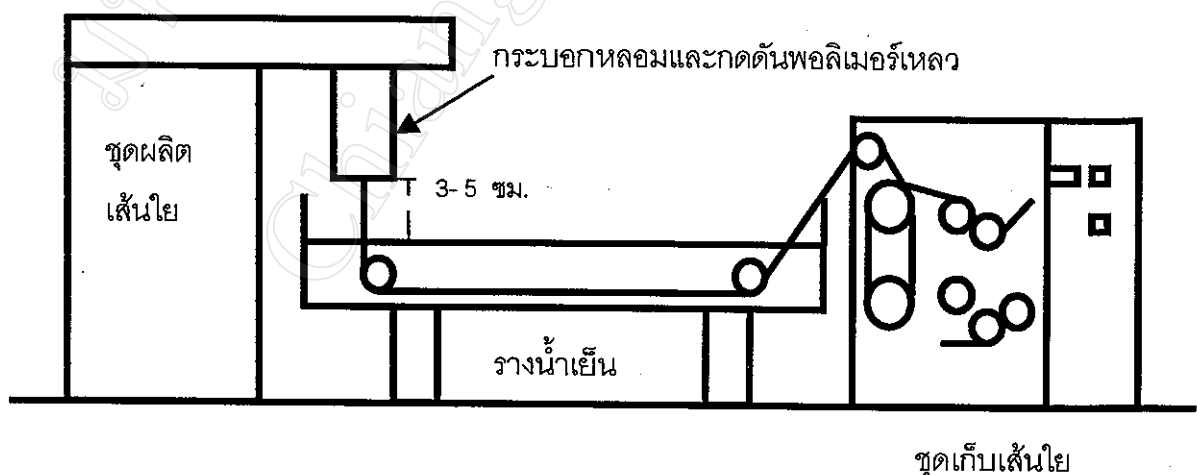


บทที่ 2

หลักการ

2.1 กระบวนการปั่นหลอม (Melt spinning) [11-12]

การปั่นหลอมเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปร่างของพอลิเมอร์ให้เป็นเส้นใย โดยการหลอมพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาวะของแข็งให้เป็นของเหลวในระบบอกถูกลูบ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ต้องสูงกว่าจุดหลอมเหลว (melting temperature ; T_m) และต่ำกว่าอุณหภูมิที่พอลิเมอร์นั้นเริ่มสลายตัว (degradation temperature ; T_d) แล้วอัดพอลิเมอร์เหลวผ่านไปยังจานที่มีรูขนาดเล็กเรียกว่า สปินเนอร์เรต (spinnerete) พอลิเมอร์ที่ผ่านรูออกมาจะเย็นตัวและแข็งตัวในอากาศได้เป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง กระบวนการนี้มักใช้ปั่นเส้นใยพวกพอลิเอไมด์ พอลิเอสเทอร์ พอลิไคโพรพิลีน และพอลิโพรพิลีน เป็นต้น และเพื่อช่วยต่อการควบคุมโครงสร้างพื้นฐานภายในเส้นใยต่อไป ในขั้นตอนนี้จะผ่านเส้นใยพอลิเมอร์ ที่ออกจากสปินเนอร์เรตลงในน้ำเย็นทันทีก่อนเก็บเข้ากระสวยเพื่อให้ได้เส้นใยพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างภายในส่วนใหญ่เป็นอสัณฐาน (amorphous) เรียกว่า as-spun fibre รูป 2.1 แสดงแผนภาพกระบวนการปั่นหลอม

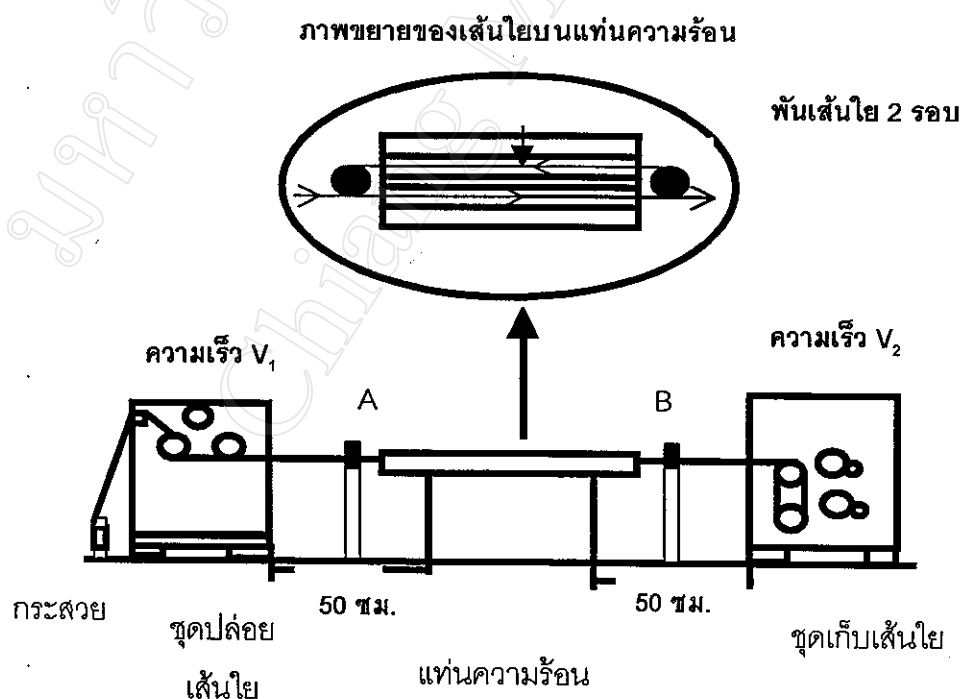


รูป 2.1 แผนภาพกระบวนการปั่นหลอม

As-spun fibre ที่ได้ออกมาใหม่ๆ มีลักษณะโครงสร้างภายในเป็นอสัณฐาน (amorphous) ยังไม่มีผลึกเกิดขึ้นเลย ทำให้เส้นใยที่ได้ไม่แข็งแรง และสามารถยืดได้มาก จึงต้องมีการนำมาปรับปรุงสมบัติเชิงกลต่อไป โดยการแอสเน็ลที่อุณหภูมิเหมาะสม และการดึงยืดขณะร้อน

2.2 กระบวนการดึงยืดขณะร้อน (Hot drawing) [11]

การดึงยืดเส้นใยขณะร้อน เป็นกระบวนการที่เพิ่มความเป็นระเบียบให้กับโมเลกุลภายในเส้นใย ให้เรียงตัวขนานกันในแนวเดียวกับแรงดึง คือตามความยาวของเส้นใย และความร้อนที่ให้ความช่วยให้โมเลกุลมีพลังงานมากพอที่จะขยับตัวเรียงไปตามแนวแรงดึงได้ง่ายขึ้น การเรียงตัวขนานกันของสายโซ่โมเลกุลจะทำให้เส้นใยแข็งแรงเพราะสายโซ่โมเลกุลที่ขนานกันจะช่วยกันรับแรง ตามความแข็งแรงของพันธะโควาเลนต์ [13] นอกจากนี้การเรียงตัวขนานกันของสายโซ่โมเลกุลเป็นการเพิ่มโอกาสการเกิดผลึกอีกด้วย ทั้งความเป็นผลึกและการจัดเรียงตัว (crystallinity and orientation) เป็นปัจจัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกลของเส้นใย [14] รูป 2.2 แสดงแผนภาพการดึงยืดขณะร้อน



รูป 2.2 แผนภาพการดึงยืดขณะร้อน (Off-Line Hot Drawing) [7]

ในรูป 2.2 อุปกรณ์ที่สำคัญในกระบวนการดึงยืดคือ ลูกกลิ้ง 2 ชุด ที่มีความเร็วต่างกัน ลูกกลิ้งชุดที่ 1 ทำหน้าที่ป้อนเส้นใยจากกระสวย ส่งให้ลูกกลิ้งชุดที่ 2 โดยผ่านแท่นความร้อน (heating block) ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้จะต้องสูงกว่า glass transition temperature ; T_g แต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลว (melting temperature ; T_m) ถ้าลูกกลิ้งชุดแรกมีความเร็ว V_1 ลูกกลิ้งชุดที่ 2 มีความเร็วเป็น V_2 เส้นใยจะถูกยืดได้ต่อเมื่อความเร็ว V_2 ต้องมากกว่า V_1

การผ่านเส้นใยบนแท่นความร้อนที่อุณหภูมิสูง จะเป็นการเพิ่มความสามารถให้โมเลกุลขยับตัวได้ง่ายขึ้น และจัดเรียงตัวใหม่ไปตามแนวแรงที่กำลังดึงและยังเพิ่มโอกาสในการเกิดผลึกเพิ่มขึ้นได้อีกด้วย

เมื่อเส้นใยรับแรงดึงเพียงพอ ($V_2 > V_1$) เส้นใยจะยืดออกทำให้ความยาวเพิ่มขึ้น เส้นผ่าศูนย์กลางลดลง และปริมาณการดึงยืดถูกระบุในเทอมของอัตราการดึงยืด (draw ratio ; λ) ดังนี้ [15]

$$\lambda = L/L_0$$

เมื่อ L_0 และ L คือความยาวของเส้นใยก่อนและหลังการถูกดึงยืด ตามลำดับ

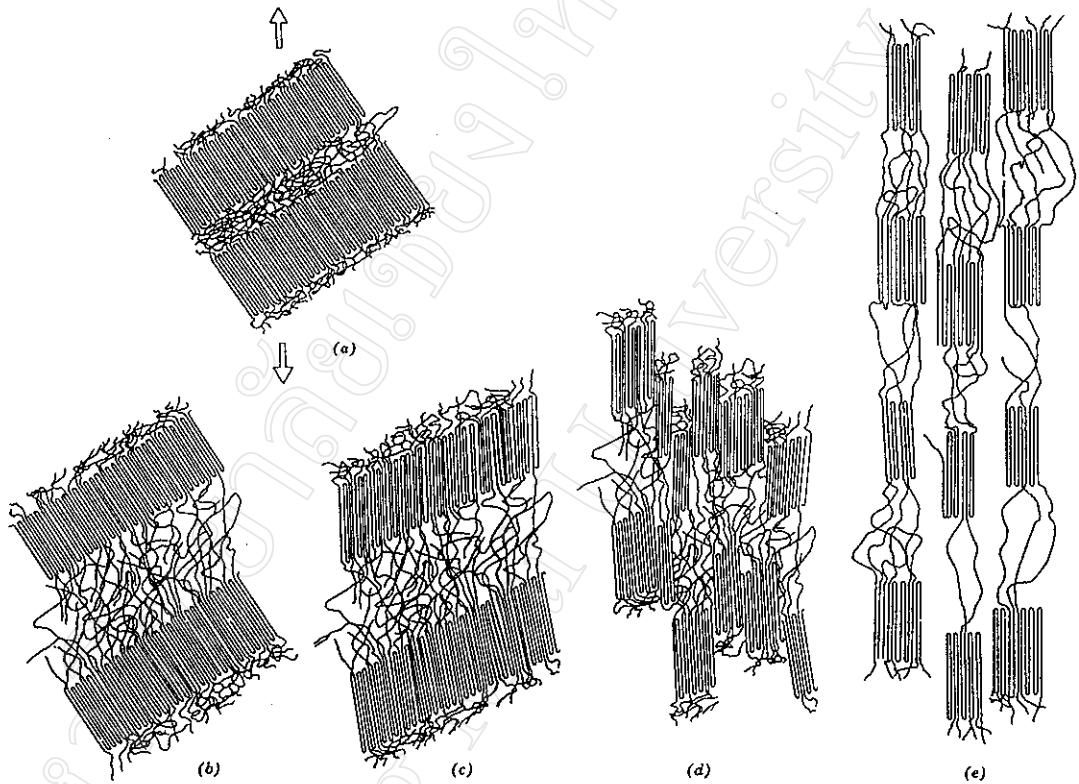
ถ้าสมมติให้การดึงยืดไม่ทำให้ปริมาตรของเส้นใยเปลี่ยนแปลงไป อัตราการดึงยืดอาจคำนวณได้จากพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยที่ถูกดึงแล้ว (A) ต่อพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยเดิม (A_0) ดังนี้

$$\lambda = A/A_0$$

สำหรับกรณีนี้ อัตราการดึงยืดสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของความเร็วของลูกกลิ้งทั้ง 2 ตัว ดังนี้

$$\begin{aligned}\lambda &= (\text{ความเร็วของลูกกลิ้งตัวที่ 2}) / (\text{ความเร็วของลูกกลิ้งตัวที่ 1}) \\ &= V_2/V_1\end{aligned}$$

ในระหว่างการดึงยืด คาดว่าการจัดเรียงของโมเลกุลภายในเส้นใยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูป 2.3 [16]



รูป 2.3 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของโมเลกุลระหว่างการดึงยืด [16]

จากรูป 2.3 ภายในเส้นใยมีโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก และอสัณฐาน โดยที่ผลึกเชื่อมต่อกันด้วยสายโซ่โมเลกุลในส่วนอสัณฐาน เมื่อเส้นใยถูกดึงยืด ส่วนแรกที่เปลี่ยนแปลงคือ ส่วนอสัณฐาน ซึ่งถูกยืดออกได้ง่าย เพราะสายโซ่โมเลกุลพันกันยุ่งเหยิง หลวมๆ เท่านั้น เมื่อดึงเส้นใยต่อไปด้วยแรงที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการแตก เลื่อน และพลิกตัวของก้อนผลึกไปตามแนวแรงที่ดึง นั่นคือเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของก้อนผลึกให้ขนานไปตามแนวแรง (ดูรูป 2.3 ประกอบ) และนอกจากนี้ยังอาจเกิดผลึกใหม่ขึ้นได้เนื่องจากโมเลกุลจะถูกยืดให้เรียงตัวชิดกันในแนวแรงดึงจนอาจเกิดแรงเหนี่ยวนำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบขึ้นได้ ถ้ามีอุณหภูมิที่เหมาะสมและเวลาที่เพียงพอในการจัดเรียงตัว

2.3 กระบวนการแอนนัล (Annealing)

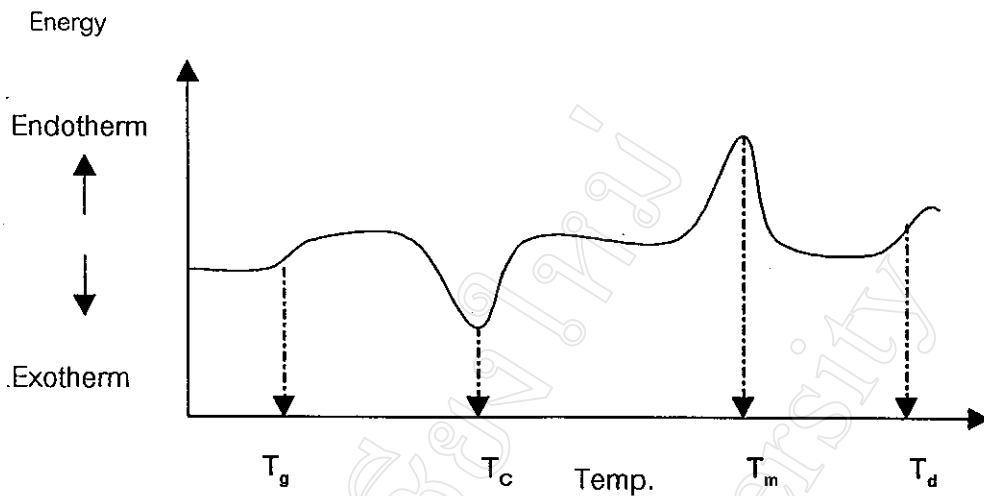
การแอนนัลหมายถึงการให้ความร้อนแก่เส้นใยที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง มีจุดประสงค์ให้เกิดปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงแอนนัลในช่วงอุณหภูมิของการเกิดการตกผลึกของพอลิเมอร์นั้นๆ [17] ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิลลายแก้ว และต่ำกว่าอุณหภูมิลอมเหลว การแอนนัลอาจทำก่อนการดึงยืดเพื่อทำให้เกิดผลึกปริมาณหนึ่งก่อนถูกดึง และ/หรือ ทำหลังจากผ่านการดึงยืดแล้ว เพื่อเพิ่มปริมาณผลึก

2.4 กระบวนการวิเคราะห์ทางความร้อน

การวิเคราะห์ทางความร้อนเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติเฉพาะของสารเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์โดยใช้ 2 เทคนิค คือ ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี และเทอร์โมกราวิเมตรี โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี (Differential Scanning Calorimetry : DSC)

ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี เป็นเทคนิคที่วัดความแตกต่างของพลังงานที่ทำให้แก่สารตัวอย่างที่จะวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานที่เฉื่อยต่อความร้อน [18-19] ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงพลังงานเทียบกับอุณหภูมิแสดงในรูปของ เทอร์โมแกรม (thermogram) โดยทั่วๆ ไปจะมีลักษณะดังรูป 2.4



รูป 2.4 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semi-crystalline polymer)

จากเทอร์โมแกรม : T_g คือ อุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว

T_c คือ อุณหภูมิที่เกิดผลึก

T_m คือ อุณหภูมิที่ผลึกหลอมตัว

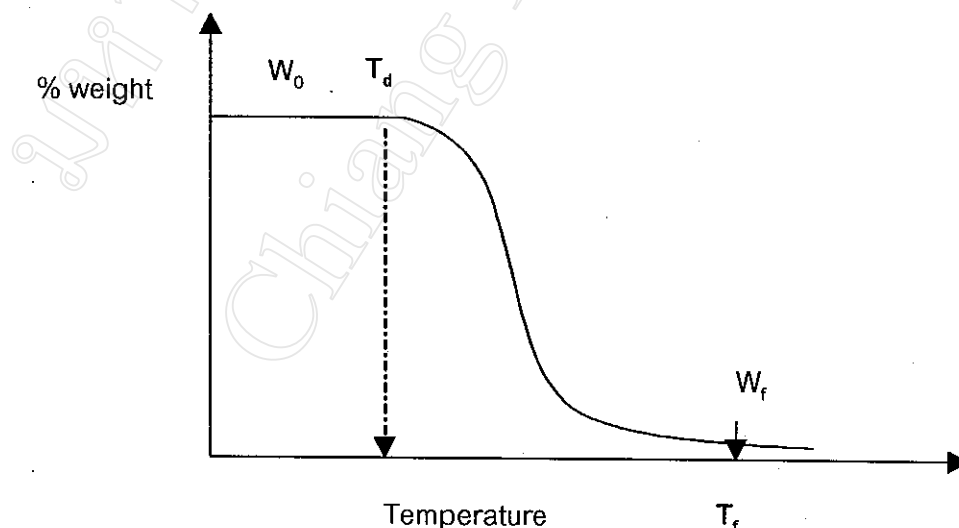
T_d คือ อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัว

ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g พอลิเมอร์จะอยู่ในสถานะที่แข็งคล้ายแก้ว (glassy state) เมื่อได้รับความร้อนและมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จนถึง T_g โมเลกุลเริ่มมีพลังงานมากพอที่สายโซ่พอลิเมอร์บางส่วนสามารถเกิดการหมุน (segmental rotation) ผลคือพอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า T_g เมื่อให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์จนมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ โมเลกุลจะมีโอกาสจัดเรียงตัวใหม่ เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลจนเป็นระเบียบของโครงสร้างผลึก (กรณีที่พอลิเมอร์ไม่มี steric hindrance) พร้อมกันนี้ก็จะมีการคายความร้อนออกมาเนื่องจากการตกผลึก เรียกว่าความร้อนของการตกผลึก (heat of crystallization ; ΔH_c) ขนาดของ ΔH_c (J/g) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ใต้พีคที่ T_c ซึ่งคืออุณหภูมิที่เกิดผลึก เมื่อให้ความร้อนต่อไป ผลึกที่เกิดขึ้นจะหลอมตัวไปเป็นของเหลวหนืดที่ T_m ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน และเรียกความร้อนที่ใช้ในการหลอมผลึกว่า ความร้อนของการหลอมเหลว (Heat of melting ; ΔH_m) ทำนองเดียวกัน ขนาดของ ΔH_m (J/g) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ใต้พีคที่ T_m เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ พอลิเมอร์สลายตัว ณ อุณหภูมิ T_d แต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์บางชนิดเราสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ไม่ครบทุกช่วงอุณหภูมิ ขึ้นอยู่กับที่มาทางความร้อนของสารตัวอย่าง (thermal history) ตัวอย่างเช่น

ถ้าพอลิเมอร์นั้นถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว จะไม่มีเวลาที่โมเลกุลจัดตัวให้เป็นระเบียบ ทำให้มีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน ซึ่งจะเห็นการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงอุณหภูมิจาก DSC เทอร์โมแกรม แต่ถ้าพอลิเมอร์หลอมนั้นถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ โมเลกุลจะมีเวลาในการจัดตัวให้เป็นระเบียบ สามารถเกิดผลึกขึ้นได้ จึงมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) ซึ่งจะไม่ปรากฏ T_c ใน DSC เทอร์โมแกรม จะปรากฏเฉพาะ T_g และ T_m

2.4.2 เทอร์โมกราวิเมตรี (Thermogravimetry ; TG)

เทอร์โมกราวิเมตรี เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาเสถียรภาพ (stability) ทางความร้อนของสารตัวอย่าง โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเทียบกับอุณหภูมิ เทคนิคที่ใช้เป็น non-isothermal thermogravimetry คือในกระบวนการศึกษาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของสารจะถูกวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องขณะที่ให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อยด้วยอัตราเพิ่มอุณหภูมิที่คงที่ [19] ผลการวิเคราะห์จะบันทึกออกมาในรูปเทอร์โมแกรมของเทอร์โมกราวิเมตรี (TG thermogram) ของน้ำหนักที่เปลี่ยนไปเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิหรือเวลา ดังแสดงในรูป 2.5



รูป 2.5 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมกราวิเมตรี (TG Thermogram)

จาก TG เทอร์โมแกรม W_0 คือน้ำหนักเริ่มต้น เมื่อให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์ พอลิเมอร์จะเริ่มสลายตัว ที่อุณหภูมิ T_d และจะสลายตัวต่อไปเรื่อยๆ จนเหลือน้ำหนัก W_r คือน้ำหนักสุดท้าย ที่อุณหภูมิ T_r

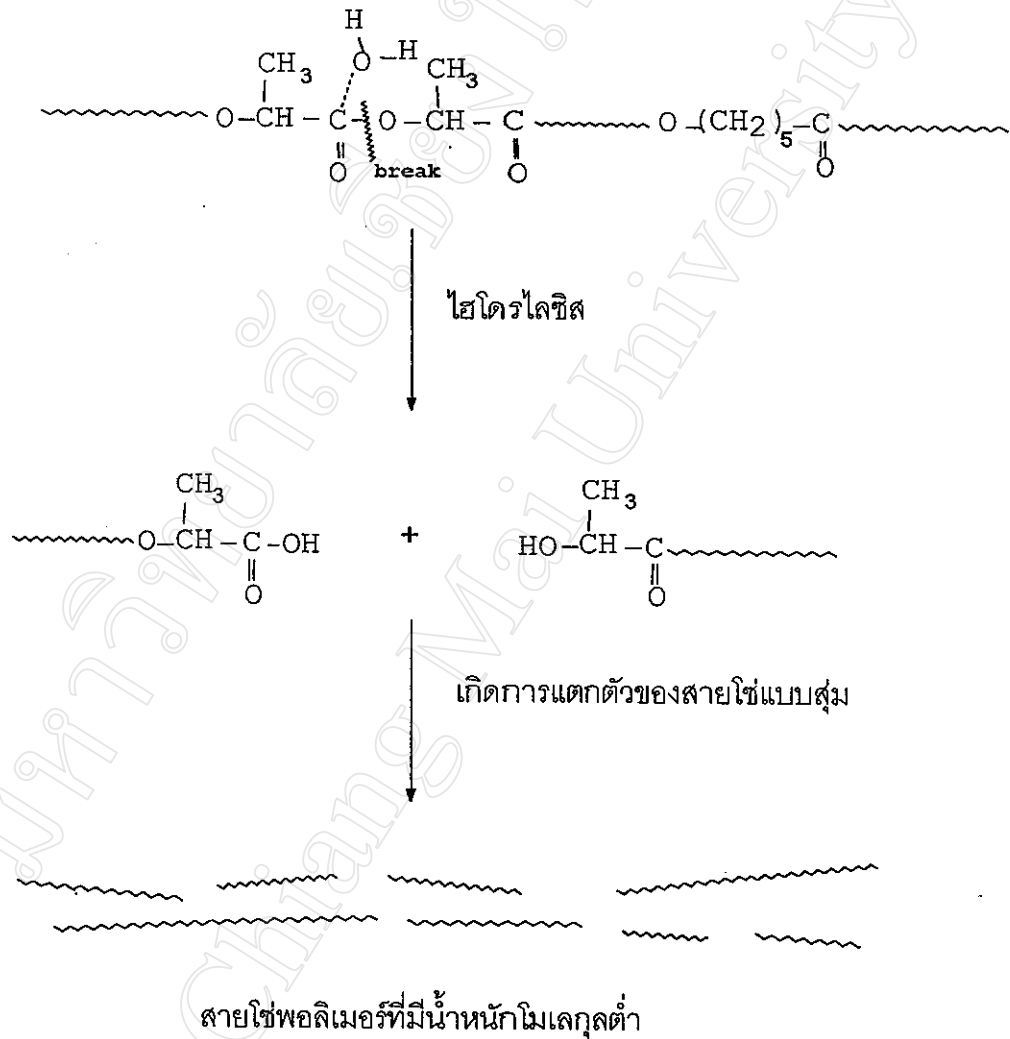
เทคนิคนี้ใช้วิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งคุณภาพวิเคราะห์ และปริมาณวิเคราะห์ ซึ่งมีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อการวิเคราะห์ เช่น อัตราเร็วในการให้ความร้อน ชนิดและสมบัติของสารตัวอย่าง ถ้าเป็นการศึกษาปริมาณวิเคราะห์ต้องใช้อัตราเร็วในการให้ความร้อนต่ำ เพื่อสามารถแยกความแตกต่างของการสลายตัวในแต่ละขั้นตอนได้ จึงจะสามารถคำนวณหาปริมาณสารที่สลายตัวในแต่ละขั้นตอนได้ง่าย

เทคนิค DSC นิยมใช้ศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของพอลิเมอร์ (transition temperature) เช่น อุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิตกผลึก (T_c) หรืออุณหภูมิลอมเหลว (T_m) สำหรับ อุณหภูมิการสลายตัว (T_d) นิยมใช้เทคนิค TG ในการศึกษาเพราะผลผลิตที่ได้จากการสลายตัวจะปนเปื้อนและทำความเสียหายให้กับเครื่อง DSC ได้

2.5 กระบวนการสลายตัวทางชีวภาพ

พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ใช้ในการผลิตไหมละลายจะต้องเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพโดยกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis process) และพอลิเมอร์ที่เหมาะสมคือพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นอลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ (aliphatic polyesters) เนื่องจากพันธะเอสเตอร์ (ester bonds) จะช่วยเสริมการสลายตัวโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสโดยของเหลวในร่างกาย (body fluids) [20]

เมื่อออลิฟาติกพอลิเอสเทอร์อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เป็นน้ำในร่างกาย จะเกิดปฏิกิริยากับน้ำ และทำให้เกิดการแตกของพันธะเอสเทอร์ในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ได้สายโซ่ที่มีขนาดสั้นลงตามลำดับ ซึ่งแสดงโดยปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

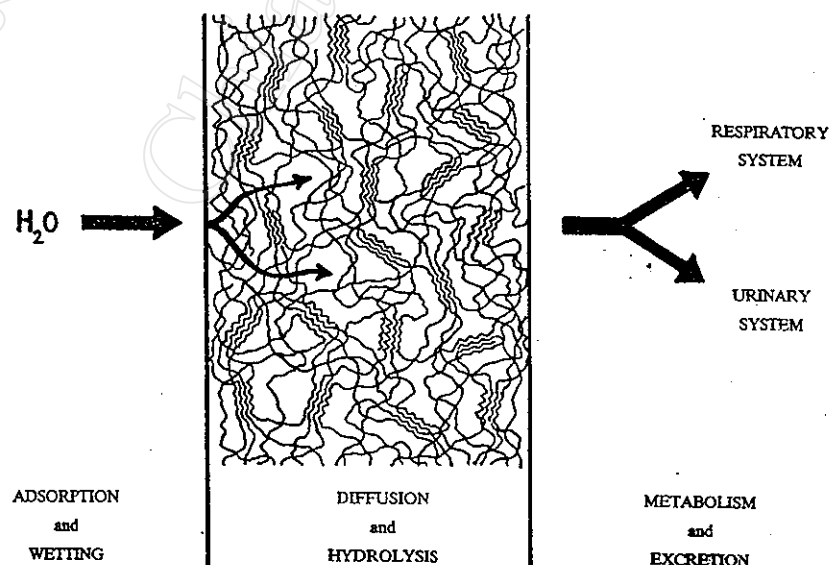


ในกรณีของไหมละลายที่เป็นออลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ จะสามารถเกิดการสลายตัวดังปฏิกิริยาข้างบนนี้ได้และสายโซ่สั้นๆ ที่เกิดขึ้นสามารถถูกกำจัดออกจากร่างกายในที่สุด การสลายตัวทางชีวภาพของไหมละลายอาจแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ดังแสดงในตาราง 2.1 [20]

ตาราง 2.1 ขั้นตอนการสลายตัวทางชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในร่างกาย [1]

ขั้นตอน	ผลที่เกิดขึ้น	การเปลี่ยนแปลงขั้นโมเลกุล
1	การไฮเดรชัน (Hydration)	แรงวัลเดอร์วาลส์ และพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonds) ระหว่างพอลิเมอร์ถูกทำลาย
2	การสูญเสียความแข็งแรง (Loss of strength)	เริ่มเกิดการแตกของพันธะโควาเลนต์ (cleavage of covalent bonds) บนเส้นหลัก (backbone) ของพอลิเมอร์
3	สูญเสียรูปร่างรวม (Loss of mass integrity)	เกิดการแตกพันธะโควาเลนต์เพิ่มขึ้น รูปร่างภายนอกเปลี่ยนไป พอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลงแต่ไม่เพียงพอสำหรับการสูญเสียน้ำหนัก
4	สูญเสียน้ำหนักโดยการละลาย (Solubilization)	โมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมากขึ้น และเกิดการย่อยเป็นส่วนเล็กๆ ซึ่งถูกกำจัดออกจากร่างกายต่อไป

ขั้นตอนต่างๆ ของการเปลี่ยนแปลงการสลายตัวทางชีวภาพของเส้นไหม แสดงดังรูป 2.6 และมีรายละเอียดในหัวข้อต่อไปนี้



รูป 2.6 การสลายตัวทางชีวภาพของเส้นไหมละลาย

2.5.1 การไฮเดรชัน (Hydration) [1, 20]

การไฮเดรชัน คือ การที่มีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นระหว่างโมเลกุลของน้ำกับพอลิเมอร์ ในขณะเดียวกันแรงวัลเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง การไฮเดรชันนี้จะเกิดมากน้อยหรือเร็วช้าอย่างไรขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ที่เกิดในธรรมชาติ เช่น คอลลาเจน (collagen) จะดูดซึมน้ำอย่างรวดเร็ว ในปริมาณค่อนข้างมาก และแทบจะเกิดการลดลงของ strength ทันทีทันใด สำหรับพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พอลิ(ไกลคอลิก แอซิด) จะดูดซึมน้ำปริมาณน้อย และแทบจะไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางฟิสิกส์เลยในขั้นตอนของการไฮเดรชัน ขั้นตอนนี้จะเกิดและสิ้นสุดลงเร็วหรือช้าก็ได้ การที่สมบัติของพอลิเมอร์เปลี่ยนไปในขั้นนี้เกิดจากการที่แรงวัลเดอร์วาลส์ และพันธะไฮโดรเจน ที่เป็นตัวยึดสายพอลิเมอร์เข้าด้วยกันถูกทำลายไป

2.5.2 การสูญเสียความแข็งแรง (Loss of strength)

ขั้นตอนนี้เริ่มเกิดการแตกของพันธะโควาเลนต์ บนเส้นหลักของพอลิเมอร์ (backbone) มีผลทำให้วัสดุสูญเสียความแข็งแรงไปโดยไม่มีการกลับคืน ในกรณีของพอลิเอสเทอร์ที่สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ อัตราการสูญเสียความแข็งแรงถูกควบคุมโดยอัตราการแตกของพันธะโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสบน backbone ของพอลิเมอร์ และพบว่าไม่ขึ้นกับระบบการย่อยใดๆ โดยเอนไซม์ ในกรณีของพอลิเมอร์ประเภทนี้ อัตราการสูญเสียความแข็งแรงจะแปรตามอุณหภูมิ และ pH โดยเฉพาะอย่างยิ่งขึ้นกับปริมาณผลึก (degree of crystallinity) ของพอลิเมอร์ [6] กล่าวคือพอลิเมอร์ที่มีปริมาณผลึกสูง จะคงความแข็งแรงไว้ได้นานกว่าพอลิเมอร์ที่มีปริมาณผลึกต่ำ เพราะส่วนที่เป็นผลึกจะเป็นส่วนที่มีการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบมากและโมเลกุลจะยึดกันด้วยพันธะที่แข็งแรง ทำให้การแทรกตัวของน้ำในผลึกเกิดได้ยากและใช้เวลานานส่งผลให้การสลายตัวของพันธะโควาเลนต์ช้ากว่าด้วยนั่นเอง ในตอนท้ายของขั้นตอนที่สองนี้ น้ำหนักของพอลิเมอร์จะยังคงอยู่แทบทั้งหมด หรือยังคงอยู่ทั้งหมด

2.5.3 การสูญเสียรูปร่างรวม (Loss of mass integrity)

ขั้นนี้จะเกี่ยวข้องกับการเริ่มต้นการดูดซึม (absorption) ซึ่งเป็นกระบวนการสูญเสียน้ำหนักรวม กระบวนการนี้อาจเกิดขึ้นต่อเนื่องจากขั้นตอนที่สองซึ่งพันธะโควาเลนต์ของพอลิเมอร์ถูกสลายจนมีโมเลกุลขนาดเล็กเกินกว่าที่จะยึดติดกันอยู่ได้ และเป็นผลทำให้เกิดการเสียรูปร่างหรือมีลักษณะคล้ายเจลาติน (gelatinized mass) และอาจเกิดการแตกแยกย่อยลงไปอีกจนสามารถหลุดจากเนื้อเยื่อไปในขั้นตอนสุดท้าย

2.5.4 การสูญเสียน้ำหนักโดยการละลาย (Solubilization)

ขั้นตอนที่ 4 เป็นขั้นตอนที่พอลิเมอร์จะถูกกำจัดออกไปจากเนื้อเยื่อ กระบวนการนี้เกิดขึ้นเมื่อพอลิเมอร์ถูกสลายเป็นโมเลกุลเล็ก ๆ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ๆ และโมเลกุลเหล่านี้จะหลุดออกไปโดยละลายเข้าไปอยู่ในช่องเหลวที่อยู่นอกเซลล์ (extracellular fluid) และถูกนำต่อไปยังระบบน้ำเหลือง (lymphatic system) และขับถ่ายออกนอกร่างกายในที่สุด