

การเสื่อมสภาพของพลาสติกบรรจุภัณฑ์สำหรับ  
อาหารสำเร็จรูปแช่แข็งภายใต้ความร้อนจากไมโครเวฟ

DEGRADATION OF PLASTICS FOR FROZEN FOOD  
PACKAGING UNDER THE MICROWAVE HEATING



นางสาวกัญญาภรณ์	มีชัย
นางสาวญาณนี	ใจจิต
นายณัฐเมธี	ตุ้จินดา

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม  
ภาควิชาเคมีคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

การเสื่อมสภาพของพลาสติกบรรจุภัณฑ์สำหรับ  
อาหารสำเร็จรูปแช่แข็งภายใต้ความร้อนจากไมโครเวฟ

DEGRADATION OF PLASTICS FOR FROZEN FOOD  
PACKAGING UNDER THE MICROWAVE HEATING



T148946

นางสาวกัญญาภรณ์

มีชัย

นางสาวญาณนี

ใจจิต

นายณัฐเมธี

ตุ้จินดา

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 148946  
วัน,เดือน,ปี... 18 S.ก. 2560

b. 12877400  
f. ....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

# DEGRADATION OF PLASTICS FOR FROZEN FOOD PACKAGING UNDER THE MICROWAVE HEATING



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Degradation of plastics for frozen food packaging under the microwave heating		
<b>Students</b>	Miss Kanyaporn Meechai	Student ID 55050885	
	Miss Yananee Jaijit	Student ID 55050911	
	Mr. Nutmethee Tuchinda	Student ID 55050918	
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (B.Sc Environmental Resouree Chemistry)		
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>Academic Year</b>	2015		
<b>Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Malinee Chaisupakitsin		

## ABSTRACT

This research was studied on degradation of Polypropylene (PP) frozen food packaging under microwave heating using water and vegetable oil as stimulant. Four types of PP was selected; Sample 1 (circular shape, colorless), Sample 2 (square shape, white), Sample 3 (circular shape, black color) and Sample 4 (square shape, colorless). All samples were treated by microwave oven at 3, 6 and 9 mins. pH values and conductivity of contact water were measured. Mechanical properties, morphology and functional groups analysis were investigated. The experimental results found that in case of water as stimulant, pH values were nearly stable. Conductivity increased with time. Mechanical properties such as tensile strength, Force at maximum and Young's modulus showed no significant different. However, the morphology from optical microscope found the increment of scratch. In case of vegetable oil as stimulant, only Sample 1 proved to be thermal resistance up to 3 mins. Before treat with microwave oven, vegetable oil decreased modulus of plastics by plasticization. Oil diffused into plastics when heated and dissolved plastics. It is

shown that mechanical properties for 4 types of plastic decreased after using plastics packaging several times.

**Keywords :** Polypropylene, Microwave



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้ และประสบการณ์ จนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย และอาจารย์กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ ช่วยตรวจทาน และแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร ที่ให้ความกรุณายืมเครื่อง Optika Microscopes เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติสัณฐานวิทยา ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ คุณกัญญา มงคลโกชน และคุณทองสุข ภู่อ้อย เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมี และพอลิเมอร์ที่คอยอำนวยความสะดวก ให้ความช่วยเหลือ และอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ รวมถึงคำแนะนำในการใช้เครื่องมือตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว รวมทั้งพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาเคมีเป็นอย่างยิ่งที่คอยให้ความช่วยเหลือ คอยไต่ถาม และให้กำลังใจตลอดมา

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ญ

<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	4
2.1 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP)	4
2.1.1 ความเป็นมา	4
2.1.2 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับพอลิโพรพิลีน	4
2.1.3 คุณสมบัติของพอลิโพรพิลีน	6
2.1.4 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิโพรพิลีน	8
2.1.5 ความปลอดภัย	8
2.1.6 การสลายตัวของพอลิโพรพิลีน	8
2.1.7 พอลิโพรพิลีนส่งผลกระทบต่อในด้านต่างๆ	9
2.2 ไมโครเวฟ (Microwave)	10
2.2.1 การทำงานของไมโครเวฟ	10
2.2.2 คลื่นไมโครเวฟ	10
2.2.3 การทำให้เกิดความร้อน	11
2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ	13
2.2.5 ส่วนประกอบภายในเตาไมโครเวฟ	15
2.2.6 ข้อได้เปรียบของการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	16
2.3 อินฟราเรด สเปกโตรสโกปี (Infrared Spectroscopy)	17

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 การวิเคราะห์ IR สเปกตรัม	18
2.3.2 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer	19
2.3.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ FT-IR	20
2.4 Thermogravimetric Analysis (TGA)	22
2.5 X-Ray Diffractometer (XRD)	24
2.6 การทดสอบแบบการดึง (Tensile Test)	26
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย</b>	<b>29</b>
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	29
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	30
3.3 การทดลอง	32
3.4 การทดสอบสมบัติ	35
3.4.1 หมูฟังกซ์ชัน	35
3.4.2 สมบัติเชิงคุณภาพ	36
3.4.3 สมบัติเชิงกล	36
3.4.4 สันฐานวิทยา	36
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง</b>	<b>37</b>
4.1 ผลของเวลาที่มีต่อน้ำกลั่นเมื่อได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ	37
4.1.1 ค่าพีเอช (pH) ของน้ำ	37
4.1.2 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ	39
4.1.3 ปริมาณตะกอน 2,4-Dinitrophenylhydrazone ในน้ำ	41
4.2 การวิเคราะห์หมูฟังกซ์ชัน	44
4.3 ผลของไมโครเวฟต่อโครงผลึกพลาสติก	47
4.4 การศึกษาสมบัติเชิงกล	52
4.4.1 ผลของน้ำที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพลาสติกพอลิพรพิลีน	52
4.4.2 ผลของน้ำมันที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพลาสติกพอลิพรพิลีน	54
4.4.3 ผลของน้ำที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพลาสติกพอลิพรพิลีนเมื่อให้ความร้อนซ้ำทุก 3 นาที จำนวน 3 ครั้ง	56

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 สันฐานวิทยาของพลาสติกพอลิโพรพิลีน	57
<b>บทที่ 5</b> สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	61
5.1 สรุปผลการทดลอง	61
5.2 ข้อเสนอแนะ	62
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	63
ภาคผนวก	67
ภาคผนวก ก การทดสอบสมบัติพื้นฐานทางกายภาพ	68
ภาคผนวก ข การทดสอบสมบัติพื้นฐานทางความร้อน	75
ภาคผนวก ค การตรวจสอบสมบัติของน้ำกลั่น	78
ภาคผนวก ง การศึกษาสมบัติเชิงกล	84
ภาคผนวก จ กราฟมาตรฐานของพอลิโพรพิลีน	92
ภาคผนวก ฉ การเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า(วัตต์) เป็น พลังงาน(BTU)	94

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติบางประการของพอลิโพรพิลีนเชิงพาณิชย์	7
2.2 การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในกระบวนการแปรรูปอาหาร	13
2.3 ความสัมพันธ์ของหมู่ฟังก์ชันบางหมู่กับตำแหน่งเลขคลื่นที่พบ	18
3.1 ข้อมูลเครื่องมือไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง	32
4.1 น้ำหนักตะกอน 2,4-Dinitrophenylhydrazone ที่เวลาต่างๆกันของแต่ละตัวอย่าง	42
4.2 ปริมาณตะกอน 2,4-Dinitrophenylhydrazone ในน้ำเมื่อให้ความร้อนซ้ำ	43
ก-1 น้ำหนักของ Sample 1	68
ก-2 ความสูงของ Sample 1	68
ก-3 เส้นผ่านศูนย์กลางขอบภาชนะของ Sample 1	69
ก-4 เส้นผ่านศูนย์กลางก้นภาชนะของ Sample 1	69
ก-5 น้ำหนักของ Sample 2	69
ก-6 ความสูงของ Sample 2	70
ก-7 ความกว้างและความยาวขอบด้านนอกของ Sample 2	70
ก-8 ความกว้างและความยาวขอบด้านในของ Sample 2	70
ก-9 ความกว้างและความยาวก้นภาชนะของ Sample 2	71
ก-10 น้ำหนักของ Sample 3	71
ก-11 ความสูงของ Sample 3	71
ก-12 เส้นผ่านศูนย์กลางขอบภาชนะของ Sample 3	72
ก-13 เส้นผ่านศูนย์กลางก้นภาชนะของ Sample 3	72
ก-14 น้ำหนักของ Sample 4	72
ก-15 ความสูงของ Sample 4	73
ก-16 ความกว้างและความยาวขอบด้านนอกของ Sample 4	73
ก-17 ความกว้างและความยาวขอบด้านในของ Sample 4	73
ก-18 ความกว้างและความยาวก้นภาชนะของ Sample 4	74
ค-1 ค่าพีเอชของน้ำกับเวลาในการอุ่นพลาสติกพอลิโพรพิลีน	78
ค-2 ค่าพีเอชของน้ำกับจำนวนครั้งที่ใช้พลาสติกอุ่นซ้ำๆ	79
ค-3 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกับเวลาในการอุ่นพลาสติกพอลิโพรพิลีน	80
ค-4 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกับจำนวนครั้งที่ใช้พลาสติกอุ่นซ้ำๆ	81
ค-5 น้ำหนักตะกอน 2,4-Dinitrophenylhydrazone ที่เวลาต่างๆกัน	82
ค-6 ปริมาณตะกอน 2,4-Dinitrophenylhydrazone เมื่อให้ความร้อนซ้ำๆ	83

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง-1 Sample 1 ผลค่าแรงดึงสูงสุดและค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีน	84
ง-2 Sample 1 ผลค่าความหนา และค่ามอดูลัสของพลาสติกพอลิโพรพิลีน	84
ง-3 Sample 2 ผลค่าแรงดึงสูงสุด และค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีน	85
ง-4 Sample 2 ผลค่าความหนา และค่ามอดูลัสของพลาสติกพอลิโพรพิลีน	85
ง-5 Sample 3 ผลค่าแรงดึงสูงสุด และค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีน	86
ง-6 Sample 3 ผลค่าความหนา และค่ามอดูลัสของพลาสติกพอลิโพรพิลีน	86
ง-7 Sample 4 ผลค่าแรงดึงสูงสุด และค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีน	87
ง-8 Sample 4 ผลค่าความหนา และค่ามอดูลัสของพลาสติกพอลิโพรพิลีน	87
ง-9 Sample 1 ผลค่าแรงดึงสูงสุดและค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีน	87
ง-10 Sample 1 ผลค่าความหนา และค่ามอดูลัสของพลาสติกพอลิโพรพิลีน	88
ง-11 Sample 2 ผลค่าแรงดึงสูงสุดและค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีน	88
ง-12 Sample 2 ผลค่าความหนา และค่ามอดูลัสของพลาสติกพอลิโพรพิลีน	88
ง-13 Sample 3 ผลค่าแรงดึงสูงสุดและค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีน	88
ง-14 Sample 3 ผลค่าความหนา และค่ามอดูลัสของพลาสติกพอลิโพรพิลีน	89
ง-15 Sample 4 ผลค่าแรงดึงสูงสุดและค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีน	89
ง-16 Sample 4 ผลค่าความหนา และค่ามอดูลัสของพลาสติกพอลิโพรพิลีน	89
ง-17 ให้ความร้อนซ้ำทุก 3 นาที จำนวน 3 ครั้ง ผลค่าแรงดึงสูงสุดและ ค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีน	90
ง-18 ให้ความร้อนซ้ำทุก 3 นาที จำนวน 3 ครั้ง ผลค่าความหนา และค่ามอดูลัส ของพลาสติกพอลิโพรพิลีน	90
ฉ-1 พลังงานความร้อนจากการได้รับความร้อนด้วยไมโครเวฟ	94

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของพอลิโพรพิลีน	4
2.2 โครงสร้างไอโซเมอร์ของ iPP, sPP และaPP	5
2.3 สัญลักษณ์การรีไซเคิลพลาสติกของพอลิโพรพิลีน	8
2.4 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิโพรพิลีน	9
2.5 แลบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	11
2.6 การเคลื่อนที่ของสารที่มีโมเลกุล 2 ชั้นภายในอาหารเมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟ	12
2.7 ส่วนประกอบภายในเตาไมโครเวฟ	15
2.8 หลักการทำงานของเครื่องFT-IR Spectrophotometer	19
2.9 เครื่องFT-IR Spectrophotometer	20
2.10 ส่วนประกอบในการทำ Nujol mull	21
2.11 ส่วนประกอบในการทำ KBr disc	21
2.12 การเตรียมสารตัวอย่างของเหลวโดยเตรียมเป็น Thin-film	22
2.13 เซลล์สารละลายสำหรับสารตัวอย่างของเหลว	22
2.14 เครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA)	23
2.15 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก	24
2.16 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)	25
2.17 เครื่อง Tensile Machine	26
3.1 พลาสติกSample 1	29
3.2 พลาสติกSample 2	29
3.3 พลาสติกSample 3	29
3.4 พลาสติกSample 4	29
3.5 เครื่องไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง	31
3.6 แผนการดำเนินการทดลอง	33
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของน้ำกับเวลา	38
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของน้ำกับจำนวนครั้งที่ใช้พลาสติกซ้ำๆ	38
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกับเวลา	39
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกับจำนวนครั้งที่ใช้ซ้ำๆ	40
4.5 ตะกอน 2,4-Dinitrophenylhydrazone สีส้ม ในน้ำ	41
4.6 สมการแสดงปฏิกิริยาระหว่างแอลดีไฮด์หรือคีโตนกับ2,4-Dinitrophenylhydrazine	42
4.7 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิโพรพิลีนเกิดเป็นสารประเภทแอลดีไฮด์หรือคีโตน	43

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 การวิเคราะห์FT-IR ของ Sample 1 สัมผัสน้ำให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 0 และ 6 นาที	44
4.9 การวิเคราะห์FT-IR ของ sample 2 สัมผัสน้ำให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 0 และ 6 นาที	45
4.10 การวิเคราะห์FT-IR ของ Sample 3 สัมผัสน้ำให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 0 และ 6 นาที	45
4.11 การวิเคราะห์FT-IR ของ Sample 4 สัมผัสน้ำให้ความร้อนด้วย	46
4.12 การวิเคราะห์FT-IR ของ Sample 1 สัมผัสน้ำมันให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 9 นาที	47
4.13 โครงผลึกของ Sample1 ที่สัมผัสน้ำได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ 0 นาที	48
4.14 โครงผลึกของ Sample1 ที่สัมผัสน้ำได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ 9 นาที	48
4.15 โครงผลึกของ Sample 2 ที่สัมผัสน้ำได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ 0 นาที	49
4.16 โครงผลึกของ Sample 2 ที่สัมผัสน้ำได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ 9 นาที	49
4.17 โครงผลึกของ Sample 1 ที่สัมผัสน้ำมันได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ 0 นาที	50
4.18 โครงผลึกของ Sample 1 ที่สัมผัสน้ำมันได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ 3 นาที	50
4.19 โครงผลึกของ Sample 2 ที่สัมผัสน้ำมันไม่ผ่านการอุ่นด้วยไมโครเวฟ	51
4.20 โครงผลึกของ Sample 3 ที่สัมผัสน้ำมันไม่ผ่านการอุ่นด้วยไมโครเวฟ	51
4.21 โครงผลึกของ Sample 4 ที่สัมผัสน้ำมันไม่ผ่านการอุ่นด้วยไมโครเวฟ	52
4.22 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีนกับเวลา	53
4.23 ความสัมพันธ์ของค่าแรงดึงสูงสุดของพลาสติกพอลิโพรพิลีนกับเวลา	53
4.24 ค่าความแข็งแรงดึง เปรียบเทียบผลเมื่อสัมผัสน้ำกับน้ำมัน ที่ 0 นาที	54
4.25 ค่าแรงดึงสูงสุด เปรียบเทียบผลเมื่อสัมผัสน้ำกับน้ำมัน ที่ 0 นาที	54
4.26 ค่ามอดูลัส เปรียบเทียบผลเมื่อสัมผัสน้ำกับน้ำมัน ที่ 0 นาที	55
4.27 ค่าความแข็งแรงดึงเปรียบเทียบผลเมื่อได้รับความร้อน 3 นาที 1 ครั้งและ 3 ครั้ง	56
4.28 ค่าแรงดึงสูงสุดเปรียบเทียบผลเมื่อได้รับความร้อน 3 นาที 1 ครั้งและ 3 ครั้ง	56
4.29 ค่ามอดูลัสเปรียบเทียบผลเมื่อได้รับความร้อน 3 นาที 1 ครั้งและ 3 ครั้ง	57
4.30 พื้นผิวพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่สัมผัสน้ำได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ เวลา 0, 3, 6 และ 9 นาที	58
4.31 พลาสติกพอลิโพรพิลีนทาผิวด้วยน้ำมันให้ความร้อนที่เวลา 0, 3, 6 และ 9 นาที	59
4.32 พลาสติกพอลิโพรพิลีนสัมผัสน้ำอุ่นด้วยไมโครเวฟซ้ำๆกัน 3 ครั้ง ครั้งละ3 นาที	60
ข-1 การวิเคราะห์XRD ของ Sample 1 ที่ยังไม่ผ่านการอุ่นด้วยไมโครเวฟ	75
ข-2 การวิเคราะห์XRD ของ Sample 2 ที่ยังไม่ผ่านการอุ่นด้วยไมโครเวฟ	76
ข-3 การวิเคราะห์XRDของ Sample 3 ที่ยังไม่ผ่านการอุ่นด้วยไมโครเวฟ	76
ข-4 การวิเคราะห์XRDของ Sample 4 ที่ยังไม่ผ่านการอุ่นด้วยไมโครเวฟ	77

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง-1 Sample 1 เปรียบเทียบเวลา 0 นาที และ 3 นาที ของค่าความแข็งแรงดึง ค่าแรงดึงสูงสุด และค่ามอดูลัสเมื่อสัมผัสน้ำมัน	91
จ-1 กราฟมาตรฐานการวิเคราะห์ด้วย FT-IR ของพอลิโพรพิลีน	92
จ-2 โครงผลึกของพอลิโพรพิลีนเพียงอย่างเดียวเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่เติมCaCO <sub>3</sub>	93



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

เนื่องจากมนุษย์มีวิถีชีวิตและเทคโนโลยีที่ต่างจากในอดีต ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทั้งทางด้านเวลาที่เร่งรีบ และวัฒนธรรมการบริโภคที่เปลี่ยนไป ทำให้ปัจจุบันมนุษย์มีการบริโภคอาหารสำเร็จรูปแช่แข็งเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความสะดวกสบาย ประหยัดเวลาในการประกอบอาหาร มีราคาที่ไม่แพงมาก มีหลากหลายเมนูให้เลือกบริโภค และสามารถหาซื้อได้ง่ายตามร้านสะดวกซื้อ ยกตัวอย่างเช่น เซเว่นอีเลฟเว่น แฟมิลี่มาร์ท และห้างสรรพสินค้าทั่วไป เป็นต้น โดยที่สามารถซื้อมาแช่เอาไว้ในตู้เย็นได้เป็นเวลานานๆ เมื่อต้องการรับประทานอาหารในช่วงเวลาที่เร่งด่วนก็สามารถนำอาหารสำเร็จรูปแช่แข็งออกมาอุ่นด้วยไมโครเวฟได้ในทันที จนบางครั้งอาจลืมนำสิ่งอันตรายที่อาจเกิดจากบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกเมื่อสัมผัสกับความร้อน โดยเริ่มตั้งแต่กระบวนการขนส่งที่ได้รับความร้อนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกจนถึงมือของผู้บริโภคที่อาหารสำเร็จรูปแช่แข็งจะได้รับความร้อนจากเตาไมโครเวฟเพื่ออุ่นอาหารให้ร้อนนั้นจะส่งผลเสียที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพร่างกายของมนุษย์อย่างไรบ้าง

อาหารแช่แข็ง คือผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านกระบวนการการแปรรูปด้วยการให้ความเย็นระดับเยือกแข็งเพื่อเป็นการถนอมอาหารให้เก็บได้ยาวนานขึ้น ยกตัวอย่างเช่น อาหารพร้อมทาน ข้าวพร้อมแกง พืชชา สปาเกตตี้ ต้มยำ เบเกอรี่ และของทอดต่างๆ (มูลนิธิวิกิมีเดีย, 2556) โดยภาชนะที่บรรจุอาหารนั้นผลิตมาจากพลาสติก ซึ่งพลาสติกนั้นเป็นสารสังเคราะห์จำพวกพอลิเมอร์ ประกอบด้วยสารเคมีหลากหลายชนิดทั้งสารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น สารกรองยูวี (UV filter) ช่วยป้องกันแสง สารต้านไฟฟ้าสถิต สารต้านการติดสี นอกจากนี้ยังมีโลหะหนักบางชนิด เช่น แคดเมียมปรอท และตะกั่ว เป็นต้น ที่ต้องนำมาผ่านกระบวนการทางการผลิตเพื่อตัดแปลงพลาสติกให้มีคุณสมบัติต่างๆ ให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน หรือเป็นไปตามความต้องการทางด้านเศรษฐกิจเพื่อการอุปโภคและบริโภคของมนุษย์ ยกตัวอย่างเช่น คุณสมบัติในการป้องกันการซึมของก๊าซ น้ำ หรือ ไขมัน ความทนทานต่อความร้อนหรือความเย็น ความทนทานต่อสภาวะกรดหรือด่าง มีลักษณะแข็งหรือเหนียว เป็นต้น โดยทั่วไปพลาสติกมีน้ำหนักเบา ไม่นำความร้อน ไม่นำไฟฟ้า สามารถขึ้นรูปให้มีรูปทรงและขนาดต่างๆ ได้ความตามต้องการ (มยุรี, 2546)

พลาสติกหรือพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับการบรรจุอาหารแช่แข็งที่ปลอดภัยกับการใช้อุ่นอาหารด้วยไมโครเวฟคือ พลาสติกพอลิโพรพิลีน (Polypropylene , PP) ซึ่งเป็นพลาสติก ที่ทนแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแทกสูง ทนการขีดข่วน ทนสารเคมี มีจุดอ่อนตัวสูง มีความหนาแน่นต่ำ และมีอุณหภูมิในการหลอมสูง ทำให้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 120 องศาเซลเซียส (Freedom, 2555) ซึ่งผลกระทบที่เกิดจากการใช้พลาสติกบรรจุอาหารต่อร่างกายของมนุษย์เมื่อมีสารเคมีต่างๆสะสมอยู่ในร่างกายเป็นระยะเวลายาวนานจะสามารถก่อให้เกิดเป็นโรคมะเร็งได้ ผลผลิตจากพอลิโพรพิลีนที่ผสมสารเม็ดสีมีตะกั่วและแคดเมียม ซึ่งผสมลงไปเพื่อให้พลาสติกมีสีต่างๆ ตะกั่วและแคดเมียมอาจแพร่กระจายออกมาจากพลาสติกได้

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเสื่อมสภาพของพลาสติกที่บรรจุอาหารสำเร็จรูปแช่แข็งซึ่งมีพลาสติกพอลิโพรพิลีนเป็นบรรจุภัณฑ์ เมื่อได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ โดยให้พลาสติกสัมผัสน้ำและน้ำมันแทนอาหาร มาทดสอบเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของน้ำและพลาสติกที่เกิดขึ้นว่าสามารถนำพลาสติกที่ผ่านการให้ความร้อนจากไมโครเวฟมาใช้ต่อได้หรือไม่

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการเสื่อมสภาพของพลาสติกบรรจุภัณฑ์อาหารแช่แข็งพอลิโพรพิลีนรูปแบบต่างๆ ที่ได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ
2. ศึกษาการเสื่อมสภาพของพลาสติกพอลิโพรพิลีน ที่บรรจุน้ำหรือน้ำมัน ขณะได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ
3. ศึกษาสารปนเปื้อนในน้ำหลังจากได้รับความร้อนจากไมโครเวฟในช่วงเวลาที่กำหนด และเมื่อใช้พลาสติกซ้ำๆ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เลือกซื้ออาหารแช่แข็งที่บรรจุพลาสติกพอลิโพรพิลีนรูปร่างกลมและสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบโปร่งแสง ขาวขุ่น และสีดำ รวมสี่แบบ
2. ศึกษาลักษณะทางกายภาพ โดยศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โครงสร้างผลึก สี รอยร้าว ของพลาสติกพอลิโพรพิลีน ก่อนที่จะสัมผัสกับความร้อนและหลังจากได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ

3. ศึกษาผลของเวลา โดยได้รับความร้อนจากไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 800 วัตต์ อุณหภูมิแช่แข็ง 0, 3, 6 และ 9 นาที ที่มีต่อโครงสร้างทางเคมีและสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความทนแรงดึง ความยืดหยุ่น และการเสื่อมสภาพของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

4. ศึกษาอิทธิพลของน้ำ และน้ำมัน ที่เคลือบผิวของพลาสติกพอลิโพรพิลีน ต่อการเสื่อมสภาพของพลาสติกพอลิโพรพิลีนเมื่อได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ

5. ศึกษาเปรียบเทียบลักษณะความโปร่งแสง ชุ่ม และทึบดำ ของบรรจุภัณฑ์ต่อการเสื่อมสภาพและจำนวนครั้งที่สามารถใช้ซ้ำของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

6. ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลเมื่อสัมผัสน้ำและน้ำมันของพลาสติก เช่น ค่าความแข็งแรงดึง ค่าแรงดึงสูงสุด และค่ามอดุลัส

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมปลอดภัย เมื่อใช้ความร้อนจากไมโครเวฟอุ่นอาหารแช่แข็งที่บรรจุในกล่องพลาสติกพอลิโพรพิลีนแบบต่าง

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP)

#### 2.1.1 ความเป็นมา

พอลิโพรพิลีน เป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยนักเคมีชาวอิตาลี Giulio Natta และนักเคมีชาวเยอรมัน Karl Rehn ในเดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 1954 ที่ประเทศสเปน โดยพอลิโพรพิลีนที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบผลึกชนิด Isotactic การค้นพบครั้งนี้เป็นการบุกเบิกนำไปสู่การผลิตเพื่อการค้าต่อมาในปี 1957 และ Giulio Natta และผู้ร่วมงานยังได้สังเคราะห์พอลิโพรพิลีนชนิด Syndiotactic ขึ้นเป็นครั้งแรก (Freedom, 2555)

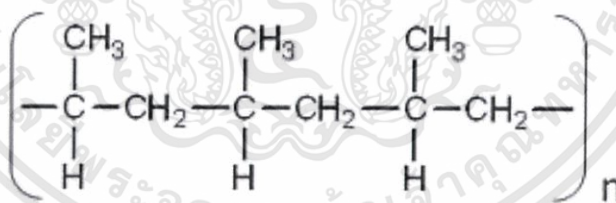
#### 2.1.2 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับพอลิโพรพิลีน

ชื่อทางเคมี (Chemical Name) : Poly(1-methylethylene)

ชื่อพ้อง (Synonyms) : Polypropylene, Polipropene 25 [USAN],  
Propylene polymers, 1-Propene homopolymer

สูตรเคมี :  $(C_3H_6)_n$

สูตรโครงสร้างทางเคมี (Chemical Structure)



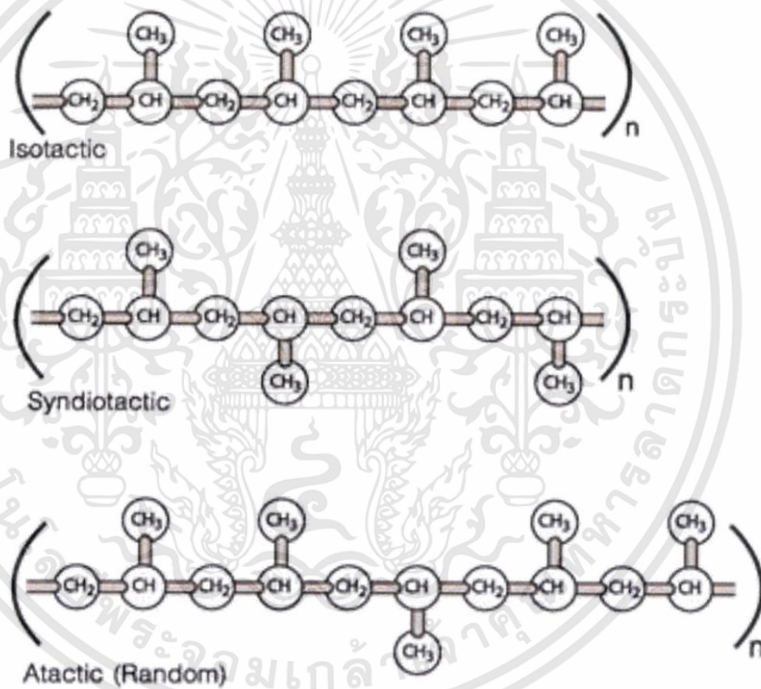
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพอลิโพรพิลีน (Freedom, 2555)

พอลิโพรพิลีน เป็นเทอร์โมพลาสติกประเภทพอลิโอเลฟิน ผลิตจากโพรพิลีน เป็นของแข็ง ไม่มีสี มีทั้งโปร่งใส และโปร่งแสง ผิวเป็นมันเงา ทนกรด เบส และสารเคมีต่างๆ ยกเว้นไฮโดรคาร์บอนและคลอรีเนเตดไฮโดรคาร์บอน (Freedom, 2555) ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามโครงสร้างของพอลิโพรพิลีนที่มีหมู่เมทิลบนสายโซ่ (กนิษฐา, 2546) ได้แก่

1. ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (Isotactic polypropylene, iPP) มีหมู่เมทิลเกาะอยู่ทางด้านเดียวของสายโซ่โมเลกุลหลัก น้ำหนักโมเลกุลสูง(150,00 - 1,500,000) โครงสร้างมีความเป็นระเบียบสูง ส่งผลให้มีการตกผลึกดีที่สุดใน

2. ซินดีโอแทกติกพอลิโพรพิลีน (Syndiotactic polypropylene, sPP) มีหมู่เมทิลเกาะสลับกันบนสายโซ่โมเลกุลหลักอย่างเป็นระเบียบ โครงสร้างมีความเป็นระเบียบลดลงจากiPP ส่งผลให้มีการตกผลึกลดลงด้วย มีจุดหลอมเหลวต่ำและละลายได้ในตัวทำละลายหลายชนิด

3. อะแทกติกพอลิโพรพิลีน (Atactic polypropylene, aPP) มีหมู่เมทิลเกาะอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้มีการตกผลึกน้อยที่สุด มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องคือ  $-20^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 2.2 โครงสร้างไอโซเมอร์ของ iPP, sPP และ aPP (Freedom, 2555)

พอลิโพรพิลีนชนิด iPP ถูกนำมาผลิตเป็นพลาสติกที่ใช้อยู่ทั่วไป เนื่องจากโครงสร้างที่มีการจัดเรียงของหมู่เมทิลอย่างเป็นระเบียบจึงมีความเป็นผลึกสูง ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็ง ทนทาน ตรงข้ามกับชนิด aPP ที่จะมีความเหนียวมากกว่า เนื่องจากหมู่เมทิลมีจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) ส่วนชนิด sPP หมู่เมทิลจัดเรียงตรงข้ามกันมีความแข็งแรงน้อยกว่า แต่ทนทานมากกว่าชนิด iPP (กนิษฐา, 2546)

พอลิโพรพิลีนมีสมบัติดีกว่าพอลิเอทิลีนหลายอย่าง เช่น ทนแรงกระแทกสูง ทนการขีดข่วน ทนสารเคมี มีจุดอ่อนตัวสูง มีความหนาแน่นต่ำ และมีอุณหภูมิในการหลอมสูง เป็นต้น ทำให้พอลิโพรพิลีนสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 120 °C ได้ ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิโพรพิลีน ได้แก่ ก่อของของเล่นเด็ก ถูบู่ โหมมเทียม พรม แผ่นรองพรม ผ้าใบกันน้ำ เชือก สายรัดบรรจุภัณฑ์ ถูร้อน ขวดใส่เครื่องดื่ม ซองขนม ท่อ ปลอกหุ้มสายไฟ สายเคเบิล งานเคลือบกระดาษ วัสดุอุดรอยรั่ว กาว และอุปกรณ์ภายในรถยนต์ (Freedom, 2555)

### 2.1.3 คุณสมบัติของพอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีนมีคุณสมบัติ (Freedom, 2555) ดังนี้

1. มีความแข็ง ความเปราะ และแตกง่ายขึ้นน้อยกว่า HDPE (High density polyethylene) และมีความยืดหยุ่นน้อยกว่า LDPE (Low density polyethylene) มีผิวแข็งทนทานต่อการขีดข่วน คงตัวไม่เสีรูปร่าง มีความทนทานมากสามารถทำเป็นบานพับในตัว
2. เมื่อไม่ได้ผสมสี มีลักษณะขาวขุ่น มีความทึบแสงกว่าพอลิเอทิลีน แต่ไม่ใสเท่ากับพอลิสไตรีน
3. มีน้ำหนักเบา เนื่องจากมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.855 - 0.946 g/cm<sup>3</sup> จึงสามารถลอยน้ำได้
4. มีจุดหลอมเหลวสูง 130–171°C จึงสามารถทนอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ (Sterilization : 100 °C) ได้
5. เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก แม้ที่อุณหภูมิสูง
6. มีความต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซได้ดี
7. ทนทานต่อสารเคมีส่วนมาก ได้แก่ กรด ต่าง แอลกอฮอล์ ตัวทำละลายอินทรีย์ แต่จะเกิดการพองตัว อ่อนนิ่ม หรือพื้นผิวเป็นรอยได้ในสารเคมีที่มีองค์ประกอบเป็นคลอรีน หรือไฮโดรคาร์บอนทั้งชนิดอะโรมาติกและอะลิฟาติก เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีคุณสมบัติไม่มีขั้วสามารถดูดซึมสารที่ไม่มีขั้วได้ดี จึงสามารถทนต่อสารที่มีขั้วได้ดีกว่า พอลิโพรพิลีนจะพองตัวและสลายตัวได้ในสารเคมีที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง เช่น ไกกรดไนตริก กรดซัลฟิวริกเข้มข้นและร้อน

ตารางที่ 2.1 สมบัติบางประการของพอลิโพรพิลีนเชิงพาณิชย์ (กนิษฐา, 2546)

สมบัติทั่วไป	พอลิโพรพิลีน
ความหนาแน่น ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	0.90
ความเป็นผลึก (%)	82
อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก ( $^{\circ}\text{C}$ )	175
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้ว ( $^{\circ}\text{C}$ )	-20
มอดูลัส (GPa)	1.0 – 1.4
ความทนทานแรงดึงสูงสุด (GPa)	0.02 – 0.04
ค่าการนำความร้อน ( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ )	0.2
ค่าการขยายตัวทางความร้อน ( $10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	110
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%)	100 – 600
ความต้านทานการกระแทก ( $\text{J}/\text{m}$ )	21 – 53
อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ ( $^{\circ}\text{C}$ ที่ 455 kPa)	225 - 250

ข้อดีของพอลิโพรพิลีน (กนิษฐา, 2546)

1. มีความเหนียวใส
2. มีน้ำหนักเบา ราคาถูก
3. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ
4. เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
5. มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี
6. ทนต่อสารเคมี เช่น กรดและเบส
7. ดูดซับน้ำต่ำ
8. มีความโค้งงอดีเยี่ยม
9. มีความเป็นผลึกสูง จึงมีสมบัติเชิงกลที่ดี

ข้อด้อยของพอลิโพรพิลีน (กนิษฐา, 2546)

1. สลายตัวต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต
2. ไม่ทนต่อสภาวะแวดล้อม
3. ติดไฟง่าย
4. ละลายในตัวทำละลายที่มีคลอไรด์หรืออะโรมาติกเป็นองค์ประกอบ
5. ยากต่อการเชื่อมต่อหรือประกอบ
6. โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน

#### 2.1.4 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิโพรพิลีน

ผลิตภัณฑ์ที่พบเสมอคือ ก่อของของเด็ก ถุงปุ๋ย ไหมเทียม พรม แผ่นรองพรม ผ้าใบกันน้ำ เชือก สายรัดบรรจุภัณฑ์ ถุงร้อน ขวดใส่เครื่องดื่ม ของขนม ท่อ ปลอกหุ้มสายไฟ สายเคเบิล งานเคลือบกระดาษ วัสดุอุดรอย อุปกรณ์ภายในรถยนต์ ก่อของเครื่องมือ กระเป๋า ปกแฟ้มเอกสาร ตลับเครื่องสำอาง เครื่องใช้ในครัวเรือน ก่อของบรรจุอาหาร อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ในอุตสาหกรรม อุปกรณ์ทางการแพทย์ ขวดใส่สารเคมี กระป๋องน้ำมันเครื่อง กระสอบข้าว และถุงบรรจุปุ๋ย

พลาสติกสำหรับใช้งานในทางการแพทย์หรือในห้องปฏิบัติการส่วนมากทำจากพอลิโพรพิลีน ซึ่งมีข้อดีคือ ทนต่อความร้อนสูงได้ สามารถนำไปอบฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งอัดความดัน (Autoclave) เมื่อทำเป็นภาชนะบรรจุอาหาร ก็สามารถนำเข้าเครื่องล้างจานอัตโนมัติ และภาชนะบรรจุอาหาร สำหรับไมโครเวฟได้

ภาชนะที่ทำจากพอลิโพรพิลีน เป็นเทอร์โมพลาสติก ได้รับการจำแนกชนิดของพลาสติก เพื่อนำกลับไปเวียนทำใหม่ (Recycle) มีสัญลักษณ์เป็นเลข 5 ซึ่งหมายถึง Resin Identification Code 5 (Freedom, 2555)



รูปที่ 2.3 สัญลักษณ์การรีไซเคิลพลาสติกของพอลิโพรพิลีน (Freedom, 2555)

#### 2.1.5 ความปลอดภัย

การใช้พอลิโพรพิลีน มีความปลอดภัยต่อสุขภาพจากความเป็นพิษของสารเคมี ในโรงงานผลิตที่อุณหภูมิสูงที่ปลดปล่อยไอที่อาจระคายเคืองต่อระบบหายใจและตา แต่ก็ยังไม่มีรายงานถึงความเป็นพิษเมื่อต้องสัมผัสกับพลาสติกชนิดนี้ในระยะยาว (Freedom, 2555)

#### 2.1.6 การสลายตัวของพอลิโพรพิลีน

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative Degradation) ของพลาสติกเป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน ความร้อน และแสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



พลาสติกได้ นอกจากนี้พอลิโพรพิลีนเป็นวัสดุที่ติดไฟได้ง่าย จึงต้องมีการเติมสารหน่วงไฟเพื่อป้องกันการติดไฟ ซึ่งสารหน่วงไฟที่เติมจะเป็นพวกโบรมิเนตและคลอรีเนต สารกลุ่มนี้ถ้าไหม้ไฟแล้วจะให้สารพิษได้ออกซิน (Freedom, 2555)

## 2.2 ไมโครเวฟ (Microwave)

### 2.2.1 การทำงานของไมโครเวฟ

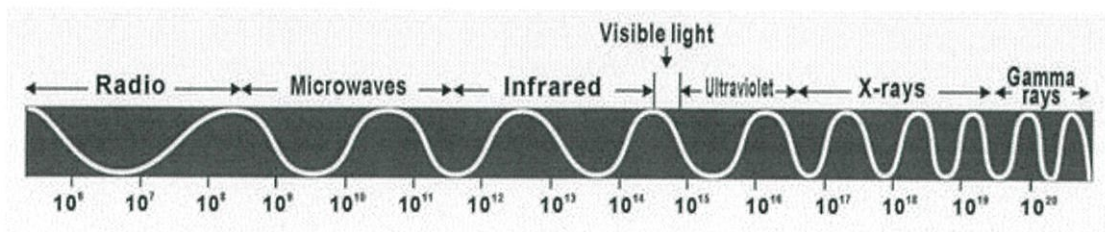
ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมากถึง 2,450 ล้านรอบต่อวินาที มีลักษณะคล้ายกับคลื่นวิทยุแต่มีความถี่ที่สั้นกว่า หัวใจสำคัญของไมโครเวฟคือ แม็กนีตรอนที่จะเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ เพราะคลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นความถี่สูงมีใช้รังสี จึงไม่กระจายและสะสมในร่างกายมนุษย์

ระบบการทำงานของไมโครเวฟ คลื่นไมโครเวฟจะพุ่งเข้าสู่อาหารจากทุกทิศทาง โดยรอบของผนังเตาด้านในแล้วแผ่กระจายไปสู่อาหาร เมื่อคลื่นไปกระทบอาหาร ทำให้โมเลกุลของอาหารเกิดการสั่นและเสียดสีกัน ก่อให้เกิดเป็นพลังงานความร้อนทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็ว ลักษณะเช่นเดียวกับการที่เราใช้มือถูกันไปมาเร็วๆ จะรู้สึกร้อนขึ้นมาทันที จากคุณสมบัติเด่นของคลื่นไมโครเวฟที่ทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็ว จึงเป็นการรักษาคุณค่าของอาหารไว้อย่างครบถ้วน ไม่ว่าจะเป็นการหุง ต้ม อบ นึ่ง บั๊ງ ย่าง ทอด และคุณสมบัติพิเศษที่ได้รับมากกว่าการประกอบอาหารด้วยวิธีดั้งเดิมหลายประการ อาทิ ความสะอาดรวดเร็ว ประหยัด ปลอดภัย และไร้เขม่าควันไฟ (สำนักหอสมุดมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2536)

### 2.2.2 คลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum) ที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่างคลื่นวิทยุ (Radio wave) กับอินฟราเรด (Infrared) มีความถี่ระหว่าง 300 - 30,000 MHz มีแม็กนีตรอน (Magnetron) เป็นส่วนประกอบหลักทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟที่นำมาใช้ประโยชน์กับอาหาร มีความถี่ 915 - 2,450 MHz หรือวัดเป็นความถี่ได้  $915 \times 10^6$  ถึง  $2.45 \times 10^9$  รอบต่อวินาทีที่กระทำต่ออาหาร (ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ และดร.นิธิยา, 2550)



รูปที่ 2.5 แถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ และดร.นิธิยา, 2550)

คลื่นไมโครเวฟสามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ต่อวัสดุได้หลากหลายลักษณะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท (สำนักหอสมุดมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2536) คือ

1. การสะท้อนกลับ (Reflection) คลื่นไมโครเวฟเมื่อไปกระทบกับภาชนะที่เป็นโลหะหรือมีส่วนผสมของโลหะ คลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านภาชนะดังกล่าวได้ จะสะท้อนกลับหมด ดังนั้นอาหารที่ใส่ในภาชนะที่เป็นโลหะก็จะไม่สุก
2. การส่งผ่าน (Transmission) คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านภาชนะที่ทำด้วยแก้ว กระจก ไม้ เซรามิก และพลาสติกได้ เพราะภาชนะดังกล่าวไม่มีส่วนผสมของโลหะ จึงเป็นภาชนะที่ใช้ได้ดีในไมโครเวฟ
3. การดูดซึม (Absorption) ปกติอาหารโดยทั่วไป จะประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำในอาหาร ซึ่งจะดูดซึมคลื่นไมโครเวฟ ทำให้อาหารร้อนอย่างรวดเร็ว และอีกนัยหนึ่งเมื่อโมเลกุลของน้ำดูดซึมคลื่นไมโครเวฟแล้วจะสลายตัวในทันที ไม่สะสมในอาหาร

### 2.2.3 การทำให้เกิดความร้อน

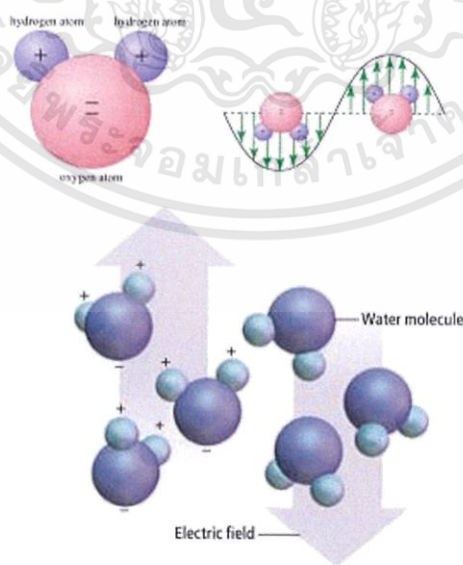
พลังงานไดอิเล็กทริก (Dielectric energy) จากคลื่นไมโครเวฟและความถี่วิทยุ (Radio frequency) เป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างหนึ่ง ซึ่งส่งผ่านในรูปของคลื่น (Wave) และแทรก (Penetrate) เข้าไปในวัสดุ และพลังงานนี้จะถูกดูดซับและเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อน โดยทั่วไปสามารถทำให้เกิดความร้อนในวัสดุได้ทั้งโดยตรงและโดยอ้อม การเกิดความร้อนในวัสดุโดยตรง (Direct method) ความร้อนจะเกิดขึ้นภายในตัวของวัสดุ เช่น ความร้อนที่เกิดจากไมโครเวฟและคลื่นวิทยุ และโดยอ้อม (Indirect method) ซึ่งเป็นการทำให้เกิดความร้อนจากภายนอก และส่งผ่านพื้นที่ผิวหน้าของวัสดุเข้าไปยังด้านในโดยการแผ่รังสี (Radiation) การพาความร้อน (Convection) หรือการนำความร้อน (Conduction) (ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ และดร.นิธิยา, 2550)

การประกอบอาหารด้วยไมโครเวฟแตกต่างจากการประกอบอาหารด้วยเตาอบธรรมดา คือเตาอบธรรมดาให้พลังงานความร้อนโดยเปลวไฟแบบเตาอบแก๊สหรือความร้อนจากขดลวดไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้อาหารสุกโดยการถ่ายเทความร้อน คือการนำ การพา และการแผ่รังสี แต่ไมโครเวฟทำให้อาหารสุกโดยคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูง ทำให้โมเลกุลของน้ำในอาหารเกิดการสั่นสะเทือนและชนโมเลกุลอื่นๆต่อไปจนเกิดเป็นพลังงานจลน์ และกลายสภาพเป็นพลังงานความร้อน จึงทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็ว และเร็วกว่าการประกอบอาหารด้วยระบบอื่นๆโดยไม่เสียพลังงานความร้อน (สำนักหอสมุดมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2536)

อาหารใดๆ ที่จะร้อนได้ด้วยไมโครเวฟ จะต้องมีส่วนประกอบอย่างหนึ่งดังนี้ (ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ และดร.นิธิยา, 2550) คือ

1. สารที่มีโมเลกุล 2 ขั้ว (Dipolar molecules) ยกตัวอย่างเช่น โมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว โดยออกซิเจนเป็นขั้วลบ และไฮโดรเจนเป็นขั้วบวก น้ำพยายามจะเรียงตัวภายใต้สนามไฟฟ้า เมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟซึ่งมีความถี่ที่สูงมากเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำเปลี่ยนทิศสลับไปมาอย่างรวดเร็ว ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าเกิดการเสียดสีกันระหว่างโมเลกุลของน้ำที่สั่นสะเทือนหรือกับโมเลกุลอื่นๆ ภายในอาหารจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นมา

2. สารที่มีไอออนอยู่ในของเหลว เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (Ionic polarization) ที่เกิดจากคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งสนามไฟฟ้าจะถูกสร้างออกมาในลักษณะ 3 ทิศทาง คือบนสู่ล่าง ข้างสู่ข้าง และหลังสู่หลัง เมื่ออนุภาคที่มีประจุในวัสดุสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟจะทำให้เกิดการสั่นและเคลื่อนที่ จึงเกิดการชน (Collisions) หรือเสียดสีกับอนุภาคที่อยู่ข้างเคียงเป็นผลให้เกิดความร้อนในวัสดุขึ้นมา



รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ของสารที่มีโมเลกุล 2 ขั้ว ภายในอาหารเมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟ (ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ และดร.นิธิยา, 2550)

การใช้ไมโครเวฟในกระบวนการแปรรูปอาหารเป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งไมโครเวฟทำให้อาหารร้อนได้ เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนในอาหาร ในอุตสาหกรรมอาหารได้ประยุกต์ใช้ไมโครเวฟมาในใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในกระบวนการแปรรูปอาหาร

กระบวนการที่นำไมโครเวฟไปใช้	ผลิตภัณฑ์
การละลายน้ำแข็ง (Thawing, Tempering)	frozen seafood, meat, fish, butter
การทำให้สุก (Cooking)	bacon, meat, potato, patties
การทำแห้ง (Dehydration)	pasta, spice, onion, cereal grain, seaweed, yolk, spice, herb
การพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurization)	-
การสเตอริไรส์ (Sterilization)	milk, prepared food
การอบ (Baking)	bread, doughnut
การคั่ว (Roasting)	tree nut, peanut, coffee, cocoa
การลวก (Blanching)	herb, vegetable, corn, fruit
การเจียว (Rendering)	lard, tallow

ที่มา : ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ และ ดร.นิธิยา (2550)

#### 2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ (ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ และดร.นิธิยา, 2550)

1. ความถี่ของคลื่น คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ต่ำกว่า 816 และ 915 MHz จะทะลุผ่านขึ้นอาหารได้ดี และมีความสม่ำเสมอในการให้ความร้อนมากกว่า เมื่อใช้กับอาหารที่มี Loss factor ต่ำ หรือมีขนาดชิ้นเล็กๆ อย่างไรก็ตาม ระดับความลึกของการทะลุผ่านของคลื่นไมโครเวฟเป็นสิ่งจำเป็น การเลือกความยาวคลื่นของไมโครเวฟที่ใช้จะขึ้นกับความเหมาะสมในการใช้พลังงาน

2. ความเข้มของสนามไฟฟ้า เมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้ามากขึ้น การให้ความร้อนกับอาหารจะใช้เวลาอันน้อยลง จึงเป็นตัวปรับอัตราเร็วในการให้ความร้อนกับอาหาร

3. ความชื้นในอาหาร เนื่องจากน้ำมีค่า Loss factor สูง อาหารที่มีความชื้นสูงจึงเพิ่มอุณหภูมิได้รวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. อุณหภูมิของอาหารเริ่มต้นจะมีผลต่อสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงพลังงาน และมีผลต่อสถานะขององค์ประกอบที่ดูดกลืนพลังงานได้ดีในอาหาร เช่น น้ำ ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีผลต่อการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

5. ขนาดและรูปร่างของอาหาร อาหารที่มีขนาดใหญ่ หรือมีความหนามาก เมื่อใช้ไมโครเวฟที่มีความถี่สูงเกินไป อาจทำให้ไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านเข้าไปถึงกึ่งกลางของอาหารได้ ทำให้การเพิ่มอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้น ความสม่ำเสมอของรูปร่างจึงมีผลต่อการให้ความร้อนเช่นเดียวกัน ตัวอย่างเช่น อาหารที่มีรูปร่างกลมจะได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอมากกว่าอาหารที่มีเหลี่ยมมุม

6. การนำไฟฟ้า เนื่องจากการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะเกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่มีประจุในอาหาร จึงมีความสัมพันธ์กับการนำไฟฟ้าในอาหาร เมื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าให้กับอาหาร เช่น เติมน้ำตาล หรือสารอื่น (เช่น น้ำตาล) ที่สามารถแตกตัวให้ประจุ จะทำให้อัตราการให้ความร้อนสูงขึ้น

7. การนำความร้อน (Thermal conductivity) ของอาหาร ระหว่างการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนในชิ้นอาหารด้วย ซึ่งจะเห็นได้ชัดในกรณีที่อาหารมีชิ้นขนาดใหญ่หรือมีความหนามาก ไมโครเวฟไม่สามารถทะลุเข้าไปถึงกึ่งกลางได้ แต่สำหรับอาหารชิ้นเล็กหรือมีความหนาไม่มาก การนำความร้อนจะไม่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่างนัก

8. ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ของอาหาร ความร้อนจำเพาะของอาหารมีผลต่ออัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิ อาหารที่มีความร้อนจำเพาะสูงกว่า จะมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่ำกว่า

9. ความหนาแน่นหรือความเป็นเนื้อเดียวกัน วัสดุที่มีความหนาแน่นมากมีแนวโน้มที่จะใช้เวลาในการให้ความร้อนนานกว่าวัสดุที่มีความหนาแน่นน้อย

10. สัมประสิทธิ์ของการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของแต่ละองค์ประกอบของวัสดุที่นำมาแปรรูป หากวัสดุที่ได้รับความร้อนมากเกินไป แต่ภายในชิ้นของวัสดุยังเย็นอยู่นั้น เกิดจากการให้ความร้อนที่มากเกินไปต่อผิวของวัสดุซึ่งมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ โดยอัตราการให้ความร้อนที่เหมาะสมต้องเข้ากันได้ (Matching) กับค่าสัมประสิทธิ์ของการนำความร้อนของวัสดุ

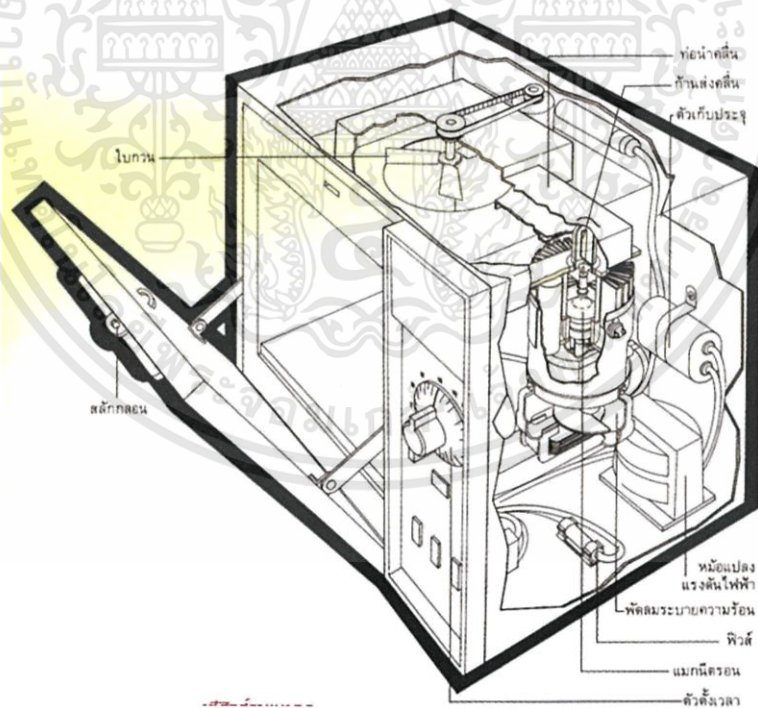
11. บรรจุภัณฑ์อาหารสำหรับไมโครเวฟต้องสามารถส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟ (Microwave transparency) ได้ แม้จะมีการดูดคลื่นไว้บ้างแล้ว บรรจุภัณฑ์แต่ละประเภทจะดูดคลื่นไว้แตกต่างกัน ตัวเลขยิ่งสูงหมายความว่า จะดูดพลังงานไมโครเวฟได้มาก

## 2.2.5 ส่วนประกอบภายในเตาไมโครเวฟ

เตาไมโครเวฟจะมีตัวตั้งเวลาติดตั้งไว้ด้วยเพื่อควบคุมการทำงานของเตา ซึ่งจะเริ่มทำงานได้ก็ต่อเมื่อประตูเตาปิดสนิทแล้วเท่านั้น กระแสไฟฟ้าแรงดันต่ำที่ป้อนเข้าสู่ตัวเตาจะถูกแปลงให้มีแรงดันสูงขึ้นจากเดิมประมาณ 30 เท่า ด้วยหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า แล้วจึงผ่านไปยังตัวเก็บประจุซึ่งจะทำงานร่วมกับอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ เพื่อทำการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงและป้อนเข้าสู่ “แม็กนีตรอน” ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวสร้างคลื่นไมโครเวฟขึ้นมา คลื่นจะออกจากแม็กนีตรอนผ่านเข้าไปในท่อนำคลื่น (มีลักษณะเป็นท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า) เพื่อป้อนเข้าสู่ห้องอบต่อไป

ที่ปากทางเข้าสู่ห้องอบจะมีอุปกรณ์กลไกคล้าย ๆ พัดลมเรียกว่า “ไบควน” ทำหน้าที่กววให้คลื่นสะท้อนไปมาลงสู่ห้องอบ และอาหารภายในเตาก็จะดูดกลืนคลื่นเข้าไปทำให้ตัวมันเองสุกได้

พัดลมระบายความร้อน และสวิตช์ควบคุมอุณหภูมิจะป้องกันแม็กนีตรอนมิให้มีอุณหภูมิสูงเกินขนาด ส่วนฟิวส์จะป้องกันสภาวะการรับภาระเกินกำลัง (ธีระยุทธ และคณะ, 2547)



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบภายในเตาไมโครเวฟ (ธีระยุทธ และคณะ, 2547)

## 2.2.6 ข้อได้เปรียบของการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (ธีระยุทธ และคณะ, 2547)

1. ใช้เวลาน้อย ประหยัดเนื้อที่ และแรงงาน ลดจำนวนวัสดุที่เสียเนื่องจากอุปกรณ์ทำงานส่วนใหญ่ไม่เคลื่อนที่

2. การทะลุทะลวงของพลังงาน (Energy penetration) คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปกำเนิดพลังงานความร้อนภายในวัสดุ ทำให้เกิดความร้อนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งก้อนวัสดุ ในขณะที่ทำการให้ความร้อนแบบอื่นจะให้ความร้อนที่ผิววัสดุซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายที่ผิวด้านนอก เพราะอุณหภูมิสูงเกินไปในขณะที่ภายในเนื้อวัสดุยังได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงนอกจากนี้ยังใช้เวลานานมากเพราะมีข้อจำกัดทางด้านความสามารถในการถ่ายเทความร้อนดังนั้นการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟจึงทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่า

3. การควบคุมระบบสามารถทำได้ดี และรวดเร็วกว่า โดยธรรมชาติของการเปิด-ปิด สามารถเปลี่ยนแปลงระดับความร้อนอย่างทันทีทันใด เพียงแต่ควบคุมพลังงานในช่วงขาออกของแหล่งกำเนิดทำให้ระบบมีประสิทธิภาพและแน่นอนในการควบคุมความร้อน

4. สามารถทำให้เกิดผลกระทบทางกายภาพและเคมีเท่าที่ต้องการได้ โดยปกติปฏิกิริยาทางเคมีและกายภาพจะถูกเร่งให้เกิดขึ้นจากความร้อนที่สร้างด้วยวิธีนี้ ได้แก่ ปฏิกิริยาการพองตัว (Puffing) การอบแห้ง (Drying) การหลอมละลาย (Melting) การทำให้โปรตีนเปลี่ยนสภาพ เป็นต้น

5. มีประสิทธิภาพสูงการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟใช้พลังงานน้อยกว่าการทำความร้อนแบบเก่ามากเมื่อเทียบกับการเกิดความร้อนภายในวัสดุที่เท่ากัน (การทำความร้อนแบบเก่ามีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 10 - 30% ในขณะที่การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟมีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 60 - 70%) โดยการทำความร้อนด้วยวิธีนี้พลังงานจากการสูญเสียสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนแปลงโดยตรงเพื่อทำให้วัสดุเกิดความร้อน โดยไม่เกิดการสูญเสียไปกับอากาศ ผงของเตา สานพานลำเลียงหรือส่วนอื่นๆของระบบ อันนำไปสู่การประหยัดพลังงาน

## 2.3 อินฟราเรด สเปกโตรสโคปี (Infrared Spectroscopy)

อินฟราเรดให้ข้อมูลที่รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพในการหาหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ย่านอินฟราเรดในสเปกตรัมของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ให้ประโยชน์มากที่สุดก่อนคืออินทรีย์ คือย่านความถี่ระหว่าง  $4000 - 650 \text{ cm}^{-1}$  ( $\text{cm}^{-1}$  เป็นหน่วยของจำนวนคลื่นต่อวินาที หรือเรียกว่า เลขคลื่น) และความยาวคลื่นระหว่าง  $2.5 - 1.5$  ไมโครเมตร ( $1 \text{ ไมโครเมตร} = 10^{-6}$  เมตร) สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น และเลขคลื่น คือ

$$\text{ความยาวคลื่น } (\mu\text{m}) = 10000/(\text{เลขคลื่น } (\text{cm}^{-1}))$$

อินฟราเรดสเปกตรัม เป็นการพล็อตระหว่างความถี่ (เลขคลื่น ,  $\text{cm}^{-1}$  หรือความยาวคลื่น ,  $\mu\text{m}$ ) และ Transmittance (T) ซึ่ง Transmittance เป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่าง (Transmittance radiation , I) และความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง ( $I_0$ ) สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่างและความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง คือ

$$\text{Transmittance} = I/I_0$$

I = ความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวกลาง

$I_0$  = ความเข้มของรังสีที่ตกกระทบตัวกลาง

$$\% \text{ Transmittance} = 100T$$

การดูดกลืนคลื่นรังสีอินฟราเรดตรงกับพลังงานในช่วง 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล พลังงานของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านนี้ก่อให้เกิดการสั่นแบบยืด (Stretching) และแบบงอ (Bending) ของพันธะในโมเลกุลของสารการดูดกลืนเป็นขบวนการควอนไทส์ (Quantized) คือการที่สารจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดนั้น ความถี่ของรังสีที่ดูดกลืนจะต้องตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะเท่านั้น นอกจากนี้การสั่นของพันธะทุกประเภทในโมเลกุลไม่ได้ให้พิคใน IR สเปกตรัมเสมอไป การสั่นของพันธะที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) เท่านั้นที่จะมีพิคปรากฏใน IR สเปกตรัม ตัวอย่างเช่น การสั่นของพันธะ C=C ใน RCH=CHR ส่วนการสั่นของ C=O ในสารประกอบคาร์บอนิลเกิดพิคที่มีความเข้มสูงใน IR สเปกตรัม โดยทั่วไปแถบที่เกิดใน IR สเปกตรัม เกิดจากการสั่นแบบพื้นฐาน ได้แก่ การยืด และการงอ ยังมีแถบที่มีความเข้มข้นต่ำเกิดที่ความถี่ 2 เท่า 3 เท่า หรือ 4 เท่า ของความถี่แบบพื้นฐาน แถบเหล่านี้เรียกว่า Overtone ซึ่งเกิดเมื่อความถี่พื้นฐานมีความเข้มสูง บางครั้งอาจมีแถบเกิดที่ความถี่ที่เป็นผลบวกหรือผลต่างของความถี่แบบพื้นฐาน แถบเหล่านี้เรียกว่า Combination bands ถ้า Overtone หรือ Combination bands เกิดใกล้กับแถบ

พื้นฐาน ผลก็คือทำให้ความเข้มของแถบพื้นฐานลดลง แต่ไปเพิ่มความเข้มของ Overtone และ Combination bands ปรากฏการณ์นี้เกิด Fermi resonance และพีคที่พบบางครั้งเรียกว่า Fermi doublet (ศูนย์รวมตำราเรียนรามคำแหง, 2555)

### 2.3.1 การวิเคราะห์ IR สเปกตรัม

IR สเปกตรัมมีประโยชน์ในการหาหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล แต่เนื่องจากมีพีคจำนวนมากใน IR สเปกตรัม ทำให้ไม่สามารถคาดหวังว่าจะรู้ทุกพีคใน IR สเปกตรัมได้ แต่ใช้เป็นแนวทางเริ่มต้นในการแปรข้อมูลจาก IR สเปกตรัมได้ (ศูนย์รวมตำราเรียนรามคำแหง, 2555) ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของหมู่ฟังก์ชันบางหมู่กับตำแหน่งเลขคลื่นที่พบ

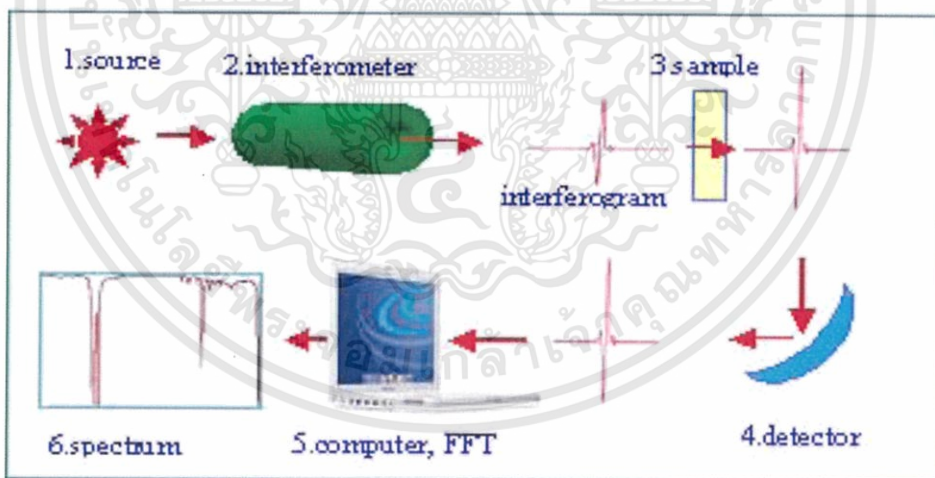
ประเภทของสาร	หมู่ฟังก์ชัน	เลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	หมายเหตุ
แอลดีไฮด์ คีโตน คาร์บอกซิลิก	C=O	1680 – 1820	ความเข้มสูง
อะลิฟาติก	C-H	2750 – 2850	ความเข้มปานกลางถึงอ่อน
แอลเคน	C-H	2850 – 2960	ความเข้มสูง
แอลคีน	C=C	1650	ความเข้มต่ำ
แอลไคน์	C≡C	2150	ความเข้มต่ำ
อีเทอร์	C-O	1000 – 1300	ความเข้มปานกลางถึงเข้มอาจมีมากกว่าหนึ่งแถบ
เอมีน	N-H	3500	หนึ่ง หรือสองแถบและความเข้มปานกลาง
แอลกอฮอล์ และฟีนอล	O-H	3200 – 3600	ความเข้มสูงและกว้าง

ที่มา : ศูนย์รวมตำราเรียนรามคำแหง (2555)

### 2.3.2 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR Spectrophotometer)

เครื่อง FT-IR Spectrophotometer เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานและหาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์ด้วยเทคนิค FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy Technique) โดยอาศัยหลักการการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เมื่อรังสีอินฟราเรดถูกดูดกลืนพลังงานจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานการหมุนและสั่นของโมเลกุล โดยโมเลกุลของสารแต่ละชนิดจะให้สเปกตรัมที่เป็นเอกลักษณ์ของพันธะของโมเลกุลนั้นๆ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการพิสูจน์หาสูตรโครงสร้างของสารประกอบ เครื่อง FT-IR Spectrophotometer มีความสามารถในการแยกสูง และสภาพไวสูง สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีปริมาณน้อยได้ (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ สจล., 2558)

เครื่อง FT-IR Spectrophotometer ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแสงเป็นแท่งเซรามิกที่เผาด้วยขดลวดความร้อน ทำให้เกิดรังสีอินฟราเรดสู่กระจกเงาที่ทำด้วยโลหะขัดมันแล้วสะท้อนคลื่นแสงเข้าสู่ตัวแยกแสง (Beam Splitter) เพื่อแยกคลื่นแสงออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ส่วนหนึ่งจะผ่านทะลุออกไป อีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับสู่กระจกเงาที่เคลื่อนที่ได้ โดยมีแสงเลเซอร์ปรับระยะการเคลื่อนที่ของกระจกให้มีทิศทางที่คลื่นแสงมารวมกันเป็นลำแสงเดี่ยวผ่านไปยังสารตัวอย่าง เรียกว่า The Michel Interferometer (ศูนย์รวมตำราเรียนรามคำแหง, 2555)



รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของเครื่อง FT-IR Spectrophotometer  
(Keck Interdisciplinary Surface Science Center, 2009)

ปัจจุบันมี IR Spectrum Libraries ของสารประกอบต่างๆถูกจัดกลุ่มเอาไว้ตามคุณสมบัติทางเคมี ที่สามารถเปรียบเทียบสเปกตรัมของสารตัวอย่างได้ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ที่สามารถบอกชนิดของสารตัวอย่าง พร้อมทั้งคำนวณหาปริมาณของสารตัวอย่างได้เมื่อเทียบกับสารมาตรฐาน (wachiraporn, 2550)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นรังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้อยู่ระหว่างย่านที่มองเห็น (Visible region) กับย่านไมโครเวฟ ความยาวคลื่นของอินฟราเรดแบ่งเป็นช่วงๆ (ศูนย์รวมตำราเรียนรามคำแหง, 2555) คือ

1. ช่วงเลขคลื่น  $4,000 - 121,800 \text{ cm}^{-1}$  เป็นย่านอินฟราเรดใกล้ (Near Infrared region)
2. ช่วงเลขคลื่น  $200 - 4,000 \text{ cm}^{-1}$  เป็นย่านอินฟราเรดกลาง (Middle Infrared region)
3. ช่วงเลขคลื่น  $10 - 200 \text{ cm}^{-1}$  เป็นย่านอินฟราเรดไกล (Far Infrared region)



รูปที่ 2.9 เครื่อง FT-IR Spectrophotometer (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ สจล., 2558)

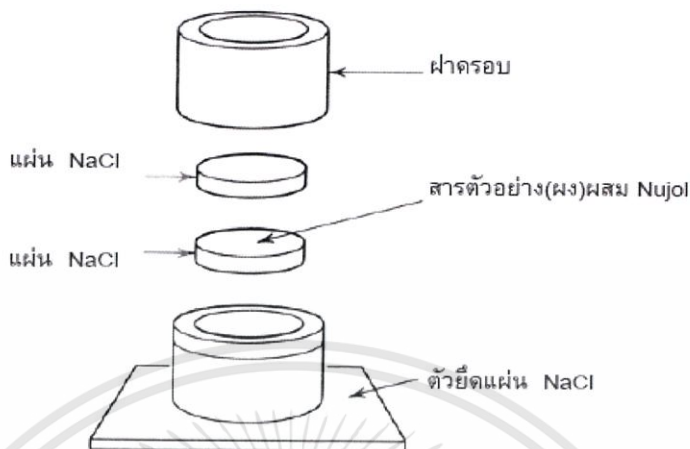
### 2.3.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ FT-IR

การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อบันทึกสเปกตรัมขึ้นกับว่าสถานะทางกายภาพของสารตัวอย่าง มีวิธีการเตรียมสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง และของเหลว มีหลายวิธีและอุปกรณ์ที่ใช้แตกต่างกัน (ศูนย์รวมตำราเรียนรามคำแหง, 2555) ดังนี้

#### 1. สารตัวอย่างของแข็ง

- เตรียมเป็น Nujol mull โดยหยด Nujol (mineral oil) ในสารตัวอย่าง 2-3 มิลลิกรัม ผสมเข้ากันแล้วทาบนแผ่น NaCl เซลล์ แล้วประกบด้วยแผ่น NaCl อีกแผ่นหนึ่งใส่ในตัวยึด Nujol เองดูคลื่นรังสี IR ในย่านเดียวกับการยึดและการงอของ C-H ในสารประกอบอัลเคน แผ่น NaCl หลังใช้แล้ว

ควรใช้ที่ซูดุ่ม  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  เช็ดให้สะอาดและจับเฉพาะขอบ นำไปเก็บใน Desiccator เนื่องจาก NaCl ดูดความชื้นง่าย



รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบในการทำ Nujol mull (ศูนย์รวมตำราเรียนรามคำแหง, 2555)

- เตรียมเป็น KBr disc โดยบดสารตัวอย่างของแข็งบริสุทธิ์ (1-2 มิลลิกรัม) รวมกับผง KBr (100 มิลลิกรัม) นำเข้าเครื่องอัด Minipress จนได้แผ่นกลมแบนใสคล้ายแก้ว ทั้งสารตัวอย่างและ KBr ควรผ่านการอบให้แห้งก่อนบดรวมกัน หลังจากอัดเป็นแผ่นแบนแล้ว นำแผ่น KBr disc ใส่ที่ยึดพิเศษแล้ววางบนลำรังสี IR



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบในการทำ KBr disc (ศูนย์รวมตำราเรียนรามคำแหง, 2555)

## 2. สารตัวอย่างของเหลว

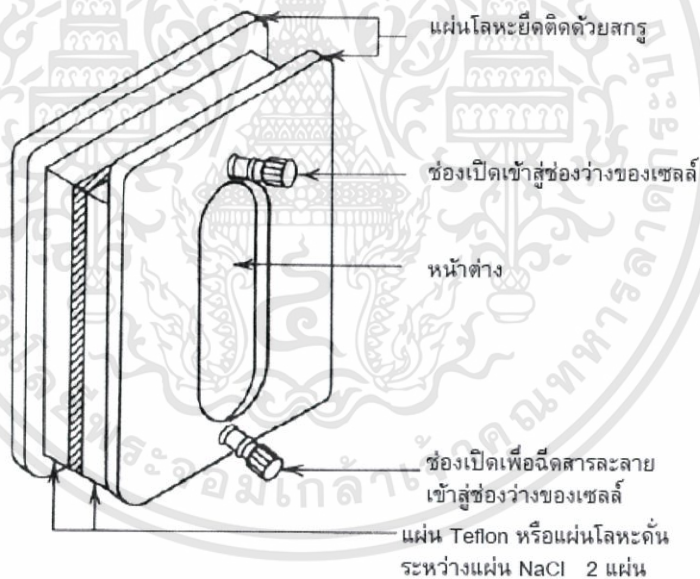
- หยดของเหลวบนแผ่น NaCl แล้วประกบด้วยแผ่น NaCl อีกแผ่น ให้กระจายระหว่างแผ่น NaCl ทั้งสอง นำไปใส่ที่ยึด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 การเตรียมสารตัวอย่างของเหลวโดยเตรียมเป็น Thin-film  
(ศุภยัรรมตำราเรียนรามคำแหง, 2555)

- สารตัวอย่างของแข็ง และของเหลวสามารถเตรียมเป็นสารละลายของ  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{CHCl}_3$ ,  $\text{CS}_2$  (5-10% โดยน้ำหนัก) ใส่สารละลายในเซลล์สารละลาย (Solution cell) ฉีดสารละลายเข้าเซลล์โดยใช้ไซริงค์ (Syringe) ระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศภายใน



รูปที่ 2.13 เซลล์สารละลายสำหรับสารตัวอย่างของเหลว (ศุภยัรรมตำราเรียนรามคำแหง, 2555)

## 2.4 Thermogravimetric Analysis (TGA)

เครื่อง TGA ใช้ศึกษาสมบัติทางความร้อนของสารตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน และเกิดการสลายตัว โดยอาศัยหลักการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซับแก๊สหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (Crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) และศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันหรือปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ สจล., 2558)

เครื่องTGA จะวิเคราะห์ตัวอย่าง โดยสารตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็กซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น อากาศหรือออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลายหรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ

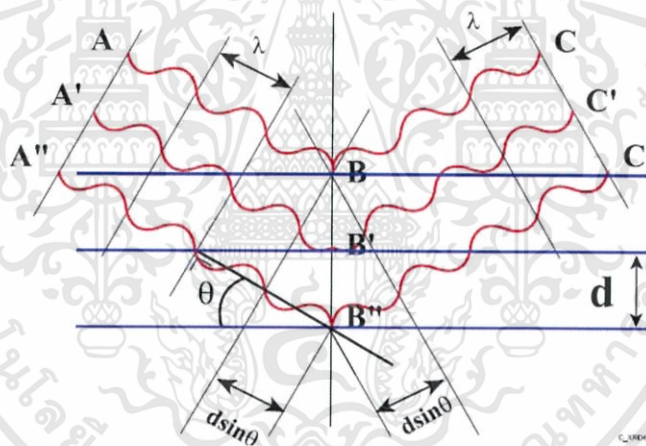
เครื่องTGA มีประโยชน์ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของสาร (Composition) ความเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability or decomposition) การระเหย (Evaporation) ปริมาณสารสัมพันธ์ที่เกิดปฏิกิริยา (Stoichiometry of reaction) จลพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา (Kinetics of reaction) กระบวนการดูดหรือคายพลังงาน (Desorption/Adsorption processes) (ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2558)



รูปที่ 2.14 เครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ สจล., 2558)

## 2.5 X-Ray Diffractometer (XRD)

เครื่อง XRD จะอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (Crystalline Structure) ของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบผง (Powder) และแบบฟิล์มบาง (Thin Film) ซึ่งเครื่อง XRD จะใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของวัสดุ โดยผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จะให้รายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก และระนาบของผลึกของสารตัวอย่าง โดยผลึกของสารตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของโครงสร้างผลึกที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ผ่านโครงสร้างผลึกรูปแบบต่างๆ แตกต่างกันไป ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิด ขนาด และปริมาณของโครงสร้างผลึกนั้นๆ ทำให้สามารถวิเคราะห์ชนิด ขนาด และปริมาณเชิงเปรียบเทียบของโครงสร้างผลึกของสารประกอบต่างๆ ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละหน่วยเซลล์ของโครงสร้างผลึก ความเครียด และค่าความเป็นผลึกของตัวอย่าง อีกทั้งยังสามารถคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย (เกียรติพงษ์, 2558)



รูปที่ 2.15 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก (เกียรติพงษ์, 2558)

XRD เป็นเครื่องมือชนิดที่อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยอาศัยหลักการของมุมระหว่างลำแสง X - ray ที่ตกกระทบ และลำแสงที่เลี้ยวเบนไปจะสัมพันธ์กับระยะระหว่าง Diffracting plane ของ Crystal lattice ( $d$  - spacing ) ดัง Bragg equation คือ

$$N\lambda = 2d \sin\theta$$

เมื่อ  $N$  = Order of reflection

$\lambda$  = wavelength ของ X - ray

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$d$  = ระยะระหว่าง Diffracting planes ของ Crystal

$\theta$  = มุมระหว่างลำแสง X – ray ตกกระทบ (Incident X – ray beam) และ Diffracting planes

จากหลักการเบื้องต้นในปี ค.ศ.1912 นาย W.L.Bragg ได้นำมาทำการศึกษาในรูปแบบโครงสร้างผลึก ต่อมาได้มีการประดิษฐ์คิดค้นเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันขึ้นในปี 1948 และพัฒนามาเรื่อยจนกระทั่งมีการนำเอาคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงาน และวิเคราะห์ประมวลผลเพื่อให้เกิดความรวดเร็วแม่นยำยิ่งขึ้น

XRD เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ในกลุ่มนักวัสดุศาสตร์ ธรณีวิทยา โลหะวิทยา เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบ และแร่ ทำให้นักวิทยาศาสตร์กลุ่มนี้สามารถแยกแยะประเภท และชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติ ว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใด หรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นแร่ชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้มข้นของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูล (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มจร., 2556)



รูปที่ 2.16 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ สจล., 2558)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 การทดสอบแบบการดึง (Tensile Test)

การทดสอบแบบการดึงเป็นการทดสอบเพื่อวัดแรงยึดเกาะ วัดค่าความเหนียวว่ามีการเกาะยึดได้ดีมากน้อยเพียงใด ด้วยการออกแรงไปในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้เกิดการแบ่งแยกออกจากกัน จนกระทั่งเกิดการแตกหัก (Break) โดยมีรอยแยกที่ไม่เป็นระเบียบ สิ่งที่ต้านแรงแยกคือ ความเหนียว (ณรงค์เดช, 2556) มีรูปแบบดังนี้

1. การดึงในแนวตั้งฉากกับการยึดติด (Tensile) โดยใช้แรงดึงกระจายไปทั่วพื้นที่ที่เกิดการยึดติด
2. การดึงในแนวระนาบขนานกับแนวการยึดติด (Shear) โดยใช้แรงดึงกระจายไปทั่วพื้นที่ที่เกิดการยึดติด
3. แรงแยก (Cleavage) โดยใช้แรงดึงกระทำในการแยกเฉพาะบริเวณขอบของการยึดติดเท่านั้น
4. การดึงลอก (Peeling) โดยใช้แรงดึงกระทำกับวัสดุอย่างน้อยด้านหนึ่งมีความยืดหยุ่น



รูปที่ 2.17 เครื่อง Tensile Machine (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ สจล., 2558)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาได้มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้ให้ความสนใจในการศึกษาค้นคว้าการเสื่อมสภาพของพลาสติกพอลิโพรพิลีนในสภาวะต่างๆ รวมทั้งการศึกษาผลจากความร้อน และแสงที่มีต่อสมบัติของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

กาญจนา เอี้ยวสุวรรณ และเต็มสิริ หวังทวีทรัพย์ (2541) ได้ทำการศึกษาการเสื่อมสภาพทางความร้อน และทางแสงของพอลิโพรพิลีนกับพอลิเอทิลีนผสมกับขานอ้อย โดยนำขานอ้อยที่ปริมาณ 0%, 1%, 5% และ 10% โดยน้ำหนัก ผสมกับพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติกและนำไปฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Irradiation) ที่ระยะเวลาต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าพอลิโพรพิลีนที่เติมและไม่เติมขานอ้อยเมื่อผ่านการฉายแสงยูวีแล้ว สมบัติเชิงกลจะลดลงตามระยะเวลาการฉายแสง สมบัติทางกายภาพมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กน้อย คือมีความหนาเพิ่มขึ้น แต่ความกว้างและความยาวลดลงเล็กน้อย และสมบัติการดูดซับน้ำจะมีค่าการดูดซับน้ำสูงขึ้นตามระยะเวลาการฉายแสง เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ผ่านการฉายแสงมีปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้น ทำให้สมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

S.Mojtaba Mirabedini และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษามลกระทบของคลื่นรังสีไมโครเวฟที่มีต่อผิวหน้าของพอลิโพรพิลีน ซึ่งศึกษาจากความชุ่มน้ำ และการยึดเกาะ โดยการทาโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพื่อวัดความชุ่มน้ำของผิวสัมผัส ใช้เครื่อง SEM และ FTIR-ATR เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของตัวอย่าง ทดสอบการดึงเพื่อศึกษาการยึดเกาะของสีอะคริลิกของพอลิโพรพิลีน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของ Free energy ที่ผิวหน้าของพอลิโพรพิลีน เมื่อผ่านการฉายรังสีไมโครเวฟเป็นเวลา 120 วินาที จากผลการทดลองพบว่าพอลิโพรพิลีนที่ผ่านการฉายรังสีไมโครเวฟมาแล้วมีที่ผิวหน้าของพอลิโพรพิลีนกลายเป็น Hydrophilic (ชอบน้ำ) มากขึ้น จากข้อมูล FT-IR ที่เห็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากการพบหมู่คาร์บอนิล และพันธะคู่ของคาร์บอน SEM แสดงให้เห็นว่าบนผิวหน้าของพอลิโพรพิลีนเป็นรูบุมเล็กน้อย การทดสอบการยึดเกาะแสดงให้เห็นว่าสี และ Surface energy มีความแข็งแรงในการยึดเกาะมากขึ้น คือมีการยึดเกาะร่วมกัน (Cohesive) ในสายโซ่สามารถสรุปได้ว่ามีปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นบนผิวหน้าของพอลิโพรพิลีนเมื่อผ่านการฉายรังสีไมโครเวฟเป็นเวลา 120 วินาที

Hing Wa So and Alexander Taube (2004) ได้ทำการศึกษาว่าความร้อนจากไมโครเวฟนั้นมีผล Loss factor ที่ต่ำมาก พันธะของพอลิโพรพิลีนถูกให้ความร้อนด้วยเครื่อง WR340 สีเหล็ยมุมฉากได้มาตรฐาน โดยให้ที่คลื่นความถี่ 2.45 GHz ในโหมดการทำงาน TE10 สามารถควบคุมอุณหภูมิที่แตกต่างในแต่ละจุดได้ มีการจำลองแบบ 2 มิติ เพื่อหาการกระจายของอุณหภูมิในชั้น

Layer ของพอลิโพรพิลีน ขณะทำงานโดยเฉพาะผลของความแตกต่างของแต่ละช่วงเวลาสามารถคำนวณได้จากสมการแสดงความแตกต่าง จากผลการทดลองสร้างแบบจำลองนั้น มีอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาเพื่อทำการเสมือนให้ความร้อนโดยไม่โครเวฟสำหรับวัต การยึดเกาะ การกระจายอุณหภูมิในชั้น Layer ของพอลิโพรพิลีนที่การยึดเกาะส่วนใหญ่ถูกวัดโดยการกระจายสนามไฟฟ้าในตัวแปลง เนื่องจากสามารถกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นได้และความคุมอัตราความร้อนได้จึงทำให้ง่ายต่อการทำนายผล แสดงให้เห็นว่าโมเดลนี้ได้ผลและแม่นยำในการใช้เพื่อการทดลอง

Evelina Fasano และคณะ (2015) ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของมอนอเมอร์ และ สารเติมแต่งในกล่องอาหารไมโครเวฟ สารเติมแต่งที่ศึกษาได้แก่ 3-phthalates, 4-tert-octylphenol (OP), 4-nonylphenol (NP), bisphenol A (BPA) และ Di(2-ethylhexyl)adipate (DEHA) โดยใช้ QuEChERS ที่ถูกปรับให้มีความเหมาะสมแก่การตรวจสอบได้ทั้งในอาหารที่เป็นของแข็งและของเหลวซึ่งถูกบรรจุในพลาสติก และการใช้ก๊าซโครมาโทกราฟีควบคู่กับเครื่อง Mass Spectrometry เพื่อตรวจสอบอาหารที่ผ่านการให้ความร้อนโดยไม่โครเวฟ จากการทดลองการตรวจสอบโดยใช้ QuEChERS แสดงให้เห็นว่าสารเติมแต่งตรวจพบในชีสและน้ำซุ๊ปที่มีส่วนผสมหรือ วัตถุที่ช่วยให้เกิดการแสดงตัวของสาร 2 ชนิดมากขึ้นเล็กน้อยในอาหาร แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของระหว่างระดับความเข้มข้นของมอนอเมอร์ และสารเติมแต่งก่อนและหลังผ่านการอบด้วยไมโครเวฟ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความร้อนนั้นไม่ใช่สาเหตุหลักของการปนเปื้อน ซึ่งการพบการปนเปื้อนอาจจะมาจากการปรุงอาหารหรือพอลิคาร์บอเนต หรือภาชนะที่เป็นพลาสติกพอลิโพรพิลีนได้ โดยหลักแล้วความร้อนจากไมโครเวฟทำให้น้ำร้อน ดังนั้นอาจเป็นเพราะอุณหภูมิของพื้นผิวของอาหารมีอุณหภูมิไม่ถึงจุดที่มีการทำให้มอนอเมอร์ของพลาสติกเคลื่อนที่เข้าไปในอาหาร ดังนั้นการบริโภคอาหารที่ผ่านความร้อนไมโครเวฟจึงไม่ใช่ตัวที่เป็นความเสี่ยงต่อผู้บริโภคแม้ว่าอาหารที่บรรจุในพลาสติกหรืออาหารทำที่บ้านจะแตกต่างกันก็ตาม

Ruoyin Cai (2013) ศึกษาผลความร้อนจากไมโครเวฟที่มีต่อการแพร่ของสารตัวเติมจากพลาสติก PS, PP, PET ที่ใช้บรรจุอาหาร โดยใช้ของเหลว 4 ชนิดแทนอาหารได้แก่ น้ำมันพืชบริสุทธิ์ 3%(v/v) กรดน้ำส้ม 15%(v/v) เอทานอล และน้ำมันมะกอก ที่อุณหภูมิ 100°C ใส่พลาสติกแซนในของเหลวดังกล่าวเป็นเวลา 10 วัน ที่อุณหภูมิ 5°C จากนั้นใช้เทคนิค Gas Chromatography และ Mass Spectrometry วิเคราะห์ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการแพร่ของสารเติมแต่งสู่อาหารขึ้นกับเวลาที่ใช้ไมโครเวฟ ชนิดของวัสดุบรรจุภัณฑ์ และของเหลวที่สัมผัส Cai พบว่า PS เกิดการแพร่ของสารเติมแต่งได้ดีเมื่อบรรจุน้ำมันพืช ขณะที่ PET สารเติมแต่งจะเข้าสู่อาหารได้ดีที่สุดเมื่อบรรจุ 15%(v/v) เอทานอล และเมื่อให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเพียง 10 นาทีจะพบ Acetaldehyde ซึ่งเป็นสารที่อาจก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้บริโภคถ้าบรรจุ 3%(v/v) กรดน้ำส้ม และน้ำมันมะกอก สำหรับ PP เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พลาสติกพอลิโพรพิลีนบรรจุภัณฑ์อาหารแช่แข็ง โดยมีรูปแบบ 4 แบบ คือ

- Sample 1 มีลักษณะ ฐานกลม สีไม่มีสี ของบริษัท GREEN PACKS
- Sample 2 มีลักษณะ ฐานเหลี่ยม สีขาว ของบริษัท EZYGO
- Sample 3 มีลักษณะ ฐานกลม สีดำ ของบริษัท GREEN PACKS
- Sample 4 มีลักษณะ ฐานเหลี่ยม สีไม่มีสี ของบริษัท Micro Freez



รูปที่ 3.1 พลาสติกSample 1



รูปที่ 3.2 พลาสติกSample 2



รูปที่ 3.3 พลาสติกSample 3



รูปที่ 3.4 พลาสติกSample 4

2. ขวดเก็บตัวอย่าง (พลาสติกใสพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต (PET) ยี่ห้อ คริสตัล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สารละลาย 2,4-ไดไนโตรฟีนิลไฮดราซีน (2,4-Dinitrophenylhydrazine; 2,4-DNP)
4. น้ำมันปาล์ม ยี่ห้อ โอลีน

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ไมโครเวฟ ยี่ห้อ Samsung รุ่น ME711K
2. เครื่องวัดค่า pH ยี่ห้อ Metrohm (Swiss mode)
3. เครื่อง Conductivity ยี่ห้อ InoLab Cond Level 2
4. เทอร์โมมิเตอร์
5. เครื่อง Optika Microscopes บริษัท เบตเตอร์ ซินติเคท จำกัด
6. เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile Machine) Model.00-536M1 No.116182  
บริษัท Comotech
7. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) รุ่น SPECTRUM GX  
บริษัท Perkin Elmer
8. เครื่อง Thermogravimetric analysis (TGA) รุ่น Pyris 1 บริษัท Perkin Elmer
- 9 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น D8 Advance
10. เครื่องชั่งน้ำหนัก (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) รุ่น CP224S ยี่ห้อ Sartorius  
บริษัท SCIENTIFIC PROMOTION CO.,LTD.
11. ตู้อบความร้อน อุณหภูมิ 40 – 45 องศาเซลเซียส
12. ปีกเกอร์ ขนาด 100 มิลลิลิตร และขนาด 1000 มิลลิลิตร
13. กระบอกตวง ขนาด 50 มิลลิลิตร
14. หลอดทดลอง
15. บีเปต 10 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. กรวยกรอง
17. กระดาษกรอง ยี่ห้อ Whatman เบอร์ 42
18. ขาตั้งและฐาน (stand and base)
19. O – ring
20. ที่คีบพลาสติก และเหล็ก
21. อะลูมิเนียมฟรอยด์
22. เครื่องวัดความหนา ยี่ห้อ PEACOCK
23. กระจกนาฬิกา



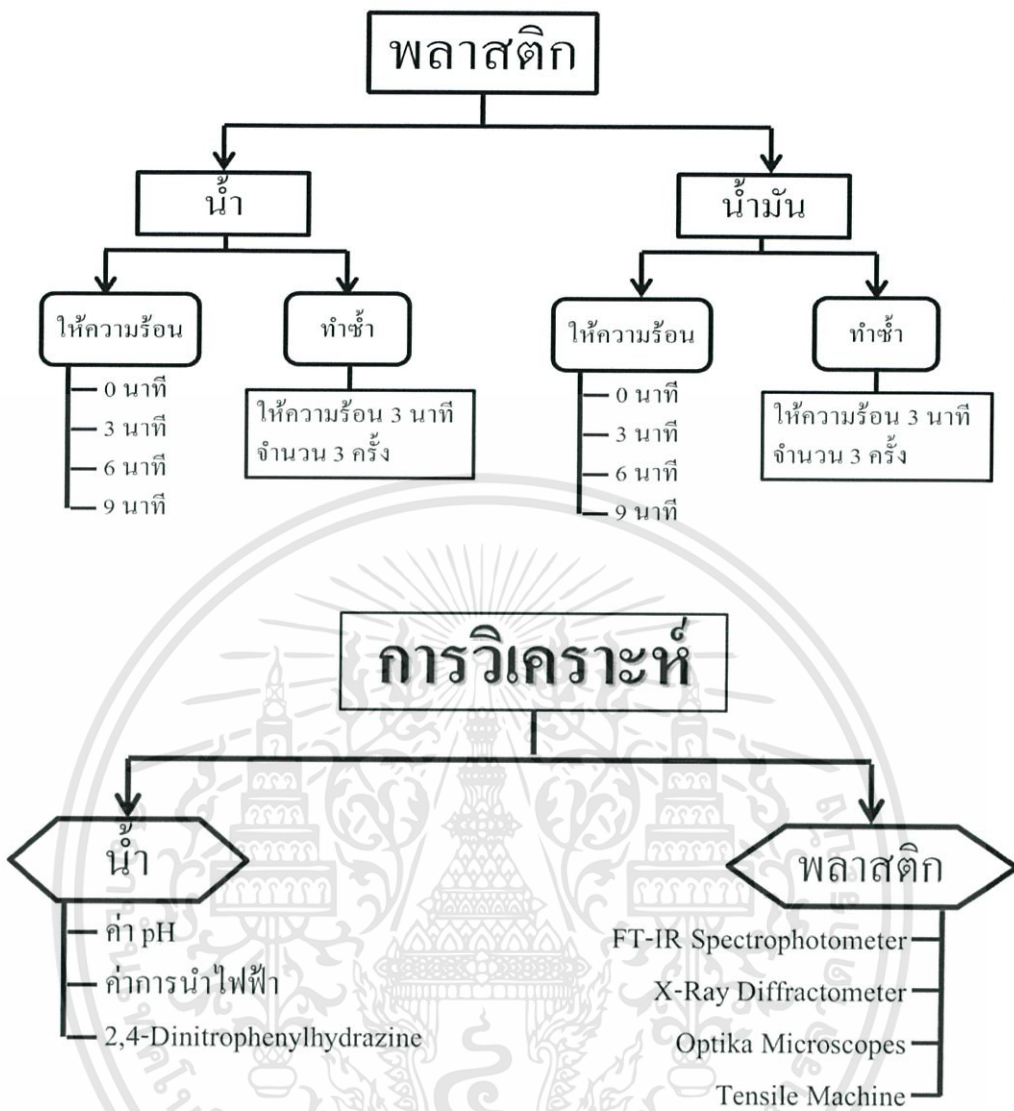
รูปที่ 3.5 เครื่องไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง

### ตารางที่ 3.1 ข้อมูลเครื่องไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง

ยี่ห้อ	Samsung
รุ่น	ME711K
การจ่ายไฟ	220 V ~ 50 Hz
การใช้พลังงาน	1150 W
กำลังไฟฟ้าต่ำสุด	100 วัตต์
กำลังไฟฟ้าสูงสุด	800 วัตต์
ความถี่ของคลื่นขณะทำงาน	2450 เมกะเฮิรตซ์
แม่กนีตรอน	OM75S(31)
วิธีระบายความร้อน	มอเตอร์พัดลมระบายความร้อน
ขนาดภายนอก (กว้าง x สูง x ลึก)	489 x 275 x 343 มิลลิเมตร
ขนาดภายใน (กว้าง x สูง x ลึก)	330 x 211 x 309 มิลลิเมตร
ปริมาตรความจุ	20 ลิตร
น้ำหนักสุทธิ	11.5 กิโลกรัม

### 3.3 การทดลอง

การทดลองนี้จำลองสถานการณ์เมื่ออาหารที่มีน้ำหรือน้ำมัน บรรจุอยู่ในพลาสติกพอลิโพรพิลีนได้รับความร้อนจากไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ตลอดการทดลอง เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของพลาสติกที่เกิดขึ้น โดยเก็บพลาสติกบรรจุภัณฑ์อาหารแช่แข็งซึ่งผลิตจากพอลิโพรพิลีน รูปร่าง สี เหลี่ยมและทรงกระบอก ฐานกลม ที่โปร่งใส สีขาว และสีดำ ล้างด้วยน้ำกลั่น เช็ดและวางให้แห้ง และยังเก็บขวดพลาสติกพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตมาใช้สำหรับเก็บน้ำตัวอย่างหลังจากทำการทดลอง โดยการทดลองใช้น้ำกลั่นที่ทางห้องปฏิบัติการชั้น 5 ตึกคณะวิทยาศาสตร์ เตรียมให้จำนวน 400 มิลลิลิตร



รูปที่ 3.6 แผนการดำเนินการทดลอง

การทดลองที่ 1 ใช้น้ำแทนอาหารแช่แข็งที่มีน้ำปนอยู่

1.1 นำตัวอย่างพลาสติกพอลิโพรพิลีน มาเติมน้ำกลั่นลงไป 400 มิลลิลิตร แล้วนำเข้าไมโครเวฟอุ่นเป็นเวลา 0, 3, 6 และ 9 นาที โดยตัวอย่างแต่ละแบบทำ 2 ซ้ำ

1.2 วัดค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกลั่น ทั้งก่อนและหลังการนำตัวอย่างพลาสติกพอลิโพรพิลีนเข้าไมโครเวฟ ที่ทำการอุ่นเป็นเวลา 0, 3, 6 และ 9 นาที บันทึกผล

1.3 เก็บตัวอย่างน้ำกลั่นที่ทำการอุ่นด้วยไมโครเวฟ ตามเวลาต่างๆในข้อ 1.2 ใส่ในขวดพลาสติกพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต

1.4 ปีเปิดน้ำกลั่นที่ เวลา 0, 3, 6 และ 9 นาทีของการทดลอง ลงหลอดทดลองขนาด 25 มิลลิลิตร หยด 2,4-ไดไนโตรฟีนิลไฮดราซีน (2,4-Dinitrophenylhydrazine; 2,4-DNP) ลงไป 3 หยด วางไว้หนึ่งคืน สังเกตสี และปริมาณของตะกอน นำไปกรอง และชั่งน้ำหนักตะกอน บันทึกผล

1.5 ตัดชิ้นงานพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้งก่อนและหลังได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ ขนาด ความกว้าง 2 เซนติเมตร และความยาว 10 เซนติเมตร มาทดสอบลักษณะพื้นผิวก่อนและหลังได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ โดยส่องกล้องจุลทรรศน์ (Optika Microscopes) บันทึกผลโดยการถ่ายภาพ

1.6 ตัดชิ้นงานพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้งก่อนและหลังได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ ขนาด ความกว้าง 2 เซนติเมตร และความยาว 10 เซนติเมตร มาทดสอบสมบัติทนแรงดึง โดยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Machine)

1.7 ตัดชิ้นงานพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้งก่อนและหลังได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ ขนาด ความกว้าง 2 เซนติเมตร และความยาว 2 เซนติเมตร มาทดสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก โดยเครื่อง X-Ray Diffractometer

การทดลองที่ 2 ใช้น้ำมันแทนอาหารที่มีน้ำมันปนอยู่

2.1 ใช้น้ำมันปาล์ม ทาบางๆพื้นผิวด้านในของตัวอย่างพลาสติกพอลิโพรพิลีนให้ทั่ว แล้วนำเข้าไมโครเวฟทำการอุ่นเป็นเวลา 0, 3, 6 และ 9 นาที โดยแต่ละตัวอย่างทำ 2 ซ้ำ

2.2 วัดค่าพีเอชของน้ำมัน หลังการนำตัวอย่างพลาสติกพอลิโพรพิลีนบรรจุภัณฑ์อาหารแช่แข็งเข้าไมโครเวฟทำการอุ่นเป็นเวลา 0 และ 3 นาที

2.3 ตัดชิ้นงานพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้งก่อนและหลังได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ ขนาด ความกว้าง 2 เซนติเมตร และความยาว 10 เซนติเมตร มาทดสอบลักษณะพื้นผิวก่อนและหลังได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ โดยส่องกล้องจุลทรรศน์ (Optika Microscopes) บันทึกผลโดยการถ่ายภาพ

2.4 ตัดชิ้นงานพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้งก่อนและหลังได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ ขนาด ความกว้าง 2 เซนติเมตร และความยาว 10 เซนติเมตร มาทดสอบสมบัติทนแรงดึง โดยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Machine)

2.5 ตัดชิ้นงานพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้งก่อนและหลังได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ ขนาด ความกว้าง 2 เซนติเมตร และความยาว 2 เซนติเมตร มาทดสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก โดยเครื่อง X-Ray Diffractometer

### การทดลองที่ 3 จำลองการใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกซ้ำหลายครั้ง

3.1 นำตัวอย่างพลาสติกพอลิโพรพิลีนบรรจุภัณฑ์อาหารแช่แข็งมาเติมน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร วัดค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ เทน้ำกลั่นออก เก็บน้ำตัวอย่างโดยการบรรจุลงขวดพลาสติกพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต

3.2 นำตัวอย่างพลาสติกพอลิโพรพิลีนจากข้อ 3.1มาเติมน้ำ 400 มิลลิลิตร อุ้มนในไมโครเวฟ 3 นาที นำออกจากเตา วางให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง วัดค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้า เทน้ำออกจากพลาสติก พอลิโพรพิลีน เก็บน้ำตัวอย่างโดยการบรรจุลงขวดพลาสติกพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต ทำซ้ำเช่นนี้ 2 ครั้งในพลาสติกพอลิโพรพิลีนใบเดิม นั่นคือพลาสติกพอลิโพรพิลีนใบนี้ผ่านความร้อน 3 ครั้งๆละ3 นาที

3.3 ปีเปิดน้ำที่เวลา 3 นาที ครั้งที่ 1, 2 และ 3 ลงหลอดทดลองขนาด 25 มิลลิลิตร หยด 2,4-ไดไนโตรฟีนิลไฮดราซีน (2,4-Dinitrophenylhydrazine; 2,4-DNP) ลงไป 3 หยด วางไว้หนึ่งคืน สังเกตสี และปริมาณของตะกอน นำไปกรอง และชั่งน้ำหนักตะกอน บันทึกผล

3.4 ตัดชิ้นงานพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้งก่อนและหลังได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ ขนาดความกว้าง 2 เซนติเมตร และความยาว 10 เซนติเมตร มาทดสอบลักษณะพื้นผิวก่อนและหลังได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ โดยส่องกล้องจุลทรรศน์ (Optika Microscopes) บันทึกผลโดยการถ่ายภาพ

3.5 ตัดชิ้นงานพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้งก่อนและหลังได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ ขนาดความกว้าง 2 เซนติเมตร และความยาว 10 เซนติเมตร มาทดสอบสมบัติทนแรงดึง โดยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Machine)

3.6 ตัดชิ้นงานพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้งก่อนและหลังได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ ขนาดความกว้าง 2 เซนติเมตร และความยาว 2 เซนติเมตร มาทดสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก โดยเครื่อง X-Ray Diffractometer

## 3.4 การทดสอบสมบัติ

### 3.4.1 หมู่ฟังก์ชัน

นำตัวอย่างพลาสติกมาชูดเป็นผง มาตรวจวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง FT-IR spectrophotometer ในช่วงเลขคลื่น  $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$

### 3.4.2 สมบัติเชิงคุณภาพ

ศึกษาโดยเครื่อง X-Ray Diffractometer

นำตัวอย่างพลาสติกตัดเป็นแผ่นขนาด  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  โดยทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกของแผ่นพลาสติกตัวอย่าง และ Scan Method ที่ใช้ในการทดลอง

Start 5 deg

Stop 5 deg

Step size 0.05 deg

Time/Step 1 Sec

### 3.4.3 สมบัติเชิงกล

สมบัติความแข็งแรงดึง ศึกษาโดยใช้เครื่อง Tensile Machine

สมบัติที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึงที่จุดขาด (Tensile strength at break) การยืด (Elongation) โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล และโปรแกรม DogBone 1.9.7 เตรียมชิ้นงานขนาด  $2 \times 10 \text{ cm}^2$  และสภาวะที่ใช้ในการทดลอง

Load cell 2 KN

Test speed 50 mm/min

Gauge Length 25 mm

### 3.4.4 สัณฐานวิทยา

ศึกษาโดยใช้เครื่อง Optika Microscopes โดยใช้โปรแกรม Optika view ควบคุมการทำงาน

นำตัวอย่างพลาสติกตัดเป็นแผ่นขนาด  $2 \times 10 \text{ cm}^2$  โดยทำการศึกษาลักษณะพื้นผิว รอยขีดข่วน และรอยร้าวของแผ่นพลาสติกตัวอย่าง

## ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

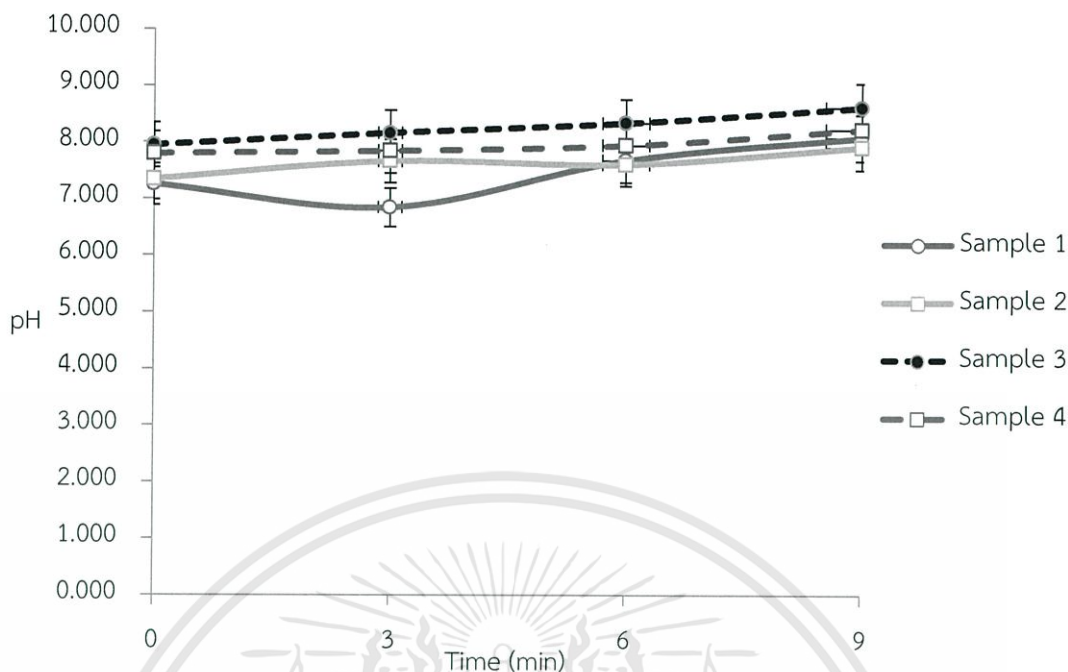
โครงการนี้ศึกษาการเสื่อมสภาพของพลาสติกบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารแช่แข็งทำจากพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน ซึ่งเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่ใช้อยู่ตามร้านสะดวกซื้อ โดยจำลองสถานการณ์เมื่อพลาสติกสัมผัสของเหลวเช่น น้ำและน้ำมัน ได้รับความร้อนจากไมโครเวฟที่ห่อหุ้มซุง ที่ระดับพลังงาน 800 วัตต์ เป็นเวลา 3, 6, และ 9 นาที จากนั้นในส่วนของน้ำนำมาทดสอบ pH ค่าการนำไฟฟ้า และทดสอบหาสารประเภทแอลดีไฮด์หรือคีโตน ก่อนและหลังได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ ทดสอบสมบัติของพลาสติกก่อนและหลังได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ สมบัติที่ทดสอบได้แก่ สัมพันธวิทยา โครงผลึกของพลาสติก สมบัติเชิงกล และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของพลาสติก พอลิโพรพิลีน บรรจุภัณฑ์ที่ถูกเลือกมาทดลองมี 4 รูปแบบ ได้แก่ Sample 1 (ฐานกลม สีไม่มีสี), Sample 2 (ฐานเหลี่ยมผืนผ้า สีขาว), Sample 3 (ฐานกลม สีดำ) และ Sample 4 (ฐานเหลี่ยม สีไม่มีสี) ผลการทดลองมีดังนี้

### 4.1 ผลของเวลาที่มีต่อน้ำกลั่นเมื่อได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ

น้ำกลั่นที่ใช้ในการทดลองใช้ของห้องปฏิบัติการเคมีชั้น 5 ตึกคณะวิทยาศาสตร์ การทดลองสมบัติของน้ำกลั่นทำได้โดยเทน้ำกลั่นจำนวน 400 มิลลิลิตร ลงในบรรจุภัณฑ์พลาสติกพอลิโพรพิลีน ทั้ง 4 รูปแบบ แล้วนำไปให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่เวลา 0, 3, 6 และ 9 นาที จากนั้นนำน้ำมาวัดค่า pH และค่าการนำไฟฟ้า นอกจากนี้ทำการทดลองเทน้ำกลั่นลงในบรรจุภัณฑ์ทั้ง 4 รูปแบบ ให้ความร้อนเป็นเวลา 3 นาที 3 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังนี้

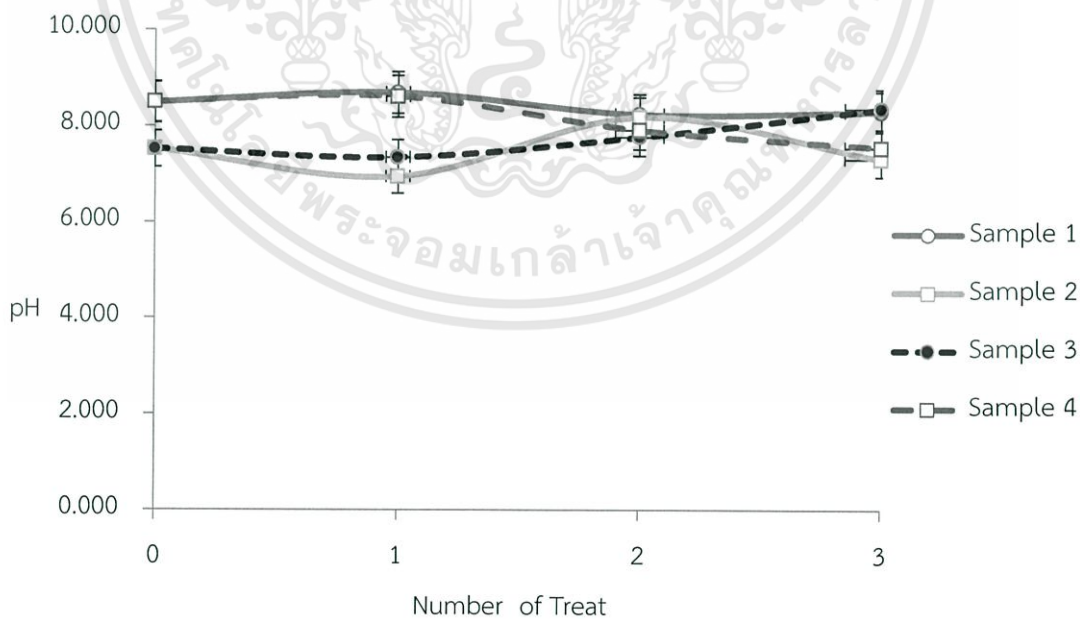
#### 4.1.1 ค่าพีเอช (pH) ของน้ำ

ค่า pH ของน้ำกลั่นในบรรจุภัณฑ์พลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้ง 4 รูปแบบที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ จากการทดลองพบว่า ค่า pH ของน้ำกลั่นที่บรรจุอยู่ในพลาสติกเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับก่อนได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ และมีแนวโน้มไปทางเดียวกัน แสดงว่า รูปร่างของภาชนะและสารเติมแต่ง สีขาว สีดำ ที่ผสมอยู่ในพลาสติก มีผลน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำ สำหรับบรรจุภัณฑ์ทั้ง 4 รูปแบบนั้นพบการเปลี่ยนแปลง pH ใน Sample 3 (ฐานกลม สีดำ) มากที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของน้ำกับเวลา

เมื่อน้ำกลั่นที่บรรจุในพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้ง 4 รูปแบบ ได้รับความร้อนด้วยไมโครเวฟซ้ำๆ กัน 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งจะใช้เวลา 3 นาที เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำกลั่น ดังรูปที่ 4.2

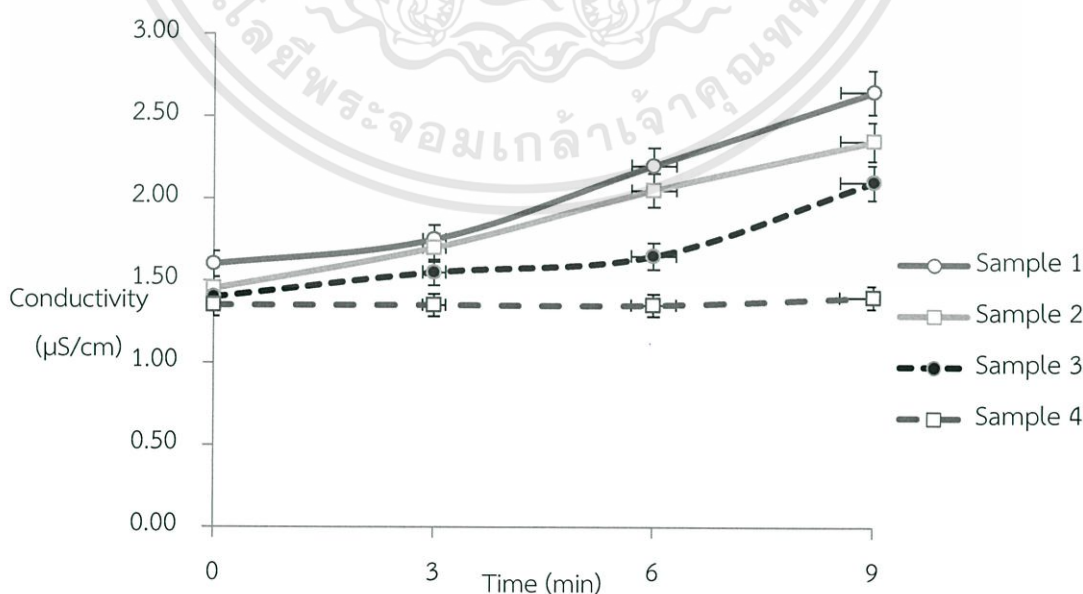


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของน้ำกับจำนวนครั้งที่ใช้พลาสติกซ้ำๆ

จากรูปที่ 4.2 พบว่าค่า pH ของน้ำเปลี่ยนแปลงขึ้นๆลงๆตามจำนวนครั้งที่ได้รับความร้อนซ้ำ เมื่อเปรียบเทียบค่า pH ของน้ำก่อนและหลังจากได้รับความร้อน ครั้งที่ 3 พบว่า Sample 1 (ฐานกลม สีไม่มีสี) และ Sample 2 (ฐานเหลี่ยม สีขาว) มีการเปลี่ยนแปลงค่า pH น้อยมาก ส่วน Sample 3 (ฐานกลม สีดำ) มีแนวโน้ม pH เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และ Sample 4 (ฐานเหลี่ยม สีไม่มีสี) มีแนวโน้ม pH ลดลงเล็กน้อย นั่นคือการใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกพอลิโพรพิลีนซ้ำหลายครั้ง ซึ่งในการทดลองนี้ ซ้ำ 3 ครั้ง มีโอกาสทำให้ค่า pH ของอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์ที่มีสารเติมแต่งสีดำ

#### 4.1.2 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ

การนำไฟฟ้า (Conductivity) เป็นวิธีการวัดความสามารถของน้ำในการส่งผ่านกระแสไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากการมีอยู่ของสารประกอบอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น แอนไอออนของคลอไรด์ ไนเตรต ซัลเฟต และฟอสเฟต (แอนไอออนคือไอออนที่มีประจุลบ) หรือแคทไอออนของโซเดียม แมกนีเซียม เหล็ก และอะลูมิเนียม (แคทไอออนคือไอออนที่มีประจุบวก) ค่าการนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย ถ้าอุณหภูมิสูงค่าการนำไฟฟ้าก็จะยิ่งมากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงรายงานค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (25°C) (การประปานครหลวง, 2557) ในการทดลองนี้วัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกลั่นที่บรรจุในพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้ง 4 รูปแบบ เมื่อได้รับความร้อนจากไมโครเวฟเป็นเวลา 0, 3, 6 และ 9 นาที ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3



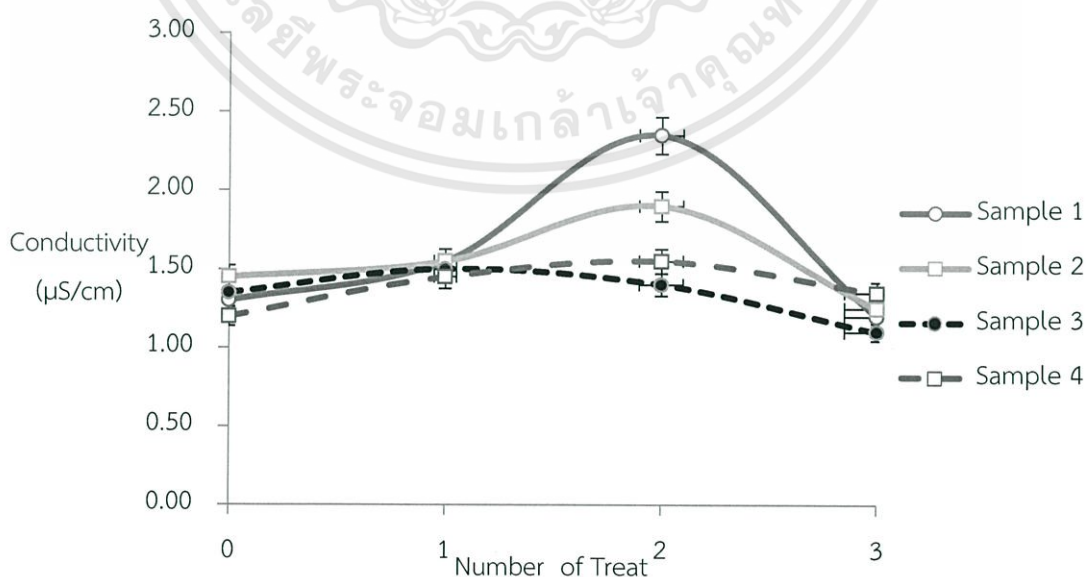
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่า Sample 1 (ฐานกลม สีไม่มีสี), Sample 2 (ฐานเหลี่ยม สีขาว), Sample 3 (ฐานกลม สีดำ) มีค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกลั่นที่บรรจุอยู่ในพลาสติกเพิ่มขึ้นตามเวลา การเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้าเนื่องจากน้ำเป็นโมเลกุลมีขั้วโดยออกซิเจนเป็นขั้วลบแล้วไฮโดรเจนเป็นขั้วบวกเมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟซึ่งมีความถี่สูงมาก โมเลกุลน้ำจะเกิดการหมุนและเสียดสีกันระหว่างโมเลกุลของน้ำ ทำให้เกิดความร้อนขึ้น สารที่มีไอออนอยู่ในน้ำเกิดการเคลื่อนที่ชนกัน หรือเสียดสีกับอนุภาคข้างเคียงทำให้เกิดความร้อนขึ้น และอาจทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุ หรือเกิดประจุต่างไปจากก่อนได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ (ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ และดร.นิธิยา, 2550) แต่ Sample 4 (ฐานเหลี่ยม สีไม่มีสี) ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เรียงลำดับค่าการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงสูงสุดไปต่ำสุดได้ดังนี้

Sample 1 (ฐานกลม สีไม่มีสี) > Sample 2 (ฐานเหลี่ยม สีขาว) > Sample 3 (ฐานกลม สีดำ) > Sample 4 (ฐานเหลี่ยม สีไม่มีสี)

ผลการทดลองแสดงว่าสารเติมแต่งสีดำที่มีอยู่ใน Sample 3 (ฐานกลม สีดำ) ยังมีส่วนดูดซับพลังงานความร้อนได้ดีกว่าทำให้ส่งผ่านความร้อนไปยังน้ำลดลง (ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ และดร.นิธิยา, 2550) การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของ Sample 3 จึงต่ำกว่า Sample 1 (ฐานกลม สีไม่มีสี) นอกจากนี้ภาชนะที่เป็นเหลี่ยมเช่น Sample 4 (ฐานเหลี่ยม สีไม่มีสี) อาจได้รับความร้อนไม่เท่ากันทุกด้านเมื่อเทียบกับภาชนะทรงกลม การเปลี่ยนแปลงของน้ำที่บรรจุอยู่ในภาชนะจึงน้อยกว่า และการที่น้ำใน Sample 2 (ฐานเหลี่ยม สีขาว) มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่า Sample 4 ทั้งๆที่มีรูปร่างภาชนะสีเหลี่ยมเหมือนกันอาจเนื่องจากสารเติมแต่งสีขาวที่ผสมอยู่ใน Sample 2 ช่วยดูดซับพลังงานได้ดีกว่า ดังนั้นรูปร่างของภาชนะ ความใส ความทึบสารเติมแต่งในพลาสติกบรรจุภัณฑ์จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำด้วย



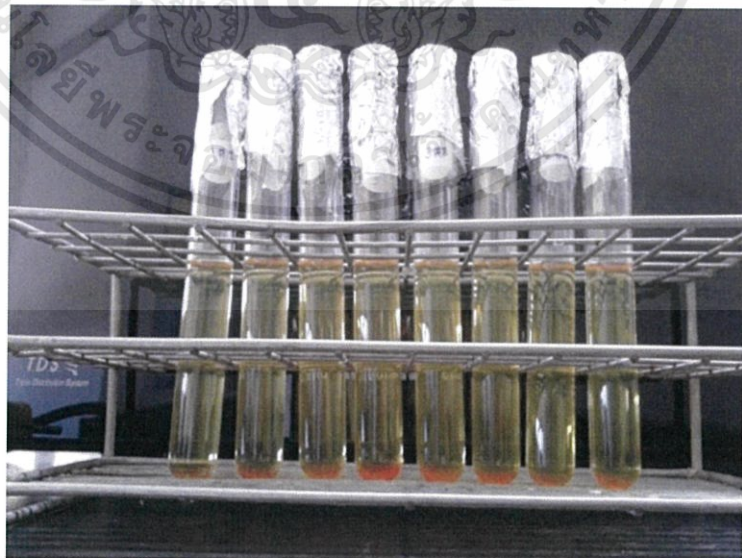
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกับจำนวนครั้งที่ใช้ซ้ำๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกลั่นที่บรรจุในพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้ง 4 รูปแบบ ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟซ้ำๆกัน 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งใช้เวลา 3 นาที แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำในพลาสติกพอลิโพรพิลีน เมื่อได้รับความร้อนครั้งที่ 2 Sample 1 (ฐานกลม สีไม่มีสี) > Sample 2 (ฐานเหลี่ยม สีขาว) > Sample 4 (ฐานเหลี่ยม สีไม่มีสี) และเมื่อได้รับความร้อนครั้งที่ 3 ค่าการนำไฟฟ้ากลับลดลงมาใกล้เคียงกับก่อนได้รับความร้อน ส่วน Sample 3 (ฐานกลม สีดำ) ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำลดลงเมื่อได้รับความร้อนครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 นั่นคือไอออนที่อยู่ในน้ำจะเกิดการเปลี่ยนแปลงหากนำมาผ่านความร้อนจากไมโครเวฟซ้ำหลายครั้งเปรียบเทียบ ภาชนะฐานกลมได้แก่ Sample 1 และ Sample 3 พบว่าสารเติมแต่งสีดำที่ผสมอยู่ในพลาสติก Sample 3 นอกจากดูดซับพลังงานความร้อนไว้บางส่วนแล้วยังอาจทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุ หรือทำให้เกิดประจุต่างไปจากก่อนได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ จึงมีค่าการเปลี่ยนแปลงลดลง ส่วน ภาชนะฐานเหลี่ยม Sample 2 สารเติมแต่งสีขาวที่ผสมอยู่ใน Sample 2 อาจเกิดหลุดออก[19] ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงมากกว่า Sample 4

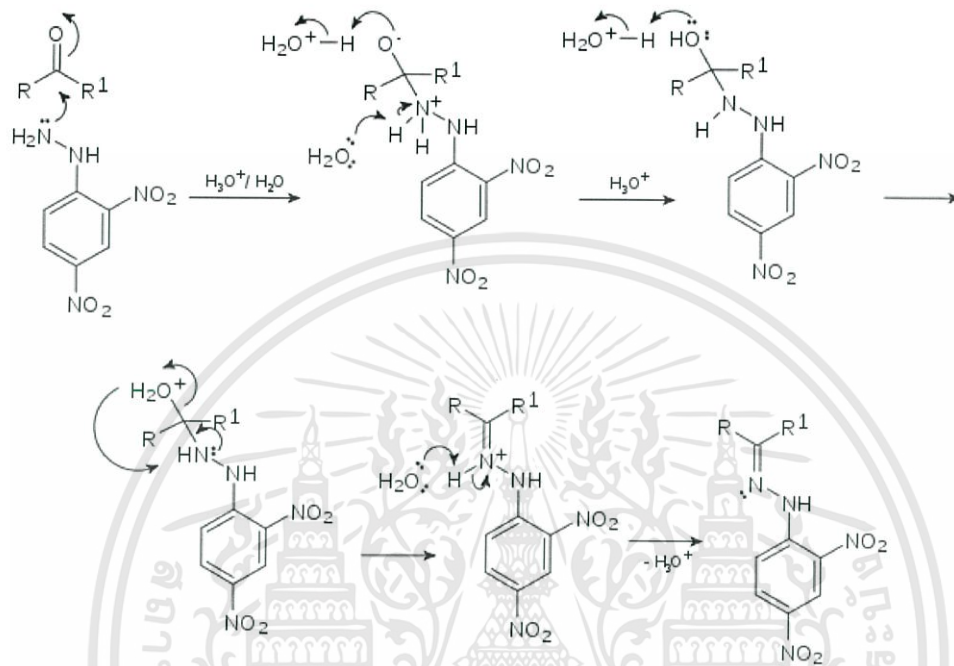
#### 4.1.3 ปริมาณตะกอน 2,4-Dinitrophenylhydrazone ในน้ำ

แอลดีไฮด์และคีโตนเป็นสารอินทรีย์ที่อาจเกิดขึ้นจากการเสื่อมสภาพของพลาสติกเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และแพร่อยู่ในชั้นน้ำที่สัมผัส การทดลองนี้วัดปริมาณตะกอน 2,4-Dinitrophenylhydrazone ที่เกิดขึ้นในน้ำกลั่นบรรจุในพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้ง 4 รูปแบบ ทั้งก่อนและหลังการได้รับความร้อนจากไมโครเวฟที่เวลา 0, 3, 6 และ 9 นาที



รูปที่ 4.5 ตะกอน 2,4-Dinitrophenylhydrazone สีส้ม ในน้ำ

เนื่องจากสารทดสอบ 2,4-Dinitrophenylhydrazine (2,4-DNP) จะทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิลของสารประเภทแอลดีไฮด์หรือคีโตน แล้วเกิดตะกอนสีส้มของ 2,4-Dinitrophenylhydrazone ดังสมการ



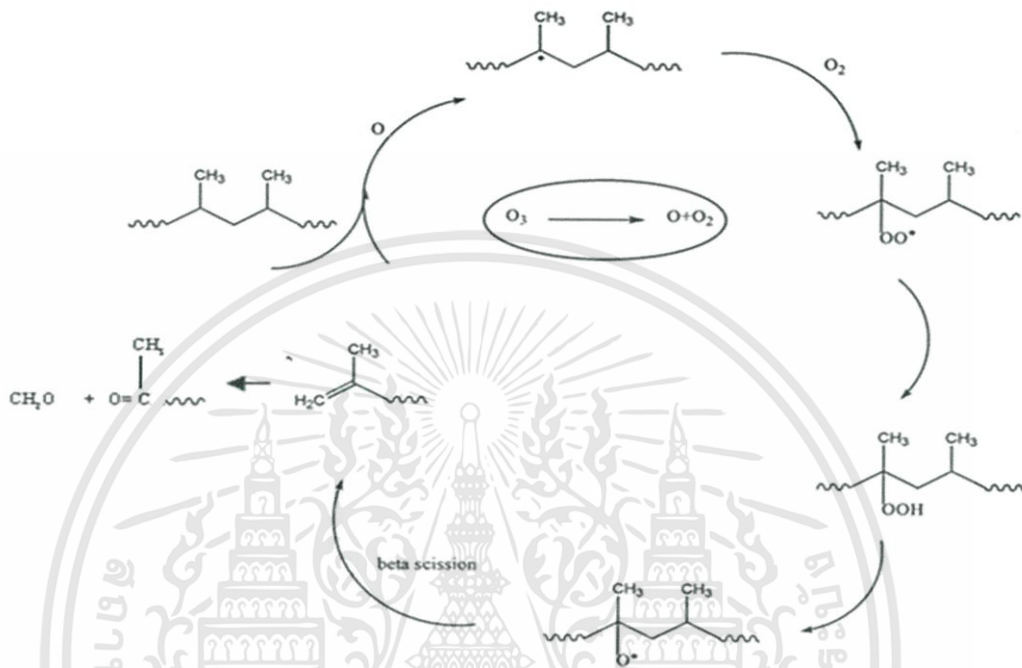
รูปที่ 4.6 สมการแสดงปฏิกิริยาระหว่างแอลดีไฮด์หรือคีโตนกับ 2,4-Dinitrophenylhydrazine (ห้องสมุดภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2546)

จากการทดลองพบว่าน้ำกลั่นที่ใช้มีตะกอนสีส้มเกิดขึ้นเล็กน้อยแสดงว่า มีสารประเภทแอลดีไฮด์หรือคีโตนอยู่บ้างแล้ว ดังนั้นผลการทดลองจะทำการเปรียบเทียบปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นก่อนและหลังได้รับความร้อนจากไมโครเวฟในแต่ละตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 น้ำหนักตะกอน 2,4-Dinitrophenylhydrazone ที่เวลาต่าง ๆ กันของแต่ละตัวอย่าง

เวลา	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
0	0.00305	0.00325	0.00535	0.00550
3	0.00390	0.00345	0.00815	0.00715
6	0.00450	0.00435	0.00950	0.00505
9	0.00530	0.00510	0.00600	0.00720

จากตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณตะกอน 2,4-Dinitrophenylhydrazone ในน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ แสดงว่าพลาสติกพอลิโพรพิลีนเมื่อได้รับความร้อนนานขึ้นอาจเกิดอนุมูลอิสระ แล้วทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้เกิดการตัดขาดสายโซ่พอลิเมอร์ เกิดโมเลกุลเล็กๆของสารประเภทแอลดีไฮด์และคีโตนแพร่ออกสู่น้ำ ดังสมการ



รูปที่ 4.7 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิโพรพิลีนเกิดเป็นสารประเภทแอลดีไฮด์หรือคีโตน (ห้องสมุดภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2546)

พลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้ง 4 รูปแบบเมื่อนำมาให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟซ้ำๆกัน 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งจะใช้เวลา 3 นาที วัดปริมาณ 2,4-Dinitrophenylhydrazone ที่มีอยู่ในน้ำกลั่นได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณตะกอน 2,4-Dinitrophenylhydrazone ในน้ำเมื่อให้ความร้อนซ้ำๆ

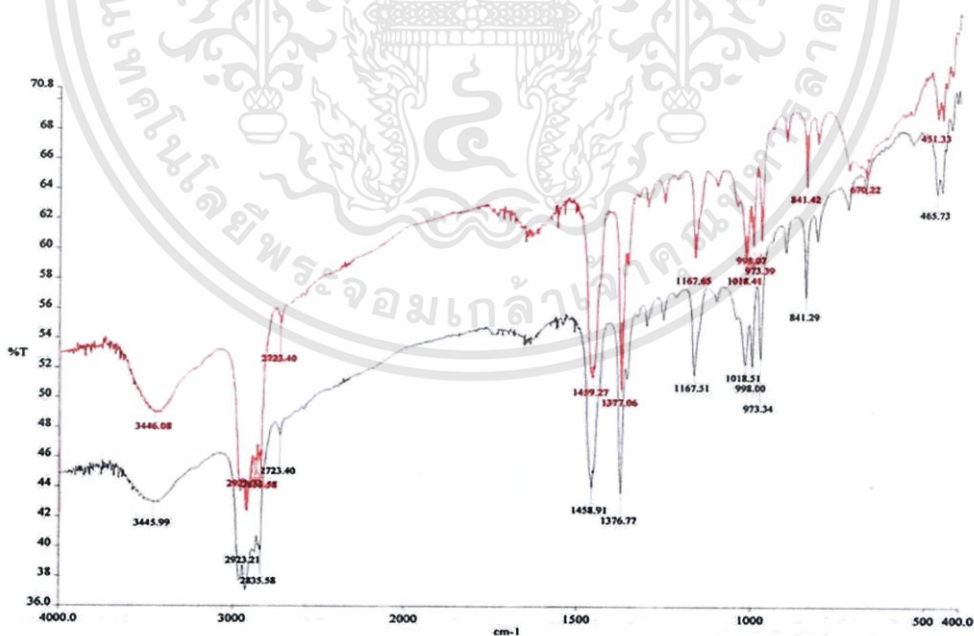
จำนวนซ้ำ	น้ำหนัก (g)	
	ก่อน	หลัง
1	17.0023	17.0042
2	17.4848	17.4850
3	17.3545	17.3554
ค่าเฉลี่ย	17.28053	17.28153

จากตารางที่ 4.2 พบว่าปริมาณตะกอน 2,4-Dinitrophenylhydrazone ในน้ำในภาชนะบรรจุภัณฑ์ทั้ง 4 รูปแบบ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามจำนวนครั้งที่ทำซ้ำ แสดงว่าภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ พลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้ง 4 รูปแบบเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้บ้าง

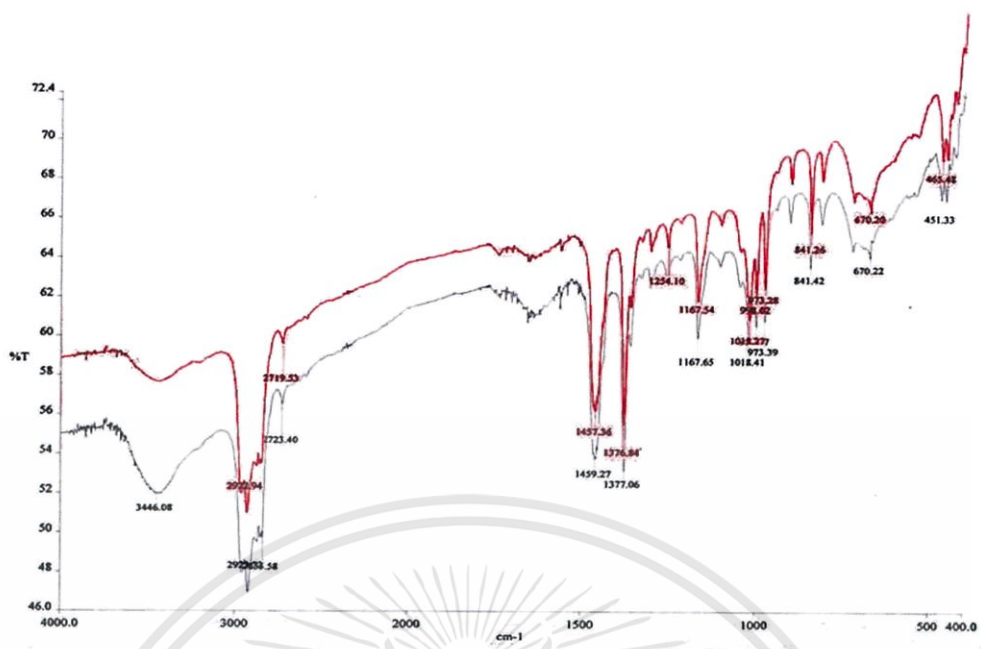
จากผลการทดลองพบว่า น้ำกลั่นที่ใช้ในการทดลองมีสารปนเปื้อนประเภทแอลดีไฮด์หรือคีโตนเกิดขึ้นก่อนได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ เนื่องจากน้ำกลั่นที่นำมาใช้ในห้องปฏิบัติการมีการปนเปื้อนมาจากโรงงาน เมื่อนำน้ำกลั่นมาใช้ในการทดลองผ่านการให้ความร้อนจากไมโครเวฟ ความร้อนทำให้พลาสติกพอลิโพรพิลีนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสลายตัวให้สารประเภทแอลดีไฮด์หรือคีโตน จึงมีปริมาณตะกอน 2,4-Dinitrophenylhydrazone เกิดเพิ่มขึ้น

## 4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

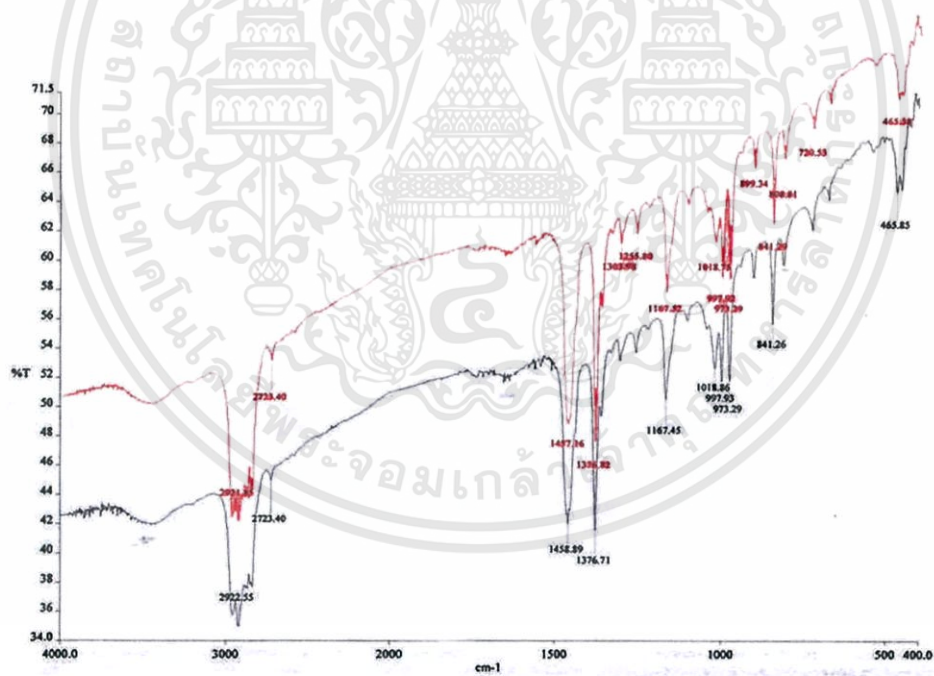
การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพลาสติกพอลิโพรพิลีนบรรจุภัณฑ์อาหารแช่แข็ง โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR Spectrophotometer) ซึ่งพิจารณาจากระยะเวลาที่ใช้ในการอุ่นพลาสติกพอลิโพรพิลีน รูปแบบของพลาสติกพอลิโพรพิลีน และพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่สัมผัสกับน้ำมันแล้วเกิดการเสถียรภาพเมื่อได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ



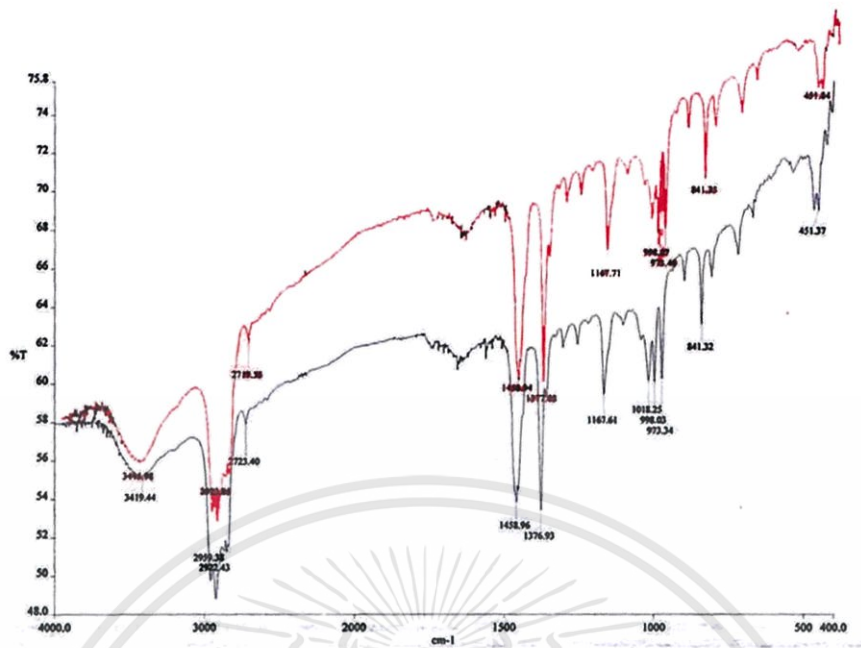
รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ FT-IR ของ Sample 1 สัมผัสน้ำให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 0 และ 6 นาที



รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ FT-IR ของ sample 2 สัมผัสน้ำให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 0 และ 6 นาที



รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์ FT-IR ของ Sample 3 สัมผัสน้ำให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 0 และ 6 นาที

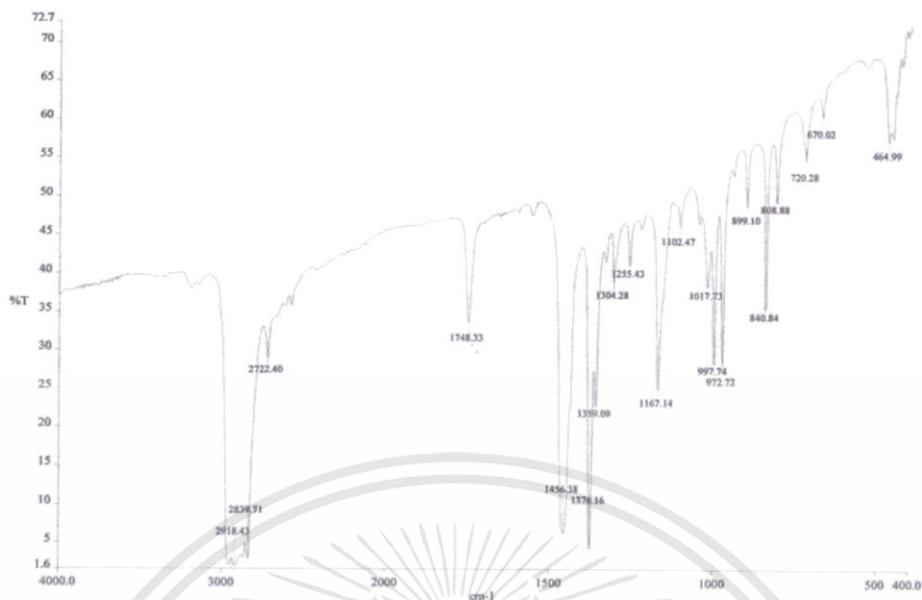


รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์ FT-IR ของ Sample 4 สัมผัสน้ำให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 0 และ 6 นาที

\*หมายเหตุ เส้นสีดำคือพลาสติกที่ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 0 นาที

เส้นสีแดงคือพลาสติกที่ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 6 นาที

FT-IR ของรูปที่ 4.8-4.11 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างพลาสติกทั้ง 4 รูปแบบเป็นพลาสติกประเภทเดียวกันจริง เพราะให้พีคต่างๆที่ตำแหน่งเดียวกัน โดยเลขคลื่นประมาณ  $3400\text{ cm}^{-1}$  แสดงหมู่ฟังก์ชัน-OH ของ ROOH ที่เกิดในพลาสติก และเลขคลื่นประมาณ  $2900\text{ cm}^{-1}$  แสดงหมู่ฟังก์ชัน-CH stretching เลขคลื่นประมาณ  $1400\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$  แสดง Asymmetric และ Symmetric bending ของหมู่ฟังก์ชัน-CH<sub>3</sub> เลขคลื่นประมาณ 1160, 1000, 970 และ  $840\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีคแหลม แสดงลักษณะเฉพาะของพอลิโพรพิลีน แต่ Sample 2 (ฐานเหลียม สีขาว) มีหมู่ฟังก์ชันที่เลขคลื่นประมาณ  $670\text{ cm}^{-1}$  เพิ่มขึ้นมาซึ่งอาจเป็นสารเติมแต่งที่ทำให้พลาสติกเป็นสีขาว เมื่อพิจารณาผลการทดลองเปรียบเทียบกันของพลาสติกสัมผัสน้ำที่ได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ 0 และ 6 นาที ดังรูปที่ 4.8-4.11 พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้ง 4 รูปแบบอย่างชัดเจน นั่นคือภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้พลาสติกพอลิโพรพิลีนยังคงทนต่อความร้อนที่ได้รับความร้อนจากไมโครเวฟได้

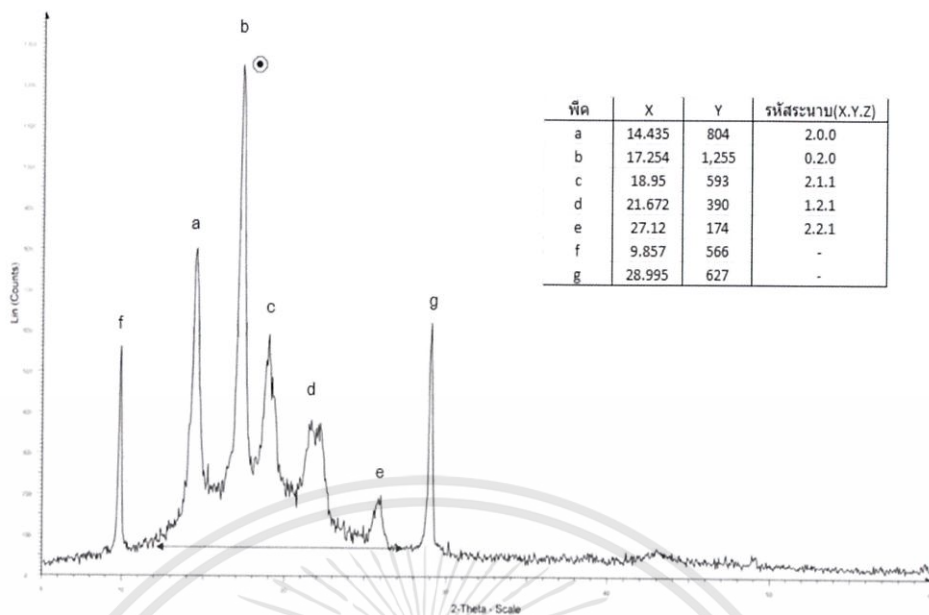


รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์ FT-IR ของ Sample 1 สัมผัสน้ำมันให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 9 นาที

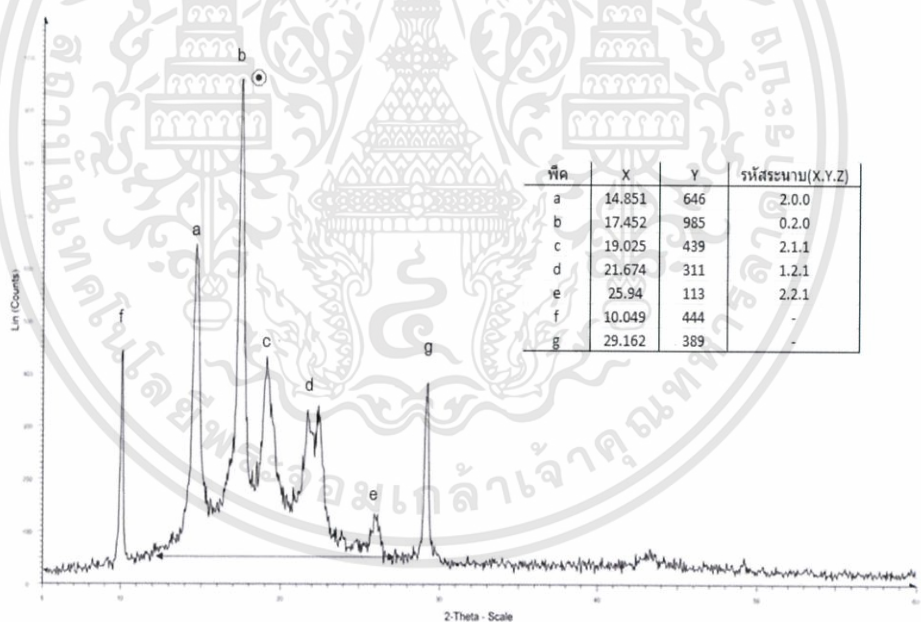
รูปที่ 4.12 เป็นผล FT-IR ของ Sample 1 (ฐานกลม ไส้ไม่มีสี) ที่ทำผิวด้านในด้วยน้ำมันได้รับความร้อนจากไมโครเวฟเวลา 9 นาที พลาสติกเกิดการหลอมละลาย เกิดการเสียสภาพจึงนำพลาสติกออกจากไมโครเวฟ ปลดปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำมาวิเคราะห์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.8 กับรูปที่ 4.12 พบว่ามีพีคของหมู่คาร์บอนิลเกิดขึ้นชัดเจนที่เลขคลื่นประมาณ  $1700\text{ cm}^{-1}$  และพีคของหมู่-OH ที่เลขคลื่นประมาณ  $3400\text{ cm}^{-1}$  หายไป นั่นคือเวลา 9 นาที พลาสติกเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและเกิดการสลายตัวของ ROOH ซึ่งเป็นสาเหตุให้หมู่คาร์บอนิลชัดเจนขึ้น

### 4.3 ผลของไมโครเวฟต่อโครงสร้างผลึกพลาสติก

นำชิ้นส่วนตัวอย่างพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้ง 4 รูปแบบที่สัมผัสน้ำมันผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของพลาสติก ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ได้ผลดังนี้



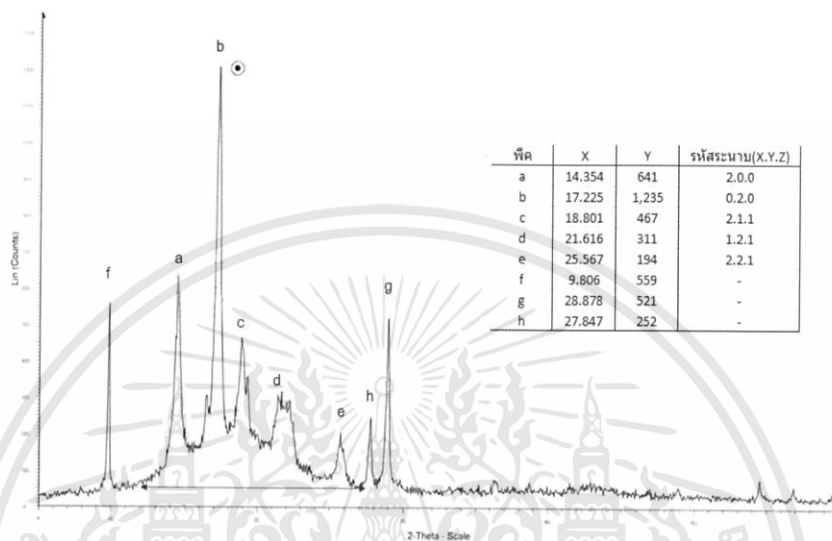
รูปที่ 4.13 โครงผลึกของ Sample1 ที่สัมผัสน้ำได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ 0 นาที



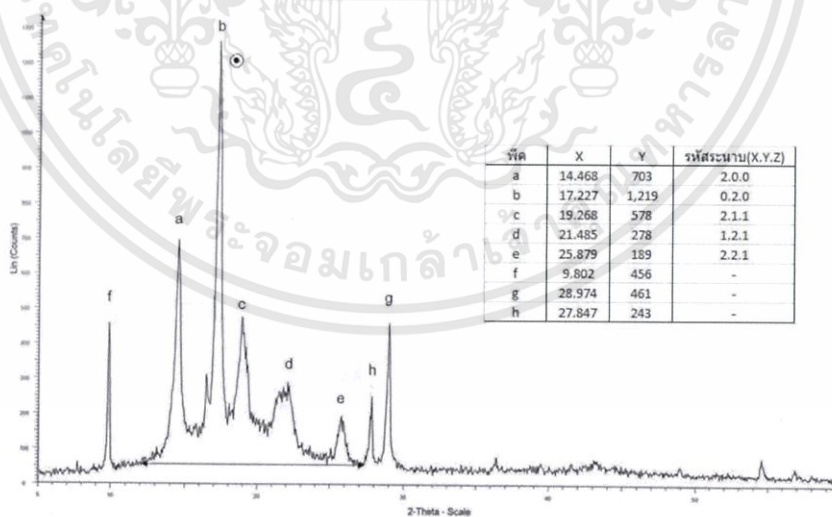
รูปที่ 4.14 โครงผลึกของ Sample1 ที่สัมผัสน้ำได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ 9 นาที

จากรูปที่ 4.13 - 4.14 พบพิกัด Monoclinic crystal ของพอลิโพรพิลีน (สุทธิพันธ์, 2555) (Qiang and Jiawe, 2013) ในช่วง  $2\theta$  ที่ 14-29 พิกัด a, b, c, d, e และ g และพบอีก 1 พิกัด คือพิกัด f ซึ่งเป็นสารเติมแต่ง (Additives) เมื่อนำรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 มาเปรียบเทียบกับพบว่า ค่า X เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งแสดงตำแหน่งของพีค a, b, c, d, e และ g ไม่มีความแตกต่างกันมาก แสดงให้เห็นว่าความร้อนจากไมโครเวฟ 800 วัตต์ ไม่ทำให้โครงสร้างของพลาสติก Sample 1 (ฐานกลม ไส้ไม่มีสี) ที่สัมผัสน้ำเป็นเวลา 9 นาที เกิดการเปลี่ยนแปลง สำหรับค่า Y หมายถึงความเข้มของพีค แต่ละตำแหน่งนั้นมียาลดลงทุกพีค แสดงว่าความร้อนทำให้ความเป็นผลึกของพลาสติกลดลง

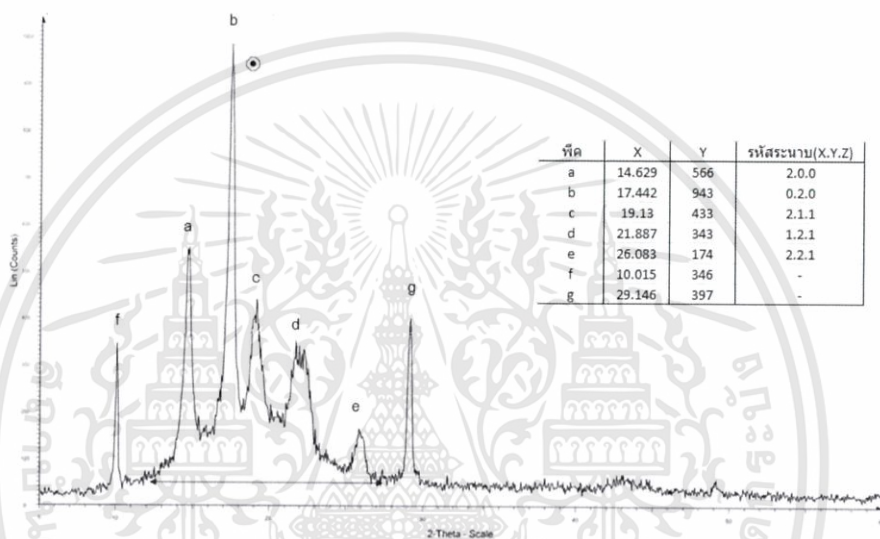


รูปที่ 4.15 โครงผลึกของ Sample 2 ที่สัมผัสน้ำได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ 0 นาที

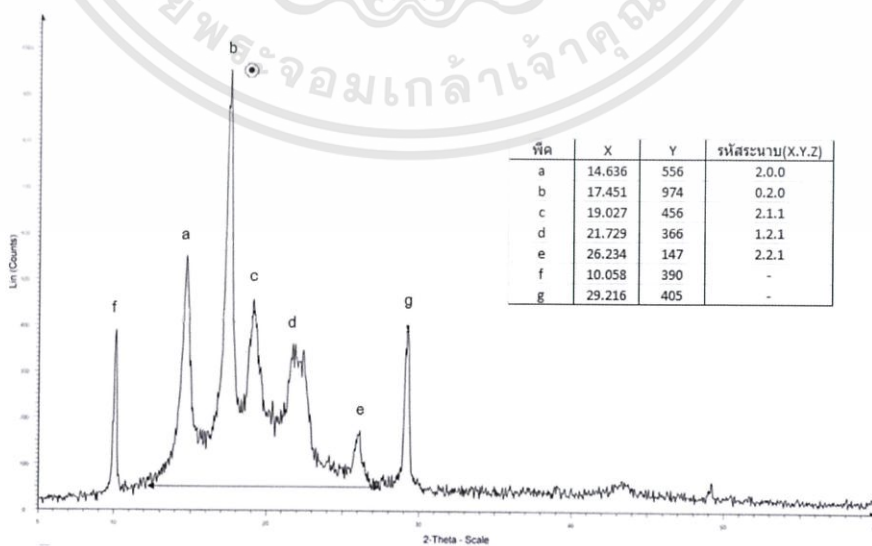


รูปที่ 4.16 โครงผลึกของ Sample 2 ที่สัมผัสน้ำได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ 9 นาที

จากรูปที่ 4.15 - 4.16 พบพิกัด Monoclinic crystal ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของพลาสติกพอลิโพรพิลีนในช่วง  $2\Theta$  ที่ 12-29 พิกัด a, b, c, d, e และ g และพบพิกัดอีก 2 พิกัด คือพิกัด f ที่คาดว่าน่าจะเป็นสารเติมแต่ง เช่นเดียวกับ Sample 1 (ฐานกลม ใสไม่มีสี) แต่มีพิกัดที่เพิ่มเติม คือพิกัด h คาดว่าน่าจะเป็นพิกัดของสารเติมแต่งประเภทสารตัวเติม(Fillers) เพื่อให้เกิดสีขาวซึ่งได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (Stefano Besco, et al., 2014) เมื่อนำรูปที่ 4.15 มาเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.16 พบว่าโครงสร้างผลึกของพอลิโพรพิลีนไม่มีการเปลี่ยนแปลง



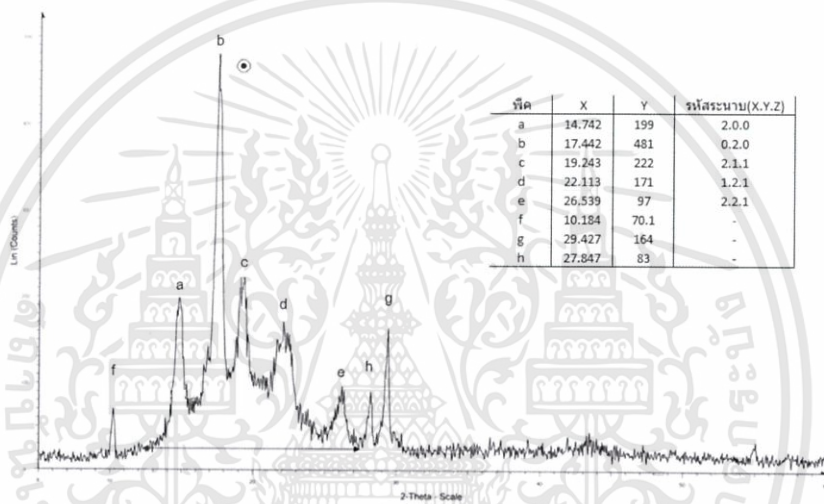
รูปที่ 4.17 โครงผลึกของ Sample 1 ที่สัมผัสน้ำมันได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ 0 นาที



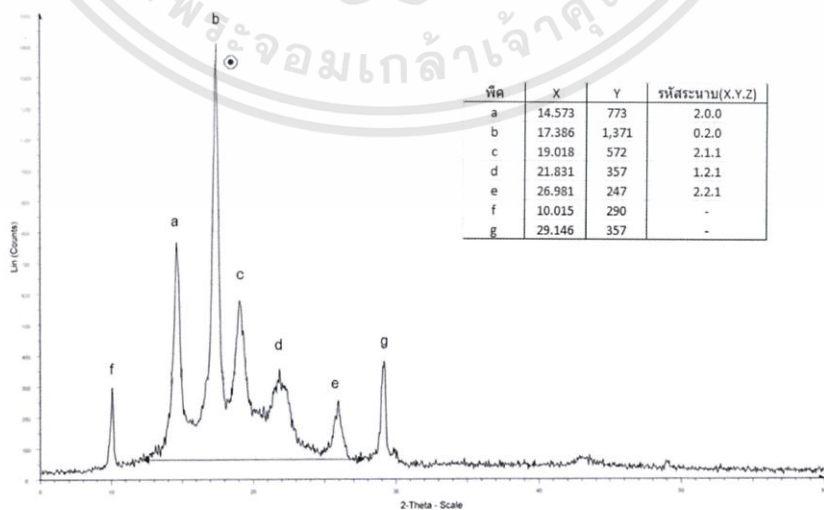
รูปที่ 4.18 โครงผลึกของ Sample 1 ที่สัมผัสน้ำมันได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ 3 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำน้ำมันพืชที่ผิวด้านในของตัวอย่างทั้ง 4 รูปแบบ แล้วนำมาให้ความร้อน พบว่า Sample 1 (ฐานกลม สีไม่มีสี) สามารถทนความร้อนได้ 3 นาที รูปที่ 4.17-4.18 แสดงผลการทดลองของ Sample 1 พบว่าน้ำมันที่อุณหภูมิห้องและผ่านการให้ความร้อน 3 นาที ไม่ได้ทำให้โครงสร้างผลึกพลาสติกพอลิโพรพิลีนเปลี่ยนแปลงเพราะค่า X เปลี่ยนแปลงน้อยมาก ยังมีโครงสร้าง Monoclinic crystal เช่นเดิม ขณะที่ Sample 2 (ฐานเหลี่ยม สีขาว), Sample 3 (ฐานกลม สีดำ) และ Sample 4 (ฐานเหลี่ยม สีไม่มีสี) หลอมละลายจึงนำตัวอย่างที่ทำน้ำมันแต่ไม่ผ่านความร้อนของ Sample 2, Sample 3 และ Sample 4 มาวิเคราะห์โครงสร้างผลึก แสดงดังรูปที่ 4.19-4.21

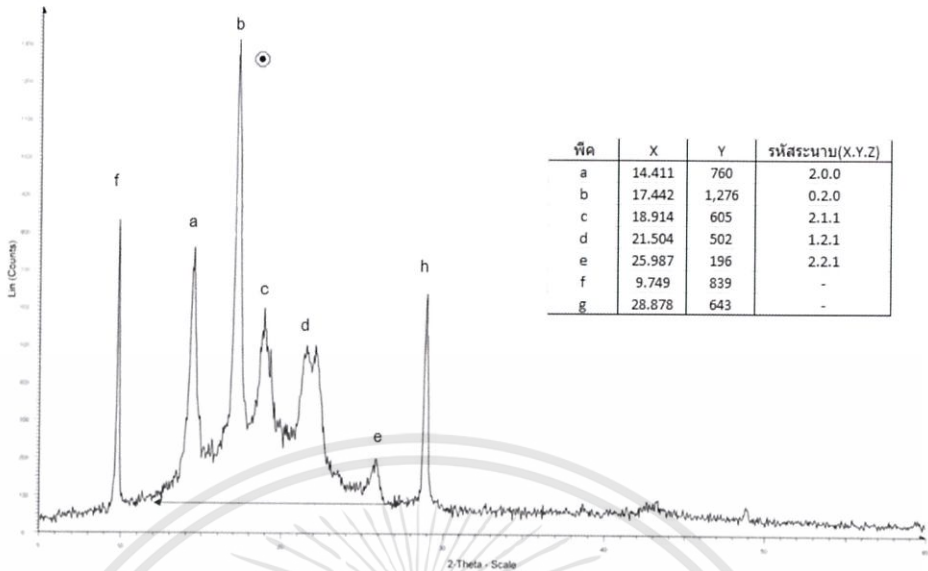


รูปที่ 4.19 โครงผลึกของ Sample 2 ที่สัมผัสน้ำมันไม่ผ่านการอุ่นด้วยไมโครเวฟ



รูปที่ 4.20 โครงผลึกของ Sample 3 ที่สัมผัสน้ำมันไม่ผ่านการอุ่นด้วยไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 โครงผลึกของ Sample 4 ที่สัมผัสน้ำมันไม่ผ่านการอุ่นด้วยไมโครเวฟ

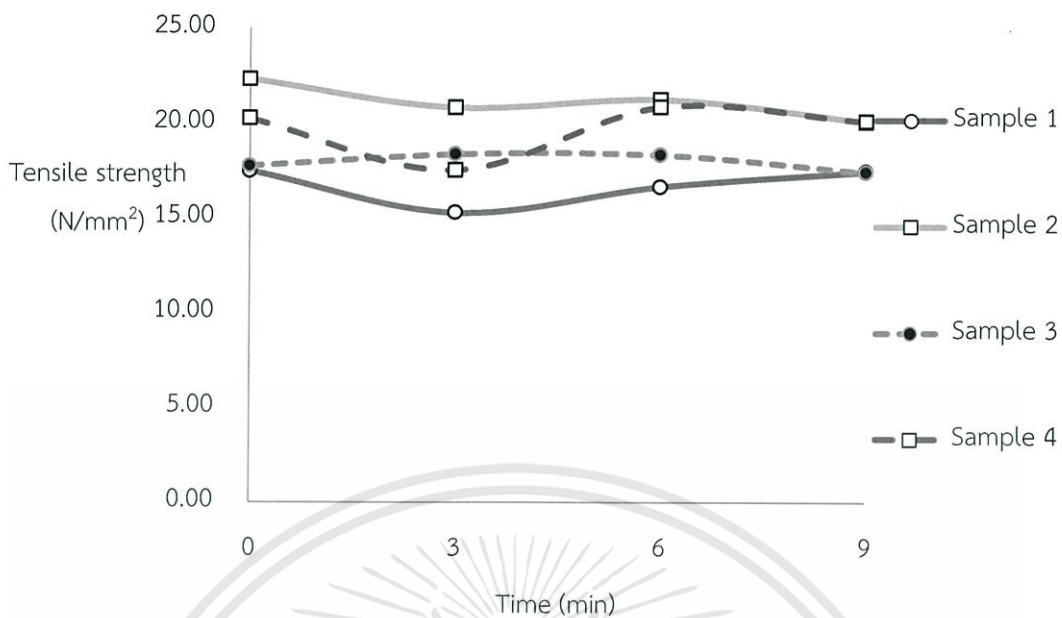
โครงผลึกของ Sample 2 (ฐานเหลี่ยม สีขาว), Sample 3 (ฐานกลม สีดำ) และ Sample 4 (ฐานเหลี่ยม ใสไม่มีสี) ที่ทาน้ำมันพืชและไม่ผ่านความร้อนแสดงดังรูปที่ 4.19-4.21 พบว่าที่อุณหภูมิห้องน้ำมันพืชไม่ทำให้โครงผลึกของพลาสติกพอลิโพรพิลีนเปลี่ยน นอกจากนี้ยังพบว่าพลาสติกที่มีสารเติมแต่งและสารตัวเติมที่ทำให้เกิดสีขาว สีดำ ก็ไม่ได้ทำให้โครงผลึกของพลาสติกเปลี่ยนแปลงด้วย

#### 4.4 การศึกษาสมบัติเชิงกล

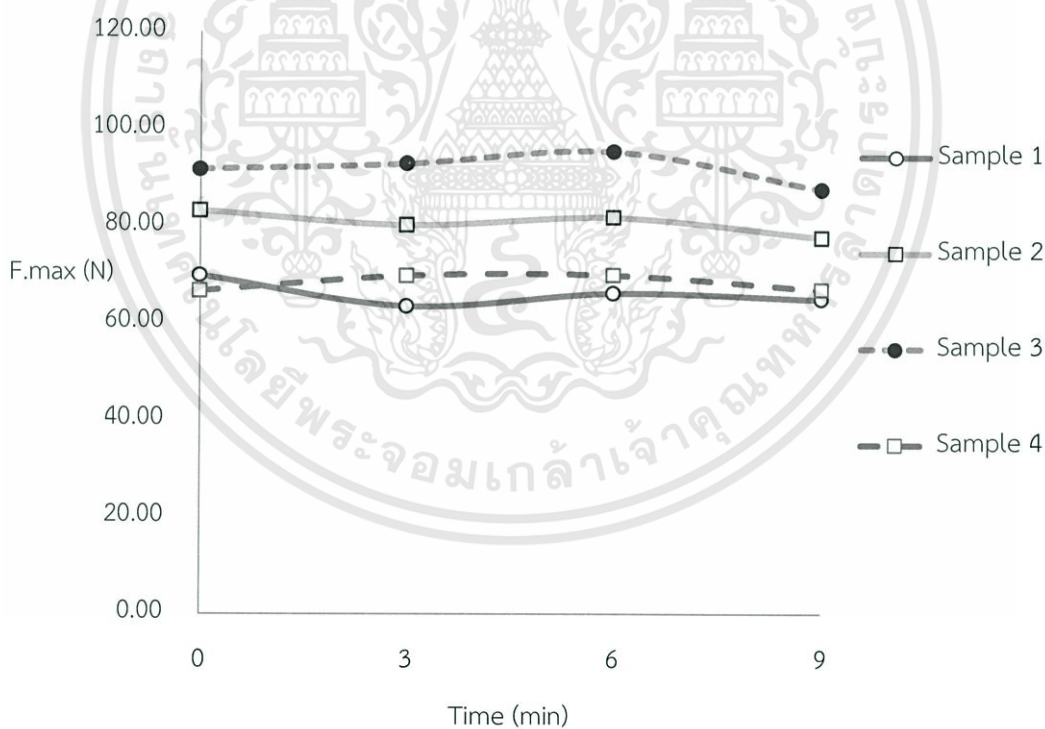
การศึกษาผลของความร้อนจากไมโครเวฟที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้ง 4 รูปแบบ แบ่งออกเป็น เมื่อสัมผัสน้ำที่เวลาต่างๆ เมื่อสัมผัสน้ำมัน และเมื่อใช้พลาสติกบรรจุน้ำอุ่นซ้ำทุก 3 นาที จำนวน 3 ครั้ง สมบัติเชิงกลที่วัดได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง ค่าแรงดึงสูงสุด และค่ามอดูลัส

##### 4.4.1 ผลของน้ำที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

เมื่อนำพลาสติกทั้ง 4 รูปแบบไปให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ที่เวลา 0, 3, 6 และ 9 นาที ให้ผลดังรูปที่ 4.22-4.23 พบว่าค่าความแข็งแรงดึง และค่าแรงดึงสูงสุด ค่อนข้างคงที่



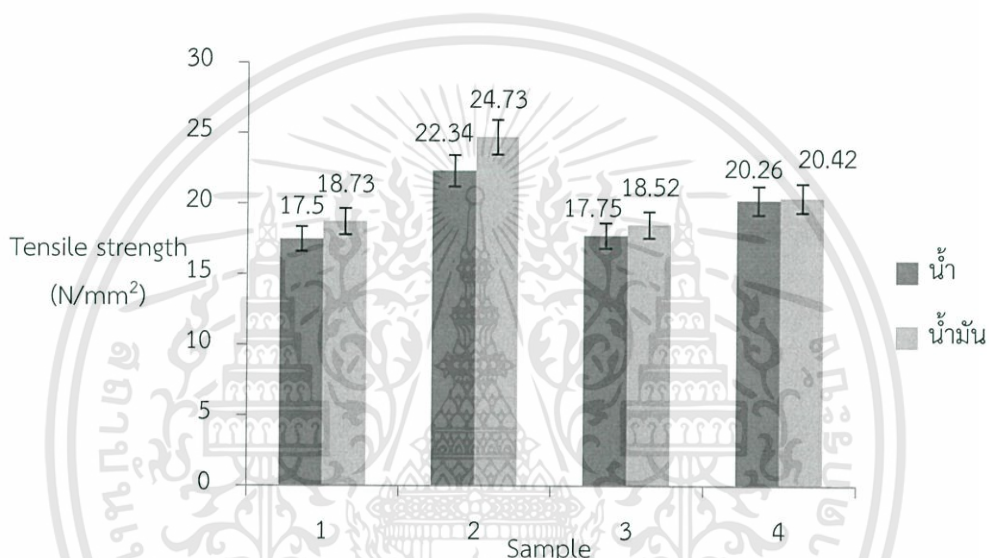
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกโพลีโพรพิลีนกับเวลา



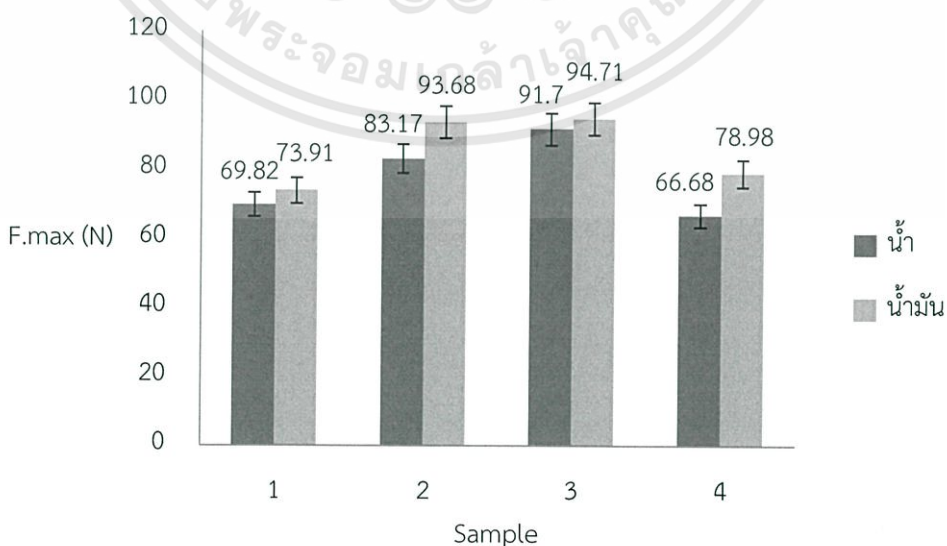
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของค่าแรงดึงสูงสุดของพลาสติกโพลีโพรพิลีนกับเวลา

#### 4.4.2 ผลของน้ำมันที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

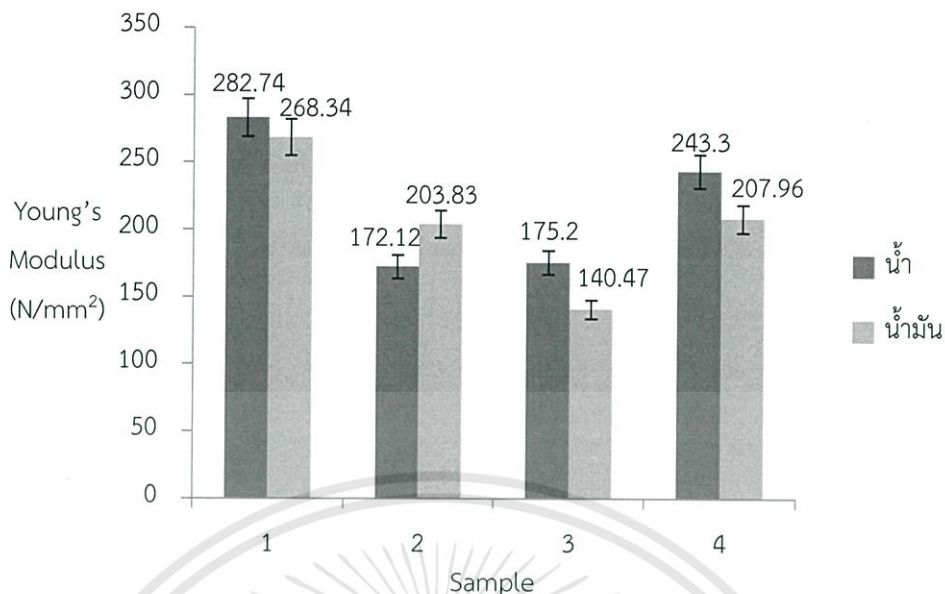
เมื่อนำพลาสติกที่ทำผิวด้วยน้ำมันพืชแล้วไปให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ที่เวลา 0, 3, 6 และ 9 นาที ปรากฏว่าที่เวลา 3, 6 และ 9 นาที Sample 2 (ฐานเหลี่ยม สีขาว), Sample 3 (ฐานกลม สีดำ) และ Sample 4 (ฐานเหลี่ยม สีไม่มีสี) เกิดการเสียสภาพ หลอม ภาชนะบิดเบี้ยวจึงไม่สามารถนำมาตัดเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลได้ ในขณะที่ Sample 1 (ฐานกลม สีไม่มีสี) สามารถทนความร้อนจากไมโครเวฟได้ ที่เวลา 3 นาที แต่เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 6 และ 9 นาที พลาสติกจะเสียสภาพ ดังรูปที่ 4.24-4.26 แสดงค่าความแข็งแรงดึง ค่าแรงดึงสูงสุด และค่ามอดูลัสของตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบผลเมื่อสัมผัสน้ำกับน้ำมัน ที่ 0 นาที



รูปที่ 4.24 ค่าความแข็งแรงดึง เปรียบเทียบผลเมื่อสัมผัสน้ำกับน้ำมัน ที่ 0 นาที



รูปที่ 4.25 ค่าแรงดึงสูงสุด เปรียบเทียบผลเมื่อสัมผัสน้ำกับน้ำมัน ที่ 0 นาที

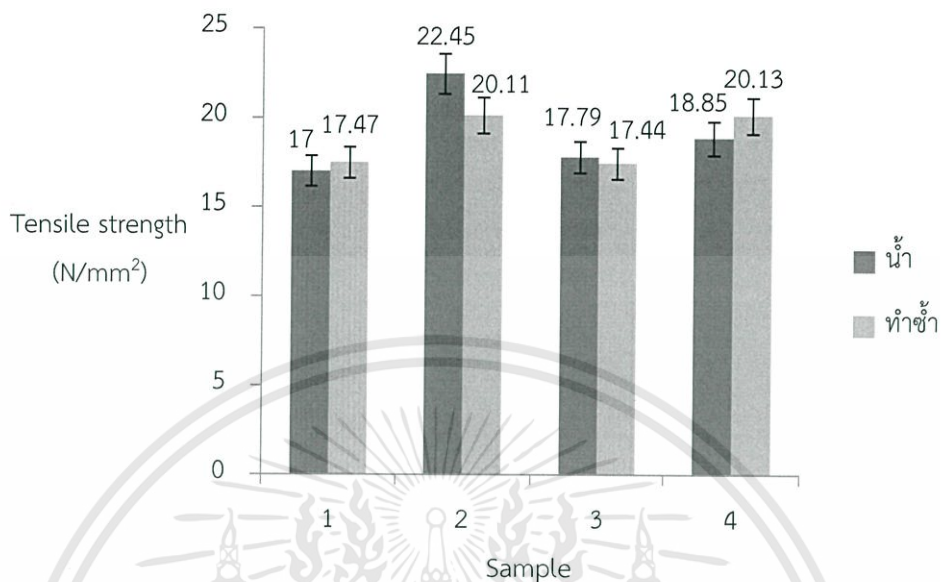


รูปที่ 4.26 ค่ามอดูลัส เปรียบเทียบผลเมื่อสัมผัสน้ำกับน้ำมัน ที่ 0 นาที

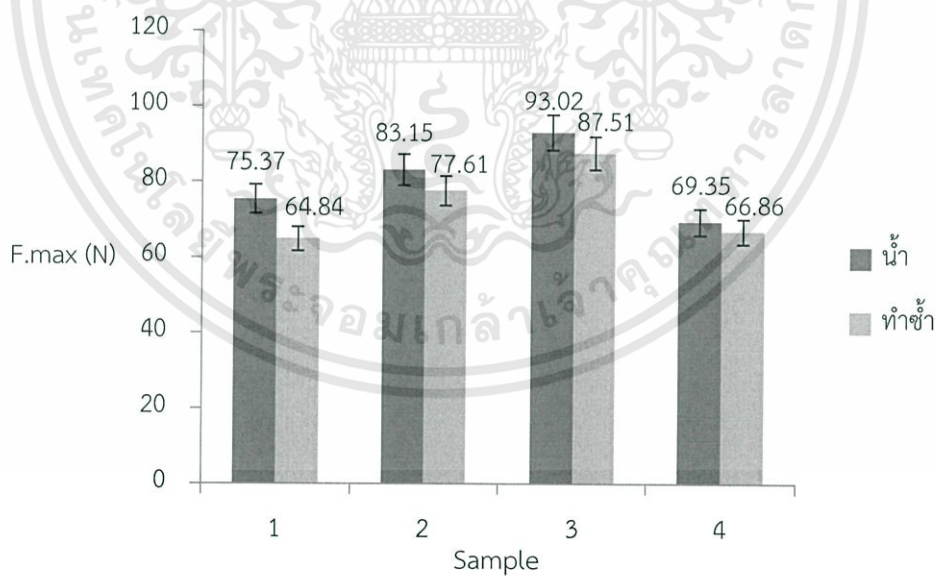
จากรูปที่ 4.24 – 4.25 ผลการทดลองพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้ง 4 รูปแบบ ที่บรรจุน้ำมันยังไม่ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ มีค่าความแข็งแรงดึง และค่าแรงดึงสูงสุดสูงขึ้น แสดงว่าน้ำมันทำหน้าที่คล้ายพลาสติกไซเซออร์ ช่วยให้พลาสติกทนแรงดึงยึดได้

จากรูปที่ 4.26 ผลของค่ามอดูลัสของพลาสติกพอลิโพรพิลีน เมื่อผิวสัมผัสกับน้ำมัน Sample 1 (ฐานกลม สีไม่มีสี), Sample 3 (ฐานกลม สีดำ) และ Sample 4 (ฐานเหลี่ยม สีไม่มีสี) ลดลงแสดงว่าน้ำมันแพร่เข้าไปในพลาสติก ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนย้ายได้ง่ายขึ้น นั่นคือทำหน้าที่คล้ายพลาสติกไซเซออร์ ยกเว้น Sample 2 (ฐานเหลี่ยม สีขาว) เมื่อสัมผัสน้ำมันค่ามอดูลัสสูงกว่าเมื่อสัมผัสน้ำ อาจเนื่องจากมีสารตัวเติมสีขาว (แคลเซียมคาร์บอเนต,  $\text{CaCO}_3$ ) ผสมอยู่ในพลาสติก

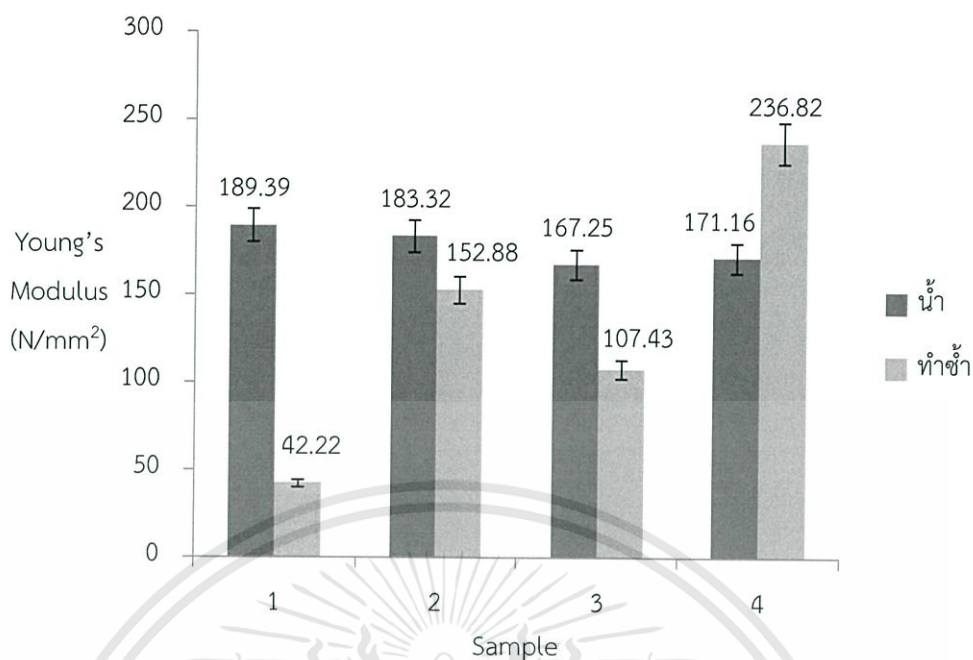
#### 4.4.3 ผลของน้ำที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพลาสติกพอลิโพรพิลีนเมื่อให้ความร้อนซ้ำทุก 3 นาทีจำนวน 3 ครั้ง



รูปที่ 4.27 ค่าความแข็งแรงดึงเปรียบเทียบผลเมื่อได้รับความร้อน 3 นาที 1 ครั้งและ 3 ครั้ง



รูปที่ 4.28 ค่าแรงดึงสูงสุดเปรียบเทียบผลเมื่อได้รับความร้อน 3 นาที 1 ครั้งและ 3 ครั้ง



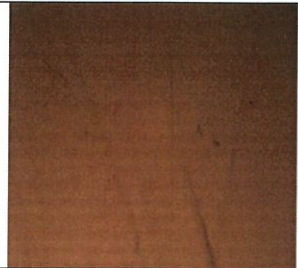





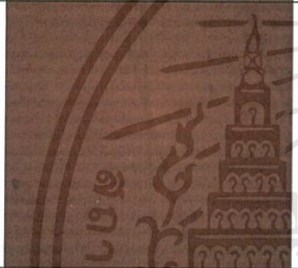





รูปที่ 4.29 ค่ามอดูลัสเปรียบเทียบผลเมื่อได้รับความร้อน 3 นาที 1 ครั้งและ 3 ครั้ง

จากรูปที่ 4.27 - 4.28 ผลการทดลองพลาสติกพอลิโพรพิลีนบรรจุภัณฑ์อาหารแช่แข็งรูปแบบต่างๆ ได้แก่ Sample 1 (ฐานกลม สีไม่มีสี), Sample 2 (ฐานเหลี่ยม สีขาว), Sample 3 (ฐานกลม สีดำ) และ Sample 4 (ฐานเหลี่ยม สีไม่มีสี) ที่สัมผัสน้ำอุ่นซ้ำทุก 3 นาที พบว่าความร้อนจากไมโครเวฟ ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง และค่าแรงที่ใช้ในการดึงยึดของพลาสติกพอลิโพรพิลีนบรรจุภัณฑ์อาหารแช่แข็งรูปแบบต่างๆ เพียงเล็กน้อย

จากรูปที่ 4.29 ผลของค่ามอดูลัสของพลาสติกพอลิโพรพิลีนบรรจุภัณฑ์อาหารแช่แข็ง เกือบทุกรูปแบบมีค่าลดลงเมื่อใช้พลาสติกซ้ำ แสดงว่าพลาสติกทนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างลดลง จึงไม่ควรใช้พลาสติกผ่านการให้ความร้อนหลายครั้ง

#### 4.5 สันฐานวิทยาของพลาสติกพอลิโพรพิลีน



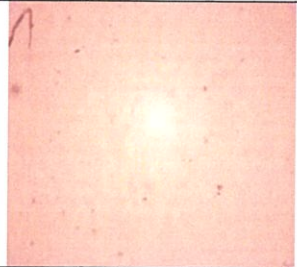

ศึกษาสันฐานวิทยาพื้นผิวของพลาสติกพอลิโพรพิลีนก่อนและหลังการได้รับความร้อนจากไมโครเวฟโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ (Optika Microscopes) โดยพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวและรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นเมื่อใช้น้ำและน้ำมันแทนอาหาร ในสภาวะต่างๆ

Time (min)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
0 min			ไม่สามารถส่องได้	
3min			ไม่สามารถส่องได้	
6 min			ไม่สามารถส่องได้	
9 min			ไม่สามารถส่องได้	

รูปที่ 4.30 พื้นผิวพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่สัมผัสน้ำได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ เวลา 0, 3, 6 และ 9 นาที

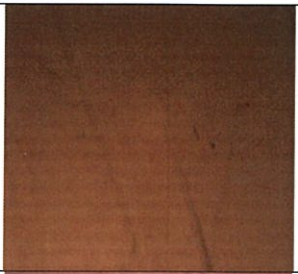
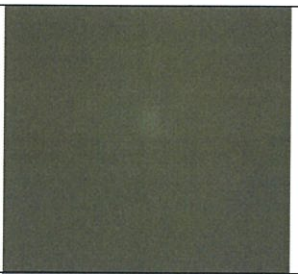
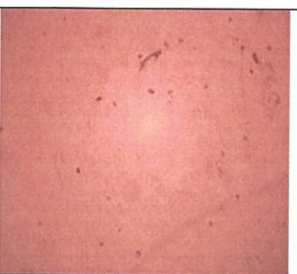



จากรูปที่ 4.30 พบว่าพื้นผิวพลาสติกพอลิโพรพิลีน Sample 1 (ฐานกลม สีไม่มีสี) มีร่องรอยการแตกหักชัดเจนที่สุดและเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ได้รับความร้อน Sample 2 (ฐานเหลี่ยม สีขาว) มองไม่เห็นร่องรอยการแตกหัก เนื่องจากมีสารเติมแต่งสีขาวผสมอยู่ และสีขาวยังทำให้เกิดการสะท้อนแสงของกล้องจุลทรรศน์ และ Sample 4 (ฐานกลม สีไม่มีสี) พบร่องรอยการแตกหักคล้าย Sample 1 เพราะเป็นพลาสติกพอลิโพรพิลีนชนิดใสเหมือนกัน ต่างกันที่รูปร่างเท่านั้น สำหรับ Sample 3 (ฐานกลม สีดำ) ไม่สามารถเห็นร่องรอยเพราะมีสีดำ แสงจากกล้องจุลทรรศน์ไม่สามารถทะลุผ่านได้ อย่างไรก็ตามสามารถกล่าวได้ว่าความร้อนทำให้เกิดร่องรอยการแตกหักที่พื้นผิวพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time (min)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
0 min			ไม่สามารถส่องได้	
3min		เสียหาย	เสียหาย	เสียหาย
6 min	เสียหาย	เสียหาย	เสียหาย	เสียหาย
9 min	เสียหาย	เสียหาย	เสียหาย	เสียหาย

รูปที่ 4.31 พลาสติกพอลิโพรพิลีนทาบด้วยน้ำมันให้ความร้อนที่เวลา 0, 3, 6 และ 9 นาที

นอกจากใช้น้ำจำลองสถานการณ์เป็นอาหารที่อยู่ในภาชนะแล้วยังลองใช้น้ำมันทาที่ผิวด้านในของพลาสติกทั้ง 4 รูปแบบด้วยและให้ความร้อนกับพลาสติกที่เวลา 0, 3, 6, 9 นาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.31 พบว่ามีแต่ Sample 1 (ฐานกลม สีไม่มีสี) เท่านั้นที่ไม่หลอมละลายเมื่อเวลาให้ความร้อน 3 นาที แต่หลอมเมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลา 6 นาที และ 9 นาที ส่วน Sample 2 (ฐานเหลี่ยม สีขาว), Sample 3 (ฐานกลม สีดำ) และ Sample 4 (ฐานเหลี่ยม สีไม่มีสี) หลอมละลายในเวลา 3 นาที ดังนั้นจึงไม่มีภาพแสดงให้เห็น

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
ก่อน การอุ่น ซ้ำ			ไม่ สามารถ ส่องได้	
หลัง การอุ่น ซ้ำ			ไม่ สามารถ ส่องได้	

รูปที่ 4.32 พลาสติกพอลิโพรพิลีนสัมผัสน้ำอุ่นด้วยไมโครเวฟซ้ำๆกัน 3 ครั้ง ครั้งละ 3 นาที

จากรูปที่ 4.32 แสดงผลการส่องกล้องจุลทรรศน์ (Optika Microscopes) ของพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่บรรจุน้ำให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟซ้ำๆกัน 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งใช้เวลาในการให้ความร้อน 3 นาที จากการทดลองพบว่าพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้ง 4 รูปแบบ หลังจากทำการนำไปให้ความร้อนซ้ำๆกันเปรียบเทียบกับก่อนทำการอุ่นซ้ำๆ มีรอยขีดข่วน และรอยร้าวเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าพลาสติกพอลิโพรพิลีนเมื่อได้รับความร้อน และรังสีจากไมโครเวฟมีผลทำให้เกิดรอยร้าวรอยขีดข่วนบนพื้นผิวของพลาสติกได้ นั่นคือการให้ความร้อนจากไมโครเวฟซ้ำๆกัน ซึ่งการทดลองใช้ซ้ำ 3 ครั้ง มีผลทำให้เกิดรอยร้าวรอยขีดข่วนบนพื้นผิวของพลาสติกพอลิโพรพิลีนได้

## สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการทดลอง

พลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนใช้ทำบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารสำเร็จรูปแช่แข็ง 4 รูปแบบ ได้แก่ Sample 1 (ลักษณะฐานกลม สีไม่มีสี), Sample 2 (ลักษณะฐานเหลี่ยม สีขาว), Sample 3 (ลักษณะฐานกลม สีดำ) และ Sample 4 (ลักษณะฐานเหลี่ยม สีไม่มีสี) นำมาทดลองโดยจำลองสถานการณ์สัมผัสน้ำและน้ำมัน ให้ความร้อนเป็นช่วงเวลาสั้นๆ และให้ความร้อนซ้ำๆ แล้ววิเคราะห์สิ่งที่เปลี่ยนแปลงในน้ำและพลาสติก เพื่อให้ทราบว่าไมโครเวฟเหมาะกับการใช้อุ่นอาหารหรือไม่

## ผลการทดลองมีดังนี้

เมื่อพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารสำเร็จรูปแช่แข็งได้รับความร้อนจากไมโครเวฟไม่ทำให้ pH ของน้ำที่ใช้เป็นตัวแทนของอาหารเปลี่ยน นั่นคือรสชาติของอาหารไม่เปลี่ยนแปลง ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยภายในเวลาได้รับความร้อน 9 นาที และการให้ความร้อนอาหารซ้ำ 3 ครั้ง ปริมาณตะกอนสีส้ม 2,4 - Dinitrophenylhydrazone เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แสดงว่ามีสารประเภทแอลดีไฮด์ หรือคีโตนเกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อนำพลาสติกพอลิโพรพิลีนไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FT-IR พลาสติกที่สัมผัสกับน้ำมันและไม่ได้รับความร้อน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชัน แต่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเมื่อพลาสติกสัมผัสกับน้ำมันและได้รับความร้อน โครงผลึกของพลาสติกพอลิโพรพิลีนไม่เปลี่ยนแปลง สมบัติเชิงกลของพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้งที่มีสารเติมแต่ง และไม่มีสารเติมแต่ง เช่น ความแข็งแรงดึง แรงสูงสุดที่ทำให้พลาสติกขาด มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากแม้ว่าเวลาได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกที่สัมผัสกับน้ำมันและน้ำภายในเวลา 3 นาที มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่าแรงดึงสูงสุดและค่ามอดูลัสของพลาสติกที่สัมผัสกับน้ำมันลดลง นั่นคือน้ำมันทำหน้าที่คล้ายพลาสติกไฮเซอริ์ให้กับพลาสติก สันฐานวิทยาของพลาสติกพอลิโพรพิลีนเมื่อได้รับความร้อน เกิดรอยร้าวรอยขีดข่วนเพิ่มขึ้นบนพื้นผิวของพลาสติก

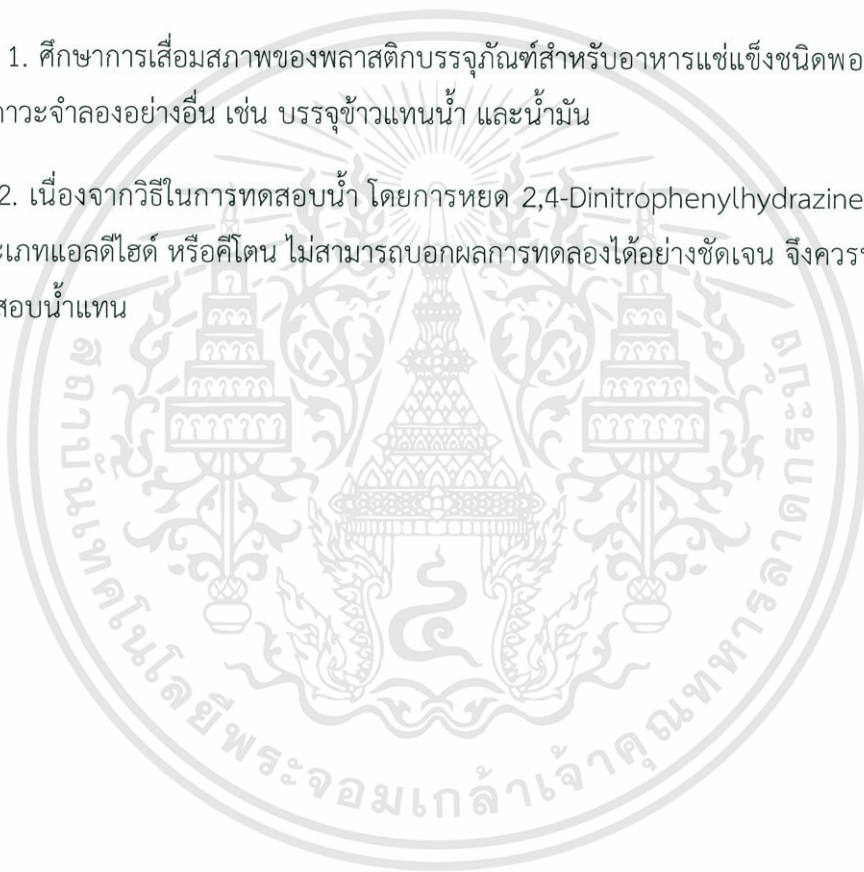
จากผลการทดลองดังกล่าว เมื่อต้องการบริโภคอาหารสำเร็จรูปแช่แข็งที่มีพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนเป็นบรรจุภัณฑ์ ถ้าอุ่นด้วยไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 800 วัตต์ เวลาที่เหมาะสม 3 นาที และไม่ควรมากเกิน 6 นาที แต่ถ้าอาหารสำเร็จรูปแช่แข็งมีส่วนประกอบของน้ำมันในปริมาณมาก ควรอุ่นที่เวลาไม่เกิน 3 นาที ไม่ควรเลือกพลาสติกที่มีสีผสมนำมาบรรจุอาหาร และรูปร่างของพลาสติกที่เหมาะสมกับไมโครเวฟ คือพลาสติกที่มีลักษณะฐานกลม จึงสามารถสรุปได้ว่าพลาสติกพอลิโพรพิลีน

รูปแบบลักษณะฐานกลม สีไม่มีสี มีความปลอดภัยมากกว่าฐานเหลี่ยม สีไม่มีสี ฐานเหลี่ยม สีขาว และฐานกลม สีดำ ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยเป็นการศึกษาการเสื่อมสภาพของพลาสติกบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารแช่แข็งชนิดพอลิโพรพิลีน เมื่อได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ สามารถสรุปข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางการศึกษาวิจัยต่อไปดังนี้

1. ศึกษาการเสื่อมสภาพของพลาสติกบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารแช่แข็งชนิดพอลิโพรพิลีนโดยสร้างสภาวะจำลองอย่างอื่น เช่น บรรจุข้าวแทนน้ำ และน้ำมัน
2. เนื่องจากวิธีในการทดสอบน้ำ โดยการหยด 2,4-Dinitrophenylhydrazine เพื่อวิเคราะห์สารประเภทแอลดีไฮด์ หรือคีโตน ไม่สามารถบอกผลการทดสอบได้อย่างชัดเจน จึงควรวางวิธีอื่นมาทำการทดสอบน้ำแทน



## เอกสารอ้างอิง

- กนิษฐา อังกรรัชต์ . 2546 “การศึกษาสมบัติของพอลิพรอพิลีนโดยใช้ซีลื้อยจากไม้เต็งนอกเป็นสารเสริมแรง” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- กาญจนา เอี้ยวสุวรรณ และเต็มสิริ หวังทวีทรัพย์ . 2541. “การเสื่อมสภาพทางความร้อนและทางแสงของพอลิเมอร์คอมพอลิเตอร์หว่างพอลิพรอพิลีนกับขวดHDPEที่ใช้แล้วผสมกับขานอ้อย” โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ณรงค์เดช เพ็ชรโต . 2556 . “การพัฒนาเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง .
- ธีระยุทธ สุวรรณประทีป และคณะ . 2547 . ไมโครเวฟ . [Online] . Available : <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/specialnews/5/microwave/Microwave2.htm> . เข้าถึงเมื่อวันที่ 2 สิงหาคม 2558 .
- ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.นิธิยา รัตนานนท์ . 2550 . Microwave . [Online] . Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0401/microwave%E0%B9%84%E0%B8%A1%E0%B9%82%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%A7%E0%B8%9F> . เข้าถึงเมื่อวันที่ 2 สิงหาคม 2558 .
- มยุรี ภาคลำเจียก . 2546 . พลาสติกกับการบรรจุหีบห่อ . [Online] . Available : [http://www.mew6.com/composer/package/package\\_31.php](http://www.mew6.com/composer/package/package_31.php) . เข้าถึงเมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2558 .
- มูลนิธิวิกิมีเดีย . 2556 . ผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็ง . [Online] . Available : <http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%9C%E0%B8%A5> . เข้าถึงเมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2558 .
- ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ . 2558 . Thermogravimetric Analysis . [Online] . Available : [http://www.nanotec.or.th/th/?page\\_id=569](http://www.nanotec.or.th/th/?page_id=569) . เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 สิงหาคม 2558 .

- ศูนย์รวมตำราเรียนรามคำแหงบนโลกอินเทอร์เน็ต . 2555 . การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR . [Online] . Available : [e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM\\_328-10.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM_328-10.pdf) . เข้าถึงเมื่อวันที่ 13 สิงหาคม 2558 .
- ศูนย์รวมตำราเรียนรามคำแหงบนโลกอินเทอร์เน็ต . 2555 . Infrared Spectroscopy . [Online] . Available : [e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM32\\_8-10.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM32_8-10.pdf) . เข้าถึงเมื่อวันที่ 13 สิงหาคม 2558 .
- ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง . 2558 . เครื่องมือวิทย์ . [Online] . Available : <http://www.science.kmitl.ac.th/links/tools/index.php?page=tools> . เข้าถึงเมื่อวันที่ 2 สิงหาคม 2558 .
- ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานและอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี . 2556 . การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) . [Online] . Available : <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/physics/16-x-ray-diffraction> . เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 สิงหาคม 2558 .
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ . 2550 . ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ . [Online] . Available : [http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic/type\\_de\\_plas.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html) . เข้าถึงเมื่อวันที่ 2 สิงหาคม 2558 .
- ส่วนวิชาการคุณภาพน้ำกองแผนคุณภาพน้ำ ฝ่ายคุณภาพน้ำ การประปานครหลวง . 2557 . ค่าการนำไฟฟ้า . [Online] . Available : [http://www.mwa.co.th/ewtadmin/ewt/mwa\\_internet/ewt\\_w3c/ewt\\_news.php?nid=13321&filename=index](http://www.mwa.co.th/ewtadmin/ewt/mwa_internet/ewt_w3c/ewt_news.php?nid=13321&filename=index) . เข้าถึงเมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน 2558 .
- สำนักหอสมุดมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี . 2536 . ไมโครเวฟ . [Online] . Available : <http://www.lib.kmutt.ac.th/st4kid/nonFlash/services/getText.jsp?id=191> . เข้าถึงเมื่อวันที่ 9 มิถุนายน 2558 .
- สุทธินันท์ พงษ์ธรรมรักษ์ . 2555 . การวิเคราะห์โครงสร้างของพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และสเปกโทรสโกปีการสั่น . [Online] . Available : <http://www.journal.kmutnb.ac.th/journal/55208255661938.pdf> . เข้าถึงเมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน 2558 .

ห้องสมุดภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ . 2546 . แอลดีไฮด์และคีโตน . [Online] . Available : [http://www.sci.nu.ac.th/chemistry/directionlab/media\\_doc/256222/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%97%E0%B8%94%E0%B8%A5%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%885.pdf](http://www.sci.nu.ac.th/chemistry/directionlab/media_doc/256222/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%97%E0%B8%94%E0%B8%A5%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%885.pdf) . เข้าถึงเมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน 2558 .

เกียรติพงษ์ ได้การ. 2558 . X-ray Diffractometer . [Online] . Available : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/x-ray-analysis-instrument-menu/item/87-%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%B7%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%B0%E0%B8%AB%E0%B9%8C%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B8%B5%E0%B9%89%E0%B8%A2%E0%B8%A7%E0%B9%80%E0%B8%9A%E0%B8%99%E0%B8%A3%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%AA%E0%B8%B5%E0%B9%80%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B8%8B%E0%B9%8C-xrd.html> . เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 ตุลาคม 2558 .

Evelina Fasano , *et al.* . 2015 . Migration of monomers and plasticizers from packed foods and heated microwave foods using QuEChERS sample preparation and gas chromatography/mass spectrometry . [Online] . Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643815300153> . เข้าถึงเมื่อวันที่ 13 ตุลาคม 2558 .

Freedom Belljoye . 2555 . โพลีโพรพิลีน หรือพีพี . [Online] . Available : <http://arceehechan-freedom.blogspot.com/2012/10/polypropylene.html> . เข้าถึงเมื่อวันที่ 9 มิถุนายน 2558 .

Hing Wa So and Alexander Taube . 2004 . Modelling and experimental investigation of microwave heating of adhesively bonded polypropylene joint . [Online] . Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749603001593> . เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 สิงหาคม 2558 .

Keck Interdisciplinary Surface Science Center . 2009 . What is FT-IR ? . [Online] . Available : <http://epic.ms.northwestern.edu/KeckII/ftir1.asp> . เข้าถึงเมื่อวันที่ 7 ตุลาคม 2558 .

- K.Palanivelu . 2010 . Comparison of Biological Activity Transistion Metal 12 Hydroxy oleate on Photodegradation of Plastics . [Online] . Available : <http://www.omicsonline.org/comparison-of-biological-activity-transistion-metal-12-hydroxy-oleate-on-photodegradation-of-plastics-2155-6199.1000109.php?aid=493> . เข้าถึงเมื่อวันที่ 17 พฤศจิกายน 2558 .
- Qiang Dou and Jiawei Duan . 2013 . Improving the performance of maleic anhydride grafted polypropylene composites . [Online] . Available : <http://www.4spepro.org/view.php?source=004616-2013-04-10> . เข้าถึงเมื่อวันที่ 25 พฤศจิกายน 2558 .
- Ruoyin Cai, 2013. “Effect of Microwave Heating on the Migration of Additives From PS,PP and PET Container into Food Stimulants” Master of Science, Rochester Institute of Technology.
- Stefano Besco , *et al* . 2014 . Structural and Mechanical Characterization of Sustainable Composites Based on Recycled and Stabilized Fly Ash . [Online] . Available : <http://www.mdpi.com/1996-1944/7/8/5920> . เข้าถึงเมื่อวันที่ 17 พฤศจิกายน 2558 .
- S.Mojtaba Mirabedini, *et al* . 2004 . Microwave irradiation of polypropylene surface: a study on wettability and adhesion . [Online] . Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749603001234> . เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 สิงหาคม 2558 .
- Wachiraporn thongbun . 2550 . คุณสมบัติทั่วไปของ Infrared Spectroscopy . [Online] . Available : <http://share.psu.ac.th/blog/aym2/1375> . เข้าถึงเมื่อวันที่ 13 สิงหาคม 2558 .



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

การทดสอบสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้ง 4 รูปแบบ

ขั้นตอนการทดลอง

1. นำตัวอย่างพลาสติกพอลิโพรพิลีนมาล้างทำความสะอาด เช็ดให้แห้ง เดซิเคเตอร์ 1 วัน
2. นำมาชั่งน้ำหนัก วัดความสูง และเส้นผ่านศูนย์กลางของพลาสติก บันทึกเป็นข้อมูลก่อนการทดลอง
3. อุ่นพลาสติกเปล่าๆด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ เป็นเวลา 3 นาที
4. รอให้เย็นในเดซิเคเตอร์ 2 วัน
5. นำมาชั่งน้ำหนัก วัดความสูง และเส้นผ่านศูนย์กลางของพลาสติก บันทึกเป็นข้อมูลหลังการทดลอง

ได้ผลการทดลอง ดังนี้

ตารางที่ ก-1 น้ำหนักของ Sample 1

จำนวนซ้ำ	น้ำหนัก (g)	
	ก่อน	หลัง
1	15.0063	15.0162
2	15.0132	15.0134
3	14.8364	14.8425
ค่าเฉลี่ย	14.95197	14.95737

ตารางที่ ก-2 ความสูงของ Sample 1

จำนวนซ้ำ	ความสูง (cm)	
	ก่อน	หลัง
1	6.4	6.4
2	6.4	6.4
3	6.4	6.4
ค่าเฉลี่ย	6.4	6.4

ตารางที่ ก-3 เส้นผ่านศูนย์กลางขอบภายนอกของ Sample 1

จำนวนซ้ำ	เส้นผ่านศูนย์กลางขอบด้านนอก (cm)		เส้นผ่านศูนย์กลางขอบด้านใน (cm)	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
1	11.8	11.8	11.0	11.0
2	11.8	11.8	11.0	11.0
3	11.8	11.8	11.0	11.0
ค่าเฉลี่ย	11.8	11.8	11.0	11.0

ตารางที่ ก-4 เส้นผ่านศูนย์กลางก้นภาชนะของ Sample 1

จำนวนซ้ำ	เส้นผ่านศูนย์กลางก้นภาชนะ (cm)	
	ก่อน	หลัง
1	9.4	9.4
2	9.4	9.4
3	9.4	9.4
ค่าเฉลี่ย	9.4	9.4

ตารางที่ ก-5 น้ำหนักของ Sample 2

จำนวนซ้ำ	น้ำหนัก (g)	
	ก่อน	หลัง
1	19.2533	19.2573
2	19.5988	19.6034
3	19.1762	19.1830
ค่าเฉลี่ย	19.34277	19.34790

ตารางที่ ก-6 ความสูงของ Sample 2

จำนวนซ้ำ	ความสูง (cm)	
	ก่อน	หลัง
1	4.2	4.2
2	4.2	4.2
3	4.2	4.2
ค่าเฉลี่ย	4.2	4.2

ตารางที่ ก-7 ความกว้างและความยาวขอบด้านนอกของ Sample 2

จำนวนซ้ำ	ความกว้างขอบด้านนอก (cm)		ความยาวขอบด้านนอก (cm)	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
1	12.6	12.6	16.6	16.6
2	12.6	12.6	16.6	16.6
3	12.6	12.6	16.6	16.6
ค่าเฉลี่ย	12.6	12.6	16.6	16.6

ตารางที่ ก-8 ความกว้างและความยาวขอบด้านในของ Sample 2

จำนวนซ้ำ	ความกว้างขอบด้านใน (cm)		ความยาวขอบด้านใน (cm)	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
1	11.6	11.6	15.6	15.6
2	11.6	11.6	15.6	15.6
3	11.6	11.6	15.6	15.6
ค่าเฉลี่ย	11.6	11.6	15.6	15.6

ตารางที่ ก-9 ความกว้างและความยาวก้นภาชนะของ Sample 2

จำนวนซ้ำ	ความกว้างก้นภาชนะ (cm)		ความยาวก้นภาชนะ (cm)	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
1	8.5	8.5	12.5	12.5
2	8.5	8.5	12.5	12.5
3	8.5	8.5	12.5	12.5
ค่าเฉลี่ย	8.5	8.5	12.5	12.5

ตารางที่ ก-10 น้ำหนักของ Sample 3

จำนวนซ้ำ	น้ำหนัก (g)	
	ก่อน	หลัง
1	17.0023	17.0042
2	17.4848	17.4850
3	17.3545	17.3554
ค่าเฉลี่ย	17.28053	17.28153

ตารางที่ ก-11 ความสูงของ Sample 3

จำนวนซ้ำ	ความสูง (cm)	
	ก่อน	หลัง
1	6.8	6.8
2	6.8	6.8
3	6.8	6.8
ค่าเฉลี่ย	6.8	6.8

ตารางที่ ก-12 เส้นผ่านศูนย์กลางขอบภายนอกของ Sample 3

จำนวนซ้ำ	เส้นผ่านศูนย์กลางขอบด้านนอก (cm)		เส้นผ่านศูนย์กลางขอบด้านใน (cm)	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
1	11.6	11.6	10.8	10.8
2	11.6	11.6	10.8	10.8
3	11.6	11.6	10.8	10.8
ค่าเฉลี่ย	11.6	11.6	10.8	10.8

ตารางที่ ก-13 เส้นผ่านศูนย์กลางก้นภาชนะของ Sample 3

จำนวนซ้ำ	เส้นผ่านศูนย์กลางก้นภาชนะ (cm)	
	ก่อน	หลัง
1	7.6	7.6
2	7.6	7.6
3	7.6	7.6
ค่าเฉลี่ย	7.6	7.6

ตารางที่ ก-14 น้ำหนักของ Sample 4

จำนวนซ้ำ	น้ำหนัก (g)	
	ก่อน	หลัง
1	20.6497	20.6499
2	21.8767	20.8769
3	20.6114	20.6120
ค่าเฉลี่ย	21.04593	20.71293

ตารางที่ ก-15 ความสูงของ Sample 4

จำนวนซ้ำ	ความสูง (cm)	
	ก่อน	หลัง
1	5.0	5.0
2	5.0	5.0
3	5.0	5.0
ค่าเฉลี่ย	5.0	5.0

ตารางที่ ก-16 ความกว้างและความยาวขอบด้านนอกของ Sample 4

จำนวนซ้ำ	ความกว้างขอบด้านนอก (cm)		ความยาวขอบด้านนอก (cm)	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
1	12.5	12.5	17.3	17.3
2	12.5	12.5	17.3	17.3
3	12.5	12.5	17.3	17.3
ค่าเฉลี่ย	12.5	12.5	17.3	17.3

ตารางที่ ก-17 ความกว้างและความยาวขอบด้านในของ Sample 4

จำนวนซ้ำ	ความกว้างขอบด้านใน (cm)		ความยาวขอบด้านใน (cm)	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
1	12.0	12.0	16.8	16.8
2	12.0	12.0	16.8	16.8
3	12.0	12.0	16.8	16.8
ค่าเฉลี่ย	12.0	12.0	16.8	16.8

ตารางที่ ก-18 ความกว้างและความยาวก้นภาชนะของ Sample 4

จำนวนซ้ำ	ความกว้างก้นภาชนะ (cm)		ความยาวก้นภาชนะ (cm)	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
1	9.3	9.3	14.5	14.5
2	9.3	9.3	14.5	14.5
3	9.3	9.3	14.5	14.5
ค่าเฉลี่ย	9.3	9.3	14.5	14.5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

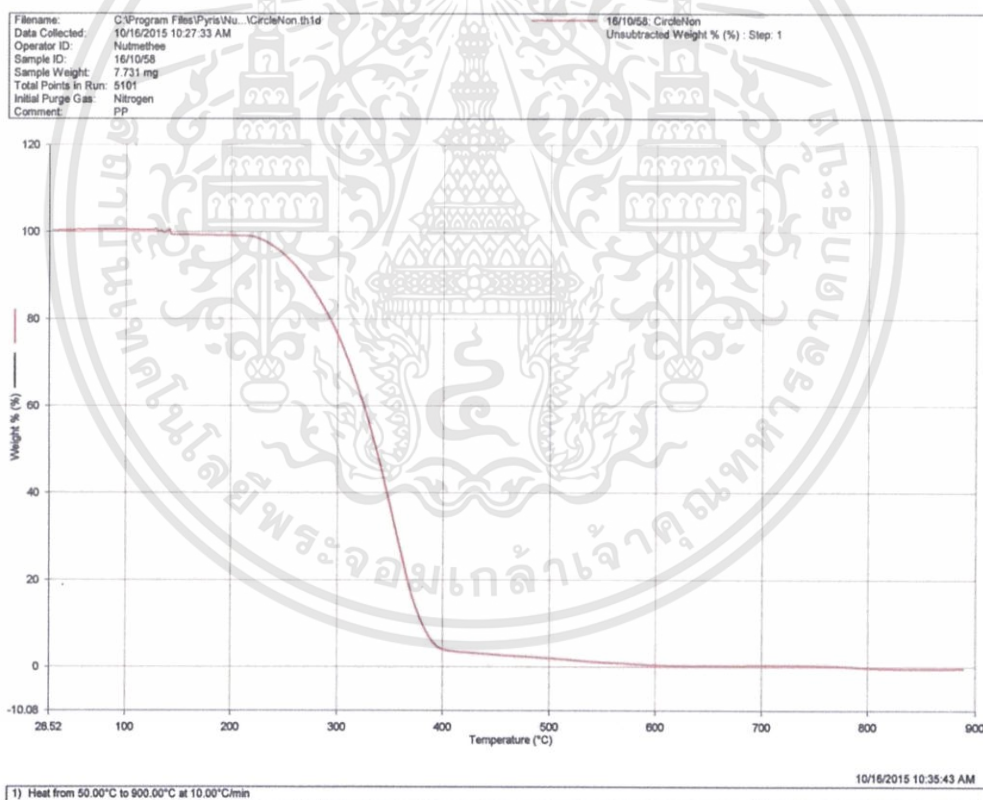
การทดสอบสมบัติพื้นฐานทางความร้อนของพลาสติกพอลิโพรพิลีนทั้ง 4 รูปแบบ ที่ยังไม่ผ่านการอุ่นด้วยไมโครเวฟ โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

1. ซั่งชิ้นงานตัวอย่างพลาสติกลงบน Pt pan ประมาณ 10 – 100 มิลลิกรัม
2. ตั้งสภาวะของเครื่อง ดังนี้

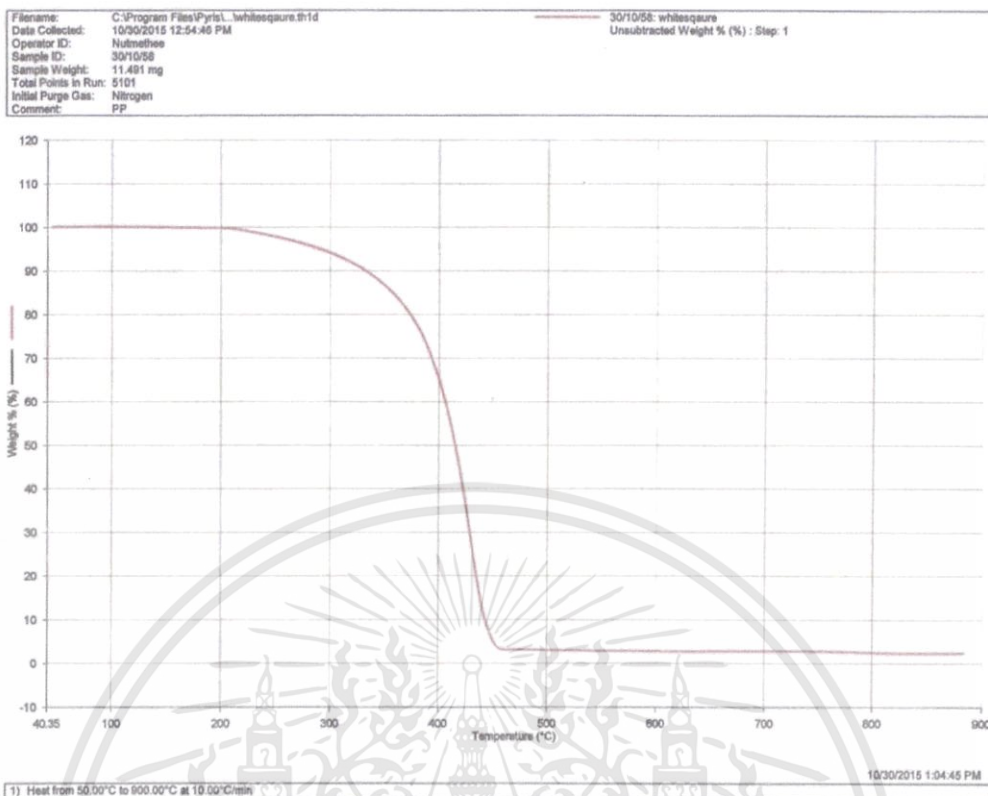
Initial temperature 50 °C

Isothermal 900 °C

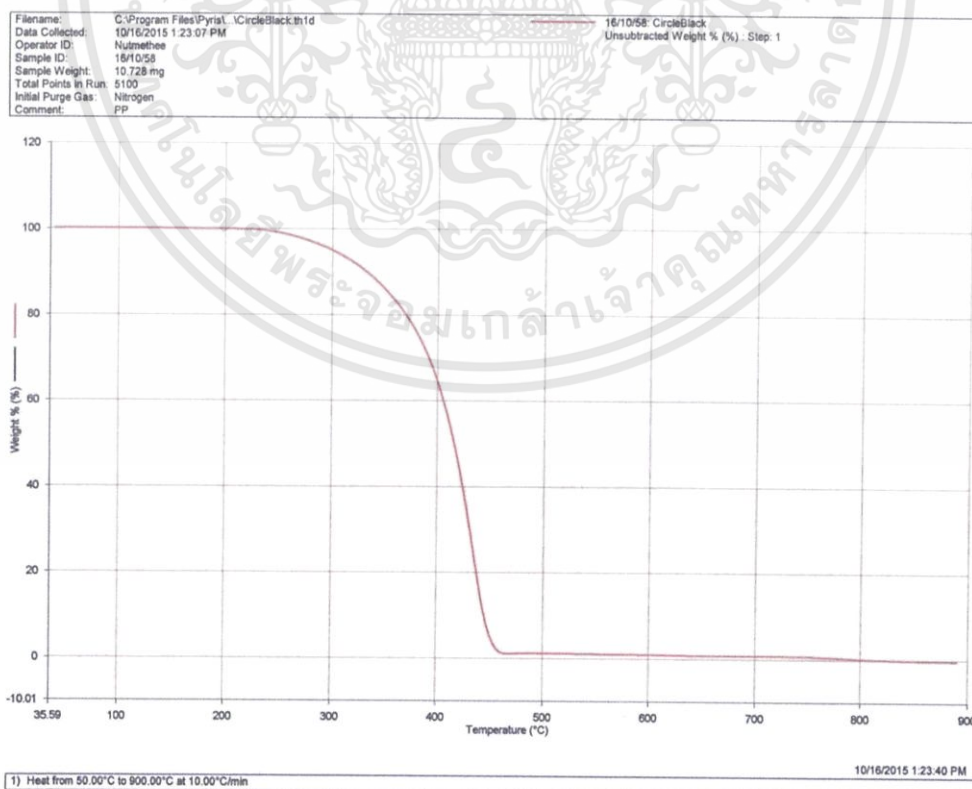
Heating rate 10 °C/min



รูปที่ ข-1 การวิเคราะห์ TGA ของ Sample 1 ที่ยังไม่ผ่านการอุ่นด้วยไมโครเวฟ

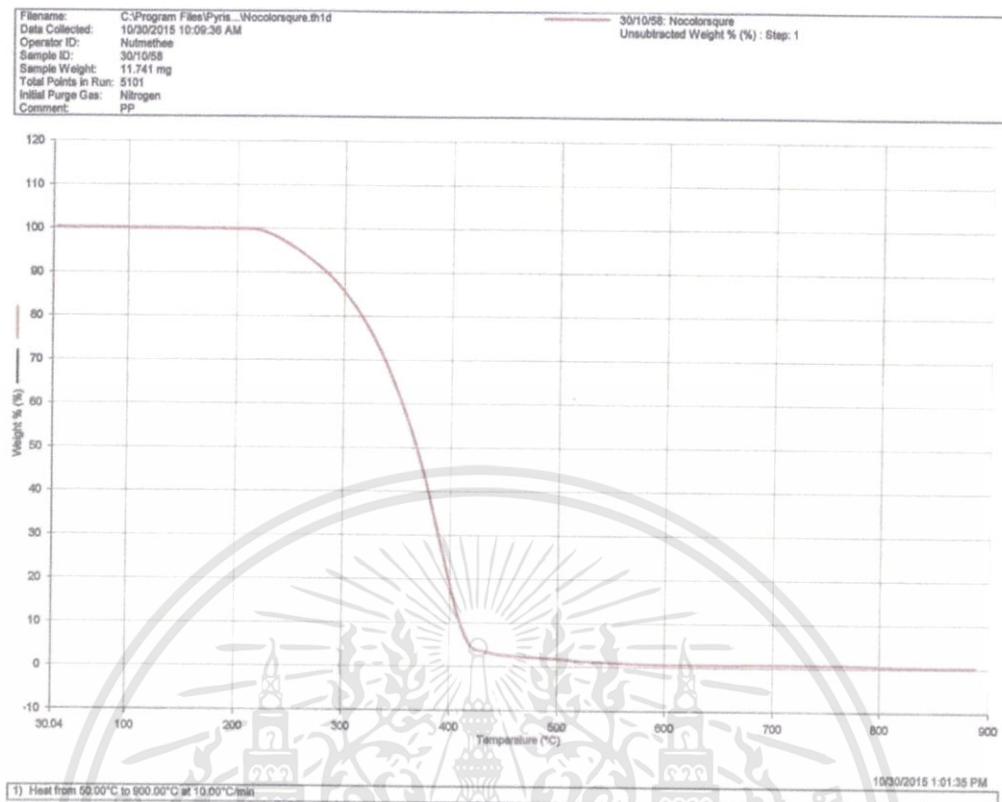


รูปที่ ข-2 การวิเคราะห์ TGA ของ Sample 2 ที่ยังไม่ผ่านการอุ่นด้วยไมโครเวฟ



รูปที่ ข-3 การวิเคราะห์ TGA ของ Sample 3 ที่ยังไม่ผ่านการอุ่นด้วยไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-4 การวิเคราะห์ TGA ของ Sample 4 ที่ยังไม่ผ่านการอุ่นด้วยไมโครเวฟ

## ภาคผนวก ค

ผลการศึกษาการตรวจสอบสมบัติของน้ำกลั่นที่บรรจุในพลาสติกพอลิโพรพิลีนรูปแบบต่างๆที่บรรจุน้ำอุ่นด้วยไมโครเวฟในเวลาที่กำหนด

ตารางที่ ค-1 ค่าพีเอชของน้ำกับเวลาในการอุ่นพลาสติกพอลิโพรพิลีน

รูปแบบ	Time (min)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Sample 1	0	7.25	7.26	7.255	0.007
	3	6.82	6.86	6.840	0.028
	6	7.71	7.63	7.670	0.057
	9	8.02	8.14	8.080	0.085
Sample 2	0	7.31	7.38	7.345	0.049
	3	7.69	7.63	7.660	0.042
	6	7.70	7.50	7.600	0.141
	9	7.90	7.92	7.910	0.014
Sample 3	0	8.01	7.88	7.945	0.092
	3	8.18	8.13	8.155	0.035
	6	8.22	8.44	8.330	0.156
	9	8.67	8.55	8.610	0.085
Sample 4	0	7.81	7.78	7.795	0.021
	3	7.88	7.80	7.840	0.057
	6	7.97	7.90	7.935	0.049
	9	8.37	8.07	8.220	0.212

ตารางที่ ค-2 ค่าพีเอชของน้ำกับจำนวนครั้งที่ใช้พลาสติกอุ่นซ้ำๆ

รูปแบบ	จำนวนซ้ำ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Sample 1	0	8.39	8.58	8.485	0.134
	1	8.69	8.68	8.685	0.007
	2	8.45	8.02	8.235	0.304
	3	8.02	8.56	8.290	0.382
Sample 2	0	7.85	7.19	7.520	0.467
	1	6.88	7.00	6.940	0.085
	2	8.47	7.88	8.175	0.417
	3	7.19	7.42	7.305	0.163
Sample 3	0	7.39	7.65	7.520	0.184
	1	7.00	7.68	7.340	0.481
	2	7.06	8.46	7.760	0.990
	3	8.44	8.26	8.350	0.127
Sample 4	0	8.57	8.42	8.495	0.106
	1	8.75	8.46	8.605	0.205
	2	8.04	7.77	7.905	0.191
	3	7.65	7.44	7.545	0.148

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-3 ค่าการนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S/cm}$ ) ของน้ำกับเวลาในการอุ่นพลาสติกพอลิโพรพิลีน

รูปแบบ	Time (min)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Sample 1	0	1.6	1.6	1.60	0.00
	3	1.7	1.8	1.75	0.07
	6	2.2	2.2	2.20	0.00
	9	2.7	2.6	2.65	0.07
Sample 2	0	1.5	1.4	1.45	0.07
	3	1.8	1.6	1.70	0.14
	6	2.1	2.0	2.05	0.07
	9	2.4	2.3	2.35	0.07
Sample 3	0	1.4	1.4	1.40	0.00
	3	1.6	1.5	1.55	0.07
	6	1.7	1.6	1.65	0.07
	9	2.1	2.1	2.10	0.00
Sample 4	0	1.4	1.3	1.35	0.07
	3	1.4	1.3	1.35	0.07
	6	1.4	1.3	1.35	0.07
	9	1.4	1.4	1.40	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-4 ค่าการนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) ของน้ำกับจำนวนครั้งที่ใช้พลาสติกอุ่นซ้ำๆ

รูปแบบ	จำนวนซ้ำ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Sample 1	0	1.3	1.3	1.30	0.00
	1	1.6	1.5	1.55	0.07
	2	2.7	2.0	2.35	0.49
	3	1.2	1.2	1.20	0.00
Sample 2	0	1.4	1.5	1.45	0.07
	1	1.5	1.6	1.55	0.07
	2	1.9	1.9	1.90	0.00
	3	1.3	1.2	1.25	0.07
Sample 3	0	1.4	1.3	1.35	0.07
	1	1.5	1.5	1.50	0.00
	2	1.5	1.3	1.40	0.14
	3	1.3	0.9	1.10	0.28
Sample 4	0	1.2	1.2	1.20	0.00
	1	1.6	1.3	1.45	0.21
	2	1.8	1.3	1.55	0.35
	3	1.4	1.3	1.35	0.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-5 น้ำหนักตะกอน 2,4-Dinitrophenylhydrazone (g) ที่เวลาต่างๆกัน

รูปแบบ	Time (min)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Sample 1	0	0.0032	0.0029	0.00305	0.00021
	3	0.0038	0.0040	0.00390	0.00014
	6	0.0039	0.0051	0.00450	0.00085
	9	0.0056	0.0050	0.00530	0.00042
Sample 2	0	0.0023	0.0042	0.00325	0.00134
	3	0.0031	0.0038	0.00345	0.00049
	6	0.0049	0.0038	0.00435	0.00078
	9	0.0053	0.0049	0.00510	0.00028
Sample 3	0	0.0055	0.0052	0.00535	0.00021
	3	0.0081	0.0082	0.00815	0.00007
	6	0.0120	0.0070	0.00950	0.00354
	9	0.0053	0.0067	0.00600	0.00099
Sample 4	0	0.0061	0.0049	0.00550	0.00085
	3	0.0056	0.0087	0.00715	0.00219
	6	0.0072	0.0029	0.00505	0.00304
	9	0.0065	0.0079	0.00720	0.00099

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-6 ปริมาณตะกอน 2,4-Dinitrophenylhydrazone (g) เมื่อให้ความร้อนซ้ำๆ

รูปแบบ	จำนวนซ้ำ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Sample 1	0	0.0026	0.0032	0.00290	0.00042
	1	0.0025	0.0050	0.00375	0.00177
	2	0.0031	0.0157	0.00940	0.00891
	3	0.0027	0.0116	0.00715	0.00629
Sample 2	0	0.0325	0.0062	0.01935	0.01860
	1	0.0049	0.0034	0.00415	0.00106
	2	0.0054	0.0061	0.00575	0.00049
	3	0.0094	0.0095	0.00945	0.00007
Sample 3	0	0.0173	0.0138	0.01555	0.00247
	1	0.0063	0.0162	0.01125	0.00700
	2	0.0128	0.0108	0.01180	0.00141
	3	0.0291	0.0148	0.02195	0.01011
Sample 4	0	0.0100	0.0118	0.01090	0.00127
	1	0.0114	0.0095	0.01045	0.00134
	2	0.0144	0.0108	0.01260	0.00255
	3	0.0123	0.0185	0.01540	0.00438

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของพลาสติกพอลิโพรพิลีน โดยใช้เครื่อง Tensile Machine ตัดตัวอย่างให้ความกว้างของชิ้นงานมีขนาด 0.6 เซนติเมตร

### 1. ผลของน้ำที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

ตารางที่ ง-1 Sample 1 ผลค่าแรงดึงสูงสุด และค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

Time (min)	F.max (N)		ค่าเฉลี่ย	S.D.	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )		ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่	ครั้งที่			ครั้งที่	ครั้งที่		
	1	2			1	2		
0	64.28	75.36	69.82	7.8347	16.32	18.68	17.50	1.6688
3	63.64	63.3	63.47	0.2404	15.64	14.94	15.29	0.4950
6	65.35	66.88	66.12	1.0819	16.51	16.8	16.66	0.2051
9	62.14	67.54	64.84	3.8184	16.46	18.48	17.47	1.4284

ตารางที่ ง-2 Sample 1 ผลค่าความหนา และค่ามอดูลัสของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

Time (min)	Thick (mm)		ค่าเฉลี่ย	S.D.	Young's Modulus (N/mm <sup>2</sup> )		ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่	ครั้งที่			ครั้งที่	ครั้งที่		
	1	2			1	2		
0	0.65	0.67	0.66	0.0141	285.21	280.27	282.74	3.4931
3	0.68	0.71	0.70	0.0212	23.88	25.71	24.80	1.2940
6	0.66	0.67	0.67	0.0071	35.87	32.85	34.36	2.1355
9	0.63	0.61	0.62	0.0141	34.65	49.78	42.22	10.6985

ตารางที่ ง-3 Sample 2 ผลค่าแรงดึงสูงสุด และค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

Time (min)	F.max (N)		ค่าเฉลี่ย	S.D.	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )		ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่	ครั้งที่			ครั้งที่	ครั้งที่		
	1	2			1	2		
0	79.05	87.28	83.17	5.8195	22.06	22.61	22.34	0.3889
3	83.81	76.61	80.21	5.0912	21.02	20.66	20.84	0.2546
6	82.95	80.46	81.71	1.7607	21.48	21.04	21.26	0.3111
9	82.83	72.38	77.61	7.3893	20.67	19.53	20.11	0.8061

ตารางที่ ง-4 Sample 2 ผลค่าความหนา และค่ามอดูลัสของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

Time (min)	Thick (mm)		ค่าเฉลี่ย	S.D.	Young's Modulus (N/mm <sup>2</sup> )		ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่	ครั้งที่			ครั้งที่	ครั้งที่		
	1	2			1	2		
0	0.60	0.64	0.62	0.0283	156.44	187.80	172.12	22.1749
3	0.66	0.62	0.64	0.0283	123.31	114.68	119.00	6.1023
6	0.64	0.64	0.64	0.0000	102.07	95.82	98.95	4.4194
9	0.67	0.67	0.67	0.0000	143.52	162.14	152.88	13.1663

ตารางที่ ง-5 Sample 3 ผลค่าแรงดึงสูงสุด และค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

Time (min)	F.max (N)		ค่าเฉลี่ย	S.D.	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )		ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่	ครั้งที่			ครั้งที่	ครั้งที่		
	1	2			1	2		
0	93.80	89.60	91.70	2.9698	18.08	17.42	17.75	0.4667
3	94.01	91.71	92.86	1.6263	18.64	18.10	18.37	0.3818
6	96.17	94.43	95.3	1.2304	18.06	18.62	18.34	0.3960
9	82.29	92.73	87.51	7.3822	17.07	17.81	17.44	0.5233

ตารางที่ ง-6 Sample 3 ผลค่าความหนา และค่ามอดูลัสของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

Time (min)	Thick (mm)		ค่าเฉลี่ย	S.D.	Young's Modulus (N/mm <sup>2</sup> )		ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่	ครั้งที่			ครั้งที่	ครั้งที่		
	1	2			1	2		
0	0.87	0.86	0.87	0.0071	177.03	173.36	175.20	2.5951
3	0.84	0.84	0.84	0.0000	172.42	165.07	168.75	5.1972
6	0.89	0.85	0.87	0.0283	117.84	183.37	150.61	46.3367
9	0.87	0.87	0.87	0.0000	112.69	102.17	107.43	7.4388

ตารางที่ ง-7 Sample 4 ผลค่าแรงดึงสูงสุด และค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

Time (min)	F.max (N)		ค่าเฉลี่ย	S.D.	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )		ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่	ครั้งที่			ครั้งที่	ครั้งที่		
	1	2			1	2		
0	63.28	70.07	66.68	4.8013	19.27	21.24	20.26	1.3930
3	73.05	66.41	69.73	4.6952	14.78	20.28	17.53	3.8891
6	68.04	71.66	69.85	2.5597	20.39	21.33	20.86	0.6647
9	69.09	64.63	66.86	3.1537	20.59	19.66	20.13	0.6576

ตารางที่ ง-8 Sample 4 ผลค่าความหนา และค่ามอดูลัสของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

Time (min)	Thick (mm)		ค่าเฉลี่ย	S.D.	Young's Modulus (N/mm <sup>2</sup> )		ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่	ครั้งที่			ครั้งที่	ครั้งที่		
	1	2			1	2		
0	0.55	0.55	0.55	0.0000	220.22	266.38	243.30	32.6400
3	0.62	0.55	0.59	0.0495	200.34	261.43	230.89	43.1972
6	0.56	0.56	0.56	0.0000	255.99	189.28	222.64	47.1711
9	0.56	0.55	0.56	0.0071	268.09	205.54	236.82	44.2295

## 2. ผลของน้ำมันที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

ตารางที่ ง- 9 Sample 1 ผลค่าแรงดึงสูงสุด และค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

Time (min)	F.max (N)		ค่าเฉลี่ย	S.D.	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )		ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่	ครั้งที่			ครั้งที่	ครั้งที่		
	1	2			1	2		
0	79.32	68.49	73.91	7.6580	18.65	18.80	18.73	0.1061
3	68.21	71.47	70.34	2.3052	17.7	17.88	17.79	0.1273

ตารางที่ ง-10 Sample 1 ผลค่าความหนา และค่ามอดูลัสของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

Time (min)	Thick (mm)		ค่าเฉลี่ย	S.D.	Young's Modulus (N/mm <sup>2</sup> )		ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
0	0.71	0.61	0.66	0.0707	211.86	324.81	268.34	79.8677
3	0.66	0.66	0.66	0.0000	242.85	216.49	229.67	18.6393

ตารางที่ ง-11 Sample 2 ผลค่าแรงดึงสูงสุด และค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

Time (min)	F.max (N)		ค่าเฉลี่ย	S.D.	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )		ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
0	92.72	94.64	93.68	1.3576	25.07	24.39	24.73	0.4808

ตารางที่ ง-12 Sample 2 ผลค่าความหนา และค่ามอดูลัสของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

Time (min)	Thick (mm)		ค่าเฉลี่ย	S.D.	Young's Modulus (N/mm <sup>2</sup> )		ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
0	0.62	0.65	0.64	0.0212	201.34	206.31	203.83	3.5143

ตารางที่ ง-13 Sample 3 ผลค่าแรงดึงสูงสุด และค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

Time (min)	F.max (N)		ค่าเฉลี่ย	S.D.	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )		ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
0	96.51	92.91	94.71	2.5456	18.95	18.09	18.52	0.6081

ตารางที่ ง-14 Sample 3 ผลค่าความหนา และค่ามอดูลัสของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

Time (min)	Thick (mm)		ค่าเฉลี่ย	S.D.	Young's Modulus (N/mm <sup>2</sup> )		ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
0	0.86	0.86	0.86	0.0000	140.32	140.62	140.47	0.2121

ตารางที่ ง-15 Sample 4 ผลค่าแรงดึงสูงสุด และค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

Time (min)	F.max (N)		ค่าเฉลี่ย	S.D.	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )		ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
0	79.76	78.2	78.98	1.1031	20.62	20.22	20.42	0.2828

ตารางที่ ง-16 Sample 4 ผลค่าความหนา และค่ามอดูลัสของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

Time (min)	Thick (mm)		ค่าเฉลี่ย	S.D.	Young's Modulus (N/mm <sup>2</sup> )		ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
0	0.61	0.65	0.63	0.0283	209.84	206.08	207.96	2.6587

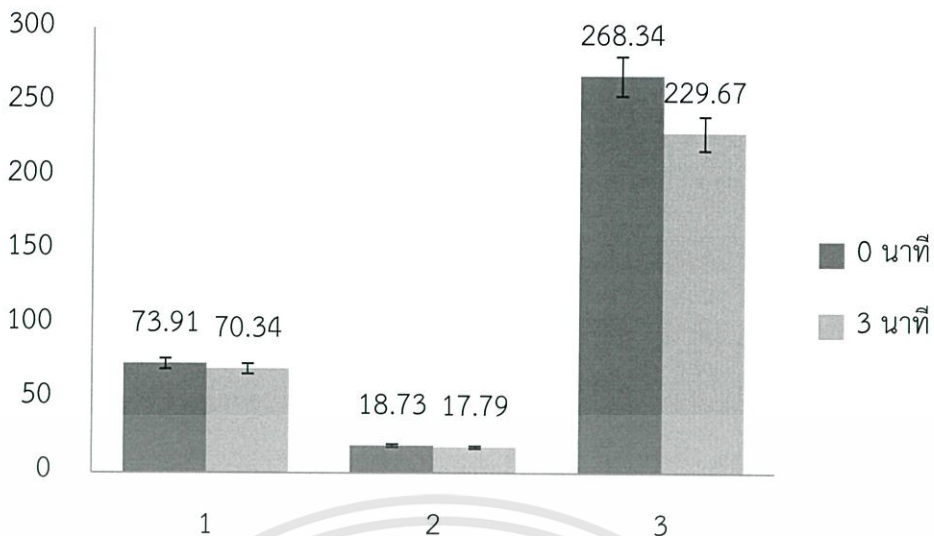
3. ผลของน้ำที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพลาสติกพอลิโพรพิลีนเมื่อให้ความร้อนซ้ำทุก 3 นาที จำนวน 3 ครั้ง

ตารางที่ ง-17 ให้ความร้อนซ้ำทุก 3 นาที จำนวน 3 ครั้ง ผลค่าแรงดึงสูงสุด และค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

รูปแบบ	F.max (N)		ค่าเฉลี่ย	S.D.	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )		ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่	ครั้งที่			ครั้งที่	ครั้งที่		
	1	2			1	2		
Sample 1	78.22	72.52	75.37	4.0305	17.37	16.63	17.00	0.5233
Sample 2	81.79	84.51	83.15	1.9233	21.95	22.95	22.45	0.7071
Sample 3	95.04	90.99	93.02	2.8638	18.36	17.22	17.79	0.8061
Sample 4	67.04	71.65	69.35	3.2598	19.05	18.65	18.85	0.2828

ตารางที่ ง-18 ให้ความร้อนซ้ำทุก 3 นาที จำนวน 3 ครั้ง ผลค่าความหนา และค่ามอดูลัสของพลาสติกพอลิโพรพิลีน

รูปแบบ	Thick (mm)		ค่าเฉลี่ย	S.D.	Young's Modulus (N/mm <sup>2</sup> )		ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่	ครั้งที่			ครั้งที่	ครั้งที่		
	1	2			1	2		
Sample 1	0.75	0.73	0.74	0.0141	178.86	199.92	189.39	14.8917
Sample 2	0.62	0.61	0.62	0.0071	152.62	214.01	183.32	43.4093
Sample 3	0.86	0.88	0.87	0.0141	184.69	149.8	167.25	24.6710
Sample 4	0.59	0.64	0.62	0.0354	157.91	184.41	171.16	18.7383



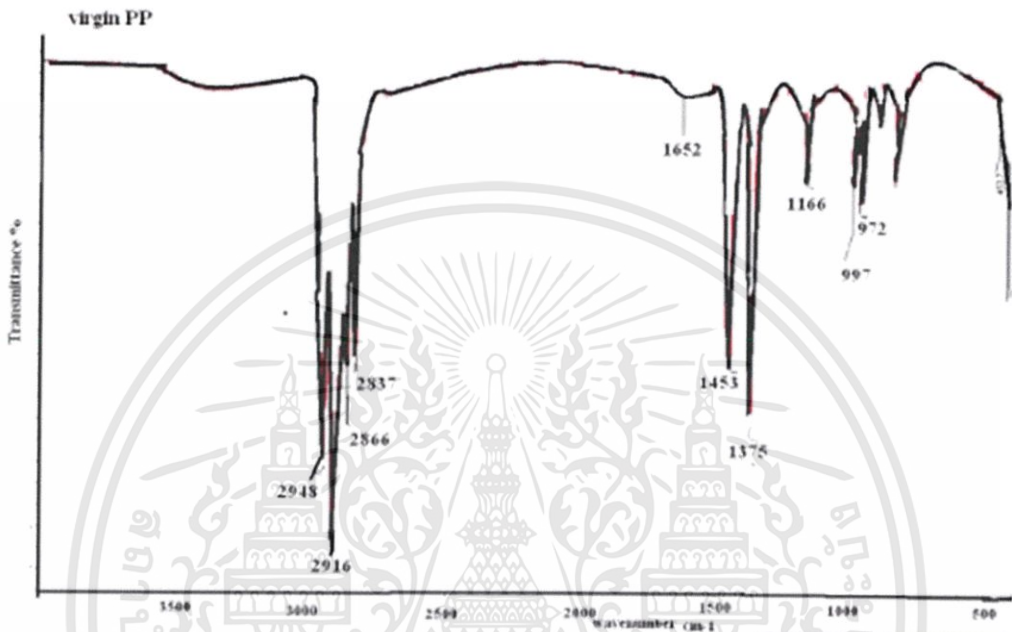
รูปที่ ง-1 Sample 1 เปรียบเทียบเวลา 0 นาที และ 3 นาที ของค่าความแข็งแรงดึง  
ค่าแรงดึงสูงสุด และค่ามอดุลัสเมื่อน้ำมัน

\*หมายเหตุ

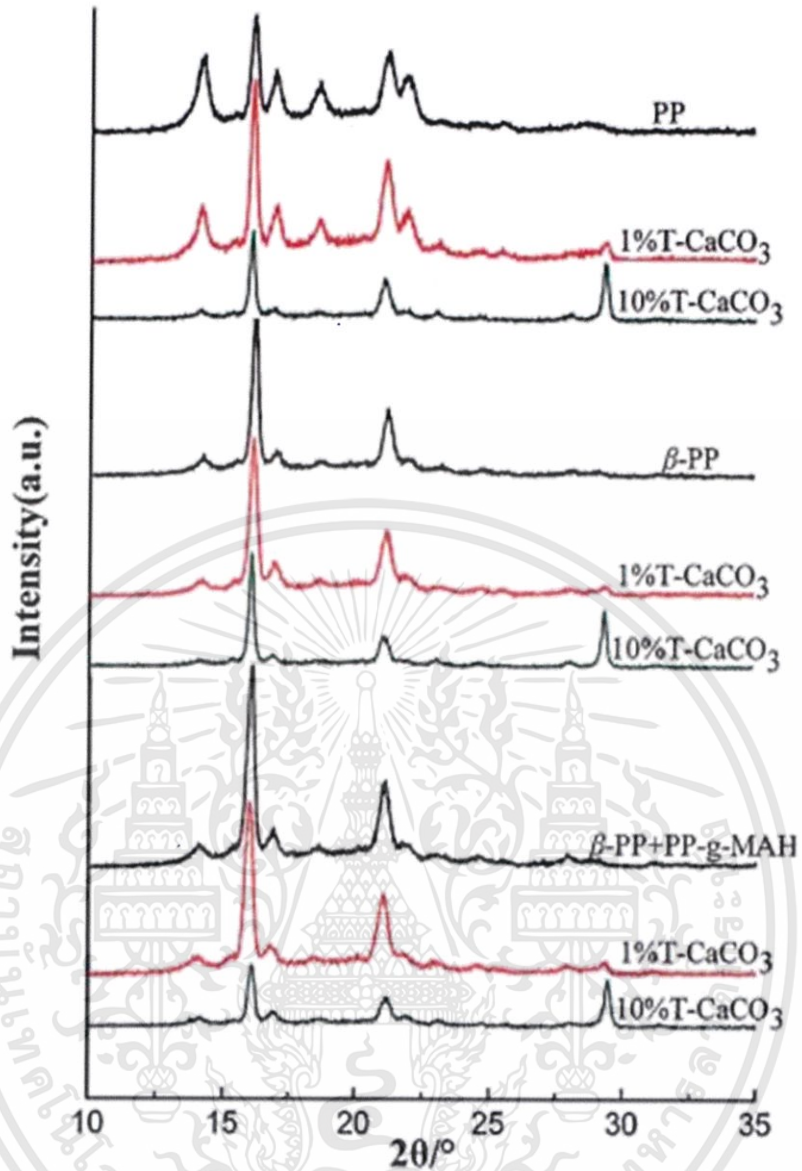
- 1 คือ F.max (N)
- 2 คือ Tensile strength ( $N/mm^2$ )
- 3 คือ Young's Modulus ( $N/mm^2$ )

## ภาคผนวก จ

กราฟมาตรฐานของพอลิโพรพิลีน ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) และเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)



รูปที่ จ-1 กราฟมาตรฐานการวิเคราะห์ด้วย FT-IR ของพอลิโพรพิลีน (K.Palanivelu, 2010)



รูปที่ จ-2 โครงผลึกของพอลิโพรพิลีนเพียงอย่างเดียวเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่เติม  $\text{CaCO}_3$   
(Qiang and Jiawei, 2013)

## ภาคผนวก ฉ

การเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า(วัตต์) เป็น พลังงาน(BTU)

$$E = P \times t$$

Energy (E) = พลังงาน มีหน่วยวัดเป็นจูล (J)

Power (P) = กำลัง มีหน่วยวัดเป็นวัตต์ (W)

Time (T) = เวลา มีหน่วยวัดเป็นวินาที (s)

ตารางที่ ฉ-1 พลังงานความร้อนจากการได้รับความร้อนด้วยไมโครเวฟ

Time(min)	P (W)	Time (s)	E (J)	E (BTU)
0	800	0	0	0.0000
3	800	180	144,000	136.4857
6	800	360	288,000	272.9713
9	800	540	432,000	409.4570

\*หมายเหตุ 1 BTU = 1055.05585 J