

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากในปัจจุบันพลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง จนเกิดปัญหามลพิษต่างๆ ต่อมา มีผู้วิจัยหลายท่านได้ศึกษาค้นคว้าพลาสติกชนิดใหม่ ๆ ที่ไม่เกิดมลภาวะหลังจากการใช้งานแล้ว ซึ่งพลาสติกเหล่านั้นเรียกว่า พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ในปัจจุบันได้ให้ความสนใจในการศึกษาพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มมากขึ้น โดยอ้างอิงจากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โคอะติเพท พอลิบิวทิลีน อดิเพท เทอเลฟทาเลท และพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ มีดังนี้

ในปี 2007 Amita Bhatia และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(1,4-butylene succinate), PBS) โดยการนำพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมกันที่อัตราส่วนต่างๆ โดยการผสมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-Screws Extruder) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส และศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยา (Morphological), สมบัติทางความร้อน (Thermal Properties), สมบัติการไหล (Fluid Properties) และสมบัติเชิงกล ในการศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมืออิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electronic Microscopy, SEM) จากการศึกษาพบว่าเฟสที่ได้เรียบ และทำการวิเคราะห์ค่า  $T_g$  โดยใช้เครื่อง Modulated differential scanning calorimetry (MDSC) พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่า  $T_g$  เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเติมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แต่จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมของ PLA:PBS ที่อัตราส่วน 80:20 % โดยน้ำหนักสามารถเข้ากันได้บางส่วน และพบว่าค่า Tensile Strength, Modulus และ Elongation at Break ของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต อย่างไรก็ตามค่า Tensile Strength, Modulus ของพอลิเมอร์ผสมของ PLA:PBS ที่อัตราส่วน 80:20 % โดยน้ำหนัก มีค่าใกล้เคียงกับกฎการผสมและผลของการไหลแสดงให้เห็นว่าการเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดนั้นอัตราส่วนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตต้องน้อยกว่า 20% โดยน้ำหนัก ซึ่งพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจะไปลดความเปราะของพอลิแลคติกแอซิด ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA:PBS สามารถนำมาแทนพลาสติกสำหรับการใช้งานบรรจุภัณฑ์ได้

ปี 2007 Yaming Wang และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาความเข้ากันได้ ลักษณะพื้นฐาน วิทยาและพฤติกรรมทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ระหว่างพอลิแลกติกแอซิด (PLA) และพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพท (PBSA) โดยทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยตัวทำละลายในอัตราส่วนต่างๆ และทำการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอเมทรี (DSC) และ Optical microscopy จากการศึกษพบว่า พอลิเมอร์ผสมไม่สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ โดยศึกษาจากค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และการเกิดผลึกที่อุณหภูมิไม่คงที่ จากไดอะแกรมแสดงถึงพฤติกรรมของการกระจายตัวในเมทริกซ์ของพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพท (PBSA) ในทุก ๆ อัตราส่วนผสมพบว่า กลไกการเกิดผลึกและอัตราการเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิด (PLA) ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังการเติมพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพท (PBSA) แต่เมื่อพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพท (PBSA) เป็นเมทริกซ์พบว่า อัตราการเกิดผลึกของพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพท (PBSA) ลดลงเมื่อปริมาณพอลิแลกติกแอซิด (PLA) เพิ่มขึ้น ในขณะที่กลไกการเกิดผลึกไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังการเติมพอลิแลกติกแอซิด (PLA)

ปี 2008 Shu-Ying Gu และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการหลอมและการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทีลีน อดิเพท เทอเลพทาเลท (Poly(butylene adipate terephthalate), PBAT) โดยใช้อัตราส่วนในการผสมกันคือ 100:0, 95:5, 90:10, 85:5, 80:20 และ 70:30 ทำการผสมกันด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ภายหลังจากการผสมแล้ว นำมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากลักษณะพื้นฐานวิทยาซึ่งศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA:PBAT ที่อัตราส่วน 70:30 พบว่า PBAT กระจายอยู่ระหว่างเมทริกซ์ (Matrix) ของ PLA ได้ไม่สม่ำเสมอ แต่การผสมกันของ PLA:PBAT จะเกิดการหลอมเข้ากันได้เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ PBAT เพิ่มมากขึ้น รวมทั้งค่า modulus ก็จะลดลงด้วย และเวลาในการผสมเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการเข้ากันได้มากขึ้น

ปี 2008 Naiwen Zhang และคณะ [4] ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการผสม PLA และ PBAT ในสภาวะหลอมเหลวและในสภาวะที่มี GMA ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ, โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา, สมบัติทางความร้อน และพฤติกรรมกลไกในขณะหลอมเหลว ด้วยการทดสอบการดึงยืด, ความทนทานต่อแรงกระแทก, ลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วย SEM, สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC และ ARES เมื่อเติมไกลิซิดิลเมทาคริเลต (Glycidyl methacrylate, GMA) ในปริมาณ 2 และ 5% โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA:PBAT จะเพิ่มขึ้นเมื่อเติม GMA ในปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก จากลักษณะพื้นฐานวิทยาพบว่าพอลิเมอร์ผสม

เข้ากันได้ดีขึ้นและกลไกการเกิด shear yielding ที่มากขึ้น และพบว่าพอลิเมอร์ผสมนั้นจะยังคงแยกเป็นสองเฟสและเมื่อทำการเติม GMA จะพบว่าการยึดเหนี่ยวระหว่างผิวหน้าของทั้งสองเฟสจะดีขึ้น สำหรับผลทางด้านสมบัติของการไหลพบว่า T-GMA จะช่วยเพิ่ม moduli ( $G'$ ), loss moduli ( $G''$ ) และความหนืดในแทบจะทุกๆ ความถี่ และมีแนวโน้มในการเกิด shear-thinning ลดลง แต่ในขณะเดียวกันพอลิเมอร์ผสมนั้นมีความเสถียรในสภาวะหลอมเหลวระหว่างกระบวนการขึ้นรูปดีขึ้น

ปี 2008 Francesca Signori และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์และศึกษาผลต่อการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล, โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา, และสมบัติทางกลของไฮโม่พอลิเมอร์และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PBAT ในอัตราส่วน 75:25 โดยใช้อุณหภูมิ 150-200 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PBAT จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างสายโซ่โมเลกุลภายใต้สภาวะการสลายตัวที่รุนแรงของ PLA ซึ่งจะทำให้เกิดการผสมของสายโซ่พอลิเมอร์ของ PLA และ PBAT เกิดเป็นโคพอลิเมอร์ การเพิ่มขึ้นของปริมาณโคพอลิเมอร์จะส่งผลให้การกระจายของเฟสดีขึ้นและมีความเหนียวเพิ่มขึ้น ในขณะที่การสลายตัวของ PLA ลดลง และพอลิเมอร์ผสมมีโมดูลัสสูงแต่มีการกระจายตัวของเฟส PBAT ในเมทริกซ์ของ PLA น้อย

ปี 2005 Sangmook Lee และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล การไหล และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพทด้วยเครื่องอัดรีด ในอัตราส่วน 100:0, 90:10, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 และ 0:100 ตามลำดับ จากนั้นขึ้นรูปและทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าสมบัติทางความร้อนของพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพทไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังการผสม จากการศึกษาสมบัติการไหลพบว่า อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมมีผลต่อสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลลดลงหลังจากการผสม ที่อัตราส่วน 80:20 ของ PLA:PBSA สามารถทนต่อแรงกระแทกได้สูงสุด ส่วนความเคียวจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพท และจากการศึกษาการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม พบว่าที่อัตราส่วน 80:20 ของ PLA:PBSA มีความเข้ากันได้มากที่สุด ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพท เท่ากับ 0.8 ไมครอน และทดสอบความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยจุลินทรีย์ (Biological oxygen demand,  $BOD_5$ ) พบว่าอัตราการย่อยสลายได้ทางชีวภาพสูงสุด คือ ที่อัตราส่วน 80:20 ของ PLA:PBSA

ปี 2007 Sangmook Lee คณะ [7] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของการฉายรังสีอัลตราซาวด์ (Ultrasound) ที่มีต่อพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PBAT ซึ่งพอลิเมอร์ผสม PLA:PBAT ในอัตราส่วน 50:50 ทำการผสมแบบหลอมเหลวที่มีอุปกรณ์อัลตราซาวด์ติดอยู่ และทำการวิเคราะห์

สมบัติทางความร้อน, สมบัติเชิงกล, สมบัติการไหล, โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา และความสามารถในการย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการฉายรังสีอัลตราซาวด์ จากการศึกษาพบว่าความหนืดของพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการฉายรังสีอัลตราซาวด์จะเพิ่มขึ้นและการฉายรังสีอัลตราซาวด์จะมีการเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรง โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการฉายรังสีอัลตราซาวด์จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการฉายรังสี พบว่าที่ปริมาณ PBAT 50% โดยน้ำหนักจะมีการลดลงของขนาดของเฟส ซึ่งจะมีค่ามากที่สุดเมื่อฉายรังสีเป็นระยะเวลา 30 วินาที ณ ที่เวลาการฉายรังสีอัลตราซาวด์ที่สูงขึ้น เฟสของ PBAT จะเกิดการจับตัวกัน จากการทดสอบสมบัติการดึงยืดจะพบว่า tensile stress ที่จุดแตกหักและค่ายังมอดูลัส จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการฉายรังสีอย่างเหมาะสม ซึ่งการปรับปรุงส่งผลให้เกิดการยึดเกาะกันที่ดีขึ้นระหว่างเนื้อของ PLA และ PBAT และมีการกระจายตัวที่ดีขึ้นของเฟส PBAT ด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม สมบัติด้านการดึงยืดจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมีพลังงานจากการฉายรังสีมากเกินไป ซึ่งเป็นเหตุมาจากการเกิด emulsifying effect ซึ่งจะทำให้เกิดการรวมตัวของเฟสของ PBAT ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดเมื่อเพิ่มการฉายรังสีอัลตราซาวด์ และในทุกๆ ตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีจะมีค่าความทนทานต่อแรงกระแทกมากกว่าในตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี ทั้งนี้เนื่องมาจากกลไกการแตกหักที่แตกต่างกันของการทดสอบการดึงยืดและการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก

## 2.2 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [8]

เนื่องจากอนาคตอันใกล้ มีการคาดการณ์ว่าปิโตรเลียมมีแนวโน้มจะไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาดและมีราคาสูงดังนั้นพลาสติกชีวภาพ (Bioplastics) ที่สามารถย่อยสลายได้จึงเป็นทางเลือกใหม่ในการผลิตพลาสติกทดแทนปิโตรเลียม อีกทั้งยังเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อมทั้งในด้านวัตถุดิบ กระบวนการผลิต และกระบวนการกำจัด โดยพลาสติกย่อยสลายได้นั้นผลิตมาจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ ในธรรมชาติ (Renewable Resource) ซึ่งใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำ และสามารถย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ด้วยจุลินทรีย์ใน ธรรมชาติภายหลังจากการใช้งาน โดยพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้นั้นจะมีคุณสมบัติในการใช้งานได้เทียบเท่า พลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแบบดั้งเดิม และสามารถทดแทนการใช้งานที่มีอยู่ได้

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เป็นพลาสติกที่ผลิตมาจากพืช เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น โดยมีกระบวนการผลิตจากการใช้เอนไซม์ย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลกลูโคส แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ก็จะได้เป็นเม็ดพลาสติก

ชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ หรือที่รู้จักคือ PLA (Polylactic Acid) ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถย่อยสลายได้เป็ฯก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เมื่อนำไปฝังกลบในดินหลังจากเลิกใช้งาน ด้วยเหตุนี้ ไบโอบีกรีน เวิลด์ ได้ตระหนักและเล็งเห็นถึงความสำคัญของการดูแลเอาใจใส่ต่อสุขภาพ และรักษาไว้ซึ่งสภาพแวดล้อมที่น่าอยู่เพื่อวันข้างหน้า การใช้บรรจุภัณฑ์ที่เป็นพลาสติกชีวภาพ (Bio Plastics) จึงเป็นทางเลือกใหม่เพื่อสิ่งแวดล้อมสีเขียวของเรา

## 2.2.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

สามารถแยกประเภทตามแหล่งกำเนิดได้เป็น 2 ประเภท คือ

### 2.2.1.1 มีแหล่งกำเนิดจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ

#### 1) พอลิเมอร์ที่แยกได้โดยตรงจากพืชและสัตว์

- พอลิแซคคาไรด์ เช่น แป้ง เซลลูโลส ลิกนิน และไคติน
- โปรตีน เช่น เจลาติน เคซีน กลูเทน ไหม และขนสัตว์
- น้ำมันจากพืชและสัตว์ ซึ่งปัจจุบันมีการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต

เทอร์โมเซตเรซิน เพื่อนำมาผสมกับเส้นใยธรรมชาติในการผลิตวัสดุคอมโพสิตที่มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงและมีราคาถูก

#### 2) พอลิเอสเทอร์ผลิตโดยจุลินทรีย์หรือพืชที่ได้รับการปรับปรุงสายพันธุ์ เช่น พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoates, PHAs)

#### 3) พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ที่ผลิตจากกระบวนการทางชีวภาพ เช่น พอลิแลกติกแอซิด

### 2.2.1.2 มีแหล่งกำเนิดจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี

#### 1) แอลิแฟติก พอลิเอสเทอร์ (Aliphatic polyester) เช่น พอลิไกลโกลิก แอซิด (Polyglycolic acid, PGA) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate, PBS) และพอลิคาโปรแลกโตน (Polycaprolactone, PCL)

#### 2) แอโรแมติก พอลิเอสเทอร์ (Aromatic polyester) เช่น พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate, PBS) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเทเรฟทาเรต (Polybutylene succinate terephthalate, PBST) หรือ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอะดิเพต (Polybutylene succinate adipate, PBSA)

#### 3) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinylalcohols, PVOH)

#### 4) พอลิโอเลฟินที่ผ่านการเติมแต่งทางเคมี (Modified polyolefin) เช่น การเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่ออนุมูลอิสระหรือแสงลงในพอลิโอเลฟิน เช่น พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) หรือพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เพื่อเร่งอัตราการย่อยสลายโดยแสง

(Photodegradation) หรือย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxodegradation) ก่อนเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ในขั้นตอนสุดท้าย

### 2.2.2 กลไกการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [10]

สามารถแบ่งจากกลไกการย่อยสลายของพลาสติกเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ

#### 1) การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation)

การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้างเมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีมืด หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการด้วยหมึกที่หนาмаกบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

#### 2) การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation)

โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ

#### 3) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจนและความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติม สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH) ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็วขึ้น

#### 4) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอมไธครายด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้คะตะลิสต์ (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้คะตะลิสต์ (Non-Catalytic Hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External Catalytic Degradation) และแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยคะตะลิสต์จากภายนอกมี 2 ชนิด คือ คะตะลิสต์ที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และคะตะลิสต์ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (alkaline metal) เบส (base) และกรด (acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

#### 5) การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้เอนไซม์คู่ความร้อน (endo-enzyme) หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบเอนไซม์คายความร้อน (exo-enzyme) หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือแร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (Biomass)

#### 2.2.3 การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ [10]

##### 1) การใช้งานทางการแพทย์

พลาสติกย่อยสลายได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุทางการแพทย์ เช่น ผิวน้ำหนักเทียม ยาที่ถูกออกแบบมาให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยตัวยาอย่างช้าๆ ภายในร่างกายในช่วง

ระยะเวลาหนึ่ง หรือไหมละลาย อุปกรณ์ประเภทสกรู และแผ่นตามกระดูกที่ได้รับการผ่าตัดและฝังอยู่ในร่างกายที่สามารถย่อยสลายได้เองภายหลังจากการทำหน้าที่ตามที่ได้รับ การออกแบบไว้แล้วเสร็จสิ้น ทำให้ไม่ต้องทำการผ่าตัดซ้ำเพื่อนำวัสดุที่ใช้ในการรักษาเสร็จแล้วออกจากร่างกายผู้ป่วย

## 2) สารเคลือบกระดาก หรือโฟม

ปัจจุบันมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้งานเป็นสารเคลือบกระดากสำหรับห่อแอมเบอร์เกอร์ หรือถ้วยน้ำชนิดใช้แล้วทิ้ง

## 3) ฟิล์มคลุมดิน และวัสดุสำหรับการเกษตร

ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตรเป็นอุปกรณ์ทางการเกษตรที่สำคัญในการเพาะปลูกพืชบางชนิด เช่น มะเขือเทศ ซึ่งแผ่นฟิล์มจะช่วยป้องกันการเติบโตของวัชพืช และรักษาความชื้นในดิน การใช้ฟิล์มสามารถผลิตได้จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะช่วยลดขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการไถพรวนลงดินได้โดยตรง ช่วยป้องกันการสูญเสียแร่ธาตุและสารอาหารบริเวณหน้าดินซึ่งมักเกิดขึ้นในขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์ม นอกจากนี้ยังมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญ เช่น ด้วยา ปุ๋ย สารเคมีสำหรับการเกษตร วัสดุกักเก็บน้ำสำหรับการเพาะปลูกพืชในทะเลทราย รวมถึงถุงหรือกระถางสำหรับเพาะต้นกล้า

## 4) ถุงสำหรับใส่ของ (Shopping bag)

ถุงพลาสติกและฟิล์มพลาสติกสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ได้รับความนิยมในการใช้งานมากขึ้นในปัจจุบัน ส่งผลให้มีสัดส่วนอยู่ในขยะในปริมาณสูงและยังไม่ได้ได้รับความนิยมนำกลับมารีไซเคิลมากนักเนื่องจากมีความยุ่งยากในขั้นตอนการคัดแยกและทำความสะอาด รวมถึงมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง ทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ พลาสติกย่อยสลายได้จึงเป็นพลาสติกที่มีศักยภาพในการนำมาใช้แทนพลาสติกทั่วไปเพื่อผลิตเป็นถุงและฟิล์มในบางโอกาส

## 5) ฟิล์ม และถุงสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร (Food waste film and bags)

ฟิล์มและถุงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร เหมาะสำหรับสถานที่ที่มีระบบการกำจัดขยะอินทรีย์ด้วยวิธีการคอมโพสต์ กำลังได้รับความนิยมในต่างประเทศ เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการนำมาทำคอมโพสต์พร้อมขยะอินทรีย์อื่นๆ ทำให้เกิดความสะดวกไม่ต้องแยกทิ้ง ปัจจุบันมีความต้องการใช้ถุงพลาสติกย่อยสลายได้สูงขึ้นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในหลายเมืองของประเทศอิตาลี ได้ใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหารตั้งแต่ปี ค.ศ. 1998 โดยมีบริษัท Novamont ซึ่งเป็นผู้ผลิตหลักให้กับประเทศในสหภาพยุโรป ทำการผลิตถุงย่อยสลายได้ในสภาวะคอมโพสต์ 10,000 ตันต่อปี ถุงที่ผลิตขึ้นนี้สามารถย่อย



สลายได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 8-10 สัปดาห์ภายใต้สภาวะการหมักในโรงงานคอมโพสท์เชิงอุตสาหกรรม

#### 6) บรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค (Consumer packaging materials)

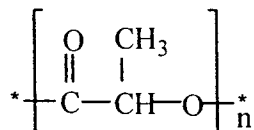
ศักยภาพหนึ่งในการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ การใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ ซึ่งตามปกติการใช้บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากพลาสติกทั่วไปมักไม่ได้รับความนิยมนำกลับมารีไซเคิลมากนัก เนื่องจากการปนเปื้อนสูง ทำให้ไม่สะดวกต่อการเก็บและทำความสะอาด การนำพลาสติกย่อยสลายได้มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร เช่น ถาดย่อยสลายได้สำหรับอาหารสำเร็จรูปและอาหารจานด่วน จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาด้านการจัดการขยะบรรจุภัณฑ์ลงได้

#### 7) โฟมเม็ดกันกระแทก (Loose fill)

โฟมเม็ดกันกระแทก (loose fill) โดยทั่วไปผลิตจากพอลิสไตรีน (PS) เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านการขนส่งสินค้า มีข้อดี คือ มีความยืดหยุ่นสามารถป้องกันสินค้าจากแรงกระแทกระหว่างการเคลื่อนย้ายและขนส่งได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบาทำให้การขนส่งสินค้าเป็นไปได้อย่างสะดวกและประหยัดเชื้อเพลิง แต่ปัญหาคือ พอลิสไตรีน เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยากและใช้เนื้อที่ในการจัดเก็บเพื่อการกำจัดสูง ในกรณีที่ต้องกำจัดด้วยการฝังกลบต้องใช้เนื้อที่ในบ่อฝังกลบมาก แม้ว่าจะนำมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้แต่ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากนัก ปัจจุบันมีการพัฒนาการผลิตโฟมเม็ดกันกระแทกจากแป้งและพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่ละลายน้ำและย่อยสลายได้ทางชีวภาพขึ้น ทำให้ง่ายต่อการใช้งานและสะดวกในการกำจัดเมื่อสิ้นสุดการใช้งานแล้ว

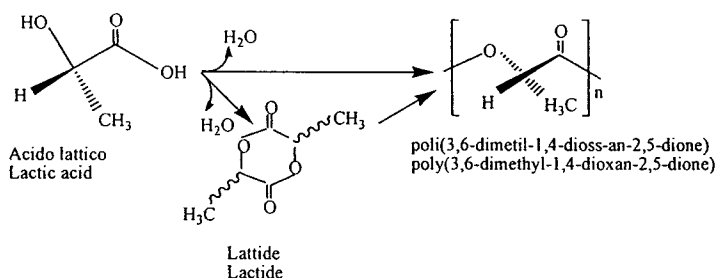
### 2.3 พอลิแลกติกแอซิด [9]

พอลิแลกติกแอซิด เป็นพอลิเอสเทอร์แบบกึ่งผลึกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีสมบัติเชิงกลสูงเทียบเท่าพลาสติกทางการค้า เช่น พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) และเทอร์โมพลาสติกชนิดอื่นๆ พอลิแลกติกแอซิดผลิตจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) โดยใช้กรดแลกติก (Lactic Acid) เป็นมอนอเมอร์ กรดแลกติกเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหมักผลผลิตทางการเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น มันสำปะหลัง อ้อย ข้าวโพด ข้าวสาลี และหัวบีท โดยใช้จุลินทรีย์เปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นกรดแลกติก แล้วนำมาผ่านกระบวนการสังเคราะห์เป็นพอลิแลกติกแอซิด ซึ่งมีกรรมวิธี เช่น การสังเคราะห์โดยใช้กระบวนการควบแน่นได้พอลิแลกติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้แสดงดังโครงสร้างในรูปที่ 2.1



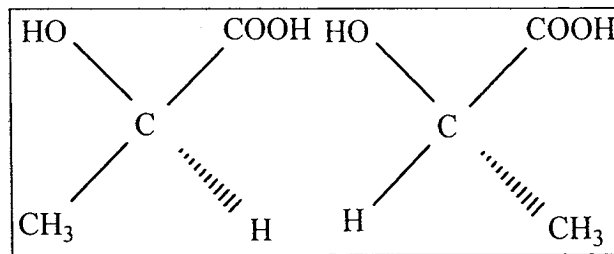
รูปที่ 2.1 สูตร โครงสร้างของพอลิแลกติกแอซิด

กระบวนการที่ใช้ในปัจจุบันคือ กระบวนการสังเคราะห์แบบเปิดวงแหวนแลกไทด์ (Lactide) แสดงดังโครงสร้างในรูปที่ 2.2 โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาได้พอลิแลกติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 100,000 และมีสมบัติที่ดี สามารถนำไปใช้งานในด้านต่างๆ ได้



รูปที่ 2.2 กระบวนการสังเคราะห์ PLA แบบเปิดวงแหวนแลกไทด์

เนื่องจากอะตอมของคาร์บอนบนโมเลกุลของแลกติกแอซิดมีสมบัติไคเรล (Chiral) แลกติกแอซิดจึงมีการจัดโมเลกุล 2 แบบ คือ L-Lactic Acid HOของสาเซลเซียส-C(OH)H(CH<sub>3</sub>) และ D-Lactic Acid, HOของสาเซลเซียส-C(OH)(CH<sub>3</sub>)H เมื่อนำมาใช้ในการสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิด จะทำให้พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ (1) Poly(L-Lactic Acid) PLLA (2) Poly(D-Lactic Acid), PDLA และ (3) Poly(LD-Lactic Acid), PLDLA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์แบบ L, แบบ D และแบบผสม ตามลำดับ แสดงดังโครงสร้างในรูปที่ 2.3 พอลิเมอร์สองแบบแรกนี้มีสมบัติทางเคมีและกายภาพเหมือนกันคือ เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก มีความเป็นผลึกอยู่ประมาณ 37% มีอุณหภูมิสถานะกลายแก้ว 50 – 80 องศาเซลเซียส มีจุดหลอมเหลวผลึก 173 – 278 องศาเซลเซียส ในขณะที่พอลิแลกติกที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ผสม มีสมบัติเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน โดยอัตราส่วนระหว่าง L/D ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของพอลิเมอร์ด้วย กรณีที่อัตราส่วน L:D = 1 พอลิเมอร์จะมีสมบัติเชิงกลต่ำและเมื่อ L:D เพิ่มขึ้น ความเป็นผลึกและจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุล D และ L ของแลกติกแอซิด [9]

### 2.3.1 สมบัติของพอลิแลกติกแอซิด

PLA มีลักษณะใส มีความแวววาวสูงและใส ซึ่งอาจขึ้นอยู่กับสารเติมแต่งด้วย PLA มีสมบัติทางกล และสามารถนำไปใช้งานได้เช่นเดียวกับพอลิเมอร์พื้นฐานทั่วไปมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก

PLA สามารถกักกันกลิ่น และรสชาติได้ดี มีความต้านทานต่อน้ำมัน และไขมันสูง ในขณะที่ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำสามารถแพร่ผ่านได้ดี มีความคงทนต่อการกระแทก (impact strength) ต่ำ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ PVC ที่ไม่มีการเติมสารเสริมสร้างพลาสติก และความแข็งแรง ความคงทนต่อการกระแทก และความยืดหยุ่น ใกล้เคียงกับ PET นอกจากนี้ PLA ยังมีสมบัติใกล้เคียงกับ PS และสามารถนำไปดัดแปรให้มีสมบัติใกล้เคียงกับ PE หรือ PP ดังนั้น PLA จึงสามารถนำไปปรับปรุงสมบัติพื้นฐานทั้งด้านการขึ้นรูปและการใช้งานได้เช่นเดียวกับพลาสติก โอลิฟินส์ที่ผลิตจากระบวนการทางปิโตรเคมี

### 2.3.2 การใช้งานพอลิแลกติกแอซิด [9]

PLA เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีสมบัติทางความร้อนและทางกลสูงกว่า PHB และ PCL โดยมีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) และ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลท (Polyethylene Terephthalate, PET) ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติกที่ขึ้นรูปได้ง่ายโดยกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกต่างๆ เช่น การฉีดขึ้นรูป การอัดรีดเป็นแผ่น การเป่าเป็นฟิล์ม การเทอร์โมฟอร์ม และการปั่นหลอมเส้นใย PLA มีศักยภาพในการนำมาใช้งานด้านเส้นใย สิ่งทอ และผ้าชนิดไม่ถักไม่ทอ (Non-woven) มีสมบัติจับจีบและคงรูปได้ดี เชื่อมติดกันด้วยความร้อน มีความทนทานต่อแสงยูวี ทำให้สีของเส้นใยซีดช้า มีสมบัติติดไฟ และการเกิดควันต่ำ เหมาะสำหรับใช้ทำเสื้อผ้าและงานตกแต่ง ผ้าคลุมพื้น ผ้าใบ นอกจากนี้ PLA เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติหลากหลายทำให้สามารถนำไปประยุกต์เป็นพลาสติกมูลค่าเพิ่มต่างๆหลายด้าน ได้แก่

- ด้านการแพทย์ เนื่องจาก PLA เป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable) สามารถเข้ากับเนื้อเยื่อ (Biocompatible) และสามารถถูกดูดซึม (Bioresorbable) ได้โดย

ระบบชีวภาพ (Biological system) ในร่างกาย จึงทำให้ PLA เป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงสำหรับงานทางการแพทย์ และถูกนำมาใช้ทางด้านนี้มานานกว่า 2 ทศวรรษ เช่น ไหมเย็บแผล (Sutures) ตัวเย็บแผล (Staples) วัสดุปิดแผล (Wound dressing) อุปกรณ์ฝังในร่างกาย (surgical implants) อุปกรณ์สำหรับยึดกระดูก (Orthopedic fixation devices) วัสดุสำหรับนำพาหรือปลดปล่อยตัวยา ซึ่งสามารถควบคุมอัตราและระยะเวลาในการปลดปล่อยยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

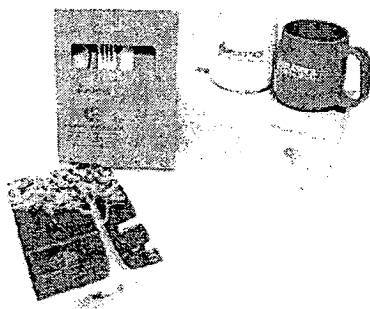
- ด้านการเกษตร เช่น ภาชนะปลูกพืช วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือปุ๋ยตามช่วงเวลาที่กำหนด

- ด้านบรรจุภัณฑ์ เช่น บรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง ภาชนะบรรจุอาหาร ขวดน้ำ ถังพลาสติก กล้องโฟลัม फिल्मสำหรับหีบห่อ เม็ดโฟมกันกระแทก ตัวเคลือบภาชนะกระดาษ

- ด้านเส้นใย และแผ่นผ้าแบบ Non-woven เช่น ผลิตภัณฑ์อนามัย ผ้าอ้อมสำเร็จรูป เสื้อผ้าและเครื่องนุ่งห่ม เส้นใยสำหรับบรรจุในเครื่องนอน

- ด้านยานยนต์ เช่น อุปกรณ์ลดแรงกระแทก (Bumpers) แผ่นรองพื้น (Floor mats) และอุปกรณ์ตกแต่งภายใน

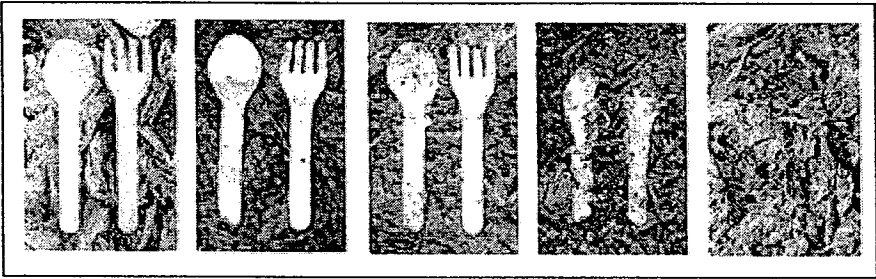
นอกจากนั้นด้านบรรจุภัณฑ์ PLA ได้ถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับของใช้และอาหาร รวมถึงขวดบรรจุน้ำดื่ม เช่น บริษัท BIOTA Brands of America นำ PLA Naturework™ มาใช้ผลิตขวดสำหรับบรรจุน้ำดื่มเป็นเจ้าแรก มีสมบัติใกล้เคียงกับขวด PET สามารถย่อยสลายได้ 100% ในสถานะของโรงหมักปุ๋ยอินทรีย์ โดยใช้เวลาในการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ ภายในเวลา 75-80 วัน หรือประมาณ 12 สัปดาห์ และได้รับการรับรองการย่อยสลายจากสถาบัน The Biodegradable Products Institute (BPI) และได้รับการรับรองจากสถาบัน The Food and Drug Administration (FDA) ว่ามีความปลอดภัยสำหรับใช้บรรจุอาหารและเครื่องดื่ม แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพที่ผลิตขึ้น [8]

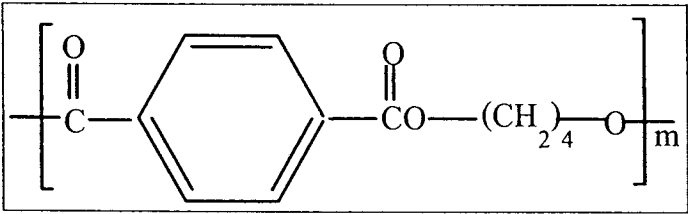
2.3.3 การย่อยสลายของพอลิแลกติกแอซิด [9]

พอลิแลกติกแอซิด ย่อยสลายได้ทางชีวภาพในสภาวะคอมโพสท์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีการย่อยสลายแบ่งออกเป็น 2 ระยะ คือ เกิดการย่อยสลายผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสที่พันธะเอสเทอร์ของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ถูกตัดสั้นลงจนมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ในขั้นตอนนี้พลาสติกจะมีสมบัติที่แตกหักเป็นชิ้นเล็กๆ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำลงจะถูกย่อยสลายต่อโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ได้ง่าย เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและมวลชีวภาพ แต่พอลิแลกติกแอซิด ย่อยสลายได้ไม่ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ 60 องศาเซลเซียส ดังนั้นวิธีการที่ดีที่สุดในการกำจัดพอลิแลกติกแอซิด ภายหลังจากการใช้งานคือ ส่งไปยังโรงคอมโพสท์ หรือ โรงหมักปุ๋ยอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนพร้อมกับขยะอินทรีย์อื่นๆ ไม่ควรส่งไปกำจัดโดยการฝังกลบ ดังนั้นในสถานที่ที่จะมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยเฉพาะพอลิแลกติกแอซิด มาใช้งาน ควรส่งเสริมให้มีการลงทุนสร้างโรงคอมโพสท์และมีระบบการคัดแยกขยะอินทรีย์ที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพจะช่วยลดปริมาณขยะบรรจุภัณฑ์ขยะอินทรีย์ และของเสียจากภาคการเกษตรที่จะต้องส่งไปกำจัดโดยการฝังกลบได้อีกทางหนึ่ง



รูปที่ 2.5 ลักษณะการย่อยสลายของพอลิแลกติกแอซิดที่เกิดขึ้น [11]

2.4 พอลิบิวทิลีน อดิเพท เทอเลฟทาเลท (Poly(butylene adipate terephthalate), PBAT) [12]



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของพอลิบิวทิลีน อดิเพท เทอเลฟทาเลท

พอลิบิวทิลีน อดิเพท เทอเลฟทาเลทเป็นโคพอลิเมอร์ของพอลิเอสเทอร์ทั้งแบบที่เป็น Aliphatic และ Aromatic ซึ่งมี 1,4-butanediol, adipic acid และ terephthalic acid เป็นมอนอเมอร์หลักและเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ สามารถเข้ากันได้เป็นอย่างดีกับพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพอื่นๆ ด้วยกัน เช่น ในการผสมแบบแห้งกับ พอลิแลกติกแอซิด, Biodegradable aliphatic polyesters หรือ Starch compounds มีการนำไปใช้พัฒนาเป็นฟิล์มที่มีความยืดหยุ่นโดยใช้กระบวนการเป่าฟิล์มหรือการหล่อฟิล์ม ตัวอย่างการนำไปใช้งาน เช่น ฟิล์มสำหรับบรรจุภัณฑ์ ฟิล์มที่ใช้ในงานเกษตรกรรม และถุงที่สามารถย่อยสลายได้

ลักษณะโดยทั่วไป คือ

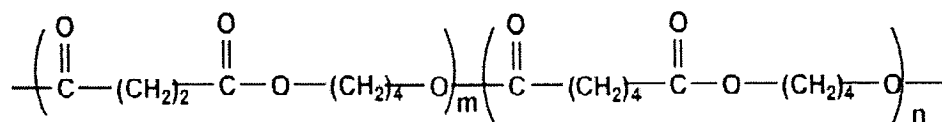
- มีจุดหลอมเหลวประมาณ 110-120 องศาเซลเซียส
- มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูง
- อัตราการทะลุผ่านของไอน้ำสามารถควบคุมได้
- สามารถทนความร้อนได้ดีถึง 230 องศาเซลเซียส
- มีลักษณะโปร่งแสง จนถึงทึบแสง มีโครงสร้างแบบ semi-crystalline
- สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าฟิล์มได้ดี
- สามารถเชื่อมและสามารถพิมพ์ได้

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของพอลิบิวทิลีน อดิเพท เทอเลฟทาเลท เทียบกับ

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE)

| Properties                         | Unit              | PBAT      | LDPE        |
|------------------------------------|-------------------|-----------|-------------|
| Density                            | g/cm <sup>3</sup> | 1.25-1.27 | 0.922-0.925 |
| Melt Flow Index<br>190 °C, 2.16 kg | ml/10 min         | 2.5-4.5   | 0.8-1.2     |
| Melt Point                         | องศาเซลเซียส      | 110-120   | 111         |
| Shore D hardness                   | -                 | 32        | 48          |
| Vicat VAT A/50                     | องศาเซลเซียส      | 80        | 96          |

## 2.5 พอลิไบวรีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพท (poly[(butylenesuccinate)-co-adipate]), (PBSA)



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของพอลิไบวรีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพท

พอลิไบวรีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพท (PBSA) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ การผสมไม่เพียงแต่จะพัฒนาสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติก แต่ยังช่วยลดการดูดซับความชื้นและการหดตัวขณะขึ้นรูปอีกด้วย

### 2.5.1 คุณสมบัติของพอลิไบวรีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพท (PBSA)

เป็นเทอร์โมพลาสติก แสดงโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.7 มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับพอลิแลคติกแอซิด (PLA) พอลิไบวรีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพท (PBSA) มีสมบัติเชิงกลสูง มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าพอลิแลคติก (PLA) สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ดี ทนความร้อนได้ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยไม่เสียสภาพ และสามารถย่อยสลายได้พอลิไบวรีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพท (PBSA) สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ในเวลา 8 สัปดาห์ และพบว่าการเติมแป้งร้อยละ 5 ลงในพอลิไบวรีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพท (PBSA) จะทำให้พลาสติกถูกย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิไบวรีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพท (PBSA) อย่างเดียว จะเกิดการย่อยสลายโดยผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่รวดเร็วและตามด้วยการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์แต่พอลิไบวรีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพท (PBSA) ไม่ทนต่อสภาวะที่มีความชื้นได้ต่ำ

### 2.5.2 การนำไปใช้งานของพอลิไบวรีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพท (PBSA)

นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแผ่นพลาสติก และทำการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์ม (Thermoform) เพื่อผลิตเป็นภาชนะบรรจุประเภทบิสกิต หรือฟิล์มพลาสติก การย่อยสลายทางชีวภาพจะเริ่มจากการย่อยสลายโดยผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งเกิดขึ้นที่พันธะเอสเทอร์ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลต่ำลง จึงเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในขั้นตอนต่อไป แผ่นฟิล์มพอลิไบวรีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพทสามารถนำไปใช้แทน PET PP LDPE HDPE PS พอลิโอลิฟินส์และพอลิแลคติกแอซิด นอกจากนี้พอลิไบวรีลีนซัคซิเนต โคอะดิเพทถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างมากมาย เช่น หลอดฉีดยา ผลิตภัณฑ์ใช้ครั้งเดียวทิ้ง ฟิล์มบรรจุภัณฑ์และอาหาร ขวดน้ำผลิตภัณฑ์อนามัย เบาะโฟม สารเสริมสร้างพลาสติกแบบ Non-migrating รวมไปถึงวัสดุที่ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรม เช่น ส่วนประกอบและชิ้นส่วนตกแต่งภายในยานยนต์ เป็นต้น

## 2.6 พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend) [13]

การทำพอลิเมอร์ผสม เป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ (Polymer) ที่นิยมใช้กันมาก โดยการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ เป็นสารละลาย (Solution) หรือ สารหลอมเหลว (Molten) มาผสมให้อยู่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Blending) ได้เป็นพอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend) ซึ่งมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันนั้น โดยธรรมชาติแล้วจะเป็นไปได้ยาก ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จึงไม่เป็นสารละลายของแข็งที่แท้จริง และพบว่าเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะกระจายอยู่ในเนื้อหรือเมทริกซ์ที่ต่อเนื่อง (Continuous matrix) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ทั้งนี้การกระจายตัวดังกล่าวต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ มิฉะนั้นจะทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่อง (Defects) ของผลิตภัณฑ์และส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงสภาพเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันซึ่งบางชนิดสามารถเข้ากันได้ดี บางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้ เนื่องจากโครงสร้างสายโซ่ต่างกันจึงไม่สามารถกระจายตัวอย่างอิสระเกิดการแยกชั้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยทางพลังงาน (Energy factor) ที่ทำให้พอลิเมอร์ 2 ชนิดเข้ากันไม่ได้ นั่นคือพลังงานที่ใช้ในการผสมผสาน โมเลกุลหรือสายโซ่ของพอลิเมอร์ เช่น การดูดกลืนพลังงานความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่ต่างกัน

### 2.6.1 กลไกสภาพเข้ากันได้ (Compatibility Mechanism)

พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่จะให้สมบัติที่ค่อนข้างต่ำโดยเฉพาะสมบัติทางกล ทั้งนี้เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำและความเค้นสะสม (Stress concentration) จากดิสเพอร์ส (Disperse) ในเมทริกซ์ (Matrix) ดังนั้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ในการผสม จึงนิยมใช้สารช่วยผสมหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผสม (In-situ chemical reaction) เพื่อปรับปรุงแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมเพื่อให้ได้โครงสร้างสัณฐานวิทยาและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เหมาะสม

### 2.6.2 วิธีการผสมเพื่อความเข้ากันได้ (Method of compatibilization)

เทคนิคที่ใช้ในการผสมเพื่อความสามารถในการเข้ากันได้ และทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติตามต้องการนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีอาจมีความเกี่ยวข้องกัน ดังนั้นการเลือกใช้ขึ้นกับผู้ผลิตเป็นหลัก โดยจะพิจารณาจากต้นทุนเป็นสำคัญ เทคนิคเหล่านี้คือ

- 1) การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Addition of block copolymers or graft copolymers) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ บล็อกโคพอลิเมอร์ (Block copolymers) จะได้รับความนิยมมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์ (Graft copolymers) โดยเฉพาะบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกของ พอลิเมอร์ที่



เหมือนกันกับพอลิเมอร์ แต่ละชนิดที่นำมาผสมกันโดยโคพอลิเมอร์ (Copolymers) ที่ใช้ต้องมีโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมที่จะไปอยู่ระหว่างเฟส (Phase) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด โครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการเป็นสารช่วยผสมจากการตรวจสอบประสิทธิภาพของสารช่วยผสม (Compatibilizer) โดยการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- บล็อกโคพอลิเมอร์ (Block copolymers) มีประสิทธิภาพมากกว่ากราฟต์ โคพอลิเมอร์ (Graft Copolymers)
- ไคบล็อกโคพอลิเมอร์ (Di-block copolymers) มีประสิทธิภาพมากกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ (Tri-block copolymers)
- ไคบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวลดหลั่นลงมามีประสิทธิภาพสูงกว่าไคบล็อกโคพอลิเมอร์ ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวเท่ากัน

2) การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (Addition of functional/reactive polymers)

การเติมพอลิเมอร์ ที่มีหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) เพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม (Compatibilizer) บ่อยครั้งเป็นการนำพอลิเมอร์ ชนิดใดชนิดหนึ่งที่จะทำการผสมมาดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาโดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาหรือมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไอออนิก (Ionic bond) กับพอลิเมอร์ชนิดที่สองได้ กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชัน สามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์หรือโดยผ่านกระบวนการอัดรีด เช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) ที่กราฟต์บนสายโซ่ของพอลิโอเลฟินส์ โดยหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic group) ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่อะมิโน (Amino group) ของพอลิเอไมด์ (Polyamide) ได้ ทั้งนี้พอลิโอเลฟินส์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polyolefin graft maleic anhydride) จัดเป็นสารช่วยผสม (Compatibilizer) ที่ได้รับความนิยมในทางการค้าและมีราคาไม่แพงนัก

3) การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ไครเซชันในระหว่างการผลิต (In-situ grafting polymerization) การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ไครเซชัน ในระหว่างการผลิตหรือ Reactive blending เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันได้ โดยต่างจากวิธีอื่นๆ ก็คือองค์ประกอบที่ทำการผสมจะถูกนำมาดัดแปลงเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสม ตัวอย่างเช่น การผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) กับพอลิเอสเทอร์ (Polyester) แม้ว่าในบางครั้งการผลิต

แบบไม่ต่อเนื่องสามารถนำมาใช้กับการผสมแบบ Reactive blending ได้แต่การใช้กระบวนการผสมแบบต่อเนื่อง เช่น การอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single-screw extruder) และการอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twins-screw extruder) ก็ได้รับความนิยมเช่นกันเพราะกระบวนการดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิและสิ่งที่ไม่ต้องการจากดำเนินไปของปฏิกิริยาได้ดีกว่ากลไกในการเกิดปฏิกิริยาในการผสมอาจมีได้ดังนี้

- เกิดกราฟต์หรือบล็อกโคพอลิเมอร์ (Graft or block copolymers) จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีในพอลิเมอร์ ซึ่งอาจกระตุ้นได้โดยการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ในระหว่างการผสม
- เกิดบล็อกโคพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยน (Interchange reaction) ที่สายโซ่โมเลกุลหลักของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดกับพอลิเมอร์ชนิดควบแน่น
- เกิดการขาดและรวมกันใหม่ของแต่ละ โมเลกุลเพื่อสร้างบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดภายใต้ภาวะที่แรงเฉือนสูงส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

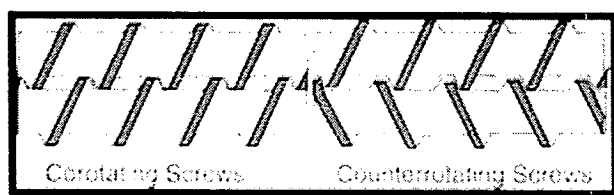
## 2.7 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin screw extruder) [14]

เครื่องอัดรีดสกรูคู่ เป็นเครื่องมือที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในแง่การผลิต, การผสมและการควบคุมความร้อนแก่วัตถุดิบที่ผ่านเครื่องอัดรีดได้มากกว่าการใช้เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว

เครื่องอัดรีดสกรูคู่ หมายถึง เครื่องอัดรีดใดๆ ที่มีสองสกรูอยู่ภายในกระบอกความร้อนอันเดียวกัน เครื่องอัดรีดสกรูคู่นี้แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบใหญ่ๆ คือ

- แบบเกลียวสกรูหมุนตามกัน (Co-rotating screw)
- แบบเกลียวสกรูหมุนสวนกัน (Counter rotating screw)

เครื่องอัดรีดทั้งสองแบบนี้สามารถแบ่งออกได้อีก 2 ลักษณะคือ สกรูที่มีลักษณะเกลียวสอดเข้าหากัน (Intermeshing) และสกรูที่มีลักษณะเกลียวไม่สอดเข้าหากัน (Non-Intermeshing)



รูปที่ 2.8 แบบเกลียวสกรูภายในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ [14]

### 2.7.1 เครื่องอัดรีดแบบหมุนตามกัน

เครื่องอัดรีดแบบหมุนตามกัน คือ เครื่องอัดรีดที่มีการหมุนของสกรูไปในทิศทางเดียวกัน โดยอาจจะเป็นการหมุนตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เครื่องอัดรีดแบบนี้จะไม่มีการสะสมของวัสดุคิบบที่รอบๆ สกรูและจะมีความดันภายในต่ำกันตลอดทั้งเกลียวสกรู โดยเครื่องอัดรีดแบบนี้จะไม่มีความอัดไปกระทำกับวัสดุคิบบในสกรูมากนัก ซึ่งผลที่ได้ อาจทำให้เกิดความร้อนสะสมที่สูงเกินไปเนื่องจากไม่มีแรงดันที่จะดันวัสดุคิบบให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้า แต่จะทำให้วัสดุคิบบเกิดการหลอมเหลวและหมุนวนอยู่ภายในร่องเกลียวสกรู และเกิดการเสียดสีกับกระบอกให้ความร้อนตลอดเวลา ดังนั้นความเร็วของการหมุนของสกรูจึงมีผลไม่มากนัก ต่ออัตราการผลิตจะขึ้นอยู่กับอัตราการเติมวัสดุคิบบลงไปเครื่องอัดรีด

### 2.7.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูหมุนสวนกัน

เครื่องอัดรีดแบบสกรูหมุนสวนกัน คือ เครื่องอัดรีดที่มีการหมุนของสกรูในทิศทางตรงกันข้าม เครื่องอัดรีดแบบนี้จะเกิดแรงบีบอัดแก่วัสดุคิบบสูงมากกว่าในเครื่องอัดรีดที่มีการหมุนตามกัน ปริมาณการผลิตที่ได้จะขึ้นอยู่กับอัตราการหมุนของสกรู ดังนั้นเครื่องอัดรีดแบบนี้จึงเหมาะสมกับวัสดุคิบบที่มีการว่องไวต่อความร้อน เนื่องจากวัสดุคิบบจะมีการเคลื่อนที่ผ่านออกไปยังปลายสกรูอย่างรวดเร็วโดยมีแรงเฉือน (Shearing action) ต่ำกว่าในเครื่องอัดรีดแบบหมุนตามกัน

## 2.8 เทคนิคการอัด (Compression Molding) [15]

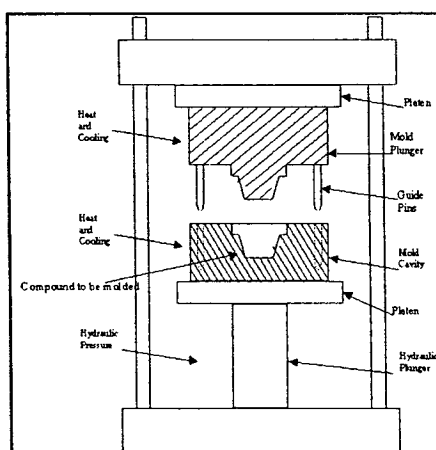
เทคนิคการอัด เป็นเทคนิคการแปรรูปพอลิเมอร์เทคนิคหนึ่ง แต่ยังมีการใช้ในการแปรรูปพลาสติกอย่างกว้างขวาง ในปัจจุบันนิยมใช้เทคนิคนี้ในการอัดเข้าพลาสติกกลุ่มเทอร์โมเซต (Thermo set) และยาง (Rubbers) นอกจากนี้ยังใช้เทคนิคนี้ ในการแปรรูปเทอร์โมพลาสติกที่ทำการแปรรูปโดยเทคนิคอื่นได้ยาก เช่น การแปรรูปเทอร์โมพลาสติกที่มีการผสมไฟเบอร์ชนิดต่าง ๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Fiber Glass) และเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) เป็นต้น นอกจากนี้การแปรรูปพอลิเมอร์ในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomers) นิยมใช้การอัดในการแปรรูป

### 2.8.1 การอัดขึ้นรูป (Compression Molding)

การใช้เครื่องอัดในการแปรรูปพอลิเมอร์เริ่มประมาณตอนเมื่อต้นศตวรรษที่ 19 โดยนักอุตสาหกรรมชื่อ Thomas Hancock เซลเซียส ใช้ในการอัดเข้ายาง กระบวนการแปรรูปพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการอัด จดลิขสิทธิ์ครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1870 โดยนักวิทยาศาสตร์ 2 คน ชื่อ John Wealey Hyatt และ S.Hyatt กระบวนการแปรรูปโดยการอัด

ประยุกต์ใช้กับพลาสติกเป็นครั้งแรก หลังจาก Bakeland ค้นพบวิธีการสังเคราะห์เรซินฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ ในปี ค.ศ. 1908 ในปัจจุบันกระบวนการแปรรูปนี้ ยังคงใช้กับการแปรรูปพลาสติกกันอย่างกว้างขวาง

ในเทคนิคการอัดใช้เครื่องอัดที่ไม่มีการขับเคลื่อน ส่วนประกอบหลักของเครื่องคือแผ่นเหล็กอัด (Platens) จำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้อีกแผ่นหนึ่งจะถูกยึดติดกับที่ ทำให้สามารถทำการปิดและเปิดเข้าได้เนื่องจากเข้าถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กทั้งสองแผ่นนี้ ส่วนประกอบอื่น ๆ คืออุปกรณ์ให้ความร้อน ระบบไฮดรอลิก และอาจเป็นอุปกรณ์หล่อเย็น ลักษณะเครื่องที่ใช้แปรรูปพลาสติกโดยการอัด แสดงดังรูปซึ่งอุปกรณ์ประกอบชนิดต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 2.9 ลักษณะของเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) [15]

## 2.9 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

### 2.9.1 การทดสอบค่าดัชนีการไหล (Melt flow index, MFI) ตามมาตรฐาน ASTM D1238

การทดสอบค่าดัชนีการไหล คือ การหาปริมาณเป็นกรัมของพลาสติกหลอมเหลวที่ไหลผ่านหัวคายซ์ภายใต้ Specific weight ซึ่งมีหน่วยเป็นอุณหภูมิที่กำหนดภายในเวลา 10 นาที ค่าที่ได้จากการทดสอบของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีค่าที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดกับน้ำหนักของพอลิเมอร์

- ค่าดัชนีหลอมเหลวสูง = การไหลของพอลิเมอร์สูง = สายโซ่โมเลกุลสั้น =  $M_n$  ต่ำ
- ค่าดัชนีหลอมเหลวดำ = การไหลของพอลิเมอร์ต่ำ = สายโซ่โมเลกุลยาว =  $M_n$  สูง

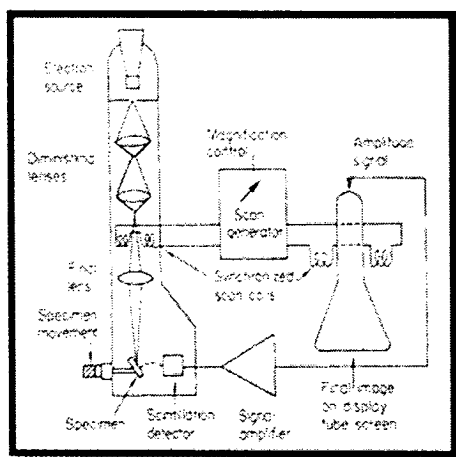
เครื่องมือที่ใช้วัดจะประกอบด้วยโลหะแข็งทรงกระบอก มีอุปกรณ์ควบคุมและปรับอุณหภูมิได้ (โดยทั่วไปในช่วง 125 องศาเซลเซียส – 300 องศาเซลเซียส + 0.5 องศาเซลเซียส) โดยกระบอกโลหะจะใช้บรรจุพอลิเมอร์ที่ต้องการทดสอบและส่วนล่างของกระบอกจะมี Capillary die ติดอยู่ใน

การทดสอบจะวางแท่งลูกสูบกดอัดพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านหัวคายซ์ออกมา ซึ่งพอลิเมอร์ที่ออกมาจะถูกตัดเป็นช่วงๆ ตามเวลาที่ได้กำหนด โดยปกติการหาค่า MFI จะหาได้จากน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ไหลออกมาในเวลา 600 วินาที (10 นาที)

ค่า MFI ในบางกรณีใช้เพื่อเป็นตัวแยกชนิดของพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการผลิตหรืออาจใช้สำหรับการควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบเบื้องต้นได้ นอกจากนี้แล้วค่า MFI นี้ยังเป็นค่าซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการไหลของพลาสติกในเบื้องต้นว่าพลาสติกที่นำมาหลอมนั้นมีสมบัติทางด้าน Melt strength เป็นอย่างไร แต่โดยปกติเมื่อให้แรงอัดพลาสติกออกมาเป็นเส้นแล้วไม่เกิดการขาด แสดงว่ามี Melt strength ดี

## 2.9.2 การทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยา [16]

2.9.2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope ; SEM) ตามมาตรฐานASTMD



รูปที่ 2.10 องค์ประกอบของเครื่อง SEM [16]

### หลักการทำงานของเครื่อง SEM

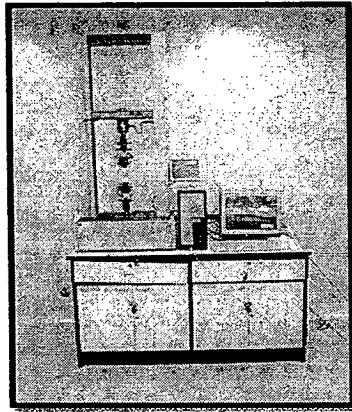
สิ่งสำคัญอันดับแรกของเครื่อง SEM คือลำอิเล็กตรอนต้องเป็นลำแสงที่มีพลังงานเดียว (ความยาวคลื่นเดียว) การออกแบบป็นอิเล็กตรอนที่ใช้กับเครื่อง SEM เหมือนกับในเครื่อง TEM คือมีขดลวดทั้งสเตนรูปตัว “วี” เป็นแหล่งกำเนิดแสง ความละเอียดของเครื่องได้รับเมื่อลำแสงอิเล็กตรอนมีความแคบสูงสุด แหล่งกำเนิดแสงใช้แลนทานัมเฮกซะไบไรด์ (Lanthanum hexaboride) สำหรับงานทางด้านพอลิเมอร์ ความละเอียดจะมีขีดจำกัด เนื่องจากความร้อนของลำอิเล็กตรอนอาจทำลายผิวหน้าของชิ้นงานที่ได้รับหลังจากการทดสอบแรงดึง หรือแรงกระแทก

นอกจากนี้ยังมีความจำเป็นต้องเคลือบชิ้นงานพอลิเมอร์ซึ่งไม่นำไฟฟ้าด้วยตัวนำไฟฟ้า เช่น คาร์บอน และทองคำ

ลำอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นเหมือนในเครื่อง TEM โดยการยิงขดลวดติดกับศักย์ไฟฟ้าที่มีความเป็นลบสูง โดยทั่วไปค่าความเป็นลบอยู่ในช่วง 1-50 กิโลโวลต์ ชิ้นงานหรืออานอดูกยึดไว้กับศักย์ไฟฟ้าที่เป็นศูนย์ลำอิเล็กตรอนผ่านอานอด และถูกโฟกัสลงบนชิ้นงานโดยใช้เลนส์หรือระบบเลนส์ทราบเท่าที่ลำอิเล็กตรอนตกกระทบบนผิวของชิ้นงาน ปฏิสัมพันธ์ที่อธิบายไว้ข้างต้นจะเกิดขึ้น เครื่องรับสัญญาณต่างๆถูกจัดเรียงในห้องตัวอย่าง (Specimen chamber) สำหรับการวัดสัญญาณแต่ละชนิดซึ่งแสดงคุณลักษณะเฉพาะตัวของบริเวณที่ชิ้นงานอยู่ภายใต้การบอมบาร์ด (Bombardment) ลำอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่เหนือชิ้นงานโดยใช้สนามแม่เหล็ก ค่าต่างๆที่ได้จากการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าของขดลวดกวาดสัญญาณ “Scan Coils” ดังรูปที่ 2.10 เมื่อลำอิเล็กตรอน เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่คุณลักษณะของสัญญาณที่ถูกวัดโดยเครื่องรับสัญญาณต่างๆ เปลี่ยนแปลงไป และแสดงผลออกมาในรูปของสัญญาณที่ถูกวัดโดยเครื่องรับสัญญาณต่างๆ เปลี่ยนแปลงไป และแสดงออกมาในรูปของความคมชัดของภาพ ในเครื่อง SEM ลำอิเล็กตรอนถูกผลิตและเคลื่อนที่ผ่านผิวหน้าของชิ้นงานคล้ายหลักการทำงานของแสงในจอภาพโทรทัศน์เวลาไม่มีภาพ (TV Raster) ซึ่งแสดงสัญญาณออกมาเป็นเส้นในแนวนอน ทีละเส้นๆ ภายใต้คำสั่งของขดลวดกวาดสัญญาณซึ่งถูกควบคุมคำสั่งโดย “เครื่องส่งกราดเจนเนอเรเตอร์” (Scan generator) สัญญาณที่วัดได้จากเครื่องตรวจจับแต่ละตัวเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องพร้อมๆกับการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะเฉพาะตัวของผิวซึ่งถูกตรวจสอบโดยอิเล็กตรอน สัญญาณซึ่งถูกปรับอย่างเหมาะสมถูกใช้เพื่อควบคุมความคมชัดของจุดบนหลอดคาโทด (Cathode Ray Tube; CRT) การส่งกราดสัญญาณด้วยคาโทดถูกควบคุมโดยเครื่องส่งกราดเจนเนอเรเตอร์ตัวเดิม ซึ่งควบคุมตำแหน่งของลำแสงใน SEM ดังนั้นความเกี่ยวข้องระหว่างชิ้นงานและรูปภาพจาก CRT เกิดขึ้น โดยทั้งสัญญาณจากเครื่องรับสัญญาณเพียงตัวเดียวจะถูกแสดงออกมา แต่ในบางเครื่องมืออาจมีการแสดงรูปภาพจากเครื่องรับสัญญาณมากกว่าหนึ่งเครื่องพร้อมๆ กัน หรือผสมสัญญาณกันก็ได้

## 2.10 การทดสอบสมบัติทางกล [16]

### 2.10.1 การทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 638



รูปที่ 2.11 ลักษณะเครื่อง Tensile strength

การทดสอบการทนต่อแรงดึงเป็นการทดสอบที่ง่าย สะดวก และให้ผลการทดสอบที่แสดงค่าสมบัติทางกลได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นการทดสอบแรงดึงจึงเป็นการทดสอบที่ได้รับความนิยมและเป็นที่รู้จักกันมากที่สุดประเภทหนึ่งในการทดสอบสมบัติทางกลพื้นฐานของวัสดุ การทดสอบแรงดึงนั้นอาศัยหลักการง่าย ๆ คือ การให้แรงดึงในแนวเส้นตรงแก่ชิ้นงานทดสอบในทิศตรงกันข้ามจนชิ้นงานนั้นเกิดการผิดรูปในช่วงพลาสติก (Plastic deformation) และมีการแตกหักเกิดขึ้นในที่สุด การวัดความสามารถในการรับแรงของวัสดุด้วยการใช้แรงดึง และหาระยะที่ยืดออกไปก่อนที่วัสดุจะแตกหัก Tensile modulus จะมีความสัมพันธ์กับ Stiffness โดยอธิบายได้จากรูปความเค้นส่วนความเครียด

Tensile strength เป็นการทดสอบความต้านทานแรงดึง โดยให้แรงดึงกับชิ้นงานทดสอบที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ค่าหนึ่ง Tensile strength คือ อัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้กับพื้นที่หน้าตัด

Elongation เป็นการทดสอบหาความสามารถในการยืด โดยเป็นความยาวที่ยืดออกต่อความยาวเดิม

การวิเคราะห์ผล

ผลจากการวัดแรงดึงที่กระทำต่อชิ้นตัวอย่าง ณ ตำแหน่งที่เกิดการแตกหัก เรียกว่าความเค้นสูงสุด (Ultimate tensile stress) หรือความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.2)

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\varepsilon$  = มอดูลัส ( $\text{N/m}^2$ )

$\Delta\sigma$  = ความแตกต่างของความเค้นระหว่างสองตำแหน่งบนเส้นตรง

$\Delta\varepsilon$  = ความแตกต่างของความเครียดระหว่างสองตำแหน่งบนเส้นตรง

โดยพื้นฐานสิ่งที่วัดได้จากการทดสอบแรงดึงมีลักษณะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งสามารถเปลี่ยนให้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่เกิดขึ้น จากข้อมูลดิบที่ได้สามารถคำนวณค่าต่างๆ ที่เป็นสมบัติเชิงกลของพลาสติก มีดังนี้

#### 1) จีดจำกัดความเป็นสัดส่วน (Proportional limit)

จีดจำกัดความเป็นสัดส่วน หมายถึง ค่าความเค้นสุดท้ายบนเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ ที่แสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น โดยทั่วไปแล้วสำหรับพลาสติกมักพบได้ในระดับความเครียดที่ต่ำมาก

#### 2) มอดูลัส (Modulus)

มอดูลัสของวัสดุเป็นค่าที่แสดงถึงสมบัติการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำ

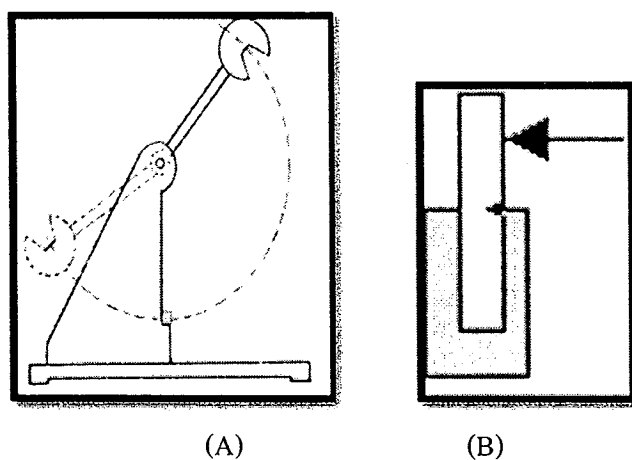
3) จุดคราก (Yield point) จุดครากเป็นค่าประมาณของวัสดุเปลี่ยนรูปร่างแบบยืดหยุ่นไปเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร โดยวัสดุที่แสดงจุดครากอย่างชัดเจนสามารถหาได้จากจุดที่มีค่าความชันเป็นศูนย์หรือจุดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความเค้น แต่มีการเปลี่ยนแปลงของความเครียด เมื่อทราบจุดครากแล้วสามารถหาค่าความเค้นและค่าความเครียด ณ จุดคราก จากการลากเส้นตรงไปตัดแกนนอนและแกนตั้ง

4) ความต้านทานสูงสุด (Strength) ความต้านทานสูงสุด หรือความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งอาจเป็นจุดครากหรือจุดที่เกิดการแตกหักก็ได้ สามารถหาได้จากค่าความเค้น ณ จุดสูงสุดของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด เพื่อจะได้ทราบถึงลักษณะสมบัติเชิงกลของพลาสติกนั้น



5) ความเค้นและความเครียด ณ จุดแตกหัก (Stress and strain at break) ความเค้นและความเครียด ณ จุดแตกหัก ในบริเวณของจุดที่ชิ้นงานเกิดการแตกหักเสียหายในการทดสอบ ในบางกรณีถือว่าเป็นค่ากำลังวัสดุหรือความต้านทานแรงสูงสุดของวัสดุ

#### 2.10.2 การทดสอบความทนต่อแรงกระแทก (Izod Impact) ตามมาตรฐาน ASTM D256 [16]



รูปที่ 2.12 การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก

(A) ลักษณะการเหวี่ยงของค้อนตี

(B) ลักษณะการวางชิ้นงานแบบ Izod

##### 1) หลักการ

เป็นการใช้แรงกระทำเคลื่อนที่ด้วยความเร็วกระแทกขึ้นทดสอบให้แตกหักในเวลาอันสั้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุเมื่อถูกแรงกระแทก การทดสอบแรงกระแทกแบบลูกตุ้มเหวี่ยงเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 แสดงความสามารถของวัสดุ ในการต้านทานแรงกระแทกจากการตีด้วยค้อน ซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานจลน์ทั้งหมดที่จำเป็นเพื่อให้วัสดุเริ่มเกิดการแตกหัก (Initiate Fracture) และดำเนินต่อไปจนกระทั่งวัสดุขาดออกจากกัน การทดสอบนี้สามารถทำได้อย่างรวดเร็วเป็นการตรวจสอบคุณภาพของวัสดุที่ง่ายสำหรับเปรียบเทียบความเหนียวของวัสดุ ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบนั้น จะทำการบากชิ้นงานก่อนการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากรอยบากบนชิ้นงานจะทำหน้าที่นำหนักกด น้ำหนักกด 30 เป็นจุดที่แรงกระทำมาสะสมกัน (Stress Concentration) ทำให้การเปลี่ยนรูป (Deformation) ของชิ้นงานเกิดขึ้นได้ยาก เพราะการแตกขาดของชิ้นงานจะเกิดที่บริเวณรอยบากเท่านั้น ตามปกติค่าการทนต่อแรงกระแทก จะรายงานในหน่วยของพลังงานต่อความกว้างของชิ้นงาน เนื่องจากค่าการทนต่อแรงกระแทกขึ้นอยู่กับความ

หนาของชิ้นงานเช่นกัน ในการเปรียบเทียบค่าการทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงานจากวัสดุที่ต่างกัน นิยมรายงานในหน่วยของจุดต่อตารางเมตร

## 2) วิธีการทดสอบ

- 1) เปิดสวิตช์เครื่องแล้วทดสอบแรงเสียดทานของค้อนน้ำหนักที่ต้องการใช้ โดยการยกค้อนให้แขวนอยู่ในตำแหน่งขึ้น วางในตำแหน่งแขวนค้อนน้ำหนัก
- 2) กดปุ่มที่อยู่ข้างเครื่องพร้อมๆ กัน ปลดปล่อยค้อนน้ำหนักลงมาอย่างอิสระโดยไม่มีชิ้นงาน อ่านค่าพลังงานที่ได้ เพื่อนำไปลบออกจากค่าพลังงานที่อ่านได้จากการทดลองเมื่อมีชิ้นงาน
- 3) การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบนั้น จะทำการบากชิ้นงานก่อนการทดสอบ
- 4) วางชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปหรือตัดจากแผ่นพลาสติกที่มีความหนาอยู่ระหว่าง 3.17–12.7 มิลลิเมตร รอยบากนั้นจะต้องอยู่ในบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน และมีขนาดของรัศมีปลายรอยบากให้เล็กลงใช้ขึ้นอยู่กับการทดสอบว่าต้องการใช้รอยบากที่คม (0.25 มิลลิเมตร) หรือทื่อ (1.0 มิลลิเมตร) โดยให้รอยบากตรงมุมแหลมของรอยอยู่ตรงตำแหน่งของตัวชิ้นงาน
- 5) กดปุ่มที่อยู่ข้างเครื่องพร้อมๆ กัน
- 6) อ่านค่าพลังงานที่ทำให้ชิ้นงานแตก
- 7) นำค่าพลังงานไปคำนวณค่าของการทนต่อแรงกระแทก

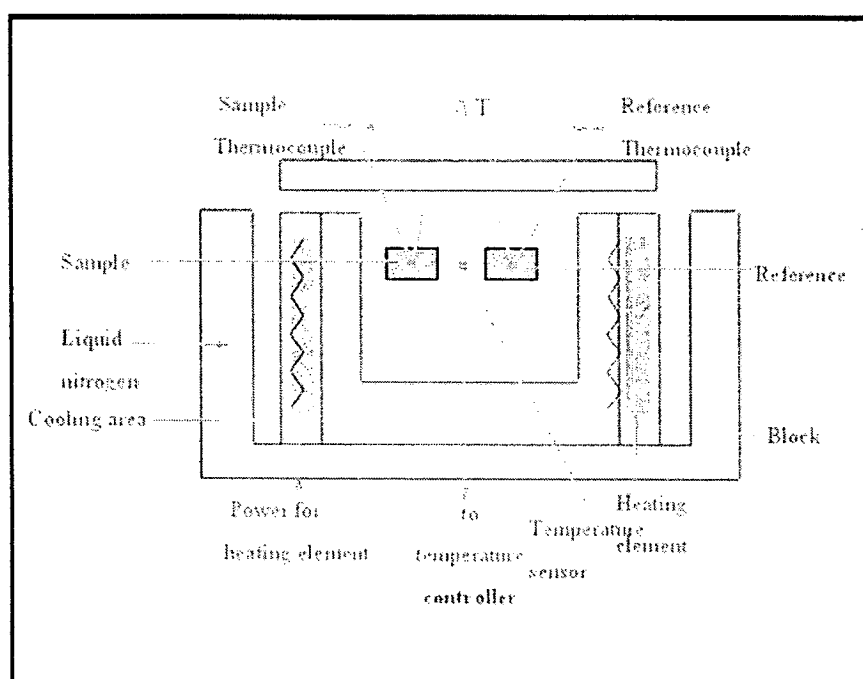
## 2.11 การทดสอบสมบัติทางความร้อน [18]

### 2.11.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)

เครื่องมือ DSC ได้ถูกออกแบบมาเพื่อช่วยวิเคราะห์ อธิบายการเปลี่ยนแปลงของ ขบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดหรือคายความร้อน โดยวัดปริมาณความร้อนที่แตกต่างกันของ วัสดุตัวอย่างกับวัสดุอ้างอิงที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยมีโปรแกรมให้เครื่องทำการวัดไปตามช่วง อุณหภูมิช่วงหนึ่ง เพื่อให้เราเห็นข้อมูลละเอียดจนเปรียบเทียบกันได้ นอกจากนี้ DSC ยังสามารถใช้ วัดปริมาณความร้อน การแพร่กระจายความร้อน ความบริสุทธิ์ของสารตัวอย่างและอื่นๆ อีก มากมาย และยังแสดงผลเป็นแผนภาพ เฟส ให้ข้อมูลทางด้านจุลศาสตร์ ซึ่งเป้าหมายของ DSC ก็เพื่อ วิเคราะห์ข้อมูล

- 1) หลักการทำงานคือ หลักความไม่สมดุลซึ่งพลังงานที่สารตัวอย่างดูดซับหรือปล่อย ออกมาจะถูกชดเชยโดยการเพิ่มเข้าหรือหักออกให้เกิดความสมดุล โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากฮีตเตอร์จะให้พลังงานออกมาโดยต่อเนื่องและอัตโนมัติ เพื่อให้ภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง พลังงาน ที่วัดออกมาจะเป็นมิลลิวัตต์ สามารถวัดหาพื้นที่ใต้รูปที่เรียกว่า “Heat Flux” ตัวอย่างรักษามูล

จนกระทั่งถึงแหล่งอ้างอิง ให้สัญญาณไฟฟ้าออกมาเท่ากัน โดยแปรตามลักษณะพฤติกรรมทางความร้อนของ ขนาดของพื้นที่ได้รูปจะขึ้นอยู่กับขนาดการคงที่ของอุณหภูมิในระบบการปฏิบัติงานที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง จะมีน้ำเย็นเป็นตัวลดอุณหภูมิ DSC 7 จะทำงานได้ที่ช่วงอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสถึง 730 องศาเซลเซียส ถ้ามีน้ำล้อมรอบจะทำงานที่ประมาณ 50 องศาเซลเซียสถึง 730 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบหลักของเครื่อง DSC [18]

2) การใช้ประโยชน์ DSC (ที่อุณหภูมิทำงาน -170 องศาเซลเซียสถึง -725 องศาเซลเซียส) ใช้วิเคราะห์เกี่ยวกับพอลิเมอร์ได้หลายเรื่อง ดังนี้

- การหลอมละลาย (Melting studies)
- ความเป็นผลึก (Crystallinity studies)
- อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition studies)
- การผสมเข้ากันได้ดี (Blend analysis and compatibility)
- ความคงต่อการถูกออกซิไดซ์ (Oxidative stability studies)
- การหาความบริสุทธิ์ (Purity determination)
- การหาความจุความร้อน (Specific heat studies)
- การนำความร้อน (Thermal conductivity measurements)