



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสังเคราะห์วัสดุผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแคลเซียม
ฟอสเฟตโมโนไฮเดรต

Synthesis for composite materials of polyester and calcium dihydrogen
phosphate monohydrate

นายสมศักดิ์ วรมงคลชัย

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2556
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสังเคราะห์วัสดุผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแคลเซียม
ฟอสเฟตโมโนไฮเดรต

Synthesis for composite materials of polyester and calcium dihydrogen
phosphate monohydrate

นายสมศักดิ์ วรมงคลชัย

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การสังเคราะห์วัสดุผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแคลเซียม

ฟอสเฟตโมโนไฮดรต

แหล่งเงิน

คณะวิทยาศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2555 ถึง 30 กันยายน 2556

1. หัวหน้าโครงการ ดร.สมศักดิ์ วรรณกุลชัย ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์

สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ 02-3298400-8411 E-mail : kwosomsa@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ได้สังเคราะห์สารประกอบฟอสเฟต ด้วยวิธีการตกตะกอนแบบธรรมดา โดยใช้สารตั้งต้น 2 ชนิด จากนั้นทำการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารทั้งสองด้วยเทคนิคต่างๆ โดยตรวจสอบรูปแบบการสั่นพื้นฐานด้วยเทคนิค FTIR พบว่ามีการสั่นของหน่วยย่อยของ PO_4^{3-} และ H_2O ตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่าโครงสร้างของสารประกอบฟอสเฟตทุกตัว เป็นผลึกแบบออร์โธโรมบิก ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วย SEM พบว่าสารที่เตรียมได้มีรูปร่างและขนาดอนุภาคแตกต่างกันขึ้นกับสารตั้งต้นที่เตรียม สุดท้ายทำการผสมสารประกอบฟอสเฟตกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการเป่า พบว่าสมบัติเชิงกลจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

คำสำคัญ : สารประกอบฟอสเฟต โครงสร้างผลึก สัณฐานวิทยา การตกตะกอนแบบธรรมดา

Research Title: Synthesis for composite materials of polyester and calcium dihydrogen phosphate monohydrate

Researcher: Somsak Woramongkolchai

Faculty: Science

Department: Chemistry

ABSTRACT

Phosphate compound had been synthesized by a simple precipitation without precipitating agent that using of 2 initial compounds. And then, characteristic methods were used for identification of both compounds. Fundamental vibrations of PO_4^{3-} anions and H_2O in structures had been determined by FTIR spectroscopy. After that, XRD technique has been use for studied the structure of compounds. The XRD result was found that all of substances were orthorhombic phase. Then, morphology study of compound by SEM, the result was indicated that there were clearly different shapes and particle sizes that were depend on raw material systems. Finally, the phosphate compound was mixed with low-density polyethylene by blow molding method. We found that the mechanical properties of low-density polyethylene with phosphate were decreased when compared to low-density polyethylene.

Keywords : Phosphate compound; low-density polyethylene; Morphology; Simple precipitation

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เรื่อง “การสังเคราะห์วัสดุผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮดรต” สำเร็จลุล่วงและราบรื่นเป็นอย่างดี ด้วยการได้รับการสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556 ของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งบประมาณ 50,000 บาท คณะผู้ทำวิจัยต้องขอขอบพระคุณสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ที่เอื้ออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ ตรวจสอบวิเคราะห์เอกลักษณ์ของสาร ด้วยเทคนิค FTIR XRD, TGA และ SEM ขอขอบคุณนักศึกษาทั้งระดับปริญญาตรีและ โท ที่ช่วยประสานงาน และทำการทดลองและทำการวิเคราะห์เครื่องมือสำหรับตรวจสอบเอกลักษณ์ที่ทำการวิจัยนี้ และต้องขอขอบพระคุณบุคคลที่ช่วยให้คำปรึกษา ชี้แนะ ประสานงาน และเพื่อร่วมงานวิจัยท่านอื่น ทุกคน คือ อาจารย์ประจำสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสุดท้ายขอขอบประธานสาขาเคมีและท่านคณบดี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มีนโยบายสนับสนุนการทำวิจัยด้วยดีตลอดมา เป็นแรงบันดาลใจให้นักวิจัยมุ่งมั่นทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วง ตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้

นายสมศักดิ์ วรมงคลชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับปุ๋ย	3
2.2 พอลิเอทิลีน	4
2.3 กระบวนการผลิตฟิล์ม	7
2.4 หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์	8
2.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล	15
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	19
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	19
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	20
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	21
3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์	22
3.5 การเตรียมฟิล์ม	25
3.6 การตรวจสอบสมบัติของแผ่นฟิล์ม	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	28
4.1 ผลการสังเคราะห์ (Synthesis results)	28

4.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิคต่าง ๆ (Characteristic materials and Identification method)	29
4.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล	36
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	39
5.1 สรุปผลการสังเคราะห์ (Synthetic results)	39
5.2 สรุปผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิคต่าง ๆ (Characteristic materials and Identification method)	39
5.3 สรุปผลจากการศึกษาสมบัติเชิงกล	40
5.4 ข้อเสนอแนะ	40
เอกสารอ้างอิง	41
ประวัตินักวิจัย	43

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติบางประการของ LDPE	7
3.1 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เกรด LD 1905F	19
3.2 อัตราส่วนการผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และสารกลุ่มโลหะฟอสเฟต	25
3.3 สภาพที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม	25
4.1 น้ำหนักของสารที่ได้จากการทดลองและทฤษฎี รวมทั้งร้อยละผลผลิตของสาร $\text{MnNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ และ $\text{KMgPO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})$	28
4.2 ปริมาณธาตุอาหารของสารที่สังเคราะห์	28
4.3 แถบการสั่น และการจำแนกรูปแบบการสั่นของสาร $\text{MnNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$	30
4.4 แถบการสั่น และการจำแนกรูปแบบการสั่นของสาร $\text{KMgPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ และ KMgPO_4	32

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างครุชนิการไหลกับความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติทางกายภาพ	5
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลกับเศษส่วนโดยมวล	6
2.3 โครงสร้างของ LDPE	6
2.4 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย TGA	9
2.5 แสดงภาพตัวอย่างที่ถ่ายได้จากเครื่อง SEM	11
2.6 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	12
2.7 แสดงแผนภูมิระบบ The Michelson Interferometer	13
2.8 แสดง อินฟราเรดสเปกตรัม (IR Spectrum)	14
2.9 ลักษณะของตัวอย่างทดสอบการฉีกขาด (Tear specimens)	14
3.1 แผนภาพการสังเคราะห์สารตัวเดียวและการตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะของสาร	23
3.2 แผนภาพการสังเคราะห์สารตัวเดียวและการตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะของสาร	24
3.3 แผนผังขั้นตอนการเตรียมฟิล์มย่อยสลายและการทดสอบสมบัติต่างๆ	22
4.1 สเปกตรัม FTIR ของสาร $\text{MnNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	29
4.2 สเปกตรัม FTIR ของสาร $\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$	29
4.3 สเปกตรัม FTIR ของสาร $\text{KMgPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	30
4.4 สเปกตรัม FTIR ของสาร KMgPO_4	31
4.5 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสติฐานด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์(XRD) ของสาร $\text{NH}_4\text{MnPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (ก่อนเผา) ที่สังเคราะห์จากสารตั้งต้นต่างกันเทียบกับกราฟมาตรฐาน PDF#860577	33
4.6 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสติฐานด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์(XRD) ของสาร $\text{MgKPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (ก่อนเผา) ที่สังเคราะห์จากสารตั้งต้นต่างกันเทียบกับกราฟมาตรฐาน PDF#751076	33
4.7 ภาพถ่าย SEM ของ (a) $\text{NH}_4\text{MnPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, (b) $\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$	34
4.8 ภาพถ่าย SEM ของ (a) $\text{KMgPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, (b) KMgPO_4	35
4.9 กราฟแสดงการสลายตัวทางความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอุณหภูมิตั้งแต่เตรียมจาก $(\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4)$	35
4.10 กราฟแสดงการสลายตัวทางความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอุณหภูมิตั้งแต่เตรียมจาก $(\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{HPO}_4)$	36

4.11	ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มเป่า LDPE , PLA และ LDPE + ปุ๋ย 10%	36
4.12	ค่ายังมอดุลัสของฟิล์มเป่า LDPE , PLA และ LDPE + ปุ๋ย 10%	37
4.13	ค่ายังมอดุลัสของฟิล์มเป่า LDPE , PLA และ LDPE + ปุ๋ย 10%	37

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

การปลูกพืชโดยใช้พลาสติกคลุมดิน ควรมีการให้ปุ๋ยไปพร้อมระบบน้ำซึ่งเป็นการ ใช้ประโยชน์จากระบบน้ำหยดที่มีอยู่แล้ว และเป็นการประหยัดแรงงานในการให้ปุ๋ยด้วย ก่อนปลูกพลาสติกนั้นเกษตรกรจะต้องทำการโรยท่อน้ำหยดก่อนทำการปลูกพลาสติกคลุมท่อน้ำหยดอีกที สาเหตุที่มีการปลูกพืชโดยใช้พลาสติกคลุมดินนั้น เพื่อป้องกันหญ้าขึ้นในร่องปลูกและป้องกันการระเหย ของน้ำ นอกจากนี้ยังควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยทางระบบ น้ำหยด ซึ่งพืชจะได้รับอย่างสม่ำเสมอและทั่วถึง ลดการใช้สารเคมี ในการกำจัดวัชพืช ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกพืชประเภทผักและผลไม้ประมาณ 1.24 ล้านไร่ ซึ่งปัจจุบันมีพื้นที่แค่เพียงประมาณ 650 ไร่ที่ปลูกภายใต้โรงเรือน (กรีนเฮาส์) แต่หากมีการนำฟิล์มพลาสติกมาใช้ จะช่วยเพิ่มมูลค่าผลผลิตให้กับเกษตรกรอีกมาก เนื่องจากมูลค่าการส่งออกและบริโภคในประเทศของพืชประเภทผักและผลไม้ของไทยมีอยู่ทั้งสิ้นประมาณ 36,500 ล้านบาท ซึ่งหากฟิล์มพลาสติกได้มีการนำไปใช้ จะช่วยเพิ่มมูลค่าของผลผลิตให้กับเกษตรกรทั่วประเทศได้รวมทั้งสิ้นกว่า 10,000 ล้านบาท [1]

ปัจจุบันสารกลุ่มโลหะฟอสเฟตได้รับความสนใจและมีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง เพราะสารกลุ่มนี้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ได้ในหลายด้าน เช่น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผงสี ตัวแลกเปลี่ยนไอออน เซลล์เชื้อเพลิง สารชักล้าง สารเติมแต่งในอาหาร สีเคลือบผิววัสดุเซรามิกหรือโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อน ใช้เป็นปุ๋ยที่มีทั้งธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองแก่พืช คือให้ทั้งธาตุฟอสฟอรัสและธาตุโลหะ [2]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะทำการสังเคราะห์สารประกอบฟอสเฟตเพื่อนำมาผลิตเป็นปุ๋ย และนำไปผสมกับพอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นฟิล์มคลุมดิน ที่ทำหน้าที่ทั้งเป็นวัสดุคลุมดิน และเป็นพอลิเมอร์ที่คอยปลดปล่อยปุ๋ยออกมาอย่างช้าๆ

1.2 วัตถุประสงค์

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบฟอสเฟตสองชนิด คือ แมงกานีสแอมโมเนียมฟอสเฟตไฮเดรต ($\text{MnNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) และ โพแทสเซียมแมกนีเซียมฟอสเฟตไฮเดรต ($\text{KMgPO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})$) จากนั้นนำไปผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ทำการขึ้นรูปโดยการเป่า ดังนั้นในการศึกษารั้งนี้จึงแบ่งวัตถุประสงค์ออกเป็น 7 ข้อ คือ

- 1.2.1 สังเคราะห์แมงกานีสแอมโมเนียมฟอสเฟตไฮเดรต ($\text{MnNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) และ โพแทสเซียมแมกนีเซียมฟอสเฟตไฮเดรต ($\text{KMgPO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})$) โดยวิธีการตกตะกอนที่ง่ายและรวดเร็ว จากนั้นนำไปผึ่งให้แห้ง เพื่อให้ได้สารประกอบฟอสเฟต

- 1.2.2 ศึกษาปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวกับการสังเคราะห์และการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม
- 1.2.3 ตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดด้วยเทคนิคฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy , FTIR)
- 1.2.4 ศึกษาผลของสารประกอบฟอสเฟตที่มีต่อแผ่นฟิล์ม
- 1.2.5 ศึกษาสมบัติต่างๆของแมงกานีสแอมโมเนียมฟอสเฟตไฮเดรต ($\text{MnNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) และโพแทสเซียมแมกนีเซียมฟอสเฟตไฮเดรต ($\text{KMgPO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})$) เช่น สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการสังเคราะห์แมงกานีสแอมโมเนียมฟอสเฟตไฮเดรต ($\text{MnNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) และโพแทสเซียมแมกนีเซียมฟอสเฟตไฮเดรต ($\text{KMgPO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})$) เพื่อใช้ในการผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับสารประกอบฟอสเฟต
2. ศึกษาปริมาณของโพแทสเซียมแมกนีเซียมฟอสเฟตไฮเดรต ($\text{KMgPO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})$) เพื่อทำการผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับสารประกอบฟอสเฟต
3. ศึกษาสมบัติต่างๆของแมงกานีสแอมโมเนียมฟอสเฟตไฮเดรต ($\text{MnNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) และโพแทสเซียมแมกนีเซียมฟอสเฟตไฮเดรต ($\text{KMgPO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})$) เช่น สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสังเคราะห์สารประกอบฟอสเฟตได้อย่างถูกต้อง
2. สามารถผลิตแผ่นฟิล์มที่มีส่วนประกอบของปุ๋ย จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และสารประกอบฟอสเฟตได้
3. สามารถผลิตฟิล์มที่สามารถปลดปล่อยปุ๋ยได้อย่างช้าๆได้
4. สามารถทราบถึงสมบัติต่างๆของแผ่นฟิล์มที่สามารถผลิตได้
5. สามารถนำความรู้ที่ใช้ไปเป็นพื้นฐานความรู้ทางการวิจัย โดยประยุกต์ใช้กับพอลิเมอร์ผสมอื่นๆได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับปุ๋ย [3]

การเพาะปลูก เป็นอาชีพมาตั้งแต่สมัยโบราณและเป็นอาชีพหลักที่สืบทอดกันมาจนกระทั่งทุกวันนี้ ในสมัยก่อนเกษตรกรได้มีการเรียนรู้จากประสบการณ์ว่า การใส่มูลสัตว์ หรือซากพืชซากสัตว์ลงไปดินจะทำให้ดินไม่ที่ปลูกเจริญงอกงาม ปัจจุบันนี้ความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ ทำให้มนุษย์ทราบว่าเหตุที่เป็นเช่นนั้น เพราะมูลสัตว์หรือซากพืชและซากสัตว์ให้อาหารแก่พืช และนอกจากนั้นยังทำให้ดินโปร่ง ร่วนซุย ทำให้อุ้มน้ำและอาหารไว้ได้ดี จึงทำให้พืชเจริญงอกงาม ต่อมาภายหลังมนุษย์ได้เรียกวัสดุที่ได้จากสิ่งมีชีวิต เช่น มูลสัตว์ หรือซากพืช และซากสัตว์ ว่า ปุ๋ยอินทรีย์ เนื่องจากปุ๋ยอินทรีย์มีอาหารพืชอยู่น้อย จึงต้องใช้ในปริมาณมาก ทำให้ไม่สะดวกในการใช้ จึงได้มีการคิดค้นวัสดุชนิดใหม่ ซึ่งมีอาหารพืชอยู่มาก และใช้ในปริมาณเล็กน้อย มาแทน วัสดุชนิดนี้ เรียกว่า ปุ๋ยเคมี หรือ ปุ๋ยวิทยาศาสตร์ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในปัจจุบัน คำว่า "ปุ๋ย" นั้นโดยทั่วไปหมายถึงวัสดุใด ๆ ก็ตาม ที่นำมาใช้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้อาหารแก่พืช อาหารพืชหรือที่เรียกกันว่า ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของพืชนั้นมี 16 ธาตุ ได้แก่ ออกซิเจน ไฮโดรเจน คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม กำมะถัน แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก สังกะสี แมงกานีส ทองแดง โบรอน โมลิบดีนัม และคลอรีน พืชได้รับ ออกซิเจน ไฮโดรเจน และคาร์บอน จากน้ำและอากาศ ทั้งที่อยู่เหนือดินและใต้ดิน ส่วนที่เหลืออีก 13 ธาตุ นั้นพืชได้จากแร่ธาตุต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบของดิน ธาตุอาหารหลักหรือธาตุปุ๋ย มี 3 ธาตุ คือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ธาตุอาหารในกลุ่มนี้ พืชต้องการในปริมาณมาก และดินมักจะมีไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช จึงต้องเพิ่มเติมให้แก่พืชโดยการใช้ปุ๋ย

ปุ๋ยแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยเคมี

1. ปุ๋ยอินทรีย์ คือ ปุ๋ยที่ได้จากสิ่งมีชีวิต ได้แก่ ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยพืชสด ขี้ค่างควา กระจูดป่น และเลือดแห้ง เป็นต้น

2. ปุ๋ยเคมี คือ ปุ๋ยที่ได้จากสิ่งมีชีวิต เช่น จากหิน หรือแร่ธาตุต่าง ๆ หรือจากการสังเคราะห์ขึ้น เช่น ปุ๋ยยูเรีย แอมโมเนียมซัลเฟต หินฟอสเฟตบด หรือปุ๋ยเคมีสูตรต่าง ๆ ที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป

แม้ว่าปุ๋ยเคมีจะมีธาตุอาหารพืชอยู่มากกว่าปุ๋ยอินทรีย์ก็ตาม แต่ปุ๋ยเคมีไม่สามารถทดแทนปุ๋ยอินทรีย์ได้ทั้งหมด เพราะปุ๋ยเคมีไม่มีคุณสมบัติในการปรับปรุงโครงสร้างของดินให้โปร่งและร่วนซุยได้ นอกจากนั้นปุ๋ยเคมีส่วนใหญ่จะไม่มีธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริมครบทุกธาตุเหมือนปุ๋ยอินทรีย์ ปุ๋ยเคมีทั่ว ๆ ไป จะเกี่ยวข้องกับธาตุอาหารอยู่ 3 ธาตุ คือ ธาตุไนโตรเจน ธาตุ

ฟอสฟอรัส และธาตุโปรตัสเซียม ซึ่งทั้ง 3 ธาตุนี้ ก็คือธาตุปุ๋ยนั่นเอง จึงอาจแบ่งปุ๋ยเคมีออกตามจำนวนธาตุที่มีอยู่ในปุ๋ยได้โดยแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ปุ๋ยเดี่ยวและปุ๋ยผสม

1. ปุ๋ยเดี่ยว คือ ปุ๋ยที่มีธาตุปุ๋ยอยู่เพียงธาตุเดียว เช่น ยูเรีย มีไนโตรเจนเพียงธาตุเดียว หรือโปรตัสเซียมคลอไรด์มีโปรตัสเซียมอยู่เพียงธาตุเดียวเป็นต้น
2. ปุ๋ยผสม จะมีธาตุปุ๋ยอยู่ 2 หรือ 3 ธาตุ เช่น ปุ๋ยสูตร 16 - 20 - 20 มีธาตุไนโตรเจน และธาตุฟอสฟอรัสเพียง 2 ธาตุ ส่วนปุ๋ยสูตร 15 - 15 - 15 จะมีธาตุ ธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโปรตัสเซียมครบทั้ง 3 ธาตุ เป็นต้น

บนกระสอบหรือภาชนะซึ่งบรรจุปุ๋ยเคมีนั้นโดยปกติ จะมีตัวเลขอยู่ 3 จำนวน แต่ละจำนวนจะมีขีดคั่นกลาง เช่น 46 - 0 - 0, 16 - 20 - 0 หรือ 15 - 15 - 15 เป็นต้น ตัวเลขที่อยู่หน้าสุดนั้นเป็นตัวเลขแสดงเปอร์เซ็นต์ (%) ของเนื้อธาตุไนโตรเจน ตัวเลขกลางเป็นเปอร์เซ็นต์ ของเนื้อธาตุฟอสฟอรัส และตัวเลขตัวหลังเป็นเปอร์เซ็นต์ ของเนื้อธาตุโปรตัสเซียม โดยน้ำหนัก ตัวเลขทั้ง 3 จำนวนนี้ เรียกว่า "สูตรปุ๋ย"

2.2 พอลิเอทิลีน [4]

พอลิเอทิลีน (PE) นับเป็นพลาสติกที่มีการใช้มากที่สุดและราคาถูก เนื่องจากพอลิเอทิลีนมีจุดหลอมเหลวต่ำเมื่อเทียบกับพลาสติกชนิดอื่นๆ ทำให้มีต้นทุนการผลิตต่ำ พอลิเอทิลีนผลิตจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ของก๊าซเอทิลีน (Ethylene) ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงโดยอยู่ในสภาวะปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ (Metal catalyst) การจับตัวของโมเลกุลในลักษณะสายโซ่สั้นและยาวจะส่งผลให้พอลิเอทิลีนที่ได้ออกมามีความหนาแน่นแตกต่างกัน

พอลิเอทิลีนแบ่งเป็น 3 ประเภทตามค่าความหนาแน่น คือ

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene หรือ LDPE) ความหนาแน่น 0.910-0.925 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Polyethylene หรือ MDPE) ความหนาแน่น 0.926-0.940 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
3. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene หรือ HDPE) ความหนาแน่น 0.941-0.965 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

2.2.1. สมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีน [5]

สมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีนที่จะพิจารณามีอยู่ 3 ประการ คือ ความหนาแน่น (Density) ดรรชนีการไหล (Melt index) และการกระจายขนาดน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight distribution) ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในแต่ละหัวข้อดังต่อไปนี้

2.2.1.1. ความหนาแน่น

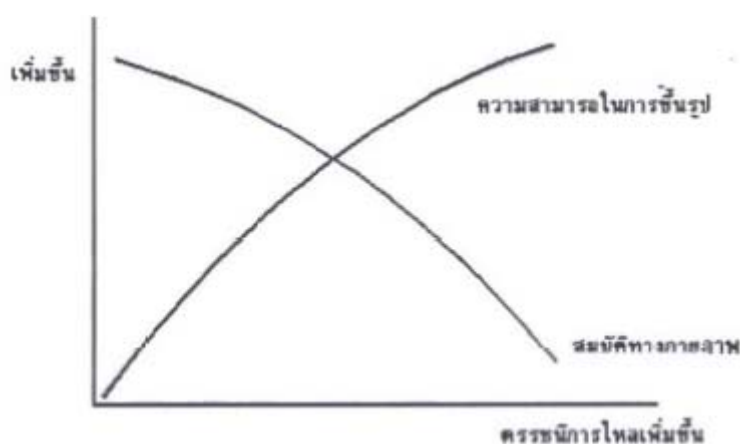
ความหนาแน่นของพลาสติก หมายถึง น้ำหนักของพลาสติกต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งทาง ASTM จะใช้หน่วยของความหนาแน่นเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm³) พอลิเอทิลีนจะมี

ความหนาแน่นสูงหรือต่ำขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ กระบวนการผลิต และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ โครงสร้างของโมเลกุล และขนาดน้ำหนักโมเลกุล แต่ละปัจจัยจะมีผลต่อ ความหนาแน่นของเม็ดพลาสติกแตกต่างกัน ปัจจัยที่มีผลมาก คือ โครงสร้างของโมเลกุล โครงสร้างของโมเลกุลที่มีกิ่งยาว และจำนวนมากจะทำให้ความหนาแน่นต่ำเพราะการที่มีกิ่งจะทำให้ความเป็นระเบียบของโมเลกุลมีน้อย โมเลกุลอยู่แบบหลวมๆ แสงทะลุผ่านง่ายจึงมีความใสแต่ความแข็งแรงต่ำ ส่วนโครงสร้างที่มีกิ่งสั้นและจำนวนน้อยจะทำให้ความหนาแน่นสูงเพราะโมเลกุลอยู่อย่างมีระเบียบและใกล้กัน จะมีความแข็งแรงแต่ไม่ใสเพราะแสงทะลุผ่านยาก ซึ่งเรียกส่วนที่เป็นระเบียบนี้ว่า “ส่วนที่เป็นผลึก” (Crystalline) และส่วนที่อยู่กันอย่างหลวมๆ เรียกว่า “ส่วนที่เป็นอสัณฐาน” (Amorphous)

2.2.1.2. วรรณิการไหล

วรรณิการไหลในบางครั้งอาจเรียกว่า “อัตราการไหลเมื่อหลอมเหลว” (Melt flow rate) ในที่นี้ขอใช้คำว่าวรรณิการไหลหรือเรียกย่อว่า “MI” คำว่า “วรรณิการไหล” หมายถึง การวัดการไหลของพลาสติกขณะเหลวโดยกำหนดความยาวขนาดของช่องทางการไหลที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน หลักการนี้ใช้ควบคุมคุณภาพของเทอร์โมพลาสติก ค่าวรรณิการไหลของเม็ดพลาสติกควรมีค่าสม่ำเสมอ ถ้ามีค่าไม่สม่ำเสมอทางผู้จะใช้จะมีปัญหาในการปรับเครื่อง เม็ดพลาสติกที่ใช้ในงานต่างๆ กันจะมีค่าวรรณิการไหลที่เหมาะสมแตกต่างกันด้วย ค่าวรรณิการไหลสามารถแสดงถึงสมบัติและขนาดของโมเลกุลได้ดังนี้ ถ้าขนาดโมเลกุลขนาดใหญ่จะทำให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ดีขึ้น การที่ค่าวรรณิการไหลสามารถแสดงถึงน้ำหนักขนาดน้ำหนักโมเลกุลได้ เพราะโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้นการเคลื่อนไหวยาวการไหลตัวจะต้องใช้พลังงานมากขึ้น ดังนั้นถ้าใช้พลังงานเท่ากันในการทดสอบการไหลตัว ขนาดโมเลกุลใหญ่จะไหลตัวได้น้อยกว่า

ในด้านความสัมพันธ์ของวรรณิการไหลกับสมบัติอื่นที่สำคัญ ได้แก่ เรื่องของความยากง่ายในการผลิตขึ้นรูปและสมบัติทางกายภาพทั่วไป ซึ่งแสดงได้ดังกราฟต่อไปนี้

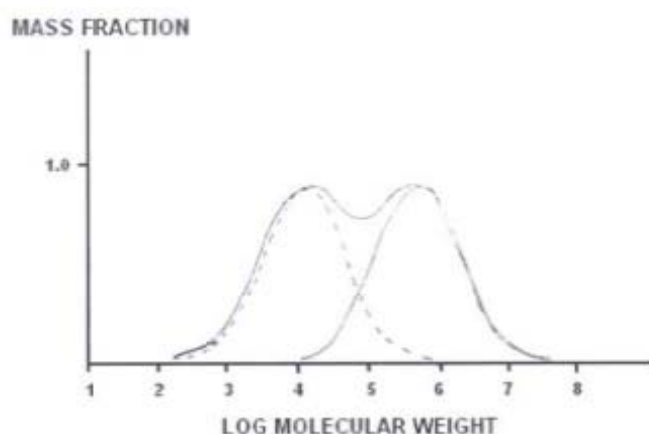


ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างวรรณิการไหลกับความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติทางกายภาพ [5]

จากกราฟแสดงว่าเมื่อกระบวนการหลอมเหลวเพิ่มขึ้น การผลิตชิ้นรูปจะง่ายขึ้นแต่สมบัติทางกายภาพส่วนใหญ่จะลดลงเพราะขนาดโมเลกุลเล็กลง

2.2.1.3. การกระจายของขนาดน้ำหนักโมเลกุล

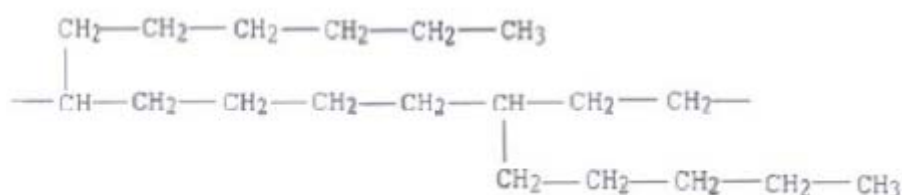
การกระจายของขนาดน้ำหนักโมเลกุลเป็นสมบัติพื้นฐานที่มีผลกระทบต่อสมบัติทางประการทั้งการผลิตชิ้นรูปและสมบัติทางกายภาพด้วย ในการผลิตพอลิเมอร์ซึ่งเกิดจากสารหน่วยเล็กๆที่เรียกว่า “มอนอเมอร์” เกิดพันธะเคมีต่อกันเป็นสายโซ่ยาวแต่จำนวนหน่วยมอนอเมอร์ในแต่ละสายโซ่โมเลกุลจะมีจำนวนไม่เท่ากันทุกๆโมเลกุล ดังนั้นขนาดโมเลกุลจึงไม่เท่ากันในทุกสายโซ่ ถ้าความแตกต่างของขนาดโมเลกุลในเนื้อพลาสติกมีมากจะเรียกว่า “การกระจายขนาดน้ำหนักโมเลกุลกว้าง” ซึ่งพอจะอธิบายได้คร่าวๆจากกราฟต่อไปนี้



ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลกับเศษส่วนโดยมวล[5]

2.2.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีความเป็นผลึกต่ำ มีโครงสร้างเป็นโซ่กิ่งสาขา ยาว พอลิเมอร์โซ่สั้นผ่านกลไกอนุมูลอิสระมีออกซิเจนหรือเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่ม ทำให้เกิดโซ่กิ่งจำนวนมาก โซ่กิ่งโดยมากเป็นหมู่อัลคิลสายสั้นๆ เช่น เอทิลหรือบิวทิลซึ่งเกิดจากกลไก “Intramolecular back-biting”



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของ LDPE [6]

2.2.2.1 สมบัติโดยทั่วไปของ LDPE มีดังต่อไปนี้ [6]

1. มีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
2. มีการไหลตัวที่ดี มีค่า Melt flow index อยู่ในช่วง 0.1-10.9 g/10 min

3. มีค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ดีพอสมควร
4. มีการซึมผ่านของไอน้ำที่ดี เหมาะสำหรับงานที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์
5. फिल्मที่ได้จาก LDPE จะมีความเป็นเงามันดี (High gloss) และมีความเป็นฝ้าต่ำ

(Low haze)

6. เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ค่อนข้างดี (Good dielectric property)

LDPE มีการใช้อย่างกว้างขวาง เพราะวราคาไม่แพง ยืดหยุ่นได้ ทนทานมากและทนต่อสารเคมีกรดและด่าง อีกทั้งยังแปรรูปได้ง่าย เป็นฉนวนได้ออย่างดีและไม่มีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ มีความสามารถในการรับแรงกระแทก และมีความยืดหยุ่น LDPE ถูกนำมาขึ้นรูปเป็นขวด หีบห่ออาหาร และของเล่นต่างๆ

LDPE เป็นพลาสติกที่ใช้มากในงานฟิล์มบรรจุภัณฑ์และมีชื่อสามัญเรียกว่า “ถุงเย็น” มักจะใช้ทำถุง ฟิล์มหัด ฟิล์มยืด ขวดน้ำ และฝาขวด เป็นต้น เนื่องจากยืดตัวได้ดี ทนต่อการที่มทะเลและฉีกขาด พร้อมทั้งสามารถใช้ความร้อนเชื่อมติดปิดผนึกได้ดี โครงสร้างของพอลิเอทิลีนจะสามารถป้องกันความชื้นได้ดีพอสมควร นอกจากนี้ LDPE ยังทนต่อกรดและด่างต่างๆไป และปล่อยให้อากาศซึมผ่านได้ง่าย แต่ข้อเสียของ LDPE คือสามารถปล่อยให้ไขมันซึมผ่านได้ง่าย

ตารางที่ 2.1 สมบัติบางประการของ LDPE [6]

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
การดึงยืด ณ จุดขาด	%	D638	90.0-800.0
ความแข็งแรงกระแทก	J.m ⁻¹	D256	No break
อุณหภูมิเบี่ยงเบนทางความร้อน	°C	D648	38.0-49.0

2.3 กระบวนการผลิตฟิล์ม

กระบวนการผลิตฟิล์มมีอยู่หลากหลายรูปแบบ เช่น การขึ้นรูปฟิล์มด้วยการเป่า (Blown Film Extrusion) ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นพวกถุง การขึ้นรูปฟิล์มด้วยการหล่อ (Cast film extrusion) ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นฟิล์มหัด ฟิล์มยืด เป็นต้น

2.3.1 การขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า [7]

หลักการคือ เม็ดพลาสติกจะถูกรีดผ่านเกลียวขับ (Extruder) พร้อมกับมีการให้ความร้อนเพื่อทำการหลอม พลาสติกหลอมเหลวถูกขับออกผ่านหัวดาย (Die head) รูปวงแหวน พอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกจากหัวดายจะถูกเป่าให้เป็นท่อกว้างโดยเครื่องเป่าลม (Blower) ซึ่งมีการเป่าลมเย็นเพื่อป้องกันไม่ให้ผิวของฟิล์มติดกันและลดแรงดึงภายในเนื้อฟิล์ม ท่อพอลิเมอร์จะถูกดึงให้เกิดการยืดตัวตามแนวยาวและมีการเป่าให้เกิดการขยายตัวออกในแนวขวาง และถูกม้วนเก็บเพื่อนำไปตัดเป็นแผ่นฟิล์มหรือทำเป็นถุงต่อไป

ความดันของอากาศจัดเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อความหนาของฟิล์ม รวมทั้งปริมาณและทิศทางของอากาศที่ใช้ในการหล่อเย็นจะต้องมีการควบคุมเพราะทั้งสองตัวแปรมีความเกี่ยวข้องกับการควบคุมความหนาของฟิล์ม ทั้งนี้ความสม่ำเสมอของความดันจะช่วยลดหรือกำจัดการเกิดเป็นคลื่น (Surging) ของฟิล์มด้วย ตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ ผลผลิตที่ได้จากเครื่องอัดรีด ความเร็วในการดึง (Take-off speed) อุณหภูมิตลอดกระบอกใส่สกรูและดาย ความกว้างของรูเปิดดาย ซึ่งเป็นตำแหน่งของแกนหมุนที่อยู่ภายในดายจะต้องมีการปรับให้ดีขึ้นเพื่อให้ความหนาของฟิล์มสม่ำเสมอ ส่วนอัตราการหล่อเย็นตรงที่ฟองถูกทำให้เย็นมีความสำคัญในการได้ฟิล์มที่มีคุณภาพสูงสุด และช่วยป้องกันการขวางกั้น (Blocking) ในลูกกลิ้งด้านบนสุด (Nip rolls) และลูกกลิ้งม้วน (Wind-up rolls) โดยทั่วไปต้องการอากาศปริมาณมากที่มีความดันต่ำมากกว่าอากาศที่มีความดันสูง

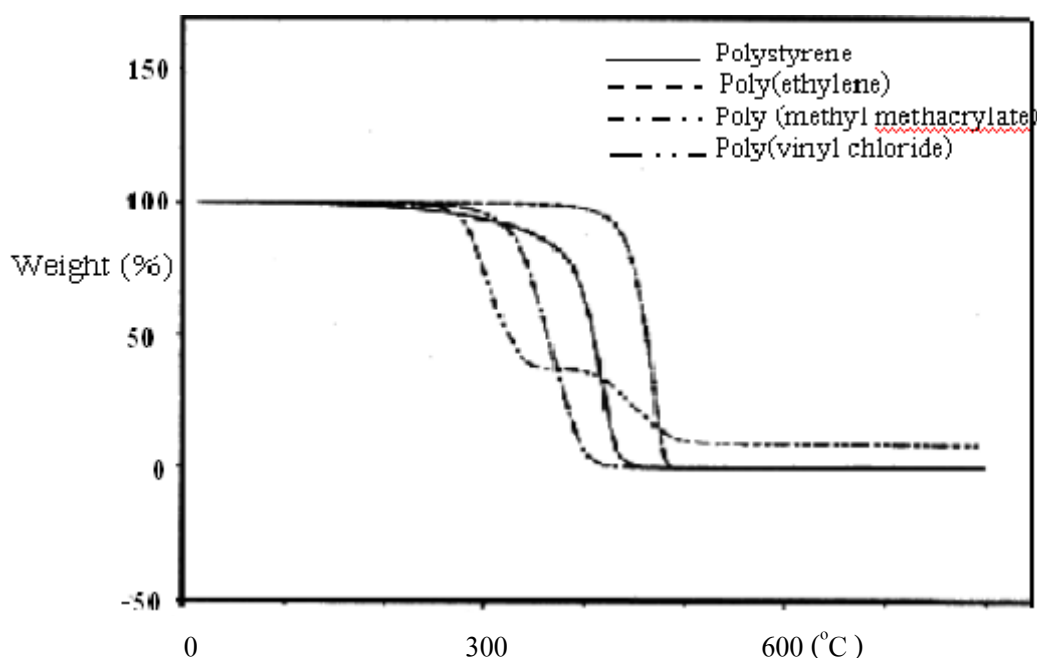
สมบัติของฟิล์มเป่า ได้แก่ ความแข็งแรงต่อการฉีกขาด (ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักร, MD และทิศทางตามแนวขวาง, TD) โดยใช้วิธีการทดสอบของเอลเมนดอร์ฟ (Elmendorf) ความทนทานต่อแรงกระแทก ความใส-ความขุ่น ความเงาของผิว ความแข็งแรงดึง (ทั้งในทิศทาง MD และ TD) การจัดเรียงตัว เปอร์เซ็นต์การยืดออก ความหนา และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก เป็นต้น ตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อสมบัติเหล่านี้ ได้แก่ อุณหภูมิของการหลอมเหลว ความหนาของฟิล์ม ความสม่ำเสมอของความหนาของแผ่นฟิล์ม อัตราส่วนการดึงลง อัตราส่วนการเป่า ความสูงของแนวเส้นแข็งตัว (Frost line height) (ระยะทางเหนือดายที่เกิดความขุ่น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการตกผลึกในขณะที่พอลิเมอร์หลอมเหลวเย็นตัวลง ซึ่งจัดเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากต่อความหนาของฟิล์ม) โดยพบว่าถ้าเพิ่มความสูงของแนวเส้นแข็งตัว เปอร์เซ็นต์ของความขุ่นจะเพิ่มขึ้น ความเงาของผิวจะเพิ่มขึ้น แต่ความใสจะลดลง ความไม่สมบูรณ์ของผิวจะลดลง และความแข็งแรงต่อแรงกระแทกจะลดลง

การขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่าเหมาะสมในการขึ้นรูปถุง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวิธีนี้จะมีลักษณะเป็นท่อกว้างที่ไม่มีตะเข็บข้าง และสามารถทำให้สมบัติเชิงกลต่างๆ มีความสม่ำเสมอทั้งในทิศทาง MD และ TD แต่ข้อเสียคือฟิล์มที่ได้จะมีความหนาที่ไม่ค่อยสม่ำเสมอ และมีความใสน้อยกว่าวิธีขึ้นรูปแบบหล่อ (Cast film extrusion)

2.4 หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์

2.4.1 เครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) [8]

เป็นวิธีเบื้องต้นในการวิเคราะห์ความเสถียรของพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน โดยใช้พื้นฐานการวัดน้ำหนักอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง (thermobalance) ในระหว่างการวิเคราะห์ อุณหภูมิของตัวอย่างซึ่งอยู่ในบรรยากาศปกติ หรือก๊าซเฉื่อยจะถูกทำให้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลการวิเคราะห์จะถูกบันทึกเป็นเทอร์โมแกรมที่แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่าง และอุณหภูมิ ดังภาพที่ 2.4 การสูญเสียน้ำหนักในช่วงแรกของการวิเคราะห์ หรือที่อุณหภูมิต่ำอาจเกิดจากการระเหยของน้ำหรือตัวทำละลาย แต่ที่อุณหภูมิสูงมักเกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ ข้อมูลเหล่านี้ทำให้ทราบเกี่ยวกับความเสถียรต่ออุณหภูมิของพอลิเมอร์ เทคนิคนี้ยังมีประโยชน์มากในการวิเคราะห์หาสารที่ระเหย หรือสารเติมแต่งที่ใส่ลงไปในพอลิเมอร์อีกด้วย



ภาพที่ 2.4 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย TGA [8]

2.4.3 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) [9]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นอุปกรณ์ที่ประยุกต์นำเอาอิเล็กตรอนที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสงมาใช้แทนคลื่นแสงและใช้สนามไฟฟ้าแทนเลนส์กระจก โดยมีตัวตรวจวัดที่จะมาจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากลำอิเล็กตรอนไปกระทบผิววัตถุ ต่อจากนั้นจะมีอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณภาพปรากฏบนจอรับภาพ โดยภาพของวัตถุจะมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า ถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของ

ภาพ ซึ่งจะขึ้นกับลักษณะของวัตถุได้ตั้งแต่ระดับ 3 ถึง 100 นาโนเมตร หลักการเกิดภาพในกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) จะเริ่มต้นจากเมื่ออิเล็กตรอน

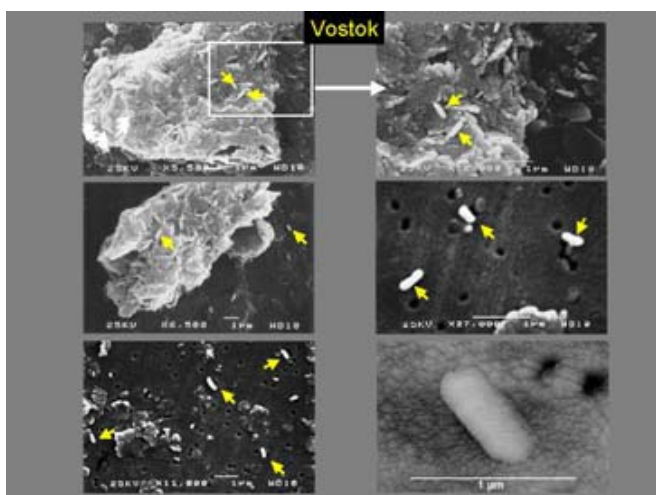
หลักการเกิดภาพในกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) จะเริ่มต้นจากเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง (1,000-3,000 eV) ที่สามารถปรับค่าได้จากนั้นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถูกดึงดูดลงสู่เบื้องล่างโดยแผ่นแอโนด (anode plate) ภายใต้ภาวะความดันสุญญากาศ 10^{-5} - 10^{-7} ทอร์และมีชุดคอนเดนเซอร์เลนส์ที่จะปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน ซึ่งลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนลงสู่เบื้องล่างผ่านเลนส์วัตถุซึ่งทำหน้าที่ปรับลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิววัตถุพอดี และลำของอิเล็กตรอนที่กระทบผิววัตถุจะมีขนาดอยู่ในช่วง 5 ถึง 200 นาโนเมตร โดยจะมีชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (scan coil) ของลำอิเล็กตรอนซึ่งจะทำให้หน้าที่ในการควบคุมทิศการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิววัตถุ โดยจะสามารถกำหนดได้โดยผ่านทางชุดควบคุม (control unit)

เมื่ออิเล็กตรอนกระทบผิววัตถุจะเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมธาตุของวัตถุและจะเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ขึ้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่างๆเป็นผลให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอน (electron signal) ชนิดต่างๆออกมาซึ่งจะนำไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในวัตถุโดยสัญญาณภาพที่ได้จากอิเล็กตรอนชนิดต่างๆมีดังนี้

- สัญญาณภาพที่ได้จากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image, SEI) เป็นภาพที่เกิดจากกลุ่มอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ (ประมาณ 3-5 eV) เกิดขึ้นในระดับพื้นผิวที่ไม่ลึก (น้อยกว่า 10 นาโนเมตร) โดยจะเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ผิวต่ำ

- สัญญาณภาพที่ได้จากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image, BEI) ซึ่งเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานบางส่วนให้กับอะตอมของวัตถุและกระเจิงกลับออกมา ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และจะเกิดที่พื้นผิวระดับลึกมากกว่า 10 นาโนเมตรโดยจะเกิดขึ้นกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง

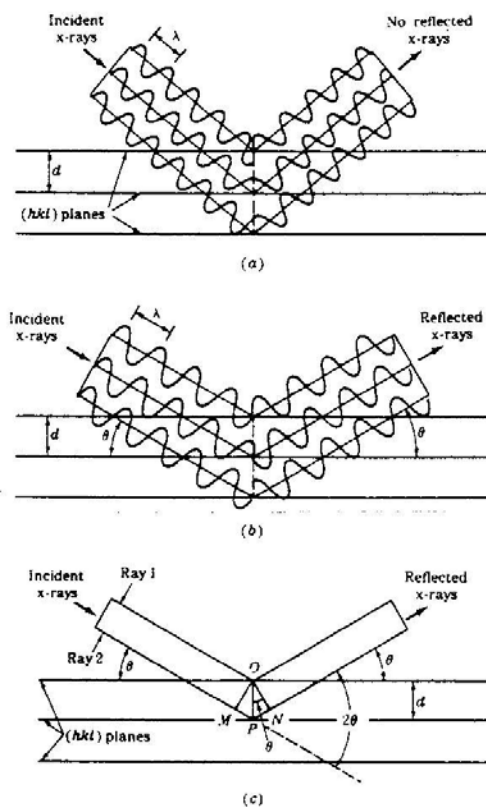
- สัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ (X-Ray Image, XRI) ชนิดที่เป็นเป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัวซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆถูกกระตุ้น(excited) หรือได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจรออกมา ทำให้อะตอมต้องรักษาสถิตของโครงสร้างรวมภายในอะตอมโดยการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ และต้องลดระดับพลังงานภายใน เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมาแทนที่มีระดับพลังงานสูงกว่า โดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อทำให้ตัวเองมีพลังงานเท่ากับชั้นวงโคจรที่ไปแทนที่ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีความยาวคลื่นเฉพาะในแต่ละธาตุ จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตุตามระดับพลังงานของตัวอย่างได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ



ภาพที่ 2.5 แสดงภาพตัวอย่างที่ถ่ายได้จากเครื่อง SEM [9]

2.4.4 เครื่อง X-ray diffraction (XRD) [10]

เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน หรือ เทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่นำรังสี X มาใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง เทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสี X ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกันโดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่ององศาในการเลี้ยวเบนของรังสี X จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษา รายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้น ของสารประกอบในสารตัวอย่าง อีกทั้งความหนาของฟิล์มได้อีกด้วย

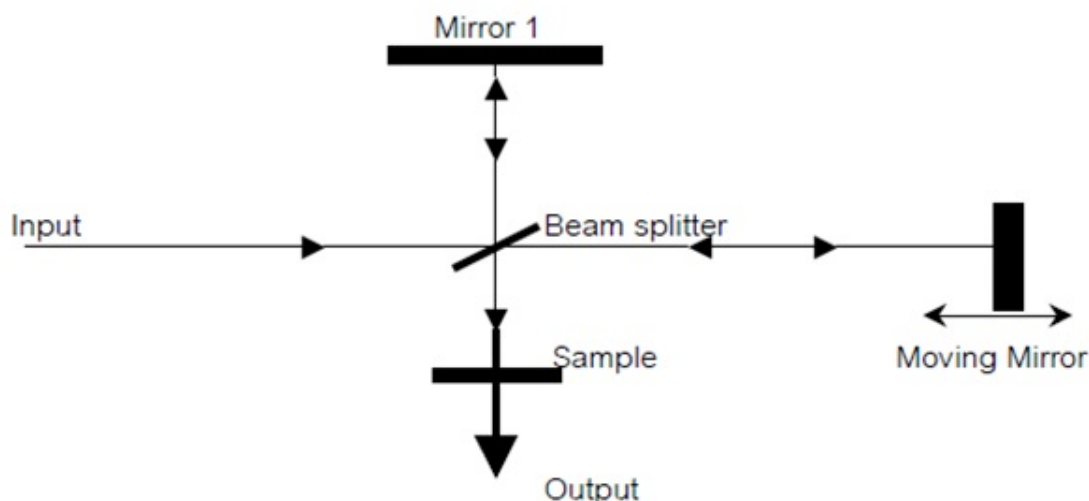


ภาพที่ 2.6 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [10]

2.4.5 Fourier Transform InfraRed Spectrometer (FT-IR)

Fourier Transform InfraRed Spectrometer (FT-IR Spectrometer) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง ที่พัฒนามาจาก เครื่อง IR Spectrometer เพื่อให้สามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้น มีความสามารถในการแยกสูง และสภาพไวสูง สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีในปริมาณน้อยๆได้ หลักการและวิธีการวิเคราะห์

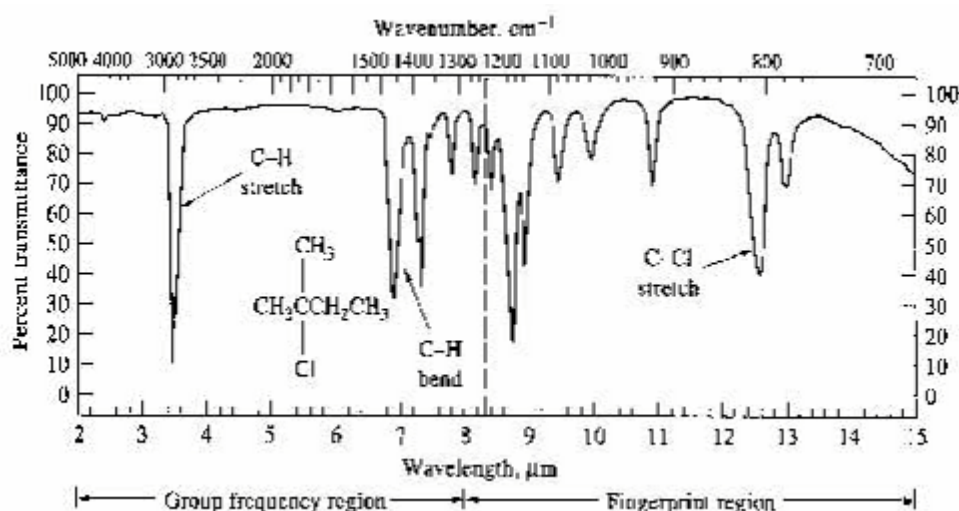
แหล่งกำเนิดคลื่นอินฟราเรดของเครื่อง FT-IR Spectrometer เป็นแท่งเซรามิกที่เผาด้วยขดลวดความร้อน ทำให้เกิดรังสีอินฟราเรด สู่กระจกเงาที่ทำด้วยโลหะขัดมัน สะท้อนคลื่นแสงสู่ส่วนสำคัญคือตัวแยกแสง (Beam Splitter) เพื่อแยกคลื่นแสงออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ส่วนหนึ่งจะผ่านทะลุออกไป อีก ส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับสู่กระจกเงาที่เคลื่อนที่ได้ โดยมีแสงเลเซอร์ปรับระยะการเคลื่อนที่ของกระจก ให้มีระยะและทิศทางที่คลื่นแสงทั้งสองส่วนมารวมกันเป็นลำแสงเดี่ยวผ่านไปยังสารตัวอย่าง ซึ่งเรียกระบบนี้ว่า The Michelson Interferometer ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 แสดงแผนภูมิระบบ The Michelson Interferometer [11]

คลื่นรังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้อยู่ระหว่างย่านที่มองเห็น (Visible region) กับย่านไมโครเวฟ ความยาวของคลื่นอินฟราเรด แบ่งเป็นช่วงๆคือ คลื่นอินฟราเรดในช่วง Wave number 4,000-12,800 cm^{-1} (2.5-0.78 ไมโครเมตร) เป็นย่านอินฟราเรดใกล้ (Near infrared region) ช่วง wave number 200-4,000 cm^{-1} (50-2.5 ไมโครเมตร) เป็นย่านอินฟราเรดกลาง (Middle infrared region) ช่วง wave number 10-200 cm^{-1} (1,000-50 ไมโครเมตร) เป็นย่านอินฟราเรดไกล (Far infrared region) นักเคมีวิเคราะห์จะให้ความสนใจ และใช้ประโยชน์คลื่นรังสีอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle IR.) มากกว่าช่วงอื่น

คลื่นอินฟราเรดในช่วง wave number 4,000 – 400 cm^{-1} ซึ่งจัดเป็นแสงอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle IR.) มีความถี่ซึ่งตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของสาร เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่พอเหมาะจะเกิดการสั่นหรือการหมุนของพันธะของโมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสง แล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมา แสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือ wave number กับค่าการส่งผ่านของแสง เรียกว่าอินฟราเรด สเปกตรัม (Infrared Spectrum –IR spectrum) ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 แสดง อินฟราเรดสเปกตรัม (IR Spectrum) [11]

อินฟราเรดสเปกตรัมเป็นข้อมูลเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด ซึ่งแตกต่างจากสารชนิดอื่น โมเลกุลที่มีพันธะต่างชนิดกันจะมีความถี่ของการดูดกลืนคลื่นต่างกัน ทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของ โมเลกุลของสารนั้นๆว่ามีหมู่ฟังก์ชันอะไรบ้าง ในตำแหน่งไหน เช่น สารกลุ่ม แอลกอฮอล์ จะพิกของพันธะ O-H อยู่ที่ประมาณ 3,300-3,600 ซม.⁻¹ หมู่เอมีน มีพิกพันธะ N-H อยู่ที่ 3,500 ซม.⁻¹ สารเอสเทอร์ พิกของหมู่ C-O อยู่ที่ประมาณ 1,000-1,300 ซม.⁻¹ เป็นต้น เมื่อพิจารณาในรายละเอียดที่ปรากฏใน IR spectrum พิกในช่วง 1,350-4,000 ซม.⁻¹ จะเป็นช่วงความถี่ของแถบการดูดกลืนคลื่นแสงของพันธะในของหมู่ฟังก์ชันต่างๆที่ค่อนข้างคงที่ ซึ่งกำหนดเป็นย่านความถี่ของหมู่ฟังก์ชัน (Group functional region) และในช่วงประมาณ 910-1,350 ซม.⁻¹ จะได้ แถบการดูดกลืนคลื่นแสง ที่มีลักษณะเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว เรียกว่าย่านรอยพิมพ์นิ้วมือ (Finger print region)

การใช้เครื่อง FT-IR Spectrometer วิเคราะห์ตัวอย่างใช้เวลาไม่นานและไม่สิ้นเปลืองสารเคมี จึงนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการวิเคราะห์ เพื่อการตรวจสอบสารในเชิงคุณภาพ หรือเพื่อการยืนยันสูตรโครงสร้างของสารตัวอย่าง โดยการพิจารณา เปรียบเทียบจากอินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบมาตรฐานกับตัวอย่าง ที่วัดในตัวกลางชนิดเดียวกัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน พิกต่อพิก ถ้าตรงกันเหมือนกันย่อมแสดงว่าเป็นสารชนิดเดียวกัน เช่นการวิเคราะห์ ชนิดหมึกพิมพ์บนแผ่นกระดาษ ชนิดเส้นใยของสิ่งทอ สารเคลือบผิวภาชนะบรรจุอาหาร ตัวอย่าง พอลิเมอร์ แผ่นพลาสติก เป็นต้น [11]

2.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) [12,13]

2.5.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile tests) [12]

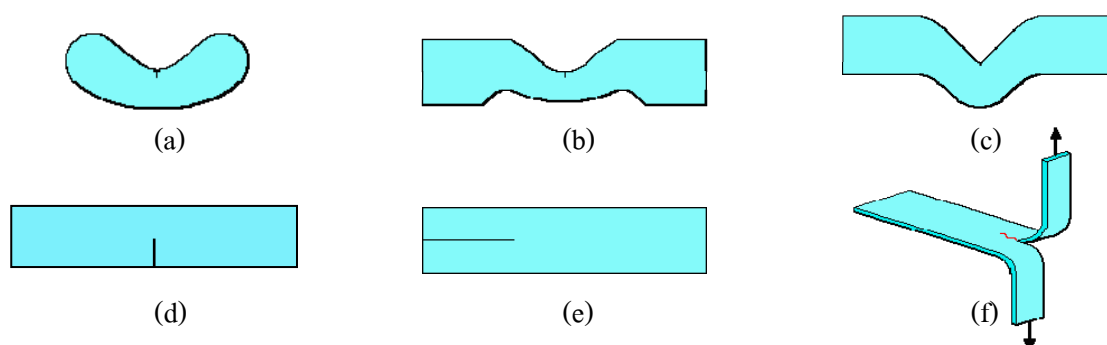
ความแข็งแรงดึง (Tensile test) โมดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) นับเป็นหนึ่งในสมบัติที่สำคัญที่สุดของวัสดุต่างๆ และมีความจำเป็นที่จะต้องทดสอบสำหรับวัสดุพอลิเมอร์ การทดสอบแรงดึงคือ การวัดความสามารถของวัสดุหนึ่งที่จะทนทานต่อแรงดึงยืดออกจากกัน ก่อนที่จะเกิดการฉีกขาด แตกหัก หรือเสียสภาพ ค่าโมดูลัสแรงดึงจะเป็นค่าที่บอกถึงความแข็งแรงเปราะ (Stiffness) ของวัสดุสามารถหาได้จากความชันของกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain curve)

การทดสอบแรงดึงทำได้โดยการยึดชิ้นงานตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐานโดยใช้ที่จับ (grips) สองชุด ที่จับข้างหนึ่งจะถูกยึดให้อยู่กับที่และอีกข้างหนึ่งจะเคลื่อนที่โดยมีเซลล์วัดแรง (load cell) เป็นตัววัดและควบคุมแรงที่กระทำต่อชิ้นงานตัวอย่างซึ่งพลาสติกโดยทั่วไปใช้ความเร็วในการดึง 50-100 มิลลิเมตรต่อนาที เนื่องจากอัตราเร็วนี้เปรียบเสมือนการดึงธรรมดา ในขณะที่การดึงในอัตราเร็วสูงเปรียบเสมือนการกระแทกหรือการกระตุกชิ้นงานตัวอย่าง การเพิ่มอัตราเร็วในการดึงจะทำให้ความชันของเส้นกราฟความเค้น-ความเครียดเพิ่มขึ้น หรือค่าโมดูลัสที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเครื่องวัดแรงดึงที่นิยมใช้เรียกว่า เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine) หรือ เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine) เนื่องจากมีความหลากหลายในการใช้งาน

ในงานวิจัยนี้ใช้มาตรฐาน ASTM D882 ในการทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และโมดูลัส (Modulus) ของฟิล์มที่มีความอ่อนนิ่ม มีความหนาไม่เกิน 1 มิลลิเมตร และใช้ทดสอบชิ้นงานที่มีค่าความเครียดดึงสูงที่สุดขาด (Strain at break) ได้

2.5.2 การทดสอบการฉีกขาด [13]

การทดสอบการฉีกขาดขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ อัตราเร็วการฉีก และ อุณหภูมิ ลักษณะตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการฉีกขาดมีหลายลักษณะลักษณะตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการฉีกมีหลายลักษณะ ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ลักษณะของตัวอย่างทดสอบการฉีกขาด (Tear specimens) [13]

- (a) ASTM Die A (Nicked Crescent) (b) ASTM Die B (Nicked Tab End)
 (c) ASTM Die C (Right Angle) (d) Russian
 (e), (f) Trouser

ตัวอย่างการทดสอบการฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM D 624 และแบบ Trousers รอยขาดจะตั้งฉากกับทิศทางของแรงที่ใส่ และแบบ Russian จะขาดตามแนวตรง โดยรายงานผลเป็นแรงที่ใช้ในการฉีกขาดตัวอย่างที่มีความหนาตามกำหนด นิยมเรียกผลที่ได้จากการทดสอบว่า “ความแข็งแรงฉีกขาด” (Tear strength) และเรียกผลที่ได้จากการทดสอบด้วยตัวอย่างแบบ Trousers ว่า “ความต้านทานฉีกขาด” (Tear resistance)

ค่าที่ได้จากการทดสอบการฉีกขาดด้วยตัวอย่างแบบ Russian จะให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด รองลงมาคือตัวอย่าง ASTM Die A หรือ B และ ASTM Die C และตัวอย่างแบบ Trousers จะให้ค่าความแข็งแรงต่ำสุด

ในงานวิจัยนี้จะตัดชิ้นงานแบบ ASTM Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 624 โดยในการทดสอบการฉีกขาด จะทำให้ทราบถึงแรงที่ทำให้ชิ้นงานเริ่มฉีกขาด ซึ่งจะเป็นค่าความเครียดสูงสุด (Maximum stress) ของชิ้นงาน

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A. Bensalem และ G. Iyer (1995) [14] ได้ทำการสังเคราะห์และหาลักษณะของสาร $\text{MgHPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ โดยทำการเตรียมตัวอย่าง ด้วยการทำปฏิกิริยาระหว่าง $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ที่อุณหภูมิห้องโดยผสมสารทั้ง 2 ตัว ในอัตราส่วนที่ต้องการในน้ำกลั่น หลังจากนั้นทำการปั่นกวนอย่างรวดเร็ว ก็จะมีตะกอนเกิดขึ้น และปรับค่า pH = 6.0 โดยการเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) แล้วนำสารละลายที่ได้ไปกรองแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อน และนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงจะได้สารที่มีลักษณะเป็นผงสีขาว ซึ่งจะมีโครงสร้างเหมือนกับ $\text{MgHPO}_4 \cdot 1.2\text{H}_2\text{O}$ ตะกอนมีลักษณะคล้ายวุ้นละเอียด แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และ FTIR สารมี orthorhombic unit cell คือ $a = 9.295\text{\AA}$, $b = 8.038\text{\AA}$, $c = 10.482\text{\AA}$ เมื่อเทียบแล้วมีขนาดต่างจาก $\text{MgHPO}_4 \cdot 1.2\text{H}_2\text{O}$ เล็กน้อย ซึ่งได้ทำการเตรียม $\text{MgHPO}_4 \cdot 1.2\text{H}_2\text{O}$ โดยปฏิกิริยาผันกลับของ Hydration ที่อุณหภูมิสูงถึง 200 °C และจากการวิเคราะห์ TGA และ DTA แสดงผลตรงกันคือ มีตำแหน่งดูดความร้อน 3 ช่วง และมีตำแหน่งเกิดการสลายตัว (weight loss) 3 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เกิดการสลายตัว คือ 2% ที่ 100 °C , ครั้งที่ 2 เกิดการสลายตัวคือ 8.5% ที่ 180 °C , ครั้งที่ 3 เกิดการสลายตัวคือ 7.5% ที่ 300 °C แสดงว่ามีการกำจัด H ของ OH group 3 ครั้ง ดังนั้นจึงใช้การสลายตัวครั้งที่ 1 และ 2 ในกำจัด H_2O ที่แทรกตัวอยู่ในโครงสร้าง องค์ประกอบของสารตัวอย่างที่สรุปได้คือ $\text{MgHPO}_4 \cdot 0.78\text{H}_2\text{O}$

บรรจง บุญชม และคณะ (2008) [15] ได้ทำการสังเคราะห์สาร Manganese hydrogenphosphate monohydrate ($\text{MnHPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) โดยการตกตะกอนอย่างรวดเร็วซึ่งใช้ $\text{Mn(c)} 0.5$ กรัม ละลายในกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เข้มข้น 1 M จำนวน 5ml แล้วนำไปปั่นจนจนได้ตะกอน ทำการกรองแล้วล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น ทิ้งให้แห้งในอากาศก็จะได้เป็น $\text{MnHPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ แล้วนำสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 773 K จะได้เป็น Manganese pyrophosphate ($\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$) แล้วนำไปตรวจสอบเอกลักษณ์ จากการตรวจสอบพบว่า โครงสร้างผลึกของ $\text{MnHPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ เป็นระบบผลึกแบบ orthorhombic มี space group คือ Pbcn ($Z = 8$) และโครงสร้างผลึกของ $\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ เป็นระบบผลึกแบบ monoclinic มี space group คือ C2/m ($Z = 4$) สำหรับขนาดผลึกเฉลี่ยและเลดทิซพารามิเตอร์ของ $\text{MnHPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ คำนวณจาก X-ray spectra ซึ่งขนาดผลึกของ $\text{MnHPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ จะใหญ่กว่าของ $\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ เป็นผลมาจากกระบวนการ dehydration ซึ่งผลจากการตรวจ XRD ก็จะทำให้ทราบถึงความแตกต่างของผลึก

M. Sahar (2010) [16] ศึกษาการสังเคราะห์ Magnesium Phosphate or orthophosphate โดยใช้เทคนิค TGA FTIR และXRD ในการยืนยันผลการทดลอง โดยที่งานวิจัยนี้จะสังเคราะห์ Magnesium Phosphate or orthophosphate ที่อุณหภูมิห้องจาก Mg(OH)_2 , MgSO_4 , MgCl_2 และ $\text{Mg(NO}_3)_2$ เป็นสารตั้งต้นและใช้ H_3PO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ และ Na_2HPO_4 เป็นแหล่งฟอสเฟต โดยมี NaOH และ NH_4OH เป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้คือ $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ และ $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 6 ชม. จะเกิดสารผลิตภัณฑ์ใหม่คือ ไพโรฟอสเฟต ($\square\text{-Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$) โดยที่ $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$ จะเกิดเป็น orthophosphate ซึ่งสามารถยืนยันผลได้จากการทดสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของสาร (FTIR) และผลจากการสลายตัวทางความร้อน (TGA)

ทัศกร ปิ่นเขียน และคณะ [17] ได้ศึกษาผลของลิกนินและน้ำมันถั่วเหลืองที่มีต่อฟิล์มย่อยสลายได้ โดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) อัตราส่วน LDPE:LLDPE เท่ากับ 70:30 จากนั้นนำไปผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ (แป้งมันสำปะหลังผสมกลีเซอรอล/น้ำมันถั่วเหลือง) โดยผสมเทอร์โมพลาสติกสตาโรซในอัตราส่วน 50 phr มีการปรับอัตราส่วนระหว่างกลีเซอรอลและน้ำมันถั่วเหลืองในอัตราส่วน 35:0, 20:15, 10:25 และ 0:35 ผสมโดยใช้เครื่องผสมความเร็วสูง เครื่องบดผสมพลาสติกและยางชนิดสองลูกกลิ้ง และเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ นำเม็ดพอลิเมอร์ที่อบแล้วนำไปเป่าเป็นฟิล์มด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูป จากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า เมื่อเติมน้ำมันถั่วเหลืองทำให้ความแข็งแรงลดลง ค่ามอดุลัสลดลง แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนของน้ำมันถั่วเหลือง จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนทำให้ทราบว่าเมื่อเติมน้ำมันถั่วเหลืองที่อัตราส่วน 10:25 มีเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกสูงขึ้นและมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงที่สุด ถ้าปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองมากจะทำให้เกิดการซึมออกของน้ำมันที่ผิวหน้าของชิ้นงานจึง

เลือกใช้กลีเซอรอลค่อน้ำมันถั่วเหลืองเท่ากับ 10:25 จากนั้นจึงเติมลินินลงไป โดยมีการปรับปริมาณของลินิน (1,2,3,4 phr) พบว่าเมื่อมีการเติมลินินทำให้ความแข็งแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่ได้เติมลินิน แต่ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า เมื่อเติมลินินลงไปในฟิล์มทำให้ร้อยละการเกิดผลึกลดลงเล็กน้อยแต่ไม่ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนลดลง เมื่อนำฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปได้ไปทดสอบการย่อยสลายโดยวิธีฝังกลบเป็นเวลา 6 สัปดาห์ พบว่าฟิล์มมีการย่อยสลายได้ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มที่จะย่อยสลายได้มากขึ้นเมื่อเวลานานขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene ; LDPE) เกรดเป่าขึ้นรูป (LD 1905F) จากบริษัท SCG Chemicals จำกัด ซึ่งมีสมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เกรด LD 1905F [8]

Property	Test Method	Value	Unit
Resin Properties			
Melt Flow Rate	ASTM D 1238 @ 190 °C	5.00	g/10 min
Density	ASTM D 1505	0.919	g/cm ³
Melting Point	ASTM D 2117	110	°C
Vicat Softening Point	ASTM D 1525	92	°C
Brittleness Temperature	ASTM D 746	< - 70	°C
Film Properties			
Tensile Strength at Yield	ASTM D 882	MD: -* , TD:100*	kg/cm ²
Tensile Strength at Break	ASTM D 882	MD:200*, TD:150*	kg/cm ²
Tensile Modulus, 2% Secant	ASTM D 882	MD:1700*, TD:1900*	kg/cm ²
Elongation at Break	ASTM D 882	MD:400*, TD:700*	%
Elmendorf Tear Strength	ASTM D 1922	MD:370*, TD:210*	g
Dart Impact Strength	ASTM D 1709	130*	g
Haze	ASTM D 1003	7*	%
Gloss	ASTM D 2457	55*	%

หมายเหตุ (*) Properties obtained from film produced on a pilot line at TPE, 38 micron, BUR 2:1,

MD = Machine Direction, TD = Transverse Direction ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

2. แมงกานีสคลอไรด์ (MnCl₂)
3. ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ((NH₄)₂HPO₄)

4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
5. แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl₂)
6. โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K₂HPO₄)
7. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
8. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. ชุดเครื่องแก้ว
2. เครื่องชั่งน้ำหนัก
3. pH meter
4. เครื่องกรองแบบลดความดัน (Ultrafiltration)
5. กระดาษกรอง (Filter paper)
6. เตาเผา (Furnace)
7. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer : TGA) : Perkin Elmer รุ่น Pyris1
8. เครื่องตรวจวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR) : Perkin Elmer รุ่น FTIR spectrum GX
9. เครื่องตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ X-ray Diffractometer (XRD) : XRD รุ่น D8 Advance
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) : รุ่น LEO 1455 VP : LEO Ltd.
11. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) : Lloyd Instrument Ltd. รุ่น LR 5 K
12. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer)
13. เครื่องบดพลาสติก (plastic grinder) : Bosco Engineering รุ่น Bosco A600
14. ตู้อบ (Oven)
15. เครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film extruder) : Lab Tech Engineering Company Ltd. รุ่น Type LF 400
16. ชุดปั่นกวน
17. ไมโครมิเตอร์

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมสารเคมี

การเตรียมสารปรับ pH ความเข้มข้น 0.5 M ปริมาตร 250 มิลลิลิตร

- เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.5 M

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร (ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 M ปริมาตร 250 มิลลิลิตร)

- เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.5 M

ชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 7.01 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร (ได้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 M ปริมาตร 250 มิลลิลิตร)

การเตรียมสารตั้งต้นความเข้มข้น 0.5 M ปริมาตร 250 มิลลิลิตร

- การเตรียมแมงกานีสคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.5 M

ชั่งแมงกานีสคลอไรด์ 24.74 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร (ได้สารละลายแมงกานีสคลอไรด์ 0.5 M ปริมาตร 250 มิลลิลิตร)

- การเตรียมไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.5 M

ชั่งไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 16.51 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร (ได้สารละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.5 M ปริมาตร 250 มิลลิลิตร)

- การเตรียมแมกนีเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.5 M

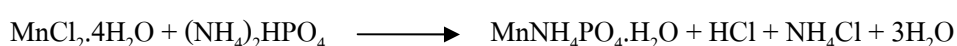
ชั่งแมกนีเซียมคลอไรด์ 25.41 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร (ได้สารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ 0.5 M ปริมาตร 250 มิลลิลิตร)

- การเตรียมโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.5 M

ชั่งโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 21.77 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร (ได้สารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.5 M ปริมาตร 250 มิลลิลิตร)

3.3.2 การสังเคราะห์แมงกานีสแอมโมเนียมฟอสเฟตไฮเดรต ($\text{MnNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

สารตั้งต้น คือ $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ จากปฏิกิริยา



กระบวนการดังนี้

1. เปิดสารตั้งต้นที่เตรียมไว้ใส่บีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร

2. ค่อยๆปรับ pH ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ พร้อมบันทึกจนกระทั่งสารละลายมี pH เท่ากับ 10 จะมีตะกอนเกิดขึ้น
3. นำตะกอนที่ได้ไปกรอง นำตะกอนไปผึ่งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนแห้ง จากนั้นเก็บตะกอนเพื่อนำไปวิเคราะห์

3.3.3 การสังเคราะห์โพแทสเซียมแมกนีเซียมฟอสเฟตไฮเดรต ($\text{KMgPO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})$)

สารตั้งต้น คือ $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ จากปฏิกิริยา



กระบวนการดังนี้

1. เปิดสารตั้งต้นที่เตรียมไว้ใส่บีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร
2. ค่อยๆปรับ pH ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ พร้อมบันทึกจนกระทั่งสารละลายมี pH เท่ากับ 10 จะมีตะกอนเกิดขึ้น
3. นำตะกอนที่ได้ไปกรอง นำตะกอนไปผึ่งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนแห้ง จากนั้นเก็บตะกอนเพื่อนำไปวิเคราะห์

3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ (Characterization)

3.4.1 วิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการสังเคราะห์สาร

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ เทคนิคนี้เป็นวิธีการทาง spectroscopy ชนิดหนึ่งที่ศึกษาการดูดกลืนแสงของสารในย่านความถี่ของแสงซึ่งโดยการวิเคราะห์โครงสร้างสารจะอาศัย การดูดกลืนที่แตกต่างกันของแต่ละโมเลกุล ซึ่งแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดที่แตกต่างกันโดยช่วง wave number 4000-500 จะเป็นช่วงที่บ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล นอกจากนั้นยังเป็นช่วง the fingerprint region ซึ่งจะมีลักษณะของ สเปกตรัมที่เฉพาะเจาะจงของสารแต่ละตัว

3.4.2 วิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสติฐาน

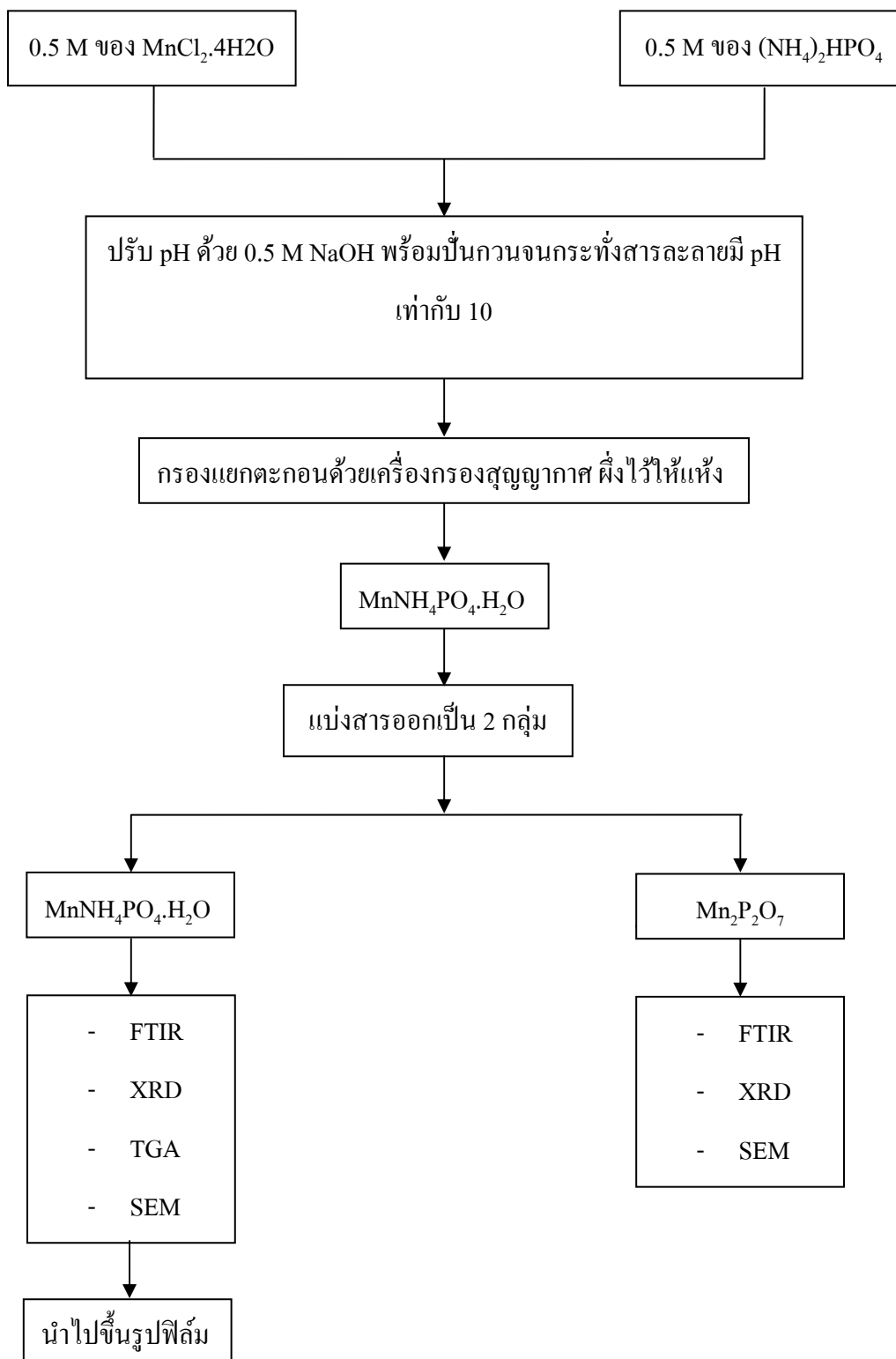
วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง ซึ่งเป็นการ ตรวจสอบพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive)

3.4.3 วิเคราะห์การตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อน

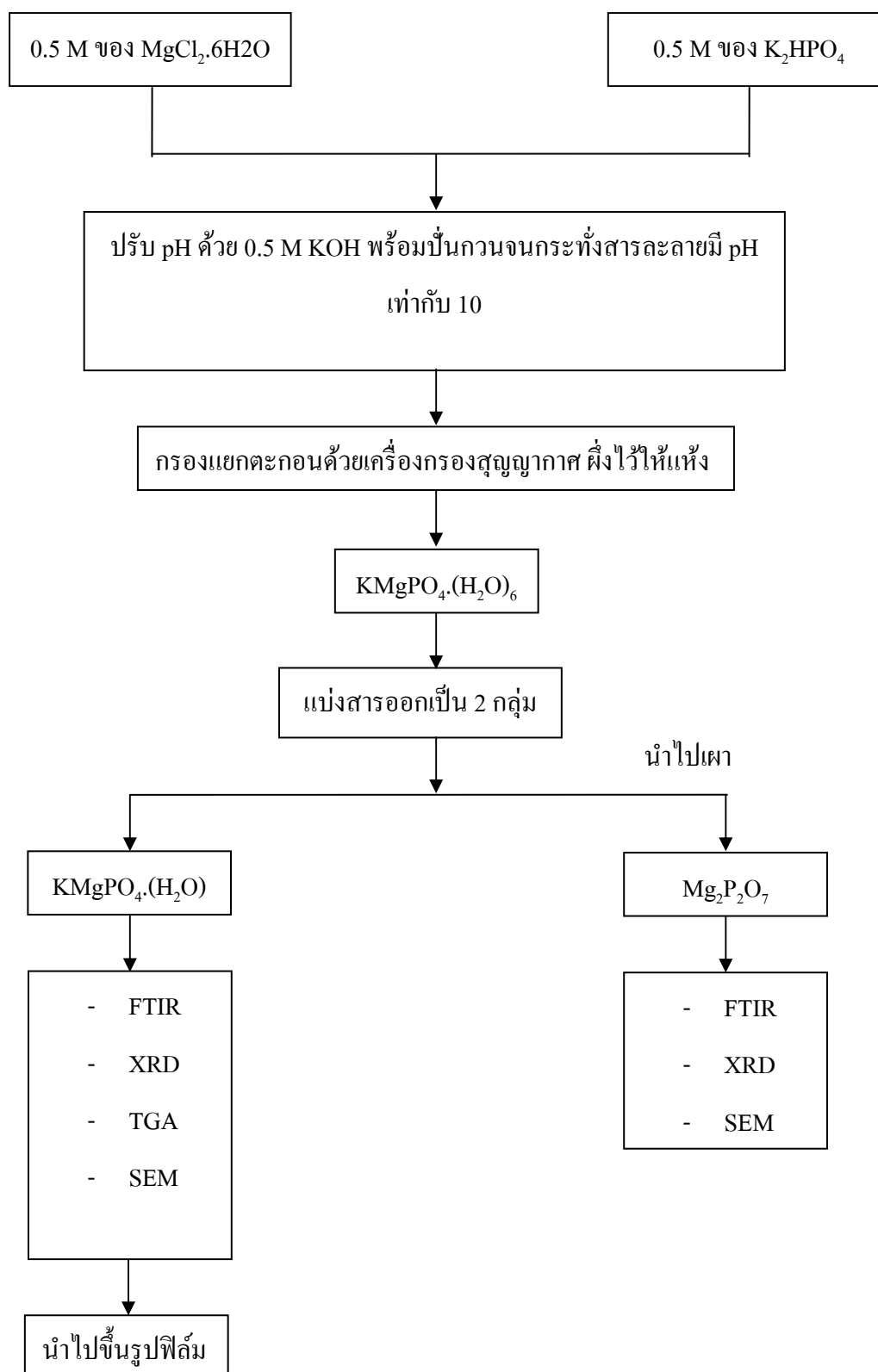
วิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA อาศัยสมบัติเชิงความร้อนของวัตถุต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้การวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งที่มีความไว และละเอียดสูงในสภาวะแวดล้อมที่กำหนดสามารถ สามารถวิเคราะห์หาจุดหลอมเหลว, การสูญเสียน้ำหนัก, หาสารเจือปนในตัวอย่าง รวมไปถึงการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อนได้อีกด้วย ซึ่งแสดงผลเป็นกราฟการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ

3.4.5 วิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของสารในระดับจุลภาค

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM อาศัยลำแสงอิเล็กตรอนที่เกิดจากการให้ความร้อนที่ขั้วแคโทดไปยังพื้นที่ผิววัตถุ เมื่อลำแสงอิเล็กตรอนไปกระตุ้นให้วัตถุเกิดพลังงานมากขึ้น วัตถุจะคายพลังงานออกมาในลักษณะลำแสงอิเล็กตรอน Back Scatter Electron



ภาพที่ 3.1 แผนภาพการสังเคราะห์สารตัวเดียวและการตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะของสาร



ภาพที่ 3.2 แผนภาพการสังเคราะห์สารตัวเดียวและการตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะของสาร

3.5 การเตรียมฟิล์ม

- การศึกษาถึงปริมาณสารกลุ่มโลหะฟอสเฟตเพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และสารกลุ่มโลหะฟอสเฟต

1. นำสารกลุ่มโลหะฟอสเฟตมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดความชื้น
2. นำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ผสมกับสารกลุ่มโลหะฟอสเฟต โดยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ซึ่งใช้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความเร็วสกรู เท่ากับ 40 รอบต่อนาที และมีอัตราส่วนดังตารางที่ 3.3

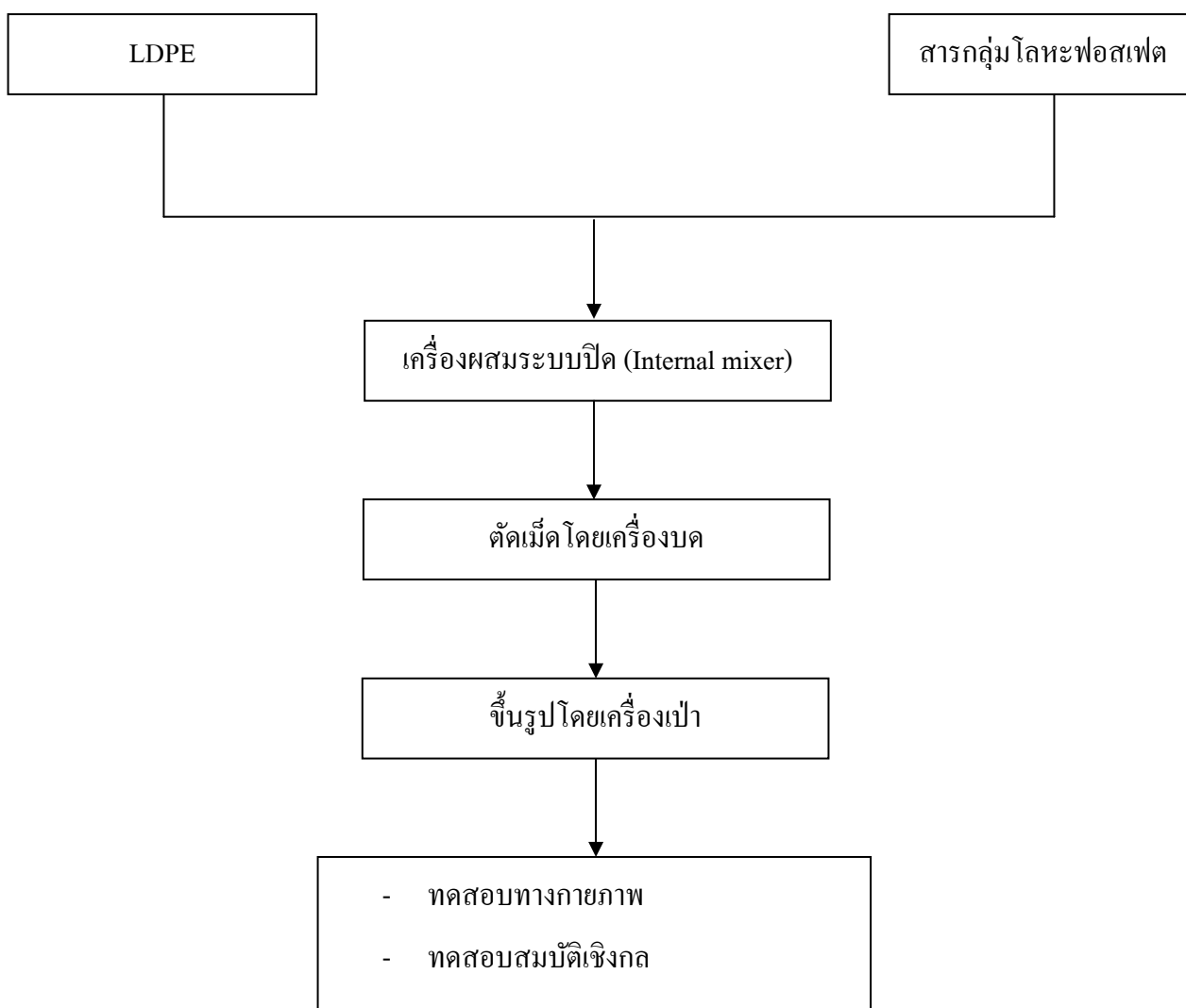
LDPE (%wt)	กลุ่มโลหะฟอสเฟต	
	$\text{MnNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (%wt)	$\text{KMgPO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})$ (%wt)
100	10	10

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนการผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และสารกลุ่มโลหะฟอสเฟต

3. นำสารที่ผสมแล้วไปตัดเม็ดด้วยเครื่องบด จากนั้นนำไปเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film extruder) โดยมีสภาวะที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูป ดังตารางที่ 3.4

สภาวะ	ค่า
อัตราเร็วสกรู	60 rpm
อุณหภูมิบริเวณที่ 1 (Feed zone)	160 °C
อุณหภูมิบริเวณที่ 2	170 °C
อุณหภูมิบริเวณที่ 3	170 °C
อุณหภูมิบริเวณที่ 4 (Die zone)	180 °C
อัตราการดึง (Draw down ratio)	1.5 mm / min

ตารางที่ 3.3 สภาวะที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film extruder)



ภาพที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการเตรียมฟิล์มย่อยสลายและการทดสอบสมบัติต่างๆ

3.6 การตรวจสอบสมบัติของแผ่นฟิล์ม

3.6.1 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม

- ตรวจสอบลักษณะของแผ่นฟิล์มโดยสังเกตลักษณะการเป่าขึ้นรูป สังเกตสีและความขุ่นของฟิล์ม และทำการวัดความหนาของแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์

3.6.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

1. สมบัติความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่ามอดุลัส (Modulus) และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at brake) ตามมาตรฐาน ASTM D882 ตัดฟิล์มตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยกำหนดให้ชิ้นงานมีความยาว 140 mm. กว้าง 20 mm. ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine Direction : MD) และทิศทางตามขวางเครื่องจักร (Transverse Direction : TD)

ทิศทางละ 10 ชั้น วัดความหนาของแต่ละชั้นงาน จากนั้นทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ
อเนกประสงค์ โดยมีสภาวะที่ใช้ทดสอบ ดังนี้

น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell) 100 N

ระยะห่างของตัวจับชิ้นงาน (Gauge length) 25 mm.

ความเร็วในการดึง (Cross head speed) 100 mm/min

โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดุลัส
(Modulus) และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at brake) โดยสามารถคำนวณค่า
ต่างๆ ได้ตามสมการที่ 3.1, 3.2 และ 3.3

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength : } \sigma) = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

$$\text{ค่ามอดุลัส (Modulus : E)} = \frac{\text{ความเค้น (}\sigma\text{)}}{\text{ความเครียด (}\epsilon\text{)}} \quad (3.2)$$

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

เมื่อ F คือ แรงดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง

L คือ ระยะระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (mm.)

L_0 คือ ระยะระหว่างจุดสองจุดก่อนทำการดึงยึดชิ้นงาน (mm.)

2. สมบัติความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength)

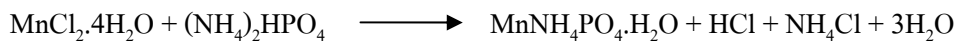
นำฟิล์มตัวอย่างมาตัดชิ้นงานเป็นรูปปีกนกแบบตาย C (ASTM Die C) ตามมาตรฐาน
ASTM D 624 ตามแนว MD และ TD นำมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยใช้ Load
cell 100 N ความเร็วในการดึง 50 mm/min โดยพิจารณาทิศทางของชิ้นงานตามการฉีกขาดตรง
บริเวณรอยเว้าของชิ้นงาน เช่น ฟิล์มที่ตัดชิ้นงานเป็นรูปปีกนกตามแนว MD เมื่อให้แรงดึงแก่
ชิ้นงานเป็นแนวเส้นตรงในทิศทาง MD ฟิล์มจะเกิดการฉีกขาดตรงบริเวณมุมรอยเว้าของชิ้นงาน
ตามทิศทาง TD

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการสังเคราะห์ (Synthesis results)

จากการเตรียมสารสำหรับโครงการพิเศษนี้ ได้พยายามเตรียมสารในกลุ่มโลหะฟอสเฟต โดยเตรียมขึ้นจากสารตั้งต้นกลุ่มโลหะแมกนีเซียมและแมงกานีส ซึ่งได้แก่ $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ทำปฏิกิริยากับ K_2HPO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ และใช้ตัวปรับ pH คือ KOH , NaOH เพื่อให้ $\text{pH} = 10$ ดังปฏิกิริยา



ชนิดของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์	น้ำหนักสารตั้งต้น (กรัม)	น้ำหนักสารจากการทดลอง (กรัม)	น้ำหนักสารจากทฤษฎี (กรัม)	ร้อยละผลผลิต
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	5.08	4.32	4.4075	98.0148
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	4.95	4.59	4.6513	98.6819

ตารางที่ 4.1 น้ำหนักของสารที่ได้จากการทดลองและทฤษฎี รวมทั้งร้อยละผลผลิตของสาร

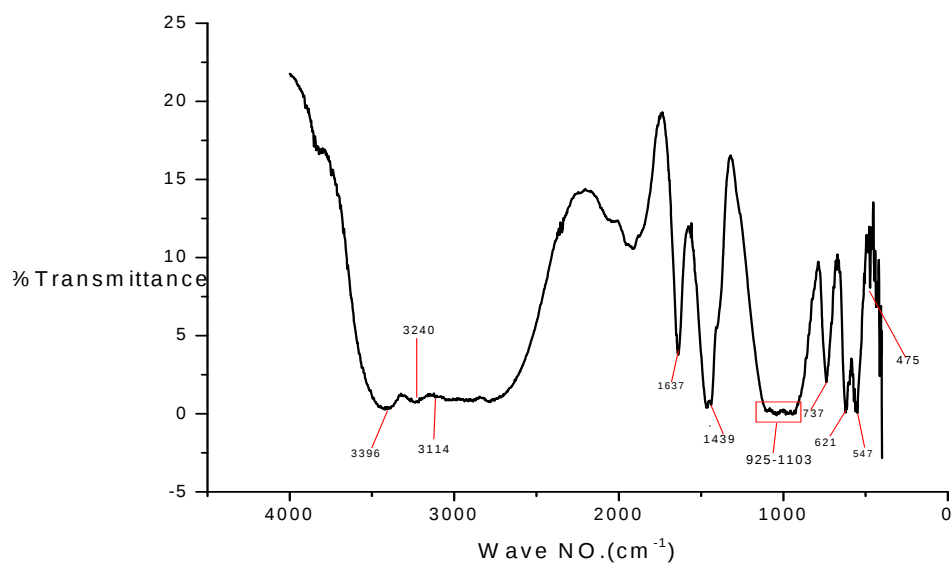


สาร	มวลโมเลกุล	P_2O_5	K_2O	NH_4^+
$\text{KMgPO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})$	176	31.53	15.63	-
$\text{MnNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	186	29.84	-	9.139785

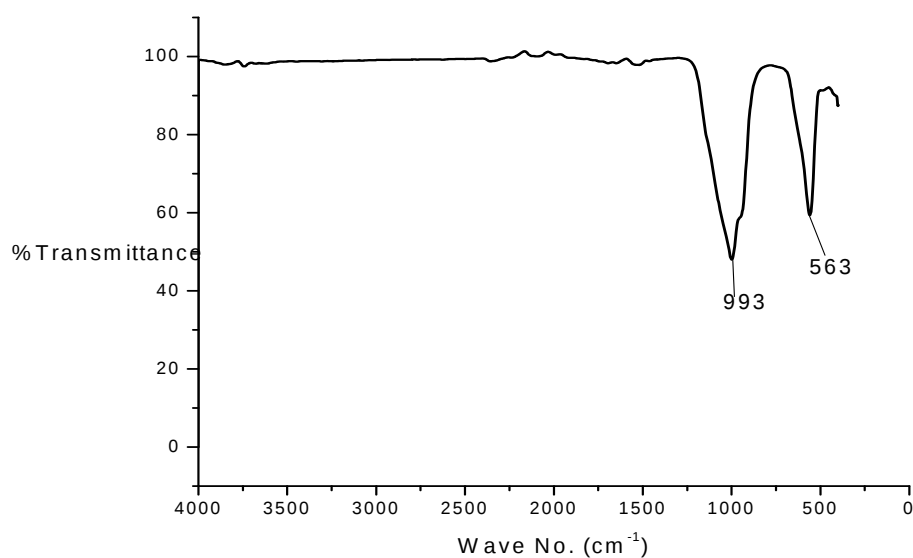
ตารางที่ 4.2 ปริมาณธาตุอาหารของสารที่สังเคราะห์

4.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิคต่างๆ (Characteristic materials and Identification method)

4.2.1 2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการันของสาร (FT-IR)



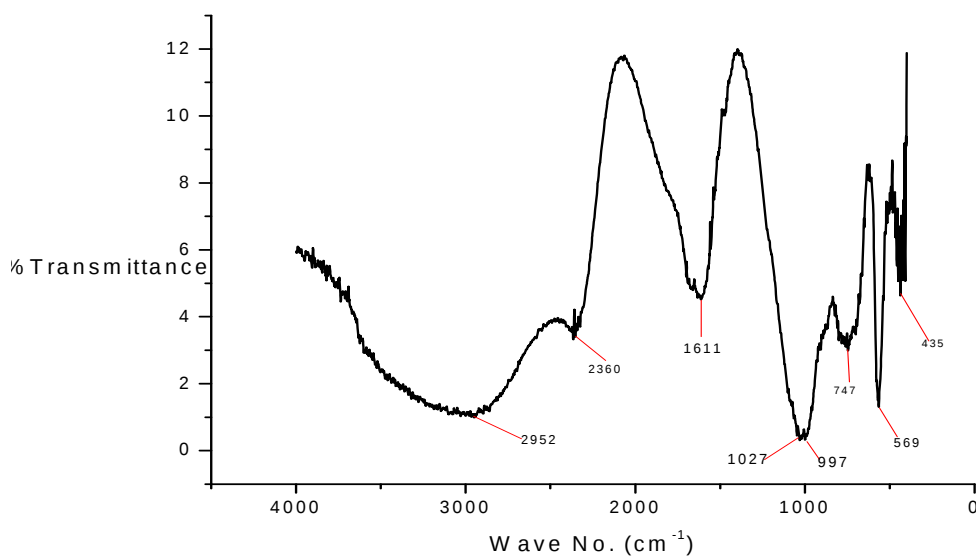
ภาพที่ 4.1 สเปกตรัม FTIR ของสาร $\text{MnNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$



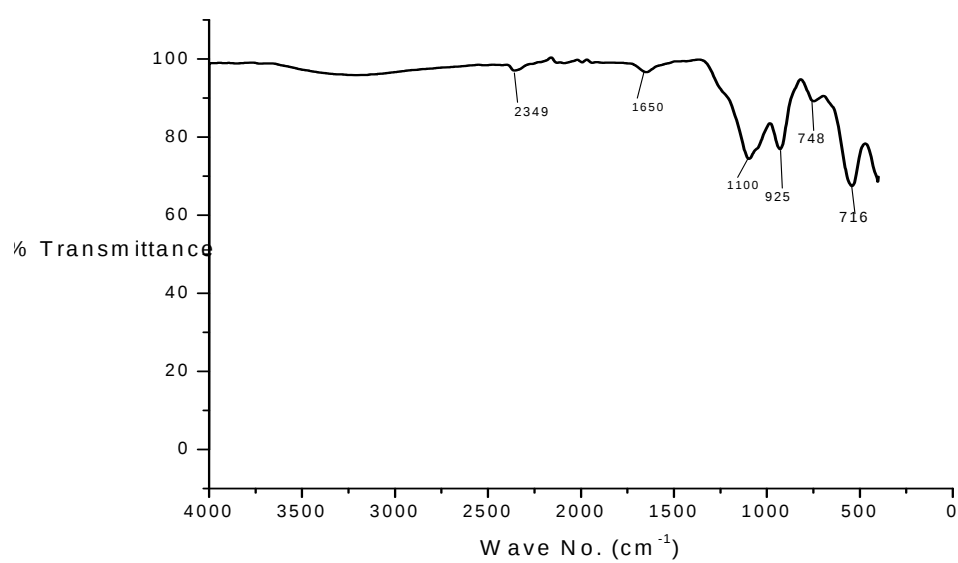
ภาพที่ 4.2 สเปกตรัม FTIR ของสาร $\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$

Molecular Motion	แถบการสั่น (cm ⁻¹) ของ MnNH ₄ PO ₄ ·H ₂ O	แถบการสั่น (cm ⁻¹) ของ Mn ₂ P ₂ O ₇
δ (PO ₃)	547	-
Mn-O stretching	621	563
γ (POH)	737	-
รูปแบบการสั่นของ HPO ₄ ²⁻ และ (P ₂ O ₇) ⁴⁻	925-1103	993
NH ₄ ⁺ bending	1439	-
V_2 (H ₂ O)	1637	-
V_1 (H ₂ O)	3114	-
NH ₄ ⁺ stretching	3240	-
V_3 (H ₂ O)	3396	-

ตารางที่ 4.3 แถบการสั่น และการจำแนกรูปแบบการสั่นของสาร MnNH₄PO₄·H₂O และ Mn₂P₂O₇



ภาพที่ 4.3 สเปกตรัม FTIR ของสาร KMgPO₄·H₂O

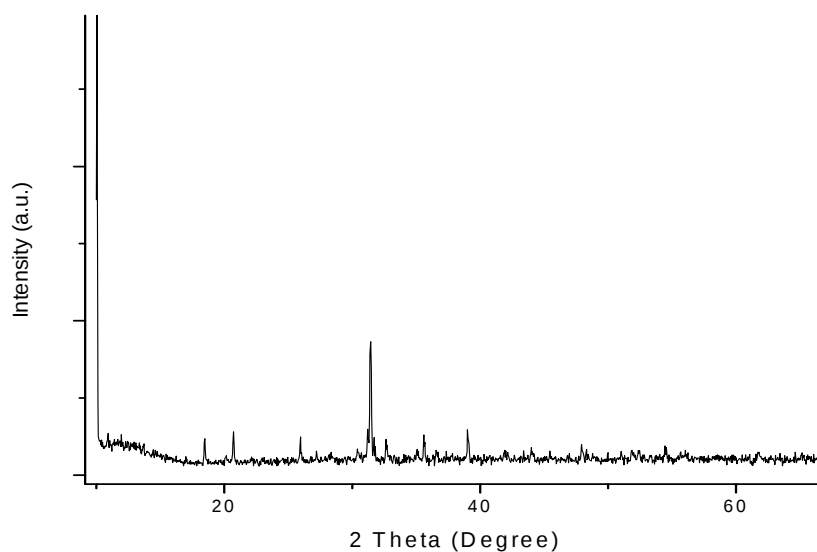


ภาพที่ 4.4 สเปกตรัม FTIR ของสาร KMgPO_4

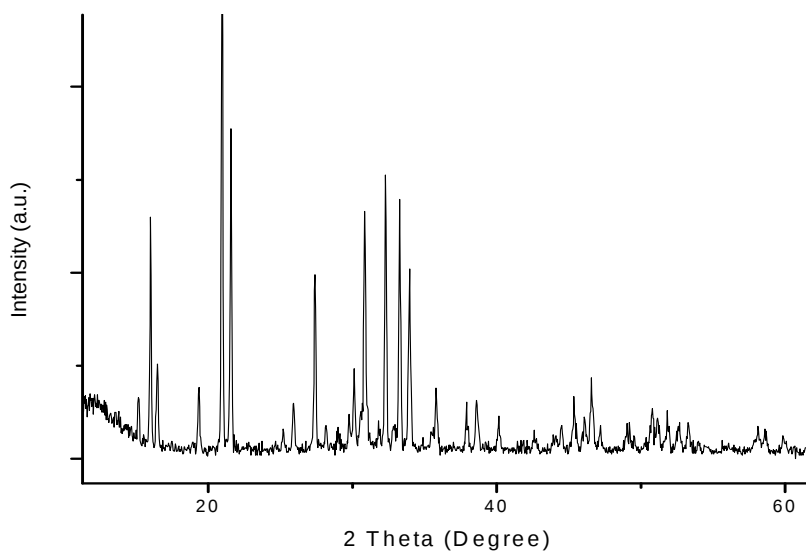
Molecular Motion	แถบการสั่น (cm^{-1}) ของ $\text{KMgPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	แถบการสั่น (cm^{-1}) ของ KMgPO_4
$\nu_4(\text{PO}_4)$	-	716
$\delta(\text{PO}_3)$	435	748
Mg-O stretching	569	-
$\nu(\text{POH})$	747	-
รูปแบบการสั่นของ $\delta(\text{POH})$ สำหรับ HPO_4^{2-} อีกทั้งยังเป็น รูปแบบการสั่นของ P-O stretching และ $\nu_{\text{sym}}(\text{POP})$ สำหรับ $(\text{P}_2\text{O}_7)^{4-}$	997	925
รูปแบบการสั่นของ $\nu(\text{PO}_3)$ สำหรับ HPO_4^{2-} และ $\nu_{\text{sym}}(\text{PO}_2)$ สำหรับ $(\text{P}_2\text{O}_7)^{4-}$	1027	-
$\nu_{\text{asym}}(\text{PO}_3)$	-	1100
$\nu_2(\text{H}_2\text{O})$	1611	-
B band ($\nu_{\text{OH}}, \text{HPO}_4^{2-}$)	2360	-
A band ($\nu_{\text{OH}}, \text{HPO}_4^{2-}$)	2952	-

ตารางที่ 4.4 แถบการสั่น และการจำแนกรูปแบบการสั่นของสาร $\text{KMgPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ และ KMgPO_4

4.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสัณฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)



ภาพที่ 4.5 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสัณฐานด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์(XRD) ของสาร $\text{NH}_4\text{MnPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (ก่อนเผา) ที่สังเคราะห์จากสารตั้งต้นต่างกันเทียบกับกราฟมาตรฐาน PDF#860577

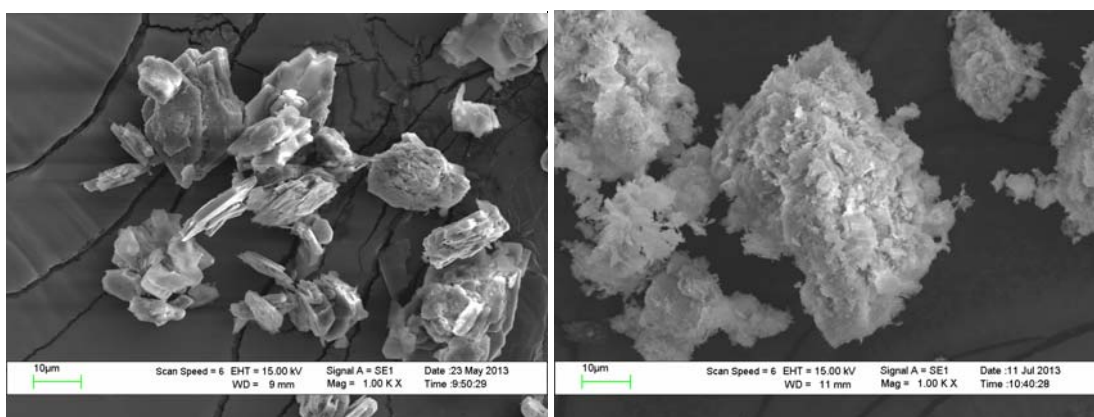


ภาพที่ 4.6 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสัณฐานด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์(XRD) ของสาร $\text{MgKPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (ก่อนเผา) ที่สังเคราะห์จากสารตั้งต้นต่างกันเทียบกับกราฟมาตรฐาน

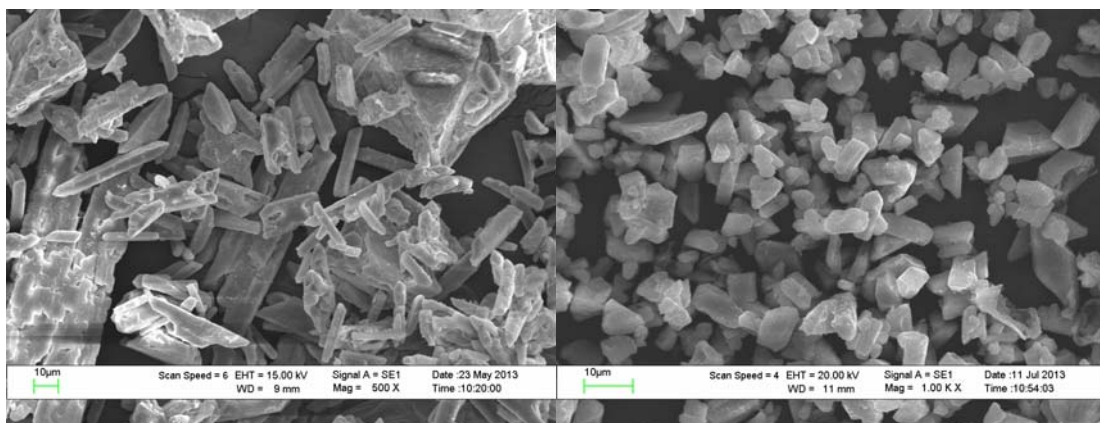
PDF#751076

Compound	System	a (Å)	b (Å)	c (Å)	β	Average crystalline size (nm)
MgKPO ₄ ·H ₂ O	PDF#751076	6.873	6.16	11.087		58.073±8.463
	This work	6.875	6.157	11.078		
	DIF.This work-PDF	-0.002	0.003	0.009		
NH ₄ MnPO ₄ ·H ₂ O	PDF#860577	5.728	8.816	4.909		60.773±21.359
	This work	5.717	8.765	4.885		
	DIF.This work-PDF	0.011	0.051	0.024		

4.2.4 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของสารในระดับจุลภาค



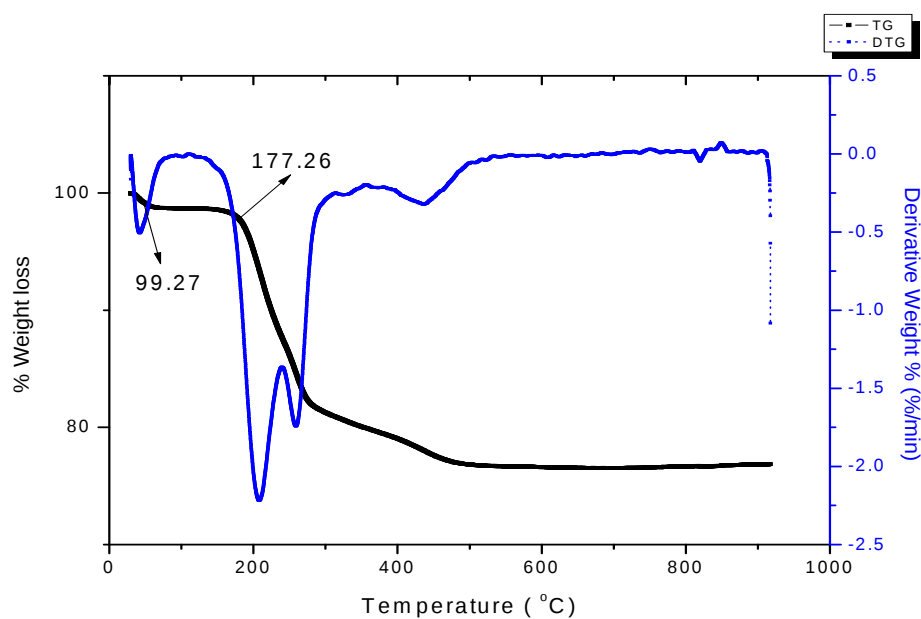
ภาพที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของ (a) NH₄MnPO₄·H₂O, (b) Mn₂P₂O₇



ภาพที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM ของ (a) $\text{KMgPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, (b) KMgPO_4

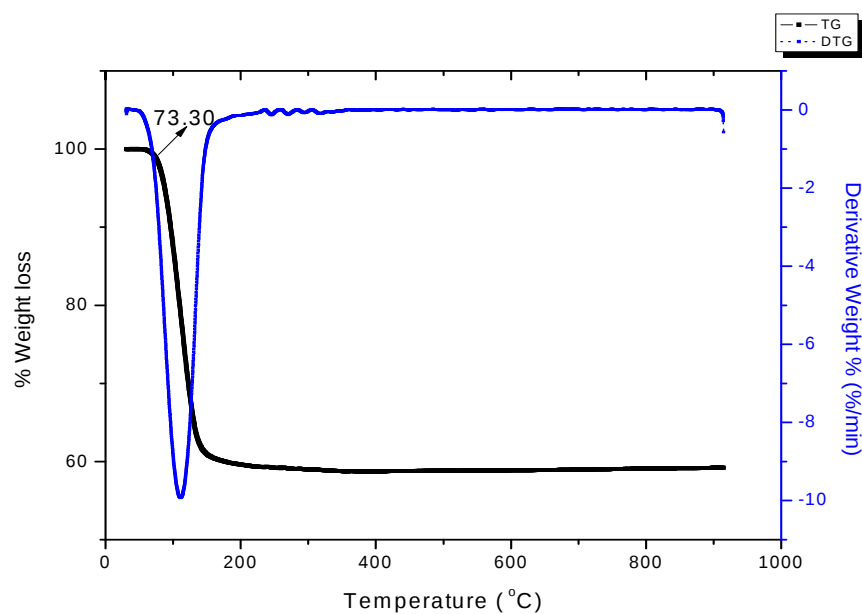
จากภาพที่ 4.7 มีลักษณะเป็นแผ่น เกะกันเป็นกลุ่มก้อน และภาพที่ 4.8 มีลักษณะเป็นแท่ง เกะกันเป็นกลุ่มก้อน

4.2.1 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนโดยเทคนิค (TGA)



ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงการสลายตัวทางความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอนุหุมิ ที่เตรียมจาก $(\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4)$

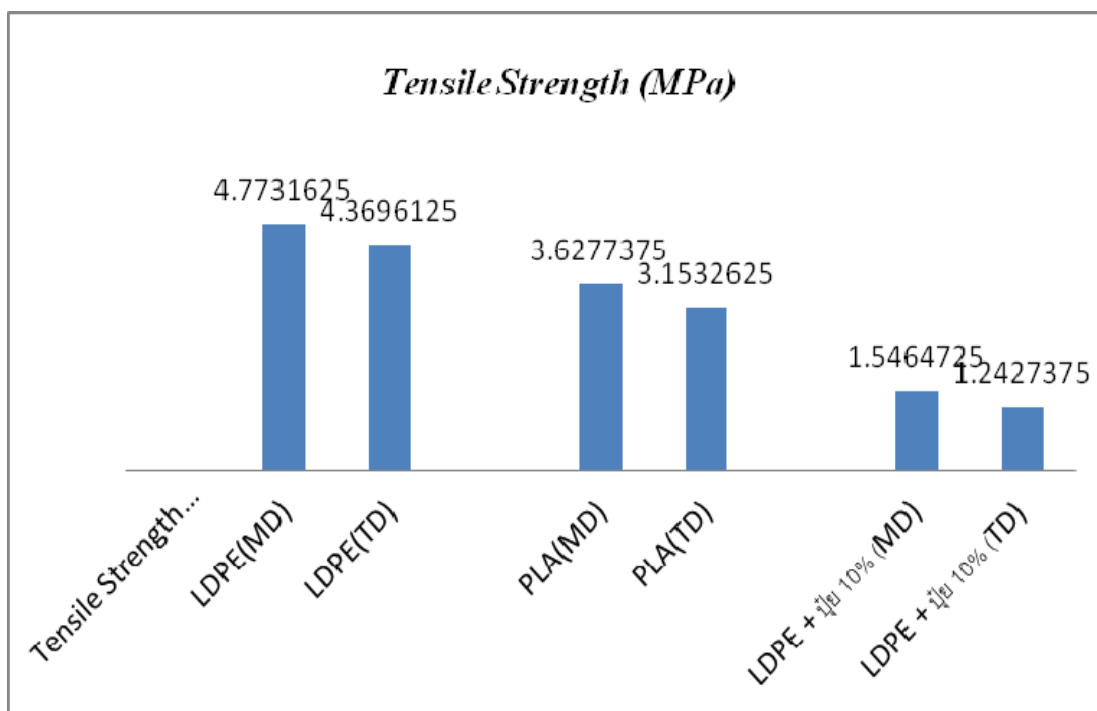
จากภาพที่ 4.9 พบว่ามีการสูญเสียน้ำหนักที่อนุหุมิ 99.27°C ซึ่งเกิดจากการ desorption น้ำของผลึก และมีการสูญเสียน้ำหนักที่อนุหุมิ 177.26°C ซึ่งเกิดจากการเกิด $\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$



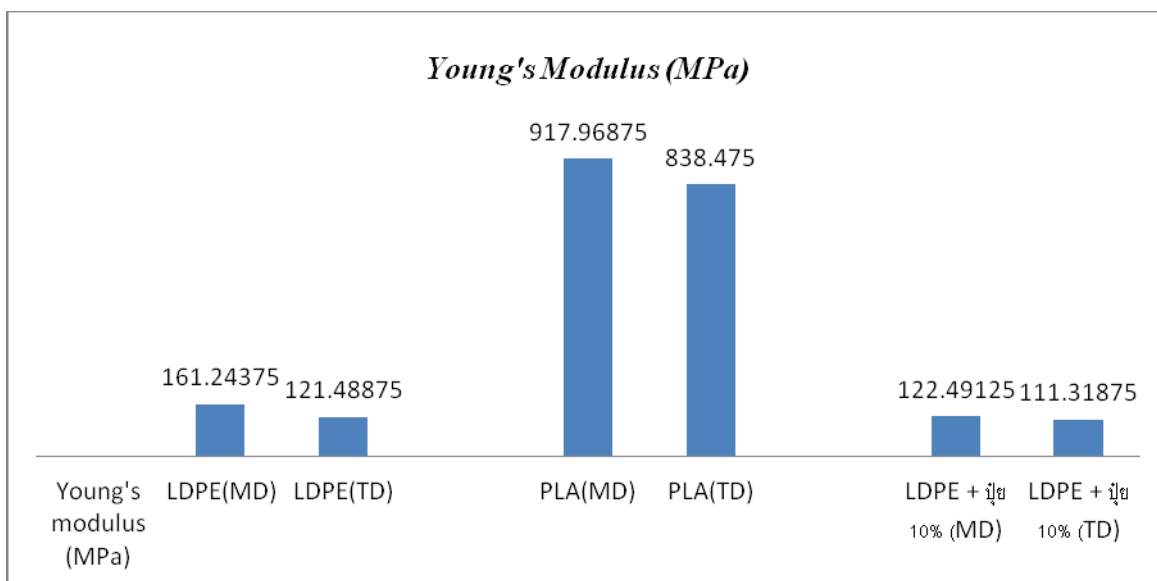
ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงการสลายตัวทางความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอนุภาคน้ำ $\text{KMgPO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})$ ที่เตรียมจาก $(\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{HPO}_4)$

จากภาพที่ 4.10 พบว่ามีการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 73.30°C ซึ่งเกิดจากการ desorption น้ำของผลึก

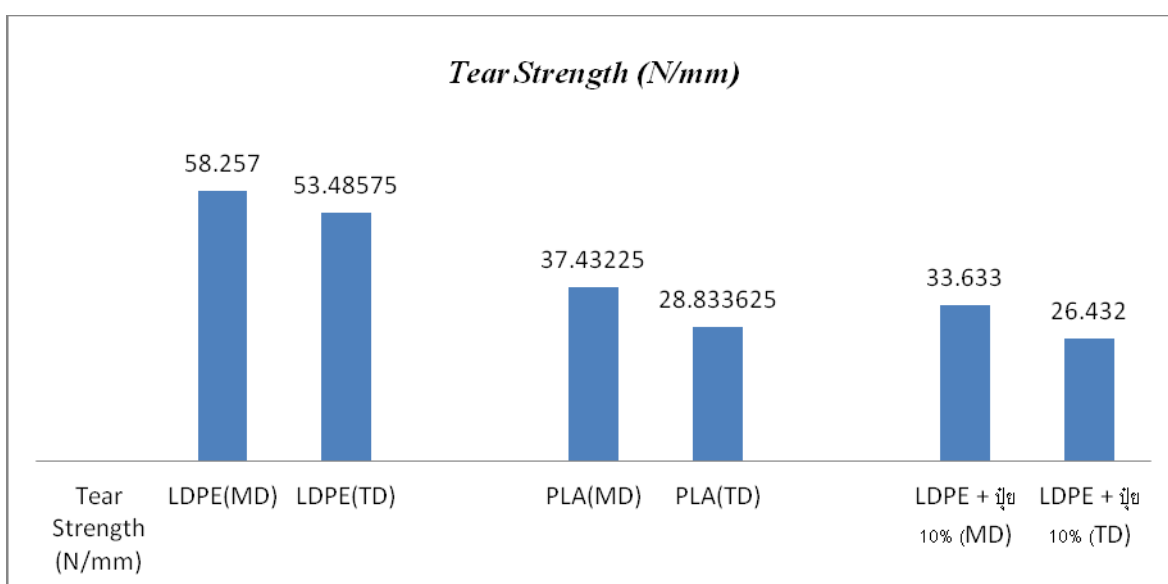
4.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล



ภาพที่ 4.11 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มเป่า LDPE , PLA และ LDPE + 10% ฟิลเลอร์



ภาพที่ 4.12 ค่ายังมอดุลัสของฟิล์มเป่า LDPE , PLA และ LDPE + ฝุ่น 10%



ภาพที่ 4.13 ค่ายังมอดุลัสของฟิล์มเป่า LDPE , PLA และ LDPE + ฝุ่น 10%

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มทั้งสามชนิดพบว่า เมื่อมีการผสมฝุ่นที่ได้จากการสังเคราะห์ลงไปปริมาณ 10%wt พบว่า มีสมบัติเชิงกลที่ลดลง ทั้งค่า ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) , ยังมอดุลัส (Young's Modulus) และ ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear Strength) เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มเป่า LDPE เนื่องจาก อนุภาคของฝุ่นเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่

LDPE ทำให้สายโซ่จัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบได้ยากขึ้น คือมีส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) มากขึ้น จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง และจากผลการทดลองจะเห็นว่า PLA มีค่ายังมอดูลัสที่มากที่สุด เนื่องจาก PLA มีสมบัติที่แข็งแรงแต่เพราะเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของ PLA ที่มีขนาดใหญ่

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการสังเคราะห์ (Synthesis results)

การสังเคราะห์แมงกานีสแอมโมเนียมฟอสเฟตไฮเดรต ($\text{MnNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) โดยใช้ $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ทำปฏิกิริยากับ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ และ สังเคราะห์โพแทสเซียมแมกนีเซียมฟอสเฟตไฮเดรต ($\text{KMgPO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})$) โดยใช้ $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ทำปฏิกิริยากับ K_2HPO_4 โดยวิธีการตกตะกอนที่ง่ายและรวดเร็ว จากนั้นนำไปผึ่งให้แห้ง เพื่อให้ได้สารประกอบฟอสเฟต จากนั้นเก็บตะกอนเพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบและทดสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่างๆ

5.2 สรุปผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิคต่างๆ (Characteristic materials and Identification method)

5.2.1 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของสาร (FT-IR)

จากการทดลองพบว่าสารที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดมีแถบการสั่นในช่วงใกล้เคียงกันกับรูปแบบการสั่นพื้นฐาน คือ สารประเภทกลุ่มไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรต โดยประกอบด้วยหน่วยย่อยการสั่น 2 แบบ คือ HPO_4^{2-} แอนไอออนและโมเลกุลน้ำ (H_2O) ซึ่งรูปแบบการสั่นพื้นฐานของ HPO_4^{2-} จะแสดงเอกลักษณ์การสั่นที่ตำแหน่ง $350\text{--}580$, $700\text{--}900$, $860\text{--}915$, $940\text{--}1010$, $1040\text{--}1170$, $1210\text{--}1400$, $2600\text{--}3250\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการจำแนกรูปแบบการสั่นของ $\delta(\text{O}_3\text{P})$, $\gamma(\text{POH})$, $\nu[\text{PO}(\text{H})]$, $\nu_s(\text{PO}_3)$, $\nu_{as}(\text{PO}_3)$, $\delta(\text{POH})$ และ $\nu(\text{OH})$ ตามลำดับ โดยการสั่นพื้นฐานของน้ำหรือ $\nu(\text{OH})$ จะแสดงการสั่นในช่วง $1600\text{--}1700$, $3100\text{--}3146$, $3200\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการจำแนกรูปแบบการสั่นของ การสั่นแบบโค้งงอ (ν_2) , การสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตร (ν_1) และการสั่นแบบยืดหดแบบอสมมาตร (ν_3) สำหรับรูปแบบการสั่นของสารไพโรฟอสเฟต $[\text{P}_2\text{O}_7]^{4-}$ ซึ่งจะแสดงรูปแบบการสั่นของ P-O stretching ที่ปรากฏในช่วง $960\text{--}1150\text{ cm}^{-1}$ จะประกอบด้วยช่วงการสั่นที่ $900\text{--}1000$, $1000\text{--}1100$ และ $1100\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ โดยเป็นช่วงการสั่นของ $\nu_{\text{sym}}(\text{POP})$, $\nu_{\text{sym}}(\text{PO}_2)$ และ $\nu_{\text{asym}}(\text{PO}_2)$ ตามลำดับ

5.2.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสัณฐาน (XRD)

การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสัณฐานโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน จากการวิเคราะห์พบว่ามีผลปรากฏที่ตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งของ $\text{MgKPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ทำให้ยืนยันได้ว่าสามารถสังเคราะห์สาร $\text{MnNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{MgKPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ได้ โดย $\text{MnNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{MgKPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ที่ได้จากสารตั้งต้น $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และใช้แหล่งฟอสฟอรัสจาก $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, K_2HPO_4 ตามลำดับ และได้ค่า Crystalline size เท่ากับ 60.773 และ 58.073 nm ตามลำดับ

5.2.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของสารในระดับจุลภาค (SEM)

การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสันฐาน โดยทำการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า $\text{NH}_4\text{MnPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ มีลักษณะเป็นแผ่น เกะกันเป็นกลุ่มก้อน และ $\text{KMgPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, KMgPO_4 มีลักษณะเป็นแท่ง เกะกันเป็นกลุ่มก้อน

5.2.4 ผลการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อน (TGA)

$\text{NH}_4\text{MnPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ มีพฤติกรรมทางความร้อนและกลไกการสลายตัวทางความร้อนอยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 เกิดที่อุณหภูมิ 99.27 °C ซึ่งน่าจะเกิดการ desorption น้ำของผลึก ช่วงที่ 2 เกิดที่อุณหภูมิ 177.26 °C ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการเกิด $\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ จากปฏิกิริยา $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ และ $\text{KMgPO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})$ มีพฤติกรรมทางความร้อนและกลไกการสลายตัวทางความร้อนอยู่ 1 ช่วงคือ ช่วงที่อุณหภูมิ 73.30 °C ซึ่งน่าจะเกิดการ desorption น้ำของผลึก จากปฏิกิริยา $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{HPO}_4$

5.3 สรุปผลจากการศึกษาสมบัติเชิงกล

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า สูตรที่ทำการผสมบดลงไป 10%wt มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ค่ายังมอดูลัส (Young's Modulus) และค่าความแข็งแรงฉีกขาด ที่น้อยกว่า फिल्म เป่า LDPE

5.4 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาในการทำให้ฟิล์มมีลักษณะที่ย่อยสลายได้ โดยการนำไปผสมกับแป้ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมวิชาการเกษตร. "การปลูกพืชโดยใช้พลาสติกคลุมดินและใช้ระบบน้ำ 2556" [Online]. Available : http://it.doa.go.th/kasikorn/year-53/nov_dec_53/part-3.pdf
- [2] Banjong Boonchom. Synthesis, Kinetic and Thermodynamics of Thermal Decomposition of metal Phosphate Hydrates
- [3] ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเรื่องปุ๋ย 2556 [Online]. Available : <http://www.puithailand.com>
- [4] Billmeyer F.W. "Textbook of Polymer Science." New York : John Wiley & Sons. 1984
- [5] ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยร่วมกับ บริษัทไทยโพลิเอทิลีน จำกัด. "การสัมมนาเรื่อง HDPE...บรรจุภัณฑ์ทันสมัย." กรุงเทพฯ 2532.
- [6] วันชาติ ปรีชาดิวงษ์. "พอลิเมอร์ (Polymer)." สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์. [online]. Available : <http://www.gocities.com/thaimafia/orchem/polymer.ppt>. 2008.
- [7] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1. กรุงเทพมหานคร : ปู้คเน็ต. 2548.
- [8] เครื่องมือวิทยาศาสตร์ เครื่องมือวิเคราะห์ [Online] Available: http://www.sec.psu.ac.th/facilities/ins_disp.php?id=13 [28 มิถุนายน 2556]
- [9] เรื่องน่ารู้ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope , SEM) [Online] Available : <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/192/SEM.pdf> [28 มิถุนายน 2556]
- [10] ห้องปฏิบัติการเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction , XRD) [Online]. Available : <http://www.mtec.or.th/laboratory/xrdxrf/> [16 มีนาคม 2556]
- [11] [online]. Available; <http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM328-10.pdf>
- [12] American Standard for testing and materials. 1998. "Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheet." ASTM D882. Annual Book of ASTM Standard 08.01., Philadelphia.
- [13] American Standard for testing and materials. 1998. "Standard Test Method for Tear Strength of conventional Vulcanized and Thermoplastic Elastomers." ASTM D624. Annual Book of ASTM Standard 08.01., Philadelphia.

- [14] Bensalem, A. and Iyer, G. 1995. Ambient Pressure and Temperature Synthesis of New Layered Magnesium Phosphate : $\text{MgHPO}_4 \cdot 0.78\text{H}_2\text{O}$. Journal of solid state chemistry. 144, 598-600.
- [15] Boonchom, B. and Danvirutai, C. 2008. A simple synthesis and thermal decomposition kinetics of $\text{MnHPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ rod-like microparticles obtained by spontaneous precipitation route. Journal of Optoelectronics and advance Material. 10, 492 – 499.
- [16] Sahar Mousa, “Study on synthesis of magnesium phosphate materials”, **Phosphorus Research Bulletin**, vol. 24 (2010) pp.16-21
- [17] ทัดชกร ปิ่นเขียน และคณะ 2554. ผลของลิกนินและน้ำมันถั่วเหลืองที่มีต่อฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้. โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
- [18] SCG. Plastic. “Data sheet LDPE EL – LENE LD 1905F.”

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล สมศักดิ์ วรมงคลชัย

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ	เคมี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2529
วท.ม	เคมีเทคนิค	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2532
Ph.D	วิศวกรรมพลาสติก	U. of Massachusetts-Lowell	2540

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

Biodegradable Plastics, Recycling Plastics, Polymer Processing

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Vasile, C.; **Woramongconchai, S.**; Deannin, R. D., Chaala, A.; and Roy, C., “Recycling the Mixed Plastics Fraction from Junked Auto. IV. Pyrolysis Products of Polymer Wastes as Melt Flow Improvers and Compatibilizing Agents”, Inter. J. Polymeric. Mater., 38, 1997, pp. 263-273
2. **Woramongconchai , S.**, “The Effects of Fillers and PVC Compounds on Fusion Properties Studied by Torque Rheometer”, Journal of Science-Ladkrabang, 8, June 1998, pp.27-42
3. Deanin, R. D.; Barry, C. M.; **Woramongconchai, S.**; and Parikh, S. C., “Recycling of Mixed Automotive Plastics”, Macromol. Symp., 135, 1998, pp.55-62
4. **Woramongconchai, S.** and Mingmuang, W., “ Mechanical Properties of Polypropylene and Nylon-6 Blends from Recycled Toothbrushes with a Compatibilizer”, Polymer Processing Society (PPS) Asia/Australia Regional Meeting 1999 Proceedings, Bangkok, Thailand, 1-3 December 1999. pp. 362-363

5. Pukdee Rattanachan and **Somsak Woramongkolchai**, “Design of Rotational Molding Machine for Laboratory Scale” , 8 th Pacific Polymer Conference, Organized by Polymer Society (Thailand), November 24-27, 2003, Bangkok, Thailand. pp 133
6. Chonlada Ritvirulh, Prappon Liawsomboon and **Somsak Woramongkolchai**, “Compatibilisation Effect of SBS on Recycling PS/NR Blends” 8 th Pacific Polymer Conference, Organized by Polymer Society (Thailand), November 24-27, 2003, Bangkok, Thailand. pp.120
7. **Somsak Woramongconchai**, Chatchawan Lohitsisat and Aree Wichianchai, “ Effects of Magnetic Powder Loading on Mechanical Properties and Magnetic Properties of Natural Rubber”, Advances. in Science and Technology , Vol. 45 1423-1428, 2006.
8. สมศักดิ์ วรมงคลชัย 2542 พลาสติกในวันนี้ วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 9 (1):8-12
9. สมศักดิ์ วรมงคลชัย 2542 อุปกรณ์ช่วยในการผสมและเหนียววัสดุของเครื่องอัดรีด วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 9 (1) : 20-26
10. สมศักดิ์ วรมงคลชัย 2542 ผลของสภาวะหลอมเหลวที่มีต่อสมบัติของพลาสติกในรถยนต์ วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 9 (1): 45-51
11. สมศักดิ์ วรมงคลชัย, บุษราภรณ์ ศิริอัสกุล และ วิไลรัตน์ เชื้อฟัก 2542 การผสมเข้ากันได้ของ ไนลอน-6 อะริโลไนตริล บิวทาไดอิน สไตรีน และ พอลิโพลิฟีนส์ที่ใช้แล้ว 1. สมบัติเชิงกล วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 9 (2) : 75-87
12. สมศักดิ์ วรมงคลชัย, ณัฐศิริ ศรีสิทธิพันธุ์กุล และ สุชีวิน สงกะมิลินท์ 2542 การผสมเข้ากันได้ของ ไนลอน-6 อะริโลไนตริล บิวทาไดอิน สไตรีน และ พอลิโพลิฟีนส์ที่ใช้แล้ว 2. สมบัติทางความร้อน สันฐานวิทยา และการดูดซับน้ำ วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 9 (2) : 30-41
13. สมศักดิ์ วรมงคลชัย, สุรัชย์ จิรศักดิ์ศิริกุล และ ธวิพันธ์ อ่ำเกตุสกุล 2543 การศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อพอลิโพลิฟีนส์ผสมและโพลีพอลิสไตรีนที่ใช้แล้ว วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 10 (1) : 42-57
14. สมศักดิ์ วรมงคลชัย 2543 วัสดุชีวภาพในร่างกายมนุษย์ และกายวิภาคของกระดูก วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 10 (1) : 20-26
15. สมศักดิ์ วรมงคลชัย, ธัญญารัตน์ อัมจิตร และธีรศักดิ์ พลอยเจริญ 2543 การสืบค้นสูตรผสมสำหรับ บล็อกยางปูพื้นโดยใช้ถุงมือยางและพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร 8 (2) :1-11

16. สมศักดิ์ วรมงคลชัย ฌัฐติอร ธัญญประกอบ และ วิภา ลีลาเอกเลิศ 2543 กระบวนการผสมระหว่างพอลิโอฟีนส์กับพอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว วารสารมหาวิทยาลัยบูรพา 5(1) :40-52
17. สมศักดิ์ วรมงคลชัย กัญญาวิรุ สุวรรณชัย ภัทธภูมิ สุพรรณสมบุรณ์ และ สุภาณี ชนะวงศ์ 2543 พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโอฟีนส์ที่ใช้แล้วกับแป้งมันสำปะหลัง วารสารเทคโนโลยีสุรนารี 7 (2) : 105-114
18. สมศักดิ์ วรมงคลชัย กษมา สุขผ่องศรี และ กรุงไกร เวียงนาค 2543 ผลของการใช้อนุภาคยางรถยนต์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน โคพอลิเมอร์ วารสารพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 10(4) : 33-41
19. สมศักดิ์ วรมงคลชัย นันทพล จรรโลงศิริชัย และ คมฤทธิ์ ร่วมฤกษ์ 2543 ผลของสารปรับสภาพพลาสติกชนิดฟลูออรีนที่มีต่อสารฟิสิกส์คอมพาวนด์. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 10(2) : 44-5920.
สมศักดิ์ วรมงคลชัย ลลิตา บุญโถม วราภรณ์ พุทธิสสะ และ วินา ชูโชติ 2543 การผลิตวัสดุโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโอฟีนส์ และ สาหร่ายแดง วารสารวิทยาศาสตร์ มก. 18(1-3) : 37-48
20. สมศักดิ์ วรมงคลชัย ฌัฐติอร ธัญญประกอบ และ วิภา ลีลาเอกเลิศ 2543 กระบวนการผสมระหว่างพอลิโอฟีนส์กับพอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว วารสารมหาวิทยาลัยบูรพา 5(1) : 40-52
21. สมศักดิ์ วรมงคลชัย ธัญญรัตน์ อัมจิตร และ ชีรศักดิ์ พลอยเจริญ 2543 การสืบค้นสูตรผสมสำหรับบดถ้อยผงฟูโดยใช้ถุงมือยางและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร 8(2) : 1-11
22. สมศักดิ์ วรมงคลชัย พัทธนิ เจริญยิ่ง จุฑารัตน์ ศิริชัยสิทธิ์ ชลธิชา ระภักดี และ พิไลพร ตั้งสกุลมงคล 2544 การสกัดสารสารให้สีจากเปลือกมังคุดเพื่อประยุกต์ใช้ในการย้อม วารสารวิทยาศาสตร์ มก. 19 (1-3) : 37-51
23. สมศักดิ์ วรมงคลชัย ทิพวรรณ พรปัญญาวุฒิ ศิริอร ประสพพชัยชนะ 2544 การใช้ไบโอพอลิเมอร์เป็นสารตัวเติมไวไนลพอลิเมอร์ วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง 9 (2) : 29-34
24. สมศักดิ์ วรมงคลชัย พัทธนิ เจริญยิ่ง พัทธรินทร์ หอเพชรรุ่งเรือง และ วณิดา อัสวเลิศตระกูล 2545 กระบวนการผลิตเส้นใยจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่และผลของ สารช่วยหน่วงการติดไฟ วารสารเทคโนโลยีสุรนารี 9 (3) : 174-179
25. อัมณพ รักรัตน์ และ สมศักดิ์ วรมงคลชัย 2552 ผล ของสารเบนโซฟีโนนที่มีต่อการสลายตัวทางแสงของฟิล์ม ระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และแป้งมันสำปะหลัง การประชุมเสนอผลงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 12 มหาวิทยาลัยขอนแก่น: 785-794

26. วังริ ธรรมราภา และ สมศักดิ์ วรมงคลชัย 2552 ผลของออร์แกนอเคลย์ที่มีต่อสมบัติเชิงกล และ สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรล การประชุมเสนอผลงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 12 มหาวิทยาลัยขอนแก่น: 795-804
28. พรชัย ชินสา เกื้อวลี พฤษยาทร และสมศักดิ์ วรมงคลชัย 2552 การเตรียมแผ่นนำ กระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดคาร์บอนคอมพอสิตเคลือบโลหะการนำเสนอผลงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 12 : มหาวิทยาลัยขอนแก่น 494-499
29. พัฒนา บัวดี และ สมศักดิ์ วรมงคลชัย 2553 ผลของสารการาจีแนที่มีต่อสมบัติเชิงกล และ สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/เทอร์โมพลาสติกสตาโรล การประชุมเสนอผลงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษาครั้งที่ 11 มหาวิทยาลัยขอนแก่น: 341-347
30. วิไลรัตน์ ทวีวงศ์สุนทร และ สมศักดิ์ วรมงคลชัย 2553 ผลของกลูเตนที่มีต่อสมบัติเชิงกล และ สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/เทอร์โมพลาสติกสตาโรล การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี ครั้งที่ 8 “ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชุมชน สังคมมีความสุข” มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 110