



## บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์

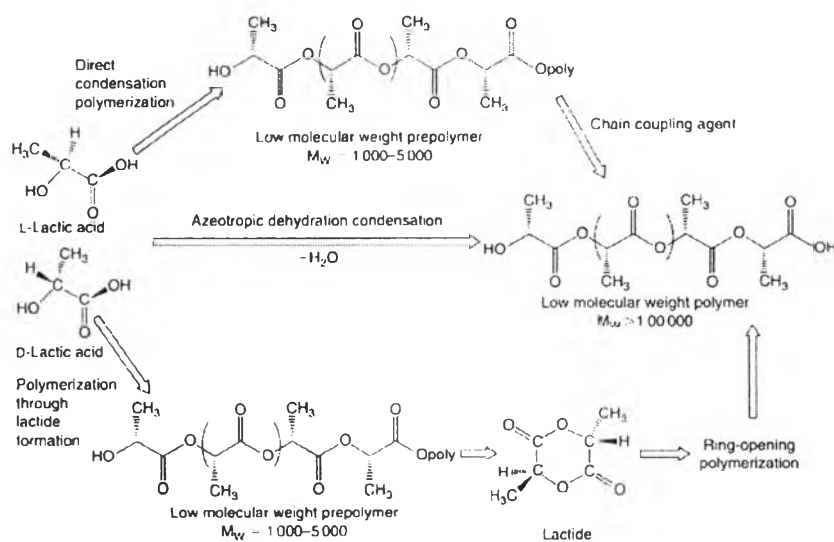
### 2.1 พอลิแล็กติกแอซิด (Poly(lactic acid) / Polylactide, PLA) [1,2]

#### 2.1.1 ลักษณะโดยทั่วไปของพอลิแล็กติกแอซิด

พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพลาสติกชีวภาพชนิดหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจในการนำมาใช้ทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเลียมเนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งไม่ก่อให้เกิดมลภาวะจากขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดสามารถย่อยสลายได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ นอกจากนี้พอลิแล็กติกแอซิดยังสามารถผลิตได้จากทรัพยากรที่เกิดขึ้นทดแทนได้ (renewable resource) โดยวัตถุดิบที่นำมาผลิตพอลิแล็กติกแอซิดสามารถหาได้จากธรรมชาติ เช่น ข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลัง เป็นต้น

#### 2.1.2 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด

พอลิแล็กติกแอซิดสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบทางธรรมชาติที่สามารถเกิดขึ้นทดแทนได้ ผลิตได้จาก ข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลัง เป็นต้น โดยนำมาผ่านกระบวนการหมักคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate fermentation) ด้วยแบคทีเรียประเภท Lactobacilli ได้แล็กติกแอซิด(lactic acid) หรือ 2-hydroxypropionic acid ซึ่งแล็กติกแอซิดที่ได้จะประกอบด้วย 2 ไอโซเมอร์ คือ ดี-แล็กติกแอซิด (D-lactic acid) และ แอล-แล็กติกแอซิด (L-lactic acid) โดยส่วนใหญ่จะพบแอล-แล็กติกแอซิดมากถึง 99.5% และพบดี-แล็กติกแอซิดเพียง 0.5% จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด

พอลิแล็กติกแอซิดสามารถสังเคราะห์ได้ 2 กระบวนการดังนี้

#### 2.1.2.1 กระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (condensation polymerization)

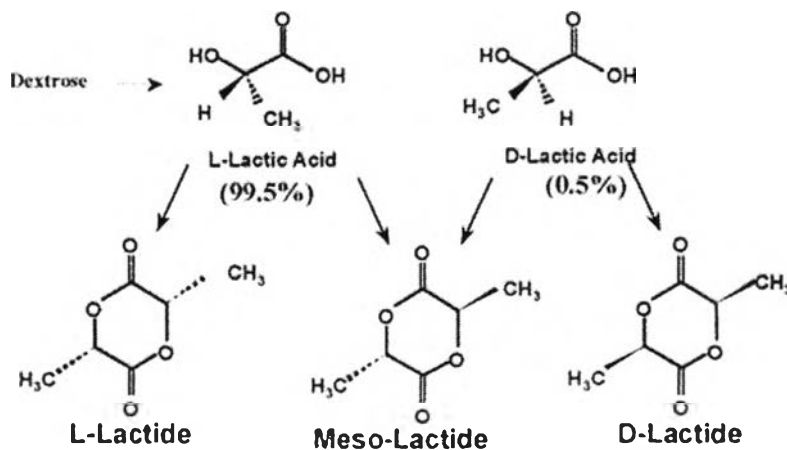
กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่เกิดจากการควบแน่นของแล็กติกแอซิด วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย แต่จะได้พอลิแล็กติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เนื่องจากได้น้ำเป็นผลพลอยได้ (by product) โดยน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) พอลิแล็กติกแอซิดที่ได้ หรือเกิดปฏิกิริยา back-biting สร้างเป็นวงแล็กไทด์แทนที่จะเกิดเป็นพอลิแล็กติกแอซิด ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ นอกจากนี้พอลิแล็กติกแอซิดที่ได้จะมีสมบัติเปราะคล้ายแก้ว (brittle glassy) อีกด้วย วิธีแก้ไขให้สามารถสังเคราะห์พอลิแล็กติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงได้ด้วยกระบวนการนี้สามารถทำได้ 2 วิธีคือ

1. การควบแน่นแบบอะซีโทรปิก ดีไฮเดรชัน (Azeotropic dehydration condensation) เป็นการทำปฏิกิริยาแบบควบแน่นควบคู่กับการดึงน้ำที่เป็นผลพลอยได้ออกระหว่างเกิดปฏิกิริยาเพื่อไม่ให้น้ำไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิแล็กติกแอซิด ทำให้ได้พอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่วิธีนี้มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมักมีความเป็นพิษจึงต้องกำจัดออกก่อนนำไปใช้งาน

2. การควบแน่นแบบใช้สารคู่ควบ (condensation and coupling agent) เป็นการทำให้ปฏิกิริยาควบแน่นโดยใช้สารคู่ควบเพื่อเพิ่มความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ได้พอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่วิธีนี้มีความยุ่งยากและซับซ้อนเนื่องจากมีวิธีการหลายขั้นตอน จึงส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายสูงอีกด้วย

2.1.2.2 กระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวงของแล็กไทด์ (ring opening polymerization of lactide)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่สามารถสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงได้ กระบวนการนี้เริ่มต้นจากการนำแล็กติกแอซิดมาทำการเปลี่ยนเป็นวงแล็กไทด์โดยนำแล็กติกแอซิด 2 โมเลกุลมาต่อกัน โดยแล็กไทด์ที่ได้จะประกอบด้วย 3 ไอโซเมอร์ ได้แก่ แอล-แล็กไทด์ (L-lactide) ดี-แล็กไทด์ (D-lactide) และเมโสแล็กไทด์ (meso lactide) มีโครงสร้างดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีไอโซเมอร์ต่างๆ ของพอลิแล็กไทด์

จากนั้นจึงนำวงแล็กไทด์ที่ได้มาผ่านกระบวนการเปิดวงเพื่อสังเคราะห์เป็นพอลิแล็กติกแอซิด โดยสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ แบบสารละลาย แบบบัลค์ แบบหลอมเหลว

หรือแบบแขนวลอย ตลอดจนกลไกแบบแคทไอออนิก แอนไอออนิก และโคออดิเนชัน ซึ่งกลไกเหล่านี้จะเป็นแบบใดขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้

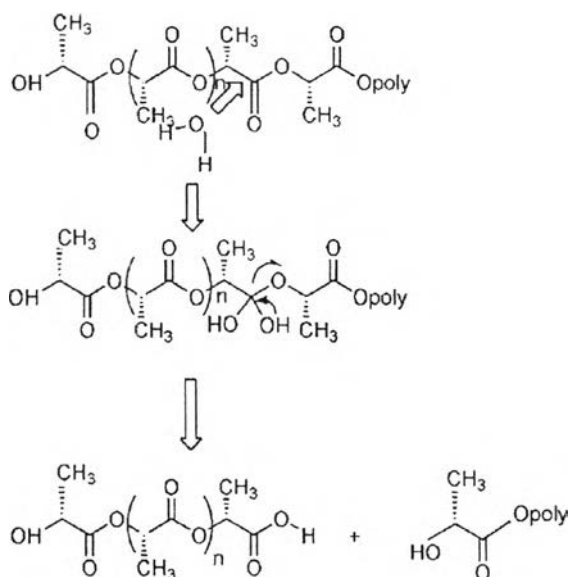
### 2.1.3 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด

พอลิแล็กติกเป็นเทอร์โมพลาสติก มีลักษณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง มีโครงสร้างเป็นทั้งอสัณฐาน (amorphous) จึงเป็นพลาสติกที่มีความใส มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature ,  $T_g$ ) ประมาณ  $60^{\circ}\text{C}$  จึงทำให้พอลิแล็กติกแอซิดมีความแข็งเปราะที่อุณหภูมิห้อง มีอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ  $150^{\circ}\text{C}$

สมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้าง พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความแข็งแรงเชิงกลสูง และสามารถนำไปใช้งานได้ดีเทียบเท่าพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากปิโตรเลียม อีกทั้งยังมีสมบัติการสกัดกันก๊าซได้ดีเทียบเท่ากับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) จึงสามารถใช้เป็นผลิตภัณฑ์ในการบรรจุอาหาร พอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีความแข็งแรงต่ำจึงไม่ค่อยมีการนำไปใช้งานมากนัก ส่วนพอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะสามารถนำไปใช้งานได้ พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic polymer) แต่ความไม่ชอบน้ำจะลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลลดลง พอลิแล็กติกแอซิดมีเสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability) ค่อนข้างต่ำ การนำไปขึ้นรูปหรือใช้งานในอุณหภูมิสูงอาจทำให้เกิดการสลายตัวได้

### 2.1.4 การสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิด

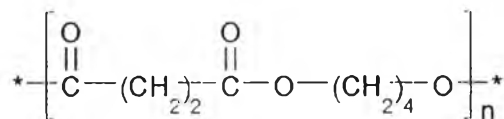
พอลิแล็กติกแอซิดสามารถสลายตัวเมื่อถูกไฮโดรไลซิส โดยโมเลกุลของน้ำจะแทรกตัวเข้าไปทำลายพันธะเอสเทอร์ภายในสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์เกิดการแตกออกส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลสั้นลง โดยหมู่ปลายที่เป็นคาร์บอกซิลิกแอซิดเป็นหมู่ที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิด การเพิ่มอุณหภูมิสามารถช่วยให้เกิดการไฮโดรไลซิสสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ซึ่งการไฮโดรไลซิสจะเกิดในส่วนของอสัณฐานก่อนส่วนของผลึก และอุณหภูมิยังเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดไฮโดรไลซิส[3] ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิดแบบไฮโดรไลซิส

## 2.2 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate), PBS)

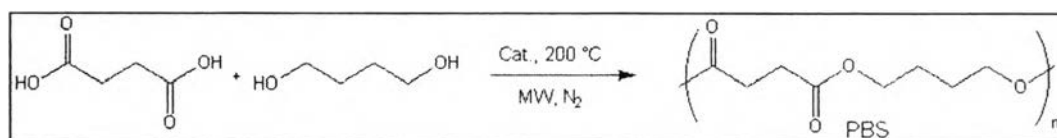
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่เป็นปิโตรเลียมและวัตถุดิบจากธรรมชาติ โดยโครงสร้างของบิวทิลีนซัคซิเนตแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

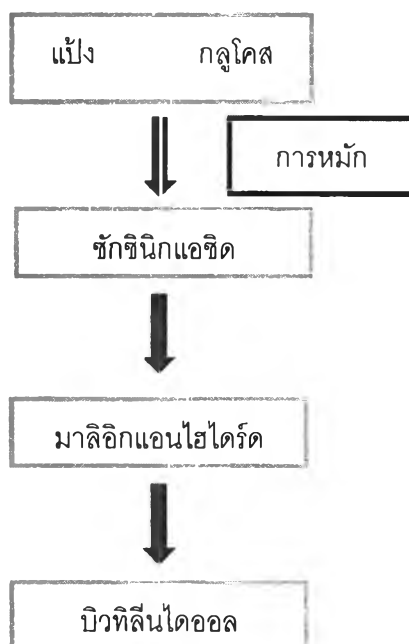
### 2.2.1 กระบวนการผลิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถผลิตได้จากกระบวนการควบแน่นของ 1,4 บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) และซัคซินิกแอซิด (succinic acid) ได้ออกมาเป็นพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตดังรูป 2.5



รูปที่ 2.5 กระบวนการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

มอนอเมอร์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตนอกจากจะสังเคราะห์ได้ทั้งจากกระบวนการทางปิโตรเลียมแล้ว ยังสามารถใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติ เช่น ข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง โดยนำมาผ่านกระบวนการหมักแป้งเพื่อให้ได้ซัคซินิกแอซิด และนำซัคซินิกแอซิดมาสังเคราะห์ 1,4 บิวเทนไดออลโดยผ่านการสังเคราะห์เป็นเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ดังรูป 2.6



รูปที่ 2.6 กระบวนการหมัก 1,4 บิวเทนไดออล

## 2.2.2 การสลายตัวของพอลิวิวิทิลีนซึกซิเนต

พอลิวิวิทิลีนซึกซิเนตสามารถสลายตัวโดยการไฮโดรไลซิสของน้ำที่พันธะเอสเทอร์ เมื่อโมเลกุลมีสายโซ่สั้นลงแล้วจุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายต่อไป

## 2.3 แร่ดิน (Clay minerals) [4]

แร่ดินเป็นแร่ที่เกิดจากการผุพังของชั้นหิน โดยทั่วไปจะเป็นพวกไฮดรอกซอลูมิเนียมซิลิเกต (hydrous aluminous silicate) หรือแร่ประเภทอลูมินา-ซิลิกาที่มีส่วนผสมของน้ำแทรกอยู่ในโครงสร้างด้วย มีองค์ประกอบหลักทางเคมีคืออลูมิเนียม ซิลิกอน และออกซิเจน โดยทั่วไปจะมีอนุภาคขนาดเล็กระดับไมโคร

### 2.3.1 ชนิดของแร่ดิน

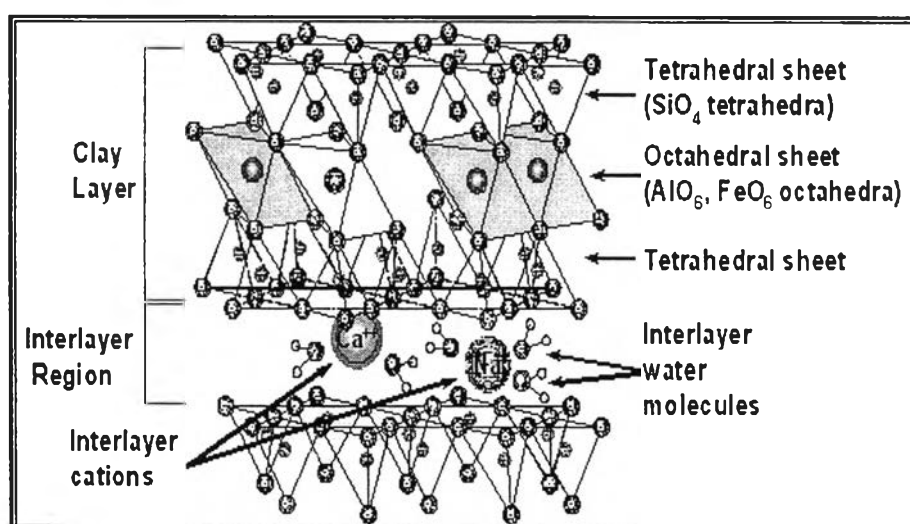
โครงสร้างของแร่ดินหรือสารประกอบของแอนไฮดรอกซอลูมิเนียมซิลิเกตส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นแผ่น เกิดจากการเรียงซ้อนกันของชั้นอลูมินาและซิลิกา โดยจะมีไอออนบวกของธาตุโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียมและเหล็กแทรกอยู่ระหว่างชั้น สามารถจำแนกชนิดของแร่ดินได้ตามโครงสร้างและองค์ประกอบที่แตกต่างกันได้ 5 ประเภทคือ

- 1) กลุ่มแร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite) มีสูตรเคมีทั่วไปคือ  $2 \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})$  เป็นแร่ดิน มีโครงสร้างประกอบด้วยชั้นของอลูมินาเรียงสลับกับชั้นของอลูมิเนียมในอัตราส่วน 1:1 จึงเรียกโครงสร้างนี้ว่าเป็นชนิด 1:1
- 2) กลุ่มแร่อิลไลต์ (Illite) มีสูตรเคมีทั่วไปคือ  $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$  เป็นแร่ชนิด 2:1 คือมีโครงสร้างของซิลิกา 2 ชั้น ประกอบด้วยชั้นของอลูมินาและในแต่ละหน่วยจะมีไอออนของโพแทสเซียมแทรกอยู่ ทำให้ดินกลุ่มนี้ไม่สามารถพองตัวในน้ำได้
- 3) กลุ่มแร่สเมคไทต์ (Smectite) มีโครงสร้างทางเคมีโดยทั่วไปคือ  $\text{M}_x(\text{Al}_4-x\text{Mg})_x\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$  โดย M คือประจุบวก ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นประจุบวกของแคลเซียม แมกนีเซียม เหล็กและโซเดียม มีโครงสร้างเป็นชนิด 2:1 โดยระหว่างชั้นจะมีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ แร่กลุ่มนี้สามารถพองตัวในน้ำได้ดี

- 4) กลุ่มแร่เวอร์มิคูลไลต์ (Vermiculite) มีสูตรเคมีโดยทั่วไปคือ  $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot xH_2O$  มีโครงสร้างคล้ายกับกลุ่มแร่ Smectite แต่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุสูงกว่า เมื่อเผาแล้วอนุภาคจะมีลักษณะคล้ายตัวหนอน
- 5) กลุ่มแร่ปาลิโกรซไกต์ (Palygorskite) มีโครงสร้างต่อเนื่องเป็นลูกโซ่

### 2.3.2 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) [6]

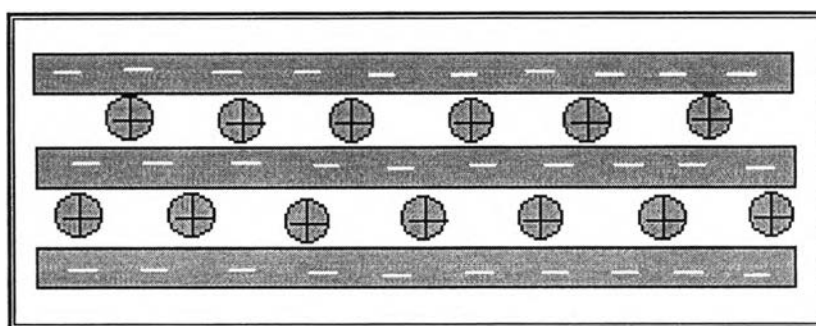
แร่มอนต์มอริลโลไนต์หรือมอนต์มอริลโลไนท์ Montmorillonite เป็นแร่ที่อยู่ในกลุ่มสเมคไทต์ (Smectite) มีสูตรทางเคมีคือ  $M^+ [Al_{2y} (Mg Fe)_y] Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$  โดย  $M^+$  หมายถึงประจุบวกอาจเป็นได้ทั้งแคลเซียมและโซเดียม โดยมีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดเล็กระดับนาโนเมตร 3 ชั้นโดยแต่ละชั้นจะมีความหนาน้อยกว่า 1 นาโนเมตร ประกอบด้วยแผ่นของกลุ่มโมเลกุลอลูมิเนียมไฮดรอกซิล โมเลกุลแปดระนาบ (Octahedral Aluminum Hydroxyl) อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นของกลุ่มโมเลกุลซิลิคอนออกไซด์โมเลกุลสี่เหลี่ยมพีระมิด (Siliconoxygen Tetrahedral) โดยที่อะตอมของอลูมิเนียมบางส่วน จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของแมกนีเซียม หรืออะตอมของธาตุเหล็ก ซึ่งจะช่วยสร้างประจุลบบนระนาบด้านฐานของโมเลกุลซิลิกา ดังแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์

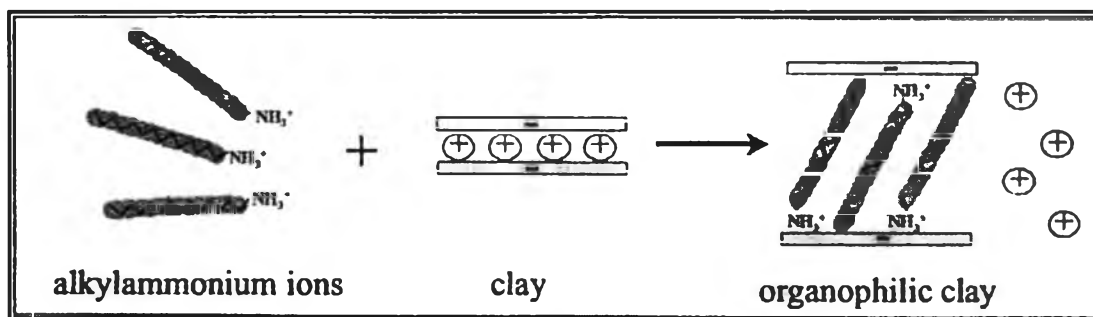


ในแรมอนต์มอริลไลไนท์ตามธรรมชาติประจุบวกเหล่านี้มักจะเป็นแคลเซียม โซเดียม หรือ แมกนีเซียมขึ้นอยู่กับสภาพดินฟ้าอากาศและสภาวะแวดล้อมในช่วงเวลาที่ก่อตัวและลักษณะการก่อตัวขึ้นของแร่ โดยแคลไออนดังกล่าวจะทำหน้าที่ยึดชั้นดินที่มีประจุลบเอาไว้ จึงทำให้ชั้นดินยึดติดกันแน่น ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การยึดติดกันระหว่างชั้นของดินกับแคลไออนที่อยู่ระหว่างชั้นดิน

มอนต์มอริลไลไนต์มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) จึงทำให้ผสมและเกิดอันตรกิริยากับพอลิเมอร์ได้ยาก เนื่องจากพอลิเมอร์มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการดัดแปรมอนต์มอริลไลไนต์เพื่อให้สามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น วิธีที่นิยมในการดัดแปรมอนต์มอริลไลไนต์ให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เพื่อให้สามารถเข้ากับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้นคือ การทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนแคลไออน (cationic exchange reaction) ที่อยู่ในช่องว่างกับสารอินทรีย์ที่มีแคลไออนและมีสายโซ่อัลคิลยาวซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ เช่น ควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (quaternary ammonium) หรือฟอสโฟเนียม (phosphonium) โดยสารดังกล่าวจะสามารถเข้าแทนที่แคลไออนที่อยู่ระหว่างชั้นดิน ทำให้ได้มอนต์มอริลไลไนต์ดัดแปรที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำมากขึ้น จึงสามารถเข้ากับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น มอนต์มอริลไลไนต์ดัดแปรที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวจะเรียกว่า ออร์แกโนไคลย์ (organoclay) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การปรับปรุงสภาพพื้นผิวของดินเหนียว

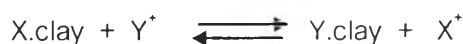
ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุด้วยสารอินทรีย์ที่มีประจุบวก ทำให้ช่อง gallery ขยายออก นั่นคือ ระยะห่างระหว่างชั้นดินเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ดินเกิดการบวมตัว เรียกออร์แกโนเคลย์ที่มีโครงสร้างแบบนี้ว่า intercalated clay แต่ถ้าชั้นของดินเกิดการบวมตัวมากจนทำให้ชั้นดินแยกจากกัน จะเรียกว่า exfoliated clay ทำให้อุณหภูมิของมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีขนาดระดับนาโนเมตร สามารถนำไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ โดยก่อให้เกิดการเสริมแรงในระดับโมเลกุล ดังนั้น จึงเรียกวัสตุเชิงประกอบประเภทนี้ว่า นาโนคอมโพสิต (nanocomposites)

### 2.3.3 กระบวนการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation exchange process หรือ Cation exchange capacity, CEC)

ดินเหนียวเมื่ออยู่ในดินตามธรรมชาติจะดึงดูดไอออนที่มีประจุบวกไว้ ส่วนชนิดของแคตไอออนที่ถูกดึงดูดอยู่นั้นจะมีมากน้อยลดหลั่นกันไปสำหรับดินในแถบร้อนและชุ่มชื้นดังนี้ คือ  $H^+ (Al^{3+}) > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$  แคตไอออนเหล่านี้จะไม่ยึดติดแน่นอยู่กับพื้นผิวของดินเหนียวแต่จะโคจรอยู่ในระยะใกล้ชิดกับผิว ภายใต้อำนาจการดึงดูดซึ่งกันและกัน ดังนั้น การชะล้างด้วยน้ำจึงไม่อาจที่จะชะเอาแคตไอออนพวกนี้ออกไปได้ เราเรียกแคตไอออนพวกนี้ว่าเป็นแคตไอออนดูดซับ (adsorbed cations) อย่างไรก็ตาม แคตไอออนพวกนี้สามารถถูกไล่ออกไปโดยแคตไอออนอื่นๆ ได้โดยง่าย

การที่แคตไอออนดูดซับสามารถถูกไล่ที่หรือแทนที่โดยแคตไอออนอื่นด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนแคตไอออน บางครั้งเราสามารถเรียกแคตไอออนดูดซับนี้ว่า แคตไอออนแลกเปลี่ยน (exchangeable cations)

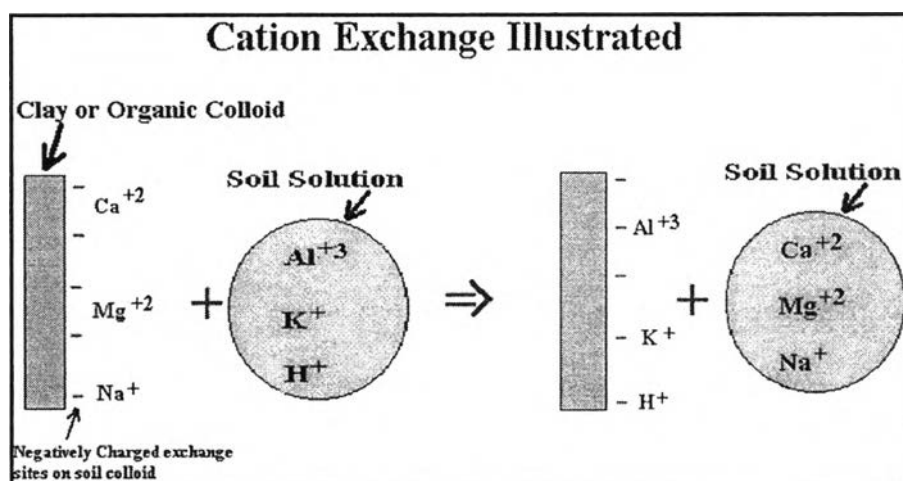
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการแลกเปลี่ยนประจุ คือ



$X^+$  : ประจุของดิน

$Y^+$  : ประจุที่ทำการเติมลงในสารละลาย

ปฏิกิริยาจะเกิดจากซ้ายไปขวา ซึ่งขึ้นกับธรรมชาติของประจุ  $X^+$  และ  $Y^+$  ปฏิกิริยาจะเคลื่อนที่ไปด้านขวาโดยการเติมประจุ  $Y^+$  ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การแลกเปลี่ยนประจุแคตไอออนที่อยู่ในดินกับแคตไอออนอื่นๆ

กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุนี้ถูกควบคุมโดยกระบวนการแพร่ของประจุเข้าไปแทนที่ในส่วนของประจุที่มีอยู่เดิม สามารถพิจารณากระบวนการได้ใน 2 ขั้นตอน

1. การแพร่ของสารละลายเข้าไปในแต่ละบริเวณช่องว่างระหว่างชั้นของดิน
2. การแพร่เข้าไปภายในตัวอนุภาค

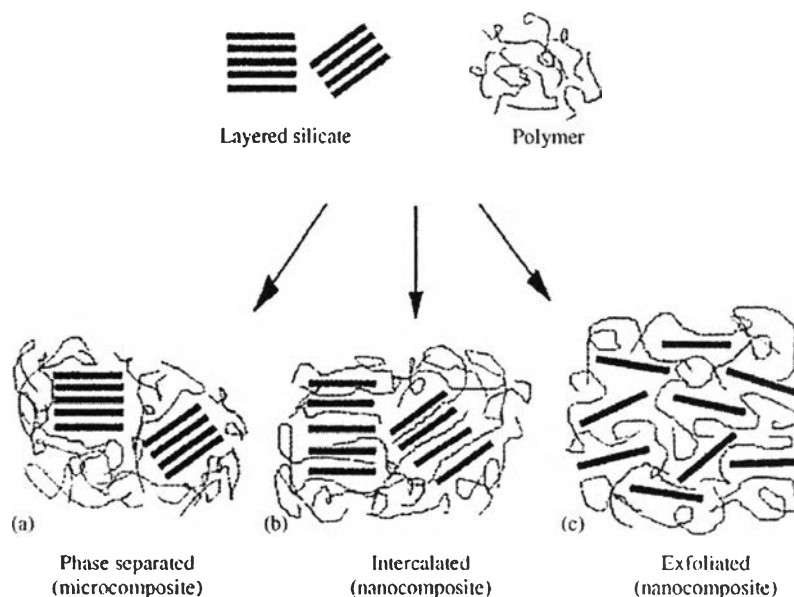
### 2.3.4 กระบวนการผสมและการกระจายอนุภาคเคลย์ [6]

การผสมพอลิเมอร์และอนุภาคของเคลย์ที่มีประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมมี 2 วิธีคือ

- 1) การผสมอนุภาคดินระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (in-reactor polymerization) เป็นกระบวนการที่อาศัยการบวมตัว (swelling) ของออร์แกโนเคลย์ด้วยมอนอเมอร์ (monomer) เมื่อมอนอเมอร์เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจะทำให้เกิดการเติบโตของสายโซ่พอลิเมอร์ภายในเนื้อเคลย์ซึ่งจะเป็นการเร่งให้เกิดการแตกออกของชั้นเคลย์ ทำให้เกิดเป็นนาโนคอมโพสิต
- 2) การผสมอนุภาคดินกับพลาสติกหลอมเหลว (melt compounding) วิธีนี้เป็นการนำอนุภาคเคลย์และเม็ดหรือผงพลาสติกทำเต็มลงไปเครื่องอัดรีดสกรูคู่เพื่อทำการผสมโดยได้ทำการควบคุมสภาวะในการผสมเช่น อัตราการเข็นและอุณหภูมิภายในเครื่อง วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายกว่าวิธีแรกแต่มีประสิทธิภาพเทียบเท่ากัน

การกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์คอมโพสิตมี 3 รูปแบบดังนี้คือ

1. Conventional composites : อนุภาคของเคลย์เกาะกันเป็นกลุ่ม และพอลิเมอร์ไม่มีการแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นของเคลย์
2. Intercalated nanocomposites : เคลย์เกาะกันเป็นกลุ่ม ระหว่างชั้นของเคลย์มีการขยายตัวโดยสายโซ่พอลิเมอร์แทรกเข้าไปอยู่ในระหว่างชั้นของเคลย์
3. Exfoliated nanocomposites หรือ delaminated nanocomposites : ชั้นของเคลย์จะกระจายตัวออกจากกันไม่มีโครงสร้างผลึก ทำให้ได้นาโนคอมโพสิตที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแสง และยังทำให้มีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของก๊าซดีขึ้น



รูปที่ 2.11 การกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์คอมโพสิต

### 2.3.5 ลักษณะสำคัญของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต

วัสดุพอลิเมอร์-เคลย์ นาโนคอมโพสิตมีลักษณะสำคัญ ดังนี้

1. มีความใส เพราะอนุภาคขนาดนาโนเมตรจะเล็กกว่าความยาวคลื่นแสง UV-Vis มาก จึงไม่ทำให้แสงเกิดการกระเจิง ไม่เกิดความขุ่น ไม่ทึบแสง แต่จะโปร่งใส
2. มีความแข็งแรง โมดูลัสสูงขึ้น เนื่องจากความแข็งของชั้นซิลิเกต
3. มีสมบัติสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซ เนื่องจากอนุภาคเคลย์ที่กระจายอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์มีพื้นผิวและ aspect ratio สูง ทำให้ระยะทางการเคลื่อนของก๊าซเพิ่มมากขึ้น
4. ทนความร้อนสูงได้ดี เพราะซิลิเกตเป็นฉนวนที่ดี การเผาไหม้ทำให้เกิดถ่าน (Char) ปกคลุมที่ผิวหน้า จึงไม่ลามไฟ และไฟดับได้รวดเร็ว
5. เมื่อผสมในพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้ จะทำให้นำไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์ได้ดีขึ้น เพราะจำกัดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลให้อยู่ในภาวะที่เอื้อต่อการนำไฟฟ้า เช่น สายโซ่โมเลกุลจะถูกยึดออกมากกว่าจะขดตัวทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสะดวกขึ้น

### 2.3.6 ผลิตภัณฑ์สำคัญของพอลิเมอร์-เคลย์ นาโนคอมโพสิต

วัสดุพอลิเมอร์-เคลย์ นาโนคอมโพสิตสามารถนำไปใช้งานได้ในหลายๆ ด้าน โดยการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ดังนี้

1. ชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น timing-belt cover โครงบุใต้หลังคา คอนโซล ตัวถัง ล้อรถยนต์ และถังน้ำมัน เป็นต้น ซึ่งให้ความแข็งแรง คงทน และทนไฟ
2. สีพ่นรถยนต์ ที่ให้ความคงทนมากขึ้น
3. แผ่นฟิล์มกันออกซิเจนในขวดยาและอาหาร อาหารกระป๋อง ป้องกันอาหารเสื่อมสภาพ ยืดอายุสินค้าให้ยาวนานขึ้น
4. ขวดน้ำอัดลม เบียร์ ป้องกันการสูญเสียก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัดไว้
5. ป้องกันการสูญเสียก๊าซภายในลูกบอล ลูกเทนนิส

## 2.4 ฟิล์มพลาสติก [7]

### 2.4.1 นิยามของคำว่าฟิล์มและซีท

นิยามของฟิล์มและซีทสามารถจำแนกโดยใช้ความหนาเป็นเกณฑ์ คือ ถ้าเป็นฟิล์มจะมีความหนาไม่เกิน 0.25 มิลลิเมตร แต่ถ้าความหนามากกว่า 0.25 มิลลิเมตร จะถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของซีท

### 2.4.2 ประวัติความเป็นมาของฟิล์ม

ฟิล์มพลาสติกชนิดแรกที่ใช้ในทางการค้าได้แก่ เซลลูโลสไนเตรต (cellulose nitrate) หรือ เซลลูลอยด์ (celluloid) เนื่องจากมีสมบัติบางอย่างดีเยี่ยมเช่น ความใส (clarity) ความแข็งแรง (strength) ต้านทานความชื้น (moisture resistance) และความคงขนาด (dimensional stability) แต่มีข้อเสียคือ ติดไฟได้ง่าย (flammability) มีเสถียรภาพต่อแสง (light stability) และตัวทำละลายต่ำ ในช่วงแรกฟิล์มจะถูกนำมาใช้ทำฟิล์มถ่ายรูปและฟิล์มภาพยนตร์ ต่อมาฟิล์มได้ถูกพัฒนานำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์หรือสินค้าฟุ่มเฟือยโดยฟิล์มดังกล่าวผลิตได้จาก regenerated cellulose ฟิล์มที่ได้ถูกเรียกว่า cellophane หรือกระดาษแก้ว ในปี 1909 เซลลูโลสอะซีเตตถูกพัฒนาสำหรับใช้เป็น safety photographic film ซึ่งเดิมทำจากเซลลูโลสไนเตรต ก่อนจะถูกพัฒนาเป็นฟิล์มห่อ

ของ (wrapping film) regenerated cellulose เป็นวัสดุสำคัญในการใช้ทำฟิล์มต่างๆจนถึงประมาณปี 1950 เนื่องจากฟิล์มเซลลูโลสอะซีเตตมีราคาแพงเกินไปสำหรับจะนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์จำนวนมาก ฟิล์มที่ทำจากพอลิเอทิลีนจึงเป็นฟิล์มชนิดแรกที่นำมาใช้แทนเซลลูโลสอะซีเตต แต่ในปัจจุบันได้มีการใช้ฟิล์มทั้งจากพอลิโพรพิลีน (PP) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ในปี 1946 ได้มีการพัฒนากระบวนการอัดรีดฟิล์ม (extrusion process) ต่อมาในปี 1948 ได้ใช้วิธีการรีดหล่อฟิล์ม (chill roll casting) ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ฟิล์มที่มีลักษณะมันเงา (gloss) และโปร่งใสกว่าฟิล์มที่ได้จากการอัดรีด แต่วิธีนี้ไม่เหมาะที่จะนำมาทำเป็นถุงเนื่องจากมีแนวโน้มที่จะเกิดการติดกันของฟิล์ม (blocking) ดังนั้นในปีถัดมาจึงมีการใช้วิธีเป่าฟิล์ม (blown film) ที่สามารถทำถุงได้

#### 2.4.3 วัสดุที่ใช้ทำฟิล์ม

2.4.3.1 พอลิโอเลฟิน (polyolefin) ถือเป็นเทอร์โมพลาสติกที่สำคัญในการทำฟิล์ม ได้แก่พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low density polyethylene, LLDPE) และพอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP)

2.4.3.2 เอทิลีน/ไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ (ethylene/vinyl alcohol copolymer, EVOH)

2.4.3.3 เอทิลีน/ไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ (ethylene/vinyl acetate copolymer, EVA)

2.4.3.4 ไวนิล (vinyl) ได้แก่

พอลิไวนิลคลอไรด์ (poly(vinyl chloride), PVC) พอลิไวนิลิดีนคลอไรด์ (poly(vinylidene chloride), PVDC) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (poly(vinyl alcohol), PVOH)

#### 2.4.3.5 ไอโอโนเมอร์ (ionomer)

#### 2.4.3.6 สไตรีนพอลิเมอร์ และโคพอลิเมอร์ (styrene polymer and copolymer)

ได้แก่

พอลิสไตรีน (polystyrene, PS) พอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูง (high impact polystyrene, HIPS) สไตรีน/อะคริโลไนไตรล์โคพอลิเมอร์ (styrene/acrylonitrile copolymer, SAN) และอะคริโลไนไตรล์/บิวตะไดอีน/สไตรีนโคพอลิเมอร์ (acrylonitrile/butadiene/styrene copolymer, ABS)

2.4.3.7 เซลลูโลส และอนุพันธ์ของเซลลูโลส (cellulose and cellulose derivatives) ได้แก่รีเจนเนอเรตเซลลูโลส (regenerated cellulose) เซลลูโลสไนเตรต (cellulose nitrate, celluloid) เซลลูโลสอะซิเตต (cellulose acetate, CA) เซลลูโลสอะซิเตต – บิวทิเรต (cellulose acetate-butyrate, CAB) และเซลลูโลสโพรพิอเนต (cellulose propionate, CP)

#### 2.4.3.8 ไนลอนหรือพอลิเอไมด์ (nylon or polyamide)

#### 2.4.3.9 พอลิคาร์บอเนต (polycarbonate, PC)

#### 2.4.3.10 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate, PET)

### 2.5 ฟิล์มหลายชั้น (multilayer film)

ฟิล์มหลายชั้นประกอบไปด้วยฟิล์มพลาสติกต่างชนิดหรือพลาสติกกับวัสดุอื่น โดยจะเป็นการนำจุดเด่นของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ร่วมกัน ซึ่งจะให้ประโยชน์ที่แตกต่างกันออกไป แล้วแต่ชนิดของพอลิเมอร์ที่มาใช้เป็นชั้นกลาง เพราะไม่มีวัสดุใดที่มีสมบัติดีในทุกๆ ด้านการผลิตฟิล์มหลายชั้นจะเกี่ยวข้องกับการพัฒนาพอลิเมอร์ชนิดใหม่ หรือการปรับปรุงพอลิเมอร์ที่มีอยู่แล้วให้มีสมบัติดีขึ้น



### 2.5.1 วิธีการผลิตฟิล์มหลายชั้น

การผลิตฟิล์มหลายชั้นสำหรับงานบรรจุภัณฑ์ จะมี 3 วิธีหลักๆ ได้แก่

#### 2.5.1.1 Adhesive lamination หรือ การประกบด้วยกาว

เป็นเทคนิคที่นำฟิล์มพลาสติกหรือวัสดุอื่น เช่น กระดาษ อะลูมิเนียมฟอยล์ มาประกบติดกันโดยใช้กาวเป็นตัวเชื่อมประสานที่ผิว แบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ได้แก่

1) การประกบเปียก (wet lamination) ใช้กาวที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ ทั้งกาวธรรมชาติและกาวสังเคราะห์ ซึ่งจะสะดวกและปลอดภัยในการนำไปใช้งาน มีการยึดติดที่แข็งแรง และราคาค่อนข้างถูก โดยมีการนำกาวสังเคราะห์ที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบมาใช้งานบรรจุภัณฑ์อย่างมาก โดยกาวสังเคราะห์ที่นำมาใช้จะมีสมบัติได้หลากหลายโดยการเติมพลาสติกไซเซออร์ฟิลเลอร์ สารรักษาสภาพ และสารกำจัดฟอง ซึ่งจะติดได้ทั้งกระจก กระดาษ พลาสติกส่วนใหญ่ และโลหะ จะสามารถแข็งตัวได้เร็ว มีกลิ่น รส และความเป็นพิษไม่มาก

2) การประกบแห้ง (dry lamination) จะใช้กาวที่มีตัวทำละลายเป็นส่วนประกอบ ซึ่งจะเป็นพวกกาวสังเคราะห์ โดยจะมีการใช้งานค่อนข้างแคบเนื่องจากเกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย จากความเป็นพิษและติดไฟได้ง่าย แต่กาวสังเคราะห์นี้จะแห้งและแข็งตัวเร็วกว่าที่ใช้น้ำ

3) การประกบร้อน (hot lamination) เป็นการใช้อุณหภูมิสูงเป็นของแข็ง 100 เปอร์เซ็นต์ ได้จากเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ จะถูกใช้งานเมื่ออยู่ในสถานะหลอมเหลว และเมื่อทิ้งไว้ให้เย็นจะเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วทำให้มีอัตราการผลิตสูง แต่ต้องระวังไม่ให้แข็งตัวก่อนที่จะทำให้ผิวเปียก เพราะจะทำให้เกิดการยึดติดที่ไม่ดี

#### 2.5.1.2 Co-extrusion หรือ การอัดรีดร่วม

เป็นการนำเทอร์โมพลาสติกตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป มาทำให้หลอมเหลวแล้วอัดรีดออกมาเป็นฟิล์มหลายชั้น ซึ่งมักจะมีกาวหรือชั้นที่เพิ่มการยึดติด (tie layer) ระหว่างชั้นพลาสติก เครื่องจักรที่ใช้ประกอบด้วยเครื่องอัดรีด (extruder) มากกว่า 1 เครื่อง ต่ออยู่กับหัวตาย (die head) เพียงหัวเดียว ซึ่งต้องมีการควบคุมอัตราเร็วของสกรู (screw speed) ความดันหลอมละลาย (melt pressure) อุณหภูมิ และพลังขับเคลื่อนของเครื่องอัดรีดอย่างถูกต้องแม่นยำ การอัดรีดร่วม

ไม่ต้องใช้ตัวทำละลาย จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมเหมือนเช่นเทคนิคการประกบ (lamination)

### 2.5.1.3 Extrusion coating

เป็นการนำพอลิเมอร์ที่เป็นเทอร์โมพลาสติกมาทำให้หลอมเหลวในเครื่องอัดรีด แล้วอัดรีดผ่านหัวตายลงบนผิววัสดุที่เคลื่อนที่อยู่ เช่น กระดาษ อะลูมิเนียมฟอยล์ และฟิล์มเซลลูโลส เป็นต้น เพื่อเคลือบให้ติดอยู่บนวัสดุเหล่านั้น ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของวัสดุรองรับนั้นจะเป็นตัวควบคุมความหนาของฟิล์ม โดยฟิล์มของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดออกมาจะถูกอัดลงบนวัสดุรองรับโดยไม่ต้องใช้กาว เมื่อฟิล์มที่หลอมเหลวผ่านหัวตายออกมา ก็จะถูกดึงลงไปในช่วงหนึ่งระหว่างลูกกลิ้งสองลูกที่อยู่ใต้หัวตายพอดี โดยวัสดุรองรับจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วกว่าฟิล์มที่ถูกอัดรีดออกมา พร้อมกับดึงฟิล์มที่ร้อนให้ติดไป และมีความหนาตามต้องการ ซึ่งความดันระหว่างลูกกลิ้งเย็น และลูกกลิ้งอัด จะกดฟิล์มให้ติดกับวัสดุรองรับ ในระหว่างนั้นฟิล์มที่หลอมเหลวจะถูกทำให้เย็นลงโดยน้ำที่หล่ออยู่ภายในลูกกลิ้งเย็นซึ่งชุบด้วยโครเมียม ส่วนลูกกลิ้งอัดก็ทำจากโลหะ แต่จะมียางสวมทับอยู่ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ยางนีโอพรีน (neoprene rubber) หรือ ยางซิลิโคน (silicone rubber) วัสดุที่ถูกเคลือบเมื่อผ่านลูกกลิ้งเย็นออกมาแล้วจะถูกดึงไปบนลูกกลิ้งตัด (slitter roll) ซึ่งเคลื่อนที่เพื่อตัดขอบที่ไม่ได้ถูกเคลือบ และกำจัดเม็ดพลาสติกที่เกิดตามขอบของฟิล์มออกไป เมื่อตกแต่งขอบเรียบร้อยแล้วก็จะถูกม้วนเก็บ โดยการทำให้ extrusion coating ต้องใช้อุณหภูมิสูงเพื่อลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว ซึ่ง LDPE มักมีกลิ่นภายใต้ภาวะเหล่านี้ จึงไม่เหมาะที่จะใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร

## 2.6 กระบวนการขึ้นรูป [8-11]

### 2.6.1 กระบวนการอัดรีด (Extrusion process)

การอัดรีดเป็นกระบวนการแปรรูปหลักของอุตสาหกรรมพลาสติกชนิดหนึ่ง โดยทั่วไปจะนิยามกระบวนการแปรรูปชนิดนี้ว่าเป็นการทำให้วัสดุมีรูปร่างตามที่ต้องการโดยการอัดพลาสติกหลอมไหลผ่านหัวตายที่มีรูปร่างที่เหมาะสม การแปรรูปพลาสติกโดยการอัดรีดจัดเป็นกระบวนการแปรรูปแบบต่อเนื่อง (continuous process) และผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป (semi-finished product) ก่อนจะนำไปเข้ากระบวนการอื่นๆต่อไปเพื่อผลิตเป็นชิ้นงานขั้น

สุดท้าย (finished product) ก่อนจะนำไปใช้งาน นอกจากอุตสาหกรรมแปรรูปและผลิตพอลิเมอร์แล้ว ยังมีการใช้เทคนิคการอัดรีดในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น การผลิตเซรามิกส์ การผลิตอิฐสำหรับงานก่อสร้าง และการแปรรูปอาหาร เป็นต้น

การอัดรีดเป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่วัสดุที่อยู่ภายในอุปกรณ์รูปทรงกระบอก หรือที่เรียกว่า บาร์เรล (barrel) ให้อ่อนตัวในกรณีที่วัสดุเป็นยาง หรือเกิดการหลอมเหลวในกรณีที่วัสดุเป็นเทอร์โมพลาสติก โดยภายในบาร์เรลจะเกิดแรงอัดเพื่อให้อ่อนตัวสามารถไหลผ่านหัวตายซึ่งเป็นตัวกำหนดรูปร่างของวัสดุที่ไหลออกมาให้มีหน้าตัดตามลักษณะที่ต้องการ โดยความร้อนที่ให้แก่วัสดุนั้นเกิดจากความร้อนภายนอกอุปกรณ์ทำความร้อน และความร้อนภายในที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานจากการหมุนของสกรู เพื่อสร้างแรงดันทำให้วัสดุไหลผ่านหัวตายผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะตามหัวตาย และวัสดุจะมีการแข็งตัวเมื่อออกจากหัวตายเนื่องจากการหล่อเย็น การอัดรีดยางที่ไม่วัลคาไนซ์และพลาสติกในกลุ่มเทอร์โมเซตบางตัวก็สามารถทำได้ แต่พอลิเมอร์กลุ่มนี้จะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเนื่องจากความร้อนในขณะทำการอัดรีด

การอัดรีดสามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกในรูปแบบต่างๆ เช่น ผลิตเส้นใย (fiber) ท่อขนาดเล็ก (tube) ท่อขนาดกลางและใหญ่ (pipe) แผ่นพลาสติก (sheet) ฟิล์มพลาสติก (film) และชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นโพรไฟล์ (profiles) รูปแบบต่างๆ ความหมายของชิ้นงานจากการอัดรีดที่เป็นโพรไฟล์ในเทคโนโลยียางและพลาสติก หมายถึง ผลิตภัณฑ์จากการอัดรีดแบบกึ่งสำเร็จรูปทั้งหมด ยกเว้นกลุ่มชิ้นงานที่ผลิตจากตายรูปแหวนในกรณีผลิตท่อ ดายกลมซึ่งใช้ในการผลิตแท่งพลาสติกกลม ดายที่มีทางออกเป็นแท่งสี่เหลี่ยม และดายเป็นผลิตแผ่นและฟิล์มพลาสติก

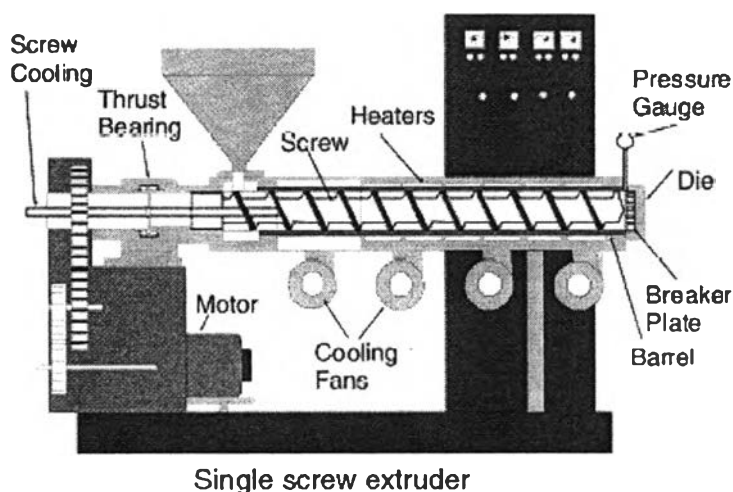
นอกจากการแปรรูปพลาสติกโดยตรงแล้ว ยังใช้เครื่องอัดรีดเป็นอุปกรณ์หลักในเครื่องแปรรูปพลาสติกในชนิดต่างๆ เช่น การเคลือบพลาสติกลงบนวัสดุชนิดอื่น (extrusion covering process) การอัดรีดเป่า (extrusion blow molding) และการเป่าฟิล์ม (extrusion blow film process)

นอกจากเครื่องอัดรีดมีความสำคัญในการแปรรูปพลาสติกแล้ว ยังมีความสำคัญในการใช้เป็นเครื่องผสมเพื่อเตรียมคอมพาวนด์พลาสติก โดยการผสมพลาสติกกับสารเติมแต่ง (additives) และสารตัวเติม (fillers) ชนิดต่างๆเข้าด้วยกัน เพื่อเป็นการเตรียมวัสดุสำหรับการแปรรูปโดยเทคนิคต่างๆ

กระบวนการอัดรีดแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder) และการอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder)

#### 2.6.1.1 การอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder)

โดยอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder)

##### 1) ส่วนป้อนพลาสติก (feed hopper)

ส่วนป้อนพลาสติก เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่เหนือส่วนต้นของเครื่องอัดรีด ใช้เติมพลาสติกลงในบาร์เรลและสกรูโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นกรวย ทำหน้าที่ป้อนเม็ดพลาสติกเข้าสู่บาร์เรลอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาศัยแรงโน้มถ่วงในการส่งจ่ายเม็ดพลาสติก และการป้อนแบบนี้เป็น

แบบที่นิยมใช้กันทั่วไป แต่อย่างไรก็ตามในบางกระบวนการที่ต้องการอัตราการจ่ายเม็ดพลาสติกที่แม่นยำและสม่ำเสมอ จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เสริมเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

- ฝาปิด เพื่อใช้ในการป้องกันฝุ่นละอองและความชื้นเข้ามาปนเปื้อนกับพลาสติก
- หน้าต่างแก้วหรือพลาสติกใส สำหรับสังเกตระดับของวัสดุภายในกรวยเติม
- ลินที่ส่วนล่างของกรวยเติม เพื่อให้สามารถปิดและเปิดให้พลาสติกไหลและหยุดได้
- ในเครื่องอัดรีดบางชนิดจะมีเครื่องเป่าอากาศร้อนเพื่อไล่ความชื้นติดตัวไว้ในส่วนของกรวยเติม หรือในบางกรณีต้องการเพิ่มอุณหภูมิของพลาสติกก่อนที่จะป้อนเข้าสู่สกรู
- อาจจะมีเครื่องกวน (agitator) เพื่อป้องกันไม่ให้เม็ดหรือผงพลาสติกติดกันเป็นก้อน การเติมเม็ดหรือพลาสติกลงในกรวยเติมของเครื่องอัดรีดในอุตสาหกรรมมักจะใช้เครื่องดูดแบบสุญญากาศในการดูดเม็ดหรือผงพลาสติกจากกระสอบหรือถุงลงในกรวยเติมพลาสติก

## 2) บาร์เรล (barrel)

หน้าที่ของบาร์เรลในเครื่องอัดรีดคือเป็นตัวบรรจุสกรูไว้ใน และเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนให้แก่พลาสติก โดยทั่วไปบาร์เรลที่อยู่ในส่วนป้อนพลาสติกซึ่งอยู่ด้านล่างกรวยเติมพลาสติกจะมีการใช้น้ำหล่อเย็นเพื่อป้องกันพลาสติกติดกันเป็นก้อน ให้พลาสติกไหลลงส่วนป้อนของสกรูได้สะดวกขึ้น ส่วนของกระบอกนอกเหนือจากส่วนนี้จะหล่อด้วยแผ่นตัวให้ความร้อนเป็นช่วงๆ นอกจากนี้รอบๆ กระบอกจะมีระบบพัดลมเป่าหรือระบบน้ำหล่อเย็น เพื่อควบคุมอุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลวให้ได้ตามอุณหภูมิที่ตั้ง หากความร้อนสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ ระบบหล่อเย็นจะทำงาน

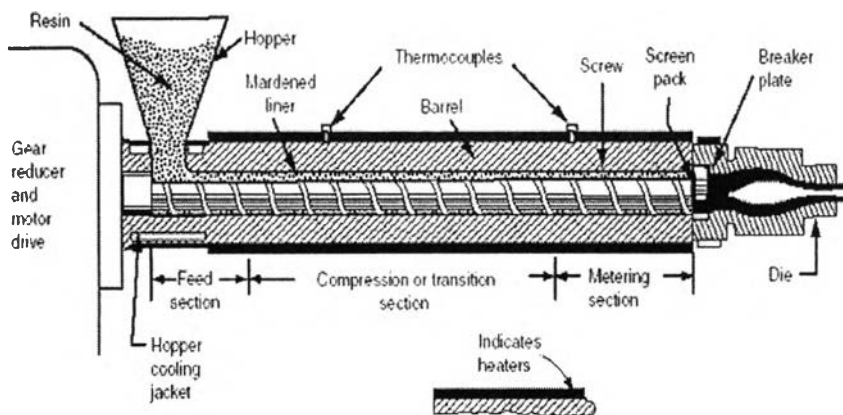
บาร์เรลของเครื่องอัดรีด ทำมาจากโลหะแข็งรูปทรงกระบอกที่สามารถทนความดันได้สูง ซึ่งจะเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต ผิวด้านในของบาร์เรลสามารถทำให้ทนต่อการสึกกร่อนได้โดยเคลือบด้วยอัลลอยด์ของโลหะ

3) สกรู (Screw)

สกรูเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ภายในบาร์เรล ถือเป็นหัวใจสำคัญของการอัดรีด มีลักษณะโดยทั่วไปคือ มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ แต่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเพิ่มขึ้นจากส่วนป้อนพลาสติกถึงหัวตาย เป็นผลให้ระยะลึกของร่อง (channel depth) ลดลง ส่งผลให้มีความดันเพิ่มขึ้น ผิวของสกรูมักถูกเคลือบหรือปรับปรุงเพื่อให้มีความทนทานต่อการสึกกร่อน การหมุนของสกรูจะถูกควบคุมด้วยระบบไฟฟ้าและเฟือง

หน้าที่สำคัญของสกรู ได้แก่ การรับเม็ดพลาสติก และส่วนผสมต่างๆ ไม่ว่าจะในสภาพเป็นเม็ดหรือเป็นผงจากส่วนป้อนพลาสติก ทำการผสมของแข็งเหล่านั้นให้เข้ากันอย่างทั่วถึง จากนั้นจะทำให้เกิดการหลอมอย่างสมบูรณ์ สร้างแรงดันที่เพียงพอเพื่อเอาชนะความต้านทานต่อแรงเสียดทานของหัวตาย และดันของหลอมเหล่านี้ให้ไหลผ่านหัวตาย ด้วยความดันและอุณหภูมิคงที่ โดยแบ่งหน้าที่การทำงานของสกรู ได้เป็น 3 ช่วง (zones) ได้แก่ feed zone, transition, หรือ compression zone และ metering หรือ melt pumping zone ดังแสดงในรูปที่

2.13



รูปที่ 2.13 โซนการทำงานของเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว

### 1. โซนรับวัสดุจากส่วนป้อนเม็ดพลาสติก (feed zone)

โซนรับวัสดุเป็นช่วงแรกของสกรู โดยอยู่ใต้ส่วนป้อนเม็ดพลาสติก มีหน้าที่ลำเลียงวัสดุจากส่วนป้อนเม็ดพลาสติกด้วยอัตราคงที่สู่ส่วนอัดรีด โดยสันของสกรูในช่วงนี้จะลึกและคงที่เพื่อความสามารถในการลำเลียง ภายในโซนรับวัสดุนี้ เม็ดพลาสติกจะได้รับแรงอัดที่เพียงพอเพื่อไล่อากาศที่อยู่ระหว่างเม็ดพลาสติกให้ไหลย้อนกลับไปออกทางส่วนป้อนเม็ดพลาสติกได้

### 2. โซนทรานซิสชัน (transition หรือ compression zone)

ในโซนนี้ระยะลึกของร่องสกรูจะค่อยๆ ลดลงอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ช่องว่างของปริมาตรลดลงส่งผลให้ความดันสูงขึ้น เม็ดพลาสติกจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นเม็ดพลาสติกที่ออกจากโซนนี้ จะเกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์และเป็นเนื้อเดียวกัน รวมทั้งมีอุณหภูมิสูงตามความต้องการที่หัวดาย

### 3. โซนหลอมเหลว (metering หรือ melt pumping zone)

สกรูในช่วงสุดท้ายนี้ จะทำหน้าที่ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันและดันให้เม็ดพลาสติกที่หลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ไหลผ่านหัวดาย เนื่องจากเป็นช่วงที่ร่องของสกรูตื้นและคงที่ ทำให้เม็ดพลาสติกหลอมมีความดันสูง โดยระบบทำความร้อนและความเย็นของสกรูทั่วไปควบคุมด้วยการไหลวนของของไหล เช่น น้ำ หรือน้ำมัน

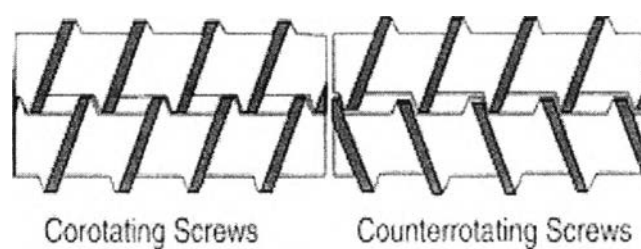
### 4) หัวดาย (die)

ดายของเครื่องอัดรีดเป็นส่วนที่ยึดติดกับส่วนปลายของบาร์เรล ดายจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลาสติกหลอมให้มีรูปร่างตามลักษณะของหัวดายซึ่งโดยทั่วไปชิ้นงานพลาสติกการอัดรีดมีรูปร่างหลายแบบขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นดายของเครื่องอัดรีดจะมีลักษณะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปร่างของชิ้นงานที่ทำการอัดรีด ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของดายออกตามชนิดของผลิตภัณฑ์ คือ เส้นใย แผ่นพลาสติก ฟิล์มพลาสติก ท่อ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นโพรไฟล์ และผลิตภัณฑ์พลาสติกจากการเคลือบ เป็นต้น

### 2.6.1.2 การอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder)

เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ประกอบด้วย สกรูจำนวน 2 อัน อยู่ในบารเรลเดียวกัน โดยประเภทของสกรูในลักษณะนี้สามารถแบ่งตามการหมุนได้ 2 แบบ คือ แบบสกรูหมุนไปทางเดียวกัน (co-rotating) และแบบสกรูหมุนสวนทางกัน (counter-rotating) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 นอกจากนี้ยังแบ่งได้ตามการขบกันของสกรูได้เป็น 2 แบบ คือ แบบสกรูขบกัน (intermeshing) ซึ่งเป็นการหมุนของสกรูหนึ่งจะทำให้สกรูอีกอันหนึ่งหมุนตามไปด้วย และแบบสกรูไม่ขบกัน (non-intermeshing) ซึ่งการหมุนของแต่ละสกรูจะไม่เกี่ยวข้องกัน เสมือนเป็นสกรูสองอันเท่านั้น ส่วนสกรูในลักษณะของแบบสกรูขบกันนั้นก็ยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แบบขบกันสนิท (conjugated screw หรือ tightly intermeshing) และแบบขบกันไม่สนิท (non-conjugated screw หรือ closely intermeshing)

โดยระดับของการขบกันของสกรูยิ่งมากจะยิ่งส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพในการขบตันของพอลิเมอร์หลอมเหลวได้สูง แต่อาจทำให้แนวโน้มของประสิทธิภาพในการผสมลดลงได้ ดังนั้น เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่ใช้เฉพาะในงานผสมและการทำคอมพาวนด์ มักใช้แบบสกรูขบกันที่มีระดับของการขบกันต่ำ และมีความเร็วในการหมุนสูง

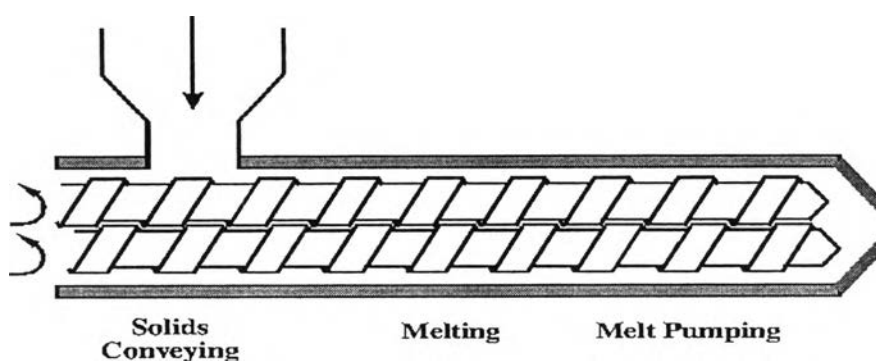


รูปที่ 2.14 ลักษณะการหมุนของสกรูในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

ข้อดีของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวมีอยู่หลายประการ เช่น มีพื้นที่ที่จะเกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่า จึงสามารถช่วยปรับปรุงการควบคุมอุณหภูมิได้ดียิ่งขึ้น และการขบตันของพอลิเมอร์หลอมเกิดขึ้นได้ดีกว่า จึงทำให้การควบคุมระยะเวลาของพอลิเมอร์ที่อยู่ในเครื่องอัดรีดได้ดีกว่า ดังนั้นเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่จึงเหมาะ



กับพอลิเมอร์ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ นอกจากนี้ถึงแม้ว่าเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่มีลักษณะของการทำงานคล้ายกันกับเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว แต่เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ก็สามารถทำได้ทั้งการผสมให้พอลิเมอร์เข้ากันได้อย่างทั่วถึง และทำให้พอลิเมอร์หลอมได้อย่างสมบูรณ์ด้วย โดยแสดงลักษณะของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ดังในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder)

### 2.6.2 การอัดรีดแผ่นและฟิล์มพลาสติก

ข้อแตกต่างระหว่างแผ่น (sheet) และฟิล์มพลาสติก (film) คือ ความหนาและลักษณะการม้วนพับ กล่าวคือฟิล์มพลาสติกคือพลาสติกที่มีหน้ากว้างและมีลักษณะผิวเรียบ มีความหนาน้อยกว่า 0.25 มิลลิเมตร นอกจากนี้สามารถม้วนได้โดยไม่เกิดการผิดรูป (deformation) อย่างถาวร แต่แผ่นพลาสติกจะมีความหนามากกว่า 0.25 มิลลิเมตร และการม้วนพับจะทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวร

การผลิตฟิล์มพลาสติกจะเริ่มจากการดันให้พลาสติกหลอมไหลผ่านหัวตาย ได้แผ่นพลาสติกร้อนและนิ่ม แล้วให้ผ่านช่องว่างของลูกกลิ้ง ซึ่งลูกกลิ้งชนิดผิวมันจากการเคลือบหรือชุบด้วยโครเมียม ลูกกลิ้งชุดนี้มีหน้าที่ในการหล่อเย็นและควบคุมความหนาของฟิล์มพลาสติก ชุดของลูกกลิ้งประกอบด้วยลูกกลิ้งจำนวน 3 ตัว ตัวแรกบนสุดเป็นลูกกลิ้งที่มีน้ำหล่อเย็นไหลผ่าน เรียกว่าลูกกลิ้งหล่อเย็น (cooling roll) ลูกกลิ้งตัวกลางทำหน้าที่ในการบีบอัดฟิล์มพลาสติก โดยการมี

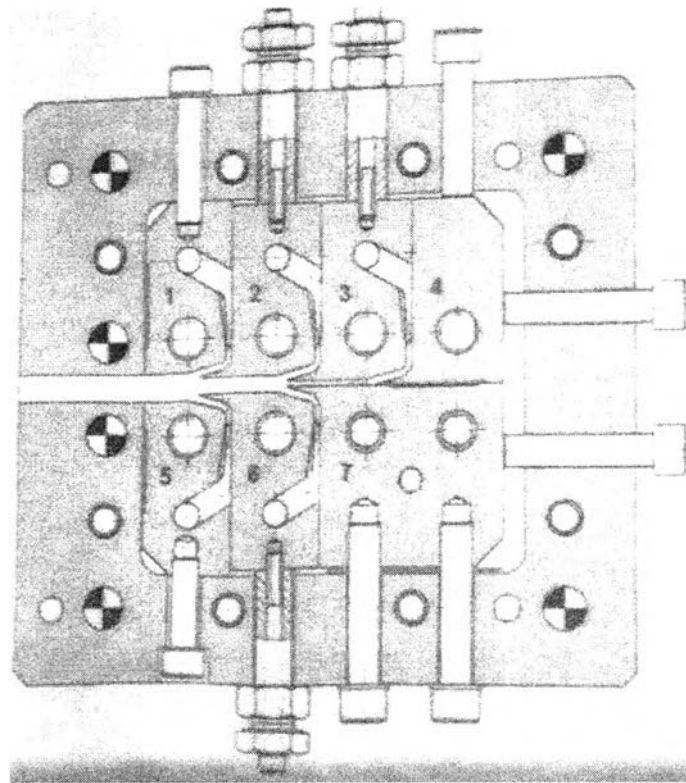
ลูกกลิ้งตัวบนและตัวล่างเป็นตัวช่วยในการบีบอัด เพื่อให้ได้ฟิล์มพลาสติกที่มีความหนาที่เหมาะสมและมีผิวเรียบ ลูกกลิ้งตัวนี้จะสัมผัสกับฟิล์มพลาสติกมากที่สุด หลังจากผ่านลูกกลิ้งตัวกลางแล้ว ฟิล์มพลาสติกจะถูกส่งต่อไปลูกกลิ้งตัวที่สามซึ่งเป็นการสิ้นสุดการหล่อเย็น หลังจากนั้นจะส่งฟิล์มพลาสติกแข็งผ่านใบมีดซึ่งทำหน้าที่ให้แผ่นพลาสติกมีผิวเรียบอีกรอบหนึ่ง ฟิล์มพลาสติกจะถูกดึงโดยลูกกลิ้งที่เคลือบผิวด้วยยางตัวบนและผิวโลหะตัวล่าง หลังจากนั้นจะส่งฟิล์มพลาสติกไปตัดตามขนาดที่ต้องการ

ตายของเครื่องอัดรีดที่นิยมใช้ในการผลิตฟิล์มพลาสติก คือตายไม้แขวนเสื้อ (coathanger sheet extrusion die) และตายรูปตัวที (center-fed T die) เนื่องจากตายทั้งสองชนิดนี้มีส่วนที่ช่วยให้พลาสติกหลอมเหลวเกิดการกระจายตัว คือทำให้พลาสติกหลอมเกิดการกระจายเป็นแผ่นบางตามลักษณะของแผ่นพลาสติกที่ทำการผลิต นอกจากนี้การมีส่วนที่ทำให้การกระจายตัว ทำให้ความเร็วของการไหลของพลาสติกหลอมที่ปากทางออกตายคงที่ตลอดหน้ากว้างของตาย ในปัจจุบันตายแบบไม้แขวนเสื้อจะได้รับความนิยมในการผลิตฟิล์มพลาสติกมากที่สุด

เนื่องจากพลาสติกหลอมไหลออกจากบาร์เรลของเครื่องอัดรีดมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก แต่ในการผลิตฟิล์มพลาสติกมีความจำเป็นต้องให้เกิดการแผ่กระจายของท่อทรงกระบอกออกเป็นแผ่นบางเต็มช่วงกว้างของตาย ดังนั้นในการออกแบบตายจึงจำเป็นต้องมีร่อง (manifolds) จำนวนมาก ซึ่งแต่ละร่องจะต้องมีความยาว (land length) และรูปทรงเรขาคณิตที่เหมาะสม ลักษณะร่องอาจเป็นร่องครึ่งวงกลมหรือร่องรูปทรงเหลี่ยมต่างๆ ทั้งนี้เพื่อให้มีการต่อต้านการไหลของพลาสติกหลอมที่ตำแหน่งต่างๆภายในตายในขณะไหลใกล้เคียงกันตลอดทุกตำแหน่ง ซึ่งถ้าการต่อต้านการไหลของตายหัวตายในทุกตำแหน่งใกล้เคียงกัน ทำให้ความเร็วของการไหล (flow velocities) ความดันในขณะไหลออก (exit pressure) อุณหภูมิของพลาสติกหลอม และการจัดเรียงตัวของโมเลกุล (molecular orientation) ของพอลิเมอร์หลอมมีค่าใกล้เคียงกันทั่วแผ่นพลาสติก ส่งผลให้แผ่นพลาสติกที่ผลิตมีสมบัติเชิงกลดีและมีสมบัติคล้ายกันตลอดทั้งแผ่น

### 2.6.3 การอัดรีดร่วม (Coextrusion) [1,9]

การผลิตแบบการอัดรีดร่วม สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ในลักษณะที่เป็นโครงสร้างคอมโพสิต โดยเป็นเทคนิคที่ทำการอัดรีดพลาสติกสองชนิดหรือมากกว่า โดยใช้เครื่องอัดรีดต่างชุดกันตามจำนวนชนิดของพอลิเมอร์ จากนั้นมีการใช้โดยผ่านหัวตายร่วมกัน เพื่อที่จะได้ให้พลาสติกเกิดการเชื่อมติดกันระหว่างชั้นพลาสติกแต่ละชนิด ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ประกอบไปด้วยพลาสติกหลายชนิดประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งวิธีนี้เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการผลิต เมื่อเทียบกับการนำชั้นพลาสติกมาเชื่อมติดกันโดยใช้วิธีอื่น และยังสามารถปรับปรุงสมบัติผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้นตามความต้องการอีกด้วย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตในลักษณะนี้ เช่นการผลิตสายไฟที่มีฉนวนหลายชั้นฟิล์มที่ใช้ในบรรจุภัณฑ์ต่างๆ โดยผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้งานของกระบวนการอัดรีดร่วมมากที่สุด คือ การผลิตฟิล์มหลายชั้น ซึ่งหากชั้นต่างๆ ของพอลิเมอร์ไม่สามารถยึดติดเชื่อมกันได้ จึงจำเป็นต้องมีการใช้สารยึด (adhesive) เข้าช่วย และเรียกชั้นนี้ว่า ชั้นกลาง (tie layer) โดยเครื่องรีดหล่อฟิล์ม (chill roll casting) เป็นเครื่องมือหนึ่งที่สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มหลายชั้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.16 แผนภาพเครื่องรีดหล่อฟิล์ม (chill roll casting)

โดยลักษณะการทำงานของเครื่องรีดหล่อฟิล์ม แบ่งออกได้เป็น 3 เอ็กซ์ทรูเดอร์ (extruder) คือ เอ็กซ์ทรูเดอร์ เอ (extruder A), เอ็กซ์ทรูเดอร์ บี (extruder B) และเอ็กซ์ทรูเดอร์ ซี (extruder C) โดยเอ็กซ์ทรูเดอร์ เอ (extruder A) และเอ็กซ์ทรูเดอร์ บี (extruder B) จะแบ่งแยกพอลิเมอร์หลอมเหลวออกจากกันได้เป็นสองช่องทางก่อนเข้าสู่ช่องหัวดาย โดยอยู่ในช่องของหมายเลข 1 กับ 5 และ 2 กับ 6 ตามลำดับ ส่วนเอ็กซ์ทรูเดอร์ ซี (extruder C) จะนำพอลิเมอร์หลอมเหลวเข้ามาสู่หัวดายในช่องของหมายเลข 3 แล้วจากนั้นพอลิเมอร์หลอมเหลวจะรวมกันออกมาผ่านหัวดาย ทำให้เครื่องรีดหล่อฟิล์มนี้สามารถผลิตฟิล์มหลายชั้นได้มากที่สุดถึง 5 ชั้น

นอกจากนี้ เครื่องรีดหล่อฟิล์มนี้สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มในแต่ละชั้นได้ โดยการใช้ความเร็วรอบของสกรูในเครื่องอัดรีดแต่ละตัว กับส่วนของลูกกลิ้งในการดึงฟิล์มออกจากหัวดาย ซึ่งสามารถดึงให้ได้ความหนาตามต้องการ

### ประโยชน์ของการอัดรีดร่วม

1. มีสมบัติเป็นสกักกันก๊าซและของเหลวเหนียวหนืดได้ดีขึ้น เหมาะที่จะใช้ในภาชนะบรรจุภัณฑ์
2. เพิ่มความแข็งแรงให้แก่ผลิตภัณฑ์
3. ลดค่าใช้จ่ายของวัสดุพอลิเมอร์หรือสารปรับแต่ง
4. ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องทำลามิเนตจึงช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตลง

### 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การปรับปรุงสมบัติของพอลิเล็กทิกแอซิดสามารถทำได้หลายวิธี เช่นการทำ โคพอลิเมอร์ระหว่างเล็กทิกแอซิดกับพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนนุ่มเพื่อลดความแข็งเปราะของ พอลิเล็กทิกแอซิด Tan และคณะ [12] ได้การทำสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมระหว่างเล็กทิกแอซิดและบิวทิลีนซัคซิเนต พบว่าพอลิเมอร์ร่วมที่ได้มีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ พอลิเล็กทิกแอซิด แต่ค่าความต้านแรงดึงและค่ามอดุลัสติงลดลง แต่การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมมีราคาสูงและมีขั้นตอนการสังเคราะห์ที่ยุ่งยาก

การเติมพลาสติกไซเซอร์ก็สามารถช่วยลดความแข็งเปราะให้แก่พอลิเมอร์ได้ Kulinski และคณะ [13] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิเล็กทิกแอซิดโดยการเติมพอลิโพรพิลีนไกลคอลเป็นสารเสริมสภาพพลาสติก พบว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Transition temperature:  $T_g$ ) ลดลงเนื่องจากสายไซโมกุลสามารถเคลื่อนไหวได้มากขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์มีความแข็งเปราะลดลง และจากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดสูงขึ้น แต่ค่าความเค้น ณ จุดครากและความเค้น ณ จุดขาดลดลงและการใช้สารเสริมสภาพพลาสติกยังมีข้อจำกัดคือสารเสริมสภาพพลาสติกสามารถแพร่ออกมาที่ผิวของวัสดุได้ ทำให้เมื่อเวลาผ่านไปวัสดุจะมีความอ่อนนุ่มลดลง

การทำพอลิเมอร์ผสมก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถปรับปรุงสมบัติของ พอลิเล็กทิกได้ โดยการผสมพอลิเล็กทิกแอซิดกับพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนนุ่ม เช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ[14]

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต[15-16] พอลิซัคซิเนตโคอะดิเพต[17] พอลิยูรีเทน [18] และ พอลิคาร์โพลิเอทิลีน [19]

การเตรียมวัสดุเชิงประกอบก็เป็นอีกวิธีที่สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของ พอลิแลกติกแอซิดได้ Krikorian และคณะ [20]ทำการศึกษาพอลิแลกติกแอซิดที่ใช้ออร์แกนอเคลย์เป็นตัวเติม โดยเปรียบเทียบผลของออร์แกนอเคลย์ทางการค้าที่ใช้ตัวตัดแปรที่แตกต่างกัน ดังรูปที่

2.17

Clay Type	Extent of Modification [meq/100g clay]	Chemical Structure of Organic Modifier
Cloisite 30B	90	
Cloisite 25A	95	
Cloisite 15A	125	

<sup>a</sup> HT is hydrogenated tallow (~65% C18; ~30% C16; ~5% C14).

รูปที่ 2.17 โครงสร้างสารที่ใช้ตัดแปรออร์แกนอเคลย์

พบว่านาโนคอมโพสิตที่ใช้ออร์แกนอเคลย์ชนิด Cloisite 30B มีการกระจายตัวของออร์แกนอเคลย์ดีกว่า โดยพบว่าการกระจายตัวแบบ Exfoliate และการเติมออร์แกนอเคลย์สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิแลกติกแอซิดได้ นอกจากนี้ Lee และคณะ [21] ได้ศึกษาการเติมออร์แกนอเคลย์ทางการค้าคือ Cloisite 10A (C10A) และ Cloisites 30B (C30B) เป็นตัวเติมในอะลิลฟาทิกพอลิเอสเทอร์พบว่าตัวอย่างที่เติม C30B ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าตัวอย่างที่เติม C10A และไม่ได้เติมตัวเติม และเมื่อตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD พบว่า C30B มีระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์มากกว่า C10A และ C30B มีการกระจายตัวแบบ Exfoliate ได้ดีใน พอลิเอสเทอร์ เนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอนิลของพอลิเอสเทอร์กับหมู่ ไฮดรอกซิลที่อยู่ใน

สารลดแรงตึงผิวที่อยู่ในแกลลอรี่ของออร์แกโนเคลย์ นอกจากช่วยเสริมแรงแล้วออร์แกโนเคลย์ยังสามารถเพิ่มช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ผสม 2 ชนิด เช่น polypropylene/polystyrene [22] และ polycarbonate/poly(methyl methacrylate)[23] เป็นต้น พบว่าออร์แกโนเคลย์ช่วยลดขนาดของพอลิเมอร์ที่เป็นดิสเพอร์สเฟสได้ และสามารถลด interfacial tension จึงช่วยเพิ่มความเข้าได้กันระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิดได้ และยังช่วยเพิ่มความต้านแรงดึงให้แก่พอลิเมอร์ผสมได้อีกด้วย

งานวิจัยของ Sinha และคณะ [17] ได้ทำการศึกษามูลของออร์แกโนเคลย์ชนิดต่างๆ ได้แก่ Cloisite 15A (C15A), Cloisite 20A (C20A), Cloisite 25A (C25A), และ Cloisite 30B (C30B) ต่อความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะติเปต พบว่าการเติม C30B สามารถลดขนาดของ disperse domain phase ได้มากที่สุด เนื่องจากตัวที่ใช้ทำการตัดแปรรออร์แกโนเคลย์มีค่า solubility parameter ใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด นอกจาก solubility parameter แล้วปัจจัยอื่นที่มีผลต่อความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ ระยะเวลาห่างระหว่างชั้นของออร์แกโนเคลย์ enthalpic interaction ระยะเวลาห่างระหว่างชั้นของออร์แกโนเคลย์ และปริมาณสารที่ใช้ในการตัดแปรรออร์แกโนเคลย์ และเมื่อศึกษาผลจาก DSC พบว่า C30B เป็น nucleating agent ที่ดีอีกด้วย นอกจากช่วยปรับปรุงสภาพเข้ากันได้และเสริมแรงแล้วออร์แกโนเคลย์ยังมีข้อดีอื่นอีก เช่น เพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน ปรับปรุงสมบัติเรืองแสง [20] เพิ่มความสามารถในการสกัดกันก๊าซให้แก่พอลิเมอร์อีกด้วย [24] และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายได้อีกด้วย [25]

Chen และคณะ [26] ได้ศึกษาการใช้ออร์แกโนเคลย์ชนิด C25A กราฟต์ด้วยไกลซิโดอกซีโพรพิลไดรเมทอกซีไซเลน เรียกว่า twice functionalized organoclay (TFC) เพื่อใช้เป็นตัวเติมเสริมแรงและใช้เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในอัตราส่วนร้อยละ 75 และ 25 โดยน้ำหนัก และเติมออร์แกโนเคลย์ในปริมาณร้อยละ 2 5 และ 10 โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาทดสอบสมบัติด้านแรงดึง พบว่าการเติมออร์แกโนเคลย์จะช่วยเพิ่มความอดุลล์ดึงให้กับพอลิเมอร์ผสม และเมื่อเปรียบเทียบ

ชนิดของออร์แกนอเคลย์ที่อัตราส่วนเท่ากันพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ TFC จะให้ค่ามอดุลัสดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เดิม C25A ในขณะที่ค่าความทนแรงดึง ณ จุดครากไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อพิจารณาพื้นฐานวิทยาด้วยเครื่องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราดพบว่าการเติม TFC จะมีขนาดของดิสเพอร์สเฟส ซึ่งก็คือพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่เดิม C25A เนื่องจากไกลซิดอกซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนที่กราฟต์บนขอบของชั้นเคลย์ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยไกลซิดอกซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนจะมีปลายด้านหนึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันและปลายอีกด้านหนึ่งเป็นหมู่ไซเลนที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่ขอบของชั้นเคลย์เกิดเป็นพันธะไซลันอล และปลายอีกด้านหนึ่งที่เป็นหมู่ฟังก์ชันสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่ไฮดรอกซิลที่ปลายสายโซ่พอลิเอสเทอร์ได้ จึงสามารถช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด