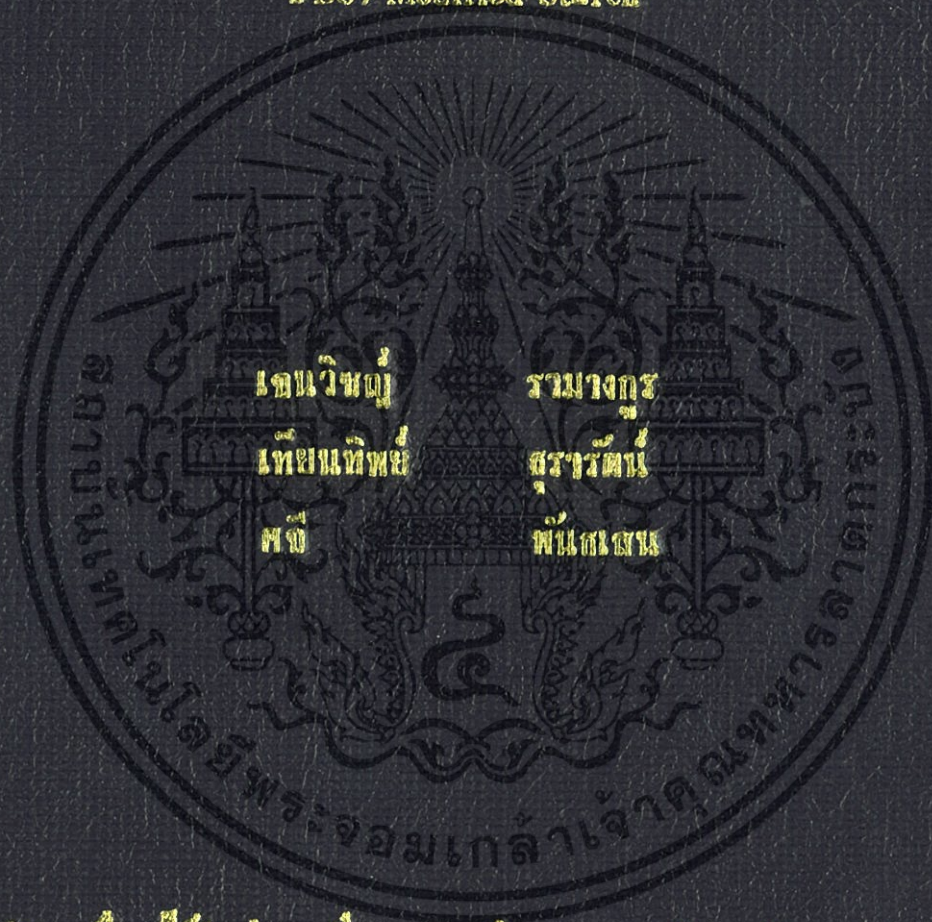


การศึกษาผลของสารตัวเติมอินทรีย์ในพลาสติกย่อยสลายได้  
จากพอลิเมอร์พีนะซีซี (PBS) ผสมแป้งคัดแปร

Study of Inorganic Fillers in Biodegradable Plastics  
PBS / Modified Starch



โครงการพิเศษเรื่องนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาเคมีอุตสาหกรรม

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

การศึกษาผลของสารตัวเติมอินทรีย์ในพลาสติกย่อยสลายได้  
จากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ผสมแป้งดัดแปร

Study of Inorganic Fillers in Biodegradable Plastics

PBS / Modified Starch



เจนวิชญ์  
เทียนทิพย์  
ศจี

รามางกูร  
ธูรรัตน์  
พันธเสน

โครงการพิเศษเรื่องนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาเคมีอุตสาหกรรม

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Study of Inorganic Fillers in Biodegradable Plastics

## PBS / Modified Starch



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE  
REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADAMIC YEAR 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ** การศึกษาผลของสารตัวเติมอินทรีย์ในพลาสติกย่อยสลายได้  
จากพอลิวิทิลีนซัคซิเนต (PBS) ผสมแป้งดัดแปร  
Study of Inorganic Fillers in Biodegradable Plastics  
PBS / Modified Starch




**ชื่อนักศึกษา** นายเจนวิษณุ รามางกูร  
นางสาวเทียนทิพย์ ชูรัตน์  
นางสาวศจี พันธเสน

**ปริญญา** วิทยาศาสตรบัณฑิต

**สาขาวิชา** เคมีอุตสาหกรรม

**อาจารย์ที่ปรึกษา** รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจักษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี  
อุตสาหกรรมประจำปีการศึกษา 2555

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ภัทรวิฑูร มนต์วิเศษ	
ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจักษ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่องานวิจัย	การศึกษาผลของสารตัวเติมอนินทรีย์ในพลาสติกย่อยสลายได้จากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ผสมแป้งคัดแปร		
ชื่อนักศึกษา	นายเจนวิชัย	รามางกูร	รหัสนักศึกษา 52050137
	นางสาวเทียนทิพย์	ธูรรัตน์	รหัสนักศึกษา 52050165
	นางสาวศจี	พันธเสน	รหัสนักศึกษา 52050237
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2555		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจักษ์		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของชนิดของสารตัวเติม (Fillers) ที่มีต่อสมบัติของพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ (Biodegradable bioplastics) ที่เตรียมจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(Butylene Succinate), PBS) ผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดไม่ชอบน้ำคัดแปรปานกลาง (Medium-modified Hydrophobic tapioca starch, HBS) โดยควบคุมอัตราส่วนของ PBS ต่อแป้งคัดแปรคงที่ 60:40 โดยน้ำหนัก และใช้กลีเซอรอลในปริมาณ 30% โดยน้ำหนักแป้ง สารตัวเติมทั้ง 4 ชนิดที่ทำการศึกษา ได้แก่ สารตัวเติม Calcined Neuburg Siliceous Earth (Aktifit® AM), แคลเซียมคาร์บอเนต (เกรดเคลือบ), สารตัวเติม Calcined Kaolin Clay (KaMin™ 70C) ปริมาณ 10-40 php และสารตัวเติม Nano-precipitated calcium carbonate (เกรด NPCC-101) ปริมาณ 5-20 php ทำการทดลองโดยผสมสูตรด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างด้วยการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) จากนั้นทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการไหล (Melt Flow Index, MFI) และศึกษาพื้นฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM สมบัติทางกายภาพโดยวัดเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%Water Absorbtion) รวมถึงการย่อยสลาย (Degradability) ด้วยวิธีการฝังกลบ (Burial test) จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมอนินทรีย์ทุกชนิด ทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น ได้แก่ มอดูลัสของยัง และความแข็งกด ส่วนความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ฉุดขาด และความแข็งแรงกระแทกลดลง การเติมสารตัวเติมทุกชนิดส่งผลต่อค่า  $T_m$  เพียงเล็กน้อย ค่าดัชนีการไหลมีค่าลดลง จากการศึกษาพื้นฐานวิทยาพบว่า สารตัวเติมทุกชนิดมีการกระจายตัวดี และมีการยึดเกาะระหว่าง PBS กับแป้งได้ดี การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชิ้นงานไม่เกิดการย่อยสลายที่เร็วเกินไป อาจกล่าวได้ว่าสารตัวเติมอนินทรีย์ทั้งสี่ชนิดที่ศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถใช้ลดต้นทุนได้ โดย  $CaCO_3$  สามารถลดต้นทุนในการทำพอลิเมอร์ผสมได้ถึงร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น โดยไม่สูญเสียสมบัติใดมากเกินไป

**คำสำคัญ :** พลาสติกย่อยสลาย พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) แป้งคัดแปร สารตัวเติม

<b>Special Project Title</b>	Study of Inorganic Fillers in Biodegradable Plastics PBS / Modified Starch		
<b>Student's name</b>	Mr. Jenwit	Ramangkool	ID 52050137
	Miss Thientip	Thuraratna	ID 52050165
	Miss Sajee	Phanthasen	ID 52050237
<b>Degree</b>	Bachelor of Science		
<b>Program</b>	Industrial Chemistry		
<b>Academic Yea</b>	2012		
<b>Special Project Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Ittipol Jangchud		

### ABSTRACT

This project aims to study effects of inorganic fillers on properties of PBS/HBS (Medium-modified hydrophobic tapioca starch) biodegradable plastics. Blend ratio of PBS/modified starch was fixed at 60:40 (weight ratio) with 40% (by weight of starch) of glycerol plasticizer. Four types of inorganic fillers were investigated in this work, i.e., calcined Neuburg siliceous earth (Aktifit<sup>®</sup> AM), calcium carbonate (coated), calcined Kaolin clay (KaMin<sup>™</sup> 70C) and nano-precipitated calcium carbonate (NPCC-101). Blend samples were prepared by using a twin-screw extruder and shaped by injection molding technique. Properties of the blends were characterized, i.e., mechanical properties, thermal properties, Melt Flow Index (MFI) and morphology using scanning electron microscope (SEM). Percentage of water absorption and degradability by burial test were also tested. By adding the fillers up to 40%, it was found that Young's modulus and hardness were increased, however, some properties were deteriorated, i.e., tensile strength, %elongation at break and impact strength. Melting temperature ( $T_m$ ) of PBS was slightly affected by all fillers. It was found that MFI decreased as the filler loading was increased. From SEM micrographs, good filler distribution and good filler-polymer interfacial bonding were found in all fillers. Percentage of water absorption increased. From burial test, it was revealed that degradability of the filled PBS/modified starch was slightly different. It seems like all 4 inorganic fillers in this work can be used to lower the cost, CaCO<sub>3</sub> reduces the cost of compounding polymer blends up to 50% compared to other fillers without any sacrifice properties.

**Keyword :** Biodegradable Plastic Poly(butylene succinate) (PBS) Modified Strach Fillers

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือตลอดทั้งคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆดังนี้

ขอขอบคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจัต ที่ปรึกษาโครงการงานพิเศษที่กรุณาให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือต่างๆ ตลอดจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วง คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ภัทรารุช มนต์วิเศษ และ ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ คณะกรรมการสอบโครงการงานพิเศษ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆ ตลอดจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประคิษฐ์ และ คุณสุศุใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ ที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกต่างๆในการใช้เครื่องมือ ตลอดจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้อำนวยความสะดวกต่างๆ ด้านการวิเคราะห์ SEM

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือหน่วยวิจัยและบริการเครื่องมือกลาง วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล ที่ให้อำนวยความสะดวกต่างๆ ด้านการวิเคราะห์ SEM

นอกจากนี้ยังมีบุคคลท่านอื่นอีกมากมายที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ที่คอยช่วยเหลือตลอดทั้งคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยนี้มาโดยตลอด คณะผู้จัดทำขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

เจนวิษญ์	รามางกูร
เทียนทิพย์	ธูรัตน์
ศจี	พันธเสน

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการงานพิเศษภาษาไทย	I
บทคัดย่อโครงการงานพิเศษภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูปภาพ	IX
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	XIII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	6
1.3 ขอบเขตการวิจัย	6
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	7
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ</b>	8
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้	8
2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้	8
2.2 พลาสติกย่อยสลายได้ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ	10
2.3 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(Butylene Succinate), PBS)	11
2.3.1 สมบัติของ PBS	11
2.3.2 การย่อยสลาย PBS	11
2.4 แป้ง	13
2.4.1 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง	13
2.4.1.1 อะไมโลส (Amylose)	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1.2 อะไมโลเพคติน (Amylopectin)	14
2.4.2 แป้งดัดแปร (Modified Starch)	14
2.4.2.1 แป้งไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic Starch, HBS)	14
2.4.3 การนำแป้งไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ	15
2.5 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer)	15
2.6 สารตัวเติม (Fillers)	17
2.6.1 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate)	17
2.6.2 ดินขาว (Kaolin)	19
2.6.3 Calcined Neuburg Siliceous Earth (Aktifit <sup>®</sup> AM)	20
2.6.4 นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (Nano-calcium carbonate; NPCC)	22
2.7 เครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน	22
2.7.1 การผสม (Mixing)	22
2.7.2 การคอมปาวด์ (Compounding)	23
2.7.3 การฉีดขึ้นรูป (Injection molding)	24
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	29
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	29
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	32
3.3 วิธีการทดลอง	33
3.3.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม	33
3.3.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน	34
3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติต่างๆของสารตัวอย่าง	34
3.3.3.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล	34
3.3.3.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน	35
3.3.3.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา	35
3.3.3.4 การทดสอบการดูดซึมน้ำ	36

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.3.5 การวิเคราะห์การย่อยสลายของชิ้นงานโดยการฝังกลบ	36
3.3.3.6 การทดสอบค่าดัชนีการไหล	36
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	<b>37</b>
<b>ตอนที่ 1 สมบัติเชิงกล</b>	<b>38</b>
1.1 ผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อค่า มอดูลัสของยัง (Young's modulus) และค่าความแข็ง (Hardness)	38
1.2 ผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)	44
1.3 ผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีปริมาณเท่ากับต่อสมบัติเชิงกล	53
<b>ตอนที่ 2 สมบัติทางความร้อน</b>	<b>57</b>
2.1 สมบัติทางความร้อน	57
<b>ตอนที่ 3 สมบัติการไหล</b>	<b>59</b>
3.1 ผลของชนิดและปริมาณของสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหล	59
<b>ตอนที่ 4 สัณฐานวิทยา</b>	<b>62</b>
4.1 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)	62
<b>ตอนที่ 5 สมบัติทางกายภาพ</b>	<b>72</b>
5.1 ผลของชนิดและปริมาณของสารตัวเติมที่มีต่อการดูดซึมน้ำ	72
<b>ตอนที่ 6 การย่อยสลาย (Degradability)</b>	<b>75</b>
6.1 การศึกษาสมบัติการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสม	75
6.2 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลหลังจากฝังกลบ	82
6.3 ต้นทุนการผลิต	87
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>88</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	88
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	89

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	90
ภาคผนวก	93
ภาคผนวก ก1 สภาวะที่ใช้ในการผสม Twin-Screw Extruder	93
ภาคผนวก ก2 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป Injection Moulding	93
ภาคผนวก ก3 ความดันของหน่วย Injection ที่ปรับจนได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์	94
ภาคผนวก ข1 วิธีการคำนวณค่าองศาความเป็นผลึก (%Crystallinity, $X_c$ ) Differential Scanning Calorimetry (DSC)	95
ภาคผนวก ค1 วิธีการคำนวณต้นทุน	98



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 เนื้อที่เพาะปลูก และผลผลิตมันสำปะหลังของประเทศผู้ผลิตสำคัญ (พ.ศ. 2552)	5
ตารางที่ 2.1 สมบัติของ PBS ที่ผลิตทางการค้า	12
ตารางที่ 2.2 สมบัติพื้นฐานของ Calcine Kaolin Clay เกรด Kamin™ 70C	20
ตารางที่ 2.3 สมบัติของ Silfit® และ Aktifit® AM	21
ตารางที่ 2.4 สมบัติพื้นฐานของ NPCC-101	22
ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ PBS	29
ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของแป้งไฮโดรโฟบิกชนิดไม่ชอบน้ำตัดแปรปานกลาง ที่ใช้ในการทดลอง	29
ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของกลีเซอรอล	30
ตารางที่ 3.4 สมบัติบางประการของ Calcined Neuburg Siliceous Earth ที่ใช้ในการทดลอง	30
ตารางที่ 3.5 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการทดลอง	30
ตารางที่ 3.6 สมบัติบางประการของ Calcined Kaolin Clay ที่ใช้ในการทดลอง	31
ตารางที่ 3.7 สมบัติบางประการของ Nano-precipitated calcium carbonate ที่ใช้ในการทดลอง	31
ตารางที่ 3.8 ตารางเปรียบเทียบสมบัติบางประการของสารตัวเติมที่ใช้ในการทดลอง	32
ตารางที่ 3.9 สูตรผสมที่ใช้ในการทดลอง	33
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC	57
ตารางที่ 4.2 แสดงราคาของการคอมปาวด์สารในแต่ละสารตัวเติมต่อการคอมปาวด์สาร หนึ่งกิโลกรัม	87

## สารบัญรูปร่างภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	2
รูปที่ 1.2 แนวโน้มการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพของโลก	3
รูปที่ 1.3 โครงสร้างทางเคมีของ PBS และตัวอย่างการใช้งาน	4
รูปที่ 1.4 ห่วงโซ่การผลิตของอุตสาหกรรมมันสำปะหลัง	5
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ PBS	11
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลส	13
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน	14
รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิตแป้งไฮโดรโฟบิก	15
รูปที่ 2.5 ปฏิกริยาสะปอนนิฟิเคชัน	16
รูปที่ 2.6 ปฏิกริยาในการเตรียมแคลเซียมคาร์บอเนต	18
รูปที่ 2.7 ลักษณะทั่วไปของ Calcined Neuburg Siliceous Earth (Aktifit® AM)	20
รูปที่ 2.8 ลักษณะความเป็นมาของ Calcined Neuburg Siliceous Earth (Aktifit® AM)	21
รูปที่ 2.9 เครื่องผสมแบบต่างๆ	22
รูปที่ 2.10 เครื่องผสมแบบ Co-Kneader	23
รูปที่ 2.11 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder)	24
รูปที่ 3.1 ชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูป	34
รูปที่ 4.1 ค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด AKFT	39
รูปที่ 4.2 ค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CaCO <sub>3</sub>	39
รูปที่ 4.3 ค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CLAY	40
รูปที่ 4.4 ค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด NPCC	40
รูปที่ 4.5 ค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด AKFT	42
รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CaCO <sub>3</sub>	42
รูปที่ 4.7 ค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CLAY	43
รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด NPCC	43
รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด AKFT	45
รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CaCO <sub>3</sub>	45
รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CLAY	46
รูปที่ 4.12 ค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด NPCC	46

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด AKFT	48
รูปที่ 4.14 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CaCO <sub>3</sub>	48
รูปที่ 4.15 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CLAY	49
รูปที่ 4.16 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด NPCC	49
รูปที่ 4.17 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด AKFT	51
รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CaCO <sub>3</sub>	51
รูปที่ 4.19 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CLAY	52
รูปที่ 4.20 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด NPCC	52
รูปที่ 4.21 ค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเท่ากัน	54
รูปที่ 4.22 ค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเท่ากัน	54
รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเท่ากัน	55
รูปที่ 4.24 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเท่ากัน	55
รูปที่ 4.25 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเท่ากัน	56
รูปที่ 4.26 ค่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเท่ากัน	56
รูปที่ 4.27 ค่าองค์ความเป็นผลึกของ PBS/HBS/สารตัวเติมชนิดต่างๆ	58
รูปที่ 4.28 ค่าดัชนีการไหลของสูตรที่ใช้ AKFT เป็นสารตัวเติม	59
รูปที่ 4.29 ค่าดัชนีการไหลของสูตรที่ใช้ CaCO <sub>3</sub> เป็นสารตัวเติม	60
รูปที่ 4.30 ค่าดัชนีการไหลของสูตรที่ใช้ CLAY เป็นสารตัวเติม	60
รูปที่ 4.31 ค่าดัชนีการไหลของสูตรที่ใช้ NPCC เป็นสารตัวเติม	61
รูปที่ 4.32 SEM กำลังขยาย 18000 เท่า แสดงสัญญาณวิทาของสารตัวเติม	63
รูปที่ 4.33 SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงสัญญาณวิทาระหว่าง PBS/HBS/AKFT30 php	64
รูปที่ 4.34 SEM กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงสัญญาณวิทาระหว่าง PBS/HBS/AKFT30 php	64
รูปที่ 4.35 SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงสัญญาณวิทาระหว่าง PBS/HBS/AKFT40 php	65
รูปที่ 4.36 SEM กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงสัญญาณวิทาระหว่าง PBS/HBS/AKFT40 php	65
รูปที่ 4.37 SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงสัญญาณวิทาระหว่าง PBS/HBS/CaCO <sub>3</sub> 30 php	66

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.38 SEM กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาระหว่าง PBS/HBS/CaCO <sub>3</sub> 30 php	66
รูปที่ 4.39 SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาระหว่าง PBS/HBS/CaCO <sub>3</sub> 40 php	67
รูปที่ 4.40 SEM กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาระหว่าง PBS/HBS/CaCO <sub>3</sub> 40 php	67
รูปที่ 4.41 SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาระหว่าง PBS/HBS/CLAY 30 php	68
รูปที่ 4.42 SEM กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาระหว่าง PBS/HBS/CLAY 30 php	68
รูปที่ 4.43 SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาระหว่าง PBS/HBS/CLAY 40 php	69
รูปที่ 4.44 SEM กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาระหว่าง PBS/HBS/CLAY 40 php	69
รูปที่ 4.45 SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาระหว่าง PBS/HBS/NPCC 10 php	70
รูปที่ 4.46 SEM กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาระหว่าง PBS/HBS/NPCC 10 php	70
รูปที่ 4.47 SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาระหว่าง PBS/HBS/NPCC 15 php	71
รูปที่ 4.48 SEM กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาระหว่าง PBS/HBS/NPCC 15 php	71
รูปที่ 4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของสูตรที่ใช้ AKFT เป็นสารตัวเติม	72
รูปที่ 4.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของสูตรที่ใช้ CaCO <sub>3</sub> เป็นสารตัวเติม	73
รูปที่ 4.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของสูตรที่ใช้ CLAY เป็นสารตัวเติม	73
รูปที่ 4.52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของสูตรที่ใช้ NPCC เป็นสารตัวเติม	74
รูปที่ 4.53 แสดงการย่อยสลายชิ้นงานที่ได้จากการฝังกลบของ PBS	76
รูปที่ 4.54 แสดงการย่อยสลายชิ้นงานที่ได้จากการฝังกลบของ PBS/HBS	76
รูปที่ 4.55 แสดงการย่อยสลายชิ้นงานที่ได้จากการฝังกลบของ PBS/HBS/CaCO <sub>3</sub>	77
รูปที่ 4.56 แสดงการย่อยสลายชิ้นงานที่ได้จากการฝังกลบของ PBS/HBS/CLAY	78
รูปที่ 4.57 แสดงการย่อยสลายชิ้นงานที่ได้จากการฝังกลบของ PBS/HBS/NPCC	79
รูปที่ 4.58 แสดงการย่อยสลายชิ้นงานที่ได้จากการฝังกลบของ PBS/HBS/AKFT	80
รูปที่ 4.59 แสดงการย่อยสลายของชิ้นงานที่ได้จากการฝังกลบเป็นระยะเวลา 14 สัปดาห์	81
รูปที่ 4.60 ค่าความหนาแน่นก่อนและหลังฝังดินของ PBS/HBS/AKFT	82
รูปที่ 4.61 ค่าความหนาแน่นก่อนและหลังฝังดินของ PBS/HBS/CaCO <sub>3</sub>	83

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.62 ค่าความหนาแน่นก่อนและหลังฝังดินของ PBS/HBS/CLAY	83
รูปที่ 4.63 ค่าความหนาแน่นก่อนและหลังฝังดินของ PBS/HBS/NPCC	84
รูปที่ 4.64 ค่าความแข็งกดก่อนและหลังการฝังกลบของ PBS/HBS/AKFT	84
รูปที่ 4.65 ค่าความแข็งกดก่อนและหลังการฝังกลบของ PBS/HBS/CaCO <sub>3</sub>	85
รูปที่ 4.66 ค่าความแข็งกดก่อนและหลังการฝังกลบของ PBS/HBS/CLAY	85
รูปที่ 4.67 ค่าความแข็งกดก่อนและหลังการฝังกลบของ PBS/HBS/NPCC	86



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

PBS	หมายความว่า	พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(Butylenes Succinate))
DSC	หมายความว่า	Differential Scanning Calorimeter
SEM	หมายความว่า	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
$X_c$ (%)	หมายความว่า	องศาความเป็นผลึก (%Crystallinity)
$\Delta H_f$	หมายความว่า	พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก
$\Delta H_f^\circ$	หมายความว่า	พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PBS ที่มีความเป็นผลึก 100 %
$T_g$	หมายความว่า	อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว
$T_m$	หมายความว่า	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก
HBS-M	หมายความว่า	แป้งมันสำปะหลังดัดแปร ชนิดไฮโดรโฟบิก ชนิดองศาการแทนที่ปานกลาง
AKFT	หมายความว่า	สารตัวเติม Calcined Neuburg Siliceous Earth (Aktifit <sup>®</sup> AM)
CaCO <sub>3</sub>	หมายความว่า	สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (เกรด Coat)
CLAY	หมายความว่า	สารตัวเติม Calcined Kaolin Clay (KaMin <sup>™</sup> 70C)
NPCC	หมายความว่า	สารตัวเติม Nano-precipitated calcium carbonate (เกรด NPCC-101)

# บทที่ 1

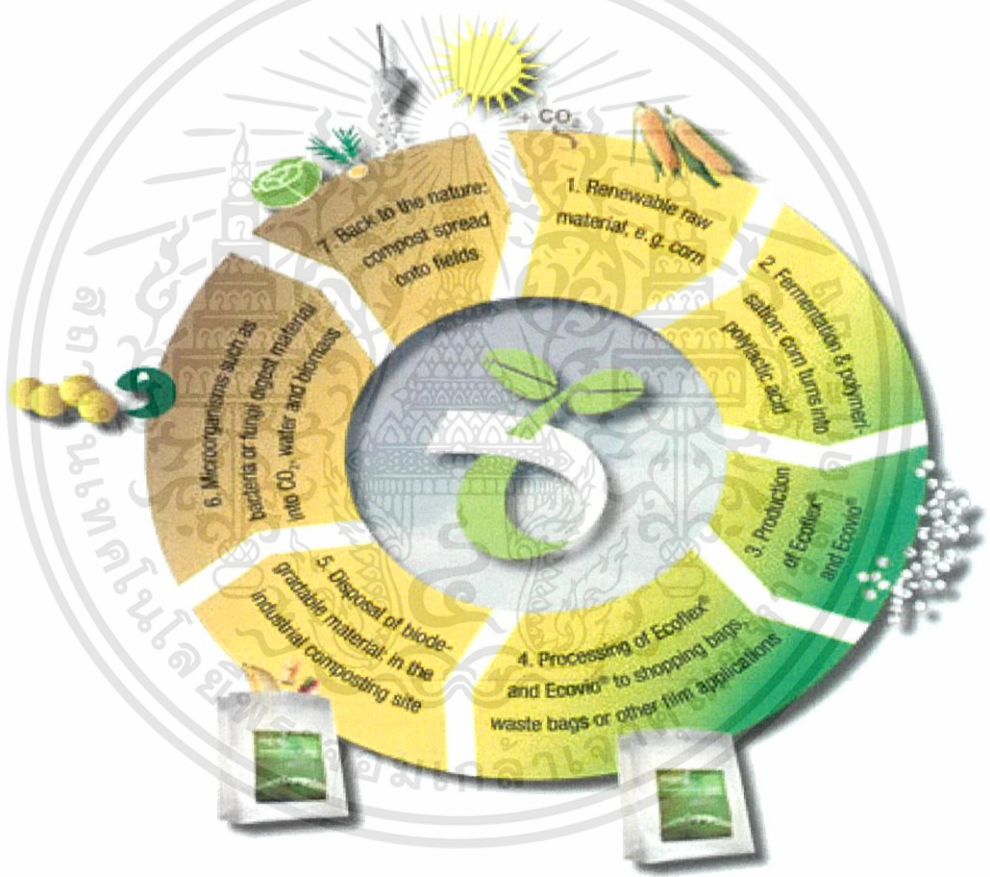
## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

เป็นเวลากว่า 100 ปีมาแล้วที่มนุษย์ได้คิดค้นพลาสติกขึ้นมาเพื่อใช้งานในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นบรรจุภัณฑ์ เครื่องมือเครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน ตลอดจนอุปกรณ์การแพทย์และการเกษตร และยังได้มีการค้นคว้าและพัฒนาคุณสมบัติของพลาสติกให้ดียิ่งขึ้นอยู่เสมอ แต่ด้วยความที่พลาสติกมีข้อจำกัดด้านอายุการใช้งาน ทำให้ปัจจุบันนี้เราต้องเผชิญกับปัญหาขยะพลาสติกโลก ซึ่งส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม และเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน แม้ว่าพลาสติกบางชนิดจะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ได้ แต่ดูเหมือนว่าทางออกที่ดีที่สุดในการลดปัญหาขยะพลาสติกคือการลดการใช้ปริมาณพลาสติกลง ซึ่งนอกจากจะเป็นการลดการเกิดขยะพลาสติกอันย่อยสลายยากแล้ว ยังเป็นการลดปริมาณการใช้สารปิโตรเคมีอันเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พลาสติกอีกด้วย

แม้ในปัจจุบันจะมีหลายหน่วยงานที่คอยกระตุ้นให้ประชาชนตระหนักถึงความเสื่อมโทรมของสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากขยะพลาสติกต่างๆ ที่มนุษย์ใช้ในแต่ละวัน แต่เนื่องจากประชากรโลกมีอัตราเพิ่มขึ้นในทุกๆ ปี จึงหมายความว่าอุปสงค์ต่อการใช้พลาสติกย่อมเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เพราะพลาสติกเป็นวัสดุที่ใช้งานได้หลากหลาย สามารถใช้ทดแทนวัสดุธรรมชาติ เช่น ไม้ และเหล็ก ได้เป็นอย่างดี มีน้ำหนักเบา ทนทาน อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปให้ได้แบบและคุณสมบัติตามต้องการได้ ทำให้มีการคิดค้นที่จะสังเคราะห์พลาสติกย่อยสลายได้ขึ้นจากวัสดุธรรมชาติเพื่อแก้ปัญหาขยะพลาสติกที่มีจำนวนมากและใช้เวลานานหลายร้อยปีกว่าจะย่อยสลายไปได้ โดยพลาสติกย่อยสลายได้นี้ เป็นพลาสติกที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้เฉพาะ ก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการ ซึ่งสามารถวัดการย่อยสลายได้โดยใช้วิธีการทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับพลาสติกและการใช้งานในช่วงเวลาหนึ่ง ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้ในการระบุชนิด และประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ [1] สามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายออกเป็น 5 ประเภทใหญ่ คือ การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation) การย่อยสลายทางกล (Mechanical Degradation) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative Degradation) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradation) และการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) [2]

จากกระแสอนุรักษ์ธรรมชาติที่กำลังเป็นที่นิยมในขณะนี้ ทำให้พลาสติกประเภทย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) ถูกใช้งานอย่างกว้างขวาง มีการวิจัยและพัฒนาให้มีสมบัติตรงตามความต้องการใช้งานยิ่งขึ้น คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ตาม ASTM D6400-99 หมายถึงพลาสติกที่ย่อยสลายได้อันเนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย ราและสาหร่าย โดยพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็น พลาสติกย่อยสลายชนิดหนึ่งที่มีกลไกการย่อยสลาย ด้วยเอนไซม์ และแบคทีเรียในธรรมชาติ ซึ่งเมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น น้ำ มวลชีวภาพ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งที่จำเป็นในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของพืช ซึ่งรวมถึงมันสำปะหลังและ ข้าวโพด ที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

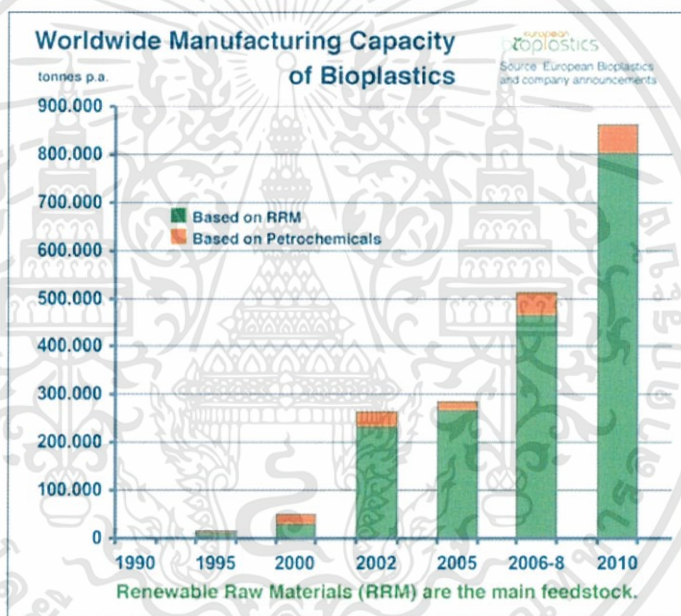


ที่ 1.1 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ[3]

ด้วยความที่พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นหนึ่งในทางเลือกภาวะโลกร้อนที่เป็นที่นิยมอย่างมากในปัจจุบัน ส่งผลให้ความต้องการผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพในตลาดโลกมีอัตราการเติบโตเพิ่มขึ้นมาก โดยมีปริมาณความต้องการใช้ทั่วโลก ในปี 2550-2551 สูงถึง 500,000 ตันต่อปีและมีอัตราการเจริญเติบโตถึงร้อยละ 70 เทียบกับปี 2548 โดยเฉพาะตลาดสำคัญซึ่งมีปริมาณการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

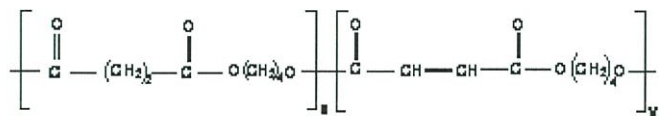
คาดการณ์ว่า ตลาดสหภาพยุโรปมีแนวโน้มปริมาณการใช้พลาสติกชีวภาพ 40,000-50,000 ตันต่อปี (ขยายตัวร้อยละ 20) ส่วนสหรัฐอเมริกามีปริมาณความต้องการใช้ 70,000-80,000 ตันต่อปี (ขยายตัวร้อยละ 16) และตลาดญี่ปุ่นมีปริมาณความต้องการใช้ 15,000 ตันต่อปี (ขยายตัวร้อยละ 100)[4] สำหรับประเทศไทยมีความพร้อมในด้านวัตถุดิบสำหรับการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่การพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ยังอยู่ในระดับบุกเบิกและกำลังเริ่มสร้างเทคโนโลยีใหม่ ดังนั้นหากประเทศไทยมีการตื่นตัวและได้รับการสนับสนุนจากทุกองค์กรทั้งในภาครัฐและภาคเอกชนในการผลักดันให้เกิดการพัฒนาองค์ความรู้ เทคโนโลยีตลอดจนนวัตกรรมของประเทศจะนำไปสู่การสนับสนุนให้เกิดธุรกิจการค้าที่ทันต่อกระแสโลก และสอดคล้องกับนโยบายและแนวทางการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมเพื่อก้าวทันกระแสตื่นตัวในการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพของโลกต่อไป



รูปที่ 1.2 แนวโน้มการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพของโลก[4]

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate :PBS) เป็นพอลิเอสเตอร์สายโซ่ตรง (Aliphatic polyester) ที่มีพันธะเอสเทอร์อยู่ในสายโซ่เป็นจำนวนมาก ซึ่งพันธะนี้มีความแข็งแรงน้อย แตกตัวด้วยน้ำ (Hydrolysis) ได้ง่ายจึงสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ โดยเตรียมได้จากปฏิกิริยาการควบแน่นของกรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทน ไดออลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการทางปิโตรเคมีหรือกระบวนการทางชีวภาพ PBS เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติคล้าย PET มีความเป็นผลึกอยู่ร้อยละ 35-45 มีสีขาว จุดหลอมเหลวสูงและมี  $T_g$  ต่ำมาก ( $-32^{\circ}\text{C}$ ) มีสมบัติเชิงกลสูง ทนความร้อนได้ถึง 200 องศาเซลเซียสโดยไม่เสียสภาพ นิยมนำมาผสมกับแป้งหรือพอลิเมอร์ร่วมที่มีหมู่อะดิเปต (Adipate copolymer) สามารถขึ้นรูปได้ทั้งวิธีการอัดรีด (Extrusion) การฉีดขึ้นรูป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Injection molding) และการเป่าขึ้นรูป (blow molding) มีการใช้งานที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นฟิล์ม บรรจุภัณฑ์ต่างๆ ตลอดจนผลิตภัณฑ์เพื่อสุขอนามัย



PBS's chemical structure

### รูปที่ 1.3 โครงสร้างทางเคมีของ

PBS และตัวอย่างการใช้งาน[5]



Some PBS applications

ในบรรดาประเทศที่เป็นแหล่งเกษตรกรรมทั่วโลก ประเทศไทยถือเป็นแหล่งเพาะปลูกที่สำคัญ ด้วยลักษณะทางภูมิศาสตร์ ความอุดมสมบูรณ์ของทรัพยากรต่างๆ ทำให้ประเทศไทยสามารถส่งออกผลผลิตทางการเกษตรได้เป็นอันดับต้นๆของโลก โดยเฉพาะมันสำปะหลัง (Tapioca starch) ซึ่งเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่สำคัญในทวีปแอฟริกาและอเมริกาใต้ ถึงแม้ประเทศไทยไม่ได้ใช้มันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตหลัก แต่มันสำปะหลังเป็นพืชที่นิยมปลูกกันมากในหลายภูมิภาคทั่วประเทศ ทำให้มีมูลค่าการส่งออกต่อปีเป็นจำนวนมหาศาล ประเทศไทยไม่ใช่ผู้ผลิตมันสำปะหลังอันดับหนึ่งของโลก (ดังตารางที่ 1.1) และประชากรไทยไม่บริโภคมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรต ประเทศไทยจึงส่งออกผลผลิตแปรรูปมันสำปะหลังเป็นอันดับหนึ่งต่อเนื่องกันมาหลายปี การส่งออกในปี 2552 มีมูลค่า 47,800 ล้านบาท แม้มูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์ (มันเส้น มันอัดเม็ด แป้ง) ไม่สูงเมื่อเทียบกับการส่งออกข้าวหรือยาง แต่การใช้มันสำปะหลังในประเทศ ก่อให้เกิดอุตสาหกรรมต่อเนื่องในประเทศมูลค่ามากกว่า 300,000 ล้านบาท และมีการจ้างงานประมาณ 1 ล้านคน ทั้งนี้ไม่นับรวมเกษตรกรผู้ปลูกมันสำปะหลังของประเทศอีก 2.6 ล้านคน

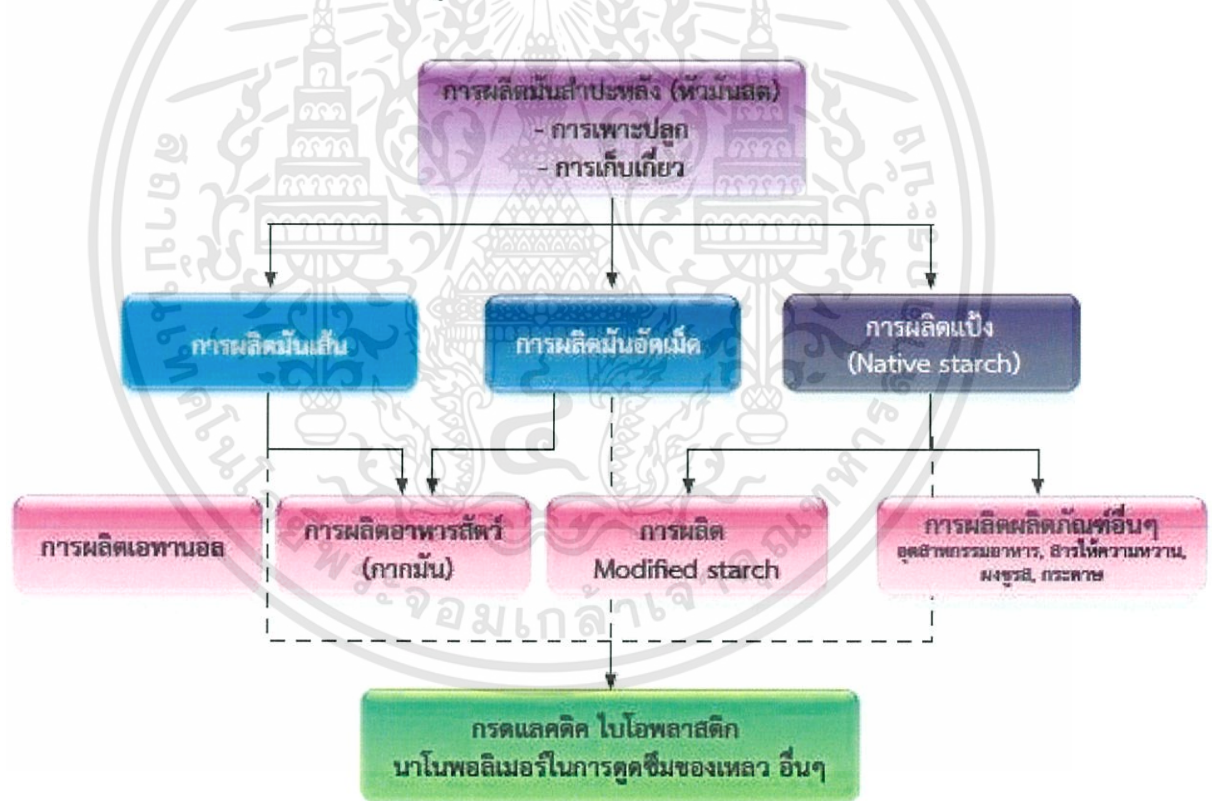
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 เนื้อที่เพาะปลูก และผลผลิตมันสำปะหลังของประเทศผู้ผลิตสำคัญ (พ.ศ. 2552)[6]

ประเทศ	พื้นที่ (ล้านไร่)	ผลผลิตทั้งหมด (ล้านตัน)	ผลผลิตเฉลี่ยต่อพื้นที่ (ตันต่อไร่)
ทั่วโลก	115	224	1.9
ไทย	8.6	30	3.6
ไนจีเรีย	24.4	46	1.9
อินเดีย**	1.5	8	5.3
บราซิล	12.2	27	2.2

หมายเหตุ: \*\*ประเทศอินเดียให้ผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่มากที่สุดแต่มีพื้นที่เพาะปลูกน้อยมากเมื่อเทียบกับประเทศอื่น

ในการเพิ่มขีดความสามารถของอุตสาหกรรมมันสำปะหลังจำเป็นต้องเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตทุกระดับ ตั้งแต่การผลิตหัวมันสำปะหลัง จนถึงกระบวนการแปรรูป โดยเขียนเป็นกระบวนการต่อเนื่องได้ ดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 ห่วงโซ่การผลิตของอุตสาหกรรมมันสำปะหลัง[7]

จากแผนภาพข้างต้น จะเห็นได้ว่ามันสำปะหลังเป็นพืชที่สามารถนำมาเป็นแหล่งผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ ผู้จัดทำได้สังเกตเห็นถึงความสำคัญในการเพิ่มมูลค่าของมันสำปะหลังที่ปลูกใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเทศไทย จึงมีแนวความคิดที่จะนำแป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic starch, HBS) ที่มีองค์การแทนที่ปานกลาง (HBS-M) มาผสมกับพลาสติกชีวภาพ PBS ในอัตราส่วน 40:60 (โดยน้ำหนัก) จากนั้นทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สัมพันธวิทยา สมบัติทางกายภาพ และสมบัติการย่อยสลาย โดยมีวัตถุประสงค์มุ่งเน้นที่จะลดต้นทุนการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้และทำให้เกิดการย่อยสลายที่ดีขึ้น จากการทดลองพบว่า PBS ที่ผสมแป้งดัดแปรจะทำให้พลาสติกเกิดการย่อยสลายได้ดีขึ้น สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ แต่มีสมบัติบางประการลดลง เช่น มีการดูดซึมน้ำได้เร็วกว่าที่กำหนดไว้ ทำให้ชิ้นงานย่อยสลายได้เร็วเกินไป[7] ผู้จัดทำจึงมีแนวความคิดที่จะแก้ปัญหานี้โดยการเติมสารตัวเติมอนินทรีย์ (Inorganic fillers) เพื่อให้ชิ้นงานมีการดูดซึมน้ำลดลง เพิ่มสมบัติบางประการและเป็นการช่วยลดต้นทุนการผลิตมากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาสมบัติพลาสติกย่อยสลายได้จาก PBS ที่ผสมแป้งดัดแปร HBS-M ในอัตราส่วน 60:40 และใส่สารตัวเติมอนินทรีย์ โดยมุ่งเน้นศึกษาชนิดและปริมาณของสารตัวเติมที่ทำให้สมบัติบางประการของพลาสติกดีขึ้น และช่วยลดต้นทุนการผลิตมากยิ่งขึ้น โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการขึ้นรูปและการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และยังเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่แป้งมันสำปะหลังที่ผลิตในประเทศไทยอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลของชนิดสารตัวเติม (Fillers) อนินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้จากพอลิবিวิทิลินซัคซิเนต ผสมแป้งดัดแปรไฮโดรโฟบิก (PBS/HBS-M) โดยสารตัวเติมที่เติมลงไป ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนตเคลือบ (Coated CaCO<sub>3</sub>), Calcined Neuburg Siliceous Earth (Aktifit® AM), Calcined Kaolin Clay (KaMin™ 70C) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (Nano-calcium carbonate; NPCC) สมบัติของพลาสติกชีวภาพที่ทำการศึกษาได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สัมพันธวิทยาและสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังกลบ

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

### 1.3.1 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1.3.2 เตรียมตัวอย่างวัตถุดิบ ทำการผสม และขึ้นรูปตัวอย่างการฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

### 1.3.3 ทดสอบสมบัติต่างๆของตัวอย่างที่เตรียมได้ ได้แก่

- สมบัติการไหล ได้แก่ ค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index; MFI)

- สมบัติเชิงกล เช่น โมดูลัส (Modulus), ความแข็งกด (Hardness), ความแข็งแรงดึง (Tensile strength), เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และสมบัติทนแรงกระแทก (Impact properties)

- สมบัติทางความร้อน เช่น  $T_g$ , องศาความเป็นผลึก ด้วยเทคนิค DSC
- สัณฐานวิทยา การกระจายตัวและการยึดเกาะของวัสดุ ด้วยเทคนิค SEM
- สมบัติทางกายภาพ (เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ)
- สมบัติการย่อยสลาย โดยการฝังกลบ (Burial test)

1.3.4 ศึกษาผลของชนิดสารตัวเติม ที่มีผลต่อสมบัติของพลาสติกชีวภาพ PBS ผสมกับเนื้อแป้งคัดแปร HBS-M ในอัตราส่วน 60:40 โดยน้ำหนัก และมีการเติมสารตัวเติมอินทรีย์ลงไป ปริมาณต่างๆ

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพให้มีสมบัติที่ดียิ่งขึ้นจากการเติมสารตัวเติมลงไปในงาน
2. สามารถผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพให้มีต้นทุนที่ต่ำลงได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการขึ้นรูปของชิ้นงาน
3. สามารถนำชิ้นงานที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ได้
4. ช่วยสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่อุตสาหกรรมมันสำปะหลัง และช่วยแก้ปัญหา มันสำปะหลังล้นตลาดแก่เกษตรกรผู้ปลูกมันสำปะหลังในประเทศไทยได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 พลาสติกย่อยสลายได้

##### 2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้

ในปัจจุบันมีปัญหาขยะกำจัดยาก และด้วยวัสดุปิโตรเคมีที่เริ่มลดน้อยลงไปเรื่อยๆ จึงเป็นปัจจัยที่ผลักดันให้เกิดการศึกษาค้นคว้าเพื่อผลิตพลาสติกที่ใช้วัตถุดิบทดแทน (Renewable) ที่มีวงจรการผลิตค่อนข้างสั้น ใช้พลังงานในการผลิตต่ำ และสมบัติที่สำคัญคือ สามารถย่อยสลายได้ กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ มีสมบัติทางกายภาพเทียบเคียงกับพลาสติกที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี[11]

พลาสติกย่อยสลาย (Biodegradable plastics) ได้รับการยอมรับ ด้วยแนวความคิดในการใช้สำหรับทดแทนผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถทดแทนได้ในธรรมชาติ (Non-renewable resource) เช่น ปิโตรเลียม, ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน อีกทั้งยังเพื่อสนับสนุนการแก้ไขปัญหาขยะพลาสติก

พลาสติกย่อยสลายสามารถจำแนกประเภทออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่ [8]

1. พลาสติกย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradable plastics)
2. พลาสติกย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastics)
3. พลาสติกย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastics)
4. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics)

ในการวิจัยครั้งนี้เป็นการทำการศึกษาพลาสติกย่อยสลาย ซึ่งในปัจจุบันมีหลายองค์กรทั่วโลกได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐานผลิตภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพขึ้น และให้คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยไว้ ดังนี้

- ASTM D6400-99 – พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพคือ พลาสติกที่ย่อยสลายได้ เนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย ราและสาหร่าย
- ISO 472:1998 – พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ เป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่งซึ่งสามารถวัดได้ โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งาน ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางชีวภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น

พลาสติกย่อยสลายได้ในทางชีวภาพ สามารถจำแนกออกได้หลายลักษณะ โดยในที่นี้ได้ทำการนำข้อมูลมาจากรูปแบบของรายงานชุด Techno-economic Feasibility of Large-scale Production of Bio-based Polymer in Europe ซึ่งจัดทำโดย European Commission ได้ทำการแบ่งประเภทพลาสติกย่อยสลายได้ออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ดังนี้

1. พอลิเมอร์แป้ง (Starch Polymer) คือวัสดุเทอร์โมพลาสติกที่ได้จากการนำแป้งมาผ่านกระบวนการทางเคมี ความร้อน และ/หรือ การให้แรงเชิงกล

2. พอลิเมอร์แลคติกแอซิด (PolyLactic Acid: PLA) คือพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรงที่มีกรดแลคติก หรือ แลคไทด์เป็นมอนอเมอร์

3. พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์ชนิดอื่นๆ เช่น

3.1 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจากกรดซัคซิเนตชีวภาพ (Poly(Butylene Succinate), PBS from bio-based succinic acid) คือ พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรง เตรียมได้จากมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ 1,4-บิวเทนไดออล (BDO) และกรดซัคซิินิก

3.2 พอลิบิวทิลีนเทอเรพทาเลตจากบิวเทนไดออลชีวภาพ (Poly(Butylene Terephthalate), PBT from bio-based BDO) คือ พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรงที่มีวงแหวนอะโรมาติก เตรียมได้จากมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ 1,4 - บิวเทนไดออล (BDO) และกรดเทอเรพทาลิก (TPA) หรือ ไดเมทิลเทอ-เรพทาเลต (DMT)

3.3 พอลิไตรเมทิลีนเทอเรพทาเลตจากโพรเพนไดออลชีวภาพ (Poly(Trimethylene Terephthalate), PTT from bio-based PDO) คือ พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรงที่มีวงแหวนอะโรมาติกในโครงสร้าง เตรียมจากมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ 1,3-โพรเพนไดออล (PDO) และกรดเทอเรพทาลิก (TPA) หรือ ไดเมทิลเทอเรพทาเลต (DMT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 พลาสติกย่อยสลายได้ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ

พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้น อาจมีปริมาณแป้งเป็นองค์ประกอบตั้งแต่ร้อยละ 10 จนถึงมากกว่า 90 แต่พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ ต้องมีปริมาณแป้งเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 60 ขึ้นไป โดยที่ปริมาณแป้งยิ่งมากขึ้นจะส่งผลให้การย่อยสลายทางชีวภาพดีขึ้นและทิ้งสารตกค้าง (Recalcitrant residues) ในปริมาณที่น้อยลง พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ถูกผสมกับพอลิเมอร์ที่มีสมรรถนะสูง (High performance polymers) เช่น พอลิเอสเทอร์แบบสายโซ่ตรง และ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติเฉพาะและเหมาะสมในการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ [9]

พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานสามารถจำแนกได้หลายประเภท ดังนี้

1. แป้งที่มีสมบัติเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Starch, TPS) มีปริมาณแป้งที่ผ่านกระบวนการแล้วเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 70 และแป้งที่ใช้ยังเป็นแป้งที่ผ่านกระบวนการที่ทำให้เป็นเจล (Gelatinized Starch) การขึ้นรูปของ TPS สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้โดยการใช้เทคนิคการขึ้นรูปเช่นเดียวกับพลาสติกทั่วไป

2. แป้งผสมพอลิเอสเทอร์แบบสายโซ่ตรง (Starch aliphatic polyester blends) โดยทั่วไปมักใช้พอลิเอสเทอร์ประมาณร้อยละ 50-60 ผสมกับแป้งเพื่อลดต้นทุนในการผลิต และมักมีการใส่สารเติมแต่ง เช่น พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและช่วยให้ขึ้นรูปง่ายขึ้น เป็นต้น แป้งพอลิเอสเทอร์ที่ย่อยสลายได้ เช่น PLA และ PCL เป็นพอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบันเนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ อย่างไรก็ตามพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีแป้งร้อยละ 45 ผสมกับ PCL มีความแข็งแรงไม่เพียงพอต่อการใช้งานโดยส่วนใหญ่เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำเพียง 60 °C และเริ่มมีการอ่อนตัวลงที่อุณหภูมิ 40°C ทำให้เกิดข้อจำกัดในการใช้งาน

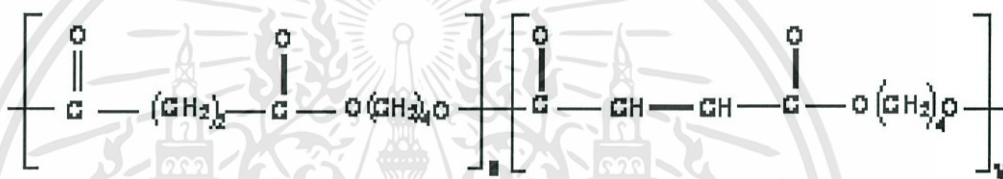
PBS และ PBSA เป็นพอลิเอสเทอร์อีกชนิดที่ได้มีการนำมาผสมกับแป้งเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล จากการวิจัยพบว่า แป้งที่ผสมกับ PBSA ในสัดส่วนร้อยละ 5-30 โดยน้ำหนัก จะมีค่า Tensile strength ต่ำกว่า PBSA ที่ไม่ได้ใส่แป้ง และค่า Tensile strength จะต่ำลงเล็กน้อยเมื่อมีปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลน้อยมากต่ออุณหภูมิการหลอมเหลว และสมบัติในการขึ้นรูป

พลาสติกที่มีเป้งเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนสูง (มากกว่าร้อยละ 60) จะเปราะและแตกหักง่าย จึงมักเติมพลาสติกไฮเซอรส์ลงไปเพื่อช่วยลดความเปราะและเพิ่มความยืดหยุ่น

สำหรับการขึ้นรูปของเป้งผสมของพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรง มักใช้สำหรับทำแผ่นพลาสติกหรือฟิล์มพลาสติกคุณภาพสูง โดยขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีดแบบแผ่นฟิล์ม เป่าเป็นฟิล์มบางหรือด้วยวิธีการขึ้นรูปด้วยความร้อน

### 2.3 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(Butylene Succinate), PBS)

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เป็นพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาการควบแน่นของมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ 1,4-บิวเทนไดออล กับ กรดซัคซิินิก สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง แสดงดังรูปที่ 2.1[10]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ PBS[5]

#### 2.3.1 สมบัติของ PBS

PBS เป็นเทอร์โมพลาสติก มีสีขาว มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับ PLA มีจุดหลอมเหลวสูงมาก และมี  $T_g$  ต่ำมากประมาณ  $-32^{\circ}\text{C}$  โดยทั่วไปแล้ว PBS มีสมบัติเชิงกลสูงเทียบเท่ากับ PP และ LDPE ทนความร้อนได้ดีถึง  $200^{\circ}\text{C}$  โดยไม่เสียสภาพ สามารถนำไปขึ้นรูปได้ดี แล้วเชื่อมติดได้ง่าย สามารถนำไปผสมกับเป้งเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลได้อีกด้วย

#### 2.3.2 การย่อยสลาย PBS

PBS สามารถเกิดการย่อยสลายไปในธรรมชาติได้เนื่องจากเป็นพอลิเอสเตอร์แบบสายโซ่ตรง ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ การย่อยสลายที่เกิดขึ้นมีดังนี้ [10]

## ตารางที่ 2.1 สมบัติของ PBS ที่ผลิตทางการค้า[12]

Properties	PBS	
	Film grade	Injection grade
Density (g/ml)	1.26	1.26
T <sub>g</sub> (°C)	-32	-32
T <sub>m</sub> (°C)	114	115
Heat Distortion Temp (°C)	97	97
Tensile break (kgf/cm <sup>2</sup> )	580	210
Tensile Elongation (%)	700	320
Flexural Modulus (kgf/cm <sup>2</sup> )	6,700	7,000

### 2.3.2.1 การย่อยสลายทางชีวภาพ(Biodegradation)

เป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้มีขนาดเล็กลงโดยอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่สำคัญได้แก่ พวก Heterotrophy ซึ่งเจริญในดิน[13] โดยกระบวนการย่อยสลายนี้อาศัย 2 ขั้นตอน คือ ในขั้นแรกสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในการเกิดการย่อยสลายนั้น พอลิเมอร์จะเปลี่ยนเป็นมอนอเมอร์ด้วยกระบวนการ Depolymerization ภายนอกเซลล์ โดยการปลดปล่อยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ทั้งแบบ Endo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และ Exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยที่อยู่ปลายของสายพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์มีขนาดเล็กลง ส่วนมอนอเมอร์ที่มีขนาดเล็กจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ได้และถูกย่อยสลาย (Mineralization) ต่อในขั้นที่สอง ได้เป็นพลังงานและสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ ซึ่งจะไม่ตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อม

### 2.3.2.2 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิ-แอนไฮดริด พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ (Enzyme) ต่างๆ เช่น Depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลน์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้ หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส[13]

## 2.4 แป้ง

แป้ง(Starch) เป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ขนาดใหญ่ที่สะสมอยู่ในพืช โดยแป้งประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์ 2 ชนิด ได้แก่ อะไมโลส (Amylose) และ อะไมโลเพกติน (Amylopectin)

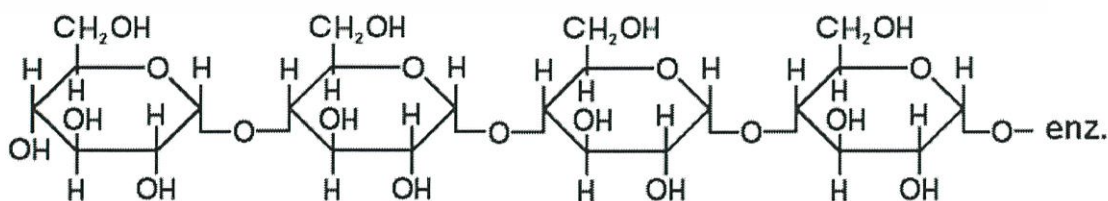
### 2.4.1 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง

องค์ประกอบหลักภายในแป้ง ประกอบด้วย

1. อะไมโลส (Amylose)
2. อะไมโลเพกติน (Amylopectin)
3. สารมัธยันต์ (Intermediate)

#### 2.4.1.1 อะไมโลส (Amylose)

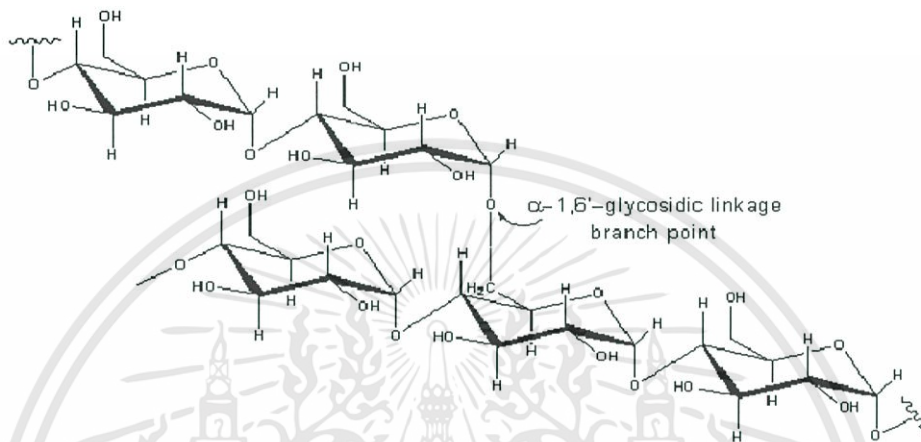
เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วย  $\alpha$ -D-กลูโคส หลายๆ หน่วยมาจับต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4' ไกลโคซิดิกทั้งหมด ดังนั้น โครงสร้างจึงเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 2.2 เนื่องจากภายในโครงสร้างมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อยู่มาก ทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติชอบน้ำหรือไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) จึงสามารถดูดความชื้น และกระจายตัวในน้ำได้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลส

### 2.4.1.2 อะไมโลเพกติน (Amylopectin)

ประกอบด้วย  $\alpha$ -D-กลูโคส หลาย ๆ หน่วยมาจับต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1, 4' โกลโคซิดิก บางส่วน แต่มีบางส่วนจับต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1, 6' โกลโคซิดิก โดยมีอัตราส่วนระหว่างพันธะทั้งสองชนิดเป็น 15 : 1 ตามลำดับ ดังนั้น โครงสร้างของอะไมโลเพกตินจึงเป็นกิ่งก้านสาขา ซึ่งเขียนแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน[15]

### 2.4.2 แป้งดัดแปร (Modified Starch)

เนื่องจากสมบัติเฉพาะชนิดและสายพันธุ์ของพืชที่มีขอบเขตจำกัด จึงทำให้เกิดการคิดค้นที่จะทำให้แป้งมีคุณสมบัติและขอบเขตในการใช้งานกว้างขึ้น โดยการพัฒนาและปรับปรุงโครงสร้างภายในโมเลกุลของแป้ง ให้เหมาะสมกับความต้องการที่จะนำไปใช้งาน โดยการขจัดสิ่งเจือปนในแป้ง เช่น ไขมัน โปรตีน และปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของแป้งให้ดีขึ้น เช่น ทำให้คงทนต่อสภาวะกรด-ด่างได้ดียิ่งขึ้น ทำให้ทนแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตได้มากขึ้น เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงและไม่สิ้นเปลือง

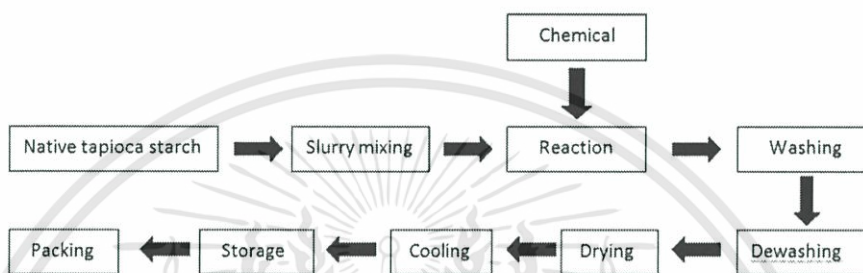
ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.1073-2535 ได้ให้ความหมายของแป้งดัดแปรไว้ว่า “แป้งดัดแปร หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้ง เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี มาเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี และ/หรือทางกายภาพเดิมด้วยความร้อน และ/หรือ เอนไซม์ และ/หรือสารเคมีต่างๆ ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งลักษณะบ่งชี้ต่างๆ ของแป้งดัดแปรแต่ละประเภทจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม”[11]

#### 2.4.2.1 แป้งไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic Starch, HBS) [14]

แป้งไฮโดรโฟบิก หรือ Octenyl Succinate Starch เป็นแป้งที่มีการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของแป้งให้มีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เพิ่มขึ้น หรือมีขั้วน้อยลง โดยใช้ Octenyl succinate anhydride เป็นสารเคมีในการทำปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผลิตแป้งไฮโดรโฟบิก จะเตรียมในระบบของผสมน้ำ โดยสภาวะที่เหมาะสมคือ ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง อุณหภูมิ 33°C ค่า pH ของระบบปฏิกิริยา คือ 8.4 กระบวนการในการผลิตแสดงดังรูป 2.4 เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติของแป้ง พบว่า เมื่อเกิดเป็นเจลจะมีความเสถียร การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง มีความคงตัวในการละลายจากการแช่แข็ง (Freeze-thaw) เพิ่มขึ้น ส่วนใหญ่ใช้สำหรับอุตสาหกรรมอาหาร



รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิตแป้งไฮโดรโฟบิก

### 2.4.3 การนำแป้งไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ

แป้งสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสม และใช้เป็นตัวเติมในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น สารยึดติด สิ่งทอ กระดาษ กาว เป็นต้น เนื่องจากแป้งมีราคาถูก หาได้ง่าย และสามารถนำมาปรับปรุงสภาพการใช้งานได้ ทำให้แป้งมีการนำไปใช้ที่หลากหลายในทางอุตสาหกรรมโดยใช้เป็นสารตัวเติม เพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุต่างๆ ให้ดีขึ้น เช่น เมื่อผสมในพลาสติกจะทำให้พลาสติกมีสมบัติในการย่อยสลายทางชีวภาพ เป็นต้น

## 2.5 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer)

พลาสติไซเซอร์เป็นสารที่เติมลงไปผสมกับเรซิน เพื่อให้พลาสติกนิ่ม เป็นการเพิ่มคุณสมบัติในทางอ่อนตัว ความเหนียว เพิ่มความทนทานต่อความร้อน เพิ่มความต้านทานการสึกหรอ และทำให้สามารถเติมสารตัวเติมได้เป็นปริมาณมากขึ้น แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. พลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ (Primary Plasticizers) เป็นพลาสติไซเซอร์ที่มีคุณภาพสูง ใช้ได้โดยตรง แต่มักมีราคาแพง

2. พลาสติไซเซอร์ทุติยภูมิ (Secondary Plasticizers) เป็นพลาสติไซเซอร์ที่มีคุณภาพค่อนข้างต่ำกว่าประเภทแรก นำไปใช้โดยตรงไม่ได้ จะต้องใช้ควบคู่กับพลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิแต่จะเพิ่มคุณสมบัติเฉพาะอย่างได้ดีกว่า

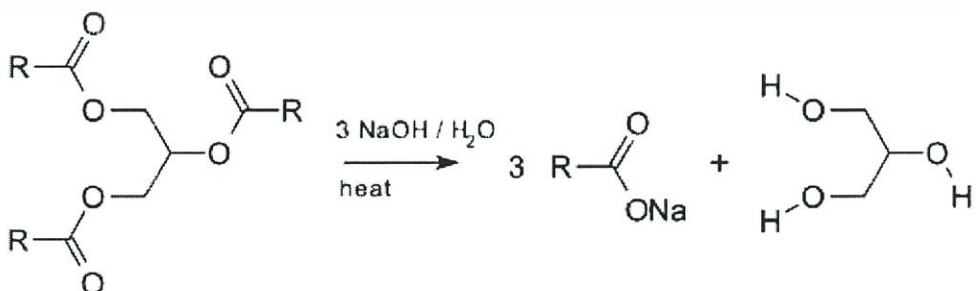
สมบัติของพลาสติไซเซอร์ที่ดี จะต้องรวมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ที่ใช้ โดยมีแรงระหว่างโมเลกุลของทั้งสองสารคล้ายคลึงกัน มีจุดเดือดสูง ระเหยยาก ละลายในตัวทำละลายที่ใช้ได้ดี ไม่ควรมีกลิ่น สี รส ไม่ติดไฟ และไม่เป็นพิษ การเลือกใช้พลาสติไซเซอร์ที่เหมาะสมจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยแยกภายในผลิตภัณฑ์

สารเคมีที่ใช้เป็นพลาสติไซเซอร์ควรมีสมบัติดังนี้[16]

1. เป็นสารประกอบอินทรีย์ ส่วนมากเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง
  2. ควรมีค่าพารามิเตอร์การละลาย (Solubility parameter) ใกล้เคียงกับพลาสติกที่ต้องการผสม
  3. ไม่ควรตกผลึกที่อุณหภูมิใช้งาน เว้นเสียแต่จะเกิดแรงดึงดูดเฉพาะกับพอลิเมอร์ได้
- พลาสติไซเซอร์ที่นำมาใช้กับพลาสติกที่มีแข็งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน มีหลากหลายประเภท ได้แก่ มอนอแซคคาไรด์ ไดแซคคาไรด์ โอลิโกแซคคาไรด์ พอลิออล ไขมันและอนุพันธ์ เป็นต้น

1. **พอลิออล (Polyols)** เป็นอนุพันธ์ของน้ำตาล ซึ่งหมู่คีโตน หรือ แอลดีไฮด์ ถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล พบในธรรมชาติและสามารถสังเคราะห์ได้ จากปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) ให้กับโมเลกุลน้ำตาล พอลิออลมีสมบัติคงทนต่อสารเคมีและความร้อนได้ดี ไม่สลายตัวง่าย ดูดซึมน้ำและความชื้นได้ดี ละลายน้ำได้

2. **กลีเซอรอล (Glycerol)** หรือ กลีเซอริน (Glycerin) เป็นพอลิออลที่มีคาร์บอน 3 อะตอม โครงสร้างทางเคมี คือ  $C_3H_8O_3$  สามารถหาได้ง่าย เกิดได้จากปฏิกิริยาการผลิตสบู่และกรดไขมัน (Saponification) มีสมบัติเป็นของเหลวหนืด ผสมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดีมาก ละลายในน้ำมันได้ ดูดความชื้นในอากาศได้ปานกลาง



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน[17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติมเป็นวัสดุที่ใช้เติมลงในขั้นตอนการผลิตพอลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างหรือเป็นการลดต้นทุน โดยในการเติมสารตัวเติมต่าง ๆ นั้น จะต้องคำนึงถึงปริมาณที่ใช้ให้สอดคล้องต่อการผลิต โดยพิจารณาถึงสมบัติของพอลิเมอร์ ขั้นตอนการผลิต และผลิตภัณฑ์ที่จะได้รับ สามารถแยกประเภทของสารตัวเติมตามชนิดได้ดังนี้[18]

### 1. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นผงหรือเป็นเม็ด (Particulate filler)

สามารถแยกออกได้อีกเป็น 2 ชนิดคือ สารตัวเติมที่ไม่ช่วยเสริมแรง (Inert filler) ทำการใส่ไปเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางอย่างของวัสดุ เช่น เพิ่มค่ามอดูลัส เพิ่มความแข็ง ปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น และสารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรง (Reinforcing filler) เติมเข้าไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสมบัติเชิงกลของวัสดุนั้นๆให้สูงขึ้น ทั้งสองชนิดสามารถใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิตได้

### 2. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นยาง (Rubbery filler)

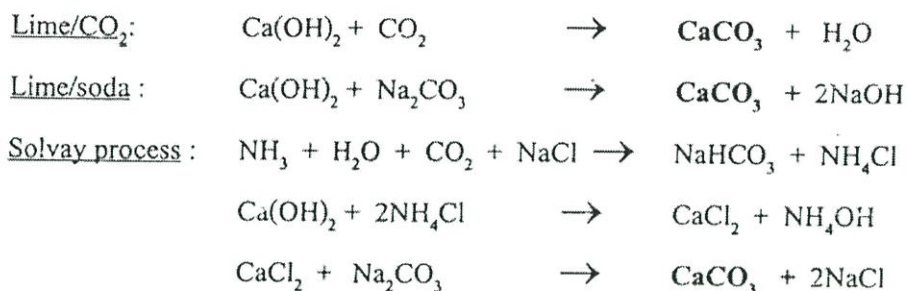
สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นยางส่วนใหญ่แล้วทำการเติมใส่ในเทอร์โมพลาสติกที่แข็งเพื่อทำให้วัสดุเหนียวขึ้น ความเหนียวที่เพิ่มขึ้นของวัสดุจะทำให้ความต้านทานการแตกหักของวัสดุเพิ่มขึ้น

### 3. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous filler)

โดยทั่วไปแล้วสารตัวเติมจะอยู่แบบเป็นชั้นๆ (Laminar form) เส้นใยจะมีความมอดูลัสสูงกว่ายางเมื่อส่วนประกอบของยางและเส้นใยถูกดึงในชั้นเส้นใย เส้นใยจะทำการสะสมความเครียดที่เกิดขึ้นภายในชั้นงาน ด้วยเหตุนี้ทำให้ความแข็งแรงและค่ามอดูลัสสูงขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุที่ไม่ได้ใส่สารตัวเติม

#### 2.6.1 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate)

แคลเซียมคาร์บอเนต มีสูตรเคมีคือ  $\text{CaCO}_3$  มีส่วนประกอบทางเคมีประกอบด้วย  $\text{CaO}$  ร้อยละ 56 และ  $\text{CO}_2$  ร้อยละ 44 ลักษณะทางกายภาพของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นผงสีขาวไม่ละลายน้ำแต่ละลายน้ำได้เมื่อมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) กลไกรวมไปในการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตเกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาในการเตรียมแคลเซียมคาร์บอเนต[19]

การผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตมี 2 วิธี คือ

### 2.6.1.1. แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดจากธรรมชาติ (Ground Calcium Carbonate: GCC)

เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดแคลเซียมคาร์บอเนตในธรรมชาติ เช่น หินปูน (Limestone) ที่มีความขาวและบริสุทธิ์สูง หินอ่อน (Marble) ที่เกิดจากหินปูนแปรสภาพด้วยความร้อนและความดันทำให้เกิดการตกตะกอนใหม่ ชอล์ก (Chalk) ซึ่งเป็นหินปูนเนื้อร่วนละเอียด และแร่แคลไซต์ (Calcite) เป็นต้น กรรมวิธีในการผลิตได้แก่ การลดขนาดแร่ (Size reduction) และการคัดขนาด (Classification)

### 2.6.1.2 แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (Precipitated Calcium Carbonate: PCC)

เป็นการนำแคลเซียมคาร์บอเนตในธรรมชาติมาทำการตกตะกอนใหม่ เป็นผงขนาดเล็กที่เกิดจากการตกตะกอน ส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นเข็ม ผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส เสถียรในอากาศ และไม่ละลายน้ำ

## ผลิตภัณฑ์แคลเซียมคาร์บอเนต [19]

### 1. ผลิตภัณฑ์แคลเซียมคาร์บอเนตชนิด GCC

ผลิตภัณฑ์แบบ Dry Product เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการบดแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติโดยตรง มีลักษณะเป็นผงสีขาว ขนาด 1-147 ไมครอน มีความขาวมากกว่าและมีองค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่าร้อยละ 98

ผลิตภัณฑ์แบบ Coating Product เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการนำแคลเซียมคาร์บอเนตแบบ Dry product อนุภาคขนาด 1-15 ไมครอน มาเคลือบผิวอนุภาคเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการให้ดีขึ้น เช่น ช่วยให้อนุภาคเปียกได้ง่ายขึ้น ช่วยให้อนุภาคแพร่กระจายได้ดีขึ้น ช่วยให้ดูดซึมน้ำมันลดลง สารที่นำมาเคลือบผิวมี 3 ชนิด ได้แก่ Stearic acid, Waxes และ Chemical agents

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ผลิตภัณฑ์เคลือบคาร์บอนชนิดPCC

ผลิตภัณฑ์แบบ Slurry Product เป็นเคลือบคาร์บอนชนิดบริสุทธิ์ มีลักษณะเป็นผงขนาดเล็ก ประมาณ 0.3-1 ไมครอน ได้จากการนำเคลือบคาร์บอนชนิดบดจากธรรมชาติ (GCC) มาทำการตกตะกอนใหม่ เพื่อให้เคลือบคาร์บอนมีคุณภาพสูง นิยมใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ

ในอุตสาหกรรมพลาสติก ได้มีการนำเคลือบคาร์บอนไปใช้เป็นตัวเติม เนื่องจากมีความขาวสูง มีดัชนีหักเหใกล้เคียงกับสารพลาสติกและสามารถปรับปรุงเนื้อพลาสติกได้ เช่น เพิ่มการรับแรงแก่พลาสติก ทำให้พลาสติกทนทานต่อการบีบอัด เป็นต้น ส่วนใหญ่นิยมใช้แบบ GCC ที่ได้จากการบด

### 2.6.2 ดินขาว (Kaolin หรือ China Clay)

ดินขาวเป็นวัตถุดิบที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจสูง เพราะสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ หลายประเภท ทั้งนี้เนื่องจากมีสีขาว มีความทนต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี และมีความสามารถในการกลบสีอื่นได้ดี มีความละเอียดมาก ไม่ก่อให้เกิดการขัดสีกับเครื่องจักรมีค่าการนำไฟฟ้าและความร้อนต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีราคาถูกกว่าวัตถุดิบอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน

แร่เคโอลินไนต์ เป็นแร่ที่มีรูปผลึกแน่นอน มีสูตรทางเคมี  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$  (hydrated aluminium silicate) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นชั้นๆ ส่วนประกอบ เคมีทางทฤษฎี คือ  $SiO_2$  46.54%,  $Al_2O_3$  39.50% และ  $H_2O$  13.96% การเกิด kaolinite ได้จากการสลายตัวของหินฟันม้า (feldspar) ซึ่งเป็นแร่ที่พบในหินแกรนิต

ประโยชน์ของ Kaolinite ใช้ทำอิฐ กระเบื้องมุงหลังคา ท่อ ดิน โคลนชนิดที่มีคุณภาพดี (high-grade clay) ซึ่งเรียกว่า China Clay หรือดินเกาลิน (Kaolin) ใช้ทำเครื่องปั้นดินเผาทุกชนิด ทำอิฐก่อสร้าง ภาชนะกระเบื้องเคลือบต่างๆ นอกจากนี้ใช้ทำอิฐ ทนไฟสำหรับเตาถลุงโลหะ ส่วนใหญ่มักจะใช้เติมลงไปในการกระดาษเพื่อเพิ่มน้ำหนัก ความทึบ และความเหนียวดีขึ้น และทำให้กระดาษมีหน้าเรียบ (coating) นอกจากนี้ ยังใช้ในอุตสาหกรรมยางและทำวัสดุทนไฟ (refractories) การที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา เนื่องจากมีคุณสมบัติเมื่อเปียกน้ำจะปั้นเป็นรูปร่างตามที่ต้องการได้ แต่เมื่อถูกทำให้ร้อน จะมีโมเลกุลของน้ำระเหยออก ทำให้แข็งและทนทาน

ตาราง 2.2 สมบัติพื้นฐานของ Calcine Kaolin Clay เกรด Kamin™ 70C [29]

Properties	Kamin™ 70C
Physical form	White fine powder
Specific gravity	2.6
pH	6
Particle size (micron)	3.2
Water Absorption	Insoluble
Oil Absorption (g/100g)	54
Chemical Analysis :	
- SiO <sub>2</sub> (%) : Crystalline	<0.10

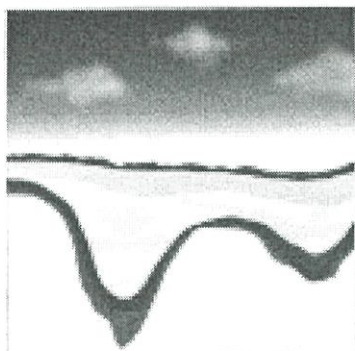
### 2.6.3. Calcined Neuburg Siliceous Earth (Aktifit® AM)

Aktifit® ผลิตโดยการปรับเปลี่ยนพื้นผิวของ Silfit® Z 91 [21] โดยใช้ไซเลน by-product ที่แยกออกระหว่างเกิดปฏิกิริยาจะถูกดูดออกระหว่างกระบวนการผลิตโดยที่ไซเลนจะเกาะแน่นอยู่บนผิวของสารตัวเดิม การกระทำดังกล่าวจะลดผลข้างเคียงที่ไม่ต้องการที่จะเกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตผสม



รูปที่ 2.7 ลักษณะทั่วไปของ Calcined Neuburg Siliceous Earth (Aktifit® AM) [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Neuburg Siliceous Earth is a sediment, which was deposited 95 million years ago on the limestone strata from the later Jurassic period and fell in so-called karst funnels where it was preserved.

รูปที่ 2.8 ลักษณะความเป็นมาของ Calcined Neuburg Siliceous Earth (Aktifit® AM) [20]

ประโยชน์ของ Aktifit® มักจะนำไปใช้ในงานที่ต้องการแรงดึงและค่ามอดุลัสสูง ป้องกันความสกปรกหรือการปนเปื้อนของผิวแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูป นิยมใช้ในการทำสายเคเบิลและฉนวนไฟฟ้า

ตารางที่ 2.3 สมบัติของ Silfit® และ Aktifit® AM [20]

Characteristic	Silfit®	Aktifit® AM
Particle Size (µm)		
- D <sub>50</sub>	2	2
- D <sub>97</sub>	10	10
Electrical Conductivity (µS/cm)	20	60
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.6	2.6
Hardness : silica/calcined kaolinite	7/4.5	7/4.5
Water solubility (%)	insoluble	insoluble
Acid solubility (%)	0.25	0.25
pH value	7	9
Chemical analysis:		
- SiO <sub>2</sub>	86	86
- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12	12
- Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 1	< 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.4. นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (Nano-calcium carbonate; NPCC)

นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นของแข็งสีขาวและมีความเป็นพิษต่ำ ปัจจุบันนิยมใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์หลายชนิด โดยมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานต่อแรงดึง ทำให้พอลิเมอร์ทนต่อการฉีกขาดได้ดีขึ้น ช่วยปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพทางความร้อน เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 สมบัติพื้นฐานของ NPCC-101 [22]

Properties	NPCC-101
ขนาดกลุ่มก้อนสารตัวเติม ( $\mu\text{m}$ )	2.9
พื้นที่ผิวจำเพาะอนุภาคเฉลี่ย ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	21.9
pH	9.19
ความถ่วงจำเพาะ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.50

## 2.7 เครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน

### 2.7.1 การผสม (Mixing)

การผสม คือ การนำวัสดุต่างชนิดมารวมกันและให้เฉลี่ยเข้ากัน โดยให้วัสดุเคลื่อนที่คลุกเคล้ากันจนได้สภาพการผสมที่ต้องการ โดยการหมุนใบกวน ในถังเปิดหรือปิดจะทำให้สารกระเทกและเสียดสีกัน เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งจะผสมเข้ากันดี ซึ่งจะมีเครื่องผสมแบบต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับชนิด และขนาดของพลาสติก ดังรูปที่ 2.7

กรรมวิธี ของเครื่องผสม	ทำงานไม่ต่อเนื่อง						ต่อเนื่อง
	ถังกวน	ถังหมุน แกว่ง	ใบผสม	เปิดถัง กระชาก	นวดผสม	โรตผสม	
Stoff- zustand							
▲ วัสดุคืบ ● สารเติม							
ผง	▲	●					
เหนียวหนืดมาก	▲						
หนืดน้อย	▲						
เหมาะสำหรับ	PVC-Paste! UP	PS, PE PP, PMMA	PVC แข็ง และอ่อน	PVC แข็ง และอ่อน	PVC	PE, PVC	เทอร์โม พลาสติก ทั้งหมด

รูปที่ 2.9 เครื่องผสมแบบต่างๆ [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

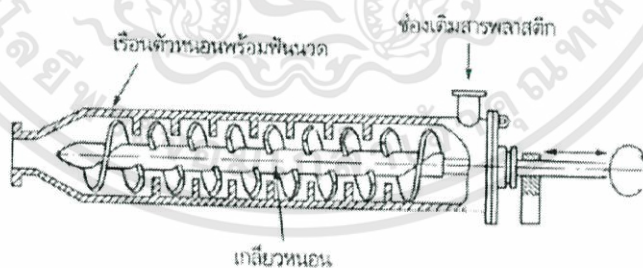
ซึ่งการผสมสารเติมแต่งกับพลาสติกส่วนใหญ่เป็นการผสมของแข็งกับของแข็งหรือของแข็งกับของเหลวเข้าด้วยกัน โดยใช้เครื่องผสม (Mixer หรือ Blender) ทำให้วัสดุเกิดการกระจายตัวเข้ากันอย่างทั่วถึง แต่ยังคงสามารถแยกอนุภาคของสารแต่ละชนิดได้อย่างชัดเจน เครื่องผสมที่ใช้ (Batch mixer) ซึ่งเกิดการผสมโดยไม่ให้พลาสติกได้รับแรงเฉือนมากนัก เทคนิคการผสมนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การผสมแบบเย็น (Cold mixing) และการผสมแบบร้อน (Hot mixing)

### 2.7.2 การคอมปาวด์ (Compounding)

การคอมปาวด์เป็นการผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ กับพลาสติก โดยพลาสติกจะถูกให้ความร้อนจนอยู่ในสภาวะหลอม จากนั้นสารเติมแต่งและพลาสติกหลอมจะถูกนวดผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน เทคนิคการคอมปาวด์พลาสติกสามารถแบ่งออกเป็น การคอมปาวด์แบบแบทช์ (Batch compounding) และการคอมปาวด์แบบต่อเนื่อง (Continuous compounding) ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงแต่การคอมปาวด์แบบต่อเนื่องซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้

#### การคอมปาวด์แบบต่อเนื่อง (Continuous compounding)

โดยทั่วไปการคอมปาวด์แบบต่อเนื่องมักใช้เครื่องอัดรีด (Extruder) หรือเครื่องนวดผสมร่วม (Co-Kneader) ซึ่งประกอบด้วยสกรูหรือฟันนวดที่หมุนอยู่ภายในกระบอกรัดรีด การหมุนของสกรู ทำให้เกิดแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวไปทุกทิศทางของส่วนผสม ซึ่งทำให้การผสมเกิดขึ้นในระดับที่ละเอียดกว่าการคอมปาวด์แบบแบทช์ เครื่องอัดรีดที่ใช้ในการคอมปาวด์พลาสติกมักจะใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่เป็นหลัก ส่วนเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวจะใช้ในกรณีที่ไม่ต้องการความพิถีพิถันในการคอมปาวด์มากนัก

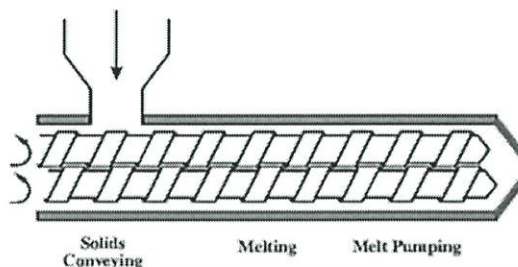


รูปที่ 2.10 เครื่องผสมแบบ Co-Kneader [23]

#### - เครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนคู่ (Twin screw extruder)

เครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนคู่มีประสิทธิภาพการผสมสูงกว่าเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ทั้งนี้เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการหมุนของสกรูคู่สูงกว่า โดยลักษณะการหมุนของสกรูคู่มีสองแบบ ได้แก่ การหมุนในทิศทางเดียวกัน (Co-rotating screw) และการหมุนสวนทางกัน

(Counter-rotating screw) โดยในการทำคอมปาวด์พลาสติกมักใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่มีลักษณะการหมุนของสกรูคู่แบบหมุนในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 2.11 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) [23]

### 2.7.3 การฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

เป็นวิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยการฉีดพลาสติกที่กำลังหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยความดันสูง เครื่องจักรที่ใช้ในการนี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่และเป็นที่นิยมแพร่หลายมีส่วนประกอบสำคัญคือ

**ฮอปเปอร์ (Hopper)** อุปกรณ์ส่วนนี้ มีลักษณะเป็นกรวยขนาดใหญ่ เป็นส่วนที่ใช้บรรจุเม็ดพลาสติกและสารตัวเติม เพื่อป้อนเข้าเครื่องฉีดพลาสติก

**กระบอกฉีดและสกรู (Injector and screw)** เป็นส่วนสำคัญของเครื่องฉีดพลาสติกทำหน้าที่หลอมเหลวพลาสติกและสร้างแรงดันเพื่อฉีดพลาสติกหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ ประกอบด้วยกระบอกตรงติดอยู่กับที่ ส่วนคั่นของกระบอกเป็นที่ติดตั้งฮอปเปอร์ ตรงส่วนกลางและส่วนปลายของกระบอกมีเครื่องให้ความร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ปลายของกระบอกจะต่อเข้ากับหัวฉีด ภายในของกระบอกนี้เป็นสกรูที่มีความยาวสั้นกว่ากระบอกเล็กน้อยมีลักษณะเป็นเกลียวหยาบหมุนป้อนส่วนผสมของพลาสติกให้เคลื่อนที่เข้าสู่กระบอก สามารถเคลื่อนถอยหลังและดันกลับ เพื่อเพิ่มแรงดันให้พลาสติกหลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์

**หัวฉีด (Nozzle)** เป็นส่วนต่อปลายกระบอกฉีดพลาสติกเข้ากับช่องทางไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์หัวฉีดมีรูขนาดเล็กเพื่อให้พลาสติกหลอมเหลวไหลผ่านเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์ด้วยความรวดเร็ว

**มอเตอร์ขับเคลื่อนสกรู (Driven motor)** มอเตอร์ขับเคลื่อนสกรู อาจเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า หรือมอเตอร์ไฮดรอลิก สำหรับหมุนสกรูและขับเคลื่อนสกรู เพื่อฉีดพลาสติกที่กำลังหลอมเหลวเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์

**แม่พิมพ์ (Mold)** เป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นช่องว่างที่มีรูปร่างตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต แม่พิมพ์โดยทั่วไปมักออกแบบให้มี 2 ชิ้น เพื่อให้สะดวกต่อการถอดผลิตภัณฑ์ออกจากแม่พิมพ์นอกจากนี้ต้องมีช่องทางไหลของพลาสติกหลอมเหลวต่อจากหัวฉีดเข้าสู่ช่องว่างใน

แม่พิมพ์เรียกว่า สปรู (sprue) ในแม่พิมพ์ที่มีหลายช่อง (เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ครั้งละหลายชิ้น) จะต้อง มีช่องทางแยกจากสปรูเข้าสู่แม่พิมพ์แต่ละช่อง เรียกว่า รันเนอร์ (runner)

**ตัวหนีบยึดแม่พิมพ์ (Hydraulic clamp unit)** มักเรียกกันว่า แคลมป์ เป็นกลไกสำหรับเปิด และปิดฝาแม่พิมพ์ขับเคลื่อนด้วยกำลังไฮดรอลิก อุปกรณ์ส่วนนี้ยังรวมทั้งอุปกรณ์ทำความร้อนเพื่อ อุ่นแม่พิมพ์ก่อนฉีด และอุปกรณ์ทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิแม่พิมพ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์แข็งตัวก่อน ถอดออกจากแม่พิมพ์

**ชุดควบคุมกลาง (Central control)** เป็นชุดควบคุมเครื่องจักรรวมทุกส่วน ได้แก่ อุปกรณ์ จ่ายกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์วัด และควบคุมอุณหภูมิ อุปกรณ์ควบคุมความดัน และอุปกรณ์ตั้งเวลา

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**Jo Ann Ratto และคณะ [24]** ได้ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBSA (Polybutylene succinate adipate) กับแป้งข้าวโพด แล้วนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล, สมบัติ ทางความร้อน และสมบัติการย่อยสลายโดยเตรียม PBSA ผสมกับแป้งในอัตราส่วน 5% - 30% โดย น้ำหนัก ทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดรีดฟิล์มแบบเป่า (Blown film extrusion) พบว่าปริมาณแป้ง ที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่ามอดูลัส (Modulus) เพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength), เปอร์เซ็นต์ การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และความเหนียว (Toughness) ลดลง ทำการวิเคราะห์ อัตราการย่อยสลายในดินด้วยเครื่อง Respirometer โดยพบการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของการย่อย สลายเมื่อมีอัตราส่วนแป้ง 20% ทำการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) พบว่าเม็ดแป้งถูกฝังอยู่ในเนื้อ PBSA อย่าง ต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งช่วยในการย่อยสลายได้ดียิ่งขึ้น และวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของ พอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค Gel Permeation Chromatography (GPC) แสดงให้เห็นว่าน้ำหนัก โมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมลดลงหลังจากทำการฝังกลบในดิน เป็นการยืนยันว่าพอลิเมอร์ผสมเกิด การสลายตัวได้ดีขึ้นเมื่อมีแป้งเป็นองค์ประกอบ

**Daniel Eiras และคณะ [25]** ได้ศึกษาอิทธิพลของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate nanoparticles) ที่มีต่อองค์ประกอบความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีน (Polypropylene) โดย องค์ประกอบของ PP/ CaCO<sub>3</sub> nanocomposites เตรียมได้จากการใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ ชนิด Co-rotational (Co-rotational twin-screw extruder) โดยใช้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต 3, 5, 7 และ 10 wt.(%) จากนั้นทำการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM), องค์ประกอบความเป็นผลึก(% Crystallinity, X<sub>c</sub>) ของของผสมด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) และ wide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

angle X-ray diffraction (WAXD) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystallization temperature,  $T_c$ ) องศาความเป็นผลึก (% Crystallinity,  $X_c$ ) ที่เพิ่มมากขึ้น และขนาดของ spherulites ที่ลดลง ใช้เทคนิค DSC และ WAXD ยืนยันรูปแบบเบต้าเฟสของพอลิโพรพิลีน และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ที่อุณหภูมิคงที่พบว่านาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมีการเกิดนิวเคลียสผลึก (Nucleation effect) ในกระบวนการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน โดยลดเวลาการเกิดผลึกลงครึ่งหนึ่ง และเพิ่มค่าคงที่ทางจลนศาสตร์ (Kinetic constant,  $k$ )

**Bonnet M.** [27] ได้ทำการศึกษาสารตัวเติมจำพวก Neuburg Siliceous Earth ซิลิไฟต์ Z 91 (Silifit® Z 91) เป็นของผสมที่เกิดได้ในธรรมชาติ เกิดจากซิลิกาอสัณฐาน ซิลิกาแบบจตุรผลึก (Crypto-crystalline) และดินขาวผิวบางที่ผ่านการบำบัดผิว (Surface treat) โดยใช้ความร้อน แอคติไฟต์ AM (Aktifit® AM) คือซิลิไฟต์ Z 91 ที่ได้รับการกระตุ้น และได้ทำการดัดแปลงผิวโดยใช้อะมิโนไซเลน ระหว่างการคอมปาวด์ หมูอะมิโนของแอคติไฟต์ AM ส่งผลให้เกิดภาวะการเปียก (Wetting) การกระจายตัวได้ดีในเนื้อพอลิเมอร์ ยิ่งไปกว่านั้นยังทำให้พันธะพอลิเอไมด์ที่ดีขึ้นเพราะการเกิดพันธะไฮโดรเจน จากการศึกษาโดยใช้ดินขาวแคลไซต์ 2 ชนิดและโวลาสโทไนส์เป็นสารตัวเติม ดินขาวชนิดแรกเป็นชนิดที่ไ้กักันอย่างแพร่หลายโดยมีค่าการกระจายหนึ่ง ดินขาวชนิดที่ 2 ใ้ไปเพื่อปรับปรุงสมบัติให้แข็ง ทนแรงกดและแข็งแรงขึ้น โดยมีขอบสเปกตรัม (Grain spectrum) ที่คล้ายกับ Neuburg Siliceous Earth แต่มีการดูดซึมน้ำมันที่ต่ำกว่า สารตัวเติมทุกตัวที่ใช้ได้ทำการบำบัดผิวโดยใช้อะมิโนไซเลนยกเว้นซิลิไฟต์ Z 91

**ช่อลดา เล้ากิตติกุล และคณะ** [26] ได้ทำการศึกษาการเตรียมพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดใหม่ (Novel Biodegradable plastics) จากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate, PBS) ผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดพรีเจล (Pregelatinized starch, PGS) โดยเน้นศึกษาผลของอัตราส่วนผสมระหว่าง PGS/PBS (50/50, 60/40, 70/30, 80/20) และผลของการเติมสารช่วยผสม (Compatibilizer) ที่มีต่อสมบัติของวัสดุ ทำการทดลองโดยการผสมพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปตัวอย่างด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) จากนั้นทำการศึกษาสมบัติต่างๆของวัสดุ ได้แก่ สมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile strength), เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break), โมดูลัส (Modulus), ความแข็งกด (Hardness) ฯลฯ สมบัติทางกายภาพ เช่น เปรอร์เซ็นต์การดูดน้ำ, ความหนาแน่น ฯลฯ สมบัติทางความร้อน เช่น อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) และองศาความเป็นผลึก (% Crystallinity,  $X_c$ ) ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) และ Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMTA) และศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SEM) พบว่าปริมาณกลีเซอรอลทำให้พอลิเมอร์ผสมนี้เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสลดลง แต่ทำให้เปอร์เซ็นต์การยึดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของแป้งคัดแปรเพิ่มมากขึ้น พอลิเมอร์ผสมจะมีสมบัติเชิงกล, อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ), อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคลดลง โดยที่เปอร์เซ็นต์การดูดน้ำและองศาความเป็นผลึก ( $X_c$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ชนิดของแป้งโดยรวมจะมีผลแก่สมบัติเชิงกลและเปอร์เซ็นต์การดูดน้ำ ซึ่งพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic starch, HBS) ได้ค่าที่ดีกว่า ซึ่งในงานวิจัยนี้การเติมสารช่วยผสมไม่เห็นผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่แน่ชัด

**กมลชนก ตังคพานิช และคณะ [7]** ได้ทำการศึกษาผลของชนิดแป้งมันสำปะหลังคัดแปรที่มีต่อสมบัติของพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ (Biodegradable bioplastics) ที่เตรียมจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(Butylenes Succinate), PBS) ผสมแป้งมันสำปะหลังคัดแปร (Modified Tapioca Starch) ในงานวิจัยนี้อัตราส่วนของ PBS ต่อแป้งคัดแปรถูกควบคุมให้คงที่ที่ 60:40 โดยน้ำหนัก แป้งคัดแปร 7 ชนิดที่ศึกษา ได้แก่ แป้งไฮโดรโฟบิกชนิดความหนาแน่นปานกลาง (HBS-M), แป้งไฮโดรโฟบิกชนิดความหนาแน่นสูง (HBS-H), แป้งเชื่อมโยง (TS-X), แป้งเอสเทอร์ (ESS), แป้งเอสเทอร์ชนิดเชื่อมโยง (ESS-X), แป้งอีเทอร์ (ETS) และแป้งอีเทอร์ชนิดเชื่อมโยง (ETS-X) ทำการทดลองโดยผสมสูตรด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปตัวอย่างด้วยการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) จากนั้นทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของวัสดุได้แก่ สมบัติการไหล (Melt Flow Index, MFI) สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและศึกษาสัญญาณวิทยาสมบัติทางกายภาพโดยการวัดเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (% Water absorption) รวมถึงสมบัติการย่อยสลาย (Degradability) ด้วยวิธีฝังกลบ (Burial test) จากการทดลองพบว่าเมื่อใส่แป้งทำให้ PBS มีสมบัติการไหล สมบัติเชิงกล อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (% Crystallinity,  $X_c$ ) ลดลง แต่มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (% Water absorption) และความสามารถในการย่อยสลายมากขึ้น โดยอนุภาคของเม็ดแป้งมีการกระจายดีใน PBS พบว่าชนิดของแป้งคัดแปรมีผลทำให้ได้วัสดุผสมที่มีสมบัติเชิงกลไม่แตกต่างกัน แต่มีการดูดซึมน้ำและความเร็วในการย่อยสลายต่างกัน โดย PBS/ETS มีความสามารถในการดูดซึมน้ำมากที่สุดและย่อยสลายได้เร็วที่สุด

**ดวงพร คล้ายเพชร และคณะ [28]** ศึกษาฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมได้จาก Polybutylene succinate (PBS) ผสมแป้งคัดแปรเอสเทอร์ (EMS) แป้งพีรีเจล (PGS) และแป้งไฮโดรโฟบิก (HBS) โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และมาลาอิกแอนไฮดรายด์กราฟพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (MA-g-PBS) เป็นสารช่วยผสม โดยทำการผสมด้วยเครื่อง Twin-screw extruder และขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการเป่า (Blow film extrusion) โดยพบว่าแป้งที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่าคือแป้งเอสเทอร์ และแป้งไฮโดรโฟบิก พบว่าอัตราส่วน PBS/Starch ที่เหมาะสมคือ 70/30 และปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมคือ 40% (โดยน้ำหนักของแป้ง) เมื่อเพิ่มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณกิลิเซอรอลทำให้พอลิเมอร์นิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึง โมดูลัสของยัง และองศาความเป็นผลึก ลดลง ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งตัดแปรส่งผลให้สมบัติเชิงกล ลดลง การใช้สารช่วยผสม MA-g-PBS ปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก PBS ช่วยปรับปรุงสัณฐานวิทยาทำให้เม็ดแป้งยึดกับ PBS ดีขึ้นการดูดซับน้ำลดลง แต่ไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนมากนัก จากการศึกษาการย่อยสลายในดินโดยการฝังกลบพบว่า พิล์มทุกสูตรสามารถย่อยสลายได้หมดภายใน 3 เดือน

**อัจฉราพร รัตนมณี [11]** ศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้จากอีโคเฟล็กซ์ (Ecoflex<sup>®</sup>) ผสมแป้งตัดแปรเอสเทอร์ (EMS) และแป้งพรีเจล (PGS) สำหรับงานเกษตรกรรม โดยนำแป้ง EMS และแป้ง PGS มาผสมกับพลาสติกย่อยสลายได้ คือ Ecoflex<sup>®</sup> โดยผสมอัตราส่วนระหว่าง Ecoflex<sup>®</sup> และแป้งสตาร์ช 80:20, 70:30, และ 60:40 (โดยน้ำหนัก) และใช้ปริมาณพลาสติกไซเซออร์ คือ กิลิเซอรอลเป็น 50% ของปริมาณแป้งสตาร์ช ทำการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม พบว่าฟิล์มที่ได้มีความหนาประมาณ 50-80 ไมครอน และเมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล Ecoflex<sup>®</sup>/PGS จะมีสมบัติเชิงกลดีกว่า Ecoflex<sup>®</sup>/EMS โดยสูตร Ecoflex<sup>®</sup>/PGS สูตร 80:20 มีค่าความแข็งแรงดึง, ความแข็งแรงฉีกขาด และค่าโมดูลัสสูงสุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่น สมบัติทางความร้อนไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และค่าองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ของ Ecoflex<sup>®</sup> ลดลง ส่วนค่าการซึมผ่านไอน้ำ (Water permeability, WVP) เพิ่มขึ้นอย่างมาก และค่าการซึมผ่านออกซิเจน (Oxygen permeability, OP) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย Ecoflex<sup>®</sup>/PGS มีค่าการซึมผ่านที่ต่ำกว่า เนื่องจากสามารถผสมเข้ากันได้ดี และมีรอยต่อระหว่างวัฏภาคน้อยกว่า และEcoflex<sup>®</sup>/PGS ดูดซับน้ำและย่อยสลายได้ดีกว่า Ecoflex<sup>®</sup>/EMS

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 พลาสติก PBS (PBS เกรด AZ91TN; BC Polymers Marketing Co., Ltd.) สมบัติบางประการของ PBS สามารถแสดง ได้ดังตารางที่ 3.1

ตาราง 3.1 สมบัติบางประการของ PBS

สมบัติ	PBS เกรด AZ91TN
ความหนาแน่น ( $\text{g/cm}^3$ )	1.26
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, $T_g$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ )	-32
จุดหลอมเหลว (Melting point, $T_m$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ )	114-115
ค่าความแข็งแรง ณ จุดขาด (Stress at break) (MPa)	37
การดึงยืด ณ จุดขาด (Strain at break) (%)	300
ค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) (MPa)	530
ค่าความแข็งแรงกระแทก (Izod impact strength) ( $\text{kJ/m}^2$ )	8.2
ครรชนีการไหล (Melt flow rate, MFR) ( $190^{\circ}\text{C}$ , 2.16 kg) ( $\text{g}/10\text{ min}$ )	4

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัท

3.1.2 แป้งไฮโดรโฟบิก ชนิดไม่ชอบน้ำตัดแปรปานกลาง (Hydrophobic tapioca starch medium density; Siam Modified Starch Co.Ltd.)

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของแป้งไฮโดรโฟบิก ชนิดไม่ชอบน้ำตัดแปรปานกลาง ที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อทางการค้า	ลักษณะ	ความชื้น	ค่า pH
SL111014	White powder	13.00%	4.5-6.5

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัท

### 3.1.3 กลีเซอรอล (Glycerol: เกรดการค้า; Lab system Co.,Ltd.)

#### ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของกลีเซอรอล

ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	จุดเดือด (°C)	จุดหลอมเหลว (°C)	ความหนืดที่ 20°C (mPs)
1.26	290	18	1400

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัท

### 3.1.4 สารตัวเติม Calcined Neuburg Siliceous Earth (เกรด Aktifit<sup>®</sup> AM; Hoffmann Mineral)

#### ตารางที่ 3.4 สมบัติบางประการของ Calcined Neuburg Siliceous Earth ที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติ	AKFT
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	2.6
Basic material	Silfit <sup>®</sup> Z 91
Surface modification	Amino silane
Electrical conductivity (μS/cm)	60
Hardness: silica/calcined kaolinite	7/4.5
Water solubility (%)	insoluble
Acid solubility (%)	0.25
pH value	9
Chemical analysis:	
SiO <sub>2</sub> (%)	86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	<1

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัท

### 3.1.5 สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (เกรด Coat; Chemmin Corporation Ltd. )

#### ตารางที่ 3.5 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติ	CaCO <sub>3</sub>
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	0.83-0.87
Chemical analysis:	
CaCO <sub>3</sub> (%)	98.5%
SiO <sub>2</sub> (%)	0.03%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.03%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติ	CaCO <sub>3</sub>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.06%
MgO (%)	0.28%
Hardness	3
Moisture (%)	0.2

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัท

3.1.6 สารตัวเติม Calcined Kaolin Clay (KaMin™ 70C; Connell Bros)

ตารางที่ 3.6 สมบัติบางประการของ Calcined Kaolin Clay ที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติ	CLAY
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	2.6
ลักษณะ	White powder
Particle size (micron)	3.2
Water Absorption	Insoluble
pH	6

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัท

3.1.7 สารตัวเติม Nano-precipitated calcium carbonate (เกรด NPCC-101; NanoMaterials Technology)

ตารางที่ 3.7 สมบัติบางประการของ Nano-precipitated calcium carbonate ที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติ	NPCC
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	2.5-2.6
ลักษณะ	White powder
Moisture content (%)	<0.5
CaCO <sub>3</sub> (%)	>97
pH	8.0-9.5

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัท

3.1.8 Phenolic antioxidant (Anox® 20:เกรคดิเคอเรทซ์; Great Lakes Chemical Co.,Ltd.)

3.1.9 Phosphite antioxidant (Anox® 240:เกรคดิเคอเรทซ์; Great Lakes Chemical Co.,Ltd.)

ตารางที่ 3.8 ตารางเปรียบเทียบสมบัติบางประการของสารตัวเดิมที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติ	AKFT	CaCO <sub>3</sub>	CLAY	NPCC
Physical form	White fine powder	White fine powder	White fine powder	White fine powder
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.6	0.83-0.87	2.6	2.5-2.6
pH	9		6	8.0-9.5
Particle size (micron)	D <sub>50</sub> 2 D <sub>97</sub> 10		3.2	0.015-0.04
Water Absorption	Insoluble	Insoluble	Insoluble	Insoluble
Chemical Analysis	SiO <sub>2</sub> (%) 86 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) 12 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) <1	CaCO <sub>3</sub> (%) 8.5 SiO <sub>2</sub> (%) 0.03 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) 0.03 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) 0.06 MgO (%) 0.28	SiO <sub>2</sub> (%) : Crystalline <0.10	CaCO <sub>3</sub> (%) >97 MgO (%) <0.5

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 บริภัณฑ์เครื่องแก้ว

3.2.2 เคชิกเคเตอร์ (Desiccators)

3.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด (Sartorius รุ่น AC201S)

3.2.4 ตู้อบ (WTC binder รุ่น 7200 Tuttlingen/Germany)

3.2.5 เครื่องผสมความเร็วสูง (High Speed Mixer; Labtech Engineering Company Ltd.)

3.2.6 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-Screw Extruder; Brabender รุ่น PL2100)

3.2.7 เครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder; Bosco Engineering รุ่น Bosco A600)

3.2.8 เครื่องฉีดขึ้นรูป (Plastic Injection Molding Machine; Cosmo รุ่น TTI-220/80 HITECH)

3.2.9 เครื่องทดสอบความแข็งแรงกด (Durometer hardness tester: Shore D; Teclock รุ่น GS-720N)

3.2.10 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine: UTM; Lloyd Instruments รุ่น LR 5K)

3.2.11 เครื่องวัดดัชนีการไหล (Melt Flow Index: MFI; Ceast รุ่น Torino-italy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.2.12 เครื่องทดสอบทางความร้อน DSC (Differential Scanning Calorimeter; Perkinelmer Instrument)
- 3.2.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope:SEM; EVO รุ่น EVO®MA10)

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

1. นำแป้งไฮโดรโฟบิก ชนิดไม่ชอบน้ำตัดแปรปานกลาง พลาสติก PBS และสารตัวเติม ชนิดต่างๆ อบที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. ทำการผสมตามสูตร ดังตารางที่ 3.9 โดยนำแป้งที่อบแล้วมาผสมกับกลีเซอรอล และ แอนติออกซิแดนที่ประมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์ของ PBS และแป้ง
3. นำแป้งที่ผสมตามสูตรแล้ว มาผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High Speed Mixer) จากนั้นนำมาใส่ในถุงแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. ใส่พอลิเมอร์ที่ผสมทิ้งไว้ลงในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-Screw Extruder) สภาวะดังภาคผนวก ก1

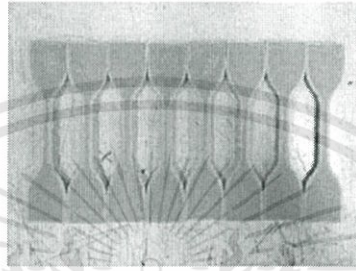
ตารางที่ 3.9 สูตรผสมที่ใช้ในการทดลอง

สารตัวอย่าง	อัตราส่วน PBS/แป้งHBS-M (w/w)	ปริมาณสารตัวเติม (php)	ปริมาณกลีเซอรอล (%โดยน้ำหนักแป้ง)
PBS Pure	-	-	-
PBS/HBS-M	60/40	-	30
PBS/HBS-M/AKFT	60/40	10, 20, 30, 40	30
PBS/HBS-M/ $\text{CaCO}_3$	60/40	10, 20, 30, 40	30
PBS/HBS-M/Clay	60/40	10, 20, 30, 40	30
PBS/HBS-M/NPCC	60/40	5, 10, 15, 20	30

### 3.3.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน

1. นำพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมแล้ว ไปบดย่อยด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder) จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. นำพอลิเมอร์ที่บดเสร็จแล้วใส่ลงในส่วนป้อนสาร (Hopper) ของเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection Molding Machine) แล้วทำการปรับอุณหภูมิและความดันตามความเหมาะสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ ดังรูปที่ 3.1 โดยใช้สภาวะดังภาคผนวกที่ ก2 และ ก3



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูป

### 3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติต่างๆของสารตัวอย่าง

#### 3.3.3.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และมอดุลัส (Modulus) (ตามมาตรฐาน ASTM D638)

นำชิ้นงานรูปดัมเบลล์ (Dumbbell) มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) โดยมีสภาวะการทดสอบดังนี้

ความเร็วของแท่นตัดขวาง (Crosshead speed)	100	มิลลิเมตรต่อนาที
ระยะห่างของชิ้นงาน	70.0	มิลลิเมตร
น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง	5	kN
จำนวนชิ้นงานที่ทดสอบ	8	ชิ้นต่อสูตร

นำผลที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณค่าสมบัติเชิงกลต่างๆ ได้จากสมการดังนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)} = F/A \quad (3.1)$$

$$\text{มอดุลัส (Modulus)} = \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}} \quad (3.2)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด} = \left( \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \right) \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $F$  คือ แรงดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (หน่วยเป็นนิวตัน)  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร)  
 $L$  คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)  
 $L_0$  คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดก่อนทำการดึงชิ้นงานเป็นระยะที่แคบที่สุดและมีพื้นที่  
 ขนานกัน (Gauge length หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

#### การทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact test)

ทดสอบด้วย Izod impact tester ตามมาตรฐาน ASTM D256 ชิ้นงานมีรอยบาก (Notch) รูป  
 ตัววี (v) ลึก 0.1 นิ้ว วัดค่าความแข็งแรงกระแทกในหน่วย  $\text{kJ/m}^2$  ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง  
 $25^\circ\text{C}$  ทดสอบชิ้นงาน 8 ชิ้นต่อสูตร

#### การทดสอบความแข็งกด (Hardness test)

การทดสอบหาค่าความแข็งกดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D785 การทดสอบใช้  
 มาตรฐานแบบ Shore D ลักษณะของชิ้นงานที่นำมาทดสอบ ต้องมีความหนาไม่ต่ำกว่า  $\frac{1}{4}$  นิ้ว กด  
 เป็นเวลา 10 วินาที จึงอ่านค่า

#### 3.3.3.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

##### Differential Scanning Calorimeter (DSC)

ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 10 มิลลิกรัมให้มีน้ำหนักที่แน่นอน แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วย  
 เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยให้อัตราความร้อนเท่ากับ  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  จาก  
 อุณหภูมิห้องจนถึง  $200^\circ\text{C}$  จากนั้นลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา  $20^\circ\text{C}/\text{min}$  จนถึง  $30^\circ\text{C}$  และให้ความร้อน  
 ครั้งที่ 2 ด้วยอัตราความร้อนเท่ากับ  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  จนอุณหภูมิถึง  $200^\circ\text{C}$  มาตรฐาน ASTM E794 ซึ่ง  
 สามารถคำนวณหาค่าองศาความเป็นผลึก (%Crystallinity,  $X_c$ ) ได้จากสมการที่ 3.4

$$\% \text{Crystallinity } (X_c) = \frac{\Delta H_f \times 100}{\Delta H_f^\circ \times \% \text{PBS ในวัสดุ}} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $\Delta H_f$  คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก

$\Delta H_f^\circ$  คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PBS ที่มีความเป็นผลึก 100 % ซึ่งมีค่า  
 เท่ากับ  $114 \text{ J/g}$  [26]

#### 3.3.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยา (Morphology)

การศึกษาพื้นฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning  
 Electron Microscope) เป็นการส่องดูพื้นผิวของวัสดุอย่างละเอียดที่กำลังขยายสูง การเตรียมตัวอย่าง  
 เตรียมด้วยการแช่ชิ้นงานลงในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นเวลา 20 นาที แล้วทำการหัก  
 ในไนโตรเจนเหลวทันที นำตัวอย่างมาเคลือบทองและนำไปวิเคราะห์ SEM ต่อไป

#### 3.3.3.4 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

ชั่งน้ำหนักชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง จากนั้นนำชิ้นงานแช่ในน้ำกลั่นทิ้งไว้ 1 วัน จากนั้นนำชิ้นงานเช็ดให้ปราศจากน้ำ แล้วชั่งน้ำหนักทุกวันจนกว่าค่าน้ำหนักชิ้นงานคงที่

#### 3.3.3.5 การวิเคราะห์การย่อยสลายของชิ้นงานโดยการฝังกลบ (Degradability by burial test)

ทำการถ้ำรูปชิ้นงานก่อนฝังกลบ แล้วทำการฝังกลบลงในดินที่มีค่าความชื้น 50-55% ค่า pH 6 โดยฝังลึกลงไปประมาณ 5 cm ทำการตรวจสอบความชื้นให้อยู่ที่ 50% และทำการถ้ำรูปทุกสัปดาห์ โดยคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจากสูตร

$$M_t (\%) = (W_w - W_d) / W_d \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ  $M_t$  คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น ณ เวลา (t) ใดๆ

$W_d$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่น้ำ

$W_w$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังแช่น้ำ

#### 3.3.3.6 การทดสอบค่าดัชนีการไหล (Melt flow index , MFI)

ดัชนีการไหล (Melt flow index , MFI) ดำเนินการทดลองตามการทดสอบของมาตรฐานการทดสอบ ASTM D1238-98 กดพอลิเมอร์ผสมหลอมเหลวให้ไหลผ่านหัวคายที่อุณหภูมิ 190 °C น้ำหนักที่ใช้กด 2.16 kg รายงานผลเป็นน้ำหนักต่อหน่วยเวลา คือ g/10 min โดยใช้เครื่อง Melt flow rate tester [7,26]

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของชนิดของสารตัวเติม (Fillers) ที่มีต่อสมบัติของพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ (Biodegradable bioplastics) ที่เตรียมจากพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนต (Poly(Butylenes Succinate), PBS) ผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (Modified Tapioca Starch) ชนิดไม่ชอบน้ำดัดแปรปานกลาง (Hydrophobic tapioca starch medium density) โดยในงานวิจัยนี้ อัตราส่วนของ PBS ต่อแป้งมันสำปะหลังดัดแปรถูกควบคุมให้คงที่ที่ 60:40 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [35,39] พบว่าเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในปริมาณ 30% โดยน้ำหนักแป้ง โดยสารตัวเติมทั้ง 4 ชนิดที่ทำการศึกษา ได้แก่ สารตัวเติม Calcined Neuburg Siliceous Earth (Aktifit<sup>®</sup> AM), สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (เกรด Coat), Calcined Kaolin Clay (KaMin<sup>™</sup> 70C) และสารตัวเติม Nano-precipitated calcium carbonate (เกรด NPCC-101) โดยเลือกใช้ปริมาณสารตัวเติมในช่วง 10-40 php แต่อย่างไรก็ดี สารตัวเติมชนิด Nano-precipitated calcium carbonate (เกรด NPCC-101) มีขนาดเล็กมากและกระจายตัวได้ยาก จึงเลือกใช้ปริมาณเพียง 5-20 php จากนั้นพิจารณาเลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุดที่เป็นไปได้ สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ย่อยสลายได้ โดยไม่ต้องการสมบัติเชิงกลสูงนัก และสามารถลดต้นทุนการผลิต

สมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนตกับแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ชนิดไม่ชอบน้ำดัดแปรปานกลางและสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ศึกษาแบ่งออกเป็น 6 ตอน ได้แก่

ตอนที่ 1 สมบัติเชิงกล ได้แก่ มอดุลัส (Modulus) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ความแข็งกด (Hardness) และการทดสอบแรงกระแทก (Impact test)

ตอนที่ 2 สมบัติทางความร้อน ได้แก่ องศาความเป็นผลึก ( $X_c$ )

ตอนที่ 3 สมบัติการไหล ได้แก่ ค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index, MFI)

ตอนที่ 4 ศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) เพื่อศึกษาการกระจายตัวและการยึดเกาะของ วัฏภาคด้วยเทคนิค SEM

ตอนที่ 5 สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

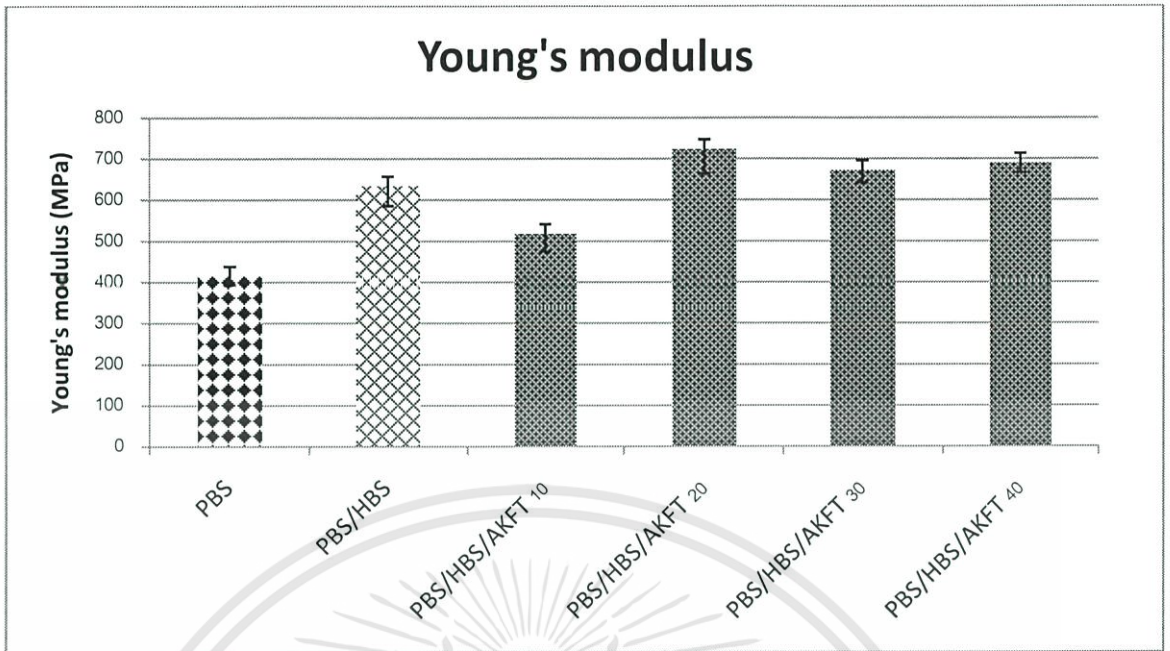
ตอนที่ 6 การย่อยสลาย (Degradability) ด้วยวิธีการฝังกลบ (Burial test)

## ตอนที่ 1 สมบัติเชิงกล

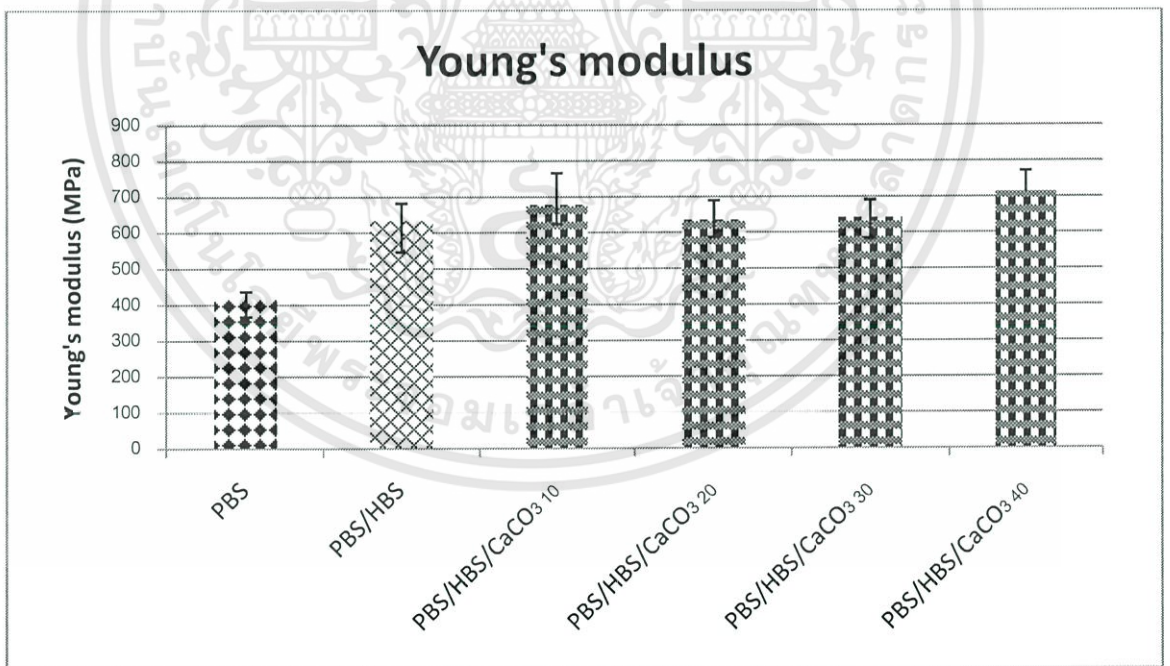
### 1.1 ผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และค่าความแข็ง (Hardness)

ในการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน หลังจากทำการฉีดขึ้นรูปของผสมจนได้เป็นชิ้นงานแล้ว ได้นำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรง ได้แก่ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และค่าความแข็งกด (Hardness) ในทางทฤษฎี การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมอนินทรีย์ลงในพอลิเมอร์เป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ตามกฎของของผสม (Rule of mixture) ยิ่งเพิ่มปริมาณสารตัวเติมมากเท่าใด ความแข็งแรงของของผสมก็จะยิ่งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

จากรูปที่ 4.1-4.4 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและปริมาณสารตัวเติมในพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ต่อค่ามอดูลัสของยัง ที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของวัสดุ พบว่าพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีค่ามอดูลัสของยังที่มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม PBS/HBS-M ทั้งนี้เนื่องจากการใส่สารตัวเติมอนินทรีย์ เป็นเหมือนการเพิ่มอนุภาคที่มีความแข็งแรงลงไปชิ้นงานทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในช่วงแรกของการดิง ค่ามอดูลัสของยังจึงเพิ่มขึ้นสูงกว่าสูตรที่เป็น PBS/HBS-M เมื่อพิจารณาที่ชนิดสารตัวเติมชนิดเดียวกัน พบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ตามกฎของของผสม

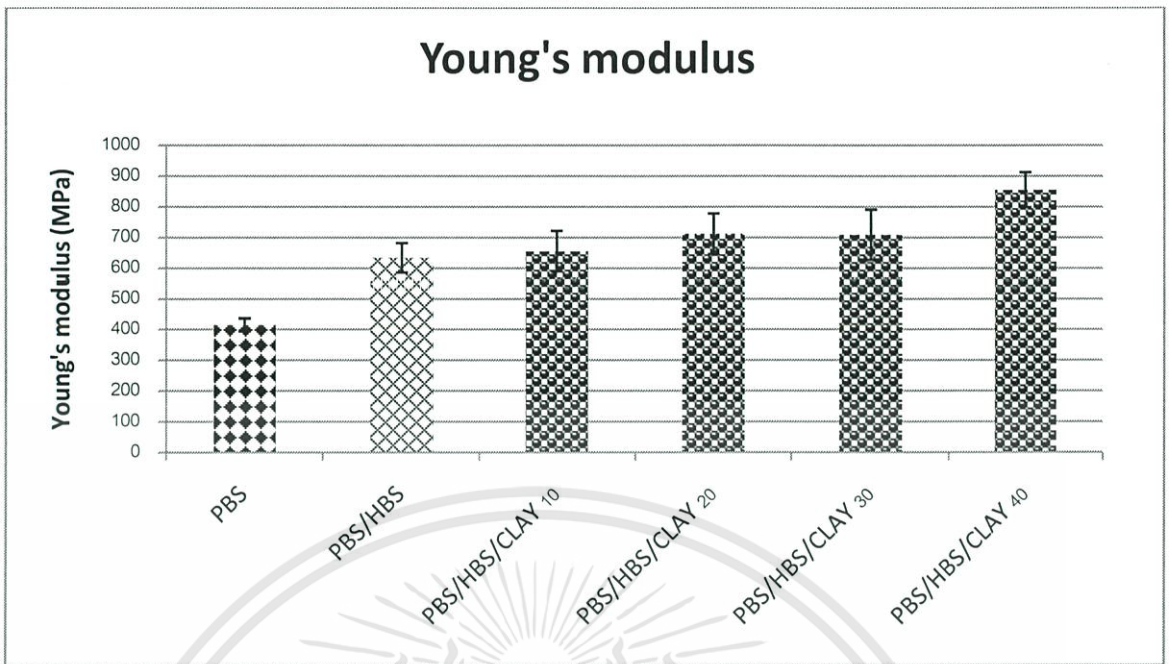


รูปที่ 4.1 ค่ามอดุลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด AKFT

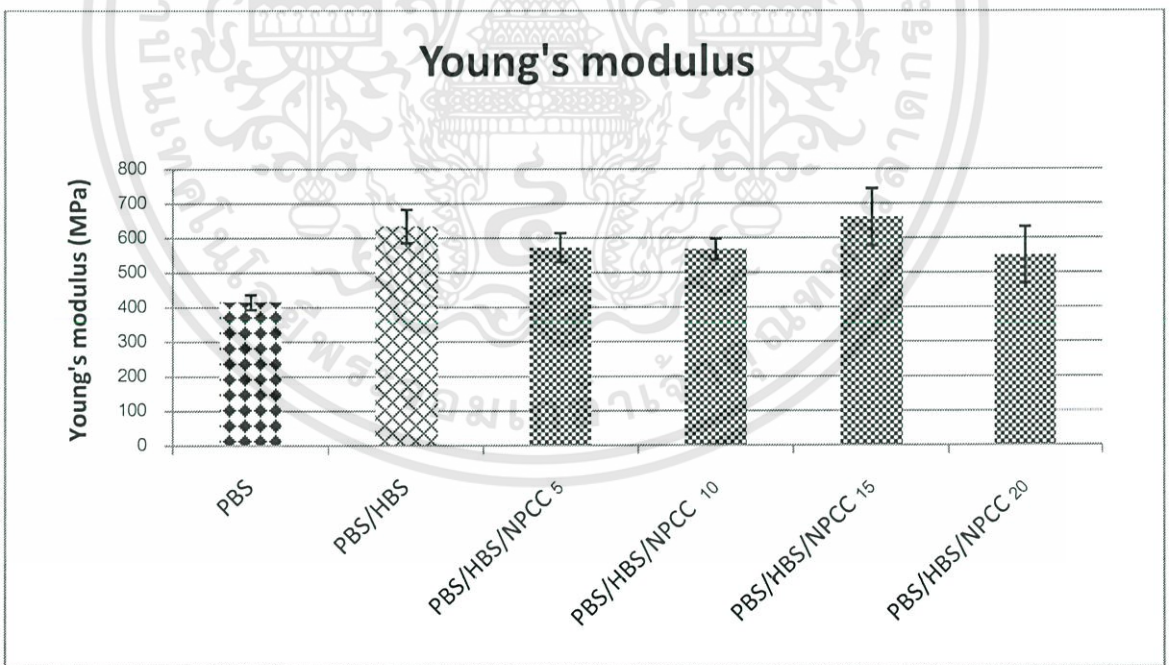


รูปที่ 4.2 ค่ามอดุลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CaCO<sub>3</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CLAY

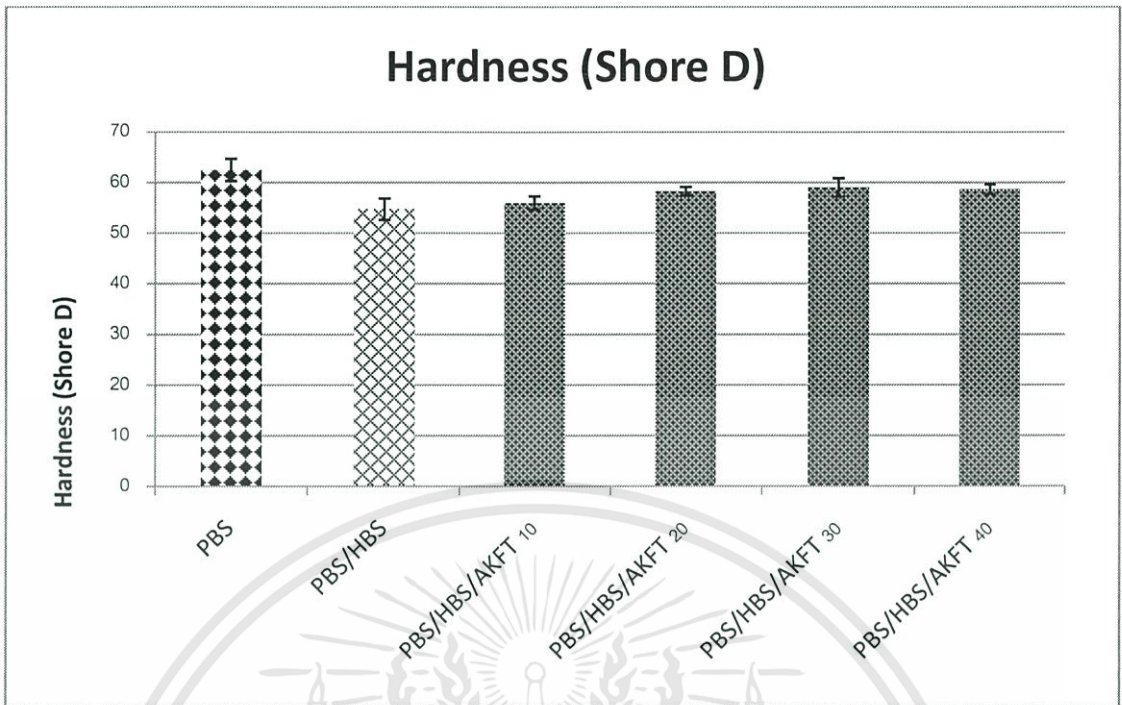


รูปที่ 4.4 ค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด NPCC

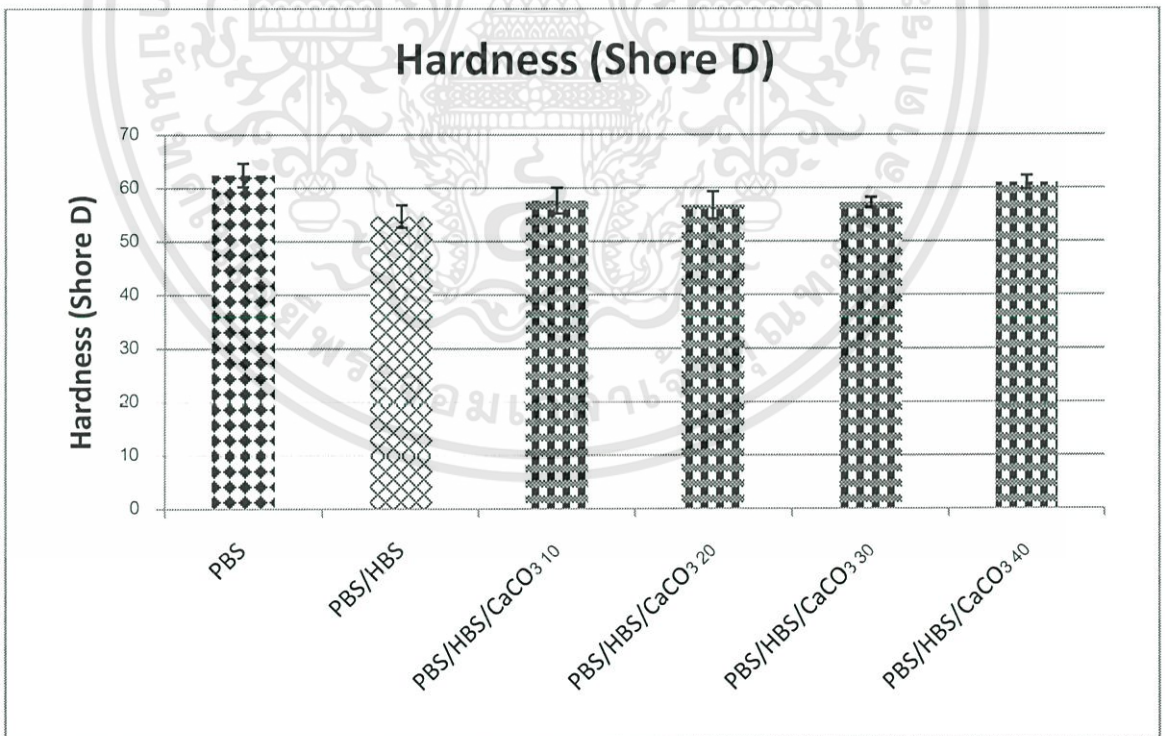
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบค่าความแข็งกดแบบ Shore (Shore hardness test) หัวกดที่ใช้เป็นแบบ Shore D เป็นการวัดความต้านทานของพอลิเมอร์ต่อรอยกด ซึ่งการเติมสารตัวเติมอินทรีย์ลงในพอลิเมอร์จะทำให้พอลิเมอร์รับแรงกดได้เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.5 -4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและปริมาณสารตัวเติมในพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ต่อค่าความแข็งกด พบว่า การใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆลงใน PBS/HBS-M ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งกดมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีข้างต้น และการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมไม่ได้ทำให้ค่าความแข็งกดของชิ้นงานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบผลของค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ที่เติมสารตัวเติม เทียบกับ PBS บริสุทธิ์ พบว่าค่าความแข็งกดลดลง ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากในการทดลองได้มีการเติมสารตัวเติมในปริมาณที่มาก (10-40 php และ 5-20 php สำหรับ NPCC) อาจทำให้เกิดรอยตำหนิที่ผิวชิ้นงาน เมื่อทำการทดสอบโดยใช้เข็มกดลงบนที่ผิวชิ้นงาน ค่าความแข็งที่ได้จึงน้อยกว่า PBS บริสุทธิ์



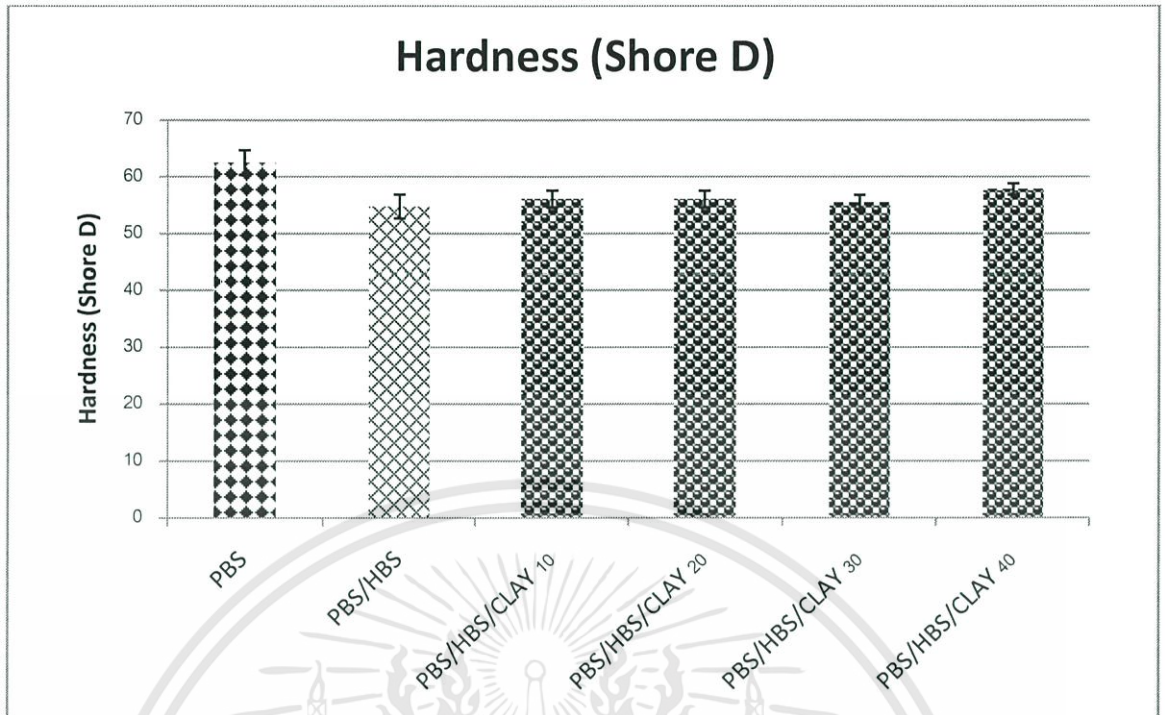


รูปที่ 4.5 ค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด AKFT

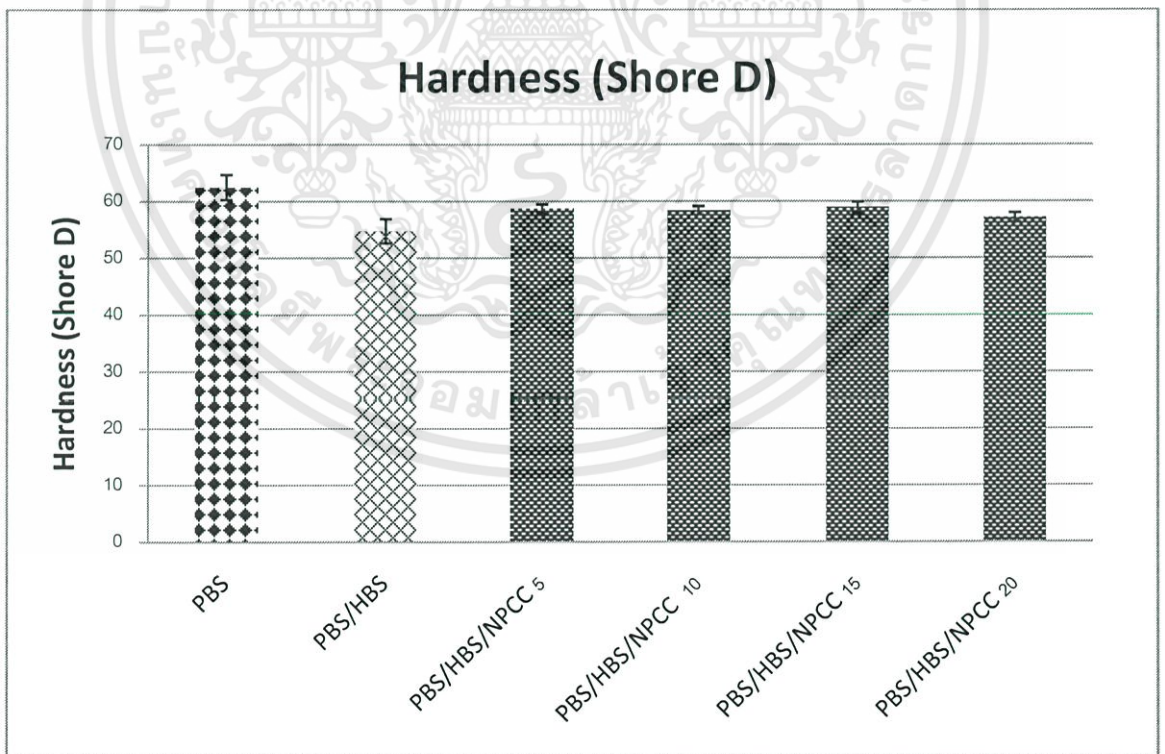


รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CaCO<sub>3</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CLAY



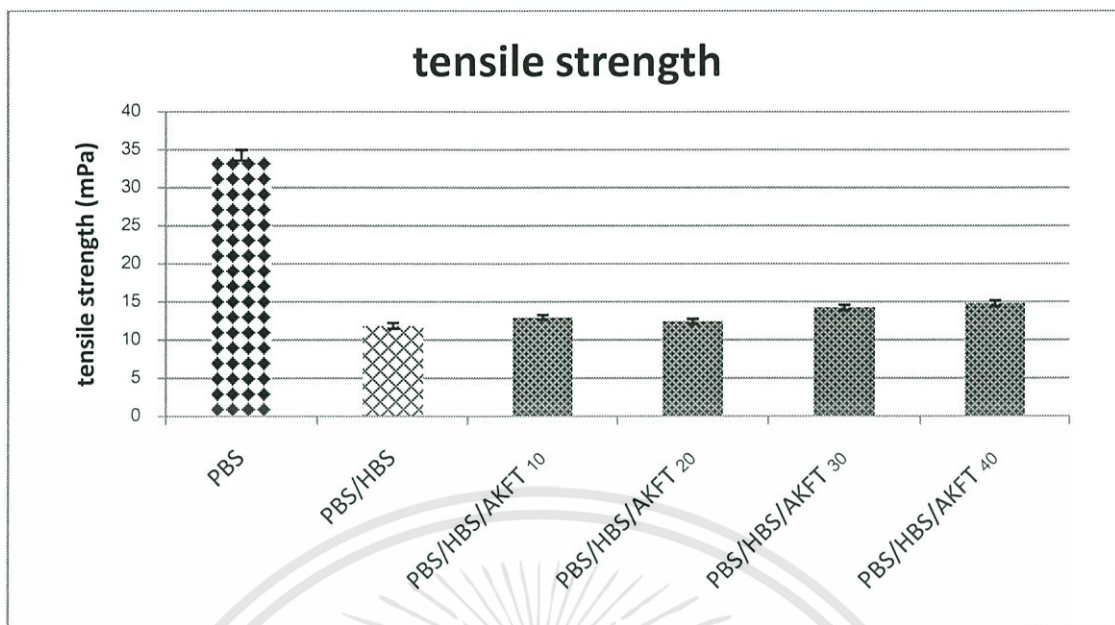
รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด NPCC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

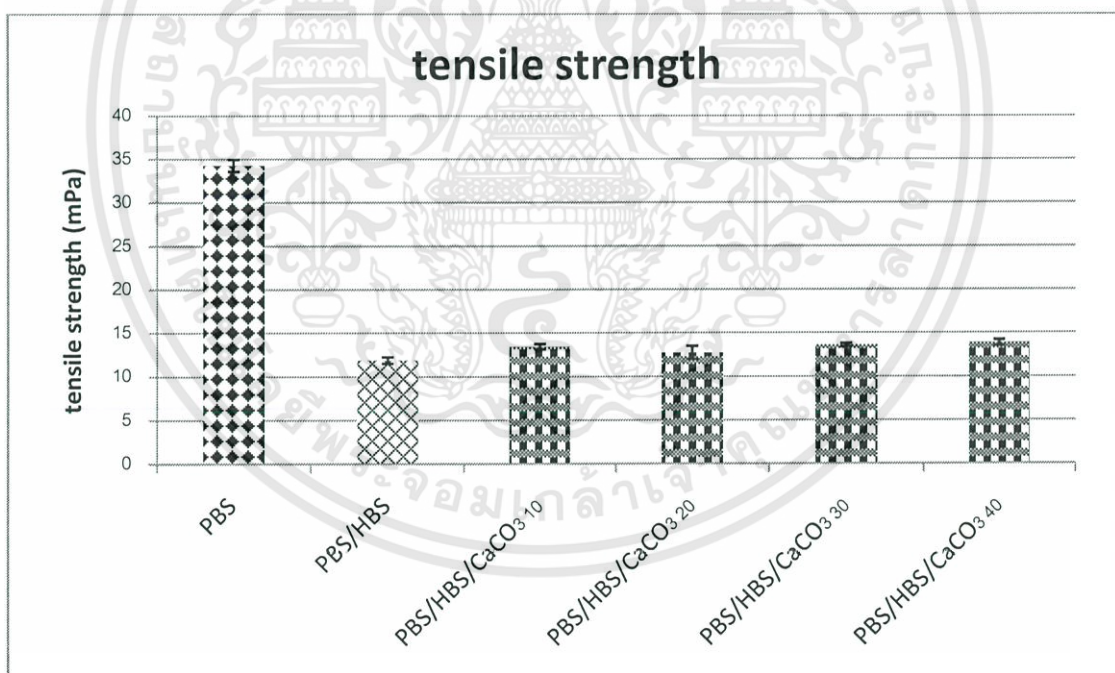
## 1.2 ผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)

การทดสอบแรงดึง คือการวัดความสามารถของวัสดุหนึ่งที่ทนทานต่อแรงดึงยึดออกจากกันก่อนที่จะเกิดการฉีกขาด แตกหัก หรือเสียหาย ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ด้วยแรงดึง นอกจากได้ค่ามอดูลัสของยังแล้ว ยังได้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ซึ่งได้ผลการวิจัยดังนี้

จากรูปที่ 4.9-4.12 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและปริมาณพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) พบว่า พอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีค่าความแข็งแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน และการใส่สารตัวเติมทุกชนิดมีผลทำให้ชิ้นงานสามารถรับแรงดึงได้เพิ่มขึ้น จากสูตรที่เป็น PBS/HBS-M เล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตาม PBS บริสุทธิ์ จะให้ค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าสูตรผสมถึงเกือบ 2 เท่า เนื่องจากโครงสร้างของ PBS มีสายโซ่บิวทิลีนอยู่ในโซ่หลัก ทำให้ PBS มีโครงสร้างเป็นกึ่งผลึกและรับแรงดึงได้ การใส่แป้งมันสำปะหลังและสารตัวเติมลงไป จึงเป็นการเพิ่มความแข็งแรงประมาให้แก่ชิ้นงาน ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interfaces) ซึ่งเป็นรอยตำหนิ (Defect) ในชิ้นงาน เมื่อได้รับแรงดึงยึด สายโซ่ PBS จึงสามารถส่งต่อแรงและกระจายแรงได้ลดลง ค่าความแข็งแรงดึงยึดจึงลดลง ทั้งนี้อาจนำไปใช้เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน PBS ด้วยเทคนิคการฉีดขึ้นรูป ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการการรับแรงดึงมากนัก เช่น กระจาดต้นไม้ ดังนั้น การใส่สารตัวเติมจึงส่งผลในด้านต้นทุนของผลิตภัณฑ์ โดยจากรูป จะเห็นได้ว่า สำหรับสารตัวเติมชนิดเดียวกัน การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมเข้าไปในชิ้นงานส่งผลให้ชิ้นงานที่ใส่สารตัวเติมแต่ละสูตรมีค่าความแข็งแรงดึงที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

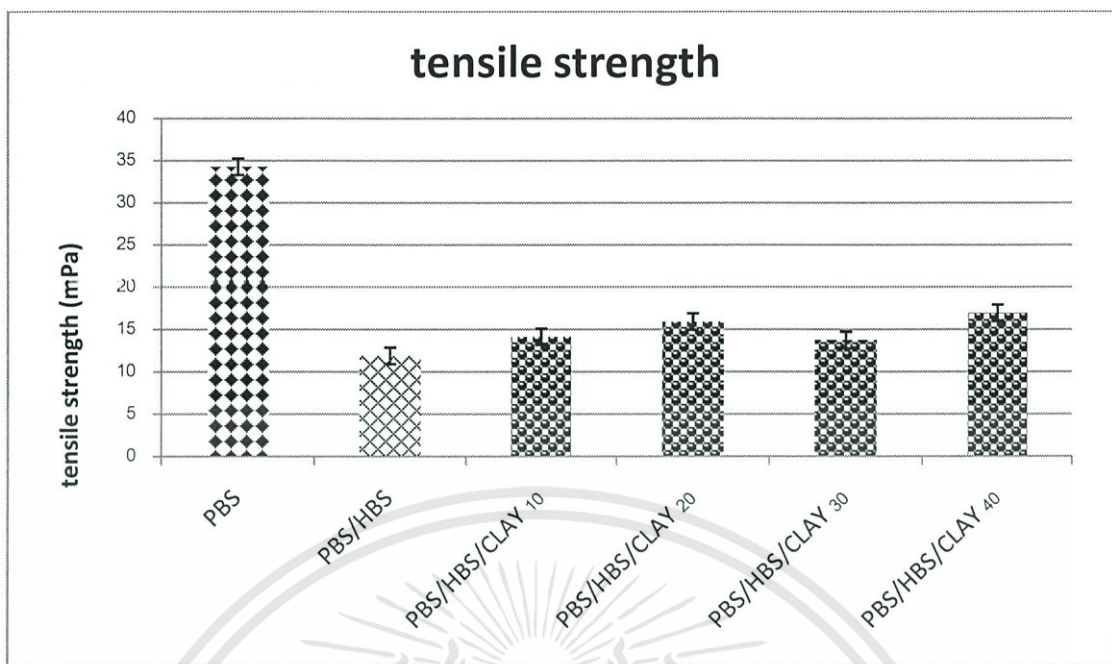


รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด AKFT

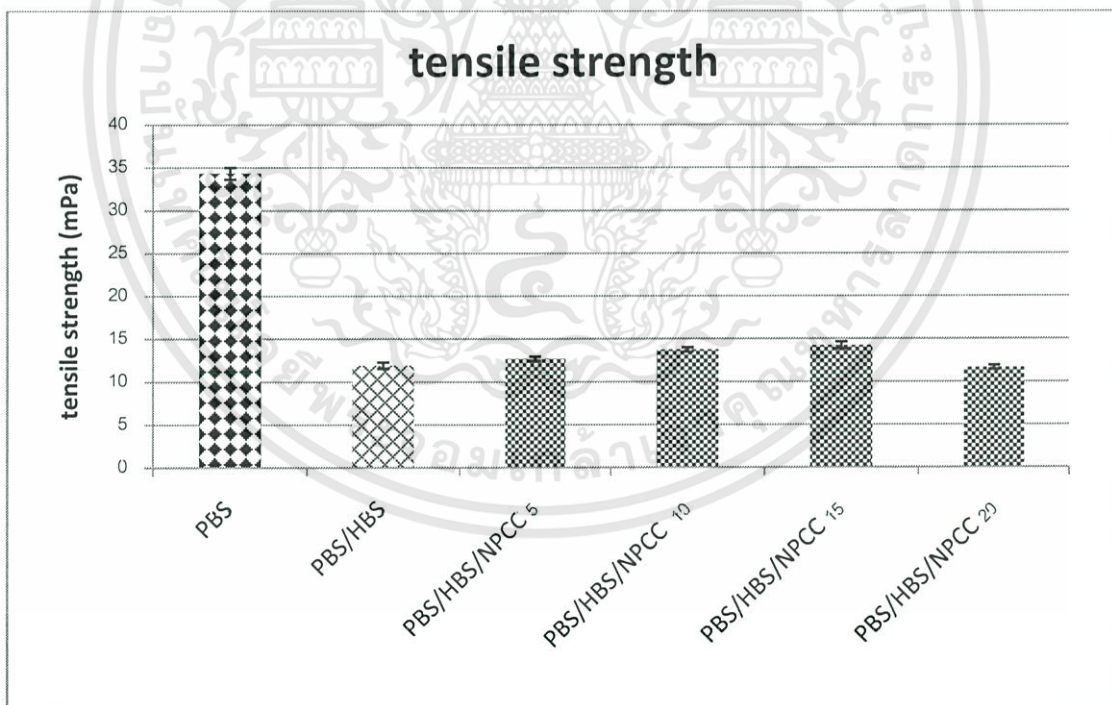


รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CaCO<sub>3</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CLAY

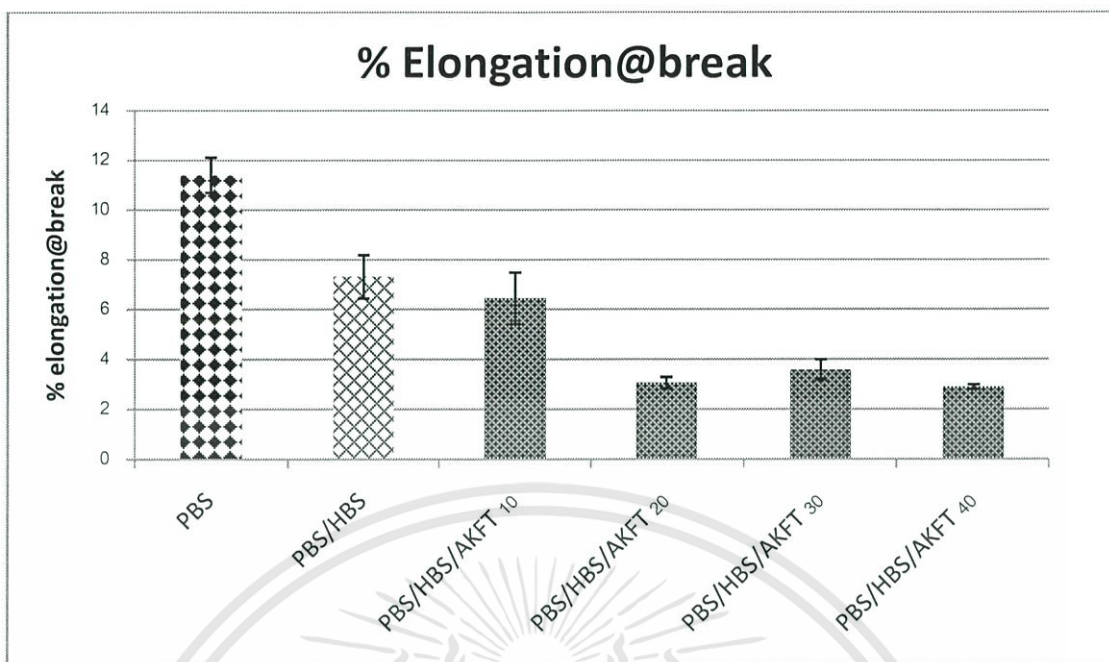


รูปที่ 4.12 ค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด NPCC

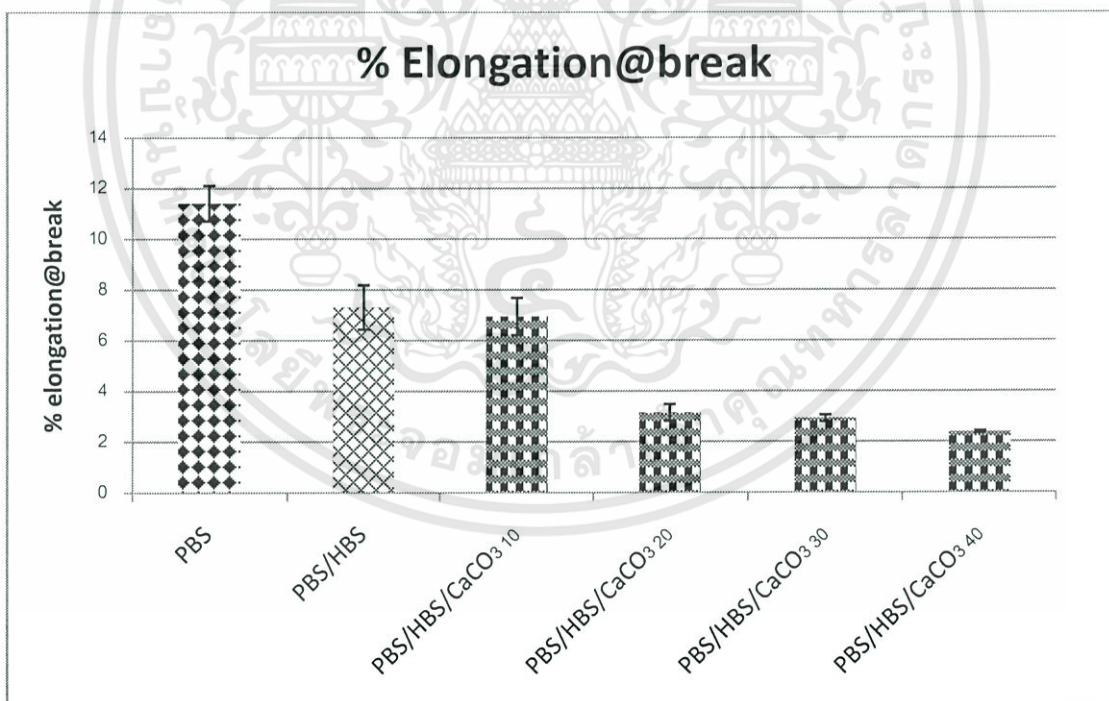
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.13 - 4.16 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและปริมาณสารตัวเติมในพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด พบว่าการใส่สารตัวเติมทุกชนิดลงใน PBS ทำให้พอลิเมอร์มีเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดที่ลดลง เนื่องจาก PBS บริสุทธิ์จะมีสมบัติแข็งแรงเหนียว สายโซ่เรียงชิดติดกัน เมื่อให้แรงดึงยืด ชิ้นงานจึงถูกดึงยืดออกไปได้มากกว่าก่อนที่จะขาด ดังนั้นการเติมสารตัวเติมลงไป ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interfaces) ซึ่งเป็นรอยตำหนิ (Defect) ในชิ้นงาน ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์ส่งต่อแรงไปหากันได้น้อยลง ความเหนียวลดลงในขณะที่ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดลดลง สอดคล้องกับค่ามอดูลัสของยังที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติมสารตัวเติมลงไป ในชิ้นงาน และเมื่อทำการเปรียบเทียบในพอลิเมอร์ที่ผสมสารตัวเติมชนิดเดียวกัน พบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเติมสารตัวเติมอนินทรีย์เป็นการเพิ่มความแข็งให้แก่ชิ้นงาน ดังนั้น ยิ่งเติมสารตัวเติมในปริมาณที่มากขึ้นเท่าใด ชิ้นงานก็จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ดึงยืดได้น้อยลง การเสียสภาพแบบแข็งแรงเหนียวจึงลดลง



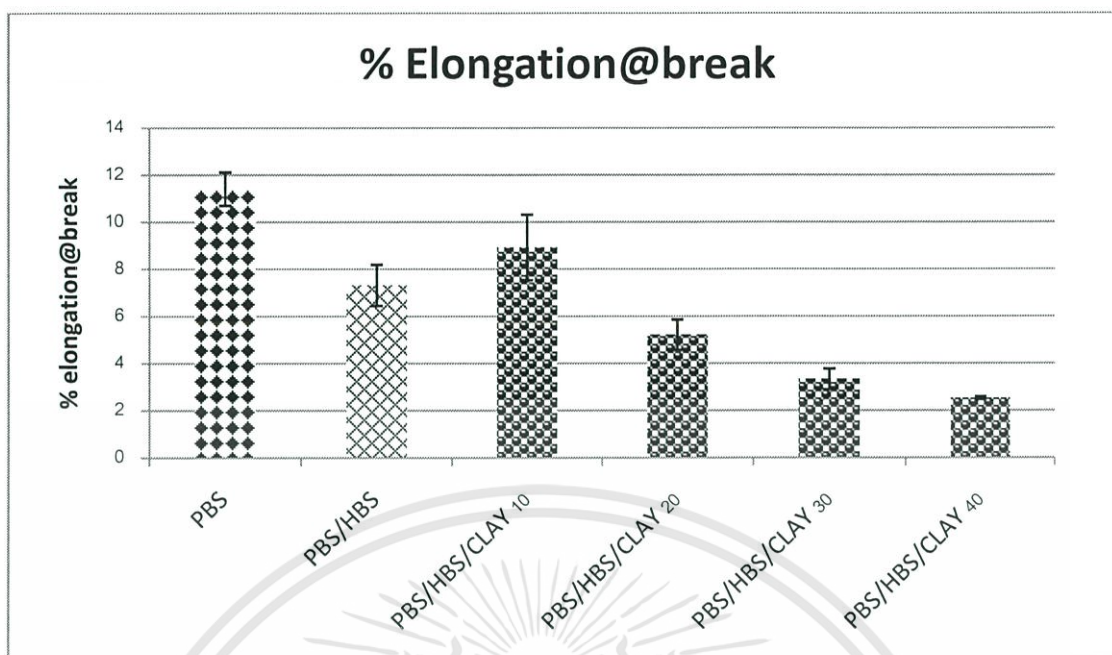


รูปที่ 4.13 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด AKFT

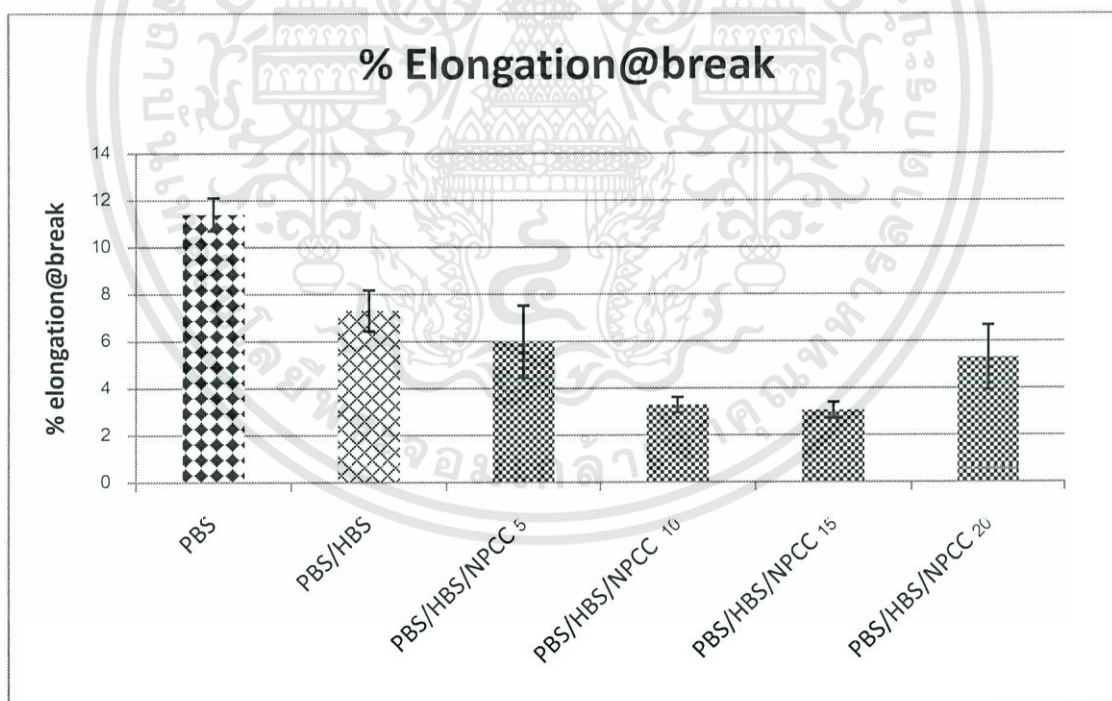


รูปที่ 4.14 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CaCO<sub>3</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CLAY

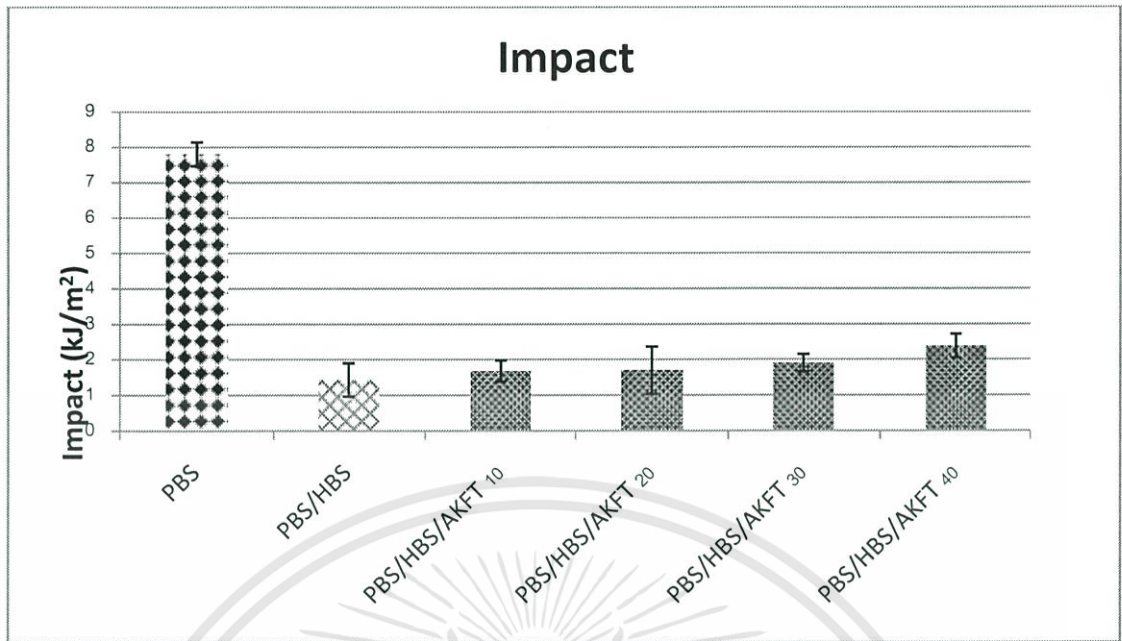


รูปที่ 4.16 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด NPCC

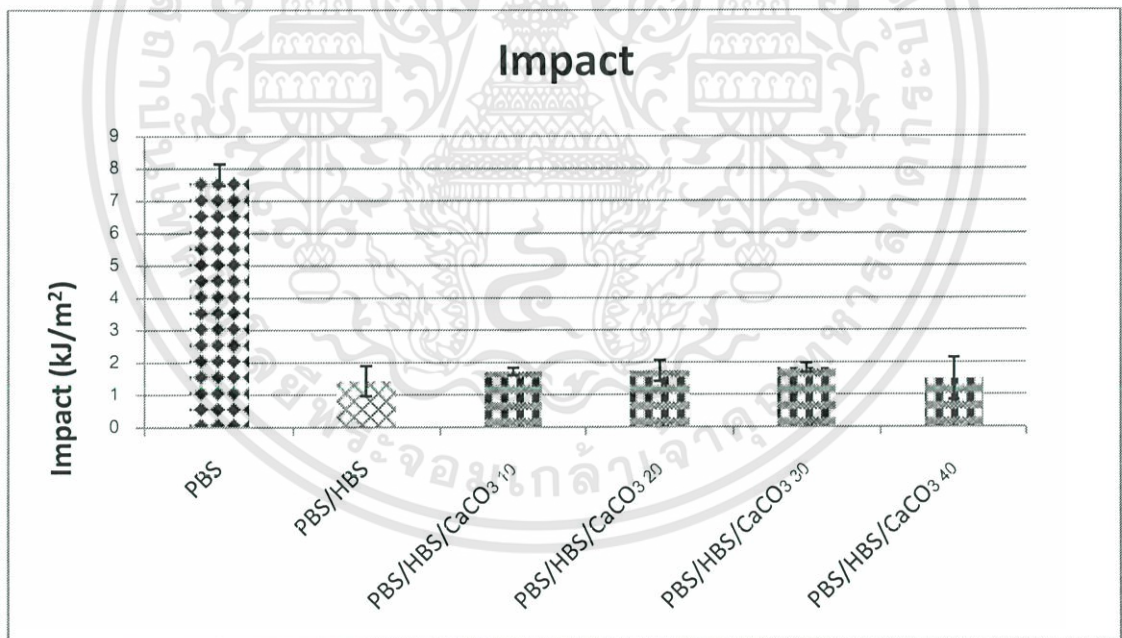
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบความแข็งแรงกระแทก เป็นการทดสอบการกระแทกแบบไอซอด (Izod impact test) โดยทำชิ้นงานให้มีรอยบากเป็นรูปตัววี (V-Notch) จากรูปที่ 4.17 -4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและปริมาณสารตัวเติมในพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ต่อค่าความแข็งแรงกระแทก ทั้งนี้เนื่องจาก PBS บริสุทธิ์มีสมบัติแข็งเหนียว จึงทำให้ทนต่อแรงกระแทกได้มากมีการส่งต่อแรงไปตามสายโซ่ได้ดี ดังนั้น การเติมสารตัวเติมอินทรีย์ลงไปชิ้นงานจึงเป็นการเพิ่มวิฤภาคของแข็งในเนื้อพอลิเมอร์ ก่อให้เกิดรอยต่อระหว่างวิฤภาค (Grain boundary) ในชิ้นงาน ทำให้เมื่อทดสอบการกระแทก จะพบว่า สูตรที่มีการผสมสารตัวเติมจะมีค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ลดลง และเมื่อพิจารณาที่ชนิดสารตัวเติมเดียวกัน พบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมไม่ได้ส่งผลให้แต่ละสูตรมีค่าความแข็งแรงกระแทกที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จากรูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด NPCC พบว่า พอลิเมอร์ที่ผสมสารตัวเติมชนิด NPCC จะมีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงกว่าพอลิเมอร์ที่ผสมสารตัวเติมชนิดอื่นๆ ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคของ NPCC ที่มีขนาดเล็กมาก (อยู่ในระดับนาโน) ทำให้รอยต่อระหว่างวิฤภาคมีขนาดเล็กแต่มีจำนวนที่เพิ่มขึ้น การกระจายแรงจึงดีกว่าพอลิเมอร์ที่ผสมสารตัวเติมอื่นๆ

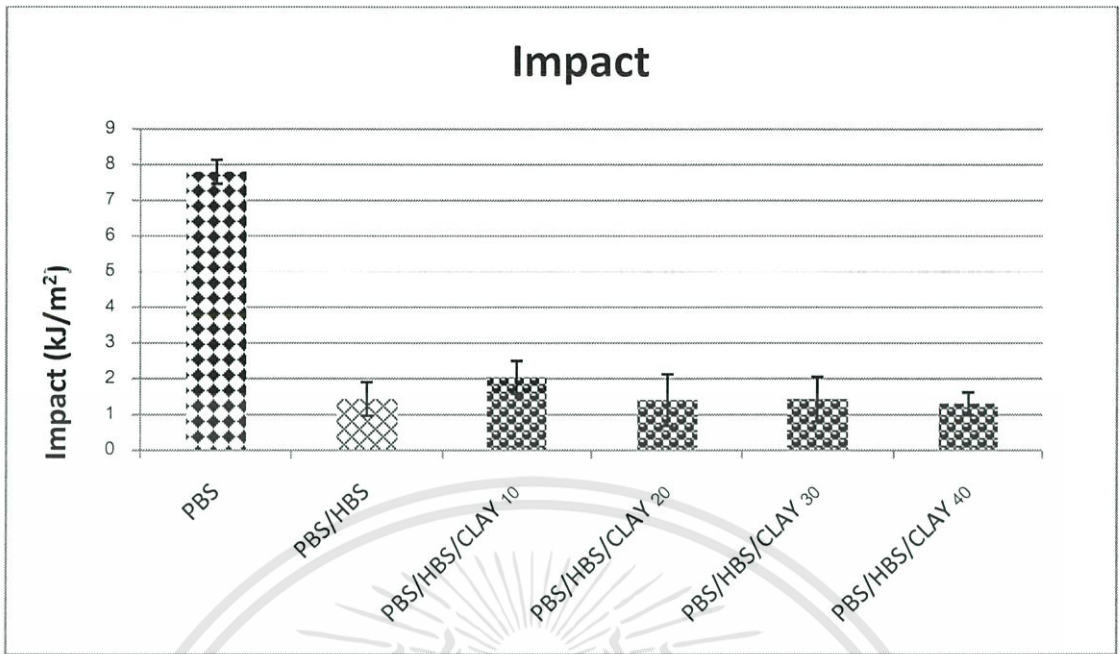


รูปที่ 4.17 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด AKFT

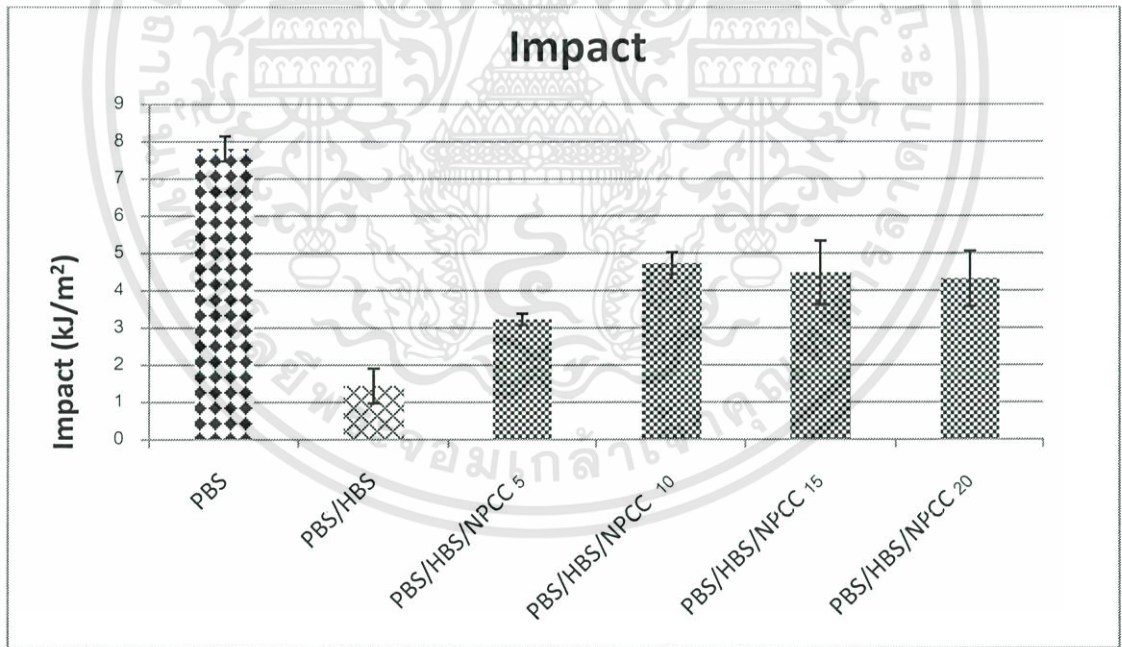


รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CaCO<sub>3</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CLAY



รูปที่ 4.20 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด NPCC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่ปริมาณเท่ากันต่อสมบัติเชิงกล

จากรูปที่ 4.21 ค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเท่ากัน พบว่า พอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด AKFT มีค่ามอดูลัสของยังสูงขึ้น เมื่อเทียบกับ PBS/HBS และมีค่ามอดูลัสของยังสูงที่สุดเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดอื่นๆ เนื่องจากโครงสร้างของสารตัวเติม AKFT ที่มีโครงสร้างเป็นแผ่น Kaolinite ทับซ้อนกัน รวมทั้งมีโครงสร้างที่เป็นผลึกและอสัณฐานปนกันอยู่ ซึ่งคล้ายคลึงกับโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CLAY ที่มีค่ามอดูลัสของยังที่ใกล้เคียงกัน

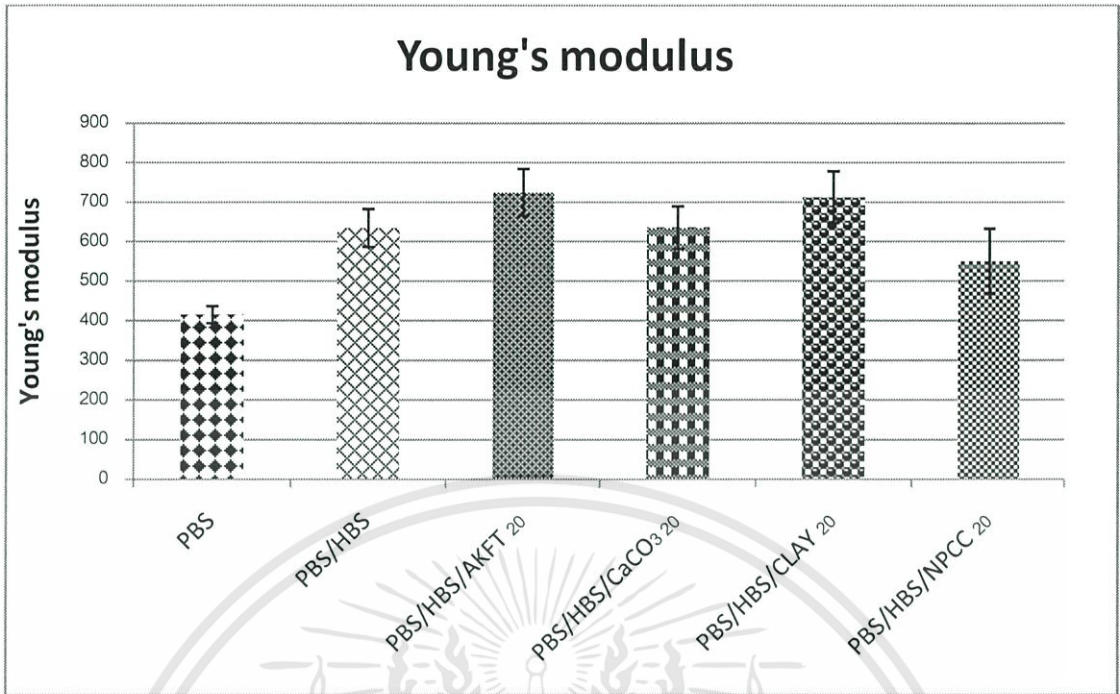
จากรูปที่ 4.22 ค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเท่ากัน พบว่าเมื่อเทียบกับสูตร PBS/HBS พอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมทุกชนิดมีค่าความแข็งกดไม่ต่างกัน อย่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จากรูปที่ 4.23 ค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเท่ากัน พบว่าเมื่อเทียบกับสูตร PBS/HBS พอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมทุกชนิดจะมีค่าความแข็งแรงดึงไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

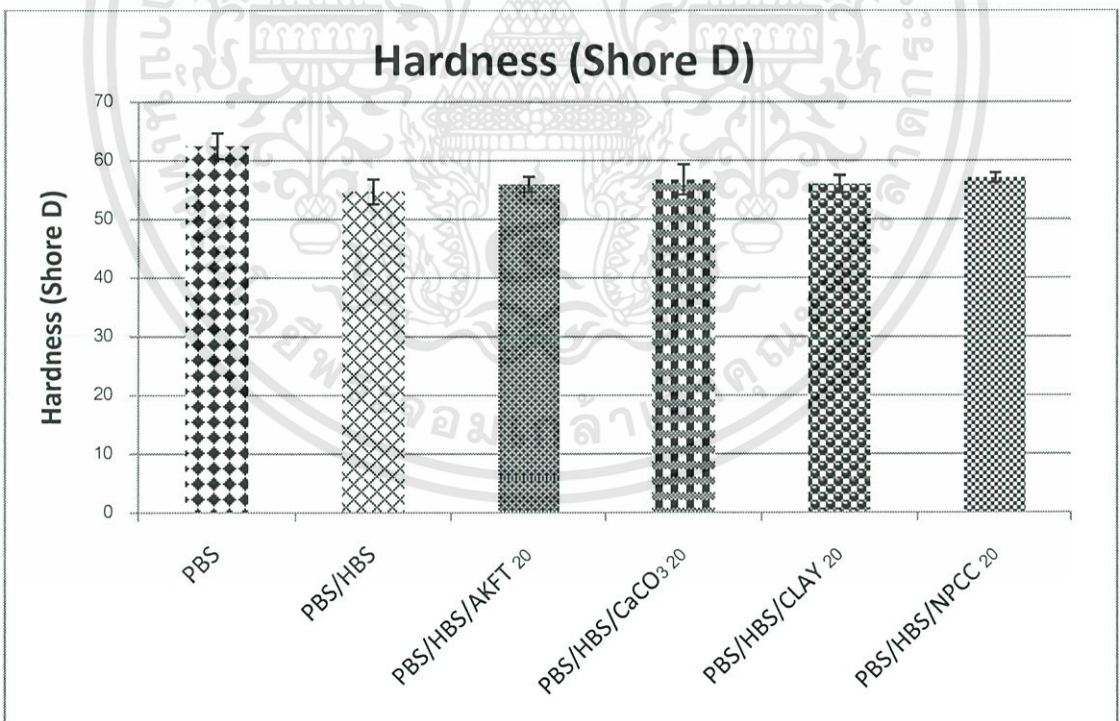
จากรูปที่ 4.24 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเท่ากันพบว่า พอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดลดลงเมื่อเทียบกับ PBS/HBS โดยจะพบว่าพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติม AKFT จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดน้อยที่สุด สอดคล้องกับค่ามอดูลัสของยังที่พบว่าพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติม AKFT ให้ค่าความแข็งแรงมากที่สุด ความสามารถในการถูกดึงยืดก่อนเสียดสภาพจึงลดลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดอื่นๆ

จากรูปที่ 4.25 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเท่ากัน พบว่า พอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมจะมีค่าความแข็งแรงกระแทกลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับ PBS/HBS โดยจะพบว่าพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติม NPCC มีความแข็งแรงกระแทกมากที่สุด เป็นผลมาจากขนาดอนุภาคของ NPCC ที่มีขนาดเล็กมาก (อยู่ในระดับนาโน) ทำให้รอยต่อระหว่างวัฏภาคมีขนาดที่เล็กแต่มีจำนวนที่เพิ่มขึ้น การกระจายแรงจึงดีกว่าพอลิเมอร์ที่ผสมสารตัวเติมอื่นๆ

จากรูปที่ 4.26 ค่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเท่ากันพบว่า พอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมจะความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ PBS โดยจะพบว่าการเติมสารตัวเติมแต่ละชนิดไม่ได้ส่งผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ

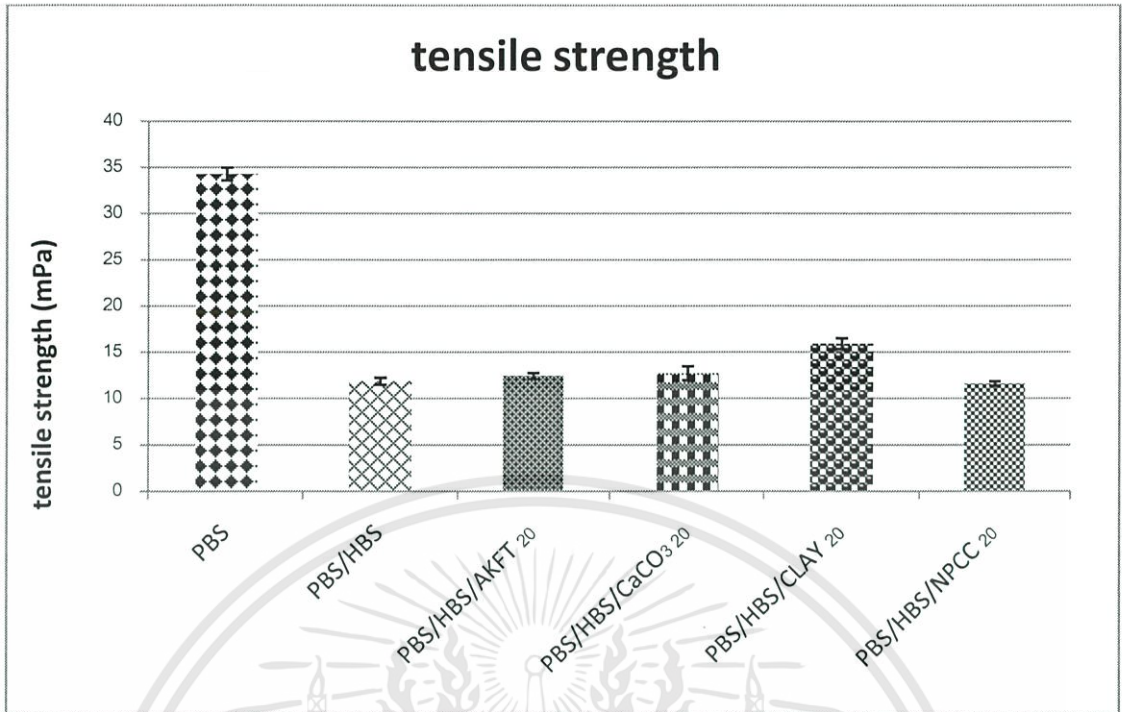


รูปที่ 4.21 ค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเท่ากัน

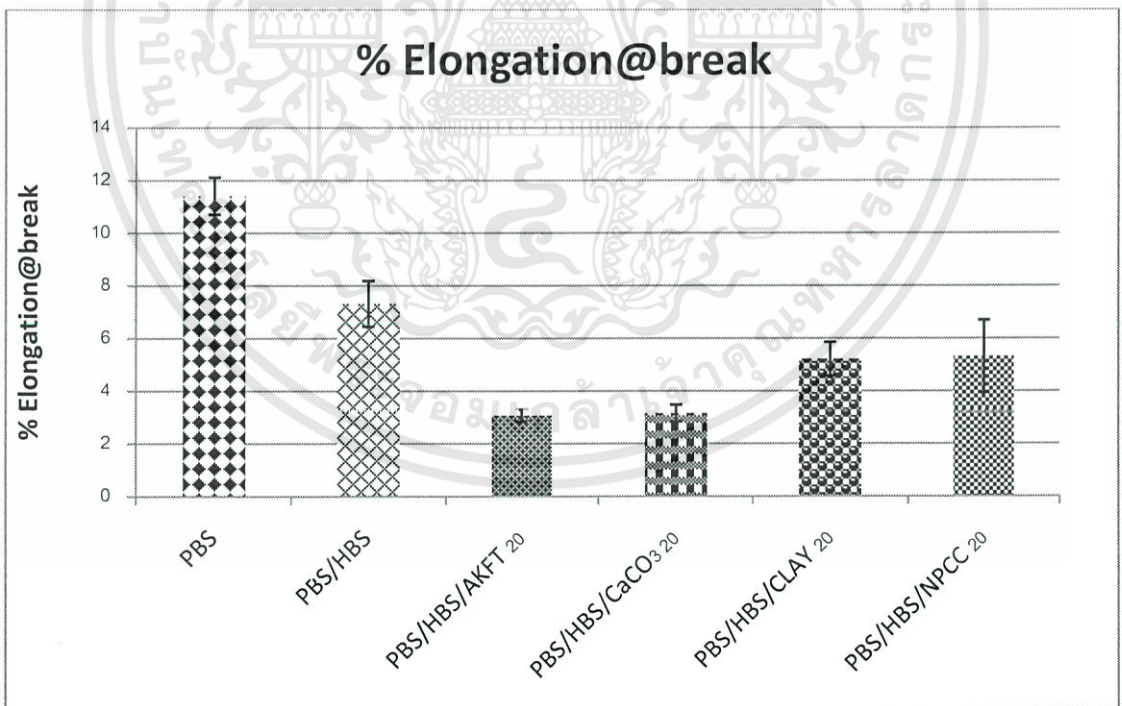


รูปที่ 4.22 ค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

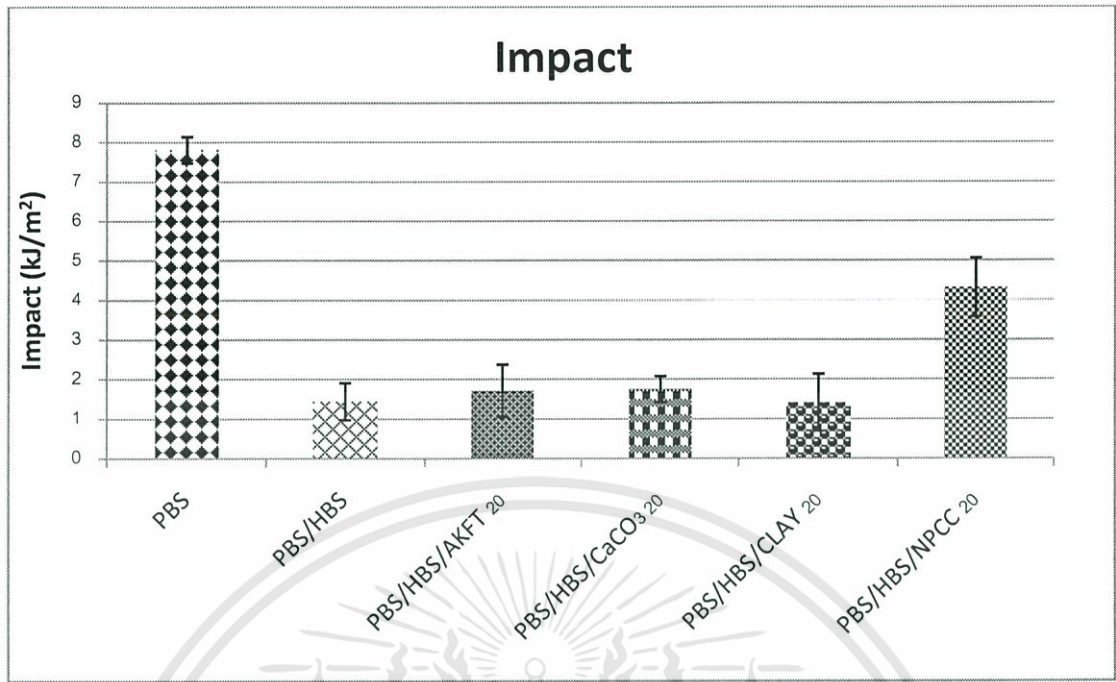


รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเท่ากัน

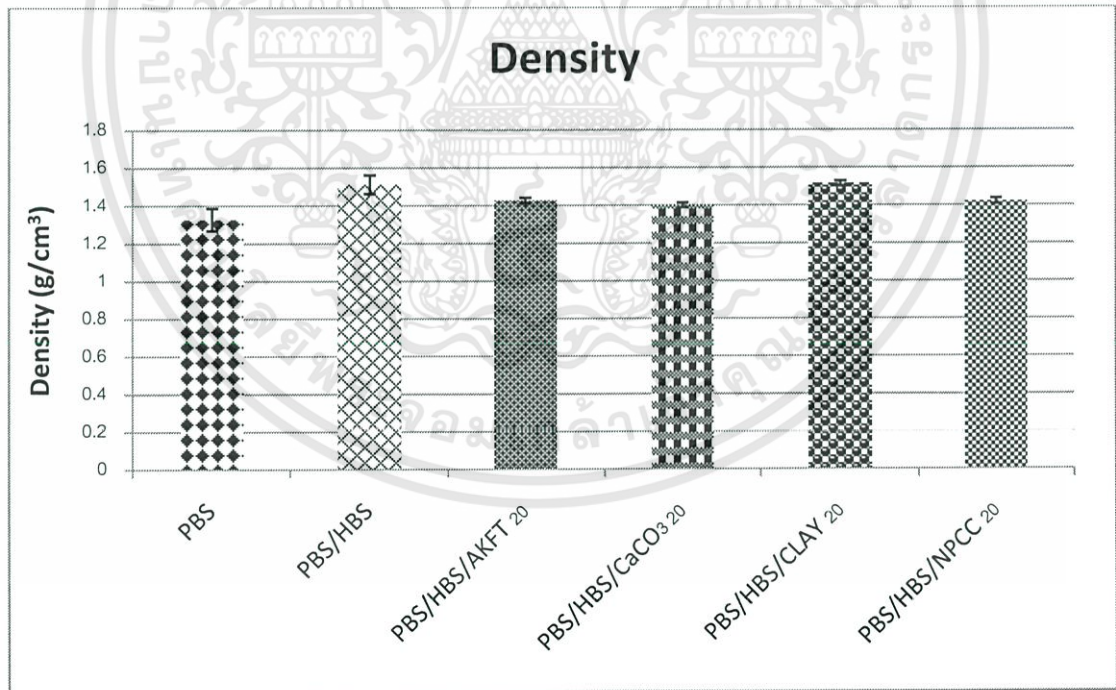


รูปที่ 4.24 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเท่ากัน



รูปที่ 4.26 ค่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตอนที่ 2 สมบัติทางความร้อน

### 2.1 สมบัติทางความร้อน Differential Scanning Calorimetry (DSC)

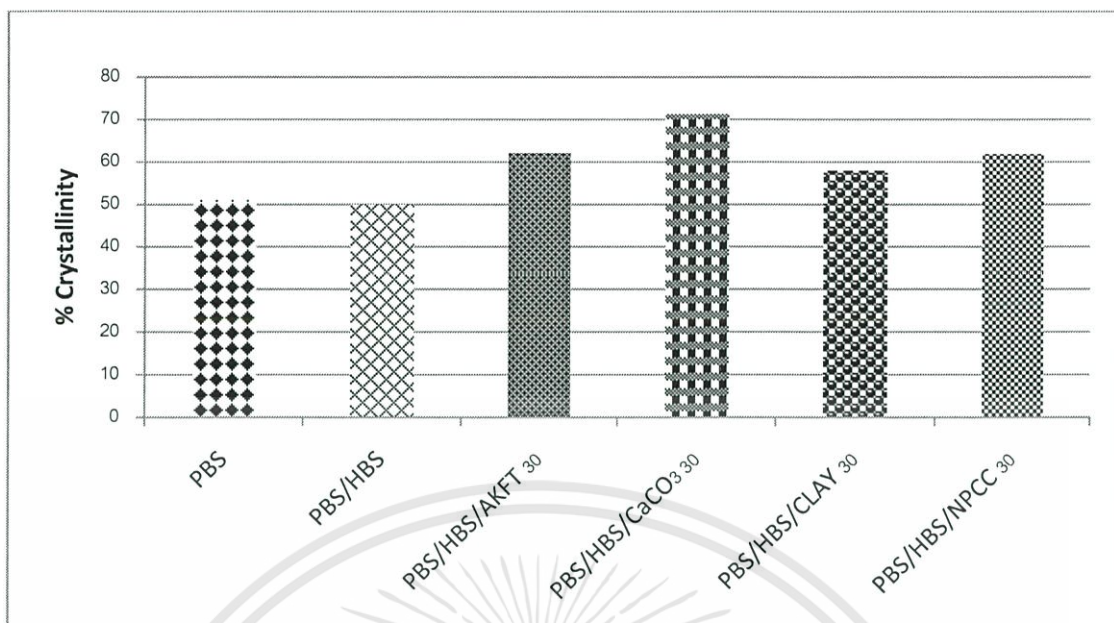
จากตารางที่ 4.1 พบว่า PBS เมื่อทำการผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ลงไปแล้ว ค่า  $T_m$  จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยพบค่า  $T_{m1}$  และ  $T_{m2}$  ซึ่งอาจเกิดจากการที่ PBS นั้นเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ส่งผลให้เกิดการย่อยสลาย (Degradation) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สั้นลง ส่งผลให้เกิดขนาดผลึกที่แตกต่างกัน และทำให้ค่า  $T_m$  เปลี่ยนแปลงไป

จากรูปที่ 4.27 พบว่าค่าองศาความเป็นผลึกเมื่อ PBS ผสมแป้งคัดแปรและสารตัวเติม จะเกิดค่าองศาความเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นอาจมีแนวโน้มที่จะเป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) โดยวัสดุผสม  $\text{CaCO}_3$  30 มีค่าองศาความเป็นผลึกสูงสุด โดยวิธีการคำนวณค่าองศาความเป็นผลึกและกราฟ DSC แสดงในภาคผนวก ค

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC

สารตัวอย่าง	$T_c$ (Onset)	$T_m$ (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	$X_c$ (%)
	(°C)	( $T_{m1}, T_{m2}$ )		
PBS	73.32*	110.4*	58.30*	51.1*
PBS/HBS-M	83.23*	109.5*	34.22*	50.0*
PBS/HBS-M AKFT 30	77.0	104.2, 111.0	32.70	62.1
PBS/HBS-M $\text{CaCO}_3$ 30	77.5	105.3, 111.1	37.54	71.3
PBS/HBS-M Clay 30	76.0	100.1, 111.7	30.51	58.0
PBS/HBS-M NPCC 15	73.5	100.3, 111.0	35.00	61.9

หมายเหตุ \* ข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [7]



รูปที่ 4.27 ค่าองศาความเป็นผลึกของ PBS/HBS/สารตัวเติมชนิดต่างๆ



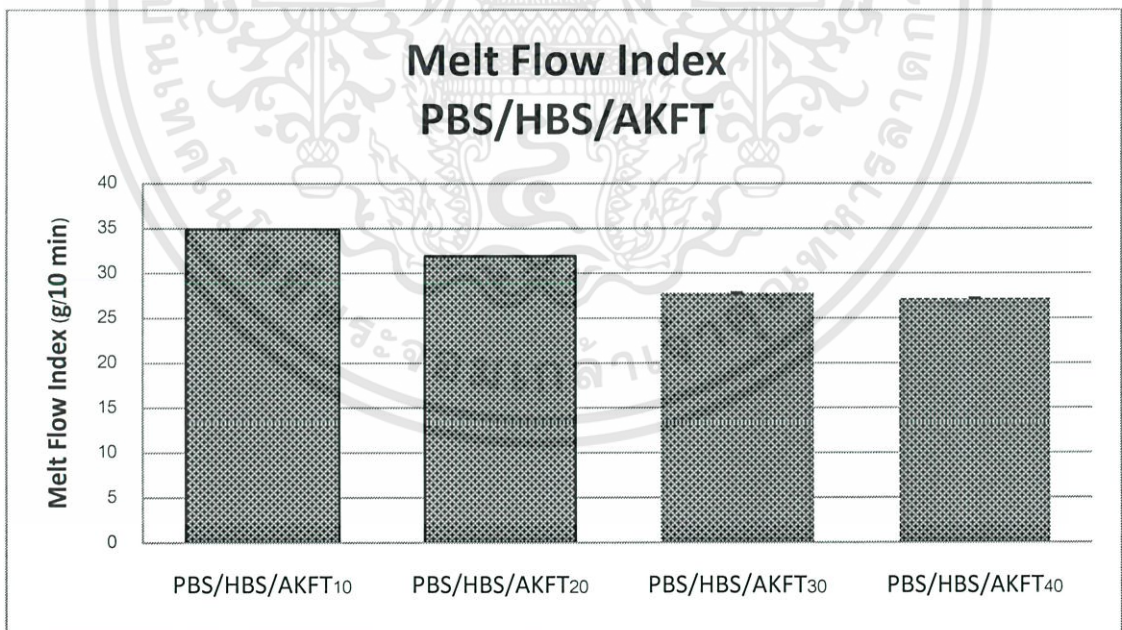
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตอนที่ 3 สมบัติการไหล

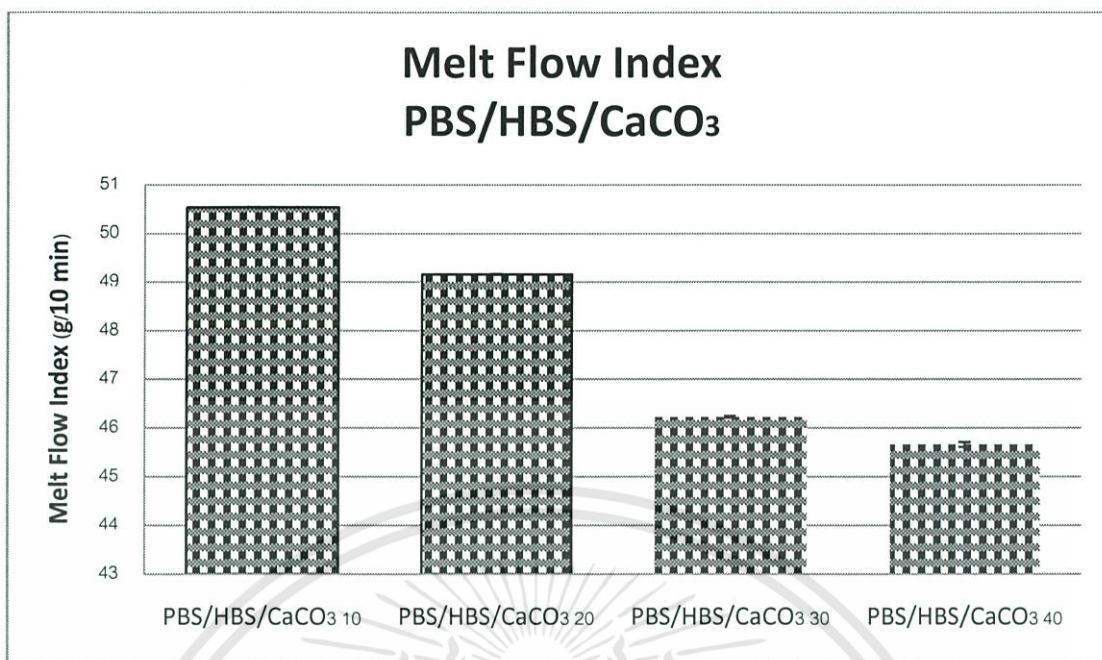
#### 3.1 ผลของชนิดและปริมาณของสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการไหล

การหาค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index, MFI) ของวัสดุตามมาตรฐานควรพบค่า MFI ที่ลดลงเมื่อเติมสารตัวเติม (Filler) เพิ่มมากขึ้น แต่เนื่องจากทำการทดลองในภายหลัง ซึ่งพอลิเมอร์ผสมอาจเกิดการย่อยสลาย (Degradation) และมีน้ำอยู่ในสารตัวเติมและแป้งที่อาจกำจัดไม่หมด ส่งผลทำให้มีค่า MFI สูงขึ้น เมื่อเทียบกับ MFI ของ PBS/HBS-M

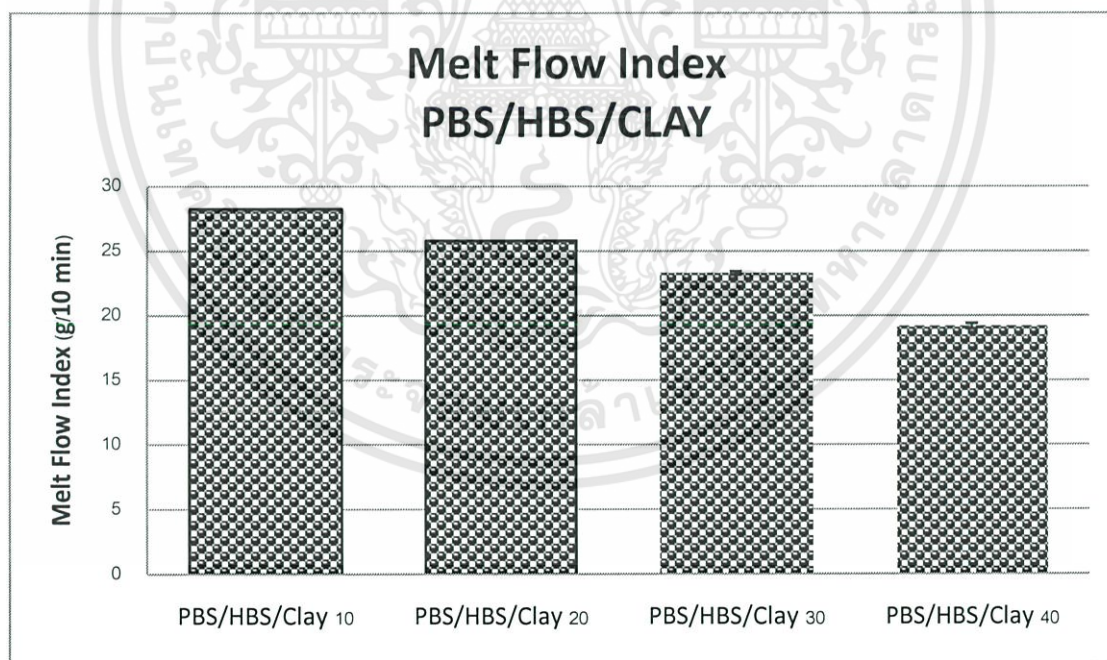
จากรูปที่ 4.28- 4.31 เป็นการทดสอบสมบัติการไหลของสารตัวเติมชนิดต่างๆ แต่อย่างไรก็ดี เมื่อทำการใส่สารตัวเติมลงไปปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจาก 10 - 40 php สำหรับพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด AKFT, CaCO<sub>3</sub> และ CLAY และ 5-20 php สำหรับสูตรพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด NPCC จะส่งผลให้ความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นหรือมีค่า MFI ที่ลดลง โดยพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด AKFT และ CLAY มีความหนืดสูงหรือมีค่า MFI น้อยกว่า เมื่อเทียบพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด CaCO<sub>3</sub> และ NPCC อาจเนื่องมาจากสารตัวเติมดังกล่าว มีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็ก และมีโครงสร้างเป็นแผ่น ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคมาก ความหนืดจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีค่า MFI ลดลง



รูปที่ 4.28 ค่าดัชนีการไหลของสูตรที่ใช้ AKFT เป็นสารตัวเติม

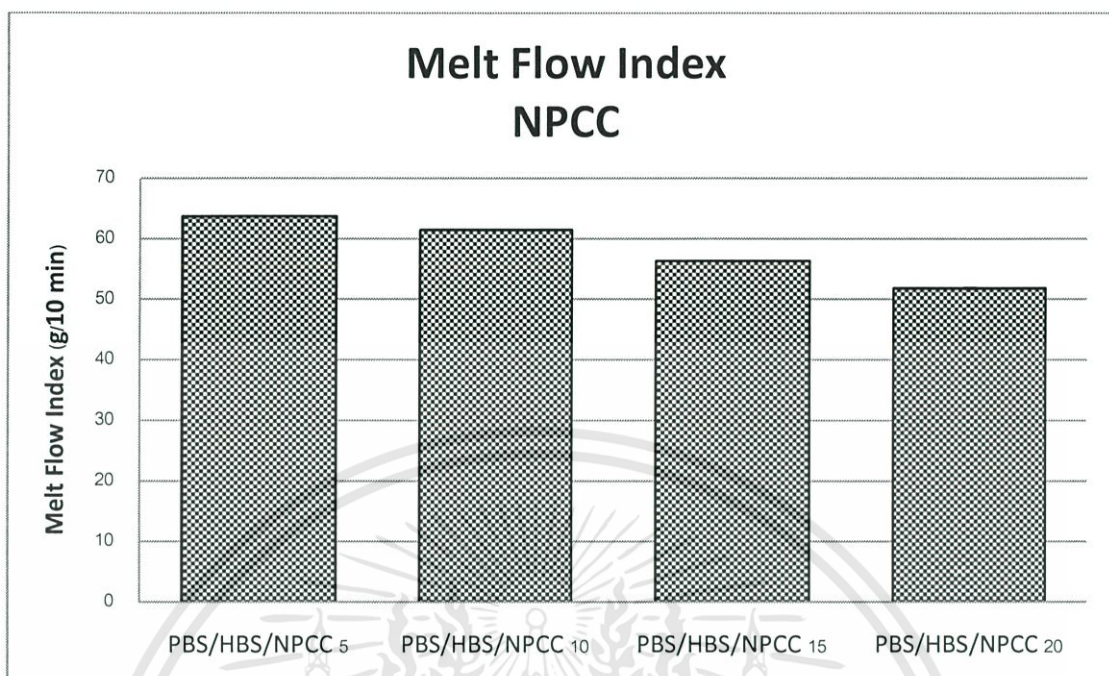


รูปที่ 4.29 ค่าดัชนีการไหลของสูตรที่ใช้ CaCO<sub>3</sub> เป็นสารตัวเติม



รูปที่ 4.30 ค่าดัชนีการไหลของสูตรที่ใช้ CLAY เป็นสารตัวเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 ค่าดัชนีการไหลของสูตรที่ใช้ NPCC เป็นสารตัวเติม

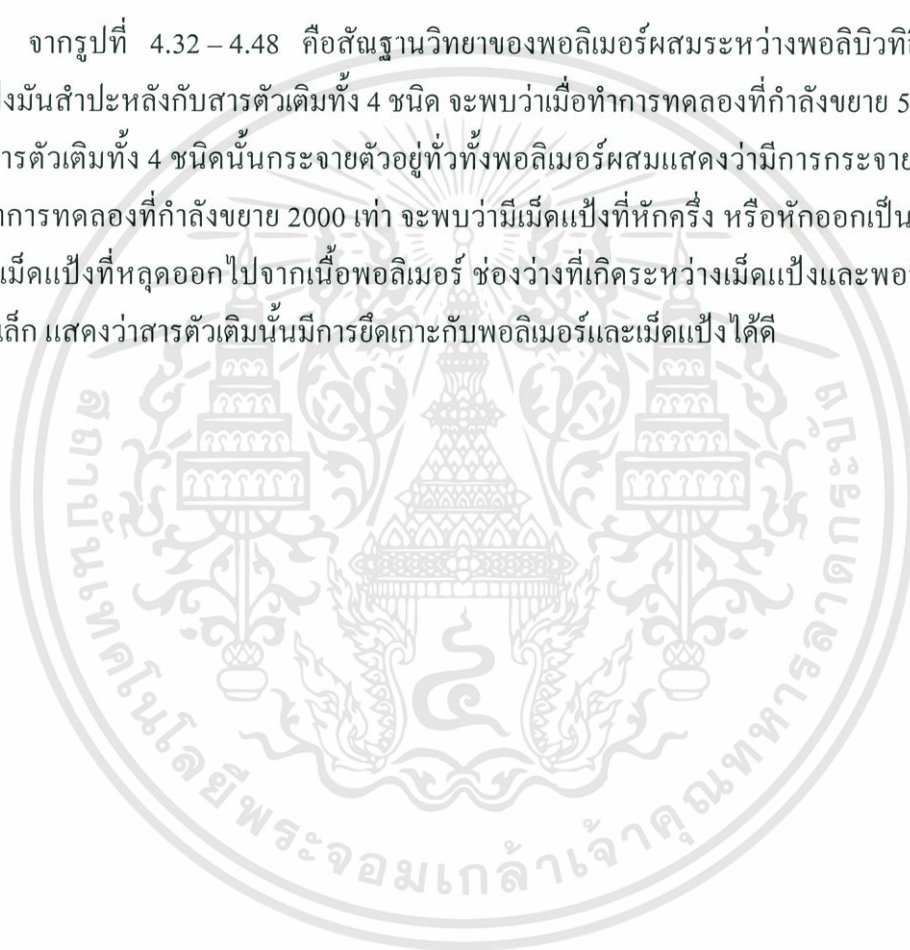
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

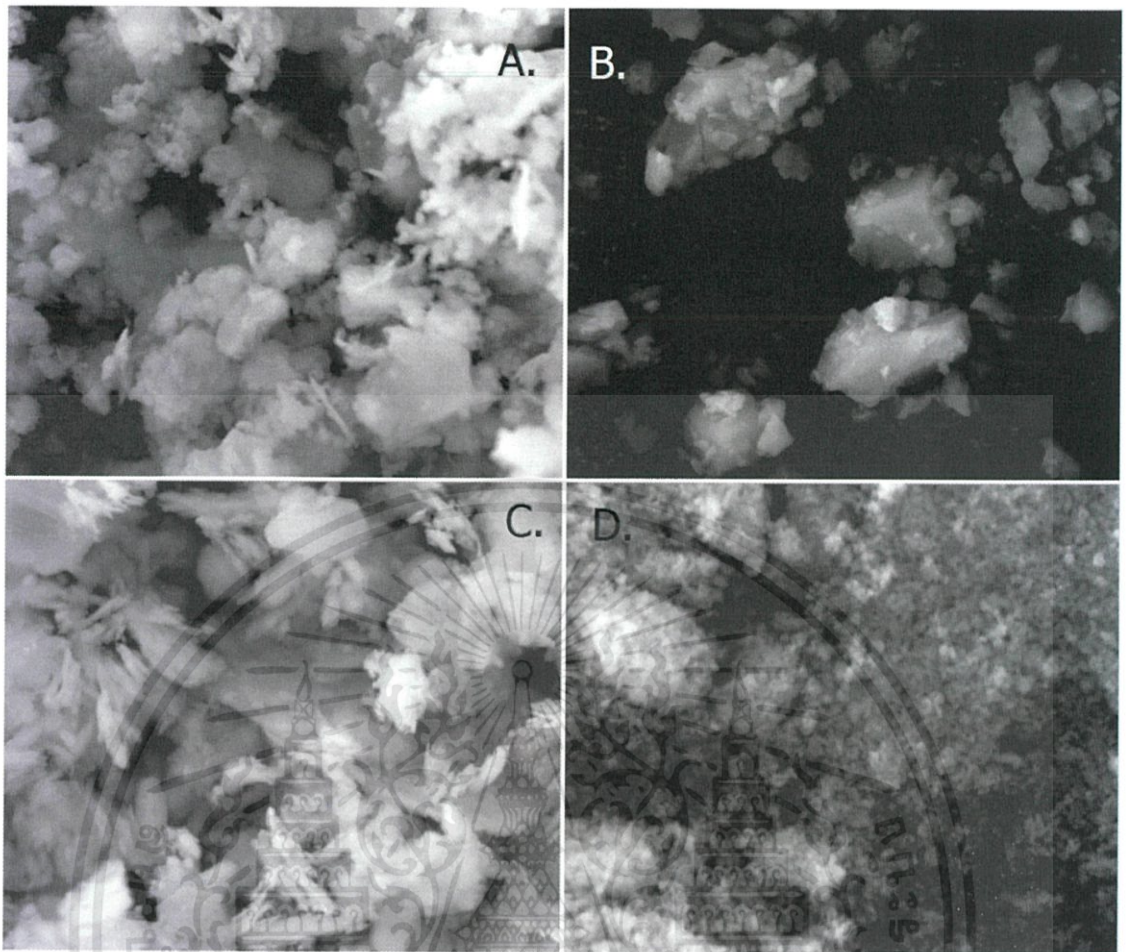
## ตอนที่ 4 สัณฐานวิทยา

### 4.1 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) กับแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูป (Modified Tapioca Starch) และสารตัวเติม (Filler) ชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) เพื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวและการยึดเกาะกันระหว่างวัฏภาคในสูตรที่มีชนิดของสารตัวเติมที่แตกต่างกัน

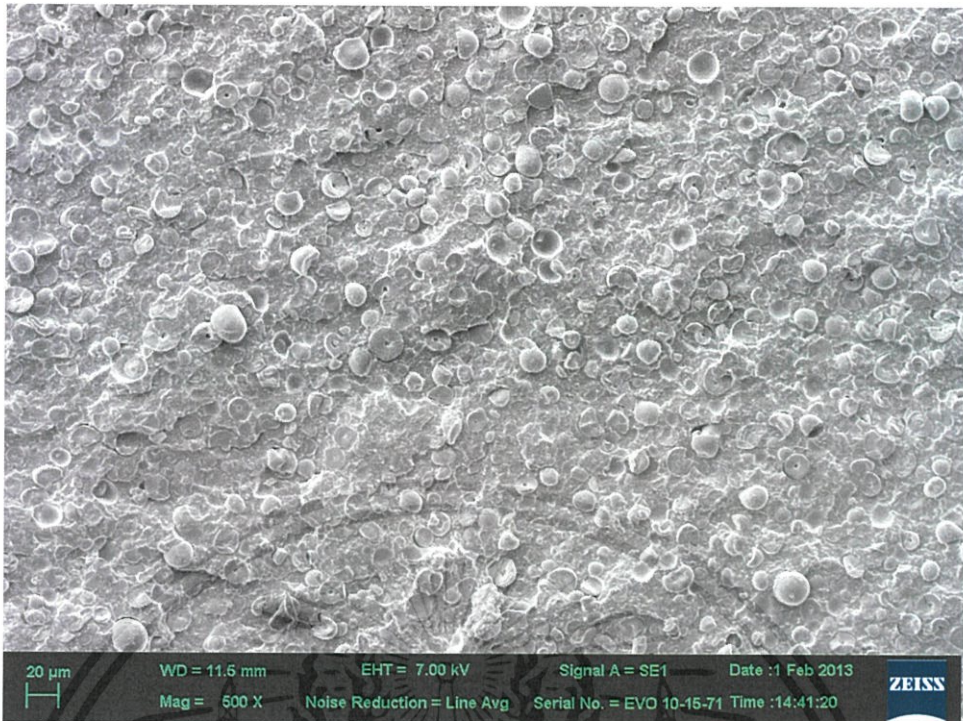
จากรูปที่ 4.32 – 4.48 คือสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับแป้งมันสำปะหลังกับสารตัวเติมทั้ง 4 ชนิด จะพบว่าเมื่อทำการทดลองที่กำลังขยาย 500 เท่า แป้งและสารตัวเติมทั้ง 4 ชนิดนั้นกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งพอลิเมอร์ผสมแสดงว่ามีการกระจายตัวที่ดี และเมื่อทำการทดลองที่กำลังขยาย 2000 เท่า จะพบว่าเม็ดแป้งที่หักครึ่ง หรือหักออกเป็นส่วนใหญ่ แต่ไม่ค่อยมีเม็ดแป้งที่หลุดออกไปจากเนื้อพอลิเมอร์ ช่องว่างที่เกิดระหว่างเม็ดแป้งและพอลิเมอร์นั้นมีขนาดเล็ก แสดงว่าสารตัวเติมนั้นมีการยึดเกาะกับพอลิเมอร์และเม็ดแป้งได้ดี



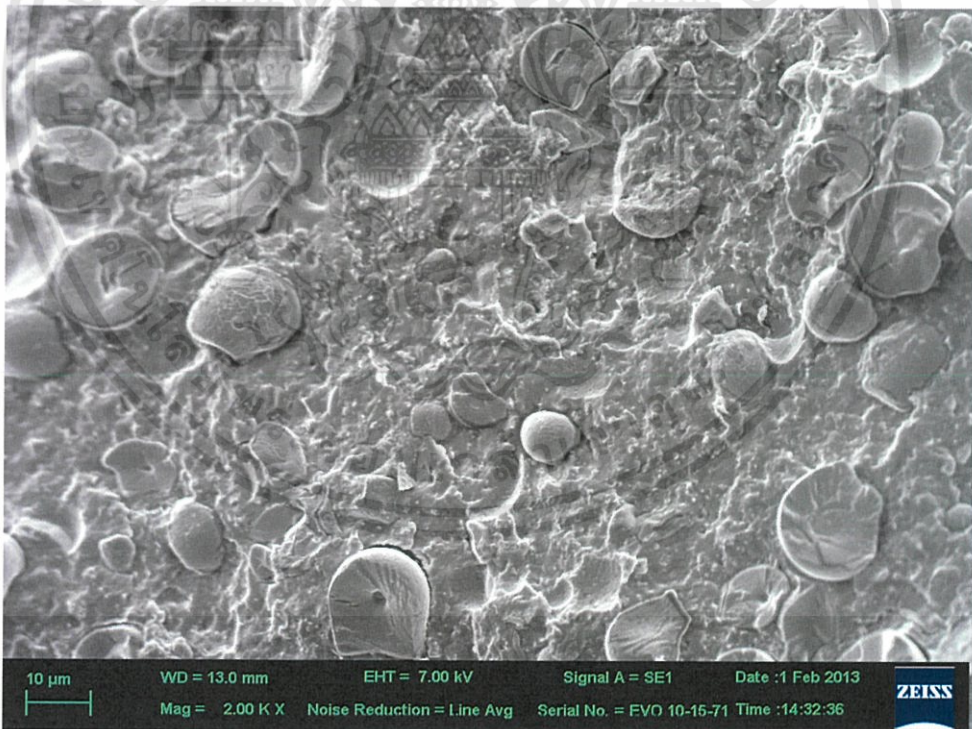


รูปที่ 4.32 SEM กำลังขยาย 18000 เท่า แสดงลักษณะของสารตัวเดิม A.) AKFT, B.)  $\text{CaCO}_3$ , C.) CLAY, D.) NPCC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

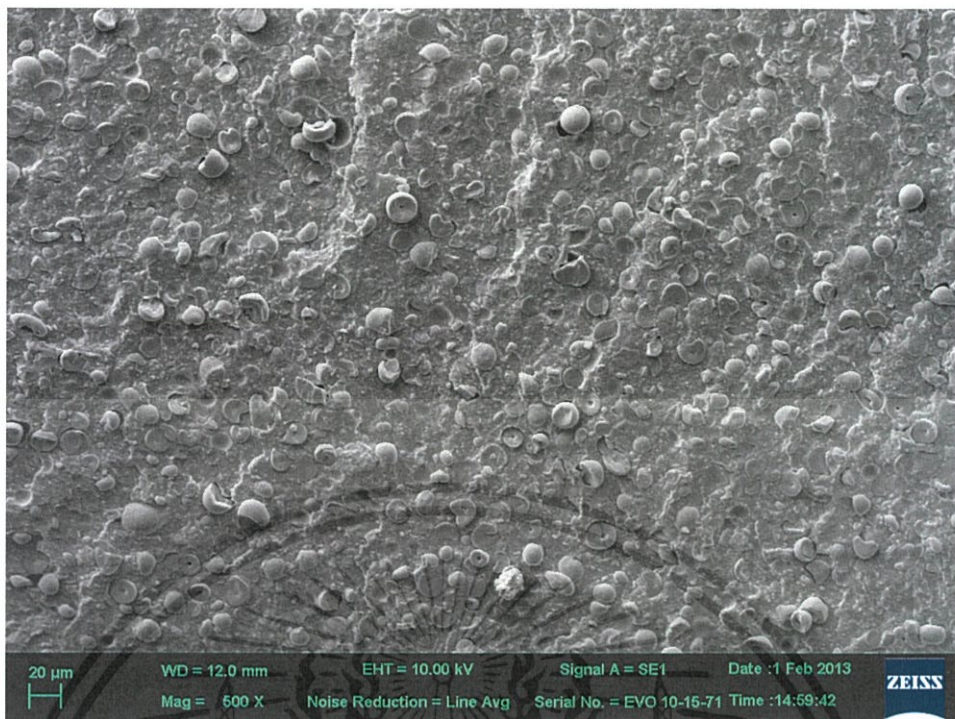


รูปที่ 4.33 SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของ PBS/HBS/AKFT 30 phr

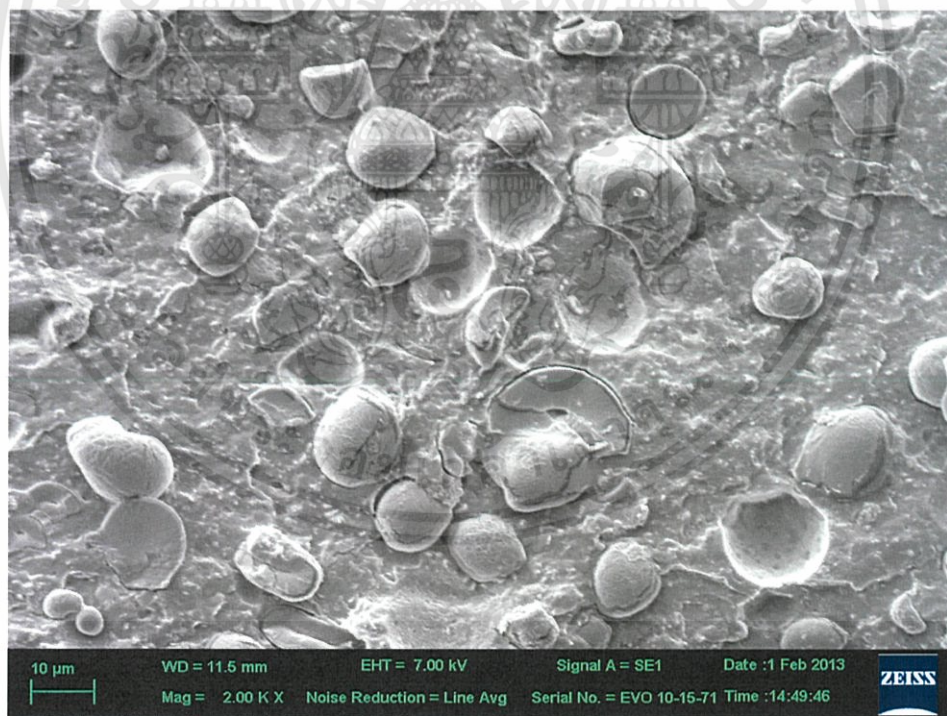


รูปที่ 4.34 SEM กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของ PBS/HBS/AKFT 30 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

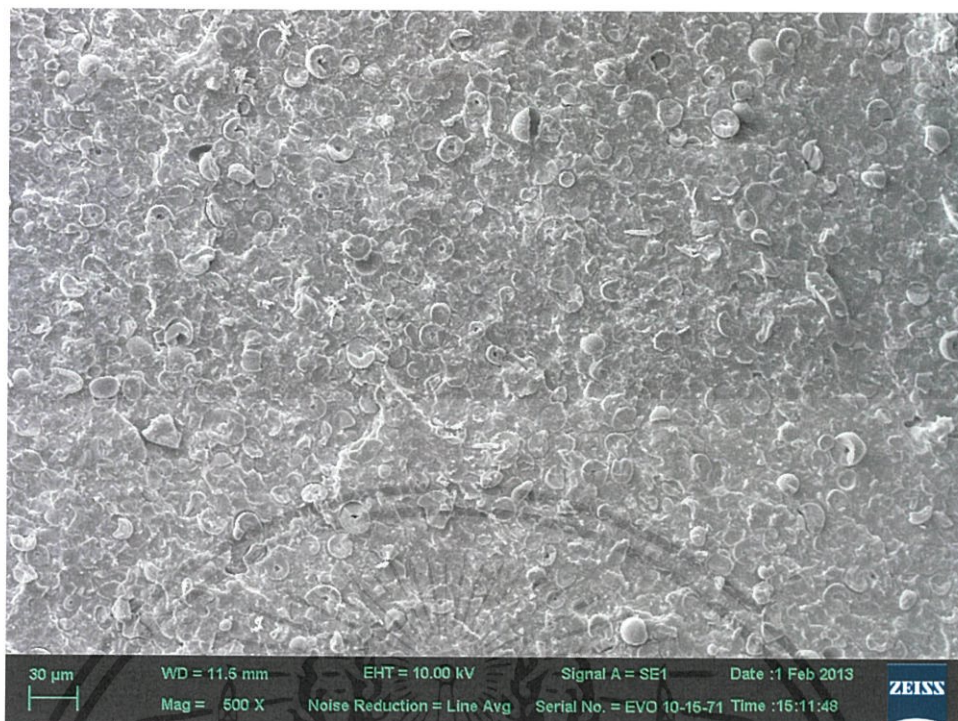


รูปที่ 4.35 SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของ PBS/HBS/AKFT 40 php

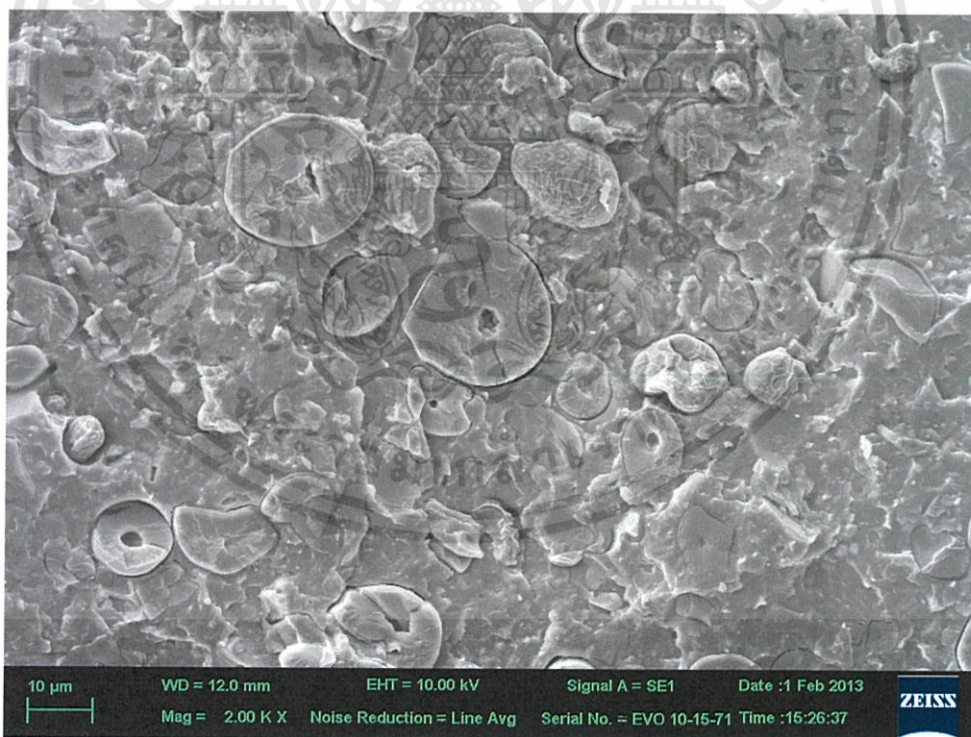


รูปที่ 4.36 SEM กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของ PBS/HBS/AKFT 40 php

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

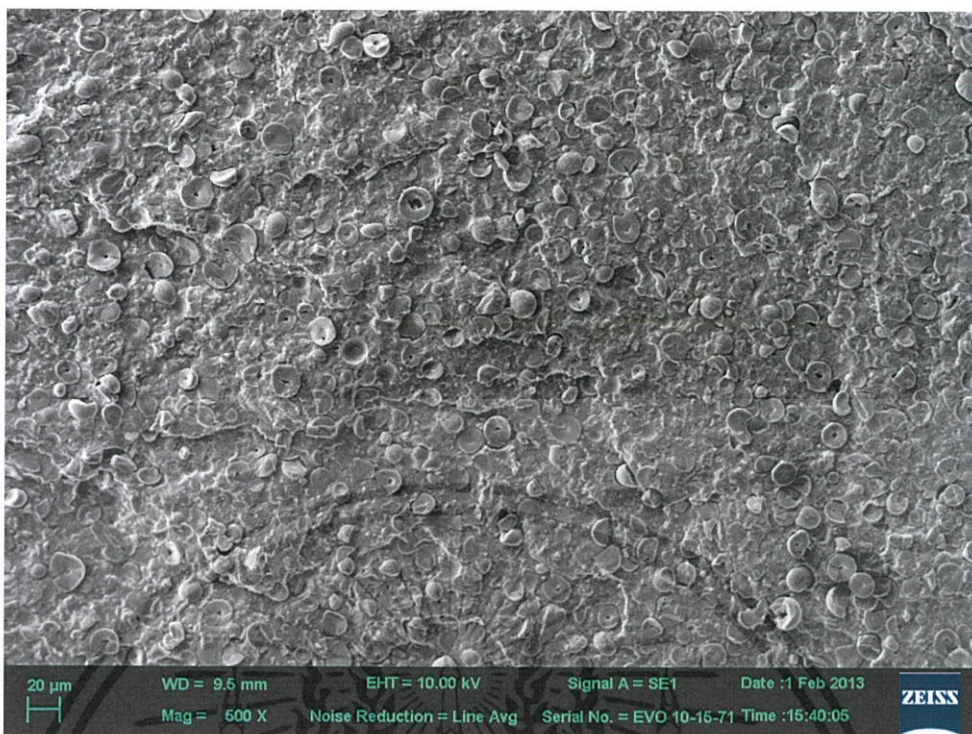


รูปที่ 4.37 SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของ PBS/HBS/ CaCO<sub>3</sub> 30 php



รูปที่ 4.38 SEM กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของ PBS/HBS/ CaCO<sub>3</sub> 30 php

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

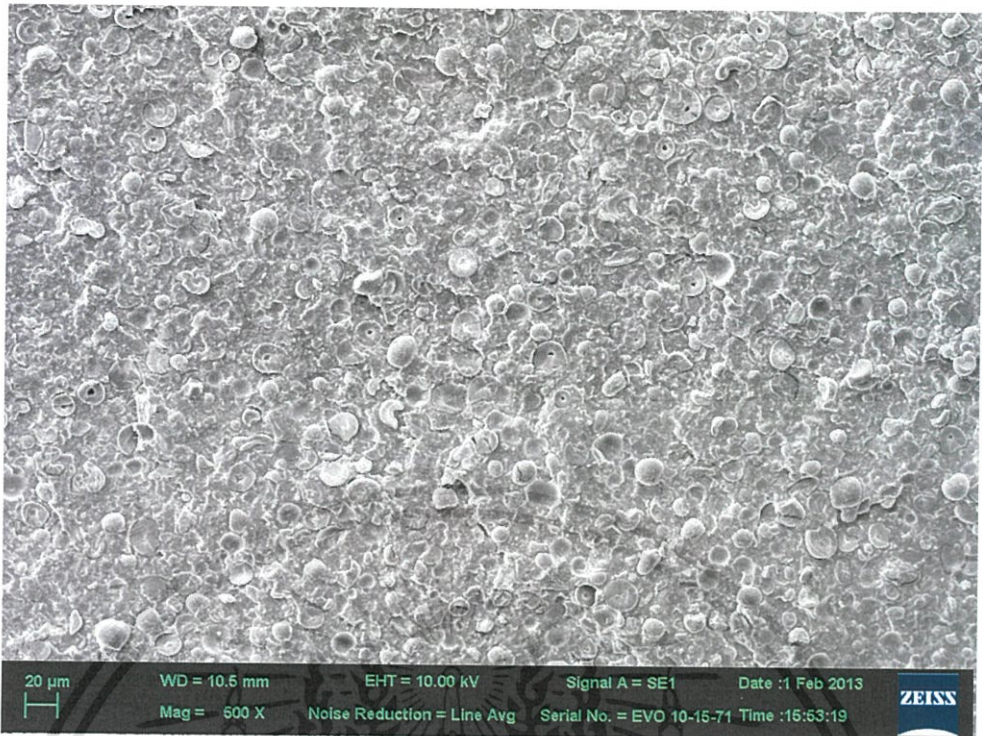


รูปที่ 4.39 SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงลักษณะพื้นฐานวิถยาระหว่าง PBS/HBS/ CaCO<sub>3</sub> 40 php

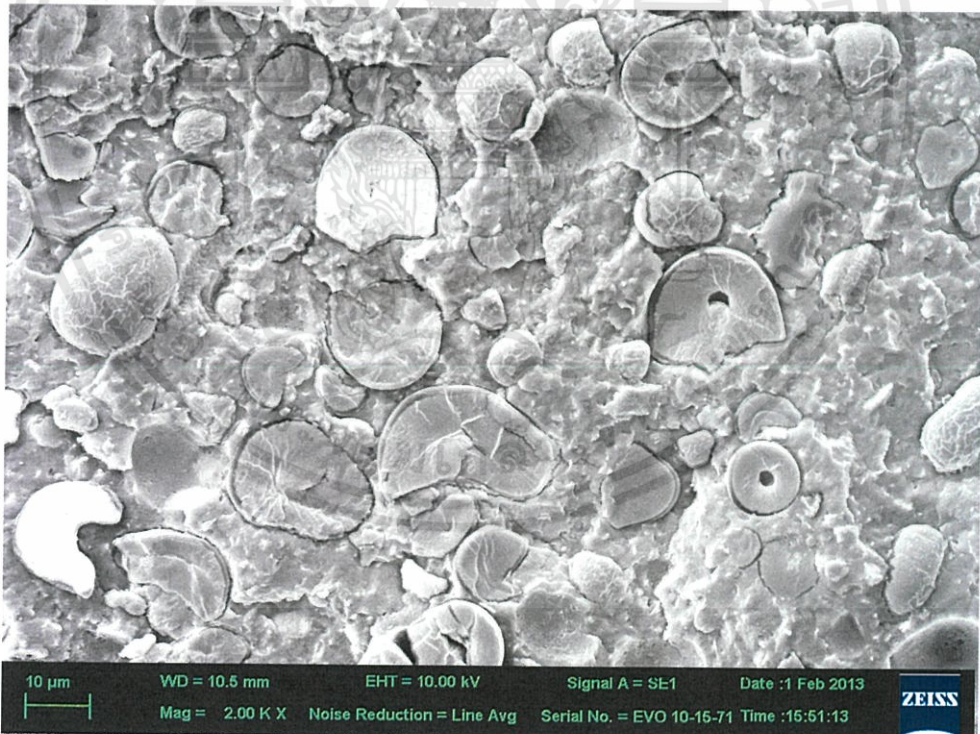


รูปที่ 4.40 SEM กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงลักษณะพื้นฐานวิถยาระหว่าง PBS/HBS/ CaCO<sub>3</sub> 40 php

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

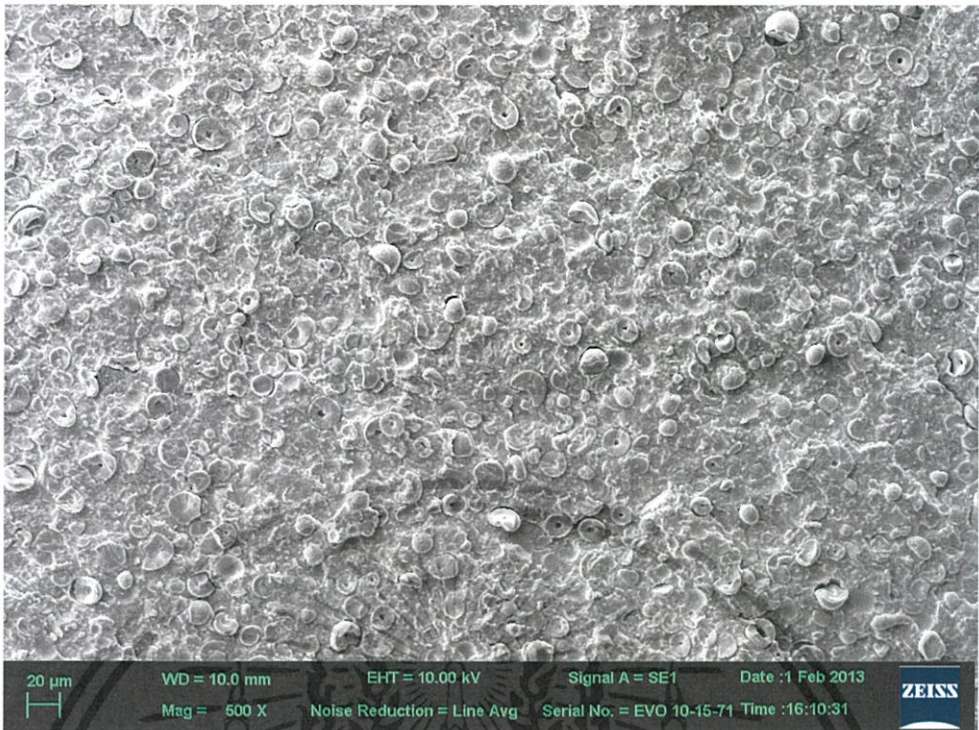


รูปที่ 4.41 SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาระหว่าง PBS/HBS/CLAY 30 php

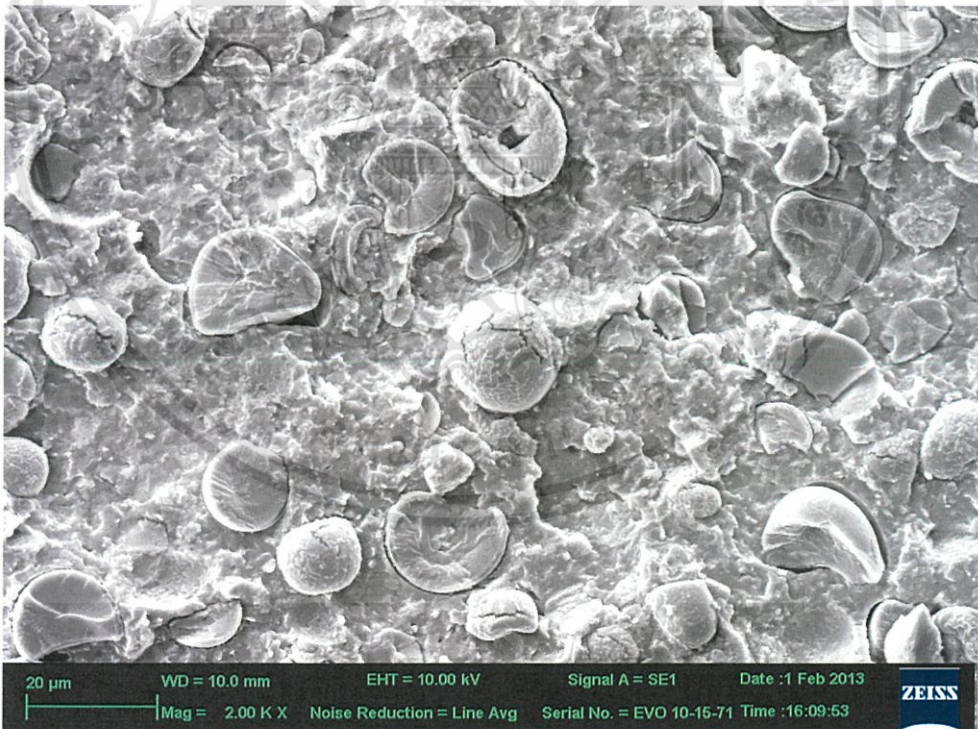


รูปที่ 4.42 SEM กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาระหว่าง PBS/HBS/CLAY 30 php

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

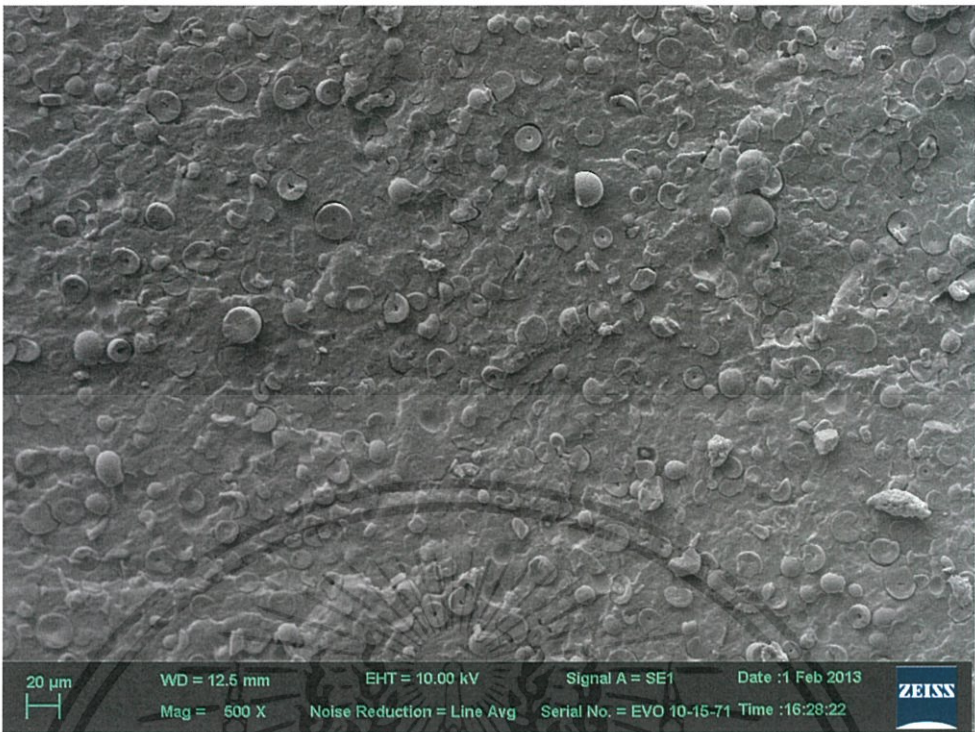


รูปที่ 4.43 SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของ PBS/HBS/CLAY 40 phr

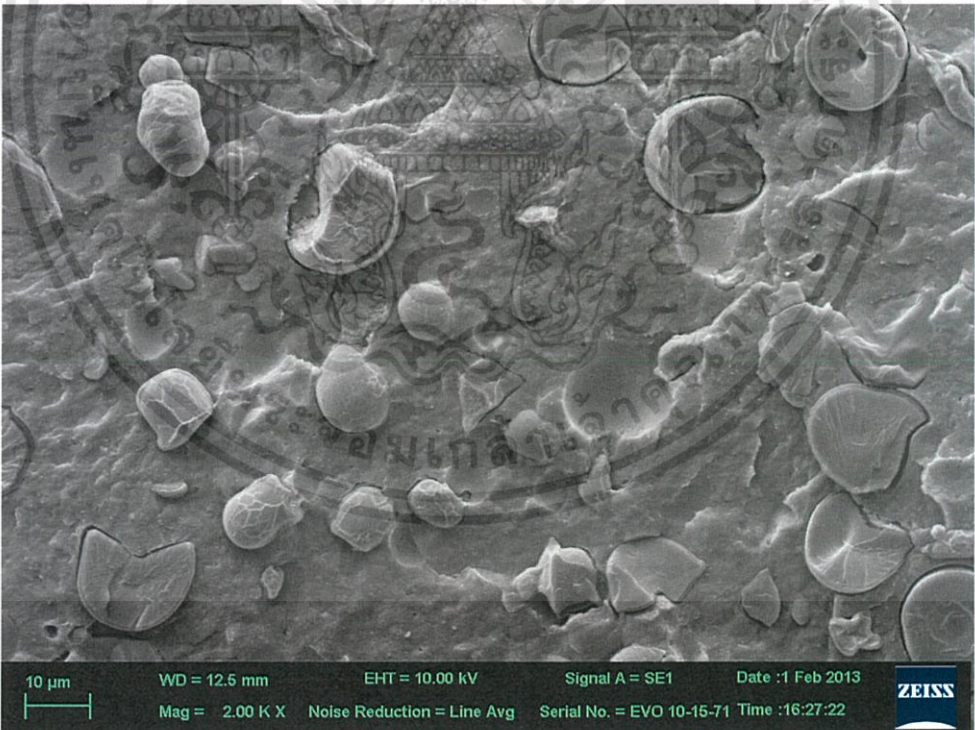


รูปที่ 4.44 SEM กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของ PBS/HBS/CLAY 40 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

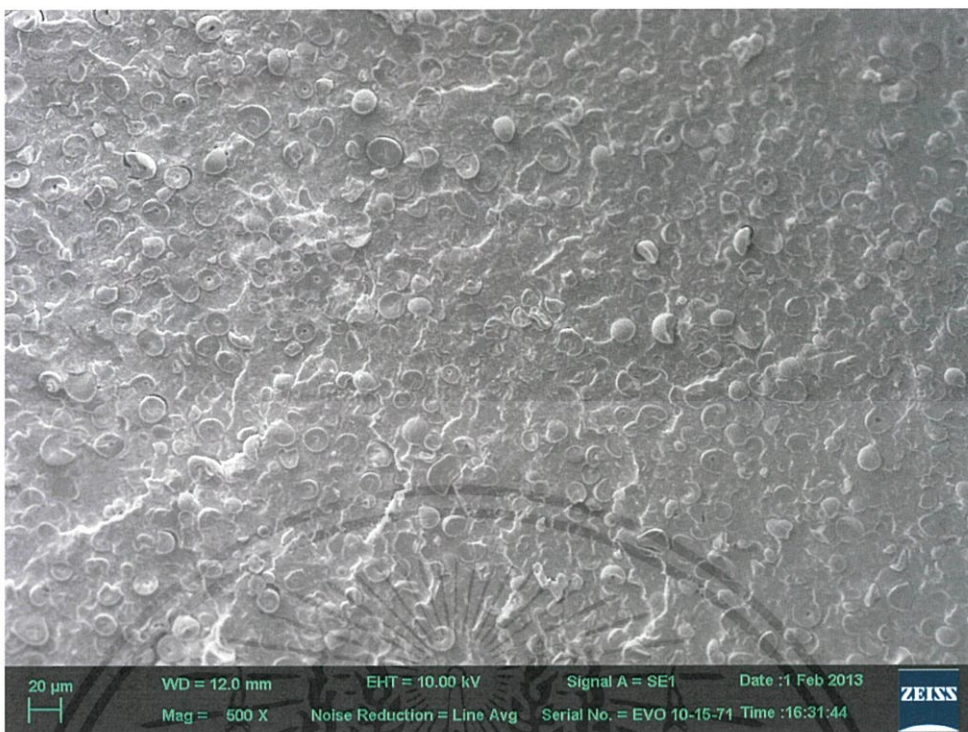


รูปที่ 4.45 SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาระหว่าง PBS/HBS/NPCC 10 phr

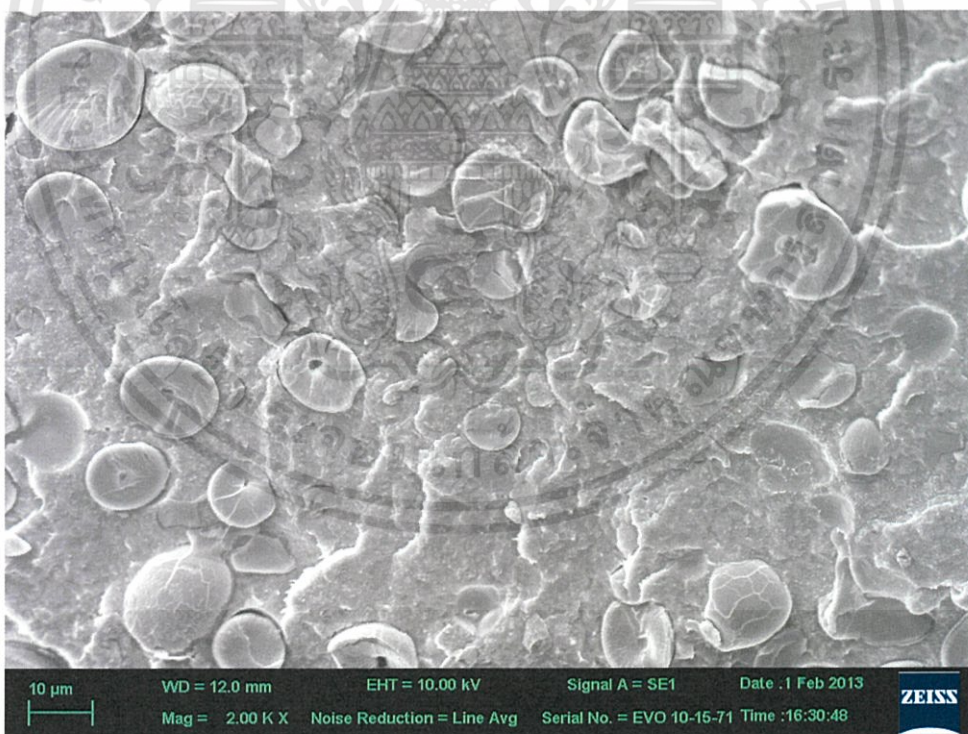


รูปที่ 4.46 SEM กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาระหว่าง PBS/HBS/NPCC 10 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.47 SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของ PBS/HBS/NPCC 15 php



รูปที่ 4.48 SEM กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของ PBS/HBS/NPCC 15 php

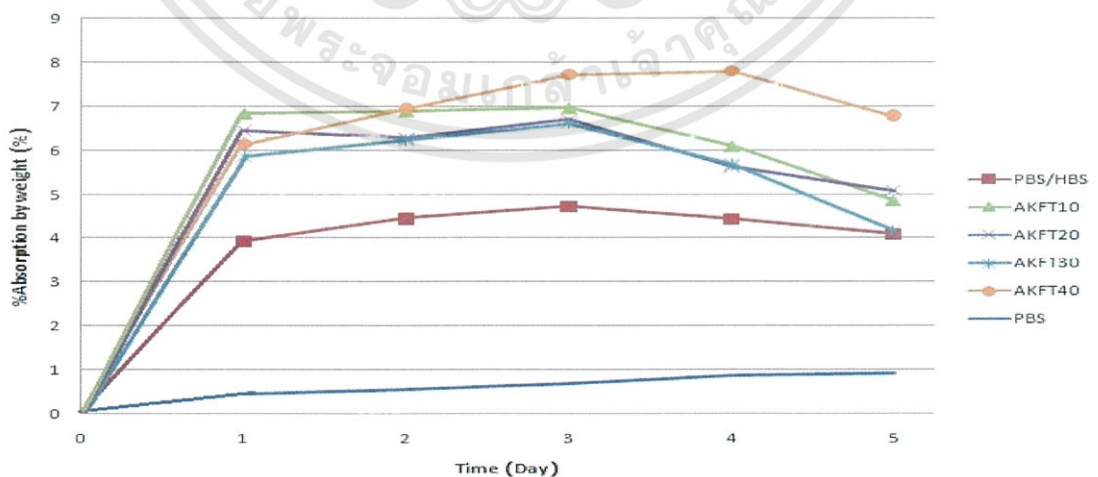
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตอนที่ 5 สมบัติทางกายภาพ

### 5.1 ผลของชนิดและปริมาณของสารตัวเติมที่มีต่อการดูดซึมน้ำ

จากรูปที่ 4.49-4.52 จะพบว่า PBS จะมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด โดยมีค่าประมาณ 0.46-0.93 % และเมื่อเติมแป้งมันสำปะหลังคัดแปร ชนิดไม่ชอบน้ำคัดแปรปานกลาง ลงไปในอัตราส่วน ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักจะพบว่าชิ้นงานมีค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มมากขึ้นอย่างมาก เนื่องจากแป้งมีโครงสร้างหลักเป็นอะไมเลสและอะไมโลเพคตินที่มีขั้ว ซึ่งทำให้ดูดซึมน้ำได้ดีหรือชอบน้ำ (Hydrophilic) และปริมาณแป้งที่ใส่ลงไปมีปริมาณถึงร้อยละ 40 จึงยังทำให้มีค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มมากขึ้นอีก พบว่าในช่วง 1-3 วันแรกของการแช่ตัวอย่างในน้ำ ชิ้นงานตัวอย่างจะมีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากและเริ่มคงที่ในช่วงต่อมา เนื่องจากอนุภาคของแป้งสามารถดูดซึมน้ำได้ดีมาก และเมื่อเม็ดแป้งดูดซึมน้ำเข้าไปก็จะเกิดการบวมตัว จนทำให้ช่องว่างระหว่างเฟสของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Matrix) กับอนุภาคสารตัวเติมเกิดการอิมมัลชันไปด้วยน้ำ ทำให้ไม่สามารถดูดซึมน้ำเข้าไปได้อีก และเริ่มมีปริมาณการดูดซึมน้ำลดลงอาจเนื่องมาจากการที่แป้งบวมตัวแล้วเกิดการหลุดออกที่ผิว

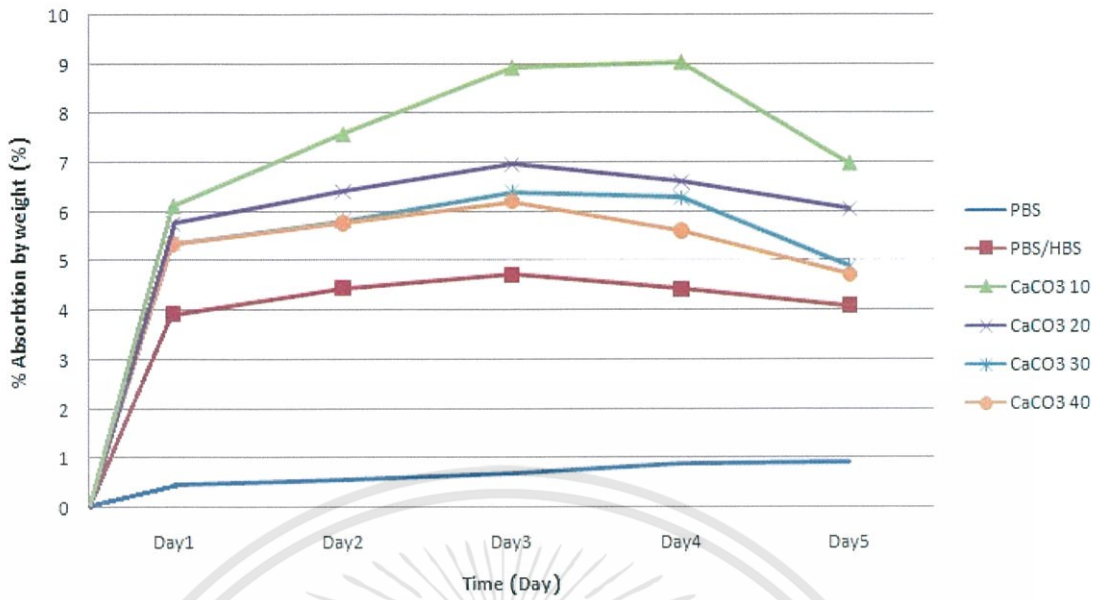
จากรูปที่ 4.49-4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของสารตัวเติมชนิดต่างๆ และปริมาณที่ใช้ เมื่อทำการใส่สารตัวเติมลงไปในพอลิเมอร์ผสม PBS/HBS-M พบว่าค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น อาจมาจากการที่ยังมีช่องว่างระหว่างเฟสของพอลิเมอร์เมทริกซ์ แป้งกับอนุภาคสารตัวเติมอยู่บ้าง ส่งผลทำให้มีพื้นที่ในการดูดซึมน้ำได้เพิ่มมากขึ้น และเมื่อใส่สารตัวเติมไปในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจาก 10-40 phg และ 5-20 phg สำหรับสูตรพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด NPCC พบว่าค่าการดูดซึมน้ำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



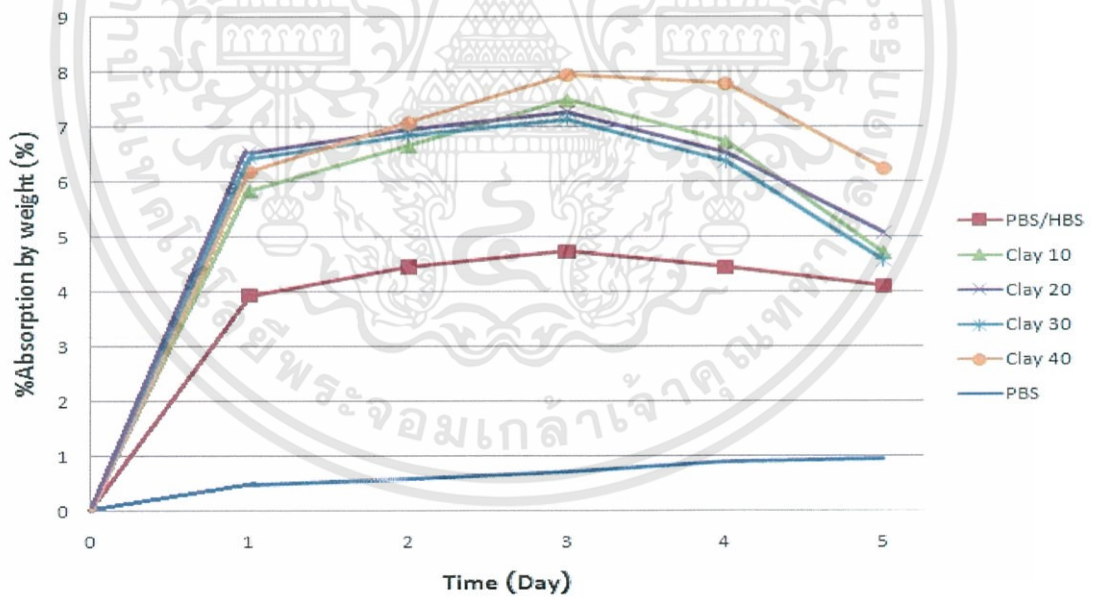
รูปที่ 4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของสูตรที่ใช้ AKFT เป็นสาร

ตัวเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

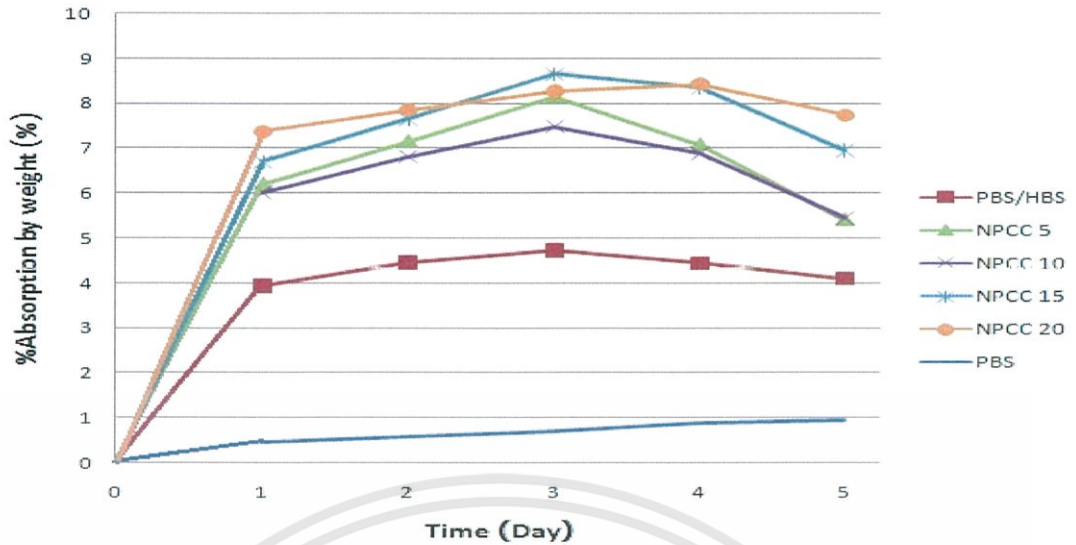


รูปที่ 4.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของสูตรที่ใช้  $\text{CaCO}_3$  เป็นสารตัวเติม



รูปที่ 4.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของสูตรที่ใช้ CLAY เป็นสารตัวเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของสูตรที่ใช้ NPCC เป็นสารตัวเติม

จากรูปที่ 4.49-4.52 จะพบว่าชนิดและปริมาณของสารตัวเติมไม่มีผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของ PBS ผสมแป้งมันสำปะหลังคัดแปร ชนิดไม่ชอบน้ำคัดแปรปานกลางอย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ดีการที่ผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ แป้งมันสำปะหลังคัดแปรกับ PBS ดังที่ได้กล่าวมา พบว่าวัสดุยังคงดูดซึมน้ำสูง แต่ก็อาจเป็นประโยชน์ในการประยุกต์ใช้กับการใช้งานทางด้านการเกษตร อย่างเช่น วัสดุจำพวกกระถางต้นไม้หรือถาดเพาะชำ ที่สามารถดูดซึมน้ำได้เพื่อการเจริญเติบโตของต้นไม้พืชได้

## ตอนที่ 6 การย่อยสลาย (Degradability)

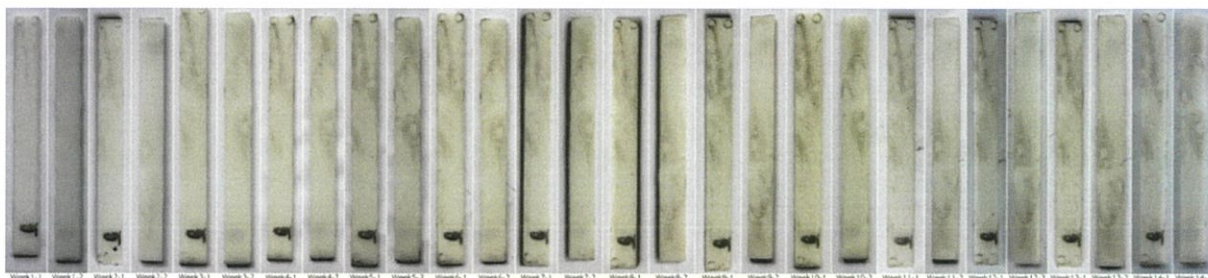
### 6.1 การศึกษาสมบัติการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสม

สารเคมีและสารประกอบแต่ละชนิดในงานวิจัยนี้ เป็นสิ่งที่สามารถเกิดการย่อยสลายเองได้ในธรรมชาติและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่เนื่องจากประโยชน์ในการนำไปใช้งานของพอลิเมอร์ผสมคือการนำไปใช้ขึ้นรูปชิ้นงานเป็นกระถางต้นไม้และถาดเพาะกล้าไม้ เป็นต้น ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมจึงต้องมีความสามารถในการคงรูปอยู่ได้เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนและหลังทำการฝังดิน ผู้จัดทำจึงทำการศึกษาเพื่อให้พอลิเมอร์ผสมเมื่อผ่านการขึ้นรูปและการฝังกลบ ชิ้นงานจะไม่เกิดการย่อยสลายที่เร็วเกินไป และศึกษาผลของการเติมสารตัวเติมที่มีผลต่อการย่อยสลาย

#### 6.1.1 วิเคราะห์การย่อยสลายด้วยรูป

จากรูปที่ 4.53 ถึง 4.59 แสดงถึงชิ้นงานที่ฝังกลบในแต่ละอัตราส่วนสารตัวเติม จะเห็นว่าชิ้นงานอื่นๆจะเกิดการย่อยสลายที่เร็วกว่าชิ้นงาน PBS เพราะมีแป้งเป็นส่วนผสมอยู่ เนื่องจากแป้งมีโครงสร้างหลักเป็นอะไมเลสและอะไมโลเพกตินที่มีขั้ว ซึ่งทำให้ดูดซึมน้ำได้ดีหรือชอบน้ำ (Hydrophilic) และปริมาณแป้งที่ใส่ลงไปมีปริมาณถึงร้อยละ 40 จึงดูดซึมน้ำได้ดี ทำให้ชิ้นงานเกิดการย่อยสลายได้ ส่วนปริมาณสารตัวเติมนั้นเนื่องจากเป็นสารอนินทรีย์ที่สามารถพบได้ในดิน จึงไม่มีผลต่อการย่อยสลายอย่างมีนัยสำคัญ

PBS

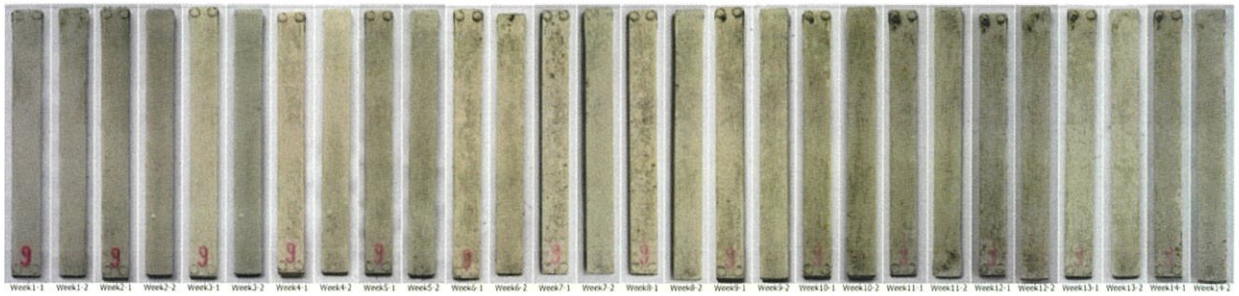
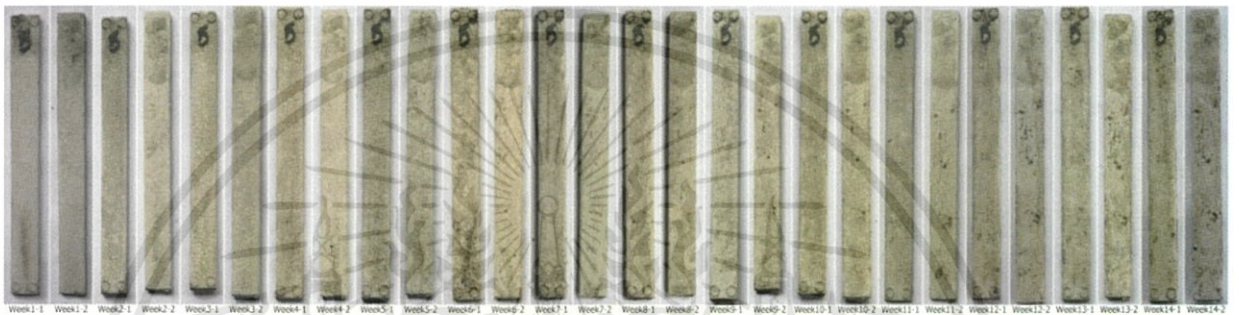
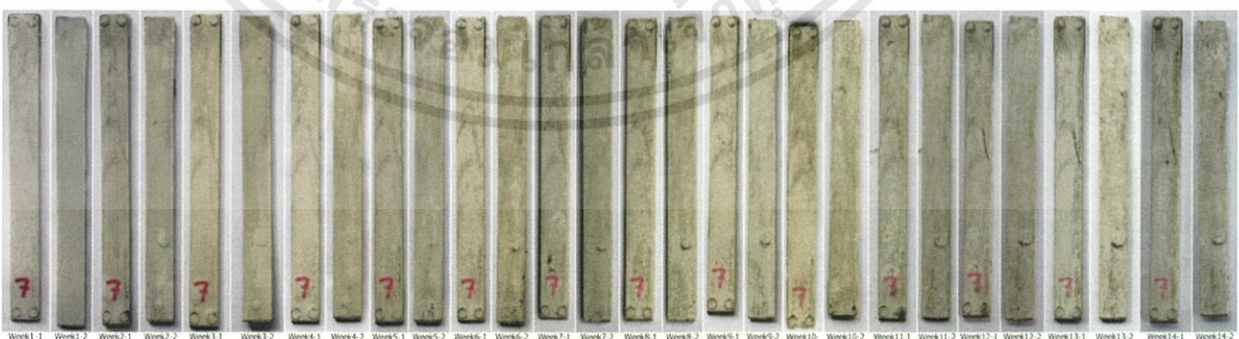


รูปที่ 4.53 แสดงการย่อยสลายชิ้นงานที่ได้จากการฝังกลบของ PBS



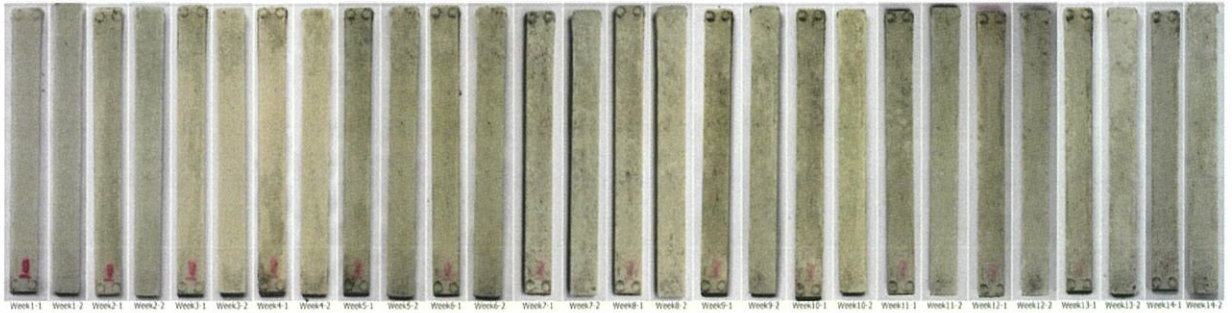
รูปที่ 4.54 แสดงการย่อยสลายชิ้นงานที่ได้จากการฝังกลบของ PBS/HBS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

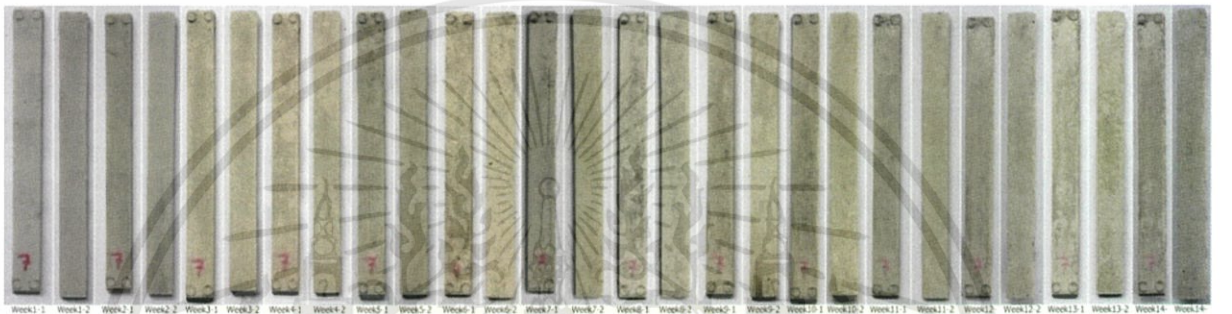
PBS/HBS/CaCO<sub>3</sub> 10 phpPBS/HBS/CaCO<sub>3</sub> 20 phpPBS/HBS/CaCO<sub>3</sub> 30 phpPBS/HBS/CaCO<sub>3</sub> 40 phpรูปที่ 4.55 แสดงการย่อยสลายชิ้นงานที่ได้จากการฝังกลบของ PBS/HBS/ CaCO<sub>3</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

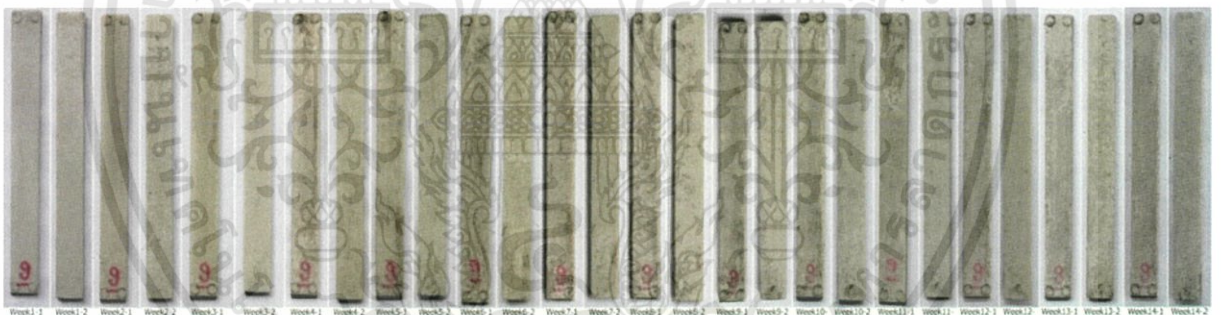
PBS/HBS/CLAY 10 php



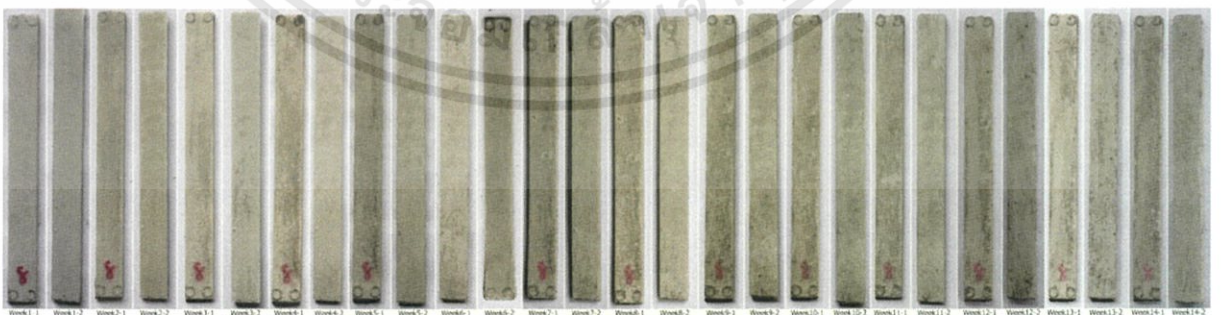
PBS/HBS/CLAY 20 php



PBS/HBS/CLAY 30 php



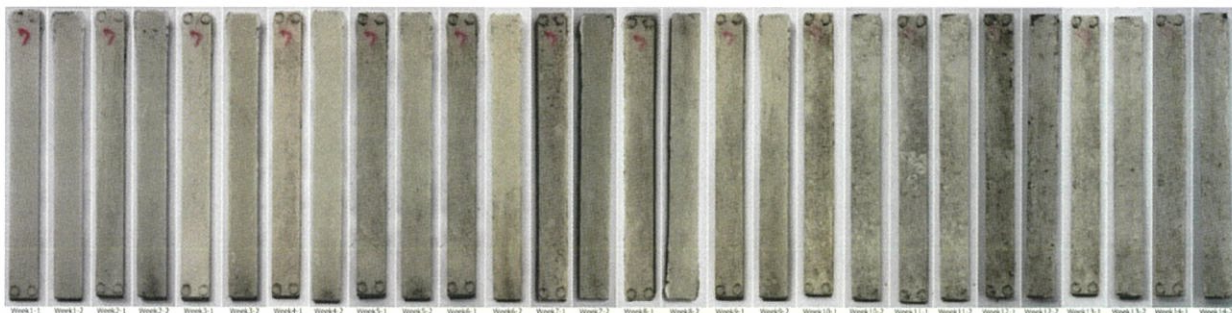
PBS/HBS/CLAY 40 php



รูปที่ 4.56 แสดงการย่อยสลายชิ้นงานที่ได้จากการฝังกลบของ PBS/HBS/CLAY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

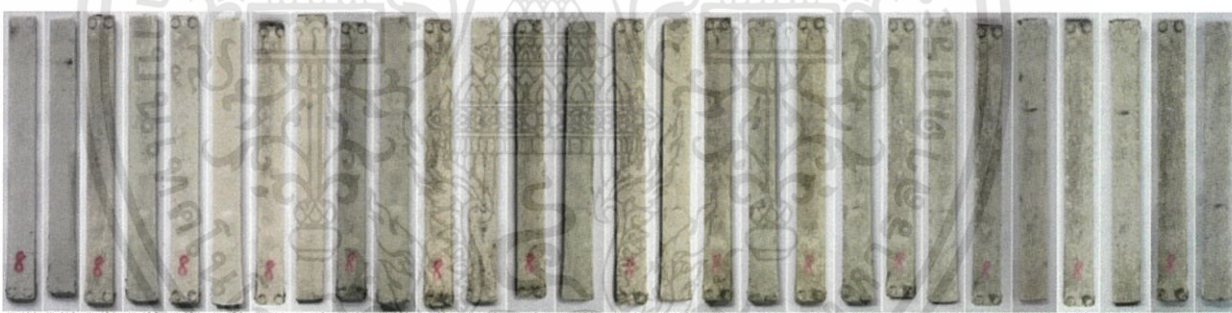
PBS/HBS/NPCC 5 php



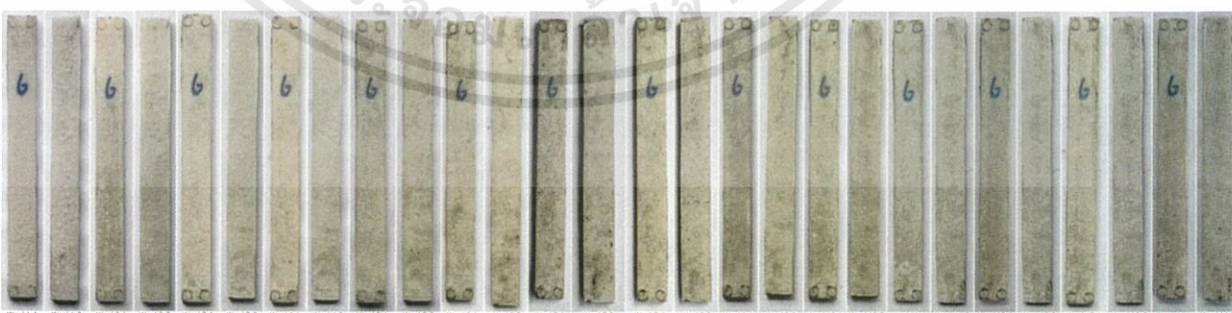
PBS/HBS/NPCC 10 php



PBS/HBS/NPCC 15 php



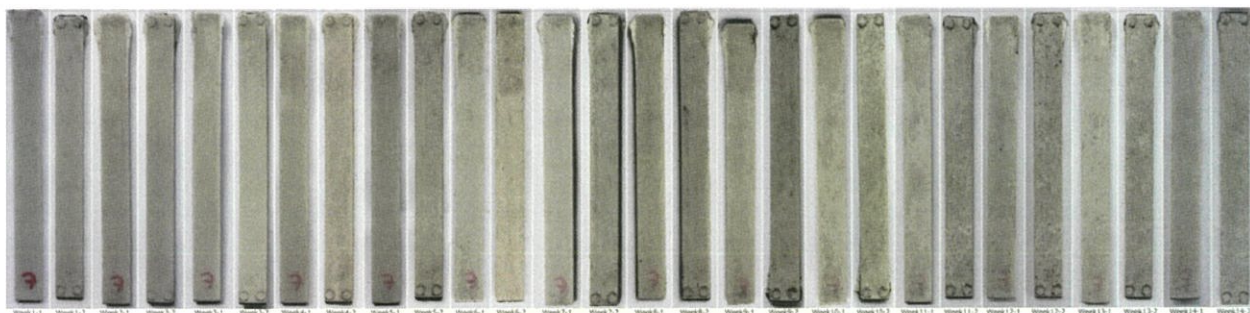
PBS/HBS/NPCC 20 php



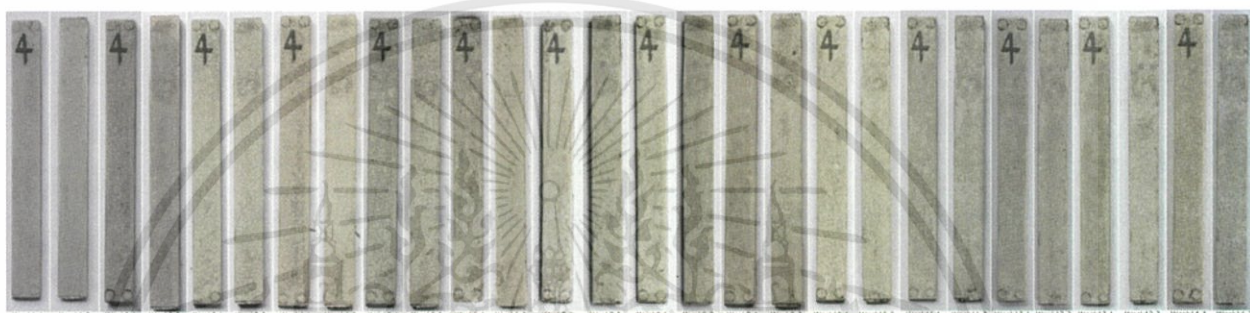
รูปที่ 4.57 แสดงการย่อยสลายชิ้นงานที่ได้จากการฝังกลบของ PBS/HBS/NPCC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PBS/HBS/AKFT10 php



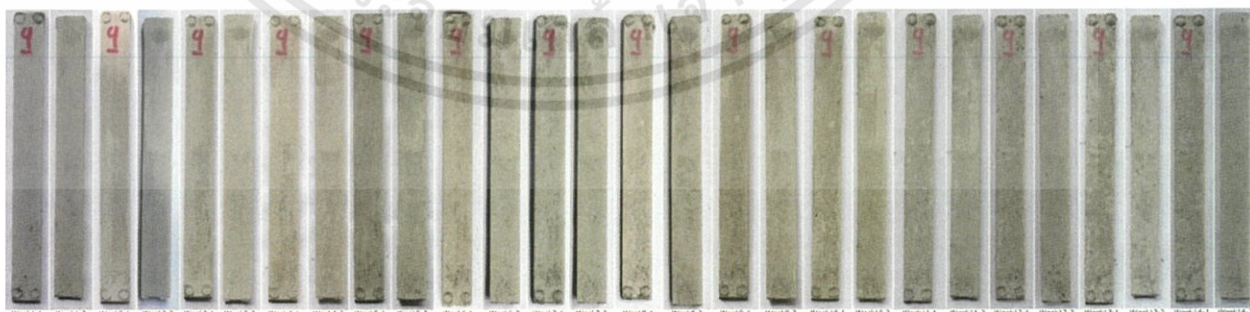
PBS/HBS/AKFT20 php



PBS/HBS/AKFT30 php

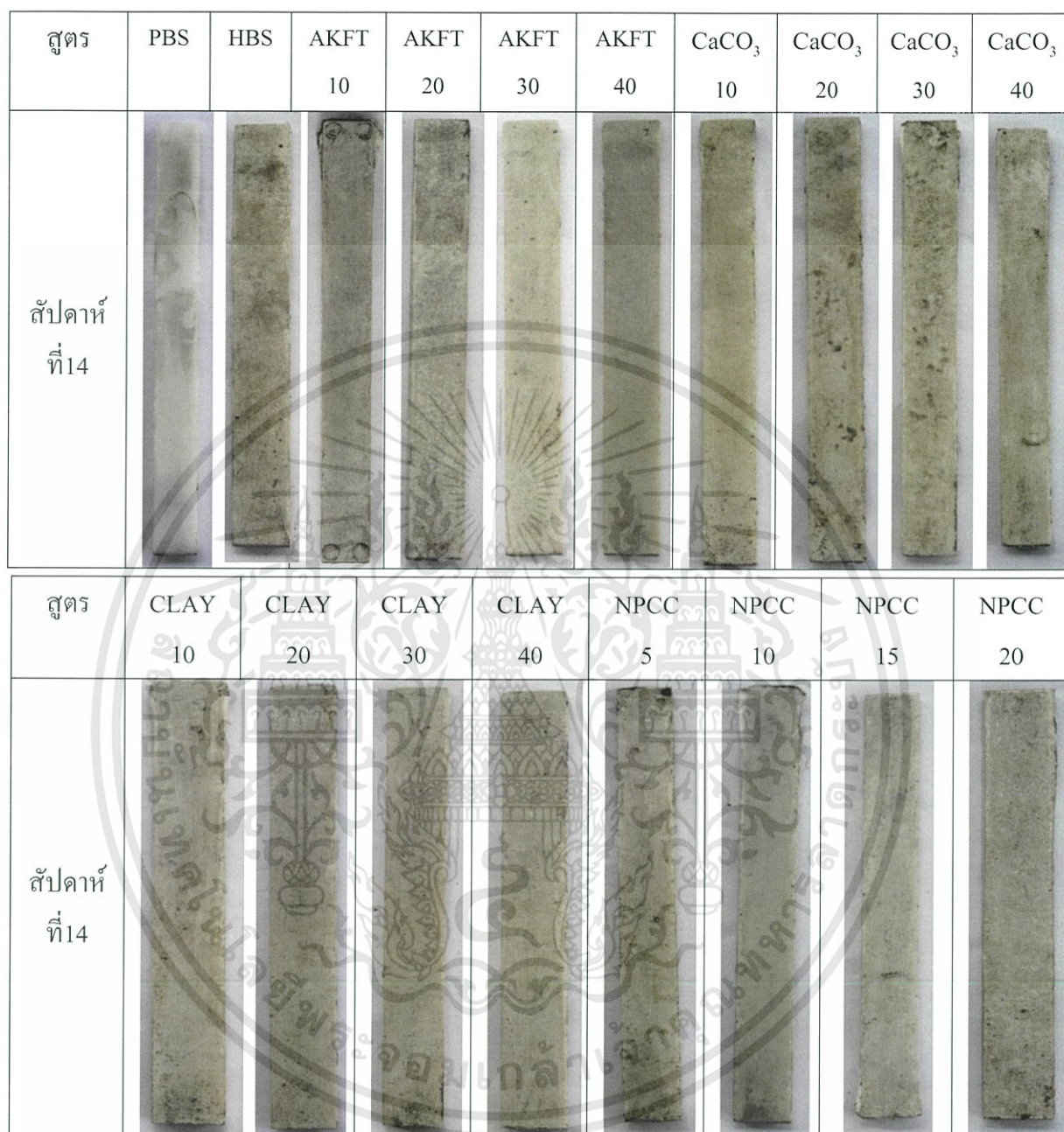


PBS/HBS/AKFT40 php



รูปที่ 4.58 แสดงการย่อยสลายชิ้นงานที่ได้จากการฝังกลบของ PBS/HBS/AKFT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.59 แสดงการย่อยสลายของชิ้นงานที่ได้จากการฝังกลบเป็นระยะเวลา 14 สัปดาห์

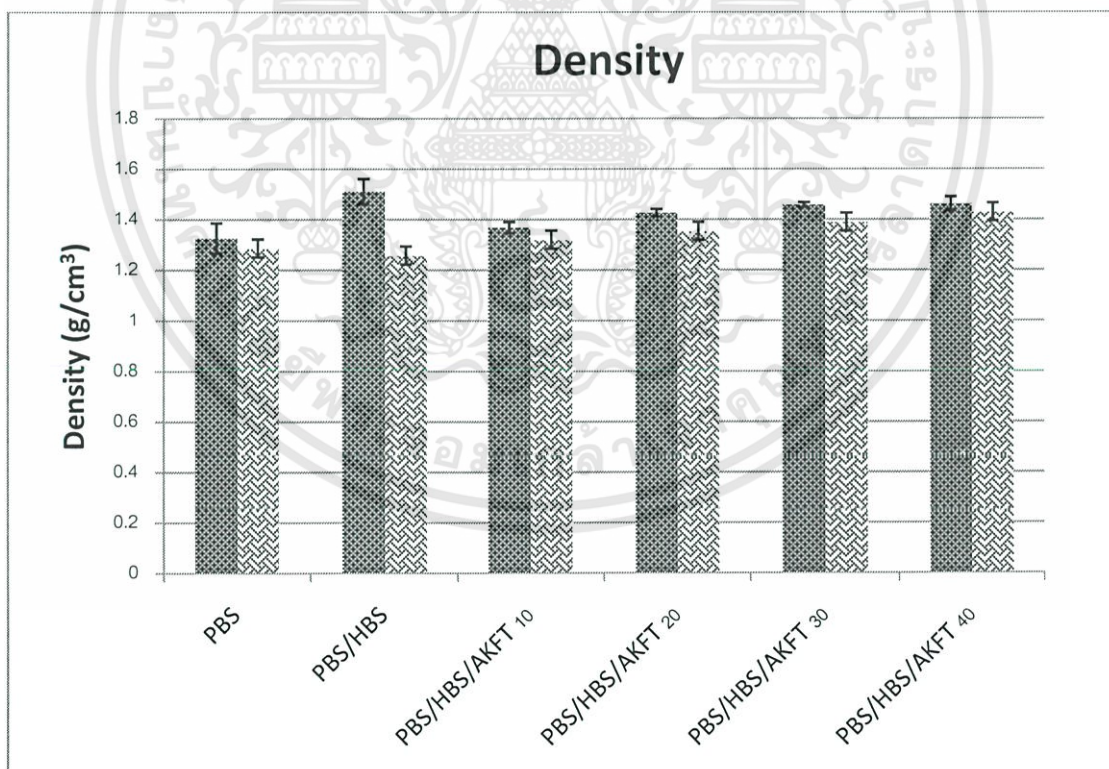
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลหลังจากฝังกลบ

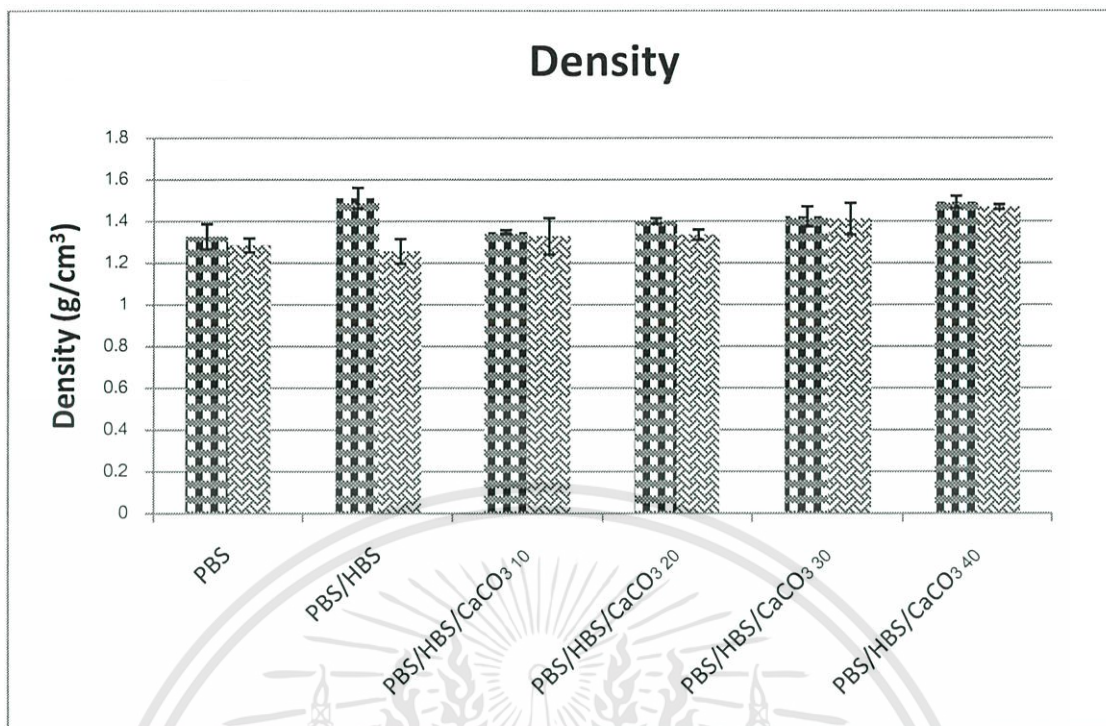
พอลิเมอร์ผสมจะเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างที่ได้กล่าวไปในข้างต้น เมื่อฝังกลบพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาและมีการย่อยสลายทางชีวภาพเกิดขึ้น ทำให้มวลของพอลิเมอร์ผสมลดลง ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมนั้นจึงลดลงที่ปริมาตรคงที่

เมื่อนำไปทดสอบความแข็งแรง ค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มที่ลดลง เพราะมีพอลิเมอร์ผสมบางส่วนเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้เกิดช่องว่างภายในพอลิเมอร์ผสม เมื่อทำการทดสอบความแข็งแรง ค่าที่ได้จึงมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าความแข็งแรงก่อนทำการฝังกลบ ดังรูปที่ 4.64-4.67 และนอกจากนี้จากการสังเกตด้วยตาเปล่า จะพบว่าหลังทำการฝังกลบเป็นระยะเวลา 14 สัปดาห์ ชิ้นงานจะมีลักษณะนูนขึ้น อ่อนตัวและมีเชื้อราสีดำเกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงานด้วย ซึ่งแสดงว่ามีการย่อยสลายที่เกิดขึ้น

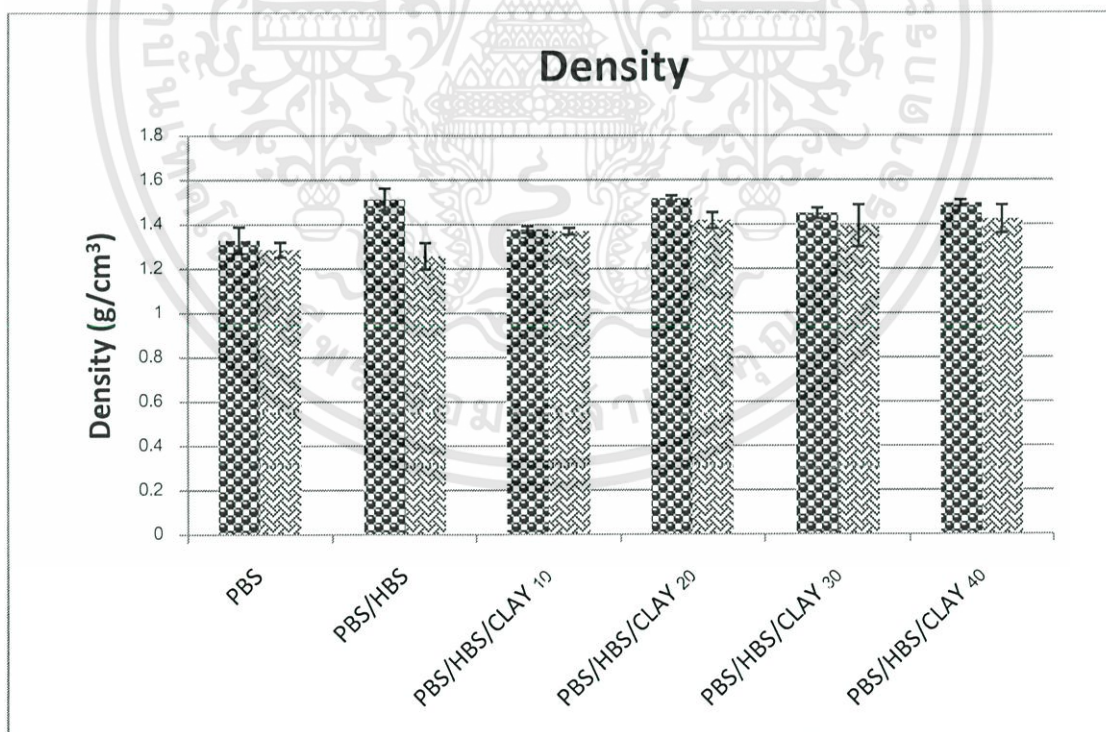
แต่เนื่องจากผลการทดสอบการย่อยสลายมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นถ้ามีความเป็นไปได้ก็ควรศึกษาการย่อยสลายด้วยการทดสอบสมบัติเชิงกล เช่น การทดสอบค่าความแข็งแรงดังเพิ่มเติม



รูปที่ 4.60 ค่าความหนาแน่นก่อนและหลังฝังกลบของ PBS/HBS/AKFT

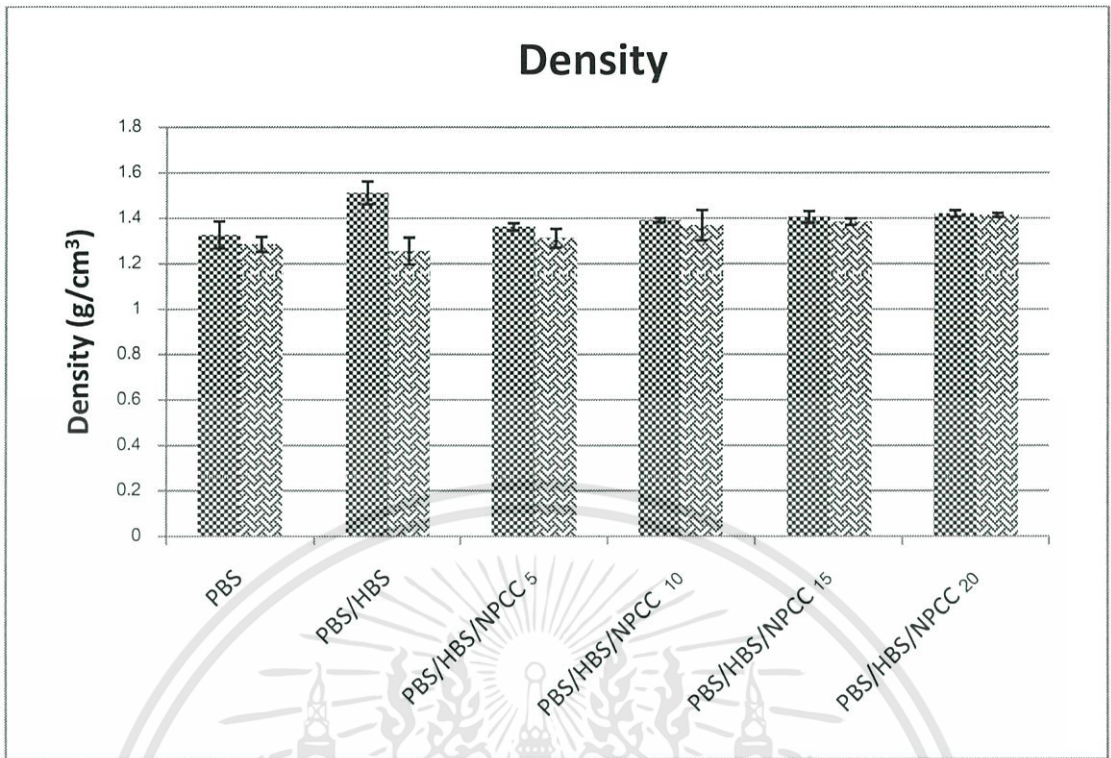


รูปที่ 4.61 ค่าความหนาแน่นก่อนและหลังฝังดินของ PBS/HBS/ CaCO<sub>3</sub>

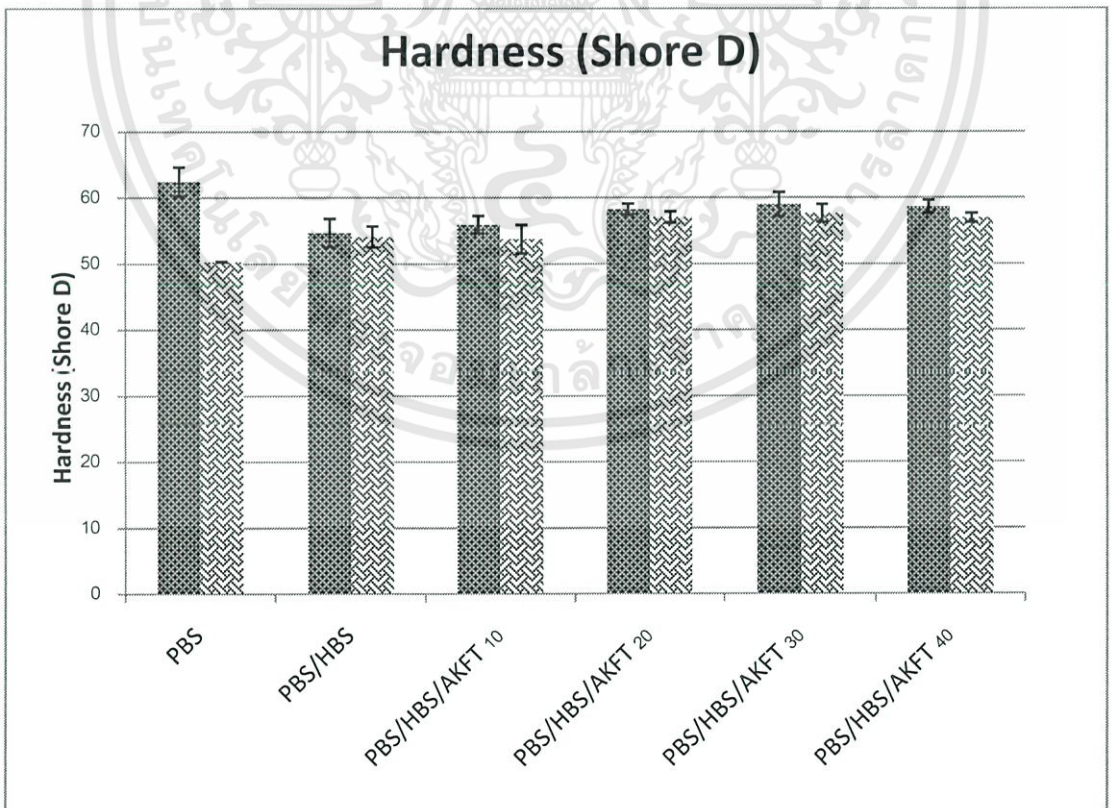


รูปที่ 4.62 ค่าความหนาแน่นก่อนและหลังฝังดินของ PBS/HBS/CLAY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

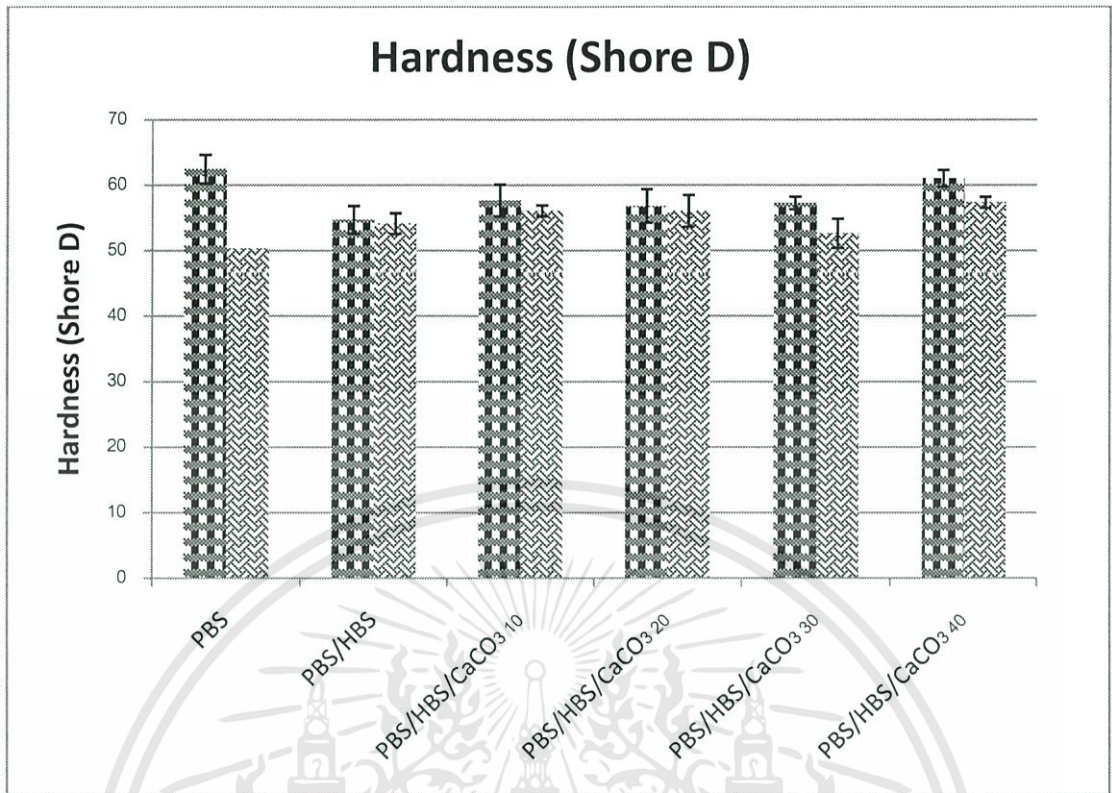


รูปที่ 4.63 ค่าความหนาแน่นก่อนและหลังฝังดินของ PBS/HBS/NPCC

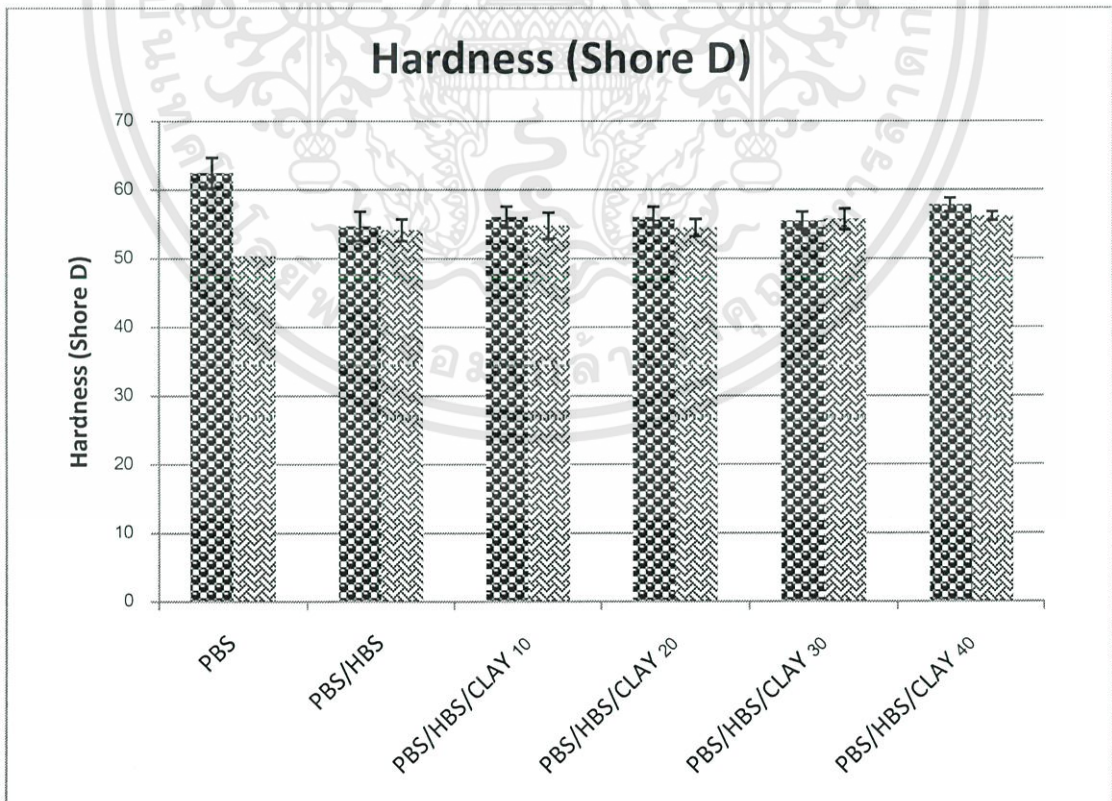


รูปที่ 4.64 ค่าความแข็งกดก่อนและหลังการฝังกลบของ PBS/HBS/AKFT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

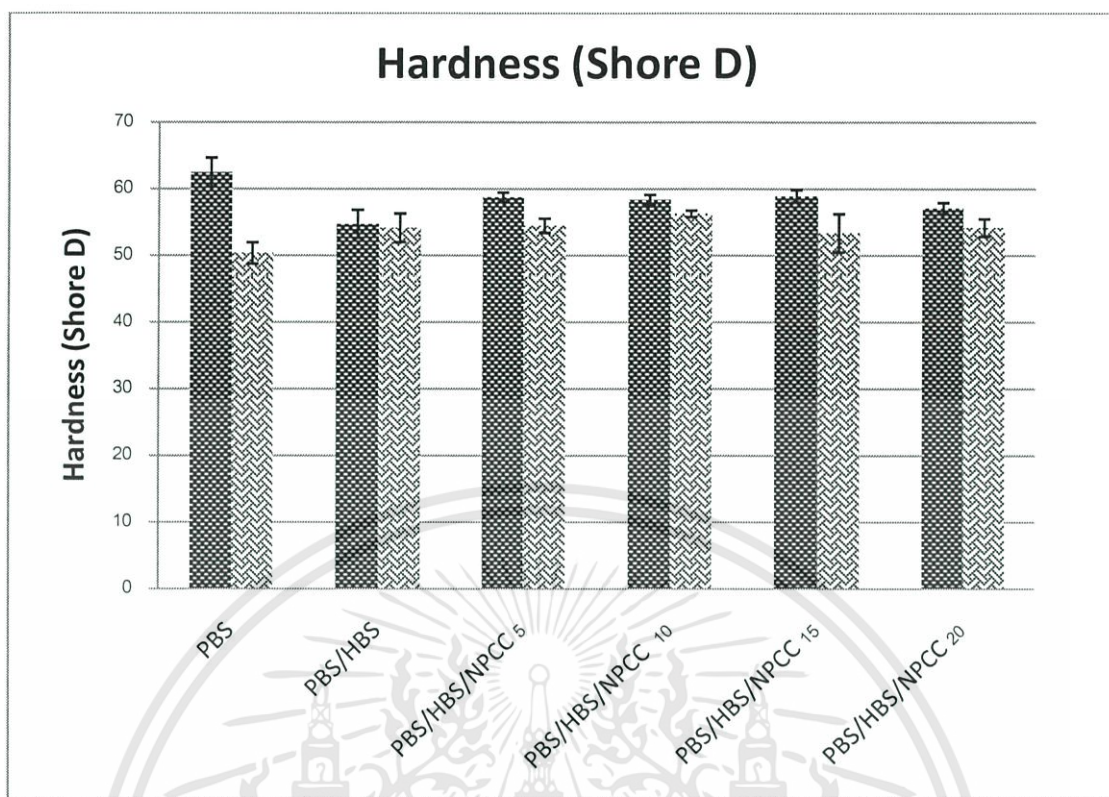


รูปที่ 4.65 ค่าความแข็งก่อก่อนและหลังการฝังกลบของ PBS/HBS/ CaCO<sub>3</sub>



รูปที่ 4.66 ค่าความแข็งก่อก่อนและหลังการฝังกลบของ PBS/HBS/CLAY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.67 ค่าความแข็งกคก่อนและหลังการฝังกลบของ PBS/HBS/NPCC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3 ต้นทุนการผลิต

#### ราคาของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylenes succinate, PBS)	200	บาทต่อกิโลกรัม
แป้งชนิดไม่ชอบน้ำ คัดแปรปานกลาง (HBS)	25	บาทต่อกิโลกรัม
กลีเซอรอล เกรดทั่วไป	45	บาทต่อกิโลกรัม

#### สารตัวเติม

แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO <sub>3</sub> MC-Coat)	7	บาทต่อกิโลกรัม
นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NPCC-101)	35	บาทต่อกิโลกรัม
ดินขาว (Calcined Kaolin Clay, KaMin <sup>TM</sup> 70C )	24	บาทต่อกิโลกรัม
Calcined Neuburg Siliceous Earth (Aktifit <sup>®</sup> AM)	65	บาทต่อกิโลกรัม

ตาราง 4.2 แสดงราคาของการคอมพิวเตอร์สารในแต่ละสารตัวเติมต่อการคอมพิวเตอร์สารหนึ่งกิโลกรัม

อัตราส่วน ชนิด	5 php (บาท)	10 php (บาท)	15 php (บาท)	20 php (บาท)	30 php (บาท)	40 php (บาท)
CaCO <sub>3</sub>	118	116	113	110.5	106	101.5
NPCC	119	117	115	113	109	105
CLAY	118	116.5	114	112	108	104.5
AKFT	120	119	117	116	114	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมอนินทรีย์ในพลาสติกย่อยสลายได้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมแป้งมันสำปะหลังชนิดไม่ชอบน้ำคัดแปรปานกลางโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิจัยชนิดและปริมาณสารตัวเติมอนินทรีย์ที่จะเพิ่มสมบัติบางประการแก่พอลิเมอร์ อาทิเช่น เพิ่มสมบัติเชิงกลต่างๆ ลดค่าการดูดซึมน้ำ และลดต้นทุนการผลิต เป็นต้น ซึ่งสามารถสรุปผลและเสนอแนะได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อใส่สารตัวเติมอนินทรีย์ชนิดต่างๆลงใน PBS/HBS จะทำให้พอลิเมอร์มีค่ามอดูลัสของยังและค่าความแข็งแรงกดในแนว โนม์ที่เพิ่มสูงขึ้นตามกฎของของผสม (Rule of mixture) โดยการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมไม่ได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อค่ามอดูลัสของยัง และค่าความแข็งแรงกดอย่างมีนัยสำคัญ แต่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง เนื่องจากการใส่สารตัวเติมอนินทรีย์ เป็นการเพิ่มวัฏภาคของแข็งเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ ทำให้ชิ้นงานเกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคมากขึ้น ทำให้ชิ้นงานสามารถรับแรงดึงและกระจายแรงได้ลดลง

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลที่ปริมาณสารตัวเติมเท่ากันที่ 20 php พบว่า AKFT มีค่ามอดูลัสของยังมากกว่าสารตัวเติมชนิดอื่น ในขณะที่ NPCC มีค่าความแข็งแรงกระแทกมากที่สุด

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อน พบว่า PBS เมื่อทำการผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ลงไปแล้ว ค่า  $T_m$  จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยจะพบค่า  $T_{m1}$  และ  $T_{m2}$  ซึ่งอาจเกิดจากการที่ PBS นั้นเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ส่งผลให้เกิดการย่อยสลาย (Degradation) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สั้นลง ส่งผลให้เกิดขนาดผลึกที่แตกต่างกัน และทำให้ค่า  $T_m$  เปลี่ยนแปลงไป

จากการทดสอบค่าดัชนีการไหล ควรพบค่า MFI ที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม แต่เนื่องจากทำการทดลองในภายหลัง ทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการย่อยสลายไปบางส่วน และเกิดการดูดซึมน้ำ ทำให้ได้ค่า MFI ที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับ MFI ของ PBS/HBS-M แต่อย่างไรก็ตามเมื่อใส่สารตัวเติมลงไปปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่า MFI ลดลง

จากการศึกษาฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม พบว่าสารตัวเติมสามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์ผสม และการใส่สารตัวเติมเป็นการเพิ่มเนื้อในชิ้นงาน ส่งผลให้พอลิเมอร์และเม็ดแป้งยึดเกาะกันได้ดียิ่งขึ้น

ในการศึกษาการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม เมื่อทำการใส่สารตัวเติมลงไป ใน PBS/HBS-M พบว่าค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น อาจมาจากการที่ยังมีช่องว่างระหว่างเฟสของพอลิเมอร์เมทริกซ์ แบ่งกับอนุภาคสารตัวเติมอยู่บ้าง ส่งผลทำให้มีพื้นที่ในการดูดซึมน้ำได้เพิ่มมากขึ้น และเมื่อใส่สารตัวเติมไปในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจาก 10-40 php และ 5-20 php สำหรับสูตรพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิด NPCC พบว่าค่าการดูดซึมน้ำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จากการศึกษาสมบัติการย่อยสลายเป็นเวลา 14 สัปดาห์ พบว่า ชนิดและปริมาณสารตัวเติมไม่ส่งผลต่อการย่อยสลายของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ เพราะสารตัวเติมทุกชนิดที่ทดลองเป็นสารอนินทรีย์จากธรรมชาติ ความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า พอลิเมอร์ที่ผสมสารตัวเติมจะสามารถนำมาขึ้นรูปใช้งานได้จริงโดยไม่เกิดการย่อยสลายที่เร็วเกินไป

เมื่อพิจารณาในด้านต้นทุนของผลิตภัณฑ์ พบว่าสารตัวเติมชนิด  $\text{CaCO}_3$  จะสามารถลดต้นทุนการผลิตได้มากที่สุดประมาณร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ

## 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. ควรทำการศึกษาเพื่อปรับปรุงสมบัติการดูดซึมน้ำ ให้ชิ้นงานดูดซึมน้ำได้น้อยลง
2. ควรทำการทดลองขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ และทดสอบการใช้งานจริง เช่น กระจกดันไม้ ถาดเพาะชำ เป็นต้น
3. ศึกษาชนิดและปริมาณสารตัวเติมให้เพิ่มมากขึ้น เพราะจากการทดลอง การใส่สารตัวเติมสูงสุดที่ 40 php ยังไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล เช่น ค่าความแข็งแรงดึง เป็นต้น
4. ควรทำการปรับปรุงสูตรเพื่อไม่ให้เกิดการย่อยสลายที่เร็วเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ธนาวดี ลีจากภัย.(2549).พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม.ศูนย์โลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [2] National Metal and Materials Technology Center (MTEC).(2007).**Bio Plastic**.(Online) Available:  
[http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic/type\\_de\\_plas.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html)  
 [August 22,2012]
- [3] BASF SE Communication Plastics.(2012).**Biodegradable Polymers Inspired by Nature Ecoflex,Ecovio**.(Online) Available:  
<http://www.plasticsportal.net/wa/plastics/portal> [September 11,2012]
- [4] สุภัตรา เจริญเกษมวิทย์.(2552).พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.(Online) Available:  
<http://www.vcharkarn.com/varticle/38614> [September 15, 2012]
- [5] Naturplas.(2010).**Biodegradable Polymers**. (Online) Available:  
<http://cvnaturplas.dnsalias.com/natural-materials/biodegradables-polymers>  
 [September 17, 2012]
- [6] มรกต ดันติเจริญ , ชนพร กลิ่นเกษร.(2555).ยุทธศาสตร์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมมันสำปะหลัง.ฝ่ายบริหารคลังเตอร์และโปรแกรมวิจัย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- [7] กมลชนก ตังคพานิช และคณะ.(2554).ผลของชนิดแป้งมันสำปะหลังที่มีผลต่อสมบัติของพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้จาก PBS ผสมแป้งดัดแปร. โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] European Commission.(2005).**Techno-economic Feasibility of Large-scale Production of Bio-based Polymers in Europe**. (Online) Available:  
<http://nws.chem.uu.nl/publica/Publicaties2005/E2005-251.pdf> [October 23, 2012]
- [9] สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย.(2009).แป้งกลายเป็นพลาสติกได้อย่างไร.(Online) Available:  
[http://www.thaitapiocastarch.org/article26\\_th.asp](http://www.thaitapiocastarch.org/article26_th.asp) [October 23, 2012]
- [10] Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., and Ahmed, S. 2008. Biological Degradation of Plastics:A Comprehensive Review. *Biotechnology Advances* 26: 246-265.

- [11] อัจฉรา รัตนมณี.(2552).ฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้จากอีโคโนพอลิเมอร์ผสมแป้งคัดแปร และจากแป้งพรีเจลสำหรับงานเกษตรกรรม.วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [12] BC Polymers Marketing Co., Ltd. **Biodegradable aliphatic polyester technical data sheet.**
- [13] Glass, J. E, and Swift, G. 1989. **Agricultural and Synthetic Polymers, Biodegradation and Utilization, ACS Symposium Series, 433.** Washington DC. American Chemical Society.
- [14] อัญชลินินทร์ สิงห์คำ และ ทศพร นามโสง.(ไม่ระบุ).การใช้ประโยชน์ของแป้งในอุตสาหกรรมอาหาร. (Online) Available: <http://courseware.rmutl.ac.th/courses/103/unit504.html> [October 23, 2012]
- [15] Denise R. Ferrier.(2006).**Biochemistry.** 4th ed. Department of Biochem and Molecular Biology Drexel University College of Medicine Philadelphia, Pennsylvania.
- [16] สุภาณี หิรัญธนกิจจากุ.(2538).ความรู้เกี่ยวกับสิ่งเป็นพิษ.กลุ่มงานพิษวิทยาและสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สาธารณสุข กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข. (Online) Available: [http://webdb.dmsh.moph.go.th/ifc\\_toxic/a\\_tx\\_2\\_001c.asp?info\\_id=146](http://webdb.dmsh.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_2_001c.asp?info_id=146) [October 23, 2012]
- [17] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.(2554).ไบโอดีเซล:วิจัย...เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้.(Online) Available: <http://share.psu.ac.th/blog/eng-biodiesel/21174> [October 23,2012]
- [18] Nura.(2008).**Chapter 1 – Introduction (Fillers).**(Online) Available: <http://polymer-filler.blogspot.com/2008/08/chapter-1-introduction-fillers.html> [October 23, 2012]
- [19] อุตสาหกรรมพื้นฐาน เอนและกรเหมืองแร่.(2547).แคลเซียมคาร์บอเนต.กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.(Online) Available: <http://www.dpim.go.th/service/download?articleid=292&F=303> [October 23, 2012]
- [20] Hoffman mineral.(n.d.).**Functional fillers.**(Online) Available: <http://www.hoffmann-mineral.com/Calcined-Neuburg-Siliceous-Earth/Product-Range/Aktifit> [October 23, 2012]
- [21] Hoffman mineral.(n.d.).**Functional fillers.**(Online) Available: <http://www.hoffmann-mineral.com/Calcined-Neuburg-Siliceous-Earth/Product-Range/Silfit> [October 23, 2012]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] กุขงค์ ทับทอง, ชาคริต ลีรสิงห์, และ พงษ์ธร แซ่อู่ย.(2551).การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมแรง ระหว่างนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกาในยางธรรมชาติ.วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรี นครินทรวิโรฒ
- [23] ดร.รชนี พันธวรการ,อ.ดร.(ไม่ระบุ).เทคโนโลยีกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์.ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [24] Jo Ann Ratto, Peter J. Stenhouse, Margaret Aueibach, John Mitchell and Richard Farrell. (1999). **“Processing, performance and biodegradability of a thermoplastic aliphatic polyester/starch system”**. Polymer 40.6777-6778
- [25] Daniel Eiras,Luiz Antonio Pessan.(2009).**Influence of calcium carbonate nanoparticles on the crystallization of polypropylene**.*Material Research*, Vol.12, No.4, 523-527
- [26] ซอลดา เล้ากิตติกุล, พนิดา ต่องนอบน้อย, พิมพาภรณ์ มั่นพิริยะกุล.(2552).พลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งคัดแปร ผสมพอลิไวนิลซัคซิเนต.วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [27] Bonnet, M.(2009).**Fillers – Small, but Highly Significant**.Kunststoffe international 99.9. 72-76
- [28] ดวงพร คล้ายเพชร. “การศึกษาฟิล์มไบโอพลาสติกที่ย่อยสลายได้จากพอลิไวนิลซัคซิเนต”. วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2553.
- [29] KaminTM 70C safety datasheet (Online) Available : <http://www.kaminllc.com/uploads/docs/TPPS/Domestic%20PDF/KaMin%2070C.pdf>  
[March 11, 2013]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก1 สภาวะที่ใช้ในการผสม Twin-Screw Extruder

สารตัวอย่าง	Screw speed (min <sup>-1</sup> )	Temperature (°C)			
		1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>
PBS/HBS-M	5	155	145	140	135
PBS/HBS-M/AKFT	5	155	145	140	135
PBS/HBS-M/CaCO <sub>3</sub>	5	155	145	140	135
PBS/HBS-M/CLAY	5	155	145	140	135
PBS/HBS-M/NPCC	5	155	145	140	135

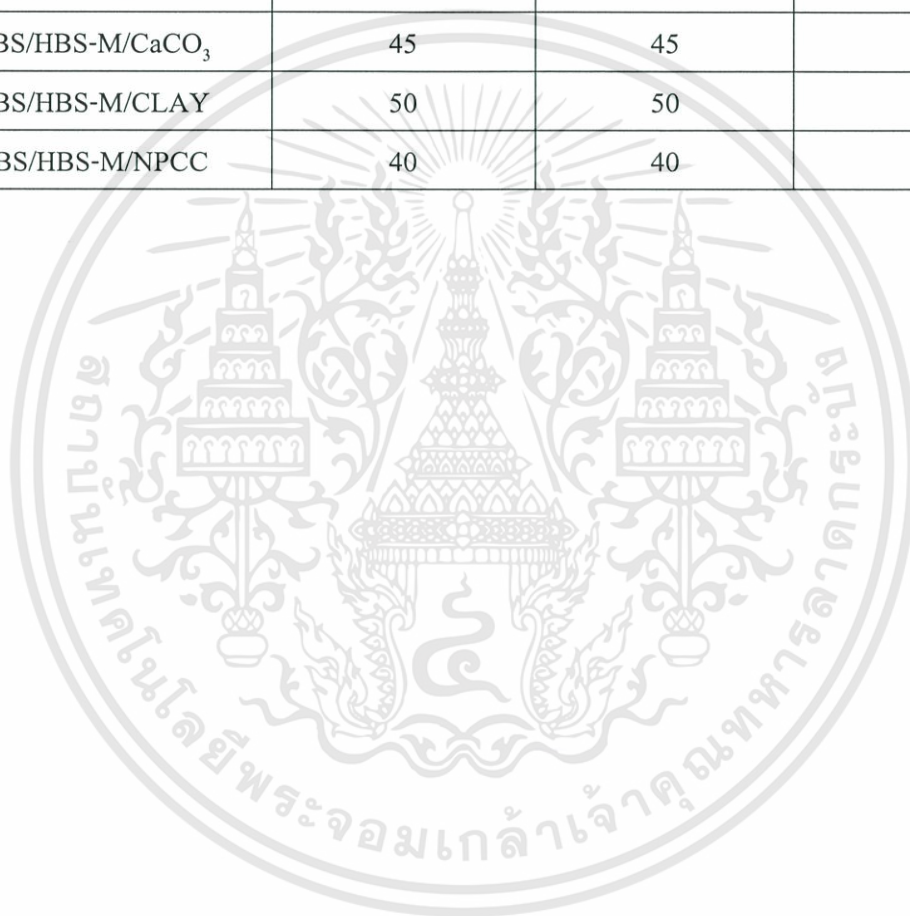
ตารางที่ ก2 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป Injection Moulding

สารตัวอย่าง	Temperature (°C)		
	1 <sup>st</sup> INJ	2 <sup>nd</sup> INJ	3 <sup>rd</sup> INJ
PBS Pure	130	125	120
PBS/HBS-M	130	125	120
PBS/HBS-M/AKFT	130	125	120
PBS/HBS-M/CaCO <sub>3</sub>	130	125	120
PBS/HBS-M/CLAY	130	125	120
PBS/HBS-M/NPCC	130	125	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก3 ความดันของหน่วย Injection ที่ปรับจนได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์

สารตัวอย่าง	Pressure (Bar)		
	1 <sup>st</sup> INJ	2 <sup>nd</sup> INJ	3 <sup>rd</sup> INJ
PBS Pure	40	40	40
PBS/HBS-M	45	45	45
PBS/HBS-M/AKFT	45	45	45
PBS/HBS-M/CaCO <sub>3</sub>	45	45	45
PBS/HBS-M/CLAY	50	50	50
PBS/HBS-M/NPCC	40	40	40



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### วิธีการคำนวณที่ ข1 Differential Scanning Calorimetry (DSC)

คำนวณหาค่าองศาความเป็นผลึก (%Crystallinity,  $X_c$ ) จากสมการที่ 3.4

$$\%Crystallinity (X_c) = \frac{\Delta H_f \times 100}{\Delta H_f^\circ \times \%PBS \text{ ในวัสดุ}} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $\Delta H_f$  คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก

$\Delta H_f^\circ$  คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PBS ที่มีความเป็นผลึก 100 % ซึ่งมีค่าเท่ากับ 114 J/g [26]

งานวิจัยนี้ อัตราส่วนของ PBS ต่อแป้งมันสำปะหลังคัดแปรรูปถูกควบคุมให้คงที่ที่ 60:40 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างเช่น สูตร สารตัวเติม AKFT 30 php

การทำของผสมครั้งละ 1 กิโลกรัม

ดังนั้น จะมี PBS อยู่จำนวน 600 กรัม

HBS อยู่จำนวน 400 กรัม

สารตัวเติม AKTF 30 php อยู่จำนวน  $30/100 \times 600 = 180$  กรัม

กลีเซอรอล 30% โดยน้ำหนักแป้ง อยู่จำนวน  $30/100 \times 400 = 120$  กรัม

รวมทั้งหมด เท่ากับ 1300 กรัม

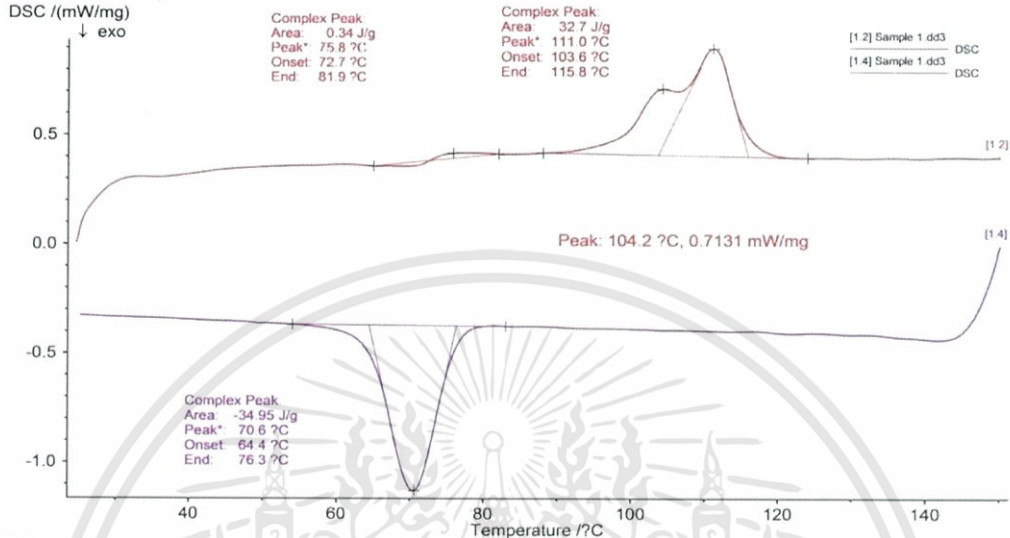
จากกราฟที่ ๓.๑ ค่า  $\Delta H_f$  เท่ากับ 32.7 J/g

แทนค่าในสมการที่ 3.4

$$\text{จะได้ค่า } \%Crystallinity (X_c) = \frac{32.7 \times 100}{114 \times 600/1300} = 62.1 \%$$

### DSC Thermogram

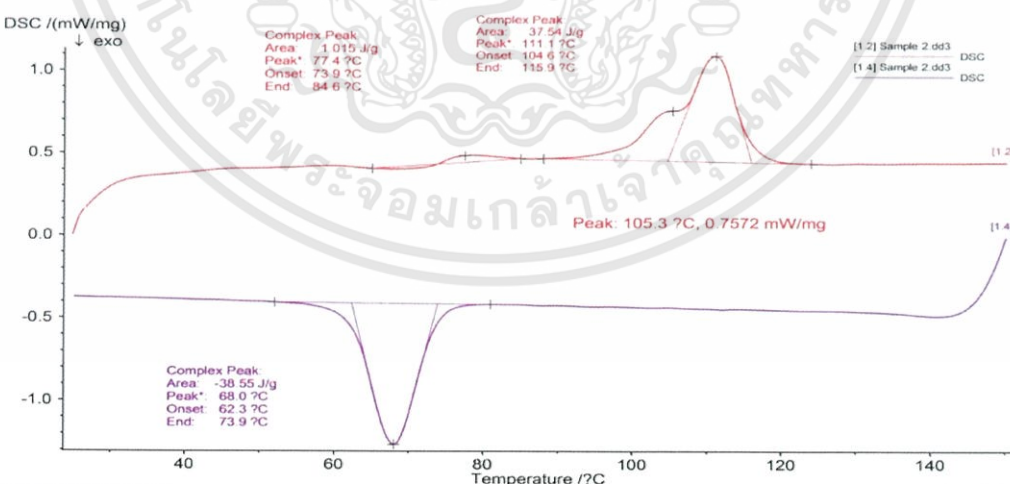
ภาพที่ ข1 PBS/HBS/AKFT 30



Main 2013-03-06 23:59 User sem  
 Instrument: NETZSCH DSC 204 F1 File: C:\ngbwint\data5\DS\_56\02\DS56\_0036\Sample 1 dd3  
 Project: temp 25c-150c\_h10\_c10\_1 Reference: crucible.0.000 mg  
 Identity: DS56\_0036\_01 Material: crucible.0.000 mg  
 Date/time: 2/25/2013 11:38:22 PM Corr./temp.cal: 25-150C\_h10\_c10\_1 bd3 / Calibrate Jan2012 id3 Segments: 4  
 Laboratory: sisc Sens.file: Calibrate Jan2012 ed3 Atmosphere: N2, 20.0ml/min / N2, 50.0ml/min  
 Operator: ray Sample car./TC: DSC 204F1 sensor / E M. range: 5000 ?V  
 Sample: crucible, 12.800 mg Mode/type of meas.: DSC / Sample + Correction  

[#] Type	Range	Acq. Rate	STC	P1:-	P2:N2	PG:N2	IC	BC	Corr.
[1-2] Dynamic	25/10.0(K/min)/150	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	0	020
[1-4] Dynamic	150/10.0(K/min)/25	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	1	020

ภาพที่ ข2 PBS/HBS/CaCO<sub>3</sub> 30

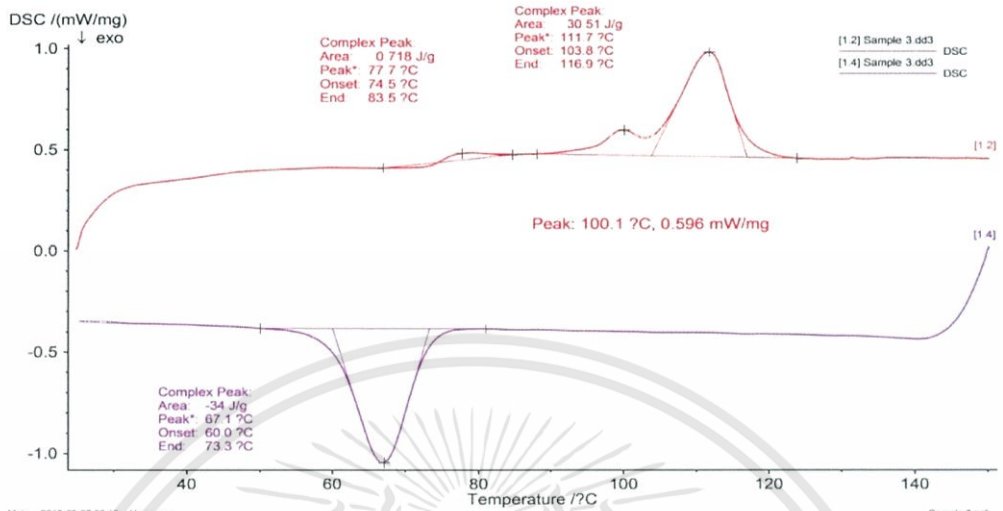


Main 2013-03-07 00:07 User sem  
 Instrument: NETZSCH DSC 204 F1 File: C:\ngbwint\data5\DS\_56\02\DS56\_0036\Sample 2 dd3  
 Project: temp 25c-150c\_h10\_c10\_1 Reference: crucible.0.000 mg  
 Identity: DS56\_0036\_02 Material: crucible.0.000 mg  
 Date/time: 2/26/2013 12:59:12 AM Corr./temp.cal: 25-150C\_h10\_c10\_1 bd3 / Calibrate Jan2012 id3 Segments: 4  
 Laboratory: sisc Sens.file: Calibrate Jan2012 ed3 Atmosphere: N2, 20.0ml/min / N2, 50.0ml/min  
 Operator: ray Sample car./TC: DSC 204F1 sensor / E M. range: 5000 ?V  
 Sample: crucible, 13.200 mg Mode/type of meas.: DSC / Sample + Correction  

[#] Type	Range	Acq. Rate	STC	P1:-	P2:N2	PG:N2	IC	BC	Corr.
[1-2] Dynamic	25/10.0(K/min)/150	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	0	020
[1-4] Dynamic	150/10.0(K/min)/25	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	1	020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ ข3 PBS/HBS/CLAY 30



Main: 2013-03-07 00:16 User: sem

Instrument: NETZSCH DSC 204 F1 File: C:\ngbwint\data5\DS\_5602\DS56\_0036\Sample 3 dd3

Project: temp 25c-150c\_h10\_c10\_1 Reference: crucible.0.000 mg

Identity: DS56\_0036\_03 Material: Crucible

Date/time: 2/26/2013 8:03:09 PM Corr./temp.cal: 25-150C\_h10\_c10\_1\_bd3 / Calibrate Jan2012.td3

Laboratory: sisc Sens.file: Calibrate Jan2012.ed3

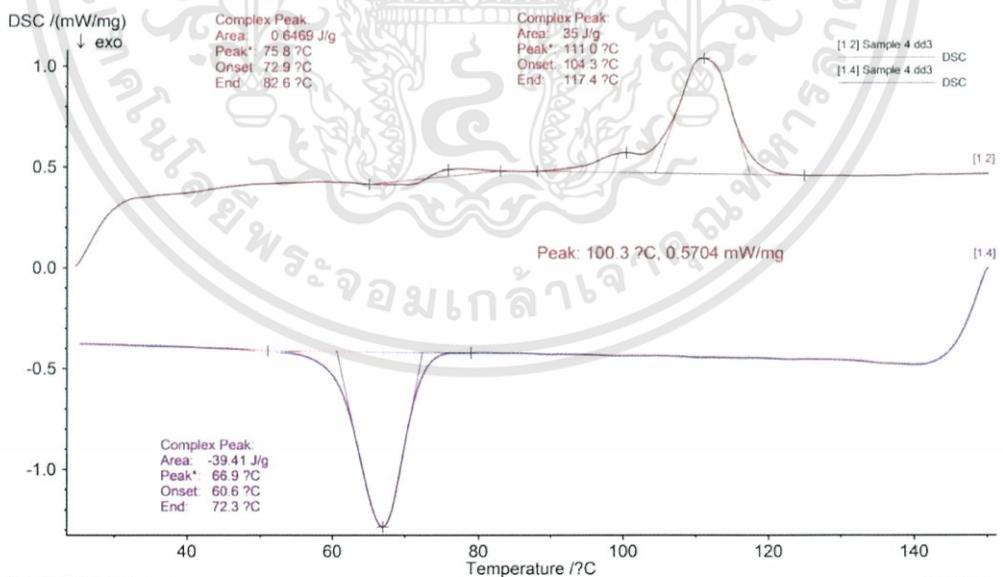
Operator: ray Sample car./TC: DSC 204F1 t-sensor / E

Sample: crucible.13.200 mg Mode/type of meas.: DSC / Sample + Correction

[#]	Type	Range	Acq.Rate	STC	P1---	P2:N2	PG:N2	IC	BC	Corr.
[1,2]	Dynamic	25/10.0(K/min)/150	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	0	020
[1,4]	Dynamic	150/10.0(K/min)/25	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	1	020

Segments: 4  
Crucible: Pan AJ, pierced lid  
Atmosphere: N2, 20.0ml/min / N2, 50.0ml/min  
M. range: 5000 7V

ภาพที่ ข4 PBS/HBS/NPCC 15



Main: 2013-03-07 00:16 User: sem

Instrument: NETZSCH DSC 204 F1 File: C:\ngbwint\data5\DS\_5602\DS56\_0036\Sample 4 dd3

Project: temp 25c-150c\_h10\_c10\_1 Reference: crucible.0.000 mg

Identity: DS56\_0036\_04 Material: Crucible

Date/time: 2/26/2013 8:43:48 PM Corr./temp.cal: 25-150C\_h10\_c10\_1\_bd3 / Calibrate Jan2012.td3

Laboratory: sisc Sens.file: Calibrate Jan2012.ed3

Operator: ray Sample car./TC: DSC 204F1 t-sensor / E

Sample: crucible.10.000 mg Mode/type of meas.: DSC / Sample + Correction

[#]	Type	Range	Acq.Rate	STC	P1---	P2:N2	PG:N2	IC	BC	Corr.
[1,2]	Dynamic	25/10.0(K/min)/150	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	0	020
[1,4]	Dynamic	150/10.0(K/min)/25	100.00	1	0.0	20.0	50.0	1	1	020

Segments: 4  
Crucible: Pan AJ, pierced lid  
Atmosphere: N2, 20.0ml/min / N2, 50.0ml/min  
M. range: 5000 7V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## วิธีการคำนวณที่ ค1 จำนวนต้นทุน

ตัวอย่างการคำนวณราคาของการคอมปาวด์สาร

PBS	1	กิโลกรัมที่ใช้ในการคอมปาวด์สารเป็นราคา	200	บาท
PBS	0.6	กิโลกรัมที่ใช้ในการคอมปาวด์สารเป็นราคา	$\frac{200 \times 0.6}{1}$	บาท

เป็นราคา 120 บาท

HBS	1	กิโลกรัมที่ใช้ในการคอมปาวด์สารเป็นราคา	25	บาท
HBS	0.4	กิโลกรัมที่ใช้ในการคอมปาวด์สารเป็นราคา	$\frac{25 \times 0.4}{1}$	บาท

เป็นราคา 10 บาท

กลีเซอรอล	1	กิโลกรัมที่ใช้ในการคอมปาวด์สารเป็นราคา	45	บาท
กลีเซอรอล	0.12	กิโลกรัมที่ใช้ในการคอมปาวด์สารเป็นราคา	$\frac{45 \times 0.12}{1}$	บาท

เป็นราคา 5.4 ~ 6 บาท

สารตัวเติมที่ใช้ คือ AKFT (Aktifit® AM) เติมไปในปริมาณ 10 php

AKFT	1	กิโลกรัมที่ใช้ในการคอมปาวด์สารเป็นราคา	65	บาท
AKFT	0.06	กิโลกรัมที่ใช้ในการคอมปาวด์สารเป็นราคา	$\frac{65 \times 0.06}{1}$	บาท

เป็นราคา 3.9 ~ 4 บาท

ดังนั้น Aktifit® AM ที่ 10 php เท่ากับ  $120 + 10 + 6 + 4 = 140$  บาทต่อ 1.18 กิโลกรัม  
 ราคาของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการคอมปาวด์ที่หนึ่งกิโลกรัมโดยใช้สารตัวเติม

พอลิเมอร์ผสม 1.18 กิโลกรัม เป็นราคา 140 บาท

ดังนั้น พอลิเมอร์ผสม 1.00 กิโลกรัม เป็นราคา 118.6 ~ 119 บาท