

การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่าง  
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน

นางสาวจันทร์จิรา อภิรักษ์เมธาวงศ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2557

**MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER  
COMPOSITES BETWEEN HDPE AND WASTE FROM  
MELAMINE WARE MANUFACTURING PROCESSES**

**Janjira Aphirakmethawong**



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

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2014**

การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง  
และเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

\_\_\_\_\_

(อ. ดร.วรรณวนัช บุ่งสุด)

ประธานกรรมการ

\_\_\_\_\_

(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

\_\_\_\_\_

(อ. ดร.กัญชลา สุตตาชาติ)

กรรมการ

\_\_\_\_\_

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

\_\_\_\_\_

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

จันทร์จิรา อภิกฤษ์เมธาวงศ์ : การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง  
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน  
(MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITES BETWEEN HDPE  
AND WASTE FROM MELAMINE WARE MANUFACTURING PROCESSES)

อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ สีวดำรงพงศ์, 110 หน้า.

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและมีการพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติอยู่เสมอ แนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ คือ การทำพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยการเติมสารตัวเติมเพื่อเสริมแรงซึ่งสารตัวเติมที่ใช้มักจะต้องแข็งแรงสูงกว่าส่วนเมทริกซ์ เช่น เศษที่ได้จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน ซึ่งเศษที่เกิดขึ้นนี้ไม่สามารถหลอมและขึ้นรูปใช้งานได้อีก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะทำพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้เศษที่ได้จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนเป็นสารตัวเติม งานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกได้ 2 ส่วน ส่วนแรกคือการศึกษาผลกระทบของชนิดเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนสองชนิด คือ เศษแบบฝุ่น และแบบครีป ต่อสมบัติเชิงกล ผลการทดลองพบว่าการเติมเศษแบบฝุ่นและแบบครีปส่งผลต่อสมบัติเชิงกลโดยรวมไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ให้ผลแตกต่างกัน กล่าวคือ การเติมเศษแบบฝุ่นค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเติมเศษแบบครีปจะทำให้ค่าการยืดตัวต่ำลง ดังนั้นจึงเลือกใช้เศษแบบฝุ่นในการศึกษาต่อในส่วนที่สอง ซึ่งในส่วนที่สองจะศึกษาผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคของสารตัวเติมที่ใช้ และการเติมสารเชื่อมโยง ต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน โดยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2 ระดับ ผลการทดสอบพบว่าสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นส่งผลต่อสมบัติเชิงกลโดยรวมสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยอื่น ๆ นอกจากนี้พบว่าการเติมสารเชื่อมโยงส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมลดต่ำลง แต่สารเชื่อมโยงนี้มีอิทธิพลร่วมกับปัจจัยอื่น ๆ ในขณะที่ขนาดอนุภาคส่งผลต่อสมบัติเชิงกลต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามการใช้เศษมาผสมในพอลิเมอร์คอมโพสิตส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากงานวิจัยนี้สรุปว่าเศษที่เกิดขึ้นสามารถรีไซเคิลได้ โดยนำไปใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ที่ไม่สัมผัสอาหาร เช่น ถังขยะ ซึ่งสามารถเติมเศษได้ถึง 20%

สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

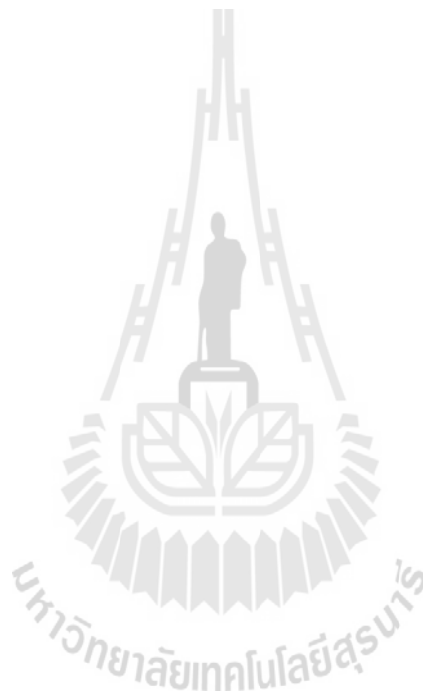
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

JANJIRA APHIRAKMETHAWONG : MECHANICAL PROPERTIES OF  
POLYMER COMPOSITES BETWEEN HDPE AND WASTE FROM  
MELAMINE WARE MANUFACTURING PROCESSES. THESIS  
ADVISOR : SOMSAK SIWADAMRONGPONG, Ph.D., 110 PP.

MECHANICAL PROPERTIES/WASTE MELAMINE/PARTICLEREINFORCED/  
POLYMER COMPOSITES/COMPOSITE MATERIALS

High density polyethylene (HDPE) is a synthetic material which popular and widely use. However, HDPE still need some development to improve properties and reduce manufacturing cost. Interesting way to improve properties is development of polymer composites. In melamine tableware manufacturing processes, waste melamine was generated and it is cannot reformed or reused. Thus, it was needed to dispose by landfills or incineration that leading to degradation of environment and cost for disposal. Therefore, the aim of this research was to recycle waste melamine by using as filler in polymer composites. This research can be separated into 2 sections. The first section was studying the effect of 2 waste melamine types on mechanical properties. The 2 types of waste melamine were flash (WMF) and powder (PWMF). The results show that, mechanical properties which affected from the two types have no significant differences except elongation. The elongation of powder type was higher than that of flash type. Therefore, waste melamine powder type was selected to carrying out in the second section. The second section was study the influence of filler content, particle size and adding of compatibilizers on the properties of HDPE/PWMF composites using  $2^k$  Factorial Design technique. It was found that filler content played the most important factor to mechanical properties of

HDPE/PWMP composites. Furthermore, adding of compatibilizers was deteriorated the overall properties. Particle size shows the lowest effect to mechanical properties. However, using of waste melamine as filler for polymer composites could improve overall properties comparing with reference high density polyethylene. This study could be concluded that the waste melamine might be possible to recycle by using as filler for the product which not related with food such as bin, traffic cone and could adding filler content up to 20wt%.



School of Manufacturing Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทั้งด้านวิชาการ และการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มอบโอกาสทางการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา อีกทั้งยังให้ความรู้ด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย

อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวคำรังพงศ์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งประสาทวิชาความรู้ ให้คำแนะนำ ทั้งในด้านวิชาการ การดำเนินชีวิต อีกทั้งยังให้กำลังใจจนสามารถผ่านอุปสรรคต่าง ๆ ลุล่วงมาได้ด้วยดี นอกจากนี้ยังชี้แนะ และมอบโอกาสที่ดี ๆ ให้เสมอมา

บุคลากรประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมพอลิเมอร์ และบุคลากรประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ตลอดจนบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้อำนวยความสะดวกในการทำวิจัยทั้งทางด้านเอกสาร ข้อมูล และอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย

บริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด มหาชน บริษัท ดูปองท์ (ประเทศไทย) จำกัด และ บริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุในการทำวิจัย รวมทั้งข้อมูลที่จำเป็นต่องานวิจัย ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ คุณงามความดีอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพยิ่ง และคณาจารย์ผู้ประสาทวิชาความรู้ ตลอดจนทุก ๆ ท่านที่ให้กำลังใจช่วยเหลือจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงด้วยดี

จันทร์จิรา อภิรักษ์เมธาวงศ์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฑ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย.....	3
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 พอลิเมอร์.....	4
2.1.1 ประเภทของพอลิเมอร์.....	4
2.1.1.1 เทอร์โมเซต.....	4
2.1.1.2 เทอร์โมพลาสติก.....	5
2.2 พอลิเอทิลีน.....	5
2.2.1 โครงสร้าง.....	6
2.2.2 สมบัติทั่วไป.....	6
2.2.3 การใช้งาน.....	7
2.3 เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน.....	8



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.1	โครงสร้าง.....	8
2.3.2	สมบัติทั่วไป.....	9
2.3.3	การใช้ประโยชน์.....	9
2.4	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	10
2.5	การเตรียมพลาสติกเพื่อการแปรรูป .....	10
2.5.1	การผสม (Mixing).....	11
2.5.2	การคอมปาวด์ (Compounding).....	11
2.5.3	การผลิตเม็ดพลาสติก (Pelletizing).....	13
2.6	การฉีดพลาสติก.....	14
2.6.1	ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติก .....	14
2.6.2	ขั้นตอนพื้นฐานในการฉีดพลาสติก.....	15
2.6.3	ข้อดีของกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีด.....	17
2.6.4	ข้อเสียของกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีด .....	17
2.7	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์.....	17
2.7.1	การทดสอบแรงดึง .....	17
2.7.2	การทดสอบแรงคด.....	21
2.7.3	การทดสอบแรงกระแทก.....	23
2.7.4	การทดสอบความแข็ง.....	26
2.7	สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ .....	28
2.8.1	การเปลี่ยนแปลงในพอลิเมอร์ .....	28
2.8.2	ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี .....	30
2.8	ปฏิกิริยารวม.....	32
3	วิธีดำเนินการวิจัย .....	36
3.1	วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย .....	36
3.1.1	เมทริกซ์.....	36
3.1.2	สารตัวเติม.....	36

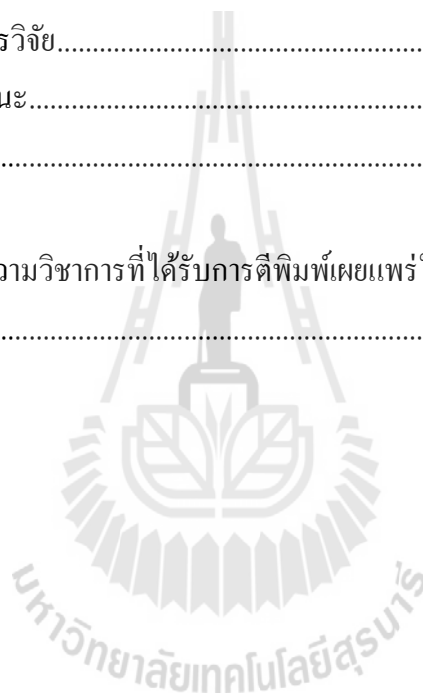
## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.3	สารเชื่อมโยง.....	38
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ .....	39
3.3	แผนผังแสดงการดำเนินงานวิจัย.....	40
3.4	วิธีดำเนินการทดลอง .....	42
3.4.1	การเตรียมสารตัวเติม.....	42
3.4.2	การออกแบบการทดลอง.....	44
3.4.3	การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน .....	45
3.4.4	การขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยวิธีการฉีด .....	47
3.4.5	การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน .....	48
3.4.5.1	การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	48
3.4.5.2	การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	50
3.4.5.3	การทดสอบการลามไฟ.....	50
4	ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....	52
4.1	ผลการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบชนิดของเศษจากกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์เมลามีน 2 ชนิดต่อสมบัติเชิงกล .....	53
4.1.1	การทดสอบแรงดึง .....	53
4.1.2	การทดสอบแรงดัด.....	55
4.1.3	การทดสอบแรงกระแทก.....	57
4.1.4	ผลจากการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบเศษ 2 ชนิด.....	58
4.2	ผลการศึกษาผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคของเศษ จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนและการเติมสารเชื่อมโยง .....	59
4.2.1	ผลการทดสอบเชิงกล .....	60
4.2.1.1	ผลการทดสอบแรงดึง .....	60
4.2.1.2	ผลการทดสอบแรงดัด .....	71
4.2.1.3	ผลการทดสอบแรงกระแทก .....	79

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1.4 ผลการทดสอบความแข็ง .....	83
4.2.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน .....	87
4.2.3 ผลการทดสอบการลามไฟ .....	91
<b>5 บทสรุป</b> .....	<b>92</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	92
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	95
รายการอ้างอิง .....	96
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา .....	97
ประวัติผู้เขียน .....	110



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สมบัติของพอลิเอทิลีน..... 7
2.2	สมบัติทางกลและทางกายภาพของเมลามีน-ฟอร์มัลดีไฮด์ ..... 9
2.3	ตัวอย่างการเลือกวิธีการทดสอบความแข็งของพลาสติก..... 26
3.1	ขนาดอนุภาคจากเครื่องวัดขนาดด้วยเลเซอร์..... 44
3.2	ปัจจัยที่สนใจในงานวิจัย ..... 44
3.3	การออกแบบการทดลองด้วยวิธี $2^k$ full-factorials design (k=3) ..... 45
4.1	ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลเพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดเศษจากกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์เมลามีน 2 ..... 53
4.2	การทดลองทั้งหมดโดยพิจารณา 3 ปัจจัย ประกอบด้วย สัดส่วนการเติมเศษแบบฟุ้ง ขนาดอนุภาคเศษแบบฟุ้ง และการเติมสารเชื่อม โยง..... 59
4.3	สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ..... 60
4.4	สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตแบบฟุ้ง ..... 89
4.5	อัตราการลามไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนแบบฟุ้งตามมาตรฐาน UL-94 ..... 92

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน ..... 6
2.2	โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และความหนาแน่นต่ำ ..... 6
2.3	ปฏิกิริยาแบบพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่นของเมลามีนและฟอร์มัลดีไฮด์ ..... 8
2.4	ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติก ..... 15
2.5	ลักษณะชั้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 ..... 18
2.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ ที่มีสมบัติต่างกัน ..... 19
2.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อที่ได้รับแรงดึง ..... 19
2.8	การทดสอบแรงค้ำแบบ 3 จุด ..... 22
2.9	รูปแบบการวางชั้นทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปีและแบบไอซอด ..... 24
2.10	ขนาดของชั้นทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด ..... 25
2.11	ลักษณะและขนาดของหัวกดแบบ Shore A และ shore D ..... 27
2.12	การจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ตามรูปแบบของพรีนจด์-ไมเซลของ พอลิเมอร์กิ่งผลึก ..... 28
2.13	องค์ประกอบของสายโซ่พอลิเมอร์ ..... 29
2.14	ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ ..... 30
2.15	เทอร์โมแกรม DSC เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการไหลความร้อนกับอุณหภูมิ ..... 32
3.1	HDPE ..... 37
3.2	สารตัวเติมที่ใช้ในงานวิจัย ..... 37
3.3	สารเชื่อมโยงที่ใช้ในงานวิจัย HDPE-g-MA ..... 38
3.4	การดำเนินงานวิจัยส่วนที่ 1 ศึกษาเพื่อเปรียบเทียบชนิดของสารตัวเติม 2 ชนิด ..... 40
3.5	แผนผังการดำเนินงานวิจัยส่วนที่ 2 ศึกษาผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน และการเติมสารเชื่อมโยง ..... 41
3.6	ขนาดและการกระจายตัวของเศษแบบฝุ่นที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (P1) ..... 43

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 ขนาดและการกระจายตัวของเศษแบบฝุ่นที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (P2).....	43
3.8 พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษ จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนแบบฝุ่นภายหลังผสม .....	46
3.9 พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษ จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนแบบฝุ่นก่อนการฉีดขึ้นรูป .....	46
3.10 ชั้นทดสอบที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีน- ความหนาแน่นสูงกับเศษแบบฝุ่น .....	47
3.11 ชั้นทดสอบแรงดึง .....	48
3.12 ชั้นทดสอบแรงดัดโค้ง .....	49
3.13 ชั้นทดสอบแรงกระแทก .....	49
3.14 ลักษณะการทดสอบการลามไฟตามแนวนอน .....	51
4.1 ผลกระทบของชนิดเศษที่ได้จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนใน พอลิเมอร์คอมโพสิตต่อค่าการต้านทานแรงดึง.....	54
4.2 ผลกระทบของชนิดเศษที่ได้จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนใน พอลิเมอร์คอมโพสิตต่อเปอร์เซ็นต์การยึดตัว .....	54
4.3 ผลกระทบของชนิดเศษที่ได้จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนใน พอลิเมอร์คอมโพสิตต่อความต้านทานแรงดัด.....	56
4.4 ผลกระทบของชนิดเศษที่ได้จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนใน พอลิเมอร์คอมโพสิตต่อโมดูลัสแรงดัด.....	57
4.5 ผลกระทบของชนิดเศษที่ได้จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนใน พอลิเมอร์คอมโพสิตต่อความต้านทานแรงกระแทก .....	58
4.6 ผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคของเศษจากกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์เมลามีนและการเติมสารเชื่อมโยงต่อความต้านทานแรงดึง .....	61
4.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าความต้านทานแรงดึง .....	63
4.8 อิทธิพลของปัจจัยหลักต่อค่าความต้านทานแรงดึง .....	64
4.9 ผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคของเศษจากกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์เมลามีนและการเติมสารเชื่อมโยงต่อโมดูลัสของยัง .....	64

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าโมดูลัสของยัง .....	65
4.11 อิทธิพลของปัจจัยหลักต่อค่าโมดูลัสของยัง .....	67
4.12 ผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคของเศษจากกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์เมลามีนและการเติมสารเชื่อมโยงต่อเปอร์เซ็นต์การยึดตัว.....	68
4.13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว.....	70
4.14 อิทธิพลของปัจจัยหลักต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว .....	71
4.15 ผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคของเศษจากกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์เมลามีนและการเติมสารเชื่อมโยงต่อความต้านทานแรงดัด.....	72
4.16 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าความต้านทานแรงดัด .....	73
4.17 อิทธิพลของปัจจัยหลักต่อค่าความต้านทานแรงดัด.....	74
4.18 ผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคของเศษจากกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์เมลามีนและการเติมสารเชื่อมโยงต่อโมดูลัสแรงดัด.....	75
4.19 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าโมดูลัสแรงดัด.....	77
4.20 อิทธิพลของปัจจัยหลักต่อค่าโมดูลัสแรงดัด.....	78
4.21 ผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคของเศษจากกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์เมลามีนและการเติมสารเชื่อมโยงต่อความต้านทานแรงกระแทก.....	79
4.22 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าความต้านทานแรงกระแทก.....	80
4.23 อิทธิพลของปัจจัยหลักต่อค่าความต้านทานแรงกระแทก.....	81
4.24 ผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคของเศษจากกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์เมลามีนและการเติมสารเชื่อมโยงต่อความแข็ง.....	82
4.25 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าความแข็ง.....	85
4.26 อิทธิพลของปัจจัยหลักต่อค่าความแข็ง .....	86
4.27 เทอร์โมแกรมจากการทดสอบ DSC ช่วง Cooling scan ของพอลิเมอร์คอมโพสิต ระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตแบบฝุ่น .....	90
4.28 เทอร์โมแกรมจากการทดสอบ DSC ช่วง 2 <sup>nd</sup> Heating scan ของพอลิเมอร์คอมโพสิต ระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตแบบฝุ่น .....	90

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$A$	= พื้นที่บริเวณรอยบาก ( $m^2$ )
$A_0$	= พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ ( $m^2$ )
$b$	= ความกว้างของชิ้นทดสอบ (mm)
$E$	= โมดูลัสความยืดหยุ่น หรือ โมดูลัสของยัง (MPa)
$E$	= พลังงานที่วัสดุดูดซับ (J)
$F_M$	= แรงที่กระทำต่อชิ้นทดสอบสูงสุด (N)
$g$	= อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก ( $9.81 m/s^2$ )
$h$	= ความสูงของหัวค้อนก่อนปล่อยกระแทก (m)
$h'$	= ความสูงของหัวค้อนหลังกระแทก (m)
$T_g$	= อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว
$\Delta H_m$	= การเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนในการหลอมเหลว (J/g)
$\Delta H_m^*$	= การเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนของ HDPE ที่ทำให้เกิดการเกิดผลึก 100% ( $293.6 J/g$ )
$L$	= ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (mm)
$L_0$	= ความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (mm)
$\Delta L$	= ความยาวที่เปลี่ยนไป (mm)
$M_B$	= ค่าโมดูลัสแรงดัดของชิ้นทดสอบ (MPa)
$m$	= ความชันของเส้นสัมผัสช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นระหว่างกราฟแรงกระทำและระยะยวบตัว (N/mm)
$m$	= มวลของหัวค้อน (kg)
$P$	= แรงที่กระทำกับชิ้นทดสอบ (N)
$R$	= ความเร็วที่ใช้กดสำหรับทดสอบแรงดัดโค้ง
$T_c$	= อุณหภูมิการเกิดผลึก
$T_d$	= อุณหภูมิการสลายตัว
$T_f$	= อุณหภูมิหลอมไหล
$T_m$	= อุณหภูมิหลอมเหลว
$T_R$	= อุณหภูมิของสารอ้างอิง

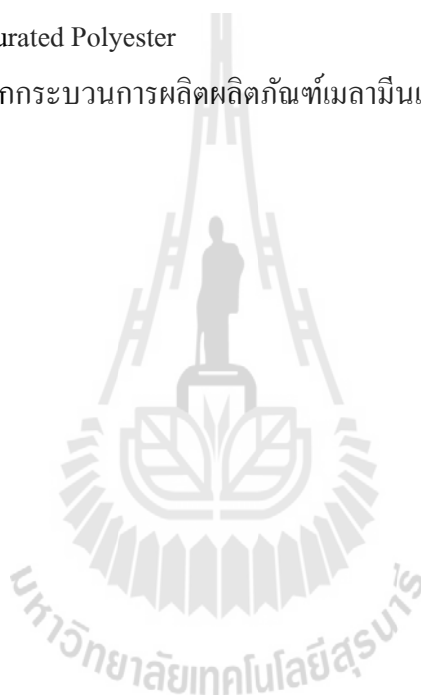


## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$T_s$	= อุณหภูมิของสารตัวอย่าง
$W_f$	= สัดส่วนน้ำหนัก HDPE ในพอลิเมอร์คอมโพสิต
$\chi_c$	= การเกิดผลึก (%)
$Z$	= อัตราความเครียดตามมาตรฐาน (0.01 mm/mm/min)
$\sigma_M$	= การต้านทานแรงดึงสูงสุด (N/mm <sup>2</sup> )
$\sigma$	= ความเค้น (N/mm <sup>2</sup> )
$\varepsilon$	= ความเครียด (mm/mm)
$\sigma_f$	= ความต้านทานแรงดึง (MPa)
ANOVA	= การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)
ASTM	= American Society for Testing and Materials
DF	= องศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom)
DSC	= ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี
F	= ค่าสถิติ F
HB	= การทดสอบการลามไฟแบบแวนอน
HDPE	= พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
HDPE-g-MA	= พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์
HDT	= การทดสอบการคั่งงอเนื่องจากความร้อน
LDPE	= พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
MC	= เมลามีนไซยานูเรต
MF	= เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์
MFR	= ดัชนีการหลอมไหล (g/10 min)
MPP	= เมลามีนพอลิฟอสเฟต
MS	= ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าเบี่ยงเบน (Mean square)
P	= P-value
P1	= อนุภาคเศษแบบฝุ่นที่ผ่านตะแกรงร้อนเบอร์ 325
P2	= อนุภาคเศษแบบฝุ่นที่ผ่านตะแกรงร้อนเบอร์ 100
PUF	= พอลิยูรีเทน
PWMF	= เศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนแบบฝุ่น
R-Sq	= ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-squared, R <sup>2</sup> )

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

R-Sq (adj)	= สัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R-squared, Adj-R <sup>2</sup> )
R-Sq (pred)	= ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจการทำนาย (Predicted R-squared, Pred-R <sup>2</sup> )
SEM	= สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป
SiC	= ซิลิกอนคาร์ไบด์
SS	= ค่าผลรวมของค่าเบี่ยงเบนกำลังสอง (Sum of square)
UF	= ยูเรีย – ฟอร์มัลดีไฮด์
UP	= Unsaturated Polyester
WMF	= เศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนแบบครึ่ง



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีความต้องการใช้พอลิเมอร์โดยเฉพาะพลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งพลาสติกจัดเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากพลาสติกมีราคาถูก น้ำหนักเบา และมีขอบข่ายการใช้งานได้กว้างขวางเพราะสามารถผลิตพลาสติกให้มีสมบัติต่าง ๆ ได้ตามที่ต้องการ โดยจะขึ้นอยู่กับ การเลือกวัตถุดิบ ปฏิกิริยาเคมี การบวนการผลิต อีกทั้งสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปต่าง ๆ ได้ อย่างมากมาย นอกจากนี้แล้วยังสามารถปรุงแต่งสมบัติได้ง่ายโดยการเติมสารเติมแต่ง แต่อย่างไรก็ตาม พลาสติกยังคงมีการพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติอยู่เสมอเพื่อให้ได้พลาสติกที่มีคุณภาพดียิ่งขึ้นและเพื่อลด ต้นทุนในการผลิต แนวทางหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติของพลาสติกและลดต้นทุนในการผลิตนั้น คือ การ ทำพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites) หรือวัสดุผสม เมื่อพลาสติกถูกใช้อย่างแพร่หลายเราจึงควร เพิ่มการตระหนักถึงปัญหาของพลาสติกที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกทั้งปัญหาจากการฝังกลบของขยะ พลาสติก สำหรับแนวทางในการช่วยจัดการขยะพลาสติกมีหลายทางเลือกไม่ว่าจะเป็นการเผา หรือฝังกลบ นอกจากนี้ยังมี การรีไซเคิล (Recycle) ซึ่งถือว่าเป็นวิธีการช่วยจัดการปัญหาขยะพลาสติกได้อย่างมี ประสิทธิภาพ เนื่องจากสามารถนำขยะพลาสติกมาใช้ก่อให้เกิดประโยชน์ อาทิเช่น ใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อ เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต อีกทั้งยังลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะพลาสติกได้อีกด้วย

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) เป็นเทอร์โมพลาสติกที่สามารถพบได้ในชีวิตประจำวัน และมีอัตราการใช้มากที่สุด เนื่องจากมีสมบัติโดดเด่น เช่น มีความเหนียว สูง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี เป็นต้น ซึ่งแนวทางหนึ่งในการอ้างอิงว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีอัตรา การใช้สูงสุดสามารถพิจารณาได้จากปริมาณขยะที่เกิดขึ้น การสำรวจปริมาณขยะในปี 2550 จะพบว่า พลาสติกที่ตกค้างอยู่ในขยะมูลฝอยชุมชนมากที่สุดคือ พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง คิด เป็นร้อยละ 39.54 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ร้อยละ 29.20 และ พอลิโพรพิลีน ร้อยละ 16.10

เมลามีนฟอรัลดีไฮด์เรซิน (Melamine-formaldehyde resin, MF) เป็นพลาสติกเทอร์โมเซตคือ ไม่สามารถหลอมละลายได้อีกด้วยวิธีการให้ความร้อน คุณสมบัติของเมลามีนฟอรัลดีไฮด์เรซินที่ทราบ กันเป็นอย่างดี คือ สามารถทนแรงกระแทกได้ดี ทนความร้อนได้สูง มีอัตราการรั่วซึมน้ำต่ำ ทนต่อการขีด ข่วน ดังนั้นจึงนิยมนำมาขึ้นรูปทำผลิตภัณฑ์ในการบรรจุอาหาร เช่น แก้วน้ำ จาน ชาม ช้อน เป็นต้น ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์บรรจุอาหารนั้น เมื่ออัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จะเกิดเศษครีบบเมลามีน (ส่วนเกิน ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น) เศษครีบบเมลามีนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกคัดออกและจะถือว่าเป็นของเสีย (scrap) เนื่องจากไม่สามารถนำมาหลอมเหลวเพื่อใช้ได้อีก นอกจากนี้ในกระบวนการขัดและตกแต่งผิวจะเกิดเศษ

ที่มีส่วนผสมของเมลามีนเป็นลักษณะฝุ่นผงเกิดขึ้นด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะเหล่านี้จะถูกกำจัดด้วยวิธีการเผาหรือฝังกลบ ซึ่งก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายในการกำจัดรวมไปถึงการทำลายทรัพยากรธรรมชาติทางอ้อม หากสามารถนำเศษเมลามีนที่เกิดขึ้นมารีไซเคิลได้ก็จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัด อีกทั้งยังไม่สร้างมลพิษให้กับธรรมชาติอีกด้วย

จากที่กล่าวมาข้างต้นดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาหาแนวทางในการนำเศษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ลดต้นทุนการกำจัด โดยจะใช้เป็นอนุภาคเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยมีพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นเมทริกซ์เนื่องจากมีปริมาณการใช้สูงและการใช้งานหลากหลาย

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนการเติมสารตัวเติม ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการลามไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคสารตัวเติม ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการลามไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน

1.2.3 ศึกษาอิทธิพลของสารเชื่อมโยง ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการลามไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 วัสดุที่ใช้เป็นส่วนเมทริกซ์คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE)

1.3.2 วัสดุที่ใช้เป็นส่วนเสริมแรง คือ เศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนที่ได้จากบริษัทศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน)

1.3.3 ขึ้นรูปชิ้นทดสอบด้วยการฉีด (Injection molding)

1.3.4 พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน เพียง 3 ปัจจัย ได้แก่ สัดส่วนการเติมสารตัวเติม ขนาดอนุภาคสารตัวเติม และอิทธิพลของการเติมสารเชื่อมโยง

1.3.5 วิเคราะห์ผลโดยพิจารณาจากสมบัติเชิงกลเป็นหลัก

## 1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 เตรียมวัตถุดิบสำหรับขึ้นรูปขึ้นทดสอบ ได้แก่

- 1) บดเศษเมลามีนแบบครีบ
- 2) คัดขนาดเศษเมลามีนด้วยการร่อนตะแกรง
- 3) วัดขนาดอนุภาคด้วยเลเซอร์

1.4.3 ออกแบบการทดลอง

1.4.4 ผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกับเศษเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนที่ได้จากการออกแบบการทดลอง โดยมีการศึกษาผลกระทบจาก 3 ปัจจัย ได้แก่ สัดส่วนการเติมสารตัวเติม ขนาดอนุภาคสารตัวเติม และอิทธิพลของการเติมสารเชื่อมโยง

1.4.5 ขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบด้วยการฉีดขึ้นรูป

1.4.6 ทดสอบคุณสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต

- 1) ทดสอบสมบัติเชิงกล
- 2) ทดสอบสมบัติทางความร้อน
- 3) ทดสอบการลามไฟ

1.4.7 รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์และสรุปผล

1.4.8 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

## 1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

1.5.1 อาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5.2 บริษัทศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน)

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เข้าใจถึงอิทธิพลของสัดส่วนการเติมสารตัวเติม ขนาดอนุภาคสารตัวเติม และการสารเชื่อมโยงที่ส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน

1.6.2 เพื่อเป็นองค์ความรู้สำหรับการวิจัยขั้นต่อไปในการพัฒนาพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีคุณสมบัติเฉพาะทาง โดยมีพื้นฐานการใช้ของเหลือใช้ทางอุตสาหกรรมเพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าเศษเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน หรือสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาหาแนวทางในการนำเศษเมลามีนที่เกิดจากกระบวนการผลิตมา รีไซเคิล โดยการนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต โดยมีพอลิเอทิลีนความหนานาน สูงเป็นเมทริกซ์ เพื่อความเข้าใจและองค์ความรู้ในการทำวิจัยเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ เกี่ยวข้องกับวัสดุ วิธีการ รวมถึงการทดสอบสมบัติต่าง ๆ นอกจากนี้ยังกล่าวถึงปรีทัศน์วรรณกรรม ที่เกี่ยวข้องโดยมีเนื้อหาสาระดังนี้

#### 2.1 พอลิเมอร์ (Polymer)

พอลิเมอร์ (Polymer) เป็นสารประกอบขนาดใหญ่ มีมวลโมเลกุลค่อนข้างสูง สามารถ เกิดขึ้นในธรรมชาติ หรือสังเคราะห์ขึ้นมาได้ ประกอบด้วยโมเลกุลเคมีเล็ก ๆ เหมือนกัน เรียกว่า มอนอเมอร์ (Monomer) มาเรียงต่อกันด้วยหน่วยย่อย หน่วยย่อยที่ซ้ำกันในสายพอลิเมอร์นี้ว่า หน่วยซ้ำ (Repeat unit) คำว่า “พอลิเมอร์” มาจากภาษากรีก แปลว่า ส่วน หรือ หน่วยย่อย โดยใน ค.ศ 1833 เบอริเซอเรียส (Berzelius) นักเคมีชาวสวีเดนเป็นผู้นำคำ Polymer มาใช้ครั้งแรก

การจัดแบ่งชนิดหรือประเภทของพอลิเมอร์นั้นสามารถแบ่งได้หลายลักษณะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ว่าใช้หลักเกณฑ์ใดในการพิจารณา หากแบ่งประเภทของพอลิเมอร์ตามลักษณะเฉพาะเมื่อมีการเพิ่ม อุณหภูมิ หรือตามสมบัติทางความร้อนจะสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ เทอร์โมเซต และ เทอร์โมพลาสติก ซึ่งในปัจจุบันทางวงการอุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ ยังคงยึดถือการแบ่งประเภท ของพอลิเมอร์ตามหลักเกณฑ์สมบัติทางด้านความร้อนนี้เป็นสำคัญ

##### 2.1.1 เทอร์โมเซต (Thermoset)

พลาสติกเทอร์โมเซต (Thermoset) หรือ เทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting plastic) เป็นพอลิเมอร์ประเภทที่มีรูปทรงถาวรเมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิต โดยให้ความร้อนและความ ดันเข้าไป เนื่องจากมีการหลอมตัวพร้อมกับเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้าง เกิดการ เชื่อมโยง (Cross-linked) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์มีโครงสร้างเป็น แบบร่างแหสามมิติ ยึดกันอย่างแข็งแรง เมื่อให้ความร้อนจนถึงจุดที่สามารถตัดเป็นรูปแบบต่าง ๆ ได้ตามความต้องการแล้ว เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงจะคงรูปตามแบบที่จัดไว้ โดยไม่สามารถนำกลับมา ให้ความร้อนได้อีกครั้ง กล่าวคือจะไม่สามารถหลอมเหลวด้วยความร้อนได้อีกครั้ง หลังจากที่ พอลิเมอร์ชนิดนี้เกิดการคงรูปอย่างถาวรด้วยการบ่ม (Set หรือ Cured) ด้วยปฏิกิริยาเคมี หรือด้วย

ความร้อน เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงจะไม่เกิดการหลอมละลายแต่จะเกิดการสลายตัวหรือไหม้ ดังนั้นจึงไม่สามารถทำการรีไซเคิลพลาสติกชนิดนี้ได้ ตัวอย่างของเทอร์โมเซตมีหลายชนิด ที่สำคัญและใช้อยู่ทั่วไปมีดังนี้

- ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน
- อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin)
- ฟีนอล – ฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน (Phenol-formaldehyde resin)
- เมลามีน-ฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน (Melamine-formaldehyde resin)

### 2.1.2 เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics)

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) เป็นพลาสติกที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และมีการนำพลาสติกประเภทนี้มารีไซเคิลกันอย่างมาก เนื่องจากพลาสติกประเภทนี้เมื่อผ่านการขึ้นรูปแล้ว หากได้รับความร้อนอีกครั้งก็ยังสามารถหลอมและอ่อนตัวจนสามารถตัดหรือขึ้นเป็นรูปต่าง ๆ ได้อีกครั้งตามต้องการ เมื่อทำให้เย็นลงจะมีสมบัติที่ แข็ง เหนียว และคงรูปตามแบบ การหลอมและเย็นตัวนี้สามารถทำได้หลาย ๆ ครั้ง ดังนั้นจึงพร้อมที่นำกลับมาใช้ได้อีก หากความร้อนที่ใช้ในการหลอมไม่เกินอุณหภูมิในการสลายตัวของพอลิเมอร์ ตัวอย่างของเทอร์โมพลาสติกที่สำคัญและใช้อยู่ทั่วไป เช่น

- พอลิเอทิลีน (Polyethylene)
- พอลิโพรพิลีน (Polypropylene)
- พอลิสไตรีน (Polystyrene)
- พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate)
- พอลิเอไมด์ (Polyamide) หรือ ไนลอน (Nylon)
- พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Poly(methyl methacrylate))

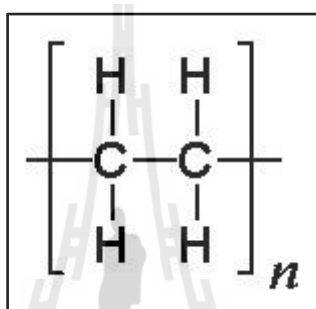
## 2.2 พอลิเอทิลีน (Polyethylene) (William F. Smith, 1996)

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกที่มีส่วนประกอบทางเคมีธรรมดาที่สุดชนิดหนึ่งถูกคิดค้นในประเทศอังกฤษในปี ค.ศ. 1933 เป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกมีลักษณะใสจนถึงสีขาว แสงผ่านได้ ถ้าเป็นฟิล์มบาง ๆ จะมีลักษณะใส แต่ถ้าหนาจะขุ่นคล้ายขี้ผึ้ง สามารถทำให้เป็นสีต่าง ๆ ได้ด้วยการเติมเม็ดสี (Pigment) พอลิเอทิลีนมีหลายชนิด แต่โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามความหนาแน่น ได้แก่

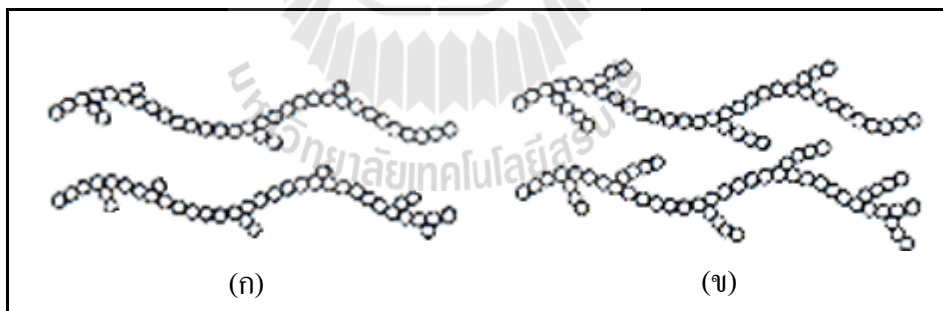
1. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE)
2. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE)

### 2.2.1 โครงสร้าง

โครงสร้างของพอลิเอทิลีนทั้งแบบความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นสูง แสดงดังรูปที่ 2.2 จะพบว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ มีโครงสร้างแบบกิ่งก้านสาขามาก ปริมาณของความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) และความหนาแน่นต่ำลง โครงสร้างแบบนี้ยังทำให้ความแข็งแรงต่ำลงอีกด้วย เนื่องจากไปทำให้แรงของการเกิดพันธะระหว่างโมเลกุลลดลง ในขณะที่พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีโครงสร้างแบบกิ่งก้านสาขาน้อย ทำให้โมเลกุลสามารถเข้าไปใกล้กันได้มากขึ้น ทำให้ความเป็นผลึกและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิด (ก) ความหนาแน่นสูง (ข) ความหนาแน่นต่ำ

### 2.2.2 สมบัติทั่วไป

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกที่ใช้กันมากทั่วโลกเนื่องจากมีราคาถูก และสมบัติเอื้อต่อการใช้งานหลาย ๆ ด้าน แข็งแรงพอสมควร เหนียว ทนต่อการสึกกร่อนได้ดี ไม่มีกลิ่น กลายเป็นไอได้น้อย สมบัติโดยทั่วไปพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นสูงสรุปได้ดังตารางที่ 2.1



ตารางที่ 2.1 สมบัติของพอลิเอทิลีน (ธีระพล วงศ์ชนะพิบูลย์, 2556)

สมบัติ	พอลิเอทิลีนความหนาแน่น	
	ต่ำ (LDPE)	สูง (HDPE)
ความหนาแน่น, g/cm <sup>3</sup>	0.910-0.925	0.941-0.965
% ความเป็นผลึก	60-70	80-95
อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว, T <sub>g</sub> (°C)	-110	-90
อุณหภูมิหลอมเหลว, T <sub>m</sub> (°C)	98-115	130-137
อุณหภูมิขึ้นรูป (°C)	149-232	177-260
การมีสาขา, จำนวนหมู่ -CH <sub>3</sub> /100 C-atoms	15-30	1-5
ดัชนีหักเหแสง (Refractive index)	1.51	1.54
การดูดซึมน้ำ, 24 ชั่วโมง ความหนา 1/8 นิ้ว (%)	< 0.01	< 0.01
จุดหลอมเหลว, °C	110-120	130-136
ความแข็ง, Shore D	41-46	60-70
ความทนแรงดึง, psi Tensile strength, (N/m <sup>2</sup> )	600-2,300 (0.41×10 <sup>7</sup> -1.6×10 <sup>7</sup> )	3,100-5,500 (0.41×10 <sup>7</sup> -1.6×10 <sup>7</sup> )
ความเครียด, Elongation (%)	90-800	20-1,000
มอดูลัสการดึง, psi Tensile modulus (N/m <sup>2</sup> )	0.41×10 <sup>5</sup> -0.38×10 <sup>5</sup> (0.97×10 <sup>8</sup> -2.6×10 <sup>8</sup> )	0.6×10 <sup>5</sup> -1.8×10 <sup>5</sup> (4.1×10 <sup>8</sup> -12.4×10 <sup>8</sup> )
มอดูลัสโค้งงอ, psi Flexural modulus, (N/m <sup>2</sup> )	0.08×10 <sup>5</sup> -0.60×10 <sup>5</sup> (0.34×10 <sup>8</sup> -4.1×10 <sup>8</sup> )	1.0×10 <sup>5</sup> -2.6×10 <sup>5</sup> (6.9×10 <sup>8</sup> -18×10 <sup>8</sup> )

### 2.2.3 การใช้งานของพอลิเอทิลีน

การใช้งานพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากมีความเหนียวและมีความยืดหยุ่นเหมาะสมสำหรับผลิตแผ่นฟิล์มต่าง ๆ เช่น วัสดุสำหรับบรรจุหีบห่ออาหาร ซองอาหาร ถุงใส่ของ และเคลือบด้านในของถังกระดาษ ในขณะที่พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงทนทานต่อสารเคมีและตัวทำละลายหลายชนิดได้ดี มีความยืดหยุ่นต่อแรงกระทบกระแทก ไม่แตกร้าวง่าย จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในงานต่าง ๆ โดยเฉพาะการผลิตภาชนะบรรจุที่เตรียมจากการเป่าจาก เนื่องจากหัดตัวในแม่พิมพ์ได้ดีมาก ไม่ติดแม่พิมพ์ ทำให้ถอดออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย นอกจากนี้ยังเหมาะกับการขึ้น

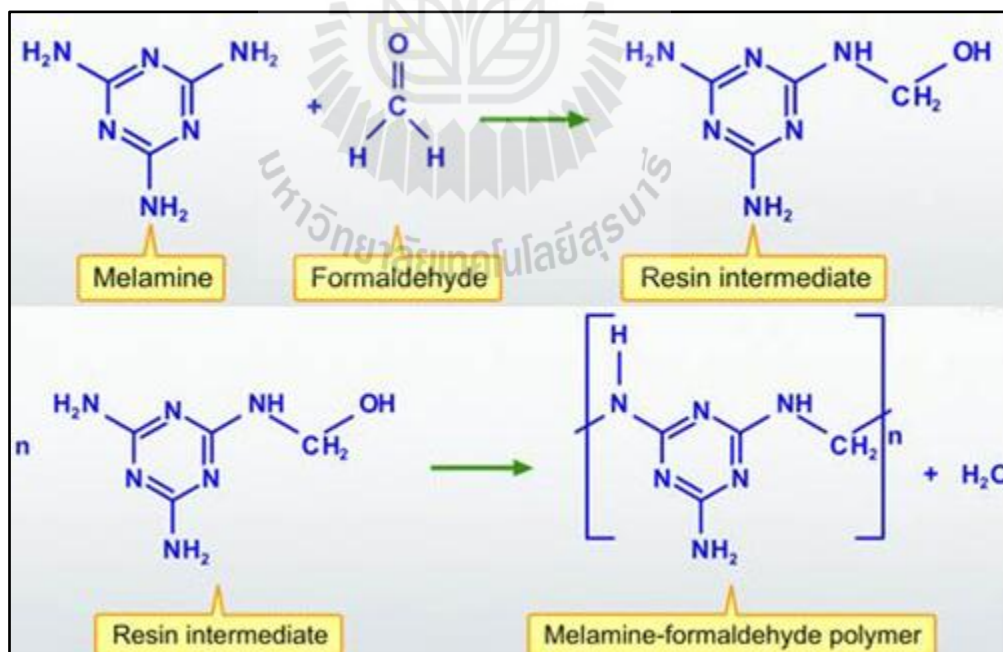
รูปแบบอื่น ๆ อีกด้วย ผลิตภัณฑ์จากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ได้แก่ ขวดบรรจุนมสด ขวดบรรจุน้ำยาซักผ้า ถังบรรจุน้ำมันในยานยนต์ ท่อประปา โตะ-เก้าอี้พับได้ ถุงพลาสติก ฯลฯ

## 2.3 เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (Melamine formaldehyde resin, MF)

เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซินเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต พบว่าอุตสาหกรรมเมลามีนพัฒนาขึ้นครั้งแรกในประเทศสวีเดนแลนด์ ในปี 1938 และเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในหลายประเทศทั่วโลก ในทวีปเอเชีย ผลิตภัณฑ์เมลามีนเริ่มมีขึ้นครั้งแรกในประเทศญี่ปุ่นในปี 1951 สำหรับในประเทศไทยเริ่มมีขึ้นตั้งแต่ปี 1973 วัตถุดิบเมลามีนประกอบด้วยองค์ประกอบหลักคือ ผลึกเมลามีน (Melamine crystal) เซลลูโลส (Cellulose) และฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)

### 2.3.1 โครงสร้าง

เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซินเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตจัดอยู่ในกลุ่มแอมมีโนเรซิน เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเมลามีนและฟอร์มัลดีไฮด์ โดยเกิดแบบพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation) แล้วได้น้ำเป็นผลพลอยได้ แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยวัสดุชนิดนี้เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการบ่มตัว ทำให้มีโครงสร้างแบบร่างแห



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาแบบพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่นของเมลามีนและฟอร์มัลดีไฮด์

(ที่มา : <http://www.learnnext.com/nextgurukul/wiki/concept/CBSE/XII/Chemistry/Condensation-Polymerisation.htm>)

### 2.3.2 สมบัติทั่วไป

เมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์เรซินที่เกิดการบ่มตัวแล้ว เนื่องจากได้รับความร้อนและความดันจะมีลักษณะแข็งมาก ไม่หลอมเหลว ไม่ละลาย มีผิวหน้าแข็งแรงมาก ทนต่อการขีดข่วนได้ดี ความต้านทานสารอินทรีย์ดีมาก ทนกรดแก่ แต่ทนด่างแก่ได้ไม่ค่อยดีนัก ทนต่อการเกาะของคราบน้ำชา กาแฟ จึงนิยมใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหาร เช่น ถ้วย ชาม จาน ฯลฯ เป็นต้น ในการใช้งานมักมีฟิลเลอร์ เช่น เซลลูโลสแอสเบสทอส แก้ว และซิลิกา เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในด้านทนความร้อนและสมบัติเกี่ยวกับการไหล เพื่อสะดวกในการฉีด หรือหล่อเพื่อขึ้นรูปในลักษณะต่าง ๆ

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกลและทางกายภาพของเมลามีน-ฟอร์มาลดีไฮด์

คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของเมลามีน-ฟอร์มาลดีไฮด์	
อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต (°C)	149-204
ความถ่วงจำเพาะ, Specific gravity	1.47-1.52
ทนแรงดึง, Tensile strength (MPa)	34-90
ทนแรงอัด, Compressive strength (MPa)	227-310
ทนแรงดัด, Flexural strength (MPa)	62-110
โมดูลัสโค้งงอ, Flexural Modulus (GPa)	7.58
ความแข็ง, Hardness	M115-M125
ทนแรงกระแทก, Impact Energy (J/m)	13.3
เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (24 ชั่วโมง ขึ้นงานหนา 1/6 นิ้ว)	0.1 - 0.8%

### 2.3.3 การใช้ประโยชน์

เมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ มักใช้ทำเป็นกาว สารเคลือบผิว สำหรับเมลามีนที่ผสมเซลลูโลสจะใช้ทำ กระจกม บุ่มลูกบิด และภาชนะบรรจุอาหาร เช่น จาน ชาม ช้อน ถ้วยกาแฟ เป็นต้น

## 2.4 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (High density polyethylene graft maleic anhydride, HDPE-g-MA)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เป็นสารคู่ควบปฏิกิริยาชนิดหนึ่ง ที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย มักถูกเรียกว่า Compatibilizer หรือสารเชื่อมโยง เนื่องจากเติมเข้าไปเพื่อปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัสของพอลิเมอร์คอมโพสิตและพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเมื่อเติมจะช่วยปรับปรุงการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเอทิลีนและสารตัวเติม โดยจะทำการตัดสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นออกให้มีขนาดเล็กสำหรับไปจับกับสารตัวเติมที่เติมลงไป

## 2.5 การเตรียมพอลิเมอร์เพื่อการแปรรูป

พลาสติกที่ใช้ในกระบวนการแปรรูป จะต้องมีการผสมสารเคมี ที่เรียกว่า สารเติมแต่ง (additive) หลายชนิด เพื่อปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานพลาสติกที่ได้และปรับปรุงความสามารถในการแปรรูปพลาสติก เพื่อให้แปรรูปได้ง่ายขึ้น ตัวอย่างสมบัติของพลาสติกที่ได้รับการปรับปรุงหลังจากผสมสารเคมี เช่น

- ความเหนียวและแข็งแรงของชิ้นงาน ซึ่งทำได้โดยการผสมพลาสติกกับสารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing filler) เช่น เส้นใยแก้ว ผงแคลเซียม เป็นต้น
- ความอ่อนนุ่ม สามารถหักงอและยึดชิ้นงานได้ดีขึ้น ทำได้โดยการผสมพลาสติกกับพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer)
- ความทนทานต่อแสงอัลตราไวโอเลตได้ดีขึ้น โดยการผสม สารเสถียร (Stabilizer)
- ชิ้นงานพลาสติกมีสีสวยงาม โดยการผสมสี (Colorants) ชนิดต่าง ๆ และสารที่ทำให้ขาวสดใส (Optical brightener)
- ทำให้การแปรรูปง่ายขึ้น โดยผสมสารหล่อลื่น (Lubricants)
- สมบัติอื่น ๆ เช่น ทำให้ชิ้นงานทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทนไฟ และป้องกันการเกิดรา และการกัดกินของแบคทีเรียบนชิ้นงาน เป็นต้น

ในอดีตการผสมสารเติมแต่งลงในพลาสติก มักจะกระทำโดยบริษัทผู้ผลิตพลาสติกเท่านั้น แต่ในปัจจุบันการผสมสารเคมีเพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของพลาสติกมักจะทำโดยผู้แปรรูป ถึงแม้ว่าพลาสติกส่วนใหญ่จะมีการผสมสารเคมีจากบริษัทผู้ผลิตมาแล้วในระดับหนึ่งก็ตาม ดังนั้นเทคนิคการผสมสารเคมีกับพลาสติกจึงมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับการเตรียมคอมพาวด์พลาสติกเพื่อใช้ในกระบวนการแปรรูป

### 2.5.1 การผสม (Mixing)

เทคนิคการผสม เป็นการผสมให้สารเคมีกระจายตัวในพลาสติก โดยไม่ให้พลาสติกได้รับแรงเสียดทานมากนัก เครื่องผสมที่ใช้จะมีลักษณะเป็นการผสมแบบเบต (Batch mixer) ซึ่งทำให้เกิดการผสมโดยการทำให้วัสดุเกิดการเคลื่อนที่คลุกเคล้ากัน วิธีการผสมแบบนี้สามารถแบ่งได้ 2 เทคนิค คือ

1. การผสมแบบเย็น (Cold mixing) เป็นการผสมที่อุณหภูมิห้อง สามารถใช้พลาสติกและสารเคมีที่มีขนาดของอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกัน ตัวอย่างของเครื่องผสมชนิดนี้ เช่น

เครื่องผสมแบบถังหมุนปกติ (Tumbling barrel) ใช้ในการผสมสารตัวเติมแต่งปริมาณไม่มากลงในพลาสติก ประสิทธิภาพของการผสมขึ้นอยู่กับปริมาณของวัสดุที่ผสมและเวลาที่ใช้ในการผสม

เครื่องผสมแบบริบบอน (Ribbon blenders) เครื่องผสมแบบริบบอนมีตัวกวนผสมซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะขดวนคล้ายสปริงยึดติดกับเพลาชับ บรรจุกวอยู่ในถังผสมที่ยึดติดอยู่กับที่ เครื่องผสมแบบนี้มักจะใช้ในการผสมวัสดุที่มีลักษณะเป็นผงหรือก้อนเล็ก ๆ โดยทั่วไปในขณะผสมจะไม่เกิดแรงเสียดทานระหว่างวัสดุผสม และระหว่างริบบอนกับผนังของถังผสม จึงไม่เกิดความร้อนในขณะทำการผสม

เครื่องผสมแบบกรวยที่มีสกรูภายใน (Conical screw mixer) ใช้ในการผสมวัสดุที่เป็นของแข็งกับของแข็ง หรือของแข็งกับของเหลวเข้าด้วยกัน ถังผสมมีลักษณะเป็นกรวยกลมภายในถังจะมีสกรูแนบอยู่ใกล้กับผนังกรวย สกรูสามารถหมุนได้ใน 2 ลักษณะ คือ หมุนรอบแกนของสกรู และหมุนเคลื่อนที่ในแนวเส้นรอบวงของกรวย ความเร็วในการหมุนสามารถปรับได้ เครื่องผสมแบบนี้สามารถผสมสารที่มีปริมาณเล็กน้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. การผสมแบบร้อน (Hot mixing) การผสมโดยเทคนิคนี้มีการให้ความร้อนกับวัสดุที่ทำการผสมโดยที่อุณหภูมิห้องผสมสูงถึง 140 องศาเซลเซียส ดังนั้นสารเติมแต่งบางชนิดอาจจะหลอมแล้วกระจายตัวเข้าไปในพลาสติกซึ่งยังคงสถานะของแข็ง ตัวอย่างเครื่องผสมแบบร้อน เช่น

เครื่องผสมเทอร์บูแลนต์ (Turbulent mixer) ตัวเครื่องผสมประกอบด้วยถังผสมร้อนและถังหล่อเย็น ในถังผสมร้อนมีใบพัดกวนที่มีความเร็วสูง เป็นตัวช่วยในการผสมองค์ประกอบต่าง ๆ เข้าด้วยกัน หลังจากผสมกันเสร็จจะถ่ายของผสมลงในถังหล่อเย็น

### 2.5.2 การคอมปาวด์ (Compounding)

การคอมปาวด์พลาสติก เป็นการผสมสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ กับพลาสติก โดยการหลอมพลาสติกและทำการรวมผสมองค์ประกอบต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เทคนิคการคอมปาวด์สามารถแบ่งได้ดังนี้

1. การคอมปาวด์แบบแบท (Batch compounding) เป็นการผสมพลาสติกกับสารเคมี โดยการใช้เครื่องผสมหลักอยู่ 2 ชนิด คือ เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และ เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)

เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ใช้ได้กับการผสมสารเคมีกับยางและพลาสติก นิยมใช้ในการเตรียมคอมปาวด์ของ PVC ลูกกลิ้งของเครื่องผสมสองลูกกลิ้งทำจากเหล็กหล่อที่มีการเคลือบผิวให้มีความแข็งและลื่น ข้อดีของเครื่องผสมชนิดนี้ คือ สามารถมองเห็นลักษณะและระดับการผสมเข้ากันของสารเคมีกับพลาสติก มีความสะดวกในการทำความสะดวก เครื่องผสม สามารถทำการผสมในปริมาณที่แตกต่างกันได้ เหมาะสำหรับการแปรรูปต่อโดยเทคนิคการอัดเป่า (Compression molding) ข้อเสีย คือ จะต้องมีความรู้ในการใช้เครื่องมือและความรู้เรื่องการคอมปาวด์สูง ในกรณีที่ต้องการผสมให้มีขนาดแต่ละแบทเท่ากัน ทำได้ยากมากเนื่องจากอาจจะมี การสูญเสียสารเคมีบางส่วน การผสมด้วยวิธีนี้จะกระทำในที่ปิด ดังนั้นจึงมีโอกาที่ฝุ่นละอองจะเข้ามาปะปนกับคอมปาวด์ และมีโอกาสที่จะเปิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคอมปาวด์ได้ง่าย และการผสมแบบนี้จะใช้เวลามากกว่าเครื่องผสมแบบปิด

เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) การคอมปาวด์พลาสติกในเครื่องผสมแบบปิด ใช้การหมุนของโรเตอร์ (Rotor) ภายในห้องผสม (Mixing chamber) เพื่อผสมสารเคมีกับพลาสติก เข้าด้วยกัน ลักษณะของโรเตอร์จะไม่ราบเรียบเหมือนผิวของลูกกลิ้ง ทำให้ในขณะที่หมุนเกิดแรงเสียดทานในห้องผสมสูงมาก ส่งผลให้การกระจายตัวของสารเคมีในพลาสติกดีกว่า และใช้เวลาในการผสมน้อยกว่า กล่าวคือสามารถใช้เวลาผสมประมาณ 4-5 นาที องค์ประกอบหลักของเครื่อง คือ โรเตอร์คู่หนึ่ง ที่หมุนในทิศทางสวนกันและสามารถปรับความเร็วได้ ห้องผสมซึ่งโดยทั่วไปปรับอุณหภูมิโดยใช้น้ำมันร้อนและน้ำไหลหมุนเวียน น้ำหนักกดซึ่งใช้ในการเปิดห้องผสมขณะเกิดเครื่อง ประตุและระบบถือคใช้ในการเปิดให้คอมปาวด์ออกจากห้องผสม ข้อดี คือ ใช้เวลาในการผสมน้อย ผู้ใช้เครื่องไม่จำเป็นต้องมีความรู้สูงไม่มีการสูญเสียวัสดุ ไม่เกิดการปนเปื้อน ไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากการผสมกระทำในภาชนะปิด และท้ายที่สุดคือขนาดในการผสมแต่ละครั้งค่อนข้างแน่นอน ข้อเสีย คือ ไม่สามารถมองเห็นการผสม ทำความสะอาดห้องผสมได้ยาก นอกจากนี้กรณีการผสมเป็นแบทขนาดใหญ่มีความจำเป็นต้องใช้เครื่องมือชนิดอื่นช่วยในการเตรียมตัวอย่างก่อนนำไปแปรรูป ข้อเสียอื่น ๆ ของการผสมแบบปิด คือ มีโอกาสที่สารเคมีบางตัวติดภายในห้องผสม เป็นต้น

2. การคอมปาวด์แบบต่อเนื่อง (Continuous compounding) เป็นการคอมปาวด์พลาสติกโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูด ซึ่งเครื่องเอกซ์ทรูดที่ใช้ในการเตรียมคอมปาวด์พลาสติกมี 3 ชนิด คือ เครื่องเอกซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยว เครื่องเอกซ์ทรูดแบบสกรูคู่ และ เครื่องเอกซ์ทรูดหลายสกรู

โดยทั่วไปในการเตรียมมักใช้เครื่องเอกซ์ทรูดแบบสกรูคู่เป็นหลัก มีการใช้เครื่องเอกซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยวในบางกรณีที่ไม่ต้องการความพิถีพิถันในการคอมปาวด์มากนัก

การคอมปาวด์โดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยว (Single screw extruder) การคอมปาวด์ด้วยเครื่องนี้มักใช้กับงานทั่วไป มีสกรูแบบธรรมดา ซึ่งไม่สามารถผสมสารเติมแต่งให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกับพลาสติกได้ ถึงแม้ว่าสารเคมีเหล่านี้และพลาสติกได้รับการผสมมาก่อนหน้านี้แล้ว ทั้งนี้เนื่องจากการหมุนของสกรูชนิดนี้ไม่ก่อให้เกิดแรงเฉือนมากพอที่จะทำให้สารเคมีชนิดต่าง ๆ เกิดการกระจายตัวเข้ากันได้ถึงระดับโมเลกุล

การคอมปาวด์โดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) สามารถผสมสารเติมแต่งให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกับพลาสติกได้แต่ไม่เท่าการผสมแบบเบท ทั้งนี้เนื่องจากการหมุนของสกรูไม่ก่อให้เกิดแรงเฉือนมากพอที่จะทำให้สารเคมีชนิดต่าง ๆ เกิดการกระจายตัวเข้ากันได้ถึงระดับโมเลกุล แต่อย่างไรก็ตามข้อดีข้อวิธีการนี้คือรวดเร็วกว่า อีกทั้งสามารถผสมได้ปริมาณมากกว่า

### 2.5.3 การผลิตเม็ดพลาสติก (Pelletizing)

กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก เป็นกระบวนการหลังจากการทำคอมปาวด์พลาสติก ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้พลาสติกอยู่ในรูปเม็ดหรือผง เพื่อให้สามารถป้อนเข้าเครื่องแปรรูปได้ เทคนิคการผลิตเม็ดพลาสติกขึ้นอยู่กับลักษณะของคอมปาวด์พลาสติกซึ่งอาจจะอยู่ในรูปแผ่น หรือมีลักษณะเป็นเส้น

1. การผลิตเม็ดพลาสติกจากแผ่นคอมปาวด์ ทำได้โดยการนำแผ่นพลาสติกเข้าตัดในเครื่องตัดที่ใบมีดแบบหยัก หรืออาจมีการผ่าแผ่นพลาสติกออกเป็นเส้นเล็ก ๆ ก่อน แล้วตัดด้วยใบมีดที่ติดตั้งบนลูกกลิ้ง ข้อเสียของการผลิตเม็ดแบบนี้ คือ เม็ดพลาสติกที่ได้มีลักษณะเป็รูปร่างเหลี่ยมทำให้เกิดการไหลจากกรวยเติม (Hopper) ได้ยาก เนื่องจากเม็ดพลาสติกเหล่านี้มักจะรวมตัวกันเป็นก้อนขวางเส้นทางการไหล

2. การผลิตเม็ดพลาสติกจากคอมปาวด์ที่เป็นเส้น ทำได้โดยการตัดเส้นพลาสติกให้มีขนาดเล็ก ซึ่งกระทำได้ 2 วิธี คือ การผลิตเม็ดพลาสติกแบบเย็น และการผลิตเม็ดพลาสติกแบบร้อน

3. เครื่องบดพลาสติกใช้ในการบดพลาสติกที่มีชิ้นขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง และมีขนาดรูปร่างเหมาะสม ซึ่งสามารถนำไปแปรรูปต่อได้ เครื่องบดมีความสำคัญกับการนำพลาสติกไปใช้ใหม่ (Recycle) ซึ่งนับวันก็ยิ่งทวีความสำคัญ ในการนำชิ้นเทอร์โมพลาสติกมาใช้ใหม่ มักจะทำการบดด้วยเครื่องบด (Cutting mill)

## 2.6 การฉีดพลาสติก

วิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกนั้นมีอยู่หลายวิธีที่สำคัญ และนิยมทำกันในวงการอุตสาหกรรมพลาสติกซึ่งหนึ่งในนั้น คือ กระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด วิธีการนี้นับว่าเป็นวิธีการที่สำคัญที่สุดสำหรับใช้ผลิตวัสดุสำเร็จรูปที่ได้จากเทอร์โมพลาสติก

### 2.6.1 ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติก

เครื่องฉีดพลาสติกโดยทั่วไป สามารถแบ่งส่วนการทำงานหลัก ๆ ของเครื่องได้เป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้

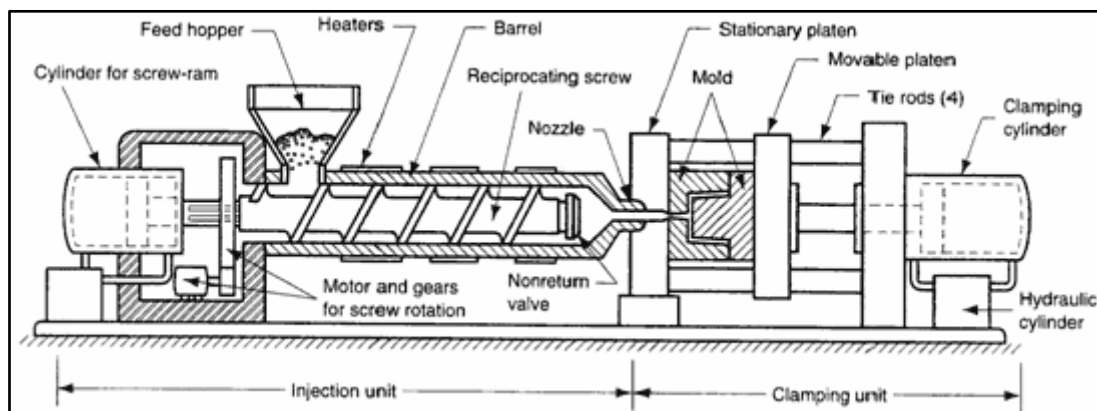
1. หน่วยฉีด (Injection unit) ทำหน้าที่ในการทำงานเกี่ยวกับการฉีดทั้งหมด เริ่มตั้งแต่การรับเม็ดพลาสติกจากกรวยมาแล้วทำการหลอมเหลว ก่อนที่จะทำการฉีดพลาสติกเหลวเข้าไปในช่องว่าง (Cavity) ของแม่พิมพ์ (Mold) ในหน่วยฉีดนั้นประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่สำคัญอีกหลายส่วน ส่วนประกอบต่าง ๆ ที่สำคัญประกอบด้วย

- กรวยเติม (Hopper) - รับเม็ดพลาสติกเพื่อเติมเข้ากระบอบสูบ
- กระบอบสูบ (Barrel) - เป็นห้องที่เก็บพลาสติกซึ่งมีฮีตเตอร์ฝังอยู่
- ฮีตเตอร์ (Heater) - สร้างความร้อนให้ฮีตเตอร์หลอมละลาย
- สกรู (Screw) - หมุนพาให้พลาสติกเคลื่อนที่ และคลุกเคล้าพลาสติก
- หัวฉีด (Nozzle) - ฉีดพลาสติกที่ออกจากกระบอบสูบเข้าสู่แม่พิมพ์
- ชุดไฮดรอลิก (Hydraulic) - ให้ชุดฉีดเคลื่อนที่เข้า – ออกจากแม่พิมพ์

2. ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ (Clamp unit) เป็นชุดอุปกรณ์มีหน้าที่ในการติดตั้งแม่พิมพ์เปิด-ปิดแม่พิมพ์ และกระทุ้งชิ้นงานที่ฉีดเสร็จแล้วออกจากแม่พิมพ์ โดยเฉพาะการปิดแม่พิมพ์นั้น ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์จะต้องมีแรงในการปิดที่สามารถต้านทานแรงดันของพลาสติกเหลวในขั้นตอนการฉีดได้

3. ชุดควบคุม (Control unit) ทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานทุกระบบของเครื่องฉีด เช่น การควบคุมอุณหภูมิของกระบอบฉีด การควบคุมแรงดันและความเร็วในการฉีด การควบคุมความเร็วในการเปิด-ปิดแม่พิมพ์ การควบคุมเวลาการทำงานในขั้นตอนต่างๆ ของเครื่องฉีด เป็นต้น





รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของเครื่องฉีดพลาสติก

(ที่มา : <http://www.sinotech.com/injectionMolded.html>)

### 2.6.2 ขั้นตอนพื้นฐานในการฉีดพลาสติก

การทำงานของเครื่องฉีดพลาสติกจะมีการทำงานด้วยกันอยู่ 3 รูปแบบด้วยกัน คือ แบบไม่เป็นอัตโนมัติ (Manual) ซึ่งจะสั่งให้เครื่องทำงานในขั้นตอนใดก่อนก็ได้ตามที่ต้องการ แบบกึ่งอัตโนมัติ (Semi-auto) ซึ่งการทำงานจะเป็นไปตามขั้นตอนของเครื่องฉีดเพียงวนรอบการทำงานเดียวเท่านั้นแล้วหยุด และแบบอัตโนมัติ (Fully-automatic) จะมีการทำงานเป็นไปตามขั้นตอนของเครื่องฉีด โดยเมื่อครบวงรอบการทำงานของเครื่องฉีดแล้ว ก็จะเริ่มวนรอบการทำงานใหม่ทันที และทำต่อไปเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่อง โดยการทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติและแบบอัตโนมัติทั้งหมดจะมีขั้นตอนพื้นฐานในการฉีดพลาสติกประกอบไปด้วย 9 ขั้นตอน คือ

1. ขั้นตอนแม่พิมพ์เคลื่อนที่เข้าปิด โดยจะมีพารามิเตอร์คือ แรงดัน (แรง) ความเร็ว และ ระยะทางในการเคลื่อนที่ปิดเข้าหากันของแม่พิมพ์ ซึ่งส่วนมากจะแบ่งออกได้เป็น 5 ช่วงด้วยกัน คือ ช่วงแรกเป็นช่วงที่แม่พิมพ์ด้านเคลื่อนที่เริ่มเคลื่อนที่เข้าไปหาแม่พิมพ์ด้านที่อยู่กับที่ โดยใช้ความเร็วที่ช้าเป็นระยะทางสั้น ๆ ช่วงที่สองเป็นช่วงแม่พิมพ์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้นเป็นระยะทางยาว ๆ ช่วงที่สามเป็รช่วงที่แม่พิมพ์กำลังลดความเร็วลงในระยะทางที่เหลือไม่มากนัก ช่วงที่สี่เป็นช่วงป้องกันแม่พิมพ์เกิดความเสียหายก่อนที่แม่พิมพ์จะปิดสนิท และช่วงที่ห้าเป็นช่วงที่แม่พิมพ์ปิดสนิทหรือเรียกว่า ช่วงปิดล็อกแม่พิมพ์ด้วยความดันหรือแรงที่สูงมาก

2. ขั้นตอนชุดฉีดหรือหัวฉีดเคลื่อนที่เข้าชนและแนบกับแม่พิมพ์ โดยจะมีพารามิเตอร์คือ ความดัน และความเร็ว

3. ขั้นตอนสกรูเคลื่อนที่ตามแนวแกนโดยไม่มีการหมุน เพื่อขับเคลื่อนพลาสติกเหลวที่อยู่ในกระบอกฉีดให้ไหลออกจากหัวฉีดเข้าไปให้เต็มแม่พิมพ์ซึ่งเรียกว่า จังหวะฉีด (Injection

phase) โดยจะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์หลัก ๆ คือ ความเร็วฉีด ความดันฉีด ระยะทางการฉีด เวลาในการฉีด แต่ผู้ผลิตเครื่องพลาสติกบางบริษัทได้ออกแบบให้สกรูสามารถเคลื่อนที่ตามแนวแกนพร้อมกับหมุนไปได้ด้วย เพื่อป้อนพลาสติกไปพร้อมกับการฉีด ทำให้สามารถฉีดชิ้นงานที่มีปริมาตรและน้ำหนักมากกว่าปกติได้

4. ขั้นตอนสกรูเคลื่อนที่ตามแนวแกนโดยไม่มีกรหมุน เพื่อขับเคลื่อนพลาสติกเหลวเข้าไปในแม่พิมพ์เพิ่มเติมหลังจากที่พลาสติกเหลวเติมในแม่พิมพ์แล้ว ทั้งนี้เพื่อรักษาความดันให้พลาสติกในแม่พิมพ์มีความหนาแน่นตามที่ต้องการที่เรียกว่า ช่วงการย่ำ (Holding phase) ชิ้นงานจะได้มีขนาดที่เที่ยงตรง มีความแข็งแรง โดยจะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์หลัก ๆ คือ ความดัน เวลาและความเร็ว (สำหรับเครื่องฉีดบางรุ่น และบางยี่ห้อ)

5. ขั้นตอนที่สกรูเริ่มหมุนเพื่อดึงเม็ดพลาสติกในกรวยเติมเม็ดพลาสติก พร้อมทั้งป้อนไปข้างหน้าของสกรูเพื่อทำให้การหลอมผสมและป้อนพลาสติกเหลวไปอยู่หน้าปลายสกรูฉีด ซึ่งเรียกว่า จังหวะ Plasticizing โดยจะมีพารามิเตอร์ คือ ความดัน ความเร็ว ระยะทาง โดยจังหวะการทำงานนี้จะเป็นตัวกำหนดปริมาณเนื้อพลาสติกเหลวหรือระยะถอยสกรู (ระยะตั้งเนื้อพลาสติก) ตามที่ต้องการ เนื่องจากเวลาที่สั่งให้สกรูหมุนนั้น พลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายสกรูจะเกิดแรงดันในการต้านการถอยหลังกลับของสกรูเพื่อควบคุมความหนาแน่นของพลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายสกรูฉีดให้มีค่าคงที่ที่เรียกว่า Back Pressure ตลอดจนมีการกระตุ้นสกรูให้เคลื่อนที่ตามแนวแกนเท่านั้นในช่วงก่อนเริ่มต้นหมุนสกรูและ/หรือเมื่อสกรูหมุนแล้วที่เรียกว่า Suck Back หรือ Pull Back หรือ Decompression

6. ขั้นตอนการหล่อเย็นพลาสติกที่อยู่ในแม่พิมพ์ให้เปลี่ยนจากพลาสติกเหลวเป็นของแข็งโดยจะทำงานพร้อมกับการเริ่มหมุนสกรูเพื่อหลอมและป้อนพลาสติกเหลวไปหน้าปลายสกรูฉีดในขั้นตอนที่ 5 โดยที่ขั้นตอนที่ 5 และ 6 นี้ จะเริ่มทำงานพร้อมกันเมื่อสิ้นสุดเวลาในการย่ำรักษาความดันแล้ว

7. ขั้นตอนชุดฉีดหรือหัวฉีดเคลื่อนที่ถอยออกจากแม่พิมพ์ จะทำงานเมื่อสกรูหยุดการเคลื่อนที่แล้วกล่าวคือหยุดหมุนและหยุดถอยแล้ว โดยจะมีพารามิเตอร์ คือ แรงดัน และความเร็ว

8. ขั้นตอนแม่พิมพ์เคลื่อนที่เปิดเมื่อเวลาในการหล่อเย็นจากขั้นตอนที่ 5 นั้นหมดลงแล้ว โดยจะมีพารามิเตอร์คือ แรงดัน ความเร็ว และระยะทาง ความเร็วและระยะทางในการเปิดแม่พิมพ์ส่วนมากจะมีอยู่ 3 ความเร็ว และ 3 ระยะทางด้วยกัน โดยความเร็วแรกเป็นช่วงที่แม่พิมพ์เริ่มเคลื่อนที่ออกจากกัน ควรใช้ความเร็วที่ช้า ๆ และเป็นระยะทางสั้น ๆ ให้ชิ้นงานสามารถยับตัวเคลื่อนที่ออกจากแม่พิมพ์ด้านที่อยู่กับที่และติดออกมากับแม่พิมพ์ด้านที่เคลื่อนที่ได้ หลังจากนั้นจึงใช้ความเร็วจังหวะที่สองให้เร็วขึ้นและเป็นระยะทางที่ยาวขึ้นด้วย ความเร็วในช่วงที่สามเป็นช่วงสุดท้ายก่อนจะถึงตำแหน่งที่แม่พิมพ์เปิดมากที่สุด ควรใช้ความเร็วที่ช้าลงและระยะทางสั้น ๆ

เพื่อให้แม่พิมพ์สามารถหยุดได้ตรงตามตำแหน่งโดยไม่เกิดการสันสะท้อน ส่วนระยะในการเปิดแม่พิมพ์ก็ไม่ควรตั้งกว้างมากเกินไป แคพอให้ชิ้นงานไม่ติดค้างอยู่หน้าแม่พิมพ์หลังจากทำการกระทุ้งแล้ว หรือสามารถใช้มือหรือแขนกลจับออกมาได้ก็เพียงพอแล้ว

9. ขั้นตอนการกระทุ้งชิ้นงานให้หลุดออกจากแม่พิมพ์ โดยจะมีพารามิเตอร์ของความเร็ว ความดัน ระยะทาง และจำนวนครั้งในการกระทุ้ง

หมายเหตุ ขั้นตอนที่ 2 และ 7 เป็นขั้นตอนในการเคลื่อนที่ของชุดฉีดเข้าหาและเคลื่อนที่ออกจากแม่พิมพ์นั้น อาจจะไม่จำเป็นต้องใช้ในการทำงานจริง เพื่อเป็นการลดขั้นตอนและเวลาในการผลิต

### 2.6.3 ข้อดีของกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีด

สำหรับกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีดนั้น มีข้อดีหลายข้อด้วยกัน ดังนี้

1. ชิ้นงานหรืออุปกรณ์ที่ผลิตได้มีคุณภาพดีและสามารถผลิตได้รวดเร็ว
2. เป็นกระบวนการผลิตที่มีค่าแรงถูก
3. ผิวของอุปกรณ์ที่ผลิตได้มีสภาพดี
4. กระบวนการนี้สามารถผลิตแบบอัตโนมัติได้
5. ชิ้นงานที่มีลักษณะซับซ้อนสามารถผลิตได้โดยวิธีนี้

### 2.6.4 ข้อเสียของกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีด

1. เครื่องจักรมีราคาแพง
2. ต้องผลิตครั้งละมาก ๆ
3. เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพที่ดีต้องควบคุมกระบวนการค่อนข้างใกล้ชิด

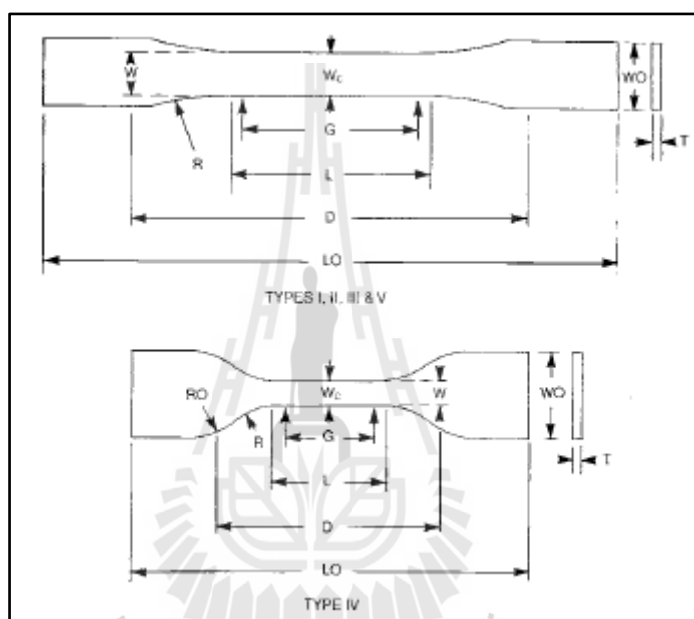
## 2.7 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ (Mechanical properties)

สมบัติทางกล คือ พฤติกรรมที่วัสดุแสดงออกมาเมื่อได้รับแรงจากภายนอกเข้ามากระทำกับวัสดุ ซึ่งสมบัติเชิงกลถือว่ามีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากเป็นสมบัติหนึ่งสำหรับใช้พิจารณาการเลือกวัสดุไปใช้ให้เหมาะสมกับงานได้อย่างถูกต้องและปลอดภัย นอกจากนี้ยังใช้ค่าต่าง ๆ ของสมบัติเชิงกลนี้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ หรือเครื่องจักร ให้สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ในการออกแบบโดยไม่เกิดการเสียหายภายใต้แรงกระทำในสภาวะงานนั้น ๆ อีกด้วย

### 2.7.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบสมบัติเชิงกลที่สำคัญมาก เนื่องจากค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึง เช่น จุดคราก (Yield point) ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) โมดูลัสของยัง (Young's modulus) เป็นต้น นิยมนำมาใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อให้สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์โดยไม่เกิดการเสียหาย สำหรับการทดสอบแรงดึงนี้จะวัดระยะการยืดตัวหรือ

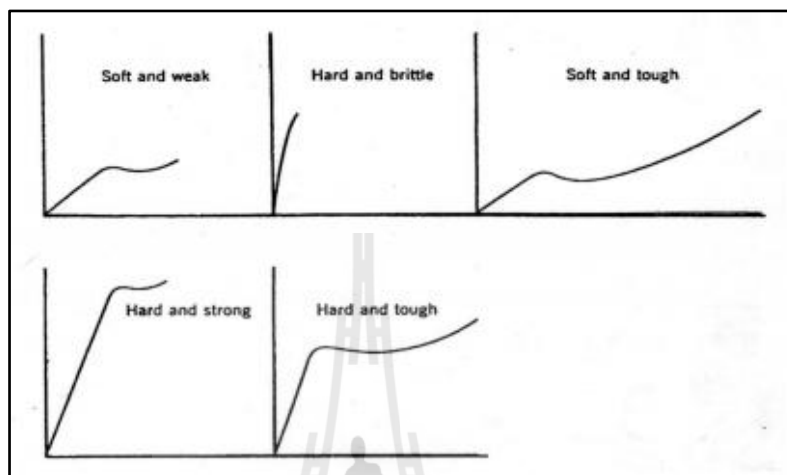
ระยะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ และแรงที่กระทำกับชิ้นงาน หรือความเค้นที่เกิดขึ้น เมื่อมีการให้ภาระกรรมกับวัสดุ โดยภาระกรรมที่ให้มีหลายลักษณะด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นการให้อัตราความเครียด (Strain rate) คงที่ หรือ ความเร็วในการดึง (Speed) คงที่ ซึ่งวัสดุที่ต่างกันจะทำให้ได้สมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันด้วย สำหรับการทดสอบแรงดึงของพอลิเมอร์นั้นมีมาตรฐานในการทดสอบที่นิยมใช้กันคือ มาตรฐาน ASTM D638 เป็นมาตรฐานสำหรับการทดสอบพลาสติกที่มีการเสริมแรงและไม่เสริมแรง โดยลักษณะของชิ้นทดสอบตามมาตรฐานแสดงดังรูป 2.5



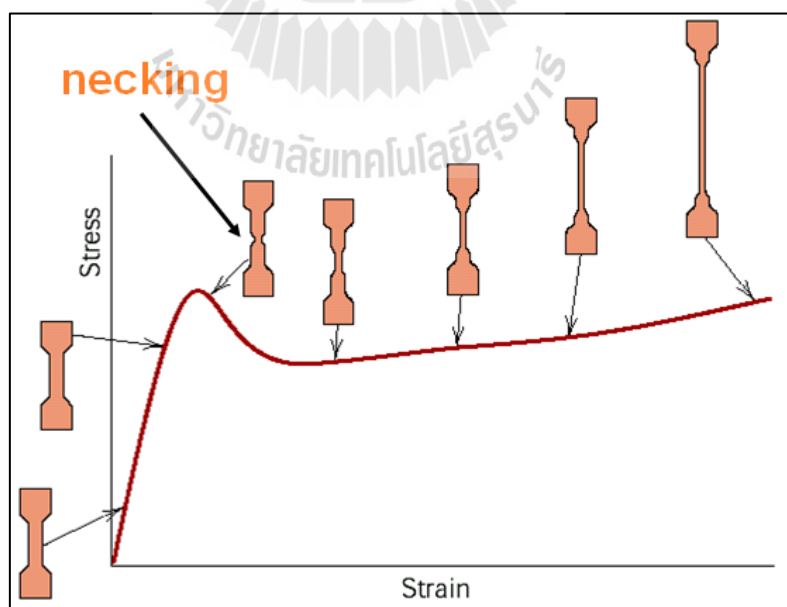
รูปที่ 2.5 ลักษณะชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน (ASTM D638)

การทดสอบแรงดึงนิยมใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine) ในการทดสอบ โดยจะติดตั้งชิ้นทดสอบเข้ากับชุดจับยึดโดยมีระยะห่างระหว่างจุดจับยึดทั้งสองข้างตามมาตรฐานกำหนด หลังจากนั้นจะให้แรงดึงคงที่ โดยเครื่องมือจะมีการวัดการยืดตัวที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นทดสอบในระยะทดสอบ (Gage length) จากนั้นจะบันทึกค่าแรงที่กระทำ และระยะการยืดตัวที่เปลี่ยนแปลงไปจนกระทั่งชิ้นทดสอบเกิดการเสียหาย ซึ่งจะสามารถนำค่าแรงและระยะการยืดตัวที่เปลี่ยนไปมาคำนวณเพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดได้ (Stress-strain curve)

พฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเมื่อได้รับแรงดึงจะมีลักษณะต่างกันขึ้นกับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ลักษณะการเรียงตัวของพอลิเมอร์ โครงสร้างของพอลิเมอร์ ปริมาณการเกิดผลึก แรงยึดติดระหว่างผิวด้านสัมผัสของพอลิเมอร์ เป็นต้น



รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ที่มีสมบัติต่างกัน (เอกสารประกอบการสอน วิชา Polymer Characterization and Analysis)



รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับแรงดึง

สมบัติที่ได้จากการทดสอบแรงดึงนั้นมีหลายสมบัติที่สำคัญ ได้แก่  
 ความเค้นวิกฤต (Yield strength) เป็นจุดสำหรับบ่งบอกว่าวัสดุนั้นสามารถรับความ  
 เค้นได้มากที่สุดที่ใด ก่อนวัสดุจะเกิดการคราก หรือการเสียรูปอย่างถาวร  
 การต้านทานแรงดึง (Tensile strength) เป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้  
 โดยค่าการต้านทานแรงดึงนี้พิจารณาจุดที่วัสดุรับแรงได้สูงที่สุด หรือที่เรียกจุดนี้ว่า UTS (Ultimate  
 tensile strength) แล้วนำมาหาค่าความต้านทานแรงดึง ดังสมการที่ 2.1

$$\sigma_M = \frac{F_M}{A_0} \quad (2.1)$$

โดย

$$\begin{aligned} \sigma_M &= \text{การต้านทานแรงดึงสูงสุด (N/mm}^2\text{)} \\ F_M &= \text{แรงที่กระทำต่อชิ้นทดสอบสูงสุด (N)} \\ A_0 &= \text{พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ (mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E) หรือรู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งว่า  
 โมดูลัสของยัง (Young's modulus) คือค่าที่บ่งบอกความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลง  
 รูปร่างของวัสดุ สามารถหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและ  
 ความเครียดในช่วงยืดหยุ่น (Elastic deformation) ซึ่งจากกฎของฮุก (Hook's law) กล่าวไว้ความ  
 เค้นและความเครียดเป็นสัดส่วนกันตรงต่อกัน และอัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียดนี้มี  
 ค่าคงที่ ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.2

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.2)$$

โดย

$$\begin{aligned} E &= \text{โมดูลัสความยืดหยุ่น (MPa)} \\ \sigma &= \text{ความเค้น (N/mm}^2\text{)} \\ \varepsilon &= \text{ความเครียด} \end{aligned}$$

ค่าความเหนียว (Ductility) สามารถหาได้โดยการหาเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) เพื่อหาร้อยละการยืดตัวของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง นอกจากนี้แล้วยังสามารถใช้จำแนกวัสดุเปราะและวัสดุเหนียวได้ด้วย หากวัสดุใดที่มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวน้อยกว่า 5% จัดว่าเป็นวัสดุเปราะ (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2549) โดยเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสามารถหาได้จากสมการ 2.3

$$\% \text{Elongation} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.3)$$

โดย

$\% \text{Elongation}$  = เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นทดสอบ (%)

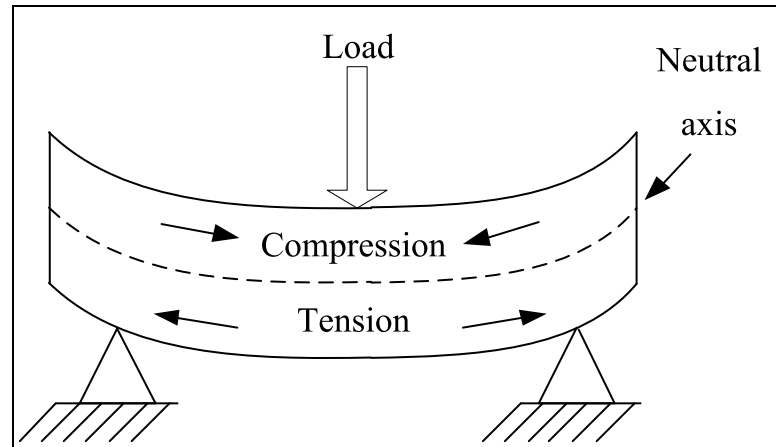
$\Delta L$  = ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป (mm)

$L_0$  = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบช่วงระยะทดสอบ (mm)

## 2.7.2 การทดสอบแรงดัด (Flexural test)

การทดสอบแรงดัด โค้งเป็นเป็นอีกสมบัติที่นิยมทดสอบในวัสดุประเภทพอลิเมอร์ โดยมีมาตรฐานการทดสอบคือ ASTM D790 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่รองรับการทดสอบพลาสติกที่มีการเสริมแรง และไม่เสริมแรง สำหรับชิ้นทดสอบแรงดัดตามมาตรฐานดังกล่าวมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับการทดสอบแรงดัดนั้นจะเริ่มจากการนำชิ้นทดสอบไปวางบนจุดรองรับ กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (Span length) ตามมาตรฐาน หลังจากนั้นจะให้แรงกดโดยใช้หัวกด กดลงบนชิ้นทดสอบด้วยอัตรากด (Crosshead speed) คงที่ จนกระทั่งอัตราการให้แรงไม่ส่งผลต่อการทดสอบ การทดสอบแบบนี้ชิ้นทดสอบจะเกิดทั้งความเค้นดึง (Tensile stress) และความเค้นกด (Compressive strength) โดยจะมีแกนสเทิน (Neutral axis) เป็นเส้นแบ่ง ซึ่งอยู่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ ดังรูป 2.8

การทดสอบแรงดัดแบบ 3 จุด (3-Point bending test) เป็นการทดสอบแรงดัด โค้งโดยมีจุดรองรับอยู่ 2 จุด และมีหัวกด 1 จุด โดยที่จุดรองรับและหัวกดมีลักษณะเป็นหัวมน รัศมีของหัวกด และชุดให้แรงกระทำต้องมีรัศมีอย่างต่ำ 3.2 มิลลิเมตร และ มีรัศมีสูงสุดไม่เกิน 4 เท่าของความหนาชิ้นงานทดสอบ สำหรับหัวกด และ 1.5 เท่าของความหนาชิ้นทดสอบสำหรับชุดรองรับ เพื่อลดระดับความเค้นหนาแน่นที่จะเกิดขึ้น ตามมาตรฐาน ASTM D790-10 นั้นมีกำหนดระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (Span length) ต่อความหนาชิ้นทดสอบตั้งแต่ 16:1 ไปจนถึง 60:1 โดยขึ้นอยู่กับประเภทและความแข็งแรงของวัสดุ นอกจากนี้ในมาตรฐานยังระบุการหาค่าความต้านทานแรงดัด (Flexural strength) และ โมดูลัสแรงดัด โค้ง (Flexural modulus) ไว้ดังนี้



รูปที่ 2.8 การทดสอบแรงค้ดแบบ 3 จุด

ความต้านทานแรงค้ด (Flexural strength) เป็นค่าที่บอกความสามารถในการรับแรงค้ดสูงสุด หรือระดับความเค้นค้ดสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของชิ้นทดสอบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 (ASTM D790-10)

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2.4)$$

โดย

- $\sigma_f$  = ความต้านทานแรงค้ด (MPa)
- $P$  = แรงที่กระทำกับชิ้นทดสอบ (N)
- $L$  = ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (mm)
- $b$  = ความกว้างของชิ้นทดสอบ (mm)
- $d$  = ความหนาของชิ้นทดสอบ (mm)

มอดูลัสแรงค้ด (Flexural modulus หรือ Modulus of elasticity of bending,  $E_B$ ) เป็นค่าที่ใช้บอกความแกร่ง (Stiffness) ของวัสดุ ซึ่งได้จากการศึกษาพฤติกรรมช่วงยืดหยุ่นระหว่างความเค้นและความเครียด โดยสามารถหาได้จากความชันระหว่างแรงกระทำและระยะยุบตัว (Load-deflection curve) ดังสมการที่ 2.5



$$M_B = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (2.5)$$

โดย

$$\begin{aligned} M_B &= \text{ค่าโมดูลัสแรงค้ำของชิ้นทดสอบ (MPa)} \\ m &= \text{ความชันของเส้นสัมผัสช่วงยื่นหย่นเชิงเส้นของกราฟความระหว่างแรงกระทำและระยะยวบตัว (N/mm)} \end{aligned}$$

สิ่งสำคัญอีกส่วนหนึ่งสำหรับการทดสอบคือความเร็วที่ในการกด (Crosshead speed) ตามมาตรฐานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 แต่อย่างไรก็ตามสามารถคลาดเคลื่อนจากที่คำนวณได้บวกลบ 10% (ASTM D790-10)

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (2.6)$$

โดย

$$\begin{aligned} R &= \text{ความเร็วที่ใช้ในการกด (mm/min)} \\ Z &= \text{อัตราความเครียด (mm/mm/min)} \end{aligned}$$

มาตรฐานกำหนดให้  $Z = 0.01 \text{ mm/mm/min}$  งานวิจัยนี้ชิ้นทดสอบมีความหนาประมาณ 3 mm ดังนั้นระยะห่างระหว่างจุดรองกับคือ 16 เท่าของความหนา ซึ่งมีค่าเท่ากับ 48 mm ดังนั้นจากสมการที่ 2.6 จะใช้ความเร็วในการกดประมาณ 1.4 mm/min

### 2.7.3 การทดสอบแรงกระแทก (Impact test)

การทดสอบแรงกระแทก เป็นการทดสอบโดยให้แรงกระทำชิ้นทดสอบด้วยความเร็วสูง ซึ่งความสามารถในการรับแรงกระแทกของวัสดุแต่ละชนิดก็จะแตกต่างกันออกไป โดยประเมินจากปริมาณของพลังงาน (Impact energy) ที่วัสดุสามารถดูดซับไว้ก่อนที่ชิ้นทดสอบจะเกิดการแตกหัก หรือปริมาณพลังงานที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก

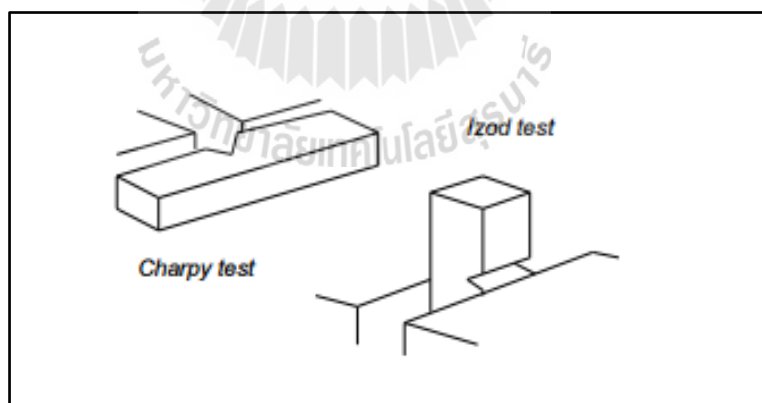
ค่าความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกนี้ใช้บ่งชี้ว่าวัสดุเปราะหรือวัสดุเหนียวได้ โดยพิจารณาจากค่าพลังงานที่ดูดซับ หรือค่าความสามารถในการต้านทานแรงกระแทก หากพลังงานที่วัสดุนั้นดูดซับได้มีปริมาณมาก หรือค่าการต้านทานแรงกระแทกมาก แสดงว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุเหนียว ซึ่งสอดคล้องกับพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด การทดสอบแรงกระแทกนั้นมี 2 ลักษณะด้วยกัน คือ แบบ pendulum test และ filling weight test แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้จะขอกล่าวถึงการทดสอบแรงกระแทกแบบ pendulum เท่านั้น

การทดสอบแรงกระแทกแบบเพนดูลัม (Pendulum test) จะใช้ก้อนเหวี่ยงลงมา กระแทกชิ้นงาน พลังงานส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการแตกหัก ซึ่งสามารถอ่านค่าพลังงานที่ใช้ไปได้จากเข็มหน้าปัดของเครื่องทดสอบ โดยคำนวณได้จากสมการที่ 2.7 หากทดสอบแล้วชิ้นงานไม่หักแสดงว่าพลังงานไม่พอ ให้เพิ่มขนาดพลังงานของเพนดูลัมโดยเพิ่มปริมาณน้ำหนักของหัวค้อน โดยน้ำหนักหัวค้อนมาตรฐานอยู่ที่ 2.7 จูล การทดสอบแรงกระแทกแบบเพนดูลัมสามารถแยกออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน ได้แก่ การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy test) และ แบบไอซอด (Izod test) โดยการทดสอบทั้ง 2 ประเภทนี้มีพื้นฐานการทดสอบเช่นเดียวกันแต่แตกต่างกันในลักษณะของการขึ้นทดสอบ ดังรูปที่ 2.9

$$E = mg(h - h') \quad (2.7)$$

โดย

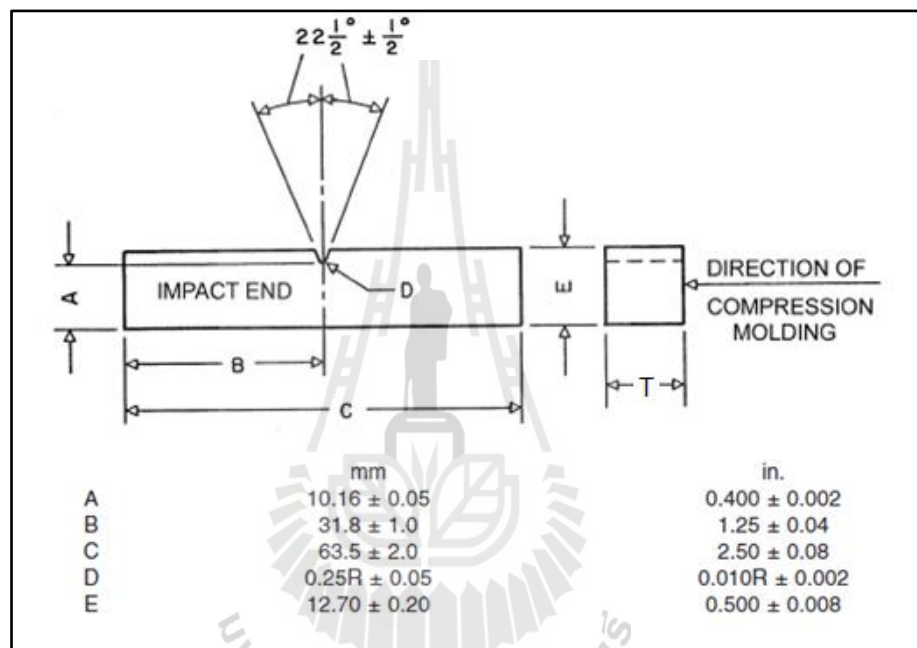
- $E$  = พลังงานที่วัสดุดูดซับ (J)
- $m$  = มวลของหัวค้อน (kg)
- $g$  = อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )
- $h$  = ความสูงของหัวค้อนก่อนปล่อยกระแทก (m)
- $h'$  = ความสูงของหัวค้อนหลังกระแทก (m)



รูปที่ 2.9 รูปแบบการวางชิ้นทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปีและแบบไอซอด

ชิ้นทดสอบของวัสดุพอลิเมอร์นั้นจะสามารถดูดซับแรงกระแทกได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของพลังงานที่ถูกดูดซับเข้าใจ หากพลังงานมีการกระจายตัวมากก็จะส่งผลให้ชิ้นทดสอบมีการเสียหายน้อย ดังนั้นการทดสอบแรงกระแทกนี้จะมีการทรอยบาก (Notch) ทำ

หน้าที่เป็นเป็นจุดศูนย์รวมแรง เพื่อส่งผลให้เกิดความเค้นหนาแน่น (Stress concentration) ที่บริเวณรอยบาก ทำให้ลดการกระจายของพลังงานเพื่อเหนี่ยวนำให้ชั้นทดสอบเกิดการเสียหายบริเวณนี้ หากไม่มีรอยบาก แรงเค้นจะกระจายไปทั่วชั้นทดสอบทำให้เกิดการเสียรูปแบบถาวรจากการตัดมากกว่าที่จะเกิดการแตกหัก สำหรับการทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด ตามมาตรฐาน ASTM D256-10 กำหนดให้ทำขนาดชั้นทดสอบดังรูปที่ 2.10 โดยที่ความหนาของชั้นทดสอบสามารถอยู่ในช่วง 3.00 – 12.70 mm



รูปที่ 2.10 ขนาดของชั้นทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด (ASTM D256-10)

จากการทดสอบจะสามารถอ่านค่าพลังงานที่ชั้นทดสอบสามารถดูดซับไว้ได้โดยการอ่านจากหน้าปัดเครื่องทดสอบ โดยปกติแล้วจะรายงานในหน่วยพลังงานต่อความกว้างของชิ้นงาน แต่เนื่องจากค่าความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกนี้ขึ้นกับความหนาของชิ้นงานเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงนิยมแสดง ค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) ในหน่วย จูลต่อตารางเมตร ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.8

$$\text{Impact strength} = \frac{E}{A} \quad (2.8)$$

โดย

$E$  = พลังงานที่ขึ้นทดสอบดูดซับ (J)

$A$  = พื้นที่บริเวณรอยบาก ( $\text{m}^2$ )

#### 2.7.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

การทดสอบความแข็ง คือการทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนรูปของวัสดุซึ่งวัสดุแต่ละชนิดก็จะมีค่าความแข็งแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย สำหรับการทดสอบความแข็งของพอลิเมอร์นั้นสามารถทดสอบได้ 2 วิธี ได้แก่ ร็อกเวลล์ (Rockwell) และ ดูโรมิเตอร์ (Durometer) หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า แบบชอร์ (Shore) ซึ่งจะเลือกใช้การทดสอบแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะนำมาทดสอบ ดังตารางที่ 2.3

การทดสอบความแข็งสำหรับพลาสติกที่มีลักษณะแข็งนั้นจะทดสอบความแข็งแบบ ร็อกเวลล์ซึ่งจะมี 5 สเตลด้วยกัน ได้แก่ R, L, M, E และ K ในขณะที่การทดสอบแบบดูโรมิเตอร์ จะใช้กับพลาสติกที่มีความแข็งไม่สูงมาก เช่น ยาง และพลาสติก

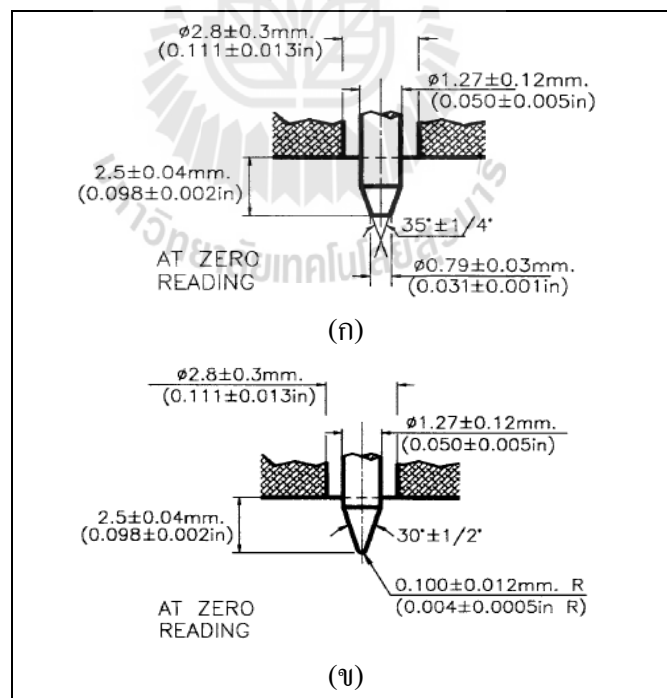
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการเลือกวิธีการทดสอบความแข็งของพลาสติก

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

สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นเมทริกซ์ของพอลิเมอร์คอมโพสิต ดังนั้นจึงจะนำเสนอทดสอบความแข็งแบบคูโรมิเตอร์เท่านั้น

การทดสอบความแข็งแบบคูโรมิเตอร์ (Durometer) จะให้แรงกดผ่านอุปกรณ์ลงไปยังชิ้นงาน โดยจะวางชิ้นทดสอบไว้บนผิวเรียบ หัวกดนี้จะติดอยู่กับสปริงเชิงเส้นซึ่งมีค่าความแข็งที่ผ่านการสอบเทียบแล้ว เมื่อทำการทดสอบโดยให้แรงกดไปขึ้นทดสอบ แรงจากสปริงจะส่งไปยังหัวทดสอบ ความลึกที่เจาะลงไปชิ้นงานจะมีค่าแปรผกผันกับค่าความแข็งของชิ้นทดสอบ กล่าวคือหากเจาะลงไปลึกมากหมายความว่าค่าความแข็งน้อย โดยทั่วไปแล้วจะกำหนดให้อ่านค่าทดสอบที่เวลาคงที่

โดยทั่วไปค่าความแข็งแบบชอร์ในแต่ละสเกลจะวัดค่าความแข็งระหว่าง 20-90 ของมาตรวัด หากไม่อยู่ในช่วงนี้ความน่าเชื่อถือจะต่ำ ซึ่งควรเปลี่ยนไปใช้การทดสอบความแข็งในสเกลที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าในสเกลถัดไป การทดสอบความแข็งสำหรับพลาสติกแบบชอร์นั้นนิยมทดสอบด้วย 2 สเกลด้วยกัน คือ Shore A และ Shore D ทั้งสองแบบนี้จะแตกต่างกันในแง่ของรูปทรงและขนาดของหัวกด ดังรูปที่ 2.11 โดยทั่วไปวัสดุที่อ่อนกว่าจะใช้สเกล A และ วัสดุที่แข็งกว่าเล็กน้อยจะใช้สเกล D

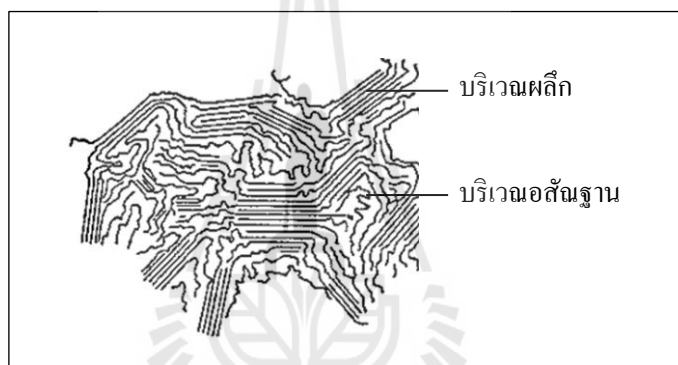


รูปที่ 2.11 ลักษณะและขนาดของหัวกด แบบ (ก) Shore A (ข) Shore D  
(ASTM D2240-05 (2010))

## 2.8 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ (ธีระพล วงศ์ชนะพิบูลย์, 2556)

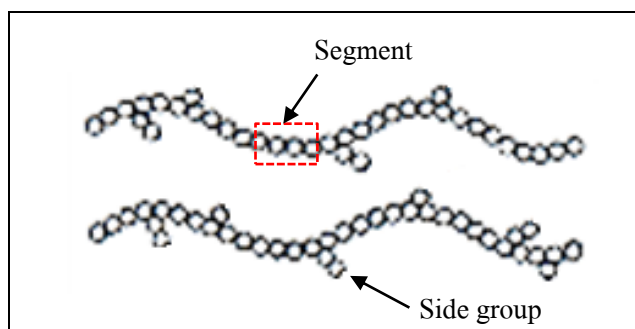
### 2.8.1 การเปลี่ยนแปลงในพอลิเมอร์ (Transition of polymers)

พอลิเมอร์เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ การจัดเรียงตัวของแต่ละสายโซ่ส่วนใหญ่เป็นไปอย่างไม่เป็นระเบียบ มีลักษณะไม่แน่นอนเกิดเป็นบริเวณที่เรียกว่า ออสัณฐาน (Amorphous region) บางส่วนของสายโซ่พอลิเมอร์อาจมีการพับงอแล้ววางตัวอย่างเป็นระเบียบ หรือบางส่วนของสายโซ่มีการวางตัวขนานเป็นระเบียบกับบางส่วนของอีกสายโซ่หนึ่ง เรียกบริเวณนั้นว่า ผลึก (Crystalline region) ลักษณะของพอลิเมอร์ที่ได้จากการจัดเรียงตัวของสายโซ่ดังกล่าว กล่าวคือพอลิเมอร์ที่มีทั้งบริเวณที่เป็นอสัณฐานและผลึก เรียกว่า พอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline) ซึ่งรูปแบบอย่างง่าย ๆ เป็นไปตามรูปแบบของฟรินจด์-ไมเชลล์ ดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 การจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ตามรูปแบบของฟรินจด์-ไมเชลล์  
ของพอลิเมอร์กึ่งผลึก

พิจารณาโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบด้วยอะตอมจำนวนมากมาต่อกันเป็นสายโซ่ยาว บางส่วนของสายโซ่พอลิเมอร์เรียกว่า เซกเมนต์ (Segment) ซึ่งประกอบด้วยอะตอมจำนวน 40-50 อะตอม ส่วนหมู่แขนง (Side group) ที่ต่อแยกออกมาจากสายโซ่หลักมีจำนวน 3-10 อะตอม โมเลกุลของพอลิเมอร์ ดังรูป 2.13

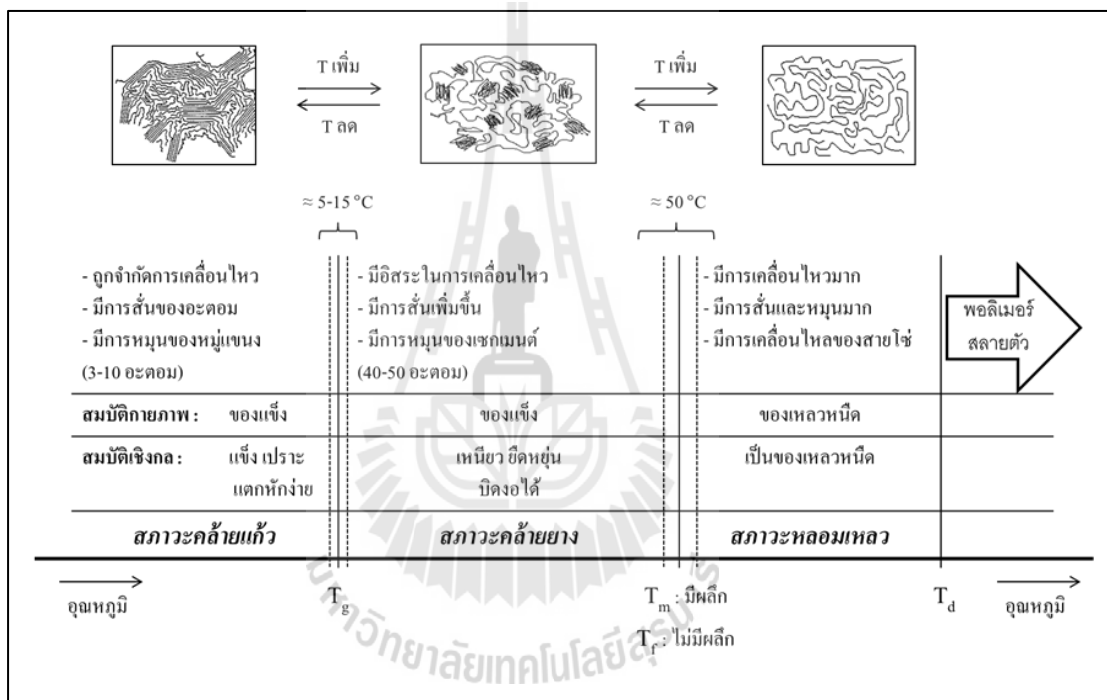


รูปที่ 2.13 องค์ประกอบของสายโซ่พอลิเมอร์

พอลิเมอร์นั้นที่อุณหภูมิต่ำ ๆ โมเลกุลในสายโซ่พอลิเมอร์วางตัวชิดกันมาก และถูกจำกัดการเคลื่อนไหว มีการสั่นเล็กน้อย มีการหมุนของหมู่แขนงน้อยมากเช่นกันเดียวกัน การที่จะทำให้บางเซกเมนต์ของสายโซ่เกิดการหมุนอย่างอิสระได้นั้นเป็นไปได้อย่างยากลำบาก ทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติแข็ง เปราะ และแตกหักง่าย คล้ายแก้ว เรียกสภาวะในขณะนี้ว่า สภาวะคล้ายแก้ว (Glassy state) เมื่อให้ความร้อนกับพอลิเมอร์มากขึ้น โมเลกุลในสายโซ่ได้รับพลังงานและเกิดการสั่นมากขึ้น ทำให้การวางตัวของสายโซ่ในบริเวณอสัณฐานหลวมและเกิดที่ว่างเพิ่มขึ้น ส่วนสั้น ๆ ของสายโซ่และหมู่แขนงมีความอิสระในการหมุนได้ง่ายขึ้น เป็นเหตุให้สมบัติของพอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงไป คือ มีความยืดหยุ่น และเหนียวคล้ายยาง จึงเรียกสภาวะนี้ว่า สภาวะคล้ายยาง (Rubbery state) อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ยังคงมีสถานะเป็นของแข็งเหมือนเดิม แต่เพียงแต่สภาวะเปลี่ยนไปจากสภาวะคล้ายแก้ว เป็นสภาวะคล้ายยาง เรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า อุณหภูมิเปลี่ยนสภาวะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ )

พอลิเมอร์ส่วนใหญ่มีการจัดเรียงตัวในลักษณะกึ่งผลึก ดังนั้นถ้าต้องการหลอมพอลิเมอร์ให้เหลว จำเป็นต้องให้ความร้อนมากพอที่จะไปทำลายโครงสร้างผลึกในพอลิเมอร์ให้แยกออกจากกัน เพื่อให้โมเลกุลในสายโซ่เกิดการสั่นและหมุนได้อย่างอิสระมากขึ้นในสภาวะหลอมเหลวที่อุณหภูมิลหลอมเหลวนี้ สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ได้แต่สายโซ่เป็นสายโซ่ยาว ลักษณะการเคลื่อนตัวของสายโซ่คล้ายกับการเลื้อยของงูเรียกการเลื้อยที่นี้ว่าการเลื้อยไหลของสายโซ่ และด้วยเหตุที่พอลิเมอร์เป็น โมเลกุลขนาดใหญ่ ของเหลวที่ได้จึงมีความหนืดสูง อุณหภูมิที่ใช้ทำลายโครงสร้างผลึกแล้วทำให้พอลิเมอร์เกิดการหลอมตัวเปลี่ยนสถานะจากของแข็ง ไปเป็นของเหลวหนืด เรียกอุณหภูมินี้ว่า อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature,  $T_m$ ) อุณหภูมินี้เป็นช่วงค่อนข้างกว้างเพราะผลึกที่เกิดขึ้นภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์มีขนาดต่าง ๆ กัน โดยทั่วไปค่า  $T_m$  เป็นช่วงกว้างประมาณ  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ดังรูปที่ 2.14 หากพอลิเมอร์ใดไม่มีลักษณะที่เป็นผลึกในโมเลกุลเลยก็จะไม่ปรากฏอุณหภูมิ  $T_m$  แต่อย่างไรก็ตาม พวกพอลิเมอร์อสัณฐานเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิให้

สูงขึ้นจะเกิดการหลอมตัวได้เช่นเดียวกัน เรียกอุณหภูมิที่ทำให้พอลิเมอร์ออสัณฐานหลอมตัวว่า อุณหภูมิหลอมไหล (Melt flow temperature,  $T_f$ ) โดยปกติ  $T_f$  จะมีค่าใกล้เคียงแต่ต่ำกว่าอุณหภูมิ  $T_m$  ทั้งนี้เพราะไม่ต้องใช้พลังงานในการไปทำลายโครงสร้างผลึกมากนักเอง หากมีการให้ความร้อนกับพอลิเมอร์เพิ่มสูงขึ้นไปอีก พลังงานที่ให้เข้าไปนั้นนอกจากไปทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลให้แยกออกจากกันแล้ว ยังมีค่าสูงพอที่ไปทำลายพันธะโคเวเลนต์ในสายโซ่ด้วย ทำให้เกิดการสลายตัวเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงเป็นเหตุให้สมบัติทางด้านเชิงกลของพอลิเมอร์เสียไป เรียกอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวนี้ว่า อุณหภูมิสลายตัว (Degradation temperature,  $T_d$ )



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์

### 2.8.2 ดีฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential scanning calorimeter, DSC)

ดีฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรีเป็นเทคนิคหนึ่งในกลุ่มของเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยความร้อน ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการหาลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ DSC เป็นเทคนิคที่วัดถึงความแตกต่างของพลังงานที่ให้เข้าไปกับสารตัวอย่าง และวัสดุเฉื่อยอ้างอิง (Inert reference material) แล้วเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ให้กับสารทั้งสองในขณะนั้น ดังนั้น DSC จึงเป็นการวัดพลังงานความร้อนที่ให้เข้าไป หรือปล่อยออกมา กับสารตัวอย่าง ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ถ้าสารตัวอย่างมีการดูดกลืนพลังงานความร้อนเข้าไปในขณะที่เปลี่ยนแปลง



อุณหภูมิกระบวนการเปลี่ยนแปลงนั้นก็จะขึ้นประเภทแบบดูดความร้อน เช่น การเปลี่ยนสถานะแก้ว ( $T_g$ ) และการหลอมเหลว ( $T_m$ ) แต่ถ้าสารตัวอย่างมีการปล่อยพลังงานความร้อนออกมา กระบวนการเปลี่ยนแปลงก็เป็นประเภทแบบคายความร้อน เช่น การเกิดผลึก ( $T_c$ )

ส่วนสำคัญที่สุดของเครื่อง DSC คือเซลล์ที่ใช้บรรจุสารตัวอย่างและสารอ้างอิง ซึ่งประกอบด้วยเซลล์สารตัวอย่าง (S) และ เซลล์อ้างอิง (R)

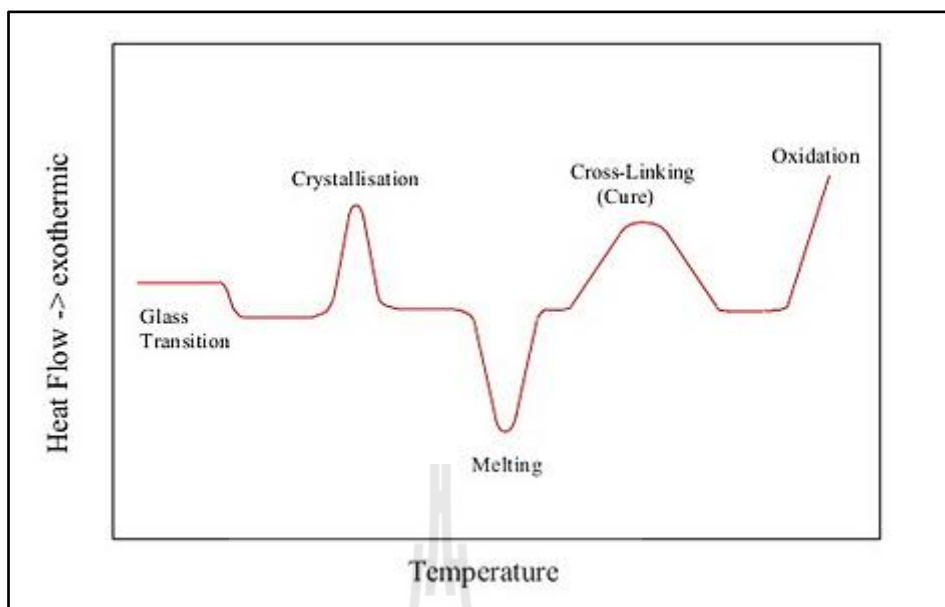
-เซลล์สารตัวอย่าง: เป็นเซลล์อะลูมิเนียม บรรจุตัวอย่างประมาณ 5-10 mg

-เซลล์อ้างอิง: เป็นเซลล์อะลูมิเนียมเปล่า ไม่บรรจุสารอะไรเลย หรือบรรจุสารเฉื่อย ซึ่งเป็นสารพวกที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิที่สนใจ

### 2.8.2.1 หลักการทำงานของเครื่อง DSC

หลักการที่นิยมใช้คือการชดเชยพลังงาน (Power compensated) โดยการชดเชยพลังงานเพื่อให้อุณหภูมิของสารตัวอย่าง ( $T_s$ ) และสารอ้างอิง ( $T_R$ ) มีค่าเท่ากันตลอดการทดลองของการเปลี่ยนอุณหภูมิ นั่นคือ  $\Delta T = T_s - T_R = 0$  เพื่อเป็นการให้อุณหภูมิมีค่าเท่ากันตลอดเวลา เครื่อง DSC ต้องใช้หลักการดุลเข้าสู่ศูนย์ (Null balance) กล่าวคือ ถ้าสารตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน สารมีการดูดกลืนพลังงานทำให้อุณหภูมิ  $T_s$  มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ  $T_R$  ( $T_s < T_R$ ) ดังนั้น เครื่อง DSC จะทำการชดเชยโดยการเพิ่มความร้อนจากพลังงานไฟฟ้า มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt, W) ให้กับเซลล์สารตัวอย่างด้วยจำนวนที่เท่ากับสารตัวอย่างดูดกลืนเข้าไปใช้ในการเปลี่ยนแปลง ทำให้อุณหภูมิ  $T_s$  เพิ่มขึ้นไปเท่ากับ  $T_R$  เดิม และค่าพลังงานการชดเชยนี้เครื่อง DSC ทำการบันทึกไว้ในคอมพิวเตอร์ ในทางกลับกันถ้าสารตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบคายความร้อน มีการให้พลังงานออกมาทำให้อุณหภูมิ  $T_s$  มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ  $T_R$  ( $T_s > T_R$ ) ดังนั้น เครื่อง DSC จะทำการชดเชยโดยการเพิ่มความร้อนจากพลังงานไฟฟ้าให้กับเซลล์อ้างอิง เพื่อทำให้ค่า  $T_R = T_S$  และค่าพลังงานการชดเชยนี้เครื่อง DSC ทำการบันทึกไว้ในคอมพิวเตอร์ พร้อมทั้งมีการบันทึกด้วยว่าการชดเชยพลังงานในแต่ละครั้งนั้นชดเชยให้กับเซลล์ใด

กราฟ DSC หรือเรียกว่าเทอร์โมแกรม ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างการไหลความร้อน (Heat flow) กับอุณหภูมิ ดังรูป 2.13 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในสารตัวอย่างทำให้เส้นกราฟเบี่ยงเบนไปจากเส้นฐาน (Baseline) ถ้าเป็นกระบวนการดูดความร้อนเส้นกราฟจะเบี่ยงขึ้นด้านบน และเบี่ยงต่ำลงจากเส้นฐานเมื่อเป็นกระบวนการคายความร้อน การสั่งให้คอมพิวเตอร์เขียนเส้นกราฟ DSC เบี่ยงแบบนี้เป็นไปตามความนิยม ซึ่งในความเป็นจริงแล้วสามารถสั่งให้เขียนเส้นกราฟ DSC เบี่ยงไปในทางตรงข้ามได้



รูปที่ 2.15 เทอร์โมแกรม DSC เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการไหลความร้อนกับอุณหภูมิ

จากกราฟ DSC ดังรูป 2.15 ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์ที่ได้มีค่าเป็นช่วง (Ranges) มากกว่าที่เป็นค่าใดค่าหนึ่ง อย่างไรก็ตามในการรายงานผลจะรายงานเป็นอุณหภูมิต่างๆ ดังนี้

- ค่า  $T_g$  ใช้จุดกึ่งกลางของเส้นกราฟรูปตัว S
- $T_c$  และ  $T_m$  ใช้ค่าอุณหภูมิที่พิก (Peak)

## 2.9 ปรีทัศน์วรรณกรรม

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

Pickering, S.J. (2006) ได้ศึกษาการนำขยะพลาสติกชนิดเทอร์โมเซตนำกลับมาใช้ใหม่โดยนำมาผสมเป็นวัสดุคอมโพสิตเพื่อให้เศษเทอร์โมเซตนี้เป็นวัสดุช่วยเสริมแรงโดยทำการทดลองทั้งขยะเทอร์โมเซตที่เป็นอนุภาคและเส้นใย จากผลการวิจัยพบว่า ขยะเทอร์โมเซตที่มีลักษณะเป็นผงทำให้ความหนาแน่นและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุลดลง ส่วนขยะเทอร์โมเซตที่มีลักษณะเป็น

เส้นใยมีศักยภาพสามารถเสริมแรงได้ มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น หากเทียบกับวัสดุที่ไม่มีการเสริมแรง แต่มีคุณสมบัติเชิงกลด้อยลงมาเมื่อเทียบกับวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ยังไม่ผ่านการขึ้นรูปมาก่อน

Phaiboon Panyakapo, Mallika Panyakapo (2008) ได้ศึกษาการนำเศษเมลามีนกลับมาใช้ใหม่ โดยนำมาบดและนำมาเป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตมวลเบา ด้วยอัตราส่วนการผสมต่างกันเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติการรับแรงกด (Compressive) และความหนาแน่น (Density) ซึ่งสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่ต้องการต้องมีความหนาแน่นต่ำและรับแรงอัดในค่าที่ยอมรับได้ ผลการวิจัยพบว่าเศษเมลามีนที่ผสมเข้าไปจะทำให้ชิ้นทดสอบมีความหนาแน่นน้อยลงและรับแรงกดได้น้อยลงด้วย

Makki และคณะ (2009) เสนอทางเลือกในการนำของเสียเมลามีน-ฟอร์มัลดีไฮด์ (MF) และยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ (UF) เรซินที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว มาบดและนำมาผสมกับพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester, UP) โดยใช้อัตราส่วนผสมต่าง ๆ จากการตรวจสอบสมบัติเชิงกลโดยพิจารณาจากค่าความแข็งแรงกดอัด พบว่าของเสีย UF และ MF สามารถนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงสำหรับคอมโพสิตของพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัวได้ดีมาก

P. Pakdeechote, และคณะ (2009) ศึกษาการใช้เปลือกไข่เป็นสารตัวเติมใน HDPE พบว่าการเพิ่มปริมาณผงเปลือกไข่จะทำให้มอดุลัสของยังก์ ความแข็ง และ HDT เพิ่มขึ้นตามปริมาณผงเปลือกไข่ที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณผงเปลือกไข่จะทำให้ การยึดตัว ณ จุดขาด ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก และ ความต้านทานแรงกระแทก ลดลงตามปริมาณผงเปลือกไข่เพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึง ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณผงเปลือกไข่จาก 10 เป็น 20% โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 30% และ 40% ความต้านทานแรงดึง ณ จุดขาดจะคงที่ พฤติกรรมการแตกหักภายใต้แรงดึงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่เติมผงเปลือกไข่จะเปลี่ยนจากการแตกหักแบบเปราะเป็นการแตกหักแบบเหนียวเมื่อเพิ่มปริมาณผงเปลือกไข่เป็น 20% โดยน้ำหนัก มอดุลัสแรงดัดเพิ่มขึ้นในขณะที่ความต้านทานแรงดัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณผงเปลือกไข่

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

P. Pakdeechote, และคณะ (2010) ศึกษาขนาดของอนุภาคสารตัวเติมที่เติมลงใน HDPE พบว่าการลดขนาดอนุภาคของผงเปลือกไข่จาก D50 17.1 และ D[4,3] เท่ากับ 24.1 ไมโครเมตร เป็น 14.4 และ 16.9 ไมโครเมตร ตามลำดับ ไม่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติการไหล สมบัติทางกล และ

สมบัติทางความร้อน การใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้เพื่อปรับปรุงการยึดติดที่ผิวหน้าระหว่างผงเปลือกไข่และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความทนต่อการกระแทก

Thirumal et al. (2010) ได้ศึกษาการนำเมลามีนโพลีฟอสเฟส (MPP) และเมลามีนไซยานูเรต (MC) มาผสมเป็นสารหน่วงไฟในโพลีโพลียูรีเทน (PUF) และทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและประสิทธิภาพการหน่วงไฟ ผลการวิจัยพบว่าโพลี PUF ที่เติม MPP มีคุณสมบัติเชิงกลที่ลดลง ส่วนโพลี PUF ที่เติม MC มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ส่วนคุณสมบัติทางด้านการหน่วงไฟทั้ง MPP และ MC ที่เติมลงไป ใน PUF มีคุณสมบัติทางด้านการหน่วงไฟที่ดีขึ้น แต่ MPP จะให้ประสิทธิภาพการหน่วงไฟที่ดีกว่า

จรุงรัตน์ พันธุ์สุวรรณ, จริญญาภรณ์ อุ่นวงษ์ และคณะ (2011) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแผ่นยางดูดซับกลิ่น โดยการศึกษาสารตัวเติมที่เติมลงไป ในยางธรรมชาติเพื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการดูดซับกลิ่น และสมบัติเชิงกลอันได้แก่ ความต้านทานแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาด โดยงานวิจัยดังกล่าวพิจารณาอยู่ 3 ปัจจัย คือ ชนิดของถ่านไม้ ขนาดของผงถ่าน และปริมาณของผงถ่าน เมื่อทำการทดลองพบว่า ขนาดอนุภาคผงถ่านใหญ่ขึ้น และปริมาณของผงถ่านเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับกลิ่นเพิ่มขึ้น ขณะที่เมื่อขนาดอนุภาคลดลง และปริมาณของผงถ่านเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น

Krittaya W. (2012) ศึกษาอิทธิพลของการดูดซึมน้ำและอุณหภูมิขึ้นรูปต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนที่ส่วนผสมต่าง ๆ ด้วยการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อน พบว่าวัสดุที่ผ่านการดูดซึมน้ำมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ทั้งด้านการรับแรงดัด แรงกดอัด และแรงกระแทก ในส่วนของอุณหภูมิขึ้นรูปที่ต่างกันนั้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่างกัน ซึ่งวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 180°C มีสมบัติทางกลด้านการรับแรงดัด ดีกว่าอุณหภูมิขึ้นรูป 160°C ส่วนสมบัติเชิงกลด้านการรับแรงกดและแรงกระแทก วัสดุที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 160°C จะมากกว่าวัสดุที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 180°C

Methini M. (2012) ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของเมลามีนโดยนำเสนอวิธีการขึ้นรูปใหม่คือการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เย็นและเปรียบเทียบผลกับการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อนซึ่งพบว่าการอัดแบบแม่พิมพ์เย็นให้ความแข็งแรงของวัสดุที่น้อยกว่า ในขณะที่ขอบเขตการขึ้นรูปเย็นที่เหมาะสมในการขึ้นรูปคือหลังจากอัดด้วยแม่พิมพ์เย็นต้อง Pre-heating ที่ 100°C 15 ชั่วโมงจากนั้นอบด้วยอุณหภูมิ 160°C 1 ชั่วโมง และจากการศึกษาวัสดุรีไซเคิลพบว่าการเพิ่มอนุภาคเศษเมลามีนเข้าไปในเมลามีนใหม่ทำให้ความต้านทานแรงดัด ความต้านทานแรงกระแทกลดลง แต่ช่วยปรับปรุงความสามารถในการรับแรงอัดได้ดีขึ้นเมื่อใส่ในปริมาณที่เหมาะสม

Agunsoye J. O และคณะ (2013) ทำการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำเศษซิลิกามาเป็นสารตัวเติมในวัสดุรีไซเคิลจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเพื่อเสริมความแข็งแรง โดยพิจารณาผลกระทบของขนาดอนุภาคเซรามิกช่วง 40 – 150 ไมโครเมตร โดยเติมสารตัวเติม 2% โดยน้ำหนัก

หลังจากนั้นนำไปศึกษาผลกระทบที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล การทดสอบการสึกหรอ และพฤติกรรมทางความร้อน สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการหาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ คือการวิเคราะห์ความแปรปรวน หรือ Analysis of variance (ANOVA) และ สมการการถดถอยเชิงเส้น หรือ Linear regression ผลการทดลองพบว่าเมื่อขนาดอนุภาคเซรามิกลดลงจะทำให้สมบัติเชิงกล การทนการสึกหรอ และ สมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตจาก LDPE-PC สูงขึ้น



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นหนึ่งในการศึกษาเพื่อหาแนวทางการใช้เศษที่เกิดจากกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนสำหรับบรรจุอาหารให้เกิดประโยชน์ โดยมีการนำเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนดังกล่าวนำไปใช้เป็นสารตัวเติมในวัสดุคอมโพสิต ซึ่งจะทำให้การศึกษา 3 ปีวิจัยได้แก่ ปริมาณการเติมสารตัวเติม ขนาดอนุภาคสารตัวเติม และการเติมสารเชื่อมโยง ต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน ซึ่งสาระสำคัญของบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานทั้งหมด เริ่มจากวัสดุเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย การเตรียมวัสดุดิบ การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต การขึ้นรูปชิ้นทดสอบ ตลอดจนวิธีการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ตามมาตรฐานสำหรับสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน ในการวิจัยนี้ศึกษาหลายสมบัติด้วยกัน เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ความสามารถในการทนไฟ เป็นต้น

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย

##### 3.1.1 เมทริกซ์ (Matrix)

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยจะใช้เมทริกซ์คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) เกรด EL-Lene H6007 JU (ดังรูป 3.1) เป็นเกรดสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (MFR = 7.5 g/10min) สาเหตุที่เลือกใช้เกรดนี้เนื่องจากในงานวิจัยจะขึ้นรูปชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด โดยจะเติมสารตัวเติมเข้าไปเพื่อให้ได้พอลิเมอร์คอมโพสิต วัสดุที่ใช้เป็นส่วนหนึ่งของเมทริกซ์ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด

##### 3.1.2 สารตัวเติม (Filler)

สารตัวเติมทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยในงานวิจัยจะศึกษาสารตัวเติม 2 ชนิด (ดังรูป 3.2) ที่ได้จากบริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด มหาชน เป็นเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (เกรดอุตสาหกรรม ME 6033 ที่มีส่วนประกอบคือ ฟลิกเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ และอัลฟาเซลลูโลส) ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แล้ว

1. เศษเมลามีนแบบครีป (Waste Melamine-Formaldehyde Resins, WMF) เป็นครีปที่ติดมากับผลิตภัณฑ์ซึ่งเกิดจากการนำเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซินมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัด โดยจะใช้เฉพาะแบบที่ไม่มีสีและไม่มีลวดลาย

2. เศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนแบบฝุ่น (Particle Waste Melamine-Formaldehyde Resins, PWMF) ที่ได้จากการขัดผิว และการตกแต่งผิวของผลิตภัณฑ์เมลามีน



รูปที่ 3.1 HDPE



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.2 สารตัวเติมที่ใช้ในงานวิจัย (ก) เศษเมลามีนแบบครีป (WMF)  
(ข) เศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนแบบฝุ่น (PWMF)

### 3.1.3 สารเชื่อมโยง (Compatibilizer)

สำหรับสารเชื่อมโยงนี้ทำหน้าที่เป็นตัวประสานทำให้ส่วนของเมทริกซ์และสารตัวเติมยึดติดกันได้ดีขึ้น สารเชื่อมโยงที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (High density polyethylene graft maleic anhydride, HDPE-g-MA) ชื่อทางการค้า Fusabond® M603 โดยปกติแล้วสารเชื่อมโยงนี้นิยมเติมที่ 5-7 % โดยน้ำหนัก เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลและสมบัติของผิวให้ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้กรณีที่มีการเติมสารเชื่อมโยงจะเติมที่ 5% ซึ่งสารเชื่อมโยงที่ใช้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท คูปองท์ (ประเทศไทย) จำกัด



รูปที่ 3.3 สารเชื่อมโยงที่ใช้ในงานวิจัย HDPE-g-MA



## 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องบดยา สำหรับบดเมลามีนแบบละเอียด

3.2.2 เครื่องร่อนตะแกรง Vibratory sieve shaker ANALYSTTE 3 PRO และตะแกรงร่อน Retsch test sieve ASTM E11 (1995)

3.2.3 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) โดย Thermo Scientific HAAKE PolyLabOS Model RheoDrive7

3.2.4 เครื่องบด PRM Plastic recycling machinery รุ่น MGK 2121R-2

3.2.5 เครื่องฉีดขึ้นรูป (Co-injection molding machine) Model TRX-60C โดย Hangzhou Tedric Machinery Co.,Ltd

3.2.6 เครื่องทดสอบแรงกด (Universal testing machine) โหลดเซลล์ขนาด 5 kN โดยบริษัท Instron Model 5565

3.2.7 เครื่องทดสอบแรงกระแทก โดย INSTRON รุ่น CEAST 9050

3.2.8 เครื่องทดสอบความแข็ง โดย DUROTECH, BENCH STAND, รุ่น BS550

3.2.9 เครื่องทดสอบดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential scanning calorimeter testing machine) โดย Perkin Elmer รุ่น Pyris Diamond

3.2.10 เครื่อง Scanning electron microscope, SEM ยี่ห้อ JEOL รุ่น JCM6010

3.2.11 เครื่องวัดขนาดด้วยเลเซอร์ ยี่ห้อ Horiba รุ่น LA-950V2

3.2.12 เครื่องชั่ง Mettler Toledo Type New Classic MF รุ่น ML3002 ทศนิยม 2 ตำแหน่ง

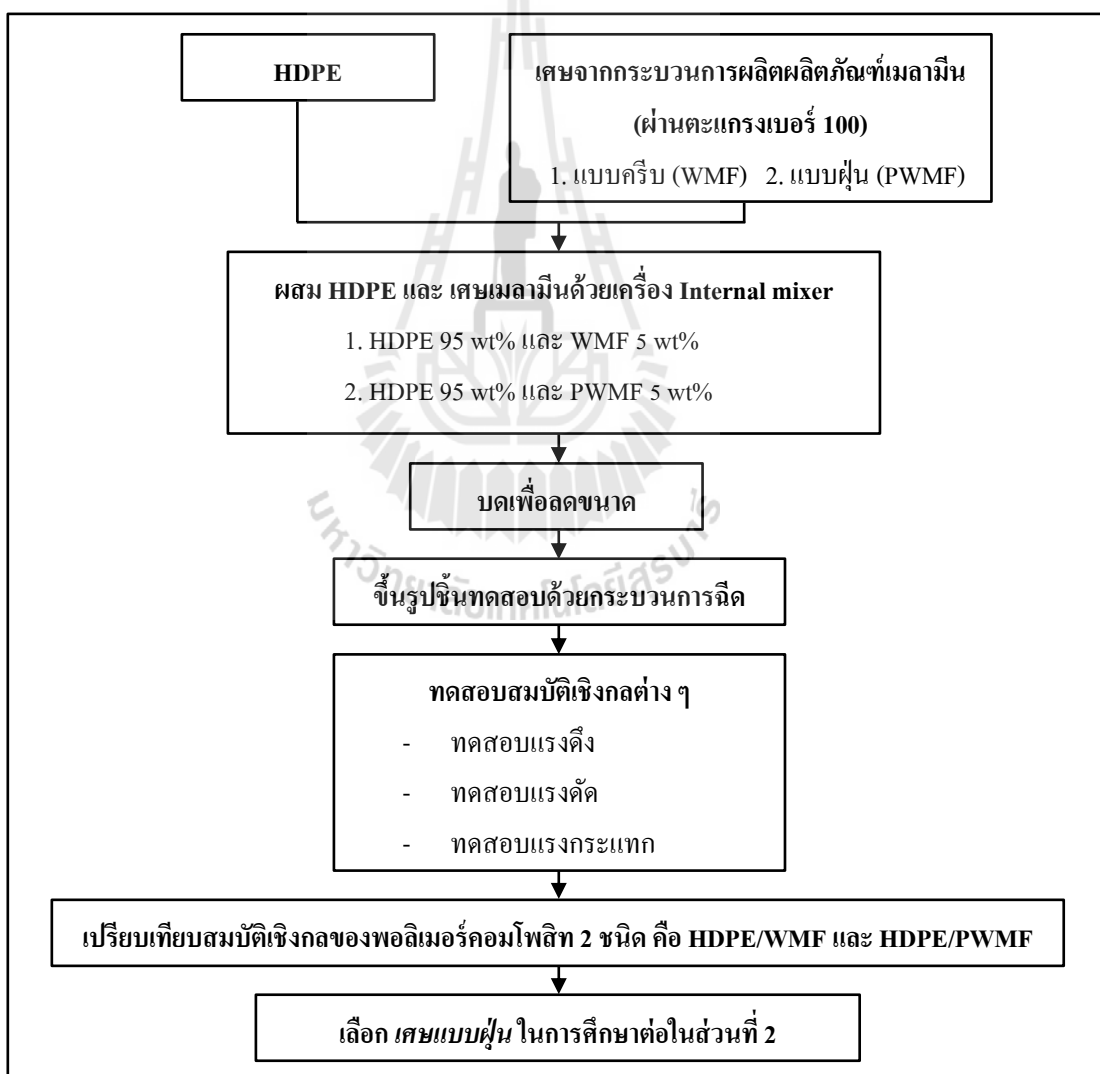
3.2.13 เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ แบบดิจิตอล 2 ตำแหน่ง โดย Mitutoyo

3.2.14 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต เช่น ถาดอะลูมิเนียม ถุงมือผ้า ถุงมือกันความร้อน แปรงทองเหลือง เกรียงทองเหลือง เป็นต้น

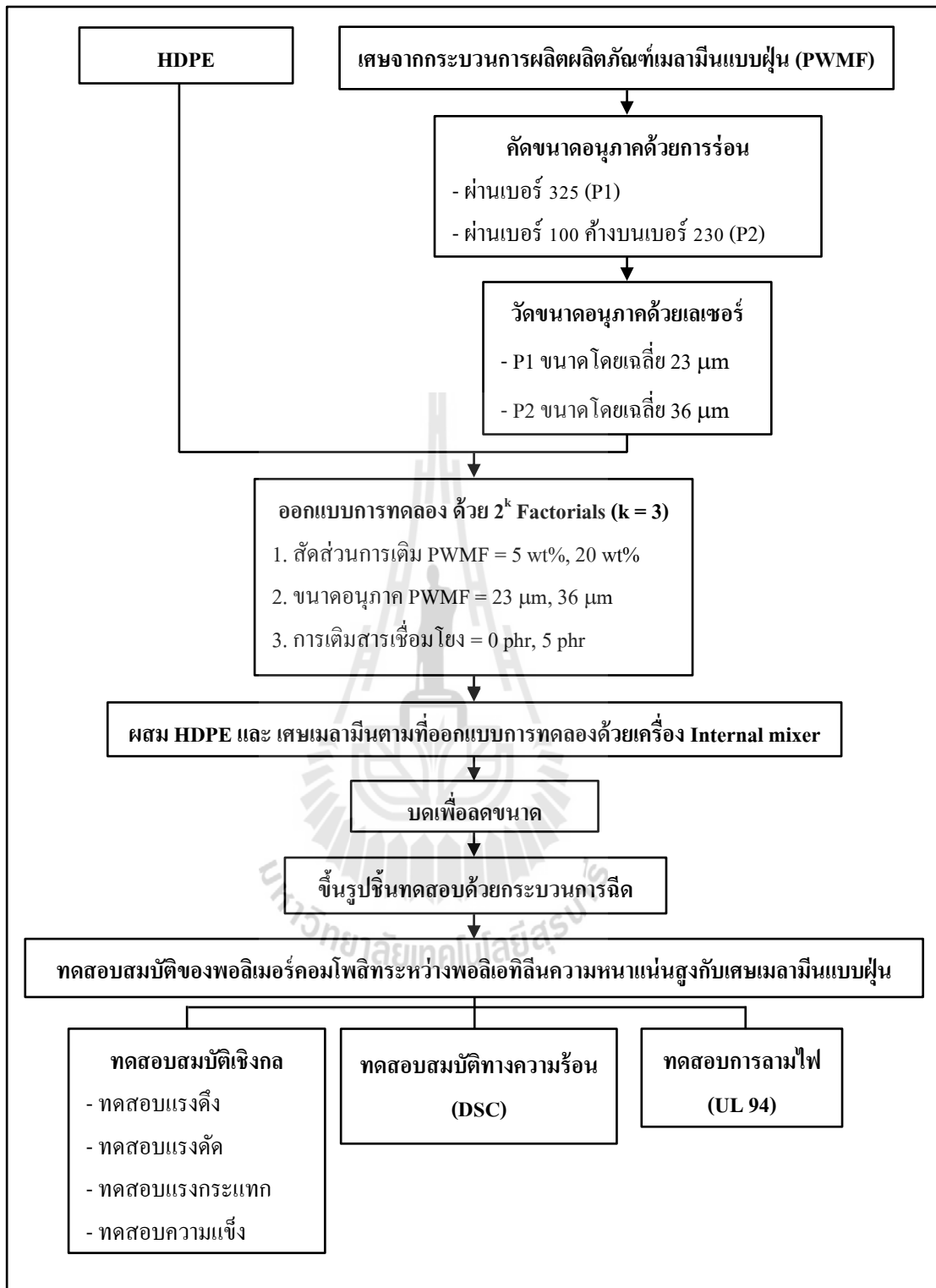
3.2.15 อุปกรณ์อื่น ๆ เช่น ถุงชีบล็อค ที่คีบสาร แปรง ผ้า เป็นต้น

### 3.3 แผนผังแสดงการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่ง คือการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบชนิดของเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนที่แตกต่างกัน 2 ชนิดต่อสมบัติเชิงกล หลังจากนั้นจะเลือกเศษมาชนิดหนึ่งเพื่อมาใช้ศึกษาต่อในส่วนที่ 2 จากการศึกษาในส่วนแรกนั้นได้เลือกเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนแบบฝุ่น (PWMF) ในการศึกษาต่อโดยจะศึกษาผลกระทบของสัดส่วนของสารตัวเติม ขนาดอนุภาคสารตัวเติม และการเติมสารเชื่อมโยงต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3.4 – 3.5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 การดำเนินงานวิจัย ส่วนที่ 1 ศึกษาเพื่อเปรียบเทียบชนิดของสารตัวเติม 2 ชนิด



รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงการดำเนินงานวิจัย ส่วนที่ 2 ศึกษาผลกระทบของสัดส่วนการเติมขนาดอนุภาคเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน และการเติมสารเชื่อมโยง

### 3.4 วิธีดำเนินการทดลอง

#### 3.4.1 การเตรียมสารตัวเติม

##### 1) การบด

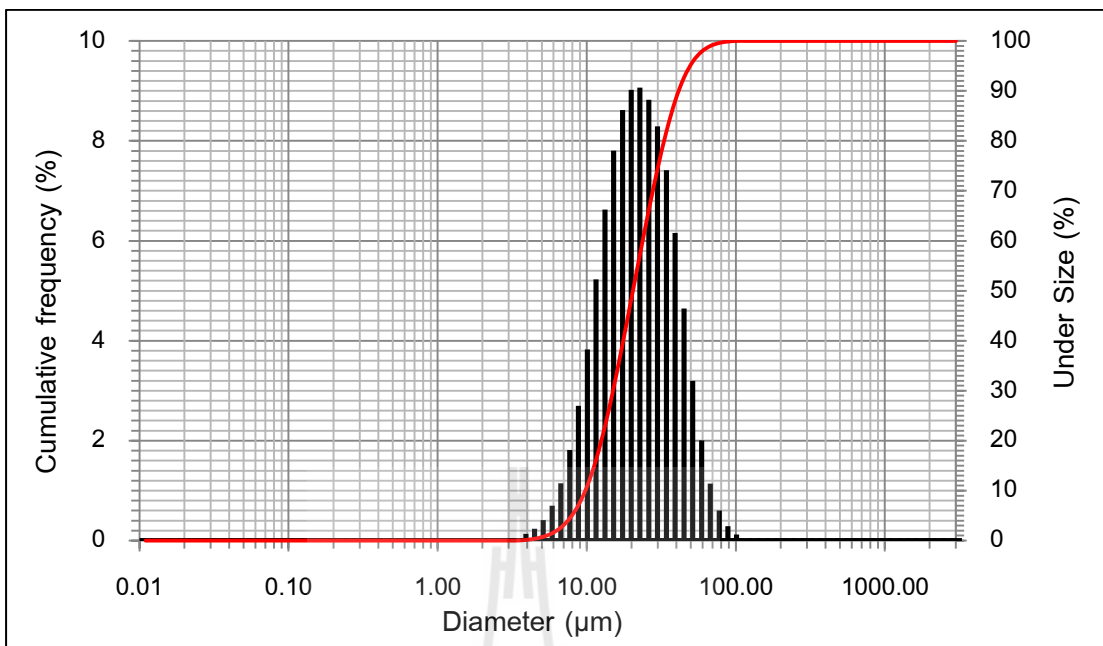
เศษเมลามีนแบบครีป จะบดย่อยขนาดทั้งหมด 2 รอบ ได้แก่ บดหยาบด้วยเครื่องบด PRM Plastic recycling machinery Model MGK 2121R-2 หลังจากนั้นจะบดละเอียดด้วยเครื่องบดยาให้มีขนาดเล็ก สำหรับเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนแบบฝุ่นเนื่องจากมีขนาดเล็กแล้วจึงไม่จำเป็นต้องบดเพื่อลดขนาด หลังจากการบดจะดำเนินการร่อนด้วยตะแกรงเพื่อคัดขนาดต่อไป

##### 2) การร่อนเพื่อคัดขนาดอนุภาค

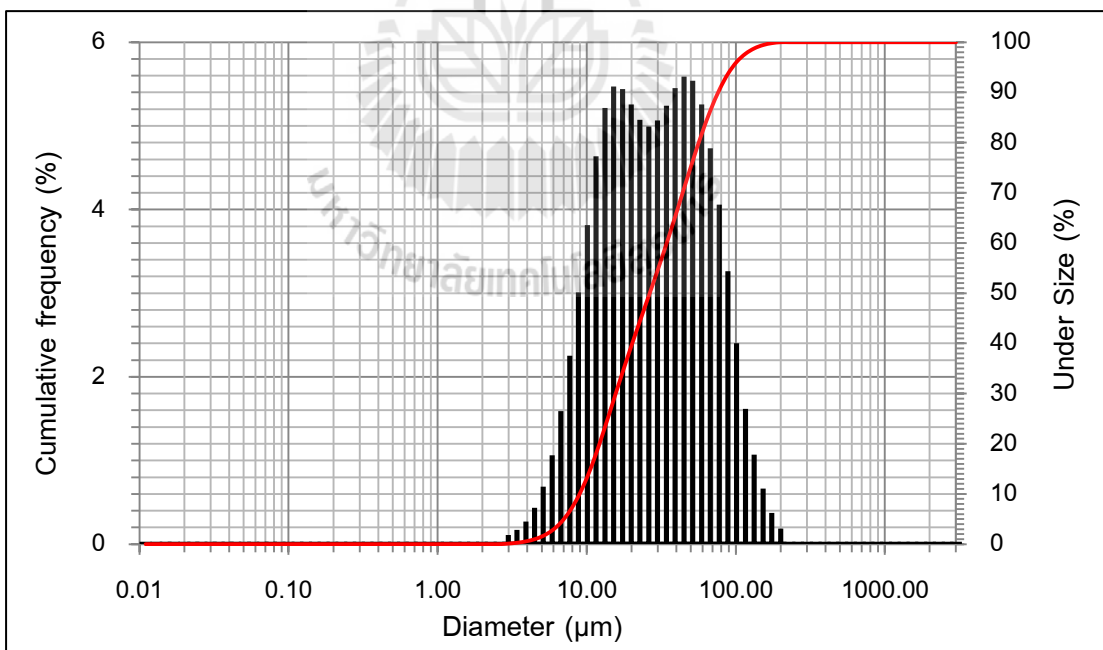
งานวิจัยนี้จะใช้ตะแกรงร่อน ที่มีชื่อทางการค้าว่า Retsch ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว สูง 2 นิ้ว ตรงตามมาตรฐาน ASTM E11 (1195) โดยตะแกรงที่ใช้ร่อนมีขนาดช่องเปิดที่แตกต่างกันไป ตามเบอร์ของตะแกรง สำหรับการร่อนเพื่อคัดขนาดจะใช้ตะแกรงร่อนที่มีช่องเปิดใหญ่สุดไว้ข้างบนและไล่ระดับลงมาให้ขนาดช่องเปิดเล็กสุดไว้ข้างล่าง โดยจะทำการเขย่าตะแกรงด้วยเครื่องร่อนตะแกรง Vibratory sieve shaker ANALYSTTE 3 PRO เป็นเวลา 5 นาที แอมพลิจูด 2 มิลลิเมตร งานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเศษแบบครีป และแบบฝุ่น ในส่วนนี้จะใช้อุณหภูมิผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เท่านั้น ในขณะที่ในส่วนที่สองจะมีการศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยในส่วนนี้จะใช้เศษแบบฝุ่นที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 230 (P2) และ เศษแบบฝุ่นที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (P1)

##### 3) การวัดขนาดอนุภาค

การวัดขนาดอนุภาคจะใช้เครื่องวัดขนาดด้วยเลเซอร์ (Laser particle size analyzer) (Horiba, LA-950V2) โดยเครื่องนี้สามารถวัดขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างที่เป็นผงแห้งและสารแขวนลอย ในการทดลองวัดขนาดอนุภาคนั้นจะใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยจะนำเศษแบบฝุ่นลงไปละลายในเอทานอลในภาชนะนั้นจะมีแท่งแม่เหล็กขนาดเล็กทำหน้าที่กวนให้เศษฟุ้งกระจายในสารละลายอยู่เสมอ จากนั้นจะมีการยิงเลเซอร์ใส่ขนาดอนุภาคในสารละลายเพื่อวัดขนาด และการกระจายตัวของอนุภาคเหล่านั้น ผลจากการวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคแสดงดังรูปที่ 3.6 และ 3.7 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตาราง 3.1



รูปที่ 3.6 ขนาดและการกระจายตัวของเศษแบบฝุ่นที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (P1)



รูปที่ 3.7 ขนาดและการกระจายตัวของเศษแบบฝุ่นที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100  
ค้างบนตะแกรงเบอร์ 230 (P2)

ตารางที่ 3.1 ขนาดอนุภาคจากเครื่องวัดขนาดด้วยเลเซอร์

	P1	P2
ค่าเฉลี่ย (Mean)	23.25 $\mu\text{m}$	35.97 $\mu\text{m}$
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	13.38 $\mu\text{m}$	29.53 $\mu\text{m}$
มัธยฐาน (Median)	20.43 $\mu\text{m}$	26.48 $\mu\text{m}$

### 3.4.2 การออกแบบการทดลอง (Design of experiment)

จากการทำการทดลองส่วนที่ 1 ที่ศึกษาเบื้องต้นของผลกระทบของชนิดเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนระหว่างแบบครีบบและแบบฝุ่นจะพบว่าเศษแบบครีบบและแบบฝุ่นให้สมบัติเชิงกลไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากเศษแบบฝุ่นสามารถใช้งานได้เลยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการบดย่อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกเศษแบบฝุ่นในการศึกษาต่อไปในส่วนที่ 2 ของงานวิจัยจะใช้การออกแบบการทดลองเข้ามาช่วย ซึ่งจะศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่สนใจต่อสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน ซึ่งปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัยด้วยกัน ได้แก่ สัดส่วนการเติมสารตัวเติม ขนาดอนุภาคของสารตัวเติม และ ผลกระทบจากการเติมสารเชื่อมโยง

การออกแบบการทดลองนี้จะออกแบบด้วย  $2^k$  full-factorials design โดยที่ k คือจำนวนของปัจจัยที่ต้องการศึกษา โดยมี 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) และ ระดับสูง (+1) ในกรณีนี้ศึกษา 3 ปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งจากการออกแบบการทดลองนั้น เมื่อพิจารณา 3 ปัจจัยจะได้รับการทดลองทั้งหมด 8 การทดลอง ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยที่สนใจในงานวิจัย

Factor	Name	Low level (-1)	High level (+1)
A	สัดส่วนการเติม PWF (%)	5	20
B	ขนาดอนุภาค PWF ( $\mu\text{m}$ )	23	36
C	การเติมสารเชื่อม โยง (phr)	0	5

ตารางที่ 3.3 การออกแบบการทดลองด้วยวิธี  $2^k$  full-factorials design (k=3)

Run	Design Code			PWMF content (%)	Particle size ( $\mu\text{m}$ )	Compatibilizer (phr)	Name
	A	B	C				
1	-	-	-	5	23	0	HDPE/5PWMF/P1
2	-	+	-	5	36	0	HDPE/5PWMF/P2
3	+	-	-	20	23	0	HDPE/20PWMF/P1
4	+	+	-	20	36	0	HDPE/20PWMF/P2
5	-	-	+	5	23	5	HDPE/5PWMF/5HDPE-g-MA/P1
6	-	+	+	5	36	5	HDPE/5PWMF/5HDPE-g-MA/P2
7	+	-	+	20	23	5	HDPE/20PWMF/5HDPE-g-MA/P1
8	+	+	+	20	36	5	HDPE/20PWMF/5HDPE-g-MA/P2

### 3.4.3 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน

สำหรับขั้นตอนหลังจากนี้จะเป็นการเตรียมวัสดุสำหรับทำพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเอทิลีนความหนาแน่นสูงกับเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนทั้งหมด 8 การทดลอง ดังที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ก่อนหน้านี้ สำหรับในการเตรียมวัสดุในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

#### 1) การผสม หรือ การคอมปาวด์

สำหรับขั้นตอนนี้จะผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน หากมีการเติมสารเชื่อมโยงก็จะผสมในขั้นตอนนี้ เช่นเดียวกัน ในงานวิจัยนี้จะใช้การผสมแบบปิด หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Internal mixer (Thermo Scientific HAAKE PolyLabOS, RheoDrive7) เนื่องจากประสิทธิภาพในการผสมสูง อีกทั้งใช้เวลา น้อยโดยใช้อุณหภูมิ  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 15 นาที ความเร็วรอบ 70 rpm โดยจะผสมครั้งละ 200 กรัม (ประมาณ 70% ของปริมาตรของห้องผสม) เมื่อผสมเรียบร้อยแล้วจะได้ลักษณะดังรูป 3.8

#### 2) การบดเพื่อลดขนาด

หลังจากผสมเรียบร้อยแล้วจะได้พอลิเมอร์คอมโพสิตในลักษณะเป็นก้อน ไม่สามารถนำไปใช้ต่อไปได้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ดังนั้นจึงต้องบดเพื่อลดขนาดสำหรับใช้ใน

กระบวนการต่อไป ในขั้นตอนนี้จะบดด้วยเครื่องบด PRM Plastic recycling machinery รุ่น MGK 2121R-2 เมื่อบดแล้วจะได้ลักษณะดังรูป 3.9



รูปที่ 3.8 พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนแบบฝุ่นภายหลังผสม



รูปที่ 3.9 พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนแบบฝุ่นก่อนการฉีดขึ้นรูป



### 3.4.4 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบด้วยวิธีการฉีด

เมื่อเตรียมเม็ดคอมปาวด์เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนและเงื่อนไขในการขึ้นรูป สำหรับการขึ้นรูปนั้นงานวิจัยนี้เลือกการฉีดขึ้นรูปเนื่องจากการฉีดขึ้นรูปนั้นนิยมใช้มากในอุตสาหกรรม อีกทั้งยังให้ความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า สำหรับการฉีดขึ้นรูปนี้ฉีดด้วยเครื่องฉีด Co-injection molding machine รุ่น TRX-60C โดยบริษัท Hangzhou Tedric Machinery Co.,Ltd โดยฉีดใส่แม่พิมพ์ที่เป็นรูปร่างและขนาดสำหรับทดสอบสมบัติต่าง ๆ ดังรูป 3.10 หลังจากนั้นตัดชิ้นทดสอบออกจาก runner แล้วตกแต่งผิว สำหรับเงื่อนไขในการฉีดมีดังนี้

- อุณหภูมิของบารเรล (°C) ทั้ง 5 โซน คือ 180, 175, 170, 165, 160 ตามลำดับ
- อุณหภูมิแม่พิมพ์ (mold temp) 30 °C
- เวลาในการเย็นตัวในแม่พิมพ์ (cooling time) 30 sec
- ความดันแช่ (hold pressure) 100 bar
- ความดันในการฉีด (injection pressure) 80 bar



รูปที่ 3.10 ชิ้นทดสอบที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกับเศษแบบฝุ่น

### 3.4.5 การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน

#### 3.4.5.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

##### 1) การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638-10 โดยขึ้นทดสอบที่ใช้เป็นประเภทที่ 1 ความหนาชิ้นงานประมาณ 3.2 mm ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine, INSTRON, model 5565) ขนาดโหลดเซลล์ 5 kN ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) โดยกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบ ดังนี้

ระยะห่างระหว่างที่จับยึด (Distance between grips)	115	mm
ความยาวเกจ (Gauge length)	50	mm
ความเร็วในการทดสอบ (Speed testing)	50	mm/min
จำนวนขึ้นทดสอบ	10	ชิ้น



รูปที่ 3.11 ชิ้นทดสอบแรงดึง

##### 2) การทดสอบแรงดัดโค้ง (Flexural test)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790-10 โดยขึ้นทดสอบเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาด 127x12.7 mm ความหนา 3.2 mm ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine, INSTRON, model 5565) ขนาดโหลดเซลล์ 5 kN ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural strength) ค่ามอดูลัสแรงดัดโค้ง (Flexural modulus) โดยกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบ ดังนี้

ระยะห่างจุดรองรับ (Support span length)	48	mm
ความเร็วในการทดสอบ (Crosshead speed)	1.4	mm/min
จำนวนขึ้นทดสอบ	10	ชิ้น



รูปที่ 3.12 ชิ้นทดสอบแรงดัดโค้ง

### 3) การทดสอบแรงกระแทก (Impact test)

การทดสอบแรงกระแทก จะทดสอบแบบ Izod ตามมาตรฐาน ASTM D256-10 โดยชิ้นทดสอบเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาด 63.5x12.7 mm ความหนา 3.2 mm รอยบากลึก (Notched) รอยบากลึก 2.54 mm ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact testing machine, INSTRON(CEAST)/CEAST 9050) ที่อุณหภูมิ 23 °C ภาระกรรมที่ใช้ (Energy load) 2.7 J เพื่อหาค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) โดยทดสอบจำนวน 10 ชิ้น



รูปที่ 3.13 ชิ้นทดสอบแรงกระแทก

### 4) การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240-05 ในการทดสอบนี้จะทดสอบโดยใช้หัวกดแบบ Shore D ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness testing machine, DUROTECH, BENCH STAND, Model BS550) 5 จุดต่อชิ้นงาน จำนวน 5 ชิ้น

### 3.4.5.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

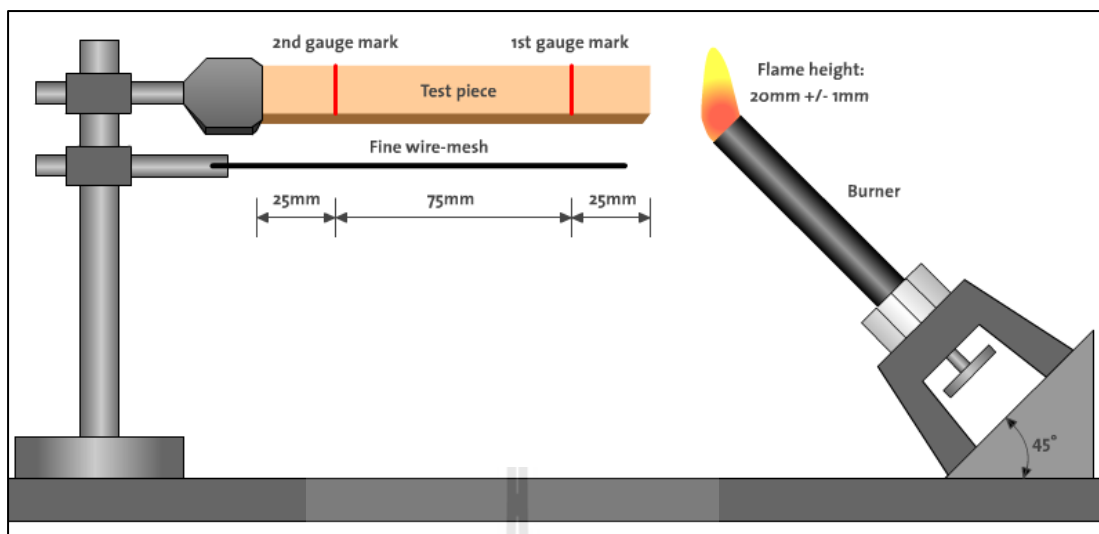
ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential scanning calorimetric, DSC) เป็นการวิเคราะห์หาอุณหภูมิที่สำคัญต่าง ๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิต ได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิการเกิดผลึก นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกได้อีกด้วย สำหรับการทดสอบจะใช้เครื่อง Differential scanning calorimeter (PerkinElmer instrument, Model Pyris Diamond) เตรียมชิ้นทดสอบให้มีขนาดเล็ก น้ำหนักโดยประมาณ 5-10 mg บรรจุในถ้วยอลูมินา ทำการทดสอบภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน ด้วยอัตราการไหล 20 mL/min เพื่อป้องกันการปฏิกิริยาที่ไม่พึงประสงค์ โดยเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) 10 °C/min ทดสอบช่วงอุณหภูมิห้อง ถึงอุณหภูมิ 200 °C (1<sup>st</sup> Heating scan) เพื่อลบความทรงจำอุณหภูมิที่วัสดุเคยผ่านมา แล้วรักษาอุณหภูมิให้คงที่ (Isothermal) เป็นเวลา 5 นาที ที่ 200 °C หลังจากนั้นลดอุณหภูมิด้วยอัตรา (Cooling rate) 10 °C/min จาก 200 °C ถึงอุณหภูมิห้อง สุดท้ายคือเพิ่มอุณหภูมิอีกครั้งด้วยอัตรา 10 °C/min ช่วงอุณหภูมิ 30-200 °C (2<sup>nd</sup> Heating scan) สำหรับเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก ( $\chi_c$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.1

$$\chi_c = \frac{\Delta H_m}{W_f \times \Delta H_m^*} \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่  $\chi_c$  = % การเกิดผลึก  
 $\Delta H_m$  = การเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนในการหลอมเหลว  
 $\Delta H_m^*$  = การเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนของ HDPE ที่ทำให้เกิดผลึก 100% (293.6 J/g) (Wunderlich, 1990)  
 $W_f$  = สัดส่วนของน้ำหนัก HDPE ในพอลิเมอร์คอมโพสิต

### 3.4.5.3 การทดสอบการลามไฟ (Flammability test)

การทดสอบการลามไฟจะทดสอบตามมาตรฐาน UL-94 แบบแนวนอน (Horizontal Burning Test, HB) โดยชิ้นทดสอบมีขนาด 125x12.7 mm ความหนา 3.2 mm โดยจะมีการจับยึดชิ้นทดสอบในลักษณะแนวนอนแล้วจุดไฟจากตะเกียงด้วยเปลวไฟสีฟ้า โดยที่ตะเกียงทำมุม 45 องศา กับแนวระดับเผาชิ้นทดสอบ ดังรูป 3.14 สำหรับการลามไฟที่ชิ้นทดสอบจะใช้เวลา 30 วินาทีเท่านั้น หลังจากนั้นรอให้ชิ้นทดสอบเผาถึงตำแหน่งอ้างอิงที่ 1 แล้วจับเวลา ไปจนกว่าชิ้นทดสอบจะเผาไปยังตำแหน่งอ้างอิงที่ 2 จากนั้นทำการหาอัตราการลามไฟที่เกิดขึ้นในช่วง 75 mm



รูปที่ 3.14 ลักษณะการทดสอบการลามไปตามแนวนอน

(ที่มา : <http://www.ul-ttc.com/en/solutions/test-methods/combustion-fire/flammability-ul-94-hb.html>)

## บทที่ 4

### ผลงานวิจัยและวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการนำเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยนำมาใช้เป็นอนุภาคเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยมีพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นเมทริกซ์ สำหรับการดำเนินงานวิจัยนั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบชนิดของเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน 2 ชนิด ได้แก่ เศษแบบครีป และเศษแบบฝุ่น ต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิต จากนั้นเลือกเศษหนึ่งชนิดใช้ในการศึกษาต่อไป สำหรับส่วนที่ 2 นั้นจะเป็นการศึกษาผลกระทบของสัดส่วนสารตัวเติม ขนาดของอนุภาคสารตัวเติม และการเติมสารเชื่อมโยง ต่อสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน โดยผลจากการศึกษาสามารถเขียนเป็นหัวข้อต่าง ๆ ได้ ดังนี้

1. ผลการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบชนิดของเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน 2 ชนิด ได้แก่ เศษแบบครีป และเศษแบบฝุ่น ต่อสมบัติเชิงกล
  - การทดสอบแรงดึง
  - การทดสอบแรงดัด
  - การทดสอบแรงกระแทก
  - ผลจากการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบเศษ 2 ชนิด
2. ผลการศึกษาผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนแบบฝุ่น และการเติมสารเชื่อมโยง
  - ผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกล
    - การทดสอบแรงดึง
    - การทดสอบแรงดัด
    - การทดสอบแรงกระแทก
    - การทดสอบความแข็ง
  - ผลจากการทดสอบสมบัติทางความร้อน
    - การทดสอบ DSC
  - ผลจากการทดสอบการลามไฟ

#### 4.1 ผลการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบชนิดของเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน 2 ชนิดต่อสมบัติเชิงกล

การศึกษาในส่วนนี้คือการศึกษาผลกระทบของเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนที่ต่างชนิดกันต่อสมบัติเชิงกลเบื้องต้น โดยการนำเศษทั้ง 2 ชนิด คือ เศษแบบกริบ (WMF) และเศษแบบฝุ่น (PWF) ที่เกิดจากกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์บรรจุอาหารมาใช้เป็นอนุภาคเสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยมีพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นเมทริกซ์ ซึ่งในส่วนนี้จะพิจารณาสมบัติเชิงกลที่เกิดขึ้นจากการเติมเศษที่ต่างชนิดกัน ที่สัดส่วน 5 wt% โดยที่เศษที่ใช้ทั้งสองชนิดจะผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนตามมาตรฐาน ซึ่งจะใช้เฉพาะเศษที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เท่านั้น สำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกลในส่วนนี้ ได้แก่ การทดสอบแรงดึงการทดสอบแรงดัด และการทดสอบแรงกระแทก โดยสรุปผลการทดสอบทั้งหมด ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลเพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดของเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน 2 ชนิด

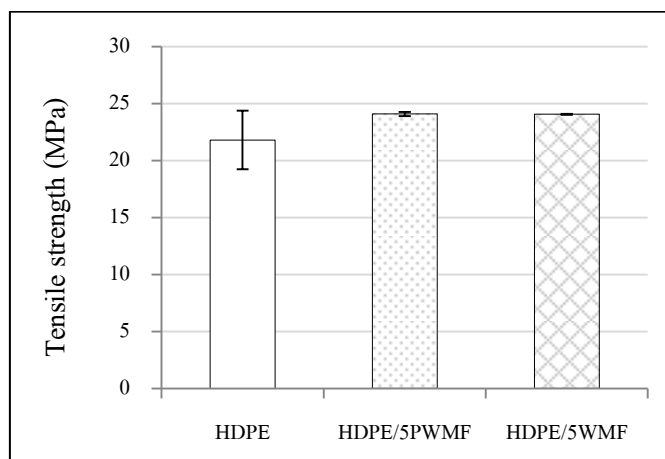
Mechanical Properties	HDPE	HDPE/5PWF	HDPE/5WMF
ความต้านทานแรงดึง (MPa)	21.80 ± 2.57	24.10 ± 0.18	24.07 ± 0.04
เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%)	656.26 ± 48.46	820.35 ± 21.70	87.72 ± 1.24
ความต้านทานแรงดัด (MPa)	23.63 ± 1.06	24.17 ± 0.96	24.09 ± 0.40
มอดูลัสแรงดัด (MPa)	856.80 ± 47.99	892.30 ± 45.83	897.60 ± 21.45
ความต้านทานแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )	4.97 ± 0.29	3.24 ± 0.62	3.30 ± 0.40

หมายเหตุ ข้อมูลแสดงในรูปค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

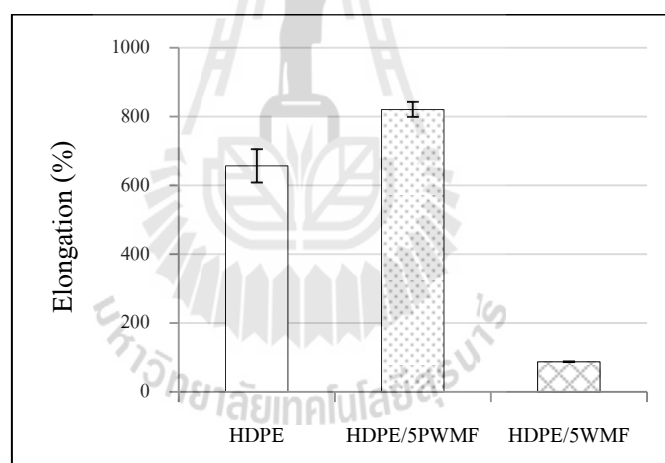
##### 4.1.1 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบเชิงกลที่สำคัญอย่างหนึ่ง เบื้องต้นในส่วนแรกนี้จะทดสอบแรงดึงเพื่อหาค่าการต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และ เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) โดยแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 4.1 – 4.2 ตามลำดับ

ผลจากการทดสอบแรงดึงพบว่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมีการเติมเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน ในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ในขณะที่เดียวกันเมื่อพิจารณาผลกระทบของชนิดของเศษที่นำมาเติมทั้ง 2 แบบ พบว่าการเติมเศษแบบฝุ่นและแบบกริบส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงไม่ต่างกัน ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลกระทบของชนิดเศษที่ได้จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน  
ในพอลิเมอร์คอมโพสิตต่อค่าการต้านทานแรงดึง



รูปที่ 4.2 ผลกระทบของชนิดเศษที่ได้จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน  
ในพอลิเมอร์คอมโพสิตต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัว



นอกจากนี้เมื่อนำค่าความต้านทานแรงดึงนี้ไปทดสอบทางสถิติด้วยวิธีทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis testing, 2-sample t) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมีสมมติฐานตั้งสมการที่ 4.1 พบว่า ค่า P-Value จากการทดสอบสมมติฐานเท่ากับ 0.878 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้คือ 0.05 ( $P\text{-Value} > 0.05$ ) จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการเติมเศษแบบฝุ่น และแบบครีปไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

$$\begin{aligned} H_0 : \mu_{\text{PWF}} &= \mu_{\text{WMF}} \\ H_1 : \mu_{\text{PWF}} &\neq \mu_{\text{WMF}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

จากรูป 4.2 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่ได้จากการทดสอบแรงดึงนั้น เมื่อไม่มีการเติมเศษ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีค่าการยึดตัวที่ 656.26% ในขณะที่เมื่อมีการเติมเศษแบบฝุ่นส่งผลให้มีค่าการยึดตัวสูงมากขึ้น เป็น 820.35 % ซึ่งสามารถคิดความสามารถในการยึดตัวเพิ่มมากขึ้นเป็นร้อยละ 24.96% ในขณะที่เมื่อเติมเศษแบบครีปนั้นกลับให้ผลตรงกันข้าม เนื่องจากส่งผลให้ค่าการยึดตัวลดต่ำ มีค่าเพียง 87.72 % คิดเป็นร้อยละ 86.62 ที่ความสามารถในการยึดตัวลดต่ำลง เมื่อพิจารณาจะพบว่า การเติมเศษสองชนิดกลับส่งผลให้ความสามารถในการยึดตัวได้ผลตรงกันข้าม เบื้องต้นทราบว่าเศษทั้งสองชนิดได้มาจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน ซึ่งคาดว่าเมลามีนเป็นองค์ประกอบหลัก แต่อย่างไรก็ตามเศษทั้งสองชนิดได้มาจากต่างกระบวนการ ส่งผลให้องค์ประกอบของเศษแบบครีปและแบบฝุ่นแตกต่างกันออกไป กล่าวคือ ในเศษแบบฝุ่นเกิดจากกระบวนการขัดเงาและตกแต่งผิวชิ้นงาน จะมีการใช้แว็กซ์และผ้าในการขัดเงาและตกแต่งผิว ลักษณะเศษที่ได้จึงมีลักษณะเป็นฝุ่นและมีความเป็นไปได้อันสูง เช่น แว็กซ์ และ ผ้า ที่ใช้ในการขัดตกแต่งผิวนี้อาจจะเข้าไปผสมในเศษแบบฝุ่น ในขณะที่เศษแบบครีปนั้นจะได้รับการตัดครีปส่วนเกินของผลิตภัณฑ์ออกจึงมีเพียงแค่มเมลามีนเป็นองค์ประกอบเท่านั้น จากเหตุผลขององค์ประกอบบางส่วนที่ต่างกันจึงส่งผลให้ค่าการยึดตัวได้ผลต่างกัน โดยที่คาดว่าเศษแบบฝุ่นนั้นมีผ้าเป็นส่วนผสมซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นใยจึงทำให้ค่าการยึดตัวดีขึ้น

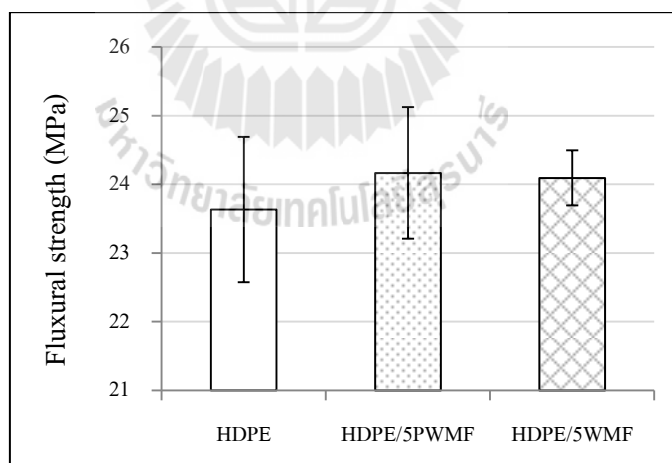
#### 4.1.2 การทดสอบแรงดัด

สมบัติที่ได้จากการทดสอบสมบัติแรงดัดนั้นเป็นสมบัติที่สำคัญมากอย่างหนึ่งสำหรับวัสดุพอลิเมอร์ โดยจะใช้พิจารณาในการนำค่าเหล่านี้ไปใช้ในการออกแบบ สำหรับการทดสอบสมบัติแรงดึงจะมีอัตราการให้แรงกระทำต่อชิ้นงานทดสอบคงที่อย่างช้า ๆ จนกระทั่งเกิดการแตกหักเช่นเดียวกันกับการทดสอบสมบัติแรงดึง สำหรับการทดสอบแรงดัดนี้จะพิจารณาความ

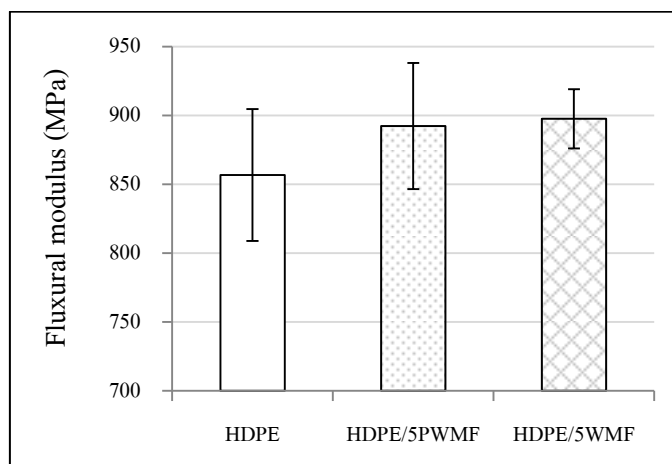
ต้านทานแรงคด (Flexural strength) และ โมดูลัสแรงคด (Flexural modulus) โดยได้ผลการทดสอบ ดังนี้

ค่าความต้านทานแรงคดโค้งของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง มีค่า  $23.63 \pm 1.06$  MPa และเมื่อมีการเติมเศษทั้งชนิดที่เป็นฝุ่น และ เศษครีบริบที่ผ่านการบด โดยเติมเศษเมลามีนที่ สัดส่วน 5% พบกว่าค่าความต้านทานแรงคดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทั้ง 2 ชนิด เพิ่มเป็น  $24.17 \pm 0.96$  และ  $24.09 \pm 0.40$  MPa ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงคดระหว่างการเติมเศษแบบฝุ่นและแบบครีบริบ โดยใช้การทดสอบสมมติฐานก็จะพบว่า P-Value = 0.812 ซึ่งมากกว่า ระดับนัยสำคัญที่กำหนด (P-value > 0.05) จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าความต้านทานแรงคดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ค่าโมดูลัสแรงคดจากเดิมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ไม่มีการเติมเศษที่ได้จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน มีค่า  $856.80 \pm 47.99$  MPa เมื่อมีการเติมเศษแบบฝุ่น และ แบบครีบริบ สัดส่วนการเติม 5% พบว่าโมดูลัสแรงคดเพิ่มขึ้นเป็น  $892.30 \pm 45.83$  และ  $897.60 \pm 21.45$  MPa ตามลำดับ คิดเป็น 4.14% และ 4.76% อย่างไรก็ตามจะพบว่าชนิดของเศษที่ได้จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนที่เติมลงไปนั้นไม่ส่งผลต่อโมดูลัสแรงคดโค้งอย่างมีนัยสำคัญ ที่สัดส่วนการเติม 5% เมื่อพิจารณาค่า P-Value = 0.746 ที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน



รูปที่ 4.3 ผลกระทบของชนิดเศษที่ได้จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน ในพอลิเมอร์คอมโพสิตต่อความต้านทานแรงคด

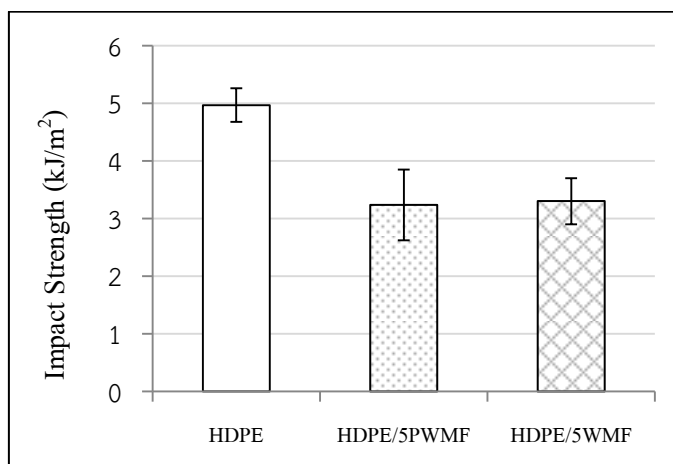


รูปที่ 4.4 ผลกระทบของชนิดเศษที่ได้จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน  
ในพอลิเมอร์คอมโพสิตต่อมอดูลัสแรงดัด

#### 4.1.3 การทดสอบแรงกระแทก

ค่าการต้านทานแรงกระแทกบ่งชี้ถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานที่กระทำต่อชิ้นทดสอบด้วยแรงที่ตกกระทบกับชิ้นทดสอบอย่างรวดเร็ว สมบัติการต้านทานแรงกระแทกสำคัญมากสำหรับการนำไปใช้สำหรับชิ้นงานที่ต้องใช้งานเกี่ยวกับการรับแรง เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงนั้นมีสมบัติเป็นวัสดุเหนียว (Ductile materials) ดังนั้นในชิ้นทดสอบถึงมีการทำรอยบากบริเวณกึ่งกลางชิ้นทดสอบเพื่อทำหน้าที่เป็นจุดรวมแรง และลดการกระจายพลังงานเพื่อเหนียวทำให้เกิดการแตกหักที่บริเวณรอยบาก

จากการทดสอบแรงกระแทกพบว่า พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีค่าความต้านทานแรงกระแทกที่  $4.97 \pm 0.29 \text{ kJ/m}^2$  เมื่อมีการเติมเศษที่ได้จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนที่สัดส่วน 5% พบว่าการเติมเศษแบบฝุ่น และแบบครีบ ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกลดลงเหลือ  $3.24 \pm 0.62$  และ  $3.30 \pm .040 \text{ kJ/m}^2$  ตามลำดับ ซึ่งค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ลดลงสามารถบอกได้ถึงระดับความสามารถในการดูดซับพลังงานของพอลิเมอร์คอมโพสิตนี้ลดลง กล่าวคือวัสดุดังกล่าวจะมีลักษณะเปราะขึ้น เมื่อได้รับแรงที่มากกระทบอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบผลกระทบของชนิดเศษที่ใช้เป็นสารตัวเติมต่อความต้านทานแรงกระแทกก็พบว่าชนิดของเศษที่ใช้เป็นสารตัวเติมทั้งแบบครีบและแบบฝุ่นส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P-Value = 0.801)



รูปที่ 4.5 ผลกระทบของชนิดเศษที่ได้จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน  
ในพอลิเมอร์คอมโพสิตต่อความต้านทานแรงกระแทก

#### 4.1.4 ผลจากการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบเศษ 2 ชนิด

จากการพิจารณาสมบัติเชิงกลเบื้องต้นของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษที่ได้จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนที่มีการเติมเศษที่ต่างกัน 2 ชนิด คือ เศษแบบฝุ่นและเศษแบบครีบ โดยการเติมเศษที่สัดส่วนร้อยละ 5 โดยใช้ขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 150 ไมโครเมตร (อนุภาคที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100) พบว่าการเติมเศษที่ต่างกันส่งผลต่อสมบัติเชิงกลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบเชิงกลดังที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่อย่างไรก็ตามค่าร้อยละการยึดตัวให้แนวโน้มแตกต่าง กล่าวคือการเติมเศษแบบฝุ่นส่งผลให้ร้อยละการยึดตัวดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ในขณะที่การเติมเศษแบบครีบส่งผลให้ร้อยละการยึดตัวมีค่าต่ำกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงบริสุทธิ์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงขั้นตอนการนำเศษทั้ง 2 ชนิดมาใช้ จะพบว่า เศษแบบฝุ่น นั้นมีจำนวนขั้นตอนการเตรียมน้อยกว่า สะดวกแก่การนำมารีไซเคิล ส่งผลให้ร้อยละการยึดตัวดีกว่า ดังนั้นจึงเลือกเศษที่ได้จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนแบบฝุ่นในการศึกษาต่อไป

#### 4.2 ผลการศึกษาผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคของเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน และการเติมสารเชื่อมโยง

จากการศึกษาก่อนหน้า คือการศึกษาผลกระทบของชนิดเศษที่ได้จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนที่ต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ เศษแบบฝุ่น และแบบครีบ ซึ่งพบว่าเศษแบบฝุ่นส่งผลให้ร้อยละการยึดตัวดีขึ้น สะดวกต่อการรีไซเคิลมากกว่า และนอกจากนี้เศษที่ต่างชนิดกันนี้ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลโดยรวม จึงเลือกเศษแบบฝุ่นมาใช้ในการศึกษาในส่วนนี้ ดังนั้นการศึกษานี้จะพิจารณาเพียงเศษแบบฝุ่นเท่านั้น โดยการศึกษาผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคของเศษที่ได้จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนแบบฝุ่น และการเติมสารเชื่อมโยง ต่อสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิต ประกอบด้วย สมบัติเชิงกล ได้แก่ การต้านทานแรงดึง การต้านทานแรงคด การต้านทานแรงกระแทก และ ความแข็ง สมบัติทางความร้อนจะใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี สมบัติการทนไฟจะทดสอบการลามไฟ และสุดท้ายจะศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ในส่วนที่ 2 นี้ โดยสรุปจะศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัย ประกอบด้วย สัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น ขนาดอนุภาคเศษแบบฝุ่นและการเติมสารเชื่อมโยง โดยศึกษาปัจจัยละ 2 ระดับ จะได้ทั้งหมด  $2^3$  หรือ 8 การทดลองดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การทดลองทั้งหมดโดยพิจารณา 3 ปัจจัย ประกอบด้วย สัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น ขนาดอนุภาคเศษแบบฝุ่น และการเติมสารเชื่อมโยง

Run	Design Code			PWMF content (%)	Particle size ( $\mu\text{m}$ )	Compatibilizer (phr)	Name
	A	B	C				
1	-	-	-	5	23	0	HDPE/5PWMF/P1
2	-	+	-	5	36	0	HDPE/5PWMF/P2
3	+	-	-	20	23	0	HDPE/20PWMF/P1
4	+	+	-	20	36	0	HDPE/20PWMF/P2
5	-	-	+	5	23	5	HDPE/5PWMF/5HDPE-g-MA/P1
6	-	+	+	5	36	5	HDPE/5PWMF/5HDPE-g-MA/P2
7	+	-	+	20	23	5	HDPE/20PWMF/5HDPE-g-MA/P1
8	+	+	+	20	36	5	HDPE/20PWMF/5HDPE-g-MA/P2

#### 4.2.1 ผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกล

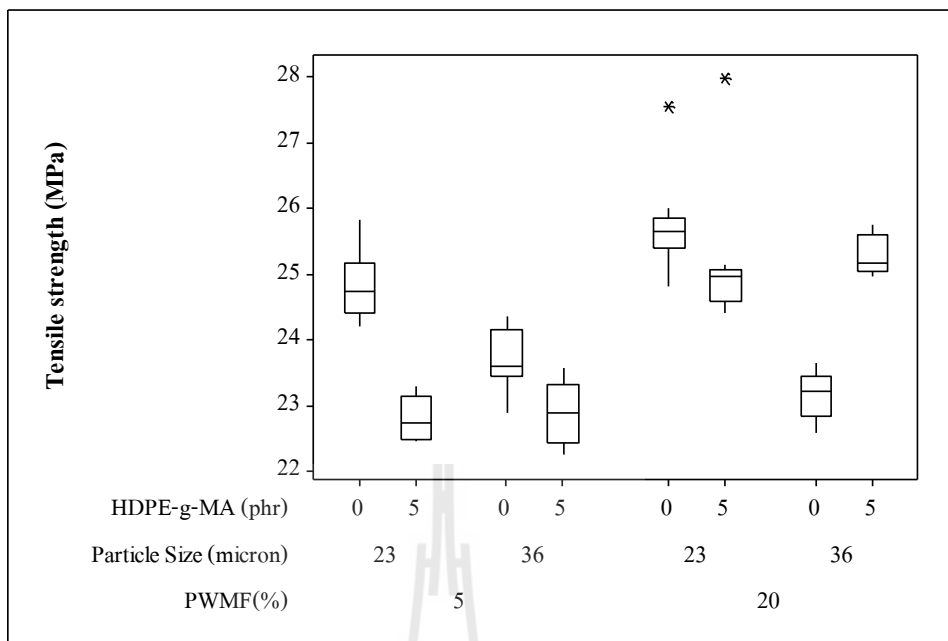
การศึกษานี้จะเปรียบเทียบผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคเศษแบบฝุ่น และการเติมสารเชื่อม โยงแล้ว นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงอีกด้วย จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง สรุปสมบัติเชิงกลได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

Mechanical properties	Mean	Standard deviation
Tensile strength (MPa)	21.80	2.57
Modulus of elasticity (MPa)	376.60	10.94
%Elongation	532.94	125.08
Flexural strength (MPa)	23.07	0.36
Flexural modulus (MPa)	665.26	20.69
Impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )	3.30	0.19
Hardness (HSD)	58.92	1.12

##### 4.2.1.1 ผลจากการทดสอบแรงดึง

สำหรับการทดสอบสมบัติแรงดึงจะพิจารณาทั้งหมด 3 สมบัติด้วยกัน ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง โมดูลัสของยัง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ซึ่งจากการทดลองได้ผลดังนี้ ค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้จากการทดสอบตามที่ออกแบบการทดลองข้างต้น แสดงดังรูปที่ 4.6 จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อมีการเติมเศษแบบฝุ่นไม่ว่าจะเป็นที่ 5% หรือ 20% ขนาดอนุภาค 23 หรือ 36 ไมโครเมตร ทั้งแบบที่มีการเติมสารเชื่อม โยงและไม่มีการเติมสารเชื่อม โยงนั้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นกว่าการไม่เติมเศษฝุ่น ซึ่งมีค่าเพียง  $21.80 \pm 2.57$  MPa ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 4.3 แต่เมื่อพิจารณาสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงพบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนจาก 5% เป็น 20% ไม่ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคให้ใหญ่มากขึ้นจาก 23 เป็น 36 ไมโครเมตร กลับส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลงอย่างเห็นได้ชัดในกรณีที่ไม่มีการเติมสารเชื่อม โยง แต่เมื่อมีการเติมสารเชื่อม โยงในพอลิเมอร์คอมโพสิตกลับทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลงทุก ๆ การศึกษา ยกเว้นในกรณีที่มีการเติมสัดส่วนเศษฝุ่นที่ 20% ขนาดอนุภาค 36 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.6 ผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคของเศษจากกระบวนการผลิต  
ผลิตภัณฑ์เมลามีนและการเติมสารเชื่อมโยงต่อความต้านทานแรงดึง

จากรูปที่ 4.6 ดังที่กล่าวข้างต้น สามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงคือ ขนาดอนุภาค และสารเชื่อมโยง ทั้งสองปัจจัยนี้ส่งผลในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น และมีการเติมสารเชื่อมโยง ต่างส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้จากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ด้วยการใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ได้ผลดังรูปที่ 4.7 ซึ่งรูปแบบการวิเคราะห์ผลทางสถิตินี้จะเปรียบเทียบค่า P-value กับค่าระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) หากพบว่าค่า P-value ของปัจจัยใด ๆ ก็ตามน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ (โดยทั่วไปกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05) แสดงว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อการทดสอบนั้น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปัจจัยหลัก (Main effect) ทั้ง 3 ปัจจัย คือ สัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น ขนาดอนุภาคเศษแบบฝุ่น และการเติมสารเชื่อมโยง ต่างก็ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.7 แต่ทว่าผลกระทบที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงนั้น ไม่ได้มีเพียงปัจจัยหลักเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีผลกระทบของปัจจัยร่วม (Interaction effect) ที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญด้วย ซึ่งประกอบไปด้วย อิทธิพลของปัจจัยร่วม 2 ระดับ ได้แก่ อิทธิพลร่วมของสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นและขนาดอนุภาคเศษแบบฝุ่น อิทธิพลร่วมระหว่างเศษแบบฝุ่นและการเติมสารเชื่อมโยง อิทธิพลร่วม

ระหว่างขนาดอนุภาคและสารเชื่อมโยง และอิทธิพลร่วมของปัจจัยร่วม 3 ระดับ ได้แก่ อิทธิพลร่วมของสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น ขนาดอนุภาคเศษแบบฝุ่นและการเติมสารเชื่อมโยง เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R-squared, R-Sq (adj)) ซึ่งมีค่า 79% แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแรงดึงนั้น 79% เกิดจากการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่ศึกษา โดยมีตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Error) อยู่ 21%

เมื่อพิจารณาเพียงผลกระทบของปัจจัยหลักจะพบว่าระดับผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดคือ สัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น รองลงมาคือขนาดอนุภาคเศษแบบฝุ่น ท้ายที่สุดคือ การเติมสารเชื่อมโยง โดยพิจารณาได้จากค่าสถิติ F ซึ่งมีค่า 100.57 47.73 และ 6.37 ตามลำดับ ซึ่งค่าสถิติ F นี้ใช้บอกระดับผลกระทบต่อค่าทดสอบที่ศึกษาโดยที่ตัวเลขที่บอกนั้นคือจำนวนที่มากกว่าปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้เป็นกี่เท่า เช่น สัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นมีค่าสถิติ F เท่ากับ 100.57 หมายความว่า สัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นนี้ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงมากกว่าปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Error) 100.57 เท่า นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ผลด้วยสถิติสามารถบ่งบอกผลกระทบเชิงบวก หรือเชิงลบของปัจจัยได้ด้วยการพิจารณาเครื่องหมายในคอลัมน์ Effect หรือ คอลัมน์ค่าสถิติ T หรือทิศทางความชันของกราฟในรูปที่ 4.8 ซึ่งเมื่อพิจารณาดังที่กล่าวมาข้างต้นจะสามารถอธิบายผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงดึงได้ว่า เมื่อมีการเติมสัดส่วนเศษแบบฝุ่นจะส่งผลเชิงบวกต่อค่าความต้านทานแรงดึง กล่าวคือ หากสัดส่วนเพิ่มจาก 5% เป็น 20% จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น ในทางกลับกัน ขนาดอนุภาคเศษแบบฝุ่น และสารเชื่อมโยงส่งผลเชิงลบต่อค่าความต้านทานแรงดึง ซึ่งก็หมายความว่า หากขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น และมีการเติมสารเชื่อมโยงลงใน HDPE/PWMP คอมโพสิต จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง

อิทธิพลของปัจจัยหลักด้านสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นที่เติมลงในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อมีการเติมเศษแบบฝุ่น จาก 5% เป็น 20% ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น จากประมาณ 23.6 MPa เป็น 24.8 MPa สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นมีความเป็นไปได้ว่าเมื่อมีการเติมสารตัวเติม คือเศษแบบฝุ่น ซึ่งมีลักษณะแข็งในเมทริกซ์ที่ค่อนข้างนิ่ม จึงทำให้สมบัติโดยรวมของวัสดุมีแนวโน้มแข็งขึ้น นอกจากนี้การสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้นจะไปจำกัดการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ให้เคลื่อนที่ได้น้อยลง (วิมลลักษณ์ และคณะ, 2554) จึงส่งผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานแรงดึงมากขึ้น

อิทธิพลของปัจจัยหลักด้านขนาดอนุภาคเศษแบบฝุ่นที่เติมลงในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง พบว่าเมื่อมีการเพิ่มขนาดอนุภาคเศษแบบฝุ่นให้ใหญ่ขึ้นจาก 23 ไมโครเมตร เป็น 36 ไมโครเมตร ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของความต้านทานแรงดึงต่ำลง จากประมาณ 24.6 MPa เหลือ 23.6 MPa นอกจากนี้ อิทธิพลของปัจจัยหลักด้านการเติมสารเชื่อมโยงที่เติมเข้าไปแล้วส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงดึง พบว่าเมื่อมีการเติมสารเชื่อมโยง ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของความต้านทานแรงดึงต่ำลง จากประมาณ 24.3 MPa เหลือ 23.9 MPa



### Factorial Fit: Tensile stre versus PWMF(%), Particle Siz, HDPE-g-MA (phr)

#### Estimated Effects and Coefficients for Tensile strength (MPa) (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		24.1864	0.06346	381.16	0.000
PWMF(%)	1.2728	0.6364	0.06346	10.03	0.000
Particle Size (micron)	-0.8767	-0.4384	0.06346	-6.91	0.000
HDPE-g-MA (phr)	-0.3202	-0.1601	0.06346	-2.52	0.014
PWMF(%)*Particle Size (micron)	-0.3497	-0.1749	0.06346	-2.76	0.007
PWMF(%)*HDPE-g-MA (phr)	1.0807	0.5404	0.06346	8.52	0.000
Particle Size (micron)* HDPE-g-MA (phr)	0.9922	0.4961	0.06346	7.82	0.000
PWMF(%)*Particle Size (micron)* HDPE-g-MA (phr)	0.3642	0.1821	0.06346	2.87	0.005

S = 0.567562 PRESS = 28.6335

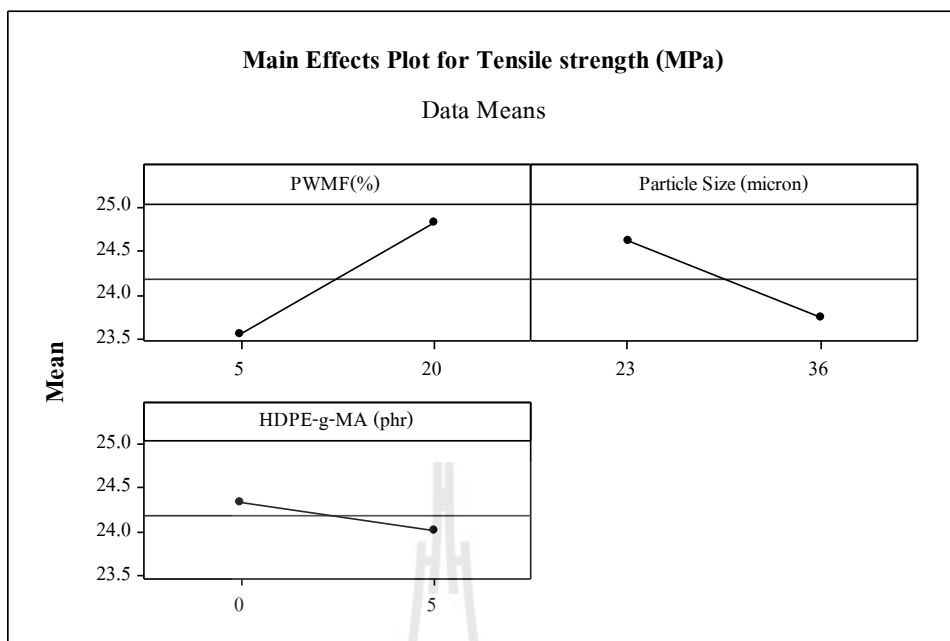
R-Sq = 80.86% R-Sq(pred) = 76.37% R-Sq(adj) = 79.00%

#### Analysis of Variance for Tensile strength (MPa) (coded units)

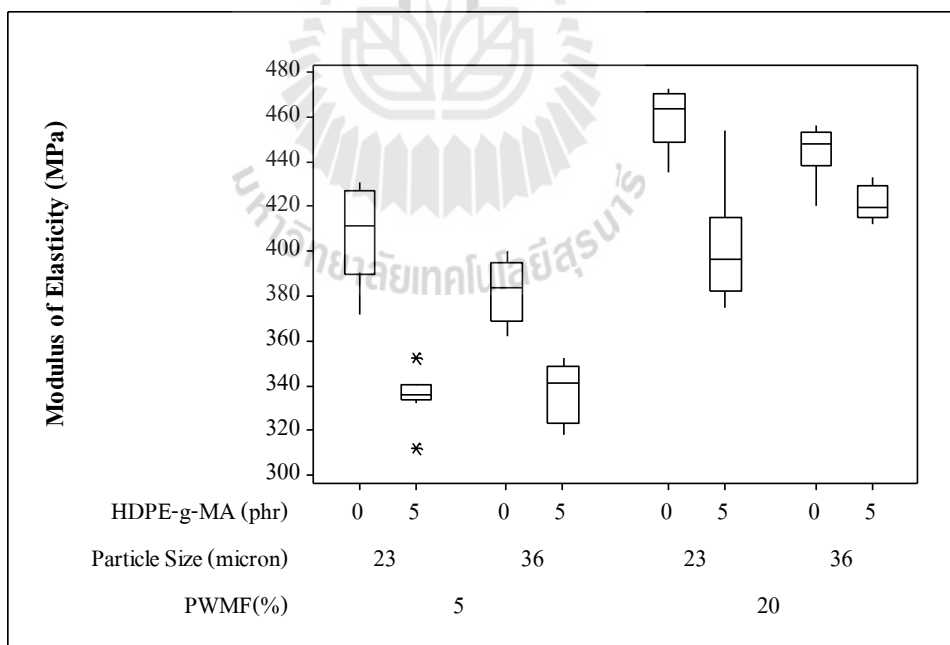
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS
Main Effects	3	49.823	49.8229	16.6076
PWMF(%)	1	32.398	32.3979	32.3979
Particle Size (micron)	1	15.374	15.3738	15.3738
HDPE-g-MA (phr)	1	2.051	2.0512	2.0512
2-Way Interactions	3	45.498	45.4981	15.1660
PWMF(%)*Particle Size (micron)	1	2.447	2.4465	2.4465
PWMF(%)*HDPE-g-MA (phr)	1	23.360	23.3604	23.3604
Particle Size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	1	19.691	19.6912	19.6912
3-Way Interactions	1	2.654	2.6536	2.6536
PWMF(%)*Particle Size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	1	2.654	2.6536	2.6536
Residual Error	72	23.193	23.1931	0.3221
Pure Error	72	23.193	23.1931	0.3221
Total	79	121.168		

Source	F	P
Main Effects	51.56	0.000
PWMF(%)	100.57	0.000
Particle Size (micron)	47.73	0.000
HDPE-g-MA (phr)	6.37	0.014
2-Way Interactions	47.08	0.000
PWMF(%)*Particle Size (micron)	7.59	0.007
PWMF(%)*HDPE-g-MA (phr)	72.52	0.000
Particle Size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	61.13	0.000
3-Way Interactions	8.24	0.005
PWMF(%)*Particle Size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	8.24	0.005
Residual Error		
Pure Error		
Total		

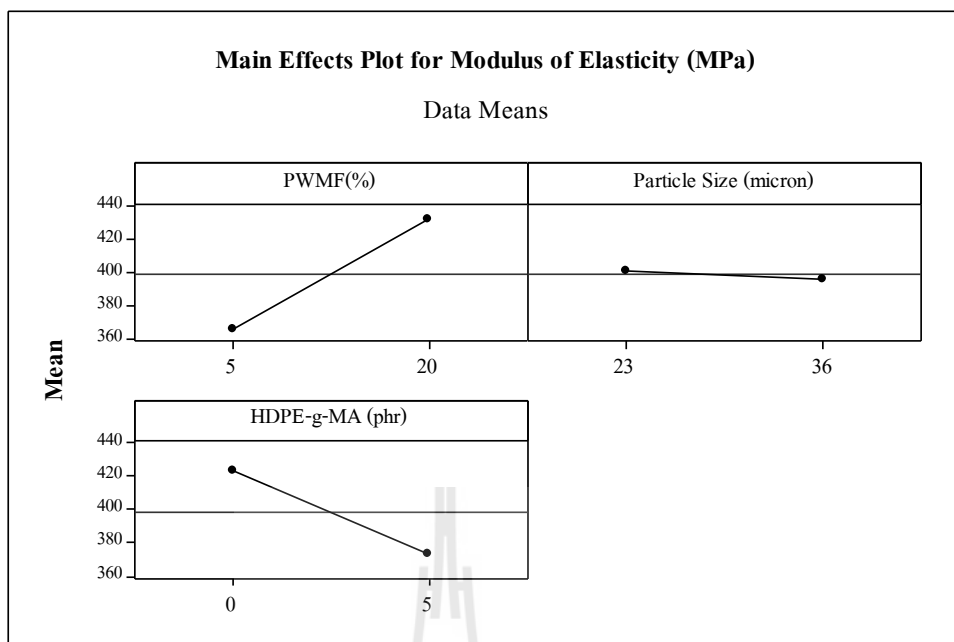
รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าความต้านทานแรงดึง



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของปัจจัยหลักต่อค่าความต้านทานแรงดึง



รูปที่ 4.9 ผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคของเศษจากกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์เมลามีนและการเติมสารเชื่อมโยงต่อโมดูลัสของยัง



รูปที่ 4.10 อิทธิพลของปัจจัยหลักต่อค่าโมดูลัสของยัง

ค่าความโมดูลัสของยัง หรือ โมดูลัสการยืดหยุ่น ได้จากการทดสอบตามที ออกแบบการทดลองข้างต้น แสดงดังรูปที่ 4.9 จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อมีการเติมเศษแบบฝุ่นไม่ว่าจะเป็นที่ 5% หรือ 20% ขนาดอนุภาค 23 หรือ 36 ไมโครเมตร ทั้งแบบที่มีการเติมสารเชื่อมโยงและไม่มีการเติมสารเชื่อมโยงนั้น ส่งผลให้ค่าโมดูลัสของยังสูงขึ้นกว่าการไม่เติมเศษฝุ่น ซึ่งมีค่า  $376.60 \pm 10.94$  MPa ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 4.3 แต่เมื่อพิจารณาสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงพบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนจาก 5% เป็น 20% ส่งผลให้ค่าโมดูลัสของยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคให้ใหญ่มากขึ้นจาก 23 เป็น 36 ไมโครเมตร กลับส่งผลให้ค่าโมดูลัสของยังลดลง แต่เมื่อมีการเติมสารเชื่อมโยงในพอลิเมอร์คอมโพสิตกลับทำให้ค่าโมดูลัสของยังลดลงทุก ๆ การศึกษา

จากรูปที่ 4.9 ดังที่กล่าวข้างต้น สามารถกล่าวได้ว่าทั้ง 3 ปัจจัยส่งผลต่อค่าโมดูลัสของยัง โดยที่ ขนาดอนุภาค และสารเชื่อมโยงส่งผลในทิศทางเดียวกันกล่าวคือ เมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น และมีการเติมสารเชื่อมโยง ต่างส่งผลให้ค่าโมดูลัสของยังลดลง แต่เมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนการเติมเศษ จาก 5 เป็น 20% กลับพบว่าค่าโมดูลัสของยังมีค่าเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่าโมดูลัสของยังที่ได้จากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.10 แต่ทว่าผลกระทบที่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสของยังนั้น ไม่ได้มีเพียงปัจจัยหลัก (Main effect) ดังที่วิเคราะห์ข้างต้นที่พิจารณา

จากกราฟเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีผลกระทบของปัจจัยร่วม (Interaction effect) ที่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสของยังอย่างมีนัยสำคัญด้วย ซึ่งประกอบไปด้วย อิทธิพลของปัจจัยร่วม 2 ระดับ และอิทธิพลร่วมของปัจจัยร่วม 3 ระดับ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R-squared, R-Sq (adj)) ซึ่งมีค่า 89.13% แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของยังนั้น 89.13% เกิดจากการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่ศึกษา โดยมีตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Error) อยู่ 10.87%

เมื่อพิจารณาผลกระทบของปัจจัยหลักจะพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสของยังอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติมีเพียง 2 ปัจจัย ซึ่งแตกต่างจากการที่พิจารณาจากกราฟโดยตรงกล่าวคือ จากกราฟจะพบว่า ปัจจัยทั้ง 3 มีอิทธิพลต่อค่าโมดูลัสของยัง แต่ในทางสถิตินั้นขนาดอนุภาคกลับไม่มีอิทธิพลต่อค่ายัง โมดูลัสอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า P-value ของขนาดอนุภาคมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ ( $\alpha=0.05$ ) สำหรับระดับผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลสูงสุดคือ สัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น และการเติมสารเชื่อมโยง โดยค่าสถิติ F มีค่า 398.56 และ 221 ตามลำดับ นอกจากนี้การพิจารณาเครื่องหมายในคอลัมน์ Effect หรือ คอลัมน์ค่าสถิติ T หรือทิศทางความชันของกราฟในรูปที่ 4.12 จะสามารถอธิบายผลกระทบต่อค่าโมดูลัสของยังได้ว่า เมื่อมีการเติมสัดส่วนเศษแบบฝุ่นจะส่งผลเชิงบวก กล่าวคือ หากสัดส่วนเพิ่มจาก 5% เป็น 20% จะทำให้ค่าโมดูลัสของยังสูงขึ้น ในทางกลับกัน สารเชื่อมโยงส่งผลเชิงลบ ซึ่งก็หมายความว่า หากมีการเติมสารเชื่อมโยงลงใน HDPE/PWMP คอมโพลีท จะทำให้ค่าโมดูลัสของยังลดลง

อิทธิพลของปัจจัยหลักด้านสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นที่เติมลงในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อมีการเติมเศษแบบฝุ่น จาก 5% เป็น 20% ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยโมดูลัสของยังสูงขึ้น จากประมาณ 365 MPa เป็น 435 MPa สาเหตุที่ค่าโมดูลัสของยังสูงขึ้นคาดว่าเป็นเหตุผลเดียวกับที่ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่า เมื่อมีการเติมสารตัวเติม คือเศษแบบฝุ่น ซึ่งมีลักษณะแข็งในเมทริกซ์ที่ค่อนข้างนิ่ม จึงทำให้สมบัติโดยรวมของวัสดุมีแนวโน้มแข็งขึ้น นอกจากนี้การสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้นจะไปจำกัดการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ให้เคลื่อนที่ได้น้อยลง และมีโอกาสเกิดผลึกมากขึ้น (วิมลลักษณ์ และคณะ, 2554; J.A. Sauer and K.D. Pae, 1977) จึงส่งผลกระทบต่อค่าโมดูลัสของยังเพิ่มขึ้น

อิทธิพลของปัจจัยหลักด้านขนาดอนุภาคเศษแบบฝุ่นที่เติมลงในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อมีการเพิ่มขนาดอนุภาคเศษแบบฝุ่นให้ใหญ่ขึ้นจาก 23 ไมโครเมตร เป็น 36 ไมโครเมตร แทบจะไม่ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของโมดูลัสของยังเปลี่ยนแปลง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปัจจัยนี้ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ

อิทธิพลของปัจจัยหลักด้านการเติมสารเชื่อมโยงที่เติมลงไปพอลิเมอร์คอมโพลีท จากรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อมีการเติมสารเชื่อมโยง ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของโมดูลัสของยังต่ำลง จากประมาณ 425 MPa เหลือ 370 MPa

### Factorial Fit: Modulus of E versus PWWF(%), Particle Siz, HDPE-g-MA (phr)

#### Estimated Effects and Coefficients for Modulus of Elasticity (MPa) (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		398.81	1.667	239.19	0.000
PWWF(%)	66.58	33.29	1.667	19.96	0.000
Particle Size (micron)	-4.62	-2.31	1.667	-1.39	0.170
HDPE-g-MA (phr)	-49.57	-24.79	1.667	-14.87	0.000
PWWF(%)*Particle Size (micron)	6.93	3.46	1.667	2.08	0.041
PWWF(%)*HDPE-g-MA (phr)	9.07	4.54	1.667	2.72	0.008
Particle Size (micron)* HDPE-g-MA (phr)	15.37	7.69	1.667	4.61	0.000
PWWF(%)*Particle Size (micron)* HDPE-g-MA (phr)	1.82	0.91	1.667	0.55	0.586

S = 14.9134      PRESS = 19769.8

R-Sq = 90.09%      R-Sq(pred) = 87.77%      R-Sq(adj) = 89.13%

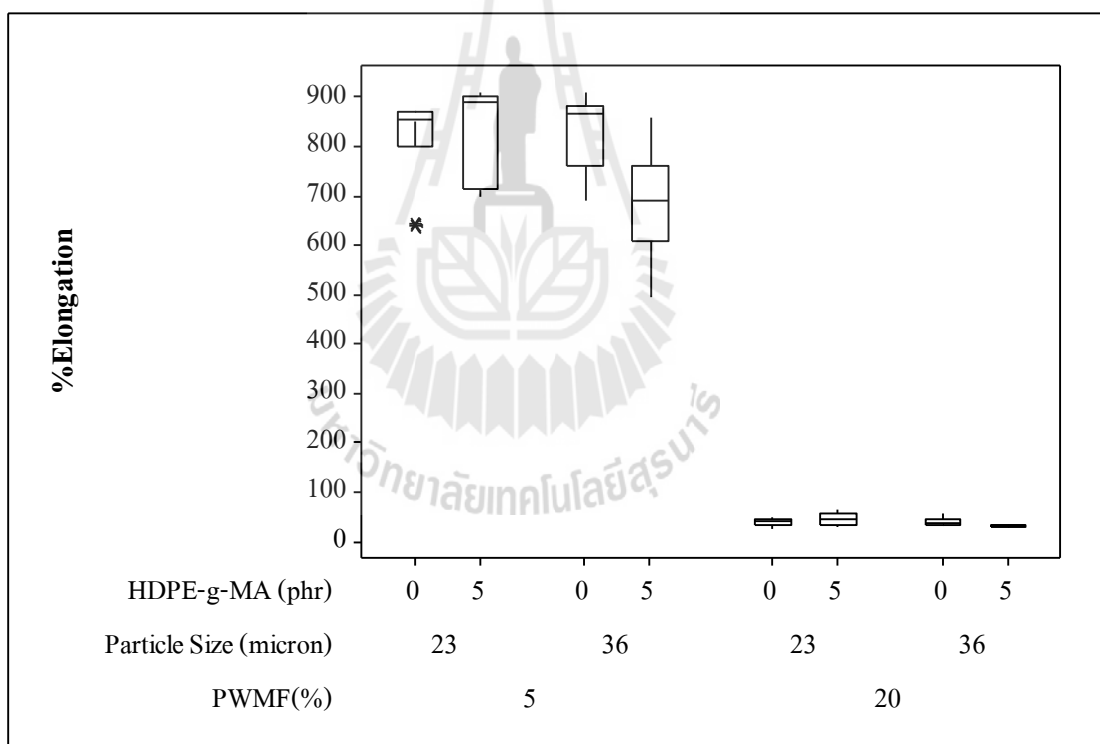
#### Analysis of Variance for Modulus of Elasticity (MPa) (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS
Main Effects	3	138226	138226	46075.3
PWWF(%)	1	88645	88645	88644.6
Particle Size (micron)	1	428	428	427.8
HDPE-g-MA (phr)	1	49154	49154	49153.6
2-Way Interactions	3	7334	7334	2444.7
PWWF(%)*Particle Size (micron)	1	959	959	959.1
PWWF(%)*HDPE-g-MA (phr)	1	1647	1647	1647.1
Particle Size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	1	4728	4728	4727.8
3-Way Interactions	1	67	67	66.6
PWWF(%)*Particle Size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	1	67	67	66.6
Residual Error	72	16013	16013	222.4
Pure Error	72	16013	16013	222.4
Total	79	161640		

Source	F	P
Main Effects	207.16	0.000
PWWF(%)	398.56	0.000
Particle Size (micron)	1.92	0.170
HDPE-g-MA (phr)	221.00	0.000
2-Way Interactions	10.99	0.000
PWWF(%)*Particle Size (micron)	4.31	0.041
PWWF(%)*HDPE-g-MA (phr)	7.41	0.008
Particle Size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	21.26	0.000
3-Way Interactions	0.30	0.586
PWWF(%)*Particle Size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	0.30	0.586
Residual Error		
Pure Error		
Total		

รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าโมดูลัสของยัง

ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว หรือร้อยละการยืดตัวได้จากการทดสอบตามที่ ออกแบบการทดลองข้างต้น แสดงดังรูปที่ 4.12 จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อมีการเติมเศษแบบฝุ่นที่ 5% ขนาดอนุภาค 23 หรือ 36 ไมโครเมตร ทั้งแบบที่มีการเติมสารเชื่อมโยงและไม่มีการเติมสารเชื่อมโยงนั้น ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงขึ้นกว่าการไม่เติมเศษฝุ่น ซึ่งมีค่าร้อยละการยืดตัว  $532.94 \pm 125.08$  ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 4.3 แต่เมื่อพิจารณาสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงพบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนจาก 5% เป็น 20% ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด จนแทบจะเปลี่ยนจากวัสดุที่เป็นวัสดุเหนียวเป็นวัสดุค่อนข้างเปราะ ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคให้ใหญ่มากขึ้นจาก 23 เป็น 36 ไมโครเมตร และเมื่อมีการเติมสารเชื่อมโยงในพอลิเมอร์คอมพอลิทกลับทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวไม่เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน



รูปที่ 4.12 ผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคของเศษจากกระบวนการผลิต  
ผลิตภัณฑ์เมลามีนและการเติมสารเชื่อมโยงต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัว

จากรูปที่ 4.12 ดังที่กล่าวข้างต้น สามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การยึดตัวมีเพียงปัจจัยเดียว ซึ่งก็คือสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น โดยเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนการเติมเศษ จาก 5 เป็น 20% เปอร์เซ็นต์การยึดตัวลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงพฤติกรรมคล้ายวัสดุเปราะ อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่ได้จากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.13 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R-squared, R-Sq (adj)) ซึ่งมีค่า 97.08% แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวนั้น 97.08% เกิดจากการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่ศึกษา โดยมีตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Error) อยู่ 2.92%

สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวนั้นเมื่อพิจารณาผลกระทบทั้งของปัจจัยหลัก และปัจจัยร่วมจะพบว่าทุก ๆ ปัจจัยหลักและทุก ๆ ปัจจัยร่วมที่มีโอกาสเกิดขึ้นนั้น ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทั้งสิ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระดับผลกระทบที่สามารถพิจารณาได้จากค่าสถิติ F พบว่าผลกระทบของปัจจัยอื่นนั้นน้อยมากเมื่อเทียบกับผลกระทบของสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น ซึ่งมีค่าสถิติ F ถึง 2593.08 ในขณะที่ผลกระทบของปัจจัยอื่น ๆ มีค่าสถิติ F น้อยกว่า 10 ทั้งสิ้น จึงสามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวนั้นคือสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น นอกจากนี้การพิจารณาเครื่องหมายในคอลัมน์ Effect หรือ คอลัมน์ค่าสถิติ T หรือ ทิศทางความชันของกราฟในรูปที่ 4.14 จะสามารถอธิบายผลกระทบต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวได้ว่า เมื่อมีการเติมสัดส่วนเศษแบบฝุ่นจะส่งผลเชิงลบ กล่าวคือ หากสัดส่วนเพิ่มจาก 5% เป็น 20% จะทำให้เปอร์เซ็นต์การยึดตัวลดลง

อิทธิพลของปัจจัยหลักด้านสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นที่เติมลงในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากรูปที่ 4.14 พบว่าเมื่อมีการเติมเศษแบบฝุ่น จาก 5% เป็น 20% ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์การยึดตัวลดลง แสดงพฤติกรรมของวัสดุเปลี่ยนไปจากเหนียวเป็น ค่อยข้างเปราะ โดยมีร้อยละการยึดตัวจากประมาณ 800 เหลือเพียง 40

อิทธิพลของปัจจัยหลักด้านขนาดอนุภาคเศษแบบฝุ่น และสารเชื่อมโยงที่เติมลงในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากรูปที่ 4.14 พบว่าเมื่อมีการเพิ่มขนาดอนุภาคเศษแบบฝุ่น ให้ใหญ่ขึ้นและเติมสารเชื่อมโยงแทบจะไม่ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์การยึดตัว แต่จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าสองปัจจัยนี้มีนัยสำคัญ แต่ระดับผลกระทบน้อยมากเมื่อเทียบกับสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น

### Factorial Fit: %Elongation versus PWMF(%), Particle Siz, HDPE-g-MA (phr)

#### Estimated Effects and Coefficients for %Elongation (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		414.9	7.428	55.86	0.000
PWMF(%)	-756.5	-378.2	7.428	-50.92	0.000
Particle Size (micron)	-36.6	-18.3	7.428	-2.46	0.016
HDPE-g-MA (phr)	-34.3	-17.1	7.428	-2.31	0.024
PWMF(%)*Particle Size (micron)	30.8	15.4	7.428	2.07	0.042
PWMF(%)*HDPE-g-MA (phr)	33.3	16.6	7.428	2.24	0.028
Particle Size (micron)* HDPE-g-MA (phr)	-45.8	-22.9	7.428	-3.08	0.003
PWMF(%)*Particle Size (micron)* HDPE-g-MA (phr)	38.3	19.2	7.428	2.58	0.012

S = 66.4359      PRESS = 392331

R-Sq = 97.34%      R-Sq(pred) = 96.71%      R-Sq(adj) = 97.08%

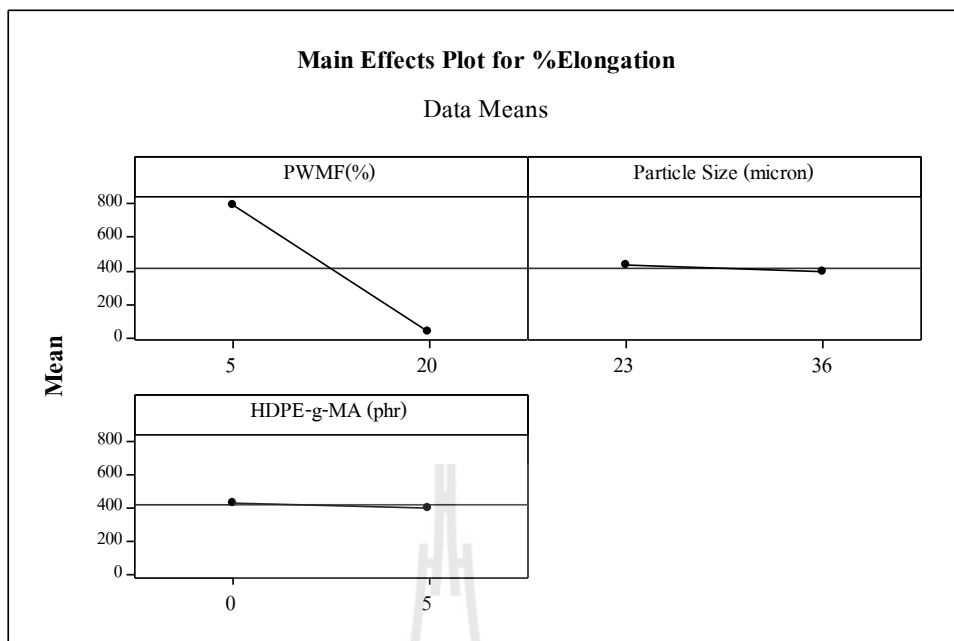
#### Analysis of Variance for %Elongation (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS
Main Effects	3	11495366	11495366
PWMF(%)	1	11445157	11445157
Particle Size (micron)	1	26725	26725
HDPE-g-MA (phr)	1	23484	23484
2-Way Interactions	3	82996	82996
PWMF(%)*Particle Size (micron)	1	18912	18912
PWMF(%)*HDPE-g-MA (phr)	1	22133	22133
Particle Size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	1	41951	41951
3-Way Interactions	1	29370	29370
PWMF(%)*Particle Size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	1	29370	29370
Residual Error	72	317788	317788
Pure Error	72	317788	317788
Total	79	11925520	

Source	Adj MS	F	P
Main Effects	3831789	868.15	0.000
PWMF(%)	11445157	2593.08	0.000
Particle Size (micron)	26725	6.05	0.016
HDPE-g-MA (phr)	23484	5.32	0.024
2-Way Interactions	27665	6.27	0.001
PWMF(%)*Particle Size (micron)	18912	4.28	0.042
PWMF(%)*HDPE-g-MA (phr)	22133	5.01	0.028
Particle Size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	41951	9.50	0.003
3-Way Interactions	29370	6.65	0.012
PWMF(%)*Particle Size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	29370	6.65	0.012
Residual Error	4414		
Pure Error	4414		
Total			

รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัว





รูปที่ 4.14 อิทธิพลของปัจจัยหลักต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว

#### 4.2.1.2 ผลจากการทดสอบแรงดัด

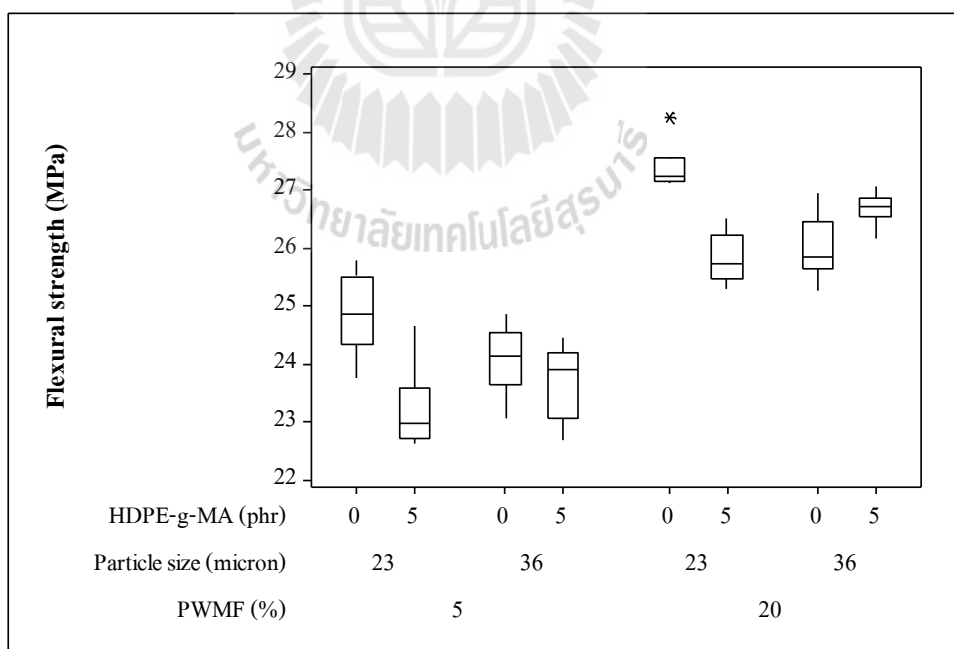
สำหรับการทดสอบสมบัติแรงดัดจะพิจารณาค่าทั้งหมด 2 ค่าด้วยกัน ได้แก่ ความต้านทานแรงดัด และ โมดูลัสการดัด ซึ่งจากการทดลองได้ผลดังนี้

ค่าความต้านทานแรงดัดที่ได้จากการทดสอบตามที่ออกแบบการทดลองข้างต้น แสดงดังรูปที่ 4.15 จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อมีการเติมเศษแบบฝุ่นไม่ว่าจะเป็นที่ 5% หรือ 20% ขนาดอนุภาค 23 หรือ 36 ไมโครเมตร ทั้งแบบที่มีการเติมสารเชื่อมโยงและไม่มีการเติมสารเชื่อมโยงนั้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดัดสูงขึ้นกว่าการไม่เติมเศษฝุ่น ซึ่งจากเดิมมีค่าเพียง  $23.07 \pm 0.36$  MPa ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 4.3 แต่เมื่อพิจารณาสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงพบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนจาก 5% เป็น 20% ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.15 กล่าวได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดัดมีเพียงปัจจัยเดียว คือ สัดส่วนการเติมเศษเมลามีน โดยที่เมื่อสัดส่วนการเติมเศษฝุ่นมากขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดัดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่าความต้านทานแรงดัดที่ได้จากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ได้ผลดังรูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปัจจัยหลัก (Main effect) 2 ปัจจัย คือ สัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น และการเติมสารเชื่อมโยง

ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดัดอย่างมีนัยสำคัญ แต่พบว่าผลกระทบที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดัดนั้น ไม่ได้มีเพียงปัจจัยหลักเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีผลกระทบของปัจจัยร่วม (Interaction effect) ที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดัดอย่างมีนัยสำคัญด้วย ซึ่งประกอบไปด้วย อิทธิพลของปัจจัยร่วม 2 ระดับ ได้แก่ อิทธิพลร่วมระหว่างสัดส่วนเศษแบบฝุ่นและการเติมสารเชื่อมโยง อิทธิพลร่วมระหว่างขนาดอนุภาคและสารเชื่อมโยง และอิทธิพลร่วมของปัจจัยร่วม 3 ระดับด้วย เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R-squared, R-Sq (adj)) ซึ่งมีค่า 87.71% แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแรงดัดนั้น 87.71% เกิดจากการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่ศึกษา โดยมีตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Error) อยู่ 12.29%

เมื่อพิจารณาเพียงระดับของผลกระทบของปัจจัยทั้งหมดที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดัดพบว่า สัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นส่งผลมากที่สุด โคนจะเห็นว่าค่า สถิติ F มีค่าถึง 459.37 โดยที่ผลกระทบของปัจจัยอื่น ๆ นอกจากนี้มีค่าสถิติ F โดยเฉลี่ยแล้วน้อยกว่า 50 ทั้งนี้ ซึ่งมีผลกระทบน้อยมากเมื่อเทียบกับผลจากสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น นอกจากนี้จะสามารถอธิบายทิศทางผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงดัดได้ว่า เมื่อมีการเติมสัดส่วนเศษแบบฝุ่นจะส่งผลเชิงบวกต่อค่าความต้านทานแรงดัด กล่าวคือ หากสัดส่วนเพิ่มจาก 5% เป็น 20% จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดัดสูงขึ้น ดังจะเห็นได้จากค่าความชันกราฟ ในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.15 ผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคของเศษจากกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์เมลามีนและการเติมสารเชื่อมโยงต่อความต้านทานแรงดัด

### Factorial Fit: Flexural str versus PWF (%) , Particle siz, HDPE-g-MA (phr)

#### Estimated Effects and Coefficients for Flexural strength (MPa) (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		25.2181	0.05841	431.75	0.000
PWF (%)	2.5038	1.2519	0.05841	21.43	0.000
Particle size (micron)	-0.2097	-0.1049	0.05841	-1.80	0.077
HDPE-g-MA (phr)	-0.7312	-0.3656	0.05841	-6.26	0.000
PWF (%)*Particle size (micron)	-0.0612	-0.0306	0.05841	-0.52	0.602
PWF (%)*HDPE-g-MA (phr)	0.3022	0.1511	0.05841	2.59	0.012
Particle size (micron)* HDPE-g-MA (phr)	0.8888	0.4444	0.05841	7.61	0.000
PWF (%)*Particle size (micron)* HDPE-g-MA (phr)	0.2432	0.1216	0.05841	2.08	0.041

S = 0.522425      PRESS = 24.2603

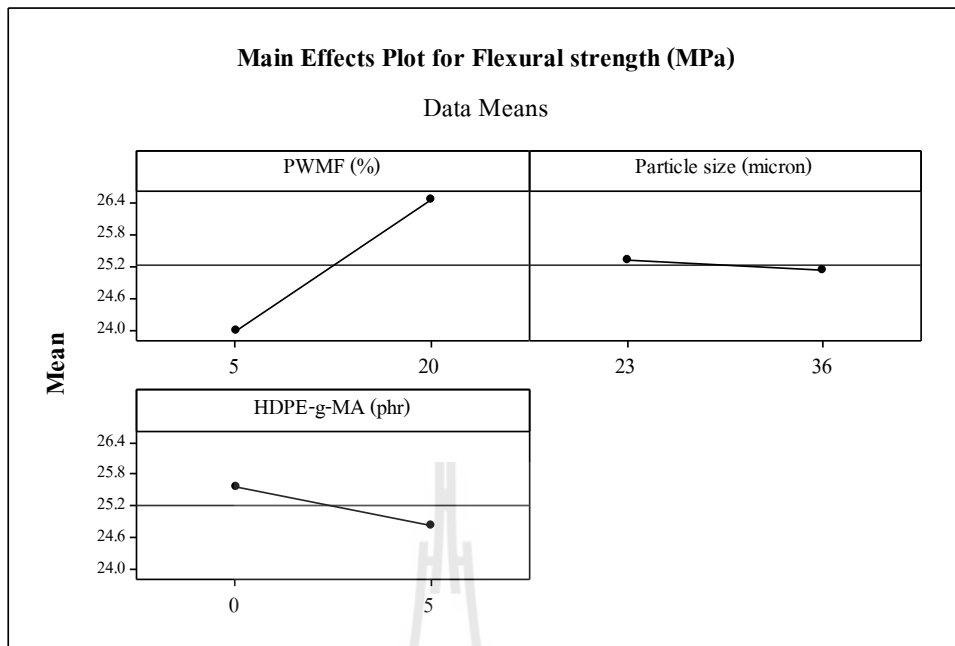
R-Sq = 88.80%      R-Sq(pred) = 86.18%      R-Sq(adj) = 87.71%

#### Analysis of Variance for Flexural strength (MPa) (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS
Main Effects	3	136.950	136.950
PWF (%)	1	125.375	125.375
Particle size (micron)	1	0.880	0.880
HDPE-g-MA (phr)	1	10.695	10.695
2-Way Interactions	3	17.700	17.700
PWF (%)*Particle size (micron)	1	0.075	0.075
PWF (%)*HDPE-g-MA (phr)	1	1.827	1.827
Particle size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	1	15.798	15.798
3-Way Interactions	1	1.183	1.183
PWF (%)*Particle size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	1	1.183	1.183
Residual Error	72	19.651	19.651
Pure Error	72	19.651	19.651
Total	79	175.484	

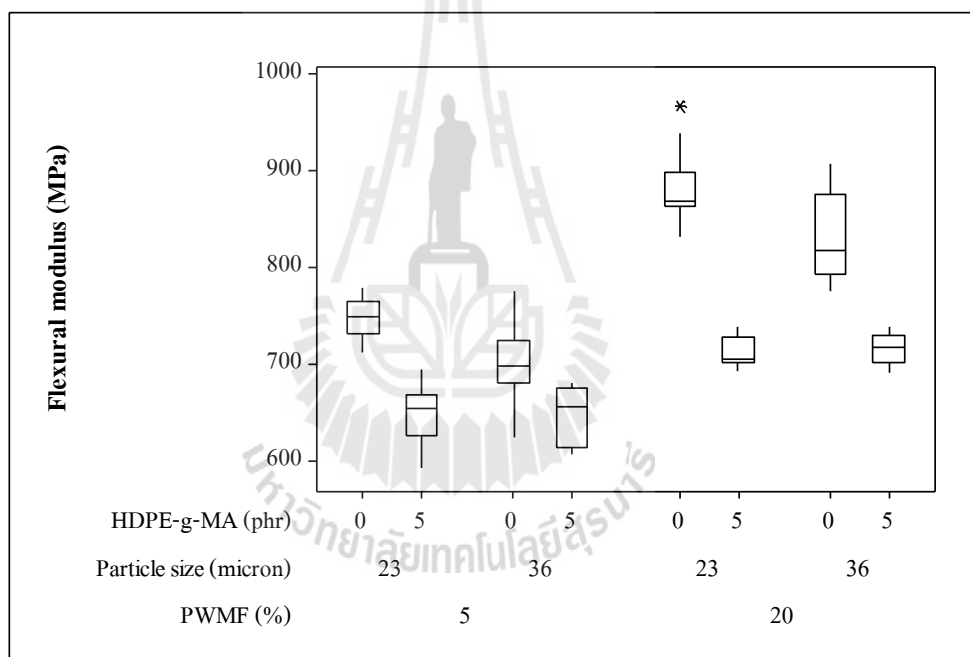
Source	Adj MS	F	P
Main Effects	45.650	167.26	0.000
PWF (%)	125.375	459.37	0.000
Particle size (micron)	0.880	3.22	0.077
HDPE-g-MA (phr)	10.695	39.18	0.000
2-Way Interactions	5.900	21.62	0.000
PWF (%)*Particle size (micron)	0.075	0.27	0.602
PWF (%)*HDPE-g-MA (phr)	1.827	6.69	0.012
Particle size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	15.798	57.88	0.000
3-Way Interactions	1.183	4.34	0.041
PWF (%)*Particle size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	1.183	4.34	0.041
Residual Error	0.273		
Pure Error	0.273		
Total			

รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าความต้านทานแรงคด



รูปที่ 4.17 อิทธิพลของปัจจัยหลักต่อค่าความต้านทานแรงคด

ค่าโมดูลัสแรงดัด ที่ได้จากการทดสอบตามที่ออกแบบการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.18 จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อมีการเติมเศษแบบฝุ่นไม่ว่าจะเป็นที่ 5% หรือ 20% ขนาดอนุภาค 23 หรือ 36 ไมโครเมตร ทั้งแบบที่มีการเติมสารเชื่อมโยงและไม่มีการเติมสารเชื่อมโยงนั้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นกว่าการไม่เติมเศษฝุ่น จากเดิมมีค่า  $665.26 \pm 20.69$  MPa ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 4.3 แต่เมื่อพิจารณาสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงพบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนจาก 5% เป็น 20% ส่งผลให้ค่าโมดูลัสแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคให้ใหญ่มากขึ้นจาก 23 เป็น 36 ไมโครเมตร ไม่ส่งผลให้ค่าโมดูลัสแรงดัด แต่เมื่อพิจารณาการเติมสารเชื่อมโยงในพอลิเมอร์คอมโพสิตกลับส่งผลให้ค่าโมดูลัสแรงดัดลดลงอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.18 ผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคของเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนและการเติมสารเชื่อมโยงต่อโมดูลัสแรงดัด

จากรูปที่ 4.18 ดังที่กล่าวข้างต้น สามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยส่งผลต่อค่าโมดูลัสแรงคัดคือสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นและการเติมสารเชื่อมโยง โดยส่งผลในทิศทางตรงกันข้ามกันกล่าวคือ เมื่อเติมสัดส่วนเศษแบบฝุ่นเพิ่มขึ้น จาก 5 เป็น 20% ค่าโมดูลัสแรงคัดมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อมีการเติมสารเชื่อมโยงทำให้ค่าโมดูลัสแรงคัดลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่าโมดูลัสแรงคัดที่ได้จากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ได้ในทิศทางเดียวกันกับรูปที่ 4.18 กล่าวคือ สัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นและการเติมสารเชื่อมโยงส่งผลต่อค่าโมดูลัสแรงคัด แต่ทว่าผลกระทบที่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสของคัตนั้นยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งกระทบอย่างมีนัยสำคัญด้วยเช่นกัน คือ ขนาดอนุภาค และ อิทธิพลของปัจจัยร่วมทั้งหมด ยกเว้นผลกระทบของอิทธิพลร่วมระหว่างสัดส่วนเศษแบบฝุ่นและขนาดอนุภาค เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R-squared, R-Sq (adj)) ซึ่งมีค่า 85.83% แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสแรงคัตนั้น 85.83% เกิดจากการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่ศึกษา โดยมีตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Error) อยู่ 14.17%

ระดับผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสแรงคัด พบว่าการเติมสารเชื่อมโยง และสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นมีระดับผลกระทบสูงที่สุด โดยที่มีค่าสถิติ F เท่ากับ 239.27 และ 198.82 ตามลำดับ สำหรับผลกระทบของปัจจัยอื่น ๆ นั้น มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับผลจากการเติมสารเชื่อมโยง และสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น อาจกล่าวได้ว่าค่าโมดูลัสแรงคัตขึ้นกับการเติมสารเชื่อมโยง และสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น โดยที่ การเติมสารเชื่อมโยงส่งผลในเชิงลบ ขณะที่ สัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นส่งผลในเชิงบวก ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.20

### Factorial Fit: Flexural mod versus PWWF (%), Particle siz, HDPE-g-MA (phr)

#### Estimated Effects and Coefficients for Flexural modulus (MPa) (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		735.12	3.548	207.20	0.000
PWWF (%)	100.05	50.03	3.548	14.10	0.000
Particle size (micron)	-23.53	-11.77	3.548	-3.32	0.001
HDPE-g-MA (phr)	-109.76	-54.88	3.548	-15.47	0.000
PWWF (%)*Particle size (micron)	-0.91	-0.46	3.548	-0.13	0.898
PWWF (%)*HDPE-g-MA (phr)	-33.80	-16.90	3.548	-4.76	0.000
Particle size (micron)* HDPE-g-MA (phr)	26.37	13.19	3.548	3.72	0.000
PWWF (%)*Particle size (micron)* HDPE-g-MA (phr)	1.63	0.82	3.548	0.23	0.819

S = 31.7330 PRESS = 89509.5

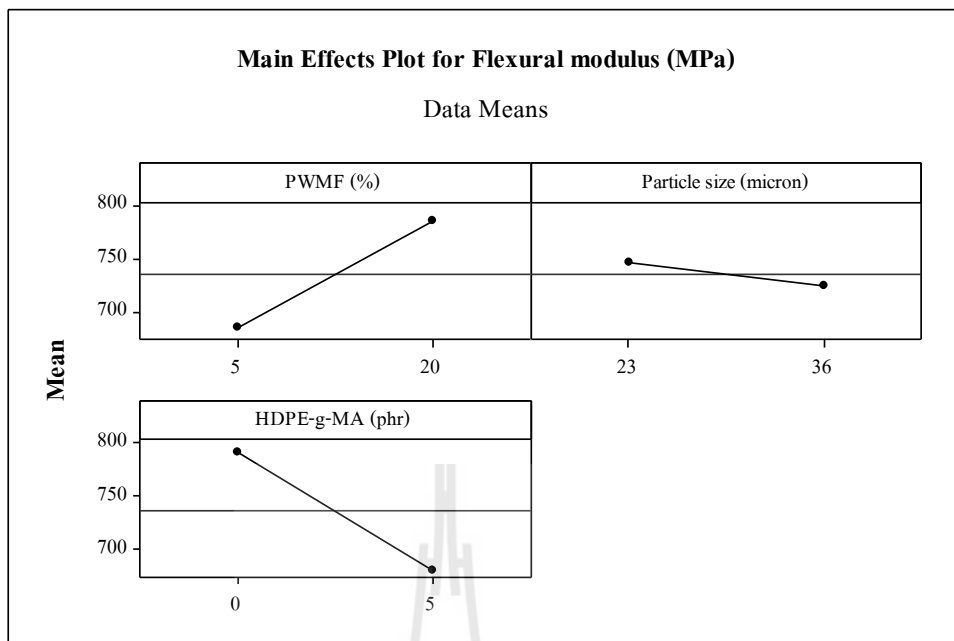
R-Sq = 87.09% R-Sq(pred) = 84.06% R-Sq(adj) = 85.83%

#### Analysis of Variance for Flexural modulus (MPa) (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS
Main Effects	3	452223	452223	150741
PWWF (%)	1	200205	200205	200205
Particle size (micron)	1	11076	11076	11076
HDPE-g-MA (phr)	1	240942	240942	240942
2-Way Interactions	3	36774	36774	12258
PWWF (%)*Particle size (micron)	1	17	17	17
PWWF (%)*HDPE-g-MA (phr)	1	22845	22845	22845
Particle size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	1	13913	13913	13913
3-Way Interactions	1	53	53	53
PWWF (%)*Particle size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	1	53	53	53
Residual Error	72	72503	72503	1007
Pure Error	72	72503	72503	1007
Total	79	561553		

Source	F	P
Main Effects	149.70	0.000
PWWF (%)	198.82	0.000
Particle size (micron)	11.00	0.001
HDPE-g-MA (phr)	239.27	0.000
2-Way Interactions	12.17	0.000
PWWF (%)*Particle size (micron)	0.02	0.898
PWWF (%)*HDPE-g-MA (phr)	22.69	0.000
Particle size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	13.82	0.000
3-Way Interactions	0.05	0.819
PWWF (%)*Particle size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	0.05	0.819
Residual Error		
Pure Error		
Total		

รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าโมดูลัสแรงดัด



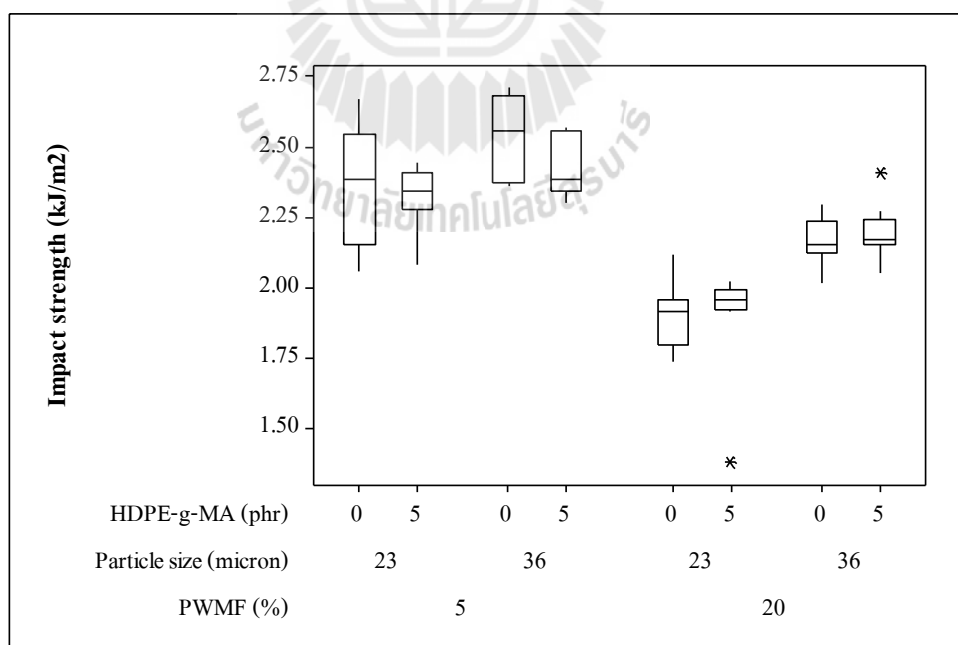
รูปที่ 4.20 อิทธิพลของปัจจัยหลักต่อค่าโมดูลัสแรงดัด





#### 4.2.1.3 ผลจากการทดสอบแรงกระแทก

สำหรับการทดสอบสมบัติแรงกระแทกจะพิจารณาค่าความต้านทานแรงกระแทก ผลจากการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.21 จากกราฟจะเห็นได้ว่าสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น และ ขนาดของอนุภาคส่งผลต่อความต้านทานแรงกระแทก โดยที่เมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นจาก 23 เป็น 36 ไมครอนส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งหมายความว่าเมื่อขนาดอนุภาคมีขนาดใหญ่ส่งผลให้สามารถดูดซับพลังงานที่มากกระทำได้ดีขึ้น แสดงว่าวัสดุที่ได้มีลักษณะเหนียวกว่า ในขณะที่เมื่อสัดส่วนการเติมเศษเมลามีนเพิ่มขึ้น จาก 5% เป็น 20% พบว่าค่าความต้านทานแรงกระแทกมีค่าลดลง ความสามารถในการดูดซับพลังงานก็ต่ำลงซึ่งสามารถตีความได้ว่าการเพิ่มสัดส่วนการเติมเศษเมลามีนส่งผลให้วัสดุมีความเปราะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังรูปที่ 4.22 ซึ่งพบว่าสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นและ ขนาดของอนุภาคส่งผลต่อความต้านทานแรงกระแทกอย่างมีนัยสำคัญ โดยพิจารณาจากค่า P-Value ที่น้อยกว่าค่านัยสำคัญ (0.05) อย่างไรก็ตามเมื่อนำผลจากการวิเคราะห์ด้วย ANOVA มาพิจารณาจะพบว่ามีผลกระทบของปัจจัยร่วม 2 ระดับที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน คือ ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น และขนาดของอนุภาค



รูปที่ 4.21 ผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคของเศษจากกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์เมลามีนและการเติมสารเชื่อมโยงต่อความต้านทานแรงกระแทก

เมื่อเปรียบเทียบระดับผลกระทบที่สามารถพิจารณาได้จากค่าสถิติ F พบว่าผลกระทบของปัจจัยอื่นนั้นน้อยมากเมื่อเทียบกับผลกระทบของสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น และขนาดของอนุภาค ซึ่งมีค่าสถิติ F ถึง 142.20 และ 45.38 ตามลำดับ ในขณะที่ผลกระทบของปัจจัยอื่น ๆ มีค่าสถิติ F น้อยมากโดยเฉพาะผลกระทบของอิทธิพลร่วม จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกคือ สัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น นอกจากนี้การพิจารณาเครื่องหมายในคอลัมน์ Effect หรือ คอลัมน์ค่าสถิติ T หรือทิศทางความชันของกราฟในรูปที่ 4.23 สามารถอธิบายผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกได้ว่า เมื่อมีการเติมสัดส่วนเศษแบบฝุ่นจะส่งผลเชิงลบ กล่าวคือ หากสัดส่วนเพิ่มจาก 5% เป็น 20% จะทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกลดลง และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคให้ใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มมากขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R-squared, R-Sq (adj)) ซึ่งมีค่า 70.58% แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแรงกระแทก 70.58% เกิดจากการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่ศึกษา โดยมีตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Error) อยู่ 29.42%

### Factorial Fit: Impact stren versus PWMF (%), Particle siz, HDPE-g-MA (phr)

#### Estimated Effects and Coefficients for Impact strength (kJ/m2) (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		2.2239	0.01551	143.35	0.000
PWMF (%)	-0.3700	-0.1850	0.01551	-11.92	0.000
Particle size (micron)	0.2090	0.1045	0.01551	6.74	0.000
HDPE-g-MA (phr)	-0.0278	-0.0139	0.01551	-0.90	0.374
PWMF (%)*Particle size (micron)	0.0688	0.0344	0.01551	2.22	0.030
PWMF (%)*HDPE-g-MA (phr)	0.0464	0.0232	0.01551	1.49	0.139
Particle size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	-0.0143	-0.0071	0.01551	-0.46	0.647
PWMF (%)*Particle size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	0.0272	0.0136	0.01551	0.88	0.384

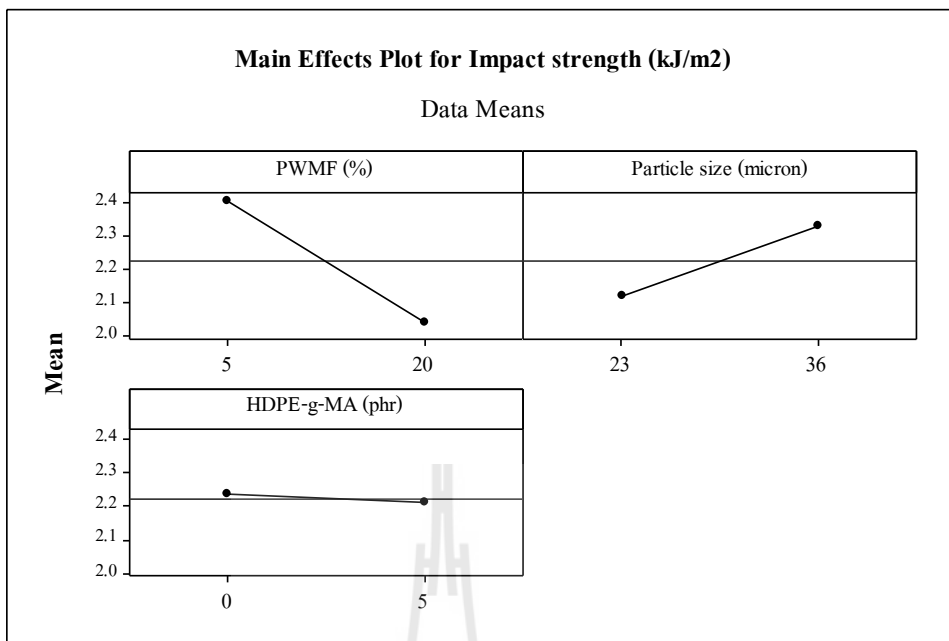
S = 0.138756      PRESS = 1.71140  
 R-Sq = 73.18%      R-Sq(pred) = 66.89%      R-Sq(adj) = 70.58%

#### Analysis of Variance for Impact strength (kJ/m2) (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS
Main Effects	3	3.62686	3.62686
PWMF (%)	1	2.73773	2.73773
Particle size (micron)	1	0.87369	0.87369
HDPE-g-MA (phr)	1	0.01543	0.01543
2-Way Interactions	3	0.14159	0.14159
PWMF (%)*Particle size (micron)	1	0.09454	0.09454
PWMF (%)*HDPE-g-MA (phr)	1	0.04300	0.04300
Particle size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	1	0.00406	0.00406
3-Way Interactions	1	0.01479	0.01479
PWMF (%)*Particle size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	1	0.01479	0.01479
Residual Error	72	1.38623	1.38623
Pure Error	72	1.38623	1.38623
Total	79	5.16948	

Source	Adj MS	F	P
Main Effects	1.20895	62.79	0.000
PWMF (%)	2.73773	142.20	0.000
Particle size (micron)	0.87369	45.38	0.000
HDPE-g-MA (phr)	0.01543	0.80	0.374
2-Way Interactions	0.04720	2.45	0.070
PWMF (%)*Particle size (micron)	0.09454	4.91	0.030
PWMF (%)*HDPE-g-MA (phr)	0.04300	2.23	0.139
Particle size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	0.00406	0.21	0.647
3-Way Interactions	0.01479	0.77	0.384
PWMF (%)*Particle size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	0.01479	0.77	0.384
Residual Error	0.01925		
Pure Error	0.01925		
Total			

รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าความต้านทานแรงกระแทก

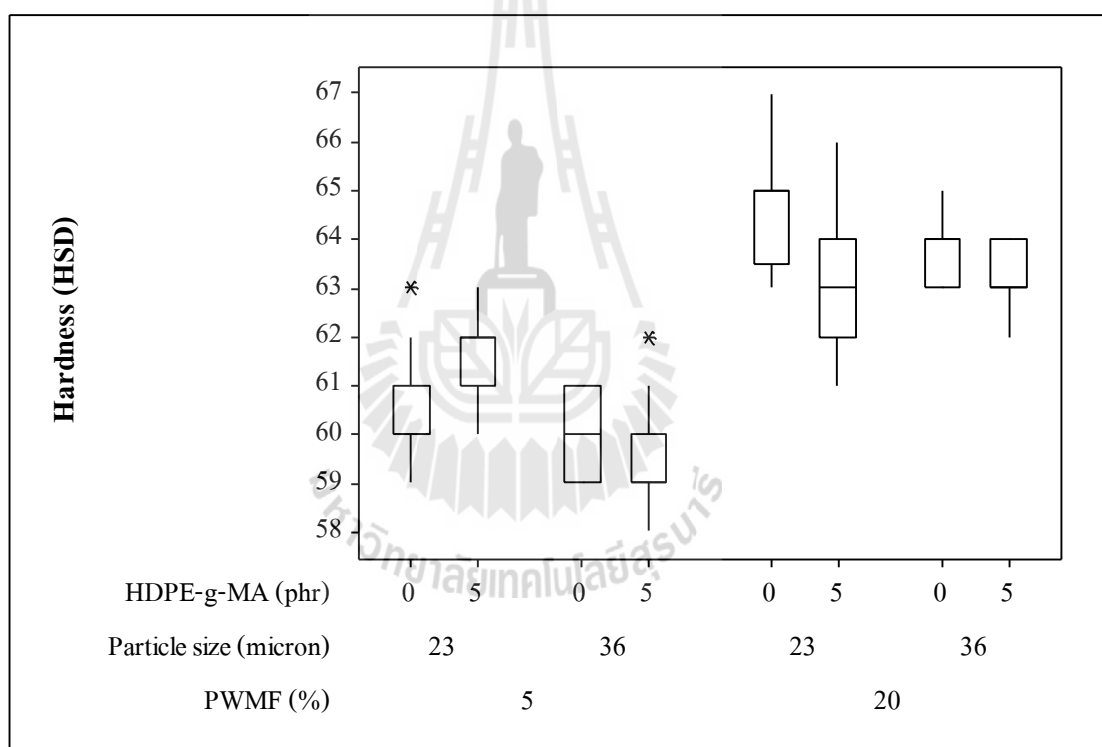


รูปที่ 4.23 อิทธิพลของปัจจัยหลักต่อค่าความต้านทานแรงกระแทก



#### 4.2.1.4 ผลจากการทดสอบความแข็ง

สำหรับการทดสอบสมบัติความแข็งที่ได้จากการทดสอบตามการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ แสดงดังรูปที่ 4.24 จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อมีการเติมเศษแบบฝุ่นไม่ว่าจะเป็นที่ 5% หรือ 20% ขนาดอนุภาค 23 หรือ 36 ไมโครเมตร ทั้งแบบที่มีการเติมสารเชื่อมโยงและไม่มีการเติมสารเชื่อมโยงนั้น ส่งผลให้ค่าความแข็งสูงขึ้นกว่าการไม่เติมเศษฝุ่น ซึ่งมีค่าเพียง  $58.92 \pm 2.57$  MPa ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 4.3 แต่เมื่อพิจารณาสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงพบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนจาก 5% เป็น 20% ส่งผลให้ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคให้ใหญ่มากขึ้นและเมื่อมีการเติมสารเชื่อมโยงในพอลิเมอร์คอมโพสิทกลับไม่ส่งผลต่อค่าความแข็ง



รูปที่ 4.24 ผลกระทบของสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคของเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนและการเติมสารเชื่อมโยงต่อความแข็ง

จากรูปที่ 4.24 สามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งคือ สัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น โดยที่เมื่อมีการเติมเศษมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากเศษแบบฝุ่นที่เติมเข้าไปเกิดการข่มตัวแล้วมีลักษณะแข็งเมื่อเติมลงไปจึงทำให้ความแข็ง

เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่าความความแข็งที่ได้จากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ได้ผลดังรูปที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าทุกปัจจัยที่มีโอกาสเกิดทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมต่างส่งผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระดับผลกระทบที่สามารถพิจารณาได้จากค่าสถิติ F พบว่าผลกระทบของปัจจัยอื่นนั้นน้อยมากเมื่อเทียบกับผลกระทบของสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น ซึ่งมีค่าสถิติ F ถึง 518.42 ในขณะที่ผลกระทบของปัจจัยอื่น ๆ มีค่าสถิติ F น้อยมาก เช่น ผลกระทบของปัจจัยร่วม 3 ปัจจัยมีค่าสถิติ F เพียง 27.38 เป็นต้น จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อค่าความแข็งนั้นคือสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น นอกจากนี้การพิจารณาเครื่องหมายในคอลัมน์ Effect หรือคอลัมน์ค่าสถิติ T หรือทิศทางความชันของกราฟในรูปที่ 4.26 สามารถอธิบายผลกระทบต่อค่าความแข็งได้ว่า เมื่อมีการเติมสัดส่วนเศษแบบฝุ่นจะส่งผลเชิงบวก กล่าวคือ หากสัดส่วนเพิ่มจาก 5% เป็น 20% จะทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R-squared, R-Sq (adj)) ซึ่งมีค่า 79.68% แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็ง 79.68% เกิดจากการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่ศึกษา โดยมีตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Error) อยู่ 20.32%



### Factorial Fit: Hardness (sh versus PwMF (%), Particle siz, HDPE-g-MA (phr))

#### Estimated Effects and Coefficients for Hardness (HSD) (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		62.0500	0.06300	984.95	0.000
PwMF (%)	3.2200	1.6100	0.06300	25.56	0.000
Particle size (micron)	-0.8000	-0.4000	0.06300	-6.35	0.000
HDPE-g-MA (phr)	-0.3600	-0.1800	0.06300	-2.86	0.005
PwMF (%)*Particle size (micron)	0.4800	0.2400	0.06300	3.81	0.000
PwMF (%)*HDPE-g-MA (phr)	-0.7200	-0.3600	0.06300	-5.71	0.000
Particle size (micron)* HDPE-g-MA (phr)	-0.2600	-0.1300	0.06300	-2.06	0.040
PwMF (%)*Particle size (micron)* HDPE-g-MA (phr)	0.7400	0.3700	0.06300	5.87	0.000

S = 0.890926 PRESS = 165.365

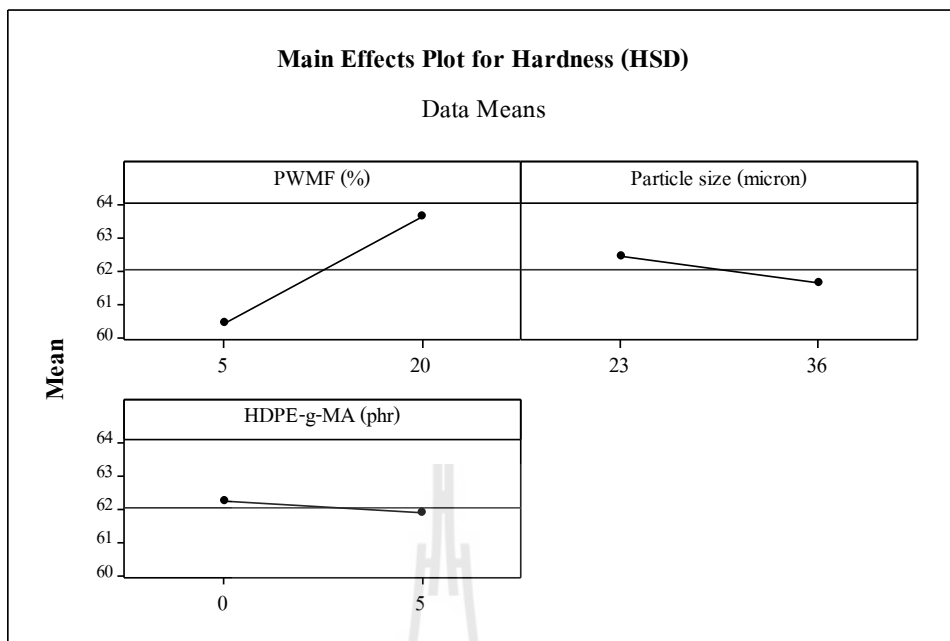
R-Sq = 80.40% R-Sq(pred) = 78.73% R-Sq(adj) = 79.68%

#### Analysis of Variance for Hardness (HSD) (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS
Main Effects	3	556.900	556.900
PwMF (%)	1	518.420	518.420
Particle size (micron)	1	32.000	32.000
HDPE-g-MA (phr)	1	6.480	6.480
2-Way Interactions	3	40.820	40.820
PwMF (%)*Particle size (micron)	1	11.520	11.520
PwMF (%)*HDPE-g-MA (phr)	1	25.920	25.920
Particle size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	1	3.380	3.380
3-Way Interactions	1	27.380	27.380
PwMF (%)*Particle size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	1	27.380	27.380
Residual Error	192	152.400	152.400
Pure Error	192	152.400	152.400
Total	199	777.500	

Source	Adj MS	F	P
Main Effects	185.633	233.87	0.000
PwMF (%)	518.420	653.13	0.000
Particle size (micron)	32.000	40.31	0.000
HDPE-g-MA (phr)	6.480	8.16	0.005
2-Way Interactions	13.607	17.14	0.000
PwMF (%)*Particle size (micron)	11.520	14.51	0.000
PwMF (%)*HDPE-g-MA (phr)	25.920	32.66	0.000
Particle size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	3.380	4.26	0.040
3-Way Interactions	27.380	34.49	0.000
PwMF (%)*Particle size (micron)*HDPE-g-MA (phr)	27.380	34.49	0.000
Residual Error	0.794		
Pure Error	0.794		
Total			

รูปที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่อค่าความแข็ง



รูปที่ 4.26 อิทธิพลของปัจจัยหลักต่อค่าความแข็ง





#### 4.2.2 ผลจากการทดสอบทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนเป็นสมบัติที่สำคัญมากของวัสดุจำพวกพอลิเมอร์เนื่องจากจะใช้ค่าของสมบัติทางความร้อนไปใช้ในการประยุกต์วัสดุเพื่อใช้งานในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ โดยพิจารณาจากอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ใช้งบชี้ว่าที่อุณหภูมิที่จะนำพอลิเมอร์ไปใช้นั้น พอลิเมอร์มีสถานะคล้ายแก้ว หรือสถานะคล้ายยาง ในขณะที่อุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) ก็ใช้งบชี้ว่าพอลิเมอร์นั้นจะเปลี่ยนจากสถานะคล้ายยางเป็นสถานะหลอมเหลวที่อุณหภูมิใด ดังนั้นอุณหภูมิหลอมเหลวจึงสำคัญมาก เนื่องจากจะนำไปใช้ระบุอุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูป

พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยปกติจะมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่  $-90^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นที่อุณหภูมิห้องพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงจึงมีสถานะคล้ายยาง สำหรับการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC ในงานวิจัยนี้ทดสอบที่อุณหภูมิห้องถึง  $200^{\circ}\text{C}$  จึงไม่สามารถศึกษาผลกระทบของสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น ขนาดอนุภาคเศษแบบฝุ่น และการเติมสารเชื่อมโยงต่ออุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วได้ แต่สามารถศึกษาผลกระทบต่ออุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก ได้ สำหรับผลจากการทดสอบสมบัติทางความร้อนสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.4

##### 1) ผลของสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น ขนาดอนุภาคเศษแบบฝุ่น และการเติมสารเชื่อมโยงต่ออุณหภูมิหลอมเหลว และ อุณหภูมิการเกิดผลึก

เมื่อพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิการเกิดผลึกพบว่าสัดส่วนการเติม ขนาดอนุภาคของเศษแบบฝุ่น และการเติมสารเชื่อมโยงไม่ส่งผลให้อุณหภูมิหลอมเหลวเปลี่ยนไป ในขณะที่อุณหภูมิการเกิดผลึกเปลี่ยนไปเล็กน้อยหากเติมเศษแบบฝุ่น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงบริสุทธิ์

##### 2) ผลของสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น ขนาดอนุภาคเศษแบบฝุ่น และการเติมสารเชื่อมโยงต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก ( $\chi_c$ ) ที่เกิดขึ้นจากพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษแบบฝุ่นพบว่าเมื่อมีการเติมเศษแบบฝุ่นโดยปราศจากการเติมสารเชื่อมโยงนั้นส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันเมื่อมีการเติมสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่นก็ส่งผลให้ปริมาณการเกิดผลึกมากขึ้นด้วยเช่นกัน ดังจะเห็นได้จาก HDPE/5PWMP/P2 มีปริมาณการเกิดผลึก 71.58% แต่ HDPE/20PWMP/P2 มีปริมาณการเกิดผลึก 78.84% เมื่อเปรียบเทียบผลของขนาดอนุภาคพบว่าเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามการเติมเศษแบบฝุ่นเข้าไปในวัสดุคอมโพสิตก็ส่งผลให้การเกิด

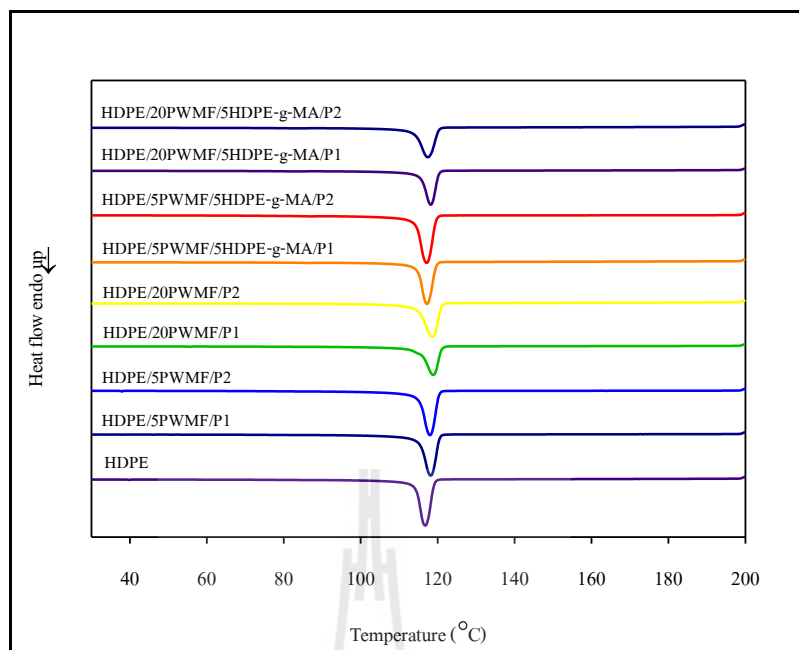
ผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมเศษเมลามีนในลึงพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยจะเห็นได้จากเดิมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงบริสุทธิ์เกิดผลึก 69.91% แต่เมื่อมีการเติมเศษแบบฝุ่นแนวโน้มนៃของการเกิดผลึกเพิ่มขึ้นเป็น 72.17% 71.58% และ 78.84% จากการศึกษาเพิ่มเติมทราบว่าปัจจัยที่ส่งผลให้ปริมาณการเกิดผลึกสูงขึ้นนั้นมีหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น อัตราการเย็นตัวของพอลิเมอร์ การอบอ่อน (Annealing) การเสีรูปร่างของพอลิเมอร์ การเติมสารช่วยก่อผลึก (Nucleating agent) เป็นต้น (ณรงค์ฤทธิ และคณะ, 2548) ในงานวิจัยนี้มีการควบคุมอุณหภูมิในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการเย็นตัว พิจารณาความเป็นไปได้ก็จะพบว่าเศษเมลามีนฟอรั่มลดีไฮนนี่เองที่เป็นสารช่วยก่อผลึกส่งผลให้เมื่อเติมเข้าไปทำให้ปริมาณการเกิดผลึกของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีปริมาณสูงขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ ที่มีการศึกษาการทำพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้ผงซีเรียมเป็นสารตัวเติม และ PBAT (polybutylene adipate terephthalate) เติมในพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ซึ่งพบว่าเติม PBAT ในพอลิเมอร์คอมโพสิตส่งผลให้ปริมาณการเกิดผลึกสูงขึ้น โดยที่ยังเติม PBAT มากปริมาณการเกิดผลึกก็จะมากขึ้นด้วย (Jiraporn N., 2557) เนื่องจาก PBAT เป็นทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Dong, Zou, Yan, Ma, and Chen, 2013; Xiao, Lu, and Yeh, 2009). นอกจากนี้การศึกษาผลกระทบของปริมาณการเกิดผลึกที่เพิ่มมากขึ้นพบว่าปริมาณของการเกิดผลึกที่เพิ่มขึ้นช่วยเพิ่มความแข็งแรงในพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกอีกด้วย (William F. Smith, 1996) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอีกหลายงานวิจัย เช่น (J.A. Sauer and K.D. Pae, 1977) มีการศึกษาปริมาณการเกิดผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พบว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงนั้นมีปริมาณการเกิดผลึกมากกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้กราฟความสัมพันธ์ช่วงยืดหยุ่นของกราฟความเค้น – ความเครียด ช้นกว่า ดังนั้นค่าความต้านทานแรงดึงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกว่า และ (R.J. Welgos, 1982) มีการศึกษาปริมาณการเกิดผลึกต่อจุดครากของพอลิเอไมด์ซึ่งจากการศึกษาพบว่าจุดครากแปรผันตรงกับเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก กล่าวคือเมื่อปริมาณการเกิดผลึกมากก็จะส่งผลให้จุดครากสูงชันด้วยเช่นเดียวกัน

แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของการเกิดผลึกเมื่อมีการเติมสารเชื่อมโยง 5 phr กลับพบว่าเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกลดลง จาก 69.91% เป็น 62.96% 67.41% 64.66% และ 65.45% จากการศึกษาหลักการของสารเชื่อมโยง (Compatibilizer) เบื้องต้น คือหลักเกณฑ์การเลือกสารเชื่อมโยงที่จะนำมาใช้โดยพิจารณาจากเมทริกซ์เป็นหลัก หลังจากนั้นจะนำไปผสมในสารเคมีอย่างอื่นซึ่งที่นิยมใช้กันคือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MA) แล้วจะได้ออกมาเป็นสารเชื่อมโยง โดยสารเชื่อมโยงนี้เมื่อเติมเข้าไปจะนำหน้าที่ไปตัดสายโซ่โมเลกุลแล้วสร้างหมู่ฟังก์ชันที่แอคทีฟทำให้ยึดเกาะกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ก็ได้มีการศึกษา

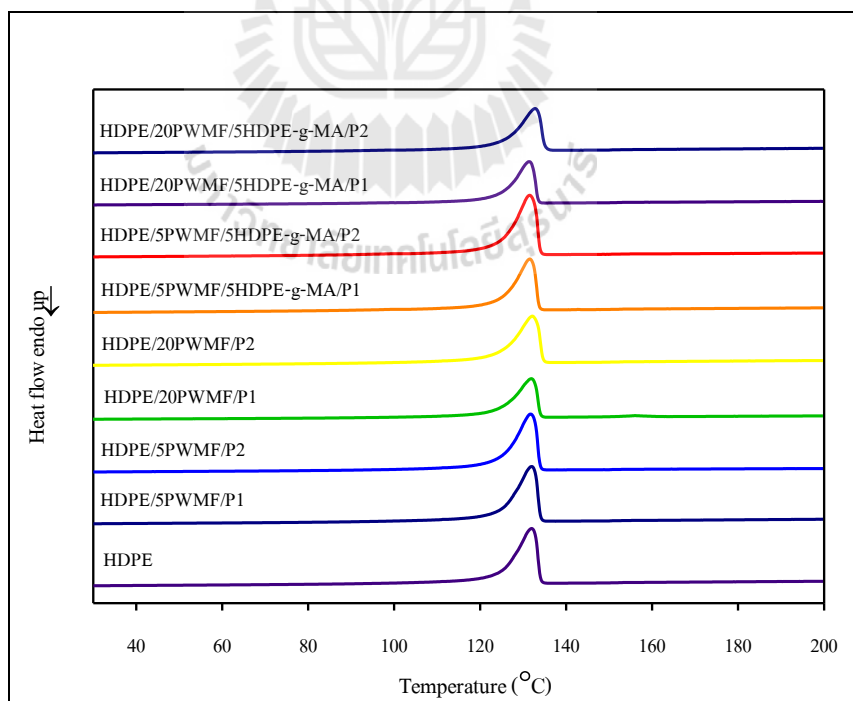
การเติมปริมาณสารเชื่อมโยงเข้าไป ซึ่งก็จะพบว่าปริมาณการเกิดผลึกนั้นลดลง ดังที่ได้กล่าวข้างต้น ซึ่งขัดกับหลักการเบื้องต้นของการเติมสารเชื่อมโยงเข้าไปที่ว่าการเติมเข้าไปและจะส่งผลให้ยึดเกาะกับสารอื่นได้ดีขึ้น สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากสารเชื่อมโยงที่ใช้นี้ได้รับความอนุเคราะห์มาเป็นสารเชื่อมโยงที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำ copolymer (Fusabond® M Series, M603) ซึ่งไม่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ นอกจากนี้สารตัวเติมที่ใช้ในงานวิจัยเป็นเศษที่เกิดการบ่มตัว (Curing) เรียบร้อยแล้ว โครงสร้างที่เกิดขึ้นจึงเป็นโครงสร้างร่างแห ยากต่อการเข้าไปตัดสายโซ่เพื่อให้เกิดหมู่ฟังก์ชัน แอคทีฟ จากสาเหตุที่กล่าวมาสองข้อข้างต้นส่งผลให้เมื่อมีการเติมสารเชื่อมโยงเข้าไปพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงจึงถูกตัดสายโซ่โมเลกุลให้สั้นลงโดยไม่มีการยึดเกาะกับเศษแบบฝุ่นที่เติมเข้าไป ส่งผลสายโซ่สั้นลงหมู่แขนงของสายโซ่มากขึ้นทำให้ปริมาณการเกิดผลึกลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้าก็มีรายงานว่าหากมีการเติมสารเชื่อมโยงเข้าไปในปริมาณมากจะทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เมทริกซ์สั้นลง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมลดลงไปด้วย (Jiraporn N., 2557; Wootthikanokkhan, Kasemwananimit, Sombatsompop, Kositchaiyong, Isarankura na Ayutthaya, and Kaabbuathong, 2012)

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนแบบฝุ่น

Name	T <sub>c</sub> (°C)	T <sub>m</sub> (°C)	ΔH <sub>c</sub> (J/g)	ΔH <sub>m</sub> (J/g)	χ <sub>c</sub> (%)
HDPE	116.75	131.96	209.48	205.27	69.91
HDPE/5PWMF/P1	118.22	131.79	201.67	201.30	72.17
HDPE/5PWMF/P2	118.05	131.78	200.69	199.64	71.58
HDPE/20PWMF/P1	118.81	131.95	163.90	161.28	68.66
HDPE/20PWMF/P2	118.67	132.11	190.58	185.18	78.84
HDPE/5PWMF/5HDPE-g-MA/P1	117.18	131.46	186.79	175.60	62.96
HDPE/5PWMF/5HDPE-g-MA/P2	117.20	131.42	194.58	188.03	67.41
HDPE/20PWMF/5HDPE-g-MA/P1	118.21	131.33	162.21	151.87	64.66
HDPE/20PWMF/5HDPE-g-MA/P2	117.50	132.78	164.25	153.72	65.45



รูปที่ 4.27 เทอร์โมแกรมจากการทดสอบ DSC ช่วง Cooling scan ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตแบบฟุ้ง



รูปที่ 4.28 เทอร์โมแกรมจากการทดสอบ DSC ช่วง 2<sup>nd</sup> Heating scan ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตแบบฟุ้ง

### 4.2.3 ผลจากการทดสอบการลามไฟ

สมบัติการทนไฟเป็นสมบัติหนึ่งที่ต้องทราบหรือทดสอบสำหรับวัสดุที่จะต้องได้สัมผัสกับความร้อนโดยตรง เช่น สายไฟ เป็นต้น พอลิเมอร์เองก็เป็นวัสดุที่นิยมนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ต้องสัมผัสกับความร้อน จึงมีมาตรฐาน UL-94 ในการทดสอบการลามไฟ เพื่อระบุระดับความสามารถในการทนไฟของวัสดุแต่ละชนิด สืบเนื่องมาจากการวิจัยนี้มีการนำเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน ซึ่งประกอบด้วยเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ไปใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อเสริมแรงให้กับวัสดุคอมโพสิตแล้ว เป็นที่ทราบกันดีว่าเมลามีนนั้นเป็นสารทนไฟที่นิยมเติมเข้าไปเพื่อให้สามารถทนไฟได้มากขึ้น ดังนั้นจึงมีการทดสอบการลามไฟเพื่อศึกษาว่าเศษที่เติมเข้าไปนั้นสามารถเป็นใช้เป็นสารทนไฟได้หรือไม่ จากการทดสอบตามมาตรฐาน UL-94 โดยการทดสอบตามแนวนอน (Horizontal burning test) พบว่าไฟไม่ดับก่อนจุดอ้างอิง (100 มิลลิเมตร) ทุก ๆ การทดสอบ และสามารถจัดชั้นคุณภาพตามมาตรฐานของชิ้นงานได้เป็นแบบ HB ทุก ๆ การทดสอบเช่นเดียวกัน (ชั้นคุณภาพตามมาตรฐานแบบ HB คือ ชั้นคุณภาพต่ำที่สุดสำหรับการทดสอบการลามไฟตามมาตรฐาน UL-94) เมื่อพิจารณาผลของปัจจัยที่ศึกษาสามารถจำแนกได้ดังนี้

#### 1) ผลของการเติมเศษแบบฝุ่น

ผลกระทบของเศษที่เติมเข้าไปในพอลิเมอร์คอมโพสิตส่งผลให้อัตราการลามไฟสูงขึ้นในทุก ๆ สัดส่วนการเติมเศษ และทุกขนาดของเศษที่เติมเข้าไป เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นบริสุทธิ์

#### 2) ผลของสัดส่วนการเติมเศษแบบฝุ่น

เมื่อมีการเติมเศษแบบฝุ่นที่สัดส่วนการเติม 5% และ 20% คือ HDPE/5PWMF/P1 และ HDPE/20PWMF/P1 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบก็จะพบว่า เมื่อเติมเศษเพิ่มมากขึ้น จาก 5% เป็น 20% ส่งผลให้อัตราการลามไฟมากขึ้น จากเดิม  $24.23 \pm 1.33$  มิลลิเมตรต่อนาที เป็น  $25.90 \pm 2.65$  มิลลิเมตรต่อนาที

#### 3) ผลของขนาดอนุภาค

ผลกระทบของขนาดเศษแบบฝุ่นพบว่าขนาดอนุภาคใหญ่จะส่งผลให้อัตราการลามไฟสูงกว่าการเติมอนุภาคขนาดเล็ก ดังจะเห็นได้จาก HDPE/5PWMF/P1 ที่มีอัตราการลามไฟ  $24.23 \pm 1.33$  มิลลิเมตรต่อนาที แต่เมื่อมีการเติมเศษแบบฝุ่นที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น HDPE/5PWMF/P2 จะพบว่าอัตราการลามไฟเพิ่มขึ้นเป็น  $27.60 \pm 1.28$  มิลลิเมตรต่อนาที

#### 4) ผลของการเติมสารเชื่อมโยง

ผลกระทบของการเติมสารเชื่อมโยงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ไม่มีการเติมสารเชื่อมโยง พบว่าการเติมสารเชื่อมโยงส่งผลให้อัตราการลามไฟสูงขึ้นเช่นเดียวกัน จะเห็นได้จาก HDPE/20PWMF/P1 ไม่มีการเติมสารเชื่อมโยง อัตราการลามไฟ  $25.90 \pm 2.65$  มิลลิเมตรต่อ นาที ในขณะที่ HDPE/20PWMF/P1/5HDPE-g-MA มีการเติมสารเชื่อมโยงเข้าไป ส่งผลให้อัตราการลามไฟมีค่า  $26.53 \pm 0.06$  มิลลิเมตรต่อ นาที

ตารางที่ 4.5 อัตราการลามไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนตามมาตรฐาน UL-94

Name	Burning rate (mm/min)	UL-94 Rating
HDPE	$20.97 \pm 1.19$	HB
HDPE/5PWMF/P1	$24.23 \pm 1.33$	HB
HDPE/5PWMF/P2	$27.60 \pm 1.28$	HB
HDPE/20PWMF/P1	$25.90 \pm 2.65$	HB
HDPE/20PWMF/P1/5HDPE-g-MA	$26.53 \pm 0.06$	HB
HDPE/5WFMF/P1	$27.40 \pm 0.66$	HB

หมายเหตุ ข้อมูลแสดงในรูปค่าเฉลี่ย  $\pm$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้เศษแบบฝุ่นที่ใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์คอมโพสิตไม่สามารถเพิ่มคุณสมบัติด้านการทนไฟได้ ในทางกลับกันกลับส่งผลให้อัตราการลามไฟสูงขึ้น ซึ่งไม่ตรงกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ว่า การเติมเศษเมลามีนซึ่งเป็นสารทนไฟลงไปจะช่วยให้สามารถทนไฟได้มากขึ้น สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจาก เศษแบบฝุ่นที่ใช้ในการนำมาเติมนั้น เป็นเกรดอุตสาหกรรมสำหรับบรรจุภัณฑ์บรรจุอาหาร ซึ่งหนึ่งส่วนประกอบสำคัญของเศษเมลามีนที่ใช้คือ อัลฟาเซลลูโลส (เยื่อกระดาษ เนื้อไม้ ผงจีเรีย) (William F. Smith, 1996) ดังนั้นเมื่อมีการเติมเศษลงไปจึงส่งผลให้อัตราการลามไฟสูงขึ้น ในทิศทางเดียวกันหากเศษเมลามีนที่ใช้เติมนั้นมีขนาดใหญ่ และสัดส่วนการเติมเศษมาก ก็จะส่งผลให้ปริมาณอัลฟาเซลลูโลสสูงขึ้นด้วย ฉะนั้นอัตราการลามไฟสูงขึ้นดังจะเห็นได้จากตารางที่ 4.5

## บทที่ 5

### สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการนำเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนที่เกิดจากการบวนการผลิตซึ่งไม่สามารถนำไปหลอมขึ้นรูปได้อีกมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการหาแนวทางการนำไปใช้โดยใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน โดยคาดว่าสมบัติเชิงกล และสมบัติการทนไฟจะสูงขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษา 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือศึกษาผลกระทบของชนิดเศษต่อสมบัติเชิงกล จากการศึกษาเบื้องต้นในส่วนนี้พบว่าชนิดของเศษเมลามีนคือทั้งเศษแบบฝุ่น และแบบครีบส่งผลต่อสมบัติเชิงกลโดยรวมดีขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบผลกระทบของชนิดเศษที่ต่างกันกลับพบว่าเศษทั้งสองชนิดส่งผลต่อสมบัติเชิงกลไม่แตกต่างกัน ยกเว้นค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่เศษแบบฝุ่นส่งผลให้ค่าการยึดตัวเพิ่มมากขึ้น และส่วนที่สองศึกษาสัดส่วนการเติมเศษ ขนาดอนุภาค และการเติมสารเชื่อมโยงต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน สมบัติที่ศึกษาในส่วนนี้ประกอบไปด้วย สมบัติทางความร้อน สมบัติการทนไฟ และสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบ ได้แก่ การทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงดัด การทดสอบแรงกระแทก และการวัดความแข็ง ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะช่วยสมบัติเชิงกลให้กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และช่วยลดต้นทุนในการกำจัดเศษเมลามีนที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังเป็นองค์ความรู้สำหรับต่อยอดในการศึกษาในงานวิจัยในอนาคต

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 ผลของชนิดเศษเมลามีน 2 ชนิด

การศึกษาเบื้องต้น ศึกษาเศษเมลามีน 2 ชนิดต่อสมบัติเชิงกล ซึ่งประกอบด้วยเศษเมลามีนแบบครีบ และเศษเมลามีนแบบฝุ่น เศษเมลามีนทั้งสองชนิดต่างส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีขึ้น ยกเว้นความต้านทานแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลง เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงบริสุทธิ์ แต่เมื่อเปรียบเทียบผลกระทบของชนิดเศษเมลามีนพบว่าชนิดเศษเมลามีนส่งผลต่อสมบัติเชิงกลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

### 5.1.2 ผลของการเติมเศษเมลามีนต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษเมลามีน

การเติมเศษเมลามีนในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น ยกเว้นความต้านทานแรงกระแทก สำหรับสมบัติทางความร้อน พบว่าเมื่อเติมเศษเมลามีน ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิการเกิดผลึก แต่เมื่อมีการเติมเศษเมลามีนโดยปราศจากการเชื่อมโยงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกของวัสดุเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณการเกิดผลึกที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น สมบัติการทนไฟพบว่าเมื่อเติมเศษเมลามีนอัตราการลามไฟสูงขึ้น

### 5.1.3 ผลของสัดส่วนการเติมเศษเมลามีน

สัดส่วนการเติมเศษเมลามีนส่งผลให้ความต้านทานแรงค้ำ โมดูลัสแรงค้ำ ความแข็ง ปริมาณการเกิดผลึก อัตราการลามไฟเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณสัดส่วนเมลามีนมีปริมาณมาก ในขณะที่ทำให้ โมดูลัสของยัง เปอร์เซ็นต์การยึดตัว และค่าความต้านทานการกระแทกลดลง

### 5.1.4 ผลของขนาดอนุภาคเศษเมลามีน

ขนาดอนุภาค ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน แต่ส่งผลให้ความสามารถในการทนไฟต่ำ เนื่องจากมีอัตราการลามไฟสูง เมื่อมีการเติมขนาดของอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น

### 5.1.5 ผลของการเติมสารเชื่อมโยง

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA) เป็นสารเชื่อมโยง พบว่าการเติมสารเชื่อมโยงในพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษเมลามีนทำให้สมบัติโดยรวมของสมบัติเชิงกล และสมบัติการทนไฟลดลง อย่างไรก็ตามไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิการเกิดผลึก แต่ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกลดลงซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สมบัติเชิงกลลดลง



## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ถึงแม้เศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลได้ อย่างไรก็ตามก็ยังมีเงื่อนไขก่อนการนำไปใช้งานได้คือการร่อนและผสมเข้าด้วยกัน อาจจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับกระบวนการขึ้นรูปเพิ่มเติม โดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการร่อน หรือหากรรมวิธีการผสมสำหรับเชิงอุตสาหกรรม

5.2.2 ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการทดสอบสมบัติด้านอื่น ๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการเลือกกระบวนการขึ้นรูป เช่น การทดสอบด้าน Rheology ของพลาสติก MFI เป็นต้น

5.2.3 ควรมีการศึกษาผลกระทบของอิทธิพลร่วมระหว่างขนาดอนุภาคและสารเชื่อมโยงที่ใช้เพิ่มมากขึ้น



## รายการอ้างอิง

- ดร.อุทัย มีคำ. การทดสอบวัสดุพอลิเมอร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปริชา 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 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 (2<sup>nd</sup> Edition)**. Raytheon Systems  
Company EI Segundo, California.
- Hunt, B. J. and James, M. I., (1993). **Polymer Characterisation**, 5<sup>th</sup> ed., Blackie Academic &  
Professional, Glasgow.
- 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 (2<sup>nd</sup> Edition)**. John Wiley & Sons, Canada.
- William F. Smith (1996). **Principles of materials science and engineering**. 3<sup>rd</sup> ed., McGraw-Hill compomy.
- 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.
- Wunderlich, B. Thermal Analysis. Academic Press: San Diego, 1990.



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, light gray watermark centered on the page. It features a stylized figure standing on a base, with a large 'S' and 'R' integrated into the design. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in a circular arc at the bottom of the logo.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์, จันทร์จิรา อภิรักษ์เมธาวงศ์, เมทินี มาให้, เฉลิมชัย ไชยรงรัตน์ (2556).

สมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนด้วยการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อนและแม่พิมพ์เย็น. การประชุมวิชาการระดับชาติ วลัยลักษณ์วิจัย ครั้งที่ 5

Siwadamrongpong, S., Wanwanut, B., and Janjira, A. (2014). **A STUDY OF JOINING PROCESS FOR RECYCLED MATERIAL FROM WASTE MELAMINE FORMED BY COLD MOLDING.** South East Asian Technical University Consortium (SEATUC 2014). 3 - 5 March. UTM. Malaysia.

Siwadamrongpong, S., Janjira, A. (2015). **EFFECT OF PARTICLE SIZE AND CONTENT OF WASTE MELAMINE FORMALDEHYDE ON MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH DENSITY POLYEHTYLENE COMPOSITES.** South East Asian Technical University Consortium (SEATUC 2015). 27-30 June. SUT. Thailand.



The 5<sup>th</sup> Walailak Research National Conference

การประชุมวิชาการระดับชาติ "วิจัยล้ำกันวิจัย" ครั้งที่ 5

สมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนด้วยการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อนและแม่พิมพ์เย็น

สมศักดิ์ ติวดำรงพงศ์, จันทวีจิรา อภิรักษ์เมธาวงศ์, เมทินี มาให้, เฉลิมชัย ไชยธรรพ์รัตน์<sup>4</sup>

สาขาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

E-mail: somsaksi@sut.ac.th, sanepmaf\_nok@hotmail.com

#### บทคัดย่อ (Abstract)

เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงพลาสติกชนิดหนึ่งที่ยิมนำมาขึ้นรูปทำผลิตภัณฑ์ในการบรรจุอาหาร ในการบวนการผลิตจะใช้ความร้อนและแรงอัดควบคู่กัน ในกระบวนการดังกล่าวจะทำให้เกิดเศษครีบซึ่งไม่สามารถนำมาหลอมเหลวเพื่อใช้ในการขึ้นรูปได้อีก งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนที่ได้จากเศษครีบที่เกิดจากกระบวนการผลิตเพื่อเป็นแนวทางในการรีไซเคิลเศษเมลามีนต่อไป โดยการนำผงเศษเมลามีนที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีน มาผสมกับผงเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซินใหม่ ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการขึ้นรูป โดยจะทดลองการขึ้นรูปสองวิธี คือ ขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อน กล่าวคือการขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูปโดยให้ความร้อนในขณะอัด และขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เย็นซึ่งคือการอัดขึ้นรูปโดยปราศจากการให้ความร้อนในขณะอัด ในการศึกษาจะศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะขึ้นรูปขึ้นทดสอบที่ส่วนผสม 10% 20% 30% 40% และ 50% ของเศษเมลามีน เพื่อศึกษาผลกระทบของส่วนผสมที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล โดยทำการทดสอบการต้านแรงดัดโค้ง แรงกด แรงกระแทก และส่วนที่ 2 คือ การวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก และการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อน และขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เย็น เปรียบเทียบกับผงเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซินใหม่ จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อนมีสมบัติเชิงกลดีกว่าการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เย็น โดยที่ค่าความต้านทานแรงดัดโค้งและค่าความทนทานต่อการกระแทกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณเศษเมลามีนเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่าความต้านทานแรงกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเศษเมลามีนเพิ่มขึ้น 10%-40% ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริกพบว่าสมบัติทางความร้อนของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อน และขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เย็นเปรียบเทียบกับเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซินใหม่ไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อทำการทดสอบ Differential Scanning Calorimetry พบว่าขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อน และขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เย็นจะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนที่อุณหภูมิ 113 องศาเซลเซียสซึ่งสอดคล้องกับปฏิกิริยาการบ่ม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปทั้งสองวิธีนี้ไม่เกิดการบ่มที่สมบูรณ์ทั้งสองวิธี

#### คำสำคัญ (Keywords)

เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน, รีไซเคิล, เทอร์โมเซตติงพลาสติก, การขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อน, การขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เย็น

#### แหล่งทุน (Funding agency)

ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

222 ตำบลไทยบุรี อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช 80161

<http://ird.wu.ac.th>

OS06: Materials Science and Engineering

## A STUDY OF JOINING PROCESS FOR RECYCLED MATERIAL FROM WASTE MELAMINE FORMED BY COLD MOLDING

Somsak Siwadamrongpong\*, Wanwanut Boongsood, Janjira Aphirakmethawong  
School of Manufacturing Engineering.

Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,  
111 University Avenue, Muang District, Nakhonratchasima 30000, Thailand.

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

### Abstract

Melamine formaldehyde resin (MF) is one of famous thermosetting plastic and commonly known as melamine. There are typically used for tableware products. Scrap and waste melamine were generated in manufacturing process and there are cannot reformed or reused. The previous report of the same authors was announced that the waste melamine can be recycled as admixture to virgin melamine. The forming of specimen from waste melamine was success by either hot or cold forming processes. Therefore, this paper has studied the joining process of the recycled material from waste melamine after formed by cold molding process. The joining using virgin melamine itself as adhesive was proposed in this study. 3 Parameters of joining process including joining humidity, heating temperature and heating time of joining process were selected. Each of specimens formed by cold molding, pre-heat for 15 hours at 100 °C, sintered for 1 hour at 160 °C and joining at room temperature by 2<sup>3</sup> factorial design technique. The flexural strength of joined specimen was evaluated as response in the study. The experimental results found that all 3 parameters significantly effect to flexural strength and the highest was joining humidity. The appropriate joining parameters were proposed by heating temperature at 180 °C for humidity 10% and heating time at 90 minute. These results might yield the more complicated geometry of product from waste melamine.

**Keyword:** Melamine formaldehyde resin, Joining, Flexural strength, Cold molding, factorial design

### 1. INTRODUCTION

Melamine formaldehyde (MF) resin commonly known as melamine is one of famous thermosetting plastic which cannot be melted and re-shaped after it is cured. Thermosetting plastic are generally excellent hardness, high thermal resistance

(Phaiboon & Malika, 2008) low cost, relatively light weight and unbreakable characteristics (Chao-Yi Chien, et al., 2011) which suitable to use for tableware products. Hence, scrap and waste melamine was generated in manufacturing process and it is cannot reformed or reused. Therefore, it needs to disposal normally by landfills or burning (S.J. Pickering, 2006) that leading to degradation of environment and cost for disposal.

The interest in recycled materials has been growing rapidly during recent year cause of environment concern and wish to reduced energy consumption. (Chaitongrat, C. et al., 2013). Therefore, waste melamine was selected to this study and general properties of melamine formaldehyde resin are shown in Table1. (Sidney H.Goodman, 1998)

In literature review, S.J. Pickering (2005) carried out studied on technologies for recycling thermoset composite materials by use of grinding techniques to comminute the scrap material for reuse as fillers or reinforcement in new composite

Hasan S. Dweil, Mohamed M. Ziara & Mohammed S. Hadidoun (2008) have studied to improve structural concrete properties with ground melamine. The waste was used as a sand replacement. The results, waste melamine that replacing sand can improve the mechanical and thermal properties of light weight concrete. In the same way Phaiboon and Malika (2008) studied the utilization of waste melamine by filled waste melamine in mix proportion of lightweight concrete. The results, waste melamine can reduce light concrete density due to low specific gravity of melamine but it tends to decrease compressive strength.

Wonglene K. (2013) studied influence of forming temperature and melamine content and found that difference forming temperature leading to difference strength and flexural strength decrease with

increasing of waste melamine percentage. Mahai M. (2013) studied influence of pre-heating in cold forming of melamine that found new forming process and suitable condition is pre-heated for 15 hours at 100 °C.

Although, previous study have a study to formed by cold molding but no one study about joining process of thermosetting plastic or melamine. Then, joining process was selected in this study.

Table1 Properties of melamine formaldehyde resin

Properties	
Molding Temperature	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 %

Target of this study was focused on joining process and determined the suitable parameters for joining process. 3 parameters including joining humidity, heating temperature and heating time of joining process were selected. 2<sup>k</sup> factorial design technique was employed to screening significant parameter. The specimens were tested for the flexural strength as response of the factorial experiment.

## 2. EXPERIMENT

### 2.1 Materials

Virgin melamine powder, industrial grade melamine powder ME6033, was used in this study (ready mixed with cellulose and formaldehyde).

### 2.2 Design of experiment (DOE)

2<sup>k</sup> factorials Design of experiment (DOE) with significant level 0.05 was carried out with using Minitab16 in analytical process. 3 Parameters for joining process are joining humidity, heating temperature and heating time was selected and summarized in Table 2.

### 2.3 Preparation of test specimens

The specimen was formed by hydraulic press controlled pressure (25 tons) without heat, pre-heat for 15 hours at 100 °C, sintered for 1 hour at 160 °C (Methinee, 2011). Procedures of experimental are shown in Fig. 1

### 2.4 Joining Specimens

Cold forming specimens were prepared by pressed forming and joined by virgin melamine at small area of specimen (3.2 mm x 12.7 mm). 2-level of 3-

parameter was specified as shown in Table 2. Each case of experiment was carried out by 6 replicates.

Table 2 Parameter for joining process

Factor	Name	Low level	High level
A	Humidity (%)	10	50
B	Time (min)	90	150
C	Temperature (°C)	160	180

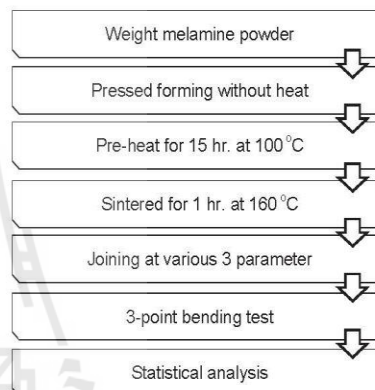


Fig. 1 Experimental procedures

### 2.5 3-Point Bending Test

The samples were 3.2 mm-thickness, 12.7 mm-width and 125 mm-long. The 3-point bending test of specimens was conducted on Instron testing machine with 5 kN load cell, span length 51.2 mm and a pressing speed of 2.0 mm/min as specified by the ASTM D790

### 2.6 Statistical analysis method

Analysis Of Variance (ANOVA) and contour plot with significant level 0.05 for analyzes the experimental data.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1 3-point bending test

Average flexural strength of each case was shown in Table 3. It was found that the flexural strength was high when joining at low level of humidity (10% humidity) and joining temperature at high level (180 °C). However, the significant level of each parameter, both main effect and interaction, was discussed later.



Table 3 Design of experiment and Response Data for 3-point bending

Standard order	Humidity (%)	Time (min)	Temperature (°C)	Flexural Strength (MPa)
1	10	90	160	4.20
2	10	90	180	9.10
3	10	150	160	5.28
4	10	150	180	7.41
5	50	90	160	5.99
6	50	90	180	5.42
7	50	150	160	2.03
8	50	150	180	3.74

### 3.2 Statistical analysis method: ANOVA

The ANOVA analysis result from Minitab was shown below.

Source	DF	SS	MS	F	P
Humidity	1	19.40	19.40	17.36	0.002
Time	1	9.70	9.70	8.68	0.016
Temperature	1	16.69	16.68	14.93	0.004
2-Interaction	2	14.99	7.49	6.71	0.016
3-Interaction	1	6.38	6.38	5.70	0.041
Error	8	9.99	1.25		
Total	15	77.23			

Fig. 2 Analysis of Variance (ANOVA) for flexural strength

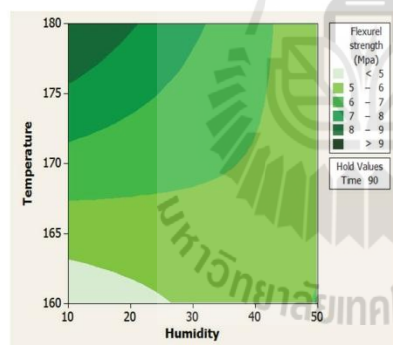


Fig. 3 Contour plot of Flexural strength

From Fig. 2, the p-value of all parameters was found to significantly effect to the flexural strength. From F-factor, humidity and temperature for joining are the most important effect to flexural strength. The rest parameters also significant to the flexural strength, but in lower degree. Furthermore, it should be mentioned to the interaction, both 2 and 3 interactions, from the analytical results. It was implied that the joining strength might be complicated results of selected parameters. However, for ease of discussion and practically used of parameters in joining process, the only humidity and temperature for joining are chose to

build the contour plot, indicated in Fig 3. It was found that the high value of joining strength will be achieved by using joining conditions at low humidity and high temperature. Thus, suitable values of parameters are heating temperature at 180 °C for humidity 10% and heating time at 90 minute.

### 4. CONCLUSION

The 3 parameters of joining process including joining humidity, heating temperature and heating time of joining process were chosen in this studied. The flexural strength was selected as response to determine the appropriated joining conditions. The 2<sup>k</sup> factorial design was employed to analyze the tested data. It was found all 3 parameters have significantly effect to the flexural strength, that the percentage of humidity was highest effect to flexural strength and least effect is heating time and known appropriate value of joining parameters are heating temperature at 180 °C for humidity 10% and heating time at 90 minute.

### 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

- Chaitongrat, C. et al.,(2013). Thermal properties of recycled materials from waste melamine formed by hot molding process, South East Asian Technical University Consortium (SEATUC 2013). 4-6 March. ITB. Bandung Indonesia.
- 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-Juan Hsiehi, Ming-Tsang Wu., High melamine migration in daily-use melamine-made tableware, Journal of Hazardous Materials 188 (2011), pp. 350–356
- 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

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

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

Sidney H.Goodman., Handbook of Thermo- set Plastics Second Edition, Noyes Publications.

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

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.

Suranaree University of Technology. She is a 2<sup>nd</sup> years of master degree student in Manufacturing Engineering.



**Somsak Siwadamrongpong** received the B.Eng. (2004) degree in Mechanical Engineering from Chulalongorn University, M.Eng. (2001) degree in Environmental System from Nagaoka University of Technology, and D.Eng. (2004) degree in Energy and Environment from Nagaoka University of Technology.

He is a Professor, Department of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology. His current interests include material characteristics, recycle of industrial waste and manufacturing productivity improvement.



**Wanwanut Boongsood** received the B.Eng. (1999) degree in Industrial Engineering from Khon Keaen University, M.Eng. (2006) degree in Industrial Engineering form Thammasat University, and Ph.D. (2012) degree in Mechanical Engineering from Liverpool University. She is a Professor, Department of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology. Her current interests include micro machining, application of ultrasonic in manufacturing.



**Janjira Aphirakmethawong** received the B.Eng. (2011) degree in Manufacturing Engineering from

OS Number 06

## EFFECT OF PARTICLE SIZE AND CONTENT OF WASTE MELAMINE FORMALDEHYDE ON MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH DENSITY POLYETHYLENE COMPOSITES

Somsak Siwadamrongpong\*, Janjira Aphirakmethawong  
School of Manufacturing Engineering,  
Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,  
111 University Avenue, Muang District, Nakhonratchasima 30000, Thailand.  
\* E-mail: somsaksi@sut.ac.th. Tel: 0-4422-4236, Fax: 0-4422-4566

### Abstract

Waste melamine formaldehyde powder (PWMF) was generated by grinding process of Melamine products and there are cannot be reformed or reused. PWMF was used as filler of HDPE matrix by 2 factors, particle size and content of PWMF. HDPE/PWMF composites were prepared using internal mixer and test specimens were formed by injection machine. Mechanical properties including tensile strength, tensile modulus, impact strength and hardness of composites were investigated. Influence of 2 factors on mechanical properties of composite was examined by using the analysis of variance (ANOVA) with the level of significant 0.05. The result was indicated that hardness is increase and impact strength is decrease with increasing PSMF content. It was also found that decreasing of particle size leads to increase of tensile strength and hardness, but impact strength is decrease. However, Young's modulus and hardness of HDPE/PWMF were higher than reference all whereas impact strength was lower.

**Keyword:** Melamine formaldehyde resin, factorial design, particle size, particle reinforced, HDPE composites.

### 1. INTRODUCTION

Nowadays, Polymers have used widely and more desire to use especially plastic because light low-cost and suitable for various application. So, could increasing concern regarding the environment and plastic waste disposal problem. The alternative methods for handle plastic waste and decreasing environment problem from plastic include burial, incineration, de-polymerization and recycling which recycling is convenient way to manage waste problem. (Rapisa & Kasama, 2013) The interest in recycled materials has been growing rapidly during recent year cause of environment concern and wish

to reduced energy consumption. (Chaitongrat, C. et al., 2013).

High density polyethylene (HDPE) is the most of thermoplastics used. HDPE is chosen to produce the composites since it is a major portion of used. In addition, HDPE outstanding properties such as high toughness, good impact resistance etc.

Melamine formaldehyde (MF) resin commonly known as melamine is one of famous thermosetting plastic which cannot be melted and re-shaped after it cured. Thermosetting plastic are generally excellent hardness, high thermal resistance (Phaiboon & Malika, 2008) low cost, relatively light weight and unbreakable characteristics (Chao-Yi Chien, et al., 2011) which suitable to use for Tableware products. Hence, waste melamine powder was generated in manufacturing process and it is cannot reformed or reused. Therefore, it needs to disposal by landfills or burning (S.J. Pickering, 2006) that leading to degradation of environment and cost for disposal. S.J. Pickering (2005) carried out studied on technologies for recycling thermoset composite materials by use of grinding techniques to comminute the scrap material for reuse as fillers or reinforcement in new composite. Hasan S. Dweil, Mohamed M. Ziara & Mohammed S. Hadidoun (2008) have studied to improve structural concrete properties with ground melamine. The waste was used as a sand replacement. The results, waste melamine that replacing sand can improve the mechanical and thermal properties of light weight concrete. In the same way Phaiboon and Malika (2008) studied the utilization of waste melamine by filled waste melamine in mix proportion of lightweight concrete. The results, waste melamine can reduce light concrete density due to low specific gravity of melamine. So, waste melamine powder was chosen as filler.

In this study, consider the effect of waste melamine powder on mechanical properties by various particle size and content of waste melamine powder. The study results will be discussed by mean of statistical design of experimental (DOE) approach.

## 2. EXPERIMENT PROCEDURE

### 2.1 Materials

High density polyethylene (HDPE, EL-Lene H6007JU, SCG) was used as matrix composite.

Waste melamine powder (PWMF) generated by grinding process in Tableware manufacturer was used as filler with two difference particle sizes consist 23 and 36  $\mu\text{m}$ , Code P1 and P2 respectively (ready mixed with cellulose and formaldehyde).

### 2.2 Design of experiment (DOE)

$2^k$  factorials Design of experiment (DOE) was used to analyze the significant effect of 2 Factors summarized in Table 1. Therefore, total of 4 runs are shown in Table 3. Influence of 2 factors on mechanical properties of HDPE/PWMF composite was examined by using the multi variance analysis (ANOVA) with the level of significant 0.05 or 95% confidential. The significant effect was calculated by Minitab16 software.

Table 1 Factor in this study

Factor	Name	Low level	High level
		(-)	(+)
A	Content of PWMF (%wt)	5	20
B	Particle size ( $\mu\text{m}$ )	23	36

### 2.3 Preparation of Test Specimens

The specimens were mixed by internal mixer (HAAKE PolyLab OS, RheoDrive7), Formed by Co-injection molding machine (TEDERIG, TRX-60C). Conditions are shown in Table2.

Table 2 Condition for Preparation of Test Specimens

Method	Conditions
<b>Mixing</b>	
- mixing temp ( $^{\circ}\text{C}$ )	170
- mixing time (min)	15
- rotor speed (rpm)	70
<b>Injection</b>	
- melting temp ( $^{\circ}\text{C}$ )	180
- molding temp ( $^{\circ}\text{C}$ )	30
- cooling time (min)	30
- holding pressure (bar)	100
- injection pressure (bar)	80

### 2.4 Mechanical Properties

Tensile tests according to ASTM D638 using a universal testing machine (Instron, 5565) with 5 kN load cell and crosshead speed of 50 mm/min. Ten samples were tested.

Izod Impact strength of HDPE/PWMF composites was performed according to ASTM D256 – 10 were using an impact testing machine (Instron, CEAST9050). Notched impact strength was tested using the impact pendulum with impact energy of 2.7 J.

Hardness according to ASTM D2240 test with Durometer hardness scale shore D. Five samples were tested.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1 Mechanical Properties

The mechanical properties of HDPE/PWMF composites by mean of tensile strength, tensile modulus, impact strength and hardness are shown in Table 4. Effect of PWMF in this study found that Young's modulus and hardness increase with adding PWMF all case in the other hand impact strength are decreased.

Two factors DOE was analyzed by box plot, normal plot and ANOVA are illustrated in Fig. 1-6 respectively.

Table 3 the design of  $2^k$  factorials for 2 factor (k=2)

RUN	Design Code		PWMF (wt%)	Particle size ( $\mu\text{m}$ )	Compatibilizer (phr)	Name
	A	B				
1	-	-	5	23	0	HDPE/5PWMF/P1
2	-	+	5	36	0	HDPE/5PWMF/P2
3	+	-	20	23	0	HDPE/20PWMF/P1
4	+	+	20	36	0	HDPE/20PWMF/P2

Table 4 Summarize of mechanical properties of HDPE/PWMF composites

Name	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )	Hardness
HDPE	24.53 ± 0.63	376.60 ± 10.94	3.30 ± 0.19	58.92 ± 1.12
HDPE/5PWMF/P1	24.84 ± 0.52	407.40 ± 20.19	2.36 ± 0.22	60.40 ± 0.87
HDPE/5PWMF/P2	23.67 ± 0.46	382.30 ± 13.84	2.54 ± 0.14	60.12 ± 0.83
HDPE/20PWMF/P1	25.73 ± 0.72	459.80 ± 13.50	1.90 ± 0.11	64.60 ± 1.12
HDPE/20PWMF/P2	23.15 ± 0.34	444.90 ± 11.53	2.16 ± 0.08	63.80 ± 0.58

**3.2 Tensile properties**

Fig. 1(a) shown box plot of tensile strength of HDPE/PWMF composites. It was found that tensile strength increased with adding PWMF small particle size but content of PWMF no effect to tensile strength. In addition, between statistical analyzed results and box plot (Fig.1 – Fig.2) are the same trends, particle size have significantly (consider from p-value less than the critical value,0.05) of tensile strength which is negative (-) effect it mean if large size of particle heading to tensile strength decreased and content of PWMF no significantly.

Young's modulus are increased with adding PWMF all case cause of PWMF high stiffness than HDPE which matrix (S-Y Fu, et al., 2008) more over filler prevent capable rotational movement and change shape of matrix (R. D. K. Misra et al., 2004).

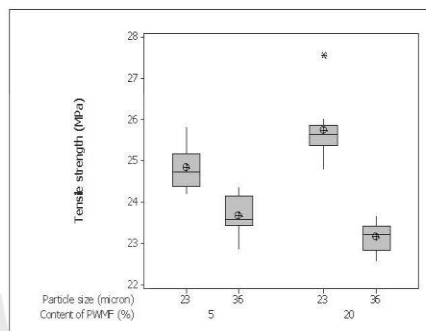
**3.3 Impact test**

Box plot and normal plot of impact strength of HDPE/PWMF composites are shown in Fig.3. It was found that impact strength are increased which increasing particle size in the other hand impact strength decreased which decreasing content of PWMF. The ANOVA results, content of PWMF significantly negative (-) effect and particle size significantly positive (+) affect to impact strength. In addition content of PWMF is more effect than particle size.

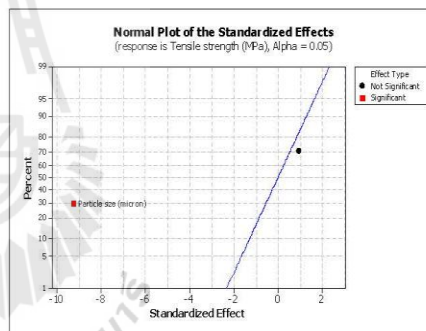
Cause of impact strength decreased with increasing content of PWMF due to poor compatibility between PWMF and HDPE, the poor interfacial adhesion resulted in voids between the interface of filler and HDPE. Under the impact test, these voids acted as stress concentration at which the impact stress was magnified and made the composites fractured at lower stress (P. Pakdeechote, et al., 2009)

**3.4 Hardness**

The hardness results were plot by box plot and normal plot are shown in Fig.5. From Fig. 5(a) was found that increasing content of PWMF heading to harness increased. The ANOVA results (Fig.6) can expand that content of PWMF is significantly positive (+) affect to hardness on other way particle size has negative (-) effect. Moreover, content of filler have a too large effect which compared with



(a)



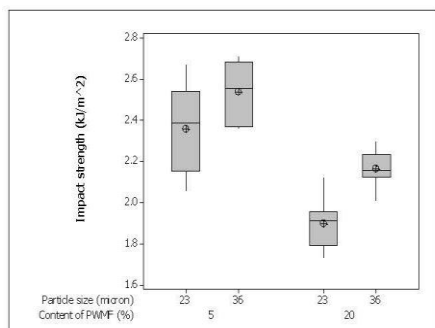
(b)

Fig. 1 Box plots of tensile strength (a) and normal plot of tensile strength (b)

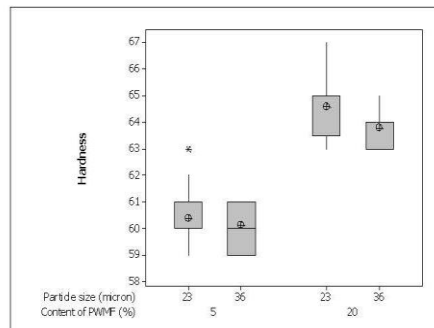
Source	DF	SS	MS	F	P
PWMF (%)	1	0.369	0.369	0.90	0.349
Particle size	1	34.931	34.931	85.27	0.000
Error	37	15.158	0.409		
Total	39	50.459			

Fig. 2 ANOVA test results of Tensile strength

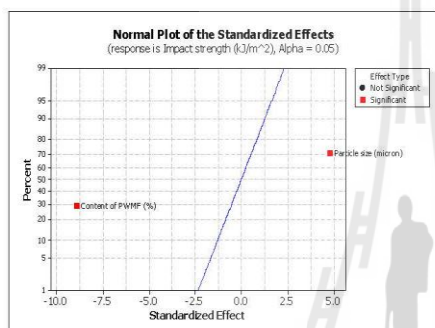
particle size. Hardness increased which adding filler due to PWMF is high stiffness than HDPE that heading to improve the matrix surface resistance (S. C. Nwanonyi, et al., 2013)



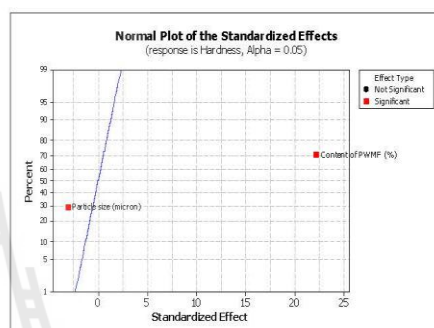
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 3 Box plots of impact strength (a) and normal plot of impact strength (b)

Fig.5 Box plots of hardness (a) and normal plot of hardness (b)

Source	DF	SS	MS	F	P
PWMF (%)	1	2.231	1.734	79.41	0.000
Particle size	1	1.733	0.498	22.83	0.000
Error	37	0.808	0.022		
Total	39	3.039			

Fig. 4 ANOVA test results of Impact strength

Source	DF	SS	MS	F	P
PWMF (%)	1	388.090	388.090	493.18	0.000
Particle size	1	7.290	7.290	9.26	0.003
Error	97	76.330	0.787		
Total	99	471.710			

Fig. 6 ANOVA test results of Hardness

**4. CONCLUSION**

Young's modulus and hardness of HDPE/PWMF were higher than HDPE all whereas impact strength was lower. With increasing content of PWMF hardness increased, impact decreased and content of PWMF no effect to tensile properties. With decreasing particle size of PWMF tensile strength and hardness increased but impact strength decreased.

**ACKNOWLEDGEMENT**

The author wish to acknowledge Suranaree University of Technology for financial and facility support. Chemical Innovation Co., Ltd. for maleic anhydride grafted polyethylene Fusabond<sup>®</sup> M603, Siam Cement Group co., Ltd. for High density polyethylene, EL-Lene H6007JU. Srithai Superware PLC for Waste melamine formaldehyde powder.

## REFERENCES

Chaitongrat, C. et al.,(2013). Thermal properties of recycled materials from waste melamine formed by hot molding process, South East Asian Technical University Consortium (SEATUC 2013). 4-6 March. ITB. Bandung Indonesia.

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-Juan Hsiehi, Ming-Tsang Wu., High melamine migration in daily-use melamine-made tableware, *Journal of Hazardous Materials* 188 (2011), pp. 350–356

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

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

P. Pakdeechote, Y. Ruksakulpiwat, N. Suppakarn, and W. Sutapun, Preparation and Characterization of Heat Treated Eggshell for HDPE composites: A preliminary Study, Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2009), Phitsanulok, Thailand P325.

Rapisa, J., and Kasama, J. (2013). Mechanical properties and flammability of sawdust/recycled high density polyethylene composites. Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON2013)

R. D. K. Misra, P. Nerikar, K. Bertrand, and D. Murphy (2004). Some aspects of surface deformation and fracture of 5 – 20% calcium carbonate-reinforced polyethylene composites. *Material Science Engineering*. A384: 284-298

S. C. Nwanonyi, M.U. Obidiegwu, G.C. Onuegbu., Effect of particle sizes, Filler content and compatibilization on the properties of linear low density polyethylene filled periwinkle shell powder, *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, volume2, 2013, pp1-8.

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

S-Y Fu, X-Q Feng, B. Lauke, and Y-W. Mai (2008). Effect of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites. *Composites Part B*. 39: 933-961.



**Somsak Siwadamrongpong** received the B.Eng. (2004) degree in Mechanical Engineering from Chulalongkorn University, M.Eng. (2001) degree in Environmental System from Nagaoka University of Technology, and D.Eng. (2004) degree in Energy and Environment from Nagaoka University of Technology.

He is a Professor, Department of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology. His current interests include material characteristics, recycle of industrial waste and manufacturing productivity improvement.



**Janjira Aphirakmethawong** received the B.Eng. (2011) degree in Manufacturing Engineering from Suranaree University of Technology. She is a 2<sup>st</sup> years of master degree student in Manufacturing Engineering.

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวจันทร์จีรา อภิรักษ์เมธาวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ. 2532 ศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนโพธิเสนวิทยา ชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนท่าบ่อ จังหวัดหนองคาย ชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนจัดิยะวงษา จังหวัดร้อยเอ็ด และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต “เกียรตินิยมอันดับสอง” จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2554 ในระหว่างการศึกษาระดับปริญญาตรี ได้สหกิจศึกษา ณ เวสเทิร์นดิจिटอล (ประเทศไทย) จำกัด ตำแหน่งผู้ช่วยวิศวกร ในแผนก Solution Provider and Scrap Prevention (SP)<sup>2</sup> เป็นเวลา 4 เดือน

ปี พ.ศ. 2555 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา โดยได้รับทุนการศึกษา “ทุนเรียนดี” จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปี พ.ศ. 2556 ได้ทุนไปแลกเปลี่ยนระยะสั้นในโครงการ Short term exchange program with scholarship (STEPS) 2012 ที่มหาวิทยาลัย Shibaura Institute of Technology ประเทศญี่ปุ่นเป็นเวลา 2 เดือน โดยระหว่างโครงการได้ศึกษาเกี่ยวกับการทำวัสดุคอมโพสิต

ขณะที่ศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิตนั้น ได้มีประสบการณ์โดยเป็นผู้สอนในรายวิชาดังนี้

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

ในระหว่างการศึกษาปริญญาโทได้นำเสนอผลงานทางวิชาการ ตามที่ได้นำเสนอแสดงในภาคผนวก ก