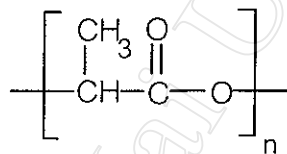


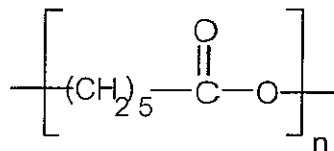
บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ เป็นการปรับปรุงพอลิเมอร์ประเภทพอลิเอสเทอร์ที่สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพชนิดใหม่ที่มีศักยภาพเพียงพอสำหรับนำไปใช้งานทางการแพทย์ เช่น ไหมเย็บแผล ชนิดโมโนฟีลาเมนต์ โดยพยายามทำการปรับปรุงให้มีความเชื่อมโยงระหว่างความสามารถในการสลายตัวได้เองทางชีวภาพกับการเพิ่มขึ้นของความยืดหยุ่นของโครงสร้างของพอลิเมอร์ โดยการออกแบบและเลือกพอลิเมอร์ตัวใหม่ เพื่อปรับปรุงโครงสร้างใหม่ละลายชนิดโมโนฟีลาเมนต์ ที่ใช้คือ poly(L-lactic acid) ; PLLA มีสูตรโครงสร้างเป็น;



ในโครงสร้างของสายโซ่หลัก ที่ประกอบด้วยกลุ่มของเอสเทอร์อยู่ มีผลทำให้ไหมที่ทำจาก PLLA มีสมบัติไฮโดรฟิลิก เกิดการดูดซึม การเปียก สามารถเกิดการไฮโดรลิซิส และเกิดการสลายตัวได้ จึงมีผลทำให้พอลิเมอร์สามารถสลายตัวทางชีวภาพได้ในร่างกายมนุษย์ แต่ยังมีปัญหาตรงที่ไหมละลายชนิดนี้มีความยืดหยุ่นน้อย ทำการปรับปรุงโครงสร้างของไหมละลายที่ทำจาก PLLA โดยการนำมาเบลนด์กับ PCL ที่มีสูตรโครงสร้างเป็น;



ส่วนในโครงสร้างของสายโซ่หลัก ที่ประกอบด้วยกลุ่มของเอสเทอร์ ทำให้พอลิเมอร์สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ และเนื่องจากมีกลุ่มของเมทิลีน ($-\text{CH}_2-$) อยู่ 5 กลุ่ม มีผลทำให้มีสายโซ่ยาวที่เพิ่มความสามารถในการบิด หรือหักงอไปมาได้ และทำให้เพิ่มความยืดหยุ่นมากขึ้น ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในการผลิตไหมละลายชนิดโมโนฟีลาเมนต์ โดยการนำ PLLA มาเบลนด์กับ PCL

เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ในการออกแบบและการเลือกพอลิเมอร์ เพื่อนำมาผลิตเป็นไหมละลายชนิดโมโนฟิลาเมนต์ ที่มีอิทธิพลต่อสมบัติและความสามารถในการสลายตัวได้ทางชีวภาพของไหม เช่น โครงสร้างทางเคมี ทั้งที่เป็นโครงสร้างของสายโซ่หลัก และโครงสร้างย่อย รวมถึงกลุ่มที่มาต่อกับสายโซ่หลัก การจัดเรียงตัวของโมเลกุล สัดส่วน ในการผสม และการกระจายตัวของมอนอเมอร์และพอลิเมอร์ เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก ขบวนการสังเคราะห์มวลโมเลกุลและการกระจายตัวของมวลโมเลกุล อิทธิพลทางกายภาพและทางเคมี รูปร่าง และสัณฐานวิทยา ขบวนการไฮโดรลิซิส การละลายและการดูดซึมของส่วนประกอบต่างๆ รวมถึงสถานที่ที่ฝังตัว หรือการใช้งานของไหม เป็นต้น ดังนั้นในการออกแบบและการเลือกพอลิเมอร์เพื่อผลิตไหมละลายชนิดโมโนฟิลาเมนต์ ต้องคำนึงและควบคุมปัจจัยต่างๆ เหล่านั้น ควรให้มีสมบัติและสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งาน

การปรับปรุงโครงสร้างของ PLLA ด้วยการนำมาเบลนด์กับ PCL ที่ใช้วิธีการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ 3 วิธี คือ การเบลนด์ทางกายภาพ การเบลนด์โดยการทำเป็นสารละลาย และการเบลนด์โดยการหลอมตัวผสมกันที่สภาวะต่างๆ แล้วนำพอลิเมอร์เบลนด์มาทดสอบเพื่อหาลักษณะเฉพาะ และศึกษาถึงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับการทำนายทางทฤษฎี

การทดลองเริ่มจากการสังเคราะห์ PLLA ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการทำพอลิเมอร์ไฮดรอลิซิสแบบคอนเดนเซชันได้ PLLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ในขั้นตอนที่ 2 ทำการสลายตัวโดยใช้ความร้อนได้ L-Lactide เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะใส เมื่อนำไปทดสอบด้วยเทคนิค DSC ได้ T_m มีค่า $\approx 100^\circ\text{C}$ มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.88% ดังรูป 5.3-5.4 ส่วนในขั้นตอนที่ 3 นำผลิตภัณฑ์ของ L-lactide มาทำพอลิเมอร์ไฮดรอลิซิสแบบเปิดวงที่ไม่มีตัวทำละลาย โดยใช้สแตนนัส ออกไซด์เป็นตัวเริ่มต้นของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 140°C ใช้เวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ PLLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งจากการทดลองนี้ได้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน ($\bar{M}_n$) เท่ากับ 2.89×10^4 ดังรูป 5.20 มีค่า $T_g \approx 60^\circ\text{C}$ มีค่า $T_m \approx 181^\circ\text{C}$ มีค่า $T_c \approx 114^\circ\text{C}$ ดังรูป 5.21 และมีค่า T_d ที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิ $283-370^\circ\text{C}$ ดังรูป 5.29 แล้วนำ PLLA ที่สังเคราะห์ได้ไปทำการเบลนด์กับ PCL ต่อไป

ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์

การศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA กับ PCL ที่เตรียมโดยวิธีการเบลนด์ต่างกัน 3 วิธี คือ การเบลนด์ทางกายภาพ การเบลนด์โดยวิธีการทำเป็นสารละลาย และการเบลนด์โดยวิธีการหลอมตัวผสมกันในสถานะที่แตกต่างกัน ด้วยเทคนิคต่างๆ แล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับการทำนายทางทฤษฎี สรุปได้ดังนี้

การทำนายความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์

การทำนายความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ในส่วนที่เป็นอสังฐานโดยทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณค่าพารามิเตอร์การละลายของพอลิเมอร์และแรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์ได้ว่าการเบลนด์ระหว่าง PLLA กับ PCL สามารถผสมเข้ากันได้ตั้งแต่สัดส่วนของ PCL น้อยๆ โดยมีค่าแรงกระทำของพอลิเมอร์; $\chi_{\text{PLLA-PCL}}$ เป็น 0.0477 ซึ่งค่าที่ได้น้อยกว่าค่าแรงกระทำที่จุดวิกฤต; $(\chi_{\text{PLLA-PCL}})_{\text{SP}}$ ที่มีค่าเป็น 0.0555 แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของ PCL ตั้งแต่ 30% ขึ้นไปได้ $\chi_{\text{PLLA-PCL}}$ มีค่ามากกว่า $(\chi_{\text{PLLA-PCL}})_{\text{SP}}$ ดังตาราง 5.6 แสดงว่าพอลิเมอร์เบลนด์ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ หรือผสมเข้ากันได้บางส่วน ซึ่งจากการศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA และ PCL ที่ได้ แสดงให้เห็นถึงสถานะของความเข้ากันได้ของการผสม PCL ใน PLLA มีปริมาณตั้งแต่น้อยๆ จนถึง 20% โดยน้ำหนักโดยประมาณ สามารถยืนยันได้จากแผนภาพ และ แผนผังวัฏภาค ดังรูป 5.10 และรูป 5.11 ตามลำดับ

ส่วนการทำนายความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ในส่วนที่เป็นผลึก โดยทางทฤษฎีเป็นการหาค่าของแรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์; χ_{12} ได้จากการคำนวณโดยอาศัยทฤษฎีของ Flory-Huggins ได้ χ_{12} ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA กับ PCL ที่เตรียมโดยวิธีหลอมตัวผสมกันที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ทั้งสอง เพื่อทำให้ผลึกทั้งสองเกิดการหลอมตัวผสมกัน ดังรูป 5.12 ได้ว่าค่าความชันที่ได้จากการพล็อตกราฟมีค่าเป็นลบ จึงทำให้ χ_{12} มีค่าเป็นบวก แสดงว่าการเบลนด์ในส่วนที่เป็นผลึกของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA และ PCL สามารถผสมเข้ากันได้บ้างเพียงบางส่วน โดยขึ้นอยู่กับสัดส่วนของ PCL เพราะเส้นกราฟที่ได้ไม่ผ่านจุดเริ่มต้น

การตรวจสอบความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์

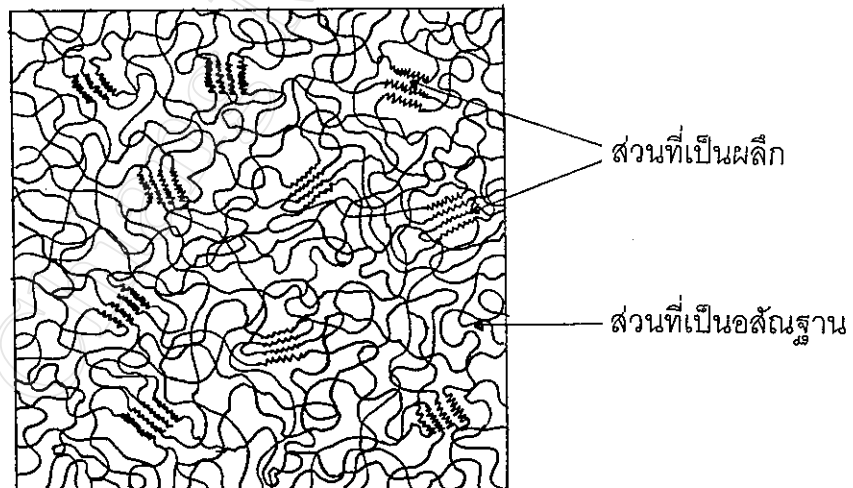
ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA กับ PCL ที่ทำการเตรียมทั้ง 3 วิธี สามารถยืนยันได้จากการตรวจสอบโดยใช้เทคนิคต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

การเบลนด์ทางกายภาพ

การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA และ PCL โดยนำ PLLA ในสัดส่วน 80% มาผสมรวมกับ PCL ในสัดส่วน 20% สามารถมองเห็นลักษณะการแยกส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสองออกจากกันเห็นได้อย่างชัดเจน จึงแสดงได้ว่า พอลิเมอร์เบลนด์คู่นี้ ผสมเข้ากันไม่ได้ สามารถยืนยันผลได้ โดยการทดสอบ ด้วยเทคนิค IR NMR ทั้ง ^1H -NMR และ ^{13}C -NMR DSC แสดงได้ ดังรูป 5.19, 5.34, 5.48 และตาราง 5.17 ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้การทดสอบของพอลิเมอร์เบลนด์ทางกายภาพเหมือนกันกับการทดสอบ PLLA และ PCL เดี่ยวๆ ที่นำมาผสมกัน สรุปได้ว่าพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA และ PCL เมื่อทำการเบลนด์ทางกายภาพ ผสมเข้ากันไม่ได้ จึงถือเอาไว้เป็นตัวอ้างอิง สำหรับการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์โดยวิธีอื่นๆ

การเบลนด์โดยวิธีการทำเป็นสารละลาย

การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA และ PCL โดยวิธีการทำเป็นสารละลาย ที่สามารถผสมเข้ากันได้บางส่วน ทั้งนี้เป็นเพราะ PLLA และ PCL มีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่งผลึก คือ ในโครงสร้างมีส่วนที่เป็นผลึกปะปนอยู่กับส่วนที่เป็นอสัณฐาน แสดงได้ดังรูป 6.1



รูป 6.1 ลักษณะโครงสร้างกิ่งผลึกของพอลิเมอร์

โดยทั่วไปการเบลนด์โดยวิธีการทำเป็นสารละลาย เป็นการเบลนด์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า จุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ทั้งสองที่นำมาเบลนด์ สามารถผสมเข้ากันได้เฉพาะในส่วนที่เป็นอสัณฐานเท่านั้น แต่ในส่วนที่เป็นผลึกไม่สามารถผสมเข้ากันได้ อันเนื่องมาจากโมเลกุลมีการ

จัดเรียงตัวอยู่กันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ จึงทำให้มีความแข็งแรงและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูง จากรายงานของ Pitt [73] ได้แสดงความสัมพันธ์ของตึกิริการเกิดผลึกของ PCL มีผลมาจากน้ำหนักโมเลกุล โดยพบว่าถ้า PCL ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีตึกิริของการเกิดผลึกสูง หรือมีส่วนที่เป็นผลึกมาก PCL ที่ใช้ในการทดลองนี้มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างต่ำมาก ประมาณ 4800 จึงมีเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกสูง $\approx 84\%$ ส่งผลให้ PCL มีส่วนที่เป็นอสัณฐานต่ำตาม ดังนั้นทำให้การเบลนดระหว่าง PLLA และ PCL ที่เตรียมโดยวิธีนี้ผสมเข้ากันได้บ้างบางส่วน เฉพาะในส่วนที่เป็นอสัณฐานเท่านั้น สามารถยืนยันได้จากการมองลักษณะทางกายภาพด้วยสายตาและการส่องกล้องออปติคัล ไมโครสโคป และทดสอบด้วยเทคนิคต่างๆ

ส่วนลักษณะของแผ่นฟิล์มที่ได้จากการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ โดยการทำเป็นสารละลายที่สัดส่วนต่างๆ ในคลอโรฟอร์ม มีลักษณะโปร่งแสง ดังตาราง 5.8 ซึ่งลักษณะความโปร่งแสงลดลง มีลักษณะความขุ่นขาวของแผ่นฟิล์มและความยืดหยุ่นมีมากขึ้น จึงสามารถลดความแข็งแกร่งของพอลิเมอร์เบลนด์ลงได้ เมื่อเติม PCL ปริมาณมากขึ้น แต่ทว่าเมื่อนำแผ่นฟิล์มที่ได้มาส่องกล้องออปติคัล ไมโครสโคป ดังรูป 5.13 สามารถมองเห็นลักษณะการแยกส่วนบนแผ่นฟิล์ม โดยมองเห็นเป็นจุดเล็กๆ ของพอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง กระจายตัวอยู่บนพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งที่เป็น disperse phase ซึ่งจำนวนและขนาดจุดของพอลิเมอร์มีมากขึ้นเมื่อสัดส่วนของ PCL เพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่าพอลิเมอร์ที่เป็น disperse phase เป็น PLLA เมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์ม PLLA เดียวๆ ส่วนที่มองเห็นเป็นจุด คือ PCL เพราะเมื่อเพิ่มปริมาณของ PCL มากขึ้น มองเห็นเป็นจุดเพิ่มมากขึ้นตาม และเมื่อเพิ่มปริมาณของ $PCL \geq 75\%$ สามารถเห็นลักษณะของสเฟียรูไลต์ได้ชัดเจน ดังรูป 5.13 (7) และ 5.13 (8) สรุปได้ว่าเป็นผลึกของ PCL แต่ไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนว่าเป็นผลึกของ PCL จริงๆ เพราะ PCL เดียวๆ ไม่สามารถทำเป็นแผ่นฟิล์มที่บางและมีความต่อเนื่องได้ จึงอาศัยการดูจากลักษณะผลึกของ PCL จากแผ่นฟิล์มในสัดส่วนที่มีปริมาณของ PCL ในพอลิเมอร์เบลนด์มากแทน

ส่วนการตรวจสอบความเข้ากันได้ของการเบลนดระหว่าง PLLA และ PCL ที่เตรียมโดยวิธีการทำเป็นสารละลาย ได้ว่าการเบลนดในทุกสัดส่วนไม่สามารถผสมเข้ากันได้ ยกเว้นการผสม PCL เข้าไปใน PLLA ในสัดส่วน 90/10% สามารถผสมเข้ากันได้บางส่วน เพราะมีค่า T_m ของพอลิเมอร์เบลนด์เพียงพิกเดียว ที่อยู่ระหว่างค่า T_m ของ PCL และ PLLA โดยไม่เห็นพิก T_m ที่อยู่ตรงตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับช่วงที่เกิดพิก T_m ของ PCL ดังตาราง 5.17 ดังนั้นจึงเป็นการผสมที่เข้ากันได้บางส่วน ในกรณีที่ทำกาใส่ PCL ปริมาณน้อยๆ จนถึง

ปริมาณ 10% แต่เมื่อนำไปทดสอบด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น IR, NMR ทั้ง $^1\text{H-NMR}$ และ $^{13}\text{C-NMR}$, DSC ดังรูป 5.19, 5.35, 5.49 และ ตาราง 5.17 ตามลำดับ ผลที่ได้เหมือนกับการทดสอบพอลิเมอร์เบลนด์ที่เตรียมโดยการเบลนด์ทางกายภาพที่ถือเป็นตัวอ้างอิง เนื่องจากการผสมโดยวิธีนี้ทำให้อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว จึงสามารถผสมเข้ากันได้เฉพาะส่วนที่เป็นอสัณฐานเท่านั้น แต่จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคต่างๆ ที่กล่าวมา โดยเฉพาะการทดสอบ DSC แบบปกติ ดังรูป 5.22 และการทดสอบ DSC ที่ทำการทดสอบ 2 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง (second run) เพื่อให้มีเวลาไม่เพียงพอในการเกิดผลึกพอลิเมอร์ยังคงลักษณะเป็นอสัณฐาน โดยเริ่มจากการทดสอบ DSC ในครั้งแรก แล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ด้วยเครื่อง DSC พอลิเมอร์เกิดการแข็งตัวเร็วมาก จนไม่มีเวลาเพียงพอในการเกิดผลึก หลังจากนั้นค่อยๆ ให้ความร้อนในการทดสอบครั้งที่ 2 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสถานะของแข็งในส่วนที่เป็นอสัณฐานไปเป็นสถานะที่มีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายยาง การเปลี่ยนแปลง ณ จุดนี้ สามารถมองเห็น T_g และเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปอีก (แต่ต้องต่ำกว่าจุดหลอมเหลว) ในช่วงนี้เป็นการเกิดผลึก จึงสามารถมองเห็น T_c แต่ PCL จากรูป 5.24 ไม่เห็นค่า T_g และ T_c คาดว่า PCL ที่นำมาผสมในการทดลองนี้มีส่วนที่เป็นอสัณฐานน้อยมาก จึงสรุปได้ว่าการเบลนด์โดยการทำป็นสารละลายในทุกสัดส่วนไม่สามารถผสมเข้ากันได้ หรือผสมเข้ากันได้เพียงบางสัดส่วน แม้การเบลนด์โดยวิธีนี้เป็นการผสมโดยใช้ตัวทำละลาย เป็นตัวลดความหนืดที่ทำให้พอลิเมอร์มีโอกาสผสมเข้ากันได้มากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะโมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสองสามารถเคลื่อนที่เข้ามาสัมผัส หรืออยู่ใกล้กันได้มากขึ้น จึงมีผลให้การเบลนด์โดยวิธีนี้สามารถผสมเข้ากันได้บางสัดส่วน แต่เนื่องจากการเบลนด์โดยการทำป็นสารละลายนี้ ทำการกำจัดออกจากระบบอย่างสมบูรณ์ได้ยาก ยังคงมีตัวทำละลายเหลือตกค้างอยู่ ซึ่งทำให้มีผลต่อสมบัติทางเชิงกล หรืออาจเป็นพิษต่อการนำไปใช้งานของพอลิเมอร์เบลนด์ได้ จึงไม่ทำการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์โดยวิธีนี้ต่อไป แล้วหันไปทำการศึกษาความเข้ากันได้โดยวิธีหลอมตัวผสมกัน

การเบลนด์โดยวิธีการหลอมตัวผสมกัน

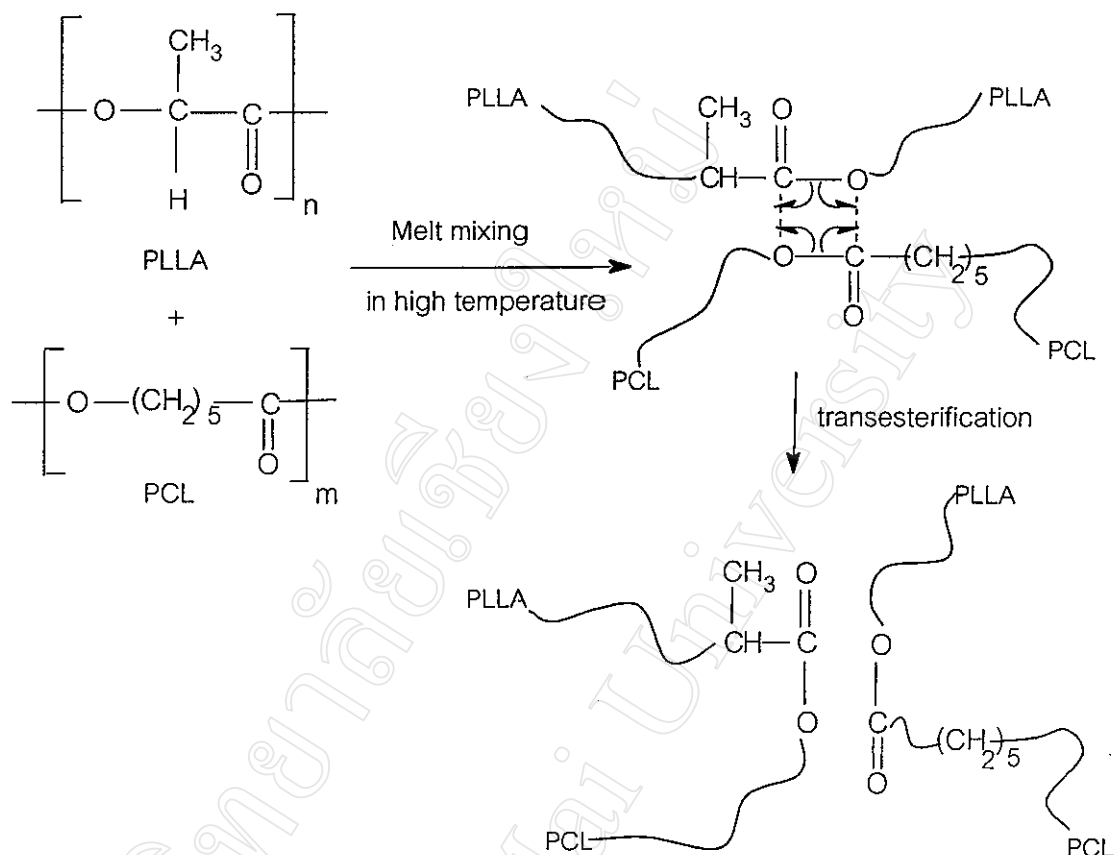
พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA และ PCL ที่เตรียมโดยวิธีหลอมตัวผสมกัน ได้ว่าการผสมของ PLLA และ PCL ในสัดส่วน 90/10% ทำที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง สามารถผสมเข้ากันได้ แต่พอลิเมอร์เบลนด์ที่เตรียมโดยการหลอมตัวผสมกันในสภาวะต่างๆ เมื่อทำการแปร สัดส่วน เวลา อุณหภูมิ และการใส่สารตัวเร่งชนิดต่างๆ ไม่สามารถผสม

เข้ากันได้ หรือผสมเข้ากันได้บางส่วน โดยสามารถตรวจสอบเพื่อยืนยันความเข้ากันได้ด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น GPC, DSC, NMR และวิสโคมิเตอร์ สรุปได้ดังนี้

การตรวจสอบความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ ด้วยเทคนิค GPC เพื่อหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์นี้ มีพีกของ GPC เพียงพีกเดียว อยู่ระหว่างพีก GPC ของ PLLA และ PCL ที่นำมาเบลนด์ ดังตาราง 5.14 จึงสรุปได้ว่าพอลิเมอร์ทั้งสองนี้สามารถผสมเข้ากันได้บ้างเพราะว่าถ้าไม่ผสมเข้ากันได้ น่าเกิดพีก GPC ของพอลิเมอร์เบลนด์ได้ 2 พีก ขึ้นตรงตำแหน่งที่เหมือนกับพอลิเมอร์เดี่ยวๆ ทั้งสองที่นำมาผสมกัน

การตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA และ PCL ในสัดส่วน 90/10% ที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง พบว่ามีค่า T_m ของพอลิเมอร์เบลนด์เพียงค่าเดียวอยู่ในช่วงระหว่าง T_m ของ PLLA กับ PCL ค่อนไปทาง PLLA อาจเป็นเพราะพอลิเมอร์เบลนด์ที่ทำมีสัดส่วน PLLA มากถึง 90% จึงสรุปได้ว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่เตรียมในสภาวะการเบลนด์นี้ สามารถผสมเข้ากันได้ แต่พอลิเมอร์เบลนด์ที่เตรียมในสภาวะอื่นๆ เช่น ที่สัดส่วนในการเติมปริมาณของ PCL มากกว่า 10% หรือที่ทำการแปรเวลา อุณหภูมิ และใส่สารตัวเร่งชนิดต่างๆ ได้ค่า T_m 2 ค่า อยู่ในตำแหน่งที่ตรงกันกับค่า T_m ของพอลิเมอร์เดี่ยวๆ หรือพอลิเมอร์เบลนด์ที่เตรียมโดยวิธีการเบลนด์ทางกายภาพในทุกสภาวะการทดลอง

ส่วนเทคนิคที่สามารถยืนยันความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ได้ดีคือ เทคนิค NMR โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ^{13}C -NMR ดังรูป 5.52-5.53 เกิดเส้นสเปกตรัมขึ้นตรงตำแหน่งที่มีค่า chemical shift $\approx 175, 173, 170$ ppm ซึ่งค่าเหล่านี้อยู่ใกล้เคียงกันกับตำแหน่งของคาร์บอนิลของ PLLA (≈ 169 ppm) กับคาร์บอนิลของ PCL (173 ppm) ทำให้เกิดมีความแตกต่างจากพอลิเมอร์เดี่ยวๆ หรือพอลิเมอร์เบลนด์ที่เตรียมโดยทางกายภาพ ทั้งนี้เป็นเพราะพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA และ PCL ในสัดส่วน 90/10% ที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมงสามารถเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (transesterification reaction) ที่เกิดการแลกเปลี่ยนตรงกลุ่มของเอสเทอร์บนสายโซ่โมเลกุลของ PLLA และ PCL เมื่อใช้อุณหภูมิในการหลอมสูงกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ทั้งสอง ดังกลไกปฏิกิริยาในรูป 6.2



รูป 6.2 การเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของ PLLA และ PCL เบลนด์

การเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของ PLLA และ PCL เบลนด์ เกิดมีการแลกเปลี่ยนสายโซ่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่นำมาเบลนด์ได้ จึงส่งผลช่วยให้การเบลนด์สามารถผสมเข้ากันได้มากขึ้น ทำให้สามารถมองเห็นการเกิดฟีกตรงตำแหน่งที่อยู่ใกล้เคียง หรืออยู่ระหว่างคาร์บอนิลของ PLLA กับคาร์บอนิลของ PCL เป็นตัวยืนยันถึงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์คู่นี้ได้

ส่วนในกรณีของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA และ PCL ในสัดส่วน 80/20% โดยทำในสภาวะเดียวกันกับการเบลนด์ที่สัดส่วน 90/10% ได้ผลที่ใกล้เคียงกัน แต่เห็นฟีกของ ^{13}C -NMR มีจำนวนและความสูงของฟีกน้อยกว่า ดังรูป 5.50-5.51 จึงสรุปได้ว่าการเบลนด์ระหว่าง PLLA และ PCL ที่สัดส่วน 80/20% สามารถผสมเข้ากันได้บางส่วน ส่วนการตรวจสอบด้วยเทคนิคอื่นๆ ไม่สามารถบ่งบอกถึงความแตกต่างที่พอยืนยันความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ได้ คือ ผลที่ได้จากการทดสอบ เหมือนกันกับผลการทดสอบของการเบลนด์

ทางกายภาพ หรือพอลิเมอร์เดี่ยวๆ ที่ใช้ในการเบลนด์ ส่วนพอลิเมอร์เบลนด์ที่เตรียมโดยการหลอมตัวผสมกันที่สภาวะต่างๆ เช่น เมื่อทำการแปรสัดส่วน เวลา อุณหภูมิ และการใส่สารตัวเร่งชนิดต่างๆ ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ หรือผสมเข้ากันได้บ้างบางส่วน เพราะจากผลการตรวจสอบด้วยเทคนิคต่างๆ ได้ค่าที่เหมือนกันกับพอลิเมอร์เดี่ยว หรือพอลิเมอร์เบลนด์ที่เตรียมโดยวิธีการเบลนด์ทางกายภาพ

การตรวจสอบความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA และ PCL ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้ผลไม่สอดคล้องกับการทำนายทางทฤษฎี เพราะจากการทำนายทางทฤษฎีของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA และ PCL สามารถผสมเข้ากันได้ จนถึงสัดส่วน 80/20% ดังนั้นในการทำพอลิเมอร์เบลนด์ครั้งนี้ จึงเลือกใช้การเบลนด์ในสัดส่วน 80/20% โดยทำการแปรปัจจัยต่างๆ เช่น วิธีการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ เวลา อุณหภูมิ และการใส่สารตัวเร่งชนิดต่างๆ ลงไป เพื่อช่วยทำให้การเบลนด์สามารถผสมเข้ากันได้ และเนื่องมาจากงานวิจัยของ K. Na- Lampang [15] พบว่าการทำโคพอลิเมอร์ระหว่าง PLLA และ PCL ในสัดส่วน 80/20% สามารถปรับปรุงสมบัติของ PLLA ให้มีความเหมาะสมสำหรับใช้ทำไหมละลายชนิดโมโนฟีลาเมนต์ แต่จากการทดลองพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA และ PCL สามารถผสมเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกัน ในสัดส่วน 90/10% เท่านั้น

ส่วนในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ทั้ง 3 วิธี สามารถสรุปได้ว่า การหลอมตัวผสมกันเป็นวิธีที่สามารถทำให้เกิดการผสมที่มีความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ดีกว่าวิธีอื่นๆ โดยทำการเตรียมที่ใช้สภาวะการเบลนด์ระหว่าง PLLA และ PCL ในสัดส่วน 80/20% ทำที่อุณหภูมิ 190°C เป็นระยะเวลาในการหลอมตัวผสมกัน 20 ชั่วโมง

ข้อเสนอแนะสำหรับการปรับปรุงงานต่อไป

1. ทำการออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในการหลอมพอลิเมอร์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
2. หาสภาวะในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ เพื่อให้สามารถผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น
3. ควรใช้เทคนิคต่างๆ ในการตรวจสอบความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ ที่เห็นได้ชัดเจนกว่าในการทดลองนี้ เช่น SEM หรือเครื่องมือที่สามารถหาค่า T_g ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่สามารถค่า T_g เห็นชัดเจนได้ดียิ่งขึ้น
4. การตรวจสอบพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA และ PCL ที่สามารถมองเห็นได้ชัดเจนคือ การดูที่ค่า T_g ของพอลิเมอร์เบลนด์ ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ PCL ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงพอที่มีส่วนของอัสฐานมากพอ ที่จะมีส่วนที่สามารถผสมเข้ากันได้ เพราะการผสมเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ มักเกิดขึ้นในส่วนอัสฐาน จึงมองเห็นค่า T_g ที่สามารถบ่งบอกถึงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์นั้นทั้งคู่ได้
5. พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA และ PCL ที่ทดลองได้ ควรนำไปใช้สำหรับงานทางการแพทย์อื่นๆ นอกเหนือจากการทำเป็นเส้นใย เช่น ทำแมทริกซ์จ่ายยา หรือทำแผ่นฟิล์มต่างๆ เพราะจากการทดลองทำแผ่นฟิล์มของ PLLA ที่ได้นั้น มีลักษณะแข็งกระด้างและเปราะเมื่อดึงจะขาดง่าย แต่ถ้านำ PCL มาทำการเบลนด์เข้าไปทำให้ได้แผ่นฟิล์มที่มีความนุ่มและยืดหยุ่นมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของ PCL
6. การปั่นเส้นใยโมโนฟิลาเมนต์ โดยนำพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA และ PCL ในสัดส่วน 80/20% ที่ทำการเตรียมโดย 3 วิธีคือ การเบลนด์ทางกายภาพ การเบลนด์โดยการทำให้เป็นสารละลาย และการเบลนด์โดยการหลอมตัวผสมกัน แล้วนำมาทำการปั่นเป็นเส้นใย ได้ว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่เตรียมโดยการเบลนด์ทางกายภาพ สามารถปั่นออกมาเป็นเส้นใยได้ แต่ขนาดของเส้นใยที่ได้ไม่สม่ำเสมอ มีความแข็งกระด้างสูง เมื่อดึงจะขาดได้ง่าย แล้วเมื่อนำไปทดสอบด้วยเครื่อง tensile ได้ดังรูป 6.3 สำหรับเส้นใยที่ได้จากพอลิเมอร์เบลนด์ที่เตรียมโดยวิธีการทำให้เป็นสารละลาย ได้เส้นใยที่มีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น ทำให้สามารถลดความแข็งกระด้างลง แต่เมื่อดึงก็ขาดได้ง่ายเช่นกัน แสดงว่าเส้นใยที่ได้นั้นยังมีความแข็งแรงไม่เพียงพอ เมื่อนำไปทดสอบด้วยเครื่อง tensile ได้ดังรูป 6.4 แต่ในกรณีของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จากการหลอมตัวผสมกันที่สภาวะต่างๆ เมื่อนำมาปั่นเป็นเส้นใย ไม่สามารถดึงออกมาเป็นเส้นได้ มีลักษณะที่เป็นหยดๆ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้ผสมเข้ากันไม่ได้หรือเข้ากันได้บางส่วน ในการผสมที่สัดส่วน 80/20% และเนื่องจากน้ำหนักโมเลกุล

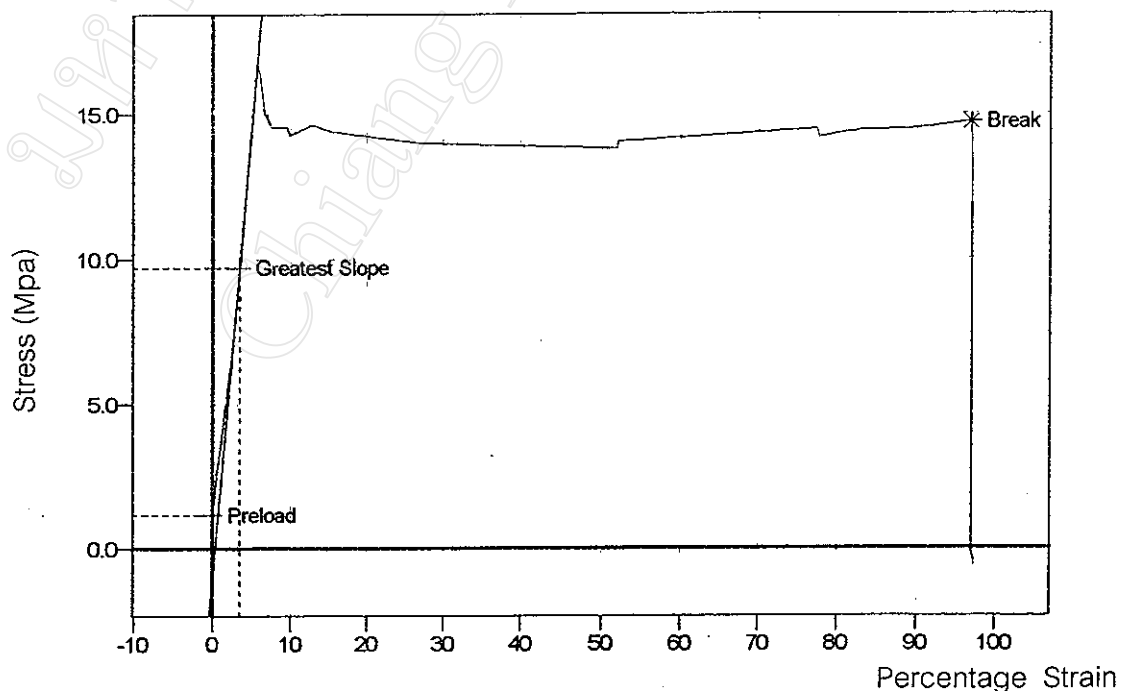
ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ดังนั้นถ้าให้อุณหภูมิสูงกว่า T_m ของ PCL ทำให้ PCL หลอมตัวก่อน แต่ PLLA ยังไม่หลอม จึงเห็นเป็นเส้นขาวๆ และไม่สามารถดึงเป็นเส้นได้ แต่ถ้าให้อุณหภูมิสูงกว่า T_m ของ PLLA ทำให้ PCL หลอมจนมีความหนืดต่ำมาก จึงไม่สามารถปั้นพอลิเมอร์เบลนด์ออกมาเป็นเส้นใยได้ จึงควรหาวิธีการทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองที่นำมาเบลนด์สามารถทำได้ในสภาวะเดียวกันได้ เช่น ใช้ PCL มีน้ำหนักโมเลกุล ที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

สมบัติทางเชิงกลของเส้นใย เมื่อนำพอลิเมอร์เบลนด์ที่ปั่นเป็นเส้นใยมาทดสอบด้วยเครื่อง tensile สรุปค่าต่างๆ ได้ดังตาราง 6.2

ส่วนสภาวะต่างๆ ในการทดสอบเครื่อง tensile ได้ดังตาราง 6.1

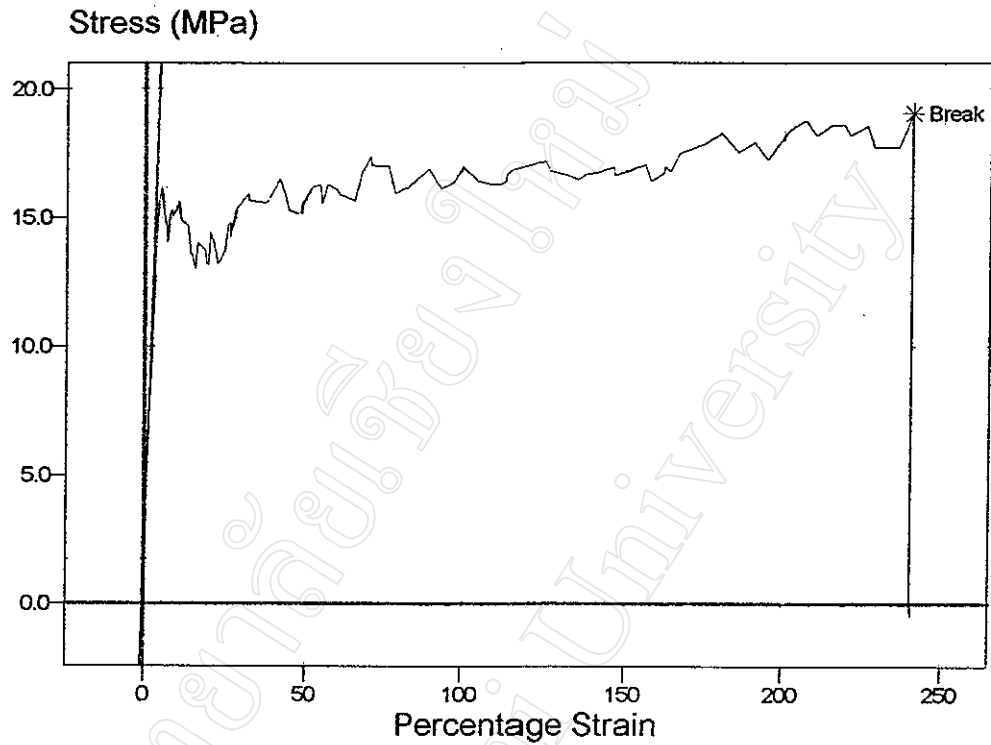
ตาราง 6.1 สภาวะต่างๆ ในการทดสอบด้วยเครื่อง tensile

สภาวะต่างๆ	วิธีการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ ที่สัดส่วน 80/20%	
	การเบลนด์ทางกายภาพ	การทำให้เป็นสารละลาย
Preload	0.100 N	0.100 N
Speed	20.0 mm/min	20.0 mm/min
Gauge Length	Exactly 40.0 mm	Exactly 40.0 mm
Area	About 0.33 mm diameter	About 0.27 mm diameter



รูป 6.3 การทดสอบ tensile ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA และ PCL

ในสัดส่วน 80/20% ที่เตรียมโดยการเบลนด์ทางกายภาพ



รูป 6.4 การทดสอบ tensile ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLLA และ PCL
ในสัดส่วน 80/20% ที่เตรียมโดยวิธีการทำเป็นสารละลาย

ตาราง 6.2 สมบัติทางเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่เตรียมโดยวิธีการทางกายภาพและการ
ทำเป็นสารละลาย

วิธีการเตรียม พอลิเมอร์เบลนด์	เส้นผ่าน- ศูนย์กลาง (mm)	ความ กระด้าง	Young's Modulus (MPa)	Load at Break (N)	Stress at Break (Mpa)	Deflection at Break (mm)
- ทางกายภาพ	0.330	667.25	312.06	1.2574	14.701	38.205
- การทำเป็น สารละลาย	0.270	615.68	430.13	1.0904	19.044	96.205