นวัตกรรมการดัดแปลงขี้เลื่อยเพื่อใช้เป็นสารเติมแต่งในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

The Innovation of Modified-Sawdusts for using as Additive in Biodegradable Plastic Processing

นุรักษ์ สังข์ศรี

(Nuruk Sungsri)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

พ.ศ. 2556

ชื่อโครงการ	นวัตกรรมการดัดแปลงขี้เลื่อยเพื่อใช้เป็นสารเติมแต่งในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
หัวหน้าโครง	นางสาวนุรักษ์ สังข์ศรี
หน่วยงานสังกัด	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
หมายเลขโทรศัพท์	075-377439
ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประเภท	ทุนอุดหนุนโครงการวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ประจำปี 2556 จำนวนเงิน 50,000 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย	1 ปี ตั้งแต่ วันที่ 15 เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2556 ถึงวันที่ 15 เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2557
คำสำคัญ	ขี้เลื่อย, พอลิแลคติกแอสิด, สารเชื่อมโยง, การดัดแปลง

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ศึกษาหาวิธีการในการดัดแปลงพื้นผิวของผงขี้เลื่อยเพื่อให้สามารถเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างผงขี้เลื่อยกับพีแอลเอในการผลิตคอมโพสิทชีวภาพ การปรับสภาพด้วยสารละลายด่าง (Alkaline treatment) และการปรับสภาพด้วยไซเลน (Silane treatment) ถูกเลือกเพื่อดัดแปลงพื้นผิวของผงขี้เลื่อยขนาด ≤125 ไมครอนและ 600 ไมครอน การปรับสภาพพื้นผิวของผงขี้เลื่อยด้วยสารละลายด่าง (NaOH) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของผงขี้เลื่อย ซึ่งยืนยันได้ด้วยผลของการทดสอบด้วยเทคนิค ATR-FTIR การปรับสภาพพื้นผิวของผงขี้เลื่อยด้วยไซเลน (GPS) ไม่สามารถยืนยันการเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีบริเวณพื้นผิวของผงขี้เลื่อยจากการทดสอบด้วยเทคนิค ATR-FTIR ได้ สมบัติทางความร้อนของพีแอลเอ และพีแอลเอคอมโพสิทถูกศึกษาและพบว่า พีแอลเอ เกรด 2002D มีค่า T_g และ T_m ที่ 58.8 °C และ 152.9 °C ตามลำดับ และพีแอลเอ เกรด 2002D ไม่สามารถเกิดผลึกได้ที่อัตราการหล่อเย็น 10°C /min อย่างไรก็ตาม ค่า T_g และ T_m ของพีแอลเอลดลงเมื่อมีการเติมผงขี้เลื่อยลงไป โดยคอมโพสิทของพีแอลเอกับผงขี้เลื่อยขนาด ≤ 125 ไมครอน ที่ไม่ผ่านกระบวนการดัดแปลงพื้นผิวแสดงค่า T_g และ T_m ต่ำที่สุด คือ 49.1 °C และ 148.4 °C ตามลำดับ นอกจากนี้การเกิดผลึกของพีแอลเอถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นเมื่อมีการเติมขี้เลื่อยลงไป โดยคอมโพสิทระหว่างพีแอลเอกับผงขี้เลื่อยขนาด ≤ 600 ไมครอนที่ผ่านกระบวนการดัดแปลงพื้นผิวโดยใช้สารละลายด่าง (NaOH) สามารถเกิดผลึกได้ที่อุณหภูมิสูงที่สุดคือ 101.7 °C

Title	The Innovation of Modified-Sawdusts for using as Additive in Biodegradable Plastic Processing
Head of the Project	Miss Nuruk Sungsri
Agencies under	Faculty of Industrial Technology
Phone number	075-377-439
Research funds category	Research funds Nakhon Si Thammarat Rajabhat University Annual 2011, 50,000 Baht
Period time of the research	1 Year, Feb 15, 2013 to Feb 15, 2014
Keywords	Sawdusts, polylactic acid, coupling agent, modification

ABSTRACT

This research studied the methods to modify surface of sawdust particles in order to increase compatibility between poly(lactic acid), PLA and sawdust particles in biocomposite production. Alkaline treatment and silane treatment were used to modify surface of sawdust particles. The particle sizes of sawdust were ≤ 125 μm and 600 μm. Alkaline treatment, using sodium hydroxide solution, changed the chemical structure of sawdust particles. It was confirmed by ATR-FTIR results. Silane treatment could not be confirmed chemical change of sawdust surfaces by ATR-FTIR results. Thermal properties of PLA and PLA composites were studied and found that T_g and T_m of PLA 2002D were 58.8 °C and 152.9 °C, respectively. PLA 2002D could not crystallize at the cooling rate of 10 °C/min. However, T_g and T_m of PLA were decreased when sawdust particles were added. Composite of PLA/nontreated sawdust (≤ 125 μm) showed the lowest of T_g and T_m at 49.1 °C and 148.4 °C, respectively. In addition, crystallization of PLA was improved when sawdust particles were added. Composite of PLA/alkaline treated sawdust (600 μm) showed the highest crystallization temperature (T_c) at 101.7 °C.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องนวัตกรรมการดัดแปลงขี้เลื่อยเพื่อใช้เป็นสารเติมแต่งในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช คณะกรรมการการอุดมศึกษา

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวิทยาศาตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ และสาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือต่างที่ใช้ในการทำวิจัย ทำให้การวิจัยดำเนินไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา เพื่อนคณาจารย์ และบุคคลที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้การสนับสนุนในด้านต่าง ๆ ในการทำวิจัยในครั้งนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบเกียรติคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	I
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	iv
สารบัญรูป	viii
สารบัญตาราง	xi
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การแบ่งประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้	4
2.1.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastics)	4
2.1.2 พลาสติกชนิดย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradable plastics)	5
2.1.3 พลาสติกย่อยสลายด้วยแสง (photodegradable plastics)	5
2.1.4 พลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradation Plastics)	5
2.2 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastics)	6
2.2.1 วัตถุดิบสำหรับการทำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	8

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า

2.2.2 การจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 9

2.3 ความเป็นไปได้ในการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ 13

2.4 การใช้ประโยชน์ผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ 15

2.4.1 การใช้งานทางการแพทย์ 15

2.4.2 สารเคลือบกระดาษ หรือโฟม 15

2.4.3 ฟิล์มคลุมดิน และวัสดุสำหรับการเกษตร 15

2.4.4 ถุงสำหรับใส่ของ (shopping Bag)

2.4.5 ฟิล์ม และถุงสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร (food waste film and bags) 16

2.4.6 บรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค (consumer packaging materials) 16

2.4.7 โฟมเม็ดกันกระแทก (loose fill) 16

2.5 โครงสร้างเทคโนโลยีของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 17

2.5.1 เทคโนโลยีต้นน้ำ-กลางน้ำ 17

2.5.2 เทคโนโลยีปลายน้ำ 17

2.6 ความพร้อมของประเทศไทยต่ออุตสาหกรรมพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 18

2.6.1 ความพร้อมด้านวัตถุดิบ 18

2.6.2 ความพร้อมด้านเทคโนโลยี 20

2.6.3 การผลิตในประเทศไทย 20

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง **หน้า**

2.7 กระบวนการขึ้นรูปพลาสติก 21

2.7.1 กระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blow Molding Process) 22

2.7.2 กระบวนการดึง – เป่า ขึ้นรูป (Stretch Blow Molding Process) 24

2.7.3 กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding Process) 26

2.7.4 กระบวนการหมุนขึ้นรูป (Rotational Molding) 27

2.7.5 กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding Process) 28

2.7.6 กระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion Process) 29

2.7.7 การ Thermoforming และการ Laminating 31

2.8 สารเชื่อมโยงไซเลน (Silane Coupling Agents) 33

2.9 คอมโพสิทไม้-พลาสติก (Wood-Plastic Composite) 34

2.10 การนำขี้เลื่อยไปใช้ 35

2.10.1 การผลิตถ่านจากขี้เลื่อยด้วยกรรมวิธีอัดร้อน 36

2.10.2 การผลิตปุ๋ยหมักจากขี้เลื่อยไม้แกะสลัก 36

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 37

2.11.1 พีแอลเอกับพลาสติไซเซอร์ (PLA with Plasticizers) 37

2.11.2 การผสมพีแอลเอ/พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ (PLA/Biodegradable Blend) 38

2.11.3 การใช้สารเชื่อมโยงไซเลนในคอมโพสิท (Using of Silane coupling agent in composite) 39

2.11.4 การใช้ขี้เลื่อยในคอมโพสิท (Using of sawdust in composite) 39

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า

บทที่ 3 การทดลอง	42
3.1 วัตถุดิบ (Materials)	42
3.2 อุปกรณ์ (Equipments)	42
3.3 วิธีการทดลอง (Methodology)	42
บทที่ 4 ผลการทดลอง	44
4.1 การปรับสภาพขี้เลื่อย	44
4.1.1 การปรับสภาพขี้เลื่อยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์	46
4.1.2 การปรับสภาพขี้เลื่อยด้วยสารเชื่อมโยงไซเลน GPS	47
4.2 การศึกษาสมบัติของพอลิแลคติคแอสิด	50
4.2.1 พอลิแลคติกแอสิด (Poly Lactic acid, PLA)	50
4.2.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของเรซินพีแอลเอและพีแอลเอคอมโพสิท	54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	60
5.1 สรุปผลการทดลอง	60
5.2 ข้อเสนอแนะ	61
เอกสารอ้างอิง	62
ประวัติผู้วิจัย	67

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ 2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแหล่งวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้
และแหล่งวัตถุดิบปิโตรเลียม 8
รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงประเภทและตัวอย่างของพอลิเอสเทอร์ 10
รูปที่ 2.3 ราคาแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวโพด และแป้งสาลี ในตลาดโลก 18
รูปที่ 2.4 ห่วงโซ่มูลค่าของมันสำปะหลัง 19
รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้จากวัตถุดิบมวลชีวภาพ 20
รูปที่ 2.6 กระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blow Molding Process) 23
รูปที่ 2.7 แผนผังกระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blow Molding Process) 23
รูปที่ 2.8 การขึ้นรูปแบบ Stretch Blow Molding 24
รูปที่ 2.9 แผนผังกระบวนการผลิต Stretch Blow Molding 25
รูปที่ 2.10 กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding Process) 26
รูปที่ 2.11 แผนผังกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding Process) 26
รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงขั้นตอนกระบวนการหมุนขึ้นรูป (Rotational Molding) 27
รูปที่ 2.13 แผนผังกระบวนการหมุนขึ้นรูป (Rotational Molding) 28
รูปที่ 2.14 เครื่องอัดขึ้นรูปและกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression
Molding Process) 28
รูปที่ 2.15 แผนผังกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding Process) 29
รูปที่ 2.16 แผนผังกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion Process) 29
รูปที่ 2.17 กระบวนการขึ้นรูปแบบ Blown Film 30
รูปที่ 2.18 กระบวนการขึ้นรูปแบบ Sheet/Film Extrusion 30
รูปที่ 2.19 กระบวนการขึ้นรูปแบบ Pipe/Tube/Profile Extrusion 31

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ 2.20 กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์จากการขึ้นรูปแบบ Tape Yarn/Filament 31

รูปที่ 2.21 การขึ้นรูปแบบใช้ลมอัด (Blow Forming) 32

รูปที่ 2.22 การขึ้นรูปแบบใช้แรงดูดสูญญากาศ (Vacuum Forming) 32

รูปที่ 2.23 การเคลือบด้วยวิธีการรีดโดยใช้ลูกกลิ้ง 33

รูปที่ 2.24 โครงสร้างทั่วไปของ organosilanes 33

รูปที่ 2.25 ผลิตภัณฑ์คอมโพสิทไม้-พลาสติก (Wood-Plastic Composite) 35

รูปที่ 2.26 เครื่องอัดร้อนขี้เลื่อยกำลังสูง 36

รูปที่ 2.27 แท่งฟืนที่ผ่านเครื่องอัดร้อนขี้เลื่อย (a) ก่อนเข้า และ
(b) หลังเข้าเตาเผาอิวาเตะ 36

รูปที่ 4.1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน 45

รูปที่ 4.2 โครงสร้างเคมี Glycedroxypropyl trimethoxy silane (GPS) 46

รูปที่ 4.3 FTIR สเปคตรัมของขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว (Nontreated SP)
ขนาด ≤ 600 ไมครอน 47

รูปที่ 4.4 FTIR สเปคตรัมของขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว (Nontreated SP)
เปรียบทียบกับขี้เลื่อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย NaOH
(NaOH treated SP) ขนาด ≤ 600 ไมครอน 48

รูปที่ 4.5 FTIR สเปคตรัมของสารเชื่อมโยงไซเลน (GPS), ขี้เลื่อยที่ไม่ผ่าน
การปรับสภาพผิว (Nontreated SP) เปรียบเทียบกับขี้เลื่อยที่ผ่าน
การปรับสภาพผิวด้วยสารเชื่อมโยงไซเลน (GPS) 49

รูปที่ 4.6 FTIR สเปคตรัมของขี้เลื่อยขนาด ≤ 600 ไมครอนที่ผ่านการปรับสภาพผิว
ด้วยสารเชื่อมโยงไซเลน (GPS) ที่ 1%, 5% และ 10% 50

รูปที่ 4.7 วัฏจักรของพอลิแลคไทด์ 51

รูปที่ 4.8 สเตอริโอไอโซเมอร์ของ (a) lactic acids, and (b) lactides 52

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ 4.9 วิธีการสังเคราะห์พีแอลเอที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง 53

รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบ DSC ของพีแอลเอ (PLA 2002D) ที่ first heating, cooling และ second heating curves ที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min. 56

รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบ DSC (first heating) ของ PLA และ คอมโพสิทของ PLA/ขี้เลื่อยที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min. 57

รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบ DSC (second heating) ของ PLA และคอมโพสิทของ PLA/ขี้เลื่อยที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min. 58

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่ 2.1 สมบัติของ PLA ที่ผลิตเพื่อการค้า 11
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีอยู่ในตลาด 13
ตารางที่ 2.3 การจำแนกประเภทกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก 21
ตารางที่ 2.4 ชนิดของพอลิเมอร์และสารเชื่อมโยงไซเลนที่เหมาะสม 34
ตารางที่ 2.5 โครงสร้างเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของพลาสติไซเซอร์ 38
ตารางที่ 4.1 ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Glass transition temperature, Tg) อุณหภูมิหลอมผลึก (Melting temperature) และอุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystallization temperature) 58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันนี้พลาสติกมีความสำคัญในรูปแบบของการนำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์เพื่อทดแทนวัตถุดิบจำพวก ไม้ แก้ว กระดาษ และเหล็ก นั่นเป็นเพราะคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ ตัวอย่างเช่น มีความแข็งแรงสูง มีความยืดหยุ่น น้ำหนักเบา สามารถขึ้นรูปให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่าง ๆ ได้อย่างง่ายดาย โดยมีราคาไม่แพงจนเกินไป พลาสติกที่พบเห็นทั่วไป จะมีแหล่งกำเนิดมาจากปิโตรเลียมและก๊าซธรรมชาติซึ่งจะถูกเรียกว่า “Petroleum-based plastics” แต่เนื่องจากพลาสติกนั้นสามารถใช้งานได้อย่างสะดวกในทุกลักษณะ ปริมาณการใช้จึงค่อนข้างสูง ผลที่ตามมาก็คือ ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการกำจัดขยะพลาสติกดังกล่าวที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ โดยในปี พ.ศ. 2546 มีการรายงานถึงปริมาณขยะพลาสติกมีปริมาณ 2.78 ล้านตัน หรือ 18.27% ของปริมาณขยะทั้งหมด นอกจากนั้น การเพิ่มการใช้งานของพลาสติกก็ยังส่งผลถึงปริมาณ ปิโตรเลียมและก๊าซธรรมชาติที่จะค่อย ๆ หมดลงไปเรื่อย ๆ เช่นกัน การแก้ไขปัญหาข้างต้นมีหลากหลายวิธี เช่น การรีไซเคิล การใช้ซ้ำ การผสมพลาสติกกับแป้งหรือแคลเซียมคาร์บอเนต เพื่อลดปริมาณการใช้พลาสติกลง เป็นต้น แต่นั่นก็ไม่ใช่วิธีการแก้ปัญหาอย่างแท้จริง การแทนที่พลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยการใช้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงจะเป็นการแก้ปัญหาที่เป็นรูปธรรมมากที่สุด

พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable polymers) ได้มาจากวัตถุที่มีมาจากแหล่งปิโตรเลียมหรือแหล่งพลังงานหมุนเวียน พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ที่ได้มาจากวัตถุที่มาจากแหล่งปิโตรเลียม เช่น poly(butylene succinate) (PBS), poly(butylene succinate adipate) (PBSA), poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), poly(carpolactone) (PCL), poly(dioxanone) (PDO) เป็นต้น สำหรับพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ที่ได้มาจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน ไม่ว่าจะเป็น poly(lactic acid),PLA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ที่เรียกว่า กรดแลคติก (lactic acid) ที่ได้มาจากการหมักของแป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง หรือจะเป็น poly(hydroxyl alkanoate) (PHA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถผลิตได้โดยตรงจากจุลินทรีย์ การผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้สามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนที่เริ่มจาก ขั้นต้นน้ำ (Upstream) โดยการใช้วัตถุดิบที่มีแหล่งที่มาจากปิโตรเลียมหรือขั้นกลางน้ำ (intermediate) มอนอเมอร์จะถูกพอลิเมอไรเซชันจนได้เรซินของพอลิเมอร์ที่สามารถ

ย่อยสลายได้ (biopolymer resins) สำหรับขั้นตอนสุดท้ายนั่นก็คือ ขั้นปลายน้ำ (down stream) นั่นก็คือการเข้าสู่กระบวนการผสมและขึ้นรูปเรซินจนได้เป็นผลิตภัณฑ์ ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของ poly (lactic acid), PLA การได้มาซึ่ง กรดแลคติก (lactic acid) จากกระบวนการหมักแป้งมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวโพด จะอยู่ในขั้นต้นน้ำ (Upstream), กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของกรดแลคติก (lactic acid) หรือ แลคไทด์ (lactide) เพื่อให้เรซินของ poly (lactic acid), PLA คือ ขั้นกลางน้ำ (intermediate) ส่วนขั้นปลายน้ำ (down stream) จะเป็นการนำเรซินของ PLA มาผ่านกระบวนการผสมและขึ้นรูปจนได้ผลิตภัณฑ์ [38]

สำหรับพีแอลเอ (poly (lactic acid), PLA) ซึ่งยังมีข้อจำกัดในกระบวนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Tg) สูง, ค่าความแข็งแรงดึง (tensile strength) และค่ายังมอดูลัส (Young' modulus) ต่ำ และความเข้ากันไม่ได้ (incompatibility) กับวัสดุที่นำมาผสม เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้น การเติมสารเติมแต่งในกระบวนการขึ้นรูปจึงเป็นสิ่งสำคัญสิ่งหนึ่งที่จะทำให้เราได้ผลิตภัณฑ์ที่ราคาไม่สูงเกินไป อย่างไรก็ตามการเติมสารเติมแต่งในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดความเข้ากันไม่ได้ (incompatibility) ระหว่างพีแอลเอกับสารเติมแต่งซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์

ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้สนใจที่จะศึกษาเพื่อพัฒนานวัตกรรมในการปรับปรุงโครงสร้างของสารเติมแต่งที่เหมาะสมกับพีแอลเอ โดยเฉพาะขี้เลื่อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น โดยจะทำการศึกษาชนิดและขนาดของขี้เลื่อยที่เหมาะสม ศึกษาถึงวิธีการในการปรับปรุงโครงสร้างของขี้เลื่อยให้สามารถเข้ากันได้กับพีแอลเอ และทำการทดลองปรับปรุงโครงสร้างของขี้เลื่อยให้สามารถเข้ากันได้กับพีแอลเอ ได้มากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติ ชนิด และขนาดของขี้เลื่อยที่เหมาะสมกับการใช้เป็นสารเติมแต่ง (additive)

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงวิธีการในการปรับปรุงโครงสร้างของขี้เลื่อยให้สามารถเข้ากันได้กับ poly (lactic acid), PLA มากขึ้น

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติของพลาสติกย่อยสลายได้โดยเฉพาะ poly (lactic acid), PLA

1.2.4 เพื่อทำการทดลองในการปรับปรุงโครงสร้างของขี้เลื่อยให้สามารถเข้ากันได้กับ poly (lactic acid), PLA มากขึ้น

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ศึกษาถึงคุณสมบัติ ชนิด และขนาดของขี้เลื่อยที่เหมาะสมกับการใช้เป็นสารเติมแต่ง

1.3.2 ศึกษาถึงวิธีการในการปรับปรุงโครงสร้างของขี้เลื่อยให้สามารถเข้ากันได้กับ PLA (Poly lactic acid) มากขึ้น

1.3.3 ศึกษาสมบัติของพลาสติกย่อยสลายได้โดยเฉพาะ (Poly lactic acid), PLA

1.3.4 ทำการทดลองในการปรับปรุงโครงสร้างของขี้เลื่อยให้สามารถเข้ากันได้กับ PLA (Poly lactic acid) มากขึ้น

1.4 ส่วนประกอบของโครงการวิจัย

ส่วนที่เหลือของโครงการวิจัยประกอบด้วยบทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งจะเสนอทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับพลาสติกย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ โดยเฉพาะพอลิแลคติคแอสิด (PLA), วัสดุคอมโพสิท, กระบวนการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิท บทที่ 3 นำเสนอรายละเอียดและขั้นตอนการในการทำการทดลองตามขอบเขตของโครงการวิจัยที่กำหนดไว้, บทที่ 4 จะนำเสนอผลจากการศึกษาและผลจากการทดลองตามขั้นตอนในบทที่ 3 ซึ่งประกอบไปด้วยคุณสมบัติ ชนิด และขนาดของขี้เลื่อยคุณสมบัติ ชนิด และขนาดของขี้เลื่อย, วิธีการในการปรับปรุงโครงสร้างของขี้เลื่อยให้สามารถเข้ากันได้กับพอลิแลคติคแอสิด (PLA) ศึกษาสมบัติของพอลิแลคติคแอสิด (PLA) และ การทดลองในการปรับปรุงโครงสร้างของขี้เลื่อยให้สามารถเข้ากันได้กับพอลิแลคติคแอสิด (PLA) และสุดท้ายบทที่ 5 จะเป็นการสรุปและเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่รอบตัวเราส่วนใหญ่ผลิตจากพลาสติกซึ่งมักจะถูกใช้ในระยะเวลาอันสั้นพร้อมที่เกิดเป็นขยะได้เสมอ ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของขยะพลาสติกและก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม การใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastics) จึงเป็นอีกหนทางหนึ่งที่จะสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ ประเทศไทยเป็นประเทศที่ความพร้อมทั้งในด้านของวัตถุดิบมวลชีวภาพ (Biomass) และด้านอุตสาหกรรมพลาสติกโดยเฉพาะอุตสาหกรรมการขึ้นรูปพลาสติกซึ่งเป็นอุตสาหกรรมปลายน้ำ ดังนั้น การวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกชีวภาพเพื่อให้เกิดนวัตกรรมใหม่ ๆ และพัฒนาประเทศไปสู่ประเทศที่มีกำลังต่อรองได้ในเวทีการค้าสากลจึงเป็นสิ่งสำคัญ กระบวนการผลิตเรซินของพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติมีอยู่ในระดับอุตสาหกรรมโดยเฉพาะพอลิแลคติกแอสิด (polylactic acid, PLA) แต่เนื่องจากพลาสติกดังกล่าวยังคงมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นการลดต้นทุนการผลิตโดยการเติมสารเติมแต่งที่มีราคาถูก และปรับปรุงโครงสร้างของสารเติมแต่งให้เหมาะกับสมบัติของพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกชีวภาพจึงเป็นสิ่งที่จะเพิ่มความสนใจในการเลือกใช้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติพลาสติกของผู้บริโภคได้ โดยเฉพาะขี้เลื่อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ที่มีมากในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์จากไม้ ถ้าเราสามารถนำมาวิจัยและพัฒนาเพื่อนำวัสดุเหลือใช้ดังกล่าวมาเป็นสารเติมแต่งในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกชีวภาพได้ ก็จะเป็นอีกทางหนึ่งที่ช่วยเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือใช้ดังกล่าว

2.1 การแบ่งประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้

เราสามารถแบ่งพลาสติกย่อยสลายได้ตามกลไกของการย่อยสลายได้ดังนี้

2.1.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastics) เป็นพลาสติกที่มีการย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในชั้นตอนแรกของของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอ็นไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งทั้งแบบใช้ endo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักชองพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (ultimate

biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (biomass)

2.1.2 พลาสติกชนิดย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradable plastics) เป็นพลาสติกที่ถูกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติม สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH) ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนดโดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นคะตะลิสต์เร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxpide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

2.1.3 พลาสติกย่อยสลายด้วยแสง (photodegradable plastics) พลาสติกที่ย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสงลงไปหรือมีการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มืด หรือแม้กระทั่งชิ้นพลาสติกที่มีการพิมพ์ด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิวเนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2.1.4 พลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradation Plastics) พอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮดรายด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูริเทน จะย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้คะตะลิสต์ (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้คะตะลิสต์ (Non-Catalytic Hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External Catalytic Degradation) และแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (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) ของหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส [4]

2.2 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastics)

ในอนาคตมีแนวโน้มการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้เพิ่มขึ้นเนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น มีการค้นพบและพัฒนากระบวนการผลิตใหม่ๆ ทำให้พลาสติกมีราคาที่ต่ำลงและมีสมบัติต่างๆ ดีขึ้น มีกฎข้อบังคับ รวมถึงการที่มีค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะที่สูงขึ้น ทำให้บริษัทต่างๆ ทำการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่มีสมบัติที่หลากหลายแตกต่างกัน บางครั้งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ไม่เกิดการย่อยสลายผ่านกระบวนการทางชีวภาพอย่างแท้จริง เพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว ปัจจุบันจึงมีหลายองค์กรทั่วโลกได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐานผลิตภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastics) ขึ้น และให้คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยไว้ ดังนี้

- ASTM D6400-99 – biodegradable plastic is a degradable plastic in which the degradation results from the action of naturally occurring microorganisms such as bacteria, fungi and algae.
  พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ย่อยสลายได้เนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย ราและสาหร่าย

- ISO 472:1998 – Biodegradable plastics are plastic designed to undergo a significant change in its chemical structure under specific environmental conditions resulting in a loss of some properties that may vary as measured by standard test methods appropriate to the plastics and application in a period of time that determines its classification. The change in chemical structure results from the action of naturally occurring microorganisms
  พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลง

โครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ เป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่งซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งาน ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น

- BPS Japan (1994) – Biodegradable plastics are polymeric materials which are changed into lower molecular weight compounds where at least one step in the degradation process is through metabolism in the presence of naturally occurring organism.
  พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ วัสดุพอลิเมอร์ ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลงได้ โดยมีอย่างน้อย 1 ขั้นตอนในกระบวนการย่อยสลายนี้เกิดผ่านกระบวนการเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ

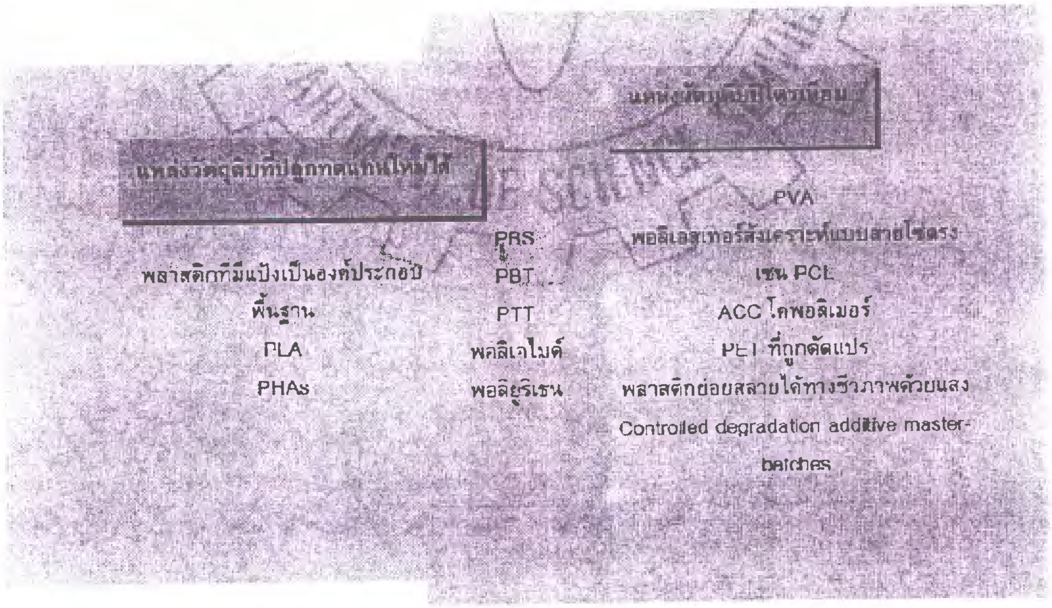
- DIN FNK103.2 (1993) – A plastic materials is called biodegradable if all its organic compounds undergo a complete biodegradation process Environmental condition and rates of biodegradation are to be determined by standardized test methods.
  วัสดุพลาสติกจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ก็ต่อเมื่อสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ ที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อม และมีอัตราการย่อยสลายอยู่ภายใต้ข้อกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐาน

- CEN (1993) – A degradable material in which the degradation results from the action of microorganisms and ultimately materials is converted to water, carbon dioxide and/or methane and a new cell biomass
  วัสดุย่อยสลายได้ คือ วัสดุที่การย่อยสลายเป็นผลมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ/ หรือ แก๊สมีเทน และมวลชีวภาพใหม่ เป็นผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย

สำหรับคำว่า biodegradation หรือการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ย่อมาจาก biotic degradation ในมาตรฐานต่าง ๆ มีคำจำกัดความที่ใช้พื้นฐานแนวคิดเดียวกัน คือ เป็นการทำงานของ

จุลินทรีย์ที่มีต่อชิ้นวัสดุ เป็นผลให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแก๊สคาร์บานไดออกไซด์หรือแก๊สมีเทนและน้ำ

2.2.1 วัตถุดิบสำหรับการทำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ วัตถุดิบที่ใช้ในการทำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด (รูปที่ 2.1) คือ



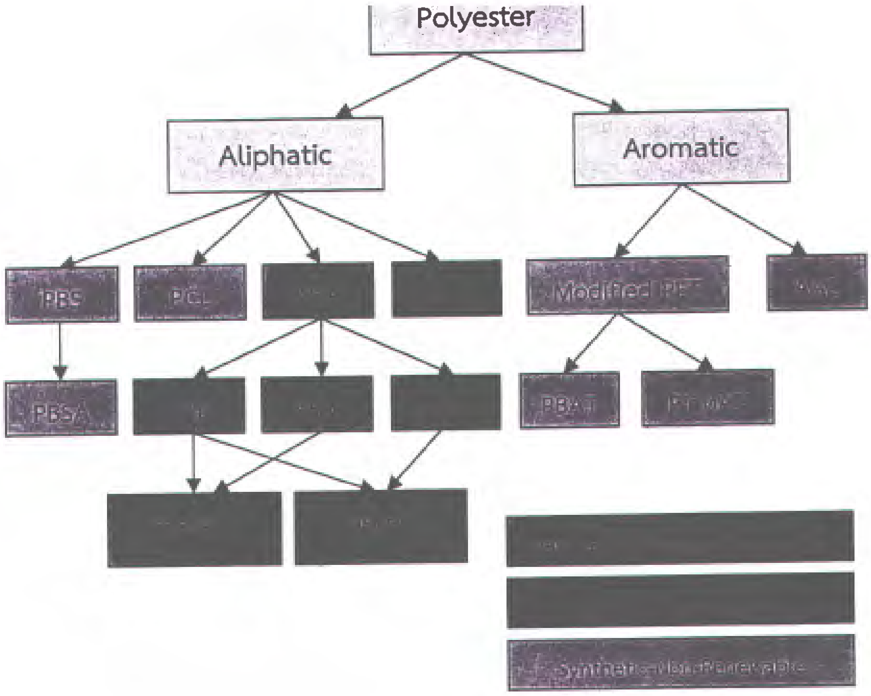
รูปที่ 2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแหล่งวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้และแหล่งวัตถุดิบปิโตรเลียม (NIA, 2551) [4]

2.2.2.1 แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ (Renewable resources) ข้าวสาลี ข้าวไรย์ และปาล์ม ในประเทศสหรัฐอเมริกา พืชผลทางการเกษตรหลักที่ใช้ในการผลิตสารตั้งต้น ได้แก่ ข้าวโพด ในขณะที่น้ำตาลจากหัวบีทถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในกลุ่มประเทศสหภาพยุโรป นอกจากพืชผลทางการเกษตรแล้ว ยังมีการนำผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมนมโค ได้แก่ หางนม (whey permeate) มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตมอนอเมอร์ (กรดแลคติก) เนื่องจากความต้องการในการลดต้นทุนการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงมีการแสวงหามวลชีวภาพประเภทอื่นที่มีศักยภาพและราคาต่ำมาใช้เป็นวัตถุดิบนอกเหนือจากแป้งและน้ำตาล ได้แก่ เซลลูโลส และลิกโนเซลลูโลซิก (lignocllulosics) ที่มีอยู่ในพืช ซึ่งสามารถนำไปย่อยเป็นน้ำตาลได้ อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีสำหรับการย่อยเซลลูโลส และลิกโนเซลลูโลซิกไปเป็นน้ำตาลในระดับอุตสาหกรรมยังอยู่ในขั้นตอนการพัฒนา

2.2.2.2 แหล่งวัตถุดิบปิโตรเลียม (Petroleum resources) เช่น น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ แนพธา (nephtha) และถ่านหิน ซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบที่ไม่สามารถหาทดแทนได้ และถูกใช้เป็นทั้งแหล่งให้พลังงาน และแหล่งวัตถุดิบในกระบวนการผลิต แหล่งวัตถุดิบดังกล่าว นอกจากจะใช้แล้วหมดไปแล้ว กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้ยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมอีกด้วย แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้จึงเป็นทางเลือกใหม่ที่คำนึงถึงการนำไปใช้ เป็นแหล่งให้พลังงาน และแหล่งวัตถุดิบในการผลิตวัสดุ โดยเฉพาะวัสดุประเภทพลาสติกเพื่อลดการใช้วัตถุดิบปิโตรเลียมลง นอกจากวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้สามารถแก้ปัญหาเรื่องการขาดแคลนด้านวัตถุดิบแล้ว ยังช่วยบรรเทาเรื่องผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมด้วย

2.2.2 การจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ พอลิเมอร์ที่มีการศึกษาวิจัย และนำมาผลิตเพื่อใช้ประโยชน์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ พอลิเมอร์ประเภทที่มีส่วนผสมของแป้ง (polyseccharide) และพอลิเอสเทอร์ (polyesters) โดยพอลิเมอร์ประเภทแรกเกิดจากการผสมพอลิเมอร์บางชนิด เข้ากับสายโซ่พอลิเมอร์ของแป้งที่เกิดจากการเรียงต่อกันของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น กลูโคส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ glucosidic โดยใช้อัตราส่วนผสมตั้งแต่ 10 - 90 % ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการใช้งาน หากส่วนผสมของแป้งมากกว่า 60 % จะทำให้พลาสติกผสมสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และเมื่อส่วนผสมของแป้งต่ำกว่า 60 % ส่วนผสมที่เป็นแป้งจะทำหน้าที่เป็นจุดที่ทำให้เกิดการแตกตัวของชิ้นส่วนพอลิเมอร์ผสม ทำให้มีขนาดเล็กลง ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกับแป้งประกอบด้วย พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิเอสเทอร์ เป็นต้น โดยก่อนกระบวนการผสมอาจมีการปรับปรุงคุณภาพของแป้งที่ใช้โดยกระบวนการทางเคมีก่อน เพื่อให้ได้คุณสมบัติทางเคมีที่เหมาะสม

พอลิเอสเทอร์ จัดเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเนื่องจากประกอบด้วยพันธะเอสเทอร์อยู่ในสายโซ่เป็นจำนวนมาก ซึ่งพันธะนี้มีความแข็งแรงน้อย สามารถแตกตัวได้ง่ายโดยทำปฏิกิริยากับน้ำ (hydrolysis) ดังนั้นจึงสามารถย่อยสลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงได้ นอกจากนี้พอลิเอสเทอร์ยังสามารถจำแนกตามส่วนประกอบของสายโซ่เป็น 2 ประเภท คือ aliphatic และ aromatic polyester ในปัจจุบันมีการผลิตพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ในกลุ่มนี้หลายชนิดดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ประเภท aliphatic polyester เพราะสายโซ่มีความเหมาะสมต่อการสลายพันธะดีกว่า ในส่วนของ aromatic polyester จะต้องทำการปรับปรุงโครงสร้างให้เหมาะสมขึ้น โดยอาจต่อสายโซ่กับ aliphatic polyester ให้เป็นโคพอลิเมอร์ aliphatic-aromatic polyester ก่อนจึงจะสามารถย่อยสลายได้ ซึ่งสามารถใช้ PET เป็นส่วนประกอบหลักได้



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงประเภทและตัวอย่างของพอลิเอสเทอร์ (ปกรณ์ โอภาประกาสิต และ มัณฑนา โอภาประกาสิต, 2551) [4]

<u>หมายเหตุ</u>

PHA - polyhynroxyalkanoate, PHB - polyhydroxy butyrate, PHH - polyhydroxy hexanoate

PHV - polyhydroxyvalerate, PLA - polylactic acid, PCL - polycaprolactone

PBS - polybutylene succinate, PBSA - polybutylene succinate adipate

AAC - Aliphatic-Aromatic copolyester, PET - polyethylene terephthalate

Aliphatic polyester ประกอบด้วยพอลิเมอร์ 4 ตระกูลใหญ่ๆ คือ polybutylene succinate (PBS), polycaprolactone (PCL), polyhynroxyalkanoate (PHA), polylactic acid (PLA) ซึ่ง 2 ชนิดแรกต้องใช้มอนอเมอร์จากปิโตรเคมี ส่วน PLA สามารถใช้วัตถุดิบที่ทดแทนได้แต่ยังต้องอาศัยปฏิกิริยาเคมีในการสังเคราะห์สายโซ่ของพอลิเมอร์ในขั้นตอนสุดท้าย ขณะที่ PHA เป็นพอลิเมอร์ตระกูลเดียวที่กระบวนการสังเคราะห์ทั้งหมดเกิดขึ้นในจุลินทรีย์ โดยปัจจุบันมีการนำพอลิเมอร์เหล่านี้มาใช้ทางการค้า และมีการผลิตผลิตภัณฑ์ออกสู่ตลาดบ้างแล้วคือ PLA ที่สามารถนำไปทดแทนพลาสติกประเภทบรรจุภัณฑ์ เช่น ขวด PET ถุงพลาสติก ฯลฯ โดยพอลิเมอร์ชนิดนี้สังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่เป็นแป้ง เช่น ข้าวโพด และมันสำปะหลัง โดยต้องนำแป้งมาผ่านกระบวนการหมักบ่มด้วย จุลินทรีย์เพื่อให้ได้ lactic acid monomer จากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการ

สังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์แต่ข้อจำกัดของ PLA คือไม่คงรูปเมื่อได้รับความร้อน ส่วนอีกชนิด คือ PHA ที่มีสมบัติทางกลดีกว่า เหมาะกับการขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermal forming) โดยพอลิเมอร์ชนิดนี้มีอนุพันธุ์หลายชนิดด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยพอลิเมอร์ส่วนใหญ่สามารถสังเคราะห์ได้โดยตรงจากสารจำพวกแป้งและน้ำตาล แล้วได้เป็นสายโซ่ยาวของพอลิเมอร์ อีกทั้งมีการใช้จุลินทรีย์ตลอดกระบวนการ จึงเรียกพอลิเมอร์ประเภทนี้ว่า “microbial polymers” [4] พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่น่าสนใจโดยมีรายละเอียด ดังนี้

2.2.2.1 พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid หรือ PLA) พอลิแล็กติกแอซิด (PLA) เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดพอลิเอสเตอร์ (Polyester) ผลิตจากกระบวนการหมักน้ำตาลให้เป็นกรดแล็กติก (Lactic acid) จากนั้นจึงนำมาทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชั่น (Polymerization) ผลิตเป็นเม็ดพลาสติก PLA ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกับพอลิสไตลีน (Polystyrene หรือ PS พลาสติกเบอร์ 6) และพอลิเอทิลีน เทเรฟแทเลต (Polyethylene Terephthalate หรือ PET พลาสติกเบอร์ 1) มีลักษณะใสถ่ายเทความร้อนและความชื้นได้ดีสามารถทนความร้อนได้ตั้งแต่ 60-120 องศาเซลเซียสเหมาะสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตต่างๆ ทั้งการฉีดการอัดและการเป่าขึ้นรูปการอัดรีดและการผลิตเส้นใย [5]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของ PLA ที่ผลิตเพื่อการค้า (NIA, 2551) [4]

สมบัติ	**NatureWork®PLA**[1]	**Biomer®L9000**[2]
ความหนาแน่น (กรัม /มล.)	1.24	1.25
T_g (°C)	56.7 – 57.9	n/a
T_m (°C)	140 - 152	n/a
HTD (°C)	40 – 45 (amorphous) 135 (crystalline)	n/a
Tensile strength (MPA)	53	70
Elongation (%)	6	2.4
Flexular Modulus (MPA)	350 - 450	3,600

2.2.2.2 พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (polyhydroxyalcanoates หรือ PHAs) เป็นกลุ่มพอลิเมอร์ประเภทพอลิเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ทางธรรมชาติโดยจุลินทรีย์ (Cox, MK., 1994) หลากหลายชนิด PHAs ประกอบด้วยมอนอเมอร์หลัก คือ กรดไฮดรอกซีอัลคาโนอิก (hydroxyl alkanoic acids) และสามารถจำแนกอย่างกว้าง ๆ ได้ 2 กลุ่มตามความยาวสายโซ่ของหมู่แทนที่ (R)

ในหน่วยมอนอเมอร์ คือ ความยาวสายโซ่ของหมู่แทนที่สั้น ซึ่งมอนอเมอร์จะประกอบ ด้วยอะตอมคาร์บอน 3 - 5 อะตอม และความยาวสายโซ่ของหมู่แทนที่ปานกลาง ซึ่งมอนอเมอร์จะประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน 6 - 14 อะตอม PHAs ที่ผลิตได้โดยทั่วไปประกอบด้วยมอนอเมอร์ 100 - 30,000 หน่วย และมีความยาวสายโซ่ของหมู่แทนที่สั้น วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต PHAs เป็นวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ ได้แก่ พืชผลทางการเกษตรจำพวกแป้ง เช่น ข้าวโพด มันฝรั่ง มันสำปะหลัง ข้าวสาลี และข้าว ในระยะแรกของการพัฒนาระบบการผลิต PHAs ได้ใช้เชื้อแบคทีเรีย Alcaligenes euthrphus H16 โดยมีน้ำตาลกลูโคสเป็นแหล่งพลังงาน ปัจจุบันมีการศึกษา เชื้อชนิดต่าง ๆ ที่มีคุณสมบัติที่ดีเด่นในการผลิตหรือการใช้วัสดุอื่นๆ เพื่อเป็นแหล่งพลังงาน รวมไปถึงการศึกษาการกระจายตัวของยีนส์ที่สำคัญในระบบการสร้าง PHAs ในเซลล์แบคทีเรียหรือการนำยีนส์ที่สำคัญไปใส่ในจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ เช่น Escherichai coli หรือ Saccharomyces cerevisiae [4]

2.2.2.3 พอลิบิวทีลีนซัคซีเนต (polybutylene succinate หรือ PBS) เป็นพลาสติกสลายได้ทางชีวภาพชนิดพอลิเอสเตอร์ (Polyester) อีกชนิดหนึ่งที่ผลิตจากโมโนเมอร์หลัก 2 ชนิดคือ กรดซักซินิก (Succinic acid) ที่ผลิตมาจากพืชและ1,4-Butanediol ที่ผลิตจากปิโตรเลียม PBS มีคุณสมบัติคล้ายพอลิเอทิลีน (Polyethylene หรือ PE พลาสติกเบอร์ 2) มีลักษณะขุ่น สามารถนำมาขึ้นรูปได้ง่ายในหลากหลายกระบวนการโดยเฉพาะการฉีดขึ้นรูป และการเป่าขึ้นรูปฟิล์มซึ่ง PBS สามารถทนความร้อนได้ตั้งแต่ 80-95 องศาเซลเซียสและมีความยืดหยุ่นที่ดีอีกทั้งยังสามารถนำไปผสมกับ PLA เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์หลายประเภทได้อีกด้วย [5]

2.2.2.4 พอลิไตรเมทิลีนเทอเรพธาเลต (polytrimethylene terephthalate หรือ PTT) PTT เป็นการรวมกันระหว่างสมบัติทางกายภาพของพอลิเอทิลีนเทอเรพธาเลต หรือPET (ความทน ความแข็ง ความเหนียว และความสามารถในการทนความร้อน) และสมบัติด้านการขึ้นรูปของพอลิบิวทิลีนเทอเรพธาเลต (PBT) (มีอุณหภูมิสำหรับการหลอมเหลวและการขึ้นรูปต่ำ สามารถเกิดผลึกได้อย่างรวดเร็ว และใช้เวลาเร็วกว่า PET) นอกจากนี้ยังมีความคล้ายคลึงกับพอลิเอไมด์ (PA 6,6) และพอลิโพรพิลีน (PP) ในการใช้งานด้านเส้นใยและพอลิคาร์บอเนต (PC) ในการใช้งานด้านการหล่อขึ้นรูปของPTT นอกจากนี้ยังมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติด้านการขึ้นรูป (เส้นใยและฟิล์ม) บางประการที่คล้าย PLA และเซลโลเฟน (cllophone) PTT ก็ถูกคาดหวังไว้ว่าจะสามารถนำไปใช้แทน PET ในงานด้านเส้นใยบางส่วนได้เช่นเดียวกับฟิล์มสำหรับหีบห่อต่างๆ และสิ่งของอื่น เช่น ฟิล์มเอกซ์เรย์ เทปแม่เหล็ก (สำหรับเครื่องเสียง วีดีโอ และคอมพิวเตอร์) และป้ายฉลาก [4]

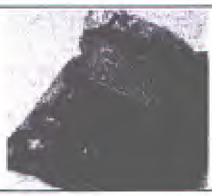
2.2.2.5 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (poly (vinyl alcohol), PVA) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถละลายน้ำและย่อยสลายได้ทางชีวภาพ PVA เป็นที่รู้จักกันมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1924 และเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพและละลายได้ดีในน้ำ มีความต้านทานต่อน้ำมัน ไขมัน และ

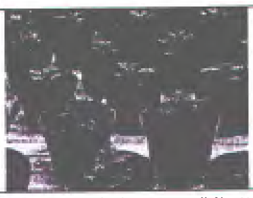
สารละลายต่าง ๆ ดีเยี่ยม รวมทั้งมีความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีก ความทนต่อการกระแทก อีกทั้งมีความยืดหยุ่นและการกั้นการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนสูง PVA สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งในระยะแรก PVA ถูกนำไปใช้ในงานสิ่งทอเป็นหลัก แต่ปัจจุบัน PVA ที่ผลิตได้ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เป็นโปรเทคตีฟคอลลอยด์ (protective colloid) ในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์อิมัลชัน นอกจากนี้ PVA ยังนำไปใช้ในการประสานเม็ดสีกับเส้นใย binding of pigments and fibers) การเคลือบผิว (coating) การผลิตสารซักฟอก และสารล้างทำความสะอาด ตัวยึดติด (กาว) สำหรับกระดาษ ไม้ ผ้า หนัง และวัสดุอื่นๆที่ดูดซับน้ำเป็นอิมัลซิไฟเออร์และโปรเทคตีฟคอลลอยด์ในการผลิตสี [4]

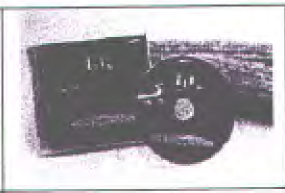
2.3 ความเป็นไปได้ในการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายประเภท เช่นเดียวกับพลาสติกจากปิโตรเคมีผลิตภัณฑ์ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพส่วนใหญ่ถูกใช้ในงานที่เน้นคุณสมบัติการย่อยสลายได้ เช่น ถุงขยะสำหรับเก็บใบไม้ แผ่นฟิล์มเพื่อการเกษตร กระถางต้นไม้ และการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในตลาดระดับสากลของบริษัทต่าง ๆ[8]

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีอยู่ในตลาด [8]

<table>
<tr><td rowspan="4">ผลิตภัณฑ์บรรจุหีบห่อ</td><td rowspan="2">ตัวอย่างผลิตภัณฑ์</td><td> </td><td> </td><td></td></tr>
<tr><td>ถุงใส่ขนมเพื่อรักษาความสดใหม่ให้นานขึ้น Innovia Films®</td><td>ฟิล์มหุ้มให้อากาศผ่านได้และถาดใส่ผัก EB®</td><td>ถุงให้อากาศผ่านได้สำหรับห่อผัก Natura®</td></tr>
<tr><td>การใช้งาน</td><td colspan="3">แผ่นฟอยล์ แผ่นฟิล์ม หรือโฟมที่กลวงตรงกลางสำหรับกันกระแทก ขวด ถาด พลาสติกกันกระแทก ตาข่าย ถุงกระสอบ ถุง</td></tr>
<tr><td>จุดอ่อน / จุดแข็ง</td><td colspan="3">บรรจุภัณฑ์อาหารที่ปนเปื้อนทางชีวภาพนั้นยากที่จะนำผ่านกรับวนการกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นการใช้งานระยะสั้นเท่านั้น / ไม่ต้องคำนึงถึงปริมาณการทิ้งเนื่องจากสามารถย่อยสลายได้</td></tr>
<tr><td rowspan="2">ภาชนะใส่อาหารแบบใช้แล้ว</td><td rowspan="2">ตัวอย่างผลิตภัณฑ์</td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>ถ้วยสำหรับใส่อาหาร Nature Works®</td><td colspan="2">ถ้วยย่อยสลายได้ที่งานประชุมเยาวชนผู้นับถือคาทอลิก ปี ค.ศ. 2005 เมืองโคโลญ Novamont®</td></tr>
</table>

		ช้อน มีด ส้อมที่ใช้ครั้งเดียวทิ้งสามารถถูกย่อยเป็นปุ๋ยได้หลังจากใช้แล้ว Pacovis®	ถ้วยที่ทำจากแป้งที่ผ่านการเคลือบสำหรับใส่เครื่องดื่มร้อนและเย็น Novamont®	
	การใช้งาน	ภาชนะใส่อาหารแบบชั่วคราว (เช่น ถ้วยชาม แก้วน้ำ)หลอด ฯลฯ		
	จุดอ่อน / จุดแข็ง	การพัฒนาสมบัติทางกายภาพและทางกลให้มีความคงทนและใช้งานได้ดีในเงื่อนไขที่จำเป็น / เป็นสินค้าที่มีปริมาณการใช้มาก และมีตลาดรองรับมาก		
เส้นใยและสิ่งทอ	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์			
		เส้นใยสำหรับทอผ้า	เส้นใยดูดซับ NoDax®	
	การใช้งาน	เสื้อผ้า เส้นใย		
	จุดอ่อน / จุดแข็ง	ความหลากหลายในประเภทและรูปแบบผลิตภัณฑ์ / สมบัติการแพร่ผ่านของก๊าซและความเงางาม		
การเพาะปลูก การทำสวนไม้ดอก พืชผล พืชไร่	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์			
		ถาดสำหรับเก็บและขนส่งดอกไม้ย่อยสลายได้ NNZ®	กระถางใส่ต้นไม้ย่อยสลายได้หลังการใช้งาน Novamont®	ฟิล์มคลุมดินไถกลบได้หลังจากใช้งานแล้ว Novamont®
	การใช้งาน	กระถางต้นไม้ ถุงกระสอบใส่ถ่าน แผ่นฟิล์มคลุมดิน ฟิล์มสำหรับผูก ถุงใส่ปุ๋ยหรือเมล็ดพันธุ์พืช		
	จุดอ่อน / จุดแข็ง	ข้อจำกัดด้านราคาของสินค้าจำพวกนี้ / การลดต้นทุนและหมดความยุ่งยากด้านการเก็บขยะหลังการใช้สามารถใช้งานหลังการฝังกลบได้เลย		
การใช้งานทางการแพทย์	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์			
		ด้ายเย็บแผล Gunze®	วัสดุจับยึดกระดูก Gunze®	
	ตัวอย่างการนำไปใช้งาน	ด้ายเย็บแผล การจับยึดกระดูก การผ่าตัดปลูกถ่ายอวัยวะถุงมืออนามัย วัสดุใช้กับปาก		
	จุดอ่อน / จุดแข็ง	สมบัติทางกายภาพและทางกล / สมบัติพื้นฐานที่ดีทางชีวภาพ		

ชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้า	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์			
		วอล์กแมน Sony	แผ่นดีวีดี Sony	ชิ้นส่วน notebook Sanyo โดยวัสดุ Nature Works®
	ตัวอย่างการนำไปใช้งาน	หน้ากากหุ้มเครื่องซีดี แผ่นดีวีดี ชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์ และเครื่องเล่นดีวีดี การ์ดบัตร		
	จุดอ่อน / จุดแข็ง	สามารถย่อยสลายได้หลังจากหมดอายุการใช้งาน เป็นการช่วยลดปริมาณขยะ		

2.4 การใช้ประโยชน์ผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้

ประโยชน์ของพลาสติกย่อยสลายได้ที่ประสบผลสำเร็จมากที่สุด คือ พลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้ในการผ่าตัด และไหมเย็บแผล ปัจจุบันมักทำจากพลาสติกย่อยสลายได้ที่สามารถละลายในของเหลวของร่างกายได้อย่างช้า ๆ ซึ่งจะช่วยให้ไม่ต้องมีการตัดไหม นอกจากนี้ยังมีการบรรจุยาลงในแคปซูลพลาสติกที่ละลายได้ช้า เพื่อปล่อยตัวยาเข้าสู่กระแสโลหิตในอัตราที่ควบคุมได้ การนำไปใช้ประโยชน์ของพลาสติกย่อยสลายได้สามารถสรุปได้โดยสังเขปดังนี้คือ

2.4.1 การใช้งานทางการแพทย์ พลาสติกย่อยสลายได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุทางการแพทย์ เช่น ผิวหนังเทียม ยาที่ถูกออกแบบมาให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยตัวยาอย่างช้าๆ ภายในร่างกายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง หรือไหมละลาย อุปกรณ์ประเภทสกรู และแผ่นดามกระดูกที่ได้รับการผ่าตัดและฝังอยู่ในร่างกายที่สามารถย่อยสลายได้เองภายหลังจากการทำหน้าที่ตามที่ได้รับการออกแบบไว้แล้วเสร็จสิ้น ทำให้ไม่ต้องทำการผ่าตัดซ้ำเพื่อนำวัสดุที่ใช้ในการรักษาเสร็จแล้วออกจากร่างกายผู้ป่วย

2.4.2 สารเคลือบกระดาษ หรือโฟม ปัจจุบันมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้งานเป็นสารเคลือบกระดาษสำหรับห่อแฮมเบอร์เกอร์ หรือถ้วยน้ำชนิดใช้แล้วทิ้ง

2.4.3 ฟิล์มคลุมดิน และวัสดุสำหรับการเกษตร ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตรเป็นอุปกรณ์ทางการเกษตรที่สำคัญในการเพาะปลูกพืชบางชนิด เช่น มะเขือเทศ ซึ่งแผ่นฟิล์มจะช่วยป้องกันการเติบโตของวัชพืช และรักษาความชื้นในดิน การใช้ฟิล์มสามารถผลิตได้จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะช่วยลดขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการไถพรวนลงดินได้โดยตรง ช่วยป้องกันการสูญเสียแร่ธาตุและสารอาหารบริเวณหน้าดินซึ่งมักเกิดขึ้นในขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์ม นอกจากนี้ยังมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้เป็นวัสดุ

ควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญ เช่น ตัวยา ปุ๋ย สารเคมีสำหรับการเกษตร วัสดุกักเก็บน้ำสำหรับการเพาะปลูกพืชในทะเลทราย รวมถึงถุงหรือกระถางสำหรับเพาะต้นกล้า

2.4.4 ถุงสำหรับใส่ของ (shopping Bag) ถุงพลาสติกและฟิล์มพลาสติกสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ได้รับความนิยมในการใช้งานมากขึ้นในปัจจุบัน ส่งผลให้มีสัดส่วนอยู่ในขยะในปริมาณสูงและยังไม่ได้รับความนิยมนำกลับมารีไซเคิลมากนัก เนื่องจากมีความยุ่งยากในขั้นตอนการคัดแยกและทำความสะอาด รวมถึงมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง ทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ พลาสติกย่อยสลายได้จึงเป็นพลาสติกที่มีศักยภาพในการนำมาใช้แทนพลาสติกทั่วไปเพื่อผลิตเป็นถุงและฟิล์มในบางโอกาส

2.4.5 ฟิล์ม และถุงสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร (food waste film and bags) ฟิล์มและถุงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใช้ใส่ขยะเศษอาหาร เหมาะสำหรับสถานที่ที่มีระบบการกำจัดขยะอินทรีย์ด้วยวิธีการคอมโพสท์ ซึ่งกำลังได้รับความนิยมในต่างประเทศ เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการนำมาทำคอมโพสท์พร้อมขยะอินทรีย์อื่น ๆ ทำให้เกิดความสะดวกไม่ต้องแยกทิ้ง ปัจจุบันมีความต้องการใช้ถุงพลาสติกย่อยสลายได้สูงขึ้นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในหลายเมืองของประเทศอิตาลี ได้ใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหารตั้งแต่ปี ค.ศ. 1998 โดยมีบริษัท Novamot ซึ่งเป็นผู้ผลิตหลักให้กับประเทศในสหภาพยุโรป ทำการผลิตถุงย่อยสลายได้ในสภาวะคอมโพสท์ 10,000 ตันต่อปี ถุงที่ผลิตขึ้นนี้สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 8-10 สัปดาห์ภายใต้สภาวะการหมักในโรงงานคอมโพสท์เชิงอุตสาหกรรม

2.4.6 บรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค (consumer packaging materials) ศักยภาพหนึ่งในการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพคือ การใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ซึ่ง ตามปกติการใช้บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากพลาสติกทั่วไปมักไม่ได้รับความนิยมนำกลับมารีไซเคิลมากนัก เนื่องจากมีการปนเปื้อนสูง ทำให้ไม่สะดวกต่อการเก็บและทำความสะอาด การนำพลาสติกย่อยสลายได้มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร เช่น ถาดย่อยสลายได้สำหรับอาหารสำเร็จรูปและอาหารจานด่วนจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาด้านการจัดการขยะบรรจุภัณฑ์ลงได้

2.4.7 โฟมเม็ดกันกระแทก (loose fill) โฟมเม็ดกันกระแทก (loose fill) โดยทั่วไปผลิตจากพอลิสไตรีน เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านการขนส่งสินค้า มีข้อดีคือ มีความยืดหยุ่นสามารถป้องกันสินค้าจากแรงกระแทกระหว่างการเคลื่อนย้ายและขนส่งได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบาทำให้การขนส่งสินค้าเป็นไปได้อย่างสะดวกและประหยัดเชื้อเพลิง แต่ปัญหาคือ พอลิสไตรีนเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก และใช้เนื้อที่ในการจัดเก็บเพื่อการกำจัดสูง ในกรณีที่ต้องกำจัดด้วยการฝังกลบต้องใช้เนื้อที่ในบ่อฝังกลบมาก แม้ว่าจะนำมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้แต่ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากนัก ปัจจุบันมีการพัฒนาการผลิตโฟมเม็ดกันกระแทกจากแป้งและพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่ละลายน้ำและย่อยสลายได้ทางชีวภาพขึ้น ทำให้ง่ายต่อการใช้งานและสะดวกในการกำจัดเมื่อสิ้นสุดการใช้งานแล้ว [4]

2.5 โครงสร้างเทคโนโลยีของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

2.5.1 เทคโนโลยีต้นน้ำ-กลางน้ำ

2.5.1.1 **กระบวนการหมัก (Fermentation)** โดยใช้เทคโนโลยชีวภาพ เริ่มด้วยการเตรียมน้ำตาลโดยเริ่มต้นจากการบดหรือโม่ผลผลิตทางการเกษตรโดยให้ละเอียดเป็นแป้ง จากนั้นทำการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสที่มีเอนไซม์ หรือกรดเป็นตัวเรงปฏิกิริยา จากนั้นจะเป็นการเตรียมมอนอเมอร์ โดยการนำน้ำตาลไปหมักด้วยจุลินทรีย์ที่เหมาะสมให้เกิดการสังเคราะห์มอนอเมอร์ขึ้น และสุดท้ายจะเป็นการเตรียมพอลิเมอร์เช่น ในกรณีของ PHAs เป็นกระบวนการโดยตรงจากน้ำตาล หรือน้ำมันที่ได้ไปหมักด้วยจุลินทรีย์ที่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลไปเป็นพอลิเมอร์โดยจะผลิตเก็บไว้ภายในเซลล์ของจุลินทรีย์

2.5.1.2 **กระบวนการพอลิเมอไรเซชั่น (Polymerization)** คือ กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากมอนอเมอร์ซึ่งเป็นหน่วยย่อยที่เกิดปฏิริยาเคมีแล้วเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวภายใสภาวะต่าง ๆ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ และความดัน เป็นต้น ปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการพอลิเมอไรเซชั่น ได้แก่

- ปฏิกิริยาการควบแน่น (condensation): มอนอเมอร์มีส่วนที่ไวต่อปฏิกิริยาที่ปลายทั้งสองเมื่อทำปฏิกิริยากันแล้วจะเกดการเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว
- ปฏิกิริยาการเติม (addition): มอนอเมอร์มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง เมื่อเกิดปฏิกิริยาพันธะคู่จะเปิดออกแล้วจึงเชื่อมต่อเป็นสายยาว
- ปฏิกิริยาการเปิดวง (ring-opening): มอนอเมอร์มีโครงสร้างเป็นวงแหวนเมื่อเกิดปฏิกิริยาจะเกิดการเปิดวงแล้วจึงเชื่อมต่อเป็นสายยาว

2.5.1.3 **กระบวนการสังเคราะห์ พอลิเมอร์ โดยใช้เทคโนโลยีพันธุวิศวกรรม** กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์สามารถทำได้โดยตรงจากการปรับแต่งพันธุกรรม หากได้มีการนำยีนที่สำคัญในการสร้างพอลิเมอร์จากจุลินทรีย์ไปใส่ในพืชเป้าหมาย เพื่อให้พืชนั้นสามารถสังเคราะห์พอลิเมอร์ได้โดยตรงจากกระบวนการสังเคราะห์แสง และเก็บสะสมไว้ในส่วนต่าง ๆ ของพืช

2.5.2 เทคโนโลยีปลายน้ำ

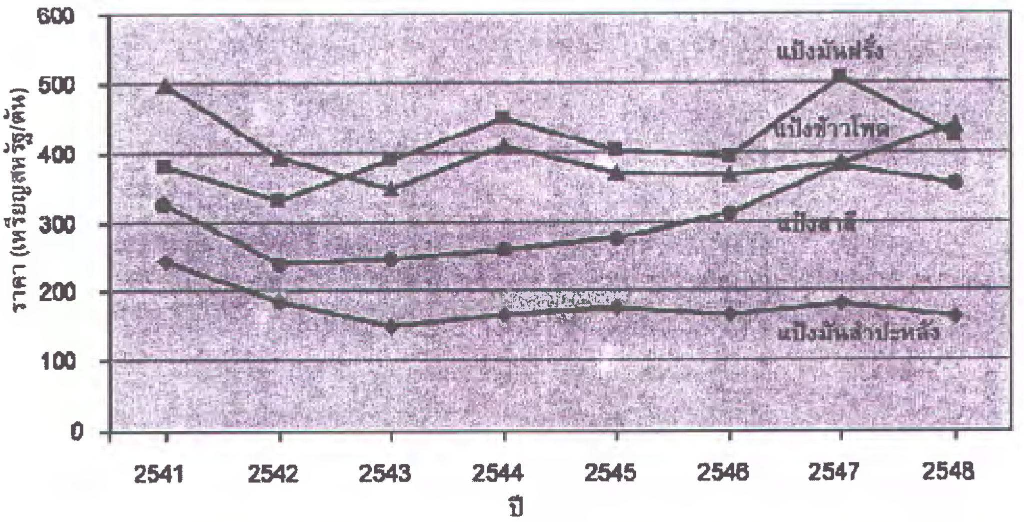
2.5.2.1 **กระบวนการคอมพาวดิ้ง (Compounding)** กระบวนการคอมพาวดิ้งเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญและจำเป็นในการปรับสมบัติทางกายภาพและทางกลให้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพแสดงปรากฏการณ์การไหลและการก่อตัวได้ดี รวมทั้งมีความยืดหยุ่น แก้ปัญหาเรื่องความเปราะบาง เพื่อให้เข้าใกล้กับสมบัติเด่นของพลาสติกที่มาจากปิโตรเคมีที่เราคุ้นเคยกันดี โดยเฉพาะให้ใกล้เคียง กับพอลิเอทธิลีนหรือพอลิโพรพิลีนให้มากที่สุด โดยการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นหรือการ

เติมสารเติมแต่ง (additive) เช่น พลาสติไซเซอร์ (plasticizer) สารช่วยผสม (compatibilizer) ฟิลเลอร์ (filler) สารเสริมแรง (reinforcing agent) สารก่อผลึก (nucleating agent) เป็นต้น

2.5.2.2 กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ (Processing) ได้แก่ การนำเม็ดพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการคอมพาวดิ้งและการผสมแล้วมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์โดยกระบวนการขึ้นรูปต่าง ๆ ได้แก่ การฉีด (injection molding) การอัดรีด (extrusion) การเป่าภาชนะกลวง (blow molding) การขึ้นรูปด้วยความร้อน (thermoforming) การอัดขึ้นรูป (compression molding) เป็นต้น [8]

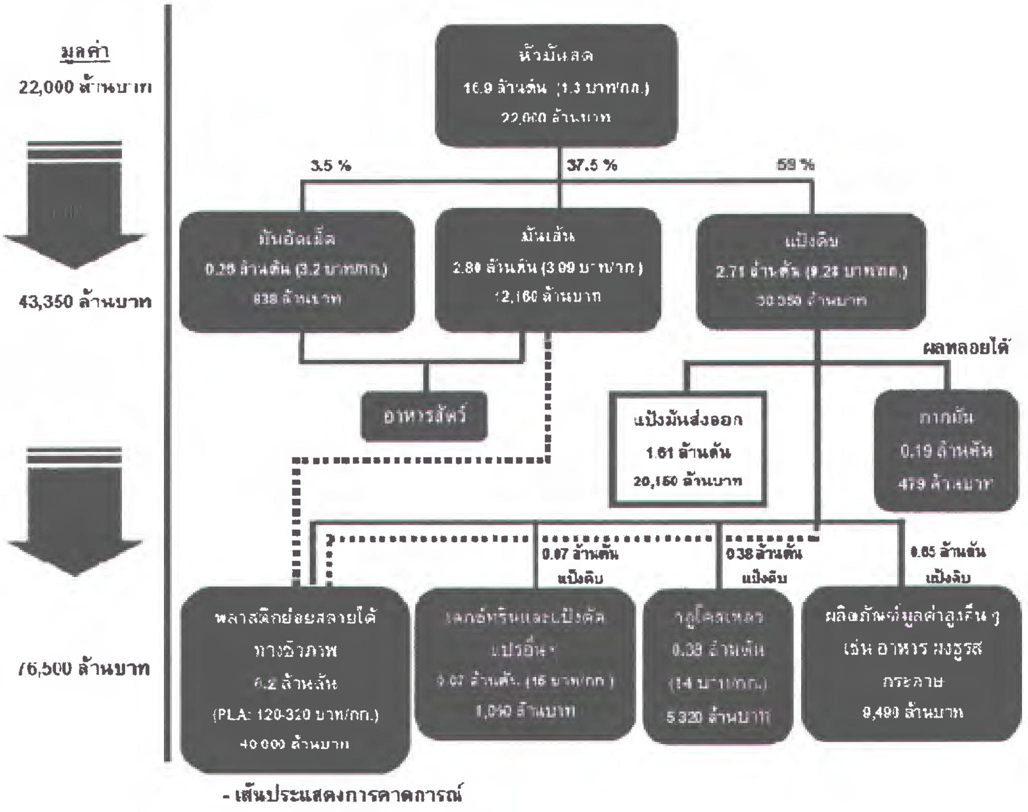
2.6 ความพร้อมของประเทศไทยต่ออุตสาหกรรมพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

2.6.1 ความพร้อมด้านวัตถุดิบ ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่อุดมสมบูรณ์ไปด้วยวัตถุดิบมวลชีวภาพหรือผลผลิตจากการเกษตรได้แก่ ข้าวเจ้า อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด เซลลูโลส ข้าวสาลี ปาล์มน้ำมัน เป็นต้น โดยผลผลิตจากการเกษตรที่มีส่วนประกอบของแป้ง (คาร์โบไฮเดรต) น้ำตาล (กลูโคส) หรือเส้นใย (เซลลูโลส) เหล่านี้สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่เมื่อพิจารณาด้านความสามารถในการแข่งขันด้านราคาและความสามารถในการเพาะปลูกของประเทศไทยแล้ว อาจจัดได้ว่ามันสำปะหลังเป็นพืชที่มีความเป็นไปได้ และมีความเหมาะสมมากที่สุด โดยเมื่อเทียบราคาแป้งมันสำปะหลังกับแป้งที่ทำจากพืชชนิดอื่นตามราคาตลาดโลก แป้งมันสำปะหลังจะมีราคาถูกที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2.3 นอกจากราคาที่แข่งขันได้ของมันสำปะหลังแล้ว ประเทศไทยยังสามารถส่งออกผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังเป็นอันดับ 1 ของโลกด้วย



รูปที่ 2.3 ราคาแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวโพด และแป้งสาลี ในตลาดโลก [8]

ผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังที่ส่งออกเกือบทั้งหมดอยู่ในรูปของมันเส้น มันอัดเม็ดและแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งมีราคาต่ำ และยังขึ้นอยู่กับปัจจัยจากตลาดต่างประเทศทั้งในเรื่องราคา และปริมาณความต้องการที่ไม่แน่นอน ดังนั้น เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าจึงควรใช้ประโยชน์จากมันสำปะหลังในรูปแบบที่เป็นผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องทางอุตสาหกรรม โดยเฉพาะแป้งมันสำปะหลังที่สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบทางอุตสาหกรรมได้อย่างมากมาย ดังรูปที่ 2.4 หากหัวมันสำปะหลังสดถูกแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นกลาง ได้แก่ มันอัดเม็ด มันเส้นและแป้งดิบ จะก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มประมาณ 1 เท่า (ร้อยละ 100) คิดเป็น 43,350 ล้านบาท แต่หากมีการแปรรูปไปถึงผลิตภัณฑ์ขั้นปลาย เช่น พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เด็กซ์ทรินและแป้งดัดแปรอื่นๆ กลูโคสเหลว และผลิตภัณฑ์แปรรูปจากมันสำปะหลังที่มีมูลค่าสูงอื่นๆ เช่น อาหาร ผงชูรส กระดาษ เป็นต้น จะก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 80 คิดเป็น 76,500 ล้านบาท โดยเฉพาะจากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพียงอย่างเดียวมีมูลค่า 40,000 ล้านบาท



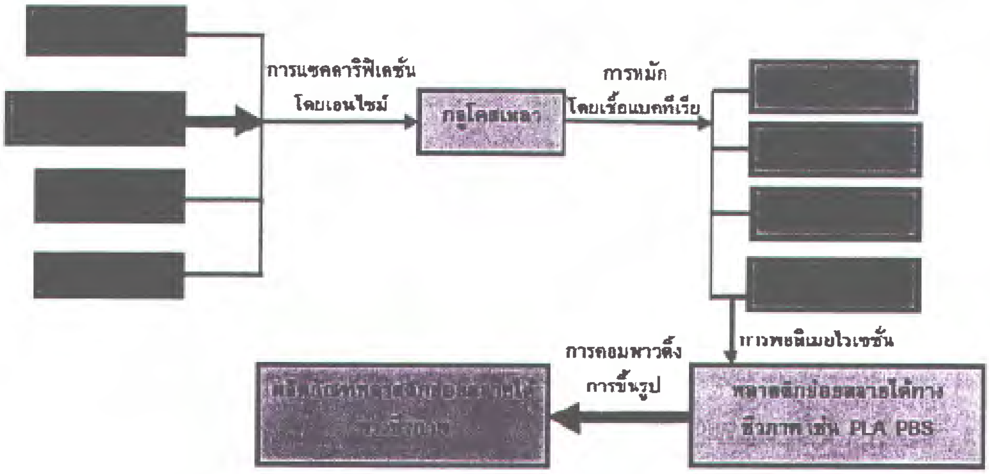
รูปที่ 2.4 ห่วงโซ่มูลค่าของมันสำปะหลัง [8]

ที่มา : ข้อมูล พ.ศ. 2548 ดัดแปลงจากแผนกลยุทธ์การวิจัยด้านเกษตรและอุตสาหกรรมการเกษตรตามวาระการวิจัยแห่งชาติในภาวะวิกฤตเพื่อฟื้นฟูชาติโดย ศาสตราจารย์ดร. ธีระสูตะบุตร และคณะ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์แผนภูมิที่ 2 หน้า 17 และรายงานฉบับร่าง Evaluation and Identification for Raw Intervention Ideas for Thailand's Tapioca Subsector โดย AgriSource Co. Ltd.

หมายเหตุ : 1 ตันของหัวมันสดสามารถเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แปรจากมันสำปะหลังมูลค่าสูง ที่มีมูลค่า 3,650 บาท

2.6.2 ความพร้อมด้านเทคโนโลยี สำหรับเทคโนโลยีการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากวตถัุดิบมวลชีวภาพนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งเริ่มจากมันสำปะหลังถูกแปรรูปเป็นแป้งมันสำปะหลังและนำไปผ่านกระบวนการแซคคาริฟิ-เคชั่นโดยเอนไซม์ได้กลูโคสเหลวจากนั้นนำกลูโคสเหลวที่ได้ไปหมักโดยเชื้อแบคทีเรียหรือเชื้อราจะได้กรดแลคติก และเมื่อนำกรดแลคติกไปพอลิเมอไรเซชั่นจะไดPLA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ พอลิเมอร์เหล่าถูกนำไปผ่านกระบวนการคอมพาวดิ้ง ใส่สารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น และนำไปผ่านกระบวนการสุดท้ายคือการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์รูปร่างต่าง ๆ ตามการใช้งาน ปัจจุบนประเทศไทยมีเพียงสองเทคโนโลยีที่ทำได้ในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ การแซคคาลิฟิเคชั่นโดยเอนไซม์เพื่อผลิตน้ำตาลกลูโคสจากแป้ง และการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติก ในขณะที่เทคโนโลยีประเภทอื่นยังอยู่ในระดับการวิจัยและพัฒนา



รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้จากวัตถุดิบมวลชีวภาพ (ลูกศรทึบ แสดงถึงกระบวนการในระดับอุตสาหกรรมในประเทศไทย) [8]

2.6.3 การผลิตในประเทศไทย ปัจจุบันมีภาคเอกชนที่พัฒนาผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพ 9 รายประกอบด้วย

(1) ผู้ผลิตถุงพลาสติกสำหรับปลูกต้นไม้ โดยใช้เทคโนโลยีผลิตจากแป้งข้าวโพด และนำเข้าเม็ดพลาสติกจากสหรัฐอเมริกานำมาขึ้นรูปในประเทศ

(2) ผู้ผลิตภาชนะใส่อาหารจาน ชาม ช้อนส้อม

(3) ผู้ผลิตถุงช้อปปิ้งส้อม แก้วน้ำ หลอดดูดน้ำ โดยใช้เทคโนโลยีผสมสารเติมแต่งที่ทำให้พลาสติกยอยสลายได้กับพลาสติกทั่วไป เช่น PE

(4) ผู้ผลิตภาชนะใส่อาหารกันความร้อนแบบใช้ครั้งเดียว เช่น จาน ชาม ช้อน โดยใช้เทคโนโลยีผลิตจากชานอ้อย

(5) ผู้ผลิตภาชนะใส่อาหารแบบใช้ครั้งเดียวเช่น จาน ชาม ถาด แก้วน้ำโดยใช้ผลผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง อัดขึ้นรูปด้วยความร้อนเป็นผลิตภัณฑ์ บวกกับเทคโนโลยีของตนเอง

(6) ผู้ผลิตภาชนะใส่อาหารใช้ครั้งเดียว เช่น จาน ชาม ช้อน ผลิตจากชานอ้อย

(7) ผู้ผลิตภาชนะใส่อาหารแบบใช้ครั้งเดียวเช่น จาน ชาม ถาด แก้วน้ำโดยใช้เทคโนโลยีผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง อัดขึ้นรูปด้วยความร้อนเป็นผลิตภัณฑ์ ผนวกกับการใช้เทคโนโลยีของตนเอง

(8) ผู้ผลิตถุงพลาสติก ฟิล์ม โดยใช้เทคโนโลยีนำเขาเม็ดพลาสติกจาก สหรัฐอเมริกาและเม็ดพลาสติกคอมพาวด์จากญี่ปุ่น และ

(9) ผู้ผลิตกรดแลกติก โดยใช้เทคโนโลยีการผลิตจากกากน้ำตาลหรือมันสำปะหลัง [8]

2.7 กระบวนการขึ้นรูปพลาสติก

สำหรับกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติก ในอุตสาหกรรมพลาสติกของประเทศไทยได้ทำการจัดกลุ่มอุตสาหกรรมการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติก โดยทำการพิจารณาแบ่งตามกระบวนการผลิต และ ประเภทของผลิตภัณฑ์พลาสติก ดังนั้นจึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 13 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2.3

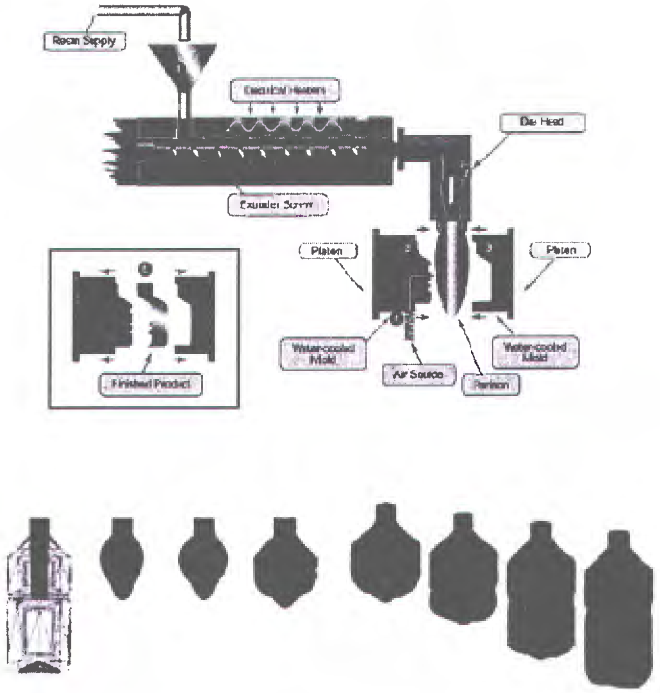
ตารางที่ 2.3 การจำแนกประเภทกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก [7]

ลำดับ	กระบวนการผลิต	ประเภทผลิตภัณฑ์	วัตถุดิบ (ประเภทเม็ดพลาสติก)
1	Blow Molding *	ถังน้ำมันเครื่อง/ขวดชมพู	PP, PE, PET, HDPE
2	Stretch Blow Molding *	ขวด	PET PET, PP, HDPE
3	Injection Molding	ชิ้นส่วนรถยนต์, ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์(IC), เครื่องใช้ในครัวเรือน, เครื่องใช้ไฟฟ้า, ชั้นวางของ	Thermoplastics (PP, PE, HDPE, ABS, PS, PC)
4	Blown Film	ถุงพลาสติก	Extrusion HDPE,

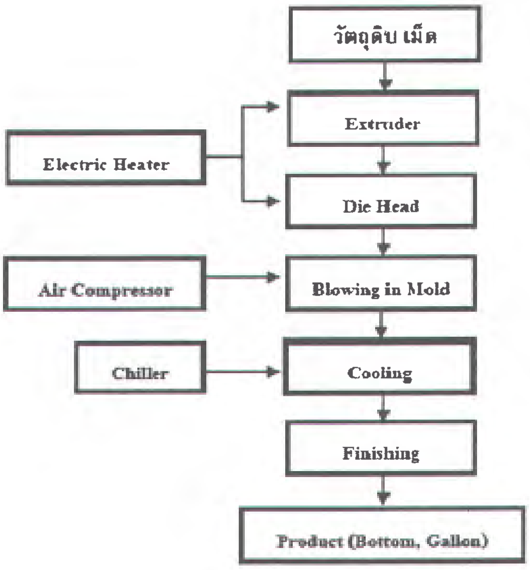
ลำดับ	กระบวนการผลิต	ประเภทผลิตภัณฑ์	วัตถุดิบ (ประเภทเม็ดพลาสติก)
			LDPE, LLDPE
5	Film Extrusion	แผ่นฟิล์มบาง(ฟิล์มบรรจุภัณฑ,์เทปกาว ฯลฯ)	PP, PE, LDPE, HDPE
6	Sheet Extrusion	แผ่นพลาสติก, แฟ้มพลาสติก, ฯลฯ	PP, PE, PS, PMMA
7	Pipe / TubeExtrusion	ท่อน้ำประปา, ท่อระบายน้ำ, ท่อ	PVC/PE, ฯลฯ PVC, PE, PP
8	Profile Extrusion	รางน้ำฝน, ขอบหน้าต่าง, รางสายไฟ, วงกบ ,ฯลฯ	PVC Rigid, HDPE
9	Rotational Molding	ถังเก็บน้ำขนาดใหญ่, ถังขยะ, ลังใส่ของ, ฯลฯ	PVC, PP, HDPE
10	Thermoforming	ถาดใส่บรรจุภัณฑ์อาหาร, ถ้วยน้ำดื่ม, ฯลฯ	PS, PE, PP, PET
11	Laminating	ถุงใส่ขนมอบกรอบ, ถุงบรรจุภัณฑ์หลายชั้น ฯลฯ	PE, PP
12	TapeYarn / Filament	กระสอบพลาสติก, ถุงปุ๋ย, ถุงจัมโบ้,ฯลฯ	PP, HDPE, PA6, PA66, PET
13	Compressed Molding	ถ้วย, จาน, ชาม, ช้อน, เครื่องใช้ในครัวเรือน(ที่ทำจากMelamine)	Melamine
14	Other (Calendering, etc.)	ผลิตภัณฑ์พลาสติกอื่นๆ	อื่นๆ

หมายเหตุ: * การเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม Blow Molding กับ กลุ่ม Stretch Blow Moldingเป็นการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกประเภทขวดบรรจุภัณฑ์เหมือนกัน แต่เนื่องจากมีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ทำให้การใช้พลังงานของแต่ละกลุ่มจะไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้จึงต้องทำการแยกกลุ่มออกจากกัน

2.7.1 กระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blow Molding Process) การเป่าขึ้นรูปขวดพลาสติกโดยเริ่มจากวัตถุดิบคือ เม็ดพลาสติกชนิด HDPE (ส่วนใหญ่) PP, PE เป็นต้น นำเม็ดพลาสติกมาหลอมใน Extruder โดยใช้ความ ร้อนจาก Heater ไฟฟ้าจากนั้นสกรูจะอัดพลาสติกเหลวโดยใช้หลักการขับเคลื่อนสกรูและการปิด-เปิดMold ด้วยระบบ Hydraulicsส่งผ่าน หัว Die Head ออกมาเป็นลักษณะทรงกระบอก (Parison) จากนั้นMold จะเคลื่อนตัวมาประกบแล้วเป่าลม โดยใช้อากาศอัดเพื่อให้เนื้อพลาสติกขยายเต็มตาม Mold เมื่อเต็ม Mold แล้วจะมีน้ำเย็นจากเครื่องChiller ไหลมาหล่อเย็นเพื่อให้ชิ้นงานแข็งตัวคงรูปตามแม่พิมพ์ที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.6 ผลิตภัณฑ์ที่ได้กระบวนการดังกล่าว เช่น ขวดบรรจุภัณฑ์ประเภท ขวดน้ำมันเครื่อง, แกลอนน้ำมัน, ขวดแชมพู, ขวดนมเปรี้ยว, ขวดน้ำหมึก เป็นต้น แผนผังแสดงกระบวนการเป่าขึ้นรูปแสดงไว้ดังรูปที่ 2.7 [7]



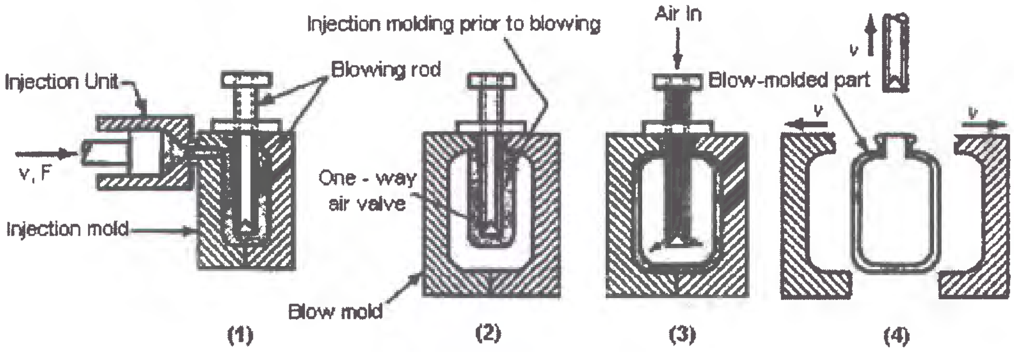
รูปที่ 2.6 กระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blow Molding Process) [7]



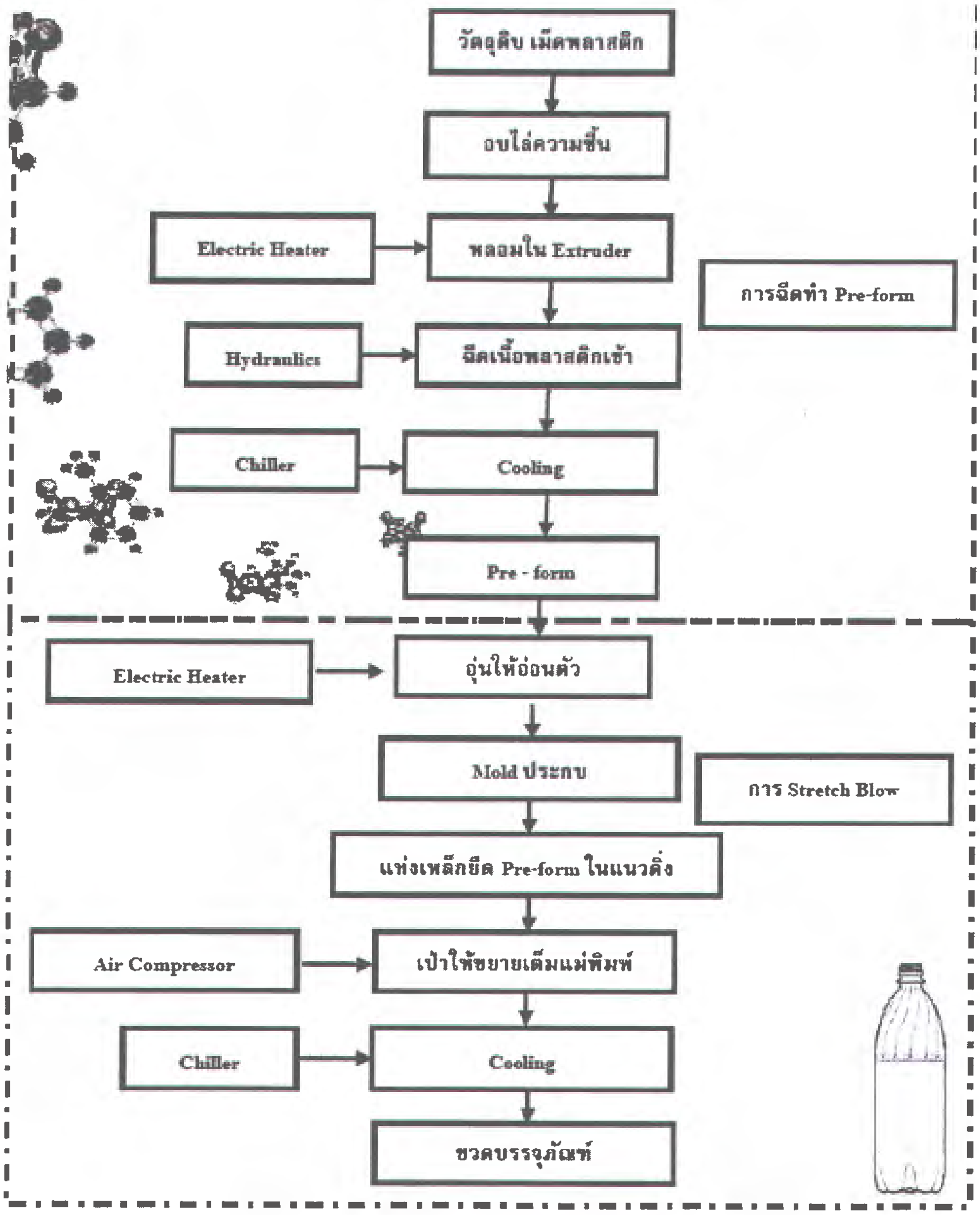
รูปที่ 2.7 แผนผังกระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blow Molding Process) [7]

2.7.2 กระบวนการดึง – เป่า ขึ้นรูป (Stretch Blow Molding Process) เป็นกระบวนการผลิตขวดบรรจุภัณฑ์เหมือนกัน ซึ่งการขึ้นรูปแบบนี้จะเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ภาชนะพลาสติก เพราะมีความหนาเฉลี่ยที่แน่นอน, ลดค่าใช้จ่ายในการผลิต เพราะเกิดของเสียน้อยและยังได้ภาชนะที่ไม่มีตะเข็บรอยต่อตรงคอและก้นของภาชนะจึงทำให้มีคุณภาพสูงกว่า การขึ้นรูปแบบBlow Molding ซึ่งการขึ้นรูปแบบ Stretch Blow Molding จะแบ่งขั้นตอนการผลิตออกเป็น 2 ส่วน คือ การฉีดเพื่อให้เป็น Pre-form แล้วจึงนำ Pre-form ที่ได้ไปเข้าสู่ขั้นตอนการ Stretch Blow เพื่อขึ้นรูปตามแม่พิมพ์ต่อไป

การฉีด (Injection Molding) คือ ใช้หลักการขับเคลื่อนสกรูและการปิด-เปิด Mold ด้วยระบบ Hydraulics หรือใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเริ่มจากวัตถุดิบเม็ดพลาสติก ส่วนใหญ่เป็นชนิด PET จากนั้นนำไปหลอมใน Extruder โดยใช้ความร้อนจาก Heater ไฟฟ้าจากนั้นสกรูจะอัดส่งผ่าน หัว Nozzle ผ่าน Runner เข้าสู่ Mold (ซึ่งการผลิต Pre-form ส่วนใหญ่จะใช้Hot Runner เพื่อลดปริมาณของเสีย) เมื่อเนื้อพลาสติกไหลเข้าเต็ม Mold จะมีน้ำเย็นจาก Chiller ไหลผ่าน Mold เพื่อให้ชิ้นงานเย็นและแข็งตัวจากนั้น Mold จะเปิดออกเพื่อให้นำชิ้นงานออกการ Stretch Blow คือ เป็นการเป่าขึ้นรูปขวดโดยใช้วัตถุดิบคือ Pre-form จากการฉีดนำมาอุ่นให้ Pre-form อ่อนตัวจากนั้น Mold จะมาประกบแล้วจะมีแท่งเหล็กกดก้นตัว Pre-form ให้ยืดลงในแนวดิ่งแล้วทำการเป่าให้ขยายเต็มแม่พิมพ์ จากนั้นจะมีน้ำเย็นไหลผ่าน Mold เพื่อให้ขวดแข็งตัวคงรูป แล้วเปิด Mold ปล่อยขวดออกมาเป็นอันเสร็จสิ้น รายละเอียดดังรูปที่ 2.8 [7]

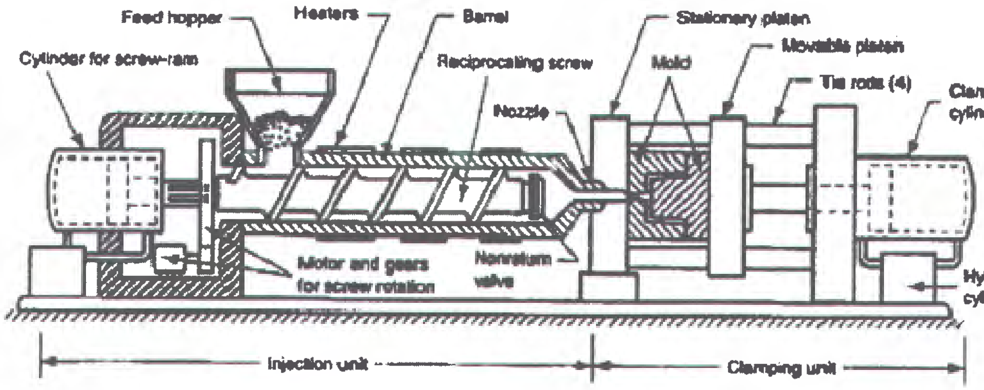


รูปที่ 2.8 การขึ้นรูปแบบ Stretch Blow Molding [7]

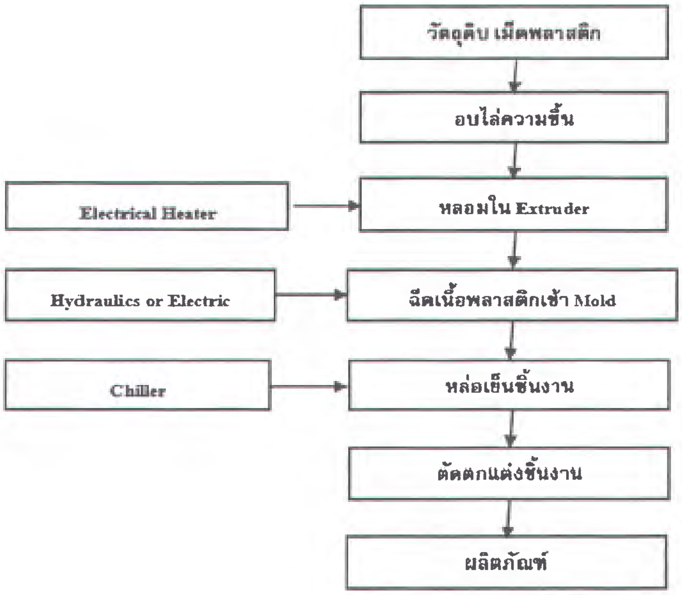


รูปที่ 2.9 แผนผังกระบวนการผลิต Stretch Blow Molding [7]

2.7.3 กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding Process) การขึ้นรูปแบบฉีด จะเริ่มจากวัตถุดิบเป็นเม็ดพลาสติกหรือเป็นผงก็ได้ลงในกรวยเติม เม็ดพลาสติกจะถูกเกลียวหนอนหมุนส่งไปยัง ด้านหน้าของกระบอกสูบ ซึ่งมีแผ่นความร้อนไฟฟ้า (Electrical Heater) ทำให้พลาสติกหลอมเหลว หลังจากนั้นจะเคลื่อนเกลียวหนอนให้ดันพลาสติกผ่านหัวฉีดไปเข้าแม่พิมพ์ (Mold) ซึ่งปิดอยู่ แม่พิมพ์ซึ่งจะมีการหล่อเย็นด้วยน้ำเย็นที่ผลิตจากเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) เพื่อทำให้ชิ้นงานเย็นและแข็งตัว สามารถถอดออกจากแบบได้ในระยะเวลาสั้น จากนั้นจะส่งไปตกแต่งชิ้นงานต่อไป ดังรูปที่ 2.10 [7]



รูปที่ 2.10 กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding Process) [7]



รูปที่ 2.11 แผนผังกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding Process) [7]

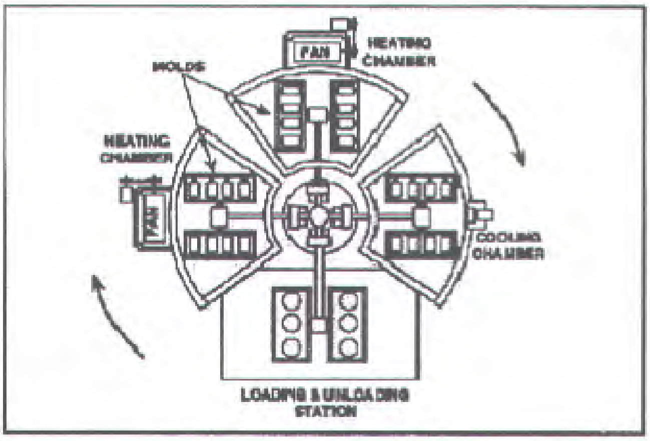
2.7.4 กระบวนการหมุนขึ้นรูป (Rotational Molding) การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกโดยวิธีหมุน เหมาะสำหรับผลิตชิ้นงานภายในกลวงขนาดใหญ่ซึ่งจะได้ชิ้นงานที่ไม่มีความเค้น ผิวงานเรียบร้อย ระยะเวลาการผลิตต่ำ และมีความหนาสม่ำเสมอ หลักการทำงานของการขึ้นรูปแบบนี้ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอนดังนี้ ดังรูปที่ 2.12

2.7.4.1 การใส่วัตถุดิบ (loading) วัตถุดิบที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นพลาสติกพวกเทอร์โมพลาสติก อาจจะมีลักษณะเป็นของเหลว หรือ เป็นผงก็ได้นำมาใส่เข้าไปในแม่พิมพ์กลวงหลังจากนั้นปิดฝาประกบแม่พิมพ์

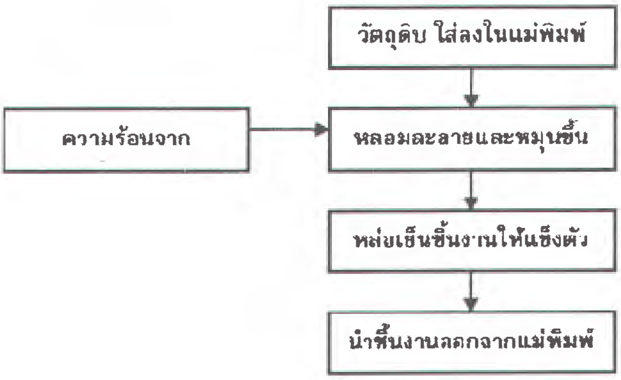
2.7.4.2 การขึ้นรูปหรือการหลอมละลาย (molding หรือ curing) ย้ายแม่พิมพ์เข้าไปยังห้องร้อน เพื่อนำไปหมุนสองแกนพร้อมทั้งใหความ ร้อนเพื่อให้พลาสติกเหลว และไหลเกลี่ยไปตามผิวภายในของแม่พิมพ์จนทั่วถึง ด้วยแรงโน้มถ่วง (ไม่ใช่แรงเหวี่ยง)

2.7.4.3 การทำให้เย็น (cooling) ย้ายไปยังห้องเย็นโดยอาจจะใช้อากาศเย็น หรือน้ำเย็นพ่นใส่แม่พิมพ์แต่แม่พิมพ์จะต้องยังคงหมุนอยู่เพื่อลดการหดตัวของชิ้นงานขณะทำการหล่อเย็น

2.7.4.4 การนำเอาชิ้นงานออก (unloading) จากนั้นเมื่อชิ้นงานแข็งตัวและคงรูปแล้วก็สามารถเปิดแม่พิมพ์ออก เพื่อนำชิ้นงานออกได้

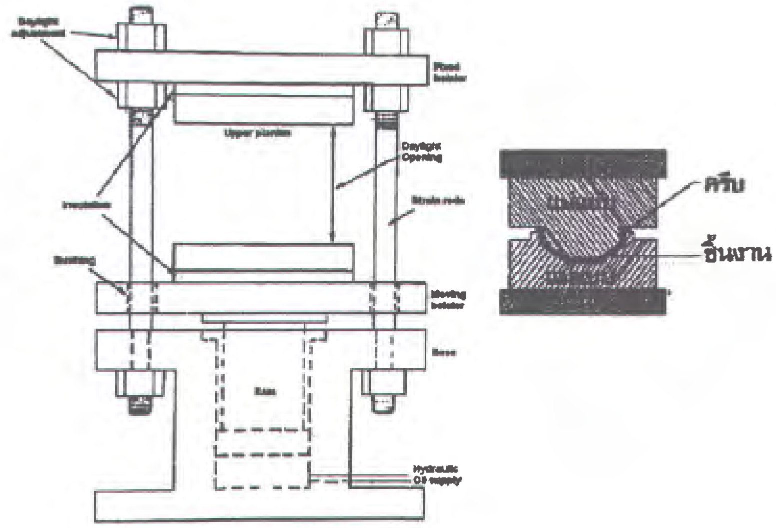


รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงขั้นตอนกระบวนการหมุนขึ้นรูป (Rotational Molding) [7]

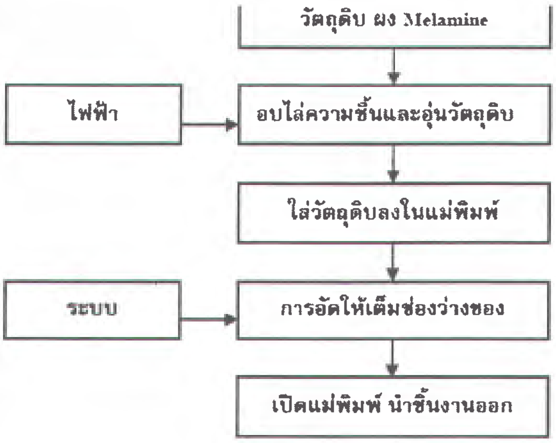


รูปที่ 2.13 แผนผังกระบวนการหมุนขึ้นรูป (Rotational Molding) [7]

2.7.5 กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding Process) เป็นการขึ้นรูปโดยการนำผงพลาสติกที่แข็งตัวมาอัดในแม่พิมพ์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งวัตถุดิบส่วนใหญ่ที่ใช้กระบวนการนี้คือ ผง Melamine ขั้นตอนการผลิตทำโดย เริ่มจากนำผงพลาสติกมาชั่งให้ได้น้ำหนักตามที่ต้องการจากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นและเป็นการอุ่นวัตถุดิบก่อนเข้าแม่พิมพ์จากนั้นนำไปใส่แม่พิมพ์พอเริ่มปิดแม่พิมพ์อัดให้พลาสติกแพร่ตัวไปตามช่องว่างของแม่พิมพ์จะเริ่มชลอช้าลงเพื่อให้พลาสติกได้รับความร้อนจากแม่พิมพ์ได้ทั่วถึงยิ่งขึ้น เมื่อถึงตำแหน่งสุด จะถึงช่วงเวลาแข็งตัวของพลาสติกเองโดยไม่ต้องใช้น้ำเย็น จากนั้นก็เปิดแม่พิมพ์นำชิ้นงานออกได้ [7]



รูปที่ 2.14 เครื่องอัดขึ้นรูปและกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding Process) [7]

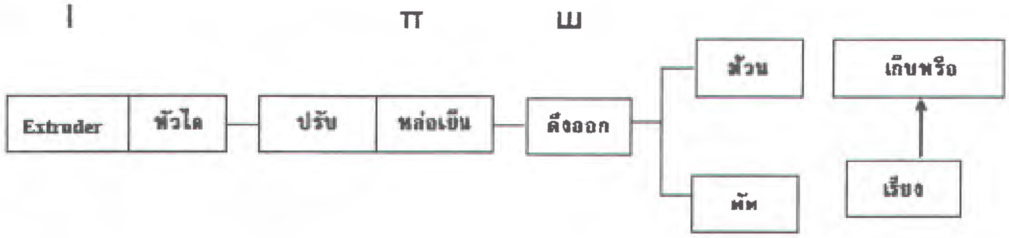


รูปที่ 2.15 แผนผังกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding Process) [7]

2.7.6 กระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion Process) กลุ่มกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) ที่สามารถจัดรวมเข้าด้วยกันได้ซึ่งจะประกอบด้วยกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้

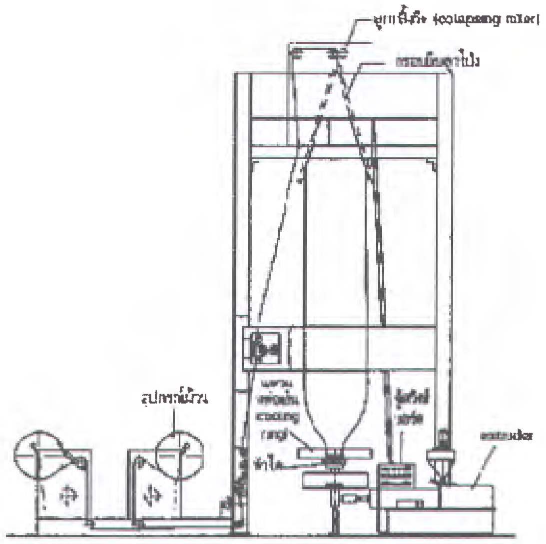
- Blown Film Extrusion ประเภทผลิตภัณฑ์ ถุงพลาสติก
- Film Extrusion ประเภทผลิตภัณฑ์ แผ่นฟิล์มบาง
- Sheet Extrusion ประเภทผลิตภัณฑ์ เสื่อน้ำมัน, หนังเทียม
- Pipe/tube Extrusion ประเภทผลิตภัณฑ์ ท่อ PVC, ท่อน้ำ
- Profile Extrusion ประเภทผลิตภัณฑ์ รางสายไฟ, ขอบหน้าต่าง
- Tape Yarn /Filament Extrusion* ประเภทผลิตภัณฑ์ กระสอบพลาสติก

*หมายเหตุ: * Tape Yarn เป็นการผลิตแบบผสม คือ การทำเส้นเทปนั้นเป็นการ Extrusion แต่หลังจากได้เส้นเทปแล้วต้องนำไปผ่านการทอ, การตัด และการเย็บ จึงจะออกมาเป็น กระสอบพลาสติก

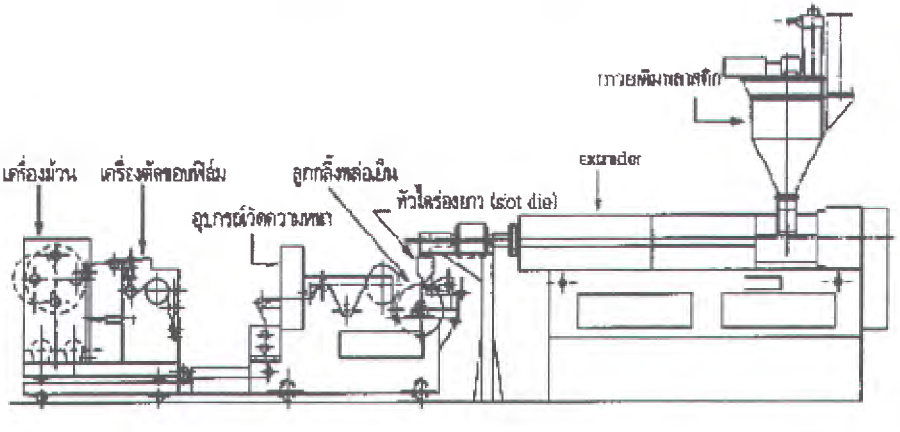


รูปที่ 2.16 แผนผังกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion Process) [7]

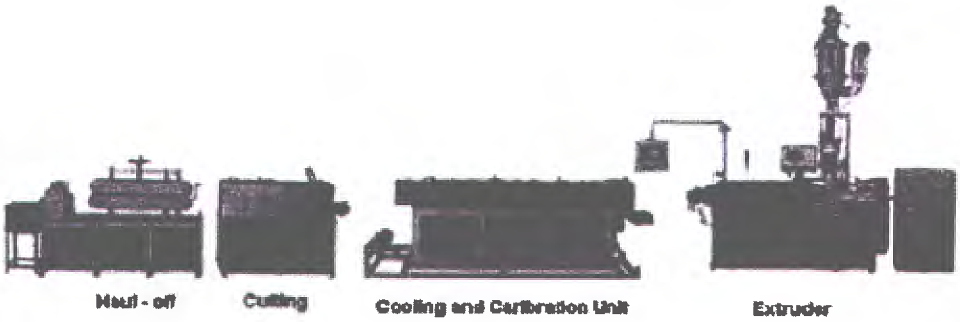
การใช้พลังงานที่เครื่องอัดรีด (Extruder) ดังในรูปที่ 2.17 - 2.20 เครื่องอัดรีดของกระบวนการผลิต Extrusion ทั้ง 6 แบบ จะคล้ายกัน จะแตกต่างกันที่รูปแบบของหัวดาย ขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์ เช่น ถ้ากระบวนการ Pipe/tube Extrusion หัวไดจะขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่หน้าตัดเป็นท่อ หรือ ถ้าใช้กระบวนการSheet Extrusion หัวไดจะมีหน้ากว้าง ซึ่งเมื่อพลาสติกเหลวไหลผ่านออกมาจะมีลักษณะเป็นแผ่น เป็นต้น ส่วนขั้นตอนการผลิตอื่น ๆ เช่น การหล่อเย็น, การดึงหรือลาก และการตัดหรือม้วน ก็เหมือนกัน หากจะพิจารณาการใช้พลังงานแล้วค่อนข้างใกล้เคียงกัน สามารถจัดให้อยู่ในกลุ่มเดียวกันได้



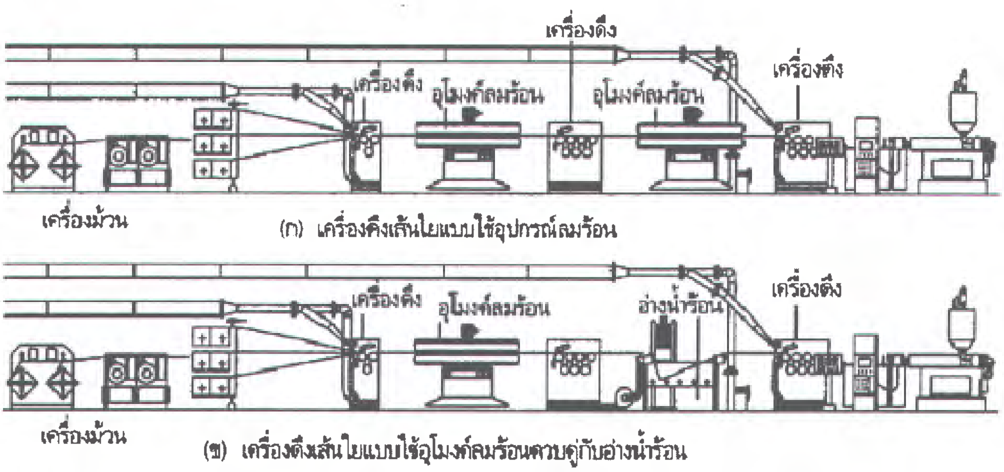
รูปที่ 2.17 กระบวนการขึ้นรูปแบบ Blown Film [7]



รูปที่ 2.18 กระบวนการขึ้นรูปแบบ Sheet/Film Extrusion [7]

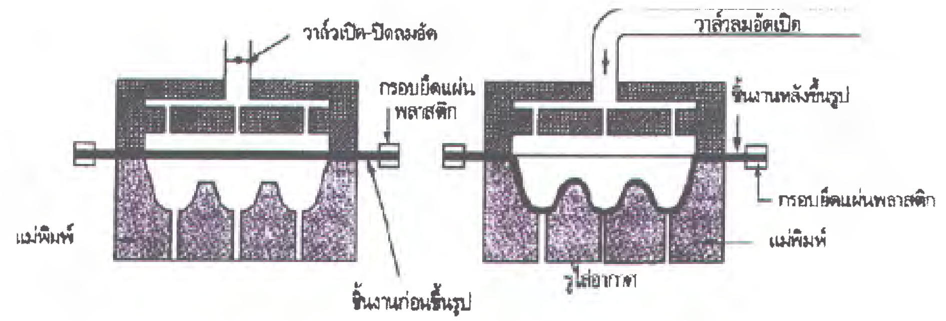


รูปที่ 2.19 กระบวนการขึ้นรูปแบบ Pipe/Tube/Profile Extrusion [7]

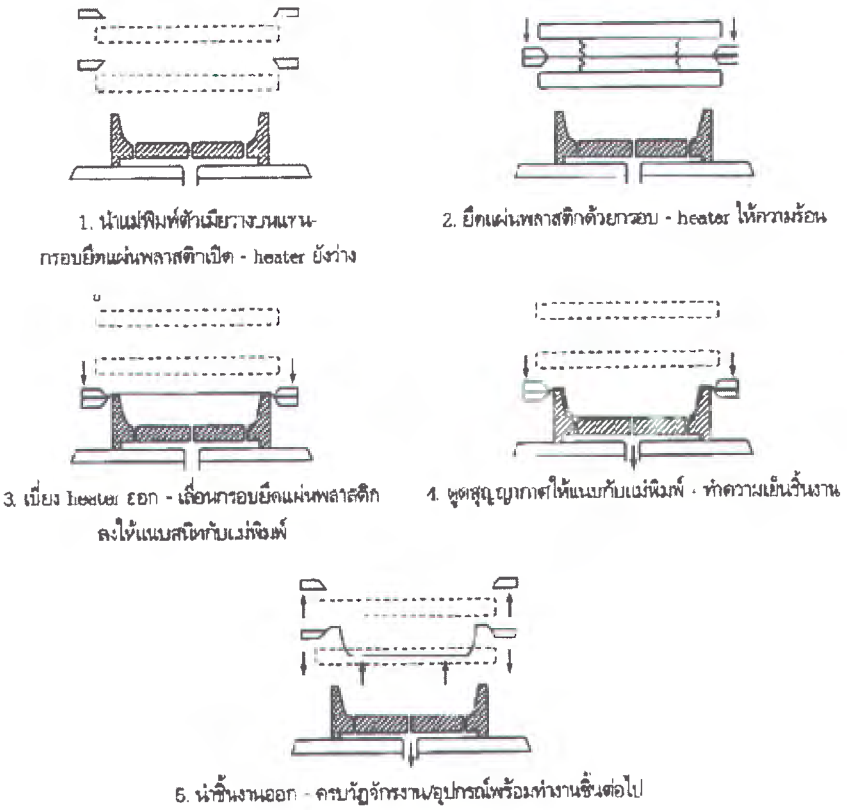


รูปที่ 2.20 กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์จากการขึ้นรูปแบบ Tape Yarn/Filament [7]

2.7.7 การ Thermoforming และการ Laminating การ Thermoforming และ การ Laminating เป็นกระบวนการที่ต่อจาก Sheet/Film Extrusion ซึ่งก็คือ วัตถุดิบที่ใช้จะเป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการSheet/Film Extrusion เป็นลักษณะ Secondary Process การ Thermoforming เป็นการขึ้นรูปโดยการให้ความร้อนกับแผ่นฟิล์ม หรือ แผ่นพลาสติกจนถึงอุณหภูมิอ่อนตัว แล้วใช้แรงบังคับให้แนบกับแม่พิมพ์ส่วนใหญ่ที่พบจะเป็นการใช้แรงดูดของสูญญากาศ (Vacuum Forming) หรือใช้ลมอัด (Blow Forming) หลังจากนั้นต้องทำให้เย็น เพื่อให้ชิ้นงานคงรูปไว้ตามแบบของแม่พิมพ์ [7]

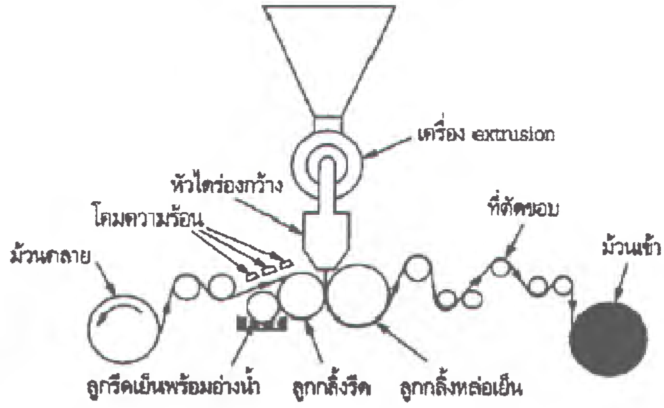


รูปที่ 2.21 การขึ้นรูปแบบใช้ลมอัด (Blow Forming) [7]



รูปที่ 2.22 การขึ้นรูปแบบใช้แรงดูดสูญญากาศ (Vacuum Forming) [7]

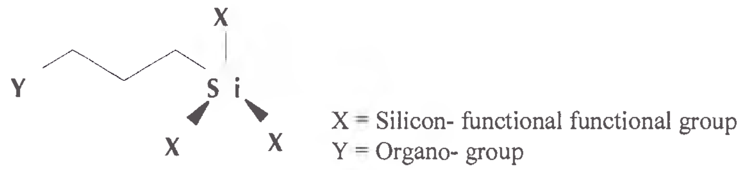
การ Laminating เป็นการเคลือบหรืออัดชั้น นั้นมีหลายวิธีการเคลือบแบบผง, แบบใช้ไฟฟ้าสถิต, แบบใช้ความร้อน เป็นต้น หลักการคือการใช้พลาสติกเหลวเคลือบไปบนวัสดุแล้วแต่หน้าที่และความต้องการอาจจะเป็นการเคลือบไปบนกระดาษ, พลาสติกด้วยกัน หรือ ผ้า ก็ได้ดังรูปที่ 2.23 ประโยชน์ที่นำไปใช้เพื่อให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น, กันน้ำหรือความชื้นได้, ป้องกันรอยขีดข่วน เป็นต้น



รูปที่ 2.23 การเคลือบด้วยวิธีการรีดโดยใช้ลูกกลิ้ง [7]

2.8 สารเชื่อมโยงไซเลน (Silane Coupling Agents)

สูตรโครงสร้างทั่วไปของไซเลน (silane) คือ $Y-(CH_2)_3Si(X)_3$ (รูปที่ 2.24) และ $Y-(CH_2)_2Si(CH_3)(X)_2$ หมู่ฟังก์ชันที่แทนด้วย X (silicon function group) จะเป็นหมู่ที่สามารถเกิดไฮโดรไลซิสได้ ซึ่งจะเป็นหมู่ที่ถูกเลือกให้ไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของสารเติมแต่ง (filler) เพื่อทำให้เกิดพันธะที่เสถียร หมู่ฟังก์ชันดังกล่าวมักจะเป็น ฮาโลเจน (halogen) หรือแอลคอกซี (alkoxy) ไซเลนที่มักนำมาใช้เป็นสารเชื่อมโยง (silane coupling agent) จะเป็นไซเลนที่มี x เป็น alkoxy และมีหมู่ที่เป็น organic group เชื่อมต่อกับซิลิคอน สูตรโครงสร้างทั่วไปจะเป็น $Y-(CH_2)_3Si(OR)_3$ จะเห็นว่าหมู่ Y จะถูกเชื่อมต่อกับซิลิคอน (Si) ผ่านสายโซ่สั้นๆ ของคาร์บอน โดยหมู่ดังกล่าวจะเป็นส่วนที่จะเชื่อมต่อกับพอลิเมอร์ การเกิดพันธะเชื่อมโยงกับพอลิเมอร์จะเกิดได้ทั้งแบบ chemical reaction หรือแบบ physicochemical interactions เช่น การเกิดพันธะฮาโลเจน (halogen bonding), การเกิดพนัธะระหว่างกรดกับเบส (acid- base interaction), การเกิดการพันกันกับสายโซ่พอลิเมอร์ (entanglement) หรือการเกิดการดึงดูดกันทางไฟฟ้า (eleactrostatic attraction) หมู่ Y อาจจะเป็นได้ทั้งโมเลกุลที่ไม่เป็นหมู่ฟังก์ชันหรือเป็นหมู่ฟังก์ชันก็ได้ เช่น vinyl, amino, methacryl, epoxy, mercapto เป็นต้น [41]



รูปที่ 2.24 โครงสร้างทั่วไปของ organosilanes [41]

ตารางที่ 2.4 แสดงถึงไซเลนชนิดต่าง ๆ ที่เหมาะสมที่จะใช้เติมในพอลิเมอร์แต่ละชนิดแล้วให้คุณสมบัติที่ดีที่สุด โดยบริษัทที่เป็นผู้ผลิตหลัก คือ Degussa Crop., Dow-Corning, GE-OSI, Shin-Etsu และ Wacker-Chemie GmbH

ตารางที่ 2.4 ชนิดของพอลิเมอร์และสารเชื่อมโยงไซเลนที่เหมาะสม [41]

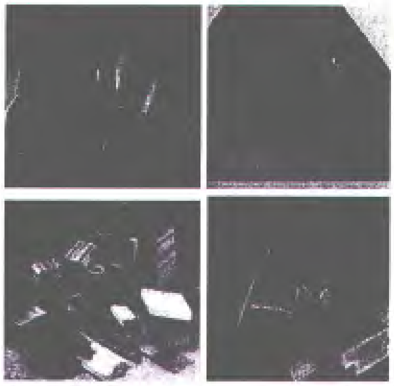
Polymer	Silane Functionality	Examples of Commercial Silanes
Acrylic	acrylate, methacrylate, vinyl	3-(methacryloxypropyl)trimethoxysilane
Butyl rubber	diamino	N-(2-aminoethyl)-3-(aminopropyl)trimethoxysilane
EVA	amino, vinyl	3-(aminopropyl)triethoxysilane, Special aminosilane blends, vinyltriethoxysilane
Neoprene	mercapto, diamino	3-(mercaptopropyl)trimethoxysilane, N-(2-aminoethyl)-3-(aminopropyl)trimethoxysilane
Nitrile rubber	mercapto	3-(mercaptopropyl)trimethoxysilane
Polyamide	amino, secondary amino	3-(aminopropyl)triethoxysilane, N-(n-butyl)-3-(aminopropyl)trimethoxysilane
Unsaturated polyester	methacrylate, polyether	3-(methacryloxypropyl)trimethoxysilane, Polyether-functional trimethoxysilane
Polyester thermoplastic	amino, epoxy	3-aminopropyltriethoxysilane, 3-glycidyloxypropyltrimethoxysilane
Polyolefin	vinyl, alkyl	Vinyltriethoxysilane, hexadecyltrimethoxysilane
EPR,EPDM	vinyl, sulfur, mercapto, thiocyanato	Vinyltriethoxysilane, Vinyltrimethoxysilane Vinyltris(2-methoxyethoxy)silane, Vinyl/alkyl-functional siloxane oligomer
SBR	sulfur, mercapto	Bis(triethoxysilylpropyl)polysulfane, 3-meracptopropyltrimethoxysilane

2.9 คอมโพสิทไม้-พลาสติก (Wood-Plastic Composite)

พลาสติกที่เรารู้จักโดยทั่วไป เช่น พอลิโพรไพลีน (PP) พอลิเอทธิลีน (PE) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และพอลิสไตรีน (PS) ทั้งหมดที่กล่าวมานั้นเป็นพลาสติกจำพวกเทอร์โมพลาสติก ซึ่งจะมีลักษณะเด่นคือ เมื่อได้รับความร้อนจะหลอมตัวเป็นของเหลวหนืดและกลายเป็นของแข็งเมื่อปล่อยให้แข็งตัว จากสมบัติดังกล่าวทำให้เราสามารถวัสดุเติมลงไปผสมกับพลาสติกก่อนกระบวนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอมโพสิทได้ สารที่กล่าวถึงจะรวมเรียกว่า “สารเติมแต่ง

(additives)" [9] คอมโพสิทไม้-พลาสติกได้จากการผสมระหว่างเศษขี้เลื่อย (sawdust) หรือผงไม้ สารประสานและพลาสติกเพื่อผลิตเป็นวัสดุซึ่งสามารถขึ้นรูปได้เหมือนกับการขึ้นรูปพลาสติกทั่วไป แต่เป็นการรวมคุณสมบัติเด่นระหว่างไม้กับพลาสติกเข้าไว้ด้วยกัน ในส่วนที่เป็นไม้นั้นจะได้มาจากเศษขี้เลื่อยเศษหรือชิ้นไม้จากการตัดขอบ นำมาผ่านกระบวนการบด (grinding) เป็นผงอนุภาคเล็กก่อนเติมลงไปในเนื้อพลาสติก นั่นก็หมายความว่า เราสามารถผลิตผลิตภัณฑ์โดยไม่สูญเสียไม้เพิ่มขึ้นจากเดิม นอกจากนั้นยังลดปริมาณการใช้พลาสติกในการผลิตผลิตภัณฑ์แต่ละชิ้นได้อีกด้วย ในกรณีที่เราเลือกใช้พลาสติกย่อยสลายได้ไปขึ้นรูปเป็นคอมโพสิทไม้-พลาสติก เราจะได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ 100 % ซึ่งเป็นการช่วยลดปริมาณขยะจากการใช้พลาสติกได้

สิ่งที่ต้องคำนึงในการผลิตวัสดุคอมโพสิทประเภทนี้คือ การรวมพลาสติกให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับผงไม้ นั่นก็คือการใช้สารตัวกลางที่ทำให้ทั้งไม้และพลาสติกเข้ากันได้ดี (compatibiliser) หรือที่เรียกว่าสารเชื่อมโยง เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของวัสดุทั้งสองชนิด สารเชื่อมโยงที่นิยมใช้ คือ มาเลอิคแอนไฮไดร์ (maleaic anhydride) ไซเลน (silanes) ไททาเนท (titanates) และกรดอะคริลิค (acrylic acid) [10] สารเหล่านี้จะทำให้ส่วนผสมของไม้และพลาสติกสามารถขึ้นรูปได้ดีขึ้น และยังช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงและมีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น [3]

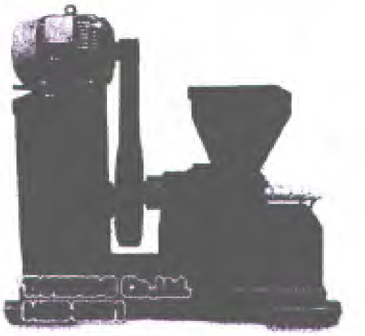


รูปที่ 2.25 ผลิตภัณฑ์คอมโพสิทไม้-พลาสติก (Wood-Plastic Composite) [3]

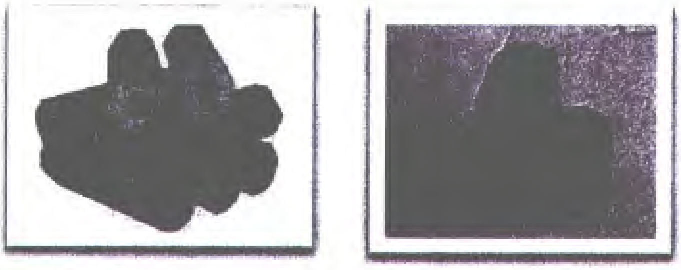
2.10 การนำขี้เลื่อยไปใช้

2.10.1 การผลิตถ่านจากขี้เลื่อยด้วยกรรมวิธีอัดร้อน กรรมวิธีการผลิตอัดร้อน แตกต่างกับกรรมวิธีการผลิตอัดเย็นคือ ไม่มีวัสดุอื่นผสมเพื่อผลิตถ่าน เช่น แป้งมัน โดยกรรมวิธีการผลิตอัดร้อนจะใช้ความร้อนเป็นตัวประสานขี้เลื่อยให้ติดกันเป็นแท่ง จากนั้นนำไปเข้าเตาเผาที่มีคุณภาพสูงจนได้เป็นผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิตเริ่มจากการนำขี้เลื่อยที่ถูกจัดเก็บในที่ที่ไม่มีความชื้นไม่มีการเจือปนจากฝุ่นหรือสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ นำไปเข้าอัดแท่งขี้เลื่อยดยเครื่องดังกล่าวต้องมีกำลังอัดที่สูง คือมีกำลัง

แรงม้า มากกว่า 22 แรงม้า และ ใช้ฮีตเตอร์เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนสำหรับแท่งอัดโดยเครื่องอัดร้อนขี้เลื่อยกำลังสูงแสดงไว้ดังรูปที่ 2.26 แท่งฟืนที่ผ่านการอัดออกมาจากเครื่องอัดจะเป็น แท่งยาวประมาณ 50 เซ็นติเมตร ลักษณะสีของแท่งฟืนที่ได้หลังจากผ่าน การอัดแท่งเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะเป็นสีน้ำตาลไหม้ หรือ สีดำ เนื่องจาก ผิวของแท่งฟืนขี้เลื่อยจะโดนความร้อนละลายสารลิกนินในเนื้อไม้ให้ ประสานกันติดเป็นแท่ง แท่งฟืนที่ได้จะไม่มีความชื้นในแท่งฟืนเลย หลังจากนั้นแท่งฟืนที่อัดได้จะถูกส่งไปเผาในเตาอิวาเตะ ซึ่งจะทำให้ได้แท่งถ่านจากขี้เลื่อยที่มีคุณภาพสูง นอกจากนั้น ผลพลอยได้จากการใช้เตาอิวาเตะนี้ก็คือ น้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเผา ถ่านอีกทางหนึ่งอีกด้วย [2]



รูปที่ 2.26 เครื่องอัดร้อนขี้เลื่อยกำลังสูง [2]



(a) (b)

รูปที่ 2.27 แท่งฟืนที่ผ่านเครื่องอัดร้อนขี้เลื่อย (a) ก่อนเข้า และ (b) หลังเข้าเตาเผาอิวาเตะ [2]

2.10.2 การผลิตปุ๋ยหมักจากขี้เลื่อยไม้แกะสลัก นายพิพัฒน์ ธารอินกองงาม นักวิชาการส่งเสริมการเกษตร ชำนาญการ ได้กล่าวถึงที่มาในการผลิตปุ๋ยหมักจากขี้เลื่อยไม้แกะสลักว่า ตำบลทาทุ่งหลวง อำเภอแม่ทา จังหวัดลำพูน เป็นแหล่งผลิตงานไม้แกะสลักที่เลื่องลือมานานจนถึงปัจจุบัน ราษฎรมากกว่าร้อยละ 70 ของครัวเรือน จะยึดเอางานแกะสลักไม้ เป็นตั้งอาชีพหลักและอาชีพรอง ควบคู่ไปกับการประกอบอาชีพด้านการเกษตร จึงมีการส่งเสริมให้ประชาชนในพื้นที่หันมานำขี้เลื่อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่นไปใช้ในด้านการผลิตปุ๋ยเพื่อใช้ในการเกษตร เพื่อให้เกษตรกรได้นำ

แนวคิดการดำเนินชีวิตตามแนวเศรษฐกิจพอเพียงมาปรับใช้อย่างเหมาะสม เช่นการผลิตและใช้ปุ๋ยหมัก จะช่วยลดต้นทุนการผลิต บำรุงดินพัฒนาคุณภาพของผลผลิตและที่สำคัญจะนำไปสู่ ระบบการผลิตสินค้าเกษตรที่ปลอดภัยและได้มาตรฐาน สร้างโอกาสทางการตลาดเกษตรกรมีรายได้เพิ่ม และมีคุณภาพชีวิตที่ดียิ่งขึ้น โดยเมื่อปี 2551- 2552 ศูนย์บริการและถ่ายทอดฯ ได้เข้าไปศึกษาการผลิตปุ๋ยหมักระบบกองเติมอากาศของกลุ่มผลิตปุ๋ยอินทรีย์หนองยางฟ้า ขนาดกองกว้าง 2.5 เมตร ยาว 3.5 เมตร สูง 1 เมตร โดยใช้วัสดุดิบทำปุ๋ยได้แก่ขี้เลื่อยร่วมกับมูลโค โดยใช้อัตราส่วนมูลสัตว์ เพิ่มขึ้นจากที่เคยทำ โดยกองที่ 1 ใช้มูลสัตว์ 1 ส่วน และขี้เลื่อย 2 ส่วน พบว่าใช้เวลาในการย่อยสลายประมาณ 80 วัน และกองที่ 2 ใช้มูลสัตว์ 1 ส่วน และขี้เลื่อย 1 ส่วน พบว่าใช้เวลาในการย่อยสลายประมาณ 50 วัน ผลการย่อยสลายของวัสดุขี้เลื่อยในกองปุ๋ยหมักแบบที่ 1 ใช้เวลานานกว่ากองปุ๋ยแบบที่ 2 เนื่องจากสัดส่วนของมูลสัตว์ในกองที่ 2 มีมากกว่ากองที่ 1 ทำให้การย่อยสลายได้ดีกว่า [2]

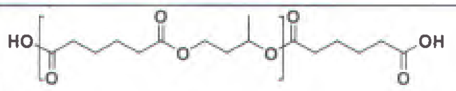
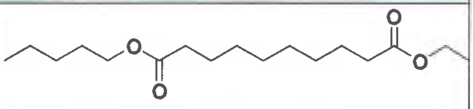
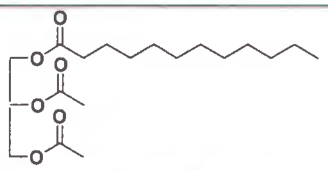
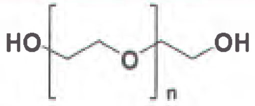
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.11.1 พีแอลเอกับพลาสติไซเซอร์ (PLA with Plasticizers) เนื่องจาก PLA จะมีลักษณะที่ค่อนข้างแข็งเปราะจึงต้องใช้พลาสติไซเซอร์เพื่อเข้าปรับปรุงความเหนียวและความยืดหยุ่นและช่วยในกระบวนการขึ้นรูป ความคาดหวังในประสิทธิภาพของพลาสติไซเซอร์ในการใช้เป็นสารเติมแต่งในพีแอลเอ คือ การลดอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และเพิ่มจุดหลอมเหลวจากการเพิ่มการเกิดผลึก [16] พลาสติไซเซอร์ที่มีการรายงานว่านำมาใช้กับพีแอลเอ เช่น poly (1,3-butanediol), dibutyl sebacate, acethyl glycerol monolaurate, poly(ethylene glycol), acetyl tri-n-butyl citrate (ATBC), tributyl citrate (TbC), acetyl triethyl citrate (ATC), และ glycerol เป็นต้น โครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของพลาสติไซเซอร์บางชนิดแสดงไว้ดังตารางที่ 2.5 [31]

Pillin *et al.* (2006) พบว่าการผสมพีแอลเอกับพลาสติไซเซอร์ดังแสดงในตารางที่ 2 ไม่เพียงแต่ลดอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกแต่ยังเปลี่ยนลักษณะเฉพาะในการหลอมและการเกิดผลึกของพีแอลเออีกด้วย การผสมพีแอลเอกับพีอีจีที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน (PEGs) ในปริมาณที่น้อยกว่า 20 wt% จะช่วยในการเกิดผลึกของพีแอลเอได้ดีกว่าพลาสติไซเซอร์ชนิดอื่น ๆ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่มากกว่า 20 wt% จะทำให้การลดลงของ Tg ค่อนข้างอิ่มตัว นั่นก็คืออัตราการลดลงของ Tg น้อยลง และในการทดลองของ Martin และ Averouss, (2001) พบว่า PEG400 และ oligomeric lactic acid (OLA) เป็นพลาสติไซเซอร์ที่ใช้ได้ดีกับ PLA คือ สามารถลด Tg จากเดิม 58°C ไปเป็น 12°C เมื่อมีการผสม PEG400 20 wt% และ สามารถลด Tg จากเดิม 58°C ไปเป็น 18°C เมื่อมีการผสม oligomeric lacticacid (OLA) 20 wt% นอกจากนี้จากการ

ทดลองของผู้วิจัยพบว่าการผสม PEG 2000 ลงไปที่ปริมาณมากว่า 20 wt% จะทำให้เกิดการแยกเฟส แต่เมื่อเราทำการปรับปรุงโครงสร้างของ PEG 2000 โดยใช้ silane coupling agent ชนิด 3-glycidoxy propyltrimethoxysilane (GPTMS) สามารถทำให้ modified PEG2000 สามารถทำหน้าเป็นได้ทั้ง plasticizer และ nucleating agent ได้ นอกจากนั้น GPTMS ยังสามารถทำหน้าที่เป็น competibilizer ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PEG 2000 อีกด้วย

ตารางที่ 2.5 โครงสร้างเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของพลาสติไซเซอร์ [31]

Name		M_w (g mol^{-1})	Chemical structure
Poly (1,3-butanediol)	PBOH	2100	
Dibutyl sebacate	DBS	314	
Acethyl glycerol monolaurate	AGM	358	
Poly(ethylene glycol)	PEG	200 400 1000	

2.11.2 การผสมพีแอลเอ/พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ (PLA/Biodegradable Blend) Bhatia *et al.* (2007) [16] พบว่าการผสมกันของพีแอลเอและพีบีเอส (PBS) ในองค์ประกอบที่แตกต่างกันสามารถเตรียมได้โดยใช้ twin-screw extruder จะแสดงการผสมเข้ากันได้ (miscible blends) เมื่อปริมาณของพีบีเอส (PBS) ที่ผสมเข้าไปเท่ากับหรือน้อยกว่า 20 wt% ค่าความแข็งแรงดึง (tensile strength) และค่าโมดูลัส (modulus) ลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ PBS อย่างไรก็ตามการผสมของพีแอลเอและพีบีเอส (PBS) ในอัตราส่วน 90/10 และ 80/20 (PLA/PBS) ยังคงสามารถทำได้ นอกจากนั้นยังพบว่าการผสม พีบีเอส (PBS) ลงไปจะเป็นตัวกระตุ้นการเกิดผลึกของพีแอลเอ นั่นเป็นเพราะว่า PBS ทำตัวเป็นตัวเหนี่ยวนำในการเกิดผลึก (crystallization nuclei) ของพีแอลเอ [43]

สำหรับการใช้พีบีเอที (PBAT) ในการผสมกับพีแอลเอนั้น เนื่องจากพีบีเอที (PBAT) มีลักษณะสำคัญคือ มีความเหนียว (high toughness) และสามารถย่อยสลายได้ จึงมักถูกพิจารณาในการนำมาใช้เป็นตัวเลือกในการปรับปรุงความเหนียวของพีแอลเอ Jiang *et al.* (2006) พบว่าการผสมพีบีเอที (PBAT) เข้าไปจะลด cold crystallization temperature (T_{cc}) ได้ประมาณ 10°C และเพิ่มอัตราในการเกิดผลึกได้ แต่อย่างไรก็ตาม การเกิดผลึกโดยรวมของพีแอลเอในสารผสมดังกล่าวยังไม่ได้เพิ่มขึ้น และการเติมพีบีเอที (PBAT) ช่วยปรับปรุงค่า elongation at break แต่ลดค่าค่าความแข็งแรงดึง (tensile strength) และค่าโมดูลัส (modulus) นอกจากนี้ [15] ได้ทำการทดลองและพบว่าการผสมกันของพีบีเอที (PBAT) และพีแอลเอจะแสดงลักษณะการผสมที่เข้ากันไม่ได้ (immiscible blend) การผสมพีบีเอที (PBAT) ลงไปจากนำไปสู่การลดลงของดัชนีการไหล (flow index) ซึ่งจะสัมพันธ์กับการแสดงลักษณะการไหลที่มีแนวโน้มแบบ shear–thinning ของของผสม

2.11.3 การใช้สารเชื่อมโยงไซเลนในคอมโพสิท (Using of Silane coupling agent in composite) Metin *et al.* (2004) [27] ได้ทำการศึกษาถึงผลของการกระทำระหว่างกันบริเวณพื้นผิวต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีน (PP) กับ natural zeolite คือมีการปรับปรุงการกระทำระหว่างกันบริเวณพื้นผิวโดยการปรับปรุงความเข้ากันได้และคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิท โดยการทำ surface treatment ของ natural zeolite ซึ่งในการทดลองจะทำ surface treatment โดยใช้สาร 4 ชนิดแตกต่างกัน พอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethyleneglycol, PEG) ที่ความเข้มข้น 3 wt% และไซเลน 3 ชนิด คือ 3- aminopropyltriethoxysilane (AMPTES), methyltriethoxysilane (MTES) และ 3-mercaptopropyl trimethoxysilane (MPTMS) ที่ความเข้มข้นต่างกัน 4 ความเข้มข้น (0.5-2 wt%) ผลการทดลองพบว่าการใช้ไซเลนเป็นตัวสำคัญที่ช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิท โดยการใช้ 1 wt% ของ AMPTES สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิทได้ดีที่สุด

2.11.4 การใช้ขี้เลื่อยในคอมโพสิท (Using of sawdust in composite) มีการจดสิทธิบัตรเกี่ยวการผลิตคอมโพสิทจากพีวีซี ดังต่อไปนี้ สิทธิบัตร "สูตรส่วนผสมสำหรับผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสมพีวีซีกับขี้เลื่อยไม้ (Materials Formulation for PVC/Sawdust Products)" เลขที่สิทธิบัตร 22706 (คุ้มครองตั้งแต่ 22 ตุลาคม พ.ศ. 2550 ถึง 23 ธันวาคม พ.ศ. 2565) ผลงานวิจัยนี้ เป็นผลงานที่มีผู้ขอรับสิทธิบัตร คือ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.) โดยผู้ประดิษฐ์ประกอบด้วย ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มจธ. ดร.ศิรินทร ทองแสง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มจธ. และ นายวิชัย โรซาพิทักษ์ บริษัท วี. พี. พลาสติก โปรดักส์ (1993) [9]

สิทธิบัตร "กรรมวิธีการเสริมแรงผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสมพีวีซี และขี้เลื่อยไม้โดยเส้นใยแก้วสังเคราะห์ และสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนและแสงยูวี (Reinforcing and stabilizing Methods for Wood/PVC Composite Products by Synthetic Glass Fiber and Thermal-UV Stabilizers)" เลขที่คำขอ 0801004853 (22 กันยายน 2551) เป็นผลงานวิจัยนี้อยู่ในระหว่างขอรับสิทธิบัตรร่วมกันระหว่าง มจธ. สกว. และบริษัท วี.พี. วู้ด จำกัด โดยสูตรและกรรมวิธีการผลิตผลิตภัณฑ์วัสดุผสมดังกล่าวนี้ มีการเติมเส้นใยแก้ว และสารเติมแต่งชนิดพิเศษ เพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์วัสดุผสมพีวีซี และขี้เลื่อยไม้ในด้านของสมบัติทางกลเชิงโครงสร้าง และความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมกลางแจ้ง ทั้งจากความร้อนและแสงยูวี ผลิตภัณฑ์วัสดุผสมที่ได้มีลักษณะภายนอกทั้งสีและผิวที่คล้ายคลึงกับวัสดุไม้ เหมาะที่จะนำมาใช้งานเป็นวัสดุก่อสร้างทดแทนการใช้ไม้ ทั้งการใช้งานภายในและภายนอกอาคาร อาทิเช่น คาน พื้น ราวสะพาน กรอบประตู และหน้าต่าง เป็นต้น นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์วัสดุผสมที่ได้ยังมีลักษณะพิเศษ คือ สามารถประกอบ และติดตั้งด้วยวิธีการที่คล้ายคลึงกับกรณีของไม้ และมีสมบัติความต้านทานการลามไฟได้ดี ปัจจุบันบริษัท ได้มีการผลิตและจำหน่ายผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ภายใต้เครื่องหมายการค้า “Cabonyx” และยังคงดำเนินการวิจัยและพัฒนาวัสดุผสมดังกล่าวอย่างต่อเนื่อง [1]

สิทธิบัตร "สูตรวัสดุผสมและกรรมวิธีการผลิต ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติผสมขี้เลื่อยไม้ (Material Formalation and Processing for Natural Rubber/Wood Sawdust)" เลขที่คำขอ 0701000589 (9 กุมภาพันธ์ 2550) ผลงานวิจัยอยู่ระหว่างขอรับสิทธิบัตรร่วมกันระหว่าง มจธ. สกว. และ บริษัท สยามยูไนเต็ดรับเบอร์ จำกัด โดยสูตรและกรรมวิธีการผลิตจากวิจัยนี้ ได้ถูกออกแบบให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์เพื่อใช้เป็นหลังคา ซึ่งมีความแข็งแกร่ง ความแข็งแรง และความคงทนสภาวะการนำไปใช้งานกลางแจ้ง นอกจากนี้ หลังคายางจากงานวิจัยนี้ยังมีลักษณะพิเศษอีก คือ สามารถลดความร้อนภายในอาคารเนื่องจากวัสดุมีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน และสามารถต้านทานการลามไฟได้ ปัจจุบัน บริษัท สยามยูไนเต็ดรับเบอร์ จำกัด ได้มีแผนการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยยังคงดำเนินการวิจัยและพัฒนาวัสดุที่ผลิตจากยางอย่างต่อเนื่อง [10]

รศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และคณะ, 2546 ได้ดำเนินการวิจัยเพื่อผลิตและทดสอบหลังคายางพาราจากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับขี้เลื่อย โดยมีแนวความคิดที่จะทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับความเป็นไปได้ในการผลิตผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงขี้เลื่อยไม้ เพื่อพัฒนาวัสดุผสมดังกล่าวนี้ มาใช้เป็นวัสดุหลังคายางธรรมชาติ (Natural Rubber Roofs) ที่มีสมบัติการใช้งานที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สมบัติด้านความสามารถในการขึ้นรูป สมบัติเชิงกลและกายภาพ และสมบัติการทนทานต่อสภาวะอากาศ น้ำ และแสง นอกจากนี้ ยังมีเป้าหมายที่จะลดต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์โดยการนำเส้นใยธรรมชาติที่เหลือจากกระบวนการผลิตและแปรรูปไม้มาใช้ร่วมกับยางธรรมชาติ อีกด้วย เพราะราคาของเส้นใยขี้เลื่อยมีราคาถูกกว่าราคายางธรรมชาติถึง 40 เท่าโดย

น้ำหนัก โดยขอบเขตของงานวิจัยนี้ จะเน้นถึงการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ (จริง) จากของผสมยางธรรมชาติและขี้เลื่อยไม้ โดยมีเป้าหมายที่ต้องการจะทราบถึง การเลือกใช้เส้นใยธรรมชาติที่เหมาะสมกับการใช้งานแต่ละประเภท อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยธรรมชาติ การปรับปรุงผิวของผงขี้เลื่อย รวมไปถึงกลไกการยึดเกาะของคู่วัสดุและวิธีการทดสอบสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ภายหลังการผลิต สำหรับกระบวนการผลิตโดยจะเน้นเฉพาะกับกระบวนการผลิตแบบอัดขึ้นรูปด้วยความดัน (Compression Moulding) [11]

เอกชัย วิมลมาลา และคณะ , 2546 ทำการศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางเอสบีอาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นสารเติมแต่ง โดยได้แนวคิดจากผลการวิจัยในเบื้องต้นของนางสาวศิรินทร ทองแสง (นักศึกษาปริญญาเอก คณะพลังงานและวัสดุ มจธ.) ซึ่งทดลองเติมเถ้าลอยลงในยางคอมปาวด์ปริมาณ 0-90 ส่วนในร้อยส่วนของยางธรรมชาติ ด้วยการผสมให้เข้ากันบนเครื่องบดลูกกลิ้งคู่ แล้วจึงนำไปอัดขึ้นรูปร้อนจนให้ยางคงรูปและได้เป็นแผ่นยางสำหรับนำไปเตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติทางกลด้านความทนแรงดึง และความแข็ง ซึ่งจากขั้นตอนของการผสมเถ้าลอยลงในยางคอมปาวด์บนเครื่องบดลูกกลิ้งคู่นั้น พบว่า โมดูลัสของวัสดุยางธรรมชาติ ณ 100 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณเถ้าลอยสูงขึ้น และพบว่า ณ ปริมาณเถ้าลอย 40 phr ยังให้ค่าความแข็งแกร่ง ณ 100 เปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงกว่าซิลิกา จากการที่วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติกับเถ้าลอยมีความแข็งแกร่งมากขึ้นเมื่อมีปริมาณเถ้าลอยมากขึ้นจึงส่งผลต่อความสามารถการยืดตัวลดลงตามไปด้วย แต่ค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาดกลับมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงสัดส่วนของเถ้าลอยในยางธรรมชาติที่มีผลต่อค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาด ส่วนค่าความแข็งนั้นให้ผลสอดคล้องกับค่าความแข็งแกร่ง คือเมื่อมีปริมาณเถ้าลอยมากขึ้นค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย จากผลการทดลองสมบัติของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติพื้นฐานข้างต้น ทำให้ทางคณะผู้วิจัยมีแนว คิดว่า การนำเถ้าลอยมาผสมในยางสังเคราะห์ที่นิยมใช้มากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมยางรถยนต์นั่นคือยางเอสบีอาร์ (Styrene-Butadiene Rubber) ซึ่งน่าจะมีความเป็นไปได้สูงเช่นเดียวกันกับยางธรรมชาติ ดังนั้นจึงควรมีการวิจัยและวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพและปริมาณ สมบัติทางต่างๆ ของวัสดุผสมและสภาวะการผลิตของวัสดุเชิงประกอบยางเอสบีอาร์ กับเถ้าลอยเพิ่มเติมมากขึ้น เพื่อนำไปสู่การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบยางเอสบีอาร์ ให้ดีและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของโรงงานในการผลิตผลิตภัณฑ์ ยางเอสบีอาร์ รวมถึงทำให้อุตสาหกรรมยางเอสบีอาร์ ในประเทศไทยเจริญเติบโตขึ้นด้วย [12]

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 วัตถุดิบ (Materials)

3.1.1 พอลิแลคติคแอสิด Poly(lactic acid) (PLA) เกรด 2002 D ราคากิโลกรัมละ 260 บาทเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท NatureWorks®

3.1.2 ขี้เลื่อยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท มหาชัยพาราวู้ด จำกัด จังหวัดนครศรีธรรมราช

3.1.3 สารเชื่อมโยงไซเลนชนิด 3-glycidoxy propyltrimethoxysilane (GPTMS) สั่งซื้อจากบริษัท Dow Corning Toray

3.1.4 สารละลายเอทธานอล

3.1.5 สารละลายอะซิโตน

3.1.6 น้ำกลั่น

3.2 อุปกรณ์ (Equipments)

3.2.1 กระบอกตวงขนาด 250 และ 100 มิลลิลิตร

3.2.2 ขวดวัดปริมาตรขนาด 250 และ 1,000 มิลลิลิตร

3.2.3 บิกเกอร์ขนาด 100, 250 และ 500 มิลลิลิตร

3.2.4 หยอดหยดขนาด 20 มิลลิลิตร

3.2.5 ปิเปตแบบมีขีด (ใช้ตวง) ขนาด 5, 10 และ 25 มิลลิลิตร

3.2.6 แท่งกวนแม่เหล็กขนาด 25 x 8 และ 40 x 8 มิลลิเมตร

3.3 วิธีการทดลอง (Methodology)

3.3.1 การดัดแปลงพื้นผิวของขี้เลื่อย (Surface modification of sawdust)

3.3.1.1 การเตรียมผงขี้เลื่อย (Sawdust particles, SP) ผงขี้เลื่อยที่ได้รับความอนุเคราะห์บริษัท มหาชัยพาราวู้ด จำกัด จังหวัดนครศรีธรรมราช จะถูกนำมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ข้ามคืน หลังจากนั้นจะถูกนำมาร่อนด้วยตะแกรงร่อนสารที่มีขนาด 30 mesh และ 120 mesh จนได้ผงขี้เลื่อยที่มีขนาด ≤ 125 ไมครอนและขนาด ≤ 600 ไมครอน ตามลำดับ

3.3.1.2 การดัดแปลงพื้นผิวผงขี้เลื่อยด้วยสารละลายด่าง ผงขี้เลื่อยปริมาณ 150 กรัม จะถูกแช่ที่ในสารละลาย NaOH 5% (w/v) ปริมาณ 667 ml ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 hr หลังจาก

นั้นจะถูกล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งมีค่า pH เป็นกลาง แล้วกรองเอาสารละลายออก ผงขี้เลื่อยที่ได้ถูกทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 70 °C จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่

3.3.1.3 การดัดแปลงพื้นผิวผงขี้เลื่อยด้วยสารเชื่อมโยงไซเลน ผงขี้เลื่อยจะถูกดัดแปลงโดยใช้สารเชื่อมโยงไซเลน 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane (GPS) โดยใช้ความเข้มข้นของ GPS เป็น 1, 5 และ 10 wt% ของปริมาณผงขี้เลื่อยที่ใช้ การดัดแปลงพื้นผิวของขี้เลื่อยเริ่มจากการนำ GPTMS มาเติมในสารละลายเอทธานอล (60% v/v) และปั่นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องก่อนที่จะเติมขี้เลื่อยลงไป หลังจากเติมขี้เลื่อยลงในสารละลาย GPS แล้วจะถูกปั่นกวนต่ออีก 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 70 °C หลังจากนั้นเทสารละลายออก ขี้เลื่อยที่ได้จากการทดลองจะถูกนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผงขี้เลื่อยที่ได้ถูกทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 70 °C จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่

3.3.1.4 การทดสอบการเปลี่ยนทางโครงสร้างเคมีของผงขี้เลื่อยที่ถูกดัดแปลงพื้นผิวด้วยเทคนิค FTIR เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณสาร โดยการวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงอินฟาเรด ซึ่งจะถูกใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาโครงสร้างของสาร โดยผงขี้เลื่อยที่ได้จากการถูกดัดแปลงโครงสร้างจะถูกทดสอบโดยใช้เครื่อง FTIR รุ่น Nicolet /Nexus 670 ชิ้นงานตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์ที่ 32 scans ความถี่ 2 cm^{-1} บันทึกที่ความยาวคลื่น 4,000 – 400 cm โดยใช้เทคนิค ATR

3.3.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของพีแอลเอและพีแอลเอคอมโพสิท

3.3.2.1 การเตรียมเม็ดเรซินพีแอลเอและพีแอลเอคอมโพสิท พีแอลเอกับผงขี้เลื่อยทั้งที่ได้รับกาและไม่ได้รับการดัดแปลงพื้นผิวในอัตราส่วนของ พีแอลเอ/ผงขี้เลื่อย เป็น 90/10 จะถูกอบที่อุณหภูมิ105 °C ก่อนนำมาใช้ เขย่าให้เข้ากันก่อนนำลงสู่เครื่องอัดรีดสกรูคู่ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปจะมี 3 ช่วงคือ 120°C, 160°C และ 160°C ตามลำดับจากช่วง feed zone ไปจนถึง die เมื่อพอลิเมอร์หลอมถูกอัดรีดออกมาจะถูกหล่อเย็นด้วยลม และนำเส้นคอมโพสิทที่ได้ไปตัดเป็นเม็ดคอมโพสิทเรซิน เม็ดเรซินพีแอลเอและพีแอลเอคอมโพสิทที่ได้จะถูกนำไปทดสอบทางความร้อนต่อไป

3.3.2.2 การวัดสมบัติทางความร้อน สมบัติทางความร้อนของเม็ดเรซินพีแอลเอและพีแอลเอคอมโพสิทจะถูกวัดโดยการใช้เครื่องวัดสมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter, DSC) รุ่น Perkin Elmer DSC 7 series ตัวอย่างน้ำหนัก 5 -15 มิลลิกรัมจะถูกปิดผนึกใน aluminum pan อุณหภูมิเริ่มต้นในการทดสอบ คือ 25°C และให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 200 °C ที่อัตราเร็ว 10°C ต่อนาทีภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

บทที่ 4

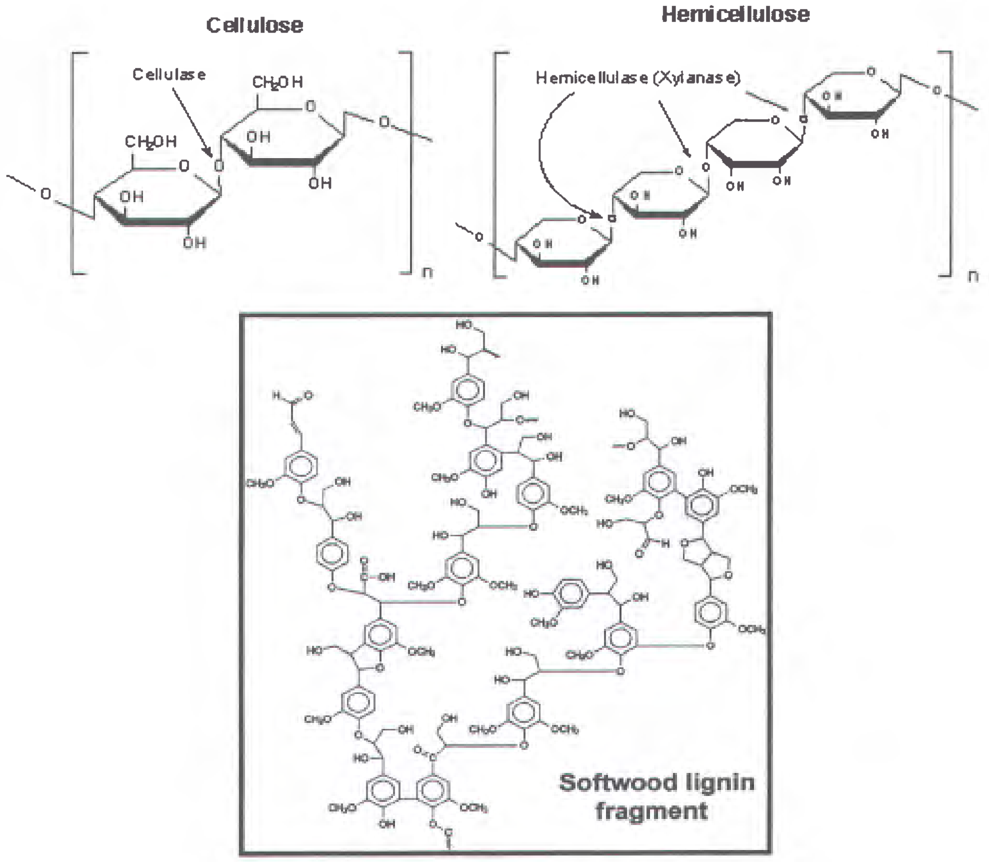
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

คอมโพสิทชีวภาพที่ถูกเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 เป็นต้นมา โดยเป็นการพัฒนาวัสดุที่มีสมรรถนะค่อนข้างสูงที่ผลิตขึ้นจากแหล่งวัตถุดิบธรรมชาติที่มีสมบัติและลักษณะเฉพาะที่หลากหลาย วัสดุที่นำมาใช้เป็นเมทริกซ์ในคอมโพสิทชีวภาพจะถูกแบ่งออกเป็นพอลิเมอร์ที่มีต้นกำเนิดมาจากปิโตรเคมี (Petrochemical based) และพอลิเมอร์ที่มีต้นกำเนิดมาจากธรรมชาติ (Bio based) ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีต้นกำเนิดมาจากปิโตรเคมี เช่น พอลิเอทธิลีน (PE), พอลิสไตรีน (PS), พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ซึ่งเป็นเมทริกซ์จำพวก เทอร์โมพลาสติก และ พอลิเอทเทอร์ (Polyester), อีพอกซีเรซิน (Epoxy resins) ซึ่งเป็นเมทริกซ์จำพวก เทอร์โมเซตติ้ง สำหรับพอลิเมอร์ที่มีต้นกำเนิดมาจากธรรมชาติ (Bio based) เป็นวัสดุที่น่าสนใจในการนำมาผลิตเป็นคอมโพสิทชีวภาพ เนื่องการใช้พอลิเมอร์ที่มีต้นกำเนิดมาจากธรรมชาติเป็นเมทริกซ์ร่วมกับเส้นใยธรรมชาติจะทำให้ได้คอมโพสิทชีวภาพที่สลายถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้อย่างสมบูรณ์ พอลิเมอร์ที่มีต้นกำเนิดมาจากธรรมชาติที่มีการนำมาใช้ในคอมโพสิทชีวภาพ คือ พอลิแลคติคแอสิด (Polylactic acid, PLA), พอลิไฮดรอกซีบิวทาเรท (Polyhydroxybutyrate, PHB) และแป้ง สำหรับพอลิแลคติคแอสิดเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในการผลิตคอมโพสิทชีวภาพ โดยการใช้เป็นเมททริกซ์ร่วมกับเส้นใยหลายๆ ชนิด โดยเส้นใยที่มีการนำใช้เป็นตัวเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิทชีวภาพมีมากมายหลายชนิด [19] ยกตัวอย่างเช่น เส้นใยปอ [32], เส้นใยป่าน [23], ปอกระเจา [33], ปอแก้ว [18], ป่าศรนารายณ์ [36], เส้นใยสับปะรด [37], เส้นใยไผ่ [29], เส้นใยปาล์ม [13] เป็นต้น สำหรับเส้นใยที่มีการนำใช้ในการเสริมแรงในคอมโพสิทชีวภาพที่มีพีแอลเอลเป็นเมททริกซ์ เช่น เส้นใยปอแก้ว [21], เส้นใยป่าน [26] เส้นใยไผ่ [30] และเส้นใยเซลลูโลส [15] เป็นต้น โดยขี้เลื่อยยังมีการนำมาทดลอง ศึกษาเพื่อใช้เป็นสารเสริมแรงในคอมโพสิทชีวภาพค่อนข้างน้อย

4.1 การปรับสภาพขี้เลื่อย

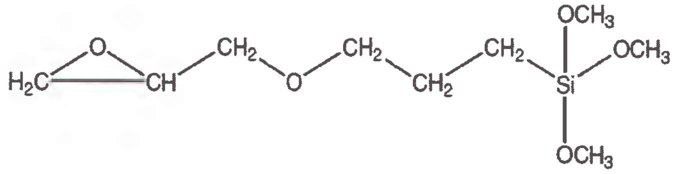
นอกจากโครงสร้างของเส้นใยแล้ว องค์ประกอบทางเคมียังเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการย่อยสลายของเส้นใยด้วย ในกรณีที่ไม่มีน้ำ ผนังเซลล์พืชจะมีองค์ประกอบหลักคือ เซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นพอลิเมอร์อยู่ร่วมกับลิกนิน (รูปที่ 4.1) และมี โปรตีน แป้ง และสารอนินทรีย์ใน

ปริมาณที่น้อยกว่า จุดด้อยหลักของเส้นใยธรรมชาติในการใช้เป็นสารเสริมแรงในคอมโพสิทคือ ความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยกับเมททริกซ์ที่เป็นพอลิเมอร์ที่ค่อนข้างต่ำจากการที่เส้นใยสามารถดูดซับความชื้นได้ค่อนข้างดี ดังนั้นการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยจะสามารถเพิ่มการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวของเส้นใยและเมททริกซ์ได้ การปรับสภาพเส้นใยมีทั้งการปรับสภาพเส้นใยทางกายภาพ เช่น การปรับสภาพด้วยโคโรนา (Corona treatment) และการปรับสภาพด้วยพลาสมา (Plasma treatment) และการปรับสภาพเส้นใยทางเคมี เช่น การปรับสภาพด้วยไซเลน (Silane treatment), การปรับสภาพด้วยสารละลายด่าง (Alkaline treatment), อะเซทิเลชั่น (Acetylation), การใช้สารเชื่อมโยงมาลิเอท (Maleated coupling) และการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ (Enzyme treatment) [19]



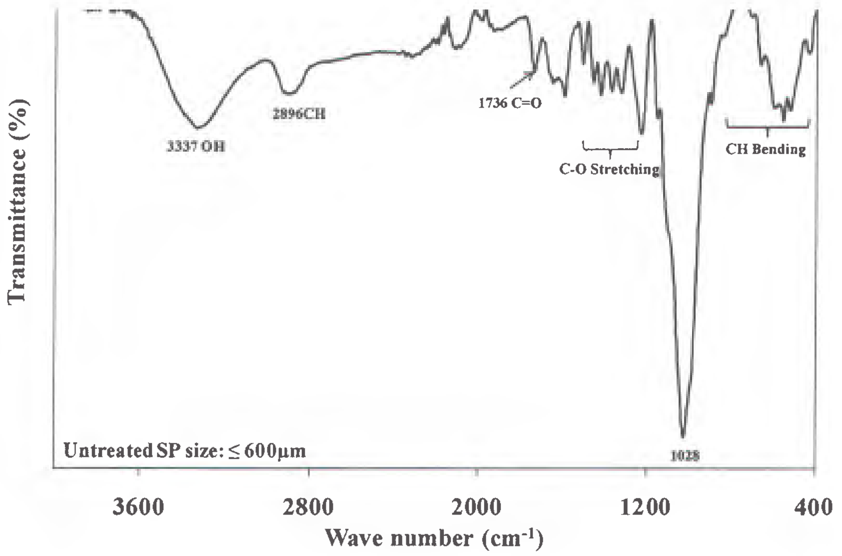
รูปที่ 4.1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกที่จะปรับสภาพผิวของขี้เลื่อยด้วยละลายด่าง (Alkaline treatment) โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และการปรับสภาพเส้นใยด้วยไซเลน (Silane treatment) โดยใช้ glycedroxypropyl trimethoxy silane (GPS) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.2



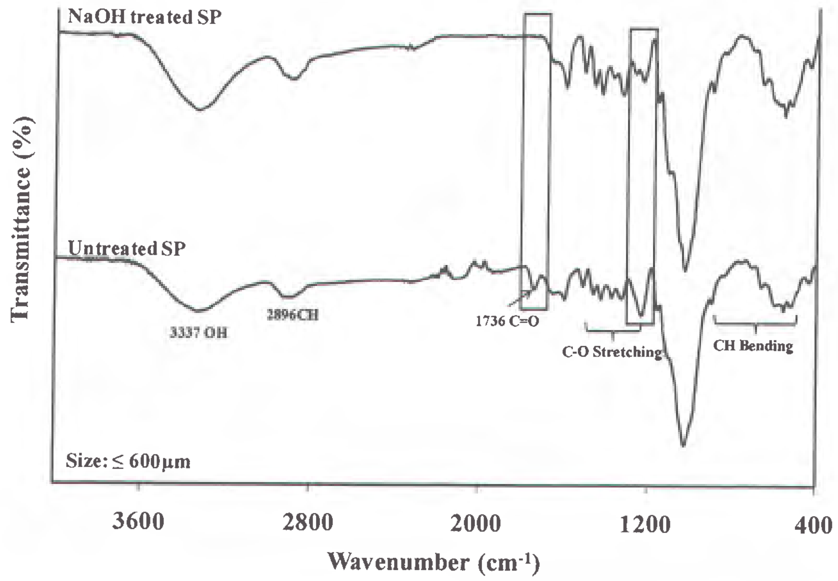
รูปที่ 4.2 โครงสร้างเคมีของ Glycedroxypropyl trimethoxy silane (GPS) [34]

4.1.1 การปรับสภาพขี้เลื่อยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR เพื่อที่จะศึกษาโครงสร้างทางเคมีของขี้เลื่อยที่ยังไม่รับการปรับสภาพผิว (Nontreated SP) ที่มีขนาด ≤ 600 ไมครอนได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งจะมีพีคที่แสดงลักษณะของขี้เลื่อยคือ เลขคลื่น 3337 cm^{-1} แสดงการการยืด – หด ของพันธะของหมู่ไอดรอกซิล (OH stretching), เลขคลื่น 2896 cm^{-1} แสดงการการการยืด – หด ของพันธะของหมู่เมทิล (methyl) และหมู่เมทธิลีน (methylene), เลขคลื่น 1736 cm^{-1} แสดงการการยืด – หด ของพันธะ คาร์บอนิล (C=O) ที่เกิดพันธะในเฮมิเซลลูโลส, เลขคลื่นที่อยู่ในช่วง 1300 -1000 cm^{-1} จะแสดงการการยืด – หด ของพันธะ C-O (CO stretching) และเลขคลื่นที่อยู่ในช่วง 990 -690 cm^{-1} จะแสดงการบิดงอของหมู่ C-H (CH stretching) เลขคลื่นที่แสดงลักษณะข้างต้นจะเป็นเลขคลื่นที่แสดงโครงสร้างทางเคมีของ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่เป็นองค์ประกอบที่มีในขี้เลื่อย [39]



รูปที่ 4.3 FTIR สเปคตรัมของขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว (Nontreated SP) ขนาด ≤ 600 ไมครอน

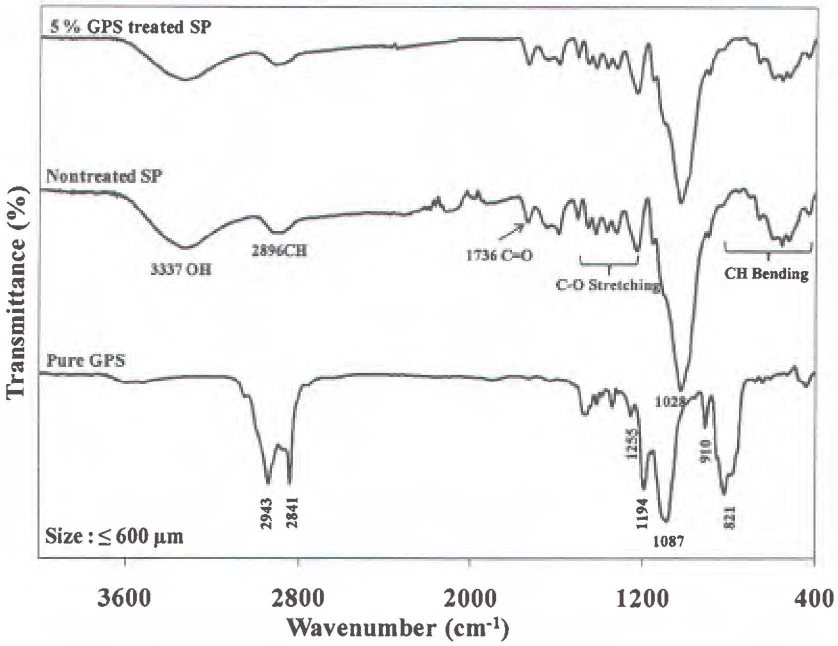
รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบผลของ FTIR ระหว่างขี้เลื่อยที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพ (Nontreated SP) กับขี้เลื่อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายด่าง (NaOH treated SP) ที่มีขนาด ≤ 600 ไมครอน เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเมื่อขี้เลื่อยได้รับการปรับสภาพ จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อขี้เลื่อยได้รับการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพีค FTIR ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1736 cm^{-1} ซึ่งเป็นเลขคลื่นที่แสดงการยืด – หดพันธะคาร์บอนิล (C=O) และที่เลขคลื่นที่อยู่ในช่วง 1270 -1200 cm^{-1} (จะแสดงการการยืด – หดของพันธะ C-O (CO stretching) โดยจะเห็นได้ว่าผล FTIR ของขี้เลื่อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายด่าง (NaOH treated SP) พีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1736 cm^{-1} และ 1230 cm^{-1} หายไปทำให้สามารถยืนยันถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของขี้เลื่อยด้วยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ โดยช่วงการเปลี่ยนที่ตำแหน่งเลขคลื่นดังกล่าวสามารถสันนิษฐานได้ว่าการปรับสภาพสารละลายด่างทำให้โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่มีขนาดเล็กรวมถึงสิ่งสกปรกต่างที่มีอยู่ใน ขี้เลื่อยสามารถถูกกำจัดออกได้ [44]



รูปที่ 4.4 FTIR สเปคตรัมของขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว (Nontreated SP) เปรียบเทียบกับขี้เลื่อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย NaOH (NaOH treated SP) ขนาด ≤ 600 ไมครอน

4.1.2 การปรับสภาพขี้เลื่อยด้วยสารเชื่อมโยงไซเลน GPS สำหรับการปรับสภาพขี้เลื่อยด้วยสารเชื่อมโยงไซเลนชนิด GPS (โครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 4.2) ตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 เมื่อ GPS ไฮโดรไลด์ด้วยสารละลายเอทานอลจะทำให้หมู่ X ซึ่งในที่นี้คือ OCH_3 จะถูกเปลี่ยนแปลงให้เป็น OH เพื่อที่จะสามารถทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงหมู่ OH ที่อยู่ในโครงสร้างของขี้เลื่อยได้ ส่วนหมู่ Y ซึ่งใน GPS ก็คือ หมู่อีพอกซี สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับพลาสติก (พีแอลเอ) เมื่อขี้เลื่อยถูกนำไปผสมกับพีแอลเอเพื่อให้ได้วัสดุคอมโพสิทออกมา การเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นทางเคมีระหว่างสารเชื่อมโยงไซเลน GPS กับขี้เลื่อยสามารถทำการพิสูจน์เบื้องได้ด้วยการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR เช่นเดียวกัน ผลการทดสอบ FTIR แสดงโครงสร้างทางเคมีของ GPS แสดงดังรูปที่ 4.5 พีคสำคัญที่แสดงถึงลักษณะโครงสร้างของ GPS คือ 1) เลขคลื่น 2943 cm^{-1} และ 2841 cm^{-1} จะแสดงการยืด – หดแบบสมมาตร และอสมมาตรของหมู่ CH_3 และ CH_2 2) เลขคลื่น 1255 cm^{-1} และ 910 cm^{-1} จะแสดงการสั่นของวงแหวนอีพอกซี 3) เลขคลื่น 1194 cm^{-1} จะแสดงการยืด – หดแบบอสมมาตรของพันธะ C-O 4) เลขคลื่น 1087 cm^{-1} จะแสดงการยืด – หดแบบอสมมาตรของพันธะ Si-O และ 5) เลขคลื่น 821 cm^{-1} จะแสดงการเสียรูป (deformation) ของพันธะ Si-O-CH_3 [34]

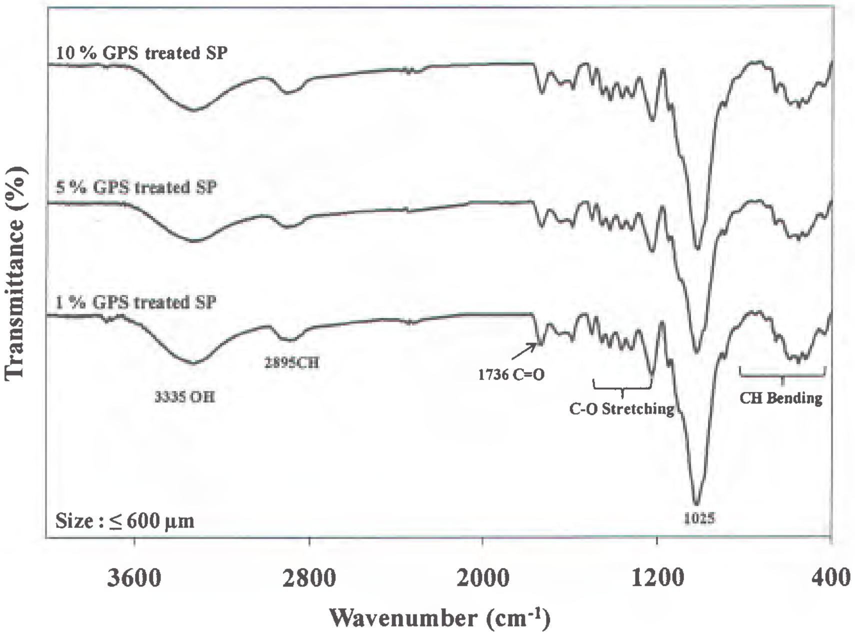
สำหรับรูปที่ 4.5 รูปบนและรูปกลางแสดงการเปรียบผลการทดสอบ FTIR ของขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Nontreated SP) กับขี้เลื่อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย GPS ที่มีความเข้มข้น 5 % (5% GPS treated SP) ในกรณีที่การปรับสภาพขี้เลื่อยด้วย GPS ประสบผลสำเร็จ ผู้วิจัยสันนิษฐานผล FTIR ของขี้เลื่อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย GPS ที่มีความเข้มข้น 5 % จะต้องปรากฏพีคสำคัญของ GPS ผลการทดสอบ FTIR ของขี้เลื่อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย GPS ที่มีความเข้มข้น 5 % แต่จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าไม่พบพีคสำคัญ GPS ในผล FTIR ของขี้เลื่อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย GPS ที่มีความเข้มข้น 5 % นอกจากนี้ยังไม่พบความแตกต่างของพีค FTIR ระหว่างของขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Nontreated SP) กับขี้เลื่อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย GPS ที่มีความเข้มข้น 5 % (5% GPS treated SP)



รูปที่ 4.5 FTIR สเปคตรัมของสารเชื่อมโยงไซเลน (GPS), ขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว (Nontreated SP) เปรียบเทียบกับขี้เลื่อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยสารเชื่อมโยงไซเลน (GPS)

สำหรับการปรับสภาพขี้เลื่อยด้วย GPS ที่มีความเข้มข้น 1% และ 10 % ก็แสดงผลในลักษณะเดียวกันดังรูปที่ 4.6 จากผลข้างต้นสามารถสันนิษฐานได้ 2 กรณี คือ การปรับสภาพเส้นใยด้วย GPS ด้วยกระบวนการข้างต้นไม่ประสบผลสำเร็จเนื่องจากไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของขี้เลื่อยด้วยการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR ได้ หรือกรณีที่ 2 อาจเกิด

การเปลี่ยนแปลงจากการปรับสภาพขี้เลื่อยด้วย GPS แต่เนื่องจากGPS ที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณน้อย ประกอบกับพีคสำคัญของ GPS อาจเกิดการซ้อนทับกับพีคสำคัญของขี้เลื่อย ซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถสังเกต การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR ได้



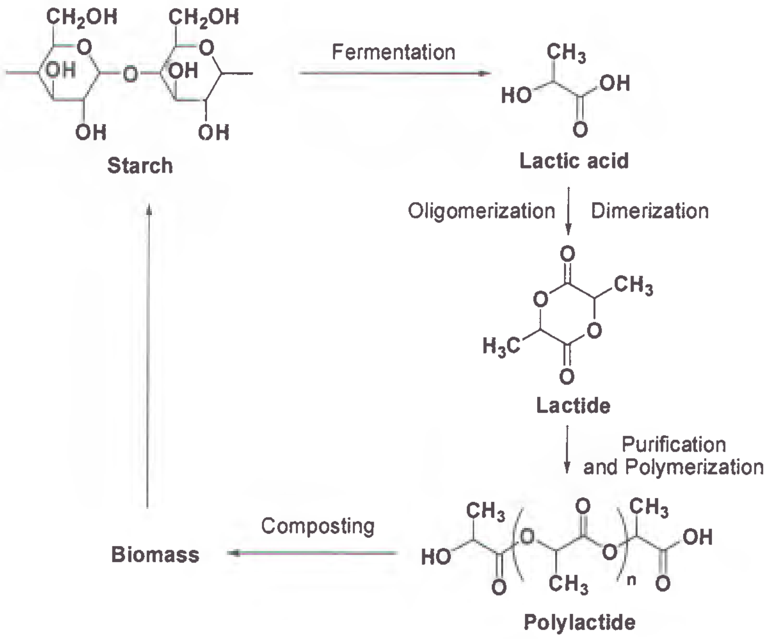
รูปที่ 4.6 FTIR สเปคตรัมของขี้เลื่อยขนาด ≤ 600 ไมครอนที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยสารเชื่อมโยงไซเลน (GPS) ที่ 1%, 5% และ 10%

4.2 การศึกษาสมบัติของพอลิแลคติคแอสิด

4.2.1 พอลิแลคติกแอสิด (Poly Lactic acid, PLA) พอลิแลคติกแอสิด หรือ พีแอลเอ คือ พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่ได้มาจากกรดแลคติก (Lactic acid) พีแอลเอจัดว่าเป็นวัสดุที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายและเป็นเรซินที่ผลิตจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน100 เปอร์เซ็นต์ เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และแป้งชนิดอื่น ๆ [14] กรดแลคติค (Lactic acid) หรือ 2- ไฮดรอกซีโพรไพออนิกแอสิด (2-hydroxypropinoic acid) จะสามารถถูกพอลิเมอไรซ์ได้เป็นพีแอลเอ วงจรของพีแอลเอแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.7 [22]

พีแอลเอจัดอยู่พอลิเมอร์จำพวกอะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ที่สามารถย่อยสลายได้โดยกระบวนทางเคมีที่ทำให้เกิดการไฮโดรลิซิส ภายใต้เงื่อนไขทางชีวภาพ กรดแลคติค (Lactic acid) หรือ

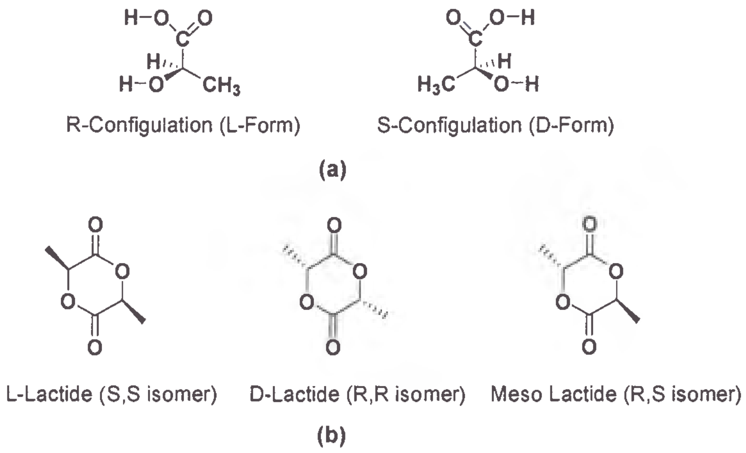
2- ไฮดรอกซีโพรไพออนิกแอสิด (2-hydroxypropinoic acid) จะได้มาจากกระบวนการหมักของจุลินทรีย์ กระบวนการดังกล่าวจะนำมาซึ่งแหล่งของกรดแลคติคที่มีประสิทธิภาพ กรดแลคติกที่พบโดยทั่วไปจะแบ่งเป็นชนิด ''L'' และ ''D'' สเตอริโอไอโซเมอร์ซึ่งจะสามารถเรียกได้เป็นชนิด ''R'' และ ''S'' ได้ตามลำดับ พีแอลเอจัดอยู่พอลิเมอร์จำพวกอะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ที่สามารถย่อยสลายได้โดยกระบวนทางเคมีที่ทำให้เกิดการไฮโดรลิซิส ภายใต้เงื่อนไขทางชีวภาพ กรดแลคติค (Lactic acid) หรือ 2- ไฮดรอกซีโพรไพออนิกแอสิด (2-hydroxypropinoic acid) จะได้มาจากกระบวนการหมักของจุลินทรีย์ กระบวนการดังกล่าวจะนำมาซึ่งแหล่งของกรดแลคติคที่มีประสิทธิภาพ กรดแลคติกที่พบโดยทั่วไปจะแบ่งเป็นชนิด ''L'' และ ''D'' สเตอริโอไอโซเมอร์ซึ่งจะสามารถเรียกได้เป็นชนิด ''R'' และ ''S'' ได้ตามลำดับ พีแอลเอที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีของกรดแลคติกจะให้ "racimic mixture" ซึ่งจะเป็นพีแอลเอที่มี กรดแลคติกชนิด "D" 50% และชนิด "L" 50% [38] พีแอลเอโดยทั่วไปมักประกอบไปด้วย 99.5% ของ L-ไอโซเมอร์และ 0.5% ของ D-ไอโซเมอร์ รูปที่ 4.8 แสดงสเตอริโอไอโซเมอร์ของกรดแลคติก [38]



รูปที่ 4.7 วัฏจักรของพอลิแลคไทด์ [22]

จากรูปที่ 4.7 กระบวนการผลิตในขั้นตอนที่กรดแลคติกผ่านกระบวนการไดเมอไรเซชัน (dimerization) จนได้เป็นวงแหวนแลคไทด์ (cycle lactide) ที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด

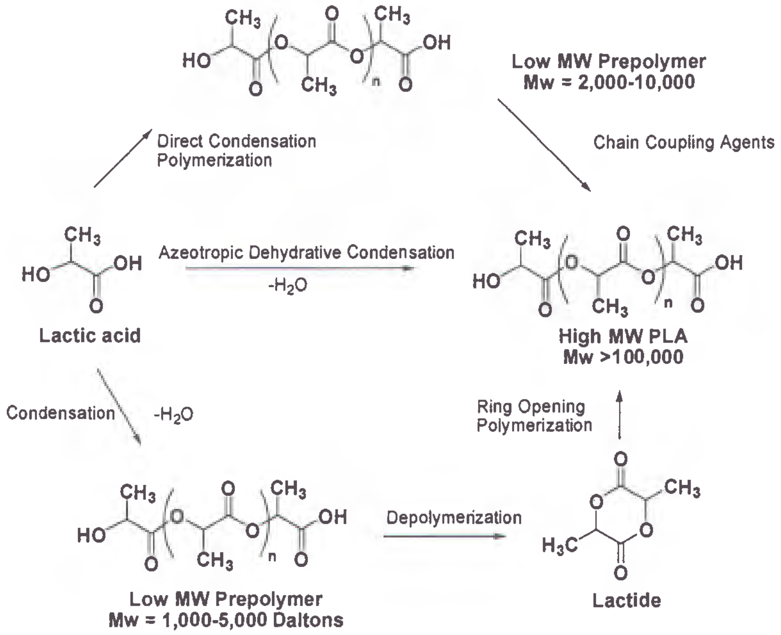
คือ D,D-lactide, L,L-lactide และ L,D -or D,L- lactide หรือเรียกว่า D-lactide, L-lactide และ meso lactide ตามลำดับดังรูปที่ 4.8 (b) วงแหวนแลคไทด์ชนิด meso lactide จะพบได้น้อย และมีคุณสมบัติแตกต่างจาก D-lactide และ L-lactide ซึ่งมักจะพบโดยทั่วไป



รูปที่ 4.8 สเตอริโอไอโซเมอร์ของ (a) lactic acids, and (b) lactides [38]

เราสามารถผลิตพีแอลเอได้โดยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันในสองรูปแบบที่แตกต่างกัน แบบแรกคือ กระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (polycondensation) ซึ่งจะเป็นกระบวนการที่มีการกำจัดน้ำออกโดยกระบวนการควบแน่นและมีการใช้สารละลายภายใต้สภาวะที่เป็นสุญญากาศ และอุณหภูมิสูง กระบวนการดังกล่าวจะได้มาซึ่งพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจนถึงปานกลาง [38] การแก้ปัญหาเรื่องน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำได้โดยที่กรดแลคติกจะถูกพอลิเมอไรซ์แบบควบแน่นโดยตรงโดยมีการปรับความสมดุลระหว่างน้ำ แลคติกแอสิด และพีแอลเอในตัวทำละลายอินทรีย์ให้เหมาะสมจนได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง แลคติกแอสิดสามารถถูกพอลิเมอไรซ์แบบควบแน่นจากมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ เช่น diols หรือ diacids จนได้เป็นพรีพอลิเมอร์ จากนั้นพรีพอลิเมอร์จะถูกเชื่อมต่อโดยใช้ตัวเชื่อมต่อโมเลกุลเช่น diisocyanate หรือ bis (amino-ether) จนได้พีแอลเอที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2 [35] บริษัทมิตซุย เคมิคอล (Mitsui Chemicals) ได้มีการพัฒนากระบวนการใหม่บนพื้นฐานของการพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นโดยตรงของ L-lactic acid จนสามารถผลิตพีแอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงโดยปราศจากการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ [38]

กระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบที่สอง คือ การพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงแหวน (ring – opening polymerization) ของแลคไทด์ (lactide) โดยมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น metals, metal halogenides, oxides, aryls และ carboxylates ตัวหลักที่นิยมใช้ คือ tin (II) bis (2-ethylhexanoate) กระบวนการดังกล่าวจะถูกริเริ่มด้วยตัวริเริ่มที่เป็น protic compound เช่น น้ำ แอลกอฮอลล์ ไทออล (thiols) และ เอมีน [22] กระบวนการดังกล่าวแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ เริ่มจากการที่น้ำจะถูกกำจัดออกภายใต้สภาวะที่เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดเป็นพรีพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ขั้นตอนที่ 2 จะเป็นการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้พรีพอลิเมอร์เกิดการจัดตัวอยู่ในรูปของวงแหวนที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ 2 โมเลกุล (cyclic intermediate dimer) ซึ่งหมายถึง แลคไทด์ (Lactide) หลังจากนั้นใช้กระบวนการกลั่นเพื่อทำให้แลคไทด์บริสุทธิ์ ก่อนที่จะถูกพอลิเมอไรซ์ในตัวทำละลายเพื่อทำการพอลิเมอไรเซชันโดยการเปิดวงแหวนและผ่านกระบวนการต่อไปเพื่อให้ได้เรซินของพอลิแลคไทด์ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4.9 กระบวนการควบคุมความบริสุทธิ์ของแลคไทด์จะสามารถทำให้ได้มาซึ่งพอลิเมอร์ที่มีช่วงกว้างของน้ำหนักโมเลกุล [24]



รูปที่ 4.9 วิธีการสังเคราะห์พีแอลเอที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง [24]

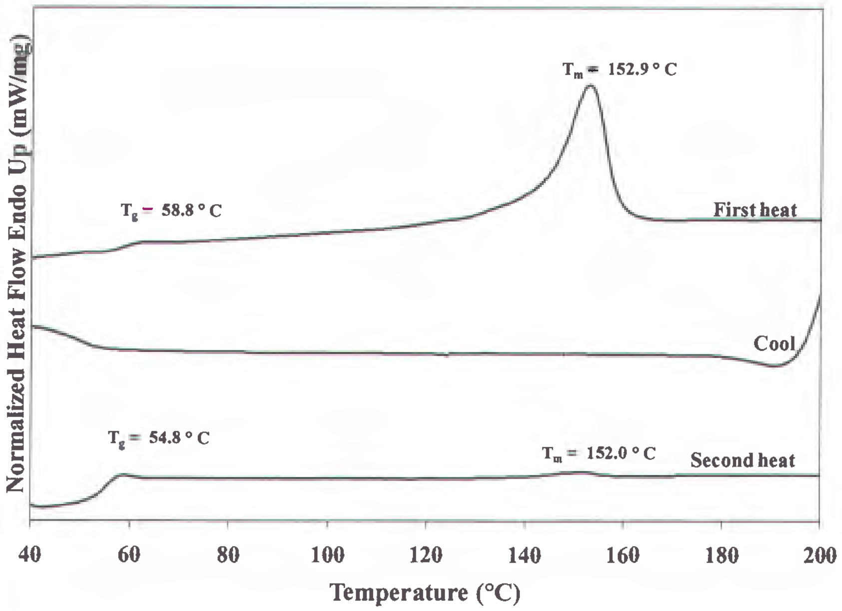
คุณสมบัติของพอลิแลคติคแอสิดนั้นจะมีลักษณะค่อนข้างกว้างซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนและการกระจายตัวของสเตอริโอไอโซเมอร์ทั้งสองชนิด สำหรับพีแอลเอชนิดที่เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature, Tg) และ heat distortion temperature (HDT) อยู่ในช่วงเดียวกันคือจะมีค่าประมาณ 60 °C และอุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature, Tm) มีค่าประมาณ 170 °C [25] น้ำหนักโมเลกุลรวมถึงความเป็นผลึกนั้นจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ ความสามารถในการเกิดผลึกของพีแอลเอนั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ L-lactic acid ต่อ D-lactic acid ยกตัวอย่างเช่น โคพอลิเมอร์แบบสุ่มที่มีอัตราส่วนของL-lactic acid ต่อ D-lactic acid ประมาณ 80:20 ถึง 20:80 จะแสดงลักษณะของพอลิเมอร์อสัณฐาน ที่มีความใส ไม่มีผลึก ในขณะที่ พีแอลเอที่มีเฉพาะ L-lactic acid หรือ D-lactic acid จะเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึกที่มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature, Tg) 60 °C และอุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature, Tm) 180 °C หรือมากกว่า 180 °C เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่มีอยู่ในท้องตลาดทั่วไป พีแอลเอจะมีค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ที่สามารถเทียบเคียงได้กับ PET ลักษณะเด่นของพีแอลเอ คือ พีแอลเอเป็นพอลิเมอร์ที่มีแหล่งกำเนิดพลังงานหมุนเวียน เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง ข้าวสาลี น้ำตาลและแป้งที่ทำมาจากข้าวชนิดอื่นๆ พีแอลเอสามารถถูกย่อยสลายได้คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และ มีเทน ซึ่งไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม [42] นอกจากนี้ยังทนทานต่อความชื้นและน้ำมัน พีแอลเอมีคุณสมบัติเชิงกลที่หลากหลายแตกต่างกัน จึงสามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลาย ๆ รูปแบบโดยใช้กระบวนการผลิตโดยเฉพาะ และนอกจากพีแอลเอจะมีการนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง เช่น แก้วเครื่องดื่ม เปลือกลูกอม และผลิตภัณฑ์อนามัยต่าง ๆ [38] แล้วพีแอลเอยังเป็น พอลิเมอร์ที่ได้รับการยอมรับให้อยู่วัสดุประเภทที่มีความปลอดภัย GRAS (generally recognized as safe, GRAS) จากองค์การอาหารและยาในสหรัฐอเมริกาอีกด้วย [2]

4.2.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของเรซินพีแอลเอและพีแอลเอคอมโพสิท จากการทดลองศึกษาสมบัติของการแสดงพฤติกรรมทางความร้อนของพีแอลเอและพีแอลเอคอมปาวด์โดยใช้เครื่องวัดสมบัติทางความร้อน (differential scanning calorimeter, DSC) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของวัสดุ โดยอาศัยหลักการของการวัดอุณหภูมิ หรือการไหลถ่ายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความร้อนของวัสดุเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา โดยเครื่องจะทำการชดเชยพลังงานเพื่อให้อุณหภูมิของเตาเผาฝั่งสารตัวอย่างและฝั่งสารอ้างอิงมีค่าเท่ากัน

ตลอดการทดลอง ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยสมการ $\Delta T = Ts - Tr = 0$ โดยการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนในเครื่องดังกล่าวจะมีสองรูปแบบคือ การเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน (endothermic) เกิดจากการที่สารตัวอย่างเกิดการดูดความร้อนทำให้อุณหภูมิฝั่งสารตัวอย่างลดลง (Ts < Tr) เครื่องจะให้ความร้อนไปที่ฝั่งของสารตัวอย่างเพื่ออุณหภูมิทั้งสองฝั่งเท่ากัน สำหรับการเปลี่ยนแปลงแบบคายความร้อน (exothermic) เกิดจากการที่สารตัวอย่างเกิดการคายความร้อนทำให้อุณหภูมิฝั่งสารตัวอย่างลดลง (Ts > Tr) เครื่องจะให้ความร้อนไปที่ฝั่งอ้างอิงเพื่ออุณหภูมิทั้งสองฝั่งเท่ากัน รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่อง differential scanning calorimeter ของพีแอลเอ (PLA 2002D) โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ขั้นที่ 1 คือการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (first heating) ซึ่งจะเป็นการทดลองเพื่อเป็นการศึกษาประวัติทางความร้อนของพีแอลเอจากการขึ้นรูปก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ยังเป็นการทดลองเพื่อลบประวัติทางทางความร้อนของพีแอลเพื่อให้สามารถศึกษาสมบัติทางความร้อนที่แท้จริงได้ ขั้นที่ 2 คือการหล่อเย็น (cooling) จะทำการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติการเกิดผลึกขณะหล่อเย็นของพีแอลเอ และขั้นที่ 3 คือการให้ความร้อนครั้งที่สอง (second heating) เพื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนที่แท้จริงของพีแอลเอ โดยอัตราการให้ความร้อนและการหล่อเย็นอยู่ที่ 10 °C /min จากการทดสอบการให้ความร้อนครั้งที่ 1 พบว่าพีแอลเอแสดงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Glass transition temperature, Tg) ที่ 58.8 °C และมีอุณหภูมิหลอมผลึก (melting temperature) ที่ 152.9 °C และไม่ปรากฏพีคของการเกิดผลึก (crystallization peak) ของพีแอลในการทดสอบการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ซึ่งนั่นแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างของเม็ดพลาสติกพีแอลเอที่นำมาทดสอบเป็นพอลิเมอร์ชนิดกึ่งผลึก (semi crystalline polymer) ที่มีการเกิดผลึกอย่างสมบูรณ์ในระหว่างกระบวนการเตรียมเม็ดพลาสติกดังกล่าว [40]

จากการทดสอบขั้นที่ 2 การหล่อเย็น (cooling) จะเห็นได้ว่าไมปรากฏพีคของการเกิดผลึก (crystallization peak) ของพีแอลเอในการหล่อเย็นที่อัตราเร็ว 10 °C/min นั่นแสดงให้เห็นว่าที่อัตราการหล่อเย็นดังกล่าวพีแอลเอ 2002D ไม่สามารถเกิดผลึกได้ ซึ่งอาจเกิดจากที่อัตราการหล่อเย็นดังกล่าวเป็นอัตราเร็วที่เร็วเกินกว่าที่พีแอลเอจะตกผลึก ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติทั่วไปของพีแอลเอที่สามารถตกผลึกได้ค่อนช้า ยกตัวอย่างเช่น X-F.Wei et al. (2014) ทำการทดสอบ DSC ของพีแอลเอ โดยทำการทดสอบการเกิดผลึกแบบนอนไอโซเทอร์มอล (Non-isothermal crystallization) โดยมีการหล่อเย็นที่อัตราเร็ว 2.5 °C /min พบว่าถึงแม้ว่าจะใช้อัตราการหล่อเย็นที่ค่อนของต่ำแล้ว พีแอลเอยังคงเกิดผลึกได้ค่อนข้างน้อย และเกิดผลึกได้ที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ (96 °C) และจากทดสอบให้

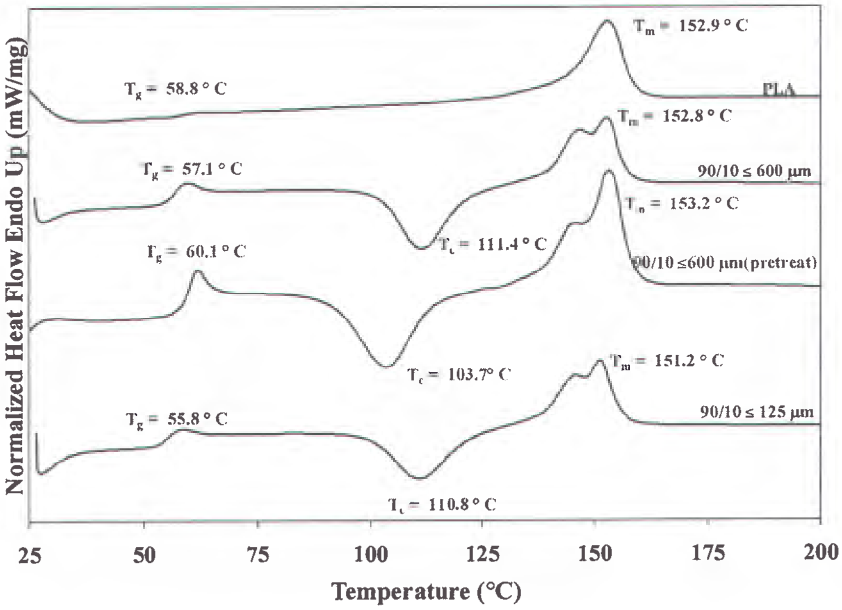
ความร้อนครั้งที่ 2 (second heating) จะเห็นว่าเมื่อทำการลบประวัติทางความร้อนของพีแอลเอแล้ว ทำให้พีแอลเอมีค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature, T_g) และมีอุณหภูมิหลอมผลึก (melting temperature, T_m) ต่ำลงเล็กน้อยคือ 54.8 °C และ 152.0 °C ตามลำดับ



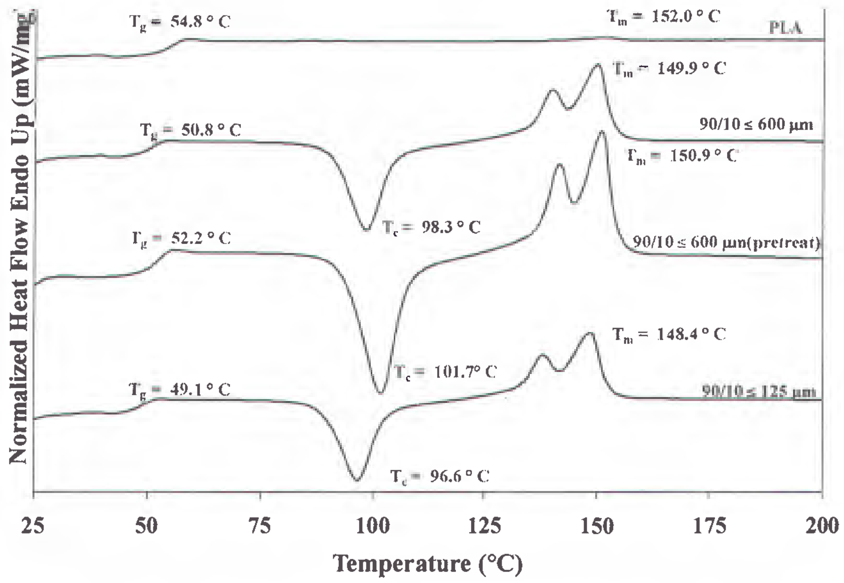
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบ DSC ของพีแอลเอ (PLA 2002D) ที่ first heating, cooling และ second heating curves ที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min.

รูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงผลการทดสอบ DSC ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (first heating) และครั้งที่ 2 (second heating) ตามลำดับ ของพีแอลเอเปรียบเทียบกับคอมโพสิทของพีแอลเอกับผงขี้เลื่อยที่มีขนาดและสภาวะในการเตรียมแตกต่างกันที่อัตราส่วนพีแอลเอ: ผงขี้เลื่อยที่ 90:10 จะเห็นได้ว่าจากการให้ความร้อนครั้งที่ 1 จะเห็นได้ว่าพีแอลเอไม่ปรากฎพีคของการเกิดผลึก ในขณะที่คอมโพสิทของพีแอลเอกับผงขี้เลื่อยทุกแบบ (ผงขี้เลื่อยขนาด ≤ 125 μm, ผงขี้เลื่อยขนาด ≤ 600 μm และผงขี้เลื่อยขนาด ≤ 600 μm ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย NaOH, (pretreated SP) ปรากฏพีคของการเกิดผลึกที่อุณหภูมิแตกต่างกัน นั่นแสดงให้เห็นว่าคอมโพสิทของพีแอลเอกับผงขี้เลื่อยที่ได้จากการเตรียมโดยกระบวนการอัดรีด (extrusion process) มีการเกิดผลึกอย่างไม่สมบูรณ์ในระหว่างการเตรียม ทั้งนี้เนื่องจากพีแอลเอเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดผลึกได้ค่อนข้างช้าประกอบกับกระบวนการเตรียมเม็ดคอมโพสิทโดยใช้กระบวนการอัดรีดนั้น เมื่อคอมโพสิท

หลอมถูกผลักดันออกมาจากหัวดาย จะถูกหล่อเย็นด้วยอากาศ ทำให้คอมโพสิทหลอมเกิดการแข็งและคงรูปได้ค่อนข้างเร็วจึงไม่มีเวลามากพอที่จะทำให้คอมโพสิทดังกล่าวไม่สามารถเกิดผลึกได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อเปรียบพีคการหลอมตัวของผลึกระหว่างพีแอลเอกับคอมโพสิทของพีแอลเอกับผงขี้เลื่อยแต่ละชนิด ทั้งกรณีที่ทำการทดลองให้ความร้อนครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 (รูปที่ 4.11 และ 4.12) พบว่าเมื่อมีการเติมผงขี้เลื่อยลงไปจะทำให้เกิดพีคการหลอมตัวของผลึก 2 พีคที่มีขนาดพีคแตกต่างกัน ซึ่งอาจเกิดจากการเกิดผลึกจากสองบริเวณที่แตกต่างกันคือ บริเวณที่พีแอลเอเองเกิดการผลึก กับการเกิดผลึกบริเวณที่รอยเชื่อมต่อระหว่างพีแอลเอกับผงขี้เลื่อย



รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบ DSC (first heating) ของ PLA และ คอมโพสิทของ PLA/ขี้เลื่อยที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min.



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบ DSC (second heating) ของ PLA และคอมโพสิทของ PLA/ขี้เลื่อยที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min.

จากผลการทดสอบ DSC ดังกล่าวสามารถสรุปค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิหลอมผลึก (melting temperature, T_m) และอุณหภูมิในการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) ได้ดังตารางที่ 4.1 จากตารางดังกล่าวจะแสดงให้เห็นว่าเมื่อพีแอลเอและพีแอลเอคอมโพสิท ผ่านการทดสอบ DSC ที่การให้ความร้อนเป็นครั้งที่ 2 (second heating) จะทำให้ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิหลอมผลึก (melting temperature, T_m) และอุณหภูมิในการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) มีค่าลดลงที่ทุกสูตรที่ทำการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบ DSC ที่การให้ความร้อนเป็นครั้งที่ 1 (first heating)

ตารางที่ 4.1 ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิหลอมผลึก (melting temperature, T_m) และอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c)

Composition	Glass transition temp, T_g (°C)		Melting temp, T_m (°C)		Crystallization temp, T_c (°C)	
	1st heating	2sd heating	1st heating	2sd heating	1st heating	2sd heating
PLA 2002D	58.8	54.8	152.9	152.0	-	-
PLA/SP (≤ 600 μm)	57.1	50.8	152.8	149.9	111.4	98.3
PLA/ pretreated SP (≤ 600μm)	60.1	52.2	153.2	150.9	103.7	101.7
PLA/SP (≤ 125 μm)	55.8	49.1	151.2	148.4	110.8	96.6

เมื่อพิจารณาเฉพาะการทดสอบ DSC ที่การให้ความร้อนเป็นครั้งที่ 2 (second heating) จะพบว่าเมื่อมีการเติมผงขี้เลื่อยลงไปจะทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิหลอมผลึก (melting temperature, T_m) ของพีแอลเอคอมโพสิทลดลง โดยคอมโพสิทของพีแอลเอกับผงขี้เลื่อยขนาด ≤ 125 ไมครอน ที่ไม่ผ่านกระบวนการดัดแปลงพื้นผิว แสดงค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิหลอมผลึก (melting temperature, T_m) ต่ำที่สุด คือ 49.1 °C และ 148.4 °C ตามลำดับ นอกจากนี้การเติมผงขี้เลื่อยลงไปในพีแอลเอสามารถกระตุ้นให้พีแอลเอเกิดผลึกได้ดีขึ้นซึ่งสังเกตได้จากผลการทดลองในรูปที่ 4.12 ที่มีพีคของการเกิดผลึกปรากฏขึ้นหลังการเติมผงขี้เลื่อยชนิดต่าง ๆ ลงไป โดยคอมโพสิทระหว่างพีแอลเอกับผงขี้เลื่อยขนาด ≤ 600 ไมครอนที่ผ่านกระบวนการดัดแปลงพื้นผิวโดยใช้สารละลายด่าง (NaOH) สามารถเกิดผลึกได้ที่อุณหภูมิสูงที่สุดคือ 101.7 °C เมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิทระหว่างพีแอลเอกับผงขี้เลื่อยขนาด ≤ 600 ไมครอนที่ไม่ผ่านกระบวนการดัดแปลงพื้นผิว และ คอมโพสิทระหว่างพีแอลเอกับผงขี้เลื่อยขนาด ≤ 125 ไมครอนที่ไม่ผ่านกระบวนการดัดแปลงพื้นผิว

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการวิจัยเพื่อศึกษาหาวิธีการในการดัดแปลงโครงสร้างบริเวณพื้นผิวของผงขี้เลื่อยให้มีเหมาะสมสามารถเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างผงขี้เลื่อยกับพีแอลเอในการผลิตคอมโพสิทชีวภาพโดยวิธีการผสมแบบร้อน โดยในการทดลองได้เลือกกระบวนการดัดแปลงพื้นผิวของขี้เลื่อยสองแบบ คือ การปรับสภาพด้วยสารละลายด่าง (Alkaline treatment) และการปรับสภาพด้วยไซเลน (Silane treatment) หลังจากกระบวนการดัดแปลงพื้นผิวดังกล่าว ขี้เลื่อยที่ได้จะถูกนำมาผสมกับพีแอลเอด้วยผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ เพื่อให้ได้เม็ดเรซินคอมโพสิทและนำไปศึกษาสมบัติทางความร้อน โดยจากการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 การปรับสภาพพื้นผิวของผงขี้เลื่อยด้วยสารละลายด่าง (NaOH) สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของผงขี้เลื่อย ซึ่งยืนยันได้ด้วยผลของการทดสอบด้วยเทคนิค ATR-FTIR

5.1.2 การปรับสภาพพื้นผิวของผงขี้เลื่อยด้วยไซเลน (GPS) ไม่สามารถยืนยันการเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของผงขี้เลื่อยบริเวณพื้นผิวจากการทดสอบด้วยเทคนิค ATR-FTIR ได้

5.1.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของพีแอลเอ และพีแอลเอคอมโพสิทพบว่า พีแอลเอเกรด 2002D มีค่า T_g และ T_m ที่ 58.8 °C และ 152.9 °C ตามลำดับ และไม่สามารถเกิดผลึกได้ที่อัตราการหล่อเย็น 10°C /min เมื่อการเติมขี้เลื่อยลงไปในพีแอลเอจะทำให้ค่า T_g และ T_m ลดลง โดยคอมโพสิทของพีแอลเอกับผงขี้เลื่อยขนาด ≤ 125 ไมครอน ที่ไม่ผ่านกระบวนการดัดแปลงพื้นผิวแสดงค่า T_g และ T_m ต่ำที่สุด คือ 49.1 °C และ 148.4 °C ตามลำดับ นอกจากนี้การการเติมขี้เลื่อยลงไปในพีแอลเอสามารถกระตุ้นให้พีแอลเอเกิดผลึกได้ดีขึ้น โดยคอมโพสิทระหว่างพีแอลเอกับผงขี้เลื่อยขนาด ≤ 600 ไมครอนที่ผ่านกระบวนการดัดแปลงพื้นผิวโดยใช้สารละลายด่าง (NaOH) สามารถเกิดผลึกได้ที่อุณหภูมิสูงที่สุดคือ 101.7 °C

5.2 ข้อเสนอแนะ

การดัดแปลงพื้นผิวของผงขี้เลื่อยจุดประสงค์หลักเพื่อการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของขี้เลื่อยกับพีแอลเอ โดยในกรณีที่การดัดแปลงพื้นผิวของผงขี้เลื่อยสามารถเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของขี้เลื่อยกับพีแอลเอได้ดีขึ้นจริง จะทำให้สมบัติเชิงกลของของคอมโพสิทดีขึ้นด้วย ดังนั้น สิ่งที่ควรจะทำในการวิจัยครั้งต่อไป ก็คือการนำคอมโพสิทเรซินที่ได้ไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปและทดสอบสมบัติเชิงกลเพื่อที่จะตรวจสอบความเข้ากันได้ระหว่างพีแอลเอและผงขี้เลื่อยที่ผ่านกระบวนการดัดแปลงพื้นผิวอีกทางหนึ่งที่เป็นรูปธรรมสามารถนำไปใช้งานได้จริง

เอกสารอ้างอิง

[1] กรรมวิธีการเสริมแรงผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสมพีวีซี และขี้เลื่อยไม้โดยเส้นใยแก้วสังเคราะห์ และสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนและแสงยูวี (Reinforcing and stabilizing Methods for Wood/PVC Composite Products by Synthetic Glass Fiber and Thermal-UV Stabilizers). [Online]. Available : http://www.kmutt.ac.th/p-prof/P-PROF%20website_thai%20version/Patent_Thai.html.

[2] ถ่านจากขี้เลื่อย ที่ผ่านการผลิตด้วยกรรมวิธีอัดร้อน. [Online].Available : http://charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/Line_product.php.

[3] ปิ่นสุภา ปีติรักษ์สกุล, 2551, คอมโพสิทไม้ - พลาสติกวัสดุใหม่สำหรับงานก่อสร้าง, วารสารรามคำแหง ฉบับวิศวกรรมศาตร์, ปีที่ 2 ฉบับที่ 1

[4] พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastics), สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. [Online].Available : http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html , 2553

[5] พลาสติกย่อยสลายได้นวัตกรรมเพื่อโลก, ฝ่ายชุมชนและผู้ด้อยโอกาส สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. [Online].Available : http://nstda.or.th/rural/public/100%20articles-stkc/39.pdf

[6] พิพัฒน์ ธารอินกอง, การผลิตปุ๋ยหมักจากขี้เลื่อยไม้แกะสลัก. [Online]. Available : http://maetha.lamphun.doae.go.th/file/KM/km5-phiphat.htm.

[7] ภาพรวมของอุตสาหกรรมพลาสติก [Online]. Available : http://www2.dede.go.th/kmberc/datacenter/factory/plastic/chapter1-2.pdf

[8] อุตสาหกรรมไบโอพลาสติก, เอกสาร profile ภาคอุตสาหกรรม, สพศ. [Online].Available : http://www.nesdb.go.th/portals/0/tasks/dev_ability/Profile/Industry/อุตสาหกรรมไบโอพลาสติก.pdf

[9] สูตรส่วนผสมสำหรับผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสมพีวีซีกับขี้เลื่อยไม้ (Materials Formulation for PVC/Sawdust Products). [Online]. Available : http://www.kmutt.ac.th/p-prof/P-PROF%20website_thai%20version/Patent_Thai.html.

[10] สูตรวัสดุผสมและกรรมวิธีการผลิต ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติผสมขี้เลื่อยไม้ (Material Formalation and Processing for Natural Rubber/Wood Sawdust). [Online]. Available : http://www.kmutt.ac.th/p-prof/P-PROF%20website_thai%20version/Patent_Thai.html.

[11] รศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ., เอกชัย วิมลมาลา., และธีระศักดิ์ หมากผิน, การผลิตและ การทดสอบหลังคายางพาราจากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับขี้เลื่อย. [Online]. Available : http://www.kmutt.ac.th/rippc/ptrf62.htm.

[12] เอกชัย วิมลมาลา., ธีระศักดิ์ หมากผิน., และรศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, การศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางเอสบีอาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นสารเติมแต่ง (ระยะที่ 1-2). [Online]. Available : http://nstda.or.th/rural/public/100%20articles-stkc/39.pdf

[13] Abu Bakar, A., Hassan, A., and Yusof, AFM. (2005) Effect of oil palm empty fruit bunch and acrylic impact modifier on mechanical properties and processability of unplasticized poly(vinyl chloride) composites. Polymer – Plastic Technology and Engineering, 44, 1125-1137.

[14] Balkcom, M. Welt, B. and Berger, K. (2002). Notes from the package-ing laboratory: polylactic acid - an exciting new packaging material. Internet. http;//edis.ifas.ufl.edu/AE210.

[15] Bax, B., and Müssig, J. (2008) Impact and tensile properties of PLA/cordenka and PLA/flax composites. Composite Science and Technology, 68, 1601-1607.

[16] Bhatia, A., Gupta, R.K., Bhattacharya, S.N., and Choi, H.J. (2007) Compatibility of biodegradable poly(lactic acid) (PLA) and poly(butylene succinate) (PBS) blends for packaging application. Korea-Australia Rheology Journal, 19, 125-131.

[17] DeRosa, A. (2002). Composites a Hit in Building industry., Plastic News, Crain Communications Inc., February.

[18] Du, Y., Zhang, J., Xue, Y., Lacy, Jr TE., Toghiani, H., Horstemeyer, and MF., Pittman, Jr CU. (2010) Kenaf bast fibre bundle-reinforced unsaturated polyester composite. III: Statistical strength characteristic and cost-performance analysis. Forest Products Journal, 60, 514-521

[19] Faruk, O., Bledzki, A.K., Fink, H-P., and Sain, M. (2012) Biocomposites reinforced with natural fibers : 2000-2010. Polymer Science, 37, 1552-1596.

[20] Gu, S-Y. Zhang, K. Ren, J. and Zhan, H. (2008) Melt rheology of polylactide /poly(butulene adipate-*co*-terephthalate) blends. Carbohydrate Polymers, article in press.

[21] Huda, MS., Drzal, LT., Mohanty, AK., and Misra, M. (2008) Effect of fiber surface treatement on the properties of laminated biocomposites from poly(lactic acid) (PLA) and kenaf fibers. Composite Science and Technology, 68, 424-432.

[22] Jacobsen, S. Gerhard Fritz, H. Degee, P. and Dubois, P. (2000) New developments on the ring opening polymerization of polylactide. Industrial Crops and Products, 11(2-3), 265-275.

[23] John, MJ., and Anandjiwala, RD. (2009) Chemical modification of flex reinforced polypropylene composites. Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, 38, 1912-1921.

[24] Kaplan, A.E. (1998) Biopolymers from Renewable Resources. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

[25] Kawamoto, N., Sakai, A., Horikoshi, T., Urushihara, T., and Tobita, E. (2007) Physical and mechanical properties of poly(L-lactic acid) nucleated by dibenzoylhydrazide compound. Journal of Applied Polymer Science, 103, 244-250.

[26] Le Duigou, A., Davies, P., and Baley, C. (2010) Interfacial bonding of flax fibre/poly(L-lactide) bio-composites. Composite Science and Technology, 70, 231-239.

[27] Metin, D., Tihminlioglu, F., Balkose, D., and Ulku, S. (2004) The effect of interactions on the mechanical properties of polypropylene/natural zeolite composites. Composites, 35, 23-32.

[28] Myers, G.E., Chahyadi, C.A., Coberly and Ermer, D.S. (1991). Wood flour/PP composites: Influence of Maleated Polyproplyene and Process and Composition Variables on Mechanical Properties. International Journal of Polymeric Materials, Vol.15, 21-44.

[29] Okubo, K., Fujii, T., and Yamamoto, Y. (2004) Delvelopment of bamboo-based polymer composites and their mechanical properties. Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, 35, 377-383.

[30] Okubo, K., Fujii, T., and Thostenson, ET. (2009) Multi-scale hybrid biocomposite: processing and mechanical characterization of bamboo fiber reinforced PLA with microfibrillated cellulose. Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, 40, 469-475.

[31] Pillin, I., Montrelay, N., and Grohens, Y. (2006) Thermo-mechanical characterization of plasticized PLA: Is the miscibility the only significant factor. Polymer, 47, 4676-4682.

[32] Pracella, M., Chionna, D., Anguillesi, I., Kulinski, Z., and Piorkowska, E. (2006) Functionalization, compatibilization and properties of polypropylene composite with hemp fibres. Composite Science and Technology, 66, 2218-2230.

[33] Ray, D., Sarkar, BK., Das, S., and Rana, AK. (2002) Dynamic mechanical and thermal analysis of vinylester-resin-matrix composites reinforced with untreated and alkali-treated jute fibres. Composite Science and Technology, 62, 911-917.

[34] Shukla, DK., Kasisomayajula, S.V., and Parameswaran, V. (2008) Epoxy composites using functionalized alumina platelets as reinforcements. Composite Science and Technology, 68, 3055-3063.

[35] Södergård, A., and Stolt, M. (2002) Properties of lactic acid based polymer and their correlation with composition. Progress in Polymer Science, 27, 1123-1163

[36] Suppakarn, N., and Jarukumjorn, K. (2009) Mechanical properties and flammability of sisal/PP composites: effect of flame retardant type and content. Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, 40, 613-618.

[37] Threepopnatkul, P., Kaerkitcha, N., and Athipongarporn, N. (2010) Polycarbonate with pineapple leaf fiber to produce functional composites. Advances in Meterials Research, 49, 1378-1384.

[38] Vink, E.T.H., Rabago, K.R., Glassner, D.A., and Gruber, P.R. (2003) Application of life cycle assessment to Nature Works^{TM} polylactide (PLA) production. Polymer Degradation and Stability, 80, 403-419.

[39] Wahab, MA., Jellali, S., and Jedidi, N. (2010) Ammonium biosorption onto sawdust: FTIR analysis, kinetics and adsorption isotherms modeling. Bioresource Technology, 101, 5070-5075.

[40] Wei, X-F., Bao, R-Y., Cao, Z-Q., Zhang, L-Q., Liu, Z-Y., Yang, W., Xie, B-H., and Yang, M-B. (2014) Greatly accelerated crystallization of poly(lactic acid): cooperative effect of stereocomplex crystallites and polyethylene glycol. Colloid Polymer Science, 292, 163-172.

[41] Xanthos, M. (2005) Functional Fillers for Plastics. Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim.

[42] Yew, G.H., Mohd Yusof, A.M., Mohd Ishak, Z.A., and Ishiak, U.S. (2005) Water absorption and enzymatic degradation of poly(lactic acid) / rice starch composites. Polymer Degradation Stability, 90(3), 488-500.

[43] Yokohara, T., and Yamaguchi, M. (2008) Structure and properties for biomass-based polyester blends of PLA and PBS. European Polymer Journal, 44, 677-685.

[44] Zhou, F., Cheng, G., and Jiang, B. (2014) Effect of sialne treatment on microstructure of sisal fibers. Applied Surface Science, 292, 806-812

ประวัติผู้วิจัย

1. หัวหน้าโครงการ

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย)	นางสาวนุรักษ์ สังข์ศรี
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ)	Miss. Nuruk Sungsri
เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน	3 8013 00982 58 3
ตำแหน่งปัจจุบัน	พนักงานมหาวิทยาลัย สายวิชาการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
หน่วยงานและสถานที่อยู่	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช เลขที่ 1 ถนน นครศรีธรรมราช-นบพิตำ หมู่ที่ 4 ตำบลท่างิ้ว อำเภอ เมือง จังหวัด นครศรีธรรมราช 80280 (E-mail) nuruks@hotmail.com , 0996859563

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2548	วิทยาศาสตร์บัณฑิตสาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
ปีการศึกษา 2552	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิตสาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติการทำงาน

ก.ย. 2552 – เม.ย. 2553	DMS Tech Co., Ltd.,
ตำแหน่ง	Production Planning Supervisor
ก.ค. 2548 – ก.พ. 2550	Thai Plastic Bags Industry Co., Ltd
ตำแหน่ง	Production planning officer

การนำเสนองานวิจัย

Proceedings:	Sungkhsee, N.; and Chirachanchai, S. (2009, April 22) Overcoming PLA Limitation by Compounding with Modified Additive. Proceedings of 15th

PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers, Bangkok, Thailand.

Presentation: Sungkhsee, N.; and Chirachanchai, S. (2009, April 22) Overcoming PLA Limitation by Compounding with Modified Additive. Paper presented at 15th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers, Bangkok, Thailand.

รางวัลที่ได้รับ

Golden Award-Poster presentation at 15th PPC Symposium on Petroleum, and Polymers, Bangkok, Thailand.