



## โครงการ

# การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

**ชื่อโครงการ** การเตรียมและสมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว: ผลของปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่ง

**ชื่อนิสิต** นางสาวกุลรัชนันท์ เรืองพุด **เลขประจำตัว** 6033207823  
นายสุชาครีย์ แสนโคต **เลขประจำตัว** 6033277723

**ภาควิชา** วัสดุศาสตร์

**ปีการศึกษา** 2563

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี

### เรื่อง

การเตรียมและสมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว: ผลของปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่ง

### เสนอ

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ตามระเบียบการศึกษาชั้นปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

### จัดทำโดย

นางสาวกุลรัชนี	เรืองพุด	6033207823
นายสุชาครีย์	แสนโคต	6033277723

### อนุมัติโดย

(รศ.ดร.วิมลวรรณ พิมพพันธุ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ปีการศึกษา 2563

## คำนำ

รายงานการวิจัยฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของหลักสูตรในการฝึกวิจัย เพื่อสร้างเสริมประสบการณ์ให้นิสิตได้พัฒนาความคิดอย่างสร้างสรรค์และฝึกทักษะในการทำวิจัย รวมทั้งได้เรียนรู้การเขียนรายงานการวิจัย ตลอดจนการนำเสนอผลงานวิจัย

คณะผู้วิจัยได้ทำโครงการวิจัย เรื่อง การเตรียมและสมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว: ผลของปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่ง เพื่อผลของปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่งต่อการเตรียมและสมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว โดยศึกษาสมบัติเชิงกลและอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เตรียมโดยใช้ปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่งที่แตกต่างกัน

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า รายงานการวิจัยฉบับนี้จักเป็นประโยชน์ทางวิชาการต่อผู้อ่านและผู้สนใจ เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและทำวิจัยต่อไป หากมีข้อบกพร่องประการใด คณะผู้วิจัยยินดีน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

คณะผู้วิจัย

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่งต่อการเตรียมและสมบัติของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว โดยใช้เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มที่ปริมาณ 1, 1.5 และ 2 phr กับใช้โคบอลต์ออกโทเอตเป็นตัวเร่งที่ปริมาณ 1, 1.5 และ 2 phr โดยผสมเรซิน ตัวริเริ่ม และตัวเร่ง ตามอัตราส่วนที่กำหนด แล้วเทลงในแม่แบบซิลิโคน รอให้ชิ้นงานแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็ง ความทนแรงกระแทก และสมบัติความทนแรงดัดโค้ง รวมทั้งศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้ปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่งที่แตกต่างกันมีผลต่อความแข็งเล็กน้อย แต่ส่งผลต่อสมบัติความทนแรงดัดโค้งและความทนแรงกระแทกอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ เมื่อใช้ตัวริเริ่มและตัวเร่งอัตราส่วนที่เท่ากัน ชิ้นงานที่เตรียมได้มีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่าการใช้อัตราส่วนของสารทั้งสองที่ต่างกัน โดยชิ้นงานที่เตรียมเมื่อใช้ตัวริเริ่ม 1.5 phr และตัวเร่ง 1.5 phr ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด และยังพบว่า ชิ้นงานดังกล่าวนี้สามารถทนต่อความร้อนได้ดีกว่าชิ้นงานอ้างอิงที่เตรียมเมื่อใช้ปริมาณตัวริเริ่ม 1 phr และตัวเร่ง 1 phr

**คำสำคัญ:** พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว, เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์, โคบอลต์ออกโทเอต, ตัวริเริ่ม, ตัวเร่ง

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์โดยท่านผู้ทรงคุณวุฒิ คือ รองศาสตราจารย์ ดร. วิมลวรรณ พิมพ์พันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ผู้ให้คำแนะนำและคำปรึกษาอย่างดียิ่ง ในการทำงานวิจัย ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขรายงานการวิจัยฉบับนี้ รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่าง ๆ ให้แก่คณะผู้วิจัยตลอดมา

นอกจากนี้ ผู้วิจัยต้องกราบขอบพระคุณหน่วยงานต่างๆ และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ สาระเคมีและสถานที่ทำการวิจัย ดังรายนามต่อไปนี้

1. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์สถานที่ทำการวิจัย
2. บริษัท สยามเคมีคอลอินดัสตรี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว โคออลต์ออกโตเอต และเมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์
3. คุณภววรรณพ เหมพันธ์พิรุฬห์ และคุณอนุรักษ อ่อนนุ่ม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ ทดสอบสมบัติต่างๆ

สุดท้ายนี้คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของคณะผู้วิจัย ซึ่งให้การสนับสนุน และกำลังใจในการทำวิจัย ขอขอบคุณพี่ๆเพื่อนๆนิสิตภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่านที่ให้กำลังใจ และความช่วยเหลือ ในการทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

คณะผู้วิจัย

## สารบัญ

คำนำ.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูป.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	13
3.1 ภาพรวมของงานวิจัย.....	13
3.2 การทดลอง.....	13
3.2.1 วัสดุดิบ.....	13
3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	13
3.2.3 การขึ้นรูปพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว.....	13
3.2.4 การวิเคราะห์และทดสอบพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัวที่เตรียมได้.....	15
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	18
4.1 ลักษณะชิ้นงาน.....	18
4.2 สมบัติเชิงกล.....	23
4.3 การสลายตัวทางความร้อน.....	27
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	29
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	29

5.2 ข้อเสนอแนะ .....	29
รายการอ้างอิง.....	30

## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 ความหนาแน่นของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต รีไซเคิลที่ปริมาณเส้นใยต่างกัน.....	3
รูปที่ 2.2 ความทนแรงดึง (a) และการยืดตัวที่จุดขาด (b) ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เสริมแรงด้วย เส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิลที่ปริมาณเส้นใยต่างกัน.....	4
รูปที่ 2.3 ความทนแรงกระแทกแบบ Izod ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เสริมแรงด้วยเส้นใย พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิลที่ปริมาณเส้นใยต่างกัน.....	4
รูปที่ 2.4 เทอร์โมแกรมจาก DSC ที่ได้จากการให้ความร้อนครั้งแรก (a) และการให้ความร้อนครั้งที่สอง (b) ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิลที่ปริมาณเส้นใย ต่างกัน.....	5
รูปที่ 2.5 การสูญเสียน้ำหนัก (a) และอนุพันธ์ของการสูญเสียน้ำหนัก (b) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิของ พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิลที่ปริมาณเส้นใยต่างกัน.....	6
รูปที่ 2.6 มอดุลัส (a) และ ความทนแรงดึง (b) ของวัสดุเชิงประกอบ UPR และเปลือกไข่.....	7
รูปที่ 2.7 ความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ UPR และเปลือกไข่.....	7
รูปที่ 2.8 การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพอลิเอสเทอร์ชนิด A และชนิด B .....	9
รูปที่ 2.9 สมบัติด้านแรงดึงของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (A) วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน (B) และวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านที่ผ่านการดัดแปร (C).....	9
รูปที่ 2.10 ความทนแรงกระแทกของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (A) วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วย เส้นใยป่าน (B) และวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านที่ผ่านการดัดแปร (C).....	10
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-strain ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (A) วัสดุเชิง ประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน (B) และวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านที่ผ่านการดัดแปร (C).....	10
รูปที่ 2.12 ภาพถ่ายจาก ESEM (กำลังขยาย 150 x, ขนาด 300 μm) แสดงพื้นผิวที่แตกหักจากการทดสอบ สมบัติด้านของแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน (a) และวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วย เส้นใยป่านที่ผ่านการดัดแปร (b).....	11
รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเวลาในระหว่างการบ่มเรซินที่ใช้ปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่งใน อัตราส่วนต่าง ๆ.....	12
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว.....	14
รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบความแข็ง.....	15



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบแรงกระแทก .....	16
รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบเนกประสงค์ที่ติดตั้งชุดทดสอบแรงกระทำ 3 จุด.....	17
รูปที่ 3.5 เทอร์โมกราฟิเมทริกแอนาไลเซอร์.....	17
รูปที่ 4.1 ความแข็งของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว.....	24
รูปที่ 4.2 ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว.....	24
รูปที่ 4.3 ความทนแรงดัดโค้งของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว.....	26
รูปที่ 4.4 มอดูลัสการดัดโค้งของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว.....	26
รูปที่ 4.5 เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวทางความร้อนของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว สูตร M1C1.....	27
รูปที่ 4.6 เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวทางความร้อนของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว สูตร M1.5C1.5.....	27

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ของการสลายตัวทางความร้อนของ UPR, PET fiber และ วัสดุเชิงประกอบ UPR/PET .....	6
ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพอลิเอสเทอร์ชนิด A และชนิด B.....	8
ตารางที่ 2.3 ผลของอัตราส่วนของตัวริเริ่มและตัวเร่งต่อเวลาการเกิดเจล.....	11
ตารางที่ 2.4 ผลของอัตราส่วนของตัวริเริ่มและตัวเร่งต่อเวลาการคายความร้อนสูงสุด.....	12
ตารางที่ 2.5 ผลของอัตราส่วนของตัวริเริ่มและตัวเร่งต่อเปอร์เซ็นต์การหดตัว.....	12
ตารางที่ 3.1 ปริมาณของตัวริเริ่มและตัวเร่งในการขึ้นรูปพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว.....	15
ตารางที่ 4.1 ลักษณะการแข็งตัวของชิ้นงานพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว ณ ช่วงเวลาต่างๆ.....	18
ตารางที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว.....	23
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชิ้นงานพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว.....	28

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester Resin หรือ UPR) เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมเซตติง (thermosetting plastic) ที่ใช้งานได้หลากหลายในด้านอุตสาหกรรม นิยมนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกหล่อชนิดต่าง ๆ ทั้งที่ผสมและไม่ผสมกับสารตัวเติม เช่น หินอ่อนเทียม อุปกรณ์ไฟฟ้า เครื่องประดับ เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งแรงสูง ทนต่อสารเคมี และทนต่อสภาพแวดล้อม การศึกษาและพัฒนาสมบัติของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวถือเป็นส่วนสำคัญของการเพิ่มมูลค่าและขยายการใช้งานของพลาสติกชนิดนี้ ปกติพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสามารถขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิห้องด้วยวิธีการหล่อ (casting) โดยใช้ตัวริเริ่ม (initiator) และตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ช่วยในการแข็งตัว โดยตัวริเริ่มและตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ คือ เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (Methyl Ethyl Ketone Peroxide (MEKPO)) และโคบอลต์ออกโทเอต (Cobalt Octoate (CoO)) ตามลำดับ

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา คณะผู้วิจัยพบว่า ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบจากพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวกับสารตัวเติมชนิดต่างๆ มักเน้นไปที่การศึกษาปริมาณของสารตัวเติมต่อการเตรียมและสมบัติของวัสดุเชิงประกอบโดยใช้ปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่งเพียงค่าเดียว ส่วนการศึกษาผลของปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเตรียมและสมบัติของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่ไม่ผสมสารตัวเติมนั้น ได้เน้นไปที่การศึกษาระยะเวลาในการเกิดเจล (gelation time) และระยะเวลาคงรูป (cure time) ดังนั้น โครงการวิจัยระดับปริญญาบัณฑิตนี้จึงสนใจที่จะศึกษาผลของตัวริเริ่มและตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเตรียมและสมบัติของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว โดยไม่ใส่สารตัวเติม เพื่อหาปริมาณของตัวริเริ่มและตัวเร่งที่เหมาะสมที่สามารถนำไปต่อยอดในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบให้มีสมบัติต่าง ๆ ตียิ่งขึ้น

#### 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของตัวริเริ่มและตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเตรียมและสมบัติของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณตัวริเริ่ม (initiator) และตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ต่อการเตรียมและสมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว โดยใช้เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มที่ปริมาณ 1, 1.5 และ 2 phr กับใช้โคบอลต์ออกโทเอตเป็นตัวเร่งที่ปริมาณ 1, 1.5 และ 2 phr โดยผสมเรซิน ตัวริเริ่ม และตัวเร่ง ตามอัตราส่วนที่กำหนด และขึ้นรูปพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวด้วยวิธีการหล่อ (casting) ในแม่แบบซิลิโคน รอให้ชิ้นงานแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (กำหนดให้ชิ้นงานที่ใช้ปริมาณตัวเร่งและตัวริเริ่ม 1 phr เป็นชิ้นงานอ้างอิง) จากนั้นนำชิ้นงานแต่ละสูตรไปทดสอบสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ได้แก่ ความแข็ง (Hardness) ความทนแรงกระแทก (Impact Strength) และสมบัติด้านแรงดัดโค้ง (Flexural Properties)

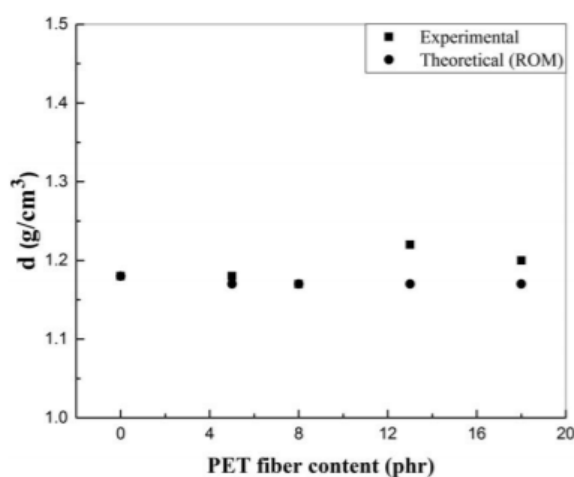
จากนั้น เลือกพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจากสูตรที่ชิ้นงานมีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุดและชิ้นงานอ้างอิง นำไปวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของชิ้นงานด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของชิ้นงานอ้างอิง ทั้งนี้เพื่อพิจารณาหาปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลดีที่สุดต่อสมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

## บทที่ 2

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

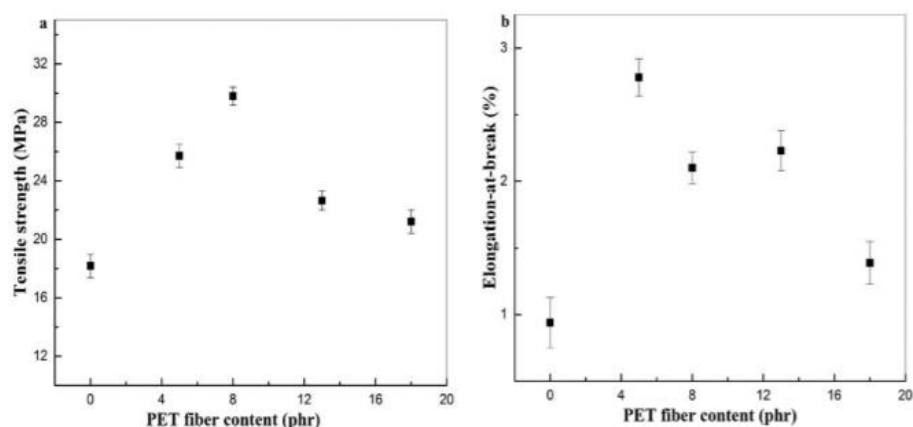
W. Dehas และคณะ [1] ศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester Resin (UPR)) ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล (recycled PET (rPET)) ที่มีความหนาแน่น  $1.16 \text{ g/cm}^3$  และมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว ( $T_g$ )  $78^\circ\text{C}$  โดยตัดเส้นใยให้มีความยาวเฉลี่ยที่แตกต่างกัน แล้วนำไปผสมกับเรซิน โดยใช้เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (methyl ethyl ketone peroxide) และโคบอลต์ออกโทเอต (cobalt octoate) อย่างละ 0.25% โดยปริมาตร เป็นตัวริเริ่ม (initiator) และตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator) ตามลำดับ กวนผสมเรซิน เส้นใย และโคบอลต์ออกโทเอตให้เข้ากันด้วยที่กวนซึ่งทำจากไม้ (wood spatula) ในภาชนะโลหะทรงกระบอก กวนของผสมเป็นเวลา 5 นาที แล้วเติมเมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ กวนให้เข้ากัน จากนั้นเทของผสมที่ได้ลงในแม่พิมพ์อย่างสม่ำเสมอ ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นให้ความร้อนที่  $40^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 16 ชั่วโมง เปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลกับพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล

จากการวัดการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น (density measurement) พบว่า ความหนาแน่นที่ต่ำของเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิลไม่ได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญต่อความหนาแน่นของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวและวัสดุเชิงประกอบ โดยชิ้นงานทั้งหมดมีความหนาแน่นใกล้เคียงกันมาก ดังรูปที่ 2.1



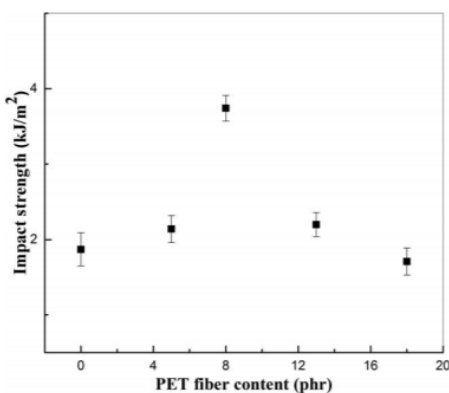
รูปที่ 2.1 ความหนาแน่นของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิลที่ปริมาณเส้นใยต่างกัน

ผลของปริมาณเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิลต่อสมบัติของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (รูปที่ 2.2a) แสดงให้เห็นการแปรผันของความทนแรงดึงของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล พบการเพิ่มขึ้นของความทนแรงดึงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเพิ่มเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล 5-8 phr และเมื่อเพิ่มเกินกว่า 8 phr ความทนแรงดึงมีค่าลดลง ในทางกลับกัน การเพิ่มของเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล 5-8 phr ทำให้การยืดตัวที่จุดขาดของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนรูปที่ 2.2b แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิลจึงช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ทำให้เพิ่มความทนแรงดึงและการยืดตัวที่จุดขาด



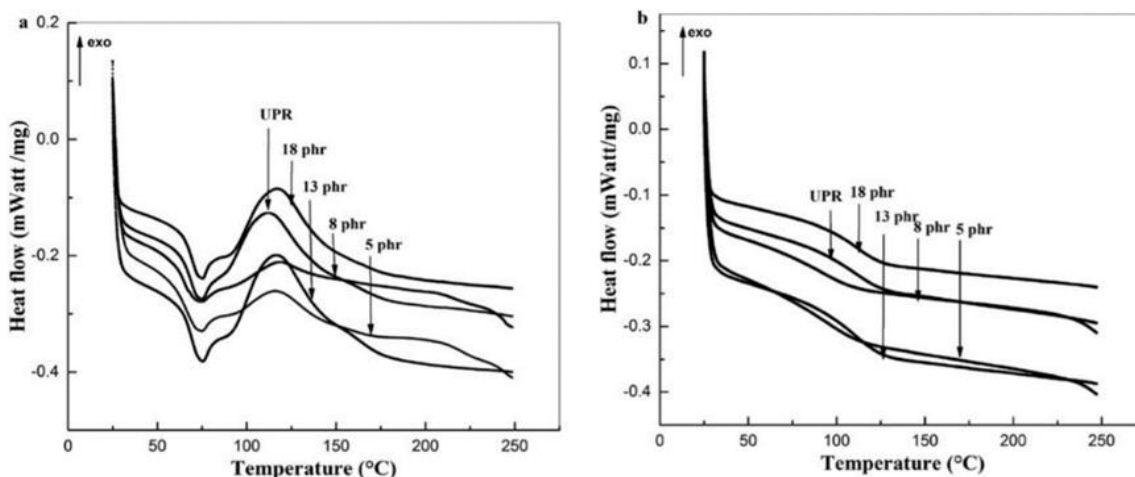
รูปที่ 2.2 ความทนแรงดึง (a) และการยืดตัวที่จุดขาด (b) ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิลที่ปริมาณเส้นใยต่างกัน

จากรูปที่ 2.3 พบว่า ความทนแรงกระแทกแบบ Izod ของตัวอย่างไม่ได้แตกต่างกันมากนัก ยกเว้นเมื่อเพิ่มเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิลที่ 8 phr ซึ่งมีการเพิ่มความยืดหยุ่นอย่างเห็นได้ชัด แนวโน้มนี้สามารถอธิบายได้ถึงการกระจายตัวที่ต่างกันของเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิลในพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว



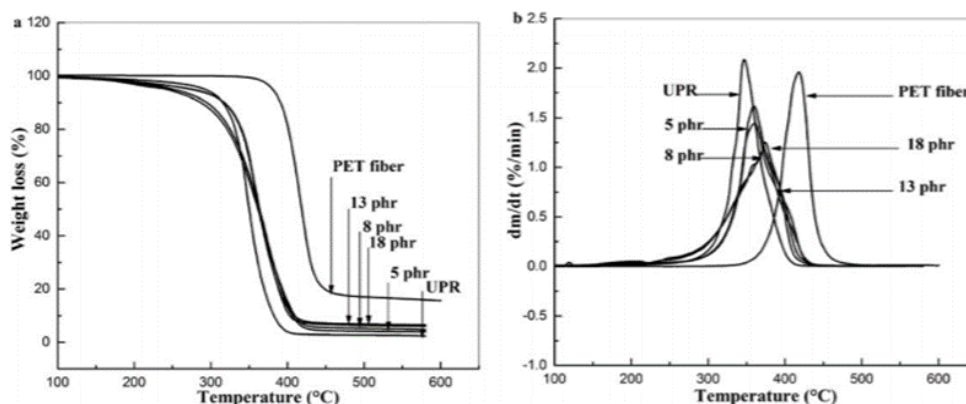
รูปที่ 2.3 ความทนแรงกระแทกแบบ Izod ของพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิลที่ปริมาณเส้นใยต่างกัน

สมบัติทางความร้อน (thermal properties) ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแคลอริเมทรี (DSC) ในการให้ความร้อนครั้งแรกของวัสดุเชิงประกอบ ตามรูปที่ 2.4 แสดงอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและการคายความร้อนสูงสุดหลังจากการบ่ม เปรียบเทียบกับพอลิเอสเตอร์เรซินปกติ พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิหลังการบ่มไม่ขึ้นกับปริมาณเส้นใย มีการลดลงของเอนทัลปีอย่างเห็นได้ชัดของวัสดุเชิงประกอบที่มีเส้นใย 5-8 phr ในการให้ความร้อนครั้งที่สองแสดงเพียงอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่านั้น ปริมาณเส้นใยที่ 5 phr มีการเพิ่มขึ้นของ  $T_g$  ของวัสดุเชิงประกอบ



รูปที่ 2.4 เทอร์โมแกรมจาก DSC ที่ได้จากการให้ความร้อนครั้งแรก (a) และการให้ความร้อนครั้งที่สอง (b) ของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตริไซเคิลที่ปริมาณเส้นใยต่างกัน

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (TGA) พบว่า วัสดุเชิงประกอบมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่าพอลิเอสเตอร์เรซินทั่วไป การใช้ปริมาณเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตริไซเคิลที่ 5-8 phr ให้ความร้อนมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิต่ำ แต่เพิ่มอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว อย่างไรก็ตาม การเพิ่มของเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตริไซเคิลมากกว่า 8 phr ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบลดลง รูปที่ 2.5b แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเส้นใย PET ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.5 การสูญเสียน้ำหนัก (a) และอนุพันธ์ของการสูญเสียน้ำหนัก (b) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลทรีไซเคิลที่ปริมาณเส้นใยต่างกัน

ณ เวลาเดียวกัน อัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลทรีไซเคิล แต่ทำให้การสลายตัวทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบใช้เวลานานขึ้น (ตารางที่ 2.1)

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ของการสลายตัวทางความร้อนของ UPR, PET fiber และวัสดุเชิงประกอบ UPR/PET

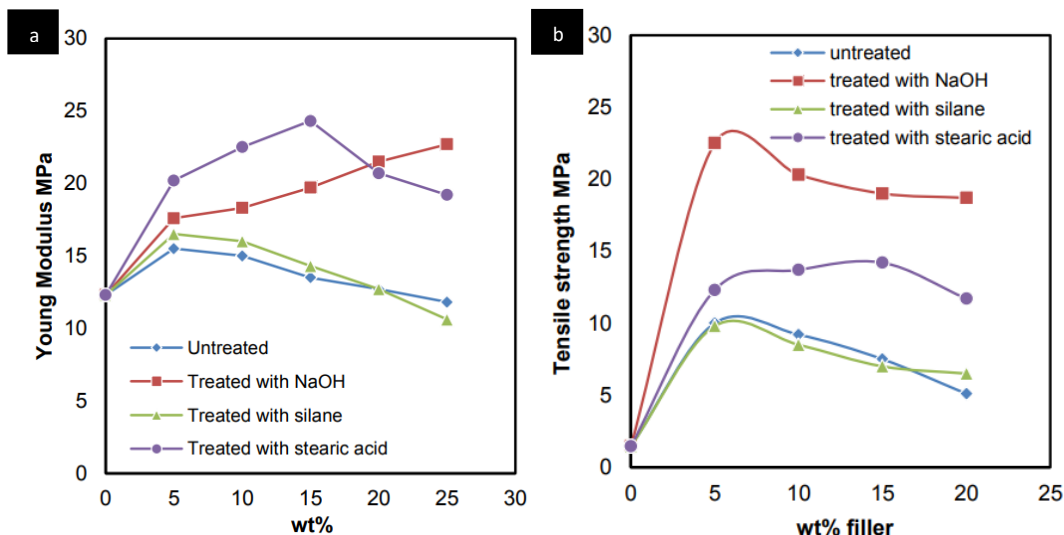
Parameter	UPR/PET fiber					
	PET fiber	UPR	18 phr	13 phr	8 phr	5 phr
$T_{d0}$ (°C)	272	277	297	300	236	342
$T_{dt}$ (°C)	457	474	465	478	447	491
$T_{dmax}$ (°C)	395	393	380	380	367	418
$V_d$ (%/min)	1.3	1.2	1.4	1.6	2.1	2.0
Weight loss at $T_{dmax}$ (%)	36	39	55	57	56	58
$m_{res}$ (%)	5	6	3	3	3	15

Rafah A. Nasif [2] ศึกษาผลของสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพผงเปลือกไข่ไก่ต่อสมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (UPR) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 7%, ซิลิโคน (SiH<sub>4</sub>) 1% และกรดสเตียริก (C<sub>18</sub>H<sub>36</sub>O<sub>2</sub>) เป็นสารเคมีในการปรับปรุงสภาพ การทดลองเริ่มจากนำเปลือกไข่มาล้างด้วยน้ำประปา จากนั้นล้างอีกครั้งด้วยน้ำกลั่น แกะเยื่อที่ติดกับเปลือกไข่ออกด้วยมือ แล้วนำเปลือกไข่ไปอบที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดเพื่อให้ได้ขนาด 63 ไมโครเมตร เมื่อได้ผงเปลือกไข่แล้วจะนำไปวิเคราะห์ห้องค์ประกอบด้วย X-ray fluorescence spectrometer แล้วนำเปลือกไข่ไปปรับสภาพด้วยสารเคมี

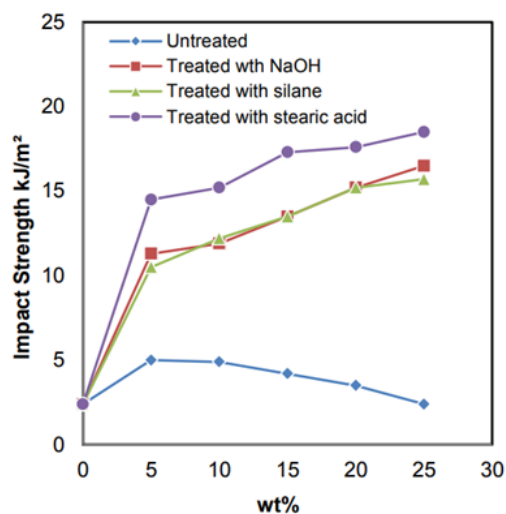
การเตรียมวัสดุเชิงประกอบทำได้โดยผสมเมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (MEKPO) 2% v/v ลงใน UPR จากนั้นตามด้วยโคบอลต์ออกไซด์ (CoO) 1% v/v กวนผสมแล้วใส่เปลือกไข่ไก่ที่ปรับสภาพด้วยสารเคมี หรือ



เปลือกไข่ไก่ที่ไม่ได้ปรับสภาพลงไป ทั้งชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องแห้งแล้วรอนแห้ง นำไปทดสอบสมบัติเชิงกลตามรูปที่ 2.6 และ 2.7



รูปที่ 2.6 มอดุลัส (a) และ ความทนแรงดึง (b) ของวัสดุเชิงประกอบ UPR และเปลือกไข่



รูปที่ 2.7 ความทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ UPR และเปลือกไข่

ความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบทุกสูตรยกเว้นสูตรที่ใส่สารตัวเติมที่ปรับสภาพด้วยกรดสเตียริก มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ส่วนความทนแรงดึงและมอดุลัสของสูตรที่ใส่สารตัวเติมที่ปรับสภาพด้วยกรดสเตียริกลดลงเมื่อเกิน 15% สำหรับมอดุลัสของสารตัวเติมที่ปรับสภาพด้วยไซเลนและที่ไม่ปรับสภาพมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ในขณะที่สูตรที่ใช้ไซโตเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น วัสดุเชิงประกอบทุกสูตรมีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ซึ่งตรงข้ามกับวัสดุเชิงประกอบที่ใส่สารตัวเติมที่ไม่ได้ปรับ

สภาพ การใช้กรดสเตียริกให้ค่าความทนแรงกระแทกสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม UPR ที่ผสมสารตัวเติมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ยังคงมีความทนแรงกระแทก มอดุลัส และความทนแรงดึงมาก เมื่อเทียบกับ UPR บริสุทธิ์

H. P. S. Abdul Khalil และคณะ [3] ศึกษาสมบัติเชิงกล (แรงดึง แรงดัดโค้ง และแรงกระแทก) และความสามารถในการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบ โดยใช้พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่สังเคราะห์ขึ้นจากเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) และกรดฟิวมาริก (fumaric acid) โดยใช้กรดโทลูอินซัลโฟนิก (p-toluene sulfonic acid) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้เส้นใยจากผลของปาล์มน้ำมัน (oil palm empty fruit bunch fibers, OPEFB) เป็นเส้นใยเสริมแรง โดยเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพอลิเอสเทอร์ 2 ชนิด ได้แก่ ชนิด A คือ พอลิเอสเทอร์เรซินที่สังเคราะห์ขึ้น และชนิด B คือ พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวทางการค้าที่ผลิตโดยบริษัท Euro Chemo-Pharma

ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพอลิเอสเทอร์ชนิด A และชนิด B

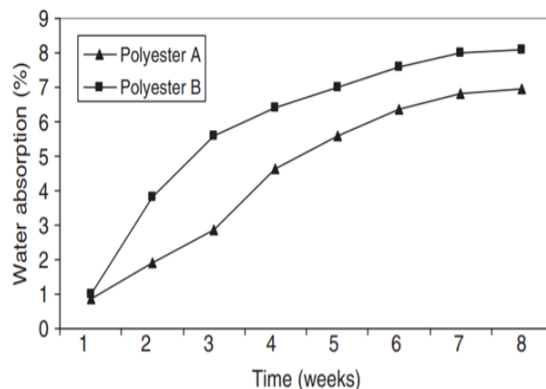
Composite	Tensile strength (MPa) $\pm$ SD	Tensile modulus (GPa) $\pm$ SD	Elongation at break (%) $\pm$ SD	Flexural strength (MPa) $\pm$ SD	Flexural modulus (GPa) $\pm$ SD	Impact strength (KJ/m <sup>2</sup> ) $\pm$ SD
Polyester A	43 $\pm$ 1.1	3.6 $\pm$ 0.7	4.0 $\pm$ 0.8	50.29 $\pm$ 1.3	4.1 $\pm$ 0.7	11.5 $\pm$ 0.8
Polyester B	35 $\pm$ 1.2	2.8 $\pm$ 0.6	3.2 $\pm$ 0.5	38.86 $\pm$ 1.0	3.4 $\pm$ 0.5	9.1 $\pm$ 0.6

\*SD = Standard derivation.

ตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่า วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพอลิเอสเทอร์ชนิด A มีสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพอลิเอสเทอร์ชนิด B โดยสังเกตได้ว่า สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบนั้นเพิ่มขึ้นตามการมีอยู่ของสารหมู่เมทิลีน (methylene group) ในเมทริกซ์พอลิเอสเทอร์ นอกจากนี้ ยังทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยเสริมแรงและเมทริกซ์พอลิเอสเทอร์เพิ่มขึ้น เกิดจากแรงไดโพลที่เพิ่มขึ้นในเมทริกซ์จากการมีอยู่ของสารหมู่เมทิลีนในสายโซ่หลักทำให้มีพันธะที่ตีระหว่างหมู่ฟังก์ชันในเมทริกซ์ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพอลิเอสเทอร์ชนิด A ดีกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพอลิเอสเทอร์ชนิด B

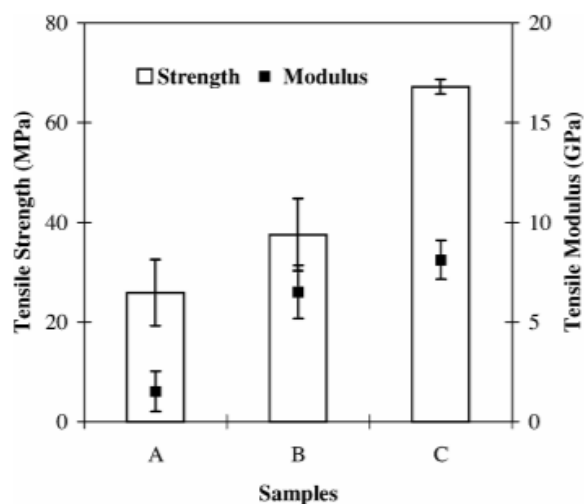
จากการทดสอบพฤติกรรมดูดซับน้ำตามรูปที่ 2.8 พบว่า วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพอลิเอสเทอร์ชนิด B มีความสามารถในการดูดซับน้ำที่ดีกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพอลิเอสเทอร์ชนิด A แสดงให้เห็นว่าการยึดเกาะระหว่างเส้นใยเสริมแรงและเมทริกซ์ในพอลิเอสเทอร์ชนิด A ดีกว่า

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า การใช้เส้นใยจากผลของปาล์มเป็นสารเสริมแรงนั้น ทำให้ได้เรซินที่มีความแข็งแรงสูงขึ้น



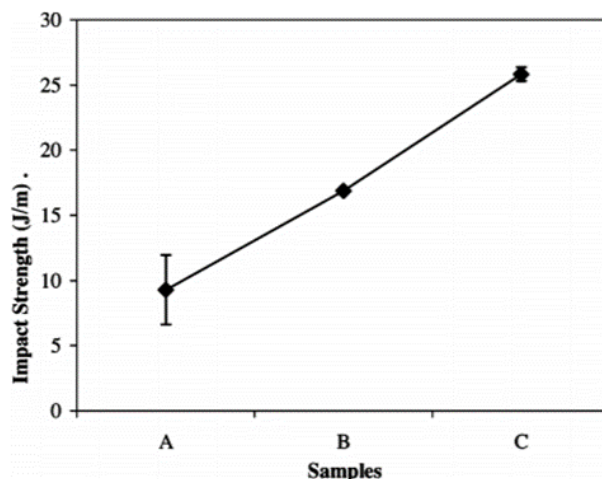
รูปที่ 2.8 การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพอลิเอสเตอร์ชนิด A และชนิด B

G. Mehta และคณะ [4] ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยธรรมชาติเสริมแรงต่อสมบัติเชิงกลและลักษณะทางสัณฐานวิทยาในพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านซึ่งผ่านการตัดแปรรและไม่ผ่านการตัดแปรรด้วยอะคริโลไนไตรล์ ณ ปริมาณเส้นใยต่างกัน (10, 20, 30 และ 40%) โดยใช้เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มและโคบอลต์แนฟทีเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่า วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติเชิงกลสูงสุดเมื่อเติมเส้นใยที่ 30% เมื่อนำวัสดุเชิงประกอบที่เติมเส้นใยปริมาณดังกล่าวไปทดสอบสมบัติด้านแรงดึงตามรูปที่ 2.9 พบว่า วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านที่ตัดแปรรด้วยอะคริโลไนไตรล์มีค่าความทนแรงดึงและค่ามอดุลัสสูงสุด (ตัวอย่าง C) รองลงมาคือ วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านที่ไม่ได้ตัดแปรรด้วยอะคริโลไนไตรล์ (ตัวอย่าง B) ในขณะที่พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว มีค่าความทนแรงดึงและค่ามอดุลัสต่ำสุด (ตัวอย่าง A)

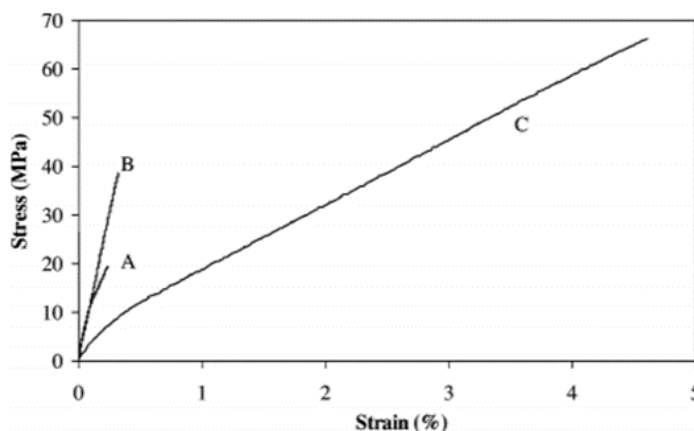


รูปที่ 2.9 สมบัติด้านแรงดึงของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (A) วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน (B) และวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านที่ผ่านการตัดแปรร (C)

จากรูปที่ 2.10 พบว่า ความทนแรงกระแทกวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านที่ผ่านการตัดแปรมีค่าเพิ่มขึ้น 180% เมื่อเทียบกับพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว และ 50% เมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน สาเหตุที่ทำให้ความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นนั้น เนื่องจากความยืดหยุ่นของโซโม่เลกุลตรงอินเตอร์เฟสในวัสดุเชิงประกอบที่มีเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงด้วยอะคริโลไนไตรล์ ทำให้ดูดซับพลังงานได้มากขึ้น เมื่อรอยแตกเคลื่อนไปข้างหน้า การเคลื่อนไหวของสายโซโม่เลกุลเปลี่ยนไป ซึ่งจะเห็นได้ชัดจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-strain ในรูปที่ 2.11

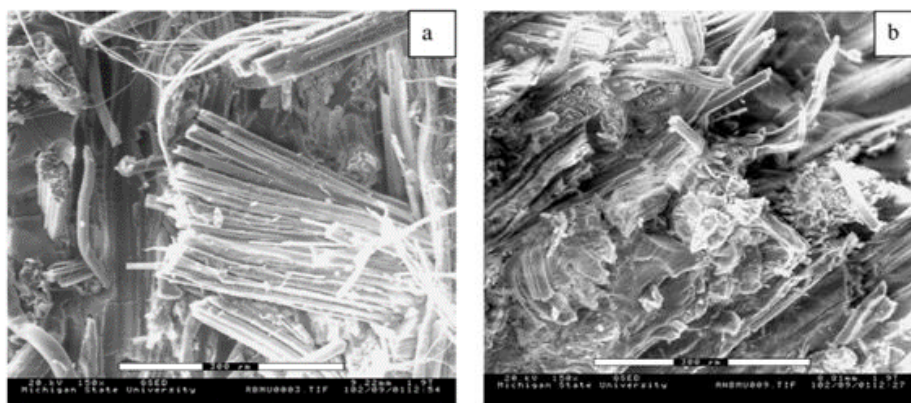


รูปที่ 2.10 ความทนแรงกระแทกของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว (A) วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน (B) และวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านที่ผ่านการตัดแปรร (C)



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-strain ของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว (A) วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน (B) และวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านที่ผ่านการตัดแปรร (C)

จากการตรวจสอบพื้นผิวที่แตกหักของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดประเภท ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope) ในรูปที่ 2.12 พบว่า วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน มีการกระจายตัวของเส้นใยเป็นแบบสุ่มและไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านที่ผ่านการตัดแปรด้วยอะคริโลไนไตรล์ มีการกระจายตัวที่ดีกว่า ซึ่งบ่งชี้ว่า การตัดแปรเส้นใยด้วยอะคริโลไนไตรล์ทำให้พันธะการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ดีขึ้น



รูปที่ 2.12 ภาพถ่ายจาก ESEM (กำลังขยาย 150 x, ขนาด 300  $\mu\text{m}$ ) แสดงพื้นผิวที่แตกหักจากการทดสอบสมบัติด้านของแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน (a) และวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านที่ผ่านการตัดแปร (b)

R.J. Pandiyan Kuppusamy และ S. Neogi [5] ศึกษาผลของปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการบ่มพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว โดยพิจารณาจากเวลาในการเกิดเจล และพฤติกรรมคายความร้อน โดยในการทดลองนี้ใช้เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มและโคบอลต์ออกโทเอตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากตารางที่ 2.3-2.5 และรูปที่ 2.13 พบว่า การปรับเปลี่ยนปริมาณของเมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ และโคบอลต์ออกโทเอตมีผลต่อพฤติกรรมคายความร้อน และอัตราการเกิดเจลของเรซิน โดยเวลาที่เกิดการคายความร้อนสูงสุดและเวลาในการเกิดเจลลดลงตามการเพิ่มขึ้นของตัวเร่งหรือตัวริเริ่ม จึงทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 2.3 ผลของอัตราส่วนของตัวริเริ่มและตัวเร่งต่อเวลาการเกิดเจล

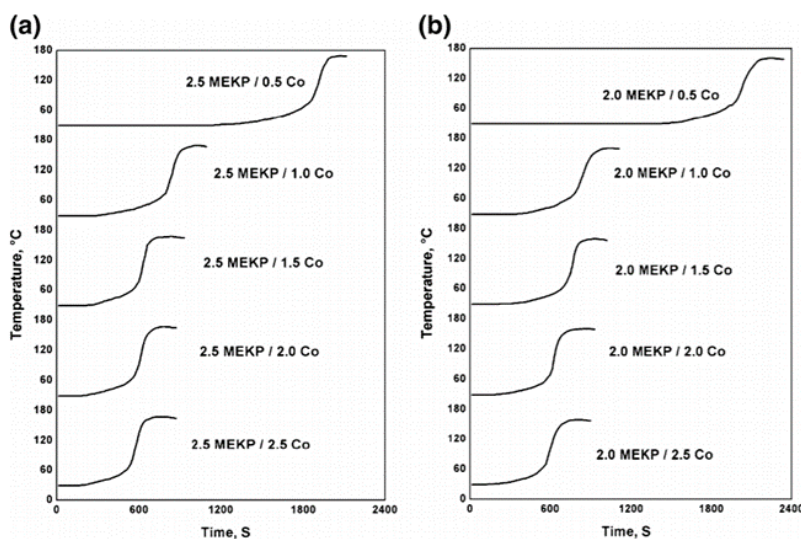
Accelerator (phr)	Gel time (S)					
	2.5	2	1.5	1	0.5	
MEKP (phr)	2.5	227	238	249	384	1151
	2	244	290	360	416	1213
	1.5	248	305	372	448	2705
	1	754	975	1210	1655	6422
	0.5	1564	1776	2467	5028	–

ตารางที่ 2.4 ผลของอัตราส่วนของตัวริเริ่มและตัวเร่งต่อเวลาการคายความร้อนสูงสุด

Accelerator (phr)		2.5	2	1.5	1	0.5
		Peak exotherm time (S)				
MEKP (phr)	2.5	750	765	825	1055	2055
	2	780	840	915	1020	2220
	1.5	810	870	1005	2040	4155
	1	1410	1665	2055	2730	9765
	0.5	2550	2865	4170	8265	–

ตารางที่ 2.5 ผลของอัตราส่วนของตัวริเริ่มและตัวเร่งต่อเปอร์เซ็นต์การหดตัว

Accelerator (phr)		2.5	2	1.5	1	0.5
		Volume shrinkage (%)				
MEKP (phr)	2.5	10.4	10.2	10	7.6	6
	2	8.6	8.2	8.4	7.6	7
	1.5	8.5	8.4	8.6	7.6	7
	1	7.8	7.6	8	7	6
	0.5	7	6.8	6.8	6	–



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเวลาในระหว่างการบ่มเรซินที่ใช้ปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่งในอัตราส่วนต่าง ๆ

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 ภาพรวมของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่งต่อการเตรียมและสมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว โดยใช้เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่ม กับใช้โคบอลต์ออกโทเอตเป็นตัวเร่ง โดยผสมเรซินตัวริเริ่ม และตัวเร่ง ตามอัตราส่วนที่กำหนด แล้วเทลงในแม่แบบซิลิโคน รอให้ชิ้นงานแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกล และนำสูตรที่ดีที่สุดไปวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัว ตามขอบเขตการวิจัยในหัวข้อ 1.3 และรายละเอียดของการทดลองที่จะกล่าวถึงในหัวข้อ 3.2

#### 3.2 การทดลอง

##### 3.2.1 วัตถุดิบ

1. พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester Resin (UPR))
2. เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (Methyl Ethyl Ketone Peroxide (MEKPO))
3. โคบอลต์ออกโทเอต (Cobalt Octoate (CoO))

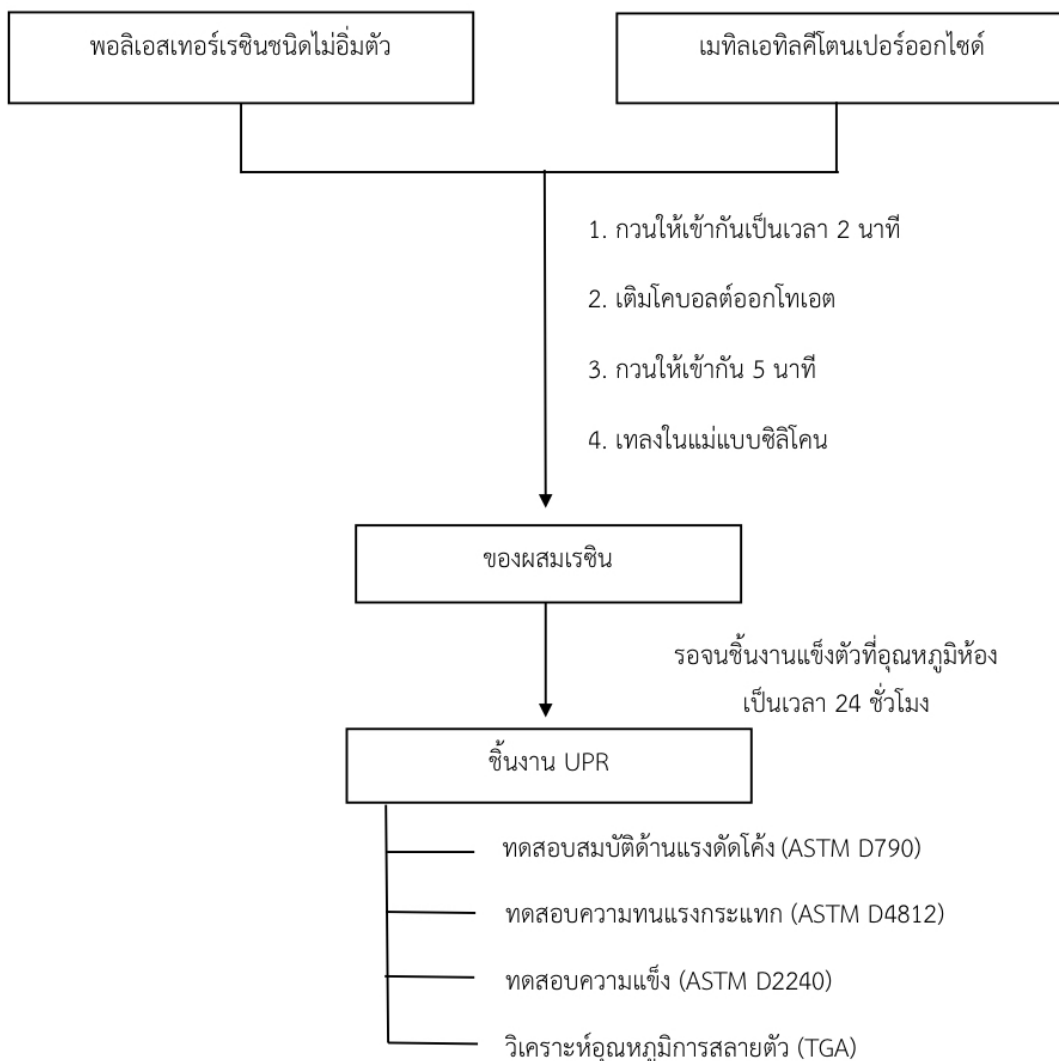
##### 3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ฐานขวดน้ำต้มใช้สำหรับผสมสาร
2. ตะเกียบไม้
3. แม่แบบยางซิลิโคน
4. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง
5. เครื่องแก้ว

##### 3.2.3 การขึ้นรูปพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

นำพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวผสมกับเมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ กวนผสมให้เข้ากันด้วยตะเกียบไม้ เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเติมโคบอลต์ออกโทเอต กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที โดยใช้ปริมาณสารตามตารางที่ 3.1 นำไปเทลงในแม่แบบยางซิลิโคน รอจนชิ้นงานแข็งตัว ณ อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานออกจากแม่แบบและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ  $23 \pm 2$  องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ  $50 \pm 5$  เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบความแข็ง ความทนแรงกระแทก และสมบัติด้านแรงดัดโค้ง

ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เพื่อวิเคราะห์หาภาวะที่เหมาะสม ซึ่งก็คือ ปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ทำให้ได้ ชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่มีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด แล้วนำชิ้นงานดังกล่าวมาวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ และเปรียบเทียบกับชิ้นงานอ้างอิงที่เตรียมเมื่อใช้ ปริมาณตัวริเริ่ม 1 phr และตัวเร่ง 1 phr (หมายเหตุ วิธีการกวนผสมด้วยมือโดยใช้ตะเกียบไม้อ้างอิงมาจากวิธีการของ W. Dehas และคณะ [1])



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว



ตารางที่ 3.1 ปริมาณของตัวริเริ่มและตัวเร่งในการขึ้นรูปพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

MEKPO (phr)	CoO (mL/100 g Resin)	ชื่อสูตร
1.0	1.0	M1C1
	1.5	M1C1.5
	2.0	M1C2
1.5	1.0	M1.5C1
	1.5	M1.5C1.5
	2.0	M1.5C2
2.0	1.0	M2C1
	1.5	M2C1.5
	2.0	M2C2

### 3.2.4 การวิเคราะห์และทดสอบพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เตรียมได้

#### 3.2.4.1 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบ

1. ชอร์ดูโรมิเตอร์ (Shore Durometer)
2. เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing Machine)
3. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine)
4. เทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer (TGA))

#### 3.2.4.2 การทดสอบความแข็ง

ทดสอบความแข็งของพื้นผิวชิ้นงานโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบชอร์ดูโรมิเตอร์ (Shore Durometer) (รูปที่ 3.2) โดยใช้หัววัดแบบ Shore D ตามมาตรฐาน ASTM D2240



รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบความแข็ง (ที่มา : Amazon.com, 2017)

### 3.2.4.3 การทดสอบความทนแรงกระแทก

ทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D4812 ด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก (รูปที่ 3.3) เลือกวิธีการทดสอบแบบ Unnotched Izod Test โดยวางชิ้นงานทดสอบไว้ในแนวตั้ง แล้วรับแรงกระแทกจากการเหวี่ยงของลูกตุ้มขนาด 1.00 จูล และอุณหภูมิในการทดสอบ  $23 \pm 2$  องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (ที่มา : นางสาวศรีจรี อุดมถาวรสวัสดิ์, 2552)

### 3.2.4.4 การทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้ง

ทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้ง (flexural properties) ตามมาตรฐาน ASTM D790 ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ซึ่งติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบแบบแรงกระทำ 3 จุด (three point bending) (รูปที่ 3.4) ชิ้นตัวอย่างมีขนาดกว้าง 12.5 มิลลิเมตร ยาว 12.8 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร ภายใต้ภาวะดังนี้

- ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ: 70 มิลลิเมตร
- Load cell: 100 นิวตัน
- ดัดโค้งด้วยอัตราเร็วคงที่ 2 มิลลิเมตรต่อนาที
- อุณหภูมิในการทดสอบ  $23 \pm 2$  องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ที่ติดตั้งชุดทดสอบแรงกระทำ 3 จุด

#### 3.2.4.5 การหาอุณหภูมิการสลายตัว

หาอุณหภูมิการสลายตัว (decomposition temperature) ด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (รูปที่ 3.5) ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ในการทดสอบเริ่มจากอุณหภูมิ 50 ถึง 700 องศาเซลเซียส และคงอุณหภูมิที่ 700 องศาเซลเซียสเป็น ระยะเวลา 10 นาที อัตราการเพิ่มความร้อน 20 องศาเซลเซียส/นาที



รูปที่ 3.5 เทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (ที่มา : นางสาวศรีจรี อุดมถาวรสวัสดิ์, 2552)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง



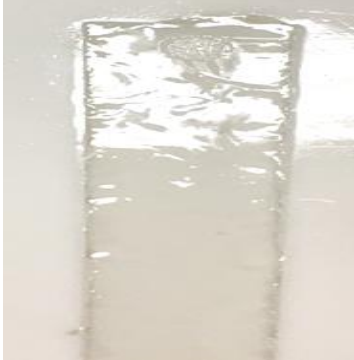
#### 4.1 ลักษณะชิ้นงาน

จากการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวโดยใช้ปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่งแตกต่างกัน 3 สูตร และสังเกตการแข็งตัวในช่วง 60 -180 นาที ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

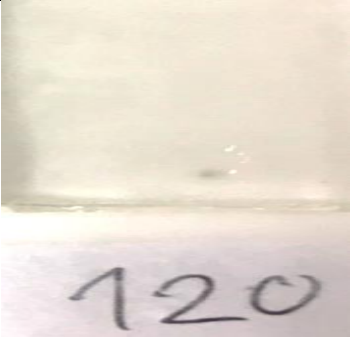


ตารางที่ 4.1 ลักษณะการแข็งตัวของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ

เวลา (นาที)	สูตร	ลักษณะ	รูปภาพ
60	M1C1	ค่อนข้างแข็ง แต่ยังไม่แห้ง ทิ้งรอยที่ผิวเมื่อกด	
	M1C1.5	ค่อนข้างแข็ง แต่ยังไม่แห้ง ทิ้งรอยที่ผิวเมื่อกด	
	M1.5C1	ค่อนข้างแข็ง แต่ยังไม่แห้ง ทิ้งรอยที่ผิวเมื่อกด	



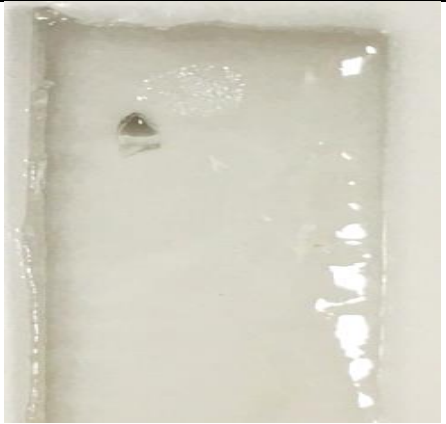
ตารางที่ 4.1 ลักษณะการแข็งตัวของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ (ต่อ)

เวลา (นาที)	สูตร	ลักษณะ	รูปภาพ
90	M1C1	ค่อนข้างแข็ง แต่ยังไม่ แห้ง ทิ้งรอยที่ผิวเมื่อกด	
	M1C1.5	ค่อนข้างแข็ง แต่ยังไม่ แห้ง ทิ้งรอยที่ผิวเมื่อกด	
	M1.5C1	ค่อนข้างแข็ง แต่ยังไม่ แห้ง ทิ้งรอยที่ผิวเมื่อกด	

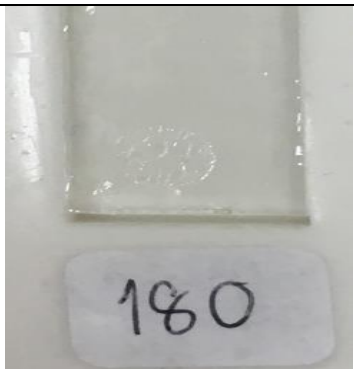
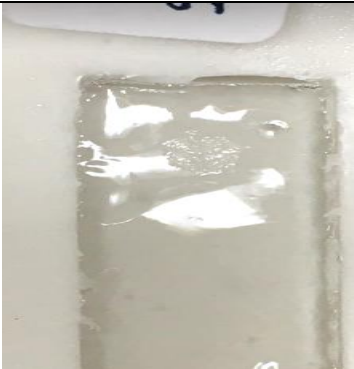

ตารางที่ 4.1 ลักษณะการแข็งตัวของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ (ต่อ)

เวลา (นาที)	สูตร	ลักษณะ	รูปภาพ
120	M1C1	ค่อนข้างแข็ง แต่ยังไม่ แห้ง ทิ้งรอยที่ผิวเมื่อกด	
	M1C1.5	ค่อนข้างแข็ง แต่ยังไม่ แห้ง ทิ้งรอยที่ผิวเมื่อกด	
	M1.5C1	ค่อนข้างแข็ง แต่ยังไม่ แห้ง ทิ้งรอยที่ผิวเมื่อกด	

ตารางที่ 4.1 ลักษณะการแข็งตัวของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ (ต่อ)

เวลา (นาที)	สูตร	ลักษณะ	รูปภาพ
150	M1C1	ค่อนข้างแข็ง แต่ยังไม่แห้ง ทิ้งรอยที่ผิวเมื่อกด	
	M1C1.5	ค่อนข้างแข็ง แต่ยังไม่แห้ง ทิ้งรอยที่ผิวเมื่อกด	
	M1.5C1	แข็งตัว แต่ยังไม่แห้งสนิท มีรอยกดเล็กน้อย	

ตารางที่ 4.1 ลักษณะการแข็งตัวของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ (ต่อ)

เวลา (นาที)	สูตร	ลักษณะ	รูปภาพ
180	M1C1	ค่อนข้างแข็ง แต่ยังไม่ แห้ง ทิ้งรอยที่ผิวเมื่อกด	
	M1C1.5	ค่อนข้างแข็งแต่ยังไม่ แห้ง ทิ้งรอยที่ผิวเมื่อกด	
	M1.5C1	แข็งตัว แต่ยังไม่แห้ง สนิท มีรอยกดเล็กน้อย	

จากตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ MEKPO หรือ CoO เป็น 1.5 phr ส่งผลให้ชิ้นงานมีการแข็งตัวที่เร็วขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของ MEKPO และ CoO ที่ส่งผลต่อการแข็งตัวของชิ้นงาน พบว่า การเพิ่มปริมาณของ MEKPO นั้นมีผลต่อการแข็งตัวของชิ้นงานมากกว่าการเพิ่มปริมาณ CoO เล็กน้อย ซึ่งผลการทดลองเบื้องต้นนี้บ่งชี้ว่า ปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่งนำมีผลต่อการเตรียมชิ้นงาน และน่าจะมีผลต่อสมบัติของชิ้นงานด้วย



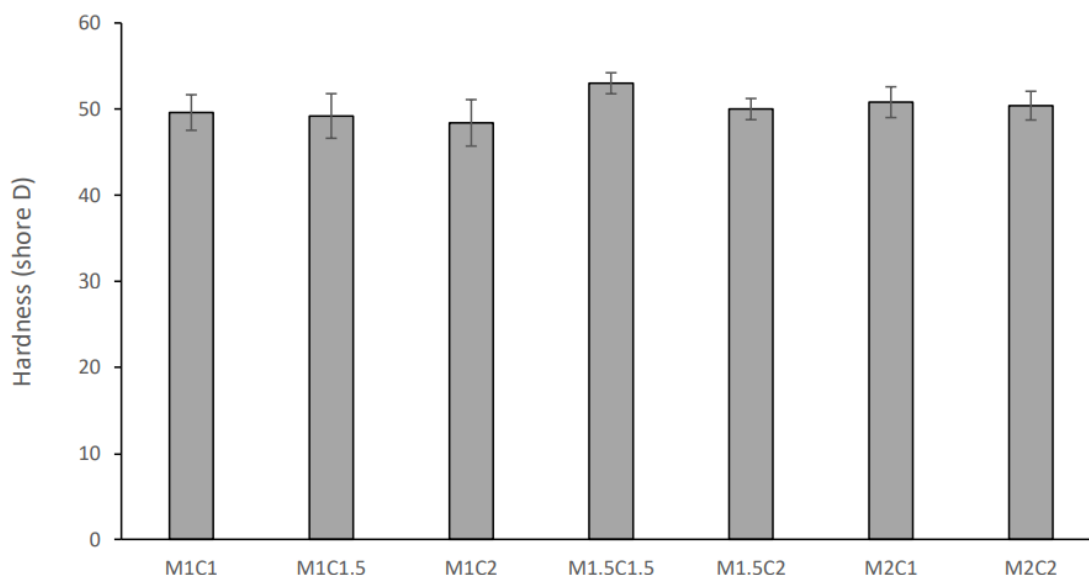
## 4.2 สมบัติเชิงกล

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน UPR ที่ขึ้นรูปทั้งหมด 3 ด้าน ได้แก่ ความแข็ง (Hardness) ความทนแรงกระแทก (Impact Strength) และสมบัติด้านแรงดัดโค้ง (Flexural Properties) ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.2 รวมทั้งรูปที่ 4.1 4.2 4.3 และ 4.4

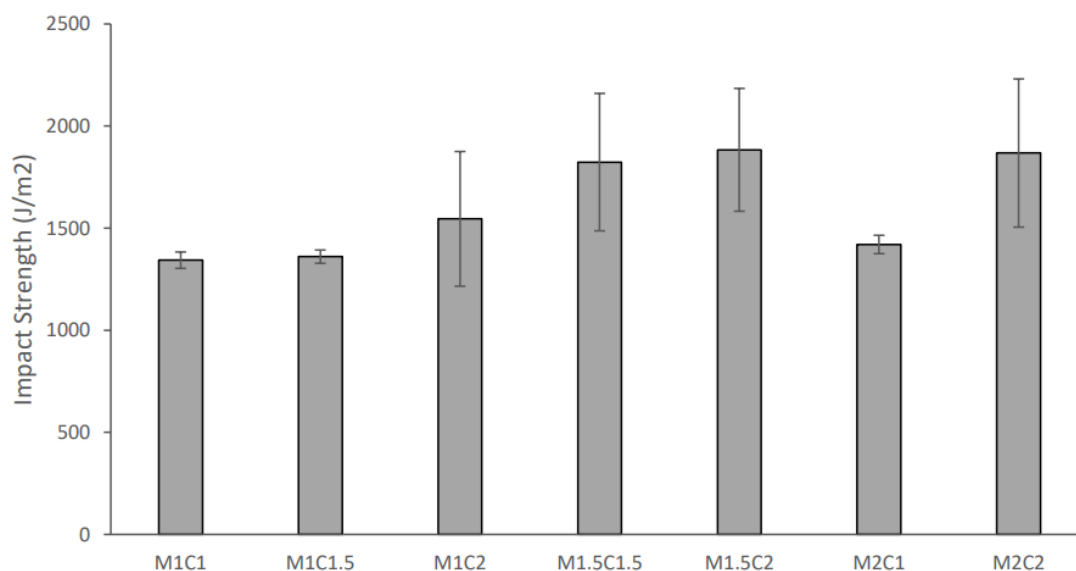
ตารางที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

Sample	Hardness (shore D)	Impact Strength (J/m <sup>2</sup> )	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
M1C1	49.6±2.1	1343.0±40.1	102.5±18.4	2377.2±411.1
M1C1.5	49.2±2.6	1360.4±32.5	70.8±12.1	1475.4±280.3
M1C2	48.4±2.7	1545.6±329.6	83.6±11.8	1825.3±323.7
M1.5C1.5	53.0±1.2	1823.5±336.5	94.3±26.9	2377.0±312.7
M1.5C2	50.0±1.2	1883.5±300.1	78.4±16.0	1772.2±489.5
M2C1	50.8±1.8	1419.9±45.0	77.4±22.5	1735.3±686.8
M2C2	50.4±1.7	1867.9±363.0	92.4±10.1	2152.9±394.1

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.1 พบว่า ความแข็ง (Shore D) ของชิ้นงานทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน ในช่วง 48-53 โดยสูตร M1.5C1.5 มีค่าความแข็งสูงกว่าสูตรอื่นเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้ปริมาณของ MEKPO และ CoO มีผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการวัดความแข็งด้วยชอร์ดูโรมิเตอร์เป็นการวัดความแข็งเฉพาะบริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน ไม่ได้เป็นการวัดทั้งเนื้อของชิ้นงาน ดังนั้น เมื่อชิ้นงานทุกสูตรต่างก็แข็งตัวเต็มที่และเป็นชิ้นงานที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน ค่าความแข็งจึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



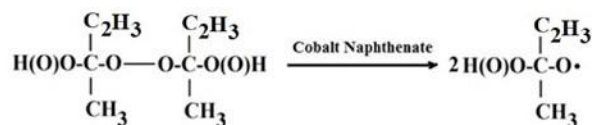
รูปที่ 4.1 ความแข็งของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว



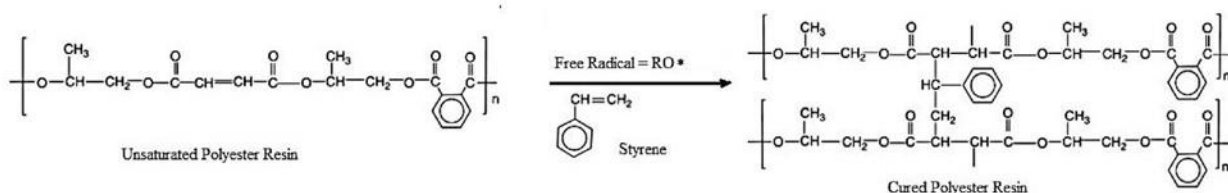
รูปที่ 4.2 ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว

อย่างไรก็ตาม จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 พบว่า ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานอยู่ในช่วง 1343-1868 J/m<sup>2</sup> และเมื่อใช้ปริมาณของ MEKPO หรือ CoO ที่มากกว่า 1 phr ค่าความทนแรงกระแทกของชิ้นงานมีแนวโน้มสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างสไตรีนมอนอเมอร์และสายโซ่พอลิเอสเตอร์ ซึ่งริเริ่มปฏิกิริยาด้วย MEKPO และเร่งให้เกิดปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ ดังเช่นที่ O. Nabinejad และ

คณะ [6] เสนอไว้ตามปฏิกิริยาด้านล่างนี้ ดังนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณ MEKPO และ/หรือ CoO จึงส่งผลให้ปริมาณการเชื่อมขวางสูงขึ้น ทำให้ชิ้นงานสามารถรับแรงกระแทกได้ดีขึ้น



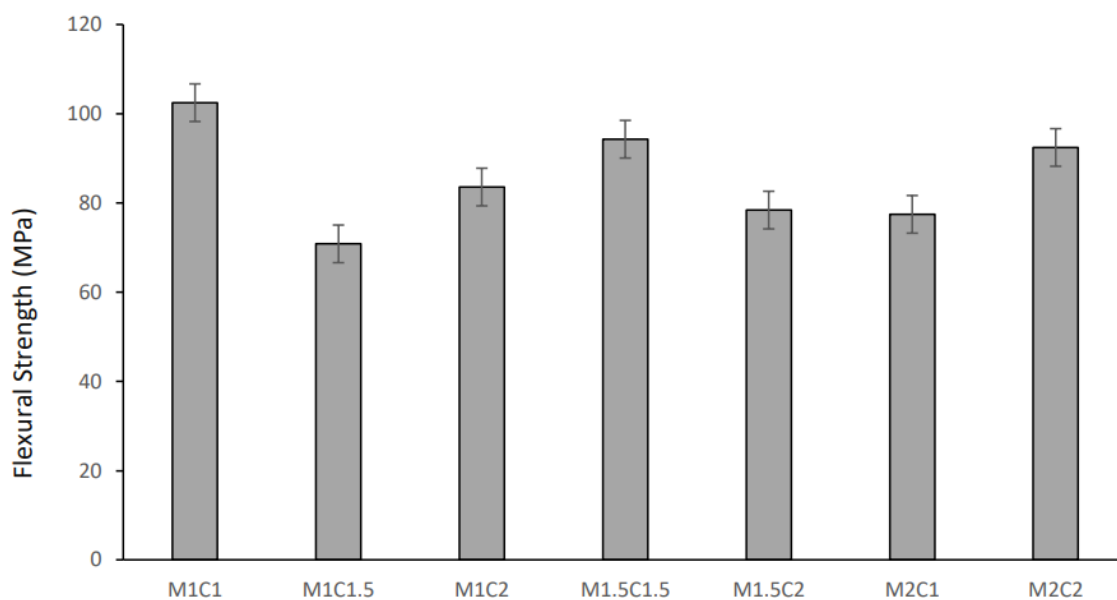
(a) Peroxide (MEKP) decomposition



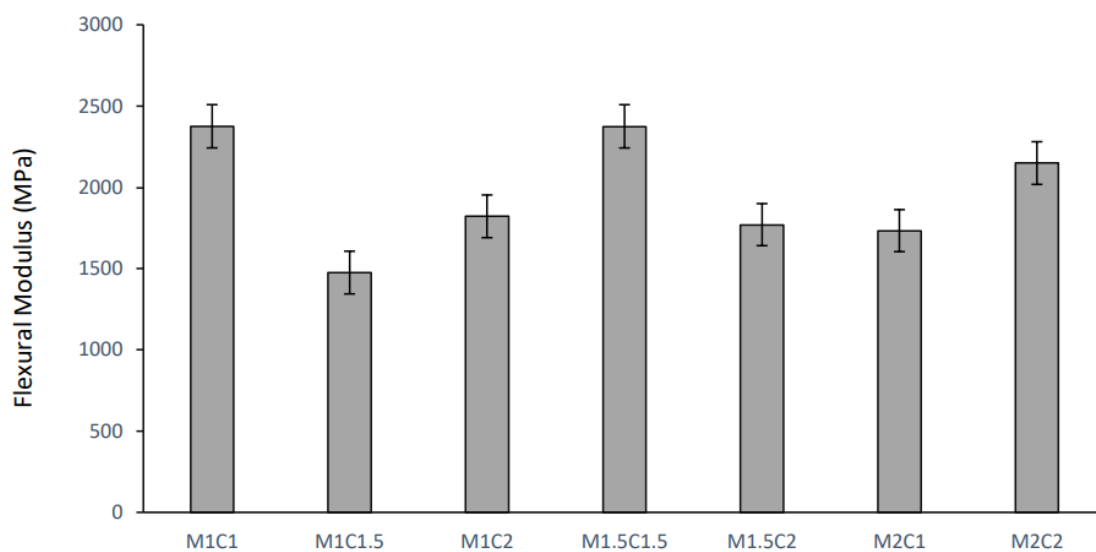
(b) Curing reaction of unsaturated polyester with MEKP and styrene

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 พบว่า ความทนแรงดัดโค้งของชิ้นงาน UPR สูตรที่ใช้ปริมาณของ MEKPO และ CoO ในอัตราส่วนที่เท่ากัน มีค่าอยู่ในช่วง 90-103 MPa ซึ่งสูงกว่าความทนแรงดัดโค้งของชิ้นงาน UPR สูตรที่ใช้อัตราส่วนของสารทั้งสองชนิดที่ต่างกัน ซึ่งมีค่าในช่วง 70-83 MPa ผลการทดลองนี้ยังสอดคล้องกับค่ามอดูลัสการดัดโค้งของชิ้นงาน UPR ที่เตรียมโดยใช้ปริมาณของ MEKPO และ CoO ในอัตราส่วนที่เท่ากัน ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 2150-2380 MPa ในขณะที่ชิ้นงาน UPR ที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารทั้งสองชนิดแตกต่างกัน ให้ค่ามอดูลัสการดัดโค้งในช่วง 1475-1825 MPa ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4 นั้นแสดงว่า เมื่อใช้ MEKPO ในอัตราส่วนที่มากกว่า CoO ปริมาณตัวริเริ่มมีมากกว่าปริมาณตัวเร่ง ทำให้ CoO ไม่เพียงพอที่จะเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของ MEKPO ในขณะเดียวกัน การใช้ MEKPO ในอัตราส่วนที่น้อยกว่า CoO ปริมาณตัวริเริ่มมีน้อยกว่าปริมาณตัวเร่ง อาจทำให้การแตกตัวของ MEKPO ไม่สมบูรณ์ ทั้งหมดนี้เป็นการบ่งชี้ว่า เมื่อใช้อัตราส่วน MEKPO และ CoO ที่เท่ากัน การริเริ่มปฏิกิริยาและการเร่งปฏิกิริยาน่าจะมีความสมดุลกว่าการใช้สารชนิดหนึ่งมากกว่าอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งส่งผลให้เกิดการเชื่อมขวางเป็นไปด้วยความสม่ำเสมอมากกว่า ชิ้นงานจึงรับแรงดัดโค้งได้ดีกว่า

นอกจากนี้ ยังพบว่า ในสูตรที่มีอัตราส่วนของ MEKPO และ CoO เท่ากัน ได้แก่ สูตร M1C1 M1.5C1.5 และ M2C2 จะเห็นได้ว่า ความทนแรงดัดโค้งและค่ามอดูลัสการดัดโค้งมีค่าลดลงตามปริมาณ MEKPO และ CoO ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากเมื่อปริมาณตัวริเริ่มมากขึ้น จำนวนอนุโมลอิสระที่ริเริ่มปฏิกิริยาก็มีมากขึ้น ตำแหน่งของการเชื่อมขวางมีโอกาสเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ความยาวของสายโซ่พอลิเอสไตรีนที่ทำหน้าที่เชื่อมขวางมีแนวโน้มลดลง ชิ้นงานจึงมีความอ่อนตัวน้อยลง ทำให้ทนต่อแรงดัดโค้งได้น้อยลง ซึ่งควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงข้อสันนิษฐานในส่วนนี้ต่อไป



รูปที่ 4.3 ความทนแรงดัดโค้งของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว

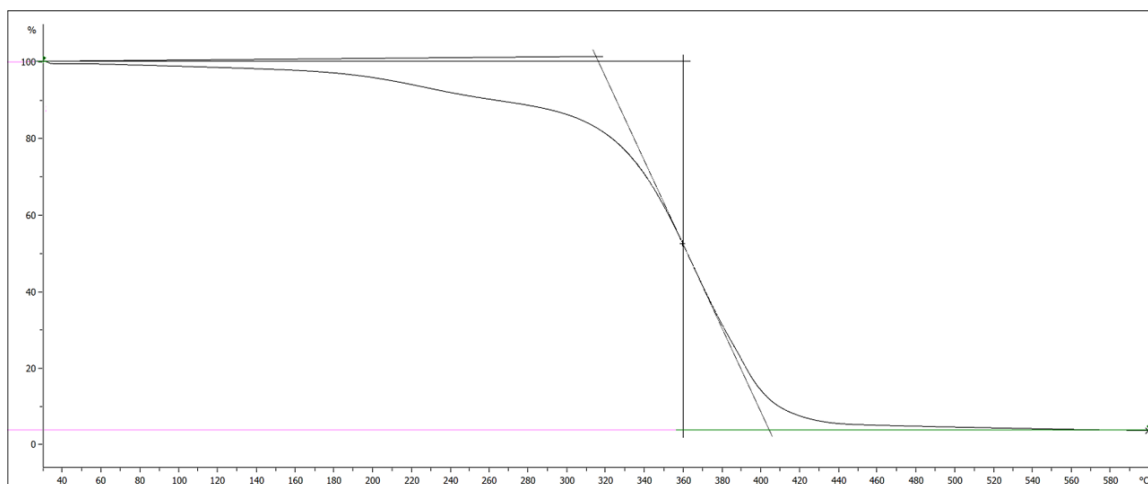


รูปที่ 4.4 มอดุลัสการดัดโค้งของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิมตัว

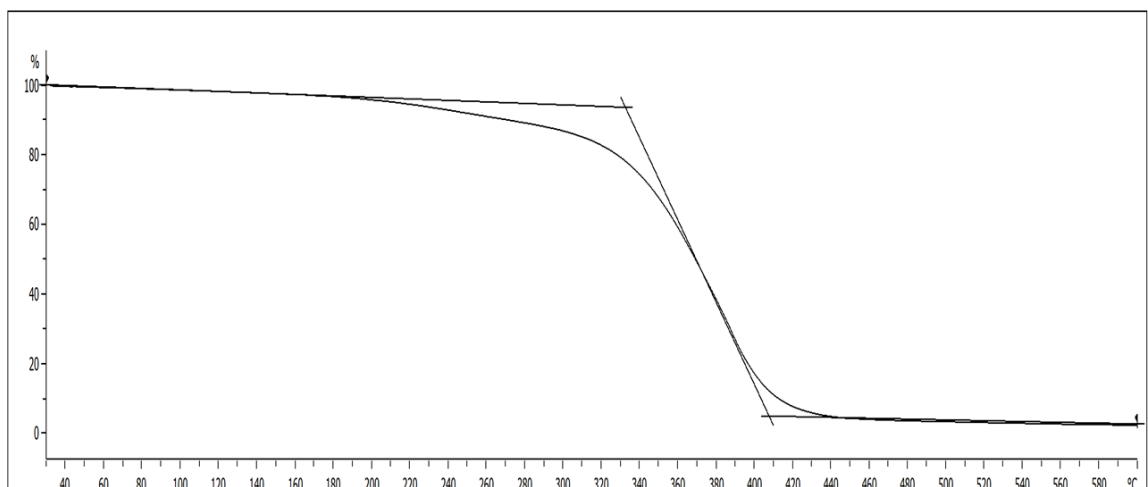
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลทั้งหมด พบว่า สูตร M1.5C1.5 ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด จึงได้นำสูตรนี้ไปวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์เพิ่มเติม

### 4.3 การสลายตัวทางความร้อน

ผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสูตร M1C1 และสูตร M1.5C1.5 ด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (TGA) แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ ซึ่งพบว่ากราฟความสัมพันธ์เป็นแบบ Single Stage Decomposition โดยสูตร M1.5C1.5 มีจุดเริ่มต้นการสลายตัวและจุดสิ้นสุดการสลายตัวที่สูงกว่าชิ้นงานอ้างอิง (M1C1)



รูปที่ 4.5 เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวทางความร้อนของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว สูตร M1C1



รูปที่ 4.6 เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวทางความร้อนของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว สูตร M1.5C1.5

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสูตร M1.5C1.5 มีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว ( $T_{onset}$ ) และอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว ( $T_{endset}$ ) สูงกว่าชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวสูตร M1C1 นั้นแสดงว่าการเพิ่มขึ้นของตัวริเริ่มและตัวเร่งในอัตราส่วนที่เท่ากันที่ 1.5 phr นั้น ทำให้ชิ้นงานทนความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากชิ้นงานสูตร M1.5C1.5 มีปริมาณการเชื่อมขวางที่สูงกว่าสูตร M1C1 จึงส่งผลให้ชิ้นงานสูตร M1.5C1.5 มีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่า

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชิ้นงานพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

สูตร	$T_{onset}$ (°C)	$T_{endset}$ (°C)
M1C1	316.60	406.39
M1.5C1.5	334.49	409.38

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่งต่อการเตรียมและสมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว โดยใช้เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มที่ปริมาณ 1 1.5 และ 2 phr กับใช้โคบอลต์ออกโทเอตเป็นตัวเร่งที่ปริมาณ 1 1.5 และ 2 phr โดยผสมเรซิน ตัวริเริ่ม และตัวเร่ง ตามอัตราส่วนที่กำหนด และให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้องในระยะเวลา 24 ชั่วโมง ให้ผลการทดลองซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การใช้ปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่งที่แตกต่างกันมีผลต่อสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็ง ความทนแรงกระแทกและสมบัติด้านแรงดัดโค้งของพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวที่เตรียมได้
2. ชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่อใช้ปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่งอย่างละ 1.5 phr ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด
3. จากการศึกษากฎतिकกรรมการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ พบว่าชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่อใช้ตัวริเริ่มและตัวเร่งอย่างละ 1.5 phr สามารถทนต่อความร้อนได้ดีกว่าชิ้นงานอ้างอิงที่เตรียมเมื่อใช้ปริมาณตัวริเริ่มและตัวเร่งอย่างละ 1 phr

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

นำสูตรที่ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุดไปทดลองทำวัสดุเชิงประกอบร่วมกับสารตัวเติมธรรมชาติ

## รายการอ้างอิง

- [1] Dehas, W., Guessoum M., Douibi, A., Jofre-Reche, J.A. and Martin-Martinez, J.M. (2018). Thermal, Mechanical, and Viscoelastic Properties of Recycled Poly(ethylene terephthalate) Fiber Reinforced Unsaturated Polyester Composites. Polymer Composites, 39: 1682-1693.
- [2] Nasif, R.A. (2019). Preparation and Characterization of Eggshell Powder (ESP) and Study Its Effect on Unsaturated Polyester Composites Material. Iraqi Journal of Applied Physics, 11: 25-28.
- [3] Abdul Khalil, H. P. S., Noorshashillawati Azura, M., Issam, A.M., Said, M.R. and Mohd Adawi, T.O. (2008). Oil Palm Empty Fruit Bunches (OPEFB) Reinforced in New Unsaturated Polyester Composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 27(16–17): 1817-1826.
- [4] Mehta, G., Mohanty, A.K., Misra, M. and Drzal, L.T. (2004). Effect of Novel Sizing on The Mechanical and Morphological Characteristics of Natural Fiber Reinforced Unsaturated Polyester Resin Based Bio-composites. Journal of Materials Science, 39: 2961-2964.
- [5] Pandiyan Kuppusamy, R.J. and Neogi, S. (2013). Influence of Curing Agents on Gelation and Exotherm Behaviour of an Unsaturated Polyester Resin. Bulletin of Materials Science, 36: 1217-1224.
- [6] Nabinejad, O., Sujana, D., Rahman, M.E. and Davies, I.J. (2017). Effect of Filler Load on The Curing Behavior and Mechanical and Thermal Performance of Wood Flour Filled Thermoset Composites. Journal of Cleaner Production, 164: 1145-1156.