# บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย

ในการทดลองได้ทำการเติมออร์กาโนเคลย์และสารช่วยผสม (Compatibilizer) ลงในพอลิ พรอพิลีน (Polypropylene : PP) เพื่อเตรียมเป็นฟิล์มพอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิต (Polypropylene nanocomposites : PP/m-MMT) หลายสูตร ดังนั้นในการนำเสนอจึงใช้อักษรย่อเพื่อแสดงแทนฟิล์ม พอลิพรอพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสองทิศทาง (Biaxially Oriented Polypropylene : BOPP) ฟิล์ม PP ชนิดของสารช่วยผสม ชนิดของออร์กาโนเคลย์และฟิล์ม PP/m-MMT สูตรต่างๆ ดังตารางที่ 4.1

ลำดับ	ត្សូី៣១	อักษรย่อ
1	ВОРР	BOPP
2	Polypropylene	РР
3	Priex <sup>®</sup> 20093	P93
4	Priex <sup>®</sup> 20095	P95
5	Polybond <sup>®</sup> 1001	P01
6	Polybond <sup>®</sup> 1002	P02
7	Cloisite <sup>®</sup> 20A	20A
8	Claytone <sup>®</sup> HY	НҮ
9	PP / P93 / 20A	
	82 / 12 / 6	P93-20A6
10	PP / P95 / 20A	
	82 / 12 / 6	P95-20A6
11	PP / P01 / 20A	
	82 / 12 / 6	P01-20A6
12	PP / P02 / 20A	
	82 / 12 / 6	P02-20A6
13	PP / P95 / HY	
	82 / 12 / 6	Р95-НҮ6

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อแทนสูตรต่างๆ

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

ถำดับ	ត្តូពរ	อักษรย่อ
14	PP / P95 / 20A	P95-20A3 หรือ
	91 / 6 / 3 (Dr = 42)	P95-20A3-D42
15	PP / P95 / 20A	
	73 / 18 / 9	P95-20A9
16	PP / P95 / 20A	
	91 / 6 / 3 (Dr = 25)	P95-20A3-D25
17	PP / P95 / 20A	
	91 / 6 / 3 (Dr = 19)	P95-20A3-D19

## 4.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ในพอลิ พรอพิลีนนาโนคอมโพสิต (PP/m-MMT)

การเตรียม PP/m-MMT โดยเติมออร์กาโนเคลย์เป็นส่วนเสริมแรง มักจะพบปัญหาบริเวณ รอยต่อระหว่างวัฎภาค (Interfaces) ของพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์และออร์กาโนเคลย์ หรือออร์กาโน เคลย์อาจเข้ามาเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนในระหว่างกระบวนการผสม ดังนั้นการเพิ่มความสามารถใน การเข้ากันได้ระหว่างวัฎภาคของพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์และออร์กาโนเคลย์จึงเป็นปัจจัยสำคัญ โดย การเติมสารช่วยผสมใน PP/m-MMT จะส่งผลให้ออร์กาโนเคลย์กระจายตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพิ่มความแข็งแรงยึดเกาะระหว่างวัฎภาคของออร์กาโนเคลย์และพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ ซึ่งเป็น การปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

ในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาผลของสารช่วยผสม ชนิดพอลิพรอพิลีนกราฟต์มาเลอิก แอนไฮไดรด์ (Polypropylene grafted Maleic Anhydride : PP-g-MA) หรือพอลิพรอพิลีนกราฟต์ อะคริลิกแอซิก (Polypropylene grafted Acrylic Acid : PP-g-AA) ที่มีโครงสร้างสายโซ่กิ่ง (Branching) เป็นหมู่ฟังก์ชันมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic Anhydride : MA) หรืออะคริลิกแอซิก (Acrylic Acid : AA) ตามลำดับ ซึ่งมีความเป็นขั้ว (Polarity) สูง จึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ ไฮครอกซิล (Hydroxyl groups : -OH) ที่โครงสร้างออร์กาโนเคลย์ [10] และสารช่วยผสมทั้ง 2 ชนิด นี้ยังมีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลด่ำ จึงสามารถแทรกสอด เข้าไปในระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ได้ง่าย เป็นผลทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโน เกลย์เพิ่มขึ้น อนุภาคซิลิเกตจึงมีค่าสัดส่วนระหว่างกวามยาวต่อความหนา (Aspect ratio) สูงขึ้น นอกจากนี้สายโซ่พอลิพรอพิลีนที่กราฟต์อยู่กับสารช่วยผสมยังสามารถเกี่ยวพัน (Entanglement) กับสายโซ่พอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ส่งผลให้เกิดความแข็งแรงบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค



**รูปที่ 4.1** XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรค Cloisite<sup>®</sup>20A และ PP/m-MMT ที่เติมสารช่วย ผสมเกรค Priex<sup>®</sup>20093 และออร์กาโนเคลย์เกรค Cloisite<sup>®</sup>20A ที่อัตราส่วนระหว่าง สารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2:1, 2.5:1 และ 3:1



ร**ูปที่ 4.2** XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite<sup>®</sup>20A และ PP/m-MMT ที่เติมสารช่วย ผสมเกรด Priex<sup>®</sup>20095 และออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite<sup>®</sup>20A ที่อัตราส่วนระหว่าง สารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 1:1, 1.5:1, 2:1, 2.5:1 และ 3:1



**รูปที่ 4.3** XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite<sup>®</sup>20A และ PP/m-MMT ที่เติมสารช่วย ผสมเกรด Polybond<sup>®</sup>1001 และออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite<sup>®</sup>20A ที่อัตราส่วนระหว่าง สารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2:1, 2.5:1 และ 3:1



**รูปที่ 4.4** XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรค Cloisite<sup>®</sup>20A และ PP/m-MMT ที่เติมสารช่วย ผสมเกรค Polybond<sup>®</sup>1002 และออร์กาโนเคลย์เกรค Cloisite<sup>®</sup>20A ที่อัตราส่วนระหว่าง สารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2:1, 2.5:1 และ 3:1

ตารางที่ 4.2 ค่าระยะห่างระหว่างชั้น (D-spacing) ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite<sup>®</sup>20A และ ออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT ที่เติมสารช่วยผสมเกรด Priex<sup>®</sup>20093, Priex<sup>®</sup>20095, Polybond<sup>®</sup>1001 และ Polybond<sup>®</sup>1002 และออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite<sup>®</sup>20A ที่อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 1:1, 1.5:1,

ត្សូីីទ	อัตราส่วน	20	ระยะห่างระหว่างชั้น
		(องศา)	(nm)
Cloisite 20A	-	1.5	5.8
		3.3	2.7
	2:1	-	-
P93 : 20A	2.5 : 1	-	-
	3:1	-	-
	1:1	2.6	3.4
	1.5 : 1	2.5	3.6
P95 : 20A	2:1	-	-
	2.5 : 1	-	-
	3:1	-	-
	2:1	1.5	6.1
P01 : 20A	2.5 : 1	1.4	6.3
	3 : 1	-	-
	2:1	1.4	6.1
P02 : 20A	2.5 : 1	1.2	7.2
	3:1	1.3	6.9

2:1, 2.5:1 และ 3:1

จากการตรวจสอบค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าออร์ กาโนเคลย์เกรด Cloisite <sup>®</sup>20A ปรากฏพีก 20 ที่ตำแหน่ง 1.5 และ 3.3 องศา ซึ่งจากการกำนวณตาม สมการ Bragg's Law พบว่ามีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 5.8 และ 2.7 nm ตามลำดับ แต่เมื่อทำการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ใน PP/m-MMT โดยเติมสาร ช่วยผสมเกรด Priex <sup>®</sup>20093, Priex <sup>®</sup>20095, Polybond <sup>®</sup>1001 และ Polybond <sup>®</sup>1002 ที่อัตราส่วน ระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2:1, 2.5:1 และ 3:1 พบว่าการเติมสารช่วยผสมชนิด PP-g-MA จะทำให้ออร์กาโนเคลย์มีระยะห่างระหว่างชั้นมากกว่าการเติมสารช่วยผสมชนิด PP-gAA ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.1-4.4 และตารางที่ 4.2 ใน XRD patterns ของ PP/m-MMT ที่เติมสาร ช่วยผสมชนิด PP-g-MA ที่อัตราส่วน 2:1, 2.5:1 และ 3:1 พบว่าไม่ปรากฎพึกที่ตำแหน่ง 20 อาจ เนื่องมาจากหมู่ฟังก์ชัน MA มีสมบัติกวามเป็นขั้ว (Dipole moment) สูงกว่าหมู่ฟังก์ชัน AA [39] โดยหมู่ฟังก์ชัน MA มีก่า Dipole moment เท่ากับ 3.93 Debye และหมู่ฟังก์ชัน AA มีก่า Dipole moment เท่ากับ 1.46 Debye ดังนั้นสารช่วยผสมที่มีโครงสร้างสายโซ่กิ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน MA จึงเกิด อันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่โครงสร้างของออร์กาโนเกลย์ได้แข็งแรงกว่า [10] นอกจากนี้จาก การศึกษาก่าดรรชนีการไหล (MFI) ดังแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าสารช่วยผสมชนิด PP-g-MA มี โครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าสารช่วยผสมชนิด PP-g-AA จึงสามารถแทรกตัวเข้าไปในระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ได้ง่ายกว่า [11] เป็นผลทำให้ออร์ กาโนเคลย์มีประสิทธิภาพการกระจายตัวที่ดี

จากรูปที่ 4.2 แสดง XRD patterns กรณีศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสม และออร์กาโนเคลย์ใน PP/m-MMT ที่มีการเติมสารช่วยผสมเกรค Priex <sup>®</sup>20095 และเติมออร์กาโน เคลย์เกรด Cloisite <sup>®</sup>20A ที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:1, 1.5:1, 2:1, 2.5:1 และ 3:1 พบว่าที่อัตราส่วน ระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 1:1, 1.5:1 ปรากฏพึก 20 ที่ตำแหน่ง 2.6 และ 2.5 ้องศา ซึ่งจากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law พบว่ามีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโน เคลย์เท่ากับ 3.4 และ 3.6 nm ตามลำคับ คังแสคงในตารางที่ 4.2 โคยการเติมสารช่วยผสมในปริมาณ ที่น้อยเกินไป จะทำให้ประสิทธิภาพการเกิดอันตรกิริยาและการแทรกตัวของสายโซ่พอลิพรอพิลีน เข้าไปในระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ลคลง ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ ้ถุดถงตามไปด้วย เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2:1. 2.5:1 และ 3:1 จะทำให้ประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์เพิ่มขึ้น [11] แต่จากการ ทคลองสามารถสังเกตได้ว่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเกลย์เพิ่มขึ้นไม่แตกต่างกันอย่างเห็น ้ได้ชัดเจน ดังจะเห็นได้จาก XRD patterns พบว่าไม่ปรากฏพึกที่ต่ำแหน่ง 20 ที่ทุกอัตราส่วน นอกจากนี้การเติมอัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์สูงจะเป็นการเพิ่มปริมาณสาร ้ช่วยผสม โดยสารช่วยผสมในปริมาณที่มากเกินไปอาจรวมตัวเกิดเป็นวัฏภาคใหม่ หรือเกิดเป็น ้ลักษณะของพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) ใด้ และการเติมสารช่วยผสมในปริมาณมากยังมีผลทำ ให้สมบัติเชิงกลของ PP/m-MMT มีแนวโน้มลดลง [11] ประกอบกับเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิต เนื่องจากสารช่วยผสมมีราคาค่อนข้างแพง

จากการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ใน PP/m-MMT โดยศึกษาในสารช่วยผสมทั้ง 4 เกรด พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและ ออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2:1 เพื่อคงประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ โดยจากการ ทดลองจะเห็นได้ว่าการเติมอัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ต่ำกว่า 2:1 จะทำให้ ประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ในพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ลดลง แต่หากเติมอัตรา ส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์สูงกว่า 2:1 สารช่วยผสมอาจรวมตัวเกิดเป็นวัฏภาค ใหม่หรือเกิดเป็นลักษณะของพอลิเมอร์ผสม รวมทั้งอาจส่งผลเสียอื่นๆ ตามมาดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

## 4.2 ผลการศึกษาชนิดของออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

## 4.2.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT

จากการสังเกตลักษณะของสี ความขุ่นและวัดความหนาของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT จะมีความขุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ ฟิล์ม PP เนื่องจากออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite<sup>®</sup> 20A เป็นอนุภาคที่มีสีขาวเมื่อเดิมลงในฟิล์ม PP/m-MMT จึงทำให้ฟิล์มมีความขุ่นเพิ่มขึ้นและยังพบจุดเล็กๆ ปรากฎบนแผ่นฟิล์ม PP/m-MMT ลักษณะ คล้ายเม็ดเจลที่เรียกว่า Fish eye [12] ซึ่งอาจเกิดจากการเชื่อมโยง (Crosslink) กันเองของสารช่วย ผสม และถือว่าเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน อาจส่งผลต่อสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจนและสมบัติเชิงกล นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 มี เฉคสีเหลืองและความขุ่นใกล้เคียงกันเนื่องจากการเติมออร์กาโนเคลย์ในปริมาณที่เท่ากัน ความหนา ของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 4.3 และตัวอย่างของฟิล์มแต่ ละสูตรแสดงดังรูปที่ 4.5

 สูตร
 ความหนาเฉลี่ย (μm)

 PP
 23 ± 3

 P95-HY6
 26 ± 3

 P95-20A6
 30 ± 6

ตารางที่ 4.3 ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6



(a)



ร**ูปที่ 4.5** ตัวอย่าง (a) ฟิล์ม PP (b) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ (c) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 (ด้านซ้ายของรูปแสดงพื้นหลังส่วนด้านขวาของรูปแสดงฟิล์ม PP/m-MMT)

### 4.2.2 ผลการศึกษาค่าดรรชนีการใหล

ผลการทดสอบค่าครรชนีการไหล (MFI) ของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT แสดงดัง ตารางที่ 4.4 พบว่า PP/m-MMT มีค่า MFI ต่ำกว่า PP หรืออาจกล่าวได้ว่า PP/m-MMT มีความหนืด มากกว่า PP ทั้งนี้เนื่องมาจากออร์กาโนเคลย์ซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งไปขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ พอลิเมอร์ ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้น้อยลง [42] ดังนั้นเมื่อทำการเติมออร์กาโนเคลย์ใน PP/m-MMT ค่า MFI จึงมีค่าลดลงหรืออาจกล่าวได้ว่ามีความหนืดสูงขึ้นนั่นเอง ปรากฏการณ์นี้เป็น สิ่งที่พบปกติเมื่อทำการเติมสารตัวเติมอนุภาคของแข็งลงในพอลิเมอร์

การศึกษาผลของชนิดออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อความหนืดใน PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 ที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone<sup>®</sup>HY และ Cloisite<sup>®</sup>20A ตามลำดับ พบว่า ฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 2 สูตร มีค่า MFI ใกล้เคียงกัน

ត្តូពរ	MFI (g/10 min)
РР	$8\pm0.5$
Р95-НҮ6	$5\pm0.5$
P95-20A6	$5 \pm 0.4$

ตารางที่ 4.4 ค่าครรชนีการไหล (230°C /2.16 kg) ของ PP และ PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6

## 4.2.3 ผลการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์

้จากการตรวจสอบค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าออร์ กาโนเคลย์เกรด Claytone <sup>®</sup>HY ปรากฏพึก 20 ที่ตำแหน่ง 1.3 และ 2.5 องศา ซึ่งจากการคำนวณตาม สมการ Bragg's Law พบว่ามีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 6.6 และ 3.5 nm ตามลำดับ ส่วนออร์กาโนเกลย์เกรด Cloisite <sup>®</sup>20A ปรากฏพีก 20 ที่ตำแหน่ง 1.5 และ 3.3 องศา ซึ่ง ้จากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law พบว่ามีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 5.8 และ 2.7 nm ตามลำดับ เมื่อทำการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 ที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone<sup>®</sup>HY และ Cloisite<sup>®</sup>20A ตามลำคับ พบว่าไม่ปรากฏพึกที่ตำแหน่ง 20 คังแสคงในรูปที่ 4.6 การที่พึก XRD ของออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone  $^{\mathbb{R}}$  HY และ Cloisite  $^{\mathbb{R}}$  20A หายไป แสดงว่าออร์กาโนเคลย์ทั้ง 2 เกรคมีประสิทธิภาพในการกระจายตัวที่ดีเนื่องจากออร์กาโนเกลย์เกรด Clavtone<sup>®</sup>HY เป็นออร์กา โนเคลย์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมสีเพื่อปรับความหนืดจึงมีสารลดแรงตึงผิวในปริมาณที่มาก และเป็น ้ออร์กาโนเคลย์ที่ผ่านการคัคแปรพื้นผิวด้วยสารอินทรีย์มาแล้ว คังนั้นจึงมีความชอบสารอินทรีย์อยู่ ้ด้านในระหว่างชั้นซิลิเกตแต่ขอบนอกของแผ่นซิลิเกตยังมีความเป็นขั้วเหลืออยู่ จึงเกิดการขยายตัว ของระยะห่างระหว่างชั้นออร์กาโนเคลย์ [19] ทำให้ออร์กาโนเคลย์เกรค Claytone <sup>®</sup>HY มีระยะห่าง ระหว่างชั้นของออร์กาโนเกลย์สูง ส่วนออร์กาโนเกลย์เกรด Cloisite<sup>®</sup>20A เป็นออร์กาโนเกลย์ที่ ได้รับการคัดแปรพื้นผิวด้วยสารอินทรี*ย*์ Dimethyl, dehydrogenated tallow, quaternary ammonium : 2M2HT จึงมีระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์สูงเช่นกัน ดังจะเห็นได้จากผล การศึกษาค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ทั้ง 2 เกรค ข้างต้น คังนั้นเมื่อนำออร์กาโนเคลย์ เกรด Claytone<sup>®</sup>HY และ Cloisite<sup>®</sup>20A มาทำการเตรียมเป็นฟิล์ม PP/m-MMT สายโซ่พอลิพรอพิ ้ลืนจึงสามารถแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ได้ง่าย ส่งผลให้ออร์กาโนเคลย์ทั้ง 2 เกรคมีประสิทธิภาพในการกระจายตัวที่ดี



ร**ูปที่ 4.6** XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone<sup>®</sup>HY และ Cloisite<sup>®</sup>20A และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6

#### 4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 ด้วยเทคนิค DSC เพื่อศึกษาค่าร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity) อุณหภูมิ หลอมเหลวผลึก (T<sub>m</sub>) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T<sub>c onsel</sub>) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และภาคผนวก ก พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์ม PP อาจเนื่องมาจากการขึ้นรูปฟิล์ม ตัวอย่างด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่น โดยการดึงฟิล์ม PP/m-MMT ผ่าน ลูกกลิ้งหล่อเย็น (Pulling roll) จะทำให้อนุภาคซิลิเกตมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) [45] ซึ่งอาจนำพาให้สายโซ่พอลิเมอร์จัดเรียงตัวในทิศทางตามแนวเครื่องจักร ส่งผลให้ฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์ม PP ที่ไม่มีการเติมออร์กาโนเกลย์ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึกของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าใกล้เกียงกัน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 ด้วยเทคนิค DSC พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 2 สูตร มีค่าร้อยละความเป็นผลึก อุณหภูมิ หลอมเหลวผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึกใกล้เคียงกัน แสดงว่าชนิดของออร์กาโนเคลย์ไม่มีผลทำให้ เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละความเป็นผลึก ความหนาของชั้นผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึก

ត្តូ២រ	ร้อยละความเป็นผลึก	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก	อุณหภูมิเริ่มตกผลึก
	(% Crystallinity)	$T_{m}$	T <sub>c onset</sub>
		(°C)	(°C)
РР	33	162	122
Р95-НҮ6	43	162	124
P95-20A6	46	163	125

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6

นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิก TGA เพื่อศึกษาปริมาณ ออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอนและอุณหภูมิเริ่มสลายตัว (T<sub>d onset</sub>) ในฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และภาคผนวก ก พบว่าปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่ แน่นอนในฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดเล็กน้อย อาจเนื่องจากในขั้นตอนการผสม เมื่อเทเม็ดพอลิพรอพิลีนที่ผสมออร์กาโนเคลย์ สารช่วยผสม และสารทำให้เกิดเสถียรภาพลงในช่อง รับสาร (Hopper) ของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ เม็ดพอลิพรอพิลีนและออร์กาโนเคลย์จะ เคลื่อนที่ตามแรงขับของสกรูและเกิดการผสม แต่อนุภาคบางส่วนของออร์กาโนเคลย์จะ ในร่องสกรู เนื่องจากออร์กาโนเคลย์มีความหนาแน่นมากกว่าเม็ดพอลิพรอพิลีน นอกจากนี้ออร์กา โนเคลย์มีลักษณะเป็นผงจึงเกิดการฟุ้งกระจายในขั้นตอนการผสมได้ง่าย ส่งผลให้ปริมาณออร์กาโน เคลย์ที่พบในฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าน้อยกว่าที่กำหนด

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวและปริมานออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอนในฟิล์ม PP และฟิล์ม

สูตร	ปริมาณออร์กาโนเคลย์	ปริมาณออร์กาโนเคลย์	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว	
	ที่กำหนด	ที่แน่นอน	T <sub>d onset</sub>	
	(% โดยน้ำหนัก)	(% โดยน้ำหนัก)	(°C)	
РР	-	-	333	
Р95-НҮ6	6	5.72	388	
P95-20A6	6	5.81	381	

PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6

จากการศึกษาอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของฟิล์ม PP/m-MMT พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบ กับฟิล์ม PP การพัฒนาความเสถียรทางความร้อน (Thermal stability) เป็นผลเนื่องมาจากการที่ชั้น ของซิลิเกตแตกตัวออกจากกันเป็นแผ่นบาง และจัดเรียงตัวขวางในลักษณะของ Tortuous path ดัง แสดงในรูปที่ 2.13 โดยเส้นทางการเคลื่อนที่ของสารที่เกิดการเสียสภาพต้องผ่านไปตามชั้นของ อนุภาคซิลิเกตที่กระจายอนุภาคเป็นแผ่นบางกั้นขวางอยู่ [11] เป็นผลทำให้ฟิล์ม PP/m-MMT มี อุณหภูมิเริ่มสลายตัวสูงขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์ม PP และการศึกษาอุณหภูมิเริ่มสลายตัวในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 พบว่าชนิดของออร์กาโนเกลย์ไม่มีผลต่ออุณหภูมิเริ่มสลายตัว ดังแสดงในตารางที่ 4.6

### 4.2.5 ผลการศึกษาสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

การศึกษาสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP/m-MMT กรณีที่ความ หนาของฟิล์มเท่ากัน โดยพิจารณาเป็นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeability Coefficient : *OP*) ในฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT มีค่า *OP* ลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์ม PP ที่ไม่ได้เติมออร์กา โนเคลย์ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ด้วย 2 เหตุผลหลักคือจากทฤษฎี Tortuosity กล่าวว่าอนุภาคซิลิเกต ที่กระจายอนุภาคเป็นแผ่นบางอยู่ในพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ จะจัดเรียงตัวขวางกั้นเส้นทางการซึม ผ่านของก๊าซออกซิเจนตาม Tortuous path ดังแสดงในรูปที่ 2.13 อีกสาเหตุหนึ่งที่อาจทำให้การซึม ผ่านของก๊าซออกซิเจนลดลงเมื่อผสมออร์กาโนเคลย์คือการที่ฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าร้อยละความ เป็นผลึกสูงกว่าฟิล์ม PP ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.4 เนื่องจากโครงสร้างผลึกเป็น โครงสร้างสายโซ่ที่เรียงตัวอย่างเป็นระเบียบหรือมีการเรียงชิดติดกัน ทำให้สามารถลดการซึมผ่าน ของก๊าซออกซิเจนลงได้ จากเหตุผลข้างด้นเป็นผลทำให้ฟิล์ม PP/m-MMT สามารถสกัดกั้นการซึม ผ่านของก๊าซออกซิเจนลงได้ จากเหตุผลข้างต้นเป็นมีการเรียงชิกติดกัน ทำให้สามารถลดการซึมผ่าน ของก๊าซออกซิเจนลงได้ จากเหตุผลข้างค้นเป็นผลทำให้ฟิล์ม PP/m-MMT สามารถสกัดกั้นการซึม ผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่าฟิล์ม PP

จากผลการทดลองพบว่าฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 สามารถสกัดกั้นการซึมผ่าน ของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่าหรือมีค่า *OP* ต่ำกว่าฟิล์มสูตร P95-HY6 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เป็นผล เนื่องมาจากประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเกลย์ เพื่อขวางกั้นการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจนในฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 2 สูตรแตกต่างกัน ซึ่งจากผลการศึกษาค่า *OP* ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตรต่างๆ นำไปสู่การศึกษาค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตโดยการคำนวณตามทฤษฎี Tortuosity ในภาคผนวก ฉ ทำให้ทราบว่าอนุภาคซิลิเกตในฟิล์มสูตร P95-20A6 มีค่า Aspect ratio สูงกว่าฟิล์มสูตร P95-HY6 แสดงดังตารางที่ 4.7 ซึ่งสามารถยืนยันผลการคำนวณค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตได้จากผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดย อนุภาคซิลิเกตที่มีค่า Aspect ratio สูง จะเป็นการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของก๊าซออกซิเจนไป ตามชั้นของอนุภาคซิลิเกตที่จัดเรียงตัวขวางกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนตาม Tortuous path ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เป็นผลทำให้ฟิล์มสูตร P95-20A6 สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจนได้ดีกว่าฟิล์มสูตร P95-HY6





ตารางที่ 4.7 Tortuosity factor ( 7) และค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6

ត្សូីទារ	$P_s/P_p^a$	ออร์กาโนเคลย์	$\phi_{s}^{b}$	Tortuosity	Aspect
		(% โดยน้ำหนัก)		factor	ratio <sup>°</sup>
Р95-НҮ6	99 / 117 = 0.85	5.72	0.02	1.16	16
P95-20A6	82 / 117 = 0.70	5.81	0.02	1.40	40

หมายเหตุ \* คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ซิลิเกตนาโนคอมโพสิตต่อ

ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอถิเมอร์บริสุทธิ์

<sup>ь</sup> คือ สัคส่วน โคยปริมาตรของซิลิเกต

์ คือ สัคส่วนระหว่างความยาวต่อความหนาของอนุภาคซิลิเกต

การที่ออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone<sup>®</sup>HY ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 มีค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตต่ำกว่าออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite<sup>®</sup>20A ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 อาจเป็นผลเนื่องมาจากรูปร่างหรือขนาดที่แท้จริงของอนุภาคซิลิเกตในออร์กาโนเคลย์ทั้ง 2 เกรดแตกต่างกัน โดยอนุภาคซิลิเกตในออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone<sup>®</sup>HY อาจมีขนาดด้านข้างเล็ก กว่าจึงมีค่า Aspect ratio ต่ำกว่าอนุภาคซิลิเกตในออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite<sup>®</sup>20A ดังนั้นถึงแม้ว่า ออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 2 สูตร จะมีประสิทธิภาพในการกระจายตัวที่เท่ากัน เมื่อ นำมาเตรียมเป็นฟิล์ม PP/m-MMT ออร์กาโนเกลย์เกรด Claytone<sup>®</sup>HY จึงมีค่า Aspect ratio ของ อนุภาคซิลิเกตต่ำกว่าออร์กาโนเกลย์เกรด Cloisite<sup>®</sup>20A

นอกจากนี้การทำนายตามทฤษฎี Tortuosity จากผลการทคลองอาจคลาคเคลื่อนเล็กน้อย เนื่องจากพบเม็คเจลที่มีลักษณะคล้าย Fish eye ซึ่งถือเป็นจุคบกพร่องบนฟิล์ม PP/m-MMT [12] ดังนั้นก่า *OP* ที่ได้อาจคลาคเคลื่อน และส่งผลต่อการทำนายตามทฤษฎี Tortuosity

## 4.2.6 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา

จากการศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัว และประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 โดยเทคนิก SEM ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite<sup>®</sup> 20A ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 มีการจัดเรียงตัว ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) จากแรงขับของเครื่องขึ้นรูปฟิล์ม และกระจายอนุภาคอย่าง สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone<sup>®</sup>HY ในฟิล์มสูตร P95-HY6 ที่มีการจัดเรียงตัว ตามแนวเครื่องจักรเพียงบางส่วนและมีการกระจายอนุภาคอย่างสม่ำเสมอเช่นเดียวกัน แต่จากรูปจะ สามารถสังเกตได้ว่าออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone<sup>®</sup>HY มีความยาวด้านข้างของอนุภาคซิลิเกตน้อย กว่าออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite<sup>®</sup>20A ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาค่า Aspect ratio ของอนุภาค ซิลิเกตในหัวข้อที่ 4.2.5





(b)



ร**ูปที่ 4.8** ภาพตัดขวาง (Cross section) ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) โดยการหักชิ้นงานที่ อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ (a) ฟิล์ม PP (b) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ (c) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

#### 4.2.7 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สตร P95-20A6 ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine Direction : MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse Direction : TD) แสดงดังรปที่ 4.9 สามารถนำมาใช้อธิบาย พฤติกรรมสมบัติเชิงกลโดยรวมของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT ได้ โดยฟิล์ม PP ในทิศทาง MD และ TD รวมทั้งฟิล์ม PP/m-MMT ในทิศทาง MD จะมีพฤติกรรมการเสียสภาพในลักษณะ ้เดียวกัน กล่าวคือเมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระทำจะเกิดการยึดออก ในช่วงแรกกราฟจะมีความสัมพันธ์ ์แบบเชิงเส้น ชิ้นงานจะสามารถกลับคืนมาอยู่ในสภาพเดิมได้ เมื่อยุติการให้แรงกระทำ แต่เมื่อให้ แรงกระทำต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุดคราก (Yield point) ชิ้นงานจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ้รูปร่างอย่างถาวร ช่วงนี้ค่าความเค้นของกราฟจะลดลง เป็นการบ่งบอกถึงการเสียรูปร่างในลักษณะ การเกิดกอกอด (Necking) และหากชิ้นงานยังกงได้รับแรงกระทำอย่างต่อเนื่อง ก่ากวามเก้นจะเริ่ม ้คงที่ จนกระทั่งชิ้นงานขาดออกจากกัน จากกราฟแสดงให้เห็นว่าฟิล์ม PP/m-MMT มีความสามารถ ในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีแรงมากระทำต่อวัสดุและมีความแข็งแรงมากกว่าฟิล์ม PP เนื่องจากมีค่ามอดลัส (Modulus) และค่าความแข็งแรงคึง (Tensile strength) หรือค่าความเค้น ณ ้จุดคราก (Stress at yield) สูงกว่า คังที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น ซึ่งนำไปสู่ความเข้าใจเกี่ยวกับ ประเภทของพลาสติก ดังนั้นฟิล์ม PP จึงเป็นพลาสติกที่มีลักษณะนิ่มและเหนียวเมื่อเทียบกับฟิล์ม ที่ผ่านการเติมออร์กาโนเคลย์แล้วทำให้ได้ฟิล์มที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โคยฟิล์ม PP/m-MMT PP/m-MMT ในทิศทาง MD จะแสดงลักษณะของพลาสติกเป็นแบบแข็งและเหนียว นอกจากนี้หาก พิจารณารูปร่างกราฟของฟิล์ม PP/m-MMT ในทิศทาง TD จะเห็นได้ว่าเมื่อให้แรงกระทำแก่ชิ้นงาน ้ชิ้นงานจะเกิดการยืดออกเพียงเล็กน้อยและเมื่อให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่อง ชิ้นงานจะเกิดการเสีย ้สภาพโดยไม่มีการยืดออก ซึ่งแสดงให้เข้าใจถึงลักษณะของฟิล์มเป็นแบบแข็งเปราะ แสดงว่าการ เติมออร์กาโนเคลย์ทำให้ได้ฟิล์มที่มีสมบัติแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic property) มากขึ้น กล่าวคือสมบัติเชิงกลในทิศทาง MD และ TD แตกต่างกันมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคซิลิเกตที่มีค่า Aspect ratio สูง เมื่อผสมในพอลิเมอร์หลอมเหลว จะทำให้มีความหนืดสูงขึ้น และเมื่อถูกคึงยืดขณะ ู้ขึ้นรูปทำให้อนุภาคซิลิเกตเกิดการจัคเรียงตัวในแนวแรง (MD) มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเสริมแรง (Reinforcing effect) ตามแนวแรง แต่ทำให้ฟิล์มเปราะขาดง่ายในแนวตั้งฉากกับแรง (TD) นอกจากนี้การที่ฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT ในทิศทาง MD มีความแข็งแรงสงกว่าทิศทาง TD เนื่องจากในงานวิจัยนี้ทำการขึ้นรูปฟิล์มโดยเทคนิคการผลิตฟิล์มแผ่น (Flat film) ที่มีการคึงยืดฟิล์ม ในขั้นตอนการม้วนเก็บตามทิศทาง MD จึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวในทิศทาง MD มากกว่าทิศทาง TD โดยเมื่อให้แรงดึงในแนว MD แผ่นฟิล์มจึงสามารถทนต่อแรงดึงและยืดตัวตาม แรงดึงได้มากขึ้น



ร**ูปที่ 4.9** ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียค (Strain) ของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 ในทิศทาง MD และ TD

้งากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT ์ ที่มีการเติมสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์มีการพัฒนาสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น เช่น ค่าความแข็งแรง ดึง ค่ามอดุลัส และค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ดังแสดงในรูปที่ 4.10-4.12 ตามลำดับ ทั้งนี้การพัฒนาค่าความแข็งแรงคึงและค่าความแข็งแรงฉีกขาด สามารถอธิบายได้จากปรากฏการณ์ เสริมแรง (Reinforcing effect) ของออร์กาโนเคลย์ โดยการเติมสารช่วยผสมชนิด PP-g-MA ที่มี ้โครงสร้างสายโซ่กิ่งเป็นหม่ฟังก์ชัน MA ซึ่งมีความเป็นขั้วสง จึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับหม่ ไฮดรอกซิลที่โครงสร้างของออร์กาโนเคลย์ และมีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีน ้ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจึงสามารถแทรกตัวเข้าไปในระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ได้ง่าย ส่งผลให้ ้ชั้นของออร์กาโนเคลย์แยกห่างออกจากกันจนกระทั่งอนุภาคซิลิเกตมีค่า Aspect ratio สูงขึ้น ซึ่ง นำไปสู่การกระจายตัวที่ดี [11] นอกจากนี้การที่สารช่วยผสมมีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอ ลิพรอพิลีนจึงสามารถเกี่ยวพันหรือเข้ากันได้ดีกับพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ การที่ออร์กาโบเอลย์ สามารถยึดติดได้ดีกับพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ทำให้มีการยึดติดระหว่างวัฏภาค (Interfaces) ดีขึ้น ้วัสคุมีสมบัติเสริมแรงที่ดี จึงสามารถถ่ายเทแรงที่ได้รับให้กับออร์กาโนเคลย์ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วน เสริมแรง เป็นผลให้วัสคุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ส่วนกรณีค่ามอคุลัสของฟิล์ม PP/m-MMT มีการ พัฒนาสมบัติขึ้นมาจากฟิล์ม PP สามารถอธิบายได้จากกฎของของผสม (Rule of mixtures) กล่าวคือ ้สมบัติของวัสดุจะเท่ากับผลรวมของสมบัติแต่ละองก์ประกอบย่อย ในสัดส่วนขององก์ประกอบนั้น ดังนั้นการเติมออร์กาโนเคลย์ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่มีค่ามอคุลัสสูงลงในฟิล์ม PP/m-MMT จะส่งผลให้ ้ ก่ามอดุลัสของระบบโดยรวมสูงขึ้น จึงเป็นสาเหตุทำให้ฟิล์ม PP/m-MMT มีก่ามอดุลัสสูงกว่าฟิล์ม

PP แต่อย่างไรก็ดีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดกราก (% Elongation at yield) ของฟิล์ม PP/m-MMT มี ก่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับฟิล์ม PP แสดงดังรูปที่ 4.13 อาจเนื่องมาจากการเติมออร์กาโนเคลย์จะ เป็นการเพิ่มความเก้นสะสม (Stress concentration) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค ส่งผลให้แรงที่ กระทำบริเวณรอบๆ อนุภาคซิลิเกตมีก่าสูงขึ้นเป็นผลทำให้ฟิล์ม PP/m-MMT ที่มีการเติมออร์กาโน เกลย์มีก่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดกรากต่ำกว่าฟิล์ม PP

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 พบว่า ฟิล์มสูตร P95-20A6 มีค่ามอดุลัสสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-HY6 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จากการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการเพิ่มขึ้นของค่ามอดุลัสเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกต [4] ซึ่งสอดกล้องกับผลการศึกษาในหัวข้อที่ 4.2.5 โดยฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 มีค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-HY6 โดยเมื่อให้แรงดึงแก่ ฟิล์ม ผลึกของฟิล์มและสายโซ่พอลิพรอพิลีนจะรับแรงและถ่ายโอนแรงที่ได้รับไปยังออร์กาโน เกลย์ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรง ดังนั้นฟิล์มสูตร P95-20A6 จึงมีค่ามอดุลัสสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-HY6

นอกจากนี้จากการทคสอบสมบัติเชิงกลยังพบว่าก่ากวามแข็งแรงดึง ก่ากวามแข็งแรงฉีก ขาดและก่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดกรากของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 มีก่า ใกล้เกียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.10, 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งแรงคึงของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6



ร**ูปที่ 4.11** ค่ามอดุลัสของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6



ร**ูปที่ 4.12** ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6



ร**ูปที่ 4.13** ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดครากของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6

## 4.3 ผลการศึกษาชนิดของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

## 4.3.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์ม PP/m-MMT

จากการสังเกตลักษณะของสี ความขุ่น และวัดความหนาของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6 พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 4 สูตรมีเฉคสีเหลืองและ ความขุ่นใกล้เกียงกัน เนื่องจากการเติมออร์กาโนเคลย์ในปริมาณที่เท่ากัน ความหนาของฟิล์ม PP/m-MMT มีก่าใกล้เกียงกัน แสดงดังตารางที่ 4.8 และตัวอย่างของฟิล์มแต่ละสูตรแสดงดังรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.8 ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ

ត្តូពរ	ความหนาเฉลี่ย (µm)
P93-20A6	$29 \pm 7$
P95-20A6	$30\pm 6$
P01-20A6	33 ± 7
P02-20A6	$29 \pm 5$

P02-20A6



ร**ูปที่ 4.14** ตัวอย่าง (a) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6 (b) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 (c) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P01-20A6 และ (d) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P02-20A6 (ด้านซ้ายของรูปแสดงพื้นหลังส่วนด้านขวาของรูปแสดงฟิล์ม PP/m-MMT)

### 4.3.2 ผลการศึกษาค่าดรรชนีการใหล

จากการศึกษาก่า MFI ของสารช่วยผสมสูตร P93 (Priex<sup>®</sup>20093), P95 (Priex<sup>®</sup>20095), P01 (Polybond<sup>®</sup>1001) และ P02 (Polybond<sup>®</sup>1002) แสดงผลในตารางที่ 4.9 พบว่ามีก่า MFI ต่างกันก่อนข้างมาก โดยสูตร P95 มีก่า MFI สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร P93, P01 และ P02 ซึ่ง มีก่า MFI ลดลงตามลำดับ กาดว่าเนื่องมาจากสารช่วยผสมเกรด Priex<sup>®</sup>20095 มีโครงสร้างสายโซ่ หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่สุด Priex<sup>®</sup>20093, Polybond<sup>®</sup>1001 และ Polybond<sup>®</sup>1002 ซึ่งมีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิ พรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังนั้นสารช่วยผสมสูตร P95 จึงมีความหนืดต่ำที่สุด และสารช่วยผสมสูตร P02 จึงมีความหนืดสูงที่สุด

เมื่อพิจารณาค่า MFI ของ PP/m-MMT ที่ผสมออร์กาโนเคลย์และสารช่วยผสมปริมาณ เท่ากัน แต่เติมสารช่วยผสมต่างชนิดกันใน PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6 จะเห็นได้ว่า PP/m-MMT ทั้ง 4 สูตรมีค่า MFI ใกล้เคียงกัน

QU ,	)
ត្សូពរ	MFI (g/10 min)
P93	$154 \pm 11$
P95	231 ± 13
P01	$38 \pm 4$
P02	$20 \pm 3$
P93-20A6	$5\pm0.2$
P95-20A6	$5\pm0.4$
P01-20A6	$5\pm0.4$
P02-20A6	$5\pm0.3$

ตารางที่ 4.9 ค่าครรชนีการไหล (230°C /2.16 kg) ของสารช่วยผสมสูตร P93, P95, P01 และ P02 และ PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6

## 4.3.3 ผลการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์

จากการตรวจสอบค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าออร์ กาโนเคลย์เกรด Cloisite<sup>®</sup>20A ปรากฏพีก 20 ที่ตำแหน่ง 1.5 และ 3.3 องสา ซึ่งจากการคำนวณตาม สมการ Bragg's Law พบว่ามีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 5.8 และ 2.7 nm ตามลำดับ เมื่อทำการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6 ที่มีการเติมสารช่วยผสมเกรด Priex<sup>®</sup>20093, Priex<sup>®</sup>20095, Polybond<sup>®</sup>1001 และ Polybond<sup>®</sup>1002 ตามลำดับ พบว่าไม่ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 20 ดังแสดงในรูปที่ 4.15 การที่พีก XRD ของออร์กาโนเคลย์หายไป เมื่อทำการเติมสารช่วยผสม เนื่องจากสารช่วยผสมมีโครงสร้างสายโช่กิ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน MA และ AA ซึ่งมีสมบัติความเป็นขั้ว สูงจึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่โครงสร้างของออร์กาโนเคลย์ได้ [10] รวมทั้งสาร ช่วยผสมมีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายไซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลด่ำ จึงสามารถแทรก เข้าไปในระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ได้ง่าย [11] ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโน เคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT ที่มีการเติมสารช่วยผสมทั้ง 4 เกรดเพิ่มขึ้น ซึ่งนำไปสู่ประสิทธิภาพการ กระจายตัวที่ดีของออร์กาโนเคลย์



**รูปที่ 4.15** XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite<sup>®</sup>20A และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6

## 4.3.4 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6 ด้วยเทคนิค DSC เพื่อศึกษาค่าร้อยละความเป็นผลึก อุณหภูมิหลอมเหลว ผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึก แสดงในตารางที่ 4.10 พบว่าชนิดของสารช่วยผสมไม่มีผลต่อค่าร้อย ละความเป็นผลึกและความหนาของชั้นผลึก

ตารางที่ 4.10 สมบัติทางกวามร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6

สูตร	ร้อยละความเป็นผลิก	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก	อุณหภูมิเริ่มตกผลึก
	(% Crystallinity) T <sub>m</sub>		T <sub>c onset</sub>
		(°C)	(°C)
P93-20A6	44	164	127
P95-20A6	46	163	125
P01-20A6	40	162	131
P02-20A6	42	165	132

นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่ แน่นอนและอุณหภูมิเริ่มสลายตัวในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6 ดังแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่าชนิดของสารช่วยผสมไม่มีผลต่ออุณหภูมิเริ่มสลายตัว

ตารางที่ 4.11 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวและปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอนของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6

สูตร	ปริมาณออร์กาโนเคลย์	ปริมาณออร์กาโนเคลย์	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว	
	ที่กำหนด	ที่แน่นอน	T <sub>d onset</sub>	
	(% โดยน้ำหนัก)	(% โดยน้ำหนัก)	(°C)	
P93-20A6	6	5.85	385	
P95-20A6	6	5.81	381	
P01-20A6	6	5.89	381	
P02-20A6	6	5.46	384	

### 4.3.5 ผลการศึกษาสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

จากการทดลองพบว่าฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของ ก๊าซออกซิเจนได้ดีที่สุดหรือมีค่า *OP* ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มสูตร P93-20A6, P02-20A6 และ P01-20A6 ที่มีก่า *OP* เพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 เป็นผลเนื่องมาจากประสิทธิภาพการ กระจายตัวของออร์กาโนเกลย์ เพื่อขวางกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 4 สูตรแตกต่างกัน ซึ่งจากผลการศึกษาก่า *OP* ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตรต่างๆ นำไปสู่การศึกษาก่า Aspect ratio ของอนุภากซิลิเกตโดยการกำนวณตามทฤษฎี Tortuosity ในภากผนวก ฉ ทำให้ทราบ ว่าอนุภากซิลิเกตในฟิล์มสูตร P95-20A6 มีก่า Aspect ratio สูงกว่าฟิล์มสูตร P93-20A6, P02-20A6 และ P01-20A6 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.12 ซึ่งสามารถยืนขันผลการกำนวนล่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตได้จากผลการศึกษาสันฐานวิทยาด้วยเทกนิก SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.17 โดย อนุภาคซิลิเกตที่มีก่า Aspect ratio สูง จะเป็นการเพิ่มระขะทางการเกลื่อนที่ของก๊าซออกซิเจนไป ตามชั้นของอนุภาคซิลิเกต ที่จัดเรียงตัวขวางกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนตาม Tortuous path ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เป็นผลทำให้ฟิล์มสูตร P95-20A6 สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจนได้ดีกว่าฟิล์มสูตร P93-20A6, P02-20A6 และ P01-20A6 ตามลำดับ



ร**ูปที่ 4.16** ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6

พิจารณาผลของสารช่วยผสมต่อค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตในฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 4 สูตร พบว่าการที่อนุภาคซิลิเกตในฟิล์มสูตร P95-20A6 มีค่า Aspect ratio สูง เนื่องจากสมบัติ ของสารช่วยผสมโดยของสารช่วยผสมเกรด  $\operatorname{Priex}^{\mathbb{R}}$ 20095 มีโกรงสร้างสายโซ่กิ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน เป็น MA ซึ่งมีความเป็นขั้วสูงกว่าสารช่วยผสมที่มีโครงสร้างสายโซ่กิ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันเป็น AA โดย พิจารณาจากค่า Dipole moment [39] จึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮครอกซิลที่โครงสร้างของ ออร์กาโนเคลย์ได้แข็งแรงกว่า [10] ประกอบกับสารช่วยผสมเกรค Priex <sup>®</sup>20095 เป็นสารช่วยผสม ้ที่มีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จึงสามารถแทรกตัวเข้า ้ไปในระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ได้ง่าย ซึ่งนำไปสู่การกระจายตัวที่ดีของออร์กาโนเคลย์ [11] ้ส่งผลให้ชั้นของออร์กาโนเคลย์แยกห่างออกจากกันได้ง่ายกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสูตร P93-20A6 ที่มีการเติมสารช่วยผสมเกรด Priex  $^{\mathbb{R}}$ 20093 ซึ่งโครงสร้างสายโซ่กิ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน MA ้เหมือนกันแต่มีปริมาณน้อยกว่า และมีโครงสร้างหลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกล ้สูงกว่า จึงเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ในฟิล์มสูตร P93-20A6 ต่ำ กว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มสูตร P95-20A6 ดังนั้นอนุภาคซิลิเกตในฟิล์มสูตร P93-20A6 จึงมีค่า Aspect ratio ต่ำกว่าฟิล์มสูตร P95-20A6 นอกจากนี้ฟิล์มสูตร P01-20A6 และ P02-20A6 ที่มีการเติมสาร ช่วยผสมเกรด Polybond  $^{
m B}$ 1001 และ Polybond  $^{
m B}$ 1002 ตามลำดับ โดยสารช่วยผสมทั้ง 2 เกรดนี้มี หมู่ฟังก์ชันเป็น AA ในปริมาณที่เท่ากัน แต่สารช่วยผสมเกรค Polybond <sup>®</sup>1001 มีโครงสร้างสายโซ่ หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกลต่ำกว่าสารช่วยผสมเกรด Polybond <sup>®</sup>1002 จึง

น่าจะสามารถแทรกตัวเข้าไปในระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ได้ง่ายกว่า ซึ่งน่าจะนำไปสู่การ กระจายตัวที่ดีของออร์กาโนเคลย์ [11] และมีค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตสูงกว่า แต่จากผล การทคลองกลับพบว่าอนุภาคซิลิเกตในฟิล์มสูตร P02-20A6 มีค่า Aspect ratio สูงกว่าอนุภาคซิลิ เกตในฟิล์มสูตร P01-20A6 อาจเนื่องมาจากปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอนในฟิล์มสูตร P01-20A6 มีปริมาณมากกว่าฟิล์มสูตร P02-20A6 โดยเมื่อพิจารณาในพื้นที่ที่เท่ากัน ฟิล์มที่มีปริมาณออร์ กาโนเคลย์มากกว่า ชั้นของออร์กาโนเคลย์จะแยกห่างออกจากกันได้น้อยกว่า ส่งผลให้การแตกตัว ออกจากกันของออร์กาโนเคลย์ลคลง [4]

สูตร	$P_s/P_p^{a}$ ออร์กาโนเคลย์		$\phi_{s}^{b}$	Tortuosity	Aspect
		(% โดยน้ำหนัก)		factor	ratio <sup>°</sup>
P93-20A6	88 / 117 = 0.75	5.85	0.02	1.31	31
P95-20A6	82 / 117 = 0.70	5.81	0.02	1.40	40
P01-20A6	101 /117 = 0.86	5.89	0.02	1.14	14
P02-20A6	96 / 117 = 0.82	5.46	0.02	1.20	20

ตารางที่ 4.12 Tortuosity factor ( 7) และค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตในฟิล์ม PP/m-MMT สุตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6

หมายเหตุ \* คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ซิลิเกตนาโนคอมโพสิตต่อ

ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์บริสุทธิ์

<sup>ь</sup> คือ สัคส่วน โคยปริมาตรของซิลิเกต

์ คือ สัคส่วนระหว่างความยาวต่อความหนาของอนุภาคซิลิเกต

### 4.3.6 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา

จากการศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัว และประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเกลย์ ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6 โดยเทคนิค SEM ผล การศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าออร์กาโนเกลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 มีการ จัดเรียงตัวในทิศทางตามแนวเกรื่องจักร (MD) ตามแรงขับของเครื่องขึ้นรูปฟิล์ม และกระจาย ตัวอย่างสม่ำเสมอในพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์เมื่อเทียบกับฟิล์มสูตร P93-20A6 และ P02-20A6 ที่ออร์ กาโนเกลย์บางส่วนมีการจัดเรียงตัวในทิศทาง MD และกระจายตัวได้ดีพอควร แต่ยังคงมีการจับตัว เป็นกลุ่มก้อนอยู่บ้างเล็กน้อย ส่วนฟิล์มสูตร P01-20A6 สามารถสังเกตการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนของ ออร์กาโนเกลย์ได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลเนื่องจากสมบัติของสารช่วยผสมเกรคต่างๆ ที่เติมลงใน ฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 4 สูตร โดยสารช่วยผสมที่มีโครงสร้างสายโซ่กิ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็น ขั้วสูง และมีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า จะทำให้ ออร์กาโนเคลย์เกิดการแตกตัวออกจากกัน หรือกระจายอนุภาคอย่างสม่ำเสมอในพอลิพรอพิลีน เมตริกซ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตในหัวข้อที่ 4.3.5



(a)



(b)



(c)



ร**ูปที่ 4.17** ภาพตัดขวางในทิศทางตามแนวเครื่องจักร โดยการหักชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำจากกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ (a) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6 (b) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 (c) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P01-20A6 และ (d) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P02-20A6 ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

#### 4.3.7 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลใน PP/m-MMT เป็น ผลมาจากการเพิ่มขึ้นของระดับการแทรกสอดของสายโซ่หลักของสารช่วยผสมและค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตที่กระจายตัวอยู่ในเมตริกซ์ [4] โดยเมื่อให้แรงดึงแก่ฟิล์ม ผลึกของฟิล์มและสาย โซ่พอลิพรอพิลีนจะรับแรงและถ่ายโอนแรงที่ได้รับไปยังออร์กาโนเคลย์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนเสริม แรง จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.5 ทำให้ทราบว่าฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6 และ P95-20A6 ที่มีการเติมสารช่วยผสมชนิด PP-g-MA จะมีค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตสูงกว่าฟิล์ม สูตร P01-20A6 และ P02-20A6 ที่มีการเติมสารช่วยผสมชนิด PP-g-AA ดังนั้นฟิล์ม PP/m-MMT ที่ มีการเติมสารช่วยผสมชนิด PP-g-MA จึงมีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสสูงกว่าฟิล์ม PP/m-MMT ที่มีการเติมสารช่วยผสมชนิด PP-g-AA ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ

นอกจากนี้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลยังพบว่าก่ากวามแข็งแรงฉีกขาด และก่าเปอร์เซ็นต์ การยืด ณ จุดกรากของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6 มี ก่าใกล้เกียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ



**รูปที่ 4.18** ค่าความแข็งแรงคึงของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6



ร**ูปที่ 4.19** ค่ามอดุลัสของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6



ร**ูปที่ 4.20** ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6



ร**ูปที่ 4.21** ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดครากของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6

## 4.4 ผลการศึกษาปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

#### 4.4.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิลั่ม PP/m-MMT

จากการสังเกตลักษณะของสี ความขุ่น และวัดความหนาของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9 พบว่าฟิล์มสูตร P95-20A9 ที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 9 % โดยน้ำหนัก จะมีความขุ่นมากกว่าและเฉดสีเหลืองเข้มกว่าฟิล์มสูตร P95-20A6 และ P95-20A3 ที่มี การเติมออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 6 และ 3 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยการเติมออร์กาโนเคลย์ใน ปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ฟิล์ม PP/m-MMT มีความขุ่นและเฉดสีเหลืองเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจาก นี้ยังพบจุดเล็กๆ ปรากฎบนแผ่นฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สูตร ลักษณะคล้ายเม็ดเจลที่เรียกว่า Fish eye [12] ซึ่งอาจเกิดจากการเชื่อมโยงกันเองของสารช่วยผสมและถือว่าเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน โดยจากการทดลองข้างต้นในหัวข้อที่ 4.1 พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและ ออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT เท่ากับ 2:1 ดังนั้นการเติมออร์กาโนเคลย์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ปริมาณสารช่วยผสมจะถูกปรับเปลี่ยนให้เพิ่มขึ้นตามไปด้วย และสังเกตได้ว่าเมื่อทำการเพิ่ม ปริมาณสารช่วยผสมในฟิล์ม PP/m-MMT ปริมาณการเกิดเม็ดเจลจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผล ต่อสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกล ด้วอย่างของฟิล์ม PP/m-MMT แสดงดังรูปที่ 4.22 และความหนาของฟิล์มแต่ละสูตรมีก่าใกล้เกียงกัน แสดงดังตารางที่ 4.13





ร**ูปที่ 4.22** ตัวอย่าง (a) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3 (b) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 และ (c) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A9 (ด้านซ้ายของรูปแสดงพื้นหลังส่วนด้านขวา ของรูปแสดงฟิล์ม PP/m-MMT)

ตารางที่ 4.13 ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9

ក្សពរ	ความหนาเฉลี่ย (µm)	
P95-20A3	$24 \pm 6$	
P95-20A6	$30\pm 6$	
P95-20A9	35 ± 9	

## 4.4.2 ผลการศึกษาค่าดรรชนีการใหล

การศึกษาผลของปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อความหนืดใน PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9 ซึ่งมีปริมาณออร์กาโนเคลย์ 3, 6 และ 9 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แสดง ในตารางที่ 4.14 พบว่าค่า MFI มีแนวโน้มลดลงเมื่อทำการเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์ เนื่องมาจาก ออร์กาโนเคลย์เป็นอนุภาคของแข็งจะไปขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้สายโซ่ พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้น้อยลง [42] ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์ก่า MFI ของ PP/m-MMT จึงมีก่าลดลงหรือมีความหนืดสูงขึ้นนั่นเอง ปรากฏการณ์นี้เป็นสิ่งที่พบปกติเมื่อทำการเติมสารตัว เติมอนุภาคของแข็งลงในพอลิเมอร์

สูตร	MFI (g/10 min)	
P95-20A3	$7\pm0.3$	
P95-20A6	$5\pm0.4$	
P95-20A9	$4\pm0.2$	

ตารางที่ 4.14 ค่าครรชนีการไหล (230°C /2.16 kg) ของ PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9

้ จากผลการทคลองสังเกตได้ว่ามี 2 ปรากฏการณ์ที่มีผลต่อความหนืดของ PP/m-MMT คือ ผลของสมบัติสารช่วยผสมและผลของปริมาณออร์กาโนเคลย์ โดยในการทคลองนี้ได้คงอัตราส่วน ระหว่างสารช่วยผสมต่อออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2:1 ดังนั้นการเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์ใน PP/m-MMT ทำให้ปริมาณการเติมสารช่วยผสมเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และจะมีปริมาณของพอลิพรอพิลีน ็ลดลง ซึ่งจากผลการศึกษาค่า MFI ข้างต้น พบว่าสารช่วยผสมมีค่า MFI สูงกว่าหรือมีความหนืด ้น้อยกว่าพอลิพรอพิลีน ซึ่งการเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมจะทำให้ความหนืดของ PP/m-MMT ลดลง ้ส่งผลให้ก่า MFI สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลตรงข้ามกับการเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์ทำให้ความหนืดของ PP/m-MMT มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า MFI ลดลง จาก 2 ปรากฏการณ์ข้างต้นเป็นปรากฏการณ์ที่ ซึ่งจากการทดลองพบว่าปริมาณออร์กาโนเคลย์มีผลต่อความหนืดเด่นชัดกว่าผลของ หักล้างกัน สมบัติสารช่วยผสม ดังจะเห็นได้จาก PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ มีค่า MFI ใกล้เคียงกัน ทั้งๆ ที่สารช่วยผสมเกรด  $\operatorname{Priex}^{\mathbb{R}}$ 20093,  $\operatorname{Priex}^{\mathbb{R}}$ 20095, P02-20A6 Polybond  $^{
m B}$ 1001 และ Polybond  $^{
m B}$ 1002 มีค่า MFI แตกต่างกันค่อนข้างมาก ดังที่ได้กล่าวมาแล้วใน หัวข้อที่ 4.3.2 และจาก PP/m-MMT สตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9 เมื่อทำการเพิ่ม ปริมานออร์กาโนเคลย์ค่า MFI มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน

## 4.4.3 ผลการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์

จากการตรวจสอบค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าออร์ กาโนเคลย์เกรด Cloisite<sup>®</sup>20A ปรากฏพีก 20 ที่ตำแหน่ง 1.5 และ 3.3 องศา ซึ่งจากการคำนวณตาม สมการ Bragg's Law พบว่ามีค่าระยะห่างระหว่างชั้นออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 5.8 และ 2.7 nm ตาม ลำดับ เมื่อทำการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9 ที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 3, 6 และ 9 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าไม่ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 20 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 แสดงว่าออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สูตร มีประสิทธิภาพในการกระจายตัวที่ดี เนื่องจากการทดลองในหัวข้อที่ 4.1 พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2:1 ดังนั้นเมื่อทำการ เพิ่มหรือลดปริมาณออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT ปริมาณการเติมสารช่วยผสมจะถูก ปรับเปลี่ยนตามไปด้วย เพื่อคงประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตรต่างๆ



ร**ูปที่ 4.23** XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite<sup>®</sup>20A และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9

## 4.4.4 ผลการศึกษาสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

จากการทดลองพบว่าฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3 สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของ ก๊าซออกซิเจนได้ดีที่สุดหรือมีก่า *OP* ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มสูตร P95-20A6 และ P95-20A9 ที่มี ก่า *OP* เพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 เป็นผลเนื่องมาจากประสิทธิภาพการกระจายตัวของ ออร์กาโนเกลย์ เพื่อขวางกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สูตรแตกต่าง กัน ซึ่งจากผลการศึกษาก่า *OP* ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตรต่างๆ นำไปสู่การศึกษาก่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตโดยการกำนวณตามทฤษฎี Tortuosity ในภาคผนวก ฉ ทำให้ทราบว่าอนุภาคซิลิ เกตในฟิล์มสูตร P95-20A3 มีก่า Aspect ratio สูงกว่าฟิล์มสูตร P95-20A6 และ P95-20A9 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.15 ซึ่งสามารถยืนยันผลการกำนวณก่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิ เกตได้จากผลการศึกษาสันฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.25 โดยอนุภาคซิลิเกตที่มี ก่า Aspect ratio สูง จะเป็นการเพิ่มระยะทางการเกลื่อนที่ของก๊าซออกซิเจนไปตามชั้นของอนุภาค ซิลิเกตที่จัดเรียงตัวขวางกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนตาม Tortuous path ดังแสดงใน รูปที่ 2.13 เป็นผลทำให้ฟิล์มสูตร P95-20A3 สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่า ฟิล์มสูตร P95-20A6 และ P95-20A9 ตามลำดับ



ร**ูปที่ 4.24** ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9

ตารางที่ 4.15 Tortuosity factor ( 7) และค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตในฟิล์ม PP/m-MMT สุตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9

สูตร	$P_s / P_s^{a}$	ออร์กาโนเคลย์	$\phi_{s}^{b}$	Tortuosity	Aspect
		(% โดยน้ำหนัก)		factor	ratio <sup>°</sup>
P95-20A3	79 / 117 = 0.68	2.72	0.01	1.46	92
P95-20A6	82 / 117 = 0.70	5.81	0.02	1.40	40
P95-20A9	94 / 117 = 0.80	8.61	0.03	1.22	15

หมายเหตุ \* คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ซิลิเกตนาโนคอมโพสิตต่อ

ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์บริสุทธิ์

<sup>ь</sup> คือ สัคส่วนโคยปริมาตรของซิลิเกต

์ คือ สัคส่วนระหว่างความยาวต่อความหนาของอนุภาคซิลิเกต

จากตารางที่ 4.15 แสดงให้เห็นถึงค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9 ซึ่งมีปริมาณออร์กาโนเคลย์ 3, 6 และ 9 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เพื่อศึกษาปริมาณออร์กาโนเคลย์ต่อค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกต พบว่าอนุภาคซิลิ เกตในฟิล์ม PP/m-MMT ที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก จะมีค่า Aspect ratio สูงกว่าการเติมออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 6 และ 9 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่ม ปริมาณออร์กาโนเคลย์ขึ้นเรื่อยๆ ตำแหน่งการแทรกสอดของสายโซ่พอลิพรอพิลีนจะเพิ่มขึ้นตาม ชั้นของออร์กาโนเคลย์จะถูกทำให้แยกห่างออกจากกัน แต่เมื่อพิจารณาในพื้นที่ที่เท่ากัน ฟิล์มที่มี ปริมาณออร์กาโนเคลย์มากกว่า ชั้นของออร์กาโนเคลย์จะแยกห่างออกจากกันได้น้อยกว่า ส่งผลให้ การแตกตัวออกจากกันอย่างอิสระของออร์กาโนเคลย์ลุตร P95-20A6 และ P95-20A3 ตามลำดับ

#### 4.4.5 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา

้งากการศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัว และประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9 โดยเทคนิค SEM ผลการศึกษา แสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่าออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3 มีประสิทธิภาพใน การกระจายตัวที่ดี โดยไม่พบการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนของออร์กาโนเคลย์และน่าจะมีการจัดเรียงตัว ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร เมื่อเปรียบเทียบกับออร์กาโนเคลย์ในฟิล์มสูตร P95-20A6 ที่ยังคงมี การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ และมีการจัคเรียงตัวในทิศทางตามแนว ้เครื่องจักร แต่จะเห็นได้ว่าสามารถสังเกตขนาดของอนภาคออร์กาโนเกลย์ได้ชัดเจนขึ้น หรือในอีก ทางหนึ่งอาจกล่าวได้ว่าอนุภาคซิลิเกตในฟิล์มสูตร P95-20A6 มีค่า Aspect ratio ต่ำกว่าอนุภาคซิลิ เกตในฟิล์มสูตร P95-20A3 และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณออร์กาโนเกลย์เป็น 9 % โคยน้ำหนัก ในฟิล์ม P95-20A9 พบแนวโน้มการเข้ามาเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนเพิ่มมากขึ้น ออร์กาโนเคลย์มี สตร ้ประสิทธิภาพในการกระจายตัวลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสมบัติความมีขั้วของออร์กาโนเคลย์แม้ ้จะผ่านการคัดแปรพื้นผิวด้วยสารอินทรีย์แล้ว แต่ยังคงมีความเป็นขั้วเหลืออยู่ที่บริเวณขอบนอกของ ์ แผ่นซิลิเกต [19] ทำให้สามารถรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนได้ง่ายเมื่อมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ประกอบกับ การเพิ่มปริมานออร์กาโนเกลย์ ในพื้นที่ที่จำกัดเท่าเดิม ฟิล์มที่มีปริมานออร์กาโนเกลย์มากกว่า ชั้น ้ของออร์กาโนเกลย์จะแยกห่างออกจากกันได้น้อยลง ส่งผลให้ออร์กาโนเกลย์แตกตัวออกจากกันได้ ิลคลง [4] ซึ่งสอคกล้องกับผลการศึกษาก่า Aspect ratio ของอนภากซิลิเกตดังที่ได้อธิบายมาแล้วใน หัวข้อที่ 4 4 4



(a)







```
รูปที่ 4.25 ภาพตัดขวางในทิศทางตามแนวเครื่องจักร โดยการหักชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำจากกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ (a) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3
(b) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 และ (c) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A9
ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า
```

### 4.4.6 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9 ด้วยเทคนิค DSC เพื่อศึกษาค่าร้อยละความเป็นผลึก อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและ อุณหภูมิเริ่มตกผลึก แสดงในตารางที่ 4.16 พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สูตร มีค่าร้อยละความเป็น ผลึก อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก และอุณหภูมิเริ่มตกผลึกใกล้เคียงกันแสดงว่าการเติมออร์กาโนเคลย์ ปริมาณ 3-9 % โดยน้ำหนัก ไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละความเป็นผลึก ความหนา ของชั้นผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึก

นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาปริมาณ ออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอนและอุณหภูมิเริ่มสลายตัวในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9 แสดงดังตารางที่ 4.17 พบว่าอุณหภูมิเริ่มสลายตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อทำการลด ปริมาณออร์กาโนเคลย์เป็นผลเนื่องมาจากฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3 มีค่า Aspect ratio ของ อนุภาคซิลิเกตสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-20A6 และ P95-20A9 ตามลำดับ การที่อนุภาคซิลิเกตมีค่า Aspect ratio สูง และจัดเรียงตัวขวางกั้นเส้นทางการเคลื่อนที่ของสารที่เกิดการเสียสภาพในลักษณะ ของ Tortuous path เป็นผลทำให้ฟิล์มสูตร P95-20A3 มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวสูงขึ้น

ត្តូ២១	ร้อยละความเป็นผลึก	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก	อุณหภูมิเริ่มตกผลึก
	(% Crystallinity)	$T_{m}$	T <sub>c onset</sub>
		(°C)	(°C)
P95-20A3	48	163	126
P95-20A6	46	163	125
P95-20A9	45	164	125

ตารางที่ 4.16 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ

P95-20A9

ตารางที่ 4.17 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวและปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอนในฟิล์ม PP/m-MMT

สูตร	ปริมาณออร์กาโนเคลย์ ปริมาณออร์กาโนเคลย์		ອຸ <b>໙</b> หภูมิเริ่มสลายตัว
	ที่กำหนด ๗⁄ โดยน้ำหนัอ)	ที่แน่นอน (% โดยน้ำหนัก)	$T_{d \text{ onset}}$
		(% เตอน เทนแ)	( C)
P95-20A3	3	2.72	391
P95-20A6	6	5.81	381
P95-20A9	9	8.61	369

## 4.4.7 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

เป็นที่ทราบกันดีว่าสมบัติของวัสดุคอมโพสิต โดยเฉพาะการเสริมแรงขึ้นอย่างมากกับ ปริมาณของส่วนเสริมแรง โดยเมื่อเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์ในพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ จะทำให้ PP/m-MMT มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เช่น ความแข็งแรงดึง มอดุลัส ฯลฯ [41] อาจกล่าวได้ว่าออร์กา โนเคลย์ทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต แต่จากผลการทดลองกลับพบว่าเมื่อทำ การเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง โดยฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3 มีก่าความแข็งแรงดึง ก่ามอดุลัสและก่าความแข็งแรงฉีกขาดสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-20A6 และ P95-20A9 ตามลำคับ ดังแสดงในรูปที่ 4.26-4.28 โดยจากการศึกษางานวิจัยที่ เกี่ยวข้องพบว่าการเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลใน PP/m-MMT เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของระดับการ แทรกสอดของสายโซ่หลักของสารช่วยผสมและก่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตที่กระจายตัวอยู่ ในเมตริกซ์ [4] ซึ่งการทดลองในหัวข้อที่ 4.4.4 พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A9 ตามลำดับ โดยเมื่อให้ แรงดึงแก่ฟิล์ม ผลึกของฟิล์มและสายโซ่พอลิพรอพิลีนจะรับแรงและถ่ายโอนแรงที่ได้รับไปยังออร์ กาโนเคลย์ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรง ดังนั้นฟิล์มสูตร P95-20A3 จึงมีค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอ ดุลัสและค่าความแข็งแรงฉีกขาดสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-20A6 และ P95-20A9 ตามลำดับ นอกจากนี้ การที่ค่าความแข็งแรงฉีกขาดในฟิล์ม PP/m-MMT มีแนวโน้มลดลง เมื่อทำการเพิ่มปริมาณออร์กา โนเคลย์ สามารถอธิบายเสริมได้ในอีกทางหนึ่งกล่าวคือในการทดลองได้ทำการตัดชิ้นงานเป็นรูป ปีกนกซึ่งจะทำให้เกิดความเค้นสะสม (Stress concentration) ที่บริเวณมุมรอยเว้าของชิ้นงาน เมื่อให้ แรงดึงแก่ชิ้นงานจึงเกิดการฉีกขาดได้ง่ายตรงบริเวณรอยเว้านี้ [42] ดังนั้นการเพิ่มปริมาณออร์กาโน เกลย์ลงในฟิล์ม PP/m-MMT เปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มอนุภาคของแข็งให้แก่ชิ้นงาน ซึ่งเป็นการ เพิ่มจุดสะสมความเค้นบนชิ้นงาน ส่งผลให้ความแข็งแรงฉีกขาดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการเติมออร์ กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT เพิ่มขึ้น ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดครากของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9 มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.29



ร**ูปที่ 4.26** ค่าความแข็งแรงคึงของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9



ร**ูปที่ 4.27** ค่ามอดุลัสของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9



ร**ูปที่ 4.28** ค่าความแข็งแรงฉีกขาคของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9



ร**ูปที่ 4.29** ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดครากของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9

## 4.5 ผลการศึกษาอัตราส่วนการดึง (Draw ratio) ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

### 4.5.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์่ม PP/m-MMT เปรียบเทียบกับฟิล์่ม BOPP

จากการสังเกตลักษณะของสี ความขุ่น และวัดความหนาของฟิล์ม BOPP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT จะมีความขุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์ม BOPP เนื่องจากออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite<sup>®</sup>20A เป็น อนุภาคที่มีสีขาว เมื่อเดิมลงในฟิล์ม PP/m-MMT จึงทำให้ฟิล์มมีความขุ่นเพิ่มขึ้น และพบจุดเล็กๆ ปรากฎบนแผ่นฟิล์ม PP/m-MMT ลักษณะคล้ายเม็ดเจลที่เรียกว่า Fish eye [12] ซึ่งอาจเกิดจากการ เชื่อมโยงกันเองของสารช่วยผสมและถือว่าเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน อาจส่งผลต่อสมบัติการด้าน การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกล นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D19 มี ความหนามากกว่าและมีสีเหลืองเข้มกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 ตามลำคับ ดังแสดงในรูปที่ 4.30 เนื่องจากฟิล์มสูตร P95-20A3-D19 มีอัตราส่วนการดึงต่ำกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 ตามลำคับ ดังแสดงในภาคผนวก จ หรืออาจกล่าวได้ว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D19 ได้รับการดึงยืดผ่านลูกกลิ้งหล่อเย็นน้อยกว่า เป็นผลทำให้ฟิล์มสูตร P95-20A3-D19 มีความหนาที่มากกว่า จึงสามารถสังเกตสีเหลืองได้ชัดเจนกว่า ดังนั้นฟิล์มแต่ละสูตรจึงมีความ หนาไม่เท่ากัน แสดงดังตารางที่ 4.18



ร**ูปที่ 4.30** ตัวอย่าง (a) ฟิล์ม BOPP และ (b) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19 (c) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D25 และ (d) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D42 (ด้านซ้ายของรูปแสดงพื้นหลังส่วนด้านขวาของรูปแสดงฟิล์ม PP/m-MMT)

**ตารางที่ 4.18** ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP

ត្សូ៣ភ	ความหนาเฉลี่ย (μm)	
BOPP	$20 \pm 1$	
P95-20A3-D19	53 ± 7	
P95-20A3-D25	$40 \pm 5$	
P95-20A3-D42	$24\pm 6$	

#### 4.5.2 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP ด้วยเทคนิค DSC เพื่อศึกษาค่าร้อยละ ความเป็นผลึก อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึก แสดงดังตารางที่ 4.19 พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D42 มีค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนการดึงในฟิล์ม PP/m-MMT สูตรต่างๆ โดย ฟิล์มสูตร P95-20A3-D42 มีอัตราส่วนการดึงสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 ตามลำดับ ดังแสดงในภาคผนวก จ โดยฟิล์มที่มีอัตราส่วนการดึงสูงจะได้รับการดึงยืดผ่านลูกกลิ้ง หล่อเย็นมากกว่า ทำให้ได้ฟิล์มที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลมากกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D42 จึงมีค่าร้อยละ กวามเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 จึงมีค่าร้อยละ กวามเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึกในฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สูตรมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าอัตราส่วนการดึงไม่มีผลต่อความหนาของชั้นผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึก

เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP ด้วยเทคนิค DSC พบว่าฟิล์ม BOPP มีก่าร้อยละความเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์ม PP/m-MMT เนื่องจาก ฟิล์ม BOPP ผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการให้แรงดึงยึดแก่ฟิล์มในทิศทาง MD และ TD ทำให้ได้ ฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในทั้ง 2 ทิศทาง ส่งผลให้ก่าร้อยละความ เป็นผลึกสูงขึ้นตามไปด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม PP/m-MMT ที่ในการทดลองนี้ผ่านการขึ้นรูป ด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่น และดึงพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านลูกกลิ้ง หล่อเย็น ทำให้ฟิล์มมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในทิศทาง MD เท่านั้น จึงมีก่าร้อยละความ เป็นผลึกน้อยกว่าฟิล์ม BOPP นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ของฟิล์ม BOPP และฟิล์ม PP/m-MMT มีก่าใกล้เกียงกัน

สูตร	ร้อยละความเป็นผลึก	อุณหภูมิหลอมเหลวผลิ๊ก	อุณหภูมิเริ่มตกผลึก
	(% Crystallinity)	T <sub>m</sub>	T <sub>c onset</sub>
		(°C)	(°C)
P95-20A3-D19	34	164	127
P95-20A3-D25	35	163	127
P95-20A3-D42	48	163	126
BOPP	51	168	122

ตารางที่ 4.19 สมบัติทางกวามร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP

#### 4.5.3 ผลการศึกษาสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

ผลการทดสอบสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน กรณีที่ความหนาของฟิล์ม โดยพิจารณาเป็นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeability เท่ากัน Coefficient : OP) ในฟิล์ม PP/m-MMT สตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP แสดงดังรูปที่ 4.31 พบว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D42 สามารถสกัดกั้นการ ซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีที่สุดหรือมีค่า *OP* ต่ำกว่าฟิล์มสุตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 ตามลำคับ โดยหากพิจารณาถึงค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตที่กระจายอนุภาคอยู่ในพอลิ พรอพิถีนเมตริกซ์ เพื่อจัคเรียงตัวขวางกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนตาม Tortuous path ดังแสดงในรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สูตร มีการเติมออร์กาโนเคลย์และสาร ช่วยผสมชนิดเดียวกันและปริมาณเท่ากัน ดังนั้นอนุภาคซิลิเกตในฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สูตร จึง ้น่าจะมีค่า Aspect ratio ใกล้เคียงกันด้วย และเมื่อพิจารณากลไกการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนใน ฟิล์ม PP/m-MMT พบว่าสามารถเกิดขึ้นได้หลายทางกล่าวกือก๊าซออกซิเจนสามารถซึมผ่านวัฏภาค ้อสัณฐานของฟิล์ม PP/m-MMT นอกจากนี้ก๊าซออกซิเจนอาจจะซึมผ่านช่องว่างระหว่างวัฏภาคของ พอลิพรอพิลีนเมตริกซ์และเม็คเจลที่เรียกว่า Fish eye ได้ เนื่องจากในระหว่างขั้นตอนการขึ้นรูป ้ฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่น เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวถูกดึงผ่าน ้ถูกกถิ้งหล่อเย็น เม็คเจลที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มซึ่งเป็นของแข็งจะไม่ยืดตัวตามแรงดึง ส่งผลให้เกิด ้ช่องว่างที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคของพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์และเม็คเจล ซึ่งอาจเป็นตำแหน่ง การแทรกผ่านของก๊าซออกซิเจน จากผลการทคลองสังเกตได้ว่ามี 2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติการต้าน การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP/m-MMT คือผลของค่าร้อยละความเป็นผลึกและผลของ การเกิดเม็ดเจลที่เรียกว่า Fish eye จากการศึกษาในหัวข้อที่ 4.5.2 พบว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D42 มี ้ค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 ตามลำดับ การที่ ้ฟิล์มสูตร P95-20A3-D42 มีค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงกว่าหรือมีส่วนที่เป็นวัฏภาคอสัณฐานอยู่ น้อยกว่า ก๊าซออกซิเจนจึงซึมผ่านได้ลดลง ซึ่งเป็นผลตรงข้ามกับการเกิดเม็ดเจลที่เรียกว่า Fish eve โดยฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D42 มีอัตราส่วนการคึงสูงที่สุดหรืออาจกล่าวได้ว่าฟิล์ม ใด้รับการคึงยืดมากกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 ตามลำดับ จึงอาจเกิด ้ช่องว่างที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคของพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์และเม็คเจลมากกว่า และอาจเป็น ้ตำแหน่งการแทรกผ่านของก๊าซออกซิเจน จาก 2 ปัจจัยข้างต้นเป็นปรากฏการณ์ที่หักล้างกัน ซึ่งจาก ้ค่าร้อยละความเป็นผลึกมีผลต่อสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน การทดลองพบว่า เด่นชัดกว่าผลของการเกิดเม็ดเจล ดังจะเห็นได้จากฟิล์มสูตร P95-20A3-D42 สามารถสกัดกั้นการ ซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีที่สุดหรือมีค่า *OP* ต่ำกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 ตามลำดับ



รูปที่ 4.31 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP

เมื่อพิจารณาค่า *OP* ของฟิล์ม PP/m-MMT เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP พบว่าฟิล์ม BOPP สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่าหรือมีค่า *OP* ด่ำกว่าฟิล์ม PP/m-MMT จาก การคำนวณตามทฤษฎี Tortuosity ในสมการที่ 2.7 และ 2.8 จะเห็นได้ว่าการเดิมออร์กาโนเคลย์ ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก จะสามารถลดการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP/m-MMT ให้ ใกล้เกียงกับฟิล์ม BOPP ได้หากอนุภาคซิลิเกตมีค่า Aspect ratio เท่ากับ 250 ดังแสดงในตารางที่ 4.20 แต่จากผลการทดลองพบว่าอนุภาคซิลิเกตมีค่า Aspect ratio เท่ากับ 250 ดังแสดงในตารางที่ 4.20 แต่จากผลการทดลองพบว่าอนุภาคซิลิเกตในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D42 มีก่า Aspect ratio เท่ากับ 92 ดังแสดงในตารางที่ 4.15 ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดกั้นการซึมผ่านของ ก๊าซออกซิเจนลดลง รวมทั้งฟิล์ม BOPP มีก่าร้อยละความเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D42 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.5.2 โดยโครงสร้างผลึกนี้เป็นโครงสร้างสายโซ่ที่ เรียงตัวอย่างเป็นระเบียบหรือมีการเรียงชิดติดกัน จึงทำให้สามารถลดการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ลงได้ ประกอบกับไม่พบเม็ดเจลที่เรียกว่า Fish eye จึงไม่มีช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค ซึ่ง อาจเป็นตำแหน่งการแทรกผ่านของก๊าซออกซิเจน จากเหตุผลข้างด้นส่งผลให้ฟิล์ม BOPP สามารถ สกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ได้ดีกว่าฟิล์ม PP/m-MMT

ตารางที่ 4.20 ปริมาณออร์กาโนเคลย์ (Cloisite<sup>®</sup>20A) ที่เหมาะสมต่อการลดการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจนให้ใกล้เกียงกับฟิล์ม BOPP ที่อนุภาคซิลิเกตมีค่า Aspect ratio ต่างๆ ตาม ทฤษฏิ Tortuosity

Aspect ratio <sup>a</sup>	$P_s/P_p^b$	$\phi_{s}$ °	ออร์กาโนเคลย์ (% โดยน้ำหนัก)
100	48 / 117 = 0.41	0.03	9.00
250	48 / 117 = 0.41	0.01	3.00
500	48 / 117 = 0.41	0.006	2.00
1000	48 / 117 = 0.41	0.003	1.00

หมายเหตุ \* คือ สัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนาของอนุภาคซิลิเกต

<sup>b</sup> คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอถิเมอร์ซิลิเกตนาโนคอมโพสิตต่อ

ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์บริสุทธิ์

้ คือ สัคส่วน โคยปริมาตรของซิลิเกต

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP/m-MMT กรณีที่ความหนาของฟิล์มแตกต่างกัน โดยพิจารณาเป็นอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Gas Transmission Rate : OTR) ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP แสคงดังรูปที่ 4.32 พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19 สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่าหรือมีค่า OTR ต่ำกว่า ฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 ตามลำคับ เนื่องจากฟิล์มสูตร P95-20A3-D19 มี ้ความหนามากกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 ตามลำคับ โดยจากทฤษฎี Tortuosity พบว่าการเพิ่มความหนาของฟิล์ม PP/m-MMT จะเป็นการเพิ่มระยะทางสำหรับการ ้เคลื่อนที่ของก๊าซออกซิเจนไปตามชั้นของอนุภาคซิลิเกต ที่จัดเรียงตัวขวางกั้นเส้นทางการซึมผ่าน ้ของก๊าซออกซิเจน ดังนั้นการเพิ่มความหนาของฟิล์มจะมีผลทำให้ค่า OTR มีแนวโน้มลดลง และ เมื่อพิจารณาค่า OTR ของฟิล์ม PP/m-MMT เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT ิสูตร P95-20A3-D19 และ P95-20A3-D25 สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่า หรือมีก่า OTR ต่ำกว่าฟิล์ม BOPP เนื่องจากฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 2 สูตร มีความหนามากกว่าฟิล์ม BOPP ประมาณ 2-3 เท่า ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจากทฤษฎี Tortuosity การเพิ่มความหนาของ ้ฟิล์ม PP/m-MMT จะเป็นการเพิ่มระยะทางสำหรับการเคลื่อนที่ของก๊าซออกซิเจนไปตามชั้นของ อนุภาคซิลิเกตเป็นผลให้ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 สามารถลด การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ต่ำกว่าฟิล์ม BOPP



ร**ูปที่ 4.32** อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP

## 4.5.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 พบว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D42 มีค่าความแข็งแรงคึง ค่ามอดลัส และค่าความ แข็งแรงฉีกขาดสูงกว่าฟิล์มสุตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 ตามลำคับ คังแสดงในรูปที่ 4.33-4.35 จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลใน PP/m-MMT เป็น ้ผลมาจากการเพิ่มขึ้นของระคับการแทรกสอคของสายโซ่หลักของสารช่วยผสมและค่า Aspect ratio ้ของอนุภาคซิลิเกตที่กระจายตัวอยู่ในเมตริกซ์ [4] รวมถึงการเพิ่มขึ้นของค่าร้อยละความเป็นผลึก ด้วย โดยหากพิจารณาถึงผลของค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตที่มีต่อสมบัติการเสริมแรงจะ เห็นได้ว่าฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สูตร มีการเติมออร์กาโนเคลย์ และสารช่วยผสมชนิคเดียวกันและ ปริมาณเท่ากัน ดังนั้นอนุภาคซิลิเกตในฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สูตร จึงน่าจะมีค่า Aspect ratio ใกล้เคียงกัน และจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.5.2 พบว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D42 ได้รับการดึง ้ยึดผ่านลูกกลิ้งหล่อเย็นที่มากกว่า เป็นผลทำให้ได้รับการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มากกว่า ฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 ตามลำคับ โคยเมื่อให้แรงคึงแก่ฟิล์ม ผลึกของฟิล์ม และสายโซ่พอลิพรอพิลีนจะรับแรงและถ่ายโอนแรงที่ได้รับไปยังออร์กาโนเคลย์ ซึ่งทำหน้าที่เป็น ดังนั้นในการทดลองนี้การเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลน่าจะเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้น ส่วนเสริมแรง ้ของการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ นอกจากนี้จากการทดลองยังพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ ้งดกรากของฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สตร มีก่าใกล้เกียงกัน ดังแสดงในรปที่ 4.36



ร**ูปที่ 4.33** ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP



ร**ูปที่ 4.34** ค่ามอดุลัสของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP



ร**ูปที่ 4.35** ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP



ร**ูปที่ 4.36** ค่าเปอร์เซ็นต์การยึค ณ จุดครากของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PP/m-MMT เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดลัส ค่าความแข็งแรงฉีกขาดและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ ้จุดครากต่ำกว่าฟิล์ม BOPP ดังแสดงในรูปที่ 4.33-4.36 ตามลำดับ เนื่องจากฟิล์ม BOPP ผ่านการขึ้น รปด้วยเทคนิคการให้แรงดึงยืดแก่ฟิล์มในทิศทาง MD และ TD ทำให้ได้ฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่มีการ จัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในทั้ง 2 ทิศทาง เป็นผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรงสูงเมื่อเปรียบเทียบ กับฟิล์ม PP/m-MMT ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่น ้ส่งผลให้ฟิล์มมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในทิศทาง MD เท่านั้น และยังพบปัญหาในกรณี การกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ในพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ หรืออาจกล่าวได้ว่าอนุภาคซิลิเกตมีค่า Aspect ratio น้อยกว่า 1000 ทำให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของออร์กาโนเคลย์ลดลง ประกอบ ้กับการเติมสารช่วยผสม ที่มีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ รวมทั้งการเกิดเม็ดเจลที่เรียกว่า Fish eye ซึ่งถือเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงานบนแผ่นฟิล์ม PP/m-MMT [12] จากเหตุผลข้างต้นล้วนส่งผลให้ฟิล์ม PP/m-MMT มีความแข็งแรงลคลงเมื่อเทียบกับ ้ฟิล์ม BOPP แต่อย่างไรก็ดีในการทดลองนี้พบว่าสามารถพัฒนาค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D42 ได้ใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP ดังแสดงในรูปที่ 4.35 ทั้งนี้อาจ เนื่องมาจากการทดลองข้างต้นได้พัฒนาสมบัติการเสริมแรง และค่าร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์ม PP/m-MMT ให้สามารถรับแรงได้มากขึ้นเป็นผลให้ฟิล์ม PP/m-MMT สตร P95-20A3-D42 มีความ แข็งแรงฉีกขาดใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP