

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

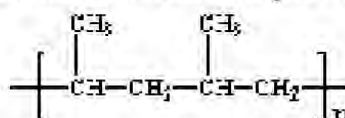
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลของ Chemical foaming agents (CFAs) และชนิดของสารเสริมแรงต่อสมบัติของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิต โดยสามารถแบ่งงานวิจัยออกได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. การศึกษาอิทธิพลของปริมาณ CFAs ที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบโฟม
2. การศึกษาผลของโครงสร้างแบบโฟมที่มีต่อสมบัติของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิต
3. การศึกษาผลของชนิดของสารเสริมแรงที่มีต่อลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบโฟม

3.1 วัสดุดิบ (materials)

3.1.1 พอลิพรอไพลีน (Polypropylene)

พอลิพรอไพลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นเมทริกซ์ในการทำวิจัยนี้ โดยพอลิพรอไพลีนที่ใช้เป็นไอโซแทกติกพอลิพรอไพลีนที่มีสูตรโครงสร้างดังนี้



จากบริษัทไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ประเทศไทย มีชื่อทางการค้าคือ POLENE 1100NK มีค่าดัชนีการไหล (melt flow index) เท่ากับ 11 กรัมต่อ 10 นาที เมื่อทดสอบโดยใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D 1238

3.1.2 Maleated-Polypropylene (MAPP)

Maleated-Polypropylene ทำหน้าที่เป็น compatibilizer ซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะระหว่างพอลิพรอไพลีนที่เป็นพลาสติกที่ไม่มีขั้วกับสารเสริมแรงที่เป็นเส้นใยแก้วหรือเส้นใยธรรมชาติที่มีสภาพขั้วสูง โดย MAPP ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาจากบริษัทดูปองค์ ประเทศสหรัฐอเมริกา มีชื่อทางการค้าคือ Fusabond P MZ 109D มีอุณหภูมิการหลอมเหลวเท่ากับ 162 องศาเซลเซียส และค่าดัชนีการไหล เท่ากับ 120 กรัมต่อ 10 นาที เมื่อทดสอบโดยใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัมที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D 1238

3.1.3 เส้นใยมะพร้าว

เส้นใยมะพร้าวที่ใช้ในงานวิจัยมาจากเกษตรกรผู้ผลิต โดยไม่มีการปรับปรุงสมบัติทางเคมีของเส้นใย นำเส้นใยมะพร้าวที่ได้มาตัดให้มีความยาวของเส้นใยอยู่ในช่วง 5-10 มิลลิเมตรและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเท่ากับ 150-250 ไมโครเมตร (60-100 mesh) โดยองค์ประกอบของเส้นใยมะพร้าวนั้นสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

3.1.4 ผงเกล็ด

ผงเกล็ดที่ใช้ในงานวิจัยมาจากโรงสีข้าวชุมชน โดยไม่มีการปรับปรุงสมบัติทางเคมีของผงเกล็ด นำผงเกล็ดที่ได้มาบดด้วยเครื่อง Ball mill ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 150-250 ไมโครเมตร (60-100 mesh) โดยองค์ประกอบของผงเกล็ดนั้นสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

3.1.5 เส้นใยแก้ว

เส้นใยแก้วที่ใช้ในงานวิจัยจะอยู่ในรูป materbatch ของเส้นใยแก้ว 30% wt ในพอลิพรอไพลีนเมทริกซ์ จากบริษัทไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ประเทศไทย ชื่อทางการค้าคือ POLENE 1111NX GA6 มีค่าดัชนีการหักเหเท่ากับ 4 กรัมต่อ 10 นาที เมื่อทดสอบโดยใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัมที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D 1238 และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.11 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D 792

3.1.6 Hydrocerol 2047

Hydrocerol 2047 ทำหน้าที่เป็น Chemical foaming agents (CFAs) ชนิดดูดความร้อนจากบริษัทคลาเรียนท์ ประเทศไทย มีอุณหภูมิการสลายตัวประมาณ 190 องศาเซลเซียส

3.2 เครื่องมือ

3.2.1 เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวของสารโดยการให้ความร้อน (Thermogravimetry Analysis, TGA) Perkin Elmer Model: TGA7HT สหรัฐอเมริกา

3.2.2 เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrareds Spectrophotometer, FTIR) Bruker Optics รุ่น Vertex 70 สหรัฐอเมริกา

3.2.3 เครื่องอัดรีดพลาสติกแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin Screw Extruder) Thermo Hakke ประกอบด้วย Rheocord RC300p และ Rheomex PTW16/25D ประเทศเยอรมัน

3.2.4 เครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding) Battenfeld Model: PLUS 350/75 ประเทศเยอรมัน

3.2.5 เครื่องทดสอบวัสดุแบบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) รุ่น Lloyd Instruments: Model LR 50K สหราชอาณาจักร

- 3.2.6 เครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Instrumented Impact Tester) Radmana Model: ITR2000
- 3.2.7 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) Olympus
- 3.2.8 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยลำแสงอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) Philips Model: XL30CP

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การศึกษาคุณลักษณะของ Hydrocerol 2047

3.3.1.1 ศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวของ Hydrocerol 2047

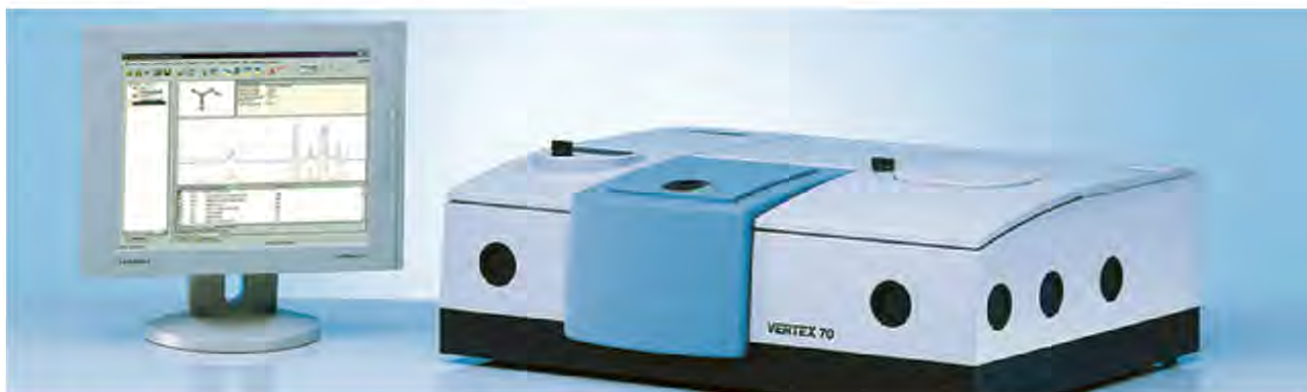
ทดสอบพฤติกรรมการสลายตัวของ Hydrocerol 2047 ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ของบริษัท Perkin Elmer รุ่น TGA7HT ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะทำให้การวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่างเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ซึ่งในการทดสอบทำการนำ Hydrocerol 2047 3-5 มิลลิกรัมบรรจุลงใน refractory pan ที่แขวนอยู่บน microbalance แล้วทำการทดสอบโดยตั้งโปรแกรมการทดสอบเริ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 นาทีจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 850 องศาเซลเซียสด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของอากาศ (air)



รูปที่ 3.1 เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ของบริษัท Perkin Elmer

3.3.1.2 วิเคราะห์ Hydrocerol 2047 ก่อนและหลังเผา ด้วยเครื่อง FTIR

ในงานวิจัยนี้จะทำการตรวจสอบเอกลักษณ์โครงสร้างทางเคมีของ Hydrocerol 2047 โดยการยิงรังสีอินฟราเรดลงบน Hydrocerol 2047 ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาสลายตัว แล้ววัดปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืน (Absorbance) หรือทะลุผ่านออกมา (Transmission) ที่แต่ละความยาวคลื่น โดยวัดในช่วงความยาวคลื่น $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 3.2 เครื่อง Fourier Infrared Spectroscopy (FTIR) ของบริษัท Bruker Optics รุ่น Vertex 70



รูปที่ 3.3 แสดง (a) Hydrocerol 2047 ก่อนเผา และ (b) Hydrocerol 2047 หลังเผา ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบทำโดยนำ Hydrocerol 2047 ไปเผาใน Electric furnace ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีจากอุณหภูมิห้อง จากนั้นนำ Hydrocerol 2047 ที่ได้จากการเผาและที่ยังไม่ผ่านการเผามาบดให้ละเอียดด้วยโม่บดสาร แล้วนำไปผสมกับ KBr ในอัตราส่วน 10:1 นำส่วนผสมที่ได้ไปอัดเป็นแผ่นกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 มิลลิเมตร ทำการใส่แผ่น

ตัวอย่างลงบนตัวยึด ทำการ scan background เครื่อง FTIR ก่อนแล้วจึงนำแผ่นตัวอย่างใส่เครื่องเพื่อวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด

3.3.2 การเตรียมตัวอย่าง

3.3.2.1 การเตรียมสารเสริมแรง

ทำการอบเส้นใยมะพร้าวและผงแคลเซียมที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อให้มีความชื้นประมาณ 1-2% จากนั้นนำไปเก็บไว้ในภาชนะปิดภายใต้สารดูดความชื้น

3.3.2.2 การเตรียมของผสมระหว่าง PP/MAPP/สารเสริมแรง/Hydrocerol 2047

เตรียมของผสมระหว่าง PP/MAPP/สารเสริมแรง/Hydrocerol 2047 ตามอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.2 ด้วยเครื่อง Twin Screw Extruder เพื่อผสมให้ของผสมเกิดการกระจายตัวเข้าหากันภายใต้ความร้อนและแรงกั้นเฉือน โดยของผสมจะถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปแบบกลม (circular die) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ความเร็วในการหมุนของสกรูเท่ากับ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิแต่ละช่วงคือ

ช่วงที่ 1 = 160 องศาเซลเซียส (โถใส่ hopper)

ช่วงที่ 2 = 170 องศาเซลเซียส

ช่วงที่ 3 = 175 องศาเซลเซียส

ช่วงที่ 4 = 180 องศาเซลเซียส (โถใส่ die)

สำหรับขั้นตอนการผสมนี้จะทำการต่อเครื่องอัดรีดพลาสติกแบบเกลียวหนอนอกู่เข้ากับระบบหล่อเย็นด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง และเครื่องตัดเม็ดเพื่อผลิตของผสมออกมาในรูปแบบเม็ดคอมปาวด์



รูปที่ 3.4 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนอกู่ (Twin screw extruder) ของบริษัท Thermo Haake

ตารางที่ 3.1 แสดงรหัสตัวอย่างและส่วนผสมต่างๆที่ใช้ในการเตรียมของผสม

รหัส ตัวอย่าง	PP	MAPP (phr)	Hydrocerol 2047 (phr)	สารเสริมแรง (phr)		
				ใยมะพร้าว	ผงแคลบ	เส้นใยแก้ว
000B	100	3	-	-	-	-
025B	100	3	0.25	-	-	-
050B	100	3	0.50	-	-	-
075B	100	3	0.75	-	-	-
100B	100	3	1.00	-	-	-
125B	100	3	1.25	-	-	-
150B	100	3	1.50	-	-	-
000C	100	3	-	10	-	-
025C	100	3	0.25	10	-	-
050C	100	3	0.50	10	-	-
075C	100	3	0.75	10	-	-
100C	100	3	1.00	10	-	-
125C	100	3	1.25	10	-	-
150C	100	3	1.50	10	-	-
000R	100	3	-	-	10	-
025R	100	3	0.25	-	10	-
050R	100	3	0.50	-	10	-
075R	100	3	0.75	-	10	-
100R	100	3	1.00	-	10	-
125R	100	3	1.25	-	10	-
150R	100	3	1.50	-	10	-
000G	100	3	-	-	-	10
025G	100	3	0.25	-	-	10
050G	100	3	0.50	-	-	10
075G	100	3	0.75	-	-	10
100G	100	3	1.00	-	-	10
125G	100	3	1.25	-	-	10

รหัส	PP	MAPP	Hydrocerol	สารเสริมแรง (phr)		
ตัวอย่าง		(phr)	2047 (phr)	ใยมะพร้าว	ผงแคลบ	เส้นใยแก้ว
150G	100	3	1.50	-	-	10

3.3.2.3 การเตรียมชิ้นงานพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบโฟม



รูปที่ 3.5 เครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding) ของบริษัท Battenfeld Model: PLUS 350/75

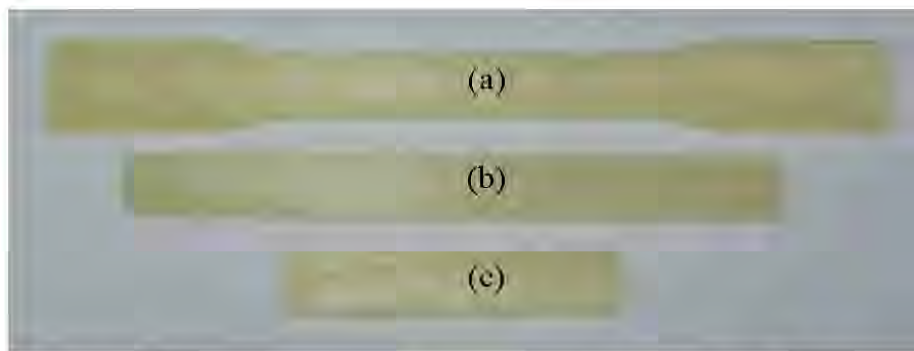
นำเม็ดคอมปาวด์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.2.2 ในทุกอัตราส่วนไปฉีดเป็นชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยึดตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type I [30] ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอตามมาตรฐาน ASTM D 790 [31] และชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก ASTM D 3763 [32] ด้วยเครื่องฉีดพลาสติก ที่อุณหภูมิแต่ละช่วงของกระบอกลอมดังนี้

ช่วงที่ 1 = 220 องศาเซลเซียส (ใกล้ hopper)

ช่วงที่ 2 = 230 องศาเซลเซียส

ช่วงที่ 3 = 240 องศาเซลเซียส (ใกล้ nozzle)

ที่สภาวะความดันในการฉีดเท่ากับ 100 bar สำหรับพอลิพรอไพลีนที่ไม่มีการเติมเส้นใย และ 150 bar สำหรับพอลิพรอไพลีนคอมพอสิตที่มีการเติมเส้นใย อุณหภูมิของแม่พิมพ์เท่ากับ 70 องศาเซลเซียสชิ้นงานที่ได้จากการฉีดจะถูกนำไปไว้ในที่อุณหภูมิ 23 ± 2 °C และที่ปริมาณความชื้น 50 ± 2 %RH เป็นเวลาอย่างน้อย 40 ชั่วโมงก่อนการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 618 [33]



รูปที่ 3.6 (a) ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการดึงยึด (b) ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอ และ (c) ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก

3.3.3 การศึกษาความหนาแน่นของชิ้นงาน

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาความหนาแน่นของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D-1622 โดยนำชิ้นงานไปทำการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม ของบริษัท Sartorius รุ่น BL210S จากนั้นทำการวัดขนาดของชิ้นงานด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์และเวอร์เนียของบริษัท Mitutoyo โดยจะทำการวัดขนาดของชิ้นงานในทุกมิติอย่างน้อยมิติละ 3 ครั้งเพื่อให้มีความแม่นยำอยู่ในช่วง $\pm 1\%$ จากนั้นทำการคำนวณความหนาแน่นของชิ้นงานตามสมการ 3.1 ดังนี้

$$D = \frac{W_s}{V} \quad (3.1)$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

W_s คือ น้ำหนักของชิ้นงาน มีหน่วยเป็นกิโลกรัม

V คือ ปริมาตรของชิ้นงาน มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร

โดยค่าที่ได้จากการคำนวณจะรายงานในรูปของค่าเฉลี่ยของตัวอย่างอย่างน้อย 5 ชิ้นงาน โดยจะทำการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) จากสมการที่ 3.2 ดังนี้

$$SD = \sqrt{\frac{\sum X^2 - n\bar{X}^2}{n-1}} \quad (3.2)$$

เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มชิ้นงาน

X คือ ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน

n คือ จำนวนชิ้นงาน

$\bar{X}$ คือ ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของกลุ่มชิ้นงาน

3.3.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

3.3.4.1 การศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการดึงยึด

ความต้านทานต่อการดึงยึด คือ สมบัติของวัสดุที่แสดงถึงความแข็งแรง และความสามารถในการทนรับแรงดึงของวัสดุจนขาดในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ด้วยอัตราการดึงคงที่ ชิ้นงานที่

ใช้สำหรับทดสอบจะมีลักษณะเป็นแบบคัมเบลล์ (Dumbbell) ตามมาตรฐาน ASTM D638, Type I การทดสอบทำโดยนำชิ้นงานที่เตรียมไว้ไปจับยึดด้วยหัวจับขนาด 5 kN ที่ปลายทั้งสองข้างของชิ้นงาน แล้วทำการดึงชิ้นงานด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ของบริษัท LLOYD Instruments รุ่น LR50K ดังรูปที่ 3.7 ด้วยความเร็วคงที่เท่ากับ 5 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดลองที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ โดยค่าที่ได้จากการทดสอบรายงานในรูปของค่าเฉลี่ยของการทดสอบตัวอย่างอย่างน้อย 5 ชิ้น

$$\text{Stress}(\sigma) = \frac{F}{A_0} \quad (3.3)$$

$$\text{Strain}(\varepsilon) = \frac{(L_i - L_0)}{L_0} \quad (3.4)$$

เมื่อ $\text{Stress} (\sigma)$ คือ ความเค้น มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

$\text{Strain} (\varepsilon)$ คือ ความเครียด

F คือ แรงดึงที่ให้กับชิ้นงาน มีหน่วยเป็นนิวตัน

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานในช่วงความยาวเกจ (gauge length) มีหน่วยเป็นตารางเมตร

L_i คือ ความยาวของชิ้นงาน ณ ตำแหน่งหรือระยะยึดใดๆ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

L_0 คือ ความยาวเกจของชิ้นงานเริ่มต้น มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

ค่ามอดูลัสของยังก์ (Young's modulus) คือ ค่าความชันของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงที่มีความสัมพันธ์ของกราฟเป็นเส้นตรง ก่อนถึงจุดคราก (yield point) ของชิ้นงาน ในช่วงก่อนถึงจุดคราก ชิ้นงานจะมีสมบัติเป็น linear elasticity คือเมื่อทำการดึงชิ้นงาน แล้วนำแรงออกชิ้นงานจะสามารถกลับคืนสู่ขนาดเดิมก่อนการดึงได้ โดยสามารถคำนวณค่าความทนทานต่อการเสียรูปได้จากสมการที่ 3.5

$$\text{Young's modulus} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

โดยในงานวิจัยนี้จะนำเสนอค่าความทนทานต่อการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบในรูปของค่า

Specific tensile modulus ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่า Young's modulus ต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน

ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) คือ ค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้ก่อนการขาด มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร โดยในงานวิจัยนี้จะนำเสนอค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้จากการทดสอบในรูปของค่า Specific tensile strength ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน

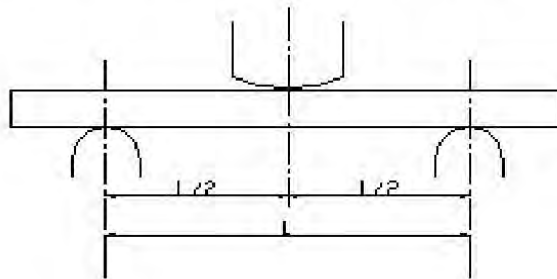


รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบวัสดุแบบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) ของ

บริษัท Lloyd Instruments: Model LR 50K

3.3.4.2 การศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการโค้งงอ

การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการโค้งงอ (Flexural test) เป็นการทดสอบสมบัติความแข็งแรงเมื่อชิ้นงานทดสอบได้รับแรงดัด (bending) การทดสอบเป็นการให้แรงกดลงบนชิ้นทดสอบที่มีจุดรองรับ (support) สองจุดซึ่งอยู่ห่างกันเป็นระยะ L ดังแสดงในรูปที่ 3.8 จนกระทั่งความเครียดของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 5% ตาม ASTM D790, Procedure B



รูปที่ 3.8 แสดงการทดสอบความทนทานต่อการโค้งงอ [33]

การทดสอบทำโดยนำชิ้นงานที่เตรียมไว้ไปวางบนจุดรองรับ (support) สองจุดที่มีระยะห่างเท่ากับ 52 มิลลิเมตร แล้วทำการกดชิ้นงานด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ของบริษัท LLOYD Instruments รุ่น LR50K ดังรูปที่ 3.7 ด้วยความเร็วของหัวกดลงที่เท่ากับ 5.2

มิลลิเมตรต่อนาที่ ผลการทดลองที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัด (flexural stress) และความเครียดดัด (flexural strain) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ งานวิจัยนี้จะนำเสนอข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแรงดัดในรูปของค่า Specific flexural modulus ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่ามอดุลัสการโค้งงอต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นงานและค่า Specific flexural strength ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานการโค้งงอ (Flexural strength) ต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน ค่าที่ได้จากการทดสอบรายงานในรูปของค่าเฉลี่ยของการทดสอบ ตัวอย่างอย่างน้อย 5 ชิ้น

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (3.7)$$

$$D = \frac{rL^2}{6d} \quad (3.8)$$

เมื่อ σ_f คือ ความเค้นดัด (flexural stress) มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

ε_f คือ ความเครียดดัด (flexural strain)

P คือ แรงกดที่ให้กับชิ้นงาน มีหน่วยเป็นนิวตัน

L คือ ระยะทางระหว่างจุดรองรับ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

b คือ ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

d คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

D คือ ระยะการโค้งงอของชิ้นงาน มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

r คือ ความเครียดดัดสูงสุดของพิกัดด้านนอกชิ้นงาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.05 mm/mm

ค่ามอดุลัสการโค้งงอ (Flexural modulus) สามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดและความเครียดดัดในช่วงที่มีความสัมพันธ์ของกราฟเป็นเส้นตรง ก่อนเกิดการแตกหักของชิ้นงาน โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.9 ดังนี้

$$E_f = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (3.9)$$

เมื่อ E_f คือ ค่ามอดุลัสการโค้งงอ (Flexural modulus) มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

m คือ ค่าความชันของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดและความเครียดดัด มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

โดยในงานวิจัยนี้จะนำเสนอค่ามอดุลัสการโค้งงอที่ได้จากการทดสอบในรูปของค่า Specific flexural modulus ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่ามอดุลัสการโค้งงอต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน

ค่าความต้านทานการโค้งงอ (Flexural strength) คือ ค่าความเค้นคด ณ จุดที่ค่าความเครียดคดเท่ากับ 5% มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร โดยในงานวิจัยนี้จะนำเสนอค่าความต้านทานการโค้งงอที่ได้จากการทดสอบในรูปของค่า Specific flexural strength ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานการโค้งงอต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน

3.3.4.3 การศึกษาสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทก

ความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุ คือ ความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุก่อนการแตกหักเมื่อได้รับแรงกระแทก ชิ้นงานสำหรับทดสอบจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตามมาตรฐาน ASTM D3763 พร้อมทำรอยบาก (notched) ลงบนชิ้นงานด้วยเครื่องทำรอยบากของบริษัทลิททิงพรแอสโซซิเอต จำกัด เพื่อเป็นจุดริเริ่มการแตกของชิ้นงาน จากนั้นนำชิ้นงานที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุด้วยเครื่อง Instrumented Impact Tester ของบริษัท Radmana รุ่น ITR2000 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ที่ความเร็วของการทดสอบเท่ากับ 3.4 เมตรต่อวินาทีและความสูงของหัวกระแทกเท่ากับ 40 มิลลิเมตร

ผลการทดลองที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางของหัวกระแทกกับแรงที่ให้ ค่าที่ได้จากการทดสอบรายงานในรูปของค่า Specific peak energy ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง peak energy ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้ในการทำให้ชิ้นงานเกิดการริเริ่มแตก (crack) กับความหนาแน่นของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น $(\text{kJ/m}^2)/(\text{g/cm}^3)$ และค่า Specific break energy ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ทำให้รอยแตกเกิดการเติบโตต่อไปจนเกิดการแตกหัก (break energy) กับความหนาแน่นของชิ้นงาน โดยพลังงานที่ทำให้รอยแตกเกิดการเติบโตต่อไปจนเกิดการแตกหักสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางของหัวกระแทกกับแรงที่ให้ มีหน่วยเป็น $(\text{kJ/m}^2)/(\text{g/cm}^3)$ [35-38] ค่าที่ได้จากการทดสอบรายงานในรูปของค่าเฉลี่ยของการทดสอบตัวอย่างอย่างน้อย 10 ชิ้น



รูปที่ 3.9 เครื่อง Instrumented Impact Tester ของบริษัท Radmana Model: ITR2000

3.3.5 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน

3.3.5.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างของโพลีที่เกิดขึ้นและลักษณะของเซลล์ของชิ้นงานโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงของบริษัท Olympus โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทกมาตัดให้มีความสูงประมาณ 5 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ที่กำลังขยายของเลนส์เท่ากับ 5x และ 10x

3.3.5.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของชิ้นงานด้วยเทคนิค SEM

ในงานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติของรอยแตกของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบแรงกระแทกด้วยเทคนิค SEM เพื่อศึกษาถึงลักษณะสัณฐานวิทยา (morphology) ของชิ้นงาน โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทกมาตัดให้มีความสูงประมาณ 5 มิลลิเมตร แล้วนำไปวางบนแผ่นรองตัวอย่าง เคลือบกาวคาร์บอนที่ผิวของชิ้นงานจนถึงแผ่นรองเพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ แล้วนำไปเคลือบทองด้วยเครื่อง Sputter Coater ของบริษัท Polaron รุ่น SC7610 จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ของบริษัท Philips รุ่น XL30CP โดยอัตราส่วนของ Hydrocerol 2047 ในชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบคือที่ 0.50 และ 1.00 phr



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)



รูปที่ 3.11 Scanning Electron Microscope บริษัท Philips รุ่น XL30CP