



การเตรียมโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทรฟทาเลตเพื่อ  
ประยุกต์ใช้ทางการแพทย์



โดย  
นางสาวจันทร์เพชร พึ่งไพร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การเตรียมโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและพอลิবিวิทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทา  
เลตเพื่อประยุกต์ใช้ทางการแพทย์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

PREPARATION OF FOAMS FROM POLYMER BLEND BETWEEN GELATIN AND  
POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) FOR MEDICAL APPLICATION



By  
MISS Janpet PHUENGPRAI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Engineering (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2020

Copyright of Graduate School, Silpakorn University



61402202 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : เจลาติน, พอลิไควทรีน อะดิเปต-โค-เทรฟทาเลต, พอลิเมอร์ผสม, โฟมพอลิเมอร์ผสม, น้ำมันหอมระเหยกานพลู

นางสาว จันทร์เพชร พึ่งไพร: การเตรียมโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและพอลิไควทรีน อะดิเปต-โค-เทรฟทาเลตเพื่อประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุกศิริ เหมศรี

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT เพื่อประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณ Blowing agent และปริมาณของน้ำมันหอมระเหยที่มีผลต่อสมบัติของโฟมพอลิเมอร์ผสม โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 ศึกษาการเตรียม Plasticized gelatin และ PBAT-g-MA และศึกษาอิทธิพลของการเติม PBAT-g-MA ที่มีต่อความเข้ากันได้ของแผ่นพอลิเมอร์ผสม จะทำการผสมด้วยเครื่อง Internal mixer และขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Compression molding สำหรับตอนที่ 2 จะทำการศึกษาผลของการเติม Blowing agent ที่มีต่อสมบัติของโฟมพอลิเมอร์ผสม และตอนที่ 3 จะทำการศึกษาผลของการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูที่มีผลต่อสมบัติของโฟมพอลิเมอร์ผสม ซึ่งในการเตรียมโฟมพอลิเมอร์ผสมจะทำการผสมด้วยเครื่อง Two roll mill แล้วนำไปขึ้นรูปด้วย Compression molding จากผลการศึกษาด้วย NMR พบว่าเกิดการกราฟของ MA บนสายโซ่ของ PBAT สำหรับแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม PBAT-g-MA จะมีความเข้ากันได้ระหว่างเจลาตินและ PBAT เพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้ากันได้ที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลทำให้แผ่นพอลิเมอร์ผสมมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ลดลง นอกจากนี้สมบัติเชิงกลของแผ่นพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของ PBAT เพิ่มขึ้น สำหรับการศึกษาอิทธิพล Blowing agent ที่มีต่อสมบัติของโฟมพอลิเมอร์ผสมพบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณ Blowing agent จะทำให้โฟมมีปริมาณเซลล์โฟม/พื้นที่เพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่น ความแข็งแรงเชิงกลและความสามารถในการดูดซึมน้ำลดลง และเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วน PBAT จะทำให้โฟมพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณเซลล์โฟม/พื้นที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้โฟมที่มีความหนาแน่น ความแข็งแรงเชิงกล และความสามารถในการดูดซึมน้ำลดลง จากการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วน 50/50 โดยมีการเติม Blowing agent 15 phr (50/50\_15) เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่จะนำไปศึกษาการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูต่อไป โดยพบว่า เมื่อมีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูจะทำให้เกิดเซลล์โฟมขนาดเล็กมากยิ่งขึ้น แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูจะทำให้เกิดเซลล์โฟมขนาดใหญ่โดยจะมีลักษณะการเชื่อมต่อกันเป็นโพรง ซึ่งส่งผลให้โฟมมีความหนาแน่น ความแข็งแรงเชิงกล และความสามารถในการดูดซึมน้ำลดลง นอกจากนี้น้ำมันกานพลูจะช่วยให้โฟมสามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้ทั้ง S. aureus และ E. coli และโฟมพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้นี้ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์

61402202 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : Gelatin, Polybutylene adipate-co-terephthalate, Polymer blend, Foam polymer blend, Clove oil

MISS JANPET PHUENGPRAI : PREPARATION OF FOAMS FROM POLYMER BLEND BETWEEN GELATIN AND POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) FOR MEDICAL APPLICATION THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR SUDSIRI HEMSRI, Ph.D.

This research was to investigate the preparation of gelatin and PBAT polymer foam blends for medical applications. The objective of this study was to study the effect of blowing agents and essential oil content on properties of polymer foam blends. The study was divided into 3 parts: Part 1 studied the preparation of Plasticized gelatin and PBAT-g-MA and studied the effect of PBAT-g-MA on the compatibility of the polymer composites. Polymer blend was mixing by Internal mixer and prepared into sheet by Compression molding. Part 2 was performed to study effect of blowing agent content on the properties of the foam polymer blend, and part 3, study the effect of clove oil content on the properties of the foam polymer. The foam polymer blend was mixed by two roll mill and then molded by compression molding. From results of the NMR study, confirmed reaction of MA grafted on the PBAT chain. Polymer blends with PBAT-g-MA showed can be increase compatibility between gelatin and PBAT resulting in better mechanical properties and lower water absorption. Furthermore, mechanical properties of polymer blends increase when PBAT content in polymer blends increases. The study of the effect of blowing agents on the properties of foam polymer blends, found that when the blowing agent content was increased, the foam had increased foam cell/area, density, mechanical strength and water absorption decreased. While PBAT content increased, foam has more foam cells/area. Resulting, mechanical strength increased and water absorption decreased. From the result, showed the ratio of 50/50 with the addition of Blowing agent 15 phr (50/50\_15) was an appropriate ratio to bring study on the addition of clove oil, found that when clove oil was added, more foam cells were formed. But when the clove oil content increased, large foam cells are formed, characterized by hole connections. This results in foam density, mechanical strength and water absorption decreased. In addition, clove oil makes the foam antibacterial against both *S. aureus* and *E. coli*, and the foam prepared is non-toxic to cells

## กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร. สุตศิริ เหมศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการดำเนินงานวิจัย ช่วยแก้ไขปัญหามากมาย ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์เรื่องนี้เป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.ณัฐฉิ ชัยยุตต์ และรองศาสตราจารย์ดร.สมเจตน์ พัทธพันธ์ ที่สละเวลามาเป็นประธานและคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์นี้ ตลอดจนให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่อบรมสั่งสอน ให้ความรู้และสนับสนุนทุนการศึกษาและทุนวิจัยในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์และคุณไพโรจน์ ตั้งศุภธวัช วิศวกรประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดเตรียมอุปกรณ์สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทำงานวิจัย ตลอดจนวิธีการใช้เครื่องมือต่างๆ และขอขอบคุณบุคลากรทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ช่วยประสานงานและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาปริญญาโททุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และคอยเป็นกำลังใจให้เสมอ และขอบคุณพี่ๆ น้องๆ ทุกคนสำหรับมิตรภาพที่ดีที่มีให้กันมาโดยตลอด และสุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณแม่และครอบครัวที่เสียสละเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน และคอยเป็นกำลังใจที่สำคัญในเรื่องต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านการเรียน ด้านการดำเนินชีวิต ตลอดจนการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์นี้ให้ผ่านลุล่วงไปได้ด้วยดี

จันทร์เพชร พึ่งไพร

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉุ
บทที่ 1 บทนำ (Introduction) .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา (Statements and significance of the problems).....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย (Objective of research).....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย (Scope or delimitation of the study).....	4
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเจลลาติน.....	6
2.1.1 โครงสร้างของเจลลาติน.....	6
2.1.2 ประเภทของเจลลาติน.....	7
2.1.3 สมบัติของเจลลาติน.....	8
2.1.4 ประโยชน์ของเจลลาติน.....	9
2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพอลิบิวทีลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลต (Polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT).....	9
2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับวัสดุปิดแผล (Wound dressing) [1, 19].....	11



2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโฟม [20].....	13
2.4.1 การแบ่งประเภทของโฟม .....	13
2.4.2 ขั้นตอนการเกิดโฟม (Foam Formation).....	15
2.5 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสารฟู (Blowing agents).....	18
2.5.1 สารฟูทางกายภาพ (Physical blowing agents : PBAs) .....	18
2.5.2 สารฟูทางเคมี (Chemical blowing agent : CBAs) .....	18
2.6 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับน้ำมันหอมระเหย (Essential oil) .....	20
2.6.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหย [24] .....	20
2.6.2 ฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาในการต้านจุลชีพของน้ำมันหอมระเหย [24] .....	22
2.6.3 กานพลู [25, 26].....	23
2.7 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับ Maleic anhydride [28].....	23
2.8 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับ Luperox®101 [29].....	24
2.9 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Review of related literature) .....	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	35
3.1 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย .....	35
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย .....	35
3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	35
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย .....	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	49
4.1 การศึกษาการเตรียมและสมบัติพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT .....	49
4.1.1 การศึกษาการเตรียมเจลาตินที่ถูกละลายด้วยพลาสติกไซส์ (Plasticized gelatin) ด้วยการศึกษ สมบัติทางความร้อนด้วย Differential Scanning Calorimeter (DSC) .....	49
4.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ PBAT-g-MA ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR).....	51

4.1.3 การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT .....	53
4.1.3.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) .....	55
4.1.3.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของแผ่นพอลิเมอร์ผสมด้วย Differential Scanning Calorimeter (DSC).....	58
4.1.3.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นพอลิเมอร์ผสมด้วยการทดสอบสมบัติการดึงยึด (Tensile testing) .....	64
4.1.3.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซึมน้ำของแผ่นพอลิเมอร์ผสม (Water absorption) .....	66
4.2 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณ Blowing agent ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพจาก พอลิ เมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT .....	68
4.2.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM).....	69
4.2.2 การศึกษาความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT .....	73
4.2.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเมอร์ผสม .....	75
4.2.3.1 การศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเมอร์ผสมด้วยการทดสอบความต้านทาน ต่อการกดอัด (Compressive testing).....	75
4.2.3.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเมอร์ผสมด้วยการทดสอบความแข็งที่ผิว (Hardness testing).....	79
4.2.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซึมน้ำของโฟมพอลิเมอร์ผสม .....	81
4.2.5 การศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity) ของโฟมพอลิเมอร์ผสม .....	83
4.3 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT.....	85
4.3.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหย กานพลูด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) .....	86

4.3.2 การศึกษาความหนาแน่นของโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลู.....	89
4.3.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลู ...	90
4.3.3.1 การศึกษาสมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูด้วยการทดสอบความต้านทานต่อการกดอัด (Compressive testing) .....	90
4.3.3.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูด้วยการทดสอบความแข็งที่ผิว (Hardness testing).....	93
4.3.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซึมน้ำของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลู (Water absorption).....	94
4.3.5 การศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity) ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลู.....	96
4.3.6 การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลู.....	97
4.3.7 การศึกษาความสามารถในการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหย (Oil released) ของ โพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลู.....	100
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	104
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	104
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	105
ภาคผนวก.....	107
ภาคผนวก ก ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่างๆ .....	108
ภาคผนวก ข การนำเสนอผลงานวิจัย .....	136
รายการอ้างอิง .....	145
ประวัติผู้เขียน.....	152

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของพอลิবিวทีลีนอะดิเปต-โค-เทรฟทาเลต [18].....	10
ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของ Maleic anhydride [28].....	24
ตารางที่ 2.3 สมบัติทั่วไปของ Luperox [29, 30] .....	25
ตารางที่ 2.4 ความหนาแน่น ความเป็นรูพรุนและขนาดรูพรุนของโฟมเจลาตินที่ความเข้มข้นต่างๆ [33] .....	30
ตารางที่ 2.5 แสดงความเป็นรูพรุน พื้นที่ผิว และขนาดรูพรุนของพอลิเมอร์ผสม sc-PLA/PBAT ที่ สัดส่วนการผสมต่างๆ [34].....	32
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนการผสมเจลาตินและ PBAT ที่มีและไม่มีการเติม PBAT-g-MA.....	40
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนการผสมของโฟมพอลิเมอร์ผสมเจลาตินและ PBAT .....	43
ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนการผสมของโฟมพอลิเมอร์ผสมเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอม ระเหยกานพลู.....	47
ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติทางความร้อนของเจลาตินที่ยังไม่ผ่านการพลาสติกไซส์ และเจลาตินที่ผ่าน การ พลาสติกไซส์ (Plasticized gelatin) จากการทดสอบ DSC.....	50
ตารางที่ 4.2 แสดงค่า $T_g$ , $T_m$ , $\Delta H_m$ และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่ได้จากการศึกษาด้วยเทคนิค DSC (ขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1).....	60
ตารางที่ 4.3 แสดงค่า $T_c$ และ $\Delta H_c$ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่ได้จากการศึกษา ด้วยเทคนิค DSC (ขั้นตอนการเย็นตัว).....	62
ตารางที่ 4.4 แสดงค่า $T_g$ , $T_m$ , $\Delta H_m$ และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่ได้จากการศึกษาด้วยเทคนิค DSC (ขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2).....	63
ตารางที่ 4.5 แสดงความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วน ต่างๆ.....	74
ตารางที่ 4.6 แสดงค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) ของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง เจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	77

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความแข็งแรงของการกดอัด (Compressive strength) ของโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ .....	78
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความแข็งที่ผิว (Hardness) ของโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ .....	80
ตารางที่ 4.9 แสดงร้อยละของความเป็นพิษ (Cytotoxicity) และร้อยละการมีชีวิต (Cell viability) ของเซลล์ HaCat จากการทดสอบด้วยกระบวนการ MTT assay ของโพลีเอสเตอร์ผสม .....	84
ตารางที่ 4.10 แสดงความหนาแน่นของโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ .....	90
ตารางที่ 4.11 แสดงค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) ของโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ .....	91
ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความแข็งแรงของการกดอัด (Compressive strength) ของโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ .....	92
ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความแข็งที่ผิว (Hardness) ของโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ .....	94
ตารางที่ 4.14 แสดงแสดงร้อยละของความเป็นพิษ (Cytotoxicity) และร้อยละการมีชีวิต (Cell viability) ของเซลล์ HaCat จากการทดสอบด้วยกระบวนการ MTT assay ของโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ .....	97
ตารางที่ 4.15 แสดงความสามารถในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ .....	98
ตารางที่ 4.16 แสดงความสามารถในการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหย (Oil released) ของโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ .....	102

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของเจลาติน [13] .....	7
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของพอลิเมอร์ PBAT [17] .....	10
ภาพที่ 2.3 ลักษณะของโฟม : (ก) โฟมเซลล์เปิด, (ข) โฟมเซลล์ปิด [20] .....	14
ภาพที่ 2.4 แผนภาพแสดงกระบวนการการเกิดโฟม [20] .....	17
ภาพที่ 2.5 ลักษณะทางกายภาพของ Azodicarbonamide (ACD) [22] .....	19
ภาพที่ 2.6 ปฏิกิริยาการสลายตัวของ ACD [22] .....	19
ภาพที่ 2.7 ลักษณะทางกายภาพของ 4,4'-Oxybis (benzenesulfonyl hydrazide) (OBSh) [22] .....	19
ภาพที่ 2.8 ปฏิกิริยาการสลายตัวของ 4,4'-Oxybis (benzenesulfonyl hydrazide) (OBSh) [22] .....	20
ภาพที่ 2.9 โครงสร้างของสารยูจีนอล (Eugenol) [27] .....	23
ภาพที่ 2.10 สูตรโครงสร้างของ Maleic anhydride [28] .....	24
ภาพที่ 2.11 สูตรโครงสร้างของ Luperox [29] .....	24
ภาพที่ 2.12 แสดงมุมสัมผัสผิวน้ำ (Water contact angle) ของเส้นใยพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ [31] .....	26
ภาพที่ 2.13 แสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ : Tensile stress-strain curve (A), Young's modulus (B), Peak strength (C) และ Strain at break (D) [31] ..	27
ภาพที่ 2.14 แสดงความมีชีวิตอยู่ของเซลล์ของเส้นใยพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ ในวันที่ 3 และวันที่ 7 [31] .....	27
ภาพที่ 2.15 แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ : (a) เจลาติน/PBAT (70:30) (x500), (b) เจลาติน/PBAT (70:30) (x1000), (c) เจลาติน/PBAT-g-MA (70:30) (x500) และ (d) เจลาติน/PBAT-g-MA (70:30) (x1000) [5] .....	29

ภาพที่ 2.16 แสดง Stress-Strain ของเจลาติน PBAT และพอลิเมอร์ผสม เจลาติน/PBAT และ เจลาติน/PBAT-g-MA ที่อัตราส่วน 70:30 [5].....	29
ภาพที่ 2.17 แสดงสัญญาณวิทยาของโพลีเมอร์เจลาตินที่ความเข้มข้นต่างๆ : (A) G5, (B) G10, (C) G20 และ (D) G30 [33] .....	30
ภาพที่ 2.18 แสดงสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสม sc-PLA/PBAT (70/30) ที่มีสัดส่วนน้ำหนักน้ำ/ น้ำหนักไขมันต่างกัน : (a) 0.4/1; (b) 0.5/1; (c) 0.6/1; (d) 0.7/1; (e) 0.8/1 และ (f) 0.9/1 [34].....	31
ภาพที่ 2.19 แสดงสัญญาณวิทยาของโพลีเมอร์ LDPE ที่เวลาต่างๆ [35] .....	32
ภาพที่ 2.20 แสดงความหนาแน่นของเซลล์โพลีเมอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์โพลีเมอร์ และการกระจายของขนาดเซลล์โพลีเมอร์ ของโพลีเมอร์ LDPE ที่เวลาต่างๆ [35].....	33
ภาพที่ 3.1 แสดงแผนภูมิการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT.....	40
ภาพที่ 3.2 แสดงแผนภูมิการเตรียมโพลีเมอร์ชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติม Blowing agent ในปริมาณต่างๆ.....	44
ภาพที่ 3.3 แสดงแผนภูมิการเตรียมโพลีเมอร์ชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหย .....	48
ภาพที่ 4.1 แสดง DSC thermogram ในขั้นการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของ : (a) Gelatin pallet และ (b) Plasticized gelatin.....	50
ภาพที่ 4.2 แสดงโครงสร้างของ (a) PBAT และ (b) PBAT-g-MA [42].....	52
ภาพที่ 4.3 แสดง $^1\text{H}$ NMR spectra ของ (a) PBAT และ (b) PBAT-g-MA .....	53
ภาพที่ 4.4 แสดงตัวอย่างแผ่นพอลิเมอร์เจลาติน PBAT และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีและไม่มี การเติม PBAT-g-MA : (a) 100/0, (b) 70/30, (c) 60/40, (d) 50/50, (e) 0/100, (f) 70/30/20, (g) 60/40/20 และ (h) 50/50/20 .....	54
ภาพที่ 4.5 แสดงสัญญาณวิทยาของ : (a) เจลาติน และ (b) PBAT ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	55
ภาพที่ 4.6 แสดงสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีและไม่มี การเติม PBAT-g-MA ที่กำลังขยาย 1500 เท่า : (a) 70/30, (b) 60/40, (c) 50/50, (d) 70/30/20, (e) 60/40/20 และ (f) 50/50/20.....	57
ภาพที่ 4.7 แสดงสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT อัตราส่วน 50/50 และผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDAX.....	57

ภาพที่ 4.8 แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT อัตราส่วน 50/50/20 และผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDAX ..... 58

ภาพที่ 4.9 แสดง DSC thermogram ในขั้นการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของ Plasticized gelatin PBAT และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีและไม่มี การเติม PBAT-g-MA..... 60

ภาพที่ 4.10 แสดง DSC thermogram ในขั้นการหล่อเย็น ของ Plasticized gelatin PBAT และ พอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีและไม่มี การเติม PBAT-g-MA ..... 61

ภาพที่ 4.11 แสดง DSC thermogram ในขั้นการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ Plasticized gelatin PBAT และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีและไม่มี การเติม PBAT-g-MA..... 63

ภาพที่ 4.12 แสดง Stress strain curve ของเจลาติน PBAT พอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่ไม่มีและมีการเติม PBAT-g-MA..... 64

ภาพที่ 4.13 แสดงสมบัติเชิงกลของ เจลาติน PBAT พอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่ไม่มีและมีการเติม PBAT-g-MA : (a) modulus (b) tensile strength และ (c) elongation at break ..... 65

ภาพที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของ PBAT พอลิเมอร์ผสมระหว่าง เจลาตินและ PBAT ที่มีและไม่มี การเติม PBAT-g-MA ที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ ..... 66

ภาพที่ 4.15 แสดงชิ้นงานโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ..... 69

ภาพที่ 4.16 แสดงสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ ..... 70

ภาพที่ 4.17 แสดงการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ ..... 72

ภาพที่ 4.18 แสดงความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วน ต่างๆ..... 74

ภาพที่ 4.19 แสดงค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) ของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ ..... 76

ภาพที่ 4.20 แสดงค่าความแข็งแรงของการกดอัด (Compressive strength) ของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ ..... 78



ภาพที่ 4.21 แสดงค่าความแข็งที่ผิว (Hardness) ของโพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ ..... 80

ภาพที่ 4.22 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของโพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ ..... 82

ภาพที่ 4.23 แสดงชิ้นงานโพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหย กานพลูในอัตราส่วนต่างๆ : (a) 0 phr, (b) 1 phr, (c) 3 phr และ (d) 5 phr ..... 86

ภาพที่ 4.24 แสดงสัญญาณวิทยาของโพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมัน หอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ : (a) 0 phr, (b) 1 phr, (c) 3 phr และ (d) 5 phr ..... 87

ภาพที่ 4.25 แสดงการกระจายตัวของขนาดเซลล์โพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ : (a) 0 phr, (b) 1 phr, (c) 3 phr และ (d) 5 phr ..... 88

ภาพที่ 4.26 แสดงความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ ..... 89

ภาพที่ 4.27 แสดงค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) ของโพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ ..... 91

ภาพที่ 4.28 แสดงค่าความแข็งแรงของการกดอัด (Compressive strength) ของโพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ ..... 92

ภาพที่ 4.29 แสดงค่าความแข็งที่ผิว (Hardness) ของโพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ ..... 93

ภาพที่ 4.30 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของโพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ ..... 95

ภาพที่ 4.31 แสดงความสามารถในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของโพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ ..... 98

ภาพที่ 4.32 แสดงโครงสร้างของผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมบวก (ซ้าย) และแบคทีเรียแกรมลบ (ขวา) [57] ..... 99

ภาพที่ 4.33 แสดงความสามารถในการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหย (Oil released) ของโพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ ..... 102

ภาพที่ 4.34 แสดงความสามารถในการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยสะสม (Cumulative released) ของ โฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ 103



## บทที่ 1

### บทนำ (Introduction)

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา (Statements and significance of the problems)

ในปัจจุบันพลาสติกถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อทดแทนวัสดุบางประเภทและเพื่อปรับปรุงสมบัติบางอย่างของวัสดุเดิมที่ใช้อยู่ เนื่องจากมีราคาถูก น้ำหนักเบา และมีคุณสมบัติที่หลากหลาย แต่การใช้พลาสติกที่มากขึ้นก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ คือ ปัญหาด้านการจัดการขยะพลาสติก โดยประเภทของผลิตภัณฑ์ที่นิยมทำมาจากพลาสติกจะเป็นผลิตภัณฑ์จำพวกที่มีอายุการใช้งานค่อนข้างสั้นใช้ครั้งเดียวทิ้ง เช่น บรรจุภัณฑ์ต่างๆ รวมทั้งวัสดุทางการแพทย์บางชนิด เช่น วัสดุปิดแผล ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวเมื่อใช้งานแล้วก็มักจะถูกทิ้งและก่อให้เกิดปัญหาด้านการจัดการขยะตามมา

วัสดุปิดแผล (Wound dressing) ถือเป็นผลิตภัณฑ์อีกประเภทหนึ่งที่มีอายุการใช้งานที่ค่อนข้างสั้น เนื่องจากเป็นวัสดุที่ต้องสัมผัสกับแผลโดยตรงหากมีการใช้ซ้ำๆ อาจจะทำให้เกิดการติดเชื้อของแผลได้ โดยวัสดุปิดแผลจำเป็นต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ สามารถระบายอากาศและความชื้นได้ดี ไม่มีความเป็นพิษต่อเนื้อเยื่อ มีความยืดหยุ่น รวมถึงสามารถดูดซับของเหลวได้ [1] ในปัจจุบันมีการนำเอาวัสดุจากธรรมชาติหรือพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติมาใช้แทนพลาสติกเดิมที่ได้มาจากแหล่งวัตถุดิบประเภทปิโตรเลียม โดยที่วัสดุต่างๆ เหล่านี้นอกจากจะมีข้อดีที่มาจากแหล่งธรรมชาติแล้ว บางชนิดยังสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพอีกด้วย ซึ่งข้อดีนี้สามารถช่วยแก้ไขปัญหาด้านการจัดการกับขยะพลาสติกได้

เจลาติน (Gelatin) ถือเป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติอีกชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ทั้งทางด้านอาหาร เครื่องสำอาง บรรจุภัณฑ์ รวมถึงวัสดุทางการแพทย์ [2] ซึ่งเจลาตินนี้มีคุณสมบัติที่น่าสนใจคือ เป็นโปรตีนประเภทหนึ่งที่สามารถไฮโดรไลส์ได้จากคอลลาเจน จึงมีความเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อของมนุษย์ [3] เป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติ และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังนั้นเจลาตินสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปิดแผลทางการแพทย์ แต่เจลาตินยังมีข้อเสียบางประการ คือมีการต้านทานการซึมผ่านของน้ำที่ต่ำ ทำให้เมื่อนำมาทำเป็นวัสดุปิดแผล อาจจะทำให้ไม่สามารถรักษาความชุ่มชื้นของบริเวณที่เกิดแผลได้ ซึ่งจะส่งผลให้แผลบริเวณดังกล่าวหายได้ช้าลง รวมถึงเจลาตินมีสมบัติที่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อเจลาตินถูกนำไปใช้ทำวัสดุปิดแผลและ

นำไปใช้งานในบริเวณที่มีการสัมผัสกับน้ำอาจทำให้วัสดุดังกล่าวเกิดการละลายไปกับน้ำได้ และ เจลาตินยังมีความยืดหยุ่นที่ค่อนข้างต่ำ มีผู้วิจัยหลายกลุ่มที่นำเอาเจลาตินมาผสมกับพอลิเมอร์ชีวภาพ ชนิดอื่นๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติดังกล่าว รวมถึงยังคงสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพของวัสดุ ทางการแพทย์ ตัวอย่างเช่น Dawei Li และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง Poly(caprolactone)/Gelatin สำหรับประยุกต์ใช้เป็นโครงเลี้ยงเซลล์ (Scaffold) จากผลการศึกษา พบว่า พอลิเมอร์ผสมดังกล่าวมีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ รวมถึงเนื้อเยื่อที่นำมาทดสอบ เกิดกระบวนการสร้างเนื้อเยื่อได้ดี และจากงานวิจัยของฐิตาภา และคณะ [5] ได้ทำการศึกษา พอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลต (Polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) เพื่อประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารพบว่าเมื่อมีการเติม PBAT ลงในเจลาตินซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์จะช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของเจลาติน เช่น ทำให้เจลาตินมีความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงมากขึ้น ความสามารถในการละลายน้ำลดลง รวมถึงมีความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนได้กว่าเมื่อเทียบกับเจลาตินที่ไม่มีการเติม PBAT ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการเติม PBAT ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ละลายตัวทางชีวภาพได้ลงไปเพื่อเป็นส่วนที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการดัดยัดและลดความสามารถในการละลายน้ำของวัสดุปิดแผลจากเจลาตินได้ นอกจากนี้ PBAT ยังมีสมบัติที่ยืดหยุ่นสามารถช่วยลดความเปราะของเจลาตินได้ รวมถึง PBAT ยังมีสมบัติความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของมนุษย์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kikku Fukushima และคณะ [6] ที่ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์คอมพอสิตของ PBAT ที่มีการเติม Clay เมื่อทำการศึกษาด้วย MTT assay หรือทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ของตัวอย่าง พบว่าระบบของ PBAT และระบบของ PBAT ที่มีการเติม Clay 10% โดยน้ำหนักไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ และงานวิจัยของ Girija Bheemaneni และคณะ [7] ที่ทำการศึกษาพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่าง PBAT กับ Wollastonite ก็พบว่าวัสดุคอมพอสิตดังกล่าวมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพและ ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์เช่นเดียวกัน

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อสำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปิดแผล แต่เนื่องจากเจลาตินและ PBAT มีความเป็นขั้วที่แตกต่างกันมาก อาจทำให้เกิดการผสมเข้ากันได้ไม่ดี จึงได้มีการเติม PBAT ที่มีการดัดแปรโครงสร้าง โดยจะนำ PBAT มากราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) (PBAT-g-MA) เพื่อช่วยปรับปรุงความเป็นขั้วของ PBAT และช่วยเพิ่มความเข้ากันระหว่างเจลาตินกับ PBAT

สำหรับวัสดุปิดแผลนี้ยังมีคุณสมบัติหลักที่ต้องคำนึงถึงคือ ต้องสามารถดูดซับของเหลวหรือ สารคัดหลั่งที่ออกจากแผลได้ดีและสามารถระบายอากาศและความชื้นได้ดีด้วย ในงานวิจัยนี้ จึงได้มีการเติมสารก่อโฟม (Blowing agent) ลงไปเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะที่เป็นรูพรุน โดยจะมีการเลือกใช้ Blowing agent ชนิด 4,4'-Oxydibenzenesulfonyl Hydrazide หรือ OBSH ซึ่งมีความเป็นพิษที่ต่ำมาใช้ และสมบัติอีกประการที่สำคัญของวัสดุปิดแผลคือต้องสามารถป้องกัน หรือยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่จะนำไปสู่การอักเสบของแผลได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะมีการผสมน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูซึ่งมีสมบัติต้านทานเชื้อจุลินทรีย์บางชนิดได้ [8] โดยจากการศึกษาของ Bruna Fernanda Murbach Teles Andrade และคณะ [9] พบว่าน้ำมัน กานพลู (Clove) มีความสามารถในการต้านเชื้อ Staphylococcus aureus (S. aureus) และเชื้อ Escherichia coli (E. coli) ได้ค่อนข้างดี ซึ่งเชื้อทั้ง 2 ชนิดนี้เป็นเชื้อที่มักพบในบริเวณที่เกิดแผล ซึ่งสามารถนำไปสู่การอักเสบหรือการติดเชื้อของแผลได้ และจากงานวิจัยของเอกพลสิษฐ์ [10] ยังพบว่าเมื่อมีการเติมน้ำมันกานพลูลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งและโคโตซานจะส่งผลให้ ตัวอย่างที่ได้มีความสามารถในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบได้ รวมถึงจะเพิ่ม ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้อีกด้วย

สำหรับในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT สำหรับนำไปใช้ทางการแพทย์โดยเตรียมเป็นวัสดุปิดแผล โดยมีการเติม PBAT-g-MA เพื่อช่วย เพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเจลาตินและ PBAT รวมถึงจะมีการเติมน้ำมันกานพลูเพื่อช่วยทำหน้าที่ ในการต้านทานการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย (Objective of research)

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณ Blowing agent ต่อขนาดเซลล์โฟม ความหนาแน่น สมบัติเชิงกล ความแข็ง สมบัติการดูดซึมน้ำ และความเป็นพิษต่อเซลล์ของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง เจลาตินและ PBAT

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำมันหอมระเหยต่อเซลล์โฟม ความหนาแน่น สมบัติเชิงกล ความแข็ง สมบัติการดูดซึมน้ำ ความเป็นพิษต่อเซลล์ และการต้านเชื้อจุลินทรีย์ ของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย (Scope or delimitation of the study)

1.3.1 พอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลต (PBAT) ที่ใช้จะเป็นเกรด F Blend C1200 ชื่อทางการค้าคือ Ecoflex® ค่าดัชนีการไหล (Melt flow index) 2.7 – 4.9 g/ 10 min เมื่อทดสอบโดยใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 190 °C และมีจุดหลอมเหลว 110 - 120 °C

1.3.2 เจลาตินเกรด 250 bloom (Pork-skin collagen) จากบริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด

1.3.3 PBAT-g-MA เป็น Compatibilizer จะทำการดัดแปรโครงสร้างของ PBAT ด้วย Maleic anhydride (MA)

1.3.4 Epoxidized soybean oil ที่ใช้ในงานวิจัยมีปริมาณ Oxirane 6.3 - 7.0% จากบริษัท อินโนเวชั่น เทคโนโลยี จำกัด เพื่อใช้เป็น Plasticizer สำหรับ PBAT โดยจะเติมในปริมาณ 20 phr

1.3.5 Supercell EW (4,4'-Oxydibenzenesulfonyl Hydrazide, OBSH) จากบริษัท A.F.Supercell เพื่อใช้เป็น Blowing agent โดยจะเติมในปริมาณ 5 10 และ 15 phr

1.3.6 น้ำมันหอมระเหยจากกานพลูเป็นสารต้านการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จากบริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น โดยเติมในปริมาณ 1 3 และ 5 phr

### 1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเบื้องต้นในการทำงานวิจัย

1.4.2 ออกแบบ - วางแผนการทดลอง และจัดซื้อสารเคมี

1.4.3 ดำเนินงานตามแผนงานวิจัย โดยแบ่งออกเป็น 3 ตอนดังนี้

ตอนที่ 1 การเตรียมและสมบัติพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ทำการเตรียมแผ่นพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่สัดส่วนการผสม 100/0 70/30 60/40 50/50 และ 0/100 ตามลำดับ สำหรับในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาผลของการเติม PBAT-g-MA ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) ระหว่างวัฏภาคของเจลาตินและ PBAT โดยมีการเติม PBAT-g-MA ในปริมาณ 20 % ของ PBAT

ตอนที่ 2 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณ Blowing agent ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ทำการเตรียมโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสม ที่สัดส่วนการผสม 100/0 70/30 60/40 50/50 และ 0/100 ตามลำดับ และมีการเติม Supercell EW (4,4'-Oxydibenzenesulfonyl Hydrazide, OBSH) เพื่อทำหน้าที่เป็น Blowing agent ในสัดส่วน 5 10 และ 15 phr

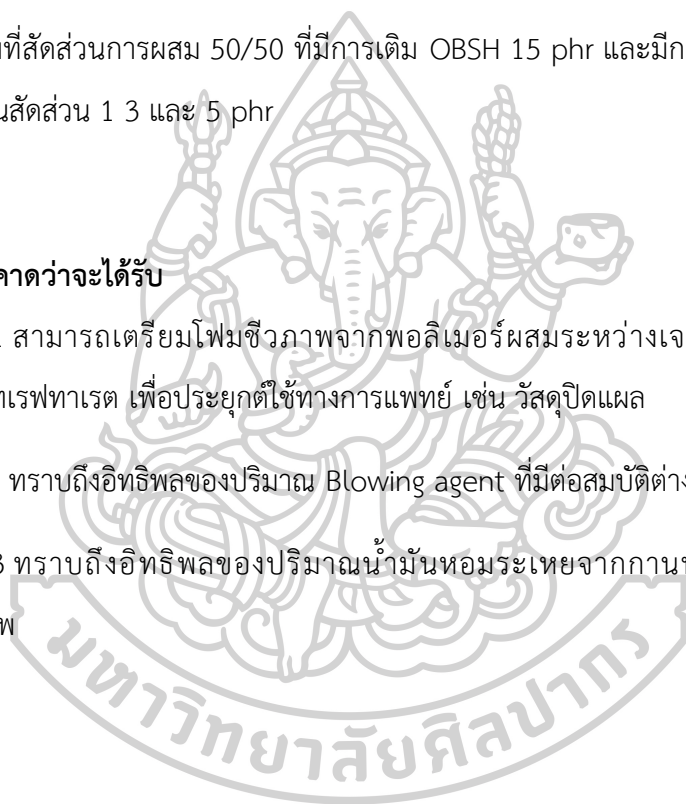
ตอนที่ 3 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ทำการเตรียมโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมที่สัดส่วนการผสม 50/50 ที่มีการเติม OBSH 15 phr และมีการเติมน้ำมันหอมระเหยจากกานพลู ในสัดส่วน 1 3 และ 5 phr

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถเตรียมโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินกับพอลิบิวทิลีนอะดีเปต-โค-เทเรพทาเรต เพื่อประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ เช่น วัสดุปิดแผล

1.5.2 ทราบถึงอิทธิพลของปริมาณ Blowing agent ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพ

1.5.3 ทราบถึงอิทธิพลของปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพ



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเจลาติน

เจลาตินเป็นโปรตีนประเภทหนึ่งที่ได้มาจากการไฮโดรไลซ์ (Hydrolysis) ของคอลลาเจน ซึ่งพบได้ในส่วนของกระดูก เนื้อเยื่อเกี่ยวพัน และหนังของสัตว์ต่างๆ ทั้ง ควาย หมู วัว และปลา การเกิดไฮโดรไลซ์คอลลาเจนให้กลายเป็นเจลาตินจะมีการใช้ความร้อน กรด หรือต่างในการย่อยหรือสลายโมเลกุลให้เล็กลง เจลาตินถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในหลากหลายอุตสาหกรรม ได้แก่ อุตสาหกรรมยา เช่น สารเคลือบเม็ดยา สารตั้งต้นในการผลิตแคปซูลยา อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เช่น ใช้เป็นสารก่อเจล หรือใช้เป็นสารทำให้เกิดความคงตัวในการผลิตครีม และอุตสาหกรรมอาหาร เช่น เป็นสารเคลือบในอาหารแปรรูป วัตถุเติมในการผลิตแยมและเยลลี่ เป็นต้น

การไฮโดรไลซ์คอลลาเจนจะทำให้เกิดการสลายของพันธะกลายเป็นโครงสร้างของเจลาติน โดยส่วนประกอบหลักของเจลาตินที่พบคือจะมีลักษณะเป็นเกลียว  $\alpha$   $\beta$  และ  $\gamma$  Chain แต่เจลาตินที่ได้จะมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับคอลลาเจน เมื่อกลายเป็นเจลาตินแล้วโครงสร้างจะสามารถจัดเรียงตัวได้ง่ายขึ้น ทำให้เมื่อได้รับความร้อนเจลาตินจะมีลักษณะคล้ายกับเจล และกลับสู่สภาพของแข็งเมื่อได้รับความเย็น ในขณะที่เมื่อนำเจลาตินไปละลายน้ำจะได้เป็นสารละลายที่มีความหนืดสูง [11, 12]

##### 2.1.1 โครงสร้างของเจลาติน

เจลาตินเป็นพอลิเมอร์ประเภทโปรตีน ซึ่งจะประกอบไปด้วยกรดอะมิโนชนิดต่างๆ มาต่อกันด้วยพันธะเพปไทด์ (Peptide bond) ได้แก่ อะลานีน อาร์จินีน แอสปาดิกแอซิด ซีสเทอีน กลูตามิกแอซิด โกลซีน ฮีสติดีน ไฮดรอกซีไลซีน ไฮดรอกซีโพรลีน ไอโซลิวซีน ลิวซีน ไลซีน เมไทโอนีน ฟีนิลอะลานีน โพรลีน ซีรีน ทรีโอนีน ทริปโตแฟน ไทโรซีน และวาเลอีน โดยส่วนใหญ่กรดอะมิโนที่พบมากที่สุดในเจลาตินคือโกลซีนมากที่สุด รองลงมาเป็นโพรลีน และไฮดรอกซีโพรลีนตามลำดับ ซึ่งกรดอะมิโนที่พบในเจลาตินมีลักษณะคล้ายกับที่พบในคอลลาเจน แสดงโครงสร้างดังภาพที่ 2.1





ส่วนของกระดุกหมู และหนังปลา เริ่มจากการนำคอลลาเจนจากกระดุกหมูหรือหนังปลามาปรับให้มีสภาพเป็นกรดที่มี pH ประมาณ 4 และมีการให้ความร้อนที่ประมาณ 50 องศาเซลเซียส จนเดือด ในขั้นตอนนี้จะเป็นการทำให้เกิดการสูญเสียสภาพของโปรตีน จากนั้นสารละลายจากคอลลาเจนนี้จะถูกนำไปสกัดเพื่อนำส่วนที่เป็นไขมันออกมาและทำการกรอง แล้วจะไปประเหยด้วยเครื่องระเหยสูญญากาศเพื่อให้เจลาตินที่ได้มีความเข้มข้นมากพอและขั้นตอนสุดท้ายจะนำไปอบในตู้อบลมร้อนเพื่อให้เจลาตินแห้ง เจลาตินชนิดนี้จะมีค่าความแข็งของเจล (Bloom strength) ประมาณ 50 -300 กรัม สำหรับเจลาตินชนิดบี จะมีแหล่งที่มาจากหนังและกระดุกของวัว เริ่มต้นจากการนำคอลลาเจนจากหนังหรือกระดุกของวัวมาทำให้มีสภาพเป็นด่าง โดยต่างจะทำการย่อยหมูแทนที่ภายในโครงสร้างของกรดอะมิโนชนิดแอสพาราจिनและกลูตามีนให้กลายเป็นกรดแอสพาทิกและกรดกลูตามิกตามลำดับ จากนั้นจะทำการล้างด่างและเกลือที่เกิดขึ้นออกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนประจุ แล้วจะนำไปย่อยต่อด้วยกรดและทำให้มีค่า pH ตามที่ต้องการ ซึ่งค่า pH นี้จะส่งผลต่อความหนืดและความแข็งของเจลของเจลาตินที่สกัดได้ จากนั้นคอลลาเจนจะถูกนำไปต้มเพื่อให้กลายเป็นเจลาตินและถูกนำไปเข้าสู่กระบวนการผลิตเช่นเดียวกับการผลิตเจลาตินชนิดเอต่อไป โดยที่เจลาตินชนิดบีจะมีค่าความแข็งของเจลประมาณ 50 -200 กรัม [12, 13]

### 2.1.3 สมบัติของเจลาติน

เจลาตินเป็นของแข็งโปร่งแสง ไม่มีสีจนถึงสีเหลืองอ่อน สมบัติของเจลาตินมีดังต่อไปนี้

1. การละลาย : เจลาตินสามารถละลายได้ในน้ำร้อนแต่จะต้องมีอุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้เจลาตินเกิดการเสียสภาพได้ ซึ่งจะส่งผลทำให้สมบัติของเจลาตินเปลี่ยนแปลงไป โดยเจลาตินสามารถละลายในน้ำเย็นได้เพียงบางส่วนเท่านั้น นอกจากนี้เจลาตินยังสามารถละลายได้ในกรดแอสซิติค (Acetic acid) แต่จะไม่สามารถละลายในอีเทอร์ (Ether) คลอโรฟอร์ม (Chloroform) และเอทานอล 98 เปอร์เซ็นต์ (Ethanol 98%) [13]

2. สมบัติทางเคมีกายภาพของเจลาติน : สำหรับความสามารถในการเกิดเจลและสมบัติในการหลอมเหลวของเจลาตินขึ้นอยู่กับความยาวของสายโซ่ ชนิดและปริมาณของกรดอะมิโน รวมถึงสัดส่วนระหว่าง  $\alpha$ -Chain ต่อ  $\beta$ -Chain ภายในโครงสร้างของเจลาติน เจลาตินยังสามารถเกิดเป็น

ฟองหรืออิมัลชันได้ นอกจากนี้ยังมีสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิว และทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ในระบบ Oil-In-Water ได้อีกด้วย [14]

- สมบัติทางด้านการไหล (Rheological properties) : เจลที่เกิดจากเจลาตินจัดเป็นเจลประเภททางกายภาพ (Physical gel) เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่ของเจลาตินนี้จะเป็นแรงแวนเดอร์วาลหรือพันธะไฮโดรเจน ทำให้หลังจากการเกิดการหลอมละลายของเจลาตินด้วยความร้อนเจลาตินสามารถคืนสู่สภาพเดิมได้

- สมบัติการเกิดฟิล์ม (Film-forming properties) : เจลาตินถูกนำมาใช้งานในรูปแบบของฟิล์มอย่างกว้างขวางเพื่อช่วยยืดอายุของอาหาร แต่เนื่องจากเจลาตินมีความสามารถในการดูดความชื้นได้ดี ทำให้เมื่อนำไปใช้งานมีโอกาสที่จะเกิดการบวมตัวของฟิล์มได้ จึงมีการเติม Crosslink agent เพื่อทำให้ความสามารถในการดูดความชื้นของเจลาตินลดลง นอกจากนี้ยังมีการเติมสาร Antimicrobial หรือ Antioxidant ลงไปเพื่อช่วยเพิ่มสมบัติในการผลิตเป็นฟิล์มจากเจลาติน [15, 16]

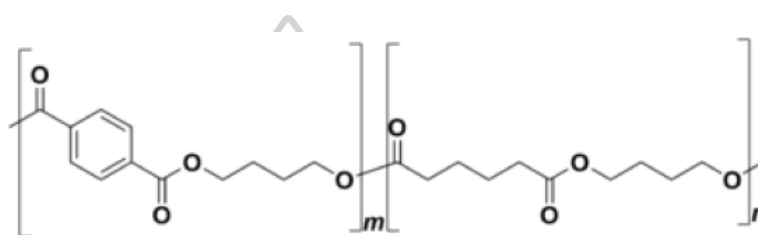
#### 2.1.4 ประโยชน์ของเจลาติน

จากที่ได้กล่าวไปข้างต้นถึงสมบัติของเจลาติน จะเห็นได้ว่าเจลาตินสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เนื่องจากเจลาตินสามารถช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น ความชื้นเหนียว และความคงตัวในผลิตภัณฑ์บางประเภทได้ ตัวอย่างเช่น เป็นส่วนประกอบในขนม โยเกิร์ต และไอศกรีม เป็นต้น นอกจากนี้อุตสาหกรรมเกี่ยวกับอาหารแล้วเจลาตินยังถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยา เช่น การนำไปเคลือบเม็ดยา หรือการนำไปผลิตเป็นแคปซูลสำหรับบรรจุยา [13]

## 2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพอลิบิวทีลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลต (Polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT)

Polybutylene adipate-co-terephthalate หรือ PBAT เป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มที่มีสมบัติสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ PBAT เป็นโคพอลิเอสเทอร์ชนิดหนึ่งที่ได้เตรียมจากกรดอะดิพิค (adipic acid), 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) และ dimethyl terephthalate PBAT ผลิตได้จากหลายบริษัท โดย PBAT เป็นที่รู้จักในชื่อทางการค้า เช่น Ecoflex®, Wango,

Ecoworld, Easter Bio และ Origo-Bi เป็นต้น PBAT มีสมบัติทั่วไปคล้ายกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) คือมีลักษณะที่ยืดหยุ่น จึงนำไปใช้ในกระบวนการผลิตที่คล้ายกับการผลิต LDPE เช่น ถุงพลาสติกและพลาสติกที่ใช้ในการห่อหุ้ม เป็นต้น โครงสร้างของพอลิเมอร์ PBAT แสดงดังภาพที่ 2.2 จากภาพจะเห็นว่า PBAT มีลักษณะเป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ได้มาจากการสร้างพันธะเชื่อมกันระหว่างบล็อกโคพอลิเมอร์ 2 บล็อกเข้าด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างที่แท้จริงยังคงเป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม [17]



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของพอลิเมอร์ PBAT [17]

PBAT เป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม มีจุดหลอมเหลวที่กว้าง ค่าโมดูลัสและความแข็งต่ำ แต่มีความยืดหยุ่นและความเหนียวสูง โดยสมบัติทั่วไปของ PBAT จะแสดงในตารางที่ 2.1 [18]

ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของพอลิเมอร์ที่สีนอะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต [18]

สมบัติ	ค่า
ความหนาแน่น (g/ml)	1.25-1.27
จุดหลอมเหลว (°C)	110-120
Tensile strength (MPa)	35-44
% Elongation	560-700
การซึมผ่านของออกซิเจน (cc/m <sup>2</sup> /day)	1600
การซึมผ่านของความชื้น (cc·mm/m <sup>2</sup> ·24hr·atm)	140
Melt flow (g/10min)	2.7-4.9

## 2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับวัสดุปิดแผล (Wound dressing) [1, 19]

ในปัจจุบันการเกิดบาดแผลเป็นเรื่องที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ทั้งบาดแผลจากอุบัติเหตุหรือบาดแผลจากการรักษา เช่น บาดแผลผ่าตัด และบาดแผลจากโรคเรื้อรัง เป็นต้น การดูแลรักษาบาดแผลที่เกิดขึ้นจึงเป็นเรื่องสำคัญ ปัจจัยในการดูแลรักษาบาดแผลที่สำคัญประการหนึ่ง คือ การเลือกใช้วัสดุปิดแผลให้เหมาะสมกับลักษณะของบาดแผลที่เกิดขึ้น เพื่อป้องกันเชื้อโรคจากภายนอกเข้าสู่แผล รวมถึงวัสดุปิดแผลที่เหมาะสมจะช่วยรักษาบาดแผลให้หายได้เร็วขึ้น สำหรับวัสดุที่นำมาปิดแผลจำเป็นต้องมีสมบัติที่สำคัญดังนี้

1. สามารถดูดซับสารคัดหลั่ง เช่น เลือด หรือน้ำเหลืองที่ออกมาจากแผลได้ดี
2. น้ำสามารถซึมผ่านได้ เพื่อป้องกันการเน่าเปื่อยของแผลเนื่องจากการมีความชื้นสูง
3. สามารถควบคุมการซึมผ่านของแก๊สได้ ซึ่งแก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สที่สำคัญที่จะช่วยให้แผลสามารถหายได้ไวขึ้น
4. สามารถป้องกันเชื้อโรคเข้าสู่แผลได้
5. สามารถรักษาสภาพที่อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่างของแผลได้
6. มีความเข้ากันได้กับผิวหนัง โดยไม่ก่อให้เกิดการแพ้ระคายเคือง และไม่เป็นพิษต่อเซลล์
7. ไม่ติดกับแผล ซึ่งจะส่งผลทำให้เมื่อนำวัสดุปิดแผลออกอาจเกิดการบาดเจ็บในขณะการเปลี่ยนวัสดุปิดแผล
8. สามารถใช้ได้ยาวนาน ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนบ่อย เพื่อป้องกันการเกิดการบาดเจ็บ รวมถึงสิ่งสกปรกและเชื้อโรคเข้าสู่บาดแผลในระหว่างการเปลี่ยนวัสดุปิดแผล
9. มีความยืดหยุ่น สามารถปรับเข้ากับรูปร่างของร่างกายบริเวณที่เกิดแผลได้
10. มีราคาไม่สูงมากนัก เนื่องจากวัสดุปิดแผลเป็นวัสดุที่ใช้แล้วทิ้งและอาจจำเป็นต้องเปลี่ยนหลายครั้งกว่าที่แผลจะหาย

สำหรับวัสดุปิดแผลที่ใช้ในปัจจุบันสามารถแบ่งเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

1. ผ้าก๊อช (Gauze) เป็นวัสดุปิดแผลที่ทำมาจากผ้าฝ้าย เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการปิดแผล ที่มีราคาถูก สามารถหาซื้อได้ง่าย และใช้งานง่าย แต่มีข้อเสียคือ เนื่องจากวัสดุปิดแผลประเภทนี้มีความสามารถดูดซับสารคัดหลั่งได้ปานกลาง รวมถึงการระคายเคืองความชื้นได้ไม่ค่อยดี ทำให้จำเป็นต้องเปลี่ยนวัสดุปิดแผลบ่อย ดังนั้นโอกาสที่เชื้อโรคจากภายนอกจะเข้าสู่แผล หรือ

การบาดเจ็บระหว่างการเปลี่ยนวัสดุปิดแผลจึงเกิดได้สูง นอกจากนี้ผ้าก๊อชมีลักษณะที่เป็นตาข่ายเส้นใยทำให้ติดกับแผลได้ดี ในระหว่างการทำแผลที่จะต้องมีการการดึงผ้าก๊อชออกอาจทำให้เกิดความบาดเจ็บแก่ผู้ป่วยได้สูง

2. แผ่นฟิล์ม (Film) เป็นวัสดุปิดแผลที่มีลักษณะเรียบบาง มีความใส สามารถมองเห็นผ่านได้ กันน้ำ และยอมให้ความชื้นระเหยได้เล็กน้อย วัสดุปิดแผลประเภทนี้จึงสามารถช่วยรักษาความชื้นของแผลได้ดี นิยมใช้กับแผลผ่าตัด หรือแผลที่มีการเย็บ เนื่องจากมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง จึงไม่สามารถดูดซับสารคัดหลั่งที่ออกมาจากแผลได้ดีนัก แต่หากต้องการใช้กับแผลที่มีสารคัดหลั่งไหลออกมาสามารถนำไปใช้ร่วมกับผ้าก๊อชโดยจะปิดทับด้านบน เพื่อให้ผ้าก๊อชทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับสารคัดหลั่งได้ ข้อเสียของวัสดุปิดแผลชนิดนี้คือจะติดกับแผลได้ เมื่อมีการดึงวัสดุปิดแผลออกในระหว่างที่มีการล้างแผลอาจทำให้เกิดการบาดเจ็บได้

3. ผ้าตาข่าย (Tulles) เป็นวัสดุปิดแผลที่มีการพัฒนามาจากผ้าก๊อช คือจะไม่มีส่วนของเส้นใยที่สามารถติดแผลได้ ทำให้สามารถช่วยลดการบาดเจ็บจากการใช้งานได้หลังจากที่ดึงวัสดุปิดแผลนี้ออก นอกจากนี้ผ้าตาข่ายยังสามารถดูดซับสารคัดหลั่งได้ โดยวัสดุปิดแผลประเภทนี้จะเหมาะกับแผลที่ตื้นและมีปริมาณสารคัดหลั่งไม่มากนัก

4. ไฮโดรเจล (Hydrogel) วัสดุปิดแผลประเภทนี้จะมีการเคลือบไฮโดรเจลหรือสารประกอบพอลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยกลีเซอรินหรือ Water-based gels ที่มีทั้งลักษณะที่เป็นแผ่นและเป็นเจล โดยส่วนใหญ่จะเตรียมจากสารประกอบคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ ทำให้สามารถช่วยเพิ่มความชุ่มชื้นแก่แผลได้และไม่ติดกับบาดแผล ทำให้ไม่ก่อให้เกิดการบาดเจ็บในระหว่างการใช้งาน วัสดุปิดแผลไฮโดรเจลเหมาะกับแผลที่ไม่ลึกมาก แผลที่แห้ง และแผลมีสารคัดหลั่งเล็กน้อย

5. แผ่นโฟม (Foam) วัสดุปิดแผลประเภทแผ่นโฟมนี้ส่วนใหญ่ทำมาจากพอลิยูรีเทน จะมีลักษณะเป็นแผ่น มีสมบัติเด่นคือมีความสามารถในการดูดซับสารคัดหลั่งได้ดีเนื่องจากมีความเป็นรูพรุนสูง สามารถใช้ได้กับทั้งแผลที่ตื้นและแผลที่ลึก แต่จะไม่เหมาะกับแผลที่มีความแห้ง

6. ไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) เป็นวัสดุปิดแผลที่มีทั้งลักษณะเป็นยาป้าย ผง หรือแผ่น ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย Gelatin, Pectin และ Carboxymethylcellulose มีสมบัติดูดซับของเหลวได้เล็กน้อย ไม่ยอมให้อากาศและความชื้นผ่านได้ และช่วยกักเก็บความชุ่มชื้นของแผลได้ โดยสามารถทำให้มีลักษณะรูปร่างต่างๆ ได้ตามลักษณะของบาดแผล เหมาะสำหรับแผลถลอก

หรือแผลตื้นๆ แต่เนื่องจากวัสดุปิดแผลประเภทนี้มีสมบัติดูดซับของเหลวได้น้อยจึงไม่เหมาะกับแผลที่มีสารคัดหลั่งปริมาณมาก

7. Alginates เป็นวัสดุปิดแผลที่ผลิตมาจากสารสกัดของสาหร่ายและสาหร่ายสีน้ำตาล มีสมบัติเด่นคือสามารถดูดซับของเหลวได้สูงมาก จึงเหมาะสำหรับบาดแผลที่มีปริมาณสารคัดหลั่งเยอะๆ แต่จะไม่เหมาะกับแผลแห้ง เนื่องจากวัสดุปิดแผลประเภทนี้จะติดกับแผลทำให้อาจเกิดการบาดเจ็บในระหว่างการใช้งานได้

## 2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโฟม [20]

โฟมเป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นรูพรุน ลักษณะดังกล่าวเกิดจากการทำให้เกิดแก๊สภายในโครงสร้างเพื่อทำให้เกิดการขยายตัวของโครงสร้างภายใน ส่งผลให้ความหนาแน่นของวัสดุลดลง โฟมจึงมีน้ำหนักเบา โฟมสามารถแบ่งเป็นประเภทต่างๆ ได้ตามลักษณะที่พิจารณา ได้แก่

### 2.4.1 การแบ่งประเภทของโฟม

2.4.1.1 การแบ่งประเภทของโฟมตามลักษณะของเซลล์โฟม การแบ่งประเภทของโฟมตามลักษณะของเซลล์โฟมจะทำให้โฟมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

- โฟมเซลล์เปิด (Open-Cell Foam) เป็นโฟมที่มีลักษณะโครงสร้างเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์ ทำให้แก๊สที่อยู่ภายในสามารถเคลื่อนที่ระหว่างเซลล์ได้ เซลล์โฟมชนิดนี้จะเตรียมได้จากระบบที่มีความดันต่ำภายใต้สภาวะบรรยากาศ ลักษณะโฟมที่ได้จะมีความยืดหยุ่น เหมาะกับการนำไปทำเป็นอุปกรณ์กันกระแทก และเบาะนั่ง เป็นต้น

- โฟมเซลล์ปิด (Closed-Cell Foam) เป็นโฟมที่มีลักษณะโครงสร้างที่แต่ละเซลล์จะมีเยื่อบางๆ กั้นอยู่ระหว่างเซลล์ ทำให้แก๊สที่อยู่ภายในโครงสร้างของแต่ละเซลล์ไม่สามารถเคลื่อนผ่านได้เหมือนในโฟมเซลล์เปิด เซลล์โฟมชนิดนี้จะเตรียมได้จากระบบที่มีความดันสูงภายใต้สภาวะบรรยากาศ ลักษณะโฟมที่ได้จะมีความแข็ง เหมาะกับการนำไปทำเป็นฉนวน เป็นต้น

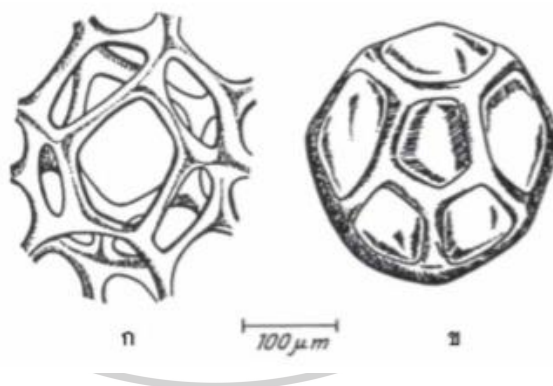
แต่ในทางปฏิบัตินั้นโฟมที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นทั้งแบบโฟมเซลล์เปิดและโฟมเซลล์ปิดปะปนกัน ทำให้สมบัติของโฟมที่เตรียมได้จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของเซลล์เปิดและเซลล์ปิดที่เกิดขึ้น โดยลักษณะของโฟมเซลล์เปิดและลักษณะของโฟมเซลล์ปิดจะแสดงในภาพ 2.3

**2.4.1.2 การแบ่งประเภทของโฟมตามลักษณะทางกายภาพ** การแบ่งประเภทของโฟมตามลักษณะทางกายภาพสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

- โฟมยืดหยุ่น (Flexible Foam) โฟมประเภทนี้จะมีลักษณะอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่น สามารถคืนตัวได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกด เนื่องจากเป็นโฟมที่มีอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature :  $T_g$ ) ที่ต่ำ ตัวอย่างโฟมประเภทนี้ได้แก่ โฟมยาง โฟมพอลิยูรีเทนยืดหยุ่น เป็นต้น

- โฟมชนิดแข็ง (Rigid Foam) โฟมประเภทนี้จะมีลักษณะที่แข็ง ไม่สามารถคืนตัวได้เมื่อได้รับแรงกด เนื่องจากสถานะที่นำไปใช้งานพอลิเมอร์เมทริกซ์ของโฟมประเภทนี้จะอยู่ในสถานะที่เป็นผลึก ตัวอย่างเช่น โฟมพอลิโพลีเอทิลีน โฟมพอลิสไตรีน โฟมพอลิยูรีเทน เป็นต้น

- โฟมชนิดกึ่งแข็ง (Semi-Rigid Foam) โฟมประเภทนี้จะมีลักษณะของโฟมยืดหยุ่นและโฟมแข็งร่วมกัน โดยที่ จะมีความยืดหยุ่นมากกว่าโฟมแข็งทั่วไป แต่ก็มีความแข็งมากกว่าโฟมยืดหยุ่นทั่วไปเช่นกัน



ภาพที่ 2.3 ลักษณะของโฟม : (ก) โฟมเซลล์เปิด, (ข) โฟมเซลล์ปิด [20]

**2.4.1.3 การแบ่งประเภทของโฟมตามประเภทของพลาสติก** การแบ่งประเภทของโฟมตามประเภทของพลาสติก สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

- โฟมเทอร์โมเซต (Thermoset Foam) โฟมประเภทนี้เป็นโฟมที่เตรียมได้จากพลาสติกประเภทเทอร์โมเซต โฟมชนิดนี้มีข้อเสียคือ การนำกลับมารีไซเคิลทำได้ยาก ตัวอย่างโฟมเทอร์โมเซต เช่น โฟมพอลิยูรีเทน และโฟมอีพอกซี เป็นต้น



- โฟมเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Foam) โฟมประเภทนี้เป็นโฟมที่เตรียมได้จากพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก สามารถนำกลับมารีไซเคิลใหม่ได้ ตัวอย่างโฟมประเภทนี้ เช่น โฟมพอลิสไตรีน และโฟมพอลิเอทิลีน เป็นต้น

#### 2.4.2 ขั้นตอนการเกิดโฟม (Foam Formation)

กระบวนการที่นำมาใช้ในผลิตโฟมมากที่สุด คือ กระบวนการการขยายตัว (Expansion process) โดยกระบวนการนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การเกิดฟอง (Bubble Formation or Initiation) ขั้นตอนนี้จะเป็นการทำให้เกิดฟองแก๊ส โดยจะเรียกว่า การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะมีการขยายตัวต่อไปในพอลิเมอร์หลอมเหลว การเกิดนิวเคลียสสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การเกิดนิวเคลียสในตัวเอง (Self Nucleation) การเกิดนิวเคลียสประเภทนี้จะเป็นการเกิดฟองแก๊สในขณะที่พอลิเมอร์หรือของเหลวเริ่มเกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และแบบที่ 2 คือกระบวนการเกิดนิวเคลียส (Nucleation Process) การเกิดนิวเคลียสแบบนี้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นที่ผิวระหว่างของแข็งกับของเหลว โดยของแข็งจะทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้เกิดนิวเคลียส (Nucleating agent)

การทำให้เกิดฟองแก๊สมีด้วยกันหลายวิธี ได้แก่

1. การสลายตัวทางความร้อนของสารฟูทางเคมี แก๊สเกิดขึ้นในขณะที่มีการผสมสารฟูกับพอลิเมอร์แล้วมีการให้ความร้อน สารฟูจะเกิดการสลายตัวกลายเป็นแก๊ส เช่น แก๊สไนโตรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น
2. การเกิดฟองแก๊สเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี โดยแก๊สที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดขึ้นในขณะที่มีการเกิดปฏิกิริยาของสารเคมี 2 ตัว ซึ่งแก๊สที่เกิดขึ้นจะถูกปลดปล่อยออกมาพร้อมกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ เช่น การเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในขณะที่ไอโซไซยานาตทำปฏิกิริยากับน้ำ ในระหว่างการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทน เป็นต้น
3. การลดความดัน แก๊สที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดขึ้นในระหว่างที่มีการลดความดันในระบบพอลิเมอร์ เช่น การขึ้นรูปพอลิเมอร์ด้วยการอัดรีด เป็นต้น

4. การกลายเป็นไอของของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำในเนื้อพลาสติก แก๊สเกิดขึ้น ในขณะที่มีการผสมสารฟู่ที่เป็นของเหลวกับพอลิเมอร์แล้วมีการให้ความร้อน ทำให้สารฟู่เป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำเกิดการระเหยกลายเป็นไอ

5. การใช้ตัวเติมชั่วคราว เป็นวิธีที่ไม่มีแก๊สเกิดขึ้น แต่จะมีการใช้ของแข็งผสมลงในพอลิเมอร์ จากนั้นจะมีการชะอนุภาคของแข็งออก ทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีลักษณะเป็นรูพรุน วิธีนี้เหมาะกับการเตรียมโฟมพอลิเมอร์ที่เกิดการขยายตัวได้ยาก เช่น พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน

6. การเก็บแก๊สเชิงกล วิธีเป็นการทำให้เกิดแก๊สเนื่องจากการกวนในระบบเชิงกล แล้วทำให้ระบบเกิดการแข็งตัวด้วยความร้อนหรือตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้เกิดการกักเก็บฟองแก๊สอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือจะทำให้ได้เซลล์โฟมที่ไม่สม่ำเสมอ

7. การเติมไมโครสเฟียร์ เป็นการเติมของแข็ง เช่น เม็ดแก้ว หรือเม็ดพลาสติกลงในพอลิเมอร์ในขณะที่เกิดการบวม

ขั้นตอนที่ 2 การเพิ่มขนาดของฟองแก๊ส (Bubble Growth) การเพิ่มขนาดของฟองแก๊สสามารถทำได้โดยการแพร่ของฟองแก๊สระหว่างเฟส โดยการขยายตัวของฟองแก๊สสามารถควบคุมได้ โดยความแตกต่างระหว่างความดันภายนอกและความดันภายในของฟองแก๊ส ( $\Delta P$ ) แรงตึงผิวที่สัมผัส ( $\gamma$ ) และรัศมีของฟองแก๊ส ( $r$ ) ตามความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 1

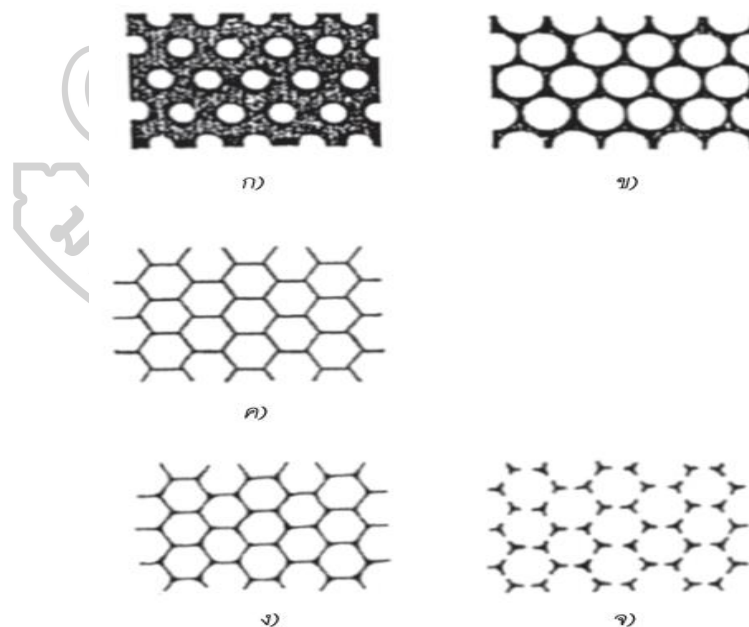
$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad (1)$$

ถ้าความแตกต่างระหว่างความดันมีค่ามาก ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นก็จะมีขนาดเล็ก โดยฟองแก๊สขนาดเล็กสามารถทำให้ฟองแก๊สมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ โดยการแตกของผนังเซลล์หรือการแพร่ของสารฟู่จากฟองแก๊สที่มีขนาดเล็กไปยังฟองแก๊สที่มีขนาดใหญ่

ขั้นตอนที่ 3 การเสถียรหรือการคงรูปของฟอง (Bubble Stability) ขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการเกิดโฟม โดยฟองโฟมที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์อาจจะยังไม่เสถียรและสามารถเกิดการยุบตัวได้ภายใต้แรงโน้มถ่วง ซึ่งความเสถียรของฟองโฟมขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญก็คือการถ่ายเทของเหลวจากผนังของเซลล์ไปยังรอยต่อของเซลล์ ขณะที่ฟองแก๊สกำลังเกิดการขยายตัวนี้จะเกิดการสัมผัสกันของผนังเซลล์ทำให้เกิดเป็นผนังเซลล์และสันของเซลล์เกิดขึ้น เมื่อเกิดการขยายตัวอย่างต่อเนื่องของเหลวก็จะเกิดการถ่ายเทไปยังบริเวณรอยต่อของเซลล์

เมื่อเกิดการถ่ายเทอย่างต่อเนื่องจะทำให้เกิดรอยแตกที่ผนังเซลล์หากทำให้ระบบเกิดการเสถียรในช่วงนี้ โฟมที่ได้จะมีลักษณะเป็นเซลล์เปิด ถ้าหากไม่ต้องการให้เกิดเป็นโฟมแบบเซลล์เปิดสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้โดยการทำให้ระบบเกิดการเสถียรก่อนที่จะเกิดรอยแตกที่ผนังเซลล์ การทำให้ระบบเกิดการเสถียรสามารถทำได้หลายวิธี ตัวอย่างเช่น การเกิดการเสถียรของระบบโฟมเทอร์โมพลาสติก ทำได้โดยการทำให้พอลิเมอร์ที่เกิดการขยายตัวเย็นตัวลงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) เพื่อป้องกันการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์

สำหรับขั้นตอนในการเกิดโฟมจะแสดงในภาพ 2.4 โดยที่ ก) ซึ่งเป็นลักษณะการเกิดฟองในพอลิเมอร์หลอมเหลว ฟองที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นทรงกลม ข) ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะมีการขยายตัว ส่งผลทำให้ความหนาแน่นของโฟมลดลง ค) ฟองแก๊สที่เกิดการขยายตัวจะเกิดการสัมผัสกันทำให้ลักษณะของฟองแก๊สเปลี่ยนจากทรงกลมไปเป็นลักษณะคล้ายรังผึ้ง ง) เป็นลักษณะของโฟมแบบเซลล์ปิด ซึ่งถ้ามีการเกิดการแตกของผนังเซลล์ จะทำให้โฟมที่ได้มีลักษณะเป็นเซลล์เปิด ดังแสดงใน จ)



ภาพที่ 2.4 แผนภาพแสดงกระบวนการการเกิดโฟม [20]

## 2.5 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสารฟู (Blowing agents)

สารฟู (Blowing agent) คือ สารที่ช่วยทำให้เกิดฟองแก๊สในกระบวนการเกิดโฟม สามารถแบ่งตามกลไกการเกิดฟองแก๊สได้เป็น 2 ประเภท คือ

### 2.5.1 สารฟูทางกายภาพ (Physical blowing agents : PBAs)

สารฟูทางกายภาพ (Physical blowing agents : PBAs) เป็นสารที่เติมลงในพอลิเมอร์ขณะขึ้นรูป โดยจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ สามารถระเหยได้เมื่อได้รับความร้อน และกระจายตัวได้ดีใน พอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น pentane, hexane, chloroform, แก๊สไนโตรเจน และ อากาศ [21]

### 2.5.2 สารฟูทางเคมี (Chemical blowing agent : CBAs)

สารฟูทางเคมี (Chemical blowing agent : CBAs) เป็นสารที่เติมลงไปนพอลิเมอร์ขณะขึ้นรูปแล้วจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้มีฟองแก๊สเกิดขึ้น สารฟูประเภทนี้จะถูกผสมกับพอลิเมอร์ก่อน จากนั้นจึงมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ทำให้เกิดฟองแก๊สของสารฟูชนิดนั้นๆ CBAs สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

**2.5.2.1 Inorganic Blowing Agents** สารฟูทางเคมีชนิดนี้ จะมีปฏิกิริยาการสลายตัวที่สามารถผันกลับได้ โดยจะเกิดการผันกลับในขณะที่มีการลดลงของแก๊สในระบบ ซึ่งจะสังเกตได้จากความดันที่ลดลงของระบบ ตัวอย่างสารฟูประเภทนี้ได้แก่ Sodium Hydrogen Carbonate และ Ammonium Hydrogen Carbonate เป็นต้น

**2.5.2.2 Organic Blowing Agents** สารฟูทางเคมีชนิดนี้ จะเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวที่ไม่สามารถผันกลับได้ ตัวอย่างเช่น

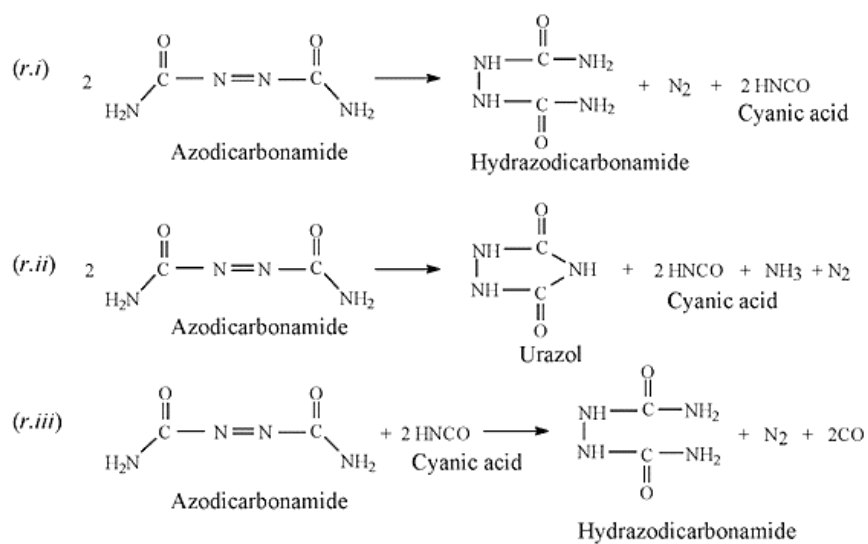
- Azodicarbonamide (ACD) มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง มีอุณหภูมิการสลายตัวในช่วง 195 - 216°C โดยลักษณะของ Azodicarbonamide แสดงดังภาพที่ 2.5 และปฏิกิริยาการสลายตัวของ Azodicarbonamide (ACD) แสดงดังภาพที่ 2.6

- 4,4'-Oxybis (benzenesulfonyl hydrazide) (OBSH) มีลักษณะเป็นผลึกของแข็งสีขาว มีอุณหภูมิการสลายตัวประมาณ 160°C เมื่อเกิดปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและแก๊ส N<sub>2</sub> โดยลักษณะของ 4,4'-Oxybis (benzenesulfonyl hydrazide) แสดงดังภาพที่ 2.7 และ

ปฏิกิริยาการสลายตัวของ 4,4'-Oxybis (benzenesulfonyl hydrazide) (OBSH) แสดงดังภาพที่ 2.8 [22]



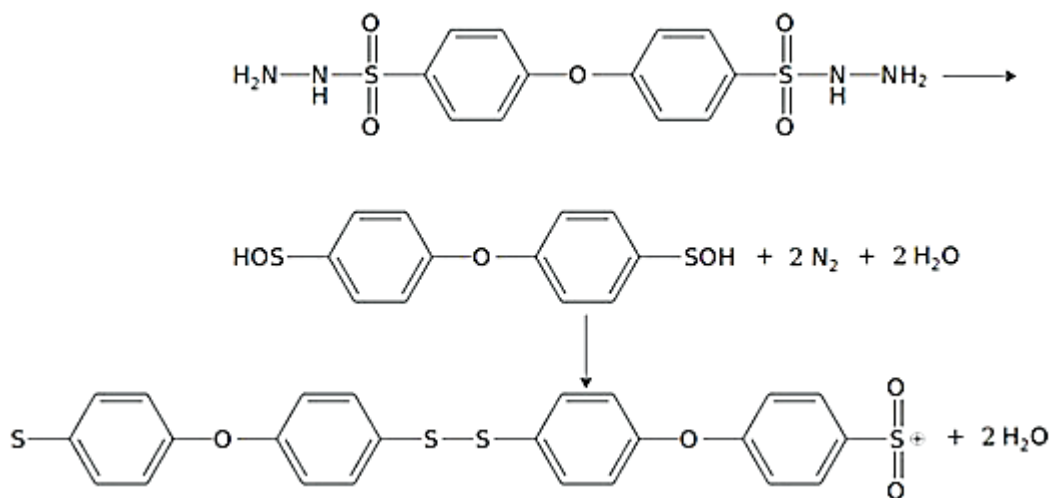
ภาพที่ 2.5 ลักษณะทางกายภาพของ Azodicarbonamide (ACD) [22]



ภาพที่ 2.6 ปฏิกิริยาการสลายตัวของ ACD [22]



ภาพที่ 2.7 ลักษณะทางกายภาพของ 4,4'-Oxybis (benzenesulfonyl hydrazide) (OBSH) [22]



ภาพที่ 2.8 ปฏิกิริยาการสลายตัวของ 4,4'-Oxybis (benzenesulfonyl hydrazide) (OBSH) [22]

## 2.6 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับน้ำมันหอมระเหย (Essential oil)

น้ำมันหอมระเหย (Essential oil) เป็นสารอินทรีย์ที่พืชสร้างขึ้น มักมีกลิ่นหอม และระเหยได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง น้ำมันหอมระเหยสามารถพบได้ตามส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ราก ลำต้น ใบ ดอก และเมล็ด โดยพืชแต่ละชนิดจะมีการสร้างและเก็บน้ำมันหอมระเหยไว้ ทำให้น้ำมันหอมระเหยที่ได้จากพืชแต่ละชนิดจะมีสมบัติและกลิ่นที่เฉพาะ เช่น บางชนิดมีกลิ่นหอมเมื่อสุกตามแล้ว จะช่วยให้เกิดการผ่นคลายได้ แต่บางชนิดอาจมีพิษก่อให้เกิดการระคายเคืองได้ [23]

### 2.6.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหย [24]

น้ำมันหอมระเหยเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน โดยจะประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีตั้งแต่ 20 – 60 ชนิด กลิ่นและสมบัติของน้ำมันหอมระเหยแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหย โดยองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นเอกลักษณ์ของน้ำมันหอมระเหยแต่ละชนิดส่วนใหญ่จะมีประมาณ 2 – 3 ชนิด และมักพบในปริมาณที่สูงเมื่อเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ที่พบ

2.6.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยที่แบ่งตามวิถีชีวสังเคราะห์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. เทอร์พีน (Terpenes and derivatives) เป็นสารที่มีองค์ประกอบหลักประกอบไปด้วยสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างต่ำ ได้แก่ กลุ่มของโมโนเทอร์พีน ในกลุ่มนี้

จะประกอบด้วยสารที่มีคาร์บอน 10 อะตอม และกลุ่มของเฮกซาคีเทอร์พีน สารกลุ่มนี้จะประกอบด้วยสารที่มีคาร์บอน 15 อะตอม ตัวอย่างน้ำมันหอมระเหยที่มีสารกลุ่มนี้จะเป็นสารองค์ประกอบหลัก เช่น ตะไคร้หอม ลาเวนเดอร์ และยูคาลิปตัส เป็นต้น

2. สารกลุ่มอะโรมาติก (Aromatic compounds and derivatives) เป็นสารในกลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติกที่ต่อกับสายโซ่คาร์บอน เช่น Eugenol ที่พบในน้ำมันกานพลู และ Estragole ที่พบในน้ำมันโหระพา สารในกลุ่มนี้พบมาในน้ำมันหอมระเหยที่ได้จากพืชวงศ์ Apiaceae เช่น เทียนข้าวเปลือก ผักชีฝรั่ง อบเชย และกานพลู เป็นต้น

2.6.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยที่แบ่งตามหมู่ฟังก์ชันสามารถแบ่งได้เป็น 8 กลุ่ม ได้แก่

1. สารกลุ่มเทอร์พีนไฮโดรคาร์บอน (Terpene hydrocarbon) เป็นสารในกลุ่มที่มีองค์ประกอบหลักเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอน เช่น สาร Limonene ในน้ำมันกระวาน ที่มีฤทธิ์ต้านไวรัส และสาร Pinene ในน้ำมันสน ที่มีฤทธิ์ฆ่าเชื้อ

2. สารกลุ่มแอลกอฮอล์ เป็นสารที่ในโครงสร้างจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เช่น สาร Geraniol ในน้ำมันดอกกุหลาบ และสาร Menthol ในน้ำมันเปเปอร์มินต์ เป็นต้น สารในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรียและต้านไวรัส

3. สารกลุ่มแอลดีไฮด์ เป็นสารที่ในโครงสร้างจะประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซาลดีไฮด์ (-CHO) เช่น สาร Citronella ในน้ำมันตะไคร้หอม และสาร Cinnamaldehyde ในน้ำมันอบเชย เป็นต้น สารในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่มีฤทธิ์ระงับประสาทลดการอักเสบ ขยายหลอดเลือด และฆ่าเชื้อแบคทีเรีย

4. สารกลุ่มคีโตน เป็นสารที่ในโครงสร้างจะประกอบด้วยหมู่คาร์บอนิล (-CO-) เกาะอยู่กับคาร์บอน เช่น สาร Carvone ในน้ำมันเทียนตากบ เป็นต้น สารในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะมีฤทธิ์ช่วยขยายหลอดลม ละลายเสมหะ เสริมสร้างเนื้อเยื่อ และลดการอักเสบ

5. สารกลุ่มฟีนอล เป็นสารที่ในโครงสร้างหลักประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่แล้วต่อกับวงแหวนเบนซีน 1 วง เช่น สาร Eugenol ในน้ำมันกานพลู และสาร Thymol ในน้ำมันไธม์ เป็นต้น สารในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย กระตุ้นระบบประสาทและภูมิคุ้มกันของร่างกาย

6. สารกลุ่มฟีนอลิกอีเทอร์ เป็นสารที่ในโครงสร้างมีอะตอมของออกซิเจนเกาะอยู่กับหมู่ฟีนิล ( $-C_6H_5$ ) อย่างน้อย 1 หมู่ เช่น สาร Anethole ในน้ำมันโป๊บกี้ และสาร Estragole ในน้ำมันโหระพา เป็นต้น สารในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่มีฤทธิ์ด้านการอักเสบ

7. สารกลุ่มเอสเทอร์ เป็นสารอนุพันธ์ของกรดคาร์บอกซิลิกที่ถูกแทนที่ด้วยหมู่อัลคอกซี หรือหมู่แอริลออกซีอย่างน้อย 1 หมู่ เช่น สาร Methyl salicylate ในน้ำมันระกำ เป็นต้น สารในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่มีฤทธิ์ระงับประสาท ลดอาการเกร็งของกล้ามเนื้อ ลดการอักเสบ และต้านเชื้อรา

8. สารกลุ่มเปอร์ออกไซด์ เป็นสารที่ในโครงสร้างจะประกอบด้วยหมู่เปอร์ออกซี ( $ROOR'$ ) เช่น สาร Ascaridole ในน้ำมันซีโนโปเตียม ที่มีฤทธิ์ขับพยาธิ

### 2.6.2 ฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาในการต้านจุลชีพของน้ำมันหอมระเหย [24]

การใช้ประโยชน์จากน้ำมันหอมระเหยมีมาตั้งแต่อดีต ทั้งใช้เป็นเครื่องเทศ แต่งกลิ่น นอกจากนี้ น้ำมันหอมระเหยยังมีสรรพคุณทางยา และสามารถเข้าสู่ร่างกายได้โดยตรงผ่านทางผิวหนัง ระบบทางเดินหายใจผ่านการสูดดม หรือผ่านทางเดินอาหารผ่านการรับประทาน โดยน้ำมันหอมระเหยมีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยามากมายหลายด้าน ตัวอย่างเช่น

1. ฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial) เนื่องจากน้ำมันหอมระเหยมีสมบัติสามารถละลายในไขมันได้ดี จึงทำให้สามารถผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียเข้าไปได้ โดยน้ำมันหอมระเหยจะเข้าไปทำลายโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้เกิดการผ่านเข้าออกของสารภายในและภายนอกของเซลล์มากขึ้น ส่งผลทำให้ระบบการทำงานของแบคทีเรียผิดปกติ และแบคทีเรียจะตายในที่สุด โดยฤทธิ์การต้านทานเชื้อแบคทีเรียส่วนใหญ่จะมาจากสารประกอบในกลุ่มฟีนอลิก เช่น Carvacrol, Thymol, Eugenol และ Cinnamic acid เป็นต้น

2. ฤทธิ์ต้านเชื้อรา (Antifungal) เชื้อราที่น้ำมันหอมระเหยมีฤทธิ์ต้านมักเป็นเชื้อราที่พบบริเวณผิวหนัง เช่น สาร Terpinen-4-ol จากน้ำมันทีทรี มีฤทธิ์ในการต้านเชื้อรา *Candida albicans* สารจากน้ำมันอบเชย กานพลู และโรส สามารถต้านทานเชื้อรา *Sporotrichon* spp. และ *Trichophyton* spp. เป็นต้น



### 2.6.3 กานพลู [25, 26]

ชื่อ : กานพลู (Clove)

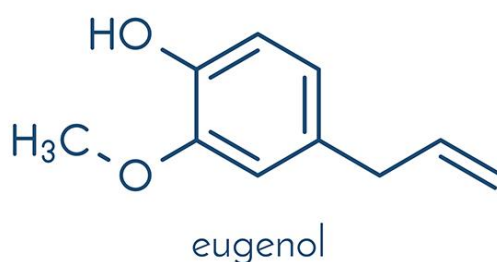
ชื่อทางวิทยาศาสตร์ : *Syzygium aromaticum* (L.) Merr. & L.M.Perry)

ชื่อวงศ์ : MYRTACEAE

ชื่อพ้อง : *Eugenia caryophyllata* Thunb, *Eugenia caryophyllus* (Spreng.) Bullock & Harrison, *Eugenia aromatica* Kuntze

กานพลูเป็นไม้ยืนต้นขนาดกลางสูงประมาณ 5 - 10 เมตร มีลักษณะเป็นใบเดี่ยวแหลม ใบมีความมันเงา ดอกกานพลูออกเป็นช่อดอกสั้นๆ แทงออกบริเวณปลายยอดหรือง่ามใบ บริเวณยอด ผลกานพลู เป็นผลเดี่ยวมี 1 เมล็ด ลักษณะเป็นผลทรงรี เมื่อแก่จะมีสีแดงเข้มออกคล้ำ

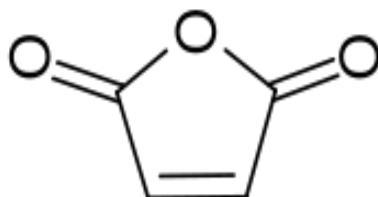
ประโยชน์กานพลู น้ำมันหอมระเหยจากกานพลูจะมีสารยูจีนอล (Eugenol) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นตัวที่ออกฤทธิ์สำคัญในการขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ทำให้โปรตีนอื่นๆ ทำงานผิดปกติ และต้านเชื้อแบคทีเรียหลายชนิด ดอกสามารถนำมาใช้รักษาอาการแน่นจุกเสียด อาการปวดฟัน แก้ท้องอืดท้องเฟ้อ ท้องเสีย ช่วยบรรเทาอาการของโรคในระบบทางเดินหายใจ รักษาหูด ช่วยบรรเทาอาการไอ ใบช่วยรักษาอาการปวดท้อง ดอกช่วยขับลม แก้ท้องอืด ท้องเฟ้อ จุกเสียดแน่นท้อง โครงสร้างของ Eugenol แสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างของสารยูจีนอล (Eugenol) [27]

### 2.7 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับ Maleic anhydride [28]

Maleic anhydride (MA) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตรโมเลกุลคือ  $C_4H_2O_3$  มีลักษณะทางกายภาพเป็นผลึกไม่มีสีหรือสีขาว มีกลิ่นฉุน นิยมนำไปใช้อุตสาหกรรมการเคลือบผิวของพอลิเมอร์ สมบัติทั่วไปของ Maleic anhydride แสดงในตารางที่ 2.2



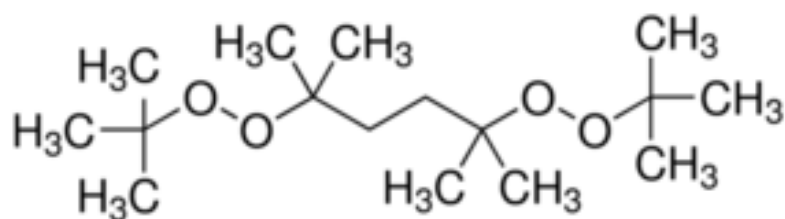
ภาพที่ 2.10 สูตรโครงสร้างของ Maleic anhydride [28]

ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของ Maleic anhydride [28]

สมบัติ	ค่า
น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	98.06
จุดหลอมเหลว (°C)	52.8
จุดเดือด (°C)	202
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	1.48
ความดันไอที่ 20°C (mmHg)	0.2

## 2.8 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับ Luperox®101 [29]

Luperox เป็นสารเคมีที่มีชื่อตาม SI units คือ 2,5-Bis(tert-butylperoxy)-2,5-dimethylhexane นิยมใช้เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) เกิดเป็น Free radicals ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ โดยภาพที่ 2.11 แสดงโครงสร้างของ Luperox และตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติทั่วไปของ Luperox



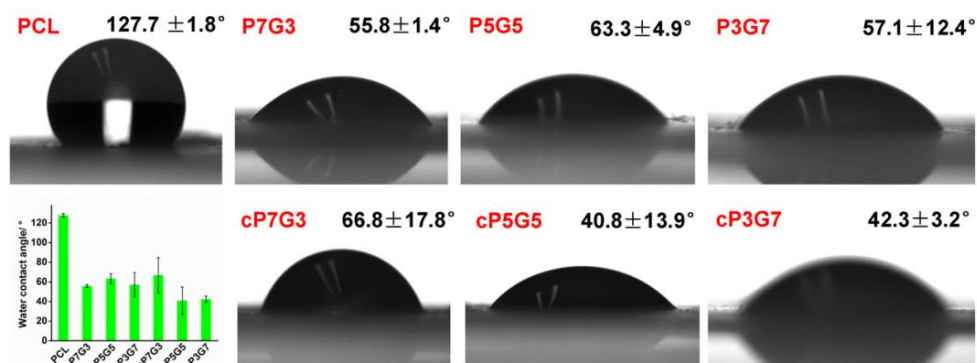
ภาพที่ 2.11 สูตรโครงสร้างของ Luperox [29]

ตารางที่ 2.3 สมบัติทั่วไปของ Luperox [29, 30]

สมบัติ	ค่า
$t_{1/2}$ ที่ 115°C (hr)	10
ที่ 134°C (hr)	1
ที่ 156°C (hr)	0.1
Refractive index	1.423
จุดเดือด (°C)	55-57
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	0.877

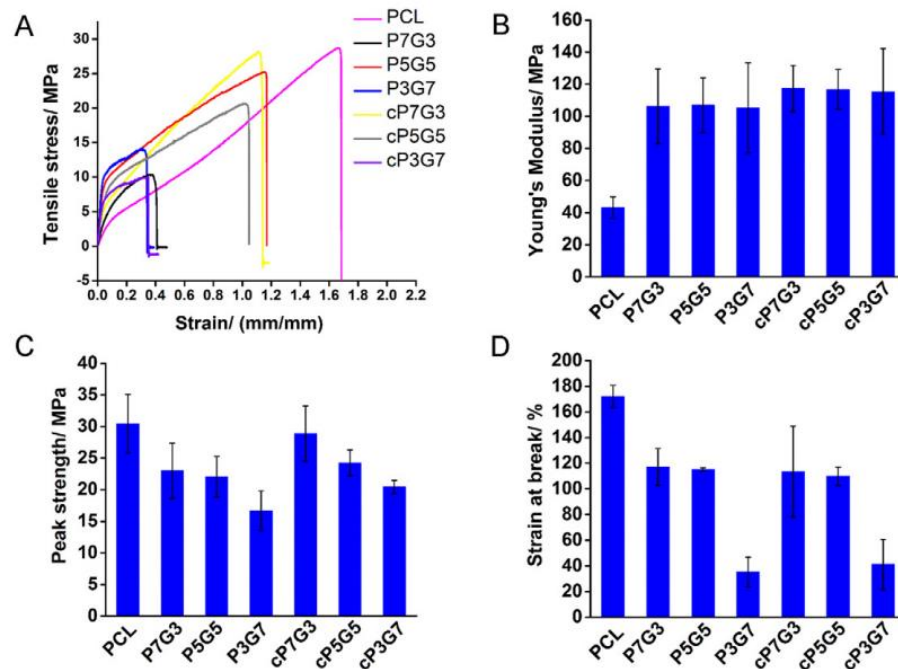
## 2.9 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Review of related literature)

Ren Ke และคณะ [31] ได้ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง poly(caprolactone)/gelatin (PCL/Gelatin) ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) สำหรับประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ เริ่มจากการละลาย PCL ในตัวทำละลาย 2,2,2-Trifluoroethanol (TFE) โดยให้สารละลายมีความเข้มข้น 10% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรและละลายเจลาตินในตัวทำละลาย TFE โดยให้สารละลายมีความเข้มข้นเท่ากับสารละลาย PCL จากนั้นนำสารละลายทั้ง 2 มาผสมเข้าด้วยกันในสัดส่วนต่างๆ ได้แก่ PCL:Gelatin สัดส่วน 10:0 7:3 5:5 3:7 และ 0:10 ตามลำดับ นำสารละลายที่เตรียมได้ไปทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Electrospinning จากการศึกษาพบว่าเส้นใยพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ มีความเข้ากันได้ค่อนข้างดี เส้นใยที่ได้ค่อนข้างเรียบ จากภาพที่ 2.12 เมื่อทำการทดสอบมุมสัมผัสของน้ำ (Water contact angle) จะเห็นว่าตัวอย่าง PCL ที่ไม่มีการเติม Gelatin จะมีมุมสัมผัสน้ำที่กว้าง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ PCL มีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) แต่เมื่อมีการเติม Gelatin จะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความมุมสัมผัสที่ลดลงซึ่งแสดงถึง Gelatin ที่มีสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilicity) เข้าไปช่วยเพิ่มความเป็น Hydrophilic ให้แก่พอลิเมอร์ผสม และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการเติม Gelatin ในพอลิเมอร์ผสม จะทำให้ความเป็น Hydrophilic ของพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้นด้วย

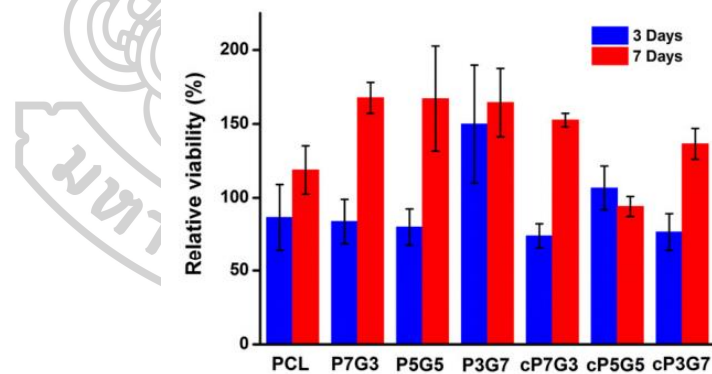


ภาพที่ 2.12 แสดงมุมสัมผัสของน้ำ (Water contact angle) ของเส้นใยพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ [31]

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิเมอร์ผสมดังแสดงในภาพที่ 2.13 พบว่าเมื่อมีการเติม Gelatin ลงในเส้นใยพอลิเมอร์ผสมจะทำให้เส้นใยมีค่า Young's modulus มีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการเติม Gelatin จะไม่ทำให้ค่า Young's modulus มีค่าแตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อมีการเติมและเพิ่มปริมาณ Gelatin ในพอลิเมอร์ผสมจะส่งผลให้เส้นใยมีค่า Tensile strength และค่า Strain at break ลดลงอย่างเห็นได้ชัดจนเป็นเช่นนั้นเนื่องจาก Gelatin มีลักษณะที่ค่อนข้างเปราะและมีความแข็งแรงต่ำ เมื่อมีการเติมลงในพอลิเมอร์ผสมจึงทำให้มีสมบัติการดึงยืดลดลง นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity) ในภาพที่ 2.14 พบว่าเซลล์ที่นำมาทดสอบมีความมีชีวิตของเซลล์มากกว่า 80% ซึ่งแสดงถึงความไม่เป็นพิษต่อเซลล์และความสามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสม



ภาพที่ 2.13 แสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ : Tensile stress-strain curve (A), Young's modulus (B), Peak strength (C) และ Strain at break (D) [31]

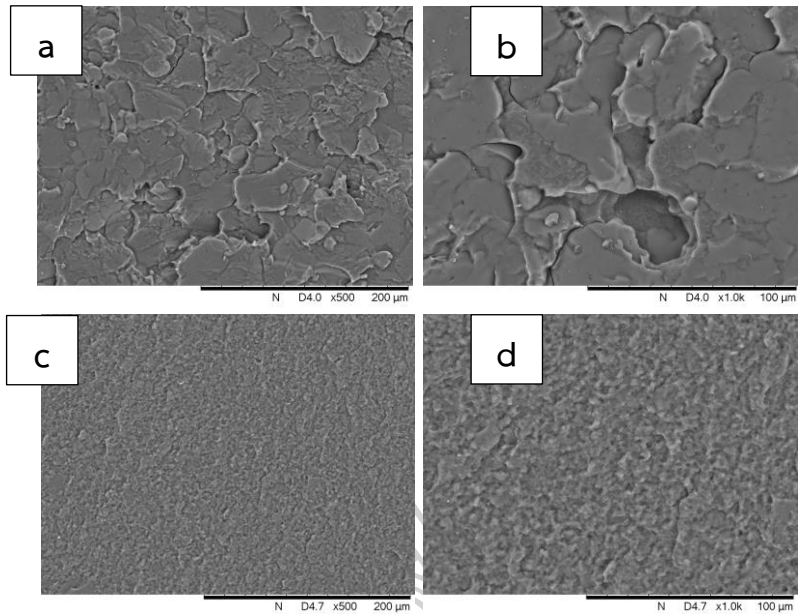


ภาพที่ 2.14 แสดงความมีชีวิตอยู่ของเซลล์ของเส้นใยพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ ในวันที่ 3 และวันที่ 7 [31]

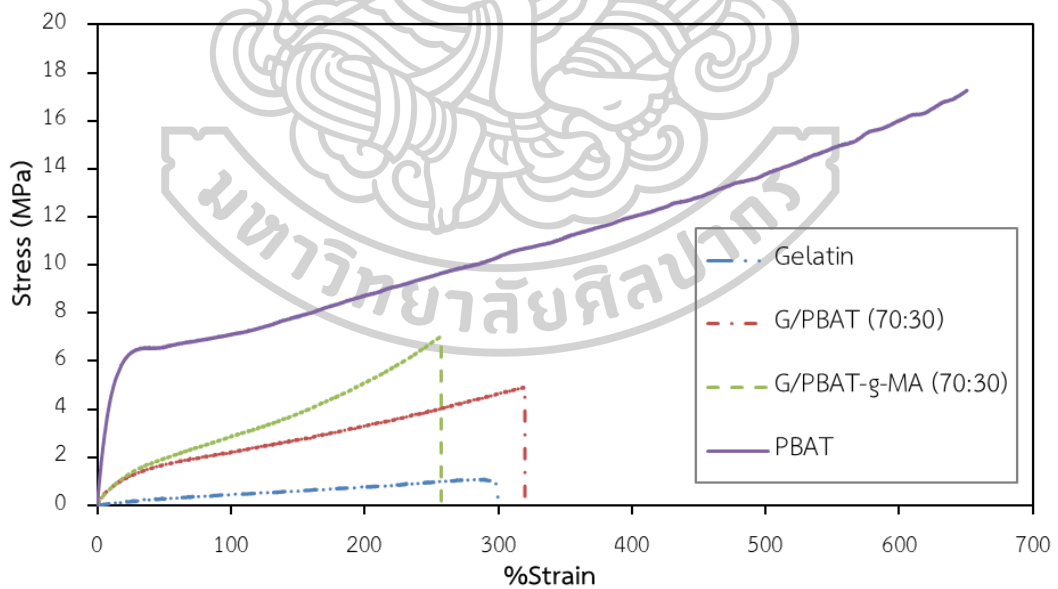
จากงานวิจัยของ Kikku Fukushima และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่าง PBAT/Clay เพื่อใช้ทางการแพทย์และในอุตสาหกรรม โดยเตรียมฟิล์มจากพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยการขึ้นรูปด้วย Compression molding พอลิเมอร์คอมพอสิตจะมีการเติม Clay ชนิดต่างๆ ในปริมาณ 5 และ 10 % จากการศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity) ด้วยวิธี

MTT พบว่า PBAT และพอลิเมอร์คอมพอสิต PBAT/Clay ที่เวลา 1 3 และ 5 วัน ไม่มีการลดลงของควมมีชีวิตของเซลล์ ซึ่งแสดงถึง PBAT และพอลิเมอร์คอมพอสิตของ PBAT มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพและไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์

จากงานวิจัยของฐิตาภา และคณะ [5] ได้ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT เพื่อประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร ในงานวิจัยนี้จะมีการเติม PBAT ลงในเจลาตินซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของเจลาติน โดยจะเริ่มการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT แต่เนื่องจากเจลาตินและ PBAT มีสภาพขั้วที่แตกต่างกันทำให้เข้ากันได้ไม่ดี จึงได้มีการปรับปรุงโครงสร้างของ PBAT ให้เป็น PBAT-g-MA จากนั้นจึงนำเจลาตินและ PBAT-g-MA มาผสมกันในสัดส่วนเจลาติน/PBAT เป็น 80/20 70/30 และ 60/40 โดยน้ำหนัก แล้วขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วย Compression molding จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่แสดงในภาพที่ 2.15 พบว่า ระบบเจลาติน/PBAT จะมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ มีการหลุดออกจากกันของทั้ง 2 วัสดุ ซึ่งแสดงถึงความไม่เข้ากันของทั้ง 2 วัสดุ ในขณะที่ระบบเจลาติน/PBAT-g-MA จะมีความเข้ากันได้ของทั้ง 2 วัสดุที่ดีกว่า รวมถึงมีการกระจายตัวของวัสดุ PBAT-g-MA ในวัสดุเจลาตินได้ดีกว่าอีกด้วย จากความเข้ากันได้ของทั้ง 2 วัสดุนี้ยังส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มจากเจลาตินเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในภาพที่ 2.16 นอกจากนี้ยังพบว่า PBAT ที่เติมลงไปเจลาตินจะช่วยให้ฟิล์มพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จะมีสมบัติการดูดซึมน้ำที่ลดลง

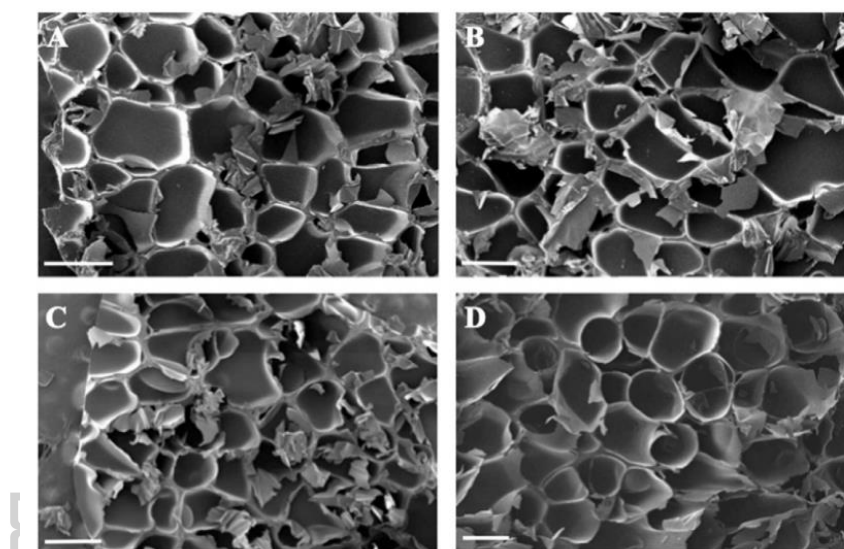


ภาพที่ 2.15 แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ : (a) เจลาติน/PBAT (70:30) (x500), (b) เจลาติน/PBAT (70:30) (x1000), (c) เจลาติน/PBAT-g-MA (70:30) (x500) และ (d) เจลาติน/PBAT-g-MA (70:30) (x1000) [5]



ภาพที่ 2.16 แสดง Stress-Strain ของเจลาติน PBAT และพอลิเมอร์ผสม เจลาติน/PBAT และ เจลาติน/PBAT-g-MA ที่อัตราส่วน 70:30 [5]

จากงานวิจัยของ Shane D. Frazier และคณะ [33] ได้ทำการเตรียมโฟมเจลาตินด้วยวิธี Evaporation-based method เริ่มจากการนำเจลาตินมาละลายในน้ำให้มีความเข้มข้นของเจลาตินเป็น 5 10 20 และ 30% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรตามลำดับ จากนั้นนำสารละลายที่ได้เทลงในถาดเพื่อขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการ Solution casting จากนั้นนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปอบที่อุณหภูมิ 150 °C จะได้เจลาตินที่มีลักษณะเป็นรูพรุน จากการศึกษพบว่าสัณฐานวิทยาของเจลาตินที่ได้จะมีผิวด้านนอกที่ค่อนข้างเรียบ และมีลักษณะด้านในทอเป็นรูพรุน ดังแสดงในภาพที่ 2.17 โดยที่เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของเจลาตินในขั้นตอนการทำ Solution casting จะทำให้โฟมที่ได้มีความเป็นรูพรุนลดลง และมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2.4



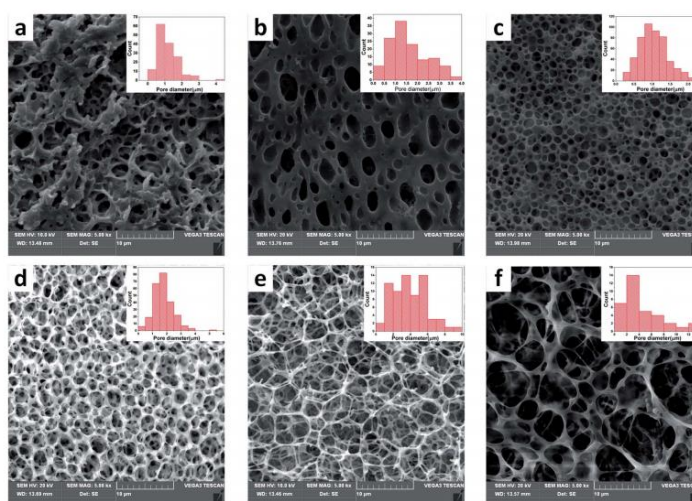
ภาพที่ 2.17 แสดงสัณฐานวิทยาของโฟมเจลาตินที่ความเข้มข้นต่างๆ : (A) G5, (B) G10, (C) G20 และ (D) G30 [33]

ตารางที่ 2.4 ความหนาแน่น ความเป็นรูพรุนและขนาดรูพรุนของโฟมเจลาตินที่ความเข้มข้นต่างๆ [33]

Sample	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)	Pore diameter (μm)
G5	0.054–0.067	94	359 ± 106
G10	0.085–0.12	90	320 ± 127
G20	0.11–0.19	85	324 ± 77
G30	0.14–0.22	84	367 ± 103



จากงานวิจัยของ Yuan Kang และคณะ [34] ได้ทำการศึกษาการเตรียม Open-porous ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง Polylactide (PLA)/PBAT ด้วยวิธี Double emulsion method เพื่อประยุกต์ใช้เป็น Scaffolds โดยทำการละลาย Sodium dodecylbenzenesulfonate (SDBS) ลงในน้ำเพื่อเป็นส่วนของวัฏภาคน้ำ และละลาย PLA และ PBAT ที่สัดส่วนต่างๆ ใน Dichloromethane เพื่อเป็นส่วนของวัฏภาคน้ำมัน จากนั้นนำทั้ง 2 ส่วนมาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อัตราส่วนต่างๆ แล้วทำการระเหย Dichloromethane และน้ำออก จะได้เป็นวัสดุผสมที่มีความเป็นรูพรุน จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของผสมที่เตรียมได้พบว่า มีลักษณะรูพรุนให้เห็นอย่างชัดเจนดังแสดงในภาพที่ 2.18 ความเป็นรูพรุนของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสมระหว่าง PLA/PBAT และสัดส่วนการผสมของวัฏภาคน้ำ/วัฏภาคไขมัน โดยในระบบที่มีสัดส่วนการผสมระหว่าง PLA/PBAT เป็น 70/30 ความเป็นรูพรุนและขนาดรูพรุนของพอลิเมอร์ผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนการผสมของวัฏภาคน้ำ จากตารางที่ 2.5 จะเห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนการผสม PBAT จะทำให้ความเป็นรูพรุนและขนาดรูพรุนของพอลิเมอร์ผสมลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้จะมีสมบัติเชิงกลดีขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการเติม PBAT รวมถึงพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพและไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์

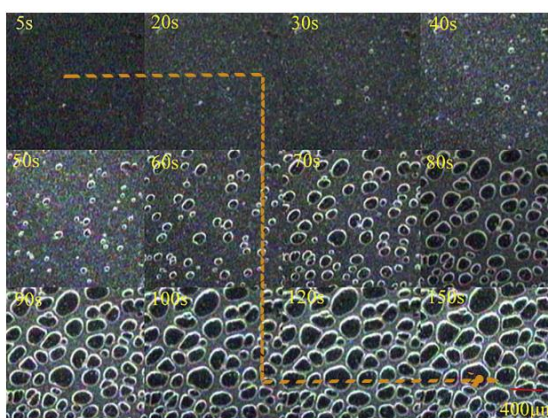


ภาพที่ 2.18 แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม sc-PLA/PBAT (70/30) ที่มีสัดส่วนวัฏภาคน้ำ/วัฏภาคไขมันต่างกัน : (a) 0.4/1; (b) 0.5/1; (c) 0.6/1; (d) 0.7/1; (e) 0.8/1 และ (f) 0.9/1 [34]

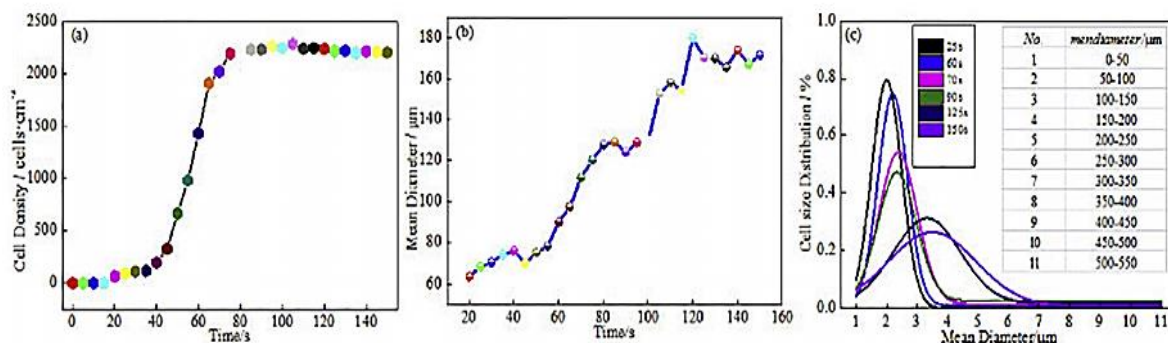
ตารางที่ 2.5 แสดงความเป็นรูพรุน พื้นที่ผิว และขนาดรูพรุนของพอลิเมอร์ผสม sc-PLA/PBAT ที่สัดส่วนการผสมต่างๆ [34]

Samples	100/0	80/20	60/40	50/50	20/80	0/100
Porosity (%)	93.5	91.2	89.0	87.6	46.1	14.3
Surface area ( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ )	9.97	9.33	10.12	11.03	4.11	2.56
Average diameter ( $\mu\text{m}$ )	$8.86 \pm 1.03$	$5.72 \pm 0.85$	$4.47 \pm 0.83$	$3.96 \pm 0.65$	$2.44 \pm 0.44$	$1.03 \pm 0.51$

งานวิจัยของ Shan Wu และคณะ [35] ได้ทำการศึกษาการเติบโตของเซลล์โฟมของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยมี p,p-oxybis(benzenesulfonyl hydrazide) (OBSh) เป็น Blowing agent โดยเริ่มจากการผสม LDPE และ OBSh ใน Internal mixer เป็นเวลา 6 นาที จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วย Compression molding จากภาพที่ 2.19 แสดงลักษณะของเซลล์โฟมที่เวลาต่างๆ พบว่า ในช่วง 5 – 50 วินาทีจะมีปริมาณเซลล์โฟมที่น้อย รวมถึงเซลล์โฟมที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็ก ปริมาณและขนาดของเซลล์โฟมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ในช่วงเวลา 50 – 70 วินาที เซลล์โฟมที่เกิดขึ้นจะมีขนาดที่พอเหมาะ แต่เมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 70 วินาที จะสังเกตเห็นถึงลักษณะของเซลล์โฟมที่ผิดรูปไป และจากภาพที่ 2.20 จะเห็นว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของเซลล์โฟมจะเพิ่มขึ้น โดยจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงแรก จากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและคงที่ ซึ่งการที่ความหนาแน่นของเซลล์โฟมค่อนข้างคงที่แสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพของการเกิดเซลล์โฟม ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาจากขนาดของเซลล์โฟมจะพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์โฟมจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามเวลาเช่นกัน



ภาพที่ 2.19 แสดงสัณฐานวิทยาของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่เวลาต่างๆ [35]



ภาพที่ 2.20 แสดงความหนาแน่นของเซลล์โพรหม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์โพรหม และการกระจายของขนาดเซลล์โพรหม ของโพรหม LDPE ที่เวลาต่างๆ [35]

งานวิจัยของ Aidilla Mubarak และคณะ [36] ได้ทำการเตรียมฟิล์มเจลาติน/ไคโตซานที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยจากกานพลู (Clove oil) เพื่อรักษาคุณภาพของปลาจะละเม็ดขาวด้วยวิธี Solution casting การเตรียมฟิล์มทำได้ด้วยการละลายเจลาติน และไคโตซาน ในน้ำ จากนั้นเติมซอร์บิทอลและกลีเซอรอลเพื่อทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำการกวนผสม จากนั้นเติมน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูปริมาณ 0.75 ml/g ของพอลิเมอร์ แล้วนำไปทำให้แห้งจะได้เป็นฟิล์มพอลิเมอร์จากการศึกษาพบว่าฟิล์มเจลาติน/ไคโตซานที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยจะสามารถต้านเชื้อ Escherichia coli (E. coli) และเชื้อ Salmonella enterica blue (S. enterica.) ได้ ในขณะที่ฟิล์มที่ไม่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูไม่สามารถต้านเชื้อดังกล่าวได้

งานวิจัยของ Haiying Cui และคณะ [37] ได้ทำการเตรียมเส้นใยเจลาตินที่มีการเติม Clove oil/อนุภาคไคโตซาน (CO@CNPs) เพื่อประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มต้านเชื้อ Escherichia coli (E. coli) ชนิด O157:H7 ในแตงกวา โดยเริ่มต้นจากการเตรียม CO@CNPs ด้วยวิธี Emulsion และ Ionic-gelation ของไคโตซานด้วย Sodium tripolyphosphate (STPP) จากนั้นเตรียมเส้นใยเจลาติน/CO@CNPs ด้วยเทคนิค Electrospinning จากการศึกษพบว่าเส้นใยที่เตรียมได้มีฤทธิ์ในต้านเชื้อ E. coli O157:H7 รวมถึงสามารถช่วงคงความสดและสีของแตงกวาไว้ได้เมื่อเวลาผ่านไป 4 วัน

งานวิจัยของเอกพลิชฐ์ [38] ได้ทำการศึกษาการเติมน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งและไคโตซานที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสด้วยเทคนิค Solution casting เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก S. aureus และแบคทีเรียแกรมลบ E. coli พบว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เตรียมได้มีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2

ชนิด แต่ประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ไม่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูจะต่ำกว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยจากกานพลู เนื่องจากไคโตซานในพอลิเมอร์คอมพอสิตจะมีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อเมื่ออยู่สถานะที่เป็นสารละลายมากกว่า เมื่อมีการขึ้นรูปที่แผ่นจึงทำให้ความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียของไคโตซานลดลง แต่ในกรณีของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูจะมีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อสูงกว่าเนื่องจากสาร Eugenol ที่เป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมันจากกานพลูสามารถทำลายผนังเซลล์ของแบคทีเรียได้ ซึ่งสาร Eugenol มีฤทธิ์ในการต้านเชื้อแบคทีเรียทั้งเชื้อ *S. aureus* และเชื้อ *E. coli*



### บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.1.1 พอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) เกรด Ecoflex® F Blend C1200, MFI = 12.88 g/10min จากบริษัท PTT MCC BioChem Company Limited
- 3.1.1.2 เจลาติน (Gelatin 250 bloom) จากบริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด
- 3.1.1.3 มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MA) ใช้เป็นสารสำหรับตัดแปรโครงสร้าง ด้วยวิธีการกราฟต์ลงบนโครงสร้างของ PBAT จากบริษัท Sigma-Aldrich
- 3.1.1.4 Luperox® 101 ซี อทวงเคมี คือ 2,5-Bis(tert-butylperoxy)-2,5-dimethylhexane จากบริษัท Sigma-Aldrich
- 3.1.1.5 Supercell EW (4,4'-Oxydibenzenesulfonyl Hydrazide, OBSH) จากบริษัท A.F.Supercell
- 3.1.1.6 Glycerol บริษัท Ajax Finechem PTY Ltd. ประเทศออสเตรเลีย
- 3.1.1.7 Reverse Osmosis water (RO)
- 3.1.1.8 อะซิโตน (Acetone)
- 3.1.1.9 น้ำมันหอมระเหยจากกานพลู จากบริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด

##### 3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.2.1 ตู้อบ (Hot air oven) ของบริษัท BINDER ประเทศเยอรมัน
- 3.1.2.2 เครื่องบดผสมระบบปิด (Internal mixer) รุ่น MX105-D40L50 บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด ประเทศไทย
- 3.1.2.3 เครื่องอัดรีดแบบสองสกรู (Co-rotating twin screw extruder) รุ่น SHJ-25 ของบริษัท Yongteng จากประเทศจีน

- 3.1.2.4 เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัดด้วยความร้อน (Compression Molding) ของบริษัท Labtech Engineering ประเทศไทย
- 3.1.2.5 เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัดด้วยความร้อน (Compression Molding) รุ่น PR1D-W300L350 บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด ประเทศไทย
- 3.1.2.6 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) บริษัท LabTech รุ่น LRM-S110/T3E ประเทศไทย
- 3.1.2.7 เครื่อง Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR) บริษัท Bruker รุ่น NMR Bruker 300 MHz ประเทศเยอรมัน
- 3.1.2.8 เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) รุ่น TM3030 ของบริษัท HITACHI, ประเทศญี่ปุ่น
- 3.1.2.9 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น MIRA3 ของบริษัท TESCAN, ประเทศออสเตรีย
- 3.1.2.10 เครื่อง Universal testing machine (UTM) รุ่น Instron-5969 ของบริษัท Instron, ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.2.11 เครื่องมือ Differential Scanning Calorimeter (DSC) รุ่น DSC1 ของบริษัท Mettler Toledo, ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.1.2.12 เครื่องมือทดสอบความแข็งได้แก่ Hardness Testing Machine จากบริษัท PTC Instruments ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.2.13 เครื่องมือศึกษาความหนาแน่น ได้แก่ เครื่อง Density kit รุ่น ME-DNY-4 จากบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.1.2.14 เครื่องมือ UV vis spectrophotometer รุ่น Shimadzu UV-1800 บริษัท Bara Scientific Co.,Ltd. ประเทศไทย

### 3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ตอน ได้แก่

ตอนที่ 1 การเตรียมและสมบัติพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

ตอนที่ 2 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณ Blowing agent ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

ตอนที่ 3 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

#### ตอนที่ 1 การศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

1. การเตรียมพลาสติกไซต์เจลาติน (Plasticized gelatin) นำเจลาตินมาแบ่งใส่ถาดแก้ว แล้วทำการผสมกับกลีเซอรอล (Glycerol) และน้ำ ในอัตราส่วน 1 : 0.33 : 0.47 โดยน้ำหนัก จากนั้นคลุกส่วนผสมให้เข้ากันแล้วบ่มทิ้งไว้ 12 - 18 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำเจลาตินที่ได้มาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่อง Twin Screw Extruder ที่อุณหภูมิจาก Hopper ถึงหัว Die คือ 80/90/100/100/110/110/125/125°C ตามลำดับ ด้วยความเร็วรอบสกรู 60 rpm ก่อนนำไปใช้งานจะต้องนำ Extrudate พลาสติกไซต์เจลาติน มาตัดและนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำ Plasticized gelatin ที่เตรียมได้มาทดสอบ

- การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของ Plasticized gelatin ด้วย Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยจะให้ความร้อนจากที่อุณหภูมิ -80 °C ถึง 180 °C ที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้สภาวะอากาศไนโตรเจน

2. การเตรียม PBAT ที่ผ่านการเชื่อมขวาง (cured PBAT) นำ PBAT ที่ผ่านการอบแล้ว มาผสมกับ Luperox@101 ด้วยสัดส่วน 1 phr แล้วไปขึ้นรูปด้วยเครื่อง Twin Screw Extruder ที่อุณหภูมิจาก Hopper ถึงหัว Die คือ 130/140/150/155/160/160/160/155°C ตามลำดับ ด้วยความเร็วรอบสกรู 60 rpm ก่อนนำไปใช้งานจะต้องนำ cured extrudate PBAT มาตัดและนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

3. การเตรียม PBAT-g-MA เริ่มจากการนำ MA ปริมาณ 5 phr และ Luperox®101 ปริมาณ 0.5 phr ของ PBAT มาละลายด้วย Acetone ในปริมาณ 15 และ 5 ml. ตามลำดับ แล้วนำไปผสมกับ PBAT ที่ผ่านการอบแล้ว จากนั้นนำส่วนผสมทั้งหมดไปอบเพื่อไล่ Acetone อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงนำมาด้วยเครื่อง Twin-screw Extruder ที่อุณหภูมิจาก Hopper ถึงหัว Die คือ 130/140/150/160/170/170/170/160°C ตามลำดับ ด้วยความเร็วรอบสกรู 60 rpm ก่อนนำไปใช้งานจะต้องนำ Extrudate พลาสติกซีต PBAT มาตัดและนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง [39] นำ PBAT-g-MA ที่เตรียมได้มาทดสอบ

- การวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การกราฟด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR) ของ PBAT-g-MA โดยใช้ความถี่ 300 MHz ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำ PBAT-g-MA ปริมาณ 3 มิลลิกรัม ละลายใน Deuterated chloroform 1 มิลลิตร แล้วบรรจุใน NMR tube จากนั้นนำไปทดสอบและวิเคราะห์ผลเทียบกับ PBAT

4. การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT นำพอลิเมอร์ที่ผ่านการอบแล้ว มาผสมด้วยเครื่อง เครื่อง Internal mixer ที่อุณหภูมิ 160 °C ความเร็วรอบการหมุน 60 rpm โดยจะมีอัตราส่วน Plasticized เจลาติน/Plasticized PBAT เป็น 100/0, 70/30, 60/40, 50/50 และ 0/100 พร้อมทั้งเติม PBAT-g-MA ในสัดส่วน 0 และ 20 % ของ PBAT โดยตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนการผสมเจลาตินและ PBAT ที่มีและไม่มีการเติม PBAT-g-MA

5. นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ในทุกอัตราส่วนไปขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัดด้วยความร้อน โดยใช้เครื่อง Compression Molding ที่อุณหภูมิ 140 °C ความดัน 1500 psi เป็นเวลา 3 นาที มีการให้ความร้อนก่อนเป็นเวลา 30 วินาที และทำให้เย็นลงเป็นเวลา 1 นาที ตัวอย่างที่ได้จะมีความหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร แล้วนำตัวอย่างไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ

6. การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

- การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT นำชิ้นงานที่ผ่านการหักใน Liquid nitrogen มาทำการตรวจสอบบริเวณพื้นผิวรอยแตกหัก จากนั้นนำมาทำการเคลือบด้วยทอง แล้วศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

- การศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ด้วย Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยจะให้ความร้อนจากที่อุณหภูมิ -80 °C ถึง



180 °C ที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้สภาวะอากาศไนโตรเจน ทำการคำนวณปริมาณผลึกจากสมการ (2)

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_m}{f \times \Delta H_m^\circ} \quad (2)$$

เมื่อ  $X_c$  คือ ปริมาณผลึก (%)

$\Delta H_m$  คือ พลังงานความร้อนที่ใช้หลอมผลึก (J/g)

$\Delta H_m^\circ$  คือ พลังงานความร้อนที่ใช้หลอมผลึกเมื่อเกิดผลึก 100% (J/g)

สำหรับ  $\Delta H_m^\circ$  ของ PBAT = 114 J/g

$f$  คือ สัดส่วนของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสม

- การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ด้วย Universal Testing Machine ตามมาตรฐาน ASTM D882 Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างเป็นแผ่นฟิล์ม และใช้ความเร็วในการดึงชิ้นงาน 50 mm/min โดยใช้ load cell ขนาด 5 kN

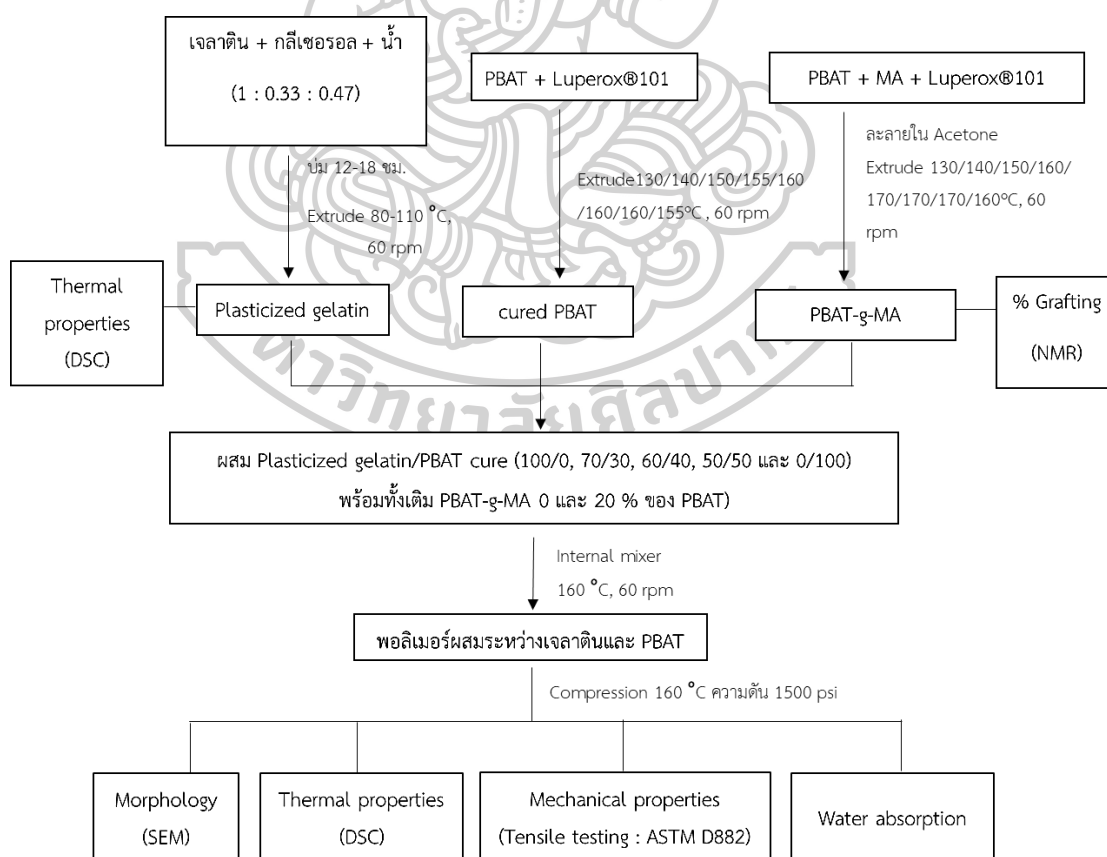
- การศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำ (%Water absorption) นำโฟมชีวภาพมาอบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนแช่ในน้ำกลั่น ( $W_1$ ) และจะชั่งน้ำหนักอีกครั้งหลังแช่ในน้ำกลั่น ( $W_2$ ) เมื่อเวลาผ่านไป 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 12, 15, 24, 30, 36 ชั่วโมง และทุกๆ วันจนครบ 14 วัน [5] จากนั้นหา %water absorption ดังสมการที่ (3)

$$\% \text{Water absorption} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3)$$

โดยแผนภาพที่ 3.1 แสดงการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนการผสมเจลาตินและ PBAT ที่มีและไม่มีกรเติม PBAT-g-MA

อัตราส่วนเจลาติน/PBAT (%wt)	ปริมาณเจลาติน (g)	ปริมาณ PBAT (g)	ปริมาณ PBAT-g-MA (g)
100/0	100	0	0
70/30	70	30	
60/40	60	40	
50/50	50	50	
70/30/20	70	24	6
60/40/20	60	32	8
50/50/20	50	40	10
0/100	0	100	0



ภาพที่ 3.1 แสดงแผนภูมิการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

## ตอนที่ 2 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณ Blowing agent ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพจาก พอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

1. นำ Plasticized เจลาติน/cured PBAT มาผสมในเครื่อง Internal mixer โดยมี อัตราส่วน Plasticized เจลาติน/cured PBAT เป็น 100/0, 70/30, 60/40, 50/50 และ 0/100 พร้อมทั้งเติม PBAT-g-MA ในสัดส่วน 20 % ของ PBAT ทำการผสมด้วย Two roll mill ที่อุณหภูมิ 130 °C ทำการผสมจนกว่าพอลิเมอร์ผสมจะหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน
2. เมื่อพอลิเมอร์หลอมเป็นเนื้อเดียวกันจะทำการลดอุณหภูมิของเครื่อง Two roll mill ให้มีอุณหภูมิ 110 °C จากนั้นเติม Supercell EW (OBSH) อัตราส่วน 5 10 และ 15 phr ของพอลิเมอร์ผสม PBAT โดยตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วนการผสมโฟมพอลิเมอร์ผสมเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ
3. นำผสมพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มาทำการขึ้นรูปเป็นโฟมด้วย Compression molding ที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นทำให้เย็นตัวลงด้วยอากาศเป็นเวลา 3 นาที แล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ
4. การศึกษาสมบัติของโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT
  - การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและขนาดเซลล์โฟมของโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT นำชิ้นงานที่ผ่านการหักใน Liquid nitrogen มาทำการตรวจสอบบริเวณพื้นผิวรอยแตกหัก จากนั้นนำมาทำการเคลือบด้วยทอง แล้วศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
  - การศึกษาความหนาแน่นของโฟมชีวภาพด้วยเครื่อง (Density kits and accessories) โดยใช้น้ำเป็นสภาวะในการเปรียบเทียบ ตามมาตรฐาน ASTM D792 Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement
  - การศึกษาความต้านทานต่อการกดอัดของโฟมชีวภาพด้วย Universal Testing Machine ในโหมดการทดสอบ Compression test ตามมาตรฐาน ASTM D1621 Standard Test Method for Compressive Properties Of Rigid Cellular Plastics โดยใช้ load cell ขนาด 50 kN โดยทำการทดสอบไปจนถึง 50% ของความสูงเริ่มต้นของชิ้นงาน

- การศึกษาความแข็งที่ผิว (Hardness testing) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 Standard Test Method for Rubber Property Durometer Hardness โดยใช้ Durometer ชนิด Shore A

- การศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำ นำโพลีเมอร์มาอบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักขึ้นงานก่อนแช่ในน้ำกลั่น ( $W_1$ ) และจะชั่งน้ำหนักอีกครั้งหลังแช่ในน้ำกลั่น ( $W_2$ ) เมื่อเวลาผ่านไป 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 12, 15, 24, 30, 36 ชั่วโมง และทุกๆ วันจนครบ 21 วัน [5] จากนั้นหา %water absorption ดังสมการที่ 3

$$\% \text{Water absorption} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3)$$

- การศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity) ด้วยวิธี MTT assay (3-(4,5-Dimethylthiazol-2-yl)-2,5-Diphenyltetrazolium Bromide) เริ่มต้นจากการซังสารตัวอย่างแล้วทำการเติมอาหาร (DMEM+ 5%FBS) ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มากรองเพื่อเก็บเป็น stock สำหรับใช้ในการทดสอบ ในส่วนของเซลล์ไลน์จะเริ่มจากการเลี้ยงเซลล์ในเพลทชนิด 96 หลุม แล้วบ่มเซลล์ เมื่อครบกำหนดจะเติม MTT ลงไปแล้วทำการบ่มต่ออีก 4 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาจะดูดสารละลาย MTT ทิ้งแล้วเติมสารที่ละลายผลึก Formazan (100%DMSO : 10%SDS อัตราส่วน 9:1) แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 590 nm ด้วยเครื่องอ่านค่าการดูดกลืนแสงในไมโครเพลท [40] เพื่อคำนวณหาค่า %Cytotoxicity ตามสมการ 4 และ %Cell viability ตามสมการ 5

$$\% \text{Cytotoxicity} = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (4)$$

A = ค่าการดูดกลืนแสงของหลุมควบคุม (หลุมที่มีเซลล์ในอาหารเพาะเลี้ยง)

B = ค่าการดูดกลืนแสงของหลุมที่มีเซลล์ในสารตัวอย่างความเข้มข้น 1,000  $\mu\text{g/ml}$

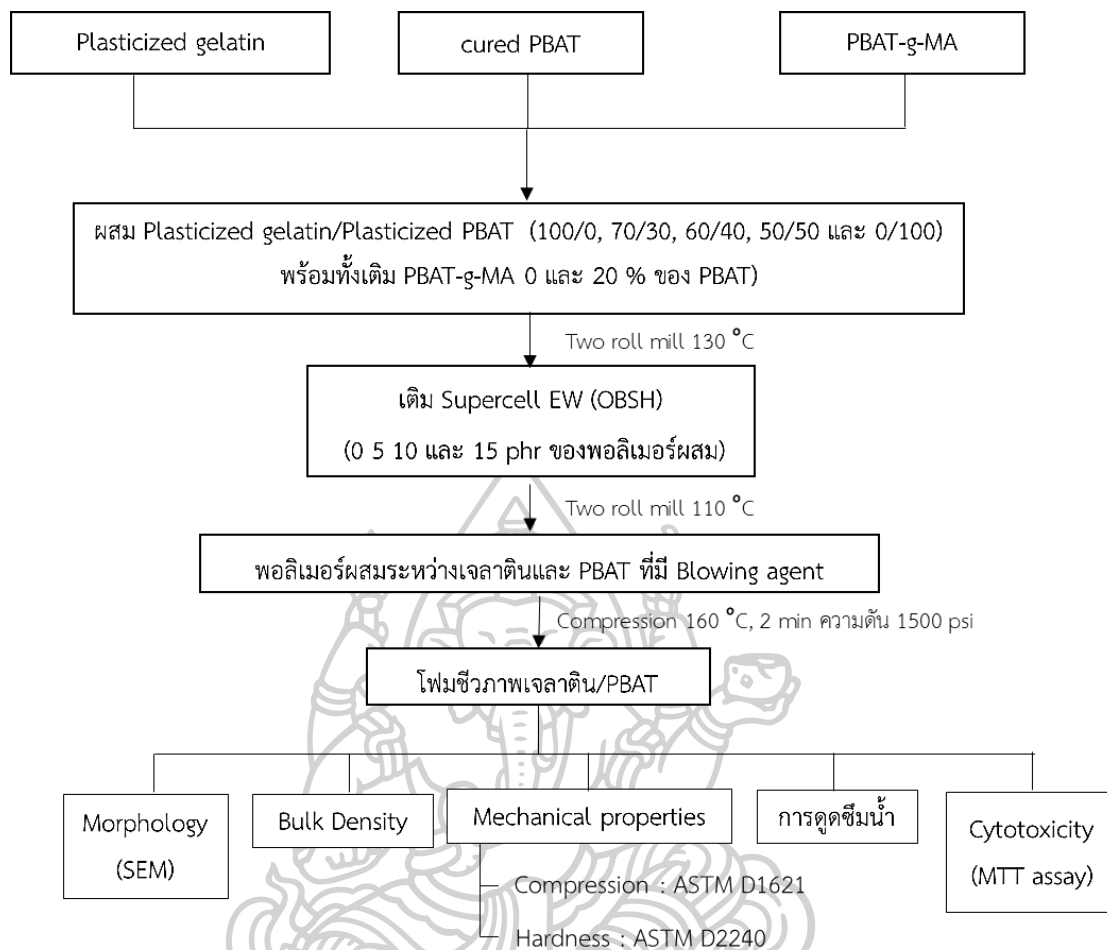
$$\% \text{Cell viability} = 100 - \% \text{Cytotoxicity} \quad (5)$$

สำหรับการเตรียมสารละลาย PBS ที่ความเข้มข้น 0.005 M เตรียมได้จากการผสม Sodium phosphate dibasic ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ) 0.005 mol (0.7098 g) และ Sodium chloride (NaCl) 0.005 mol (0.2925 g) จากนั้นเติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรเป็น 500 ml และปรับความเป็นกรด-ด่างด้วย HCl ความเข้มข้น 1 M ให้มี pH ประมาณ 7.4

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนการผสมของโพลิเมอร์ผสมเจลาตินและ PBAT

ชื่อย่อ	เจลาติน (%wt)	PBAT (%wt)	OBSH (phr)
Gelatin_5	100	0	5
Gelatin_10			10
Gelatin_15			15
70/30_5	70	30	5
70/30_10			10
70/30_15			15
60/40_5	60	40	5
60/40_10			10
60/40_15			15
50/50_5	50	50	5
50/50_10			10
50/50_15			15
PBAT_5	0	100	5
PBAT_10			10
PBAT_15			15

จากตอนที่ 2 นี้จะเลือกปริมาณ Blowing agent ที่เหมาะสมที่ทำให้โพลิเมอร์มีความหนาแน่นต่ำ ขนาดเซลล์โพลิเมอร์สม่ำเสมอ และมีสมบัติเชิงกลที่ดี เพื่อนำไปศึกษาต่อในตอนที่ 3 โดยแผนภาพที่ 3.2 แสดงการเตรียมโพลิเมอร์จากโพลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติม Blowing agent ในปริมาณต่างๆ



ภาพที่ 3.2 แสดงแผนภูมิการเตรียมโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติม Blowing agent ในปริมาณต่างๆ

หมายเหตุ : จากตอนที่ 2 นี้จะเลือกปริมาณ Blowing agent ที่เหมาะสมที่ทำให้โฟมมีความหนาแน่นต่ำ และขนาดเซลล์โฟมสม่ำเสมอ เพื่อนำไปศึกษาต่อในตอนที่ 3

### ตอนที่ 3 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

1. นำ Plasticized เจลาติน/cured PBAT โดยเลือกสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาในตอนที 2 มาผสมกับ PBAT-g-MA และน้ำมันหอมระเหยจากกานพลู ปริมาณ 0 1 3 และ 5 phr ด้วยเครื่อง Two roll mill ให้มีอุณหภูมิ 130 °C ทำการผสมจนกว่าพอลิเมอร์ผสมจะหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน

2. เมื่อพอลิเมอร์หลอมเป็นเนื้อเดียวกันจะทำการลดอุณหภูมิของเครื่อง Two roll mill ให้มีอุณหภูมิ 110 °C จากนั้นเติม Supercell EW (OBSH) อัตราส่วน 15 phr ซึ่งเป็นสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาในตอนที 2 โดยตารางที่ 3.3 แสดงอัตราส่วนการผสมโฟมพอลิเมอร์ผสมเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูที่อัตราส่วนต่างๆ

3. นำผสมพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มาทำการขึ้นรูปเป็นโฟมด้วย Compression molding ที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นทำให้เย็นตัวลงด้วยอากาศเป็นเวลา 3 นาที แล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ

4. การศึกษาสมบัติของโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหย

- การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและขนาดเซลล์โฟมของโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT นำชิ้นงานที่ผ่านการหักใน Liquid nitrogen มาทำการตรวจสอบบริเวณพื้นผิวรอยแตกหัก จากนั้นนำมาทำการเคลือบด้วยทอง แล้วศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

- การศึกษาความหนาแน่นของโฟมชีวภาพด้วยเครื่อง (Density kits and accessories) โดยใช้น้ำเป็นสภาวะในการเปรียบเทียบ ตามมาตรฐาน ASTM D792 Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement

- การศึกษาความต้านทานต่อการกดอัดของโฟมชีวภาพด้วย Universal Testing Machine ในโหมดการทดสอบ Compression test ตามมาตรฐาน ASTM D1621 Standard Test Method for Compressive Properties Of Rigid Cellular Plastics โดยใช้ load cell ขนาด 50 kN โดยทำการทดสอบไปจนถึง 50% ของความสูงเริ่มต้นของชิ้นงาน

- การศึกษาความแข็งที่ผิว (Hardness testing) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 Standard Test Method for Rubber Property Durometer Hardness โดยใช้ Durometer ชนิด Shore A

- การศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำ นำโฟมชีวภาพมาอบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักขึ้นงานก่อนแช่ในน้ำกลั่น ( $W_1$ ) และจะชั่งน้ำหนักอีกครั้งหลังแช่ในน้ำกลั่น ( $W_2$ ) เมื่อเวลาผ่านไป 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 12, 15, 24, 30, 36 ชั่วโมง และทุกๆ วันจนครบ 21 วัน [5] จากนั้นหา %water absorption ดังสมการที่ 3

$$\% \text{Water absorption} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3)$$

- การศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity) ด้วยวิธี MTT assay (3-(4,5-Dimethylthiazol-2-yl)-2,5-Diphenyltetrazolium Bromide) เริ่มต้นจากการซังสารตัวอย่างแล้วทำการเติมอาหาร (DMEM+ 5%FBS) ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มากรองเพื่อเก็บเป็น stock สำหรับใช้ในการทดสอบ ในส่วนของเซลล์ไลน์จะเริ่มจากการเลี้ยงเซลล์ในเพลทชนิด 96 หลุม แล้วบ่มเซลล์ เมื่อครบกำหนดจะเติม MTT ลงไปแล้วทำการบ่มต่ออีก 4 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาจะดูดสารละลาย MTT ทิ้งแล้วเติมสารที่ละลายผลึก Formazan (100%DMSO : 10%SDS อัตราส่วน 9:1) แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 590 nm ด้วยเครื่องอ่านค่าการดูดกลืนแสงไมโครเพลท [40] เพื่อคำนวณหาค่า %Cytotoxicity ตามสมการ 4 และ %Cell viability ตามสมการ 5

$$\% \text{Cytotoxicity} = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (4)$$

A = ค่าการดูดกลืนแสงของหลุมควบคุม (หลุมที่มีเซลล์ในอาหารเพาะเลี้ยง)

B = ค่าการดูดกลืนแสงของหลุมที่มีเซลล์ในสารตัวอย่างความเข้มข้น 1,000  $\mu\text{g/ml}$

$$\% \text{Cell viability} = 100 - \% \text{Cytotoxicity} \quad (5)$$

- การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย โดยใช้แบคทีเรีย 2 ชนิด คือ Staphylococcus aureus (S. aureus, Gram-positive) และ Escherichia coli (E. coli, Gram-negative) ด้วยเทคนิค Agar Diffusion โดยเริ่มจากการเตรียมเซลล์เชื้อบนอาหาร Mueller Hintor agar (MHA; Difco) ที่อุณหภูมิ 37 °C เวลา 24 ชั่วโมง เตรียมสารละลาย 0.85% NaCl ให้ได้ความ



ชุนเทียบเท่ากับ McFarland No. 0.5 (ปริมาณเซลล์ประมาณ  $1 \times 10^8$  CFU/ml) จากนั้นใช้ไม้พันสำลีป้ายเชื้อ (swab) ลงบนผิวอาหาร Muller Hinton agar แล้วนำตัวอย่างวางลงบนผิวอาหาร และบ่มจานอาหารที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจะทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณยับยั้ง (Inhibition zone) ที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวอย่าง

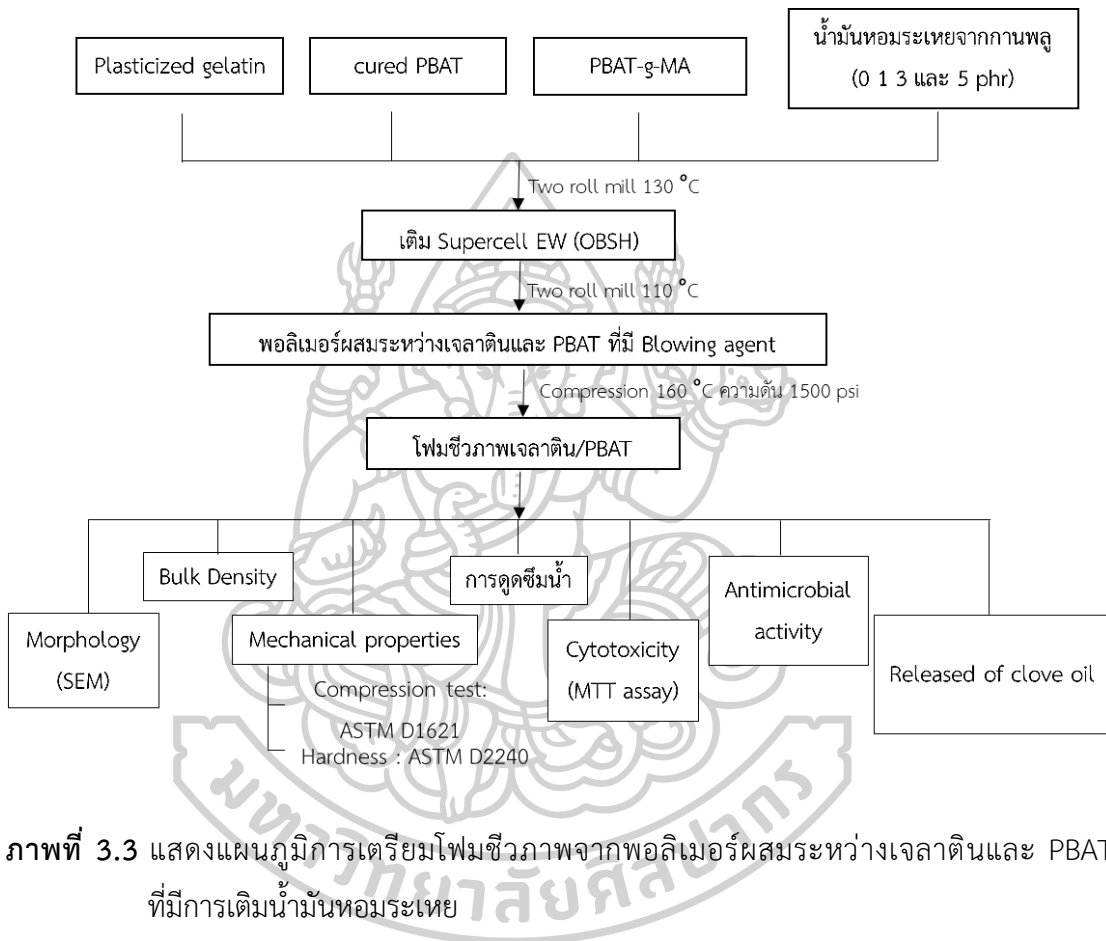
$$\text{Antimicrobial index} = \frac{\text{zone diameter} - \text{ขนาดชิ้นงาน}}{\text{ขนาดชิ้นงาน}} \quad (6)$$

- การศึกษาความสามารถในการปลดปล่อยสารต้านเชื้อของน้ำมันหอมระเหยทำการเตรียมกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (Calibration curve) ด้วยการนำสารละลายมาตรฐานที่ได้จากการละลายน้ำมันหอมระเหยกานพลูความเข้มข้น 200, 400, 600, 800 และ 1000 ppm ในสารละลาย PBS มาวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นจำเพาะของน้ำมันหอมระเหยกานพลู แล้วนำความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ทราบค่าแน่นอนกับค่าการดูดกลืนแสงของแต่ละความเข้มข้นมาพลอตกราฟจะได้กราฟความเข้มข้นมาตรฐานที่เป็นกราฟเส้นตรง นำตัวอย่าง 0.2 กรัม มาแช่ในสารละลาย PBS ทำการเก็บตัวอย่างสารละลาย PBS ที่เวลา 1, 2, 3, 6, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง โดยในการเก็บตัวอย่างแต่ละครั้งจะทำการดูดสารละลาย PBS ออกมา จากนั้นนำสารละลาย PBS ที่ได้มาวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร [39] แล้วนำค่าดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณจากสมการเชิงเส้นของกราฟความเข้มข้นมาตรฐานที่เตรียมไว้ จะได้ความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง

**ตารางที่ 3.3** อัตราส่วนการผสมของโพลีเอสเตอร์ผสมเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลู

ชื่อย่อ	เจลาติน (%wt)	PBAT (%wt)	OBSH (phr)	Clove oil (phr)
0 phr	50	50	15	0
1 phr				1
3 phr				3
5 phr				5

โดยแผนภาพที่ 3.3 แสดงการเตรียมโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT  
ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหย



ภาพที่ 3.3 แสดงแผนภูมิการเตรียมโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT  
ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT โดยมีการเติมน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ แต่เนื่องจากเจลาตินและ PBAT มีความเข้ากันได้ไม่ดีจึงได้มีการเติม PBAT-g-MA เพื่อทำหน้าที่เป็น Compatibilizer ระหว่างวัฏภาค ทั้ง 2 สำหรับงานวิจัยนี้จะมีเจลาตินเป็นวัฏภาคหลักและมี PBAT เป็นวัฏภาครอง โดยจะแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

ตอนที่ 1 ศึกษาการเตรียมและสมบัติโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

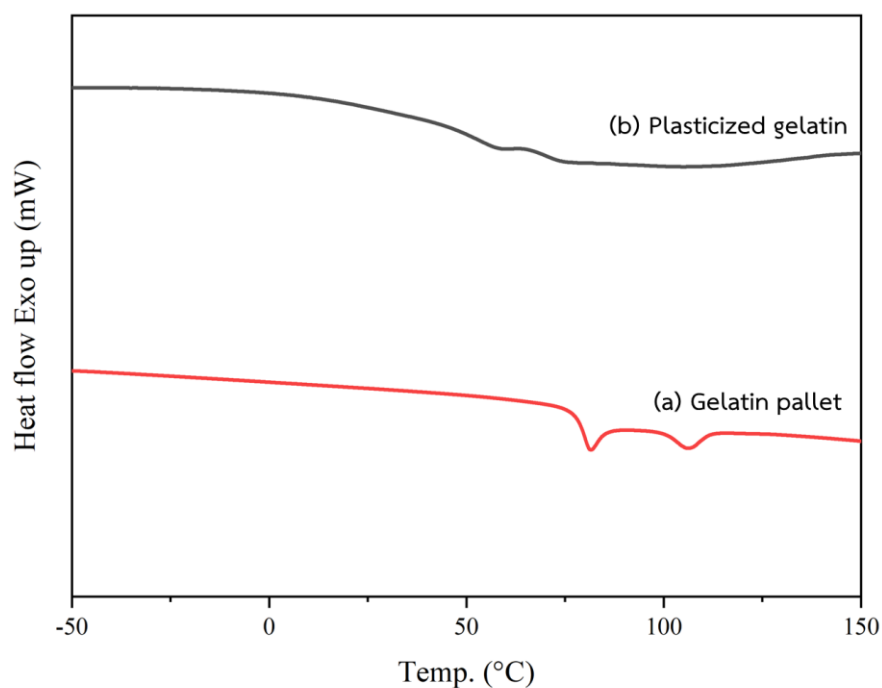
ตอนที่ 2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณ Blowing agent ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโพลีเมอร์ผสมจากโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

ตอนที่ 3 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโพลีเมอร์ผสมจากโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

#### 4.1 การศึกษาการเตรียมและสมบัติโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

##### 4.1.1 การศึกษาการเตรียมเจลาตินที่ถูกพลาสติกไซส์ (Plasticized gelatin) ด้วยการศึกษสมบัติทางความร้อนด้วย Differential Scanning Calorimeter (DSC)

ในงานวิจัยนี้มีการใช้เจลาตินเป็นโพลีเมอร์หลักในการเตรียมโพลีเมอร์ผสม เจลาตินเป็นโปรตีนประเภทหนึ่งประกอบไปด้วยกรดอะมิโนหลากหลายชนิด แต่เนื่องจากเจลาตินจะประกอบไปด้วยพันธะไฮโดรเจนจำนวนมากส่งผลทำให้กระบวนการขึ้นรูปเจลาตินทำได้ยาก ดังนั้นก่อนที่จะนำเจลาตินไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปจึงจำเป็นต้องนำเจลาตินมาผ่านกระบวนการพลาสติกไซส์เพื่อลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะไฮโดรเจนภายในสายโซ่ของเจลาตินก่อน สำหรับการทำให้พลาสติกไซส์จะใช้น้ำและกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) โดยจะทำการผสมเจลาติน น้ำ และกลีเซอรอล ในสัดส่วน 1 : 0.33 : 0.47 โดยน้ำหนัก แล้วทำการบ่มเป็นเวลา 12-18 ชั่วโมง จากนั้นจะนำของผสมที่เตรียมได้มาผ่านความร้อนและแรงเฉือนด้วยเครื่อง Twin screw extruder ได้เป็น Plasticized gelatin



ภาพที่ 4.1 แสดง DSC thermogram ในชั้นการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของ : (a) Gelatin pallet และ (b) Plasticized gelatin

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติทางความร้อนของเจลาตินที่ยังไม่ผ่านการพลาสติกไซส์ และเจลาตินที่ผ่านการพลาสติกไซส์ (Plasticized gelatin) จากการทดสอบ DSC

ตัวอย่าง	$T_g$ (°C) (1 heat)	$T_m$ (°C) (1 heat)	$T_g$ (°C) (2 heat)	$T_m$ (°C) (2 heat)
Gelatin pallet	79.43	105.75	-	-
Plasticized gelatin	56.07	-	59.05	-

สำหรับ Plasticized gelatin ที่เตรียมได้จะถูกนำมาพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วย Differential Scanning Calorimeter (DSC) จากผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วย DSC ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าเจลาตินที่ไม่ผ่านการพลาสติกไซส์จะมีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) เป็น 79.43 °C โดยจะพบ  $T_g$  เฉพาะการให้ความร้อนในครั้งที่ 1 เท่านั้น เนื่องจากเจลาตินที่ไม่ผ่านการพลาสติกไซส์จะประกอบไปด้วยพันธะไฮโดรเจนจำนวนมาก เมื่อได้รับความร้อนสายโซ่เจลาตินที่ถูกยึดเหนี่ยวด้วยพันธะไฮโดรเจนจะเคลื่อนไหวสายโซ่ได้ยาก เมื่อได้รับความร้อนที่มากขึ้น

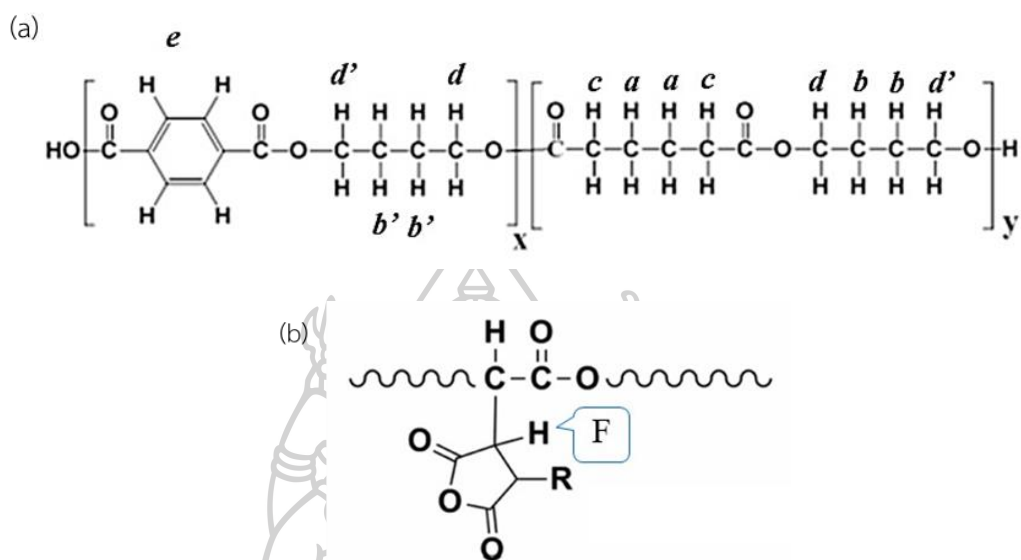
สายโซ่จะเกิดการเสียสภาพทำให้เมื่อทำการทดสอบต่อโดยการลดอุณหภูมิและให้ความร้อนอีกครั้งจึงไม่สามารถรายงานค่าได้ นอกจากนี้จะพบค่าอุณหภูมิหลอมผลึก ( $T_m$ ) เท่ากับ  $105.75\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่ Plasticized gelatin เมื่อทำการทดสอบจะพบ  $T_g$  ทั้งในการให้ความร้อนทั้งครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 โดยจะมีค่าเท่ากับ  $56.07$  และ  $59.05\text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่า  $T_g$  ของเจลาตินที่ไม่ผ่านการพลาสติกไซส์และ Plasticized gelatin จะเห็นว่า Plasticized gelatin จะมี  $T_g$  ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเจลาตินที่ไม่ผ่านการพลาสติกไซส์ เนื่องจากในกระบวนการการพลาสติกไซส์เจลาติน น้ำและกลีเซอรอลที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์จะเข้าไปแทรกและทำลายพันธะไฮโดรเจนสายโซ่ของเจลาติน ทำให้ปริมาณพันธะไฮโดรเจนของสายโซ่เจลาตินลดลง สายโซ่จึงสามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น ค่า  $T_g$  จึงมีค่าที่ต่ำลง ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของ S. Rivero และคณะ [41] ที่ทำการศึกษากการพลาสติกไซส์เจลาตินด้วยกลีเซอรอลที่อัตราส่วนต่างๆ โดยจะพบว่าเจลาตินที่ผ่านการพลาสติกไซส์แล้วจะมี  $T_g$  ที่ลดลงเมื่อเทียบกับผงเจลาตินที่ไม่ผ่านการพลาสติกไซส์ และจะมีค่า  $T_g$  ลดลงตามสัดส่วนการเติมกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้น

#### 4.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ PBAT-g-MA ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR)

ในงานวิจัยนี้ได้มีการเลือกใช้ PBAT-g-MA เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) ระหว่าง Plasticized gelatin และ PBAT เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้ง 2 มีความเป็นขั้วที่แตกต่างกันส่งผลทำให้เมื่อทำการผสมพอลิเมอร์ทั้งสอง จะทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองเข้ากันได้ไม่ดี โดย PBAT-g-MA สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่าง PBAT กับ MA โดยมี Luperox®101 ทำหน้าที่เป็น Initiator สำหรับการเกิดปฏิกิริยาการกราฟติดของ MA บนสายโซ่ของ PBAT ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) ซึ่งปฏิกิริยาการกราฟติดของ MA บนสายโซ่ของ PBAT สามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NMR

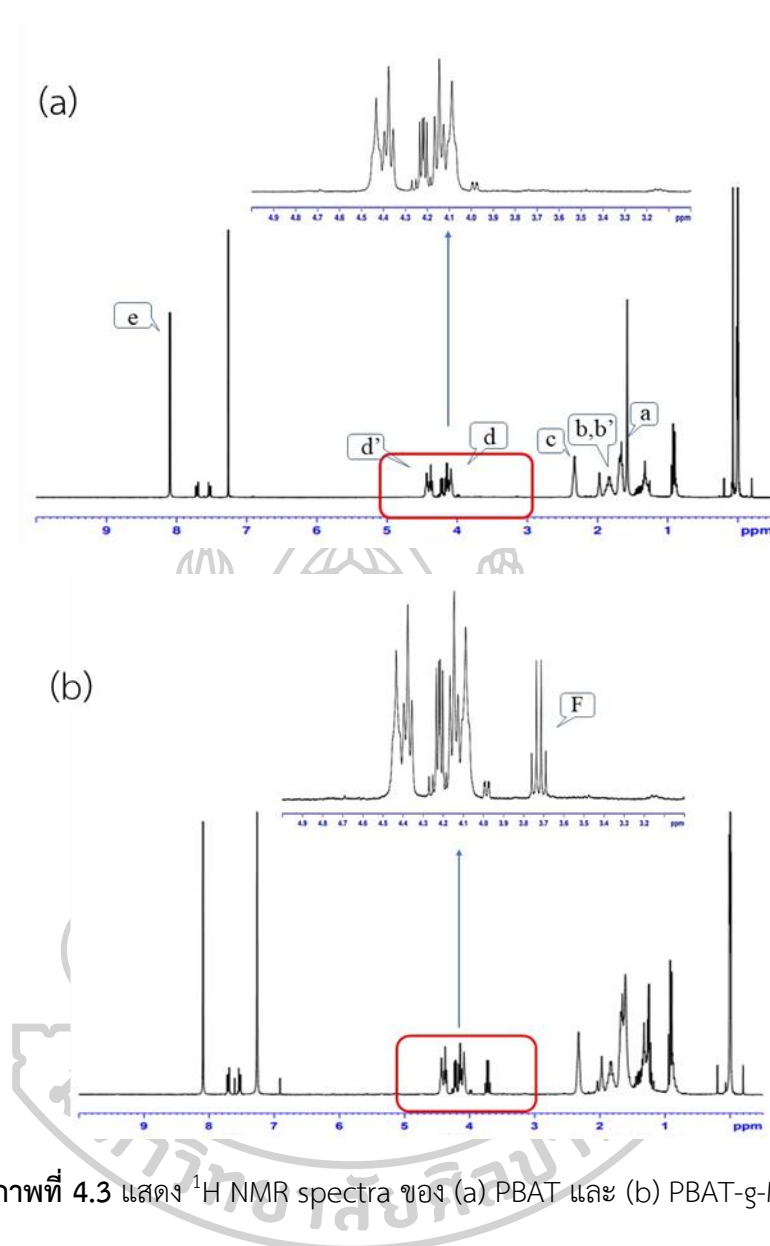
ภาพที่ 4.3 แสดง  $^1\text{H}$  NMR spectra ของ (a) PBAT และ (b) PBAT-g-MA จากภาพจะสังเกตเห็นได้ว่าทั้งตัวอย่าง PBAT และ PBAT-g-MA จะพบพีคเอกลักษณ์ที่เหมือนกัน ได้แก่ ที่ตำแหน่ง  $1.6\text{ ppm}$  เป็นพีคของโปรตอนที่ตำแหน่ง a (แสดงโครงสร้างในภาพที่ 4.2) และที่ตำแหน่ง  $1.8\text{-}1.9\text{ ppm}$  เป็นพีคของโปรตอนที่ตำแหน่ง b และ b' ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งของ Methylene protons ( $-\text{C}(\text{CH}_2)_2-\text{C}-$ ) นอกจากนี้ยังพบพีคที่ตำแหน่ง  $2.3\text{ ppm}$  เป็นพีคของโปรตอนที่ตำแหน่ง c ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งของโปรตอนที่อยู่ที่กับหมู่คาร์บอนิล ที่ตำแหน่ง  $4.0\text{-}4.1$  และ  $4.3\text{-}4.4\text{ ppm}$  จะแสดงพีคของโปรตอนที่ตำแหน่ง d และ d' ตามลำดับ ในตำแหน่งนี้จะแสดงถึงโปรตอนที่ตำแหน่งอยู่ติดกับ

หมู่เอสเทอร์ และจะพบพีคที่ตำแหน่ง 8.0 ppm ซึ่งเป็นพีคของโปรตอนตำแหน่ง e สำหรับพีคดังกล่าวจะเป็นพีคเอกลักษณ์ของ Aromatic protons ของ Terephthalic group ที่อยู่ในสายโซ่ของ PBAT



ภาพที่ 4.2 แสดงโครงสร้างของ (a) PBAT และ (b) PBAT-g-MA [42]

เมื่อพิจารณา  $^1\text{H}$  NMR spectra ของ PBAT-g-MA จะพบพีคเอกลักษณ์ที่แตกต่างจากพีคเอกลักษณ์ของ PBAT เล็กน้อย คือจะพบพีคที่ตำแหน่ง 3.7-3.8 ppm โดยพีคนี้เป็นพีคเอกลักษณ์ที่แสดงถึงโปรตอนตำแหน่ง F ที่อยู่ภายในโครงสร้างของ MA ซึ่งโปรตอนในตำแหน่งดังกล่าวจะเป็นโปรตอนที่อยู่ติดกับ Carbon atom ที่เกิดปฏิกิริยากับสายโซ่ของ PBAT แสดงให้เห็นถึงการกราฟติดของ MA บนสายโซ่ของ PBAT ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shahab Kashani Rahimi และคณะ [42] ที่ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่าง PBAT-g-MA และ Cellulose nanocrystal ได้ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของ PBAT-g-MA ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค NMR โดยจะพบพีคเอกลักษณ์ที่สำคัญที่ตำแหน่ง 3.7-3.8 ppm ซึ่งแสดงถึงการกราฟของ MA บนสายโซ่ PBAT เช่นกัน

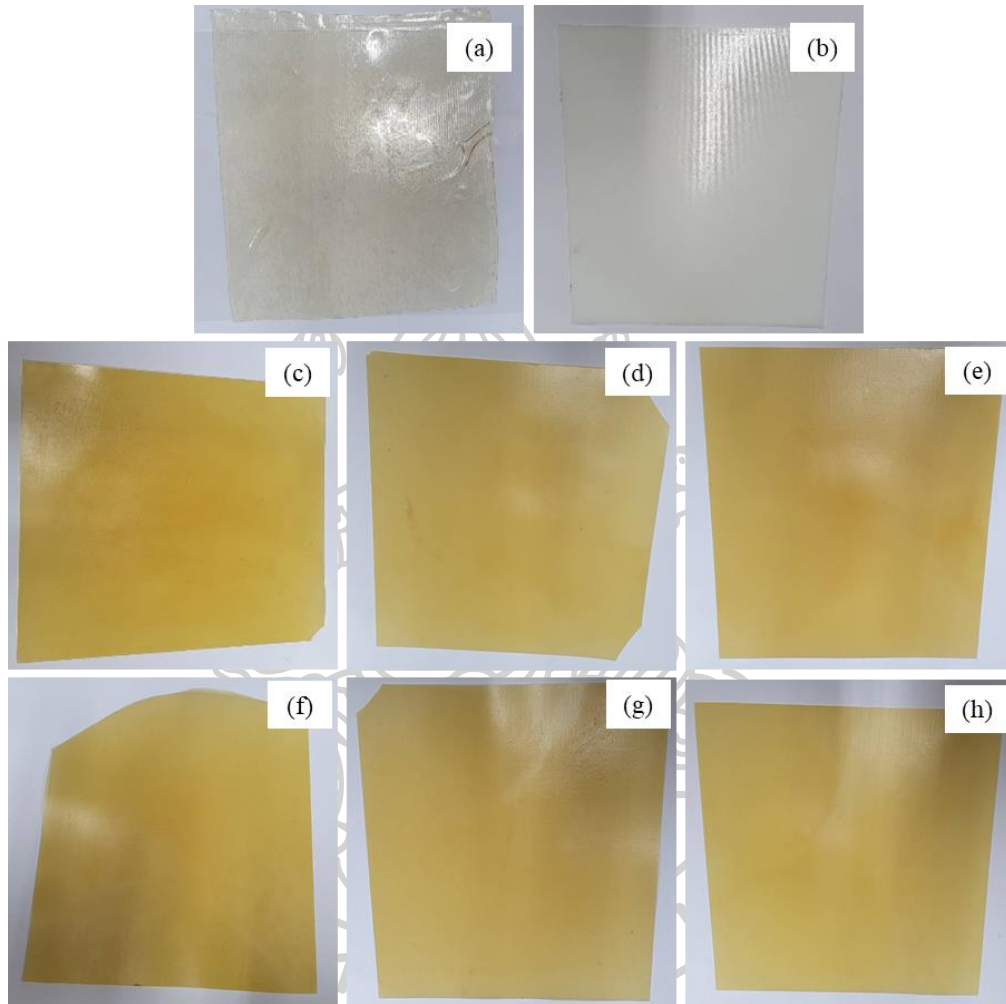


ภาพที่ 4.3 แสดง  $^1\text{H}$  NMR spectra ของ (a) PBAT และ (b) PBAT-g-MA

#### 4.1.3 การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่สัดส่วนการผสมต่างๆ ได้แก่ 70/30, 60/40 และ 50/50 โดยจะมีเจลาตินทำหน้าที่เป็นวัสดุหลักในพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้จะทำการเติม PBAT-g-MA ลงในพอลิเมอร์ผสมเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุของเจลาตินและ PBAT โดยจะมีการเติม PBAT-g-MA ในสัดส่วน 20% เมื่อเทียบกับปริมาณ PBAT ในพอลิเมอร์ผสม ตัวอย่างแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้จะแสดงในภาพที่ 4.4 ซึ่งในส่วนนี้จะ

ทำการศึกษาอิทธิพลของการเติม PBAT-g-MA ที่มีผลต่อสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม

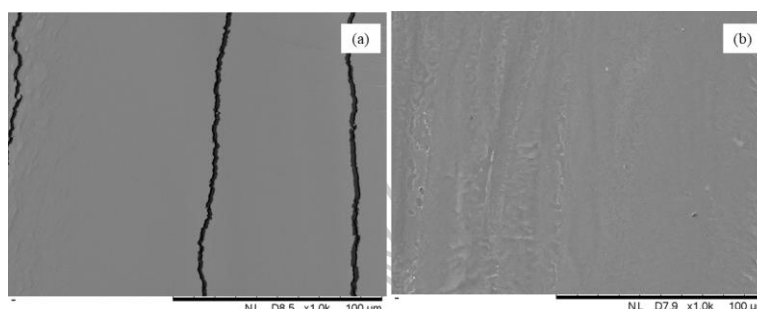


ภาพที่ 4.4 แสดงตัวอย่างแผ่นพอลิเมอร์เจลาติน PBAT และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีและไม่มี การเติม PBAT-g-MA : (a) 100/0, (b) 70/30, (c) 60/40, (d) 50/50, (e) 0/100, (f) 70/30/20, (g) 60/40/20 และ (h) 50/50/20



#### 4.1.3.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า สำหรับเจลาตินและ PBAT และที่กำลังขยาย 1500 เท่า สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT



ภาพที่ 4.5 แสดงสัณฐานวิทยาของ : (a) เจลาติน และ (b) PBAT ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

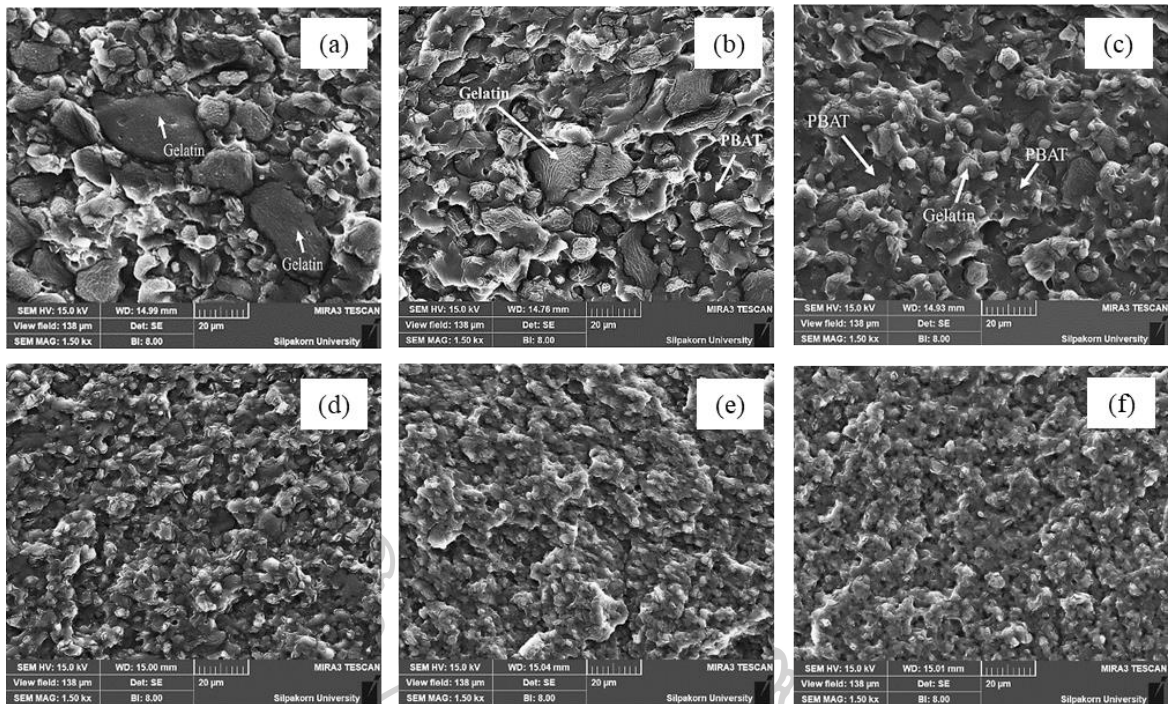
ภาพที่ 4.5 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเจลาตินและ PBAT ด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า โดย a จะแสดงตัวอย่างเจลาติน และ b แสดงตัวอย่าง PBAT จากภาพพบว่าตัวอย่างทั้ง 2 มีลักษณะเป็นวัฏภาคที่เรียบ แต่ในตัวอย่างเจลาตินจะเห็นได้ว่ามีรอยแตกเกิดขึ้นเนื่องจากในระหว่างขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบตัวอย่างจะถูกทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างยิ่งยวดทำให้วัฏภาคของเจลาตินที่มีความเปราะเกิดการหดตัวรวมถึงเมื่อชิ้นงานถูกนำเข้าสู่ระบบสุญญากาศทำให้ความชื้นที่อยู่ภายในวัฏภาคของเจลาตินถูกดึงออกไปด้วย วัฏภาคของเจลาตินจึงเกิดการหดตัวแล้วจึงเกิดเป็นลักษณะรอยแตกดังกล่าว

ภาพที่ 4.6 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีและไม่มี การเติม PBAT-g-MA ด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) ที่กำลังขยาย 1500 เท่า โดยในภาพ a-c จะแสดงตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มี การเติม PBAT-g-MA และภาพ d-f แสดงตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม PBAT-g-MA เพื่อทำหน้าที่เป็น Compatibilizer

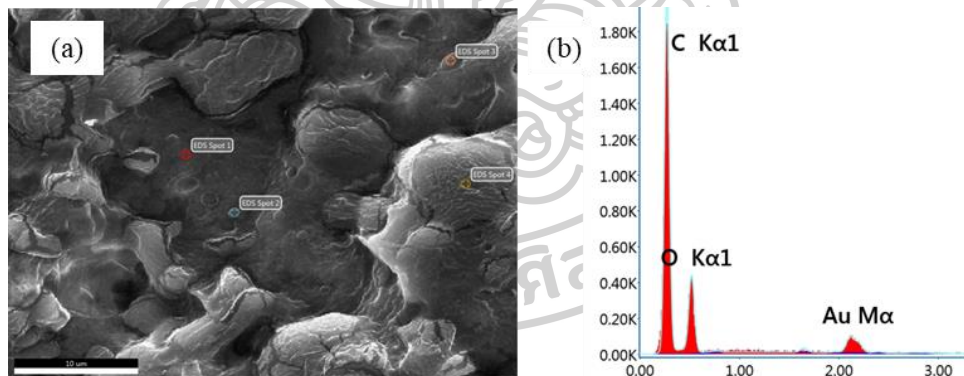
จากภาพตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่ไม่มี การเติม Compatibilizer จะพบว่าพอลิเมอร์ทั้งสองมีการแยกในวัฏภาคกันค่อนข้างชัดเจน โดยที่เจลาตินจะมีลักษณะรวมตัวกันเป็นก้อนที่มีรูปร่างไม่แน่นอนกระจายอยู่ รวมถึงวัฏภาคของเจลาตินจะมีลักษณะเป็นรอยแตกอยู่ทั้งในวัฏภาคของเจลาตินและรอบๆ ของในวัฏภาคเจลาตินซึ่งเป็นผลมาจากการหดตัวของวัฏภาค

เจลาตินในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง ในขณะที่วัฏภาคของ PBAT ปรากฏลักษณะของวัฏภาค 2 แบบ ได้แก่ ส่วนที่มีลักษณะเป็นวัฏภาคทรงกลมกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์ผสม และส่วนที่สองจะมีลักษณะเป็นพื้นผิวที่เรียบภายในพอลิเมอร์ผสม ลักษณะของวัฏภาคทั้ง 2 สามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS โดยในพื้นที่ที่เป็นรอยแตกจะพบธาตุองค์ประกอบ 3 ชนิด ได้แก่ C N และ H ซึ่งธาตุทั้ง 3 นี้เป็นธาตุองค์ประกอบของเจลาติน ในขณะที่พื้นผิวที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่องและบริเวณที่เป็นอนุภาคกลมๆ จะพบเพียงพิกที่แสดงถึงธาตุ C และ H เท่านั้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าบริเวณดังกล่าวคือส่วนของวัฏภาค PBAT ดังแสดงในภาพ 4.7

สำหรับลักษณะการแยกวัฏภาคกันระหว่างเจลาตินและ PBAT เกิดจากการที่พอลิเมอร์ทั้งสองมีความแตกต่างระหว่างขั้ว โดยเจลาตินเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นขั้วสูง ส่วน PBAT เป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นขั้วต่ำ ทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองมีความเข้ากันได้ไม่ดีจึงเกิดการแยกวัฏภาคกันดังกล่าว และเมื่อทำการพิจารณาพอลิเมอร์ผสมที่สัดส่วนการผสมต่างๆ จะพบว่าที่อัตราส่วน 70/30 ก่อนของเจลาตินจะมีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ เนื่องจากที่อัตราส่วนนี้จะเป็นอัตราส่วนที่มีปริมาณเจลาตินมากที่สุด ทำให้เจลาตินอาจเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่ ในขณะที่อัตราส่วน 60/40 และ 50/50 ซึ่งมีปริมาณเจลาตินลดลงตามลำดับ โดยขนาดของก้อนเจลาตินจะมีขนาดลดลงตามลำดับเช่นกัน ขณะเดียวกันที่อัตราส่วนที่ 60/40 และ 50/50 จะมีการเพิ่มขึ้นของสัดส่วน PBAT จะสังเกตเห็นว่าวัฏภาคของ PBAT มีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วนการผสมของ PBAT ที่มากขึ้นด้วย



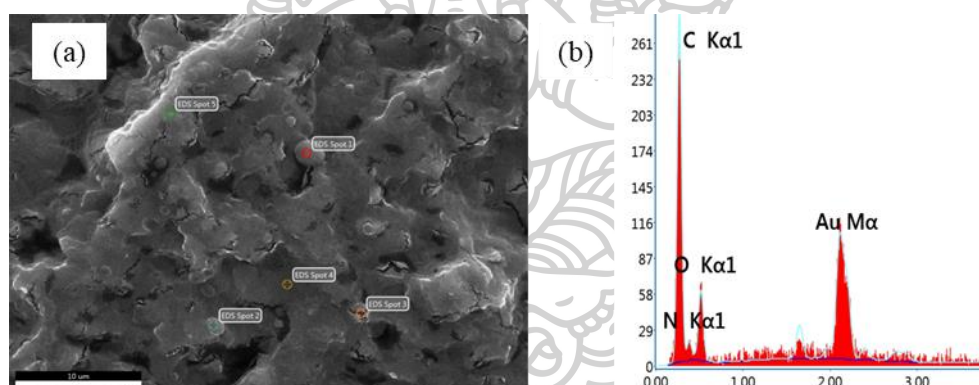
ภาพที่ 4.6 แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีและไม่มี การเติม PBAT-g-MA ที่กำลังขยาย 1500 เท่า : (a) 70/30, (b) 60/40, (c) 50/50, (d) 70/30/20, (e) 60/40/20 และ (f) 50/50/20



ภาพที่ 4.7 แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT อัตราส่วน 50/50 และ ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDAX

เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติม Compatibilizer ดังแสดง ในภาพที่ 4.6 (d-f) จะพบว่าพอลิเมอร์ทั้งสองมีลักษณะการแยกกันของวัฏภาคที่ลดลงเมื่อเทียบกับ พอลิเมอร์ผสมที่ไม่มี การเติม Compatibilizer สามารถสังเกตได้จากรอยแตกที่ไม่ชัดเจนบริเวณรอบๆ วัฏภาคของเจลาติน แสดงให้เห็นว่า PBAT บางส่วนที่มีความเข้ากันได้กับเจลาตินจะเข้าไปแทนที่

บริเวณที่เกิดการยุบตัวของเจลลาตินเนื่องจากการสูญเสียน้ำทำให้เราสังเกตเห็นรอยแตกได้ไม่ชัดเจน นอกจากนี้ยังสามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ดังแสดงในภาพที่ 4.8 โดยพบว่า บริเวณที่เป็นพื้นที่ผิวที่เรียบในพอลิเมอร์ผสมจะมีองค์ประกอบของธาตุ C N และ H ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าบริเวณดังกล่าวมีการผสมกันอยู่ระหว่างวัฏภาคของเจลลาตินและวัฏภาคของ PBAT และเมื่อทำการพิจารณาที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนการผสม 70/30/20 จะยังคงเห็นรอยแตกของวัฏภาคเจลลาตินอยู่ เป็นผลมาจากการที่ในตัวอย่างนี้ยังมีสัดส่วนของเจลลาตินที่มากอยู่ ทำให้สามารถมองเห็นวัฏภาคของเจลลาตินได้ชัดกว่าตัวอย่างอื่นๆ และเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ สัดส่วนการผสมเดียวกันแต่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA จะเห็นว่าพอลิเมอร์ทั้ง 2 มีความเข้ากันได้มากกว่า ทำให้ไม่สามารถมองเห็นขอบเขตของรอยแตกของวัฏภาคเจลลาตินที่ชัดเจน และเมื่อมีการเติมสัดส่วนของ PBAT ลงในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม PBAT-g-MA จะเห็นว่า จะพบรอยแตกของ วัฏภาคของเจลลาตินที่น้อยลงอย่างเห็นได้ชัดรวมถึงวัฏภาคทั้ง 2 มีความเข้ากันได้มากขึ้นด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 4.8 แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลลาตินและ PBAT อัตราส่วน 50/50/20 และผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDAX

#### 4.1.3.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของแผ่นพอลิเมอร์ผสมด้วย

##### Differential Scanning Calorimeter (DSC)

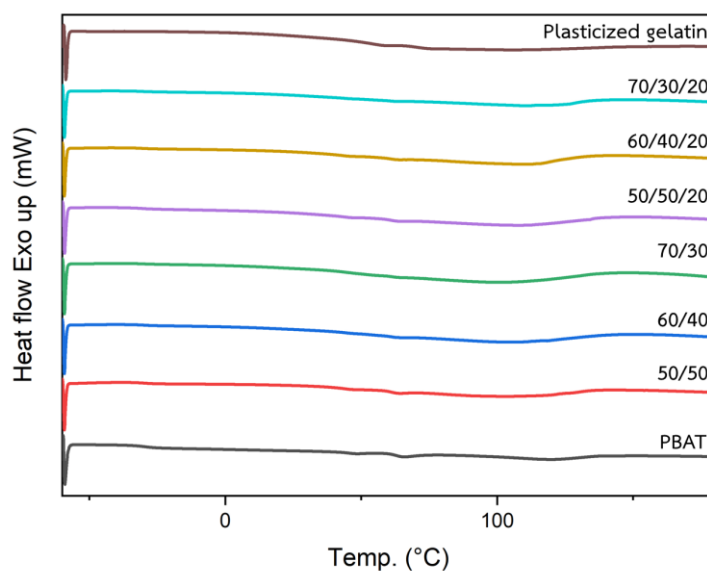
การศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลลาตินและ PBAT ด้วย Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยจะทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  ด้วยอัตราการให้ความร้อน  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ภายใต้สภาวะอากาศไนโตรเจน

ภาพที่ 4.9 แสดง DSC thermograms ของเจลาติน PBAT และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของเจลาติน PBAT และพอลิเมอร์ผสม สำหรับเจลาตินพบเพียง  $T_g$  เท่านั้น ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ  $56.07\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่ PBAT จะพบ  $T_g$  และ  $T_m$  มีค่าเท่ากับ  $-32.26\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $119.58\text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ สำหรับ  $\Delta H_m$  และปริมาณผลึกมีค่าเท่ากับ  $-25.07\text{ J/g}$  และ  $22.01\%$  ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์ผสมพบว่า พอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนจะแสดงค่า  $T_g$  2 ตำแหน่ง คือ  $T_{g1}$  เป็นส่วนของ PBAT และ  $T_{g2}$  เป็นส่วนของเจลาติน โดยที่  $T_g$  ทั้ง 2 ค่า นั้นจะมีค่าอุณหภูมิอยู่ระหว่าง  $T_g$  ของ Pure PBAT และ Pure plasticized gelatin ลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT เป็นระบบการผสมแบบเข้ากันได้บางส่วน ทำให้พบค่า  $T_g$  2 ตำแหน่งที่มีค่าอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง เมื่อทำการเปรียบเทียบพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ พบว่า ที่อัตราส่วนการผสม 70/30 พอลิเมอร์ผสมจะมีค่า  $T_{g1}$  เท่ากับ  $-27.32\text{ }^{\circ}\text{C}$  และเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมคือที่อัตราส่วน 60/40 และ 50/50 จะมีค่า  $T_{g1}$  เท่ากับ  $-28.18$  และ  $-30.89\text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมจะทำให้ค่า  $T_{g1}$  มีค่าลดลงหรือมีค่าเลื่อนเข้าใกล้ค่า  $T_g$  ของ PBAT ในขณะที่ค่า  $T_{g2}$  จะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมเช่นกัน คือที่อัตราส่วน 70/30 จะมีค่า  $T_{g2}$  เท่ากับ  $45.47\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่อัตราส่วน 60/40 จะมีค่า  $43.53\text{ }^{\circ}\text{C}$  และที่อัตราส่วน 50/50 จะมีค่าเท่ากับ  $37.94\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยลักษณะดังกล่าวเป็นผลมาจากสัดส่วนการผสมของ PBAT ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สายโซ่ภายในพอลิเมอร์ผสมเคลื่อนไหวได้ง่ายมากขึ้น ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ให้เข้าไปเพื่อจะนำไปใช้ทำให้สายโซ่เกิดการเคลื่อนไหวจึงใช้น้อยลงตามไปด้วย เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการหลอมผลึก ( $T_m$ ) และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่มีและไม่มีการเติม PBAT-g-MA ที่อัตราส่วนการผสมเดียวกันที่สัดส่วนการผสม 70/30 พบว่าจะมีลักษณะที่คล้ายกันคือพบ  $T_g$  2 ตำแหน่ง โดยที่พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม PBAT-g-MA จะมีค่า  $T_{g1}$  เท่ากับ  $-26.06\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจะมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมไม่มีการเติม PBAT-g-MA ที่มีค่า  $T_{g1}$  เท่ากับ  $-27.32\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่  $T_{g2}$  ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม PBAT-g-MA จะมีค่า  $T_{g2}$  เท่ากับ  $43.08\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยจะมีค่าต่ำลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA ที่มีค่า  $T_{g2}$  เท่ากับ  $45.47\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องมาจาก PBAT-g-MA ที่เติมลงไปจะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างวัฏภาคทั้ง 2 โดยจะทำให้ส่วนของสายโซ่ PBAT

เคลื่อนไหวได้ยากขึ้น  $T_{g1}$  จึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้ส่วนของสายโซ่เจลาตินเคลื่อนไหวได้ง่ายมากขึ้น  $T_{g2}$  จึงมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่สัดส่วนการผสมอื่นๆ ก็จะมีลักษณะที่คล้ายกัน

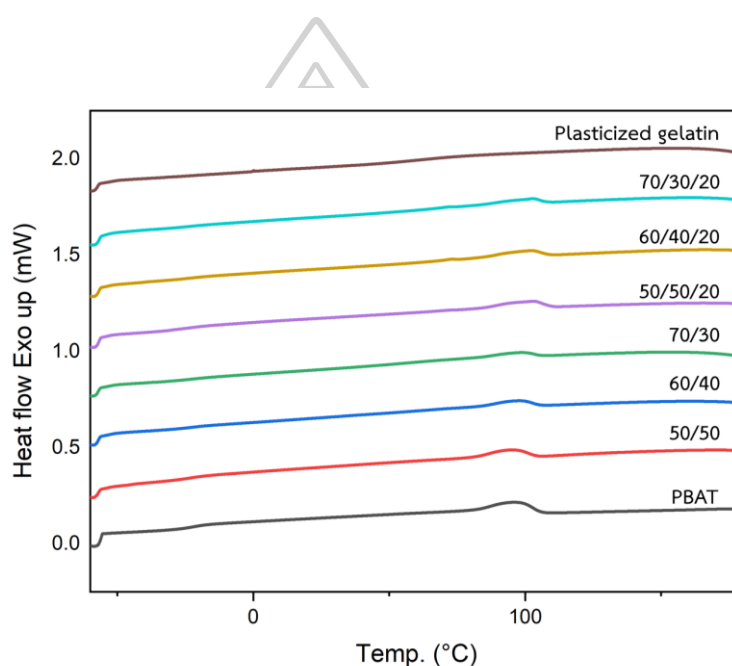


ภาพที่ 4.9 แสดง DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของ Plasticized gelatin PBAT และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีและไม่มีกรดเติม PBAT-g-MA

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า  $T_g$ ,  $T_m$ ,  $\Delta H_m$  และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่ได้จากการศึกษาด้วยเทคนิค DSC (ขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1)

ตัวอย่าง	$T_g$ (°C)		$T_m$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)	% Crystallinity
	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)			
Plasticized gelatin	-	56.07	-	-	-
70/30	-27.32	45.47	106.02	19.82	57.95
60/40	-28.18	43.53	106.77	25.42	55.75
50/50	-30.89	37.94	105.56	29.4	51.58
70/30/20	-26.06	43.08	111.1	19.15	55.99
60/40/20	-27.78	35.46	112.36	24.15	52.96
50/50/20	-29.71	30.33	112.37	29.38	51.54
PBAT	-32.26	-	119.58	25.09	22.01

นอกจากนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบที่สัดส่วนการผสม 70/30 พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม PBAT-g-MA จะมี  $T_m$  เท่ากับ  $111.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  และมีปริมาณผลึกเท่ากับ  $57.95\%$  ซึ่งสูงกว่าเมื่อเทียบ  $T_m$  และปริมาณผลึกของ 70/30 ที่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA ที่มีค่าเท่ากับ  $106.02\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $55.99\%$  ตามลำดับ ลักษณะดังกล่าวเป็นผลมาจากเมื่อมีการเติม PBAT-g-MA จะทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุภาคทั้ง 2 เพิ่มขึ้น ส่งผลให้พลังงานความร้อนที่ใช้เพื่อทำให้เกิดการหลอมผลึกจะต้องใช้เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน สำหรับตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม PBAT-g-MA ที่สัดส่วนการผสม 60/40 และ 50/50 จะมี  $T_m$  และปริมาณผลึกสูงกว่าเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA เช่นกัน



ภาพที่ 4.10 แสดง DSC thermogram ในขั้นการหลอมเย็น ของ Plasticized gelatin PBAT และ พอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีและไม่มีการเติม PBAT-g-MA

จากภาพที่ 4.10 แสดง DSC thermogram ในขั้นการหลอมเย็น และตารางที่ 4.3 แสดงค่า  $T_c$  และ  $\Delta H_c$  ของ Plasticized gelatin PBAT และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีและไม่มีการเติม PBAT-g-MA พบว่าพอลิเมอร์ผสมจะมีค่า  $T_c$  ซึ่งเป็น  $T_c$  ในส่วนของ PBAT ที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับ  $T_c$  ของ PBAT ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเจลาตินที่เติมลงไปมีส่วนทำให้สายโซ่ของ PBAT เกิดการตกผลึกได้ง่ายมากขึ้น อุณหภูมิที่ทำให้ PBAT เกิดการตกผลึกจึงสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบพอลิเมอร์ผสมที่มีและไม่มีการเติม PBAT-g-MA พบว่า ตัวอย่างที่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA จะมี  $T_c$  ที่

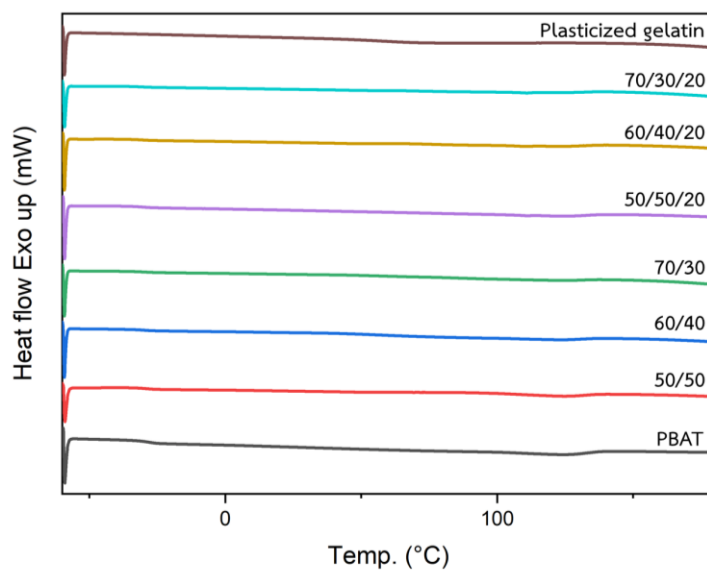
ต่ำกว่าตัวอย่างที่มีการเติม PBAT-g-MA ซึ่งเป็นผลมาจากความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ที่มากขึ้น ทำให้โอกาสที่สายโซ่ PBAT จะเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกจึงเกิดได้ง่ายกว่าและเร็วกว่า

**ตารางที่ 4.3** แสดงค่า  $T_c$  และ  $\Delta H_c$  ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่ได้จากการศึกษา ด้วยเทคนิค DSC (ขั้นตอนการเย็นตัว)

ตัวอย่าง	$T_c$ (°C)	$\Delta H_c$ (J/g)
Plasticized gelatin	-	-
70/30	97.50	6.72
60/40	96.75	8.47
50/50	94.42	8.78
70/30/20	102.42	6.98
60/40/20	101.75	8.92
50/50/20	100.99	10.76
PBAT	95.58	18.12

และเมื่อพิจารณาที่การให้ความร้อนในครั้งที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 4.11 และตารางที่ 4.4 พบว่าจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการให้ความร้อนในครั้งที่ 1 คือเมื่อมีการเพิ่มปริมาณสัดส่วนของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมจะทำให้ค่า  $T_{g1}$  และ  $T_{g2}$  มีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากสัดส่วนการผสมของ PBAT ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สายโซ่ภายในพอลิเมอร์ผสมเคลื่อนไหวได้ง่ายมากขึ้น ส่งผลให้  $T_g$  ทั้ง 2 มีค่าลดลง แต่ไม่ส่งผลให้ค่า  $T_m$  และปริมาณผลึกมีค่าแตกต่างกันมากนัก ในขณะที่เมื่อมีการเติม PBAT-g-MA จะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีค่า  $T_{g1}$  และ  $T_{g2}$  shift เข้าหากันมากยิ่งขึ้น แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ทั้ง 2 ภูมิภาคมีความเข้ากันได้มากขึ้น แต่การเติม PBAT-g-MA ไม่ส่งผลให้  $T_m$  และปริมาณผลึกมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน





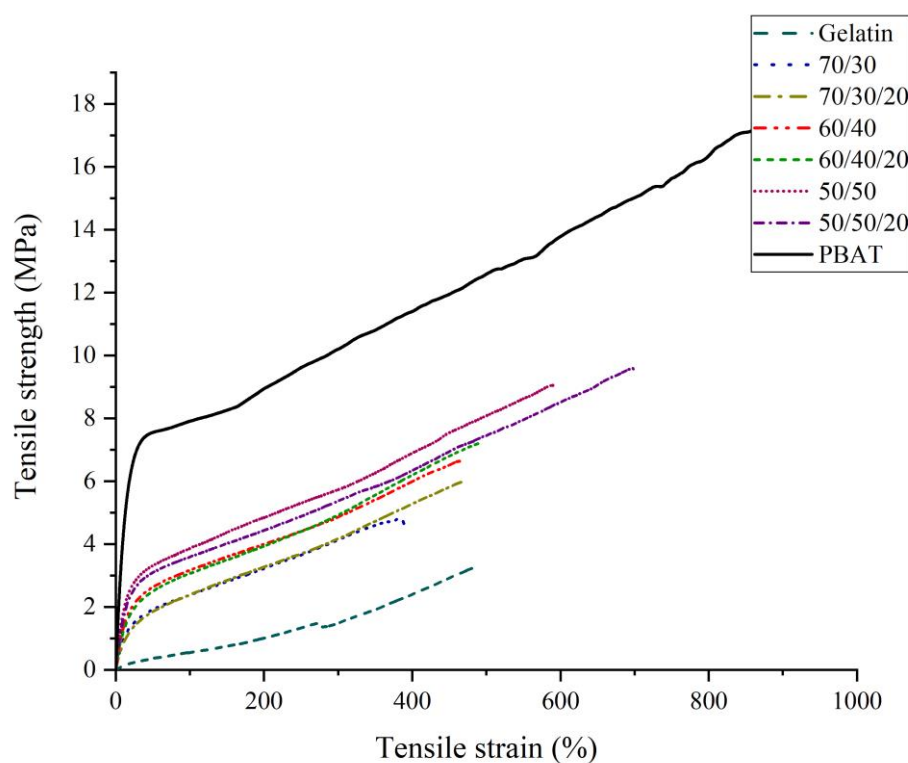
ภาพที่ 4.11 แสดง DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ Plasticized gelatin PBAT และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีและไม่มีกรดเติม PBAT-g-MA

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า  $T_g$ ,  $T_m$ ,  $\Delta H_m$  และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่ได้จากการศึกษาด้วยเทคนิค DSC (ขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2)

ตัวอย่าง	$T_g$ (°C)		$T_m$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)	% Crystallinity
	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)			
Plasticized gelatin	-	59.05	-	-	-
70/30	-26.8	41.29	113.53	4.26	12.46
60/40	-28.24	39.41	113.53	5.31	11.64
50/50	-30.31	38.83	113.17	5.19	9.11
70/30/20	-25.33	40.86	113.81	5.01	14.65
60/40/20	-26.45	34.61	113.35	5.03	11.03
50/50/20	-29.48	32.55	113.88	5.6	9.82
PBAT	-30.86	-	123.92	13.39	11.75

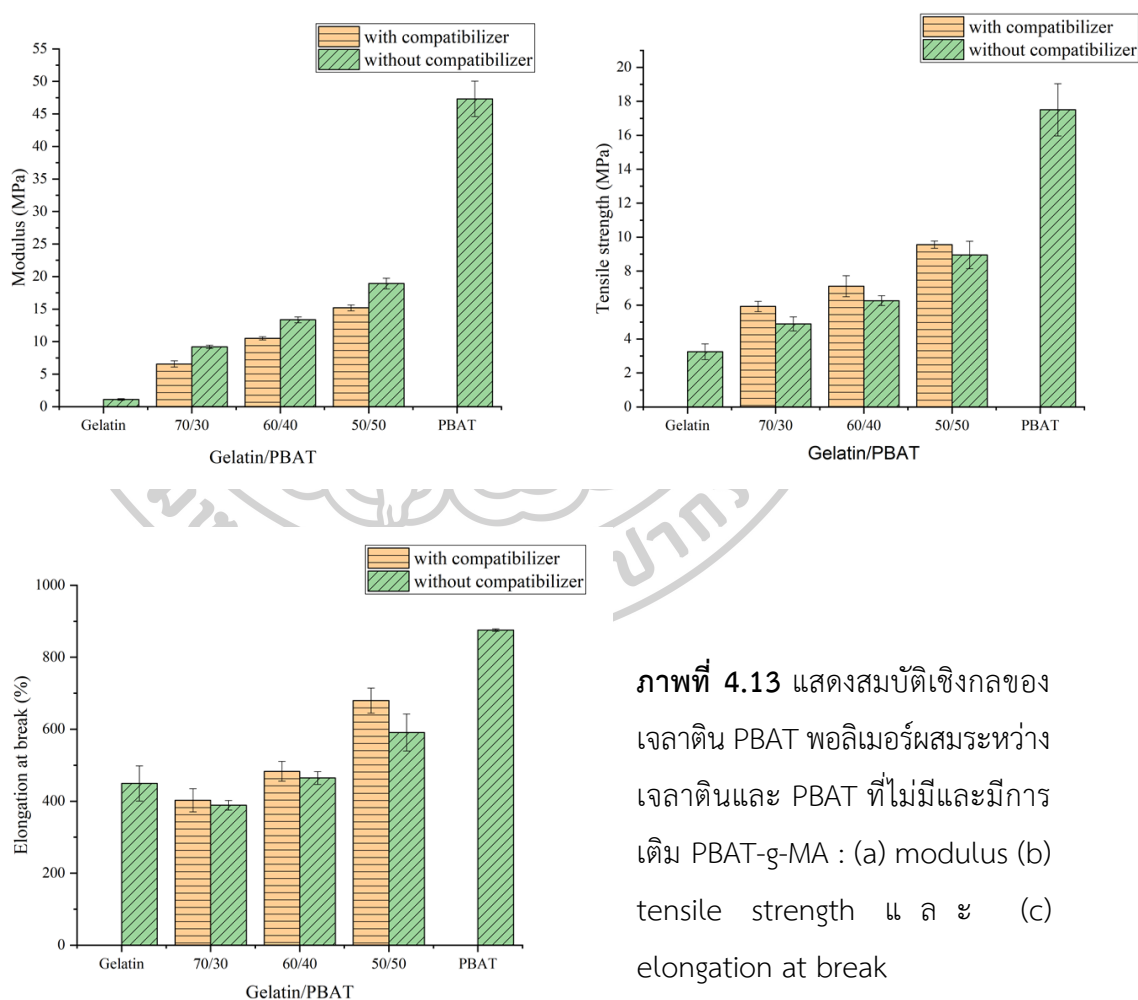
#### 4.1.3.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นพอลิเมอร์ผสมด้วยการทดสอบสมบัติการดึงยึด (Tensile testing)

การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีและไม่มี การเติม PBAT-g-MA โดยทำการทดสอบในโหมดการดึงยึด (Tension test) ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM D882 Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting ที่ความเร็วในการดึงขึ้นงาน 50 mm/min สำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกลสามารถบ่งบอกถึงลักษณะพฤติกรรมของพอลิเมอร์ผสมเมื่อได้รับแรงดึงยึด โดยจะรายงานค่าเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-strain curve) ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Modulus) ความสามารถในการต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และระยะยืดสูงสุดของชิ้นงาน ณ จุดขาด (Elongation at break) ดังแสดงในภาพที่ 4.12 และ 4.13



ภาพที่ 4.12 แสดง Stress strain curve ของเจลาติน PBAT พอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่ไม่มีและมีการเติม PBAT-g-MA

ภาพที่ 4.12 และ 4.13 แสดงสมบัติเชิงกลของเจลาติน PBAT พอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาติน และ PBAT ที่ไม่มีและมีการเติม PBAT-g-MA จากภาพพบว่า PBAT จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดในด้านของ Modulus Tensile strength และ Elongation at break ในขณะที่เจลาตินจะมีสมบัติเชิงกลด้อยที่สุด โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบพอลิเมอร์ผสมจะเห็นว่าพอลิเมอร์ผสมจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับเจลาติน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PBAT สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเจลาตินให้ดีขึ้นได้ ในขณะที่เมื่อสังเกตลักษณะของแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนการผสมที่แตกต่างกันจะสังเกตได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมก็จะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยในสูตร 50/50 จะมีสมบัติเชิงกลดีที่สุดใน



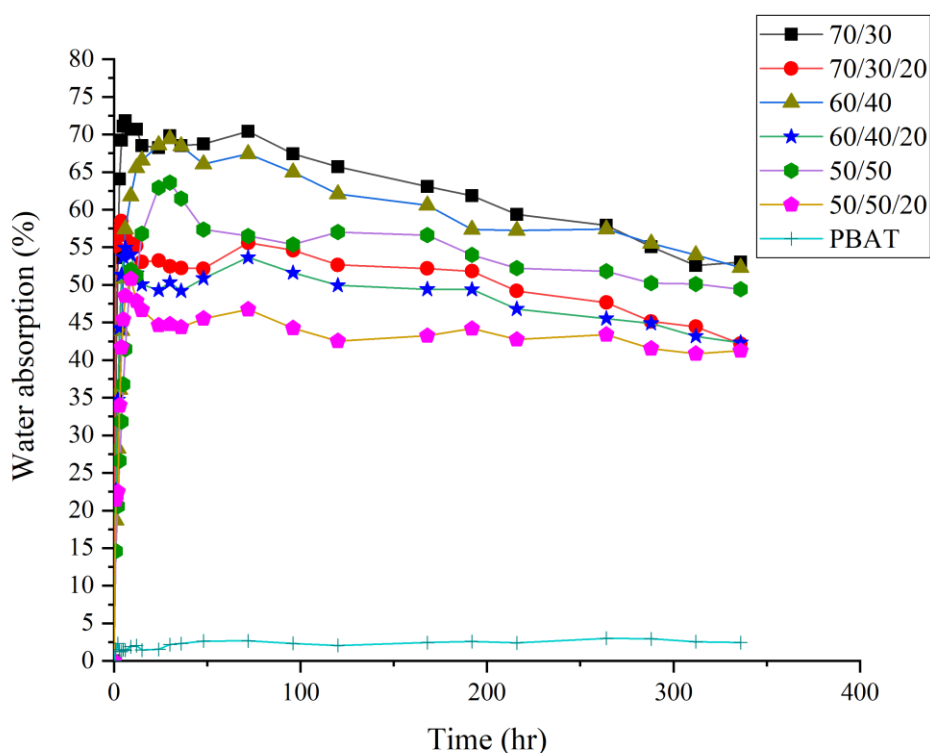
ภาพที่ 4.13 แสดงสมบัติเชิงกลของเจลาติน PBAT พอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่ไม่มีและมีการเติม PBAT-g-MA : (a) modulus (b) tensile strength และ (c) elongation at break

เมื่อทำการเปรียบเทียบพอลิเมอร์ผสมที่มีและไม่มีการเติม PBAT-g-MA จะพบว่าตัวอย่างที่ไม่มี การเติม PBAT-g-MA จะมี Tensile strength และ Elongation at break ที่ต่ำกว่าตัวอย่างที่มีการ

เติม PBAT-g-MA ซึ่งสอดคล้องกับผลของสัญญาณวิทยาที่แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA จะมีความเข้ากันระหว่างวัฏภาคไม่ดี ซึ่งส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวด้อยกว่า ในขณะที่ตัวอย่างที่มีการเติม PBAT-g-MA จะเห็นลักษณะสัญญาณวิทยาของทั้ง 2 วัฏภาคมีความเข้ากันได้ดีกว่า ซึ่งส่งผลทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นด้วย

#### 4.1.3.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซึมน้ำของแผ่นพอลิเมอร์ผสม (Water absorption)

สำหรับความสามารถในการดูดซึมน้ำของแผ่นพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นอยู่กับสมบัติความเป็นขั้วของพอลิเมอร์ โดยพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วหรือมีความเป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) จะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ต่ำ ตัวอย่างพอลิเมอร์ประเภท Hydrophobic เช่น พอลิเมอร์ในกลุ่มพอลิโอเลฟิน (Polyolefin) ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีขั้วหรือมีความเป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) จะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สูงกว่า ตัวอย่างพอลิเมอร์ประเภทนี้ เช่น พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl) หมู่เอมีน (Amine) และหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl)



ภาพที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของ PBAT พอลิเมอร์ผสมระหว่าง เจลาตินและ PBAT ที่มีและไม่มี การเติม PBAT-g-MA ที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ

ภาพที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของแผ่นพอลิเมอร์และแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่เวลาต่างๆ สำหรับความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์จะแปรผันตรงกับน้ำหนักของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น โดยตัวอย่าง Plasticized gelatin จะไม่สามารถรายงานได้เนื่องจาก Plasticized gelatin มีความเป็น Hydrophilic ที่สูง ทำให้มีความสามารถดูดซึมน้ำรวมถึงละลายน้ำได้ดี โดยในระหว่างการทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมงแผ่น Plasticized gelatin เกิดการละลายไปจนหมด จึงไม่สามารถรายงานค่าการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ดังกล่าวได้ ในขณะที่ตัวอย่าง PBAT พบว่าจะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่น้อยมากเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมชนิดอื่นๆ เนื่องจาก PBAT เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติความเป็นขั้วที่ต่ำ ทำให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำด้วยเช่นกัน

เมื่อพิจารณาตัวอย่างของแผ่นพอลิเมอร์ผสม พบว่าความสามารถในการดูดซึมน้ำของแผ่นพอลิเมอร์ผสมแต่ละอัตราส่วนจะมีลักษณะการดูดซึมน้ำที่คล้ายกัน โดยจะมีน้ำหนักของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างเริ่มต้นก่อนทำการทดสอบ เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมมีส่วนของ Plasticized gelatin ที่มีหมู่เอมีนซึ่งมีความเป็นขั้วสูง ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีลักษณะเป็น Hydrophilic จึงสามารถดูดซึมน้ำได้ดี น้ำหนักของตัวอย่างจึงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยในช่วงแรกน้ำหนักของแผ่นพอลิเมอร์ตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งแสดงถึงอัตราการดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่สามารถดูดซึมได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรก ในขณะที่เมื่อเวลาผ่านไปจะเห็นได้ว่าอัตราการการดูดซึมน้ำจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และเมื่อเวลาผ่านไปความสามารถในการดูดซึมน้ำจะลดลงและค่อยๆ คงที่ โดยการลดลงอัตราการดูดซึมของพอลิเมอร์ผสมซึ่งสอดคล้องกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ลดลงเป็นผลมาจากความเป็นขั้ว Plasticized gelatin ซึ่งความเป็น Hydrophilic ของพอลิเมอร์นอกจากจะมีผลทำให้พอลิเมอร์สามารถดูดซึมน้ำได้ดีแล้ว ยังมีผลทำให้พอลิเมอร์สามารถละลายน้ำได้ดีเช่นกัน ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปส่วนของ Plasticized gelatin ก็จะละลายน้ำไปด้วยเช่นกัน ทำให้น้ำหนักของตัวอย่างมีค่าค่อยๆ ลดลง

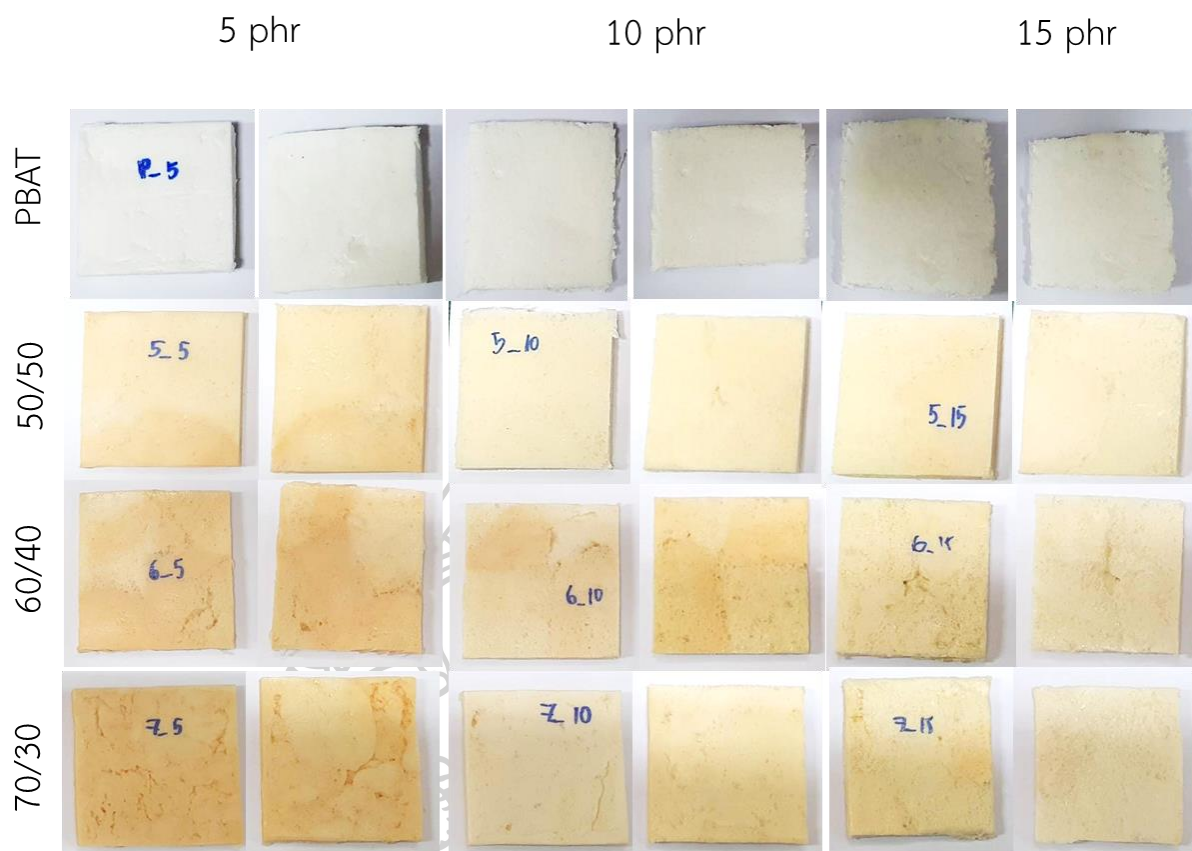
เมื่อทำการเปรียบเทียบตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าที่อัตราส่วนการผสม 70/30 จะมีอัตราการดูดซึมน้ำที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนการผสมอื่นๆ โดยที่อัตราส่วนการผสม 60/40 และ 50/50 จะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ลดลงตามลำดับ เนื่องจากที่อัตราส่วน 70/30 จะมีสัดส่วนของ Plasticized gelatin ที่มากทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเป็น Hydrophilic ที่มากด้วยเช่นกัน ในขณะที่อัตราส่วน 60/40 และ 50/50 จะมีสัดส่วนของ Plasticized gelatin ลดลงตามลำดับ จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำลดลงตามลำดับเช่นกัน ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้สามารถพบได้ทั้งในตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีและไม่มีกรดเติม PBAT-g-MA และเมื่อทำการเปรียบเทียบ

ตัวอย่างที่มีและไม่มีการเติม PBAT-g-MA ที่สัดส่วนการผสมเดียวกัน จะพบว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA จะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการเติม Compatibilizer เนื่องจาก PBAT-g-MA ที่เติมลงไปจะทำให้ส่วนของ Plasticized gelatin และ PBAT มีความเข้ากันได้มากขึ้น ซึ่งความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองแสดงในลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ศึกษาจาก SEM อีกทั้ง MA จากส่วนของ PBAT-g-MA จะเข้าทำปฏิกิริยากับส่วนที่มีขั้วภายในโครงสร้างของเจลาติน ทำให้ส่วนที่เป็นขั้วของเจลาตินที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจน (H-bonding) กับน้ำมีจำนวนที่ลดลง จากปัจจัยดังกล่าวส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ku Marsilla Ku Ishak [43] ที่ทำการศึกษาศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS กับโพรตีนเทอร์โมพลาสติก โดยจะมีการเติม Compatibilizer เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ทั้ง 2 โดยจากการศึกษาความสามารถในการดูดซึมน้ำ พบว่าการเติม Compatibilizer จะทำให้พอลิเมอร์ผสมที่มีจะสามารถในการดูดซึมน้ำที่ต่ำลง

จากการศึกษาการเตรียมแผ่นพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT พบว่าการเติม PBAT-g-MA ลงในพอลิเมอร์ผสมจะช่วยให้วัสดุภาคทั้ง 2 มีความเข้ากันได้มากขึ้น โดยสามารถยืนยันได้จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM และการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC โดยความเข้ากันได้ที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลทำให้พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น และมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ลดลง ดังนั้นในส่วนถัดไปจึงเลือกนำเอาพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม PBAT-g-MA ไปใช้ในการเตรียมโฟมพอลิเมอร์ผสมต่อไป

#### 4.2 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณ Blowing agent ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

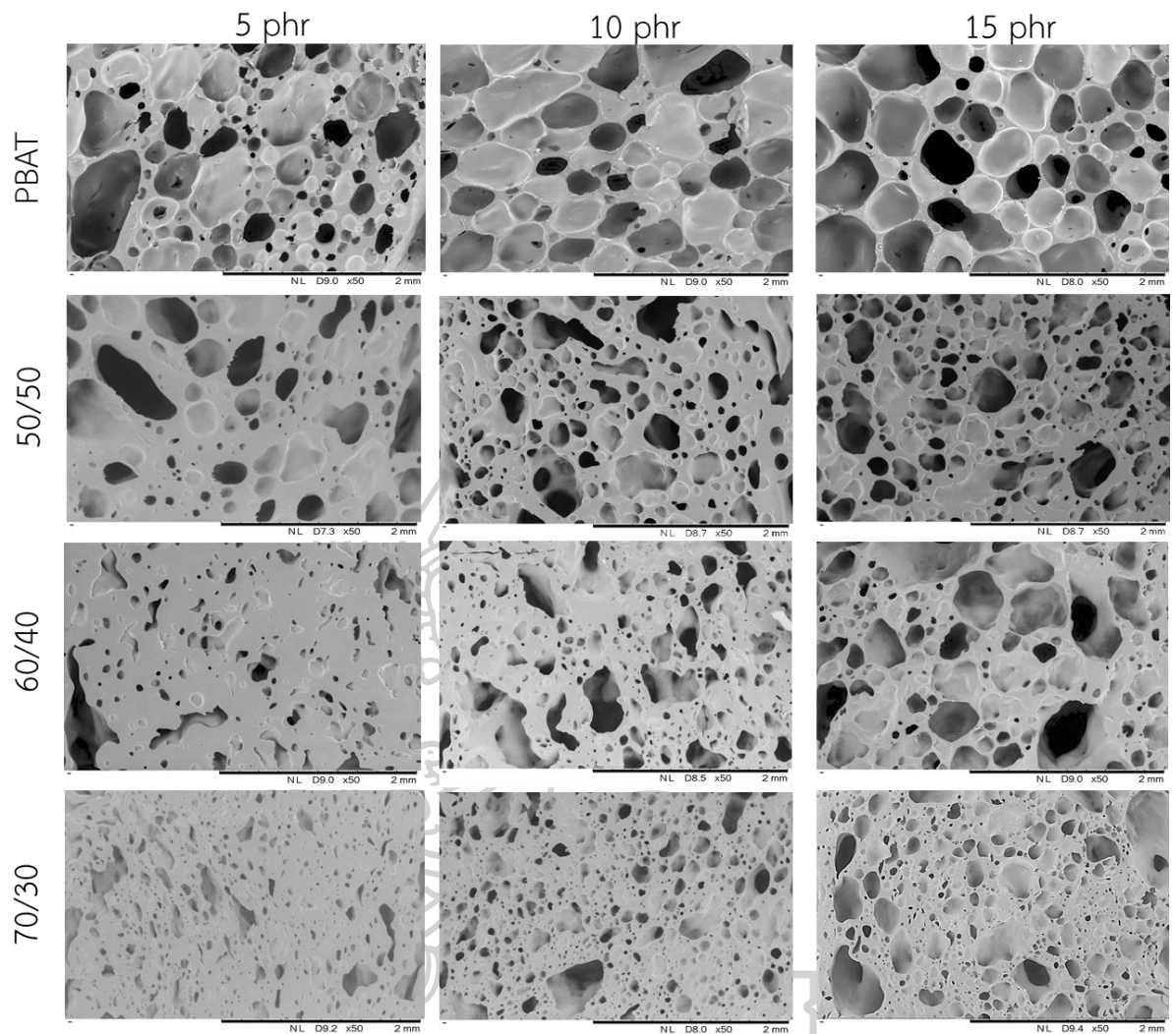
สำหรับตอนที่ 2 จะเป็นการศึกษาอิทธิพลของปริมาณ Blowing agent ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT โดยจะมีการเติม OBSH เพื่อทำหน้าที่เป็น Blowing agent ในสัดส่วน 5, 10 และ 15 phr ลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วน 70/30, 60/40, 50/50 และ 0/100 และจะมีการเติม PBAT-g-MA เพื่อทำหน้าที่เป็น Compatibilizer 20% เมื่อเทียบกับสัดส่วนของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสม ทำการผสมด้วยเครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill) และขึ้นรูปด้วยเครื่อง Compression Molding ที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 2 นาที จะได้ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมดังแสดงในภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 แสดงชิ้นงานโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ

#### 4.2.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ผสมด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT จะทำการศึกษาด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) ที่กำลังขยาย 50 เท่า และทำการศึกษขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ด้วยโปรแกรม Image J โดยทำการพิจารณาการกระจายตัวของเซลล์โพลีเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ



ภาพที่ 4.16 แสดงสัณฐานวิทยาของโพลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ

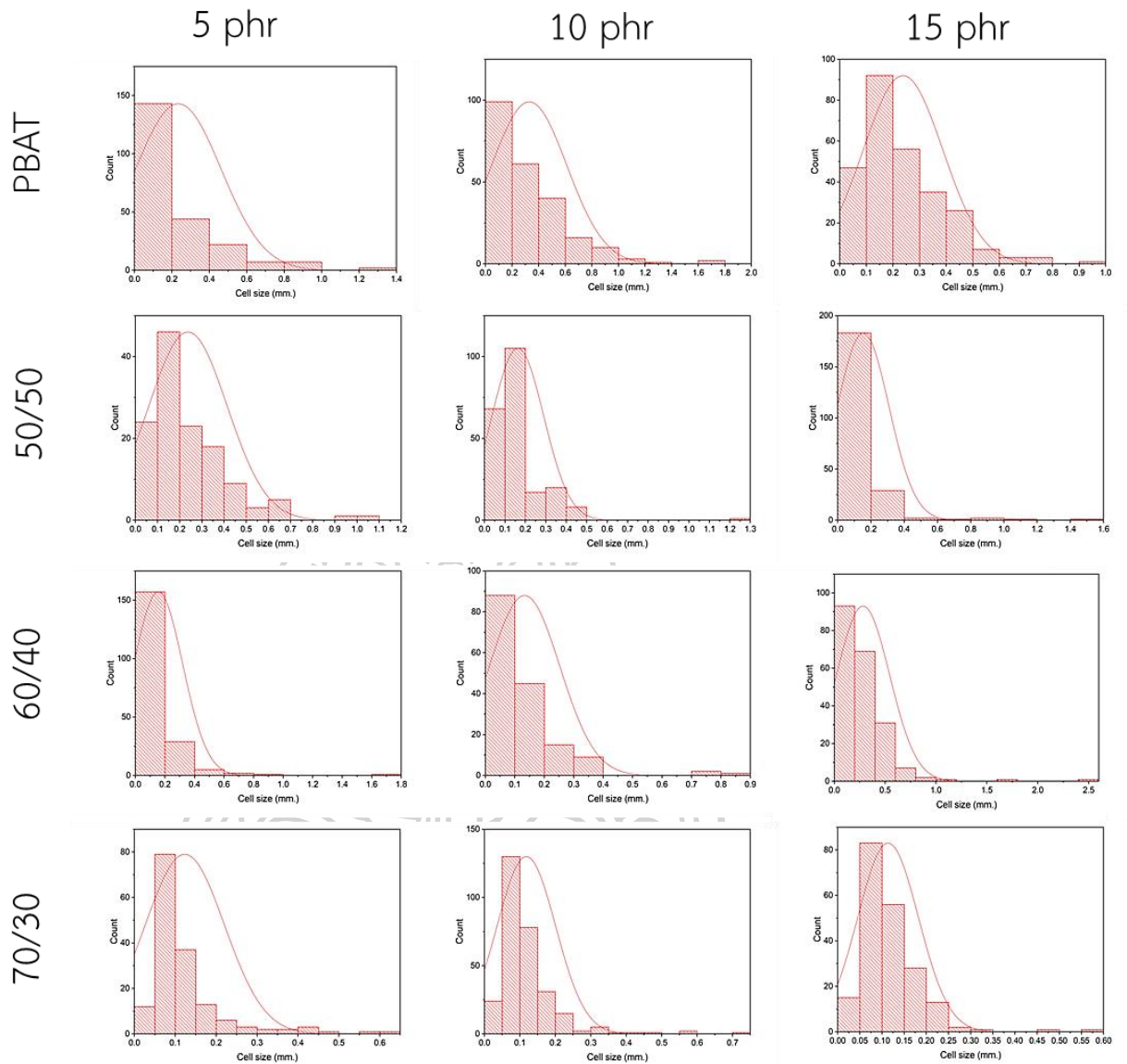
สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานโพลิเมอร์และโพลิเมอร์ผสมจะสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้เฉพาะ PBAT และโพลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ เท่านั้น จะไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานโพลิเมอร์เจลาตินได้ เนื่องจากในขั้นตอนการผสมโพลิเมอร์กับ Blowing agent จะทำการผสมภายใต้สภาวะการให้ความร้อน เมื่อ Blowing agent ได้รับความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาและแตกตัวทำให้มีฟองแก๊สเกิดขึ้นในระบบ สำหรับระบบโพลิเมอร์เจลาติน เมื่อมีฟองแก๊สเกิดขึ้นในระบบเจลาตินไม่สามารถคงรูปฟองแก๊สได้ ทำให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะไม่สามารถคงรูปและแตกออกจนไม่สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ ในขณะที่ระบบของ PBAT และโพลิเมอร์ผสม จะมีส่วนของ PBAT ที่มีลักษณะโครงสร้างที่ผ่านการเชื่อมขวาง จึงมี



ร่างแหเพื่อช่วยคงรูปฟองแก๊สที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงสามารถเตรียมโพลีเมอร์ PBAT และโพลีเอสเตอร์ผสมได้

ภาพที่ 4.16 แสดงสัณฐานวิทยาของโพลีเอสเตอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อทำการพิจารณาที่ตัวอย่างโพลีเมอร์ PBAT ดังแสดงในภาพที่ 4.16 พบว่า ลักษณะของเซลล์โพลีเมอร์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะรูปร่างทั้งที่เป็นทรงกลมและทรงรี โดยจะมีขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ทั้งเล็กและใหญ่ปะปนกันไป เมื่อเปรียบเทียบผลของการเติม Blowing agent พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ Blowing agent จะทำให้เซลล์โพลีเมอร์ที่ได้มีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ขึ้นรวมถึงจะมีปริมาณเซลล์โพลีเมอร์ต่อ 1 หน่วยพื้นที่ (ปริมาณเซลล์โพลีเมอร์/พื้นที่) ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

เมื่อพิจารณาสัณฐานวิทยาตัวอย่างโพลีเอสเตอร์ผสมในภาพ 4.16 และการกระจายตัวของขนาดเซลล์โพลีเมอร์ของโพลีเอสเตอร์ผสมในภาพที่ 4.17 จะพบว่าโพลีเอสเตอร์ผสมที่เตรียมได้จะมีลักษณะเป็นโพลีเมอร์แบบเซลล์เปิดและเซลล์โพลีเมอร์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะรูปร่างและขนาดที่ไม่แน่นอน ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นผลมาจากโครงสร้างของโพลีเอสเตอร์ผสม โดยที่ส่วนของเจลาตินจะไม่สามารถคงรูปฟองแก๊สที่เกิดขึ้นได้ ทำให้เซลล์โพลีเมอร์ของโพลีเอสเตอร์ที่ได้มีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน เมื่อพิจารณาโพลีเอสเตอร์ผสมที่มีอัตราส่วนการเติม Blowing agent ที่เท่ากัน พบว่า โพลีเอสเตอร์ผสมที่อัตราส่วน 70/30 จะมีเซลล์โพลีเมอร์เกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยและมีขนาดเซลล์โพลีเมอร์ที่ค่อนข้างเล็กเมื่อเทียบกับอัตราส่วนของผสมอื่นๆ ลักษณะดังกล่าวซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของเจลาตินในโพลีเอสเตอร์ผสม โดยที่อัตราส่วนนี้จะมีปริมาณเจลาตินมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shane D. Frazier และคณะ [33] ที่ได้ทำการเตรียมโพลีเอสเตอร์ผสมเจลาตินด้วยกระบวนการ Evaporation-based method พบว่าเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของเจลาตินจะทำให้โพลีเอสเตอร์ที่ได้มีขนาดเซลล์โพลีเมอร์เล็กลง อย่างไรก็ตามในกรณีนี้เมื่อโพลีเอสเตอร์ผสมได้รับความร้อนในขั้นตอนการขึ้นรูปทำให้เมื่อมีฟองแก๊สเกิดขึ้นในระบบโพลีเอสเตอร์จะสามารถกักเก็บและคงรูปฟองแก๊สได้น้อย ทำให้มีปริมาณเซลล์โพลีเมอร์/พื้นที่ต่ำและมีเซลล์โพลีเมอร์ขนาดเล็ก และเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนของ PBAT ในโพลีเอสเตอร์ผสมเป็น 60/40 และ 50/50 จะพบว่าโพลีเอสเตอร์ผสมจะมีปริมาณเซลล์โพลีเมอร์/พื้นที่และขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ที่เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการเติม PBAT ที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.17 แสดงการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมของโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ

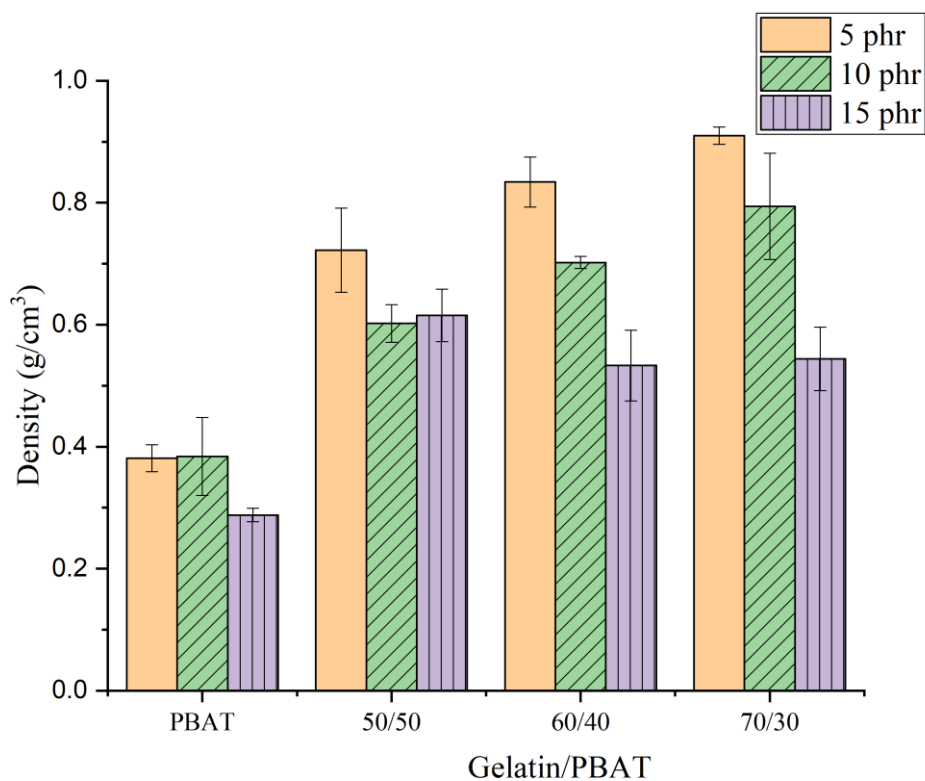
สำหรับเปรียบเทียบผลของปริมาณ Blowing agent ในโพลีเมอร์ผสม จะพบว่าที่อัตราส่วนการผสมเดียวกัน เมื่อมีการเพิ่มปริมาณ Blowing agent จะทำให้มีปริมาณเซลล์โฟม/พื้นที่มากขึ้น ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องมาจากปริมาณ Blowing agent ที่เพิ่มขึ้นทำให้เมื่อเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวจะทำให้มีฟองแก๊สเกิดขึ้นในระบบมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Weawboon Yamsaengsung และคณะ [44] ที่ได้ทำการศึกษผลของการเติม OBSH ในโพลี

EPDM พบว่าเมื่อมีเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ OBSH จะทำให้โฟมที่ได้มีความเป็นรูพรุนที่มากขึ้น แต่สำหรับในกรณีของการเติม Blowing agent 15 phr จะพบว่าโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนส่วนของเจลาติน/PBAT เป็น 50/50 จะมีลักษณะของเซลล์โฟมรวมถึงการกระจายตัวของเซลล์โฟมค่อนข้างสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับโฟมพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วนอื่นๆ ที่มีการเติม Blowing agent 15 phr

ลักษณะดังกล่าวนี้จะสอดคล้องกับลักษณะชิ้นงานที่เตรียมได้ที่แสดงในภาพ 4.15 จากภาพจะเห็นได้ว่าโฟม PBAT จะมีลักษณะการฟูขึ้นอย่างชัดเจน และมีเซลล์โฟมที่ผิวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ในขณะที่ชิ้นงานโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนของเจลาตินในพอลิเมอร์ผสมที่มากจะมีการฟูที่ค่อนข้างน้อยกว่า รวมถึงความสม่ำเสมอของเซลล์โฟมที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่าอัตราส่วนอื่นๆ เช่นกัน โดยจะสังเกตได้อย่างชัดเจนที่อัตราส่วนการส่วนของเจลาติน/PBAT เป็น 70/30 ที่มีการ Blowing agent 5 phr (70/30\_5) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เตรียมได้จะมีเซลล์โฟมเกิดขึ้นที่ผิวน้อยมาก รวมถึงชิ้นงานที่ได้จะค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมเป็น 60/40 และ 50/50 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานจะมีความสม่ำเสมอและมีเซลล์โฟมที่ผิวเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ในทำนองเดียวกันเมื่อมีเพิ่ม Blowing agent จาก 5 phr เป็น 10 และ 15 phr ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าชิ้นงานจะมีความสม่ำเสมอและมีเซลล์โฟมที่ผิวเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

#### 4.2.2 การศึกษาความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

การศึกษาความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์และโฟมพอลิเมอร์ผสมสามารถศึกษาได้จากการวัดด้วยเครื่อง Density kit โดยผลการศึกษาที่ได้จะแสดงในรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.5 จากการศึกษาพบว่า โฟม PBAT จะมีความหนาแน่นต่ำที่สุด โดยแนวโน้มของความหนาแน่นจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ Blowing agent ซึ่งสอดคล้องกับฐานวิทยาของโฟม PBAT ที่แสดงในภาพที่ 4.16 โดยปริมาณ Blowing agent ที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลทำให้เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวและเกิดฟองแก๊สขึ้นในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โฟมที่เตรียมได้มีปริมาณเซลล์โฟมที่เพิ่มขึ้นด้วย ปริมาณเซลล์โฟมที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้ส่วนของผนังเซลล์หรือพอลิเมอร์ส่วนที่ไม่เกิดรูพรุนมีปริมาณที่ลดลง ดังนั้นน้ำหนักหรือความหนาแน่นของโฟมที่วัดได้จึงลดลงตามไปด้วย



ภาพที่ 4.18 แสดงความหนาแน่นของโพลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 4.5 แสดงความหนาแน่นของโพลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ

Sample (Gelatin/PBAT)	Density (g/cm <sup>3</sup> )		
	5 phr	10 phr	15 phr
PBAT (0/100)	0.38±0.02 <sup>e</sup>	0.38±0.06 <sup>e</sup>	0.29±0.01 <sup>e</sup>
50/50	0.72±0.07 <sup>b,c</sup>	0.60±0.03 <sup>c,d</sup>	0.62±0.04 <sup>c,d</sup>
60/40	0.83±0.04 <sup>a,b</sup>	0.79±0.09 <sup>a,b</sup>	0.53±0.06 <sup>d</sup>
70/30	0.91±0.01 <sup>a</sup>	0.70±0.01 <sup>b,c</sup>	0.54±0.05 <sup>d</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

เมื่อพิจารณาโฟมพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนการเติม Blowing agent ที่เท่ากันพบว่า โฟมที่มีสัดส่วนของเจลาตินมาก คือ 70/30 จะมีความหนาแน่นของโฟมที่สูงที่สุด และค่าความหนาแน่นจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณสัดส่วนของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสม ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากความสามารถในการกักเก็บและคงรูปฟองแก๊สของ PBAT ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ส่งผลทำให้โฟมที่มีสัดส่วนของ PBAT มากจะมีเนื้อของพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ไม่เกิดรูพรุนน้อย น้ำหนักหรือความหนาแน่นของโฟมจึงลดลงตามไปด้วย และในส่วนของ การเพิ่มปริมาณ Blowing agent ในโฟมพอลิเมอร์ผสมก็จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับโฟม PBAT คือ เมื่อมีการเพิ่มปริมาณ Blowing agent จะทำให้ความหนาแน่นของโฟมลดลง

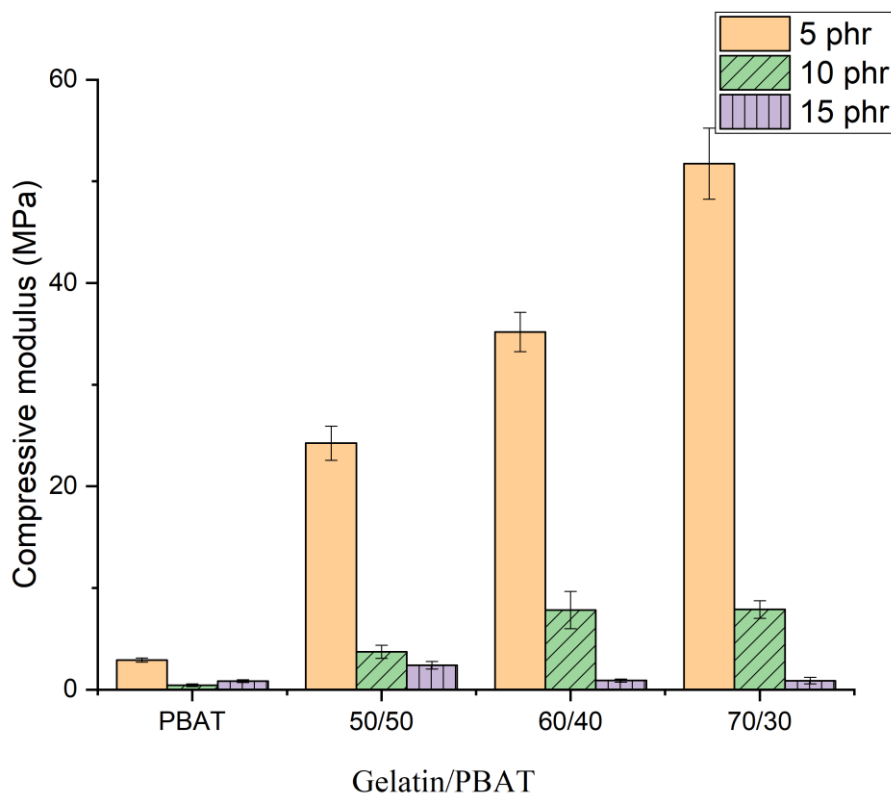
แต่จะสังเกตเห็นว่าตัวอย่างโฟมพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนการผสมเจลาติน/PBAT เป็น 50/50 ที่มีการ Blowing agent 15 phr (50/50\_15) จะมีค่าใกล้เคียงกับโฟมพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนการผสมเจลาติน/PBAT เป็น 50/50 ที่มีการ Blowing agent 10 phr (50/50\_10) ถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณ Blowing agent เนื่องจากที่อัตราส่วน 50/50\_15 จะมีการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ รวมถึงเซลล์โฟมที่เกิดขึ้นจะมีรูปร่างที่ค่อนข้างแน่นอนเมื่อเทียบกับโฟมพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วนอื่นๆ ส่งผลทำให้โฟมพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มีความหนาแน่นที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนักเมื่อเทียบกับการเติม Blowing agent 10 phr นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า ที่สัดส่วน 50/50\_15 จะมีความหนาแน่นที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับ 60/40\_15 และ 70/30\_15 ซึ่งในความเป็นจริงแล้วความหนาแน่นของโฟมควรจะมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนของ PBAT เพิ่มมากขึ้น แต่เนื่องจากการเติม Blowing agent 15 phr นี้จะทำให้โฟม 60/40\_15 และ 70/30\_15 ซึ่งเป็นโฟมที่มีอัตราส่วนของเจลาตินมาก โดยเจลาตินจะมีความสามารถในการกักเก็บฟองแก๊สที่ต่ำ ทำให้เมื่อมีสัดส่วนของเจลาตินในโฟมพอลิเมอร์ผสมมากยิ่งขึ้น โอกาสที่โฟมจะสามารถคงรูปฟองแก๊สที่เกิดขึ้นไว้ได้จะมีน้อยลง ส่งผลทำให้เซลล์โฟมที่เกิดขึ้นจะมีการแตกออกของเซลล์โฟมในบางเซลล์ โดยจะเห็นเป็นลักษณะของโพรงรูพรุนที่เชื่อมกัน โฟมพอลิเมอร์ผสมที่ได้จึงมีพอลิเมอร์เมทริกซ์มีปริมาณที่ลดลง ความหนาแน่นของโฟมจึงลดลงตามไปด้วย

#### 4.2.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเมอร์ผสม

##### 4.2.3.1 การศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเมอร์ผสมด้วยการทดสอบความต้านทานต่อการกดอัด (Compressive testing)

การศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเมอร์ผสมจะทำการศึกษาด้วยการให้แรงกดอัด (Compressive testing) ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM

D1621 Standard Test Method for Compressive Properties Of Rigid Cellular Plastics<sup>1</sup> ด้วย Load cell ขนาด 50 kN ที่ความเร็วในการกดอัด 1.3 mm/min โดยจะการกดอัดขึ้นงานที่ 50% strain จะทำการพิจารณาความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับแรงกดอัด (Compressive modulus) และความสามารถในการต้านทานแรงดึง (Compressive strength) สำหรับความสามารถในการรับแรงกดอัดจะขึ้นอยู่กับการตอบสนองของพอลิเมอร์เมื่อได้รับแรงกดอัด จากภายนอกเข้ามากระทำ โดยโฟมพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จะประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือส่วนของพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนหรือเป็นเกิดเซลล์โฟม และส่วนที่ 2 คือส่วนของพอลิเมอร์เมทริกซ์หรือส่วนที่ไม่เกิดเซลล์โฟม ซึ่งส่วนของพอลิเมอร์เมทริกซ์นี้เองจะเป็นส่วนที่สามารถรองรับแรงกระทำจากภายนอกได้



ภาพที่ 4.19 แสดงค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) ของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ

เมื่อพิจารณา Compressive modulus จากภาพที่ 4.19 และตารางที่ 4.6 พบว่าโฟม PBAT จะมีค่า Compressive modulus ต่ำมากเมื่อเทียบกับโฟมพอลิเมอร์ผสม และจะมีค่าลดลงเมื่อมีการ

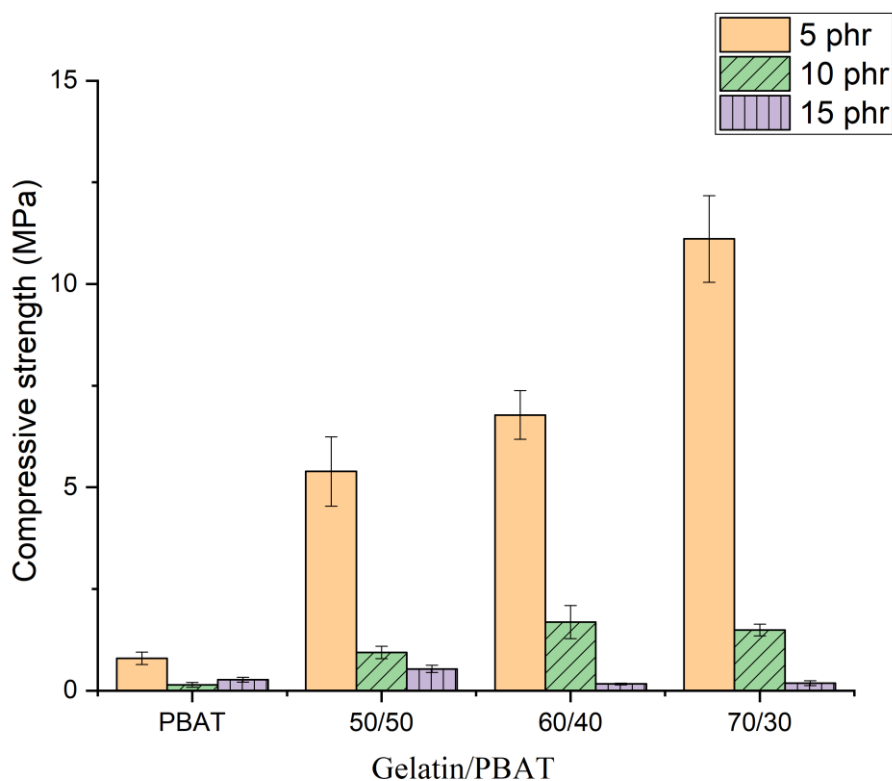
เพิ่มปริมาณ Blowing agent เนื่องจากถ้าพิจารณาจากสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ PBAT จะเห็นได้ว่าการเกิดเซลล์โพลีเมอร์ในปริมาณที่ค่อนข้างมาก ส่งผลทำให้โพลีเมอร์ PBAT มีพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่สามารถรับแรงกดอัดได้น้อย ค่า Compressive modulus จึงมีค่าต่ำ เมื่อทำการเปรียบเทียบโพลีเมอร์ผสมที่มีอัตราการเติม Blowing agent 5 phr ก็พบว่าโพลีเมอร์ผสม 70/30\_5 จะมีค่า Compressive modulus เท่ากับ 51.74 MPa และที่อัตราส่วน 60/40\_5 และ 50/50\_5 จะมีค่าเท่ากับ 35.19 และ 24.25 MPa ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าความสามารถในการต้านทานการเสียรูปจะลดลงเมื่อมีปริมาณ PBAT ที่เพิ่มมากขึ้น เป็นผลมาจากปริมาณพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ PBAT ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับสัณฐานวิทยาและความหนาแน่นของโพลีเมอร์ผสมดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณ Blowing agent ก็จะพบว่าค่า Compressive modulus มีแนวโน้มที่ลดลงเช่นกัน

**ตารางที่ 4.6** แสดงค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) ของโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ

Sample (Gelatin/PBAT)	Compressive modulus (MPa)		
	5 phr	10 phr	15 phr
PBAT (0/100)	2.92±0.21 <sup>e,f</sup>	0.43±0.15 <sup>f</sup>	0.84±0.14 <sup>f</sup>
50/50	24.25±1.68 <sup>c</sup>	3.74±0.65 <sup>e</sup>	2.40±0.39 <sup>e,f</sup>
60/40	35.19±1.93 <sup>b</sup>	7.82±1.83 <sup>d</sup>	0.89±0.15 <sup>f</sup>
70/30	51.74±3.49 <sup>a</sup>	7.89±0.87 <sup>e</sup>	0.89±0.31 <sup>f</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่ต่างกันแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

แต่ในโพลีเมอร์ผสม 50/50\_15 จะเห็นได้ว่ามีค่า Compressive modulus ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโพลีเมอร์ 60/40\_15 และ 70/30\_15 ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นที่สูงกว่าของ 50/50\_15 จึงทำให้โพลีเมอร์ผสมในอัตราส่วนนี้มีความแข็งแรงมากกว่า



ภาพที่ 4.20 แสดงค่าความแข็งแรงของการกดอัด (Compressive strength) ของโพลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความแข็งแรงของการกดอัด (Compressive strength) ของโพลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ

Sample (Gelatin/PBAT)	Compressive strength (MPa)		
	5 phr	10 phr	15 phr
PBAT (0/100)	0.80±0.15 <sup>d,e,f</sup>	0.14±0.06 <sup>f</sup>	0.27±0.06 <sup>e,f</sup>
50/50/20	5.39±0.85 <sup>c</sup>	0.94±0.15 <sup>d,e</sup>	0.54±0.09 <sup>e,f</sup>
60/40/20	6.78±0.60 <sup>b</sup>	1.69±0.41 <sup>d</sup>	0.16±0.02 <sup>e,f</sup>
70/30/20	11.11±1.06 <sup>a</sup>	1.49±0.15 <sup>d,e,f</sup>	0.18±0.06 <sup>f</sup>

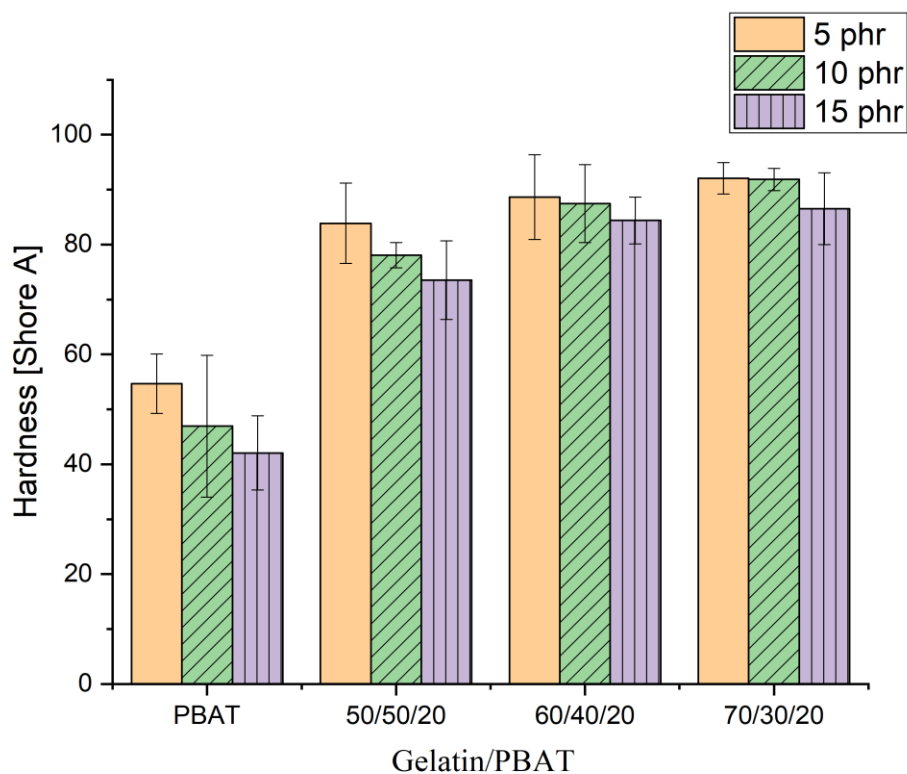
หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )



และสำหรับค่า Compressive strength จะทำการวัดแรงกดอัดที่กระทำต่อชิ้นงานที่จุดที่ชิ้นงานได้รับแรงกดอัดจนชิ้นงานมีความหนาเท่ากับ 50% ของความหนาเริ่มต้น จากผลการศึกษาพบว่าค่า Compressive strength จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า Compressive modulus คือ Compressive strength จะมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของสัดส่วน PBAT และปริมาณ Blowing agent ในโฟมพอลิเมอร์ผสม

#### 4.2.3.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเมอร์ผสมด้วยการทดสอบความแข็งที่ผิว (Hardness testing)

การศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเมอร์ผสมจะทำการศึกษาความแข็งแรงที่ผิว (Hardness testing) ด้วยเครื่อง Durometer ชนิด Shore A สำหรับความแข็งแรงที่ผิวจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นบริเวณผิวของชิ้นงาน โดยจากการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 4.21 และตารางที่ 4.8 พบว่าโฟม PBAT จะมี Hardness ต่ำที่สุดและจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ Blowing agent ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมพอลิเมอร์ผสมจะเห็นได้ว่าจะมีค่า Hardness ที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับโฟม PBAT และโฟมพอลิเมอร์ผสมจะมีแนวโน้มของค่า Hardness ลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ PBAT สำหรับการเพิ่มปริมาณ Blowing agent จะส่งผลทำให้โฟมพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มของค่า Hardness ลดลงเล็กน้อยเช่นกัน ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นที่ผิวของชิ้นงานโดยสอดคล้องกับความหนาแน่นของโฟมดังแสดงในภาพที่ 4.18 และตารางที่ 4.5 แต่จะสังเกตเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน 50/50\_15 จะมีค่า Hardness สูงกว่าที่อัตราส่วน 50/50\_10 เล็กน้อย ซึ่งเมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าชิ้นงาน 50/50\_15 จะมีความสม่ำเสมอของเซลล์โฟมที่บริเวณผิวของชิ้นงานมากกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงาน 50/50\_10 ทำให้ความแข็งแรงที่ผิวเฉลี่ยที่วัดได้มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อทำการวิเคราะห์เชิงสถิติแล้วจะพบว่าค่า Hardness ของอัตราส่วนทั้ง 2 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4.21 แสดงค่าความแข็งที่ผิว (Hardness) ของโพลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความแข็งที่ผิว (Hardness) ของโพลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ

Sample (Gelatin/PBAT)	Hardness [Shore A]		
	5 phr	10 phr	15 phr
PBAT (0/100)	54.67±5.14 <sup>d</sup>	46.93±12.93 <sup>d,e</sup>	42.07±6.74 <sup>e</sup>
50/50/20	84.40±4.26 <sup>a,b</sup>	73.53±7.18 <sup>c</sup>	78.07±2.32 <sup>b,c</sup>
60/40/20	88.67±7.71 <sup>a</sup>	87.47±7.07 <sup>a</sup>	83.87±7.31 <sup>a,b</sup>
70/30/20	92.07±2.87 <sup>a</sup>	91.87±2.02 <sup>a</sup>	86.53±6.53 <sup>a,b</sup>

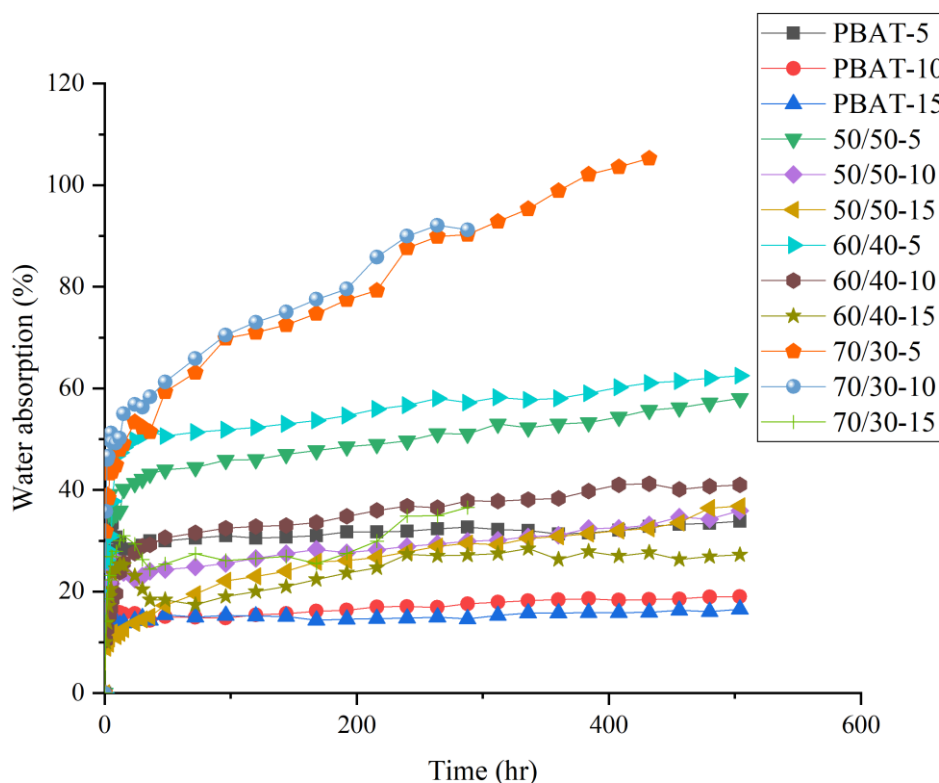
หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

#### 4.2.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซึมน้ำของโพลีเมอร์ผสม

สำหรับความสามารถในการดูดซึมน้ำของโพลีเมอร์จะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ 1) ความเป็นขั้วของโพลีเมอร์แต่ละชนิดในโพลีเมอร์ และ 2) ความเป็นรูพรุนหรือความหนาแน่นของโพลีเมอร์ [45] สำหรับโพลีเมอร์ผสมนี้จะประกอบด้วยเจลาตินที่เป็นโพลีเมอร์ที่มีความเป็นขั้วสูงหรือเป็น Hydrophilic polymer และ PBAT ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ที่ไม่มีขั้วหรือ Hydrophobic polymer ดังนั้นความสามารถในการดูดซึมน้ำของโพลีเมอร์จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของเจลาตินและ PBAT ในโพลีเมอร์ผสม และสำหรับความเป็นรูพรุนของโพลีเมอร์ผสมจะสอดคล้องกับความหนาแน่นของโพลีเมอร์ผสมที่ศึกษาได้ กล่าวคือถ้าลักษณะของโพลีเมอร์ผสมมีความเป็นรูพรุนมาก จะทำให้โพลีเมอร์ผสมมีส่วนของผนังเซลล์หรือว่าส่วนของโพลีเมอร์เมทริกซ์จะมีปริมาณที่น้อยลงด้วย ดังนั้นค่าความหนาแน่นของโพลีเมอร์ผสมที่วัดได้ก็จะมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่งส่วนของโพลีเมอร์เมทริกซ์นี้จะเป็นส่วนที่สามารถดูดซึมน้ำได้ ถ้าโพลีเมอร์ผสมมีส่วนที่เป็นโพลีเมอร์เมทริกซ์มากก็จะมีโอกาสที่จะเกิดการดูดซึมน้ำได้มากขึ้นเช่นกัน โดยความสามารถในการดูดซึมน้ำนี้จะสัมพันธ์กับน้ำหนักของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นเมื่อนำไปแช่ในน้ำ กล่าวคือถ้าตัวอย่างยังมีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักที่มาก แสดงว่าตัวอย่างนั้นมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ดีนั่นเอง

ภาพที่ 4.22 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของโพลีเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อทำการพิจารณาที่ปริมาณการเติม Blowing agent ที่เท่ากันพบว่า โพลีเมอร์ผสม PBAT จะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด สำหรับโพลีเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 70/30 จะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำมากกว่า 60/40 และ 50/50 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากสัดส่วนของเจลาตินในโพลีเมอร์ผสม โดยถ้ามีสัดส่วนของเจลาตินมากก็จะทำให้มีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สูง นอกจากสภาพขั้วของเจลาตินแล้วความหนาแน่นของโพลีเมอร์ผสมก็มีผลต่อการดูดซึมน้ำด้วยเช่นกัน เมื่อพิจารณาจากความหนาแน่นของโพลีเมอร์ผสมดังแสดงในภาพที่ 4.18 พบว่าความหนาแน่นของโพลีเมอร์ผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเจลาติน โพลีเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 70/30 จึงมีความหนาแน่นมากที่สุด โดยโพลีเมอร์ผสมที่มีความหนาแน่นมากแสดงว่ามีสัดส่วนของโพลีเมอร์เมทริกซ์มากกว่าส่วนของโพลีเมอร์ที่เกิดเซลล์โพลีเมอร์ ซึ่งส่วนของโพลีเมอร์เมทริกซ์นี้จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการดูดซึมน้ำ จึงเป็นผลทำให้โพลีเมอร์ที่มีส่วนของโพลีเมอร์เมทริกซ์มากหรือมีความหนาแน่นสูง จะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ดีกว่าโพลีเมอร์ที่มีความหนาแน่นต่ำ จากเหตุผลทั้ง 2 ปัจจัยนี้จึงทำให้โพลีเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 70/30 จะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่มากกว่าที่อัตราส่วน 60/40 และ 50/50 ตามลำดับ แต่จะสังเกตได้ว่า

โพลีเมอร์ผสม 70/30 ที่มีการเติม Blowing agent 5, 10 และ 15 phr นั้นจะสามารถรายงานค่าได้เพียงช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากความเป็น Hydrophilic ของเจลาตินนอกจากจะทำให้เจลาตินสามารถดูดซึมน้ำได้ดีแล้วยังส่งผลทำให้เจลาตินสามารถละลายน้ำได้ดีด้วย โดยโพลีเมอร์ผสมที่อัตราส่วนดังกล่าวจึงเกิดการละลายจนไม่สามารถวัดน้ำหนักและรายงานค่าได้



ภาพที่ 4.22 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบโพลีเมอร์ผสมที่มีปริมาณการเติม Blowing agent ที่แตกต่างกันพบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณ Blowing agent ความสามารถในการดูดซึมน้ำของโพลีเมอร์จะลดลง ซึ่งผลการทดสอบนี้จะสอดคล้องกับความหนาแน่นของโพลีเมอร์คือ เมื่อเพิ่มปริมาณ Blowing agent จะทำให้โพลีเมอร์มีความเป็นรูพรุนมากขึ้น และส่งผลให้โพลีเมอร์ผสมมีความหนาแน่นลดลง ดังนั้นส่วนของโพลีเมอร์ที่ทำหน้าที่ในการดูดซึมน้ำก็จะลดลงด้วย ความสามารถในการดูดซึมน้ำของโพลีเมอร์ผสมจึงลดลงด้วยเช่นกัน

ยกเว้นตัวอย่างโพลีเมอร์ 50/50\_15 จะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สูงกว่า 60/40\_15 ซึ่งถ้าพิจารณาจากสัดส่วนการผสมแล้วโพลีเมอร์ 60/40\_15 ควรจะต้องมีความสามารถในการดูดซึมน้ำมากกว่าเนื่องจากมีสัดส่วนของเจลาตินที่มากกว่า แต่ถ้าพิจารณาจากการกระจายตัวของขนาดเซลล์โพลีเมอร์จะเห็นว่า โพลีเมอร์ 50/50\_15 มีการกระจายตัวของขนาดที่ค่อนข้างแคบเมื่อเทียบกับโพลีเมอร์ 60/40\_15 รวมถึงโพลีเมอร์ 50/50\_15 ความหนาแน่นสูงกว่าจึงส่งผลทำให้มีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่มากกว่า

#### 4.2.5 การศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity) ของโพลีเมอร์ผสม

การทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity) ของโพลีเมอร์ผสม จะเป็นการศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์ด้วย ด้วยวิธี MTT assay โดยจะทำการทดสอบด้วยเซลล์ HaCat (Human Keratinocyte cell line) ซึ่งเป็นเซลล์ผิวหนังของมนุษย์ สำหรับในการศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์จะเลือกตัวอย่างโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Blowing agent ในปริมาณ 15 phr มาใช้ในการศึกษา โดยเป็นอัตราส่วนที่มีปริมาณ Blowing agent มากที่สุด ซึ่งส่วนของ Blowing agent นี้เองที่น่าจะส่งผลต่อความเป็นพิษต่อเซลล์ เนื่องจากส่วนของเจลาตินและ PBAT มีความเป็นพิษต่อเซลล์ที่ค่อนข้างต่ำ กล่าวคือมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) กับเซลล์ได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S Ali Poursamar และคณะ [46] ได้ศึกษาผลการใช้สารเชื่อมขวางชนิดต่างๆ ที่มีต่อการเตรียมเนื้อเยื่อโครงเลี้ยงเซลล์จากเจลาติน จากการศึกษาพบว่าโครงเลี้ยงเซลล์ที่เตรียมจากเจลาตินที่มีและไม่มีการสารเชื่อมขวางมีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อเซลล์ โดยมีระดับความมีชีวิตอยู่ของเซลล์มากกว่า 70% และจากงานวิจัยของ Nuruzzaman Khan และคณะ [47] ได้ทำการเตรียมคอมพอสิตที่มีความเป็นรูพรุนที่เตรียมจากเจลาติน โดยจะมีการเติม polyethylene oxide (PEO), tricalcium phosphate (TCP) และไคโตซาน พบว่าโพลีเมอร์คอมพอสิตที่เตรียมได้มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่สูง สำหรับความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของ PBAT สามารถยืนยันได้จากงานวิจัยของ Kikku Fukushima และคณะ [6] ได้เตรียมฟิล์ม PBAT และฟิล์มคอมพอสิตระหว่าง PBAT/clay พบว่าฟิล์ม PBAT และฟิล์มคอมพอสิตที่เตรียมได้มีร้อยละการมีชีวิตอยู่ของเซลล์มากกว่า 70% ซึ่งแสดงความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Girija Bheemaneni และคณะ [7] ที่ได้ทำการศึกษาฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม Wollastonite ( $\text{CaSiO}_3$ ) พบว่าฟิล์ม PBAT และฟิล์มคอมพอสิตที่เตรียมได้มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility)

ตารางที่ 4.9 แสดงร้อยละของความเป็นพิษ (Cytotoxicity) และร้อยละการมีชีวิต (Cell viability) ของเซลล์ HaCat จากการทดสอบด้วยกระบวนการ MTT assay ของโพลีเมอร์ผสม

พบว่าเจลาตินมี %Cell viability มากที่สุดคือ 84.626% และโพลีเมอร์ PBAT จะมี %Cell viability เท่ากับ 70.891% ในขณะที่โพลีเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 70/30\_15, 60/40\_15 และ 50/50\_15 จะมี %Cell viability เท่ากับ 70.297%, 70.697% และ 70.392% ตามลำดับ ซึ่ง %Cell viability จะแสดงถึงค่าการมีชีวิตอยู่ของเซลล์ กล่าวคือถ้ามีค่า %Cell viability มาก แสดงว่าที่สภาวะดังกล่าว เซลล์ยังสามารถเติบโตและมีชีวิตอยู่ได้ แต่ถ้ามีค่า %Cell viability น้อย แสดงว่าสภาวะนั้นมีผลต่อการเติบโตของเซลล์หรือมีความเป็นพิษสูงจนเซลล์ไม่สามารถเติบโตและมีชีวิตอยู่ได้นั่นเอง ซึ่งจากมาตรฐานอุตสาหกรรมสำหรับการประเมินทางชีวภาพของเครื่องมือแพทย์ (ISO 10993-5:1999) [48] ได้ระบุว่าตามมาตรฐานการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ด้วยวิธี MTT assay สำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่มี %Cell viability น้อยกว่า 70% จะถือว่าวัสดุดังกล่าวอาจมีความเป็นพิษต่อเซลล์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโพลีเมอร์ เจลาติน โพลีเมอร์ PBAT และโพลีเมอร์ผสมที่เตรียมได้นั้นมีค่า %Cell viability มากกว่า 70% ขึ้นไป แสดงว่าโพลีเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับเซลล์ผิวหนังที่นำมาทดสอบ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าโพลีเมอร์ผสมที่เตรียมได้ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ได้

**ตารางที่ 4.9** แสดงร้อยละของความเป็นพิษ (Cytotoxicity) และร้อยละการมีชีวิต (Cell viability) ของเซลล์ HaCat จากการทดสอบด้วยกระบวนการ MTT assay ของโพลีเมอร์ผสม

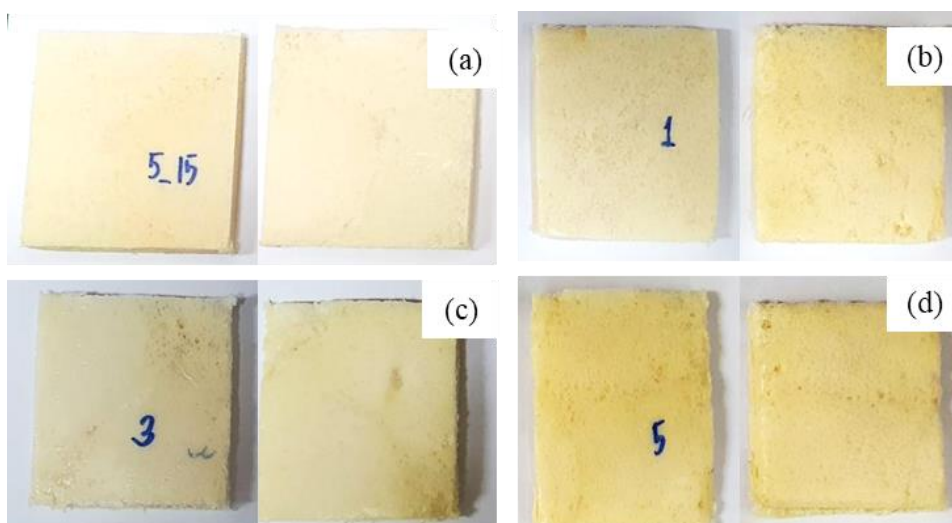
Sample	Cytotoxicity (%)	Cell viability (%)
Gealatin_15	15.374	84.626
70/30_15	29.703	70.297
60/40_15	29.303	70.697
50/50_15	29.608	70.392
PBAT_15	29.109	70.891

จากการศึกษาการเตรียมโพลีเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าโพลีเมอร์ผสมเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ PBAT ในโพลีเมอร์ผสมจะทำให้โพลีเมอร์ผสมมีความหนาแน่นลดลง มีเซลล์โพลีเมอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวแสดงถึงความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น รวมถึงส่งผลให้โพลีเมอร์แข็งแรงลดลง และเมื่อมีการเติม Blowing agent เพิ่มขึ้นจากอัตราส่วน 5 เป็น 10 และ 15 phr ตามลำดับ พบว่าโพลีเมอร์ผสมมีความเป็นโพลีเมอร์มากขึ้น โดยในส่วนถัดไปจะเลือกโพลีเมอร์ผสมในอัตราส่วน 50/50\_15 ทำการศึกษาการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลู เนื่องจากที่อัตราส่วนนี้

จะได้โฟมที่มีขนาดเซลล์โฟมที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ มีความหนาแน่นที่ต่ำ มีความแข็งแรงเชิงกลที่ดี มีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ต่ำ รวมถึงไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์

#### 4.3 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

สำหรับตอนที่ 3 จะเป็นการศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ในอัตราส่วน 50/50 ที่มีการเติม OBSH 15 phr ซึ่งเป็นอัตราส่วนการผสมโดยจะทำการผสมที่มีขนาดเซลล์โฟมที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ มีความหนาแน่นที่ต่ำ มีความแข็งแรงเชิงกลที่ดี มีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ต่ำ รวมถึงไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ โดยทำการผสมด้วยเครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill) และขึ้นรูปด้วยเครื่อง Compression Molding ที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 2 นาที จะได้ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมดังแสดงในภาพที่ 4.23 จากภาพจะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยจะมองเห็นเซลล์โฟมบริเวณที่ผิวชิ้นงานได้อย่างชัดเจน รวมถึงที่ขอบของชิ้นงานจะมีการยุบตัวเล็กน้อยเนื่องจากรอยตัดของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ นอกจากนี้จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพพบว่า ชิ้นงานที่เตรียมได้มีกลิ่นของน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูอยู่ สำหรับน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูจะมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ นั่นก็คือสาร Eugenol โดยสารดังกล่าวจะมีจุดเดือดที่ 225°C ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมรวมถึงใช้ในการขึ้นรูปจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของสาร Eugenol จึงสามารถยืนยันได้ว่ายังมีส่วนของน้ำมันหอมระเหยอยู่แม้จะผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยความร้อนมาแล้ว

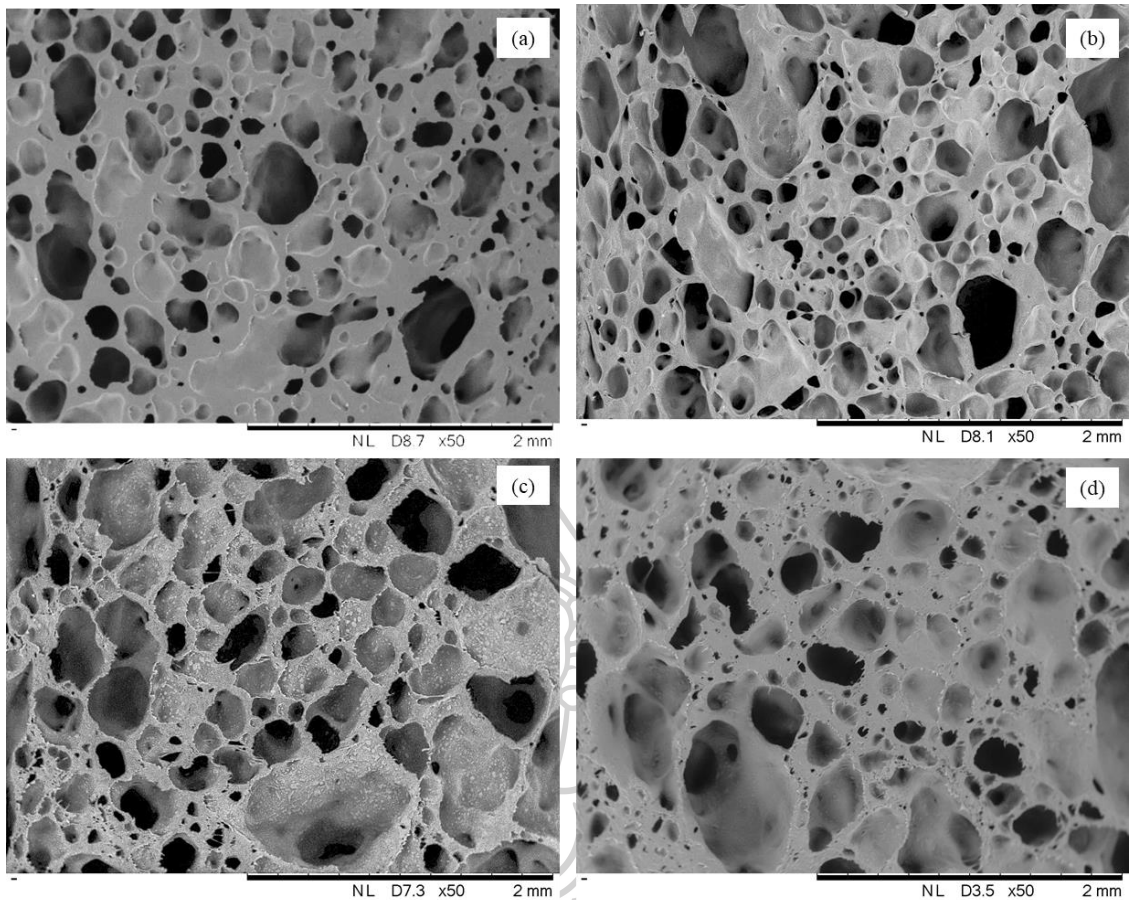


ภาพที่ 4.23 แสดงชิ้นงานโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ : (a) 0 phr, (b) 1 phr, (c) 3 phr และ (d) 5 phr

#### 4.3.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูจะทำการศึกษาดูด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) ที่กำลังขยาย 50 เท่า และทำการศึกษขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ด้วยโปรแกรม Image J โดยทำการพิจารณาการกระจายตัวของเซลล์โพลีเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ

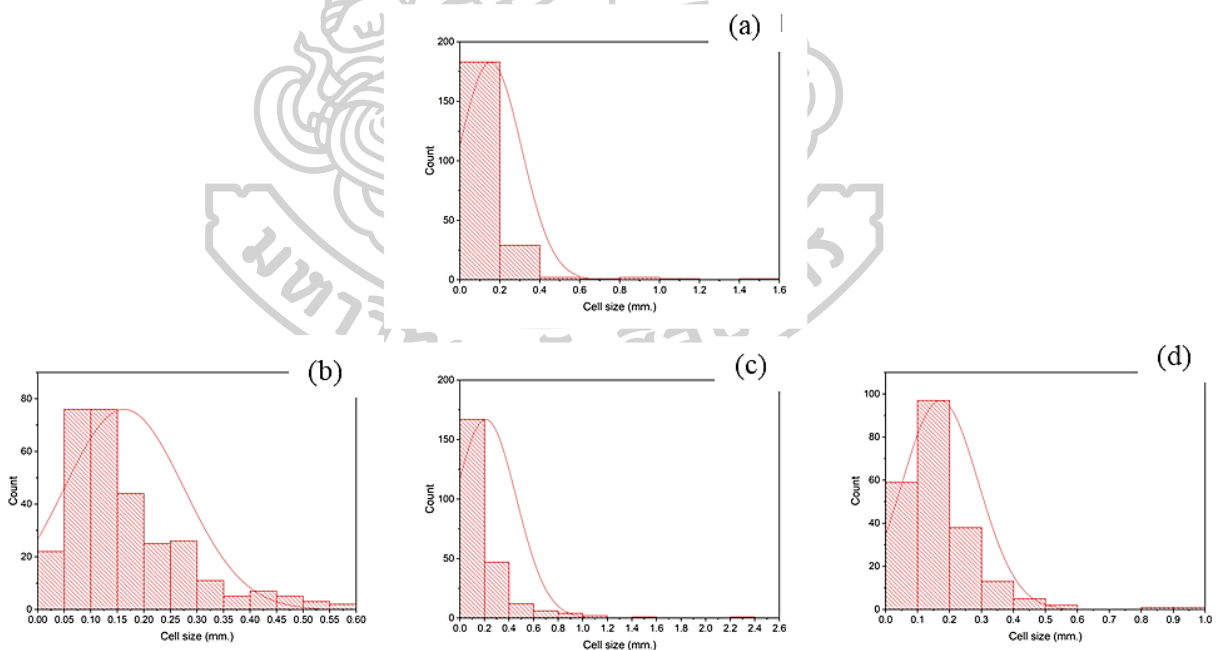




ภาพที่ 4.24 แสดงสัณฐานวิทยาของโพลีเอไมด์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ : (a) 0 phr, (b) 1 phr, (c) 3 phr และ (d) 5 phr

ภาพที่ 4.24 แสดงสัณฐานวิทยาของโพลีเอไมด์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า โพลีเอไมด์ผสมที่เตรียมได้จะมีลักษณะเซลล์โพลีเอไมด์เป็นรูปทรงกลมและทรงรี โดยมีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ปะปนกันไป เมื่อทำการพิจารณาโพลีเอไมด์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยจะเห็นได้ว่าเซลล์โพลีเอไมด์ที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับโพลีเอไมด์ผสมที่ไม่มีการเติมน้ำมันหอมระเหย สอดคล้องกับขนาดของเซลล์โพลีเอไมด์ที่วัดได้ดังแสดงในภาพที่ 4.25 โดยจากงานวิจัยของ Sandra Acosta และคณะ [49] ที่ได้ทำการเตรียมฟิล์มโพลีเอไมด์ผสมระหว่างแป้งและเจลาตินโดยมีการเติมน้ำมันหอมระเหย 3 ชนิดได้แก่ น้ำมันหอมระเหยอบเชย, น้ำมันหอมระเหยกานพลู และน้ำมันหอมระเหยออริกาโน โดยจากการศึกษาพบว่าน้ำมันหอมระเหยที่เติมลงไปนั้นจะทำให้ฟิล์มโพลีเอไมด์ที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งเกิดจากความเป็นขั้วที่แตกต่างกันระหว่างโพลีเอไมด์เมทริกซ์กับน้ำมันหอมระเหยที่มีเป็นส่วนไขมัน จึงทำให้โพลีเอไมด์เมทริกซ์และน้ำมันหอม

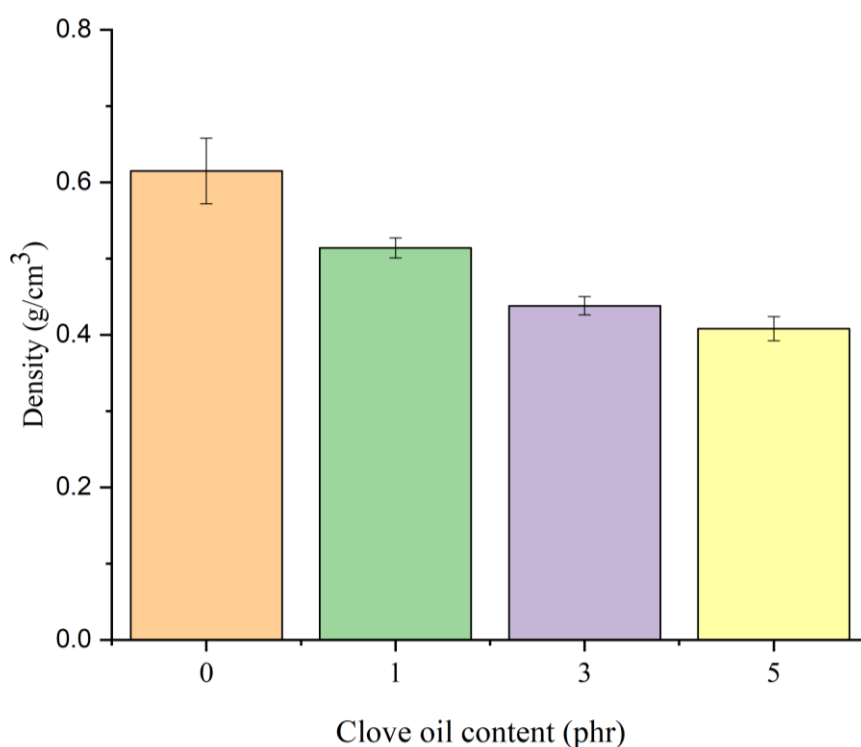
ระเหยเข้ากันได้ไม่ดีเกิดการรวมตัวเป็นหยดของน้ำมันหอมระเหย เมื่อผ่านการขึ้นรูปหยดน้ำมันดังกล่าวจะเกิดการระเหยออกจนกลายเป็นรูพรุนเกิดขึ้นในพื้นที่ผิวของฟิล์ม เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Zhu Shen และคณะ [50] ที่ได้ทำการเติมน้ำมันหอมระเหยลงในฟิล์มโคโตะซาน จะพบว่าน้ำมันหอมระเหยที่เติมลงไปนั้นจะเกิดการรวมตัวและถูกกักเก็บอยู่ภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์ เมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปน้ำมันหอมระเหยบางส่วนที่ถูกกักเก็บไว้จะเกิดการระเหยออกทำให้เกิดเป็นลักษณะรูพรุนภายในฟิล์มพอลิเมอร์ จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้เมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยลงในโพลีเมอร์ผสมจะทำให้โพลีเมอร์ที่เตรียมได้มีความเป็นรูพรุนที่มากขึ้น แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยจาก 1 phr เป็น 3 และ 5 phr จะเห็นว่าขนาดของเซลล์โพลีเมอร์มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับการเติมน้ำมันหอมระเหยที่ 1 phr โดยเซลล์โพลีเมอร์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นโพรงเชื่อมต่อกันที่เป็นเช่นนั้นเนื่องมาจากน้ำมันหอมระเหยที่เติมลงไปจะทำหน้าที่คล้ายพลาสติกไซเซอร์ [51] ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่หลอมเหลวเกิดการไหลได้ง่ายมากยิ่งขึ้นในระหว่างขั้นตอนการขึ้นรูป เมื่อมีเซลล์โพลีเมอร์เกิดขึ้นในระบบพอลิเมอร์ผสมจึงไม่สามารถคงรูปร่างของเซลล์โพลีเมอร์ไว้ได้จึงเกิดเป็นลักษณะดังกล่าวโดยเซลล์โพลีเมอร์ที่เกิดขึ้นมีขนาดที่ใหญ่และมีผนังของเซลล์โพลีเมอร์ในส่วนที่เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ลดลง



ภาพที่ 4.25 แสดงการกระจายตัวของขนาดเซลล์โพลีเมอร์ของโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ : (a) 0 phr, (b) 1 phr, (c) 3 phr และ (d) 5 phr

#### 4.3.2 การศึกษาความหนาแน่นของโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลู

การศึกษาความหนาแน่นของโพลีเอสเตอร์ผสมสามารถศึกษาได้จากการวัดด้วยเครื่อง Density kit โดยผลการศึกษาที่ได้จะแสดงในรูปที่ 4.26 และตารางที่ 4.10 จากการศึกษาพบว่า เมื่อมีการเติมน้ำมันหอมระเหยลงในโพลีเอสเตอร์ผสมจะทำให้โพลีเอสเตอร์ผสมที่เตรียมได้มีความหนาแน่นลดลง เนื่องจากการเติมน้ำมันหอมระเหยลงไปจะทำให้มีเซลล์โพลีเมอร์ขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจำนวนมากโดยสามารถยืนยันได้จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและขนาดเซลล์โพลีเมอร์เฉลี่ย (ภาพที่ 4.24 และ 4.25) จึงส่งผลทำให้ปริมาณเซลล์โพลีเมอร์/พื้นที่มีมากขึ้น ความหนาแน่นของโพลีเอสเตอร์ผสมจึงลดลง และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยในโพลีเอสเตอร์ผสมก็จะทำให้ความหนาแน่นลดลงเช่นกัน แต่สำหรับกรณีนี้เกิดจากการที่เมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนน้ำมันหอมระเหยจะทำให้โพลีเอสเตอร์ผสมมีความสามารถในการกักเก็บและคงรูปเซลล์โพลีเมอร์ที่ลดลง โดยลักษณะเซลล์โพลีเมอร์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นโพร่งขนาดใหญ่ จึงส่งผลทำให้ความหนาแน่นของโพลีเอสเตอร์ผสมลดลง



ภาพที่ 4.26 แสดงความหนาแน่นของโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ

**ตารางที่ 4.10** แสดงความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ

Sample	Density (g/cm <sup>3</sup> )
0 phr	0.62±0.04 <sup>a</sup>
1 phr	0.51±0.01 <sup>b</sup>
3 phr	0.44±0.01 <sup>c</sup>
5 phr	0.41±0.02 <sup>c</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่ต่างกัันแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

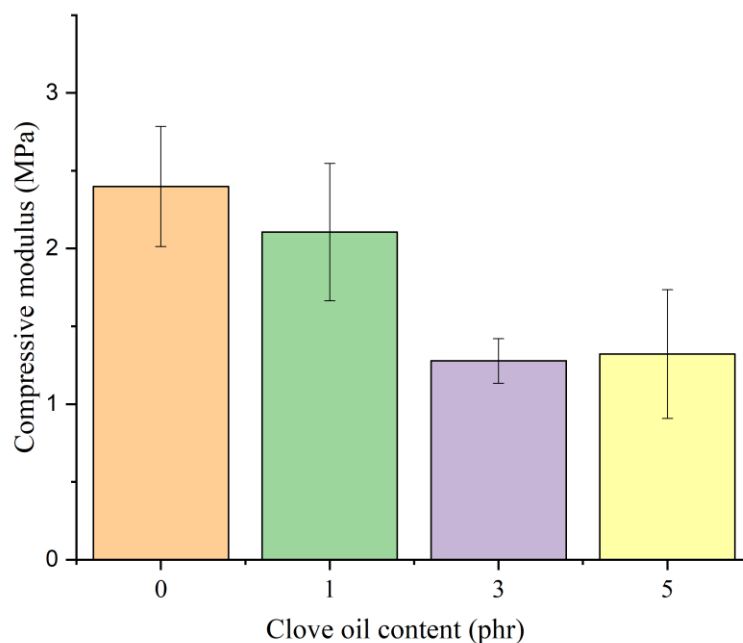
#### 4.3.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลู

##### 4.3.3.1 การศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูด้วยการทดสอบความต้านทานต่อการกดอัด (Compressive testing)

การศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเมอร์ผสมจะทำการศึกษาด้วยการให้แรงกดอัด (Compressive testing) ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM D1621 Standard Test Method for Compressive Properties Of Rigid Cellular Plastics1 ด้วย Load cell ขนาด 50 kN ที่ความเร็วในการกดอัด 1.3 mm/min โดยจะการกดอัดชิ้นงานที่ 50% strain จะทำการพิจารณาความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับแรงกดอัด (Compressive modulus) และความสามารถในการต้านทานแรงดึง (Compressive strength)

จากภาพที่ 4.27 และตารางที่ 4.11 แสดงค่า Compressive modulus ของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าเมื่อมีการเติมน้ำมันหอมระเหยลงในโฟมพอลิเมอร์ผสมจะทำให้โฟมพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มของค่า Compressive modulus ที่ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อมีการเติมน้ำมันหอมระเหยจะทำให้โฟมพอลิเมอร์ผสมมีการเกิดเซลล์โฟมในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นส่วนของพอลิเมอร์เมทริกซ์หรือผนังของเซลล์โฟมที่ใช้ในการรับแรงจะลดลง โดยสามารถยืนยันได้จากผลการศึกษาความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่เมื่อมีการเติมน้ำมันหอมระเหยจะทำให้โฟมพอลิเมอร์ผสมมีความหนาแน่นที่ลดลงดังแสดงในภาพที่ 4.26 รวมถึงน้ำมันหอมระเหยที่เติมลงไป

จะทำให้ชิ้นงานโพลีเมอร์ที่เตรียมได้มีความนิ่มมากขึ้น เมื่อมีแรงกดอัดมากกระทำกันชิ้นงานชิ้นงานจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายค่า Compressive modulus จึงมีค่าลดลง



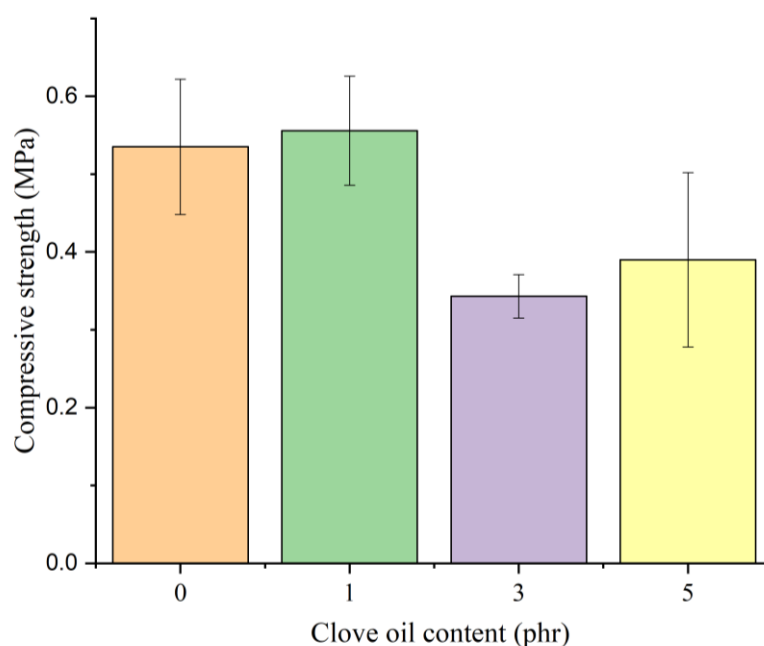
ภาพที่ 4.27 แสดงค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) ของโพลีเมอร์ผสมระหว่าง เจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 4.11 แสดงค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) ของโพลีเมอร์ผสมระหว่าง เจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ

Sample	Compressive modulus (MPa)
0 phr	2.40±0.39 <sup>a</sup>
1 phr	2.11±0.44 <sup>a</sup>
3 phr	1.28±0.15 <sup>b</sup>
5 phr	1.32±0.41 <sup>b</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

สำหรับค่า Compressive strength ที่แสดงในภาพที่ 4.27 และตารางที่ 4.11 จะเห็นว่า มีแนวโน้มที่ลดลงเช่นกันเมื่อมีการเติมน้ำมันหอมระเหย ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นที่ลดลงของ โฟมพอลิเมอร์ผสมเมื่อมีการเติมน้ำมันหอมระเหยทำให้มีส่วนของพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ทำหน้าที่ในการ รับแรงลดลง รวมถึงน้ำมันหอมระเหยที่เติมลงไปจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ทำให้ เมื่อมีแรงกระทำจากภายนอกโฟมพอลิเมอร์จะรับแรงได้น้อยลง



ภาพที่ 4.28 แสดงค่าความแข็งแรงของการกดอัด (Compressive strength) ของโฟมพอลิเมอร์ผสม ระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ

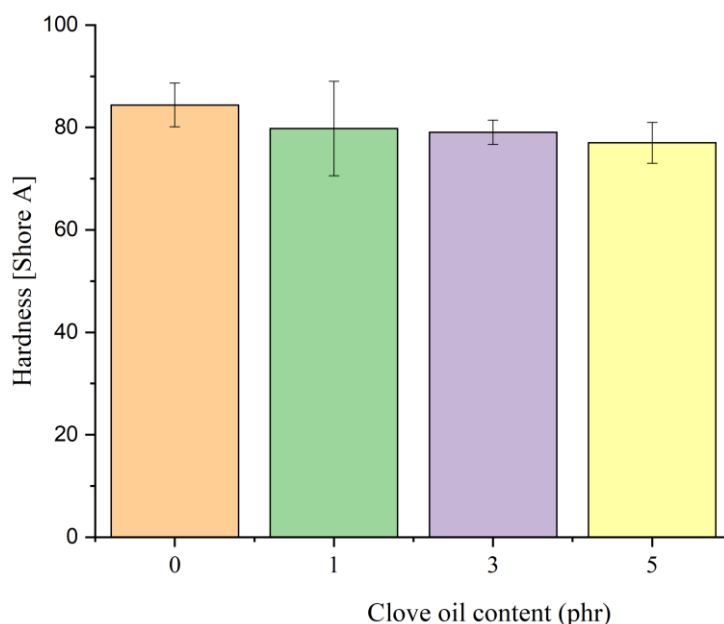
ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความแข็งแรงของการกดอัด (Compressive strength) ของโฟมพอลิเมอร์ ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ

Sample	Compressive strength (MPa)
0 phr	0.54±0.09 <sup>a</sup>
1 phr	0.56±0.07 <sup>a,b</sup>
3 phr	0.34±0.03 <sup>b,c</sup>
5 phr	0.39±0.11 <sup>c</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

#### 4.3.3.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของโพลีเอสเตอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูด้วยการทดสอบความแข็งที่ผิว (Hardness testing)

การศึกษาสมบัติเชิงกลของโพลีเอสเตอร์ผสมจะทำการศึกษาความแข็งแรงที่ผิว (Hardness testing) ด้วยเครื่อง Durometer ชนิด Shore A สำหรับความแข็งแรงที่ผิวจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นบริเวณผิวของชิ้นงาน โดยจากการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 4.29 และตารางที่ 4.13 พบว่าโพลีเอสเตอร์ผสมที่ไม่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยจะมีค่า Hardness ที่สูงที่สุด เนื่องจากที่อัตราส่วนนี้ จะมีการเกิดขึ้นของเซลล์โพลีที่น้อยกว่าอัตราส่วนอื่นๆ รวมถึงความหนาแน่นของโพลีที่วัดได้จะมีค่าสูงกว่าสูตรอื่นๆ ด้วยเช่นกัน นอกจากนี้จากลักษณะของชิ้นงานโพลีที่เตรียมได้ดังแสดงในภาพที่ 4.23 ยังพบว่าที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานมีเซลล์โพลีเกิดขึ้นน้อยกว่า ส่งผลให้บริเวณที่ผิวของชิ้นงานมีโพลีเมอร์เมทริกซ์ที่มากกว่า ที่อัตราส่วนนี้จึงมีค่า Hardness ที่มากกว่าเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ และเมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยจะพบว่า ค่า Hardness มีแนวโน้มที่จะลดลงตามปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเติมน้ำมันหอมระเหยจะทำให้ชิ้นงานมีความนิ่มมากยิ่งขึ้นรวมถึงจะมีเซลล์โพลีเกิดขึ้นที่ผิวมากขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อทำการวิเคราะห์เชิงสถิติแล้วจะเห็นได้ว่าการลดลงของค่า Hardness มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ กล่าวคือการเติมน้ำมันหอมระเหยลงในโพลีเอสเตอร์ผสมไม่มีผลต่อค่า Hardness ของโพลีเอสเตอร์ผสม



ภาพที่ 4.29 แสดงค่าความแข็งที่ผิว (Hardness) ของโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ

**ตารางที่ 4.13** แสดงค่าความแข็งที่ผิว (Hardness) ของโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ

Sample	Hardness [Shore A]
0 phr	84.40±4.26 <sup>a</sup>
1 phr	79.80±9.21 <sup>a</sup>
3 phr	79.07±2.37 <sup>a</sup>
5 phr	77.00±3.98 <sup>a</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

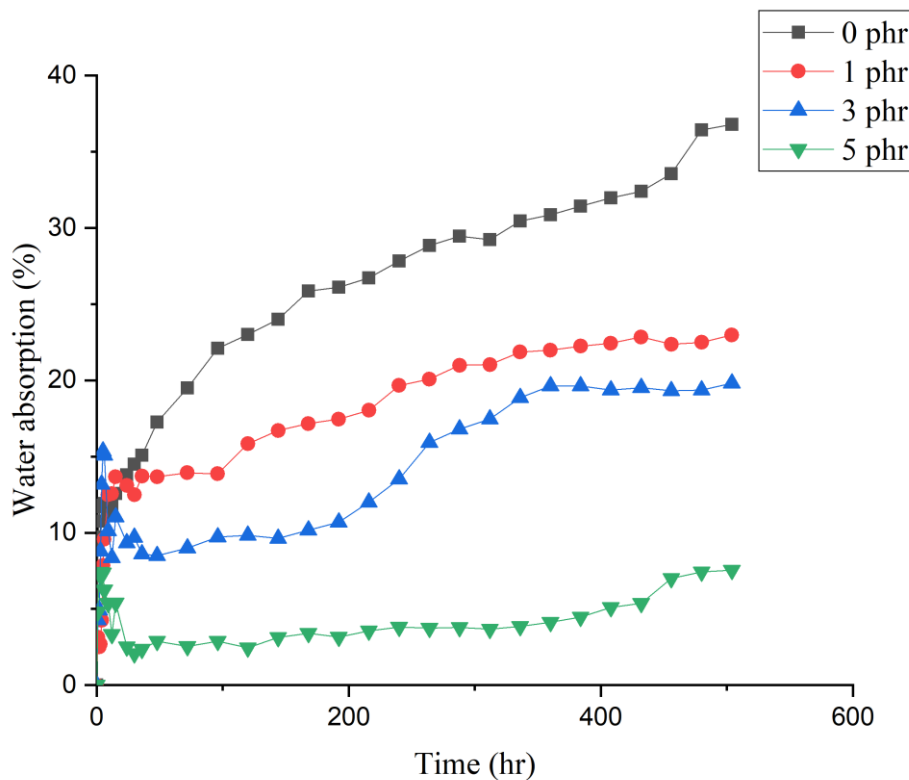
#### 4.3.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซึมน้ำของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลู (Water absorption)

สำหรับความสามารถในการดูดซึมน้ำของโพลีเมอร์ผสมจะประกอบด้วย 2 ปัจจัย คือ 1 ความเป็นขี้ของโพลีเมอร์แต่ละประเภทในโพลีเมอร์ผสม และปัจจัยที่ 2 คือความเป็นรูพรุนของโพลีเมอร์ผสม [45] ตามที่ได้กล่าวไปในตอนที่ 2 สำหรับในส่วนนี้ความสามารถในการดูดซึมน้ำของโพลีเมอร์ผสมยังจะขึ้นอยู่กับน้ำมันหอมระเหยที่เติมลงไปด้วย เนื่องจากการเติมน้ำมันหอมระเหยจะส่งผลต่อสภาพความเป็นขี้ของโพลีเมอร์ผสม รวมถึงน้ำมันหอมระเหยยังมีผลต่อลักษณะความเป็นรูพรุนของโพลีเมอร์ผสมด้วยเช่นกัน สำหรับน้ำมันหอมระเหยกานพลูจะมีโครงสร้างที่มีความไม่ชอบน้ำหรือ Hydrophobic ดังนั้นการเติมน้ำมันหอมระเหยลงไปจะทำให้โพลีเมอร์ผสมมีความเป็น Hydrophilic น้อยลง

ภาพที่ 4.30 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ จากภาพพบว่าความสามารถในการดูดซึมน้ำของโพลีเมอร์ผสมจะเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยโพลีเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมน้ำมันหอมระเหย จะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำมากที่สุด และเมื่อมีการเติมน้ำมันหอมระเหยลงไปจะทำให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำของโพลีเมอร์ผสมลดลง ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่าน้ำมันหอมระเหยมีสมบัติเป็น Hydrophobic ทำให้เมื่อเติมลงไปโพลีเมอร์ผสมมีความชอบน้ำลดลงเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nathalie Gontard และคณะ [52] ได้ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มกุนเตนโดยมีการเติมกรดไขมันชนิดต่างๆ จากผลการศึกษาพบว่า กรดไขมันที่เติมลงไปซึ่งมีความเป็น



Hydrophobic จะส่งผลทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการซึมผ่านน้ำที่ลดลง Manuel Pérez-Mateos และคณะ [53] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมน้ำมันดอกทานตะวันที่มีผลต่อฟิล์มเจลาติน จากการทดลองพบว่าน้ำมันดอกทานตะวันจะช่วยเพิ่มความเป็น Hydrophobic ให้แก่ฟิล์มเจลาตินทำให้ฟิล์มเจลาตินมีความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำและความสามารถในการละลายน้ำที่ลดลง และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการเติมน้ำมันดอกทานตะวันก็จะส่งผลทำให้ ความเป็น Hydrophobic เพิ่มขึ้น ยิ่งขึ้น เป็นต้น นอกจากนี้การเติมน้ำมันหอมระเหยจะส่งผลทำให้เกิดโพลีเมอร์มีเซลล์โพลีเมอร์เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.24 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของเซลล์โพลีเมอร์นี้จะส่งผลทำให้โพลีเมอร์ผสมมีความเป็นรูพรุนมากยิ่งขึ้นและมีความหนาแน่นของโพลีเมอร์ลดลง โดยส่วนของโพลีเมอร์เมทริกซ์ที่ทำหน้าที่ในการดูดซึมน้ำก็ลดลงเช่นกัน จากปัจจัยทั้ง 2 จึงแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเติมน้ำมันหอมระเหยลงในโพลีเมอร์ผสมจะส่งผลให้โพลีเมอร์ผสมมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ลดลง



ภาพที่ 4.30 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มี การเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ

นอกจากนี้เมื่อทำการเพิ่มปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่เติมลงในโพลีเมอร์ผสมจะพบว่าโพลีเมอร์ผสมจะมีความสามารถในการดูดซับน้ำที่ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยทั้ง 2 ที่ได้กล่าวไปข้างต้น กล่าวคือปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มความเป็น Hydrophobic ให้กับโพลีเมอร์ผสม รวมถึงปริมาณของน้ำมันหอมระเหยที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เซลล์โพลีเมอร์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเชื่อมต่อกันเป็นโครงขนาดใหญ่ โดยขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ที่ใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้โพลีเมอร์ผสมนี้มีความเป็นรูพรุนที่มากยิ่งขึ้น และมีความหนาแน่นที่ลดลง ดังนั้นความสามารถในการดูดซับน้ำของโพลีเมอร์ผสมลดลงด้วย

#### 4.3.5 การศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity) ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลู

การทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity) ของโพลีเมอร์ผสม จะเป็นการศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์ด้วย ด้วยวิธี MTT assay โดยจะทำการทดสอบด้วยเซลล์ HaCat (Human Keratinocyte cell line) ซึ่งเป็นเซลล์ผิวหนังของมนุษย์

ตารางที่ 4.14 แสดงร้อยละของความเป็นพิษ (Cytotoxicity) และร้อยละการมีชีวิต (Cell viability) ของเซลล์ HaCat จากการทดสอบด้วยกระบวนการ MTT assay ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยในอัตราส่วนต่างๆ จากตารางพบว่าโพลีเมอร์ผสมมี %Cell viability ที่ใกล้เคียงกัน คือที่อัตราส่วน 50/50\_15 ที่ไม่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูจะมี %Cell viability เท่ากับ 70.109% โพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันกานพลู 1 phr จะมี %Cell viability เท่ากับ 70.297% และมีค่าเท่ากับ 70.697% และ 70.392% สำหรับโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันกานพลู 3 และ 5 phr ตามลำดับ การผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าน้ำมันหอมระเหยกานพลูไม่มีผลทำให้ความเป็นพิษของโพลีเมอร์ผสมเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Guilherme E. de O. Blanco และคณะ [54] ที่ได้ศึกษาการเติมน้ำมันหอมระเหยการพลูลงในฟิล์มโพลีเมอร์คอมพอสิต gelatin/[Mg-Al-CO<sub>3</sub>]-LDH จากการศึกษพบว่าฟิล์มที่มีการเติมน้ำมันกานพลูลงไป 5 %wt จะมี %Cell viability มากกว่า 70%

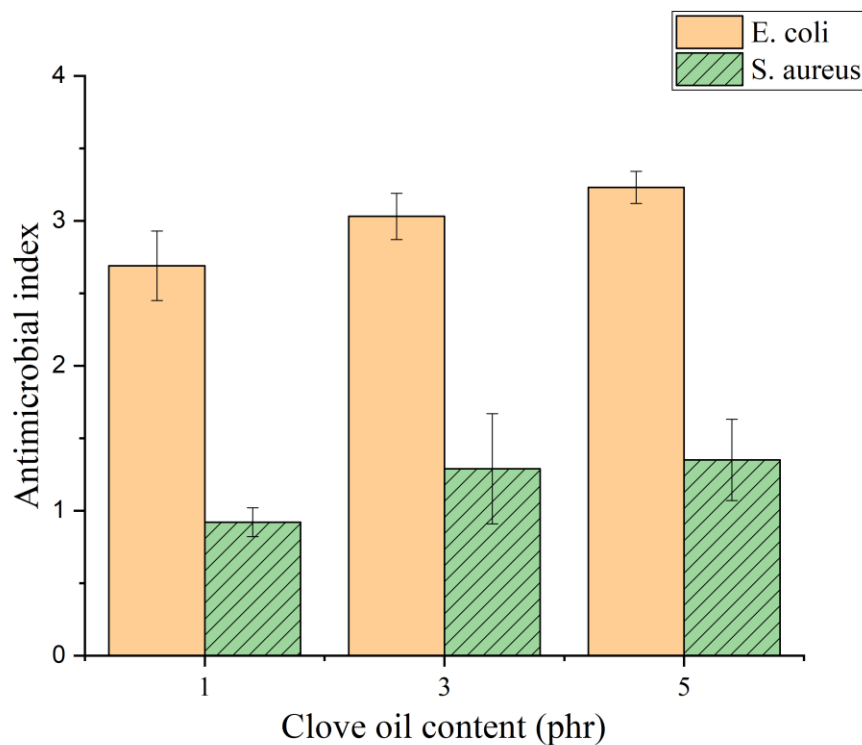
จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าโพลีเมอร์ผสมโพลีเมอร์ผสมที่เตรียมได้มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับเซลล์ผิวหนังของมนุษย์โดยมี %Cell viability มากกว่า 70% ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐาน (ISO 10993-5:1999) [48] ที่กล่าวว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทางการแพทย์ที่มี %Cell viability น้อยกว่า 70% จะถือว่าวัสดุดังกล่าวอาจมีความเป็นพิษต่อเซลล์

**ตารางที่ 4.14** แสดงแสดงร้อยละของความเป็นพิษ (Cytotoxicity) และร้อยละการมีชีวิต (Cell viability) ของเซลล์ HaCat จากการทดสอบด้วยกระบวนการ MTT assay ของโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ

Sample	Cytotoxicity (%)	Cell viability (%)
0 phr	29.608	70.392
1 phr	29.703	70.297
3 phr	29.303	70.697
5 phr	29.608	70.392

#### 4.3.6 การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลู

การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูจะทำการศึกษาดังวิธี Agar Diffusion โดยจะศึกษาความสามารถในการต้านเชื้อ Escherichia coli (E. coli) เป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมลบ และ Staphylococcus aureus (S. aureus) เป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมบวกซึ่งเป็นแบคทีเรียที่สามารถพบได้บริเวณผิวหนังของมนุษย์ โดยในการศึกษานี้จะพิจารณาจากค่า Antimicrobial index ที่แสดงถึงความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรีย สำหรับผลการศึกษาก็จะแสดงในภาพที่ 4.31 และตารางที่ 4.15



ภาพที่ 4.31 แสดงความสามารถในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาติน และ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ

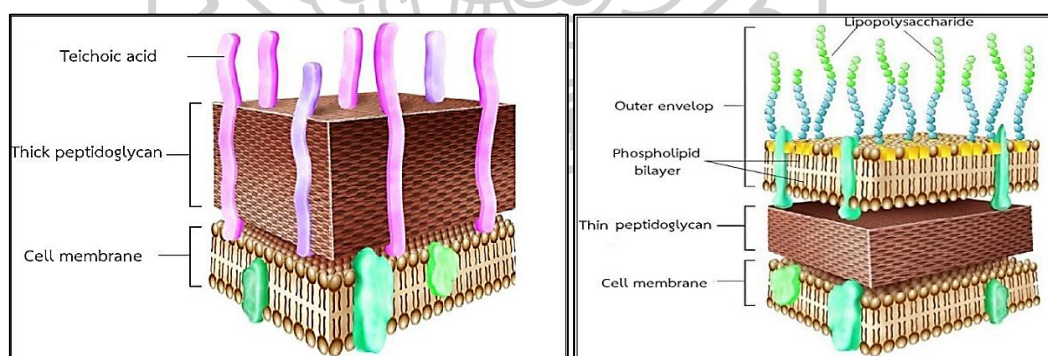
ตารางที่ 4.15 แสดงความสามารถในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของโพลีเมอร์ผสมระหว่าง เจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ

Sample	Antimicrobial index	
	E.coli	S.aureus
0 phr	NI	NI
1 phr	2.69 ± 0.24 <sup>b</sup>	0.92 ± 0.10 <sup>a</sup>
3 phr	3.03 ± 0.16 <sup>a,b</sup>	0.95 ± 0.64 <sup>a</sup>
5 phr	3.23 ± 0.11 <sup>a</sup>	1.35 ± 0.28 <sup>a</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

NI : no inhibition zone

เมื่อพิจารณา Antimicrobial index ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยการพลูในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยจะมีความสามารถในการต้านเชื้อทั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* เป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมลบ และ *S. aureus* เป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมบวกซึ่งเป็นแบคทีเรียที่สามารถพบได้บริเวณผิวหนังของมนุษย์ โดยโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยการพลูในอัตราส่วน 1 3 และ 5 phr จะมี Antimicrobial index สำหรับเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* เท่ากับ 2.69 3.03 และ 3.23 ตามลำดับ และมี Antimicrobial index ของการต้านเชื้อ *S. aureus* เท่ากับ 0.92 0.95 และ 1.35 สำหรับตัวอย่างโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยการพลูในอัตราส่วน 1 3 และ 5 phr ตามลำดับ จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียของโพลีเมอร์ผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยการพลู ซึ่งในน้ำมันหอมระเหยการพลูจะมีสาร Eugenol เป็นองค์ประกอบหลัก โดยสารชนิดนี้จะมีฤทธิ์ในการต้านเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Somwang Lekjing และคณะ ที่ได้ทำการศึกษาผลของน้ำมันหอมระเหยการพลูที่มีต่อการต้านของฟิล์มไคโตซาน [55] พบว่าฟิล์มไคโตซานที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยการพลูสามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งชนิดแกรมบวกและแกรมลบ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Jasim Ahmed และคณะ [56] ที่ได้ศึกษาผลของการเติมน้ำมันหอมระเหยการพลูที่มีผลต่อการต้านเชื้อของฟิล์ม PLA/PEG โดยพบว่าฟิล์ม PLA/PEG ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยการพลูสามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งชนิดแกรมบวก (*S. aureus*) และชนิดแกรมลบ (*E. coli*)



ภาพที่ 4.32 แสดงโครงสร้างของผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมบวก (ซ้าย) และแบคทีเรียแกรมลบ (ขวา)

[57]

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดจะพบว่าโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยจะมีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมลบ

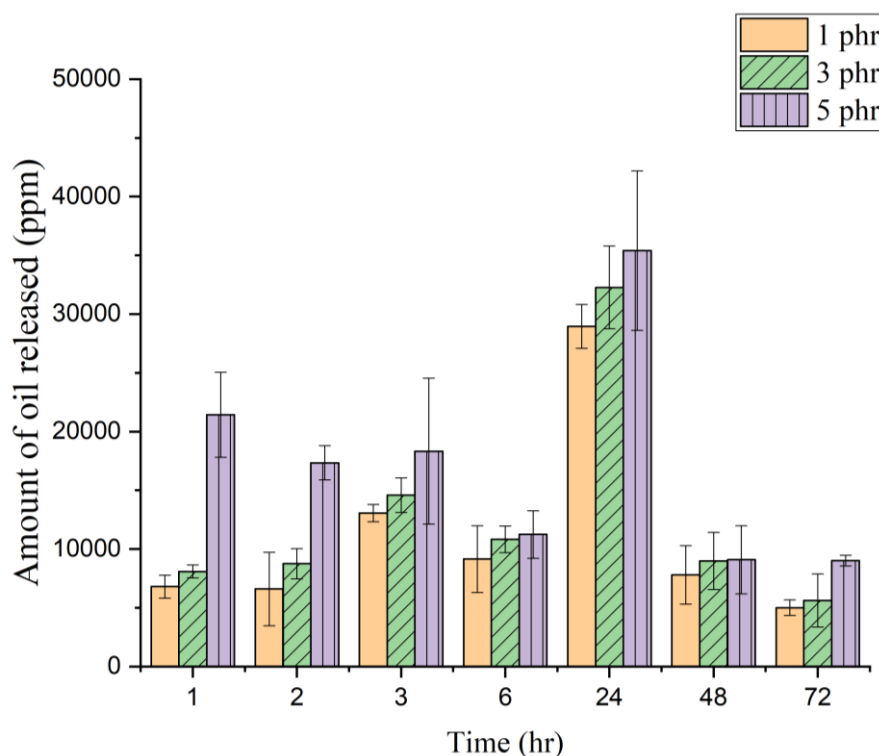
(*E. coli*) ได้ดีกว่าแบคทีเรียชนิดแกรมบวก (*S. aureus*) ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องมาจากความแตกต่างของผนังเซลล์ของแบคทีเรียทั้ง 2 ประเภท ดังแสดงในภาพที่ 4.31 โดยจะเห็นว่าที่ผนังเซลล์ของแบคทีเรียชนิดแกรมลบจะประกอบไปด้วย Lipoprotein Lipopolysaccharides และชั้น phospholipid ซึ่งเป็นส่วนที่มีความเป็น Hydrophobic จึงทำให้น้ำมันหอมระเหยที่มีความเป็น Hydrophobic เหมือนกันสามารถเข้าไปทำลายส่วนของผนังเซลล์ดังกล่าวได้ ทำให้เซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบทำงานผิดปกติจนแบคทีเรียตายไปในที่สุด [10, 58] ในขณะที่ผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกจะประกอบไปด้วย Peptidoglycan เป็นส่วนใหญ่ซึ่งจะมีความหนาของชั้น Peptidoglycan มากกว่าเมื่อเทียบกับ Peptidoglycan ของผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมลบ นอกจากนี้ผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมบวกยังประกอบไปด้วย Teichoic acid ที่เชื่อมกับ Peptidoglycan ด้วยพันธะโควาเลนต์ทำให้น้ำมันหอมระเหยจากเปลือกอบเชยเทศ พบว่าน้ำมันหอมระเหยจากอบเชยเทศมีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียแบคทีเรียทั้งชนิดแกรมบวกและแกรมลบ เช่น *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis*, *Escherichia coli* สำหรับสารออกฤทธิ์ที่เป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมันหอมระเหยอบเชยคือสาร Eugenol เช่นกัน โดยจะมีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมลบได้ดีกว่าแบคทีเรียชนิดแกรมบวก และงานวิจัยของ Seenivasan Prabuseenivasan และคณะ [61] ที่ได้ศึกษาความสามารถในต้านเชื้อแบคทีเรียของน้ำมันหอมระเหยชนิดต่างๆ จากการศึกษาพบว่าน้ำมันหอมระเหยกานพลูมีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* (*E. coli*, ATCC 25922) และ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*, ATCC 25923) ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก โดยจะมีค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถต้านเชื้อแบคทีเรีย (MIC) สำหรับเชื้อ *E. coli* คือที่ความเข้มข้นมากกว่า 1.6 mg/ml ในขณะที่น้ำมันหอมระเหยกานพลูจะมีค่า MIC สำหรับเชื้อ *S. aureus* คือที่ความเข้มข้นมากกว่า 6.4 mg/ml แสดงให้เห็นว่าน้ำมันหอมระเหยกานพลูมีความสามารถในการต้านเชื้อ *E. coli* ได้ดีกว่า *S. aureus*

#### 4.3.7 การศึกษาความสามารถในการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหย (Oil released) ของ โฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลู

การศึกษาความสามารถในการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลู จะนำเอาชิ้นงานโฟมพอลิเมอร์ผสมมาแช่ในสารละลาย PBS โดยจะทำการ

เก็บตัวอย่างสารละลาย PBS ที่มีน้ำมันหอมระเหยปลดปล่อยออกมาในช่วงเวลาต่างๆ จากนั้นจะนำเอาสารละลายที่เตรียมได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometry ที่ความยาวคลื่น 320 nm. ซึ่งเป็นความยาวคลื่นจำเพาะของน้ำมันหอมระเหยกานพลู แล้วนำค่าการดูดกลืนที่วัดได้ไปเทียบกับกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (Calibration curve) โดยการศึกษานี้จะรายงานความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหยกานพลูที่ปลดปล่อยออกมาจากโคมตัวอย่างที่เวลาต่างๆ และความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหยที่ปลดปล่อยออกมาสะสมที่เวลาต่างๆ

สำหรับความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหยกานพลูที่ปลดปล่อยออกมาจากชิ้นงานโคมพอลิเมอร์ผสมจะแสดงในภาพที่ 4.32 และตารางที่ 4.16 จากผลการศึกษาจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกคือช่วงเวลา 1 – 6 ชั่วโมงจะเห็นได้ว่าโคมพอลิเมอร์ผสมจะมีความสามารถในการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยลดลงตามเวลา โดยที่ชั่วโมงที่ 1 จะมีความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหยที่ปลดปล่อยออกมามากที่สุด และเมื่อเวลาผ่านไปถึงช่วงที่ 2 คือที่เวลา 24 ชั่วโมงจะเห็นว่าที่ช่วงเวลานี้จะมีความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหยถูกปลดปล่อยออกมามากที่สุด และช่วงสุดท้ายคือช่วงเวลา 48 – 72 ชั่วโมงจะมีปริมาณการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยออกมาน้อยที่สุด และเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันหอมระเหยสะสมที่ปลดปล่อยออกมาดังแสดงในภาพที่ 4.33 จะพบว่าในช่วงแรกจะมีอัตราการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยมากที่สุดโดยพิจารณาจากความชันของกราฟหรือที่เรียกว่า การปลดปล่อยอย่างมากในช่วงเวลาเริ่มต้น (Initial burst release) [62] และเมื่อเวลาผ่านไปจะพบว่าที่ทุกอัตราส่วนการเติมน้ำมันหอมระเหยจะมีการปลดปล่อยที่ใกล้เคียงกันและเริ่มเข้าสู่สมดุลโดยพิจารณาจากความชันที่ลดลง



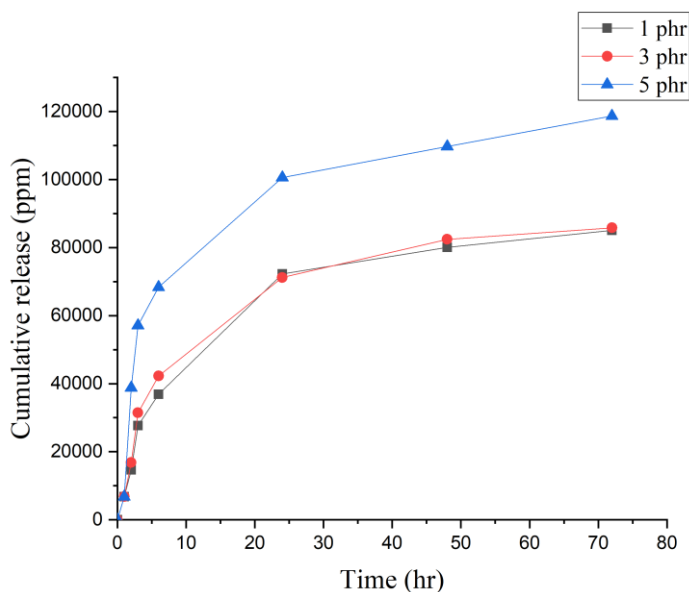
ภาพที่ 4.33 แสดงความสามารถในการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหย (Oil released) ของโพลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 4.16 แสดงความสามารถในการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหย (Oil released) ของโพลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ

Time (s)	Amount of oil released (ppm)		
	1 phr	3 phr	5 phr
1	6796.02 ± 983.94 <sup>f,g</sup>	8094.37 ± 547.50 <sup>f,g</sup>	21428.40 ± 3632.46 <sup>b,c</sup>
2	6599.50 ± 3115.89 <sup>f,g</sup>	8747.17 ± 1288.46 <sup>e,f,g</sup>	17338.90 ± 1453.31 <sup>c,d,e</sup>
3	13048.50 ± 737.99 <sup>c,d,e,f,g</sup>	14594.97 ± 1471.59 <sup>c,d,e,f</sup>	18326.93 ± 6208.48 <sup>c,d</sup>
6	9141.93 ± 2840.12 <sup>e,f,g</sup>	10827.37 ± 1122.52 <sup>d,e,f,g</sup>	11239.87 ± 2024.83 <sup>d,e,f,g</sup>
24	35396.20 ± 1860.75 <sup>a</sup>	28952.57 ± 3516.46 <sup>a,b</sup>	32275.17 ± 6789.50 <sup>a</sup>
48	7806.40 ± 2488.66 <sup>d,e,f,g</sup>	8981.53 ± 2434.12 <sup>e,f,g</sup>	9094.57 ± 2894.47 <sup>e,f,g</sup>
72	5002.40 ± 664.81 <sup>g</sup>	5625.87 ± 2255.21 <sup>g</sup>	9014.53 ± 452.58 <sup>e,f,g</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )





ภาพที่ 4.34 แสดงความสามารถในการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยสะสม (Cumulative released) ของ โฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ

เมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยจะพบว่าที่ปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหย 5 phr จะมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยถูกปลดปล่อยออกมามากที่สุด รองลงมาเป็นที่อัตราส่วนการเติมน้ำมันหอมระเหย 3 phr และ 1 phr ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียพบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณน้ำมันหอมระเหยในโฟมพอลิเมอร์ผสม จะทำให้โฟมพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการต้านเชื้อที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาจากการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยสะสม (ภาพที่ 4.33) จะเห็นว่าที่อัตราส่วนการเติมน้ำมันหอมระเหย 1 และ 3 phr จะมีปริมาณการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยสะสมใกล้เคียงกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT โดยมีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ แต่เนื่องจากเจลาตินและ PBAT มีความเข้ากันได้ไม่ดีจึงได้มีการเติม PBAT-g-MA เพื่อทำหน้าที่เป็น Compatibilizer ระหว่างวัฏภาคทั้ง 2 สำหรับงานวิจัยนี้จะมีเจลาตินเป็นวัฏภาคหลักและมี PBAT เป็นวัฏภาครอง ซึ่งจะทำการศึกษาผลของการเติม PBAT-g-MA ที่มีต่อสมบัติของแผ่นโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT และศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างเจลาตินและ PBAT ปริมาณ Blowing agent และปริมาณของน้ำมันหอมระเหยที่มีต่อสมบัติของโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT จากผลการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 ศึกษาการเตรียม Plasticized gelatin โดยใช้น้ำและกลีเซอรอลเป็น Plasticizer พบว่าจะมีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ลดลงเมื่อเทียบกับเจลาตินที่ไม่ผ่านการพลาสติกไซส์ และสำหรับการเตรียม PBAT-g-MA ที่ทำหน้าที่เป็น Compatibilizer จะสามารถยืนยันปฏิกิริยาการกราฟติคของ MA บนสายโซ่ของ PBAT สามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NMR

5.1.2 การศึกษาการเตรียมฟิล์มโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT พบว่าเจลาตินและ PBAT จะเกิดการแยกวัฏภาคกัน แต่เมื่อมีการเติม PBAT-g-MA ลงไปในแผ่นโพลีเอสเตอร์ผสมจะทำให้แผ่นโพลีเอสเตอร์ผสมมีความเข้ากันระหว่างวัฏภาคที่ดีขึ้น ส่งผลทำให้แผ่นโพลีเอสเตอร์ผสมมีค่า Tensile strength และ Elongation at break ที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นโพลีเอสเตอร์ผสมที่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA นอกจากนี้ความเข้ากันที่เพิ่มขึ้นยังทำให้แผ่นโพลีเอสเตอร์ผสมมีความเป็น Hydrophobic จึงทำให้แผ่นโพลีเอสเตอร์ผสมมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ลดลง และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ PBAT ในโพลีเอสเตอร์ผสมจะทำให้โพลีเอสเตอร์ผสมมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ลดลง

5.1.3 การศึกษาการเตรียมโพลีเอสเตอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า เมื่อมีการเพิ่มสัดส่วน PBAT ในโพลีเอสเตอร์ผสมจะทำให้โพลีเอสเตอร์ผสมมีปริมาณเซลล์โพลีเมอร์/พื้นที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้โพลีเอสเตอร์ผสมที่มีความหนาแน่นลดลง นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้ความแข็งแรงเชิงกลของ

โพลีเอสเตอร์ผสมลดลง รวมถึงจะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ลดลงเช่นเดียวกัน และเมื่อพิจารณาปริมาณ การเติม Blowing agent พบว่า เมื่อปริมาณ Blowing agent เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณเซลล์โพลี/พื้นที่เพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่น ความแข็งแรงเชิงกลและความสามารถในการดูดซึมน้ำลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าโพลีเอสเตอร์ผสมที่เตรียมได้จะไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ สำหรับสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับนำไปศึกษาผลการของเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูคือที่อัตราส่วน 50/50 โดยมีการเติม Blowing agent 15 phr (50/50\_15)

5.1.4 การศึกษาการเตรียมโพลีเอสเตอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า เมื่อมีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูจะทำให้เกิดเซลล์โพลีขนาดเล็กมากยิ่งขึ้น แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูจะทำให้เกิดเซลล์โพลีขนาดใหญ่โดยจะมีลักษณะการเชื่อมต่อกันเป็นโพร่ง นอกจากนี้การเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูจะทำให้โพลีเอสเตอร์ผสมมีความหนาแน่น สมบัติเชิงกล และความสามารถในการดูดซึมน้ำลดลง นอกจากนี้ น้ำมันกานพลูจะช่วยให้โพลีเอสเตอร์ผสมที่เตรียมได้มีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียทั้ง *S. aureus* และ *E. coli* โดยน้ำมันหอมระเหยกานพลูที่เติมลงไปจะไม่ส่งผลต่อความเป็นพิษต่อเซลล์

5.1.5 เมื่อพิจารณาในแง่ของการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปิดแผลพบว่าลักษณะชิ้นงานของโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูที่ได้อาจจะยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ เนื่องจากลักษณะชิ้นงานมีความเป็นรูพรุนที่ผิวต่ำ รวมถึงพื้นผิวชิ้นงานบางบริเวณจะมีลักษณะเป็นพื้นผิวที่ปิดจึงส่งผลทำให้การระบายอากาศจากแผลเกิดได้ไม่ดีนัก

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 โพลีเอสเตอร์ผสมที่เตรียมได้มีขนาดเซลล์และการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากโพลีเอสเตอร์ที่เลือกใช้คือเจลาตินที่มีความสามารถในการกักเก็บฟองแก๊สต่ำ เมื่อมีฟองแก๊สเกิดขึ้นจึงส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมขนาดและการกระจายตัวได้ ดังนั้นจึงควรปรับปรุงโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ให้มีความสามารถในการกักเก็บฟองแก๊สได้ เช่น ทำให้เกิดการเชื่อมขวางภายในภูมิภาคของเจลาติน

5.2.2 เนื่องจากเจลาตินเป็นโพลีเอสเตอร์ที่เมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลานานจะเกิดการเสื่อมสภาพได้ ส่งผลทำให้ชิ้นงานที่เตรียมได้มีสีที่เปลี่ยนไปรวมถึงมีความแข็งมากขึ้น ดังนั้นจึงควรลดขั้นตอนหรือกระบวนการเพื่อที่จะให้เจลาตินผ่านการให้ความร้อนลดลง

5.2.3 สำหรับกระบวนการการขึ้นรูปโพลีเมอร์ผสมด้วยกระบวนการกดอัด จะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความหนาและความแข็งมาก จึงอาจจะยังไม่เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ ดังนั้นจึงควรที่จะปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปเพื่อที่จะให้ได้ชิ้นงานที่มีความหนาและความแข็งที่เหมาะสม

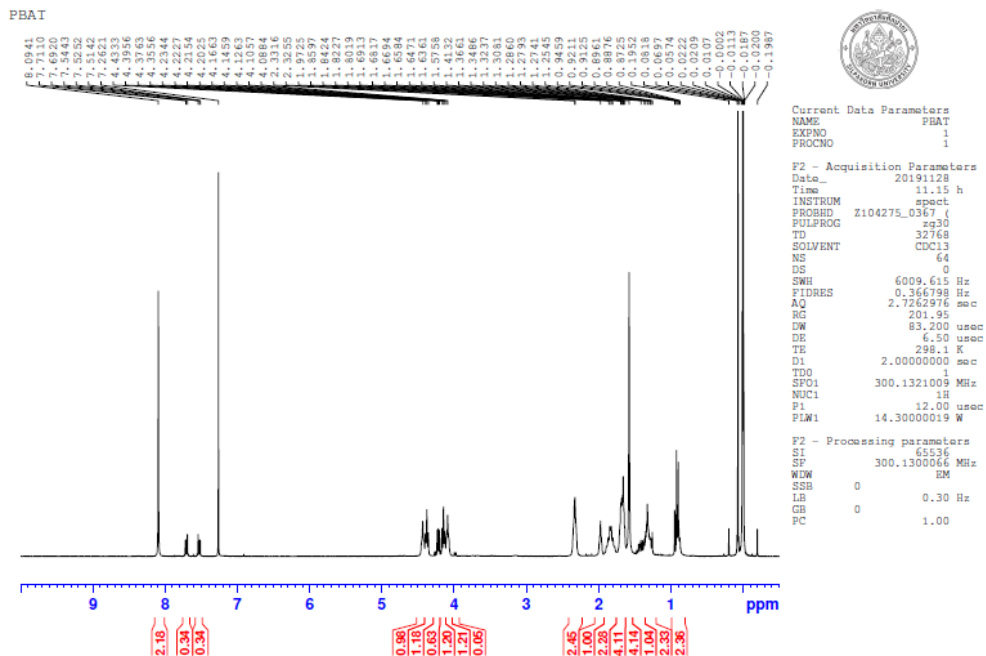




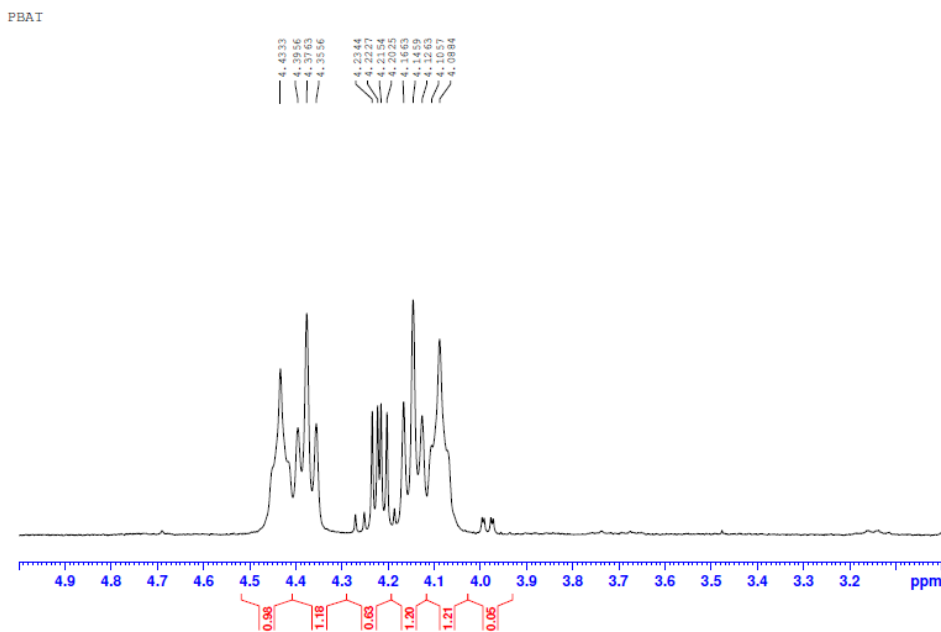


ภาคผนวก ก  
ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่างๆ

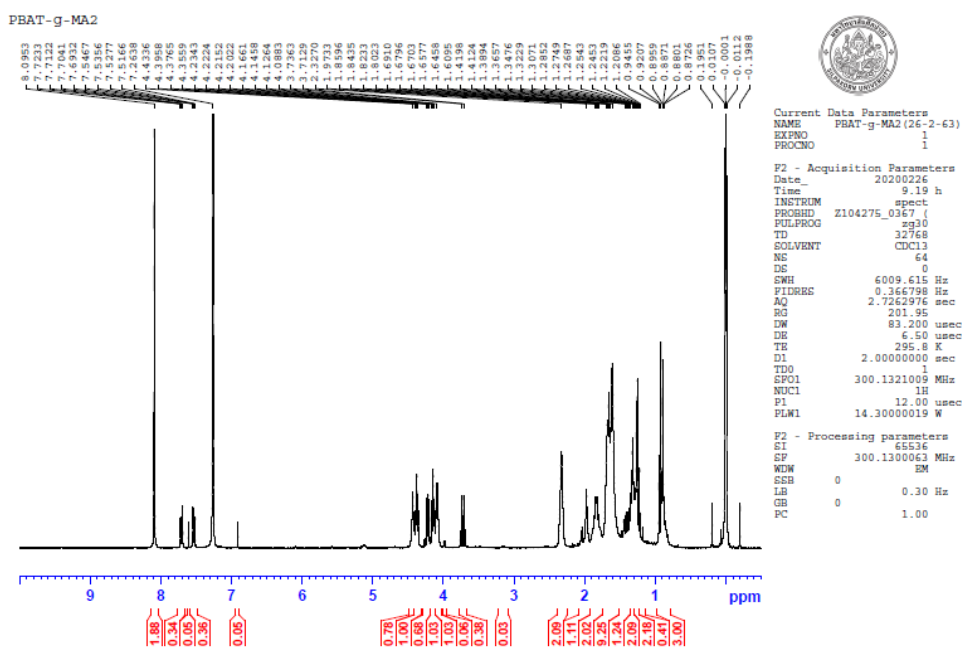
ภาคผนวก ก.1 แสดงการพิสูจน์เอกลักษณ์ PBAT-g-MA ด้วยเทคนิค NMR



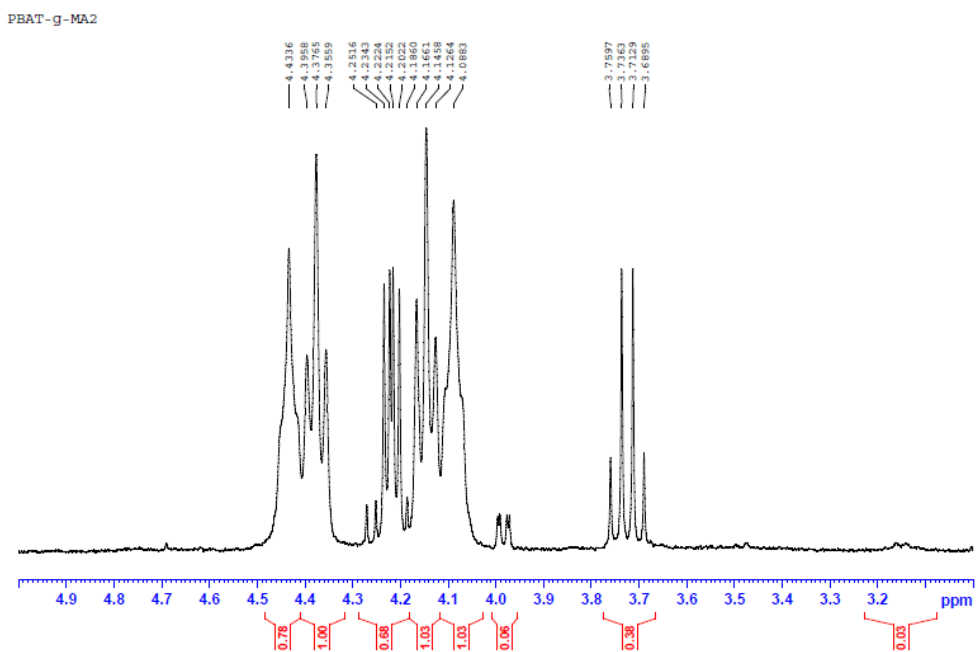
ภาพภาคผนวกที่ ก-1 แสดง <sup>1</sup>H NMR spectra ของ PBAT



ภาพภาคผนวกที่ ก-2 แสดง <sup>1</sup>H NMR spectra ของ PBAT



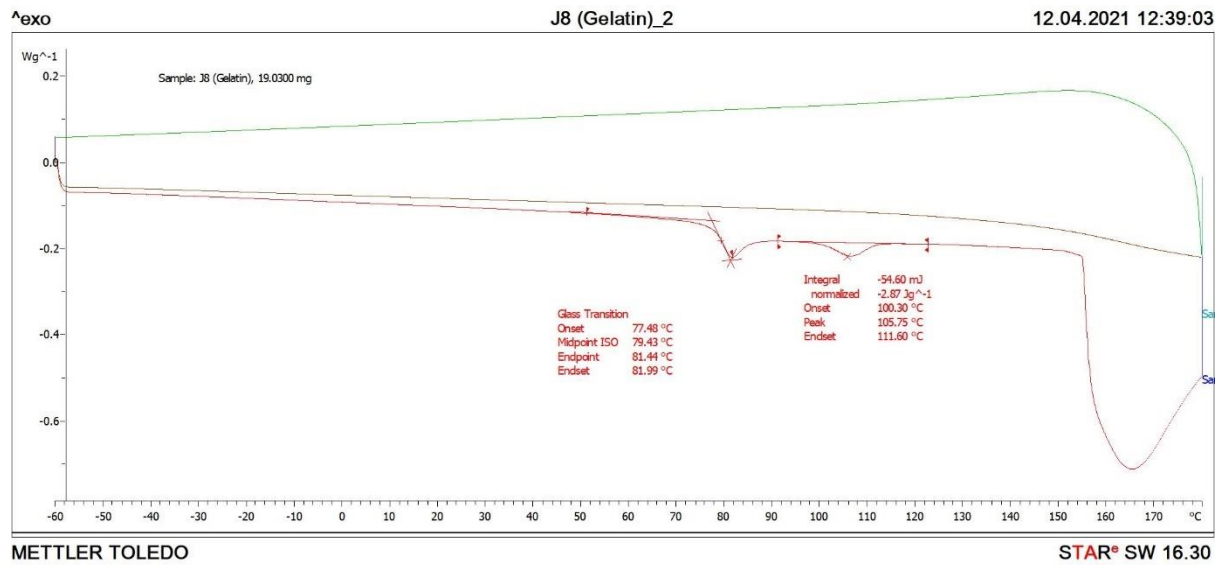
ภาพภาคผนวกที่ ก-3 แสดง  $^1\text{H}$  NMR spectra ของ PBAT-g-MA



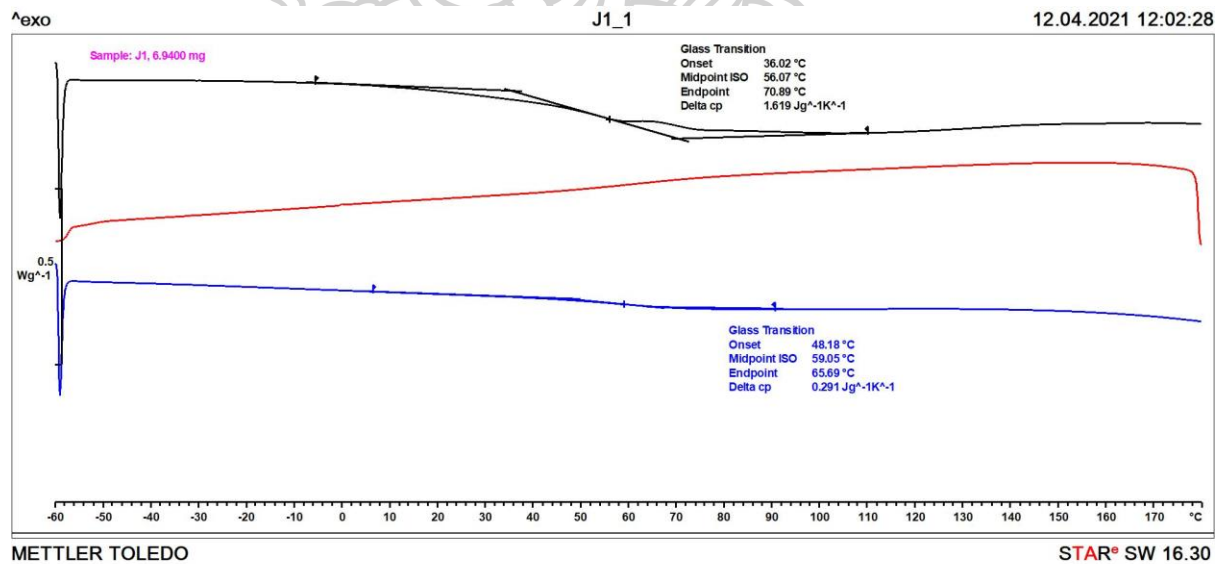
ภาพภาคผนวกที่ ก-4 แสดง  $^1\text{H}$  NMR spectra ของ PBAT-g-MA



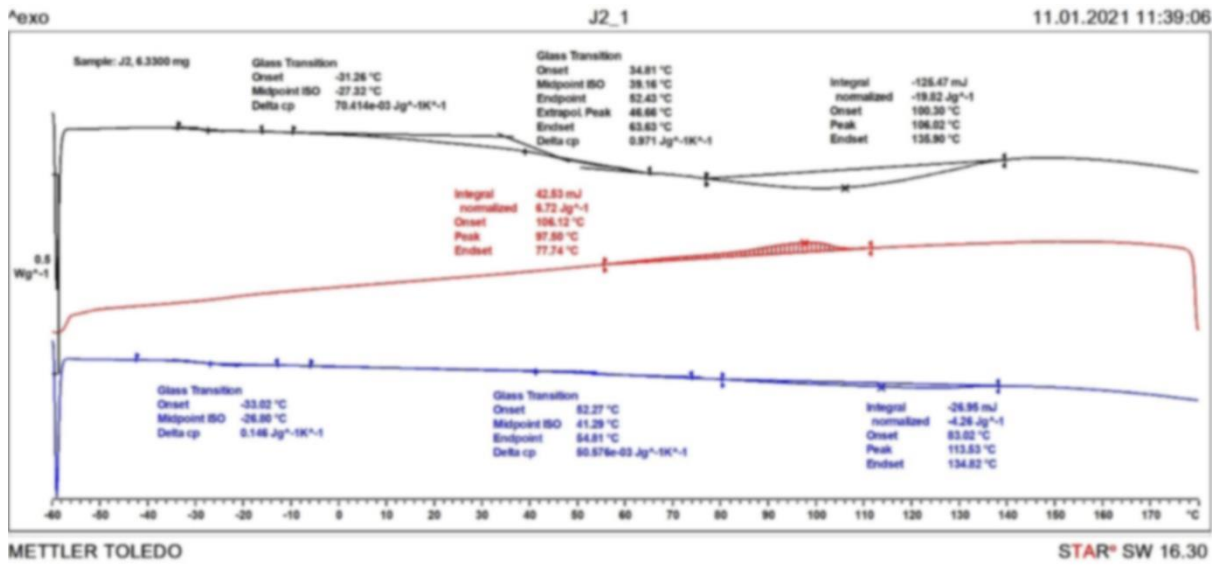
ภาคผนวก ก.2 แสดงการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



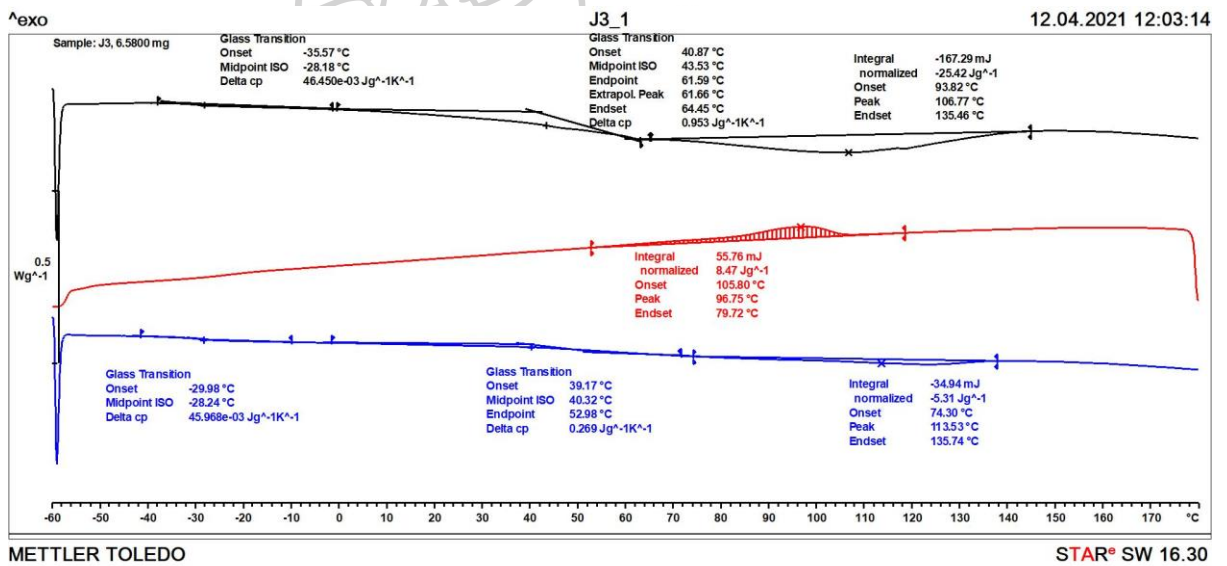
ภาพภาคผนวกที่ ก-5 แสดง DSC thermogram ของ Gelatin pellet



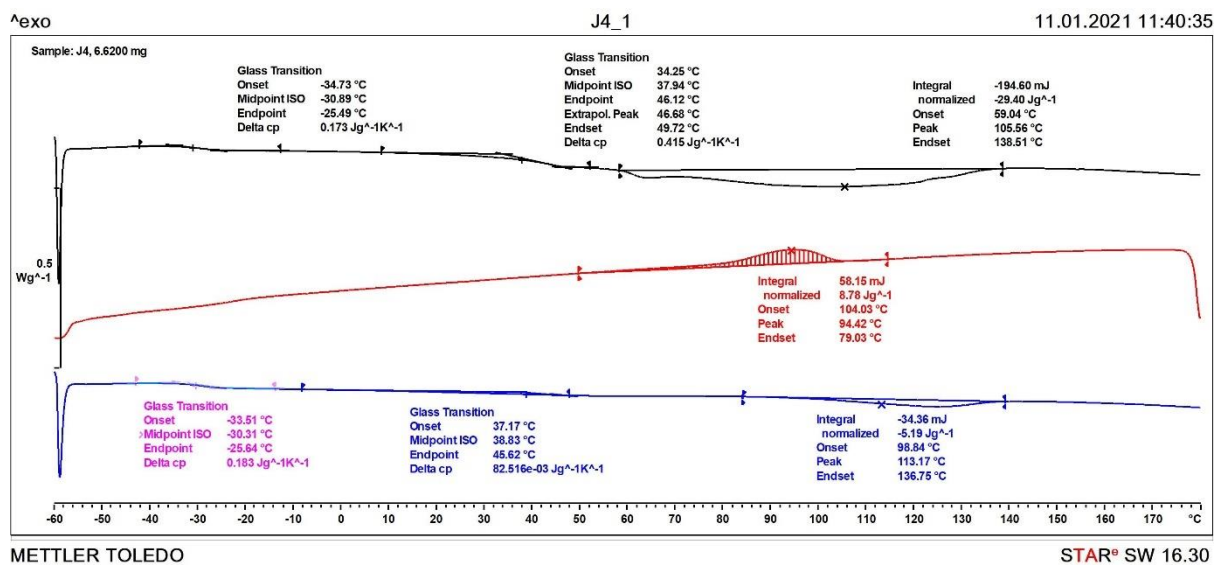
ภาพภาคผนวกที่ ก-6 แสดง DSC thermogram ของ Plasticized gelatin



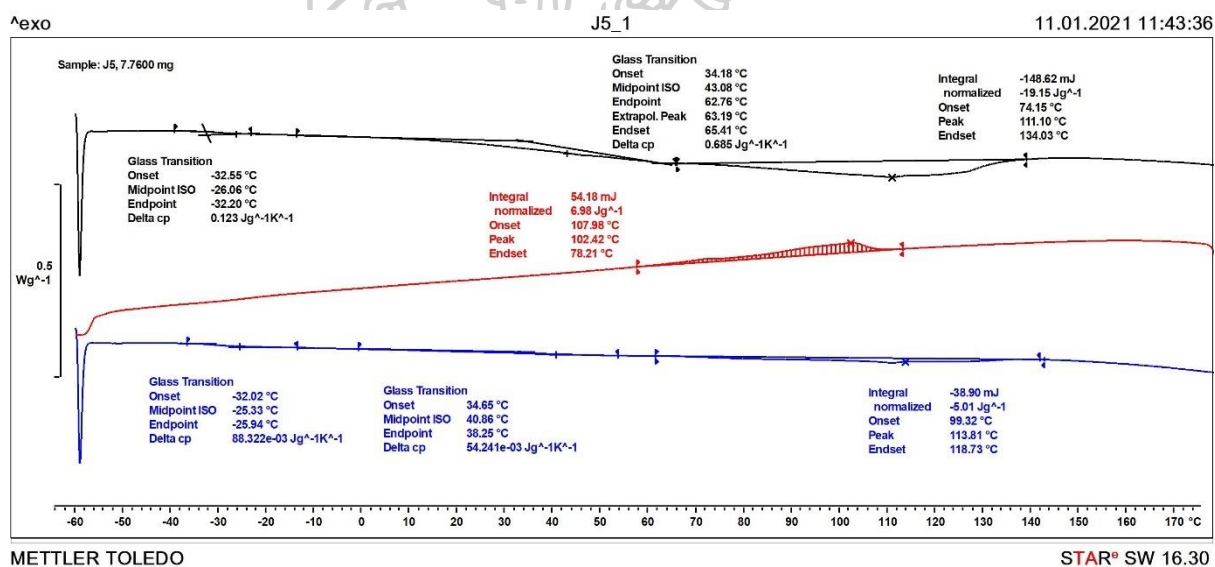
ภาพภาคผนวกที่ ก-7 แสดง DSC thermogram ของฟิล์มเจลาติน/PBAT 70/30



ภาพภาคผนวกที่ ก-8 แสดง DSC thermogram ของฟิล์มเจลาติน/PBAT 60/40

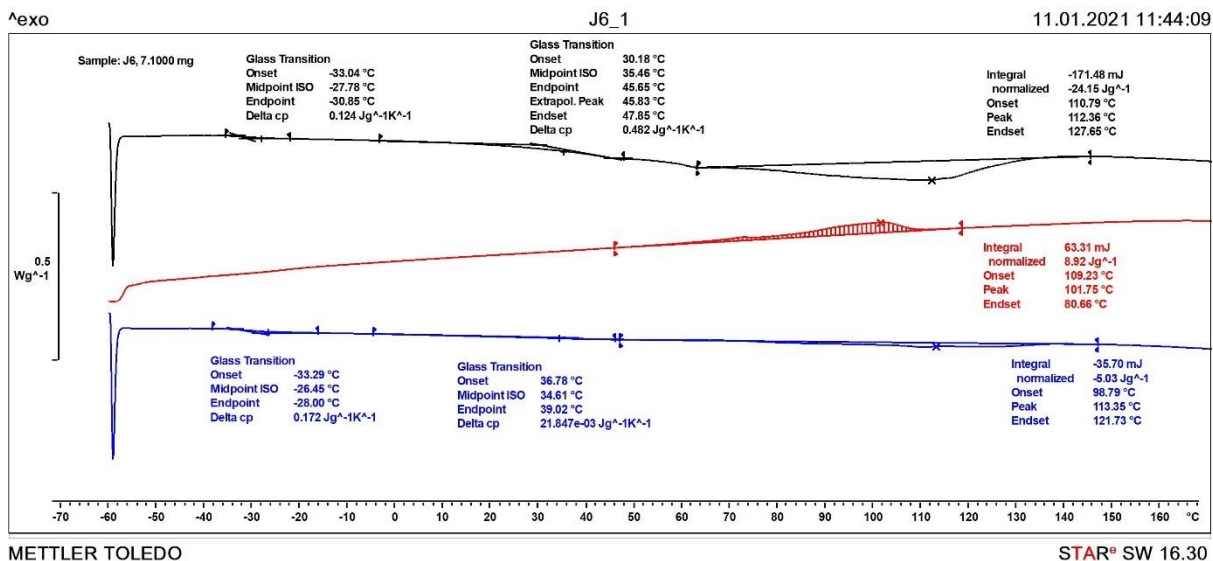


ภาพภาคผนวกที่ ก-9 แสดง DSC thermogram ของฟิล์มเจลาติน/PBAT 50/50

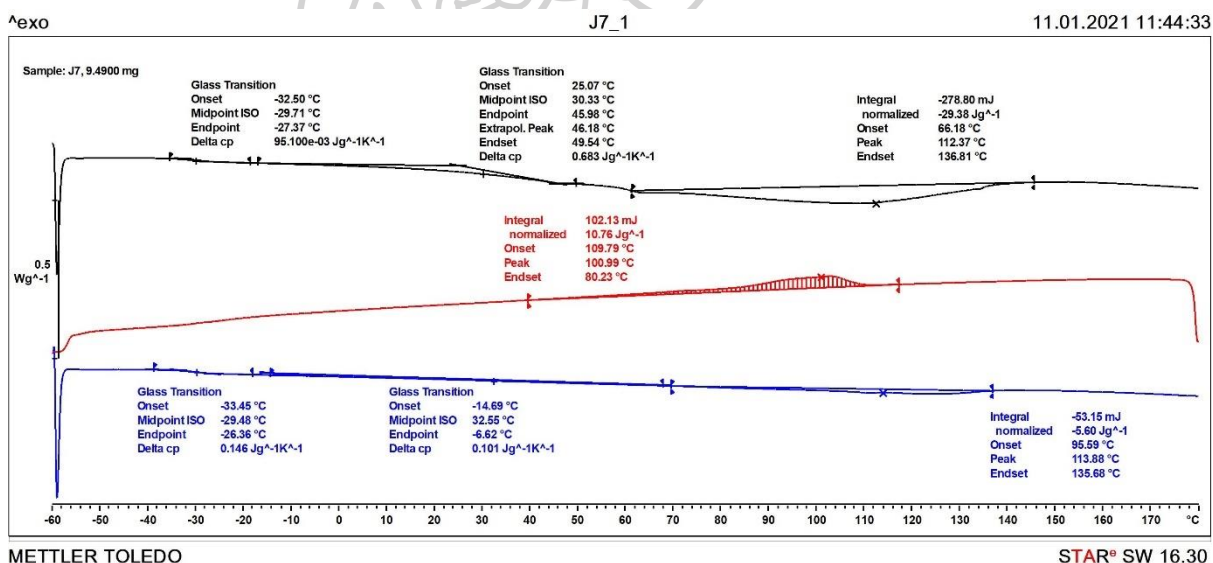


ภาพภาคผนวกที่ ก-10 แสดง DSC thermogram ของฟิล์มเจลาติน/PBAT ที่มีการเติม PBAT-g-MA

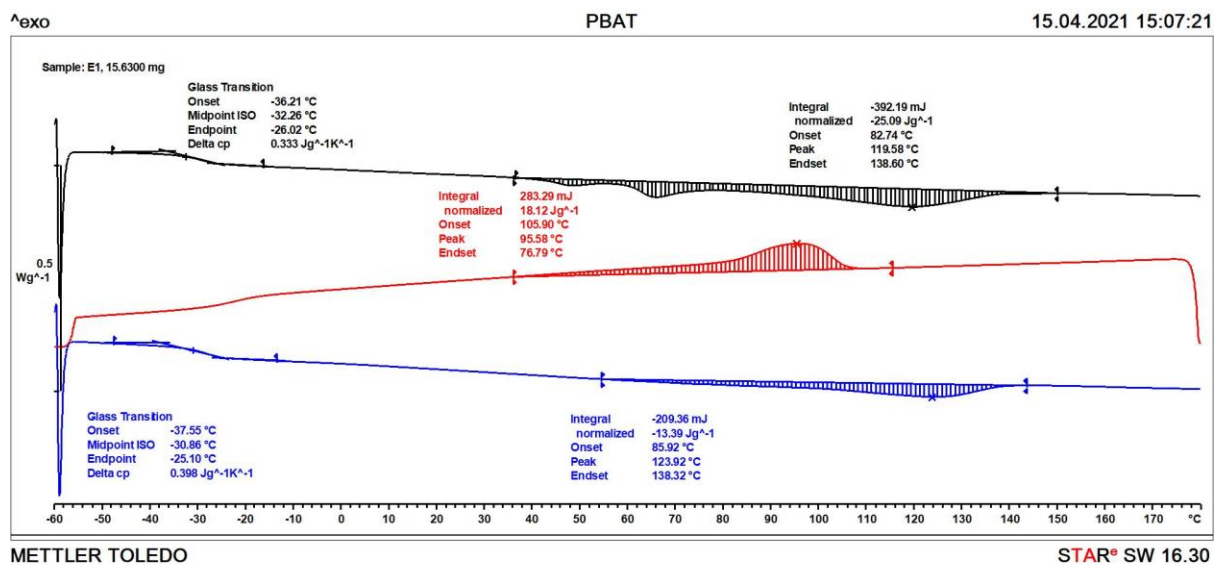
70/30/20



ภาพภาคผนวกที่ ก-11 แสดง DSC thermogram ของฟิล์มเจลาติน/PBAT ที่มีการเติม PBAT-g-MA 60/40/20



ภาพภาคผนวกที่ ก-12 แสดง DSC thermogram ของฟิล์มเจลาติน/PBAT ที่มีการเติม PBAT-g-MA 50/50/20



ภาพภาคผนวกที่ ก-13 แสดง DSC thermogram ของ PBAT



ภาคผนวก ก.3 แสดงการศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบการดึงยืด (Tensile testing)

ตารางผนวกที่ ก-1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบการดึงยืด

ตัวอย่าง	ชั้นที่	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation @ break (%)
Gelatin	1	1.28	3.63	448.20
	2	1.00	3.00	412.62
	3	1.03	2.05	310.63
	4	1.27	3.26	437.58
	5	0.99	2.50	362.57
	6	1.07	2.88	412.72
	7	0.97	2.22	333.98
	8	0.84	2.50	381.28
	9	1.22	3.57	488.59
	10	1.16	3.56	493.79
	11	1.04	3.25	482.44
	12	1.06	3.22	459.72
	13	1.18	3.90	508.32
	14	1.09	3.71	503.76
	mean	1.09	3.09	431.15
	SD	0.12	0.58	64.49
70/30	1	8.99	4.51	379.59
	2	6.88	4.87	460.63
	3	8.35	5.47	445.09
	4	7.21	5.35	426.03
	5	7.61	5.49	380.87
	6	9.17	5.34	403.90
	7	8.47	5.16	449.11
	8	10.36	4.87	388.62
	9	7.05	5.03	431.21
	10	7.24	5.95	508.35

ตัวอย่าง	ชั้นที่	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation @ break (%)
	11	9.47	4.79	383.01
	12	8.33	4.80	451.95
	13	8.23	6.087	517.28
	14	7.70	4.97	428.30
	15	7.69	6.23	480.91
	mean	8.18	5.26	435.66
	SD	0.99	0.51	44.28
60/40	1	13.98	5.98	480.11
	2	13.68	7.033	528.91
	3	13.68	6.91	518.77
	4	12.91	6.31	474.28
	5	13.67	8.08	452.12
	6	12.17	6.99	540.14
	7	13.31	6.64	463.59
	8	11.98	7.37	488.77
	9	13.20	6.09	440.23
	10	11.66	7.38	524.58
	11	12.32	6.84	530.45
	12	11.59	6.84	382.10
	mean	12.85	6.87	485.34
	SD	0.86	0.58	46.73
50/50	1	20.68	7.72	543.74
	2	17.91	9.87	727.34
	3	18.13	8.83	584.25
	4	18.75	9.12	529.00
	5	18.81	8.90	665.70
	6	17.70	10.71	753.28
	7	17.50	9.81	699.68
	8	17.57	9.86	712.93

ตัวอย่าง	ชั้นที่	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation @ break (%)
	9	18.84	9.82	564.39
	10	18.47	9.05	588.54
	11	19.83	8.95	660.77
	12	18.59	10.31	719.84
	13	18.63	8.79	618.52
	14	18.15	8.19	611.00
	15	19.01	9.97	680.25
	mean	18.57	9.32	643.94
	SD	0.84	0.81	71.99
70/30/20	1	6.90	6.06	366.88
	2	6.21	5.92	417.00
	3	6.48	4.22	286.19
	4	4.77	6.71	465.17
	5	5.15	6.89	567.65
	6	4.76	7.50	579.65
	8	6.56	7.14	466.26
	9	7.11	5.70	393.55
	10	6.35	6.16	398.96
	11	5.85	5.56	356.59
	12	6.13	5.93	413.25
	13	6.42	5.98	466.02
	14	6.09	6.26	401.50
	15	7.31	5.29	362.40
	mean	6.15	6.09	424.36
	SD	0.79	0.82	79.86
60/40/20	1	11.24	6.27	444.39
	2	10.60	7.19	488.79
	3	10.29	8.09	512.76
	4	10.87	6.37	439.32



ตัวอย่าง	ชั้นที่	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation @ break (%)
	5	8.26	8.70	676.22
	6	10.19	7.63	438.73
	7	10.10	6.04	456.25
	8	10.92	6.01	389.53
	9	10.13	6.33	433.18
	10	8.12	9.03	638.83
	11	10.41	6.89	481.97
	12	11.16	6.03	397.65
	13	10.66	6.93	443.00
	14	10.62	7.27	479.90
	15	10.87	7.324	519.14
	mean	10.30	7.07	482.64
	SD	0.92	0.96	80.19
50/50/20	1	15.23	9.86	658.09
	2	19.84	7.54	512.85
	3	16.31	8.63	599.08
	4	14.59	9.59	698.44
	5	17.42	8.13	569.65
	6	15.40	9.44	633.46
	7	18.48	7.46	513.66
	8	14.96	9.30	722.14
	9	16.80	7.21	488.74
	10	18.32	7.14	497.68
	11	18.79	7.46	449.93
	12	15.74	9.57	685.25
	13	19.35	7.54	518.89
	14	18.48	7.41	499.16
	15	16.06	8.06	590.68
	mean	17.05	8.29	575.85

ตัวอย่าง	ชั้นที่	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation @ break (%)
	SD	1.72	1.00	86.92
PBAT	1	45.79	17.11	962.01
	2	45.56	16.9	827.56
	3	48.50	14.81	588.08
	4	46.07	15.69	770.66
	5	48.32	15.42	840.64
	6	46.03	17.18	873.36
	7	42.52	18.78	915.66
	8	47.59	18.44	907.29
	9	45.46	18.24	883.47
	10	46.29	20.40	1,105.30
	11	46.34	19.38	891.99
	12	47.05	18.81	930.40
	13	51.97	17.83	938.31
	14	43.48	20.20	1,022.10
	15	49.24	15.99	814.59
	16	53.59	13.94	686.38
	17	47.37	19.98	964.85
	18	48.40	18.95	775.34
	19	48.03	19.91	781.72
	20	53.10	15.08	735.33
	mean	47.53	17.66	860.75
	SD	2.84	1.97	119.29

ภาคผนวก ก.4 แสดงความสามารถในการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

ตารางผนวกที่ ก-2 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

Time (hr)	Water absorption (%)						
	70-30	60-40	50-50	70-30-20	60-30-20	50-50-20	PBAT
1	35.75	18.70	14.60	55.17	22.69	21.41	1.52
2	53.62	28.28	20.58	56.57	34.70	22.51	2.30
3	64.09	36.11	26.62	57.38	44.27	33.97	1.30
4	69.22	43.91	31.83	58.47	51.33	41.67	1.25
5	71.11	50.85	36.78	56.67	53.67	45.41	1.49
6	71.82	57.42	41.48	56.64	54.90	48.54	1.43
9	70.69	61.83	52.00	55.51	53.98	50.79	1.90
12	70.68	65.55	51.26	55.19	51.52	47.85	2.04
15	68.52	66.58	56.82	53.07	50.04	46.65	1.46
24	68.26	68.60	62.93	53.22	49.30	44.65	1.55
30	69.82	69.43	63.61	52.48	50.35	44.77	2.17
36	68.53	68.46	61.48	52.24	49.18	44.37	2.30
48	68.73	66.08	57.37	52.16	50.87	45.52	2.64
72	70.42	67.41	56.51	55.6	53.66	46.74	2.67
96	67.42	64.98	55.37	54.6	51.61	44.25	2.34
120	65.71	62.07	57.02	52.66	49.93	42.53	2.06
168	63.06	60.57	56.61	52.17	49.41	43.23	2.44
192	61.84	57.39	53.98	51.82	49.40	44.19	2.59
216	59.36	57.25	52.23	49.19	46.79	42.74	2.41
264	57.9	57.44	51.81	47.66	45.53	43.4	3.02
288	55.07	55.54	50.23	45.13	44.89	41.54	2.95
312	52.58	53.97	50.13	44.44	43.17	40.87	2.55
336	53.02	52.31	49.42	42.18	42.31	41.24	2.44

ตารางผนวกที่ ก-3 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของโพลีเมอร์ PBAT และโพลีเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT (50/50)

Time (hr)	Water absorption (%)					
	P-5	P-10	P-15	5_5	5_10	5_15
1	15.02	15.90	16.41	14.42	11.22	8.91
2	19.92	17.87	18.20	17.85	17.57	11.69
3	25.79	17.88	20.99	39.14	19.78	9.71
4	28.08	13.61	16.32	39.06	20.01	10.76
5	31.92	14.97	15.52	36.71	21.56	11.79
6	33.49	14.19	13.29	34.62	24.07	11.91
9	30.68	15.01	13.02	35.33	25.98	11.21
12	29.78	15.89	13.46	35.89	24.47	11.80
15	28.36	15.6	13.78	40.12	23.72	12.56
24	28.34	15.66	14.3	41.3	22.41	13.80
30	29.11	14.67	14.85	42.11	23.07	14.49
36	29.96	14.32	14.36	43.12	23.99	15.08
48	29.98	15.03	15.41	43.96	24.31	17.25
72	30.54	14.89	14.98	44.42	24.82	19.48
96	30.96	14.78	15.32	45.86	25.53	22.10
120	30.50	15.41	15.14	46.00	26.53	23.00
144	30.69	15.64	15.09	47.00	27.45	24.00
168	31.01	16.12	14.32	47.74	28.3	25.85
192	31.70	16.34	14.56	48.49	27.63	26.11
216	31.73	16.98	14.66	49.00	28.22	26.72
240	31.87	17.04	14.78	49.64	28.86	27.82
264	32.36	16.89	14.98	51.08	29.37	28.85
288	32.68	17.58	14.63	50.99	29.87	29.46
312	32.23	17.88	15.3	53.01	30.11	29.23
336	31.98	18.21	15.74	52.23	30.78	30.46

Time (hr)	Water absorption (%)					
	P-5	P-10	P-15	5_5	5_10	5_15
360	31.32	18.42	15.78	52.96	31.06	30.86
384	31.56	18.56	15.86	53.23	32.4	31.42
408	32.04	18.31	15.84	54.33	32.47	31.98
432	32.85	18.44	15.94	55.68	33.10	32.40
456	33.21	18.53	16.33	56.18	34.67	33.55
480	33.41	18.96	16.04	57.12	34.24	36.42
504	33.87	18.99	16.53	58.04	35.93	36.80

ตารางผนวกที่ ก-4 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของโพลีเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตระหว่างเจลลาตินและ PBAT (60/40 และ 70/30)

Time (hr)	Water absorption (%)					
	6_5	6_10	6_15	7_5	7_10	7_15
1	14.84	10.39	10.00	31.80	35.76	14.12
2	19.59	12.62	13.89	38.99	45.97	18.57
3	25.90	14.93	17.16	38.38	46.63	22.29
4	27.87	15.329	19.09	43.27	49.85	23.14
5	30.93	16.66	20.50	44.35	51.21	26.92
6	37.74	18.32	23.47	43.62	49.44	26.82
9	46.69	19.59	24.50	44.86	49.20	27.90
12	47.32	23.81	25.34	47.97	50.18	30.00
15	48.4	25.67	25.14	49.02	54.99	30.96
24	49.86	27.57	23.09	53.34	56.85	29.35
30	50.61	28.94	20.44	52.33	56.29	26.31
36	51.55	29.2	18.36	51.41	58.28	24.38
48	50.61	30.59	18.36	59.28	61.25	25.42
72	51.39	31.53	17.40	63.07	65.87	27.42
96	51.86	32.47	19.00	69.79	70.47	26.10

Time (hr)	Water absorption (%)					
	6_5	6_10	6_15	7_5	7_10	7_15
120	52.30	32.80	20.00	71.00	73.00	26.50
144	53.00	33.00	21.00	72.50	75.00	26.90
168	53.67	33.59	22.39	74.74	77.52	25.49
192	54.62	34.79	23.66	77.42	79.57	27.52
216	55.91	35.96	24.69	79.26	85.84	29.93
240	56.68	36.79	27.34	87.65	89.93	34.88
264	57.98	36.48	27.02	89.89	92.10	34.91
288	57.17	37.83	27.15	90.28	91.20	36.54
312	58.23	37.78	27.48	92.83		
336	57.72	38.09	28.46	95.32		
360	58.02	38.33	26.32	98.88		
384	59.03	39.77	27.88	102.10		
408	60.22	41.02	26.98	103.56		
432	61.06	41.22	27.67	105.26		
456	61.44	40.10	26.32			
480	62.00	40.70	26.88			
504	62.48	40.98	27.24			

ตารางผนวกที่ ก-5 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหย

Time (hr)	Water absorption (%)			
	0 phr	1 phr	3 phr	5 phr
1	8.91	3.14	4.29	4.81
2	11.69	2.51	4.91	7.31
3	9.71	2.68	8.80	7.41
4	10.76	4.24	13.17	7.18
5	11.79	7.85	15.36	7.37

Time (hr)	Water absorption (%)			
	0 phr	1 phr	3 phr	5 phr
6	11.91	9.58	15.08	6.25
9	11.21	12.50	10.12	5.36
12	11.80	12.55	8.35	3.34
15	12.56	13.66	11.03	5.40
24	13.80	13.10	9.34	2.52
30	14.49	12.48	9.70	2.07
36	15.08	13.72	8.61	2.35
48	17.25	13.67	8.50	2.88
72	19.48	13.93	9.00	2.55
96	22.10	13.86	9.71	2.88
120	23.00	15.84	9.84	2.46
144	24.00	16.71	9.62	3.14
168	25.85	17.16	10.16	3.39
192	26.11	17.45	10.69	3.16
216	26.72	18.03	12.00	3.55
240	27.82	19.66	13.51	3.80
264	28.85	22.08	15.91	3.73
288	29.46	22.99	16.80	3.78
312	29.23	21.03	17.45	3.67
336	30.46	21.86	18.86	3.86
360	30.86	21.98	19.64	4.12
384	31.42	22.24	19.63	4.46
408	31.98	22.43	19.36	5.09
432	32.40	22.84	19.53	5.38
456	33.55	22.36	19.32	6.99
480	36.42	22.49	19.36	7.43
504	36.80	22.98	19.82	6.55
528		22.99	20.48	7.63

ภาคผนวก ก.5 แสดงการศึกษาความหนาแน่นของโพลีเอสเตอร์ผสม (Density)

ตารางผนวกที่ ก-6 แสดงข้อมูลที่ได้จากการการศึกษาความหนาแน่นของโพลีเอสเตอร์ผสม (Density) ของโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

ตัวอย่าง	Density (g/cm <sup>3</sup> )			เฉลี่ย
	1	2	3	
PBAT_5	0.379	0.404	0.36	0.381 ± 0.022
PBAT_10	0.411	0.43	0.311	0.384 ± 0.064
PBAT_15	0.291	0.297	0.276	0.288 ± 0.011
50/50_5	0.654	0.72	0.792	0.722 ± 0.069
50/50_10	0.591	0.637	0.578	0.602 ± 0.031
50/50_15	0.572	0.617	0.657	0.615 ± 0.043
60/40_5	0.855	0.86	0.787	0.834 ± 0.041
60/40_10	0.892	0.763	0.727	0.794 ± 0.087
60/40_15	0.506	0.6	0.493	0.533 ± 0.058
70/30_5	0.915	0.921	0.895	0.910 ± 0.014
70/30_10	0.704	0.691	0.711	0.702 ± 0.010
70/30_15	0.491	0.595	0.546	0.544 ± 0.052

ตารางผนวกที่ ก-7 แสดงข้อมูลที่ได้จากการการศึกษาความหนาแน่นของโพลีเอสเตอร์ผสม (Density) ของโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหย

ตัวอย่าง	Density (g/cm <sup>3</sup> )			เฉลี่ย
	1	2	3	
0 phr	0.572	0.617	0.657	0.615 ± 0.043
1 phr	0.514	0.527	0.501	0.514 ± 0.013
3 phr	0.435	0.451	0.427	0.438 ± 0.012
5 phr	0.418	0.416	0.39	0.408 ± 0.016



ภาคผนวก ก.6 แสดงการศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบการกดอัด (Compression)

ตารางผนวกที่ ก-8 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบการกดอัดของ โฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT

ตัวอย่าง	ชั้นที่	Compressive modulus (MPa)	Compressive stress (MPa)
PBAT_5	1	4.91854	1.0995
	2	2.0781	0.60088
	3	1.91907	0.60394
	4	3.04746	0.93539
	5	3.08352	0.91782
	6	2.03307	0.67619
	7	2.92663	0.64747
	8	2.61976	0.67992
	9	1.8982	0.65249
	10	4.25655	1.43617
	Mean	2.87809	0.82498
	S.D	1.02402	0.2735
PBAT_10	1	0.3432	0.08636
	2	0.54323	0.13715
	3	0.32483	0.10642
	4	0.2325	0.07811
	5	1.00629	0.333
	6	0.42764	0.15655
	7	1.97399	0.53607
	8	1.8189	0.71632
	9	0.48025	0.16965
	10	0.67194	0.24495
	Mean	0.78228	0.25646
	S.D	0.62677	0.21361
PBAT_15	1	0.82498	0.24697
	2	0.9353	0.27139

ตัวอย่าง	ชั้นที่	Compressive modulus (MPa)	Compressive stress (MPa)
	3	0.86497	0.32778
	4	0.72831	0.22052
	5	0.97751	0.32965
	6	2.00957	0.62548
	7	0.57166	0.17305
	8	0.9434	0.3
	9	1.46923	0.47514
	10	0.28936	0.08298
	Mean	0.96143	0.3053
	S.D	0.47651	0.15317
50/50_5	1	15.13753	2.80065
	2	23.16816	4.70081
	3	23.40775	5.1386
	4	10.0718	2.06115
	5	17.78475	3.69071
	6	15.74209	3.73081
	7	10.18458	1.84584
	8	8.42179	2.18101
	9	39.80096	10.40163
	10	26.18686	6.34495
	Mean	18.99063	4.28962
	S.D	9.53044	2.59793
50/50_10	1	6.40528	1.60173
	2	3.96108	0.96012
	3	6.32541	1.80535
	4	2.81398	0.73637
	5	3.41433	0.84885
	6	5.06589	1.28859
	7	3.36332	0.85709

ตัวอย่าง	ชั้นที่	Compressive modulus (MPa)	Compressive stress (MPa)
	8	4.55145	1.12006
	9	4.30553	1.11531
	10	8.7167	2.23799
	11	7.98847	1.97989
	12	5.85408	1.40811
	Mean	5.23046	1.32996
	S.D	1.86614	0.48514
50/50_15	1	2.10122	0.47985
	2	2.63441	0.54425
	3	6.75598	1.42034
	4	4.33816	1.01929
	5	2.68629	0.6486
	6	2.88151	0.6192
	7	1.27832	0.28689
	8	1.9148	0.41964
	9	2.17432	0.49947
	10	1.26738	0.26735
	Mean	2.80324	0.62049
	S.D	1.64622	0.35216
60/40_5	1	35.20276	6.63801
	2	37.84066	7.66688
	3	32.76785	7.07712
	4	34.05448	6.26843
	5	36.10407	6.25102
	6	52.14175	9.96254
	7	41.12903	9.21807
	8	9.85805	1.73974
	9	11.78588	2.13802
	10	50.22691	10.09206

ตัวอย่าง	ชั้นที่	Compressive modulus (MPa)	Compressive stress (MPa)
	Mean	34.11114	6.70519
	S.D	13.91075	2.89396
60/40_10	1	2.56928	0.43319
	2	9.10838	1.9435
	3	15.89795	3.18121
	4	1.78985	0.28617
	5	18.2616	3.36504
	6	1.04434	0.17786
	7	1.79388	0.31812
	8	6.89013	1.32315
	9	5.71137	1.35829
	10	9.58965	2.12228
	Mean	7.26564	1.45088
	S.D	6.03201	1.18661
60/40_15	1	0.86217	0.18974
	2	0.7655	0.16629
	3	0.83067	0.13174
	4	0.22579	0.04791
	5	1.11293	0.16667
	6	2.38507	0.46751
	7	2.08183	0.40684
	8	6.84333	1.32442
	9	2.35179	0.46732
	10	3.41099	0.68639
	11	7.85281	1.56728
	12	3.35044	0.68556
	Mean	2.67278	0.52564
	S.D	2.42141	0.48144
70/30_5	1	26.74346	5.56943

ตัวอย่าง	ชั้นที่	Compressive modulus (MPa)	Compressive stress (MPa)
	2	32.35259	6.88915
	3	24.15257	5.20809
	4	40.96943	9.05738
	5	66.03829	13.99662
	6	52.52577	11.95567
	7	53.09528	12.14975
	8	56.50353	11.01547
	9	48.37001	9.46501
	10	48.227	10.96908
	Mean	44.8978	9.62757
	S.D	13.59288	2.95234
70/30_10	1	3.76806	0.75772
	2	4.19191	0.82569
	3	7.23486	1.37308
	4	3.87306	0.77802
	5	6.3269	1.21858
	6	4.81447	0.97043
	7	4.70102	0.9001
	8	8.59162	1.6404
	9	8.68664	1.5872
	10	7.03533	1.35505
	Mean	5.92239	1.14063
	S.D	1.8987	0.33655
70/30_15	1	8.01547	1.67472
	2	1.877	0.38665
	3	0.7259	0.15371
	4	1.03995	0.21663
	5	0.76556	0.16563
	6	0.98623	0.19211

ตัวอย่าง	ชั้นที่	Compressive modulus (MPa)	Compressive stress (MPa)
	7	0.96906	0.20689
	8	0.48995	0.0929
	9	1.19854	0.24724
	10	1.48639	0.30389
	11	0.69972	0.14576
	12	0.53567	0.11654
	Mean	1.56579	0.32522
	S.D	2.06968	0.4327

ตารางผนวกที่ ก-9 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบการกดอัดของ โฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหย

ตัวอย่าง	ชั้นที่	Compressive modulus (MPa)	Compressive stress (MPa)
0 phr	1	0.82498	0.24697
	2	0.9353	0.27139
	3	0.86497	0.32778
	4	0.72831	0.22052
	5	0.97751	0.32965
	6	2.00957	0.62548
	7	0.57166	0.17305
	8	0.9434	0.3
	9	1.46923	0.47514
	10	0.28936	0.08298
	Mean	0.96143	0.3053
	S.D	0.47651	0.15317
1 phr	1	1.76718	0.48185
	2	1.68804	0.51183
	3	6.93942	1.58603

ตัวอย่าง	ชั้นที่	Compressive modulus (MPa)	Compressive stress (MPa)
	4	3.52644	0.87721
	5	2.43672	0.6007
	6	3.9507	0.80473
	7	18.95807	3.60781
	8	2.53439	0.62849
	9	0.83188	0.16762
	10	6.25698	1.43981
	Mean	4.88898	1.07061
	S.D	5.32041	0.99096
3 phr	1	2.51498	0.56577
	2	1.11451	0.28117
	3	0.95532	0.24405
	4	1.35836	0.33793
	5	0.66657	0.16645
	6	1.15117	0.32738
	7	1.17159	0.30846
	8	1.49268	0.38913
	9	1.14289	0.33675
	10	1.34834	0.36009
	Mean	1.29164	0.33172
	S.D	0.48718	0.10385
5 phr	1	3.17279	0.76676
	2	8.44863	2.31165
	3	4.7431	1.35277
	4	1.71863	0.50417
	5	6.33826	1.62257
	6	3.52249	0.87777
	7	3.76659	0.97982
	8	2.93911	0.8362

ตัวอย่าง	ชั้นที่	Compressive modulus (MPa)	Compressive stress (MPa)
	9	0.8921	0.27886
	10	1.35614	0.38668
	Mean	3.68978	0.99172
	S.D	2.32841	0.62097

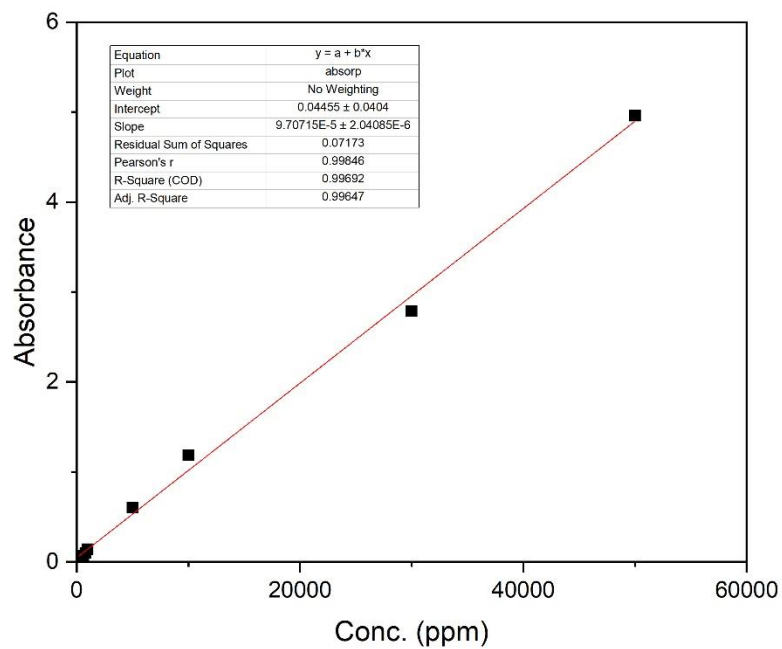
ภาคผนวก ก.7 แสดงการศึกษาการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

ตารางผนวกที่ ก-10 แสดงความสามารถในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของโพลีเมอร์ผสมระหว่าง เจลาตินและ PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยกานพลูในอัตราส่วนต่างๆ

Sample		Zone diameter (mm.)	
		E.coli	S.aureus
1 phr	1	34.99	18.16
	2	39.58	20.17
	3	36.09	19.38
	Mean	36.89	19.24
	SD	2.40	1.01
3 phr	1	39.85	25.59
	2	42.05	20.25
	3	38.86	12.79
	Mean	40.25	19.54
	SD	1.63	6.43
5 phr	1	41.05	21.85
	2	43.28	26.63
	3	42.57	21.88
	Mean	42.30	23.45
	SD	1.14	2.75



ภาคผนวก ก.8 แสดงการศึกษาการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหย (Oil release)



ภาพภาคผนวกที่ ก-14 กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของน้ำมันหอมระเหย (Calibration curve)





ภาคผนวก ข  
การนำเสนอผลงานวิจัย

ภาคผนวก ข.1 การประชุมวิชาการ International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT2020)

บันทึกงานประชุม (Proceeding)



**The International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT2020), September 11–13, 2020**

**Mechanical and Morphological Properties of Gelatin and Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate) Blend**

[Phuengprai<sup>1</sup> and S Hemsri<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000, Thailand

\* Corresponding address (Email: sudsirihemsri@yahoo.com, +66-34-241708)

**HIGHLIGHTS**

- PBAT-g-MA as a compatibilizer was success fully prepared using a twin screw extruder.
- NMR results indicated the grafting reaction of MA on PBAT
- SEM results showed that the compatibility between gelatin and PBAT increases when PBAT-g-MA was added in polymer blends.
- The tensile strength and elongation of gelatin/PBAT with PBAT-g-MA compatibilizer are higher than those of gelatin/PBAT without PBAT-g-MA.

**ABSTRACT**

Gelatin is one of proteins derived from nature and can be biodegradable. In addition, gelatin also has some advantages, including softness and non-toxic. However, gelatin has some disadvantages, especially low mechanical properties. In order to improve the mechanical properties of the gelatin, the gelatin was blending with other polymers. In this work, PBAT (poly(butylene adipate-co-terephthalate)) was selected to blend with gelatin to improve the properties of gelatin. However, gelatin and PBAT have different polarities, leading to immiscibility between both polymers. Therefore, PBAT-g-MA with 20% by weight as a compatibilizer was added to increase compatibility between gelatin and PBAT. PBAT-g-MA (maleic anhydride (MA) grafted PBAT) was prepared by twin screw extruder and grafting reaction was confirmed by NMR. NMR showed the peak at 3.7-3.8 ppm that represents the proton of MA that adjacent to the  $\alpha$ -carbon of the PBAT chain which confirmed the grafting reaction of MA on PBAT. The gelatin/PBAT and gelatin/PBAT/PBAT-g-MA blends were prepared in an internal mixer with the PBAT content of 30, 40 and 50% by weight of the blends. The polymer blends samples were characterization by SEM and Tensile test. SEM results indicated that polymer blends without PBAT-g-MA are immiscible while polymer blends with PBAT-g-MA showed a better compatibility between gelatin and PBAT. Tensile test results showed that the mechanical properties of polymer blends with and without PBAT-g-MA were higher than those gelatin. Furthermore, modulus, tensile stress and elongation of both gelatin/PBAT and gelatin/PBAT/PBAT-g-MA blends increased when PBAT content in polymer blends increased. Adding PBAT-g-MA improved tensile stress and elongation of polymer blends compared with the blends without adding PBAT-g-MA.

**Keywords:** Gelatin; PBAT(poly(butylene adipate-co-terephthalate)); PBAT-g-MA; Polymer blends



## The International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT2020), September 11–13, 2020

### 1. INTRODUCTION

Plastic materials are used widely because they have excellent properties, such as low cost, lightweight, electrical insulation, flexible, etc. Thus, the plastics are used to replace the other materials. However, the use of large amounts of plastic causes environmental problems because the plastics are difficult to degrade. The plastic wastes also cause plastic pollution in the environment. This pollution has harmful effects on the land and ocean by affecting wildlife and human health. In order to solve plastic waste problems and also to reduce the use of plastic products, one of approach is the use of biodegradable plastics to replace the non-biodegradable plastics.

Gelatin is a type of protein derived from the alkaline or acid hydrolysis of collagen from various parts of animals such as animal skins, connective tissue and bone. The gelatin is used widely in a variety of industries including food, cosmetics, medical materials and packaging. In addition, the gelatin also has some advantages, including softness, non-toxic and biodegradability. Therefore, it can be used as materials that require low toxicity or materials that have direct contact with food. On the other hand, the gelatin has some disadvantages, such as soluble in water, low water permeability rate and low strength compared to other polymers [1,2]. However, the properties of gelatin can improve by blending with other polymers. For instance, Hazirah et al. [3] prepared the polymer blend between gelatin, carboxymethyl cellulose (CMC) and xanthan gum. The results showed that when xanthan gum content increases the moisture content and water vapor permeability increase. Hosseini et al. [4] prepared the polymer blend between gelatin and chitosan. It was found that the mechanical properties increased and water solubility decreased when adding chitosan in the polymer blend.

Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) is a biodegradable polymer that is used in a variety of industries. PBAT has many advantages, including good mechanical properties, flexibility, resistance to water vapor permeability and insoluble in water.[5]

In this study, PBAT was blended with gelatin to improve properties of gelatin. In addition, PBAT-g-MA as compatibilizer was added to enhance the compatibility between gelatin and PBAT. The morphological and mechanical properties of gelatin and PBAT with and without PBAT-g-MA were investigated.

### 2. EXPERIMENTAL

#### 2.1 Materials

Gelatin 250 Bloom was purchased from Chemipan Corporation Co., Ltd. (Thailand). Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) (Ecoflex® F Blend C1200) was obtained from BASF Chemical Company (Germany). Maleic anhydride (MA) and Luperox® 101 (2,5-Bis(tert-butylperoxy)-2,5-dimethylhexane) were supplied from Sigma-Aldrich Chemical Reagent Co., Ltd. (USA). Glycerol was purchased from Ajax Finechem PTY Ltd. (Australia).

#### 2.2 Preparation of plasticized gelatin and PBAT-g-MA

Plasticized gelatin was prepared by mixing gelatin with glycerol and water in ratio of gelatin: glycerol: water of 1: 0.33: 0.47 by weight. Then the gelatin mixture was melt blended in a twin screw extruder. The temperature profiles were set from feed zone to die at 80/90/100/100/100/110/125/125°C with screw speed of 60 rpm.

PBAT-g-MA was prepared by dissolving MA of 5 phr and Luperox®101 of 0.5 phr with respect to PBAT weight in acetone. After that, PBAT pellet were mixed in the mixture solution of MA and Luperox®101 and then dried at 50°C for 30 min to obtain PBAT pellets coated MA and Luperox®101. The PBAT coated MA and Luperox®101 were melt blended in a twin screw extruder. The temperature profiles were set from feed zone to die at 130/140/150/160/170/170/170/160°C, 60 rpm.

## The International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT2020), September 11–13, 2020

### 2.3 Characterizations of PBAT-g-MA

PBAT-g-MA was characterized by Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR).  $^1\text{H}$  NMR spectra of PBAT-g-MA and neat PBAT were obtained by using deuterated chloroform as a solvent.

### 2.4 Preparation of polymer blends

Before processing, gelatin, PBAT and PBAT-g-MA were dried at  $60^\circ\text{C}$  for 12 hr in an oven. The polymer blends were prepared by mixing gelatin and PBAT in internal mixer at  $160^\circ\text{C}$ , 60 rpm. In the case of the compatibilized gelatin/PBAT blends, the PBAT-g-MA with amount of 20 wt% of PBAT was used. The gelatin/PBAT ratios were varied at 70:30, 60:40 and 50:50 by weight. Then, the polymer blends were dried at  $40^\circ\text{C}$  for 4 hr in vacuum oven. The specimens of polymer blends were prepared by compression-molding at  $140^\circ\text{C}$  for 3 min with 1,500 psi pressure.

### 2.5 Characterization of polymer blends

**Morphological properties:** The polymer blends were characterized by scanning electron microscope (SEM) (MIRA3 TESCAN, Australia). The specimens were fractured in liquid nitrogen and the fractured surfaces were sputtered with gold.

**Mechanical properties:** The polymer blends were characterized by Universal Testing Machine (Instron, USA) according to ASTM D 882. The tensile properties of polymer blends were measured at crosshead movement speed of 50 mm/min with load cell of 5 kN.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1 Characterizations of PBAT-g-MA

The Figure 1 represents the structure of PBAT and PBAT-g-MA. The  $^1\text{H}$  NMR spectra of PBAT and PBAT-g-MA are shown in Figure 2a and Figure 2b respectively. The pure PBAT and PBAT-g-MA spectra showed peak at 1.6 ppm associated with Ha proton and peak at 1.8-1.9 ppm represented to Hb and Hb' proton. The peak at 2.3 ppm corresponded to Hc protons. In addition, the Hd and Hd' protons appear at 4.0-4.1 and 4.3-4.4 ppm respectively. The peak at 8.0 ppm indicated He protons of phenyl group. However, PBAT-g-MA spectrum as presented in Figure 1d showed a new peak at 3.7-3.8 ppm which was the proton of MA (Hf) adjacent to  $\alpha$ -carbon of the PBAT chain [6,7]. This result showed that MA was grafted on the PBAT [7].

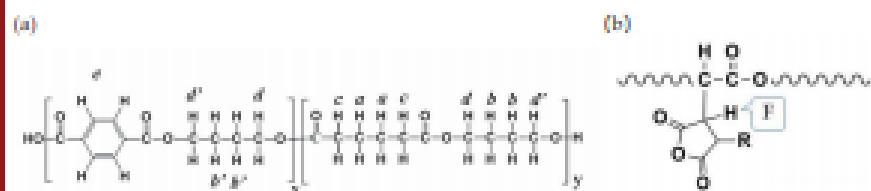


Figure 1. Structure of (a) PBAT and (b) PBAT-g-MA [6]

The International Conference on Engineering and  
Industrial Technology (ICEIT2020), September 11–13, 2020

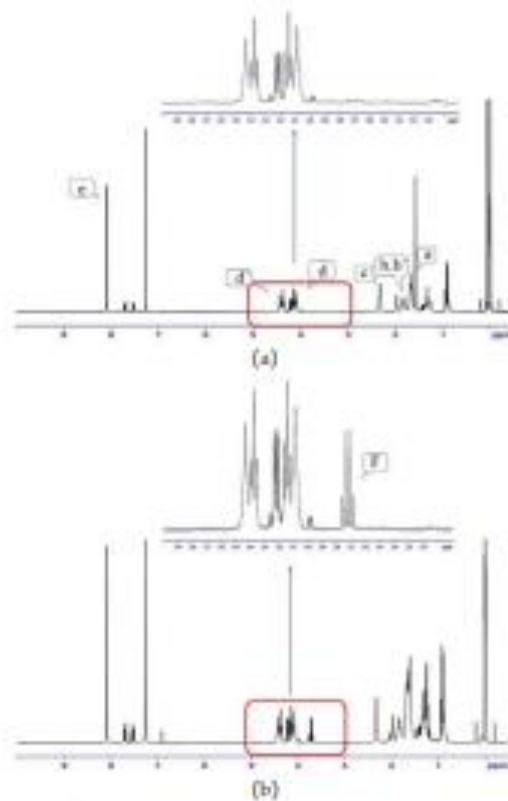


Figure 3.  $^1\text{H}$  NMR spectra of (a) PBAT and (b) PBAT-g-MA

### 3.2 Scanning electron microscopy

The morphologies of the gelatin/PBAT and gelatin/PBAT/PBAT-g-MA blends are shown in Figure 3. The uncompatibilized polymer blends (Figure 3a-3c) clearly observed agglomeration of gelatin phase with cracked surface due to dehydration of the gelatin phase during cryogenic freezing of the specimens before the SEM analysis. In the uncompatibilized blends at the ratio 70/30, large particle size of gelatin was obviously found as shown in Figure 3a, while the gelatin particle size in the polymer blends at 60/40 and 50/50 (Figure 3b and 3c, respectively) become smaller as increasing PBAT concentration. Therefore, the SEM result revealed incompatibility between gelatin and PBAT phase. This was because gelatin has high polarity, while PBAT has less polarity, thereby immiscible gelatin/PBAT blends.

In the case of gelatin/PBAT with PBAT-g-MA, the morphologies of the polymer blends in all ratios showed better compatibility between gelatin and PBAT phase. Aggregation of the gelatin phase was unclearly compared to the uncompatibilized gelatin/PBAT blends. Furthermore, scanning electron microscopy and energy dispersive x-ray Spectrometry (SEM-EDS) analysis of compatibilized polymer blends (Figure 4) indicated that the surface of the compatibilized gelatin/PBAT blends in many areas found C, N and H elements (Figure 4b), which confirmed that gelatin and PBAT phase were compatible.

The International Conference on Engineering and  
Industrial Technology (ICEIT2020), September 11–13, 2020

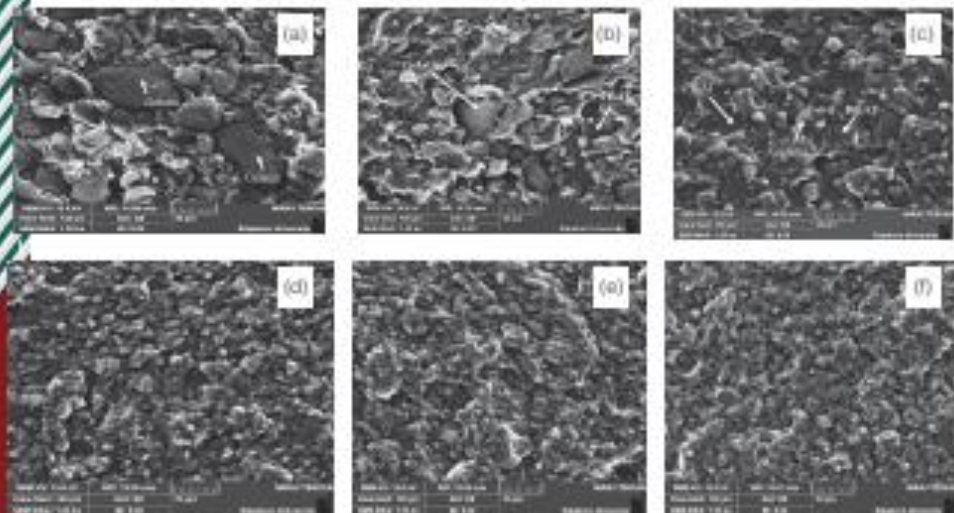


Figure 3. SEM images of the gelatin/PBAT blends at (a) 70/30, (b) 60/40 and (c) 50/50 and SEM images of the gelatin/PBAT/PBAT-g-MA blends at (d) 70/30/20, (e) 60/40/20 and (f) 50/50/20.

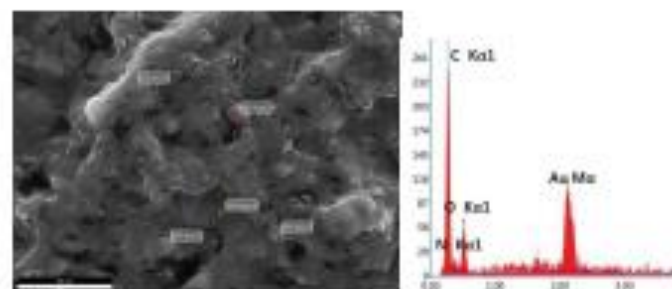


Figure 4. EDAX images of gelatin/PBAT/PBAT-g-MA 50/50/20 (a) SEM image and (b) EDAX mapping.

### 3.3 Mechanical properties of the blends

The mechanical properties of plasticized gelatin, PBAT and gelatin/PBAT blends with and without PBAT-g-MA compatibilizer are represented in Figure 5. The result found that PBAT had good mechanical properties including modulus, tensile strength and elongation at break while gelatin provided poor mechanical properties. The uncompatibilized and compatibilized blends showed significantly an increase in mechanical properties compared to the gelatinized gelatin. The tensile strength and elongation at break of polymer blends with and without PBAT-g-MA increased with increasing PBAT content. The polymer blends at 50/50 showed the highest modulus, tensile strength and elongation at break. Comparing the polymer blends at the same ratio, the polymer blends containing PBAT-g-MA provided higher tensile strength and elongation at break than those of the polymer blends without PBAT-g-MA. This result might be explained by surface morphologies of the polymer blends as shown in Figure 3, that is the uncompatibilized polymer blends provided immiscible morphology, resulting in poor tensile strength and elongation at break. On the other hand, more compatible morphology was observed in the compatibilized polymer blends, leading to enhanced mechanical properties.

The International Conference on Engineering and  
Industrial Technology (ICEIT2020), September 11–13, 2020

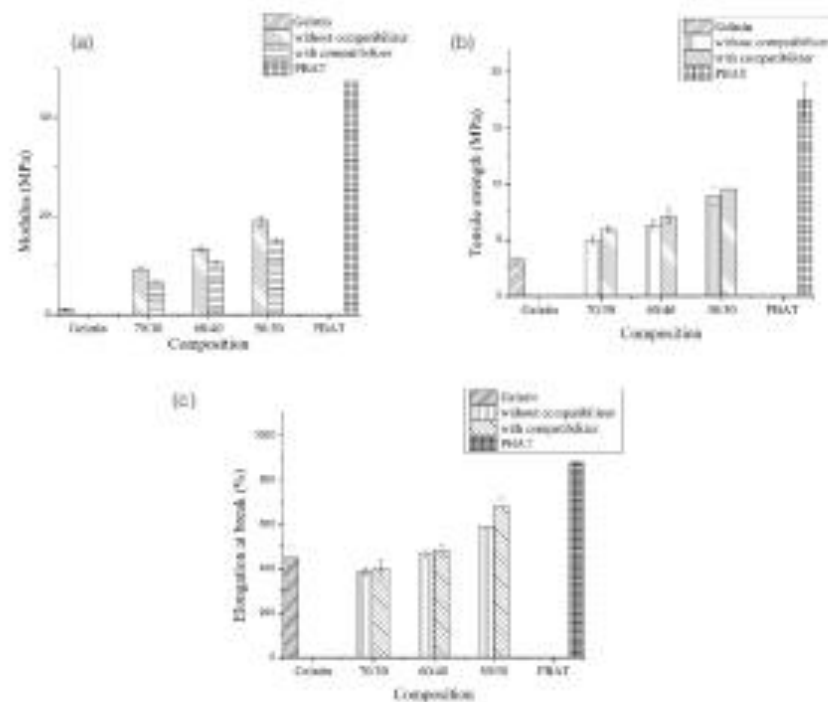


Figure 5. Tensile properties of gelatin, PBAT, uncompatibilized and compatibilized blends (a) modulus, (b) tensile strength and (c) elongation at break.

#### 4. CONCLUSION

In this research, blending PBAT into gelatin could improve mechanical properties of gelatin. In addition, incorporation of the PBAT-g-MA enhanced the compatibility between both polymers. The NMR result of PBAT-g-MA confirmed the grafting reaction of MA on PBAT. Morphology observation of the polymer blends indicated that polymer blends without PBAT-g-MA was incompatibility while the addition of PBAT-g-MA enhanced compatibility between gelatin and PBAT phase. As the result, the polymer blends with PBAT-g-MA provided an improvement in mechanical properties compared to the blends without PBAT-g-MA. Moreover, modulus, tensile strength and elongation at break of the polymer blends increased with increasing PBAT content.

#### ACKNOWLEDGMENT

This research was financially supported by Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakom University.

#### REFERENCES

- Djagny V B, Wang Z, and Xu S 2001 *Crit Rev Food Sci Nutr*, 41.  
 Olsen D, Yang C, Bodo M, Chang R, Leigh S Baez J, Carmichael D, Perala , Hamalainen E R, Jarvinen M, and Polansk J 2003 *Adv Drug Deliv Rev*, 55.  
 Hazrinah N, Isab M I N and Sarben N M 2016 *Food Packaging and Shelf Life* 9 55-63.



## The International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT2020), September 11–13, 2020

- Hossini S F, Rezaei M, Zandi M and Ghavi F F 2013 *Food Chemistry*. 136 1490-1495.  
Muthuraj R, Misra M and Mohanty A K 2017 *Applied Polymer Science* 134.  
Zhou J, Jiang Z, Wang Z, Zhang J, Li J, Li Y, Zhang J, Chen P and Gu Q 2013 *RSC Advances*. 40.  
Rahimi S K, Azarshvand R, Kim K and Otaigbe J U 2017 *Biomacromolecules* 18 2179-2194.





## รายการอ้างอิง

1. เก่งกาจ วินัยโกศล. *Advanced Wound Dressing*. 2013; Available from: [http://202.28.95.4/library/main/eproceeding/Lec\\_18\\_23.pdf](http://202.28.95.4/library/main/eproceeding/Lec_18_23.pdf)[http://202.28.95.4/library/main/eproceeding/Lec\\_18\\_23.pdf](http://202.28.95.4/library/main/eproceeding/Lec_18_23.pdf).
2. Djagny, V.B., Z. Wang, and S. Xu, *Gelatin: a valuable protein for food and pharmaceutical industries: review*. Crit Rev Food Sci Nutr, 2001. 41(6): p. 481-92.
3. Olsen, D., Yang, C., Bodo, M., Chang, R., Leigh, S., Baez, J., Carmichael, D., Perala, M., Hamalainen, E. R., Jarvinen, M., and Polarek, J., *Recombinant collagen and gelatin for drug delivery*. Adv Drug Deliv Rev, 2003. 55(12): p. 1547-67.
4. Li, Dawei, Chen, Weiming, Sun, Binbin, Li, Haoxuan, Wu, Tong, Ke, Qinfei, Huang, Chen, Ei-Hamshary, Hany, Al- Deyab, Salem S. and Mo Xiumei, *A comparison of nanoscale and multiscale PCL/gelatin scaffolds prepared by disc-electrospinning*. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2016. 146: p. 632-641.
5. จิตตภา มารมย์, ชนบดี บุญมาเลิศ, รัฐนันท์ ศิริชนพัฒน์, การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและพอลิไวนิลปิโรลิดีนอะดิเปต-โค-เทเรพทาเรตเพื่อประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์. 2561.
6. Fukushima, Kikku, Wu, Meng-Hsiu, Bocchini, Sergio, Rasyida, Amaliya and Yang, Ming-Chien, *PBAT based nanocomposites for medical and industrial applications*. Mater Sci Eng C Mater Biol Appl, 2012. 32(6): p. 1331-51.
7. Bheemaneni, G., S. Saravana, and R. Kandaswamy, *Processing and Characterization of Poly (butylene adipate-co-terephthalate) / Wollastonite Biocomposites for Medical Applications*. Materials Today: Proceedings, 2018. 5(1): p. 1807-1816.
8. รู้จักน้ำมันหอมระเหย 20 สูดยอดน้ำมันบำบัดจากธรรมชาติ. Available from: [https://www.aroka108.com/%E0%B8%A3%E0%B8%B9%E0%B9%89%E0%B8%88shLBI\\_H1WPs1dniv\\_TJqedO7U](https://www.aroka108.com/%E0%B8%A3%E0%B8%B9%E0%B9%89%E0%B8%88shLBI_H1WPs1dniv_TJqedO7U).
9. Murbach Teles Andrade, Bruna Fernanda, Nunes Barbosa, Lidiane, da Silva Probst, Isabella and Fernandes Júnior Ary, *Antimicrobial activity of essential oils*. Journal of Essential Oil Research, 2014. 26(1): p. 34-40.

10. เอกพิสิษฐ์ โชคอุทัยกุล, เ., แผ่นผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับไบโอดีซานที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสโดยมีน้ำมันหอมระเหยเป็นสารต้านเชื้อแบคทีเรีย, in วิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ. 2557, ศิลปากร.
11. เจลาติน. Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%88%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%99>.
12. Gelatin / เจลาติน. Available from: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1008/gelatin-%E0%B9%80%E0%B8%88%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%99>.
13. สารก่อเจล. Available from: <http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2010/9183/6/Chapter2.pdf>.
14. สมบัติทางเคมีกายภาพของเจลาติน.; Available from: <http://agro-industry.mfu.ac.th/events/482>.
15. เนรัญชรา ภูระหงษ์, ในหล้า จันทนะโพธิ์, ประภากร ศรีแย้ม, สารเคลือบผิวเจลาตินกับน้ำมันละหุ่งสำหรับผลไม้และผักสด(*Gelatin/castor oil coating for fresh fruits and vegetables*). 2559.
16. สามารถ ยานวงษ์, ผลของน้ำมันหอมระเหยและสารเชื่อมขวางต่อสมบัติของฟิล์มเจลาตินกินได้จากหนังปลา(*Effect of essential oils and crosslink agent on properties of fish skin gelatin edible films*). 2557.
17. ณวัฒน์ ศุภสวัสดิ์, วยุรี ศรีนันทภากร และศุภวิชญ์ พวงทอง, การเตรียมและสมบัติของฟิล์มพอลิ บิวทิลีนอะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต/เอทิลีนไวไนลอะซิเตตสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร. 2016.
18. BASF Ecoflex® F BX 7011 Biodegradable Plastic. Available from: [http://www.lookpolymers.com/polymer\\_BASF-Ecoflex-F-BX-7011-Biodegradable-Plastic.php](http://www.lookpolymers.com/polymer_BASF-Ecoflex-F-BX-7011-Biodegradable-Plastic.php).
19. ณิชทร บุษางกูร, อุปกรณ์ทำแผลขั้นสูง ธรรมชาติศาสตร์เวชสาร, 2560. 17(3).
20. ชาญวิทย์ พูนศรีไชยสิทธิ์, การเกิดเซลล์โฟม Available from: [https://www2.mtec.orththemagazineadminupload238\\_74-78.pdf](https://www2.mtec.orththemagazineadminupload238_74-78.pdf).

21. บทที่ 10 สารเติมแต่งพอลิเมอร์. Available from:  
[http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/s\\_muangpil/%E0%B8%84%E0%B8%AA3%E0%B9%8C.pdf](http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/s_muangpil/%E0%B8%84%E0%B8%AA3%E0%B9%8C.pdf).
22. Duanghathai Pentrakoon, J.W.E., *Blowing Agents, An introduction to plastic foams*. Chulalongkorn University Press, 2005: p. 37-46.
23. กรมวิทยาศาสตร์บริการ, น้ำมันหอมระเหยและสுகอนธบำบัด. 2553.
24. นันทิยา จ้อยชะรัต, ตำราองค์ประกอบทางเคมีในพืชสมุนไพร ไกลโคไซด์ น้ำมันหอมระเหย กรดอินทรีย์ เรซิน บาลซัม. 1 ed. 2561, สงขลา: กราฟฟิกเน็กซ์
25. Puechkaset. กานพลู ประโยชน์ และสรรพคุณกานพลู. 2015; Available from:  
<https://puechkaset.com/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B9/>.
26. กานพลู. Available from:  
<http://www.medplant.mahidol.ac.th/pubhealth/syzygium.html>.
27. Robinson, J. *Eugenol sources, health benefits and uses*. 2017; Available from:  
<https://www.naturalpedia.com/eugenol-sources-health-benefits-and-uses.html>.
28. *Maleic anhydride*. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Maleic\\_anhydride](https://en.wikipedia.org/wiki/Maleic_anhydride).
29. *Luperox® 101, 2,5-Bis(tert-butylperoxy)-2,5-dimethylhexane*. Available from:  
<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/388092?lang=en&region=TH>.
30. *Product data sheet Trigonox 101*. Available from:  
[http://www.pcpds.akzonobel.com/PolymerChemicalsPDS/showPDF.aspx?pds\\_id=94](http://www.pcpds.akzonobel.com/PolymerChemicalsPDS/showPDF.aspx?pds_id=94).
31. Ren, Ke, Wang, Yi, Sun, Tao, Yue, Wen and Zhang, Hongyu, *Electrospun PCL/gelatin composite nanofiber structures for effective guided bone regeneration membranes*. Materials Science and Engineering: C, 2017. 78: p. 324-332.
32. Fukushima, Kikku, Wu, Meng-Hsiu, Bocchini, Sergio, Rasyida, Amaliya and Yang, Ming-Chien, *PBAT based nanocomposites for medical and industrial applications*. Materials Science and Engineering: C, 2012. 32(6): p. 1331-1351.

33. Frazier, S.D. and W.V. Srubar, 3rd, *Evaporation-based method for preparing gelatin foams with aligned tubular pore structures*. Mater Sci Eng C Mater Biol Appl, 2016. 62: p. 467-73.
34. Wu Shan, He Li, Zhang Chun, Gong Wei, He Yue and Luo Yuan, *Preparation of open-porous stereocomplex PLA/PBAT scaffolds and correlation between their morphology, mechanical behavior, and cell compatibility*. RSC Advances, 2018. 8(23): p. 12933-12943.
35. Wu Shan, He Li, Zhang Chun, Gong Wei, He Yue and Luo Yuan, *Visualization observation of cells growth in low-density polyethylene foaming processes*. Polymer Testing, 2017. 63: p. 367-374.
36. Aidilla Mubarak, Z.S.O., Nurul Ulfah Karim, *Gelatin chitosan film incorporated with clove essential oil for retaining quality of silver pomfret fish fillet*. Asian Journal of Agriculture and Biology, 2019. 7: p. 86-92.
37. Cui, Haiying, Bai, Mei, Rashed, Marwan M. A. and Lin, Lin, *The antibacterial activity of clove oil/chitosan nanoparticles embedded gelatin nanofibers against Escherichia coli O157:H7 biofilms on cucumber*. International Journal of Food Microbiology, 2018. 266: p. 69-78.
38. เอกพิสิษฐ์ โชคอุทัยกุล, แผ่นผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับไคโตซานที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลส โดยมีน้ำมันหอมระเหยเป็นสารต้านเชื้อแบคทีเรีย 2557.
39. กัปตัน สมบูรณ์ชนะชัย, กานติมา โชติปรีชาสิน และจิรนนท์ แก้ววิจิตร, พอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและเอธิลีนไวไนลอะซิเตทสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร. 2560.
40. อมรรัตน์ ตันติธำรงวุฒิ, การเตรียมและสมบัติของเส้นใยระดับนาโนของไคโตซาน/พอลิแลคติกแอซิดสำหรับการใช้งานทางด้านวัสดุปิดแผล. 2555.
41. Rivero, S., M.A. García, and A. Pinotti, *Correlations between structural, barrier, thermal and mechanical properties of plasticized gelatin films*. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010. 11(2): p. 369-375.
42. Kashani Rahimi Shahab, Aeinehvand Robabeh, Kim Kyoungtae and Otaigbe Joshua U., *Structure and Biocompatibility of Bioabsorbable Nanocomposites of Aliphatic-Aromatic Copolyester and Cellulose Nanocrystals*. Biomacromolecules, 2017. 18(7): p. 2179-2194.

43. Ku-Marsilla, K.I. and C.J.R. Verbeek, *Compatibilization of Protein Thermoplastics and Polybutylene Succinate Blends*. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2015. 300(2): p. 161-171.
44. Yamsaengsung, W. and N. Sombatsompop, *Effect of chemical blowing agent on cell structure and mechanical properties of EPDM foam, and peel strength and thermal conductivity of wood/NR composite-EPDM foam laminates*. *Composites Part B: Engineering*, 2009. 40(7): p. 594-600.
45. Mahnama H., Dadbin S., Frounchi M. and Rajabi S., *Preparation of biodegradable gelatin/PVA porous scaffolds for skin regeneration*. *Artif Cells Nanomed Biotechnol*, 2017. 45(5): p. 928-935.
46. Poursamar S. A., Lehner A. N., Azami M., Ebrahimi-Barough S., Samadikuchaksaraei A. and Antunes A. P., *The effects of crosslinkers on physical, mechanical, and cytotoxic properties of gelatin sponge prepared via in-situ gas foaming method as a tissue engineering scaffold*. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2016. 63: p. 1-9.
47. Khan, M.N., J.M. Islam, and M.A. Khan, *Fabrication and characterization of gelatin-based biocompatible porous composite scaffold for bone tissue engineering*. *J Biomed Mater Res A*, 2012. 100(11): p. 3020-8.
48. *ISO 10993-5 Biological evaluation of medical devices — Part 5: Tests for in vitro cytotoxicity*. 2009.
49. Acosta Sandra, Chiralt Amparo, Santamarina Pilar, Rosello Josefa, González-Martínez Chelo and Cháfer Maite, *Antifungal films based on starch-gelatin blend, containing essential oils*. *Food Hydrocolloids*, 2016. 61: p. 233-240.
50. Shen, Z. and D.P. Kamdem, *Development and characterization of biodegradable chitosan films containing two essential oils*. *Int J Biol Macromol*, 2015. 74: p. 289-96.
51. KROCHTA, T.H.S.a.J.M., *Whey Protein Emulsion Film Performance as Affected by Lipid Type and Amount*. *FOOD SCIENCE*, 1997. 62: p. 390-394.
52. GONTARD NATHALIE, DUCHEZ, CHRISTOPHE, CUQ JEAN-LOUIS and GUILBERT STÉPHANE, *Edible composite films of wheat gluten and lipids: water vapour*

- permeability and other physical properties*. International Journal of Food Science & Technology, 1994. 29(1): p. 39-50.
53. Guillen MCG, M.M., Estaca JG, Caballero EL, Monyero P., *Fish gelatin: a renewable material for developing active biodegradable films*. Trends Food Sci Technol, 2009. 20: p. 3-16.
  54. de O. Blanco Guilherme E., de Souza Clóvis W. O., Bernardo Marcela P., Zenke Martin, Mattoso Luiz H. C., Moreira Francys K. V., *Antimicrobially active gelatin/[Mg-Al-CO<sub>3</sub>]-LDH composite films based on clove essential oil for skin wound healing*. Materials Today Communications, 2021. 27.
  55. Chinarak, D.S.L.a.K., *Effect of Clove Essential Oil on Film Properties, Antioxidant and Antimicrobial Activities of Chitosan Film*. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น (ฉบับบัณฑิตศึกษา), 2019. 4: p. 172-189.
  56. Ahmed Jasim, Mulla Mehrajfatema, Jacob Harsha, Luciano Giorgio T.B Bini and Almusallam Abdulwahab, *Poly(lactide)/poly( $\epsilon$ -caprolactone)/zinc oxide/clove essential oil composite antimicrobial films for scrambled egg packaging*. Food Packaging and Shelf Life, 2019. 21.
  57. โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของแบคทีเรีย. Available from: <https://sites.google.com/site/baekhthireiy/kar-canaek/khorngrsang-laea-xngkh-prakxb-thang-khemi-khxng-baekhthireiy-kae-rm-lb>.
  58. ภิษณี วิจันท์ก และ มารุต ตั้งวัฒนาชุติพร, *ฤทธิ์ต้านจุลชีพของน้ำมันหอมระเหยยูคาลิปตัส*. Thammasat Medica, 2019. 19: p. 79-89.
  59. ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.นิธิยา รัตนานนท์, *Cell wall* Available from: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/4077/cell-wall-%E0%B8%9C%E0%B8%99%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B9%80%E0%B8%8B%E0%B8%A5%E0%B8%A5%E0%B9%8C>.
  60. Pilanthana Lertsatitthanakorn, K.M., Nichthima Paengnakorn and Watcharee Khunkitti, *Antibacterial Activity of an Effective Essential Oil Formulated in Liquid Soap Against Skin Bacteria*. Chiang Mai J. Sci., 2014. 41: p. 71-83.



61. Prabuseenivasan, S., M. Jayakumar, and S. Ignacimuthu, *In vitro antibacterial activity of some plant essential oils*. BMC Complement Altern Med, 2006. 6: p. 39.
62. Hosseini S. F., Zandi M., Rezaei M. and Farahmandghavi F, *Two-step method for encapsulation of oregano essential oil in chitosan nanoparticles: preparation, characterization and in vitro release study*. Carbohydr Polym, 2013. 95(1): p. 50-6.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	จันทร์เพชร พึ่งไพร
วัน เดือน ปี เกิด	20 กรกฎาคม 2539
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) ปีโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	123/370 หมู่บ้านนันทนาการเดิ่น ซ.ท่าอิฐ ต.บางรักน้อย อ.เมือง จ.นนทบุรี
ผลงานตีพิมพ์	Janpet Phuengprai and Sudsiri Hemsri "Mechanical and morphological properties of gelatin and poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend" International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT 2020), The ZIGN Hotel Pattaya, Chonburi, Thailand 11-13 September, 2020
รางวัลที่ได้รับ	พ.ศ. 2561 – 2562 (4 ภาคการศึกษา) ได้รับทุนการศึกษาและทุนนักศึกษาผู้ช่วยสอน จากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

