



การศึกษาคำความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติพอลิแลกติกแอซิดสำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ได้ใน

ไมโครเวฟ

โดย

นายมนตรี อุดมฉวี



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติพอลิแลกติกแอซิดสำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ได้  
ในไมโครเวฟ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

FEASIBILITY STUDY ON THE IMPROVEMENT OF PROPERTY OF POLYLACTIC  
ACID IN MICROWAVE PACKAGING APPLICATION



By

MR. Montree UDOMCHAWEE

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

Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Silpakorn University

Academic Year 2023

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ การศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติพอลิแลกติกแอซิด  
สำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ได้ในไมโครเวฟ  
โดย นายมนตรี อุดมฉวี  
สาขาวิชา วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา  
มหาบัณฑิต  
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. มนัส แซ่ด่าน

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติ  
ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุณศรี ลีจิระจำเนียร) เทคโนโลยีอุตสาหกรรม

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ญัฐวดี ชัยยุตต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร. มนัส แซ่ด่าน)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัตติกาล ชันธุ์เครือ)



620920074 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : พอลิแลคติกแอซิด, พลาสติกชีวภาพ, ผลิตภัณฑ์สำหรับไมโครเวฟ, กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

นาย มนตรี อุดมฉวี: การศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติพอลิแลคติกแอซิด สำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในไมโครเวฟ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด (PLA) สำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์ใช้งานในไมโครเวฟ เนื่องจาก PLA เป็นพลาสติกชีวภาพที่ไม่ตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟ[24] และมีค่า dielectric constant ต่ำ[8] แต่ PLA มีจุดอ่อนด้านสมบัติทางความร้อน สามารถปรับปรุงด้วยการเพิ่มปริมาณผลึกของ PLA โดยการเติมสารตัวเติมและสารก่อผลึก[27] จากการศึกษาการเติม Talc, CaCO<sub>3</sub> และ mPET ที่อัตราส่วน 1, 3, 5 phr และสารก่อผลึก EBU, LAK ที่อัตราส่วน 0.1, 0.3, 0.5 phr พบว่า Tensile strength และ(%) Elongation at break มีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ Neat PLA ซึ่งมีค่าเท่ากับ 60±5 MPa และ10±2% ตามลำดับ สำหรับค่า Yong's modulus มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1,580±25 MPa เป็น 1,865±28 MPa เมื่อเติม Talc 5 phr สำหรับการทดสอบสมบัติทางกลเชิงไดนามิก พบว่าที่อุณหภูมิ 30 °C ค่า Storage modulus มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมสารตัวเติม และสารก่อผลึกเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่ม stiffness ของชิ้นงาน การศึกษาความสามารถในการใช้งานในไมโครเวฟโดยการเติมน้ำและน้ำมันมะกอก กำหนดกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์เป็นเวลา 3.5 นาที พบว่า การเติมสารตัวเติม และสารก่อผลึก EBU ช่วยให้ผลึกของ PLA มีค่าเพิ่มขึ้น[6] ทำให้ถ้วยบรรจุภัณฑ์ไม่เกิดการบิดเบี้ยวและเสียรูป ถึงแม้ว่าอุณหภูมิของน้ำและน้ำมันสูงกว่าค่า T<sub>g</sub> ของ PLA แต่สำหรับ Neat PLA และ PLA ที่เติมสารก่อผลึก LAK ยังมีการบิดเบี้ยวเสียรูปของถ้วยบรรจุภัณฑ์ ซึ่งเกิดจากการให้ความร้อนและการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในกระบวนการการขึ้นรูป และอุณหภูมิตกผลึกช้า T<sub>cc</sub> ของ PLA LAK เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ผลึกที่เกิดขึ้นไม่เพียงพอต่อการป้องกันการเสียรูป[26] จึงสรุปได้ว่าการเติมสารตัวเติม และสารก่อผลึก EBU ส่งผลให้ PLA ตกผลึกเพิ่มขึ้นในทั้งสองกระบวนการคือ กระบวนการขึ้นรูปด้วยเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่อุณหภูมิ 145±5 °C และกระบวนการทดสอบในไมโครเวฟ ทำให้ผลิตภัณฑ์สามารถทนต่ออุณหภูมิของน้ำและน้ำมันที่เพิ่มขึ้น และจะช่วยลดการบิดเบี้ยวและเสียรูปผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

620920074 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : Polylactic acid (PLA), Microwave irradiation, Microwave Packaging, Bioplastic

MR. Montree UDOMCHAWEE : Feasibility study on the improvement of property of Polylactic acid in microwave packaging application Thesis advisor : Associate Professor Supakij Suttiruengwong, Dr.Ing.

This research aims to study on the improvement of the properties of polylactic acid (PLA) for microwave packaging applications. PLA is a bio-based plastic that is non-responsive to microwave radiation [24] and has a low dielectric constant [8]. However, PLA weakness is its thermal properties. The thermal properties of PLA could be improved, for example by adding fillers and nucleating agents [27]. The addition of Talc,  $\text{CaCO}_3$ , and mPET at ratios of 1, 3, and 5 phr and nucleating agents EBU and LAK at ratios of 0.1, 0.3, and 0.5 phr did not significantly change the tensile strength and elongation at break compared to neat PLA, which had values of  $60 \pm 5$  MPa and  $10 \pm 2\%$ , respectively. However, Young's modulus increased to the maximum of  $1,865 \pm 28$  MPa with the addition of Talc 5 phr. For dynamic mechanical analysis, at  $30^\circ\text{C}$ , the storage modulus increased with the addition of nucleating agents and fillers, hence enhancing the stiffness of PLA. The study also evaluated the performance of packaging with and without water and olive oil microwave heating at 600 watts for 3.5 minutes. The addition of fillers and the nucleating agent EBU improved the heat resistance of PLA, preventing deformation and twisting of the cup packaging. Even though the temperature of water and oil was higher than the  $T_g$  of PLA, Neat PLA and PLA with the nucleating agent LAK still experienced deformation due to rapid heating and cooling during processing and the repeated cold crystallization temperature ( $T_{cc}$ ) of PLA with LAK at a high temperature. In conclusion, the addition of fillers and nucleating agent EBU improved the crystallinity and heat resistance of PLA in both thermoforming at  $145 \pm 5^\circ\text{C}$  and microwave testing, This enhancement allowed the product to withstand increased temperatures of water and oil, effectively reducing the deformation of the cup packaging.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ ผู้เป็นที่ปรึกษางานวิจัย และ รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส แซ่ด่าน ผู้เป็นที่ปรึกษา ร่วมงานวิจัย ในเรื่องของเครื่องมือ อุปกรณ์ ที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนการให้คำปรึกษา การแก้ปัญหา และวิเคราะห์ผลการทดลองในงานวิจัยรวมถึงตรวจสอบความเรียบร้อย เพื่อให้เล่มวิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.สาโรช พูนเทพ ผู้ให้ความอนุเคราะห์ ในเรื่องของเครื่องมือ อุปกรณ์ ที่ใช้ใน งานวิจัย ตลอดจนการให้คำปรึกษา การแก้ปัญหา ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตติกาล ชันซ์เครือ ที่สละเวลามาเป็นประธานและกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำในการ แก้ไขข้อบกพร่องเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ขอขอบคุณคณาจารย์และ บุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนและชี้แนะทั้งทางด้านวิชาการและการใช้ชีวิต ตลอดจนถึงขั้นตอนในการทำงานวิจัยที่ถูกต้อง ขอขอบคุณ คุณลูกกวาง อุ่นสิริและคุณพินิจ เจียนระลึก บุคลากรภายในภาควิชา ที่คอยช่วยเหลือแนะนำ ให้กำลังใจ อำนวยความสะดวกด้านการทำเอกสาร การให้ความอนุเคราะห์ด้านการใช้เครื่องมือ ตลอดทั้งอำนวยความสะดวกในการจัดหาอุปกรณ์สำหรับ ดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ บริษัท Total Energies Corbion Co., Ltd. สำหรับการสนับสนุนเม็ดพลาสติก ชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และบริษัท เอ็กเซล ซุปเปอร์แพ็ค จำกัด ที่สนับสนุน Polyethylene Terephthalate Powder (mPET) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณพ่อแม่ พี่ น้อง เพื่อนๆ ทุกท่านที่คอยให้กำลังใจ สนับสนุน และ ช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยของข้าพเจ้าให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีตลอดมา

มนตรี อุดมฉวี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 แนวคิดของงานวิจัย .....	2
1.4 ขอบเขตและข้อจำกัดของงานวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานโดยสรุป .....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 พอลิแลคติกแอซิด Polylactic-acid หรือ PLA [4].....	5
2.2 กระบวนการตกผลึกของพอลิเมอร์ (Polymer crystallization) [6].....	6
2.2.1 ขั้นตอนการเกิดนิวเคลียส (Nucleation).....	7
2.2.2 ขั้นตอนการเติบโตของผลึก (Growth process) .....	8
2.3 กระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง [18].....	8
2.3.1 หลักการของเทอร์โมฟอร์มมิ่งแบบต่างๆ .....	9

2.4	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของภาชนะพลาสติกบรรจุอาหารสำหรับเตาไมโครเวฟ[34]	10
2.4.1	คุณลักษณะที่ต้องการ	10
2.4.2	คุณลักษณะด้านการใช้งาน	11
2.4.3	คลื่นไมโครเวฟ และหลักการทำงานของไมโครเวฟ[33]	12
2.4.4	คลื่นไมโครเวฟ[33]	12
2.4.5	เตาไมโครเวฟและความปลอดภัย[33]	14
2.4.6	ภาชนะบรรจุอาหารสำหรับเตาไมโครเวฟ[24]	15
2.5	คุณสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties) ของอาหารและวัสดุ	16
2.6	พลังงานที่ถูกดูดซับในวัตถุ (absorbed power)[9]	16
2.6.1	ภาพรวมของการตอบสนอง dielectric ของโพลีเมอร์[24]	17
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3	วิธีดำเนินงานวิจัย	28
3.1	วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	28
3.2	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	29
3.3	ขั้นตอนการทำงานวิจัย	29
3.3.1	ศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม และสารก่อผลึกที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของ PLA	29
3.3.2	ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ การขึ้นรูปด้วยบรรจุภัณฑ์ในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง	31
3.3.3	ศึกษาสมบัติทางความร้อน และการทดสอบในไมโครเวฟ	32
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	35
4.1	ผลการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม และสารก่อผลึกที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของ PLA	35
4.1.1	ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของ PLA ที่มีการเติมสารตัวเติมและสารก่อผลึก	35
4.1.2	ผลการศึกษาสมบัติทางกลเชิงไดนามิก (DMA) ของ PLA ที่มีการเติมสารตัวเติม และสารก่อผลึก	38

4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ การขึ้นรูปด้วยบรรจุภัณฑ์ในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง .....	40
4.2.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการขึ้นรูปด้วยบรรจุภัณฑ์ด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง.....	40
4.2.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อถ้วยบรรจุภัณฑ์ด้วยตู้อบลมร้อน ....	41
4.3 ศึกษาสมบัติทางความร้อน และการทดสอบในไมโครเวฟ .....	43
4.3.1 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน และผลการทดสอบด้วยไมโครเวฟของถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่ผ่านการอบด้วยตู้อบลมร้อน .....	43
4.3.2 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน และผลการทดสอบในไมโครเวฟ ของถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่เติมสารตัวเติมและสารก่อผลึก.....	46
4.3.3 ข้อสันนิษฐานเบื้องต้นเกี่ยวกับการทนความร้อนของถ้วยบรรจุภัณฑ์ในไมโครเวฟ .....	49
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	52
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	52
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	53
ภาคผนวก.....	54
ภาคผนวก ก: ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง.....	55
ภาคผนวก ข : การนำเสนอผลงาน.....	74
รายการอ้างอิง .....	84
ประวัติผู้เขียน.....	90



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 การเวลาที่ให้ความร้อนสำหรับการทดสอบผลึกในไมโครเวฟตามมาตรฐานเลขที่ มอก. 2493 เล่ม 1 – 2554[34].....	11
ตารางที่ 2 รวบรวมค่า dielectric constant ของพอลิเมอร์และวัสดุบางชนิด[8][24] .....	19
ตารางที่ 3 สูตรและองค์ประกอบของตัวอย่างทั้งหมด[24].....	20
ตารางที่ 4 Impact failure weight (g) ของตัวอย่างที่แช่แข็ง[24] .....	21
ตารางที่ 5 คุณสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิต PLA และ PLA/Talc[32] .....	23
ตารางที่ 6 แสดงพารามิเตอร์จากผลการทดสอบ DSC ของพอลิแลคติกแอซิดเมื่อมีการเติม TMC-328 ที่ปริมาณต่างๆ[14].....	26
ตารางที่ 7 PLLA และอัตราส่วนการผสมสารก่อผลึก[28].....	26
ตารางที่ 8 สมบัติทางความร้อนของ PLLA ที่มีการเติมสารก่อผลึกจากการทดสอบ DSC[28].....	26
ตารางที่ 9 แสดงชื่อสูตร และสัดส่วนการผสมของ PLA สารตัวเติม และสารก่อผลึก สำหรับนำไป ทดสอบสมบัติเชิงกล.....	30
ตารางที่ 10 แสดงชื่อสูตรและอุณหภูมิในการขึ้นรูปของถัวยบรรจุภัณฑ์ของ Neat PLA ใน กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง .....	31
ตารางที่ 11 แสดงชื่อสูตรและเวลาในการทดสอบในตู้อบลมร้อนของถัวยบรรจุภัณฑ์ Neat PLA ที่ ผ่านการขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน.....	32
ตารางที่ 12 แสดงชื่อสูตรเทอร์โมฟอร์มมิ่งซีสและสัดส่วนการผสมของ PLA สารตัวเติม และสารก่อ ผลึก สำหรับนำไปทดสอบสมบัติทางความร้อน และการทดสอบไมโครเวฟ .....	34
ตารางที่ 13 แสดงสมบัติเชิงกลค่า Yong's modulus, Tensile strength, %Elongation at break ของ Neat PLA และ PLA ที่มีการเติม Talc CaCO <sub>3</sub> และ mPET และสารก่อผลึก LAK และ EBU 37	
ตารางที่ 15 แสดงสมบัติทางความร้อน จากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC แบบ non-isothermal ของบรรจุภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง Neat PLA 145C ผ่านการอบด้วยตู้อบลมร้อน ที่เวลา 0, 5, 10 และ 20 นาที.....	46

ตารางที่ 16 แสดงสมบัติทางความร้อนจากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC ของบรรจุภัณฑ์ที่ได้จาก  
 หลังกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่  $145 \pm 5^{\circ}\text{C}$  และหลังจากการทดสอบในไมโครเวฟ ของ Neat PLA  
 และ PLA ที่เติมสารตัวเติม Talc  $\text{CaCO}_3$  และ mPET ที่ 5phr และสารก่อผลึก LAK และ EBU ที่ 0.5  
 phr แบบ non-isothermal ..... 51

ตารางที่ 17 แสดงสมบัติทางความร้อนจากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC ของบรรจุภัณฑ์ที่ได้จาก  
 กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่  $145 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ของ Neat PLA และ PLA ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วย  
 สารตัวเติม Talc  $\text{CaCO}_3$  และ mPET และสารก่อผลึก LAK และ EBU แบบ non-isothermal ..... 55





## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 ปฏิกริยาการสังเคราะห์ PLA จากกรดแลคติกและหรือแลคไทด์[5].....	5
รูปที่ 2 แสดงลำดับขั้นตอนของการเกิดผลึก [6] .....	7
รูปที่ 3 แสดงส่วนประกอบของผลึกของพอลิเมอร์ [7] .....	8
รูปที่ 4 ชนิดของกระบวนการ Thermoforming A) Matched mold forming B) Slip forming C) Air forming หรือ pressure forming D) Vacuum forming[18] .....	10
รูปที่ 5 แสดงชนิดของคลื่นและความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ[2].....	12
รูปที่ 6 ลักษณะและส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไมโครเวฟที่เรียกว่า แมกนีตรอน (magnetron)[33].....	13
รูปที่ 7 ลักษณะและส่วนประกอบของเตาไมโครเวฟ[33].....	14
รูปที่ 8 (a) พอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว Polyethylene และ (b) พอลิเมอร์ที่มีขั้ว poly(fluoroethylene)[24] .....	18
รูปที่ 9 อิทธิพลของ polarization ประเภทต่างๆ ต่อการตอบสนองของ dielectric constant: (I) radio; microwave; (III) infrared-visible และ (IV) อัลตราไวโอเล็ต[24] .....	18
รูปที่ 10 % strain at break ของ PLA และพอลิเมอร์ผสม[3].....	21
รูปที่ 11 อุณหภูมิพื้นผิวของตัวอย่างที่สภาวะต่างๆ ในเตาไมโครเวฟ กำลังไฟฟ้า 180 วัตต์[3].....	22
รูปที่ 12 อุณหภูมิพื้นผิวของตัวอย่างในสภาวะต่างๆ ในเตาไมโครเวฟ กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์[3].....	22
รูปที่ 13 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิต PLA และ PLA/Talc สำหรับการให้ความร้อนครั้งแรก (a) ขั้นตอนทำความเย็น (b)[32].....	23
รูปที่ 14 Dynamic flexural ของตัวอย่าง PLA and PLA/Talc (a) storage modulus; (b) loss modulus; (c) internal dissipation.[32] .....	24
รูปที่ 15 แสดงสมบัติหลักของ PLA เทียบกับ PP, ABS และ PC .....	25
รูปที่ 16 แสดงผลการทดสอบ POM ของ (a) Neat PLA และ (b) PLA ผสมสารก่อผลึก TMC [11] .....	26

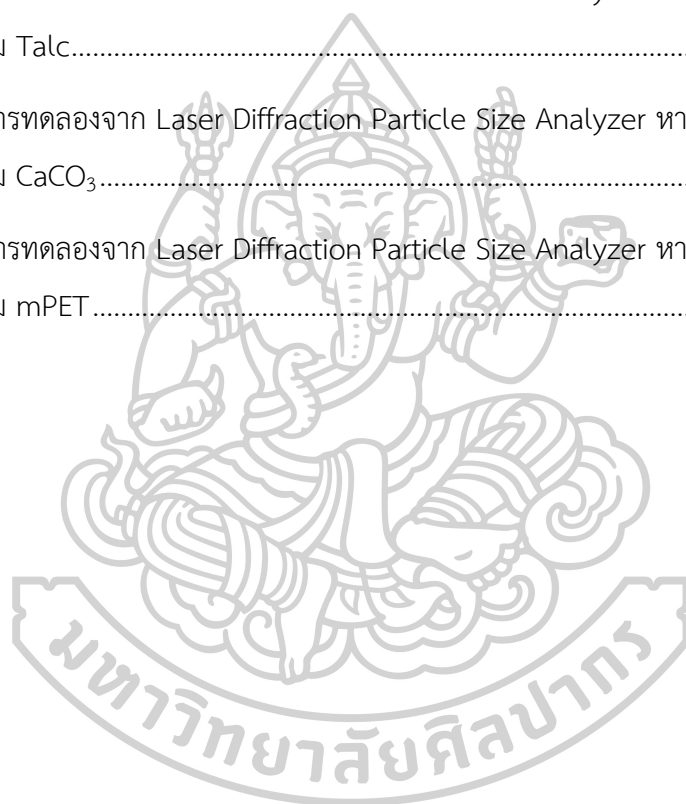
รูปที่ 17 ภาพถ่านความร้อนด้วย FLIR temperature sensor ของอาหารแช่แข็งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ 800 W, 2.45 GHz เป็นเวลา 300 วินาที[13].....	27
รูปที่ 18 การเปรียบเทียบผลอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างการจำลองและการทดลองจาก fiber temperature sensors[13] .....	27
รูปที่ 19 สูตรโครงสร้างของ potassium dimethyl 5-sulfoisophthalate (LAK-301)[20].....	28
รูปที่ 20 สูตรโครงสร้างของ สารก่อผลึก N’N ethylene bis(10-undecanamide) หรือ EBU[28]29	
รูปที่ 21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress และ strain ของ Neat PLA และ PLA ที่มีการเติม Talc CaCO <sub>3</sub> และ mPET และสารก่อผลึก LAK และ EBU.....	36
รูปที่ 22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า A) storage modulus, Loss Modulus และB) tan(delta) หรือ Damping factor ต่ออุณหภูมิเมื่อเติมสารตัวเติม PLA Talc5, PLA CaCO <sub>3</sub> 5 และ PLA mPET 5 .....	39
รูปที่ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า A) storage modulus, Loss Modulus และB) tan(delta) หรือ Damping factor ต่ออุณหภูมิเมื่อเติมสารก่อผลึก PLA EBU 0.5 และ PLA LAK 0.5 .....	39
รูปที่ 24 รูปแสดงอุณหภูมิของแผ่นฟิล์มขณะได้รับความร้อนและมีการอ่อนตัวในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ที่อุณหภูมิ 80±5 °C .....	40
รูปที่ 25 รูปแสดงขณะแผ่นฟิล์มเมื่อได้รับความร้อนและมีการขึ้นรูปในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ที่อุณหภูมิ 120±5 °C .....	41
รูปที่ 26 รูปแสดงขณะแผ่นฟิล์มเมื่อได้รับความร้อนและมีการขึ้นรูปในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ที่อุณหภูมิ 145±5 °C .....	41
รูปที่ 27 รูปแสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดสอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ที่เวลาต่างกัน 5, 10 และ 20 นาที ของผลิตภัณฑ์ Neat PLA ได้จากกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ที่อุณหภูมิ 120±5 °C และ 145±5 °C .....	42
รูปที่ 28 ภาพถ่ายแสดงอุณหภูมิพื้นผิวต่ำสุดและสูงสุดในการทดสอบด้วยไมโครเวฟที่ไม่มีการเติมน้ำ และน้ำมัน และถ่ายด้วย FLIR temperature sensor โดยทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600,800 วัตต์ ที่เวลา 3.5,4 และ5 นาที ของ Neat PLA 140C.....	43

- รูปที่ 29 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์หลังการทดสอบด้วยไมโครเวฟที่เติมน้ำ โดยทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์ที่เวลา 3.5 นาที ของ Neat PLA 145C แล้วการทดสอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ที่เวลาต่างกัน 0, 5, 10 และ 20 นาที ..... 44
- รูปที่ 30 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์หลังการทดสอบด้วยไมโครเวฟที่เติมน้ำมันมะกอก โดยทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์ที่เวลา 3.5 นาที ของ Neat PLA ที่ผ่านการขึ้นรูปที่ 140±5 °C แล้วการทดสอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ที่เวลาต่างกัน 0, 5, 10 และ 20 นาที ..... 45
- รูปที่ 31 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์หลังการทดสอบด้วยไมโครเวฟที่เติมน้ำ โดยทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์ที่เวลา 3.5 นาที ของ Neat PLA และ PLA ที่สารตัวเติม Talc, CaCO<sub>3</sub> mPET ที่ 5 phr และสารก่อผลึก LAK, EBU ที่ 0.5 phr..... 48
- รูปที่ 32 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์หลังการทดสอบด้วยไมโครเวฟที่เติมน้ำมันมะกอก โดยทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์ที่เวลา 3.5 นาที ของ Neat PLA และ PLA ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยสารตัวเติม Talc, CaCO<sub>3</sub> mPET และสารก่อผลึก LAK, EBU ..... 49
- รูปที่ 33 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์หลังการทดสอบด้วยไมโครเวฟที่เติมน้ำมันมะกอก โดยทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์ที่เวลา 3.5 นาที ของ PLA ที่เติมสารตัวเติม Talc และสารก่อผลึก LAK, EBU ..... 50
- รูปที่ 34 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาของสารตัวเติม Talc, CaCO<sub>3</sub> และ mPET ..... 56
- รูปที่ 35 ภาพถ่ายแสดงอุณหภูมิพื้นผิวต่ำสุดและสูงสุดในการทดสอบด้วยไมโครเวฟที่เติมน้ำ และถ่ายด้วย FLIR temperature sensor โดยทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์ที่เวลา 3.5 นาที ของ Neat PLA ( ที่ผ่านการขึ้นรูปที่ 140±5 °C และอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ที่เวลาต่างกัน 0, 5, 10 และ 20 นาที ) ..... 56
- รูปที่ 36 ภาพถ่ายแสดงอุณหภูมิพื้นผิวต่ำสุดและสูงสุดในการทดสอบด้วยไมโครเวฟที่เติมน้ำมัน และถ่ายด้วย FLIR temperature sensor โดยทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์ที่เวลา 3.5 นาที ของ Neat PLA ( ที่ผ่านการขึ้นรูปที่ 140±5 °C และอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ที่เวลาต่างกัน 0, 5, 10 และ 20 นาที ) ..... 56
- รูปที่ 37 ภาพถ่ายจากการทดสอบด้วย FLIR temperature sensor ที่การทดสอบด้วยไมโครเวฟที่เติมน้ำ โดยทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์ที่เวลา 3.5 นาที ของ Neat PLA และ PLA ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยสารตัวเติม Talc CaCO<sub>3</sub> และ mPET และสารก่อผลึก LAK และ EBU ..... 57

รูปที่ 38 ภาพถ่ายจากการทดสอบด้วย FLIR temperature sensor ที่การทดสอบด้วยไมโครเวฟที่ เติมน้ำ โดยทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์ที่เวลา 3.5 นาที ของ Neat PLA และ PLA ที่ผ่าน การปรับปรุงสมบัติด้วยสารตัวเติม Talc CaCO <sub>3</sub> และ mPET และสารก่อผลึก LAK และ EBU .....	58
รูปที่ 39 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ neat PLA .....	59
รูปที่ 40 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA Talc 1 .....	59
รูปที่ 41 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA Talc 3 .....	59
รูปที่ 42 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA Talc 5 .....	60
รูปที่ 43 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA CaCO <sub>3</sub> 1 .....	60
รูปที่ 44 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA CaCO <sub>3</sub> 3 .....	60
รูปที่ 45 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA CaCO <sub>3</sub> 5 .....	60
รูปที่ 46 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA mPET 1 .....	61
รูปที่ 47 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA mPET 3 .....	61
รูปที่ 48 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA mPET 5 .....	61
รูปที่ 49 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA EBU0.1.....	61
รูปที่ 50 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA EBU0.3.....	62
รูปที่ 51 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA EBU0.5.....	62
รูปที่ 52 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA LAK0.1.....	62
รูปที่ 53 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA LAK0.3.....	62
รูปที่ 54 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA LAK0.5.....	63
รูปที่ 55 DSC thermogram ของถ้วยบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ Neat PLA.....	63
รูปที่ 56 DSC thermogram ของถ้วยบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA Talc 1.....	63
รูปที่ 57 DSC thermogram ของถ้วยบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA Talc 3.....	64

รูปที่ 58 DSC thermogram ของถั่วยบรจุกัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA Talc 5.....	64
รูปที่ 59 DSC thermogram ของถั่วยบรจุกัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA CaCO <sub>3</sub> 1 .....	65
รูปที่ 60 DSC thermogram ของถั่วยบรจุกัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA CaCO <sub>3</sub> 3 .....	65
รูปที่ 61 DSC thermogram ของถั่วยบรจุกัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA CaCO <sub>3</sub> 5 .....	66
รูปที่ 62 DSC thermogram ของถั่วยบรจุกัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA mPET 1 .....	66
รูปที่ 63 DSC thermogram ของถั่วยบรจุกัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA mPET 3 .....	67
รูปที่ 64 DSC thermogram ของถั่วยบรจุกัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA mPET 5 .....	67
รูปที่ 65 DSC thermogram ของถั่วยบรจุกัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA EBU 0.1.....	68
รูปที่ 66 DSC thermogram ของถั่วยบรจุกัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA EBU 0.3.....	68
รูปที่ 67 DSC thermogram ของถั่วยบรจุกัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA EBU 0.5.....	69
รูปที่ 68 DSC thermogram ของถั่วยบรจุกัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA LAK 0.1 .....	69
รูปที่ 69 DSC thermogram ของถั่วยบรจุกัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA LAK 0.3 .....	70
รูปที่ 70 DSC thermogram ของถั่วยบรจุกัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA LAK 0.5 .....	70

รูปที่ 71 DSC thermogram ของถั่วยบรจุกัณฑ์หลังจากกระบวนการอบด้วยตู้อบมร้อน 5 นาที ของ Neat PLA A5 .....	71
รูปที่ 72 DSC thermogram ของถั่วยบรจุกัณฑ์หลังจากกระบวนการอบด้วยตู้อบมร้อน 10 นาที ของ Neat PLA A5 .....	71
รูปที่ 73 DSC thermogram ของถั่วยบรจุกัณฑ์หลังจากกระบวนการอบด้วยตู้อบมร้อน 20 นาที ของ Neat PLA A20 .....	72
รูปที่ 74 ผลการทดลองจาก Laser Diffraction Particle Size Analyzer หาขนาดของอนุภาคเฉลี่ย ของสารตัวเติม Talc.....	72
รูปที่ 75 ผลการทดลองจาก Laser Diffraction Particle Size Analyzer หาขนาดของอนุภาคเฉลี่ย ของสารตัวเติม CaCO <sub>3</sub> .....	73
รูปที่ 76 ผลการทดลองจาก Laser Diffraction Particle Size Analyzer หาขนาดของอนุภาคเฉลี่ย ของสารตัวเติม mPET.....	73





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การใช้ไมโครเวฟในการแปรรูปอาหารเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมอาหาร เพราะสามารถนำไมโครเวฟมาใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ได้หลายกระบวนการเช่น การทำให้สุก(cooking) การละลายน้ำแข็ง(thawing) และ การอบ(baking) โดยในปัจจุบันนี้ผู้บริโภคต้องการอาหารที่มีคุณภาพ สะอาด ปลอดภัย มีความสะดวกสบายในการเตรียม โดยเฉพาะอาหารที่ปรุงสุกได้อย่างรวดเร็ว (quick cooking dishes) ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในสังคมปัจจุบัน[2] ซึ่งการพัฒนาบรรจุภัณฑ์เพื่อให้สามารถบรรจุอาหารใช้ร่วมกับไมโครเวฟจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากการเลือกใช้ภาชนะหรือบรรจุภัณฑ์ให้เหมาะกับการใช้งานไมโครเวฟ โดยวัสดุต้องไม่ดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดี เพราะจะแบ่งการดูดซับพลังงานจากอาหารที่ถูกบรรจุอยู่ สำหรับวัสดุที่สะท้อนคลื่นไมโครเวฟก็จะไม่เหมาะสมเช่นเดียวกัน เนื่องจากจะทำให้อาหารภายในภาชนะบรรจุไม่ได้สัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟ นอกจากนั้นคลื่นที่สะท้อนกลับยังทำให้แมกนีตรอนเสื่อมสภาพและมีอายุการใช้งานสั้นลง ในส่วนของวัสดุที่เหมาะสมได้แก่ วัสดุที่ยอมให้คลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านไปได้ดี กล่าวคือเป็นชนิดที่มีค่า dielectric constant และ loss tangent ต่ำ[1] ได้แก่กระดาษ แก้ว พลาสติก เครื่องเคลือบดินเผาและเซรามิกส์ [2] ซึ่งพลาสติกที่นิยมใช้งานสำหรับไมโครเวฟในปัจจุบันคือ โพลีโพรไพลีน (Polypropylene) และเป็นพลาสติกที่ได้จากปิโตรเลียมที่เป็นทรัพยากรที่มีวันหมด และรูปแบบการใช้งานส่วนใหญ่แล้วเป็นการใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง พลาสติกชีวภาพ (bioplastics) จึงเป็นทางเลือกที่สำคัญในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์สำหรับใช้งานในไมโครเวฟ เนื่องจากพลาสติกชีวภาพมีสมบัติที่โดดเด่น โดยวัตถุดิบพื้นฐานในการผลิต (bio-based) เช่น มันสำปะหลัง ฟางข้าว อ้อย ข้าวโพด สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ง่ายและเป็นวัตถุดิบทดแทนการใช้ปิโตรเลียม อีกทั้งยังสามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ (Compostable Plastic)[3] อย่างไรก็ตาม พลาสติกชีวภาพที่ไม่ตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟและมีค่า dielectric constant ที่ต่ำ[25]คือ พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid)หรือ PLA) แต่ PLA ยังมีข้อจำกัดหลายอย่างที่จะนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารสำหรับใช้งานในไมโครเวฟ โดยเฉพาะสมบัติทางความร้อน ซึ่งผลิตภัณฑ์ต้องไม่เกิดการบิดเบี้ยวและเสียรูปในการใช้งานในไมโครเวฟ

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม พอลิเมอร์ผสม และสารก่อผลึก ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อนของพอลิแลคติก ศึกษากระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง และความสามารถในการใช้งานในไมโครเวฟของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของสารตัวเติม ผลการเติมสารก่อผลึก และพอลิเมอร์ผสมของ

พอลิแลคติกแอซิด

1.2.2 ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน ของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และ

ความสามารถในการใช้งานในไมโครเวฟ

## 1.3 แนวคิดของงานวิจัย

1.3.1 อุณหภูมิการขึ้นรูปในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งส่งผลต่อการบิดเบี้ยวและเสียรูปของผลิตภัณฑ์เมื่อได้รับความร้อน

1.3.2 การปรับปรุงสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดโดยการเติมสารตัวเติม พอลิเมอร์ผสม และสารก่อผลึก ส่งผลต่อการบิดเบี้ยวเสียรูปของผลิตภัณฑ์เมื่อได้รับความร้อน

## 1.4 ขอบเขตและข้อจำกัดของงานวิจัย

1.4.1 ใช้พอลิเมอร์ชนิด พอลิแลคติกแอซิด เกรด LX175 ใช้สารตัวเติม เช่น ผงแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ), ผงทัลคัม Talcum Powder (Talc), และพอลิเมอร์ผสม Polyethylene Terephthalate Powder (mPET) ในปริมาณ 0 - 5 phr

1.4.2 ใช้สารก่อผลึก เช่น N,N'-ethylenebis(10-undecenamide) (EBU) ร่วมกับ Peroxide 0.1 phr และ Potassium dimethyl 5-sulfoisophthalate (LAK-301) ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก ปริมาณที่ใช้ไม่เกิน 0.5 phr

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานโดยสรุป

1.5.1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2. ออกแบบวิธีการและวางแผนงานวิจัย

1.5.3. ดำเนินงานวิจัย



## ส่วนที่ 1 ศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม พอลิเมอร์ผสมและสารก่อผลึกที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิแลคติกแอลิต

1. ทำการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตพอลิแลคติกแอลิตที่มีสารตัวเติมคือ ผงแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ), ผงทัลคัม Talcum Powder (Talc), และพอลิเมอร์ผสม Polyethylene Terephthalate Powder (mPET) ในปริมาณ 0 - 5 phr โดยเครื่องผสม internal mixer ที่อุณหภูมิ  $190^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นบดด้วยเครื่องบดและนำพอลิเมอร์ที่ได้ไปอบเพื่อทำการทดสอบสมบัติต่อไป
2. ทำการเตรียมพอลิเมอร์พอลิแลคติกแอลิตที่มีการเติมสารก่อผลึกใช้สารก่อผลึก เช่น N,N'-ethylenebis(10-undecenamide) (EBU) และ Potassium dimethyl 5-sulfoisophthalate (LAK-301) ในปริมาณ 0-0.5 phr โดยเครื่องผสม internal mixer ที่อุณหภูมิ  $190^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นบดด้วยเครื่องบดและนำพอลิเมอร์ที่ได้ไปอบเพื่อทำการทดสอบสมบัติต่อไป
3. ศึกษาสมบัติเชิงกล ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM)
4. ศึกษาสมบัติเชิงรีโอโลยี ด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer (DMA)

## ส่วนที่ 2 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

1. การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ของพอลิแลคติกแอลิตที่ผ่านการปรับปรุงโดยใช้สารตัวเติม พอลิเมอร์ผสมและสารก่อผลึก โดยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) โดยให้ความร้อนได้ขึ้นงานมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมความหนาประมาณ 0.7mm
2. การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่ง (Thermofforming) ที่อุณหภูมิ  $80 \pm 5$ ,  $120 \pm 5$  และ  $145 \pm 5$  °C ที่อัตราการให้ความร้อนอยู่ที่  $50^\circ\text{C}/\text{นาที}$

## ส่วนที่ 3 ศึกษาความสามารถในการใช้งานของผลิตภัณฑ์ในไมโครเวฟ

1. ศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยใช้ Differential Scanning Calorimetry (DSC)
2. ศึกษาความสามารถในการใช้งานด้วยเครื่องไมโครเวฟ (Samsung/ST 23 ลิตร) โดยวัดอุณหภูมิพื้นผิวของบรรจุภัณฑ์ด้วยเครื่อง FLIR temperature sensor

### 1.5.4. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

### 1.5.5. นำเสนอส่วนหนึ่งของงานวิจัยในงานประชุมวิชาการ

### 1.5.6. จัดทำรายงานผลการวิจัย

### 1.5.6. การสอบโครงการวิจัย

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เพื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง และอิทธิพลของการเติมสารตัวเติม พอลิเมอร์ผสมและสารต่อผลิตภัณฑ์ต่อการบิดเบี้ยวและเสียรูปของผลิตภัณฑ์ในการใช้งานในไมโครเวฟ

1.6.2 เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการเตรียมบรรจุภัณฑ์ที่สามารถใช้งานในไมโครเวฟได้ โดยมีสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนที่เหมาะสมกับการใช้งานในไมโครเวฟ อีกทั้งยังเป็นบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

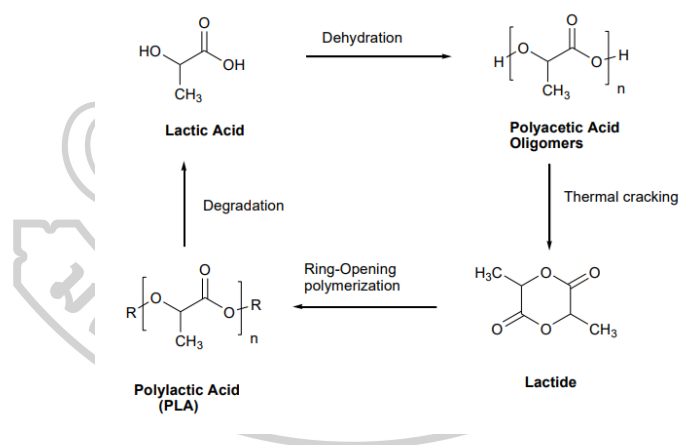


## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พอลิแลคติกแอซิด Polylactic-acid หรือ PLA [4]

พอลิแลคติกแอซิด (PLA) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ ที่ได้มาจากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของกรดแลคติก (ซึ่งเป็นสารที่ได้จากการหมักคาร์โบไฮเดรต เช่น แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง) ซึ่งพอลิแลคติกแอซิด สามารถการสังเคราะห์ ได้หลายวิธี (รูปที่ 1 ) เช่น การสังเคราะห์โดยปฏิกิริยา Azeotropic dehydration condensation ซึ่งจะทำให้ได้ พอลิแลคติกแอซิด ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง[15] หรือปฏิกิริยาควบแน่นโดยตรงของกรดแลคติก (ได้เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ) นอกจากนี้ เมื่อนำพอลิเมอร์ดังกล่าวไปผ่านปฏิกิริยาแตกตัวย้อนกลับ (depolymerization) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแลคไทด์ซึ่งมีโครงสร้างไอโซเมอร์หลายแบบ เช่น LL, LD, และ DD ซึ่งสารดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวง (ring opening polymerization) ได้เป็นพอลิแลคติกแอซิด อีกครั้ง ซึ่งจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงได้เช่นเดียวกัน



รูปที่ 1 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PLA จากกรดแลคติกและหรือแลคไทด์[5]

พอลิแลคติกแอซิด Polylactic-acid หรือ PLA เป็นพลาสติกได้มาจากส่วนผสม วัสดุทางธรรมชาติเช่น ส่วนประกอบข้าวโพด หรือ ธัญญาพืช PLA เป็น Thermoplastic คือ หากถูกความร้อนสามารถหลอมเปลี่ยนรูปร่างต่าง ๆ ได้ เนื่องจากเป็นวัสดุที่เกิดจากผลผลิตธรรมชาติ จึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม[8]

พอลิแลคติกแอซิด มีลักษณะใสและเงา ขึ้นงานที่ออกมามีลักษณะกึ่งใส คล้ายแก้ว จึงเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความเงา ความแข็ง[11] แต่มีสมบัติทางความร้อนที่เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการเสียรูปที่อุณหภูมิ T<sub>g</sub> จึงไม่ทนต่อการบิด[7] และการดึง PLA ยังมีกลิ่นเป็นมิตร เนื่องจากเป็น

ส่วนประกอบจากธรรมชาติ กลิ่นจึงไม่เหมือนพลาสติกโดยทั่วไป อีกทั้งยังได้ชิ้นงานสวยกว่า เนื่องจากมีจุดอุณหภูมิขึ้นรูปอยู่ที่ 180-220 °C [11] พลาสติกที่ออกจากกระบวนการนั้นจะมีความเหนียวเล็กน้อย เก็บรายละเอียดดี ขึ้นรูปง่าย และเย็นตัวเร็ว พอลิแลคติกแอซิด มีลักษณะด้อยคือความเปราะ จากที่กล่าวไว้ข้างต้นแข็งแต่เปราะ [7] ไม่ทนต่อแรงบิดนั้ก หากดึงหรือบิดเมื่อเทียบกับ PBS จะเริ่มงอแล้วค่อยขาด แต่ PLA จะหักก่อนที่จะงอ (คุณสมบัติคล้ายๆ แก้ว) ทนความร้อนได้น้อยกว่า เนื่องจากมี Glass Transition Temperature ที่ 55-65 °C [15] จึงเสียรูปร่างได้ง่ายๆ จากไปไว้ในที่อุณหภูมิสูง เช่นผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานร่วมกับน้ำร้อน หรือ ผลิตภัณฑ์ที่ต้องผ่านความร้อน ซึ่งทำให้ขอบเขตการใช้งานที่จำกัด [5]

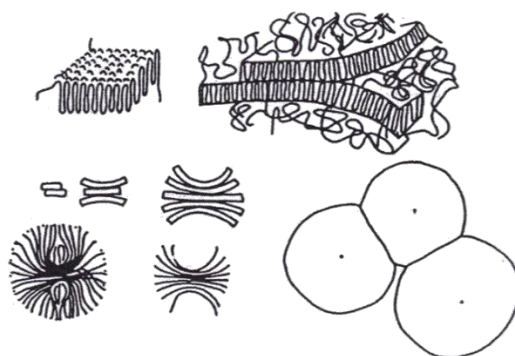
## 2.2 กระบวนการตกผลึกของพอลิเมอร์ (Polymer crystallization) [6]

การเกิดผลึกของพอลิเมอร์จากสภาวะหลอมเหลว จะเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะดังต่อไปนี้

- โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์จะต้องเอื้ออำนวยต่อการจัดเรียงตัวของผลึก กล่าวคือ สายโซ่ของพอลิเมอร์จะต้องเคลื่อนไหวได้สะดวกการมีหมู่ข้างเคียงที่ไม่สม่่าเสมอหรือมีโครงสร้างที่มีกิ่งก้านขนาดใหญ่จะขัดขวางการเกิดผลึกของพอลิเมอร์

- อุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystallization temperature:  $T_c$ ) จะเกิดต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว แต่ต้องมีความมากกว่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature:  $T_g$ ) เพื่อให้สายโซ่ของพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างสะดวก

- การเกิดผลึกของพอลิเมอร์จะเริ่มจากการเกิดนิวเคลียส [9] (nucleation) ขึ้นมาก่อน ซึ่งการมีนิวเคลียสจะเป็นตัวเริ่มต้นในการเกิดผลึก โดยลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ซ้อนกันเป็นชั้นๆ เรียกว่า ลามลลา (Lamella) ซึ่งมีความหนาประมาณ 100 °Å [5] นั้นแสดงว่าสายโซ่ของพอลิเมอร์จะต้องมีการพับไปพบมาจากนั้นลามลลาจะมีการจัดเรียงตัวรวมกลุ่มกันโดยกระจายออกจากนิวเคลียสซึ่งต่อมาจะได้เป็นโครงสร้างทรงกลมที่ซับซ้อนเรียกว่า spherulites ซึ่งกล่าวได้ว่า spherulites ประกอบไปด้วยลามลลามารวมกลุ่มกัน โดยจะมีส่วนอัสฐานแทรกอยู่ระหว่างผลึกลามลลา [5] ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2 แสดงลำดับขั้นตอนของการเกิดผลึก [6]

สำหรับอัตราการเกิดผลึกโดยรวม (Overall crystallization rate) สามารถวัดได้จากความหนาแน่นของนิวเคลียส และอัตราการเติบโต (Growth rate) ของ spherulite ซึ่งโดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์ซึ่งมีการเกิดผลึกจากการเกิดนิวเคลียสแบบเนื้อเดียวกัน (Homogeneous nucleation) ซึ่งมักมีสมบัติเชิงกลและทางความร้อนที่ไม่แน่นอน เนื่องจากขนาด spherulite ไม่สม่ำเสมอ และมีการกระจายตัวในช่วงกว้าง นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดของผลึก อัตราการเกิดผลึก และอัตราการเติบโตของผลึกจะขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวของพอลิเมอร์ โดยถ้าทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวเย็นลงอย่างรวดเร็ว จะได้ spherulite ขนาดเล็กจำนวนมากและมีความเป็นผลึกต่ำ [21] ในทางตรงข้าม ถ้าทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวเย็นตัวลงอย่างช้าๆ จะได้ spherulite ขนาดใหญ่และมีจำนวนน้อย อีกทั้ง มีความเป็นผลึกสูง [9]

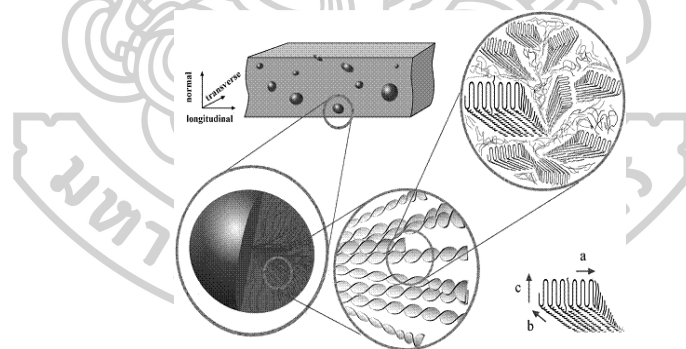
### 2.2.1 ขั้นตอนการเกิดนิวเคลียส (Nucleation)

จากพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวอยู่เมื่ออุณหภูมิลดลงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature) แต่สูงกว่าเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) สายโซ่โพลิเมอร์ที่ไม่เป็นระเบียบในอสัณฐาน (Amorphous phase) จะเริ่มปรับการจัดเรียงตัวของสายโซ่โพลิเมอร์ให้เป็นระเบียบและมีขนาดใหญ่ที่มีเสถียรภาพมากพอ (Critical size) จะเกิดเป็นนิวเคลียสเกิดขึ้น ปัจจัยที่สำคัญที่ขัดขวางการเกิดนิวเคลียสมี 2 ปัจจัย ได้แก่ การลดอุณหภูมิส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ และ ความยุ่งเหยิงของสายโซ่พอลิเมอร์ การเกิดนิวเคลียสนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทโดยพิจารณาตามลักษณะของการเกิดนิวเคลียส คือการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Nucleation) โดยส่วนใหญ่เป็นการเกิดนิวเคลียสจากตัวเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลวเอง ซึ่งจะมีนิวเคลียสใหม่เกิดขึ้นตลอดช่วงที่มีการตกผลึก และการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous Nucleation) ซึ่งเป็นการเกิดนิวเคลียสจากสิ่งแปลกปลอม

อื่น เช่น สารเติมแต่ง (Additives) สารก่อผลึก (Nucleating agent) เป็นต้น ซึ่งนิวเคลียสทั้งหมดจะเกิดเฉพาะเวลาเริ่มต้นเท่านั้น หลังจากที่สายโซ่โมเลกุลเรียงตัวกันจนเกิดเป็นนิวเคลียสเกิดขึ้น

### 2.2.2 ขั้นตอนการเติบโตของผลึก (Growth process)

เป็นการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เพิ่มเติมต่อจากนิวเคลียส ในการจัดเรียงตัวนั้นถ้าแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุลมากจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวกันได้ง่าย ค่าอัตราการเติบโตของผลึกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการตกผลึก กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึกต่ำเกินไป ค่าการเติบโตของผลึกจะน้อย เนื่องจากมีพลังงานน้อยส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลที่ช้าลง และถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึกสูงเกินไป ค่าอัตราการเติบโตของผลึกจะน้อยเช่นกัน เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงนั้นสายโซ่มีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาจึงทำให้การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลทำได้ยากที่บริเวณผิวของผลึก ดังนั้นอุณหภูมิในการตกผลึกที่จะทำให้เกิดผลึกได้นั้นจะอยู่ในช่วงระหว่างอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ในการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เพื่อแสดงการเติบโตนั้นจะต้องมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมากและเมื่อมีแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุลมากจะทำให้ง่ายต่อการจัดเรียงตัวของโมเลกุล เมื่อสายโซ่โมเลกุลสมมาตรและมีแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่มากจะทำให้สายโซ่โมเลกุลจัดเรียงตัวเป็นลามลลา (lamellar) จนเกิดเป็นผลึกดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงส่วนประกอบของผลึกของพอลิเมอร์ [7]

### 2.3 กระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง [18]

กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งจะเป็นกระบวนการที่รวมถึงเทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นพลาสติก (sheet-forming) เช่น การขึ้นรูปด้วยสุญญากาศ (vacuum forming) ด้วยความดัน (pressure forming) และด้วยแม่พิมพ์ประกบ (matched mold forming)[22] ซึ่งเทคนิคต่างๆ ที่กล่าวมานี้จะต้องใช้แผ่นเทอร์โมพลาสติกซึ่งจะถูกยึด (clamp) และถูกให้ความร้อนเพื่อทำให้เกิด



รูปร่างในหรือบนแม่พิมพ์[17] ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้โดยทั่วไปมักจะต้องมีขั้นตอนตัดหรือเพื่อตกแต่งผลิตภัณฑ์ก่อนการนำไปใช้งาน นอกจากนี้ยังอาจต้องมีขั้นตอนการทาสี พิมพ์สีหรือการทากาว กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งจะให้การคงรูปที่เร็วและสม่ำเสมอ รวมทั้งราคาแม่พิมพ์ที่ต่ำทำให้กระบวนการนี้เป็นกระบวนการผลิตที่มีต้นทุนต่ำ

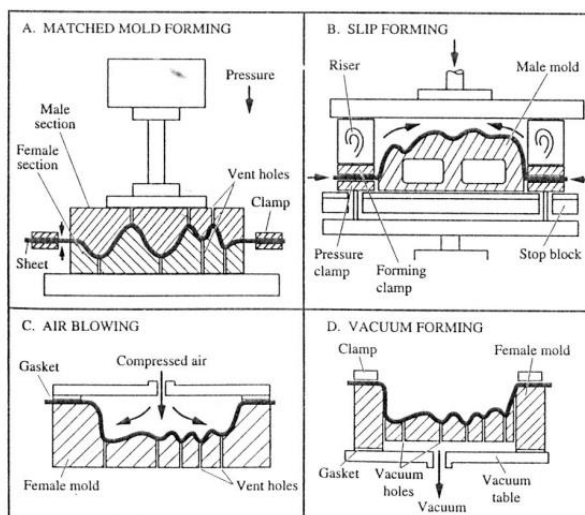
ส่วนประกอบที่สำคัญพื้นฐานของกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งได้แก่[18]

- 1) แผ่นเทอร์โมพลาสติก
- 2) กระบวนการยึด (clamping mechanism)
- 3) ระบบให้ความร้อน
- 4) แม่พิมพ์
- 5) แรงที่ใช้ในการทำให้พลาสติกคงรูป (forming force)
- 6) เครื่องมือตัดขอบ (trim apparatus)

### 2.3.1 หลักการของเทอร์โมฟอร์มมิ่งแบบต่างๆ

เราสามารถแบ่งชนิดของกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งได้เป็น 4 รูปแบบ ได้แก่

1. Matched mold forming โดยการใช้อแม่พิมพ์ตัวผู้และตัวเมียที่เข้าคู่กัน
2. Slip forming โดยการใช้เฉพาะแม่พิมพ์ตัวผู้
3. Air forming หรือ pressure forming โดยการใช้ความดันอากาศในการให้แผ่นพลาสติกประกบติดแม่พิมพ์
4. Vacuum forming โดยการใช้การดูดอากาศออกหรือการทำให้แม่พิมพ์เป็นสุญญากาศ



รูปที่ 4 ชนิดของกระบวนการ Thermoforming A) Matched mold forming B) Slip forming C) Air forming หรือ pressure forming D) Vacuum forming[18]

## 2.4 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของภาชนะพลาสติกบรรจุอาหารสำหรับเตาไมโครเวฟ[34]

กระทรวงอุตสาหกรรมออกประกาศกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สำหรับภาชนะพลาสติกบรรจุอาหารสำหรับเตาไมโครเวฟ เล่ม 1 สำหรับการอุ่น มาตรฐานเลขที่ มอก. 2493 เล่ม 1 - 2554 โดยมี ขอบข่าย ดังนี้ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ครอบคลุมภาชนะพลาสติกรวมถึงฝาที่ต้องสัมผัสโดยตรงกับอาหารที่อุ่นในเตาไมโครเวฟ และต้องทนอุณหภูมิได้ไม่ต่ำกว่า 100°C มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ไม่ครอบคลุมภาชนะพลาสติกที่ใช้ปรุงอาหารในเตาไมโครเวฟและภาชนะพลาสติกที่ใช้อุ่นอาหารในเตาไมโครเวฟครั้งเดียวรวมทั้งภาชนะและ/หรือเครื่องใช้พลาสติกที่ประกาศกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไว้แล้ว[10]

### 2.4.1 คุณลักษณะที่ต้องการ

ลักษณะทั่วไป ต้องสะอาด ปราศจากข้อบกพร่อง เช่น รูปร่างลักษณะผิดปกติ หรือมีตำหนิที่เห็นได้ชัดเจน กรณีมีฝา ต้องปิดได้สนิทและเหมาะสมตามลักษณะการใช้งานกรณีมีตัวยึดระหว่างตัวภาชนะกับฝา ต้องเหมาะสม ไม่เป็นอุปสรรคต่อการใช้งาน แข็งแรงเพียงพอและต้องทำจากวัสดุที่ทนความร้อนในเตาไมโครเวฟได้ ความหนาของภาชนะพลาสติก ณ จุดซึ่งสมมาตรกันหรือที่จุดต่าง ซึ่งอยู่ในลักษณะและระดับเดียวกัน ต้องสม่ำเสมอ กรณีภาชนะพลาสติกที่ไม่สมมาตร ต้องมีส่วนความหนาเหมาะสม การทดสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ



## 2.4.2 คุณสมบัติการใช้งาน

การใช้ในเตาไมโครเวฟ วางตัวอย่างในเตาไมโครเวฟ แล้วให้ความร้อนที่กำลังไฟระหว่าง 500 วัตต์ ถึง 2,000 วัตต์และเวลาที่กำหนดในตารางที่ 2.1 ตรวจสอบพินิจตัวอย่างระหว่างการทดสอบ โดยสังเกตประกายไฟหรือสิ่งผิดปกติอื่น พร้อมทั้งรูปร่างลักษณะของตัวอย่าง ฝาและตัวยึด (ถ้ามี) หลังจากนั้น นำออกจากเตาไมโครเวฟ ปลดเตาไมโครเวฟและตัวอย่างให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิ ( $23 \pm 5$ ) °C แล้วปฏิบัติซ้ำ อีก 2 ครั้ง โดยตรวจพินิจเช่นเดียวกันทุกครั้ง หลังจากนั้น นำตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบแล้วไปทดสอบกลิ่นและรสแล้ว ต้องไม่มีกลิ่นไม่พึงประสงค์ และรสของน้ำต้องไม่เปลี่ยนจากเดิม

**ตารางที่ 1** การเวลาที่ให้ความร้อนสำหรับการทดสอบผลิตภัณฑ์ไมโครเวฟตามมาตรฐานเลขที่ มอก. 2493 เล่ม 1 – 2554[34]

กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลาที่ใช้ (นาที)
2,000	1.0
1,000	2.0
600	3.5
500	4.0

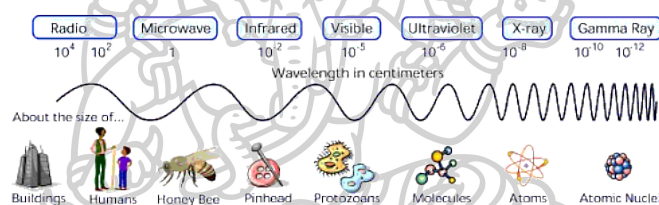
ความสามารถในการทนความร้อน ต้องทนอุณหภูมิได้ไม่ต่ำกว่า 100 °C และเมื่อทดสอบวางตัวอย่าง ที่บริเวณกึ่งกลางแผ่นทนความร้อน และนำไปไว้ในตู้อบแบบอากาศหมุนเวียน โดยตั้งอุณหภูมิไว้ที่อุณหภูมิสูงสุดตามที่ระบุไว้ที่ฉลาก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมา ปลดตู้ไว้ให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิ ( $23 \pm 5$ ) °C เป็นเวลาประมาณ 30 นาที แล้วตรวจพินิจแล้ว ต้องไม่มีลักษณะผิดปกติที่อาจเป็นผลเสียต่อการใช้งาน เช่น บิดเบี้ยว ย่น และยังมีทดสอบอื่นๆที่จำเป็นต้องผ่านการทดสอบ ก่อนที่จะนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งานเช่น ความทนแรงกระแทก เมื่อทดสอบแล้วต้องไม่แตกไม่ร้าว ความทนการใช้งาน เมื่อทดสอบแล้ว ต้องไม่มีลักษณะผิดปกติที่อาจเป็นผลเสียต่อการใช้งาน หากเปลี่ยนสี ต้องไม่ต่ำกว่าเกรยสเกลระดับ 3 และเมื่อนำไปทดสอบความทนแรงกระแทกต่อแล้วภาชนะพลาสติก ต้องไม่แตกไม่ร้าว ทดสอบกลิ่นและรสต้องไม่มีกลิ่นไม่พึงประสงค์และรสของน้ำต้องไม่เปลี่ยนจากเดิม ทดสอบตัวยึด (ถ้ามี) เมื่อทดสอบแล้วต้องไม่แตก ไม่ตก และไม่มีลักษณะผิดปกติที่อาจเป็นผลเสียต่อการใช้งาน

คุณสมบัติด้านความปลอดภัย สีที่ใช้พิมพ์ (ถ้ามี) และสีผสมในเนื้อพลาสติก ต้องเป็นสีชั้นคุณภาพสัมผัสอาหาร มีความปลอดภัยและไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ผู้ทำต้องพิสูจน์หรือแสดง

เอกสารรับรองคุณภาพหรือผลการวิเคราะห์จากสถาบันหรือหน่วยงาน ที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยอมรับ ความคงทนของสีที่ใช้พิมพ์ (ถ้ามี) เมื่อแล้ว สีที่ใช้พิมพ์ต้องไม่หลุดติดแถบกระดาษกาวย่น สีผสมในพลาสติกที่ละลายออกมาเมื่อทดสอบแล้ว สีของสารละลายที่ได้ต้องไม่เข้มกว่าสีของสารละลายสอบเทียบ ปริมาณสารที่ละลายออกมา ต้องไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด และโลหะในพลาสติก ต้องไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดการวิเคราะห์ให้ปฏิบัติตาม มอก. 656[34]

### 2.4.3 คลื่นไมโครเวฟ และหลักการทำงานของไมโครเวฟ[33]

เตาไมโครเวฟใช้คลื่นรังสีไมโครเวฟในการทำอาหาร ซึ่งเป็นคลื่นแบบเดียวกันทั้งเตาที่ใช้ตามบ้าน ร้านค้า หรือโรงงานต่างๆ ปัจจุบันยังไม่มีคำแนะนำที่ชัดเจนในการใช้เตาไมโครเวฟจากผู้ผลิต การดูแลรักษาเพื่อให้ใช้งานได้ดี หรือป้องกันอันตรายจากรังสี เราจึงควรรู้คุณสมบัติบางอย่างและข้อควรระวังในการใช้เตาไมโครเวฟ



รูปที่ 5 แสดงชนิดของคลื่นและความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ[2]

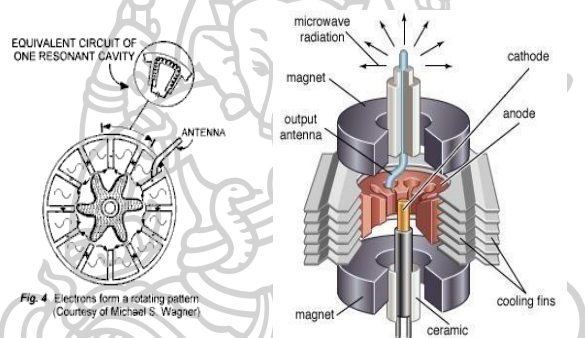
### 2.4.4 คลื่นไมโครเวฟ[33]

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นเดียวกับแสงสว่าง โดยอยู่ในช่วงของคลื่นวิทยุความถี่สูง (high frequency radio wave) เมื่อรังสีมีความถี่สูงขึ้น ความยาวคลื่นจะลดลง คลื่นที่มีความถี่สูงมาก ความยาวคลื่นจึงสั้นมาก ดังนั้น คลื่นชนิดนี้จึงได้ชื่อว่าไมโครเวฟ ซึ่งแปลว่าคลื่นสั้นมาก สำหรับรังสีอินฟราเรด (infrared) แสงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) และรังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกัน แต่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าไมโครเวฟ

ไมโครเวฟที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง อาจจะทะลุผ่านไป เกิดการสะท้อนหรือถูกดูดกลืน วัตถุที่เป็นโลหะจะสะท้อนไมโครเวฟทั้งหมดที่ตกกระทบ ส่วนวัตถุที่ไม่ใช่โลหะ เช่น แก้ว หรือพลาสติก ไมโครเวฟจะเคลื่อนที่ผ่านไปได้บางส่วน วัตถุที่มีความชื้น เช่น ร่างกายคนเราหรืออาหารจะดูดกลืนพลังงานของไมโครเวฟ ถ้าพลังงานที่ถูกดูดกลืนเอาไว้มากกว่าพลังงานที่คายออกมาอุณหภูมิก็จะสูงขึ้น

การนำคลื่นไมโครเวฟไปใช้ประโยชน์โดยทั่วไปไมโครเวฟมีใช้ในงานด้านการสื่อสารผ่านดาวเทียม โทรศัพท์เคลื่อนที่ เรดาร์ อุปกรณ์นำร่องทางการบินและการเดินเรือ นอกจากนั้น ยังมีการนำไปใช้ในการให้ความร้อนทางอุตสาหกรรมและการรักษาโดยการให้ความร้อน

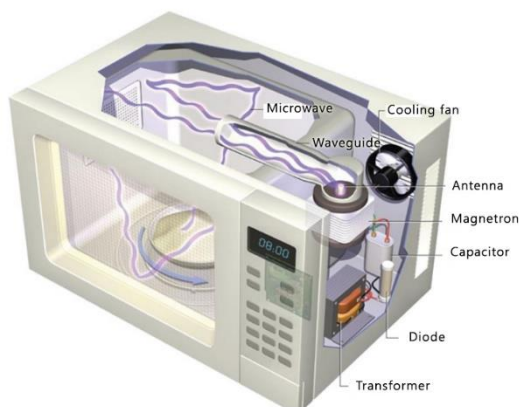
ในช่วงเวลาที่ผ่านมาไม่นาน มีการใช้เตาไมโครเวฟตามบ้านเรือน ทางอุตสาหกรรม และการพาณิชย์เพิ่มขึ้นจำนวนมาก โดยในเตาไมโครเวฟที่ใช้ตามบ้านเรือนมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เรียกว่า แมกนีตรอน (magnetron) ใช้สำหรับผลิตคลื่นไมโครเวฟ คลื่นไมโครเวฟที่ผลิตออกมามีความถี่ 2,450 MHz ซึ่งจะปล่อยออกมาที่ช่องว่างภายในเตาที่มีผนังเป็นโลหะ คลื่นไมโครเวฟจะสะท้อนไปมาอยู่ภายในเตาและถูกดูดกลืนโดยอาหารหรือเครื่องดื่มที่เราใส่เข้าไป การดูดกลืนที่ไม่สม่ำเสมอจะทำให้บางตำแหน่งเกิดจุดร้อน (hot spots) ขึ้น



**รูปที่ 6** ลักษณะและส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในไมโครเวฟที่เรียกว่า แมกนีตรอน (magnetron)[33]

ไมโครเวฟที่ผ่านเข้าไปในอาหารหรือของเหลวจะทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการสั่น ทำให้เกิดการเสียดสีกันของโมเลกุล จึงเกิดความร้อนและทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เวลาที่ใช้ประกอบอาหารจึงสั้นกว่าการใช้เตาแบบธรรมดา ความร้อนจะเพิ่มขึ้นเร็วหรือช้าจะขึ้นกับปริมาณความร้อนรูปร่าง ปริมาตร และมวลของอาหารที่ใส่เข้าไป อาหารบางชนิดจะมีความร้อนเพิ่มขึ้นไม่สม่ำเสมอ ที่ผิวนอกอาจจะเพียงอุ่นๆ ขณะที่ภายในใกล้ถึงจุดเดือด ตัวอย่างเช่น โดนัทไส้แยม หรือพายไก่ อาหารบางชนิด บางส่วนจะสุก บางส่วนไม่สุก อาหารแช่แข็งอาจจะยังแข็งตัวอยู่ถ้าไม่นำออกมาทิ้งไว้ให้น้ำแข็งละลายก่อน

ผนังของเตาไมโครเวฟและภาชนะที่ไม่ใช่โลหะจะไม่เกิดความร้อนโดยตรงจากไมโครเวฟ เนื่องจากเป็นวัสดุที่ไม่ดูดกลืนพลังงานของไมโครเวฟ แต่ผนังภายในของเตาและภาชนะร้อนขึ้นเนื่องจากได้รับความร้อนจากอาหารที่ใส่เข้าไป และความร้อนจากการทำงานของวงจรไฟฟ้าของเตา



รูปที่ 7 ลักษณะและส่วนประกอบของเตาไมโครเวฟ[33]

#### 2.4.5 เตาไมโครเวฟและความปลอดภัย[33]

คลื่นไมโครเวฟที่ผลิตจากเตาไมโครเวฟจะหมดลงทันทีที่ปิดสวิทช์ของแมกนีตรอน แบบเดียวกับการปิดสวิทช์หลอดไฟฟ้า จะไม่มีคลื่นไมโครเวฟหลงเหลืออยู่ในอาหารเมื่อปิดสวิทช์หรือนำออกมาจากเตาแล้ว ไมโครเวฟจะไม่ทำให้อาหารหรือเตามีกัมมันตภาพรังสี อาหารที่ปรุงด้วยเตาไมโครเวฟจึงไม่มีอันตราย เตาไมโครเวฟทุกเครื่องจะมีสวิทช์แบบ safety interlock อย่างน้อย 2 ส่วน ซึ่งจะตัดการผลิตไมโครเวฟทันทีที่ประตูของเตาถูกเปิดออก การออกแบบเตาสสมัยใหม่จะทำให้ไมโครเวฟอยู่เฉพาะภายในเตา แต่ก็ยังมีโอกาสที่ไมโครเวฟจะรั่วออกไปตามแนวรอบประตูได้ โดยทั่วไปจะต้องออกแบบให้ไมโครเวฟรั่วออกไปต่ำกว่าค่าที่กำหนด ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ไฟฟ้า AS/NZS60335.2.25:2002 Safety Part 2.25 ของออสเตรเลีย กำหนดมาตรฐานการทดสอบระดับการรั่วของไมโครเวฟว่า การรั่วของไมโครเวฟที่ระยะ 50 มิลลิเมตรหรือเกินกว่านั้นจากผิวนอกของเตาจะต้องไม่เกิน 50 วัตต์ต่อตารางเมตร มาตรฐานนี้ใช้กับเตาไมโครเวฟที่ใช้ตามบ้านหรือใช้งานทั่วไป ค่าที่กำหนดนี้เป็นแต่เพียงการป้องกันและเพื่อความปลอดภัยเท่านั้น ไม่มีใครทราบว่าการรั่วของไมโครเวฟรั่วเกินกว่านี้จะส่งผลอย่างไรต่อผู้ใช้ จากการสำรวจของหน่วยงานทดสอบแสดงให้เห็นว่า มีเตาไมโครเวฟที่มีการรั่วเกินกว่าระดับที่กำหนดน้อยมาก เตาไมโครเวฟที่อยู่ในสภาพดีและใช้อย่างถูกต้องมีความปลอดภัย ถ้าเตามีความเสียหาย ไม่ควรนำมาใช้จนกว่าจะได้รับการซ่อมหรือทดสอบโดยช่างที่มีประสบการณ์ว่าไม่มีไมโครเวฟรั่วออกมาเกินกว่าที่กำหนด เตาไมโครเวฟโดยทั่วไปไม่มี ความจำเป็นที่ต้องวัดระดับการรั่วเป็นประจำ ผู้ใช้ควรตรวจสอบตำแหน่งเหล่านี้ก่อนจะนำเตาไมโครเวฟมาใช้ ผนังของประตูควรมีสภาพเรียบร้อยไม่มีตำหนิ ประตูของเตาไมโครเวฟควรปิดได้สนิทพอดีกับตัวเตา และสามารถเปิดปิดได้สะดวก บานพับของประตูควรมีอยู่ในสภาพดี เตาควรมีอยู่ในสภาพดี มีความสะอาดโดยเฉพาะขอบประตูและสภาพภายใน ไม่มีรอยไหม้ ไม่มีรอยสีกร่อนที่ประตู ขอบ

ประตูหรือภายในเตา การใช้เตาไมโครเวฟควรปฏิบัติตามคู่มือหรือคำแนะนำของผู้ผลิตและข้อควรระวังเพื่อความปลอดภัย ไม่ควรแก้ไขหรือขัดขวางการทำงานของระบบล็อก (interlocking device) ไม่ควรใช้เตาไมโครเวฟโดยไม่มีจานรองที่ได้รับมาจากผู้ผลิต ยกเว้นในกรณีที่คู่มือการใช้งานระบุให้ใช้ภาชนะอื่นได้ ไม่เปิดใช้เตาไมโครเวฟโดยไม่มีสิ่งของอยู่ภายใน ซึ่งจะตูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ เช่น อาหาร หรือน้ำ ยกเว้นในกรณีที่คู่มือการใช้งานระบุให้ทำได้ ขณะที่เปิดประตูของเตาไมโครเวฟ ไม่ควรวางหรือทิ้งน้ำหนักของที่มีน้ำหนักมาก เช่น ภาชนะบรรจุอาหารไว้ที่ประตูของเตา ทำความสะอาดภายในเตา ประตูและขอบประตูด้วยน้ำหรือน้ำยาทำความสะอาดแบบอ่อน ไม่ควรใช้แผ่นใยขัดในการทำความสะอาด ให้คำแนะนำที่ถูกต้องแก่เด็กในการใช้เตาไมโครเวฟ บางครั้งอาหารหรือของเหลวอาจจะมีความร้อนสูงมาก (super-heat) เกินกว่าจุดเดือดตามธรรมชาติ ของเหลวที่มีความร้อนสูงมากนี้จะเดือดอย่างรุนแรงทันทีที่มีการกระเทือนหรือทำการคนหลังจากที่นำออกจากเตา ทางที่ดีควรใช้ความระมัดระวัง โดยอาจจะใช้ฝาปิดอาหารหรือของเหลว หรือปล่อยให้เย็นลงก่อนจะนำออกจากเตา เมื่อละลายอาหารแช่แข็งด้วยเตาไมโครเวฟ ควรทำให้น้ำแข็งละลายทั่วทั้งหมดก่อนนำมาปรุงอาหาร ไม่ควรใช้เตาไมโครเวฟในการฆ่าเชื้อ (sterilize) ขวดนมหรือภาชนะบรรจุอาหารของเด็กทารก อาหารที่ปรุงด้วยเตาไมโครเวฟ ควรนำมาคนหรือทิ้งไว้สักครู่ก่อนรับประทาน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ควรระมัดระวังเมื่อใช้ในการอุ่นขวดนมเด็ก ขวดแก้วที่เราจับอาจจะรู้สึกว่าจะไม่ร้อน แต่นั่นภายในขวดอาจจะร้อนมาก มีรายงานกรณีที่เด็กทารกได้รับบาดเจ็บสาหัสจากการดื่มนมที่นำออกมาจากเตาไมโครเวฟ เพื่อป้องกันปัญหาเหล่านี้ จึงไม่ควรอุ่นอาหารเด็กทารกด้วยเตาไมโครเวฟ ถ้าไม่มีทางเลือกหลังจากที่อุ่นแล้ว ควรเขย่าขวดหรือคนให้ทั่วและทดสอบความร้อนของนมหรืออาหารก่อนให้เด็กทาน และใช้ภาชนะที่ออกแบบมาสำหรับใช้กับเตาไมโครเวฟเท่านั้น

#### 2.4.6 ภาชนะบรรจุอาหารสำหรับเตาไมโครเวฟ[24]

ภาชนะที่เป็นพลาสติกเหมาะสำหรับการเก็บอาหารที่อุณหภูมิห้อง แต่บางชนิดอาจจะไม่เหมาะที่จะใช้กับเตาไมโครเวฟ เมื่อปรุงอาหารด้วยอุณหภูมิสูงอาจจะทำให้คุณสมบัติทางเคมีเสียไป และอาจจะละลายออกมาปะปนกับอาหารที่บรรจุอยู่ เนื่องจากการยากที่จะบอกส่วนประกอบหรือชนิดของพลาสติกเมื่อมองจากภายนอก จึงไม่ควรใช้ฟิล์มหรือภาชนะพลาสติกมาใช้กับเตาไมโครเวฟ นอกจากจะได้รับการออกแบบมาโดยเฉพาะ ถ้ามีปัญหาเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ควรสอบถามโดยตรงจากผู้ผลิต เซรามิกส์ เซรามิกส์แก้ว พลาสติกบางชนิดและกระดาษสามารถนำมาใช้กับเตาไมโครเวฟได้[33] งานที่เคลือบด้วยโลหะ เช่น เงินหรือทองไม่ควรนำมาใช้ ถ้าจะใช้ฟอยล์บรรจุอาหารหรืออลูมิเนียมฟอยล์ ควรใช้ความระมัดระวังและปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิต ไม่ควรวางฟอยล์



บรรจุกาหรืออลูมิเนียมพอยล์สัมผัสกับผนังด้านในของเตาไมโครเวฟ เนื่องจากอาจจะทำให้เกิดประกายไฟ (spark) ขึ้นได้

## 2.5 คุณสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties) ของอาหารและวัสดุ

Singh และ Heldman [8] รายงานว่าในกระบวนการแปรรูปด้วยไมโครเวฟจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัสดุที่ถูกทำให้เกิดความร้อน ซึ่งสมบัติดังกล่าวจะมีความสำคัญต่อการเลือกวัสดุเพื่อใช้กับไมโครเวฟ[33] ได้แก่

1. relative dielectric constant ( $\epsilon'$ ) เป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัสดุในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ เมื่อนำไปวางในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าเก็บพลังงานได้มากแต่ค่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความชื้น

2. relative dielectric loss ( $\epsilon''$ ) เป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัสดุที่จะกระจายพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าจะเกิดความร้อนสูง คำว่า “loss” หรือสูญเสีย หมายถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน

ค่าเหล่านี้จะทำให้ทราบเกี่ยวกับความสามารถในการเป็นฉนวนไฟฟ้า (electrical insulating ability) ของวัสดุ ซึ่งอาหารเป็นฉนวนที่ไม่ดีดังนั้นอาหารจึงมักจะดูดซับพลังงานส่วนใหญ่ไว้เมื่อสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟและเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้น (Mudgett, 1986) โดยค่า dielectric loss และ dielectric constant มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\epsilon'' = \epsilon' \tan \delta$$

จากสมการ ค่า loss tangent ( $\tan \delta$ ) แสดงให้เห็นถึงระดับการทะลุทะลวงของสนามไฟฟ้า และระดับการกระจายพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ค่าเหล่านี้ถึงมีสูงแสดงว่าวัสดุจะเกิดความร้อนดีขึ้น

## 2.6 พลังงานที่ถูกดูดซับในวัสดุ (absorbed power)[9]

Singh และ Heldman รายงานว่าพลังงานไมโครเวฟเองไม่ใช่พลังงานความร้อน (thermal energy) แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากอันตรกิริยาระหว่างพลังงานไมโครเวฟและวัสดุที่มีสมบัติไดอิเล็กทริก การเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟไปเป็นความร้อนหรือพลังงานที่ถูกดูดซับในอาหารและวัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการ[33]

$$PD = 55.61 \times 10^{-14} E^2 f \epsilon' \tan \delta$$

โดย PD = พลังงานที่สารดูดซับ (วัตต์/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

E = ความเข้มสนามไฟฟ้า (โวลต์/เซนติเมตร )

f = ความถี่ของไมโครเวฟ (Hz)

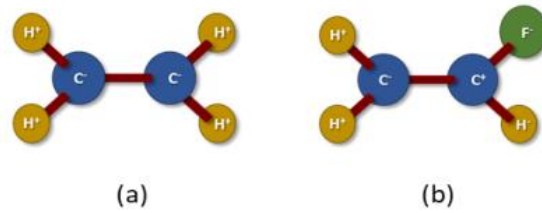
$\epsilon'$  = relative dielectric constant

$\tan \delta$  = loss tangent

จากสมการค่าความถี่ของไมโครเวฟ ได้แก่ 915 หรือ 2,450 GHz ส่วนค่า  $\epsilon'$  เป็นค่าคุณสมบัติไดอิเล็กทริก ซึ่งหาได้จากหนังสืออ้างอิงทั่วไปค่า E ซึ่งเป็นความเข้มสนามไฟฟ้า (electrical field strength ; V/cm) ภายในช่องใส่อาหารจะขึ้นอยู่กับการออกแบบของเตาไมโครเวฟ สมบัติไดอิเล็กทริกของอาหารและรูปร่างของอาหาร จากสมการจะเห็นว่าความเข้มของสนามไฟฟ้ามีผลอย่างมากต่อพลังงานที่ถูกดูดซับหรือความร้อนที่เกิดขึ้นสารหรือวัตถุที่ดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดีจะเรียกว่ามี lossy สูง ซึ่งสารประเภทนี้จะทำให้ร้อนได้อย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟ นอกจากนั้นรูปแบบของน้ำในองค์ประกอบลักษณะทางกายภาพของ อุณหภูมิและความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะมีผลต่อปริมาณพลังงานของไมโครเวฟที่ถูกดูดซับโดยน้ำที่อยู่ในรูปน้ำอิสระ (free water) จะดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดีกว่าน้ำที่จับอยู่กับสารประกอบอื่น ๆ (bound water)

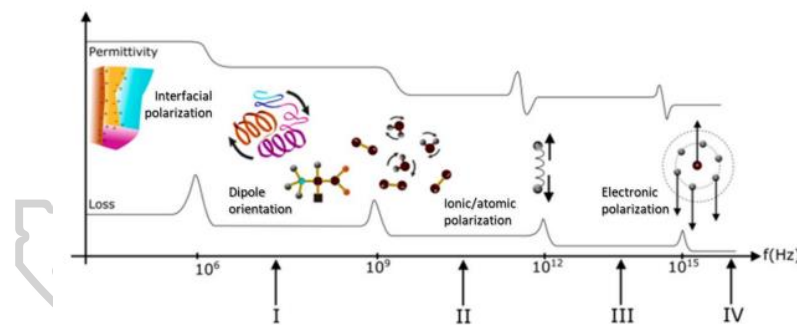
### 2.6.1 ภาพรวมของการตอบสนอง dielectric ของโพลีเมอร์[24]

โพลีเมอร์สามารถจำแนกได้เป็นแบบขั้ว polar หรือแบบไม่มีขั้ว nonpolar รูปที่ 8 เนื่องจากโครงสร้างทางเคมี[8]. โพลีเมอร์แบบไม่มีขั้วเป็นวัสดุที่เป็นฉนวนที่มีประสิทธิภาพ และแสดงค่า dielectric loss ประมาณ  $10^{-4}$  ถึง  $10^{-3}$  และ dielectric ประมาณ 2.5 ถึง 3 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามของความถี่และอุณหภูมิ โพลีเมอร์ประเภทนี้มักประกอบด้วยของอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนอยู่บนสายโซ่คาร์บอนสมมาตร Polyethylene และ poly(tetrafluoroethylene) เป็นสองตัวอย่างของโพลีเมอร์ไม่มีขั้ว ในทางตรงกันข้าม โพลีเมอร์ที่มีขั้วมักประกอบด้วยโมเลกุลที่มีอะตอมของ electronegative เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน ฟลูออไรด์ หรือคลอรีน ซึ่งให้ dipoles หรือความมีขั้วแก่โครงสร้างโพลีเมอร์ มีลักษณะเฉพาะด้วยค่า dielectric constant และ loss factor ที่สูงขึ้นประมาณ 3.5 ถึง 10 และ  $10^{-2}$  ถึง  $10^{-1}$  ตามลำดับ ตัวอย่างของโพลีเมอร์ที่มีขั้วคือ โปรตีนและมีลักษณะที่มีขั้วขึ้นอยู่กับสายโซ่กิ่งด้านข้างของกรดอะมิโน



รูปที่ 8 (a) พอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว Polyethylene และ (b) พอลิเมอร์ที่มีขั้ว poly(fluoroethylene)[24]

Polarization ของวัสดุเกิดขึ้นพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ของพอลิเมอร์เมื่อใดมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น Polarization อาจเกิดจากผลกระทบหลายอย่าง เช่น ประจุ การสะสมที่ส่วนต่อประสานวัสดุกับชั้นที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่างกัน (interfacial polarization), dipolar reorientation, atomic หรือ electronic polarization ลักษณะของการเกิด Polarization เหล่านี้มีส่วนทำให้ค่า dielectric constant มีการเปลี่ยนแปลง relaxations เกิดขึ้นจนถึง THz และ resonances เกิดขึ้นเหนือ THz สำหรับ Dielectric และ loss factor สามารถแสดงได้ในช่วงความถี่ที่หลากหลายดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 อิทธิพลของ polarization ประเภทต่างๆ ต่อการตอบสนองของ dielectric constant: (I) radio; microwave; (III) infrared-visible และ (IV) อัลตราไวโอเลต[24]

จากรูปที่ 9 สามารถพิจารณา polarization ได้สี่ประเภท ที่ช่วงความถี่ต่ำ polarization ที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ dielectric constant สูงขึ้น เมื่อความถี่ที่เพิ่มขึ้น อิทธิพลของ dipolar บางส่วนได้ลดลง ทำให้ค่า dielectric constant ลดลง polarization ประเภทแรกคือ interfacial polarization ซึ่งเกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำ (<106 Hz) และในแต่ละวัสดุก็ต่างกันเนื่องจากข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ของประจุและการสะสมที่ส่วนต่อประสานวัสดุรวมถึงข้อจำกัดระหว่าง ระยะภายในโมเลกุลของวัสดุที่มีค่าอนุญาติต่างกัน polarization ประเภทนี้เกิดขึ้นในวัสดุที่เป็นของแข็งและของเหลว มักอยู่ในโครงสร้างที่ต่างกัน heterogeneous หรือ amorphous



Polarization ประเภทที่สอง dipole orientation คือการวางแนวของขั้วหรือโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ภายใต้สนามไฟฟ้าที่ความถี่สูง (106 ถึง 1,010 Hz) เนื่องจากการหมุนหรือการเปลี่ยนแปลง rotation ของ side groups ที่มีประจุและ relaxation ของน้ำที่ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลโดยปกติแล้ว จะมีค่า dielectric constant อยู่ที่ 4 ถึง 5 ที่ระดับความชื้นต่ำและสูงถึง 10 ที่หากความชื้นสูง ในทางตรงกันข้าม ค่า dielectric loss ต่ำ ( $10^{-3}$  เป็น  $10^{-2}$ ) และสามารถแปรผันตามอุณหภูมิ ความชื้น และความถี่ [8] polarization ของ Atomic and ionic polarization เป็นผลมาจากการ กระจัดของอะตอมของพันธะ ionic bonds valence electrons เคลื่อนที่ไปตามวงโคจรร่วมกับ อะตอมอื่น ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของ dipole และค่า dielectric ที่เกิดจากพันธะไอออนิก มักพบ ในโพลีเมอร์ที่เป็น inorganic solid และโครงสร้างของผลึก

Polarization ประเภทสุดท้ายคือ electronic polarization ซึ่งมีอยู่ในโพลีเมอร์ทุกประเภท เมื่อทดสอบค่าความถี่สูง (1,013 Hz) ปฏิกิริยาการสั่นไหวที่สัมพันธ์กับนิวเคลียส ของอะตอมจนเกิด dipoles ขั้วคร่าวซึ่งจะหายไปทันทีที่สนามไฟฟ้าถูกลดลง ซึ่งได้มีการรวบรวมค่า dielectric constant ของพอลิเมอร์และวัสดุบางชนิดดังตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** รวบรวมค่า dielectric constant ของพอลิเมอร์และวัสดุบางชนิด[8][24]

Materials	Dielectric constant, $\epsilon$	Materials	Dielectric constant, $\epsilon$
TiO <sub>2</sub>	100	Fluorinated polyimide	2.5 – 2.9
H <sub>2</sub> O	78	Olive oil	0.9 – 2.7
neoprene	9.8	Polyarelene ether	2.8 – 2.9
PVDF	6.0	Polyethylene (PE)	2.3 – 2.7
SiO <sub>2</sub>	3.9 – 4.5	Polystyrene (PS)	2.5 – 2.9
Fluorosilicate glass	3.2 – 4.0	Teflon AF	2.1
Polypropylene	2.0	Polylactic acid (PLA)	2.54-2.75
Polybutylene succinate(PBS)	3.5– 4.0	Poly ( $\beta$ -hydroxybutyrates) (PHB)	2-7
poly(butylene adipate-co terephthalate) (PBAT)	3.2-5	Polyhydroxyalkanoates (PHA)	2.2
Polyimide	2.8 – 3.2	Air	1.02

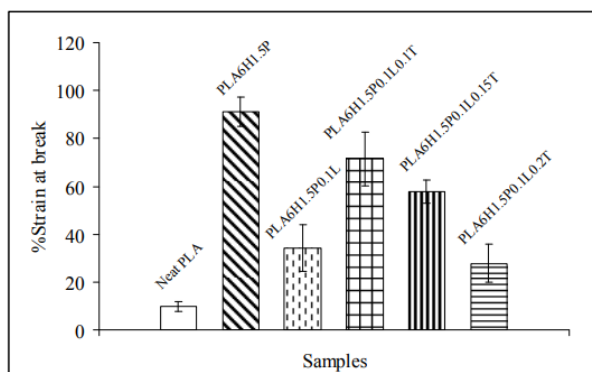
## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Supakij และคณะ[3]ได้ศึกษาความสามารถในการแช่แข็งและความสามารถใช้งานในไมโครเวฟของ PLA ผ่านปฏิกิริยาเชื่อมขวาง สำหรับการปรับปรุงสมบัติของของ PLA ได้ใช้ hyperbranched Polymer (HBP) และ polypropylene glycol (PPG) เป็นพลาสติกไซเซออร์ จากนั้นจึงแนะนำการเชื่อมขวางของ PLA โดยเติม peroxide (Luperox101) และ triallyl isocyanurate (TAIC) ในเครื่อง internal mixer จากนั้นทดสอบคุณสมบัติทางกล และปริมาณของเจลพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของการเติม TAIC ส่งผลให้โครงสร้างเกิดเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งยืนยันด้วย FT-IR spectra อีกทั้งตัวอย่าง PLA ที่ปรับปรุงสมบัติทั้งหมดมี %strain ที่สูงกว่า neat PLA นอกจากนี้ด้านความต้านทานแรงกระแทกในขณะแช่แข็ง แสดงให้เห็นว่า PLA ที่เติมเปอร์ออกไซด์ 0.1wt% และ TAIC 0.15 wt% โดยน้ำหนักมีค่าสูงกว่า neat PLA อีกทั้งยังแสดงให้เห็นการตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟสูงสุดและการสะสมความร้อนจะลดลงโดยจุ่มชิ้นงานลงในน้ำระหว่างทำการทดสอบ

### ตารางที่ 3 สูตรและองค์ประกอบของตัวอย่างทั้งหมด[24]

Formula	PLA (wt %)	HBP (wt %)	PPG (wt %)	Luperox101 (wt %)	TAIC (wt %)
Neat PLA	100	-	-	-	-
PLA6H1.5P	92.5	6.0	1.5	-	-
PLA6H1.5P0.1L	92.4	6.0	1.5	0.1	-
PLA6H1.5P0.1L0.1T	92.3	6.0	1.5	0.1	0.1
PLA6H1.5P0.1L0.15T	92.25	6.0	1.5	0.1	0.15
PLA6H1.5P0.1L0.2T	92.2	6.0	1.5	0.1	0.2

การทดสอบการตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้ไมโครเวฟในครัวเรือน ตัวอย่างมีขนาด 10 x 30 x 0.5 มิลลิเมตร และทำการทดสอบสภาวะที่กำหนดกำลังไฟฟ้า 180 วัตต์ เป็นเวลา 4 และ 7 นาที และ 800 วัตต์ เป็นเวลา 1 และ 1.5 นาที หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้น นำชิ้นงานทดสอบออกจากเตาอบและวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวทันที จากนั้นบันทึกการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของชิ้นงานทดสอบทำซ้ำสามครั้ง และคำนวณหาอุณหภูมิเฉลี่ย นอกจากนี้ การทดสอบวิธีเดียวกัน แต่นำตัวอย่างไปแช่ในน้ำระหว่างการทดสอบ การหาปริมาณเจล วัดปริมาณเจลตามมาตรฐาน ASTM D2675 โดยน้ำหนักที่เหลือหลังจากการละลายตัวอย่างในคลอโรฟอร์มที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



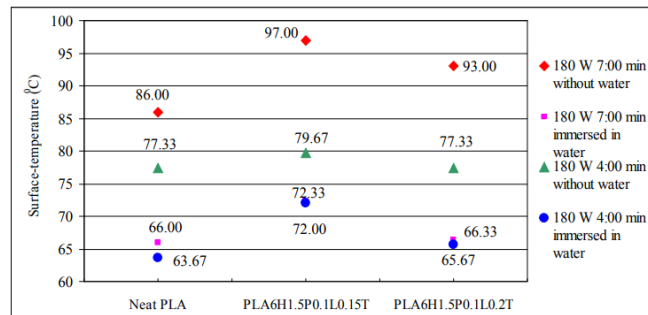
รูปที่ 10 % strain at break ของ PLA และพอลิเมอร์ผสม[3]

สมบัติเชิงกลพบว่า % strain at break ของ PLA ผสมกับ HBP และ PPG ในอัตราส่วน (PLA6H1.5P) มี % strain at break สูงสุด เนื่องจากผลของพลาสติกไซเซอร์ของ HBP และ PPG ในกรณีของ PLA ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย Luerox101 และ TAIC พบว่ามี %strain at break ลดลงตามปริมาณ TAIC ที่เพิ่มขึ้น TAIC ทำปฏิกิริยากับสายโซ่โพลิเมอร์เกิดการเชื่อมขวางดังนั้นที่อัตราส่วน TAIC ที่สูงขึ้น การเชื่อมขวางในพอลิเมอร์มากขึ้น ส่งผลให้ %strain at break น้อยลง แต่ไม่ได้เปลี่ยนค่าความต้านทานแรงดึงและค่า Young's modulus ในกรณีของการทดสอบแรงกระแทก พบว่า PLA6H1.5P0.1L0.15T ถูกเลือกเพื่อทดสอบแรงกระแทกที่สถานะแช่แข็ง (-8 °C) Impact failure weight (g) ของตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 Impact failure weight (g) ของตัวอย่างที่แช่แข็ง[24]

Formula	Impact failure weight (g)
Neat PLA	249
PLA6H1.5P0.1L0.15T	253

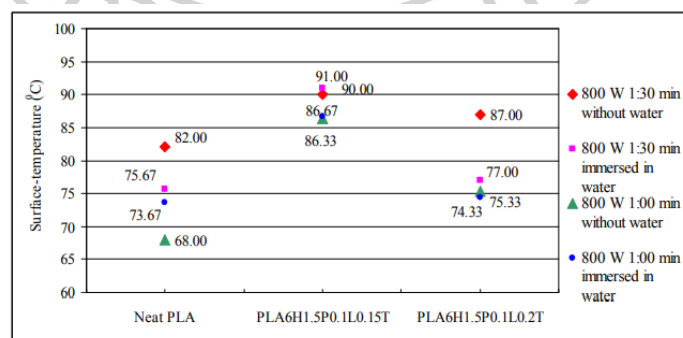
จากตารางที่ 4 การทดสอบแรงกระแทกของ PLA ที่ปรับปรุงสมบัตินั้นสูงกว่า Neat PLA ซึ่งสอดคล้องกับทั้งพลาสติกไซเซอร์และการเชื่อมขวางสามารถปรับปรุงสมบัติ PLA มีคุณสมบัติที่สูงขึ้น การตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟของ PLA และของตัวอย่างที่มีการทดสอบสภาวะต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 11 และรูปที่ 12 การตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟของวัสดุ ศึกษาผ่านการทดสอบอุณหภูมิบนพื้นผิวจากรูปที่ 11 เห็นได้ว่าเมื่อเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้นจาก 4 เป็น 7 นาที อุณหภูมิพื้นผิวก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 11 อุณหภูมิพื้นผิวของตัวอย่างที่สภาวะต่างๆ ในเตาไมโครเวฟ กำลังไฟฟ้า 180 วัตต์[3]

เมื่อพิจารณาตัวอย่างที่เติมน้ำและไม่เติมน้ำ พบว่า Neat PLA มีอุณหภูมิต่ำกว่า PLA ที่ปรับปรุงสมบัติ เพราะ HBP และ PPG เป็นวัสดุที่มีชีวิตที่ตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟ ความร้อนสะสมในพอลิเมอร์เมทริกซ์ส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้น ใน PLA ที่ปรับปรุงมากกว่า Neat PLA นอกจากนี้ อุณหภูมิของ PLA ที่ปรับปรุงยังเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อเติม TAIC 0.2 %wt เนื่องจากการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้นในพอลิเมอร์ช่วยลดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลโพลีเมอร์เมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟ จึงทำให้อุณหภูมิของตัวอย่าง PLA6H1.5P0.1L0.2T ต่ำกว่า

ผลการทดลองที่ให้พลังงาน 800 วัตต์ (แสดงดังรูปที่ 11) ในกรณีของตัวอย่างที่แช่ในน้ำในระหว่างการทดสอบด้วยกำลังวัตต์เดียวกัน อุณหภูมิของตัวอย่างทั้งหมดจะต่ำกว่า เนื่องจากน้ำสามารถดูดซับความร้อนจากวัสดุและลดอุณหภูมิภายในวัสดุได้นอกจากนี้ ผลของสภาวะทั้ง 180 และ 800 วัตต์ พบว่ามีความร้อนสะสมต่ำเป็นผลมาจากไอน้ำดูดซับพลังงานแทนวัสดุและเนื่องจากไอน้ำมีการสูญเสียความร้อนต่ำกว่า[3] ดังนั้นจึงทำให้ความร้อนต่ำกว่าสภาพที่ไม่มีน้ำ



รูปที่ 12 อุณหภูมิพื้นผิวของตัวอย่างในสภาวะต่างๆ ในเตาไมโครเวฟ กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์[3]

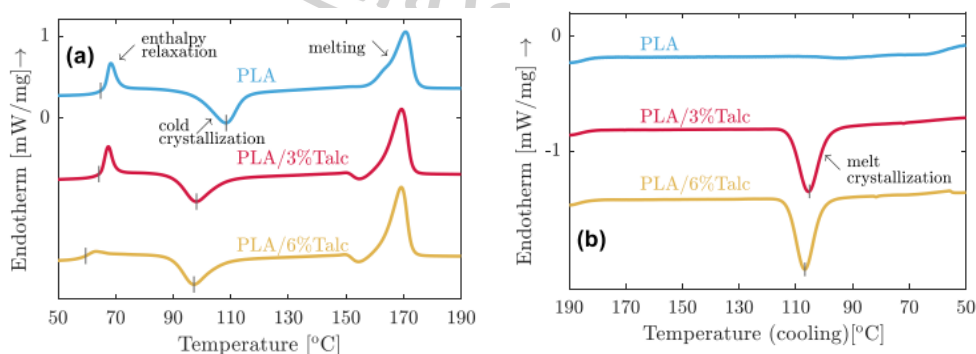
Wangwang Yu และคณะ[32] ได้ทำการศึกษาการตกผลึกของพอลิแลคติกแอซิดของเส้นสำหรับขึ้นรูป 3D ด้วย differential scanning calorimetry (DSC) การเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี ในระหว่างการให้ความร้อนใน DSC เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นใกล้  $T_g$  จะมีพิกัดความร้อนเล็กน้อย พิกเหล่านี้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการ aging ของโพลีเมอร์ และเกิดจากการที่สายโซ่โพลีเมอร์กลับคืนสู่ thermodynamic equilibrium

ตารางที่ 5 คุณสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิต PLA และ PLA/Talc[32]

Heat cycle	Composition	$T_g$ [°C]	$T_{cc}$ [°C]	$T_{mc}$ [°C]	$T_m$ [°C]	$\Delta H_{cc}$ [J/g]	$\Delta H_{mc}$ [J/g]	$\Delta H_m$ [J/g]	$\chi_c$
First heating	PLA	64.8	108.3	n.a.	170.7	-30.5	n.a.	33.8	3.6%
	PLA/3%Talc	64.2	98.1	n.a.	169.3	-21.2	n.a.	31.5	11.4%
	PLA/6%Talc	59.6	97.2	n.a.	169.2	-21.1	n.a.	32.1	12.6%
Cooling	PLA	-	n.a.	93.8	n.a.	n.a.	-1.5	n.a.	1.6%
	PLA/3%Talc	-	n.a.	105.2	n.a.	n.a.	-28.7	n.a.	31.8%
	PLA/6%Talc	-	n.a.	106.4	n.a.	n.a.	-29.4	n.a.	33.6%
Second heating	PLA	60.4	108.2	n.a.	169.5	-29.6	n.a.	35.0	5.8%
	PLA/3%Talc	61.3	-	n.a.	162.9 169.9	0	n.a.	35.1	39.0%
	PLA/6%Talc	62.0	-	n.a.	165.8 169.8	0	n.a.	36.8	42.1%

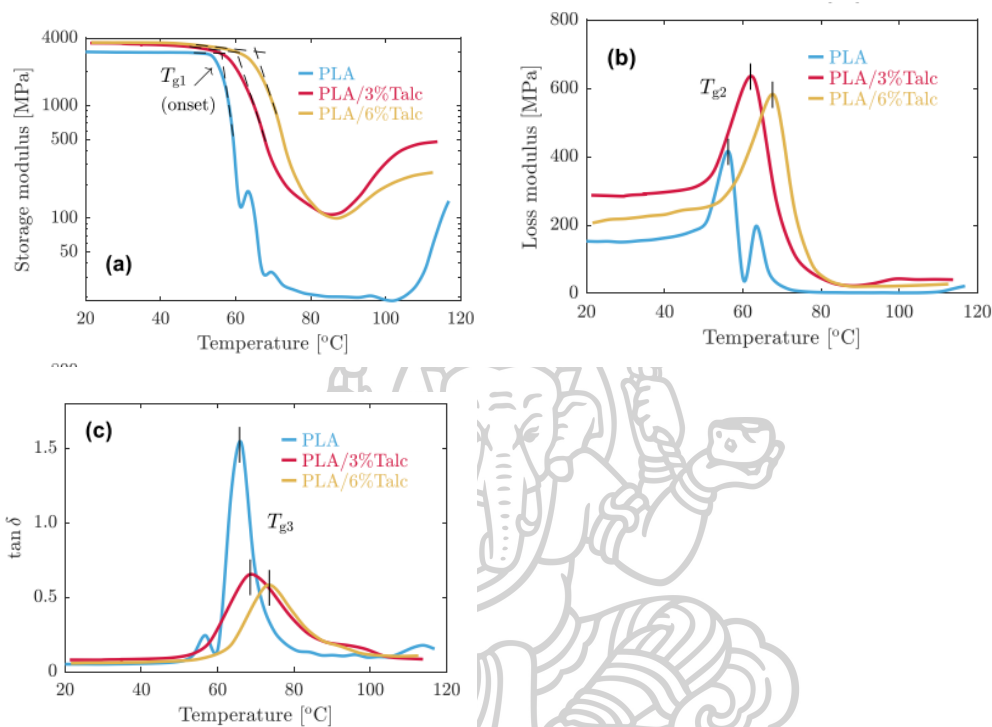
Note: 'n.a.' is short for 'not applied'; '-' means not observed.

สายโซ่โพลีเมอร์ PLA จะเคลื่อนที่ได้เมื่ออุณหภูมิสูงเกิน  $T_g$  เท่านั้น การที่ Enthalpy relaxation อาจได้รับผลกระทบจากการตกผลึกและประวัติทางความร้อนของตัวอย่าง เช่น PLA/6%Talc จุดสูงสุดของการดูดกลืนความร้อนจะมองเห็นได้น้อยกว่าองค์ประกอบส่วนของการเติม Talc ในปริมาณอื่นๆ ในระหว่างเย็นตัวใน DSC การเติม Talc ที่อัตราส่วนต่างๆ พิกของการตกผลึกเลื่อนไปที่มีอุณหภูมิต่ำลงประมาณ 10 °C เมื่อมีการเติม Talc ที่เพิ่มขึ้นและจุดสูงสุดของการตกผลึกขณะเย็นลง cold crystallization temperatures ก็ต่ำลง และความสามารถในการตกผลึกก็จะเพิ่มขึ้น ในระหว่างนี้ กระบวนการหลอมของ PLA, PLA/3%Talc และ PLA/6%Talc ยังคงใกล้เคียงกัน โดยมีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่เกือบ 170 °C และยิ่งพบว่าความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้นในรอบการให้ความร้อนครั้งแรกเป็นการพิสูจน์โดยตรงของการตกผลึกของของ PLA ซึ่งยังอธิบายการเพิ่มขึ้นของความแข็งดั่งที่แสดงในตาราง 5



รูปที่ 13 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิต PLA และ PLA/Talc สำหรับการให้ความร้อนครั้งแรก (a) ขึ้นการทำความเย็น (b)[32]

สำหรับการทดสอบ DMA ในช่วงอุณหภูมิห้อง PLA มีค่า Storage Modulus มีค่าเท่ากับ 3,020 MPa และเมื่อมีการเติม Talc ที่อัตราส่วน PLA/3%Talc และ PLA/6%Talc มีค่าเท่ากับ 3,608 และ 3,648 MPa และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 65°C Storage Modulus ลดลงอย่างต่อเนื่อง จนถึงการตกผลึกซ้ำหรือ Cold crystallization ที่อุณหภูมิ 95°C จะเกิดโครงสร้างที่แข็ง (stiff structure) เพิ่มขึ้น



รูปที่ 14 Dynamic flexural ของตัวอย่าง PLA and PLA/Talc (a) storage modulus; (b) loss modulus; (c) internal dissipation.[32]

Lee และคณะ[10]ได้รวบรวม ผลการศึกษาสมบัติของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด PLA ซึ่งสามารถแทนที่ Polypropylene (PP), Polyamide (PA) Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) และพอลิเมอร์ที่มาจากปิโตรเลียมบางชนิดได้ โดย PLA Neat มีสมบัติเชิงกลทั้งโมดูลัสต่ำกว่า PP, ABS หรือ PA แสดงในรูป 13 และค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงกว่า PP และ ABS แต่ต่ำกว่า PA การผลิต PLA ปลอดภัยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าการผลิตมากของพลาสติกจากปิโตรเลียมทั่วไป ราคาเฉลี่ยของ PLA คือ สูงกว่าพลาสติกทั่วไปเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม จุดด้อยหลักของ PLA คือความเปราะและอุณหภูมิการเสียรูปด้วยความร้อนค่อนข้างต่ำ (HDT) อย่างไรก็ตาม PLA ที่ผ่านการอบอ่อนจะมีสมบัติที่เพิ่มสูงขึ้น ทั้งสมบัติเชิงกล และอุณหภูมิการเสียรูปด้วยความร้อน (HDT) ที่สูงขึ้น



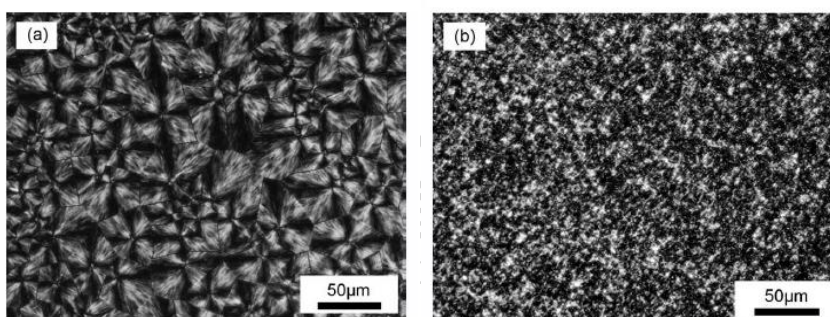
Property/Material	PP	ABS	PC	Amorphous PLA	Annealed PLA
Density, g/cm <sup>3</sup>	0.9	1.06	1.20	1.24	1.29
Tensile strength, MPa	30	50	65	59	66
Tensile modulus, MPa	1600	2400	2400	3750	4150
Elongation at break (ε), %	>150%	40	6	2.2	2.0
Flexural strength, MPa	40	75	85	106	119
Flexural modulus, MPa	1400	2500	2400	3650	4150
Charpy impact strength (unnotched), kJ/m <sup>2</sup>	45	60	not broken	20	35
Charpy impact strength (notched), kJ/m <sup>2</sup>	10	22	70	3	7
Glass transition temperature, °C	0	110	150	55	55
Melting temperature, °C	165	220	250	155	155
Heat Deflection Temperature (HDT at 0.45 MPa load), °C	65	95	130	55	120
Vicat softening, °C	62	85	118	53	115
Shrinkage, %	0.8	0.5	0.6	0.4	0.4

### รูปที่ 15 แสดงสมบัติหลักของ PLA เทียบกับ PP, ABS และ PC

Ping Song และคณะ[11][20] ได้ทำศึกษาผลของการเติมสารก่อผลึกประเภท multiamide หรือ TMC – 328 ลงใน PLA การทดสอบ DSC เมื่อมีการเติม TMC – 328 จะทำให้ลักษณะของพีค Tm ที่เปลี่ยนแปลง โดยแสดงลักษณะของพีคเป็น 2 พีค ซึ่งแตกต่างจากในกรณีของ neat PLA จะปรากฏพีคของ Tm เพียงพีคเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติม TMC – 328 จะทำให้โครงสร้างผลึกของ PLA เปลี่ยนแปลงไป และสอดคล้องกับผลการทดสอบ WAXD ซึ่งเมื่อมีการเติม TMC – 328 จะปรากฏพีคของ 2θ ที่ 24.5° ซึ่งเป็นพีคเอกลักษณ์ของโครงสร้างผลึกแบบ α' อีกทั้งเมื่อพิจารณาในส่วน of ความเข้มของผลึกพบว่าการเติม TMC – 328 จะส่งผลให้เพิ่มขึ้นเป็น 33 % เมื่อมีการเติม TMC -328 ที่ปริมาณ 0.5% ขึ้นไป โดยผลึกของ PLA จะอยู่ที่ 17.6% และเมื่อพิจารณาถึงอัตราการตกผลึกของ PLA พบว่า เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 100°C หากมีการเติม TMC – 328 จะทำให้อัตราการตกผลึกของ PLA มีค่าเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่า t<sub>1/2</sub> มีค่าลดลงจาก 11.13 นาที ในกรณีของ neat PLA มาเป็น 1.83 นาทีในกรณีของการเติม TMC – 328 ปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก และมีประสิทธิภาพของการเป็นสารก่อผลึก (Nucleating efficiency) หากมีการเติม TMC-328 ในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพของการเป็นสารก่อผลึกเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยจะมีค่าประมาณ 66% และเมื่อศึกษาสัญญาณของผลึกในกรณีที่มีการเติม TMC-328 จะพบว่าขนาดของผลึกจะมีขนาดเล็กลง และมีความหนาแน่นของผลึกเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 6 แสดงพารามิเตอร์จากผลการทดสอบ DSC ของพอลิแลคติกแอซิดเมื่อมีการเติม TMC-328 ที่ปริมาณต่างๆ[14]

TMC content (wt%)	$T_g$ (°C)	$T_{cc,onset}$ (°C)	$T_{cc}$ (°C)	$\Delta H_{cc}$ (J/g)	$T_m$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)	$X_{c1}$ (%)	$X_{c2}$ (%)
0	59.0	114.6	128.7	16.6	152.4	16.5	17.6	0
0.25	58.8	106.1	121.0	24.9	150.9, 155.6	25.6	27.4	0.7
0.5	58.9	99.8	112.9	33.2	148.6, 155.5	33.3	35.7	0
0.75	58.6	98.2	112.2	33.3	148.0, 155.4	33.7	36.2	0.4
1	58.7	98.1	111.5	33.0	148.3, 156.0	33.6	36.2	0.6



รูปที่ 16 แสดงผลการทดสอบ POM ของ (a) Neat PLA และ (b) PLA ผสมสารก่อผลึก TMC [11]

Thanawat และคณะ[11]ได้ศึกษาผลของ EBU ที่มีการเติมรวมกับเปอร์ออกไซด์หรือ TMC-306, PDLA และ EBU ผสม PDLA และ TMC-306 ส่งผลต่อพฤติกรรมการตกผลึก EBU ที่เติมรวมกับเปอร์ออกไซด์พบว่า เป็นสารก่อผลึกที่มีประสิทธิภาพดีกว่า TMC-306 และ PDLA ไม่สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกสำหรับ PLLA ยืนยันได้จาก ผล DSC ใน PLLA ส่งผลให้เกิดการก่อตัวของผลึกแบบ sc-crystal และ homo-crystal ของ PLLA การเพิ่ม EBU เพียงอย่างเดียวมีเปอร์เซ็นต์ของผลึกเพิ่มขึ้นจาก 3.8% เป็น 24.94 % ในขณะที่ระบบ PDLA และ EBU แสดงผลึกต่ำกว่า EBU

ตารางที่ 7 PLLA และอัตราส่วนการผสมสารก่อผลึก[28]

Sample	Content of Substance				
	PLLA (%)	PDLA (%)	TMC (%)	EBU (%)	Peroxide (phr)
Neat PLLA	100.0	-	-	-	-
PLLA/EBU0.5 *	99.5	-	-	0.5	0.1
PLLA/TMC0.5	99.5	-	0.5	-	-
PLLA/PDLA7	93.0	7.0	-	-	-
PLLA/PDLA7/EBU0.5 *	92.5	7.0	-	0.5	0.1
PLLA/PDLA7/TMC0.5	92.5	7.0	0.5	-	-

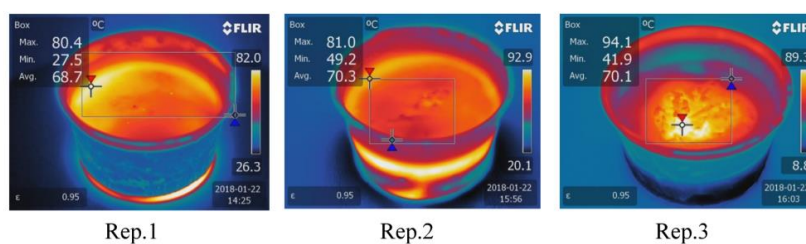
\* Peroxide of 0.1 phr added to promote the free radical reaction.

ตารางที่ 8 สมบัติทางความร้อนของ PLLA ที่มีการเติมสารก่อผลึกจากการทดสอบ DSC[28]

Sample Name	$T_g$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_{cc}$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)	$\Delta H_{cc}$ (J/g)	$X_c$ (%)	$T_{sc}$ (°C)	$\Delta H_{m,sc}$ (J/g)
Neat PLLA	58.7	-	117.1	146.1, 149.8	26.37	22.84	3.80	-	-
PLLA/EBU0.5 *	59.1	112.3	102.6	146.7	25.15	2.04	24.94	-	-
PLLA/TMC0.5	58.4	97.5	102.0	142.2, 150.4	25.75	17.74	8.61	-	-
PLLA/PDLA7	59.6	-	117.2	146.6, 150.7	25.82	19.45	7.35	207.0	6.20
PLLA/EBU0.5/PDLA7 *	58.9	-	98.5	144.0, 149.1	19.48	6.87	14.64	206.0	6.66
PLLA/TMC0.5/PDLA7	59.8	-	111.8	145.6, 151.8	25.45	18.05	8.59	207.9	7.47

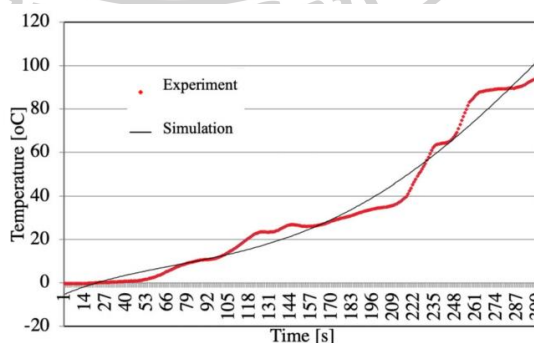
\* Peroxide was added together with EBU.

Waraporn และคณะ[13]ได้ทำการศึกษาลักษณะการใช้งานบรรจุภัณฑ์อาหารแช่แข็งในไมโครเวฟโดยการศึกษเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเมื่อนำบรรจุภัณฑ์ใช้งานในไมโครเวฟโดยกำหนดกำลัง 800 วัตต์ เป็นเวลา 300 วินาที โดยเล็มจากนำบรรจุภัณฑ์และอาหารแช่แข็งที่อุณหภูมิเฉลี่ย  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  จากนั้นนำมาทดสอบในไมโครเวฟและวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปโดยใช้ optical fiber temperature sensors และการถ่ายภาพด้วย IR camera (FLIR Systems) ซึ่งพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  มีอุณหภูมิสูงสุดที่  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  และมีอุณหภูมิต่ำสุดที่  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 17 ภาพถ่านความร้อนด้วย FLIR temperature sensor ของอาหารแช่แข็งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ 800 W, 2.45 GHz เป็นเวลา 300 วินาที[13]

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ของการจำลอง ได้มีการทำการทดลองหลายชุดโดยมีการจำลองซ้ำสามครั้งในแต่ละกรณี อุณหภูมิจะถูกบันทึกโดยใช้เซ็นเซอร์ไฟเบอร์ออปติกและกล้องถ่ายภาพความร้อน ผลลัพธ์แสดงให้เห็นผลมีแนวโน้มที่ดีกับเมื่อเทียบกับจำลอง พบความแตกต่างอยู่ในช่วงระหว่าง 5–10% ผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิของอาหารแช่แข็งหลังจากเข้าไมโครเวฟจะสูงที่สุดในกรณีที่ไม่มีฟิล์มโลหะบนบรรจุภัณฑ์ทั้งด้านบนและด้านข้าง การตรวจสอบเพิ่มเติมพบว่าพื้นที่ฟิล์มโลหะบนบรรจุภัณฑ์ส่งผลต่อความสม่ำเสมอในการทำความร้อน อุณหภูมิด้านบนจะเพิ่มอุณหภูมิมากถึง 25%



รูปที่ 18 การเปรียบเทียบผลอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างการจำลองและการทดลองจาก fiber temperature sensors[13]

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 พอลิแอลแลคติกแอซิด (PLA) เกรด LX-175 ผลิตโดยบริษัท Total Corbion Thailand มีความหนาแน่น 1.24 g/cm<sup>3</sup> อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ 55°C และอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ 155°C และมี %L-isomer ที่ 96%

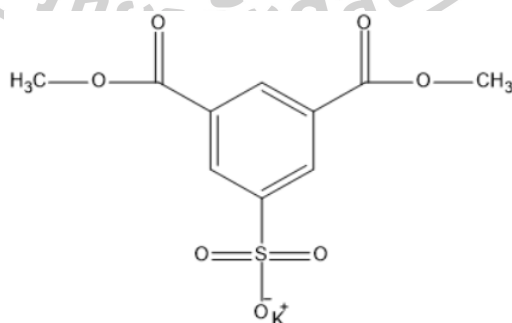
3.1.2 สารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยคือ Di(tert-butylperoxyisopropyl) Benzene เกรด 14s มีชื่อทางการค้า PerkadoxR ผลิตโดยบริษัท AkzoNobel ประเทศไทย มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว โดยมีปริมาณเปอร์ออกไซด์ 40% โดยน้ำหนัก และองค์ประกอบอื่นๆ เป็น CaCO<sub>3</sub> และ SiO<sub>2</sub> มีน้ำหนักโมเลกุล 338.5 กรัมต่อโมล

3.1.4 ผงทัลคัม Talcum Powder (Talc) เกรด Jetfine 3 CA ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 11±4 ไมครอน ซื้อมาจากบริษัท โกลบอล คอนเนคชั่นส์ จำกัด (มหาชน)

3.1.5 ผงแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>) เกรด Ca 0303B ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 10±5 ไมครอน จาก Chemipan Corporation Co., Ltd.

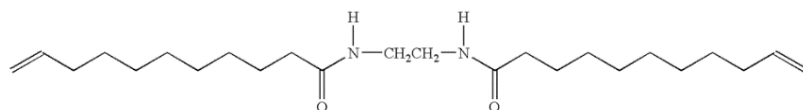
3.1.6 Micronized Polyethylene Terephthalate Powder (mPET) จากเศษ Polyethylene Terephthalate ในกระบวนการในอุตสาหกรรมที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 29±17 ไมครอน สนับสนุนโดย บริษัท เอ็กเซล ซุปเปอร์แฟ็ค จำกัด

3.1.7 สารประกอบ potassium dimethyl 5-sulfoisophthalate (LAK-301) ผลิตโดยบริษัท Takemoto Oil & Fat Co. ประเทศญี่ปุ่น มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว



รูปที่ 19 สูตรโครงสร้างของ potassium dimethyl 5-sulfoisophthalate (LAK-301)[20]

3.1.8 สารก่อผลึก N,N ethylene bis(10-undecanamide) หรือ EBU สังเคราะห์ขึ้นภายในกลุ่มวิจัย



N, N' – ethylene bis(10-undecanamide)

**รูปที่ 20** สูตรโครงสร้างของ สารก่อผลึก N,N ethylene bis(10-undecanamide) หรือ EBU[28]

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- 3.2.1 เครื่อง Universal testing machine Instron
- 3.2.2 เครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer (DMA)
- 3.2.3 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยใช้ความแตกต่างทางความร้อน Differential Scanning Calorimetry (DSC) รุ่น Metter Toledo บริษัท TA instruments ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.4 เครื่องไมโครเวฟ (Samsung/ST 23 ลิตร)
- 3.2.5 FLIR temperature sensor, Interferometric Temperature Sensors

### 3.3 ขั้นตอนการทำงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน

#### 3.3.1 ศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม และสารก่อผลึกที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของ PLA

- 3.3.1.1 เตรียม PLA และสารตัวเติมที่ต้องการผสม นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 3.3.1.2 ทำการผสม PLA กับ สารตัวเติม และสารก่อผลึกด้วยเครื่องผสมระบบปิด (internal mixer) ที่อุณหภูมิ 190°C และมีความเร็วรอบของใบกวนผสม 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้ปริมาณดังตารางที่ 9
- 3.3.1.3 ทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบที่ได้จากข้อ 3.3.1.2 ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) โดยให้ความร้อนไปที่ 190°C เป็นเวลา 5 นาที และกดอัด แล้วปล่อยให้เย็นลงมาที่อุณหภูมิห้อง
- 3.3.2.1 สำหรับการทดสอบด้วยเครื่อง universal testing machine ทำการขึ้นรูปด้วยการกดอัด โดยให้ความร้อนไปที่ 190°C เป็นเวลา 5 นาที และกดอัดเป็นเวลา 1 นาที ชิ้นงานมีลักษณะเป็น dog bone โดยมีการเย็นตัวเฉลี่ยของชิ้นงานอยู่ที่ 30°C/นาที



3.3.2.2 ศึกษาสมบัติทางกลเชิงไดนามิก ด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) โดยทำการทดสอบแบบ torsion ซึ่งเป็นการทดสอบแบบเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยชิ้นงานมีขนาด  $40 \times 10 \times 1.16$  ลูกบาศก์มิลลิเมตร ช่วงอุณหภูมิที่ทดสอบ  $30-150^{\circ}\text{C}$  ที่ความถี่ 1 เฮิรท์ อัตราการให้ความร้อน  $3^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ [27]

**ตารางที่ 9** แสดงชื่อสูตร และสัดส่วนการผสมของ PLA สารตัวเติม และสารก่อผลึก สำหรับนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล

Sample	PLA (%wt)	Talc (phr)	CaCO <sub>3</sub> (phr)	mPET (phr)	EBU* (phr)	LAK (phr)
Neat PLA	100	-	-	-	-	-
PLA Talc 1	100	1	-	-	-	-
PLA Talc 3	100	3	-	-	-	-
PLA Talc 5	100	5	-	-	-	-
PLA CaCO <sub>3</sub> 1	100	-	1	-	-	-
PLA CaCO <sub>3</sub> 3	100	-	3	-	-	-
PLA CaCO <sub>3</sub> 5	100	-	5	-	-	-
PLA mPET 1	100	-	-	1	-	-
PLA mPET 3	100	-	-	3	-	-
PLA mPET 5	100	-	-	5	-	-
PLA EBU 0.1	100	-	-	-	0.1	-
PLA EBU 0.3	100	-	-	-	0.3	-
PLA EBU 0.5	100	-	-	-	0.5	-
PLA LAK 0.1	100	-	-	-	-	0.1
PLA LAK 0.3	100	-	-	-	-	0.3
PLA LAK 0.5	100	-	-	-	-	0.5

\* มีการเติมสารประกอบเปอร์ออกไซด์ PerkadoxR-14s โดยกำหนดที่ 0.1 phr



### 3.3.2 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ การขึ้นรูปด้วยบรรจุภัณฑ์ในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

3.3.2.1 เตรียม PLA โดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 คืน

3.3.2.2 ทำการผสม PLA ด้วยเครื่องผสมระบบปิด (internal mixer) ที่อุณหภูมิ 190°C และมีความเร็วรอบของใบกวนผสม 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

3.3.2.3 ทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบ ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป(Compression molding) โดยให้ความร้อนไปที่ 190°C เป็นเวลา 5 นาที และกดอัดเป็นเวลา 1 นาที ชิ้นงานมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมความหนาประมาณ 0.7 mm โดยมีการควบคุมอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานอยู่ที่ 30°C/นาที

3.3.2.4 ทำการขึ้นรูปชิ้นงานที่เตรียมได้จากตารางที่ 10 ด้วยเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่ง (Thermoforming) ด้วยการมีอัตราการให้ความร้อนเฉลี่ยของชิ้นงานอยู่ที่ 50°C/นาที ให้ความร้อนที่  $80\pm 5^{\circ}\text{C}$ ,  $120\pm 5^{\circ}\text{C}$  และ  $145\pm 5^{\circ}\text{C}$  มีอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานอยู่ที่ 30°C/นาที

3.3.2.5 ทำการทดสอบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากข้อ 3.3.2.3 ทดสอบด้วยตู้อบลมร้อนที่เวลาต่างกัน 0, 5, 10 และ 20 นาที แสดงดังตารางที่ 11

**ตารางที่ 10** แสดงชื่อสูตรและอุณหภูมิในการขึ้นรูปของถ้วยบรรจุภัณฑ์ของ Neat PLA ในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

Sample	Temperature in thermoforming process. (°C)
Neat PLA 80C	80
Neat PLA 120C	120
Neat PLA 145C	145

**ตารางที่ 11** แสดงชื่อสูตรและเวลาในการทดสอบในตู้อบลมร้อนของถ้วยบรรจุภัณฑ์ Neat PLA ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน

Sample	Time in hot air oven (min)
Neat PLA 120C A5	5
Neat PLA 120C A10	10
Neat PLA 120 C A20	20
Neat PLA 145 C A5	5
Neat PLA 145 C A10	10
Neat PLA 145 C A20	20

### 3.3.3 ศึกษาสมบัติทางความร้อน และการทดสอบในไมโครเวฟ

3.3.3.1 เตรียม PLA และสารตัวเติมที่ต้องการผสม นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 คืน

3.3.3.2 ทำการผสม PLA กับ สารตัวเติม และสารก่อผลึกด้วยเครื่องผสมระบบปิด (internal mixer) ที่อุณหภูมิ 190°C และมีความเร็วรอบของใบกวนผสม 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้ปริมาณดังตารางที่ 12

3.3.3.3 ทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบที่ได้จากข้อ 3.3.1.2 ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป(Compression molding) โดยให้ความร้อนไปที่ 190°C เป็นเวลา 5 นาที และกดอัด แล้วปล่อยให้เย็นลงมาที่อุณหภูมิห้อง

3.3.3.4 ศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC โดยมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

- คงอุณหภูมิไว้ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 30°C เป็นเวลา 1 นาที
- เพิ่มอุณหภูมิจาก 30 ไปที่ 200°C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 7°C/min
- คงอุณหภูมิไว้ที่ 200°C เป็นเวลา 1 นาที
- ลดอุณหภูมิจาก 200 ไปที่ 30°C ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 7°C/min
- คงอุณหภูมิไว้ที่ 30°C เป็นเวลา 1 นาที

การให้อุณหภูมิครั้งแรกเป็นการศึกษาการจัดประวัติทางความร้อนจากการขึ้นรูปในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) และปริมาณผลึก

(%X<sub>c</sub>) จะคำนวณจากการให้อุณหภูมิในครั้งที่สอง ซึ่งการคำนวณปริมาณผลึกคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$X_c(\%) = \frac{\Delta H}{\Delta H_m^0 \cdot \left(1 - \frac{\%wt \text{ filler}}{100}\right)} \cdot 100$$

สมการที่ 3.1

โดยค่า $\Delta H$  เท่ากับ  $\Delta H_{cc}$  คือเอนทาลปีที่ใช้ในการตกผลึกขณะให้ความร้อน,  $\Delta H_m$  คือเอนทาลปีที่ใช้ในการหลอมผลึก, และ  $\Delta H_m^0$  คือเอนทาลปีที่ใช้ในการหลอมผลึกของ PLA ที่มีปริมาณผลึก 100% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 93.7 จูลต่อกรัม [12]

3.3.3.5 ศึกษาความสามารถในการใช้งานของผลิตภัณฑ์ด้วยไมโครเวฟโดยกำหนดกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์ที่เวลา 3.5 นาที ซึ่งมีการเติมน้ำและน้ำมันมะกอก



**ตารางที่ 12** แสดงข้อมูลสูตรเทอร์โมฟอร์มมิ่งชีสและสัดส่วนการผสมของ PLA สารตัวเติม และสารก่อผลึก สำหรับนำไปทดสอบสมบัติทางความร้อน และการทดสอบในไมโครเวฟ

Sample	PLA (%wt)	Talc (phr)	CaCO <sub>3</sub> (phr)	mPET (phr)	EBU* (phr)	LAK (phr)
Neat PLA 145C	100	-	-	-	-	-
PLA Talc 1 145C	100	1	-	-	-	-
PLA Talc 3 145C	100	3	-	-	-	-
PLA Talc 5 145C	100	5	-	-	-	-
PLA CaCO <sub>3</sub> 1 145C	100	-	1	-	-	-
PLA CaCO <sub>3</sub> 3 145C	100	-	3	-	-	-
PLA CaCO <sub>3</sub> 5 145C	100	-	5	-	-	-
PLA mPET 1 145C	100	-	-	1	-	-
PLA mPET 3 145C	100	-	-	3	-	-
PLA mPET 5 145C	100	-	-	5	-	-
PLA EBU 0.1 145C	100	-	-	-	0.1	-
PLA EBU 0.3 145C	100	-	-	-	0.3	-
PLA EBU 0.5 145C	100	-	-	-	0.5	-
PLA LAK 0.1 145C	100	-	-	-	-	0.1
PLA LAK 0.3 145C	100	-	-	-	-	0.3
PLA LAK 0.5 145C	100	-	-	-	-	0.5

\*\* มีการเติมสารประกอบเปอร์ออกไซด์ PerkadoxR-14s โดยกำหนดที่ 0.1 phr

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

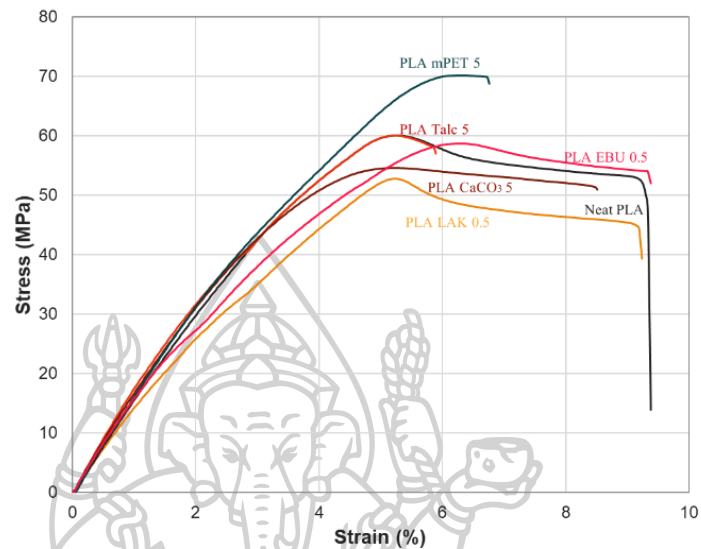
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) สำหรับถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในไมโครเวฟ โดยมีการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม สารก่อผลึก ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนของ PLA ศึกษาอุณหภูมิการขึ้นรูปในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง และความสามารถในการใช้งานของผลิตภัณฑ์ในไมโครเวฟ โดยผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

- 1 ศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม และสารก่อผลึกที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของ PLA
  - 2 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ การขึ้นรูปด้วยบรรจุภัณฑ์ในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง
  - 3 ศึกษาสมบัติทางความร้อน และการทดสอบในไมโครเวฟ
- #### 4.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม และสารก่อผลึกที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของ PLA

##### 4.1.1 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของ PLA ที่มีการเติมสารตัวเติมและสารก่อผลึก

จากการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ด้วยการเติมสารตัวเติมและสารก่อผลึก ด้วยเครื่องผสมระบบปิด (internal mixer) ที่อุณหภูมิ 190°C และมีความเร็วรอบของการผสม 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ในการเติมสารตัวเติม Talc, CaCO<sub>3</sub> และ mPET ได้กำหนดอัตราส่วนในการผสมที่ 1,3 และ 5 phr และการเติมสารก่อผลึกในเชิงพาณิชย์และสารก่อผลึกที่มีการสังเคราะห์ขึ้นภายในกลุ่ม กำหนดอัตราส่วนในการผสมที่ 0.1, 0.3 และ 0.5 phr แล้วนำไปทำการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Compassion molding โดยให้ความร้อนไปที่ 190°C เป็นเวลา 5 นาที และกดอัดได้ชิ้นงานมีลักษณะเป็น dog bone Type-V และปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นการทดสอบสมบัติเชิงกล ซึ่งทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine ตามมาตรฐาน ASTM-D638 ที่ speed 10 mm/min โดยใช้ Load cell 10 KN[29] พบว่าค่า Tensile strength และ (%) Elongation at break มีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ Neat PLA ซึ่งมีค่าเท่ากับ 60±5 MPa และ 10±2% ตามลำดับ สำหรับค่า Yong's modulus เมื่อมีการเติม Talc ,CaCO<sub>3</sub> และ mPET มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ Neat PLA ซึ่งมีสูงสุดที่การเติม PLA Talc 5 phr มีค่าเท่ากับ 1,865±28 MPa ซึ่งอาจเป็นผลจากการเติมสารตัวเติมเพิ่มขึ้นช่วยเพิ่ม stiffness ของชิ้นงานจึงแสดงพฤติกรรมที่แข็งและเปราะมากกว่าของ Neat PLA [32] และการเติมสารก่อผลึก LAK และ EBU อัตราส่วน 0.1, 0.3 และ 0.5 phr พบว่าค่า Young's Modulus ของ PLA LAK มีค่า Young's

Modulus เปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ และ PLA EBU มีค่า Young's Modulus เพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 10 และรูปที่ 21 เนื่องจากโดยธรรมชาติของส่วนที่เป็นผลึก จะมี modulus สูงกว่าส่วนที่เป็น amorphous ซึ่งเมื่อปริมาณผลึกสูงขึ้น จึงทำให้ค่า modulus โดยรวมของชิ้นงานสูงขึ้น[31]



รูปที่ 21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress และ strain ของ Neat PLA และ PLA ที่มีการเติม Talc CaCO<sub>3</sub> และ mPET และสารก่อผลึก LAK และ EBU





**ตารางที่ 13** แสดงสมบัติเชิงกลค่า Yong's modulus, Tensile strength, %Elongation at break ของ Neat PLA และ PLA ที่มีการเติม Talc CaCO<sub>3</sub> และ mPET และสารก่อผลึก LAK และ EBU

Sample	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Elongation at break (%)
Neat PLA	60±5	1,580±25	10±2
PLA Talc 1	58±2	1,601±20	8±1
PLA Talc 3	61±4	1,774±25	6±1
PLA Talc 5	60±4	1,865±28	6±1
PLA CaCO <sub>3</sub> 1	54±6	1,588±33	9±2
PLA CaCO <sub>3</sub> 3	54±2	1,683±36	8±2
PLA CaCO <sub>3</sub> 5	55±3	1,755±30	9±3
PLA mPET 1	63±8	1,538±85	6±2
PLA mPET 3	63±4	1,701±66	6±2
PLA mPET 5	70±3	1,769±57	7±1
PLA EBU 0.1	61±8	1,692±25	8±1
PLA EBU 0.3	60±3	1,702±15	7±2
PLA EBU 0.5	59±3	1,706±41	8±2
PLA LAK 0.1	54±9	1,564±86	8±3
PLA LAK 0.3	53±8	1,520±92	10±2
PLA LAK 0.5	53±9	1,506±84	9±2

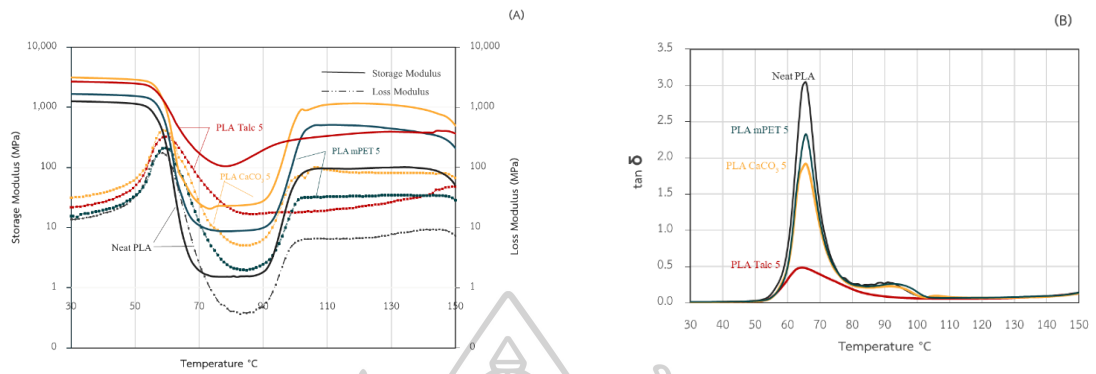
#### 4.1.2 ผลการศึกษาสมบัติทางกลเชิงไดนามิก (DMA) ของ PLA ที่มีการเติมสารตัวเติมและสารก่อผลึก

สำหรับทดสอบสมบัติทางกลเชิงไดนามิก (DMA) โดยทำการทดสอบแบบเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 30 ถึง 150 °C ที่อัตรา 3 °C/นาที ที่ Frequency เท่ากับ 1 Hz และ Amplitude เท่ากับ 0.01 % [27] สำหรับ Neat PLA และ PLA ที่มีการเติมสารตัวเติม Talc, CaCO<sub>3</sub> และ mPET พบว่าที่อุณหภูมิ 30 °C มีการเปลี่ยนแปลงของค่า Storage modulus เพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติมสารตัวเติม [27] และค่า Storage modulus จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ระหว่างช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 55 ถึง 70°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนผ่านจาก glassy state เป็น rubber state. ของ PLA หากพิจารณาที่อุณหภูมิ 65°C (Tg) พบว่าการเติมสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้น ค่า Storage modulus จะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นอิทธิพลของสารตัวเติมเกิดการเสริมแรงเพิ่ม stiffness ให้กับชิ้นงาน และพบ Rubbery plateau [32] ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 70 ถึง 90 °C สำหรับในช่วงอุณหภูมิมากกว่า 80 ไปจนถึง 110°C ค่า Storage modulus จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งเนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิในการเกิดผลึก หรือ Cold crystalline temperature (Tcc)[4] พบว่าจุดเริ่มต้นของการตกผลึกมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวเติมซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถของการเป็นสารก่อผลึกโดย PLA Talc 5 phr เริ่มตกผลึกที่ 78°C สำหรับสารตัวเติม PLA CaCO<sub>3</sub> 5 phr เริ่มตกผลึกที่ 87°C และ PLA mPET 5 phr เริ่มตกผลึกที่ 88°C ซึ่งมีอุณหภูมิการเริ่มตกผลึกต่ำกว่า Neat PLA ซึ่งเริ่มตกผลึกที่ 90 °C และค่า Storage modulus จะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้ 150°C เนื่องจากเริ่มมีการหลอมของผลึกเกิดขึ้นบางส่วน เมื่อพิจารณาค่า Storage modulus เมื่อมีการเติมสารตัวเติมมากขึ้น

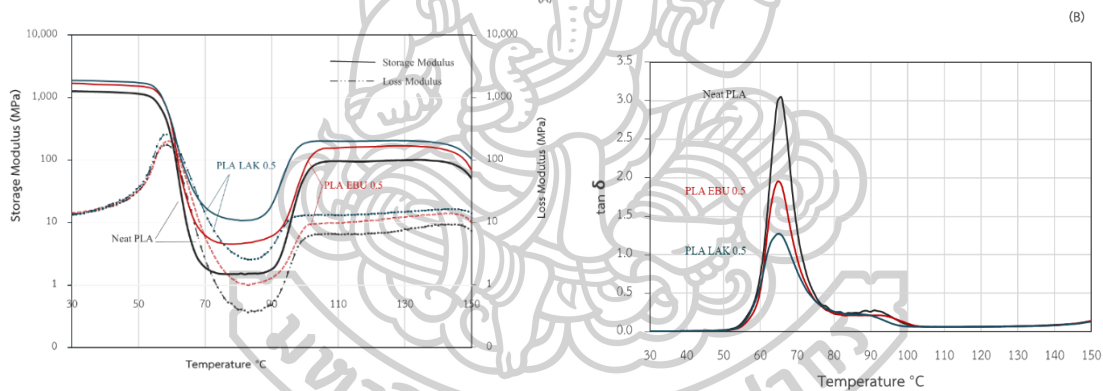
สำหรับ PLA ที่มีการเติมสารก่อผลึก EBU และ LAK พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงคล้ายการเติมสารตัวเติมคือมีการเพิ่มขึ้นของค่า Storage modulus เมื่อมีการเติมสารก่อผลึกเพิ่มขึ้น[27] สำหรับในช่วงอุณหภูมิมากกว่า 80°C ไปจนถึง 110°C เป็นช่วงอุณหภูมิในการเกิดผลึก หรือ Cold crystalline temperature (Tcc)[4] พบว่าการเติมสารก่อผลึกที่ต่างชนิดกันมีจุดเริ่มต้นของการตกผลึกแตกต่างกันโดย PLA EBU 0.5 phr เริ่มตกผลึกที่ 79°C สำหรับสารตัวเติม PLA LAK 0.5 phr เริ่มตกผลึกที่ 90°C

และสำหรับ tan(delta) หรือ Damping factor ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ของส่วนที่เป็นอสัณฐานของ PLA (amorphous phase) ซึ่งพบว่าค่า Tg มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเติมสารตัวเติมและสารก่อผลึกเพิ่มขึ้น tan(delta) peaks จะมีลักษณะลดต่ำลง และกว้างซึ่งบ่งบอกถึงสัดส่วนการลดลงของ

Loss modulus ต่อ Storage modulus บ่งบอกถึงการลดลงของ softening และ Heat distortion ของ PLA เมื่อเติมสารตัวเติม และสารก่อผลึก แสดงในรูปที่ 22 และ 23



รูปที่ 22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า A) storage modulus, Loss Modulus และ B) tan(delta) หรือ Damping factor ต่ออุณหภูมิเมื่อเติมสารตัวเติม PLA Talc5, PLA CaCO<sub>3</sub> 5 และ PLA mPET 5

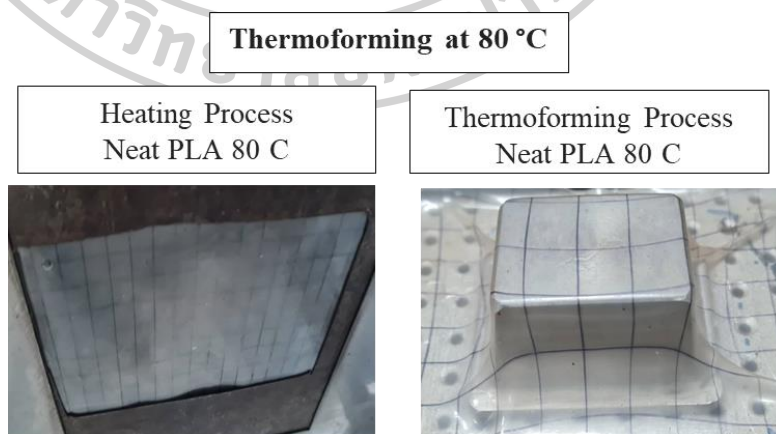


รูปที่ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า A) storage modulus, Loss Modulus และ B) tan(delta) หรือ Damping factor ต่ออุณหภูมิเมื่อเติมสารก่อผลึก PLA EBU 0.5 และ PLA LAK 0.5

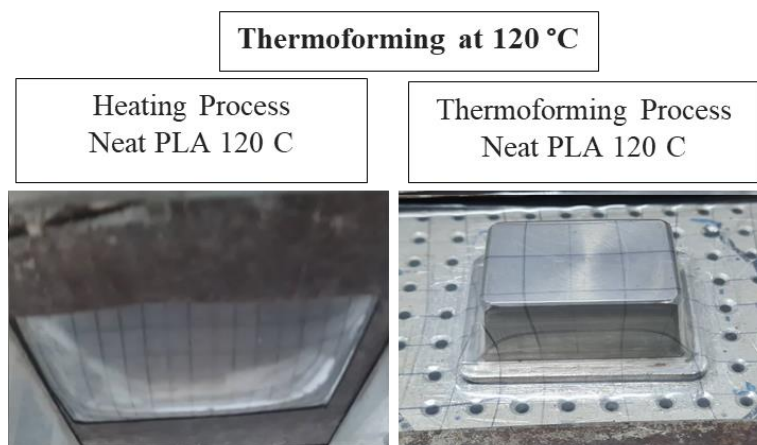
## 4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ การขึ้นรูปด้วยบรรจุภัณฑ์ในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

### 4.2.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการขึ้นรูปด้วยบรรจุภัณฑ์ด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

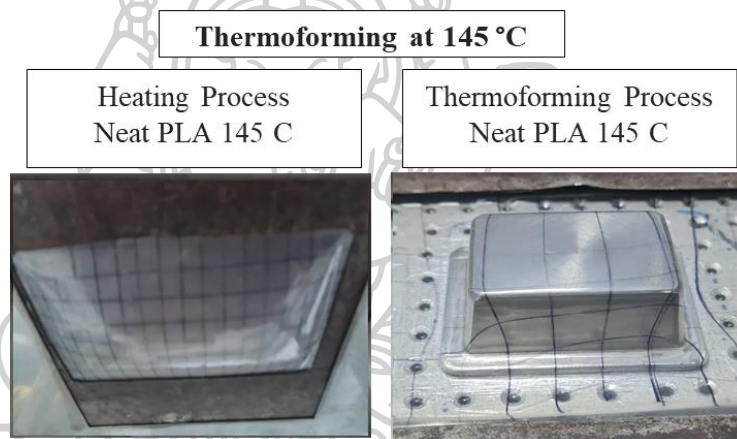
ผลการศึกษาการเตรียมด้วยบรรจุภัณฑ์สำหรับการใช้งานในไมโครเวฟ ด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยการเตรียมแผ่นฟิล์ม Neat PLA ด้วยเครื่อง Compassion molding ที่อุณหภูมิ  $190^{\circ}\text{C}$  จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวจะได้แผ่นฟิล์มหนาประมาณ 0.7 mm โดยได้มีการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ ซึ่งได้ศึกษาอุณหภูมิตั้งแต่  $80\pm 5^{\circ}\text{C}$ ,  $120\pm 5^{\circ}\text{C}$  และ  $145\pm 5^{\circ}\text{C}$  ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิ  $80\pm 5^{\circ}\text{C}$  แผ่นฟิล์มเมื่อได้รับความร้อนในขั้น Heating Process ไม่เกิดการอ่อนตัว และเมื่อขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัดแบบสุญญากาศ (Vacuum Thermoforming แผ่นฟิล์มไม่สามารถแนบสนิทกับแม่พิมพ์จึงไม่สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ แสดงในรูปที่ 24 สำหรับการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงขึ้นคือ  $120\pm 5^{\circ}\text{C}$  และ  $145\pm 5^{\circ}\text{C}$  พบว่าแผ่นฟิล์มเมื่อได้รับความร้อนมีลักษณะอ่อนตัว ย้อยตัวลง พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนตัวหรือไหลได้บางส่วนเห็นได้จากตารางที่เขียนขึ้นบนแผ่นฟิล์มมีการยืดออกและเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม[17] ซึ่งจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้  $T_m$  เห็นได้ในรูปที่ 25 และรูปที่ 26 ตามลำดับ) เมื่อมีการขึ้นรูปด้วยเทอร์โมฟอร์มมิ่ง แผ่นพลาสติกที่อ่อนตัวจะแนบสนิทกับแม่พิมพ์ โดยแผ่นฟิล์มบริเวณที่สัมผัสกับผิวแม่พิมพ์อุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นผลจากอุณหภูมิต่างกันของแผ่นฟิล์มและแม่พิมพ์จึงเกิดการถ่ายเทความร้อน[18] และเมื่อเย็นตัวลงสามารถถอดออกมาได้ด้วยบรรจุภัณฑ์สำหรับนำไปทดสอบในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 24 รูปแสดงอุณหภูมิของแผ่นฟิล์มขณะได้รับความร้อนและมีการอ่อนตัวในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ที่อุณหภูมิ  $80\pm 5^{\circ}\text{C}$



**รูปที่ 25** รูปแสดงขณะแผ่นฟิล์มเมื่อได้รับความร้อนและมีการขึ้นรูปในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่อุณหภูมิ  $120 \pm 5$  °C



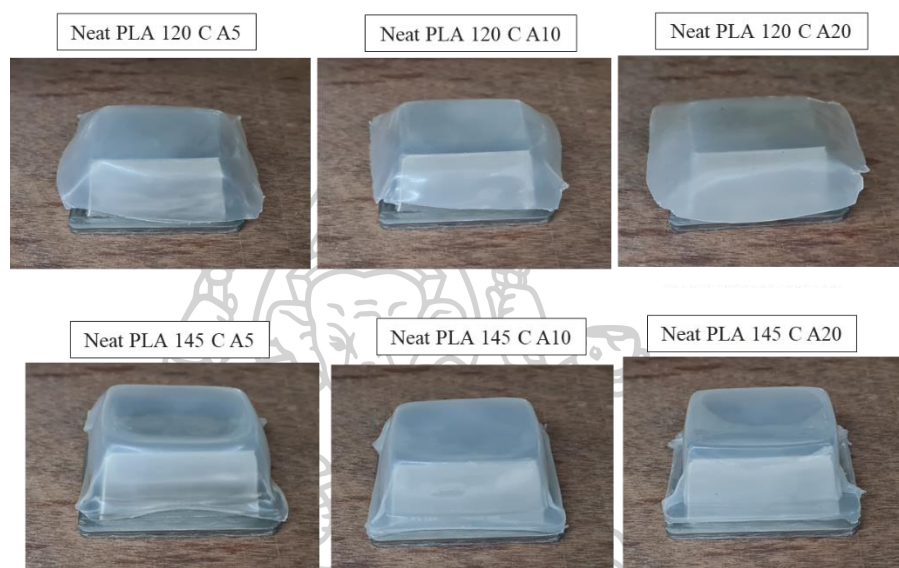
**รูปที่ 26** รูปแสดงขณะแผ่นฟิล์มเมื่อได้รับความร้อนและมีการขึ้นรูปในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่อุณหภูมิ  $145 \pm 5$  °C

#### 4.2.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อถ้วยบรรจุภัณฑ์ด้วยตู้อบลมร้อน

ผลการนำถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ทั้งสองอุณหภูมิคือ Neat PLA 120C และ Neat PLA 145C แล้วทดสอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  ที่เวลาต่างกัน 5, 10 และ 20 นาที (PLA 120C A5, PLA 120C A10, PLA 120C A20 ตามลำดับ) พบว่าถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ  $120 \pm 5^{\circ}\text{C}$  มีลักษณะบิดเบี้ยวเสียรูปและพยายามคืนรูปเป็นแผ่น เกิดจากการขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำมี Stress คงค้างในบรรจุภัณฑ์เมื่อบรรจุภัณฑ์ได้รับความร้อนจึงเกิดการกลับคืนลักษณะเดิม [17] และเมื่อนำถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ  $145 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ไปทดสอบในตู้อบลมร้อนเห็นได้ชัดว่าถ้วยบรรจุภัณฑ์ไม่เกิดการเสียรูป เนื่องจากการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง



ใกล้อุณหภูมิหลอมของ PLA สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนตัวได้ง่าย และเมื่อได้รับแรงจากการขึ้นรูป ทำให้พอลิเมอร์มีการเคลื่อนตัวและถูกทำลายโครงสร้างที่จะทำให้กลับคืนสู่ตำแหน่งเดิมหรือสูญเสียสมบัติการหดกลับ Shape-memory ถูกทำลาย และสายโซ่ถูกตรึงที่ตำแหน่งใหม่และเกิดการจัดเรียงตัวแบบใหม่ Stress คงค้างในผลิตภัณฑ์จึงหลงเหลืออยู่น้อย เมื่อนำมาทดสอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C จึงไม่เกิดการหดกลับและบิดเบี้ยวเสียรูป แสดงในรูปที่ 27 ด้วย



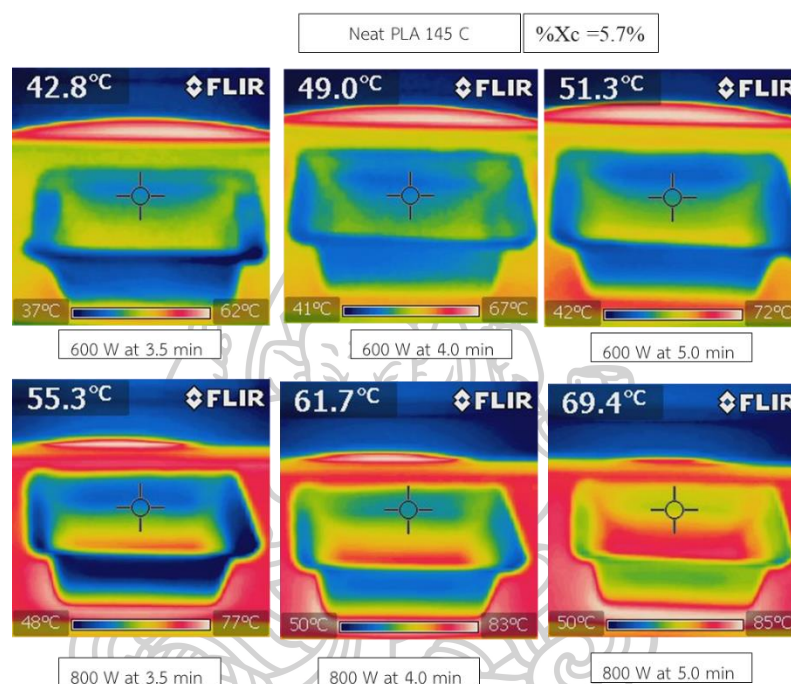
**รูปที่ 27** รูปแสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดสอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ที่เวลาต่างกัน 5, 10 และ 20 นาที ของผลิตภัณฑ์ Neat PLA ได้จากกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ที่อุณหภูมิ 120±5 °C และ 145±5 °C

จากการศึกษาความสามารถในการใช้งานในไมโครเวฟของถ้วยบรรจุภัณฑ์โดยนำถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่อุณหภูมิ 145±5 °C (Neat PLA 145C) ทดสอบโดยการกำหนดกำลังไฟฟ้า 600 และ 800 วัตต์ และกำหนดเวลา 3.5, 4 และ 5 นาที โดยไม่มีการเติมน้ำหรือน้ำมันลงไป พบว่าอุณหภูมิพื้นผิวของถ้วยบรรจุภัณฑ์ Neat PLA 145C เพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าและเวลาที่เพิ่มขึ้น มีค่าสูงสุดถึง 85°C เป็นผลจากการถ่ายเทความร้อนของสิ่งแวดล้อมเข้ามายังถ้วยบรรจุภัณฑ์สามารถสังเกตเห็นได้จากการใช้กล้อง FLIR เมื่อวัดอุณหภูมิบริเวณด้านบนของถ้วยพบว่า มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิพื้นผิวด้านล่างของถ้วยซึ่งเป็นผลจากการถ่ายเทความร้อนของภาตลอง และการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงสามารถช่วยลด Stress คงค้างในถ้วยบรรจุภัณฑ์จึงไม่เกิดการบิดเบี้ยวและเสียรูป[17] อีกปัจจัยหนึ่งคือจากการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของ PLA มีค่าประมาณ 0.1-0.2 (W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>) บ่งบอกถึงการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำ[37] เนื่องจากพลาสติกเป็นฉนวนทางความร้อน ซึ่ง



เมื่อได้รับความร้อนจากสิ่งแวดล้อมด้วยการนำความร้อนที่ต่ำอาจเป็นสาเหตุทำให้ถ้วยบรรจุภัณฑ์ Neat PLA 145C ไม่ร้อนถึงอุณหภูมิเสียรูป จึงไม่เกิดการบิดเบี้ยวและเสียรูปของถ้วยบรรจุภัณฑ์

ผลการศึกษาข้างต้นจึงสามารถที่จะใช้การขึ้นรูปโดยกำหนดอุณหภูมิเท่ากับ  $145 \pm 5$  °C เพื่อที่จะนำไปศึกษาในถัดไป



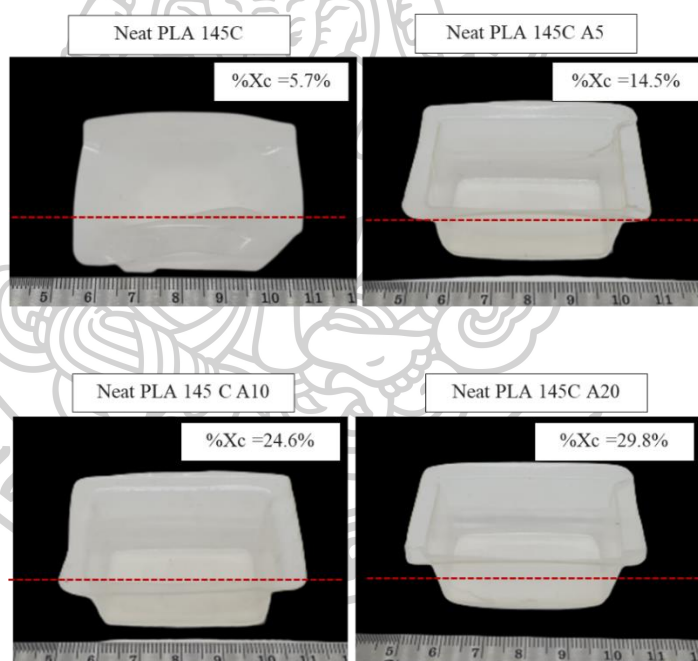
รูปที่ 28 ภาพถ่ายแสดงอุณหภูมิพื้นผิวต่ำสุดและสูงสุดในการทดสอบด้วยไมโครเวฟที่ไม่มีการเติมน้ำและน้ำมัน และถ่ายด้วย FLIR temperature sensor โดยทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600,800 วัตต์ ที่เวลา 3.5,4 และ5 นาที ของ Neat PLA 140C

#### 4.3 ศึกษาสมบัติทางความร้อน และการทดสอบในไมโครเวฟ

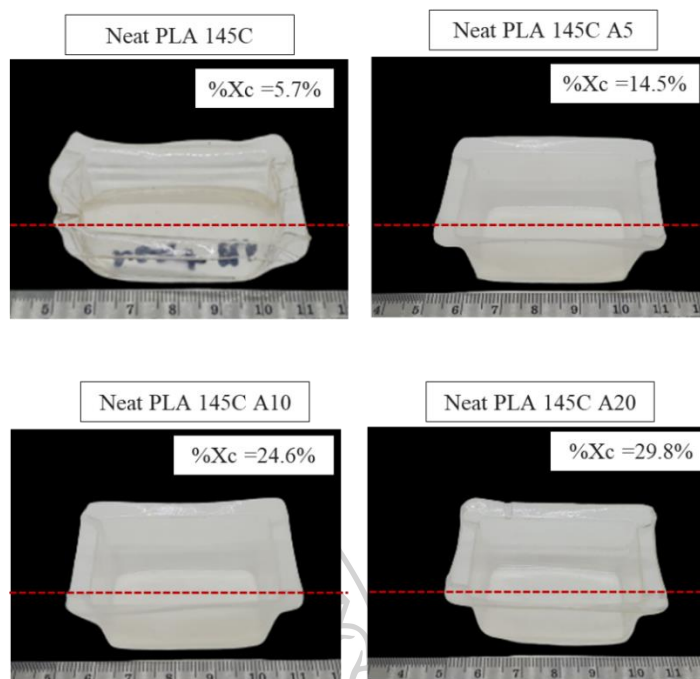
##### 4.3.1 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน และผลการทดสอบด้วยไมโครเวฟของถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่ผ่านการอบด้วยตู้อบลมร้อน

เมื่อทำการนำผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจากระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่อุณหภูมิ  $145 \pm 5$  °C ที่ผ่านการอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ที่เวลาต่างกัน 0, 5, 10 และ 20 นาที ซึ่งมีผลิตภัณฑ์ Neat PLA 145C, Neat PLA 145C A5, Neat PLA 145C A10 และ Neat PLA 145 A20 ตามลำดับ ทำการทดสอบความสามารถในการใช้งานในไมโครเวฟโดยการเติมน้ำซึ่งเป็นตัวแทนของสารที่มีไขมันหรืออาหารที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ และที่ถ้วยบรรจุภัณฑ์น้ำมันมะกอก ซึ่งเป็นตัวแทนของ

ของเหลวไม่มีขี้หรืออาหารที่มีส่วนประกอบของน้ำมัน จากนั้นปรับกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์เป็นเวลา 3.5 นาที ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์ไม่เกิดการบิดเบี้ยวและเสียรูป Neat PLA 145C A5, Neat PLA 145C A10 และ Neat PLA 145C A20 เมื่อเทียบกับ Neat PLA 145C แสดงดังรูปที่ 29 และรูปที่ 30 ที่ไม่ได้ทำการอบในตู้อบลมร้อน การที่ Neat PLA 145C เกิดการบิดเบี้ยวเสียรูปไปจากเดิมเนื่องจากปริมาณผลึกไม่เพียงพอที่จะทำให้ถ้วยมี Stiffness เพิ่มขึ้นได้เพียงพอต่อแรงกระทำของน้ำหนักของน้ำและน้ำมัน ซึ่งแตกต่างจากการทดสอบในตู้อบลมร้อนที่มีการใช้แม่พิมพ์ในการพองบรรจุภัณฑ์ อย่างไรก็ตามการทดสอบการอบด้วยตู้อบลมร้อนเป็นการยืนยันอิทธิพลของผลึก Neat PLA 145C ทำการอบที่อุณหภูมิตกผลึก 100°C ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการตกผลึกเพิ่มมากขึ้นจึงสามารถทนความร้อนเพิ่มสูงขึ้นและเมื่อผลึกเพิ่มมากขึ้นจะลดส่วนที่เป็น Amorphous ลงส่งผลให้มี stiffness เพิ่มขึ้นจึงแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ขุ่นเพิ่มขึ้น และไม่เกิดการบิดเบี้ยวและเสียรูปของถ้วยบรรจุภัณฑ์



**รูปที่ 29** ภาพถ่ายถ้วยบรรจุภัณฑ์หลังการทดสอบด้วยไมโครเวฟที่เติมน้ำ โดยทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์เป็นเวลา 3.5 นาที ของ Neat PLA 145C แล้วการทดสอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ที่เวลาต่างกัน 0, 5, 10 และ 20 นาที



**รูปที่ 30** ภาพถ่ายด้วยบรรจุภัณฑ์หลังการทดสอบด้วยไมโครเวฟที่เติมน้ำมันมะกอก โดยทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์ที่เวลา 3.5 นาที ของ Neat PLA ที่ผ่านการขึ้นรูปที่  $140 \pm 5$  °C แล้ว การทดสอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ที่เวลาต่างกัน 0, 5, 10 และ 20 นาที

จากการทดสอบความสามารถในการใช้งานในไมโครเวฟที่เติมน้ำและน้ำมัน โดยถ่ายด้วย FLIR temperature sensor แสดงดังรูปที่ 35 และรูปที่ 36 จะเห็นได้ว่าบริเวณที่ด้วยบรรจุภัณฑ์สัมผัสกับน้ำและน้ำมัน เมื่อทำการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากถึง 83 ถึง 100 °C ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นสูงกว่าอุณหภูมิ  $T_g$  ของ PLA แต่จากผลการทดสอบพบว่าไม่เกิดการเสียรูปและบิดเบี้ยวของถ้วยบรรจุภัณฑ์สำหรับการอบในตู้อบลมร้อนคือ Neat PLA 145C A5, Neat PLA 145C A10 และ Neat PLA 145C A20 ซึ่งเป็นการยืนยันผลของการอบในตู้อบลมร้อน สามารถช่วยให้บรรจุภัณฑ์ใช้งานที่อุณหภูมิสูงและทนต่อความร้อนขณะใช้งานในไมโครเวฟได้ การอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ทำให้พอลิเมอร์สามารถตกผลึกได้เพิ่มมากยิ่งขึ้นซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนแสดงในตารางที่ 11 เมื่อทำการอบถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่เวลาเพิ่มมากขึ้น %Xc มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ Neat PLA และยังมีการตกผลึกช้าลดลงเห็นได้จากการอบเป็นเวลา 20 นาที จะไม่พบ  $T_{cc}$  เกิดขึ้น แสดงถึงการตกผลึกก่อนหน้ามีการตกผลึกอย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 14 แสดงสมบัติทางความร้อน จากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC แบบ non-isothermal ของบรรจุภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง Neat PLA 145C ผ่านการอบด้วยตู้อบลมร้อน ที่เวลา 0, 5, 10 และ 20 นาที

Samples	T <sub>g</sub> (°C)	T <sub>cc</sub> (°C)	T <sub>m1</sub> (°C)	T <sub>m2</sub> (°C)	ΔH <sub>m</sub> (J/g)	ΔH <sub>cc</sub> (J/g)	%X <sub>c</sub> (%)
Neat PLA 145C	54.4	105.9	149.1	156.0	31.0	25.7	5.7
Neat PLA 145C A5	55.9	100.2	-	153.7	29.2	15.8	14.5
Neat PLA 145C A10	54.9	94.29	-	153.5	27.4	4.58	24.6
Neat PLA 145C A20	54.8	-	-	153.4	27.7	-	29.8

อย่างไรก็ตามในการขึ้นรูปในระดับอุตสาหกรรมสำหรับกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง การอบด้วยลมร้อนไม่ถูกใช้ในการผลิต เนื่องจากส่งผลต่อเวลาในการผลิต การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และต้นทุนที่เพิ่มขึ้น กระบวนการอบด้วยลมร้อนจึงไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติในระดับอุตสาหกรรม ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติม Talc, CaCO<sub>3</sub>, mPET และสารก่อผลึก EBU และ LAK ที่ไม่มีการอบด้วยตู้อบลมร้อน

#### 4.3.2 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน และผลการทดสอบในไมโครเวฟ ของถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่เติมสารตัวเติมและสารก่อผลึก

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC ของถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง พบว่า ถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่เตรียมได้จาก Neat PLA 145C มีค่า T<sub>g</sub> (Glass transition temperature) หรืออุณหภูมิที่เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยาง ที่อุณหภูมิ 54.4 °C พบพีคพีค cold crystallization temperature (T<sub>cc</sub>) ที่ 105.87°C มีปริมาณผลึก (%X<sub>c</sub>) มีค่าเท่ากับ 5.7% และมีพีคการหลอมผลึก melting temperature (T<sub>m</sub>) สองตำแหน่งที่ 149.13 และ 155.97 °C ซึ่งบ่งบอกถึงผลึกแบบ α-crystal ที่มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่ที่แตกต่างกันขณะตกผลึกทำให้ใช้พลังงานในการหลอมเหลวผลึกแตกต่างกัน [13, 14] เมื่อพิจารณาผลของการเติมสารตัวเติม Talc และ CaCO<sub>3</sub> พบว่า เมื่อมีการเติมสารตัวเติมที่ปริมาณเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มที่ปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับบรรจุภัณฑ์จาก Neat PLA 145C สำหรับการเติมสารตัวเติม Talc ที่มีปริมาณ 1, 3 และ 5 phr พบว่าปริมาณผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมสารตัวเติม Talc เพิ่มขึ้นจาก 5.7% สำหรับ Neat PLA 140C เป็น 10.8%, 14.4% และ 17.0% ตามลำดับ สำหรับการเติมสารตัวเติม CaCO<sub>3</sub> ที่

ปริมาณ 1 และ 3 phr พบว่าปริมาณการตกผลึกเพิ่มขึ้นเป็น 12.4% และ 14.5% แต่พบว่าเมื่อมีการเติม  $\text{CaCO}_3$  5 phr ปริมาณผลึกมีค่าลดต่ำลงเท่ากับ 10.5% อาจเป็นผลมาจากอนุภาคของสารตัวเติม  $\text{CaCO}_3$  บางส่วนขัดขวางการเกิดผลึกโดยเฉพาะอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จึงส่งผลให้ปริมาณการตกผลึกลดลง[12] สำหรับการเติม mPET ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr พบว่าปริมาณผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ Neat PLA 140C ซึ่งมีปริมาณผลึกเท่ากับ 13.8%, 11.9% และ 6.2% เห็นได้ว่าเมื่อเติม mPET ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณผลึกมาค่าลดลงซึ่งอาจเกิดจากขนาดของอนุภาคที่ไม่เหมาะสมสำหรับการเป็น Nucleus ของผลึกสำหรับ PLA และการที่เติม mPET มากเกินไปอาจขัดขวางการตกผลึกของ PLA

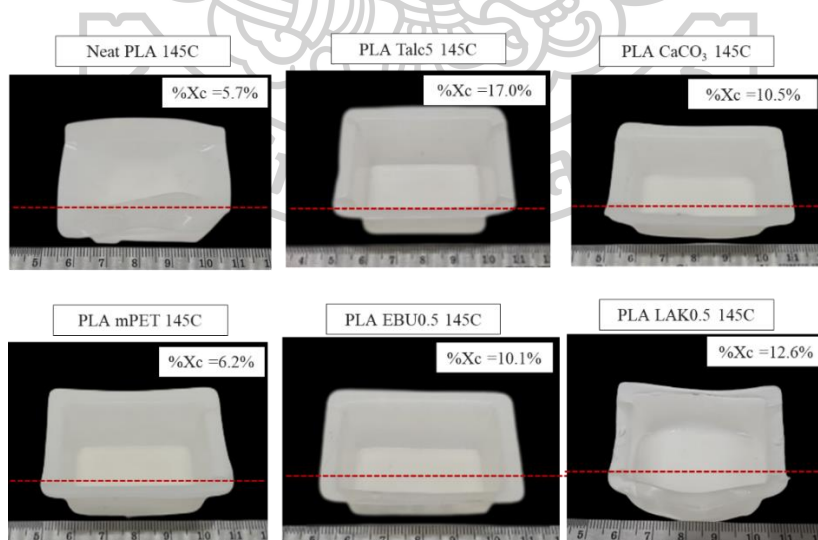
สำหรับการเติมสารก่อผลึก EBU ที่อัตราส่วน 0.1, 0.3 และ 0.5 phr โดยมีการเติม peroxide ซึ่งถูกเติมเพื่อส่งเสริมปฏิกิริยา free radicals ของพันธะคู่ในสารประกอบ EBU) [28,20] โครงสร้างทางเคมีของ EBU ประกอบด้วยพันธะคู่สองตัว หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับ peroxide ผ่านปฏิกิริยา free radicals เกิดการกราฟต์ บนสายโซ่ PLA ซึ่งช่วยให้ PLA มีอัตราการตกผลึกได้เพิ่มขึ้น [28] ซึ่งปริมาณการตกผลึกของ PLA เพิ่มขึ้นจาก 5.7 % สำหรับ Neat PLA 145C เป็น 7.1%, 9.3% และ 10.1% ตามลำดับ สำหรับการเติมสารก่อผลึก LAK ที่อัตราส่วน 0.1, 0.3 และ 0.5 phr โดย aromatic sulfonate derivative LAK ส่งเสริมให้เกิดผลึกสำหรับ PLA โดยเมื่อปริมาณการเติม LAK ที่เพิ่มขึ้นทำให้ PLA อัตราการเกิดผลึกที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.7%, 16.4% และ 12.6% ตามลำดับ ซึ่งแสดงในตารางที่ 17

จากการทดสอบความสามารถในการใช้งานในไมโครเวฟโดยกำหนดกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์ที่เวลา 3.5 นาที ที่เติมน้ำและน้ำมัน พบว่าสามารถสังเกตเห็นการเสีรูรูปได้ชัดเจนสำหรับ ถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่ขึ้นรูปจาก Neat PLA เมื่อมีการเติม Talc,  $\text{CaCO}_3$ , mPET พบว่าไม่ปรากฏการเสีรูรูปที่สามารถสังเกตเห็นที่ชัดเจนในทุกอัตราส่วนซึ่งเป็นผลจากถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งเป็นการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงจึงลด Stress คงค้างในบรรจุภัณฑ์ลง และที่อุณหภูมิสูง (ใกล้อุณหภูมิหลอมของ PLA) สายโซ่สามารถเคลื่อนตัวได้ง่ายและเมื่อได้รับแรงจากการขึ้นรูปทำให้พอลิเมอร์มีการเคลื่อนตัวและถูกทำลายโครงสร้างที่จะทำให้กลับคืนสู่ตำแหน่งเดิมหรือสูญเสียสมบัติการหดกลับ Shape-memory และเมื่อถูกการกดอัดด้วยเครื่องกดอบบแบบสุญญากาศ แล้วมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ถูกตรึงที่ตำแหน่งใหม่ และเกิดการจัดเรียงตัวแบบใหม่ อีกทั้งยังมีการเติมสารตัวเติมลงไป ซึ่งเป็นสารสารก่อผลึกซึ่งลดสัดส่วนของ Amorphous ในเมตริกของ PLA ลง [23]จำกัดการเคลื่อนตัวของสายโซ่และลดการบิดเบี้ยวเสีรูรูปของถ้วยบรรจุภัณฑ์ และสำหรับการ



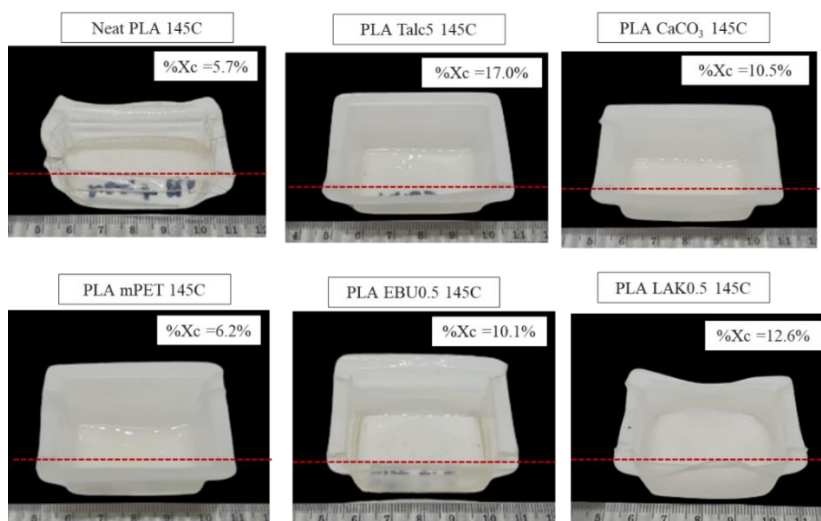
เติมสารก่อผลึก LAK และ EBU พบว่า PLA ที่เติม EBU ทุกอัตราส่วนไม่ปรากฏการเสีรูปร่างที่สามารถสังเกตเห็นที่ชัดเจนเช่นเดียวกับสารตัวเติม Talc, CaCO<sub>3</sub> และ mPET เนื่องจาก PLA EBU ที่เติมเปอร์ออกไซด์ เกิดการกราฟต์ บนสายโซ่ PLA ซึ่งส่งผลให้ PLA มีปริมาณการตกผลึกเพิ่มขึ้นและสามารถตกผลึกซ้ำได้ง่ายเนื่องจากตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสอดคล้องกันถ่ายอุณหภูมิพื้นผิวของผลิตภัณฑ์เมื่อผ่านการทดสอบในไมโครเวฟด้วยกล้อง FLIR temperature sensor แสดงดังรูปที่ 37 และ รูปที่ 38 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าบริเวณที่ถ้วยบรรจุภัณฑ์สัมผัสกับน้ำและน้ำมันเมื่อทำการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วประมาณ 75-85°C ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นสูงกว่าอุณหภูมิ T<sub>g</sub> ของ PLA แต่จากผลการทดสอบพบว่าไม่เกิดการเสีรูปร่างและบิดเบี้ยวของถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่มีการเติมสารตัวเติม Talc, CaCO<sub>3</sub> mPET และสารก่อผลึก EBU

สำหรับ PLA ที่เติม LAK ปรากฏการเสีรูปร่างที่สามารถสังเกตเห็นที่ชัดเจน ซึ่งเกิดจากในกระบวนการเตรียมถ้วยบรรจุภัณฑ์ด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง เป็นกระบวนการเตรียมที่มีการให้ความร้อนและการเย็นตัวอย่างรวดเร็วส่งผลให้ระยะเวลาสำหรับการเกิดผลึกไม่เพียงพอในการต้านทานการเสีรูปร่างของถ้วยบรรจุภัณฑ์เมื่อได้รับความร้อน แสดงลักษณะของบรรจุภัณฑ์หลังการทดสอบและลักษณะของการเสีรูปร่างแสดงดังรูปที่ 29 และ รูปที่ 30 และยังมีผลของอุณหภูมิตกผลึกซ้ำซึ่ง PLA LAK 145C มีอุณหภูมิตกผลึกซ้ำที่สูงทำให้ไม่เกิดการตกผลึกในระหว่างการทดสอบในไมโครเวฟจึงเกิดการบิดเบี้ยวและเสีรูปร่าง



**รูปที่ 31** ภาพถ่ายถ้วยบรรจุภัณฑ์หลังการทดสอบด้วยไมโครเวฟที่เติมน้ำ โดยการทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์ที่เวลา 3.5 นาที ของ Neat PLA และ PLA ที่สารตัวเติม Talc, CaCO<sub>3</sub> mPET ที่ 5 phr และสารก่อผลึก LAK, EBU ที่ 0.5 phr





**รูปที่ 32** ภาพถ่ายด้วยบรรจุภัณฑ์หลังการทดสอบด้วยไมโครเวฟที่เติมน้ำมันมะกอก โดยการทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์ที่เวลา 3.5 นาที ของ Neat PLA และ PLA ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยสารตัวเติม Talc,  $\text{CaCO}_3$  mPET และสารก่อผลึก LAK, EBU

#### 4.3.3 ข้อสันนิษฐานเบื้องต้นเกี่ยวกับการทนความร้อนของถ้วยบรรจุภัณฑ์ไมโครเวฟ

โดยหลังจากการทดสอบในไมโครเวฟ ได้นำถ้วยบรรจุภัณฑ์ไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC พบว่ามี %Xc เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงการตกผลึกซ้ำระหว่างการทดสอบในไมโครเวฟ และชนิดของสารตัวเติมและสารก่อผลึกมีผลต่อการตกผลึกโดยจะยกตัวอย่างในกรณีของ A PLA Talc 5 140C พบการเพิ่มขึ้นของผลึกจาก 17% เพิ่มเป็น 26.8% และ A PLA EBU 0.5 140C พบการเพิ่มขึ้นของผลึกจาก 10.1% เพิ่มเป็น 27.7% ตามลำดับ เนื่องจากการเติมสารตัวเติม Talc สารก่อผลึก EBU สามารถช่วยให้ PLA ตกผลึกซ้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าสารตัวเติมและสารก่อผลึกอื่นๆ ซึ่งมีอุณหภูมิ  $T_{cc}$  Onset ของ A PLA Talc 5 140C ผ่านการทดสอบในไมโครเวฟ มีค่าเท่ากับ  $86.6^{\circ}\text{C}$  สำหรับ A PLA EBU 0.5 140C มีอุณหภูมิ  $T_{cc}$  Onset เท่ากับ  $88.2^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสอดคล้องกับจากการทดสอบ DMA ที่  $T_{cc}$  Onset เท่ากับ  $78, 79^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ และจากภาพถ่ายอุณหภูมิพื้นผิวที่ถ่ายด้วย FLIR temperature sensor มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิตกผลึกแสดงดังรูปที่ 35 และรูปที่ 36 ซึ่งส่งผลให้ตกผลึกซ้ำในขั้นการใช้งานในไมโครเวฟ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไม่เกิดการบิดเบี้ยวและเสียรูปถึงแม้อุณหภูมิสูงเลยค่า  $T_g$  ของ PLA

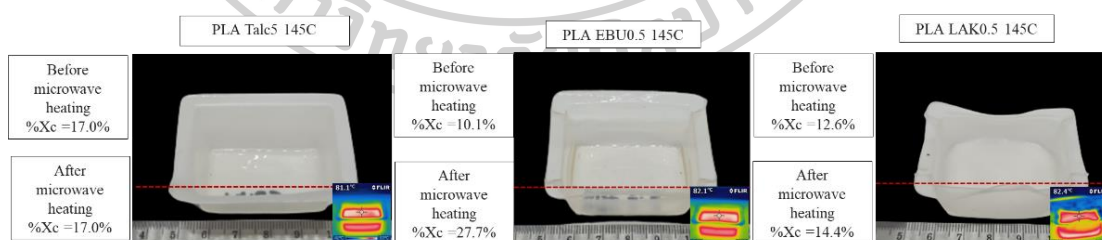
ซึ่งไม่เกิดขึ้นในกรณี A PLA LAK 0.5 145C ซึ่งพบว่า %Xc เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยซึ่งเป็นผลจาก ซึ่งมีอุณหภูมิ  $T_{cc}$  Onset ของ A PLA LAK 0.5 145C มีค่าสูงถึง  $95.8^{\circ}\text{C}$  ซึ่งการทำสอบใน

ไมโครเวฟอุณหภูมิพื้นผิวของถ้วยบรรจุภัณฑ์อาจร้อนขึ้นไม่ถึงอุณหภูมิตกผลึกของ A PLA LAK 0.5 145C ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบ ทดสอบ DMA ที่  $T_{cc}$  Onset เท่ากับ 90 °C จากภาพถ่ายอุณหภูมิพื้นผิวด้วย FLIR temperature sensor ซึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิตกผลึกแสดงดังรูปที่ 35 และรูปที่ 36 จึงทำให้ถ้วยบรรจุภัณฑ์เกิดการบิดเบี้ยวและเสียรูป

**ข้อสันนิษฐานที่ 1** ในกรณีของถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่เติมสารตัวเติม Talc, CaCO<sub>3</sub> และ mPET จากข้อมูลข้างต้นพบว่า การเติมสารตัวเติมสามารถช่วยให้ถ้วยบรรจุภัณฑ์ไม่เกิดการบิดเบี้ยวและเสียรูป เป็นผลจากอิทธิพลของสารตัวเติมเกิดการเสริมแรงเพิ่ม stiffness ให้กับชิ้นงานยืนยันผลจากการทดสอบ DMA

**ข้อสันนิษฐานที่ 2** ในกรณีของถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่เติมสารตัวเติม Talc และ สารก่อผลึก EBU จากข้อมูลเบื้องต้นพบว่า การเติมสารตัวเติม Talc และ สารก่อผลึก EBU สามารถช่วยให้ PLA ตกผลึกได้เพิ่มขึ้นระหว่างกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง และเกิดการตกผลึกซ้ำในกระบวนการทดสอบในไมโครเวฟ ซึ่งช่วยให้ถ้วยบรรจุภัณฑ์ไม่เกิดการบิดเบี้ยวและเสียรูปยืนยันผลจากการทดสอบ DMA, DSC ของถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งและหลังจากการทดสอบในไมโครเวฟ

**ข้อสันนิษฐานที่ 3** ในกรณีของถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่เติมสารก่อผลึก LAK จากข้อมูลข้างต้นพบว่า การเติมสารก่อผลึก LAK มีอุณหภูมิการตกผลึกซ้ำที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเมื่อทดสอบในไมโครเวฟและการขึ้นรูปถ้วยบรรจุภัณฑ์ในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่อุณหภูมิสูง อาจมีการหลอมของผลึก และเนื่องจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจึงมีระยะเวลาในการตกผลึกไม่เพียงพอ



**รูปที่ 33** ภาพถ่ายถ้วยบรรจุภัณฑ์หลังการทดสอบด้วยไมโครเวฟที่เติมน้ำมันมะกอก โดยการทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์เป็นเวลา 3.5 นาที ของ PLA ที่เติมสารตัวเติม Talc และสารก่อผลึก LAK, EBU

**ตารางที่ 15** แสดงสมบัติทางความร้อนจากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC ของบรรจุภัณฑ์ที่ได้จาก หลังกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่  $145 \pm 5^{\circ}\text{C}$  และหลังจากการทดสอบในไมโครเวฟ ของ Neat PLA และ PLA ที่เติมสารตัวเติม Talc  $\text{CaCO}_3$  และ mPET ที่ 5phr และสารก่อผลึก LAK และ EBU ที่ 0.5 phr แบบ non-isothermal

Samples	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{cc}$ Onset ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{cc}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m1}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m2}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta H_m$ (J/g)	$\Delta H_{cc}$ (J/g)	%Xc (%)
Neat PLA 145C	54.4	94.4	105.9	149.1	156.0	31.0	25.7	5.7
PLA Talc 5 145C	59.3	80.9	98.9	148.6	155.0	25.5	8.9	17.0
PLA $\text{CaCO}_3$ 5 145C	59.8	94.0	107.7	148.3	154.6	25.5	15.2	10.5
PLA mPET 5 145C	60.0	102.7	110.2	150.1	155.0	23.8	17.9	6.2
PLA EBU 0.5 145C	59.4	97.7	113.2	148.8	154.5	27.2	17.8	10.1
PLA LAK 0.5 145C	58.8	96.8	101.8	148.1	155.3	35.7	24.0	12.6
A Neat PLA 145C	60.8	93.7	101.9	147.7	154.8	27.6	18.5	9.4
A PLA Talc 5 145C	61.0	86.6	95.3	147.2	154.4	30.7	4.4	26.8
A PLA $\text{CaCO}_3$ 5 145C	60.9	92.5	100.2	147.4	154.8	28.6	14.6	14.3
A PLA mPET 5 145C	60.7	94.3	101.5	147.6	154.8	30.8	15.3	15.8
A PLA EBU 0.5 145C	60.0	88.2	96.4	146.9	153.9	30.2	4.4	27.7
A PLA LAK 0.5 145C	59.0	95.8	101.3	147.7	155.1	33.8	20.4	14.4

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

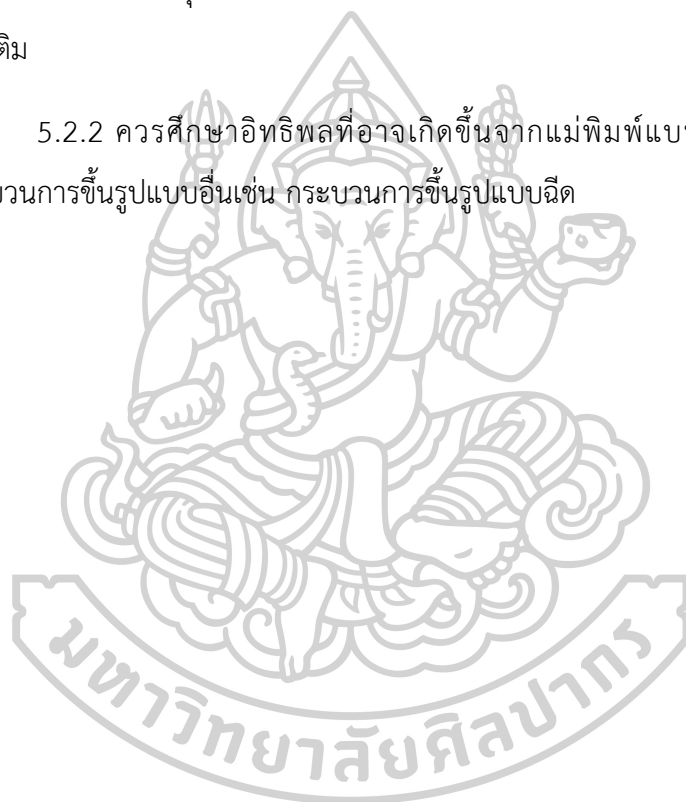
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) สำหรับถ้วยบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในไมโครเวฟโดยเริ่มจากศึกษาผลของการเติมสารตัวเติม พอลิเมอร์ผสมและสารก่อผลึก ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล พบว่า Tensile strength และ (%) Elongation at break มีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ Neat PLA ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $60 \pm 5$  MPa และ  $10 \pm 2\%$  ตามลำดับ สำหรับค่า Yong's modulus มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ Neat PLA ซึ่งมีสูงสุดที่การเติม PLA Talc 5 phr มีค่าเท่ากับ  $1,865 \pm 28$  MPa เป็นผลจากการเติมสารตัวเติมเพิ่มขึ้นช่วยเพิ่ม stiffness ของชิ้นงาน สำหรับการทดสอบสมบัติทางกลเชิงไดนามิก พบว่าที่อุณหภูมิ  $30^\circ\text{C}$  ค่า Storage modulus มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมสารตัวเติม พอลิเมอร์ผสมและสารก่อผลึก พบอุณหภูมิ Tg ประมาณ  $65^\circ\text{C}$  พบช่วงอุณหภูมิในการเกิดผลึกประมาณ  $80$  ถึง  $110^\circ\text{C}$  สำหรับการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ของกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งมีค่าเท่ากับ  $145 \pm 5^\circ\text{C}$  การศึกษาความสามารถในการทนความร้อนโดยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  พบว่าบรรจุภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ  $145 \pm 5^\circ\text{C}$  ไม่เกิดการบิดเบี้ยวเสียรูปเกิดจากการที่ผลิตภัณฑ์ไม่มี Stress คงค้างหลงเหลือในบรรจุภัณฑ์ สำหรับความสามารถในการใช้งานในไมโครเวฟโดยการเติมน้ำและน้ำมันมะกอกที่มีกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์เป็นเวลา 3.5 นาที ไม่เกิดการบิดเบี้ยวและเสียรูปซึ่งการอบในตู้อบลมร้อนทำให้เกิดการตกผลึกซ้ำเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามในการขึ้นรูปในระดับอุตสาหกรรมการอบด้วยลมร้อนไม่เป็นที่ยอมรับ สำหรับผลของการเติม Talc,  $\text{CaCO}_3$ , mPET และสารก่อผลึก EBU ที่ไม่มีการอบด้วยตู้อบลมร้อน พบว่าสารตัวเติมมีประสิทธิภาพในการช่วยให้ถ้วยบรรจุภัณฑ์ไม่เกิดการบิดเบี้ยวและเสียรูปขณะใช้งานในไมโครเวฟที่อุณหภูมิของน้ำและน้ำมันเพิ่มขึ้นสูงถึง  $80$ - $100^\circ\text{C}$  เป็นผลจากความสามารถในการตกผลึกซ้ำของสารตัวเติมและสารก่อผลึกโดยในการทดสอบ PLA Talc 5 140C และ PLA EBU 0.5 140C พบการเพิ่มขึ้นของผลึกจาก 17% เพิ่มเป็น 26.8% และ 10.1% เพิ่มเป็น 27.7% ตามลำดับ เนื่องจากมีอุณหภูมิตกผลึกซ้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าสารตัวเติมและสารก่อผลึกอื่นๆจึงสามารถตกผลึกได้ในขั้นทดสอบในไมโครเวฟ แต่สำหรับ PLA ที่เติมสารก่อผลึก LAK ยังมีการบิดเบี้ยวเสียรูปของถ้วยบรรจุภัณฑ์ เป็นผลจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่ให้ความร้อนและเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดผลึกไม่เพียงพอซึ่งสอดคล้องกับ DSC และ DMA พบว่าการเติมสารตัวเติม LAK มีการตกผลึกซ้ำที่สูงประมาณ  $90^\circ\text{C}$  ทำให้ปริมาณผลึกไม่เพียงพอขณะทดสอบในไมโครเวฟ

ดังนั้นการเติมสารตัวเติม Talc, CaCO<sub>3</sub>, mPET และสารก่อผลึก EBU สามารถส่งผลให้ PLA ตกผลึกเพิ่มขึ้น ทั้งสองกระบวนการคือ กระบวนการขึ้นรูปด้วยเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่อุณหภูมิ 145±5 °C และกระบวนการทดสอบไนไมโครเวฟ 600 วัตต์ 3.5 นาที ทำให้ผลิตภัณฑ์สามารถทนต่ออุณหภูมิของน้ำและน้ำมันที่เพิ่มขึ้น และจะช่วยลดการบิดเบี้ยวและเสียรูปผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เพื่อเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สำหรับภาชนะพลาสติกบรรจุอาหารสำหรับเตาไมโครเวฟ ควรมีการทดสอบตามข้อกำหนดอื่นๆ เพิ่มเติม

5.2.2 ควรศึกษาอิทธิพลที่อาจเกิดขึ้นจากแม่พิมพ์แบบอื่นๆ และอาจศึกษากระบวนการขึ้นรูปแบบอื่นเช่น กระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด



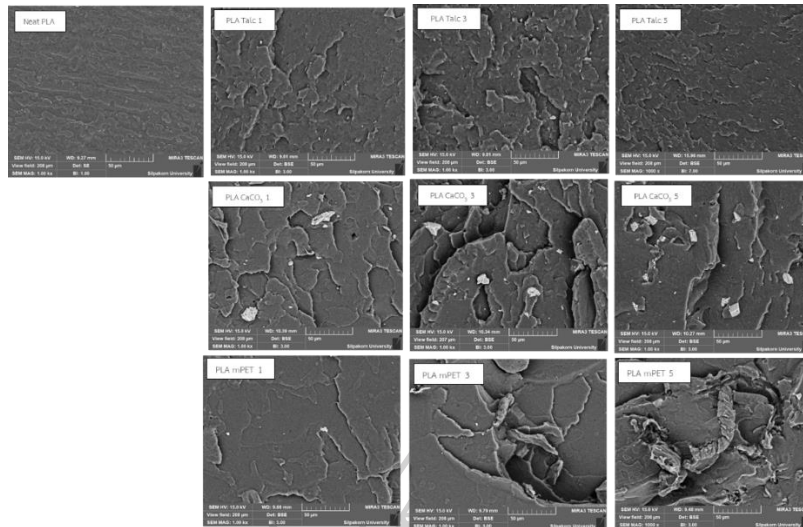




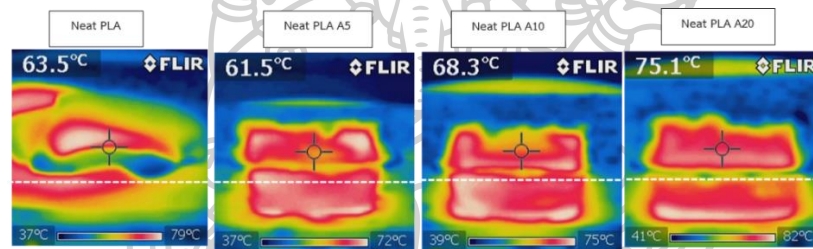
ภาคผนวก ก: ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 16 แสดงสมบัติทางความร้อนจากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC ของบรรจุภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่  $145\pm 5^{\circ}\text{C}$  ของ Neat PLA และ PLA ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยสารตัวเติม Talc  $\text{CaCO}_3$  และ mPET และสารก่อผลึก LAK และ EBU แบบ non-isothermal

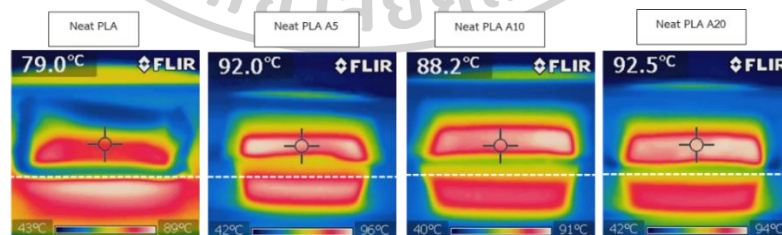
Samples	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{cc}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m1}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m2}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta H_m$ (J/g)	$\Delta H_{cc}$ (J/g)	%Xc (%)
Neat PLA 145C	54.4	105.9	149.1	156.0	31.0	25.7	5.7
PLA Talc 1 145C	59.9	106.2	149.4	155.1	26.7	16.6	10.8
PLA Talc 3 145C	60.2	102.9	149.1	155.3	27.6	13.8	14.4
PLA Talc 5 145C	59.3	98.9	148.6	155.0	25.5	8.9	17.0
PLA $\text{CaCO}_3$ 1 145C	59.1	99.7	147.9	155.3	26.8	15.1	12.4
PLA $\text{CaCO}_3$ 3 145C	59.8	108.2	148.9	155.4	28.3	14.4	14.5
PLA $\text{CaCO}_3$ 5 145C	59.8	107.7	148.3	154.6	25.5	15.2	10.5
PLA mPET 1 145C	59.5	106.3	148.9	155.8	28.8	15.9	13.8
PLA mPET 3 145C	59.7	108.4	148.7	155.7	26.3	15.0	11.9
PLA mPET 5 145C	60.0	110.2	150.1	155.0	23.8	17.9	6.2
PLA EBU 0.1 145C	59.7	111.2	149.5	155.4	28.0	21.3	7.1
PLA EBU 0.3 145C	56.2	102.1	148.2	154.9	25.8	17.0	9.4
PLA EBU 0.5 145C	59.4	113.2	148.8	154.5	27.2	17.8	10.1
PLA LAK 0.1 145C	59.1	102.5	148.3	155.7	31.5	26.1	5.7
PLA LAK 0.3 145C	59.4	103.5	148.1	155.1	37.2	22.0	16.4
PLA LAK 0.5 145C	58.8	101.8	148.1	155.3	35.7	24.0	12.6



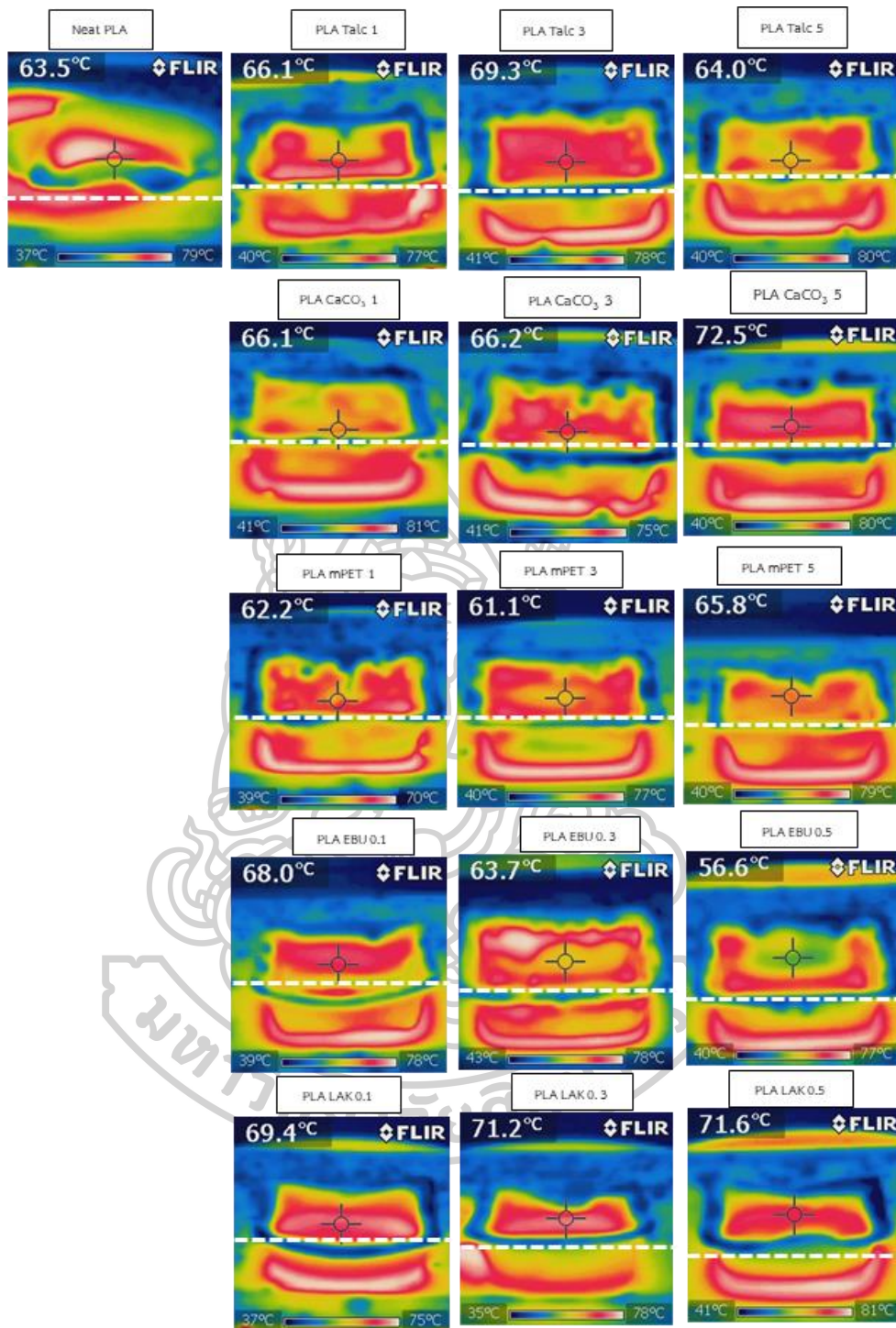
รูปที่ 34 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาของสารตัวเติม Talc,  $\text{CaCO}_3$  และ mPET



รูปที่ 35 ภาพถ่ายแสดงอุณหภูมิพื้นผิวต่ำสุดและสูงสุดในการทดสอบด้วยไมโครเวฟที่เติมน้ำ และถ่ายด้วย FLIR temperature sensor โดยทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์ที่เวลา 3.5 นาที ของ Neat PLA ( ที่ผ่านการขึ้นรูปที่  $140 \pm 5$  °C และอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ที่เวลาต่างกัน 0, 5, 10 และ 20 นาที )



รูปที่ 36 ภาพถ่ายแสดงอุณหภูมิพื้นผิวต่ำสุดและสูงสุดในการทดสอบด้วยไมโครเวฟที่เติมน้ำมัน และถ่ายด้วย FLIR temperature sensor โดยทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์ที่เวลา 3.5 นาที ของ Neat PLA ( ที่ผ่านการขึ้นรูปที่  $140 \pm 5$  °C และอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ที่เวลาต่างกัน 0, 5, 10 และ 20 นาที )

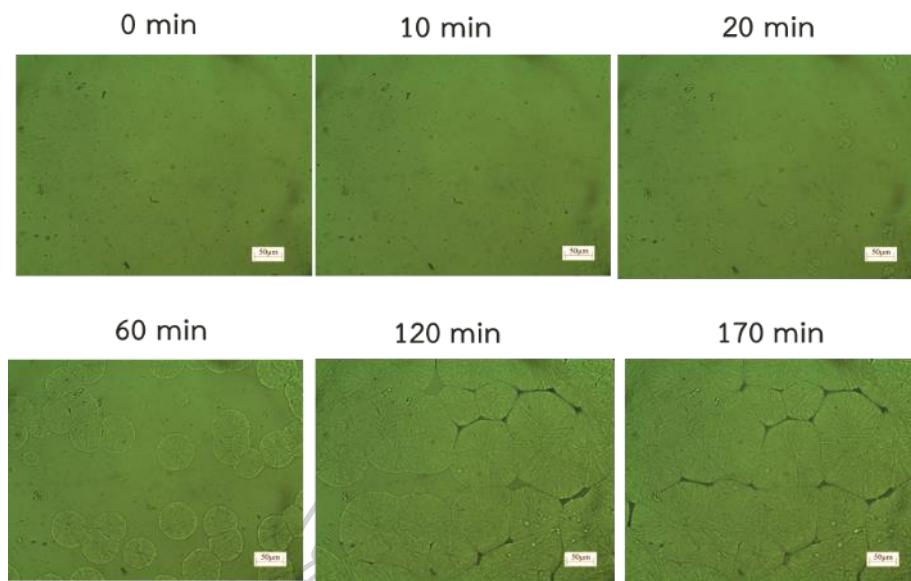


รูปที่ 37 ภาพถ่ายจากการทดสอบด้วย FLIR temperature sensor ที่การทดสอบด้วยไมโครเวฟที่เติมน้ำ โดยทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์ที่เวลา 3.5 นาที ของ Neat PLA และ PLA ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยสารตัวเติม Talc CaCO<sub>3</sub> และ mPET และสารก่อผลึก LAK และ EBU

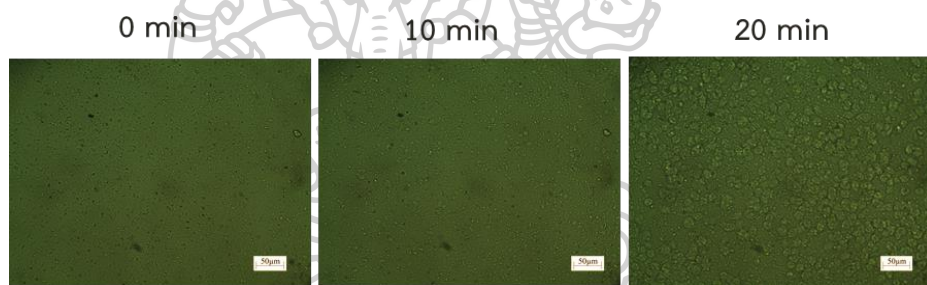




รูปที่ 38 ภาพถ่ายจากการทดสอบด้วย FLIR temperature sensor ที่การทดสอบด้วยไมโครเวฟที่ เต็มน้ำ โดยทำการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 600 วัตต์ที่เวลา 3.5 นาที ของ Neat PLA และ PLA ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยสารตัวเติม Talc CaCO<sub>3</sub> และ mPET และสารก่อผลึก LAK และ EBU



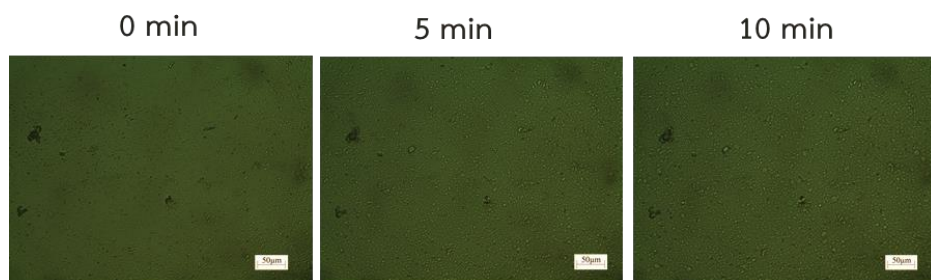
รูปที่ 39 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ neat PLA



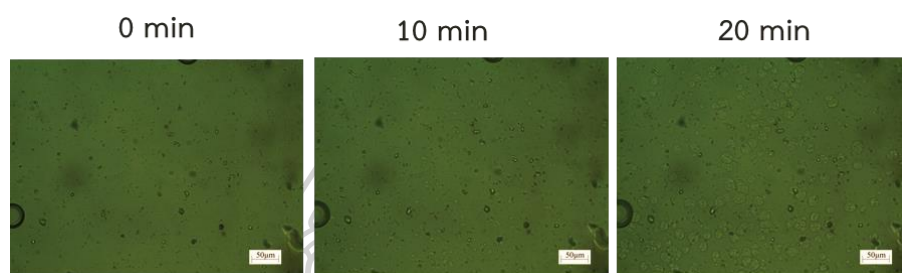
รูปที่ 40 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA Talc 1



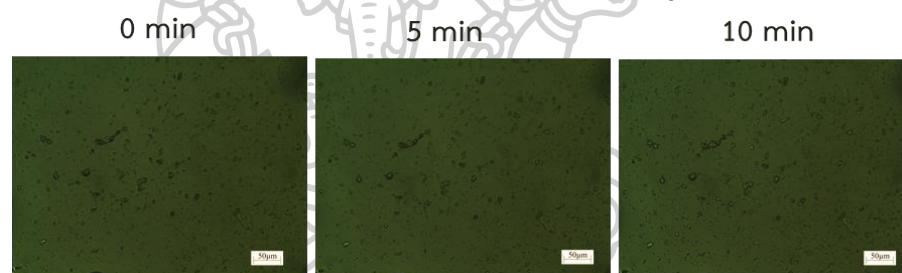
รูปที่ 41 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA Talc 3



รูปที่ 42 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA Talc 5



รูปที่ 43 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA CaCO<sub>3</sub> 1

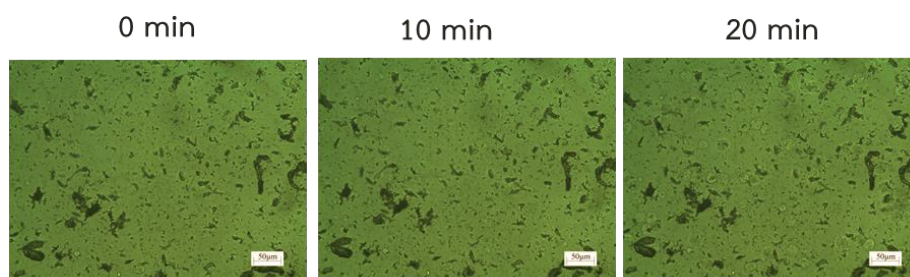


รูปที่ 44 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA CaCO<sub>3</sub> 3

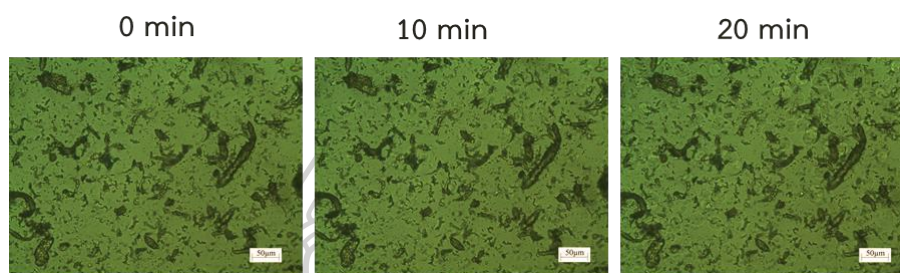


รูปที่ 45 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA CaCO<sub>3</sub> 5

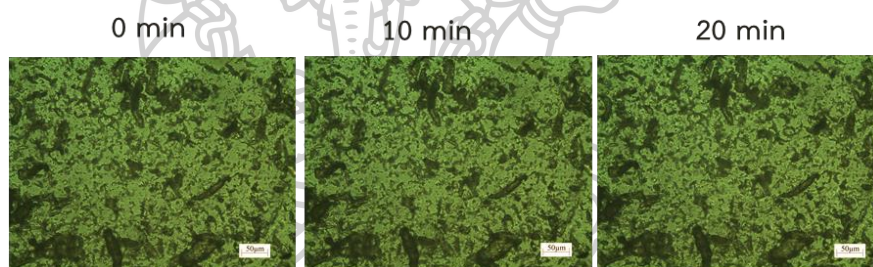




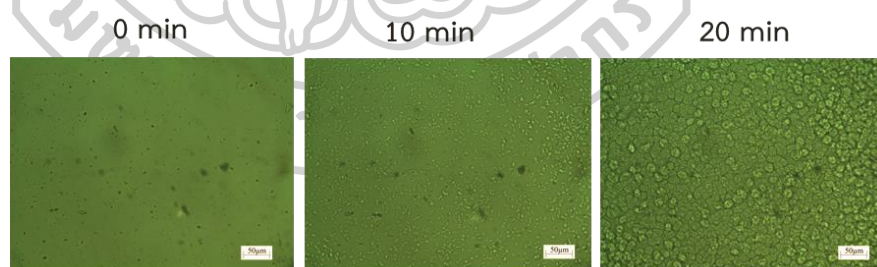
รูปที่ 46 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA mPET 1



รูปที่ 47 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA mPET 3



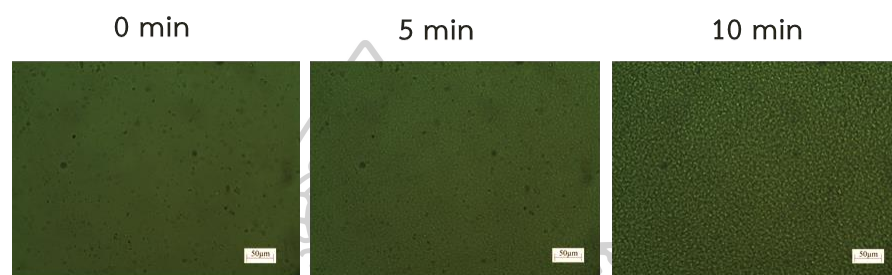
รูปที่ 48 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA mPET 5



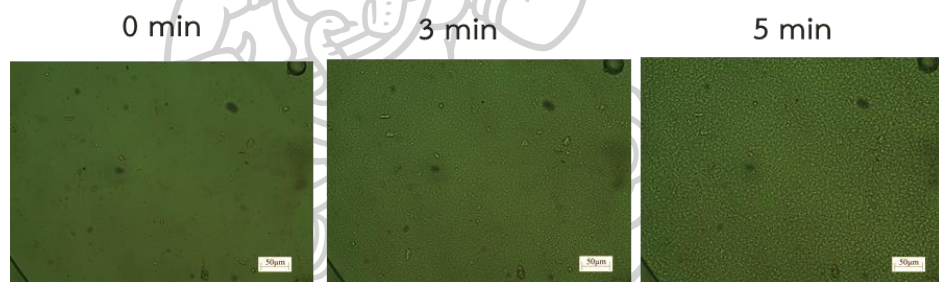
รูปที่ 49 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA EBU0.1



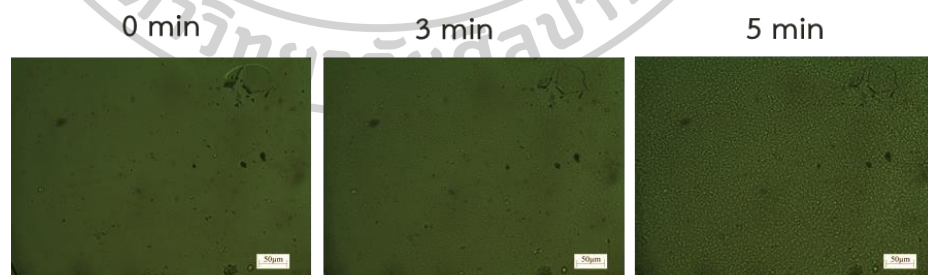
รูปที่ 50 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA EBU0.3



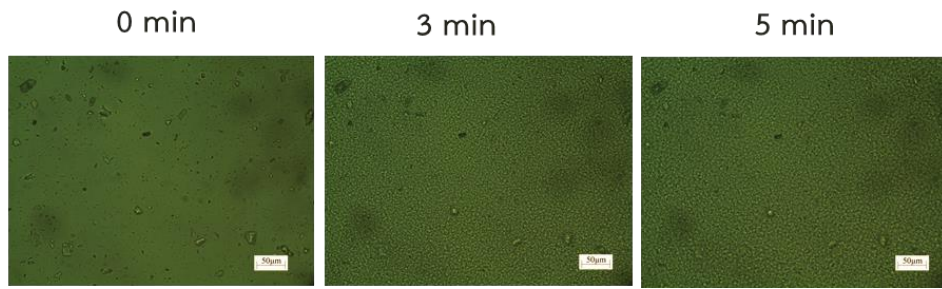
รูปที่ 51 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA EBU0.5



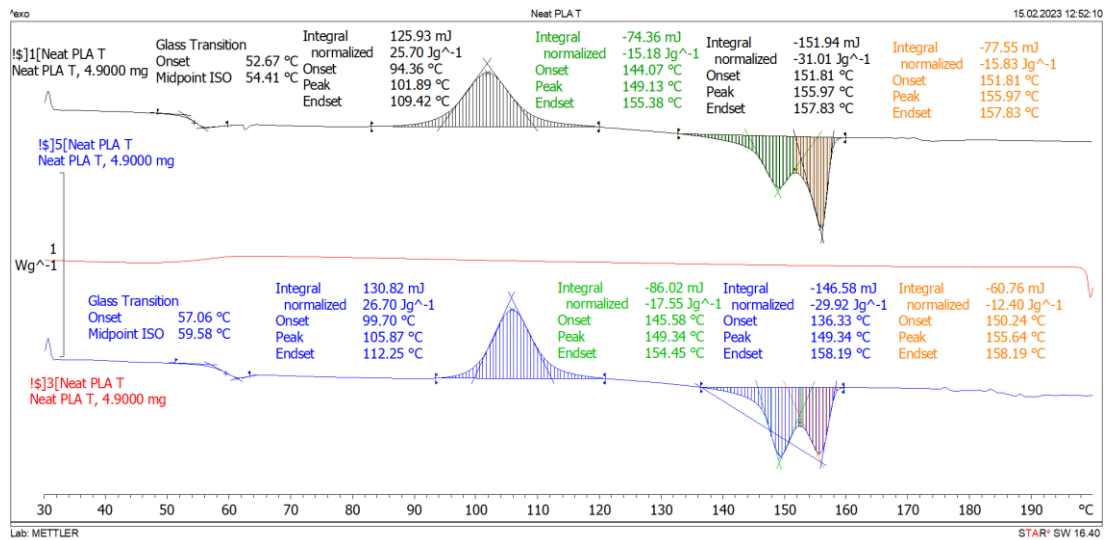
รูปที่ 52 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA LAK0.1



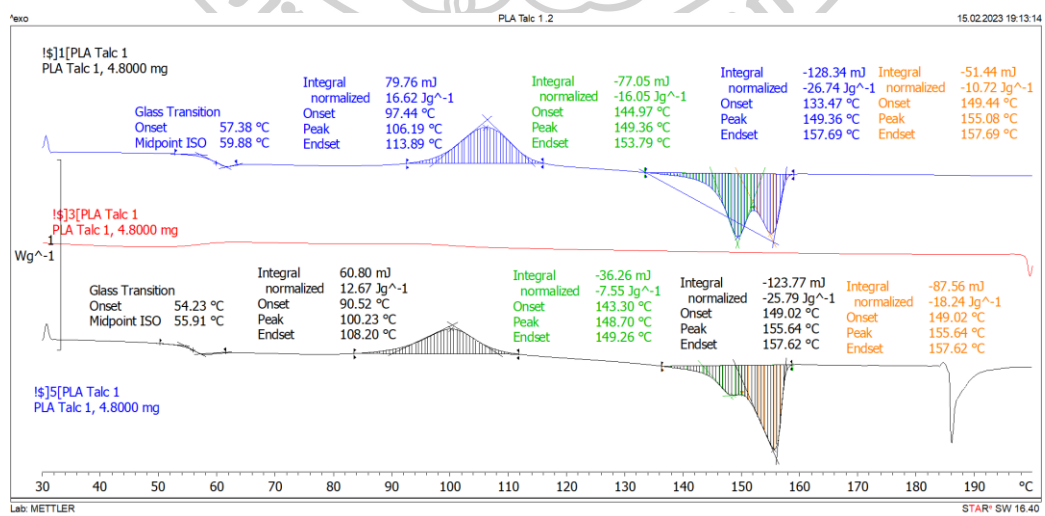
รูปที่ 53 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA LAK0.3



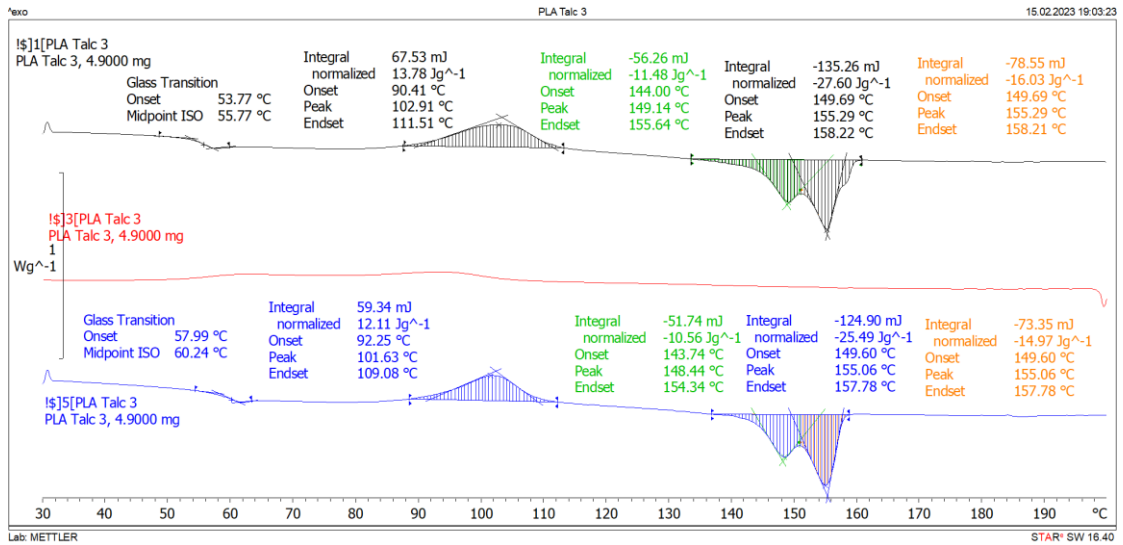
รูปที่ 54 แสดงภาพการเติบโตของผลึกจากเทคนิค POM ของ PLA LAK0.5



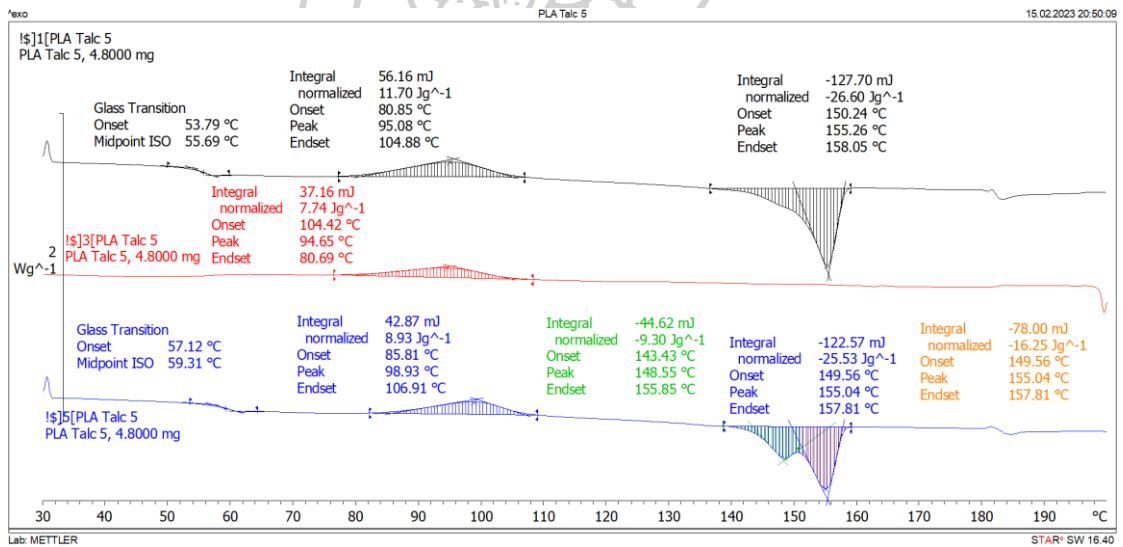
รูปที่ 55 DSC thermogram ของถ้วยบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ Neat PLA



รูปที่ 56 DSC thermogram ของถ้วยบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA Talc 1

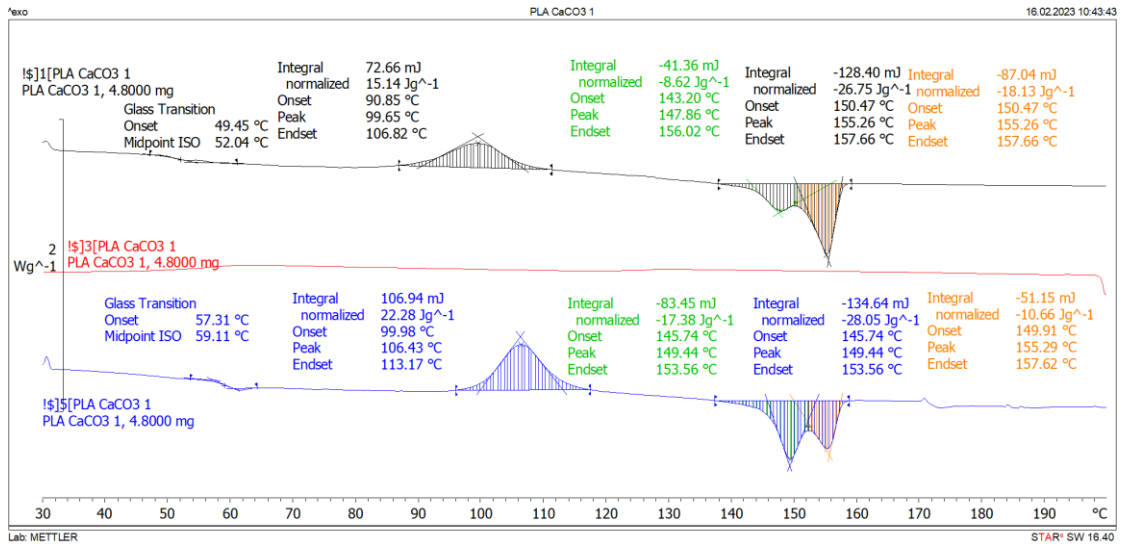


รูปที่ 57 DSC thermogram ของถ้วยบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA Talc 3

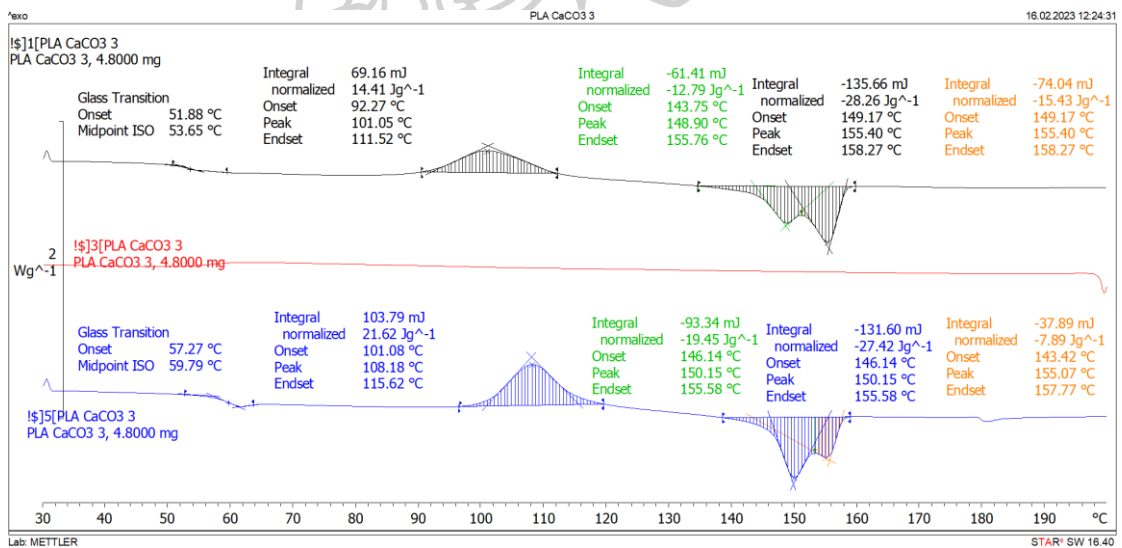


รูปที่ 58 DSC thermogram ของถ้วยบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA Talc 5

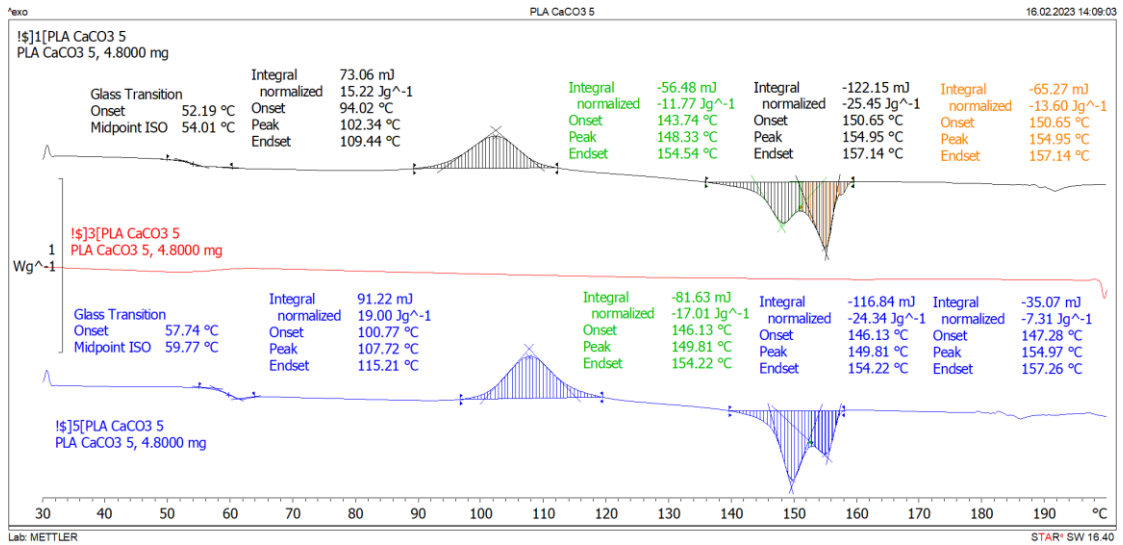




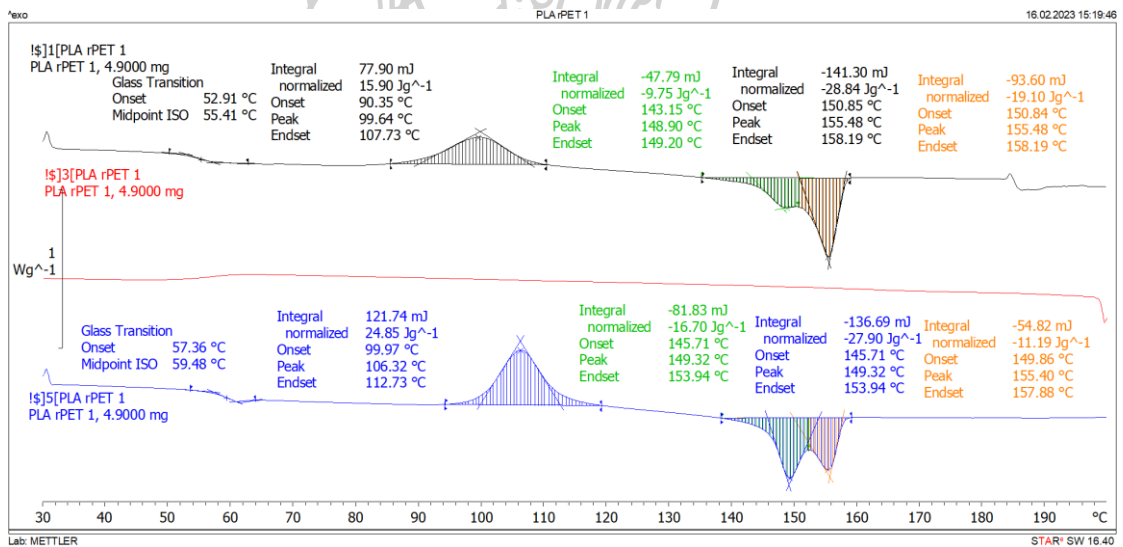
รูปที่ 59 DSC thermogram ของถ้วยบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA CaCO<sub>3</sub> 1



รูปที่ 60 DSC thermogram ของถ้วยบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA CaCO<sub>3</sub> 3

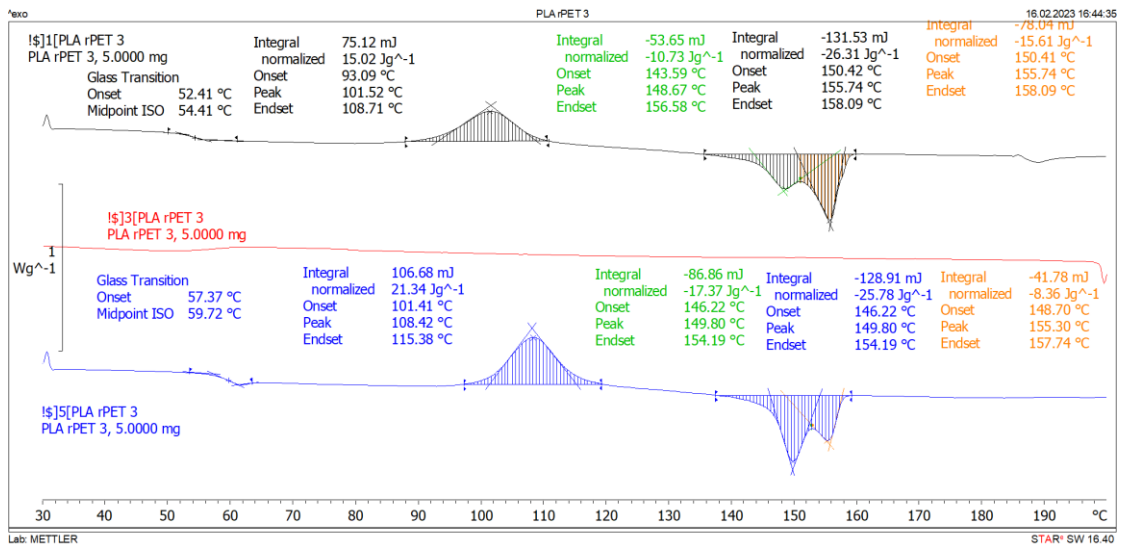


รูปที่ 61 DSC thermogram ของถ้วยบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA CaCO<sub>3</sub> 5

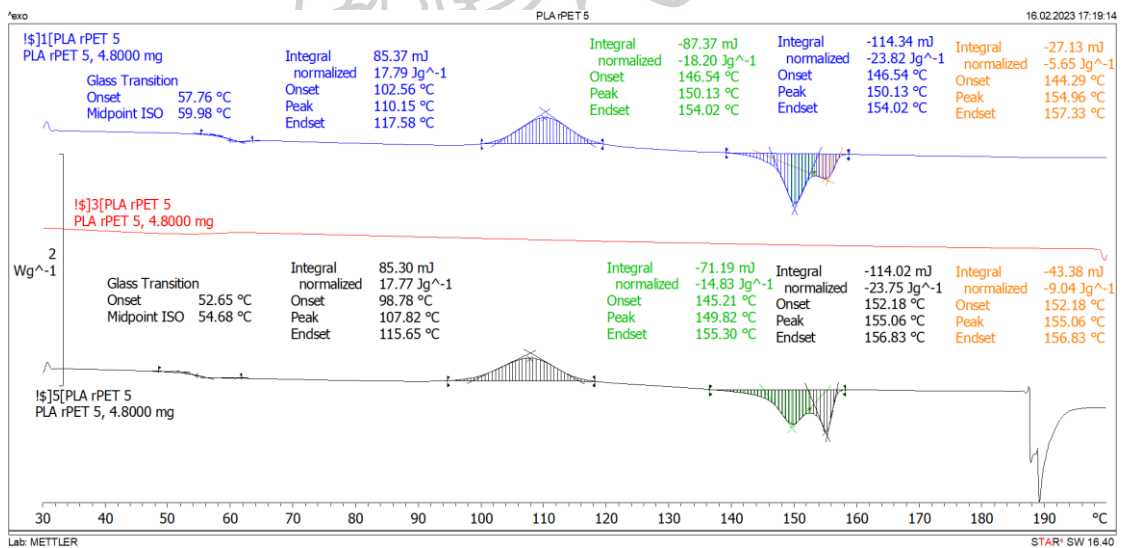


รูปที่ 62 DSC thermogram ของถ้วยบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA mPET 1

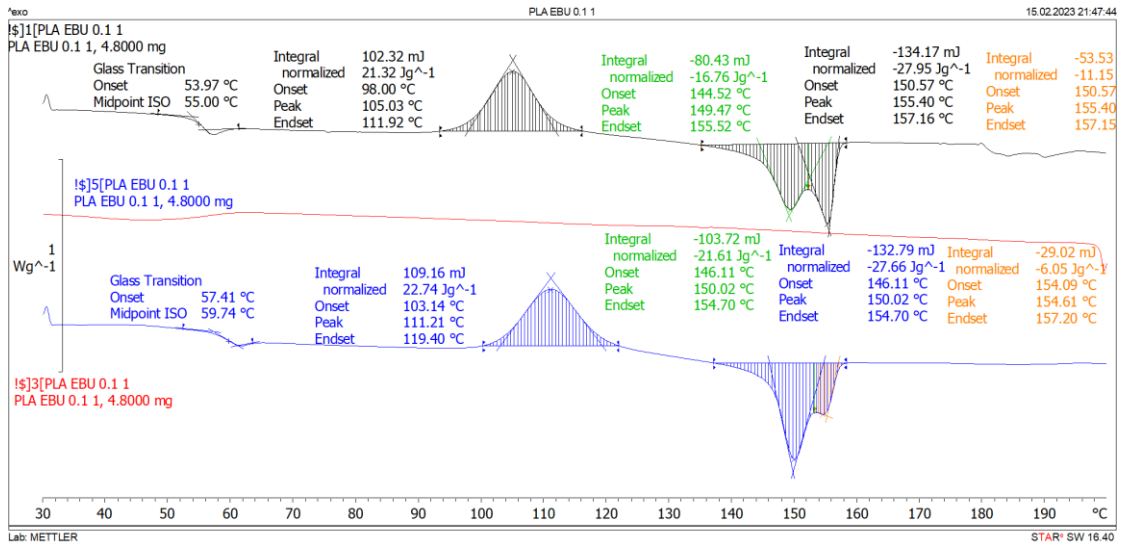




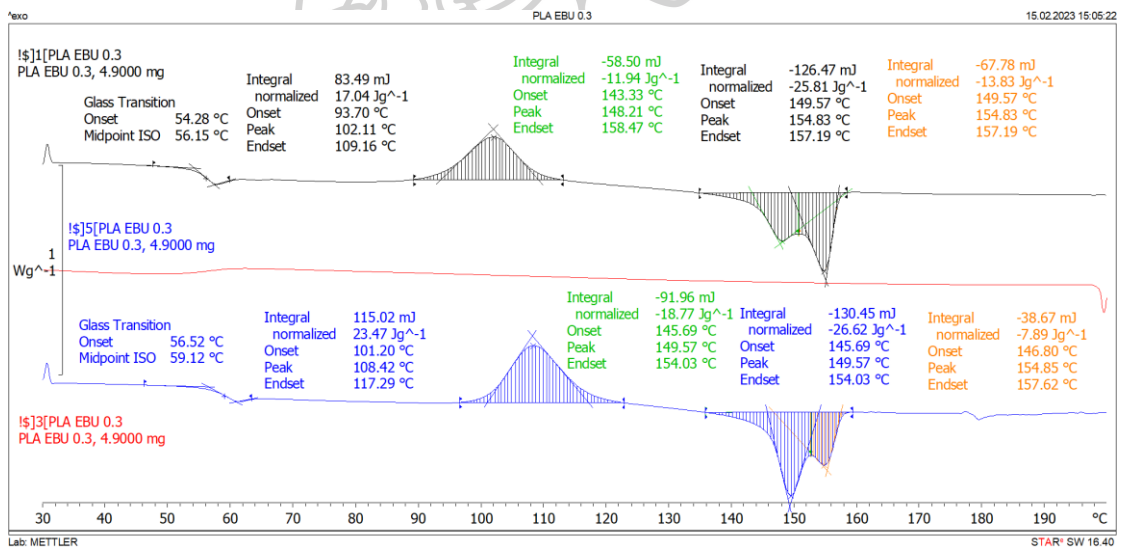
รูปที่ 63 DSC thermogram ของถ้วยบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA mPET 3



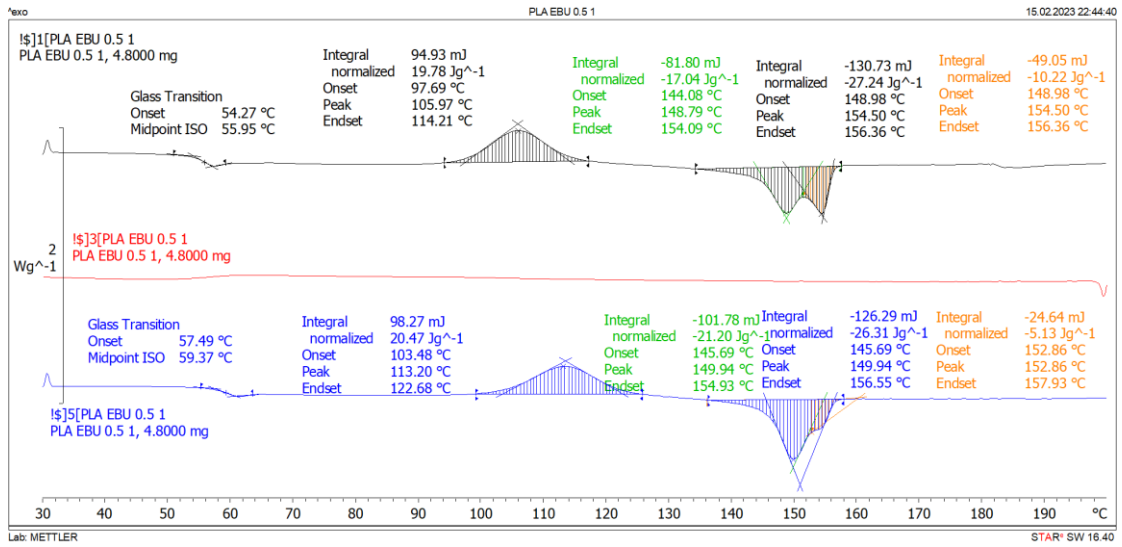
รูปที่ 64 DSC thermogram ของถ้วยบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA mPET 5



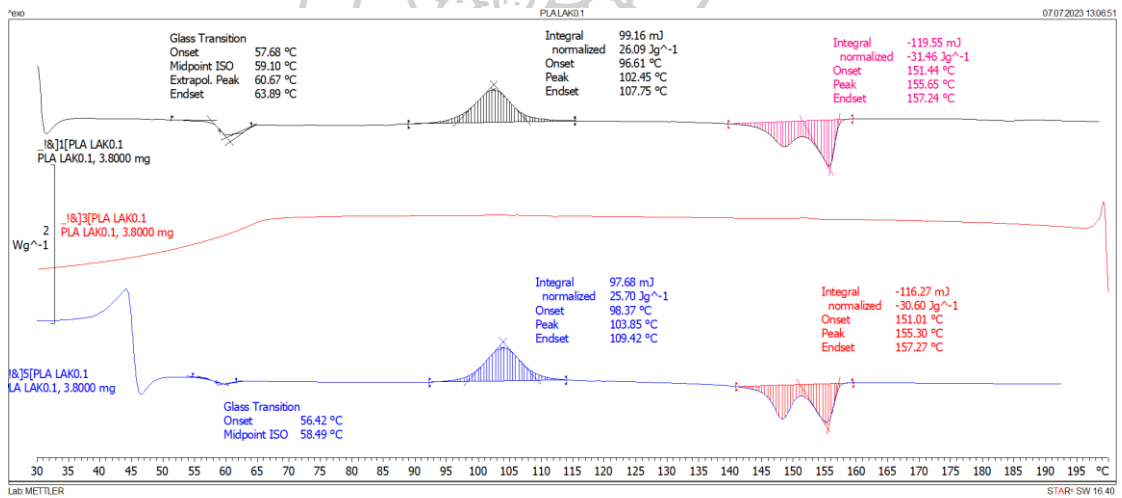
รูปที่ 65 DSC thermogram ของถ้วยบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA EBU 0.1



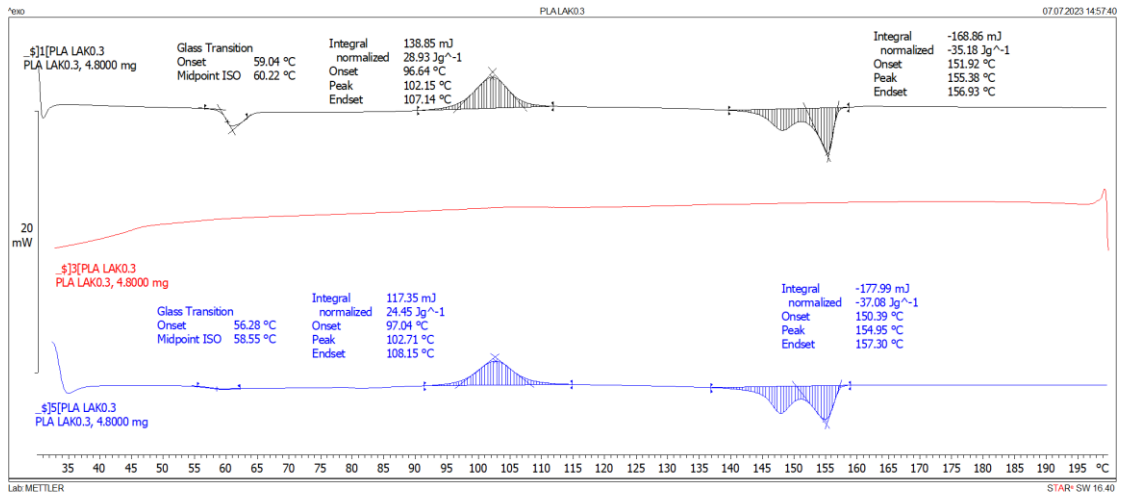
รูปที่ 66 DSC thermogram ของถ้วยบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA EBU 0.3



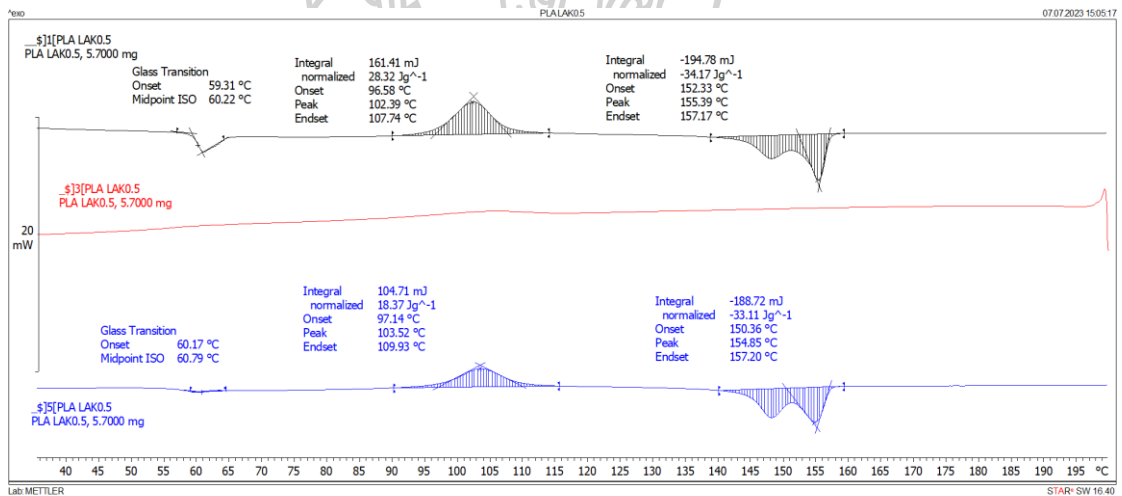
รูปที่ 67 DSC thermogram ของถ้วยบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA EBU 0.5



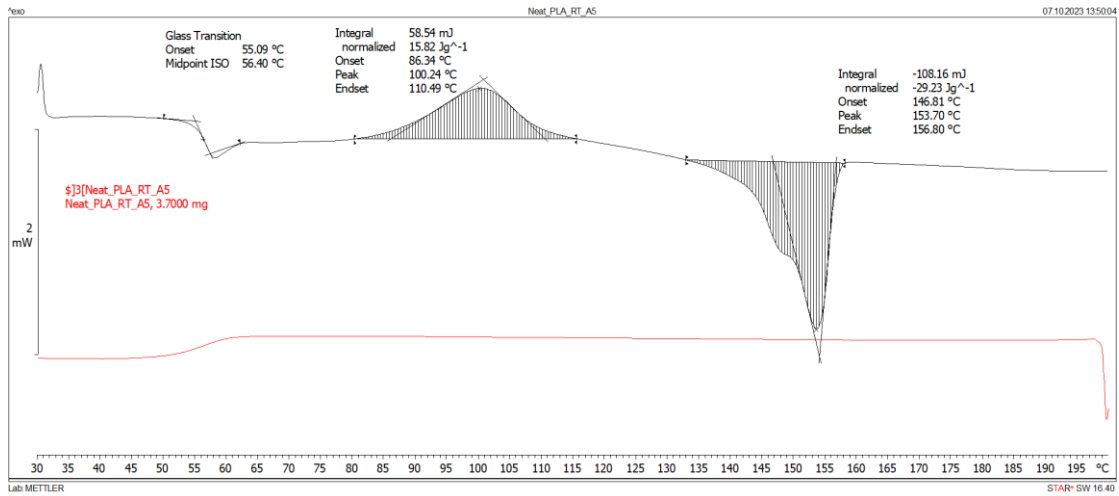
รูปที่ 68 DSC thermogram ของถ้วยบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA LAK 0.1



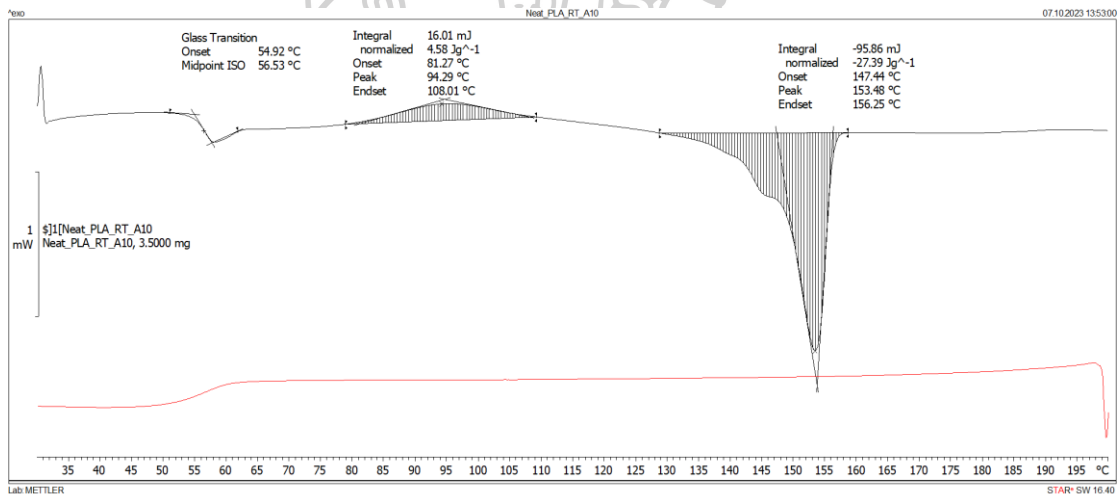
รูปที่ 69 DSC thermogram ของถ้วยบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA LAK 0.3



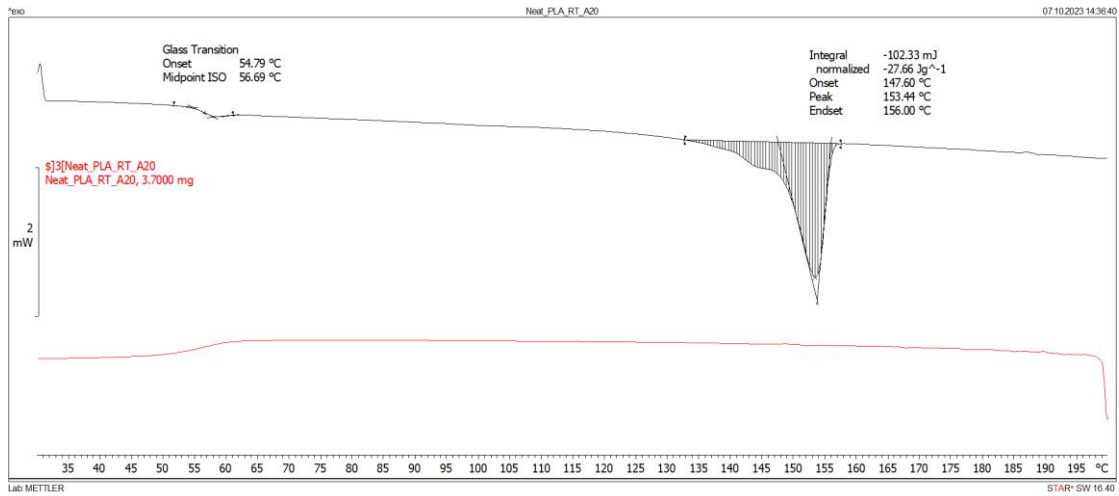
รูปที่ 70 DSC thermogram ของถ้วยบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการ Thermoforming ของ PLA LAK 0.5



รูปที่ 71 DSC thermogram ของถั่วยบรจุกณ์ท์หลังจากกระบวนการอบด้วยตู้อบมร้อน 5 นาที ของ Neat PLA A5



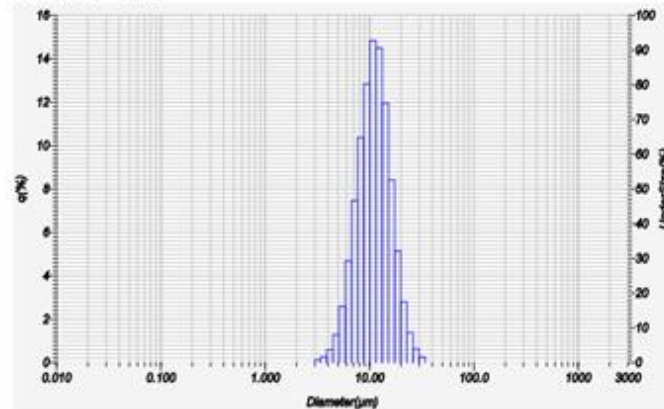
รูปที่ 72 DSC thermogram ของถั่วยบรจุกณ์ท์หลังจากกระบวนการอบด้วยตู้อบมร้อน 10 นาที ของ Neat PLA A5



รูปที่ 73 DSC thermogram ของถ้ายบรจุภัณฑ์หลังจากกระบวนการอบด้วยตู้อบร้อน 20 นาที ของ Neat PLA A20

### HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample Name	:		Median Size	:	11.04876(µm)
ID#	:	20090206041120	Mean Size	:	11.72752(µm)
Data Name	:	Clay 20 A 3	Std.Dev.	:	4.41996(µm)
Transmittance(R)	:	88.8(%)	Geo.Mean Size	:	10.9571(µm)
Transmittance(B)	:	89.8(%)	Geo.Std.Dev.	:	1.4488(µm)
Circulation Speed	:	OFF	Mode Size	:	10.8883(µm)
Agitation Speed	:	OFF	Span	:	OFF
Ultra Sonic	:	OFF	Diameter on Cumulative %	:	(2110.00 (%)- 6.7805(µm)
Form of Distribution	:	Auto		:	(9990.00 (%)- 17.4561(µm)
Distribution Base	:	Volume			

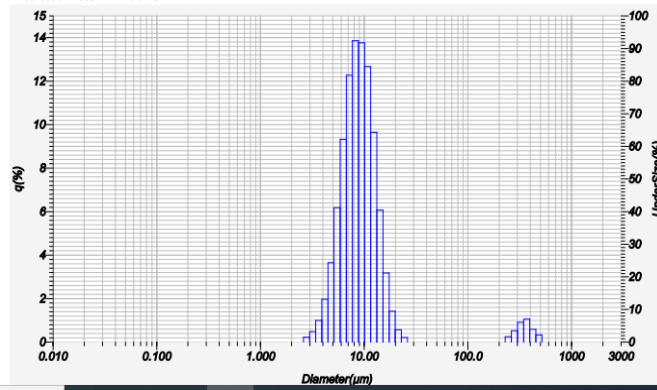


รูปที่ 74 ผลการทดลองจาก Laser Diffraction Particle Size Analyzer หาขนาดของอนุภาคเฉลี่ยของสารตัวเติม Talc

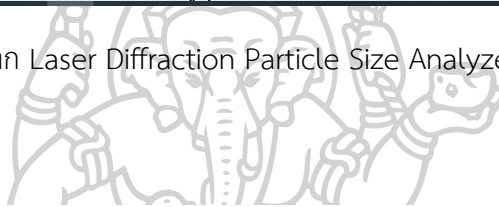


## HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample Name	:		Median Size	:	8.91127(๙m)
ID#	:	200902200115114	Mean Size	:	21.73603(๙m)
Data Name	:	CaCO3 3	Std.Dev	:	65.6892(๙m)
Transmittance(R)	:	75.4(%)	Geo.Mean Size	:	9.9197(๙m)
Transmittance(B)	:	76.0(%)	Geo.Std.Dev	:	2.1741(๙m)
Circulation Speed	:	OFF	Mode Size	:	8.2977(๙m)
Agitation Speed	:	OFF	Span	:	OFF
Ultra Sonic	:	OFF	Diameter on Cumulative %	:	(2)10.00 (%) - 5.4358(๙m)
Form of Distribution	:	Auto		:	(9)90.00 (%) - 14.8216(๙m)
Distribution Base	:	Volume		:	



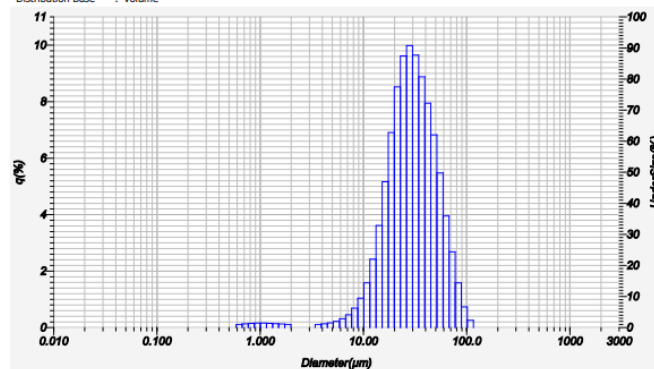
รูปที่ 75 ผลการทดลองจาก Laser Diffraction Particle Size Analyzer หาขนาดของอนุภาคเฉลี่ยของสารตัวเติม  $\text{CaCO}_3$



2009.02.20 00:32:30

## HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample Name	:		Median Size	:	29.07954(๙m)
ID#	:	200902200030177	Mean Size	:	32.96474(๙m)
Data Name	:	PET 01	Std.Dev	:	17.9272(๙m)
Transmittance(R)	:	99.2(%)	Geo.Mean Size	:	27.9163(๙m)
Transmittance(B)	:	99.4(%)	Geo.Std.Dev	:	1.9100(๙m)
Circulation Speed	:	OFF	Mode Size	:	27.9496(๙m)
Agitation Speed	:	OFF	Span	:	OFF
Ultra Sonic	:	OFF	Diameter on Cumulative %	:	(2)10.00 (%) - 14.1315(๙m)
Form of Distribution	:	Auto		:	(9)90.00 (%) - 57.7711(๙m)
Distribution Base	:	Volume		:	



รูปที่ 76 ผลการทดลองจาก Laser Diffraction Particle Size Analyzer หาขนาดของอนุภาคเฉลี่ยของสารตัวเติม mPET

### ภาคผนวก ข : การนำเสนอผลงาน

มีการนำเสนอผลงานวิชาการในงาน The 4th Materials Research Society of Thailand International Conference ( MRS-Thailand 2023 ) หัวข้อเรื่อง Effect of organic and inorganic fillers on mechanical property and microwave resistance of polylactic acid วันที่ 28 กุมภาพันธ์-3 มีนาคม 2566



8/19/23, 11:01 AM

mrsthailand2023.com/fullpaper-accept-letter.php

**Acceptance Letter****11 July 2023**Dear **Mr. Montree Udomchawee**

On behalf of The 4<sup>th</sup> of Materials Research Society of Thailand International Conference (MRS-Thailand 2023) organizing committee, I am pleased to inform you that your manuscript has been accepted for publication in the proceeding/journal designated below. The details of your manuscript are as follows:

Manuscript title: **Effect of organic and inorganic fillers on mechanical property and microwave irradiation of polylactic acid**

Proceeding/Journal : **E-Proceeding (Online Version, Accepted with no limit in number from all symposia)**

Please kindly be reminded that your accepted manuscript will be transferred to the production department of the respective proceeding/journal. The publication date is estimated to be around December 2023 but the actual date will depend on the processing schedule of each proceeding/journal.

Sincerely yours,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Siriporn Jungsuttiwong'.

(Prof. Dr. Siriporn Jungsuttiwong)  
Chair of Organizing Committee, MRS – Thailand 2023

Sincerely yours,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Santi Maensiri'.

(Prof. Dr. Santi Maensiri, Ph.D.)  
President  
Materials Research Society of Thailand



## Effect of organic and inorganic fillers on mechanical property and microwave resistance of polylactic acid

Montree Udomchawee<sup>1,3,\*</sup>, Saroj Pullteap<sup>2</sup>, Manus Seadan<sup>3</sup>, Supakij Suttiruengwong<sup>1,3,\*</sup>

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

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Sanamchandra Palace Campus, Nakhon Pathom 73000, Thailand,

<sup>3</sup>Sustainable Materials Laboratory, Silpakorn University, Sanamchandra Palace, Nakhon Pathom 73000, Thailand

\*Corresponding Author's E-mail: Udomchawee\_m@su.ac.th, suttiruengwong\_s@su.ac.th

### Abstract

Poly(lactic acid) (PLA) is a biodegradable aliphatic polyester that is widely commercialized today. Although it has good mechanical properties and can be durable in some applications, the resistance to a higher temperature than 60 °C is a major drawback. In terms of the food packaging application, the polymers may undergo the series of cooling and heating or microwave irradiation. In this work, Polylactide acid (PLA LX175) was added with organic and inorganic fillers, such as Talcum powder (Talc), Calcium Carbonate powder (CaCO<sub>3</sub>), and micronized Polyethylene Terephthalate (mPET) at 5 phr in an internal mixer with the rotor speed of 60 rpm and 190 °C for 10 min. The synthesized nucleating agent was also used. The samples were then compression-molded for tensile testing and morphological observations using SEM. The surface temperature of polymer composites after exposure to microwave radiation at 600 and 800 W for 3.5, 4, and 5 min. were also investigated by thermal imaging cameras and non-contact infrared (IR) thermometers. The results showed that Young's modulus and tensile strength were increased, while elongation at break decreased upon increasing the amount of fillers as a result of the reinforcement of the fillers. The morphological properties revealed that all types of fillers exhibited good dispersion for the small amounts of fillers whereas the higher amount of fillers led to the agglomeration in PLA matrix. The surface temperature of PLA trays after exposure to microwave irradiation was found to increase with increasing heating time and microwave power for all fillers and neat PLA. The power of 600 W for 4 min found that causing highest temperature. PLA trays with different fillers filled with olive oil tested in this condition did not physically deform, similar addition of nucleating agent.

**Keywords:** Poly(lactic acid) (PLA), Microwave irradiation, Organic filler, Inorganic fillers, Glass transition temperature

### Introduction

There has been an increase in use of precooked foods, which are convenient and easy to prepare. The ready-to-eat meal is generally suitable for life in cities and even in the remote areas. Microwave heating used for precooked foods has many advantages, such as an easy-to-use, a fast acceleration rate and the ability to save time and energy. The packaging for such a precooked foods is used in large quantities, and most of the products are non-degradable. Thermoformed plastic trays are among the most common packaging used for microwave heating. Most of the thermoformed packaging is made from Polypropylene (PP), Polystyrene (PS), polyethylene terephthalate (PET), and Polymethyl methacrylate (PMMA), with PP being the most commonly used in microwave. PP does not well respond to microwave and does not deform when subjected to microwave heating.

Poly(lactic acid) (PLA) is a commercially available compostable biobased material that could become a material of choice due to its high strength and moderate barrier properties. Moreover, it is a



highly transparent and rigid material with a relatively low crystallization rate, which makes it a promising candidate for the fabrication of biaxially oriented films, thermoformed containers, and stretch-blown bottles [1, 2]. However, the range of applications of PLA is severely limited because of its high glass transition temperature (around 55–60 °C). The research has focused on the study of PLA crystallization improvement [3]. At temperatures higher than the glass transition temperature of PLA, only the PLA crystalline phase can confer useful mechanical properties, thus increasing the crystallization speed of PLA is desired [4]. In processes such as thermoforming molding, where the orientation is limited and the cooling rate is high, it is much more difficult to develop significant crystallinity, and thus formulation or process changes are required. In order to increase crystallinity, three main routes can be considered. The first one is to add a nucleating agent that will lower the surface free energy barrier towards nucleation and thus initiates crystallization at higher temperature upon cooling. A second possibility is to add a plasticizer, which will increase the polymer chain mobility and enhance the crystallization rate by reducing the energy required during crystallization for the chain folding process. The third possibility is to tune the molding conditions, in particular molding temperature and cooling time.

Several potential nucleating agents have been examined in the literature such as talc, mica, kaolin, calcium carbonate etc. [13] Talc is a widely used nucleating agent. It was shown that talc nucleates the crystallization which polymers [3] through an epitaxial mechanism [6]. In the case of PLA, it was shown that the crystallization half-time can be reduced by more than one order of magnitude to less than 1 min when 1% talc is added [7]. Similarly, a strong increase in nucleation density with addition of talc was found in poly(L-lactide-co-meso lactide) [5]. This paper investigated the effect of Talc, CaCO<sub>3</sub>, and mPET on the crystalline content developed during heating and cooling in thermoforming process. The crystalline content and mechanical properties are determined using differential scanning calorimetry and universal testing machine. This information would be useful to better understand the effect of the nucleating agents on PLA and their manufacturing for possible applications.

## Experimental

### Materials and sample preparation

PLA extrusion grade (LX-175) consists of 96% L-isomer content and has a melt flow index of 11 g/10 min, which was kindly provided by Total Energies Corbion Co., Ltd. (Rayong, Thailand). Unsaturated N,N Ethylene bis(10-undecenamide) (EBU) was synthesized by our group [8]. The melting temperature and crystallization temperature of EBU were found to be 144.9 °C and 140 °C, respectively. Talcum powder (Talc) grade Jetfine 3 CA with the average particle size of 11±4 micron was purchased from Global Connections Public Company Limited, Calcium Carbonate powder (CaCO<sub>3</sub>) grade Ca 0303B with the average particle size of 10±5 micron was purchased from Chemipan Corporation Co., Ltd., micronized Polyethylene Terephthalate (mPET) with the average particle size of 29±17 micron was obtained from scrap in processing and supported by Excel Superpack Co., Ltd., Thailand.

### Sample Preparations

PLA resin and fillers were dried at 60 °C for 24 h and then blended with Talc, CaCO<sub>3</sub>, and mPET at 5 phr and blended with EBU at 0.5 phr with 0.1 phr of Perkadox in an internal mixer (MX105-D40L50, Charoentut Model, Charoentut, Co. Ltd., Samutprakarn, Thailand) at 190 °C and 60 rpm for 10 min. After mixing, PLA samples were compressed at 190 °C for 5 min. (preheat for 4 min and 1 min compression time).

### Scanning Electron Microscopy (SEM)

Morphology of cryo-fractured surface of PLA and PLA Talc, PLA CaCO<sub>3</sub>, PLA mPET, and PLA EBU was investigated by field emission scanning electron microscopy (FESEM) (MIRA3, TESCAN). A gold coating was applied on samples.

### Tensile Testing Tensile

Tensile testing of PLA and PLA Talc, PLA CaCO<sub>3</sub>, and PLA mPET at 5 phr and PLA EBU at 0.5 phr was carried out by using a Narin Instrument Thailand Model NRI-TS500-5B testing machine according to ASTM D638 Type V at 5 mm/min testing speed. Eight specimens of each sample were tested, and average values were reported.

### Thermoforming Process

The preparation of a trays prepared from PLA and PLA Talc, PLA CaCO<sub>3</sub>, PLA mPET, and PLA EBU sheet films was performed using a thermoforming machine. After that, it was heated to a temperature at rate of 50 °C/min and then decreased the temperature at an air cooling rate of 30 °C/min.

### Microwave heating

The trays were tested by a microwave model Samsung Microwave MS23F300EEK/ST at the power rate of 600 W, then addition water two-thirds of trays and testing for 3.5 min in microwave. For olive oil addition two-thirds of trays and testing for 3.5 min and 4 min in microwave and the both use infrared thermal camera (FLIR) was used to measure the highest and lowest temperature of trays.

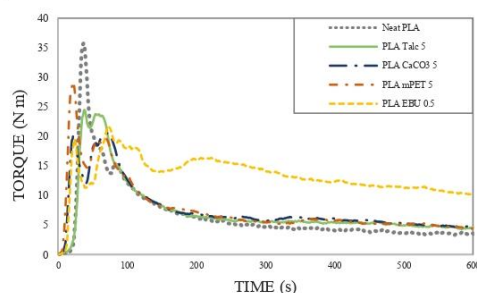
### Differential Scanning Calorimetry

DSC measurements were carried out using Mettler Toledo, DSC1 STAR instrument under an N<sub>2</sub> atmosphere. 5–10 mg of samples was used. In this study, there were two programs for measuring thermal characteristic and crystallization behaviors, respectively, for measuring the thermal characteristic of each sample. The samples were heated from 30 to 200 °C at a heating rate of 7 °C/min and held for 1 min to study the prior thermal history. The percent of crystallinity is evaluated by Eq. 1 [8]. The first heating scan of neat PLA and nucleated PLA was illustrated. The data of thermal characteristics including the glass transition temperature (T<sub>g</sub>), melting temperature (T<sub>m</sub>), and cold-crystallization temperature (T<sub>cc</sub>), as well as the enthalpy of melting (ΔH<sub>m</sub>) and cold crystallization (ΔH<sub>cc</sub>) ΔH<sub>m</sub><sup>0</sup> is the enthalpy of total crystal-line melting of PLA (93.7 J/g)

$$X_c(\%) = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0 \cdot \left(1 - \frac{\%wt \text{ filler}}{100}\right)} \cdot 100 \quad (1)$$

### Results and discussion

The torque curves of neat PLA and PLA Talc, PLA CaCO<sub>3</sub>, and PLA mPET at 5 phr and PLA EBU at 0.5 phr were in Fig. 1. The torque values of PLA increase slightly when adding 5 phr of Talc, CaCO<sub>3</sub>, or mPET. For the addition of EBU, peroxide was added to promote the free radical reaction of double bonds in EBU compounds, as demonstrated in the previous work [8,10]. The torque value increased as a result of a possible reaction between EBU and PLA [8], indicating an increase in melt viscosity. The unsaturated structure might have reacted with peroxide to generate a grafted PLA structure during the probable crosslinking reactions that occurred during the melt-blending [5]. When compared PLA Talc, PLA CaCO<sub>3</sub> and PLA mPET with PLA EBU, thus PLA EBU exhibited the higher end torque value.

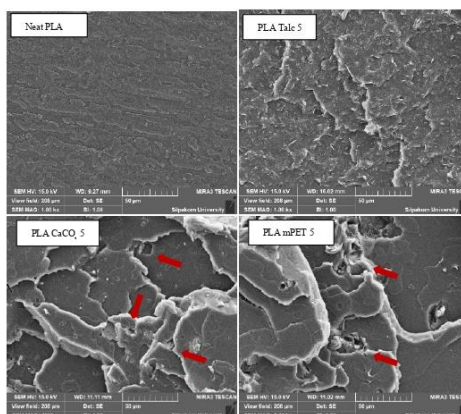


**Figure 1** Torque curves of PLA with and without fillers in an internal mixer with the rotor speed of 60 rpm and 190 °C for 10 min.



### Morphology

Fig.2 showed the SEM micrographs of neat PLA and PLA Talc, PLA CaCO<sub>3</sub> and PLA mPET fillers. Neat PLA micrograph showed clear and smooth surface corresponding to the brittle fracture of PLA. When Talc, CaCO<sub>3</sub>, and mPET were added into PLA, the micrographs represented rougher surface. The distribution of Talc were considered homogenous, as indicated in Fig.2. However, the result showed that there were small gaps adjacent to CaCO<sub>3</sub> and mPET particles, as displayed by arrows, indicating the agglomeration and poor interfacial adhesion between fillers. Piekarska et al. also reported that when increasing the filler contents, the particle sizes of fillers increased due to agglomeration [14].



**Figure. 2** SEM micrographs of cryo-fractured surface of PLA with and without fillers.

### Mechanical properties

As shown in Table 1, Young's modulus improved when adding Talc, CaCO<sub>3</sub>, and mPET at 5 phr. The Young's modulus of PLA Talc, PLA CaCO<sub>3</sub> and PLA mPET was 1,765±27, 1,668±30 and 1,668±57 MPa, respectively whereas neat PLA had the Young's modulus of 1,580±25 MPa. The improvement in Young's modulus was attributed to the ability of stress transfer from the matrix to the fillers [11]. Moreover, since Talc, CaCO<sub>3</sub>, and mPET are rigid particles, they can restrict the polymer chain movement and increase the stiffness of the composite. Similar results were reported by Khankrua, R, et al. [11]. There was a linear relationship between the increase in Talc, CaCO<sub>3</sub>, and mPET contents and the increase in Young's modulus of the fillers. The addition of filler affects the strength of the composite material where there isn't deformation in the material and transfers force from PLA matrix to the filler, causing an increase in stress. The modulus increase should be attributed to the presence of inorganic fillers that restrict the movement of the polymer chains. Among the fillers, PLA EBU 0.5 exhibited Young's modulus at 1,616±41 MPa. There was no significant change compared to neat PLA.

It was also found that PLA Talc, PLA CaCO<sub>3</sub>, and PLA mPET at 5 phr showed an inconsistent change in tensile strength. The tensile strength fluctuated between 60±4, 55±3 and 70±3 MPa for the addition of Talc, CaCO<sub>3</sub>, and mPET respectively. The highest tensile strength was recorded for mPET 5 phr content, where the tensile strength increased for 5 phr mPET as compared to neat PLA. However, with the addition of CaCO<sub>3</sub>, the tensile strength was still lower as compared to neat PLA at 60 ± 5 MPa. The reduction in tensile strength may be resulted from the poor interfacial adhesion between CaCO<sub>3</sub> and PLA matrix. Similar results were reported by Carmen, L. et al. [9]. Amongst the fillers loaded, PLA EBU has tensile strength at 59 ± 2 MPa. There was however no significant change when compared to neat PLA.

**Table 1** Summary of mechanical properties of neat PLA, PLA Talc, PLA CaCO<sub>3</sub>, and PLA mPET at 5 phr and PLA EBU at 0.5 phr

Samples	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
Neat PLA	1580 ± 25	60 ± 5	10 ± 2
PLA Talc 5	1765 ± 27	60 ± 4	6 ± 1
PLA CaCO <sub>3</sub> 5	1668 ± 30	55 ± 3	8 ± 3
PLA mPET 5	1668 ± 57	70 ± 3	7 ± 1
PLA EBU 0.5	1616 ± 41	59 ± 2	8 ± 2

According to Table 1, the addition of the fillers and nucleating agent in PLA reduced the elongation at break from 9.5% for neat PLA to 6%, 8%, 7%, and 8% for Talc, CaCO<sub>3</sub>, mPET and EBU. The deterioration in the elongation at break suggested that PLA with the addition of nucleating agents became more brittle with the addition of Talc, CaCO<sub>3</sub>, and mPET, where the filler acts as a stress concentrator and causes initial cracks that result in easier breakage of specimens. A previous study by Khuenkeao et al. [12] reported the similar findings where the incorporation of Talc, CaCO<sub>3</sub>, mPET became more brittle. The incorporation of Talc as rigid filler not just hindered the PLA molecular chain movement during stretching; it also acted as a stress concentrator, embrittling the matrix and causing the reduction in elongation at break.

#### Thermal Characteristics of PLA

Table 2 shows the thermal parameters from the first heating scan of all thermoformed samples. The addition of 5 phr Talc and CaCO<sub>3</sub> in PLA. A significant increase in the crystallinity percentage formed by nucleating agents from 5.7% of neat PLA to 16.9% and 10.5% with respect to Talc and CaCO<sub>3</sub>. Upon adding mPET, the crystallization percentage increased very little, implying the inefficient nucleating performance of mPET. For the addition of 0.5 phr EBU (peroxide was added to promote the free radical reaction of double bonds in EBU compounds) as demonstrated in previous work [8,10]. The chemical structure of EBU consists of two double bonds at its moiety. These functional groups could react with peroxide to form free radicals and form the polymerized EBU, grafted, or crosslinked structures of PLA. This structure allowed PLA to crystalline more predominately [8]. The degree of crystallinity of PLA was increased from 5.7 % for neat PLA to 10.1% for PLA/EBU0.5.

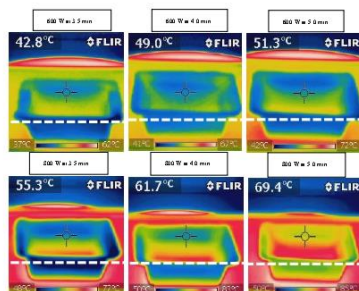
**Table 2** Thermal properties of first heating for PLA with and without fillers after thermoforming process.

Samples	T <sub>g</sub> (°C)	T <sub>cc</sub> (°C)	T <sub>m1</sub> (°C)	T <sub>m2</sub> (°C)	ΔH <sub>m</sub> (J/g)	ΔH <sub>cc</sub> (J/g)	%Xc (%)
Neat PLA	54.4	105.87	149.13	155.97	31.01	25.70	5.7
PLA Talc 5	59.3	98.93	148.55	155.04	25.53	8.93	16.9
PLA CaCO <sub>3</sub> 5	59.7	107.72	148.33	154.59	25.45	15.22	10.5
PLA mPET 5	59.9	110.15	150.13	154.96	23.82	17.79	6.1
PLA EBU 0.5	59.3	113.20	148.79	154.50	27.24	17.78	10.1

#### Effect of microwave irradiation

Fig. 3 shows that the temperature of PLA surface measured by FLIR for different heating powers of 600 and 800 W and the heating time of 3.5, 4.0, and 5.0 min. PLA responded to the microwave wave. With the surface temperature increased from 43 to 51 °C when heating at 600 W for 3.5 to 5 min respectively. The higher heating power of 800 W exhibited the similar trend. The surface trays temperature increased from 55 to 69 °C when heating from 3.5 min to 5 min. The trays

were still not deformed. However, when adding water and olive oil to the trays, it was found that the trays underwent a severe deformation as shown in Fig. 4 and Fig. 5.

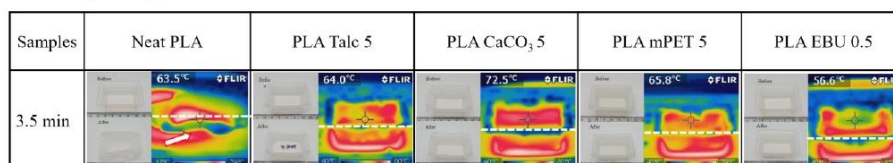


**Figure 3** FLIR images evolution of PLA trays tested in microwave with the heating power of 600 and 800 W for 3.5, 4.0 and 5.0 min.

When testing the tray made from PLA Talc, PLA CaCO<sub>3</sub>, PLA mPET, and PLA EBU in the microwave at 600 W for 3.5 min., trays filled with water and olive oil responded to the microwave wave. The surface temperature increased as presented in Table 2. It displayed the lowest and highest temperatures of trays filled with water and olive oil. For the trays filled with either water or olive oil tested at the heating power of 600 W for 3.5 min, the surface temperature of all samples reached almost 80 °C. However, PLA trays with different fillers filled with water and olive oil tested in this condition did not physically deform (see Fig. 4 and Fig. 5) whereas neat PLA tray was severely damaged.

**Table 2** Highest and lowest temperature of trays filled with water or olive oil tested in the microwave at the heating power of 600 W for 3.5 and 4 min.

Sample Trays	T <sub>Low</sub> (°C)	T <sub>High</sub> (°C)
Filled with water 3.5 min		
Neat PLA	37	79
PLA Talc 5	40	80
PLA CaCO <sub>3</sub> 5	40	80
PLA mPET 5	40	79
PLA EBU 0.5	40	77
Filled with olive oil 3.5 min		
Neat PLA	43	88
PLA Talc 5	41	83
PLA CaCO <sub>3</sub> 5	43	80
PLA mPET 5	42	84
PLA EBU 0.5	43	83
Filled with olive oil 4 min		
Neat PLA	36	122
PLA Talc 5	44	131
PLA CaCO <sub>3</sub> 5	43	128
PLA mPET 5	45	135
PLA EBU 0.5	43	127



**Figure 4** FLIR images of microwave heating of PLA Talc, PLA CaCO<sub>3</sub>, PLA mPET and PLA EBU trays filled with water tested in the microwave heating power 600 W for 3.5 min.

When increasing the time to 4 min. the trays filled with olive oil tested at the heating power of 600 W, the surface temperature of all samples reached almost 135 °C. PLA trays with different fillers filled with olive oil tested in this condition did not physically deform (see Fig. 5) whereas neat PLA tray was severely damaged. For the trays filled with olive oil, when testing at the heating power more than 600 W or the heating time longer than 4 min., the surface temperature of all samples increased, and the trays was severely deformed.





**Figure. 5** Microwave heating of PLA Talc, PLA CaCO<sub>3</sub>, PLA mPET and PLA EBU trays filled with olive oil tested in the microwave heating power 600 W for 3.5 and 4 min.

### Conclusions

In this work, PLA with different fillers were prepared by melt-blending. The properties such as mechanical, thermal, and morphology were investigated in order to understand the relationship between these properties and microwave irradiation. Young's modulus of all samples improved when adding Talc, CaCO<sub>3</sub>, and mPET at 5 phr whereas the addition of PLA with EBU 0.5 phr did not show the significant change in the modulus when compared to neat PLA. The tensile strength of PLA with mPET 5 phr was 70 MPa except PLA filled with CaCO<sub>3</sub>, where the tensile strength was lower than neat PLA due to the poor interfacial adhesion between CaCO<sub>3</sub> and PLA matrix. Elongation at break of all samples decreased or the samples were more brittle. DSC results revealed that the addition of Talc 5 phr could improve the crystallinity percentage to 16.9%. When tray samples were exposed to microwave irradiation, the surface temperature of PLA trays increased with increasing the heating time and microwave power. Neat PLA tray was severely deformed when addition the water and olive oil in the trays at the heating power of 600 W for 3.5 min. The highest temperature when using power of 600 W for 4 min was 135 °C for the trays filled with olive oil. The addition of all fillers at 5 phr (Talc, CaCO<sub>3</sub>, and mPET) and EBU at 0.5 phr (EBU) could provide the sufficient properties for PLA trays tested at 600 W for 4 min.

### Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University. The authors would like to thank Total Energies Corbion Co., Ltd. For providing PLA, and Excel Superpack Co., Ltd. for supplying mPET material.

### References

- [1] Shen L., H. J., Patel M. K. (2009). "Product overview and market projection of emerging biobased plastics:PRO-BIP 2009." PRO-BIP Final Report 2009.
- [2] Lim, L. T., et al. (2008). "Processing technologies for poly(lactic acid)." *Progress in Polymer Science* 33(8): 820-852.
- [3] Li, H. and M. A. Huneault (2007). "Effect of nucleation and plasticization on the crystallization of poly(lactic acid)." *Polymer* 48(23): 6855-6866.
- [4] Bigg D. M.: Controlling the performance and rate of degradation of polylactide copolymers. in 'Annual Technical Conference – ANTEC 2003 Conference Proceedings, Nashville, USA', Vol 3, 2816–2822 (2003)
- [5] Battagazzore, D., et al. (2011). "Crystallization kinetics of poly(lactic acid)-talc composites." *Express Polymer Letters* 5(10): 849-858.



- [6] Haubruge H. G., D. R., Jonas A. M., Legras R., Wittmann J. C., Lotz B (2003). "Epitaxial nucleation of poly (ethylene terephthalate) by talc: Structure at the lattice and lamellar scales." *Macromolecules*, (2003) 36: 2-10,1139.
- [7] Ke T., Sun X.: ." Melting behavior and crystallization kinetics of starch and poly(lactic acid) composites 89: 1203-1210.
- [8] Khwanpipat, T., et al. (2018). "Effect of PDLA and Amide Compounds as Mixed Nucleating Agents on Crystallization Behaviors of Poly (l-lactic Acid)." *Materials (Basel)* 11(7).
- [9] Lee, C., et al. (2020). "Talc filled polylactic-acid biobased polymer composites: tensile, thermal and morphological properties." *SN Applied Sciences* 2(3).
- [10] Jongpanya-Ngam, P., et al. (2022). "Effect of synthesized sulfonate derivatives as nucleating agents on crystallization behavior of poly(lactic acid)." *Des Monomers Polym* 25(1): 115-127.
- [11] Khankrua, R., et al. (2013). "Thermal and Mechanical Properties of Biodegradable Polyester/Silica Nanocomposites." *Energy Procedia* 34: 705-713.
- [12] Khuenkeao, T., et al. (2016). Thermal and mechanical properties of bioplastic poly(lactic acid) compounded with silicone rubber and talc. *AIP Conf Proc* 1713(1) , 080005.
- [13] Jain, S., et al. (2012). "Thermal, Mechanical and Rheological Behavior of Poly(lactic acid)/Talc Composites." *Journal of Polymers and the Environment* 20(4): 1027-1037.
- [14] Piekarska, K., et al. (2017). "The influence of matrix crystallinity, filler grain size and modification on properties of PLA/calcium carbonate composites." *Polymer Testing* 62: 203-209.



## รายการอ้างอิง

1. Phiriyawirut, M., et al., in Department of Tool and Materials Engineering Faculty of Engineering. 2016, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
2. ASHIM K. DATTA, P.M.D. Microwave and Radio Frequency Processing Reference Module in Food Science 2011 [cited 2011 2021].
3. Saengiet, B., et al., Response of Modified Poly(lactic acid)to Microwave Radiation. Key Engineering Materials II, 2012. 488-489.
4. Peelman, N., et al., Heat resistance of new biobased polymeric materials, focusing on starch, cellulose, PLA, and PHA. Journal of applied polymer science, 2015. 2305(Manufacturing of Advanced Biodegradable Polymeric Components).
5. Onyari, M. and S.J. Huang, Manufacturing routes for lactic acid based polymers. Vol. 193. 2003.
6. สรวารี, ร.อ., สารเติมแต่งพอลิเมอร์. Vol. 1. 2546, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
7. นันทธนานนท์, ภ., การปรับปรุงพอลิแลคติกแอซิดโดยใช้อะซิลาติกเอไมด์, in วิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ. 2556, มหาวิทยาลัยศิลปากร: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
8. Fellows, P., Dielectric, ohmic and infrared heating. "Food Processing Technology : Principles and Practice". 2000.
9. ประดิษฐ์ดวง, ส., การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและการฉายรังสีอาหาร. Vol. 173-195. 2543, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
10. Tábi, T., T. Agyeyeva, and J.G. Kovács, Improving the ductility and heat deflection temperature of injection molded Poly(lactic acid) products: A comprehensive review. Polymer Testing, 2021. 101.
11. Khwanpipat, T., M. Seadan, and S. Suttiruengwong, Effect of PDLA and Amide Compounds as Mixed Nucleating Agents on Crystallization Behaviors of Poly (L-lactic Acid). journal material, 2018. 2-10(1139).
12. Nagarajan, V., A.K. Mohanty, and M. Misra, Crystallization behavior and morphology of polylactic acid (PLA) with aromatic sulfonate derivative. Journal of Applied Polymer Science, 2016. 133(28).

13. Tashiro, K., et al., Crystal Structure of Poly(lactic acid) Stereocomplex: Random Packing Model of PDLA and PLLA Chains As Studied by X-ray Diffraction Analysis. *Macromolecules*, 2017. 50(20): p. 8048-8065.
14. Tsuji, H., Poly(lactide) Stereocomplexes: Formation, Structure, Properties, Degradation, and Applications. *Macromolecular Bioscience*, 2005. 5(7): p. 569-597.
15. Bassir, D., D. Gere, and T. Czigany, Recycling of Mixed Poly(Ethylene-terephthalate) and Poly(Lactic Acid). *MATEC Web of Conferences*, 2019. 253.
16. Borrell, A. and M.D. Salvador, Advanced Ceramic Materials Sintered by Microwave Technology, in *Sintering Technology - Method and Application*. 2018.
17. Bureepukdee, C. and S.S.a.M.S. , A study on reactive blending of (poly lactic acid). *Global Conference on Polymer and Composite Materials*, 2015. 012070.
18. Carmen Lee, M.M.P., Seong Chun Koay, Hui Leng Choo, Kim Yeow Tshai, Talc filled polylactic-acid biobased polymer composites: tensile, thermal and morphological properties. *SN Applied Sciences* (2020), 2020. 2:354.
19. D. Battezzore, S.B., A. Frache, Crystallization kinetics of poly(lactic acid)-talc composites. *eXPRESS Polymer Letters*, 2011. **Vol.5**: p. 849–858.
20. Gere, D. and T. Czigany, Future trends of plastic bottle recycling: Compatibilization of PET and PLA. *Polymer Testing*, 2020. 81.
21. H. G. Haubruge, R.D., A. M. Jonas, and R. Legras, Epitaxial Nucleation of Poly(ethylene terephthalate) by Talc: Structure at the Lattice and Lamellar Scales. *Macromolecules 2003 American Chemical Society*, 2003. 36: p. 4452–4456.
22. Hegde, V., Dielectric study of biodegradable and/or bio-based polymeric materials. *Hal Open science*, 2017.
23. Hongbo Li, M.A., Huneault, Effect of nucleation and plasticization on the crystallization of poly(lactic acid). *Polymer Science Direct*, 2007. 48: p. 6855e6866.
24. Jim Throne, C., *Applied Plastics Engineering Handbook*. 2011.
25. Kim, H.S., et al., Mechanical properties and thermal stability of poly(L-

- lactide)/calcium carbonate composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008. 109(5): p. 3087-3092.
26. Klaudia Piekarska, E.P., Joanna Bojda, The influence of matrix crystallinity, filler grain size and modification on properties of PLA/calcium carbonate composites. *Polymer Testing*, 2017: p. 203-209.
  27. Klinbun, W. and P. Rattanadecho, Numerical study of initially frozen rice congee with thin film resonators package in microwave domestic oven. *Journal of Food Process Engineering*, 2021. 45(1).
  28. KOLSTAD, J.J., Crystallization Kinetics of Poly(i-lactide-co-meso-lactid). *Journal of Applied Polymer Science*, 1996. 62: p. 1079–1091.
  29. L.-T. Lima, R.A.M.R., Processing technologies for poly(lactic acid). *Progress in Polymer Science*, 2008: p. 820–852.
  30. Lee, C., et al., Talc filled polylactic-acid biobased polymer composites: tensile, thermal and morphological properties. *SN Applied Sciences*, 2020. 2(3).
  31. Lee, R.E., et al., Thermoforming of Polylactic Acid Foam Sheets: Crystallization Behaviors and Thermal Stability. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016. 55(3): p. 560-567.
  32. Leite, W.O., et al., Vacuum Thermoforming Process: An Approach to Modeling and Optimization Using Artificial Neural Networks. *Polymers (Basel)*, 2018. 10(2).
  33. Li Shen, J.H., Martin K. Patel, Product overview and market projection of emerging bio-based plastics PRO-BIP 2009 European Polysaccharide Network of Excellence and European Bioplastics, 2009.
  34. Pasawat Jongpanya-Ngam, R.K., Manus Seadan , Supakij Suttiruengwong, Effect of synthesized sulfonate derivatives as nucleating agents on crystallization behavior of poly(lactic acid). *DESIGNED MONOMERS AND POLYMERS*, 2022. 25: p. 115–127.
  35. Rattikarn Khankrua, S.P.-A.b., Hamada Hiroyuki ,Supakij Suttiruengwong, Thermal and Mechanical Properties of Biodegradable polyester/silica Nanocomposites. *Eco-Energy and Materials Science and Engineering*, 2013: p. 705 – 713.
  36. Rattikarn Naimlang, S.B., Koosomsuan Wasin, Paungprasert Phassakarn, and S.M.

- Khankrua Sumonman, Suttiruengwong Supakij, Response of Modified Poly(lactic acid) to Microwave Radiation. *Advanced Materials Research*, 2012. 488-489: p. 1393-1397.
37. Riley, A., *Plastics manufacturing processes for packaging materials*, in *Packaging Technology*. 2012. p. 310-360.
  38. Sabzi, M., et al., PLA/sepiolite and PLA/calcium carbonate nanocomposites: A comparison study. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012. 129(4): p. 1734-1744.
  39. Salazar, H., P.M.M. , C. M. Costa<sup>1</sup> , and S.L.-M. , Dielectric analysis of different natural and synthetic polymers types. 2018.
  40. Shi, X., et al., Comparison of Precipitated Calcium Carbonate/Poly(lactic acid) and Halloysite/Poly(lactic acid) Nanocomposites. *Journal of Nanomaterials*, 2015. 2015: p. 1-11.
  41. Shikha Jain, M.M., Amar K. Mohanty, Anup K. Ghosh, Thermal, Mechanical and Rheological Behavior of Poly(lactic acid)/Talc Composites. *J Polym Environ* 2012, 2012. 20: p. 1027–1037.
  42. Thanawat Khwanpipat, M.S., Supakij Suttiruengwong, Effect of PDLA and Amide Compounds as Mixed Nucleating Agents on Crystallization Behaviors of Poly (L-lactic Acid). *Journal of Applied Polymer Science*, 2018. 11: p. 2-10.
  43. Thidarat Khuenkeaoa, N.P., Sirijutaratana Covavisaruch, Thermal and mechanical properties of bioplastic poly(lactic acid) compounded with silicone rubber and talc. *AIP Conference Proceedings* 1713, 2016. 080005: p. 1-5.
  44. Tianyi Ke, X.S., Melting Behavior and Crystallization Kinetics of Starch and Poly(lactic acid) Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2003. 89: p. 1203–1210.
  45. Wieme, T., et al., Effect of Matrix and Graphite Filler on Thermal Conductivity of Industrially Feasible Injection Molded Thermoplastic Composites. *Polymers (Basel)*, 2019. 11(1).
  46. Yu, F., et al., Effects of talc on the mechanical and thermal properties of poly(lactide). *Journal of Applied Polymer Science*, 2012. 125(S2).
  47. Yu, W., et al., Melt crystallization of PLA/Talc in fused filament fabrication.

Materials & Design, 2019. 182.

48. Zhang, H., Microwave packaging for food products. January 2017.

49. กระทรวงอุตสาหกรรม, กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สำหรับภาชนะพลาสติกบรรจุอาหารสำหรับเตาไมโครเวฟ. มาตรฐานเลขที่ มอก. 2493, 2554(เล่ม 1 ).







## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	มนตรี อุดมฉวี
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต(วศ.บ.) ปีโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผลงานตีพิมพ์	Montree Udomchawee,Saraj Pullteap, Manus Seadan,Supakij Suttiruengwong "Effect of organic and inorganic fillers on mechanical property and microwave resistance of polylactic acid" The 4th of Material Research Society of Thailand Inthernational Conference (MRS-Thailand 2023)
รางวัลที่ได้รับ	ได้รับรางวัลชนะเลิศอันดับ 1 ในโครงการ Bioplastics Innovation Contest 2017 ผลงานด้านการวิจัยและพัฒนาด้านพลาสติกชีวภาพที่ได้รับคือ รางวัลชนะเลิศ นวัตกรรมแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19 สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เป็นตัวแทนประเทศไทยโดยร่วมกับ สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ และ สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (NIA) เข้าร่วมแข่งขันในงาน AsianInvent Singapore (AiSG) 2020 และได้รับรางวัลชนะเลิศระดับเหรียญทอง Gold Award ได้รับรางวัลชนะเลิศ “โครงการประกวดบรรจุภัณฑ์ทดแทนถุงเพาะชำกล้าไม้ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม” Bio Plus Nursery (ผลิตภัณฑ์ถุงเพาะชำย่อยสลายได้ทางชีวภาพ) และโล่รางวัล จากรัฐมนตรีกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จัดโดยกรมป่าไม้ ได้รับรางวัลชนะเลิศแผนธุรกิจ “ สุดยอด GSB Change Maker 2022 “ ในโครงการประกวดแผนธุรกิจระดับ SMEs / SME Startup ไทย จัดขึ้นโดยธนาคารออมสิน