

อิทธิพลของการดูดซึมน้ำและอุณหภูมิขึ้นรูปต่อสมบัติเชิงกล
ของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีน

นางสาวกฤติยา วงศ์เลน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**INFLUENCES OF WATER ABSORPTION AND
FORMING TEMPERATURE ON MECHANICAL
PROPERTIES OF RECYCLED MATERIAL
FROM WASTE MELAMINE**

Krittiya Wonglane

**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

อิทธิพลของการดูดซึมน้ำและอุณหภูมิขึ้นรูปต่อสมบัติเชิงกล
ของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.นิธินาถ สุภกาญจน์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กฤติยา วงศ์เลน : อิทธิพลของการดูดซึมน้ำและอุณหภูมิขึ้นรูปต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ
รีไซเคิลจากเศษเมลามีน (INFLUENCES OF WATER ABSORPTION AND FORMING
TEMPERATURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF RECYCLED MATERIAL
FROM WASTE MELAMINE) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์,
81 หน้า.

เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (Melamine Formaldehyde Resin) เป็นเทอร์โมเซตติงพลาสติกชนิดหนึ่ง ส่วนมากใช้ทำผลิตภัณฑ์ใช้ในครัวเรือน เช่น จาน ชาม ช้อน เป็นต้น มีความแข็งแรงดี และทนความร้อนได้ดี ในระหว่างกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน จะเกิดเศษกริบออกมาเป็นจำนวนมาก ซึ่งเศษกริบเหล่านี้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ หรือรีไซเคิลได้ ในการกำจัดต้องใช้วิธีการฝังกลบ หรือการเผา ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางน้ำ และทางอากาศ อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดอีกด้วย ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการนำเศษเมลามีนมารีไซเคิล โดยนำเศษเมลามีน (ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้ว) มาบดให้ละเอียดเป็นผง แล้วกรองให้ได้ขนาดอนุภาคที่ต้องการ แล้วนำมาผสมกับเมลามีนใหม่ (เมลามีนที่ยังไม่ผ่านการขึ้นรูป) เพื่อใช้เป็นตัวประสานระหว่างอนุภาคของเศษเมลามีนเข้าด้วยกัน ด้วยอัตราส่วนผสมที่ต่างกัน จากนั้นนำมาขึ้นรูปด้วยการอัดแบบแม่พิมพ์ร้อน (Hot molding) ด้วยอุณหภูมิการขึ้นรูปที่ต่างกัน หลังจากนั้นตัดชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปให้อยู่ในลักษณะและขนาดของชิ้นทดสอบทางกลต่าง ๆ โดยวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือ ศึกษาอิทธิพลของการดูดซึมน้ำและอุณหภูมิขึ้นรูปต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนที่ส่วนผสมต่าง ๆ ด้วยการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อน ซึ่งจากการศึกษาวิจัยพบว่าวัสดุที่ผ่านการดูดซึมน้ำมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ทั้งด้านการรับแรงดัด แรงกดอัด และแรงกระแทก ในส่วนของอุณหภูมิขึ้นรูปที่ต่างกันนั้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่างกัน ซึ่งวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 180°C มีสมบัติทางกลด้านการรับแรงดัด ดีกว่าอุณหภูมิขึ้นรูป 160°C ส่วนสมบัติเชิงกลด้านการรับแรงกด และแรงกระแทก วัสดุที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C จะมากกว่าวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 180°C

KRITTIYA WONALANE : INFLUENCES OF WATER ABSORPTION
AND FORMING TEMPERATURE ON MECHANICAL PROPERTIES
OF RECYCLED MATERIAL FROM WASTE MELAMINE.

THESIS ADVISOR : SOMSAK SIWADAMRONGPONG, Ph.D., 81 PP.

MELAMINE RECYCLED FORMING TEMPERATURE WATER ABSORPTION

Melamine formaldehyde resin is one of the most thermosetting plastic used for tableware such as plates, dishes, spoons, cup etc. It is well-known that the polymer melamine has excellent hardness and high thermal resistance properties. In the manufacturing process, melamine formaldehyde resin was compressed and heated simultaneously to form into the desired shape by compression molding. After compression process the melamine product were performed and scrap or waste melamine had generated, which cannot be reformed or reused. The waste disposal might be done by using landfills or burning in an incinerator that leads to the environmental problems and wastage cost for disposal. Thus this study was aimed to recycled melamine. The recycled melamine was ground to particle and sieving. The recycled melamine was used for admixture with virgin melamine at various mixing ratios. The admixture was form by hot molding with different forming temperature for mechanical test. Therefore, this study was aimed at investigating influence of forming temperature and water absorption of recycled material from waste melamine. The experimental results revealed that the 3-point bending, compression and impact properties were improved after water absorption. The results of 180°C forming temperature yielded flexural properties better than 160°C forming temperature. On the

other hand 160°C forming temperature were shown compression and impact properties higher than the other one.



School of Mechanical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูง และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ ดร. สมศักดิ์ ศิวคำรังพงศ์ หัวหน้าสาขาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำ ช่วยแก้ปัญหา รวมทั้งช่วยตรวจแก้ไขในการดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยมีความซาบซึ้ง และถือเป็นพระคุณอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้อำนวยความสะดวกในการทำวิจัย ทั้งข้อมูล และอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ บริษัท ศรีไทยชุบเปอร์แวร์ จำกัด มหาชน ที่ได้อำนวยความสะดวกในด้านสถานที่ ด้านการจัดหาวัตถุดิบ เครื่องมือ เครื่องจักรในการทำวิจัย รวมทั้งข้อมูลที่จำเป็นต่องานวิจัย ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบรรดาผู้ที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูลที่มีประโยชน์ต่องานวิจัย รวมทั้งคำแนะนำต่าง ๆ ด้านวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณงามความดีอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพ และคณาจารย์ผู้ประสิทธิ์วิชาความรู้ ตลอดจนทุก ๆ ท่านที่ให้กำลังใจช่วยเหลือจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงด้วยดี

นางสาวกฤติยา วงศ์เลน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ฅ
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย.....	2
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย.....	3
1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ปรัชญ์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 เมลามีนฟอรัลดีไฮด์เรซิน(Melamine formaldehyde resin).....	5
2.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ Water absorption (ASTM D570).....	6
2.2.1 วิธีการทดสอบการดูดซึมน้ำ.....	6
2.3 การทดสอบแรงดัด (Flexural test)	7
2.3.1 การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด	7
2.3.2 การทดสอบแรงดัดงอแบบ 4 จุด.....	9
2.4 การทดสอบแรงอัด (Compression test) ASTM D695.....	10
2.5 การทดสอบการทนแรงกระแทก (Impact testing).....	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6	การทดสอบความแข็ง.....	14
2.6.1	การทดสอบแบบ Rockwell	15
2.7	การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	16
2.7.1	สถิติพรรณนา (Descriptive Statistics).....	16
2.7.2	สถิติอ้างอิง (Inferential Statistics).....	17
2.7.3	การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance).....	17
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	21
3.1	การเตรียมชิ้นทดสอบวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีน	23
3.1.1	วัตถุดิบ	23
3.1.2	การผสม.....	26
3.1.3	การเตรียมชิ้นทดสอบแรงดัด และชิ้นทดสอบความแข็ง.....	26
3.1.4	การเตรียมชิ้นทดสอบแรงกระแทก.....	29
3.1.5	การเตรียมชิ้นทดสอบแรงกด.....	30
3.2	การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	32
3.2.1	การทดสอบแรงดัดแบบสามจุด (3-Point Bending).....	32
3.2.2	การทดสอบแรงกระแทก (Impact testing).....	32
3.2.3	การทดสอบความแข็ง (Hardness testing).....	32
3.2.4	การทดสอบแรงกด (Compression test).....	32
3.3	การทดสอบการดูดซึมน้ำ.....	33
4	ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	34
4.1	ผลจากการทดสอบแรงดัด (3-Point Bending).....	34
4.1.1	อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน (การทดสอบ 3-Point Bending).....	37
4.1.2	อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูป (การทดสอบ 3-Point Bending).....	39
4.1.3	อิทธิพลของการดูดซึมน้ำ (การทดสอบ 3-Point Bending).....	42

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.4	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (การทดสอบ 3-Point Bending)	45
4.2	ผลจากการทดสอบแรงอัด (Compression)	47
4.2.1	อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน (การทดสอบ Compression)	47
4.2.2	อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูป (การทดสอบ Compression)	49
4.2.3	อิทธิพลของการดูดซึมน้ำ (การทดสอบ Compression)	51
4.2.4	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (การทดสอบ Compression)	53
4.3	ผลจากการทดสอบแรงกระแทก(Impact)	54
4.3.1	อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน (การทดสอบ Impact)	54
4.3.2	อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูป (การทดสอบ Impact)	57
4.3.3	อิทธิพลของการดูดซึมน้ำ (การทดสอบ Impact)	59
4.3.4	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (การทดสอบ Impact)	61
4.4	ผลจากการทดสอบความแข็ง(Hardness)	62
4.4.1	อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน (การทดสอบ Hardness)	62
4.4.2	อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูป (การทดสอบ Hardness)	64
4.5	ผลจากการศึกษาฐานฐานวิทยา	66
5	สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ	67
5.1	สรุปการวิจัย	67
5.1.1	อิทธิพลของเศษเมลามีน	67
5.1.2	อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูป	67
5.1.3	อิทธิพลของการดูดซึมน้ำ	68
5.2	ข้อเสนอแนะ	68
	รายการอ้างอิง	69
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	71
	ประวัติผู้วิจัย	81

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของเมลามีน.....	6
2.2 แสดงวิธีทดสอบความแข็ง (Hardness) ที่ควรเลือกสำหรับพลาสติกต่างๆ.....	14
2.3 ชนิดของลูกบอลเหล็กและแรงที่ใช้กดในการทดสอบค่าความแข็งแบบต่างๆ.....	16
3.1 ขนาดผงเมลามีนและเศษเมลามีน.....	24
3.2 อัตราส่วนผสมเศษเมลามีนและผงเมลามีน.....	26
3.3 ขนาดของชิ้นทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ.....	31
4.1 One-way ANOVA เปรียบเทียบอุณหภูมิ 160°C 180°C และ 200°C.....	35
4.2 General Regression เปรียบเทียบอุณหภูมิ 160°C 180°C และ 200°C.....	36
4.3 1 Sample - t Flexural strength ของเศษเมลามีน 40%:50%.....	38
4.4 Two-way ANOVA Flexural strength อุณหภูมิ 160°C และ 180°C.....	40
4.5 General Regression Flexural strength อุณหภูมิ 160°C และ 180°C.....	41
4.6 Two-way ANOVA Flexural strength อุณหภูมิ 160°C ชิ้นทดสอบแห้งและดูดซึมน้ำ.....	43
4.7 General Regression Flexural strength อุณหภูมิ 160°C ชิ้นทดสอบแห้งและดูดซึมน้ำ.....	44
4.8 One-way ANOVA เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ อุณหภูมิ 160°C.....	46
4.9 General Regression เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ อุณหภูมิ 160°C.....	46
4.10 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำระหว่างชิ้นทดสอบเคลือบเงาและไม่เคลือบเงา.....	47
4.11 Two-way ANOVA Compression stress อุณหภูมิ 160°C และ 180°C.....	50
4.12 General Regression Compression stress อุณหภูมิ 160°C และ 180°C.....	50
4.13 Two-way ANOVA Compression ชิ้นทดสอบแห้งและดูดซึมน้ำ อุณหภูมิ 160°C.....	52
4.14 General Regression Compression ชิ้นทดสอบแห้งและดูดซึมน้ำ อุณหภูมิ 160°C.....	52
4.15 1- Sample t Impact strength อุณหภูมิ 160°C.....	54

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.16 1- Sample t Impact strength อุณหภูมิ 180°C	56
4.17 Two-way ANOVA Impact strength อุณหภูมิ 160°C และ 180°C.....	58
4.18 General Regression Impact strength 160°C และ 180°C.....	58
4.19 Two-way ANOVA Impact strength ขึ้นทดสอบแห้งและดูดซึมน้ำ.....	60
4.20 General Regression Impact strength ขึ้นทดสอบแห้งและดูดซึมน้ำ.....	60
4.21 Two-way ANOVA Hardness อุณหภูมิ 160°C และ 180°C.....	64



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะการทดสอบแรงดัด.....	8
2.2	การทดสอบแรงดัดแบบสามจุด.....	9
2.3	การทดสอบแรงดัดแบบสี่จุด.....	10
2.4	ชิ้นทดสอบ Compression test ASTM D695.....	11
2.5	การทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod.....	12
2.6	รูปแบบการวางชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod และ Charpy.....	13
2.7	ขนาดชิ้นทดสอบ Izod Impact ตามมาตรฐาน ASTM D256-10.....	13
2.8	แสดงขั้นตอนในการทดสอบความแข็ง Hardness แบบ Rockwell.....	16
3.1	แผนผังการดำเนินงาน.....	22
3.2	เศษเมลามีน.....	23
3.3 (ก)	เมลามีนใหม่(ข) เศษเมลามีนที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรงกรอง 100 mesh.....	24
3.4	แสดงขนาดของเมลามีนใหม่.....	25
3.5	แสดงขนาดของเศษเมลามีน.....	25
3.6	Compression molding machine.....	27
3.7	งานที่ได้จากการขึ้นรูป.....	27
3.8	เครื่องเลื่อยสายพาน.....	28
3.9	(ก) การตัดขอบงานออก (ข) การตัดชิ้นทดสอบตามขนาด (ค) ชิ้นทดสอบแรงดัด.....	28
3.10	แสดงเครื่องกัด (Milling) ยี่ห้อ Bridgeport.....	29
3.11	การทำรอยบากชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก.....	29
3.12	เครื่อง Profile projector.....	30
3.13	แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นทดสอบแรงกด.....	31
4.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength ของชิ้นทดสอบเมลามีน 100% อุณหภูมิ 160°C 180°C และ 200°C.....	35
4.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C.....	37

สารบัญรูป (ต่อ)

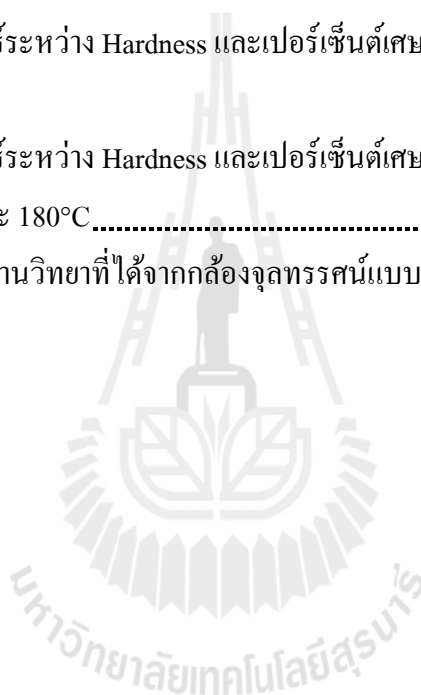
รูปที่	หน้า
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Flexural strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 180°C38	
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C และ 180°C.....	39
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C ระหว่างขั้นตอนทดสอบแห้งและขั้นตอนทดสอบดูดซึมน้ำ42	
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C.....	45
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Compression stress และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160 °C47	
4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Compression stress และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 180°C48	
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Compression stress และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C และ 180°C	49
4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Compression stress และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C ขั้นตอนทดสอบแห้งและขั้นตอนทดสอบดูดซึมน้ำ51	
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C.....	53
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Impact strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C54	
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Impact strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 180°C 55	
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Impact strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนอุณหภูมิ 160°C และ 180°C.....	57
4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Impact strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C ขั้นตอนทดสอบแห้งและขั้นตอนทดสอบดูดซึมน้ำ59	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C.....	61
4.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C.....	62
4.18	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 180°C.....	63
4.19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C และ 180°C.....	64
4.20	แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	66



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

P_w	=	น้ำหนักขึ้นทดสอบหลังการทดลองดูดซึมน้ำ
P_D	=	น้ำหนักขึ้นทดสอบก่อนการทดลองดูดซึมน้ำ
F	=	น้ำหนักที่ทำให้เกิดการแตกของพอลิเมอร์ (สำหรับการทดสอบแรงดัด)
L	=	ระยะห่างระหว่างตำแหน่งของวัสดุที่รองรับตัวอย่าง
W	=	ความกว้างของตัวอย่าง
t	=	ความสูงของตัวอย่าง
h	=	ความสูงของตัวอย่าง
δ	=	ระยะที่ตัวอย่างเกิดการโค้งงอเมื่อถูกกดด้วยแรง F
F_0	=	น้ำหนักกดย่อยเบื้องต้น (Minor Load) หน่วย kgf
F_1	=	น้ำหนักกดหลัก (Major Load) หน่วย kgf
F	=	น้ำหนักรวม (Total Load) หน่วย kgf (สำหรับการทดสอบความแข็ง)
e	=	ความลึกถาวรจากการกด
E	=	ค่าคงที่ขึ้นกับรูปแบบของหัว
HR	=	ค่าความแข็งในหน่วย Rockwell (Rockwell hardness number)
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลเหล็ก (diameter of steel ball)
WA	=	Water absorption (การดูดซึมน้ำ)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงพลาสติกที่เมื่อผ่านการขึ้นรูปด้วยความร้อนแล้วไม่สามารถหลอมเหลวได้อีก นิยมนำมาทำผลิตภัณฑ์สำหรับโต๊ะอาหาร เช่น จาน ชาม ช้อน เป็นต้น ในกระบวนการผลิตนั้นทำโดยให้ความร้อนและแรงอัดแก่เมลามีนด้วยอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม ซึ่งผลิตภัณฑ์เมลามีนแต่ละชนิดจะใช้อุณหภูมิ ความดัน และเวลาในการขึ้นรูปต่างกัน หลังกระบวนการอัดจะได้ผลิตภัณฑ์เมลามีนและเศษครีบอกออกมาด้วย ซึ่งเศษครีบนี้นี้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากไม่สามารถหลอมละลายได้อีก ทำให้เศษครีบเป็นของเสียที่ต้องกำจัดด้วยการฝังกลบ หรือการเผา ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสิ้นเปลืองในการกำจัดอีกด้วย หากเศษครีบเมลามีนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิลได้จะทำให้สามารถช่วยลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และไม่ต้องเสียต้นทุนในการกำจัดงานวิจัยนี้จึงสนใจการรีไซเคิลเศษเมลามีน เพื่อเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์ต่อไป โดยนำเศษเมลามีนมาบดให้ละเอียด แล้วกรองให้ได้ขนาดอนุภาคที่กำหนด จากนั้นนำมาผสมกับเมลามีนใหม่ที่ยังไม่ผ่านการขึ้นรูปเพื่อช่วยประสานระหว่างอนุภาคของเศษเมลามีนเข้าด้วยกัน แล้วนำไปขึ้นรูปใหม่อีกครั้ง

เศษเมลามีนที่นำกลับมาขึ้นรูปใหม่นั้นจำเป็นต้องทดสอบสมบัติต่าง ๆ เพื่อทดสอบว่าวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนที่ได้นั้นมีคุณสมบัติอย่างไร และสามารถนำมาใช้ในงานประเภทใดได้บ้าง เนื่องจากวัสดุหรือผลิตภัณฑ์นั้นมีลักษณะการใช้งานที่หลากหลาย และใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน วัสดุบางประเภทอาจต้องใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง หรือต้องสัมผัสน้ำเป็นประจำ จึงต้องมีสมบัติการดูดซึมน้ำต่ำ และต้องมีการประเมินสมบัติของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ด้วยว่าเมื่อมีการดูดซึมน้ำแล้วสมบัติทางกลเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่ อย่างไร หรือวัสดุบางประเภทอาจต้องใช้งานที่ต้องรับแรงกดเป็นประจำ เช่น กระเบื้องปูพื้น วัสดุที่นำมาทำจึงต้องสามารถรับแรงกดอัดได้เป็นอย่างดี เป็นต้น เพราะฉะนั้นในการนำวัสดุมาใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ต้องเลือกวัสดุให้ตรงตามลักษณะการใช้งาน อีกทั้งในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนนั้นต้องใช้อุณหภูมิ และความดันที่เหมาะสม หากอุณหภูมิและความดันที่ใช้ไม่เหมาะสมอาจส่งผลต่อสมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์ได้

ดังนั้นจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาอิทธิพลของการดูดซึมน้ำและอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนที่ส่วนผสมต่าง ๆ ด้วยการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อน

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของการดูดซึมน้ำต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนที่ส่วนผสมต่าง ๆ

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูปต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนที่ส่วนผสมต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 วัตถุดิบเมลามีน จากบริษัทศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด มหาชน

1.3.2 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบใช้วิธีการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อน (Hot molding) ด้วยอุณหภูมิ 160 180 และ 200°C

1.3.3 อัตราส่วนผสมระหว่างเศษเมลามีนและเมลามีนใหม่เท่ากับ 0:100 10:90 20:80 30:70 40:60 และ 50:50

1.3.4 ทดสอบสมบัติทางกลซึ่งประกอบด้วย

- 1) ทดสอบแรงคัต
- 2) ทดสอบแรงอัด
- 3) ทดสอบแรงกระแทก
- 4) ความแข็ง

1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 เตรียมวัตถุดิบสำหรับขึ้นรูปขึ้นทดสอบ ได้แก่

- 1) บดเศษเมลามีน (ที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว)
- 2) กรองเศษเมลามีน (ร่อนด้วยตะแกรงกรองขนาด 100 mesh หรือ 150µm)
- 3) ผสมวัตถุดิบเข้าด้วยกันด้วยเครื่องผสมด้วยอัตราส่วนต่างกัน

เศษเมลามีน: เมลามีนใหม่ 0: 100 10: 90 20: 80 30: 70 40: 60 และ 50: 50

1.4.3 พงเมลามีนที่ผสมแล้วนำมาขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อนที่อุณหภูมิการขึ้นรูปต่างกัน

1.4.4 ทดสอบคุณสมบัติการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

1.4.5 ทดสอบคุณสมบัติทางกล

1) ทดสอบแรงดัด

2) ทดสอบแรงอัด

3) ทดสอบแรงกระแทก

4) ความแข็ง

1.4.4 รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์และสรุปผล

1.4.5 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

1.5.1 อาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 1 4 5 และ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5.2 บริษัทศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน)

1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1.6.1 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อน (Hot compression molding)

1.6.2 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine: UTM) ใช้สำหรับทดสอบ 3 - Point Bending และทดสอบแรงกดอัด

1.6.3 เครื่องทดสอบแรงกระแทก

1.6.4 เครื่องวัดความแข็ง Hardness Test (HRM)

1.6.5 เครื่องเย็บสายพาน (Vertical band sew machine)

1.6.6 เครื่องขยายภาพชิ้นงานความเที่ยงตรงสูง Profile Projector Mitutoyo รุ่น PH-3500

1.6.7 เครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง Analytical balance ใช้ในการชั่งน้ำหนักขึ้นทดสอบก่อนและหลังการดูดซึมน้ำ

1.6.8 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) ใช้ในการศึกษาสัณฐานวิทยา

1.6.8 เตาอบความร้อน (Hot air oven)

1.6.9 เครื่องกัด (Milling) ยี่ห้อ Bridgeport สำหรับใช้ในการทำรอยบากของขึ้นทดสอบแรงกระแทก

1.6.9 โถดูดความชื้น (Desiccator)

1.6.10 ตะแกรงกรอง (Sieve) เบอร์ 100 mesh ใช้สำหรับกรองเศษเมลามีนที่ผ่านการบดละเอียด

1.6.11 กระดาษทราย เบอร์ 600 1000 และ 1500 ใช้สำหรับขัดผิวชิ้นทดสอบที่ผ่านการตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 เข้าใจถึงผลกระทบของอุณหภูมิการขึ้นรูปต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนที่ส่วนผสมต่างกัน

1.7.2 เข้าใจถึงผลกระทบจากการดูดซึมน้ำต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนที่ส่วนผสมต่างกัน

1.7.3 ทราบแนวทางการใช้ประโยชน์วัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนได้



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน (Melamine formaldehyde resin)

เมลามีน มีสูตรทางเคมีคือ $C_3H_6N_6$ ถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกโดยนักเคมีชาวเยอรมันชื่อ Justus Von Liebig ในปี 1835 (พ.ศ. 2378) แต่เป็นการเตรียมในห้องทดลอง ซึ่งได้ผลิตเมลามีนอย่างง่าย ๆ โดยการเปลี่ยนแคลเซียมไซยานาไมด์ ($CaCN_2$) ให้เป็นเมลามีน ด้วยวิธีการให้ความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (จุดหลอมเหลว) ของ $CaCN_2$ จนกระทั่งปี 1935 เฮนเกล (Henkel) จึงได้นำไปผลิตเรซินกับฟอร์มาลดีไฮด์ (Melamine Formaldehyde Resins) ซึ่งเป็นอะมิโนเรซิน และเป็นพลาสติกชนิดหุ้มด้วยความร้อน หรือพลาสติกเทอร์โมเซต (Thermosetting plastic) โดยในการเตรียมเรซินจะเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างเมลามีนกับฟอร์มาลดีไฮด์ ที่อุณหภูมิ 80 - 100°C จะได้ของผสมของเมธิลอลเมลามีนที่ละลายน้ำได้ เมื่อให้ความร้อนต่อไป เมธิลอลเมลามีนจะเกิดปฏิกิริยาควบแน่นให้เรซิน ซึ่งเรซินที่ได้นี้ยังไม่เกิดการเชื่อมโยง การทำให้เกิดการเชื่อมโยงทำได้โดยเพิ่มความร้อน เมื่อเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์เรซินที่เกิดการเชื่อมโยงแล้วจะมีลักษณะแข็งมาก ไม่หลอมเหลว ไม่ละลาย มีผิวหน้าแข็งแรงมาก ทนต่อการขีดข่วนได้ดี ความต้านทานสารอินทรีย์ดีมาก ทนกรดแก่ ด่างแก่ได้ไม่ค่อยดีนัก ทนต่อการเกาะของคราบน้ำชา กาแฟ ด้วยเหตุดังกล่าวนี้จึงนิยมใช้เป็นภาชนะจำพวก ถ้วย ชาม จาน ฯลฯ เป็นต้น ในการใช้งานมักมีฟิลเลอร์ เช่น เซลลูโลส แอสเบสตอส แก้ว และซิลิกา เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในด้านทนความร้อนและสมบัติเกี่ยวกับการไหล เพื่อสะดวกในการฉีด หรือหล่อเพื่อขึ้นรูปในลักษณะต่าง ๆ

ปัจจุบันเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์เรซินมีปริมาณการใช้งานสูง อุตสาหกรรมเมลามีนพัฒนาขึ้นครั้งแรกในประเทศสวีเดนแลนด์ ในปี 1938 และเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในหลายประเทศทั่วโลก ในทวีปเอเชีย ผลิตภัณฑ์เมลามีนเริ่มมีขึ้นครั้งแรกในประเทศญี่ปุ่นในปี 1951 สำหรับในประเทศไทยเริ่มมีขึ้นตั้งแต่ปี 1973 โดยเมลามีนใช้ทำเป็นภาชนะเคลือบผิว และภาชนะบรรจุอาหารเช่น จาน ชาม ช้อน ถ้วยกาแฟ เป็นต้น และนิยมใช้กันมาก มีทั้งที่เป็นสีเรียบและลวดลายสวยงาม วัตถุดิบเมลามีนประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด คือ ผลึกเมลามีน (Melamine crystal) เซลลูโลส (Cellulose) และฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) แต่เมลามีนเมื่อผ่านการขึ้นรูปทางความร้อนแล้วไม่สามารถหลอมละลายได้ ซึ่งสมบัติทางกลและทางกายภาพของเมลามีนดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของเมลามีน

ลักษณะทางกายภาพ ของ Melamine formaldehyde	
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
ความแข็ง (Hardness)	M115-M125
ทนแรงกระแทก (Impact Energy)	13.3 J/m
เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (24 ชั่วโมง ชั่งงานหนา 1/6 นิ้ว)	0.1 - 0.8%

2.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ Water absorption (ASTM D570)

ความสามารถในการดูดซึมน้ำของพลาสติกส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับชนิดและคอมโพสิตของวัสดุ ตัวอย่างเช่น วัสดุที่ประกอบด้วยธาตุไฮโดรเจนและคาร์บอน อันได้แก่ โพลีโพรพิลีน โพลีสไตรีน เป็นวัสดุที่ทนน้ำมาก ในขณะที่วัสดุที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนหรือกลุ่มออกซิไฮโดรเจนจะไวต่อการดูดซึมน้ำมาก วัสดุที่ประกอบด้วยคลอรีน โบรมีน หรือฟลูออรีน จะเป็นวัสดุที่ทนน้ำ ลักษณะการดูดซึมน้ำของพลาสติกอาจเปลี่ยนแปลงโดยการเติมสารเติมแต่ง ตัวอย่างเช่น เส้นใย เส้นใยแก้ว เป็นต้น พลาสติกบางประเภทดูดซึมน้ำได้น้อยมากที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่อุณหภูมิสูง ๆ ความสามารถในการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น วัสดุหรืออุปกรณ์ที่ต้องการให้มีการดูดซึมน้ำต่ำได้แก่ ใบกวนในเครื่องซักผ้า ผลิตภัณฑ์สำหรับใส่อาหาร สปริงเกลอร์ เป็นต้น

การทดสอบการดูดซึมน้ำของพลาสติกสามารถทำได้ง่ายโดยอุปกรณ์ที่ใช้ได้แก่ เครื่องชั่งวิเคราะห์ (Analytical balance) ที่มีความละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง, ตู้อบ (Oven) ที่สามารถให้อุณหภูมิในการอบอย่างสม่ำเสมอ และโถดูดความชื้น (Desiccators) ชั่งทดสอบอาจเป็นลักษณะแผ่นดิสก์, แท่ง หรือท่อ ขนาดเปลี่ยนแปลงตามชนิดของชิ้นทดสอบ

2.2.1 วิธีการทดสอบการดูดซึมน้ำ

- 1) อบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 24 ชั่วโมง
- 2) ทิ้งให้ชิ้นทดสอบเย็นลงในโถดูดความชื้น
- 3) ชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบ (น้ำหนักก่อนการดูดซึมน้ำ)
- 4) แช่ชิ้นทดสอบลงในน้ำกลั่น

- 5) เมื่อครบตามกำหนดเวลานำขึ้นทดสอบขึ้นจากน้ำ เช็ดให้แห้งด้วยผ้าสะอาดหรือกระดาษทิชชู
- 6) ชั่งน้ำหนักขึ้นทดสอบทันที (น้ำหนักหลังการดูดซึมน้ำ)
- 7) คำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำตามสมการที่ (1)

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ} = \frac{P_W - P_D}{P_D} \quad (2.1)$$

เมื่อ P_W = น้ำหนักขึ้นทดสอบหลังการทดลองดูดซึมน้ำ
 P_D = น้ำหนักขึ้นทดสอบก่อนการทดสอบดูดซึมน้ำ

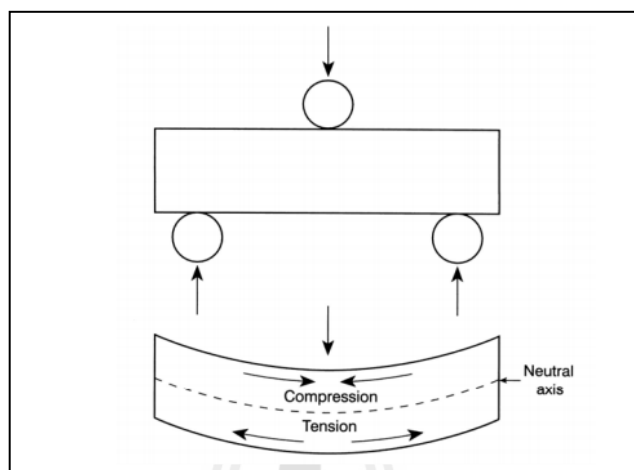
2.3 การทดสอบแรงดัด (Flexural test)

ความทนแรงดัด (Flexural strength) เป็นค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบให้เกิดการงอตัวโดยใช้หัวกด (Indentor) ซึ่งกดลงตั้งฉากกับขึ้นทดสอบที่อยู่ในลักษณะแนวนอน โดยมีตัวรองรับ (Supporting jig) เป็นตัวกำหนดช่วงห่าง (Span) การทดสอบแบบนี้ขึ้นทดสอบจะได้รับทั้งแรงเค้นดึง (Tensile stress) และแรงเค้นกด (Compressive stress) ซึ่งแรงเค้นกดจะเกิดขึ้นบนขึ้นทดสอบ ส่วนแรงเค้นดึงจะเกิดใต้ขึ้นทดสอบ ดังรูปที่ 2.1 การทดสอบแรงดัดแบ่งเป็น 2 วิธี คือ 3 – Point Bending เป็นการให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบและจุดรองรับในทิศทางตรงกันข้ามบริเวณปลายทั้งสองด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากัน และวิธี 4 – Point Bending เป็นการให้แรงกระทำที่ 2 จุดในบริเวณกึ่งกลางของขึ้นทดสอบและ จุดรองรับในทิศทางตรงกันข้ามบริเวณปลายทั้งสองด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากัน ซึ่งคุณสมบัติจากการทดสอบแรงดัดประกอบด้วย ความเค้น – ความเครียดสูงสุด ความแข็งแรงดัดสูงสุด ความยืดหยุ่น เป็นต้น

2.3.1 การทดสอบการดัดอแบบ 3 จุด

การทดสอบแบบนี้เป็นการให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบและจุดรองรับในทิศทางตรงกันข้ามบริเวณปลายทั้งสองด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากัน เหมาะสำหรับการทดสอบพลาสติกที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ต่ำ หัวกดที่ใช้ให้แรงกระทำและชุดรองรับมีลักษณะเป็นใบมีดมน (Round knife edges) หรือเพลลาโลหะแข็งก็ได้ รัศมีของหัวกด และชุดให้แรงกระทำต้องมีรัศมีอย่างต่ำ 3.2 มิลลิเมตร และ มีรัศมีสูงสุดไม่เกิน 4 เท่าของความหนาชิ้นงานทดสอบสำหรับหัวกด และ 1.5 เท่าของความหนาขึ้นทดสอบสำหรับชุดรองรับ การที่ชุดกดและชุดรองรับต้องมีลักษณะเป็นผิวโค้งที่จุดสัมผัสดังกล่าวเพื่อ เป็นการลดความเข้มข้นของความเค้น

(Stress concentration) ที่อาจเกิดขึ้นบริเวณจุดสัมผัสดังกล่าว และอาจทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักบริเวณจุดสัมผัสนั้น นอกจากนี้ระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองสามารถกำหนดได้จากอัตราส่วนของ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองกับความหนาของชิ้นทดสอบโดยมีค่าได้ระหว่าง 16:1 ถึง 60:1



รูปที่ 2.1 ลักษณะการทดสอบแรงดัด

การคำนวณหาความทนแรงดัด (Flexural strength) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2)

$$\text{Flexural strength} = \frac{3FL}{2Wt^2} \quad (2.2)$$

โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ในการทำให้ตัวอย่างโค้งงอสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

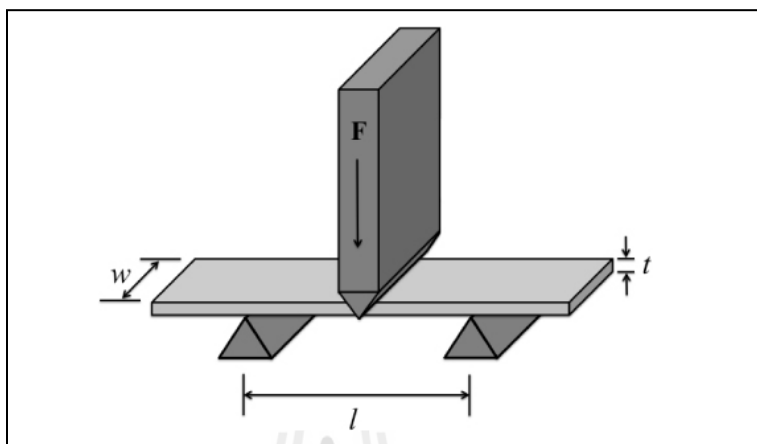
$$\text{Flexural modulus} = \frac{L^3 F}{4Wt^3 \delta} \quad (2.3)$$

เมื่อ F = น้ำหนักที่ทำให้เกิดการแตกของพอลิเมอร์
 L = ระยะห่างระหว่างตำแหน่งของวัสดุที่รองรับตัวอย่าง

W = ความกว้างของตัวอย่าง

t = ความสูงของตัวอย่าง

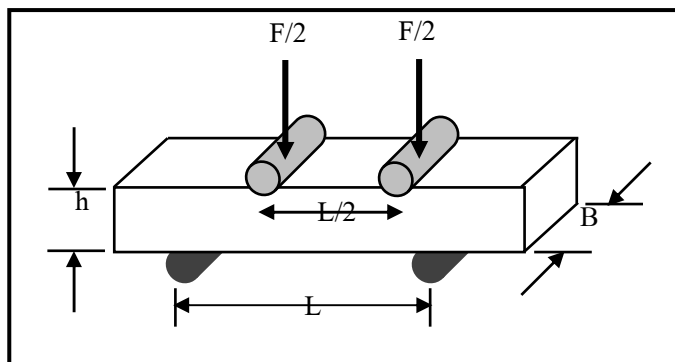
δ = ระยะที่ตัวอย่างเกิดการโค้งงอเมื่อถูกกดด้วยแรง F



รูปที่ 2.2 การทดสอบแรงดัดแบบสามจุด

2.3.2 การทดสอบการดัดงอแบบ 4 จุด

การทดสอบแบบนี้เป็นการให้แรงกระทำที่ 2 จุดในบริเวณกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ และจุดรองรับในทิศทางตรงกันข้ามบริเวณปลายทั้งสองด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากัน เหมาะสำหรับการทดสอบวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงกว่าในกรณีของการทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด หัวกดที่ให้ภาระและชุดรองรับมีลักษณะเป็นใบมีดมนหรือเพลาลอยแข็งเช่นเดียวกับการทดสอบแบบ 3 จุด แต่รัศมีของหัวกดและชุดให้ภาระจะมีค่าเท่ากัน โดยจะต้องมีรัศมีอย่างน้อย 3.2 มิลลิเมตร และมีรัศมีสูงสุดไม่เกิน 1.5 เท่าของความหนาของชิ้นงานทดสอบ ระยะห่างระหว่างชุดกดและชุดรองรับในการทดสอบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบ 1/3 และแบบ 1/4 การจัดระยะ 1/3 หมายถึง ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ – จุดกด และระหว่างจุดกดทั้งสองมีค่าเท่ากัน คือ 1/3 ของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสอง ในขณะที่การจัดระยะแบบ 1/4 หมายถึง ระยะห่างระหว่างจุดรองรับและจุดกดมีค่าเท่ากับ 1/4 ของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสอง ในขณะที่ระยะห่างระหว่างจุดกดทั้งสองเท่ากับ 2/4 เท่าของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสอง ทั้งนี้ระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสอง หรือระยะสเป้นสามารถกำหนดได้โดยจาก อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองกับความหนาของชิ้นงานทดสอบโดย มีค่าได้ระหว่าง 16 : 1 ถึง 60 : 1



รูปที่ 2.3 การทดสอบแรงดัดแบบสี่จุด

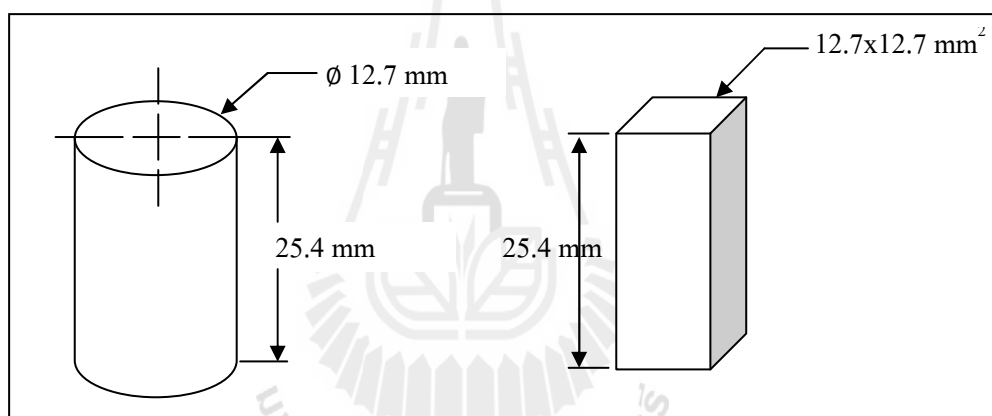
2.4 การทดสอบแรงอัด (Compression test) ASTM D695

การทดสอบแรงอัดเป็นการทดสอบที่มีลักษณะการใส่แรงกระทำในแบบตรงข้ามกับการทดสอบแรงดึง คือการทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบในลักษณะการดึงยืดขึ้นทดสอบส่วนการทดสอบแรงอัดเป็นการทดสอบในลักษณะการกดอัดขึ้นทดสอบ โดยการพิจารณาเลือกการทดสอบแรงอัดแทนกระบวนการทดสอบอื่นจะขึ้นอยู่กับประเภทของการนำไปใช้งานของวัสดุเช่น โลหะซึ่งมีความต้านทานแรงดึงค่อนข้างสูงรวมทั้งวัสดุกลุ่มพลาสติก ส่วนใหญ่จะทำการทดสอบแรงดึง ส่วนวัสดุเปราะเช่น คอนกรีต อิฐ และผลิตภัณฑ์เซรามิก พอลิเมอร์บางชนิดซึ่งมีความแข็งแรงดึงค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับความแข็งแรงอัด ประกอบกับวัสดุประเภทนี้จะใช้งานในรูปของการรับแรงอัดมากกว่า ดังนั้นการทดสอบแรงอัดกับวัสดุประเภทนี้จึงให้นัยสำคัญมากกว่าการทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงอัดเป็นการทดสอบสมบัติเชิงกล ซึ่งสมบัติการรับแรงกดอธิบายพฤติกรรมของวัสดุเมื่อได้รับแรงกดในทิศทางตรงกันข้ามกับการทดสอบแรงดึง ความเร็วในการกดต่ำ และคงที่ตลอดการทดสอบ โดยความยาวของชิ้นทดสอบไม่ควรมากเกินไปเนื่องจากจะทำให้เกิดการแตกหักแบบโก่งเดาะ (Buckling) ในทางกลับกันถ้าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างน้อยจะทำให้ความแข็งแรงปรากฏของชิ้นทดสอบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างหน้าสัมผัสของชิ้นทดสอบกับแท่นทดสอบ ซึ่งหน้าสัมผัสนี้จะทำให้ชิ้นทดสอบไม่สามารถเลื่อนได้ตลอดหน้าสัมผัส ทำให้เหมือนว่าวัสดุมีความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้น ส่วนตัวจับยึดชิ้นทดสอบจะปรับเปลี่ยนไปตามชนิดของวัสดุ บางครั้งเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบอาจต้องเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังของเครื่องทดสอบ แต่อย่างไรก็ตามความยาวไม่ควรเกินสองเท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ และส่วนปลายของชิ้นทดสอบควรเรียบขนานและตั้งฉากกัน

คุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบแรงกดประกอบด้วย ความเค้นอัด โมดูลัสความยืดหยุ่น ความเค้นคราก การเปลี่ยนรูปของวัสดุ เป็นต้น

ความเค้นอัดเกิดจากแรงอัดที่ให้กับชิ้นทดสอบ ซึ่งทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการหดตัวหรืออัดตัวภายใต้แรงอัดนั้น ชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงอัดนี้ต้องมีลักษณะสั้น เนื่องจากการทดสอบแรงอัดกับชิ้นทดสอบที่มีขนาดยาวจะเกิดการโค้งงอด้านข้าง ซึ่งมีรูปแบบการเกิดที่ไม่แน่นอนจากการเสียรูปแบบยืดหยุ่น ดังนั้นโดยปกติชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงอัดมักเตรียมเป็นทรงกระบอก สำหรับชิ้นทดสอบ ได้กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM D695 ดังรูปที่ 2.4 ชิ้นทดสอบมาตรฐานจะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร และสูง 25.4 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 : 1 สำหรับชิ้นทดสอบที่เป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะมีขนาด 12.7 x 12.7 x 25.4 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.4 ชิ้นทดสอบ Compression test ASTM D695

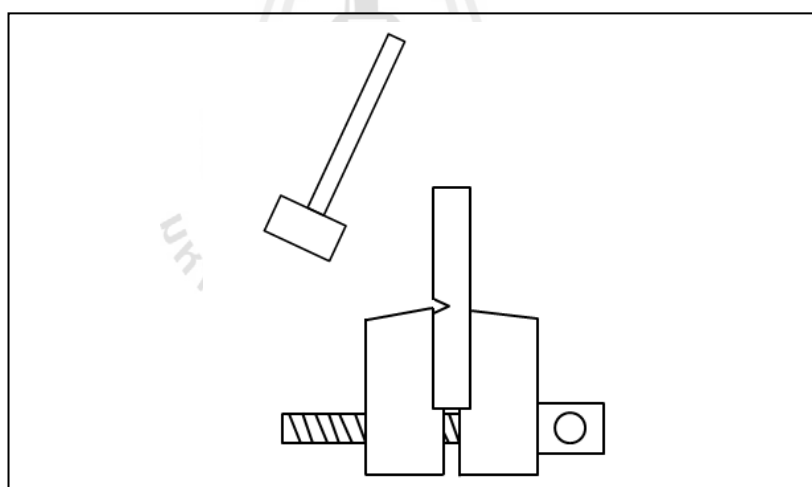
2.5 การทดสอบการทนแรงกระแทก (Impact testing)

ในการทดสอบการรับแรงกระแทกของวัสดุพอลิเมอร์เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรงเหนียว (Toughness) ของวัสดุ โดยการทดสอบสมบัติด้านการทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์จะมีจุดเด่นตรงที่เป็นการทดสอบด้วยอัตราการกระแทกด้วยความเร็วสูง เข้ากระแทกกับชิ้นทดสอบแล้วทำให้ชิ้นทดสอบนั้นเกิดการเสียรูปทรง (Failure) โดยที่ความแข็งแรงเหนียวของชิ้นทดสอบจะสัมพันธ์กับพลังงานที่ถูกดูดซับ วิธีการทดสอบความสามารถรับแรงกระแทกอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะของวัตถุที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานตกกระแทก คือ (1) ใช้ Pendulum ที่ทราบค่าพลังงานที่แน่นอน และ (2) ใช้ตุ้มน้ำหนักซึ่งอาจจะเป็นลักษณะเป็นลูกบอลหรือหัวลูกศร หรือตัวตกกระแทกอื่น โดยที่พลังงานที่ใช้ในการทดสอบจะควบคุมโดยกำหนดระยะ

ความสูงจากตุ้มน้ำหนักถึงจุดทดสอบ ในส่วนของการทดสอบโดยใช้ Pendulum ยังแบ่งย่อยออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะของตำแหน่งการวางชิ้นทดสอบ คือ Izod และ Charpy

ลักษณะการทดสอบแบบ Izod คือการที่ Pendulum ที่ทราบน้ำหนักและความสูง หมุนตก กระแทกกับชิ้นทดสอบ ณ จุดต่ำสุดของวงสวิง พลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไปในการทำให้ชิ้นงาน แตกหัก ซึ่งสามารถอ่านค่าพลังงานที่ใช้ไปได้จากเข็มหน้าปัด (หน่วยเป็น ft-lbs) ดังแสดงใน รูปที่ 2.3 ซึ่งในกรณีที่ทดสอบแล้วชิ้นงานไม่หักแสดงว่าพลังงานไม่พอ ซึ่งจะต้องเพิ่มน้ำหนักขึ้นไปอีก (หรือใช้เครื่องที่มีขนาดใหญ่กว่า) ชิ้นงานทดสอบจะต้องมีการทำรอยบาก (Notch) เพื่อให้เกิดจุดรวมแรง (Stress concentration point) ขนาดชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 – 10 ดังแสดงในรูปที่ 2.5

ส่วนการทดสอบแบบ Charpy จะคล้ายกับการทดสอบแบบ Izod แต่มีข้อแตกต่างกัน คือ การทดสอบแบบ Charpy นั้นชิ้นทดสอบจะถูกยึดอยู่ในลักษณะที่เป็นแท่งขวางกับ Pendulum โดยที่ตัว Pendulum จะตกกระแทก ณ จุดกึ่งกลางระหว่างแท่งยึดชิ้นทดสอบ สำหรับชิ้นทดสอบที่มีรอยบาก Pendulum จะกระแทก ณ จุดตรงกันข้ามกับรอยบาก

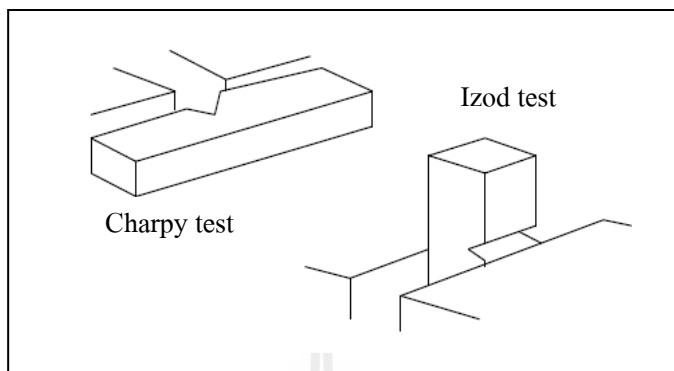


รูปที่ 2.5 การทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod

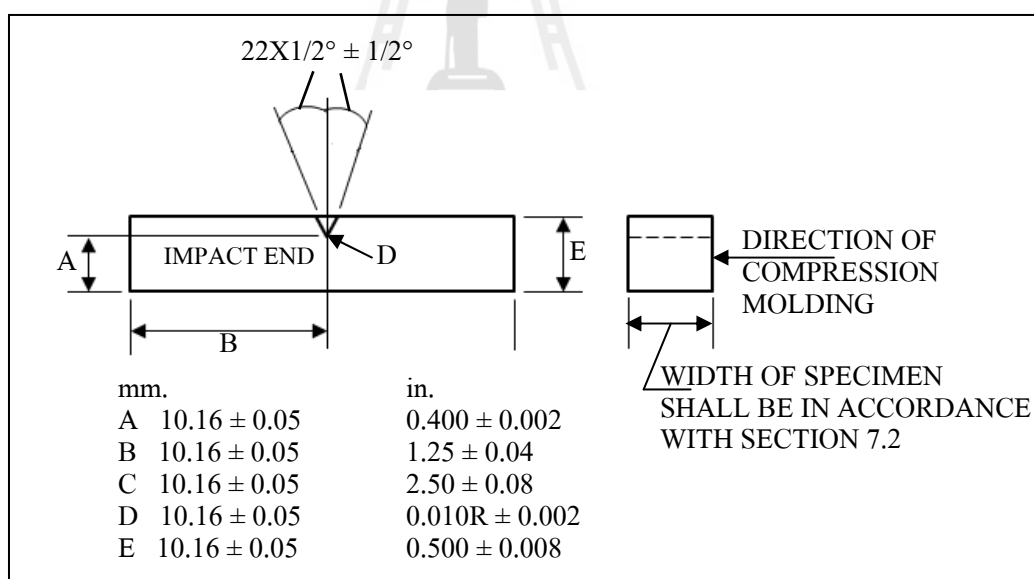
โดยจากพลังงานที่อ่านได้สามารถนำมาคำนวณเป็น Impact strength ได้จากสมการที่ (4)

$$\text{Impact strength} = \frac{\text{Energy(J)}}{\text{Thickness(m)}} \quad (2.4)$$

$$\text{หรือบางกรณีจะใช้} = \frac{\text{Energy(J)}}{\text{Area(notch)(m}^2\text{)}} \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.6 รูปแบบการวางชิ้นงาน สำหรับการทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod และ Charpy



รูปที่ 2.7 ขนาดชิ้นทดสอบ Izod Impact ตามมาตรฐาน ASTM D256-10

2.6 การทดสอบความแข็ง

ความแข็งเป็นการแสดงสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความต้านทานในการเกิดรอยกดที่พื้นผิวในการทดสอบความแข็งไม่มีวิธีใดวิธีหนึ่งที่จะสามารถทำการทดสอบได้กับทุกวัสดุ หลักการเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งจะเกี่ยวข้องกับการวัดความต้านทานต่อการเกิดเป็นรอยกด ซึ่งใช้เป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดความแข็งแบบต่าง ๆ หัวกดมีทั้งที่เป็นแบบหัวบอลแบบ ระบาย หรือแบบกรวยปลายมน หรือปิรามิด ซึ่งปกติทำจากเหล็กกล้าแข็งหรือเพชรและใช้ทดสอบภายใต้สภาวะน้ำหนักคงที่โดยการวัดน้ำหนักที่จะทำให้เกิดรอยกดตามที่กำหนดหรือวัดรอยกดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำนั้น

ความแข็งที่กล่าวถึงนี้จะแตกต่างไปจากค่าความต้านทานการขัดสี (Abrasion resistance) หรือค่าความต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance) ของวัสดุ ยกตัวอย่างเช่น พอลิไธรีน จัดเป็นวัสดุที่มีความแข็ง (Hardness) สูง แต่ขณะเดียวกันก็มีความต้านทานการขัดสีต่ำ

การทดสอบความแข็งของพอลิเมอร์สามารถกระทำได้ 2 วิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ดังตารางที่ 2.2 กล่าวคือการทดสอบแบบ Rockwell จะใช้กับพลาสติกที่มีลักษณะแข็ง เช่น พอลิไธรีน พอลิเมธิลเมทาคริเลต และไนลอน เป็นต้น ในขณะที่การทดสอบแบบ Durometer จะใช้กับพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวมากกว่า ตัวอย่างเช่น ยางชนิดต่าง ๆ รวมทั้งพอลิไวนิลคลอไรด์ ชนิดที่เติมสารเพิ่มสภาพพลาสติก (Plasticized PVC) และพอลิเอธิลีน

ตารางที่ 2.2 แสดงวิธีทดสอบความแข็ง (Hardness) ที่ควรเลือกสำหรับพลาสติกต่าง ๆ

วัสดุ	วิธีการทดสอบ
ยาง	Shore A
PVC	Shore A
LDPE	Shore D
HDPE	Shore D
PP	Rockwell R
Toughened PS	Rockwell R
ABS	Rockwell R
PS	Rockwell M
PMMA	Rockwell M
Melamine	Rockwell M

2.6.1 การทดสอบแบบ Rockwell

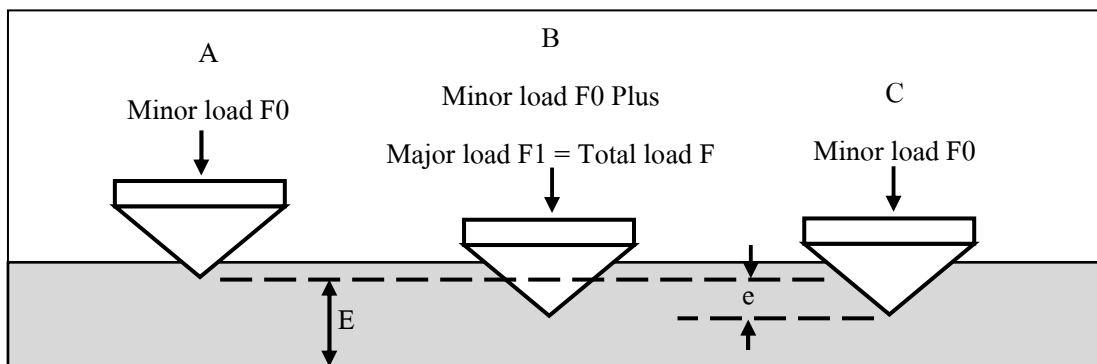
การทดสอบความแข็งแบบ Rockwell จะใช้การกดด้วยหัวกดเพชร (Diamond Cone Indenter) ที่มีรูปร่างเหมือนกรวย หรือหัวกดลูกบอลเหล็ก (Steel Ball Indenter) ลงบนชิ้นงาน หัวกดจะออกแรงกระทำต่อชิ้นงานภายใต้ น้ำหนักกดย่อยเบื้องต้น (Preliminary Minor Load) F_0 ตามรูปที่ 2.8 A ซึ่งปกติจะมีค่าอยู่ที่ 10kgf เมื่อหัวกดอยู่ในสภาวะสมดุลแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือการกดด้วยน้ำหนักกดหลัก (Major Load) เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงด้านความลึก ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนรูปที่ 2.8 B

เมื่อได้สมดุลอีกครั้ง จะเอาน้ำหนักกดหลักออกปล่อยให้ชิ้นงานเกิดการคืนตัว (Recover) แต่ยังคงรักษาน้ำหนักกดย่อยเบื้องต้นไว้ การเอาน้ำหนักกดหลักออกทำให้ความลึกในการกดลดลงบ้าง ตามรูปที่ 2.8 C

ในการคำนวณค่าความแข็งจะใช้ผลความลึกถาวรจากการกด ก็คือความลึกของการได้รับน้ำหนักหลักและเอาน้ำหนักกดหลักออกเรียบร้อยแล้วในการคำนวณหาค่าความแข็ง คำนวณออกมาเป็นหน่วยของความแข็งแบบ Rockwell (HR) โดยมีสูตรการคำนวณดังสมการที่ (6)

$$HR = E - e \quad (2.6)$$

เมื่อ	F_0	=	น้ำหนักกดย่อยเบื้องต้น (Minor Load) หน่วย kgf
	F_1	=	น้ำหนักกดหลัก (Major Load) หน่วย kgf
	F	=	น้ำหนักรวม (Total Load) หน่วย kgf
	e	=	ความลึกถาวรจากการกด
	E	=	ค่าคงที่ขึ้นกับรูปแบบของหัว
	HR	=	ค่าความแข็งในหน่วย Rockwell (Rockwell hardness number)
	D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลเหล็ก (diameter of steel ball)



รูปที่ 2.8 แสดงขั้นตอนในการทดสอบความแข็ง Hardness แบบ Rockwell

ตารางที่ 2.3 ชนิดของลูกบอลเหล็กและแรงที่ใช้กดในการทดสอบค่าความแข็งแบบต่าง ๆ

Scale	Indenter	Minor Load F0 kgf	Major Load F1 kgf	Total Load F kgf	Value of E
A	Diamond Cone	10	50	60	100
B	1/16" Steel Ball	10	90	100	130
C	Diamond Cone	10	140	150	100
E	1/8" Steel Ball	10	90	100	130
L	1/4" Steel Ball	10	50	60	130
M	1/4" Steel Ball	10	90	100	130
R	1/2" Steel Ball	10	50	60	130

โดยสเกล R และ L จะใช้กับพลาสติกที่มีค่าความแข็งต่ำ ส่วนสเกล M และ E จะใช้กับพลาสติกที่มีความแข็งสูง โดยในแต่ละสเกลที่ใช้ทดสอบนั้น ถ้าหากตัวเลขที่อ่านได้จากหน้าปัดมีค่าเกิน 115 จะถือว่าความไวของการวัดนั้นสูญเสียไป และต้องเปลี่ยนไปใช้สเกลทดสอบถัดไป

2.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ

สถิติ หมายถึง วิธีการที่ว่าด้วยการเก็บรวบรวมข้อมูล การนำเสนอข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล และการตีความหมายข้อมูล ซึ่งสถิติแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.7.1 สถิติพรรณนา (Descriptive Statistics) เป็นสถิติที่ใช้อธิบายคุณลักษณะต่าง ๆ ของสิ่งที่ต้องการศึกษาในกลุ่มใดกลุ่มหนึ่ง วิธีการทางสถิติที่อยู่ในประเภทนี้ เช่น การจัด

กระทำกับข้อมูลโดยนำเสนอในรูปของตารางหรือรูปภาพ การแปลงคะแนนให้อยู่ในรูปแบบอื่น ๆ เช่นเปอร์เซ็นต์ไทล์ คะแนนมาตรฐาน ฯ การคำนวณค่าเฉลี่ยหรือการกระจายของข้อมูล เช่น มัชฐาน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน พิสัย ฯ เป็นต้น

2.7.2 สถิติอ้างอิง (Inferential Statistics) เป็นสถิติที่ใช้อธิบายคุณลักษณะของสิ่งที่ต้องการศึกษาในกลุ่มใดกลุ่มหนึ่ง แล้วสามารถอ้างอิงไปยังกลุ่มอื่น ๆ ได้ โดยกลุ่มที่นำมาศึกษาจะต้องเป็นตัวแทนที่ดีของประชากร ตัวแทนที่ดีของประชากรได้มาโดยวิธีการสุ่มตัวอย่าง และตัวแทนที่ดีของประชากรจะเรียกว่า "กลุ่มตัวอย่าง" สถิติอ้างอิงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทย่อย คือ สถิติพารามิเตอร์ และสถิติไร้พารามิเตอร์

- สถิติพารามิเตอร์ (Parametric Statistics) เป็นวิธีการทางสถิติที่จะต้องเป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้น 3 ประการ ดังนี้ ตัวแปรที่ต้องการวัดจะต้องอยู่ในมาตราการวัดระดับช่วงขึ้นไป (Interval Scale) ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จากกลุ่มตัวอย่างจะต้องมีการแจกแจงเป็นโค้งปกติ และกลุ่มประชากรแต่ละกลุ่มที่นำมาศึกษาจะต้องมีความแปรปรวนเท่ากัน สถิติพารามิเตอร์ เช่น t-test ANOVA Regression Analysis ฯ

- สถิติไร้พารามิเตอร์ (Nonparametric Statistics) เป็นวิธีการทางสถิติที่ไม่มีข้อจำกัดใด ๆ นั่นก็คือ ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จากกลุ่มตัวอย่างมีการแจกแจงแบบใดก็ได้ (Free Distribution) กลุ่มประชากรแต่ละกลุ่มที่นำมาศึกษาไม่จำเป็นต้องมีความแปรปรวนเท่ากัน สถิติไร้พารามิเตอร์เช่น ไคสแควร์ Median Test Sign test ฯ

2.7.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) ความแปรปรวน (Variance) เป็นมาตราการวัดการกระจายของข้อมูลซึ่งมีความสัมพันธ์กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เนื่องจากความแปรปรวนสามารถคำนวณได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานยกกำลังสอง ความแปรปรวนจึงเป็นการวัดการกระจายของข้อมูลในรูปของพื้นที่ สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) หรือเรียกอย่างย่อว่า ANOVA เป็นวิธีหนึ่งในการทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มขึ้นไปพร้อม ๆ กันซึ่งยังคงใช้หลักการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มประชากรกลุ่มเดียวหรือ 2 กลุ่มในการใช้ z หรือ t ทดสอบ กล่าวคือ ถ้าเป็นการเปรียบเทียบกับประชากรเพียงกลุ่มเดียว ส่วนใหญ่จะเป็นการเปรียบเทียบค่าระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่าที่ผู้วิจัยสนใจหรือค่าที่กำหนดขึ้น ส่วนการเปรียบเทียบระหว่างประชากร 2 กลุ่ม จะเป็นที่กำหนดไว้ในกรณีที่มีประชากรมากกว่า 2 กลุ่มหรือมีสิ่งที่ต้องการศึกษามากกว่า 2 สิ่ง ความแตกต่างระหว่างกลุ่มจะถูกวัดในรูปของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือความแปรปรวน ซึ่งในที่นี้ก็คือค่าเฉลี่ยของความแปรผัน (Mean Squares) โดยที่ความแปรผันเกิดจากผลรวมยกกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าแต่ละค่าของค่าเฉลี่ย การวิเคราะห์ความแปรปรวน จึงเป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มกับความแตกต่างภายในกลุ่มในกรณี

ประชากรมีมากกว่า 2 กลุ่มในลักษณะของความแปรผัน โดยมีเงื่อนไขว่าข้อมูลที่ได้จากกลุ่มประชากรที่นำมาทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยข้อมูลของแต่ละกลุ่ม จะต้องมีการแจกแจงแบบปกติเท่านั้น การวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

- การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One – way ANOVA) การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว หรือ One – way ANOVA เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวเดียวกับตัวแปรตามเพียงตัวเดียว โดยที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอาจมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ (Qualitative Variable) ที่จำแนกออกเป็นระดับหรือประเภทต่าง ๆ เช่น เก่ง ปานกลาง อ่อน ดี ดีมาก พอใช้ แย่ เป็นต้น ส่วนตัวแปรตามอาจมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ (Quantitative Variable) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นว่าจะส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตาม ตามสมมติฐานการวิจัยที่กำหนดไว้

- การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two – way ANOVA) การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง หรือ Two – way ANOVA เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นที่เป็นสิ่งทดลองจำนวน 2 ตัวกับตัวแปรตามเพียงตัวเดียว โดยที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอาจมีลักษณะเชิงคุณภาพที่จำแนกออกเป็นระดับหรือประเภทต่าง ๆ ส่วนตัวแปรตามมีลักษณะเชิงปริมาณ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นว่าจะส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตาม ตามสมมติฐานการวิจัยที่กำหนดไว้ โดยที่การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง นอกจากจะสามารถศึกษาผลของตัวแปรทั้งสองตัวไปพร้อม ๆ กันแล้วยังสามารถศึกษาผลร่วม (Interaction) ระหว่างตัวแปรทั้งสองตัวด้วยว่า ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวหนึ่ง นอกจากจะส่งผลต่อตัวแปรตามแล้วยังส่งผลใด ๆ ต่อตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอีกตัวหนึ่งหรือไม่

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Panyakapo, P., and Panyakapo, M. (2008) ได้ศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของเศษของเสียเมลามีนโดยนำมาบดและนำมาเป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตมวลเบา ด้วยอัตราส่วนการผสมต่างกันเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติการรับแรงกด (Compressive) และความหนาแน่น (Dry density) ซึ่งคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่ต้องการต้องมีความหนาแน่นต่ำและรับแรงอัดในค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งผลการวิจัยพบว่าเศษของเสียเมลามีนที่ผสมเข้าไปจะทำให้ชิ้นทดสอบมีความหนาแน่นลดลงแต่ในขณะที่รับแรงกดได้น้อยลงเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามคอนกรีตมวลเบาที่ได้ก็ยังคงตรงตามมาตรฐานของ ASTM C129-05 Type II

Akil, H.M., et al. (2009) ได้ศึกษาการดูดซึมน้ำของพอลิเอสเตอร์คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอกระเจา โดยได้แช่ชิ้นทดสอบในน้ำกลั่น, น้ำทะเล และสารละลายกรดอะซิติก เป็นเวลา 3 สัปดาห์ จากนั้นศึกษาผลกระทบจากการดูดซึมน้ำต่อคุณสมบัติทางกลซึ่งประกอบด้วยการรับแรงดัด (Flexural) และการรับแรงกดอัด (Compressive) ซึ่งผลการวิจัยพบว่าคุณสมบัติการรับแรงดัดและแรงกดอัดลดลงเมื่อการดูดซึมน้ำมากขึ้น และชิ้นทดสอบที่แช่ในน้ำกลั่นจะมีการดูดซึมน้ำได้มากที่สุดตามมาด้วยการแช่ในกรดและการแช่ในน้ำทะเลจะดูดซึมน้ำได้น้อยที่สุด

Dhakal, H.N. (2007) ได้นำ HFRUPE (Hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites) ที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยที่ต่างกันมาทดสอบการดูดซึมน้ำ จากนั้นนำชิ้นทดสอบที่แช่น้ำครบตามกำหนดเวลามาทดสอบคุณสมบัติการรับแรงดึงและการรับแรงดัดเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่แห้ง ผลการวิจัยพบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีเซลลูโลสสูง และคุณสมบัติการรับแรงดึงและแรงดัดลดลงเมื่อมีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น

Willis, M.R., and Masters, I. (2003) ได้ศึกษาพฤติกรรม 3-Point Bending ของคอมโพสิตพอลิเอสเตอร์เรซินด้วยการเติมวัสดุรีไซเคิล โดยใช้ flyash มาเป็น filler ด้วยอัตราส่วนตั้งแต่ 10-50 เปอร์เซ็นต์ โดยเพิ่มขึ้นทีละ 10 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองผลปรากฏว่าเมื่อการเติม flyash เข้าไปในคอมโพสิตทำให้คอมโพสิตมีค่า Flexural strength ลดลงและเมื่อเปอร์เซ็นต์ของ flyash เพิ่มขึ้นทำให้ค่า Flexural strength ลดลง อีกทั้งพบว่าขนาดของ flyash มีผลต่อค่า strength ด้วย โดยขนาดของ flyash ที่เพิ่มขึ้นทำให้ strength ลดลงเช่นเดียวกัน

Huang, G., and Sun, H.X. (2007) ได้ศึกษาการดูดซึมน้ำและคุณสมบัติทางกลของลามิเนตที่ปรับปรุงด้วยผ้าใยแก้วและพอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว หลังจากการแช่น้ำนำชิ้นทดสอบมาทดสอบการรับแรงดึงและแรงดัดภายใน 30 นาที พบว่าเมื่อเวลาในการแช่น้ำขึ้นวัสดุมีการดูดซึมน้ำมากขึ้นอาจมาจากโมเลกุลน้ำถูกดึงดูดโดยกลุ่มชอบน้ำในเส้นใยแก้วและพอลิเอสเตอร์ อีกนัยหนึ่งคือน้ำเข้าไปในช่องว่างและรอยแตก ผลการทดสอบแรงดึงพบว่าเมื่อเวลาการแช่น้ำมากขึ้นความแข็งแรงดิ่งมีค่าลดลงแต่ในทางกลับกันการรับแรงดัดกลับดีขึ้น

Chotirat, L. (2007) ได้ศึกษากลไกการยึดเกาะและ interfacial strength ของคอมโพสิต ABS/ซีลี้อยู่ที่มีสารคู่ควบต่างกัน 2 ชนิด อันได้แก่ KBM503 และ KBM603 โดยใช้เทคนิค FTIR และได้ศึกษาสมบัติทางกลด้วย ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณของซีลี้อยู่ส่งผลให้คอมโพสิตมีค่ามอดูลัสเพิ่มมากขึ้น แต่ในทางกลับกันความแข็งแรงของคอมโพสิตลดลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารคู่ควบทั้งสองชนิด พบว่า KBM603 มีประสิทธิภาพในการเพิ่ม interfacial strength ที่มากกว่า สำหรับการยึดเกาะของ KBM503 มีแรง dipole-dipole ที่อินเทอร์เฟซของ ABS/ซีลี้อยู่ ส่วน KBM603 มีการยึดเกาะแบบพันธะโควาเลนต์ที่อินเทอร์เฟซ



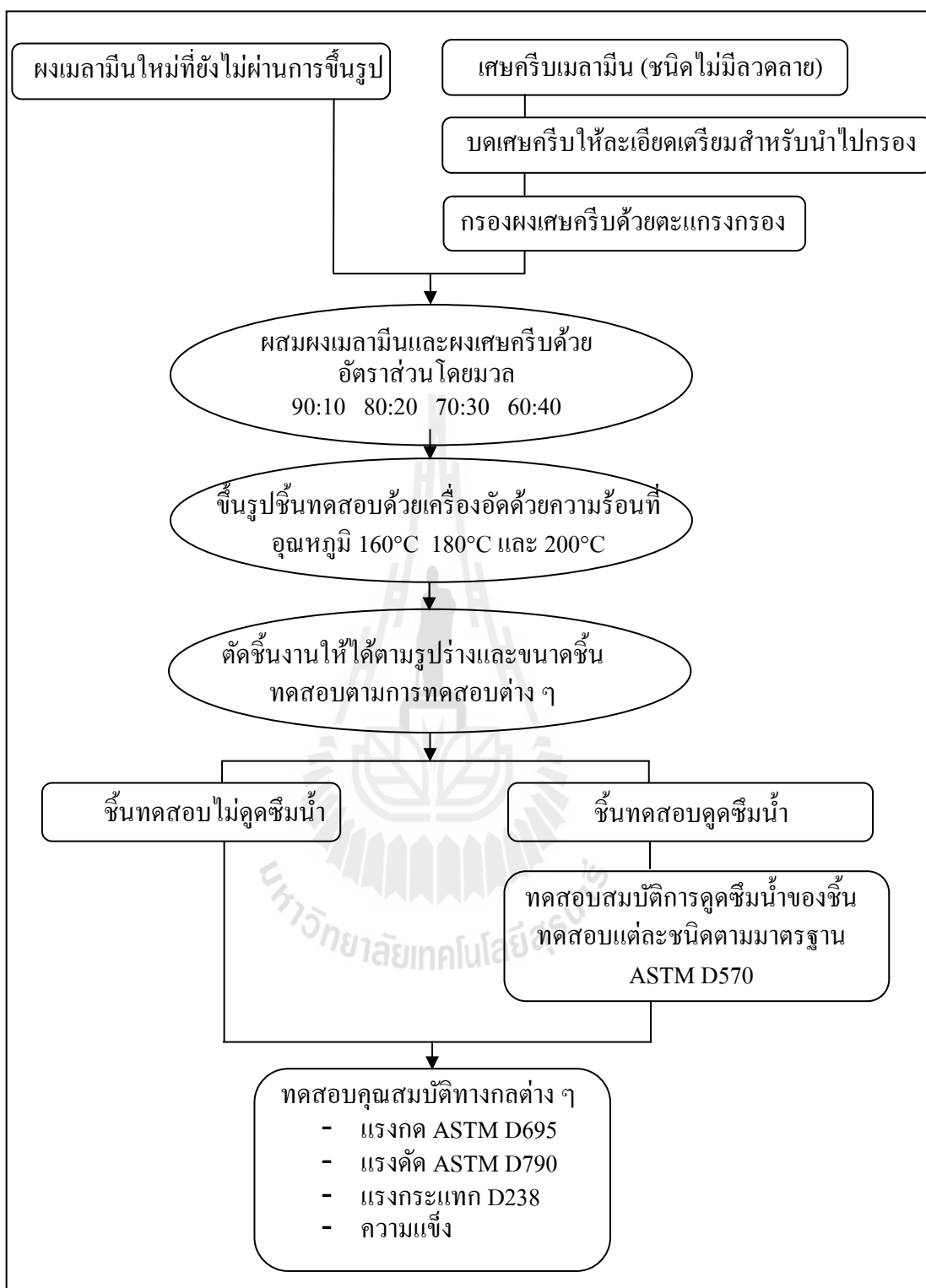
บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือ การศึกษาอิทธิพลของการดูดซึมน้ำและอิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูปของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีน ซึ่งเศษเมลามีนนั้นเป็นเทอร์โมเซตติงพลาสติกที่ไม่สามารถหลอมเหลวได้หลังจากผ่านการขึ้นรูปด้วยความร้อนจึงไม่สามารถนำรีไซเคิลด้วยความร้อนได้ ซึ่งในการศึกษานี้จะเป็นการนำเศษเมลามีนมาใช้เป็นส่วนผสมในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล ว่ามีการเปลี่ยนแปลงและแตกต่างกันอย่างไรหากผสมเศษเมลามีนด้วยอัตราส่วนที่ต่างกัน และเพื่อศึกษาแนวทางการนำวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนไปใช้ประโยชน์ในอนาคต

เศษเมลามีนที่นำมาใช้ในการศึกษาต้องถูกบดให้ละเอียดและกรองเพื่อให้ได้ขนาดที่ต้องการ จากนั้นจะผสมเศษเมลามีนเข้ากับเมลามีนใหม่ตามอัตราส่วนต่าง ๆ โดยเมลามีนใหม่จะทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ ส่วนผสมจะถูกขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดทางความร้อน ด้วยความดัน เวลาที่เหมาะสม ที่อุณหภูมิ 160°C 180°C และ 200°C

เนื่องจากในการขึ้นรูปนั้นแม่พิมพ์ไม่ได้มีรูปร่างและขนาดตามที่ขึ้นทดสอบกำหนด จึงต้องมีขั้นตอนในการตัดชิ้นงานที่ได้จากการอัดให้อยู่ในรูปร่างและขนาดของขึ้นทดสอบ จากนั้นจึงสามารถนำขึ้นทดสอบไปทดสอบการดูดซึมน้ำ และสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น การทดสอบแรงดัด การทดสอบแรงกระแทก การทดสอบแรงกด และการทดสอบความแข็ง ซึ่งแผนผังการดำเนินงานแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน

3.1 การเตรียมขั้นตอนทดสอบวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีน

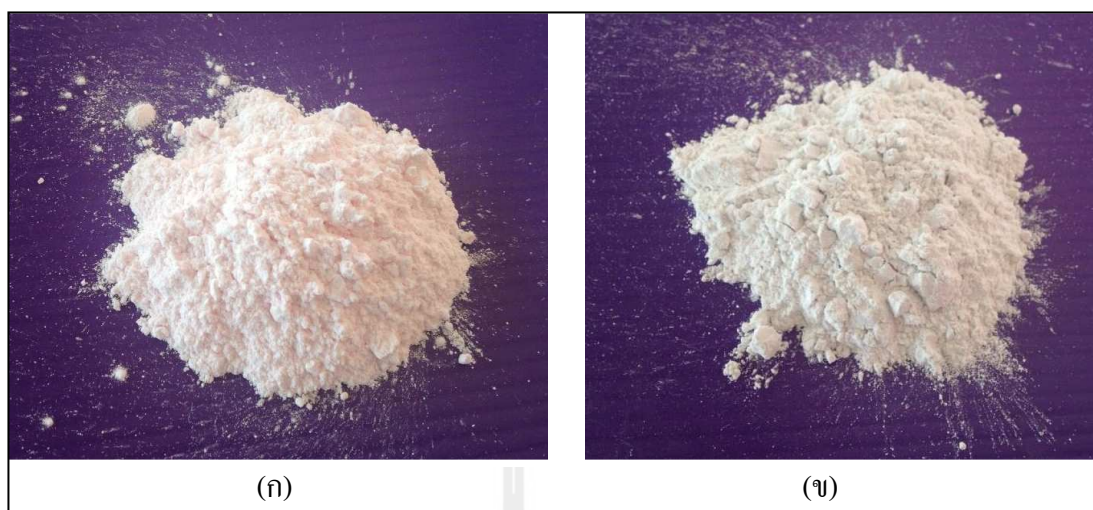
3.1.1 วัตถุดิบ

- 1) ผงเมลามีนใหม่ (ยังไม่ผ่านการขึ้นรูป) รหัส ME6033 สีชมพู ส่วนประกอบหลักของเมลามีนประกอบด้วย เมลามีนคริสตัล ฟอรัมัลดีไฮด์ และแอลฟาเซลลูโลส
- 2) เศษเมลามีน เป็นเศษเมลามีนของผลิตภัณฑ์แบบสี่เหลี่ยม ไม่มีลวดลาย ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เศษเมลามีน

เศษเมลามีนจะถูกบดให้ละเอียดเป็นผง ด้วยเครื่องบดแบบ Ball mill ซึ่งเมื่อบดเศษเมลามีนเรียบร้อยแล้วเศษเมลามีนจะถูกนำมากรองด้วยตะแกรงกรองขนาด 100 mesh (150 μ m) ซึ่งรูปที่ 3.3แสดงรูปเปรียบเทียบระหว่างผงเมลามีนใหม่และผงเศษเมลามีนที่ผ่านการกรองเรียบร้อยแล้ว

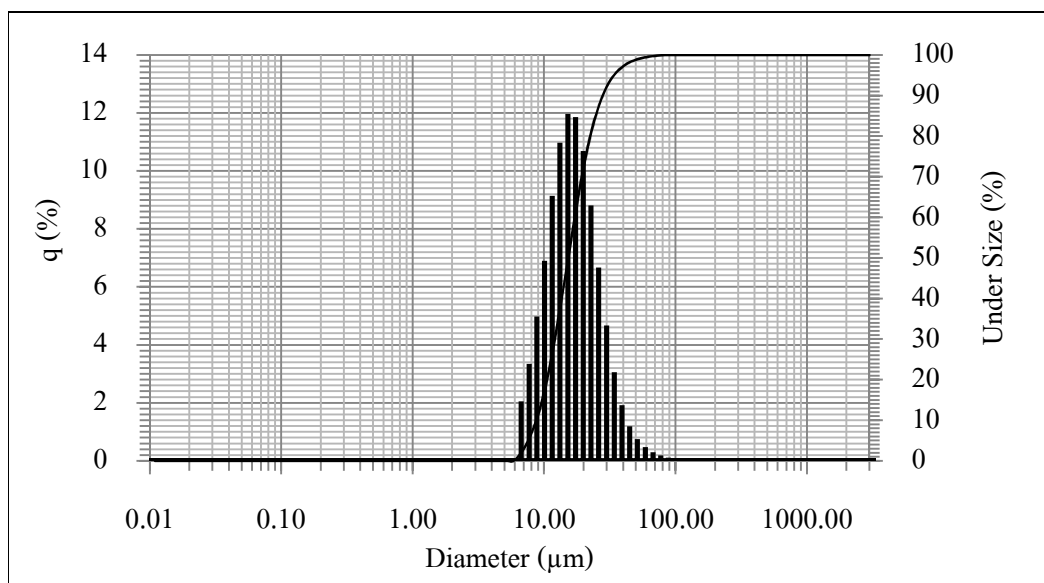


รูปที่ 3.3 (ก) เมลามีนใหม่ (ข) เศษเมลามีนที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรงกรอง 100 mesh

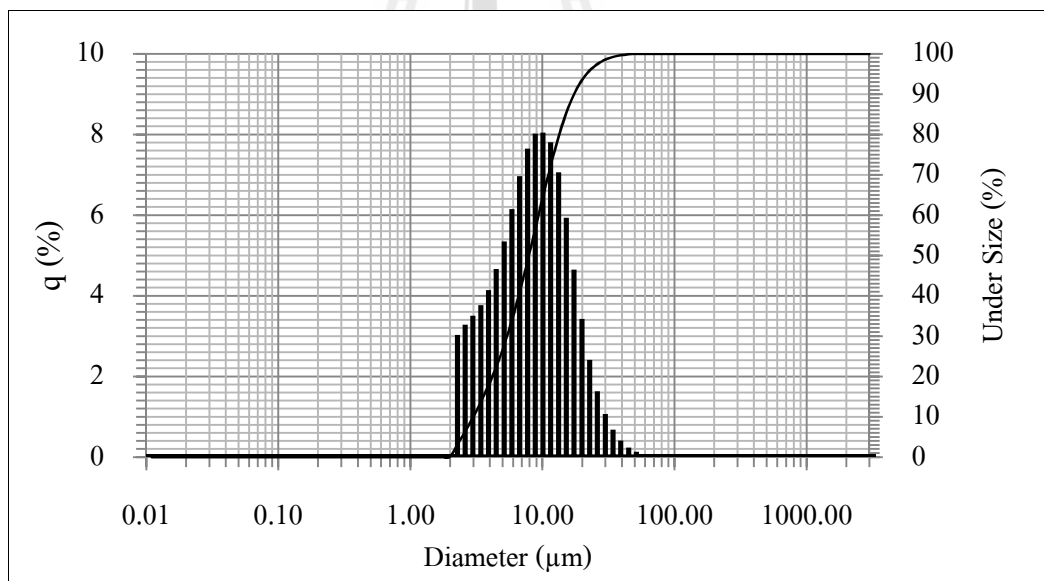
หลังจากกรองเศษเมลามีนแล้วนำเศษเมลามีนไปวัดขนาดของอนุภาค ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.4 และ 3.5 เป็นรูปที่แสดงขนาดอนุภาคของผงเมลามีนใหม่และเศษเมลามีนตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ขนาดผงเมลามีนและเศษเมลามีน

ค่าต่างๆ	เมลามีน	เศษเมลามีน
ค่าเฉลี่ย (Mean)	17.055 μm	9.398 μm
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	8.899 μm	6.406 μm
มัธยฐาน (Median)	14.979 μm	7.896 μm



รูปที่ 3.4 แสดงขนาดของเมลามีนใหม่



รูปที่ 3.5 แสดงขนาดของเศษเมลามีน

3.1.2 การผสม

หลังจากเตรียมวัตถุดิบสำหรับการขึ้นรูปขึ้นทดสอบเรียบร้อยแล้ว วัตถุดิบทั้งสองชนิดจะถูกผสมเข้าด้วยกัน เป็นการผสมแบบแห้ง ด้วยเครื่อง High speed mixer ในการผสมแต่ละครั้งใช้วัตถุดิบรวม 1 กิโลกรัม ใช้เวลาในการผสมครั้งละ 1 นาที ซึ่งอัตราส่วนผสมระหว่างเศษเมลามีนและเมลามีนแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมเศษเมลามีนและผงเมลามีน

เศษเมลามีน (%)	เมลามีน (%)
10	90
20	80
30	70
40	60
50	50

3.1.3 การเตรียมขึ้นทดสอบแรงดัด และขึ้นทดสอบความแข็ง

ในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ เนื่องจากไม่สามารถทำแม่พิมพ์ที่เป็นรูปร่างและขนาดของขึ้นทดสอบได้โดยตรง ดังนั้นจึงขึ้นรูปขึ้นงานเป็นลักษณะจานก่อนโดยใช้แม่พิมพ์ของบริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด มหาชน ซึ่งเลือกแม่พิมพ์ที่ให้ความหนาของชิ้นงานใกล้เคียงกับความหนาของขึ้นทดสอบ หลังจากขึ้นรูปเป็นจานแล้วจึงนำจานที่ได้ไปตัดให้อยู่ในรูปร่างและขนาดของขึ้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดัด ขึ้นทดสอบความแข็ง และขึ้นทดสอบแรงกระแทก

ในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบขึ้นรูปด้วยเครื่อง Compression molding machine ของบริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด มหาชน ชื่อเครื่อง LONG CHANG ขนาด 100 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 3.6

ก่อนการอัดขึ้นรูปต้องมีการอบ (Pre - heat) เมลามีนก่อน เพื่อไล่ความชื้นและให้เมลามีนจับกันเป็นก้อน คล้ายก้อนเค้ก โดยอบไล่ความชื้นด้วยอุณหภูมิประมาณ 90 - 100°C เป็นเวลา 45 วินาที

การขึ้นรูปใช้ความดันเท่ากับ 100 kg/cm² เป็นเวลา 65 วินาที ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C 180°C และ 200°C ซึ่งชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้เป็นรูปจาน ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 Compression molding machine



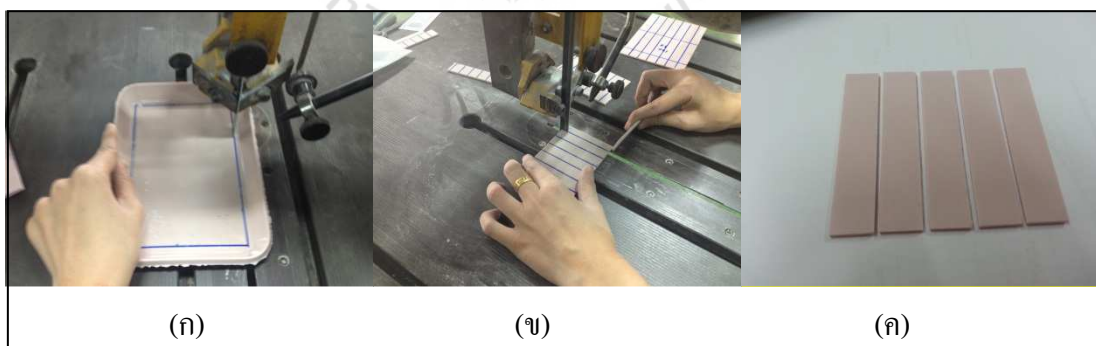
รูปที่ 3.7 งานที่ได้จากการขึ้นรูป

หลังจากการขึ้นรูป งานที่ได้จะถูกตัดให้มีรูปร่างและขนาดตามขั้นตอนทดสอบที่กำหนดไว้ในมาตรฐานการทดสอบ ตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน (Vertical band saw machine) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งขั้นตอนการตัดมีขนาดดังนี้คือ กว้าง 12.7 มิลลิเมตร ยาว 80 มิลลิเมตร และหนา 2.7 มิลลิเมตร ส่วนขั้นตอนสำหรับวัดความแข็งมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 25.4 ตารางมิลลิเมตร และหนา 2.7 มิลลิเมตร ซึ่งในการตัดขั้นตอนจะมีการเผื่อขนาดไว้สำหรับขัดให้ผิวขั้นตอนเรียบสม่ำเสมอ



รูปที่ 3.8 เครื่องเลื่อยสายพาน

เมื่อตัดชิ้นทดสอบได้ขนาดใกล้เคียงกับมาตรฐานกำหนด จากนั้นขัดขอบชิ้นทดสอบให้เรียบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 1000 และ 1500 ตามลำดับ และวัดขนาดอีกครั้งหลังขัดผิวเพื่อให้ได้ขนาดที่ถูกต้อง การตัดชิ้นทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 (ก) การตัดขอบงานออก (ข) การตัดชิ้นทดสอบตามขนาด (ค) ชิ้นทดสอบแรงดัด

3.1.4 การเตรียมชิ้นทดสอบแรงกระแทก

หลังจากตัดตามขนาดชิ้นทดสอบแรงกระแทกและขัดชิ้นทดสอบเรียบร้อยแล้ว นำชิ้นทดสอบไปทำรอยบาก (notch) มุม 45 องศา ความลึก 2.5 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D256-10 ด้วยเครื่องกัด (Milling) ยี่ห้อ Bridgeport ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยใช้ดอกกัดมุม 45 องศา ซึ่งในการกัดรอยบากต้องเอียงหัวกัดทำมุม 67.5 องศา ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ในการกัดควรใช้ความเร็วรอบต่ำ ๆ เพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นงานแตก และเพื่อให้ได้รอยบากที่เรียบอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 3.10 แสดงเครื่องกัด (Milling) ยี่ห้อ Bridgeport



รูปที่ 3.11 การทำรอยบากชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก

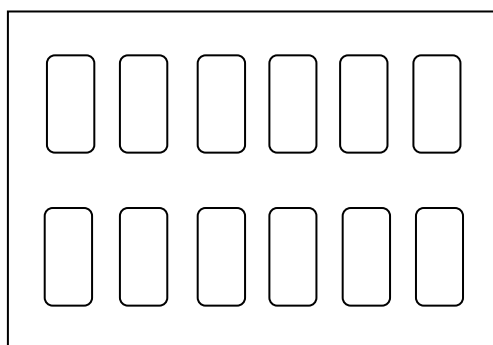
เมื่อทำรอยบากขึ้นทดสอบเรียบร้อยแล้ว ใช้เครื่องขยายภาพถ่ายขึ้นงานความเที่ยงตรงสูง(Profile Projector) Mitutoyo รุ่น PH – 3500 ในการวัดความลึกรอยบากของขึ้นทดสอบ เพื่อให้ได้ขนาดที่ถูกต้องที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่อง Profile projector

3.1.5 การเตรียมขึ้นทดสอบแรงกด

ในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบแรงกดใช้แม่พิมพ์ที่เป็นรูปร่างและขนาดของขึ้นทดสอบแรงกด ในการอัดแต่ละครั้งจะได้ขึ้นทดสอบ 12 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ขึ้นรูปด้วยเครื่อง Compression molding machine LONG CHANG ขนาด 70 ตัน ในการอัดแต่ละครั้งใช้ส่วนผสมน้ำหนัก 65 กรัม ความดันในการขึ้นรูป 200 kg/cm^2 อบส่วนผสมเมลามีนเพื่อไ้ความขึ้นเป็นเวลา 45 วินาที ใช้เวลาในการอัดขึ้นรูป 80 วินาที ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิขึ้นรูป 160°C และ 180°C



รูปที่ 3.13 แม่พิมพ์ขึ้นรูปชั้นทดสอบแรงกด

จากการเตรียมชั้นทดสอบสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปข้อมูลขนาดชั้นทดสอบได้ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ขนาดของชั้นทดสอบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ

การทดสอบ	ชั้นทดสอบ	ขนาด
แรงดัด		12.7 mm x 80 mm x 2.7 mm
แรงกระแทก		12.7 mm x 63.5 mm x 2.7 mm
ความแข็ง		25.4 mm x 25.4 mm x 2.7 mm
แรงกด		Ø 12.7 mm x 25.4 mm

3.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ในการทดสอบสมบัติเชิงกลจะประกอบด้วย การทดสอบแรงดัด การทดสอบแรงกระแทก การทดสอบความแข็ง และการทดสอบแรงกด ซึ่งชิ้นทดสอบจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือชิ้นทดสอบที่ทดสอบสมบัติเชิงกลแบบไม่ผ่านการดูดซึมน้ำ และอีกกลุ่มคือชิ้นทดสอบสมบัติเชิงกลแบบดูดซึมน้ำ

3.2.1 การทดสอบแรงดัดแบบสามจุด (3-Point Bending)

การทดสอบแรงดัดแบบสามจุด เป็นการหาค่าความแข็งแรงต่อการดัด (Flexural strength) ของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีน โดยการทดสอบจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D790 ทดสอบโดยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine) โหลดเซลล์ 5 kN ด้วยระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้านเท่ากับ 48 มิลลิเมตร และความเร็วในการทดสอบ 2 มิลลิเมตร/นาที ใช้ชิ้นงานในการทดสอบแต่ละอัตราส่วนผสม 6 ชิ้นแล้วทำการหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.2.2 การทดสอบแรงกระแทก (Impact testing)

การทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod เป็นการหาค่าความแข็งแรงเหนียว (Impact strength) โดยการทดสอบจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกซึ่งชิ้นทดสอบที่ใช้เป็นแบบมีรอยบาก (Notch) ในการทดสอบแต่ละอัตราส่วนทดสอบ 6 ครั้ง

3.2.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness testing)

การทดสอบความแข็งเป็นการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell สเกล M เพื่อหาค่าความแข็งของวัสดุรีไซเคิล โดยจะทดสอบ 5 จุดต่อชิ้นทดสอบ 1 ชิ้น และแต่ละจุดจะห่างกันอย่างน้อย 5 มิลลิเมตร ใช้ชิ้นงานในการทดสอบแต่ละอัตราส่วนผสม 6 ชิ้นแล้วทำการหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.2.4 การทดสอบแรงกด (Compression test)

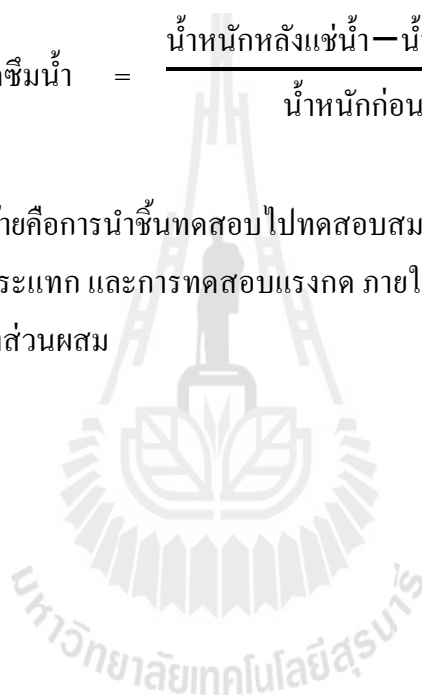
การทดสอบแรงกด เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นแรงอัด (Compression stress) ของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีน โดยการทดสอบจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D695 ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ขนาดโหลดเซลล์ 50 kN ความเร็วในการทดสอบ 1.33 มิลลิเมตร/นาที ใช้ชิ้นงานในการทดสอบแต่ละอัตราส่วนผสม 6 ชิ้นแล้วทำการหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

การทดสอบเพื่อหาค่าการดูดซึมน้ำ หรือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีน โดยในการทดสอบจะต้องนำชิ้นทดสอบไปอบด้วยอุณหภูมิ $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นทดสอบออกมาทิ้งให้เย็นตัวโดยใช้สารดูดความชื้น เมื่อชิ้นทดสอบเย็นตัวนำไปชั่งน้ำหนักก่อนแช่น้ำ และแช่ชิ้นทดสอบในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดนำชิ้นทดสอบขึ้นมาเช็ดให้แห้ง แล้วชั่งน้ำหนักหลังแช่น้ำกลั่น คำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหรือเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำได้จากสมการที่ 7

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักหลังแช่น้ำ} - \text{น้ำหนักก่อนแช่น้ำ}}{\text{น้ำหนักก่อนแช่น้ำ}} \times 100 \% \quad (3.1)$$

และขั้นตอนสุดท้ายคือการนำชิ้นทดสอบไปทดสอบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ได้แก่ การทดสอบแรงดัด การทดสอบแรงกระแทก และการทดสอบแรงกด ภายใน 30 นาที โดยใช้ชิ้นทดสอบ 6 ชิ้น ในการทดสอบแต่ละอัตราส่วนผสม



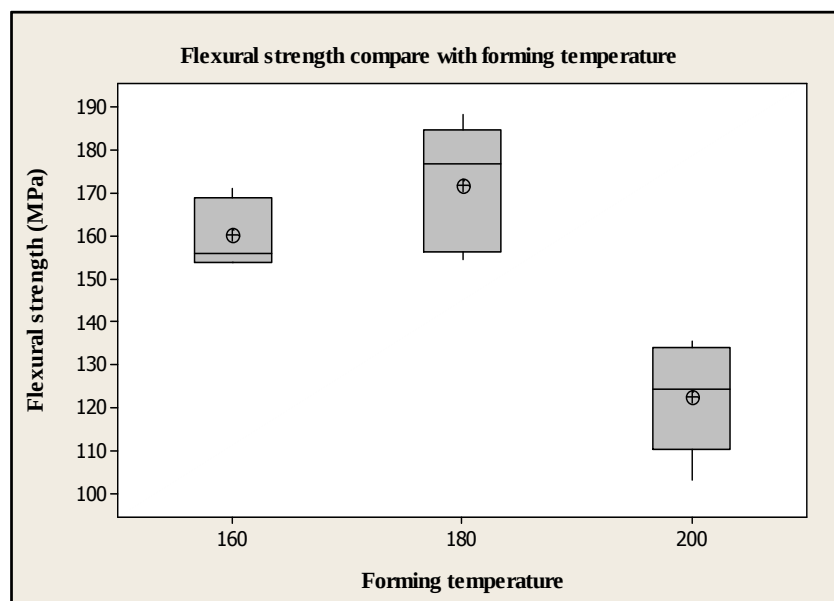
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากการดำเนินการนำเศษเมลามีนมารีไซเคิล โดยนำเศษเมลามีนมาบดให้ละเอียดและใช้เป็นส่วนผสมในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ สำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ตามอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ร้อน ซึ่งอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ศึกษาคือ 160°C 180°C และ 200°C เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลซึ่งประกอบด้วย การทดสอบแรงดัด การทดสอบแรงกด การทดสอบแรงกระแทก และการทดสอบความแข็ง ซึ่งขึ้นทดสอบจะแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ คือขึ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการดูดซึมน้ำและขึ้นทดสอบที่ผ่านการดูดซึมน้ำ ได้ผลการวิจัยดังต่อไปนี้

4.1 ผลจากการทดสอบแรงดัด (3-Point Bending)

ในการทดสอบแรงดัดเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความทนแรงดัดงอ (Flexural strength) ของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีน เนื่องจากในการวิจัยนี้มีการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูประหว่าง 160°C 180°C และ 200°C ในขั้นต้นจะศึกษาอุณหภูมิขึ้นรูปที่เหมาะสม โดยขึ้นรูปขึ้นทดสอบเฉพาะเมลามีนใหม่ 100% (ไม่ผสมเศษเมลามีน) ด้วยอุณหภูมิ 160°C 180°C และ 200°C จากนั้นนำขึ้นทดสอบมาทดสอบแรงดัด เพื่อดูแนวโน้มของค่า Flexural strength ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength ของชิ้นทดสอบ
เมลามีน 100% อุณหภูมิ 160°C 180°C และ 200°C

รูปที่ 4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength ของชิ้นทดสอบที่ไม่ผสม
เศษเมลามีนหรือเมลามีน 100% และอุณหภูมิขึ้นรูป 160°C 180°C และ 200°C จากกราฟพบว่า
อุณหภูมิขึ้นรูป 180°C มีค่าเฉลี่ยของ Flexural strength สูงที่สุด รองลงมาคือ อุณหภูมิ 160°C
และอุณหภูมิที่มีค่า Flexural strength น้อยที่สุดคือ อุณหภูมิขึ้นรูป 200°C

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยวิธีทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab 16 ด้วย
One – Way ANOVA (กำหนดระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$) ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 One - way ANOVA เปรียบเทียบอุณหภูมิ 160°C 180°C และ 200°C

One - way ANOVA: 160 C 180 C 200 C					
Source	DF	SS	MS	F	P
Temp	2	6573	3286	21.97	0.000
Error	12	1795	150		
Total	14	8367			
S = 12.23 R-Sq = 78.55% R-Sq(adj) = 74.98%					

จากตารางที่ 4.1 แสดงการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ One-way ANOVA เปรียบเทียบระหว่างค่า Flexural strength ของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C 180°C และ 200°C จากการวิเคราะห์พบว่าค่า P ของ Temp มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งสามารถระบุได้ว่าอุณหภูมิขึ้นรูปที่ต่างกันมีผลต่อค่า Flexural strength อย่างมีนัยสำคัญ

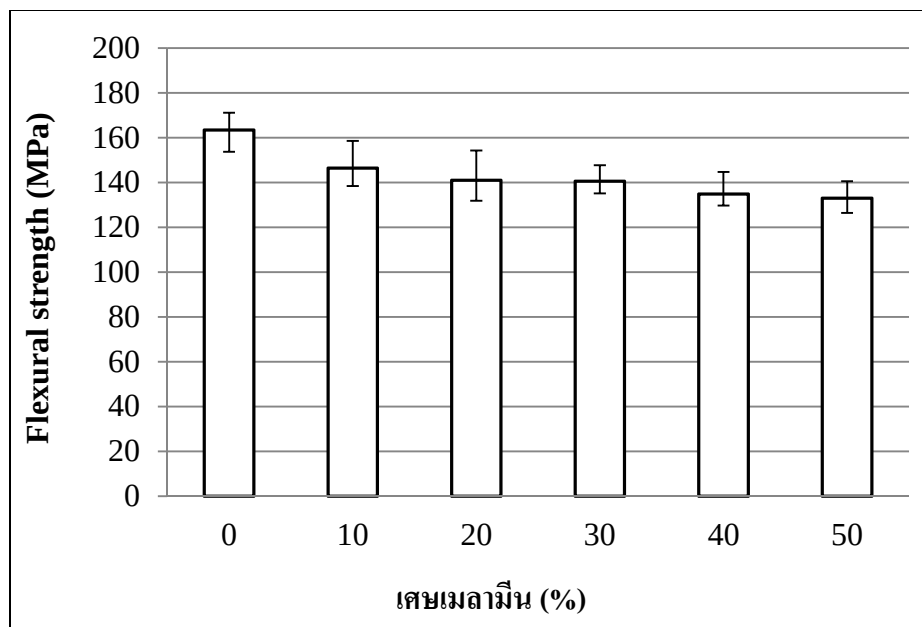
ตารางที่ 4.2 General Regression เปรียบเทียบอุณหภูมิ 160°C 180°C และ 200°C

General Regression Analysis: Flexural strength versus Temp				
Regression Equation				
Flexural strength = 320.45 - 0.93865 Temp				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	320.450	55.1580	5.80968	0.000
Temp	-0.939	0.3052	-3.07573	0.009

จากตารางที่ 4.2 แสดง General regression analysis ของค่า Flexural strength และอุณหภูมิขึ้นรูป ซึ่งจะพบว่าค่า Coefficient ของอุณหภูมิขึ้นรูป (Temp) มีค่าในทิศทางลบเท่ากับ -0.939 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิขึ้นรูปที่เปลี่ยนไปส่งผลให้ค่า Flexural strength ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า อุณหภูมิขึ้นรูป 200°C มีค่า Flexural strength น้อยที่สุด

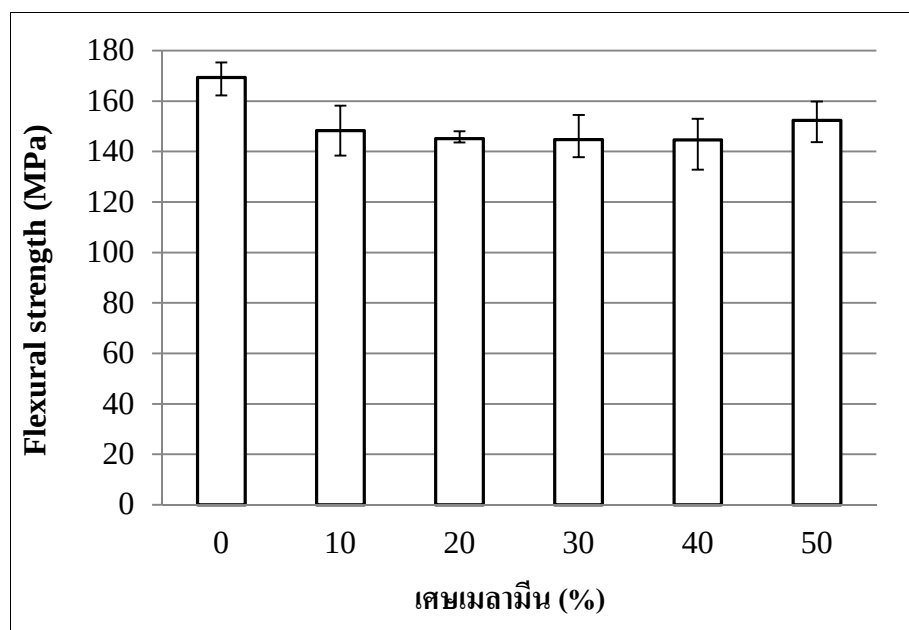
เนื่องจากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้น วัสดุที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 200°C มีค่า Flexural strength ที่น้อยที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกอุณหภูมิ 160°C และ 180°C ในการขึ้นรูปชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ต่อไป

4.1.1 อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน (การทดสอบ 3-Point Bending)



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C

รูปที่ 4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน 0 - 50% ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C จากกราฟพบว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผสมเศษเมลามีน (0% เศษเมลามีน) มีค่า Flexural strength สูงที่สุด และค่า Flexural strength ค่อย ๆ ลดลง 10.4 13.7 14.0 17.5 และ 18.7% ตามลำดับ เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนจาก 10% ถึง 50%



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Flexural strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนอุณหภูมิ 180°C

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย Flexural strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 180°C ผลการทดสอบพบว่าขึ้นทดสอบ 0% เศษเมลามีนมีค่า Flexural strength สูงที่สุด และค่า Flexural strength มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเศษเมลามีนเพิ่มขึ้นจาก 10 - 40% และค่า Flexural strength เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเศษเมลามีนเท่ากับ 50%

สำหรับค่า Flexural strength ของขึ้นทดสอบที่ผสมเศษเมลามีน 50% เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่า Flexural strength ของขึ้นทดสอบผสมเศษเมลามีน 50% เมื่อเทียบกับขึ้นทดสอบผสมเศษเมลามีน 40% มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

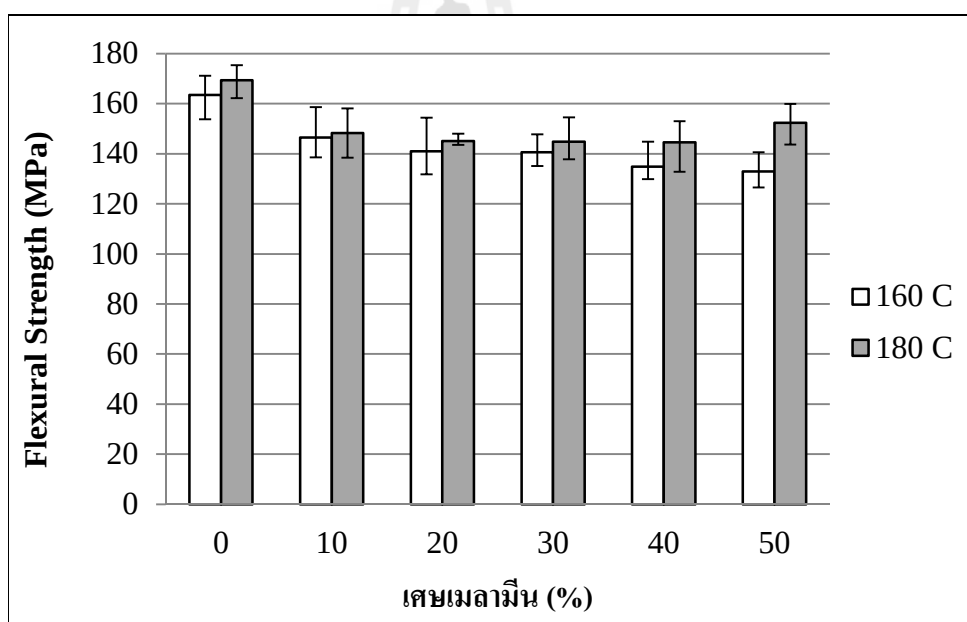
ตารางที่ 4.3 1 Sample - t Flexural strength ของเศษเมลามีน 40%: 50%

%เศษเมลามีน	Variable	Mean	StDev	SE Mean	T	P	การแปรผล
40%: 50%	50% 180	152.32	5.25	2.15	3.61	0.015	Significant

จากผลการทดสอบแรงคัดของขึ้นทดสอบขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C และ 180°C พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเศษเมลามีนจะส่งผลให้ค่า Flexural strength ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อเศษเมลามีนมากขึ้น เมลามีนเมทริกซ์น้อยลงด้วย ส่งผลให้วัสดุมีความเปราะมากขึ้น เนื่องจาก

เมลามีนเป็นตัวผสมระหว่างอนุภาคของเซสเมลามีน อีกทั้งเซสเมลามีนที่ผสมเข้าไปไม่มีการจับตัวกันวัสดุจึงไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ยิ่งเซสเมลามีนมากขึ้นการจับตัวกันของเซสเมลามีนก็มากขึ้นด้วย สังเกตได้จากภาพถ่ายจากการศึกษาสัณฐานวิทยา ดังรูปที่ 4.20 ซึ่งการที่วัสดุไม่เป็นเนื้อเดียวกันนี้ทำให้การส่งถ่ายแรงจากเมทริกซ์ไปยังอนุภาคของเซสเมลามีนเป็นไปได้ยาก ทำให้ความสามารถในการทนแรงดัดลดลง ซึ่งผลการทดลองนี้ได้ผลเช่นเดียวกับ Willis, M.R., and Masters, I. (2003) ที่ได้ศึกษาพฤติกรรมแรงดัดของคอมโพสิตพอลิเอสเตอร์ที่เติมวัสดุรีไซเคิลจากผงเถ้าลอยซึ่งผลของการทดสอบพบว่าค่า Flexural strength มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอย ตั้งแต่ 10 - 80% แต่ในทางตรงกันข้าม Flexural modulus นั้นมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุรีไซเคิลจากเถ้าลอย

4.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูป (การทดสอบ 3-Point Bending)



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength และเปอร์เซ็นต์เซสเมลามีน อุณหภูมิ 160°C และ 180°C

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Flexural strength และเปอร์เซ็นต์เซสเมลามีนเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิขึ้นรูป 160°C และ 180°C ผลการทดสอบปรากฏว่าค่า Flexural strength ของอุณหภูมิขึ้นรูป 160°C และ 180°C มีค่าใกล้เคียงกันในทุก ๆ อัตราส่วนเซสเมลามีน

ในการวิเคราะห์เชิงสถิติ สำหรับข้อมูลชุดนี้ใช้การทดสอบด้วยฟังก์ชัน Two – way ANOVA เนื่องจากมีตัวแปรสองตัวแปรที่ต้องการวิเคราะห์ ได้แก่ อุณหภูมิขึ้นรูปและเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.4

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่าปัจจัยอุณหภูมิขึ้นรูป (Temp) ให้ผลการวิเคราะห์ที่สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิการขึ้นรูปที่แตกต่างกันมีผลต่อค่าเฉลี่ย Flexural strength อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับปัจจัยเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนให้ผลการวิเคราะห์ที่คล้ายกันกับปัจจัยชนิดของการทดสอบ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนที่ต่างกันมีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ย Flexural strength อย่างมีนัยสำคัญ และปัจจัยของเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนมีผลต่อค่า Flexural strength มากกว่าปัจจัยของอุณหภูมิขึ้นรูปเล็กน้อยซึ่งดูได้จากค่า F

ตารางที่ 4.4 Two - way ANOVA Flexural strength อุณหภูมิ 160°C และ 180°C

Two - way ANOVA: Flexural strength versus Type of test % waste					
Source	DF	SS	MS	F	P
Temp	1	1014.90	1014.90	24.19	0.000
% waste	5	5802.29	1160.46	27.66	0.000
Interaction	5	612.08	122.42	2.92	0.020
Error	60	2517.24	41.95		
Total	71	9946.52			
S = 6.477R-Sq = 74.69% R-Sq(adj) = 70.05%					

ในการวิเคราะห์ว่าตัวแปรนั้น ๆ ส่งผลอย่างไรต่อค่า Flexural strength สามารถวิเคราะห์ได้อีกวิธีหนึ่งซึ่งสามารถบอกทิศทางการส่งผลกระทบต่อค่า Flexural strength ได้คือการใช้ Regression analysis ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.5

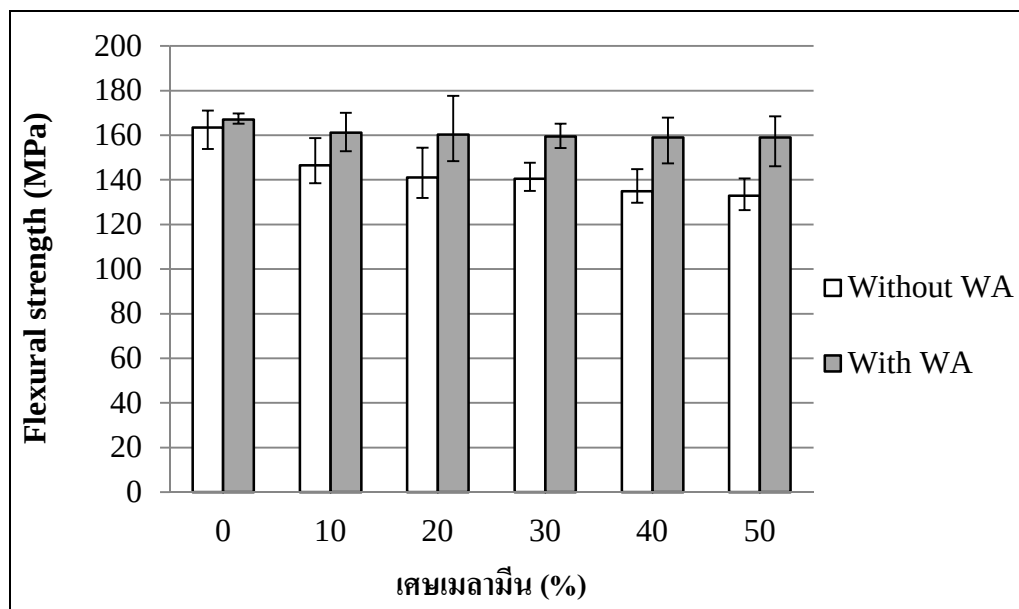
ตารางที่ 4.5 General Regression Flexural strength อุณหภูมิ 160°C และ 180°C

General Regression Analysis: Flexural strength versus Temp % Waste				
Regression Equation				
Flexural strength = 93.3041 + 0.365444 Temp – 0.406476 % Waste				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	93.3041	17.9217	5.20620	0.000
Temp	0.3754	0.1049	3.58066	0.001
% Waste	-0.4065	0.0614	-6.62058	0.020

จากผลการวิเคราะห์ด้วย General Regression ในตารางที่ 4.5 ค่าที่บ่งบอกถึงอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อค่า Flexural strength คือค่า Coefficients ซึ่งผลปรากฏว่า Coefficient ของอุณหภูมิขึ้นรูปมีค่าในทิศทางบวกเท่ากับ +0.3754 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิการขึ้นรูปเปลี่ยนไปจาก 160°C เป็น 180°C ส่งผลให้ค่า Flexural strength มีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ค่า Coefficient ของเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนมีค่าในทิศทางลบเท่ากับ -0.4065 ความหมายคือ เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน ส่งผลให้ Flexural strength ต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งถ้าเปรียบเทียบระหว่างสองปัจจัย ๆ ที่มีผลต่อค่า Flexural strength มากที่สุดคือ เปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่าชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 180°C มีค่า Flexural strength สูงกว่าชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C เนื่องจากการขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 180°C มีระดับการบ่ม (Cured) ที่สูงกว่า ซึ่งวัสดุที่มีระดับการบ่มที่สูงกว่าจะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงทำให้สมบัติการรับแรงคดดีขึ้น แต่ในทางกลับกันวัสดุที่ได้มีความยืดหยุ่นต่ำลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณการเชื่อมโยง (Cross - link) จะไปยับยั้งการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล วัสดุจึงมีความเปราะมากขึ้น

4.1.3 อิทธิพลของการดูดซึมน้ำ (การทดสอบ 3-Point Bending)



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C ระหว่างขั้นตอนแห้งและขั้นตอนดูดซึมน้ำ

รูปที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Flexural strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C เปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนแห้ง (Without WA) และขั้นตอนที่ผ่านการดูดซึมน้ำ (With WA) ผลปรากฏว่าขั้นตอนที่ผ่านการดูดซึมน้ำมีค่า Flexural strength สูงกว่าขั้นตอนแห้ง อย่างไรก็ตามขั้นตอนที่อัตราส่วน 0% และ 10% เศษเมลามีน พบว่าค่า Flexural strength ของขั้นตอนทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน

ในการวิเคราะห์เชิงสถิติ สำหรับข้อมูลชุดนี้ใช้การทดสอบด้วยฟังก์ชัน Two - way ANOVA เนื่องจากมีตัวแปรสองตัวแปรที่ต้องการวิเคราะห์ ได้แก่ ประเภทของการทดสอบ (ไม่ดูดซึมน้ำและดูดซึมน้ำ) และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 Two - way ANOVA Flexural strength อุณหภูมิ 160°C ชั้นทดสอบแห้งและดูดซึมน้ำ

Two - way ANOVA: Flexural strength versus Type of test % waste					
Source	DF	SS	MS	F	P
Type of test	1	5672.7	5672.72	114.50	0.000
% waste	5	2967.4	593.48	11.98	0.000
Interaction	5	977.5	195.50	3.95	0.004
Error	60	2972.6	49.54		
Total	71	12590.3			
S = 7.039 R-Sq = 76.39% R-Sq(adj) = 72.06%					

จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าปัจจัยชนิดของการทดสอบ (Type of test) ให้ผลการวิเคราะห์ที่สามารถสรุปได้ว่าชนิดของการทดสอบทั้งสองประเภทที่กล่าวมาข้างต้นมีผลต่อค่าเฉลี่ย Flexural strength อย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับปัจจัยเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนให้ผลการวิเคราะห์ที่คล้ายกันกับปัจจัยชนิดของการทดสอบ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนที่ต่างกันมีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ย Flexural strength อย่างมีนัยสำคัญ และปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า Flexural strength มากที่สุดคือชนิดของการทดสอบ สังเกตจากค่า F

สำหรับปัจจัย interaction ระหว่างวิธีการทดสอบและเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนสรุปได้ว่าชนิดของการทดสอบมี interaction กับเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน

ในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ข้อสรุปว่าตัวแปรหรือปัจจัยแต่ละปัจจัยส่งผลอย่างไรต่อค่า Flexural strength สามารถสรุปได้ด้วยการทำ General Regression ซึ่งผลการวิเคราะห์ General Regression ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 General Regression Flexural strength อุณหภูมิ 160°C ขึ้นทดสอบแห้งและดูดซึมน้ำ

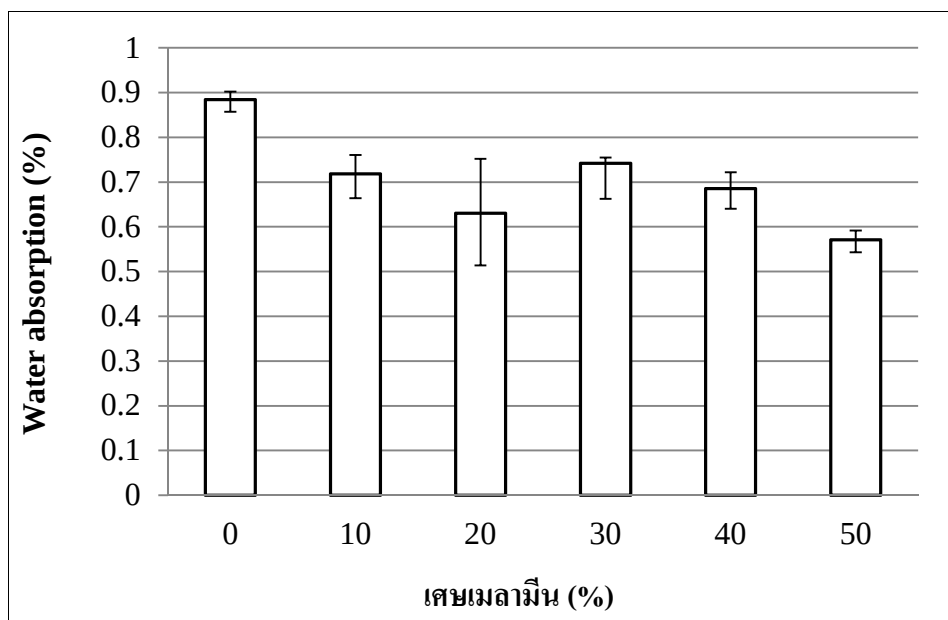
General Regression Analysis: Flexural strength versus Type of test % Waste				
Regression Equation				
Flexural strength = 133.875 + 17.7525 Type of test - 0.336574 % Waste				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	133.875	3.33067	40.1947	0.000
Type of Test	17.753	1.91162	9.2866	0.000
% Waste	-0.337	0.05597	-6.0139	0.000

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.7 ค่าที่บ่งบอกถึงอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อค่า Flexural strength คือค่า Coefficients ซึ่งผลปรากฏว่า Coefficient ของชนิดของการทดสอบคือขึ้นทดสอบแห้งและดูดซึมน้ำ (Type of test) มีค่าในทิศทางบวกเท่ากับ +17.753 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อชนิดการทดสอบเปลี่ยนไปส่งผลให้ค่า Flexural strength สูงขึ้น ดังนั้นสรุปว่าการทดสอบแบบดูดซึมน้ำมีค่า Flexural strength สูงกว่าการทดสอบแบบไม่ดูดซึมน้ำอย่างมีนัยสำคัญ

ในขณะที่ Coefficient ของเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน (% Waste) มีค่าในทิศทางลบเท่ากับ -0.337 หมายความว่า เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนส่งผลให้ Flexural strength ต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งถ้าเปรียบเทียบระหว่างสองปัจจัย ๆ ที่มีผลต่อค่า Flexural strength มากที่สุดคือชนิดของการทดสอบ

ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของวัสดุ เมื่อแช่ขึ้นทดสอบในน้ำกลั่นวัสดุมีการดูดซึมน้ำ เป็นผลมาจาก น้ำซึมเข้าไปในรูช่องว่างเล็ก ๆ (voids) ภายในขึ้นทดสอบ อีกทั้งโมเลกุลของน้ำถูกดึงดูดด้วยกลุ่มชอบน้ำ (Hydrophilic group) ในเซลลูโลสที่มีอยู่ในเมลามีนซึ่งน้ำที่เข้าไปเติมเต็มในช่องว่างจะทำหน้าที่เหมือนพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ทำให้วัสดุมีความสมบูรณ์มากขึ้น จึงส่งผลให้ Flexural strength มีค่ามากขึ้น Huang, G., and Sun, H.X. (2007)

4.1.4 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (การทดสอบ 3-Point Bending)



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ
และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C

จากรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C หลังจากแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ชิ้นทดสอบที่ไม่ผสมเศษเมลามีนมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่มากที่สุด และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนเพิ่มขึ้นจาก 10-50% โดยลดลง 18.7 28.7 16.1 22.4 และ 35.4% ตามลำดับ ผลการทดสอบยืนยันด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติ จากตารางที่ 4.8 พบว่าค่า P มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยของเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำอย่างมีนัยสำคัญ และจากตารางที่ 4.9 ค่า Coefficient ของเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนนั้นมีค่าในทิศทางลบเท่ากับ -0.003878 และ P-value < 0.05 ด้วยจึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนมากขึ้นส่งผลให้มีการดูดซึมน้ำที่น้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.8 One - way ANOVA เพอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ อุณหภูมิ 160°C

One - way ANOVA: 0% 10% 20% 30% 40% 50%					
Source	DF	SS	MS	F	P
% waste	5	0.30856	0.06171	23.22	0.000
Error	30	0.07974	0.00266		
Total	35	0.38830			
S = 0.05155 R-Sq = 79.47% R-Sq(adj) = 76.04%					

ตารางที่ 4.9 General Regression เพอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ อุณหภูมิ 160°C

General Regression Analysis: % water absorption versus % waste				
Regression Equation				
% water absorption = 0.803037 - 0.00387803 % waste				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.803037	0.0243221	33.0168	0.000
% Waste	-0.003878	0.0008033	-4.8274	0.000

การที่วัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนสามารถดูดซึมน้ำ อันเนื่องมาจากโมเลกุลของน้ำจะถูกดึงดูดโดยกลุ่มที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) ที่อยู่ในเส้นใย จำพวกเยื่อกระดาษซึ่งเป็นส่วนผสมหนึ่งในเมลามีน อีกทั้งน้ำยังแทรกซึมเข้าไปในช่องว่าง (voids) ในเนื้อวัสดุได้อีกด้วย Huang, G., and Sun, H.X. (2007)

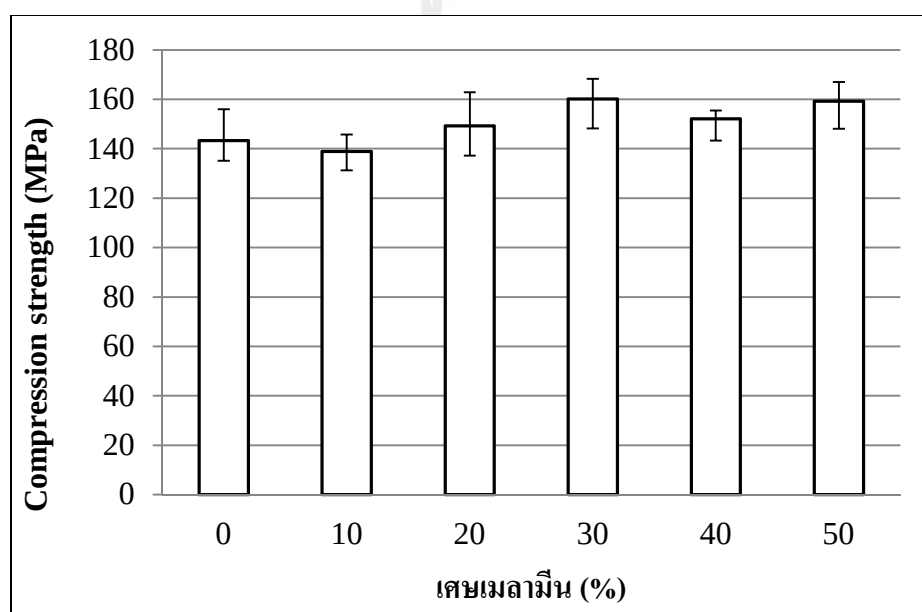
การที่ชั้นทดสอบที่ผสมเศษตั้งแต่ 10-50% มีการดูดซึมน้ำน้อยกว่าชั้นทดสอบ 0% เศษเมลามีน เนื่องจากในเศษเมลามีนนั้นเป็นเศษเมลามีนของผลิตภัณฑ์ที่มีการเคลือบเงาด้วย ซึ่งสารที่ใช้ในการเคลือบเงา คือเมลามีนคริสตัล ที่ผสมเพียงฟอร์มาลดีไฮด์ ไม่ได้เติมเซลลูโลสหรือเยื่อกระดาษเข้าไปด้วย จึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำน้อยลง สำหรับชั้นทดสอบ 0% เศษเมลามีนนั้นในการขึ้นรูปไม่มีการเคลือบเงาจึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่มากกว่าชั้นทดสอบที่ผสมเศษเมลามีน ซึ่งมีการทดลองเปรียบเทียบระหว่างชั้นทดสอบ 0% เศษเมลามีนที่เคลือบเงา และไม่เคลือบเงา ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.10 จากเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชั้นทดสอบต่างชนิดกันพบว่า ชั้นทดสอบที่เคลือบเงามีการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่าชั้นทดสอบไม่เคลือบเงาถึง 30.11%

ตารางที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำระหว่างขั้นตอนทดสอบเคลือบเงาและไม่เคลือบเงา

ชนิดของขั้นตอนทดสอบ	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ
ไม่เคลือบเงา	0.6024
เคลือบเงา	0.4210

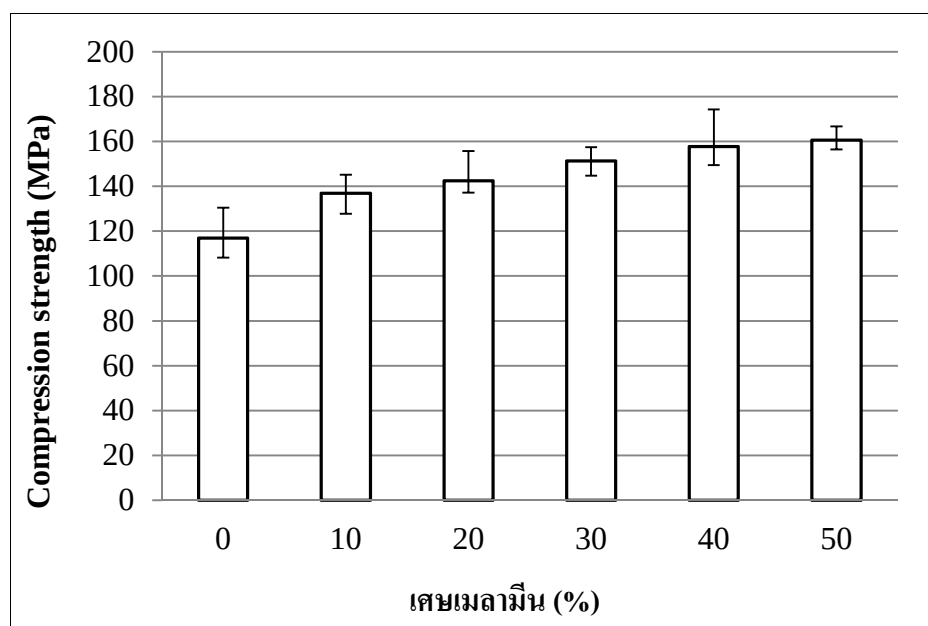
4.2 ผลจากการทดสอบแรงอัด (Compression)

4.2.1 อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน (การทดสอบ Compression)



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Compression strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนอุณหภูมิ 160°C

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compression strength ของขั้นตอนที่ผสมเศษเมลามีนที่อัตราส่วนต่างกัน ขั้นตอนอบขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C จากผลการทดลองพบว่าค่า Compression strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเศษเมลามีนเพิ่มขึ้น



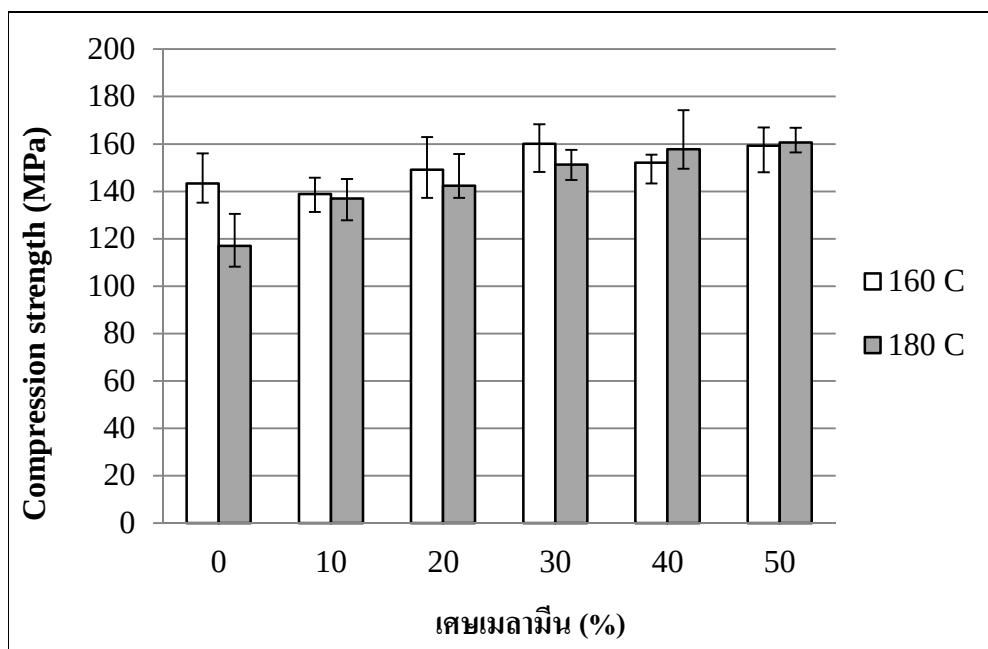
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Compression strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนอุณหภูมิ 180°C

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compression strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน ขึ้นทดสอบขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 180°C จากผลการทดลองพบว่าค่า Compression strength ของขึ้นทดสอบ 0% เศษเมลามีนมีค่าน้อยที่สุด และค่า Compression strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 17.121.8 29.3 34.9 และ 37.3% ตามลำดับเมื่อเศษเมลามีนเพิ่มขึ้นจาก 10%-50%

แนวโน้มความสัมพันธ์ของค่า Compression strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน มีการแปรผันตรง คือ เมื่อเศษเมลามีนเพิ่มขึ้น ค่า Compression strength ก็เพิ่มขึ้นด้วย (ทั้งสองอุณหภูมิขึ้นรูป) เนื่องจากเศษเมลามีนที่ผสมเข้าไปนั้นมีความแข็งแรงมากกว่าเมลามีนเมิร์ซ ซึ่งอ้างอิงจากผลการทดสอบความแข็ง ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 อีกทั้งเศษเมลามีนก็มีความหนาแน่นมากกว่าเมลามีนใหม่อีกด้วย ดังนั้นวัสดุจึงสามารถรับแรงกดอัดได้ดีมากยิ่งขึ้นเมื่อผสมเศษเมลามีนมากขึ้น

สำหรับผลการทดสอบแรงกดของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C และ 180°C ของขึ้นทดสอบที่ผ่านการดูดซึมน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก็ให้ผลในทางเดียวกันนั่นคือ เมื่อเศษเมลามีนเพิ่มขึ้นความสามารถในการรับแรงกดอัดของขึ้นทดสอบมากขึ้นด้วย

4.2.2 อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูป (การทดสอบ Compression)



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Compression strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C และ 180°C

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compression strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิขึ้นรูป 160°C และ 180°C จากกราฟพบว่าขึ้นทดสอบ 0% เมลามีนขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C มีค่า Compression strength มากกว่าขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 180°C อย่างเห็นได้ชัด ส่วนขึ้นทดสอบที่ผสมเศษเมลามีนตั้งแต่ 10% - 50% ค่า Compression strength ของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปทั้งสองอุณหภูมิไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แต่เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติด้วย Two - way ANOVA ดังแสดงในตารางที่ 4.11 เพื่อศึกษาผลที่มีต่อค่า Compression strength ของสองปัจจัยคืออุณหภูมิขึ้นรูปและเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน พบว่าทั้งปัจจัยอุณหภูมิขึ้นรูปและปัจจัยเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนที่ต่างกันมีผลต่อค่า Compression strength อย่างมีนัยสำคัญ และจากค่า F พบว่าปัจจัยของเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนมีผลต่อค่า Compression strength มากกว่าปัจจัยของอุณหภูมิขึ้นรูป

ตารางที่ 4.11 Two - way ANOVA Compression strength อุนหภูมิ 160°C และ 180°C

Two - way ANOVA: Compression strength versus Temp % Waste					
Source	DF	SS	MS	F	P
Temp	1	528.2	528.24	9.34	0.004
% waste	5	6967.8	1393.56	24.65	0.000
Interaction	5	1242.1	248.41	4.39	0.002
Error	48	2713.3	56.53		
Total	59	11451.5			
S = 7.519 R-Sq = 76.31% R-Sq(adj) = 70.88%					

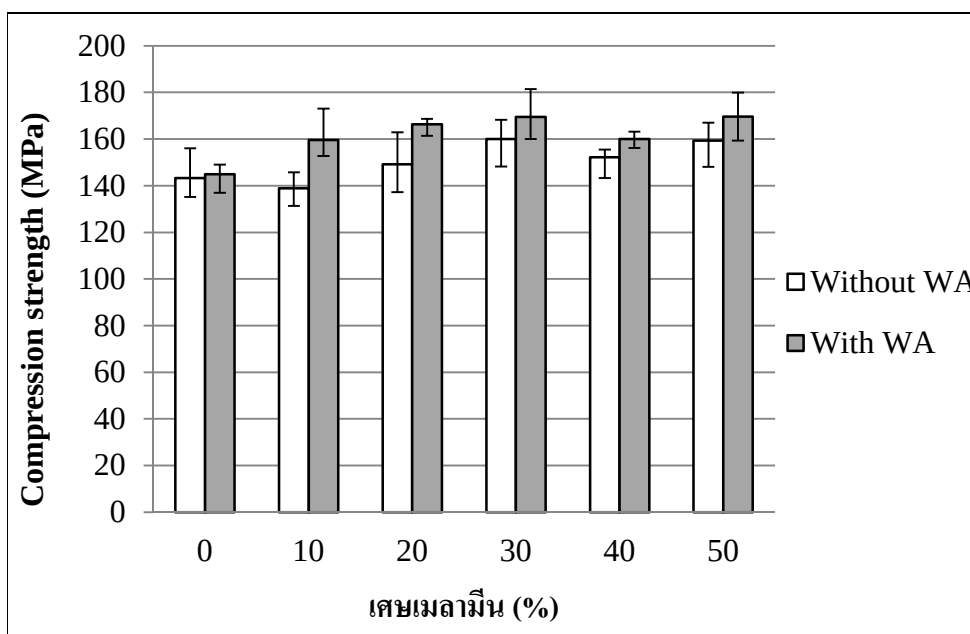
ตารางที่ 4.12 General Regression Compression strength อุนหภูมิ 160°C และ 180°C

General Regression Analysis: Compression strength versus Temp % Waste				
Regression Equation				
Compression strength = 182.699 - 0.296717 Temp + 0.6101 % Waste				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	182.699	19.4076	9.41379	0.000
Temp	-0.297	0.1135	-2.61317	0.011
% Waste	0.610	0.0665	9.17637	0.000

จากข้อมูลในตารางที่ 4.12 เป็นการวิเคราะห์ระหว่างปัจจัยอุณหภูมิขึ้นรูปและปัจจัยเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนส่งผลต่อค่า Compression strength ในทิศทางใด ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่าอุณหภูมิขึ้นรูปส่งผลต่อ Compression strength ในทิศทางลบ เท่ากับ -0.297 สามารถกล่าวได้ว่าอุณหภูมิขึ้นรูปที่เปลี่ยนจาก 160°C เป็น 180°C จะส่งผลให้ค่า Compression strength ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ในขณะที่ปัจจัยเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนให้ผลตรงกันข้ามคือ เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนส่งผลให้ค่า Compression strength สูงขึ้นเนื่องจากค่า Coefficient มีค่าเป็น +0.610 และสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยของเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนส่งผลต่อ Compression มากกว่าอุณหภูมิขึ้นรูป

ในส่วนของอิทธิพลของการขึ้นรูปนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบแรงกดของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160 °C และ 180°C สำหรับชิ้นทดสอบที่ผ่านการดูดซึมน้ำด้วย ได้ผลในทิศทางเดียวกันกับชิ้นทดสอบที่ไม่แช่น้ำ คือ ชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C มีความสามารถในการรับแรงกดอัดได้ดีกว่าอุณหภูมิ 180°C

4.2.3 อิทธิพลของการดูดซึมน้ำ (การทดสอบ Compression)



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Compression strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C ชิ้นทดสอบแห้งและชิ้นทดสอบดูดซึมน้ำ

จากรูปที่ 4.10 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Compression strength และ เปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน ที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C โดยเป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่างชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการดูดซึมน้ำและชิ้นทดสอบที่ผ่านการดูดซึมน้ำ ผลการทดลองพบว่าชิ้นทดสอบผสมเศษเมลามีนตั้งแต่ 10% - 50% ที่ผ่านการดูดซึมน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อนำมาทดสอบแรงกดพบว่าค่า Compression strength มีแนวโน้มสูงกว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการดูดซึมน้ำเล็กน้อย ในทางกลับกันชิ้นทดสอบ 0% เศษเมลามีนกลับให้ค่า Compression strength ที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.13 Two - way AVOVA Compression ขึ้นทดสอบแห้งและดูดซึมน้ำ อุณหภูมิ 160°C

Two - way ANOVA: Compression strength versus Type of Test % Waste					
Source	DF	SS	MS	F	P
Type of Test	1	1876.34	1876.34	37.61	0.000
% waste	5	3704.97	740.99	14.85	0.000
Interaction	5	456.40	91.28	1.83	0.125
Error	48	2394.73	49.89		
Total	59	8432.43			
S = 7.063 R-Sq = 71.60% R-Sq(adj) = 65.09%					

จากตารางที่ 4.13 เป็นตารางแสดงการวิเคราะห์ทางสถิติของการทดสอบแรงอัดเปรียบเทียบระหว่างสองปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า Compression strength ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่าทั้งปัจจัยชนิดของการทดสอบ (ไม่ดูดซึมน้ำและดูดซึมน้ำ) และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนมีค่า P เท่ากับ 0.000 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าทั้งสองปัจจัยส่งผลต่อค่า Compression strength อย่างมีนัยสำคัญ และจากค่า F ทำให้ทราบว่าปัจจัยชนิดของการทดสอบนั้นมีผลต่อค่า Compression strength มากกว่าปัจจัยเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน

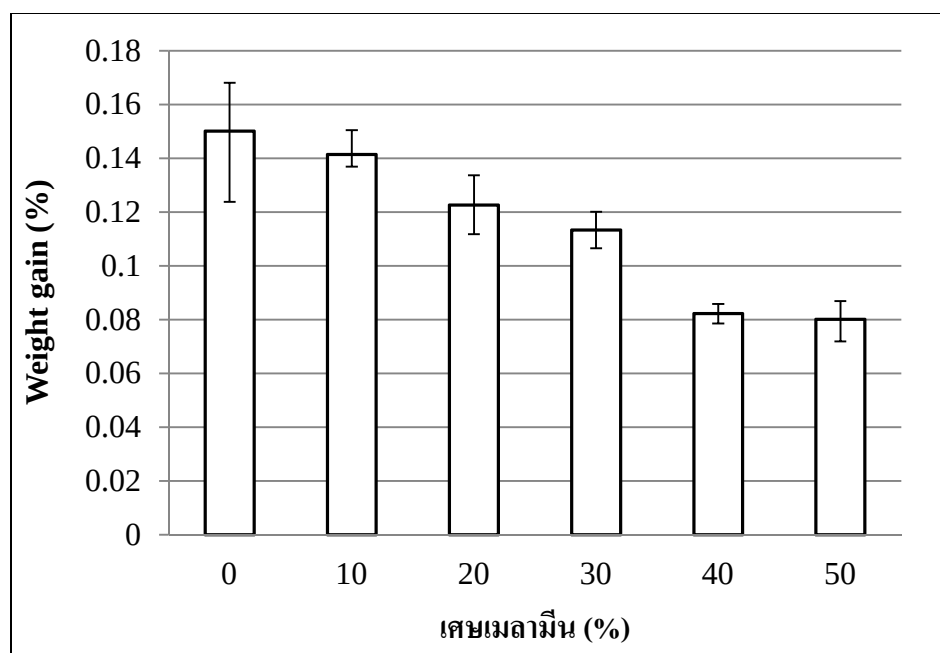
ตารางที่ 4.14 General Regression Compression ขึ้นทดสอบแห้งและดูดซึมน้ำ อุณหภูมิ 160°C

General Regression Analysis: Compression strength versus Type of Test % Waste				
Regression Equation				
Compression strength = 129.422 + 11.1843 Type of Test + 0.394831 % Waste				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	129.422	3.68665	35.1054	0.000
Type of Test	11.184	2.11593	5.2858	0.000
% Waste	0.395	0.06195	6.3736	0.000

จากตารางที่ 4.14 แสดงการวิเคราะห์ General Regression เปรียบเทียบทิศทางการส่งผลต่อ Compression strength ระหว่างปัจจัยอุณหภูมิขึ้นรูปและเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน จากผลการวิเคราะห์พบว่าทั้งสองปัจจัยส่งผลในทิศทางบวกเช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าสำหรับปัจจัยชนิดของการทดสอบ การทดสอบแบบดูดซึมน้ำจะส่งผลให้ค่า Compression strength ที่

สูงกว่าการทดสอบแบบไม่ดูดซึมน้ำ และสำหรับปัจจัยเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน กล่าวได้ว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนมากขึ้นส่งผลให้ค่า Compression strength มากขึ้นด้วยอย่างมีนัยสำคัญ และปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า Compression strength มากที่สุดคือปัจจัยชนิดของการทดสอบ

4.2.4 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (การทดสอบ Compression)

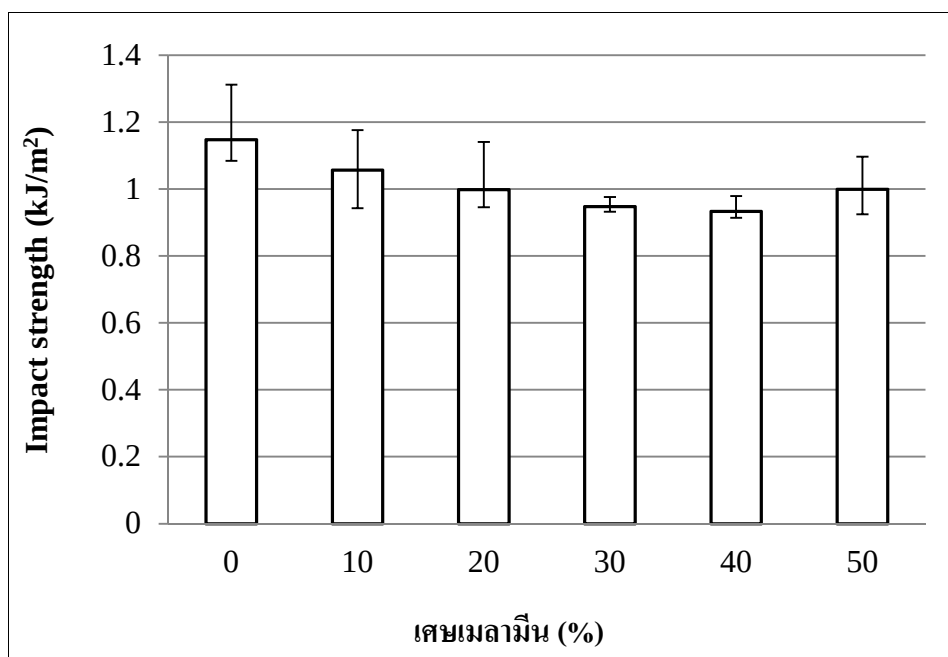


รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C

รูปที่ 4.11 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน ของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C ชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบ Compression ผลปรากฏว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผสมเศษเมลามีน (0% เศษเมลามีน) มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่มากที่สุด และค่าการดูดซึมน้ำลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มเศษเมลามีนจาก 10% - 50% โดยเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำลดลง 5.8 18.3 24.5 45.2 และ 46.6 ตามลำดับ

4.3 ผลจากการทดสอบแรงกระแทก (Impact)

4.3.1 อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน (การทดสอบ Impact)



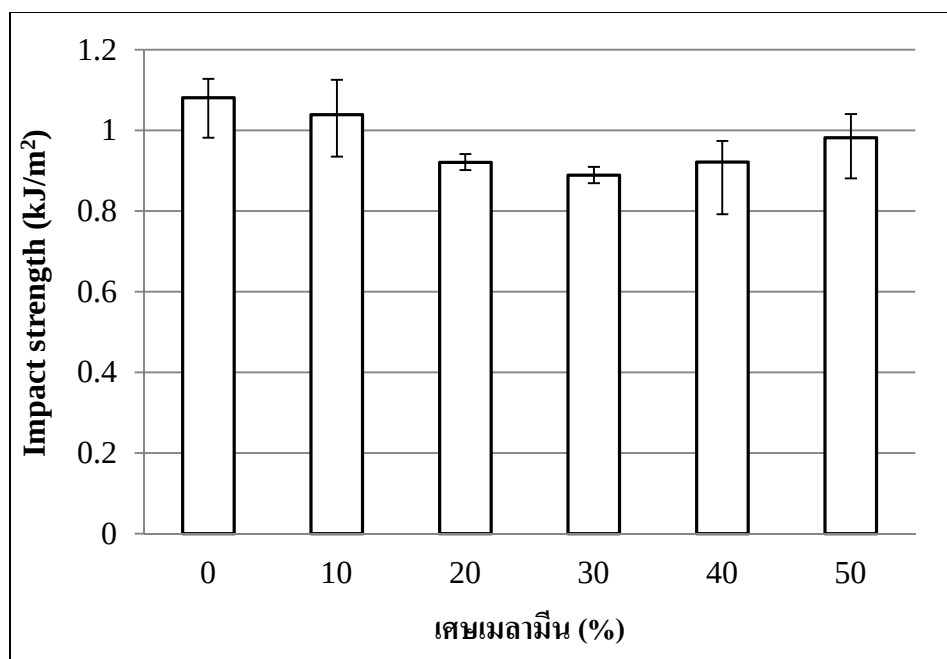
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Impact strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C

จากรูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Impact strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C จากกราฟพบว่าขึ้นทดสอบ 0% เศษเมลามีนมีค่า Impact strength มากที่สุดและค่า Impact strength มีแนวโน้มลดลง 7.9 13.1 17.5 18.7 และ 12.9% เมื่อเศษเมลามีนเพิ่มขึ้นจาก 10%-50% (เทียบกับ 0% เศษเมลามีน) และจากกราฟพบว่าที่อัตราส่วนเศษเมลามีน 50% พบว่า Impact strength มีแนวโน้มมากกว่าเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน 30% และ 40%

ตารางที่ 4.15 1 - Sample t Impact strength อุณหภูมิ 160°C

การเปรียบเทียบ	Variable	Mean	StDev	SE Mean	T	P	การแปลผล
30%: 50%	50% 160	0.9991	0.0861	0.0385	1.35	0.249	No Significant
40%: 50%	50% 160	0.9991	0.0861	0.0385	1.72	0.16	No Significant

จากตารางที่ 4.15 เป็นการนำข้อมูลไปวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน 30% และ 50% และความแตกต่างระหว่างเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน 40% และ 50% ซึ่งผลพบว่าค่า Impact strength ของเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน 30% และ 50% นั้นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกันกับเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน 40% และ 50%



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Impact strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 180°C

จากรูปที่ 4.13 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Impact strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 180°C ผลการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยของค่า Impact strength ของ 0% เศษเมลามีนมีค่าสูงที่สุดและมีแนวโน้มลดลง 3.8 14.8 17.7 14.7 และ 9.1% เมื่อเศษเมลามีนเพิ่มขึ้นจาก 10% - 50% และจากกราฟสังเกตได้ว่า เศษเมลามีน 40% และ 50% มีแนวโน้มของค่า Impact strength ที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับ เศษเมลามีน 30%

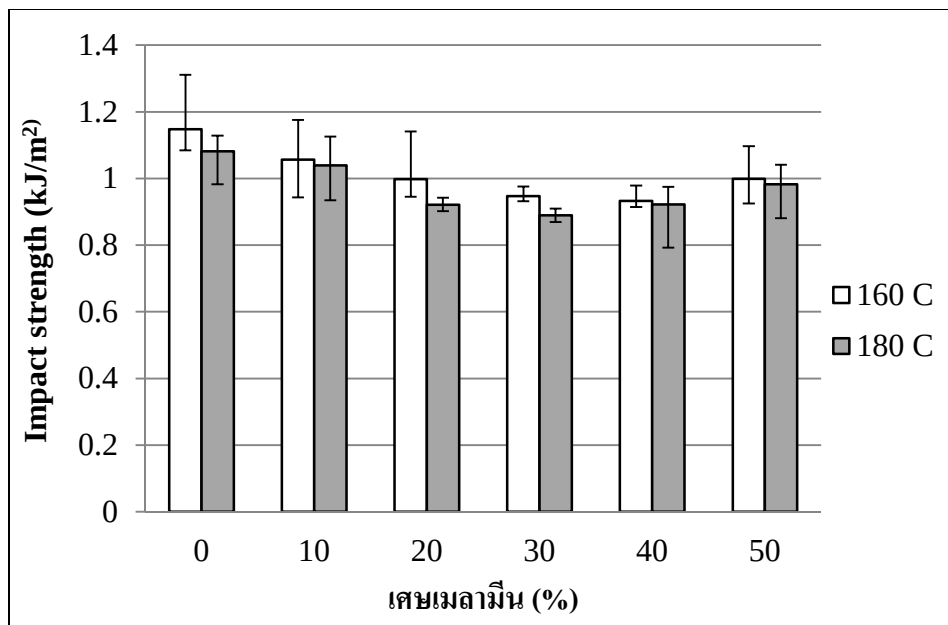
ตารางที่ 4.16 1 - Sample t Impact strength อุณหภูมิ 180°C

การเปรียบเทียบ	Variable	Mean	StDev	SE Mean	T	P	การแปลผล
30%: 40%	40% 180	0.9220	0.0873	0.0352	1.21	0.293	No Significant
40%: 50%	50% 180	0.9822	0.0763	0.0312	1.93	0.111	No Significant

เมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.16 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่า Impact strength ระหว่างเศษเมลามีน 30% และ 40% พบว่าค่า Strength ที่ได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกันกับการเปรียบเทียบค่า Strength ระหว่างเศษเมลามีน 40% และ 50%

จากผลการทดสอบแรงกระแทกของทั้งสองอุณหภูมิขึ้นรูปพบว่าแนวโน้มค่า Impact strength ลดลงเมื่อเศษเมลามีนเพิ่มขึ้น นั่นคือความเหนียวของชิ้นทดสอบลดลง เนื่องจากเมลามีนเมทริกซ์ลดลง เมลามีนเมทริกซ์ที่เชื่อมต่อดัวยอนุภาคของเศษเมลามีน และการรวมตัวกันของอนุภาคเศษเมลามีน ซึ่งจะทำให้วัสดุไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งส่งผลให้ยากต่อการส่งผ่านของแรงภายใต้แรงกระแทก ส่งผลให้การรับแรงกระแทกน้อยลงเมื่อปริมาณเศษเมลามีนเพิ่มมากขึ้น Chotirat, L., et al. (2007) ซึ่งจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะแสดงให้เห็นว่าวัสดุที่ผสมเศษเมลามีนเข้าไปแล้ว ทำให้วัสดุไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และเมื่อผสมเศษเมลามีนมากขึ้นก็ทำให้เห็นการรวมกลุ่มของเศษเมลามีนมากขึ้นด้วย

4.3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูป (การทดสอบ Impact)



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Impact strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C และ 180°C

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Impact strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน เปรียบเทียบระหว่างการขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C และ 180°C จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่เศษเมลามีน 0% 20% และ 30% ชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C มีค่า Impact strength สูงกว่าอุณหภูมิขึ้นรูป 180°C อย่างชัดเจน ส่วนอัตราส่วนอื่น ๆ นั้นให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไปวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติด้วย Two - way ANOVA เนื่องจากมีตัวแปรที่สนใจสองตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิขึ้นรูปและเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.17 จากค่า P ของทั้งสองตัวแปรพบว่ามีค่าน้อยมาก (< 0.05) ซึ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่าทั้งปัจจัยของอุณหภูมิขึ้นรูปและเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนที่ต่างกันมีผลต่อค่า Impact strength อย่างมีนัยสำคัญ และจากค่า F พบว่าอุณหภูมิขึ้นรูปมีค่า F มากที่สุดซึ่งสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยของอุณหภูมิขึ้นรูปมีผลต่อค่า Impact strength มากกว่าเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน

ตารางที่ 4.17 Two - way ANOVA Impact strength อุณหภูมิ 160°C และ 180°C

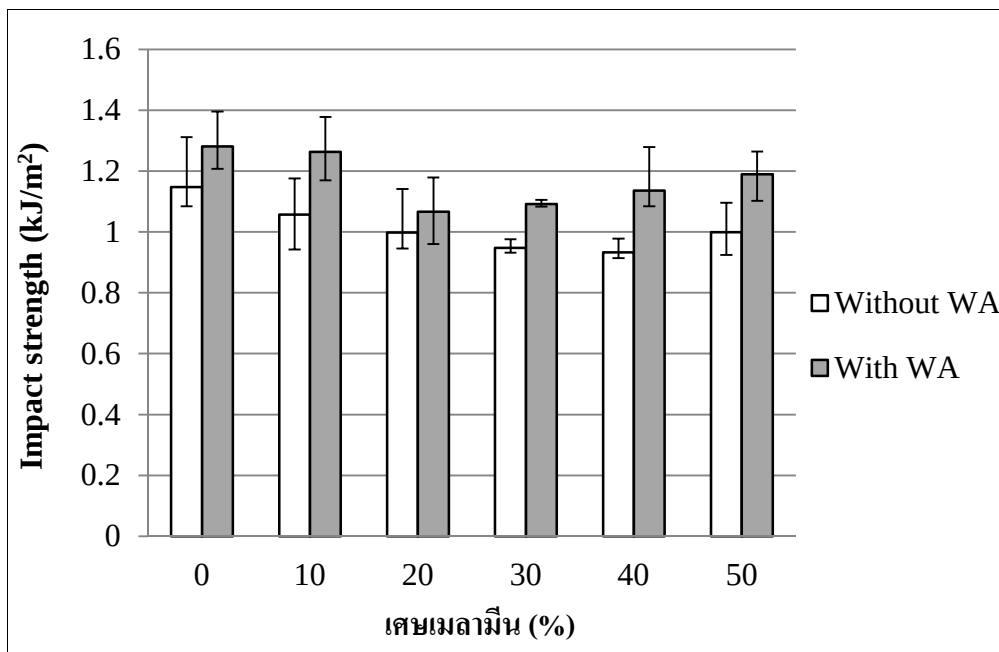
Two - way ANOVA: Impact strength versus Temp % Waste					
Source	DF	SS	MS	F	P
Temp	1	0.09497	0.0949699	8.89	0.004
% waste	5	0.34555	0.0691095	6.47	0.000
Interaction	5	0.02252	0.0045049	0.42	0.832
Error	60	0.64071	0.0106785		
Total	71	1.10375			
S = 0.1033 R-Sq = 41.95% R-Sq(adj) = 31.31%					

ในการสรุปว่าตัวปัจจัยแต่ละปัจจัยมีผลต่อค่า Impact strength ในทิศทางใดนั้น สามารถวิเคราะห์ได้โดยการทำ General Regression Analysis ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.18 จะเห็นได้จากค่า Coefficient ของทั้งปัจจัยอุณหภูมิขึ้นรูปและปัจจัยเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน มีค่าในทิศทางลบ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิการขึ้นรูปเป็น 180°C ส่งผลให้ค่า Impact strength ต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับปัจจัยเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนก็เช่นเดียวกัน คือเมื่อเศษเมลามีนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า Impact strength ที่ได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า Impact strength มากที่สุด คืออุณหภูมิขึ้นรูป

ตารางที่ 4.18 General Regression Impact strength 160°C และ 180°C

General Regression Analysis: Impact strength versus Temp % Waste				
Regression Equation				
Impact strength = 1.67572 - 0.00363184 Temp - 0.00265173 % Waste				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1.67572	0.225029	7.44668	0.000
Temp	-0.00363	0.001317	-2.75859	0.007
% Waste	-0.00265	0.000771	-3.43980	0.001

4.3.3 อิทธิพลของการดูดซึมน้ำ (การทดสอบ Impact)



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Impact strength และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน
อุณหภูมิ 160°C ชั้นทดสอบแห้งและชั้นทดสอบดูดซึมน้ำ

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Impact strength และเปอร์เซ็นต์เมลามีนที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C โดยเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบแบบไม่ดูดซึมน้ำและการทดสอบแบบดูดซึมน้ำ จากผลการทดสอบพบว่าการทดสอบแบบดูดซึมน้ำมีค่า Impact strength สูงกว่าการทดสอบแบบไม่ดูดซึมน้ำ มีเพียงเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน 20% เท่านั้นที่ค่า Impact strength ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Two-way ANOVA เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยสองปัจจัยที่มีผลต่อค่า Impact strength ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.19 พบว่าทั้งสองปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิขึ้นรูปและเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนที่ต่างกันมีผลต่อค่า Impact strength อย่างมีนัยสำคัญ และจากค่า F ทำให้สามารถระบุได้ว่าปัจจัยชนิดการทดสอบ มีผลต่อค่า Impact strength มากกว่าเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.19 Two - way ANOVA Impact strength ชั้นทดสอบแห้งและดูดซึมน้ำ

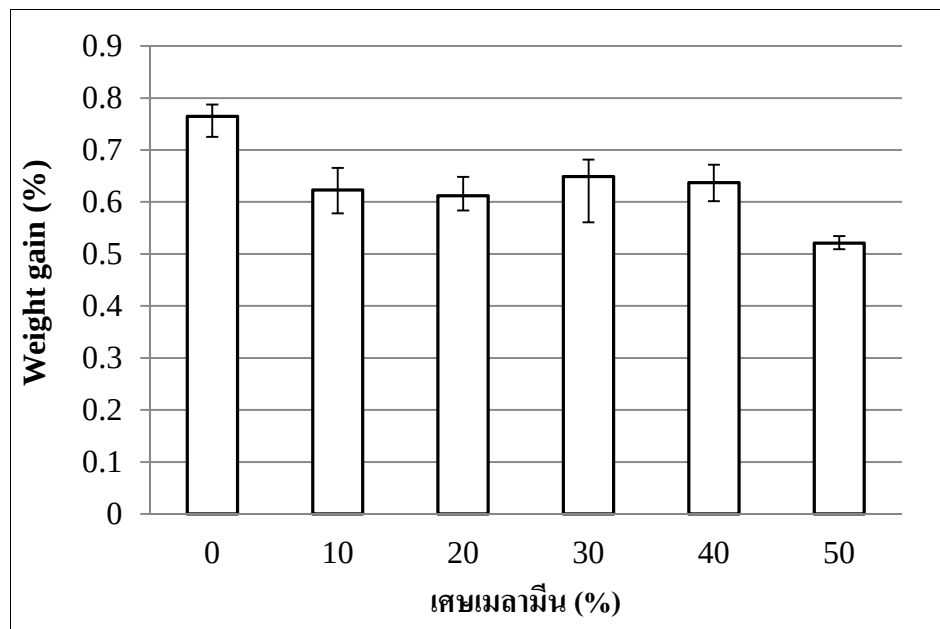
Two - way ANOVA: Impact strength versus Type of test % Waste					
Source	DF	SS	MS	F	P
Type of Test	1	0.26084	0.260839	19.50	0.000
% waste	5	0.27735	0.055470	4.15	0.003
Interaction	5	0.01867	0.003734	0.28	0.923
Error	60	0.80243	0.013374		
Total	71	1.35929			
S = 0.1156 R-Sq = 40.97% R-Sq(adj) = 30.14%					

ตารางที่ 4.20 General Regression Impact strength ชั้นทดสอบแห้งและดูดซึมน้ำ

General Regression Analysis: Impact strength versus Type of test % Waste				
Regression Equation				
Impact strength = 0.960982 + 0.120379 Type of test - 0.00212133 % Waste				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.960982	0.0495365	19.3995	0.000
Type of Test	0.120379	0.0284312	4.2340	0.000
% Waste	-0.002121	0.0008324	-2.5485	0.013

จากตารางที่ 4.20 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ General Regression Analysis เปรียบเทียบระหว่างปัจจัยชนิดการทดสอบแบบไม่ดูดซึมน้ำและดูดซึมน้ำ และปัจจัยเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน พบว่าค่า Coefficient ของชนิดการทดสอบมีทิศทางเป็นบวกมีค่า +0.120 สามารถระบุได้ว่าการทดสอบแบบดูดซึมน้ำส่งผลให้ค่า Impact strength มากกว่าการทดสอบแบบไม่ดูดซึมน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ปัจจัยเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนมีค่า Coefficient ในทิศทางลบสรุปได้ว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า Impact strength ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และปัจจัยที่มีผลต่อ Impact strength มากที่สุดคือชนิดของการทดสอบ

4.3.4 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (การทดสอบ Impact)

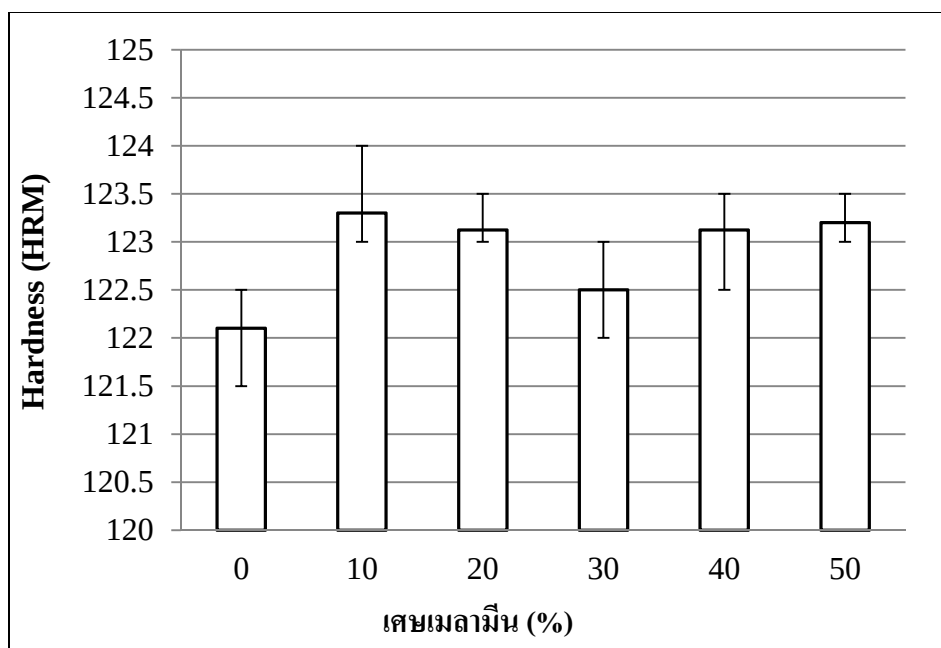


รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ
และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C

จากรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน ที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C ผลการทดสอบพบว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผสมเศษเมลามีน มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่มากที่สุด และแนวโน้มจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำลดลงเมื่อเศษเมลามีนเพิ่มขึ้น

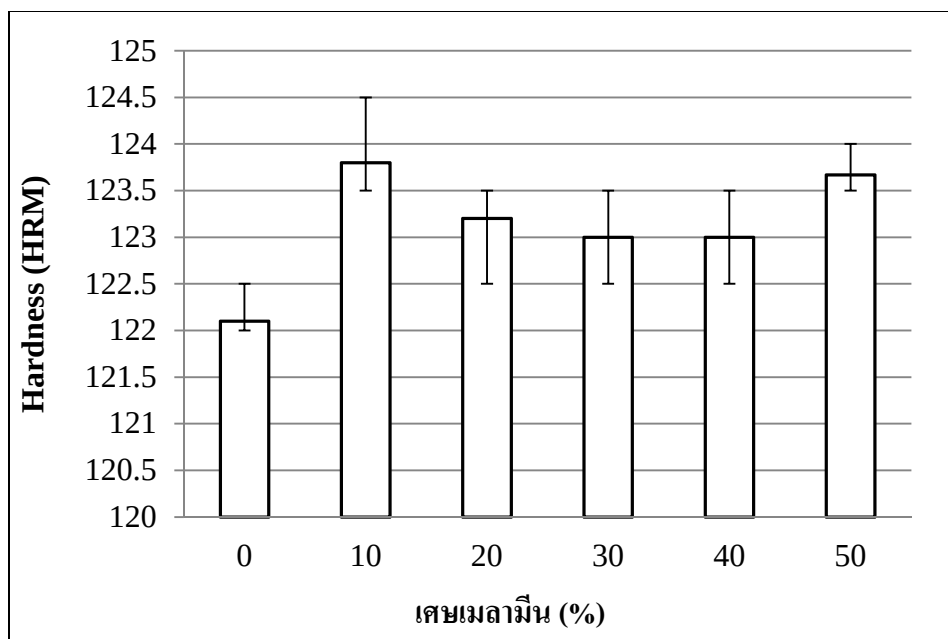
4.4 ผลจากการทดสอบความแข็ง (Hardness)

4.4.1 อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน (การทดสอบ Hardness)



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C

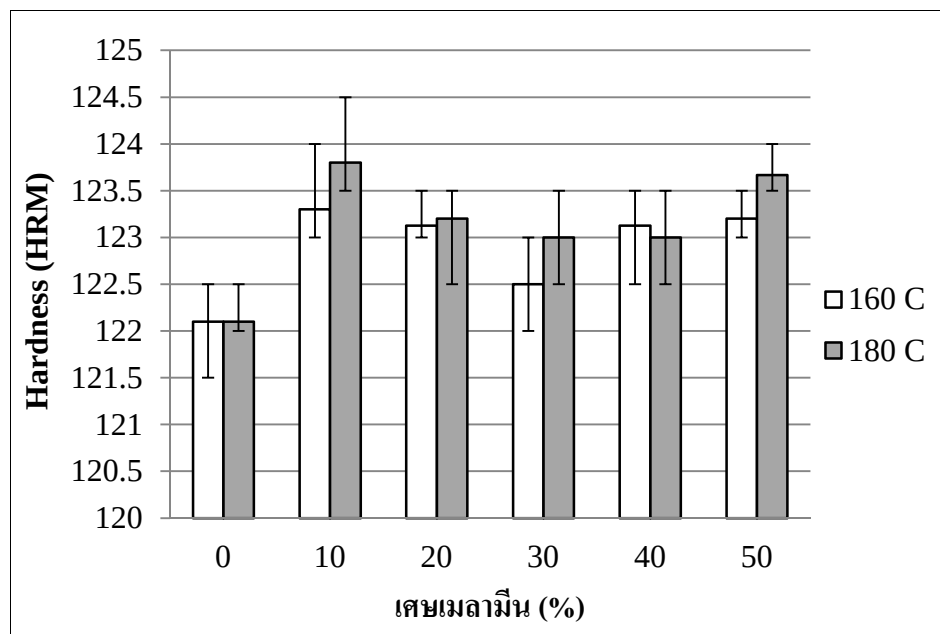
จากรูปที่ 4.17 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Hardness (HRM) และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C จากกราฟจะเห็นว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผสมเศษเมลามีน (0% เศษเมลามีน) มีค่า Hardness น้อยที่สุดและจะเห็นว่าเมื่อผสมเศษเมลามีนแล้วทำให้ความแข็งของวัสดุมากกว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผสมเศษเมลามีน



รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 180°C

จากรูปที่ 4.18 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Hardness (HRM) และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C จากกราฟจะเห็นว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผสมเศษเมลามีน (0% เศษเมลามีน) มีค่า Hardness น้อยที่สุด

4.4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูป (การทดสอบ Hardness)



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน อุณหภูมิ 160°C และ 180°C

จากรูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness (HRM) และเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน เปรียบเทียบระหว่างวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C และ 180°C จากกราฟพบว่าที่เปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนเท่ากัน Hardness ของทั้งสองอุณหภูมิไม่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสามารถยืนยันผลนี้ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 Two - way ANOVA Hardness อุณหภูมิ 160°C และ 180°C

Two - way ANOVA: Hardness versus Temp % Waste					
Source	DF	SS	MS	F	P
Temp	1	0.6	0.60000	2.72	0.106
% waste	5	15.3	3.06000	13.86	0.000
Interaction	5	1.0	0.20000	0.91	0.485
Error	48	10.6	0.22083		
Total	59	27.5			

จากตารางที่ 4.21 แสดงการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ Two-way ANOVA เพื่อวิเคราะห์ความสำคัญของสองปัจจัย คืออุณหภูมิขึ้นรูป (Temp) และ เปอร์เซ็นต์เศษเมลามีน ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยของอุณหภูมิขึ้นรูปที่ต่างกันไม่มีผลต่อค่า Hardness อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสังเกตได้จากค่า P ที่มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ สำหรับปัจจัยของเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนสามารถสรุปได้ว่าเปอร์เซ็นต์เศษเมลามีนที่ต่างกันมีผลต่อค่า Hardness อย่างมีนัยสำคัญ



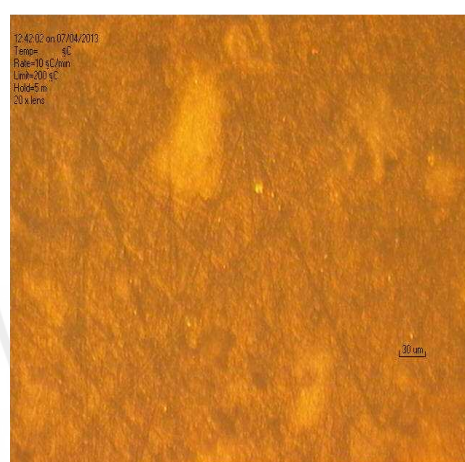
4.5 ผลจากการศึกษาสัณฐานวิทยา

จากการนำชิ้นทดสอบที่ผสมเศษเมลามีนที่อัตราส่วนต่าง ๆ ไปศึกษาทางสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscopes) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.20 วัสดุที่นำมาศึกษาเป็นวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C โดยใช้กำลังขยาย 20 เท่า

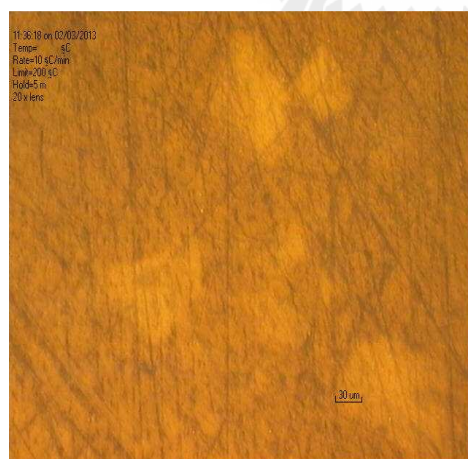
จากภาพจะพบว่าเมื่อผสมเศษเมลามีนเข้าไปจะทำให้เห็นว่าวัสดุไม่ได้รวมเป็นเนื้อเดียวกัน และเห็นการรวมตัวของอนุภาคเศษเมลามีนและการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ และเมื่อผสมเศษเมลามีนมากขึ้นก็ทำให้เห็นการรวมกลุ่มของเศษเมลามีนมากขึ้นด้วย



0 % เศษเมลามีน



20 % เศษเมลามีน



40 % เศษเมลามีน



50 % เศษเมลามีน

รูปที่ 4.20 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

บทที่ 5

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูปและอิทธิพลของการดูดซึมน้ำต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนที่ผสมด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ กัน

จากการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการนำเศษเมลามีนมารีไซเคิล โดยการนำเอาเศษเมลามีน ที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วมาบดให้ละเอียดและกรองเพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคที่ต้องการ เพื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน เพื่อนำมาทำเป็นชิ้นทดสอบในการทดสอบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ทั้งการทดสอบแรงดัด การทดสอบแรงอัด การทดสอบแรงกระแทก และการทดสอบความแข็ง อีกทั้งการทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นทดสอบและสมบัติเชิงกลของชิ้นทดสอบที่ผ่านการดูดซึมน้ำว่ามีสมบัติเปลี่ยนแปลงอย่างไร ซึ่งผลการดำเนินงานและการทดสอบต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 อิทธิพลของเศษเมลามีน

การเพิ่มปริมาณของเศษเมลามีนส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดัด (Flexural strength) ความทนแรงกระแทก (Impact strength) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามค่าความทนต่อการดัดของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีน (ทุกอัตราส่วนผสม) ยังอยู่ในช่วงของคุณสมบัติทั่วไปของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์

ในขณะที่ค่าความทนแรงอัด (Compression stress) กลับมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเศษเมลามีน จากคุณสมบัตินี้วัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนจึงมีประสิทธิภาพในการนำไปรีไซเคิลเพื่อใช้งานในลักษณะรับแรงกดอัดได้ดี

ในด้านของค่าความแข็ง (Hardness) ของวัสดุรีไซเคิล พบว่าเมื่อผสมเศษเมลามีนส่งผลให้ค่าความแข็งของวัสดุมีค่ามากกว่าวัสดุเมลามีนที่ไม่ได้ผสมเศษเมลามีน

5.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูป

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิขึ้นรูปที่ต่างกันคือ 160°C และ 180°C พบว่าวัสดุรีไซเคิลที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 180°C มีความทนต่อการดัดโค้ง สูงกว่าวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C อย่างมีนัยสำคัญ

ในขณะที่วัสดุที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C กลับมีสมบัติทางกลด้านการรับแรงกด และแรงกระแทกได้ดีกว่าวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 180°C ส่วนความแข็งของวัสดุนั้นสรุปได้ว่า อุณหภูมิขึ้นรูปที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ

5.1.3 อิทธิพลของการดูดซึมน้ำ

ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของวัสดุรีไซเคิลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำวัสดุรีไซเคิลมาทดสอบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ พบว่าวัสดุที่ผ่านการดูดซึมน้ำ หรือแช่น้ำ มีสมบัติด้านความทนต่อแรงคด ความทนต่อแรงกด และความทนต่อการกระแทกมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนมีศักยภาพในการนำไปทำเป็นวัสดุที่ต้องใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง หรือต้องใช้งานในน้ำได้ดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ใช้เศษเมลามีนบดละเอียดที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรงกรอง 100 mesh หรือขนาด 150 μm เพื่อศึกษาอิทธิพลของการดูดซึมน้ำและอุณหภูมิขึ้นรูปต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีน ด้วยการผสมเศษเมลามีนอัตราส่วนที่ต่างกัน หากจะมีการศึกษาวิจัยในเรื่องนี้ต่อไป ควรมีการศึกษาปัจจัยของขนาดเศษเมลามีนที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลด้วย เนื่องจากคาดว่าปัจจัยของขนาดเศษเมลามีนจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ต่างกัน เพื่อเป็นแนวทางในการนำวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนไปใช้ประโยชน์ที่หลากหลายมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- ดร.อุทัย มีคำ. การทดสอบวัสดุพอลิเมอร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปรีชา พหลเทพ (2535). โพลีเมอร์ **HIGH POLYMERS**. มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- Akil, H.M., Cheng, W.L., Mohd Ishak, Z.A., Abu Bakar, A., and Abd Rahman, M.A. (2009).
Water absorption study on pultruded jute fibre reinforced unsaturated polyester
composites. **Composites Science and Technology**. Vol.69, No.11-12. September 2009.
pp.1942–1948.
- Annual Book of ASTM Standard, 2004. **Standard Test Methods for Determining the Izod
Pendulum Impact Resistance of Plastics**. ASTM D256-10, Vol.8.01. pp.1 - 20.
- Annual Book of ASTM Standards, (1998). **Standard Test Method for Water Absorption of
Plastics**. ASTM D570, Vol.8.01. pp.34 - 36.
- Annual Book of ASTM Standard, (1998). **Standard Test Method for Compressive Properties
of Rigid Plastics**, ASTM D695, Vol.8.01. pp.77 - 83.
- Annual Book of ASTM Standard, (1998). **Standard Test Methods for Flexural Properties of
Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**. ASTM
D790, Vol.8.01. pp.145 - 152.
- Chotirat, L., Chaochanchaikul, K., and Sombatsompop, N. (2007). On adhesion mechanisms and
interfacial strength in acrylonitrile–butadiene–styrene/wood sawdust composites.
International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol.27, No.8. December 2007.
pp.669 - 678.
- Dhakal, H.N., Zhang, Z.Y., and Richardson, M.O.W. (2007). Effect of water absorption on the
mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites.
Composites Science and Technology, Vol.67, No.7-8. June 2007. pp.1674 - 1683.
- Goodman, S.W. (1998). **Handbook of Thermoset Plastics (2nd Edition)**. Raytheon Systems
Company EI Segundo, California.
- Huang, G., and Sun, H.X. (2007). Effect of water absorption on the mechanical properties of
glass/polyester composites. **Materials and Design**, Vol.28, No.5. pp.1647 - 1650.

- Panyakapo, P., and Panyakapo, M. (2008). Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete. **Waste Management**, Vol.28, No.9. pp.1581 - 1588.
- Shah, Vishu. (1998). **Handbook of plastics testing technology (2nd Edition)**. John Wiley & Sons, Canada.
- Willis, M.R., and Masters, I. (2003). The effect of filler loading and process route on the three - point bend performance of waste based composites. **Composite Structures**, Vol.62, pp.475-479.





ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

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

Chamniprasart, K., Siwadamrongpong, S., Wonglane, K., and Mahai, M. (2013). **Influence of forming temperature and waste melamine content on flexural strength of recycled material from waste melamine.** South East Asian Technical University Consortium (SEATUC 2013). 4-6 March. Institut Teknologi Bandung, Indonesia.



INFLUENCE OF WATER ABSORPTION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF RECYCLED MATERIALS FROM WASTE MELAMINE

Somsak Siwadamrongpong^{1*}, Krittiya Wonglane², Metinee Mahai²
^{1*}School of Manufacturing Engineering. ²School of Mechanical Engineering.
 Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.
 111 University Avenue, Muang District, Nakhonratchasima 30000, Thailand.
^{1*}: E-mail: somsaksi@sut.ac.th.Tel: 0-4422-4236, Fax: 0-4422-4613

Abstract

Melamine formaldehyde resin is one of the most common thermosetting plastics used for table wares. Its best known properties are; strength and hardness and also high thermal resistance. In the manufacturing process, waste Melamine cannot be reformed or reused. It will be more environmentally friendly if the waste Melamine could be reused or recycled. Therefore, this study was aimed at investigating water absorption of the recycled Melamine and its mechanical properties. The recycled Melamine was formed at various mixing ratios. The water absorption, 3-Point Bending and Compression test were carried out. It was found that the recycled Melamine samples showed higher water absorption level than virgin Melamine. It was also found that the flexural strength and modulus of the water absorbed samples was higher than in the dried samples. In contrast, the compression strength and modulus of water absorbed samples was slightly lower than the dried samples. However, at the lower mixing of 20% waste Melamine, the compression strength of recycled Melamine and virgin Melamine was statistically equivalent. Therefore, it is assumed that the recycled Melamine could be usable in many applications.

1. Introduction

Melamine formaldehyde resin is one of the most common thermosetting plastics [1] used for kitchenware such as dishes, jars, cups, spoons etc. Melamine $C_3H_6N_6$ (1,3,5-triazine-2,4,6-triamine) was used with formaldehyde as a raw materials to form products for more than 60 years ago. [5] The Melamine product industry was began in Thailand in 1973. Its raw materials consisted of 3 major components;

Melamine crystal, alpha cellulose and formaldehyde.

It is well-known that Melamine has excellent hardness and high thermal resistance properties. [6] The general properties of cellulose filled Melamine formaldehyde (MF) were shown in Table 1. In the manufacturing process, Melamine formaldehyde resin was compressed and heated simultaneously to form into the desired shape by compression molding. After its formation the Melamine product was transferred to the grinding and surface finishing machine and when finished it was packaged. During the formation and grinding processes, scraps and waste Melamine were generated cannot be reformed or reused. The waste disposal might be done by using landfills or burning in an incinerator [7] that leads to environmental problems. Therefore, it will be more environmentally friendly if the waste Melamine could be reused or recycled. However, the recycled material should be tested for stability, its effects on human health and the environment such as water dissolution and water absorption. Moreover, mechanical properties of the recycled Melamine are also important due to safety of use for desired application. Therefore, this study was aimed at investigating the water absorption of recycled Melamine and its mechanical properties.

Table 1. General properties of melamine

Properties	
Molding Temperature[10]	149-204 °C
Specific Gravity	1.47-1.52
Tensile Strength	34-90 MPa
Flexural Strength	62-110 MPa
Compression Strength	227-310 MPa
Hardness	M115-M125
Water absorption 24 hr	0.1-0.8 %

2. Experimental Procedures

2.1 Materials

Waste Melamine was pound into particles and sieved with a 150 μm sieve. Industrial grade Melamine powder (ready mixed with cellulose and formaldehyde), virgin Melamine, was used as a binding material. The virgin Melamine was mixed with waste Melamine powder at a ratio of virgin:waste 70:30, 80:20, 90:10 and 100:0 by mass. [9] The mixed substance was formed by compression molding, heated at 160° C, pressure 200 bar for 150 seconds.

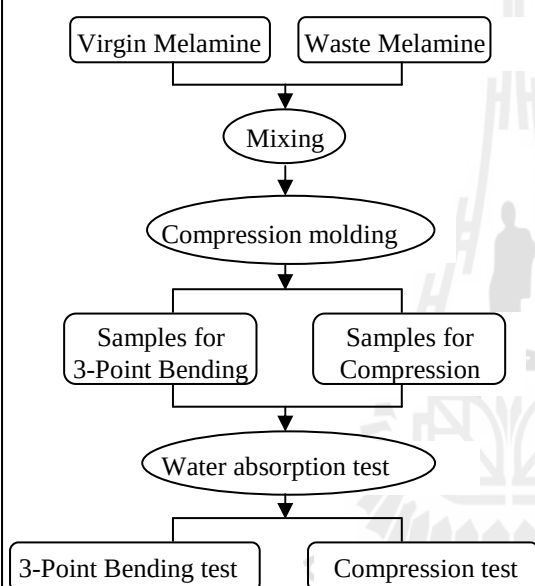


Fig. 1. Process flow chart

2.2 Testing

2.2.1 Water Absorption Test

The water absorption test followed the standard ASTM D570. [2] The sample were dried in an oven at a temperature of 50±3°C for 24 hours and cooled in desiccators at room temperature for 1 hour. The dried samples were weighted with analytical balance (4 digits) and dipped into a bottle of distilled water. The samples were removed from the water after periods of 24 and 48 hours, then all surface were wiped with a clean dry cloth, and then immediately reweighed.

The samples for the 3-Point Bending and Compression test with different percentages of waste and virgin Melamine were measured at 5.7X5.8X100 mm³ and 5.9X6.0X12.1 mm³ respectively, 5 samples were made of each mixing condition. All samples were immersed for 24 and 48 hours in distilled water.

The water absorption was calculated following the equation (1)

$$\% \text{ Water absorption} = \left(\frac{P_W - P_D}{P_D} \right) \times 100 \quad (1)$$

Where P_W = weight after absorption
 P_D = weight before absorption

2.2.2 3-Point Bending Test

The test followed the ASTM D790 standard [3]. The samples were cut into a rectangular bar shape for testing, 5.7X5.8X100 mm³, using a mechanical saw and polished with sand paper #600, 1000, 1500 and 2000 respectively. 5 samples for each substance were tested, using the Universal Testing Machine (UTM) with 5 kN load cell, support span 90 mm maintaining a span to depth ratio of 16:1 and a speed of 2.0 mm/min. [8]

2.2.3 Compression Test

The compression test was followed the ASTM D695 standard [4]. The samples were cut into rectangular bar shapes, 5.9X6.0X12.1 mm³, using a mechanical saw and polished with sand paper #600, 1000, 1500 and 2000 respectively. 5 samples of each substance were tested by using the Universal Testing Machine (UTM) with 50 kN load cell and a speed of 1.3 mm/min.

3. Results and Discussion

3.1 Water absorption

Figure 2 and 3 show the water absorption of the recycled Melamine. It was found that the sample of virgin Melamine showed the lowest water absorption. Whereas the other 3 groups of samples showed higher, or levels of water absorption than the virgin Melamine. Due to the samples having been immersed in water, the hydrophilic group of fibers in the cellulose attracted water molecules [12] and water molecules penetrated into voids or cracks in the samples. The higher level of water absorption of the recycled Melamine could be considered to relate to the porosity of the recycled Melamine, because the waste Melamine was solid, which could not be melted and could not be combined when merged with the virgin Melamine. Therefore the recycled Melamine had porosity greater than virgin Melamine. When the immersion time increased we found that water absorption for each condition increased.

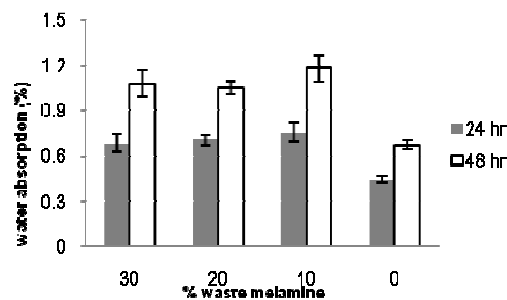


Fig2. Water absorption of Bending sample

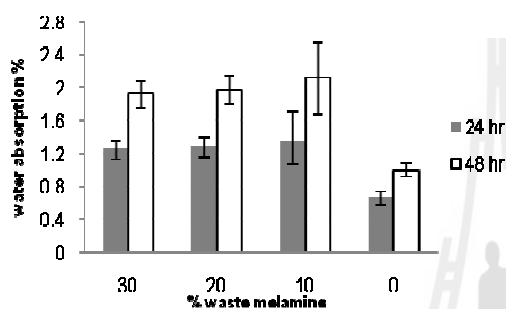


Fig3. Water absorption of Compression sample

Table 2 shows water absorption ratio of the surface area, over a 48 hours immersion time. It was found that Bending Test samples, the surface areas had water absorption ratios higher than others. Although the surface area of both samples were quite similar, and only the length differed. It could be considered that the water absorption of the larger samples was higher than the small samples.

Table 2 Water absorption per surface area

% melamine	Bending test		Compression test	
	Water absorption(g)	Water absorption/ surface area	Water absorption (g)	Water absorption/ surface area
0	0.0325	0.00101	0.01110	0.00030
10	0.0578	0.00185	0.01206	0.00037
20	0.0541	0.00147	0.01300	0.00035
30	0.0552	0.00166	0.01292	0.00034

3.2 Flexural properties

The flexural strength and flexural modulus of the 48 hours dipping sample, shown in Fig. 4 and 5, respectively, compared to reference sample (no water absorption). It was found that the flexural strength and modulus of the water absorbed samples showed statistically higher than the reference samples. These results could be due to high uptake of water, which caused swelling of the fibers in the cellulose, and that filled in the voids and cracks of the

recycled Melamine, leading to improved flexural properties. It was found that the flexural strength and modulus of reference samples slightly decreased when increasing the percentage of waste to virgin Melamine.

On the other hand, the strength and modulus of the water absorbed samples seemed not to be significantly different from the waste Melamine containing samples.

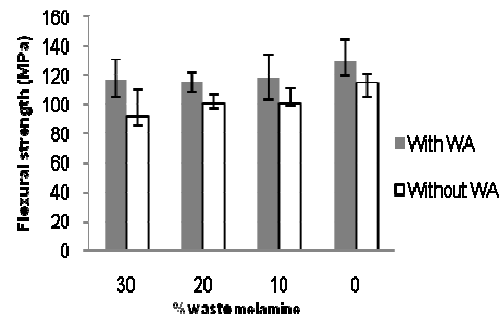


Fig4. Flexural strength of recycled Melamine

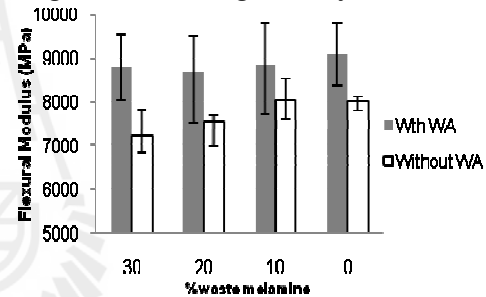


Fig5. Flexural modulus of recycled Melamine

3.3 Compression properties

The compression strength and modulus of the 48 hours dipping sample shown in Fig. 6 and 7, respectively, compared to reference sample (no water absorption). It was found that the strength of dried recycled Melamine containing less than 20% waste Melamine showed the same strength as the sample made by virgin Melamine. It was also found that the strength and modulus of water absorbed samples is slightly lower than the reference samples. It could be discussed that the swelling of the fibers in the Melamine might lower the rigidity and therefore be more flexible than dried Melamine. However, the water absorbed samples showed the same level of compression strength whether containing waste Melamine or pure virgin Melamine. It can be assumed that the recycled Melamine might be useable in some applications.

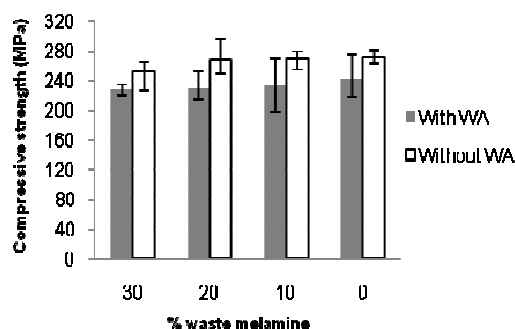


Fig. 6. Compression strength of recycled Melamine

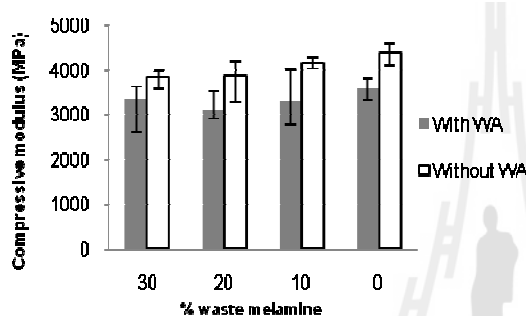


Fig. 7. Compressive modulus of recycled Melamine

4. Conclusions

The virgin Melamine and recycled Melamine were formed at various mixing ratios. The water absorption, 3-Point Bending and Compression test were all carried out. It was found that the recycled Melamine samples showed higher water absorption levels than the virgin Melamine. It was also found that the flexural strength and modulus of the water absorbed samples, were statistically higher in the dried samples. In contrast, the strength and modulus of water absorbed samples is slightly lower than the dried samples. However, at lower than 20% waste Melamine mixing, the compression strength of recycled Melamine and virgin Melamine were statistically equal. Therefore, it is assumed that the recycled Melamine could be usable in some applications. However, other properties of the recycled Melamine should be further investigated such as porosity, water dissolution, thermal properties etc.

Acknowledgments

Thank you to Srithai Superware PLC Ltd. for testing materials and your cooperation. Testing equipment supplied by Suranaree University of Technology.

References

- [1] R.J.Ehrig., Plastic Recycling Product and Processes, Carl Hanser Verlag New York Barcelona 1992.
- [2] Annual Book of ASTM Standard, 2004. Standard Test Method for Water Absorption of Plastics, ASTM D570.
- [3] Annual Book of ASTM Standard, 2004. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM D790.
- [4] Annual Book of ASTM Standard, 2004. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, ASTM D695.
- [5] W. Gindl, F. Zargar-Yaghubi, R. Wimmer., Impregnation of softwood cell walls with melamine-formaldehyde resin, *Bioresource Technology* 87 (2003), pp.325–330.
- [6] Phaiboon Panyakapo, Mallika Panyakapo., Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete, *Waste Management* 28 (2008), pp.1581–1588.
- [7] S.J. Pickering., Recycling technologies for thermoset composite materials—current status, *Composites: Part A* 37 (2006), pp.1206–1215.
- [8] H.N. Dhakal, Z.Y. Zhang, M.O.W. Richardson., Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fiber reinforced unsaturated polyester composites, *Composites Science and Technology* 67 (2007), pp.1674–1683.
- [9] Metinee Mahai, Somsak Siwadamrong pong., Study on mechanical properties of recycle material from waste melamine. Suranaree University of Technology.
- [10] Pichit Liampipat., *Plastics* 13thed, Bangkok, 1996
- [11] Sidney H.Goodman., *Handbook of Thermo-set Plastics* Second Edition, Noyes Publications.
- [12] Gu Huang, Hongxia Sun.Effect of water absorption on the mechanical properties of glass/polyester composites. *Materials and Design* 28 (2007), pp.1647–1650.

INFLUENCE OF FORMING TEMPERATURE AND WASTE MELAMINE CONTENT ON FLEXURAL STRENGTH OF RECYCLED MATERIAL FROM WASTE MELAMINE

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

^{1*}School of Manufacturing Engineering, ²School of Mechanical Engineering,
Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.

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

^{1*}; E-mail: somsaksi@sut.ac.th. Tel: 0-4422-4566, Fax: 0-4422-4494

Abstract

This paper is investigated on the influence of forming temperature and waste melamine content on flexural strength of recycled material from waste melamine. Recycled melamine was scraped from manufacturing process of the melamine product, which cannot be reformed or reused. Due to melamine was a thermosetting plastic which was a three dimensional network of bonds (cross linking). Waste melamine was ground into powder with particles size 1-60 micron. The ground waste melamine was used to admix with virgin melamine at 10:90 to 50:50 ratios by mass. The virgin melamine was used as binder materials. Specimens were formed by compression molding machine at 160 and 180 degree Celsius. The experimental results revealed that the virgin melamine behaves the highest flexural strength and the flexural strength slightly decreases by increasing waste melamine content. While forming temperature seem to be no significant effect to the flexural strength of the recycled melamine.

Keyword: Melamine, Recycled, Flexural strength, Compression forming, Thermosetting

1. INTRODUCTION

The melamine formaldehyde (MF) resin is one of thermosetting plastics made from melamine and formaldehyde by polymerization. Thermosetting materials are generally excellent hardness and high thermal resistance. (Phaiboon & Mallika, 2008)

The Melamine formaldehyde resin is often used in the tableware manufacturing because of low cost, relatively light weight and unbreakable characteristics (Chao-Yi Chien, et al., 2011).

The melamine products were found for 60 years ago (W. Gindl, et al., 2003). Then Thailand melamine product industry was begun in 1973. Raw materials consisted of 3 major components; melamine crystal, alpha cellulose and formaldehyde.

Melamine formaldehyde resin was not able to melt after heat and pressure forming process due to three dimensional networks (cross-linking). The general properties of the Melamine formaldehyde adding cellulose were shown in Table 1.

In the melamine forming process, the melamine was compressed and heated simultaneously to desired shape by compression molding machine with suitable pressure, temperature and time. After formation the melamine product was transferred to the grinding and surface finishing. During these processes, scraps and waste melamine were generated, which cannot be reformed and recycled. Therefore, the disposal is usually done by landfills or burning (S.J. Pickering, 2006) that leads to the environmental problems and wastage cost for disposal. It will be more environmentally friendly if the melamine can be recycled.

In literature review, Hasan S. Dweil, Mohamed M. Ziara & Mohammed S. Hadidoun (2008) have studied to improve properties of structural concrete with ground melamine. The thermosetting plastic waste was used as a sand replacement. The results indicated that replacing sand with the waste melamine improves the mechanical and thermal characteristics of light weight concrete.

In the same way, Phaiboon and Mallika (2008) studied the utilization of recycled melamine as an admixture in the mix proportion of lightweight concrete. As the result, the recycled melamine was able to reduce the concrete density due to low specific gravity of melamine. Although the compressive strength of the lightweight concrete tends to decrease, it was acceptable for some type of lightweight concrete.

In this study the waste melamine was used as the admixture to form specimens at various forming temperature and waste melamine

content. The specimens were tested the flexural strength.

Thus, this study was aimed to investigate the influence of forming temperature and waste melamine content on flexural strength of recycled material from waste melamine.

Table1 General properties of melamine formaldehyde resin (Sidney H.Goodman)

Properties	
Molding Temperature[10]	149-204 °C
Specific Gravity	1.47-1.52
Tensile Strength	34-90 MPa
Flexural Strength	62-110 MPa
Compression Strength	227-310 MPa
Hardness	M115-M125
Water absorption 24 hr (1/6 inch thick specimen)	0.1-0.8 %

2. EXPERIMENT

2.1 Materials

- Waste melamine was scraped from forming process which ground into powder by ball mill and sieve shakers with particles size about 1-60 micron.

- Virgin melamine is industrial grade melamine powder ME6033 (ready mixed with cellulose and formaldehyde). the virgin melamine was used as a binding material. The experimental procedure was shown in Fig 1.

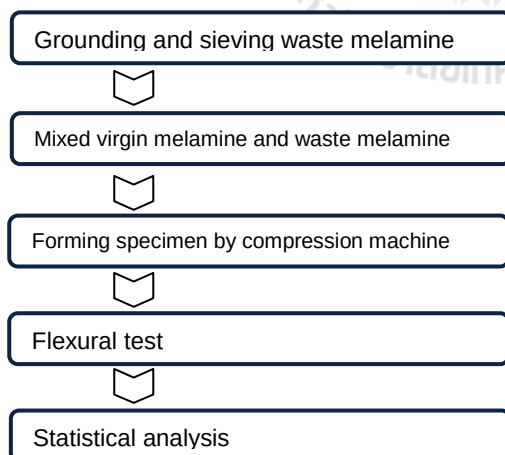


Fig. 1 Process flow chart

2.2 Mixing

Mixing ratio of virgin Melamine and waste melamine were 10:90 to 50:50 by mass, by ball mill with batch size 300 grams for 20 minutes.

2.3 Preparation of test specimens

The mixed powder between the virgin melamine and the waste melamine was formed by compression molding machine, LONG CHANG 100 TON, Srithai Superware Public Co.,Ltd, heated at 160° and 180°C, compression pressure 100 kg/cm² for 65 seconds. The melamine was formed in plate shape, then cut into a specimen shape by radius saw.

2.4 Testing

2.4.2 3-Point Bending Test

The samples were cut to a rectangular bar for testing by using a radius saw. The samples were 2 mm-thickness, 13 mm-width and 63 mm-long. The specimens were polished all edge with sand paper #600, 1000, and 1500 respectively. Ten samples of each mixing ratio were tested, using the Universal Testing Machine (UTM) INSTRON with 5 KN load cell, support span 32 mm maintaining a span to depth ratio of 16:1 and a pressing speed of 2.0 mm/min (H.N. Dhakal, et al., 2007).

2.5 Statistical analysis method

Analysis of variance (ANOVA)

Analysis Of Variance (ANOVA) with significant level (α) 5% was employed to analyze the experimental data. The analysis was carried out using Minitab.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Three point bending test

3.1.1 Flexural strength of 160°C forming temperature

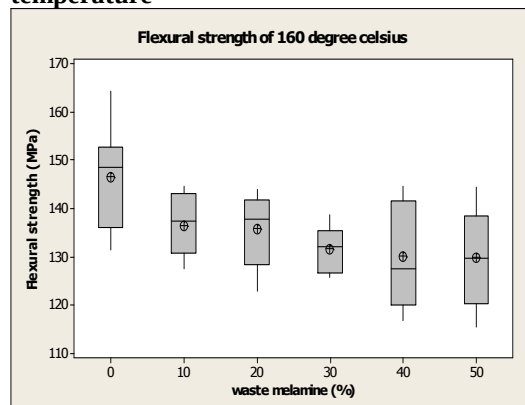


Fig. 2 Flexural strength of 160°C forming temperature.

The flexural strength of 160 degree Celsius forming temperature was shown in Fig. 2. It was found that the flexural strength of virgin melamine (0% waste Melamine) showed the highest value of flexural strength. The flexural strength was found to slightly decrease by 7.43%, 7.98%, 11.47%, 12.75% and 15.89% with increasing the percentage of waste melamine from 10-50%.

3.1.2 Flexural strength of 180°C forming temp

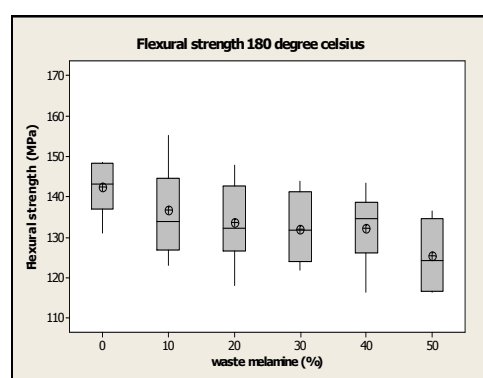


Fig. 3 Flexural strength of 180°C forming temperature

The flexural strength of 180 degree Celsius forming temperature was shown in Fig. 2. It was found that the same trend of flexural strength as 160 degree Celsius was exhibited. Moreover, the flexural strength of specimen formed at 180 degree Celsius was slightly lower than that of 160 degree Celsius. The comparison result was shown in Fig. 3. However, it was statistically no significant different between 160 and 180 degree Celsius forming temperature.

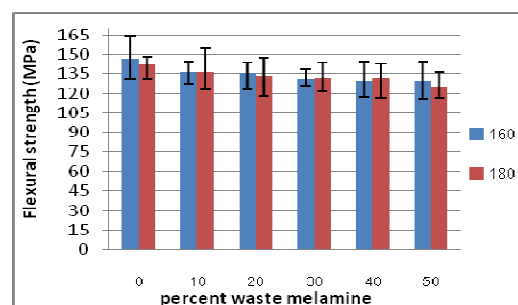


Fig. 3 Flexural strength of 160°C compared to 180°C forming temperature

3.2 Statistical analysis method: ANOVA

The 2-way ANOVA analysis result was shown below.

Source	DF	SS	MS	F	P
Temp	1	27.4	27	0.32	0.575
%waste	5	4227	845	9.77	0.000
Interac-tion	5	130	26	0.30	0.911
Error	108	9349	86		
Total	119	13735			

Fig. 4 2-way ANOVA (Minitab software)

From the p-value, only percent of waste melamine was found to significantly affect the flexural strength of the specimen. The F factor results were also agreed with the p-value and results shown in Fig. 4.

4. CONCLUSION

The recycled melamine was formed by compression molding into specimen shape. The virgin melamine was used as binder material at various mixing ratio and various forming temperature by compression molding machine. The three point bending was carried out and statistical analysis (2-way ANOVA) was employed to analyze the tested data. It was found that the percentage of waste melamine was the main effect that affected the flexural strength. The virgin melamine (0% waste melamine) showed the highest flexural strength and the flexural strength decrease with increasing of waste melamine percentage. The 2-way ANOVA showed that forming temperature had no significant effect to the flexural strength of the recycled material from waste melamine.

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

H.N. Dhakal, Z.Y. Zhang, M.O.W. Richardson., Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fiber reinforced unsaturated polyester composites, *Composites Science and Technology* 67 (2007), pp.1674–1683.

W. Gindl, F. Zargar-Yaghubi, R. Wimmer., Impregnation of softwood cell walls with melamine-formaldehyde resin, *Bioresource Technology* 87 (2003), pp.325–330.

Phaiboon Panyakapo, Mallika Panyakapo., Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete, *Waste Management* 28 (2008), pp.1581–1588.

S.J. Pickering., Recycling technologies for thermoset composite materials—current status, *Composites: Part A* 37 (2006), pp.1206–1215.

Sidney H.Goodman., *Handbook of Thermoset Plastics* Second Edition, Noyes Publications.

Hasan S. Dweil, Mohamed M. Ziara& Mohammed S. Hadidoun., Enhancing Concrete Strength and Thermal Insulation Using Thermoset Plastic Waste, *International Journal of Polymeric Materials*, 57:635–656,2008

Chao-Yi Chien, Chia-Fang Wu, Chia-Chu Liu, Bai-Hsiun Chen, Shu-Pin Huang, Yii-Her Chou, Ai-Wen Chang, Hei-Hwa Lee, Chih-Hong Pan, Wen-Jeng Wu, Jung-Tsung Shen, Mei-Yu Chang, Chun-Hsiung Huang, Jentaie Shiea, Tusty-Jiuan Hsiehi, Ming-Tsang Wu., High melamine migration in daily-use melamine-made tableware, *Journal of Hazardous Materials* 188 (2011) 350–356

ประวัติผู้เขียน

นางสาวกฤติยา วงศ์เลน เกิดเมื่อวันที่ 4 สิงหาคม พ.ศ. 2530 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนวัดนันทน์ จังหวัดระยอง ชั้นประถมศึกษาปีที่ 5 – 6 ที่โรงเรียนบ้านเกาะหัวช้าง จังหวัดลำปาง ชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนแม่พริกวิทยา จังหวัดลำปาง ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 ที่โรงเรียนบางปะกง บวรวิทยายน จังหวัดฉะเชิงเทรา และได้สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี 2552 ในระหว่างการศึกษาในระดับปริญญาตรีได้สหกิจศึกษา(ฝึกงาน) ณ บริษัทซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ในตำแหน่งผู้ช่วยวิศวกร ในแผนก Tooling Development & Replications เป็นเวลา 4 เดือน

ปี พ.ศ. 2553 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในระหว่างการศึกษาได้ร่วมวิจัยในโครงการเสริมสร้างศักยภาพการบริหารการผลิตโรงงานเมลามีนโคราช ในภารกิจ โครงการลดการใช้พลังงาน (ศึกษาปริมาณและวิธีการซึ่งที่เหมาะสม) โดยความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและบริษัท ศรีไทย ซุปเปอร์แวร์ จำกัด มหาชน นอกจากนี้ยังเป็นผู้สอนในรายวิชาดังนี้

- 1) ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 2 3
- 2) ปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิต 3
- 3) ปฏิบัติการวิศวกรรมยานยนต์ 3
- 4) กระบวนการแปรรูปและการเชื่อม
- 5) การเขียนแบบวิศวกรรม 1
- 6) สถิติและวิธีเชิงตัวเลข

ในระหว่างการศึกษาปริญญาโทได้นำเสนอผลงานทางวิชาการ ตามที่ได้นำเสนอแสดงในภาคผนวก ก