



รายงานการวิจัย

สมบัติการหน่วงไฟของคอมโพสิตชีวภาพจาก  
พอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลท  
(Flame retardancy of poly (butylene adipate-co-  
terephthalate) based biocomposites)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

สมบัติการหน่วงไฟของคอมโพสิตชีวภาพจาก  
พอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลท  
(Flame retardancy of poly (butylene adipate-co-  
terephthalate) based biocomposites)

ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิธินาถ ศุภกาญจน์  
สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ผู้ร่วมวิจัย

อาจารย์ ดร. สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์  
สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต อุตโนมิติ และหุ่นยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2557-2558  
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2561

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2557 และได้รับการอำนวยความสะดวกด้านการใช้สถานที่ทำการทดลอง เครื่องมือ รวมทั้งอุปกรณ์บางส่วนที่ใช้ในการทดลองจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีผู้ช่วยวิจัย คือ นายเอกชัย ประภารัตน์และนายนราศักดิ์ พลใส



## บทคัดย่อภาษาไทย

งานวิจัยนี้เตรียมคอมโพสิตชีวภาพจากพอลิบิวทิลีนอะดีเปทโคเทอเรบทาเลทโดยใช้สารตัวเติมสองชนิด ได้แก่ เมลามีนซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร และแกลบข้าวซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการสีข้าว โดยศึกษาผลของปริมาณของสารตัวเติมต่อสมบัติทางกลและสมบัติการหน่วงไฟของวัสดุคอมโพสิต

การเพิ่มปริมาณสารตัวเติม (เมลามีนหรือแกลบข้าว) ในพอลิบิวทิลีนอะดีเปทโคเทอเรบทาเลทเมทริกซ์ ช่วยเพิ่มค่าYoung's modulus ของพอลิบิวทิลีนอะดีเปทโคเทอเรบทาเลทคอมโพสิต ในขณะที่ความสามารถในการยืด อด จุดขาด ความแข็งแรงก่อนการแตกหัก และความสามารถในการรับแรงกระแทกมีค่าลดลง นอกจากนี้ สันฐานวิทยาจาก SEM แสดงให้เห็นถึงการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างพอลิบิวทิลีนอะดีเปทโคเทอเรบทาเลทเมทริกซ์และสารตัวเติมทั้งสองชนิด

การเพิ่มปริมาณเมลามีนหรือแกลบข้าวในพอลิบิวทิลีนอะดีเปทโคเทอเรบทาเลทเมทริกซ์ ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุคอมโพสิตมีค่าลดลง แต่จะช่วยเพิ่มปริมาณเถ้าที่เหลือที่อุณหภูมิ 800°C

วัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิบิวทิลีนอะดีเปทโคเทอเรบทาเลทกับเมลามีนที่ปริมาณเมลามีน 10%-40% โดยน้ำหนัก มีค่าออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สูงกว่าค่าออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศปกติ และมีการหน่วงไฟระดับ V-1

วัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิบิวทิลีนอะดีเปทโคเทอเรบทาเลทกับแกลบข้าว มีพฤติกรรมการหน่วงไฟลดลงเมื่อปริมาณแกลบข้าวเพิ่มขึ้น โดยวัสดุพอลิบิวทิลีนอะดีเปทโคเทอเรบทาเลทคอมโพสิตที่มีปริมาณแกลบข้าว 10% - 20% โดยน้ำหนัก มีค่าออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สูงกว่าค่าออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศปกติ และมีการหน่วงไฟระดับ V-2



## ABSTRACT

In this research work, melamine, a waste from tableware production process, and rice husk, a byproduct from a rice milling process, were used as reinforcing filler for preparing poly (butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) based biocomposites. Effect of filler content on mechanical properties and flame retardancy of PBAT composites was investigated.

With increasing filler content, either melamine or rice husk, Young's modulus of PBAT composites increased while elongation at break, ultimate tensile strength and Impact strength decreased. Moreover, SEM micrographs of PBAT composites indicated poor adhesion between PBAT matrix and those two fillers.

With increasing filler content, thermal decomposition temperatures of PBAT composites decreased while their char residue at 800°C increased.

At melamine contents of 10%-40% wt., limiting oxygen index (LOI) values of the PBAT composites were greater than the atmospheric oxygen concentration and the PBAT composites possessed V-1 flame retardancy rating.

Addition of rice husk worsened flame retardancy of the PBAT composites. Their flame retardancy were V-2 rating. Nonetheless, LOI values of the PBAT composites at rice husk contents of 10%-20% wt. were greater than the atmospheric oxygen concentration.



## สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ .....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูปภาพ .....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาในงานวิจัย .....	1
1.2 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย .....	3
1.3 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	5
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	7
1.5 ขอบเขตของการวิจัย .....	7
<b>บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย .....</b>	<b>8</b>
2.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย .....	8
2.2 การทดลอง .....	8
2.2.1 การเตรียมผงเมลามีน .....	8
2.2.2 การเตรียมแกลบข้าว (rice husk, RH) .....	9
2.2.3 การเตรียม PBAT คอมโพสิต .....	9
2.2.4 การตรวจสอบสมบัติการต้านแรงดึง (Tensile properties) .....	10
2.2.5 การตรวจสอบสมบัติการต้านแรงกระแทก (Impact properties) .....	10
2.2.6 การตรวจสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยา (Morphological properties) .....	10
2.2.7 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal Properties) .....	10
2.2.8 การตรวจสอบสมบัติการหน่วงไฟ (Flame retardant properties) .....	10

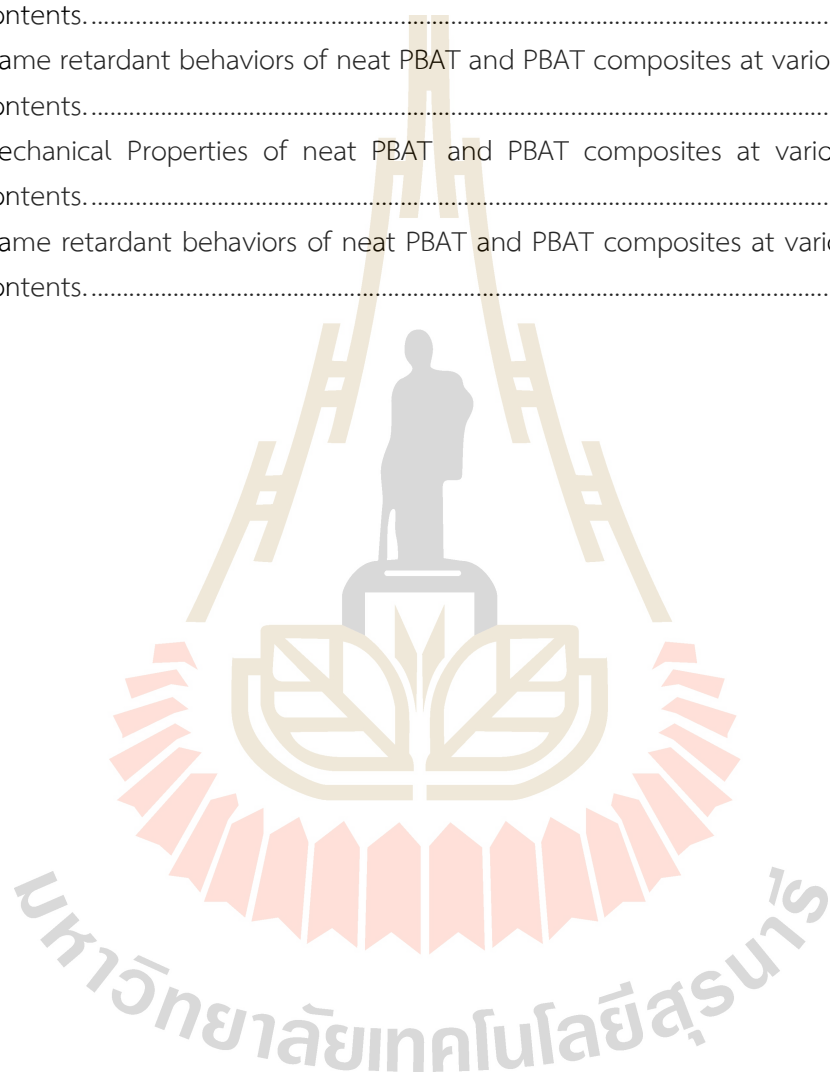
## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง .....	13
3.1 พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลทและเมลามีน.....	13
3.1.1 สมบัติเชิงกลของ PBAT และวัสดุคอมโพสิทระหว่าง PBAT กับเมลามีน.....	13
3.1.2 สันฐานวิทยาของวัสดุคอมโพสิทระหว่าง PBAT กับเมลามีน .....	19
3.1.3 สมบัติทางความร้อนของ PBAT และวัสดุคอมโพสิทระหว่าง PBAT กับเมลามีน..	20
3.1.4 สมบัติการหน่วงไฟของ PBAT และวัสดุคอมโพสิทระหว่าง PBAT กับเมลามีน .....	22
3.2 พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลทและแคลบซัว.....	25
3.1.1 สมบัติเชิงกลของ PBAT และวัสดุคอมโพสิทระหว่าง PBAT กับแคลบซัว.....	25
3.1.2 สันฐานวิทยาของวัสดุคอมโพสิทระหว่าง PBAT กับแคลบซัว.....	30
3.1.3 สมบัติทางความร้อนของ PBAT และวัสดุคอมโพสิทระหว่าง PBAT กับแคลบซัว	31
.....	31
3.1.4 สมบัติการหน่วงไฟของ PBAT และวัสดุคอมโพสิทระหว่าง PBAT กับแคลบซัว..	32
บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง.....	35
บรรณานุกรม .....	36
ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงผลการวิจัย.....	38
ประวัติคณะผู้วิจัย .....	39

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 Mechanical Properties of neat PBAT and PBAT composites at various melamine contents.....	18
3.2 Flame retardant behaviors of neat PBAT and PBAT composites at various melamine contents.....	23
3.3 Mechanical Properties of neat PBAT and PBAT composites at various rice husk contents.....	29
3.4 Flame retardant behaviors of neat PBAT and PBAT composites at various rice husk contents.....	34





สารบัญรูปภาพ

รูปภาพ	หน้า
2.1 (a-b) กลไก ball milling ภายในหม้อบด (c) เครื่องบดและหม้อบด.....	8
2.2 แม่พิมพ์สำหรับ (a) ชิ้นงานทดสอบสมบัติการต้านแรงดึง (b) ชิ้นงานทดสอบสมบัติการต้านแรง กระแทก และ (c) ชิ้นงานทดสอบสมบัติการหน่วงไฟ.....	9
2.3 การทดสอบการติดไฟชนิด Horizontal burning test .....	11
2.4 การทดสอบการติดไฟชนิด Vertical burning test .....	11
3.1 Stress-strain curves of neat PBAT and PBAT composites at various melamine contents. ....	13
3.2 Elongation at Break of neat PBAT and PBAT composites at various melamine contents. ....	15
3.3 Tensile strength of neat PBAT and PBAT composites at various melamine contents. .....	16
3.4 Young’s modulus of neat PBAT and PBAT composites at various melamine contents .....	17
3.5 Impact strength of neat PBAT and PBAT composites at various melamine contents. .....	18
3.6 SEM micrographs of impact fracture surfaces of PBAT composites at various melamine contents: (a) 20 wt%, (b) 30 wt%, (c) 40 wt%, and (d) 50 wt%; at x500 (1) and x2000 (2) magification.....	19
3.7 TGA thermograms of neat PBAT, neat melamine, and PBAT composites at various melamine contents. ....	21
3.8 DTGA thermograms of neat PBAT, neat melamine, and PBAT composites at various melamine contents. ....	22
3.9 Photographs of neat PBAT and PBAT composites specimens at various melamine contents from Vertical burning test.....	24

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
3.10 Stress-strain curves of neat PBAT and PBAT composites at various rice husk contents .....	25
3.11 Elongation at Break of neat PBAT and PBAT composites at various rice husk contents .....	26
3.12 Ultimate tensile strength of neat PBAT and PBAT composites at various rice husk contents .....	27
3.13 Young’s modulus of neat PBAT and PBAT composites at various rice husk contents .....	28
3.14 Impact strength of neat PBAT and PBAT composites at various rice husk contents .....	29
3.15 SEM micrographs at x60 magification of tensile fracture surfaces of PBAT composites at various rice husk contents : (a) 10 wt%, (b) 20 wt%, (c) 30 wt%, and (d) 40 wt% .....	30
3.16 TGA thermograms of neat PBAT, neat melamine, and PBAT composites at various rice husk contents .....	31
3.17 DTGA thermograms of neat PBAT, neat melamine, and PBAT composites at various rice husk contents .....	32

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาในงานวิจัย

ในปัจจุบัน ความต้องการใช้พอลิเมอร์โดยเฉพาะพลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงเกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมตามมา คือ ปัญหาขยะพลาสติกและการกำจัด เนื่องจากพอลิเมอร์มีความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมมาก การกำจัดโดยการฝังกลบเพื่อให้อยู่สลายใช้เวลานานหลายสิบปี หรือ อาจไม่เกิดการย่อยสลายเลย และการกำจัดขยะพลาสติกโดยการเผาซึ่งทำให้เกิดปัญหามลภาวะจากก๊าซพิษเพิ่มขึ้นอีก นอกจากนี้ ความต้องการใช้พอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นผลทำให้เกิดการขาดแคลนพลังงานเชื้อเพลิงตามมาในอนาคต เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์ซึ่งส่วนใหญ่ คือ ผลผลิตทางปิโตรเคมี มีปริมาณลดลงอย่างมากและไม่สอดคล้องกับกระบวนการเกิดขึ้นใหม่ตามธรรมชาติที่ใช้เวลานับร้อยปีในการทับถมของซากสิ่งมีชีวิต แนวทางการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้พอลิเมอร์อาจทำได้โดยการลดการใช้ (reduce) การยืดอายุการใช้งานของวัสดุพอลิเมอร์ หรือการใช้งานวัสดุพอลิเมอร์อย่างมีประสิทธิภาพโดยการนำกลับมาใช้ใหม่ (reuse) และการรีไซเคิล (recycle) ซึ่งมีผลช่วยลดปริมาณการผลิตพอลิเมอร์ นอกจากนี้ การใช้พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ (degradable polymers) ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยลดปัญหาการเกิดและการสะสมขยะพลาสติกได้

พอลิเอสเทอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ซึ่งมีวงอะโรมาติกในสายโซ่หลัก และเริ่มมีการใช้งานแพร่หลายในงานด้าน บรรจุภัณฑ์ วัสดุที่ใช้ทางการแพทย์ วัสดุที่ใช้ครั้งเดียว ฯลฯ ได้แก่ พอลิবিวิทิลินอะดิเปทโคเทอเรพทาเลท (poly (butylenes adipate-co-terephthalate), PBAT) จากการที่ PBAT เป็นโคพอลิเอสเทอร์ที่มีวงอะโรมาติกอยู่ในโครงสร้าง นอกเหนือจากความสามารถในการย่อยสลายได้แล้ว PBAT ยังมีสมบัติที่เด่นกว่าพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ตัวอื่น ๆ คือ มีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ด้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างและการแตกหักภายใต้แรงดึงที่คงที่ (creep fracture) และด้านทานต่อความล้าและการสึกกร่อน (fatigue and wear) ได้ดี นอกจากนี้ สมบัติทางกายภาพของ PBAT ยังสามารถปรับเปลี่ยนให้มีความหลากหลายและเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยอาจจะใช้การปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีในสายโซ่พอลิเมอร์ตามสัดส่วนระหว่างส่วนอะลิฟาติกและอะโรมาติกในสายโซ่หลัก หรือการผสม PBAT กับสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ซึ่งวิธีที่สองจะเป็นวิธีที่สะดวกและทำได้ง่ายกว่า

เนื่องจาก PBAT เช่นเดียวกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ เป็นสารอินทรีย์ จึงมีสมบัติการหน่วงไฟที่ต่ำ เป็นเชื้อเพลิงที่ดี ดังนั้น การปรับเปลี่ยนสมบัติการหน่วงไฟควบคู่ไปกับการปรับเปลี่ยนสมบัติเชิงกลของ

PBAT จะช่วยให้มีการนำ PBAT ไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีการประยุกต์ใช้งานหลากหลายมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้มีการเพิ่มกำลังการผลิต PBAT เพิ่มขึ้นและมีราคาที่ลดลง รวมทั้งจะเป็นแนวทางหนึ่งในการส่งเสริมให้มีการนำพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมาใช้งานมากขึ้น

การปรับเปลี่ยนสมบัติเชิงกลของ PBAT ทำได้โดยการทำคอมโพสิทระหว่าง PBAT กับสารตัวเติมชนิดที่เป็นสารเสริมแรง (reinforcing filler) ที่มีความเข้ากันได้กับเมทริกซ์ของ PBAT ตัวอย่างสารเสริมแรงที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพด้านอื่นของพอลิเมอร์ เช่น เหมาดำ ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต เส้นใยชนิดต่าง ๆ เป็นต้น ส่วนการปรับเปลี่ยนสมบัติการหน่วงไฟ ของ PBAT ทำได้โดยการเติมสารเคมีที่มีสมบัติหน่วงไฟ (flame retardant, FR) เช่น โลหะออกไซด์ (metal oxides) สารประกอบฮาโลเจน (halogenated compounds) สารประกอบฟอสฟอรัส (phosphorus compounds) สารประกอบไนโตรเจน (nitrogen compounds) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การใช้สารตัวเติมที่สามารถเสริมแรงพร้อมทั้งเพิ่มสมบัติการหน่วงไฟให้กับ PBAT รวมทั้ง หาได้ง่ายในประเทศและช่วยลดมลภาวะให้สิ่งแวดล้อมได้ เป็นทางเลือกที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งเช่นกัน

สินค้าทางการเกษตรที่สำคัญของประเทศไทยชนิดหนึ่ง คือ ข้าว ซึ่งเป็นที่ต้องการของตลาดทั้งในและต่างประเทศ การปลูกและผลิตข้าวจำนวนมากในแต่ละปี ทำให้มีผลผลิตพลอยได้เหลือทิ้งเป็นจำนวนมากเช่นกันโดยเฉพาะในขั้นตอนของการสีข้าวเปลือก คือ แกลบข้าว (rice husk, RH) จากการสำรวจของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ในปี 2551-2552 พบว่าประเทศไทยมีผลผลิตแกลบประมาณ 7-8 ล้านตัน/ปี ซึ่งแกลบสามารถไปใช้ประโยชน์หลายอย่าง เช่น เป็นปุ๋ย วัสดุรองนอนในโรงเรือนเปิดไก่ ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับทำให้เกิดพลังงานความร้อนทดแทนพลังงานจากน้ำมันดิบ หรือนำไปผสมกับวัสดุอื่นในการทำอิฐและวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ นอกจากนี้ขี้เถ้าแกลบ (rice husk ash) ที่ได้จากการเผาไหม้ของแกลบ ยังสามารถส่งออกขายต่างประเทศได้ ถึงแม้ว่าจะมีความพยายามที่จะนำแกลบข้าวไปใช้ประโยชน์ด้านต่าง ๆ ดังได้กล่าวมาแล้ว แต่ยังมีแกลบข้าวอีกจำนวนมากที่ต้องนำไปกำจัด ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมทั้งทางน้ำและอากาศ ในขณะเดียวกันต่างประเทศซึ่งมีความตื่นตัวและให้ความสนใจกับปัญหาสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ได้มีความพยายามในการนำวัสดุธรรมชาติ เช่น เส้นใยธรรมชาติ กระจุก เปลือกไข่ ฯลฯ มาใช้เป็นสารเสริมแรงด้วยเหตุผลทางด้านเศรษฐศาสตร์และความปลอดภัยต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เช่น รากคาถุก หาได้ง่าย ความหนาแน่นต่ำ ย่อยสลายได้ในระบบชีวภาพ มีความแข็งแรงเฉพาะ (specific strength) ที่สูง และไม่อันตรายต่อเครื่องจักรและสุขภาพคนงาน นอกจากนี้ แกลบข้าวยังมีองค์ประกอบที่เป็น เซลลูโลส ลิกนิน และซิลิกา ในปริมาณค่อนข้างสูง (Govindarao, 1980, Chandrasekhar et al., 2003) การนำแกลบข้าวมาใช้เป็นสารเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ จะช่วยลดปริมาณแกลบข้าวที่เป็นผลผลิตพลอยได้เหลือทิ้ง รวมถึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับแกลบข้าวได้

เมลามีน-ฟอร์มัลดีไฮด์ พลาสติก (melamine-formaldehyde plastic, MF) เป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซตซึ่งมีการใช้งานหลากหลาย โดยผลิตภัณฑ์ที่แพร่หลายชนิดหนึ่ง คือ ภาชนะบรรจุอาหารและเครื่องดื่ม ในนครราชสีมามีโรงงานศรีไทยซูเปอร์แวร์ซึ่งเป็นโรงงานขนาดใหญ่ที่ผลิตผลิตภัณฑ์

ลามีน-พอร์มัลดีไฮด์สำหรับบรรจุอาหารและเครื่องดื่มส่งขายทั้งในและต่างประเทศ และมีของเสียหรือส่วนเกินที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากพอลิเมอร์ชนิดนี้เกิดขึ้นเป็นปริมาณมาก ซึ่งของเสียหรือส่วนเกินเหล่านี้ ไม่สามารถนำมาหลอมขึ้นรูปใหม่ได้ การนำไปเมลามีนที่เป็นของเสียไปกำจัดก่อให้เกิดความสูญเสียทั้งทางเศรษฐศาสตร์และเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากพลาสติกจากเมลามีน-พอร์มัลดีไฮด์หลังผ่านการให้ความร้อนจะมีโครงสร้างร่างแหเกิดขึ้นและมีความแข็งแรงเชิงกลที่ค่อนข้างสูง การนำ MF ที่เป็นของเสียมารีไซเคิลโดยใช้เป็นสารเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก จะช่วยลดปริมาณ MF ที่เป็นของเสียที่เหลือทิ้ง รวมถึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถใช้ประโยชน์จาก MF ที่เป็นของเสียได้

ในโครงการวิจัยนี้คณะผู้วิจัยต้องการพัฒนาพอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรพทาเลทคอมโพสิทชนิดที่มีสมบัติการหน่วงไฟและมีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม โดยศึกษาผลของสารตัวเติมสองชนิด คือ แกลบข้าวและผงเมลามีนที่มีต่อสมบัติการหน่วงไฟ และสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิท

## 1.2 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

พอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรพทาเลท (poly (butylenes adipate-co-terephthalate), PBAT) เป็นพอลิเอสเตอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ซึ่งมีวงอะโรมาติกอยู่ในโครงสร้างหลัก PBAT เริ่มมีการใช้งานแพร่หลายในงานด้าน บรรจุภัณฑ์ วัสดุที่ใช้ทางการเกษตร วัสดุที่ใช้ครั้งเดียว ฯลฯ จากการที่ PBAT เป็นโคพอลิเอสเตอร์ที่มีวงอะโรมาติกอยู่ในโครงสร้าง นอกเหนือจากความสามารถในการย่อยสลายได้แล้ว PBAT ยังมีสมบัติที่เด่นกว่าพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ตัวอื่น ๆ คือ มีสมบัติเชิงกลที่ดี (เช่น ด้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างและการแตกหักภายใต้แรงดึงที่คงที่ (creep fracture) และด้านทานต่อความล้าและการสึกกร่อน (fatigue and wear) ได้ดี) และมีสมบัติทางความร้อนที่ดี (คือ มีความเสถียรที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง) อย่างไรก็ตาม PBAT มีข้อด้อยที่คล้ายคลึงกับพอลิเมอร์อื่น ๆ ทั่วไป คือ ติดไฟได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการนำ PBAT ไปประยุกต์ใช้ในงานหลายด้าน การศึกษาเพื่อหาวิธีเตรียม PBAT คอมโพสิทที่มีทั้งสมบัติความหน่วงไฟและสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมจะช่วยทำให้มีการใช้ PBAT ในงานที่หลากหลายมากขึ้น และเป็นแนวทางการส่งเสริมการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพอลิเมอร์ชนิดย่อยสลายได้ ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

สารประกอบไนโตรเจนเป็นสารหน่วงไฟชนิดหนึ่งที่มีความนิยมเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากมีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม คือ ไม่ปล่อยกาซพิษออกมาระหว่างเผาไหม้ สารหน่วงไฟชนิดที่เป็นสารประกอบไนโตรเจนที่สำคัญ ได้แก่ เมลามีนรวมถึงสารอนุพันธ์ เช่น เมลามีนออกซาเลต (melamine oxalate) เมลามีนฟอสเฟต (melamine phosphate) เมลามีนพทาเลท (melamine phthalate) เมลามีนไซยานูเรท (melamine cyanurate) ฯลฯ (Weil, 1995, Horacek et al., 1996 และ Camino et al., 2000) เนื่องจากสารประกอบฟอสฟอรัสและสารประกอบไนโตรเจน มีกลไกการหน่วงไฟที่คล้ายคลึงกัน โดยเกิดเป็นชั้นของเถ้า (char layer) ที่ผิวหน้าของพอลิเมอร์ซึ่งแยกพอลิเมอร์ออกจากความร้อนจากการเผาไหม้และกาซออกซิจน ซึ่งการจำกัดปริมาณออกซิจนโดยการขวางจากชั้นเถ้าจะ

หยุดการลามของเปลวไฟ พร้อมทั้งหน่วงอัตราการสลายตัวของพอลิเมอร์เนื่องความร้อน รวมถึงลดการเกิดควันและไม่เกิดกาซพิษ (Troitzsch, 1990)

ผลิตภัณฑ์เมลามีน-ฟอร์มัลดีไฮด์พลาสติก (melamine-formaldehyde plastic, MF) ที่แพร่หลายและเป็นสินค้าส่งออกชนิดหนึ่ง ได้แก่ ภาชนะบรรจุอาหารและเครื่องดื่มน้ำ ของเสียหรือส่วนเกินที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดนี้มีปริมาณมาก ไม่สามารถนำมาหลอมขึ้นรูปใหม่ได้ และการนำไปกำจัดก่อให้เกิดความสูญเสียทั้งทางเศรษฐศาสตร์และเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากพลาสติกจากเมลามีน-ฟอร์มัลดีไฮด์หลังผ่านการให้ความร้อนจะมีโครงสร้างร่างแหเกิดขึ้นและมีความแข็งแรงเชิงกลที่ค่อนข้างสูง ดังนั้น ของเสีย MF จากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกน่าจะนำมารีไซเคิล โดยนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกได้ นอกจากนี้ จากโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบ MF เป็นสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ สารตัวเติมจากของเสีย MF น่าจะช่วยเพิ่มสมบัติการหน่วงไฟให้กับ PBAT ซึ่งเป็นพอลิเอสเตอร์เทอร์โมพลาสติก รวมถึงช่วยลดปริมาณ MF ที่เป็นของเสียที่เหลือทิ้งและเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถใช้ประโยชน์จาก MF ที่เป็นของเสียได้

แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นผลพลอยได้ทางการเกษตรที่ประเทศไทยผลิตได้ในปริมาณมาก มีโครงสร้างหลักประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐานสองส่วน ได้แก่ 1) สารอินทรีย์ เช่น เซลลูโลส ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และ 2) สารอนินทรีย์ซึ่งมีซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) เป็นองค์ประกอบหลัก (ประมาณ 20 % โดยน้ำหนัก) ปนอยู่กับโลหะออกไซด์ประเภทอื่น (Govindarao, 1980, Chandrasekhar et al., 2003) แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นแหล่งธรรมชาติที่สำคัญสำหรับการผลิตซิลิกาซึ่งเป็นสารที่มีประโยชน์มากในเชิงอุตสาหกรรม เช่น เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์วัสดุที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ (เช่น ซีโอไลต์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ซิลิกอนไนไตรด์ (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)) ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวตรึงในอุตสาหกรรมเคมี เป็นสารเสริมแรงให้กับพลาสติกและยาง ฯลฯ นอกจากนี้ข้อดีของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหมือนกับเส้นใยธรรมชาติอื่น ๆ คือ มีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และย่อยสลายได้ในธรรมชาติ แล้ว องค์ประกอบพื้นฐานของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็น เซลลูโลส ซิลิกา และลิกนิน น่าจะมีส่วนสำคัญช่วยในการเสริมแรงซึ่งจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้แก่พอลิเมอร์ พร้อมทั้งปรับปรุงสมบัติหน่วงไฟของพอลิเมอร์จากการเพิ่มปริมาณเถ้าที่หน่วงไฟจากองค์ประกอบที่เป็นซิลิกา ลิกนินและเซลลูโลส (Zhao et al., 2009) ซึ่งนอกจากจะลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือทิ้งแล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วย

ระบบการหน่วงไฟที่น่าสนใจระบบหนึ่งคือ intumescent flame retardants (IFR) เนื่องจากมีความเป็นพิษต่ำและเกิดควันน้อย ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบนี้ ได้แก่ สารที่แตกตัวให้กรด (acid source) สารที่เป็นแหล่งของคาร์บอน (carbonization compound) และสารที่ทำให้เกิดการพองตัว (blowing agent) ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์และเมลามีนสามารถทำหน้าที่เป็น carbonization compound) และ blowing agent ได้ (ตามลำดับ) การนำแคลเซียมไฮดรอกไซด์และ/หรือ เมลามีน ไปผสมกับสารเคมีที่แตกตัวให้กรด (acid catalyst) เมื่อได้รับความร้อน เช่น แอมโมเนียมฟอสเฟต แล้วนำไปเป็นสารตัวเติมของ PBAT น่าจะช่วยทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีสมบัติการหน่วงไฟที่ดีขึ้นโดยไม่กระทบต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ

### 1.3 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

สารเคมีที่มีสมบัติหน่วงไฟ (flame retardant, FR) ที่นิยมนำมาผสมกับพอลิเมอร์เพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกมีหลายประเภท เช่น โลหะออกไซด์ (metal oxides) สารประกอบฮาโลเจน (halogenated compounds) สารประกอบฟอสฟอรัส (phosphorus compounds) สารประกอบไนโตรเจน (nitrogen compounds) เป็นต้น สารหน่วงไฟแต่ละชนิดมีกลไกและประสิทธิภาพในการหน่วงไฟต่างกัน การใช้สารประกอบฮาโลเจนเป็นสารหน่วงไฟจะทำให้เกิดกาซพิษและควันปริมาณมาก ซึ่งเป็นข้อจำกัดเกี่ยวกับความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม (Sen et al., 1991) ดังนั้น การใช้สารหน่วงไฟชนิดที่ไม่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบจึงได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ สารหน่วงไฟชนิดโลหะออกไซด์ โดยเฉพาะแมกนีเซียมออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ มีการใช้งานค่อนข้างกว้างขวาง เนื่องจากราคาไม่แพงและมีความปลอดภัย กลไกการหน่วงไฟหลักเกิดจากการทำให้ระบบเย็นตัวลงโดยการปลดปล่อยน้ำ ทำให้ต้องใช้สารตัวเติมชนิดนี้เป็นปริมาณค่อนข้างมากซึ่งมีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Wang et al., 1996 และ Wang et al., 2001)

สารประกอบไนโตรเจนเป็นสารหน่วงไฟอีกชนิดที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากมีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม คือ ไม่ปล่อยกาซพิษออกมาระหว่างเผาไหม้ สารหน่วงไฟชนิดที่เป็นสารประกอบไนโตรเจนที่สำคัญ ได้แก่ เมลามีนรวมถึงสารอนุพันธ์ เช่น เมลามีนออกซาเลต (melamine oxalate) เมลามีนฟอสเฟต (melamine phosphate) เมลามีนฟทาเลต (melamine phthalate) เมลามีนไซยานูเรท (melamine cyanurate) ฯลฯ (Weil, 1995, Horacek et al., 1996 และ Camino et al., 2000) เนื่องจากสารประกอบฟอสฟอรัสและสารประกอบไนโตรเจน มีกลไกการหน่วงไฟที่คล้ายคลึงกัน โดยเกิดเป็นชั้นของเถ้า (char layer) ที่ผิวหน้าของพอลิเมอร์ซึ่งแยกพอลิเมอร์ออกจากความร้อนจากการเผาไหม้และกาซออกซิเจน ซึ่งการจำกัดปริมาณออกซิเจนโดยการขวางจากชั้นเถ้าจะหยุดการลามของเปลวไฟ พร้อมทั้งหน่วงอัตราการสลายตัวของพอลิเมอร์เนื่องความร้อน รวมถึงเกิดกาซที่ไม่ติดไฟ ลดการเกิดควัน และไม่เกิดกาซพิษ (Troitzsch, 1990) จึงมีการศึกษาเกี่ยวกับผลของการใช้เมลามีน อนุพันธ์ของเมลามีน หรือ ของผสมของอนุพันธ์ของเมลามีนกับสารประกอบฟอสฟอรัสต่อสมบัติการหน่วงไฟในพอลิเมอร์หลายชนิด เช่น พอลิเอไมด์ พอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีนไวนิลอะซิเตต อีพอกซีเรซิน พอลิบิวทิลีนเทอแรพทาเลต ฯลฯ ซึ่งผลที่ได้มีทั้งทางเสริม (synergistic effect) หรือหักล้างกัน (antagonistic effect) (Gaan et al., 2008, Gijnsman et al., 2002, Casu et al., 1997, Braun et al., 2007, Chen et al., 2006, Lv et al., 2005, Liu et al., 2007, Nyambo et al., 2009, Chen et al., 2004, Xiao et al., 2006)

Song และคณะ (Song et al., 2005) รายงานผลการทดลองที่แสดงการเสริมกันเมื่อใช้เมลามีนพอลิฟอสเฟตเป็นสารหน่วงไฟพร้อมกับออร์การ์โนเคลย์ในพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ Modesti และคณะ (Modesti et al., 2001 และ Modesti et al., 2002) ศึกษาการใช้สารหน่วงไฟผสมระหว่างเมลามีนไซยานูเรทกับแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตในโพนพอลิยูรีเทนพบว่าสมบัติการหน่วงไฟดีขึ้นในขณะที่สมบัติ

เชิงกลแย่ง เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม จากการศึกษาผลของเมลามีนต่อการสลายตัวภายใต้ความร้อนของพอลิบิวทิลีนเทอเรพทาเลท (PBT) โดย Balabanovich (Balabanovich, 2004) และจากการศึกษาผลของสารตัวเติมผสมของเมลามีนและไตรฟีนิลฟอสเฟต โดย Xiao และ คณะ (Xiao et al., 2006) พบว่า ทั้งการใช้เมลามีนที่ปริมาณที่เหมาะสมและการใช้สารตัวเติมผสมระหว่างเมลามีนและไตรฟีนิลฟอสเฟตที่อัตราส่วนที่เหมาะสมใน PBT ทำให้พอลิเมอร์มีการหน่วงไฟที่สูงขึ้น ทั้งเมลามีนและสารตัวเติมผสมสามารถเกิดแรงกระทำกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกลไกการสลายตัวภายใต้ความร้อน (pyrolysis) โดยเพิ่มปริมาณเถ้าที่เหลือที่อุณหภูมิสูงและเปลี่ยนองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสถานะก๊าซ นอกจากนี้ สารตัวเติมผสมยังมีผลในการเพิ่มผลึกของ PBT ด้วย

Makki และคณะ (Makki et al. 2009) เสนอทางเลือกในการนำของเสียเมลามีน-ฟอร์มัลดีไฮด์ (MF) และ ยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ (UF) เรซินที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว มาบดและนำมาผสมกับพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated polyester, UP) โดยใช้อัตราส่วนผสมต่าง ๆ จากการตรวจสอบสมบัติเชิงกลโดยพิจารณาจากค่าความแข็งแรงกดอัด พบว่าของเสีย UF และ MF สามารถนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงสำหรับคอมโพสิตของพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัวได้ดีมาก อย่างไรก็ตาม การใช้เมลามีนหรืออนุพันธ์เป็นสารเสริมแรงหรือเป็นสารหน่วงไฟใน PBAT ยังไม่พบรายงานการศึกษา

การศึกษาเพื่อนำกลับมาใช้เสริมแรงในพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ได้มีการศึกษาและมีรายงานวิจัยออกมาหลากหลายแนวทาง เช่น Park และคณะ (Park et al., 2004) ใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) และเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Infrared spectroscopy, FTIR) ในการศึกษาพื้นผิวหน้าของผงเคลือบที่ถูกปรับปรุงโดยใช้สารประสานไซเลนชนิด  $\gamma$ -aminopropyltriethoxy-silane (APS) หรือ maleated PP (MAPP) พบว่า สารทั้งสองชนิดน่าจะเกิดพันธะเคมีกับผิวหน้าของผงเคลือบผ่านพันธะเอสเทอร์ (เมื่อใช้ MAPP) หรือพันธะอีเทอร์ (เมื่อใช้ APS) งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าสมบัติที่พื้นผิวของผงเคลือบสามารถปรับเปลี่ยนได้หลายวิธี ซึ่งจะส่งผลถึงการยึดติดกัน (interfacial adhesion) ระหว่างพอลิเมอร์กับผงเคลือบและสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ Kim และคณะ (Kim et al., 2004) เตรียมพอลิเอทิลีนคอมโพสิตโดยใช้ผงเคลือบเป็นสารตัวเติม พบว่า การเพิ่มปริมาณผงเคลือบทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำลงแต่จะมีเถ้าเหลือหลังการสลายตัวมากขึ้น Yang และคณะ (Yang et al., 2007) เตรียมพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตโดยใช้ผงเคลือบเป็นสารตัวเติม และใช้ maleated polypropylene เป็น compatibilizer พบว่า tensile strength ของคอมโพสิตลดลงเมื่อปริมาณของผงเคลือบเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การเติม compatibilizer ช่วยปรับปรุงความเข้ากันระหว่างผงเคลือบและพอลิโพรพิลีน และทำให้คอมโพสิตมีค่า tensile strength สูงขึ้น Rozman และ คณะ (Rozman, Musa and Abubakar, 2005) ปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างผงเคลือบกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยปรับปรุงพื้นผิวผงเคลือบด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรเรต (MAH) ไกลซิดีลเมทาไครเลท (GMA) หรือซัคซินิก แอนไฮไดรเรต (SAH) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ และนำผงเคลือบที่ปรับปรุงพื้นผิวแล้วไปผสมกับพอลิเอสเทอร์ไม่อิ่มตัวเพื่อเตรียมวัสดุคอมโพสิต พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึง โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดัด และ ความทนต่อแรงตกกระแทกของวัสดุคอมโพสิตระหว่างผงเคลือบที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย GMA และ MAH มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่



ที่สมบัติดังกล่าวของวัสดุคอมโพสิตระหว่างกลบข้าวที่ปรับปรุงด้วย SAH และพอลิเอสเทอร์มีค่าลดลง Kim และคณะ (Kim et al., 2006) ศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวผงกลบข้าวโดยการฉายรังสี ลำแสงอิเล็กตรอนที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ กัน ต่อแรงยึดติดของคอมโพสิตระหว่างผงกลบข้าวและพอลิโพรพิลีน พบว่า ผงกลบข้าวผ่านการฉายรังสีมีแรงยึดติดที่ดีและมีการกระจายตัวที่ดีในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ เนื่องจากการฉายรังสีลำแสงอิเล็กตรอนช่วยลดความชอบน้ำของพื้นผิวผงกลบข้าวและช่วยเพิ่มพื้นผิวที่ขรุขระให้ผงกลบข้าวนำไปสู่การเพิ่มขึ้นแรงยึดติดของผงหน้าระหว่างผงกลบข้าวและพอลิโพรพิลีน นอกจากนี้ ความต้านทานต่อแรงดึงของคอมโพสิตที่เติมผงกลบข้าวที่มีปรับปรุงพื้นผิวมีค่าสูงกว่าคอมโพสิตที่เติมผงกลบข้าวไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว

Zhao และคณะ (Zhao et al., 2009) เตรียมคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและกลบข้าวที่ปริมาณต่าง ๆ จากการศึกษาสมบัติการหน่วงไฟของคอมโพสิตโดยใช้ thermogravimetric analysis และ cone calorimetry พบว่า การเติมกลบข้าวช่วยทำให้กระบวนการเทอร์โมออกซิเดชันของพอลิเมอร์เกิดช้าลง คอมโพสิตจะมีสมบัติการหน่วงไฟที่ดีที่ปริมาณกลบข้าวค่อนข้างสูง (50 - 70 wt%) จากการศึกษาขององค์ประกอบและโครงสร้างของเถ้าที่เหลืออยู่พบว่า กลไกหลักของการหน่วงไฟ คือ การกั้นการแพร่ผ่านของออกซิเจนและความร้อนโดยชั้นป้องกันไฟที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักโดยชั้นดังกล่าวเกิดขึ้นระหว่างที่คอมโพสิตเกิดการเผาไหม้ การศึกษาสมบัติการหน่วงไฟโดยการนำกลบข้าวไปใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ยังไม่มีปรากฏการรายงานในบทความวิชาการ

#### 1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อให้ทราบถึงผลของสารตัวเติมต่อสมบัติการหน่วงไฟ สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสัญญาณวิทยาของพอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรทาเลทคอมโพสิต

#### 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- (1) ศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติการหน่วงไฟ สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสัญญาณวิทยาของพอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรทาเลทคอมโพสิตที่ปริมาณของสารตัวเติมต่าง ๆ
- (2) ศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติการหน่วงไฟ สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสัญญาณวิทยาของพอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรทาเลทคอมโพสิตที่ใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน

## บทที่ 2

### วิธีดำเนินการวิจัย

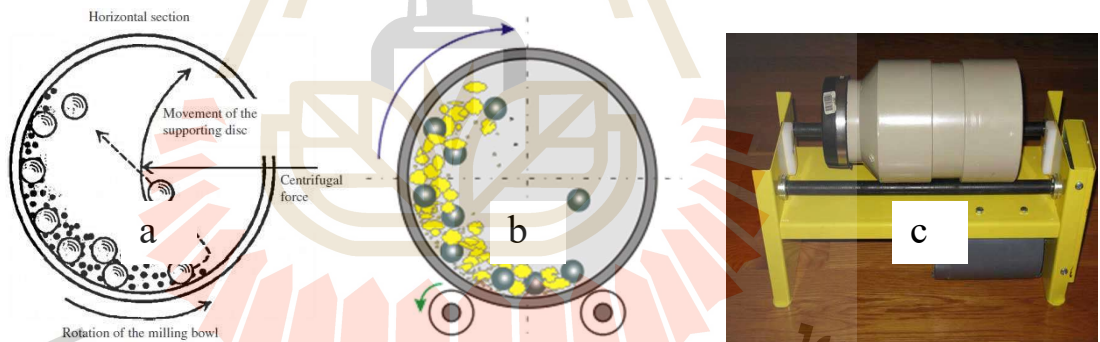
#### 2.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

พอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเลท แกลบข้าว (จากโรงสีข้าวซึ่งตั้งอยู่ที่พื้นที่ใกล้มหาวิทยาลัย) และ เศษเมลามีน (จากของเสียในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกของโรงงานศรีไทยซูเปอร์แวร์ นิคมอุตสาหกรรมสุนารี นครราชสีมา)

#### 2.2 วิธีการทดลอง

##### 2.2.1 การเตรียมผงเมลามีน

เมลามีนที่ใช้ในการทดลองเป็นของเหลือใช้ที่ได้จากการบดย่อยผลิตภัณฑ์งาน ชาม ที่เป็นของเสียจากกระบวนการผลิต ซึ่งขนาดผงยังมีขนาดใหญ่อยู่ ต้องทำให้ขนาดอนุภาคเล็กลงถึงระดับไมโครเมตร โดยใช้เทคนิคการบดแบบ ball milling มีหลักการ คืออาศัยการตกระทบของลูกบอลเซรามิกทำให้เกิดการแตกตัวของอนุภาค



รูปที่ 2.1 (a-b) กลไก ball milling ภายในหม้อบด (c) เครื่องบดและหม้อบด

โดยมีขั้นตอนการบด ดังนี้ นำลูกบดขนาดต่าง ๆ ใส่หม้อบดให้มีปริมาณเป็น 80 % ของปริมาตรหม้อบด ใส่ผงเมลามีนปริมาณ 200 กรัมลงในหม้อบด เติมน้ำลงในหม้อบดให้ระดับน้ำท่วมลูกบด ปิดฝาให้แน่น บดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แยกลูกบดออกจากน้ำ slip (ของผสมระหว่างน้ำและผงเมลามีน) นำน้ำ slip ที่กรองได้ใส่ภาชนะรองรับ ทิ้งไว้ 1 คืนให้ตกตะกอน หลังจากนั้นรินน้ำที่อยู่ชั้นบนออก นำน้ำ slip จากภาชนะที่รินได้ เทใส่ถาด นำไปอบระเหยน้ำให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 °C นำเมลามีนที่ระเหยน้ำแล้วไปบด

ด้วยโกร่งไฟฟ้า และคัดแยกขนาดเมลามีนโดยใช้ตะแกรงร่อน (sieve) ผงเมลามีนที่ผ่านตะแกรงขนาด 45  $\mu\text{m}$  จะนำมาใช้สำหรับการเตรียม PBAT คอมโพลีท

### 2.2.2 การเตรียมแกลบข้าว (rice husk, RH)

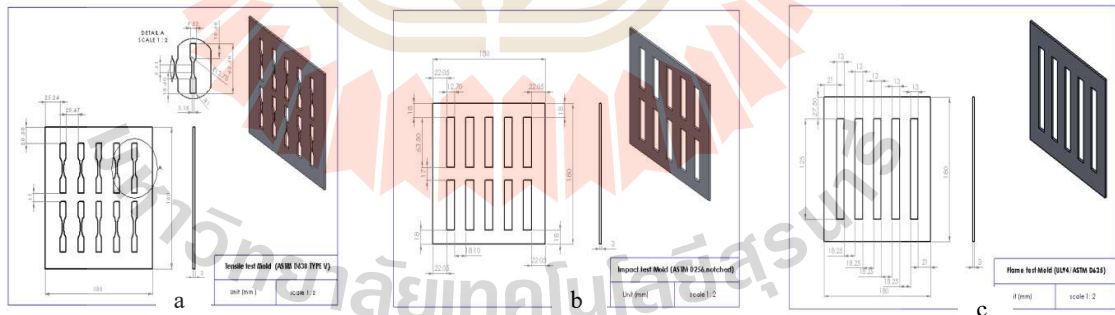
นำแกลบข้าวมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเพื่อขจัดดินและสิ่งสกปรกและตากทิ้งไว้ให้แห้ง หลังจากนั้นนำแกลบข้าวที่แห้งแล้วไปบดด้วยเครื่องบดสาร (RETSCH/ZM200) นำแกลบข้าวที่ผ่านการบดไปร่อนผ่านตะแกรงโดยใช้เครื่องร่อนแบบเขย่า (RETSCH/AS200) และใช้เส้นใยแกลบข้าวที่มีขนาดระหว่าง 300 - 450 ไมโครเมตรเป็นสารตัวเติมในงานวิจัยนี้

### 2.2.3 การเตรียม PBAT คอมโพลีท

PBAT คอมโพลีทที่ปริมาณเมลามีนต่าง ๆ ถูกเตรียมโดยใช้เครื่องบดผสมภายใน (Haake, model Rheomix 3000P) อุณหภูมิการผสม 140°C ความเร็วรอบการผสม 60 รอบต่อนาทีและเวลาผสม 10 นาที ก่อนผสมนำ PBAT และ เมลามีนไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เวลา 4 ชั่วโมง วัสดุ PBAT คอมโพลีทที่เตรียมขึ้นมีอัตราส่วนเมลามีนในการผสม คือ ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของ PBAT

PBAT คอมโพลีทที่ปริมาณแกลบข้าวต่าง ๆ ถูกเตรียมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสองสกรู (Twin screw Extruder ) ที่อุณหภูมิเท่ากับ 140°C ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที ก่อนผสมนำ PBAT และ แกลบข้าวไปอบที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 4 ชั่วโมง และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ วัสดุ PBAT คอมโพลีทที่เตรียมขึ้นมีอัตราส่วนแกลบข้าวในการผสม คือ ร้อยละ 10, 20, 30, และ 40 โดยน้ำหนักของ PBAT

จากนั้น ชิ้นงาน PBAT คอมโพลีท 3 ชนิด ได้แก่ ชิ้นงานทดสอบสมบัติการต้านแรงดึง ชิ้นงานทดสอบสมบัติการต้านแรงกระแทก และชิ้นงานทดสอบสมบัติการหน่วงไฟ จะถูกขึ้นรูปโดยใช้เครื่องกดอัด (compression Molding) (Scientific, model LP20-30) ที่อุณหภูมิขึ้นรูป 140°C ความดัน 140 bar เวลาขึ้นรูป 10 นาที เวลาหล่อเย็น 15 นาที



รูปที่ 2.2 แม่พิมพ์สำหรับ (a) ชิ้นงานทดสอบสมบัติการต้านแรงดึง (b) ชิ้นงานทดสอบสมบัติการต้านแรงกระแทก และ (c) ชิ้นงานทดสอบสมบัติการหน่วงไฟ

#### 2.2.4 การตรวจสอบสมบัติการต้านแรงดึง (Tensile properties)

สมบัติการต้านแรงดึงตรวจสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยเครื่อง Universal testing machine รุ่น instron 5565 load cell 5 กิโลนิวตัน ความยาว gauge 7.62 มิลลิเมตร และ ความเร็วในการดึง 10 มิลลิเมตร/นาที (วัสดุคอมโพสิทระหว่าง PBAT กับแกลบลั่ว) หรือ ความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตร/นาที (วัสดุคอมโพสิทระหว่าง PBAT กับเมลามีน)

#### 2.2.5 การตรวจสอบสมบัติการต้านแรงกระแทก (Impact properties)

สมบัติการต้านแรงกระแทกตรวจสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยเครื่อง ATLAS Impact testing (Atlas, model BPI) ใช้ตุ้มถ่วงในการทดสอบ (Hammer) ชนิด 2.7 จูล โดยทำการทดสอบแบบ notched Izod impact strength ทดสอบ

#### 2.2.6 การตรวจสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยา (Morphological properties)

สมบัติทางสัณฐานวิทยาตรวจสอบจากพื้นผิวของ PBAT คอมโพสิทภายหลังการแตกหัก โดยใช้เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope (SEM) (JEOL/JCM-5000)) โดยใช้พลังงานเท่ากับ 10 กิโลโวลต์ และฉายตัวอย่างด้วยทองคำก่อนนำไปตรวจสอบ

#### 2.2.7 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

การเสื่อมสลายทางความร้อนและเถ้าคงเหลือของ PBAT และ PBAT คอมโพสิท ตรวจสอบโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analyzer, TGA) (TA INSTRUMENT/SDT2960)) กราฟของ TGA และ DTGA ของ PBAT และ PBAT คอมโพสิทได้จากการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจากอุณหภูมิห้องจนถึง 800°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10°C/min ในสถานะที่เป็นก๊าซไนโตรเจน

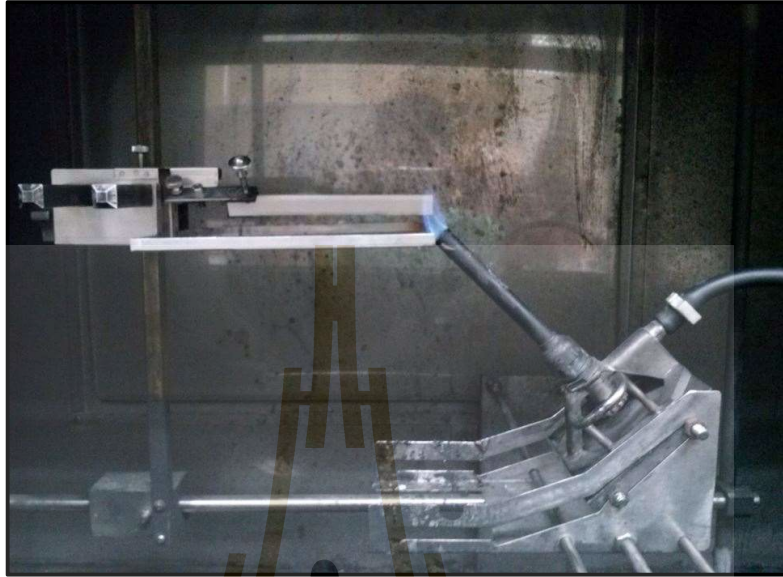
#### 2.2.8 การตรวจสอบสมบัติการหน่วงไฟ (Flame retardant properties)

การตรวจสอบสมบัติการหน่วงไฟโดยใช้เครื่อง ATLAS รุ่น Plastics HVUL Horizontal/ Vertical Flame Chamber โดยตรวจสอบ 2 แบบ 1) Horizontal burning test 2) Vertical burning test

Horizontal burning test กระบวนการทดสอบเริ่มโดยจับชิ้นงานในลักษณะขนานกับพื้นดินทำเครื่องหมายกับชิ้นทดสอบที่ 25 mm. และ 100 mm. จากปลายด้านที่จะเผา ปรับไฟให้เป็นสีฟ้ามีความสูงของเปลวไฟประมาณ 1 เซนติเมตร จากนั้นเผาชิ้นงานและบันทึกเวลาระหว่างการเผาจากจุดที่ทำเครื่องหมายทั้ง 2 จุดและคำนวณค่าอัตราการเผาไหม้ (Burning rate, V) จากสูตร

$$V = 60L/t$$

เมื่อ L = ระยะที่ไฟลาม (mm) และ t = เวลาที่ไฟลาม (s)



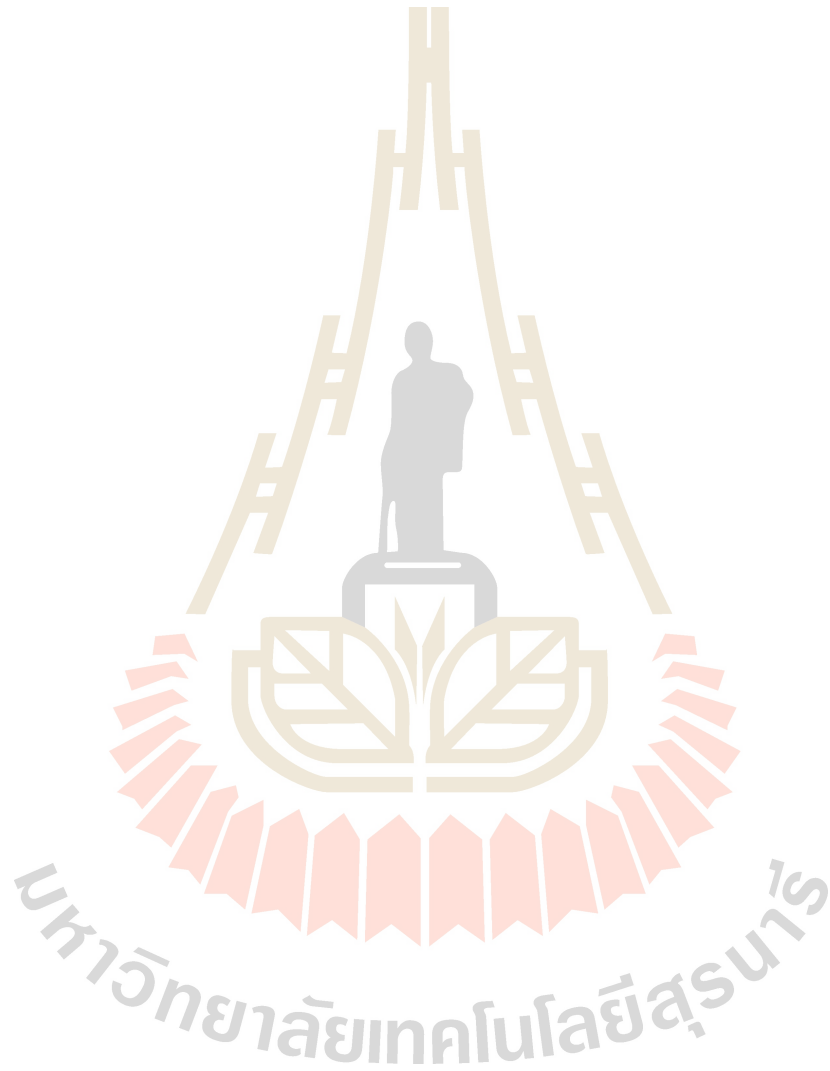
รูปที่ 2.3 การทดสอบการติดไฟชนิด Horizontal burning test

Vertical burning test กระบวนการทดสอบเริ่มโดยการจับชิ้นงานในลักษณะตั้งฉากกับพื้นดินชิ้นงานสูงจากฐาน 300 mm. โดยที่ฐานรองด้วยสำลี การเผาขึ้นกระบอกเชื้อเพลิงห่างจากชิ้นทดสอบ 10 mm. จากนั้นปรับเปลวไฟให้มีสีฟ้าและมีความสูงประมาณ 1 เซนติเมตร การทดสอบโดยทำการเผาชิ้นทดสอบเป็นเวลา 10 วินาที แล้วนำเชื้อเพลิงออกแล้วเริ่มต้นจับเวลาจนกระทั่งไฟดับลง



รูปที่ 2.4 การทดสอบการติดไฟชนิด Vertical burning test

Limiting oxygen index (LOI) ตรวจสอบตามมาตรฐาน ASTM D2863 โดยใช้เครื่องมือที่ประกอบเองในห้องปฏิบัติการ โดยหลักการทำงาน คือ ตรวจสอบการติดไฟของชิ้นงานภายใต้บรรยากาศที่มีการไหลของออกซิเจนและไนโตรเจนผสมกันที่อัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำที่สุดที่สามารถทำให้ชิ้นงานติดไฟและมีการลามไฟอย่างต่อเนื่อง LOI ที่มีค่ามากกว่า 21 แสดงถึง การไม่ติดไฟในบรรยากาศปกติ



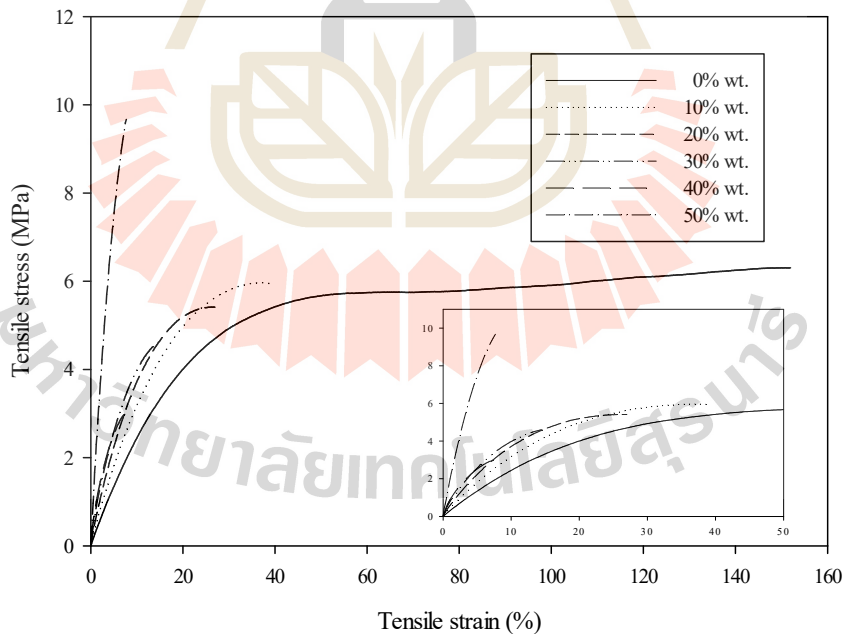
### บทที่ 3

#### ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

#### 3.1 พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิบิวทีลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลทและเมลามีน

##### 3.1.1 สมบัติเชิงกลของ PBAT และวัสดุคอมโพสิทระหว่าง PBAT กับเมลามีน

ผลของปริมาณเมลามีนต่อสมบัติเชิงกลของ PBAT คอมโพสิท แสดงในรูปที่ 3.1-3.5 การเปลี่ยนแปลงของลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) กับความเครียด (strain) ของ PBAT และ วัสดุคอมโพสิทระหว่าง PBAT กับเมลามีนที่ปริมาณเมลามีนต่างๆ แสดงในรูปที่ 3.1 จากกราฟของขึ้นทดสอบ PBAT ที่ไม่มีการเติมเมลามีน จะเห็นว่าเมื่อขึ้นทดสอบถูกดึงยืดในช่วงแรก จะแสดงการเปลี่ยนแปลง stress ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ strain ซึ่งเป็นพฤติกรรมแบบอิลาสติก (elastic behavior)



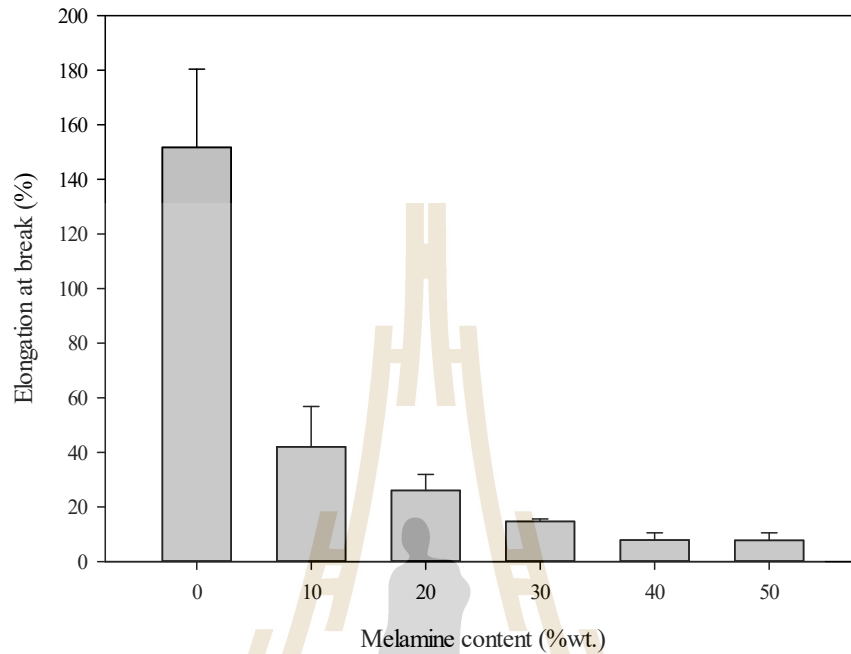
รูปที่ 3.1 Stress-strain curves of neat PBAT and PBAT composites at various melamine contents

จากนั้น เมื่อให้แรงดึงแก่ชิ้นทดสอบ PBAT ต่อไปภายใต้อัตราการดึงยึดคงที่และสังเกตลักษณะทางกายภาพของชิ้นทดสอบเทียบกับกราฟ stress - strain พบว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress - strain ของชิ้นทดสอบจะเบี่ยงเบนไปจากพฤติกรรมแบบอีลาสติกที่เกิดขึ้นในช่วงแรก โดยการเปลี่ยนแปลงจะเกิดอย่างค่อยเป็นค่อยไป (gradual yielding) strain ของชิ้นทดสอบเพิ่มขึ้นในขณะที่ stress ค่อนข้างคงที่ เมื่อสังเกตจากลักษณะกายภาพ ชิ้นทดสอบเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ยึดออก จนกระทั่งเกิดการขาดในที่สุด ซึ่งเป็นพฤติกรรมแบบพลาสติก (plastic behavior) อย่างไรก็ตาม กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress - strain ของชิ้นทดสอบ PBAT คอมโพลีที่เตรียมขึ้นจากการผสมเมลามีนที่ปริมาณ 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% wt. จะแตกต่างไปจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress - strain ของชิ้นทดสอบ PBAT โดยความสามารถในการต้านทานแรงดึงยึดของชิ้นทดสอบ PBAT คอมโพลีจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณเมลามีนใน PBAT คอมโพลีเพิ่มขึ้น ตามลำดับ และในทุกสัดส่วนการผสมชิ้นทดสอบจะขาดก่อนเกิด yield

รูปที่ 3.2 แสดงค่าความสามารถในการยืด ณ จุดขาด (elongation at Break) ของ PBAT และวัสดุคอมโพลีระหว่าง PBAT กับเมลามีนที่ปริมาณเมลามีนต่างๆ จะสังเกตเห็นแนวโน้มการลดลงของความสามารถในการยืด ณ จุดขาดเมื่อปริมาณเมลามีนในวัสดุ PBAT คอมโพลีเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณา PBAT ที่ยังไม่มีการเติมเมลามีนจะเห็นว่าความต่อเนื่องของเฟสเป็น 100 % เมื่อเตรียมวัสดุ PBAT คอมโพลีโดยเพิ่มปริมาณของเมลามีนที่สัดส่วนต่าง ๆ คือ 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% wt. ความสามารถในการยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลงตามลำดับ แสดงว่า การกระจายตัวของเมลามีนในเนื้อของ PBAT ขัดขวางความต่อเนื่องของเฟส PBAT และลดความสามารถในการยืดตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ จึงส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงดึงลดลงตามปริมาณสัดส่วนเมลามีนที่เพิ่มขึ้น

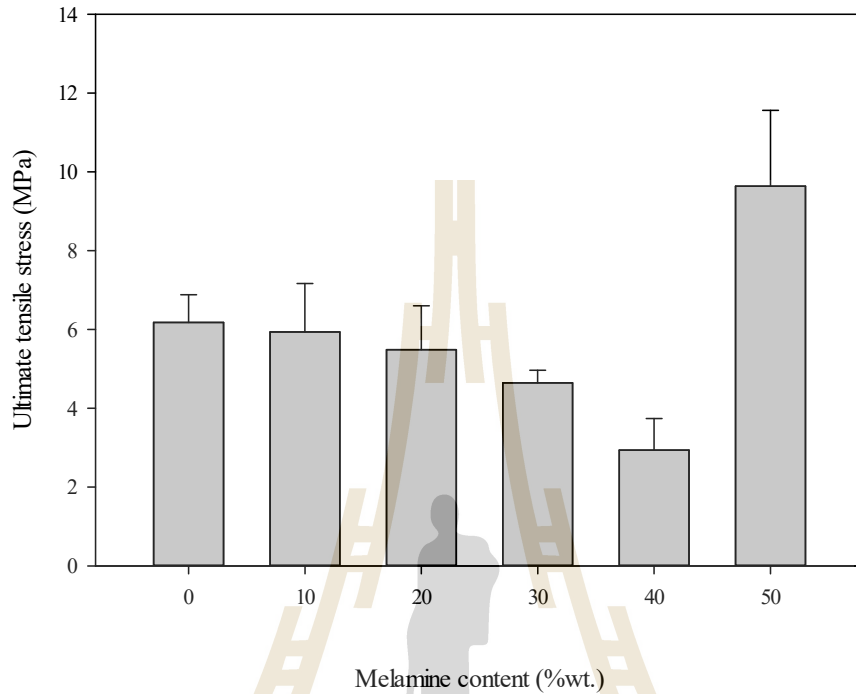






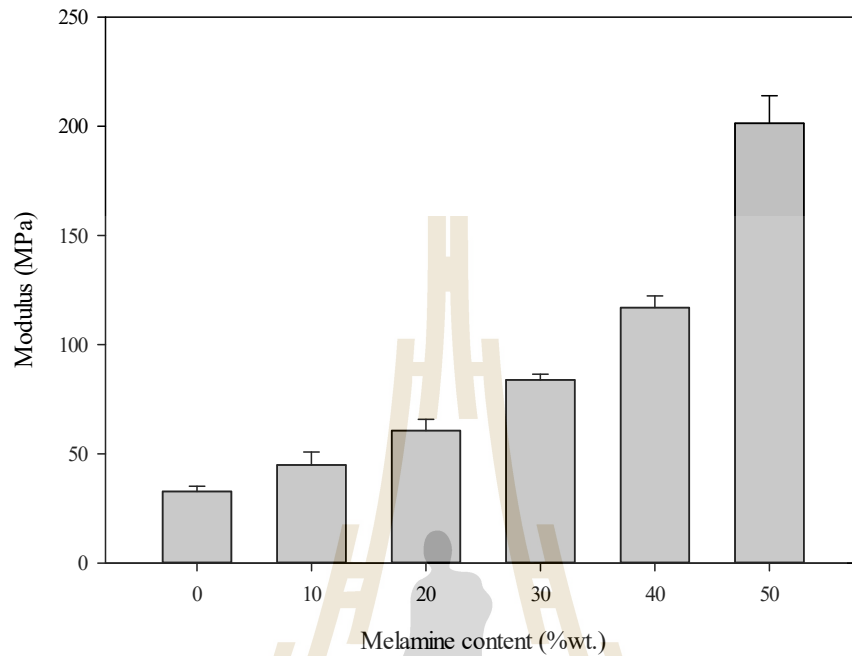
รูปที่ 3.2 Elongation at Break of neat PBAT and PBAT composites at various melamine contents

จากรูปที่ 3.3 แสดงค่าความแข็งแรงก่อนการแตกหัก (ultimate tensile strength) ของ PBAT และวัสดุคอมโพสิทระหว่าง PBAT กับเมลามีนที่ปริมาณเมลามีนต่างๆ จะเห็นว่าวัสดุ PBAT ที่เดิมมีค่าความแข็งแรงก่อนการแตกหักที่ 6.18 MPa เมื่อมีการผสมเมลามีนลงไปในอัตราส่วนต่าง ๆ คือ 10%, 20%, 30% และ 40% wt. ค่าความแข็งแรงจะลดลงเป็น 5.94, 5.48, 4.64, 2.94 MPa ตามลำดับ แต่เมื่อมีการเติมเมลามีนที่ปริมาณสัดส่วนการผสม 50% wt. ค่าความแข็งแรงก่อนการแตกหักของวัสดุคอมโพสิทกลับเพิ่มขึ้นเป็น 9.63 MPa สูงกว่าค่าความแข็งแรงก่อนการแตกหักของ PBAT เนื่องจากเมลามีนเป็นเทอร์โมเซทพลาสติกมีความแข็งแรงมากกว่า PBAT เมื่อนำไปเป็นสารตัวเติมโดยมี PBAT เป็น matrix ปริมาณเมลามีนที่เพิ่มขึ้นทำให้พฤติกรรมของชิ้นทดสอบภายใต้การดึงยืดเปลี่ยนแปลงไป (ดังแสดงในรูป 3.1) โดยต้านการดึงยืดเพิ่มขึ้น แต่ยืดตัวได้น้อยลง



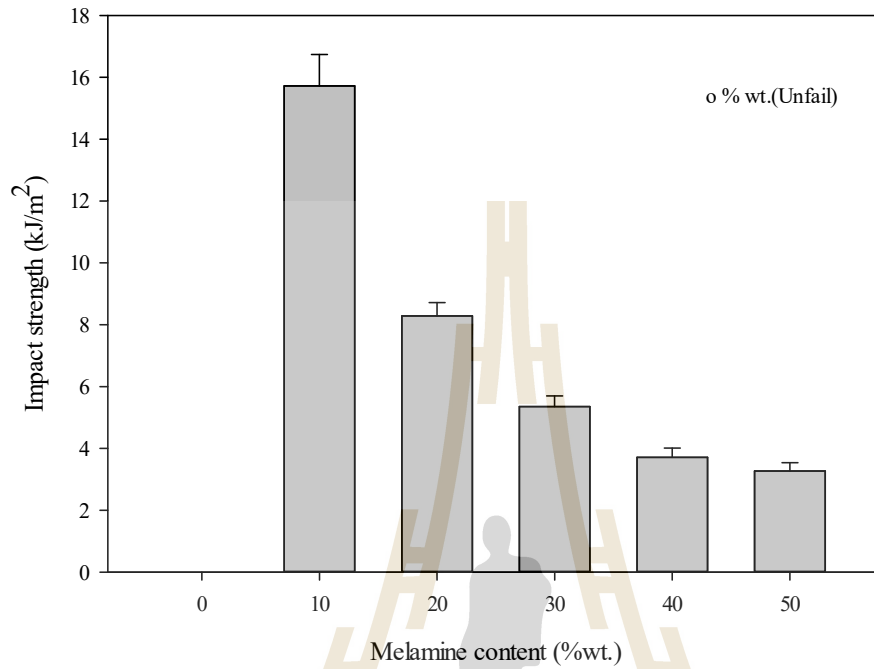
รูปที่ 3.3 Ultimate tensile strength of neat PBAT and PBAT composites at various melamine contents

จากรูปที่ 3.4 แสดงค่า Young's modulus (Young's modulus) ของ PBAT และวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PBAT กับเมลามีนที่ปริมาณเมลามีนต่างๆ พบว่าค่า Young's modulus ของวัสดุคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมเมลามีนในสัดส่วนการผสมที่มากขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า Young's modulus ของวัสดุคอมโพสิตเป็นไปตาม rule of mixture เมลามีนเป็นเทอร์โมเซตพลาสติกมีค่า Young's modulus มากกว่า PBAT การเพิ่มปริมาณเมลามีนในคอมโพสิต จึงเป็นผลให้ค่า Young's modulus ของวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของเมลามีนที่ถูกเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.4 Young's modulus of neat PBAT and PBAT composites at various melamine contents

จากรูปที่ 3.5 แสดงสมบัติการต้านแรงกระแทก (Impact strength) ของ PBAT และวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PBAT กับเมลามีนที่ปริมาณเมลามีนต่างๆ แสดงให้เห็นถึงค่าความสามารถในการต้านแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิต ซึ่ง PBAT ที่ไม่มีการเติมเมลามีนเมื่อนำไปทดสอบพบว่าไม่เกิดการแตกหัก เมื่อเติมเมลามีนที่สัดส่วนการผสม 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% wt. พบว่าค่าความสามารถในการต้านแรงกระแทกจะลดลงตามสัดส่วนการผสมที่มากขึ้นตามลำดับ สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นเกิดจากความแตกต่างกันของวัสดุสองชนิดคือ PBAT และเมลามีน เมื่อพิจารณาไปที่โครงสร้างทางเคมีของ PBAT ซึ่งมีสมบัติอ่อนนุ่มคล้ายยางจึงมีความสามารถในการต้านแรงกระแทกที่ดี แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางเคมีของเมลามีนซึ่งเป็นเมลามีนที่มีโครงสร้างแบบร่างแหความแข็งแรงของโครงสร้างร่างแหจึงทำให้สมบัติของวัสดุแบบแข็งเปราะ และเมื่อนำ PBAT ผสมกับเมลามีนสมบัติการต้านแรงกระแทกที่ดีของ PBAT จะค่อยสูญเสียและเปลี่ยนสมบัติเป็นแบบแข็งเปราะตามปริมาณสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของเมลามีน



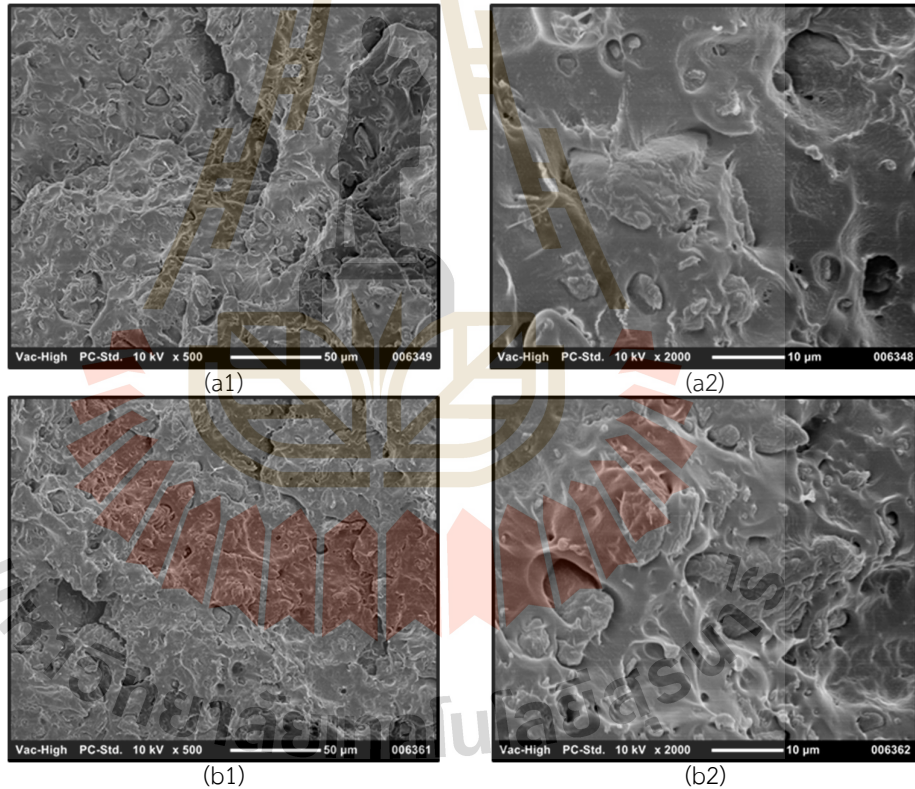
รูปที่ 3.5 Impact strength of neat PBAT and PBAT composites at various melamine contents

ตารางที่ 3.1 Mechanical Properties of neat PBAT and PBAT composites at various melamine contents.

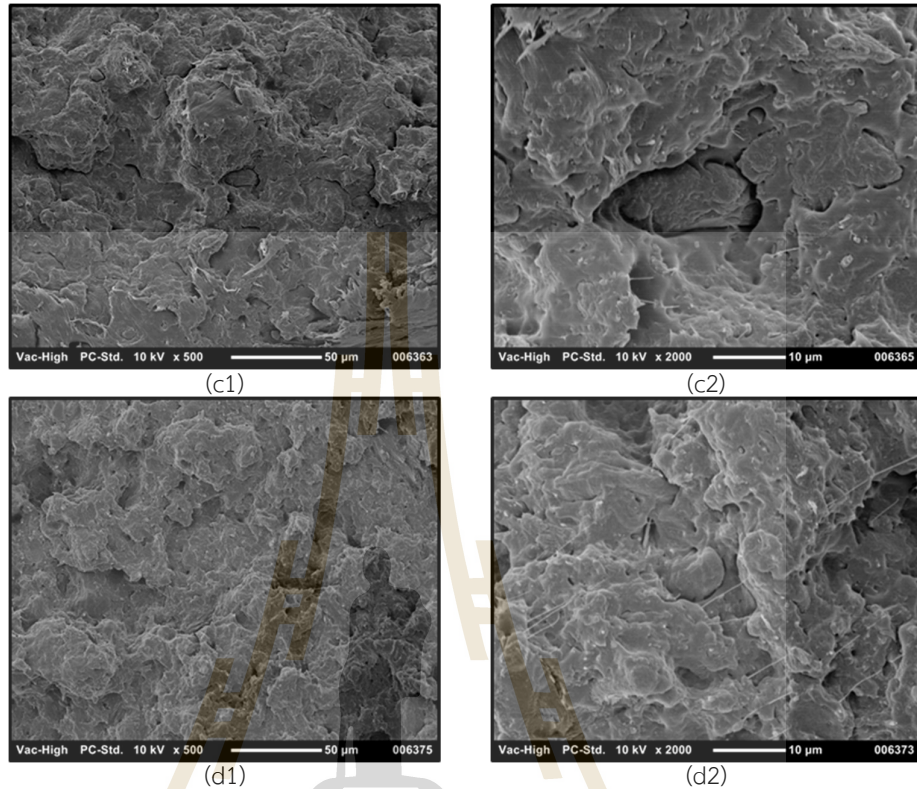
Mechanical Properties	Melamine contents (%wt.)					
	0	10	20	30	40	50
Elongation at Break (%)	151.73	42.04	26.03	14.73	7.85	7.77
Young's modulus (MPa)	32.76	44.89	60.62	83.83	116.94	201.38
Tensile strength (MPa)	6.18	5.94	5.48	4.64	2.94	9.63
Impact strength ( $\text{kJ/m}^2$ )	ไม่แตกหัก	15.72	8.28	5.35	3.71	3.27

### 3.1.2 สันฐานวิทยาของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PBAT กับเมลามีน

สันฐานวิทยา SEM ของพื้นผิวการแตกหักด้วยแรงตกกระแทกของ PBAT คอมโพสิตที่มีปริมาณเมลามีนต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 3.6 (a-d) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 500 เท่า แสดงให้เห็นว่า ผงเมลามีนมีการแตกตัวและการกระจายตัวใน PBAT ก่อนข้างสม่ำเสมอ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบภาพถ่ายที่ กำลังขยาย 2000 เท่า จะสังเกตเห็นช่องว่างแยกระหว่างผงเมลามีนและ PBAT และพื้นผิวของเมลามีน สะอาดโดยไม่ปรากฏเนื้อของ PBAT บนพื้นผิวของเมลามีน และยังพบหลุมที่อาจเกิดจากการเมลามีนที่ หลุดไปจากเนื้อเมทริกซ์ จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่า เมลามีนและ PBAT เมทริกซ์มีการยึดเกาะที่ไม่ แข็งแรง สันฐานวิทยาจาก SEM สนับสนุนผลการทดลองสมบัติเชิงกลที่พบว่า PBAT คอมโพสิตที่มี ปริมาณเมลามีนเพิ่มขึ้น จะมี ความแข็งแรง การดึงยึด ณ จุดขาด และความสามารถในการต้านแรง กระแทกที่ลดลง



รูปที่ 3.6 SEM micrographs of impact fracture surfaces of PBAT composites at various melamine contents: (a) 20 wt%, (b) 30 wt%, (c) 40 wt%, and (d) 50 wt%; at x500 (1) and x2000 (2) magnification

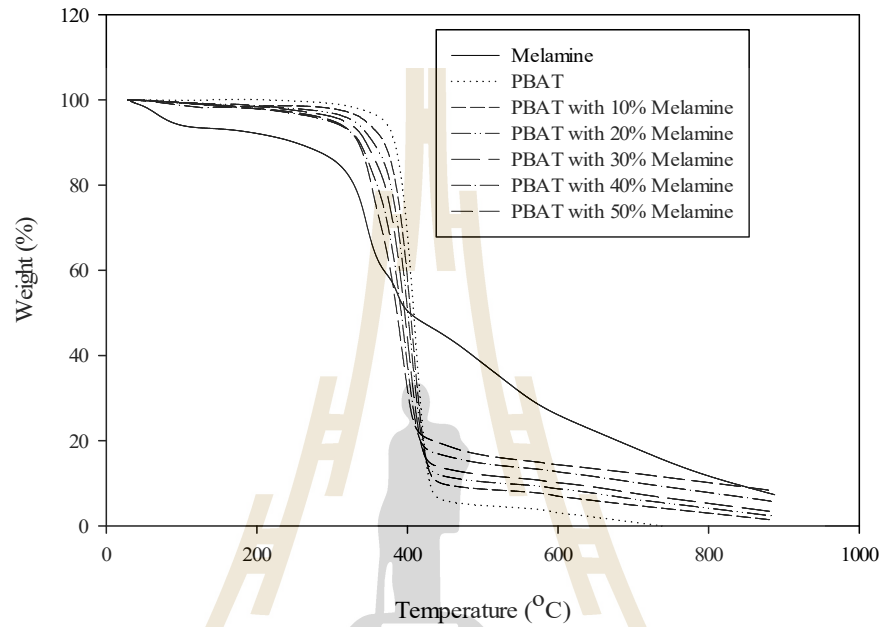


รูปที่ 3.6 SEM micrographs of impact fracture surfaces of PBAT composites at various melamine contents: (a) 20 wt%, (b) 30 wt%, (c) 40 wt%, and (d) 50 wt%; at x500 (1) and x2000 (2) magnification

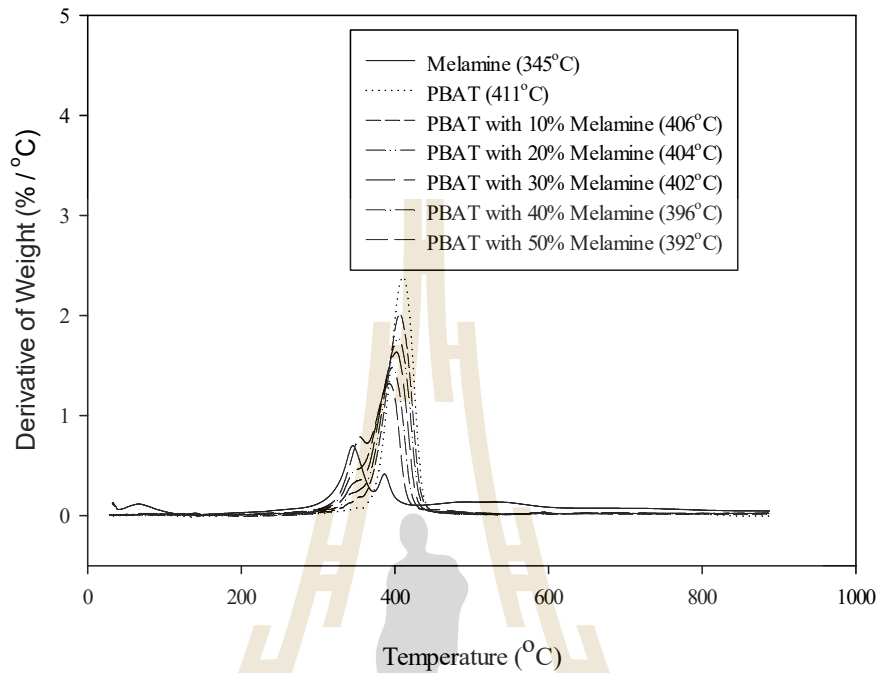
### 3.1.3 สมบัติทางความร้อนของ PBAT และ วัสดุคอมโพสิตระหว่าง PBAT กับเมลามีน

รูปที่ 3.7 และ 3.8 แสดง TGA และ DTGA (Derivative thermogravimetric thermogram) เทอร์โมแกรมของ PBAT เมลามีน และวัสดุ PBAT คอมโพสิตที่เมลามีนปริมาณต่าง ๆ ตามลำดับ จากกราฟในรูป พบว่า PBAT มีการสลายตัวเกิดขึ้นหนึ่งลำดับชั้น โดยเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 390°C และสิ้นสุดที่อุณหภูมิประมาณ 700°C โดยไม่มีเถ้าเหลืออยู่ ส่วนเมลามีนแสดงการสูญเสียน้ำหนักประมาณ 10 % ที่ อุณหภูมิ 100°C เนื่องจากการระเหยของน้ำที่อาจตกค้างอยู่จากการขึ้นตอนการเตรียม มีการสลายตัวเกิดขึ้นสามลำดับชั้น โดย เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 300°C สิ้นสุดที่อุณหภูมิประมาณ 700°C มีเถ้าสีดำเหลือเหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 800°C โดยมีน้ำหนักเถ้าที่เหลืออยู่ประมาณ 15 % เมื่อพิจารณาวัสดุ PBAT คอมโพสิตที่มีปริมาณเมลามีน 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% wt. พบว่าอุณหภูมิที่เริ่มสลายตัวจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของ PBAT แต่

สูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของเมลามีน โดยพีคของอุณหภูมิที่มีการสลายตัวครั้งแรก คือ 406, 404, 402, 396 และ 392 °C ตามลำดับ โดยที่น้ำหนักเก้าที่เหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 800°C มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเมลามีนที่ผสมอยู่ในวัสดุ PBAT คอมโพสิต



รูปที่ 3.7 TGA thermograms of neat PBAT, neat melamine, and PBAT composites at various melamine contents



รูปที่ 3.8 DTGA thermograms of neat PBAT, neat melamine, and PBAT composites at various melamine contents

#### 3.1.4 สมบัติการหน่วงไฟของ PBAT และวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PBAT กับเมลามีน

ตารางที่ 3.2 แสดงพฤติกรรมหน่วงไฟของ PBAT และวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PBAT กับเมลามีนที่ปริมาณการผสมต่าง ๆ ที่ได้จากการตรวจสอบสมบัติการหน่วงไฟของวัสดุโดยใช้ Vertical burning test, Horizontal burning test และ Limiting oxygen index (LOI) ในการทดสอบแบบ Vertical burning test เมื่อให้เปลวไฟแก่ PBAT เป็นเวลา 10 วินาที ชั้นทดสอบไม่เกิดการติดไฟแต่มีการไหลย้อยลงบนสำลีทำให้อำนาจการติดไฟ จึงจำแนกประเภทการติดไฟเป็น V-2 และเมื่อนำ PBAT มาทดสอบแบบ Horizontal burning test พบว่าไม่เกิดการติดไฟ และมีค่า LOI เท่ากับ 29.5 เมื่อพิจารณาวัสดุ PBAT คอมโพสิตที่สัดส่วนการผสมเมลามีน 10%, 20%, 30% และ 40% wt. ในการทดสอบแบบ Vertical burning test หลังจากให้เปลวไฟเป็นเวลา 10 วินาทีแล้ววัสดุไม่ติดไฟ เกิดการไหลย้อยลงบนสำลี แต่สำลีไม่ติดไฟ จึงจำแนกประเภทการติดไฟเป็น V-1 พิจารณาการทดสอบแบบ



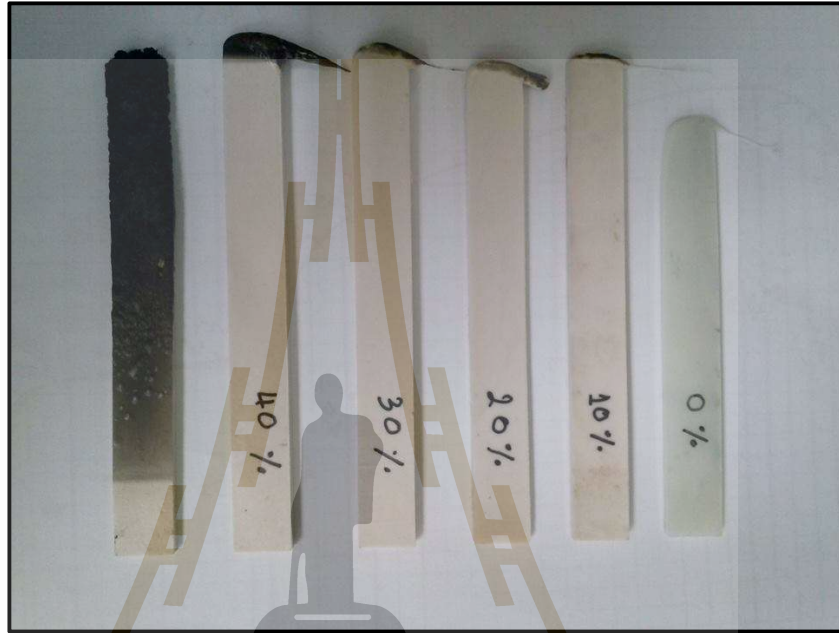
Horizontal burning test พบว่าไม่มีการติดไฟ ส่วนค่า LOI ของวัสดุ PBAT คอมโพสิตที่ปริมาณเมลามีนเพิ่มขึ้นเป็น 40% wt. จะมีค่าลดลงจาก 29.5 เหลือ 25.5 ซึ่งแสดงว่าวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PBAT กับเมลามีนยังคงต้องการปริมาณออกซิเจนน้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ในปริมาณที่สูงกว่าปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศปกติ เมื่อนำวัสดุ PBAT คอมโพสิตที่ผสมเมลามีนในอัตราส่วน 50% wt. มาทดสอบการติดไฟแบบ Vertical burning test พบว่าหลังจากให้เปลวไฟเป็นเวลา 10 วินาที ซึ่งงานเกิดการลุกติดไฟเป็นเวลา 41.30 วินาที และมีการเศษเถ้าที่ลุกติดไฟตกลงบนสำลี ทำให้สำลีติดไฟ จึงจำแนกประเภทการติดไฟเป็น NC และเมื่อพิจารณาการทดสอบแบบ Horizontal burning test ของสัดส่วนการผสมดังกล่าว พบว่าเกิดการติดไฟด้วยอัตราการเผาไหม้ 26.79 มิลลิเมตรต่ออนาที และมีค่า LOI เท่ากับ 21.1

**ตารางที่ 3.2** Flame retardant behaviors of neat PBAT and PBAT composites at various melamine contents

Melamine contents (%wt.)	Vertical burning: observation	Vertical burning rating*	Horizontal burning rate (mm/min)	LOI
0	ไม่ติดไฟ มีการไหลย้อยมาก สำลีติดไฟ	V-2	ไฟดับ	29.5
10	ไม่ติดไฟ มีการไหลย้อยมาก สำลีไม่ติดไฟ	V-1	ไฟดับ	29.5
20	ไม่ติดไฟ มีการไหลย้อยปานกลาง สำลีไม่ติดไฟ สำลีไม่ติดไฟ	V-1	ไฟดับ	29.5
30	ไม่ติดไฟ มีการไหลย้อยปานกลาง สำลีไม่ติดไฟ	V-1	ไฟดับ	25.5
40	ไม่ติดไฟ มีการไหลย้อยน้อย สำลีไม่ติดไฟ	V-1	ไฟดับ	25.5
50	ให้ไฟ 10 sec. ติดไฟ 41.30 sec. มีการไหลย้อยน้อย สำลีติดไฟ	NC	26.79	21.1

\*เมื่อ V-0 = ไฟลาม  $\leq$  10 sec. ไม่มีการหยด, V-1 = ไฟลาม  $\leq$  30 sec. มีการหยดแต่ไม่ไหม้สำลี, V-2 = ไฟลาม  $\leq$  30 sec. มีการหยดและไหม้สำลี, NC = no classification

นอกจากนี้ รูปถ่ายขึ้นทดสอบ PBAT และวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PBAT กับเมลามีนที่ ปริมาณการผสมต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 พบว่า วัสดุ PBAT คอมโพสิตจะมีฝ้าสีดำเกิดขึ้น โดย ปริมาณฝ้าจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเมลามีนที่ผสมอยู่ในคอมโพสิต

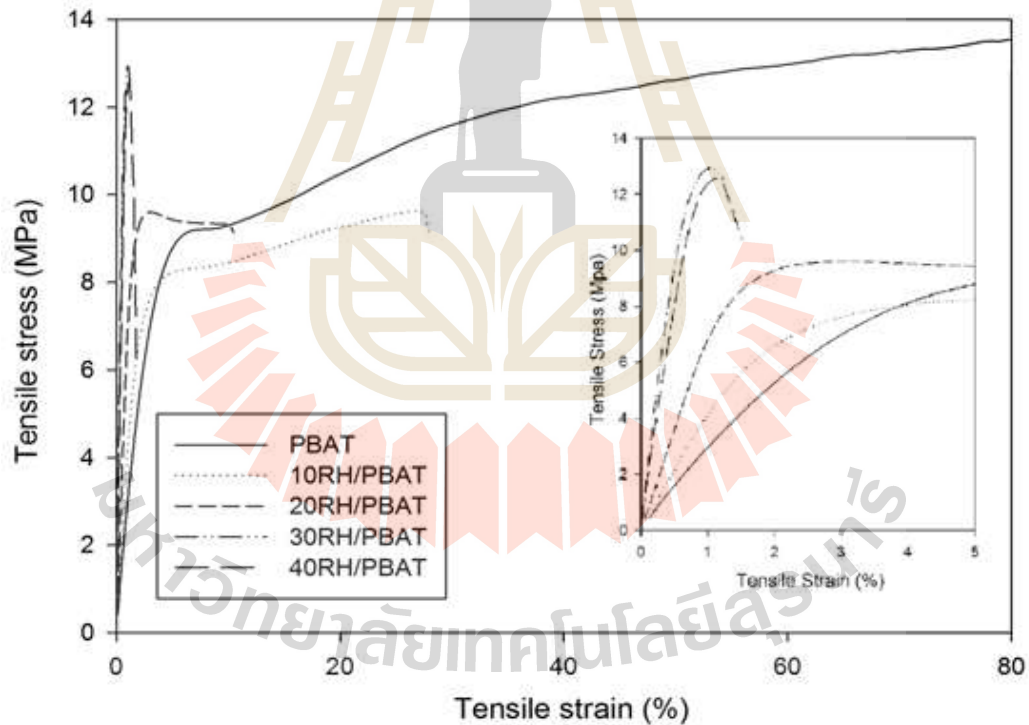


รูปที่ 3.9 Photographs of neat PBAT and PBAT composites specimens at various melamine contents from Vertical burning test

### 3.2 พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิบิวทิลีนอะดีเปทโคเทอเรบทาเลทและแกลบข้าว

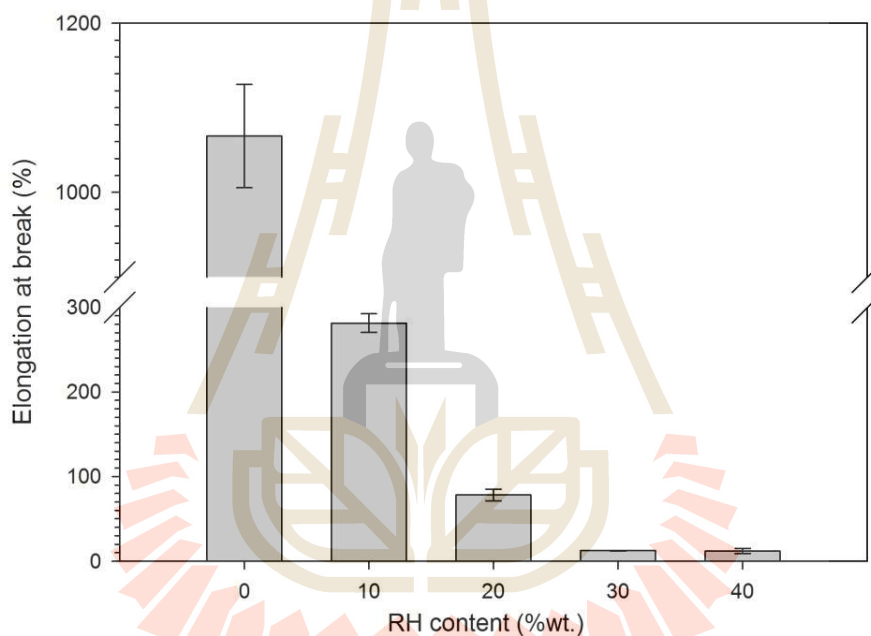
#### 3.2.1 สมบัติเชิงกลของ PBAT และวัสดุคอมโพสิทระหว่าง PBAT กับแกลบข้าว

ผลของปริมาณแกลบข้าวต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ PBAT คอมโพสิท แสดงในรูปที่ 3.10-3.14 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain ของ PBAT และวัสดุคอมโพสิทระหว่าง PBAT กับแกลบข้าว (RH) ที่ปริมาณแกลบข้าวต่าง ๆ กัน แสดงในรูปที่ 3.10 PBAT ที่ไม่มีการผสมแกลบข้าวลงไปนั้น จะให้ความสามารถในการดึงยึดที่ดีที่สุด ลักษณะของวัสดุหลังจากมีการเสีรูปถาวรแล้วนั้นวัสดุยังคงยึดต่อไปได้อีกบ่งบอกถึงความเหนียวของวัสดุ และเมื่อพิจารณาวัสดุคอมโพสิทที่มีแกลบข้าวในปริมาณต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าความสามารถในการดึงยึดนั้นจะลดลงตามการเพิ่มของปริมาณแกลบข้าว กล่าวคือ วัสดุคอมโพสิทที่มีความสามารถดึงยึดได้ดีรองลงมาคือวัสดุคอมโพสิทที่มีปริมาณแกลบข้าว 10%, 20%, 30% และ 40% wt. ตามลำดับ โดยวัสดุ PBAT คอมโพสิทที่มีปริมาณแกลบข้าว 40% wt. จะเกิดการแตกหักก่อนการยึดตัวและเสีรูปอย่างถาวร



รูปที่ 3.10 Stress-strain curves of neat PBAT and PBAT composites at various rice husk contents

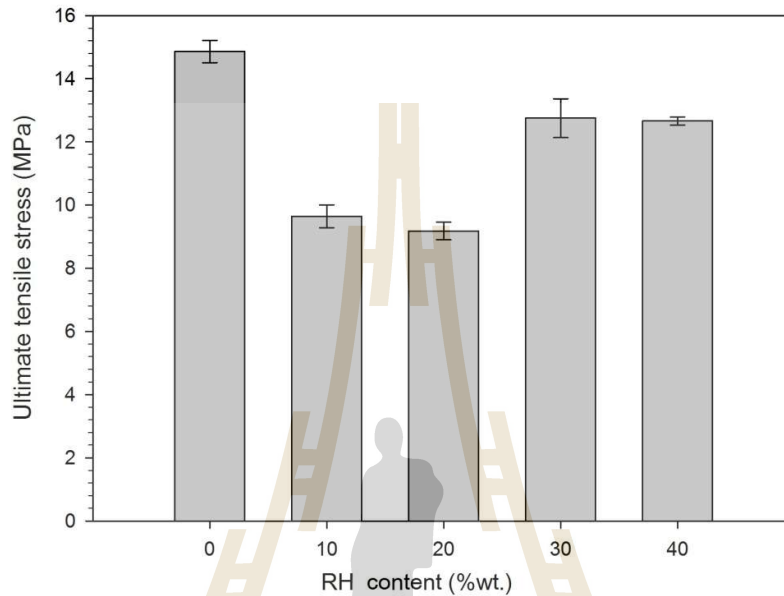
ค่าความสามารถในการยืด ณ จุดขาด (elongation at Break) ของ PBAT และวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PBAT กับแกลบข้าวที่ปริมาณแกลบข้าวต่าง ๆ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบชิ้นงานอย่างน้อย 5 ชิ้น แสดงในรูปที่ 3.2 PBAT มีความสามารถในการดึงยืดที่ดีที่สุด รองลงมาคือวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณแกลบข้าว 10%, 20%, 30% และ 40% wt. ตามลำดับ ซึ่งอาจเนื่องมาจากอนุภาคของแกลบข้าวที่เป็นเฟสกระจาย (dispersed phase) ที่เติมลงไปในวัสดุคอมโพสิตนั้น ทำให้การเชื่อมกันของ PBAT ที่เป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) ลดน้อยลง ทำให้ความสามารถในการส่งผ่านแรงระหว่างเฟสเป็นไปได้น้อยลง ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการการดึงยืดลดน้อยลง



รูปที่ 3.11 Elongation at break of neat PBAT and PBAT composites at various rice husk contents

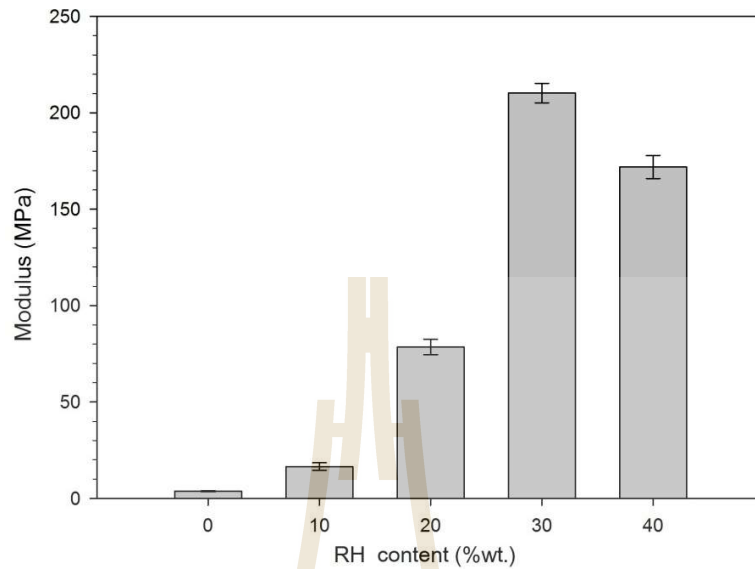
จากรูปที่ 3.11 แสดงค่าความแข็งแรงก่อนการแตกหัก (ultimate tensile strength) ของ PBAT และวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PBAT กับแกลบข้าวที่ปริมาณแกลบข้าวต่าง ๆ จะเห็นว่า PBAT ที่ไม่มีการเติมแกลบข้าวจะมีค่าความแข็งแรงก่อนการแตกหักสูงสุด รองลงมาคือวัสดุคอมโพสิตที่มี

ปริมาณแกลบข้าว 30% wt และ 40% wt ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน และที่ปริมาณแกลบข้าว 10% wt และ 20% wt มีค่าต่ำสุดและใกล้เคียงกัน



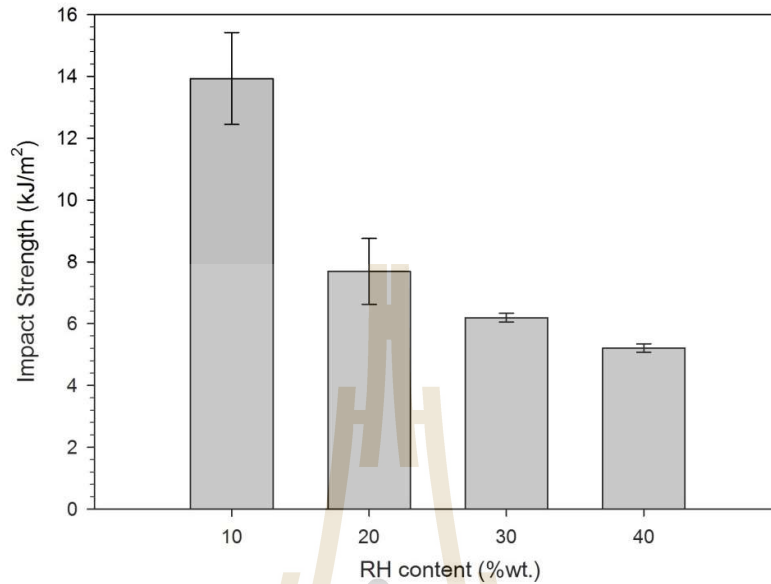
รูปที่ 3.12 Ultimate tensile strength of neat PBAT and PBAT composites at various rice husk contents

จากรูปที่ 3.13 แสดงค่า Young's modulus (Young's modulus) ของ PBAT และวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PBAT กับแกลบข้าวที่ปริมาณแกลบข้าวต่างๆ วัสดุคอมโพสิตระหว่าง PBAT กับแกลบข้าวที่ปริมาณแกลบข้าว 30% wt. มีค่า Young's modulus ที่สูงที่สุด รองลงมาคือที่ปริมาณแกลบข้าว 40%, 20%, 10% wt. และ PBAT ตามลำดับ เนื่องจากแกลบข้าวมีความแข็งแรงมากกว่า PBAT การเพิ่มปริมาณแกลบข้าวในคอมโพสิต จึงเป็นผลให้ค่า Young's modulus ของวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของแกลบข้าวที่เพิ่มขึ้น การลดลงของค่า Young's modulus ของวัสดุ PBAT คอมโพสิตเมื่อปริมาณแกลบข้าวเพิ่มเป็น 40% wt. อาจเนื่องมาจากแกลบข้าวที่มีปริมาณที่มากทำให้มีการกระจายตัวที่ไม่ดีในเนื้อเมทริกซ์



รูปที่ 3.13 Young's modulus of neat PBAT and PBAT composites at various rice husk contents

รูปที่ 3.14 แสดงค่าความสามารถในการต้านแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PBAT กับแกลบข้าวที่ปริมาณแกลบข้าวต่าง ๆ วัสดุ PBAT คอมโพสิตที่ปริมาณแกลบข้าว 10% wt. จะสามารถรับแรงได้มากที่สุด รองลงมาคือ 20%, 30%, และ 40% wt. ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณแกลบข้าวเพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุมีการต้านแรงกระแทกได้ลดลง เนื่องจากปริมาณแกลบข้าวที่มากขึ้นขัดขวางความต่อเนื่องของเฟส PBAT และลดความสามารถในการกระจายแรงและส่งผ่านแรงกระแทก จึงส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงดิ่งลดลงตามปริมาณสัดส่วนแกลบข้าวที่เพิ่มขึ้น



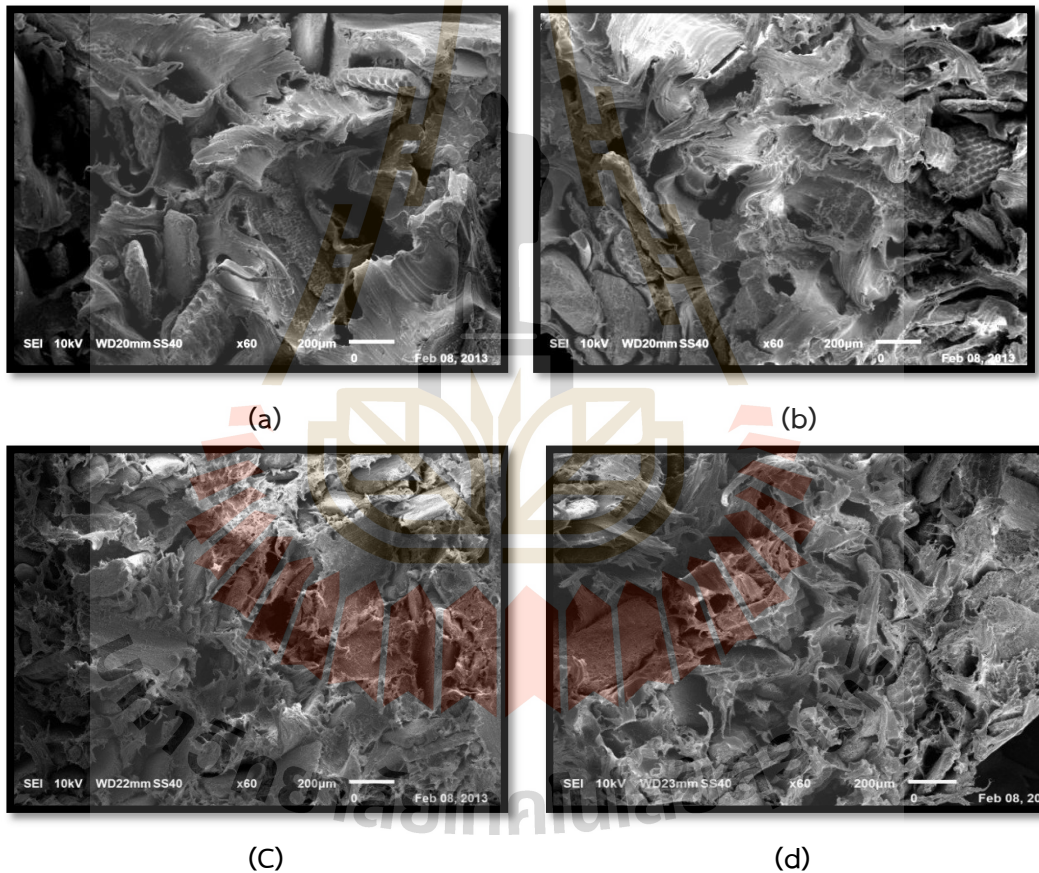
รูปที่ 3.14 Impact strength of neat PBAT and PBAT composites at various rice husk contents

ตารางที่ 3.3 Mechanical Properties of neat PBAT and PBAT composites at various rice husk contents

Mechanical Properties	rice husk contents (%wt.)				
	0	10	20	30	40
Elongation at Break (%)	1066.46	281.35	78.27	12.29	11.94
Modulus (MPa)	3.76	16.57	78.51	210.25	171.92
Tensile strength (MPa)	14.86	9.64	9.18	12.75	12.66
Impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )	ไม่แตกหัก	13.93	7.69	6.19	5.21

### 3.2.2 สันฐานวิทยาของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PBAT กับแกลบข้าว

รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะของพื้นผิวจากการแตกหักด้วยแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตที่ปริมาณแกลบข้าวต่าง ๆ โดยการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) จะสังเกตเห็นช่องว่างแยกแหว่งระหว่างแกลบข้าวและ PBAT และพื้นผิวของแกลบข้าวสะอาดโดยไม่ปรากฏเนื้อของ PBAT บนพื้นผิว และยังพบหลุมที่อาจเกิดจากการที่แกลบข้าวหลุดไปจากเนื้อเมทริกซ์ จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่า แกลบข้าวและ PBAT เมทริกซ์มีการยึดเกาะที่ไม่แข็งแรง สันฐานวิทยาจาก SEM สนับสนุนผลการทดลองสมบัติเชิงกลที่พบว่า PBAT คอมโพสิตที่มีปริมาณแกลบข้าวเพิ่มขึ้น จะมี ความแข็งแรง การดึงยืด ณ จุดขาด และความสามารถในการต้านแรงกระแทกที่ลดลง

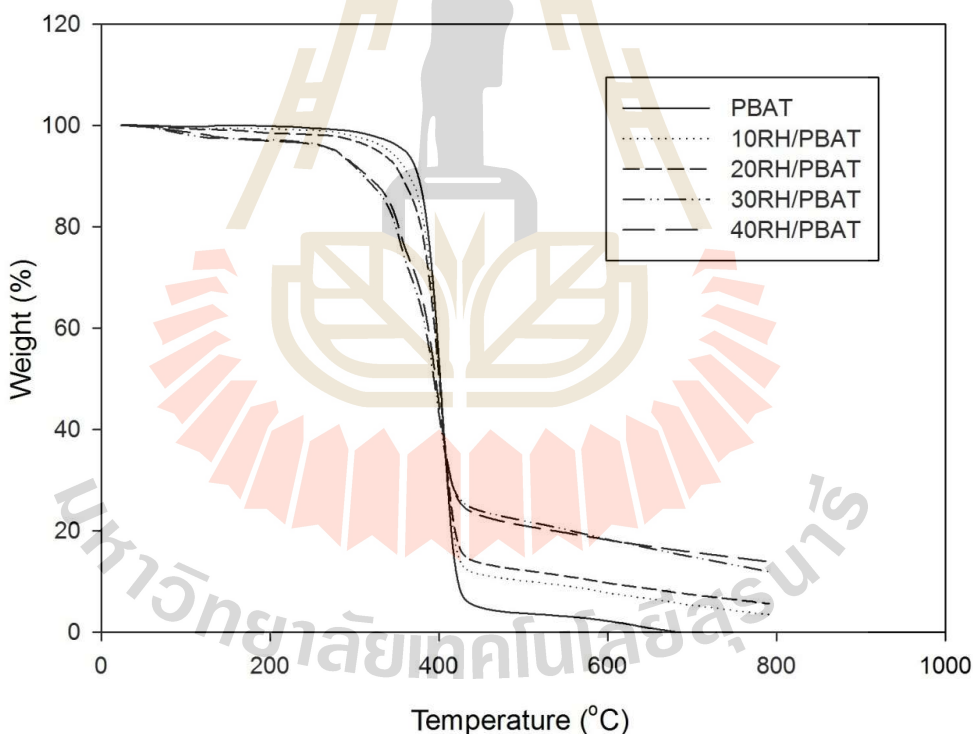


รูปที่ 3.15 SEM micrographs at x60 magnification of tensile fracture surfaces of PBAT composites at various rice husk contents : (a) 10 wt%, (b) 20 wt%, (c) 30 wt%, and (d) 40 wt%

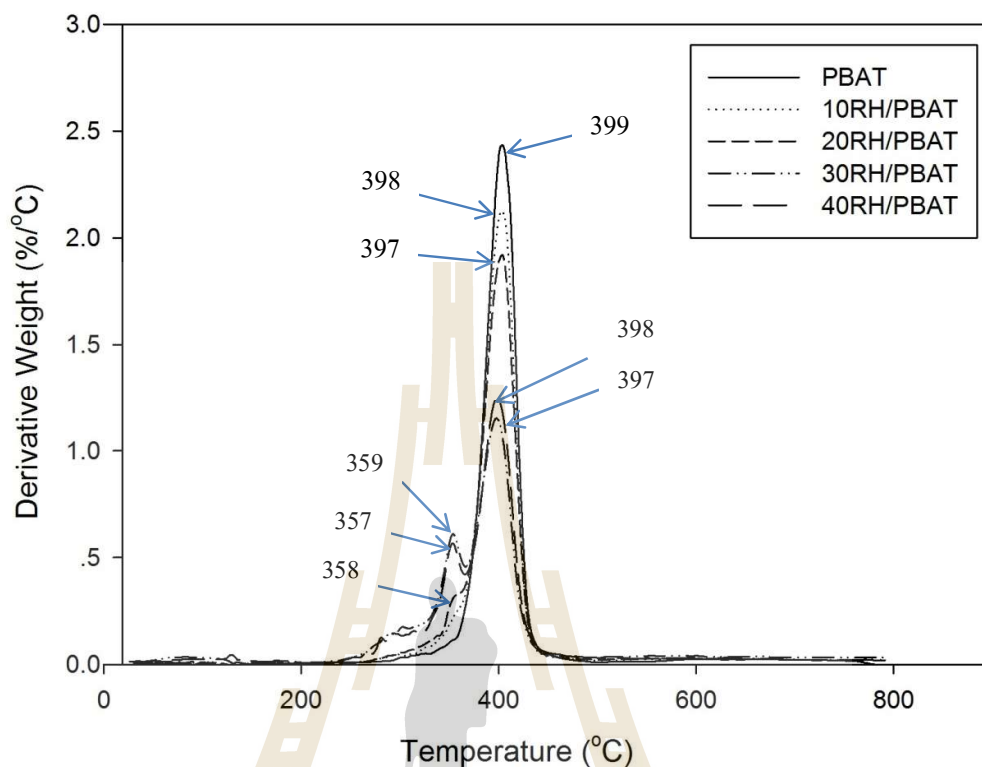


### 3.2.3 สมบัติทางความร้อนของ PBAT และ วัสดุคอมโพสิตระหว่าง PBAT กับแกลบข้าว

รูปที่ 3.7 และ 3.8 แสดง TGA และ DTGA (Derivative thermogravimetric thermogram) เทอร์โมแกรมของ PBAT และวัสดุ PBAT คอมโพสิตที่แกลบข้าวปริมาณต่าง ๆ จากกราฟในรูป พบว่า PBAT มีการสลายตัวเกิดขึ้นหนึ่งลำดับชั้น โดยเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 390°C และสิ้นสุดที่อุณหภูมิประมาณ 700°C โดยไม่มีเถ้าเหลืออยู่ ส่วนวัสดุ PBAT คอมโพสิตแสดงการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 100°C ซึ่งมาจากการระเหยของน้ำที่อยู่ในแกลบข้าว อุณหภูมิที่เริ่มสลายตัวจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของ PBAT มีการสลายตัวเกิดขึ้นสามลำดับชั้น โดยเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 250°C สิ้นสุดที่อุณหภูมิประมาณ 700°C ตามลำดับ ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวไปของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ที่เป็นองค์ประกอบในแกลบข้าว วัสดุ PBAT คอมโพสิตที่มีปริมาณแกลบข้าวต่างกัน จะมีเถ้าสีเทาเหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 800°C ในปริมาณโดยน้ำหนักที่ต่างกัน และเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแกลบข้าวที่ผสมอยู่ใน PBAT คอมโพสิต



รูปที่ 3.16 TGA thermograms of neat PBAT and PBAT composites at various rice husk contents



รูปที่ 3.17 DTGA thermograms of neat PBAT and PBAT composites at various rice husk contents

### 3.2.4 สมบัติการหน่วงไฟของ PBAT และ วัสดุคอมโพสิตระหว่าง PBAT กับแกลบข้าว

ตารางที่ 3.4 แสดงพฤติกรรมการหน่วงไฟของ PBAT และวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PBAT กับแกลบข้าวที่ปริมาณการผสมต่าง ๆ ที่ได้จากการตรวจสอบสมบัติการหน่วงไฟของวัสดุโดยใช้ Vertical burning test, Horizontal burning test และ Limiting oxygen index (LOI) ในการทดสอบแบบ Vertical burning test เมื่อให้เปลวไฟแก่ PBAT เป็นเวลา 10 วินาที ขึ้นทดสอบไม่เกิดการติดไฟแต่มีการไหลย้อยลงบนสำลีทำให้สำลีลุกติดไฟ จึงจำแนกประเภทการติดไฟเป็น V-2 และเมื่อนำ PBAT มาทดสอบแบบ Horizontal burning test พบว่าไม่เกิดการติดไฟ และมีค่า LOI เท่ากับ 29.5 ส่วนวัสดุ PBAT คอมโพสิตที่ผสมแกลบข้าวในปริมาณต่าง ๆ เมื่อผ่านการทดสอบแบบ Vertical burning test พบว่า วัสดุ PBAT คอมโพสิตที่สัดส่วนการผสมแกลบข้าว 10% และ 20% wt. หลังจากให้เปลวไฟเป็นเวลา 10 วินาที เกิดการลุกติดไฟ มีสารไหลย้อยลงบนสำลี ทำให้สำลีติดไฟ จำแนกประเภทการติดไฟเป็น V-2 อย่างไรก็ตาม ผลทดสอบแบบ Horizontal burning test พบว่าไม่มีการ

ติดไฟ ส่วนค่า LOI ของวัสดุ PBAT คอมโพลีไทท์ จะมีค่าลดลงจาก 29.5 เหลือ 24.5 เมื่อปริมาณแกลบข้าวเพิ่มขึ้นเป็น 20% wt. ซึ่งแสดงว่าวัสดุคอมโพลีไทท์ระหว่าง PBAT กับแกลบข้าว ยังคงต้องการปริมาณออกซิเจนน้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ในปริมาณที่สูงกว่าปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศปกติ เมื่อนำวัสดุ PBAT คอมโพลีไทท์ที่สัดส่วนการผสมแกลบข้าว 30% และ 40% wt. มาทดสอบการติดไฟแบบ Vertical burning test พบว่า หลังจากให้เปลวไฟเป็นเวลา 10 วินาที ชิ้นงานเกิดการลุกติดไฟเป็นเวลาประมาณ 24-29 วินาที และมีฝ้าที่ลุกติดไฟตกลงบนสำลี ทำให้สำลีติดไฟ จำแนกประเภทการติดไฟเป็น NC และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบแบบ Horizontal burning test ของสัดส่วนการผสมดังกล่าวพบว่าเกิดการติดไฟด้วยอัตราการเผาไหม้ 12-20 มิลลิเมตรต่อนาที และมีค่า LOI ประมาณ 22 - 20 ตามลำดับ แสดงว่า ปริมาณแกลบข้าวที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้วัสดุ PBAT คอมโพลีไทท์มีสมบัติการหน่วงไฟที่ลดลง และเกิดการเผาไหม้ได้ที่บรรยากาศปกติ

ตารางที่ 3.4 Flame retardant behaviors of neat PBAT and PBAT composites at various rice husk contents

Rice husk contents (%wt.)	Vertical burning: observation	Vertical burning rating*	Horizontal burning rate (mm/min)	LOI
0	ไม่ติดไฟ มีการไหลย้อยมาก สำลิตติดไฟ	V-2	ไฟดับ	29.5
10	ติดไฟ 4.33 sec มีการไหลย้อยมาก สำลิตติดไฟ	V-2	ไฟดับ	26.5
20	ติดไฟ 9.24 sec มีการไหลย้อยมาก สำลิตติดไฟ	V-2	ไฟดับ	24.5
30	ติดไฟ 23.51 sec. มีการไหลย้อยมาก สำลิตติดไฟ	NC	12.03	22.0
40	ติดไฟ 28.63 sec. มีการไหลย้อยมาก สำลิตติดไฟ	NC	19.66	20.1

\*เมื่อ V-0 = ไฟลาม  $\leq$  10 sec. ไม่มีการหยุด, V-1 = ไฟลาม  $\leq$  30 sec. มีการหยุดแต่ไม่ไหม้ สำลิต, V-2 = ไฟลาม  $\leq$  30 sec. มีการหยุดและไหม้สำลิต, NC = no classification

## บทที่ 4

### สรุปผลการทดลอง

การเพิ่มปริมาณสารตัวเติม (เมลามีนหรือแคลเซียม) ในพอลิบิวทิลีนอะดีเปทโคเทอเรบทาเลทเมทริกซ์ ช่วยเพิ่มค่า Young's modulus ของพอลิบิวทิลีนอะดีเปทโคเทอเรบทาเลทคอมโพสิต อย่างไรก็ตามความสามารถในการยึด ฉุดขาด ความแข็งแรงก่อนการแตกหัก และความสามารถในการรับแรงกระแทกมีค่าลดลง นอกจากนี้ สันฐานวิทยาจาก SEM แสดงให้เห็นถึงการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างพอลิบิวทิลีนอะดีเปทโคเทอเรบทาเลทเมทริกซ์และสารตัวเติมทั้งสองชนิด

การเพิ่มปริมาณเมลามีนหรือแคลเซียมในพอลิบิวทิลีนอะดีเปทโคเทอเรบทาเลทเมทริกซ์ ทำให้คุณสมบัติการสลายตัวของวัสดุคอมโพสิตมีค่าลดลง แต่จะช่วยเพิ่มปริมาณเถ้าที่เหลือที่อุณหภูมิ 800°C

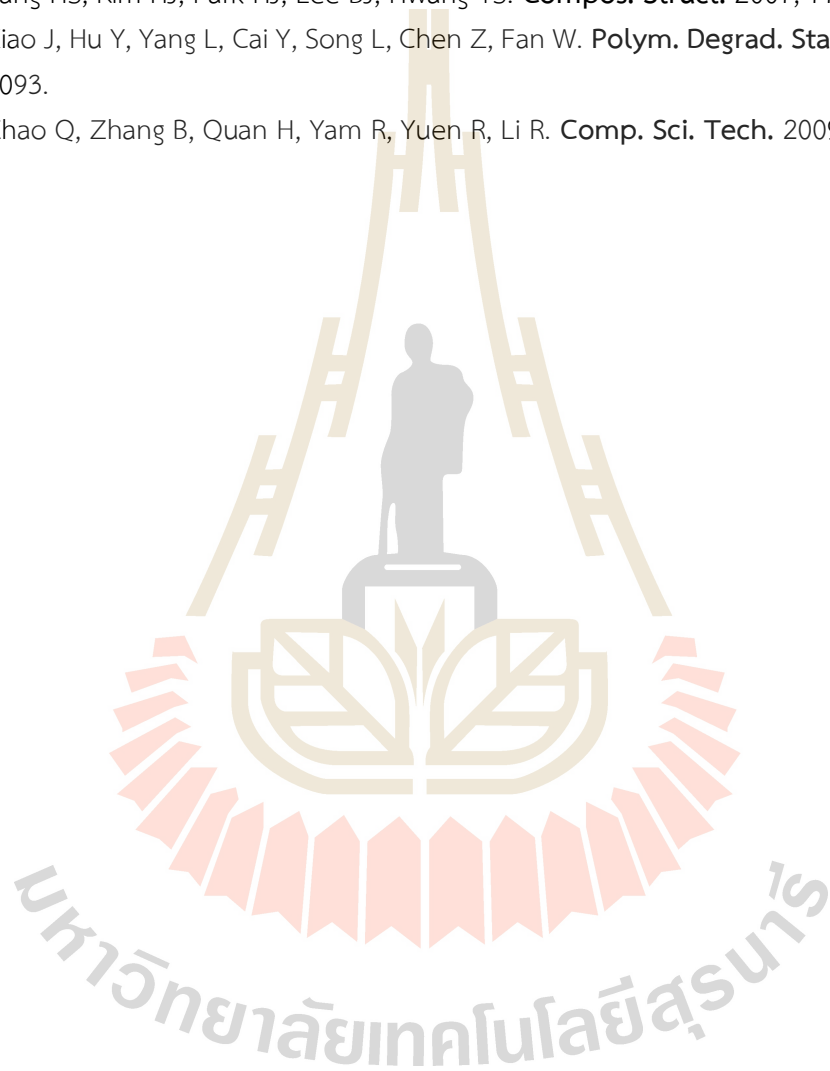
วัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิบิวทิลีนอะดีเปทโคเทอเรบทาเลทกับเมลามีนที่ปริมาณเมลามีน 10%-40% โดยน้ำหนัก มีค่าออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สูงกว่าค่าออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศปกติ และมีการหน่วงไฟระดับ V-1

วัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิบิวทิลีนอะดีเปทโคเทอเรบทาเลทกับแคลเซียม มีพฤติกรรมการหน่วงไฟลดลงเมื่อปริมาณแคลเซียมเพิ่มขึ้น โดยวัสดุพอลิบิวทิลีนอะดีเปทโคเทอเรบทาเลทคอมโพสิตที่มีปริมาณแคลเซียม 10% - 20% โดยน้ำหนัก มีค่าออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สูงกว่าค่าออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศปกติ และมีการหน่วงไฟระดับ V-2

### บรรณานุกรม

- Braun U, Schartel B, Fichera MA, Jager C. **Polym. Degrad. Stab.** 2007; 92: 1528.
- Balabanovich AI, Engelmann J. **Polym. Degrad. Stab.** 2003; 79: 85.
- Camino G, Delobel R. Intumescence. In Grand AF, Wilkie CA, (ed). **Fire Retardancy of Polymeric Materials.** New York: Marcel Dekker; 2000. 217.
- Casu A, Camino G, Giorgi MD, Flath D, Morone V, Zenoni R. **Polym. Degrad. Stab.** 1997; 58: 297.
- Chandrasekhar S, Satyanarayana KG, Pramada PN, Raghavan P, Gupta TN, **J. Mater. Sci.** 2003; 38: 159.
- Chen Y, Wang Q, Yan W, Tang H. **Polym. Degrad. Stab.** 2006; 91: 2632.
- Chen WY, Wang YZ, Chang FC. **J. Polymer. Res.** 2004; 11: 109.
- Gaan S, Sun G, Hutches K, Engelhard MH. **Polym. Degrad. Stab.** 2008; 93: 99.
- Gijsman P, Steenbakkers R, Furst C, Kersjes J. **Polym. Degrad. Stab.** 2002; 78: 219.
- Govindarao, VMH. **J. Sci. Ind. Res.** 1980; 39: 495.
- Horacek, H. and Grabner, R. **Polym. Degrad. Stab.** 1996; 54: 205.
- Kim HS, Kim S, Kim HJ. **Macromol. Mater. Eng.** 2006; 291: 762.
- Kim HS, Yang HS, Kim HJ, Park HJ. **J. Therm. Anal. Cal.** 2004; 76: 395.
- Liu M, Liu Y, Wang Q. **Macromol. Mater. Eng.** 2007; 292: 206.
- Lv P, Wang Z, Hu K, Fan W. **Polym. Degrad. Stab.** 2005; 90: 523.
- Makki MSI, Sabahi TR, Abdelaal MY. **Int. J. Polym. Mater.** 2009; 58: 647.
- Modesti M, Lorenzetti A. **Polym. Degrad. Stab.** 2002; 78: 341.
- Modesti M, Lorenzetti A, Siminoi F, Chechin M. **Polym. Degrad. Stab.** 2001; 74: 475.
- Nyambo C, Kandare E, Wilkie CA. **Polym. Degrad. Stab.** 2009; 94: 513.
- Park BD, Wi SG, Lee KH, Singh AP, Yoond TH, Kim YS. **Biomass and Bioenergy.** 2004; 27: 353.
- Rozman HD, Musa L, Abubkar A. **J. Appl. Polym. Sci.** 2005; 97:1237.
- Sen AK, Mukherjee B, Bhattacharya AS, Sanghi LK, De PP, Bhowmick AK. **J. Appl. Polym. Sci.** 1991; 43: 1673.
- Song L, Hu Y, Tang Y, Zhang R, Chen Z, Fan W. **Polym. Degrad. Stab.** 2005; 87: 111.

- Troitzsch J. **International Plastics Flammability Handbook**. 2nd ed. New York: Hanser Publishers; 1990.
- Wang J, Tung JF, Fuad MYA, Hornsby PR. **J. Appl. Polym. Sci.** 1996; 60: 1425.
- Wang ZZ, Qu BJ, Fan WC, Huang P. **J. Appl. Polym. Sci.** 2001; 81: 206.
- Weil ED, Choudhary V. **J. Fire Sci.** 1995; 13: 104.
- Yang HS, Kim HJ, Park HJ, Lee BJ, Hwang TS. **Compos. Struct.** 2007; 77: 45.
- Xiao J, Hu Y, Yang L, Cai Y, Song L, Chen Z, Fan W. **Polym. Degrad. Stab.** 2006; 91: 2093.
- Zhao Q, Zhang B, Quan H, Yam R, Yuen R, Li R. **Comp. Sci. Tech.** 2009; 69: 2675.



## ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงผลการวิจัย

จากผลการวิจัย เรื่อง “สมบัติการหน่วงไฟของคอมโพสิตชีวภาพจากพอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลท” แม้ว่าผลการทดลองบางส่วน จะพบว่า การเติมสารตัวเติม ได้แก่ เมลามีน หรือ แกลบข้าว ในพอลิพอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลท จะส่งผลให้สมบัติทางกายภาพบางประการของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีแนวโน้มที่ดีขึ้น แต่ยังมีสมบัติหลายประการที่มีแนวโน้มไปด้านลบ ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงสำหรับงานวิจัยในลำดับต่อไป ดังนี้

การศึกษาเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงการยึดติดระหว่างพื้นผิวหน้าของพอลิเมอร์เมทริกซ์ และสารตัวเติม เช่น การปรับปรุงผิวหน้าของสารตัวเติมด้วยสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ การเติมสาร compatibilizer

การศึกษาสมบัติการหน่วงไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยศึกษาผลการเสริมกัน (synergistic effect) จากการใช้สารตัวเติมลูกผสมระหว่างเมลามีนและแกลบข้าว รวมถึงการหาสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการใช้สารตัวเติมสองชนิด



## ประวัติคณะผู้วิจัย

**นางสาวนิธินาถ ศุภกาญจน์** ดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา สำเร็จการศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2536 วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2538 และ Doctor of Philosophy (Macromolecular Science and Engineering) Case Western Reserve University มลรัฐโอไฮโอ ประเทศสหรัฐอเมริกา พ.ศ. 2543 สาขาวิชาที่มีความสนใจ Polymer Characterization และ Polymer Composites มีผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารระดับนานาชาติ รวมทั้งผลงานทางวิชาการ ประกอบด้วย บทความทางวิชาการ 55 บทความ และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

**นายสมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์** ดำรงตำแหน่ง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต อดิโนมัติ และหุ่นยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เครื่องกล) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2538 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (Environmental and Environment) Nagaoka University of Technology ประเทศญี่ปุ่น พ.ศ. 2544 และ วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (Energy and Environment) University Nagaoka University of Technology ประเทศญี่ปุ่น พ.ศ. 2547 สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ Material Characteristics Reliability of Product, Processes and Parts Jig & Fixture Design for Manufacturing / Maintenance มีผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารระดับนานาชาติ ผลงานทางวิชาการ ประกอบด้วย บทความทางวิชาการ 50 บทความ และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี