point blending และ Compression); ยี่ห้อ Universal Testing Machine, INSTRON รุ่น 5965
27. เครื่องวิเคราะห์การวิเคราะห์วัสดุเชิงกลแบบไดนามิก (Dynamic Mechanical Analyzer (DMA)); ยี่ห้อ TA INSTRUMENTS รุ่น DMA 850
28. เครื่องสแตอริโอถ่ายภาพ ยี่ห้อ KRUSS รุ่น MSZ 5000
29. เครื่องหล่อเย็น (Cooling Bath); ยี่ห้อ Cole-Parmer Polystat
30. เข็มไวแคท (Vicat needle); บริษัท C.B.N. MATERIALTEST CO., LTD

3.2 สารเคมี

1. ขวดน้ำดื่มพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (พีที, PET) ยี่ห้อ สิงห์
2. เอทิลีนไกลคอล (99.5% Ethylene glycol (EG), $C_2H_6O_2$); Analytical reagent, Carlo erba reagents
3. กลีเซอรอล (99.5% Glycerol, $C_3H_8O_3$); Analytical reagent, Ajax Finechem
4. ไตรเมทิลอลโพรเพน (Trimethylolpropane (THMP), $H_3CH_2C(CH_2OH)_3$); Analytical reagent, ACROS ORGANICS
5. พาทาลิกแอนไฮไดรด์ (Phthalic anhydride (PA), $C_6H_4(CO)_2O$); Analytical reagent, ACROS ORGANICS
6. ซิงค์อะซิเตท (Zinc acetate, $ZnC_4H_6O_4$); Analytical reagent, Ajax Finechem Pty Ltd
7. พาราโทลูอินซันโฟนิค แอซิด (p-Toluenesulfonic acid (PTSA), $CH_3C_6H_4SO_3H$); Analytical reagent, EMD Millipore Corporation
8. ไดโกลซิดีล อีเทอร์ บิสฟีนอล เอ (Diglycidyl ether of bisphenol A, DGEBA) เกรด RTP-M103; Commercial grade, Richtech Paint Co.,Ltd
9. เอมีนทางการค้าสำหรับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ เกรด RTP-M103; Richtech Paint Co.,Ltd
10. ไดโกลซิดีล อีเทอร์ บิสฟีนอล เอ (Diglycidyl ether of bisphenol A, DGEBA) เกรด RTP-C100; Commercial grade, Richtech Paint Co.,Ltd
11. เอมีนทางการค้าสำหรับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ตัดแปร เกรด RTP-เกรด RTP-C100; Richtech Paint Co.,Ltd
12. N,N-ไดเมทิลเบนซิลามีน (N,N-dimethylbenzamide, $C_6H_5CH_2N(CH_3)_2$); Analytical reagent, Arlo Erba Reagents
13. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH); Analytical reagent, Ajax Finechem
14. กรดซัลฟิวริก (98% Sulfuric acid, H_2SO_4); Analytical reagent, Carlo erba reagents
15. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl); Analytical reagent, Kemaus
16. ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane Methylene, CH_2Cl_2); Analytical reagent, Carlo erba reagents
17. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (Sodium hydrogen carbonate, $NaHCO_3$); Analytical reagent, Kemaus
18. ทวีน 20 (Tween 20 (USP-NF, BP ,Ph. Eur.); pure, pharma grade, PanReac AppliChem
19. กรดฟอร์มิก (98% Formic acid, CH_2O_2); Analytical grade, Carlo erba reagent

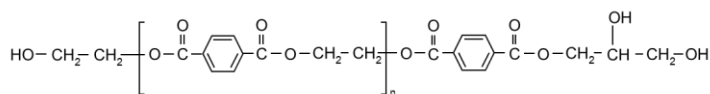
20. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (50% Hydrogen peroxide; H_2O_2); Commercial grade, Thai peroxide
21. โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulphate, Na_2SO_4); Analytical reagent grade, Kemaus
22. คลอโรฟอร์ม ดี (Chloroform-d); 99.8 atom % D (Contains 1% (v/v) TMS), SIGMA-ALDRICH
23. แก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์สูง (Gas Nitrogen, N_2); บริษัททรายทอง จำกัด มหาชน
24. ทราย ขนาด 0.15-0.30 mm (50- 00 mesh) และขนาด 1.19-2.38 mm (8-16 mesh)
25. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิด 1 (Ordinary Portland cement Type I); ยี่ห้อ ราชสีห์แดง บริษัทภูมิใจไทยซีเมนต์

3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

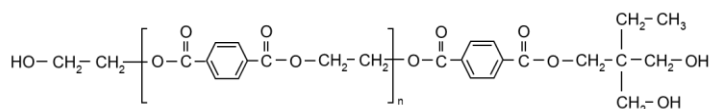
3.3.1 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีหมู่ปลายเป็นหมูกรดคาร์บอกซิลิก (PET-COOH)

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีหมู่ปลายเป็นหมูกรดคาร์บอกซิลิก (PET-COOH) ที่ใช้ใน งานวิจัยนี้ เตรียมโดยการทำปฏิกิริยาใน 2 ขั้นตอน คือการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิส (Glycolysis) และการเปิดวงของแอนไฮไดรด์

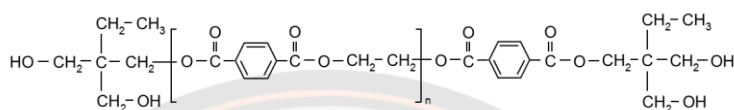
ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิส เตรียมโดยการนำขวดพีตมาทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิสกับ สารไกลคอลที่แตกต่างกัน 3 สูตร คือ 1) การทำปฏิกิริยาร่วมกับไกลคอลผสมระหว่างเอทิลีนไกลคอล และกลีเซอรอล (EG) 2) การทำปฏิกิริยาร่วมกับไกลคอลผสมระหว่างเอทิลีนไกลคอลและไตรเมทิล ลออลโพรเพน (THMP) (ET) และ 3) การทำปฏิกิริยาร่วมกับไตรเมทิลลอโพรเพน (THMP) (T) ใน อัตราส่วน PET:Glycol = 1:2 โดยน้ำหนัก โดยใช้ซิงค์อะซิเตท (Zinc acetate) (0.1% โดยน้ำหนัก ของพีต) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 180-200°C ภายใต้บรรยากาศปกติเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง สารที่ได้หลังสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้ PET-OH มีหมู่ปลาย เป็นหมูไฮดรอกซิล ที่แตกต่างกัน 3 ตัวคือ P-EG, P-ET และ P-T ตามลำดับ โครงสร้างทางเคมีของ PET-OH ทั้ง 3 ชนิด แสดงดังภาพ 44



(a)



(b)

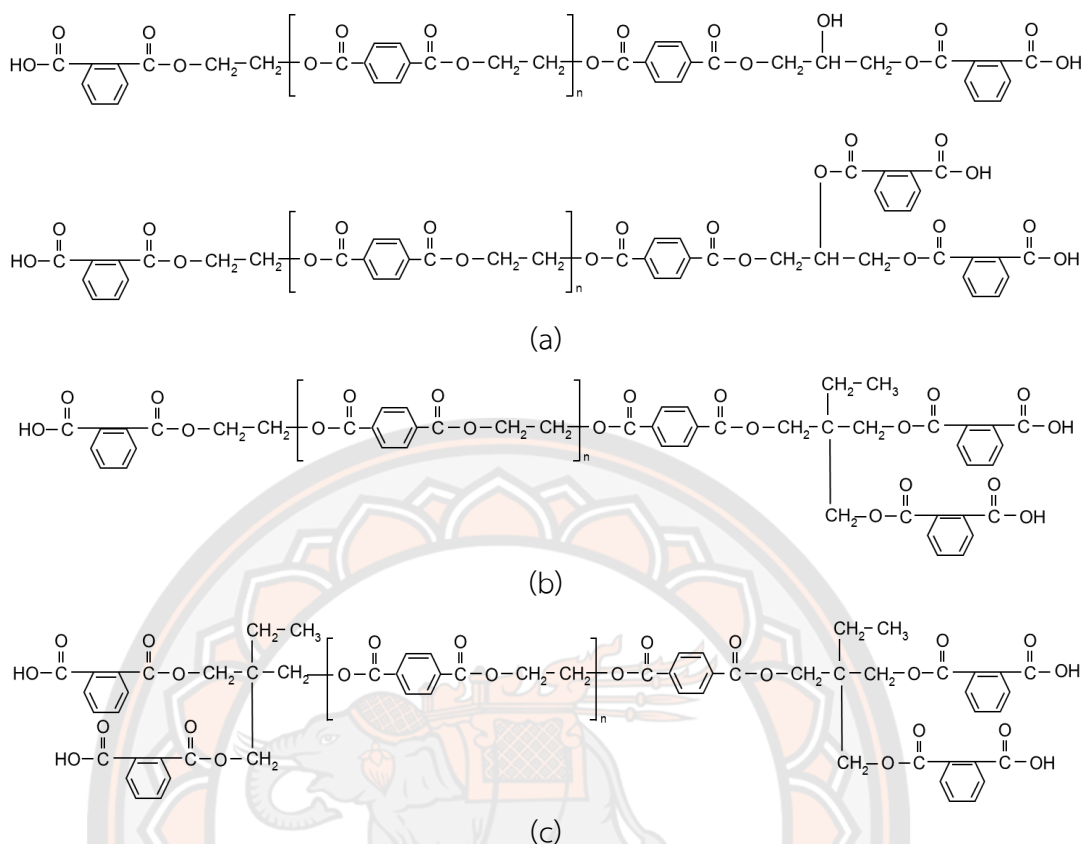


(c)

ภาพ 41 โครงสร้างของ PET-OH ที่เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิส PET เมื่อ (a) P-EG (b) P-ET และ (c) P-T

ขั้นตอนการเปิดวงของแอนไฮไดรด์ เตรียมโดยนำ PET-OH ที่ได้จากขั้นตอนการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิส (P-EG, P-ET และ P-T) มาทำปฏิกิริยาการเปิดวงพาทาลิกแอนไฮไดรด์ (PA) โดยเติม PA และสารตัวเร่งปฏิกิริยาพาราโทลูอินซีนโฟนิกแอซิด (PTSA) ในอัตราส่วน PET-OH:PA = 1:1.2 และ PTSA 0.1% โดยน้ำหนักของ PET-OH ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 145-160°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน สารที่ได้หลังสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้พีธัตต์ดแปรที่มีหมู่ปลายเป็นหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (PET-COOH) ที่แตกต่างกัน 3 ตัวคือ P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA ตามลำดับ

นำ PET-COOH ทั้ง 3 ตัวไปหาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิคเจลเพอร์มีเอชันโครมาโตกราฟี (Gel Permeation Chromatography, GPC) พบว่า P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA มีน้ำหนักโมเลกุล คือ 733 g/mol 920 g/mol และ 1148 g/mol ตามลำดับ นำค่าน้ำหนักโมเลกุลที่ได้มาคาดเดาการเกิดปฏิกิริยาการเปิดวง พบว่าแม้ว่า P-EG-PA จะมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งปลายจำนวน 3 หมู่เช่นเดียวกับ P-ET-PA แต่จากค่าน้ำหนักโมเลกุลที่ตรวจวัดได้พบว่ามีค่านี้น้อยกว่า คือ 733 g/mol ซึ่งแสดงถึงการหายไปของ PA 1 ตัว จึงคาดเดาได้ว่า P-EG-PA ที่เตรียมได้จะมีหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่ตำแหน่งปลายส่วนใหญ่ 2 หมู่ และมีบางส่วน 3 หมู่ ซึ่งต่อไปจะขอเรียกว่า มี -COOH 2-3 หมู่ (ภาพ 45 (a)) ในขณะที่ P-ET-PA สามารถบ่งบอกได้ว่ามีหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่ตำแหน่งปลาย 3 หมู่ (ภาพ 45 (b)) และ 4 หมู่ (ภาพ 45 (c)) ตามลำดับ



ภาพ 42 โครงสร้างของ PET-COOH ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาการเปิดวงของแอนไฮไดรด์ เมื่อ (a) P-EG-PA ชนิด 2-3 หมู่ COOH (b) P-ET-PA ชนิด 3 หมู่ COOH และ (c) P-T-PA ชนิด 4 หมู่ COOH

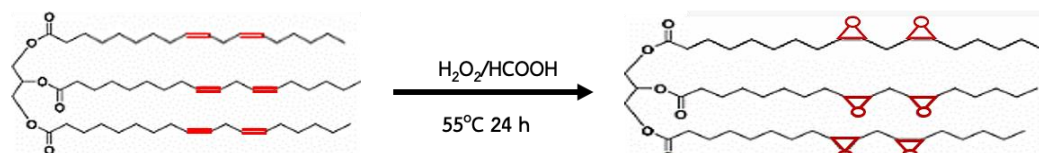
3.3.2 การสังเคราะห์น้ำมันปาล์มอีพ็อกซีไดซ์ (EPO)

น้ำมันปาล์มอีพ็อกซีไดซ์ เตรียมได้โดยการทำปฏิกิริยาอีพ็อกซีเดชัน แบบ in-situ ที่ตำแหน่งพันธะคู่ของน้ำมันปาล์มด้วยกรดเปอร์ฟอร์มิก ซึ่งเตรียมโดยเติมน้ำมันปาล์ม (PO) ปริมาตร 600 mL ลงไปในขวดก้นกลมแบบ 2 คอ ขนาด 2000 mL เติมกรดฟอร์มิก (30% โดยโมลของน้ำมันปาล์ม, 31.43 v/v) ลงไปอย่างช้า ๆ ด้วยกรวยแก้วหยดสาร พร้อมทั้งปั่นกวนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (100% โดยโมลของน้ำมันปาล์ม 130.81 v/v) ลงไปอย่างช้า ๆ พร้อมทั้งปั่นกวนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 55°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ภาพ 46)

เมื่อครบกำหนดเวลาทำการแยกชั้นน้ำออกจากชั้นน้ำมันด้วยกรวยแยก นำชั้นน้ำมันที่ได้มาละลายในสารละลายไดคลอโรมีเทน ก่อนปรับค่าความเป็นกรดต่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คาร์บอนเนตจนมีค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 7 จากนั้นทำการแยกชั้นน้ำออกจากชั้นของสารละลายไดคลอโรมีเทน และทำการเติมโซเดียมซัลเฟตเพื่อกำจัดน้ำส่วนที่เหลือ ทำการแยกสารดูความชื้น

ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ก่อนนำสารผสมไปประเหยสารละลายไดคลอโรมีเทนออก น้ำมันที่ได้หลังกระบวนการทำให้บริสุทธิ์คือน้ำมันปาล์มอีพ็อกซีไดซ์ (EPO)

ปฏิกิริยาอีพ็อกซิเดชัน



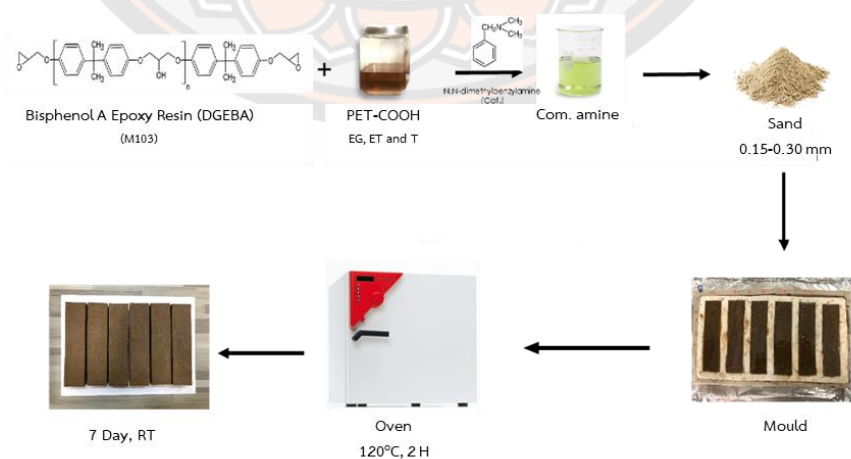
ภาพ 43 ปฏิกิริยาอีพ็อกซิเดชันของน้ำมันปาล์ม

3.3.3 การเตรียมอีพ็อกซีมอร์ตาร์ (Epoxy mortar)

อีพ็อกซีมอร์ตาร์ในงานวิจัยนี้เตรียมโดยการผสม PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA หรือ P-T-PA) ร่วมกับอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ (M103) ตามอัตราส่วนที่กำหนด (ตาราง 5) ที่อุณหภูมิห้อง ทำการปั่นกวนสารผสมเป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบกำหนดเวลาเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยา N-ไดเมทิลเบนซิลามีน (0.25% โดยน้ำหนักของ PET-COOH) ลงไป ทำการปั่นกวนต่อเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเติมเอมีนทางการค้า (M103) ลงไป ปั่นกวนสารผสมทั้งหมดให้เข้ากันเป็นเวลา 3 นาที แล้วจึงเติมทรายขนาด 0.15-0.30 mm (Sieve size 50–100 mesh) ตามอัตราส่วนที่กำหนดพร้อมปั่นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 3 นาที โดยมีอัตราส่วนระหว่างเรซินต่อส่วนหยาบ (Resin/aggregate) เท่ากับ 0.4 เทส่วนผสมทั้งหมดลงในแม่พิมพ์ที่กำหนด นำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ $120 \pm 5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในตู้อบลมร้อน เมื่อครบกำหนดเวลา นำมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน ก่อนนำไปทดสอบ (ภาพ 47)

ตาราง 5 อัตราส่วนสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของสารทำให้แข็งเอมีนต่อ PET-COOH

Codes	อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม (%w/w)							
	Epoxy oligomer	Hardeners			Sand			
		Com. Amine	P-EG-PA	P-ET-PA		P-T-PA		
M103	M103							
M-EA	2	1			5			
M-EA-EG0.25	2	0.75	0.25		5			
M-EA-EG0.50	2	0.50	0.50		5			
M-EA-EG0.75	2	0.25	0.75		5			
M-EA-ET0.25	2	0.75		0.25	5			
M-EA-ET0.50	2	0.50		0.50	5			
M-EA-ET0.75	2	0.25		0.75	5			
M-EA-T0.25	2	0.75			0.25	5		
M-EA-T0.50	2	0.50				0.50	5	
M-EA-T0.75	2	0.25					0.75	5

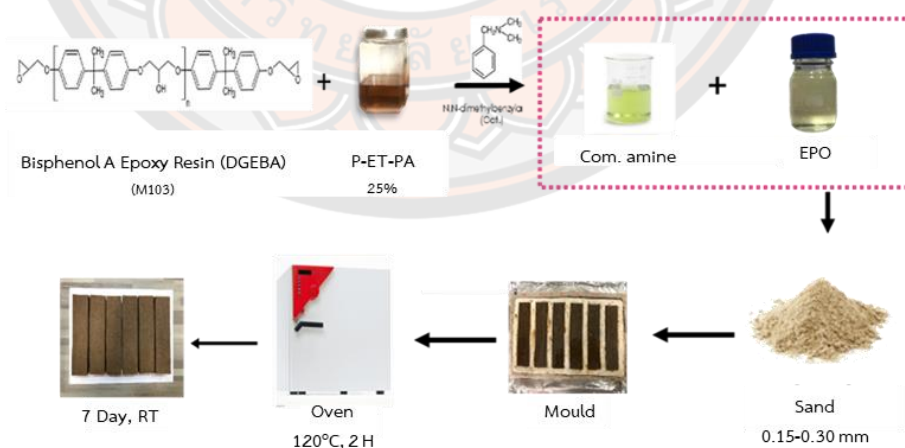


ภาพ 44 ขั้นตอนการผสมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของสารทำให้แข็งเอมีนต่อ PET-COOH

ในขณะที่ชิ้นงานอีพ็อกซีเรซินที่มี EPO เป็นอีพ็อกซีโพลิเมอร์รวม จะเตรียมโดยการผสม PET-COOH ร่วมกับอีพ็อกซีโพลิเมอร์ (M103) ตามอัตราส่วนที่กำหนด (ตาราง 6) ทำการปั่นจนสารผสมเป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบกำหนดเวลาเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป ทำการปั่นจนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเติมสารผสมระหว่างเอมีนทางการค้า (M103) กับ EPO ที่ผ่านการปั่นจนรวมกันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปั่นจนสารผสมทั้งหมดเป็นเวลา 20 นาทีก่อนเติมทรายลงไป และปั่นอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาประมาณ 5 นาทีก่อนเทส่วนผสมทั้งหมดในแม่พิมพ์ นำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ $120\pm 5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในตู้อบลมร้อน เมื่อครบเวลากำหนดเวลา นำมาเก็บไว้ในอุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน ก่อนนำไปทดสอบ (ภาพ 48)

ตาราง 6 อัตราส่วนสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมอีพ็อกซีเรซิน เมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอีพ็อกซีโพลิเมอร์ M103 ต่อ EPO

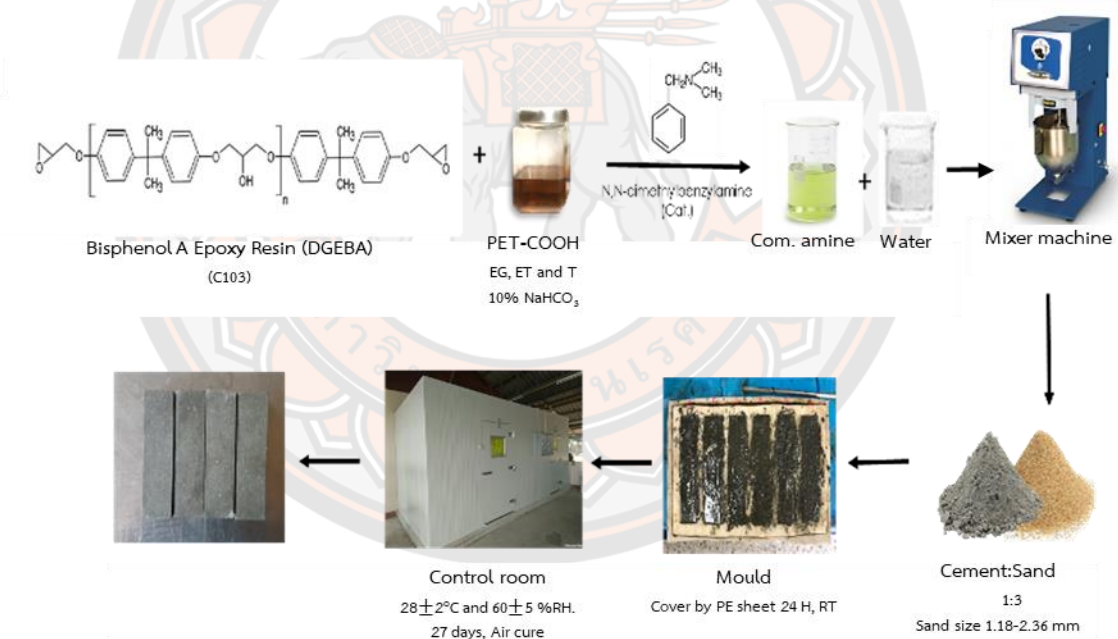
Codes	อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม (%w/w)				Sand
	Epoxy oligomer		Hardeners		
	M103	EPO	Com. Amine M103	P-ET-PA	
M-EA-ET0.25	2		0.75	0.25	5
M-EO0.25-ET0.25	1.75	0.25	0.75	0.25	5
M-EO0.50-ET0.25	1.50	0.50	0.75	0.25	5



ภาพ 45 ขั้นตอนการผสมอีพ็อกซีเรซิน เมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอีพ็อกซีโพลิเมอร์ M103 ต่อ EPO

3.3.4 การเตรียมอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร (Epoxy modified mortar)

อีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร หรืออีพ็อกซีซีเมนต์ในงานวิจัยนี้เตรียมโดยทำการปรับสภาพ PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA หรือ P-T-PA) ให้อยู่ในสภาวะสารแขวนลอย โดยใช้สารละลาย โซเดียมคาร์บอเนต (10% w/w) จากนั้นทำการผสม PET-COOH อิมัลชันร่วมกับอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ (C100) และสารตัวเร่งปฏิกิริยา N-ไดเมทิลเบนซิลามีน (0.25% โดยน้ำหนักของ PET-COOH) ปั่น กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมเอมีนทางการค้า (C100) ลงไปตามอัตราส่วนที่กำหนด (ตาราง 7) ปั่นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 5 นาที เมื่อครบกำหนดเวลาเติมน้ำตามอัตราส่วนที่กำหนด ลงไปพร้อมปั่นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงเติมสารผสมที่เตรียมจากซีเมนต์ และ ทราย ตามชนิดและอัตราส่วนที่กำหนด (ซีเมนต์ และทราย มีการผสมให้เข้ากันโดยการปั่นกวนเป็น เวลา 5 นาที) โดยทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาด 1.19–2.38 mm (Sieve size 8 –16 mesh) กำหนดให้ส่วนผสมทั้งหมดมีอัตราการไหลแผ่ 110-120 mm ก่อนเทลงในแม่พิมพ์ที่กำหนด บ่ม ชีงงานในแม่พิมพ์โดยคลุมด้วยผ้าเปียกหมาด และคลุมทับด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหย ของน้ำที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปเก็บในห้องควบคุมความชื้น (50%RH) ที่อุณหภูมิ 28°C เป็นเวลา 27 วัน (เวลาในการบ่มทั้งหมด คือ 28 วัน) ก่อนนำไปทดสอบ (ภาพ 49)



ภาพ 46 ขั้นตอนการผสมอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อทำการปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของสาร ทำให้แข็งเอมีนต่อ PET-COOH

ตาราง 7 อัตราส่วนสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมอีพ็อกซีมอร์ตาร์ตัดแปร เมื่อทำการปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งเอมีนต่อ PET-COOH

Codes	อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม (%w/w)					C ¹	W ³
	Epoxy oligomer	Hardeners			Com.		
		C100	Amine C100	P-EG-PA			
C						20	0.5
C-EAc	3	1.50				20 ²	0.06
C-EA	3	1.50				20	0.06
C-EA-EG0.25	3	1.25	0.25			20	0.08
C-EA-EG0.50	3	1.00	0.50			20	0.10
C-EA-EG0.75	3	0.75	0.75			20	0.12
C-EA-ET0.25	3	1.25		0.25		20	0.08
C-EA-ET0.50	3	1.00		0.50		20	0.10
C-EA-ET0.75	3	0.75		0.75		20	0.12
C-EA-T0.25	3	1.25			0.25	20	0.10
C-EA-T0.50	3	1.00			0.50	20	0.12
C-EA-T0.75	3	0.75			0.75	20	0.14

หมายเหตุ C¹ คือ ซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างปูนปอร์ตแลนด์:ทราย = 1:3 โดยใช้ทรายขนาด 1.19–2.38 mm (8 –16 mesh)

² คือ สูตรที่ใช้ซีเมนต์และทรายจากบริษัทริชเทค โดยเป็นซีเมนต์เกรดทนความชื้นที่ผสมสำเร็จร่วมกับทราย ในอัตราส่วน 1:3

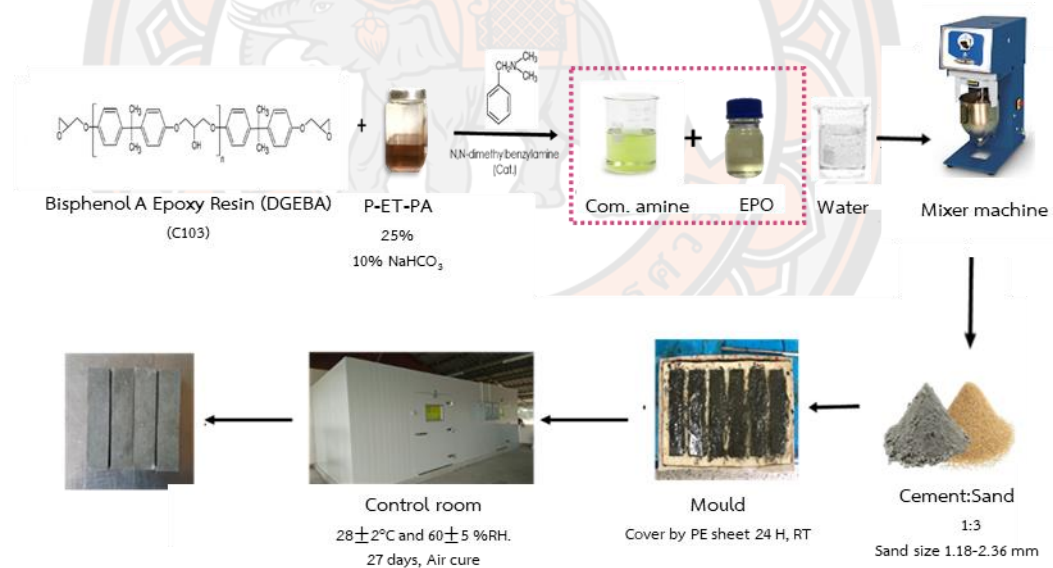
W³ คือ ปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อทำให้ส่วนผสมทั้งหมดมีค่าการไหลผ่าน 110-120 mm

ในขณะที่ขึ้นงานอีพ็อกซีมอร์ตาร์ตัดแปรที่มี EPO เป็นอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์รวม เตรียมโดยการผสมสารแขวนลอย PET-COOH ร่วมกับอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ (C100) และสารตัวเร่งปฏิกิริยาตามอัตราส่วนที่กำหนด ทำการปั่นกวนสารผสมเป็นเวลา 30 นาที ก่อนทำการเติมสารผสมร่วมระหว่างเอมีนทางการค้า (C100) กับสารแขวนลอย EPO (เตรียมโดยใช้ 0.25% w/v ทวิน 20) ลงไปตามอัตราส่วนที่กำหนด (ตาราง 8) พร้อมปั่นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 15 นาที เมื่อครบกำหนดเวลาเติมน้ำตามอัตราส่วนที่กำหนดลงไปพร้อมปั่นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 5 นาที กำหนดให้ส่วนผสม

ทั้งหมดมีอัตราการใช้ 110-120 mm ก่อนเทลงในแม่พิมพ์ที่กำหนด ทำการบ่มชิ้นงานตามวิธีดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้นเป็นเวลา 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบ (ภาพ 50)

ตาราง 8 อัตราส่วนสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ C100 ต่อ EPO

Codes	อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม (%w/w)					
	Epoxy oligomer		Hardeners		Cement	Water
	C100	EPO	Com. Amine C100	P-ET-PA		
C-EA-ET0.25	3.00		1.25	0.25	20	0.08
C-EO0.25-ET0.25	2.75	0.25	1.25	0.25	20	0.06
C-EO0.50-ET0.25	2.50	0.50	1.25	0.25	20	0.06



ภาพ 47 ขั้นตอนการผสมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ M101 ต่อ EPO

3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติกายภาพของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปร

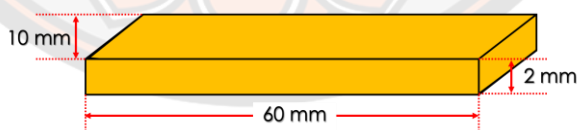
3.4.1 สมบัติทางความร้อน

ทดสอบสมบัติความหยุ่นหนืด (Viscoelastic properties) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปร ด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) ยี่ห้อ TA INSTRUMENTS รุ่น DMA 850 ในโหมด Dual cantilever (ภาพ 51) ในช่วงอุณหภูมิ 0-150°C ด้วยอัตราเร็ว 3°C/min ความถี่ 1 Hz โดยใช้ชิ้นงานขนาดกว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ 10 x 60 x 2 mm³ (ภาพ 52) รายงานผลค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus) ค่าแดมปีง เฟคเตอร์ (Damping factor, Tan δ) และค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง (Crosslink density, V_R) โดยค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางคำนวณดังสมการ (1)

$$V_R = \frac{E'R}{3RT} \quad (1)$$



ภาพ 48 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงกลแบบไดนามิก โหมด Dual cantilever



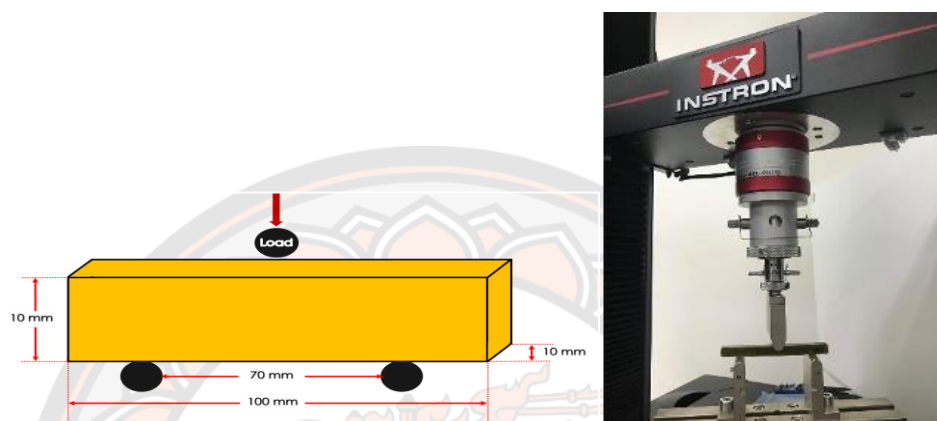
ภาพ 49 โมเดลตัวอย่างชิ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปร สำหรับทดสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงกลแบบไดนามิก โหมด Dual cantilever

3.4.2 สมบัติเชิงกล

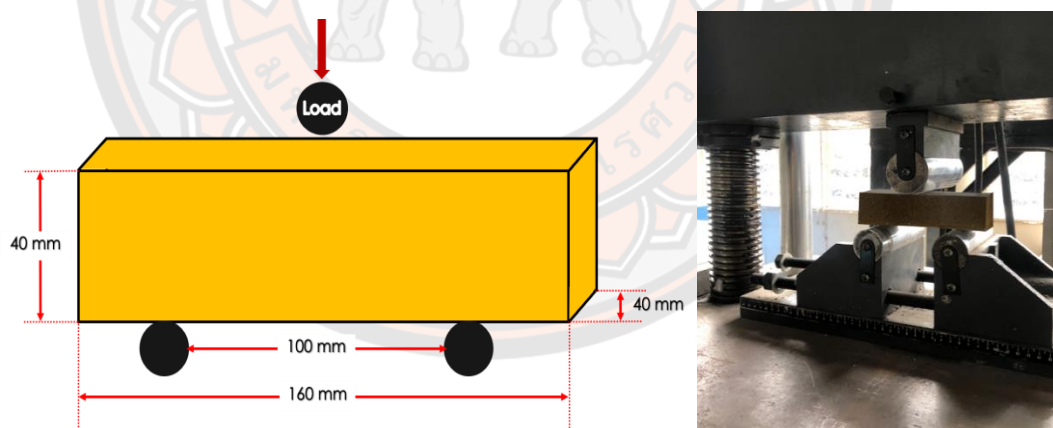
3.4.2.1 สมบัติความต้านแรงดัดโค้ง

ทดสอบสมบัติความต้านแรงดัดโค้งด้วยเครื่องทดสอบเชิงกล ตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยใช้ชิ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ จะทำการทดสอบด้วยเครื่อง INSTRON รุ่น 5965 (ภาพ 53) โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาดกว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ 10 x 100 x 10 mm³ ระยะห่างของจุดรองรับ (Support span) 70 mm ด้วยอัตราเร็ว 1 mm/min ด้วยโหลดเซลล์ (Load cell)

ขนาด 5 kN ในขณะที่อีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร จะทำทดสอบด้วยเครื่อง BPS INSTRUMENT รุ่น HY-600F (ภาพ 54) โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาดกว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ $40 \times 160 \times 40 \text{ mm}^3$ ระยะห่างของจุดรองรับ (Support span) 100 mm ด้วยอัตราเร็ว 1 mm/min ด้วยโหลดเซลล์ (Load cell) ขนาด 600 kN ทำการทดสอบ 5 ชิ้นงาน/สูตร วัดแรงที่ใช้ในการทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักต่อพื้นที่หน้าตัด รายงานผลเป็นค่าความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural strength) ของชิ้นงาน



ภาพ 50 โมเดลตัวอย่างและเครื่องมือสำหรับการทดสอบสมบัติความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีมอร์ตาร์

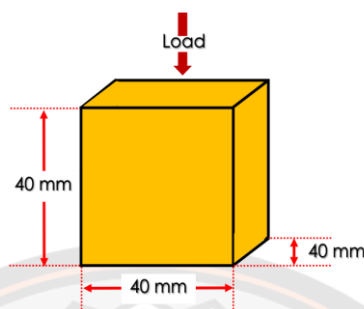


ภาพ 51 โมเดลตัวอย่างและเครื่องมือสำหรับการทดสอบสมบัติความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร

3.4.2.2 สมบัติความทนแรงอัด

ทดสอบสมบัติความทนแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยชิ้นงานอีพ็อกซีมอร์ตาร์ ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเชิงกล INSTRON รุ่น 5965 โดยใช้ชิ้นงาน ขนาด กว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ ในขณะที่อีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรทดสอบด้วยเครื่อง

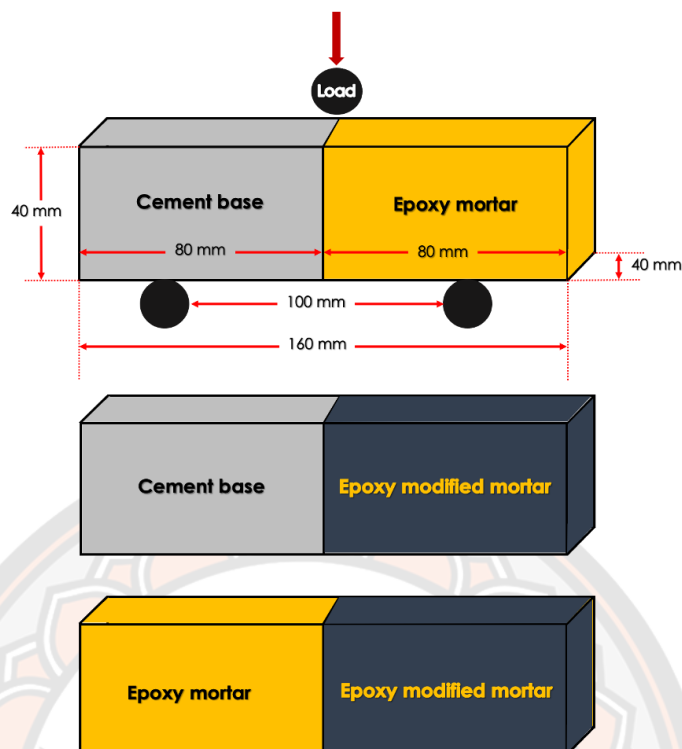
ทดสอบกำลังกดอัด (Compression machine) ยี่ห้อ MODENA-ITALY โดยใช้ชิ้นงาน ขนาด กว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ (ภาพ 55) ทำการกดขึ้นทดสอบด้วยอัตราเร็ว 1 mm/min โหลดเซลล์ (Load cell) ขนาด 5 kN ทดสอบ 5 ชิ้นงาน/สูตร



ภาพ 52 โมเดลตัวอย่างสำหรับการทดสอบสมบัติความทนแรงอัด

3.4.2.3 สมบัติแรงยึดเหนี่ยว

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาสมบัติแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุที่แตกต่างกัน 3 ชุด คือ 1) แรงยึดเหนี่ยวระหว่าง ซีเมนต์ทางการค้า (C) และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ 2) ซีเมนต์ทางการค้ากับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ ดัดแปร และ 3) อีพ็อกซีมอร์ตาร์กับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร (ภาพ 56) โดยเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง แบบ 3 จุด ซึ่งชิ้นงานที่เป็นฐานคือ ซีเมนต์ทางการค้า และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ จะทำการเตรียมก่อน โดยเตรียมให้มีขนาดกว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ $40 \times 160 \times 40 \text{ mm}^3$ จากนั้นเก็บชิ้นงานไว้เป็นระยะเวลา 1 เดือน (ให้เป็นตัวแทนของชิ้นงานเก่า) โดยชิ้นงาน ซีเมนต์ทางการค้า เก็บในห้องควบคุมอุณหภูมิ ในขณะที่ชิ้นงาน อีพ็อกซีมอร์ตาร์ เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อครบกำหนดนำชิ้นงานมาตัดครึ่ง ($40 \times 80 \times 40 \text{ mm}^3$) ขัดผิวหน้าให้เรียบเพื่อเป็นการเตรียมผิว เรียกชิ้นงานส่วนนี้ว่าชิ้นงานเก่า จากนั้นนำชิ้นงานกลับไปใส่ในแม่พิมพ์ แล้วนำอีพ็อกซีมอร์ตาร์/อีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรสูตรที่กำหนด หล่อรวมกับชิ้นงานเก่า เพื่อให้ได้ชิ้นงานขนาดกว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ $40 \times 160 \times 40 \text{ mm}^3$ โดยหากเป็นการหล่อรวมกับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ จะนำชิ้นงานไปอบ ที่อุณหภูมิ $120 \pm 5^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน ก่อนนำไปทดสอบ ในขณะที่หากเป็นการหล่อรวมกับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรจะทำการบ่มด้วยผ้าเปียกหมาดและเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบ



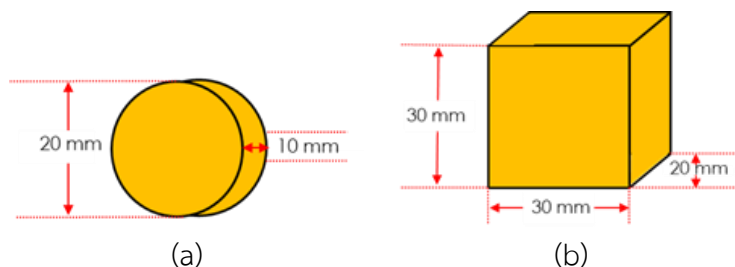
ภาพ 53 โมเดลตัวอย่างชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของซีเมนต์ทางการค้า และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ ซีเมนต์ทางการค้ากับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร และอีพ็อกซีมอร์ตาร์กับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร

3.4.3 สมบัติทางกายภาพ

3.4.3.1 สมบัติการดูดซึมน้ำ

ทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำของชิ้นงานอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร โดยทำการแช่ชิ้นงานอีพ็อกซีมอร์ตาร์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 mm หนา 10 mm (ภาพ 57 (a)) และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรขนาดกว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ 30 x 30 x 20 mm³ (ภาพ 57 (b)) ใน น้ำที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน ทดสอบ 3 ชิ้นงาน/สูตร เมื่อครบกำหนดเวลานำชิ้นงานไปชั่งน้ำ บริเวณผิวก่อนชั่งน้ำหนักเทียบกับชิ้นงานก่อนแช่น้ำ ค่าการดูดซึมน้ำคำนวณดังสมการ (2)

$$\text{Water absorption (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักหลังแช่น้ำ} - \text{น้ำหนักก่อนแช่น้ำ}}{\text{น้ำหนักหลังแช่น้ำ}} \times 100 \quad (2)$$



ภาพ 54 โมเดลตัวอย่างสำหรับทดสอบการดูดซึบสารละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) ของ (a) อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ และ (b) อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร

3.4.3.2 สมบัติความต้านทานต่อตัวทำละลายกรด เบส และเกลือ

ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อตัวทำละลายกรด เบส และเกลือของชิ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ตาร์และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร โดยทำการแช่ชิ้นงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 mm หนา 10 mm (ภาพ 57 (a)) และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรขนาดกว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ $30 \times 30 \times 20 \text{ mm}^3$ (ภาพ 57 (b)) ในสารละลาย 10% กรดซัลฟูริก (10% H_2SO_4) 10% โซเดียมไฮดรอกไซด์ (10% NaOH) และ 10% โซเดียมคลอไรด์ (10% NaCl) เป็นเวลา 7 วัน ทดสอบ 3 ชิ้นงาน/สูตร เมื่อครบกำหนดเวลานำชิ้นงานไปอบให้แห้ง ชั่งน้ำหนักของชิ้นงานหลังอบแห้งเทียบกับชิ้นงานก่อนแช่ในตัวทำละลาย สมบัติความต้านทานต่อตัวทำละลาย คำนวณจากปริมาณเนื้อสารที่สูญเสียหลังจากการแช่ในสารละลาย ดังแสดงในสมการ (3)

$$\text{Weight loss (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนแช่สารละลาย} - \text{น้ำหนักหลังแช่สารละลาย}}{\text{น้ำหนักก่อนแช่สารละลาย}} \times 100 \quad (3)$$

3.4.3.3 ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์ (Setting time of cement)

ศึกษาระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์ โดยใช้เข็มไวแคท (Vicat needle) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 mm (ภาพ 58) โดยหลังเตรียมชิ้นงาน (ซีเมนต์เพส) ตามวิธีที่กำหนด นำผ้าเปียกมาคลุมชิ้นงาน และเก็บชิ้นงานไว้ในห้องควบคุม ที่อุณหภูมิ 28°C ความชื้นสัมพัทธ์ 50%RH เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข็มไวแคทมาวางบนชิ้นงาน อ่านค่าระยะทางที่เข็มจมลงไปนชิ้นงาน เมื่อเวลาผ่านไป 30 วินาที จากนั้นนำเข็มไวแคทออก นำผ้าเปียกมาคลุมชิ้นงาน เก็บชิ้นงานในห้องควบคุม อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์อีกครั้ง หลังเก็บชิ้นงานเป็นเวลา 15 นาที นำชิ้นงานมาวัดค่าระยะทางที่เข็มจมลงไปนชิ้นงาน เมื่อเวลาผ่านไป 30 วินาที อีกครั้ง ทำซ้ำทุก ๆ 15 นาที จนกระทั่งเข็มไวแคทไม่สามารถทะลุผ่านชิ้นงาน นำข้อมูลเวลา และระยะทางที่เข็มจมลงไปนซีเมนต์เพสมาพลอตกราฟหา

1) ระยะเวลาก่อตัวขั้นต้น (Initial setting time) ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ซีเมนต์เพสก่อตัวจนสามารถรับน้ำหนักของเข็มไวแคท โดยวัดเวลาที่เข็มจมลงไป 25 มิลลิเมตร เมื่อปล่อยเข็มไว้ 30 วินาที และ

2) ระยะเวลาก่อตัวขั้นปลาย (Final setting time) เป็นระยะเวลาที่ซีเมนต์เพสก่อตัวจนสามารถรับน้ำหนักของเข็มไวแคตโดยเข็มไม่จมลงไปนซีเมนต์ และปรากฏเพียงรอยกระทงของเข็มเท่านั้น



ภาพ 55 การทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต โดยวิธีการทดสอบด้วยเทคนิค Vicat needle

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 สมบัติความหยุ่นหนืดของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร

ศึกษาสมบัติความหยุ่นหนืด (Viscoelastic properties) ของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วัสดุเชิงกลแบบไดนามิก (Dynamic Mechanical Analysis; DMA) โดยวิเคราะห์ค่ามอดุลัสสะสมที่สถานะคล้ายแก้ว (Storage modulus at glassy state, E'_G) มอดุลัสสะสมที่สถานะคล้ายยาง (Storage modulus at rubber state, E'_R) และค่าการสูญเสียแทนเจนต์ (Loss tangent, $\tan \delta$)

โดยค่า E'_G สัมพันธ์กับค่าความแข็งเหนียว (Stiffness) ของโซ่พอลิเมอร์ และค่าการยึดเกาะ (Adhesion) ระหว่างอีพ็อกซีกับวัสดุผสม (Aggregate) โดยโซ่พอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีความแข็งแรง เช่น หมู่อะโรมาติก จะมีค่า E'_G สูงกว่าโซ่พอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีความยืดหยุ่น และค่าการยึดเกาะระหว่างอีพ็อกซีกับวัสดุผสมที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่า E'_G ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า E'_R จะถูกใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง (Crosslink density) ของอีพ็อกซีพอลิเมอร์

สำหรับค่า $\tan \delta$ จะมีการใช้ข้อมูลใน 2 ส่วน คือ 1) การใช้แสดงค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วแบบไดนามิก (T_g) โดยพิจารณาจากค่าอุณหภูมิ ณ จุดที่มีค่า $\tan \delta$ มากที่สุด และ 2) ค่าความสูงของ $\tan \delta$ ซึ่งบ่งบอกถึงสมบัติการกระจายพลังงาน (Damping property) โดยวัสดุที่มีสมบัติการกระจายพลังงานที่ดี (ค่า $\tan \delta$ มากกว่า 0.3) จะช่วยในเรื่องของการลดเสียงรบกวน และลดการสั่น (Noise and vibration reduction) อย่างไรก็ตามค่า $\tan \delta$ ที่เพิ่มขึ้น จะบ่งบอกถึงค่าการยึดเกาะระหว่างเฟส (Interfacial adhesion) ที่ลดลง ในขณะที่ค่า T_g สัมพันธ์กับความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง การมีหมู่ฟังก์ชันที่แข็งในโครงสร้าง รวมถึงค่าการยึดเกาะระหว่างอีพ็อกซีกับวัสดุผสม ดังนั้นในการพิจารณาถึงสูตรที่ให้อีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่มีแรงยึดเกาะระหว่างอีพ็อกซีกับวัสดุผสมที่ดี ทั้งยังมีสมบัติด้านการกระจายพลังงานที่ดี จึงต้องพิจารณาสูตรที่ให้ทั้งค่า $\tan \delta$ ที่ต่ำ (แต่ต้องสูงกว่า 0.3) และค่า T_g ที่สูง

4.1.1 อีพ็อกซีมอร์ตาร์ (Epoxy Mortar)

4.1.1.1 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม (Co-hardener) ต่อสมบัติความหยุ่นหนืดของอีพ็อกซีมอร์ตาร์

ศึกษาผลของสารทำให้แข็งร่วมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีจำนวนหมู่ปลายเป็นหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (เพ็ตแอซิด, PET-COOH) ที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ P-EG-PA ซึ่งมีหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่ตำแหน่งปลาย (-COOH) 2-3 หมู่ (ซึ่งจะใช้ตัวย่อว่า EG) P-ET-PA ซึ่งมีหมู่ -COOH 3 หมู่ (ซึ่งจะใช้ตัวย่อว่า ET) และ P-T-PA ซึ่งมีหมู่ -COOH 4 หมู่ (ซึ่งจะใช้ตัวย่อว่า T) ต่อสมบัติทางความร้อนวัสดุเชิงกลแบบไดนามิกของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ ในช่วงอุณหภูมิ 0–150°C ที่ความถี่ 1 Hz โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของเอมีน: PET-COOH เท่ากับ 1:0, 0.75:0.25, 0.50:0.50 และ

0.25:0.75 โดยน้ำหนัก หรือการใช้สารทำให้แข็งร่วม PET-COOH ในอัตราส่วน 0%, 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ

จากผลการศึกษาพบว่าอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทที่เตรียมจากอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ (Epoxy oligomer) เอมีนทางการค้า (Amine) และทราาย (ซึ่งจะใช้ตัวย่อว่า M-EA) มีค่า E'_G 21,919 MPa การผสมร่วมกับ PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด ในอัตราส่วน เอมีน:PET-COOH เท่ากับ 0.75:0.25 ขึ้นงาน มีค่า E'_G เพิ่มขึ้น (ภาพ 59 และตาราง 9) ซึ่งค่า E'_G แสดงถึงความสามารถในการรับแรง (Load-carrying capacity) แบบอีลาสติกของวัสดุในรอบของการสั่นที่สถานะคล้ายแก้วของวัสดุ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความแข็งเหนียว (Stiffness) ของโซพอลิเมอร์ และค่าการยืดเกาะระหว่างอีพ็อกซีกับทราาย [40] จึงอาจกล่าวได้ว่าหมู่เอโรมาติกของ PET-COOH เพิ่มความแข็งเหนียวให้กับอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทได้ดีกว่าการใช้สารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว รวมถึงช่วยเพิ่มการยืดเกาะระหว่างอีพ็อกซีกับทราาย โดยการผสมร่วมกับ PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH 3 หมู่ (M-EA-ET0.25) มีค่า E'_G สูงที่สุด รองลงไปคือการผสมร่วมกับ PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH 4 หมู่ (M-EA-T0.25) และการผสมร่วมกับ PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH 2-3 หมู่ (M-EA-EG0.25) ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนสถานะของวัสดุจากสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยาง พบว่า M-EA-T0.25 มีค่ามอดุลัสสะสมที่สถานะคล้ายยาง (E'_R) สูงที่สุด รองลงไปคือ M-EA-ET0.25 และ M-EA-EG0.25 ซึ่งค่า E'_R สัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง [39-40] และเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่าสารทำให้แข็งที่มีจำนวนหมู่ฟังก์ชันที่มากกว่าจะมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่มากกว่าเมื่อสารทำให้แข็งมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกัน อย่างไรก็ตามการเชื่อมขวางที่มากเกินไปอาจส่งผลต่อการรับ และกระจายแรงแบบอีลาสติกของวัสดุ จึงส่งผลให้ M-EA-ET0.25 ที่แม้ว่าจะมีการเชื่อมขวางที่น้อยกว่า M-EA-T0.25 แต่ยังมีกระจายแรงแบบอีลาสติกที่สถานะคล้ายแก้วที่สูงกว่า ในขณะที่ M-EA-EG0.25 ซึ่งมีจำนวนหมู่ฟังก์ชัน -COOH ที่น้อยที่สุดพบว่าขึ้นงานมีการเชื่อมขวาง และค่า E'_G ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับ PET-COOH อีก 2 ชนิด (ภาพ 59 และตาราง 9)

แม้ว่าการผสมร่วมของ PET-COOH กับเอมีนทางการค้าจะช่วยเพิ่มค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง และความแข็งเหนียวของโซพอลิเมอร์เมื่อเทียบกับการใช้สารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว แต่ความยาวโซ่ที่มากกว่าของ PET-COOH เมื่อเทียบกับเอมีนทางการค้า รวมถึงความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่น้อยกว่า 1° เอมีน [33] ส่งผลให้ขึ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางลดลงตามอัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้น (50% และ 75% ส่วน) ซึ่งส่งผลต่อค่าความสามารถในการรับแรงที่สถานะคล้ายแก้ว (E'_G) ของขึ้นงานที่ลดลงตามอัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้น

ศึกษาค่าความสูง ณ สูงสุดของค่า $\tan \delta$ ($\tan \delta_{\max}$) พบว่าอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทที่เตรียมจากอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ และเอมีนทางการค้า (M-EA) มีค่า $\tan \delta_{\max}$ 0.44 หมายถึงขึ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทที่เตรียมได้มีสมบัติการกระจายพลังงาน (Damping) ที่ดี (ค่า $\tan \delta > 0.3$) [41-43] ซึ่งสมบัติดังกล่าวจะช่วยในเรื่องของการลดเสียงรบกวน และลดการสั่นของวัสดุเมื่อรับแรง การผสม PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด พบว่าขึ้นงานมีค่า $\tan \delta_{\max}$ เพิ่มขึ้น ทั้งยังมีช่วงอุณหภูมิการใช้งานของ

สมบัติการกระจายพลังงานที่เพิ่มขึ้น (ภาพ 60 และตาราง 9) โดยอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ที่เตรียมจากอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ และเอมีนทางการค้ามีช่วงอุณหภูมิการใช้งานของสมบัติการกระจายพลังงาน (ค่า $\tan \delta > 0.3$) ระหว่าง 36-58°C ในขณะที่การผสมร่วมกับ PET-COOH ในอัตราส่วน 25% ช่วยให้ชิ้นงานมีช่วงอุณหภูมิการใช้งานของสมบัติการกระจายพลังงานเพิ่มขึ้น โดย M-EA-T0.25 และ M-EA-ET0.25 สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ ระหว่าง 38-80°C ในขณะที่ M-EA-EG0.25 สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า คือระหว่าง 35-73°C ซึ่งช่วงอุณหภูมิการใช้งานของสมบัติการกระจายพลังงานที่เพิ่มขึ้น น่าจะมาจากการเชื่อมขวางแบบแทรกสอดระหว่างกัน (Interpenetration network) ระหว่างอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์กับเอมีน และอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์กับ PET-COOH ที่ช่วยให้สามารถใช้งานสมบัติการกระจายพลังงานในช่วงอุณหภูมิที่สูงและกว้างขึ้น

อย่างไรก็ตามการผสม PET-COOH ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอัตราส่วน 75% พบว่าชิ้นงานทุกสูตรมีค่า $\tan \delta_{\max}$ เพิ่มขึ้น และมีช่วงอุณหภูมิการใช้งานของสมบัติการกระจายพลังงานที่แคบลง ซึ่งค่า $\tan \delta_{\max}$ ที่เพิ่มขึ้นนั้น นอกจากจะบ่งบอกว่าชิ้นงานเกิดการกระจายพลังงานที่เพิ่มขึ้นแล้วนั้น ยังบ่งบอกว่าชิ้นงานมีอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีกับทรายที่ลดลง [33] โดยจากผลการทดลองพบว่าสูตร M-EA-EG0.75 ซึ่งเป็นการผสมร่วมกับ PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH ที่ตำแหน่งปลายที่น้อยที่สุด (-COOH 2-3 หมู่) มีค่า $\tan \delta_{\max}$ สูงที่สุด คือ 0.91 ซึ่งแสดงถึงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีกับทรายที่ต่ำที่สุด รองลงไปคือ M-EA-ET0.75 และ M-EA-T0.75 ตามลำดับ

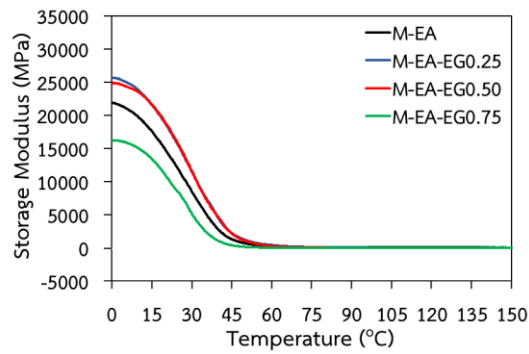
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาลักษณะพีค $\tan \delta$ ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทั้งที่เตรียมจากการใช้เอมีนเป็นสารทำให้แข็งเพียงอย่างเดียว หรือการใช้สารทำให้แข็งร่วมระหว่างเอมีนและ PET-COOH มีลักษณะเป็นพีคเดียว (Single $\tan \delta$ peak) ซึ่งบ่งบอกถึงความเข้ากันได้ (Good compatibility) [43] ของการเชื่อมขวางแบบแทรกสอดที่แตกต่างกัน แต่ทั้งนี้ความกว้างของพีคมีความแตกต่างกัน ซึ่งแตกต่างกันตามอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วมที่ใช้ ซึ่งอัตราส่วนของเอมีนและ PET-COOH ที่แตกต่างกันส่งผลต่อปริมาณของหมู่ฟังก์ชันของการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นที่แตกต่างกัน (หมู่ 3° เอมีน เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์กับเอมีน และหมู่เอสเทอร์ เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์กับ PET-COOH)

ศึกษาค่าอุณหภูมิ ณ จุดสูงสุดของค่า $\tan \delta$ ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ (ภาพ 60 และตาราง 9) ซึ่งค่า T_g ของชิ้นงานสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง และการมีหมู่ฟังก์ชันที่แข็งเกร็ง (Rigid) ในโครงสร้าง [33, 39, 43] จากผลการทดลองพบว่าอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ที่เตรียมจากเอมีนทางการค้าเพียงอย่างเดียว (M-EA) มีค่า T_g เท่ากับ 45.56°C การผสมร่วมกับ PET-COOH ทำให้ชิ้นงานมีค่า T_g เพิ่มขึ้น โดย M-EA-T ซึ่งเป็นการผสมร่วมกับ PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH ที่ตำแหน่งปลาย 4 หมู่ มีค่า T_g สูงที่สุด รองลงไปคือ M-EA-ET และ M-EA-EG ซึ่งเป็นการผสมร่วมกับ PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH ที่ตำแหน่งปลาย 3 หมู่ และ 2-3 หมู่ ตามลำดับ ซึ่งค่า T_g เป็นค่าที่เกิดจากการยับยั้งโซ่ของพอลิเมอร์ ซึ่งพอลิเมอร์ที่มีตำแหน่งของการเชื่อมขวางที่มากกว่า (สัมพันธ์กับจำนวนหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้) จะขัดขวางการยับยั้งโซ่ของพอลิเมอร์ที่มากกว่าเช่นกัน ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่า T_g ที่

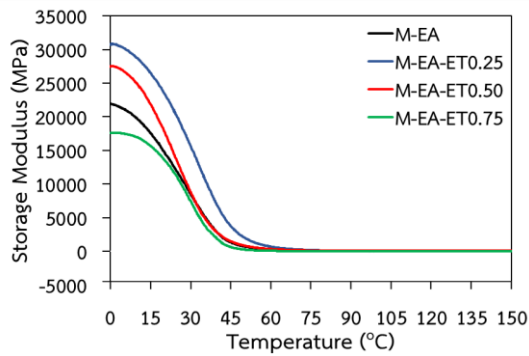
สูงขึ้น นอกจากนี้ค่า T_g ยังสัมพันธ์กับค่าการยืดเกาะระหว่างอีพ็อกซีกับวัสดุผสมหรือทราย [38, 43] โดยชั้นงานที่มีค่า T_g ที่สูงขึ้น จะบ่งบอกถึงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีกับทรายที่เพิ่มขึ้น

ทั้งนี้อีพ็อกซีโมรตาร์นิยมใช้ในการปูพื้นอาคารของโรงงานที่ต้องการการรับแรงที่สูง รวมถึงสามารถกระจายพลังงานได้ดี ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงสมบัติการกระจายพลังงานที่ดี (ค่า $\tan \delta > 0.3$) และชั้นงานมีอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีกับทรายสูง (T_g สูง) พบว่าการผสม PET-COOH ในอัตราส่วน 25% ให้ค่า $\tan \delta$ ระหว่าง 0.47-0.50 และให้ค่า T_g ที่สูงที่สุด เมื่อเทียบกับการใช้สารทำให้แข็งร่วม PET-COOH ในอัตราส่วนอื่น ๆ โดย M-EA-T0.25 ให้ค่า $\tan \delta$ ต่ำที่สุด คือ 0.47 และให้ค่า T_g สูงที่สุด คือ 64.45°C ซึ่งแสดงถึงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีกับทราย และการแสดงสามารถกระจายพลังงานของวัสดุที่ดีที่สุดที่ลดลงไปคือ M-EA-ET0.25 และ M-EA-EG0.25 ตามลำดับ

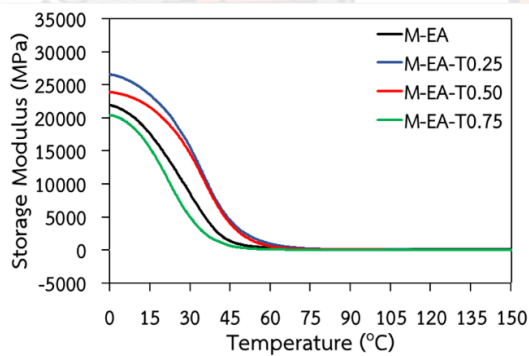




(a)

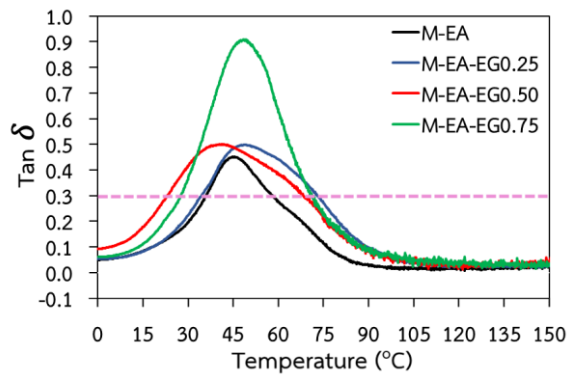


(b)

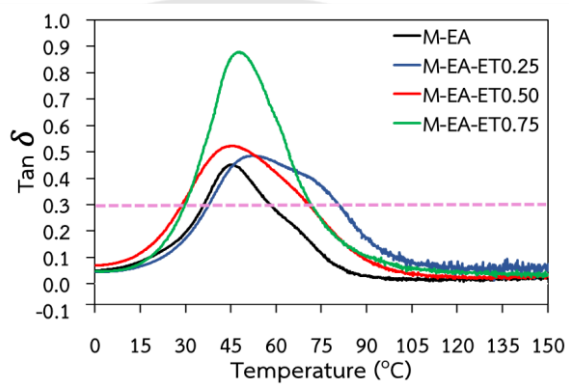


(c)

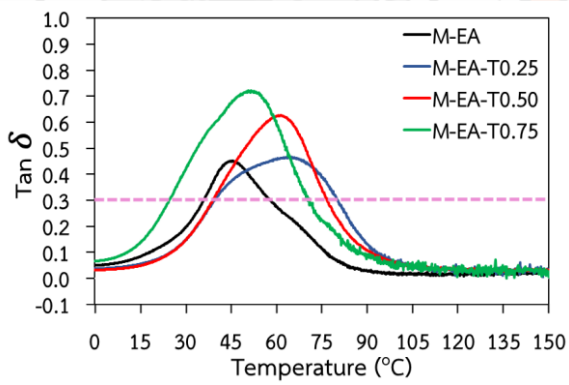
ภาพ 56 ค่ามอดุลัสสะสมของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทที่เตรียมจากสารทำให้แข็งร่วม เอมีน:PET-COOH ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เมื่อผสมร่วมกับ PET-COOH (a) M-EA-EG (b) M-EA-ET และ (c) M-EA-T



(a)



(b)



(c)

ภาพ 57 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ของอีพ็อกซีโมรตาร์ที่เตรียมจากสารทำให้แข็งร่วมเอมีน:PET-COOH ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เมื่อผสมร่วมกับ PET-COOH (a) M-EA-EG (b) M-EA-ET และ (c) M-EA-T

ตาราง 9 ค่ามอดูลัสสะสม ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ค่าอุณหภูมิลักษณะเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของอีพ็อกซีอีพอกซีออลิโกเมอร์ที่ปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ PET-COOH

Codes	Storage Modulus (MPa)		$(\tan \delta)_{\max}$	T_g (°C)	Crosslink Density ($10^{-3} \cdot \text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$)
	Glassy region ^a	Rubbery region ^b			
M-EA	21918.80	149.23	0.44	45.56	17.12
M-EA-EG0.25	25681.30	158.79	0.50	48.87	18.22
M-EA-EG0.50	24861.50	121.35	0.50	41.97	13.94
M-EA-EG0.75	16268.20	56.39	0.91	48.59	6.77
M-EA-ET0.25	30800.20	193.85	0.49	52.28	22.23
M-EA-ET0.50	27473.40	148.75	0.52	45.13	17.09
M-EA-ET0.75	17609.50	89.33	0.88	47.84	10.72
M-EA-T0.25	26546.40	201.82	0.47	64.45	23.15
M-EA-T0.50	23842.80	178.76	0.63	61.49	20.83
M-EA-T0.75	20362.70	92.28	0.72	51.71	11.08

หมายเหตุ

a คือ วัดอุณหภูมิที่ 0°C

b คือ วัดอุณหภูมิที่ 75.5 °C (เทียบจาก T_g+30 ของ M-EA)

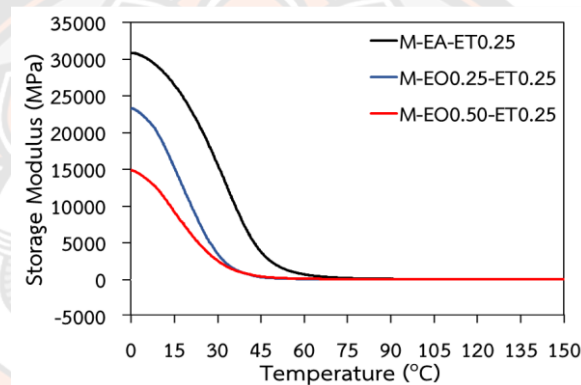
4.1.1.2 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารอีพ็อกซีร่วม (Co-epoxy oligomer)

ต่อสมบัติความหนืดของอีพ็อกซีอีพอกซีออลิโกเมอร์

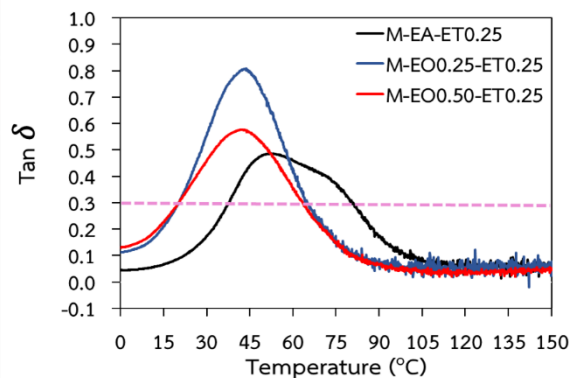
เนื่องจากอีพ็อกซีอีพอกซีออลิโกเมอร์ทางการค้าที่นิยมใช้ในการเตรียมอีพ็อกซีพอลิเมอร์คือไดโกลซิดิล อีเทอร์ของบิสฟีนอลเอ (DGEBA) ซึ่งเตรียมมาจากสารตั้งต้นที่สามารถก่อให้เกิดมะเร็งได้ [33] งานวิจัยนี้จึงสนใจนำน้ำมันปาล์มดัดแปร (Epoxidized palm oil, EPO) ที่มีการเปลี่ยนพันธะคู่ในโครงสร้างของกรดไขมันให้เป็นหมู่อีพอกไซด์มาศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ทดแทนอีพ็อกซีอีพอกซีออลิโกเมอร์ทางการค้า โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างอีพ็อกซีอีพอกซีออลิโกเมอร์:EPO เท่ากับ 2:0, 1.75:0.25 และ 1.50:0.50 ส่วนโดยน้ำหนัก หรือการใช้ EPO ในอัตราส่วน 0%, 12.5% และ 25% ตามลำดับ เมื่อใช้สารทำให้แข็งร่วมเอมีน:PET-COOH (ET) ในอัตราส่วน 0.75:0.25 โดยน้ำหนัก

ภาพ 61 และตาราง 10 แสดงสมบัติทางความร้อนวัสดุเชิงกลแบบไดนามิกของอีพ็อกซีอีพอกซีออลิโกเมอร์ที่ผสมร่วมกับ EPO พบว่าสมบัติความหนืดของอีพ็อกซีอีพอกซีออลิโกเมอร์ มีค่าลดลงตามอัตราส่วนของ EPO ที่เพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะเป็นค่า E'_G หรือค่า E'_R ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการรับแรงแบบอีลาสติกของวัสดุในรอบของการสั่นที่สถานะคล้ายแก้วและที่สถานะคล้ายยาง ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจาก EPO มีโซพอลิเมอร์ที่ยาว และยืดหยุ่นกว่าอีพ็อกซีอีพอกซีออลิโกเมอร์ทางการค้า รวมถึงการมีหมู่อีพอกไซด์ชนิด 2° ซึ่งมีความว่องไว้น้อยกว่าหมู่อีพอกไซด์ชนิด 1° ของอีพ็อกซีอีพอกซีออลิโกเมอร์

ทางการค้า [33] ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ช้าลง และมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่ลดลง ส่งผลต่อเนื้อต่อค่า T_g ที่ลดลง และแม้ว่าชิ้นงานจะมีอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีพอลิเมอร์และทรายที่ลดลง เนื่องจากค่า $\tan \delta$ ที่เพิ่มขึ้น แต่ชิ้นงานมีช่วงอุณหภูมิใช้งานที่แสดงถึงสมบัติการกระจายพลังงานที่ดี ($\tan \delta > 0.3$) ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำลง โดย M-EA-ET0.25 ที่ไม่ผสมร่วมกับ EPO มีช่วงอุณหภูมิใช้งานที่แสดงถึงสมบัติการกระจายพลังงานที่ดี ระหว่าง 38-80°C ในขณะที่การผสมร่วมกับ EPO ในทั้ง 2 อัตราส่วนมีช่วงอุณหภูมิใช้งานที่แสดงถึงสมบัติการกระจายพลังงานที่ดี ระหว่าง 20-64°C หรืออาจกล่าวได้ว่าการผสมของ PET-COOH ช่วยให้ชิ้นงานใช้งานที่อุณหภูมิที่สูงได้ดีกว่าการใช้เอมีนเป็นสารทำให้แข็งเพียงอย่างเดียว ในขณะที่ EPO ช่วยให้ชิ้นงานมีความยืดหยุ่นและกระจายพลังงานที่อุณหภูมิต่ำ (20°C) ได้ดีกว่า



(a)



(b)

ภาพ 58 DMA เทอร์โมแกรมของอีพ็อกซีเรซินที่เตรียมจากสารอีพ็อกซีร่วมกับ อีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้า:EPO ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เมื่อ (a) ค่ามอดูลัสสะสมที่สถานะคล้ายแก้ว (E'_g) และ (b) ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$)

ตาราง 10 ค่ามอดุลัสสะสม ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ EPO

Codes	Storage Modulus		$(\tan \delta)_{\max}$	T_g (°C)	Crosslink Density ($10^{-3} \cdot \text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$)
	(MPa)				
	Glassy region ^a	Rubbery region ^b			
M-EA-ET0.25	30800.20	193.85	0.49	52.28	22.23
M-EO0.25-ET0.25	23249.90	104.62	0.81	43.64	12.75
M-EO0.50-ET0.50	14882.80	68.83	0.57	42.63	7.89

หมายเหตุ a คือ วัตอุณหภูมิที่ 0°C

b คือ วัตอุณหภูมิที่ 75.5 °C (เทียบจาก T_g+30 ของ M-EA)

4.1.2 อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทัดแปร (Epoxy Modified Mortar)

4.1.2.1 ผลของซีเมนต์และทรายผลต่อสมบัติความหยุ่นหนืดของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทัดแปร

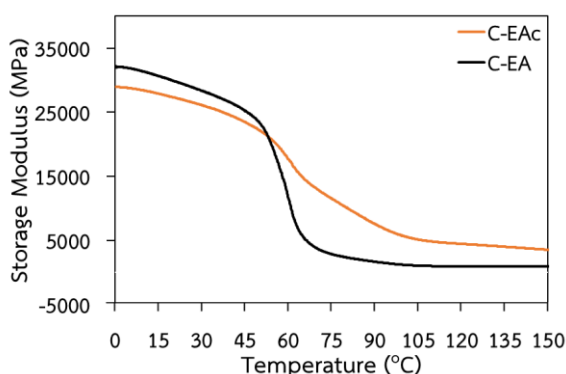
ดัดแปร

อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทัดแปร หรืออีพ็อกซีซีเมนต์ นิยมใช้ในการปูทับพื้นผิวซีเมนต์เพื่อป้องกัน/ลดการผ่านของความชื้นใต้ผิวดิน รวมถึงช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับพื้นของอาคาร อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทัดแปรจากงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ริชเทคเพ้นท์ จำกัด ซึ่งมีส่วนประกอบของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ สารทำให้แข็งเอมีน ปูนซีเมนต์ (สูตรพิเศษของโรงงาน) ทรายขนาด 0.149 mm (ขนาดน้อยกว่า หรือเท่ากับ 100 mesh ซึ่งต่อไปจะเรียก C-EAc แต่เพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานในอนาคตงานวิจัยนี้จึงสนใจใช้ปูนซีเมนต์ และทรายที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด โดยปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ยี่ห้อ ราชสีห์ และทรายขนาด 1.18–2.36 mm ในการผสมร่วมกับอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ และสารทำให้แข็งเอมีน ซึ่งต่อไปจะเรียก C-EA

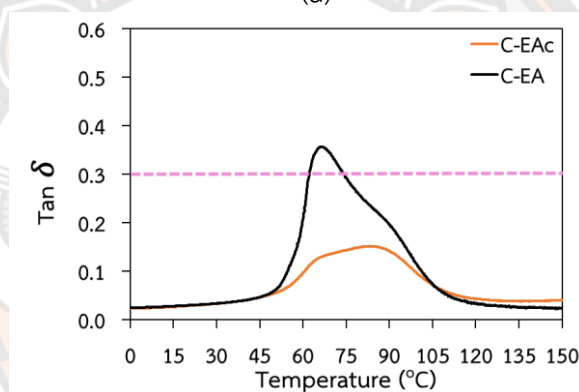
ภาพ 62 และตาราง 11 แสดงผลการทดสอบสมบัติความหยุ่นหนืดของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทัดแปร พบว่าอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทัดแปรสูตร C-EAc มีค่า E'_R ความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง และค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วแบบไดนามิก (T_g) สูงกว่าอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทัดแปรสูตร C-EA ในขณะที่มีค่า $\tan \delta_{\max}$ ที่ต่ำกว่า ซึ่งค่าทั้งหมดดังกล่าวบ่งบอกว่าสูตร C-EAc มีอันตรกิริยาระหว่างซีเมนต์ ทราย และอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ที่ดีกว่าสูตร C-EA [43] และการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของซีเมนต์และอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ช่วยให้ชิ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทัดแปรแสดงความสามารถในการรับแรง (Load-carrying capacity) แบบอีลาสติกของวัสดุในรอบของการสั่นที่สถานะคล้ายแก้ว (E'_R) ได้ดีกว่าสูตร C-EA [38]

อย่างไรก็ตามการใช้ทรายที่มีขนาดใหญ่กว่า รวมถึงปูนซีเมนต์ที่ต่างชนิดกันของสูตร C-EA พบว่ามีส่วนช่วยในการรับแรงแบบอีลาสติกของวัสดุในรอบของการสั่นที่สถานะคล้ายแก้ว (E'_G) ที่ดีกว่า ทั้งการเชื่อมขวางที่น้อยกว่าส่งผลให้โซ่พอลิเมอร์สามารถขยับ (Molecular mobility) ได้มากขึ้น (ค่า $\tan \delta_{\max}$ สูงและค่า T_g ต่ำ) [41] รวมถึงการแสดงสมบัติการกระจายพลังงาน (Damping) ที่

ดีกว่า (ค่า $\tan \delta_{\max} > 0.3$) [41-43] ซึ่งจะช่วยให้ชิ้นงานสามารถกระจายแรงและลดการสั่นของวัสดุเมื่อได้รับแรงได้ดีกว่าสูตร C-EAc



(a)



(b)

ภาพ 59 ค่ามอดุลัสสะสม และค่าการสูญเสียแทนเจนต์ของอีพ็อกซีเรซินที่ดัดแปรสูตรที่ใช้สารเคมีทั้งหมดจากบริษัท (C-EAc) และสูตรที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ (C-EA) เมื่อ (a) ค่ามอดุลัสสะสมที่สถานะคล้ายแก้ว (E'_G) และ (b) ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$)

4.1.2.2 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม (Co-hardener) ต่อสมบัติความหนืดของอีพ็อกซีเรซินที่ดัดแปร

ศึกษาผลของสารทำให้แข็งร่วมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีจำนวนหมู่ปลายเป็นหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (เพ็ตแอซิด, PET-COOH) ที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ P-EG-PA ซึ่งมีหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่ตำแหน่งปลาย (-COOH) 2-3 หมู่ (ซึ่งจะใช้ตัวย่อว่า EG) P-ET-PA ซึ่งมีหมู่ -COOH 3 หมู่ (ซึ่งจะใช้ตัวย่อว่า ET) และ P-T-PA ซึ่งมีหมู่ -COOH 4 หมู่ (ซึ่งจะใช้ตัวย่อว่า T) ต่อสมบัติทางความร้อนวัสดุเชิงกลแบบไดนามิกของอีพ็อกซีเรซินที่ดัดแปร โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ เอมีน:PET-COOH เท่ากับ 1.5:0, 1.25:0.25, 1:0.50 และ 0.75:0.75 ส่วนโดยน้ำหนัก หรือการใช้สารทำให้แข็งร่วม PET-COOH ในอัตราส่วน 0%, 16.7%, 33.3% และ 50% ตามลำดับ

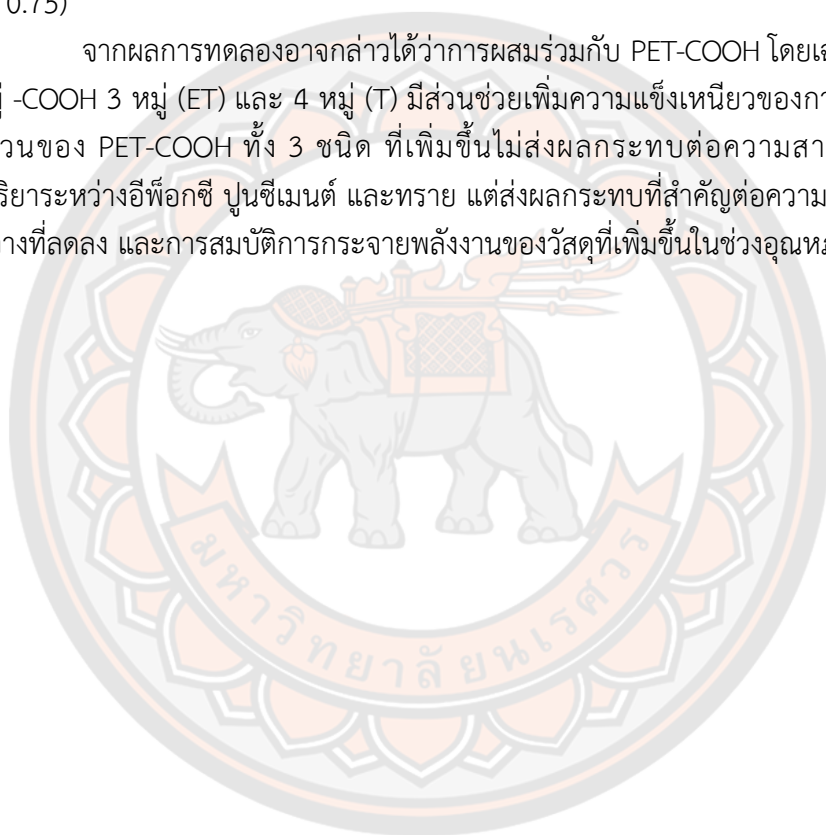
จากผลการทดลองพบว่าอีพ็อกซีโมรตาร์ดัดแปรสูตร C-EA-ET0.25 ซึ่งผสมร่วมกับ PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH 3 หมู่ และ C-EA-T0.25 ซึ่งผสมร่วมกับ PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH 4 หมู่ ในอัตราส่วนเอมีน:PET-COOH เท่ากับ 1.25:0.25 มีค่า E'_G เพิ่มขึ้น (ภาพ 63 และตาราง 11) ซึ่งค่า E'_G สัมพันธ์กับค่าความแข็งเหนียว (Stiffness) ของโซ่พอลิเมอร์ ค่าการยืดเกาะระหว่างอีพ็อกซี ปูนซีเมนต์ และทราย และความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้น [38] ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสูตร C-EA-ET0.25 และ C-EA-T0.25 มีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางน้อยกว่าสูตร C-EA เล็กน้อย และมีค่า $\tan \delta_{max}$ เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย (ภาพ 64 และตาราง 11) โดยค่า $\tan \delta_{max}$ ของสูตร C-EA-ET0.25 มีค่าลดลงเล็กน้อยโดยมีค่าลดลงจาก 0.36 เป็น 0.33 ในขณะที่ค่า $\tan \delta_{max}$ ของสูตร C-EA-T0.25 มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.36 เป็น 0.43 ซึ่งค่า $\tan \delta_{max}$ แสดงถึงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซี ปูนซีเมนต์ และทรายที่เพิ่มขึ้น (ในกรณีของ C-EA-ET0.25) และลดลง (ในกรณีของ C-EA-T0.25) เล็กน้อย ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าหมู่อะโรมาติกในโครงสร้างของ ET และ T ในอัตราส่วน 16.7% เป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้การเชื่อมขวางมีความแข็งเหนียวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า E'_G เพิ่มขึ้น ในขณะที่การผสมร่วมกับ PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH 2-3 หมู่ (C-EA-EG0.25) พบการลดลงของการเชื่อมขวางอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับสูตร EA ซึ่งการลดลงของการเชื่อมขวางส่งผลที่สำคัญต่อการลดลงของค่า E'_G ของอีพ็อกซีโมรตาร์ดัดแปรสูตร C-EA-EG0.25 [39, 41]

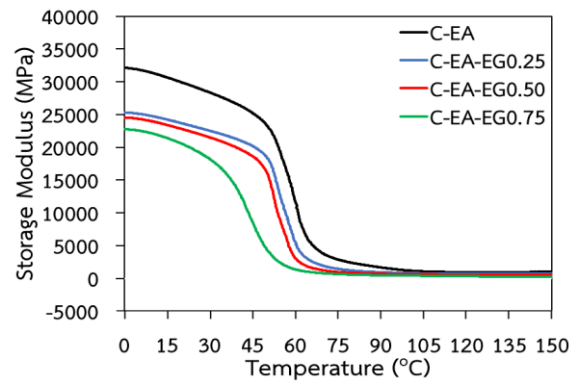
อย่างไรก็ตามแม้ว่า PET-COOH จะมีหมู่แข็งเกร็ง (Rigid) ในโครงสร้าง ซึ่งหมู่อะโรมาติกดังกล่าวส่งผลให้การเชื่อมขวางของอีพ็อกซีพอลิเมอร์มีความแข็งเหนียวเพิ่มขึ้น ทำให้อีพ็อกซีโมรตาร์ดัดแปรมีค่า E'_G เพิ่มขึ้น แต่อัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้นในทุกสูตร พบว่าค่า E'_G มีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่ลดลง ซึ่งความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่ลดลงส่งผลต่อการยับยั้งของโซ่พอลิเมอร์ที่ง่ายขึ้น [31, 37, 40] ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของอีพ็อกซีโมรตาร์ดัดแปรที่ผสม PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด มีค่าลดลงตามอัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซี ปูนซีเมนต์ และทรายพบว่ามีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ PET-COOH โดยพิจารณาจากค่า $\tan \delta_{max}$ ซึ่งเป็นค่าที่สามารถใช้บ่งบอกถึงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซี ปูนซีเมนต์ และทรายที่พบว่ามีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่ออัตราส่วนของ PET-COOH เพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามแม้ว่า $\tan \delta_{max}$ ซึ่งเป็นค่าที่สามารถใช้บ่งบอกถึงความสามารถในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซี ปูนซีเมนต์ และทรายที่พบว่ามีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่อัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อชนิดของการเชื่อมขวางที่แตกต่างกัน โดยเมื่อใช้เอมีนในอัตราส่วนที่ลดลง การเชื่อมขวางแบบ 3° เอมีน ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์กับเอมีนจะลดลง ในขณะที่การเชื่อมขวางแบบเอสเทอร์ ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์กับ PET-COOH จะเพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของพันธะเชื่อมขวางดังกล่าว รวมถึงความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่ลดลงเนื่องจากความว่องไวของหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่น้อยกว่าหมู่เอมีน ส่งผลขึ้นงานอีพ็อกซีโมรตาร์ดัดแปรมีความกว้างของพีค $\tan \delta$ ที่เพิ่มขึ้น รวมถึงยับยั้งไปในทิศทางที่มีอุณหภูมิที่ลดต่ำลง เมื่อผสมร่วมกับ PET-COOH ในอัตราส่วนที่

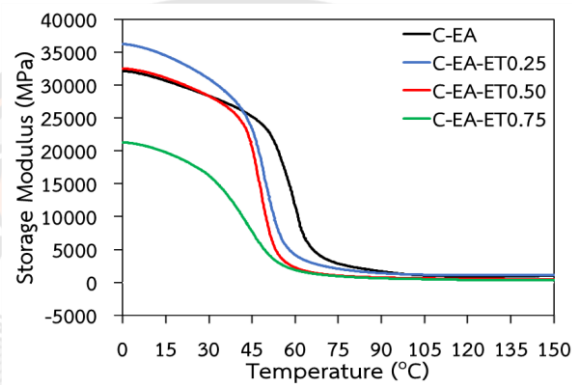
เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงสมบัติการกระจายพลังงาน (Damping) ที่ดี (ค่า $\tan \delta > 0.3$) พบว่า EA มีช่วงอุณหภูมิการใช้งานของสมบัติการกระจายพลังงานที่ดีอยู่ระหว่าง 62-74°C การผสมร่วมกับ T ซึ่งเป็น PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH 4 หมู่ ในอัตราส่วน 16.7% (C-EA-T0.25) ขึ้นงานมีช่วงอุณหภูมิการใช้งานของสมบัติการกระจายพลังงานที่ดีเพิ่มขึ้น เป็น 62-78°C ในขณะที่การผสมร่วมกับ ET และ EG ซึ่งมีหมู่ -COOH 3 หมู่ 2-3 หมู่ ตามลำดับ ขึ้นงานมีช่วงอุณหภูมิการใช้งานของสมบัติการกระจายพลังงานที่ดีลดลง โดยมีค่าระหว่าง 54-72°C และช่วงอุณหภูมิการใช้งานของสมบัติการกระจายพลังงานที่ดี พบว่าลดลงตามอัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้น โดยช่วงอุณหภูมิใช้งานต่ำสุดคือ 46-67°C (C-EA-EG0.75) และ 47-61°C (C-EA-ET0.75) รองลงไปคือ 49-70°C (C-EA-T0.75)

จากผลการทดลองอาจกล่าวได้ว่าการผสมร่วมกับ PET-COOH โดยเฉพาะ PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH 3 หมู่ (ET) และ 4 หมู่ (T) มีส่วนช่วยเพิ่มความแข็งแรงเหนียวของการเชื่อมขวาง โดยอัตราส่วนของ PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด ที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซี ปูนซีเมนต์ และทราย แต่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่ลดลง และการสมบัติการกระจายพลังงานของวัสดุที่เพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำลง

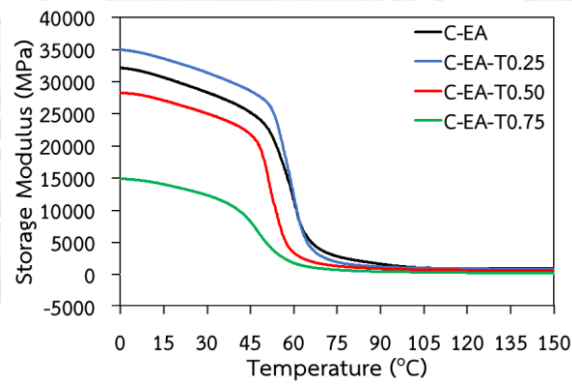




(a)

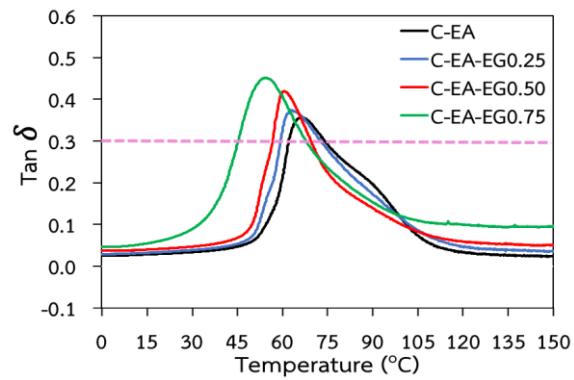


(b)

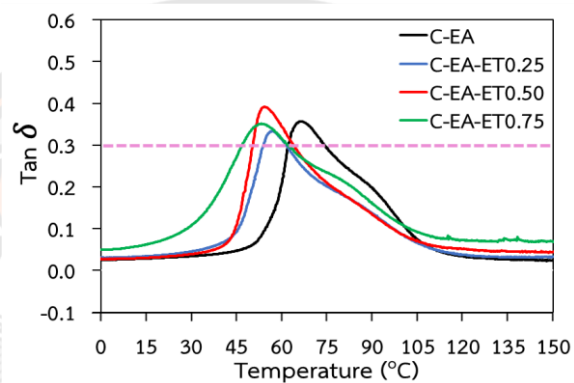


(c)

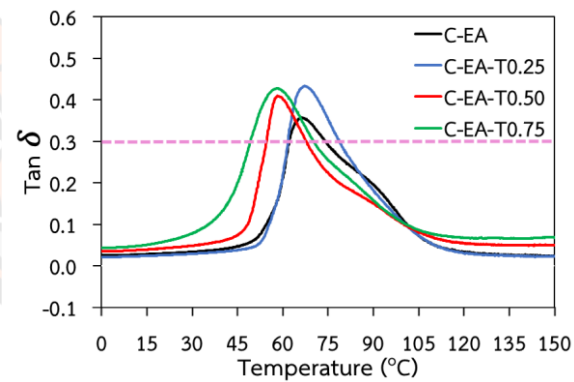
ภาพ 60 ค่ามอดุลัสสะสมของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่เตรียมจากสารทำให้แข็งร่วมเอมีน:PET-COOH ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เมื่อผสมร่วมกับ PET-COOH (a) C-EA-EG (b) C-EA-ET และ (c) C-EA-T



(a)



(b)



(c)

ภาพ 61 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่เตรียมจากสารทำให้แข็งร่วมเอมีน:PET-COOH ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เมื่อผสมร่วมกับ PET-COOH (a) C-EA-EG (b) C-EA-ET และ (c) C-EA-T

ตาราง 11 ค่ามอดุลัสสะสม ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ PET-COOH

Codes	Storage Modulus (MPa)		$(\text{Tan } \delta)_{\text{max}}$	T_g (°C)	Crosslink Density ($10^{-3} \cdot \text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$)
	Glassy region ^a	Rubbery region ^b			
C-EAc	28935.50	4601.81	0.15	83.83	474.29
C-EA	32124.30	1325.27	0.36	66.45	143.43
C-EA-EG0.25	25302.50	1028.63	0.37	63.48	114.88
C-EA-EG0.50	24517.10	751.44	0.42	60.69	83.92
C-EA-EG0.75	22719.10	503.32	0.45	54.25	56.21
C-EA-ET0.25	36222.60	1287.66	0.33	56.86	139.91
C-EA-ET0.50	32502.50	812.95	0.39	54.17	91.04
C-EA-ET0.75	21263.80	567.15	0.35	53.26	61.62
C-EA-T0.25	34937.90	1236.26	0.43	67.36	136.17
C-EA-T0.50	28211.50	929.90	0.41	58.38	102.42
C-EA-T0.75	14912.80	473.06	0.43	58.03	52.11

หมายเหตุ

a คือ วัสดุอุณหภูมิที่ 0°C

b คือ วัสดุอุณหภูมิที่ 96.45°C (เทียบจาก T_g+30 ของ M-EA)

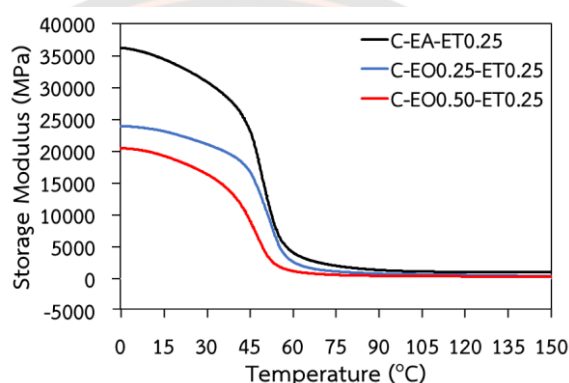
4.1.2.3 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารอีพ็อกซีร่วมต่อสมบัติความหนืดของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร

ศึกษาผลของการใช้น้ำมันปาล์มอีพ็อกไซด์ (EPO) เป็นสารอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ร่วม (Co-epoxy oligomer) ร่วมกับอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้า โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์:EPO เท่ากับ 3:0, 2.75:0.25 และ 2.50:0.50 โดยน้ำหนัก หรือการใช้ EPO ในอัตราส่วน 8.3% และ 16.7% ตามลำดับ เมื่อใช้สารทำให้แข็งร่วมเอมีน: PET-COOH ในอัตราส่วน 1.25:0.25 โดยน้ำหนัก

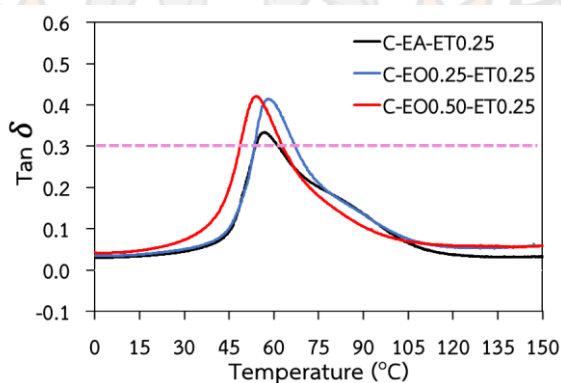
จากผลการทดลองพบว่าความสามารถในการรับแรงแบบอีลาสติกของวัสดุในรอบของการสั่นที่สถานะคล้ายแก้ว (E'_g) และที่สถานะคล้ายยาง (E'_r) มีค่าลดลงตามอัตราส่วนของ EPO ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า $\text{tan } \delta_{\text{max}}$ มีค่าเพิ่มขึ้น (จาก 0.33 เป็น 0.41) จึงอาจกล่าวได้ว่าการใช้ EPO เป็นสารอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ร่วมในการเตรียมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร ซึ่งมีน้ำเป็นตัวทำละลายในระบบ ส่งผลให้อีพ็อกซีพอลิเมอร์มีอันตรกิริยากับปูนซีเมนต์ และทรายได้น้อยลง และเกิดการเชื่อมขวางภายในอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรลดลง โดยการเชื่อมขวางของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรพบว่าลดลงตามอัตราส่วนของของ EPO ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงแบบอีลาสติกของวัสดุมีค่าลดลง

แต่ EPO ที่เพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสของ อีพ็อกซีพอลิเมอร์ ปูนซีเมนต์ และทราย โดยเมื่อผสมร่วมกับ EPO ในอัตราส่วน 8.3% และ 16.7% พบว่าค่า $\tan \delta_{\max}$ มีค่า 0.41 และ 0.42 ตามลำดับ (ภาพ 65 และตาราง 12)

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาช่วงอุณหภูมิใช้งานที่แสดงถึงสมบัติการกระจายพลังงานที่ดี ($\tan \delta > 0.3$) พบว่าการผสมร่วมกับ EPO ช่วยเพิ่มช่วงกว้างของอุณหภูมิใช้งานของอีพ็อกซีเรซินที่ดัดแปรให้เพิ่มขึ้น โดย C-EA-ET0.25 มีช่วงอุณหภูมิใช้งานที่แสดงถึงสมบัติการกระจายพลังงานที่ดี ระหว่าง 54-61°C การผสมร่วมกับ EPO ในอัตราส่วน 8.3% และ 16.7% ช่วยให้ชิ้นงานมีช่วงอุณหภูมิใช้งานที่กว้างขึ้น คือ 54-67°C และ 49-63°C ตามลำดับ



(a)



(b)

ภาพ 62 ค่ามอดุลัสสะสม และค่าการสูญเสียแทนเจนต์ของอีพ็อกซีเรซินที่ดัดแปรที่เตรียมจากสาร อีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีโพลิเอเธอร์ทางการค้า: EPO ในอัตราส่วนที่ต่างกัน เมื่อ (a) ค่ามอดุลัสสะสมที่สถานะคล้ายแก้ว (E'_{g}) และ (b) ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$)

ตาราง 12 ค่ามอดุลัสสะสม ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ EPO

Codes	Storage Modulus		$(\tan \delta)_{\max}$	T_g (°C)	Crosslink Density ($10^{-3} \cdot \text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$)
	(MPa)				
	Glassy region ^a	Rubbery region ^b			
C-EA-ET0.25	36222.60	1287.66	0.33	56.86	139.91
C-EO0.25-ET0.25	23886.70	775.84	0.41	58.27	82.60
C-EO0.50-ET0.50	20441.00	473.06	0.42	54.28	50.72

หมายเหตุ a คือ วัสดุอุณหภูมิที่ 0°C

b คือ วัสดุอุณหภูมิที่ 96.45°C (เทียบจาก T_g+30 ของ M-EA)

4.2 สมบัติความความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร

การดัดโค้งเป็นการให้แรงกระทำกับวัสดุในตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งแล้ววัสดุนั้นมีการเปลี่ยนรูปในตำแหน่งที่รับแรงกระทำ ซึ่งการรับแรงที่ไม่เท่ากันทั้งชิ้นงานทำให้วัสดุมีการเปลี่ยนรูปที่ไม่เท่ากัน และจะเกิดการพังทลายหรือหักในบริเวณที่รับแรงกระทำนั้น ซึ่งในงานก่อสร้างมีความสำคัญอย่างมากในการออกแบบเพื่อเสริมแรงวัสดุ โดยเฉพาะงานพื้นที่มีการรับแรงกระทำเป็นจุด ๆ ซึ่งจุดที่รับแรงกระทำนั้นต้องมีความแข็งแรงเพียงพอกับการใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาสมบัติความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural test) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร โดยวิเคราะห์ค่าความต้านแรงดัดโค้ง (Flexural strength; σ_{fs}) และค่าการยืดตัวเมื่อดัดโค้ง (Flexural strain; ϵ_{fs}) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความต้านทานแรงดัดโค้ง แบบ 3 จุด (Three-point bending)

4.2.1 อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร (Epoxy Mortar)

4.2.1.1 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม (Co-hardener) ต่อสมบัติความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร

ศึกษาผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีจำนวนหมู่ปลายเป็นหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (เพ็ตแอสิด, PET-COOH) ที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA ต่อสมบัติความต้านทานแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ เอมีน:PET-COOH เท่ากับ 1:0, 0.75:0.25, 0.50:0.50 และ 0.25:0.75 ส่วนโดยน้ำหนัก หรือการใช้สารทำให้แข็งร่วม PET-COOH ในอัตราส่วน 0%, 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ

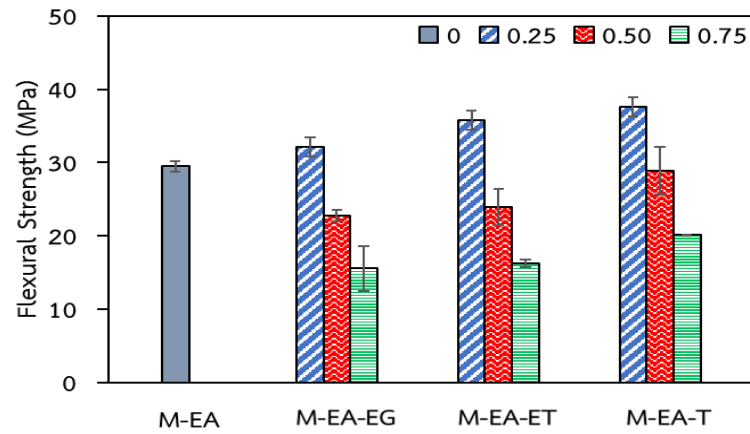
จากผลการศึกษาพบว่าอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรที่เตรียมจากอีพ็อกซีโพลิโกลิเมอร์ เอมีนทางการค้า และทราย (M-EA) มีค่าความต้านแรงดัดโค้ง (σ_{fs}) = 29.48 MPa การผสมร่วมกับ PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด ในอัตราส่วน เอมีน:PET-COOH เท่ากับ 0.75:0.25 ส่วนโดยน้ำหนัก ชิ้นงาน

มีค่า σ_{fs} เพิ่มขึ้น (ภาพ 66 และตาราง 13) ค่า σ_{fs} ที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงความสามารถในการต้านหรือรับแรงดัดโค้งของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับค่าสมบัติความยืดหยุ่นหนืดของอีพ็อกซีเรซินที่วิเคราะห์โดยเทคนิค DMA ที่พบว่า การเติม PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด ในอัตราส่วน 25% จะช่วยให้ชิ้นงานมีค่ามอดุลัสสะสม ค่า Damping และค่า T_g เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้เอมีนเพียงอย่างเดียว ค่าที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวแสดงถึงพฤติกรรมด้านความยืดหยุ่น และความเข้ากันได้ระหว่างอีพ็อกซีและทรายที่เพิ่มขึ้น ซึ่งความเข้ากันได้ระหว่างอีพ็อกซีพอลิเมอร์กับทรายที่เพิ่มขึ้นจะมีส่วนช่วยเพิ่มการกระจายแรงของวัสดุได้ดีขึ้น [44] ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่า σ_{fs} เพิ่มขึ้น โดยพบว่า P-T-PA ซึ่งมี -COOH 4 หมู่ (M-EA-T0.25) มีค่า σ_{fs} สูงที่สุด รองลงไป คือการผสมร่วมกับ P-ET-PA ซึ่งมี -COOH 3 หมู่ (M-EA-ET0.25) และ P-EG-PA ซึ่งมี -COOH 2-3 หมู่ (M-EA-EG0.25) ตามลำดับ จึงอาจกล่าวได้ว่าหมู่เอโรมาติกของ PET-COOH ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับอีพ็อกซีเรซินที่ดัดโค้งมากกว่าการใช้สารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว

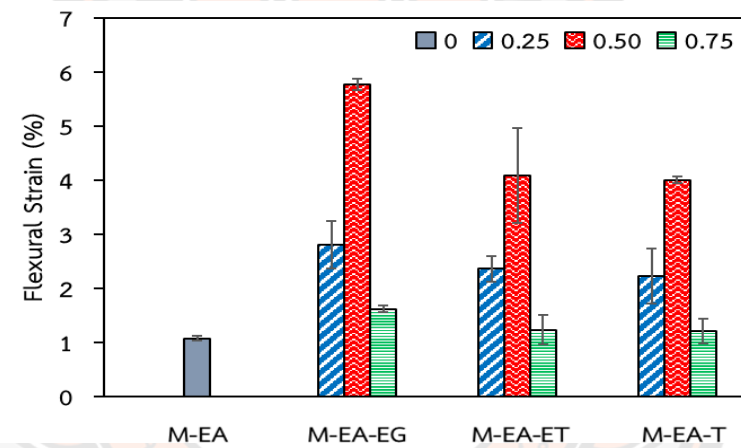
นอกจากนี้ PET-COOH ยังมีส่วนช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างอีพ็อกซีกับทราย ทั้งความยาวของสายโซ่ของ PET-COOH ที่มีความยาวมากกว่าเอมีนทางการค้า จึงทำให้จุดเชื่อมต่อ (Linkage) อยู่ห่างกัน ส่งผลให้การกระจายพลังงานเมื่อได้รับแรงกระทำเพิ่มขึ้น [44]

อย่างไรก็ตามการผสม PET-COOH ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น พบว่ามีผลต่อความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง และอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีกับทรายที่ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ PET-COOH ในอัตราส่วน 75% และเมื่อใช้ P-EG-PA ซึ่งมี -COOH 2-3 หมู่ (M-EA-EG0.25) ส่งผลให้ค่า σ_{fs} ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่ลดลงจะส่งผลต่อการรับและกระจายแรงแบบอีลาสติกของวัสดุที่ลดลง ส่งผลให้ค่า σ_{fs} ลดลงเมื่อใช้ PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH ที่ตำแหน่งปลายที่ลดลง และมีอัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้น [2, 39-40, 45] (ตาราง 9)

นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ โดยศึกษาค่าการยืดตัวเมื่อดัดโค้ง (Flexural strain; ϵ_{fs}) จากการทดลอง พบว่าอีพ็อกซีเรซินที่เตรียมจาก M-EA มีค่า ϵ_{fs} ประมาณ 1% หมายถึงชิ้นงานมีความแข็ง แต่เปราะ (Hard and Brittle) เมื่อทำการผสม PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด ในอัตราส่วน 25%-50% พบว่าชิ้นงานมีค่า ϵ_{fs} เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5-4% (ภาพ 66 และตาราง 13) ซึ่งการยืดตัวที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวอาจมาจากความสามารถในการขยายโซ่ของการเชื่อมขวาง และการกระจายพลังงานที่เพิ่มขึ้นของ PET-COOH อย่างไรก็ตามอัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่ออันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีและทรายที่ลดลง ส่งผลให้ชิ้นงานยืดตัวได้น้อยลง ก่อนชิ้นงานจะเกิดการเสียหายเมื่อใช้ PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด ในอัตราส่วน 75% นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นงานอีพ็อกซีเรซินมีการยืดตัวได้ดีเมื่อใช้ PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH ที่ตำแหน่งปลายที่น้อยกว่า คือ -COOH 2-3 หมู่ (M-EA-EG) รองลงไปคือ -COOH 3 หมู่ (M-EA-ET) ในขณะที่การผสมร่วมกับ -COOH 4 หมู่ (M-EA-T) ซึ่งมีการเชื่อมขวาง และมีจำนวนหมู่เอโรมาติกในโครงสร้างมากที่สุด จะให้การยืดตัวของชิ้นงานต่ำที่สุด [1-2, 45]



(a)



(b)

ภาพ 63 (a) ค่าความต้านแรงดัดโค้ง และ (b) ค่าการยืดตัวเมื่อดัดโค้ง ของอีพ็อกซีเรซินที่ปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ PET-COOH

ตาราง 13 ค่าความต้านแรงดัดโค้ง ค่าการยืดตัวเมื่อดัดโค้ง และค่าความทนแรงอัดของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทที่ ปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ PET-COOH

Codes	Flexural		Compressive
	Flexural strength (MPa)	Flexural strain (%)	Compressive strength (MPa)
M-EA	29.48±0.71	1.08±0.04	52.23±3.14
M-EA-EG0.25	32.09±0.25	2.81±0.43	73.39±3.85
M-EA-EG0.50	22.79±1.92	5.78±0.11	58.76±2.28
M-EA-EG0.75	15.57±3.07	1.62±0.06	36.42±1.10
M-EA-ET0.25	35.78±1.31	2.37±0.23	76.52±4.20
M-EA-ET0.50	23.86±2.24	4.10±0.88	60.97±4.75
M-EA-ET0.75	16.27±0.49	1.24±0.27	41.27±1.86
M-EA-T0.25	37.63±1.17	2.24±0.51	80.78±3.31
M-EA-T0.50	28.88±0.98	4.01±0.06	64.75±1.71
M-EA-T0.75	20.15±0.07	1.22±0.23	48.65±3.33

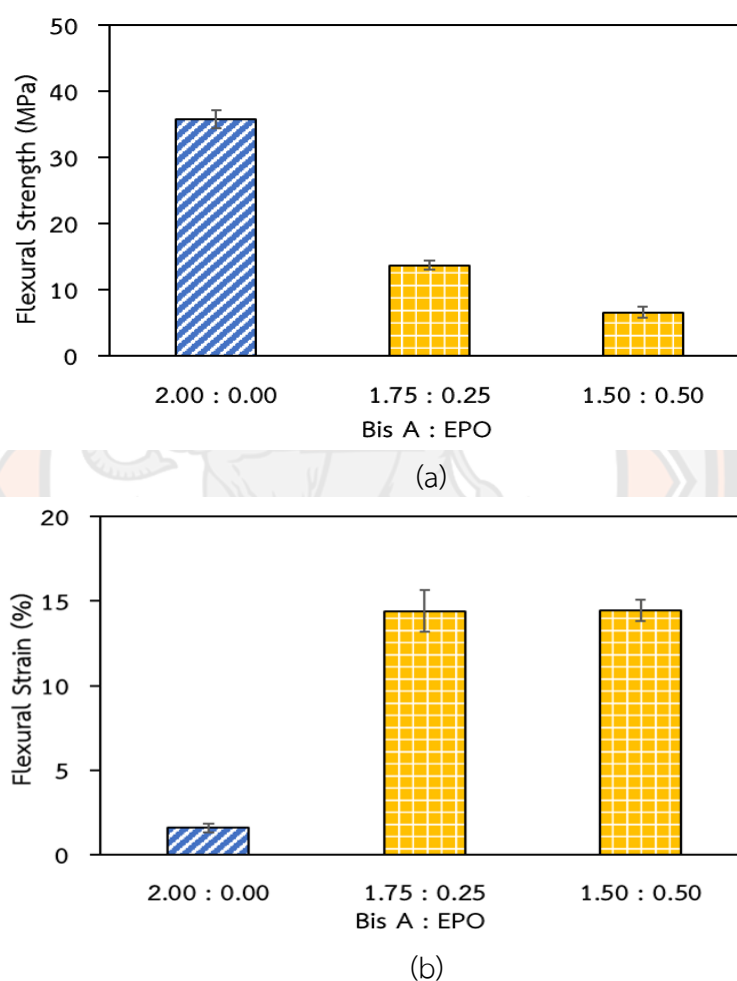
4.2.1.2 ผลของอัตราส่วนของสารอีพ็อกซีร่วม (Co-epoxy oligomer) ต่อสมบัติความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ท

ศึกษาผลของการใช้น้ำมันปาล์มอีพ็อกไซด์ (EPO) เป็นสารอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ร่วม (Co-epoxy oligomer) ร่วมกับอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้าในการเตรียมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ท โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์:EPO เท่ากับ 2:0, 1.75:0.25 และ 1.50:0.50 ส่วน โดยน้ำหนัก หรือการใช้ EPO ในอัตราส่วน 0%, 12.5% และ 25% ตามลำดับ เมื่อใช้สารทำให้แข็งร่วมเอมีน:PET-COOH ในอัตราส่วน 0.75:0.25 โดยน้ำหนัก

จากผลการทดลองพบว่าค่า σ_{fs} มีค่าลดลงตามสัดส่วนของ EPO ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่า σ_{fs} ลดลงจาก 35.78 MPa เป็น 13.70 MPa และ 6.59 MPa เมื่อผสมร่วมกับ EPO ในอัตราส่วน 12.5% และ 25% ตามลำดับ ซึ่งการลดลงดังกล่าวอาจเนื่องมาจากหลายสาเหตุ ทั้งการเป็นหมู่อีพ็อกไซด์ที่ไม่ว่องไว (2° epoxide ring ในสายโซ่ไตรกลีเซอไรด์) หรือความยืดหยุ่นของสายโซ่ของ EPO ($-CH_2-$) เมื่อเทียบกับอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้าที่มีหมู่อีพ็อกไซด์ที่ว่องไว (1° และ 2° epoxide ring ที่ตำแหน่งปลายสายโซ่) และการมีหมู่อะโรมาติกในโครงสร้าง ทำให้อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทมีการเชื่อมขวาง และค่า T_g ลดลงตามอัตราส่วนของ EPO ที่เพิ่มขึ้น (ตาราง 10) ส่งผลให้ค่า σ_{fs} ของชิ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทลดลงตามอัตราส่วนของ EPO ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามสายโซ่ที่ยาวและยืดหยุ่นของ EPO พบว่าช่วยให้ค่า Damping ของของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงการกระจายพลังงานของวัสดุที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่า ϵ_{fs} เพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานมีค่า ϵ_{fs} เพิ่มขึ้น จาก 1.6% (M-EA-ET0.25) เป็น

14.4% และ 14.5% เมื่อผสมร่วมกับ EPO ในอัตราส่วน 12.5% และ 25% ตามลำดับ (ภาพ 67 และ ตาราง 14)

จากผลการทดลองอาจกล่าวได้ว่า EPO สามารถแสดงพฤติกรรมเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizing effect) ทำให้วัสดุสามารถกระจายพลังงานได้ดีขึ้นส่งผลให้ค่า ϵ_{fs} เพิ่มขึ้น แต่การเชื่อมขวาง และอันตรกิริยาร่วมกับทรายที่ลดลงส่งผลต่อค่า σ_{fs} ที่ลดลง ดังนั้นการเลือกเติม EPO อาจต้องคำนึงถึงสถานะในการใช้งานว่าต้องการความแข็งแรง หรือการกระจายพลังงาน (การยืดตัว) ของวัสดุ



ภาพ 64 (a) ค่าความต้านแรงดัดโค้ง และ (b) ค่าการยืดตัวเมื่อดัดโค้ง ของอีพ็อกซีโมรตาร์ที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอีพ็อกซีโพลิโกลิเมอร์:EPO

ตาราง 14 ค่าความต้านแรงดัดโค้ง ค่าการยืดตัวเมื่อดัดโค้ง และค่าความทนแรงอัดของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์:EPO

Codes	Flexural		Compressive
	Flexural strength (MPa)	Flexural strain (%)	Compressive strength (MPa)
M-EA-ET0.25	35.78±1.31	1.59±0.25	76.52±4.20
M-EO0.25-ET0.25	13.70±0.66	14.41±1.24	45.42±3.94
M-EO0.50-ET0.25	6.59±0.86	14.48±0.63	14.62±1.93

4.2.2 อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทัดแปร (Epoxy Modified Mortar)

4.2.2.1 ผลของซีเมนต์กับทราย และผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม (Co-hardener) ต่อสมบัติความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทัดแปร

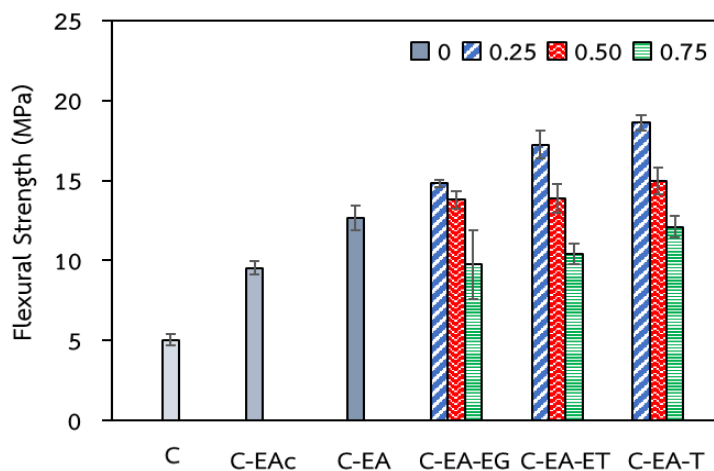
ศึกษาผลของชนิดของซีเมนต์และทรายต่อสมบัติความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทัดแปร โดยในงานวิจัยนี้ได้เตรียมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทัดแปร หรืออีพ็อกซีซีเมนต์ โดยใช้ปูนซีเมนต์และทรายที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด คือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ยี่ห้อ ราชสีห์ และทรายขนาด 1.18–2.36 mm (C-EA) เทียบกับปูนซีเมนต์เกรดทนความชื้นที่ผสมแบบสำเร็จร่วมกับทรายของบริษัทริชเทค (C-EAc) และชิ้นงานซีเมนต์ที่ไม่ผสมอีพ็อกซี (C)

จากผลการทดสอบค่า σ_{fs} พบว่าชิ้นงานซีเมนต์ที่ใช้ซีเมนต์ ทรายและอีพ็อกซีของบริษัทริชเทค (C-EAc) ชิ้นงานมีค่า σ_{fs} เพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า เมื่อเทียบกับชิ้นงานซีเมนต์ที่ไม่ผสมร่วมกับอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ (C) (ภาพ 68 และตาราง 15) และเมื่อเปรียบเทียบกับค่า σ_{fs} กับชิ้นงานที่เตรียมจากซีเมนต์และทรายที่เลือกใช้ในการวิจัยนี้ (C-EA) พบว่าซีเมนต์และทรายที่เลือกใช้ในการวิจัยนี้ให้ผลทดสอบค่า σ_{fs} ที่สูงกว่าซีเมนต์และทรายของบริษัทริชเทค โดยมีค่า σ_{fs} เพิ่มขึ้นจาก 9.5 MPa เป็น 12.7 MPa (ภาพ 68 และตาราง 15) ซึ่งถึงแม้ว่า C-EAc จะมีค่าความหนาแน่นในการเชื่อมขวางสูงกว่า C-EA (ตาราง 11) แต่จากผลการทดสอบ DMA ก่อนหน้าพบว่าการใช้ทรายที่มีขนาดที่ใหญ่กว่า รวมถึงการใช้ปูนซีเมนต์ที่ต่างชนิดกันของ C-EA มีผลต่อการรับแรงของวัสดุ และการยึดเกาะของสารตัวเติมกับเมทริกซ์หลักที่ดีขึ้น ส่งผลให้วัสดุคอมโพสิต (Composite) มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น [36] ทั้งการเชื่อมขวางที่น้อยกว่าส่งผลให้โซ่พอลิเมอร์ของ C-EA สามารถยับยั้งได้มากกว่า (ค่า $\tan \delta_{max}$ สูงและค่า T_g ต่ำ) [41] รวมถึงการแสดงผลการกระจายพลังงาน (Damping) ที่ดีกว่า (ค่า $\tan \delta_{max} \tan \delta > 0.3$) [33, 41-42] ซึ่งจากผลดังกล่าวช่วยให้ชิ้นงาน C-EA สามารถกระจายแรง และลดการสั่นของวัสดุเมื่อได้รับแรงได้ดีกว่าสูตร C-EAc ส่งผลให้ C-EA มีค่า σ_{fs} ที่สูงกว่า C-EAc แม้ว่า C-EAc จะมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่สูงกว่า

ศึกษาผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วมของ PET-COOH ที่มีโครงสร้างแตกต่างกันทั้ง 3 ชนิด คือ P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ

เอมีน:PET-COOH เท่ากับ 1.5:0, 1.25:0.25, 1:0.50 และ 0.75:0.75 ส่วนโดยน้ำหนัก หรือการใช้สารทำให้แข็งร่วม PET-COOH ในอัตราส่วน 0%, 16.7%, 33.3% และ 50% ตามลำดับ ต่อสมบัติความต้านทานแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีโมรตาร์ดัดแปร พบว่า PET-COOH ในอัตราส่วน 16.7% และ 33.3% ช่วยให้ชิ้นงานอีพ็อกซีโมรตาร์ดัดแปรมีค่า σ_{fs} เพิ่มขึ้น โดยการผสมร่วมกับ P-T-PA ซึ่งมี -COOH 4 หมู่ และมีอัตราส่วน 16.7% (C-EA-T0.25) มีค่า σ_{fs} สูงที่สุด รองลงไป คือการผสมร่วมกับ P-ET-PA ซึ่งมี -COOH 3 หมู่ ในอัตราส่วน 16.7% (C-EA-ET0.25) และ P-EG-PA ซึ่งมี -COOH 2-3 หมู่ (C-EA-EG0.25) ในอัตราส่วน 16.7% ตามลำดับ (ภาพ 68 และตาราง 15) ซึ่งค่าความดัดโค้งดังกล่าวน่าจะเป็นผลของความยืดหยุ่น และความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแหของ PET-COOH และอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีและสารตัวเติมทั้งในส่วนของซีเมนต์และทราย โดยการผสมร่วมกับ PET-COOH โครงสร้างร่างแหที่มากกว่า (PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH 4 หมู่) จะให้ความหนาแน่นและการกระจายแรงที่มากกว่าการผสมร่วมกับ PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH ที่ตำแหน่งปลายที่น้อยกว่า

ในขณะที่การผสม PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด ในอัตราส่วน 33.3% ให้ค่า σ_{fs} ที่ไม่ต่างกันมาก และมากกว่าสูตรที่ไม่ผสม PET-COOH (C-EA) เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างร่างแหที่ลดลงเมื่อเทียบกับสูตรที่ผสม PET-COOH รวมเพียง 16.7% รวมถึงอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีและสารตัวเติมที่ลดลงตามอัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า σ_{fs} มีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม โครงสร้างร่างแหที่เกิดจาก PET-COOH พบว่าน่าจะมีการกระจายแรงที่ดีกว่าโครงสร้างร่างแหที่เกิดจากสารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว จึงพบว่าสูตรที่ใช้ PET-COOH ในอัตราส่วน 33.3% ยังคงมีค่า σ_{fs} ที่สูงกว่า อย่างไรก็ตามการผสมร่วมกับ PET-COOH ที่มากเกินไป (50%) ส่งผลต่อการเกิดการเชื่อมขวาง และอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีและสารตัวเติมที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด (ตาราง 11) ส่งผลให้ชิ้นงานอีพ็อกซีโมรตาร์ดัดแปรมีค่า σ_{fs} ลดลงมากกว่า 40% เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผสมร่วมกับ PET-COOH ในอัตราส่วน 16.7% [33, 39, 42]



ภาพ 65 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีอิมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ PET-COOH

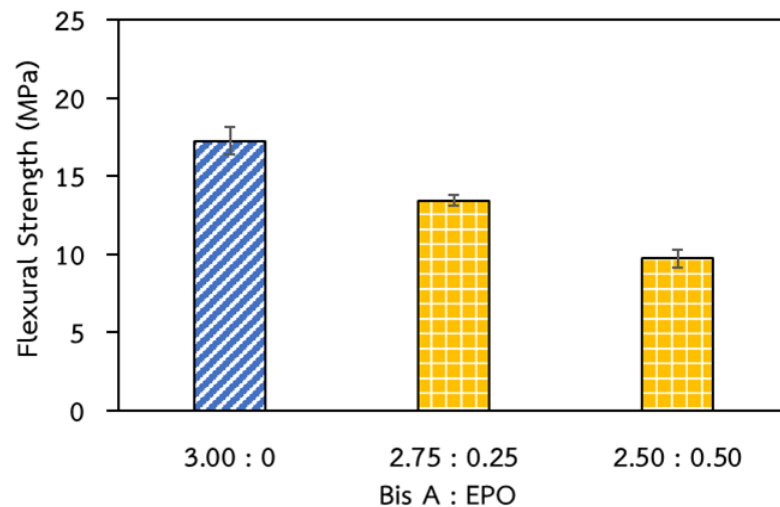
ตาราง 15 ค่าความต้านแรงดัดโค้ง และค่าความทนแรงอัดของอีพ็อกซีอิมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของ PET-COOH

Codes	Flexural strength (MPa)	Compressive strength (MPa)
C	5.04±0.34	16.83±0.30
C-EAc	9.54±0.40	31.33±1.39
C-EA	12.68±0.77	32.70±2.08
C-EA-EG0.25	14.81±0.24	39.70±0.65
C-EA-EG0.50	13.79±0.53	32.39±1.47
C-EA-EG0.75	9.75±2.13	23.10±0.65
C-EA-ET0.25	17.24±0.88	40.89±1.19
C-EA-ET0.50	13.87±0.92	36.39±1.90
C-EA-ET0.75	10.42±0.66	25.06±1.74
C-EA-T0.25	18.61±0.49	41.49±0.23
C-EA-T0.50	14.98±0.86	37.78±0.67
C-EA-T0.75	12.11±0.69	24.27±1.64

4.2.2.2 ผลของอัตราส่วนของสารอีพอกซีรวม (Co-epoxy oligomer) ต่อสมบัติความต้านแรงดัดโค้งของอีพอกซีเรซินที่ดัดแปร

ศึกษาผลของการใช้น้ำมันปาล์มอีพอกซีไดซ์ (EPO) เป็นสารอีพอกซีโอลิโกเมอร์รวม (Co-epoxy oligomer) ร่วมกับอีพอกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้าในการเตรียมอีพอกซีเรซินที่ดัดแปร โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างอีพอกซีโอลิโกเมอร์:EPO เท่ากับ 3:0, 2.75:0.25 และ 2.50:0.50 โดยน้ำหนัก หรือการใช้ EPO ในอัตราส่วน 0%, 8.3% และ 16.7% ตามลำดับ เมื่อใช้สารทำให้แข็งร่วมเอมีน:PET-COOH ในอัตราส่วน 1.25:0.25 โดยน้ำหนัก

จากผลการทดลองพบว่าเป็นไปในทำนองเดียวกับอีพอกซีเรซินคือค่า σ_{fs} มีค่าลดลงตามสัดส่วนของ EPO ที่เพิ่มขึ้น EPO ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าลดลงจาก 17.24 MPa เป็น 13.44 MPa และ 9.71 MPa เมื่อผสมร่วมกับ EPO ในอัตราส่วน 8.3% และ 16.7% ตามลำดับ ซึ่งการลดลงดังกล่าวอาจเกิดจากความยาว และโครงสร้างยืดหยุ่น ($-\text{CH}_2-$) ของโซ่ไตรกลีเซอรอลของ EPO ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง และความแข็งแรงของที่ลดลง (อีพอกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้ามีหมู่อะโรมาติกในโครงสร้าง) (ตาราง 10) ส่งผลให้ชิ้นงานอีพอกซีเรซินที่ดัดแปรมีค่า σ_{fs} มีค่าลดลงตามสัดส่วนของ EPO ที่เพิ่มขึ้น [3, 33] (ภาพ 69)



ภาพ 66 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของอีพอกซีเรซินที่ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอีพอกซีโอลิโกเมอร์:EPO

ตาราง 16 ค่าความต้านแรงดัดโค้ง และค่าความทนแรงอัดของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอีพ็อกซีโพลิเอไมน์:EPO

Codes	Flexural strength (MPa)	Compressive strength (MPa)
C-EA-ET0.25	17.24±0.88	40.89±1.19
C-EO0.25-ET0.25	13.44±0.33	29.75±0.17
C-EO0.50-ET0.25	9.71±0.56	21.61±1.26

4.3 สมบัติความทนแรงอัดของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร

นอกจากความแข็งแรงในส่วนของการรับแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรแล้ว ซึ่งเป็นการรับแรงกระทำเฉพาะจุดแล้ว สมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือความทนแรงอัดของวัสดุ เพื่อดูความสามารถของวัสดุในการต้านทานต่อแรงอัด (Compressive stress) ที่เกิดขึ้นทั่วทั้งชิ้นงาน โดยไม่เกิดการพังทลาย (Failure) เช่น รอยแตกร้าวที่ปรากฏ โดยปัจจัยสำคัญของกำลังอัดของมอร์ตาร์ ได้แก่กำลังของมอร์ตาร์ กำลังของมวลรวมหยาบ และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ตาร์กับมวลรวมหยาบ [46] การทดสอบความทนแรงอัดจึงสำคัญอย่างยิ่งสำหรับงานก่อสร้างงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาสมบัติความทนแรงอัด (Compression test) ของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร โดยรายงานผลเป็นค่าความทนแรงอัด (Compressive strength; σ_{cs})

4.3.1 อีพ็อกซีมอร์ตาร์ (Epoxy mortar)

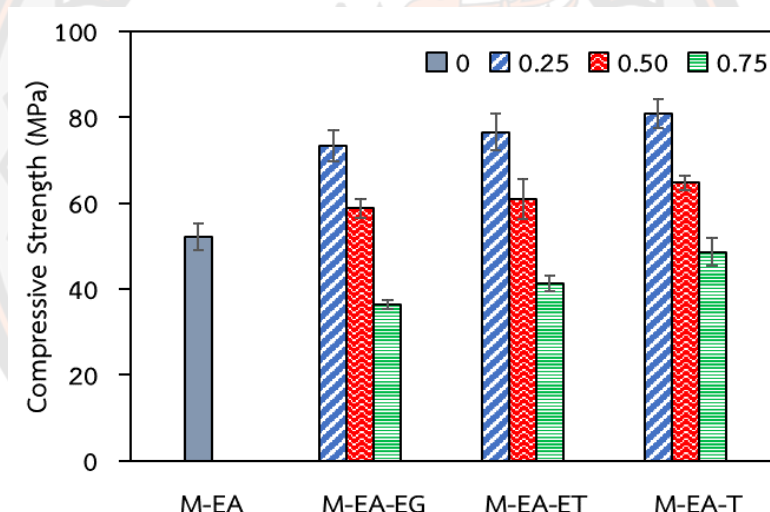
4.3.1.1 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม (Co-hardener) ต่อสมบัติความทนแรงอัด (Compressive strength) ของอีพ็อกซีมอร์ตาร์

ศึกษาผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีจำนวนหมู่ปลายเป็นหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (PET-COOH) ที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA ต่อสมบัติความทนแรงอัดของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของเอมีน:PET-COOH เท่ากับ 1:0, 0.75:0.25, 0.50:0.50 และ 0.25:0.75 ส่วนโดยน้ำหนัก หรือการใช้สารทำให้แข็งร่วม PET-COOH ในอัตราส่วน 0%, 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ

จากผลการศึกษาความทนแรงอัด พบว่ามีผลการทดสอบคล้ายกับการทดสอบความต้านแรงดัดโค้ง โดยพบว่าอีพ็อกซีมอร์ตาร์ที่เตรียมจากอีพ็อกซีโพลิเอไมน์ทางการค้า และทราย (M-EA) มีค่า $\sigma_{cs} = 52.23$ MPa การผสมร่วมกับ PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด ในอัตราส่วนเอมีน: PET-COOH เท่ากับ 0.75:0.25 ส่วนโดยน้ำหนัก ชิ้นงานมีค่า σ_{cs} เพิ่มขึ้น (ภาพ 70 และตาราง 15) ค่า σ_{cs} แสดงถึงความสามารถในการทนแรงอัดของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่พบว่าการผสมร่วมกับ PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด ในอัตราส่วน PET-COOH เท่ากับ 25% ช่วยให้อีพ็อกซีมอร์ตาร์มีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น โดย P-T-PA ซึ่งมี -COOH 4 หมู่ (M-EA-T0.25) มีค่า σ_{cs} สูงที่สุด รองลงไปคือการผสมร่วมกับ P-ET-PA

ซึ่งมี -COOH 3 หมู่ (M-EA-ET0.25) และ P-EG-PA ซึ่งมี -COOH 2-3 หมู่ (M-EA-EG0.25) ตามลำดับ นอกจากนี้จากการมีหมู่อะโรมาติกในโครงสร้างของ PET-COOH นอกจากจะช่วยให้ชิ้นงานมีความอดุลีสมดุล และค่า T_g เพิ่มสูงกว่าการใช้เอมีนเพียงอย่างเดียวแล้วนั้น ความแข็งแรงของโครงสร้างของหมู่อะโรมาติกยังมีส่วนช่วยให้ชิ้นงานทนแรงอัดได้เพิ่มขึ้น [1-2, 45] (ตาราง 9)

เมื่อเพิ่มอัตราส่วน PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด เป็น 50% พบว่า มีค่า σ_{cs} ลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่า σ_{cs} ดังกล่าวยังคงมีค่าสูงกว่า M-EA ประมาณ 12-24% โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการผสมร่วมกับ P-T-PA ซึ่งมี -COOH 4 หมู่ (M-EA-T0.5) และการผสมร่วมกับ P-ET-PA ซึ่งมี -COOH 3 หมู่ (M-EA-ET0.5) ซึ่งมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่มากกว่า M-EA และแม้ว่าการผสมร่วมกับ P-EG-PA (M-EA-EG0.5) จะมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่น้อยกว่า แต่หมู่อะโรมาติกในโครงสร้างยังคงเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ชิ้นงานมีค่า σ_{cs} สูงกว่า M-EA อย่างไรก็ตามการผสม PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด ในอัตราส่วน 75% นอกจากชิ้นงานจะมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางลดลงอย่างมีนัยสำคัญแล้ว อันตรกิริยาระหว่างอีพอกซีพอลิเมอร์และทรายทีลดลงยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกร้าวภายใต้แรงอัดได้ง่ายขึ้น (ภาพ 70) ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่า σ_{cs} ลดลง

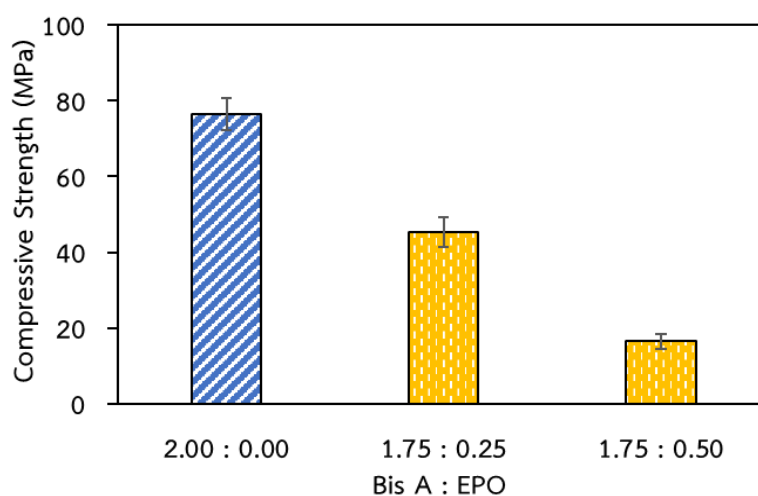


ภาพ 67 ค่าความทนแรงอัดของอีพอกซีเรซินที่ปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ PET-COOH

4.3.1.2 ผลของอัตราส่วนของสารอีพอกซีร่วม (Co-epoxy oligomer) ต่อสมบัติความทนแรงอัด (Compressive strength) ของอีพอกซีเรซิน

ศึกษาผลของการใช้น้ำมันปาล์มอีพอกซีไดซ์ (EPO) เป็นสารอีพอกซีโอลิโกเมอร์ร่วม (Co-epoxy oligomer) ร่วมกับอีพอกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้า โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างอีพอกซีโอลิโกเมอร์:EPO เท่ากับ 2:0, 1.75:0.25 และ 1.50:0.50 ส่วนโดยน้ำหนัก หรือการใช้ EPO ในอัตราส่วน 0%, 12.5% และ 25% ตามลำดับ เมื่อใช้สารทำให้แข็งร่วมเอมีน:PET-COOH ในอัตราส่วน 0.75:0.25 โดยน้ำหนัก

จากผลการทดลองพบว่าค่า σ_{cs} มีค่าลดลงตามสัดส่วนของ EPO ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าลดลงจาก 76.52 MPa เป็น 45.42 MPa และ 14.62 MPa เมื่อผสมร่วมกับ EPO ในอัตราส่วน 12.5% และ 25% ตามลำดับ ทั้งนี้ค่า σ_{cs} ที่ลดลงดังกล่าวอาจเกิดจากความยาว และโครงสร้าง ยืดหยุ่น (-CH₂-) ของไฮดรอกซีเทอร์มินัลของ EPO ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง และความแข็งแรงที่ลดลง (อีพ็อกซีโพลิเมอร์ทางการค้ามีหมู่เอะโรมาติกในโครงสร้าง) (ตาราง 10) ส่งผลให้ความทนแรงอัดของชิ้นงานอีพ็อกซีโมรตาร์ลดลงตามอัตราส่วนของ EPO ที่เพิ่มขึ้น [3, 33] (ภาพ 71 และตาราง 14)



ภาพ 68 ค่าความทนแรงอัดของอีพ็อกซีโมรตาร์ที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอีพ็อกซีโพลิเมอร์:EPO

4.3.2 อีพ็อกซีโมรตาร์ดัดแปร (Epoxy Modified Mortar)

4.3.2.1 ผลของซีเมนต์กับทราย และผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม (Co-hardener) ต่อสมบัติความทนแรงอัด (Compressive strength) ของอีพ็อกซีโมรตาร์ดัดแปร

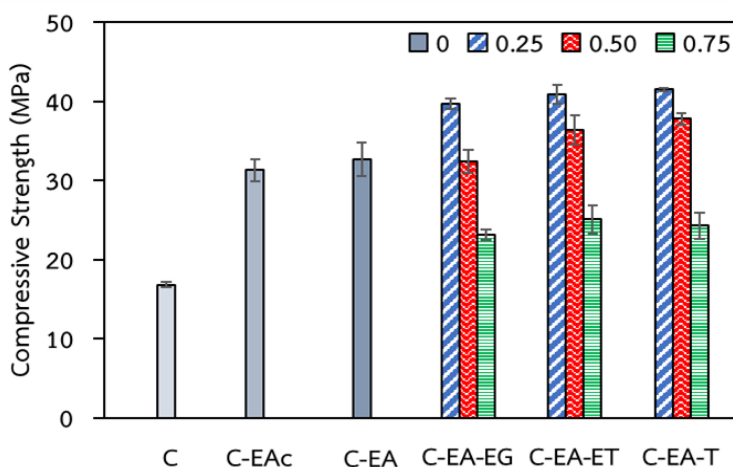
ศึกษาผลของชนิดของซีเมนต์และทรายต่อสมบัติความทนแรงอัดของอีพ็อกซีโมรตาร์ดัดแปร โดยในงานวิจัยนี้ได้เตรียมอีพ็อกซีโมรตาร์ดัดแปร หรืออีพ็อกซีซีเมนต์ โดยใช้ปูนซีเมนต์ และทรายที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ยี่ห้อ ราชสีห์ และทรายขนาด 1.18–2.36 mm (C-EA) เทียบกับปูนซีเมนต์เกรดทนความชื้นที่ผสมแบบสำเร็จร่วมกับทรายของบริษัททรียเทค (C-EAC) และชิ้นงานซีเมนต์ที่ไม่ผสมอีพ็อกซี (C)

จากผลการทดสอบค่าความทนแรงอัดพบว่าชิ้นงานซีเมนต์ที่ใช้ซีเมนต์ ทรายและอีพ็อกซีของบริษัททรียเทค (C-EAC) ชิ้นงานมีค่า σ_{cs} เพิ่มขึ้นประมาณ 2.5 เท่า เมื่อเทียบกับชิ้นงานซีเมนต์ที่ไม่ผสมร่วมกับอีพ็อกซีโพลิเมอร์ (C) (ภาพ 72 และตาราง 15) และเมื่อเปรียบเทียบกับค่า σ_{cs} กับชิ้นงานที่เตรียมจากซีเมนต์และทรายที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ (C-EA) พบว่าซีเมนต์และทรายที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ให้ผลทดสอบค่า σ_{cs} ที่สูงกว่าเล็กน้อย โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 31.33 MPa เป็น 32.70 MPa (ภาพ 72 และตาราง 15) ซึ่งแม้ว่า C-EAC จะมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางสูง

กว่า C-EA (ตาราง 11) แต่จากผลการทดสอบ DMA ก่อนหน้าพบว่าการใช้ทรายที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า รวมถึงปูนซีเมนต์ที่ต่างชนิดกันของ C-EA มีส่วนช่วยในการรับแรงของวัสดุ รวมถึงการยึดเกาะของสารตัวเติมกับเมทริกซ์หลักที่ดีกว่า ส่งผลให้วัสดุคอมโพสิต (Composite) มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทั้งการเชื่อมขวางที่น้อยกว่าส่งผลให้โซ่พอลิเมอร์ของ C-EA สามารถขยับได้มากขึ้น (ค่า $\tan \delta_{\max}$ สูง และค่า T_g ต่ำ) [41] รวมถึงการแสดงสมบัติการกระจายพลังงาน (Damping) ที่ดีกว่า (ค่า $\tan \delta_{\max}$ $\tan \delta > 0.3$) [41-43] ซึ่งสมบัติทั้งหมดดังกล่าวช่วยให้ชิ้นงาน C-EA สามารถกระจายแรงและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันของวัสดุ (ซีเมนต์ ทราย อีพ็อกซี) เมื่อได้รับแรงได้ดีกว่าสูตร C-EAc ส่งผลให้ชิ้นงาน C-EA มีค่า σ_{cs} สูงกว่าชิ้นงาน C-EAc

ศึกษาผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วมของ PET-COOH ที่มีโครงสร้างแตกต่างกันทั้ง 3 ชนิด คือ P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของเอมีน:PET-COOH เท่ากับ 1.5:0, 1.25:0.25, 1:0.50 และ 0.75:0.75 ส่วนโดยน้ำหนัก หรือการใช้สารทำให้แข็งร่วม PET-COOH ในอัตราส่วน 0%, 16.7%, 33.3% และ 50% ตามลำดับ ต่อสมบัติความทนแรงอัดของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร พบว่า PET-COOH ในอัตราส่วน 16.7% และ 33.3% ช่วยให้ชิ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร มีค่า σ_{cs} เพิ่มขึ้น โดยการผสมร่วมกับ P-T-PA ซึ่งมี -COOH 4 หมู่ และมีอัตราส่วน 16.7% (C-EA-T0.25) มีค่า σ_{cs} สูงที่สุด รองลงไป คือการผสมร่วมกับ P-ET-PA ซึ่งมี -COOH 3 หมู่ ในอัตราส่วน 16.7% (C-EA-ET0.25) และ P-EG-PA ซึ่งมี -COOH 2-3 หมู่ (C-EA-EG0.25) ในอัตราส่วน 16.7% ตามลำดับ (ภาพ 72 และตาราง 15) ซึ่งค่า σ_{cs} ขึ้นกับความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแหของ PET-COOH อันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีและสารตัวเติมทั้งในส่วนของซีเมนต์และทราย โดยการผสมร่วมกับ PET-COOH โครงสร้างร่างแหที่มากกว่า (P-T-PA ซึ่งมี -COOH 4 หมู่) จะให้ความหนาแน่นและการกระจายแรงที่มากกว่าการผสมร่วมกับ PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH ที่ตำแหน่งปลายที่น้อยกว่า

ในขณะที่การผสม PET-COOH ทั้ง 3 ชนิดในอัตราส่วน 33.3% ของ PET-COOH ที่มี -COOH 3-4 หมู่ ให้ค่า σ_{cs} ที่ไม่ต่างกันมาก และมากกว่าสูตรที่ไม่ผสม PET-COOH (C-EA) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างร่างแหที่ลดลงเมื่อเทียบกับสูตรที่ผสมร่วมเพียง 16.7% รวมถึงอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีและสารตัวเติมที่ลดลงตามอัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า σ_{cs} มีค่าลดลง อย่างไรก็ตามโครงสร้างร่างแหที่เกิดจาก PET-COOH น่าจะมีการกระจายแรงที่ดีกว่าโครงสร้างร่างแหที่เกิดจากสารทำให้แข็งเอมีน จึงพบว่ายังคงมีค่า σ_{cs} ที่สูงกว่าสูตรที่เติมสารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามการผสมร่วมกับ PET-COOH ที่มากเกินไป (50%) ส่งผลต่อความหนาแน่นของการเกิดการเชื่อมขวาง และอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีและสารตัวเติมที่ลดลงลงอย่างมีนัยสำคัญ (ตาราง 11) ส่งผลให้ชิ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร มีค่า σ_{cs} ลดลงประมาณ 2 เท่า เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผสมร่วมกับ PET-COOH ในอัตราส่วน 16.7% [33, 39, 42]

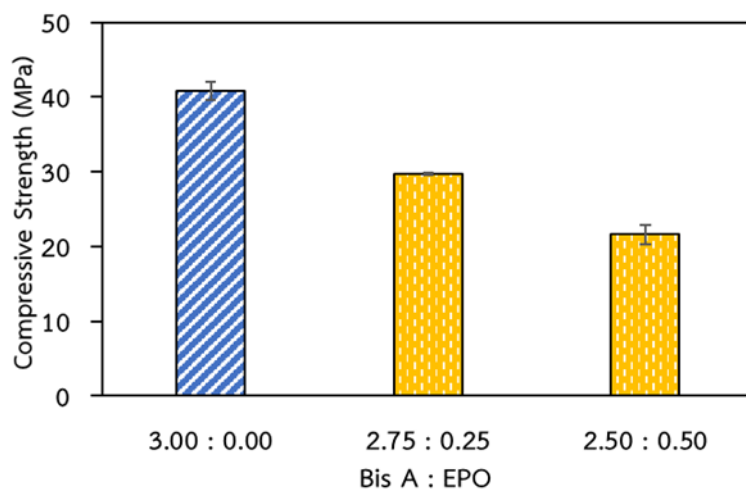


ภาพ 69 ค่าความทนแรงอัดของอีพ็อกซีเรซินที่ปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ PET-COOH

4.3.2.2 ผลของอัตราส่วนของสารอีพ็อกซีร่วม (Co-epoxy oligomer) ต่อสมบัติความทนแรงอัด (Compressive strength) ของอีพ็อกซีเรซินที่ปรับเปลี่ยน

ศึกษาผลของการใช้น้ำมันปาล์มอีพ็อกไซด์ (EPO) เป็นสารอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ร่วม (Co-epoxy oligomer) ร่วมกับอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้าในการเตรียมอีพ็อกซีเรซินที่ปรับเปลี่ยน โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง อีพ็อกซีโอลิโกเมอร์:EPO เท่ากับ 3:0, 2.75:0.25 และ 2.50:0.50 โดยน้ำหนัก หรือการใช้ EPO ในอัตราส่วน 0%, 8.3% และ 16.7% ตามลำดับ เมื่อใช้สารทำให้แข็งร่วมเอมีน:PET-COOH ในอัตราส่วน 1.25:0.25 โดยน้ำหนัก

จากผลการทดลองพบว่าเป็นไปในทำนองเดียวกับอีพ็อกซีเรซินคือค่า σ_{cs} มีค่าลดลงตามสัดส่วนของ EPO ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าลดลงจาก 40.89 MPa เป็น 29.75 MPa และ 21.61 MPa เมื่อผสมร่วมกับ EPO ในอัตราส่วน 8.3% และ 16.7% ตามลำดับ ซึ่งการลดลงดังกล่าวอาจเกิดจากความยาว และโครงสร้างยึดหยุ่น ($-\text{CH}_2-$) ของโซ่ไตรกลีเซอรอลของ EPO ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง และความแข็งแรงของที่ลดลง (อีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้ามีหมู่อะโรมาติกในโครงสร้าง) (ตาราง 12) ส่งผลให้ชิ้นงานอีพ็อกซีเรซินที่ปรับเปลี่ยนมีค่า σ_{cs} มีค่าลดลงตามสัดส่วนของ EPO ที่เพิ่มขึ้น [3, 33] (ภาพ 73)



ภาพ 70 ค่าความทนแรงอัดของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์:EPO

4.4 สมบัติแรงยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร

คอนกรีตเป็นหนึ่งในวัสดุโครงสร้างที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก อย่างไรก็ตามคอนกรีตสามารถเกิดการเสื่อมสภาพ กร่อนตัว หรือเกิดความเสียหายจากการใช้งาน ปัจจุบันนิยมการแทนที่หรือซ่อมแซมคอนกรีตส่วนที่กร่อนหายไปด้วยคอนกรีตใหม่ หรือวัสดุซ่อมแซมแทนการรื้อและสร้างโครงสร้างคอนกรีตขึ้นมาใหม่ ซึ่งหากมีวัสดุซ่อมแซมที่เหมาะสมก็จะช่วยลดต้นทุน และยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเดิมได้นานขึ้น รวมถึงลดผลกระทบที่อาจเกิดกับส่วนอื่น ๆ ของโครงสร้างหากมีการรื้อและสร้างโครงสร้างคอนกรีตขึ้นมาใหม่

พอลิเมอร์มอร์ตาร์และพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดัดแปร หรือที่เรียกว่าพอลิเมอร์ซีเมนต์ ได้รับความนิยมในด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้างและวิศวกรรม โดยเฉพาะในการแทนที่หรือซ่อมแซม เนื่องจากส่วนของ พอลิเมอร์จะช่วยปรับโครงสร้างที่มีรูพรุนของคอนกรีต และส่วนของพอลิเมอร์มอร์ตาร์ และพอลิเมอร์ มอร์ตาร์ดัดแปรยังมีการยึดเกาะกับคอนกรีตที่ดี ส่งผลให้โครงสร้างหลังการซ่อมแซมมีความแข็งแรงสูงกว่าการซ่อมแซมด้วยคอนกรีตแบบปกติ หรือวัสดุซ่อมแซมชนิดอื่น โดยพอลิเมอร์ที่มีความโดดเด่นในการใช้เป็น พอลิเมอร์มอร์ตาร์ และพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดัดแปรคืออีพ็อกซีพอลิเมอร์ ซึ่งอีพ็อกซีพอลิเมอร์จะช่วยให้ พอลิเมอร์มอร์ตาร์ และพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดัดแปรที่ได้มีความแข็งแรงสูง มีการรับแรงที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์กลุ่มอื่น เช่นกลุ่มอีลาสโตเมอร์ หรือกลุ่มอะคริลิก [47-48] อย่างไรก็ตามอีพ็อกซีส่วนใหญ่ซึ่งเตรียมจากอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์และสารทำให้แข็งเอมีนให้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงที่ดี แต่มีความยืดหยุ่น การรับและกระจายแรงที่จำกัด งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของสารทำให้แข็งร่วมที่เตรียมจากการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของขูดพีต ซึ่งพีตเป็นพอลิเมอร์ที่มีทั้งความแข็งแรง และความยืดหยุ่นที่ดีจากโครงสร้างอสัณฐานและอะโรมาติกของพีต ดังนั้นการผสมร่วมระหว่างสารทำให้แข็งเอมีนและ PET-COOH น่าจะช่วยให้อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรเมื่อใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมแล้วจะช่วยให้ชิ้นงานมีการรับแรงได้และกระจายแรงได้ดีกว่าการใช้สารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว

โดยผลการทดลองในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาสมบัติแรงยึดเหนี่ยว (Bond strength) ของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร โดยการศึกษาค่าความต้านทานแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial flexural strength; σ_{ifs}) ระหว่างรอยต่อของวัสดุของการยึดเหนี่ยวที่เกิดจากการยึดติด (Adhesion) และแรงเสียดทาน (Friction) ระหว่างคอนกรีต:คอนกรีต คอนกรีต:มอร์ตาร์ คอนกรีต:มอร์ตาร์ดัดแปร และมอร์ตาร์:มอร์ตาร์ดัดแปร

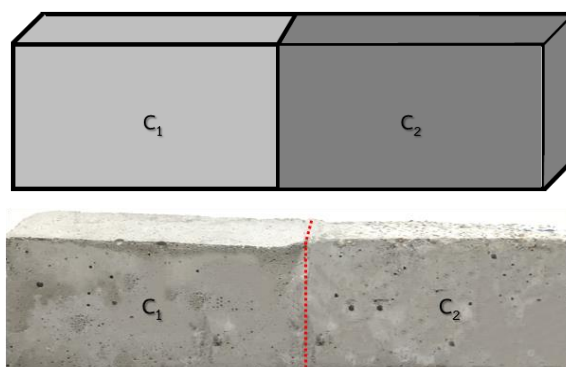
4.4.1 อีพ็อกซีมอร์ตาร์ (Epoxy Mortar)

งานวิจัยส่วนนี้เป็นการศึกษาสมบัติแรงยึดเหนี่ยวของซีเมนต์ที่เตรียมให้เป็นซีเมนต์เก่า (C_1) โดยใช้ปูนซีเมนต์ และทรายที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด คือปูนพอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ยี่ห้อราชสีห์ และทรายขนาด 1.18–2.36 mm ที่ผ่านการหล่อขึ้นงานมาอย่างน้อย 1 เดือน กับอีพ็อกซีมอร์ตาร์สูตรต่าง ๆ ทั้งสูตรที่ใช้สารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว และสูตรใช้สารทำให้แข็งร่วมระหว่างเอมีนและ PET-COOH โดยศึกษาค่าความต้านแรงดัดโค้งบริเวณรอยต่อระหว่างซีเมนต์เก่ากับอีพ็อกซีมอร์ตาร์เทียบกับขึ้นงานซีเมนต์เก่า (C_1) และขึ้นงานซีเมนต์เก่าที่หล่อร่วมกับซีเมนต์ใหม่ ($C_1:C_2$)

4.4.1.1 สมบัติความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัสและแรงยึดเหนี่ยว (Bond strength) ของซีเมนต์

ศึกษาสมบัติความต้านแรงดัดโค้งของซีเมนต์เก่า (C_1) และสมบัติแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เก่าและซีเมนต์ใหม่ ($C_1:C_2$) พบว่าขึ้นงานซีเมนต์เก่าที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้หลังจากบ่มขึ้นงานโดยการคลุมทับด้วยผ้าเปียกและแผ่นพลาสติกที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน และเก็บขึ้นงานในห้องควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 27 วัน มีค่าความต้านแรงดัดโค้ง (σ_{fs}) 5.04 MPa จากนั้นเมื่อนำซีเมนต์เก่าที่เตรียมได้ไปตัดแบ่งครึ่งขึ้นงานและหล่อร่วมกับซีเมนต์ใหม่ ก่อนบ่มขึ้นงานตามที่กล่าวไปข้างต้น เป็นเวลา 28 วัน (ภาพถ่ายขึ้นงานดังแสดงใน ภาพ 74) พบว่าเมื่อนำขึ้นงานมาทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างรอยต่อของซีเมนต์ทั้ง 2 ส่วน โดยวัดค่าความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัส (σ_{ifs}) พบว่าขึ้นงานมีการแตกร้าวในส่วนของซีเมนต์ใหม่ (ตาราง 17) และมีค่าแรงที่ใช้กดน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ (1.48 MPa) เมื่อเทียบกับขึ้นงานเริ่มต้น (ซีเมนต์เก่า)

จึงอาจกล่าวในเบื้องต้นได้ว่าซีเมนต์อาจไม่ใช่วัสดุที่ดีที่สุดสำหรับใช้ในการซ่อมแซมโครงสร้างซีเมนต์ที่เกิดความเสียหาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการรับแรงระหว่างซีเมนต์เก่าและซีเมนต์ใหม่ที่แตกต่างกัน ทำให้เมื่อขึ้นงานได้รับแรงกระทำ ความเครียด (Stress concentration) ที่เกิดขึ้นจะไปสะสมอยู่ในส่วนของซีเมนต์ใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการรับแรงที่ต่ำกว่า จึงทำให้เกิดการแตกร้าวในส่วนของซีเมนต์ใหม่ในส่วนที่ใกล้กับรอยต่อของซีเมนต์ทั้งสองมากกว่าจะเกิดการแตกร้าวบริเวณรอยต่อ และในส่วนของซีเมนต์เก่า



ภาพ 71 ภาพถ่ายชิ้นงานที่เตรียมจากการหล่อร่วมระหว่างซีเมนต์เก่า (C_1) และซีเมนต์ใหม่ (C_2) เพื่อใช้ในการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุซ่อมชนิดซีเมนต์

ตาราง 17 OM images (5x) บริเวณหล่อร่วมของซีเมนต์เก่าและซีเมนต์ใหม่ ($C_1:C_2$) ก่อนและหลังการทดสอบความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัส

ตัวอย่าง	ก่อน	หลัง
$C_1:C_2$		

4.4.1.2 สมบัติแรงยึดเหนี่ยว (Bond strength) ระหว่างซีเมนต์และอีพ็อกซีเมอร์

ดาร์

ศึกษาผลของการใช้อีพ็อกซีเมอร์ดาร์เพื่อใช้เป็นสารสำหรับซ่อมแซมโครงสร้างซีเมนต์ที่เกิดการเสียหาย โดยการหล่อร่วมของซีเมนต์เก่า (C_1) กับอีพ็อกซีเมอร์ดาร์ที่เตรียมจากสารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว (M-EA) และการใช้สารทำให้แข็งร่วมระหว่างเอมีนและกับ PET-COOH ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ P-EG-PA มี 2-3 แขน (M-EA-EG), P-ET-PA มี 3 แขน (M-EA-ET) และ P-T-PA มี 4 แขน (M-EA-T) ในอัตราส่วนเอมีน:PET-COOH เท่ากับ 1:0, 0.75:0.25 และ 0.50:0.50 ส่วนโดยน้ำหนัก หรือการใช้สารทำให้แข็งร่วม PET-COOH ในอัตราส่วน 0%, 25% และ 50% ตามลำดับ ทดสอบสมบัติความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial flexural strength, σ_{ifs}) บริเวณรอยต่อของวัสดุทั้ง 2 เทียบกับชิ้นงานซีเมนต์เก่า (C_1) และชิ้นงานที่หล่อร่วมกับซีเมนต์ใหม่ ($C_1:C_2$) ภาพถ่ายชิ้นงานระหว่างซีเมนต์และอีพ็อกซีเมอร์ดาร์ดังแสดงใน ภาพ 75

จากผลการทดลองพบว่าการหล่อร่วมกับอีพ็อกซีเมอร์ดาร์ทุกสูตรทั้งสูตรที่เตรียมจากสารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว (M-EA) และสูตรที่ใช้สารทำให้แข็งร่วม PET-COOH ทั้งชนิดและอัตราส่วนของ PET-COOH ต่าง ๆ กัน เกิดการแตกร้าวบริเวณซีเมนต์เก่า (ตาราง 18) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอีพ็อกซีเมอร์ดาร์มีค่าความต้านแรงดัดโค้งสูงกว่าซีเมนต์ และในกระบวนการหล่อ ส่วน

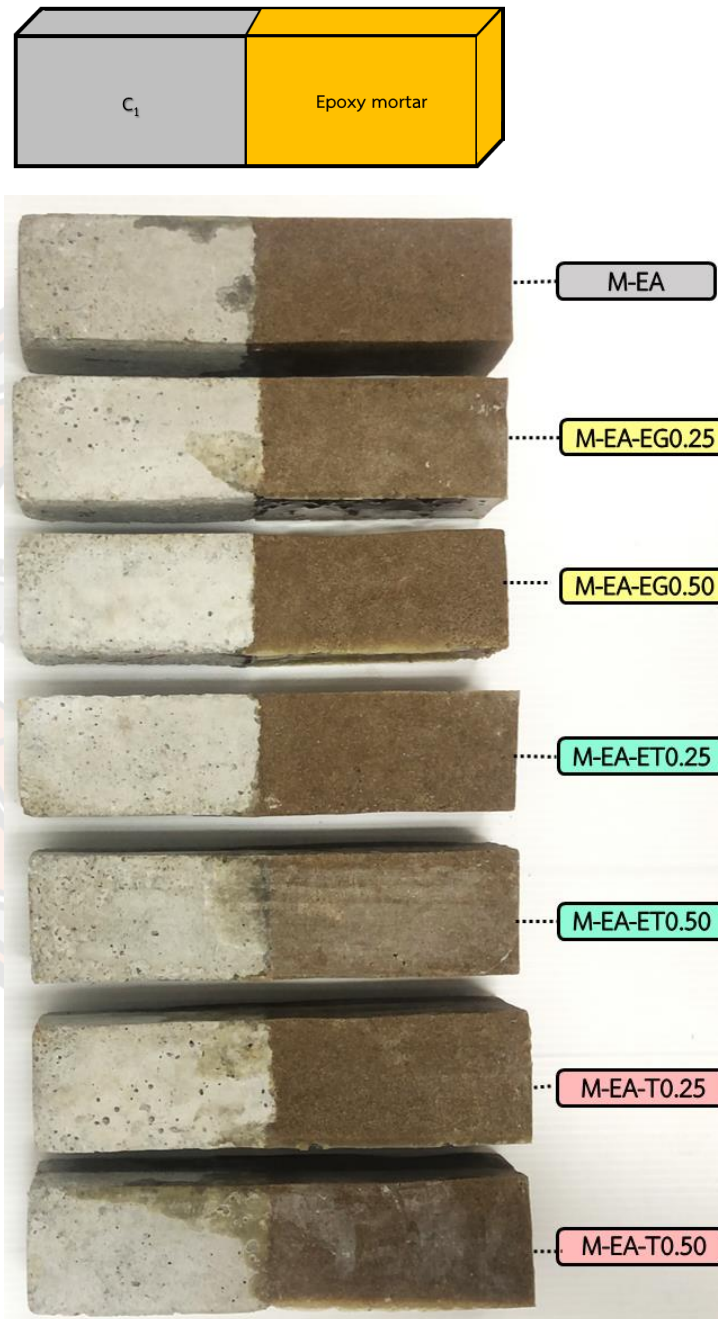
ของอีพ็อกซีพอลิเมอร์ซึ่งเป็นของเหลวสามารถแทรกซึมผ่านรูพรุนเข้าไปอุดช่องว่างของซีเมนต์เก่า และเกิดฟิล์มพอลิเมอร์เคลือบซีเมนต์เก่าได้ [49-50] ทำให้บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุทั้ง 2 มีความแข็งแรงที่มากกว่าเมื่อเทียบซีเมนต์เก่า ดังนั้นชั้นงานเมื่อได้รับแรงดัดโค้งจึงพบรอยแตกร้าวบริเวณซีเมนต์เก่าในทุกชั้นงาน

อย่างไรก็ตามแม้ว่าการแตกร้าวจะเกิดบริเวณซีเมนต์เก่าทุกสูตร แต่แรงที่ใช้ในการกดเพื่อให้ชั้นงานเกิดการแตกร้าวพบว่าไม่เท่ากัน โดยสูตรที่ใช้สารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว (M-EA) มีค่า σ_{fs} 4.76 MPa ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าแรงที่ใช้ในการกดชั้นงานซีเมนต์เก่า (5.04 MPa) แต่ยังคงมีค่าสูงกว่าการหล่อร่วมกับซีเมนต์ใหม่ (1.48 MPa) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างร่างแหเอมีนมีความแข็งเกร็ง (Rigid) ทำให้แม้ว่าจะสามารถแทรกสอดเข้าไปในช่องว่างของซีเมนต์เก่าบริเวณรอยต่อได้นั้น แต่เมื่อชั้นงานได้รับแรงกระทำ โครงสร้างที่แข็งเกร็งจะมีการกระจายแรงที่น้อยกว่า ส่งผลให้ซีเมนต์เก่าบริเวณเหนือรอยต่อเป็นจุดสะสมความเครียด และเกิดการแตกร้าวขึ้นได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับบริเวณรอยต่อและในส่วนของอีพ็อกซีโมรตาร์

การผสมร่วมกับ PET-COOH ในอัตราส่วน 25% โดยเฉพาะ PET-COOH ชนิดที่มี 3 แขน (ET) และ 4 แขน (T) ซึ่งมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่สูง และมีโครงสร้างที่ยืดหยุ่นกว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้างร่างแหเอมีน (ตาราง 9) ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ค่าความยืดหยุ่นของอีพ็อกซีโมรตาร์ที่โดยเทคนิค DMA ที่พบว่าการเติม PET-COOH ในอัตราส่วน 25% จะช่วยให้ชั้นงานมีค่ามอดุลัสสะสม ค่า Damping และค่า T_g เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้เอมีนเพียงอย่างเดียว บ่งบอกถึงพฤติกรรมด้านความยืดหยุ่น และความเข้ากันได้ระหว่างอีพ็อกซีและทรายที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวมีส่วนช่วยเพิ่มการกระจายแรงของวัสดุได้ดีขึ้น [44] นอกจากนี้การมีหมู่อะโรมาติกในโครงสร้างของ PET-COOH นอกจากจะช่วยให้ชั้นงานมีค่ามอดุลัสสะสม และค่า T_g สูงกว่าการใช้เอมีนเพียงอย่างเดียวแล้วนั้น ความแข็งเกร็งของโครงสร้างของหมู่อะโรมาติกยังมีส่วนช่วยให้ชั้นงานมีค่า σ_{fs} เพิ่มขึ้น [1-2, 45] ทำให้เมื่อนำชั้นงาน M-EA-ET0.25 และ M-EA-T0.25 ไปหล่อร่วมกับซีเมนต์เก่า และให้แรงกดบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นงาน ชั้นงานจะสามารถกระจายแรงไปยังส่วนต่างๆ ของชั้นงานได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับสูตรที่ใช้สารทำให้แข็ง เอมีนเพียงอย่างเดียว ทำให้ต้องใช้แรงเพิ่มขึ้นในการทำให้ชั้นงานเกิดการแตกร้าว และมีค่าสูงกว่าแรงที่ใช้กดชั้นงานซีเมนต์เก่า (C_1) 8.8% (5.67 MPa) และ 4.8% (5.46 MPa) เมื่อใช้ M-EA-ET0.25 และ M-EA-T0.25 ในการหล่อร่วมตามลำดับ ในขณะที่การผสมร่วมกับ PET-COOH ชนิดที่มี 2 แขน (EG) ในอัตราส่วน 25% สามารถรับแรงดัดโค้งได้ใกล้เคียงกับสูตรที่ใช้สารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้แม้ว่าจะมีโครงสร้างที่แข็งแรง ยืดหยุ่น และรับแรงได้ดีของ PET-COOH แต่การเชื่อมขวางที่น้อยกว่า (ตาราง 9) ส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงที่ดีน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ PET-COOH ชนิดที่มี 3 แขน (ET) และ 4 แขน (T)


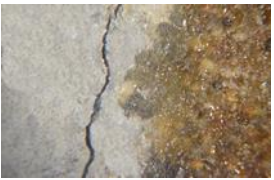







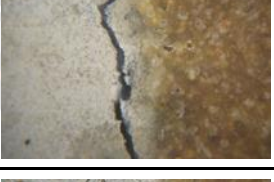




อย่างไรก็ตามการผสมร่วมของ PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด (EG, ET และ T) ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น (50%) ชั้นงานสามารถทนต่อแรงดัดโค้งได้ลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นอีพ็อกซีพอลิเมอร์ส่งผลต่อการแทรกผ่านช่องว่างของซีเมนต์เก่า ทำให้ความแข็งแรงบริเวณรอยต่อลดลง ทั้งความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง และอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีกับทรายที่ลดลงตามอัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้น (ตาราง 9) ทำให้กระจายแรงแบบอีลาสติกของวัสดุที่ลดลง

ส่งผลให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชิ้นงานซีเมนต์เก่ากับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ลดลงตามอัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้น [2, 39-40, 45] อย่างไรก็ตามทุกสูตรยังคงมีค่าสูงกว่าการใช้ซีเมนต์เป็นสารหล่อร่วมน ผลการทดสอบความต้านแรงดัดโค้งบริเวณหล่อร่วมนำมาแสดงใน ภาพ 76 และตาราง 19



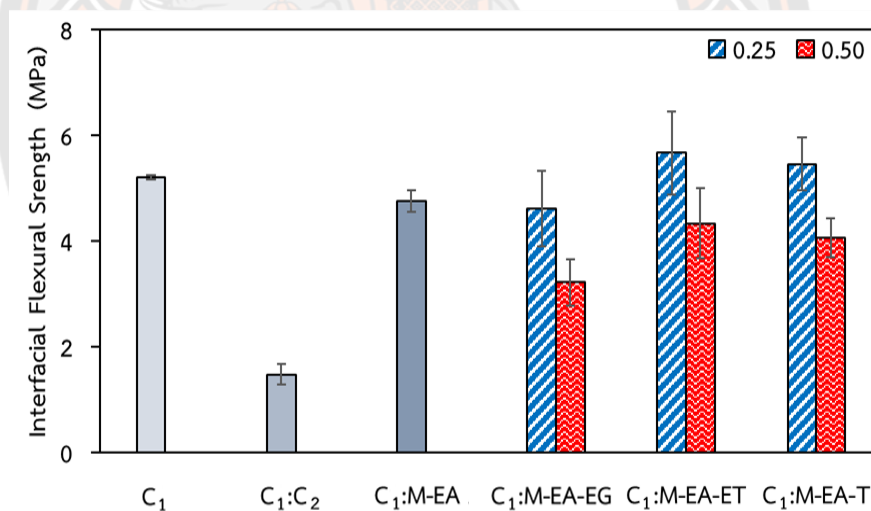
ภาพ 72 ภาพถ่ายชิ้นงานที่เตรียมจากการหล่อร่วมนระหว่างซีเมนต์เก่า (C_1) และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ เพื่อใช้ในการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH

ตาราง 18 OM images (5x) บริเวณหลอร่วมของซีเมนต์เก่าและอีพ็อกซีโมรตาร์ ก่อนและหลังการทดสอบความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัส เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH

ตัวอย่าง	ก่อน	หลัง
M-EA		
M-EA-EG0.25		
M-EA-EG0.50		
M-EA-ET0.25		
M-EA-ET0.50		
M-EA-T0.25		
M-EA-T0.50		

ตาราง 19 ค่าความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัสบริเวณหล่อร่วมของซีเมนต์เก่าและอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH

ตัวอย่าง	Interfacial flexural strength (MPa)
C ₁ :C ₂	1.48±0.20
M-EA	4.76±0.19
M-EA-EG0.25	4.62±0.71
M-EA-EG0.50	3.22±0.44
M-EA-ET0.25	5.67±0.78
M-EA-ET0.50	4.34±0.66
M-EA-T0.25	5.46±0.50
M-EA-T0.50	4.06±0.37



ภาพ 73 ค่าความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัสบริเวณหล่อร่วมของซีเมนต์เก่าและอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH

4.4.2 อีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร (Epoxy Modified Mortar)

งานวิจัยส่วนนี้เป็นการศึกษาสมบัติแรงยึดเหนี่ยวของซีเมนต์ที่เตรียมให้เป็นซีเมนต์เก่า (C_1) กับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรสูตรต่าง ๆ ทั้งสูตรที่ใช้สารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว และสูตรใช้สารทำให้แข็งร่วมระหว่างเอมีนและ PET-COOH โดยศึกษาค่าความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial flexural strength, σ_{ifs}) บริเวณรอยต่อระหว่างซีเมนต์เก่ากับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร เทียบกับชิ้นงานซีเมนต์เก่าที่หล่อร่วมกับซีเมนต์ใหม่ ($C_1:C_2$) ชิ้นงานซีเมนต์เก่าที่หล่อร่วมกับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่ใช้ปูนและทรายที่ขายทางการค้าของบริษัทริชเทค ($C_1:C-EAc$) และชิ้นงานซีเมนต์เก่าที่หล่อร่วมกับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่ใช้ปูนและทรายที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ($C_1:C-EA$)

4.4.2.1 สมบัติแรงยึดเหนี่ยว (Bond strength) ของซีเมนต์และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรทางการค้า

ศึกษาสมบัติแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เก่าและอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรทางการค้า 2 ชนิด คือชนิดที่ใช้อีพ็อกซีโพลิโกลิโกลิเมอร์ สารทำให้แข็งเอมีน ปูนเกรดทนความชื้นที่ผสมแบบสำเร็จร่วมกับทรายของบริษัทริชเทค ($C_1:C-EAc$) และชนิดที่ใช้อีพ็อกซีโพลิโกลิโกลิเมอร์ และสารทำให้แข็งเอมีนของบริษัท ริชเทคที่ผสมร่วมกับปูนราชสีห์และทรายที่ขายตามท้องตลาด ($C_1:C-EA$) เทียบกับชิ้นงานซีเมนต์เก่า (C_1) และชิ้นงานที่เตรียมจากซีเมนต์เก่าและซีเมนต์ใหม่ ($C_1:C_2$) โดยทดสอบสมบัติต้านแรงดัดโค้งของชิ้นงานบริเวณหล่อร่วมหลังบ่มชิ้นงานเป็นเวลา 28 วัน ภาพถ่ายชิ้นงานระหว่างซีเมนต์และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรดังแสดงใน ภาพ 77

จากผลการทดลองพบว่า การหล่อร่วมกับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรทั้ง 2 สูตร ($C_1:C-EAc$ และ $C_1:C-EA$) ให้ค่า σ_{ifs} สูงกว่าการหล่อร่วมโดยใช้ซีเมนต์ปกติ ($C_1:C_2$) ซึ่งผลดังกล่าวอาจเนื่องมาจากอีพ็อกซีโพลิเมอร์สามารถแทรกซึมผ่านรูพรุนเข้าไปอุดช่องว่างของซีเมนต์เก่า และเกิดฟิล์มโพลิเมอร์เคลือบซีเมนต์เก่าได้ [49-50] ทำให้บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุทั้ง 2 มีความแข็งแรงมากกว่าเมื่อเทียบซีเมนต์เก่า ดังนั้นเมื่อชิ้นงานได้รับแรงดัดโค้งจึงพบรอยแตกกว้างบริเวณซีเมนต์เก่าในทุกชิ้นงาน (ตาราง 20) ในขณะที่เมื่อพิจารณาการใช้ปูนและทรายของบริษัทริชเทค พบว่ามีส่วนช่วยให้ชิ้นงานทนต่อแรงดัดโค้งหรือแรงกดบริเวณรอยต่อได้ดีกว่าปูนและทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (ตาราง 21 และภาพ 78) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปูนของบริษัทริชเทคเป็นปูนซีเมนต์เกรดทนความชื้นพิเศษที่ผสมร่วมกับทรายที่มีขนาดที่เล็กกว่าเมื่อเทียบกับขนาดของทรายที่เลือกใช้ ซึ่งชนิดของปูนและทรายเหล่านี้ส่งผลต่อการรับและกระจายแรงของวัสดุ อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกในทำวิจัยและการต่อยอดงานวิจัยในอนาคต งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ปูนและทรายที่สามารถหาได้ง่ายในท้องตลาด

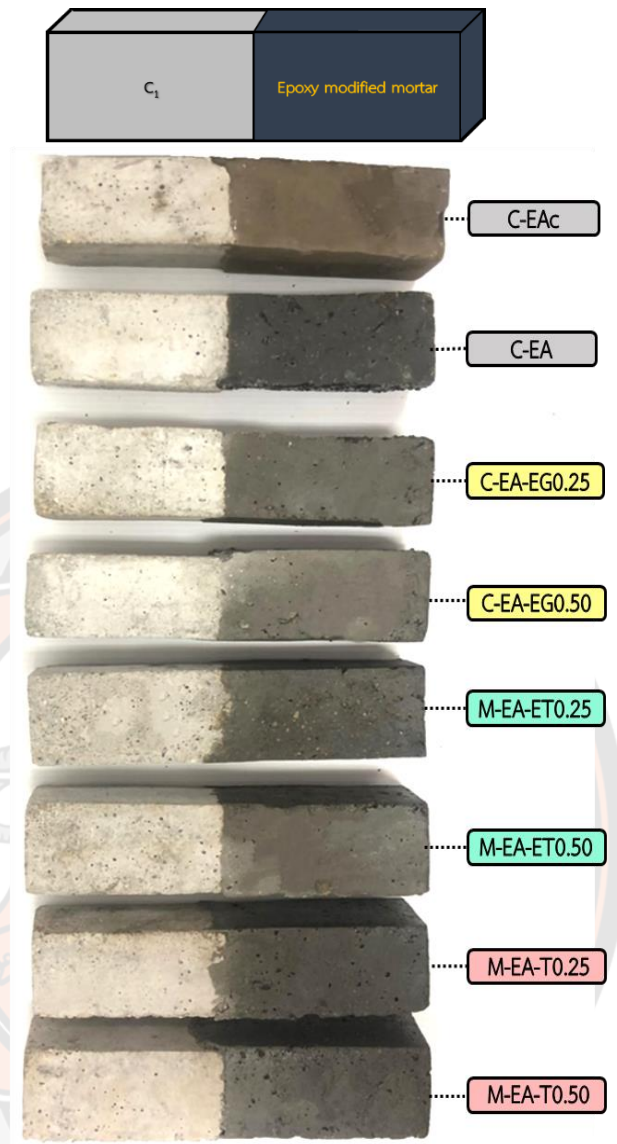
4.4.2.2 สมบัติแรงยึดเหนี่ยว (Bond strength) ระหว่างซีเมนต์และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร

ศึกษาผลของการใช้อีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรหรืออีพ็อกซีซีเมนต์เพื่อใช้เป็นสารสำหรับซ่อมแซมโครงสร้างซีเมนต์ที่เกิดการเสียหาย โดยการหล่อร่วมของซีเมนต์เก่า (C_1) กับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่เตรียมจากสารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว ($C-EA$) และการใช้สารทำให้แข็งร่วมระหว่าง

เอมีนและกับ PET-COOH ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ P-EG-PA มี 2-3 แขน (C-EA-EG), P-ET-PA มี 3 แขน (C-EA-ET) และ P-T-PA มี 4 แขน (C-EA-T) ในอัตราส่วนเอมีน:PET-COOH เท่ากับ 1.5:0, 1.25:0.25 และ 1:0.50 ส่วนโดยน้ำหนัก หรือการใช้สารทำให้แข็งร่วม PET-COOH ในอัตราส่วน 0%, 16.7% และ 33.3% ตามลำดับ โดยทดสอบสมบัติความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial flexural strength, σ_{ifs}) บริเวณรอยต่อของวัสดุทั้ง 2 เทียบกับชิ้นงานซีเมนต์เก่าที่หล่อร่วมกับอีพ็อกซีพอลิเมอร์ดัดแปรที่ใช้ปูนและทรายที่ขายทั่วไปในท้องตลาด (C_1 :C-EA) ภาพถ่ายชิ้นงานระหว่างซีเมนต์และอีพ็อกซีพอลิเมอร์ดังแสดงใน ภาพ 77










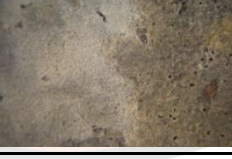




จากผลการทดลองพบว่าการหล่อร่วมกับอีพ็อกซีพอลิเมอร์ดัดแปร สูตรที่ใช้สารทำให้แข็งร่วม PET-COOH ทั้งชนิดและอัตราส่วนของ PET-COOH ต่าง ๆ กัน เกิดการแตกร้าวทั้งในบริเวณซีเมนต์เก่าและระหว่างผิวสัมผัส (ตาราง 20) และไม่พบการแตกร้าวในส่วนของอีพ็อกซีพอลิเมอร์ดัดแปร ซึ่งผลดังกล่าวแตกต่างจากการใช้อีพ็อกซีพอลิเมอร์เล็กน้อย โดยในสูตรที่ใช้อีพ็อกซีพอลิเมอร์ไม่พบการแตกร้าวระหว่างรอยต่อของพอลิเมอร์ทั้ง 2 เลย จะพบการแตกร้าวเฉพาะในส่วนของซีเมนต์เก่า ในขณะที่ในส่วนที่หล่อร่วมกับอีพ็อกซีพอลิเมอร์ดัดแปรจะพบการแตกร้าวบริเวณรอยต่อร่วมด้วย (ตาราง 19 และตาราง 21) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากทั้ง 2 ส่วนต่างมีซีเมนต์เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นความสามารถในการรับแรงมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก บริเวณรอยต่อจึงเป็นจุดสะสมความเครียด (Stress concentration) ทำให้เป็นจุดที่เกิดการแตกร้าวได้ง่ายเมื่อได้รับแรงดัดโค้ง อย่างไรก็ตามการผสมร่วมของ PET-COOH ในอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 16.7% พบว่าทุกสูตรมีค่า σ_{ifs} สูงกว่าสูตรที่ใช้เอมีนทางการค้าเป็นสารทำให้แข็งเพียงอย่างเดียว โดยเฉพาะอย่างยิ่งสูตรที่ผสมร่วมของ PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH 3 หมู่ (EA-ET0.25) ที่พบว่ามีค่าแรงยึดเหนี่ยวที่สุด รองลงไปคือการผสมร่วมของ PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH 4 หมู่ (EA-T0.25) และ PET-COOH ที่มีหมู่ -COOH 2-3 หมู่ (EA-EG0.25) โดยมีค่า σ_{ifs} 6.14 MPa 5.81 MPa และ 5.63 MPa ตามลำดับ (ตาราง 21 และภาพ 78) ซึ่งผลดังกล่าวน่าจะเกิดจากผลของความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่แตกต่างกัน รวมถึงความสามารถในการยับยั้งเพื่อกระจายแรงของอีพ็อกซีพอลิเมอร์ที่อยู่ภายในซีเมนต์ [41-43] ซึ่งค่า σ_{ifs} ของชิ้นงานระหว่างซีเมนต์เก่ากับอีพ็อกซีพอลิเมอร์ดัดแปร สูตรที่ใช้สารทำให้แข็งร่วม PET-COOH เป็นองค์ประกอบในอัตราส่วน 16.7% จะมีค่าสูงกว่าวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมประสานอื่น ๆ แล้วนั้น ยังพบว่ามีค่าสูงกว่าชิ้นงานซีเมนต์เริ่มต้นหรือชิ้นงานที่ใช้เป็นซีเมนต์เก่า (C_1) ซึ่งมีค่าความต้านแรงดัดโค้ง (σ_{fs}) ของชิ้นงาน 5.04 MPa ดังนั้นจึงอาจกล่าวในเบื้องต้นได้ว่าการซ่อมแซมวัสดุซีเมนต์ หรือการหล่อร่วมกับวัสดุซีเมนต์ที่เหมือนกัน แต่มีการผสมร่วมกับอีพ็อกซีพอลิเมอร์ที่มี PET-COOH ในอัตราส่วน 16.7% เป็นสารทำให้แข็งร่วม ทำให้ชิ้นงานซีเมนต์หลังซ่อมแซมมีความแข็งแรง และทนต่อแรงดัดโค้งสูงกว่าวัสดุคอนกรีตเริ่มต้น

อย่างไรก็ตามการผสมร่วมของ PET-COOH ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น (33.3%) พบว่าให้ผลที่คล้ายคลึงกับการหล่อร่วมกับอีพ็อกซีพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้น คือมีค่า σ_{fs} ลดลง ทั้งนี้จากเนื่องมาจากการเกิดการเชื่อมขวางที่ลดลง ความหนืดที่เพิ่มขึ้นของอีพ็อกซีพอลิเมอร์ รวมถึงความเข้ากันได้ของ PET-COOH อิมัลชันที่แพร่ผ่านไปเกิดปฏิกิริยาร่วมกับซีเมนต์เก่าที่ลดลง ทำให้การแตกร้าวส่วนใหญ่จึงเกิดบริเวณรอยต่อ และใช้แรงกดที่ลดลง



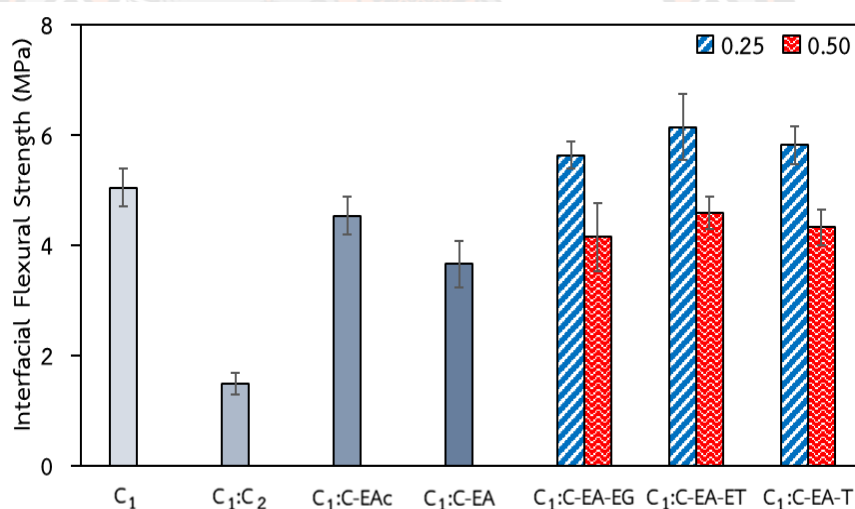
ภาพ 74 ภาพถ่ายชิ้นงานที่เตรียมจากการหล่อร่วมระหว่างซีเมนต์เก่า (C_1) และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร เพื่อใช้ในการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH

ตาราง 20 OM images (5x) บริเวณหล່ร่วมของซีเมนต์เก่าและอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร ก่อนและหลังการทดสอบความต้านแรงดัดโค้งเมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH

ตัวอย่าง	ก่อน	หลัง
C-EAc		
C-EA		
C-EA-EG0.25		
C-EA-EG0.50		
C-EA-ET0.25		
C-EA-ET0.50		
C-EA-T0.25		
C-EA-T0.50		

ตาราง 21 ค่าความต้านแรงดัดโค้งบริเวณหล່ร่วมของซีเมนต์เก่าและอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH

ตัวอย่าง	Interfacial flexural strength (MPa)
C ₁ :C ₂	1.48 ±0.20
C-EAc	4.53 ±0.35
C-EA	3.65 ±0.43
C-EA-EG0.25	5.63 ±0.25
C-EA-EG0.50	4.14 ±0.62
C-EA-ET0.25	6.14 ±0.60
C-EA-ET0.50	4.58 ±0.30
C-EA-T0.25	5.81 ±0.34
C-EA-T0.50	4.32 ±0.32



ภาพ 75 ค่าความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัสบริเวณหล່ร่วมของซีเมนต์เก่าและอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH

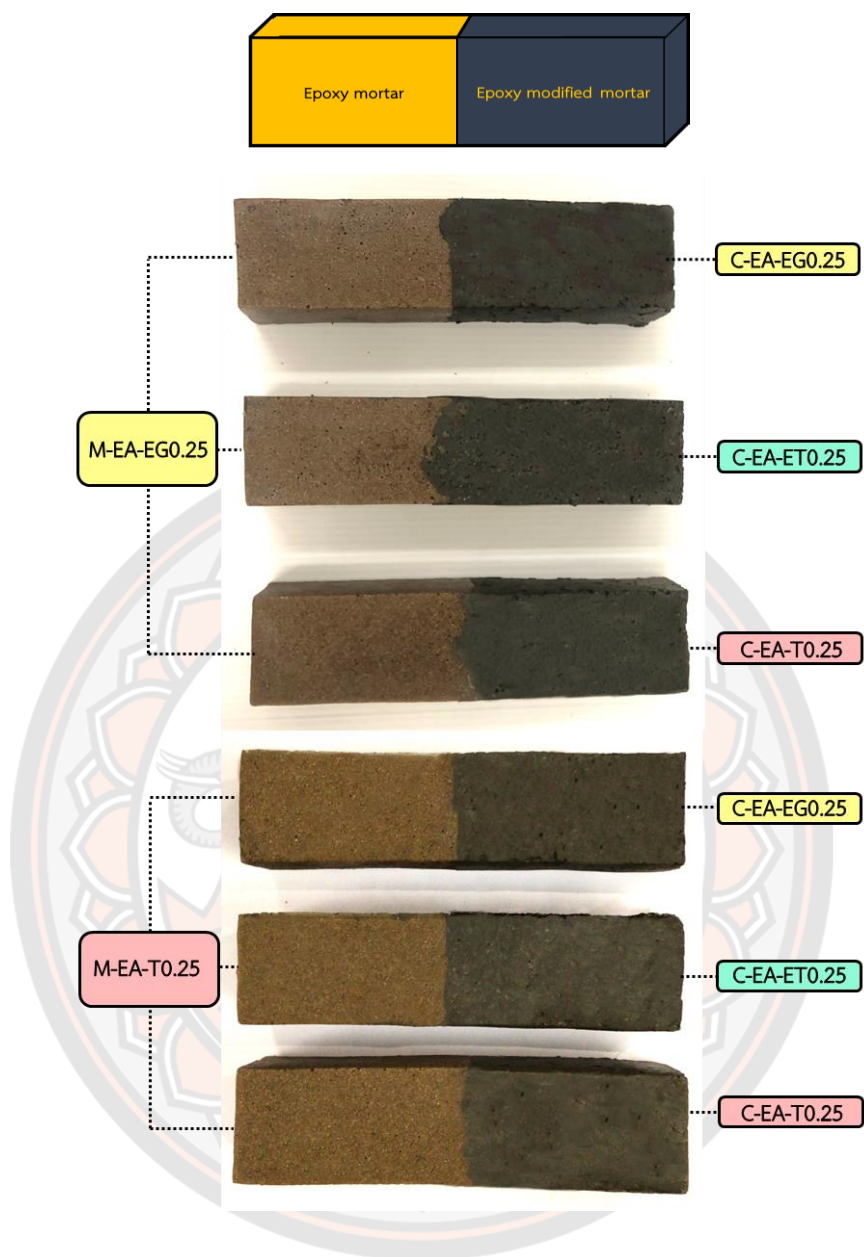
4.4.4.3 สมบัติแรงยึดเหนี่ยว (Bond strength) ระหว่างอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร

จากหัวข้อที่กล่าวไปแล้วข้างต้น เป็นการสนใจศึกษาการใช้อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรเป็นวัสดุในการซ่อมแซมซีเมนต์ จึงวัดค่าความต้านทานทางแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัส (σ_{ifs}) บริเวณรอยต่อของซีเมนต์และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร อย่างไรก็ดี

ตามงานวิจัยนี้สนใจอยากศึกษาสมบัติแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปรที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เช่นกัน ผู้วิจัยจึงได้กำหนดให้อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์เป็นส่วนที่เตรียมขึ้นมาก่อน และทำการแบ่งครึ่งหลังเก็บไว้ 7 วัน โดยในส่วนอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์จะเป็นการศึกษาการใช้ PET-COOH 2 ชนิด ในอัตราส่วนคงที่ 0.25 ส่วน หรือ 25% คือ PET-COOH ชนิดที่มี 2 แขน (M-EA-EG0.25) และ PET-COOH ชนิดที่มี 4 แขน (M-EA-T0.25) จากนั้นจึงทำการหล่อร่วมกับอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปร กลุ่มด้วยผ้าขึ้นและพลาสติก และเก็บในห้องควบคุมความชื้นเป็นเวลา 28 วัน ก่อนนำมาค่า σ_{fs} โดยในส่วนอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปรจะเป็นการศึกษาการใช้ PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด ในอัตราส่วนคงที่ 0.25 ส่วน (16.7%) คือ PET-COOH ชนิดที่มี 2 แขน (C-EA-EG0.25) PET-COOH ชนิดที่มี 3 แขน (C-EA-ET0.25) และ PET-COOH ชนิดที่มี 4 แขน (C-EA-T0.25) ภาพถ่ายชิ้นงานระหว่างอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปรดังแสดงใน ภาพ 79





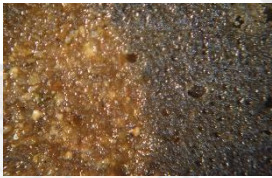


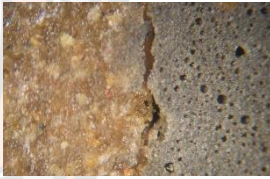
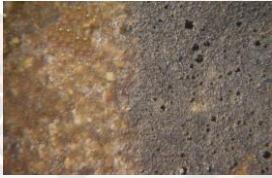
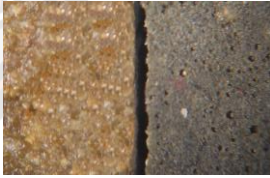

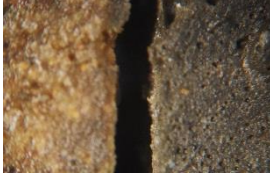
จากผลการทดลองพบว่าการหล่อร่วมระหว่างอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปรที่มี PET-COOH เป็นองค์ประกอบในอัตราส่วน 0.25 ส่วนโดยน้ำหนัก ทุกสูตรเกิดการแตกร้าวบริเวณผิวสัมผัส (Interface) (ตาราง 22) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์มีความหนาแน่นของวัสดุที่มากกว่า ในขณะที่มีช่องว่างที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับซีเมนต์ ทำให้เมื่อทำการหล่อร่วมกับอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปร การแพร่ผ่านของอีพ็อกซีพอลิเมอร์ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปร เข้าไปยังโครงสร้างของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์จึงเกิดขึ้นได้น้อยกว่า ทั้ง 2 วัสดุยังมีความแข็งแรงสูง ดังนั้นบริเวณรอยต่อจึงเป็นจุดสะสมความเครียด (Stress concentration) ทำให้เป็นจุดที่เกิดการแตกร้าวได้ง่ายเมื่อได้รับแรงดัดโค้ง

อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าแปลกใจที่พบว่าการใช้ PET-COOH ที่เหมือนกันในการเตรียมทั้งอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปรจะให้ชิ้นงานที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกัน (พิจารณาจากค่า σ_{fs}) ดีกว่าใช้ PET-COOH ต่างชนิดกัน และค่าแรงยึดเหนี่ยวจะมีค่าลดลงตามความแตกต่างของแขนของ PET-COOH ที่ต่างกัน เช่นในกรณีที่ใช้ EG ซึ่งมี 2 แขน ในการเตรียมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ (M-EA-EG0.25) เมื่อหล่อร่วมกับอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปรที่ใช้ EG เป็นสารทำให้แข็งร่วม แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสจะสูงกว่าการหล่อร่วมกับ PET-COOH ที่มี 3 แขน (C-EA-ET0.25) และ 4 แขน (C-EA-T0.25) ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อใช้ T ซึ่งมี 4 แขน ในการเตรียมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ (M-EA-T0.25) เมื่อหล่อร่วมกับอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปรที่ใช้ T เป็นสารทำให้แข็งร่วม แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสจะสูงกว่าการหล่อร่วมกับ PET-COOH ที่มี 3 แขน (C-EA-ET0.25) และ 2 แขน (C-EA-EG0.25) ตามลำดับ (ภาพ 80 และตาราง 23)



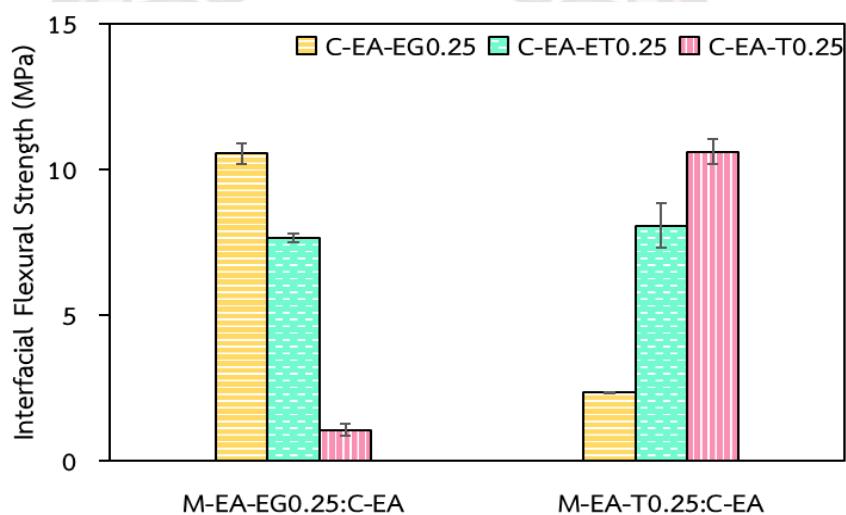
ภาพ 76 ภาพถ่ายชิ้นงานที่เตรียมจากการหล่อร่วมระหว่างอีพ็อกซีมอร์ตาร์ (M-EA) และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร (C-EA) เพื่อใช้ในการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH

ตาราง 22 OM images (5x) บริเวณหล່อร่วมของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ (M-EA) และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ตัดแปร (C-EA) ก่อนและหลังการทดสอบความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัสเมื่อปรับเปลี่ยนชนิดของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH

ตัวอย่าง	ก่อน	หลัง
M-EA-EG0.25 : C-EA-EG0.25		
M-EA-EG0.25 : C-EA-ET0.25		
M-EA-EG0.25 : C-EA-T0.25		
M-EA-T0.25 : C-EA-EG0.25		
M-EA-T0.25 : C-EA-ET0.25		
M-EA-T0.25 : C-EA-T0.25		

ตาราง 23 ค่าความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัสบริเวณหล່ร่วมของฟ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ (M-EA) และอีฟ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปร (C-EA) เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH

ตัวอย่าง	Interfacial flexural strength (MPa)
M-EA-EG0.25 : C-EA-EG0.25	10.55 ±0.35
M-EA-EG0.25 : C-EA-ET0.25	7.74 ±0.15
M-EA-EG0.25 : C-EA-T0.25	1.06 ±0.21
M-EA-T0.25 : C-EA-EG0.25	2.35 ±0.01
M-EA-T0.25 : C-EA-ET0.25	8.07 ±0.76
M-EA-T0.25 : C-EA-T0.25	10.60 ±0.42



ภาพ 77 ค่าความต้านแรงดัดโค้งระหว่างผิวสัมผัสบริเวณหล່ร่วมของฟ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ (M-EA) และอีฟ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปร (C-EA) เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH

4.5 สมบัติการดูดซึมน้ำ และสารละลายของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร

4.5.1 อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ (Epoxy Mortar)

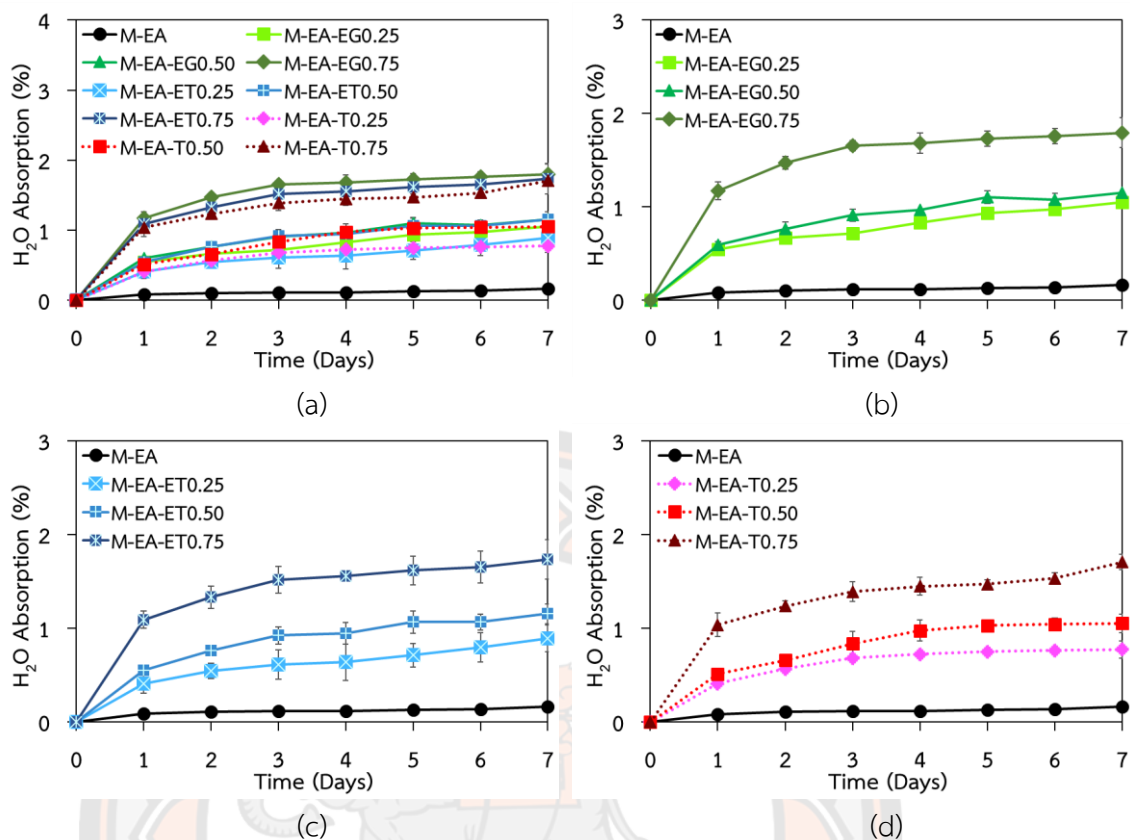
4.5.1.1 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วมต่อสมบัติการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์

ศึกษาผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีจำนวนหมู่ปลายเป็นหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (เพ็ตแอซิด, PET-COOH) ที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA ต่อสมบัติการดูดซึมน้ำของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ เอมีน:PET-COOH เท่ากับ 1:0, 0.75:0.25, 0.50:0.50 และ 0.25:0.75 ส่วนโดยน้ำหนัก หรือการใช้สารทำให้แข็งร่วม PET-COOH ในอัตราส่วน 0%, 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ

ในการก่อสร้าง นิยมใช้อีพ็อกซีเมอร์ตาร์และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรในการปูพื้นงานก่อสร้าง โดยเฉพาะชั้นที่มีการสัมผัสกับผิวดิน เนื่องจากอีพ็อกซีที่ผสมร่วมกับเมอร์ตาร์ดัดแปรช่วยป้องกันการแพร่ผ่านของน้ำผิวดินขึ้นไปสู่ผิวชั้นบนของโครงสร้าง ซึ่งน้ำดังกล่าวอาจก่อให้เกิดการหลุดร่อนของวัสดุเคลือบผิวที่ปิดทับ หรือเกิดการกัดกร่อนของโครงสร้างได้ โดยทั่วไปจะมีข้อกำหนดการดูดซึมน้ำของวัสดุอีพ็อกซีเมอร์ตาร์และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรว่าต้องไม่เกิน 3% จากผลการทดลองพบว่าอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรทางคาร์บอเนต (M-EA) มีค่าการดูดซึมน้ำค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และมีค่าคงที่หลังการแช่น้ำเป็นเวลา 3 วัน โดยมีค่าการดูดซึมน้ำประมาณ 0.16% หลังการแช่น้ำเป็นเวลา 7 วัน (ภาพ 81)

อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ที่ผสมร่วมกับ PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด ในทุกอัตราส่วน ให้พฤติกรรมการดูดซึมน้ำที่คล้ายคลึงกันคือมีการดูดซึมน้ำค่อนข้างเร็วในวันแรก จากนั้นจึงมีการดูดซึมน้ำที่ช้าลง และมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไม่มากหลังการแช่น้ำ 3-4 วัน และมีการดูดซึมน้ำมากกว่าสูตรที่ใช้เอมีนทางการค้าเพียงอย่างเดียว (M-EA) โดยสูตรที่ผสมร่วมกับ PET-COOH ในอัตราส่วน 25% มีการดูดซึมน้ำน้อยที่สุด (0.8%–1.1%) รองลงไปที่สูตรที่ผสมร่วมกับ PET-COOH ในอัตราส่วน 50% (1%–1.2%) และ 75% (1.7%–1.8%) ตามลำดับ (ภาพ 81)

นอกจากนี้ยังพบว่าการผสมร่วมกับ P-T-PA ซึ่งมี -COOH 4 หมู่ มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่า P-ET-PA ซึ่งมี -COOH 3 หมู่ และ P-EG-PA ซึ่งมี -COOH 2-3 หมู่ เมื่อผสมในอัตราส่วนเดียวกัน ซึ่งอัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้น และจำนวนของ -COOH ที่ลดลง ส่งผลต่อความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ที่ลดลง ทำให้การซึมผ่านของน้ำเข้าไปในโครงสร้างของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) พันธะเอสเทอร์ของเพ็ต ทำให้โครงสร้างของเมทริกซ์พอลิเมอร์เกิดการคลายตัว โมเลกุลของน้ำจึงสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างที่เกิดขึ้นได้มากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าการดูดซึมน้ำได้มากกว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้างของอีพ็อกซีที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ร่วมกับสารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว [1, 53] อย่างไรก็ตามแม้ว่าอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ที่ผสมร่วมกับ PET-COOH จะทำให้ชิ้นงานมีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น แต่ค่าดังกล่าวยังคงเป็นไปตามค่ามาตรฐานที่กำหนดว่าต้องมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกิน 3%



ภาพ 78 ค่าการดูดซึมน้ำของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ท์ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของ (a) PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA) (b) P-EG-PA (c) P-ET-PA และ (d) P-T-PA

4.5.1.2 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วมต่อสมบัติการดูดซึมน้ำ

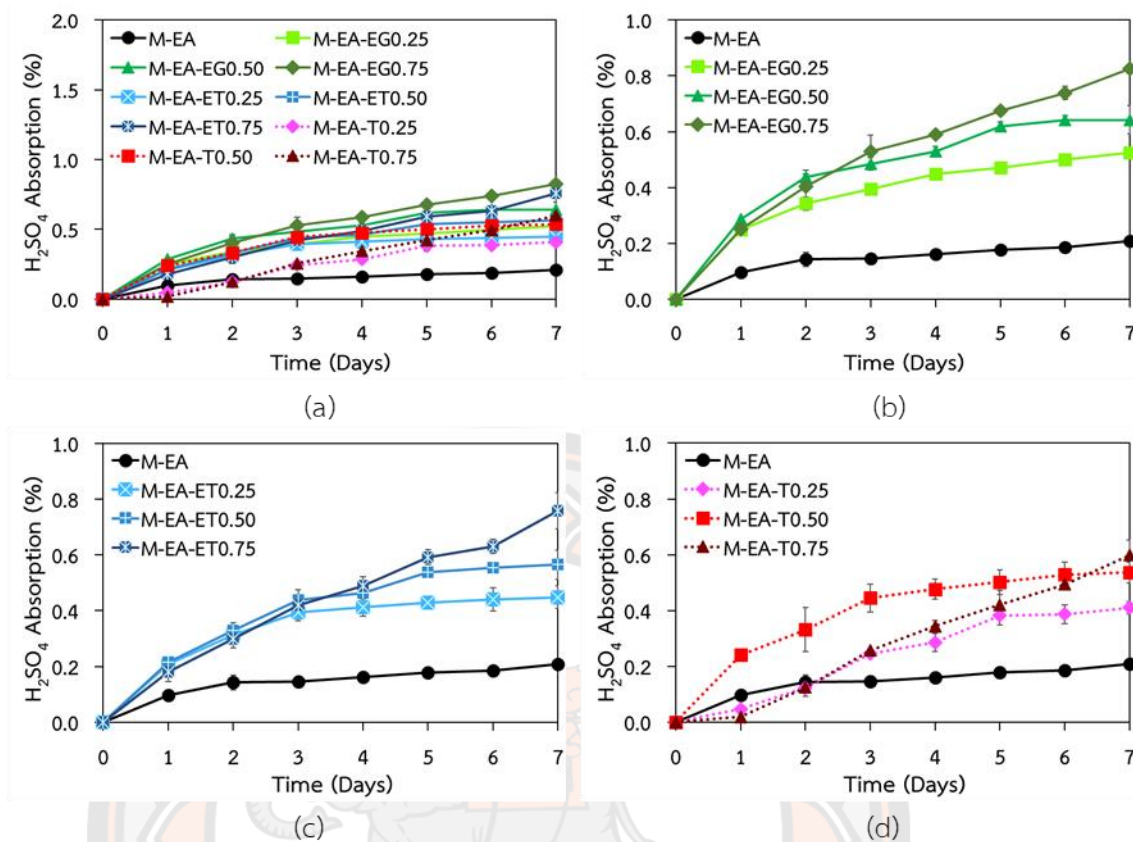
ละลาย กรด เบส และเกลือของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ท์

ศึกษาผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีจำนวนหมู่ปลายเป็นหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (เพ็ดแอซิด, PET-COOH) ที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA ต่อสมบัติการดูดซึมน้ำละลายกรด (10% H_2SO_4) เบส (10% NaOH) และเกลือ (10% NaCl) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ท์ โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของเอมีน:PET-COOH เท่ากับ 1:0, 0.75:0.25, 0.50:0.50 และ 0.25:0.75 ส่วนโดยน้ำหนัก หรือการใช้สารทำให้แข็งร่วม PET-COOH ในอัตราส่วน 0%, 25%, 50% และ 75% ตามลำดับ

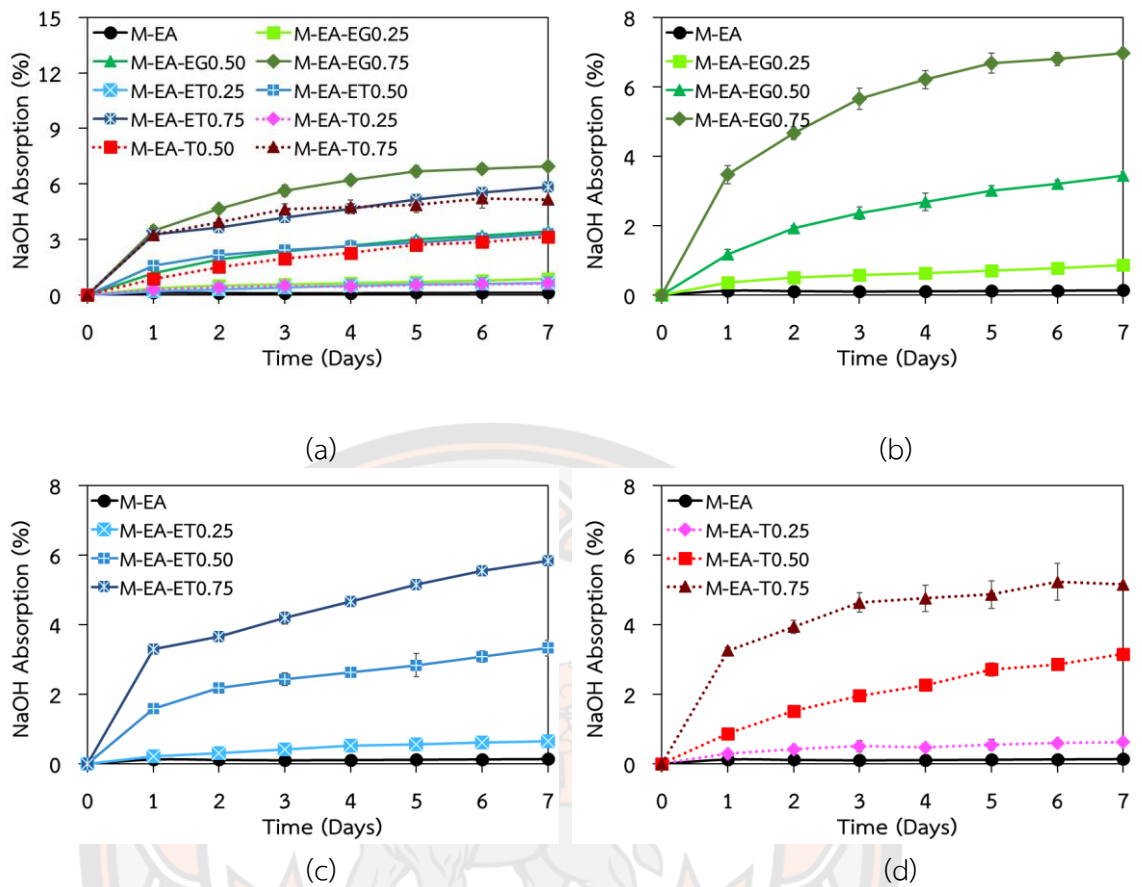
จากผลการทดลองพบว่าอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ท์ที่เตรียมจากสารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว (M-EA) มีการดูดซึมน้ำละลายทั้ง 3 ชนิด น้อยกว่า 1% โดยมีค่าการดูดซึมน้ำที่เมื่อแช่ชิ้นงานในสารละลายประมาณ 2 วัน และมีค่าการดูดซึมน้ำละลายกรด เบส และเกลือ 0.53% 0.86% และ 0.47% หลังแช่ชิ้นงานในสารละลายเป็นเวลา 7 วัน (ภาพ 82 และ ตาราง 24)

การผสมร่วมกับ PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด พบว่าชิ้นงานมีการดูดซึ่มสารละลายกรด เบส และเกลือมากกว่าการใช้สารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว และชิ้นงานมีค่าการดูดซึ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 2-3 วันแรก จากนั้นจึงมีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามเวลาที่แช่ชิ้นงานในสารละลาย (ภาพ 82-84) นอกจากนี้ยังพบว่าพฤติกรรมการดูดซึ่มสารละลายทั้ง 3 ชนิด คล้ายกับการดูดซึ่มน้ำ คือการผสมร่วมกับ PET-COOH ในอัตราส่วน 25% มีค่าการดูดซึ่มสารละลายกรด เบส และเกลือต่ำที่สุด และมีค่าการดูดซึ่มสารละลายทั้ง 3 ชนิดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้จำนวนหมู่ฟังก์ชัน -COOH ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการต้านทานการซึมผ่านของสารละลายเข้าไปในชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแม้ว่าการผสม PET-COOH ในอัตราส่วน 25% จะให้ชิ้นงานที่มีการเชื่อมขวางมากกว่าการใช้สารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว แต่การความยาวโซ่ของ PET-COOH ที่มากกว่า ส่งผลให้การเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นหลวม (Loose linkage) กว่า สารละลายจึงแทรกตัวผ่านเข้าไปในชิ้นงานที่มี PET-COOH ได้มากกว่าชิ้นงานที่ใช้สารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว [51]

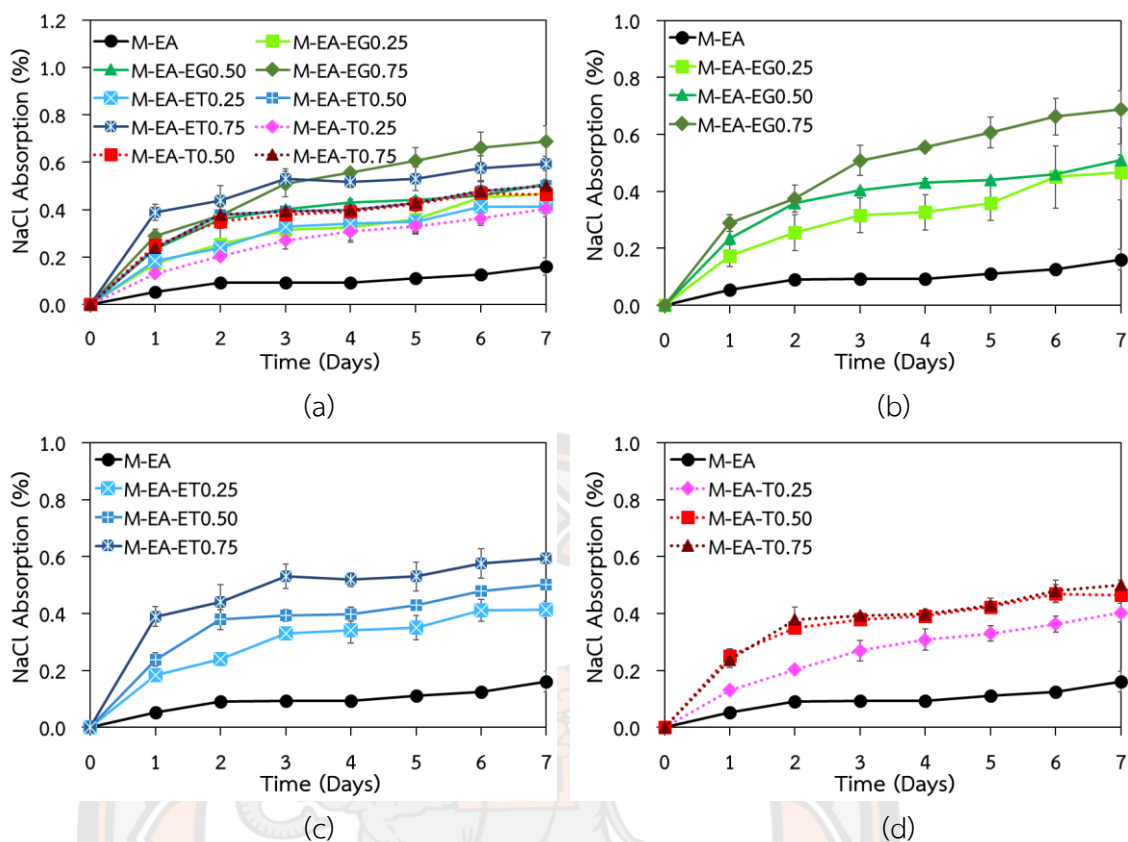
นอกจากนี้จากผลการทดลองยังพบว่าชิ้นงานอีพ็อกซีอิมอร์ตาร์ที่ผสม PET-COOH มีการต้านทานการซึมผ่านของสารละลายกรด และเกลือ ได้ดีกว่าสารละลายเบส โดยมีค่าการดูดซึ่มของสารละลายกรด และเกลือ ระหว่าง 0.4%-0.8% และ 0.4%-0.7% ตามลำดับ ในขณะที่ค่าการดูดซึ่มของสารละลายเบสมีค่าระหว่าง 0.6%-7% ขึ้นกับชนิดและอัตราส่วนของ PET-COOH ซึ่งการดูดซึ่มสารละลายเบสที่สูงดังกล่าวน่าจะเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสพันธะเอสเทอร์ของพีต ทำให้โครงสร้างของเมทริกซ์พอลิเมอร์เกิดการคลายตัวโมเลกุลของสารละลายเบส (OH⁻) จึงสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างที่เกิดขึ้นได้มากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าการดูดซึ่มสารละลายเบสได้มากกว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้างของอีพ็อกซีที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ร่วมกับสารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว (ภาพ 82-85 และ ตาราง 24) [1, 52-53]



ภาพ 79 ค่าการดูดซึมสารละลายกรด (10% H_2SO_4) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของ (a) PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA) (b) P-EG-PA (c) P-ET-PA และ (d) P-T-PA



ภาพ 80 ค่าการดูดซึมสารละลายเบส (10% NaOH) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของ (a) PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA) (b) P-EG-PA (c) P-ET-PA และ (d) P-T-PA

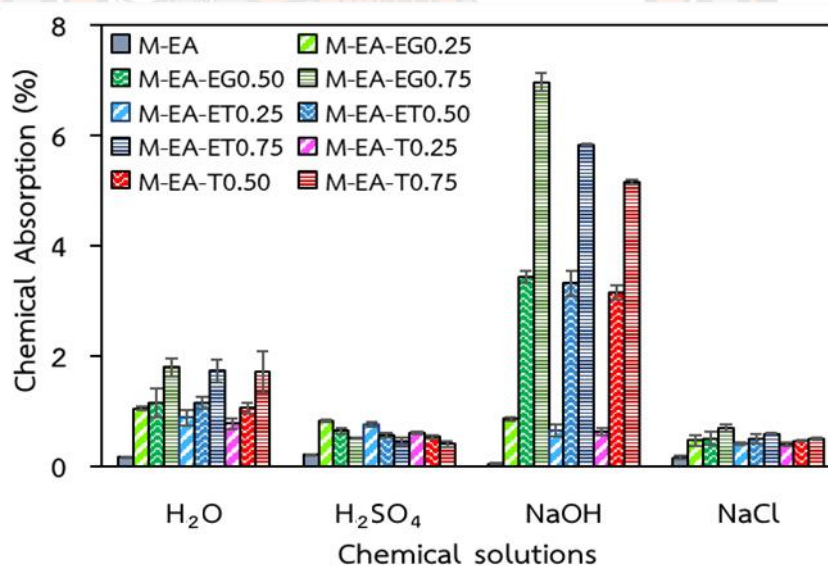


ภาพ 81 ค่าการดูดซึมสารละลายเกลือ (10% NaCl) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของ (a) PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA) (b) P-EG-PA (c) P-ET-PA และ (d) P-T-PA

จากผลการศึกษาการดูดซึมสารละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เมื่อแช่ชิ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ที่ปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของเอมีน:PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA) ในสารละลายเป็นเวลา 7 วัน (ภาพ 85) สามารถสรุปได้ว่าอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทางการค้า (M-EA) สามารถต้านทานการซึมผ่านของสารละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) ได้ดี โดยมีค่าการดูดซึมสารละลายทั้ง 4 ชนิด ระหว่าง 0.14% - 0.21% โดยชิ้นงานมีการดูดซึมสารละลายเบสต่ำที่สุด รองลงไปคือน้ำและเกลือ และมีการดูดซึมกรดสูงที่สุด คือ 0.14% 0.16% 0.16% และ 0.21% ตามลำดับ การผสมร่วมกับ PET-COOH ชนิดที่มี -COOH 4 หมู่ (P-T-PA) ในอัตราส่วน 25% มีค่าการดูดซึมสารละลายต่ำที่สุด รองลงไปคือการผสมร่วมกับ PET-COOH ชนิดที่มี -COOH 3 หมู่ และ 2 หมู่ ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแห และช่องว่างระหว่างการเกิดการเชื่อมขวาง (Linkage) รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ง่ายของพอลิเมอร์ กลุ่มพอลิเอสเทอร์ ทำให้อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ที่มี PET-COOH ไม่เหมาะกับการใช้งานที่มีโอกาสสัมผัสกับสารละลายเบส แต่สามารถใช้ได้กับการใช้งานในสภาวะกรดและเกลือ โดยมีค่าการดูดซึมสารละลายกรดและเกลือต่ำกว่า 0.5% เมื่อใช้ PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด ในอัตราส่วน 25%

ตาราง 24 ค่าการดูดซึมสารละลาย (%) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ท์หลังแช่ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของเอมีน:PET-COOH

ตัวอย่าง	ค่าการดูดซึมสารละลาย (%)			
	H ₂ O	H ₂ SO ₄	NaOH	NaCl
M-EA	0.16	0.21	0.14	0.16
M-EA-EG0.25	1.05	0.53	0.86	0.47
M-EA-EG0.50	1.15	0.64	3.43	0.51
M-EA-EG0.75	1.79	0.83	6.97	0.69
M-EA-ET0.25	0.89	0.45	0.65	0.41
M-EA-ET0.50	1.15	0.56	3.32	0.50
M-EA-ET0.75	1.73	0.76	5.84	0.59
M-EA-T0.25	0.78	0.41	0.63	0.40
M-EA-T0.50	1.05	0.54	3.15	0.46
M-EA-T0.75	1.71	0.60	5.15	0.51



ภาพ 82 ค่าการดูดซึมสารละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ท์ เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ เอมีน:PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA)

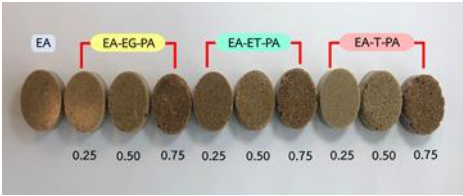
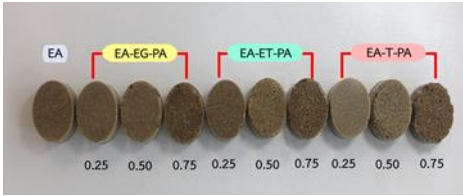
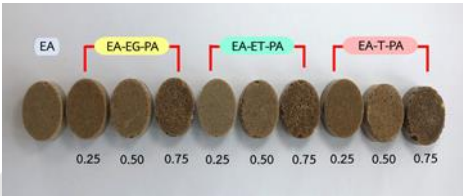
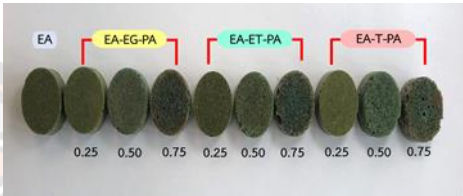
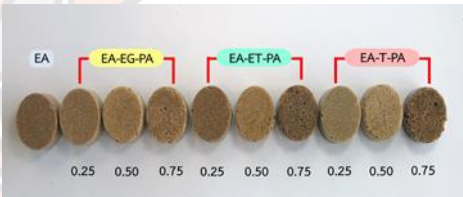
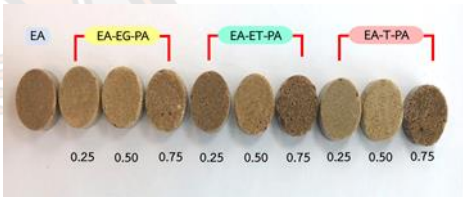
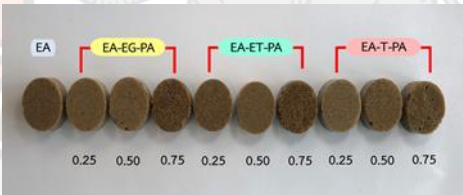
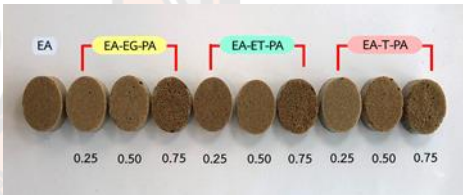
4.5.1.3 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติความต้านทานต่อตัวทำละลาย (Weight loss)

ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และสมบัติความต้านทานต่อตัวทำละลายของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ท์หลังแช่ในงานในสารละลาย (น้ำ กรด เบส และกลาง) เป็นเวลา 7 วัน โดยเมื่อครบกำหนดเวลา

นำชิ้นงานไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 °C จนมีน้ำหนักคงที่ สังเกตลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังอบ และชั่งน้ำหนักเทียบกับชิ้นงานก่อนแช่

ตาราง 25 แสดงภาพถ่ายชิ้นงาน ก่อนและหลังแช่ชิ้นงานอีพ็อกซีมอร์ตาร์ในตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ พบว่าชิ้นงานทุกสูตรหลังแช่ในตัวทำละลาย และอบแห้ง ชิ้นงานมีสี และขนาดเหมือนกับชิ้นงานก่อนแช่ในตัวทำละลาย ยกเว้นสูตรที่แช่ในสารละลายกรดที่พบว่าชิ้นงานอีพ็อกซีมอร์ตาร์มีการเปลี่ยนสีจากสีน้ำตาลเป็นสีเขียว ซึ่งการเปลี่ยนสีดังกล่าวเกิดขึ้นกับชิ้นงานทุกสูตร รวมถึงชิ้นงานที่ผสมร่วมกับอีพ็อกซีทางการค้า และเมื่อนำชิ้นงานไปหาค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าชิ้นงานที่เตรียมจากอีพ็อกซีทางการค้า ส่วนใหญ่น้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ชิ้นงานที่ผสมร่วมกับ PET-COOH พบทั้งสูตรที่มีน้ำหนักของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น และสูตรที่มีน้ำหนักของชิ้นงานที่ลดลง อย่างไรก็ตามค่าที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงดังกล่าวมีค่าไม่มากนัก โดยมีค่าไม่เกิน $\pm 0.3\%$ ของน้ำหนักเดิมของชิ้นงาน จึงอาจกล่าวได้ว่าชิ้นงานอีพ็อกซีมอร์ตาร์ทุกสูตรทนต่อตัวทำละลายทั้งน้ำ สารละลายกรด เบส และเกลือ โดยชิ้นงานไม่เกิดการกร่อนของชิ้นงานแม้ว่าจะมีการดูดซึมสารละลายเข้าไปในชิ้นงาน โดยเฉพาะสารละลายเบสที่มีการดูดซึมเข้าไปในชิ้นงานสูงที่สุด ยังคงพบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักชิ้นงานใกล้เคียงกับชิ้นงานที่แช่ในสารละลายชนิดอื่น ๆ โดยพบว่าชิ้นงานมีน้ำหนักลดลงระหว่าง 0.03%–0.23% (ตาราง 26)

ตาราง 25 ภาพถ่ายชิ้นงาน ก่อน-หลัง แช่ฮีพ็อกซิมอร์ตาร์ ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของเอมีน:PET-COOH

ชนิดสารละลาย	ก่อนแช่ชิ้นงาน	หลังแช่ชิ้นงาน
H ₂ O		
H ₂ SO ₄		
NaOH		
NaCl		

ตาราง 26 ลักษณะทางกายภาพ และน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (%) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์หลังแช่ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของเอมีน:PET-COOH

ตัวอย่าง	ลักษณะทางกายภาพ (น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (%))			
	H ₂ O	H ₂ SO ₄	NaOH	NaCl
M-EA	A	C (-0.4%)	A	C (-0.03%)
M-EA-EG0.25	B (+0.04%)	C (-0.29%)	C (-0.10%)	C (-0.04%)
M-EA-EG0.50	B (+0.08%)	C (-0.22%)	C (-0.05%)	B (+0.07%)
M-EA-EG0.75	B (+0.011%)	C (-0.18%)	B (+0.09%)	B (+0.08%)
M-EA-ET0.25	B (+0.04%)	C (-0.21%)	C (-0.11%)	B (+0.01%)
M-EA-ET0.50	B (+0.10%)	C (-0.08%)	C (-0.03%)	C (-0.01%)
M-EA-ET0.75	B (+0.07%)	B (+0.02%)	B (+0.06%)	B (+0.01%)
M-EA-T0.25	B (+0.03%)	C (-0.24%)	C (-0.23%)	C (-0.03%)
M-EA-T0.50	B (+0.07%)	C (-0.20%)	C (-0.16%)	B (+0.01%)
M-EA-T0.75	B (+0.09%)	C (-0.29%)	C (-0.11%)	B (+0.01%)

หมายเหตุ A = ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

B = เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยขึ้นงานมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น (+)

C = เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยขึ้นงานมีน้ำหนักลดลง (-)

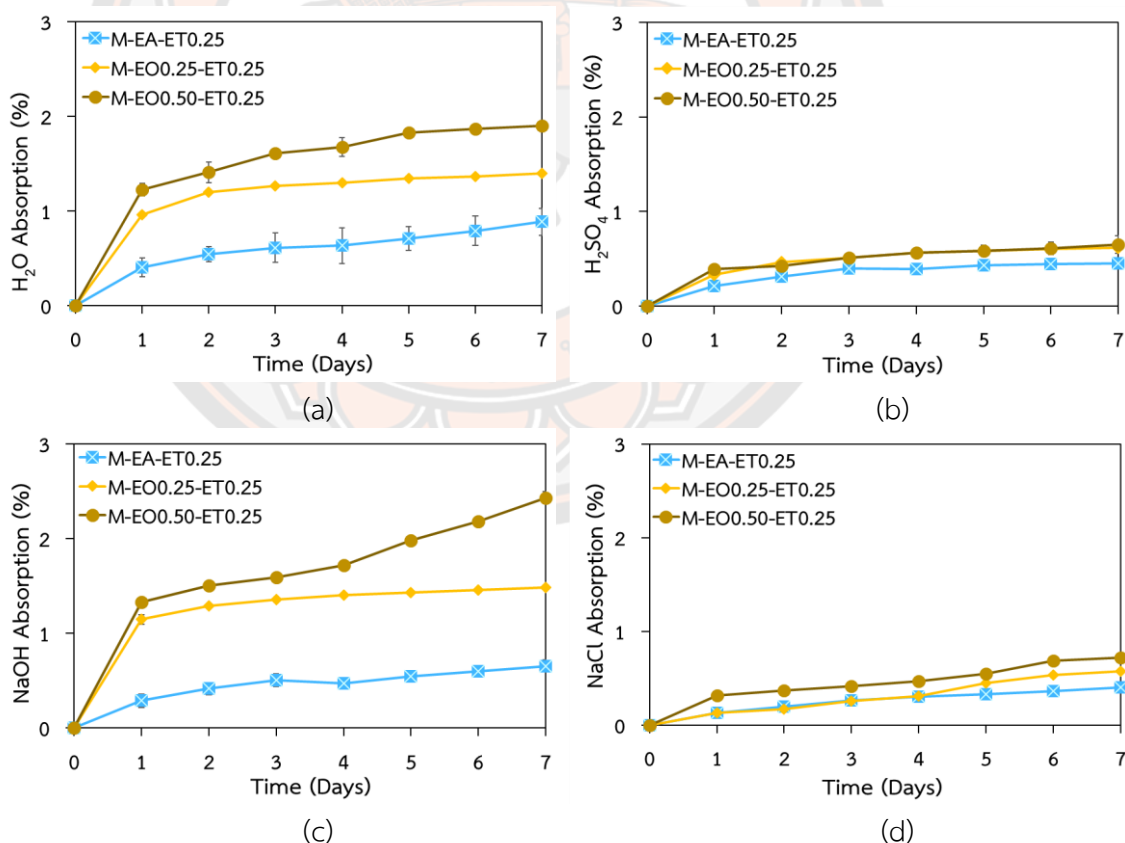
4.5.1.4 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารอีพ็อกซีร่วม (Co-epoxy oligomer)

ต่อสมบัติการดูดซึมน้ำ กรด เบส และเกลือของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์

ศึกษาผลของการใช้น้ำมันปาล์มอีพ็อกไซด์ (EPO) เป็นสารอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ร่วม (Co-epoxy oligomer) ร่วมกับอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้าในการเตรียมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ ต่อสมบัติการดูดซึมน้ำ สารละลายกรด (10% H₂SO₄) เบส (10% NaOH) และเกลือ (10% NaCl) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์:EPO เท่ากับ 2:0, 1.75:0.25

และ 1.50:0.50 ส่วนโดยน้ำหนัก หรือการใช้ EPO ในอัตราส่วน 0%, 12.5% และ 25% ตามลำดับ เมื่อใช้สารทำให้แข็งร่วม เอมีน:PET-COOH ในอัตราส่วน 0.75:0.25 โดยน้ำหนัก

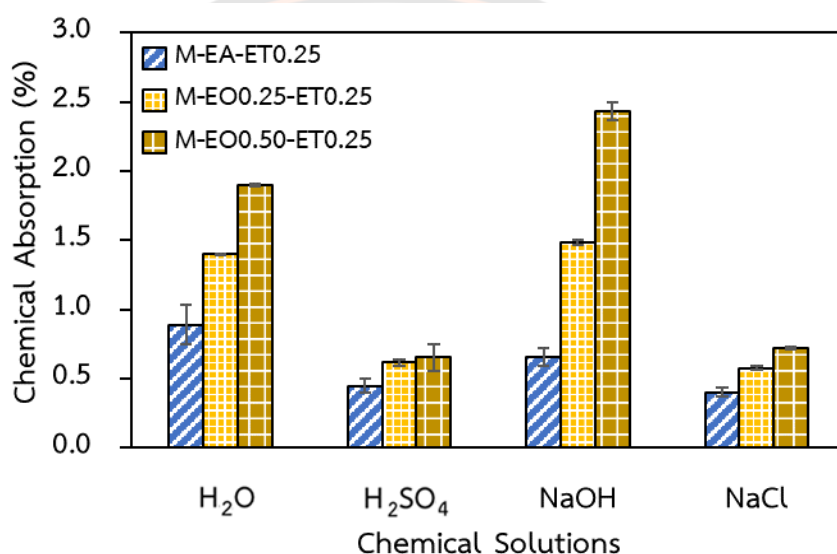
จากผลการทดลองพบว่าการผสมรวมของ EPO ซึ่งมีผลทำให้ชิ้นงานอีพ็อกซีเรซินมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางลดลง ทำให้สารละลายสามารถถูกดูดซึมเข้าไปในชิ้นงานได้เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ EPO ที่เพิ่มขึ้น โดยสารละลายทั้ง 4 ชนิด พบพฤติกรรมการดูดซึมสารละลายที่คล้ายคลึงกัน คือมีการดูดซึมค่อนข้างเร็วใน 1-2 วันแรก จากนั้นจึงมีการดูดซึมที่ช้าลง โดยพบการดูดซึมน้ำ และสารละลายเบสของชิ้นงานที่สูงใกล้เคียงกัน โดยมีค่าการดูดซึมเพิ่มขึ้นประมาณ 60%-115% และ 130%-270% (เมื่อแช่ชิ้นงานในน้ำและสารละลายเบสเป็นเวลา 7 วัน) เมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่ผสม EPO รองลงไปคือการดูดซึมสารละลายเกลือ ที่พบว่าชิ้นงานมีการดูดซึมเพิ่มขึ้น 45%-80% เมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่ผสม EPO ในขณะที่ชิ้นงานแสดงสมบัติความต้านทานต่อสารละลายกรดได้ดีที่สุด โดยมีค่าการดูดซึมสารละลายกรดใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ไม่ผสม EPO โดยมีค่าการดูดซึมสารละลายกรด เพิ่มขึ้นเพียง 40%-45% เมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่ผสม EPO (ภาพ 86-74 และ ตาราง 27)



ภาพ 83 ค่าการดูดซึมสารละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) ของอีพ็อกซีเรซินที่ปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์:EPO ระยะเวลาแช่น้ำ 7 วัน

ตาราง 27 ค่าการดูดซึมสารละลาย (%) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทหลังแช่ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์: EPO

ตัวอย่าง	ค่าการดูดซึมสารละลาย (%)			
	H ₂ O	H ₂ SO ₄	NaOH	NaCl
M-EA-ET0.25	0.89	0.45	0.65	0.40
M-O0.25-ET0.25	1.40	0.62	1.48	0.58
M-O0.50-ET0.25	1.90	0.65	2.43	0.72








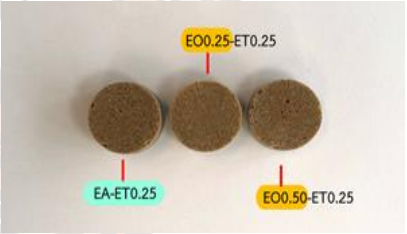

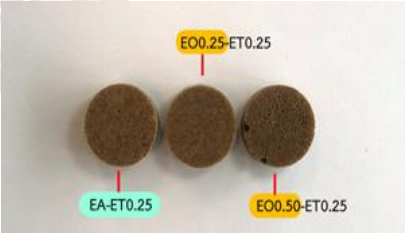
ภาพ 84 ค่าการดูดซึมสารละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ท เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์:EPO

4.5.1.5 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติความต้านทานต่อตัวทำละลาย (Weight loss)

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพ และสมบัติความต้านทานต่อตัวทำละลายของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทหลังแช่ชิ้นงานในสารละลาย (น้ำ กรด เบส และกลาง) เป็นเวลา 7 วัน โดยเมื่อครบกำหนดเวลา นำชิ้นงานไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 65°C จนมีน้ำหนักคงที่ สังเกตลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังอบ และชั่งน้ำหนักเทียบกับชิ้นงานก่อนแช่ พบว่าการผสมร่วมของ EPO ไม่ส่งผลต่อการคงสภาพของชิ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ท (ตาราง 28) โดยชิ้นงานหลังอบยังคงมีสีคงเดิม และมีน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เตรียมจากอีพ็อกซีทางการค้าที่ผสมร่วมกับ PET-COOH (P-ET-PA) (ตาราง 29) ยกเว้นสูตรที่แช่ในสารละลายกรดที่ชิ้นงานหลังแช่มีการเปลี่ยนสีจากสีน้ำตาลเป็นสีเขียว จึงอาจกล่าวได้ว่าชิ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทที่ผสมร่วมกับ EPO 12.5% และ

25% ทนต่อตัวทำละลายทั้งน้ำ สารละลายกรด เบส และเกลือ โดยชิ้นงานไม่เกิดการกร่อนของชิ้นงานแม้ว่าจะมีการดูดซึมสารละลายเข้าไปในชิ้นงาน

ตาราง 28 ภาพถ่ายชิ้นงาน ก่อน-หลัง แช่อีพ็อกซีอิมอร์ตาร์ ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของอีพ็อกซีโพลิโกเมอร์:EPO

ชนิดสารละลาย	ก่อนแช่ชิ้นงาน	หลังแช่ชิ้นงาน
H ₂ O		
H ₂ SO ₄		
NaOH		
NaCl		

ตาราง 29 ลักษณะทางกายภาพ และน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (%) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรหลังแช่ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์:EPO

ตัวอย่าง	ลักษณะทางกายภาพ (น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (%))			
	H ₂ O	H ₂ SO ₄	NaOH	NaCl
M-EA-ET0.25	B (+0.04%)	C (-0.21%)	C (-0.11%)	B (+0.01%)
M-EO0.25- ET0.25	B (+0.07%)	C (-0.23%)	C (-0.13%)	B (+0.05%)
M-EO0.25- ET0.25	B (+0.08%)	C (-0.25%)	C (-0.14%)	B (+0.06%)

หมายเหตุ A = ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
B = เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยชิ้นงานมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น (+)
C = เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยชิ้นงานมีน้ำหนักลดลง (-)

4.5.2 อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร (Epoxy Modified Mortar)

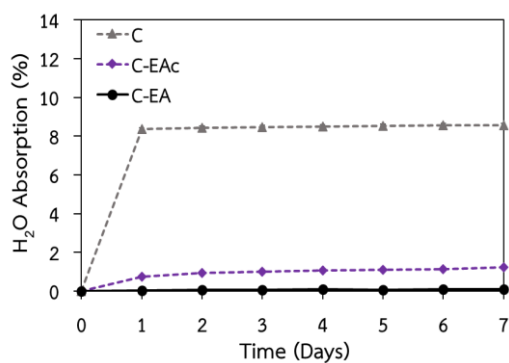
4.5.2.1 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วมต่อสมบัติการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร

ศึกษาผลของชนิดของซีเมนต์และทรายต่อสมบัติการดูดซึมน้ำของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร หรืออีพ็อกซีซีเมนต์ โดยในงานวิจัยนี้ได้เตรียมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร โดยใช้ปูนซีเมนต์และทรายที่ขายทั่วไปในท้องตลาด คือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ยี่ห้อ ราชสีห์ และทรายขนาด 1.18–2.36 mm (C-EA) เทียบกับปูนซีเมนต์เกรดทนความชื้นที่ผสมแบบสำเร็จร่วมกับทรายของบริษัทริชเทค (C-EAc) และชิ้นงานซีเมนต์ที่ไม่ผสมอีพ็อกซี (C) ที่เตรียมจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ยี่ห้อ ราชสีห์ และทรายขนาด 1.18–2.36 mm

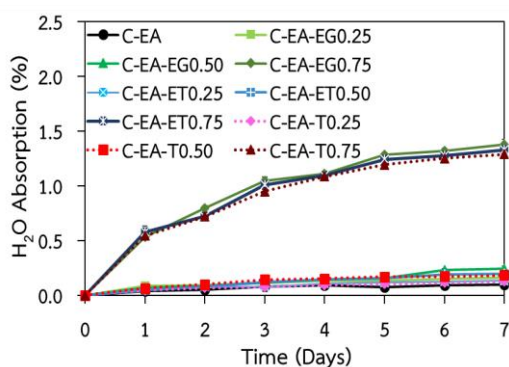
จากผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของซีเมนต์ที่ไม่ผสมอีพ็อกซี (C) อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรในงานวิจัยนี้ (C-EA) และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรที่ใช้ปูนและทรายของบริษัทริชเทค (C-EAc) พบว่าหลังการแช่ชิ้นงานทั้ง 3 สูตรในน้ำเป็นเวลา 7 วัน (ภาพ 88 (a)) ชิ้นงานซีเมนต์ที่ไม่ผสมอีพ็อกซี (C) มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีค่าอิมตัวหลังการแช่น้ำ 1 วัน โดยมีค่าการดูดซึมน้ำ 8.37% และมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อแช่น้ำเป็นเวลาต่าง ๆ กัน การผสมซีเมนต์ (C) ร่วมกับอีพ็อกซี (C-EA) ช่วยให้ซีเมนต์ดูดซึมน้ำน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยชิ้นงาน C-EA มีค่าการดูดซึมน้ำเพียง 0.1% เมื่อแช่ชิ้นงานในน้ำเป็นเวลา 7 วัน และมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานอีพ็อกซีซีเมนต์ของบริษัทริชเทค (C-EAc) ที่มีค่าการดูดซึมน้ำ 1.23% ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวอาจเนื่องมาจากขนาดของทรายและซีเมนต์ที่เลือกใช้ที่มีความแตกต่างกัน (ภาพ 88 (a) และ ตาราง 30) นำสูตรอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร (C-EA) มาศึกษาผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH มีโครงสร้างแตกต่างกันทั้ง 3 ชนิด คือ P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA โดย

ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ เอมีน:PET-COOH เท่ากับ 1.5:0, 1.25:0.25, 1:0.50 และ 0.75:0.75 ส่วน โดยน้ำหนัก หรือการใช้สารทำให้แข็งร่วม PET-COOH ในอัตราส่วน 0%, 16.7%, 33.3% และ 50% ตามลำดับ พบว่าการผสมรวมของ PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด ในอัตราส่วน 16.7% และ 33.3% ให้ ชิ้นงานที่มีการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกันและมีค่าไม่แตกต่างกับการใช้สารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว มากนัก โดยมีค่าการดูดซึมน้ำประมาณ 0.13-0.16% และ 0.18-0.2% ตามลำดับ

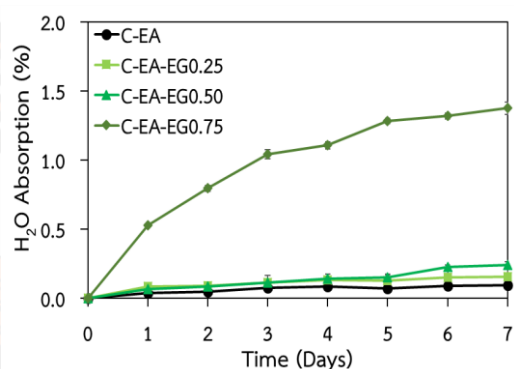
อย่างไรก็ตามการผสม PET-COOH ทั้ง 3 ชนิดในอัตราส่วนที่มากเกินไป (50%) พบ การเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของการดูดซึมน้ำ โดยมีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามเวลาในการแช่น้ำที่เพิ่มขึ้น โดย P-T-PA ซึ่งมี -COOH 4 หมู่ มีค่าการดูดซึมน้ำหลังแช่น้ำเป็นเวลา 7 วัน ต่ำที่สุด คือ 1.29% รองลงไปคือ P-ET-PA ซึ่งมี -COOH 3 หมู่ และ P-EG-PA ซึ่งมี -COOH 2-3 หมู่ โดยมีค่าการดูดซึมน้ำ 1.33% และ 1.38% ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแหที่ลดลง ตามอัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้น รวมถึงการคลายตัวของโครงสร้างร่างแห (Loose linkage) ที่เกิดจากความยาวของโซ่ของ PET-COOH ที่มากกว่าสารทำให้แข็งเอมีน [1, 53] ส่งผลให้น้ำ สามารถแทรกผ่านเข้าไปในโครงสร้างได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามค่าการดูดซึมน้ำดังกล่าวยังคงมีค่าต่ำกว่า ซิเมนต์ที่ไม่ผสมอีพอกซีที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงถึง 8.37%



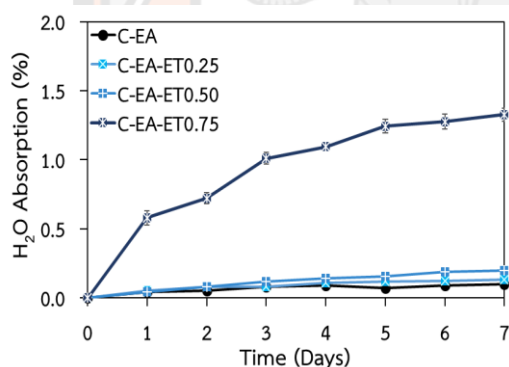
(a)



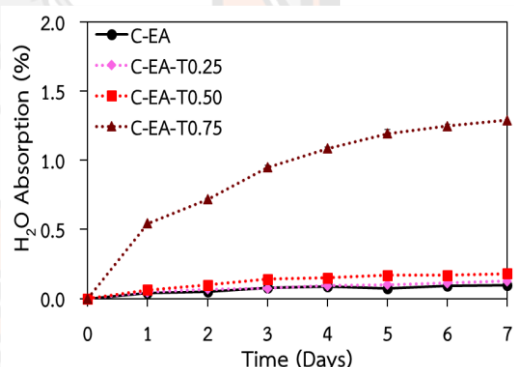
(b)



(c)



(d)



(e)

ภาพ 85 ค่าการดูดซึมน้ำของ (a) ซีเมนต์ (C) และอีพ็อกซีโมรตาร์ทัดแปรทางการค้า (C-EAc และ C-EA) และอีพ็อกซีโมรตาร์ทัดแปร เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ (b) PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA) (c) P-EG-PA (d) P-ET-PA และ (e) P-T-PA

4.5.2.2 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วมต่อสมบัติการดูดซึมน้ำของสารละลายกรด เบส และเกลือของอีพ็อกซีเมอร์ดัดแปร

ศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำของสารละลายกรด เบส และเกลือของชิ้นงานซีเมนต์ที่ไม่ผสมอีพ็อกซี (C) ชิ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ดัดแปร หรืออีพ็อกซีซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (C-EA) และอีพ็อกซีซีเมนต์ที่เตรียมโดยใช้ปูนและทรายบริษัทริชเทค (C-EAC) พบว่าชิ้นงาน C มีค่าการดูดซึมน้ำของสารละลายกรดประมาณ 3.6% ในวันที่ 1 จากนั้นจึงมีค่าลดลง และมีค่าลดลงมากกว่า 40% เมื่อแช่ชิ้นงาน C ในสารละลายกรดเป็นเวลา 7 วัน (ภาพ 89 (a) และตาราง 30) ซึ่งค่าที่ลดลงดังกล่าวเกิดจากการกัดกร่อนของซีเมนต์ในสถานะที่แช่ในสารละลายกรด จึงทำให้ไม่สามารถวัดค่าการดูดซึมน้ำของสารละลายได้ จึงอาจกล่าวได้ว่าชิ้นงานซีเมนต์ไม่ทนต่อตัวทำละลายที่มีความเป็นกรด ในขณะที่ชิ้นงานซีเมนต์ที่ผสมอีพ็อกซีทั้ง 2 สูตร ทั้งสูตรที่ใช้ซีเมนต์ C ผสมร่วมกับอีพ็อกซี (C-EA) และซีเมนต์ชนิดพิเศษของบริษัทริชเทค (C-EAC) ไม่พบการกร่อนตัวของซีเมนต์ โดยเมื่อแช่ชิ้นงานในสารละลายกรดเป็นเวลา 7 วัน ชิ้นงาน C-EA มีการดูดซึมน้ำของสารละลายกรดเพียง 1.1% ในขณะที่ชิ้นงาน C-EAC มีการดูดซึมน้ำของสารละลายกรด 4.0% ซึ่งค่าที่แตกต่างกันดังกล่าวอาจเนื่องมาจากชนิดของซีเมนต์และขนาดของทรายที่แตกต่างกันในอีพ็อกซีซีเมนต์ทั้ง 2 ชนิด โดยซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นปูนปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ใช้สำหรับงานก่อสร้างที่ต้องการรับแรงกำลังอัดสูง และทรายที่ใช้มีขนาดที่ใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับทรายที่เลือกใช้ของบริษัทริชเทค

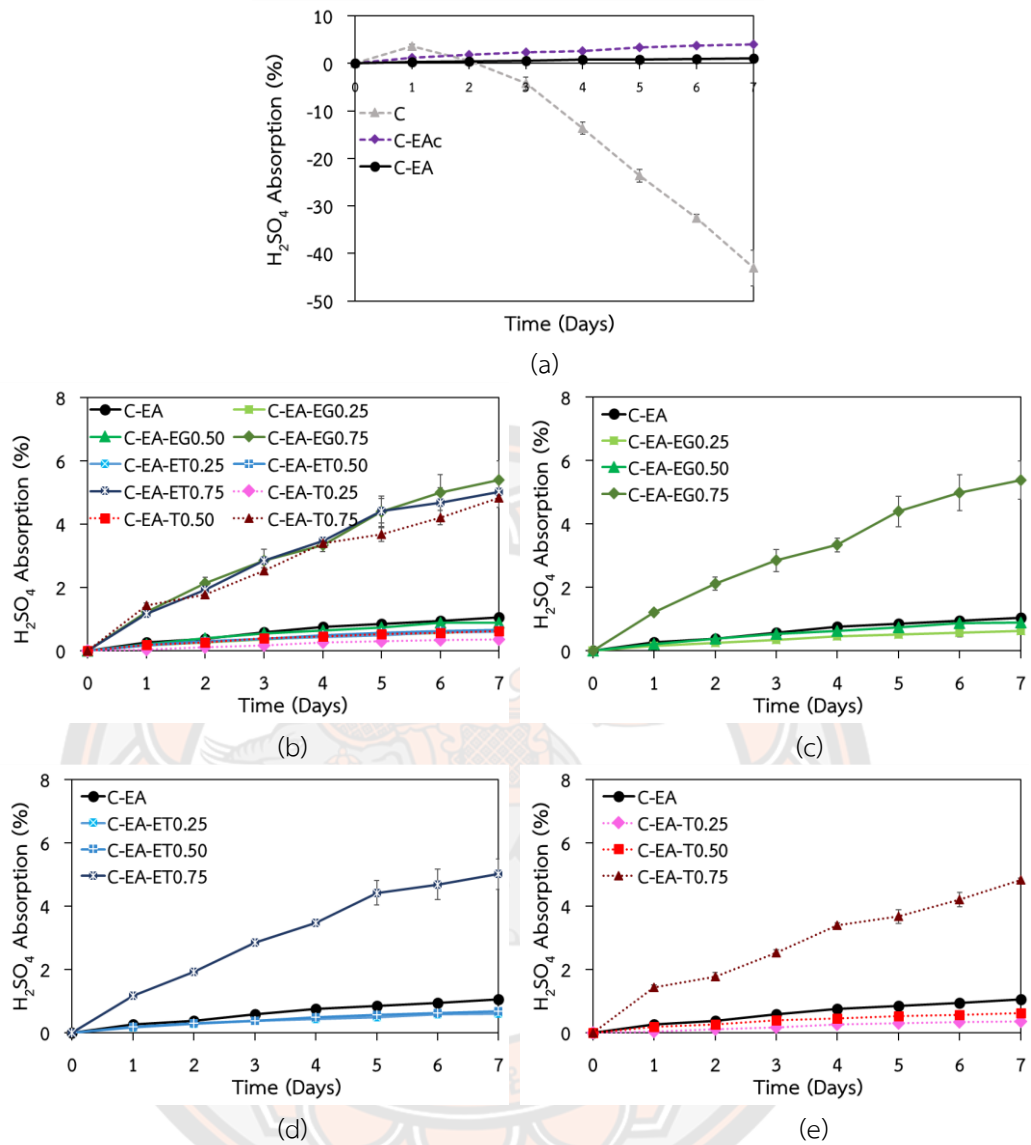
ในขณะที่พิจารณาการดูดซึมน้ำของสารละลายเบสและเกลือของ C, C-EA และ C-EAC พบว่าให้ผลไปในทำนองเดียวกัน คือชิ้นงาน C มีการดูดซึมน้ำของสารละลายเบสและเกลือสูงที่สุด โดยมีการดูดซึมน้ำของสารละลายเบสและเกลือ หลังแช่ชิ้นงานเป็นเวลา 7 วัน ประมาณ 9.5% และ 9.2% ตามลำดับ การผสมร่วมกับอีพ็อกซีช่วยให้ชิ้นงานซีเมนต์ (C-EA และ C-EAC) ด้านทานการดูดซึมน้ำของสารละลายเบสและเกลือได้ดีขึ้น โดยมีค่าการดูดซึมน้ำของสารละลายเบสและเกลือเพียง 0.5%-2% และ 0.1%-1% ตามลำดับ (ภาพ 90 (a) ภาพ 91 (a) และ ตาราง 30) จึงอาจกล่าวได้ว่าอีพ็อกซีเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่ช่วยให้ซีเมนต์ทนต่อการกัดกร่อนของสารละลายกรด และลดการดูดซึมน้ำของสารละลายประเภทต่าง ๆ ได้อย่างมีนัยสำคัญ

ศึกษาผลของชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีจำนวนหมู่ปลายเป็นหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (เพ็ดแอซิด, PET-COOH) ที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA ต่อสมบัติการดูดซึมน้ำของสารละลายกรด (10% H₂SO₄) เบส (10% NaOH) และเกลือ (10% NaCl) ของอีพ็อกซีเมอร์ดัดแปร โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ เอมีน:PET-COOH เท่ากับ 1.5:0, 1.25:0.25, 1:0.50 และ 0.75:0.75 ส่วนโดยน้ำหนัก หรือการใช้สารทำให้แข็งร่วม PET-COOH ในอัตราส่วน 0%, 16.7%, 33.3% และ 50% ตามลำดับ

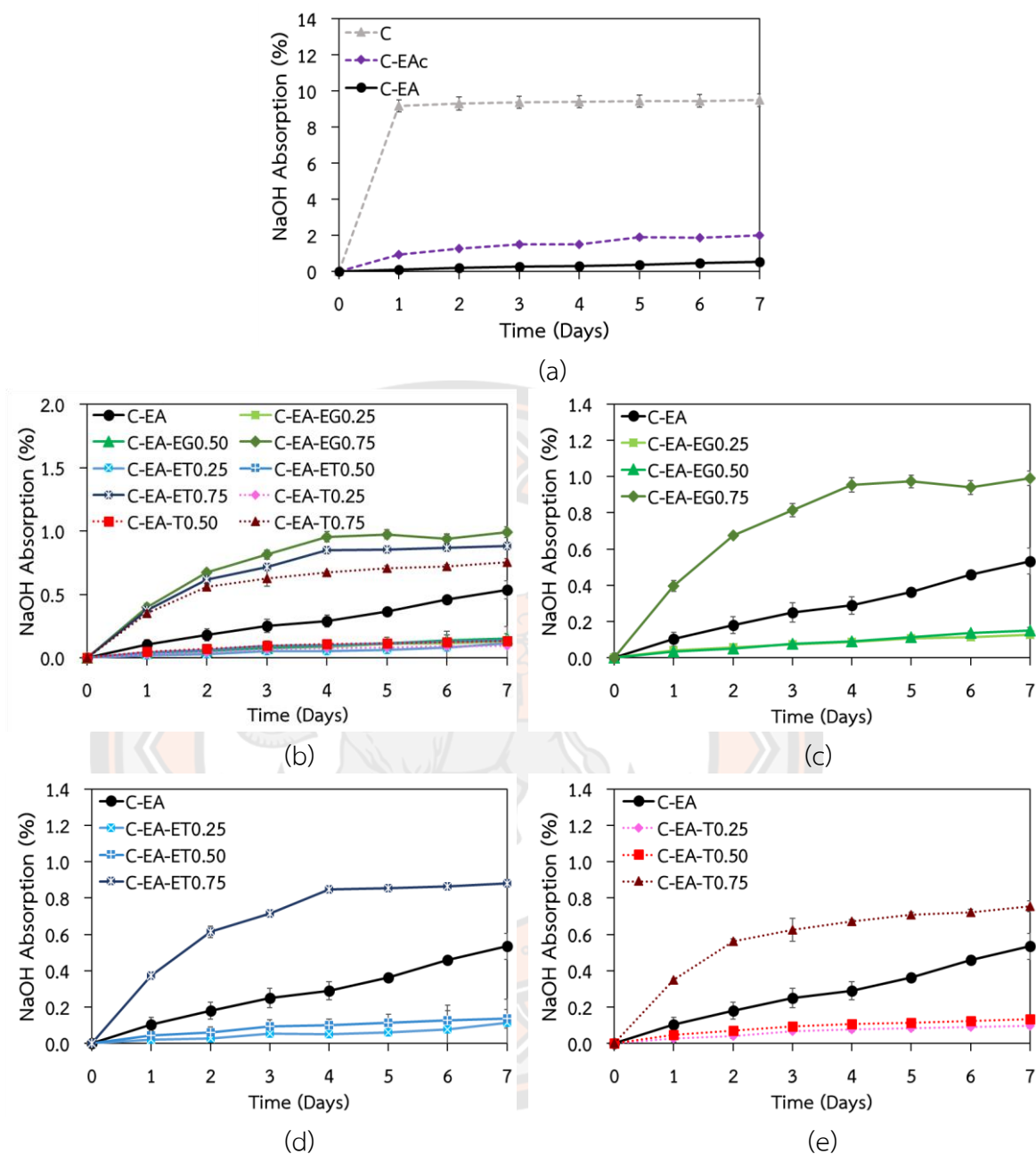
จากผลการศึกษาพบว่าพฤติกรรมของการดูดซึมน้ำของสารละลายกรด เบส และเกลือของการผสมร่วมกับ PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด เป็นไปในทำนองเดียวกัน คือการผสมร่วมกับ PET-COOH ทั้ง 3 ชนิดในอัตราส่วน 16.7% และ 33.3% ช่วยให้ชิ้นงานด้านทานการซึมผ่านสารละลายกรด เบส และเกลือเข้าไปในชิ้นงานได้ดีกว่าการใช้เอมีนเป็นสารทำให้แข็งเพียงอย่างเดียว ซึ่งผลดังกล่าวอาจมาจากการทนต่อสารเคมีที่ดีของ PET [53] อย่างไรก็ตามการผสมร่วมของ PET-COOH ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น (50%) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่ลดลง ส่งผลให้สารละลายกรด เบส และเกลือสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในชิ้นงานได้มากขึ้น [51]

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจำนวนหมู่ฟังก์ชันของ PET-COOH ก็พบว่าให้ผลไปในทำนองเดียวกันกับการทดสอบในหัวข้ออื่น ๆ ที่พบว่าการผสมร่วมกับ PET-COOH ชนิดที่มี -COOH 4 หมู่ (P-T-PA) ในอัตราส่วน 25% ซึ่งมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางมากที่สุด มีค่าการดูดซึ่มสารละลายทั้งสารละลายกรด เบส และเกลือต่ำที่สุด โดยมีค่าการดูดซึ่มหลังแช่ชิ้นงานในสารละลายเป็นเวลา 7 วัน ประมาณ 0.36%, 0.10% และ 0.06% รองลงไปที่การผสมร่วมกับ PET-COOH ชนิดที่มี -COOH 3 หมู่ (P-ET-PA) ในอัตราส่วน 25% โดยมีค่าการดูดซึ่ม 0.60%, 0.11% และ 0.08% และ PET-COOH ชนิดที่มี -COOH 2 หมู่ (P-EG-PA) ในอัตราส่วน 25% โดยมีค่าการดูดซึ่ม 0.63%, 0.13% และ 0.08% ตามลำดับ (ภาพ 89-91 และตาราง 30) [1, 53]

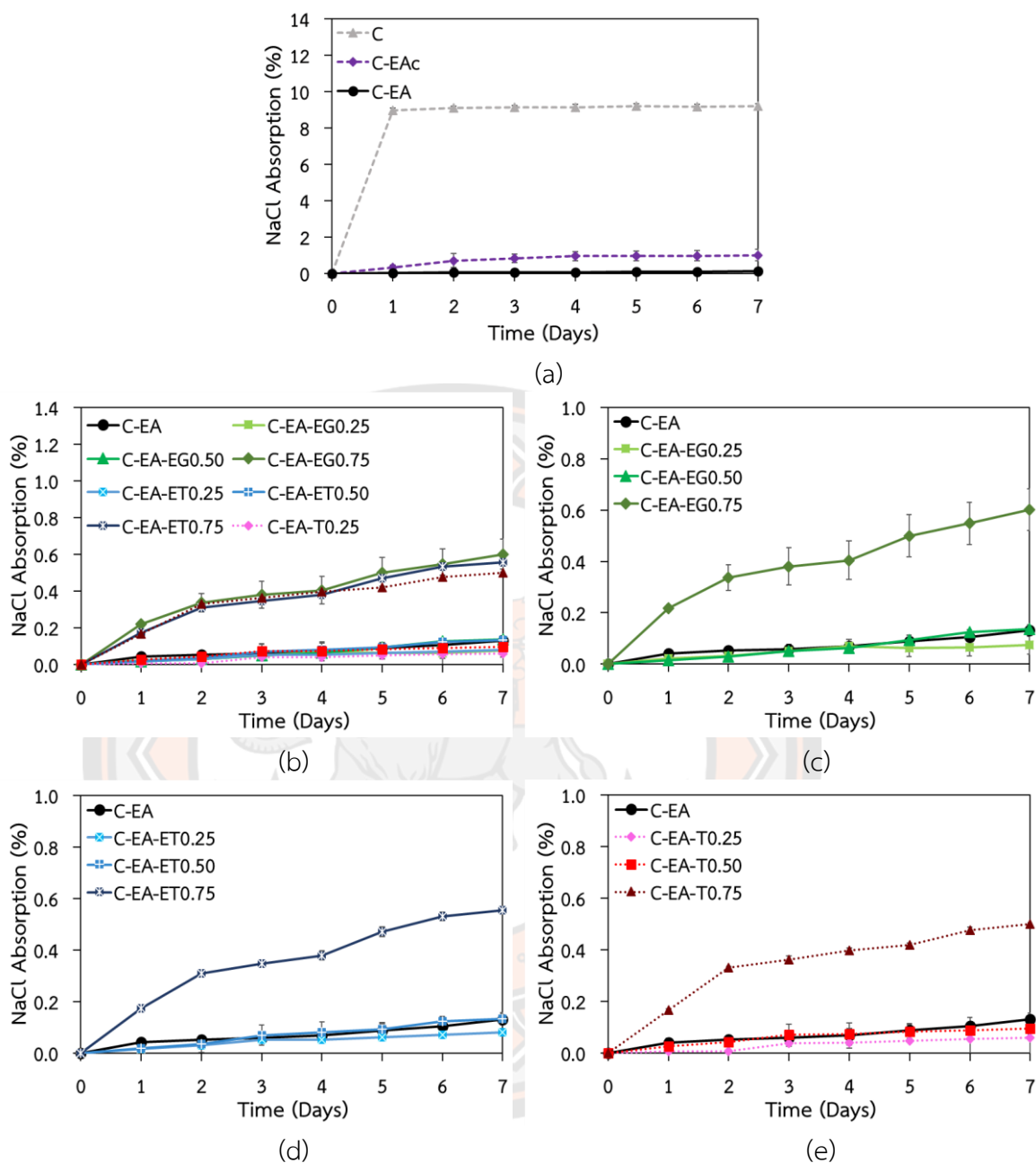
ภาพ 92 แสดงข้อมูลโดยสรุปของการดูดซึ่มสารละลายของซีเมนต์ (C) และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรสูตรต่าง ๆ พบว่าการผสมอีพ็อกซีช่วยให้ซีเมนต์ทนต่อการดูดซึ่มสารละลายทั้งน้ำกรด เบส และเกลือได้ดี โดยมีค่าการดูดซึ่มลดลงมากกว่า 90% เมื่อเทียบกับชิ้นงานซีเมนต์ที่ไม่ผสมอีพ็อกซี การใช้ PET-COOH เป็นสารทำให้แข็งร่วมในอัตราส่วน 16.7% แม้ว่าจะมีโครงสร้างร่างแหที่หนาแน่นกว่าการใช้เอมีนเป็นสารทำให้แข็งเพียงอย่างเดียว แต่โครงสร้างของ PET-COOH ที่มีขนาดใหญ่กว่าทำให้ได้โครงสร้างร่างแหที่หลวมกว่า (Loose linkage) ส่งผลให้น้ำสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในชิ้นงานได้มากกว่าชิ้นงานที่ใช้เอมีนเป็นสารเชื่อมขวางเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามโครงสร้างอะโรมาติกของ PET พบว่าน่าจะมีส่วนช่วยให้อีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรมีการดูดซึ่มของสารละลายกรด เบส และเกลือต่ำกว่าอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่ใช้เอมีนเป็นสารเชื่อมขวางเพียงอย่างเดียว โดยมีค่าการดูดซึ่มลดลง 20-80% (ขึ้นกับชนิดของสารละลาย ชนิด และอัตราส่วนของ PET-COOH) แต่ทั้งนี้การผสมร่วมของ PET-COOH ที่มากเกินไป (50%) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการลดลงอย่างมีนัยสำคัญต่อความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง ทำให้การดูดซึ่มสารละลายโดยเฉพาะสารละลายกรดเพิ่มขึ้นมากกว่า 7-8 เท่า เมื่อเทียบกับการผสมร่วมกับ PET-COOH ในอัตราส่วนที่เหมาะสม (16.7%-33.3%)



ภาพ 86 ค่าการดูดซึมสารละลายกรด ($10\% H_2SO_4$) ของ (a) ซีเมนต์ (C) และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรทางการค้า (C-EAc และ C-EA) และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของ (b) PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA) (c) P-EG-PA (d) P-ET-PA และ (e) P-T-PA



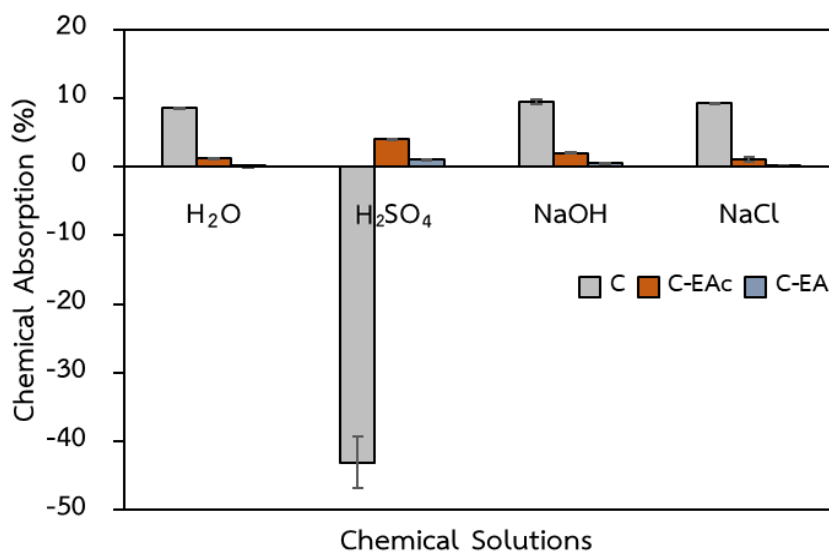
ภาพ 87 ค่าการดูดซึมสารละลายเบส (10% NaOH) ของ (a) ซีเมนต์ (C) และอีพ็อกซีโมรต์าร์ดัดแปรทางการค้า (C-EAc และ C-EA) และอีพ็อกซีโมรต์าร์ดัดแปร เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของ (b) PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA) (c) P-EG-PA (d) P-ET-PA และ (e) P-T-PA



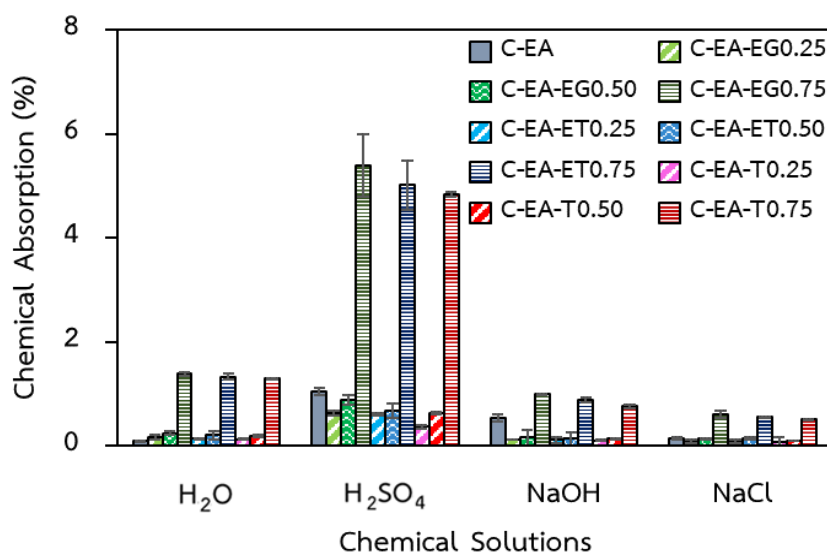
ภาพ 88 ค่าการดูดซึมสารละลายเกลือ (10% NaCl) ของ (a) ซีเมนต์ (C) และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรทางการค้า (C-EAc และ C-EA) และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร เมื่อปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของ (b) PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA) (c) P-EG-PA (d) P-ET-PA และ (e) P-T-PA

ตาราง 30 ค่าการดูดซึมสารละลาย (%) ของซีเมนต์ และอีพ็อกซีโมรตาร์ดัดแปรหลังแช่ในตัวทำละลาย(น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของเอมีน:PET-COOH

ตัวอย่าง	ค่าการดูดซึมสารละลาย (%)			
	H ₂ O	H ₂ SO ₄	NaOH	NaCl
C	8.57	-43.06	9.49	9.22
C-EAc	1.23	3.97	2.01	1.01
C-EA	0.10	1.05	0.53	0.13
C-EA-EG0.25	0.16	0.63	0.13	0.08
C-EA-EG0.50	0.24	0.89	0.15	0.14
C-EA-EG0.75	1.38	5.39	0.99	0.60
C-EA-ET0.25	0.13	0.60	0.11	0.08
C-EA-ET0.50	0.20	0.67	0.14	0.13
C-EA-ET0.75	1.33	5.01	0.88	0.56
C-EA-T0.25	0.13	0.36	0.10	0.06
C-EA-T0.50	0.18	0.62	0.13	0.10
C-EA-T0.75	1.29	4.83	0.75	0.50



(a)



(b)

ภาพ 89 ค่าการดูดซึมสารละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) ของ (a) ซีเมนต์ (C) และอีพ็อกซีโมรตาร์ดัดแปรทางการค้า (C-EAc และ C-EA) และ (b) อีพ็อกซีโมรตาร์ดัดแปร เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ เอมีน:PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA)

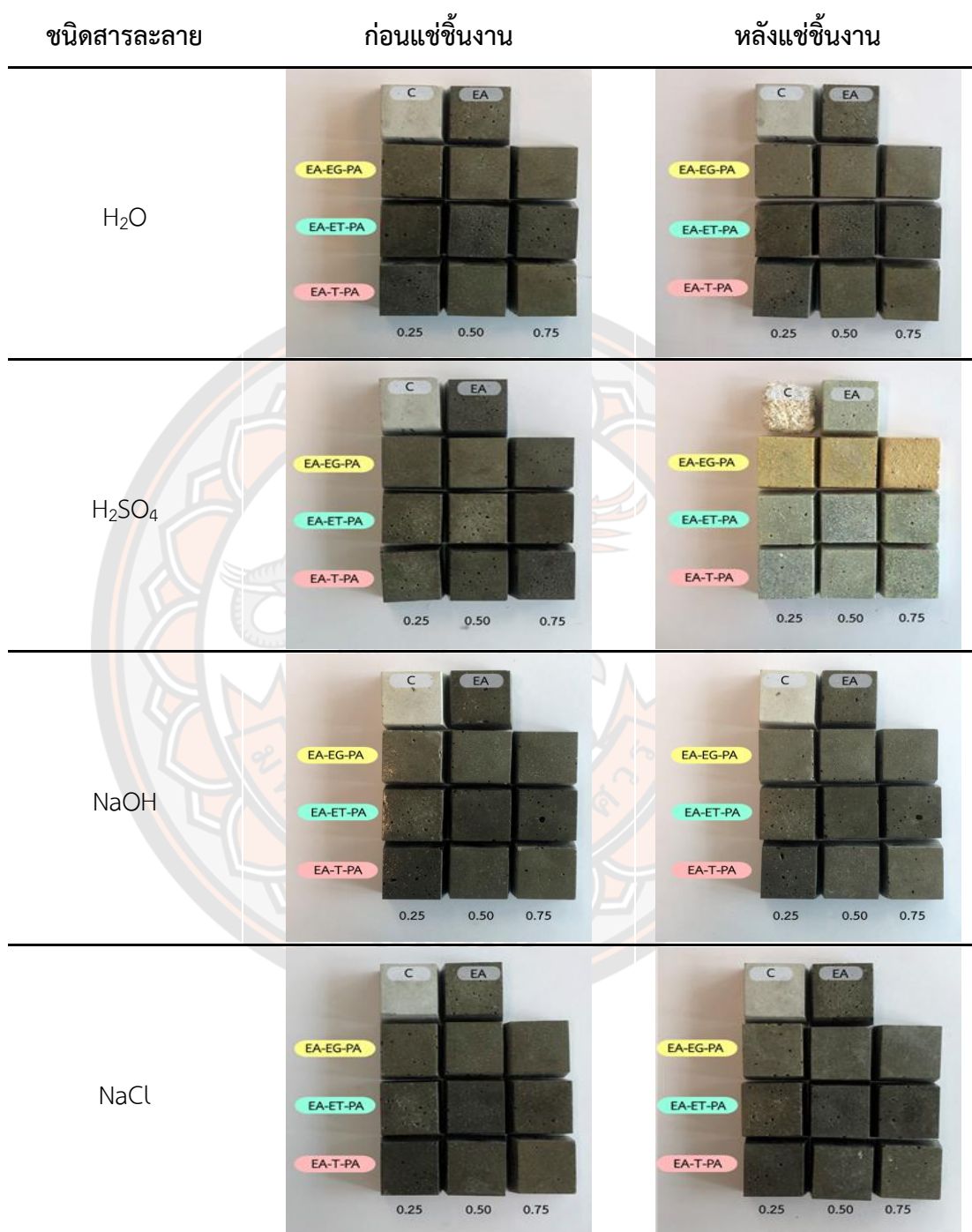
4.5.2.3 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติความต้านทานต่อตัวทำละลาย (Weight loss)

ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และสมบัติความต้านทานต่อตัวทำละลายของอีพ็อกซีเมอร์ คาร์ดิคดแปรหลังแช่ชิ้นงานในสารละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน โดยเมื่อครบกำหนดเวลา นำชิ้นงานไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 65°C จนมีน้ำหนักคงที่ สังเกตลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังอบ และชั่งน้ำหนักเทียบกับชิ้นงานก่อนแช่

ตาราง 31 แสดงภาพถ่ายชิ้นงาน ก่อนและหลังแช่ชิ้นงานซีเมนต์ (C) และอีพ็อกซีเมอร์ คาร์ดิคดแปรสูตรต่าง ๆ ในตัวทำละลายน้ำ กรด เบส และเกลือ พบว่าชิ้นงาน C ซึ่งเตรียมจากซีเมนต์: ทราย ในอัตราส่วน 1:3 ส่วนโดยน้ำหนัก เกิดการกัดกร่อนของชิ้นงานเมื่อแช่ในสารละลายกรดไปประมาณ 43% หรือประมาณ 1.7 ส่วน ซึ่งส่วนที่ถูกกัดกร่อนหายไปน่าจะเป็นทั้งในส่วนของซีเมนต์ และทรายที่ผสมอยู่ร่วมกับซีเมนต์ ในขณะที่การแช่ชิ้นงานในสารละลายน้ำ เบส และเกลือ ไม่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของซีเมนต์ และน้ำหนักของชิ้นงาน โดยชิ้นงานมีค่าน้ำหนักหลังแช่ในสารละลายเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยมีค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ประมาณ $\pm 0.4-1.8\%$ (ตาราง 32)

การผสมอีพ็อกซีร่วมกับซีเมนต์ทุกสูตรทั้งสูตรที่ใช้เอมีนเป็นสารทำให้แข็งร่วมเพียงอย่างเดียว (C-EA) และสูตรที่ใช้ PET-COOH เป็นสารทำให้แข็งร่วม ช่วยให้ชิ้นงานซีเมนต์ไม่เกิดการกร่อนตัวเมื่อแช่ในสารละลายกรด แต่ชิ้นงานหลังแช่พบว่ามียูรีนที่อ่อนลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานเริ่มต้น ในขณะที่การแช่ในตัวทำละลายน้ำ เบส และเกลือ ไม่พบความแตกต่างของลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานก่อนและหลังการแช่ในตัวทำละลาย นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักหลังแช่ในสารละลายลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงาน C โดยมีค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ประมาณ $\pm 0.07-1.5\%$ ขึ้นกับชนิดและอัตราส่วนของ PET-COOH

ตาราง 31 ภาพถ่ายชิ้นงาน ก่อน-หลัง แช่อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และ เกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของเอมีน:PET-COOH



ตาราง 32 ลักษณะทางกายภาพ และน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (%) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรหลัง
 แขนในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และ
 อัตราส่วนของเอมีน:PET-COOH

ตัวอย่าง	ลักษณะทางกายภาพ (น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (%))			
	H ₂ O	H ₂ SO ₄	NaOH	NaCl
C	B (+0.36%)	C (-43.48%)	C (-1.84%)	C (-1.51%)
C-EAc	B (+0.09%)	C (-0.26%)	B (+0.14%)	B (+0.10%)
C-EA	B (+0.07%)	C (-0.24%)	B (+0.12%)	B (+0.07%)
C-EA-EG0.25	B (+0.13%)	C (-0.13%)	B (+1.00%)	B (+0.17%)
C-EA-EG0.50	B (+0.15%)	C (-0.14%)	B (+1.30%)	B (+0.20%)
C-EA-EG0.75	B (+0.18%)	C (-0.16%)	B (+1.51%)	B (+0.22%)
C-EA-ET0.25	B (+0.13%)	C (-0.11%)	B (+0.10%)	B (+0.16%)
C-EA-ET0.50	B (+0.14%)	C (-0.13%)	B (+0.17%)	B (+0.20%)
C-EA-ET0.75	B (+0.18%)	B (+0.14%)	B (+0.26%)	B (+0.21%)
C-EA-T0.25	B (+0.12%)	C (-0.10%)	B (+0.07%)	B (+0.12%)
C-EA-T0.50	B (+0.14%)	C (-0.10%)	B (+0.15%)	B (+0.18%)
C-EA-T0.75	B (+0.16%)	C (-0.12%)	B (+0.21%)	B (+0.20%)

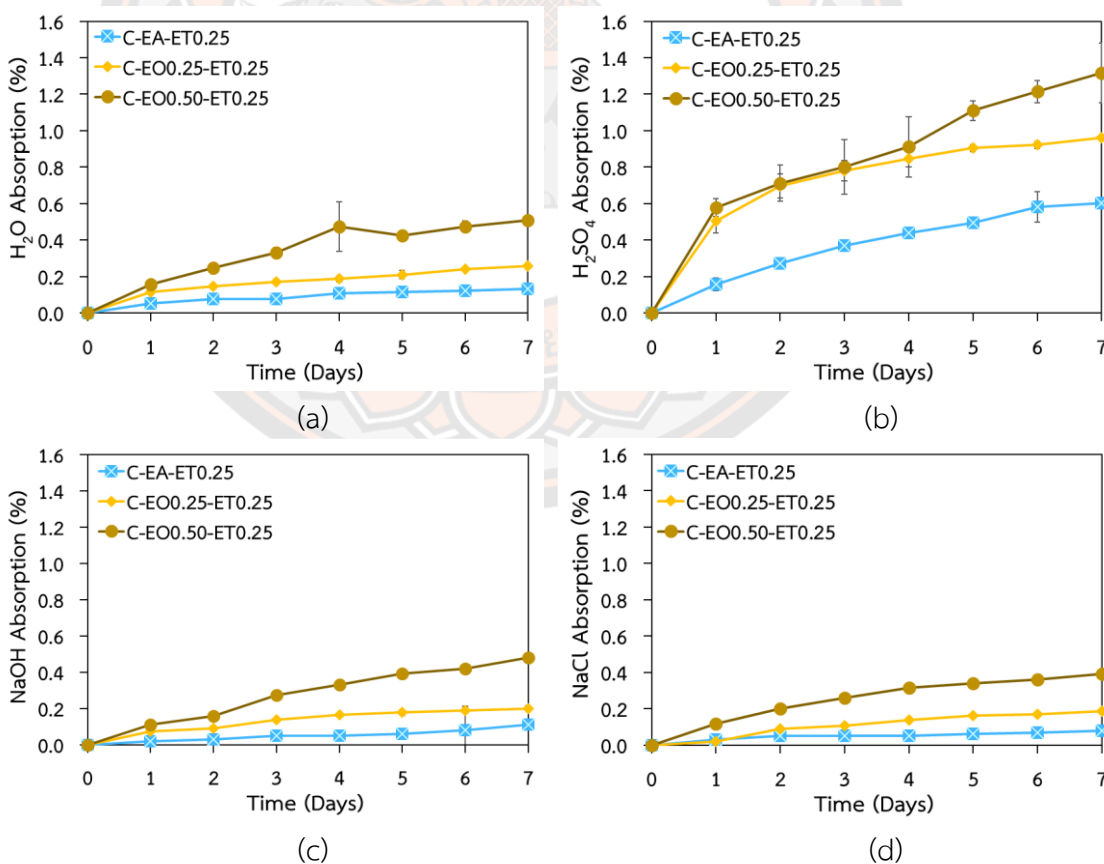
หมายเหตุ : A = ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
 B = เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยขึ้นงานมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น (+)
 C = เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยขึ้นงานมีน้ำหนักลดลง (-)

4.5.2.4 ผลของชนิดและอัตราส่วนของสารอีพ็อกซีร่วม (Co-epoxy oligomer)

ต่อสมบัติการดูดซึมน้ำ กรด เบส และเกลือของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร

ศึกษาผลของการใช้น้ำมันปาล์มอีพ็อกไซด์ (EPO) เป็นสารอีพ็อกซีโพลิโเมอร์ร่วม (Co-epoxy oligomer) ร่วมกับอีพ็อกซีโพลิโเมอร์ทางการค้าในการเตรียมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร หรืออีพ็อกซีซีเมนต์ ต่อสมบัติการดูดซึมน้ำ สารละลายกรด (10% H_2SO_4) เบส (10% NaOH) และเกลือ (10% NaCl) โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างอีพ็อกซีโพลิโเมอร์:EPO เท่ากับ 3:0, 2.75:0.25 และ 2.50:0.50 โดยน้ำหนัก หรือการใช้ EPO ในอัตราส่วน 0%, 8.3% และ 16.7% ตามลำดับ เมื่อใช้สารทำให้แข็งร่วม เอมีน: PET-COOH ในอัตราส่วน 1.25:0.25 โดยน้ำหนัก

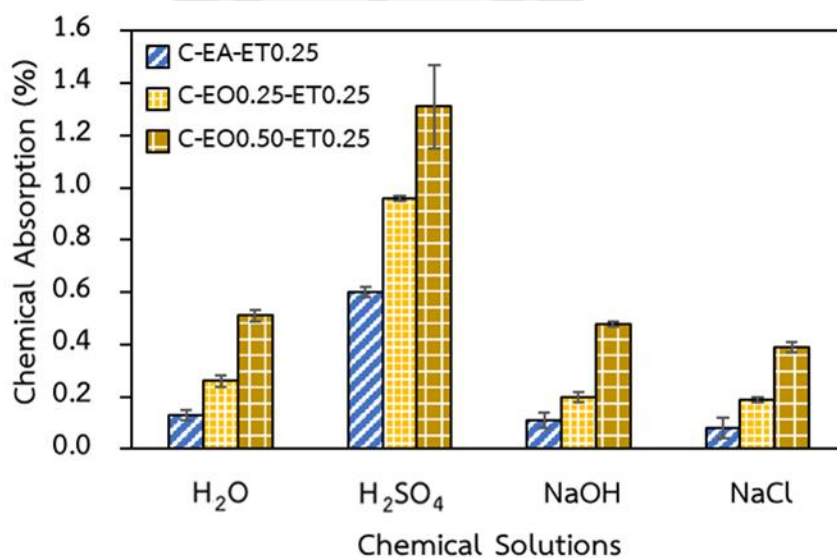
จากผลการทดลองพบว่าการผสมร่วมของ EPO ทุกอัตราส่วนขึ้นงานมีการดูดซึมสารละลายทั้ง 4 ชนิดเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ EPO ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการลดลงของโครงสร้างร่างแหของอีพ็อกซีส่งผลให้สารละลายสามารถแทรกตัวผ่านเข้าไปในชิ้นงานได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามค่าที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวยังคงมีค่าน้อยมาก โดยมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยกว่า 0.5% เมื่อแช่ในน้ำ สารละลายเบสและเกลือ และมีค่าน้อยกว่า 1.5% เมื่อแช่ในสารละลายกรด เป็นเวลา 7 วัน ตามลำดับ (ภาพ 93-94 และ ตาราง 33)



ภาพ 90 ค่าการดูดซึมสารละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของอีพ็อกซีโพลิโเมอร์:EPO ระยะเวลาแช่น้ำ 7 วัน

ตาราง 33 ค่าการดูดซึมสารละลาย (%) ของอีพ็อกซีเมอร์ดัดแปรหลังแช่ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ เอมีน:PET-COOH

ตัวอย่าง	ลักษณะทางกายภาพ (น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (%))			
	H ₂ O	H ₂ SO ₄	NaOH	NaCl
C-EA-ET0.25	0.13	0.60	0.11	0.08
C-EO0.25-ET0.25	0.26	0.96	0.20	0.19
C-EO0.50-ET0.25	0.51	1.31	0.48	0.39




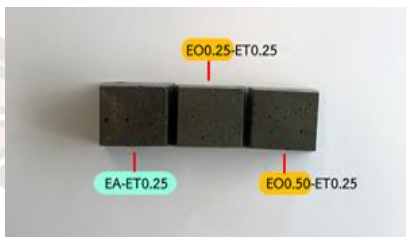



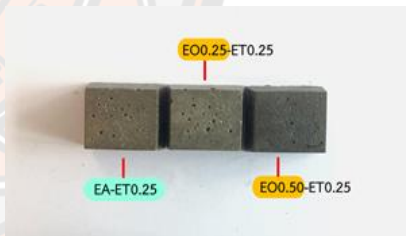

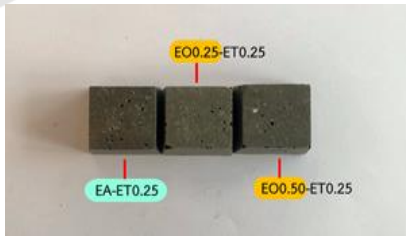
ภาพ 91 ค่าการดูดซึมสารละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) ของอีพ็อกซีเมอร์ดัดแปร เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของ เอมีน:PET-COOH (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA)

4.5.2.5 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติความต้านทานต่อตัวทำละลาย (Weight loss)

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพ และน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ดัดแปรที่มี EPO เป็นเป็นสารอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ร่วม หลังแช่ชิ้นงานในสารละลาย (น้ำ กรด เบส และกลาง) เป็นเวลา 7 วัน พบว่าชิ้นงานหลังจากแช่ในสารละลายยังคงมีลักษณะทางกายภาพเหมือนกับก่อนแช่ ยกเว้นชิ้นงานที่แช่ในสารละลายกรดที่มีสีของชิ้นงานที่อ่อนลง และเมื่อพิจารณาในส่วนของน้ำหนักที่หายไป พบว่าชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักน้อยมาก โดยมีค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปประมาณ $\pm 0.1\% - 0.2\%$ จึงอาจกล่าวได้ว่าการลดอัตราส่วนของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้า และการเพิ่ม EPO แม้ว่าจะให้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่ลดลง และส่งผลให้ชิ้นงานดูด

ซีเมนต์ละลายชนิดต่าง ๆ ได้เพิ่มขึ้น แต่เมื่อระเหยสารละลายต่าง ๆ ออกไป และทำให้ชิ้นงานแห้งตัวพบว่าชิ้นงานยังคงมีน้ำหนักใกล้เคียงกับชิ้นงานเริ่มต้น จึงอาจกล่าวได้ว่าการปรับสัดส่วนระหว่างอีพ็อกซีโพลีเอไมด์กับการค้า กับ EPO ไม่มีผลต่อการเสียสภาพหรือเกิดการกร่อนตัวของซีเมนต์ (ตาราง 34-35)

ตาราง 34 ภาพถ่ายชิ้นงาน ก่อน-หลัง แช่อีพ็อกซีอีพอกซีเรซินดัดแปร ในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของอีพ็อกซีโพลีเอไมด์:EPO

ชนิดสารละลาย	ก่อนแช่ชิ้นงาน	หลังแช่ชิ้นงาน
H ₂ O		
H ₂ SO ₄		
NaOH		
NaCl		

ตาราง 35 ลักษณะทางกายภาพ และน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (%) ของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรหลัง
 แชนในตัวทำละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) เป็นเวลา 7 วัน เมื่อปรับเปลี่ยนชนิด และ
 อัตราส่วนของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์:EPO

ตัวอย่าง	ลักษณะทางกายภาพ (น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (%))			
	H ₂ O	H ₂ SO ₄	NaOH	NaCl
C-EA-ET0.25	B (+0.13%)	C (-0.11%)	B (+0.10%)	B (+0.16%)
C-EO0.25-ET0.25	B (+0.14%)	C (-0.12%)	B (+0.11%)	B (+0.18%)
C-EO0.50-ET0.25	B (+0.15%)	C (-0.14%)	B (+0.12%)	B (+0.19%)

4.6 ระยะเวลาการก่อตัวของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร

ศึกษาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร โดยการหาระยะเวลาการก่อตัว (Setting time) ด้วยเข็มแบบไวแคต ค่าที่ได้รับจะบ่งบอกถึงระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) คือ เวลาที่ยังสามารถผสม เท อัด และแต่งผิวของซีเมนต์/อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรได้ (Limit of Handing) และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) คือระยะเวลาที่อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรเริ่มเข้าสู่สภาพการแข็งตัว และเริ่มพัฒนากำลังอัด (Beginning of Mechanical Strength) การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวจึงเป็นสมบัติที่สำคัญในด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้าง เพราะช่วยให้สามารถวางแผนการทำงานได้ถูกต้อง

4.6.1 ผลของซีเมนต์ ททราย และอีพ็อกซีพอลิเมอร์ต่อสมบัติระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร

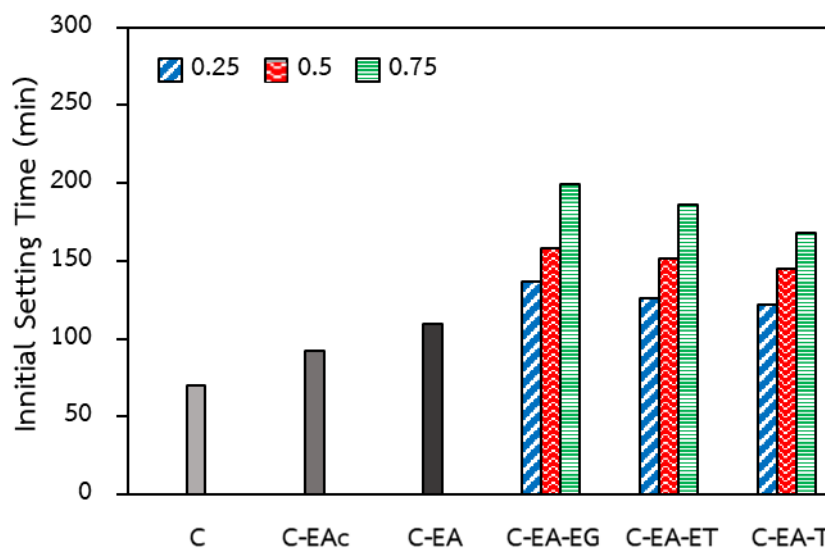
ศึกษาสมบัติระยะเวลาการก่อตัวของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร หรืออีพ็อกซีซีเมนต์ (C-EA) เทียบกับสมบัติการก่อตัวของซีเมนต์ (C) โดยซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ยี่ห้อ ราชสีห์ และทรายขนาด 1.18–2.36 mm ในขณะที่ในส่วนของอีพ็อกซีเป็นการทำปฏิกิริยาร่วมระหว่างอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้า และสารทำให้แข็งเอมีนทางการค้า จากผลการทดลองพบว่าซีเมนต์ (C) มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น 70 นาที และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย 135 นาที หรือมีระยะเวลาห่าง ประมาณ 65 นาที จากระยะการก่อตัวเริ่มต้น การผสมร่วมกับอีพ็อกซีพอลิเมอร์ช่วยให้ซีเมนต์สามารถเท อัด และแต่งผิวได้นานขึ้น (ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น 110 นาที) แต่มีความเร็วในการแข็งตัวเร็วขึ้น โดยมีระยะเวลาห่างจากระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น ประมาณ 25 นาที ทำให้ขึ้นงานยังคงมีเวลารวมในการแข็งตัวเท่าเดิม (ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย 135 นาที)

อย่างไรก็ตามเวลาการก่อตัวของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรยังขึ้นกับชนิดของซีเมนต์และขนาดของทราย โดยเมื่อคงชนิด และอัตราส่วนของอีพ็อกซีพอลิเมอร์ แต่เปลี่ยนมาใช้ซีเมนต์และทรายของ

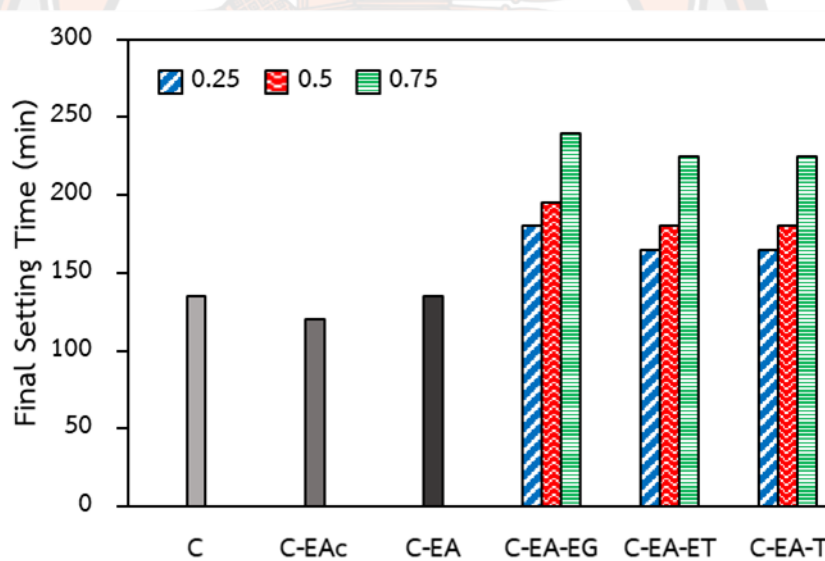
บริษัท ริชเทค (C-EAc) พบว่าชิ้นงานมีเวลาการก่อตัวที่เร็วกว่าซีเมนต์และทรายที่เลือกใช้ใน งานวิจัยนี้ โดยมีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น 92 นาที และมีระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย 120 นาที ทั้งนี้แม้ว่า C-EAc จะใช้เวลาในการก่อตัวเร็วกว่า C-EA แต่ทั้ง 2 สูตร พบว่ามีระยะเวลาการก่อตัว เริ่มต้นนานกว่าสูตรซีเมนต์ที่ไม่ผสมร่วมกับอีพ็อกซี แต่มีระยะเวลาในการแข็งตัวที่เร็วกว่า จึงอาจ กล่าวได้ว่าอีพ็อกซีก่อนการเกิดปฏิกิริยา และช่วงต้นของการเกิดปฏิกิริยา มีส่วนในการหน่วง ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์ แต่เมื่อเกิดปฏิกิริยาไประยะเวลาหนึ่ง การเกิดการเชื่อมขวาง ของอีพ็อกซีพอลิเมอร์จะเร่งการแข็งตัวของซีเมนต์

การผสมรวมของสารทำให้แข็งร่วม PET-COOH ทั้ง 3 ชนิด (P-EG-PA, P-ET-PA และ P-T-PA) ในอัตราส่วน 0%, 16.7%, 33.3% และ 50% พบว่ามีผลไปในทำนองเดียวกัน คือระยะเวลา การก่อตัวเริ่มต้น และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายเพิ่มขึ้น ตามอัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในการผสมมีตัวทำละลายน้ำซึ่งใช้ในการละลายซีเมนต์ และแม้ว่าในการทดลอง จะมีการเปลี่ยน PET-COOH ให้เป็น PET-COO⁻Na⁺ เพื่อช่วยให้ละลายได้น้ำได้เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณ ของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้นอาจมีข้อจำกัดเรื่องความเข้ากันได้ของระบบ ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาการ พอลิเมอไรเซชันของอีพ็อกซีพอลิเมอร์ที่ช้าลง จึงส่งผลให้เวลาในการก่อตัวของซีเมนต์เพิ่มขึ้นตาม อัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้น โดยมีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และระยะเวลาการก่อตัว สุดท้ายเพิ่มขึ้นประมาณ 1.2-1.8 เท่าของระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย ของอีพ็อกซีสูตรดัดแปรสูตรที่ใช้สารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว (C-EA) ขึ้นกับชนิดและ อัตราส่วนของ PET-COOH

นอกจากนี้ยังพบว่าซีเมนต์ที่ผสม PET-COOH ที่มี -COOH 4 หมู่ (C-EA-T) มีระยะเวลาการ ก่อตัวเริ่มต้นเร็วที่สุด รองลงไปคือซีเมนต์ที่ผสม PET-COOH ที่มี -COOH 3 หมู่ (C-EA-ET) และ ซีเมนต์ที่ผสม PET-COOH ที่มี -COOH 2-3 หมู่ (C-EA-EG) ตามลำดับ ในขณะที่ระยะเวลาการก่อตัว สุดท้ายซีเมนต์ที่ผสม PET-COOH ที่มี -COOH 4 หมู่ (C-EA-T) และ -COOH 3 หมู่ (C-EA-ET) มี ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายใกล้เคียงกัน และมีระยะเวลาที่สั้นกว่าซีเมนต์ที่ผสม PET-COOH ที่มี -COOH 2-3 หมู่ (C-EA-EG) ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวน่าจะมาจากความเร็วในการเกิดการเชื่อมขวาง ที่พบว่า PET-COOH ที่มี -COOH 4 หมู่ และ 3 หมู่ นอกจากจะมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่ มากกว่าแล้ว ความเร็วในการเกิดการเชื่อมขวางยังเร็วกว่า PET-COOH ที่มี -COOH 2-3 หมู่ ซึ่งความ หนืดของการผสมเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาร่างแหของอีพ็อกซีที่เพิ่มขึ้น จะช่วยเพิ่มการแข็งตัวของ ซีเมนต์ให้เร็วขึ้น [54] ดังนั้นจึงพบว่าเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามจำนวนหมู่ฟังก์ชันของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้น (ภาพ 95-96 และ ตาราง 36)



ภาพ 92 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์ และอีพ็อกซีเรซินอัตราตัดแปรสูตรต่าง ๆ ที่ปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม เอมีน:PET-COOH



ภาพ 93 ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์ และอีพ็อกซีเรซินอัตราตัดแปรสูตรต่าง ๆ ที่ปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม เอมีน:PET-COOH

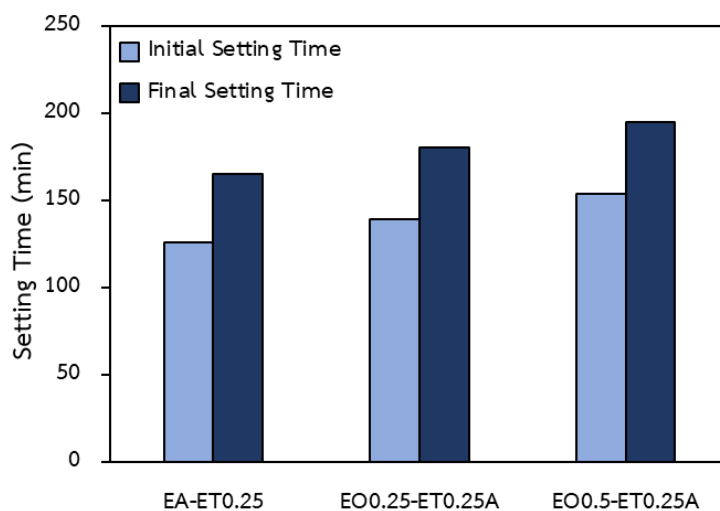
ตาราง 36 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรสูตรต่าง ๆ ที่ปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของสารทำให้แข็งร่วม เอมีน:PET-COOH

ตัวอย่าง	ระยะเวลาการก่อตัวของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร	
	ระยะก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	ระยะก่อตัวสุดท้าย (นาที)
C	70	135
C-EAc	92	120
C-EA	110	135
C-EA-EG0.25	137	180
C-EA-EG0.50	158	195
C-EA-EG0.75	199	240
C-EA-ET0.25	126	165
C-EA-ET0.50	152	180
C-EA-ET0.75	186	225
C-EA-T0.25	122	165
C-EA-T0.50	145	180
C-EA-T0.75	168	225

4.6.2 ผลของอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ร่วม (Co-epoxy oligomer) ต่อสมบัติระยะเวลาการก่อตัวของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร

ศึกษาผลของการใช้น้ำมันปาล์มอีพ็อกไซด์ (EPO) เป็นสารอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ร่วม (Co-epoxy oligomer) ร่วมกับอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้าในการเตรียมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์:EPO เท่ากับ 3:0, 2.75:0.25 และ 2.50:0.50 โดยน้ำหนัก หรือการใช้ EPO ในอัตราส่วน 0%, 8.3% และ 16.7% ตามลำดับ เมื่อใช้สารทำให้แข็งร่วม เอมีน:PET-COOH ในอัตราส่วน 1.25:0.25 โดยน้ำหนัก

จากผลการทดลองพบว่าระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ EPO ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวน่าจะมาจาก 2 สาเหตุที่สำคัญ คือความเร็วในการเกิดเชื่อมขวางที่ช้าลงเนื่องจากความไม่เข้ากันของน้ำในระบบกับ EPO และความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่ลดลงเนื่องจากความไวในการเกิดปฏิกิริยาของ EPO (2° epoxide ring) ที่ช้ากว่าอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้า (1° epoxide ring) ซึ่งจากเหตุผลทั้ง 2 ข้อดังกล่าวส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาหรือการเพิ่มขึ้นของความหนืดของระบบที่ช้าลงตามการเพิ่มขึ้นของ EPO ส่งผลต่อเนื่องต่อการก่อตัวของซีเมนต์ที่ช้าลง [54] ทำให้ชิ้นงานต้องใช้เวลาในการก่อตัวที่เพิ่มขึ้น (ภาพ 97 และตาราง 137)



ภาพ 94 ระยะเวลาการก่อตัวของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของสารอีพ็อกซีร่วม อีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้า:EPO

ตาราง 37 ระยะเวลาการก่อตัวของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปรที่ปรับเปลี่ยนชนิด และอัตราส่วนของสารอีพ็อกซีร่วม อีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ทางการค้า:EPO

ตัวอย่าง	ระยะเวลาการก่อตัวของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดัดแปร	
	ระยะก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	ระยะก่อตัวสุดท้าย (นาที)
C-EA-ET0.25	126	165
C-EO0.25-ET0.25	139	180
C-EO0.25-ET0.25	154	195

บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาผลของการใช้สารทำให้แข็งร่วมที่เตรียมจากการลดน้ำหนักโมเลกุล และการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือเพ็ต (PET) ให้มีหมู่ปลายเป็นหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (PET-COOH) กับสารทำให้แข็งเอมีนทางการค้า (ชนิด amine-amine hardener) และผลของการใช้อีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ร่วมจากอีพ็อกซีโอลิโกเมอร์ชีวภาพน้ำมันปาล์มอีพ็อกซีไดซ์ (EPO) กับสารโอลิโกเมอร์ทางการค้า ในการเตรียมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปร โดยงานวิจัยนี้ได้เตรียม PET-COOH ที่มีจำนวนหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่ตำแหน่งปลายที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ P-T-PA ซึ่งมี -COOH 4 หมู่ P-ET-PA ซึ่งมี -COOH 3 หมู่ และ P-EG-PA ซึ่งมี -COOH 2-3 หมู่ ตามลำดับ ทั้งนี้ในการผสมร่วมกับเอมีนอิมัลชันในการเตรียมอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปร หรืออีพ็อกซีซีเมนต์ จะมีการเปลี่ยน PET-COOH ให้เป็นPET-COO⁻ เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้กับเอมีนอิมัลชัน น้ำ และซีเมนต์ ซึ่งการผสมระหว่างสารทำให้แข็งเอมีนและ PET-COOH/PET-COO⁻ ทำให้อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปรมีพันธะของการเชื่อมขวางที่แตกต่างจากการใช้สารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว โดยมีพันธะผสมระหว่างพันธะเอมีนพันธะเอไมด์ และพันธะเอสเทอร์ ซึ่งความหนาแน่นของการเชื่อมขวางขึ้นกับชนิด และอัตราส่วนระหว่างสารทำให้แข็งเอมีนและ PET-COOH

จากผลการศึกษาสมบัติความหยุ่นเหนียวพบว่าการผสมร่วมของ PET-COOH และ PET-COO⁻ ในอัตราส่วน 25% และ 16.7% ช่วยให้สมบัติความหยุ่นเหนียวของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปรทั้ง E'_G (บ่งบอกถึงสมบัติความเป็นอีลาสติกของวัสดุ) E'_R (บ่งบอกถึงความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของวัสดุ) $\tan \delta_{max}$ (บ่งบอกถึงสมบัติการกระจายพลังงานของวัสดุ) และ T_g (บ่งบอกถึงอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีกับอะกรีเกต) ดีกว่าสูตรที่ใช้สารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว ซึ่งสมบัติที่ดียิ่งขึ้นดังกล่าวน่าจะมาจากหมู่เอโรมาติกที่แข็งเกร็ง (Rigid) ของ PET-COOH และความเข้ากันได้ที่เพิ่มขึ้นระหว่างอีพ็อกซีพอลิเมอร์กับทราย หรืออันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีพอลิเมอร์ ทราย และซีเมนต์ โดยมี PET-COOH เป็นตัวช่วยประสาน

อย่างไรก็ตามเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับหมู่กรดคาร์บอกซิลิกมีความว่องไว้น้อยกว่าการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับหมู่เอมีน/เอไมด์ ดังนั้นอัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของการเชื่อมขวางเมื่ออีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปรแข็งตัวลดลง ซึ่งความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่ลดลงเป็นส่วนสำคัญต่อการลดลงของอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีพอลิเมอร์กับทราย หรืออันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีพอลิเมอร์ ทราย และซีเมนต์ ทำให้สมบัติความหยุ่นเหนียวของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ทาร์ดัดแปรลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ PET-COOH

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจำนวนหมู่กรดคาร์บอกซิลิกของ PET-COOH พบว่า PET-COOH ที่มีหมู่ COOH 4 หมู่ (P-T-PA) ให้สมบัติความหยุ่นเหนียวสูงกว่า PET-COOH ที่มีหมู่ COOH 3 หมู่ และ

2-3 หมู่ ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในอัตราส่วนเดียวกัน P-T-PA ให้โครงสร้างของการเชื่อมขวางแบบเอสเทอร์ที่หนาแน่นกว่า รองลงไปคือ P-ET-PA และ P-EG-PA ทำให้อีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดาร์ดัดแปรสมบัติความหยุ่นเหน็ดเพิ่มขึ้นตามจำนวนหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาในส่วนของการใช้อีพ็อกซีโพลิโกลิเมอร์ร่วม (EPO) พบว่า EPO ทุกอัตราส่วนทำให้ชิ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดาร์ดัดแปรสมบัติความหยุ่นเหน็ดลดลง ซึ่งผลดังกล่าวน่าจะมาจากหมู่ฟังก์ชันที่มีขนาดใหญ่และยึดหยุ่นของกลีเซอไรด์ของน้ำมันปาล์ม และหมู่อีพ็อกไซด์ชนิด 2° ซึ่งมีความว่องไวน้อยกว่าหมู่อีพ็อกไซด์ชนิด 1° ของอีพ็อกซีโพลิโกลิเมอร์ทางการค้า ทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางลดลงตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของ EPO ที่ผสมร่วม ส่งผลต่อการลดลงของสมบัติความหยุ่นเหน็ดของชิ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดาร์ดัดแปรที่เตรียมได้

จากผลการศึกษาสมบัติความต้านแรงดัดโค้งพบว่า การผสมรวมของ PET-COOH และ PET-COO⁻ ในอัตราส่วน 25% และ 16.7% ช่วยให้ชิ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดาร์ดัดแปร มีค่าความต้านแรงดัดโค้ง (σ_{fs}) และการยึดตัวเมื่อตัดโค้งก่อนเกิดการแตกร้า (ϵ_{fs}) สูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ผสมรวมกับ PET-COOH แสดงให้เห็นว่า PET-COOH สามารถช่วยต้านหรือรับแรงดัดโค้งของชิ้นงานได้เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจาก PET-COOH ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างอีพ็อกซีกับทรายที่มากขึ้น ทั้งการผสมรวมของ PET-COOH ยังส่งผลต่อความยาวหรือระยะห่างของจุดเชื่อมขวางที่มากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานสามารถรับแรงและการกระจายพลังงานเพื่อเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแรงภายนอกกระทำได้ดีขึ้น แต่ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจำนวนหมู่กรดคาร์บอกซิลิกของ PET-COOH พบว่า PET-COOH ที่มีหมู่ COOH 4 หมู่ (P-T-PA) ซึ่งมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางสูงสุด ให้ค่า σ_{fs} สูงที่สุด แต่แสดงค่า ϵ_{fs} ต่ำที่สุด ในขณะที่ PET-COOH ที่มีหมู่ COOH 2-3 หมู่ (P-EG-PA) ซึ่งมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางต่ำที่สุด ให้ค่า σ_{fs} ต่ำที่สุด แต่แสดงค่า ϵ_{fs} สูงที่สุด แสดงให้เห็นว่า นอกจากความยาวของการเชื่อมขวางแล้ว ความหนาแน่นของการเชื่อมขวางยังมีส่วนสำคัญต่อค่าความต้านแรงดัดโค้ง และการยึดตัวของชิ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดาร์ดัดแปร

นอกจากนี้ผลของการเพิ่มอัตราส่วนของ PET-COOH ยังคงมีผลไปในการทำงานเกี่ยวกับสมบัติความหยุ่นเหน็ดที่พบว่าชิ้นงานมีค่า E'_R ซึ่งบ่งบอกถึงความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของวัสดุลดลง ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่า σ_{fs} ลดลงตามอัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้น

และเมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนของสารอีพ็อกซีร่วมต่อสมบัติความต้านแรงดัดโค้งของอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดาร์ พบว่าค่า σ_{fs} มีค่าลดลงในขณะที่ ϵ_{fs} มีค่าเพิ่มขึ้น ตามสัดส่วนของ EPO ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้แม้ว่า EPO จะทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางลดลง ซึ่งส่งผลต่อการลดลงของค่า σ_{fs} แต่ EPO สามารถแสดงพฤติกรรม Plasticizing effect ทำให้วัสดุสามารถกระจายพลังงานได้ดีขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดาร์มีค่า ϵ_{fs} เพิ่มขึ้น

จากผลการศึกษาสมบัติความทนแรงอัดพบว่า การผสมรวมของ PET-COOH และ PET-COO⁻ ในอัตราส่วน 25% และ 33.3% ช่วยให้ชิ้นงานอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดาร์ และอีพ็อกซีเมอร์ตาร์ดาร์ดัดแปร มีค่าความทนแรงอัด (σ_{cs}) สูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ผสมรวมกับ PET-COOH ซึ่งผลดังกล่าวนอกจากจะมาจากผลของความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้นแล้วนั้น การมีหมู่อะโรมาติกในโครงสร้างของ PET-COOH ยังเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้ชิ้นงานทนแรงอัดได้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราส่วนของ PET-COOH และ PET-COO⁻ ที่มากเกินไปนอกจากจะส่งผลให้ความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง

ลดลงแล้วนั้น ยังเป็นการลดอันตรกิริยาระหว่างอีพ็อกซีกับทราย ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกร้าวภายใต้แรงอัดได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้การปรับเปลี่ยนจำนวนหมู่กรดคาร์บอกซิลิกของ PET-COOH และการผสมร่วมของ EPO พบว่าให้ผลไปในทำนองเดียวกับการทดสอบสมบัติความต้านแรงดัดโค้งที่พบว่าค่า σ_c มีค่าลดลงตามจำนวนหมู่กรดคาร์บอกซิลิกของ PET-COOH ที่ลดลง และตามอัตราส่วนของ EPO ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของชิ้นงานที่ลดลง

ศึกษาสมบัติแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์กับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และซีเมนต์กับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร เทียบกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์กับซีเมนต์ด้วยการทดสอบสมบัติความต้านแรงดัดโค้งบริเวณรอยต่อของชิ้นงาน พบว่าอีพ็อกซีพอลิเมอร์ช่วยให้ชิ้นงานมอร์ตาร์และมอร์ตาร์ดัดแปรยึดติดกับซีเมนต์ได้ดีกว่าการใช้ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารอีพ็อกซีเริ่มต้นเป็นของเหลวสามารถแทรกซึมผ่านรูพรุนเข้าไปอุดช่องว่างของซีเมนต์ เกิดเป็นฟิล์มพอลิเมอร์เคลือบซีเมนต์และช่วยยึดส่วนของซีเมนต์กับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ หรืออีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร ทำให้บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุทั้ง 2 มีความแข็งแรงที่มากกว่าส่วนอื่น ซึ่งสังเกตได้จากการเกิดการแตกร้าวของชิ้นทดสอบในส่วนของซีเมนต์มากกว่าบริเวณรอยต่อของชิ้นงาน หรือในส่วนของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ หรืออีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร นอกจากนี้การผสมร่วมของ PET-COOH และ PET-COO⁻ ในอัตราส่วน 25% และ 16.7% ช่วยให้ชิ้นงานอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรยึดติดกับซีเมนต์ได้ดีกว่าการใช้เอมีนเป็นสารทำให้แข็งเพียงอย่างเดียว ซึ่งนอกจาก PET-COOH จะช่วยให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้นแล้วนั้น ระยะห่างของจุดเชื่อมขวางของพันธะเอสเทอร์ของ PET-COOH ยังส่งผลให้ชิ้นงานมีความยืดหยุ่นและกระจายแรงได้ดีกว่าการมีเพียงพันธะเอมีน และพันธะเอไมด์จากการใช้สารทำให้แข็งเอมีนเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่ลดลงไม่ว่าจะเป็นจำนวนหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่ตำแหน่งปลายของ PET-COOH ที่ลดลง (P-EG-PA ซึ่งมีหมู่ -COOH 2-3 หมู่) และอัตราส่วนของ PET-COOH ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการลดลงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวของซีเมนต์กับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปร

เมื่อทดลองนำอีพ็อกซีมอร์ตาร์ และอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่เตรียมมาทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของวัสดุทั้ง 2 ชนิด พบว่าหากวัสดุทั้ง 2 ชนิดที่นำมาต่อกันมีองค์ประกอบของ PET-COOH ที่มีหมู่กรดคาร์บอกซิลิกเท่ากันจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันสูงที่สุด และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันจะลดลงตามจำนวนหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่แตกต่างกัน โดยพบว่าอีพ็อกซีมอร์ตาร์ที่ใช้ PET-COOH ที่มี 4 แขน (P-T-PA) จะยึดติดกับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่ใช้ PET-COOH ที่มี 4 แขน (P-T-PA) ได้ดีที่สุด รองลงไปคืออีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่ใช้ PET-COOH ที่มี 3 แขน (P-ET-PA) และ 2-3 แขน (P-EG-PA) ตามลำดับ เช่นเดียวกันหากใช้อีพ็อกซีมอร์ตาร์ที่ผสมร่วมกับ PET-COOH ที่มี 2-3 แขน (P-EG-PA) จะยึดติดกับอีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่ใช้ PET-COOH ที่มี 2-3 แขน (P-EG-PA) ได้ดีที่สุด รองลงไปคืออีพ็อกซีมอร์ตาร์ดัดแปรที่ใช้ PET-COOH ที่มี 3 แขน (P-ET-PA) และ 4 แขน (P-T-PA) ตามลำดับ

ศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำ การดูดซับ และเกลือ) ของอีพ็อกซีมอร์ตาร์ พบว่าการผสมร่วมของ PET-COOH ทั้ง 3 ชนิดในทุกอัตราส่วนให้ผลการดูดซึมน้ำสูงกว่าการใช้เอมีนเป็นสารทำให้แข็งเพียงอย่างเดียว โดยชิ้นงานอีพ็อกซีมอร์ตาร์มีการดูดซึมน้ำ การดูดซับ และเกลือ

ต่ำกว่า 0.5% เมื่อผสมร่วมกับ PET-COOH ในอัตราส่วน 25% ในขณะที่มีการดูดซึมน้ำและเบสประมาณ 0.6-1% ขึ้นกับจำนวนหมู่กรดคาร์บอกซิลิกของ PET-COOH ที่ใช้ นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของ PET-COOH ส่งผลต่อการดูดซึมสารละลายที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากสารละลายสามารถแทรกผ่านเข้าไปยังชิ้นงานได้มากขึ้นตามความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของชิ้นงานที่ลดลง

ศึกษาสมบัติการดูดซึมสารละลาย (น้ำ กรด เบส และเกลือ) ของซีเมนต์ และอีพ็อกซีโมรตาร์ดัดแปร ที่เป็นการผสมระหว่างอีพ็อกซีพอลิเมอร์กับซีเมนต์ พบว่าซีเมนต์ที่ไม่ผสมร่วมกับอีพ็อกซีพอลิเมอร์มีการดูดซึมสารละลายทุกชนิดมากกว่า 9% ภายใน 1 วันที่ทดสอบ นอกจากนี้ยังพบการกร่อนตัวของซีเมนต์เมื่อแช่ชิ้นงานในสารละลายกรด การผสมระหว่างอีพ็อกซีพอลิเมอร์กับซีเมนต์ช่วยลดการดูดซึมสารละลาย และเพิ่มความทนทานของชิ้นงานในสารละลายกรดมากขึ้น โดยไม่พบการกร่อนตัวของชิ้นงานเกิดขึ้น โดยพบว่าชิ้นงานมีน้ำหนักลดลงเพียง 0.1%–0.2% หลังแช่ชิ้นงานไว้ในสารละลายกรดเป็นเวลา 7 วัน นอกจากนี้ยังพบว่าการผสมร่วมกับ PET-COOH ในอีพ็อกซีโมรตาร์ดัดแปร ให้ผลการทดสอบที่ต่างจากการผสมรวมในชิ้นงานอีพ็อกซีโมรตาร์ โดยในชิ้นงานอีพ็อกซีโมรตาร์ดัดแปร การผสมร่วมกับ PET-COOH ในอัตราส่วน 25% และ 50% ช่วยให้ชิ้นงานซีเมนต์ต้านทานต่อการดูดซึมสารละลายกรด เบส และเกลือได้ดีกว่าชิ้นงานซีเมนต์ที่ใช้เอมีนเป็นสารทำให้แข็งเพียงอย่างเดียว ในขณะที่ชิ้นงานอีพ็อกซีโมรตาร์ที่ผสมร่วมกับ PET-COOH ทุกอัตราส่วนมีการดูดซึมสารละลายมากกว่าสูตรที่ใช้เอมีนเป็นสารทำให้แข็งเพียงอย่างเดียว

อย่างไรก็ตามเมื่อศึกษาผลของการผสมรวมของ EPO ทั้งในชิ้นงานอีพ็อกซีโมรตาร์ และอีพ็อกซีโมรตาร์ดัดแปร พบว่าผลไปในทำนองเดียวกันคือชิ้นงานมีการดูดซึมสารละลายทั้ง 4 ชนิดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ EPO ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราส่วนของ EPO ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการดูดซึมสารละลายที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารละลายสามารถแทรกผ่านเข้าไปยังชิ้นงานได้มากขึ้นตามความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของชิ้นงานที่ลดลง

บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

1. Dębska, B. and L. Lichołai, *The selected mechanical properties of epoxy mortar containing PET waste*. Construction and Building Materials, 2015. 94: p. 579-588.
2. Ozeren Ozgul, E. and M.H. Ozkul, *Effects of epoxy, hardener, and diluent types on the hardened state properties of epoxy mortars*. Construction and Building Materials, 2018. 187: p. 360-370.
3. Li, Y.-D., et al., *Fully biobased and high performance epoxy thermosets from epoxidized soybean oil and diamino terminated polyamide 1010 oligomers*. Polymer Testing, 2018. 72: p. 140-146.
4. ไทยโพสต์, *ขยะพลาสติก ปัญหาขบคิดระดับชาติ*. สืบค้น 16 เมษายน 2563, จาก <https://www.thaipost.net/main/detail/17790>.
5. Chula zero waste, *ขวดพลาสติก...สะดวก หรือ สะสม?*. สืบค้น 16 เมษายน 2563, จาก <http://www.chulazerowaste.chula.ac.th/plastic-bottle-convenient-or-rubbish>
6. Chulaturator. *สรุปเนื้อหาพอลิเมอร์*. สืบค้น 10 มกราคม 2566. จาก https://www.chulaturator.com/blog/%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A1%E0%B8%B5-%E0%B8%9E%E0%B8%AD%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%A1%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C/#.Y_cz8HZByUk.
7. Vashchuk, A., et al., *Application of ionic liquids in thermosetting polymers :Epoxy and cyanate ester resins*. eXPRESS Polymer Letter Vol.12, 2018. 10: p. 898-917
8. Massingill, J.L. and R.S. Bauer, *EPOXY RESINS*, in *Applied Polymer Science: 21st Century*, C.D. Craver and C.E. Carraher, Editors. 2000, Pergamon: Oxford. p. 393-424.
9. Kaohsiung Huamei. *การออกแบบวัสดุอีพ็อกซี*. สืบค้น 10 มกราคม 66, จาก <http://www.hmp.com.tw/th/epoxy-resins-4/>.
10. Fidanovski, B.Z., et al., *Composite materials from fully bio-based thermosetting resins and recycled waste poly(ethylene terephthalate)*. Composites Part B: Engineering, 2018. 153: p. 117-123
11. Aggarwal, L.K., P.C. Thapliyal, and S.R. Karade, *Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsions*. Construction and Building Materials, 2007. 21(2): p. 379-383.
12. PubChem. *Bisphenol A diglycidyl ether*. สืบค้น 10 มกราคม 2566. จาก, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Bisphenol-A-diglycidyl-ether#section=Boilin g-Point>.

13. Chemical book. *BISPHENOL A DIGLYCIDYL ETHER RESIN*. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2566, จาก https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB3749115.htm
14. Karak, N. *Overview of Epoxies and Their Thermosets. Sustainable Epoxy Thermosets and Nanocomposites*. ACS Symposium Series; American Chemical Society. 2021. November 3.
15. Jin, F.-L., X. Li, and S.-J. Park, *Synthesis and application of epoxy resins: A review*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015. 29: p. 1-11.
16. Chen, Y., Z. Xi, and L. Zhao, *New bio-based polymeric thermosets synthesized by ring-opening polymerization of epoxidized soybean oil with a green curing agent*. European Polymer Journal, 2016. 84: p. 435-447.
17. Park, S.-J. and F.-L. Jin, *Thermal stabilities and dynamic mechanical properties of sulfone-containing epoxy resin cured with anhydride*. Polymer Degradation and Stability, 2004. 86(3): p. 515-520.
18. Foix, D., et al., *Study on the chemical modification of epoxy/anhydride thermosets using a hydroxyl terminated hyperbranched polymer*. European Polymer Journal, 2009. 45(5): p. 1454-1466.
19. Zeng, R.-T., et al., *Curing behavior of epoxidized soybean oil with biobased dicarboxylic acids*. Polymer Testing, 2017. 57: p. 281-287.
20. Ariffin, N.F., et al., *Strength properties and molecular composition of epoxy-modified mortars*. Construction and Building Materials, 2015. 94: p. 315-322.
21. Guo, S.-Y., et al., *Mechanical and interface bonding properties of epoxy resin reinforced Portland cement repairing mortar*. Construction and Building Materials, 2020. 264: p. 120715.
22. PubChem. *Bisphenol A*. สืบค้น 10 กุมภาพันธ์ 256. จาก <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Bisphenol-A>.
23. Admin_superlock. *ไขข้อสงสัย ! BPA Free คืออะไรกันนะ*. Microware. สืบค้น 10 กุมภาพันธ์ 2566. จาก <https://www.micronware.co.th/%E0%B8%9A%E0%B8%A5%E0%B9%87%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B8%99%E0%B9%88%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%B9%E0%B9%89/%E0%B9%84%E0%B8%82%E0%B8%82%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%AA%E0%B8%87%E0%B8%AA%E0%B8%B1%E0%B8%A2-bpa-free%E0%B8%84%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%DE0%B8%B0%E0%B9%84%E0%B8%A3%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%99>.

24. Deng, P., et al., *Bisphenol A promotes breast cancer cell proliferation by driving miR-381-3p-PTTG1-dependent cell cycle progression*. *Chemosphere*, 2021. 268: p. 129221.
25. German International Cooperation to support sustainable development in Thailand and ASEAN. *การผลิตปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์มอย่างยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในประเทศไทย*. สืบค้น 13 พฤษภาคม 2564. จาก <https://www.thai-german-cooperation.info/th/sustainable-and-climate-friendly-palm-oil-production-and-procurement-scopp-in-thailand/>
26. ณรงค์ฤทธิ์ อดุลย์ฐานานุกิตต์, ลัดดา ธรรมวิทย์สกุล. *อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันไทย : ในบริบทใหม่ที่ท้าทาย*. สืบค้น 13 พฤษภาคม 2564. จาก https://www.bot.or.th/Thai/MonetaryPolicy/Southern/DocLib/palm_minisym.pdf.
27. Khot, S.-N., et al., *Development and application of triglyceride-based polymers and composites*. *Journal Application Polymer*. 2017. 82: p. 703-723.
28. Hwang, H.-S., et al., *Modification of epoxidized soybean oil for lubricant formulations with improved oxidative stability and low pour point*. 2001. 78: p. 1179-1184.
29. Scientific Psychic. *Fats Oils Fatty Acids Triglycerides*. สืบค้น 13 พฤษภาคม 2564. จาก <https://www.scientificpsychic.com/fitness/fattyacids1.html>.
30. Food Network Solution ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหาร, *Oleic acid / กรดโอเลอิก*. สืบค้น 10 กุมภาพันธ์ 2566. จาก <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1643/oleic-acid>.
31. ฐานเศรษฐิกิจ. *เจาะลึกธุรกิจรับเหมาก่อสร้างปี 65-67 แนวโน้มรุ่งหรือร่วง เช็คที่นี่. ฐานเศรษฐกิจดิจิทัล*. [สืบค้น 10 กุมภาพันธ์ 2566. จาก <https://www.thansettakij.com/real-estate/530069>.
32. Desay. *รายงานวิจัยอีพ็อกซีเรซิน*. สืบค้น 15 กุมภาพันธ์ 2566. จาก http://th.desaiglue.com/news/epoxy-resin-research-report/?fbclid=IwAR0yJrZk7WA0mxy_tXLCtCvE7LgZYNUmnkaRzHyMq0Yj410BPihJuZEL8dY.
33. Frias, C.F., et al., *Preparation of fully biobased epoxy resins from soybean oil based amine hardeners*. *Industrial Crops and Products*, 2017. 109: p. 434-444.
34. Best life. *PET Plastic คือ โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly-Ethylene Terphthalate)*. สืบค้น 15 กุมภาพันธ์ 2566. จาก <https://besterlife.com/pet-plastic-%E0%B8%84%E0%B8%B7%E0%B8%AD/>.
35. Omnexus. *Comprehensive Guide on Polyethylene Terephthalate (PET)*. สืบค้น 15 กุมภาพันธ์ 2566. จาก <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-terephthalate-pet-plastic>

36. Ge, Z., et al., *Physical and mechanical properties of mortar using waste Polyethylene Terephthalate bottles*. Construction and Building Materials, 2013. 44: p. 81-86.
37. Dębska, B. and L. Lichotaj, *The selected mechanical properties of epoxy mortar containing PET waste*. Construction and Building Materials, 2015. 94: p. 579-588.
38. Alothman, O.Y., et al., *Thermal characterization of date palm/epoxy composites with fillers from different parts of the tree*. Journal of Materials Research and Technology, 2020. 9(6): p. 15537-15546.
39. Yang, S. and J. Qu, *Computing thermomechanical properties of crosslinked epoxy by molecular dynamic simulations*. Polymer, 2012. 53(21): p. 4806-4817.
40. Park, S.-J. and F.-L. Jin, *Thermal stabilities and dynamic mechanical properties of sulfone-containing epoxy resin cured with anhydride*. Polymer Degradation and Stability, 2004. 86(3): p. 515-520.
41. Chen, Y., et al., *Application of Epoxy-Asphalt Composite in Asphalt Paving Industry: A Review with Emphasis on Physicochemical Properties and Pavement Performances*. Advance Material Science Engineering, 2021. 35: p. 345-429.
42. Yin, H., et al., *Thermal, damping, and mechanical properties of thermosetting epoxy-modified asphalts*. Journal Thermal Analysis, 2014. 115: p. 1073-1080.
43. Yin, H., et al., *Performance of hot mix epoxy asphalt binder and its concrete*. Material Structure, 2015. 48: p. 3825-3835.
44. Srisuwan, S., et al., *The effect of alkalized and silanized woven sisal fibers on mechanical properties of natural rubber modified epoxy resin*. Energy Procedia, 2014. 56: p. 19-25.
45. Garcia, F.-G., et al., *Mechanical properties of epoxy networks based on DGEBA and aliphatic amines*. Application Polymer Science, 2007. 106: p. 2047-2055.
46. CPAC. *กำลังอัดของคอนกรีต*. สืบค้น 9 สิงหาคม 2565. จาก https://www.cpacacademy.com/download/cpacacademy_com/ECEMENTAPP%20U15.pdf
47. ACI Committee 548. *Polymer-Modified Concrete*. ACI 548.3R-03.
48. Guo, S.-Y., et al., *Mechanical and interface bonding properties of epoxy resin reinforced Portland cement repairing mortar*. Construction and Building Materials, 2020. 264: p. 120715.

49. Guo, S.-Y., et al., *Preparation of TiO₂/epoxy resin composite and its effect on mechanical and bonding properties of OPC mortars*. Construction and Building Materials, 2021. 272: p. 121960.
50. Zheng, Z., et al., *High density and high strength cement-based mortar by modification with epoxy resin emulsion*. Construction and Building Materials, 2019. 197: p. 319-330
51. Dębska, B. and L. Lichołai, *The selected mechanical properties of epoxy mortar containing PET waste*. Construction and Building Materials, 2015. 94: p. 579-588.
52. Ribeiro, M. C. -S., et al., *Chemical resistance of epoxy and polyester polymer concrete to acids and salts*. Journal Polymer Engineering, 2002. 22: 27-44.
53. Dębska, B. and L. Lichołai, *A study of the effect of corrosive solutions on selected physical properties of modified epoxy mortars*. Construction and Building Materials, 2014. 65: p. 604-611.
54. Ariffin, N.F., et al., *Strength properties and molecular composition of epoxy-modified mortars*. Construction and Building Materials, 2015. 94: p. 315-322.

