

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนที่ส่วนผสมต่าง ๆ
ด้วยการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อนและแม่พิมพ์เย็น



นางสาวเมทินี มาให้

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**MECHANICAL PROPERTIES OF RECYCLED
MATERIAL FROM WASTE MELAMINE AT VARIOUS
COMPOSITIONS FORMED BY HOT MOLDING
AND COLD MOLDING PROCESSES**

Methini Mahai



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2012

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนที่ส่วนผสมต่าง ๆ
ด้วยการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อนและแม่พิมพ์เย็น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสวีฐผล)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวคำรงพงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.นิธินาด สุภกาญจน์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เมทินี มาให้ : คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนที่ส่วนผสมต่าง ๆ ด้วยการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อนและแม่พิมพ์เย็น (MECHANICAL PROPERTIES OF RECYCLED MATERIAL FROM WASTE MELAMINE AT VARIOUS COMPOSITIONS FORMED BY HOT MOLDING AND COLD MOLDING PROCESSES) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ สีวงศ์, 72 หน้า.

เมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์เรซิน (Melamine-Formaldehyde Resins) เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมเซต มีการใช้งานอย่างกว้างขวางและเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่าไม่สามารถนำกลับมาหลอมให้อ่อนตัวซ้ำได้ ซึ่งในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน จะใช้เมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์เรซิน เป็นวัตถุดิบ ซึ่งในกระบวนการผลิตจะเกิดเศษครีบบและผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเสียจำนวนหนึ่งไม่สามารถนำมาขึ้นรูปซ้ำได้อีก วิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาเชิงทดลอง โดยคาดว่าจะช่วยเพิ่มมูลค่าเศษผลิตภัณฑ์เมลามีนนี้ โดยการนำเอาเศษครีบบที่เหลือจากกระบวนการผลิต ตกแต่งและผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเสียมาผสมกับผงเมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์เรซิน ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการขึ้นรูป โดยจะทดลองวิธีการขึ้นรูปสองวิธี คือขึ้นรูปด้วยการอัดพร้อมกับการให้ความร้อน (Compression Molding) และขึ้นรูปด้วยการอัดและให้ความร้อนภายหลังการอัด (Cold Molding) ซึ่งคาดว่าวิธีที่สองจะใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า และศึกษาการกำหนดปริมาณส่วนผสมเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม พร้อมทั้งทดสอบคุณสมบัติเชิงกลซึ่งประกอบไปด้วย การทดสอบการต้านแรงอัด แรงดัด แรงกระแทก คาดว่าจะสามารถกำหนดวิธีเพิ่มมูลค่าให้กับเศษเมลามีนได้ ผลการศึกษาพบว่า การอัดแบบแม่พิมพ์เย็นให้ความแข็งแรงของวัสดุที่น้อยกว่า เนื่องจากข้อด้อยของวิธีการขึ้นรูปที่มีประสิทธิภาพการบรรจุอนุภาคสาร (Packing) ต่ำกว่า จากการหาขอบเขตการขึ้นรูปเย็นพบว่าขอบเขตการขึ้นรูปเย็นที่เหมาะสมในการขึ้นรูปคือหลังจากอัดด้วยแม่พิมพ์เย็น Pre-heating ที่ 100°C 15 ชั่วโมง จากนั้นอบด้วยอุณหภูมิ 160°C 1 ชั่วโมง จากการศึกษาวัสดุรีไซเคิลพบว่าการเพิ่มอนุภาคเศษเมลามีนเข้าไปในเมลามีนใหม่ ทำให้ความแข็งแรงดัด (Flexural Strength) และแรงกระแทก (Impact Strength) ลดลง แต่ช่วยปรับปรุงความเสถียรในการรับแรงอัด (Compressive Strength) ได้ดีขึ้นเมื่อใส่ในปริมาณที่เหมาะสม

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

METHINI MAHAI : MECHANICAL PROPERTIES OF RECYCLED
MATERIAL FROM WASTE MELAMINE AT VARIOUS COMPOSITIONS
FORMED BY HOT MOLDING AND COLD MOLDING PROCESSES.
THESIS ADVISOR : SOMSAK SIWADAMRONGPONG, Ph.D., 72 PP.

RECYCLE/MELAMINE FORMALDEHYDE RESIN/THERMOSETTING

Melamine–formaldehyde resin is one of thermosetting plastics that are widely used in kitchen ware production industries. In the manufacturing processes, scrap and waste of formed melamine cannot be reformed or reused. Therefore, this study aims to investigate the proper proportion of virgin melamine powder and waste melamine in order to increase values of those plastic products. For experiment methodology, the melamine powder and waste melamine are compounded and formed as newly reformed products by hot compression molding and cold compression molding for mechanical property testing. Compressive test, bending test and impact test are used for evaluating mechanical properties of above mentioned products. For experimental results, the mechanical properties of cold molding products are relatively lower than hot molding products due different melamine molecular packing. It was found that the pre–heating at 100°C for 15 hours and heating at 160°C for 1 hour is the appropriate condition for cold forming. The impact and bending strengths of waste melamine containing products were relatively lower than virgin melamine products, while the compressive strength was improved for the product that contain waste melamine less than 40%.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้ หากไม่ได้รับความกรุณาจากท่านอาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ คอยให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการทำวิจัย อีกทั้งยังเป็นแบบอย่างที่ดีให้แก่ผู้วิจัย ในด้านการสอนการทำวิจัย ความมีระเบียบวินัย และการดำรงชีวิต ซึ่งผู้วิจัยจะนำไปใช้ในการทำงาน การดำรงชีวิตในภายภาคหน้าต่อไป

ขอขอบคุณบริษัทศรีไทยซูเปอร์แวร์จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในส่วนของวัสดุในการทำวิจัย เครื่องมือการขึ้นรูปชิ้นงานตลอดจนบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญในการขึ้นรูปวัสดุ มาให้ความรู้และช่วยเหลือในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและขอขอบคุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ให้ความรู้ทางด้านการใช้เครื่องมือตลอดจนอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณพ่ออยู่ไร แม่ประมวรัตน์ มาให้ ที่ได้ให้กำเนิดและอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนให้โอกาสทางการศึกษา

เมทินี มาให้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ปรีक्षणวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 กล่าวนำ.....	3
2.2 เมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์เรซิน (Melamine-Formaldehyde Resins).....	3
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.3.1 การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดร้อน (Hot Compression Molding).....	4
2.3.2 การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดเย็น (Cold Compression Molding).....	6
2.3.3 การทดสอบแรงค้ด (Bending Test).....	7
2.3.4 การทดสอบแรงอัด (Compressive Test).....	9
2.3.5 การทดสอบแรงกระแทก.....	12
2.3.5.1 การทดสอบแบบชาร์ปี (Charpy Test).....	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.5.2	การทดสอบแบบไอซอด (Izod Test)	17
2.3.5.3	การทดสอบแบบแฮทท์จูลเนอร์ (Hatt–Turner Test)	18
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
3	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	22
3.1	กล่าวนำ.....	22
3.2	วัสดุที่ใช้ทำการวิจัย	23
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	23
3.4	วิธีการทดลอง	24
3.4.1	การเตรียมวัตถุดิบสำหรับขึ้นรูป (Molding Compound)	24
3.4.2	การผสม	27
3.4.3	การกำหนดปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบอัดเย็น	28
3.4.4	การขึ้นรูป (Forming)	29
3.5	การทดลอง.....	33
3.5.1	สมบัติเชิงกล.....	33
3.5.2	สมบัติเชิงกายภาพ	35
3.5.3	สมบัติทางความร้อน	35
4	ผลลัพธ์และการอภิปรายผล	37
4.1	กล่าวนำ.....	37
4.2	ผลการทดสอบการหาวิธีการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดเย็น ของเมลามีนใหม่.....	38
4.2.1	ผลกระทบของเวลาในการ Pre-Heating ต่อความแข็งแรงดัด	38
4.2.2	ผลกระทบของเวลาและอุณหภูมิในการอบ (Heating) ต่อความแข็งแรงดัด.....	40
4.2.3	ผลกระทบของเวลาในการอบต่อความแข็งแรงดัด	43
4.3.	ผลของการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิล ที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อนและเย็น	45

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1	ผลกระทบของปริมาณเศษเมลามีนต่อความแข็งแรงดัด (Flexural Strength)	45
4.3.2	ผลกระทบของปริมาณเศษเมลามีนต่อความแข็งแรงกระแทก (Izod Impact Strength).....	46
4.3.3	ผลกระทบของปริมาณเศษเมลามีนต่อความแข็งแรงอัด (Compressive Strength)	47
4.4	ผลการทดสอบทางกายภาพของเมลามีนใหม่ที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อนและอัดเย็น	49
4.4.1	ผลทดสอบการดูดซึมน้ำของเมลามีนใหม่.....	49
4.4.1.1	ขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการอัดเย็น	49
4.4.1.2	ขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อน.....	50
4.5	ผลการทดสอบทางกายภาพของเมลามีนใหม่ที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อนและอัดเย็น	51
4.5.1	ผลการทดสอบ Thermo gravimetric analysis (TGA)	51
4.5.2	ผลการทดสอบ Differential scanning calorimetry (DSC)	52
4.6	ผลการทดสอบสัณฐานวิทยาของเมลามีนใหม่ที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อนและอัดเย็น.....	54
4.6.1	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)	54
4.6.2	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)	56
5	สรุปและข้อเสนอแนะ	59
5.1	สรุปผล.....	59
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	59
	รายการอ้างอิง	60
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	62
	ประวัติผู้เขียน	72

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะทางกายภาพของเมลามีน	4
3.1 อัตราส่วนการผสมวัตถุดิบ	27
3.2 มาตรฐานต่าง ๆ ของการทดสอบ	33
4.1 ขอบเขตของการทดสอบเวลาในการ Pre-Heating	39
4.2 ผลการทดสอบแบบ One Sample T – Test ของ ($H_0: \mu=90.12$) vs ($H_1: \mu \neq 90.12$) ด้วยความเชื่อมั่น 95%	40
4.3 ขอบเขตของการทดสอบอุณหภูมิและเวลาในการอบ	41
4.4 ผลการคำนวณทางสถิติด้วย Two – Way ANOVA ที่ความเชื่อมั่น 95% ของตัวแปรอุณหภูมิและเวลา	42
4.5 ขอบเขตของการทดสอบเวลาในการอบ	44
4.6 ผลการทดสอบแบบ One Sample T – Test ของ ($H_0: \mu=104.05$) vs ($H_1: \mu \neq 104.05$) ด้วยความเชื่อมั่น 95%	50
4.7 ผลการทดสอบแบบ One Sample T – Test ของ ($H_0: \mu=163.50$) vs ($H_1: \mu \neq 163.50$) ด้วยความเชื่อมั่น 95%	51

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ส่วนประกอบของเครื่องกดอัด5
2.2	แม่พิมพ์ที่ใช้ในการอัด.....6
2.3	ลักษณะการทดสอบแรงดัดงอแบบจุดสามจุด8
2.4	การเลือกรูปแบบโค้งงอออกด้านข้างของวัสดุภายใต้แรงอัด9
2.5	ชิ้นทดสอบพลาสติกสำหรับทดสอบแรงอัด..... 10
2.6	แสดงการรับแรงของชิ้นงานกับทิศทางของการใส่แรง 11
2.7	ลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบแรงกระแทก..... 13
2.8	ชิ้นทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปีและไอซอด 15
2.9	ลักษณะการทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี 16
3.1	แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน โดยสังเขป.....22
3.2	ผลการทดสอบการวัดขนาดเฉลี่ยของผงเมลามีนใหม่.....24
3.3	ลักษณะผงเมลามีนใหม่.....25
3.4	แผนผังกระบวนการเตรียมเศษเมลามีน25
3.5	ผลการทดสอบการวัดขนาดเฉลี่ยของเศษเมลามีน.....26
3.6	ลักษณะเศษเมลามีน27
3.7	ชิ้นทดสอบแรงดัด (3 – Point Bending Test).....28
3.8	ชิ้นทดสอบแรงอัด (Compressive Test Specimen).....29
3.9	ชิ้นทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod Impact Test Specimen).....29
3.10	กระบวนการขึ้นรูปเมลามีนแบบอัดร้อน30
3.11	แผนผังการขึ้นรูปแบบอัดเย็น30
3.12	กลไกของแม่พิมพ์อัดเย็น.....31
3.13	ชิ้นทดสอบแรงดัด แรงอัดและแรงกระแทก32
3.14	การทดสอบแบบจุดรองรับสามจุด34
3.15	การทดสอบแรงอัด34
3.16	การทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1	แผนผังการทดสอบขึ้นรูปแบบอัดเย็น 38
4.2	ขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการอัดแบบแม่พิมพ์เย็น 39
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงคัดและเวลาที่ใช้ Pre-Heating..... 40
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเวลาอบที่มีผลต่อความแข็งแรงคัด..... 41
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเวลาอบที่มีผลต่อความแข็งแรงคัด..... 42
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเวลาอบที่มีผลต่อความแข็งแรงคัด..... 43
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงคัดและเวลาในการอบ..... 44
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงคัด และร้อยละปริมาณเศษเมลามีน 45
4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัส และร้อยละปริมาณเศษเมลามีน 46
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทก และร้อยละปริมาณเศษเมลามีน 47
4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงอัด และร้อยละปริมาณเศษเมลามีน 48
4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงคัด ของขึ้นทดสอบการดูดซึมน้ำ..... 50
4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงคัด ของขึ้นทดสอบการดูดซึมน้ำ..... 51
4.14	กราฟ TGA ของเมลามีนเมื่อเปลี่ยนวิธีการขึ้นรูปแบบอัดร้อนและอัดเย็น 52
4.15	กราฟ DSC ของสารประกอบเมลามีน (Melamine compound) 53
4.16	กราฟ DSC ของวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อน 53
4.17	กราฟ DSC ของวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยการอัดเย็น 54
4.18	วัสดุที่ผสมเศษเมลามีน 0% 55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 วัสดุที่ผสมเศษเมลามีน 20%	55
4.20 วัสดุที่ผสมเศษเมลามีน 50%	56
4.21 ภาพตัดขวางของวัสดุเมลามีนใหม่	57
4.22 ภาพตัดขวางของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีน 40%	57
4.23 ภาพตัดขวางของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีน 50%	58



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

T -value	=	ค่าที่ใช้พิจารณาใน T – Distribution
P -value	=	ค่าสถิติที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05
H_0	=	สมมุติฐานหลัก (Null hypothesis)
H_1	=	สมมุติฐานรอง / สมมุติฐานทางเลือก (Alternative hypothesis)
μ	=	ค่าเฉลี่ยของประชากรทั้งหมดที่สนใจ
S	=	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)
R -sq	=	Coefficient of determination
DF	=	องศาอิสระ (Degree of freedom)
SS	=	ผลรวมความเบี่ยงเบนกำลังสอง (Sum of square)
MS	=	ค่ากลางกำลังสอง (Mean square)
F -value	=	ค่าที่ใช้พิจารณาใน F – distribution

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์เรซิน (Melamine-Formaldehyde Resins) เป็น โพลีเมอร์กลุ่มเทอร์โมเซต เมื่อผ่านการหลอมขึ้นรูปแล้ว มีลักษณะแข็งแรง ไม่หลอมเหลว ไม่ละลาย นิยมนำมาผลิตเป็นภาชนะและเครื่องใช้ต่าง ๆ เช่น ถ้วย ชาม จาน โต๊ะ เก้าอี้ เป็นต้น ซึ่งในกระบวนการผลิตจะเกิดเศษผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากเศษครีบก้นภายหลังกระบวนการผลิต ตกแต่งผลิตภัณฑ์และชิ้นงานที่เป็นของเสียจำนวนหนึ่ง ไม่สามารถนำกลับมาหลอมให้อ่อนตัวซ้ำได้

จากการที่เศษผลิตภัณฑ์เมลามีนนี้ไม่สามารถนำมาขึ้นรูปซ้ำได้อีก งานวิจัยนี้ได้เห็นประโยชน์ของเศษผลิตภัณฑ์เมลามีนที่อาจสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยการนำเศษผลิตภัณฑ์เมลามีนมาบดเป็นผงผสมกับเมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์เรซิน ที่ยังไม่ผ่านการอัดขึ้นรูปเพื่อใช้เป็นตัวยึดระหว่างผงที่มีลักษณะเป็นเทอร์โมเซตนี้ และขึ้นรูปอีกครั้งหนึ่งด้วยการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อน (Hot Molding) และแม่พิมพ์เย็น (Cold Molding) พร้อมทั้งทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน จึงได้ทำการค้นคว้าศึกษาวิจัยและทำการทดลองกระบวนการการขึ้นรูปที่เหมาะสมและศึกษาทดลองที่ปริมาณสัดส่วนของส่วนผสมต่าง ๆ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติทางกลที่สามารถนำไปใช้งานได้และใช้ต้นทุนการผลิตที่ไม่สูงเกินไป โดยทำการทดสอบ ทดสอบแรงดัด การทดสอบแรงอัดและทดสอบแรงกระแทก ว่ามีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำมาผลิตชิ้นงานประเภทใด

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการขึ้นรูปวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนด้วยการอัดแบบแม่พิมพ์ร้อนและแม่พิมพ์เย็น

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากการอัดแบบแม่พิมพ์ร้อนและแม่พิมพ์เย็นจากเศษเมลามีนที่อัตราส่วนต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาการขึ้นรูปด้วยการอัดด้วยแม่พิมพ์เย็นและแม่พิมพ์ร้อนของเศษเมลามีนจากบริษัท ศรีไทยซูบเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน) ที่มีลักษณะบดเป็นผงผสมกับผงเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการขึ้นรูป และศึกษาที่ปริมาณ อัตราส่วนผสมต่าง ๆ พร้อมทั้งทดสอบคุณสมบัติ ซึ่งประกอบไปด้วย

- 1.3.1 ทดสอบแรงกระแทก
- 1.3.2 ทดสอบแรงดัด
- 1.3.3 ทดสอบแรงอัด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถกำหนดการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน – ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินในการรีไซเคิลได้
- 1.4.2 เข้าใจถึงผลกระทบการปริมาณส่วนผสมเศษเมลามีนต่อคุณสมบัติเชิงกล



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมในการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพ การทำการทดลองนั้นจำเป็นต้องเข้าใจถึงกระบวนการและรายละเอียดของข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการทดสอบความแข็งแรงของเมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์เรซิน ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงข้อจำกัดและปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ได้การทดลองที่มีประสิทธิภาพ

2.2 เมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์เรซิน (Melamine-Formaldehyde Resins)

เมลามีน $C_3H_6N_6$ นำมาใช้กับฟอรัมาลดีไฮด์ เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์เรซิน (Melamine-Formaldehyde Resins) หรือเมลามีนฟิซิด เลียมฟิพัฒน์ (2542) ซึ่งเป็นโพลิเมอร์เทอร์โมเซตประเภทอะมิโน (Amino) มีน้ำหนักมากกว่าพลาสติกทั่ว ๆ ไปเล็กน้อย คือมีความถ่วงจำเพาะระหว่าง 1.47 – 1.52 รับแรงดึงได้ดีพอสมควร รับแรงอัดและแรงบิดงอได้ดีมาก ทนความร้อนได้ดี เนื้อแข็งแรงทนการขีดข่วนได้ดีไม่เหมาะกับการใช้ภายนอก ถูกแสงแดดจะซีดและเสื่อมคุณภาพมีสีต่าง ๆ มีทั้งสีฟ้าและทึบแสงชนิดฝ้ากระจายแสงได้ดีมาก

คุณสมบัติทางไฟฟ้า เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีกับกระแสไฟฟ้าความถี่ต่ำ ไม่เหมาะกับการใช้กับกระแสไฟฟ้าความถี่สูง ใช้ทำอุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิดที่เกิดไฟอาร์คแทนการใช้พลาสติกชนิดฟีนอลิก

คุณสมบัติทางด้านเคมี ทนกรดต่างชนิดอ่อนได้ ไม่ทนกรดต่างชนิดแก่ ทนสารเคมีอื่น ๆ เช่นผงซักฟอก น้ำมัน ไขมัน ทินเนอร์ ดูดซึมน้ำได้บ้าง

การอัดขึ้นรูปเมลามีน โดยปกติเมลามีนขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูป (Compression Molding) โดยแม่พิมพ์จะถูกยัดระหว่างแผ่นให้ความร้อนของแท่นประกบไฮโดรลิก จากนั้นคอมปาว์ซึ่งมีลักษณะเป็นผงในปริมาณที่เตรียมไว้จะถูก Pre-heating เพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 – 110 °C จากนั้นใส่คอมปาว์ไปในแม่พิมพ์ที่มีความร้อนเท่ากับอุณหภูมิขึ้นรูป ซึ่งวางอยู่ในแท่นประกบแท่นจะปิดด้วยความดันเพียงพอที่จะป้องกันการเกิดครีบที่เส้นแบ่งแยกแม่พิมพ์ ในกระบวนการนี้คอมปาว์จะอ่อนตัวและไหลไปตามรูปร่างของแม่พิมพ์ และหลังจากที่อุณหภูมิสูงพอที่จะเกิดการบ่ม (Cure) ของวัสดุในแม่พิมพ์จากนั้นชิ้นงานก็จะถูกนำออกจากแม่พิมพ์

ตารางที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพของเมลามีน

ลักษณะทางกายภาพ ของ Melamine-Formaldehyde Resins	
อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต	149 – 204°C
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	1.47 – 1.52
ทนแรงดึง (Tensile Strength)	34 – 90 MPa
ทนแรงอัด (Compressive Strength)	227 – 310 MPa
ทนแรงดัด (Flexural Strength)	62 – 110 MPa
Flexural Modulus	7.58 GPa
ทนแรงกระแทก (Impact Energy)	13.3 J/m
ความแข็ง (Hardness)	M115 – M125

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัย คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนที่ส่วนผสมต่าง ๆ ด้วยการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อนและแม่พิมพ์เย็นนี้ ในช่วงแรกจะเป็นการศึกษาการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อนและแม่พิมพ์เย็น จากนั้นขึ้นรูปวัสดุรีไซเคิลที่อัตราส่วนต่าง ๆ และทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ตามที่กล่าวข้างต้น

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะเป็นทฤษฎีเกี่ยวกับการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ได้แก่ การทดสอบแรงดัด การทดสอบแรงอัดและการทดสอบแรงกระแทก ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.3.1 การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดร้อน (Hot Compression Molding)

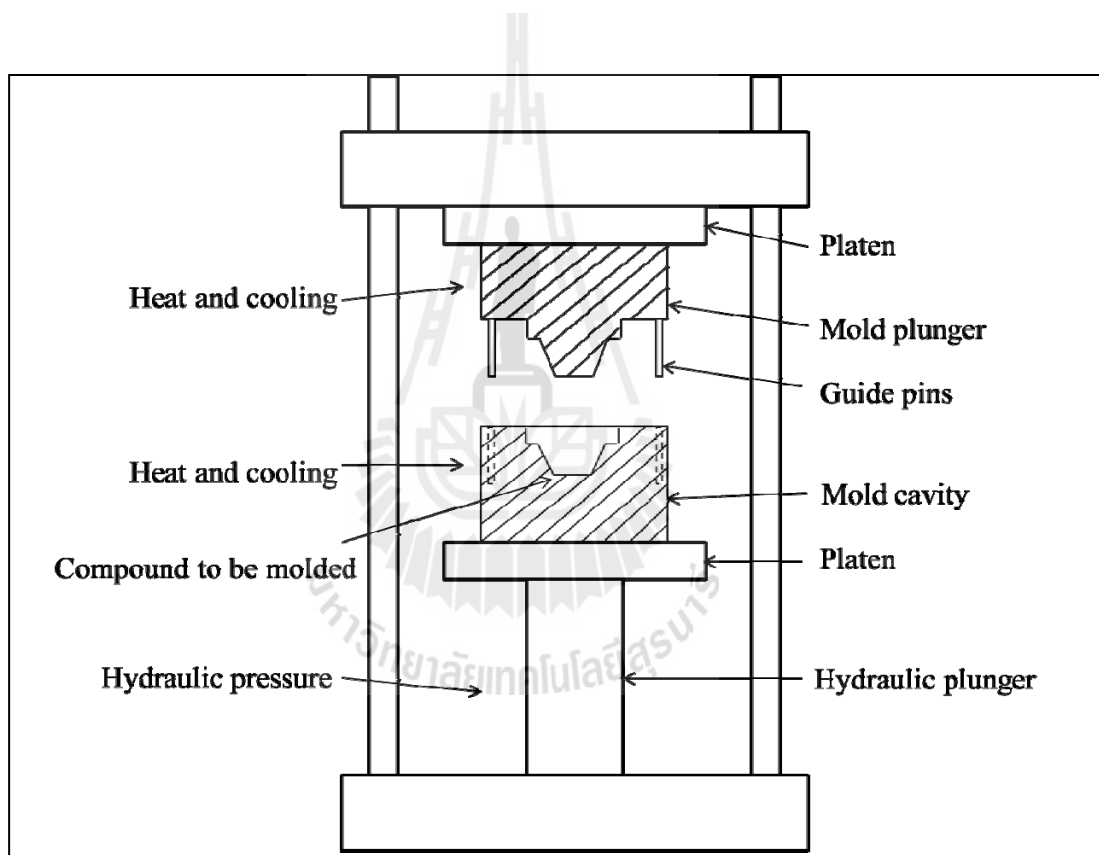
เทคนิคการอัดร้อน (Hot Compression Molding) เป็นเทคนิคการขึ้นรูปร้อนที่เก่าแก่ที่สุดเทคนิคหนึ่ง แต่ก็ยังมีการใช้ในการแปรรูปพลาสติกอย่างกว้างขวาง ในปัจจุบันก็ยังมีการใช้เทคนิคการอัดพลาสติกกลุ่มเทอร์โมเซต และยาง นอกจากนี้ยังเป็นที่ยอมรับใช้กับเทอร์โมพลาสติกที่แปรรูปด้วยเทคนิคอื่นได้ยาก

สำหรับเครื่องอัดในการแปรรูปพอลิเมอร์นั้นเริ่มต้นประมาณศตวรรษที่ 19 โดยนักอุตสาหกรรมชื่อ Thomas Hancock ใช้อัดเบ้ายาง กระบวนการแปรรูปนี้ถูกจดลิขสิทธิ์ครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1870 โดยนักวิทยาศาสตร์สองคนชื่อ John Wesley Hyatt และ S. Hyatt กระบวนการแปรรูปโดยการอัดประยุกต์ใช้กับพลาสติกครั้งแรกหลังจาก Bakeland ค้นพบ

วิธีการสังเคราะห์เรซินฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ในปี ค.ศ. 1980 ปัจจุบันกระบวนการแปรรูปนี้ยังใช้กัน
อย่างแพร่หลาย

ส่วนประกอบหลักของเครื่อง คือ แผ่นเหล็กอัด (Platens) จำนวน 2 ชุด ซึ่งแผ่น
หนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ อีกแผ่นจะถูกยึดติดกับด้านที่ทำให้สามารถทำการปิดเปิดเบ้าได้
เนื่องจากเบ้าถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กทั้งสองแผ่นนี้ ส่วนประกอบอื่น ๆ คืออุปกรณ์ให้ความร้อน
ระบบไฮดรอลิกและอุปกรณ์หล่อเย็น ลักษณะเครื่องแสดงดังรูปที่ 2.1

วิธีการขึ้นรูปทำได้โดยนำวัสดุผสมเข้าไปในเบ้า และให้ความร้อนขณะทำการอัด
จากนั้นใช้ระบบหล่อเย็น โดยใช้น้ำไหลหมุนเวียนเข้าสู่ระบบท่อใกล้ช่องว่างของเบ้า



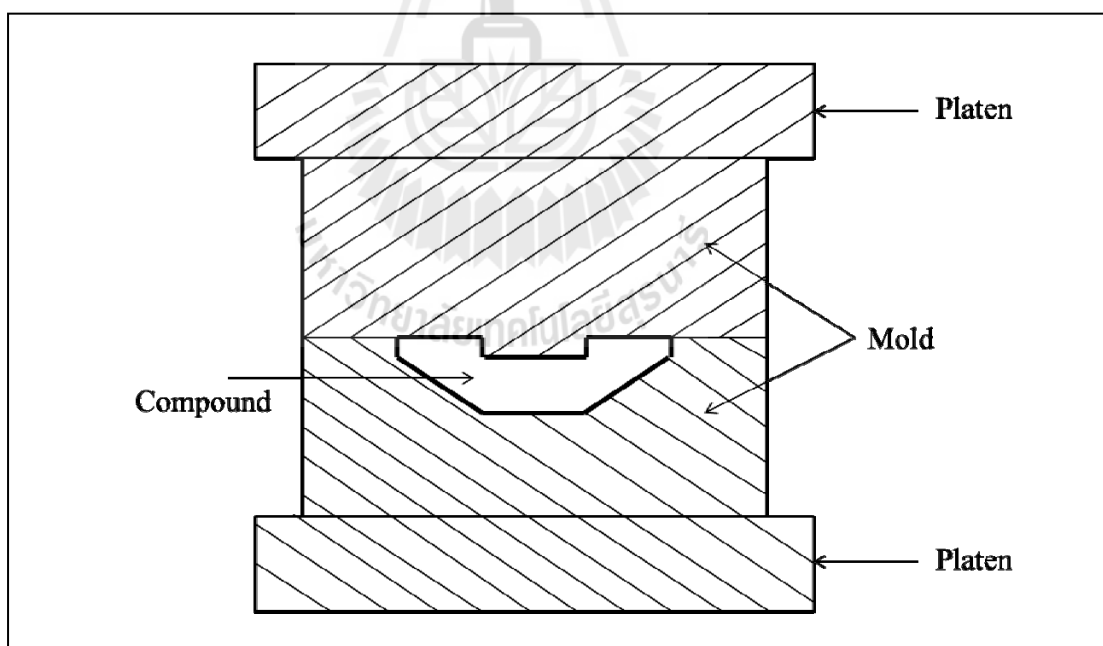
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครื่องกดอัด

ความดันที่ใช้ในการอัดเบ้าต้องใช้น้อยที่สุด แต่มากพอที่ทำให้พลาสติกไหล
เต็มช่องว่างของเบ้า แต่ไม่สูงจนทำให้พลาสติกรั่วไหลออกจากรอยแยกเบ้า ระดับความดันที่ใช้
ขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูป

2.3.2 การขึ้นรูปด้วยการอัดเย็น (Cold Compression Molding)

การขึ้นรูปด้วยการอัดเย็นเป็นกรรมวิธีที่ดัดแปลงมาจากกรรมวิธีการผลิตในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาใช้เพียงแรงอัดอย่างเดียว ไม่ใช้ความร้อนทำให้หลอมละลาย กรรมวิธีทั่วไปเหมือนกับแบบอัดร้อนแต่ทำได้เร็วกว่า เพราะไม่ต้องรอให้หลอมละลายก่อน เมื่ออัดก้อนแล้วจึงนำไปเข้าเตาอบในปริมาณมากพร้อม ๆ กันอีกครั้ง ซึ่งขั้นตอนการผลิตมีดังนี้

- 1) นำเอาส่วนผสมของพลาสติกเหลวกับวัสดุผสมอื่น เช่น ใยหิน ที่มีลักษณะอ่อนตัวได้ในแม่แบบเครื่องอัด
- 2) ผลกดแม่แบบโดยใช้แรงอัด 13.7 – 27.5 MPa ความเร็วที่กดแล้วแต่ชนิดของเครื่องและความสะดวกสบาย
- 3) นำชิ้นงานออกจากแม่แบบ
- 4) นำชิ้นงานไปเข้าเตาอบซึ่งมีอุณหภูมิ 232°C ปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของเตา ใช้ระยะเวลาประมาณ 72 ชั่วโมง จะทำให้พลาสติกสุกและแข็งตัว
- 5) นำชิ้นงานที่อบแล้วออก



รูปที่ 2.2 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการอัด

ชนิดของพลาสติกเป็นพวกเทอร์โมเซตติง และนิยมใช้เฉพาะฟีนอลิก (Phenolic) เท่านั้น ก่อนใช้น้ำฟีนอลิกนำไปผสมกับใยหินให้มีลักษณะอ่อนตัว วัสดุอื่นนอกจากพลาสติกที่ใช้

ผลิตด้วยกรรมวิธีแบบนี้มี พุกบิตุเมน (เช่นยางแอสฟัลท์หรือที่เรียกกันว่ายางมะตอย) กับวัสดุผสมอื่นเช่นใยหิน ส่วนชนิดของผลิตภัณฑ์ใช้ทำพวกอุปกรณ์ไฟฟ้าราคาถูกที่รับแรงน้อย ๆ ปุ่มและมือจับ

2.3.3 การทดสอบแรงดัด (Bending Test)

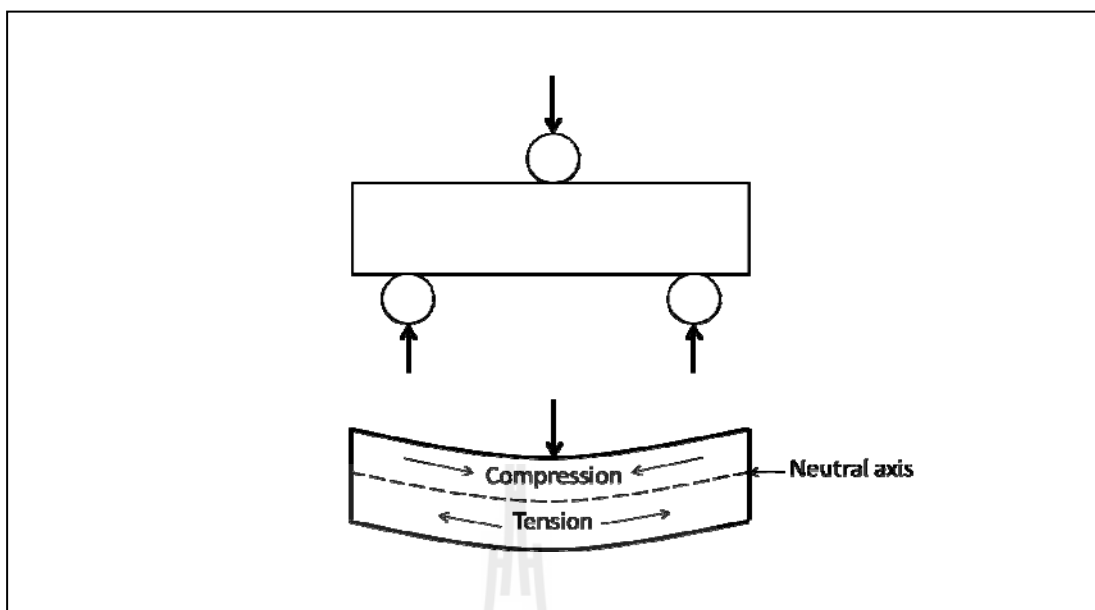
การทดสอบแรงดัดคือการใส่แรงกระทำกับชิ้นทดสอบแล้วทำให้เกิดแรงเค้นอัดที่บริเวณด้านบนของหน้าตัดชิ้นงานและเกิดแรงเค้นดึงที่บริเวณด้านล่างของหน้าตัดชิ้นงาน การดัดอาจกระทำด้วยแรงเค้นตรง แรงเฉือนตัด หรือแรงเฉือนบิด โดยแท่งชิ้นงานที่มีการใช้ในลักษณะที่มีการรับแรงแบบสวนทางมักจะทำการทดสอบการดัด ซึ่งแท่งชิ้นงานจะมีการโค้งงอเกิดขึ้น ณ หนึ่งบนพื้นผิวบริเวณที่มีการรับแรง การดัดเป็นการทดสอบสติเฟนสของแท่งทดสอบซึ่งสามารถใช้เป็นฟังก์ชันในส่วนของสมบัติสติเฟนสของวัสดุ

สมบัติที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบดัดจะเป็นแบบเดียวกันกับการทดสอบแรงดึง ได้แก่ ความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Strength) จุดจำนน (Yield Point) โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus Of Elasticity) และอื่น ๆ ด้วยเหตุนี้การทดสอบการดัดจึงใช้เป็นการทดสอบพื้นฐานที่ดีที่สุดในการทดสอบชิ้นงานที่มีรูปทรงแบบต่าง ๆ ในการนำไปใช้งาน

เมื่อชิ้นทดสอบมีการรับแรงในลักษณะที่มีฐานรองรับทั้งสองแล้วมีการใส่แรงกระทำบริเวณตรงกลางชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้ด้านล่างของชิ้นงานอยู่ภายใต้ชิ้นงานและด้านบนอยู่ภายใต้แรงอัด แรงดึงจะทำให้ด้านล่างของชิ้นทดสอบถูกดึงยืดออกส่วนแรงอัดจะทำให้ชิ้นทดสอบถูกอัดเข้าหากัน และบริเวณกึ่งกลางระหว่างสองแรงนี้คือเส้นหรือแกนแบ่ง

การบันทึกข้อมูลแรงที่กระทำกับการดัดที่เกิดขึ้นสามารถนำไปเขียนกราฟแรงเค้นความเครียดการดัด เพื่อใช้ในการอธิบายคุณลักษณะของวัสดุจากการทดสอบการดัด นอกจากนั้นควรทำรายงานทั้งในส่วนของแรงที่กระทำกับการดัด ประเภทและคุณลักษณะของการแตกหัก เช่น อธิบายชนิดของรอยแตกหักว่าแตกหักจากแรงดึง แรงอัดหรือว่าแรงเฉือน หรือมีการบวมของชิ้นงานก่อนการแตกหักหรือไม่ ลักษณะของรอยแตกหักเป็นอย่างไร หยาบ ขรุขระ หรือเรียบเสมอกัน เป็นต้น หรืออาจมีการวาดรูปรอยแตกหักคร่าว ๆ ประกอบคำอธิบายสั้น ๆ ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ดีในการอธิบายประเภทและคุณลักษณะของรอยแตกหัก

การทดสอบการดัดมักทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine) รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของชิ้นทดสอบและการทดสอบการดัด การทดสอบการดัดบ่อยครั้งจะใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ โดยวางฐานรับชิ้นงานบนแท่นรับชิ้นงานดึง จากนั้นติดแท่นกดเข้ากับชุดเคลื่อนด้านบน



รูปที่ 2.3 ลักษณะการทดสอบแรงค้ดงอแบบจุดสามจุด

การบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับแรงที่กระทำและการค้ดงอที่เกิดขึ้น ตลอดจนความเร็วในการใส่แรงเป็นสิ่งที่สำคัญ โดยไม่ควรให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักเร็วเกินไป การกำหนดการทดสอบควรจะถูกอ้างอิงถึง

วัสดุเปราะเช่นเซรามิกและวัสดุประกอบ (Composite) การทดสอบแรงค้ดงอปกติไม่สามารถทำได้ เนื่องจากหัวจับยึดชิ้นงานจะทำให้เกิดรอยรอยบนพื้นผิวซึ่งจะเป็นจุดเริ่มต้นในการแตกหัก และทำให้ผลการทดสอบที่ได้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ในกรณีเช่นนี้จะใช้การทดสอบการค้ดงอในการวัดความแข็งแรงการค้ดงอและโมดูลัสการแตกหัก ด้วยการให้แรงกับชิ้นทดสอบแบบจุดสามจุด แรงค้ดงอจะเกิดขึ้นจากจุดกึ่งกลางที่ใส่แรงกระจายไปยังปลายทั้งสองของชิ้นทดสอบ ความแข็งแรงการค้ดงอสามารถคำนวณได้ดังสมการ 2.1

$$\text{ความแข็งแรงการค้ดงอ } (N/m^2) = \frac{3FL}{2wh^2} \quad (2.1)$$

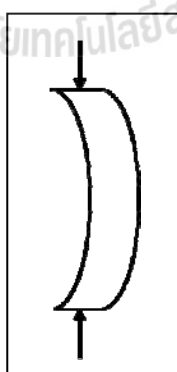
- เมื่อ
- F คือแรงกระทำ (นิวตัน)
 - L คือระยะห่างระหว่างสองจุดของฐานรองรับชิ้นงาน (เมตร)
 - w คือความกว้างของชิ้นทดสอบ (เมตร)
 - h คือความสูงของชิ้นทดสอบ (เมตร)

2.3.4 การทดสอบแรงอัด (Compressive Test)

การทดสอบแรงอัดเป็นการทดสอบที่มีลักษณะการใส่แรงกระทำในแบบตรงกันข้ามกับการทดสอบแรงดึง คือการทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบในลักษณะการดึงยืดขึ้น ทดสอบส่วนการทดสอบแรงอัดเป็นการทดสอบในลักษณะการกดอัดขึ้นทดสอบ โดยการพิจารณาเลือกการทดสอบแรงอัดแทนกระบวนการทดสอบอื่นขึ้นอยู่กับประเภทของการนำไปใช้งานของวัสดุ เช่น โลหะซึ่งมีความต้านทานแรงดึงค่อนข้างสูง รวมทั้งวัสดุกลุ่มพลาสติก ส่วนใหญ่จะทำการทดสอบแรงดึง ส่วนวัสดุประเภท เซรามิก อิฐ และผลิตภัณฑ์เซรามิก ซึ่งมีความแข็งแรงดึงค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับความแข็งแรงอัด ประกอบกับวัสดุประเภทนี้จะใช้งานในรูปของการรับแรงอัดมากกว่า ดังนั้นการทดสอบแรงอัดกับวัสดุประเภทนี้จึงทำให้นัยสำคัญมากกว่าการทดสอบแรงดึง

แรงเค้นอัดเกิดจากแรงที่อัดให้กับชิ้นทดสอบ ซึ่งทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการหดตัวหรืออัดตัวภายใต้แรงอัดนั้น ชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงอัดนี้จะต้องมีลักษณะสั้นและมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าความยาว เนื่องจากการทดสอบแรงอัดกับชิ้นทดสอบที่มีขนาดยาวจะเกิดการโค้งงอด้านข้าง ซึ่งมีรูปแบบการเกิดที่ไม่แน่นอนจากการเสียรูปแบบยืดหยุ่น ดังรูปที่ 4 ดังนั้นโดยปกติชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงอัดมักจะเตรียมชิ้นทดสอบในรูปทรงที่สะดวกที่สุด

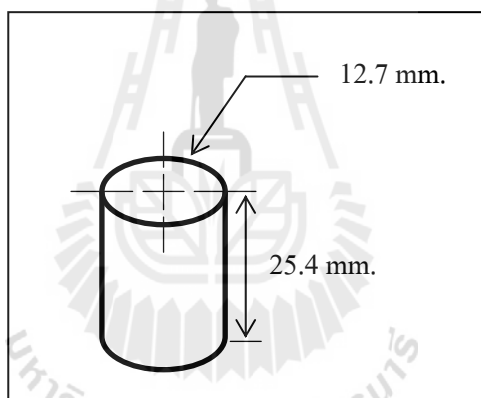
อัตราความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบต้องพิจารณาอย่างระมัดระวัง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุกับเงื่อนไขการทดสอบ เนื่องจากความคงรูปของชิ้นทดสอบจะลดลงตามความสูงหรือความยาวของชิ้นทดสอบที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.4 การเสียรูปแบบ โค้งงอออกด้านข้างของวัสดุภายใต้แรงอัด

ในทางกลับกันถ้าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างน้อยจะทำให้ความแข็งแรงปรากฏของชิ้นทดสอบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากความเสียดทานระหว่างหน้าสัมผัสของชิ้นทดสอบกับแท่นทดสอบ ซึ่งหน้าสัมผัสนี้จะทำให้ชิ้นทดสอบไม่สามารถเลื่อนได้ตลอดหน้าสัมผัส ทำให้เหมือนว่าวัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่วนตัวจับยึดชิ้นทดสอบจะปรับเปลี่ยนไปตามชนิดของวัสดุ บางครั้งเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบอาจต้องเปลี่ยนไปตามกำลังของเครื่องทดสอบ แต่อย่างไรก็ตามความยาวไม่ควรเกินสองเท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ

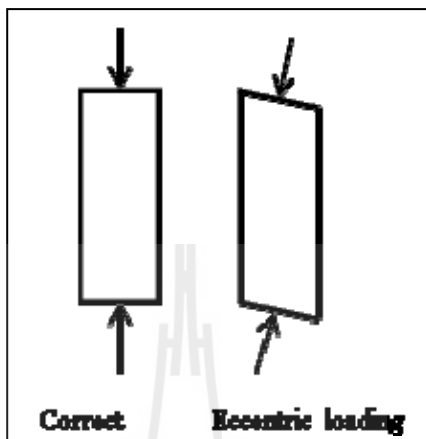
ส่วนปลายของชิ้นทดสอบควรเรียบขนานกันและตั้งฉาก สำหรับชิ้นทดสอบพลาสติกได้กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM D695 ดังรูปที่ 2.5 ชิ้นทดสอบตามมาตรฐานจะเป็นทรงกระบอกขนาด 12.7 X 25.4 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 : 1



รูปที่ 2. 5 ชิ้นทดสอบพลาสติกสำหรับทดสอบแรงอัด

เครื่องทดสอบโดยปกติแล้วจะใช้เครื่องเดียวกับเครื่องทดสอบแรงดึง และแม้ว่าเครื่องทดสอบจะถูกออกแบบมาเพื่อทดสอบแรงอัดโดยเฉพาะ ความสามารถของเครื่องทดสอบก็ยังคงถูกกำหนดโดยขนาดและชนิดของวัสดุที่จะทำการทดสอบ ดังนั้นการทดสอบแรงอัดอาจทำได้ด้วยเครื่องทดสอบอื่น ๆ ที่สามารถให้แรงกดอัดกับชิ้นทดสอบและสามารถวัดค่าแรงอัดได้ ทรานส์กัมมิ่งของเครื่องมีขนาดมากกว่าความแข็งแรงอัดของวัสดุ อุปกรณ์วัดระยะการอัดตัว (Compress Meter) จะใช้แบบเดียวกันกับอุปกรณ์วัดระยะยืด (Extensometer) ในการทดสอบแรงดึง

ส่วนปลายทั้งสองของชิ้นงานควรเรียบเสมอกันและตั้งฉากกันซึ่งจะทำให้แรงเค้นไปสะสมอยู่ที่บริเวณปลายทั้งสอง มิเช่นนั้นจะเกิดการรับแรงที่บิดเบี้ยวไปจากแนวแกนของชิ้นทดสอบดังแสดงรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการรับแรงของชิ้นงานกับทิศทางของการใส่แรง

วัตถุประสงค์การทดสอบแรงอัดคือการวัดความแข็งแรงอัดของชิ้นทดสอบ ซึ่งมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องได้แก่ ความแข็งแรงการอัด น้ำหนักที่ใส่ และการเสียรูปที่เกิดขึ้น วัสดุเปราะจะวัดความแข็งแรงอัดได้ไม่ยาก ส่วนความแข็งแรงอัดของวัสดุเหนียวจะขึ้นอยู่กับการเสียรูปเช่นเดียวกับการทดสอบแรงดึง และวัสดุเหนียวจะไม่แสดงอาการแตกหักแบบฉับพลันเหมือนกับวัสดุเปราะ เนื่องจากวัสดุเหนียวจะเกิดการโป่งออกด้านข้าง และข้อมูลการเสียรูปในลักษณะของการโป่งออกนี้จะต้องทำการวัดและบันทึกไว้เพื่อใช้ในการหาค่าความแข็งแรงอัดของวัสดุ

ก่อนทดสอบต้องทำการวัดขนาดของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องมือที่เหมาะสมและให้ค่าที่ถูกต้อง เมื่อได้ค่าขนาดของชิ้นทดสอบที่เหมาะสมแล้วนำไปปรับแรงกดอัดในเครื่องทดสอบแรงอัด และควรระมัดระวังในการทดสอบโดยต้องให้ชิ้นทดสอบตั้งตรงและอยู่ในแนวแกนของการใส่แรงของเครื่องทดสอบตลอดการทดสอบ เนื่องจากการยากที่จะควบคุมการเกิดการกระจายตัวแรงเค้นอย่างสม่ำเสมอในระหว่างการทดสอบ ดังนั้นการวัดความเครียดมักจะทำ 120° รอบแนวเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นทดสอบและควรใช้อุปกรณ์วัดการอัดแบบเฉลี่ยในการทดสอบ

อัตราการใส่แรงจำเพาะของแต่ละวัสดุจะแตกต่างกันไปตามที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM ส่วนข้อมูลที่ได้จะเกี่ยวกับการกดอัดและน้ำหนักที่ใส่ระหว่างการทดสอบ โดยข้อมูลเหล่านี้

สามารถนำมาเขียนกราฟแรงเค้นความเครียด ความแข็งแรงอัดจะเหมือนกับความแข็งแรงดึง มีหน่วยพาสคาล โดยค่าแรงเค้นจะได้จากค่าน้ำหนักกดอัดต่อพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ

2.3.5 การทดสอบการกระแทก

อัตราเร็วการใส่แรงและอัตราการเสียรูปที่เกิดขึ้นทำให้วัสดุแสดงสมบัติแตกต่างกันคือวัสดุส่วนใหญ่สามารถรับแรงได้สูงขึ้นก่อนแตกหักหากมีระยะเวลาการใส่แรงนานขึ้นคือการทดสอบแบบสถิต (Static Testing) แต่ถ้าแรงแบบพลวัต (Dynamic Testing) แม้จะกระทำด้วยแรงที่น้อยกว่าปกติชิ้นงานก็แตกหักได้ ทั้งนี้เพราะสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุหลายชนิดขึ้นอยู่กับอัตราการยืดตัว (Strain Rate) การทดสอบที่ใช้วัดค่าพลังงานที่จำเป็นในการทำให้วัสดุแตกหักภายใต้การรับแรงแบบฉับพลันนี้เรียกว่าเป็นการทดสอบการกระแทก

การทดสอบการกระแทกเป็นการวัดการส่งถ่ายพลังงานที่จำเป็นในการแตกหักของวัสดุ ค่าความแข็งแรงการกระแทกจะบ่งบอกถึงความสามารถในการรับแรงแบบฉับพลัน (Shock Load) แม้พลังงานไม่สามารถสร้างและทำลาย แต่พลังงานการกระแทกจะสูญเสียไปในหลายลักษณะ เช่น ถูกใช้ในการเสียรูปแบบยืดหยุ่นและแบบถาวรของวัสดุ และแรงเสียดทานจากการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่าง ๆ เป็นต้น โดยการออกแบบ โครงสร้างและเครื่องจักรประการแรกต้องให้ชิ้นงานสามารถดูดซับพลังงานให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ในช่วงของการยืดหยุ่นและประการที่สองคืออาศัยการหั่นบางรูปแบบเพื่อลดการดูดซับพลังงานของเครื่อง ในการทดสอบการกระแทกจะใช้พลังงานของลูกตุ้มกระแทกให้ชิ้นทดสอบแตกหัก โดยพลังงานจะนิยามเป็นงานซึ่งเป็นแรงที่กระทำเป็นระยะทางหนึ่ง ดังสมการ 2.2

$$W = FD \quad (2.2)$$

เมื่อ

W คืองาน (นิวตันเมตร)

F คือแรงที่กระทำ (นิวตัน)

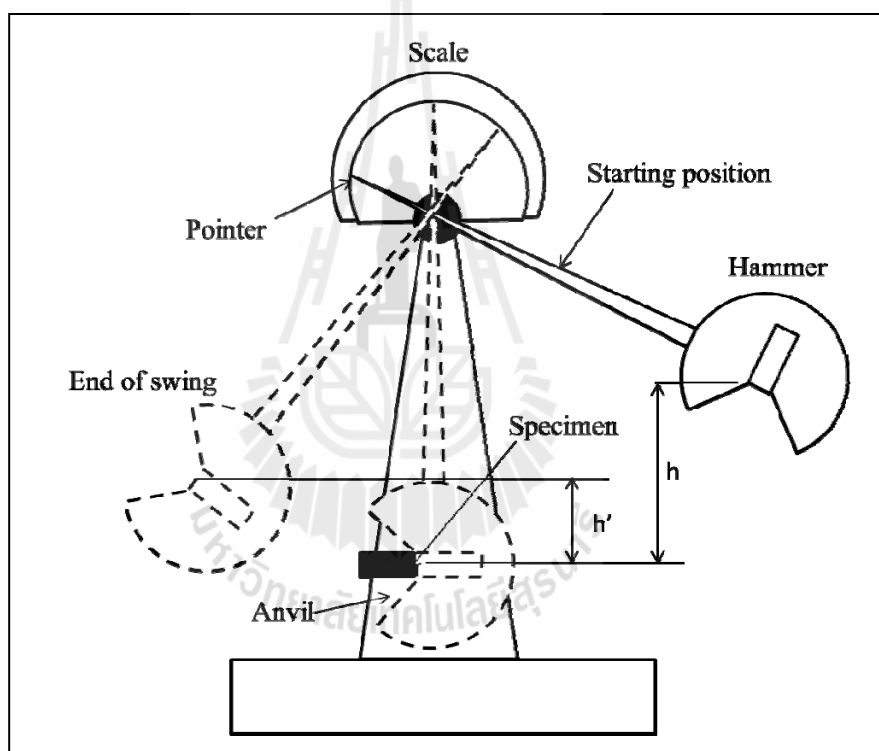
D คือระยะทางในช่วงที่แรงกระทำ (เมตร)

วัตถุประสงค์การทดสอบแรงกระแทกคือการวัดงานที่ใช้ในการแตกหักภายใต้การกระแทกอย่างฉับพลัน ซึ่งสามารถได้จากการปล่อยลูกตุ้มที่ทราบค่าน้ำหนักแน่นอนลงบนชิ้นทดสอบด้วยความสูงค่าหนึ่ง ดังรูปที่ 2.7 แล้วทำการคำนวณค่าการดูดซับพลังงานการกระแทกหรือความต้านทานการกระแทกของวัสดุจากผลต่างของระดับพลังงานศักย์ของลูกตุ้มก่อนและหลังการกระแทกด้วยสมการ 2.3

$$E = w(h - h') \quad (2.3)$$

$$= mg(h - h')$$

- เมื่อ
- E คือพลังงานที่ได้จากการปล่อยตุ้มน้ำหนัก (นิวตันเมตร)
 - w คือน้ำหนักของลูกตุ้ม (นิวตัน)
 - m คือมวลของตุ้มน้ำหนัก (กิโลกรัม)
 - h, h' คือความสูงลูกตุ้มก่อนและหลังกระแทกตามลำดับ (เมตร)
 - g คืออัตราเร่งจากแรงดึงดูดของโลก (9.81 เมตร/วินาทีกำลังสอง)

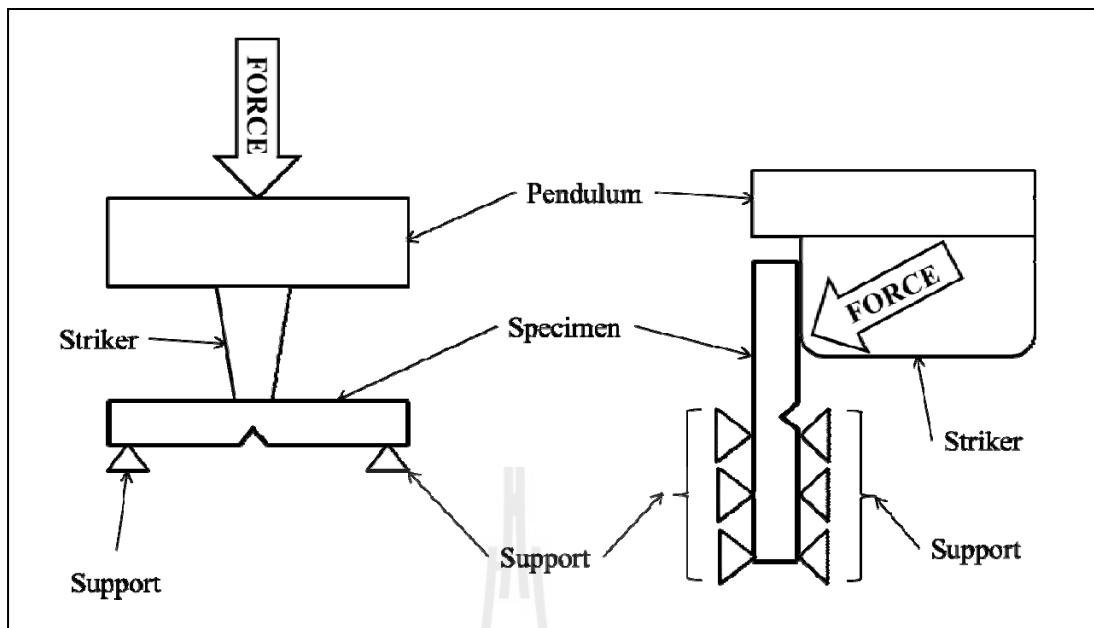


สมบัติของวัสดุที่สัมพันธ์กับความแตกหักเรียกว่าความแกร่ง (Toughness) โดยสาเหตุของการแตกหักมาจากการกระแทกหรือแรงกระทำแบบฉับพลัน โดยความเหนียวและความแข็งแรงจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อความแกร่งของวัสดุ และโดยทั่วไปจะทำการทดสอบการกระแทกในการวัดความแกร่งของวัสดุ

แรงที่กระทำในการทดสอบการกระแทกสามารถทำได้ทั้งในรูปของการดัดงอ การดึง การอัด หรือการบิด แต่ที่นิยมใช้คือแรงดัดงอและที่นิยมใช้น้อยที่สุดคือแรงดึง ส่วนแรงอัด และแรงบิดจะใช้เฉพาะกรณีเท่านั้น การตีกระแทกสามารถทำได้ด้วยการปล่อยลูกตุ้มน้ำหนักการเหวี่ยงลูกตุ้มหรือการหมุนวงล้อ บางการทดสอบจะเป็นการทดสอบการแตกหักของชิ้นทดสอบด้วยการกระแทกเพียงครั้งเดียว บางการทดสอบเป็นการแตกหักชิ้นทดสอบด้วยการกระแทกหลายครั้งด้วยน้ำหนักเดิม โดยเพิ่มความสูงลูกตุ้มขึ้นเรื่อย ๆ จนชิ้นงานแตกหัก

อย่างไรก็ตามการทดสอบที่นิยมใช้โดยทั่วไปได้แก่ การทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี และแบบไอซอด (Charpy and Izod Impact Tests) โดยการทดสอบทั้งคู่นี้จะทำการใส่แรงกระทำด้วยการเหวี่ยงลูกตุ้มและให้ชิ้นทดสอบที่มีร่องบากและมีขนาดเล็ก และการทดสอบจะเป็นการใส่แรงด้วยการดัดงอ การทดสอบทั้งสองแบบนี้ต่างกันที่การออกแบบชิ้นทดสอบและความเร็วของลูกตุ้มในการกระแทกชิ้นทดสอบ ในการทดสอบแบบชาร์ปีชิ้นทดสอบจะถูกยึดในลักษณะเป็นคานเดี่ยว (Single Beam) แล้วตีกระแทกที่บริเวณด้านหลังของร่องบาก ส่วนในการทดสอบแบบไอซอดจะยึดชิ้นงานในรูปของคานโยก และตีกระแทกที่ปลายอีกข้างหนึ่งด้านหน้าร่องบาก ในการทดสอบเหล่านี้การดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นในชิ้นทดสอบในการแบบไอซอดดังรูปที่ 2.8 จะถูกยึดปลายข้างหนึ่งในแนวตั้งด้วยหัวจับที่ติดอยู่กับตัวฐาน ความเร็วมาตรฐานในการเหวี่ยงลูกตุ้มในการทดสอบการกระแทกแบบไอซอดคือ 11.5 ฟุตต่อวินาที ในขณะที่การทดสอบแบบชาร์ปีชิ้นงานจะถูกยึดปลายทั้งสองข้างและอยู่ในแนวนอน โดยใช้ความเร็วลูกตุ้มในการกระแทก 17.5 ฟุตต่อวินาที การบากชิ้นทดสอบทั้งสองแบบเป็นการเพิ่มแรงเค้นเฉพาะบริเวณ ซึ่งจะทำให้เกิดการดูดซับของพลังงานที่จุดเดียวและทราบบริเวณที่ชิ้นงานจะเกิดการแตกหัก ถ้าไม่มีการบากแรงเค้นจะกระจายไปทั่วชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปถาวรจากการดัดงอมากกว่าที่เกิดการแตกหัก ซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบที่ได้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุประสงค์การทดสอบการกระแทกเป็นการวัดปริมาณพลังงานที่ต้องการในการแตกหักของวัสดุ

สำหรับวัสดุไม้จะใช้การทดสอบแบบฮัทท์จูลเนอร์ โดยการทดสอบแบบนี้จะเป็นการทดสอบการกระแทกที่ใส่แรงกระทำในลักษณะการดัดงอด้วยการปล่อยก้อนน้ำหนักคงที่ค่าหนึ่งที่ระยะความสูงต่าง ๆ โดยความสูงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักจะถูกใช้ในการหาค่าความแกร่งของวัสดุ และข้อมูลที่จะได้รับการทดสอบแบบฮัทท์จูลเนอร์นี้ได้แก่โมดูลัสความยืดหยุ่น จีดีจำกัดสัดส่วน และค่าเรซิเลียนเฉลี่ย



รูปที่ 2.8 ชั้นทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปีและไอซอด

ส่วนประกอบที่จำเป็นต้องได้มาตรฐานในการทดสอบการกระแทกได้แก่ กระบวนการทดสอบ แท่นวางชิ้นงาน ชุดรองรับชิ้นงาน ชั้นทดสอบ น้ำหนักของลูกตุ้ม และความเร็วการกระแทกของลูกตุ้ม

รูปแบบทางทฤษฎีของเครื่องทดสอบการกระแทกแบบแตกหักในคราวเดียว (Single Blow) ควรเป็นดังนี้

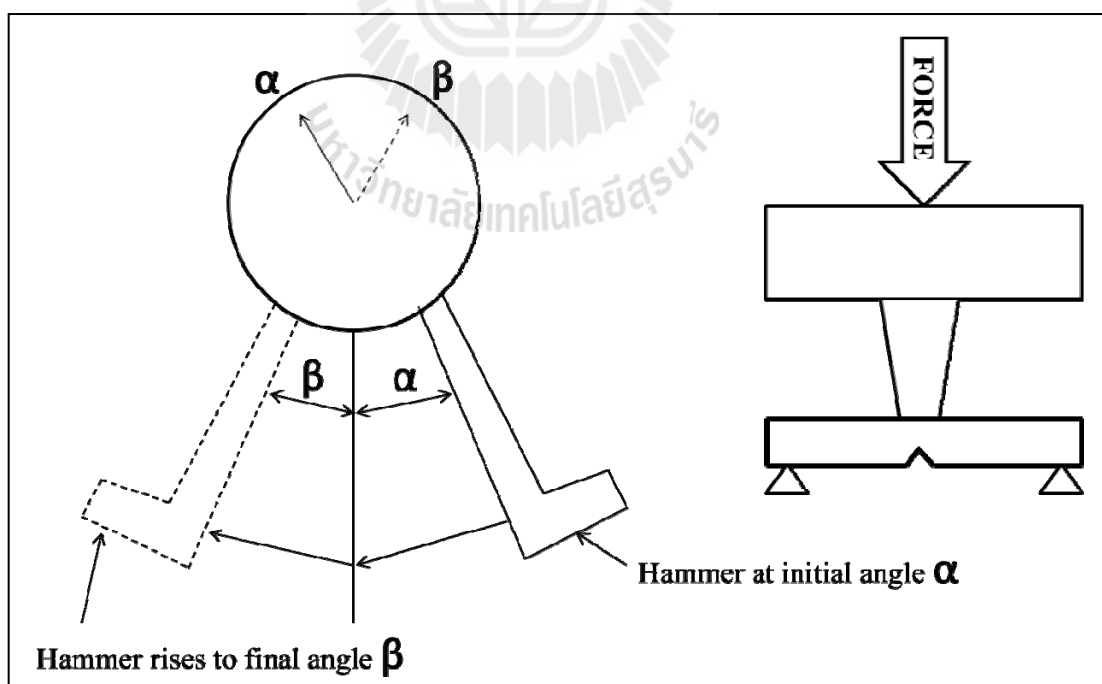
- ตั้มน้ำหนักที่เคลื่อนที่ควรจะให้พลังงานจลน์ที่มากพอที่จะทำให้ชั้นทดสอบแตกหักในบริเวณที่กำหนด
- แท่นวาง ชุดรองรับชิ้นงานที่สามารถรับแรงที่กระแทกได้เต็มที่
- กรรมวิธีสำหรับการวัดพลังงานหลงเหลือของลูกตุ้มหลังจากที่ชิ้นงานแตกหัก พลังงานจลน์การกระแทกจะทำการวัดและควบคุมจากน้ำหนักกับระดับความสูงที่วัดจากกึ่งกลางน้ำหนักของลูกตุ้มที่ถูกปล่อยลงมาอย่างอิสระ และลูกตุ้มควรจะถูกยึดเป็นอย่างดีเพื่อลดอิทธิพลของการแกว่งด้านข้างหรือแรงหน่วงและความเสียดทาน คือต้องอยู่สภาพที่ยึดแน่นเมื่อเหวี่ยงกระแทกกับชิ้นงาน ดังนั้นต้องหากลไกการขจัดสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้เพื่อลดผลกระทบจากการยึดเหนี่ยว ความเร่งและการสั่น

แท่งงานชิ้นงานควรจะมีน้ำหนักมากพอเมื่อเทียบกับพลังงานจากการกระแทกของลูกตุ้ม และไม่ทำให้พลังงานการกระแทกเกิดการสูญเสียจากการเสียดสีหรือการสั่นของแท่งวางและชิ้นงานจะต้องถูกยึดอย่างดีและอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องตลอดการทดสอบ

2.3.5.1 การทดสอบแบบชาร์ปี (Charpy Test)

เครื่องทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปีปกติจะมีขนาด 220 ปอนด์ฟุต สำหรับทดสอบโลหะและ 4 ปอนด์ฟุตสำหรับชิ้นงานพลาสติก (ASTM E23) ลูกตุ้มประกอบด้วยแขนยึดลูกตุ้มที่ค่อนข้างเบาแต่แข็งแรงและมีก้อนน้ำหนักติดอยู่ที่ปลาย ลูกตุ้มนี้จะเคลื่อนผ่านระหว่างขาตั้งเครื่องสองขา โดยมีใบมีดติดไว้ที่ของด้านที่จะกระแทกกับชิ้นทดสอบ ซึ่งต้องกระทบกับชิ้นงานบริเวณด้านหลังและเป็นส่วนที่ลึกที่สุดของร่องบาก

ชิ้นทดสอบมาตรฐานมีขนาด 10 X 10 X 55 มิลลิเมตร และมีการบากตรงกลางชิ้นงานไว้ที่ด้านหนึ่ง โดยชิ้นทดสอบจะถูกวางไว้ระหว่างแท่นรองรับชิ้นงาน โดยวางให้ฝั่งตรงข้ามร่องบากหันไปในทางที่จะทำการกระแทก คือใบมีดที่ติดอยู่กับลูกตุ้มจะต้องกระแทกเข้ากับด้านหลังร่องบากของชิ้นงานที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างแท่นรองรับชิ้นงาน ดังรูปที่ 7 จากนั้นทำการยกลูกตุ้มขึ้นไปยังมุมก่อนกระแทก แล้วปล่อยลูกตุ้มเหวี่ยงลงมากระทบกับชิ้นทดสอบ



รูปที่ 2.9 ลักษณะการทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี

ลูกตุ้มกระแทกต้องยกขึ้นด้วยมุมที่ทราบค่าแน่นอนคือ α ดังรูปที่ 2.9 ในทางทฤษฎีถ้าลูกตุ้มไม่มีความต้านทานใด ๆ เมื่อทำการปล่อยลูกตุ้มควรมีมุมหลังเหวี่ยงที่ด้านตรงข้ามเท่ากับมุม α เท่าเดิมซึ่งในความเป็นจริงจะมีความเสียดทานของเครื่อง ดังนั้นในการทดสอบควรรวมพลังงานที่สูญเสียไปกับความเสียดทานเหล่านี้ด้วย เมื่อทำการทดสอบให้ยกลูกตุ้มไปที่มุม α จากนั้นวางชั้นทดสอบเข้ากับแท่นวาง ปล่อยค้อนน้ำหนักลงมาโดยให้เหวี่ยงอย่างอิสระ เมื่อลูกตุ้มเหวี่ยงกระแทกกับชั้นทดสอบจะเกิดการถ่ายพลังงานส่วนหนึ่งให้กับชั้นทดสอบจนเกิดการแตกหัก จากนั้นลูกตุ้มจะเหวี่ยงเลยไปยังฝั่งตรงข้ามด้วยมุมน้อยกว่า β

เมื่อทำการบันทึกค่าน้ำหนักของลูกตุ้ม ความยาวของแขนลูกตุ้ม รวมทั้ง มุมยกเริ่มต้นกับมุมน้อยกว่าหลังกระแทกของลูกตุ้ม (α และ β) จากนั้นทำการคำนวณด้วยดังแสดงในสมการ 2.4

$$E = wr(\cos \beta - \cos \alpha) \quad (2.4)$$

$$= mgr(\cos \beta - \cos \alpha)$$

เมื่อ	E	คือพลังงานที่ใช้ในการแตกหักของชั้นทดสอบ (นิวตันเมตร)
	w	คือน้ำหนักลูกตุ้ม (นิวตัน)
	m	คือมวลของลูกตุ้ม (กิโลกรัม)
	g	คือความเร่งจากแรงดึงดูดโลก (9.81 เมตร/วินาทียกกำลังสอง)
	r	คือความยาวแขนลูกตุ้ม (เมตร)
	α	คือมุมยกลูกตุ้มเริ่มต้นก่อนกระแทก
	β	คือมุมน้อยกว่าลูกตุ้มสุดท้ายหลังกระแทก

2.3.5.2 การทดสอบแบบไอซอด (Izod Test)

เครื่องทดสอบการกระแทกแบบไอซอดปกติจะมีขนาด 120 ปอนด์ฟุต ส่วนการทดสอบจะเป็นแบบเดียวกันกับแบบชาร์ปี ถึงแม้ว่าชั้นทดสอบและรูปแบบการทดสอบจะต่างกัน ในการทดสอบการกระแทกแบบไอซอด ลูกตุ้มจะกระแทกด้านหน้าของชั้นทดสอบที่มีร่องบากซึ่งจะกลับกันกับการทดสอบแบบชาร์ปี ความแข็งแรงการกระแทกของชั้นทดสอบจะขึ้นอยู่กับค่ามุมหลังกระแทก ซึ่งปกติค่าพลังงานการกระแทกสามารถอ่านได้โดยตรงจากหน้าเครื่องทดสอบ

2.3.5.3 การทดสอบแชนท์จูลเนอร์ (Hatt – Turner Test)

การทดสอบการกระแทกแบบแชนท์จูลเนอร์โดยปกติจะใช้ในการทดสอบวัสดุไม้ซึ่งจะวัดด้วยปลอกค้ำน้ำหนักลงมากระแทกกับชิ้นทดสอบในแนวตั้งตามแรงโน้มถ่วง ชิ้นทดสอบจะเป็นชิ้นไม้ซึ่งปกติจะมีขนาด 2 X 2 X 30 นิ้ว และชิ้นทดสอบจะถูกวางบนแท่นขนาด 28 นิ้ว โดยปลอกค้ำจะถูกปล่อยลงมาตรงกึ่งกลางแท่นวาง โดยความสูงของปลอกค้ำเริ่มต้นที่ 1 นิ้ว จากนั้นจะทำการเพิ่มความสูงขึ้นครั้งละ 1 นิ้ว ไปเรื่อย ๆ จนถึงความสูง 10 นิ้วแรก ถ้าชิ้นงานยังไม่แตกหักให้เพิ่มความสูงเพิ่มขึ้นเป็นครั้งละ 2 นิ้ว จนกว่าชิ้นงานจะแตกหักหรือชิ้นงานเกิดการโค้งงอ 6 นิ้ว จากการกระแทก

เมื่อได้ข้อมูลหลังจากทำการทดสอบการกระแทกให้นำข้อมูลการทดสอบมาคำนวณหาค่าต่าง ๆ เป็นผลการทดสอบซึ่งจะเป็นสมบัติของวัสดุต่อไป

- พลังงานดูดซับ (Absorbed Energy) เป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการทำให้วัสดุแตกหัก ซึ่งหาค่าโดยการอ่านจากหน้าปัดของเครื่องทดสอบ หรือด้วยการคำนวณจากสมการพลังงานดูดซับ ดังสมการ 2.5

$$\begin{aligned} E &= wr(\cos \beta - \cos \alpha) \\ &= mgr(\cos \beta - \cos \alpha) \end{aligned} \quad (2.5)$$

- ค่าการกระแทก (Impact Value) หาได้จากการนำค่าพลังงานดูดซับหารด้วยพื้นที่หน้าตัดบริเวณร่องบาก ดังสมการ 2.6

$$\text{ค่าการกระแทก (Impact Strength)} = \frac{E}{A} \quad (2.6)$$

เมื่อ E คือพลังงานดูดซับ
A คือพื้นที่หน้าตัดบริเวณร่องบาก

- รอยแตกหัก (Fracture Surface) เมื่อทำการทดสอบการกระแทกกับวัสดุ รอยแตกหักที่เกิดขึ้นสองแบบคือรอยแตกหักเปราะกับรอยแตกหักเหนียว ซึ่งปกติแล้วพื้นที่การเปราะน่าจะอยู่บริเวณกึ่งกลางรอยแตก ส่วนพื้นที่การแตกเหนียวจะอยู่บริเวณขอบชิ้นงานโดยรอบ โดยวัสดุที่เหนียวกว่าจะมีสัดส่วนพื้นที่ร่องแตกเหนียวลดลงเมื่อวัสดุเปราะขึ้น ซึ่งปกติจะแสดงรูปของรอยละการแตกหัก

- ร้อยละการแตกแบบเปราะ (Percent Brittle Fracture, %B) เป็นร้อยละของอัตราส่วนพื้นที่รอยแตกเปราะต่อพื้นที่รอยแตกหักทั้งหมดของชิ้นทดสอบสภาพรอยแตกเปราะจะมีลักษณะเป็นเกรนของผลึกจำนวนมากและแตกแบบผ่าเกรน โดยมีพื้นที่ผิวแตกหักตั้งฉากกับแนวแรงที่กระทำและสะท้อนแสง ร้อยละการแตกเปราะหาได้โดยการวัดพื้นที่รอยแตกเปราะกับพื้นที่รอยแตกหักทั้งหมดแล้วนำไปคำนวณตามสมการ 2.6

$$\%S = (C/A) \times 100 \quad (2.7)$$

เมื่อ C คือพื้นที่รอยแตกเปราะ และ A คือพื้นที่รอยแตกทั้งหมด

- ร้อยละรอยแตกเหนียว (Percent Ductile Fracture, %S) เป็นร้อยละของอัตราส่วนพื้นที่รอยแตกเหนียวต่อพื้นที่รอยแตกหักทั้งหมดของชิ้นทดสอบ สภาพรอยแตกเหนียวจะมีลักษณะแตกตามขอบเกรนในแนว 45° กับแรงกระทำและไม่สะท้อนแสง ร้อยละการแตกเหนียวหาด้วยการวัดพื้นที่รอยแตกเหนียวกับพื้นที่รอยแตกหักทั้งหมดแล้วคำนวณตามสมการ 2.8

$$B = (F/A) \times 100 \quad (2.8)$$

เมื่อ F คือพื้นที่รอยแตกเหนียว

- อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะภาพ (Transition Temperature) เมื่อทำการทดสอบชิ้นงานหลาย ๆ ชิ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน เพื่อหาค่าอุณหภูมิเฉพาะที่ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะภาพ ซึ่งจะทำให้วัสดุมีความสามารถในการดูดซับพลังงานและมีพื้นผิวยอยแตกเปลี่ยนไปอย่างมาก นั่นคือเมื่อผ่านอุณหภูมินี้วัสดุจะเปลี่ยนพฤติกรรมจากเหนียวเป็นเปราะหรือจากเปราะเป็นเหนียวในทางกลับกัน

- อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงลักษณะรอยแตก (Fracture Appearance Transition Temperature, Trs) เป็นอุณหภูมิที่วัสดุมีพื้นที่ผิวยอยแตกเหนียวเท่ากับพื้นที่รอยแตกเปราะ นั่นคืออุณหภูมิ ณ จุดที่ชิ้นงานทดสอบมีพื้นที่ร้อยละการแตกเปราะกับร้อยละการแตกเหนียวเท่ากับร้อยละ 50 ร้อยละการแตกหักเมื่อทำการทดสอบวัสดุเหนืออุณหภูมินี้วัสดุมีร้อยละการแตกเหนียวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยวัสดุจะเปลี่ยนพฤติกรรมจากเปราะเป็นเหนียวและในทางกลับกัน วัสดุจะเปลี่ยนพฤติกรรมจากเหนียวเหนียวเป็นเปราะ

- อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงพลังงานดูดซับ (Energy Transition Temperature, T_{re}) เป็นอุณหภูมิที่วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงการดูดซับพลังงานอย่างรวดเร็วซึ่งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิ

การขยายตัวแนวขวาง (Lateral Expansion) คือความกว้างของชิ้นทดสอบที่เพิ่มขึ้นบริเวณรอยแตกหักด้านที่ถูกกระแทกเทียบกับความกว้างเดิมหาค่าได้โดยการนำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทดสอบมาทำการวัดขนาดความกว้าง แล้วนำไปคำนวณค่าการขยายตัวแนวขวาง ดังสมการ 2.9

$$\text{การขยายตัวแนวขวาง} = a - b \text{ (หน่วยมิลลิเมตร)} \quad (2.9)$$

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากการวิจัยวัสดุคอมโพสิตจากเศษเมลามีนและการทดสอบคุณสมบัติทางกลมีความคล้ายคลึงกันกับงานวิจัยการนำเศษพลาสติกชนิดเทอร์โมเซตกลับมาใช้ใหม่ รวมทั้งงานวิจัยวัสดุคอมโพสิตจากวัสดุอื่น ๆ จึงขอนำเสนอการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยข้างต้น ซึ่งจะได้ประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ด้วย

Pickering, S.J. (2006) ได้ศึกษาการนำขยะพลาสติกชนิดเทอร์โมเซตนำกลับมาใช้ใหม่ โดยนำมาผสมเป็นวัสดุคอมโพสิตเพื่อให้เศษเทอร์โมเซตนี้เป็นวัสดุช่วยเสริมแรงโดยทำการทดลองทั้งขยะเทอร์โมเซตที่เป็นอนุภาคและเส้นใย จากผลการวิจัยพบว่า ขยะเทอร์โมเซตที่มีลักษณะเป็นผงทำให้ความหนาแน่นและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุลดลง ส่วนขยะเทอร์โมเซตที่มีลักษณะเป็นเส้นใยมีศักยภาพสามารถเสริมแรงได้ มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น หากเทียบกับวัสดุที่ไม่มีการเสริมแรง แต่มีคุณสมบัติเชิงกลด้อยลงมาเมื่อเทียบกับวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ยังไม่ผ่านการขึ้นรูปมาก่อน

Panyakapo, P., and Panyakapo, M. (2008) ได้ศึกษาการนำเอาขยะเมลามีนมาเป็นส่วนประกอบของคอนกรีตมวลเบา โดยมีการศึกษาปริมาณสัดส่วนของส่วนประกอบต่าง ๆ ในคอนกรีตมวลเบาโดยอ้างอิงจากความแข็งแรงและความหนาแน่นเพื่อให้ตรงตามมาตรฐานอิฐมวลเบา ผลการวิจัยพบว่าเศษเมลามีนสามารถช่วยลดความหนาแน่นซึ่งหมายถึงน้ำหนักที่น้อยลงด้วย เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตที่ต่ำลง แต่น้ำหนักของคอนกรีตก็ยังไม่ตามมาตรฐานแต่ความแข็งแรงก้นสามารถรับแรงได้ตรงตามมาตรฐาน

Durand, J.M., Vardavoulias, M., and Jeandin, M. (1995) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างวัสดุคอมโพสิตจากโลหะและพอลิเมอร์ โดยใช้ผงเซรามิกเป็นอนุภาคเสริมแรงในวัสดุ และทดสอบ

การสึกหรอ ผลการวิจัยพบว่า วัสดุโลหะผสมกับอนุภาคเซรามิกมีความต้านทานการสึกหรอที่ดีขึ้น ส่วนวัสดุพอลิเมอร์ผสมกับอนุภาคเซรามิกมีความต้านทานการสึกหรอที่น้อยลงกว่าวัสดุที่ไม่ผสมอนุภาค และขนาดอนุภาคขนาดต่ำกว่า $20\ \mu\text{m}$ ทำให้ความต้านทานการสึกหรอลดลง ในทางกลับกันอนุภาคขนาดใหญ่กว่า $20\ \mu\text{m}$ ทำให้ความต้านทานการสึกหรอดีขึ้น และในปริมาณอนุภาค 20% โดยปริมาตรมีศักยภาพในการต้านทานการสึกหรอมากที่สุด

Zhang et al. (2009) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างวัสดุคอมโพสิตที่ผสมระหว่างโลหะกับอนุภาคอะลูมินาและนำมาทดสอบความแข็งแรงกดและศึกษาโครงสร้างของวัสดุ ผลการวิจัยพบว่าโลหะที่ผสมอนุภาคอะลูมินาสามารถเพิ่มความแข็งแรงกดได้ เนื่องจากพันธะที่แข็งแรงระหว่างโลหะและอนุภาคทำให้แรงกดสามารถถ่ายเทลงไปที่อนุภาคของผงอะลูมินาได้ และโครงสร้างของวัสดุนั้นพบว่าเป็นโครงสร้างของวัสดุเปราะ

Thirumal et al. (2010) ได้ศึกษาการนำเมลามีน โพลีฟอสเฟต (MPP) และเมลามีน ไชยานูเรต (MC) มาผสมเป็นสารหน่วงไฟในโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลต (PET) และทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและประสิทธิภาพการหน่วงไฟ ผลการวิจัยพบว่าโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลต ที่เติม MPP มีคุณสมบัติเชิงกลที่ลดลง ส่วนโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลต ที่เติม MC มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ส่วนคุณสมบัติทางด้านการหน่วงไฟทั้ง MPP และ MC ที่เติมลงไปใน PET มีคุณสมบัติทางด้านการหน่วงไฟที่ดีขึ้น แต่ MPP จะให้ประสิทธิภาพการหน่วงไฟที่ดีกว่า

Gnjidic, Z., Bozic, D., and Mitkov, M. (2001) ได้ศึกษาการสร้างวัสดุคอมโพสิตระหว่างโลหะและเซรามิก และทำการทดสอบแรงกด จากผลการวิจัยพบว่าอนุภาคเซรามิกที่เติมเข้าไปช่วยเพิ่มค่าความเค้นคราก (Yield Strength) และค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Elastic Modulus) แต่จะลดค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Strength) และความเหนียวของวัสดุ อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ($33\ \mu\text{m}$) ทำให้คุณสมบัติเชิงกลลดลง

Bauri, R., and Surappa, M.K. (2009) ได้ศึกษาทดลองสร้างวัสดุคอมโพสิตจาก Al – Li alloys เป็นเนื้อ Matrix ผสมกับอนุภาค Silicon Carbide (SiC) เพื่อเป็นอนุภาคเสริมแรงและทำการทดลองความแข็งแรงกด (Compressive Strength) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคทำให้ความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มขึ้นจนถึงในปริมาณหนึ่งที่จะมีความแข็งแรงสูงสุดและเมื่อเพิ่มปริมาณเศษต่อไปความแข็งแรงจะลดลง

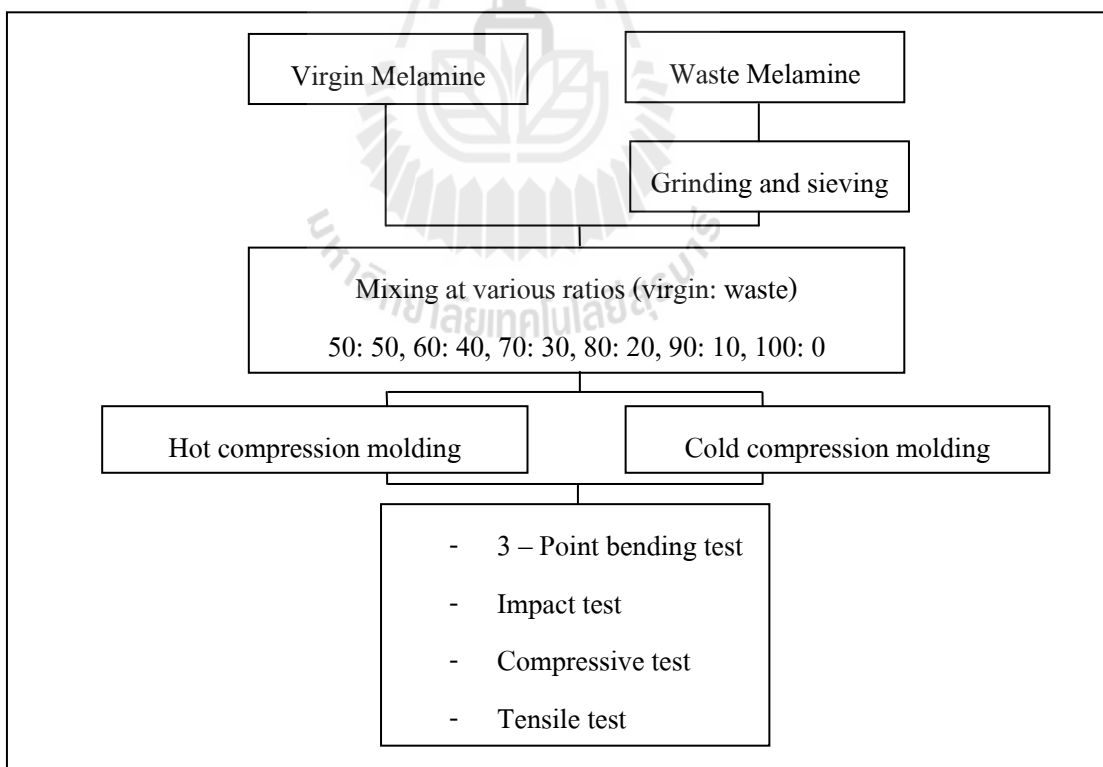
Damadzadeh et al. (2010) ได้ทำการศึกษาทดลองในการสร้างวัสดุคอมโพสิต 2 วัสดุจาก Poly – L – lactic acid และ Poly – L – lactic – co – glycolic acid เป็นเนื้อสาร (Matrix) ผสมกับอนุภาค Hydroxyapatite (HAP) และทดสอบความแข็งแรงดัด (Flexural Strength) พบว่าเมื่อเติมสารตัวเติมแบบอนุภาคทำให้ความแข็งแรงดัดลดลงแปรผันตรงตามปริมาณอนุภาค เนื่องจากสารตัวเติมแบบอนุภาคไม่สามารถต้านรอย Crack ของวัสดุได้เหมือนกับสารตัวเติมแบบเส้นใย

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 กล่าวนำ

การศึกษาวิจัยการขึ้นรูปวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีน เป็นการศึกษาเพื่อหาวิธีการลดปริมาณเศษขยะเมลามีนและเพื่อหาวิธีการขึ้นรูปเมลามีนที่ช่วยลดการใช้พลังงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดเย็น เป็นวิธีที่ประยุกต์มาจากการขึ้นรูปเครื่องปั้นดินเผาและใช้ในการขึ้นรูปฟีนอลิก จากนั้นทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลจากการขึ้นรูปแบบอัดร้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเริ่มต้นด้วยการศึกษาวิธีการขึ้นรูป เตรียมเครื่องมือสำหรับขึ้นรูป เตรียมวัตถุดิบ ขึ้นรูปขึ้นทดสอบ ทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ความร้อนและศึกษาโครงสร้างของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนดังแผนผังในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน โดยสังเขป

ในบทนี้จะประกอบด้วยขั้นตอนการทำงานต่าง ๆ ที่ได้ทำการศึกษาวิจัย ดังนี้

- 1) วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย
- 2) เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย
- 3) วิธีการทดลอง
- 4) การทดสอบ

3.2 วัสดุที่ใช้ทำการวิจัย

- 1) เมลามีน พอร์มาลดีไฮด์ เรซิน (Melamine-Formaldehyde Resins) ทั้งแบบเศษจากการขึ้นรูปแล้ว (Melamine Waste) และผงแบบสารประกอบ (Melamine Compound)
- 2) เหล็กทำแม่พิมพ์พลาสติก M200
- 3) น้ำกลั่น (Distilled Water)
- 4) สารดูดความชื้น (Silica gel)

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) เครื่องบดเศษพลาสติก
- 2) ตะแกรงร่อนแยกขนาด
- 3) เครื่องบดผสมแบบลูกบอล (Ball Mill)
- 4) เครื่องอัดขนาด 60 ตัน
- 5) เครื่องอัดร้อน (Compression Forming Machine) รุ่น Long Chang ขนาด 200 ตัน
- 6) แม่พิมพ์สำหรับอัดขึ้นรูปเย็น
- 7) เครื่องเลื่อยสายพาน
- 8) เต้าเผา
- 9) กระดาษทรายเบอร์ 600, 800, 1000, 1500, 2000
- 10) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 11) ถุงซิปล็อค (Zip Lock Bag)
- 12) เครื่องชั่ง
- 13) ถังมือกั้นความร้อน
- 14) เวอร์เนียร์
- 15) เครื่องทดสอบแรงกด (Universal Testing Machine) ขนาด 5 kN และ 50 kN
- 16) เครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Izod Impact Test)

- 17) เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)
- 18) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)
- 19) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

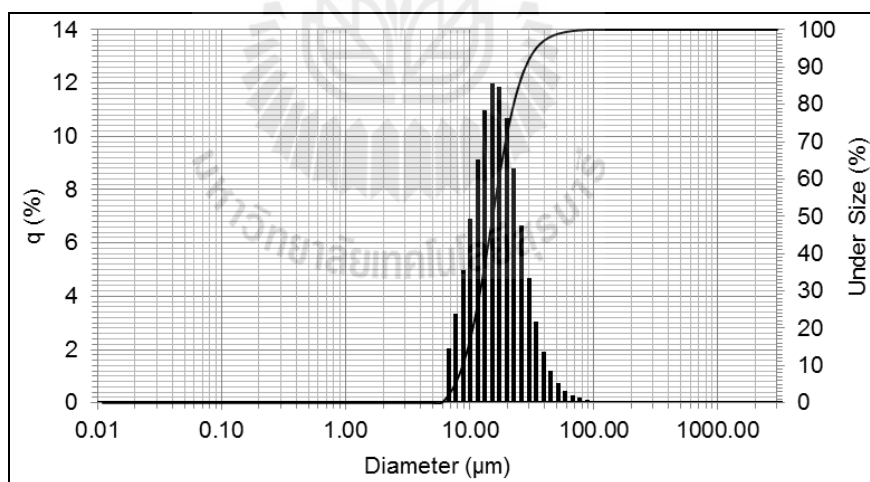
3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบสำหรับอัดขึ้นรูป (Molding Compound)

วัตถุดิบในการขึ้นรูปจะใช้เพียงผงเมลามีนใหม่ (Melamine Molding Compound) และเศษเมลามีนที่บดเป็นผง ใช้ในการขึ้นรูปทั้งอัดร้อนและอัดเย็น

1) ผงเมลามีนใหม่ (Melamine Molding Compound)

เป็นผงเมลามีนที่ใช้ในอุตสาหกรรมที่ผสมเข้ากระดาษเพื่อความแข็งแรงและผสมสีเพื่อให้ทึบแสงซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ต้องการในผลิตภัณฑ์เมลามีน โดยเมลามีนที่ใช้จะกำหนดสีเดียวกันและชุดการผลิตเดียวกันทั้งหมด ขนาดเฉลี่ยของผงเมลามีนที่นำมาใช้ในการทดลองทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle Size Analysis) พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ $17.05 \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 3.2 และมีลักษณะที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงดังรูปที่ 3.3

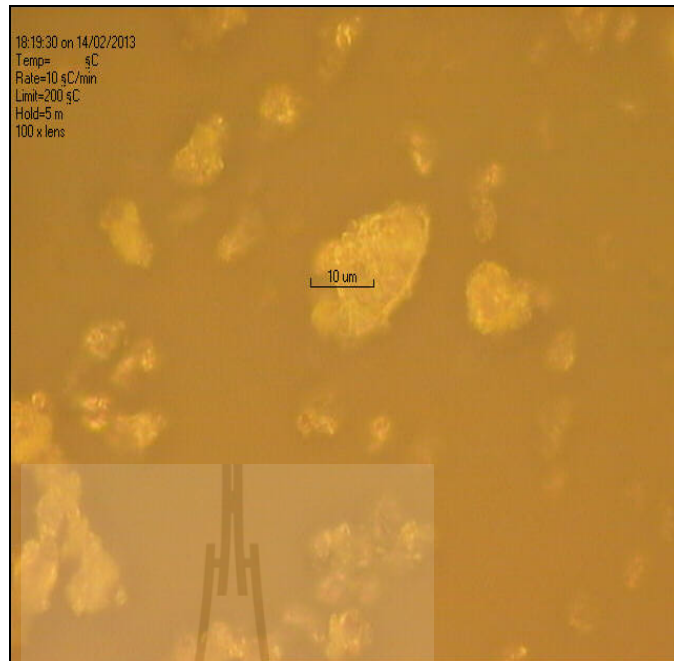


รูปที่ 3.2 ผลการทดสอบการวัดขนาดเฉลี่ยของผงเมลามีนใหม่

Median size : $14.97 \mu\text{m}$

Mean size : $17.05 \mu\text{m}$

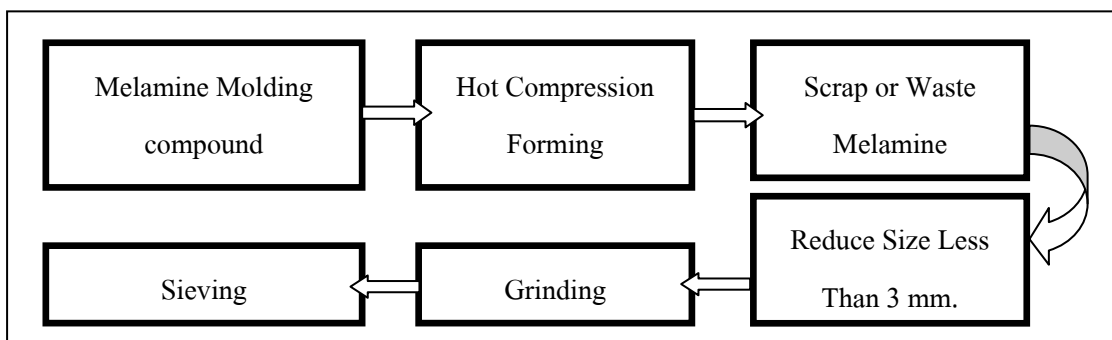
Standard derivative : $8.89 \mu\text{m}$



รูปที่ 3.3 ลักษณะผงเมลามีนใหม่

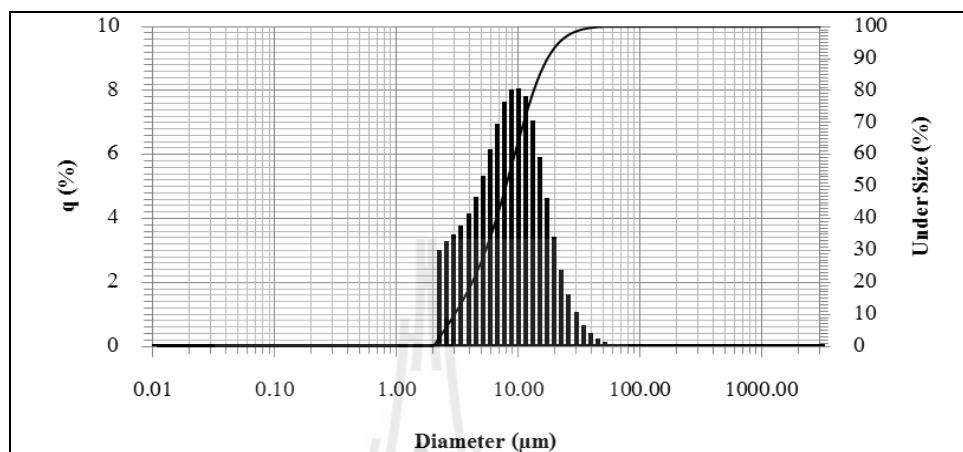
2) เศษเมลามีน (Melamine Waste)

เศษเมลามีนได้จากเมลามีนที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการตกแต่งเมลามีนซึ่งจะเกิดเศษครีบหลังจากกระบวนการอัดดังรูปที่ 3.4 จากนั้นเศษเมลามีนจะถูกลดขนาดด้วยเครื่องลดขนาดพลาสติกเหลือขนาดประมาณ 3 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปบดละเอียดด้วยเครื่องบดผสมด้วยลูกบอลลและกรองแยกขนาด



รูปที่ 3.4 แผนผังกระบวนการเตรียมเศษเมลามีน

ขนาดเฉลี่ยของเศษเมลามีนที่นำมาใช้ในการทดลองถูกทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle Size Analysis) พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ $9.39 \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 3.5 และมีลักษณะที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงดังรูปที่ 3.6



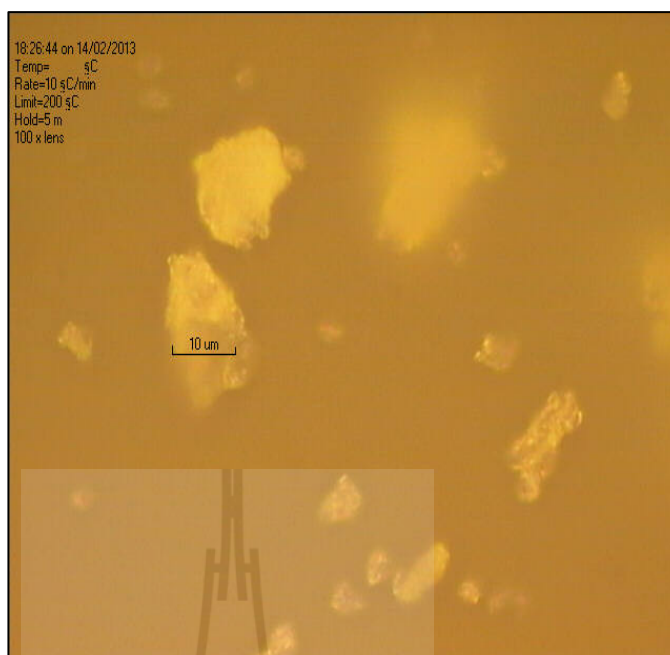
รูปที่ 3.5 ผลการทดสอบการวัดขนาดเฉลี่ยของเศษเมลามีน

Median size: $7.89 \mu\text{m}$

Mean size: $9.39 \mu\text{m}$

Standard derivative: $6.40 \mu\text{m}$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.6 ลักษณะเศษเมลามีน

3.4.2 การผสม

การผสมจะเป็นการผสมในสถานะของแข็ง โดยใช้เครื่องบดผสมแบบลูกบอล (Ball Mill) แต่จะไม่ใส่ลูกบอลลงไปเนื่องจากแรงกระแทกของลูกบอลอาจทำให้ผงบางส่วนอัดแน่นเป็นก้อนจนทำให้การผสมไม่เข้ากัน และจะผสมครั้งละเพียง 50 กรัม เพื่อให้วัตถุดิบเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุด ซึ่งจะผสมครั้งละ 20 นาที ตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนการผสมวัตถุดิบ

Sample	% Melamine	% Waste Melamine
1	100	0
2	90	10
3	80	20
4	70	30
5	60	40
6	50	50

3.4.3 การกำหนดปริมาณวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบอัดเย็น

ปริมาณสารที่กำหนดในขั้นตอนทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการอัดเย็นแต่ละชั้นอ้างอิงจากมาตรฐานการขึ้นรูปขึ้นทดสอบจากเมลามีน ASTM D704 โดยใช้เท่ากับ $1,425 \text{ kg/m}^3$ เมื่อทำการคำนวณจากสูตร

$$m = \rho v$$

เมื่อ

m คือมวลของวัสดุ

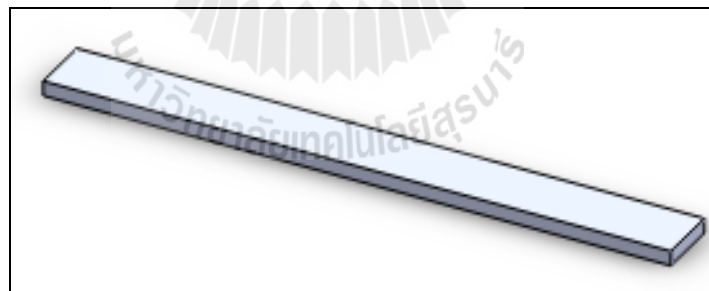
v คือปริมาตรของวัสดุ

ρ คือความหนาแน่นของวัสดุ

จะสามารถคำนวณหามวลหรือน้ำหนักของเมลามีนที่ต้องใช้ในแต่ละชั้นทดสอบ ซึ่งจะแสดงตัวอย่างต่อไป

1) ปริมาณวัสดุสำหรับทดสอบแรงดัด

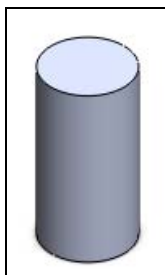
ปริมาณของวัสดุสำหรับขึ้นรูปขึ้นทดสอบแรงดัดดังแสดงรูปที่ 3.7 คำนวณจากความหนาแน่น X ปริมาตร = $1425 \text{ kg/m}^3 \times 6429.38 \text{ mm}^3 = 9.16 \text{ gram}$ และปริมาตรเพื่ออีก 10% จะได้น้ำหนักวัสดุก่อนอัดเป็น $9.16 + 0.91 = 10.07 \text{ gram}$



รูปที่ 3.7 ชิ้นทดสอบแรงดัด (3 – Point Bending Specimen)

2) ปริมาณวัสดุสำหรับทดสอบแรงอัด

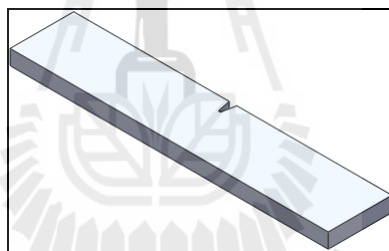
ปริมาณของวัสดุสำหรับขึ้นรูปขึ้นทดสอบแรงอัดดังแสดงรูปที่ 3.8 คำนวณจากความหนาแน่น X ปริมาตร = $1425 \text{ kg/m}^3 \times 3128.92 \text{ mm}^3 = 4.46 \text{ gram}$ และปริมาตรเพื่ออีก 10% จะได้น้ำหนักวัสดุก่อนอัดเป็น $4.46 + 0.44 = 4.90 \text{ gram}$



รูปที่ 3.8 ชิ้นทดสอบแรงอัด (Compressive Test Specimen)

3) ปริมาณวัตถุดิบสำหรับทดสอบแรงกระแทก

ปริมาณของวัตถุดิบสำหรับขึ้นรูปชิ้นทดสอบแรงกระแทกดังแสดงรูปที่ 3.9
คำนวณจากความหนาแน่น X ปริมาตร = $1425 \text{ kg/m}^3 \times 2330.94 \text{ mm}^3 = 3.32 \text{ gram}$ และปริมาตร
เผื่ออีก 10% จะได้น้ำหนักวัตถุดิบก่อนอัดเป็น $3.32 + 0.33 = 3.65 \text{ gram}$

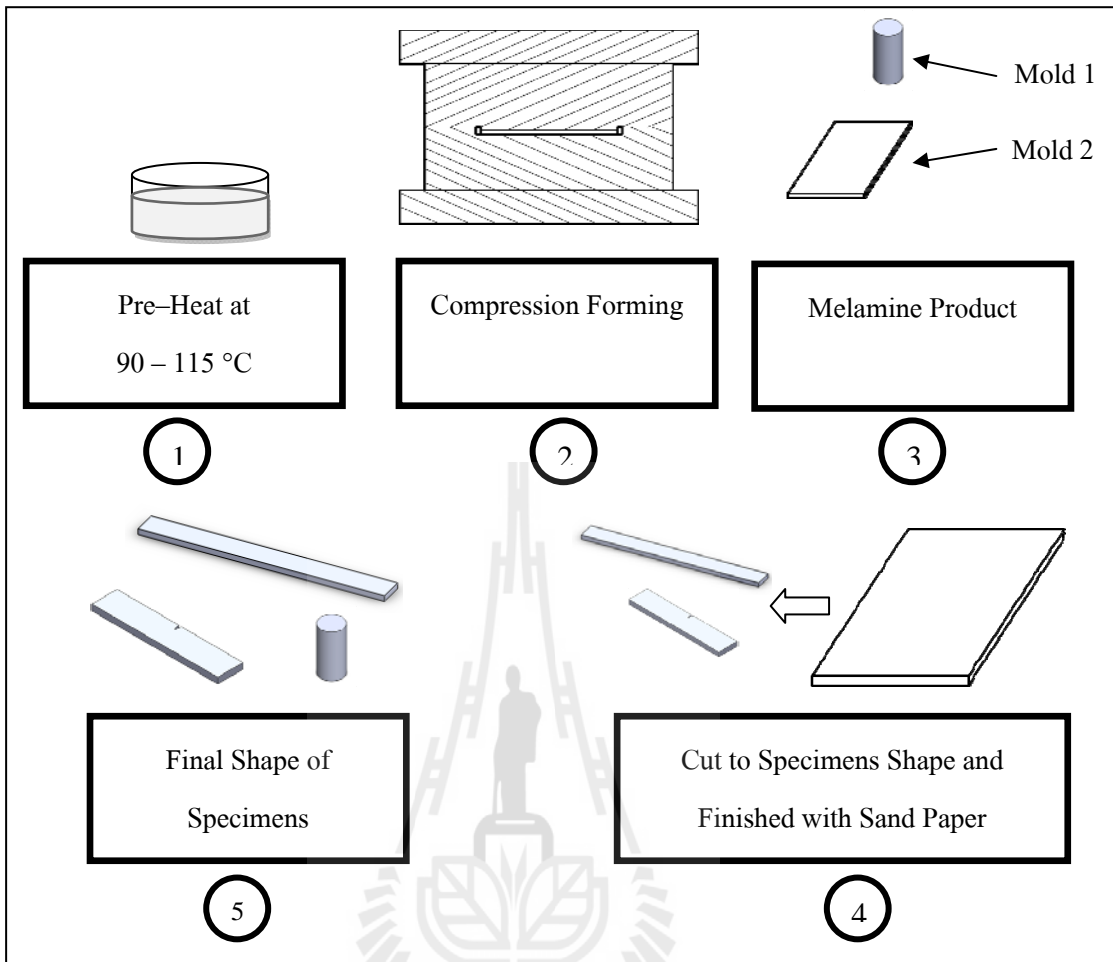


รูปที่ 3.9 ชิ้นทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod Impact Test Specimen)

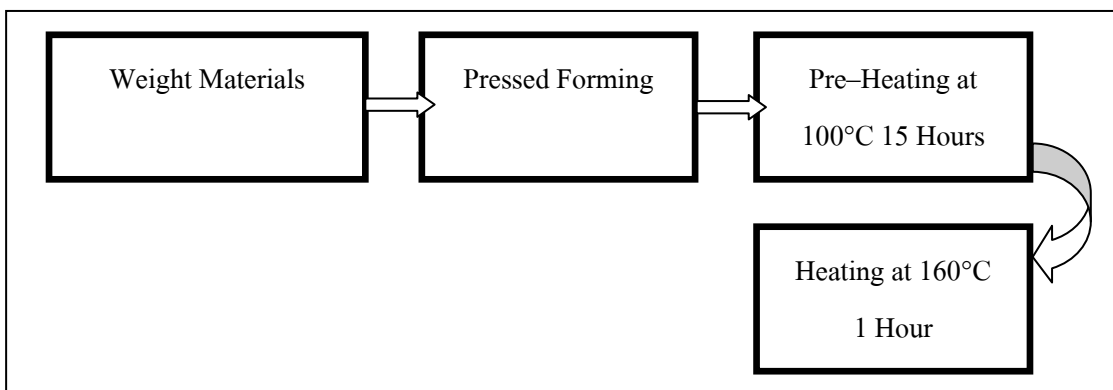
3.4.4 การขึ้นรูป (Forming)

1) การขึ้นรูปร้อน

การขึ้นรูปร้อนแบ่งการขึ้นรูปเป็น 2 แม่พิมพ์ คือ 1. ขึ้นรูปเป็นลักษณะแผ่น
หนา 2.6 ± 1 มิลลิเมตร ขนาดประมาณ 140×50 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาตัดด้วยเครื่องเลื่อย
สายพานเป็นรูปชิ้นทดสอบแรงดัดและแรงกระแทกและขัดตกแต่งขอบชิ้นงานเพื่อให้มีผลต่อการ
ทดสอบคุณสมบัติทางกลน้อยที่สุด 2. ขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM D695
ซึ่งกระบวนการอัดร้อนในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3.10



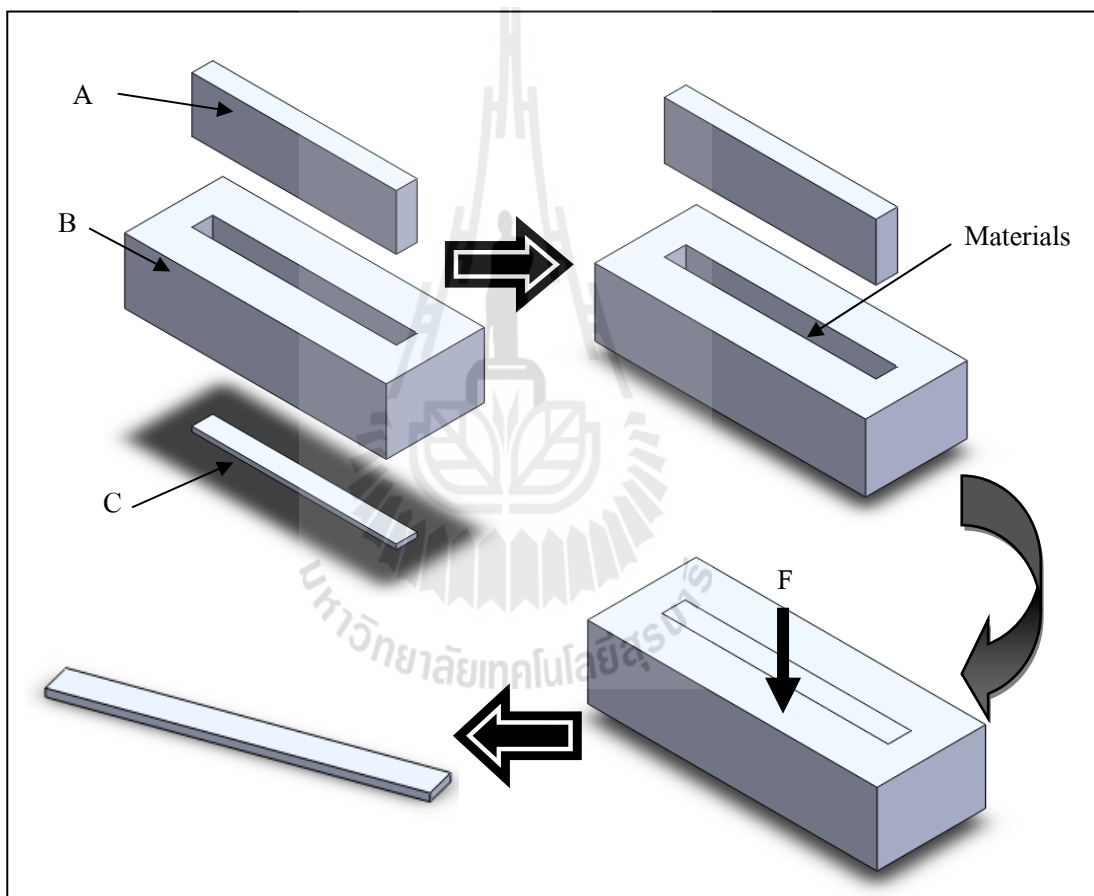
รูปที่ 3.10 กระบวนการขึ้นรูปเมลามีนแบบอัดร้อน



รูปที่ 3.11 แผนผังการขึ้นรูปแบบอัดเย็น

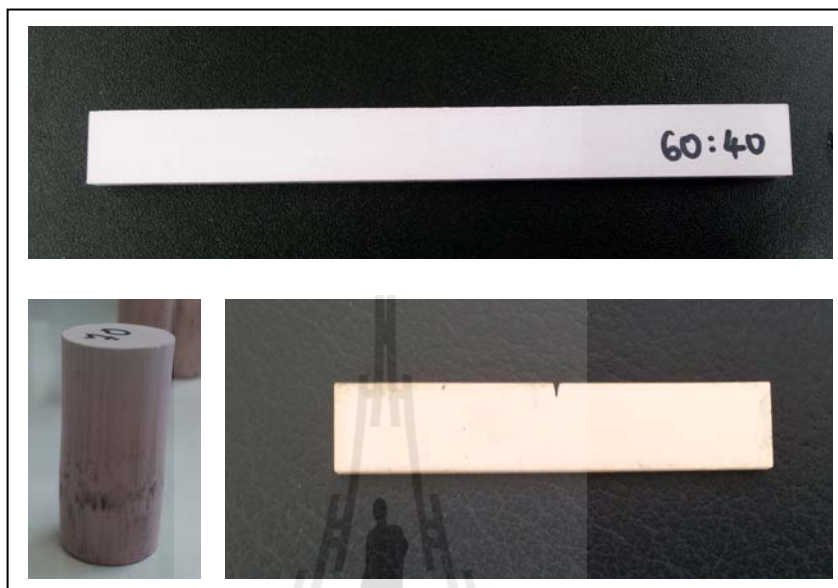
2) การขึ้นรูปเย็น

เนื่องจากวิธีการอัดเย็นมีขั้นตอนการขึ้นรูปดังแผนผังในรูปที่ 3.11 โดยปกติไม่ได้ใช้ในการอัดเมลามีน จึงมีการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ใหม่ทั้งหมดซึ่งมีส่วนประกอบและกลไกของแม่พิมพ์ดังรูปที่ 3.12 ส่วนขั้นตอนการอัดเย็นนั้นจะเริ่มจากใส่แผ่นรองส่วน C ดังรูปที่ 3.12 จากนั้นใส่วัสดุลงไปแม่พิมพ์และใส่ส่วนกด A ลงไป กดด้วยแรงประมาณ 25 ตัน ชิ้น A จะเรียบเสมอกับหน้าตัดแม่พิมพ์ ซึ่งข้างในจะมีช่องว่างพอดีกับขนาดชิ้นทดสอบ จากนั้นนำชิ้นทดสอบออกมาเก็บไว้ในถุงซิปล็อกกันความชื้น



รูปที่ 3.12 กลไกของแม่พิมพ์อัดเย็น

เมื่อได้ชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอัดมาแล้วจะมีลักษณะจับตัวเป็นชิ้นทดสอบแต่ความแข็งแรงไม่มากนัก มีลักษณะดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ชิ้นทดสอบแรงคัด แรงอัดและแรงกระแทก

เมื่อได้ชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดมาแล้วจากนั้นนำไป Pre-Heating ไล่ความชื้นที่ 100°C 15 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบ (Heating) ที่ 160°C อีก 1 ชั่วโมง ซึ่งอุณหภูมิ Pre-Heating อ้างอิงจากอุณหภูมิที่ใช้โดยปกติในการขึ้นรูปร้อน ส่วนเวลาในการ Pre-Heating อบและอุณหภูมิในการอบได้ทำการศึกษาวิจัยซึ่งได้แสดงผลการวิจัยในบทต่อไป

3.5 การทดลอง

การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ ได้ทำการทดสอบมาตรฐานดังตาราง 3.2 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 มาตรฐานต่าง ๆ ของการทดสอบ

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยรายงานผล	จำนวนชิ้นทดสอบ
ความแข็งแรงดัด (Flexural strength)	ASTM D790	MPa	6
มอดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus)	ASTM D790	MPa	6
ความแข็งแรงกด (Compressive strength)	ASTM D695	MPa	6
ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)	ASTM D256	kJ/m ²	6
% การดูดซับน้ำ (% water absorption)	–	%	6

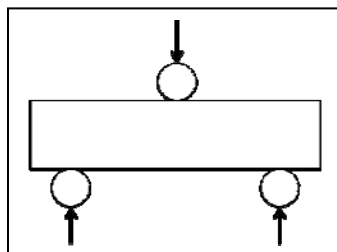
3.5.1 สมบัติเชิงกล

3.5.1.1 ความแข็งแรงดัด

การทดสอบหาค่าความแข็งแรงดัด (Flexural Strength) และมอดูลัสโค้งงอ (Flexural Modulus) เป็นไปดั่งมาตรฐาน D790 โดยลักษณะการทดสอบเป็นแบบจุดรองรับสามจุด (3 – Point Bending Test) เป็นดังรูปที่ 3.14 และสภาวะในการทดสอบดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load Cell) 5 กิโลนิวตัน (kN)
- ความเร็วในการกด (Compression Speed) 2 มิลลิเมตร / นาที
- ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (Span Length) 40 มิลลิเมตร

ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ของ INSTRON ขนาดของชิ้นทดสอบ 125 X 12.7 X 3.2 มิลลิเมตร



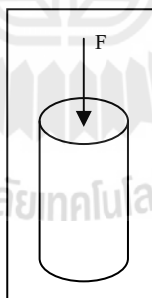
รูปที่ 3.14 การทดสอบแบบจุดรองรับสามจุด

3.5.1.2 ความแข็งแรงอัด

การทดสอบหาค่าความแข็งแรงอัด (Compressive Strength) เป็นไปตามมาตรฐาน D695 โดยลักษณะการทดสอบแรงอัด เป็นดังรูปที่ 3.15 และสภาวะในการทดสอบดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load Cell) 50 กิโลนิวตัน (kN)
- ความเร็วในการกด (Compression Speed) 1.33 มิลลิเมตร / นาที

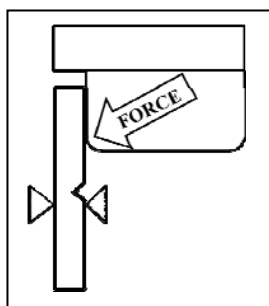
ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ของ INSTRON ขนาดของชิ้นทดสอบเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร สูง 25.4 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.15 การทดสอบแรงอัด

3.5.1.2 ความแข็งแรงกระแทก

การทดสอบหาค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) จะทดสอบแบบไอซอด (Izod Impact Test) เป็นไปตามมาตรฐาน D256 โดยลักษณะการทดสอบแรงกระแทก เป็นดังรูปที่ 3.16 และขนาดของชิ้นทดสอบขนาด 63.5 X 12.7 X 3 มิลลิเมตร รอยบากลึก 2.54 มิลลิเมตร มุมรอยบาก 45 องศา รัศมี 0.25 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.16 การทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด

3.5.2 สมบัติทางกายภาพ

3.5.2.1 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) จะทดสอบใกล้เคียงกับ ASTM D570 โดยการนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่ได้ไปไว้ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 30–45 นาทีซึ่งน้ำหนักและบันทึก จากนั้นนำไปแช่น้ำ 24 ชั่วโมง โดยการดูดซึมน้ำสามารถหาได้จากสมการ 3.1 ดังต่อไปนี้

$$\% \text{ การดูดซึมน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างเปียก} - \text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100 \quad (3.1)$$

3.5.3 สมบัติทางความร้อน

3.5.3.1 Thermo Gravimetric Analysis (TGA)

Thermo Gravimetric Analysis (TGA) เป็นการศึกษาการสลายตัวของพอลิเมอร์ หลักการของเครื่อง TGA คือให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนชิ้นงานเสถียรภาพ นำผลการทดลองมาวาดกราฟอุณหภูมิเทียบกับน้ำหนักที่หายไป โดยใช้สภาวะดังนี้

- อัตราเพิ่มอุณหภูมิ (Heating Rate) = 2.5, 2, 5°C / นาที
- อุณหภูมิที่ใช้ = 35 – 900°C

3.5.3.1 Differential Scanning Calorimeter (DSC)

เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ เช่น จุดเดือด จุดหลอมเหลว หลักการทำงานคือ สารตัวอย่างและสารอ้างอิงที่เชื่อมต่อการเกิดปฏิกิริยาที่บรรจุใน

ถ้าอะลูมิเนียมขนาดเล็ก จะถูกให้ความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน จากนั้นสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในตัวอย่างจะถูกวัดและแปลผล

- อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating Rate) = $5^{\circ}\text{C} / \text{นาที}$
- อุณหภูมิที่ใช้ = $40 - 250^{\circ}\text{C}$



บทที่ 4

ผลลัพธ์และการอภิปรายผล

4.1 กล่าวนำ

การทดลองในงานวิจัยจะศึกษาหาวิธีการขึ้นรูปด้วยการอัดเย็นและทดสอบคุณสมบัติวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีน จากวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยการอัดเย็นเทียบกับวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อน เริ่มจากการทดลองศึกษาเวลาที่ใช้ในการ Pre-Heating อุณหภูมิและเวลาที่ใช้อบ (Heating) จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบทั้งที่ขึ้นรูปด้วยการอัดเย็นและการอัดร้อนเพื่อเปรียบเทียบในด้านของวิธีการขึ้นรูปและอิทธิพลของปริมาณเศษเมลามีนที่ผสมลงในวัสดุว่ามีแนวโน้มอย่างไรต่อคุณสมบัติเชิงกล

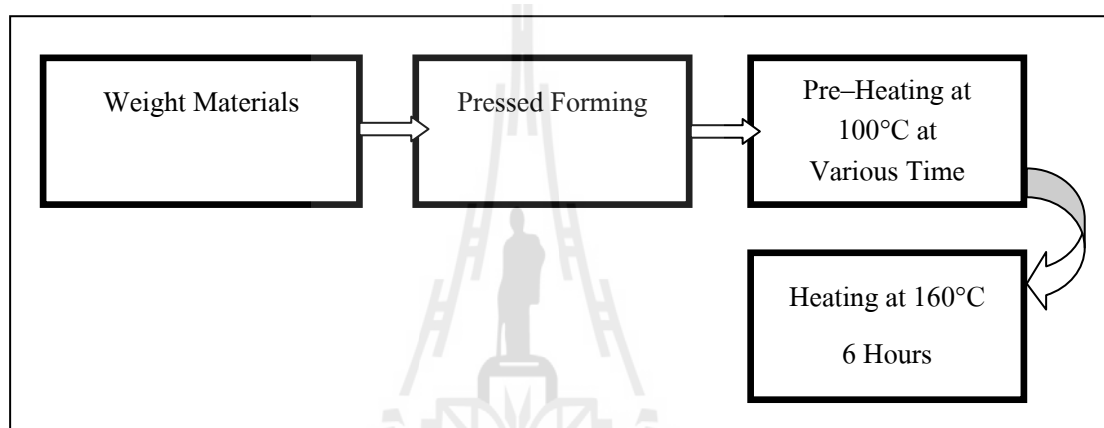
ในบทนี้จะเป็นผลลัพธ์และการอภิปรายผล ที่ได้ทำการศึกษาไว้ในบทที่ 3 ประกอบด้วยหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ผลการทดสอบการหาวิธีการขึ้นรูปด้วยการอัดเย็นของเมลามีนใหม่
 - ผลกระทบของเวลาในการ Pre-Heating ต่อความแข็งแรงตัด
 - ผลกระทบของเวลาและอุณหภูมิในการอบต่อความแข็งแรงตัด
 - ผลกระทบเวลาในการอบต่อความแข็งแรงตัด
- 2) ผลของการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลวัสดุรีไซเคิลที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อนและเย็น
 - ผลกระทบของปริมาณเศษเมลามีนต่อความแข็งแรงตัด
 - ผลกระทบของปริมาณเศษเมลามีนต่อความแข็งแรงกระแทก
 - ผลกระทบของปริมาณเศษเมลามีนต่อความแข็งแรงกด
- 3) ผลการทดสอบทางกายภาพของเมลามีนใหม่ที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อนและอัดเย็น
 - ผลทดสอบการดูดซับน้ำของเมลามีนใหม่
- 4) ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของเมลามีนใหม่ที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อนและเย็น
 - ผลการทดสอบ Thermo Gravimetric Analysis (TGA)
 - ผลการทดสอบ Differential Scanning Calorimetry (DSC)
- 5) ผลการศึกษาพื้นฐานวิทยาของวัสดุ
 - ผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)
 - ผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)

4.2 ผลการทดสอบการหาวิธีการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดเย็นของเมลามีนใหม่

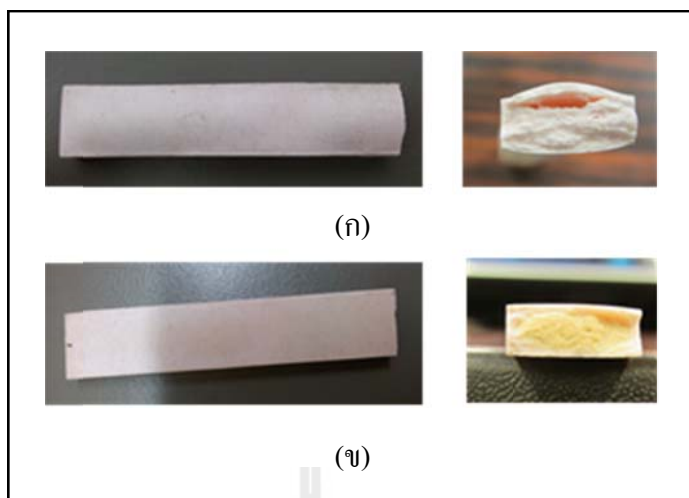
4.2.1 ผลกระทบของเวลาในการ Pre-Heating ต่อความแข็งแรงคัด

การทดลองนี้มีกระบวนการขึ้นรูปดังรูปที่ 4.1 โดยมีขั้นตอนเริ่มจากชั่งน้ำหนักเมลามีนตามที่ได้กำหนดไว้ โดยมีปริมาณเนื้อ 10% ที่อาจสูญเสียระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น จากนั้น Pre-Heating ที่อุณหภูมิ 100°C ที่เวลาต่าง ๆ เพื่อศึกษา จากนั้นกำหนดอุณหภูมิอบ 160°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งเวลาและอุณหภูมิในการอบนั้นเป็นการกำหนดขึ้นมาเพื่อหาเวลา Pre-Heating ที่เหมาะสม แต่ยังไม่ใช่ขอบเขตที่ดีที่สุดซึ่งจะได้ศึกษาในส่วนถัดไป



รูปที่ 4.1 แผนผังการทดสอบขึ้นรูปแบบอัดเย็น

จากผลการทดสอบความแข็งแรงคัดของเมลามีนใหม่ที่ขึ้นรูปด้วยการอัดเย็นดังขอบเขตในตารางที่ 4.1 พบว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ได้ผ่านการ Pre-Heating มีลักษณะที่พองบวมแตกต่างจากชิ้นทดสอบที่ผ่านการ Pre-Heating ที่มีลักษณะที่ดี ผิวเรียบดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งเกิดจากความชื้นที่ค้างค้างในชิ้นงานเมื่อถึงกระบวนการให้ความร้อนความชื้นเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำที่มีแรงดันสูงพยายามดันออกมาภายนอกชิ้นงานจึงทำให้ชิ้นงานบวม ผลการทดสอบความแข็งแรงคัดของชิ้นงานที่ Pre-Heating ในเวลาต่างๆ ในกราฟแสดงค่าเฉลี่ยและค่าสูงสุด - ต่ำสุด ดังรูปที่ 4.3 พบว่าค่าเฉลี่ยความแข็งแรงมากที่สุดอยู่ที่เวลา Pre-Heating 36 ชั่วโมง แต่หากเปรียบเทียบทางสถิติตามตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าที่เวลา 18 และ 15 ชั่วโมงนั้นไม่ต่างกันกับ 36 ชั่วโมงอย่างมีนัยสำคัญ ($P - \text{value} > 0.05$) เราจึงเลือกใช้ที่ 15 ชั่วโมงเพื่อเป็นการประหยัดเวลาและต้นทุนในการผลิตต่อไป



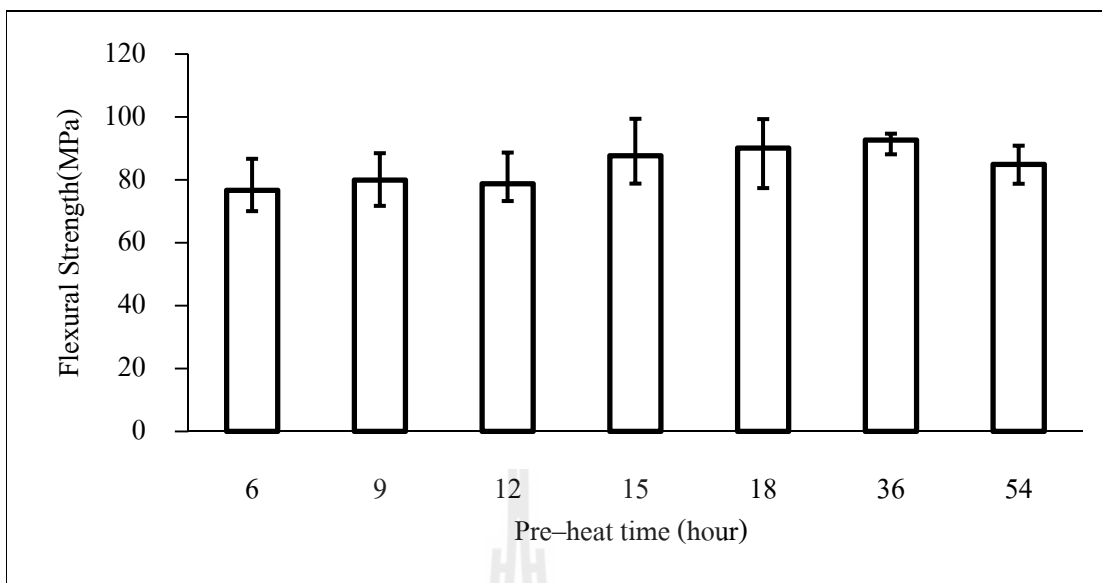
รูปที่ 4.2 ชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการอัดแบบแม่พิมพ์เย็น

(ก) ชิ้นทดสอบที่ไม่ได้ผ่านการ Pre-Heating

(ข) ชิ้นทดสอบที่ผ่านการ Pre-Heating

ตารางที่ 4.1 ขอบเขตของการทดสอบเวลาในการ Pre-Heating

Specimen No.	Pre-Heat Condition.		Heating Condition	
	Temp.	Time	Temp	Time
1	100°C	0	160 °C	6 hr.
2		6		
3		18		
4		36		
5		54		
6	100°C	9	160 °C	6 hr.
7		12		
8		15		



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงคัดและเวลาที่ใช้ Pre-Heating

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแบบ One Sample T – Test ของ ($H_0: \mu = 90.12$) vs ($H_1: \mu \neq 90.12$) ด้วยความเชื่อมั่น 95%

Specimen No.	Pre-Heat Time	Mean	St. Dev.	T	P-Value	Difference
2	6	76.62	6.84	-4.69	0.018	No significant
6	9	79.94	6.87	-3.70	0.034	No significant
7	12	78.41	7.48	-4.26	0.013	No significant
8	15	87.66	9.18	-1.09	0.357	Significant
3	18	90.12	3.09	-1.64	0.200	Significant
4	36	92.6	4.29	Ref.	-	-
5	54	84.73	2.80	-6.93	0.001	No significant

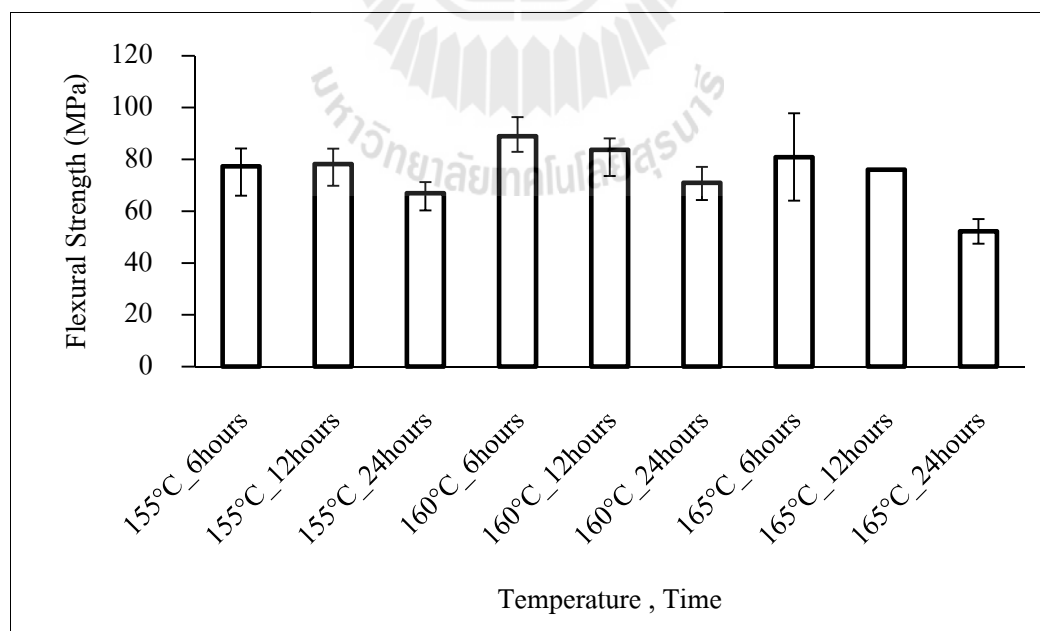
4.2.2 ผลกระทบของเวลาและอุณหภูมิในการอบ (Heating) ต่อความแข็งแรงคัด

เมื่อเราได้เวลาที่เหมาะสมในการ Pre-Heating แล้วขั้นตอนต่อไปก็จะเป็นการหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการอบเพื่อดูผลกระทบของทั้งสองตัวแปรต่อความแข็งแรงคัด โดยเบื้องต้นจะเลือกทดสอบ 3 อุณหภูมิ 3 เวลา รวมเป็น 9 ขอบเขตดังตารางที่ 4.3 และนำไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อออกแบบการทดลองต่อไป

ตารางที่ 4.3 ขอบเขตการทดสอบอุณหภูมิและเวลาในการอบ

Specimen No.	Pre-Heat Condition.		Heating Condition	
	Temp. (°C)	Time (hr.)	Temp.(°C)	Time (hr.)
1	100	15	155	6
2			155	12
3			155	24
4			160	6
5			160	12
6			160	24
7			165	6
8			165	12
9			165	24

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4 เห็นได้อย่างค่อนข้างชัดเจนว่าเวลานั้นมีผลกับความแข็งแรง และเมื่อได้ทดสอบทางสถิติทำให้เห็นผลชัดเจนยิ่งขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.4



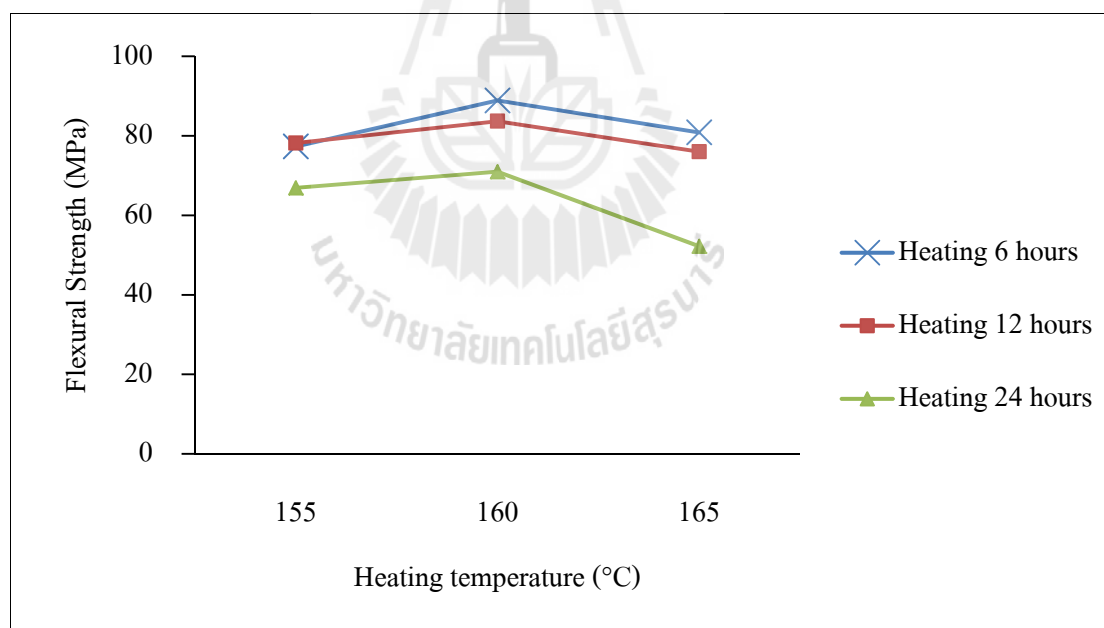
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาอบที่มีผลต่อความแข็งแรงคัด

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณทางสถิติด้วย Two – Way ANOVA ที่ความเชื่อมั่น 95% ของตัวแปร อุณหภูมิ (Temperature) และเวลา (Time)

Source	DF	SS	MS	F	P
Temperature	2	201.461	100.731	4.23	0.103
Time	2	623.641	311.820	13.09	0.018
Error	4	95.720	23.818	–	–
Total	8	920.372	–	–	–

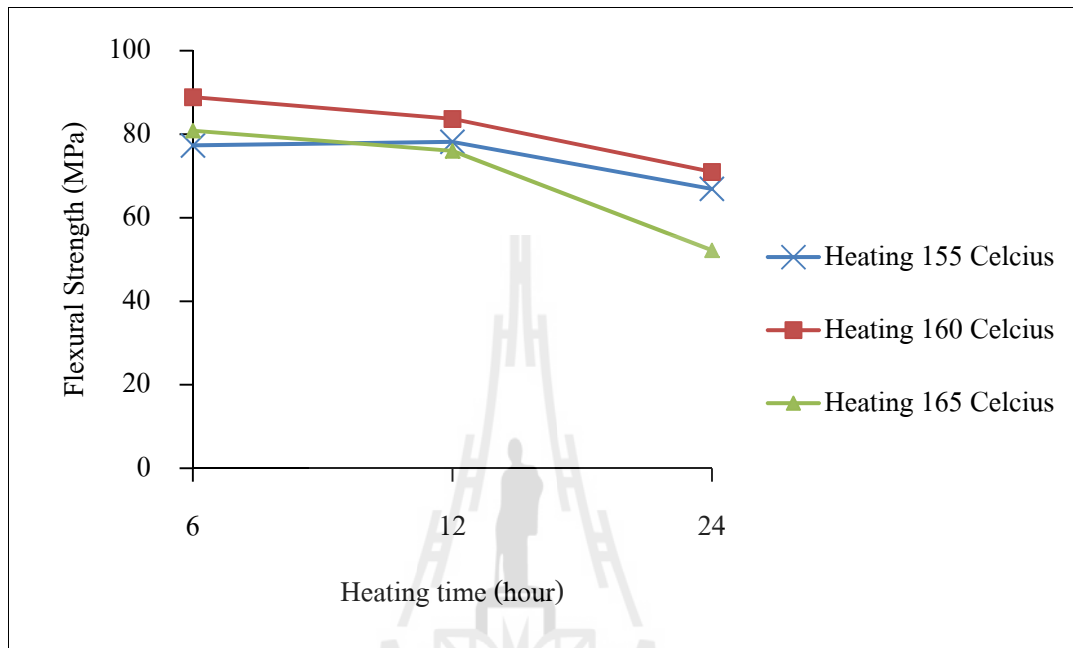
S = 4.880, R – sq = 89.65%, R – sq (adj) = 79.30%

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าที่อุณหภูมิอบ 160°C นั้นให้ความแข็งแรงสูงสุด ไม่ว่าจะใช้เวลาอบเท่าใด และที่อุณหภูมิ 155°C และ 165°C จะมีความแข็งแรงน้อยกว่า ดังนั้นเราจึงเลือกที่อุณหภูมิ 160°C นี้เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบ



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาอบที่มีผลต่อความแข็งแรงคัด

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าความแข็งแรงลดลงเมื่อเวลาในการอบเพิ่มมากขึ้น จึงยังไม่สามารถสรุปได้ว่าเวลาในการอบที่ 6 ชั่วโมงนั้นดีที่สุด จึงออกแบบการทดลอง ที่เวลาอบต่ำกว่า 6 ชั่วโมงต่อไปเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมโดยกำหนดอุณหภูมิอบที่ 160°C



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาอบที่มีผลต่อความแข็งแรงคัด

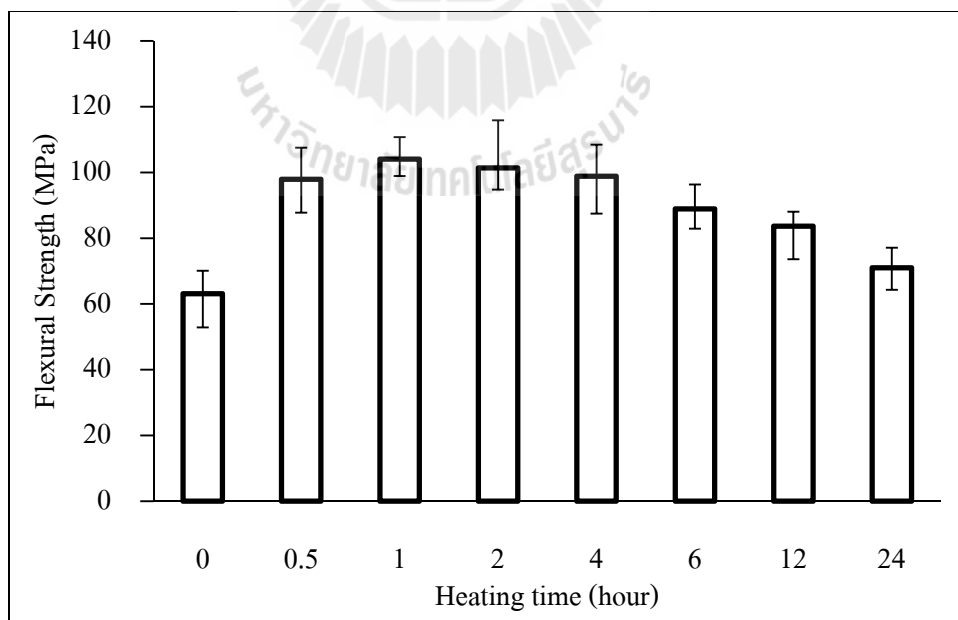
4.2.3 ผลกระทบเวลาในการอบต่อความแข็งแรงคัด

สืบเนื่องจากการทดลองที่ผ่านมา ผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมยังไม่สามารถสรุปได้ จึงออกแบบการทดลองเพิ่มเติมตามขอบเขตดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ขอบเขตการทดสอบเวลาในการอบ

Specimen No.	Pre-Heat Condition.		Heating Condition	
	Temp. (°C)	Time (hr.)	Temp.(°C)	Time (hr.)
1	100	15	160	0
2			160	0.5
3			160	1
4			160	2
5			160	4
6			160	6
7			160	12
8			160	24

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.7 ก็จะได้ข้อสรุปที่ชัดเจนว่าความแข็งแรงสูงสุดอยู่ที่ 1 ชั่วโมง และที่เวลาต่าง ๆ มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังนั้นเราจึงเลือกเวลาอบที่ 1 ชั่วโมง เป็นเวลาที่เหมาะสมในการอบ



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงคัดและเวลาในการอบ

4.3 ผลของการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิล

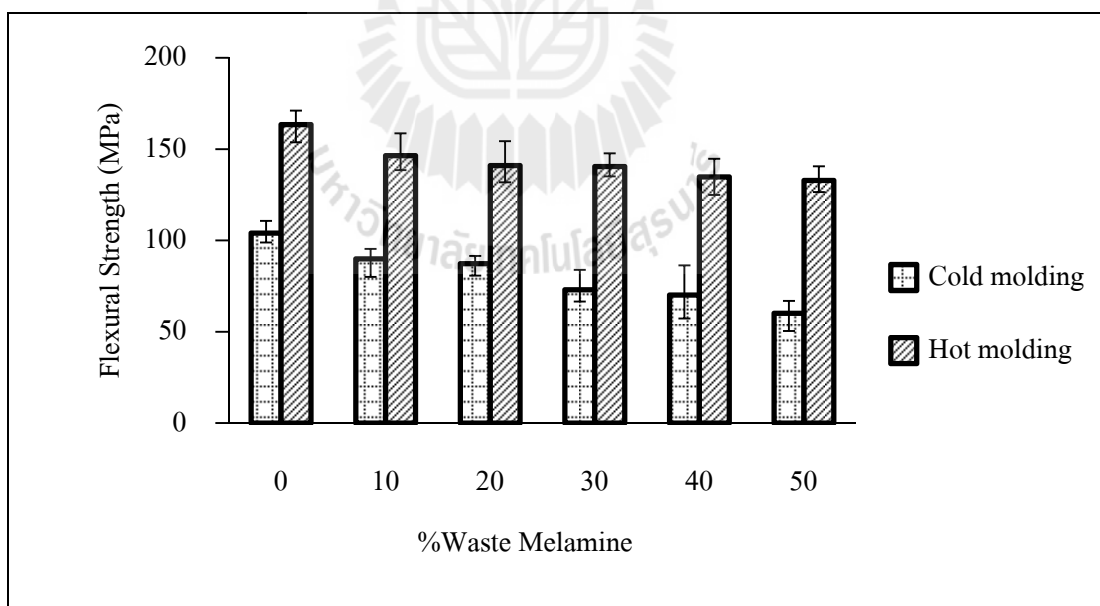
ที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อนและเย็น

เมื่อเราทดลองหาวิธีการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เย็นที่เหมาะสมแล้ว ต่อไปจะเป็นการทดลองใส่เศษเมลามีนที่ปริมาณต่าง ๆ (0 – 50%) ผสมเข้าไปในเมลามีนใหม่สร้างเป็นวัสดุรีไซเคิลควบคู่กับการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบแม่พิมพ์ร้อน และศึกษาผลกระทบจากปริมาณเศษเมลามีนต่อความแข็งแรงดัด แรงกระแทกและแรงอัดเพื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อน ซึ่งได้ผลดังนี้

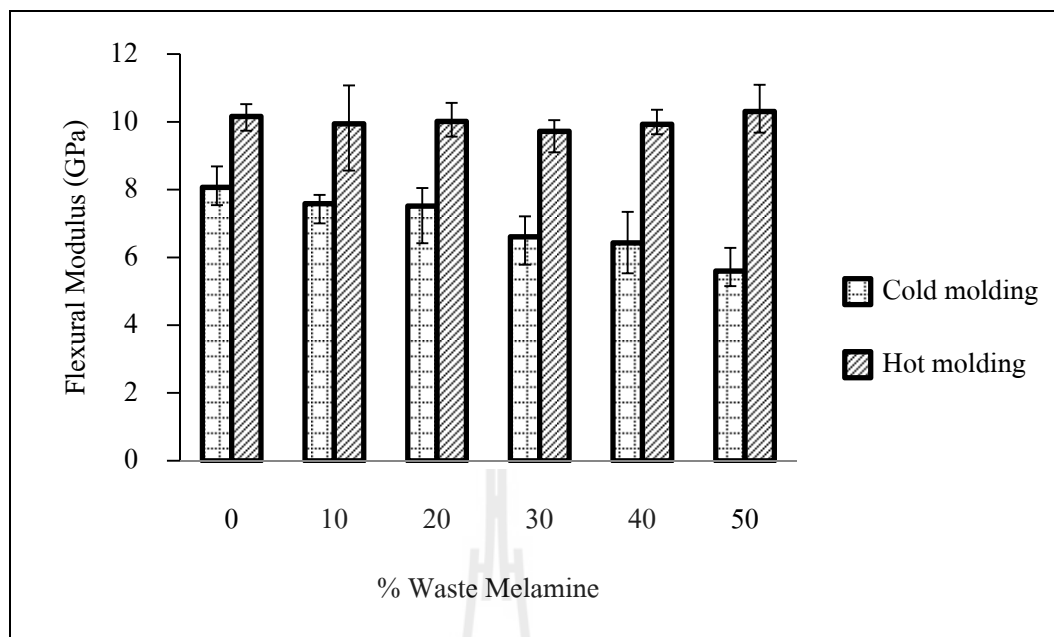
4.3.1 ผลกระทบของปริมาณเศษเมลามีนต่อความแข็งแรงดัด (Flexural Strength)

จากวัสดุที่ขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อนผลการทดสอบความแข็งแรงดัดของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนดังแสดงในรูปที่ 4.8 4.9 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเศษเมลามีนค่าความแข็งแรงดัดลดลง 10.42 13.74 14.04 17.54 และ 18.69% ตามลำดับ ส่วนค่า Flexural Modulus ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณเศษเมลามีน

จากวัสดุที่ขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เย็นผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเศษเมลามีน 0 – 50% ความแข็งแรงดัดจะลดลง 13.57 16.11 29.83 32.57 และ 42.17% ตามลำดับและค่า Flexural Modulus จะลดลง 6.37 7.33 22.11 25.46 และ 44.11% ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดัดและร้อยละปริมาณเศษเมลามีน



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสและร้อยละปริมาณเศษเมลามีน

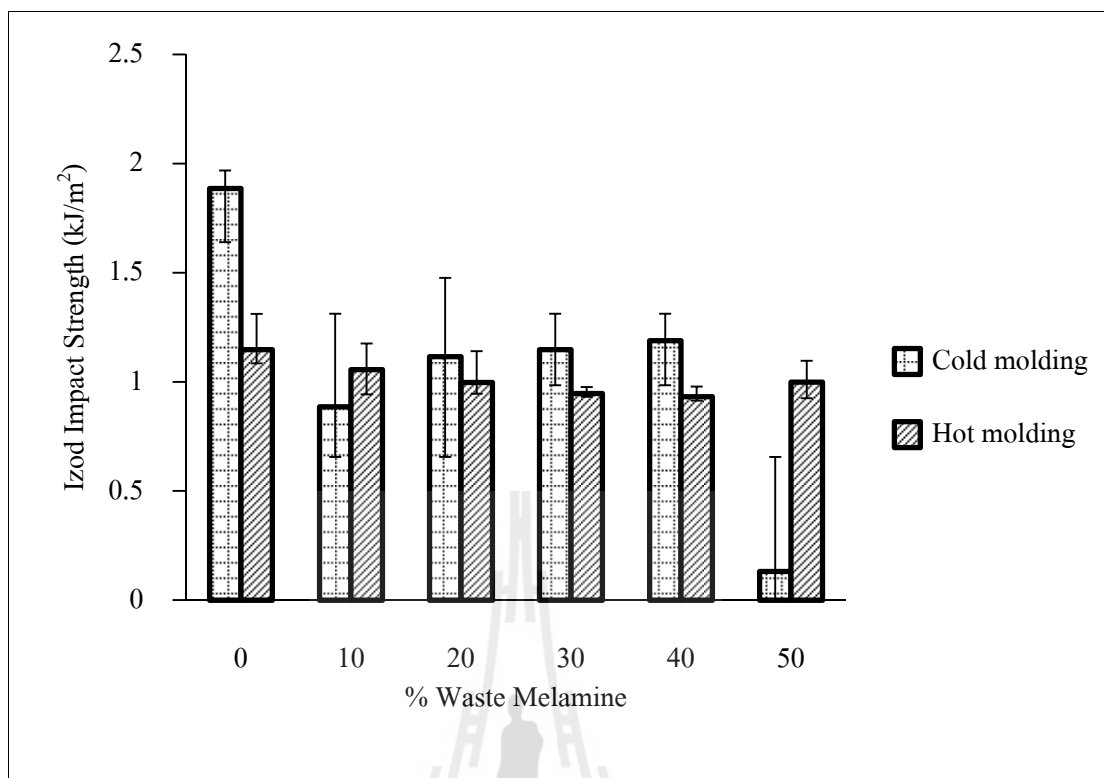
ได้เคยมีการศึกษาวัสดุคอมโพสิตจาก Poly – L – lactic – co – glycolic (PLGA) เป็น Matrix และ Hydroxyapatite (HAP) เป็นสารตัวเติม (Filler) ที่เป็นอนุภาคขนาดเล็ก 5 μm Damadzadeh et al. (2010) พบว่าการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมที่ 0 10 20 30% ทำให้ความแข็งแรงดัด (Flexural Strength) ลดลงตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มตรงกันกับผลที่ได้ในงานวิจัยนี้ ผลการวิเคราะห์ได้กล่าวไว้ว่าเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวที่ไม่เพียงพอระหว่างอนุภาคและ Matrix และประการสำคัญคือรูปร่างของสารตัวเติม เป็นที่ทราบกันดีว่าสารตัวเติมแบบอนุภาคไม่สามารถต้านทานรอยแตก (Crack) ได้เช่นเดียวกับสารตัวเติมแบบเส้นใย

4.3.2 ผลกระทบของปริมาณเศษเมลามีนต่อความแข็งแรง

กระแทก (Izod Impact Strength)

จากวัสดุที่ขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อนผลการทดสอบความแข็งแรงกระแทกแบบไอซอดของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเศษเมลามีนค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง 7.93 13.05 17.46 18.73 และ 12.94% ตามลำดับ

จากวัสดุที่ขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เย็นผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเศษเมลามีนความแข็งแรงจะลดลงถึง 53.04 40.86 39.13 36.95 และ 93.04% จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มเศษที่ 50% ความแข็งแรงจะลดลงจนแทบไม่สามารถต้านแรงกระแทกได้เลย



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกและร้อยละปริมาณเศษเมลามีน

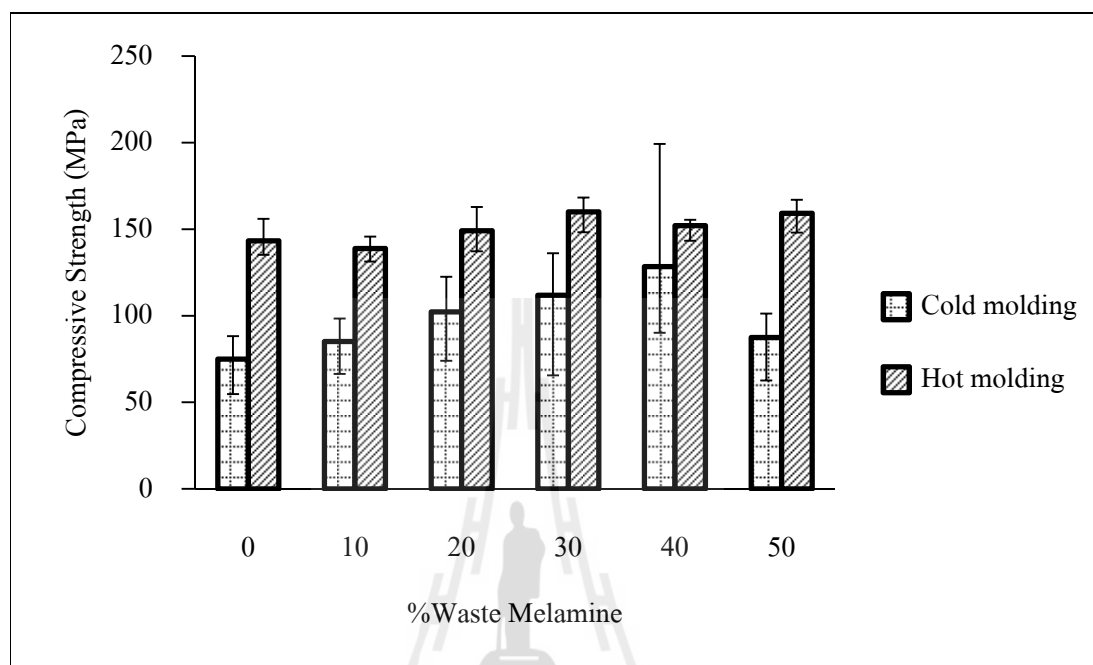
เนื่องจากลักษณะการให้แรงกระแทก ขึ้นทดสอบมีลักษณะกลไกเสียหาย เหมือนกับแรงคัต ผลการทดสอบจึงมีแนวโน้มที่ลดลงในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบแรงคัต ด้วยเหตุผลเดียวกันคือเกี่ยวกับแรงยึดเหนี่ยวที่ไม่เพียงพอระหว่างอนุภาคและ Matrix และด้วยรูปร่างของสารตัวเติม เป็นที่ทราบกันดีว่าสารตัวเติมแบบอนุภาคไม่สามารถต้านทานรอย Crack ได้ เช่นเดียวกับสารตัวเติมแบบเส้นใยจึงทำให้ความแข็งแรงลดลงเมื่อเพิ่มอนุภาคเศษเมลามีน

4.3.3 ผลกระทบของปริมาณเศษเมลามีนต่อความแข็งแรงอัด (Compressive Strength)

จากวัสดุที่ขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อนผลการทดสอบความแข็งแรงอัดของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเศษเมลามีนที่ 10% ค่าความแข็งแรงอัดไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเพิ่มเศษเมลามีนเป็น 20 30 40 50% ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น 4.10 11.70 6.15 11.13% ตามลำดับ

จากวัสดุที่ขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เย็นผลการทดลองพบว่าเมื่อเศษเมลามีนมีปริมาณเพิ่มขึ้นในช่วง 10 – 40% วัสดุรีไซเคิลมีความแข็งแรงกดเพิ่มมากขึ้น 13.49 36.34 49.10 และ 71.24% ตามลำดับ

แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเศษเมลามีนเป็น 50% ความแข็งแรงจะลดลงแต่ก็ยังมีค่าความแข็งแรงมากกว่าวัสดุจากเมลามีนใหม่อยู่ 16.56%



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงอัดและร้อยละปริมาณเศษเมลามีน

ได้เคยมีการศึกษาการวัสดุคอมโพสิตจาก Aluminum lithium alloys (Al – Li alloys) เป็น Matrix และ Silicon Carbide (SiC) เป็นอนุภาคเสริมแรงที่เป็นอนุภาคขนาดเฉลี่ย 40 μm Bauri, R. and Surappa, M.K. (2008) พบว่าการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมที่ 0 8 12 และ 18% ทำให้ความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นในช่วง 0 – 8% และความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลงที่ 8 – 18% ซึ่งตรงกันกับผลในงานวิจัยนี้ในส่วนของการวิเคราะห์ได้กล่าวไว้ว่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นเกิดจากแรงถูกถ่ายทอดจาก Matrix สู่ออนุภาคเสริมแรงผ่านทางหน้าสัมผัสของ Matrix และอนุภาคหากพันธะที่หน้าสัมผัสแข็งแรงก็จะทำให้ออนุภาคเสริมแรงมีประสิทธิภาพมากขึ้น

วัสดุที่มีปริมาณอนุภาคมากขึ้นเกิดโอกาสที่อนุภาคจะรวมกลุ่มกัน (Particle Clustering) ใน Matrix ที่อยู่กันอย่างไม่เป็นระเบียบสามารถทำให้เกิดความเสียหายได้ ในส่วนของการวิเคราะห์ พบว่าการเสียรูปของวัสดุเริ่มจากพื้นที่ที่มีอนุภาคแบบรวมกลุ่ม กลุ่มอนุภาคนี้ทำให้เกิดการ Slip และเกิดการเสียรูปทำให้เสียหายเร็วกว่า ดังนั้นกลุ่มของอนุภาคเศษเมลามีนที่ 50% ที่เกิดการจับกลุ่มกันใน Matrix ของเมลามีนใหม่นี้ จึงทำให้ลดค่าความแข็งแรง

ของวัสดุลดลง หากเพิ่มเศษเมลามีนให้สูงขึ้นกว่า 50% จึงสามารถคาดการณ์ได้ว่าความแข็งแรงจะมีแนวโน้มที่ลดลง

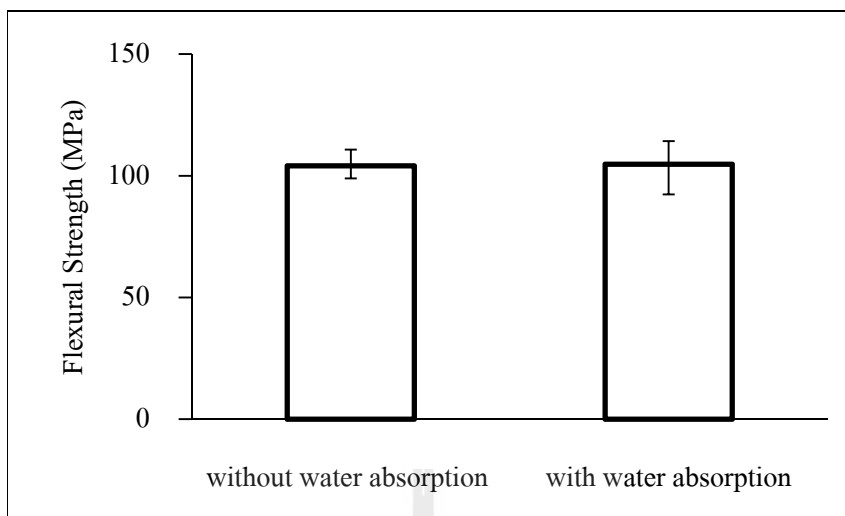
จากผลการทดสอบที่ผ่านมาจะเห็นว่าการขึ้นรูปด้วยการอัดเย็นนั้นมีคุณสมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่าอัดร้อนและจากผลการทดสอบ TGA พบว่าองค์ประกอบและอุณหภูมิการสลายตัวของส่วนประกอบต่างๆของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปทั้งสองวิธี ยังคงไม่ต่างกัน และจากผลการทดสอบ DSC พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปทั้งสองวิธีมีปฏิกิริยาการบ่มที่สมบูรณ์แล้ว ดังนั้นคุณสมบัติเชิงกลที่ด้อยลงสาเหตุหนึ่งจึงคาดการณ์ได้ว่ามาจากวิธีการขึ้นรูป ซึ่งการขึ้นรูปแบบอัดร้อนเป็นการให้ความร้อนจนกระทั่งถึงอุณหภูมิหลอมเหลวและสามารถไหลตัวได้พร้อมกับให้ความดันพร้อมไปด้วยจนกระทั่งเกิดการของวัสดุ การบรรจุอนุภาค (Packing) จึงดีกว่าเกิดพันธะที่แข็งแรงมากกว่าการที่อัดด้วยแม่พิมพ์เย็นซึ่งในขณะที่ให้แรงดัน อนุภาคยังคงมีสถานะเป็นอนุภาคไม่เกิดการอ่อนตัวหรือไหลตัวและเมื่อให้ความร้อนปราศจากความดัน พันธะที่เกิดขึ้นจึงไม่แข็งแรงเท่ากับวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อน

4.4 ผลการทดสอบทางกายภาพของเมลามีนใหม่ที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อนและอัดเย็น

4.4.1 ผลทดสอบการดูดซึมน้ำของเมลามีนใหม่

4.4.1.1 ชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการอัดเย็น

จากผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของเมลามีนใหม่ที่ขึ้นรูปด้วยการอัดเย็นพบว่าวัสดุสามารถดูดซึมน้ำได้ 1.15% ในขณะที่ความแข็งแรงดัดโค้งแสดงในรูปที่ 4.12 ของชิ้นทดสอบดูดซึมน้ำและไม่ดูดซึมน้ำมีความแข็งแรงไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญดังผลการคำนวณในตารางที่ 4.6 ดังนั้น วัสดุเมลามีนที่ขึ้นรูปด้วยการอัดเย็นนี้สามารถสัมผัสน้ำได้ การใช้งานกว้างยิ่งขึ้น



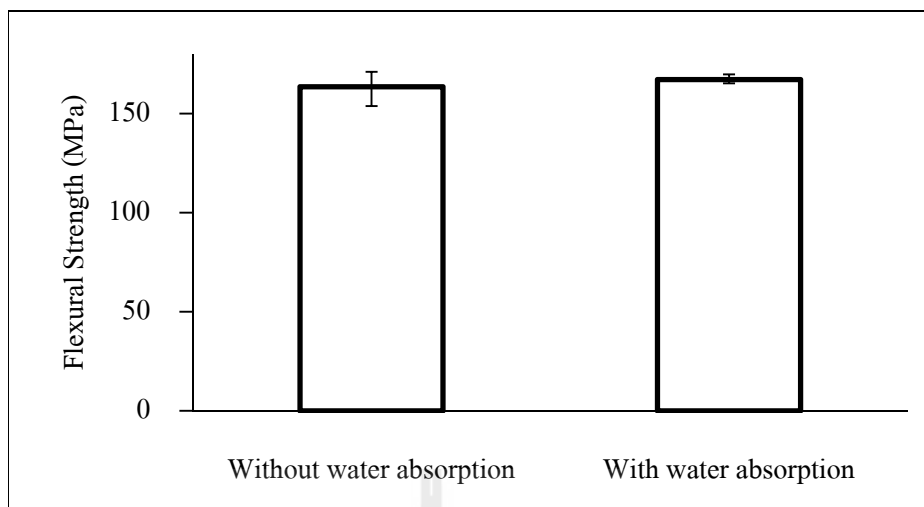
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงคัดของชิ้นทดสอบการดูดซึมน้ำ

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบแบบ One Sample T – Test ของ ($H_0: \mu = 104.05$) vs ($H_1: \mu \neq 104.05$)
ด้วยความเชื่อมั่น 95%

Specimen	Mean	St. Dev.	T	P-Value	Difference
Without Water Absorption	104.05	4.62	Ref.	–	–
With Water Absorption	104.73	10.37	0.15	0.892	No significant

4.4.1.2 ชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อน

จากผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของเมลามีนใหม่ที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อนพบว่าวัสดุสามารถดูดซึมน้ำได้ 0.88% ในขณะที่ความแข็งแรงคัดดังแสดงในรูปที่ 4.13 ของชิ้นทดสอบดูดซึมน้ำมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญดังผลการคำนวณในตารางที่ 4.7 ซึ่งผลการทดสอบจะเห็นว่าการดูดซึมน้ำของชิ้นทดสอบอัดร้อนนั้นจะมากกว่าชิ้นทดสอบอัดเย็นและความแข็งแรงคัดของชิ้นทดสอบแบบอัดร้อนจะเพิ่มขึ้นหลังจากดูดซึมน้ำ



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงคัดของชิ้นทดสอบการดูดซึมน้ำ

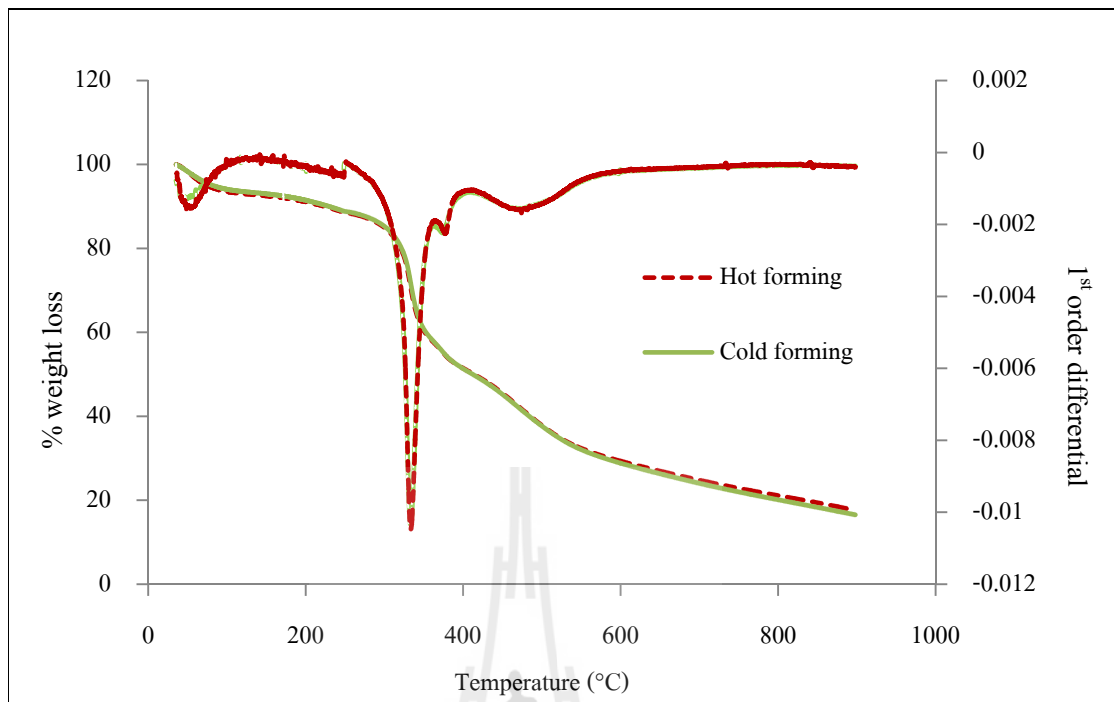
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบแบบ One Sample T – Test ของ ($H_0: \mu = 163.50$) vs ($H_1: \mu \neq 163.50$) ด้วยความเชื่อมั่น 95%

Specimen	Mean	St. Dev.	T	P – value	Difference
Without Water Absorption	163.50	6.31	Ref.	–	–
With Water Absorption	167.19	1.80	4.58	0.010	No significant

4.5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของเมลามีนใหม่ที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อนและอัดเย็น

4.5.1 ผลการทดสอบ Thermo Gravimetric Analysis (TGA)

จากผลการทดสอบ TGA ที่อุณหภูมิ 40 – 900°C ของวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อนและอัดเย็นพบว่าลักษณะร้อยละของน้ำหนักที่ลดลงที่อุณหภูมิต่างๆ ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากว่าวัตถุดิบที่นำมาขึ้นรูปร้อนและเย็นเป็นวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบเหมือนกันและในปริมาณของส่วนประกอบที่เท่ากัน



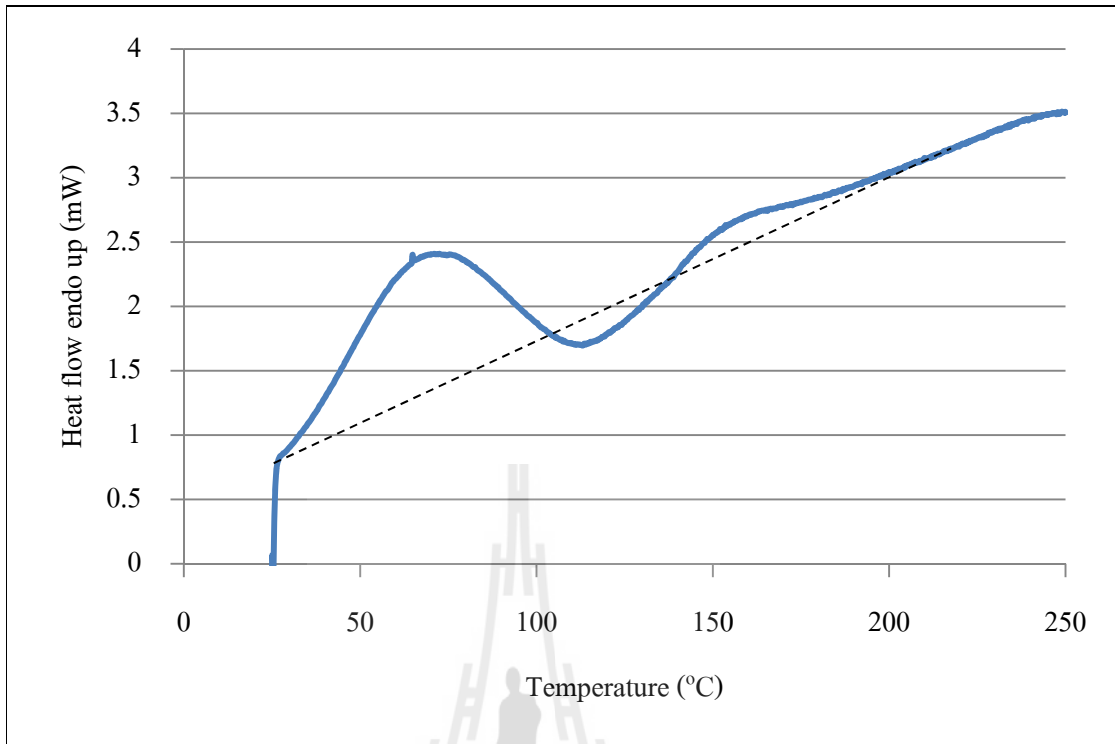
รูปที่ 4.14 กราฟ TGA ของเมลามีนเมื่อเปลี่ยนวิธีการขึ้นรูปแบบอัดร้อนและอัดเย็น

นอกจากนี้จากผล TGA พบว่าวิธีการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อนและแม่พิมพ์เย็นที่ใช้ระยะเวลาในการขึ้นรูปต่างกัน ไม่ได้มีผลทำให้ปริมาณส่วนประกอบของชิ้นงานหลังจากขึ้นรูปต่างกัน และอุณหภูมิการสลายตัวของส่วนประกอบต่างๆก็ยังคงเกิดที่อุณหภูมิเดียวกัน

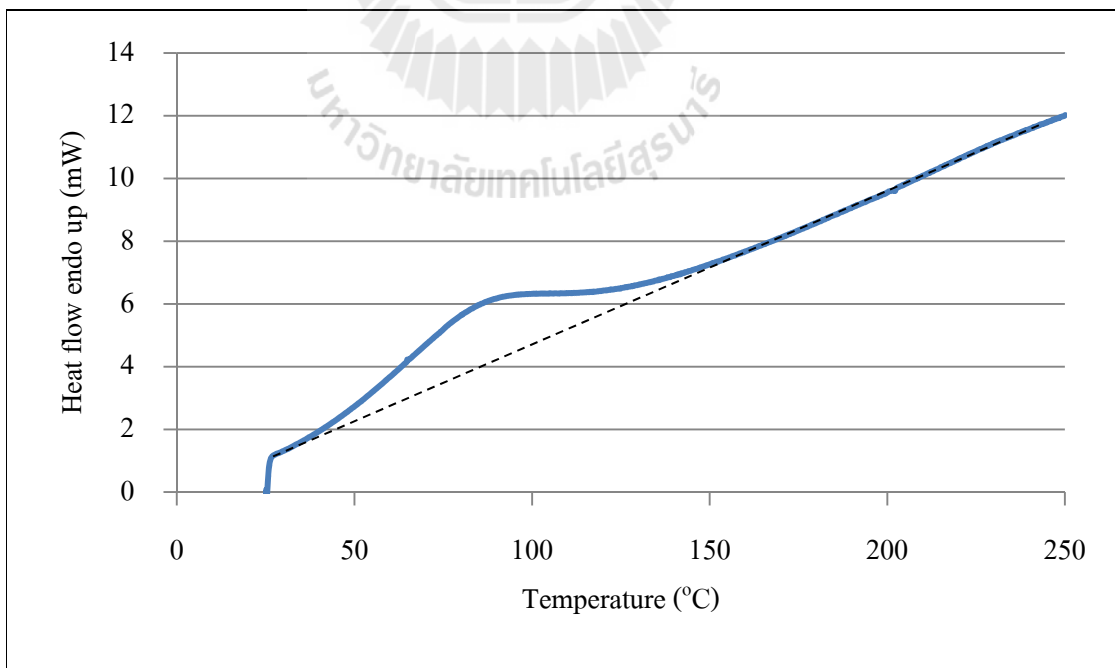
4.5.2 ผลการทดสอบ Differential Scanning Calorimetry (DSC)

จากผลการทดสอบ DSC ของสารประกอบเมลามีน (Melamine Compound) ดังแสดงในรูป 4.15 จากอุณหภูมิ 25 – 250°C พบว่าเกิด Peak ปฏิริยาคายความร้อนที่อุณหภูมิ 113.05°C ซึ่งเป็นปฏิริยาการบ่ม (Cure) ของเมลามีน

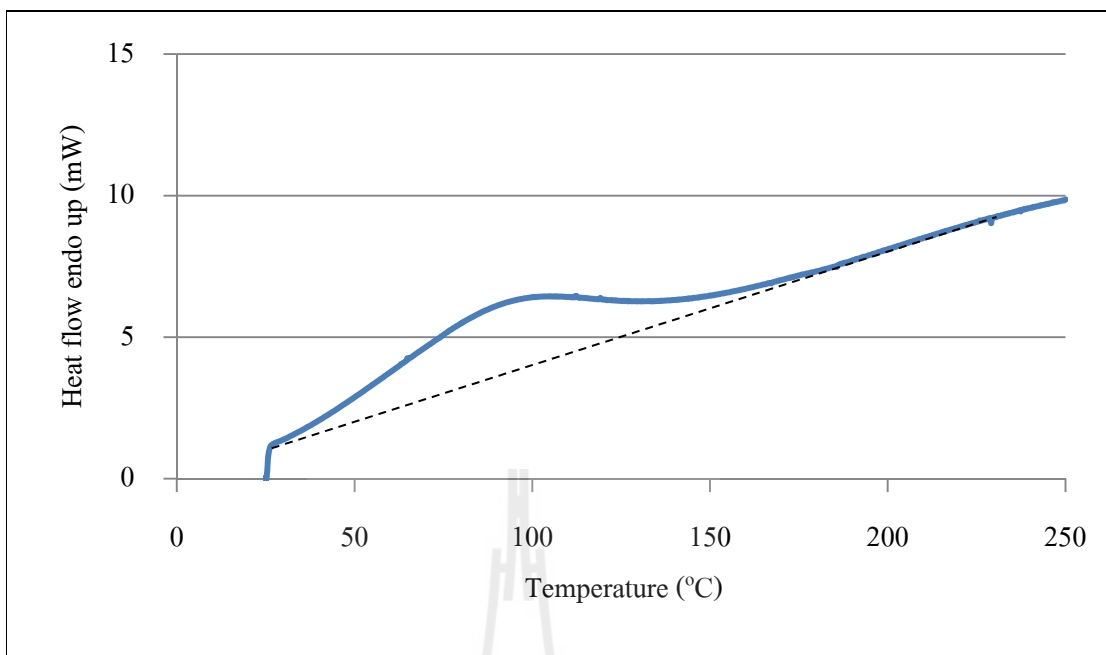
จากผล DSC ของวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดร้อน (รูป 4.16) และอัดเย็น (รูป 4.17) นั้นจะเห็นได้ว่าไม่พบ Peak การคายความร้อน ดังนั้นผลการทดสอบจึงแสดงให้เห็นว่าเมลามีนได้เกิดปฏิริยาการบ่มอย่างสมบูรณ์แล้ว



รูปที่ 4.15 กราฟ DSC ของสารประกอบเมลามีน (Melamine Compound)



รูปที่ 4.16 กราฟ DSC ของวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อน

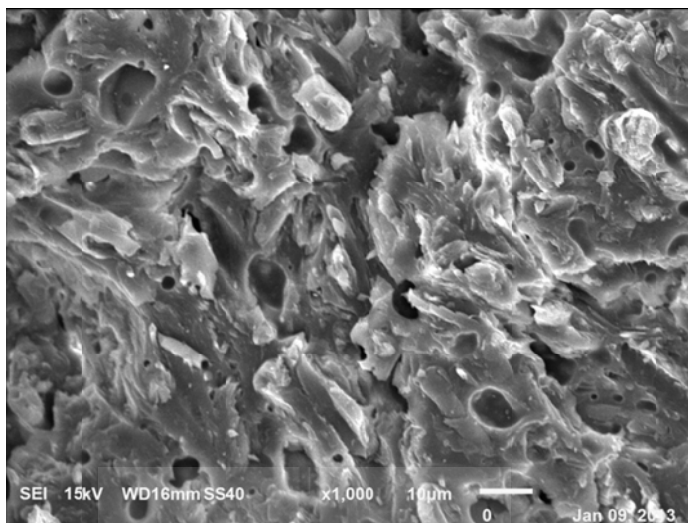


รูปที่ 4.17 กราฟ DSC ของวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยการอัดเย็น

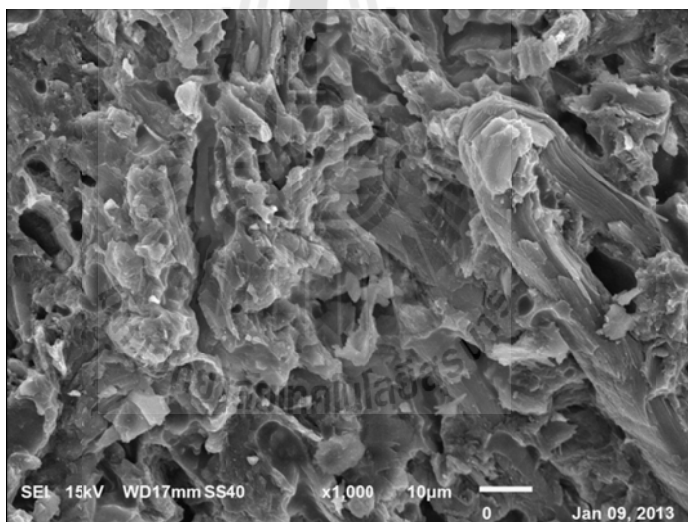
4.6 ผลการตรวจสอบสถานะฐานวิทยาของเมลามีนใหม่ที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อนและอัดเย็น

4.6.1 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

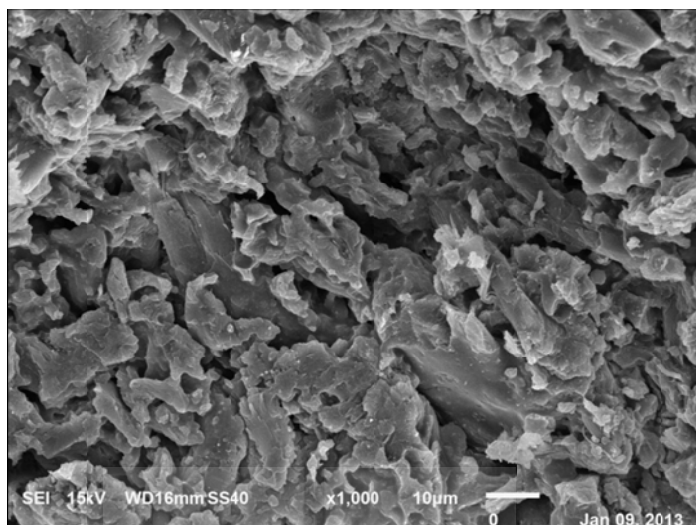
จากรูปการตรวจด้วย SEM ดังรูปที่ 4.18 – 4.20 จะเห็นว่าภายในวัสดุเกิดช่องอากาศและรอยต่อระหว่างเนื้อวัสดุ เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคทำให้ลักษณะความต่อเนื่องของเนื้อวัสดุมีน้อยลงเกิดรอยต่อระหว่างเนื้อวัสดุมากขึ้น เกิดการยึดเหนี่ยวของพันธะที่ไม่แข็งแรง เป็นจุดกำเนิดการ Crack ของวัสดุเมื่อได้รับแรง



รูปที่ 4.18 วัสดุที่ผสมเศษเมลามีน 0%



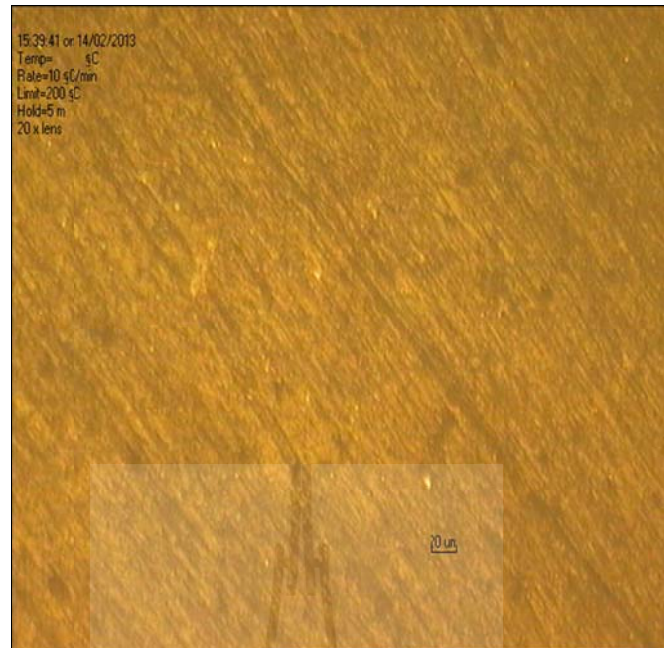
รูปที่ 4.19 วัสดุที่ผสมเศษเมลามีน 20%



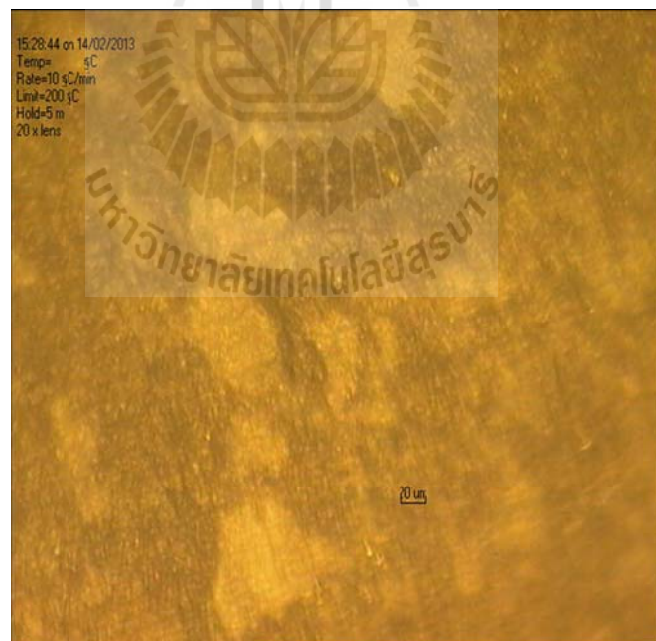
รูปที่ 4.20 วัสดุที่ผสมเศษเมลามีน 50%

4.6.2 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)

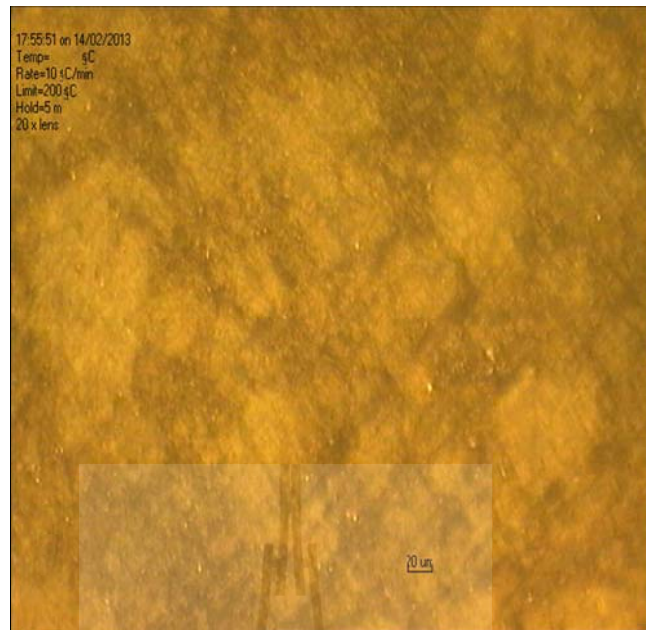
จากผลการตรวจด้วยจุลทรรศน์แบบใช้แสง ดังแสดงในรูป 4.21 – 4.23 จะพบว่าอนุภาคไม่ได้ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับ Matrix เป็นลักษณะที่อนุภาคฝังและกระจายตัวอยู่ใน Matrix ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณเศษเมลามีนให้มากขึ้นทำให้เกิดโอกาสที่อนุภาคจะรวมกลุ่มกันเองและเกิดพันธะที่ไม่แข็งแรงก็มีเพิ่มมากขึ้นไปด้วย



รูปที่ 4.21 ภาพตัดขวางของวัสดุเมทามินใหม่



รูปที่ 4.22 ภาพตัดขวางของวัสดุอีพ็อกซีที่เกิดจากเศษเมทามิน 40%



รูปที่ 4.23 ภาพตัดขวางของวัสดุไทเทเนียม 50%



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาการขึ้นรูปวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนด้วยการอัดแบบแม่พิมพ์ร้อนและแม่พิมพ์เย็น และคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลที่อัตราส่วนต่าง ๆ สามารถสรุปผลและประมวลข้อเสนอแนะของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ดังนี้

5.1 สรุปผล

5.1.1 การอัดแบบแม่พิมพ์เย็นให้ความแข็งแรงของวัสดุที่น้อยกว่าการอัดแบบแม่พิมพ์ร้อนเนื่องจากการวิธีการขึ้นรูปที่มีข้อด้อย ทำให้การประสิทธิภาพการบรรจุอนุภาคสาร (Packing) ที่ด้อยกว่า

5.1.2 การอัดแบบแม่พิมพ์ร้อนให้ความแข็งแรงของวัสดุในระดับที่มีศักยภาพที่จะใช้งานได้

5.1.3 ขอบเขตการขึ้นรูปเย็นที่เหมาะสมในการขึ้นรูปคือหลังจากอัดด้วยแม่พิมพ์เย็นที่ 100°C 15 ชั่วโมงจากนั้นอบด้วยอุณหภูมิ 160°C 1 ชั่วโมง

5.1.4 การเพิ่มอนุภาคเศษเมลามีนเข้าไปในเมลามีนใหม่ทำให้ความแข็งแรงดัด (Flexural Strength) และแรงกระแทก (Impact Strength) ลดลง แต่ช่วยปรับปรุงความสามารถในการรับแรงอัด (Compressive Strength) ได้ดีขึ้นเมื่อใส่ในปริมาณที่เหมาะสม

5.1.5 วิธีการขึ้นรูปเย็นในงานวิจัยนี้ช่วยลดต้นทุนในการผลิตลงได้ หากออกแบบให้สามารถใช้ความร้อนทั้งจากกระบวนการการผลิตเมลามีนด้วยการอัดแบบแม่พิมพ์ร้อน มาใช้ในขั้นตอนการพรีฮีตในการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เย็น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรทำการศึกษาเรื่องความชื้นของเมลามีนในขั้นตอนก่อนอัดเย็น

5.2.2 ควรทำการศึกษาขอบเขตใหม่หากมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างความหนาแน่นของชิ้นงานเนื่องจากมีผลต่ออุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม

5.2.3 การกำหนดวิธีการขึ้นรูปควรวิเคราะห์ถึงผลกระทบเชิงเศรษฐศาสตร์ให้ลึกซึ้งยิ่งขึ้น เช่น ราคาวัสดุทำแม่พิมพ์ ค่าการใช้พลังงานต่อหน่วยจริง ราคาในการสร้างที่แปรตามลักษณะชิ้นงาน

รายการอ้างอิง

- บรรเลง ศรีนิล (2525). เทคโนโลยีพลาสติก. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) พิมพ์ครั้งที่ 15, 425 หน้า
- ปรีชา พหลเทพ (2535). โพลีเมอร์ **high polymers**. มหาวิทยาลัยรามคำแหง พิมพ์ครั้งที่ 6, 423 หน้า
- ปรีดา พิมพ์ขาวขำ (2547). เซรามิกส์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พิมพ์ครั้งที่ 5, 562 หน้า
- พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์ (2542). พลาสติก. กองบริการอุตสาหกรรม พิมพ์ครั้งที่ 15, 311 หน้า
- มานพ ตันตระบัณฑิตย์ (2546). งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) พิมพ์ครั้งที่ 6, 308 หน้า
- Bauri, R., and Surappa, M.K. (2009). Processing and compressive strength of Al–Li–SiCp composites fabricated by a compound billet technique. **Journal of Materials Processing Technology**, Vol.209, No.4, February 19, 2009. pp.2077–2084.
- Damadzadeh, B., Jabari, H., Skrifvars, M., Airola, K., Moritz, N., and Vallittu, P.K. (2010). Effect of ceramic filler content on the mechanical and thermal behaviour of poly-L-lactic acid and poly-L-lactic-co-glycolic acid composites for medical applications. **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, Vol.21, No.9, June 15, 2010. pp.2523–2531.
- Durand, J.M., Vardavoulias, M., and Jeandin, M. (1995). Role of reinforcing ceramic particles in the wear behaviour of polymer-based model composites. **The 10th Conference on Wear of Materials**, Vol.181–183, Part 2, March 1995. pp.833–839.
- Gindl, W., Zargar-Yaghubi, F., and Wimmer, R. (2003). Impregnation of softwood cell walls with melamine-formaldehyde resin. **Bioresource Technology**, Vol.87, No.3, May 2003. pp.325–330.
- Gnjidic, Z., Bozic, D., and Mitkov, M. (2001). The influence of SiC particles on the compressive properties of metal matrix composites. **Materials Characterization**, Vol.47, No.2, August 2001. pp.129–138.
- Goodman, S.W. (1998). **Handbook of Thermoset Plastics**. (2nd Edition), Raytheon Systems Company EI, Segundo, California.

- Hu, J.F., Chen, H.Q., and Zhang, Z. (2009). Mechanical properties of melamine formaldehyde microcapsules for self-healing materials. **Materials Chemistry and Physics**, Vol.118, No.1, November 15, 2009. pp.63–70.
- Panyakapo, P., and Panyakapo, M. (2008). Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete, **Waste Management**, Vol.28, No.9, pp.1581–1588.
- Pickering, S.J. (2006). Recycling technologies for thermoset composite materials – current status. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, The 2nd International Conference: Advanced Polymers Composites for Structural Applications in Construction**, Vol.37, No.8, August 2006. pp.1206–1215.
- Rahaman, M.N. (2007). **Ceramic Processing**. CRC/Taylor & Francis, U.S.A., 473pp.
- Salaün, F., and Vroman, I. (2008). Influence of core materials on thermal properties of melamine-formaldehyde microcapsules. **European polymer Journal**, Vol.44, No.3, March 2008. pp.849–860.
- Shah, V. (1998). **Handbook of Plastics Testing Technology**. Performance Engineered Products. Inc, Pomona, California.
- Thirumal, M., Khastgir, D., Nando, G.B., Naik, Y.P., and Singha, N.K. (2010). Halogen-free flame retardant PUF: Effect of melamine compounds on mechanical, thermal and flame retardant properties. **Polymer Degradation and Stability**, Vol.95, No.6, June 2010. pp.1138–1145.
- Zhang, X.J., Zhan, Y.Z., Mo, H.L., Huang, Q.X., and Zhang, G.H. (2009). Microstructure and compressive properties of in situ synthesized Ti – Si alloy composites reinforced with La₂O₃ particles. **Materials Science and Engineering: A**, Vol.526, No.1-2, November 25, 2009. pp.185–189.

ภาคผนวก ก

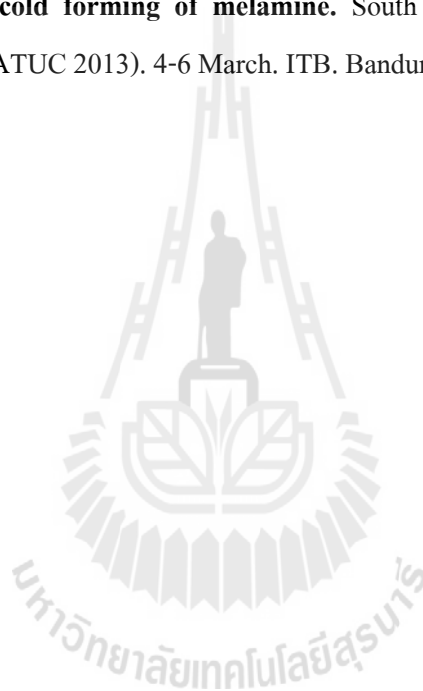
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Siwadamrongpong, S., Mahai, M., and Wonglane, K., (2012). **Study on properties of recycled materials from waste melamine.** South East Asian Technical University Consortium (SEATUC 2012). 6-7 March. KMUTT. Bangkok Thailand.

Siwadamrongpong, S., Boongsod, W., Mahai, M., and Wonglane, K., (2013). **Influence of pre-heating in cold forming of melamine.** South East Asian Technical University Consortium (SEATUC 2013). 4-6 March. ITB. Bandung Indonesia.



STUDY ON PROPERTIES OF RECYCLED MATERIALS FROM WASTE MELAMINE

Somsak Siwadamrongpong^{1*}, Metinee Mahai², Krittiya Wonglane²

¹School of Manufacturing Engineering, ²School of Mechanical Engineering

Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,

111 Suranaree District, Muang, Nakhonrachasima, 30000

*E-mail:somsaksi@sut.ac.th, 0-4422-4236, 0-4422-4411

ABSTRACT

Melamine formaldehyde resin is one of the thermosetting plastics that are widely used in kitchen ware production industries. In the manufacturing processes, scrap and waste of formed Melamine cannot be reformed or reused. Therefore, this study aims to investigate the proper proportion of virgin Melamine powder and waste Melamine in order to increase values of those plastic products. For experiment methodology, the Melamine powder and waste Melamine are compounded and formed as newly-reformed products for mechanical property testing. Heat-compressive test, bending test and roughness test are used for evaluating mechanical properties of abovementioned products. For experimental results, the mechanical properties of reused Melamine products are relatively lower than virgin Melamine products. The part which its waste Melamine is not over 30 % has effective flexural and compressive strengths in the proper range of virgin Melamine property. Surface roughness of the formed parts decrease when amount of waste Melamine increases.

1. INTRODUCTION

Plastic is the bio-chemical substance that is popularly used to produce low cost plastic products instead of natural materials. Nowadays, plastic products are widely used in several countries. So, the increase of the use of plastic products will increase the amount of waste, which will have an influence on environment and climate change. Plastic and Foam waste is about 14 percent of all product waste, 1.9 million tons in 1999. In 2001, the amount of plastic product waste increased about 16 percent, to 2.3 million tons. Lastly, it increased by about 2.7 million tons in

2008 (Pollution Control Department). Because of increasing populations, the use of plastic products and waste consequently increases. Plastic materials can be divided into two types.

1. Thermoplastics, i.e. Polyethylene terephthalate (PET), Polyethylene (PE), Polypropylene (PP), Polystyrene (PS) and Polyvinyl chloride (PVC), can be reused in the plastic reproduction process.

2. Thermosetting, i.e. PUR, Epoxy, Phenolic and Melamine, these types cannot be reused due to cross linking among the polymer chains. Thermosetting has more durability on high temperature resistance and it will be immediately diluted when the melting temperature reaches the critical point. Normally, high temperatures combined with high compressive forces can form this material well to the required shape.

The used plastic products can be disposed of by various methods, such as burial, landfill, incineration and recycling processes. The recycle processes are the best method. The advantages of recycle processing are reducing pollution and cost of reproduction. So, this method is interesting for studying the increase in values of the used plastic materials.

Melamine formaldehyde resin is mostly used to produce dishes and table wear, spoons etc. for food preparation. It has a specific weight about 1.45-1.52 (Pichit Liampipat, 1996) with high strength and hardness. This Melamine formaldehyde powder is not suitable for outside surface coating because it is fades easily. For electric conductivity, it is an electrical resistor and is unmatched with high electrical frequency. However, it is popularly made for some electric devices instead of Phenolic. The mechanical properties of Melamine are shown in Table1 (Sidney H. Goodman, 1998).

Several fields of material forming research studied on plastic recycle and plastic deformation.

Especially, S.J. Pickering (2005) who carried out studies on technologies for recycling thermoset composite materials. Mechanical and Thermal recycling techniques involve the use of grinding techniques to comminute the scrap material for reuse as fillers or partial reinforcement in new composite material. There are technologies that can be used to produce powder and fibrous recyclates that have potential for reuse back into thermoset compounds. However they have lower density and lower mechanical properties. The fibrous recyclates have some potential as reinforcement materials, but they are not as good as the virgin reinforcement. Phaiboon Panyakapo and Mallika Panyakapo (2007) have carried out studies on lightweight concrete - Melamine waste combination. For their research result, that product has a low density and weight because of the reduced specific gravity.

This research uses thermosetting material to form the example parts (specimen) by using compression process, including heat input. Finally, the mechanical properties of those specimens are evaluated by compressive test, bending test and roughness test.

Table 1 Properties of Melamine.

Melamine properties	
Tensile strength	35-90 MPa
Compression strength	228-310 MPa
Flexural strength	62-110 MPa
Flexural modulus	7.58 GPa
Hardness	M115-M125

2. EXPERIMENT

2.1 Material

2.1.1 Melamine powder. Industrial grade Melamine powder (ready mixed with cellulose and formaldehyde).

2.1.2 Melamine waste. Defected parts of Melamine products (scrap and scratch parts) are used. This Melamine waste is ground and filtered by sieve shaker machine, with 90-150 micron.

2.2 Combination

The virgin Melamine was mixed with waste Melamine powder at ratio virgin: waste 50:50, 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 and 100:0 which compounded by ball mill, 10 minutes of running machine. Grinding mill (diameter = 1 cm.) is used to mix, 250 g a times.

2.3 Specimen preparation

Specimens for test are formed by LONG CHANG 200TON from Srithai Superware public company limited, Nakhonratchasima, Thailand. Temperature input of 160 Celsius and compression force of 200 bar with running time of 150 second is performed.

2.4 Experiments

The specimens are finished with sand papers (numbers 600, 1000, 1500 and 2000) and are machined by a belt saw and milling machine. Then was finished again by sand papers (numbers 1000, 1500 and 2000)

2.4.1 Bending test. Dimensions of standard specimens (ASTM D790) are 6 mm X 6 mm X 100 mm, support distances (span length) = 90 mm. Universal Testing Machine, INSTRON Load cell with 5 kN tension force, speed ratios = 2.0 mm / minute at room temperature is used. Five specimens per testing condition are performed. The specimens are bent under three - point bending.

2.4.2 Compressive test. Dimensions of standard specimens (ASTM D695) are 6 mm X 6 mm X 12 mm. Universal Testing Machine, INSTRON Load cell with 50 kN tension force, speed ratios = 1.33 mm / minute at room temperature is used. Five specimens per testing condition are performed.

2.4.3 Surface roughness test. The specimens are tested on surface of a square bar dimensions of bar = 6 mm X 6 mm X 100 mm. Mitutoyo SUTEST SA-400, 600 micron, distance testing point = 3.5 cm. edge distance = 1.5 cm. at room temperature is used for testing. One specimen per testing condition is performed. Measurements are taken of four sides and the average taken.

3. EXPERIMENTAL RESULTS

3.1 Result of part forming

Four of all ratios (i.e. 100:0, 90:10, 80:20, 70:30) can be prepared for testing. The remaining parts (i.e. 60:40, 50:50) are thick and shown in Fig. 1. Due to flow instability during compressing, heating, and increased hardness caused by many Melamine wastes, flow ability of material consequently decreases at the same compression and heat input. Moreover, tools may be damaged if compression force increases.

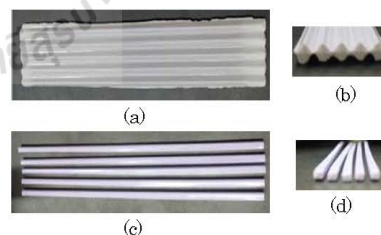


Fig. 1 (a), (b) Unusable specimens or defect part (Mixing ratio, 60:40, 50:50). (c), (d) Usable specimens (Mixing ratio, 100:0, 90:10, 70:30).

3.2 Bending test

The flexural strength (Fig. 2) has highest at 0% waste Melamine. When waste Melamine increases the flexural strength is reduced by 13.05%, 15.06% and 26.74%, respectively. Flexural modulus (Fig. 3) at 0% waste Melamine (8.17GPa) is the highest value and slightly reduced by 1.53%, 7.69% and 11.59%, respectively when waste Melamine increases. However, the flexural strengths at almost all the test are close to Melamine properties (7.58 GPa). Flexural modulus, the minimum value found is 7.23 GPa. Therefore recycling can be used for bending load.

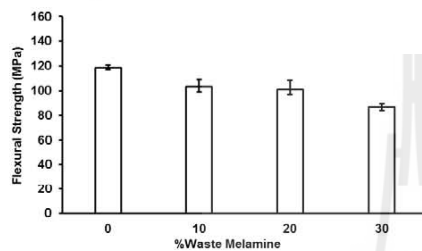


Fig. 2 Flexural strength of recycled Melamine.

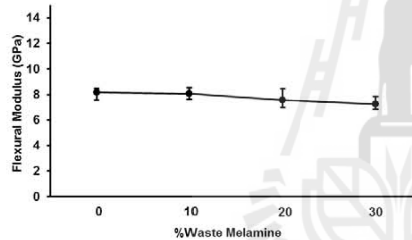


Fig. 3 Flexural modulus of recycled Melamine.

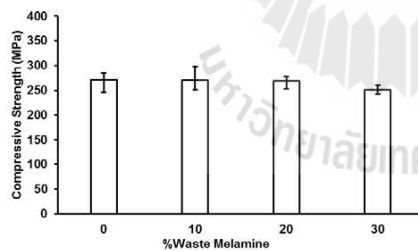


Fig. 4 Compressive strength of recycled Melamine.

3.3 Compression test

The compressive strength showed in Fig. 4. The highest value at 0% waste Melamine (262.57 MPa) and slightly reduced to 0.43%, 1.05% and 7.37%, respectively, when waste Melamine increases.

The minimum compressive strength found was 251.25 MPa which is in the range of Melamine properties. In addition, the compression strength of recycled Melamine can be replaced with other materials such as Phenolic, Urea, etc.

As the waste Melamine increases it causes a decrease of matrix which has a continuous phase effect to the flexural and the compressive strengths which are reduced.

3.4 Roughness

The result of surface roughness showed in Fig. 5. The surface roughness was lowest at 0% waste Melamine (0.4054 μm). The waste melamine causes an increase of the roughness and reaches about 93%, 123%, and 139% respectively.

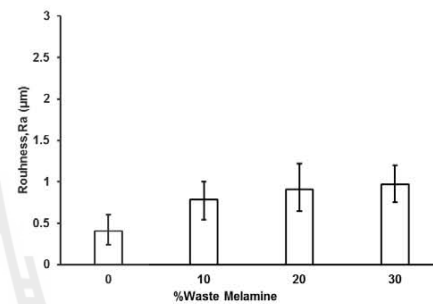


Fig. 5 Roughness of recycled Melamine.

CONCLUSION

From the combination of waste Melamine and virgin Melamine, it is found that over 30 % of waste Melamine (40%, 50%) causes decrease of flow ability of reused material during forming. So, the formed parts are thick and are not suitable for use as specimens. In contrast, the part with waste Melamine not over 30 % was found to have the flexural strength and furthermore the compressive strength of material obtained from experimental results and they are in the proper range of virgin Melamine property. For flexural modulus, the formed part with waste Melamine at 10 %, 20%, and 30% has flexural modulus close to virgin Melamine. On the other hand, surface roughness of the formed parts increase when the amount of waste Melamine increases which may cause more friction resulting in the formation of corrosion or damage.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors actually appreciate and thank to Srithai Superware public company limited that give us raw materials and compression forming machine, The Center for scientific and technological equipment, Suranaree University of Technology that give us the experimental apparatus and useful information.

REFERENCES

ASTM D790 standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials.

ASTM D695 standard test methods for compressive properties of rigid plastics.

Phaiboon Panyakapo ,Mallika Panyakapo, Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete, *Waste Management*, no.28, pp.1581-1588, 2008

Pichit Liampipat, *Plastics*, Bangkok, 1996

S.J. Pickering, Recycling technologies for thermoset composite materials-current status, *Composite Part A*, no. 37, pp. 1206-1215, 2006

Sidney H. Goodman, *Handbook of Thermoset Plastics Second Edition*. Raytheon Systems Company El Segundo, California, 1998



OS Number ____06____

INFLUENCE OF PRE-HEATING IN COLD FORMING OF MELAMINE

Somsak Siwadamrongpong¹, Wanwanut Boongsood¹, Methini Mahai², Krittiya Wonglane²

¹School of Manufacturing Engineering, ²School of Mechanical Engineering,

Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,

111 University Avenue, Muang District, Nakhonratchasima 30000, Thailand.

¹E-mail: somsaksi@sut.ac.th. Tel: 0-4422-4566, Fax: 0-4422-4494

ABSTRACT

Melamine formaldehyde resin is one of the thermosetting plastics that are widely used in kitchen ware production industries. Melamine is normally formed by hot compression molding, which requires high energy input. The ultimate goal of this study was to form recycled materials from waste melamine. It is desired to use cold compression molding, which consumes lower energy consumption in the forming processes. One important step in the cold processes is pre-heating process. Therefore, this study aims to investigate the influence of pre-heating in cold forming of melamine. The specimens are formed by cold compression molding, pre-heated for several time and sintered in the shape of 3-point bending test sample. The flexural strength and moisture content of the specimen were measured. It was found that the pre-heating at 100 degree Celsius for 15 hours is the appropriate condition for elimination of the moisture. The specimens of such conditions are well formed in shape with good surface appearance. It is recommended to form and test the specimens which are mixed between waste and virgin Melamine for further work.

1. INTRODUCTION

Plastic is the substance that is popularly used to produce low cost products instead of natural materials. Nowadays, plastic products are widely used in several countries and lead to the increase of plastic waste amount. Consequently, there are an influence on environmental impact and climate change. In a period of 10 years, plastic and foam waste is about 18 percent of all product waste, 1.65-2.84 million tons a year in 2000-2009 (Pollution Control Department).

Because of increasing populations, the use of plastic products and waste consequently increases. Normally, plastic materials can be divided into two types.

1. Thermoplastics, i.e. Polyethylene terephthalate (PET), Polyethylene (PE), Polypropylene (PP), Polystyrene (PS) and Polyvinyl chloride (PVC), can be reused in the plastic reproduction process.
2. Thermosetting, i.e. PUR, Epoxy, Phenolic and Melamine, these types cannot be reused due to cross linking among the polymer chains. Thermosetting has more durability, high temperature resistance and it will be immediately melted when reaches the melting point. It is usually formed with high temperatures and high compressive forces, simultaneously, in the mold of desired shape.

The used thermosetting plastic products can be disposed by land filling. Due to the plastic is durable and takes a hundred of years to decompose. So, the recycle processes are the most interesting method to face this problem. The advantages of recycle processing are reducing pollution and environmental impact.

Melamine formaldehyde resin is mostly used to produce dishes, table ware and spoons etc. It has a specific weight about 1.45-1.52 (Pichit Liampipat, 1996) with high strength and hardness. For electric conductivity, it is an electrical insulator and is unmatched with high electrical frequency. However, it is popularly made for some electric devices instead of Phenolic. The mechanical properties of melamine are shown in Table 1 (Sidney H. Goodman, 1998).

Table1 Properties of Melamine.

Melamine properties	
Tensile strength	35-90 MPa
Compression strength	228-310 MPa
Flexural strength	62-110 MPa
Flexural modulus	7.58 GPa
Hardness	M115-M125

Typically, melamine product was formed by hot compression molding. The processes of forming consist of pre-heating and hot pressing processes. In the hot pressing process, the compound will be melted and flowed to form into shape in the mold. Then, the mold is opened and Melamine product is removed from the mold.

Several fields of material forming research studied on plastic recycle and plastic deformation. S.J. Pickering (2005) carried out studies on technologies for recycling thermoset composite materials. Mechanical and Thermal recycling techniques involve the use of grinding techniques to comminute the scrap material for reuse as fillers or partial reinforcement in new composite material. There are technologies that can be used to produce powder and fibrous recycle that have potential for reuse. However the recycled materials usually have lower density and mechanical properties than the original fresh material. The fibrous recyclates have some potential as reinforcement materials, but they are not as good as the virgin reinforcement. Phaiboon Panyakapo and Mallika Panyakapo (2007) have carried out studies on lightweight concrete- waste melamine combination. They have been reported that the waste melamine could be reused in some type of lightweight concrete.

The ultimate goal of this study was to use cold compression molding, which consumes lower energy consumption in the forming processes, to form the recycled melamine. In this stage, the cold forming condition of pure melamine was investigated. One important step in the cold processes is pre-heating process. Therefore, this study aims to investigate the influence of pre-heating in cold forming process of pure melamine.

The melamine powders are formed by cold compression molding, pre-heated for several time and sintered in the shape of 3-point bending test sample. The flexural strength and moisture content of the specimen were measured. It is recommended to form and test the specimens which are mixed between waste and virgin Melamine for further work.

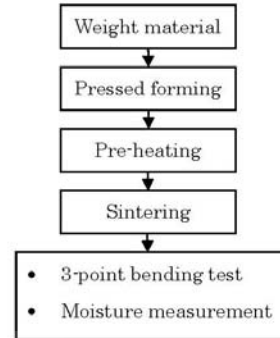


Fig. 1 Experiment procedure.

2. EXPERIMENT

2.1 Melamine powder

Industrial grade melamine powder (ready mixed with cellulose and formaldehyde).

2.2 Specimen forming

Melamine powder was weighted in calculated amount from volume of specimen using density of 1.425 kg/m³ (reference from specimen that formed by hot compression molding). The specimen was formed by hydraulic press without heat. Then, pre-heat at various time periods was carried out. The forming condition is shown in table 2. After that, the formed specimen was sintered and tested the flexural strength.

Table2 Forming conditions

Specimen No.	Pre-heat condition.		Sintering condition	
	Temp.	Time	Temp	Time
1	100 °C	0	160 °C	6 hr.
2		6		
3		18		
4		36		
5		54		
6	100 °C	9	160 °C	6 hr.
7		12		
8		15		

2.3 Measurements

2.3.1 Bending test

Dimensions of standard specimens (ASTM D790) are 125 mm X 12.7 mm X 3.2 mm, supported distances (span length) 51.2 mm. Universal Testing Machine, INSTRON Load cell 5 kN, speed 2.0 mm / minute at room temperature is used. Six specimens for each testing condition are performed. The specimens are bent under three - point bending.

2.3.2 Moisture measurement

After the sintering process, specimens were weighed to the reference value. Then, the specimen was ground to reduce size for easier elimination of moisture. The reduced size specimen was baked at 100 °C for 24 hours. Then, cooling down in the desiccators and weighed again to achieve the moisture amount .

3. EXPERIMENTAL RESULTS

3.1 Result of specimen forming

Specimen no.1 was pressed and sintered at 160 °C (follow to the normal forming temperature of Melamine) without pre-heating. The specimens of such conditions cannot be formed in shape compared to specimen with pre-heating as show in Fig. 2. It could be considered that might cause by moisture remaining in the specimen. On the sintering process, the moisture changes into vapor phase with high pressure while the surface of the specimen was already cured. It results the bending and crack of specimen surface as shown in Fig. 2. The specimens no. 2-8 are well formed in shape with good surface appearance.

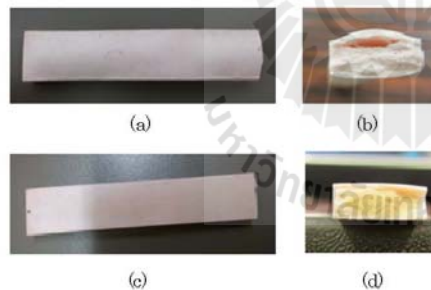


Fig. 2 (a), (b) Specimen without pre - heating.
(c), (d) Specimen with pre - heating.

3.2 Influence of pre-heated time

The flexural strength results of specimen no. 2, 3, 4, 5 was shown in Fig.3. It was found that specimen no. 4 is the highest flexural strength. However, the statistical hypothesis test at the 95% confidence level, shown in Table 3, was indicated that there are not significantly different between specimen no 3 and 4. It was implied that the appropriate pre-heating time should be located between 6-18 hours.

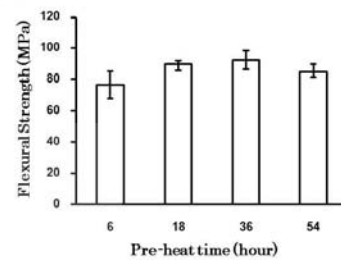


Fig. 3 Flexural strength of specimen no. 2- 5.

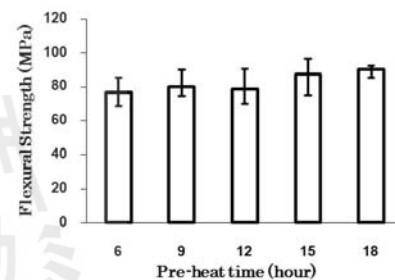


Fig. 4 Flexural strength of specimen no.2, 3, 6, 7, 8.

Figure 4 showed the flexural strength of specimen no. 2, 3, 6, 7 and 8 which was pre-heating for 6, 9, 12, 15 and 18 hours respectively. From these results, it was statistically discussed and selected to pre-heat the specimen for 15 hours (specimen no. 3) due to it was significantly no different between pre-heating time 18 hours. The results of hypothesis testing was shown in Table 3. It was obvious that the lower pre-heating time than 15 hours yielded the significantly different flexural strength from the sepcimen no. 3.

Table 3 The result of one sample t-test of ($H_0: \mu = 90.12$) vs ($H_1: \mu \neq 90.12$) with confidence level 95%.

Specimen No.	Pre-heat time	St. Dev.	SE Mean	95% CI	T	P-value
2	6	9.74	4.87	(57.72, 88.71)	-3.47	0.040
6	9	7.63	3.11	(72.58, 88.59)	-3.06	0.028
7	12	10.37	4.64	(63.54, 89.29)	-2.96	0.042
8	15	5.75	2.87	(85.04, 103.34)	1.42	0.252
3	18	3.09	1.54	(85.21, 95.03)	Ref.	-
4	36	4.95	2.48	(84.76, 100.53)	1.02	0.383
5	54	3.09	1.38	(81.06, 88.74)	-3.77	0.020

3.3 Moisture measurement

The remaining moisture content in the specimens no. 2, 3, 4, 5 were decreased as increasing of pre-heating time. The exponential function was proposed to predict the remaining moisture content in the specimen after sintering as follow:

$$y = 2.9958e^{-0.008x}$$

with $R^2 = 0.9889$). Therefore, pre-heat time was concluded to strongly related to the remaining moisture content in the specimen. The approximated of remaining moisture content in the specimen that pre-heated for 15 hours was calculated to be 2.657% moisture.

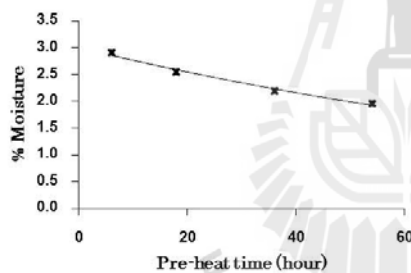


Fig. 5 Remaining moisture content of specimen no.

2-5.

4. CONCLUSION

This study aims to study influence of pre-heating on the cold forming process of melamine. The specimens were formed by various pre-heating time periods. The specimens were tested the flexural strength and remaining moisture content. It was found that the pre-heating at 100 degree Celsius for 15 hours might be the appropriate condition elimination of the moisture which, remaining moisture content in the specimen was approximately 2.657%. The specimens of such conditions are well formed in shape with good surface appearance. It could be concluded that the cold forming process with pre-heating has the

potential to form the melamine product. It is recommended to form and test the specimen which is mixed between waste and virgin melamine for the further study.

ACKNOWLEDGEMENT

The author would like to thank The Thailand Research Fund (TRF) for financial support, Srithai Superware PLC. for material and forming machine, Suranaree University of Technology for facility support.

REFERENCES

- ASTM D790 standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials.
- Phaiboon Panyakapo, Mallika Panyakapo, Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete, *Waste Management*, no.28, pp.1581-1588, 2008
- Pichit Liampipat, *Plastics*, Bangkok, 1996
- S.J. Pickering, Recycling technologies for thermoset composite materials: current status, *Composite Part A*, no. 37, pp. 1206-1215, 2006
- Sidney H. Goodman, *Handbook of Thermoset Plastics Second Edition*. Raytheon Systems Company El Segundo, California, 1998

ประวัติผู้เขียน

นางสาวเมทินี มาให้ เกิดเมื่อวันที่ 28 มิถุนายน พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดอุดรดิตถ์ สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนบ้านบึงท่ายวน อำเภอพิชัย จังหวัดอุดรดิตถ์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพิชัย อำเภอพิชัย จังหวัดอุดรดิตถ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2552 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2553 โดยได้รับทุนการศึกษา “ทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก” ขณะศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิตนั้น ได้มีประสบการณ์เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล และวิศวกรรมการผลิต จำนวน 5 รายวิชาดังนี้

- (1) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1, 3
- (2) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมยานยนต์ 3, 4
- (3) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิต 1, 2, 3
- (4) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมอากาศยาน 1, 2
- (5) วิชาสถิติและวิธีเชิงตัวเลข

มีผลงานวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ 2 บทความ ดังในภาคผนวก ก.