

การผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
ที่มีกลิ่นหอมจากวานิลลา

PRODUCTION OF VANILLA FRAGRANCE PRODUCTS
OF LOW DENSITY POLYETHYLENE

ภัทรพงษ์ สวงวงศ์ศักดิ์
PATARAPHONG SANGUANSAKDI

๒๕๕๑
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะศึกษาศาสตร์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

การผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
ที่มีกลิ่นหอมจากวานิลลา

PRODUCTION OF VANILLA FRAGRANCE PRODUCTS
OF LOW DENSITY POLYETHYLENE

ภัทรพงษ์ สงวนศักดิ์

PATARAPHONG SANGUANSAKDI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

**PRODUCTION OF VANILLA FRAGRANCE PRODUCTS
OF LOW DENSITY POLYETHYLENE**

PATARAPHONG SANGUANSAKDI

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN TECHNOLOGY POLYMER
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG**

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีกลิ่นหอม
จากวานิลลา
นักศึกษา นายภัทรพงษ์ สงวนศักดิ์
รหัสประจำตัว 47064215
ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ. 2550
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

บทคัดย่อ

กลิ่นไม่พึงประสงค์ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมรอบข้าง และมีผลในการตัดสินใจเลือกซื้อของผู้บริโภค ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษากระบวนการปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ได้จากกระบวนการเป่าฟิล์ม โดยทำการผสมสารละลายวานิลลาใช้เป็นสารให้กลิ่น สารฟิวซาบอนด์ใช้เป็นสารช่วยผสม และแคลเซียม-สังกะสีใช้เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้เครื่องผสมความเร็วสูงและเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยวในการผสม ก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่าฟิล์ม จากการศึกษาพบว่าการเติมสารช่วยผสม MAPE ช่วยให้พอลิเมอร์มีสมบัติเชิงกลโดยรวมสูงขึ้น สันฐานวิทยาและลักษณะทางกายภาพให้ผลสอดคล้องกัน คือ สารช่วยผสมมีการกระจายตัวสม่ำเสมอทำให้พื้นผิวมีความเรียบเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ฟิล์มมีความขุ่นเพิ่มขึ้นด้วย ผลที่ได้จากการศึกษาการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน ทำให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลลดลง มีอุณหภูมิการสลายตัว (T_d) เพิ่มขึ้น พื้นผิวมีความขรุขระทำให้เกิดการซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาการเติมสารละลายวานิลลาลงในพอลิเมอร์พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารละลายวานิลลาทำให้พอลิเมอร์มีสีเหลืองและมีกลิ่นหอมของสารละลายวานิลลาเพิ่มมากขึ้น แต่ทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของฟิล์มต่ำลงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังศึกษาด้วยเทคนิค FTIR สามารถตรวจพบสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของสารช่วยผสมและสารวานิลลินในพอลิเมอร์ผสมได้ การศึกษาด้วยเทคนิค GC-MS สามารถตรวจสอบการสลายตัวของสารวานิลลินและใช้ยืนยันได้ว่าสารวานิลลินยังคงอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์

Thesis	Production of Vanilla Fragrance Products of Low Density Polyethylene
Student	Pataraphong Sanguansakdi
Student ID	47064215
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Somsak Woramongconchai

ABSTRACT

Undesired odour will affect for the environment and consumer behavior, thus this research will concentrate on improvement of low density polyethylene and blown film properties. A mixture of additive are used to improve the quality of polymer as vanilla solution as a fragrance, fusabond as a compatibilizer and Ca-Zn as a heat stability of polymer. The polymer and additive were compounded with high-speed mixer before the process went through the blown-film extrusion. It was found that the adding of compatibilizer MAPE would enhance mechanical properties of polymer. The morphology and physical performance indicated parallel results. The compatibilizer was even dispersion and promoting smooth surface but the film was greater haze. The studies of adding thermal stability revealed that the film indicated lower mechanical properties, higher decomposition temperature and more roughness surface leading to higher water transmission. The adding vanilla solution into polymer was show that the higher amount of vanilla solution was leading to pale yellow and good smelling of vanilla scent. The overall mechanical properties of film was less lower properties. In addition, FTIR technique could be identified functional group of crucial structure of compatibilizer and vanillin in polymer blend. GC-MS technique was used to identify decomposition of vanillin and confirmed that vanillin was still in polymer matrix as well.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สมศักดิ์ วรรณกุลชัย ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีในระหว่าง การดำเนินงานวิจัยตลอดมา

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มาลินี ชัยสุขกิจสินธุ์ ผศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร และ รศ.ดร. เก็จวดี พดุกษาทร กรรมการสอบหัวข้อและโครงสร้างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนข้อชี้แนะ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุนทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือในการวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคาร ปฏิบัติการอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ที่อำนวยความสะดวกและให้คำแนะนำในการใช้ เครื่องมือต่างๆ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี คณะ วิทยาศาสตร์ ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยนี้มาโดยตลอด

สุดท้ายต้องขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกท่านที่คอยแนะนำ ให้ความช่วยเหลือและคอยเป็น กำลังใจตลอดมา

ภัทรพงษ์ สงวนศักดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินงาน.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 สารให้กลิ่น.....	3
2.1.1 การสกัดสารให้กลิ่นจากผลหรือเมล็ดวานิลลา.....	6
2.1.2 การสังเคราะห์สารวานิลลิน.....	7
2.2 พอลิเมอร์ผสม.....	11
2.2.1 ความสามารถในการละลายและการผสมเข้ากันได้.....	12
2.2.2 สารช่วยผสม.....	13
2.3 พอลิเอทิลีน.....	14
2.4 สารคงสภาพ.....	16
2.5 หลักการของเครื่องมือผสมและการขึ้นรูป	
2.5.1 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว.....	17
2.5.2 เครื่องเป่าฟิล์ม.....	19
2.6 หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์	
2.6.1 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนอินฟราเรด.....	24
2.6.2 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน.....	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.3 การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกวาด.....	29
2.6.4 การตรวจวิเคราะห์ห้องค์ประกอบด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี- แมสสเปกโตรเมตรี.....	31
2.6.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	34
2.6.6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ.....	38
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	43
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	44
3.3 วิธีการทดลอง	
3.3.1 การเตรียมตัวอย่าง.....	45
3.3.2 การขึ้นรูป.....	46
3.4 การตรวจวิเคราะห์	
3.4.1 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนอินฟราเรด.....	48
3.4.2 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน.....	49
3.4.3 การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกวาด.....	49
3.4.4 การตรวจวิเคราะห์ห้องค์ประกอบด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี- แมสสเปกโตรเมตรี.....	49
3.4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	50
3.4.6 การตรวจวิเคราะห์ด้วยการชั่งน้ำหนัก.....	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 ผลที่ได้จากการศึกษาสารตัวเดิมในเบื้องต้น	
4.1.1 การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกวาด.....	53

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ.....	54
4.2 ผลที่ได้จากการศึกษาสารช่วยผสมในปริมาณต่างๆ กัน	
4.2.1 การตรวจวิเคราะห์การดูดกลืนอินฟราเรด.....	56
4.2.2 การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกวาด.....	59
4.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ.....	60
4.2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	63
4.2.5 การตรวจวิเคราะห์ด้วยการชั่งน้ำหนัก.....	66
4.2.6 การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ.....	67
4.3 ผลที่ได้จากการศึกษาสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนในปริมาณต่างๆ กัน	
4.3.1 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน.....	68
4.3.2 การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกวาด.....	71
4.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ.....	72
4.3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	73
4.3.5 การตรวจวิเคราะห์ด้วยการชั่งน้ำหนัก.....	76
4.2.6 การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ.....	77
4.4 ผลที่ได้จากการศึกษาสารละลายวานิลลาในปริมาณต่างๆ กัน	
4.4.1 การตรวจวิเคราะห์การดูดกลืนอินฟราเรด.....	78
4.4.2 การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกวาด.....	82
4.4.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ.....	83
4.4.4 การตรวจวิเคราะห์ห่อหุ้มประกอบด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี- แมสสเปกโตรเมทรี.....	85
4.4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	88
4.4.6 การตรวจวิเคราะห์ด้วยการชั่งน้ำหนัก.....	93
4.4.7 การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ.....	95

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	96
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	97
เอกสารอ้างอิง.....	98
ภาคผนวก ก.....	103
ภาคผนวก ข.....	104
ภาคผนวก ค.....	108
ประวัติผู้ทำงานวิจัย.....	109

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของวานิลลิน.....	5
2.2 a) เกลาของต้นวานิลลา	
b) ส่วนของดอกวานิลลา.....	5
2.3 a) ฝักของวานิลลาที่ยังไม่สุก	
b) ฝักของวานิลลาที่สุกแล้ว.....	6
2.4 สารประกอบที่ใช้ในการสังเคราะห์วานิลลิน.....	7
2.5 ปฏิกริยาไรเมอร์-โทมานน์.....	8
2.6 ปฏิกริยาโบรมิเนชัน 4-ไฮดรอกซีเบนซิลดีไฮด์.....	8
2.7 การเตรียมวานิลลิน.....	8
2.8 โครงสร้างบางส่วนของพอลิเมอร์ลิกนิน.....	9
2.9 มอนอเมอร์บางตัวที่สำคัญของพอลิเมอร์ลิกนิน.....	9
2.10 a) การเปลี่ยนจากยูเจนอลเป็นเฟอร์ูลิก แอซิด	
b) การเปลี่ยนจากเฟอร์ูลิก แอซิดเป็นวานิลลิน.....	10
2.11 โครงสร้างของฟิวซาบอนด์.....	14
2.12 การทำงานของพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	14
2.13 กลไก intermolecular back-biting.....	15
2.14 รูปทรงทางเรขาคณิตของสกรู.....	17
2.15 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว.....	18
2.16 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม.....	20
2.17 คายวงแหวนแบบป้อนเข้าด้านข้าง.....	21
2.18 เครื่องเป่าฟิล์ม.....	23
2.19 การสั้นของ โมเลกุลแบบการยืด.....	24
2.20 การสั้นของ โมเลกุลแบบการโค้งงอ.....	25
2.21 ส่วนประกอบของเครื่อง IR spectrometer.....	26
2.22 Fourier transform infrared spectrometer.....	26
2.23 ส่วนประกอบของเครื่อง TGA.....	28
2.24 Thermogravimetric analyzer.....	28
2.25 Scanning electron microscope.....	29

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....	30
2.27 เครื่อง Gas Chromatography-Mass Spectrometry.....	31
2.28 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่อง GC.....	32
2.29 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่อง MS.....	33
2.30 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึง.....	35
2.31 ทิศทางการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์.....	35
2.32 Universal testing machine.....	36
2.33 กราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึง.....	36
2.34 ลักษณะของตัวอย่างทดสอบการฉีกขาด.....	37
4.1 ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีสารเติมแต่งต่างชนิดกัน.....	53
4.2 ลักษณะของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีสารเติมแต่งต่างชนิดกัน.....	55
4.3 สเปกตรัมของไซลีนและพอลิเมอร์ผสมที่ละลายด้วยไซลีน.....	57
4.4 โครงสร้างของสารไซลีน.....	58
4.5 โครงสร้างของสารช่วยผสม (MAPE)	58
4.6 ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีสารช่วยผสมปริมาณต่างๆ กัน.....	59
4.7 ลักษณะของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีสารช่วยผสมในปริมาณต่างๆ กัน.....	60
4.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารช่วยผสม.....	62
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง กับ ปริมาณสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสม.....	63
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัส กับ ปริมาณสารช่วยผสมในพอลิเมอร์.....	64
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานฉีกขาด กับ ปริมาณสารช่วยผสมในพอลิเมอร์.....	65
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนัก กับ เวลา เปรียบเทียบกัน ระหว่างพอลิเมอร์ที่มีสารช่วยผสมในปริมาณต่างๆ กัน.....	66
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของไอน้ำ กับ ปริมาณสารช่วยผสมที่แตกต่างกัน.....	67
4.14 เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารวานิลลา.....	68
4.15 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนต่างกัน.....	69
4.16 ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีสารเพิ่มเสถียรภาพ ทางความร้อนปริมาณต่างๆ กัน.....	71
4.17 ลักษณะของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนในปริมาณต่างๆ กัน.....	72

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง กับ ปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพ ทางความร้อนในพอลิเมอร์ผสม.....	73
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัส กับ ปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน ในพอลิเมอร์.....	74
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานฉีกขาด กับ ปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพ ทางความร้อนในพอลิเมอร์.....	75
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนัก กับ เวลา เปรียบเทียบกัน ระหว่างพอลิเมอร์ที่มีสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนในปริมาณต่างๆ กัน.....	76
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของไอน้ำ กับ ปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพ ทางความร้อนที่แตกต่างกัน.....	77
4.23 สเปกตรัมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารวานิลลา.....	78
4.24 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....	79
4.25 หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญใน โครงสร้างของสารวานิลลิน.....	79
4.26 สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่มีสารละลายวานิลลาในปริมาณต่างๆ กัน.....	80
4.27 สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่มีสารวานิลลา 2 % ที่เวลาต่างๆ กัน.....	81
4.28 ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีสารละลายวานิลลา ปริมาณต่างๆ กัน.....	82
4.29 ลักษณะของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีสารละลายวานิลลาในปริมาณต่างๆ กัน.....	83
4.30 สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากเครื่อง GC ในกรณีทีวิเคราะห์เมื่อเดือนที่ 1 และเดือนที่ 5.....	85
4.31 เลขมวลที่มีลักษณะเฉพาะของสารที่ระเหยได้ในพอลิเมอร์ผสมเปรียบเทียบกับ เลขมวลของสารวานิลลินที่มีอยู่ในฐานข้อมูลอ้างอิง.....	86
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง กับ ปริมาณสารละลายวานิลลาในพอลิเมอร์.....	88
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง กับ ปริมาณสารละลายวานิลลาในพอลิเมอร์ เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือน.....	88
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัส กับ ปริมาณสารละลายวานิลลาในพอลิเมอร์.....	90
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัส กับ ปริมาณสารละลายวานิลลาในพอลิเมอร์ เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือน.....	90

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานฉีกขาด กับ ปริมาณสารละลายวานิลลา ในพอลิเมออร์.....	91
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานฉีกขาด กับ ปริมาณสารละลายวานิลลา ในพอลิเมออร์เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือน.....	91
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนัก กับ เวลา เปรียบเทียบกัน ระหว่างพอลิเมออร์ที่มีสารละลายวานิลลาในปริมาณต่างๆ กัน.....	93
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนัก กับ เวลา เปรียบเทียบกัน ระหว่างพอลิเมออร์ผสมสูตรที่ไม่เติมสารช่วยผสม สูตรที่ไม่เติมสารเพิ่มเสถียรภาพ ทางความร้อน และสูตรที่มีทั้งสารช่วยผสมและสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน.....	94
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของไอน้ำ กับ ปริมาณสารละลายวานิลลา ที่แตกต่างกัน.....	95

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....	15
2.2 สมบัติเด่นและสมบัติด้อยของพอลิเอทิลีน.....	16
3.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LD 1905 F).....	43
3.2 สมบัติของ Stabinex NL-214 (Ca/Zn stabilizer).....	44
3.3 สมบัติของ Fusabond [®] MB 226D.....	44
3.4 อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมเมื่อใส่สารเติมแต่งต่างชนิดกัน.....	46
3.5 อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมเมื่อมีปริมาณสารช่วยผสมต่างกัน.....	46
3.6 อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมเมื่อมีปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนต่างกัน.....	47
3.7 อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมเมื่อมีปริมาณสารละลายวานิลลาต่างกัน.....	47
4.1 พันธะและตำแหน่งของพิกที่สำคัญในงานวิจัย.....	56
4.2 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสม ที่มีการปรับปรุง โดยการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน.....	70
4.3 ลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมในแต่ละสูตร.....	84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการวิจัย

ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพลาสติกเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ให้ความทนทาน น้ำหนักเบา ราคาถูก นำมาใช้แทนทรัพยากรธรรมชาติได้และสามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ได้หลายรูปแบบตามความต้องการของผู้บริโภค แต่ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพลาสติกก็มีข้อเสียเช่นกัน ที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งคือ กลิ่นที่ไม่พึงปรารถนา กลิ่นอาจเกิดจากสารประกอบที่นำมาใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกหรือเกิดจากการนำพลาสติกที่ใช้งานแล้วกลับมาใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่อีกครั้ง (recycle) ซึ่งกลิ่นที่เกิดขึ้นมานี้ยังสามารถพบได้ในกรณีผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตขึ้นมาจากเม็ดพลาสติกที่ยังไม่ได้ใช้งานอีกด้วย

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมพลาสติกเริ่มให้ความสำคัญเรื่องความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น กรณีหนึ่งที่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมคือการแพร่ของกลิ่น โดยปกติแล้วผู้บริโภคที่ใช้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพลาสติกจะสังเกตการแพร่ของกลิ่นได้จากการใช้การสูดดมเท่านั้น กลิ่นที่แพร่ออกมานี้อาจจะเป็นกลิ่นที่เกิดจากการรวมกันของสารที่ให้กลิ่นหลายชนิดไม่สามารถจำแนกได้ ซึ่งการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกลิ่นต้องการวิธีที่สามารถตอบสนองต่อกลิ่นได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง แม้ว่าจะมีการพัฒนาการวิเคราะห์ทั้งทางเคมีและทางกายภาพให้มีความทันสมัยมากขึ้นแต่ก็ยังพบว่าจมูกของมนุษย์ยังคงถูกใช้เป็นเครื่องตรวจวัดกลิ่นที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการตรวจวัด (analytical sensors) เช่น เครื่อง Gas chromatography จะสามารถจำแนกกลิ่นของสารที่ได้รับเพียงกลิ่นเดียว แต่ในความเป็นจริงแล้วมีอยู่บ่อยครั้งที่สารชนิดหนึ่งจะให้กลิ่นออกมามากกว่าหนึ่งกลิ่นซึ่งจมูกของมนุษย์สามารถรับรู้กลิ่นได้ แต่เครื่องมือที่วิเคราะห์ไม่สามารถตรวจวัดได้

กลิ่นที่เกิดขึ้นมานี้จะส่งผลให้เกิดข้อเสียกับตัวผลิตภัณฑ์ชนิดนั้นๆ เอง เมื่อนำไปวางขาย เช่น ก่องหรือถังพลาสติก ของเด็กเล่นที่ทำจากพลาสติก เฟอร์นิเจอร์ที่ใช้ตกแต่งภายในบ้าน ถุงดำที่ใช้ใส่ขยะ และผลิตภัณฑ์ที่ใช้เกี่ยวกับการตกแต่งในอุตสาหกรรมรถยนต์ เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำให้กลิ่นที่ไม่พึงปรารถนาเหล่านั้นลดลงหรือหายไป ในงานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์และการลดลงของกลิ่นที่ไม่พึงปรารถนาด้วยการเติมสารละลายวานิลลาซึ่งใช้เป็นสารให้กลิ่นลงไป เพื่อทำให้กลิ่นที่เกิดจากตัวผลิตภัณฑ์พลาสติกและกลิ่นที่เกิดจากกระบวนการผลิตฟิล์มเป่าเป็นกลิ่นที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมรอบข้างมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อลดกลิ่นไม่พึงปรารถนาที่เกิดจากตัวผลิตภัณฑ์และจากกระบวนการผลิตฟิล์มเป่าโดยอาศัยสารละลายวานิลลาเป็นสารให้กลิ่น
2. เพื่อหาอัตราส่วนและสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มเป่า
3. เพื่อศึกษาผลของสารละลายวานิลลาที่มีต่อสมบัติของฟิล์มเป่า

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาสมบัติของสารละลายวานิลลา ที่ใช้เป็นสารให้กลิ่น
2. ทำการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับสารช่วยผสม สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน และสารให้กลิ่น
3. ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่าฟิล์ม
4. ศึกษาสมบัติเชิงกล อัตราการสลายตัว เสถียรภาพทางความร้อน สันฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ และสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินงาน

1. การค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับการลดกลิ่นและวิธีการตรวจสอบกลิ่นไม่พึงประสงค์ที่เกิดจากผลิตภัณฑ์พลาสติก
2. การค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับสารละลายวานิลลาที่ใช้เป็นสารให้กลิ่น และการเข้ากันได้กับพอลิเมอร์
3. ทำการหาสูตรผสมของพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง
4. นำไปผสมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยวแล้วตัดให้เป็นเม็ด
5. ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการเป่าฟิล์มและขึ้นรูปเป็นฟิล์ม โดยใช้เครื่องเป่าฟิล์ม
6. นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกล อัตราการสลายตัว เสถียรภาพทางความร้อน สันฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ และสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. คาดว่าจะสามารถลดกลิ่นที่ไม่พึงปรารถนาที่เกิดจากผลิตภัณฑ์พลาสติกได้
2. เป็นแนวทางในการปรับปรุงพอลิเมอร์ให้มีสมบัติที่ดีขึ้น และเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ที่มาจากพลาสติก

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 สารให้กลิ่น (Fragrance) [1]

ในทางเคมีสารให้กลิ่นนำมาใช้เติมลงในผลิตภัณฑ์ เพื่อปรับแต่งให้ได้กลิ่นที่ต้องการหรือช่วยปกปิดกลิ่นที่ไม่ต้องการในวัสดุหรือสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไป เป็นน้ำมันหอมระเหย (perfume oils) ซึ่งทำเป็นเม็ดสีเข้มข้น (masterbatches) ในเทอร์โมพลาสติก โดยมักจะรวมกับสารให้สี (colorant) และขายเป็นผงหรือเป็นเม็ดให้แก่กระบวนการที่ต้องการผสมเม็ดสีเข้มข้นกับเรซินธรรมชาติเข้าด้วยกัน โดยใช้การอัดแบบโดยทั่วไป การอัดรีดและกระบวนการทำโฟม เป็นต้น

สารให้กลิ่นแบ่งตามองค์ประกอบได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

1. สารให้กลิ่นแบบธรรมชาติ (Natural Flavour) เป็นสารให้กลิ่นที่ใช้วัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติ 100 % ไม่มีตัวทำละลายเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ พริกสารสกัดชนิดต่างๆ เช่น essential oil, vanilla extract, malt extract เป็นต้น

2. สารให้กลิ่นชนิดเลียนแบบ (Natural Identical Flavour หรือ Synthetic Flavour) เป็นสารให้กลิ่นที่ผลิตโดยการสังเคราะห์สารเคมีให้มีองค์ประกอบทางเคมีให้เลียนแบบกลิ่นที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สาร Diacetyl เป็นสารให้กลิ่นที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในเนยอยู่แล้ว ดังนั้นการใช้สาร Diacetyl ในการผลิตเนยจะถือว่าสารให้กลิ่นชนิดนี้เป็นแบบ Natural Identical

3. สารให้กลิ่นสังเคราะห์ (Artificial Flavour) เป็นสารให้กลิ่นที่ผลิตโดยการสังเคราะห์สารเคมีที่ไม่ได้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารวานิลลินซึ่งได้จากการสกัดวานิลลาถือว่าเป็น Natural Identical Raw Material แต่ Ethyl Vanillin จัดเป็นสารให้กลิ่นแบบสังเคราะห์ เนื่องจากสารเคมีตัวนี้ไม่ได้เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติ แต่ได้จากการสังเคราะห์เท่านั้น แต่ Ethyl Vanillin จะมีราคาถูกและให้กลิ่นที่แรงกว่าสาร Vanillin

รูปแบบของสารให้กลิ่น (Flavour Forms)

สารให้กลิ่นที่มีขายอยู่ทั่วไปนั้นมีขายกันในหลายรูปแบบและความเข้มข้นที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้เพื่อจุดประสงค์ในด้านความสะดวกและความเหมาะสมในการใช้งาน สามารถแบ่งได้หลายรูปแบบดังต่อไปนี้

1. สารให้กลิ่นชนิดผง (Powder Form) อาจผลิตได้จากการ Spray Dry, Adsorbate (การฉีดพ่นสารให้กลิ่นลงบนตัวพาต่างๆ เช่น เกลือ, น้ำตาล เป็นต้น), Encapsulate (การใช้สารพวก gum ห่อหุ้มสารให้กลิ่นให้อยู่ภายใน)

2. สารให้กลิ่นชนิดน้ำ (Liquid Form) แบ่งเป็น

- ชนิดที่มีตัวทำละลายที่ไม่ใช่แอลกอฮอล์ เช่น Propylene Glycol, Triacetin
- ชนิดที่มีแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลาย
- ชนิดที่มีน้ำมัน, ไขมัน เป็นตัวทำละลาย
- ชนิดที่ไม่มีตัวทำละลาย เช่น Essential Oil

3. สารให้กลิ่นชนิด Emulsion โดยปกติใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์

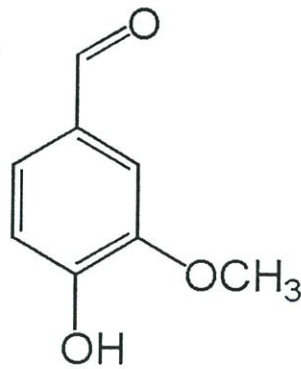
ความเข้มข้นของสารให้กลิ่นมีตั้งแต่ 10 ส่วนในล้านส่วน (ใช้กับฟิล์มห่ออาหาร) จนถึง 40 เปอร์เซ็นต์ (สารปรับอากาศบริสุทธิ์) ความเข้มข้นที่ขายกันประมาณ 2-8 คอลลาร์ต่อปอนด์ อายุการใช้งานของกลิ่นควบคุมโดยความดันไอของกลิ่น อัตราส่วนระหว่างผิวต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิและการไหลของอากาศที่ได้รับการควบคุม อายุการใช้งานอาจอยู่ในช่วงหลายวันจนถึงหลายปี ผลิตภัณฑ์ที่นิยมนำสารให้กลิ่นไปใช้กันมากคือ การผลิตหัวน้ำหอม ลูกขยะ ฟิล์มทั่วไป สารปรับอากาศบริสุทธิ์ในห้องหรือรถยนต์ ของเด็กเล่น สิ่งทอ ของใช้ในโรงพยาบาล ผลิตภัณฑ์ขนมหวาน หมากฝรั่ง เครื่องสำอางค์ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากนม เป็นต้น ส่วนมากในงานเหล่านี้ต้องการใช้กลิ่นที่มีความเข้มข้นสูง แต่การใช้งานในบางกรณีใช้กลิ่นที่มีความเข้มข้นสูงไม่ได้จะต้องรักษากลิ่นให้อยู่ในระดับอ่อนเพื่อลดผลที่จะเกิดขึ้นในทางจิตวิทยา

การประเมินกลิ่น (Flavour Evaluation)

สารให้กลิ่นที่ถูกปรุงแต่งขึ้นมามีการประเมินทางประสาทสัมผัส คือ การดม โดยได้อธิบายลักษณะกลิ่นแบ่งเป็น 3 ระยะขึ้นกับระยะเวลาตั้งทิ้งไว้ก่อนหลังดังนี้

1. Top Note เป็นความรู้สึกที่เกิดขึ้นเมื่อดมทันที ส่วนใหญ่มักได้กลิ่นของสารละลาย
2. Body เป็นความรู้สึกที่เกิดขึ้นเมื่อตั้งทิ้งไว้ซักครู่ก่อนที่จะดมกลิ่น
3. Dry Out ทิ้งไว้นานหลายชั่วโมงหรือข้ามคืน ยังมีกลิ่นติดค้างนานยิ่งดี

ในงานวิจัยนี้ใช้สารละลายวานิลลา (vanilla) เป็นสารให้กลิ่น ซึ่งวานิลลาเป็นที่รู้จักกันดีและเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายในการนำมาใช้เป็นสารแต่งกลิ่นและรสชาติ ซึ่งสารประกอบหลักที่เป็นตัวให้กลิ่นวานิลลาจะเป็นสารประกอบบริสุทธิ์จะรู้จักกันในชื่อ วานิลลิน (vanillin) มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 ได้มาจากดอกกล้วยไม้ในตระกูลวานิลลา (genus *Vanilla*) สายพันธุ์ (species) หลักๆ ที่นิยมเพาะปลูกกันคือ วานิลลา แพลนโฟเลีย (*Vanilla planfolia*) ในอดีตเป็นพืชท้องถิ่นของประเทศเม็กซิโก แต่ในปัจจุบันสามารถปลูกได้ทั่วไปในประเทศเขตร้อน ซึ่งที่เกาะมาดากัสการ์ (Madagascar) ทางตะวันออกเฉียงใต้ของทวีปแอฟริกาเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ที่สุดในโลก



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของวานิลลิน [2]

วานิลลาเป็นไม้เถารูปที่ 2.2 ซึ่งสารประกอบที่ให้กลิ่นมีลักษณะเด่นเฉพาะตัว จะพบได้ที่ส่วนของผลหรือเมล็ดที่ได้จากการผสมเกสรของดอก ถ้าผลหรือเมล็ดสุกจะหลุดออกจากต้นและแตกออกให้กลิ่นที่เป็นลักษณะเฉพาะตัวของวานิลลาออกมา ในเมล็ดที่สุกจะมีสีค่อนข้างดำและภายในจะบรรจุด้วยสารที่ให้กลิ่นเฉพาะตัวของวานิลลาซึ่งจะไม่พบกลิ่นนี้ในเมล็ดที่ยังไม่สุก



a)



b)

รูปที่ 2.2 a) เถาของต้นวานิลลา b) ส่วนของดอกวานิลลา [3]

การผลิตหัวน้ำหอมจากวานิลลาสามารถทำได้ 2 รูปแบบ คือ การสกัดจากผลหรือเมล็ดและจากการสังเคราะห์ ซึ่งวานิลลาที่ได้จากการสกัดจากผลหรือเมล็ดพบว่าเป็นของผสมซึ่งมีสารประกอบต่างๆ รวมกันอยู่มากกว่าร้อยละ โดยมิ้วานิลลินเป็นองค์ประกอบหลักในการให้กลิ่นวานิลลา ส่วนสารประกอบอื่นๆ ที่รวมกันอยู่จะมีผลทำให้กลิ่นของวานิลลาที่สกัดได้เปลี่ยนไป ตรงกันข้ามกับวานิลลาที่ได้จากสังเคราะห์ซึ่งจะมีราคาถูกลงกว่าและมีวานิลลินเป็นองค์ประกอบหลักเพียงอย่างเดียวทำให้กลิ่นที่ได้มีความใกล้เคียงกับกลิ่นวานิลลาในธรรมชาติมากที่สุด

2.1.1 การสกัดสารให้กลิ่นจากผลหรือเมล็ดวานิลลา (Vanilla) [3]

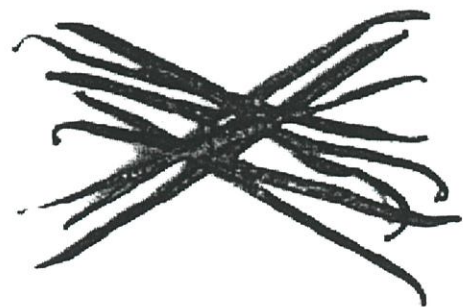
สารออร์แกนิกเอสเทอร์ที่ทำหน้าที่เป็นสารให้กลิ่นสามารถสกัดได้จากส่วนที่เป็นฝักหรือเมล็ดของวานิลลารูปที่ 2.3 ถ้าเป็นเมล็ดที่มีสีเขียวหรือเมล็ดที่ยังไม่สุกจะไม่พบกลิ่นหรือรสชาติที่เป็นลักษณะเฉพาะของวานิลลา ส่วนเมล็ดที่มีสีค่อนข้างดำหรือเมล็ดที่สุกแล้วนั้นมักมีกลิ่นและรสชาติที่เป็นลักษณะเฉพาะของวานิลลา แต่เมล็ดที่สุกแล้วจะหลุดออกจากดอกและเมล็ดจะแตกออกให้กลิ่นวานิลลาออกมาทำให้ไม่สามารถเก็บเมล็ดนั้นไปใช้งานได้ ดังนั้นต้องเก็บเกี่ยวตั้งแต่เมล็ดที่ยังไม่สุกเพื่อนำไปเตรียมให้เป็นเมล็ดที่สุกจึงจะสามารถนำไปใช้งานได้

กระบวนการเตรียมเมล็ดวานิลลา มีขั้นตอนดังนี้

1. นำเมล็ดสีเขียวหรือเมล็ดที่ยังไม่สุกไปให้ความร้อนที่ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 3 นาที จะทำให้กระบวนการทางธรรมชาติถูกยับยั้ง
2. หลังจากการอบไล่ความชื้นในระยะเวลาสั้นๆ เมล็ดจะถูกเก็บไว้ในกล่องไม้ที่มีฝาห่อเอาไว้เป็นระยะเวลา 4 เดือน จะทำให้เมล็ดมีสีน้ำตาลเข้มมากขึ้น
3. นำเมล็ดมาตากให้แห้งโดยใช้เตาอบหรือใช้แสงอาทิตย์ โดยทำการเว้นระยะห่างให้เท่าๆ กันตากไปจนกว่าเมล็ดจะแห้ง แต่ถ้าตากจนแห้งเกินไปเมล็ดนั้นก็จะเป็นอันตรายนำไปใช้งานได้
4. เมล็ดจะถูกแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ โดยเมล็ดที่สมบูรณ์ มีขนาดใหญ่ จะถูกเก็บเอาไว้เพื่อนำไปขาย ส่วนเมล็ดที่มีขนาดเล็ก หรือแตกหักส่วนหนึ่งจะนำไปใช้ในการสกัดสารวานิลลาหรือนำเมล็ดเหล่านั้นไปบดเป็นผง
5. เมล็ดที่เหลือจะถูกปล่อยให้สุกในกล่องไม้ใช้เวลาประมาณ 8 เดือน โดยจะมีการตรวจสอบสภาพหรือความชื้นเป็นระยะๆ สุดท้ายจะได้เมล็ดวานิลลาที่สุกพร้อมที่จะนำไปใช้ในการแต่งเติมกลิ่นและรสชาติที่เป็นลักษณะเฉพาะของวานิลลา



a)



b)

รูปที่ 2.3 a) ฝักของวานิลลาที่ยังไม่สุก b) ฝักของวานิลลาที่สุกแล้ว [4]

2.1.2 การสังเคราะห์สารวานิลลิน (Vanillin) [2]

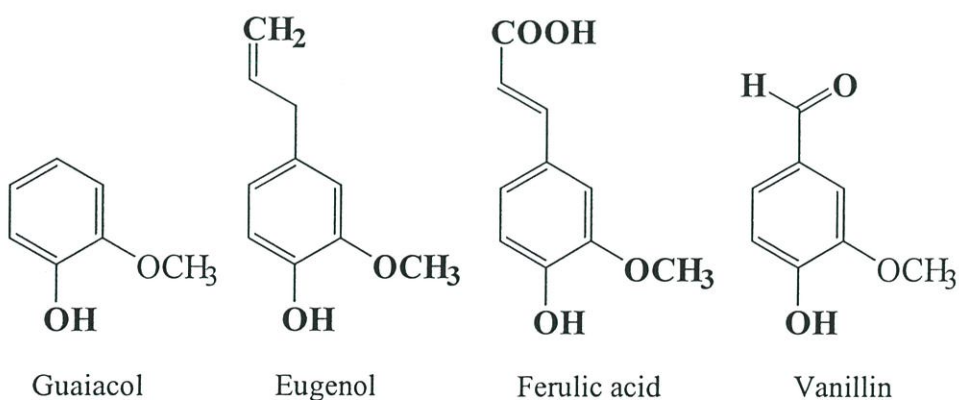
วานิลลินหรือ 4-ไฮดรอกซี-3-เมทอกซีเบนซัลดีไฮด์ (*4-hydroxy-3-methoxybenzaldehyde*) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตร โมเลกุลดังนี้ $C_8H_8O_3$ ส่วนที่เป็นหมูฟังก์ชันที่สำคัญคือ

- อัลดีไฮด์ (aldehyde)
- อีเทอร์ (ether)
- แอลกอฮอล์ (alcohol)

ในธรรมชาติสามารถสกัดสารวานิลลินได้จากเมล็ดวานิลลา ซึ่งวานิลลินที่สังเคราะห์ได้นิยมใช้เป็นตัวแต่งกลิ่นในอาหาร เครื่องดื่ม และในผลิตภัณฑ์ยา

วานิลลาที่สกัดได้จากธรรมชาติจะมีสารประกอบแตกต่างกันเป็นร้อยชนิด แต่ในวานิลลาที่สังเคราะห์ขึ้นมาจะมีแค่วานิลลินเพียงอย่างเดียว เนื่องจากวานิลลินที่สกัดได้จากธรรมชาติหายากและมีราคาแพงมาก (ราคาตั้งแต่ 1200-4000 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัม ขึ้นกับความบริสุทธิ์ของสารที่สกัดได้) ดังนั้นวานิลลินที่ใช้ในอุตสาหกรรมจึงได้จากการสังเคราะห์ (ราคาต่ำกว่า 15 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัม) การสังเคราะห์เพื่อการค้าครั้งแรกตั้งต้นจาก ยูเจนอล (eugenol) รูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นสารประกอบในธรรมชาติที่หาได้ง่ายนำไปผ่านกระบวนการไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) จะได้ไอโซยูเจนอล (isoeugenol) แล้วนำไปทำกระบวนการออกซิเดชันจะได้วานิลลิน แต่ปัจจุบันการผลิตวานิลลินได้จาก

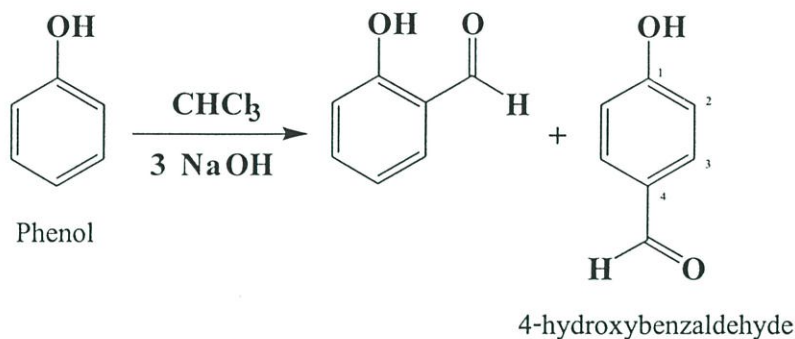
- ฟอร์มิลเลชัน (formylation) กัวไอเอคอล (guaiacol) รูปที่ 2.4 หรือเรียกว่า ปฏิกริยาไรเมอร์-ไทมานน์ (Reimer-Tiemann reaction)
- โดยการหมัก ลิกนิน (lignin) รูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมกระดาษ



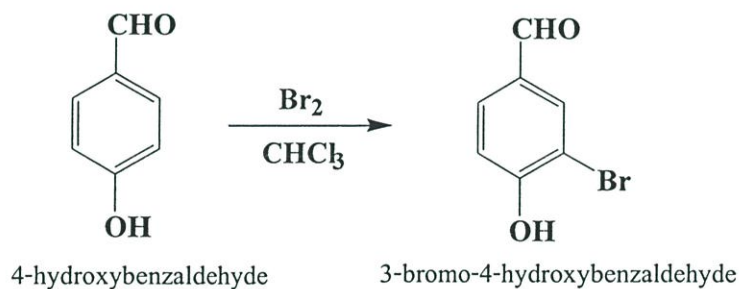
รูปที่ 2.4 สารประกอบที่ใช้ในการสังเคราะห์วานิลลิน [5]

2.1.2.1 การสังเคราะห์หัววานิลลินผ่านปฏิกิริยาไรเมอร์-ไทมานน์ (Reimer-Tiemann reaction)

ขั้นตอนที่ 1 ทำปฏิกิริยาไรเมอร์-ไทมานน์ (Reimer-Tiemann reaction)

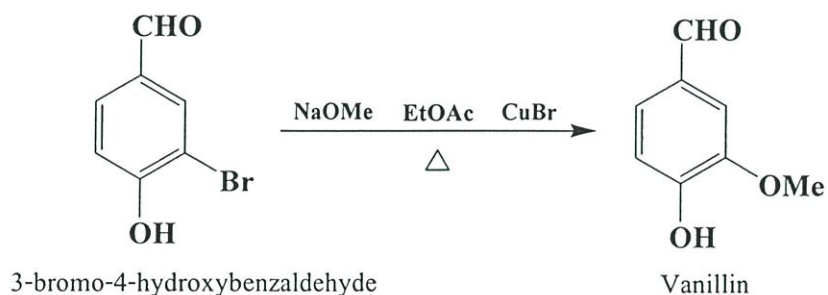


ขั้นตอนที่ 2 ทำปฏิกิริยาโบรมิเนชัน 4-ไฮดรอกซีเบนซัลดีไฮด์ (Bromination of 4-hydroxybenzaldehyde)



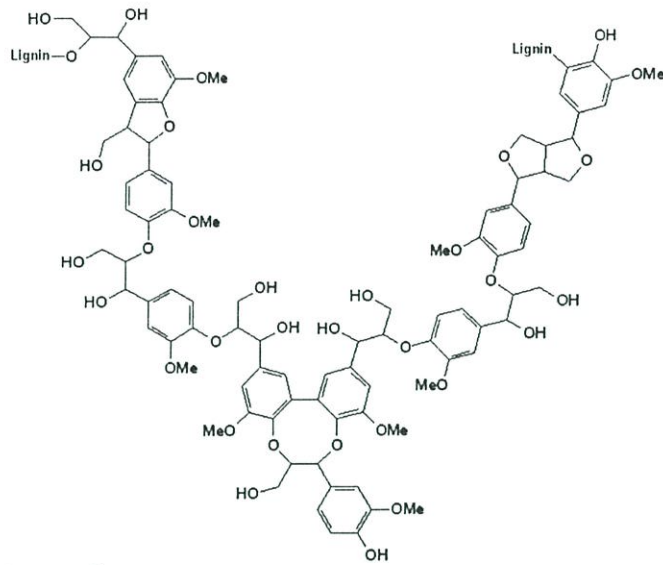
รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาโบรมิเนชัน 4-ไฮดรอกซีเบนซัลดีไฮด์ [7]

ขั้นตอนที่ 3 การเตรียมวานิลลิน



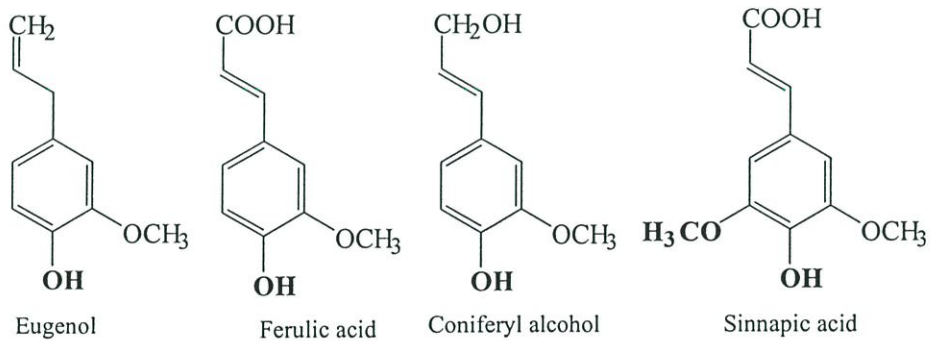
รูปที่ 2.7 การเตรียมวานิลลิน [7]

2.1.2.2 การสังเคราะห์หวานิลลินผ่านกระบวนการหมักลิกนิน (Fermentation of lignin)

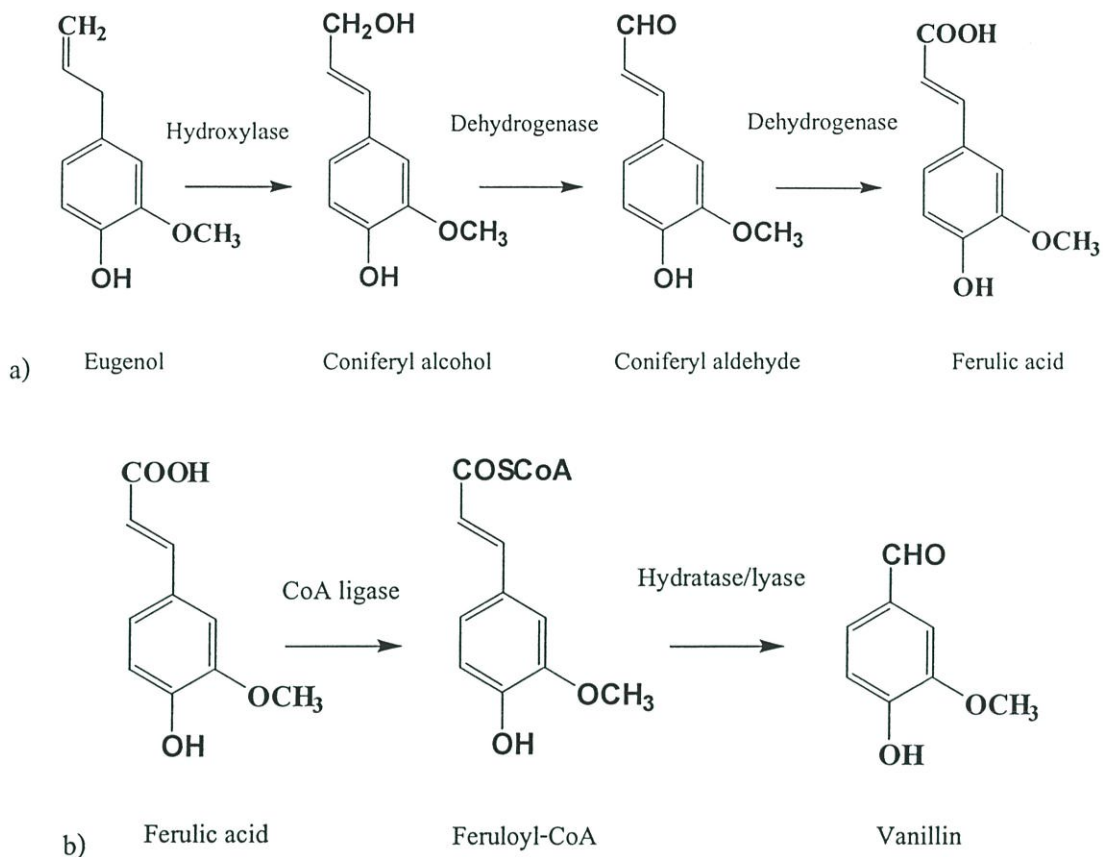


รูปที่ 2.8 โครงสร้างบางส่วนของพอลิเมอร์ลิกนิน [8]

การหมัก (fermentation) เป็นการสลายพันธะของพอลิเมอร์ลิกนินซึ่งจะได้โมโนเมอร์ที่สำคัญออกมาหลายชนิด เช่น ยูเจนอล (eugenol) เฟอูลิก แอซิด (ferulic acid) คอนนิเฟอร์อัลกอฮอล์ (coniferyl alcohol) และซินนาปิก แอซิด (sinnapic acid) เป็นต้น โครงสร้างดังรูปที่ 2.9 ในการสังเคราะห์หวานิลลินจะเริ่มจากยูเจนอลซึ่งเป็นสารประกอบที่หาได้ง่ายในธรรมชาติผ่านกระบวนการต่างๆ ที่แสดงในรูปที่ 2.10 จนสุดท้ายได้เป็นหวานิลลิน



รูปที่ 2.9 มอนอเมอร์บางตัวที่สำคัญของพอลิเมอร์ลิกนิน [5]



รูปที่ 2.10 แสดง a) การเปลี่ยนจากยูเจนอลเป็นเฟอร์ูลิก แอซิด

b) การเปลี่ยนจากเฟอร์ูลิก แอซิดเป็นวานิลลิน [9]

การนำวานิลลาไปใช้งานจะพบ 3 รูปแบบคือ นำไปใช้ทั้งเมล็ด นำไปใช้ในรูปแบบผง และนำสารที่สกัดหรือสังเคราะห์ได้ไปใช้

การนำวานิลลาไปเป็นสารปรุงแต่งกลิ่นและรสชาติในครีม เค้ก หรือในอาหารประเภทอื่นๆ อาจจะใช้การเติมวานิลลาที่เป็นสารละลายลงไปหรือจะนำทั้งเมล็ดไปผสมในอาหารเลยก็ได้ ซึ่งเมล็ดที่มีสีค่อนข้างดำจะให้กลิ่นวานิลลาเมื่อเมล็ดนั้นแตกออกจากกัน โดยทั่วไปแล้วสารละลายวานิลลาจะมีสีเหลืองน้ำตาลทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสาร

วานิลลาที่มีคุณภาพดีจะให้กลิ่นค่อนข้างแรงแต่ในบางกรณีไม่ต้องการให้มีกลิ่นแรงจึงจำเป็นต้องใช้วานิลลาที่มีคุณภาพต่ำลงมาหรือจะใช้วานิลลาที่ได้จากการสังเคราะห์ ซึ่งในปัจจุบันนี้เป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายเพราะวานิลลาสังเคราะห์ได้นี้มีราคาถูกกว่าวานิลลาที่สกัดได้จากธรรมชาติ

2.2 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) [10]

ในอดีตมีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่เพื่อตอบสนองความต้องการในการนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะทาง แต่ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ได้เริ่มมีการนำพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่มีอยู่มาทำการผสมแทนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่และเป็นที่รู้จักกันในชื่อของ *พอลิเมอร์ผสม* ซึ่งหมายถึงการนำพอลิเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกันเพื่อทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่หรือเพื่อแก้ไขสมบัติที่ไม่ดีของพอลิเมอร์เดิม ทั้งนี้การผสมกันของพอลิเมอร์มีประโยชน์หลายประการ เช่น

- เพื่อให้พอลิเมอร์มีสมบัติที่ดีขึ้น แต่มีราคาถูกลง
- สามารถนำพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นแต่ละชนิดมาผสมกัน เช่น การทำพอลิเมอร์ผสมของเทอร์โมพลาสติกซึ่งมีความเปราะและมีความทนทานแรงกระแทกได้สูง กับอีลาสโตเมอร์ (elastomer) ซึ่งไม่เปราะแต่มีความแข็ง (stiffness) ต่ำ เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติรวมแตกต่างจากสมบัติพอลิเมอร์หลักที่นำมาผสมกัน โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น สภาพะในการผสม สมบัติการไหล สัณฐานวิทยา ซึ่งมีผลต่อสมบัติและการนำไปใช้งานของพอลิเมอร์ผสมตามต้องการ
- หลีกเลี่ยงปัญหาของความยุ่งยากจากการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่
- ไม่ต้องลงทุนผลิตพอลิเมอร์ใหม่เพื่อนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะทาง
- เพื่อช่วยกระบวนการผสมในอุตสาหกรรมการนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น การนำเศษพลาสติกหลายๆ ชนิดกลับมาขึ้นรูปใหม่

พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียว (Miscible blend) หมายถึง พอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (solubility parameter, δ) ใกล้เคียงกัน เป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน
2. พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียว (Immiscible blend) สามารถอธิบายได้จากสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}}$$

- เมื่อ
- ΔG คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสม (พลังงานอิสระกิบส์)
 - ΔH คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (enthalpy) ของการผสม
 - ΔS คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (entropy) ของการผสม
 - T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมส่วนมากเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ (macromolecule) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นสาเหตุทำให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (entropy) ในการผสมต่ำ ส่วนค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (enthalpy) ในการผสมมักมีค่าเป็นบวก ดังนั้นทำให้ค่าพลังงานอิสระกิบส์ของพอลิเมอร์ผสมมีค่ามากกว่าศูนย์ เป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวหรือกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (solubility parameter, δ) ต่างกันมาก เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน สามารถแบ่งได้เป็น 2 ภูมิภาคคือพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของพอลิเมอร์ผสมเรียกว่า *ภูมิภาคหลัก* (matrix phase) ส่วนพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบส่วนน้อยเรียกว่า *ภูมิภาคกระจาย* (dispersed phase) ซึ่งสามารถตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM)

2.2.1 ความสามารถในการละลายเข้ากันได้และความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Miscibility and Compatibility) [1]

ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ (Miscibility) ในระดับโมเลกุลจัดเป็นมโนทัศน์ทางทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์กล่าวคือ เมื่อสามารถละลายเข้ากันได้จะทำให้เกิดระบบภูมิภาคเดี่ยวเนื้อเดียว (homogeneous single-phase system) มีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด และโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ พอลิเมอร์ผสมจัดเป็นสิ่งที่มีความหมายในการค้า โดยเฉพาะเมื่อองค์ประกอบมีส่วนเกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลายเข้ากันได้ของโมเลกุล (molecular miscibility) ได้แก่

- น้ำหนักโมเลกุลต่ำ
- ความเป็นผลึกมีค่าเท่ากับศูนย์
- ความมีขั้วคล้ายกัน
- พันธะไฮโดรเจนร่วมกัน

ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Compatibility) จัดเป็นสมบัติในทางปฏิบัติของพอลิเมอร์ผสมบางชนิดซึ่งละลายได้ในระดับโมเลกุลและมีประโยชน์ในการค้า อย่างไรก็ตามระบบพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ในทางการค้าเป็นระบบที่ไม่ละลาย (immiscible) ในระดับโมเลกุลและแยกออกเป็นระบบหลายภูมิภาค (multi-phase system) ในขณะที่ระบบหลายภูมิภาคนี้นานขึ้นจะมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวมากขึ้น (strong interfacial adhesion) ทำให้สามารถรวมสมบัติที่ดีที่สุดของแต่ละภูมิภาค และเกิดเป็นความสมดุลของสมบัติทั้งหมดที่ไม่สามารถได้จากสมบัติของพอลิเมอร์บริสุทธิ์โดยลำพัง

2.2.2 สารช่วยผสม (Compatibilizer) [10]

สารละลายวานิลลา ซึ่งเป็น โมเลกุลที่มีขั้วละลายได้ในแอลกอฮอล์หรือน้ำ (hydrophilic) แต่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้วซึ่งจะไม่ละลายในน้ำ (hydrophobic) เนื่องจากความแตกต่างกันในเรื่องคุณสมบัติดังกล่าวนี้ ทำให้ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (compatibility) มีค่าต่ำ การผสมระหว่างสารละลายวานิลลาและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดข้อบกพร่อง ดังนี้

1. มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคไม่ดี
2. มีค่าความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค (Interfacial tension) สูง
3. มีสัณฐานวิทยา (Morphology) ที่ไม่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป

จากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์ผสม จึงต้องมีการนำสารช่วยผสม (compatibilizer) มาใช้ เพื่อเพิ่มความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (compatibility) และยังสามารถช่วยลดแรงตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค ทำให้พอลิเมอร์มีสัณฐานวิทยาที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูปและทำให้สมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาคดีขึ้น ซึ่งวิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้น คือ การเติมสารช่วยผสม ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

1. Non-reactive blending คือ การเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์แบบไม่เกิดปฏิกิริยา ทั้งนี้สารช่วยผสมที่ใช้ควรมีสถูกรโครงสร้างเหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันเพื่อให้เกิดการเกี่ยวพันกัน (entanglement) กับวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ ดังนั้นสารช่วยผสมที่ใช้ต้องเป็นพอลิเมอร์ผสมซึ่งมีหลายชนิด เช่น พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง (graft copolymer) แบบไดบล็อก (diblock copolymer) แบบไตรบล็อก (triblock copolymer) หรือแบบสุ่ม (random copolymer)

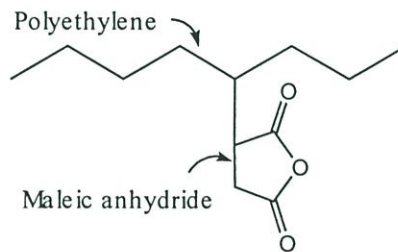
2. Reactive blending เป็นการเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์แบบเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีหมู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีขณะที่ทำการผสม หรือทำให้เกิดการต่อกิ่งพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งให้มีหมู่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง

โดยสารช่วยผสมอาจเป็นพอลิเมอร์ร่วมชนิดบล็อกหรือกราฟท์ ซึ่งสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสม ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น ในการเลือกพอลิเมอร์ร่วมเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมต้องคำนึงถึงน้ำหนักโมเลกุลในแต่ละส่วนของพอลิเมอร์ร่วม คือ ถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความยาวของสายโซ่สั้น ทำให้การแทรกซึมผ่านไปในพอลิเมอร์ผสมได้น้อย ส่งผลให้การยึดติดระหว่างผิวสัมผัสต่ำ แต่ถ้าน้ำหนักโมเลกุลสูงมากเกินไป ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยาก การแทรกซึมผ่านไปในพอลิเมอร์ผสมก็ต่ำเช่นเดียวกัน

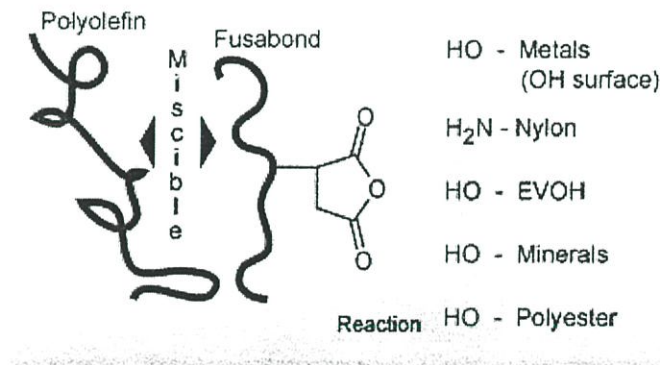
สำหรับในงานวิจัยนี้จะมีการเติมสารฟิวซาบอนด์ เอ็มบี 226ดี (Fusabond MB 226D) เป็นสารช่วยผสม ซึ่งสารนี้เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อกิ่งกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MAPE : Maleic anhydride grafted Polyethylene) มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.11 พอลิเอทิลีนเป็นหนึ่งใน

พอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วส่งผลให้เมื่อทำการผสมกับวัสดุอื่นที่มีขั้ว มักมีสมบัติด้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวไม่ดี แต่สามารถที่จะทำการแก้ไขได้ โดยการเติมสารอีกชนิดหนึ่งลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติการเข้ากันได้

มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีน เป็นการต่อกิ่งพอลิเอทิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เสถียรแล้ว ซึ่งจะทำให้สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (physicochemical properties) ดีขึ้น โดยเพิ่มความเป็นขั้วของพอลิเอทิลีนทำให้ความเป็นขั้ว (hydrophilicity) เพิ่มขึ้น และความสามารถในการยึดติดเพิ่มขึ้น พบว่าแอนไฮไดรด์เป็นส่วนที่เกิดการเชื่อม โยงจะเกิดอันตรกิริยากับสารวานิลลินรูปที่ 2.12 ทำให้ความสามารถในการเข้ากันได้ของสารทั้งสองชนิดมีเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของพีวซาบอนด์ [11]

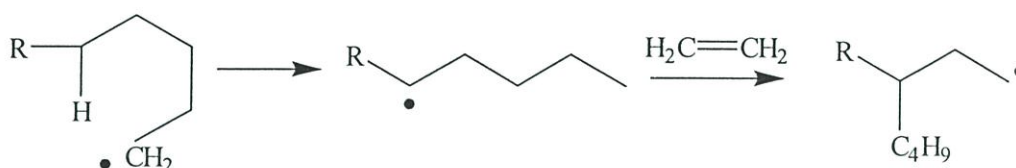


รูปที่ 2.12 การทำงานของพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ [11]

2.3 พอลิเอทิลีน (Polyethylene) [12,13]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีความเป็นผลึกต่ำ โครงสร้างมีโซ่กิ่งสาขายาว มีความหนาแน่นต่ำ $0.926 - 0.940 \text{ g.cm}^{-3}$ พอลิเมอร์ไรเซชันผ่านกลไกอนุโมลติสระมีออกซิเจนหรือเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่ม ทำให้เกิดโซ่กิ่งจำนวนมาก โซ่กิ่งโดยมากเป็นหมู่อัลคิลสายสั้นๆ เช่น เอทิลหรือบิวทิลซึ่งเกิดจากกลไก “intramolecular back-biting” ดังรูปที่ 2.13

โซ่กิ่งเหล่านี้เป็นจุดบกพร่องทำให้ปริมาณผลึกลดลง ความหนาแน่น และจุดหลอมเหลวของ LDPE จึงต่ำเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)



รูปที่ 2.13 กลไก intramolecular back-biting [13]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,000 – 40,000 ในเชิงพาณิชย์ นิยมระบุน้ำหนักโมเลกุลด้วยค่า ดัชนีการหลอมเหลว (melt index) (ASTM 1238) ซึ่งหมายถึง น้ำหนักเป็นกรัมของพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากหลอดรูเล็กมาตรฐานที่อุณหภูมิ 190 °C ในเวลา 10 นาที สำหรับ LDPE มีค่า melt index อยู่ในช่วง 0.1 – 10.9 g/10นาที

ตารางที่ 2.1 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) [13]

สมบัติ	หน่วย	ASTM	LDPE
ความถ่วงจำเพาะ	-	D792	0.91 - 0.93
ความเป็นผลึก	%	-	50.0 - 70.0
อุณหภูมิหลอมเหลว	°C	-	98.0 - 120.0
ความแข็งแรงดึง	MPa	D638	4.10 - 16.0
มอดุลัส	GPa	D638	0.10 - 0.26
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด	%	D638	90.0 - 800.0
ความแข็งแรงกระแทก, Notch Izod	J.m ⁻¹	D256	No break
อุณหภูมิเบี่ยงเบนทางความร้อน	°C	D648	38.0 - 49.0

ตารางที่ 2.2 สมบัติเด่นและสมบัติด้อยของพอลิเอทิลีน [13]

สมบัติเด่น	สมบัติด้อย
<ol style="list-style-type: none"> 1. ราคาถูก 2. เป็นฉนวนที่ดี 3. ทนความชื้น 4. ทนสารเคมี 5. ใช้บรรจุอาหารได้ดี 6. ขึ้นรูปได้โดยกระบวนการทางเทอร์โมพลาสติกทั่วไป 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ขยายตัวได้มากเมื่อได้รับความร้อน 2. ไม่ทนสภาพดินฟ้าอากาศ 3. เมื่อแตกหัก ยากต่อการเชื่อมต่อ 4. ติดไฟได้

2.4 สารคงสภาพ (Stabilizers) [12,13]

สารที่นำมาใช้เป็นสารคงสภาพจะมีประสิทธิภาพในการขัดขวางและช่วยลดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ แม้ว่าจะนำพอลิเมอร์ที่ผสมสารคงสภาพไปผ่านกระบวนการทางกายภาพ (ให้ความร้อนหรือการฉายรังสี) หรือกระบวนการทางเคมีสารคงสภาพเหล่านั้นก็ยังคงอยู่ในพอลิเมอร์

การเสื่อมของสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์เป็นผลที่เกิดขึ้นจากหลายกรณี เช่น เกิดจากสถานะที่มีอุณหภูมิสูง (thermo-oxidative) ออกซิเจน รังสีในบรรยากาศ โอโซน น้ำ และจากจุลินทรีย์ การเสื่อมสภาพทำให้เกิดการแตกหักหรือการตัดขาดสายโซ่ (chain scission) ทำให้พอลิเมอร์สูญเสียความแข็งแรงและความเหนียว เกิดพันธะเชื่อมโยง (crosslinking) ทำให้พอลิเมอร์แข็งเปราะและการละลายลดลง เกิดหมุดูดกลืนแสงซึ่งเป็นสาเหตุทำให้พอลิเมอร์มีสี และเกิดหมุมิข้วในพอลิเมอร์ ทำให้สมบัติการเป็นฉนวนลดลง

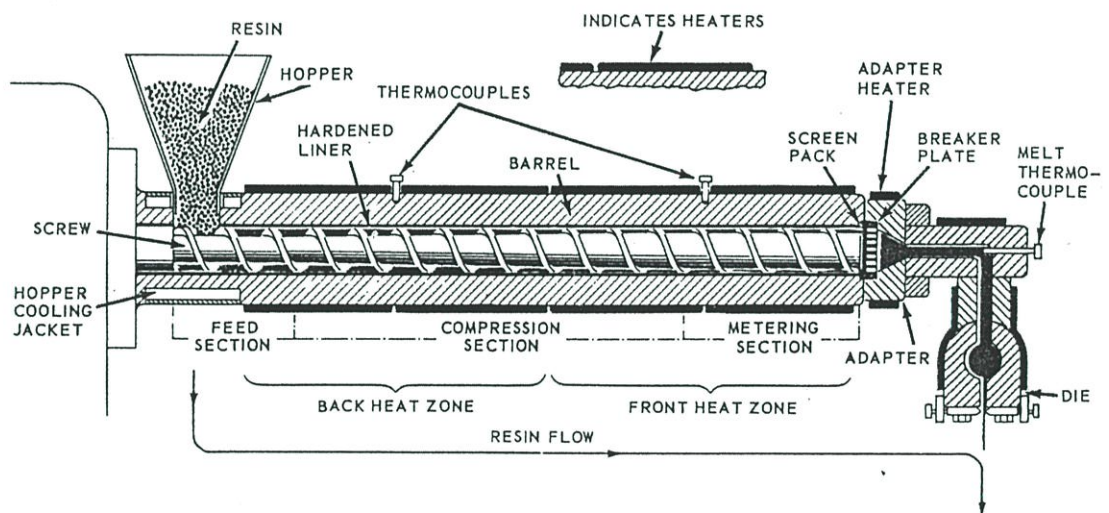
สารคงสภาพส่วนมากจะเป็นสารประกอบอินทรีย์หรือโลหะของสารประกอบอินทรีย์ โดยองค์ประกอบพื้นฐานประกอบด้วย ดีบุก (tin) ตะกั่ว (lead) และสารผสมของโลหะหมู่ 2 (แบเรียม แคลเซียม และ สังกะสี) จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับพอลิเมอร์ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Ca-Zn เป็นสารคงสภาพ

2.5 หลักการของเครื่องมือผสมและการขึ้นรูป

2.5.1 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder) [14]

เครื่องอัดรีดจัดเป็นเครื่องมือที่มีจุดประสงค์หลากหลายในกระบวนการแปรรูปพอลิเมอร์ กล่าวคือ เม็ดพลาสติกที่ถูกป้อนเข้ามาในระหว่างสกรูของเครื่องอัดรีดและกระบอกใส่สกรู (barrel) จะถูกอัด หลอม ผสม เกิดขึ้นในระหว่างที่มีการไหลผ่านไปตามท่อและออกไปทางหัวตาย ทั้งนี้โดยอาศัยความแตกต่างของความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของสกรูและกระบอกใส่สกรูทำให้เกิดพลังงานเฉือน (shearing energy) ช่วยในการผสมและการหลอม ในกรณีของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวอาจทำให้การผสมและการเฉือนเพิ่มขึ้นโดยอาศัยอุปกรณ์เสริมไปติดเพิ่มระหว่างส่วนของเฟืองสกรู (screw flights)

เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวจัดว่ามีความสำคัญอย่างมากในทางอุตสาหกรรม โดยมีลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิต ทั่วไปแบ่งออกได้ 3 ส่วนดังรูปที่ 2.14



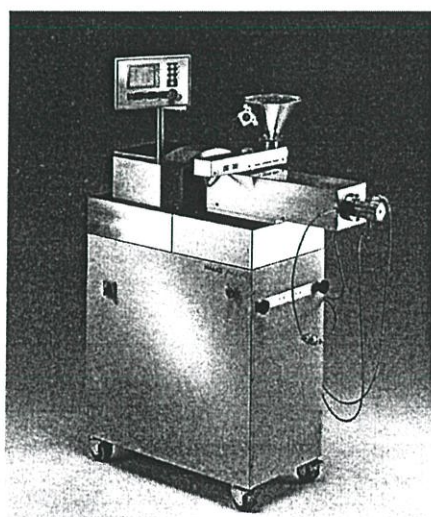
รูปที่ 2.14 รูปทรงทางเรขาคณิตของสกรู [15]

โครงสร้างของสกรูแบบนี้ใช้แทนการทำงานแบบขั้นตอนเดียว (single state) ซึ่งหมายถึง สกรูมีเพียงส่วนของการอัด (compression section) เท่านั้น แม้ว่ารูปทรงทางเรขาคณิตจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนก็ตาม ในส่วนแรก (ใกล้กับทางเปิดให้วัสดุเข้า) จะมีเฟืองค่อนข้างลึก โดยวัสดุที่เข้ามาในส่วนนี้จะอยู่ในสถานะของแข็งเรียกส่วนนี้ว่า ส่วนป้อนวัสดุ (feed section) ส่วนท้ายสุด (ใกล้กับตาย) จะมีเฟืองค่อนข้างตื้น โดยวัสดุในส่วนนี้จะอยู่ในสภาวะหลอมเหลวทั้งหมดเรียกส่วนนี้ว่า ส่วนมาตรวัดหรือส่วนบีบวัสดุ (metering or compression section) ส่วนที่อยู่ระหว่างส่วนป้อนวัสดุและส่วนบีบวัสดุเรียกว่า ส่วนทรานสิชันหรือส่วนอัด (transition or compression section) ส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการหลอมวัสดุ

โครงสร้างแบบนี้ความลึกของช่องสกรูจะลดลงแบบเส้นตรงจากส่วนป้อนวัสดุ ไปยังส่วนมาตรวัดหรือส่วนบีบวัสดุ ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดการอัดตัวของวัสดุในช่องสกรู ตัวแปรอีกตัวหนึ่งในการออกแบบสกรูที่นับว่ามีความสำคัญคือ อัตราส่วนความยาวของสกรูต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสกรู (L/D) โดยปกติจะอยู่ในช่วง 20 ถึง 30 แต่ที่นิยมใช้คือ 24 แต่ในเครื่องอัดรีดบางประเภท เช่น เครื่องอัดรีดที่มีช่องระบายอากาศ (vented extruder) จะมีอัตราส่วนนี้สูงถึง 30 ถึง 40

การทำงานพื้นฐานของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว คือ วัสดุเข้ามาทางอุปกรณ์ป้อนวัสดุ (feed hopper) โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงไหลลงมายังส่วนของกระบอกสกรู (extruder barrel) วัสดุมบางชนิดป้อนเข้ามาได้ยากจึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์พิเศษช่วยเพื่อป้องกันการติดค้าง (bridging) ของวัสดุ เมื่อวัสดุเข้ามายังกระบอกสกรูจะผ่านไปยังช่องว่างวงแหวนหรือช่องว่างของสกรูเกิดแรงเสียดทานกระทำต่อวัสดุทั้งในส่วนของกระบอกใส่สกรูและพื้นผิวของสกรู แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะพาวัสดุให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าพร้อมกับมีความร้อนจากส่วนของอุปกรณ์ให้ความร้อนที่ติดอยู่ตรงกระบอกใส่สกรู (barrel heater) เป็นตัวช่วยให้ความร้อนสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิของวัสดุเกินจุดหลอมเหลวจะเกิดฟิล์มบางๆ ที่ผิวของกระบอกสกรูซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพพลาสติก (ไม่ใช่บริเวณเดียวกับส่วนที่เกิดการอัด) ทั้งนี้ขึ้นกับรูปทรงเรขาคณิตของเครื่องจักรสมบัติของพอลิเมอร์ และสภาวะการทำงาน

ในขณะที่วัสดุเคลื่อนที่ไปข้างหน้าปริมาณของของแข็งในแต่ละตำแหน่งจะลดลงในขณะที่ปริมาณการหลอมเหลวเพิ่มขึ้น และเมื่อของแข็งหมดไปจะเข้าสู่ปลายบริเวณของการเปลี่ยนแปลงสภาพพลาสติกและบีบเข้าสู่ดาย ในขณะที่พอลิเมอร์ไหลผ่านดายจะมีรูปร่างเหมือนกับช่องทางการไหลของดาย ทำให้วัสดุที่ออกจากดายมีรูปร่างสอดคล้องกับภาคตัดขวางของส่วนสุดท้ายของช่องการไหลของดายด้วย



รูปที่ 2.15 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว [16]

2.5.2 เครื่องเป่าฟิล์ม (Blown-film machine) [14]

การเป่าฟิล์มเป็นกระบวนการแปรรูปพลาสติกแบบต่อเนื่องเช่นเดียวกับกระบวนการอัดรีดอื่นๆ การผลิตเริ่มต้นจากการอัดรีดท่อเทอร์โมพลาสติกหลอม ดายที่ใช้เป็นแบบวงแหวนสองชั้น (annular die) โดยทำการอัดรีดในแนวตั้งฉากกับแนวของเครื่องอัดรีด หลังจากนั้นทำการดึงท่อพลาสติกในแนวแกนของการอัดรีด (axial direction) แล้วใช้ลมเป่าท่อกันในขณะเดียวกัน ทำให้พลาสติกหลอมพองตัวออกในแนวรัศมี (radial direction) เกิดเป็นลูกโป่งที่มีผนังบาง (thin wall bubble) โดยพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่งจะมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวดายหลายเท่า ลูกโป่งที่ร้อนจะถูกหล่อเย็นด้วยลมเป่าที่ผิวด้านนอกของลูกโป่ง โดยมีหัวเป่าเป็นลักษณะวงแหวน (air ring) อยู่ด้านนอกหัวดาย หัวเป่าวงแหวนนี้จะเป็นตัวปรับทิศทางของลมเป่าให้กระทบลูกโป่งในแนวตั้งฉากและทำให้กระแสมเป่ามีความสม่ำเสมอ ไม่พุ่งออกไปที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง ทำให้การหล่อเย็นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ลักษณะของเครื่องและกระบวนการเป่าฟิล์มแสดงดังรูปที่ 2.16 ลูกโป่งจะถูกปรับให้มีขนาดที่เหมาะสมและถูกจำกัดอยู่ในส่วนที่ช่วยพองฟิล์ม (sizing basket หรือ calibration unit) หลังจากนั้นรวบลูกโป่งโดยป้อนให้ลูกโป่งเคลื่อนที่ผ่านแผ่นโลหะหุ้มก้ามเหยี่ยวที่ตีบเข้า (collapsing boards) และป้อนเข้าในช่องว่างของลูกกลิ้งสองตัว (nip roll) ทำให้ลูกโป่งแบนลงเกิดเป็นฟิล์มสองชั้นซ้อนทับกัน หลังจากนั้นทำการดึงฟิล์มโดยใช้หน่วยดึง (haul-off unit) สุดท้ายฟิล์มจะถูกพันเป็นม้วนด้วยตัวม้วนฟิล์ม (winder) แล้วนำไปทำถุงหรือนำไปทำผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ ต่อไป

2.5.2.1 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม

1. เครื่องอัดรีด (extruder) มีหน้าที่หลักในการหลอมเหลวพอลิเมอร์
2. หัวดาย (die) โดยปกติมี 2 ชนิด คือ วงแหวนป้อนเข้าด้านล่าง (annular bottom feed die) และวงแหวนแบบป้อนเข้าด้านข้าง (annular side feed die) รูปที่ 2.17
3. ระบบการหล่อเย็น แบ่งเป็นแบบบังคับด้วยอากาศ (forced air) การทำให้เย็นโดยอาศัยแหล่งความเย็นจากภายในหรือภายนอก (internal or external refrigeration) และการหล่อเย็นด้วยน้ำ (water cooling bath)
4. หอคอยช่วงดึงขึ้น (take-off system) ได้แก่
 - 4.1 ลูกกลิ้งดึง (pull rolls) แบ่งเป็น แบบหลัก (primary type) และแบบรอง (secondary type)
 - 4.2 ระบบการพับฟิล์ม (folding system)
 - 4.3 ระบบม้วนฟิล์ม (wind-up system) แบ่งเป็นแบบระบบขับโดยตรง (direct drive) และระบบขับพื้นผิว (surface drive)

5. อุปกรณ์อื่นๆ

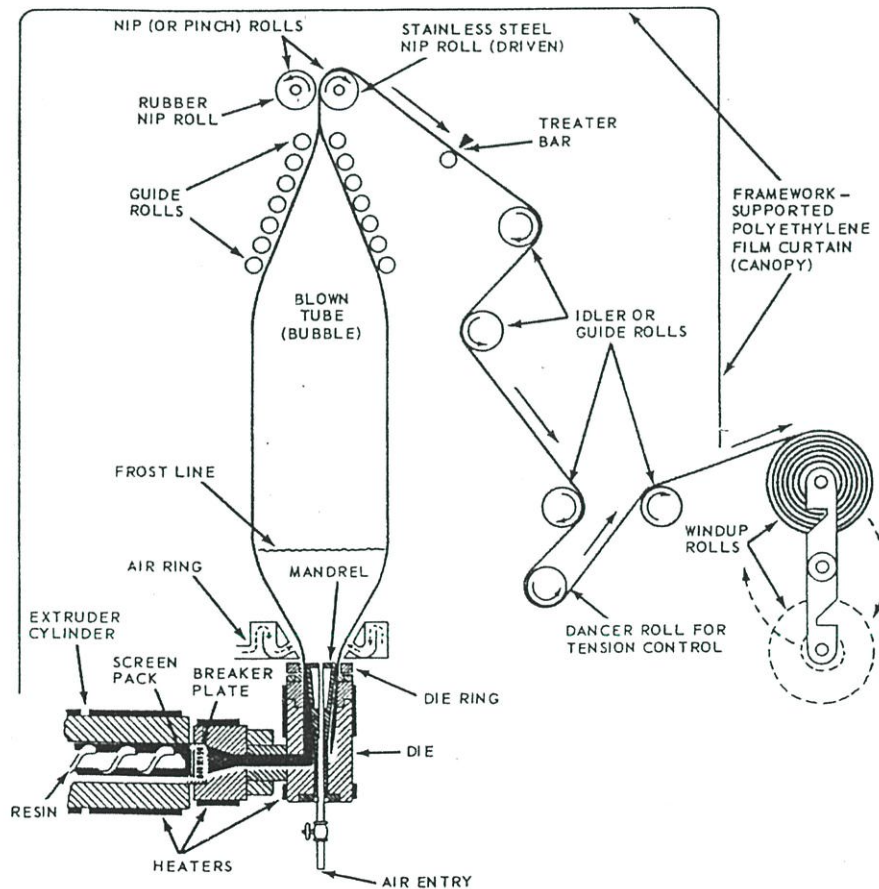
5.1 อุปกรณ์ทั่วไป

- เครื่องวัดความหนาแน่นของแผ่นฟิล์ม (film thickness gauges)
- เครื่องวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (bubble diameter)
- ระบบควบคุมวงจรรปิด (closed loop system)

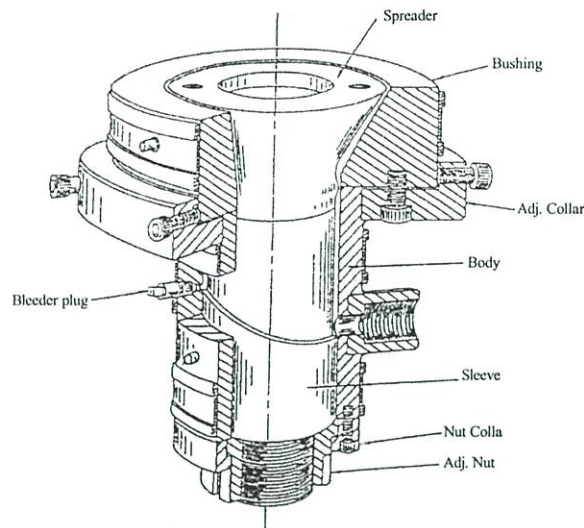
5.2 อุปกรณ์ปรับพื้นผิว

- โคโรนาดีสชาร์จ (corona discharge)
- เปลวไฟก๊าซ (gas flame)

5.3 อุปกรณ์ช่วยเสริม เช่น เครื่องจักรสำหรับทำถุง (bag making machine)



รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม [15]



รูปที่ 2.17 คายวงแหวนแบบป้อนเข้าด้านข้าง [14]

ปัจจัยที่สำคัญต่อการเป่าฟิล์ม เช่น ความเร็วของสกรู อัตราการดึง และขนาดของลูกโป่งที่เหมาะสมกับส่วนพุงฟิล์ม การปิดอากาศที่ใช้เป่าเข้าภายในลูกโป่ง มีการใช้เทอมที่สำคัญในการอธิบายกระบวนการแปรรูปพลาสติกโดยการเป่าฟิล์ม เช่น อัตราการพองตัวของลูกโป่ง (blow-up ratio) และอัตราการดึง (draw-down ratio)

- อัตราการพองตัว (blow-up ratio) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่งกับเส้นผ่านศูนย์กลางของคาย โดยทั่วไปอัตราการพองตัวของลูกโป่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2:1 ถึง 6:1 ซึ่งหมายความว่า คายตัวหนึ่งสามารถทำถุงได้หลายขนาด

- อัตราการดึง (draw-down ratio) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความเร็วของฟิล์มที่ดึงโดยลูกกลิ้ง (หรือ โดยหน่วยดึง) กับความเร็วของการอัดรีด ซึ่งความเร็วของการอัดรีดคำนวณได้จากน้ำหนักของพลาสติกที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลา แปรให้เป็นปริมาตรแล้วค่อยนำปริมาตรหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของคาย

วัสดุที่ใช้ในการเป่าฟิล์มเป็นเทอร์โมพลาสติก เช่น พลาสติกในกลุ่มของพอลิโอเลฟินส์ (LDPE, LLDPE, HDPE และ HMW-HDPE) จะเป็นพลาสติกที่นิยมใช้ในกระบวนการเป่าฟิล์ม ในบรรดาพอลิโอเลฟินส์ LDPE เป็นที่นิยมมากที่สุด นอกจากนี้พลาสติกอื่นๆ ที่ใช้ในการเป่าฟิล์ม เช่น ไนลอน พอลิคาร์บอเนต พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิพอฟิลีน และ PET

เทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในการเป่าฟิล์มต้องมีค่าความหนืดสูง และมีค่าดัชนีการไหลต่ำกว่า วัสดุที่ใช้ในการผลิตฟิล์มโดยกระบวนการอัดรีดแบบธรรมดา ตัวอย่างกรณี LDPE ที่ใช้ในการเป่าฟิล์ม มีค่าดัชนีการไหลอมอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.0 กรัม / 10 นาที (ทำการทดสอบตัวอย่างที่ 190 °C และใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม) ในขณะที่ LDPE ที่ใช้ในการผลิตฟิล์มโดยกระบวนการอัดรีดแบบธรรมดา มีค่าดัชนีการไหลอมไหลอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.6 กรัม / 10 นาที

2.5.2.2 หลักการเป่าฟิล์ม

ฟิล์มเป่ามีความหนาน้อยกว่า 0.020 นิ้ว (0.050 เซนติเมตร) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ทำฟิล์มเป่าประกอบด้วยเครื่องอัดรีดต่ออยู่กับหัวดายประเภทวงแหวน (annular die) ซึ่งโดยปกติจะมีทิศอยู่ในแนวตั้ง การผลิตฟิล์มเป่าแบบทอ (tubular blown film) จะใช้อากาศและแรงดึงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยอากาศที่อยู่ภายในจะช่วยทำให้เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่ และมีส่วนของลูกกลิ้งที่ใช้รวบฟิล์ม (collapsing guild and nip) อยู่ทางด้านบน โดยฟิล์มจะขยายตัวออกประมาณ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเดิมตามแนวนอน และขณะเดียวกันจะถูกดึงขึ้นในทิศทางตั้งฉาก ผลที่ได้ทำให้เกิดการจัดเรียงตัว 2 ทิศทาง (biaxial orientation) เกิดการตกผลึก (crystallization) และการแข็งตัว (freeze) อยู่ในทิศทางการจัดเรียงตัวนั้น

ฟิล์มที่เกิดจากการขยายตัวเนื่องจากการเป่ามีกระบวนการเป็นแบบแรงดึง (tensile force) มากกว่าที่จะเป็นแบบแรงเฉือน (shear force) เพราะความเค้นเฉือนมีลักษณะการตอบสนองเป็นแบบวิสโคอิลาสติก ทำให้ความหนืดเนื่องจากแรงดึงมีค่าสูง ถ้าความหนืดเนื่องจากแรงดึงไม่ขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด เรียกว่า เทราโตเนียน (troutonian) ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมความเค้นเฉือนในนิวโตเนียน แต่ถ้าความหนืดเนื่องจากแรงดึงขึ้นกับอัตราความเครียดจะเรียกว่า นอนเทราโตเนียน (non-troutonian) (พอลิเมอร์หลอมเหลวส่วนใหญ่จะเป็นแบบเทราโตเนียน) ซึ่งแบ่งออกเป็นการทำให้แข็งเนื่องจากแรงดึง (tension stiffening) และการทำให้บางเนื่องจากแรงดึง (tension thinning) เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแบบกึ่งและการตอบสนองแบบอิลาสติกจะเป็นการทำให้แข็งเนื่องจากแรงดึง ในขณะที่พอลิโอฟีนแบบเส้นตรง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิพรอพิลีน เป็นการทำให้บางเนื่องจากการดึง เป็นต้น

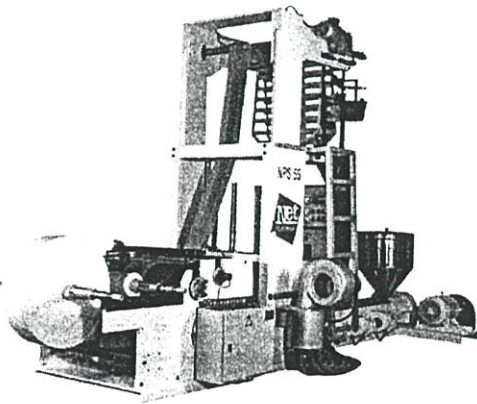
เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวออกจากดายและค่อยๆ บางลง ความเค้นจะมากขึ้นและถ้าวัสดุยังไม่แข็งพอจะเกิดความเครียดต่อไปเรื่อยๆ จนเกิดการแตกของฟิล์มในที่สุด อย่างไรก็ตามการทำให้แข็งเนื่องจากแรงดึงทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นหรือมีการตอบสนองแบบอิลาสติกมากพอที่จะชดเชยการเพิ่มขึ้นของความเค้นทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น อัตราการตกผลึก (crystallization rate) เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อเสถียรภาพกล่าวคือ การผลิตฟิล์มโดยวิธีนี้จะมีลักษณะที่เรียกว่า แนวเส้นแข็งตัว (frost line หรือ freeze line) เกิดขึ้นตามทางที่เกิดฟอง ซึ่งเป็นบริเวณที่พอลิเมอร์เกิดการตกผลึกทำให้ความใส (transparent) ลดน้อยลง อิทธิพลของแนวเส้นแข็งตัวนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดการดึงและทำให้เกิดการแข็งตัวขึ้น ด้วยเหตุนี้อัตราการตกผลึกจึงไม่ควรสูงเกินไปจนทำให้ไม่เกิดการจัดเรียงตัวในสองทิศทาง

2.5.2.3 สมบัติของฟิล์มเป่า

สมบัติของฟิล์มเป่า ได้แก่ ความแข็งแรงต่อการฉีกขาด(ทั้งในทิศทางตามเครื่องจักร และทิศทางตามขวางเครื่องจักร โดยใช้วิธีการทดสอบของ เอลเมนดอร์ฟ (Elmendorf)), ความทนทานต่อแรงกระแทก ความใส ความเงาของผิว ความแข็งแรงดึง (ทั้งในทิศทางตามเครื่องจักร และทิศทางตามขวางเครื่องจักร) เปอร์เซ็นต์การยืด ความหนา การจัดเรียงตัว และเปอร์เซ็นต์ความ เป็นผลึก เป็นต้น ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อสมบัติเหล่านี้ ได้แก่ อุณหภูมิการหลอมเหลว ความหนา ของฟิล์ม ความสม่ำเสมอของความหนาแผ่นฟิล์ม อัตราส่วนการดึง อัตราส่วนการเป่า ความสูงของ แนวเส้นแข็งตัว (frost line height) และความสม่ำเสมอของความดันซึ่งช่วยลดหรือจำกัดการเกิด เป็นคลื่น (surging)

ความหนาของฟิล์มขึ้นอยู่กับช่องว่างของคาน อุณหภูมิของการหลอมเหลว อัตราส่วนการ เป่า และอัตราการดึง ส่วนความสูงของแนวเส้นแข็งตัว คือ ระยะทางเหนือคานที่เกิดความขุ่น ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับการเกิดการตกผลึกในขณะที่ของหลอมเหลวเย็นตัวลง จัดเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมาก ต่อความหนาของฟิล์ม พบว่าถ้าเพิ่มความสูงของแนวเส้นแข็งตัว เปอร์เซ็นต์ของความขุ่นจะเพิ่มขึ้น ความเงาของผิวจะเพิ่มขึ้น แต่ความใสจะลดลง ความไม่สมบูรณ์ของผิวลดลงและความแข็งแรงต่อ แรงกระแทกลดลง นอกจากนี้พบว่าความสูงของแนวเส้นแข็งตัวยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการ หลอมเหลวและอัตราการอัดรีดด้วย โดยตัวแปรทั้งสองเมื่อเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความสูงของแนวเส้น แข็งตัวจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย

อัตราส่วนการเป่าจะมีผลต่อความแข็งแรงต่อการดึง โดยจะเพิ่มขึ้นในทิศทางตามขวาง เครื่องจักรและลดลงในทิศทางตามเครื่องจักร แต่จะมีผลตรงข้ามต่อความแข็งแรงต่อการฉีกขาด นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนการเป่าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนการดึงที่เพิ่มขึ้นจะให้ผลตรงข้ามกัน



รูปที่ 2.18 เครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film machine) [17]

2.6 หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์

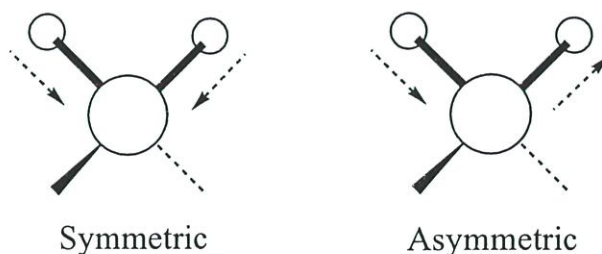
2.6.1 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนอินฟราเรด (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) [18]

รังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีเลขคลื่นยาวกว่าแสงวิสิเบิล (visible) รังสีอินฟราเรดนี้แบ่งได้เป็น 3 ช่วงคือ

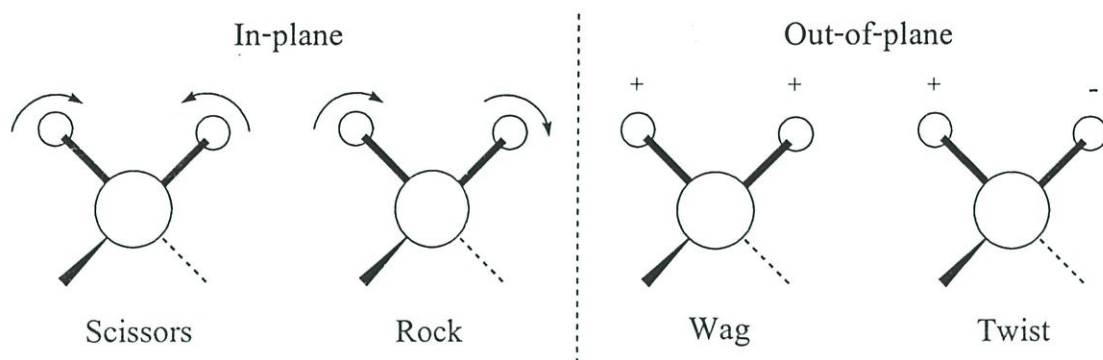
- อินฟราเรดย่านใกล้ (near IR) แถบการดูดกลืนแสงของโมเลกุลในย่านนี้ส่วนใหญ่เกิดจากโอเวอร์โทน ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่ 0.8-2.5 ไมโครเมตร (μm) ($12500-4000\text{ cm}^{-1}$)
- อินฟราเรดย่านกลาง (middle IR) แถบการดูดกลืนแสงอยู่ระหว่าง 2.5-50 ไมโครเมตร (μm) ($4000-200\text{ cm}^{-1}$) ใช้ศึกษาคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์ ในช่วงนี้จะแบ่งเป็นช่วงกลุ่มความถี่ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการดูดกลืนแสงของหมู่ฟังก์ชันและช่วงลายพิมพ์นิ้วมือที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของโมเลกุล
- อินฟราเรดย่านไกล (far IR) แถบการดูดกลืนแสงอยู่ระหว่าง 50-1000 ไมโครเมตร (μm) ($200-10\text{ cm}^{-1}$) จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับการหมุนของโมเลกุล เนื่องจากพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการทรานซิชันมีระดับพลังงานค่อนข้างต่ำ

เมื่อพิจารณาโมเลกุลของสารโดยทั่วไปจะประกอบด้วยอะตอมที่ยึดเกาะกันด้วยพันธะเคมี เมื่อโมเลกุลได้รับรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ตรงกับการสั่นของโมเลกุล จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์โมเลกุลนั้นสามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ เรียกว่า IR active แต่ถ้าการสั่นนั้นไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์จะไม่เกิดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เรียกว่า IR inactive

การสั่นของโมเลกุลแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ การยืด (stretching) และการโค้งงอ (bending หรือ deformation) แสดงดังรูปที่ 2.19 และ 2.20 ตามลำดับ โมเลกุลที่มีอะตอมที่เหมือนกัน เช่น โมเลกุลไนโตรเจน (N_2) จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ขณะสั่น โดยโมเลกุลที่ประกอบด้วย n อะตอม มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงจะมีรูปแบบการสั่นเท่ากับ $3n-5$ แบบ ส่วนโมเลกุลที่ไม่เป็นเส้นตรงจะมีรูปแบบการสั่นเท่ากับ $3n-6$ แบบ

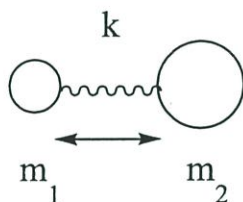


รูปที่ 2.19 การสั่นของโมเลกุลแบบการยืด (stretching) [19]



รูปที่ 2.20 การสั่นของโมเลกุลแบบการโค้งงอ (bending) [19]

พิจารณาการสั่นแบบยี่ดระหว่างอะตอม 2 อะตอม ที่ยึดกันด้วยพันธะเคมี ถ้าสมมติว่ามวลของอะตอมทั้งสองต่อกันด้วยสปริงแล้วมีการแกว่งแบบฮาร์โมนิกอย่างง่าย (simple harmonic oscillation) สามารถคำนวณค่าของความถี่ได้จาก



$$\nu = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$$

เมื่อ ν คือ ความถี่ของการสั่น (cm^{-1})

k คือ ค่าคงที่ของแรง

c คือ ความเร็วของแสง

μ คือ reduce mass (kg)

โดยที่

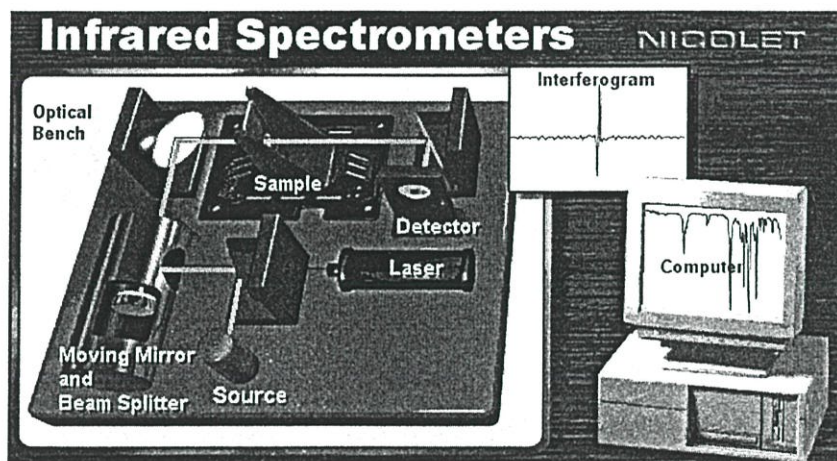
$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

เมื่อ m_1, m_2 คือ มวลของแต่ละอะตอม

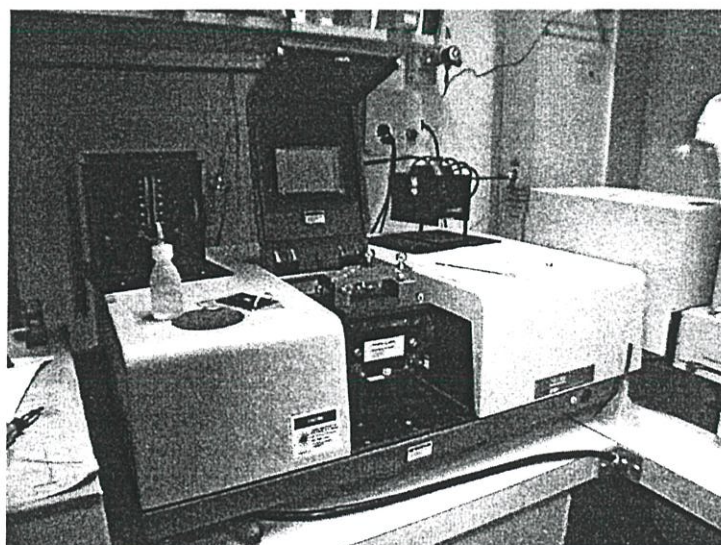
ค่าคงที่ของแรงของพันธะสามจะมากกว่าพันธะสองและมากกว่าพันธะเดี่ยว ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่าความถี่ของการยี่ดระหว่างอะตอมคู่หนึ่งได้

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง IR spectrometer มีดังรูปที่ 2.21

1. แหล่งกำเนิดแสง (radiation source) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการให้ความร้อนแก่โลหะแล้วปล่อยรังสีอินฟราเรดออกมา
2. ส่วนบรรจุสารตัวอย่าง (sample containers) ถ้าเป็นของแข็งจะทำได้หลายวิธี เช่น บดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ แล้วอัดให้เป็นเม็ดหรือทำให้เป็นแผ่นบาง เป็นต้น ถ้าเป็นของเหลวจะบรรจุในเซลล์หรือหยดลงบนผลึกของโซเดียมคลอไรด์ แล้วนำอีกแผ่นมาประกบก่อนนำไปตรวจวัด
3. ส่วนควบคุมเลกคลื่น (wavelength selector) ใช้แยกคลื่นแสงที่ต้องการ
4. เครื่องตรวจวัดสัญญาณ (detector)
5. เครื่องแปรสัญญาณและรายงานผล (signal processor and readout devices)



รูปที่ 2.21 ส่วนประกอบของเครื่อง IR spectrometer [20]



รูปที่ 2.22 Fourier transform infrared spectrometer (FTIR)

2.6.2 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA) [21]

การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน (thermogravimetric analysis, TGA) เป็นเทคนิคของการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักความร้อน (thermal analysis) นำมาใช้ประโยชน์มาก โดยเฉพาะการหาความทนทานต่อความร้อน (thermal stability) และหาองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่าง

เครื่อง TGA (thermogravimetric analyzer) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดน้ำหนักของสารที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อนเทียบกับเวลาหรืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

ถ้าทราบปฏิกิริยาการสลายตัวของสาร จะสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของสารที่สูญเสียไป (% weight loss) ได้ ซึ่งจะตรงกับค่าที่อ่านได้จากเทอร์โมแกรม ดังนั้นสามารถคำนวณหามวลโมเลกุลของสารที่สูญหายไปได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{มวลโมเลกุลของสารที่สูญหายไป} = \frac{\% X}{100} \times MW_s$$

เมื่อ % X คือ % น้ำหนักของสารที่สูญเสียไป (% weight loss)

MW_s คือ มวลโมเลกุลของสารตัวอย่าง

นั่นคือผลจากเทอร์โมแกรมทำให้ทราบปฏิกิริยาการสลายตัวของสาร ความสามารถในการทนทานต่อความร้อน องค์ประกอบหรือสิ่งเจือปนต่างๆ ที่มีอยู่ในสารนั้นได้ และสามารถคำนวณหาปริมาณหรือร้อยละของสารที่เป็นองค์ประกอบหรือสิ่งที่เจือปนอยู่ได้จากสมการดังต่อไปนี้

ให้ A เป็นองค์ประกอบชนิดหนึ่งในสารผสม

$$\% W_{AM} = \frac{\% W_M}{\% W_A}$$

เมื่อ $\% W_{AM}$ คือ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักขององค์ประกอบ A

$\% W_M$ คือ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของสารผสมที่เปลี่ยนแปลง

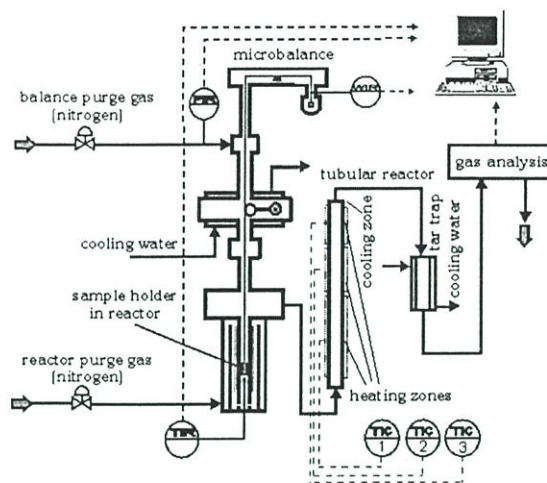
$\% W_A$ คือ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของสาร A บริสุทธิ์ที่เปลี่ยนแปลง

การใช้เครื่อง TGA เพื่อการวิเคราะห์ทดสอบมีอยู่ 2 ประการดังนี้

1. ใช้เพื่อศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของปฏิกิริยาทางจลนพลศาสตร์ เช่นปฏิกิริยาการสลายตัว ปฏิกิริยาการระเหยกลายเป็นไอ และปฏิกิริยาคีไฮเดรชัน

2. ใช้ในการศึกษาหาปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ ในของผสม เช่นปริมาณสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ รวมทั้งพอลิเมอร์ผสม

โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ TGA หาเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 2.23 ส่วนประกอบของเครื่อง TGA [22]

เครื่อง TGA ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนดังนี้

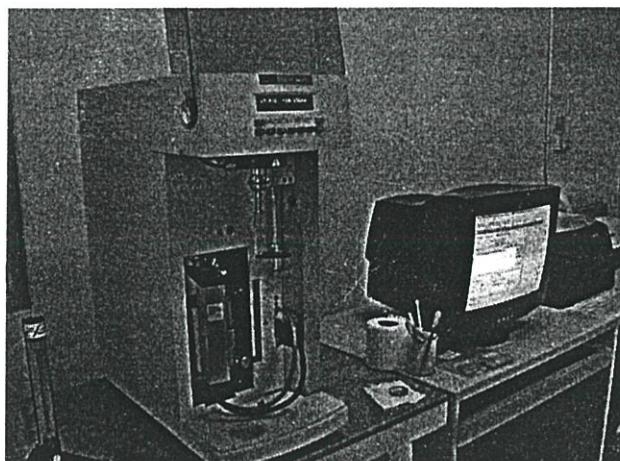
1. ส่วนของเครื่อง TGA ซึ่งประกอบด้วย ระบบที่ให้ความร้อนแก่สารตัวอย่าง ภาชนะสำหรับใส่สารตัวอย่างทำด้วยแพลทินัม เครื่องตรวจวัดความร้อน และเครื่องชั่งน้ำหนัก

2. ส่วนควบคุมหรือโปรแกรมอุณหภูมิพร้อมจอแสดงผล ส่วนนี้จะเชื่อมต่อกับส่วนที่ 1 อุณหภูมิหรือความร้อนที่เตาได้รับจะถูกควบคุมด้วยการ โปรแกรมอุณหภูมิโดยทั่วไปทำได้ 2 แบบ คือ

- Isothermal program เป็นการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นด้วยอัตราส่วนคงที่ตลอด เช่น $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ วิธีนี้ใช้ศึกษาความทนทานต่อความร้อน หรือความทนทานต่อการออกซิไดซ์ของสาร

- Multi-state temperature program เป็นการ โปรแกรมให้ความร้อนเป็นช่วงๆ

3. ส่วนบันทึกข้อมูลหรือแสดงผล เป็นตัวบันทึกน้ำหนักของสารเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิโดยแกน x เป็นอุณหภูมิและแกน y เป็นร้อยละ โดยน้ำหนักของสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.24 Thermogravimetric analyzer

2.6.3 การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope, SEM) [23,24]

การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด โดยอาศัยหลักการใช้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ผ่านชุดคอนเด็นเซอร์เลนส์เพื่อปรับลำอิเล็กตรอนให้วิ่งลงสู่เลนส์วัตถุที่ทำหน้าที่ปรับจุดโฟกัสบนผิวชิ้นงาน และใช้ชุดขดลวดควบคุมการส่องกวาด (scanning coil) ในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวชิ้นงาน แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพื่อแปลงเป็นสัญญาณภาพ

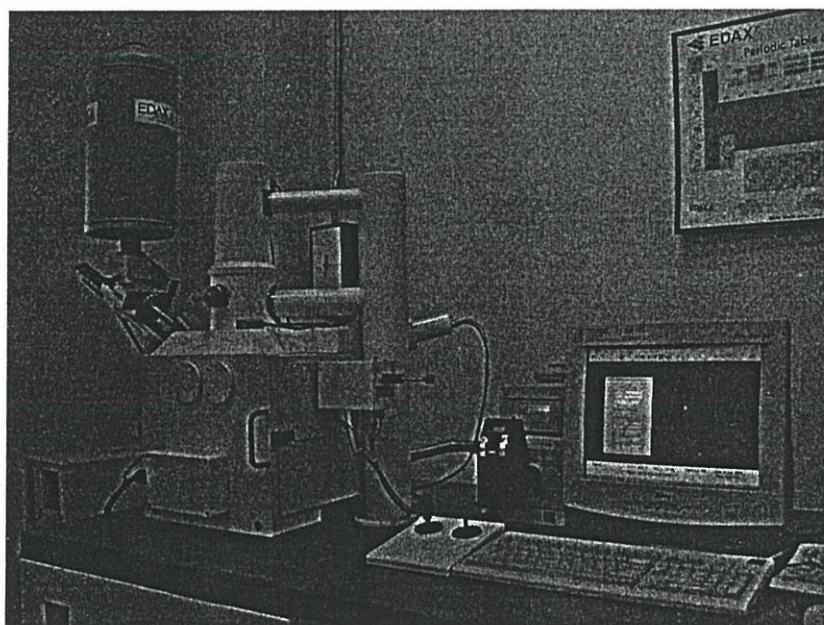
เมื่อลำอิเล็กตรอนกระทบกับตัวอย่างจะมีสัญญาณที่สำคัญเกิดขึ้น 3 สัญญาณ คือ

1. การกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน (backscattered electron, BSE) เป็นผลมาจากแรงกระทำทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนอิสระในลำอิเล็กตรอนกับแวนนิเวกเลียสของอะตอมตัวอย่างที่มีประจุบวกแล้วกระเจิงออกจากพื้นผิวของชิ้นงาน โดยอิเล็กตรอนที่ออกมาจะมีพลังงานสูง

2. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron, SE) อิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดขึ้นจากอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงใน (inner shell) ของอะตอมตัวอย่าง อิเล็กตรอนชนิดนี้จะคายออกมาจากตัวอย่างและมีพลังงานต่ำ

3. รังสีเอ็กซ์ (x-ray) เกิดจากการขาดหายไปของอิเล็กตรอนในวงในของอะตอมตัวอย่างหลุดหายไป ทำให้อะตอมที่อยู่วงนอกซึ่งมีพลังงานสูงกว่าเข้ามาแทนที่แล้วคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์

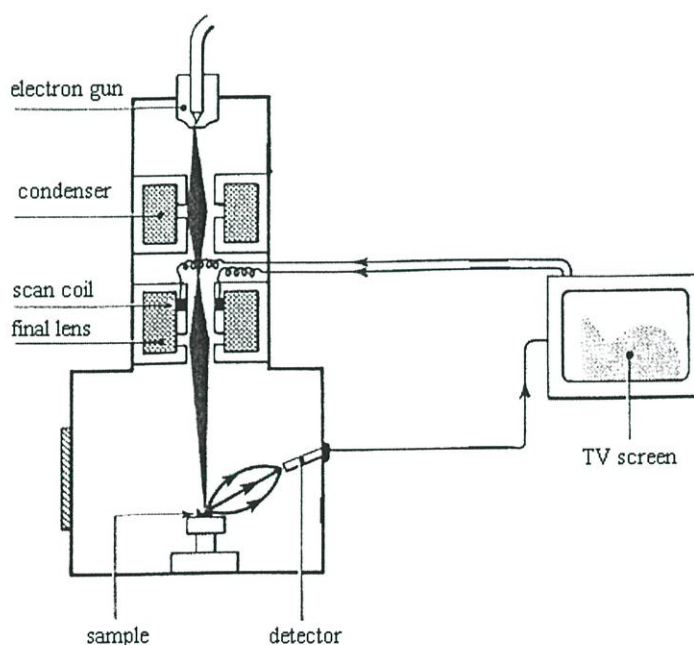
สัญญาณทั้งหมดจะเกิดขึ้นพร้อมกัน ดังนั้นการตรวจวัดจะขึ้นอยู่กับเครื่องมือตรวจวัด (detector) ที่ใช้



รูปที่ 2.25 Scanning electron microscope (SEM)

ส่วนประกอบที่สำคัญของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ดังรูปที่ 2.26

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปจะเป็นหลอดทังสเตนที่ถูกทำให้ร้อน (heated tungsten filament) หรืออาจใช้แลนทานัม เฮกซะโบรไรด์ (lanthanum hexaboride, LaB₆) โดยจะต้องให้ลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานเพียงค่าเดียว
2. ชุดคอนเด็นเซอร์เลนส์ (condenser lens) ใช้เพื่อปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดตามต้องการ
3. ชุดขดลวดควบคุมการส่องกวาด (scanning coil) ใช้ควบคุมตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดที่ละตำแหน่งจนกระทั่งได้ข้อมูลทั้งภาพ
4. เครื่องตรวจวัด (detector) ใช้ตรวจวัดสัญญาณที่เกิดขึ้น สามารถใช้ได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับความต้องการในการตรวจวัด เช่น secondary electron detector จะใช้ในการตรวจวัดสัญญาณที่เป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งมีพลังงานต่ำ โดยเรียกสัญญาณภาพที่เกิดขึ้นว่า secondary electron detector (SEI)
5. จอแสดงภาพ (cathode ray tube) จะเป็นอุปกรณ์ที่แสดงภาพที่ได้จากเครื่องมือวัด



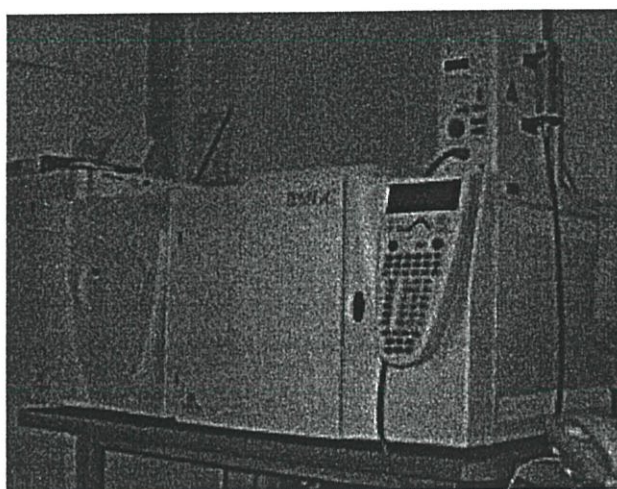
รูปที่ 2.26 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด [25]

2.6.4 การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry : GC-MS) [26,27]

เป็นวิธีที่สามารถทำนายชนิดขององค์ประกอบที่สามารถระเหยได้ (Volatile organic compounds : VOCs) ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้อย่างค่อนข้างแม่นยำ โดยอาศัยการเปรียบเทียบเลขมวล (Mass number) ที่เป็นลักษณะเฉพาะของสารตัวอย่างนั้นๆ กับข้อมูลที่มีอยู่ในฐานข้อมูลอ้างอิง นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณ (Quantitative analysis) และเชิงคุณภาพ (Qualitative analysis)

ในกรณีที่สารตัวอย่างเป็นสารละลายจะถูกฉีดเข้าสู่เครื่องและระเหยเป็นไอก่อนที่จะเข้าสู่ Column แต่ในกรณีที่สารตัวอย่างเป็นของแข็งไม่สามารถฉีดเข้าเครื่อง GC-MS ได้โดยตรงจึงต้องใช้อุปกรณ์ช่วยในการตรวจวิเคราะห์คือ headspace-solid-phase microextraction (HS-SPME) ซึ่งอุปกรณ์นี้จะช่วยดูดซับความเข้มข้นของสารละลายที่ระเหยออกจากสารตัวอย่างแล้วนำไปฉีดเข้าที่เครื่อง GC-MS เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารที่ระเหยออกมา ในงานวิจัยนี้ใช้ HS-SPME ชนิด 50/30 μm divinylbenzene-carboxen /poly(dimethylsiloxane) fibre (DVB-CAR/PDMS)

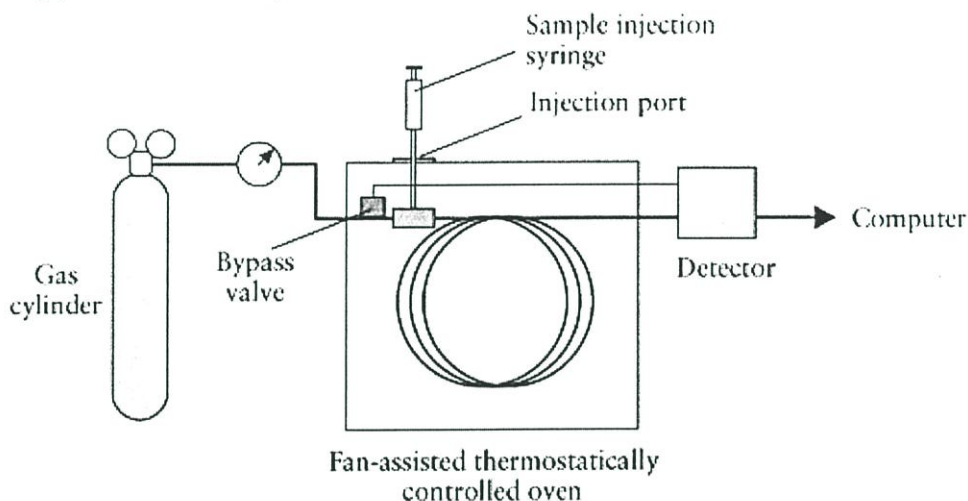
GC-MS ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของเครื่อง Gas chromatography (GC) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการแยกองค์ประกอบของสารที่มีอยู่ในตัวอย่างให้ออกมาทีละองค์ประกอบก่อนที่จะเข้าสู่ detector และส่วนของเครื่อง Mass spectrometer (MS) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็น detector ในการตรวจสอบดูว่าองค์ประกอบต่างๆ ที่ผ่านออกมาจากเครื่อง GC นั้น มีเลขมวล (mass number) เป็นเท่าไร เพื่อที่จะได้สามารถทำนายได้ว่า สารที่สนใจอยู่นั้นประกอบด้วยองค์ประกอบชนิดใดบ้าง และมีปริมาณเท่าไร



รูปที่ 2.27 เครื่อง Gas Chromatography-Mass Spectrometry [26]

1) Gas Chromatograph (GC)

ทำหน้าที่ในการแยกองค์ประกอบของสารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอ (Volatile organic compounds : VOCs) ได้เมื่อถูกความร้อน กลไกที่ใช้ในการแยกองค์ประกอบต่างๆ ในสารตัวอย่างอาศัยหลักของความชอบที่แตกต่างกันขององค์ประกอบในตัวอย่างที่มีต่อเฟส 2 เฟส คือ Stationary phase และ Mobile phase



รูปที่ 2.28 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่อง GC [26]

องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง GC สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ดังรูปที่ 2.28

1. Injector คือ ส่วนที่สารตัวอย่างจะถูกฉีดเข้าสู่เครื่องและระเหยเป็น ไอก่อนที่จะเข้าสู่ Column อุณหภูมิที่เหมาะสมของ injector ควรเป็นอุณหภูมิที่สูงพอที่จะทำให้สารตัวอย่างสามารถระเหยได้แต่ต้องไม่ทำให้สารสลายตัว ตัวอย่างของ injector ได้แก่ Split, Splitless, On column

2. Oven คือ ส่วนที่ใช้สำหรับบรรจุ Column และเป็นส่วนที่ควบคุมอุณหภูมิของ Column ให้เปลี่ยนไปตามความเหมาะสมกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิของ Oven นั้นมี 2 แบบ คือ

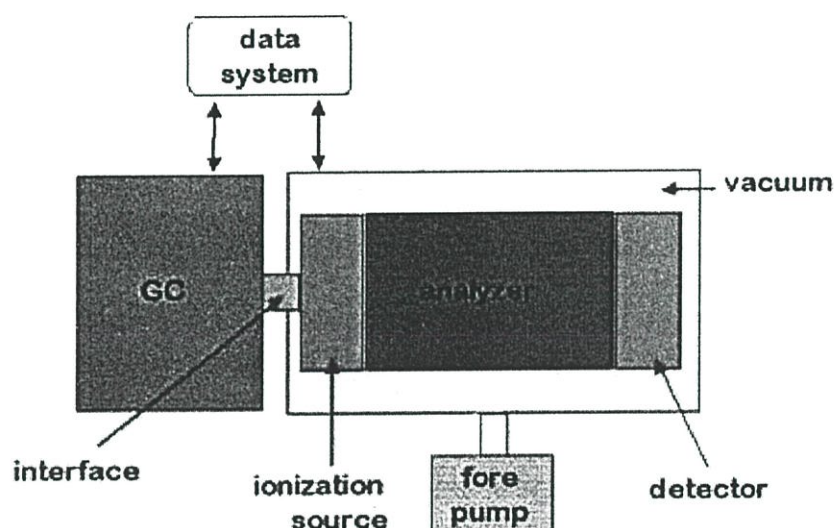
2.1) Isocratic Temperature

2.2) Gradient Temperature ข้อดีของการทำ Gradient temperature คือสามารถใช้กับสารตัวอย่างที่มีจุดเดือดกว้าง (Wide boiling range) และยังช่วยลดเวลาในการวิเคราะห์

3. Detector คือส่วนที่จะใช้สำหรับตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและดูว่าสารตัวอย่างชนิดที่เราสนใจมีปริมาณอยู่เท่าใด

2) Mass Spectrometer (MS)

เป็น Detector ที่ใช้ตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างโดยอาศัยกลไก คือ โมเลกุลขององค์ประกอบที่ถูกแยกออกมาจากสารตัวอย่างโดยเครื่อง GC จะถูกไอออไนซ์ในสถานะสูญญากาศแล้วตรวจวัดออกมาเป็นเลขมวล (Mass number) เทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิง แล้วแปลผลออกมาเป็นชื่อขององค์ประกอบนั้นๆ



รูปที่ 2.29 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่อง MS [26]

องค์ประกอบสำคัญของ MS แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังรูปที่ 2.29

1. Ionization Source แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

Electron Ionization (EI) เป็นการทำให้สารเกิด Fragment โดยใช้ลำอิเล็กตรอน ซึ่ง Ionization chamber ต้องมีความดันต่ำประมาณ 8-10 Torr โดยอิเล็กตรอนจาก Filament ที่ร้อนจะถูกโฟกัสผ่านห้องนี้และถูกดึงเข้าหา repeller voltage ที่มีความต่างศักย์ 70 โวลต์ ซึ่งจะให้พลังงานกับอิเล็กตรอนเป็น 70 eV ทำให้ของผสมที่ซับซ้อนของไอออนเกิดการแตกหัก (Fragmentation ion) ที่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างและความอุดมสมบูรณ์ (Relative abundance)

Chemical Ionization (CI) เป็นการทำให้สารเกิดการ Fragment ด้วยวิธีทางเคมีโดยผสมสารตัวอย่าง (ความดัน 4-10 Torr) เข้ากับแก๊สที่ทำปฏิกิริยาคู่ (ความดัน 1 Torr) แล้วผ่านสารผสมเข้าไปใน Ionization chamber โดยการทำให้เกิดการ Fragment ด้วยการชนกับอิเล็กตรอน เช่นเดียวกันแก๊สที่ใช้ได้แก่ Methane, Isobutane, Ammonia

2. Mass Analyzer

เป็นเครื่องวิเคราะห์มวล มีหลายแบบ คือ Magnetic-sector analyzer, Electrostatic analyzer, Time-of-flight analyzer, Ion cyclotron resonance analyzer และ Quadrupole mass spectrometer ใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยสนามแม่เหล็ก คือ เป็น Path-stability mass spectrometer ซึ่งมีแหล่งผลิตไอออน 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะทำให้ตัวอย่างกลายเป็นไอออน และส่วนที่ 2 ทำให้สารมาตรฐานกลายเป็นไอออนลำไอออนทั้งสองจะถูกบังคับให้ผ่านเครื่องแยกไอออนชุดเดียวกัน ดังนั้นไอออนทั้งหมดจะได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กในสถานะเดียวกัน แต่ถูกตรวจและวัดด้วยเครื่อง Detector แยกกันซึ่งมีข้อดีคือทำให้สามารถวัดมวลได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

3. Detector

ที่ใช้โดยทั่วไปมีหลายอย่าง คือ Faraday cup detector, Electron multiplier detector, Scintillation counter detector และ Photographic plate detector

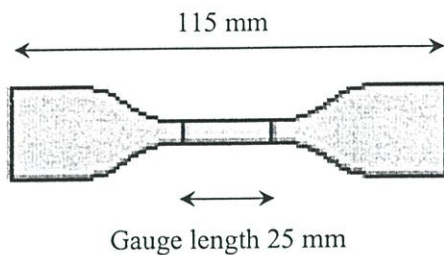
2.6.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

2.6.5.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile tests) [28,29]

ความแข็งแรงดึง (tensile strength) โมดูลัสแรงดึง (tensile modulus) นับเป็นหนึ่งในสมบัติที่สำคัญที่สุดของวัสดุต่างๆ และมีความจำเป็นที่จะต้องทดสอบสำหรับวัสดุพอลิเมอร์ การทดสอบแรงดึง คือการวัดความสามารถของวัสดุหนึ่งที่จะทนทานต่อแรงดึงยึดออกจากกัน ก่อนที่จะเกิดการฉีกขาด แตกหัก หรือเสียสภาพ ค่าโมดูลัสแรงดึงจะเป็นค่าที่บอกถึงความแข็งเปราะ (stiffness) ของวัสดุ สามารถหาได้จากความชันของกราฟความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve)

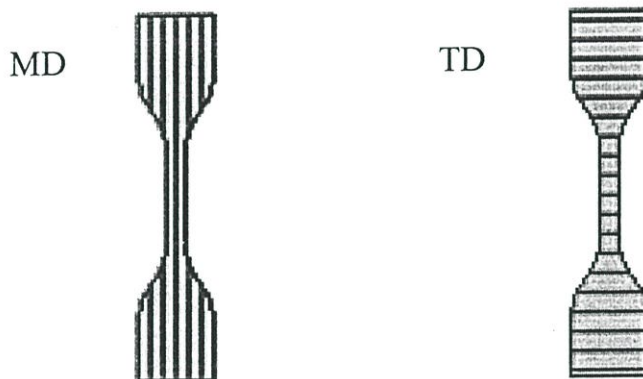
การทดสอบแรงดึงทำได้โดยการยึดชิ้นงานตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐาน โดยใช้ที่จับ (grips) สองชุด ที่จับข้างหนึ่งจะถูกยึดให้อยู่กับที่และอีกข้างหนึ่งจะเคลื่อนที่โดยมีเซลล์วัดแรง (load cells) เป็นตัววัดและควบคุมแรงที่กระทำกับชิ้นงานตัวอย่าง โดยมากแล้วชิ้นงานจะมีรูปร่างคล้าย “ดัมเบลล์” (dump-bell) เพื่อให้ชิ้นงานตัวอย่างเกิดการขาดที่บริเวณตรงกลางของชิ้นงาน ห่างจากบริเวณที่จับ การยึดออกของชิ้นงานพอลิเมอร์สามารถวัดได้จากการวัดระยะห่างระหว่างสองเส้น (gauge marks) บนชิ้นงานตัวอย่างที่ห่างกันเป็นระยะเท่ากับ “ความยาวเกจ” (gauge length) ตามมาตรฐานใช้ความยาวเกจ 20 หรือ 25 มิลลิเมตร สำหรับตัวอย่างขนาดเล็ก ดังรูปที่ 2.30 โดยใช้เครื่องแอกเทนโซมิเตอร์ (extensometer) หนีบกับชิ้นงานตัวอย่าง พลาสติกโดยทั่วไปใช้ความเร็วในการดึง 50-100 มิลลิเมตรต่อนาที เนื่องจากอัตราเร็วการดึงมีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมของพอลิเมอร์และผลการทดสอบแรงดึง การใช้อัตราเร็วต่ำเปรียบเสมือนการดึงธรรมดา ในขณะที่การดึงอัตราเร็วสูงเปรียบเสมือนการกระแทกหรือการกระตุกชิ้นงานตัวอย่าง การ

เพิ่มอัตราเร็วในการดึงจะทำให้ความชันของเส้นกราฟความเค้น-ความเครียดเพิ่มขึ้น หรือค่ามอดุลัสที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.30 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึง [30]

เมื่อ MD - Machine Direction และ TD - Transverse Direction



รูปที่ 2.31 ทิศทางการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ [30]

จากแรงดึงที่ใช้และการยืดออกของตัวอย่างสามารถคำนวณค่าสมบัติเชิงกลต่างๆ ดังนี้

- ความเค้นดึง (tensile stress), $\sigma = F / A$
- ความเครียดดึง (tensile strain), $\epsilon = \Delta l / l_0$ ($\Delta l = l - l_0$)
- มอดุลัส (modulus), $E = \text{ความเค้นดึง} / \text{ความเครียดดึง}$

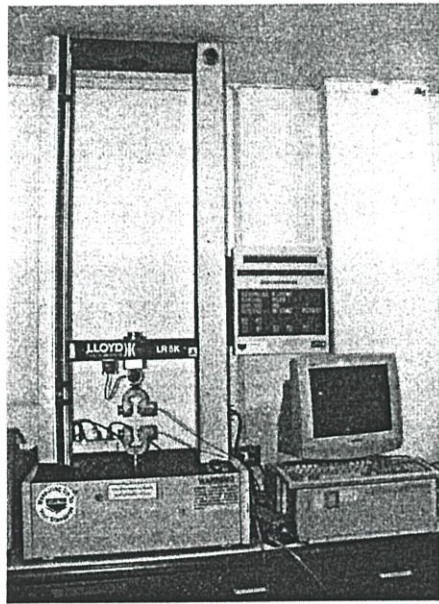
เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ดึงยึดตัวอย่าง (หน่วยเป็นนิวตัน, N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร, mm^2)

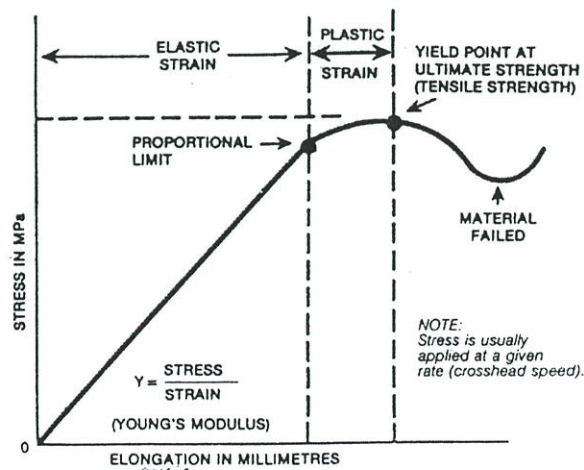
l คือ ระยะห่างระหว่างขีดสองเส้นบนตัวอย่าง (gauge marks) ขณะดึง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร, mm)

l_0 คือ ระยะห่างระหว่างขีดสองเส้นบนตัวอย่างก่อนดึง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร, mm)

เครื่องวัดแรงดึงที่นิยมใช้เรียกว่า เครื่องทดสอบแรงดึง (tensile testing machine) หรือ เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) เนื่องจากมีความหลากหลายในการใช้งาน ตัวเครื่องประกอบด้วยส่วนจับตัวอย่าง (grips) สองข้าง ข้างหนึ่งยึดติดอยู่กับที่อีกด้านหนึ่งติดกับ ส่วนให้แรงที่สามารถเคลื่อนที่ให้แรงดึง (tension) หรือเคลื่อนที่ลงให้แรงกดอัด (compression) ใน อัตราเร็ว (crosshead speed) ที่สามารถควบคุมได้ โดยมีเครื่องวัดแรง (load cell) ต่ออยู่ทำหน้าที่วัด แรงที่ใช้ดึงหรือกดอัดตัวอย่าง ส่วนจับตัวอย่างมีหลายชนิดต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับตัวอย่าง สามารถจับตัวอย่างได้ดี ไม่มีการเลื่อนหลุด (slippage) หรือทำให้ตัวอย่างบิดเบี้ยว



รูปที่ 2.32 Universal testing machine

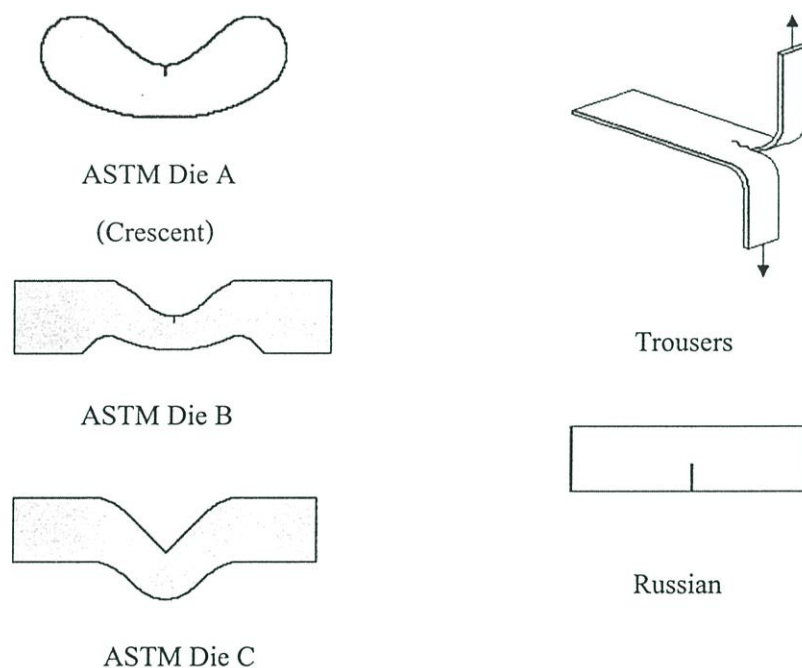


รูปที่ 2.33 กราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึง [31]

ในงานวิจัยนี้ใช้มาตรฐาน ASTM D 882 ในการทดสอบค่าความแข็งแรงดึง (tensile strength) และมอดุลัส (modulus) ของฟิล์มที่มีความอ่อนนุ่ม มีความหนาไม่เกิน 1 มิลลิเมตรและใช้ทดสอบชิ้นงานที่มีค่าความเครียดดึงที่จุดขาด (strain at break) สูงได้ โดยตัดชิ้นงานเป็นรูปคัมเบลล์ มีความยาวเกจ 25 มิลลิเมตร

2.6.5.2 การทดสอบการฉีกขาด (Tear test) [32]

การทดสอบการฉีกขาดขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ อัตราเร็วการฉีก และอุณหภูมิ ลักษณะตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการฉีกขาดมีหลายลักษณะดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 ลักษณะของตัวอย่างทดสอบการฉีกขาด (Tear specimens) [33]

ตัวอย่างการทดสอบการฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM D 1004 และแบบ Trousers รอยขาดจะตั้งฉากกับทิศทางแรงที่ให้ แต่การทดสอบตัวอย่างแบบ Russian จะขาดตามแนวตรง โดยรายงานผลเป็นแรงที่ใช้ในการฉีกขาดตัวอย่างที่มีความหนาตามกำหนด นิยมเรียกผลที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ว่า “ความแข็งแรงฉีกขาด” (tear strength) และนิยมเรียกผลที่ได้จากการทดสอบด้วยตัวอย่างแบบ Trousers ว่า “ความต้านทานฉีกขาด” (tear resistance)

ค่าที่ได้จากการทดสอบลักษณะตัวอย่างแบบ Russian ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด รองลงมาคือตัวอย่าง ASTM Die A หรือ B และ ASTM Die C และตัวอย่างแบบ Trousers ให้ค่าความแข็งแรงต่ำสุด ค่าความแข็งแรงลักษณะของแต่ละชนิดต่างกัน ไม่มีความสัมพันธ์กัน และไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้

ในงานวิจัยนี้จะตัดชิ้นงานแบบ ASTM Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 1004 ในการทดสอบการฉีกขาด จะทำให้ทราบถึงแรงที่ทำให้ชิ้นงานเริ่มฉีกขาด ซึ่งจะเป็นค่าความเครียดสูงสุด (maximum stress) ของชิ้นงาน

2.6.6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

2.6.6.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพเป็นวิธีวิเคราะห์ที่ไม่ซับซ้อน โดยจะพิจารณาจากลักษณะภายนอกของพอลิเมอร์ผสมที่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างได้ง่าย เช่น ลักษณะพื้นผิว สี และกลิ่นของพอลิเมอร์ผสม เป็นต้น วิธีการวิเคราะห์อาจใช้วิธีการสังเกตด้วยตาเปล่า อาศัยการใช้มือสัมผัส และใช้การสูดดมทางจมูกเพื่อบอกความแตกต่างของพอลิเมอร์ผสม

2.6.6.2 การตรวจวิเคราะห์ด้วยการชั่งน้ำหนัก

เป็นการตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพที่อาศัยการชั่งน้ำหนักจากเครื่องชั่งที่มีความละเอียดสูง (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปนี้อาจเกิดจากการสลายตัวของสารที่สามารถระเหยได้ในพอลิเมอร์ผสมหรือเกิดจากการดูดความชื้นของพอลิเมอร์ผสมก็เป็นไปได้ การสังเกตน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงนี้อาศัยเวลาในการศึกษาอย่างน้อย 2 – 4 เดือนเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่ชัดเจน

2.6.6.3 การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (ASTM E 96-95) [35]

การซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงสำหรับอุตสาหกรรมฟิล์มพลาสติกที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ โดยวัดการซึมผ่านได้จากปริมาตรหรือมวลของก๊าซหรือของไอน้ำที่สามารถแทรกผ่านฟิล์มได้ในเวลา 24 ชั่วโมง

อุปกรณ์

1. ถ้วยทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ
2. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
3. ชีฟี่งพาราฟิน
4. ซิลิกาเจลอบแห้ง

การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างต้องไม่มีรอยพับ ชูด ชีด ร้ว ตัดตัวอย่างฟิล์มเป็นวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 7 เซนติเมตร ก่อนทำการทดสอบต้องเก็บไว้ในสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (27/65) อย่างน้อย 24 ชั่วโมง

วิธีการทดสอบ

ใส่ซิลิกาเจลอบแห้งลงในถ้วย นำตัวอย่างฟิล์มปิดทับลงบนปากถ้วยฉีกด้วยพาราฟินเหลวเพื่อป้องกันรอยร้ว นำถ้วยทดสอบไปชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด แล้วนำไปเก็บในที่ควบคุมสภาวะ บันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักทุกๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 8 วัน

การคำนวณ

$$\text{อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR)} = (G/t) / A \quad \text{Unit : g/m}^2 \cdot \text{day}$$

เมื่อ WVTR คือ Water Vapor Transmission Rate

G/t คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่อเวลา (slope)

A คือ พื้นที่ของตัวอย่างที่วัดการซึมผ่าน

$$\text{การซึมผ่านของไอน้ำ (WVP)} = \text{Permeance} \times \text{ความหนาฟิล์ม} \quad \text{Unit : g} \cdot \text{mm/m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{kPa}$$

$$\text{โดยที่ Permeance} = \text{WVTR} / \Delta P = \text{WVTR} / S(R_1 - R_2)$$

เมื่อ WVP คือ Water Vapor Permeability

S คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 25 °C (3.169kPa หรือ 23.7694mmHg)

R₁ คือ ความชื้นสัมพัทธ์บรรยากาศห้องทดสอบ = 72%

R₂ คือ ความชื้นสัมพัทธ์บรรยากาศในถ้วยทดสอบ = 0%

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mariani, P. , Carianni, G. และ La Mantia, F.P. (2004) นักวิจัยชาวอิตาลี [35]

ศึกษาผลของสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนในการควบคุมการเสถียรภาพทางความร้อนในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยวิเคราะห์ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวในการผสม และดูจากค่าทอร์คต่อเวลาที่ใช้ ซึ่งเป็นผลโดยตรงที่ได้จากการแตกของสายโซ่ ในงานวิจัยนี้ใช้ LDPE ที่มี MFI ($190^{\circ}\text{C} / 2.16\text{ kg}$) = $2\text{ g}/10$ และมีความหนาแน่น $0.923\text{ g}/\text{cm}^3$ ทำการผสมแบบแห้ง และมีการเติม primary antioxidants (Irganox 1076) 550 ppm โดยวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 160 195 และ 230°C ใช้เวลาในการผสมต่างกันอยู่ในช่วง 15 – 60 นาที ใช้ความเร็วสกรูในการผสม 20 100 และ 150 รอบต่อนาที พบว่าถ้าเพิ่มอุณหภูมิ, ความเร็วสกรูในการผสมจะเร่งการแตกของสายโซ่ให้เร็วขึ้นดูจากกราฟค่าทอร์คที่ลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนระยะเวลาที่ใช้ในการผสมไม่มีผลต่อค่าทอร์คเพราะจะให้ค่าสูงสุดที่เวลาเดียวกันในตัวอย่างที่สภาวะเหมือนกัน ทั้งในกรณีที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนจะให้ผลคล้ายๆ กัน แต่ตัวอย่างที่เติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนจะช่วยลดการแตกของสายโซ่เนื่องจากความร้อนได้ดีกว่า

Bledzki, A.K. , Kessler, A. และ Lieser, L. (1999) นักวิจัยชาวเยอรมนี [36]

ศึกษากระบวนการลดกลิ่นและการตรวจวัดกลิ่นที่ไม่พึงปรารถนาในพลาสติกที่จะนำกลับมาใช้งานใหม่ โดยแบ่งวิธีการทดลองออกเป็น 3 แบบ คือ ใช้เทคนิค degasification ในระหว่างการตัดเม็ดพลาสติก (ทำซ้ำ 4 ครั้ง), ใช้วิธีการเติมสารดูดซับ เช่น อลูมิเนียมออกไซด์ ซีโอไลท์ และแอคทิเวทชาโคล เป็นต้น และใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งแต่ละวิธีทำการตรวจวัดกลิ่นด้วยกระบวนการ Olfactometry ได้ผลดังนี้ วิธี degasification ในระหว่างการตัดเม็ด 3 ครั้งแรกพบว่ามีแนวโน้มลดลงของกลิ่น 37% แต่หลังจากผ่านกระบวนการอัดรีดครั้งที่ 4 พบว่ากลิ่นมีค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเพราะพลาสติกเกิดการเสถียรภาพเนื่องจากได้รับความร้อนซ้ำกันหลายครั้ง วิธีการเติมสารดูดซับพบว่าแอคทิเวทชาโคลให้ผลดีที่สุดในการลดกลิ่นเมื่อเทียบกับสารดูดซับอื่น โดยสามารถลดกลิ่นลงไปได้ถึง 50% และวิธีสุดท้ายการสกัดด้วยตัวทำละลายจะลดกลิ่นได้มากที่สุด โดยกลิ่นที่ตรวจวัดได้จะมีค่าใกล้เคียงกับพลาสติกที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

Walton, N.J. , Mayer, M.J. และ Narbad, A. (2003) นักวิจัยชาวอังกฤษ [37]

ศึกษากระบวนการสังเคราะห์ทางชีวภาพของสารวานิลลิน โดยเส้นทางการสังเคราะห์ vanillin- β -D-glucoside อาจเกิดจาก 4-coumaric ผ่าน 4-hydroxybenzaldehyde อีกวิธีที่สามารถสังเคราะห์วานิลลินได้โดยอาศัย ferulic acid ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการ hydroxycinnamate degradation ใน *Pseudomonas* ซึ่งจะมีเอนไซม์ 4-hydroxycinnamoyl-CoA hydratase/lyase (HCHL) เป็นตัวช่วย

Perez-Silva, A. , Odoux, E. , Brat, P. และคณะ (2006) นักวิจัยชาวฝรั่งเศสและเม็กซิโก [38]

ศึกษาสารประกอบที่สามารถระเหยได้จากเมล็ดวานิลลาที่สูงแล้วโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในการสกัดแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS และ GC-O พบว่าในงานวิจัยนี้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่ให้ผลดีที่สุดในการสกัดสารให้กลิ่นจากเมล็ดวานิลลาจะเป็นสารละลายผสมที่ประกอบด้วยเพนเทนและอีเทอร์ (1/1 v/v) เมื่อวิเคราะห์สารละลายที่สกัดได้ด้วยเครื่องมือ GC-MS จะสามารถตรวจพบสารที่สามารถระเหยได้ 65 ชนิด ซึ่งจะมีสารประกอบหลักๆ ที่ตรวจพบคือ aromatic acid, aliphatic acid และ phenolic และเมื่อนำสารละลายที่สกัดได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ GC-O จะตรวจพบสารประกอบที่ให้กลิ่น 26 ชนิด ซึ่งสารประกอบหลักที่ให้กลิ่นที่พบในเมล็ดวานิลลาคือ vanillin จะมีความเข้มข้นมากกว่าสาร guaiacol, 4-methylguaiacol, acetovanillone และ vanillyl alcohol หลายเท่า

Villberg, K. , Veijanen, A. , Gustafsson, I. และ Wickstrom, K. (1997) นักวิจัยชาวฟินแลนด์และสวีเดน [39]

วิเคราะห์ปัญหาเรื่องกลิ่นและรสชาติที่เกิดจากสารประกอบในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ใช้ในกระบวนการผลิตท่อน้ำ ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์กลิ่นจากตัวเม็ดพลาสติกเองและวิเคราะห์รสชาติจากน้ำที่ใช้ล้างเม็ดพลาสติก ซึ่งการวิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยได้ (volatile organic compounds : VOCs) จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจะนำไปวิเคราะห์ด้วยระบบ gas chromatography-mass spectrometry-sniffing (GC-MS-SNIFF) และระบบ gas chromatography-fourier transform infrared spectroscopy-sniffing (GC-FTIR-SNIFF) โดยจะใช้เทคนิค purge-and-trap ในการนำ VOCs ที่ได้จากตัวอย่างเข้าสู่ระบบ GC และพื้นฐานของเทคนิค sniffing จะใช้จมูกของมนุษย์เป็นเครื่องตรวจวัด ส่วนการวิเคราะห์น้ำที่ได้จากการเขย่ารวมกับเม็ดพลาสติกนาน 4 ชั่วโมงจะถูกนำไปประเมินด้วยอาสาสมัคร ซึ่งอาสาสมัครเห็นด้วยกับสมบัติของกลิ่นแบ่งได้ 6 ชนิดคือ sweet, chemical, stale, dusty, foul และ floor-cloth ส่วนสมบัติของรสชาติแบ่งได้เป็น sweet, metallic, stony, pungent, dusty, plastic, foul, stink bug และ candle grease

Kohn, J. , Tate, R. และ Jordy, D. (1997) [40]

ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดเป่าขึ้นรูป พบว่าปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านของฟิล์มพอลิเอทิลีนคือ ความหนาแน่น ความหนาของฟิล์ม และการจัดเรียงตัวของผลึก ซึ่งพบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่วนความหนาของฟิล์มไม่มีผลต่อการซึมผ่านมากนัก เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวยังมีความสัมพันธ์กับการกระจายน้ำหนักโมเลกุลและการจัดเรียงตัวของผลึกด้วย ซึ่ง

พอลิเมอร์ที่มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลแคบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนพอลิเมอร์ที่มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลกว้างทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำได้ถึง 50% หรือมากกว่านั้น และฟิล์มที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกมากทำให้ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำแปรผันโดยตรงกับอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและอัตราส่วนระหว่างการดึงตามแนวขวางเครื่องจักรกับการดึงตามแนวของเครื่องจักร (TD/MD ratio)

Lee, K.T. และ Yoon, C.S. (2001) [41]

ทำการศึกษาศสมบัติด้านกายภาพของฟิล์มที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แบบสุญญากาศและแบบหีบห่อที่ใช้สำหรับเนื้อสัตว์แช่เย็นพบว่า พอลิไวนิลลิคินคลอไรด์/เอทิลีนไวนิลอะซิเตต (PVDC/EVA) ที่นิยมทำเป็นฟิล์มห่อจะมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนน้อยกว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนเคลือบพอลิเอไมด์ (PA/PE : Polyamide laminated to Polyethylene film) แต่มีความแข็งแรงดึงที่สูงกว่า เมื่อฟิล์ม PVDC/EVA เกิดการหดตัวจะมีอัตราการหดตัวอยู่ในช่วง 34.9 ถึง 48.5% ตามทิศทางของเครื่องจักร และอัตราการหดตัวอยู่ในช่วง 40.9 ถึง 57.3% ตามทิศทางขวางเครื่องจักร ยิ่งไปกว่านั้นความหนาที่เพิ่มขึ้นประมาณ 2-3 เท่า ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงและอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนลดลง ความหนาของฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ใช้สำหรับการห่ออยู่ในช่วง 11 ถึง 13 ไมครอน ในขณะที่ฟิล์ม LLDPE มีความหนาอยู่ในช่วง 9 ถึง 12 ไมครอน นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ใช้สำหรับห่อมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำสูงกว่าฟิล์ม LLDPE และยังมีความขุ่นน้อยกว่าด้วย

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. สารละลายสังเคราะห์วานิลลา (Vanilla) Food grade. Keith Harris & Co.
2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) เกรดการค้า 1905 F

Thai Polyethylene Co., LTD.

ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LD 1905F)*

สมบัติ	หน่วย	Test Method	LD1905F
อัตราการไหล (Melt flow rate)	g/10 min	ASTM D 1238	5.0
ความหนาแน่น (Density)	g/cm ³	ASTM D 1505	0.919
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)	kg/cm ²	ASTM D 638	MD: 210 TD : 170
ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	%	ASTM D 638	MD: 320 TD : 680
ความแข็งแรงในการฉีกขาด (Tear strength)	g/25 micron	ASTM D 1922	MD: 370 TD : 210
ความแข็งผิวหน้า (Hardness)	-	ASTM D 2240	46
จุดหลอมเหลว (Melting point)	°C	ASTM D 2117	110
มอดุลัส โค้งงอ (Flexural modulus)	kg/cm ²	ASTM D 790	2,100

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3. สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Stabinex NL-214) Mizusawa Industrial Chemicals, Ltd.

ตารางที่ 3.2 สมบัติของ Stabinex NL-214 (Ca/Zn stabilizer)*

สมบัติ	Stabinex NL-214
Main Components	Calcium / Zinc / Magnesium
Appearance	White powder
Moisture (%)	Less than 3.0
Bulk Density	0.38 ± 0.10
Melting point	110~120 °C

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

4. สารช่วยผสม (Fusabond[®] MB 226D) Creative Polymer Ltd.

ตารางที่ 3.3 สมบัติของ Fusabond[®] MB 226D*

สมบัติ	หน่วย	Test Method	MB226D*
Melt flow rate (190 °C/2.16 kg)	g/10 min	ASTM D1238	1.5
Density	g/cm ³	ASTM D1505	0.93
Melting point	°C	ASTM D3418	120

* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก (Electronic balance) ความละเอียด 4 ตำแหน่ง
2. เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) : รุ่น Model 3000 : LAB TECH Engineering Company., Ltd.
3. เครื่องบดย่อยพลาสติก (Grinding machine) : รุ่น A 600 : Bosco Engineering
4. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder) : Polydrive with Rheomex R 252 HAAKE
5. เครื่องเป่าฟิล์ม (Blown – film machine) : รุ่น Type LF 400 : LAB TECH Engineering Company., Ltd.

6. เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) : รุ่น LR 5K : Lloyd Instrument Ltd.
7. เครื่องตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบของสาร (Gas Chromatography-Mass Spectrometry) : GC รุ่น 6890 N และ MS รุ่น 5973 N : Agilent Technologies Co.
8. เครื่องตรวจวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer, TGA) : รุ่น Pyris 1 : Perkin
9. เครื่องตรวจวิเคราะห์การดูดกลืนอินฟราเรด (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) : รุ่น FTIR spectrum GX : Perkin Elmer
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscopy, SEM) : รุ่น LEO 1455 VP : LEO Ltd.
11. เครื่องทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeation tester) : รุ่น Lyssy L80-4000 : Assignee Ricoh Co., Ltd.
12. กล้องถ่ายภาพดิจิทัล : รุ่น Dimage Z5 : Konica Minolta
13. ตู้อบ (Oven)
14. เครื่องแก้วต่างๆ

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมตัวอย่าง

1. ชั่งน้ำหนักสารละลายวานิลลาและสารเติมแต่งต่างๆ ที่จะใช้ในการผสม ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 4 ตำแหน่ง โดยใช้อัตราส่วนต่างๆ กันดังตารางที่ 3.4-3.7
2. นำส่วนผสมต่างๆ มาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยใช้เครื่องผสมความเร็วสูง ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยความเร็ว 2000 รอบต่อนาที
3. นำของผสมที่ผสมเรียบร้อยแล้วป้อนเข้าสู่เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว โดยตั้งอุณหภูมิช่วงต่างๆ ของเครื่องอัดรีดทั้ง 4 ช่วงเป็นดังนี้ 150-155-160-160 °C ตามลำดับ (จากส่วนป้อนสารจนถึงหัวดาย) ให้ความเร็วสกรูหมุนด้วยความเร็วคงที่ 60 รอบต่อนาที โดยใช้หัวดายแบบเส้น (spinneret)
4. ปล่อยให้พอลิเมอร์ที่ผสมเรียบร้อยแล้วเย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปบดย่อยด้วยเครื่องบดก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการเป่าฟิล์ม โดยแยกเก็บบางส่วนไว้เพื่อทำการวิเคราะห์

3.3.2 การขึ้นรูป

ทำการขึ้นรูปโดยการเป่าเป็นฟิล์มบาง โดยนำพอลิเมอร์ผสมในแต่ละสูตรที่ผ่านการบดมา อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลานาน 30 นาทีเพื่อลดความชื้นที่อาจเกิดขึ้นได้จากตอนที่ตั้งเม็ดที่ผ่านการบดทิ้งเอาไว้ เมื่อนำพอลิเมอร์ผสมออกจากคู่อบทำการเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณที่เท่ากับกับพอลิเมอร์ผสม ผสมให้เข้ากัน โดยใช้การเขย่าเพื่อให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เติมเข้าไปกระจายตัวผสมกับพอลิเมอร์ผสมก่อนที่จะนำไปป้อนเข้าสู่เครื่องเป่าฟิล์ม

โดยสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปจะตั้งอุณหภูมิช่วงต่างๆ ของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวทั้ง 4 ช่วงเป็นดังนี้ 160-170-180-180 °C (จากส่วนป้อนสารจนถึงหัวตาย) โดยให้ความเร็วสกรูหมุนด้วยความเร็ววงที่ 100 รอบต่อนาที และอุณหภูมิที่หัวตายแบบวงแหวนตั้งอุณหภูมิที่ 180 °C กำหนดให้มี อัตราการพองตัว (blow-up ratio) 3 : 1 และใช้ความเร็วในการดึงของลูกกึ่ง 5 เมตรต่อนาที [ภาคผนวก ข] โดยอัตราส่วนที่ใช้ในการผสมแต่ละสูตรมีค่าดังตารางที่ 3.5 3.6 และ 3.7

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมเมื่อใส่สารเติมแต่งต่างชนิดกัน (% โดยน้ำหนักพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ)

Sample	LDPE (g)	Fusabond MB226D (%)	Ca/Zn (%)	Vanilla (%)
1	500	-	-	-
2	500	10	-	-
3	500	-	1	-
4	500	-	-	2

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมเมื่อมีปริมาณสารช่วยผสมต่างกันเพื่อหาปริมาณที่ให้สมบัติโดยรวมของพอลิเมอร์ผสมดีที่สุด (% โดยน้ำหนักพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ)

Sample	LDPE (g)	Fusabond MB226D (%)	Ca/Zn (%)	Vanilla (%)
5	500	-	1	2
6	500	5	1	2
7	500	10	1	2
8	500	15	1	2

ตารางที่ 3.6 อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมเมื่อมีปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนต่างกัน เพื่อหาปริมาณที่ให้สมบัติโดยรวมของพอลิเมอร์ผสมดีที่สุด (% โดยน้ำหนักพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ)

Sample	LDPE (g)	Fusabond MB226D (%)	Ca/Zn (%)	Vanilla (%)
9	500	10*	-	2
10	500	10*	1	2
11	500	10*	3	2
12	500	10*	5	2
13	500	10*	7	2

หมายเหตุ * คือ ปริมาณสารช่วยผสมที่ให้สมบัติโดยรวมของพอลิเมอร์ผสมดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.7 อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมเมื่อมีปริมาณสารละลายวานิลลาต่างกันเพื่อหาปริมาณที่ให้สมบัติโดยรวมของพอลิเมอร์ผสมดีที่สุด (% โดยน้ำหนักพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ)

Sample	LDPE (g)	Fusabond MB226D (%)	Ca/Zn (%)	Vanilla (%)
14	500	10*	1**	-
15	500	10*	1**	1
16	500	10*	1**	2
17	500	10*	1**	3
18	500	10*	1**	4

หมายเหตุ * คือ ปริมาณสารช่วยผสมที่ให้สมบัติโดยรวมของพอลิเมอร์ผสมดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 3.5

** คือ ปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่ให้สมบัติโดยรวมของพอลิเมอร์ผสมดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 3.6

3.4 การตรวจวิเคราะห์

3.4.1 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนอินฟราเรด (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)

Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสาร โดยจะใช้ตรวจหาหมู่ฟังก์ชันของสารวานิลลินในพอลิเมอร์ผสมเพื่อตรวจสอบว่ามีสารวานิลลินอยู่ในพอลิเมอร์ผสม โดยคาดว่าจะมีพีกของหมู่คาร์บอนิลที่ตำแหน่ง 1720 cm^{-1} เพิ่มขึ้นมาเมื่อเทียบกับพีกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือการตรวจวิเคราะห์เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันของสารวานิลลินในสารละลาย การตรวจวิเคราะห์เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันของสารช่วยผสมและสารวานิลลินในตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม และการตรวจวิเคราะห์เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของสารวานิลลินในพอลิเมอร์ผสมเมื่อเวลาผ่านไป

ก่อนทำการทดสอบตัวอย่างด้วย FTIR จะต้องทำการเทียบมาตรฐานของเครื่องมือโดยการบันทึกสเปกตรัมของแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนเพื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาตรฐาน ว่ามีความคลาดเคลื่อนหรือไม่ ที่เลขคลื่น $4000 - 400\text{ cm}^{-1}$

ในส่วนของการทดสอบตัวอย่างที่เป็นสารละลายวานิลลิน จะใช้การฉีดสารละลายวานิลลินให้เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างเพลท KBr ทำให้ได้สารละลายเป็นฟิล์มที่มีขนาดบาง แล้วนำไปบันทึกสเปกตรัม และในส่วน of ตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม จะแยกการวิเคราะห์ออกเป็น 2 แบบคือวิธีแรกจะเป็นวิธีการหาสารช่วยผสมที่มีในพอลิเมอร์ผสมโดยนำพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการบดย่อยประมาณ 1 กรัมมาละลายด้วยตัวทำละลายไซลีน 20 มิลลิลิตรให้ความร้อนเล็กน้อยเพื่อช่วยในการละลาย เมื่อได้เป็นสารละลายใสแล้วนำสารละลายไปฉีดให้เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างเพลท KBr รอให้แห้งจะได้เป็นฟิล์มขนาดบาง แล้วนำไปบันทึกสเปกตรัม วิธีที่ 2 นำพอลิเมอร์ผสมประมาณ 0.2 กรัมมาผสมกับสาร KBr แบบผงให้เข้ากันก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีขนาดบางด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) เมื่อได้เป็นฟิล์มบางแล้วนำไปบันทึกสเปกตรัม โดยทั้งหมดจะทำการบันทึกสเปกตรัมที่ $4000 - 400\text{ cm}^{-1}$

นอกจากนี้ FTIR ยังใช้ติดตามการสลายตัวหรือการหายไปของสารวานิลลินเมื่อเวลาผ่านไปได้ โดยการนำฟิล์มที่ได้จากการอัดขึ้นรูปในแต่ละสูตรมาตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ในทุกๆ 2 สัปดาห์ เพื่อพิจารณาลักษณะของพีกและหมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงไป (ทั้งรูปร่างและตำแหน่ง)

3.4.2 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA)

Thermogravimetric analysis (TGA) เป็นเทคนิคของการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักความร้อน เพื่อใช้หาเสถียรภาพทางความร้อนและปริมาณของสารวานิลลินในพอลิเมอร์ผสม โดยในการทดสอบจะใช้สารตัวอย่างประมาณ 20 – 25 มิลลิกรัม ซึ่งจะถูกให้ความร้อนด้วยอัตราเร็ว 10 °C ต่อนาที จากอุณหภูมิห้องจนถึง 800 °C

โดยการวิเคราะห์ด้วย TGA นี้ จะใช้เปรียบเทียบกับผลของอุณหภูมิ Onset ที่ได้จากการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนในพอลิเมอร์ผสม

3.4.3 การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope, SEM)

การตรวจวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา (Morphology) จะช่วยยืนยันความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับสารวานิลลิน ทั้งที่มีการเติมและไม่มีการเติมสารช่วยผสม โดยตัวอย่างที่จะนำไปวิเคราะห์ต้องนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลานานอย่างน้อย 60 นาทีก่อนที่จะนำไปทำให้แตกหัก แล้วนำตัวอย่างที่หักแล้วไปเคลือบพื้นผิวด้วยทองคำก่อนการทดสอบ โดยตั้งสภาวะของเครื่อง SEM ในการวิเคราะห์ ใช้พลังงาน 10 kV scan speed = 8 และกำลังขยาย 5,000 เท่า

3.4.4 การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry : GC-MS)

การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี เป็นการวิเคราะห์สารที่สามารถระเหยได้จากของแข็ง จะช่วยยืนยันสารวานิลลินที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสมได้ค่อนข้างแม่นยำ

การเตรียมตัวอย่างนำพอลิเมอร์ผสมที่เป็นของแข็งมาประมาณ 5 กรัม ใส่ลงในขวดที่มีฝาปิดขนาด 20 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลานาน 30 นาที ก่อนที่จะใช้ SPME holder สอดเข้าไปในขวด โดยอย่าให้ส่วนปลายอยู่ใกล้ชิ้นงานตัวอย่างในขวดมากเกินไป เนื่องจากในการวิเคราะห์นี้ต้องการศึกษาสารที่ระเหยออกมาจากชิ้นงานตัวอย่างว่ามีสารประกอบใดบ้าง ถ้า SPME holder สัมผัสกับชิ้นงานจะทำให้เกิดการปนเปื้อนที่ SPME holder ซึ่งจะทำได้ค่าที่วิเคราะห์ออกมาไม่ตรงกับความจริง โดยจะสอด SPME holder ทิ้งไว้เวลาน 30 นาทีเพื่อให้เส้นใยที่อยู่ใน SPME holder สามารถดูดซับความเข้มข้นของสารที่ระเหยได้ของตัวอย่างเอาไว้ เมื่อครบเวลาที่กำหนดให้รีบนำไปฉีดเข้าที่เครื่อง GC-MS โดยทันที

สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS โดยส่วนที่เป็นเครื่อง GC จะใช้ fused-silica capillary column ที่มีความยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 มิลลิเมตร พิล์มหนา 0.25 μm (Agilent Technologies Co., USA.) ซึ่งอุณหภูมิเริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์อยู่ที่ 35 $^{\circ}\text{C}$ และทำการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราเร็ว 5 $^{\circ}\text{C}$ ต่อนาที จากอุณหภูมิ 35 $^{\circ}\text{C}$ จนถึง 230 $^{\circ}\text{C}$ ทำการวิเคราะห์น้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมตัวอย่างด้วยเครื่องมือ MS ภายใต้สภาวะ electron ionisation (EI) 70 eV และทำการบันทึกช่วงน้ำหนักในการตรวจสอบแต่ละรอบอยู่ที่ 33 – 200 m/z (mass / charge ratio)

3.4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

3.4.5.1 การทดสอบค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่ามอดุลัส (Modulus) ตามมาตรฐาน ASTM D882

ตัดชิ้นงานเป็นรูปคัมเบลล์ (Dumb-bell) โดยตัดชิ้นงานทิศทางตามเครื่องจักรและทิศทางตามขวางเครื่องจักร ทิศทางละ 24 ชิ้นงาน วัดความหนาของแต่ละชิ้นงาน จากนั้นทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) โดยใช้สภาวะในการทดสอบ ดังนี้

ความเร็วของแท่นตัดขวาง (Crosshead speed)	100 mm/min
ระยะห่างของชิ้นงาน (Gauge length)	25 mm
น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell)	100 N

นำผลที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณค่าสมบัติเชิงกลต่างๆ ได้จากสมการ ดังนี้

ความแข็งแรงดึง (Tensile strength),	$\sigma = F / A$
มอดุลัส (Modulus),	$E = \text{ความเค้น } (\sigma) / \text{ความเครียด } (\epsilon)$
ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด	$\epsilon = ((L - L_0) / L_0) \times 100$

- เมื่อ
- F คือ แรงดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (หน่วยเป็น นิวตัน : N)
 - A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (หน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร : mm^2)
 - L คือ ระยะระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (หน่วยเป็น มิลลิเมตร : mm)
 - L_0 คือ ระยะระหว่างจุดสองจุดก่อนทำการดึงยึดชิ้นงาน เป็นระยะที่แคบที่สุดของชิ้นงานและมีพื้นที่ขนาดเท่ากัน (Gauge length หน่วยเป็น มิลลิเมตร : mm)

3.4.5.2 การทดสอบการฉีกขาด (ตามมาตรฐาน ASTM D 1004)

ตัวอย่างชิ้นงานตามแบบ ASTM Die C โดยตัดชิ้นงานทิศทางตามเครื่องจักรและทิศทางตามขวางเครื่องจักร ทิศทางละ 24 ชิ้นงาน วัดความหนาของแต่ละชิ้นงาน จากนั้นทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) โดยใช้สภาวะในการทดสอบ ดังนี้

ความเร็วของแท่นตัดขวาง (Crosshead speed)	50 mm/min
น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell)	100 N

3.4.6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

3.4.6.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การถ่ายภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเพื่อเป็นการศึกษา ลักษณะทางกายภาพ โดยสภาวะที่ใช้ในการถ่ายภาพจะกำหนดให้ฟิล์มพอลิเมอร์นั้นอยู่ห่างจากเลนส์กล้องถ่ายรูปประมาณ 1 นิ้ว กำหนดให้มีแสงส่องผ่านมาจากทางด้านหลังของฟิล์มเพื่อเป็นตัวแปรที่จะแสดงถึงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มว่ามีความใส ชุ่น เรียบ มากน้อยเพียงไร โดยพิจารณาจากแสงที่ส่องออกมาจากทางด้านหลังและองค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ด้านหลังฟิล์ม

3.4.6.2 การตรวจวิเคราะห์ด้วยการชั่งน้ำหนัก

การชั่งน้ำหนักจะช่วยติดตามการสลายตัวหรือการหายไปของสารวานิลินในพอลิเมอร์ผสมได้ โดยการชั่งน้ำหนักของสารตัวอย่างให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอน (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) นำแต่ละตัวอย่างไปวางไว้ในภาชนะเปิดที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักทุกๆ 2 สัปดาห์ บันทึกผล นำผลที่ได้มาคำนวณเปอร์เซ็นต์การหายไปของสารได้ด้วย

3.4.6.3 การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (ASTM E 96-95)

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือในการทดสอบคือ Water vapor permeation tester : Lyssy L80-4000 ที่ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย ที่สภาวะการทดสอบ อุณหภูมิ 38 °C และมีความชื้นสัมพัทธ์ 90 % โดยทำการตัดฟิล์มพอลิเมอร์ให้ได้ขนาด 6 x 6 นิ้ว แล้วนำไปเข้าเครื่องมือเพื่อทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อสมบัติเชิงกล ลักษณะทางกายภาพ ลักษณะสัณฐานวิทยา เสถียรภาพทางความร้อน และการดูดกลืนอินฟราเรดของพอลิเมอร์ผสม โดยทำการศึกษาปริมาณของสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ที่ผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแล้วให้สมบัติโดยรวมของพอลิเมอร์ผสมมีค่าดีที่สุด โดยได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ การศึกษาปริมาณของสารช่วยผสม (Fusabond MB 226 D) ที่ 0 5 10 และ 15 % การศึกษาปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Ca-Zn Heat stabilizer) ที่ 0 1 3 5 และ 7 % และสุดท้ายเป็นการศึกษาปริมาณสารละลายวานิลลาที่ใช้เป็นสารให้กลิ่นที่ 0 1 2 3 และ 4 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ อาศัยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวช่วยในการผสมสารต่างๆ เข้าด้วยกันที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที จากนั้นนำพอลิเมอร์ที่ผสมแล้วมาขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่าให้เป็นฟิล์มบางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว หนา 0.04 มิลลิเมตร สุดท้ายนำฟิล์มบางที่ได้ไปทดสอบสมบัติด้านต่างๆ เช่น ลักษณะทางกายภาพที่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า ใช้มือสัมผัส หรือการใช้จุกคดมกลืนได้ การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เพื่อตรวจหาหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่สำคัญของสารเติมแต่งที่เติมเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมและใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันเมื่อสารละลายวานิลลามีการสลายตัวออกไปจากพอลิเมอร์ การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อนเพื่อใช้หาเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม การตรวจวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดเพื่อตรวจสอบสัณฐานวิทยาและความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม การทดสอบสมบัติเชิงกลเป็นการทดสอบสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเมื่อนำไปใช้งานจริง การตรวจวิเคราะห์ด้วยการชั่งน้ำหนักเพื่อตรวจสอบการสลายตัวของสารให้กลิ่นที่ได้เติมเข้าไปในพอลิเมอร์ผสม และการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ เป็นต้น ผลที่ได้จากการทดสอบต่างๆ เหล่านี้ จะเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจเลือกสูตรพอลิเมอร์ผสมที่ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด

ผลที่ได้จากการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ

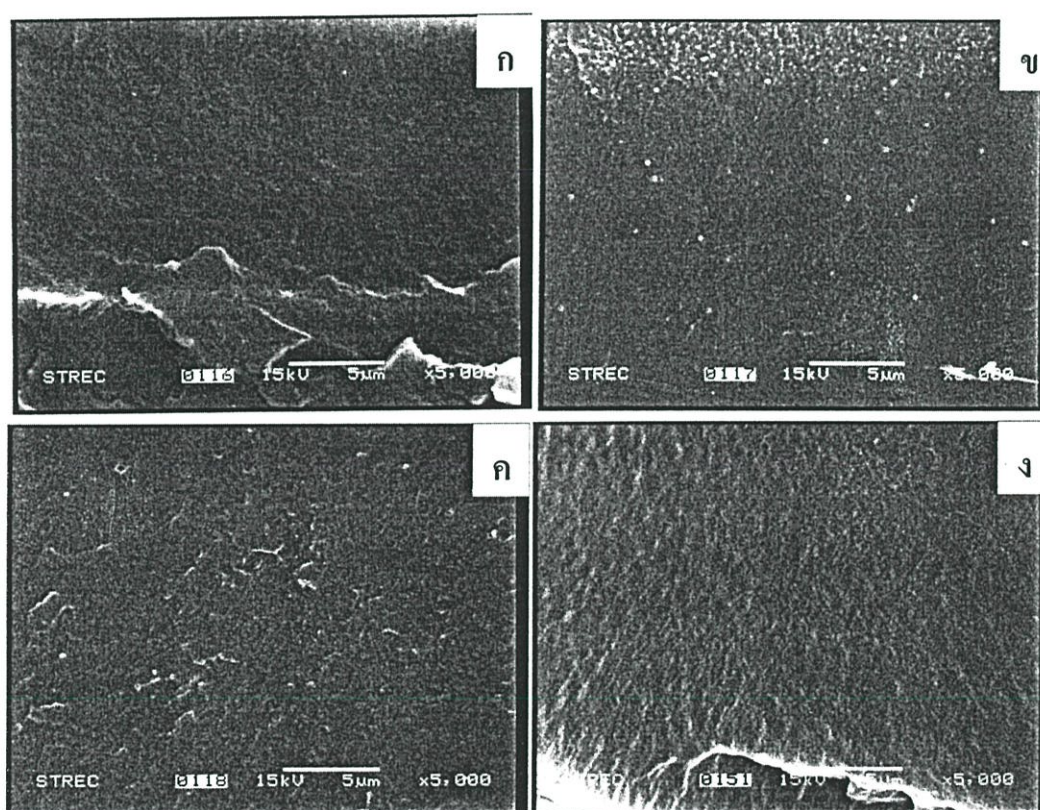
1. ผลที่ได้จากการศึกษาสารตัวเติมในเบื้องต้น
2. ผลที่ได้จากการศึกษาสารช่วยผสมในปริมาณต่างๆ กัน
3. ผลที่ได้จากการศึกษาสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนในปริมาณต่างๆ กัน
4. ผลที่ได้จากการศึกษาสารละลายวานิลลาในปริมาณต่างๆ กัน

4.1 ผลที่ได้จากการศึกษาสารตัวเติมในเบื้องต้น

เป็นการศึกษาผลของสารตัวเติมแต่ละชนิดที่มีผลต่อฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ได้ผลดังนี้

4.1.1 การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope, SEM)

เมื่อนำฟิล์มพลาสติกที่ได้หลังจากการผสมสูตรและขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าเป็นถุงพลาสติก มาทำการตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาเพื่อดูความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีสารเติมแต่งต่างชนิดกัน

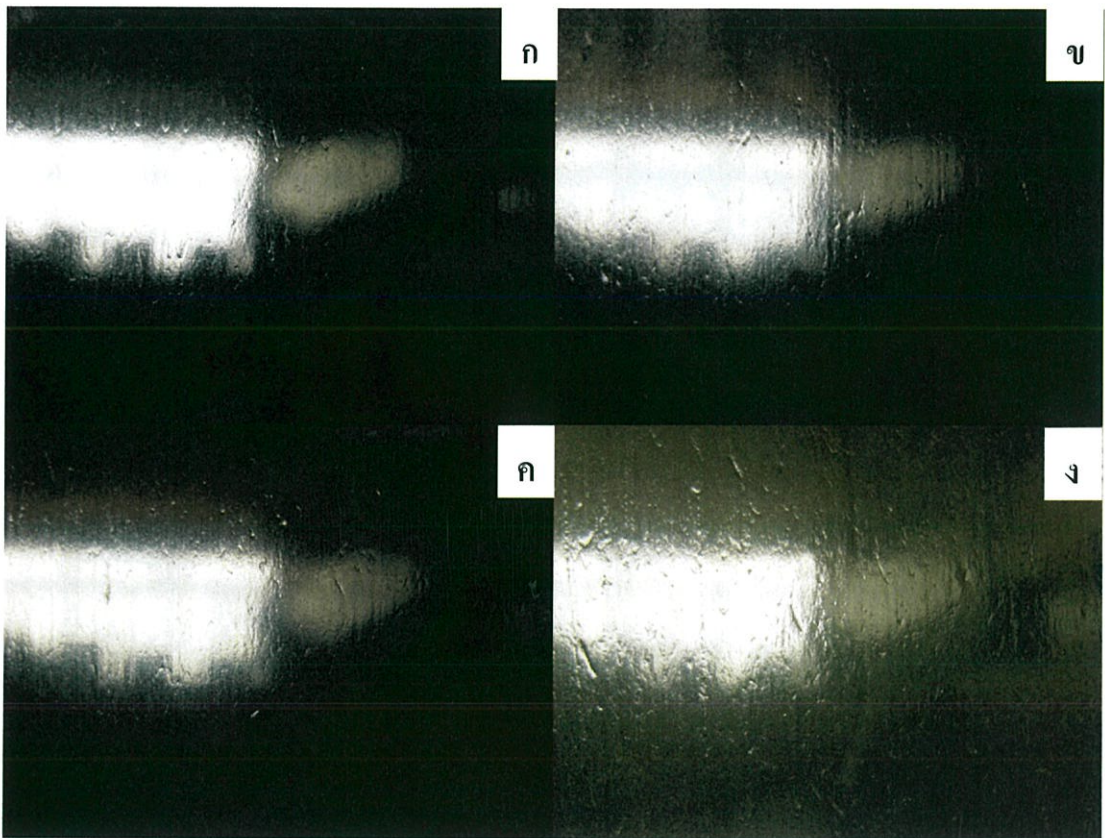
- ก) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
- ข) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมกับสารช่วยผสม 10 %
- ค) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน 1 %
- ง) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมกับสารละลายวานิลลา 2 %

จากรูปที่ 4.1 ก. เป็นสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพียงอย่างเดียว พบว่ามีพื้นผิวค่อนข้างเรียบแต่มีส่วนที่เกิดจากการหักชิ้นงานเหลืออยู่ รูปที่ 4.1 ข. เป็นสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมกับสารช่วยผสม 10 % พบการกระจายตัวของสารช่วยผสมอย่างสม่ำเสมอที่พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม โดยสังเกตจากจุดทรงกลมสีขาวๆ ที่กระจายตัวกันอยู่บนพื้นผิวของพอลิเมอร์ รูปที่ 4.1 ค. เป็นสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน 1 % พบว่ามีพื้นผิวค่อนข้างเรียบ แต่อาจมีริ้วรอยเกิดเนื่องจากการหักชิ้นงานที่ยังไม่แข็งตัวเต็มที่ทำให้เกิดรอยของชิ้นงานที่ยึดเกิดขึ้น รูปที่ 4.1 ง. เป็นสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมกับสารละลายวานิลลา 2 % พบว่าพื้นผิวมีความขรุขระเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่พบการแบ่งวัฏภาคอย่างชัดเจน

4.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มที่ได้จากการเป่าขึ้นรูปนี้ จะอาศัยวิธีที่ไม่ยุ่งยากในการตรวจสอบ โดยอาศัยการสังเกตด้วยตาเปล่า การใช้มือสัมผัสกับพื้นผิวฟิล์ม หรือการใช้จุกดูดลม ก็สามารถตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นได้ เช่น ความใส สี ความมันเงา ความขรุขระของพื้นผิว และกลิ่นของสารละลายวานิลลาที่เติมเข้าไป เป็นต้น ซึ่งลักษณะทางกายภาพจะเป็นส่วนหนึ่งในการตัดสินใจเลือกใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

ในการทดลองนี้จะทำการถ่ายภาพฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ เมื่อเวลาผ่านไป 1 เดือน โดยทำการติดตั้งชิ้นงานให้มีระยะห่าง 1 นิ้วจากเลนส์กล้องถ่ายรูป และกำหนดสถานะให้มีแสงส่องผ่านมาจากทางด้านหลังของฟิล์มเพื่อที่จะได้เห็นลักษณะต่างๆ ของฟิล์มพอลิเมอร์ได้อย่างชัดเจน ทั้งความใส ความขรุขระ และสีของฟิล์มพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังใช้การดูดลมกลิ่นของสารละลายวานิลลาที่ผสมอยู่ในพอลิเมอร์ผสมด้วยว่ามีความเข้มข้นของกลิ่นต่างกันมากน้อยเพียงไร โดยฟิล์มที่ได้จากการเป่าขึ้นรูปมีลักษณะทางกายภาพ ดังนี้



รูปที่ 4.2 ลักษณะของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีสารเติมแต่งต่างชนิดกัน

- ก) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
- ข) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมกับสารช่วยผสม 10 %
- ค) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน 1 %
- ง) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมกับสารละลายวานิลลา 2 %

จากรูปที่ 4.2 เป็นลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปจากกระบวนการเป่า โดยทำการถ่ายภาพฟิล์มเมื่อเวลาผ่านไป 4 สัปดาห์หลังจากการเป่าขึ้นรูป พบว่าฟิล์มทั้ง 4 ชนิดมีความใส ผิวเรียบมัน แต่เมื่อพิจารณาให้ดีแล้วพบว่าความใสของพื้นผิวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ในรูป 4.2 ก. จะมีมากกว่าสูตรที่เติมสารเติมแต่ง สังเกตจากบริเวณกรอบแสงสีขาวภายในรูปพบว่า รูป 4.2 ก. จะเห็นกรอบรอบแสงสีขาวนั้นค่อนข้างชัดเจน เมื่อมีการเติมสารช่วยผสมและสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนเข้าไปกรอบแสงที่ส่องมาจากด้านหลังเริ่มลดความชัดเจนลงไปเล็กน้อยดังรูป 4.2 ข. และ 4.2 ค. ตามลำดับ เนื่องจากฟิล์มพอลิเมอร์ผสมนี้เกิดความขุ่นขึ้นเล็กน้อย และรูป 4.2 ง. เป็นฟิล์ม พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีการเติมสารละลายวานิลลาลงไป พบว่าสีของฟิล์มกลายเป็นสีเหลืองอ่อนใส ยังสามารถมองเห็นแสงที่ส่องมาจากด้านหลังได้แต่ไม่สามารถระบุองค์ประกอบของภาพที่อยู่ด้านหลังฟิล์มนั้นได้ นอกจากสีเหลืองที่พบในฟิล์มแล้ว โดยอาศัยการสุดคมยังตรวจพบกลิ่นของสารละลายวานิลลาจางๆ ได้อีกด้วย

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์กับสัณฐานวิทยาที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM พบว่าลักษณะทางกายภาพที่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ สูตรที่ผสมกับสารช่วยผสม 10 % สูตรที่ผสมกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน 1 % และสูตรที่ผสมกับสารละลายวานิลลา 2 % มีพื้นผิวที่เรียบคล้ายกันทั้ง 4 สูตร เมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 5,000 เท่า พบว่าให้ผลเช่นเดียวกันคือมีพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบใกล้เคียงกัน

4.2 ผลที่ได้จากการศึกษาสารช่วยผสมในปริมาณต่างๆ กัน

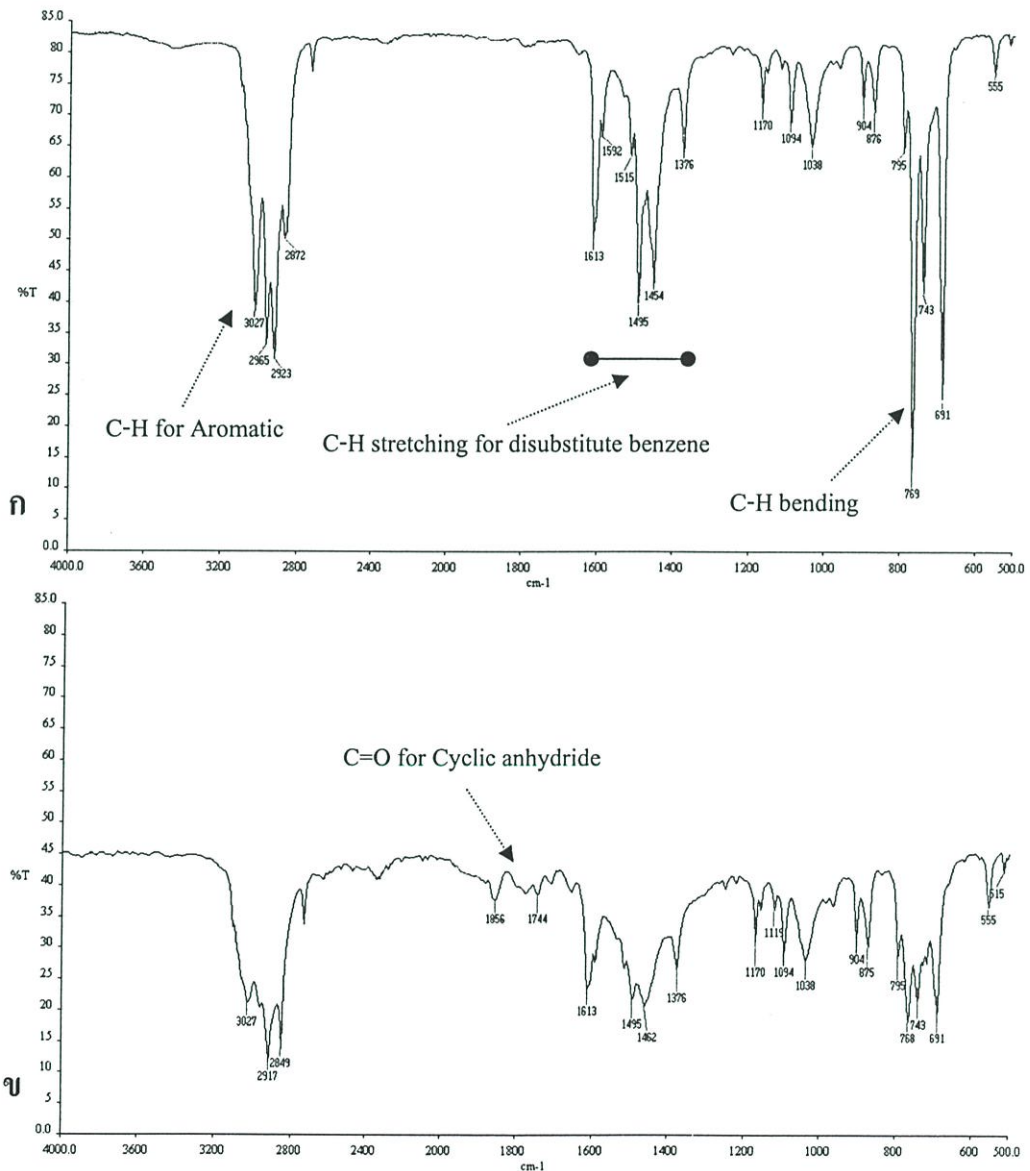
4.2.1 การตรวจวิเคราะห์การดูดกลืนอินฟราเรด (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)

การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดจะอาศัยเครื่องมือ FTIR เพื่อตรวจหาหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่สำคัญของสารเติมแต่งที่เติมเข้าไปในพอลิเมอร์ผสม เช่น หมู่ฟังก์ชัน O-H ของสารละลายวานิลลา หมู่ฟังก์ชัน C=O ของสารช่วยผสม หมู่ฟังก์ชัน C-H ของวงอะโรมาติก เป็นต้น นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ยังสามารถใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันเมื่อเวลาผ่านไปได้อีกด้วย ซึ่งผลที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์ มีดังนี้

ตารางที่ 4.1 พันธะและตำแหน่งของพิกที่สำคัญในงานวิจัย [42]

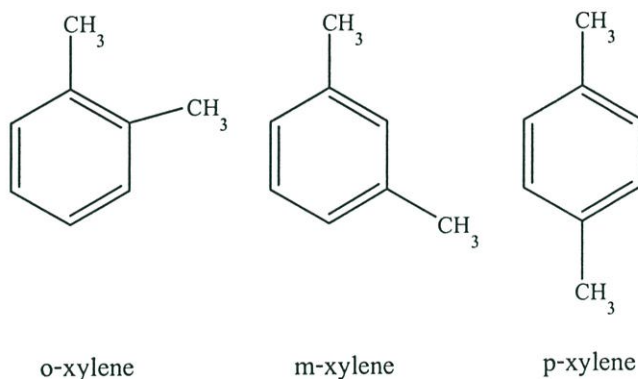
พันธะ	ตำแหน่งเลขคลื่นที่พบพิก (cm ⁻¹)
O-H stretching	3600 - 3200
C-H for Aromatic	3100 - 3010
C-H stretching	3000 - 2800
C=O for Cyclic anhydride	1850 และ 1750
C=O for Aromatic aldehyde	1710 - 1690
C-H stretching for Aromatic	1600 - 1450
C-H bending for CH ₂	1463
C-H bending for CH ₃	1377
C-O stretching for Aromatic ether	1275 - 1200 และ 1080 - 1040
C-H rocking for CH ₂	729

การหาหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของสารช่วยผสมในงานวิจัยนี้ไม่สามารถวิเคราะห์ได้จากวิธีการบดเม็ดพอลิเมอร์ผสมรวมกับสาร KBr แบบผงแล้วนำไปอัดขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีขนาดบางได้ เนื่องจากปริมาณสารช่วยผสมที่เติมเข้าไปมีอัตราส่วนน้อยกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมากทำให้ไม่สามารถตรวจสอบฟังก์ชันที่สำคัญของสารช่วยผสมได้ ดังนั้นจึงต้องอาศัยสมบัติการละลายของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารละลายไซลีนและให้ความร้อนเล็กน้อยเพื่อละลายพอลิเมอร์ผสม เมื่อได้เป็นสารละลายใสแล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของสารช่วยผสมที่พบในสารละลายนั้น ได้ผลดังนี้

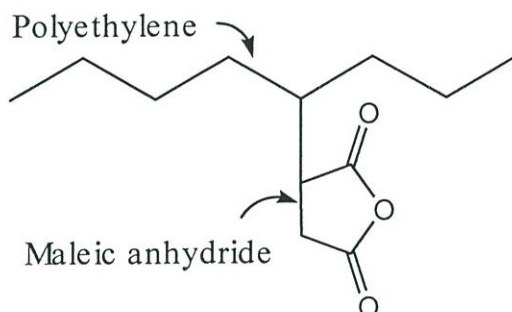


รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของไซลีน (ก.) และพอลิเมอร์ผสมที่ละลายด้วยไซลีน (ข.)

จากรูปที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบสเปกตรัมของสารละลายไซลีนกับสารละลายไซลีนที่ละลายพอลิเมอร์ผสม พบว่าสเปกตรัมของไซลีน (เส้น ก.) มีพีกของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ ที่เลขคลื่น $3100 - 3010 \text{ cm}^{-1}$ ของ C-H for Aromatic ที่เลขคลื่น $1620 - 1400 \text{ cm}^{-1}$ ของ C-H stretching for disubstitute benzene ที่เลขคลื่น $790 - 690 \text{ cm}^{-1}$ ของ C-H bending และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมของสารละลายไซลีนที่ละลายพอลิเมอร์ผสม (เส้น ข.) พบความแตกต่างของทั้ง 2 สเปกตรัม ที่เลขคลื่น 1850 และ 1740 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งเลขคลื่นที่สำคัญของหมู่ฟังก์ชัน C=O ของ Cyclic anhydride เป็นพีกที่เพิ่มขึ้นมาในสเปกตรัมรูปที่ 4.3 ข. จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าภายในโครงสร้างของสารไซลีนในจะมีแต่พันธะ C-H เท่านั้นดังนั้นหมู่ฟังก์ชัน C=O ที่เพิ่มขึ้นมาในรูป 4.3 ข. จึงเป็นหมู่ฟังก์ชันของสารช่วยผสมดังโครงสร้างในรูปที่ 4.5 จากเหตุผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าภายในพอลิเมอร์ผสมนั้นมีสารช่วยผสมอยู่จริง

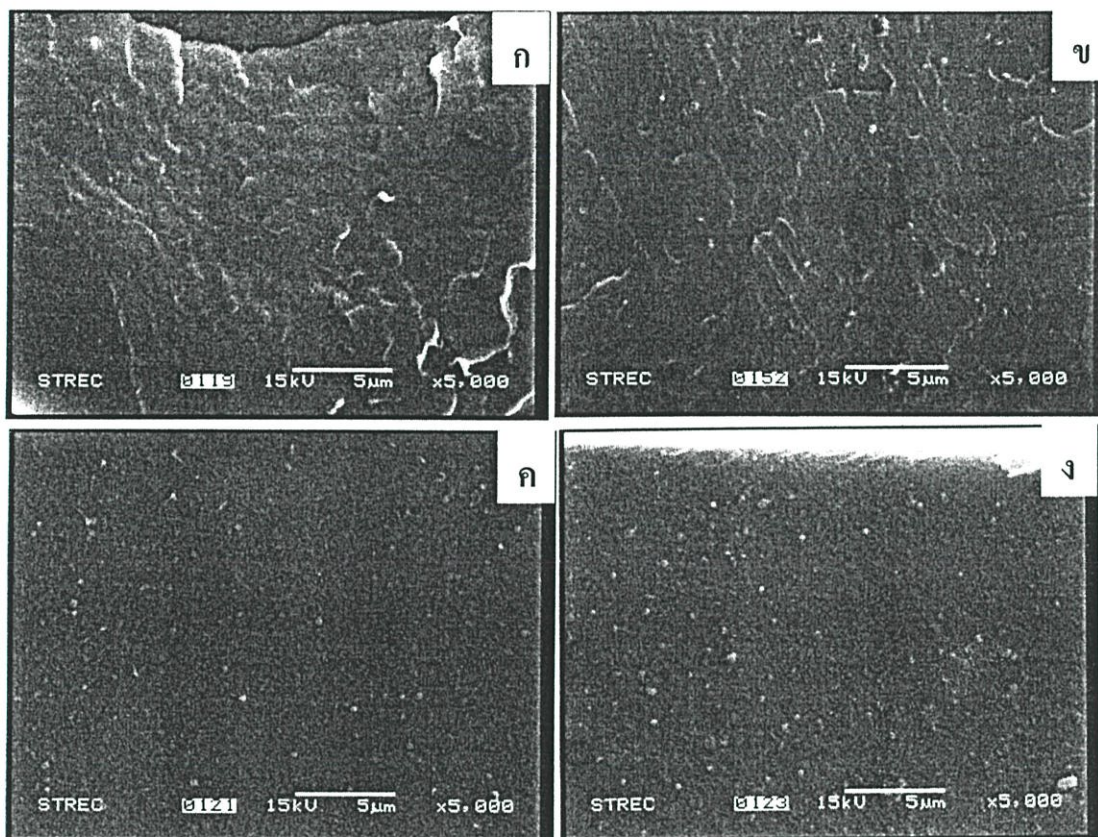


รูปที่ 4.4 โครงสร้างของสารไซลีน [43]



รูปที่ 4.5 โครงสร้างของสารช่วยผสม (MAPE) [11]

4.2.2 การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope, SEM)

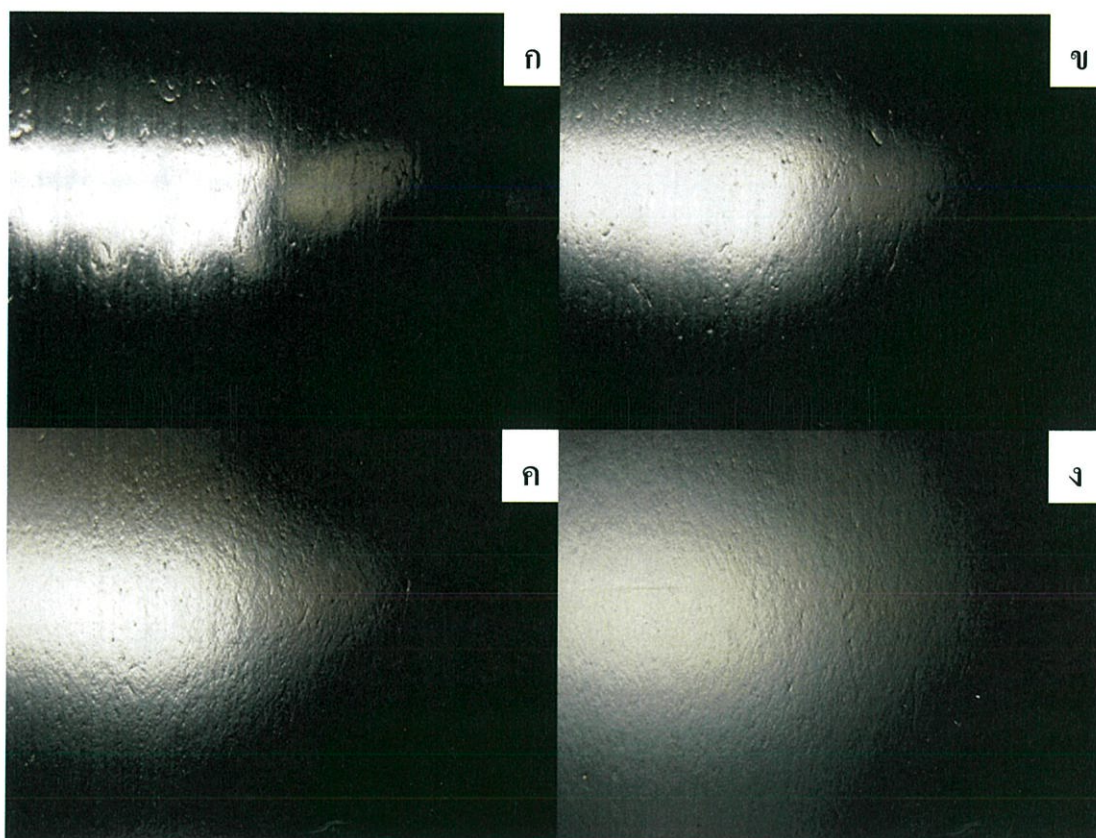


รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีสารช่วยผสมปริมาณต่างๆ กัน

- ก) LDPE : Ca-Zn 1 % : Vanilla 2 % : MAPE 0 %
- ข) LDPE : Ca-Zn 1 % : Vanilla 2 % : MAPE 5 %
- ค) LDPE : Ca-Zn 1 % : Vanilla 2 % : MAPE 10 %
- ง) LDPE : Ca-Zn 1 % : Vanilla 2 % : MAPE 15 %

จากรูปที่ 4.6 ก. เป็นสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม พบว่าที่พื้นผิวของพอลิเมอร์มีลักษณะค่อนข้างเรียบ ส่วนในกรณีรูปที่ 4.6 ข. และ 4.6 ค. เป็นสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารช่วยผสม 5 % และ 10 % ตามลำดับ พบว่ามีการกระจายตัวของสารช่วยผสมที่พื้นผิวค่อนข้างสม่ำเสมอสังเกตจากจุดทรงกลมสีขาวในรูปที่ 4.6 ค. ที่มีการกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมเป็น 15 % พบว่าการกระจายตัวของสารช่วยผสมไม่ค่อยสม่ำเสมอดังรูปที่ 4.6 ง. เริ่มมีการรวมตัวหนาแน่นอยู่ตรงบริเวณใดบริเวณหนึ่งบนพื้นผิวเนื่องจากปริมาณสารช่วยผสมที่เพิ่มมากขึ้นทำให้การกระจายตัวของสารช่วยผสมไม่สม่ำเสมอเท่ากับสูตรที่เติมสารช่วยผสม 10 %

4.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ



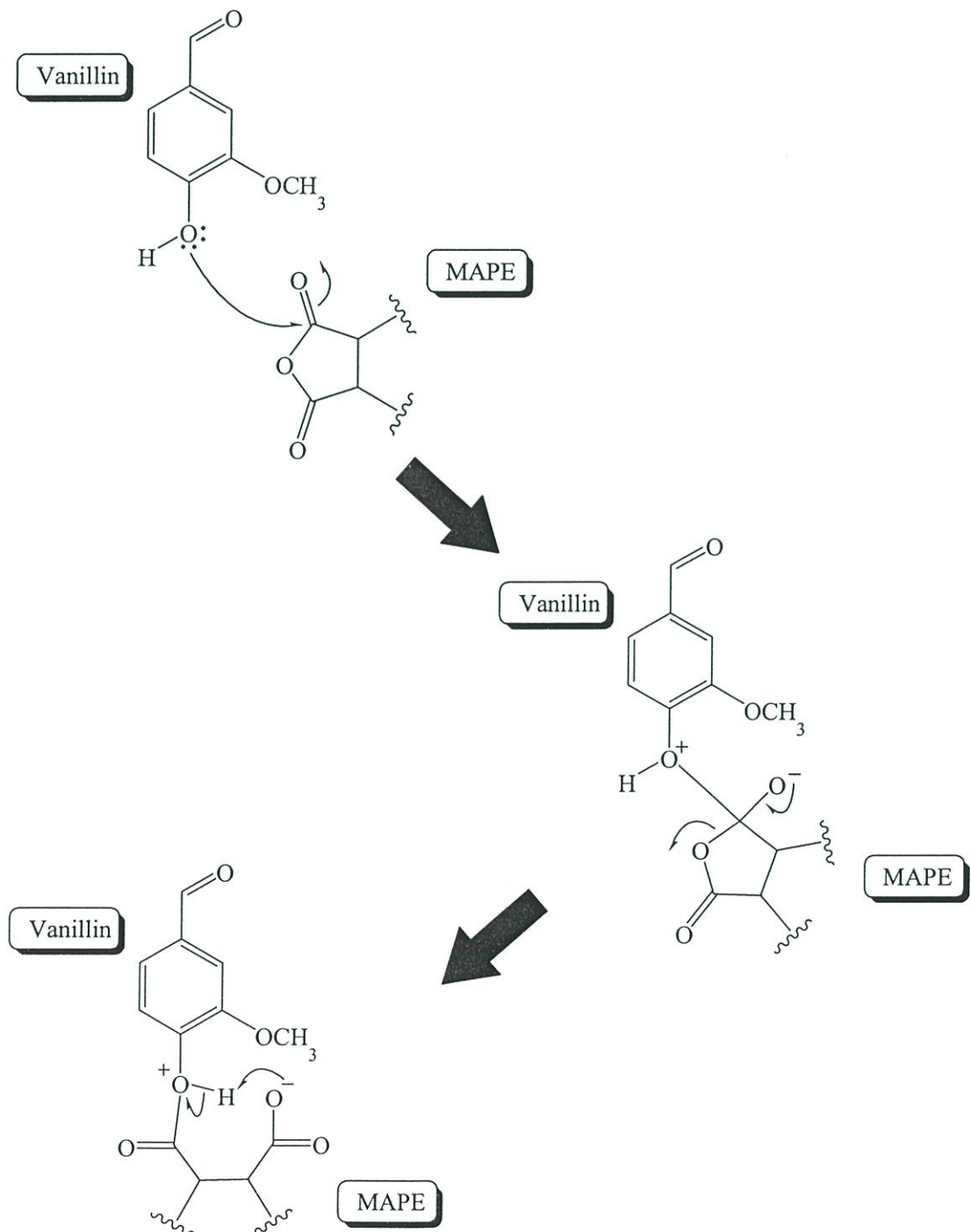
รูปที่ 4.7 ลักษณะของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีสารช่วยผสมในปริมาณต่างๆ กัน

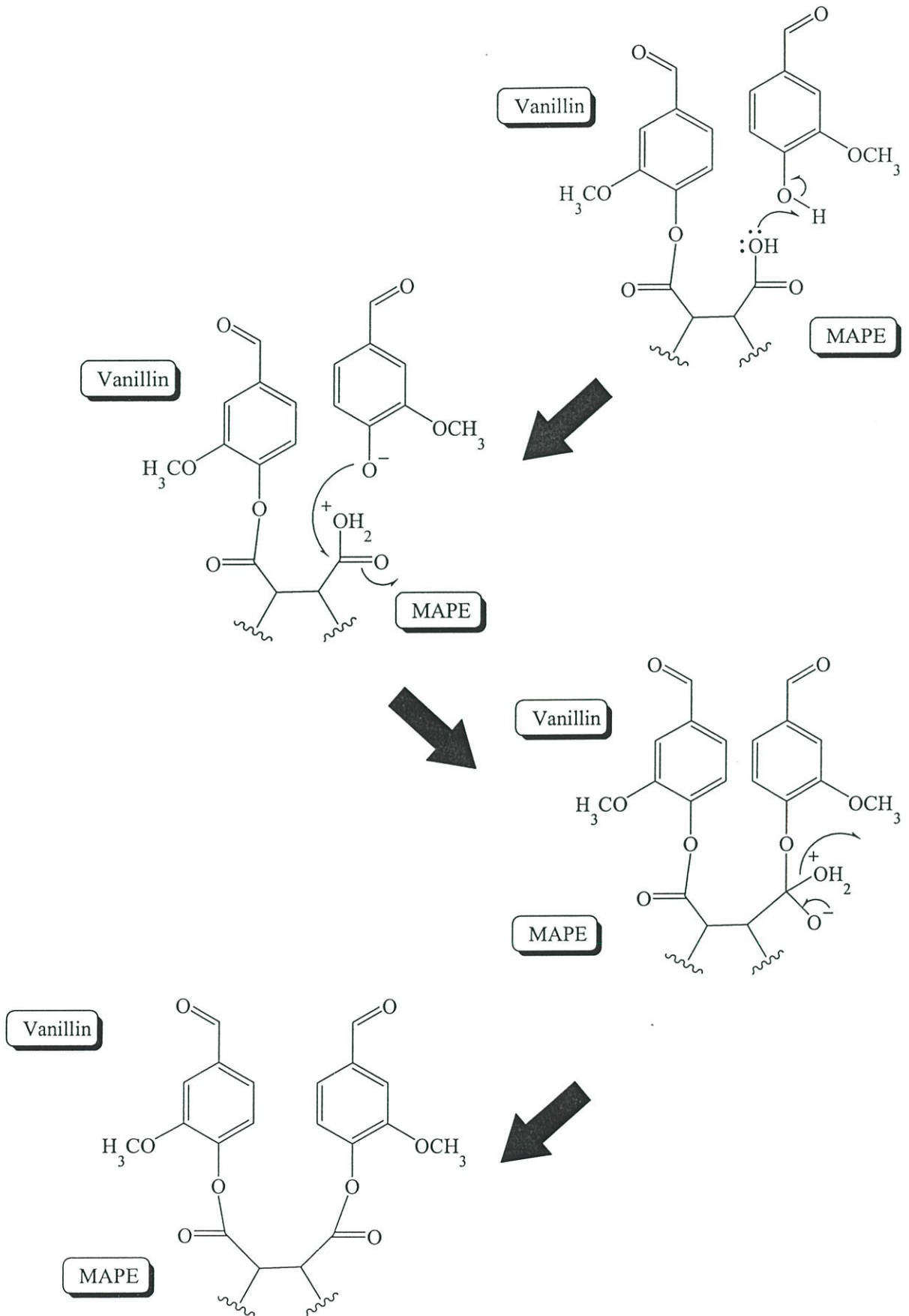
- ก) LDPE : Ca-Zn 1 % : Vanilla 2 % : MAPE 0 %
- ข) LDPE : Ca-Zn 1 % : Vanilla 2 % : MAPE 5 %
- ค) LDPE : Ca-Zn 1 % : Vanilla 2 % : MAPE 10 %
- ง) LDPE : Ca-Zn 1 % : Vanilla 2 % : MAPE 15 %

จากรูปที่ 4.7 เป็นการพิจารณาปริมาณสารช่วยผสมที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม โดยทำการถ่ายภาพฟิล์มเมื่อเวลาผ่านไป 4 สัปดาห์หลังจากการเป่าขึ้นรูป มีจุดที่น่าสังเกตคือ องค์ประกอบของแสงที่ส่องมาจากทางด้านหลังของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่ารูปที่ 4.7 ก. เป็นฟิล์มของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม รูปนี้ยังพอที่จะมองเห็นองค์ประกอบทางด้านหลังของฟิล์มพอลิเมอร์อยู่บ้างเล็กน้อย แม้จะไม่ชัดเจนแต่สามารถมองเห็นผ่านได้บ้างแตกต่างจากสูตรที่มีการเติมสารช่วยผสม 5 % 10 % และ 15 % ดังรูปที่ 4.7 ข. 4.7 ค. และ 4.7 ง. ตามลำดับ พบว่าการมองเห็นแสงที่ผ่านมาจากทางด้านหลังของฟิล์มนั้นเริ่มทำได้ยาก

ขึ้นตามลำดับ เมื่อพิจารณาการมองเห็นทะลุผ่านฟิล์มในรูปที่ 4.7 ง. นั้นพบว่าไม่มีทางเป็นไปได้เลยที่จะมองเห็นแสงที่ทะลุผ่านมาจากด้านหลัง จะเห็นเป็นเพียงแสงมัวๆ

เนื่องจากปริมาณสารช่วยผสมที่มีอยู่ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมนั้นมีมากเกินไปจนทำให้สารช่วยผสมนั้นรวมตัวกันแน่นส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีลักษณะขุ่นจนทำให้แสงไม่สามารถทะลุผ่านได้ นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มจะมีสีเหลืองอ่อนและมีกลิ่นของวานิลลารวมอยู่ด้วยเมื่อทำการสุกคัมเนื่องจากสารช่วยผสมจะเข้าไปสร้างพันธะกับสารละลายวานิลลา ดังรูปที่ 4.8 [44] ทำให้สามารถตรวจพบสมบัติของสารละลายวานิลลาในพอลิเมอร์ผสมนี้ได้





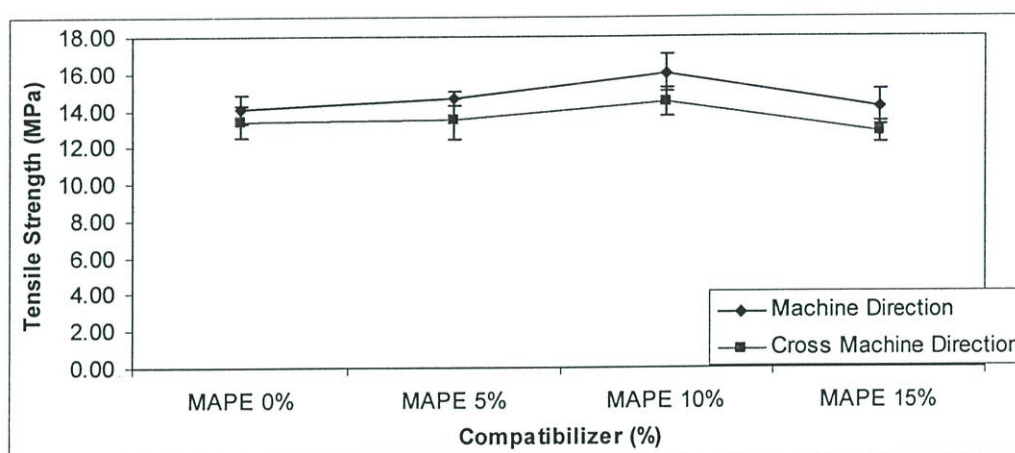
รูปที่ 4.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารช่วยผสมกับสารวานิลลิน [44]

4.2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

เป็นการทดสอบสมบัติของฟิล์มที่จะทนทานต่อแรงดึงยึดออกจากกัน ก่อนที่จะเกิดการฉีกขาด แตกหัก หรือเสียสภาพ ในงานวิจัยนี้ใช้ฟิล์มที่มีความหนา 0.04 มิลลิเมตร ได้ผลดังนี้

4.2.4.1 การทดสอบค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

จะทำการตัดชิ้นงานให้มีรูปร่างคล้ายดัมเบลล์ เพื่อให้ชิ้นงานตัวอย่างเกิดการขาดที่บริเวณตรงกลางของชิ้นงาน โดยมีความยาวแกน 25 มิลลิเมตร การตัดชิ้นงานในรูปแบบดัมเบลล์จะใช้ทดสอบตัวอย่างที่มีการดึงยึดได้สูง ในแต่ละสูตรตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะทำการตรวจวัดจากชิ้นงานจำนวน 24 ชิ้น ทั้งทิศทางตามเครื่องจักรและทิศทางขวางเครื่องจักรนำไปทดสอบแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

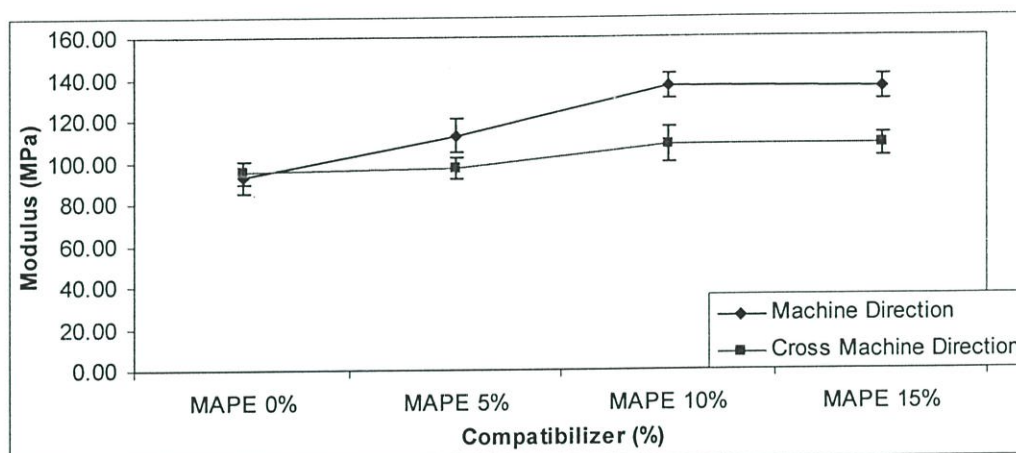


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง กับ ปริมาณสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสม

จากรูปที่ 4.9 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณของสารช่วยผสมแล้ว ค่าความแข็งแรงดึงจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น สูตรของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารช่วยผสม 10 % จะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุดและเมื่อทำการเติมสารช่วยผสมเพิ่มเป็น 15 % พบว่าค่าความแข็งแรงดึงนั้นกลับลดลง เนื่องจากสารช่วยผสมที่ใส่ลงไปมีปริมาณมากเกินไปทำให้สารช่วยผสมเกิดการรวมตัวกันอย่างหนาแน่นในบริเวณหนึ่งๆ ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาที่พบว่าสูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารช่วยผสม 15 % ในรูปที่ 4.6 ง. จะมีการกระจายตัวของสารช่วยผสมที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้ชิ้นงานที่ตัดเป็นรูปดัมเบลล์เมื่อทดสอบการดึงยึดแล้วไม่ขาดตรงตำแหน่งกึ่งกลางเสมอไป ดังนั้นการเติมสารช่วยผสมในปริมาณมากเกินไปจะทำให้เกิดการแบ่งวัฏภาคภายในพอลิเมอร์ผสมเนื่องจากการสร้างพันธะกันเองระหว่างสารช่วยผสม [45] และส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มลดลงตามไปด้วย

4.2.4.2 การทดสอบค่ามอดุลัส (Modulus)

ค่ามอดุลัสแรงดึงจะเป็นค่าที่บอกลถึงความแข็งเปราะ (stiffness) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม สามารถหาได้จากความชันของกราฟความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve) โดยตัดชิ้นงานทีศทางตามเครื่องจักรและทีศทางตามขวางเครื่องจักร ทีศทางละ 24 ชิ้น นำไปทดสอบแล้วนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

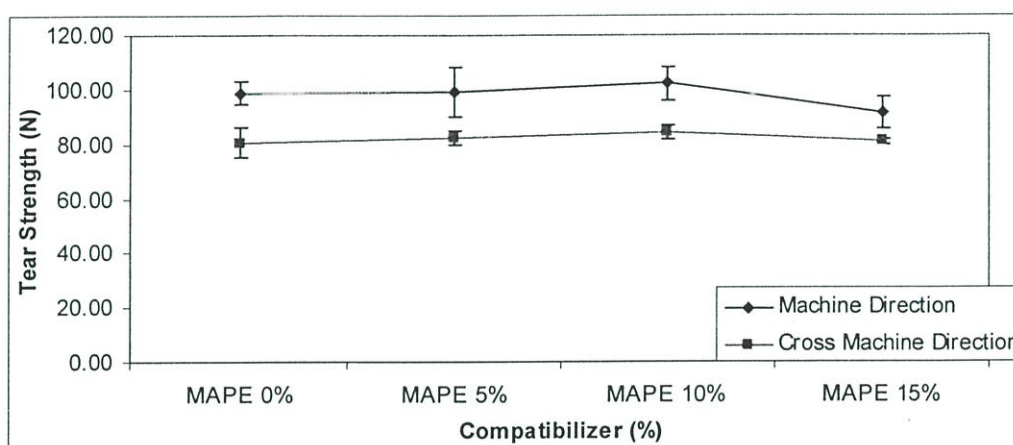


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัส กับ ปริมาณสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสม

จากรูปที่ 4.10 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณของสารช่วยผสมให้มีค่ามากขึ้นมีผลทำให้ค่ามอดุลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน โดยค่ามอดุลัสที่เพิ่มขึ้นบ่งบอกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีความเหนียวเพิ่มมากขึ้นเมื่อเติมสารช่วยผสมเข้าไปในงานวิจัยนี้เมื่อเติมสารช่วยผสม 10 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำจะทำให้ได้ค่ามอดุลัสสูงสุด อาศัยการพิจารณาจากสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.6 ค. พบการกระจายตัวของสารช่วยผสมอย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม จากผลของสารช่วยผสมที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในพอลิเมอร์นี้ทำให้อรอยต่อที่เกิดจากแต่ละวัฏภาคในพอลิเมอร์ผสมลดลง ส่งผลให้พอลิเมอร์มีความเหนียวเพิ่มมากขึ้นซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงในการดึงที่ได้จากรูปที่ 4.9

4.2.4.3 การทดสอบการฉีกขาด (Tear test)

เป็นการทดสอบค่าความต้านทานในการฉีกขาด จะทำให้ทราบถึงแรงที่ทำให้ชิ้นงานเริ่มฉีกขาด ซึ่งจะเป็นค่าความเครียดสูงสุด (maximum stress) ของชิ้นงาน โดยตัดชิ้นงานทิศทางตามเครื่องจักรและทิศทางตามขวางเครื่องจักร ทิศทางละ 24 ชิ้น นำไปทดสอบแล้วนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

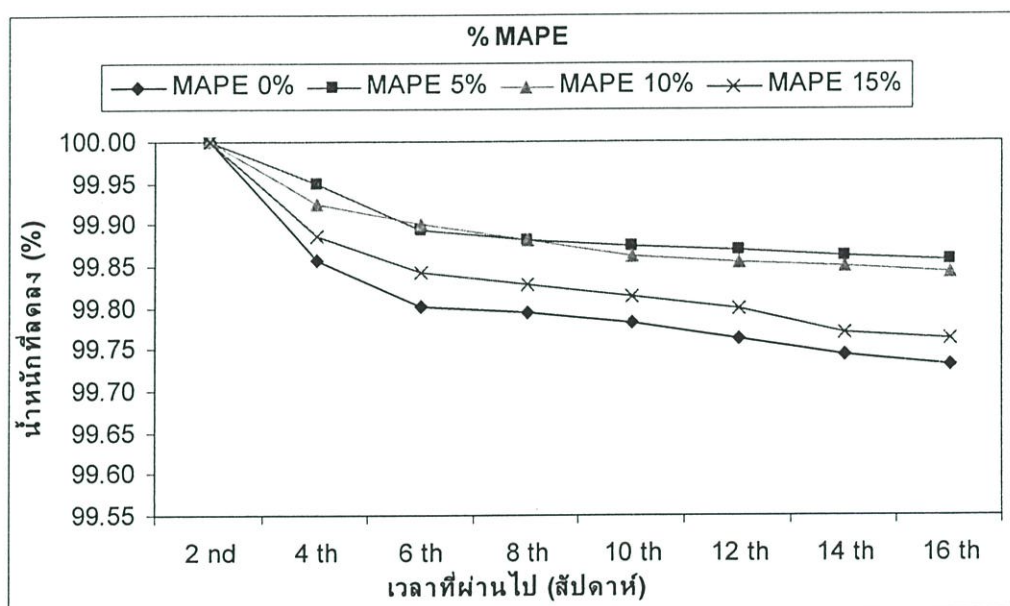


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานฉีกขาดกับปริมาณสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสม

จากรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อปริมาณสารช่วยผสมมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะให้ค่าความต้านทานในการฉีกขาดเพิ่มขึ้นเมื่อมีสารช่วยผสม 10 % เนื่องจากสารช่วยผสมจะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความแข็งแรงมากขึ้นที่ปริมาณสารช่วยผสม 10 % มีการกระจายตัวรับแรงที่เข้ามากระทำได้เท่าๆ กันดังหลักฐานวิทยาในรูปที่ 4.6 ค. ทำให้ค่าความต้านทานในการฉีกขาดมีค่าสูงที่สุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมเป็น 15 % กลับมีค่าความต้านทานในการฉีกขาดลดลง พิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความแข็งคล้ายกับสูตร 10 % เมื่อพิจารณาจากค่ามอดูลัสในรูปที่ 4.10 แต่เนื่องจากที่ปริมาณสารช่วยผสม 15 % เป็นปริมาณสารช่วยผสมที่มีมากเกินไปทำให้ฟิล์มมีลักษณะขุ่นดังรูปที่ 4.7 ง. เกิดการแยกวัฏภาคขึ้นในพอลิเมอร์ผสมเนื่องจากปริมาณสารช่วยผสมที่มากเกินไปจะเกิดสร้างพันธะกันเองระหว่างสารช่วยผสม โดยค่าความต้านทานในการฉีกขาดที่ลดลงจะให้ผลสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงที่ลดลงด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.9

4.2.5 การตรวจวิเคราะห์ด้วยการชั่งน้ำหนัก

การตรวจวิเคราะห์ด้วยการชั่งน้ำหนัก อาศัยการชั่งจากเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งในช่วงเวลาต่างๆ กัน ซึ่งจะชั่งทุกๆ 2 สัปดาห์เป็นเวลานาน 4 เดือน จะสามารถช่วยติดตามเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมได้ โดยพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง สันนิษฐานได้ว่าเกิดจากการสลายตัวของสารละลายวานิลลาที่ได้เติมเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ดังรูปที่ 4.27 ที่บ่งบอกถึงการสลายตัวของสารละลายวานิลลาที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสม จากการชั่งน้ำหนักได้ผลดังนี้

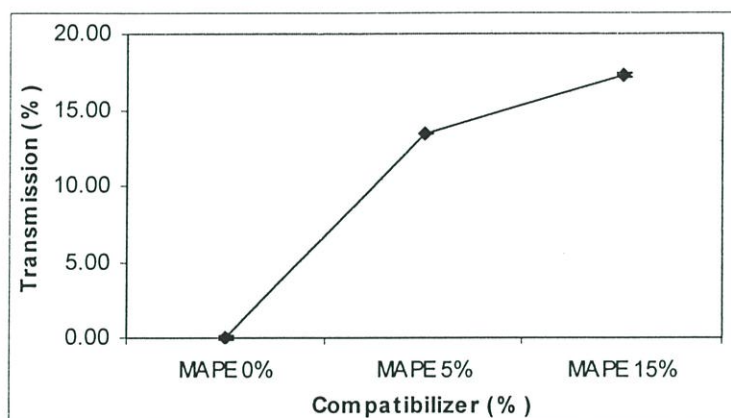


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนัก กับ เวลา เปรียบเทียบกันระหว่างพอลิเมอร์ที่มีสารช่วยผสมในปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมที่มีสารช่วยผสมในปริมาณที่ต่างกันเมื่อเวลาผ่านไป พบว่าสูตรที่ไม่เติมสารช่วยผสมจะมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักมากที่สุด สูตรที่เติมสารช่วยผสม 5 % และ 10 % มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมเป็น 15 % พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงใกล้เคียงกับสูตรที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสม เนื่องจากสารช่วยผสมในปริมาณ 15 % นั้นมีปริมาณมากเกินไปทำให้เกิดการแยกวัฏภาคออกจากกันเนื่องจากเกิดการสร้างพันธะกันเอง ดังนั้นเมื่อสารละลายวานิลลาซึ่งเป็นส่วนที่มีขี้ผึ้งเติมเข้าไปจึงไม่ถูกสร้างพันธะกับสารช่วยผสม ทำให้สารละลายวานิลลานั้นเกิดการสูญหายออกจากพอลิเมอร์ผสมได้ง่าย ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมลดลงมากตามไปด้วย

4.2.6 การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ

เป็นนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารช่วยผสมในปริมาณต่างๆ ที่ได้จากการะบวนการเป่าขึ้นรูปมาทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ เพื่อสังเกตแนวโน้มของการซึมผ่านของไอน้ำ ได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของไอน้ำ กับ ปริมาณสารช่วยผสมที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.13 เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของไอน้ำกับปริมาณสารช่วยผสมที่แตกต่างกันในพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อมีปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งได้ผลที่สอดคล้องกับสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมดังรูปที่ 4.6 เมื่อมีสารช่วยผสมเพิ่มขึ้นจะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีโอกาสเกิดการแยกวัฏภาคเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณสารช่วยผสม 15 % จะมีการแยกวัฏภาคอย่างชัดเจนทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำสูงที่สุด

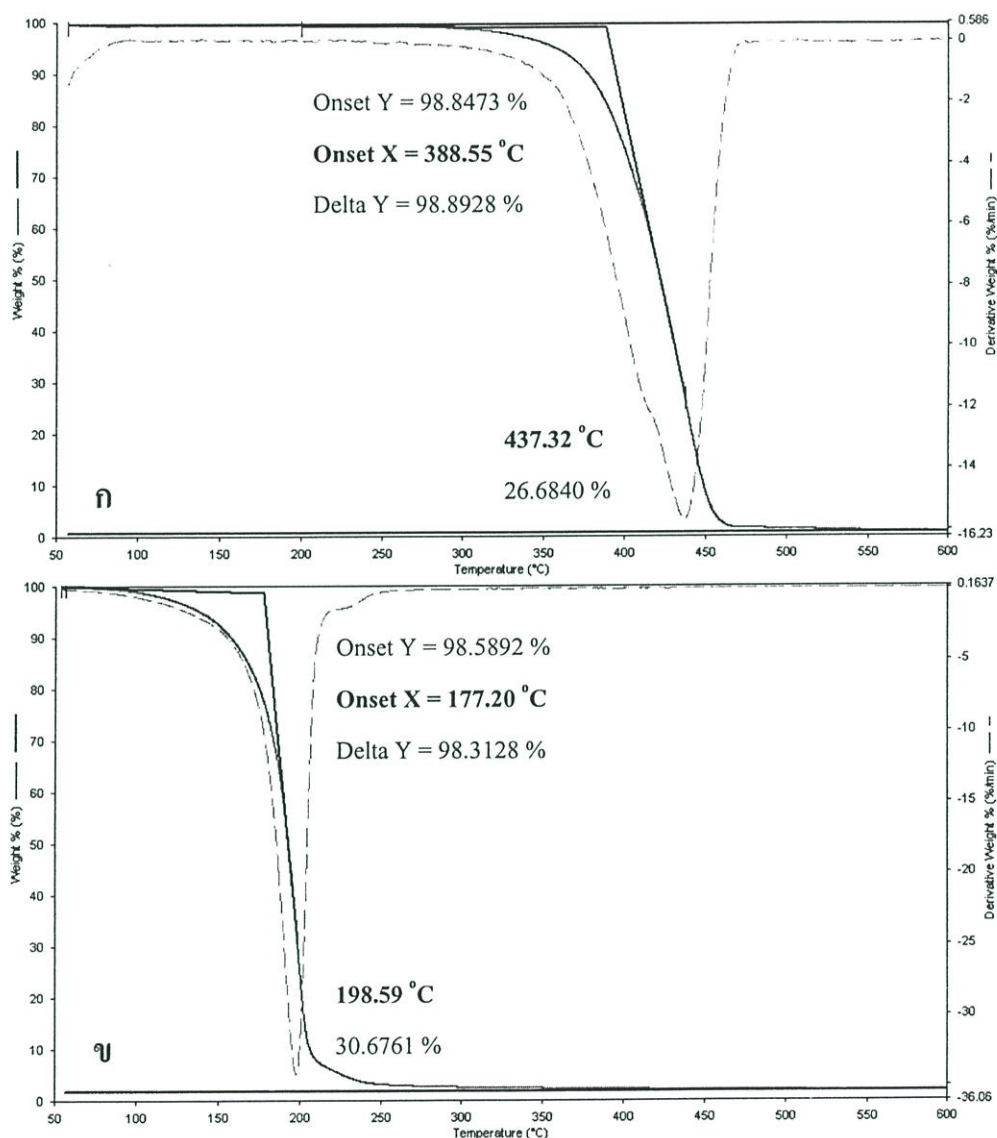
เมื่อเปรียบเทียบสมบัติโดยรวมของพอลิเมอร์กับสัณฐานวิทยาที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM พบว่าได้ผลที่สอดคล้องกัน โดยสูตรที่มีสารช่วยผสม 0 % ฟิล์มจะมีลักษณะใสสามารถมองเห็นทะลุผ่านได้ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมเป็น 5 % 10 % และ 15 % พบว่าความสามารถในการมองเห็นทะลุผ่านค่อยๆ ลดลงตามลำดับ เนื่องจากสารช่วยผสมจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในกรณีที่มีสารช่วยผสมในปริมาณน้อยแต่เมื่อมีปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ เริ่มมีการรวมตัวกันหนาแน่นส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีลักษณะขุ่นจนไม่สามารถมองเห็นทะลุผ่านได้

นอกจากนี้การกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอของสูตรที่มีสารช่วยผสม 15 % จะทำให้เกิดการแยกวัฏภาคขึ้นภายในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าลดลง และความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำมีเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

4.3 ผลที่ได้จากการศึกษาสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนในปริมาณต่างๆ กัน

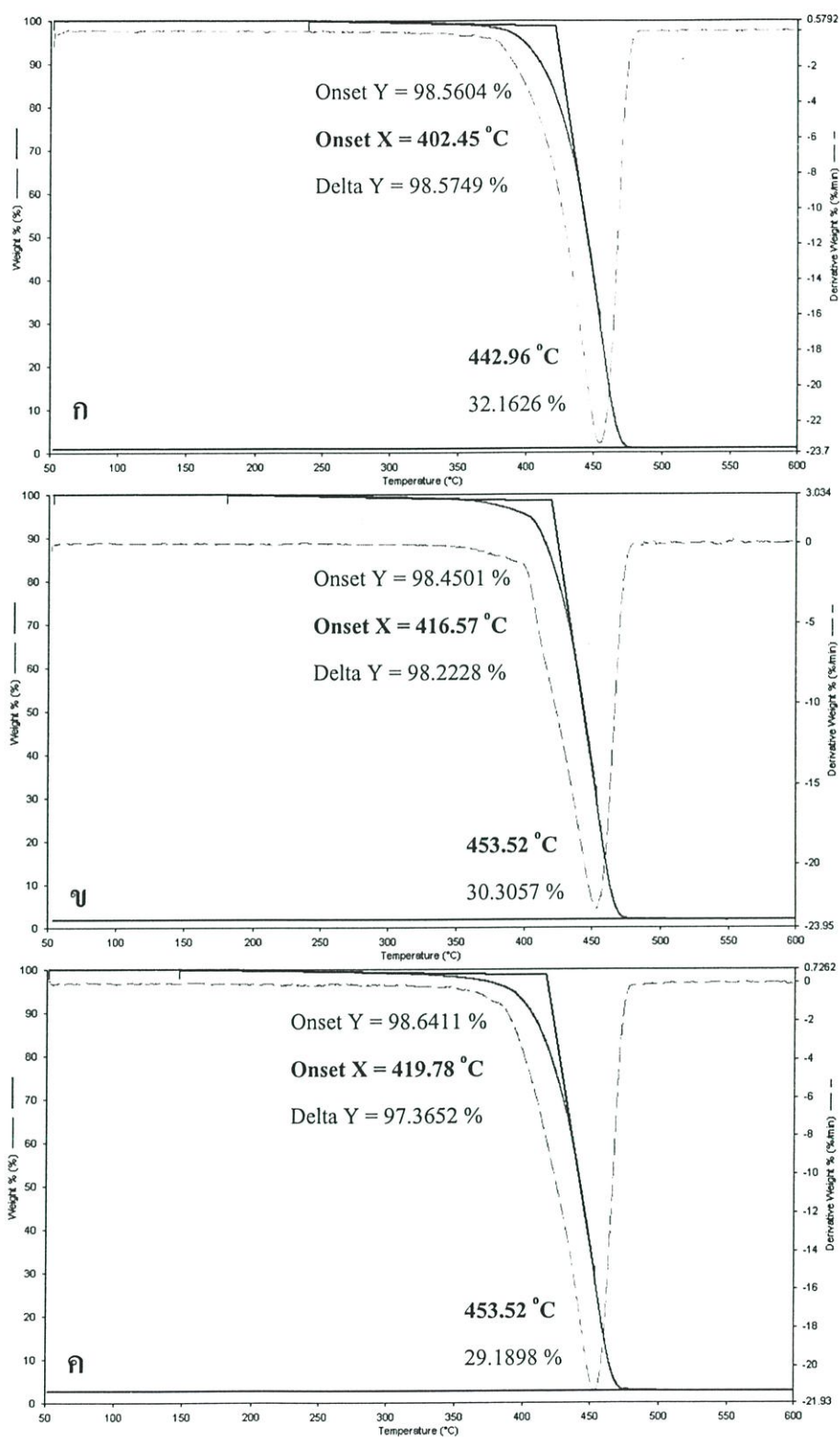
4.3.1 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA)

การตรวจวิเคราะห์ด้วย TGA ใช้ศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature, T_d) หรือเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.14 เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (ก.) และสารวานิลลา (ข.)

จากรูป 4.14 ก. และ 4.14 ข. เป็นเทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสารละลายวานิลลา ตามลำดับ พบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 388.55 °C และสลายตัวหมดที่อุณหภูมิ 437.32 °C ส่วนสารละลายวานิลลาเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 177.20 °C และสลายตัวหมดที่อุณหภูมิ 198.59 °C จากเทอร์โมแกรมพบว่าสารละลายวานิลลามีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่าทำให้ระเหยได้ง่ายกว่า LDPE



รูปที่ 4.15 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนต่างกัน

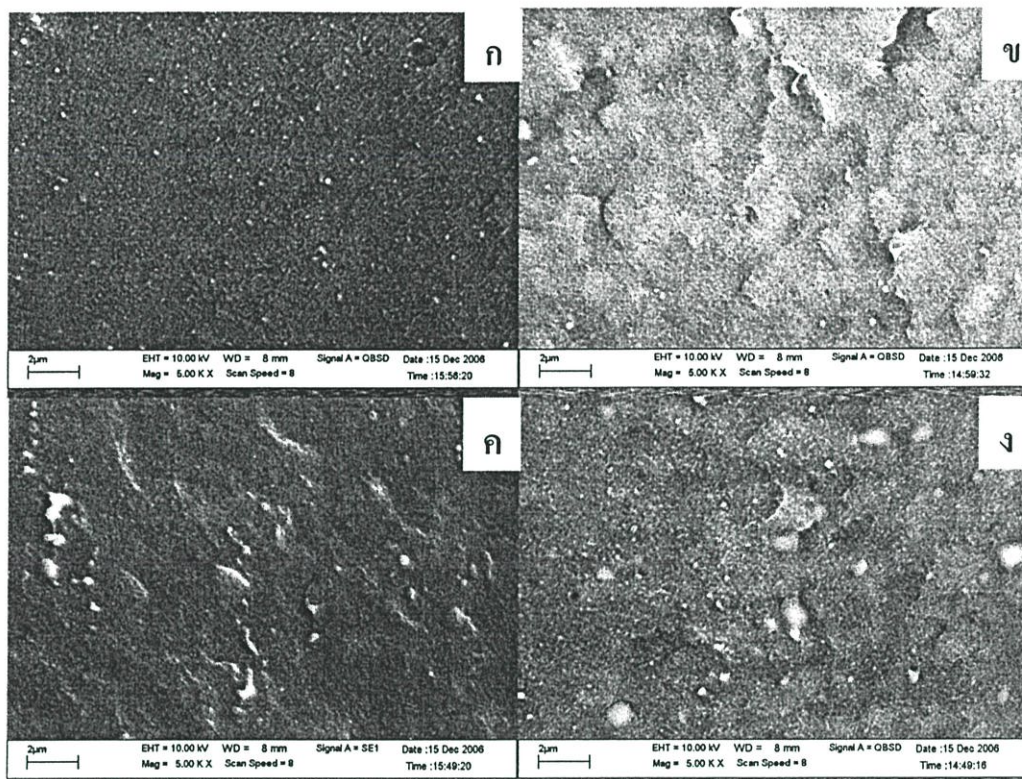
- ก) LDPE : Vanilla 2 % : MAPE 10 % : Ca-Zn 1 %
- ข) LDPE : Vanilla 2 % : MAPE 10 % : Ca-Zn 3 %
- ค) LDPE : Vanilla 2 % : MAPE 10 % : Ca-Zn 5 %

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสม ที่มีการปรับปรุงโดยการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน

พอลิเมอร์	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)
LDPE	388.55
LDPE+MAPE+Vanilla+Ca/Zn 1 %	402.45
LDPE+MAPE+Vanilla+Ca/Zn 3 %	416.57
LDPE+MAPE+Vanilla+Ca/Zn 5 %	419.78

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.15 เป็นการพิจารณาผลของสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่มีต่อพอลิเมอร์ผสม โดยรูปที่ 4.15 ก. 4.15 ข. และ 4.15 ค. เป็นเทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน 1 % 3 % และ 5 % ตามลำดับ พบว่าปริมาณของสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่มีค่ามากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมค่อยๆ มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่ใส่ลงในพอลิเมอร์ผสมด้วย เมื่อพิจารณารูปที่ 4.15 เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.14 ก. ที่เป็นเทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพียงสารเดียว พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนจะมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงกว่าประมาณ 15 – 20 °C หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 4 – 10 %

4.3.2 การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope, SEM)

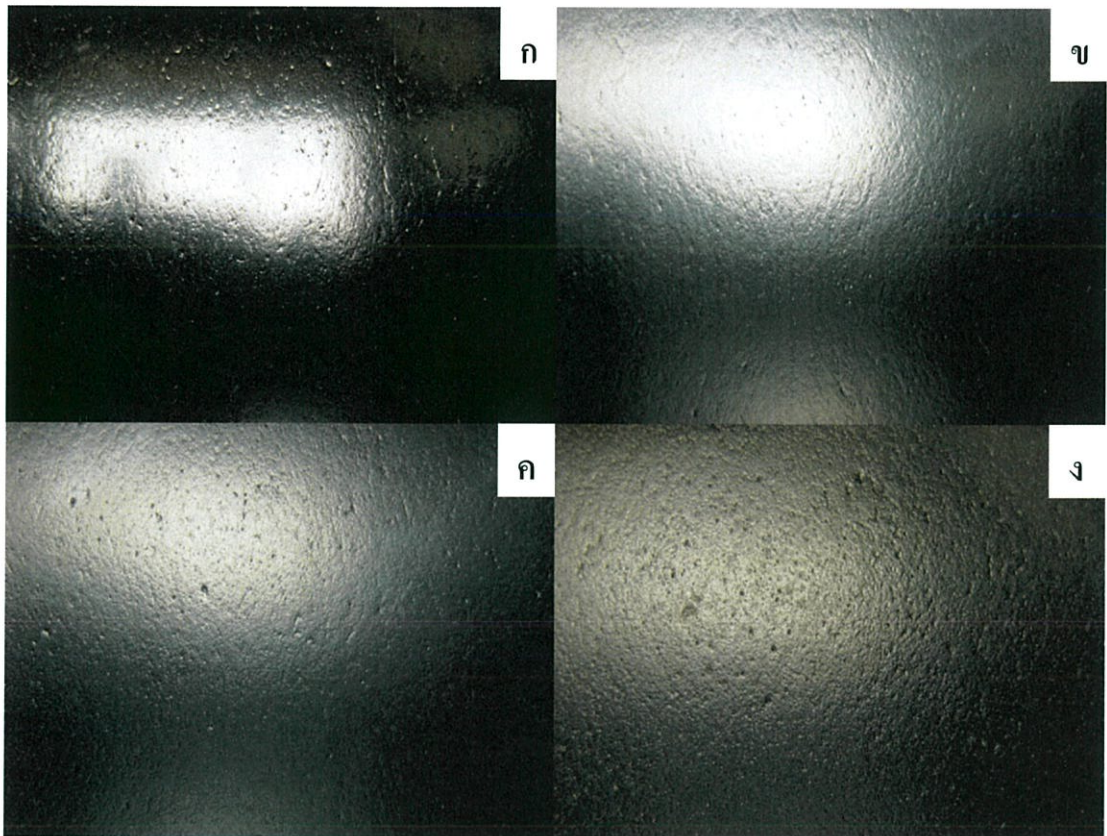


รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน ปริมาณต่างๆ กัน

- ก) LDPE : Vanilla 2 % : MAPE 10 % : Ca-Zn 0 %
- ข) LDPE : Vanilla 2 % : MAPE 10 % : Ca-Zn 1 %
- ค) LDPE : Vanilla 2 % : MAPE 10 % : Ca-Zn 3 %
- ง) LDPE : Vanilla 2 % : MAPE 10 % : Ca-Zn 5 %

จากรูปที่ 4.16 ก. เป็นสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีสารเติมเสถียรภาพทางความร้อน พบว่ามีพื้นผิวค่อนข้างเรียบใกล้เคียงกับรูปที่ 4.16 ข. ซึ่งเป็นสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน 1 % ส่วนรูป 4.16 ค. และ ง. เป็นสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน 3 % และ 5 % ตามลำดับ พบว่าที่พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมเริ่มมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนทรงกลมขนาดใหญ่ของสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน พบว่าสูตรที่มีสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน 5 % จะมีการรวมตัวกันมากที่สุดทำให้เกิดเป็นรอยต่อขึ้นในระหว่างวัฏภาค

4.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ



รูปที่ 4.17 ลักษณะของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนในปริมาณต่างๆ กัน

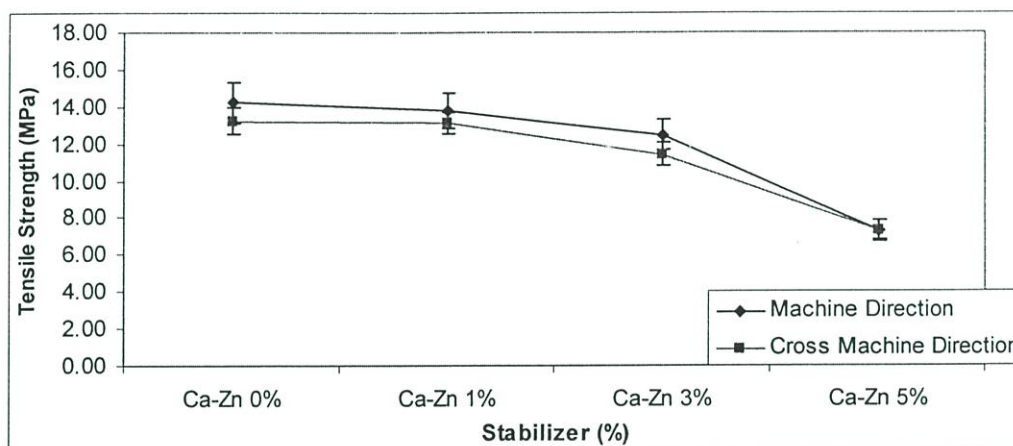
- ก) LDPE : Vanilla 2 % : MAPE 10 % : Ca-Zn 0 %
- ข) LDPE : Vanilla 2 % : MAPE 10 % : Ca-Zn 1 %
- ค) LDPE : Vanilla 2 % : MAPE 10 % : Ca-Zn 3 %
- ง) LDPE : Vanilla 2 % : MAPE 10 % : Ca-Zn 5 %

จากรูปที่ 4.17 เป็นการพิจารณาปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม โดยทำการถ่ายภาพฟิล์มเมื่อเวลาผ่านไป 4 สัปดาห์หลังจากการเป่าขึ้นรูป พบว่ารูปที่ 4.17 ก. เป็นรูปที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนทำให้ลักษณะของฟิล์มที่เห็นนั้นยังสามารถมองทะลุผ่านได้เล็กน้อย แต่เมื่อเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเริ่มมีความขุ่นจนไม่สามารถมองทะลุผ่านได้ นอกจากนี้ที่ปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน 3 % และ 5 % ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มจะมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ความขรุขระนี้เกิดจากการรวมตัวกันของสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่มีมากเกินไปดังรูปที่ 4.16 ค. และ 4.16 ง. ซึ่งเป็นสัญญาณวิทายของพอลิเมอร์ผสมทั้ง 2 ชนิด หากใช้มือสัมผัสที่พื้นผิวของฟิล์มจะสามารถสัมผัสได้ถึงความขรุขระที่เกิดขึ้นได้ นอกจากนี้การเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนในปริมาณมากจะส่งผลให้สีและกลิ่นที่เกิดจากสารละลายวานิลลามีเพิ่มมากขึ้นด้วย

4.3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

เป็นการทดสอบสมบัติของฟิล์มที่จะทนทานต่อแรงดึงยึดออกจากกัน ก่อนที่จะเกิดการฉีกขาด แตกหัก หรือเสียสภาพ ในงานวิจัยนี้ใช้ฟิล์มที่มีความหนา 0.04 มิลลิเมตร ได้ผลดังนี้

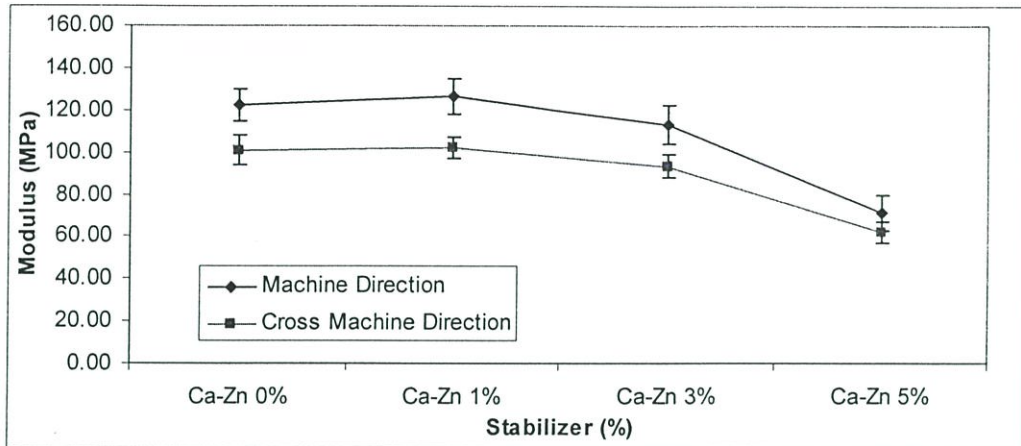
4.3.4.1 การทดสอบค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength)



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง กับ ปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน ในพอลิเมอร์ผสม

พิจารณารูปที่ 4.18 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเมื่อทำการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้มีปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในรูปที่ 4.17 พบว่าพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนในปริมาณ 3 % และ 5 % ดังรูปที่ 4.17 ค. และ 4.17 ง. ตามลำดับจะมีพื้นผิวที่ขรุขระมากกว่าพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนในรูปที่ 4.17 ก. และเมื่อพิจารณาฐานันฐานวิทยาที่ได้จากเครื่อง SEM ดังรูปที่ 4.16 ค. และ 4.16 ง. พบว่ามีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่พื้นผิวทำให้เกิดเป็นรอยต่อระหว่างวัฏภาคขึ้น จากผลที่วิเคราะห์ได้นี้ทำให้ทราบได้ว่าปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่มีเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มลดลง

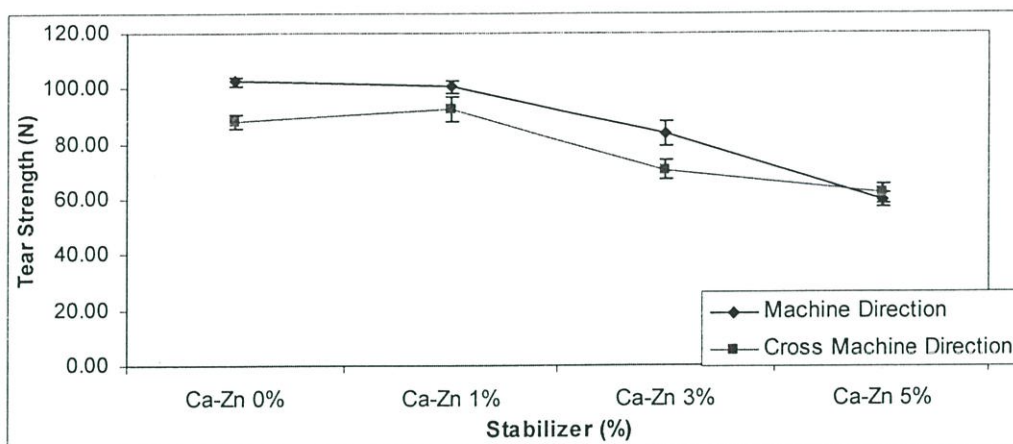
4.3.4.2 การทดสอบค่ามอดุลัส (Modulus)



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัส กับ ปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนใน พอลิเมอร์ผสม

จากรูปที่ 4.19 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่เพิ่มมากขึ้น 1 % 3 % และ 5 % มีผลทำให้ค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงตามลำดับ เนื่องจากสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนจะทำให้เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคของพอลิเอทิลีนและวัฏภาคของสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน พิจารณาได้จากรูปที่ 4.16 ก. และ 4.16 ง. ที่เป็นสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ด้วยเหตุนี้ทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความเหนียวลดลงด้วย ประกอบกับการพิจารณารูปที่ 4.18 พบว่าค่าความแข็งแรงดึงที่ลดลงให้ผลที่สอดคล้องกับการลดลงของค่ามอดุลัสเช่นเดียวกัน

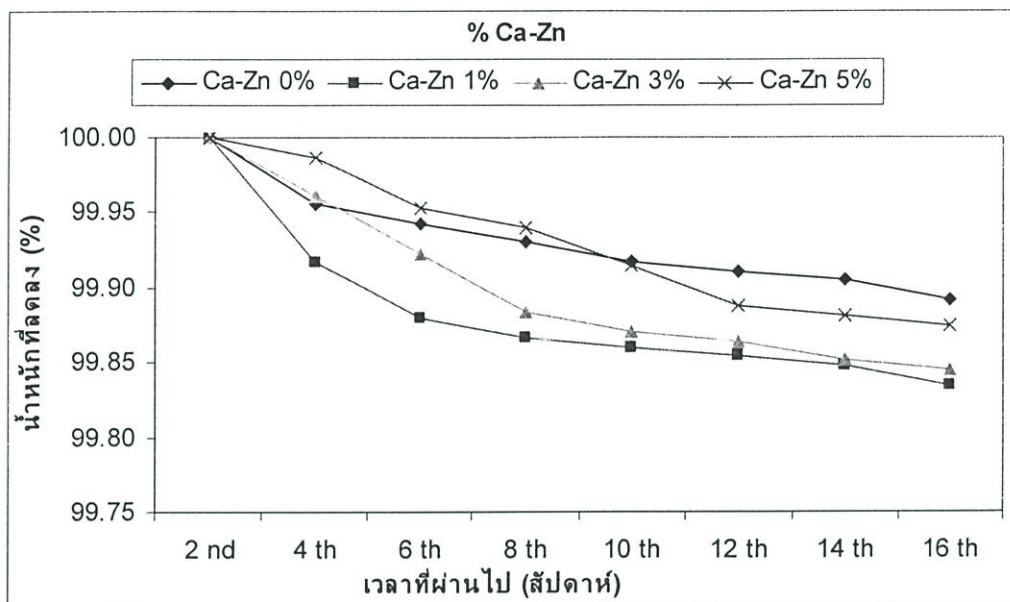
4.3.4.3 การทดสอบการฉีกขาด (Tear test)



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานฉีกขาด กับ ปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนในพอลิเมอร์ผสม

จากรูปที่ 4.20 พบว่าการลดลงของค่าความต้านทานการฉีกขาดมีค่าสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมที่มีการลดลงดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ ค่าความต้านทานการฉีกขาดจะมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่มีปริมาณมากจะไม่เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จะรวมตัวกันอยู่เป็นกลุ่มก้อนเกิดเป็นดั่งเช่นสัณฐานวิทยารูปที่ 4.16 ง. ทำให้พื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความขรุขระเกิดขึ้นดังรูปที่ 4.17 ง. เมื่อออกแรงดึงชิ้นงานพบว่าชิ้นงานที่มีพื้นผิวขรุขระมากจะมีค่าความต้านทานการฉีกขาดที่ต่ำ เนื่องจากอนุภาคของสารเพิ่มเสถียรภาพที่รวมตัวกันนี้จะไปขัดขวางการรับแรงที่เข้ามาทำกับชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดในบริเวณที่อนุภาคนั้นรวมตัวกันอยู่ได้ง่าย

4.3.5 การตรวจวิเคราะห์ด้วยการชั่งน้ำหนัก

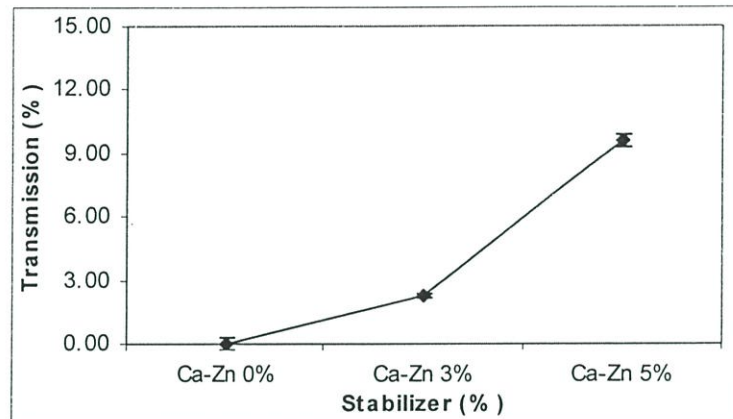


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนัก กับ เวลา เปรียบเทียบกันระหว่างพอลิเมอร์ที่มีสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนในปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.21 เป็นการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมที่มีสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนในปริมาณที่ต่างกันเมื่อเวลาผ่านไป พบว่าสูตรที่ไม่มีสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนจะมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักน้อยที่สุด จะมีแค่สารช่วยผสมเท่านั้นที่จะสร้างพันธะกับสารละลายวานิลลา [44] แต่เมื่อมีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนเข้าไปพบว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนจะเข้าไปแทรกอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ผสมทำให้สารละลายวานิลลาที่ไม่ได้สร้างพันธะกับสารช่วยผสมสลวยตัวออกได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่ 1 % และ 5 % พบว่าการลดลงของน้ำหนักลดน้อยลง เนื่องจากปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่มีมากขึ้นจะเข้าไปรวมตัวกับสารละลายวานิลลาที่หลุดจากการสร้างพันธะกับสารช่วยผสมได้มากขึ้น ทำให้เหลือปริมาณสารละลายวานิลลาที่จะระเหยออกจากพอลิเมอร์ผสมลดลง ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพดังรูปที่ 4.17 ซึ่งพบว่าที่ปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน 5 % จะทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีสีเหลืองเข้มที่สุด

4.3.6 การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ

เป็นนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารช่วยผสมในปริมาณต่างๆ ที่ได้จากการระบวนการเป่าขึ้นรูปมาทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ เพื่อสังเกตแนวโน้มของการซึมผ่านของไอน้ำ ได้ผลดังนี้



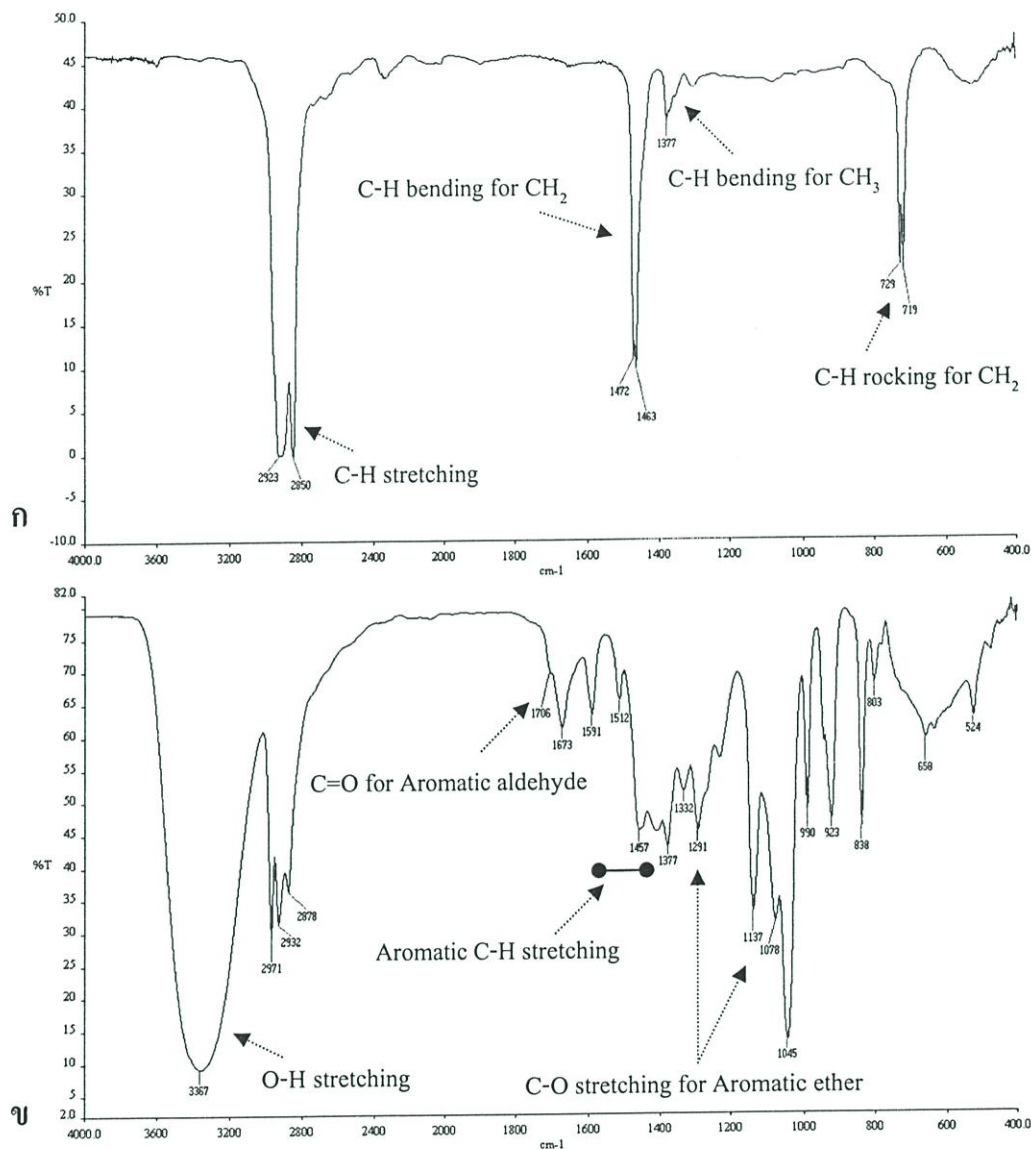
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของไอน้ำ กับ ปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่แตกต่างกัน

พิจารณาปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.22 ซึ่งได้ผลที่สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมดังรูปที่ 4.17 และ 4.16 ตามลำดับ พบว่าเมื่อมีปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนมากเกินไปจะทำให้เกิดการรวมตัวกันที่พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมเกิดเป็นรอยต่อระหว่างวัฏภาคเกิดขึ้น เนื่องจากรอยต่อของวัฏภาคนี้จะทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนในปริมาณต่างๆ กัน พบว่าผลที่จากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวฟิล์มที่มีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนเข้าไปในพอลิเมอร์ผสม โดยพบว่าสูตรที่มีสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน 5 % จะให้พื้นผิวของฟิล์มขรุขระมากที่สุด นอกจากนี้รอยต่อที่เกิดขึ้นระหว่างวัฏภาคจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดิ่งมีค่าลดลง และความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มมากขึ้น

4.4 ผลที่ได้จากการศึกษาสารละลายวานิลลาในปริมาณต่างๆ กัน

4.4.1 การตรวจวิเคราะห์การดูดกลืนอินฟราเรด (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)

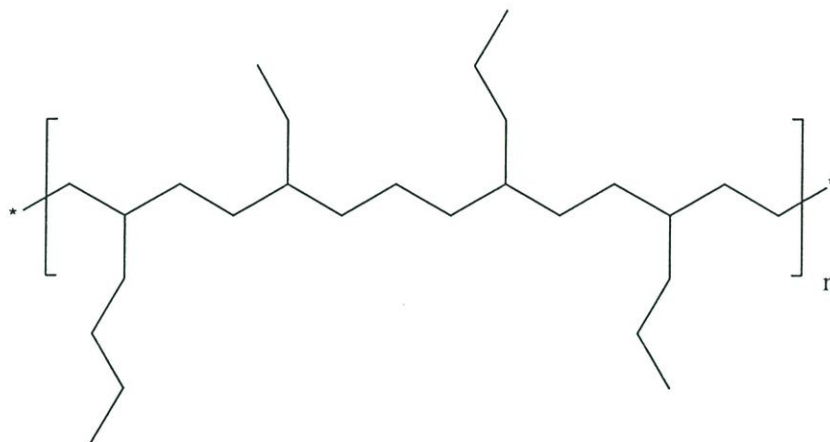


รูปที่ 4.23 สเปกตรัมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (ก.) และสารวานิลลา (ข.)

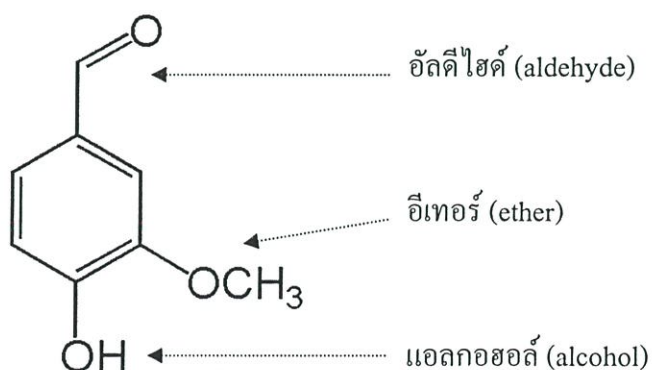
จากรูปที่ 4.23 เป็นการเปรียบเทียบสเปกตรัมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับสารละลายวานิลลา พบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (เส้น ก.) มีพีกที่สำคัญคือ ที่เลขคลื่น 3000 - 2800 cm⁻¹ ของ C-H stretching ที่เลขคลื่น 1463 cm⁻¹ ของ C-H bending for CH₂ ที่เลขคลื่น 1377 cm⁻¹ ของ C-H bending for CH₃ ที่เลขคลื่น 729 cm⁻¹ ของ C-H rocking for CH₂ และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมของสารละลายวานิลลา (เส้น ข.) พบพีกที่สำคัญคือ ที่เลขคลื่น 3600 - 3200 cm⁻¹ ของ O-H stretching ซึ่งมีขนาดพีกที่ค่อนข้างกว้าง ที่เลขคลื่น 1710 - 1690 cm⁻¹ ของ C=O for

Aromatic aldehyde ที่เลขคลื่น $1600 - 1450 \text{ cm}^{-1}$ ของ Aromatic C-H stretching ที่เลขคลื่น $1275 - 1200$ และ $1080 - 1040 \text{ cm}^{-1}$ ของ C-O stretching for Aromatic ether

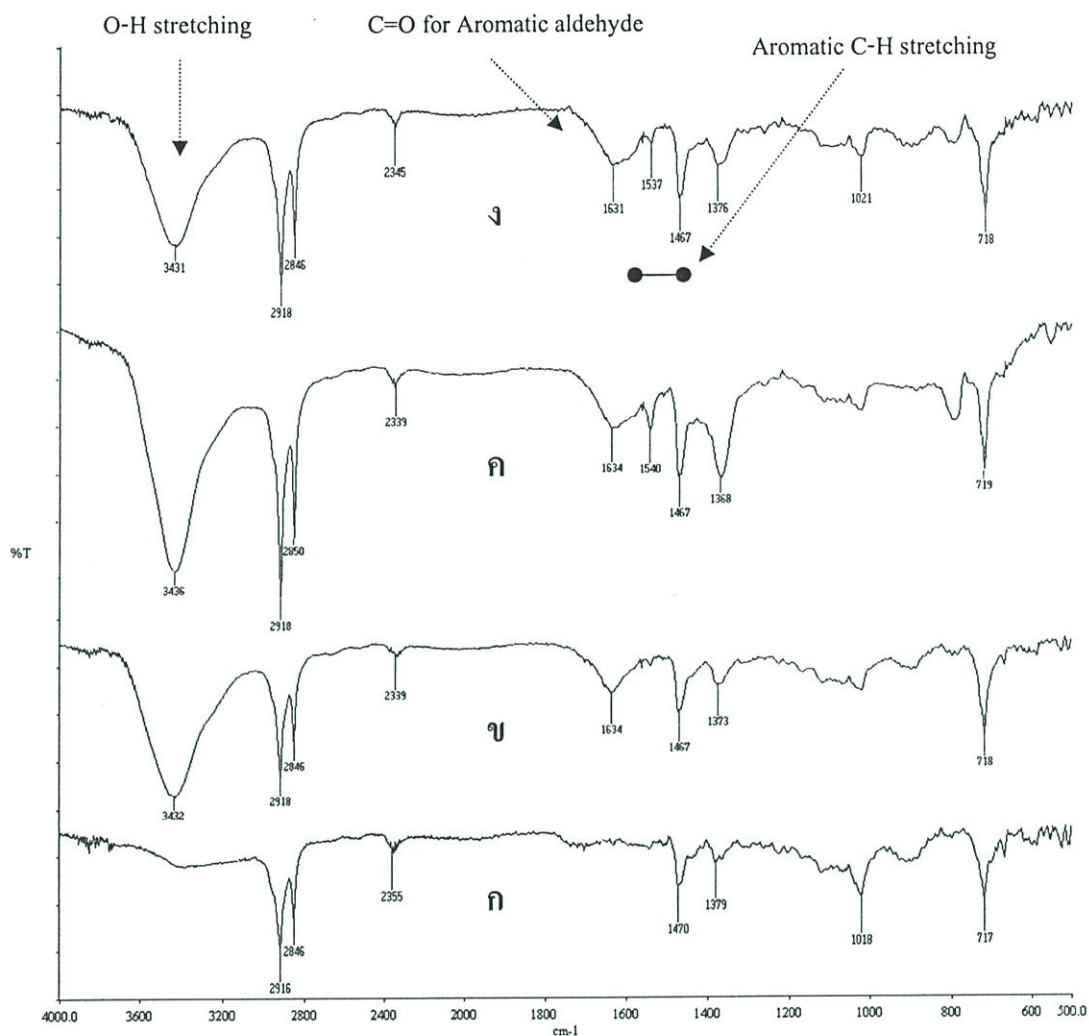
จากโครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำดังรูปที่ 4.24 พบว่าภายในโครงสร้างมีกิ่งสาขายาวต่อออกจากพอลิเมอร์หลัก ซึ่งโซ่กิ่งเหล่านี้จะเพิ่มปริมาตรแต่ลดความหนาแน่นของพอลิเมอร์ลง ตลอดทั้งโครงสร้างเป็น โมเลกุลของ CH_2 ทำให้สเปกตรัมที่วิเคราะห์ได้แสดงในรูปที่ 4.24 ก. ด้วยเหตุนี้จึงพบแต่พันธะของ C-H แต่มีการสั่นในรูปแบบที่ต่างกันออกไป พบทั้งการสั่นแบบ stretching และ bending แล้วเมื่อพิจารณาสเปกตรัมของสารละลายวานิลลาในรูปที่ 4.24 ข. พบตำแหน่งของพีกที่สามารถระบุได้ถึงหมู่ฟังก์ชันสำคัญที่อยู่ในโครงสร้างของสารวานิลลินทั้ง 3 หมู่ คือ หมู่ฟังก์ชันของอัลดีไฮด์ อีเทอร์ และ แอลกอฮอล์ ดังรูปที่ 4.25 ที่ตำแหน่งเลขคลื่น $1710 - 1690$ $1080 - 1040$ และ $3600 - 3200 \text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ ทำให้ทราบถึงตำแหน่งเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของสารวานิลลินในการสังเกตเมื่อนำพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารละลายวานิลลาแล้ว มาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ FTIR



รูปที่ 4.24 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ [12]



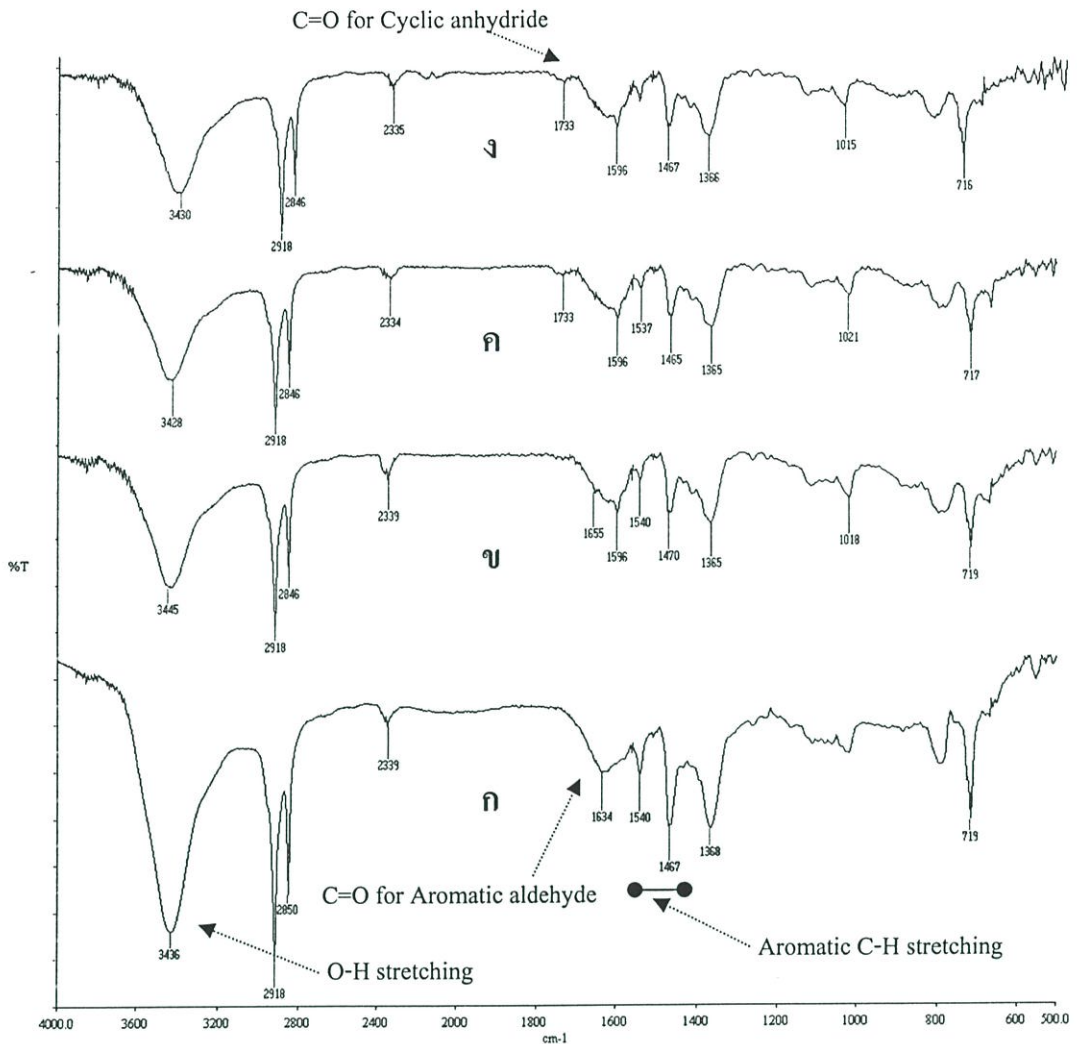
รูปที่ 4.25 หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในโครงสร้างของสารวานิลลิน [2]



รูปที่ 4.26 สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่มีสารละลายวานิลลาในปริมาณต่างๆ กัน

- ก) LDPE : MAPE 10 % : Ca-Zn 1 % : Vanilla 0 %
- ข) LDPE : MAPE 10 % : Ca-Zn 1 % : Vanilla 1 %
- ค) LDPE : MAPE 10 % : Ca-Zn 1 % : Vanilla 2 %
- ง) LDPE : MAPE 10 % : Ca-Zn 1 % : Vanilla 3 %

จากรูปที่ 4.26 แสดงสเปกตรัมเส้น ก. ข. ค. และ ง. ซึ่งเป็นสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารละลายวานิลลาต่างๆ กัน คือ 0 1 2 และ 3 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำตามลำดับ พบตำแหน่งพีกที่แตกต่างกับสเปกตรัมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ที่เลขคลื่น $3600 - 3200 \text{ cm}^{-1}$ ของ O-H stretching ที่เลขคลื่น $1710 - 1690 \text{ cm}^{-1}$ ของ C=O for Aromatic aldehyde ที่เลขคลื่น $1600 - 1450 \text{ cm}^{-1}$ ของ Aromatic C-H stretching จากพีกในสเปกตรัมในรูปที่ 4.26 แสดงให้เห็นว่าโมเลกุลของสารวานิลลานั้นแทรกอยู่ในพอลิเมอร์ผสม โดยปริมาณสารละลายวานิลลาในพอลิเมอร์ผสมที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้พีก O-H stretching สูงขึ้น ทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความเข้มข้นของกลิ่นวานิลลาเพิ่มมากขึ้นเมื่อสุกดม

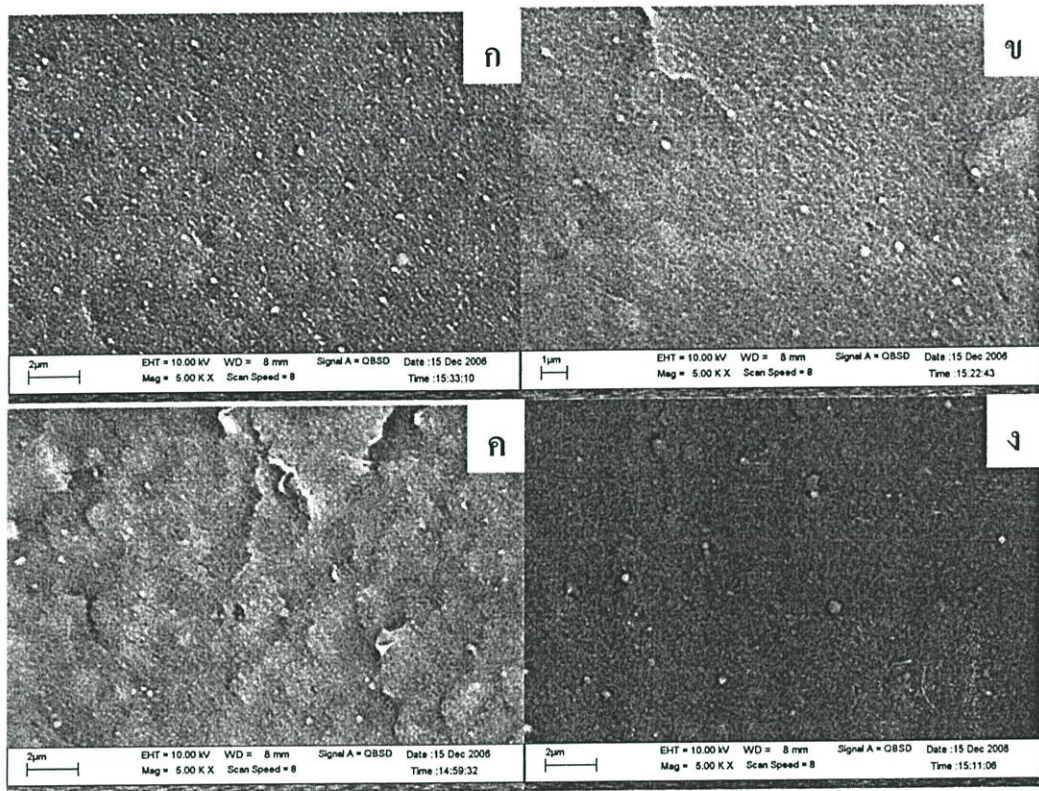


รูปที่ 4.27 สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่มีสารวานิลลา 2 %

- ก) เมื่อเวลาผ่านไป 2 สัปดาห์
- ข) เมื่อเวลาผ่านไป 4 สัปดาห์
- ค) เมื่อเวลาผ่านไป 6 สัปดาห์
- ง) เมื่อเวลาผ่านไป 8 สัปดาห์

จากรูปที่ 4.27 แสดงสเปกตรัมเส้น ก. ข. ค. และ ง. ซึ่งเป็นสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารวานิลลา 2 % ในช่วงเวลาต่างๆ กัน คือ ช่วงสัปดาห์ที่ 2 4 6 และ 8 สัปดาห์ตามลำดับ พบว่ามีการลดลงของพีคที่เห็นได้ชัดเจนคือ ที่เลขคลื่น $3600 - 3200 \text{ cm}^{-1}$ ของ O-H stretching ที่เลขคลื่น $1710 - 1690 \text{ cm}^{-1}$ ของ C=O for Aromatic aldehyde และที่เลขคลื่น $1600 - 1450 \text{ cm}^{-1}$ ของ Aromatic C-H stretching ทำให้สังเกตเห็นพีคที่ถูกบดบังได้ คือ ที่เลขคลื่น 1730 cm^{-1} ของ C=O for Cyclic anhydride แสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไปปริมาณสารละลายวานิลลาในพอลิเมอร์ผสมจะลดน้อยลงโดยพิจารณาจากการลดลงของพีค O-H stretching รวมทั้งคลื่นของสารละลายวานิลลาที่จางลงไปด้วย

4.4.2 การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope, SEM)

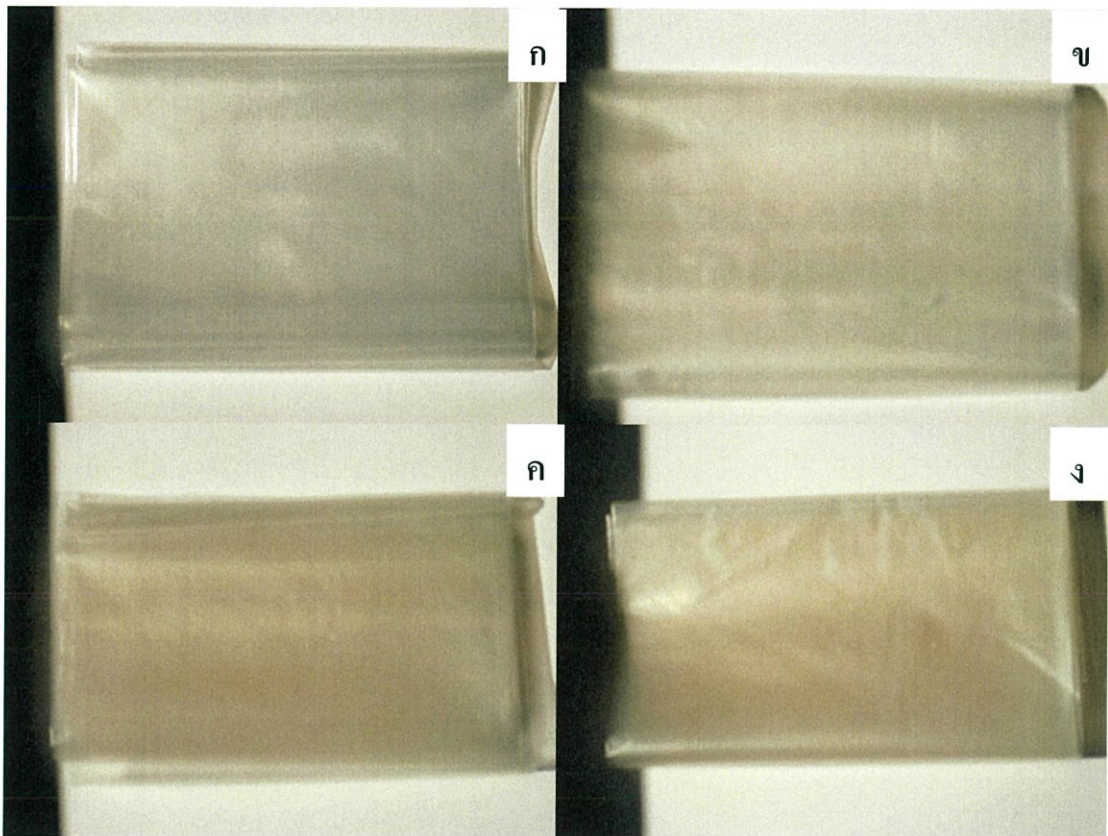


รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของพอลิเมอร์ที่มีสารละลายวานิลลาปริมาณต่างๆ กัน

- ก) LDPE : MAPE 10 % : Ca-Zn 1 % : Vanilla 0 %
- ข) LDPE : MAPE 10 % : Ca-Zn 1 % : Vanilla 1 %
- ค) LDPE : MAPE 10 % : Ca-Zn 1 % : Vanilla 2 %
- ง) LDPE : MAPE 10 % : Ca-Zn 1 % : Vanilla 3 %

จากรูปที่ 4.28 ก. เป็นสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารละลายวานิลลา พบว่ามีพื้นผิวค่อนข้างเรียบ ส่วนรูปที่ 4.28 ข. ค. และ ง. เป็นสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารละลายวานิลลา 1 % 2 % และ 3 % ตามลำดับ พบว่าพื้นผิวมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันคือ ขรุขระเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีปริมาณสารละลายวานิลลาเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีการแบ่งภูมิภาคอย่างชัดเจนระหว่างพอลิเมอร์และสารละลายวานิลลา ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับการพิจารณาค่าความแข็งแรงดึง โดยค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตรที่เติมสารละลายวานิลลาจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่ได้เติมสารละลายวานิลลา เนื่องจากความขรุขระของฟิล์มที่เกิดขึ้นจะส่งผลกับค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์

4.4.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ



รูปที่ 4.29 ลักษณะของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีสารละลายวานิลลาในปริมาณต่างๆ กัน

- ก) LDPE : MAPE 10 % : Ca-Zn 1 % : Vanilla 0 %
- ข) LDPE : MAPE 10 % : Ca-Zn 1 % : Vanilla 1 %
- ค) LDPE : MAPE 10 % : Ca-Zn 1 % : Vanilla 2 %
- ง) LDPE : MAPE 10 % : Ca-Zn 1 % : Vanilla 3 %

จากรูปที่ 4.29 เป็นการพิจารณาปริมาณสารละลายวานิลลาที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม โดยทำการถ่ายภาพฟิล์มเมื่อเวลาผ่านไป 4 สัปดาห์หลังจากการเป่าขึ้นรูป พบว่าสมบัติของสารละลายพอลิเมอร์ที่สังเกตเห็นได้ชัดเจนที่สุดคือ สีเหลือง และกลิ่นหอมของวานิลลา เมื่อทำการเติมสารละลายวานิลลาเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมในปริมาณที่ต่างกันก็จะทำให้สมบัติทั้ง 2 ของสารละลายวานิลลาที่มีในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมต่างกันไปด้วย พิจารณารูปที่ 4.29 ก. เป็นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารละลายวานิลลาทำให้ได้ฟิล์มที่มีสีใสและไม่พบกลิ่นหอมของวานิลลาแต่เมื่อทำการเติมสารละลายวานิลลาเข้าไป 1 % 2 % และ 3 % ดังรูปที่ 4.29 ข. ค. และ ง. พบว่าฟิล์มจะมีสีเหลืองและกลิ่นหอมของวานิลลาเพิ่มขึ้นตามลำดับ

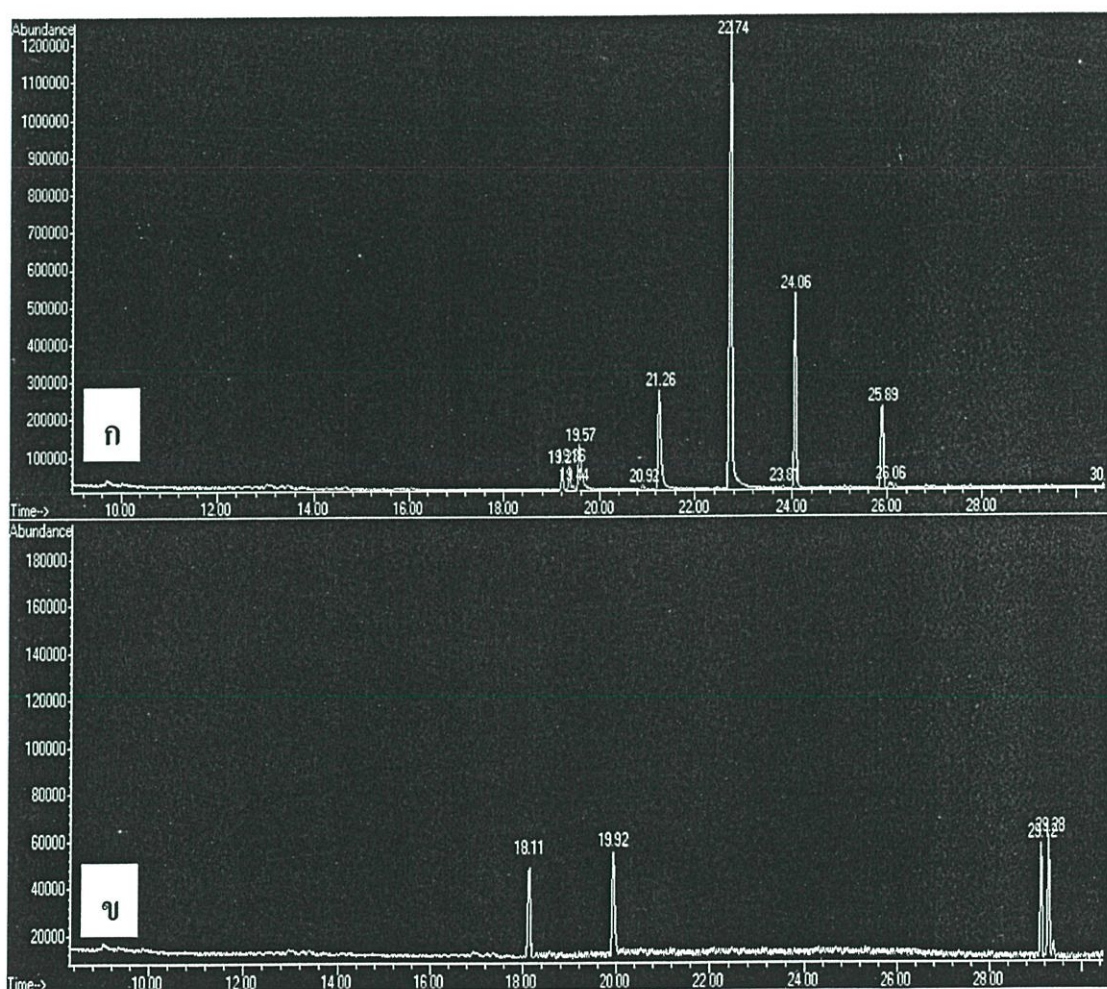
ตารางที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมในแต่ละสูตร

สูตร	ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม
LDPE	ใสสามารถมองเห็นทะลุผ่านได้ ผิวเรียบมัน
LDPE + MAPE 10%	ใส ผิวเรียบมัน เป็นเนื้อเดียวกัน
LDPE + Ca-Zn 1%	ใส ผิวเรียบมัน เป็นเนื้อเดียวกัน
LDPE + Vanilla 2%	มีสีเหลืองอ่อน ใส มีกลิ่นของสารละลายวานิลลาอ่อนๆ
0 % MAPE	มีสีเหลือง ใส ผิวเรียบมัน มีกลิ่นของสารละลายวานิลลาอ่อนๆ
5 % MAPE	มีสีเหลือง ขุ่น ผิวเรียบมัน มีกลิ่นของสารละลายวานิลลา
10 % MAPE	มีสีเหลือง ขุ่นมากกว่าสูตร 5 % มีกลิ่นของสารละลายวานิลลา
15 % MAPE	มีสีเหลือง ขุ่นมากกว่าสูตร 10 % มีกลิ่นของสารละลายวานิลลา
0 % Ca-Zn	มีสีเหลือง ใส ผิวเรียบมัน มีกลิ่นของสารละลายวานิลลา
1 % Ca-Zn	มีสีเหลือง ขุ่น ผิวเรียบมัน มีกลิ่นของสารละลายวานิลลา
3 % Ca-Zn	มีสีเหลือง ขุ่น ผิวขรุขระ มีกลิ่นของสารละลายวานิลลา
5 % Ca-Zn	มีสีเหลือง ขุ่น ผิวขรุขระมากกว่าสูตร 3 % มีกลิ่นของสารละลายวานิลลา
7 % Ca-Zn	เหลือปริมาณสาร Ca-Zn ที่ไม่รวมเข้ากับพอลิเมอร์ผสม ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง
0 % Vanilla	ขุ่น ผิวเรียบมัน เป็นเนื้อเดียวกัน
1 % Vanilla	ขุ่น ผิวเรียบมัน มีสีเหลืองอ่อน มีกลิ่นของสารละลายวานิลลา
2 % Vanilla	ขุ่น ผิวเรียบมัน มีสีเหลืองเข้มและมีกลิ่นของสารละลายวานิลลา มากกว่าสูตร 1 %
3 % Vanilla	ขุ่น ผิวเรียบมัน มีสีเหลืองเข้มและมีกลิ่นของสารละลายวานิลลา มากกว่าสูตร 2 %
4 % Vanilla	เหลือปริมาณสารละลายวานิลลาที่ไม่รวมเข้ากับพอลิเมอร์ผสม ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง

จากตารางที่ 4.3 พบว่าปริมาณสารเติมแต่งทั้ง 3 ชนิด มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม โดยปริมาณสารช่วยผสมจะมีผลต่อความใสและความขุ่นของฟิล์ม ปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนมีผลต่อความเรียบและความขรุขระของพื้นผิวฟิล์ม ปริมาณสารละลายวานิลลามีผลต่อสีและกลิ่นของฟิล์ม เมื่อเติมสารเติมแต่งในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีลักษณะดังกล่าวเพิ่มมากขึ้นด้วย

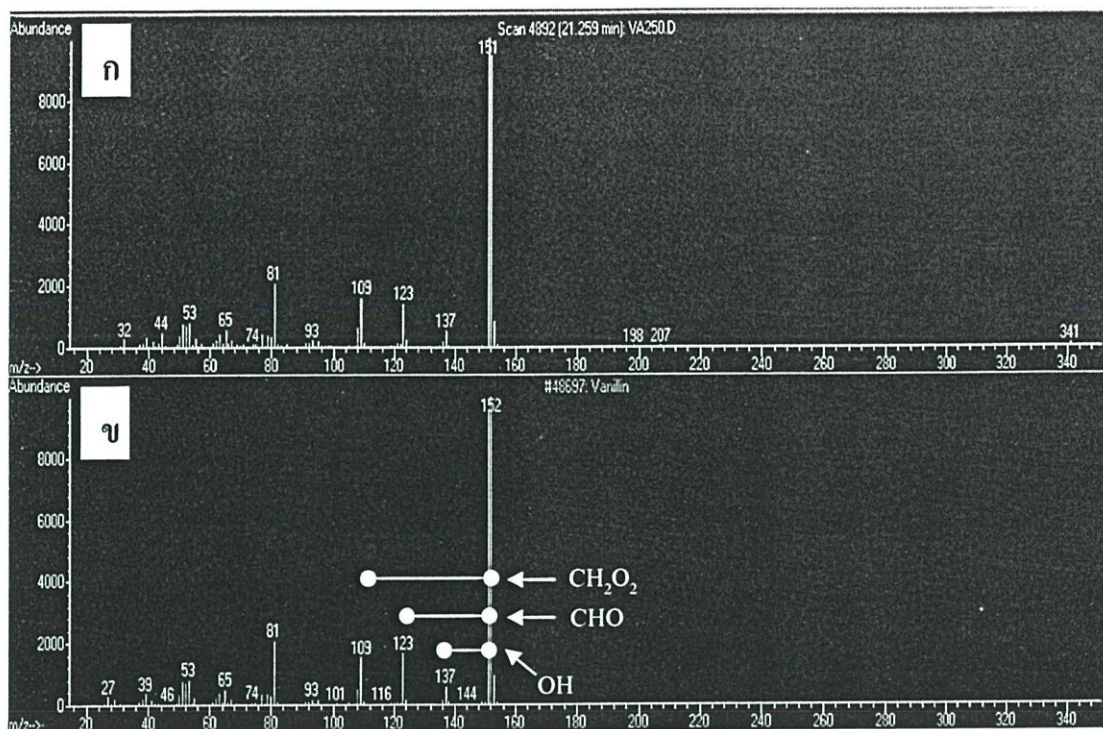
4.4.4 การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry : GC-MS)

เป็นวิธีที่สามารถทำนายชนิดขององค์ประกอบที่สามารถระเหยได้ (Volatile organic compounds : VOCs) ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้อย่างค่อนข้างแม่นยำ โดยอาศัยการวิเคราะห์จากเครื่อง GC เพื่อแยกองค์ประกอบของสารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอที่มีอยู่ในตัวอย่างให้ออกมาทีละองค์ประกอบ ก่อนที่จะเข้าสู่ detector ซึ่งเป็นส่วนของเครื่อง MS เพื่อตรวจสอบกับข้อมูลที่มีอยู่ในฐานข้อมูลอ้างอิง จะได้ทราบว่าองค์ประกอบต่างๆ ที่ผ่านออกมาจากเครื่อง GC นั้น มีเลขมวลเป็นเท่าไร ซึ่งเลขมวลของแต่ละองค์ประกอบจะเป็นเลขที่มีลักษณะเฉพาะของสารนั้นๆ



รูปที่ 4.30 สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากเครื่อง GC ในกรณีที่วิเคราะห์พอลิเมอร์ผสม LDPE : MAPE 10 % : Ca-Zn 1 % : Vanilla 2 % เมื่อเดือนที่ 1 (รูป ก.) และเดือนที่ 5 (รูป ข.)

จากรูปที่ 4.30 เป็นการเปรียบเทียบสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ขึ้นรูปในเวลาที่แตกต่างกันประมาณ 4 เดือน โดยรูปที่ 4.30 ก. เป็นสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่ทำการเป่าขึ้นรูปไว้เมื่อเดือนที่ 1 และรูปที่ 4.30 ข. เป็นสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่ทำการเป่าขึ้นรูปไว้แล้วนำกลับมาวิเคราะห์อีกครั้งเมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือน พบว่ารูปที่ 4.30 ก. ในช่วงเวลาที่สนใจสามารถตรวจพบพีกหลักๆ ได้หลายตำแหน่ง เช่น ที่ตำแหน่ง 19.57 นาฬิกาที่เป็นของสาร Piperonal และที่ตำแหน่ง 2.74 นาฬิกาที่เป็นของสาร Ethyl Vanillin เป็นต้น แต่ตำแหน่งพีกที่สนใจในงานวิจัยนี้คือ พีกของสารวานิลลินซึ่งในรูปที่ 4.30 ก. จะพบที่ตำแหน่ง 21.26 นาฬิกา ได้อย่างชัดเจนซึ่งเป็นพีกของสารวานิลลินที่เป็นสารประกอบสำคัญในการให้กลิ่นของสารละลายวานิลลาที่ได้เติมเข้าไปในพอลิเมอร์ผสม แล้วเมื่อพิจารณารูปที่ 4.30 ข. พบว่าไม่ปรากฏพีกของสารวานิลลินที่สนใจที่ตำแหน่ง 21.26 นาฬิกาเหมือนกับรูปที่ 4.30 ก. เนื่องจากในระยะเวลา 4 เดือนที่ทำการทดลองสารวานิลลินจะมีการระเหยออกไปอย่างสม่ำเสมอซึ่งสอดคล้องกับกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FTIR ในรูปที่ 4.27 ทำให้ปริมาณสารวานิลลินที่เหลืออยู่ในพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงสังเกตได้จากปริมาณความเข้มข้นของกลิ่นที่จางลงเมื่อทำการสูดดม ผลจากสเปกตรัมทั้ง 2 ในรูปที่ 4.30 จึงสามารถยืนยันได้ว่าปริมาณของสารละลายวานิลลาที่เติมเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมนั้นจะมีการระเหยออกมาและกลิ่นของสารละลายวานิลลาที่เติมเข้าไปสามารถคงอยู่ในพอลิเมอร์ผสมได้นานอย่างน้อย 4 เดือน แม้เครื่องมือ GC-MS ไม่สามารถตรวจพบพีกของสารวานิลลินใน พอลิเมอร์ผสมที่ทำการขึ้นรูปไว้เวลานาน 4 เดือนได้ แต่หากทดสอบโดยใช้การสูดดมยังสามารถได้กลิ่นจางๆ ของวานิลลาที่อยู่ในพอลิเมอร์ผสมได้



รูปที่ 4.31 เลขมวลที่มีลักษณะเฉพาะของสารที่ระเหยได้ในพอลิเมอร์ผสม (ก.) เปรียบเทียบกับเลขมวลของสารวานิลลินที่มีอยู่ในฐานข้อมูลอ้างอิง (ข.)

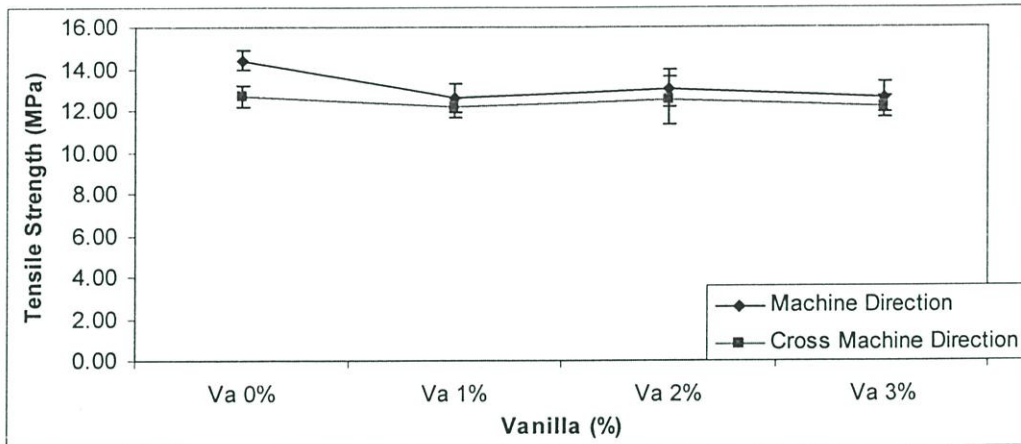
จากรูปที่ 4.31 เป็นการเปรียบเทียบเลขมวลที่มีลักษณะเฉพาะของสารที่ระเหยได้ในพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการทดลอง กับเลขมวลของสารวานิลลินที่มีอยู่ในฐานข้อมูลอ้างอิงของเครื่องมือ GC-MS ดังรูปที่ 4.31 ก. และรูปที่ 4.31 ข. ตามลำดับ ซึ่งเลขมวลเป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบต่างๆ ที่ผ่านออกมาจากเครื่อง GC ด้วยเครื่อง Mass Spectrometry (MS) พบว่าเลขมวลของพิกพอลิเมอร์ผสมที่ตำแหน่ง 21.26 นาที ในรูปที่ 4.30 ก. มีความใกล้เคียงกับเลขมวลของสาร วานิลลินที่พบได้จากฐานข้อมูลอ้างอิงในรูปที่ 4.31 ข.

ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS ในรูปที่ 4.30 และ 4.31 สามารถยืนยันได้ว่าองค์ประกอบของสารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสมเป็นองค์ประกอบของสารวานิลลินซึ่งเป็นสารประกอบสำคัญในการให้กลิ่นของสารละลายวานิลลา และสารวานิลลินที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสมนี้สามารถระเหยออกมาได้จริง

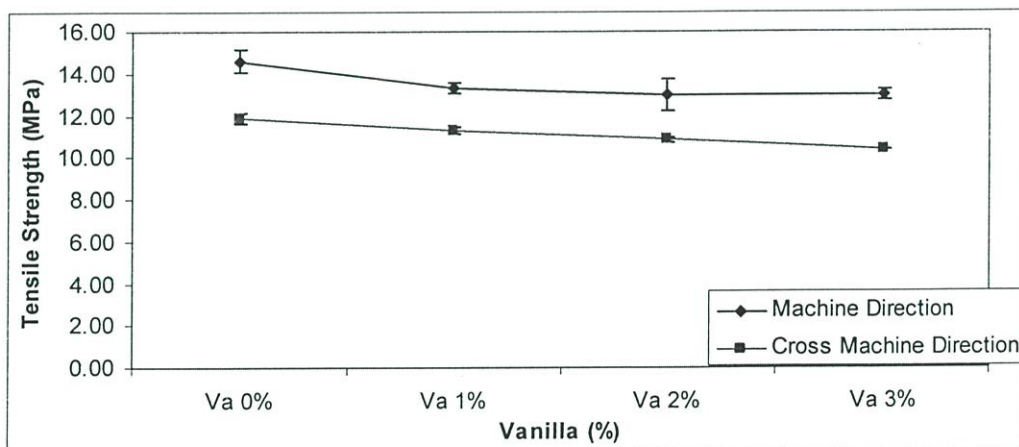
4.4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

เป็นการทดสอบสมบัติของฟิล์มที่จะทนทานต่อแรงดึงยึดออกจากกัน ก่อนที่จะเกิดการฉีกขาด แตกหัก หรือเสียหาย ในงานวิจัยนี้ใช้ฟิล์มที่มีความหนา 0.04 มิลลิเมตร ได้ผลดังนี้

4.4.5.1 การทดสอบค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength)



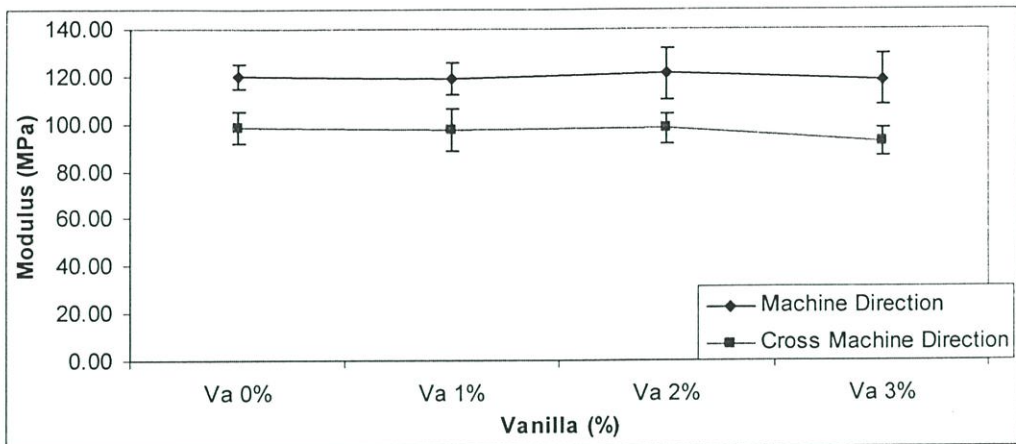
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง กับ ปริมาณสารละลายวานิลลาในพอลิเมอร์ผสม



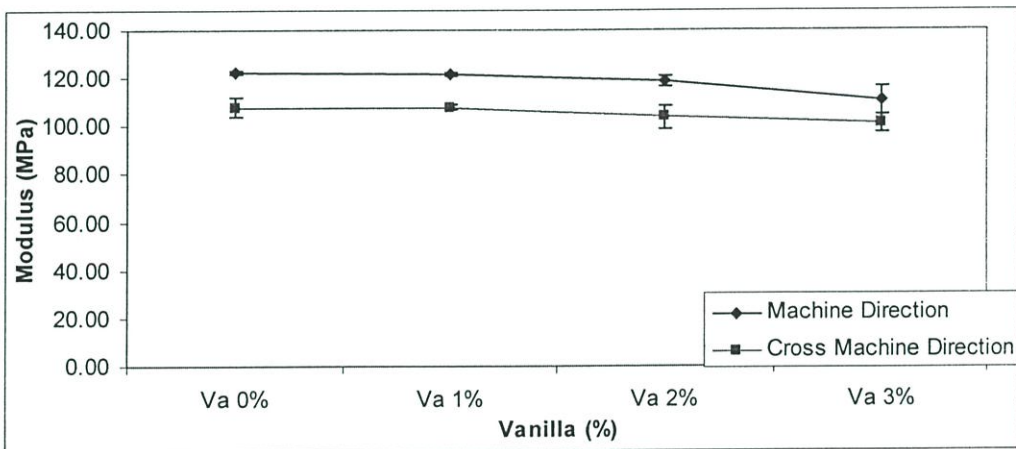
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง กับ ปริมาณสารละลายวานิลลาในพอลิเมอร์ผสม
เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือน

พิจารณารูปที่ 4.32 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารละลายวานิลลาจะมีค่าความแข็งแรงดึงต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารละลายวานิลลาเล็กน้อย เนื่องจากสารละลายวานิลลาที่แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์จะทำให้การรับและส่งผ่านแรงในสายโซ่พอลิเมอร์ไม่สม่ำเสมอทำให้รับแรงดึงได้ต่ำลง เมื่อพิจารณาฐานวิทยารูปที่ 4.28 พบว่าพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจะมีความขรุขระเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการเติมสารละลายวานิลลาเข้าไปในพอลิเมอร์ผสม ความขรุขระนี้ไม่ได้ทำให้เกิดการแบ่งวัฏภาคกันอย่างชัดเจนของพอลิเมอร์ผสมแต่ส่งผลให้เกิดการลดลงของค่าความแข็งแรงดึง และเมื่อนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ได้ทำการขึ้นรูปไปแล้วเป็นเวลานาน 4 เดือนมาทดสอบค่าความแข็งแรงดึงอีกครั้ง พบว่าแนวโน้มการลดลงของค่าความแข็งแรงดึงในรูปที่ 4.33 ยังคงให้ผลสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบ 4 เดือนก่อนหน้า นี้ดังแสดงในรูปที่ 4.32 แต่ลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันออกไปคือความเข้มข้นของกลิ่นวานิลลาในพอลิเมอร์ผสมที่เหลืออยู่เพียงแค่อ่อนๆ เท่านั้น ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ดังรูปที่ 4.27 และการลดลงของน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมดังรูปที่ 4.38 ที่บ่งบอกว่าเมื่อเวลาผ่านไปสารวานิลลาที่มีในพอลิเมอร์ผสมจะค่อยๆ สลายตัวลดลง

4.4.5.2 การทดสอบค่ามอดุลัส (Modulus)



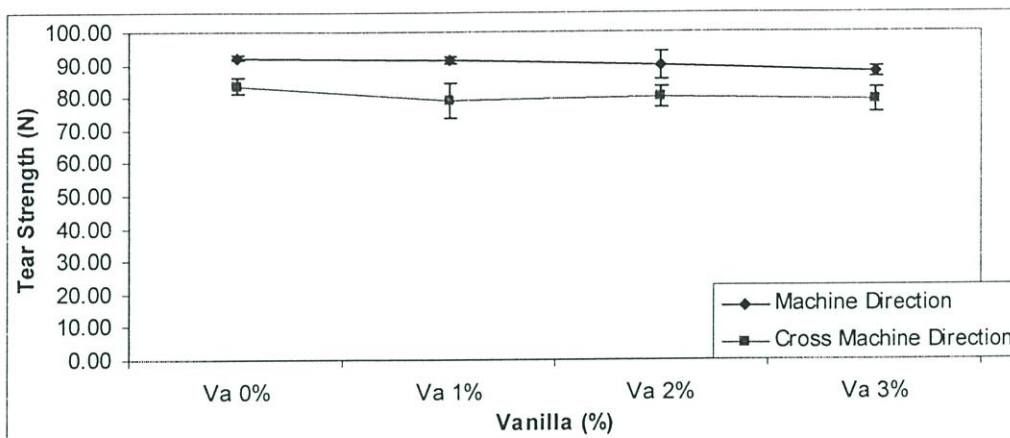
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัส กับ ปริมาณสารละลายวานิลลาในพอลิเมอร์ผสม



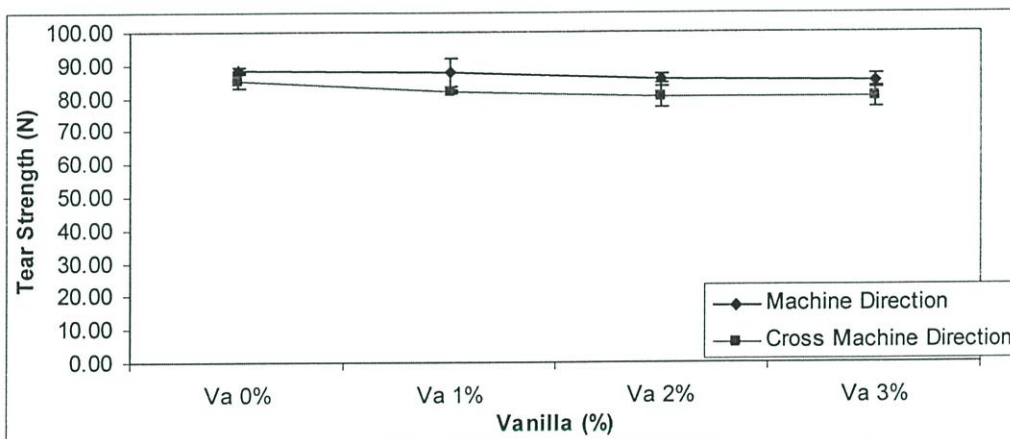
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัส กับ ปริมาณสารละลายวานิลลาในพอลิเมอร์ผสมเมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือน

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.34 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าปริมาณสารละลายวานิลลาที่เติมเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมจะทำให้ค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมมีค่าคงที่ เมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.35 ซึ่งเป็นการนำฟิล์มพอลิเมอร์สูตรเดียวกันนี้ที่ได้ทำการขึ้นรูปแล้วเป็นเวลานาน 4 เดือนมาทดสอบค่ามอดุลัสอีกครั้ง พบว่าแนวโน้มการลดลงของค่ามอดุลัสยังคงลดลงสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบ 4 เดือนก่อนหน้าจากรูปที่ 4.34 เนื่องจากโมเลกุลของสารวานิลลินจะกระจายและแทรกตัวอยู่กับสายโซ่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยอาศัยสารช่วยผสมเป็นตัวช่วยในการยึดเกาะกันระหว่างสารทั้ง 2 ชนิด ซึ่งการเติมสารละลายวานิลลานี้จะทำให้สายโซ่ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีปริมาตรอิสระเพิ่มมากขึ้น สายโซ่ของพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นหรือเรียกได้ว่าพอลิเมอร์มีความนิ่มมากขึ้น ทำให้ค่ามอดุลัสมีค่าลดลง

4.4.5.3 การทดสอบการฉีกขาด (Tear test)



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานฉีกขาด กับ ปริมาณสารละลายวานิลลาในพอลิเมอร์ผสม

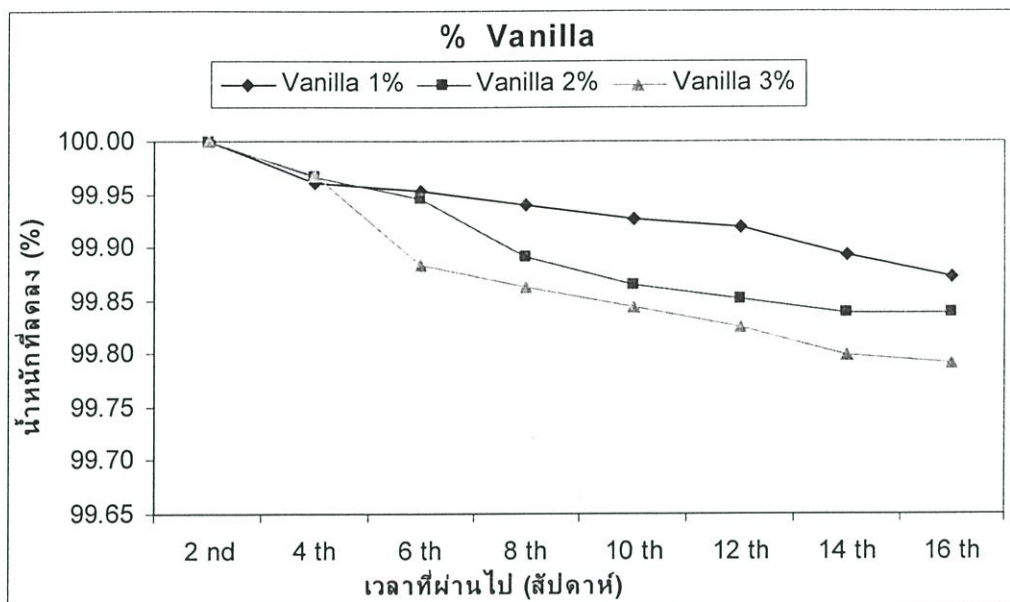


รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานฉีกขาด กับ ปริมาณสารละลายวานิลลาในพอลิเมอร์เมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือน

จากรูปที่ 4.36 พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารละลายวานิลลาในพอลิเมอร์ผสมจะทำให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดมีค่าลดลงเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.37 ซึ่งเป็นการนำฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้ทำการขึ้นรูปแล้วเป็นเวลานาน 4 เดือนมาทดสอบค่าความต้านทานการฉีกขาดอีกครั้ง พบว่าแนวโน้มการลดลงของค่าความต้านทานการฉีกขาดยังคงให้ผลสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบ 4 เดือนก่อนหน้านี้ในรูปที่ 4.36 เนื่องจากสารละลายวานิลลาในพอลิเมอร์ผสมเปรียบเสมือนวัฏภาคกระจายของพอลิเมอร์ซึ่งส่งผ่านแรงไปยังพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำได้ไม่ดีเท่ากับการส่งผ่านระหว่างพอลิเมอร์ด้วยกัน ดังนั้นปริมาณสารละลายวานิลลาจำนวนมากที่มีในพอลิเมอร์ผสมทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของวัฏภาคกระจายของพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้นด้วย ส่งผลให้มีค่าความต้านทานการฉีกขาดของพอลิเมอร์ต่ำลง

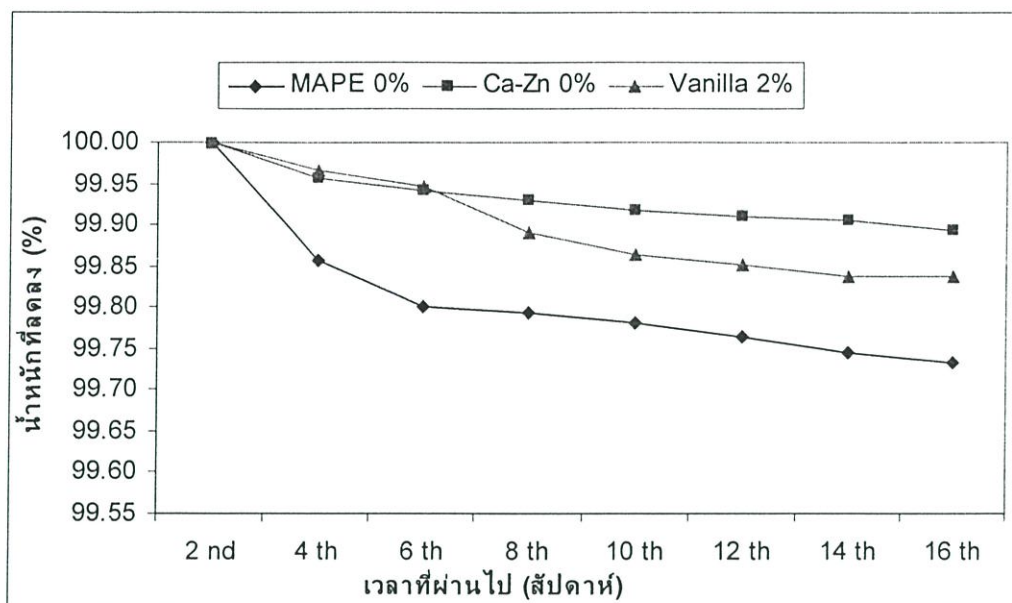
ในงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนการเป่า 3 : 1 อัตราการดึง 5 เมตรต่อนาที เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีความหนา 0.04 มิลลิเมตรเท่าๆ กัน เมื่อพิจารณาทิศทางการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์กับค่าความแข็งแรงดึง พบว่าพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกับเครื่องจักรจะมีความแข็งแรงดึงค่ามอดุลัส และมีค่าความต้านทานการฉีกขาดสูงกว่า เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์มีการเคลื่อนที่และจัดเรียงตัวกันได้ดีกว่าในระหว่างทำการขึ้นรูป ทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางขวางแนวการทำงานของเครื่องจักร

4.4.6 การตรวจวิเคราะห์ด้วยการชั่งน้ำหนัก



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนัก กับ เวลา เปรียบเทียบกันระหว่างพอลิเมอร์ที่มีสารละลายวานิลลาในปริมาณต่างๆ กัน

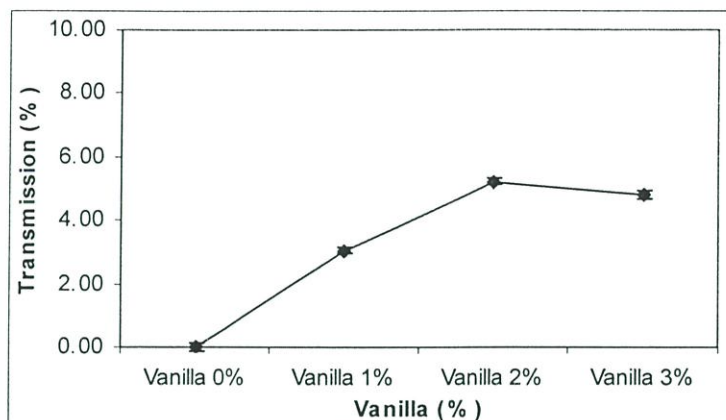
จากรูปที่ 4.38 เป็นการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมที่มีสารละลายวานิลลาในปริมาณที่ต่างกันเมื่อเวลาผ่านไป พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมทั้ง 3 สูตรลดลงอย่างสม่ำเสมอ โดยสูตรที่เปอร์เซ็นต์น้ำหนักลดลงมากที่สุดคือสูตรที่เติมสารละลายวานิลลา 3 % รองลงมาคือ 2 % และ 1 % ตามลำดับ เนื่องจากการใส่สารละลายวานิลลาที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณอัตราส่วนระหว่างส่วนที่มีขี้คือสารละลายวานิลลา และส่วนที่ไม่มีขี้คือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นปริมาณสารช่วยผสมที่(เลือกจากสูตรที่ให้ผลดีที่สุด) 10 % ที่เติมลงไปไม่สามารถสร้างพันธะกับสารละลายวานิลลาได้ทั้งหมด ทำให้เหลือสารละลายวานิลลาอยู่อีกจำนวนหนึ่งในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งวานิลลาส่วนที่ไม่ได้สร้างพันธะกับสารช่วยผสมนี้จะสามารถสลายออกจากพอลิเมอร์ผสมได้ง่าย ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ดังรูปที่ 4.27 ที่บ่งบอกถึงการสลายตัวของสารละลายวานิลลาที่อยู่ในพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นสูตรของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารละลายวานิลลามากทำให้เกิดการสลายตัวได้มาก ทำให้น้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมลดลงมากด้วย



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนัก กับ เวลา เปรียบเทียบกันระหว่างพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ไม่เติมสารช่วยผสม สูตรที่ไม่เติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน และสูตรที่มีทั้งสารช่วยผสมและสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน

จากรูปที่ 4.39 เป็นการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ไม่เติมสารช่วยผสม สูตรที่ไม่เติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน และสูตรที่มีทั้งสารช่วยผสมและสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน โดยทั้ง 3 สูตรมีการเติมสารละลายวานิลลาในปริมาณ 2 % เท่าๆ กัน พบว่าสมบัติของสารช่วยผสมจะช่วยในการสร้างพันธะระหว่างส่วนที่มีขั้วของสารละลายวานิลลากับส่วนที่ไม่มีขั้วของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ส่วนสมบัติของสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนจะเข้าไปแทรกในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้สารละลายวานิลลาที่ไม่ได้สร้างพันธะกับสารช่วยผสมสามารถสลายตัวออกจากพอลิเมอร์ผสมได้ง่าย จากสมบัติทั้ง 2 ส่งผลให้สูตรที่ไม่มีการเติมสารช่วยผสมจะมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักมากที่สุดเนื่องจากไม่เกิดการสร้างพันธะยึดเกาะกันระหว่างสารละลายวานิลลากับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำทำให้การสลายตัวของสารละลายวานิลลาเกิดขึ้นได้ง่ายที่สุดสอดคล้องกับผลในรูปที่ 4.12 ส่วนสูตรไม่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนจะมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักต่ำที่สุดเนื่องจากมีสารช่วยผสมคอยสร้างพันธะระหว่างส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้วทำให้การสลายตัวของสารวานิลลาเกิดขึ้นได้ยากสอดคล้องกับผลในรูปที่ 4.21 ทำให้กลิ่นของสารละลายวานิลลาที่ได้้นั้นค่อนข้างอ่อน แต่สูตรที่เติมทั้งสารช่วยผสมและสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนแม้จะไม่ได้มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักต่ำที่สุด แต่จะนำสมบัติของสารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิดมารวมกัน คือ ทั้งช่วยสร้างพันธะระหว่างส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้วและช่วยในด้านการให้กลิ่นสลายตัวออกมาได้มากขึ้น

4.4.7 การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของไอน้ำ กับ ปริมาณสารละลายวานิลลาที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาปริมาณสารละลายวานิลลาที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.40 เนื่องจากโมเลกุลของสารวานิลลินจะเข้าไปแทรกหรือเข้าไปสร้างพันธะอยู่กับสายโซ่ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ทำให้ปริมาตรอิสระของพอลิเมอร์มีมากขึ้น การซึมผ่านของไอน้ำที่เกิดจากช่องว่างเหล่านี้เพิ่มมากขึ้นด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มพอลิเมอร์และการลดลงของกลิ่นที่ไม่พึงปรารถนาด้วยการเติมสารละลายวานิลลาซึ่งใช้เป็นสารให้กลิ่นลงไป มีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยการใช้สารช่วยผสมชนิดมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride- grafted- polyethylene, MAPE) คือ Fusabond ® MB226D มีค่า MFI 1.5 g/10 min ที่ปริมาณ 5 % 10 % และ 15 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Stabindex NL-214 (Ca/Zn stabilizer) ที่ปริมาณ 1 % 3 % และ 5 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนอินฟราเรด ด้วยเครื่อง FTIR สามารถตรวจพบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของสารช่วยผสม และสารละลายวานิลลาได้ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้การลดลงของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของสารละลายวานิลลาในพอลิเมอร์ผสมยังสามารถใช้ติดตามระยะเวลาการระเหยของสารละลายวานิลลาได้อีกด้วย

2. การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน ด้วยเครื่อง TGA พบว่าสารละลายวานิลลามีอุณหภูมิการสลายตัวค่อนข้างต่ำแต่ยังมีค่ามากกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมพบว่าไม่พบการสลายตัวของสารละลายวานิลลาในเทอร์โมแกรมเนื่องจากปริมาณสารละลายวานิลลาที่เติมเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณน้อย แต่เมื่อพิจารณาการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนพบว่าสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนจะช่วยทำให้พอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงขึ้นได้จริง แต่สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนจะมีผลทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้มีลักษณะขุ่นและส่งผลให้ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าสูงขึ้นด้วย

3. การตรวจวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบภายในพอลิเมอร์ผสมด้วย GC-MS สามารถตรวจพบสารวานิลลินซึ่งเป็นสารประกอบที่สำคัญในการให้กลิ่นวานิลลาในพอลิเมอร์ผสม เมื่อนำชิ้นงานที่ตั้งไว้ในระบบเปิดที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 4 เดือนมาวิเคราะห์พบว่าสารวานิลลินค่อยๆ สลายตัวออกจากพอลิเมอร์ผสมจนทำให้เหลือปริมาณน้อยมากจนเครื่องไม่สามารถตรวจพบได้ เทคนิคนี้จึงเป็นการยืนยันได้ว่าในพอลิเมอร์เมทริกซ์มีสารวานิลลินอยู่และสามารถสลายตัวให้กลิ่นออกมาได้

4. การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง SEM พบว่าสูตรของพอลิเมอร์ผสมที่ดีที่สุดคือเมื่อมีปริมาณสารช่วยผสม 10 % สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน 1 % และสารละลายวานิลลา 2 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จะทำให้มีการกระจายตัวของสารช่วยผสมดีที่สุด พื้นผิวของฟิล์มไม่เกิดรอยต่อระหว่างภูมิภาคต่างๆ สีและกลิ่นของสารละลายวานิลลาไม่เข้มข้นจนเกินไป ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับสมบัติเชิงกลโดยพอลิเมอร์ผสมสูตรนี้จะให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และค่าความแข็งแรงลักษณะที่สุดด้วย

5. จากการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ เมื่อพิจารณาจากปริมาณสารช่วยผสม MAPE ที่เพิ่มขึ้นพบว่าความใสของฟิล์มค่อยๆ ลดลงจนไม่สามารถมองเห็นทะลุผ่านได้ เมื่อพิจารณาจากปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่เพิ่มขึ้นพบว่าความใสของฟิล์มค่อยๆ ลดลงจนไม่สามารถมองเห็นทะลุผ่านได้และพื้นผิวของฟิล์มมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน สุดท้ายการเพิ่มปริมาณสารละลายวานิลลาในพอลิเมอร์ผสมพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีสีเหลืองและมีกลิ่นของสารละลายวานิลลาเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณสารละลายวานิลลาที่ใส่เข้าไป

6. การวิเคราะห์ด้วยการชั่งน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมที่หายไป เพื่อเป็นการตรวจสอบการสลายตัวของสารวานิลลิน พิจารณาปริมาณสารละลายวานิลลาพบว่า การลดลงของน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารละลายวานิลลา 3 % จะทำให้น้ำหนักลดลงมากที่สุด สูตรที่ไม่เติมสารช่วยผสมและสูตรที่เติมสารช่วยผสม 15 % จะมีการลดลงของน้ำหนักสูงใกล้เคียงกันเนื่องจากปริมาณสารช่วยผสมที่มากเกินไปทำให้เกิดการสร้างพันธะกันเองไม่สร้างพันธะกับสารวานิลลิน

7. พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของไอน้ำกับปริมาณสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ในพอลิเมอร์ พบว่าเมื่อมีปริมาณสารช่วยผสม สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน และปริมาณสารละลายวานิลลาเพิ่มมากขึ้นจะทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการศึกษาผลของการใช้สารเติมแต่งกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เช่น พอลิเมอร์ผสม หรือพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เป็นต้น
2. เนื่องจากชิ้นงานที่ได้มีสีเหลือง อาจมีการศึกษาต่อไปถึงวิธีการปรับปรุงสีที่ได้ของพอลิเมอร์
3. ปรับปรุงวิธีตรวจสอบกลิ่นให้มีประสิทธิภาพมากกว่านี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. **สารปรับแต่งพอลิเมอร์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท บุ๊คเน็ต จำกัด
- [2] Wikipedia. 2549. **Vanillin**. [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Vanillin>
- [3] Wikipedia. 2549. **Vanilla**. [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Vanilla>
- [4] Daniel R. Porter. 2547. **Vanillin or Vanilla**. [Online]. Available :
<http://www.historicaljesusquest.com/vanillin.htm>
- [5] Zylstra, G.J. **Microbial synthesis of vanillin and related compounds**.
- [6] Wikipedia. 2549. **Reimer-Tiemann reaction**. [Online]. Available :
http://en.wikipedia.org/wiki/Reimer-Tiemann_reaction
- [7] University of Delaware. 2549. **Synthesis of Vanillin**. [Online]. Available :
<http://valhalla.chem.udel.edu/vanillin.html>
- [8] Wikipedia. 2549. **Lignin**. [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Lignin>
- [9] Walton, N.J. , Mayer, M.J. and Narbad, A. 2546. **Vanillin**. *Phytochemistry*. 63 : 505-515
- [10] Paul, D.R. and Bucknall, C.B. 2543. **Polymer Blends**. Vol.1. U.S.A. : John Wiley and Sons, Inc.
- [11] DuPont Polymer Modifiers. 2549. **Compatibilizers improve the value of blended or recycled polymers**. [Online]. Available :
www.dupont.com/industrial-polymer/plastic/polymers/fusabond.html
- [12] Staff of Modern Plastic Magazine. 2537. **Plastics Handbook**. U.S.A. : McGraw-Hill, Inc.
- [13] มาลินี ชัยสุภกิจสินธ์. 2546. **เคมีพอลิเมอร์**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [14] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2548. **เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1**. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : บริษัท บุ๊คเน็ต จำกัด
- [15] Baird, R.J. and Baird, D.T. 2525. **Industrial Plastics**. U.S.A. : The Goodheart-Willcox co., Inc.
- [16] Thermo Electron Corporation. 2549. **HAAKE PolyDrive Extruder**. [Online]. Available :
<http://www.thermo.com/com/cda/product/detail/0,1055,1000001045124,00.html>
- [17] Netplasmak Ltd. **Blown Film Extruder with Automatic Winder**. [Online]. Available :
<http://www.netplasmak.com>

- [18] Stuart, B.H. 2547. **Infrared Spectroscopy : Fundamentals and Applications**. Sydney, Australia. : John Wiley and Sons., Ltd.
- [19] Skoog, D.A. , West, D.M. , Holler, F.J. and Crouch, S.R. 2547. **Fundamentals of Analytical Chemistry**. 8th ed., U.S.A. : Books/Cole-Thomson Learning.
- [20] Bioforum. 2549. **Fourier Transform InfraRed (FTIR)**. [Online]. Available :
http://www.forumsci.co.il/HPLC/FTIR_page.html
- [21] Hatakeyama, T. and Quinn, F.X. 2537. **Thermal Analysis : Fundamentals and Applications to Polymer Science**. Ibaraki, Japan. : John Wiley and Sons., Ltd.
- [22] Änderung, L. 2545. **Thermogravimetric analysis (TGA)**. [Online]. Available :
<http://www.amft.tugraz.at/science/pyrolyse/pyrolyse.de.4.html>
- [23] Flegler, S.L. , Heckman, J.W. and Klomparens, K.L. 2536. **Scanning and Transmission Electron Microscopy and Introduction**. Michigan State University. : Oxford University Press, Inc.
- [24] Amelinckx, S. , Dyck, D.V. , Landuyt, J.V. and Tendeloo, G.V. 2540. **Electron Microscopy Principles and Fundamentals**. Germany. : A Wiley co.
- [25] Perkes, P. 2542. **Scanning Electron Microscopy (SEM)**. [Online]. Available :
<http://accept.la.asu.edu/PiN/rdg/elmicr/elmicr.shtml>
- [26] Wikipedia. 2550. **Gas chromatography-mass spectrometry**. [Online]. Available :
http://en.wikipedia.org/wiki/Gas_chromatography-mass_spectrometry
- [27] Christian, G.D. and Reilly, J.E.O. **Instrumental Analysis**. 2nd Edition
- [28] Shah, V. 2541. **Handbook of Plastics Testing Technology**. 2nd ed., U.S.A. : John Wiley and Sons, Inc.
- [29] American Standard for Testing and Materials. 2541. **Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting**. ASTM D 882. Annual Book of ASTM Standard 08.01., Philadelphia
- [30] IDES Inc. 2529-2549. **Tensile Properties of Film - ASTM D 882**. [Online]. Available :
http://www.ides.com/property_descriptions/ASTMD882.asp
- [31] Richardson, T.L. 2532. **Industrial Plastics : Theory and Application**. 2nd ed. New York. : Delmar Publishers, Inc.

- [32] American Standard for Testing and Materials. 2539. **Standard Test Method for Initial Tear Resistance of Plastic Film and Sheeting.** ASTM D 1004. Annual Book of ASTM Standard 08.01., Philadelphia
- [33] IDES Inc. 2529-2549. **Tear Strength - ASTM D 1004.** [Online]. Available : http://www.ides.com/property_descriptions/ASTMD1004.asp
- [34] American Standard for Testing and Materials. 2541. **Standard Test Method for Water Vapor Transmission of Materials.** ASTM E 96-95. Annual Book of ASTM Standard 04.06., Philadelphia
- [35] Mariani, P. , Carianni, G. and La Mantia, F.P. 2547. **The antioxidant effect in controlling thermal degradation of a low density polyethylene blown film.** Polymer degradation and stability. 85 : 1003 - 1007
- [36] Bledzki, A.K. , Kessler, A. and Lieser, L. 2542. **Odour reduction on plastic and its measurement.** Polymer Testing. 18 : 63-71
- [37] Walton, N.J. , Mayer, M.J. and Narbad, A. 2546. **Vanillin.** Phytochemistry. 63 : 1003-1007
- [38] Perez-Silva, A. , Odoux, E. , Brat, P. , 2549. **GC-MS and GC-olfactometry analysis of aroma compounds in a representative organic aroma extract from cured vanilla (*Vanilla planifolia*) beans.** Food Chemistry.
- [39] Villberg, K. , Veijanen, A. , Gustafsson, I. and Wickstrom, K. 2540. **Analysis of odour and taste problems in high-density polyethylene.** Journal of Chromatography A. 791 : 213-219
- [40] Kohn, J. , Tate, R. and Jordy, D. 2540. ANTEC'97. : 1654-1658
- [41] Lee, K.T. and Yoon, C.S. 2544. Journal of Food Science and Biotechnology. 10(3) : 282-285
- [42] Lin-Vien, D. , Colthup, N.B. , Fateley, W.G. and Grasselli, J.G. 1991. **The Handbook of Infrared and Raman Characteristic Frequencies of Organic Molecule.** Academic Press., New York
- [43] Wikipedia. 2550. **Xylene.** [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Xylene>
- [44] Hee-Soo, K. , Sumin, K. , Hyun-Joong, K. and Han-Seung, Y. 2549. **Thermal properties of bio-flour-filled polyolefin composites with different compatibilizing agent type and content.** Thermochemica Acta. 451 : 181-188

- [45] Rana, A.K. , Mandal, A. , Mitra, B.C. , Jacobson, R. , Rowell, R. and Banerjee, A.N.
2541. **Short Jute Fiber-Reinforced Polypropylene Composites : Effect of
Compatibilizer.** Journal Apply Polymer Science. 69 : 329-338

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 แสดงสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มเป่า

ตัวแปรที่มีผลกับการขึ้นรูป	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง
อัตราเร็วของเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว ในการผสมสูตร	60 รอบ / นาที
อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว ในการผสมสูตร (จากส่วนป้อนสารจนถึงหัวคาย)	150 - 155 - 160 - 160 °C ตามลำดับ
อัตราเร็วของเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว ในการขึ้นรูปฟิล์มเป่า	100 รอบ / นาที
อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว ในการขึ้นรูปฟิล์มเป่า (จากส่วนป้อนสารจนถึงหัวคาย)	160 - 170 - 180 - 180 °C ตามลำดับ
ความสูงของแนวเส้นแข็งตัว (สูงจากหัวคาย)	12 นิ้ว
อัตราการพองตัว	3 : 1
ความเร็วในการดึงของลูกกลิ้ง	5 เมตร / นาที
เส้นผ่านศูนย์กลางของฟิล์ม	6 นิ้ว
ความหนาของฟิล์ม	0.04 มิลลิเมตร

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ในการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มเป่า

Sample	Tensile : Machine Direct		Tensile : Cross Machine Direct	
	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
Extruder speed 60 rpm	14.06±0.89	85.46±8.90	9.78±0.91	98.20±2.40
Extruder speed 80 rpm	15.24±0.57	89.74±4.05	11.15±0.52	103.98±2.36
Extruder speed 100 rpm	15.42±0.66	94.87±4.27	11.77±0.31	106.72±0.78
Extruder speed 120 rpm	16.97±0.20	98.84±3.36	14.15±0.81	109.55±2.33
DDR 3 m/min	13.86±0.69	85.41±5.29	12.07±0.54	99.04±4.25
DDR 5 m/min	15.42±0.66	89.74±4.27	11.77±0.31	106.72±0.78
DDR 7 m/min	16.81±0.51	87.26±5.99	10.67±0.39	109.68±4.30
DDR 9 m/min	18.32±0.45	87.91±5.31	9.97±0.62	117.76±7.16

* หมายถึง DDR (Draw-Down Ratio) คือ อัตราเร็วในการดึงของลูกกิ้ง

ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงโดยสารช่วยผสม สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน และสารละลายวานิลลา

ตารางที่ ข.2 ค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม

Sample	Tensile : Machine Direct		Tensile : Cross Machine Direct	
	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
LDPE	15.21±0.54	94.79±5.09	13.62±0.38	85.49±9.25
LDPE+MAPE	15.48±0.58	95.22±1.91	13.84±0.59	86.05±3.91
LDPE+CaZn	15.16±0.63	92.41±2.45	13.70±0.83	81.71±4.87
LDPE+Vanilla	14.64±0.97	89.00±6.96	12.52±0.94	80.52±6.35
PE+MA 0%+St+Va	14.08±0.77	92.70±7.35	13.39±0.88	94.99±5.25
PE+MA 5%+St+Va	14.63±0.35	112.50±8.15	13.52±1.11	97.05±4.74
PE+MA 10%+St+Va	16.02±1.04	136.03±6.11	14.41±0.77	108.25±8.49
PE+MA 15%+St+Va	14.19±0.96	135.30±5.97	12.82±0.58	107.93±5.55
PE+MA+St 0%+Va	14.22±1.09	122.43±7.38	13.24±0.70	100.62±7.05
PE+MA+St 1%+Va	13.81±0.95	126.85±8.39	13.11±0.60	102.21±5.23
PE+MA+St 3%+Va	12.48±0.78	112.87±9.09	11.40±0.62	93.17±5.45
PE+MA+St 5%+Va	7.29±0.53	71.26±8.46	7.32±0.58	61.85±5.15
PE+MA+St+Va 0%	14.39±0.46	119.83±4.97	12.66±0.51	98.28±6.37
PE+MA+St+Va 1%	12.59±0.71	119.35±6.59	12.15±0.47	97.75±9.10
PE+MA+St+Va 2%	13.05±0.90	121.36±10.80	12.48±1.15	97.99±6.24
PE+MA+St+Va 3%	12.62±0.70	118.68±10.56	12.18±0.50	92.17±5.97
PE+MA+St+Va 0% 4	14.58±0.54	122.15±0.64	11.87±0.25	107.90±3.96
PE+MA+St+Va 1% 4	13.29±0.24	121.43±0.57	11.27±0.18	107.90±1.29
PE+MA+St+Va 2% 4	13.00±0.75	118.57±2.40	10.83±0.13	103.70±4.67
PE+MA+St+Va 3% 4	12.97±0.24	110.60±5.80	10.35±0.01	100.80±3.82

ตารางที่ ข.3 ค่าความต้านทานการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสม

Sample	Tear : Machine Direct		Tear : Cross Machine Direct	
	Tear Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Tear Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
LDPE	92.26±4.61	451.09±27.10	75.52±3.84	423.32±18.74
LDPE+MAPE	95.28±6.79	435.20±20.37	76.26±2.85	429.58±26.00
LDPE+CaZn	90.91±6.04	427.10±19.39	73.14±8.08	352.89±25.63
LDPE+Vanilla	90.44±4.69	435.38±18.24	76.86±4.37	359.30±16.26
PE+MA 0%+St+Va	98.86±4.07	458.04±11.62	80.57±5.52	428.30±14.39
PE+MA 5%+St+Va	99.09±9.24	482.96±20.24	82.50±2.50	430.25±27.26
PE+MA 10%+St+Va	102.20±6.04	549.36±25.79	84.24±2.67	461.74±21.93
PE+MA 15%+St+Va	91.38±6.07	569.72±9.18	80.79±0.85	441.88±22.19
PE+MA+St 0%+Va	102.45±1.29	498.75±18.67	88.05±2.37	395.10±13.57
PE+MA+St 1%+Va	100.58±2.31	530.13±21.66	92.67±4.31	440.20±19.63
PE+MA+St 3%+Va	83.73±4.60	410.09±19.55	70.51±3.24	390.71±4.82
PE+MA+St 5%+Va	59.41±2.34	315.25±9.66	61.65±3.74	253.37±19.39
PE+MA+St+Va 0%	92.11±0.97	565.98±12.48	83.52±2.39	456.99±16.57
PE+MA+St+Va 1%	91.45±1.24	573.13±11.28	79.06±5.16	477.43±17.64
PE+MA+St+Va 2%	89.83±4.42	574.41±11.29	80.18±3.28	466.83±9.68
PE+MA+St+Va 3%	87.72±1.74	546.79±15.12	78.94±3.85	433.14±12.58
PE+MA+St+Va 0% 4	88.30±4.06	562.76±18.07	85.33±4.34	442.47±10.70
PE+MA+St+Va 1% 4	87.66±4.15	567.73±12.81	81.90±0.27	479.90±1.00
PE+MA+St+Va 2% 4	85.73±1.12	576.38±11.78	80.48±2.75	448.50±13.40
PE+MA+St+Va 3% 4	85.16±2.02	570.52±26.26	80.38±5.98	484.25±22.70

ตารางที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนัก กับ เวลาที่ผ่านไป

Sample	เวลาที่ผ่านไป (สัปดาห์)							
	2 nd	4 th	6 th	8 th	10 th	12 th	14 th	16 th
MAPE 0%	100.00	99.86	99.80	99.79	99.78	99.76	99.74	99.73
MAPE 5%	100.00	99.95	99.89	99.88	99.88	99.87	99.86	99.86
MAPE 10%	100.00	99.92	99.90	99.88	99.86	99.86	99.85	99.84
MAPE 15%	100.00	99.89	99.84	99.83	99.81	99.80	99.77	99.76
Ca-Zn 0%	100.00	99.96	99.94	99.93	99.92	99.91	99.90	99.89
Ca-Zn 1%	100.00	99.92	99.88	99.87	99.86	99.85	99.85	99.83
Ca-Zn 3%	100.00	99.96	99.92	99.88	99.87	99.86	99.85	99.84
Ca-Zn 5%	100.00	99.99	99.95	99.94	99.91	99.89	99.88	99.87
Vanilla 1%	100.00	99.96	99.95	99.94	99.93	99.92	99.89	99.87
Vanilla 2%	100.00	99.97	99.95	99.89	99.86	99.85	99.84	99.84
Vanilla 3%	100.00	99.97	99.88	99.86	99.84	99.82	99.80	99.79

ภาคผนวก ก

ปัญหาที่พบในงานวิจัย

1. ควรปิดปากถุงเม็ดพลาสติกทุกครั้งหลังจากใช้งานเสร็จ เนื่องจากความชื้นจะมีผลต่อเม็ดพลาสติกจะส่งผลให้ฟิล์มที่ขึ้นรูปได้มีความมันลดลง ฟิล์มมีลักษณะเหนียวเพิ่มขึ้นแยกออกจากกันได้ง่าย

2. ใช้อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดียวในการขึ้นรูปฟิล์มเป่าของพอลิเมอร์ผสมไม่ต่ำกว่า 160°C และไม่สูงเกิน 180°C เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำกว่า 160°C จะพบพอลิเมอร์ที่ยังไม่หลอมละลายบางส่วนทำให้เกิดรูร่วนบนพื้นผิวฟิล์ม และที่อุณหภูมิสูงเกิน 180°C พอลิเมอร์ผสมที่ออกจากหัวดายมีความเหลวมากจนไม่สามารถขึ้นรูปได้

3. พอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีสารละลายวานิลลาในอัตราส่วนที่มากกว่า 3 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จะไม่สามารถผสมให้รวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้ เนื่องจากปริมาณสารละลายวานิลลาที่มากเกินไปทำให้สารละลายวานิลลานั้นทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นภายในเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยวแทน

4. พอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนในอัตราส่วนที่มากกว่า 5 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จะไม่สามารถผสมให้รวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้เนื่องจากปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่มากเกินไปทำให้เกิดการแยกวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์และสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน

5. ไม่สามารถตรวจพบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของสารช่วยผสมด้วยเครื่องมือ FTIR ในกรณีบีดอัดรวมกับสาร KBr เป็นฟิล์มบางได้ ต้องใช้สารละลายไซลีนช่วยในการละลายพอลิเมอร์ผสมก่อนเมื่อได้เป็นสารละลายใสแล้วนำสารละลายไปฉีดให้เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างเพลา KBr รอให้แห้งจะได้เป็นฟิล์มขนาดบาง แล้วนำไปบันทึกสเปกตรัม

ประวัติผู้ทำงานวิจัย

ชื่อ	ภัทรพงษ์ สงวนศักดิ์
วันเกิด	24 กุมภาพันธ์ 1982
ภูมิลำเนา	กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	236 ซ.ศุภฤกษ์ ถ.สุทธิสาร สามเสนนอก ห้วยขวาง กรุงเทพฯ 10310
การศึกษา	- ระดับมัธยม โรงเรียนเซนต์คาเบรียล - ระดับปริญญาตรี (วท.บ.) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ - ระดับปริญญาโท (วท.ม.เทคโนโลยีพอลิเมอร์) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง