

ผลของการเติมนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในเส้นใย
พอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลทรีไซเคิลเพื่อใช้ทำพรมต้านแบคทีเรีย

**EFFECT OF NANO-TITANIUM DIOXIDE ADDITION IN
RECYCLED POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) FIBER FOR
ANTI-BACTERIA CARPETS**

คมสัน สุญย์พันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผลของการเติมนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในเส้นใย
พอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตรีไซเคิลเพื่อใช้ทำพรมต้านแบคทีเรีย

คมสัน สุญย์จันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการเติมนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในเส้นใย พอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตรีไซเคิลเพื่อใช้ทำพรมด้านเบคทีเรีย Effect of Nano-Titanium Dioxide Addition in Recycled Poly(Ethylene Terephthalate) Fiber for Anti-Bacteria Carpets
ชื่อ – นามสกุล	นายคมสัน สุญย์จันทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์วีราภรณ์ ผิวสอาด, D.Eng.
ปีการศึกษา	2561

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยภพ ศีระวรกุล, วศ.ค.)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ประกอบ กิจไชยา, Ph.D.)

..... กรรมการ
(อาจารย์ศศิริดี จันทสี, วศ.ค.)

..... กรรมการ
(อาจารย์วีราภรณ์ ผิวสอาด, D.Eng.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 29 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการเติมนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในเส้นใย พอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตรีไซเคิลเพื่อใช้ทำพรมด้านแบคทีเรีย
ชื่อ – นามสกุล	นายคมสัน สุญย์จันทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมีและวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์วีราภรณ์ ฝิวสอาด, Ph.D.
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

พรมที่ใช้ในอาคารและสำนักงานผลิตจากเส้นใยพอลิเอสเตอร์ประเภทพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลต (PET) โดยในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นเส้นใยจากพอลิเมอร์ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (RPET) การใช้งานพรมมีการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมต่าง ๆ รวมทั้งความเปียกชื้นที่เกิดขึ้นกับพรมและส่งผลกระทบต่อ การเกิดเชื้อแบคทีเรียบนเส้นใยพรมและสะสมเป็นระยะเวลานาน ทำให้คุณภาพของพรมลดลง ดังนั้นการ พัฒนาคุณภาพของพรมโดยการเพิ่มสารต่อต้านแบคทีเรียลงในเส้นใย RPET จะช่วยให้พรมมี คุณภาพที่ดีขึ้นและเพิ่มระยะเวลาของการใช้งานพรม

งานวิจัยนี้ศึกษาการเติมนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ในเส้นใย RPET เตรียมด้วย เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่และขึ้นรูปเส้นใยแบบสององค์ประกอบ โดยมาสเตอร์แบทช์ประกอบด้วย RPET และ TiO_2 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และผสมกับ RPET โดยมีปริมาณ TiO_2 ร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปเป็นเส้นใยแบบเต็มเส้นและแบบสององค์ประกอบ โดยแกนของเส้นใยเป็น RPET และผิวด้านนอกเป็น RPET/ TiO_2 ในอัตราส่วน 90/10, 70/30, 50/50, 30/70 และ 10/90 โดยน้ำหนัก เส้นใยถูกม้วนเก็บด้วยความเร็ว 500 และ 1,000 เมตรต่อนาที

จากนั้นวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบออปติคัล และทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความทนต่อแรงดึง ค่าการยืดตัวของเส้นใย โชนิกโมดูลัสของ เส้นใย พบว่า ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยสูงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเล็กลง การเรียงตัวของโมเลกุลและความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น ลักษณะรูปแบบผลึกจากการวิเคราะห์ด้วย x-rays diffraction (XRD) แสดงให้เห็นว่า TiO_2 มีรูปแบบผลึกอนาเทสและรูไทล์ การทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโต ของแบคทีเรียพบว่ามีประสิทธิภาพสูงในเส้นใยแบบสององค์ประกอบ

คำสำคัญ: พรม พอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตรีไซเคิล นาโนไททาเนียมไดออกไซด์

เส้นใยสององค์ประกอบ การยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

Thesis Title	Effect of Nano-Titanium Dioxide Addition in Recycled Poly(ethylene terephthalate) Fiber for Anti-Bacteria Carpets
Name - Surname	Mr. Komsan Sunyikhan
Program	Chemical and Materials Engineering
Thesis Advisor	Mrs. Weraporn Pivsa-Art, Ph.D.
Academic Year	2018

ABSTRACT

Carpets used in residence and office buildings are made from poly(ethylene terephthalate) (PET) fiber. The polymer used in the recent years is recycled PET (RPET). Carpets are used in various conditions including damp environment which results in occurring of bacteria on the carpet. This drawback affects the quality of carpet. Therefore, the improvement of carpet quality by addition of anti-bacteria substance to the polymer fiber will protect the growth of bacteria on carpet.

In this research, we studied the addition of nano-titanium dioxide (TiO_2) to RPET and extruded to fiber using a bicomponent extruder fed spinning machine. The master batch of RPET and 10 wt% TiO_2 was firstly prepared using a twin screw extruder. Then, the master batch was blended with RPET with the TiO_2 content of 1, 2 and 3 wt%. The multifilament was prepared by bicomponent melt spinning method with a single fiber and core/shell structure in which RPET was a core part and master batch was a shell part. The ratios of core/shell components were 90/10, 70/30, 50/50, 30/70 and 10/90 by weight. The fiber was collected with winding speed of 500 and 1,000 m/min.

The size of multifilament was measured by cutting cross section of fiber and evaluates the diameter using an optical microscopy technique. The mechanical property include tenacity, elongation at break and sonic modulus of multifilament was evaluated. The high draw ratio resulted in small diameter of fiber and molecular orientation and high tenacity was achieved. From x-rays diffraction (XRD) analysis, it is clear that these TiO_2 can be classified as having standard anatase and rutile structures. The inhibition of bacterial growth is more effective with the bicomponent fibers.

Keywords : recycled poly(ethylene terephthalate) (RPET), nano titanium dioxide (TiO_2), bicomponent fiber, anti-bacteria, carpet

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาจัดทำวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์แบบได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของ ดร.วีราภรณ์ ผิวสอาด อาจารย์ที่ปรึกษาเสียเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัย ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยภพ ศิระวรกุล ประธานกรรมการสอบ ท่าน ดร.ศศิธรดี จันทลี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และท่านรองศาสตราจารย์ ดร.ประกอบ กิจไชยา กรรมการสอบผู้ทรงคุณวุฒิจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความกรุณา ในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัยตลอดคำแนะนำ รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณ คุณทาทาโนริ เนโกโร จากบริษัท ไทยเนโกโร จำกัด จังหวัดสมุทรปราการ ที่ให้ความอนุเคราะห์ สนับสนุนใช้เครื่องมือ วัสดุและอุปกรณ์ ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ดร.อัญญาจุฑา อารีศิริสุข และนางสาวอาทิตย์ยาพัฒน์ กันนิกา ที่เสียเวลาให้คำปรึกษาในเรื่องการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แนวทางการทดลอง คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ ครอบครัวและพี่น้อง เพื่อนที่แสนดีและคุณครู-อาจารย์ ที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ หากวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

คมสัน สุญย์จันทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ.....	15
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	15
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	16
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	16
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	18
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.1 พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต.....	19
2.2 ไททานเนียมไดออกไซด์.....	22
2.3 เส้นใย.....	28
2.4 พรอม.....	38
2.5 มาสเตอร์แบทช์.....	41
2.6 สมบัติทางความร้อน.....	43
2.7 สมบัติทางกายภาพ.....	44
2.8 สมบัติเชิงกล.....	51
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	56
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	59
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	59
3.2 วัสดุและอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	60
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	66

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน ทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล.....	68
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	72
4.1 ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope).....	72
4.2 ทดสอบการเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย (Dynamic Modulus Tester).....	74
4.3 ทดสอบค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาด (Tenacity).....	75
4.4 ทดสอบค่าการยืดตัวของเส้นใย ณ จุดขาด (Elongation at break).....	76
4.5 สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)	77
4.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	80
4.7 การทดสอบความเป็นผลึก ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer).....	81
4.8 การยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย <i>E.coli</i> และ <i>S.aureus</i>	83
4.9 ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope).....	85
4.10 ทดสอบการเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย (Dynamic Modulus Tester).....	89
4.11 ทดสอบค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาด (Tenacity).....	91
4.12 ทดสอบค่าการยืดตัวของเส้นใย ณ จุดขาด (Elongation at break).....	93
4.13 สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC).....	94
4.14 ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	99
4.15 การทดสอบความเป็นผลึก ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer).....	102

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.16 การยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย <i>E.coli</i> และ <i>S.aureus</i>	104
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ.....	110
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	110
5.2 ผลข้อเสนอแนะ.....	111
บรรณานุกรม.....	112
ภาคผนวก.....	114
ประวัติผู้เขียน.....	141



สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	สมบัติทั่วไปของ PET.....	20
ตารางที่ 2.2	ค่าความหนืดที่เหมาะสม ของ PET ในการใช้งานด้านต่างๆ.....	20
ตารางที่ 2.3	การขึ้นรูป PET แบบต่างๆ ในการบรรจุอาหารและเครื่องดื่ม.....	21
ตารางที่ 2.4	สมบัติของไททานเนียมไดออกไซด์.....	24
ตารางที่ 2.5	ขนาดของเส้นใยธรรมชาติ.....	31
ตารางที่ 3.1	สภาวะในการดำเนินงานของเครื่องดีฟเฟอร์เรนเซียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....	68
ตารางที่ 4.1	สมบัติทางความร้อนของเส้นใย RPET/TiO ₂	78
ตารางที่ 4.2	ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย <i>E.coli</i>	83
ตารางที่ 4.3	ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย <i>S.aureus</i>	83
ตารางที่ 4.4	สมบัติทางความร้อนของเส้นใย RPET/TiO ₂ แบบสององค์ประกอบ.....	97
ตารางที่ 4.5	ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย <i>E.coli</i> ของเส้นใยที่เติม TiO ₂ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก.....	105
ตารางที่ 4.6	ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย <i>S.aureus</i> ของเส้นใยที่เติม TiO ₂ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก.....	106
ตารางที่ 4.7	ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย <i>E.coli</i> ของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่อัตราส่วน 90/10.....	107
ตารางที่ 4.8	ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย <i>S.aureus</i> ของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่อัตราส่วน 90/10.....	108

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	โครงสร้าง PET.....	20
รูปที่ 2.2	โครงสร้างของผลึกของไททานเนียมไดออกไซด์.....	23
รูปที่ 2.3	กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไททานเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง.....	25
รูปที่ 2.4	กลไกเมื่อไททานเนียมไดออกไซด์ได้รับแสงยูวีที่ทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์แตกตัวกลายเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์.....	26
รูปที่ 2.5	รูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใย.....	33
รูปที่ 2.6	Melt Spinning of Continuous Filaments.....	34
รูปที่ 2.7	เส้นใยสององค์ประกอบแบบ Core/Shell.....	36
รูปที่ 2.8	เส้นใยสององค์ประกอบแบบ Side-by-Side.....	36
รูปที่ 2.9	เส้นใยสององค์ประกอบแบบ Segmented pie.....	37
รูปที่ 2.10	เส้นใยพอลิเอสเทอร์ใน Island-in-Sea.....	38
รูปที่ 2.11	ส่วนประกอบของพรม.....	38
รูปที่ 2.12	ส่วนประกอบหลักของเครื่องดีฟเฟอร์เรนเซียสแกนนิ่งแคลลอริมิเตอร์.....	43
รูปที่ 2.13	หลักการทำงานของเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	46
รูปที่ 2.14	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	47
รูปที่ 2.15	ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	49
รูปที่ 2.16	ตัวอย่างแท่นวางตัวอย่าง (Sample Stage) แบบต่างๆ.....	50
รูปที่ 2.17	ขีดจำกัดความเป็นสัดส่วน.....	53
รูปที่ 2.18	การหาค่ามอดูลัสด้วยวิธีต่างๆ.....	54
รูปที่ 2.19	การทดสอบความต้านทานแรงดึงของเส้นใย.....	56
รูปที่ 2.20	เส้นใยใหม่ที่เคลือบสารต้านทานแบคทีเรีย.....	57
รูปที่ 2.21	layer-by-layer deposition.....	58
รูปที่ 2.22	เส้นใยใหม่ที่เคลือบด้วยสารต้านทานแบคทีเรียด้วยกระบวนการ Layer-by-layer (LbL).....	58

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.1	เม็ดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล (RPET).....	61
รูปที่ 3.2	นาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂) เกรด P25.....	61
รูปที่ 3.3	เครื่องขึ้นรูปเส้นใย Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine รุ่น Hill's Lab Modal-100.....	62
รูปที่ 3.4	เครื่องม้วนเก็บเส้นใย (Winder).....	62
รูปที่ 3.5	เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter).....	63
รูปที่ 3.6	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)..	63
รูปที่ 3.7	เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength).....	64
รูปที่ 3.8	เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer).....	64
รูปที่ 3.9	เครื่องทดสอบการเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย (Sonic Modulus Tester)...	65
รูปที่ 3.10	ขั้นตอนการดำเนินงาน	66
รูปที่ 3.11	สถานะที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใย.....	67
รูปที่ 3.12	แผ่นไมโครโทม (Microtome).....	69
รูปที่ 3.13	ตัวอย่างการทดสอบการเรียงตัวโมเลกุลของเส้นใย.....	69
รูปที่ 4.1	ภาพตัดขวางของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	73
รูปที่ 4.2	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย RPET/TiO ₂	73
รูปที่ 4.3	ค่าการเรียงตัวโมเลกุลของเส้นใย RPET/TiO ₂	74
รูปที่ 4.4	ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใย RPET/TiO ₂	75
รูปที่ 4.5	ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของเส้นใย RPET/TiO ₂	76
รูปที่ 4.6	เทอร์โมแกรมสมบัติทางความร้อนของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยเท่ากับ 500 เมตรต่อนาที.....	77
รูปที่ 4.7	เทอร์โมแกรมสมบัติทางความร้อนของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยเท่ากับ 1,000 เมตรต่อนาที.....	78
รูปที่ 4.8	ร้อยละความเป็นผลึกของเส้นใย RPET/TiO ₂	79

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.9	สัณฐานวิทยาของเส้นใย RPET/TiO ₂	80
รูปที่ 4.10	ผลการทดสอบ XRD ของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บ เส้นใย 500 เมตรต่อนาที.....	81
รูปที่ 4.11	ผลการทดสอบ XRD ของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บ เส้นใย 1,000 เมตรต่อนาที.....	82
รูปที่ 4.12	ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของ <i>E.coli</i> ของเส้นใย RPET/TiO ₂	84
รูปที่ 4.13	ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของ <i>S.aureus</i> ของเส้นใย RPET/TiO ₂	84
รูปที่ 4.14	ภาพตัดขวางของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ที่เติมปริมาณ TiO ₂ ร้อยละ 1 ,2 และ 3 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็ว 500 เมตรต่อ นาที.....	86
รูปที่ 4.15	รูปภาพตัดขวางของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้ แสงที่เติมปริมาณ TiO ₂ ร้อยละ 1 ,2 และ 3 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็ว 1000 เมตรต่อนาที.....	86
รูปที่ 4.16	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บ เส้นใย 500 เมตรต่อนาที.....	87
รูปที่ 4.17	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บ เส้นใย 1,000 เมตรต่อนาที.....	87
รูปที่ 4.18	ค่าการเรียงตัวโมเลกุลของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บ เส้นใย 500 เมตรต่อนาที.....	89
รูปที่ 4.19	ค่าการเรียงตัวโมเลกุลของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บ เส้นใย 1,000 เมตรต่อนาที.....	89
รูปที่ 4.20	ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วน เก็บเส้นใย 500 เมตรต่อนาที.....	91
รูปที่ 4.21	ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วน เก็บเส้นใย 1,000 เมตรต่อนาที.....	91

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.22	ค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 500 เมตรต่อนาที.....	93
รูปที่ 4.23	ค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 1,000 เมตรต่อนาที.....	93
รูปที่ 4.24	เทอร์โมแกรมสมบัติทางความร้อนของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 500 เมตรต่อนาที.....	95
รูปที่ 4.25	เทอร์โมแกรมสมบัติทางความร้อนของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 1,000 เมตรต่อนาที.....	95
รูปที่ 4.26	ค่าความเป็นผลึกของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 500 เมตรต่อนาที.....	98
รูปที่ 4.27	ค่าความเป็นผลึกของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 1,000 เมตรต่อนาที.....	98
รูปที่ 4.28	ลักษณะวิทยาของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 500 เมตรต่อนาที.....	100
รูปที่ 4.29	ลักษณะวิทยาของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 1,000 เมตรต่อนาที.....	101
รูปที่ 4.30	ผลการทดสอบ XRD ของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 500 เมตรต่อนาที.....	103
รูปที่ 4.31	ผลการทดสอบ XRD ของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 1,000 เมตรต่อนาที.....	103
รูปที่ 4.32	ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของ <i>E.coli</i> ของเส้นใยที่เติม TiO ₂ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก.....	105
รูปที่ 4.33	ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของ <i>S.aureus</i> ของเส้นใยที่เติม TiO ₂ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก.....	106

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.34 ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของ <i>E.coli</i> ของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่อัตราส่วน 90/10.....	108
รูปที่ 4.35 ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของ <i>S.aureus</i> ของเส้นใย RPET/TiO ₂ ที่อัตราส่วน 90/10.....	109



บทที่ 1

บทนำ

พรมปูพื้น นิยมใช้ร่วมกับห้องที่มีเครื่องปรับอากาศ ห้องที่ให้ความรู้สึกเป็นส่วนตัว เช่น ห้องดูทีวี ห้องอ่านหนังสือ เป็นต้น พรมให้ผิวสัมผัสสบายเท้า ติดตั้งง่าย น้ำหนักเบา สามารถเก็บเสียงได้ดี ให้ความรู้สึกอบอุ่น หรูหรา แต่ตามมาด้วยปัญหามากมาย เช่น ฝุ่น การสัมผัสกับความชื้นและเหงื่อจากเท้า ซึ่งทำให้ยากต่อการทำความสะอาดเป็นผลให้การสะสมและการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ซึ่งทำให้เกิดโรคหรือภูมิแพ้ต่างๆ การผลิตพรมที่สามารถยับยั้งแบคทีเรียได้จึงเป็นความต้องการของผู้บริโภค

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พรมเป็นวัสดุอีกอย่างหนึ่งที่นิยมใช้ปูพื้นกัน พรมสามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท คือ พรมขนสัตว์และพรมสังเคราะห์ พรมขนสัตว์ เป็นพรมที่มีราคาแพง เนื่องจากทำมาจากธรรมชาติ มีความหรูหรา หนานุ่ม แข็งแรง ป้องกันคราบและรอยเปื้อนได้ดี แต่อาจก่อให้เกิดภูมิแพ้ ดูแลทำความสะอาดยาก สีจะซีดถ้าโดนแดดและสารเคมีที่ใช้ทำความสะอาด พรมสังเคราะห์เป็นพรมที่ได้รับความนิยมค่อนข้างมาก เพราะทำจากวัสดุสังเคราะห์ จึงมีความคงทนมากกว่าพรมขนสัตว์ พลาสติกที่ทำพรมส่วนใหญ่เป็น พอลิเอทิลีน เทเลฟทาเลต รีไซเคิล (Recycled poly(ethylene terephthalate), RPET) พอลิเอทิลีน เทเลฟทาเลต (Poly(ethylene terephthalate), PET) พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) พอลิเอสเทอร์ (Polyester, PS) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) และอื่นๆ

บริษัทไทยเนโกโร จำกัด ทำธุรกิจด้านการออกแบบ การผลิต และการจำหน่ายผลิตภัณฑ์จำพวกสิ่งปูพื้น เช่น พรมปูพื้น (Carpets) พรมปูในรถ (Car Mats) ปลอกหุ้มเก็บความร้อน (Hot Covers) พรมตกแต่งบ้าน (Area Rugs) เป็นต้น ขายทั้งในประเทศและต่างประเทศ พรมปูพื้นสำเร็จรูปทำจากหลายชิ้นส่วนมาประกบกันเป็นชั้น ๆ เส้นใยด้านบนและส่วนของแผ่นรองด้านล่างของพรมปูพื้น (Backing) นั้น ได้แก่ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ฐานพรมชั้นที่หนึ่ง (Primary Backing) และ

ฐานพรมชั้นที่สอง (Secondary Backing) ทำจากวัสดุพอลิพรอพิลีน ไนลอนหรือพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลต โครงการงานวิจัยนี้ร่วมกับบริษัทไทยเนโกโรมีแนวคิดร่วมกันเพื่อพัฒนาพรมในส่วนของขนพรมด้านบน (Tuft) ที่สัมผัสกับเท้าหรือพื้นรองเท้าที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย วัตถุประสงค์หลักที่ใช้ทำขนพรมเป็นพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตริไซเคิล (RPET) และเลือกใช้ไททานเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide, TiO_2) เกรดการค้า (P25) เป็นสารยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งมีสัดส่วนของโครงสร้างแบบ รูไทต์/อนาเทส/บรูคไคท์ เป็น 85/15/0 เริ่มจากการเตรียมมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตริไซเคิลและนาโนไททานเนียมไดออกไซด์ จากนั้นทำคอมพาวด์กับพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตริไซเคิล แล้วขึ้นรูปเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นหลอม (Melt Spinning) ด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine) และทดสอบสมบัติต่างๆ ของเส้นใย ได้แก่ สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) ทดสอบความเป็นผลึก ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) ทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ทดสอบการเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย (Dynamic Modulus Tester) ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) และทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตริไซเคิลที่เติมนาโนไททานเนียมไดออกไซด์เป็นสารยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของปริมาณการเติมนาโนไททานเนียมไดออกไซด์ในเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตริไซเคิล

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เตรียมมาสเตอร์แบทช์ (Master Batch) ของพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตริไซเคิล (RPET) และนาโนไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่

1.3.2 ทำการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตริไซเคิล (RPET) และมาสเตอร์แบทช์ (Master Batch) ด้วยกระบวนการปั่นหลอม (Melt Spinning) ด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine)

ตอนที่ 1 การขึ้นรูปเส้นใยแบบเต็มเส้น

- 1) ปริมาณนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็น 1, 2 และ 3 ร้อยละโดยน้ำหนัก
- 2) ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย คือ 500 และ 1000 เมตรต่อนาที

ตอนที่ 2 การขึ้นรูปเส้นใยแบบสององค์ประกอบ

- 1) ปริมาณนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็น 1, 2 และ 3 ร้อยละโดยน้ำหนัก
- 2) เส้นใยที่ขึ้นรูปแบบสององค์ประกอบในการทดลองมีอัตราส่วนระหว่างแกนกลางเส้นใยด้านใน (Core)/ขอบเส้นใยด้านนอก (Shell) เป็น 90/10, 70/30, 50/50, 30/70 และ 10/90
- 3) ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย คือ 500 และ 1000 เมตรต่อนาที

1.3.3 นำเส้นใยที่ได้จากกระบวนการปั่นหลอม (Melt Spinning) มาทดสอบสมบัติดังนี้

- 1) สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)
- 2) ทดสอบความเป็นผลึก ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)
- 3) ทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)
- 4) ทดสอบการเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย (Dynamic Modulus Tester)
- 5) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (Optical Microscope)
- 6) ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 3822 01
- 7) ทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งใช้ *Escherichia Coli* (*E. coli*) ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ (Gram Negative Bacteria) และ *Staphylococcus Aureus* (*S. aureus*) ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก (Gram Positive Bacteria) เป็นตัวแทนเชื้อในการทดสอบ ตามมาตรฐาน JIS Z 2801

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ปริมาณของนาโนไททานเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการเตรียมเส้นใยพอลิเอทิลีน เทเลฟทาเลตรีไซเคิล

1.4.2 ได้สภาวะที่เหมาะสมของการเติมนาโนไททานเนียมไดออกไซด์ในการเตรียมเส้นใยพอลิเอทิลีน เทเลฟทาเลตรีไซเคิล

1.4.3 ได้พรมที่มีสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย



บทที่ 2

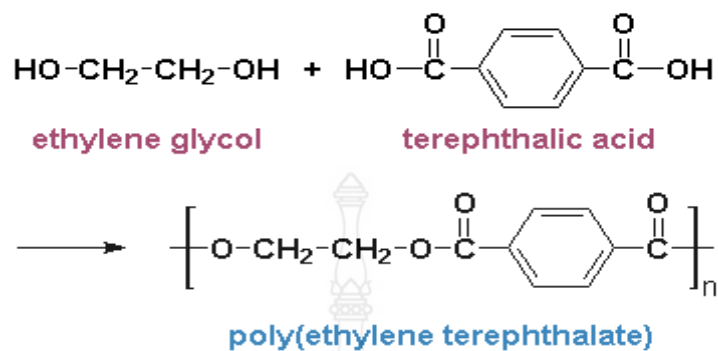
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรต เป็นพลาสติกที่นิยมใช้ในการผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารต่างๆ รวมถึงเครื่องดื่มชนิดอัดแก๊ส เนื่องจากมีสมบัติพิเศษหลายประการเช่นน้ำหนักเบา ใส ราคาถูก และเหนียวไม่แตกง่าย ในประเทศไทยนิยมใช้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตสำหรับผลิตขวดน้ำดื่ม น้ำอัดลม น้ำปลา และน้ำมันพืช ภายหลังจากใช้งาน พลาสติกประเภทนี้สามารถนำกลับมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้ซึ่งนับว่าเป็นพลาสติกที่ได้รับความนิยมในการนำกลับมารีไซเคิลชนิดหนึ่ง โดยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตรีไซเคิลส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเส้นใย โดยอ้างอิงจากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [1]

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ (Monomer) หลายๆ ตัวซึ่งได้จากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) ระหว่างกรดเทเลฟทาอิก (Terephthalic Acid, TPA) กับเอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol, EG) โดยมีน้ำเกิดขึ้นในปฏิกิริยาหรือเกิดจากมอนอเมอร์ซึ่งได้จากปฏิกิริยาระหว่างไดเมทิลเทเลฟทาเลต (Dimethyl Terephthalate) กับเอทิลีนไกลคอล (EG) โดยมีเมทานอลเกิดขึ้นในปฏิกิริยาซึ่งสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิต PET นั้น ได้จากอุตสาหกรรมน้ำมัน ทั้งนี้ ความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้นเป็นสิ่งสำคัญมาก และมีผลต่อคุณภาพของ PET ที่ได้ โดยเฉพาะเมื่อใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์ สำหรับบรรจุอาหาร PET ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีความเหนียวทนทานและมีความยืดหยุ่นต่อแรงกระทบกระแทกจึงไม่แตกเมื่อถูกแรงกดดัน การนำ PET มาผลิตวัสดุต่างๆ เทคนิคการให้ความร้อน การทำให้เย็นที่อุณหภูมิ และระยะเวลาต่างๆ ที่เรียกว่า “Heat Setting” จะทำให้ได้ PET ที่มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานต่างๆ กัน เช่น เป็นแผ่นฟิล์ม หรือขวดพลาสติกใส เป็นพลาสติกขุ่น สำหรับบรรจุภัณฑ์ หรือถาด ซึ่งสามารถทนต่อแรงกระทบ และอุณหภูมิแตกต่างกัน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทางกายภาพ แตกต่างกันเหล่านี้ล้วนมาจาก PET ที่มีสมบัติทางเคมีเหมือนกันทั้งสิ้นนอกจากนี้การเติมสารอื่นๆ เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของ PET เช่น การเติม

Isophthalic Acid (IPA หรือ 1,4-Cyclohexanedimethanol) จะทำให้ได้แผ่นฟิล์ม หรือขวดที่มีความหนาขึ้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้าง PET

ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของ PET [2]

สมบัติของ PET	ค่าของสมบัติ PET
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว	73-80 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิหลอมเหลว	245-265 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	1.29-1.40 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ความต้านทานแรงดึง	48.2-72.3 มิลลิปาสคาล
โมดูลัสยืดหยุ่น	2,756-4,135 มิลลิปาสคาล
การยืดตัว ณ จุดขาด	30-3,000 เปอร์เซ็นต์
ความต้านทานการฉีกขาด	0.83 กรัมต่อมิลลิเมตร

ตารางที่ 2.2 ค่าความหนืดที่เหมาะสม ของ PET ในการใช้งานด้านต่างๆ [3]

การใช้งาน	ค่าความหนืด (เดซิลิตรต่อกรัม)
เทปบันทึกเสียง	0.60
เส้นใย	0.65
ขวดน้ำอัดลม	0.73-0.80
เส้นใยเชิงวิศวกรรม	0.85

การใช้ PET เพื่อบรรจุอาหารและเครื่องดื่ม เนื่องจาก PET เป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์ประเภทพลาสติกที่ได้รับการคิดค้นขึ้นมาเพื่อการบรรจุน้ำอัดลม โดยเฉพาะสมบัติเด่นทางด้านความใส ทำให้ได้รับความนิยมในการบรรจุน้ำมันพืชและน้ำดื่ม นอกจากนี้ขวดแก้ว PET ยังสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มซึ่งมีสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้เป็นอย่างดี จึงมีการนำไปเคลือบหลายชั้นทำเป็นซองสำหรับบรรจุอาหารที่มีความไวต่อก๊าซ เช่น อาหารขบเคี้ยว ถาดบรรจุอาหาร ที่เป็น Modified Atmosphere Packaging (MAP) เป็นต้น นอกจากนี้ ฟิล์ม PET ยังมีสมบัติเด่นอีกหลายประการ เช่น ทนแรงยืดและแรงกระแทกเสียดสีได้ดี จุดหลอมเหลว แต่ข้อด้อย คือ ไม่สามารถปิดผนึกด้วยความร้อนและเปิดฉีกยาก ทำให้โอกาสใช้ฟิล์ม PET อย่างเดียวน้อยมาก แต่มักใช้เคลือบกับพลาสติกอื่น

ตารางที่ 2.3 การขึ้นรูป PET แบบต่างๆ ในการบรรจุอาหารและเครื่องดื่ม

ผลิตภัณฑ์จาก PET	อาหารและเครื่องดื่มที่บรรจุ
ขวด	เครื่องดื่ม, น้ำอัดลม, น้ำผลไม้, น้ำมันพืช, น้ำสลัด, ซอสปรุงรส
กระปุกและขวดปากกว้าง	แยม, ผลไม้กวน, อาหารแห้ง
ถาด	อาหารปรุงสุกสำหรับอุ่นในไมโครเวฟ
แผ่นฟิล์ม และแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์	- บรรจุภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็ง
เคลือบพลาสติก	- บรรจุภัณฑ์แบบสุญญากาศ (vacuum packagine) - ข้าวโพดคั่วในไมโครเวฟ (microwave popcorn)
บรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันออกซิเจนผ่าน	เค้ก

PET เป็นหนึ่งในพลาสติกที่ใช้กันทั่วไปในผลิตภัณฑ์เพื่อผู้บริโภคและพบได้ในขวดน้ำและบรรจุภัณฑ์ PET บางส่วนมีไว้สำหรับการใช้งานเพียงครั้งเดียว การใช้ซ้ำใช้เพิ่มความเสี่ยงของการ

เจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ก่อโรคนิคมต่าง ๆ พลาสติก PET สามารถนำไปรีไซเคิลได้และขวดพลาสติก PET ประมาณ 25% ของสหรัฐอเมริกาในปัจจุบันถูกนำกลับมาใช้ใหม่ พลาสติกถูกบดแล้วหั่นเป็นเกล็ดเล็กๆ ที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลเพื่อทำขวด PET ใหม่หรือปั่นเป็นเส้นใยพอลิเอสเตอร์ เส้นใยที่นำกลับมาใช้ทำสิ่งทอ เช่น เสื้อผ้า พรหมเช็ดเท้า พรหมปูพื้น ปลอดภัยและเนื้อนุ่มเป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติก PET จึงควรมานำรีไซเคิล แต่ไม่สามารถใช้ซ้ำได้

2.2 ไททาเนียมไดออกไซด์ [4]

ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียม ที่ถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ เนื่องจากมีความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษ และมีราคาถูก มีชื่อทางการค้าคือ ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide) ไททานิกแอนไฮไดรด์ (Titanic Anhydride) และไททาเนีย (Titania)

ไททาเนียมเป็นแร่ที่ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อ ค.ศ. 1791 ในเหมืองแร่เหมืองคอร์นวอลล์ ประเทศอังกฤษ โดยนักธรณีวิทยาชื่อ William Gregor ใช้สัญลักษณ์แทนคือ Ti มีเลขอะตอม 22 มีคุณสมบัติแข็งแรง ทนต่อสภาพกัดกร่อนของคลอรีน น้ำทะเล และกรด-ด่าง ได้ดี ไททาเนียมไดออกไซด์โดยธรรมชาติจะพบน้อยมาก ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแร่ิลเมนไนต์ (Ilmenite) หรือ ลิวโซซีน (Leucocene) โดยทำให้บริสุทธิ์ได้โดยวิธี Rutile Beach Sand

2.2.1 ชนิดไททาเนียมไดออกไซด์ แบ่งตามโครงสร้างของผลึก ได้แก่

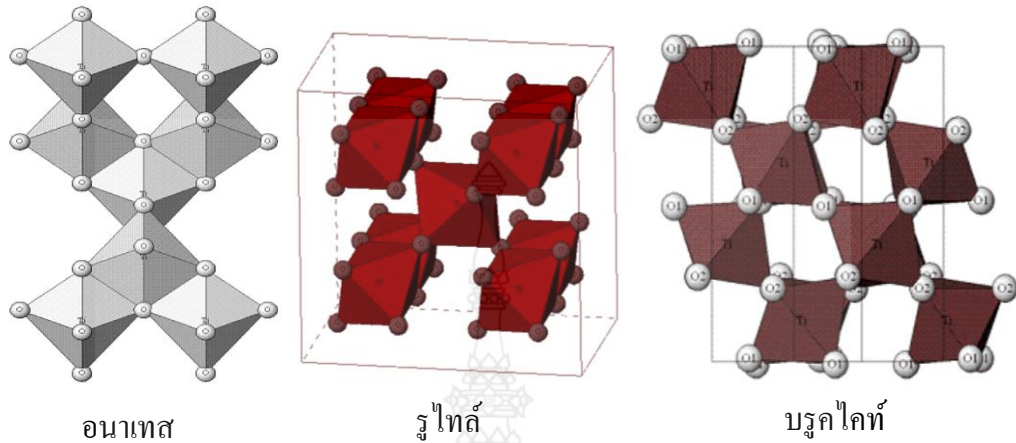
1) รูไทล์ (Rutile) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล (Tetragonal) เป็นชนิดที่พบมากที่สุด ในธรรมชาติ มีความคงทน และเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่สูง

2) อนาเทส (Anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล (Tetragonal) เป็นชนิดที่พบในธรรมชาติปานกลาง หากให้ความร้อนสูงกว่า 915 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์

3) บรูคไคท์ (Brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) เป็นชนิดที่พบได้น้อยในธรรมชาติ มีความเสถียรต่ออุณหภูมิต่ำ หากได้รับความร้อนมากกว่า 750 °C จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์

โดยโครงสร้างผลึกทั้ง 3 ชนิดนี้มีความแตกต่างกันเนื่องมาจากการบิดตัวของแต่ละออกไซด์รอลที่เรียงต่อกันและจากรูปแบบการเรียงตัวของออกไซด์รอล โดยโครงสร้างผลึกอนาเทสเกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนยอดของแต่ละออกไซด์รอล ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์เกิด

มาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล และ โครงสร้างผลึกบรูคไคท์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ทั้งส่วนยอดและส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์

นาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (Nano Titanium Dioxide) เป็นการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากไททาเนียมไดออกไซด์ เพื่อทำให้เกิดแผ่นฟิล์มบางๆ ของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีต่าง ๆ คือ

- 1) วิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering) เป็นการให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ก๊าซ Ar^+ ทำให้อิออน Ar^+ วิ่งเข้าชนกับแผ่นไททาเนียม จนอะตอมของไททาเนียมหลุดออกไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วฝังติดบนแผ่นฐานรองจนเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ
- 2) วิธีโกลว์ดิสชาร์จ (Glow Discharge) เป็นวิธีการให้ศักย์ไฟฟ้าแก่พลาสมาของไททาเนียม ทำให้อะตอมไททาเนียมหลุดออกไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และจับตัวในตำแหน่งที่ต้องการ
- 3) วิธีการตกเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) เป็นวิธีให้ความร้อนแก่ไททาเนียมจนเกิดไอของไททาเนียมเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้เป็นไททาเนียมไดออกไซด์รวมตัวกันในตำแหน่งที่ต้องการ
- 4) กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Process) ในสภาวะเบสเข้มข้นภายใต้ความร้อนและความดันสูง เป็นกระบวนการที่ดีที่สุดในปัจจุบัน ได้ผลิตกัณท์นาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิวมาก

ตารางที่ 2.4 สมบัติของไททานเนียมไดออกไซด์

สมบัติของไททานเนียมไดออกไซด์	ค่าสมบัติของไททานเนียมไดออกไซด์
มวลโมเลกุล	79.9 กรัม/โมล
ความหนาแน่น	3.84-4.26 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	1,850 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	2,500 องศาเซลเซียส
พื้นที่ผิว	50 ตารางเมตร/กรัม
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	20 นาโนเมตร
ความถ่วงจำเพาะ	0.7 กรัม/ลิตร
การละลายน้ำ	ไม่ละลายน้ำ

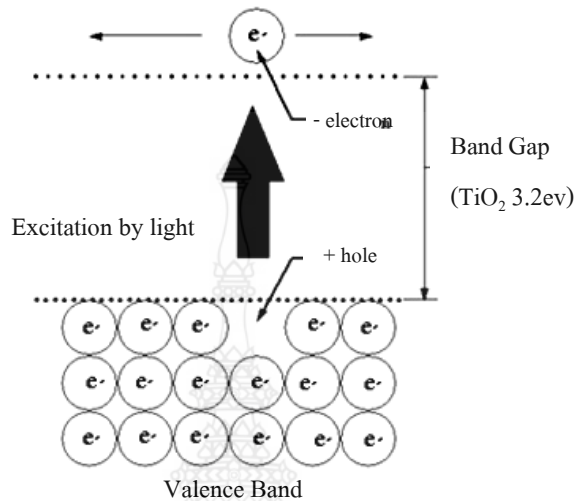
ด้านความปลอดภัยของไททานเนียมไดออกไซด์

- 1) การกินจากอุบัติเหตุ (Ingestion) มีความเป็นอันตรายต่ำ
- 2) การสูดดม (Inhalation) ทำให้เกิดการคัน และอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจในระยะยาว
- 3) การสัมผัสผิวหนัง (Skin) มีความเป็นอันตรายต่ำ สามารถล้างออกได้
- 4) การสัมผัสส่นัยน์ตา (Eyes) มีความเป็นอันตรายต่ำ มีอาการแสบ คันเล็กน้อย สามารถล้างออกได้

2.2.2 ลักษณะของไททานเนียมไดออกไซด์สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม

เนื่องจากไททานเนียมมีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึก ไททานเนียมจึงจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type Semiconductor) ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไปพร้อมๆกัน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction Reactions) โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าพลังงานแบนด์แกป (Band gap energy) ความสามารถของสารกึ่งตัวนำที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของพลังงานแบนด์แกปของสารกึ่งตัวนำและตำแหน่งของศักย์พลังงานในการเกิดรีดอกซ์ (Redox) ของสารที่ถูกดูดซับ โดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) จะเป็นระดับของศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited electron) ในทางกลับกัน ระดับของพลังงานที่สูงที่สุดของวาเลนซ์แบนด์

(Valence band) จะเป็นระดับศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วย โฮล (Hole) ที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว



รูปที่ 2.3 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไททาเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง

สารกึ่งตัวนำแตกต่างจากโลหะคือ มีความไม่ต่อเนื่องของระดับพลังงาน ทำให้เกิดเป็นช่องว่างของระดับพลังงานหรือแบนด์แกป ซึ่งส่งผลให้เกิดการแยกจากกันของอิเล็กตรอนและโฮลหลังจากที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง ทำให้ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลมีระยะเวลาเพียงพอในการเคลื่อนที่ผ่านไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและก่อให้เกิดปฏิกิริยาในที่สุด ความแตกต่างของโครงสร้างผลึกของไททาเนียชนิดอนาเทสและรูไทล์ทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นและโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลให้มีค่าพลังงานแบนด์แกปแตกต่างกันคือ 3.20 eV สำหรับโครงสร้างผลึกอนาเทส และ 3.02 eV สำหรับโครงสร้างผลึกรูไทล์ ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนแสงเริ่มเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นของแสงที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างผลึกอนาเทสสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 นาโนเมตร ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 นาโนเมตร ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม

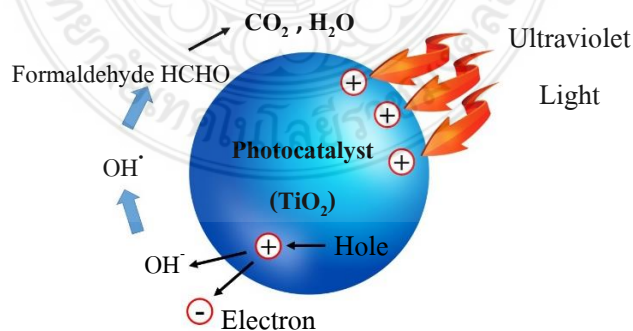
2.2.3 กลไกในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย [5]

การฉายแสงยูวีไปยังไททาเนียมไดออกไซด์จะทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide) และประจุลบของซูเปอร์ออกไซด์ แอนไอออน (Superoxide Anion) ซึ่งสารดังกล่าวเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง สามารถทำลายโครงสร้างและยับยั้งชีวเคมีของแบคทีเรียและเซลล์ที่ติดเชื้อไวรัส หรือจะทำให้สารประกอบอินทรีย์ถูกออกซิไดซ์กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ กลไกการย่อยสลายแสดงดังสมการต่อไปนี้



เมื่อ OP_{ads} คือ สารมลพิษอินทรีย์ (Organic Pollutant) ที่ดูดซับบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา

มีการศึกษาอย่างต่อเนื่องเกี่ยวกับไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย ทั้งแบคทีเรียชนิดแกรมบวกและแกรมลบ กลไกการย่อยสลายเชื้อแบคทีเรียจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นหากตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีอนุภาคเล็ก ย่อมมีพื้นผิวในการดูดซับแบคทีเรียมาก ประสิทธิภาพการย่อยสลายจึงสูงขึ้นตามไปด้วย อนุมูลอิสระที่เกิดจากปฏิกิริยา เช่น อนุมูลออกซิเจนที่ว่องไว (Reactive Oxygen Species, ROS) จะทำลายผนังเซลล์และเซลล์เมมเบรนของเชื้อแบคทีเรีย ทำให้เซลล์แตกและของเหลวภายในรั่วไหลออกมาเป็นเหตุให้เชื้อแบคทีเรียตายในที่สุด รูปที่ 2.4 แสดงกลไกการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย



รูปที่ 2.4 กลไกเมื่อไททาเนียมไดออกไซด์ได้รับแสงยูวีที่ทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์แตกตัวกลายเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์

2.2.4 ประโยชน์ของไททาเนียมไดออกไซด์

ปัจจุบันไททาเนียมไดออกไซด์ที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์มาก มักใช้ในรูปแบบของผลึกแบบรูไทล์ (Rutile) ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมในด้านต่างๆ ซึ่งพบมากในธรรมชาติ ส่วนชนิดอนาเทส (Anatase) นิยมใช้ในกระบวนการใช้แสงชั้นสูง การนำมาใช้ประโยชน์เกี่ยวข้องกับด้านต่าง ๆ ได้แก่

1) ใช้สำหรับสารให้สี อุตสาหกรรมสีที่เกี่ยวข้องมักใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสมของสีทาบ้าน ด้วยคุณสมบัติให้สารสีขาว สามารถดูดกลืน และหักเหช่วงแสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้สูง ขนาดอนุภาคเล็ก มีความยืดหยุ่นสูงทำให้ปกปิดรอยร้าว รอยตำหนิได้ดี และทนต่อสภาพความเป็นกรด-ด่าง ทนต่อแสง และความชื้น รวมถึงใช้เป็นส่วนผสมของสีสำหรับงานพิมพ์งานศิลปะ เนื่องจากมีคุณสมบัติให้สีขาวสว่าง

2) ใช้เป็นสารเคลือบผลิตภัณฑ์ มักใช้เป็นสารเคลือบในอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมแก้ว กระจก อุตสาหกรรมผลิตกระเบื้อง การผลิตสุขภัณฑ์ การผลิตเซรามิก อุตสาหกรรมโลหะสำหรับการเคลือบผิวโลหะ อุตสาหกรรมกระดาษสำหรับการเคลือบกระดาษเพื่อลดการทะลุผ่านของแสง ด้วยคุณสมบัติที่สามารถยึดเกาะ และเคลือบติดผิวได้ง่าย มีความทนทานต่อการกัดกร่อน รวมถึงคุณสมบัติที่กล่าวในข้างต้น นอกจากนี้ การใช้ไททาเนียมไดออกไซด์สำหรับเคลือบผิวผลิตภัณฑ์สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิต และลดน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ได้อีกทาง

3) เป็นสารกึ่งตัวนำผลิตกระแสไฟฟ้า การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

4) ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้ามักใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัติมีค่าคงที่ทางไฟฟ้า และค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง

5) ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง เครื่องสำอางบางยี่ห้อมีการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสมสำหรับทำหน้าที่ให้ผงละเอียดสีขาว มีคุณสมบัติทึบแสง สามารถสะท้อน และหักเหแสงได้สูง และสะท้อนรังสียูวีได้ดี ไม่เป็นอันตรายต่อผิว ผลิตภัณฑ์ที่พบใช้เป็นส่วนผสมมาก ได้แก่ ครีมบำรุงผิว ครีมกันแดด แป้งรองพื้น และทาตัม เป็นต้น

6) ใช้ในการบำบัดมลพิษ

6.1) ใช้เป็นสารดูดซับ ใช้งานในการบำบัดมลพิษทางอากาศ และมลพิษทางน้ำ ทำหน้าที่เป็นสารตัวดูดซับมลพิษ

6.2) ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์แสง ไททานเนียมไดออกไซด์เมื่อได้รับแสงและความร้อน จะแตกตัวให้สาร และรังสีที่มีคุณสมบัติสามารถกำจัดของเสียหรือมลพิษในน้ำ และอากาศ รวมถึงการกำจัด และต้านเชื้อจุลินทรีย์ โดยมีกลไก ดังนี้

(1) สำหรับการต้านเชื้อจุลินทรีย์ เมื่อแผ่นนาโนไททานเนียมไดออกไซด์ได้รับแสงจะปลดปล่อยไฮดรอกซิล แรดิคัล (OH[•]) และซูเปอร์ออกไซด์ไอออน (O²⁻) ออกมาสู่อากาศ และอะตอมดังกล่าวจะเข้าดั่งอะตอมไฮโดรเจน และคาร์บอนจากผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ รวมถึงสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดกลิ่นทำให้จุลินทรีย์ และสารมลพิษต่าง ๆ สลายตัวไป

(2) สำหรับการบำบัดมลพิษทางอากาศ เช่น การกำจัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_x) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ด้วยการผ่านแสงอุลตราไวโอเลตในช่วงคลื่น 300-400 นาโนเมตร จะทำให้เกิดอนุภาคข้างต้นเข้าทำปฏิกิริยากับสารมลพิษดังกล่าวทำให้กลายเป็นกรดไนตริก และกรดซัลฟูริก ส่วนสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นสารอื่นที่มีความเป็นอันตรายน้อยลง

(3) สำหรับบำบัดมลพิษในน้ำ ด้วยการให้แสงแก่แผ่นตัวกลางนาโนไททานเนียมไดออกไซด์ที่แขวนอยู่ในน้ำ เมื่อได้รับแสงจะเกิดการปลดปล่อยอนุภาคข้างต้นเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่แขวนลอยในน้ำกลายเป็นก๊าซ CO₂



2.3 เส้นใย [6]

เส้นใยหมายถึงวัสดุหรือสารใดๆที่เกิดจากธรรมชาติและมนุษย์สร้างขึ้น สามารถขึ้นรูปเป็นผ้าได้ และต้องเป็นองค์ประกอบที่เล็กที่สุดของผ้า ไม่สามารถแยกย่อยในเชิงกลได้อีก

2.3.1 ประเภทของเส้นใยแบ่งตามแหล่งกำเนิดของเส้นใย

1) เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers)

(1) เส้นใยจากพืช ได้แก่ เส้นใยจากเซลลูโลส เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยเซลลูโลส ซึ่งได้จากส่วนต่างๆของพืช เช่น ป่าน ปอ ลินิน ใยสับปะรด ใยมะพร้าว ฝ้าย นุ่น เป็นต้น เซลลูโลสเป็นโฮโมพอลิเมอร์ ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสจำนวนมาก

(2) เส้นใยจากสัตว์ ได้แก่ เส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ไหม ผม เล็บ เขา ใยไหม เป็นต้น เส้นใยเหล่านี้ มีสมบัติ คือ เมื่อเปียกน้ำ ความเหนียวและความแข็งแรงจะลดลงถ้าสัมผัสแสงแดดนานๆ จะสลาย

(3) เส้นใยจากหินแร่ เช่น แร่ใยหิน (Asbestos) ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทนไฟ ไม่นำไฟฟ้า

2) เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic Fiber)

(1) เส้นใยพอลิเอสเตอร์ เช่น เทโตรอน ใช้บรรจุในหมอน เพราะมีความฟูยืดหยุ่น ไม่เป็นอันตรายต่อผิวหนัง สำหรับดาคרון (Dacron) เป็นเส้นใยสังเคราะห์พวกพอลิเอสเตอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “Mylar” มีประโยชน์ทำเส้นใยทำเชือก และฟิล์ม

(2) เส้นใยพอลิเอไมด์ เช่น ไนลอน (Nylon) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีหลายชนิด เช่น ไนลอน 6,6 ไนลอน 6,10 ไนลอน 6 ซึ่งตัวเลขที่เขียนกำกับหลังชื่อจะแสดงจำนวนคาร์บอนอะตอมในมอนอเมอร์ของเอมีนและกรดคาร์บอกซิลิก ไนลอนจัดเป็นพวกเทอร์มอพลาสติก มีความแข็งแรงกว่าพอลิเมอร์แบบเดิมชนิดอื่น (เพราะมีแรงดึงดูดที่แข็งแรงของพันธะเพปไทด์) เป็นสารที่ติดไฟยาก (เพราะไนลอนมีพันธะ C-H ในโมเลกุลน้อยกว่าพอลิเมอร์แบบเดิมชนิดอื่น) ไนลอนสามารถทดสอบโดยผสมโซดาแลม (NaOH + Ca(OH)₂) หรือเผาจะให้ก๊าซแอมโมเนีย ประโยชน์ของไนลอนใช้ในการทำเสื้อผ้า ถุงเท้า ขนแปรงต่างๆ สายกีตาร์ สายเอ็น ไม้เร็กเก็ต เป็นต้น

(3) เซลลูโลสแอซิเตด เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากการใช้เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับกรดซิดิกเข้มข้น โดยมีกรอซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้ประโยชน์จากเซลลูโลสอะซิเตด เช่น ผลิตเป็นเส้นใยอาร์แนล 60 ผลิตเป็นแผ่นพลาสติกที่ใช้ทำแผงสวิทช์และหุ้มสายไฟ

2.3.2 สมบัติของเส้นใย

สมบัติของเส้นใยมีผลโดยตรงต่อสมบัติของผ้าที่ทำขึ้นจากเส้นใยนั้น ๆ ผ้าที่ทำจากเส้นใยที่แข็งแรงก็จะมีความแข็งแรงทนทานด้วย หรือเส้นใยที่สามารถดูดซับน้ำได้ดีจะส่งผลให้ผ้าสามารถดูดซับน้ำและความชื้นได้ดี เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในส่วนที่มีการสัมผัสกับผิวและดูดซับน้ำ เช่น ผ้าเช็ดตัว ผ้าอ้อม เป็นต้น ดังนั้นการที่เราเข้าใจสมบัติของเส้นใยจะช่วยทำให้สามารถทำนายสมบัติของผ้าที่มีเส้นใยนั้น ๆ เป็นองค์ประกอบ รวมไปถึงผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ ซึ่งจะช่วยให้สามารถเลือกชนิดของผลิตภัณฑ์ในเบื้องต้น ได้ถูกต้องตามความต้องการ ของการนำไปใช้งาน โดยการคาดเดาจากองค์ประกอบที่แจ้งไว้ในป้ายสินค้า

ความแตกต่างของเส้นใยขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และการเรียงตัวของโมเลกุล ซึ่งส่วนผสมและความแตกต่างในปัจจัยทั้งสามนี้ ทำให้เส้นใยมีสมบัติที่หลากหลายและแตกต่างกัน ซึ่งสมบัติของเส้นใยก็จะมีผลต่อสมบัติของผ้าหรือผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากเส้นใยนั้น ทั้งในส่วนที่เป็นที่ต้องการและไม่ต้องการต่อการนำไปใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น ในเส้นใยที่สามารถดูดซับน้ำได้น้อย จะส่งผลให้ผ้าที่ทำจากเส้นใยชนิดนี้มีสมบัติดังนี้

- 1) เกิดไฟฟ้าสถิตย์ (Static Build-Up) บนเนื้อผ้าได้ง่าย ทำให้ผ้าลื่นติดตัว
 - 2) ผ้าแห้งเร็ว เนื่องจากมีปริมาณน้ำที่ดูดซับน้อยและไม่มีพันธะ (Bond) ระหว่างเส้นใย และโมเลกุลของน้ำ
 - 3) ย้อมติดสียาก เนื่องจากการย้อมสีส่วนใหญ่อาศัยน้ำเป็นตัวกลางพาโมเลกุลของสีเข้าไปในเนื้อผ้า ผ้าที่ไม่ดูดซับน้ำจึงติดสีย้อมได้ยากกว่า
 - 4) สวมใส่สบายน้อยกว่า เนื่องจากการเหี่ยวที่อยู่บนผิวถูกดูดซับน้อยทำให้รู้สึกเปียกชื้นได้
 - 5) คงรูปได้ขณะเปียกหรือขณะซัก และผ้ายับน้อย ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับมีน้อย และไม่เกิดพันธะระหว่างเส้นใย และโมเลกุลของน้ำ ที่จะทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป
- ปัจจัยทั้งสามที่มีผลต่อสมบัติของเส้นใย คือ โครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมีและการจัดเรียงตัวของโมเลกุล

2.3.3 โครงสร้างทางกายภาพ

โครงสร้างทางกายภาพหรือโครงสร้างทางสัณฐาน (Morphology) ของเส้นใย สามารถสังเกตได้จากกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) ที่มีกำลังขยาย 250-1000 เท่า โครงสร้างทางกายภาพนั้นครอบคลุมถึง ความยาว ขนาดหรือเส้นผ่าศูนย์กลาง รูปร่างภาคตัดขวาง (Cross-Sectional Shape) รูปร่างของผิวเส้นใย และความหยักของเส้นใย

2.3.4 ความยาวเส้นใย (Fiber Length)

เส้นใยมีทั้งชนิดสั้นและยาว ซึ่งความยาวของเส้นใยจะมีผลต่อสมบัติและการนำไปใช้งานของผลิตภัณฑ์สิ่งทอ ก่อนอื่นเรามาทำความรู้จักกับชนิดของเส้นใยทั้งสองนี้ก่อน

1) เส้นใยสั้น (Staple Fiber) เป็นเส้นใยที่มีความยาวอยู่ในช่วง 2 ถึง 46 เซนติเมตร เส้นใยธรรมชาติทั้งหมดยกเว้นไหมเป็นเส้นใยสั้น ยกตัวอย่างเช่น เส้นใยฝ้าย ฝ้าย ขนสัตว์ เส้นใยสั้นที่มาจากเส้นใยสังเคราะห์มักทำเป็นเส้นยาวก่อนแล้วตัด (Chop) เป็นเส้นใยสั้นตามความยาวที่กำหนด

2) เส้นใยยาว (Filament Fiber) เป็นเส้นใยที่มีความยาวต่อเนื่องไม่สิ้นสุด มีหน่วยวัดเป็นเมตรหรือหลา เส้นใยยาวส่วนใหญ่เป็นเส้นใยสังเคราะห์ ยกเว้นไหมซึ่งเป็นเส้นใยยาวที่มาจากธรรมชาติ เส้นใยยาวอาจเป็นชนิดเส้นยาวเดี่ยว (Monofilament) ที่มีเส้นใยเพียงเส้นเดียว หรือเส้นใยยาวกลุ่ม (Multifilament) ซึ่งจะมีเส้นใยมากกว่า 1 เส้นรวมอยู่ด้วยกันตลอดความยาว เส้นยาวที่ออกมาจากหัวฉีด (Spinnerets) จะมีลักษณะเรียบซึ่งมีลักษณะเรียบคล้ายเส้นใยไหม หากต้องการลักษณะเส้นใยที่หยักก็จะต้องนำไปผ่านกระบวนการทำหยัก (Crimp) ซึ่งเส้นใยที่ได้จะมีลักษณะคล้ายเส้นใยฝ้ายหรือขนสัตว์ ซึ่งส่วนมากเส้นใยที่ทำหยักมักจะนำไปตัดเพื่อทำเป็นเส้นใยสั้น

2.3.5 ขนาดเส้นใย

ขนาดของเส้นใยมีผลต่อสมรรถนะการใช้งานและสมบัติทางฟิสิกส์ (Hand Properties) เส้นใยที่มีขนาดใหญ่จะให้ความรู้สึกที่หยาบและแข็งของเนื้อผ้า แต่ในขณะเดียวกันก็ให้ความแข็งแรงมากกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยชนิดเดียวกันที่มีขนาดเล็กกว่า ผ้าที่ทำจากเส้นใยที่มีขนาดเล็กหรือมีความละเอียดก็จะให้ความนุ่มต่อสัมผัส และจัดเข้ารูป (Drape) ได้ง่ายกว่า

เส้นใยธรรมชาตินั้นมักมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ คุณภาพของเส้นใยธรรมชาติมักจะวัดจากความละเอียดของเส้นใย เส้นใยที่มีความละเอียดมากจะมีคุณภาพที่ดีกว่า การวัดความละเอียดมักวัดจากเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยในหน่วยของ ไมโครเมตร ซึ่งโดยทั่วไปขนาดของเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดมีดังตัวอย่างข้างล่างนี้

ตารางที่ 2.5 ขนาดของเส้นใยธรรมชาติ

ชนิดของเส้นใย	ขนาดของเส้นใย (ไมโครเมตร)
เส้นใยฝ้าย	16-20 ไมโครเมตร
ขนสัตว์ (แกะ)	10-50 ไมโครเมตร
ไหม	11-12 ไมโครเมตร
เส้นใยลินิน	12-16 ไมโครเมตร

สำหรับเส้นใยสังเคราะห์ที่ผลิตในอุตสาหกรรม ขนาดของเส้นใยจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น ขนาดของรูในหัวฉีด (Spinneret Holes) การดึงยึดขณะที่ปั่นเส้นใยและหลังการปั่นเส้นใย รวมไปถึงปริมาณและความเร็วของการอัดน้ำพลาสติกผ่านหัวฉีดในกระบวนการปั่นเส้นใย เส้นใยสังเคราะห์ที่ได้สามารถควบคุมความสม่ำเสมอได้ดีกว่าเส้นใยธรรมชาติ แต่ก็ยังมีส่วนที่ไม่สม่ำเสมอบ้างเนื่องจากความไม่คงที่ (Irregularity) ของกระบวนการผลิต หน่วยที่มักใช้วัดความละเอียดของเส้นใยสังเคราะห์คือดีเนียร์ (Denier) และ เท็กซ์ (Tex)

1) ดีเนียร์ (Denier) เป็นหน่วยการวัดขนาดของเส้นใย โดยเป็นน้ำหนักในหน่วยกรัมของเส้นใยที่มีความยาว 9,000 เมตร เส้นใยที่มีค่าดีเนียร์ต่ำจึงมีความละเอียดมากกว่า เส้นใยที่มีค่าดีเนียร์สูงเนื่องจากมีน้ำหนักน้อยกว่าในความยาวที่เท่ากัน

2) เท็กซ์ (Tex) เป็นหน่วยการวัดขนาดของเส้นใยคล้ายกับดีเนียร์ แต่เป็นน้ำหนักในหน่วยกรัมของเส้นใยที่มีความยาว 1,000 เมตร

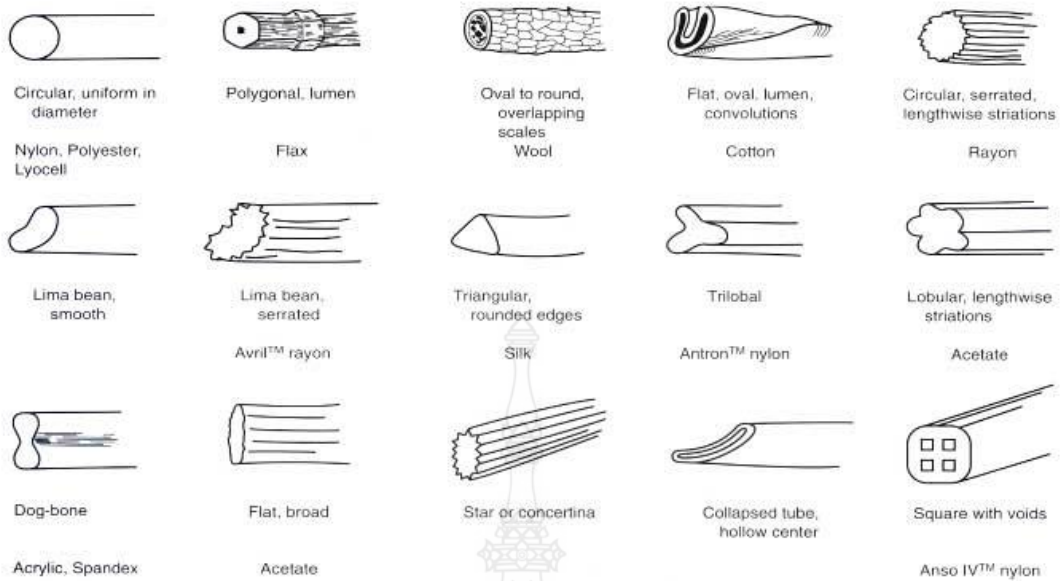
ดีเนียร์ต่อฟิลาเมนต์ (Denier Per Filament, DPF) เป็นค่าที่วัดความละเอียดของเส้นใยที่อยู่ในเส้นด้ายซึ่งมีจำนวนเส้นใยตั้งแต่ 2 ขึ้นไป ดังนั้นค่าดีเนียร์ต่อฟิลาเมนต์จึงเท่ากับดีเนียร์ของฟิลาเมนต์นั้นหารด้วยจำนวนฟิลาเมนต์ (หรือจำนวนเส้นใย) ทั้งหมด โดยทั่วไปเส้นใยที่ใช้สำหรับเสื้อผ้ามีขนาดอยู่ในช่วง 1 ถึง 7 ดีเนียร์ เส้นใยสำหรับทำพรมมีขนาดใหญ่อยู่ในช่วง 15 ถึง 24 ดีเนียร์ เส้นใยขนาดเท่ากันไม่ได้หมายความว่ามีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานชนิดเดียวกันได้ เส้นใยที่ใช้สำหรับเสื้อผ้ามักจะนุ่มและละเอียดเกินกว่าที่จะทนต่อแรงกดได้ดีเหมือนเส้นใยที่ใช้ทำพรม ในทางกลับกันเส้นใยที่ใช้ทำพรมก็ให้ความรู้สึกต่อผิวสัมผัสที่ละเอียดน้อยกว่าเส้นใยที่ใช้ทำเสื้อผ้า

2.3.6 องค์ประกอบทางเคมีและการเรียงตัวของโมเลกุล

เส้นใยเป็นพอลิเมอร์ที่มีการเรียงตัวของโมเลกุลแตกต่างกัน เมื่อแต่ละโมเลกุลมีการเรียงตัวอย่างไร้ทิศทาง (Random) ก็จะทำให้เส้นใยบริเวณนั้นมีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ส่วนในบริเวณที่โมเลกุลมีการเรียงซ้อนกันอย่างเป็นระเบียบก็จะมีความเป็นผลึก (Crystalline) เกิดขึ้น เส้นใยที่มีความเป็นผลึกมากก็จะมีความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยที่มีความเป็นผลึกน้อย อย่างไรก็ตามปริมาณความเป็นผลึกไม่ใช่ปัจจัยที่กำหนดความแข็งแรงของเส้นใย หากรวมไปถึงทิศทางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่เป็นระเบียบเหล่านี้ด้วย ถ้าโมเลกุลมีการจัดเรียงตัวอยู่ในทิศทางที่ขนานกับแกนตามความยาวของเส้นใย ก็จะช่วยให้เส้นใยมีความแข็งแรงมาก เนื่องจากโมเลกุลเรียงตัวในทิศทางเดียวกับแรงที่กระทำต่อเส้นใย ทำให้สามารถมีส่วนช่วยในการรับแรงเต็มที่ เรียกว่าเส้นใยนั้นมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่ดี (Oriented Fiber) ในอีกกรณีหนึ่งแม้เส้นใยจะมีบริเวณที่เป็นผลึกมาก แต่มีทิศทางการจัดเรียงตัวที่ไม่ขนานกับแกนตามยาวของเส้นใย โมเลกุลก็ไม่สามารถรับแรงในทิศทางการดึงเส้นใยได้เต็มที่ ทำให้มีความแข็งแรงน้อยกว่าในกรณีแรก ดังนั้น ในกระบวนการผลิตเส้นใยประดิษฐ์จึงต้องมีการดึงยืดเส้นใยที่ออกมาจากหัวฉีด เพื่อเพิ่มความเป็นผลึกโดยการจัดเรียงโมเลกุลให้เป็นระเบียบ และทำการจัดเรียงโมเลกุลที่เป็นระเบียบเหล่านี้ให้อยู่ในทิศทางเดียวกับแกนตามยาวของเส้นใย กระบวนการนี้เรียกว่าการดึงยืด (Drawing)

2.3.7 รูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใย

รูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใยมีผลต่อความเป็นมันวาว ลักษณะเนื้อผ้า และสมบัติต่อผิวสัมผัส เส้นใยมีรูปร่างหน้าตัดที่หลากหลายกัน เช่นวงกลม สามเหลี่ยม ทรงคล้ายกระดูก (Dog Bone) ทรงรูปถั่ว (Bean-Shaped) เป็นต้น



รูปที่ 2.5 รูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใย

ความแตกต่างของรูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใยธรรมชาติ เกิดจากลักษณะการสร้างเซลลูโลสในขณะที่พืชเติบโต เช่นในเส้นใยฝ้าย หรือการกระบวนการสร้างโปรตีนในสัตว์ เช่น ขนสัตว์ หรือรูปร่างของช่อง (Orifice) ในตัวไหมที่ทำหน้าที่ฉีดเส้นใยไหมออกมา สำหรับเส้นใยประดิษฐ์รูปร่างหน้าตัดของเส้นใยขึ้นอยู่กับรูปร่างของรูในหัวฉีด

2.3.8 เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers)

เส้นใยธรรมชาติที่นำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายคือเซลลูโลส ซึ่งได้จากส่วนต่างๆ ของพืช ได้แก่ เส้นใยหุ้มเมล็ดฝ้าย หนุ่น ไยมะพร้าว เส้นใยจากเปลือกไม้ เช่น ลิ้นิน ปอ กัญชา เส้นใยจากใบ เช่น สับปะรด กระจับปี่ เส้นใยจากฝ้ายเป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์ นำมาใช้ประโยชน์มากที่สุดถึง 50% ของเส้นใยทั้งหมด ฝ้าย เป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์ เส้นใยที่ได้จากสัตว์เป็นเส้นใยโปรตีน เช่น ขนแกะ ขนแพะ และเส้นใยจากรังไหม เส้นใยเหล่านี้มีสมบัติทั่วไปคล้ายโปรตีน

2.3.9 เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic Fiber)

กระบวนการผลิตเส้นใยสังเคราะห์แบ่งได้เป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือ การเตรียมโพลิเมอร์ตั้งต้น และการขึ้นรูปเป็นเส้นใย

1) การเตรียมโพลิเมอร์ตั้งต้นในการผลิตเส้นใยจากวัสดุธรรมชาติที่มีโครงสร้างโมเลกุลโพลิเมอร์อยู่แล้ว เช่นเส้นใยเรยอน ขั้นตอนการเตรียมโพลิเมอร์ตั้งต้นจะประกอบด้วยการย่อยวัตถุดิบ

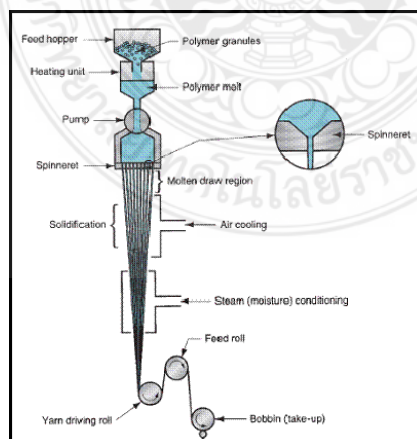
เช่น ไม้ ให้เป็นชิ้นเล็กๆ โดยใช้แรงกลและสารเคมี แล้วทำให้อยู่ในรูปของสารละลายเข้มข้น (Polymer Viscous) ส่วนในกรณีที่เป็นเส้นใยสังเคราะห์ ขั้นตอนการเตรียมโพลิเมอร์ก็จะเริ่มจากการสังเคราะห์โพลิเมอร์จากโมโนเมอร์ ซึ่งอาจเป็นแบบการรวมตัว (Addition Polymerization) หรือแบบกลั่น (Condensation Polymerization) ขึ้นอยู่กับชนิดของโมโนเมอร์ที่สังเคราะห์

2) การขึ้นรูปเป็นเส้นใย (Fiber Spinning) กระบวนการขึ้นรูปเป็นเส้นใยสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของโพลิเมอร์ตั้งต้น กระบวนการขึ้นรูปพื้นฐานมี 3 แบบคือ แบบปั่นแห้ง (Dry Spinning) แบบปั่นเปียก (Wet Spinning) และแบบปั่นหลอม (Melt Spinning)

(1) การผลิตเส้นใยแบบปั่นแห้ง (Dry Spinning) เริ่มต้นโดยการเตรียมโพลิเมอร์ให้อยู่ในรูปสารละลาย แล้วฉีดผ่านหัวฉีด (Spinnerets) ทำการระเหยตัวทำละลายส่วนที่เหลือในเส้นใยที่ฉีดออกมาโดยใช้ลมร้อน (Hot Air) เป่า จากนั้นทำการดึงยืดเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของเส้นใย ตัวอย่างเส้นใยที่ขึ้นรูปโดยวิธีนี้ได้แก่ พอลิอะซิเตด พอลิไทรอะซิเตด และพอลิอะไคริลิก

(2) การผลิตเส้นใยแบบปั่นเปียก (Wet Spinning) เริ่มจากการเตรียมสารละลายโพลิเมอร์แล้วฉีดผ่านหัวฉีด (Spinnerets) ที่จุ่มอยู่ในอ่างของสารละลายตกตะกอน (Coagulation Bath) เส้นใยที่ตกตะกอนออกมาจากสารละลาย จะถูกดึงยืดเพื่อเพิ่มความแข็งแรง แล้วทำให้แห้งโดยใช้ลมร้อนเป่า ตัวอย่างเส้นใยที่ผลิตโดยวิธีนี้คือ เรยอน

(3) การผลิตเส้นใยแบบปั่นหลอม (Melt Spinning) เริ่มจากการหลอมโพลิเมอร์ในเครื่องปั่นหลอม (Melt Extruder) แล้วทำการฉีดผ่านหัวฉีด เส้นใยที่ได้ที่เริ่มแข็งตัวจะถูกดึงยืดเพื่อเพิ่มความแข็งแรง เส้นใยสังเคราะห์ส่วนใหญ่ผลิตโดยวิธีนี้ เช่น ไนลอน พอลิเอสเทอร์ พอลิเอทิลีน เป็นต้น ดังรูปที่ 2.6



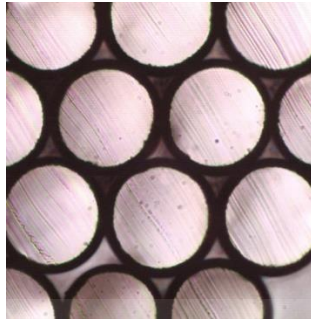
รูปที่ 2.6 Melt Spinning of Continuous Filaments [7]

2.3.10 เส้นใยสององค์ประกอบ (Bicomponent Fiber) [8]

เส้นใยสององค์ประกอบเกิดจากการออกแบบหัวฉีดเส้นใย (Spinneret) ให้พอลิเมอร์สองชนิดมาอยู่ร่วมกัน โดยที่พอลิเมอร์องค์ประกอบทั้งสองนี้จะถูกจัดวางในลักษณะ (Configuration) ที่แต่ละองค์ประกอบต่างก็มีบริเวณ (Domain) ที่แบ่งแยกกันอย่างชัดเจนภายในเส้นใย ลักษณะเช่นนี้แตกต่างจากเส้นใยของพอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend) ที่เกิดจากการผสมพอลิเมอร์สองชนิดเข้าด้วยกันแล้วจึงนำมาฉีดเป็นเส้นใย เส้นใยของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จึงมีพอลิเมอร์องค์ประกอบทั้งสองกระจายอยู่ด้วยกัน โดยทั่วในเนื้อเส้นใย

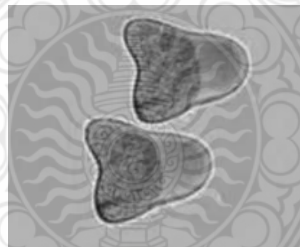
หลักการปั่นหลอมเส้นใยสององค์ประกอบยังคงเหมือนกับการปั่นหลอมเส้นใยทั่วไป กล่าวคือ ใช้เครื่องหลอมอัดรีด (Extruder) สำหรับหลอมพอลิเมอร์แล้วอัดรีดผ่านออกที่ปลายซึ่งต่อกับหัวฉีด แต่สำหรับการผลิตเส้นใยสององค์ประกอบจะใช้เครื่องหลอมอัดรีด 2 เครื่องสำหรับการแยกหลอมพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบตามอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์ที่ใช้ จากนั้นพอลิเมอร์หลอมทั้งสองจะถูกอัดรีดเข้าสู่ชั้นแรกที่อยู่ด้านบนสุดของหัวฉีดซึ่งมีรู 2 รูสำหรับรองรับพอลิเมอร์แต่ละองค์ประกอบก่อนที่จะถูกส่งผ่านไปชั้นถัดไปของหัวฉีด ทั้งนี้จะมีการออกแบบให้พอลิเมอร์หลอมทั้งสองชนิดไหลไปตามร่องตามการจัดเรียงในหัวฉีดนั้นๆ จนกระทั่งชั้นสุดท้ายที่พอลิเมอร์ทั้งสองถูกจัดเรียงและอัดรีดออกมาตามลักษณะเฉพาะของเส้นใยสององค์ประกอบ ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบดังนี้

1) แบบ Core/shell พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งทำหน้าที่เป็นแกนกลางในขณะที่พอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งโอบล้อมพอลิเมอร์แกนกลางไว้ จึงมีลักษณะคล้ายเปลือกที่หุ้มอยู่รอบแกนดังรูปที่ 2.7 เส้นใยที่ออกแบบส่วนใหญ่มีหน้าตัดเป็นวงกลม แต่ปัจจุบันได้มีการออกแบบหน้าตัดที่เป็นรูปอื่นด้วย เช่น สามเหลี่ยม เพื่อเพิ่มสมบัติด้านความมันวาว สมบัติพิเศษเชิงผิวของเส้นใยก็สามารถออกแบบลักษณะ Core/Shell ที่มีส่วนเปลือกเป็นพอลิเมอร์ที่ให้สมบัติพิเศษเชิงผิวตามที่ต้องการ ในขณะที่แกนกลางอาจเลือกใช้พอลิเมอร์ชนิดอื่นที่ราคาถูกลงกว่า หรือเป็นพอลิเมอร์ที่มาจากวัสดุหมุนเวียนก็ได้ ซึ่งจะทำให้สามารถผลิตเส้นใยที่มีสมบัติเชิงผิวตามต้องการแต่มีราคาที่ถูกลงได้ เช่นเดียวกันในกรณีที่ต้องการใช้สารเติมแต่งราคาแพงสำหรับสมบัติเชิงผิวของเส้นใยก็สามารถที่จะใช้สารเติมแต่งผสมกับพอลิเมอร์เฉพาะส่วนที่ทำหน้าที่เป็นเปลือก ในขณะที่ส่วนแกนเป็นเนื้อพอลิเมอร์เพียงอย่างเดียว ก็จะทำให้สามารถลดปริมาณการใช้สารเติมแต่งลงได้โดยที่ยังคงสมบัติที่ต้องการไว้เช่นเดิม



รูปที่ 2.7 เส้นใยสององค์ประกอบแบบ Core/Shell

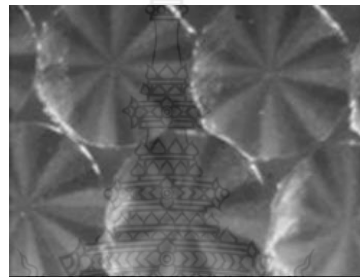
2) แบบ Side-by-Side พอลิเมอร์องค์ประกอบทั้งสองอยู่ติดกันแบบแบ่งข้างซ้ายขวา ดังรูปที่ 2.8 เส้นใยที่ได้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะหยักงอคล้ายสปริง (Self-Bulking) เนื่องจากพอลิเมอร์องค์ประกอบทั้งสองในเส้นใยที่ออกจากหัวฉีดเกิดการหดตัว (Shrinkage) ไม่เท่ากันเมื่อได้รับแรงดึงยืดในขณะที่กำลังเย็นตัวลง เป็นผลทำให้ด้านของพอลิเมอร์ที่มีการหดตัวมากกว่าดึงรั้งด้านของพอลิเมอร์ที่หดตัวน้อยกว่า เส้นใยจึงไม่เป็นเส้นตรง หากแต่มีการขดม้วนเป็นเกลียวคล้ายสปริงลักษณะเกลียวดังกล่าวนี้ถ้าเป็นในกรณีของเส้นใยองค์ประกอบเดียวจะต้องนำไปผ่านกระบวนการทำให้เกิดความหยักหรือเกลียว (crimping) ซึ่งเป็นขั้นตอนเพิ่มเติมที่ต้องใช้เครื่องมือและพลังงานเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.8 เส้นใยสององค์ประกอบแบบ Side-by-Side

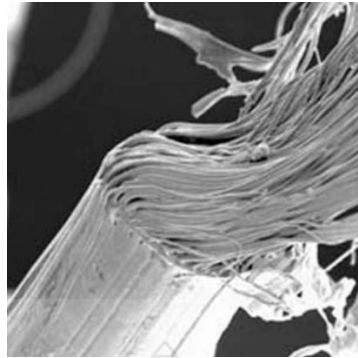
3) แบบ Segmented pie พอลิเมอร์องค์ประกอบทั้งสองมีการเรียงตัวสลับกันตามแนวรัศมีของเส้นใย ดังรูปที่ 2.9 เส้นใยลักษณะนี้ถูกออกแบบเพื่อผลิตเส้นใยที่มีขนาดเล็กละเอียด หรือเส้นใยไมโครไฟเบอร์ (Microfibers) ขนาดประมาณ 1-5 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่การผลิตเส้นใยองค์ประกอบเดียวด้วยเทคโนโลยีการปั่นหลอมเส้นใยที่มีอยู่โดยทั่วไปไม่สามารถทำได้ การออกแบบหัวฉีดแบบ Segmented pie ทำให้สามารถผลิตเส้นใยไมโครไฟเบอร์ได้โดยยังคงใช้เทคโนโลยีการปั่น

หลอมเดิมเส้นใยไมโครไฟเบอร์ที่มีขนาดเล็กละเอียดนี้มี สมบัติเด่นด้านพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น ตัวอย่างหนึ่งของ การใช้งานคือ ในวัสดุเช็ดถู (Wipes) ซึ่งผิวสัมผัสที่ เพิ่มมากขึ้นจะทำให้วัสดุที่ทำจากเส้นใยไมโครไฟเบอร์ นี้สามารถจับเก็บอนุภาคขนาดเล็กๆ ได้ดี การ ทำความสะอาดจึงมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผ้าไมโคร ไฟเบอร์และหนังสือพิมพ์ก็ เป็นอีกตัวอย่างหนึ่ง ของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเส้นใยไมโครไฟเบอร์ นอกจากนี้เรายังเห็นผลิตภัณฑ์เสื้อผ้าที่ทำจากเส้นใยไมโคร ไฟเบอร์พอลิเอสเตอร์หรือ โพลอน เนื่องจากเส้นใย ไมโครไฟเบอร์จะให้สัมผัสที่นุ่มมือและช่วยในการดูด ชับน้ำได้เร็วกว่าเส้นใยทั่วไป



รูปที่ 2.9 เส้นใยสององค์ประกอบแบบ Segmented pie

4) แบบ Island-in-Sea สำหรับเส้น ใยชนิดนี้พอลิเมอร์องค์ประกอบ แรกมีขนาดเล็กและกระจายอยู่เป็นจำนวนมากในเนื้อของพอลิเมอร์ที่สอง ทำให้คุณลักษณะคล้ายเกาะ เล็กๆ กลางทะเล เมื่อทำการละลายพอลิเมอร์ที่สองออกไปก็จะคงเหลือแต่เส้น ใยของพอลิเมอร์ แรกที่มีขนาดเล็กละเอียดมากในระดับนาโนเมตร จำนวนของเส้น ใยที่ได้ขึ้นอยู่กับหัวฉีดที่ออกแบบ ในการเลือกพอลิเมอร์มักเลือกพอลิเมอร์ที่สามารถละลายออกได้ง่ายด้วยตัวทำละลายหรือน้ำ ตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.10 เป็นพอลิเอสเตอร์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ซึ่งมีจำนวน 600 เส้น ของพอลิเอสเตอร์ต่อหนึ่งเส้น ใยที่ฉีดออกมา เมื่อทำการละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ออกด้วยน้ำร้อนก็จะทำให้ได้เส้น ใยพอลิเอสเตอร์ที่มีขนาดเล็กมาก ถึง 300 นาโนเมตร



รูปที่ 2.10 เส้นใยพอลิเอสเตอร์ใน Island-in-Sea

2.4 พรม

2.4.1 ส่วนประกอบของพรม

พรมส่วนใหญ่ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่ ขนพรม (Tuft) แผ่นรองพรมชั้นที่ 1 (Primary backing) สารช่วยยึดติด (Adhesive) และ แผ่นรองพรมชั้นที่ 2 (Secondary backing) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของพรม [9]

- 1) ขนพรม (Tuft) อาจเป็นวัสดุที่มาจากธรรมชาติหรือวัสดุสังเคราะห์ ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้ไนลอน พอลิเอสเตอร์และโพลีเอทิลีน
- 2) แผ่นรองพรมชั้นที่ 1 (Primary backing) เป็นผ้าทอหรือผ้าไม่ถักไม่ทอ ส่วนใหญ่ผลิตจากโพลีโพรพิลีน โดยส่วนของแผ่นรองพรมชั้นที่ 1 จะถูกยึดติดกับขนพรม
- 3) สารช่วยยึดติด (Adhesive) โดยทั่วไปที่ใช้คือ น้ำยาง หรือพลาสติก เป็นต้น ทำหน้าที่ยึดส่วนของขนพรมกับแผ่นรองพรมชั้นที่ 1 และแผ่นรองพรมชั้นที่ 2 ไว้ด้วยกัน

4) แผ่นรองพรหมชั้นที่ 2 (Secondary backing) โดยทั่วไปจะเป็นผ้าทอหรือผ้าไม่ถักไม่ทอ ที่ผลิตจากพอลิโพรพิลีน แผ่นรองพรหมชั้นที่ 2 จะถูกเคลือบติดกับแผ่นรองพรหมชั้นที่ 1 โดยใช้ตัวประสาน แผ่นรองพรหมชั้นที่ 2 ช่วยเพิ่มเสถียรภาพเกี่ยวกับขนาดให้กับพรหมและทำให้การเลื่อนง่ายขึ้น ในขณะที่พรหมถูกยึดระหว่างการติดตั้ง โดยแผ่นรองพรหมชั้นที่ 2 จะช่วยยืดอายุการใช้งานของพรหม และสามารถดูดซับเสียงได้

2.4.2 ประเภทของพรหม

พรหมเป็นวัสดุที่นิยมใช้ปูพื้น เพราะให้ความอบอุ่น สบาย นุ่มเท้า ให้สัมผัสที่ดี นอกจากนั้นยังมีหลายแบบ ทั้งลวดลาย สี และลายเส้นการทอที่แตกต่างกัน โดยปกติแล้วพรหมจะแบ่งตามลักษณะของเส้นใย ซึ่งแบ่งได้ 2 ประเภท

1) พรหมขนสัตว์ เป็นพรหมที่มีราคาสูง เนื่องจากทำมาจากธรรมชาติ มีความหนา นุ่ม แข็งแรง ป้องกันคราบและรอยเปื้อนได้ดี ให้สัมผัสที่นุ่มสบายที่สุดในบรรดาชนิดของพรหมทั้งหมด พรหมขนสัตว์ค่อนข้างทนทานต่อการใช้งานและมีหลายสีให้เลือก แต่ข้อเสียคืออาจก่อให้เกิดภูมิแพ้ ดูแลทำความสะอาดยาก สีจะซีดถ้าโดนแดดและสารเคมีที่ใช้ทำความสะอาด และเมื่อใช้ไปสักระยะเวลา จะมีแมลงต่างๆ มาอาศัยอยู่ ฉะนั้นจึงต้องหมั่นทำความสะอาดเป็นประจำ

2) พรหมสังเคราะห์ เป็นพรหมที่ได้รับความนิยมค่อนข้างมาก เพราะทำจากวัสดุสังเคราะห์ จึงมีความคงทนมากกว่าพรหมขนสัตว์ บางชนิดก็สามารถป้องกันรอยขีดข่วน กันน้ำและเชื้อราได้ มีราคาถูกกว่าพรหมขนสัตว์ ซึ่งสามารถแบ่งประเภทได้ตามลักษณะเส้นใยและวัสดุที่ใช้ทำ แต่คนทั่วไปมักเลือกซื้อพรหมจากลักษณะเส้นใยก็คือ พรหมขนตัด พรหมขด และพรหมขนยาว

(1) พรหมขนตัด คือ พรหมที่มีลักษณะปลายด้านบนของเส้นพรหมจะถูกตัดออกจากกัน มีความทนทานน้อยกว่าพรหมขนห้วง แต่ให้สัมผัสที่นุ่มสบายเท่ากับพรหมขนห้วงมาก นิยมใช้ปูในสถานที่ที่ต้องการดูดซับเสียง เช่น ห้องบอลรูม, ห้องประชุม, ห้องอัดเสียง เป็นต้น

(2) พรหมขด หรือ พรหมขนห้วง จะมีลักษณะปลายของเส้นพรหมจะยึดติดกับผืนผ้าไว้ทั้งสองข้าง ซึ่งพรหมชนิดนี้ก็จะมีความหนาแน่นของเส้นใยมากกว่า ทำให้แข็งแรง คงทน และใช้ได้ยาวนาน มีทั้งที่ทำจากเส้นใยผ้าและเส้นใยพลาสติก เช่น พรหมปูในรถยนต์

(3) พรหมขนยาว มีลักษณะปลายขนยาวเหมือนพรหมขนสัตว์ เป็นพรหมที่มีขนาดใหญ่ไม่ใหญ่เพราะใช้ปูตกแต่งเฉพาะพื้นที่ นิยมใช้ในโซนห้องรับแขก หรือห้องนอน

2.4.3 วัสดุที่นำมาใช้ทำพรม [10]

1) ฝ้าย (Cotton) เป็นวัสดุธรรมชาติที่ได้มาจากผลฝ้ายที่มีเมล็ดข้างใน ซึ่งพอแตกออก เส้นใยจะฟูเป็นก้อนเล็กๆ รวมกลุ่มอยู่ด้วยกัน ด้วยความที่เส้นใยมีความนุ่มเบาสบายจึงนิยมนำไปผลิต เครื่องนุ่งห่ม เครื่องนอน และพรม มีข้อดีตรงที่ดูแลรักษาง่าย เพราะสามารถซักในเครื่องซักผ้าปกติ ที่สำคัญยังทนความร้อนได้ดี แต่เมื่อเปียกจะมีน้ำหนักมากขึ้นและเส้นใยจะหดตัว จึงควรจับพรมทั้งผืน ยีออกหลังซักเสร็จ

2) โยมะพร้าว เป็นวัสดุธรรมชาติที่ได้จากการแยกเส้นใยออกมาจากเปลือกชั้นนอกของ ลูกมะพร้าวหรือกาบมะพร้าว โยมะพร้าวมีความหยาบ แข็งและกันน้ำได้ พรมโยมะพร้าวจึงมีความ ทนทานและเหมาะกับการใช้งานในพื้นที่ๆ กรองฝุ่นหรือคราบสกปรกชั้นที่ 1 ได้แก่หน้าประตูบ้าน สำหรับดักฝุ่นจากรองเท้าก่อนเข้ามาในบ้าน

3) ป่านสรนารายณ์ เป็นวัสดุธรรมชาติที่แข็งแรง ได้จากใบแข็งของพืชตระกูลอะกาเว คุณสมบัติโดดเด่นคือเส้นใยมีความมันเงา และทนทานสูง จึงมักใช้ทำพรมผืนใหญ่ที่เน้นลดทลาย สวยงาม ส่วนใหญ่จะนิยมนำไปใช้ใน โถงอาคารสาธารณะ แต่ด้วยความที่เส้นใยดูดซับความชื้นได้ดี จึงทำให้พบปัญหาการหดตัว จึงไม่ควรซักป่านสรนารายณ์แต่ทำความสะอาดได้ด้วยการแปรงสิ่ง สกปรกออก นำไปตากแดด หรือดูดฝุ่นออก

4) อะคลิลิก พอลิพรอพิลีน และไนลอนเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ หลากหลาย โดยเส้นใยประเภทนี้นิยมนำไปทอร่วมกับเส้นใยธรรมชาติ อาทิเส้นใยขนสัตว์ ข้อดีอยู่ที่ ความแน่นแต่ยืดหยุ่น แข็งแรงทนทาน และทำความสะอาดง่าย ทั้งยังซึมซับความชื้นได้น้อย

พรมที่ใช้มีวัสดุประสงค์ที่หลากหลายได้แก่

- 1) ป้องกันความเย็นจากพื้นกระเบื้องและพื้นคอนกรีต ทำให้ห้องพักที่สะดวกสบายมากขึ้น
- 2) ใช้แบ่งสัดส่วนการใช้งาน เช่น เป็นบริเวณสำหรับนั่งเล่นของเด็ก หรือเป็นพรมสำหรับสวดมนต์
- 3) ลดเสียงจากการเดิน (โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอาคารอพาร์ทเมนท์)
- 4) สำหรับการตกแต่งห้อง เนื่องจากพรมสามารถย้อมสีของเส้นใยให้มีความที่แตกต่างกันได้

2.5 วัสดุแม่สี [11]

เม็ดพลาสติกแม่สีเกิดจากการกระบวนการนำเม็ดพลาสติกมาผสมกับสี (Colorant) หรือสารเติมแต่ง (Additive) หรือฟิลเลอร์ (Filler) ซึ่งผ่านการวิเคราะห์และคำนวณสัดส่วนที่เหมาะสม นำมาผ่านกระบวนการหลอมและรีดเป็นเส้นพลาสติก จากนั้นจึงตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ทำเป็นเม็ดแม่สี

เบตซ์ที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ ตามที่ลูกค้าต้องการ ทั้งในเรื่องของ สี คุณลักษณะ และคุณสมบัติ ซึ่งในการใช้งานลูกค้าจะต้องนำมาสเตอร์เบตซ์ ไปผสมกับเม็ดพลาสติกตามสัดส่วนที่กำหนดก่อนแล้วจึงนำไปใช้ในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ เช่น การอัดเป่าฟิล์ม (Extrusion Blow Film), การรีดเข้าแม่แบบ (Extrusion), การเป่าเข้าแม่พิมพ์ (Blow Molding) และการฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Injection Molding) เป็นต้น



ปัจจุบัน มาสเตอร์เบตซ์ที่บริษัทผลิตและจำหน่ายสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มได้ดังนี้

1) มาสเตอร์เบตซ์ประเภทสีขาวและสีดำ (White Master Batch and Black Master Batch) มาสเตอร์เบตซ์ประเภทสีขาวและสีดำ หรือเม็ดพลาสติกสีขาวและสีดำแบบเข้มข้น ใช้เพื่อให้สีขาวและสีดำในผลิตภัณฑ์พลาสติก กระบวนการผลิตมาสเตอร์เบตซ์ประเภทนี้เกิดจากการนำเม็ดพลาสติกผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์หรือคาร์บอนแบล็ก ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดสีขาวหรือสีดำตามลำดับ โดยอาจมีการเพิ่มสารเติมแต่งเล็กน้อย เพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติบางอย่างให้แก่เม็ดพลาสติก

2) มาสเตอร์เบตซ์ประเภทสี (Colour Master Batch) มาสเตอร์เบตซ์ประเภทสี หรือเม็ดพลาสติกสีแบบเข้มข้น ใช้เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกมีสีต่าง ๆ ตามต้องการ กระบวนการผลิตมาสเตอร์เบตซ์ประเภทนี้เกิดจากการนำเม็ดพลาสติกผสมกับสี (Colourant) ในโทนสีต่าง ๆ เช่น แดง, เหลือง, เขียว, ชมพู, ฟ้า, ส้ม, เงิน, ทอง, มุก, แดงมุก, เหลืองทอง, สีสะท้อนแสง, สีเปล่งแสง เป็นต้น และอาจมีการเพิ่มสารเติมแต่งเล็กน้อย เพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติบางอย่างให้แก่เม็ดพลาสติกเช่นเดียวกับมาสเตอร์เบตซ์ประเภทสีขาวและสีดำ

3) มาสเตอร์เบตซ์ประเภทสารเติมแต่ง (Additive Master Batch) มาสเตอร์เบตซ์ประเภทสารเติมแต่ง ใช้เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกมีคุณสมบัติต่าง ๆ ตามที่ต้องการ เช่น ป้องกัน

แบคทีเรีย, ทนต่อแสงอาทิตย์และความร้อน, ลดการเกาะของไอน้ำ, ลดไฟฟ้าสถิตย์ที่บรรจุภัณฑ์เพื่อลดการเกาะของฝุ่น หรือลดความลื่นของพื้นผิวสัมผัส เป็นต้น กระบวนการผลิตมาสเตอร์แบตช์ประเภทนี้เกิดจากการนำเม็ดพลาสติกผสมกับสารเติมแต่ง (Additive) ต่าง ๆ แล้วผ่านกรรมวิธีผลิตเป็นมาสเตอร์แบตช์เช่นเดียวกับมาสเตอร์แบตช์ประเภทอื่น

4) มาสเตอร์แบตช์ประเภทฟิลเลอร์ (Filler Master Batch) มาสเตอร์แบตช์ประเภทฟิลเลอร์ ใช้เพื่อเป็นวัสดุทดแทนเม็ดพลาสติกที่ใช้เป็นเนื้อพลาสติกในการแปรรูปผลิตภัณฑ์พลาสติก โดยที่ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้ยังคงมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ กระบวนการผลิตมาสเตอร์แบตช์ประเภทฟิลเลอร์เกิดจากการนำเม็ดพลาสติกผสมกับฟิลเลอร์ประเภทต่าง ๆ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต, ทัลคัม หรือแบเรียม เป็นต้น นำมาผ่านกระบวนการหลอมและตัดเป็นเม็ดมาสเตอร์แบตช์ ซึ่งฟิลเลอร์ที่ใส่ลงไปนี้จะทำหน้าที่เสมือนวัสดุทดแทนเม็ดพลาสติก ส่งผลให้ปริมาณเม็ดพลาสติกที่ใช้เป็นเนื้อพลาสติกของผลิตภัณฑ์พลาสติกลดลง ซึ่งเป็นการช่วยประหยัดต้นทุนการผลิตเนื่องจากมีฟิลเลอร์มีราคาถูกกว่าเม็ดพลาสติก นอกจากนี้ มาสเตอร์แบตช์ประเภทฟิลเลอร์ยังถูกนำไปใช้เพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์พลาสติก และเพื่อวัตถุประสงค์ทางสิ่งแวดล้อมอีกด้วย เนื่องจากการใช้ฟิลเลอร์ซึ่งเป็นสารธรรมชาติเป็นการช่วยลดปริมาณการใช้เม็ดพลาสติกซึ่งย่อยสลายได้ยาก ปัจจุบันมาสเตอร์แบตช์ประเภทฟิลเลอร์ของบริษัทจะดำเนินการผลิตโดยบริษัทย่อย โดยมาสเตอร์แบตช์ของบริษัทสามารถแบ่งออกตามระดับชั้นความละเอียดที่แตกต่างกันหลายระดับ เพื่อรองรับความต้องการใช้งานที่แตกต่างกันของลูกค้า ซึ่งระดับความละเอียดยิ่งมาก ความเรียบเนียนของผิวเนื้อพลาสติกยิ่งสูง และยิ่งใช้ฟิลเลอร์เป็นส่วนผสมในปริมาณมาก ยิ่งทำให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกมีความแข็งแรงและย่อยสลายได้ง่ายขึ้น

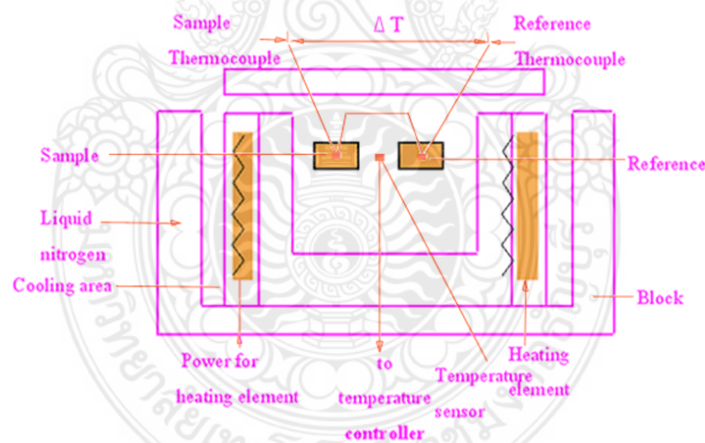
การใช้วัตถุดิบในรูปของมาสเตอร์แบตช์หรือเม็ดพลาสติกแบบเข้มข้นในการผลิตนั้น เป็นการอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้ประกอบการแปรรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกในการผลิต เนื่องจากช่วยประหยัดเวลาและต้นทุนในการค้นคว้าวิจัยสูตรหรือส่วนผสมของวัตถุดิบที่จะนำมาใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกนั้นมีอยู่มากมายหลายประเภท การเลือกประเภทวัตถุดิบและการคำนวณสัดส่วนการใช้วัตถุดิบประเภทต่าง ๆ นั้น ต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในคุณสมบัติ หน้าที่ และปริมาณที่เหมาะสมของเม็ดพลาสติกและสารเคมีประเภทต่าง ๆ เป็นอย่างดี

เพื่อที่จะทำให้สูตรผสมวัตถุดิบที่ได้นั้น สามารถนำไปใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

2.6 สมบัติทางความร้อน

2.6.1 ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry, DSC) [12]

เป็นเครื่องที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบวัสดุโดยการวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การหลอมเหลว การเปลี่ยนสถานะ การเปลี่ยนรูปผลึก การเกิดปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น โดยที่พื้นที่ใต้กราฟที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงความร้อนของตัวอย่างในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานอะลูมิเนียมที่อยู่ภายในเตาที่ควบคุมอุณหภูมิได้ โดยภายในเตาจะมีสารอ้างอิงซึ่งเป็นจานอะลูมิเนียมเปล่า เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับตัวอย่างภายใต้สภาวะเดียวกัน



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบหลักของเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลลอริมิเตอร์

ความร้อนที่ให้สารตัวอย่าง (Heat Flow) มีค่าสอดคล้องกับพลังงานที่ให้สารตัวอย่าง และถูกวัดในหน่วยมิลลิวัตต์ (Milliwatts, mW) เมื่อนำค่าพลังงานมาคูณด้วยเวลา ผลลัพธ์ที่ได้คือ ปริมาณพลังงานที่ถูกแสดงในหน่วย มิลลิวัตต์วินาที (mW.s) หรือ มิลลิจูลล์ (mJ) พลังงานที่ให้สาร

ตัวอย่างมีค่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (Enthalpy) ของสารตัวอย่าง เมื่อสารตัวอย่างดูดพลังงาน เราเรียกว่า เอนทัลปี (Enthalpy) มีการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน (Endothermic) และเมื่อสารตัวอย่างคายพลังงาน เราเรียกว่า เอนทัลปี (Enthalpy) มีการเปลี่ยนแปลงแบบคายความร้อน (Exothermic) เมื่อสารตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การหลอมเหลว (Melting Furnace) ต้องให้ความร้อนแพนตัวอย่าง (Sample Pan) มากกว่าที่ให้แพนอ้างอิง (Reference Pan) เพื่อที่จะคุมอุณหภูมิของแพนตัวอย่างและแพนอ้างอิง ให้เท่ากัน ความร้อนจะถูกส่งผ่านไปยังแพนตัวอย่างมากกว่าหรือน้อยกว่าที่ถูกส่งผ่านไปยังแพนอ้างอิงนั้น ขึ้นอยู่กับว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบ Exothermic หรือแบบ Endothermic

โดยทั่วไป Differential Scanning Calorimetry เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ตั้งแต่ในอุตสาหกรรมเคมี พลาสติก อิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ อากาศยาน ไปจนถึงอาหารและยา โดยถูกนำไปประยุกต์ใช้ ทั้งสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์และสำหรับงานวิจัย ตัวอย่างของข้อมูลที่สามารถวัดได้จากการใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimetry คือ จุดหลอมเหลว (Melting Point) อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, Tg) ความเสถียรต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Stability) จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา (Reaction Kinetics) หรือ ความบริสุทธิ์ (Purity) และการคำนวณร้อยละความเป็นผลึก (Percent Crystallinity) ดังสมการที่ 2.7

$$\%X_c = (\Delta H_m / \Delta H_m^0) \times 100 \quad (2.7)$$

ΔH_m แทน เอนทัลปีของการหลอม

ΔH_m^0 แทน เอนทัลปีการหลอมของพอลิเมอร์ที่ปริมาณผลึก 100 เปอร์เซ็นต์

2.7 สมบัติทางกายภาพ

2.7.1 กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสง (Optical Microscope, OM) [13]

กล้องจุลทรรศน์คือเครื่องมือที่ขยายภาพ สิ่งที่มีขนาดเล็กที่ไม่สามารถเห็นด้วยตาเปล่าได้ ทำให้เห็นรายละเอียดมากขึ้นกว่าที่ตาเปล่าจะมองเห็นได้ กล้องจุลทรรศน์แบ่งเป็นชนิด ได้แก่ ใช้เลนส์ 1 อัน (One Lens) คือแว่นขยาย (Magnifying Lens) และ ใช้เลนส์หลายอัน (Multiple Lens) เป็นเครื่องมือที่ใช้ขยายวัตถุหรือเนื้อเยื่อที่มีขนาดเล็ก เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในเซลล์ให้ละเอียดมากยิ่งขึ้น

Optical Microscope เป็น Microscope รูปแบบหนึ่งที่ใช้แสงเป็นตัวช่วยในการทำให้มองเห็นภาพ โดยแสงจะวิ่งผ่านระบบเลนส์ต่างๆ และมีการส่งไปที่วัตถุ ก่อนที่แสงผ่านเข้าสู่สายตาเรา ซึ่งแสงที่อยู่ในระบบที่สะท้อนกลับเข้าสู่สายตาเราจะทำให้เราเห็นภาพได้โดยการมองผ่านเลนส์ Eyepiece

ความละเอียด (Resolution) คือความสามารถของเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์ในการแยกจุดสองจุด ซึ่งอยู่ใกล้กันที่สุดให้เห็นแยกออกเป็นสองจุด เรียกความสามารถนี้ว่า “Two Points of Discrimination” ซึ่งหาได้จากช่องว่างของเซลล์รับแสงในชั้นขึ้นอยู่กับ ระบบของแสง (Optical System) ความยาวของคลื่นแสง (Wavelength of The Light Source) ที่ผ่านเลนส์ และความสามารถของเลนส์ที่อยู่ใกล้วัตถุ (Numerical Aperture)

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นอีก เช่น ความหนาของตัวอย่าง (Specimen Thickness) คุณภาพของการกำหนดเนื้อเยื่อ (Quality of Fixation) และความเข้มของการย้อมสี (Staining Intensity) ระบบของกล้องจุลทรรศน์โดยทั่วไปแบ่งออกได้ดังนี้

1) ระบบส่องสว่าง (Illuminating System) เป็นระบบผลิตลำแสงให้พุ่งตรงไปตกยังตัวอย่างประกอบด้วย

(1) แหล่งผลิตลำแสง ได้แก่ หลอดไฟฟ้าและดวงอาทิตย์ แหล่งผลิตลำอิเล็กตรอน คือ เส้นทังสเตนที่ใช้กำลังไฟฟ้าแรงสูงผ่าน

(2) คอนเดนเซอร์เลนส์ (Condenser Lens) คือ เลนส์ที่ช่วยรวบรวมลำแสงที่กระจายออกจากแหล่งผลิต ให้เป็นลำพุ่งตรงไปตกที่ตัวอย่าง เพื่อให้เกิดความเข้มของแสงมากที่สุด

(3) ไอริส ไดอะแฟรม (Iris Diaphragm) เพื่อควบคุมคุณภาพของแสงที่ผ่านทะลุตัวอย่าง

2) ระบบการถ่ายภาพ (Imaging System) คือระบบที่ประกอบด้วยเลนส์ชนิดต่าง ๆ มาประกอบกันเพื่อรวบรวมลำแสงที่ผ่านออกจากชิ้นเนื้อนั้น เกิดเป็นภาพขยายใหญ่มากขึ้นตามลำดับ

3) ระบบบันทึกภาพ (Image Recording System) คือระบบที่บันทึกภาพที่ขยายสุดท้ายที่เกิดขึ้น

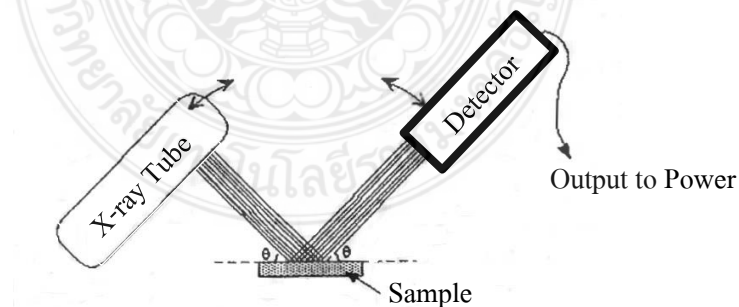
2.7.2 ทดสอบการเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย (Dynamic Modulus Tester) [14]

DMT PPM-5R (Sonic Modulus Tester) เป็นเครื่องมือในการวัดความเร็วของเสียงที่วิ่งผ่านวัสดุเป็นจังหวะๆ โดยให้เสียงผ่านวัสดุที่บางหรือเล็ก เช่น เส้นใย ฟิล์ม กระดาษ และแผ่นเว็บ ซึ่งความเร็วที่ผ่านนั้น ก็สะท้อนถึงลักษณะโครงสร้างและการจัดเรียงองค์ประกอบของวัสดุนั้น โดยความเร็วเสียงเป็นพลังงานเชิงกลอย่างหนึ่ง โดยการวัดความเร็วเสียงที่แม่นยำก็จะทราบถึงโครงสร้างทางกายภาพและเคมีของวัสดุนั้นๆ ได้ ความเร็วเสียงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรากที่สองของโมดูลัสซึ่งเครื่องฯ จะวัดค่า Dynamic Modulus of Elasticity ของวัสดุและค่าที่ได้นั้นจะสัมพันธ์กับการเรียงตัวของโมเลกุลในเส้นใยหรือฟิล์ม การเรียงตัวของเส้นใยในแผ่นเว็บ องศาการโค้งตัวของเส้นใยที่เส้นด้ายที่มีเกลียว และวัสดุที่มีสมบัติที่มีสมบัติไม่เท่ากันในแต่ละด้าน

ผลการทดสอบบ่งบอกได้ถึง สมบัติด้านความแข็งแรง ความแข็งตึง อีลาสติซิตีความสามารถในการยืด ความยืดหยุ่น ความล้าในวัสดุ ในกรณีที่เป็นวัสดุความชื้นก็สามารถวัดอัตราการซึมผ่านของของเหลว อัตราการทำแห้ง อัตราการเปื่อย และปริมาณความชื้นได้

2.7.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) [15]

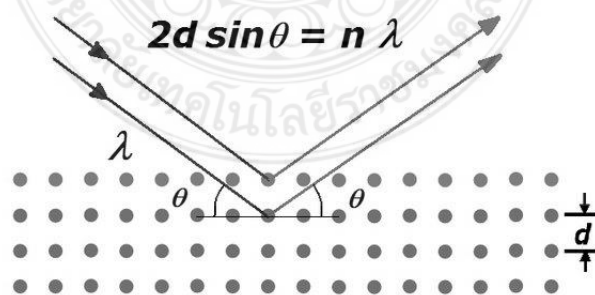
เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุพื้นฐานชนิดการวิเคราะห์แบบไม่ทำลาย (Non-destructive Analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (Crystal Structure) การจัดเรียงตัวของโมเลกุลในสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และปริมาณ (Quantitative) โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และความรู้เกี่ยวกับระบบโครงสร้างผลึก (Crystallography) เครื่องมือชนิดนี้มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพการผลิตสำหรับการตรวจสอบสมบัติวัสดุดิบและผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ



รูปที่ 2.13 หลักการทำงานของเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การทำงานของเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยเริ่มจากหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าแรงดันสูง (High-tension Transformer) ทำหน้าที่ป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขั้วแคโทด ทำให้เส้นลวดฟิลาเมนต์ร้อนขึ้นและก่อให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากเส้นลวด ดังนั้น ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดเพิ่มสูงขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนเป้า (Target) ที่ขั้วแอโนดมีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาผ่านทางหน้าต่างที่ทำด้วยเบริลเลียม (Beryllium Window) หลอดรังสีเอกซ์ มีหลายชนิด เรืองชื่อตามชนิดของโลหะที่ใช้ทำแอโนด ซึ่งจะทำให้รังสีเอกซ์มีความยาวคลื่นต่างกัน ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ แต่โดยทั่วไปนิยมใช้ทองแดง (Copper) ซึ่งให้ค่าความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ 1.542 อังสตรอม จะมีทั้ง K_{α} และ K_{β} สำหรับการวิเคราะห์นี้จำเป็นต้องใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic X-ray) ดังนั้นจึงต้องใช้แผ่นกรองเบต้าเพื่อกำจัด K_{β} เพื่อให้เหลือเพียง K_{α} อย่างเดียว การเลือกแผ่นกรองเบต้าควรเลือกให้เหมาะสมกับชนิดของหลอดรังสีเอกซ์ โดยดูจากค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับมวล (Mass Absorption Coefficient) จากนั้นรังสีเอกซ์ K_{α} จะถูกบีบให้เป็นลำแคบลงโดยไดเวอร์เจนสลิต ลำรังสีเอกซ์ที่ผ่านไดเวอร์เจนสลิตจะตกกระทบลงบนตัวอย่างซึ่งติดไว้กับแกนของโกนิโอมิเตอร์ (Goniometer) รังสีที่สะท้อนกลับจากสารตัวอย่างจะผ่านไปยังรีซีฟิงสลิตและเข้าไปยังหน่วยระบบสัญญาณเพื่อแปลงสัญญาณออกมาในรูปดิฟแฟรคโตแกรม (Diffractogram) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม 2θ และค่าความเข้มของแสง

เมื่อลำรังสีเอกซ์ตกกระทบผิวหน้าของผลึกโดยทำมุม θ บางส่วนของรังสีเอกซ์จะเกิดการกระเจิงด้วยชั้นของอะตอมที่ผิวหน้า อีกส่วนหนึ่งของลำรังสีเอกซ์จะผ่านไปยังชั้นที่สองของอะตอมซึ่งบางส่วนจะเกิดจากการกระเจิง และส่วนที่เหลือจะผ่านไปยังชั้นที่สามของอะตอมแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ถ้าอะตอมผลึกจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและมีระยะห่างระหว่างอะตอมเท่าๆ กัน ลำรังสีเอกซ์ผ่านเข้าไปในแต่ละชั้นของอะตอมจะเกิดการเลี้ยวเบนเป็นลำขนานกัน การเลี้ยวเบนนี้ก็มีลักษณะคล้ายกับการเลี้ยวเบนแบบเกรตติ้งแบบสะท้อน (Reflection Grating) สิ่งสำคัญในการเกิดการเลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์ขึ้นอยู่กับภาวะสองประการ คือ

1) รังสีที่ตกกระทบ รังสีเลี้ยวเบน และเส้นตั้งฉากกับผิวหน้าจะต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน

2) ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอมควรมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
จากรูปที่ 2.14 จะพบว่ารังสีขนานตกลงบนผลึกโดยมุม θ กับระนาบของผลึก การเลี้ยวเบนของรังสีเกิดขึ้นเมื่อระยะทางที่รังสีเอกซ์ที่เดินทางต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นจะได้ว่า

$$n \lambda = 2d \sin \theta \quad (2.8)$$

λ แทน ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (นาโนเมตร)

θ แทน มุมของแบรกก์ (องศา)

d แทน ระยะระหว่างระนาบของผลึก (นาโนเมตร)

โดยกฎข้อนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ถ้ารังสีเอกซ์ตกกระทบมีความยาวคลื่นคงที่แล้ว มุมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นกับระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

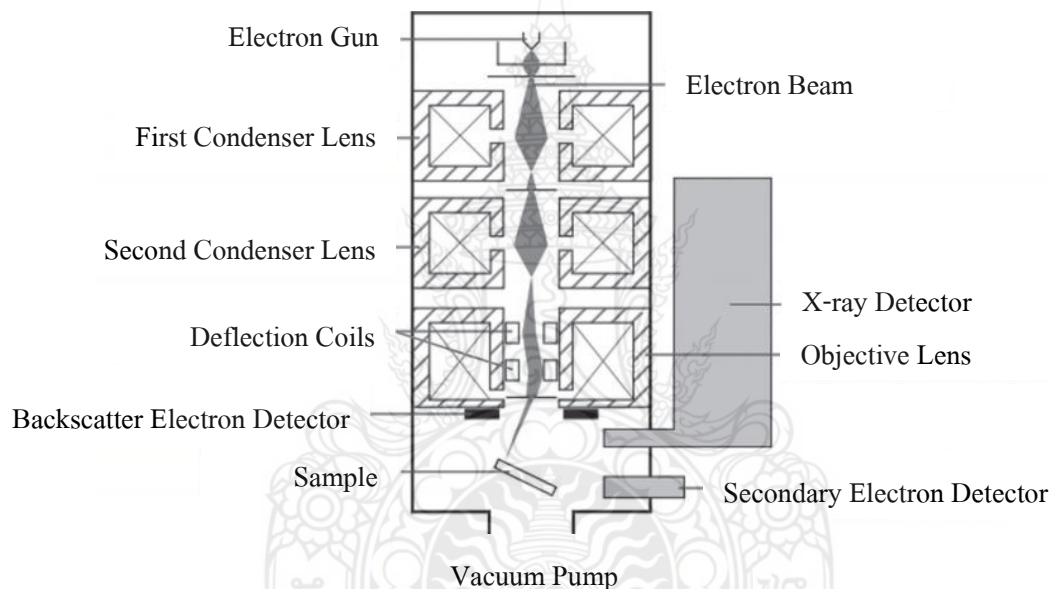
เครื่อง X-ray Diffractometer สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็งหรือตัวอย่างที่เป็นผงได้ ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบผิวจะต้องเรียบ ส่วนในกรณีที่ตัวอย่างที่เป็นผงจะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 325 เมช หรือ ประมาณ 40 ไมโครเมตร จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดี โดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้ง จะอยู่ประมาณ 1-2 กรัมในกรณีที่ตัวอย่างเป็นก้อน ต้องมีขนาดกว้างยาว ไม่เกิน 10 เซนติเมตร ทั้งนี้ พื้นที่ที่จะทำการทดสอบ จะเป็นเพียงบริเวณเล็กๆ ประมาณ 10 มิลลิเมตร เท่านั้น กรณีที่ตัวอย่าง มีปริมาณน้อยมากๆ ก็อาจทำการทดสอบได้ โดยทางห้องปฏิบัติการจะใช้แผ่น Zero Background ในการวางตัวอย่าง เพื่อทำการทดสอบ

2.7.4 การทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยา (Scanning Electronic Microscopy, SEM) [16]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope) เกิดจากการ คิดค้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการมองเห็นวัตถุให้ดีกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสง กล่าวคือ กล้องชนิดนี้สามารถแยกแยะรายละเอียดของภาพได้มากกว่าเดิม โดยใช้ อิเล็กตรอนที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสง

และใช้เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแทน เลนส์กระจก รวมถึงมีอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากอันตรกิริยาของ ลำอิเล็กตรอนกับวัตถุ จากนั้นจึงใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณอิเล็กตรอนเป็นภาพแสดง บนจอรับภาพ ผลที่ได้คือ ภาพของวัตถุที่กำลังขยายสูง และสามารถแยกแยะรายละเอียดของภาพได้ถึง 100 นาโนเมตร

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ใช้ศึกษารายละเอียดของโครงสร้างภายนอกหรือผิวของตัวอย่าง ภาพที่ได้จาก กล้อง SEM เป็นภาพเสมือน 3 มิติที่มีระยะชัดลึกสูง ทำให้สามารถระบุลักษณะของ พื้นผิวของชิ้นงานได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [17]

1) ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) เป็นแหล่ง กำเนิดอิเล็กตรอน เรียกว่า แคโทด (Cathode) เนื่องจากเป็นขั้วลบ วัสดุที่ใช้ทำต้องมีเสถียรภาพสูง แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบ่งประเภทตามกลไก การกำเนิดอิเล็กตรอนได้ดังนี้

(1) การปล่อยเนื่องจากความร้อน (Thermionic Emission) ได้แก่ ใยหลอดทังสเตน (Tungsten Filament) ผลึกแลนทานัมเฮกซะโบไรด์ (Lanthanum Hexaboride Crystal Source)

(2) การปล่อยเนื่องจากสนามไฟฟ้า (Field Emission) ได้แก่ โคลด์ฟิลด์อิมิสชัน (Cold Field Emission Source)

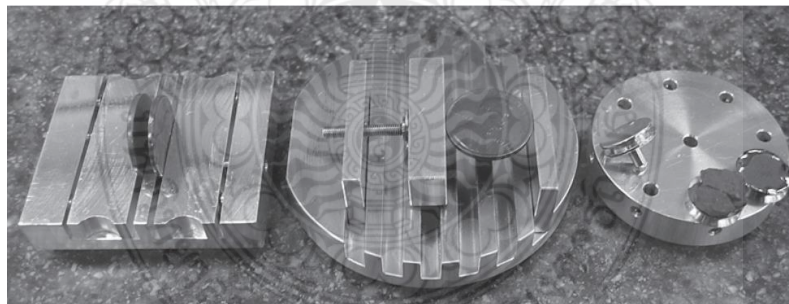
2) เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lens) มีหน้าที่ลดขนาดของลำอิเล็กตรอนที่เกิดจาก แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 50 ไมโครเมตรให้เหลือประมาณ 5 นาโนเมตร การลดขนาดลำอิเล็กตรอนจะใช้เลนส์ 2 หรือ 3 ชุด ใน ระบบ 3 ชุดจะประกอบด้วย

(1) เลนส์ 1 คือ เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser Lens) มีหน้าที่ควบคุมกระแสของลำอิเล็กตรอน

(2) เลนส์ 2 คือ เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser Lens) มีหน้าที่ควบคุมเส้นผ่านศูนย์กลางของลำอิเล็กตรอน

(3) เลนส์ 3 คือ เลนส์วัตถุ (Objective Lens) มีหน้าที่ โฟกัสลำอิเล็กตรอนลงบนชิ้นงาน

3) แท่นวางตัวอย่าง (Sample Stage) แท่น วางตัวอย่างสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะมีหลากหลายรูปแบบและ หลายขนาด ขึ้นกับยี่ห้อและรุ่นของเครื่อง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยทั่วไปแท่นวางตัวอย่างจะสามารถเคลื่อนที่ได้ 5 แนว ได้แก่ แนวแกน X,Y, Z, เอียง และ สามารถหมุนทำมุม ได้ถึง 360 องศา



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างแท่นวางตัวอย่าง (Sample Stage) แบบต่างๆ

4) อุปกรณ์ตรวจจับ (Detector) กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทุกเครื่องต้องมีอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ในขณะที่บางเครื่อง อาจมีอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electron, BSE) และอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์

(Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) โดยประสิทธิภาพของเครื่องมือ จะขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ

เครื่องทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้ในการตรวจสอบผิวหน้าของชิ้นงานด้วยความละเอียดสูง เมื่ออิเล็กตรอนซึ่งมีความเร็วสูงพุ่งเข้าชนผิวของแข็งภายใต้สุญญากาศ อิเล็กตรอนเกิดการสะท้อนออกมาเรียกว่า อิเล็กตรอนปฐมภูมิซึ่งเกิดจากการกระเจิงกลับ (Back Scattered Primary Electron) อิเล็กตรอนนี้มีทิศทางเบนไปจากทิศทางที่พุ่งเข้าชนเนื่องจากการปฏิสัมพันธ์กับนิวคลีไอ อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) เกิดขึ้นเนื่องจากลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิซึ่งตกกระทบ (Incident Primary Electron) บนชิ้นตัวอย่างแทรกซึมทะลุทะลวงเข้าสู่เนื้อของชิ้นตัวอย่างเกิดการไอออไนเซชันและเปล่งรังสีกลับออกมา อิเล็กตรอนทุติยภูมินี้มีพลังงานค่อนข้างต่ำ เนื่องจากหัวอ่านอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ส่องกราดในแนวขวางของชิ้นทดสอบภาพผิวหน้าของชิ้นตัวอย่างเกิดจากการสร้างภาพด้วยหลอดจะแสดงภาพในรูปของแสงซึ่งเกิดจากการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอนปฐมภูมิและแสงซึ่งเกิดจากการเปล่งอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมา

กล่าวได้ว่าการสูญเสียพลังงานน้อยมาก ในทำนองเดียวกับอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะกระดอนตัวออกจากนิวเคลียสของชิ้นงาน โดยปราศจากการสูญเสียพลังงานแต่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางไปจากแนวเดิมมาก เรียกอิเล็กตรอนซึ่งเกิดการหักเหกลับว่า อิเล็กตรอนปฐมภูมิซึ่งเกิดการกระเจิงกลับ (Backscattered Primary Electrons) ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นมีชื่อเรียกว่า การกระเจิงกลับ (Backscattering) ส่วนอิเล็กตรอนซึ่งเกิดการเบี่ยงเบนทิศทางไปในมุมกว้างถูกเรียกว่า อิเล็กตรอนปฐมภูมิ ซึ่งเกิดจากการกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastically Scattered Primary Electrons) และเรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นแบบนี้ว่า การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic Scatterin)

นอกจากนี้ยังมีความจำเป็นต้องเคลือบชิ้นงานพอลิเมอร์ซึ่งไม่นำไฟฟ้าด้วยตัวนำไฟฟ้า เช่น คาร์บอน และทองคำ

2.8 สมบัติเชิงกล

2.8.1 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) [18]

การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง หมายถึง การวัดความสามารถในการรับแรงของวัสดุด้วยการใช้แรงดึง และหาระยะที่ยืดออกไปก่อนที่วัสดุจะแตกหัก

ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) เป็นการทดสอบความต้านทานแรงดึง โดยให้แรงดึงกับชิ้นงานทดสอบที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์

สามารถทดสอบจากลักษณะการยืดออกของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดึงจากภายนอก โดยอาศัยทอม 2 ทอมที่สัมพันธ์กัน คือ ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ความเค้น คือ แรงที่ใช้ในการดึงหรือยืดตัวอย่าง ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด

$$\text{ความเค้น} = \frac{\text{แรง (F)}}{\text{พื้นที่หน้าตัด (A)}} \quad (2.2)$$

ความเครียด (\mathcal{E}) คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนไปของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดึงต่อความยาวเริ่มต้น

$$\text{ความเครียด} = \frac{\text{ความยาวที่เปลี่ยนไป } (\Delta L)}{\text{ความยาวเดิม (L)}} \quad (2.3)$$

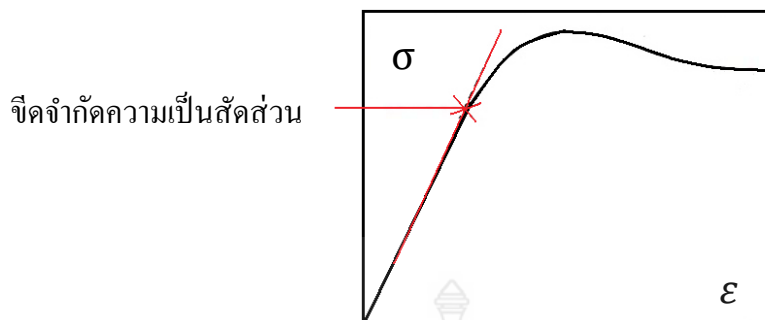
$$\text{โมดูลัส} = \frac{\text{ความเค้น } (\sigma)}{\text{ความเครียด } (\mathcal{E})} \quad (2.4)$$

เนื่องจากพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของวัสดุเป็นลักษณะที่ขึ้นกับเวลา อัตราเร็วที่ความเค้นหรือแรงถูกให้กับตัวอย่างจึงมีผลต่อการยืดของตัวอย่างหรือความเครียดเป็นอย่างมาก เช่น เมื่อนำตัวอย่างประเภทเส้นใยมาทดสอบ โดยใช้แรงดึงอย่างรวดเร็วจนทำให้เส้นใยขาดออกโดยง่ายแต่เมื่อใช้แรงขนาดเดิมแต่ดึงอย่างช้า ๆ จะทำให้เส้นใยยืดออกและทนต่อแรงดึงอยู่ได้นานก่อนที่จะขาดในทางปฏิบัติทั่วไป

โดยพื้นฐานสิ่งที่วัดได้จากการทดสอบแรงดึงมีลักษณะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งสามารถเปลี่ยนให้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่เกิดขึ้น จากข้อมูลดิบที่ได้สามารถคำนวณค่าต่างๆที่เป็นสมบัติเชิงกลของพลาสติก มีดังนี้

1) ขีดจำกัดความเป็นสัดส่วน (Proportional Limit)

ขีดจำกัดความเป็นสัดส่วน หมายถึง ค่าความเค้นสุดท้ายบนเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ ดังรูปที่ 2.17 ที่แสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น โดยทั่วไปแล้วสำหรับพลาสติกมักพบได้ในระดับความเครียดที่ต่ำมาก



รูปที่ 2.17 จุดจำกัดความเป็นสัดส่วน

2) โมดูลัส (Modulus)

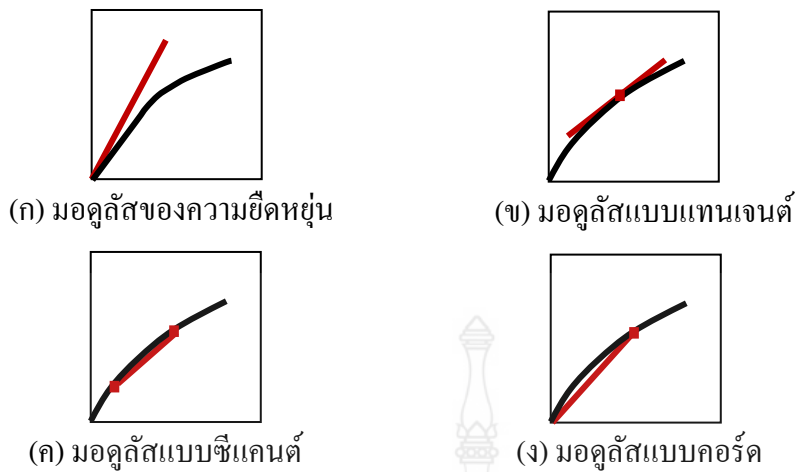
มอดูลัสของวัสดุเป็นค่าที่แสดงถึงสมบัติการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำ สามารถคำนวณได้หลายวิธี ดังนี้

2.1) โมดูลัสแบบแทนเจนต์ (Tangent Modulus) คำนวณได้จากความชันของกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใยที่จุดต่างๆที่กำหนด ดังรูปที่ 2.18 (ก)

2.2) มอดูลัสของความยืดหยุ่น (Elastic Modulus) หรือค่ายังมอดูลัส (Young's Modulus) เป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการคำนวณสำหรับพลาสติกแข็งที่แสดงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงในช่วงแรก ดังรูปที่ 2.18(ข) โดยหาค่ามอดูลัสแทนเจนต์ในช่วงแรกของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ค่าความเครียดต่ำในระดับที่วัสดุยังคงแสดงสภาพการยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น

2.3) มอดูลัสแบบซีแคนต์ (Secant Modulus) คำนวณได้จากค่าความเครียดที่ต้องการหาค่ามอดูลัสมีค่าเท่าใดและอัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียด ณ จุดนั้น ดังรูปที่ 2.18(ค)

2.4) มอดูลัสแบบคอร์ด (Chord Modulus) คำนวณได้จากความชันของกราฟ ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้ในบางกรณีเท่านั้นดังรูปที่ 2.18(ง)



รูปที่ 2.18 การหาค่าโมดูลัสด้วยวิธีต่างๆ

3) จุดคราก (Yield Point)

จุดครากเป็นค่าประมาณของวัสดุเปลี่ยนรูปร่างแบบยืดหยุ่นไปเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร โดยวัสดุที่แสดงจุดครากอย่างชัดเจนสามารถหาได้จากจุดที่มีค่า ความชันเป็นศูนย์หรือจุดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความเค้น แต่มีการเปลี่ยนแปลงของความเครียด เมื่อทราบจุดครากแล้วสามารถหาค่าความเค้นและค่าความเครียด ณ จุดคราก จากการลากเส้นตรงไปตัดแกนนอนและแกนตั้ง

4) ความต้านทานสูงสุด (Strength)

ความต้านทานสูงสุด หรือความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งอาจเป็นจุดครากหรือจุดที่เกิดการแตกหักก็ได้ สามารถหาได้จากค่าความเค้น ณ จุดสูงสุดของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเพื่อจะได้ทราบถึงลักษณะสมบัติเชิงกลของพลาสติกนั้นๆ

5) ความเค้นและความเครียด ณ จุดแตกหัก (Stress And Strain At Break)

ความเค้นและความเครียด ณ จุดแตกหักในบริเวณของจุดที่ชิ้นงานเกิดการแตกหักเสียหายในการทดสอบ ในบางกรณีถือว่าเป็นค่ากำลังวัสดุหรือความต้านทานแรงสูงสุดของวัสดุ

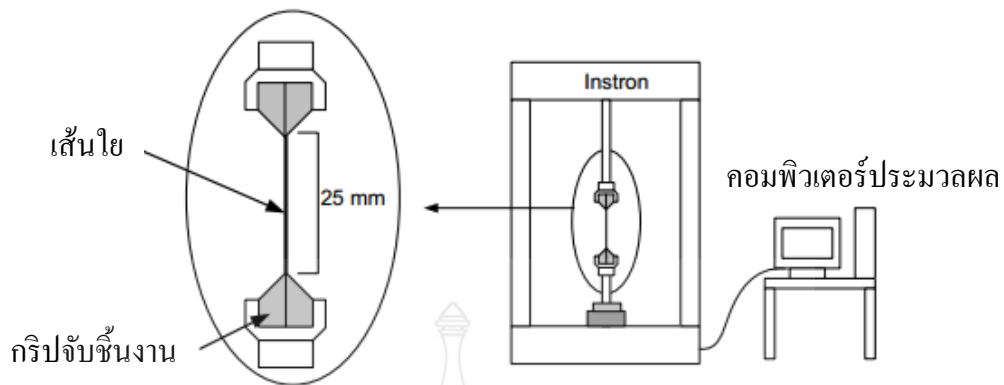
6) ความเหนียว (Toughness)

ความเหนียว ได้แก่ พลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก ซึ่งสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด วัสดุที่มี

ความเหนียวจะมีพื้นที่ใต้กราฟมากกว่าวัสดุที่มีความเปราะ ความเหนียวที่ได้ไม่สามารถใช้ทดแทนความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Strength)

โดยสมบัติของเส้นใยที่ประกอบเข้ากับเป็นเส้นด้ายจะมีความสำคัญต่อการใช้งานของเส้นด้ายและสมบัติทางความสวยงาม ซึ่งการปรับเปลี่ยนเส้นใยเหล่านี้อาจปรับปรุงสมบัติให้แก่เส้นด้ายได้ ในระหว่างการพัฒนาเส้นด้าย การทดสอบแรงดึงมักจะถูกดำเนินการเพื่อประเมินสมบัติทางกลของวัสดุหลายประเภทเพื่อศึกษาว่าสมบัติมีการเปลี่ยนแปลงเช่นไร การทดสอบแรงดึงจะถูกดำเนินการในระหว่างกระบวนการผลิตเพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพว่าวัสดุยังมีสมบัติตามข้อกำหนดและลดเศษวัสดุที่ไม่จำเป็น ซึ่งการเลือกใช้ Grip นั้นมีความสำคัญเนื่องจากจะช่วยให้สามารถติดตั้งและนำชิ้นงานออกได้อย่างสะดวก ในบางกรณีการสร้างแถบวัสดุที่บริเวณปลายด้วยเทปจะช่วยให้ติดตั้งชิ้นงานได้ง่ายขึ้น โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีขนาดเล็กที่ยากต่อการมองเห็นด้วยตาเปล่า หากเลือกใช้ Grip ได้เหมาะสม การเลื่อนหลุดหรือการเสียหายของชิ้นงานบริเวณจับยึดจะไม่เกิดขึ้น โดยเส้นใยเดี่ยวแต่ละเส้นจะมีความเปราะและสามารถเสียหายได้ที่แรงต่ำ การเลือกใช้โพลีเอสเตอร์ที่เหมาะสมจะช่วยให้สามารถได้ผลการทดสอบที่มีความถูกต้อง จะมี Grips หลายประเภทที่เหมาะสมต่อการทดสอบเส้นใยเดี่ยว

นอกจากนั้นยังช่วยคงแนวศูนย์ในการทดสอบของชิ้นงาน โดยการทดสอบการดึงจนขาดที่ความเร็วในการดึง 30 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการจับเส้นใยกับกริปจับชิ้นงานให้เส้นใยมีความยาวที่ 25 มิลลิเมตร และเส้นใยจะถูกดึงโดยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ (UTM, Instron Model 8872) แสดงดังรูป 2.10 ซึ่งค่าแรงดึงและการยืดตัวจะถูกบันทึกเมื่อมีแรงกระทำกับเส้นใย



รูปที่ 2.19 การทดสอบความต้านทานแรงดึงของเส้นใย

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

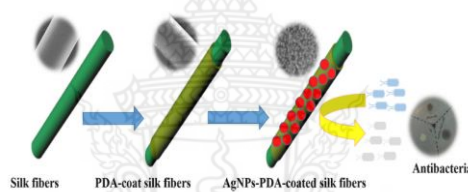
J.H. Hsieh และคณะ [19] ศึกษาการเตรียม TaON–Ag nanocomposite thin films ซึ่งการเติมอนุภาคนาโน Ag บนผิวของ TaON นั้น ทำโดยการ reactive co-sputtering ของ Ta และ Ag ในพลาสมาของ O_2 , N_2 , และ Ar ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสด้วย Rapid thermal annealing (RTA) फिल्मที่ได้นำมาวิเคราะห์ด้วย XRD, FESEM และ TEM จากการทดสอบสมบัติการต้านทานแบคทีเรียพบว่า TaON–Ag films ต้านทานการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ดีเมื่อฉายด้วยแสงขาว (Visible Light) เนื่องจาก Ag ทำงานในช่วงแสงนี้และ TaON มีพฤติกรรม photocatalytic และฟิล์มที่ผ่านกระบวนการอบมีประสิทธิภาพในการต้านทานการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสูงขึ้น

Liang Zhang และคณะ [20] ศึกษาฟิล์มคอมโพสิตต้านทานการเจริญเติบโตของแบคทีเรียของ CTS/PVP/TiO₂/Ag เพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์น้ำดื่ม จากการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วย SEM พบว่าอนุภาคของ TiO₂ ติดอยู่บนพื้นผิวของฟิล์ม จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มด้วย DSC แสดงการเข้ากันได้ดี และ CTS/PVP/TiO₂ ที่เติม Ag มีความเสถียรทางความร้อนมากกว่า และการทดสอบฟิล์มคอมโพสิตนั้น สามารถต้านทานการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ดี

Walid Bahloul และคณะ [21] ศึกษาการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิต PP/TiO₂ ที่เตรียมด้วยปฏิกิริยา Hydrolysis–Condensation (Sol–Gel Method) วิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของคอมโพสิตด้วย TEM, XRD, XPS พบว่าขนาดของ TixOy(OH)z ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ประมาณ 10 นาโนเมตร

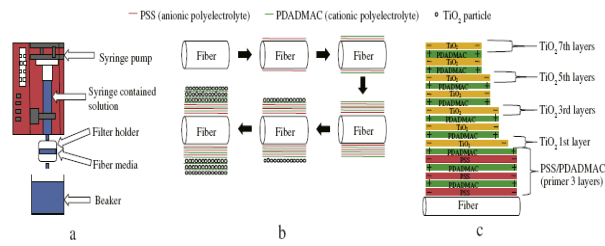
ทดสอบสมบัติการต้านทานการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่เรียกว่า JIS Z 2801:2000 standard แบคทีเรียที่ศึกษา ได้แก่ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) และ *Escherichia coli* (*E. coli*) ผลการทดสอบพบว่า ไททานเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์แสดงสมบัติการต้านทานแบคทีเรียได้กว่าไททานเนียมไดออกไซด์ในรูปของอะนาทาสใน PP

Zhisong Lu และคณะ [22] ศึกษาการเตรียมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (AgNPs) สำหรับการประยุกต์ใช้ด้านเชื้อแบคทีเรียในเส้นใยไหม งานวิจัยนี้พัฒนาการเกิดปฏิกิริยาของ AgNPs กับหมู่ฟังก์ชัน (Polydopamine, PDA) ที่เคลือบอยู่บนเส้นใยไหม AgNPs ที่เตรียมได้มีขนาด 30–90 นาโนเมตร มีโครงสร้างเป็นผลึกแบบ FCC เกาะอยู่บน PDA ที่เคลือบอยู่บนผิวของเส้นใยไหม จากการทดสอบการต้านทานแบคทีเรีย พบว่าสารที่เคลือบบนเส้นใยไหมแสดงสมบัติการต้านทานแบคทีเรีย ดังรูปที่ 2.20 แสดงขั้นตอนการเคลือบสารต้านทานแบคทีเรียบนเส้นใยไหม



รูปที่ 2.20 เส้นใยไหมที่เคลือบสารต้านทานแบคทีเรีย

Suttipan Pavasupree และคณะ [23] ศึกษาการเตรียมเส้นใย PP ที่เคลือบผิวด้วยนาโนไททานเนียมไดออกไซด์ โดยใช้เทคนิค layer-by-layer (LbL) ทำการเคลือบทั้งหมด 3 ชั้น ได้แก่ poly(4-styrenesulfonic acid) (PSS), poly(diallyl-dimethylammonium chloride) (PDADMAC) และนาโนไททานเนียมไดออกไซด์ ซึ่งแสดงกระบวนการและจำนวนชั้นในการเคลือบดังรูปที่ 2.21 โดย TiO_2 /PDADMAC ทำการเคลือบถึง 7 ชั้น ผลการทดสอบ photocatalytic activity efficiency ของ TiO_2 ที่เคลือบบนผิวของเส้นใยให้ผลเทียบเท่า TiO_2 ที่อยู่ในรูปของสารละลาย



รูปที่ 2.21 layer-by-layer deposition

Mei Meng และคณะ [24] ศึกษาการเตรียม multilayered polymeric films ด้วยเทคนิค Layer-by-layer (LbL) ซึ่งเตรียมดังนี้ เริ่มจากเคลือบ Poly(ethyleneimine) บนเส้นใยไหม จากนั้นตามด้วย poly(acrylic acid) (PAA)/poly(dimethyldiallylammonium chloride) (PDADMAC) สุดท้ายใส่ AgNPs ลงบนเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ที่เคลือบบนเส้นใยไหม ทำการเคลือบประมาณ 8 ครั้งจนพื้นผิวของเส้นใยปกคลุมไปด้วยฟิล์ม ดังรูปที่ 2.22 จากผลการทดสอบการต้านทานแบคทีเรียของ Ag^+ พบว่าสามารถยับยั้งการเกิดจุลินทรีย์ได้ ซึ่งกระบวนการเตรียมเส้นใยไหมที่เคลือบสารต้านแบคทีเรียสามารถประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมสิ่งทอได้



รูปที่ 2.22 เส้นใยไหมที่เคลือบด้วยสารต้านทานแบคทีเรียด้วยกระบวนการ Layer-by-layer (LbL)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงาน แผนการดำเนินงานของกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยของพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตที่เติมไททานเนียมไดออกไซด์ (RPET/TiO₂) โดยเทคนิคการปั่นแบบหลอมเหลว (Melt Spinning) ด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใย Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine รุ่น Hill's Lab Modal-100 วิธีการทดสอบ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล มีขั้นตอนดังนี้

3.1 แผนการดำเนินงาน

3.1.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1.2 รวบรวมข้อมูลและวางแผนการดำเนินงาน

3.1.3 จัดหาวัสดุุดิบและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.1.4 เตรียมมาสเตอร์แบทช์ (Master Batch) ของพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตรีไซเคิล (RPET) และไททานเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ที่สัดส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

3.1.5 ทำการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตรีไซเคิลและมาสเตอร์แบทช์ของพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตที่เติมไททานเนียมไดออกไซด์ (RPET/TiO₂) โดยกระบวนการปั่นหลอม (Melt Spinning) ด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใย Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine รุ่น Hill's Lab Modal-100 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ปริมาณนาโนไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ที่ใช้เป็นร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก

2) ทำการขึ้นรูปเส้นใย 2 แบบ ได้แก่

2.1) การขึ้นรูปเส้นใยแบบเต็มเส้น

2.2) การขึ้นรูปเส้นใยแบบสององค์ประกอบ โดยมีอัตราส่วนระหว่าง พอลิเอทิลีน

เทเลฟทาเลต (Core)/มาสเตอร์แบทช์ (Shell) เป็น 90/10, 70/30, 50/50, 30/70 และ 10/90

3) ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย คือ 500 และ 1,000 เมตรต่อนาที

3.1.6 นำเส้นใยที่ได้จากกระบวนการปั่นหลอม (Melt Spinning) มาทดสอบสมบัติต่างๆดังนี้

1) สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)

2) ทดสอบความเป็นผลึก ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer, XRD)

3) ทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

4) ทดสอบการเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย (Dynamic Modulus Tester)

5) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (Optical Microscope)

6) ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 3822 01

7) ทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งใช้ Escherichia Coli (*E. coli*) ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ (Gram Negative Bacteria) และ Staphylococcus Aureus (*S. aureus*) ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก (Gram Positive Bacteria) เป็นตัวแทนใช้ในการทดสอบ ตามมาตรฐาน JIS Z 2801

3.1.7 รวบรวมผลทดสอบ จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1.8 สรุปผลการทดลองและจัดทำรูปเล่มรายงาน

3.2 วัสดุและอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 วัสดุดิบ

1) เม็ดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล (RPET) จากบริษัท ไทยเนโกโร จำกัด



รูปที่ 3.1 เม็ดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล (RPET)

2) นาโนไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เกรด P25 มีความหนาแน่น 3.9 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร ขนาดอนุภาค 10-30 นาโนเมตร และพื้นที่ผิวหน้า 30-65 ตารางเมตรต่อกรัม [25]



รูปที่ 3.2 นาโนไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เกรด P25

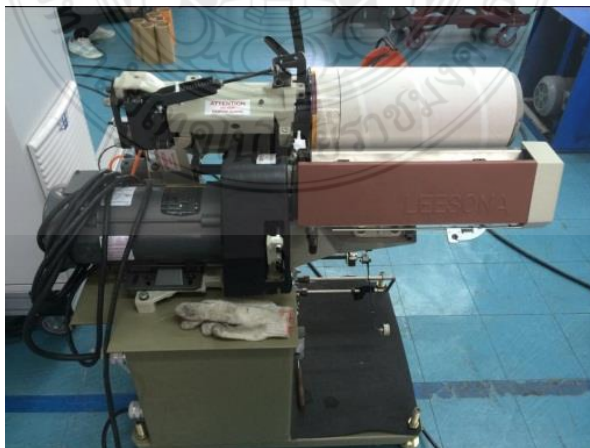
3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1) เครื่องขึ้นรูปเส้นใย Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine รุ่น Hill's Lab Modal-100 หัวคายแบบหัวฉีดเส้นใย (Spinneret) จำนวน 24 รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูละ 0.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 เครื่องขึ้นรูปเส้นใย Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine รุ่น Hill's Lab Modal-100

- 2) ตู้อบแบบลมร้อนของ Scientific Promotion CO.,LTD รุ่น FD115
- 3) เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Analytical Balanc Overting) ยี่ห้อ Sartorius Group รุ่น BSA3202S
- 4) เครื่องม้วนเก็บเส้นใย (Winder) ยี่ห้อ Leesona รุ่น 2391 Model 967 Order B18513 บริษัท BURLINGTON, MC USA



รูปที่ 3.4 เครื่องม้วนเก็บเส้นใย (Winder)

3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลลอรีมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter) ยี่ห้อ Perkin elmer รุ่น DSC 8000 (ประเทศเยอรมนี)



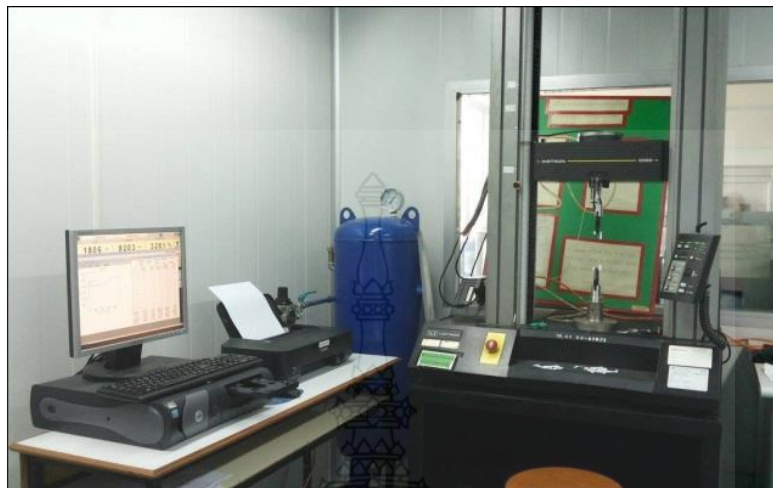
รูปที่ 3.5 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลลอรีมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter)

- 2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JEM-6510 (ประเทศญี่ปุ่น)



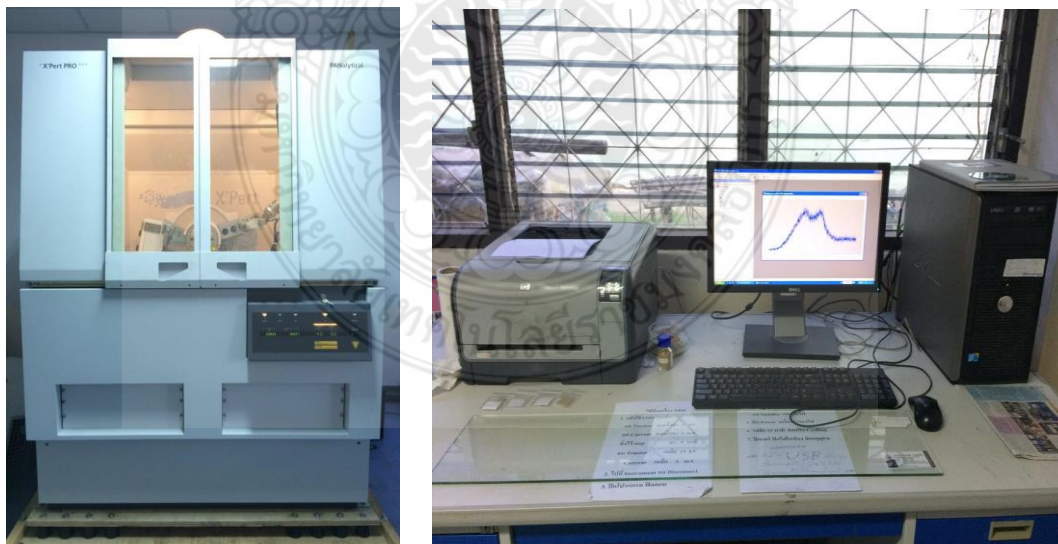
รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)

3) เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ยี่ห้อ Instron รุ่น 5569 (ประเทศสหรัฐอเมริกา)



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength)

4) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer) รุ่น PW3040/60 ของบริษัท PANalytical (ประเทศเนเธอร์แลนด์)



รูปที่ 3.8 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer)

5) เครื่องทดสอบการเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย (Sonic Modulus Tester Lawson and Hemphil) รุ่น DMT PPM-5R (ประเทศสหรัฐอเมริกา)

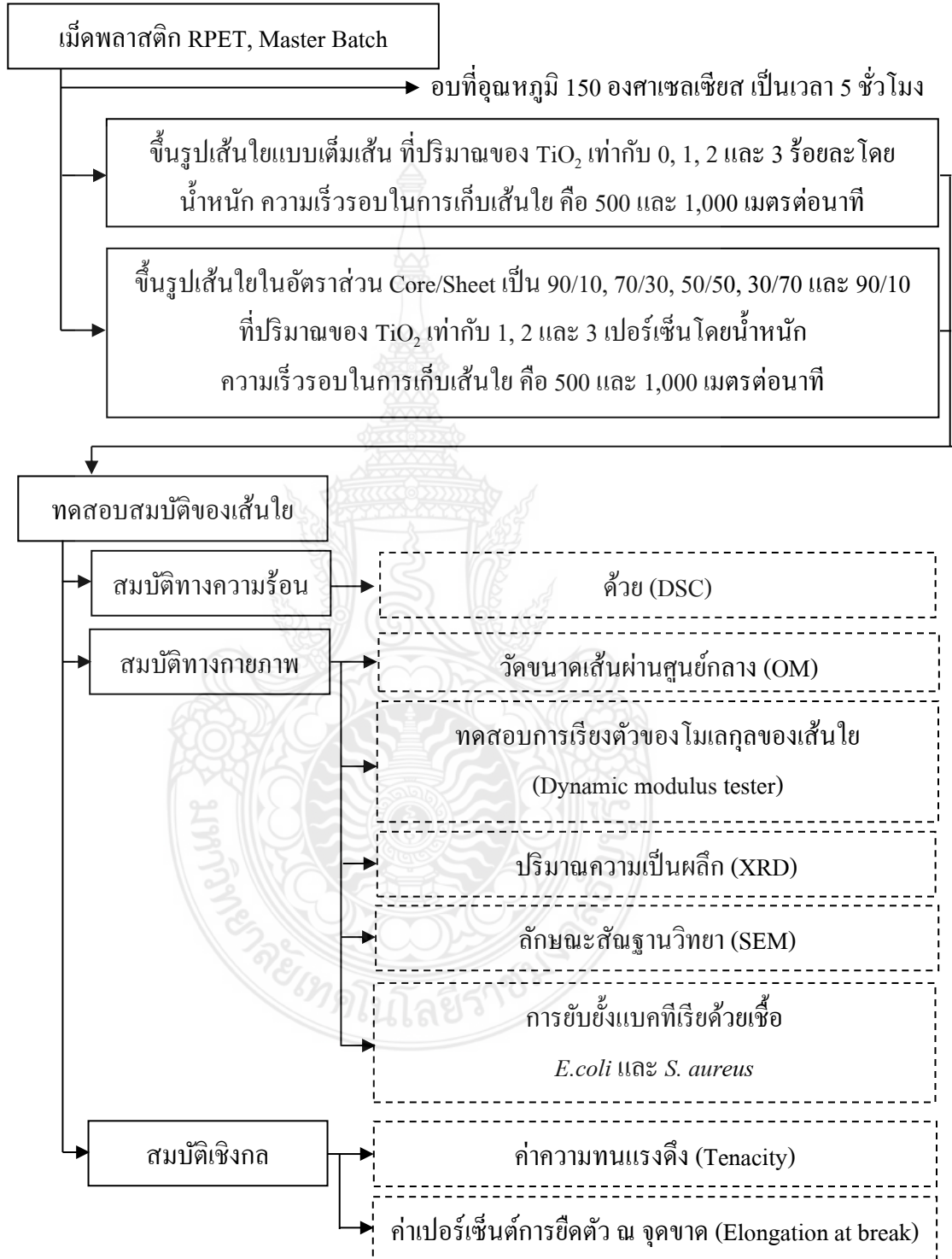


รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบการเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย (Sonic Modulus Tester)



3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.3.1 การเตรียมมาตรฐานเบรทซ์

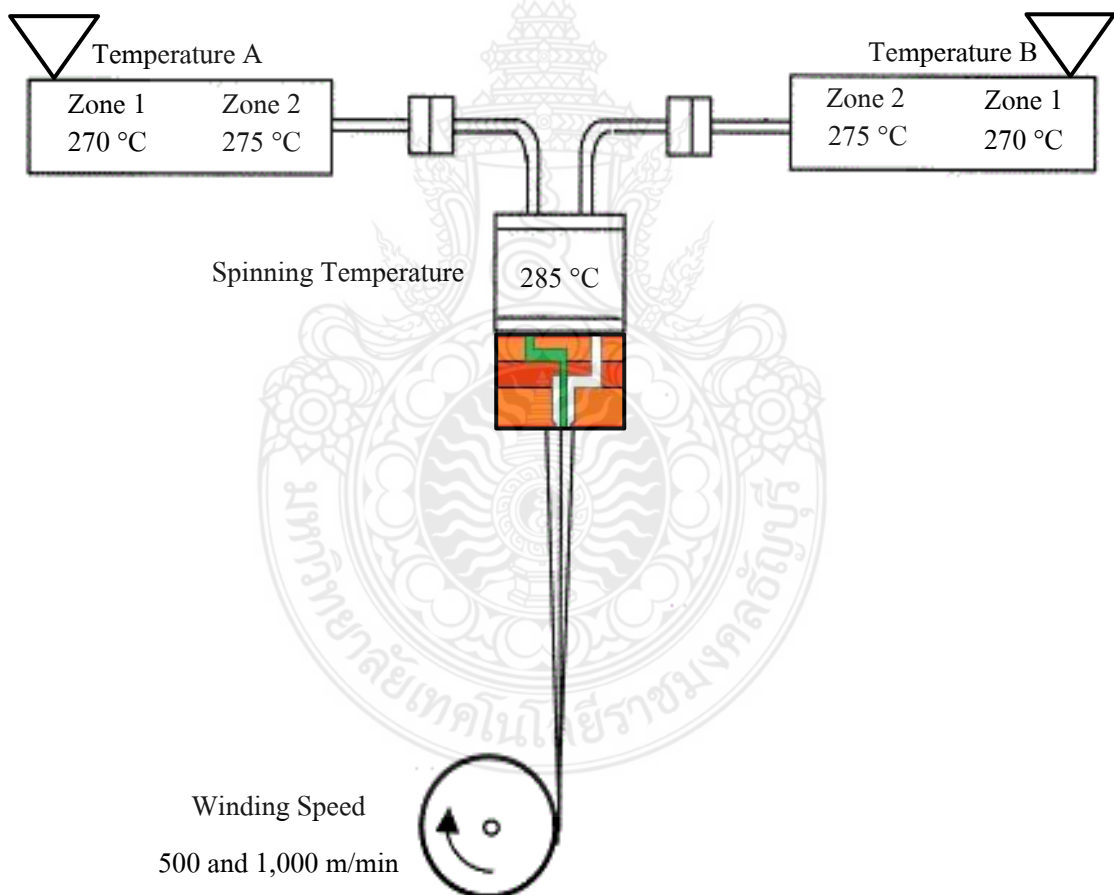
นำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิลและไททานเนียมไดออกไซด์เกรด P25 ขึ้นรูปเป็นเม็ดมาตรฐานเบรทซ์ที่มีปริมาณไททานเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยบริษัท สาลี คัลเลอร์ จำกัด (มหาชน) จังหวัดสมุทรปราการ

3.3.2 การขึ้นรูปเส้นใยแบบเต็มเส้น

1) อบเม็ดพลาสติกรีไซเคิลพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและมาตรฐานเบรทซ์ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

2) ชั่งน้ำหนักพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิลและมาตรฐานเบรทซ์ โดยที่ต้องมีปริมาณของนาโนไททานเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก

3) สภาพที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใยแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 สภาพที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใย

3.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน ทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล

3.4.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter) มีขั้นตอนดังนี้

1) การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ทำการชั่งน้ำหนักสารตัวอย่างให้มีน้ำหนักประมาณ 5-10 มิลลิกรัม บรรจุสารตัวอย่างลงในภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง (Pan) ทำการอัดแน่นจนอากาศไม่สามารถเข้าไปได้

2) สภาวะการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.1

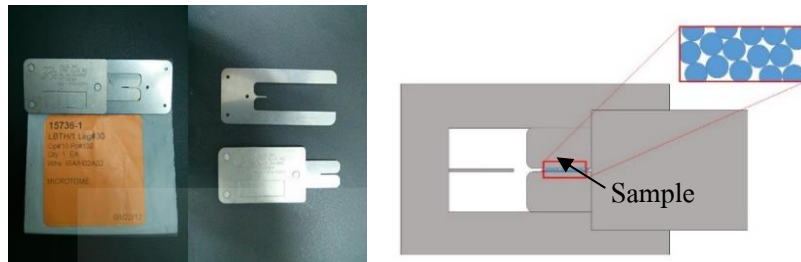
ตารางที่ 3.1 สภาวะในการดำเนินงานของเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

ขั้นตอนที่	รายละเอียด
1	ให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 30-300 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
2	ให้ความร้อนคงที่ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
3	ลดอุณหภูมิการให้ความร้อนจาก 300-30 องศาเซลเซียส อัตราการเย็นตัว 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
4	ให้ความร้อนคงที่ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
5	ให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 30-300 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.4.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

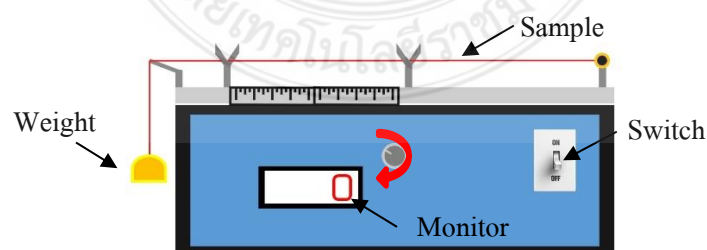
1) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสง (OM)

1.1) นำเส้นใยที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปนำไปตัดขวาง โดยใช้แผ่นไมโครโทม (Microtome) ดังรูปที่ 3.12 แล้วใช้ใบมีดโกนตัดเส้นใยส่วนเกินออกทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่น



รูปที่ 3.12 แผ่นไมโครโทม (Microtome)

- 1.2) วางแผ่นไมโครโทมลงบนแท่นวางของกล้องจุลทรรศน์ ให้แผ่นอยู่กึ่งกลางในบริเวณที่แสงส่องผ่าน
- 1.3) มองด้านข้างตามแนวระดับของแท่นวาง ค่อยๆ หมุนปุ่มปรับภาพหยาบให้เลนส์ใกล้วัตถุเลื่อนลงมาอยู่ใกล้ๆ ชื่นทดสอบ
- 1.4) มองที่เลนส์ใกล้ตา ค่อยๆ ปรับภาพหยาบให้กล้องเลื่อนขึ้นช้าๆ เพื่อหาระยะภาพเมื่อได้ระดับภาพที่ชัดแล้ว ตรวจสอบความสว่างมากหรือน้อยเกินไปหรือไม่ ให้ปรับที่ไดอะแฟรมเพื่อให้ได้แสงที่พอเหมาะ
- 1.5) ถ้าต้องการขยายภาพให้ใหญ่ขึ้น ให้หมุนเลนส์ที่กำลังขยายสูงขึ้นเข้าสู่แนวลำกล้องแล้วปรับความคมชัดด้วยปุ่มปรับภาพละเอียดเท่านั้น โดยกำลังขยายที่ใช้คือ 10 เท่า
- 1.6) ทำการถ่ายภาพในตำแหน่งที่เห็นภาพของชื่นทดสอบ ได้ชัดเจนที่สุด
- 2) ทดสอบการเรียงตัวโมเลกุลของเส้นใย (Sonic Modulus Tester)
 - 2.1) นำเส้นใยมาตัดให้มีความยาวประมาณ 50 เซนติเมตร
 - 2.2) ทำการตรึงเส้นใยด้านหนึ่งไว้และปลายเส้นใยอีกด้านหนึ่งให้ถ่วงน้ำหนักเพื่อให้เส้นใยตึงดังรูปที่ 3.13 แล้วทำการทดสอบ



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างการทดสอบการเรียงตัวโมเลกุลของเส้นใย

2.3) ทำการปรับปุ่มเพื่อให้เกิดความถี่ จากนั้นบันทึกค่าที่ความยาวของเส้นใยที่ 200, 190, 180, 170, 160 และ 150 มิลลิเมตร และนำค่าที่ได้ป้อนเข้าโปรแกรมคำนวณเพื่อหาค่า Sonic Modulus

3) การทดสอบความเป็นผลึก ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer)

3.1) เตรียมตัวอย่างของเส้นใยโดยพันให้เรียงชิดติดกันบนแผ่นอลูมิเนียม

3.2) ทำการทดสอบในช่วง 2θ เท่ากับ 5-80 องศา $\text{Cu K}\alpha$ แผ่รังสีด้วยความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ 1.5418 อังสตรอม แรงดันไฟฟ้า (Voltage) เท่ากับ 40 กิโลโวลต์ และกระแสไฟฟ้า (Current) เท่ากับ 30 มิลลิแอมป์

3.3) บันทึกข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลจากกราฟ

4) การทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.1) นำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการทนแรงดึงมาเตรียมตัวอย่างเพื่อจะนำไปทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.2) นำตัวอย่างมาเคลือบด้วยทอง ภายใต้สภาวะสุญญากาศ แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กระแสไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ ที่กำลังขยาย 150 เท่าและ 2200 เท่า ทำการเลือกภาพบริเวณที่ต้องการและถ่ายภาพ

5) ทดสอบการยับยั้งแบคทีเรียมาตรฐาน JIS Z 2801

5.1) เตรียมตัวอย่างเส้นใยให้ได้น้ำหนัก 0.3 กรัมต่อตัวอย่าง

5.2) นำเชื้อ *E. coli* และ *S. aureus* ที่สต็อกไว้ มาใส่ในอาหารเหลว ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และบ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ภายใต้การเขย่า 150 รอบต่อนาที

5.3) จากนั้นนำตัวอย่างเส้นใยใส่ลงในเชื้อ *E. coli* และ *S. aureus* ที่เตรียมไว้ และบ่มในตู้บ่มเชื้อภายใต้การใช้แสง UV ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ภายใต้การเขย่า 150 รอบต่อนาที

5.4) ทำการเก็บผลการทดสอบที่เวลาเริ่มต้นและทุกๆ 24 ชั่วโมง จนครบ 72 ชั่วโมง โดยการนำอาหารเหลวที่ผสมเชื้ออยู่ประมาณ 0.1 มิลลิลิตรมาเพาะลงบนอาหารแข็ง

5.5) นับจำนวนโคโลนีที่เกิดขึ้นและทำการทดลองซ้ำ

3.4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

1) การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 3822 01

1.1) นำเส้นใยที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยแล้วม้วนเก็บด้วยเครื่องมือม้วนเก็บเส้นใย Winder

1.2) หาขนาดของเส้นใย (Denier) ด้วยเครื่อง Fiber Fineness โดยทำการหมุนเป็นจำนวน 9 รอบ เก็บตัวอย่างสุตรละ 3 ตัวอย่าง

1.3) นำตัวอย่างที่ได้ไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่งบันทึกผลนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าขนาดของเส้นใยโดยเทียบกับน้ำหนักเป็นกรัมของเส้นใยที่ยาว 900 เมตร เพื่อนำไปเป็นตัวแปรในการหาค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของเส้นใย

1.4) ทำการเตรียมตัวอย่างเส้นใยที่เป็นรูปตัวซีแคมป์ (C-Camp) ความยาว 2.5 เซนติเมตร ซึ่งทำการเตรียมตัวอย่างเส้นใยชนิดละ 10 ตัวอย่าง

1.5) นำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปทดสอบการทนต่อแรงดึงด้วยเครื่อง Tensile Strength ที่ใช้โหลดเซลล์ขนาด 50 กิโลนิวตัน Gate Length ความยาว 250 มิลลิเมตร และความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที

1.6) บันทึกข้อมูลทำการทดสอบเช่นเดิมกับทุกชิ้นงาน ตัวอย่างละ 10 ชิ้น นำค่าที่ได้มาหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดึงหรือความเหนียว (Tenacity) และค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของเส้นใย (Elongation at break)

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

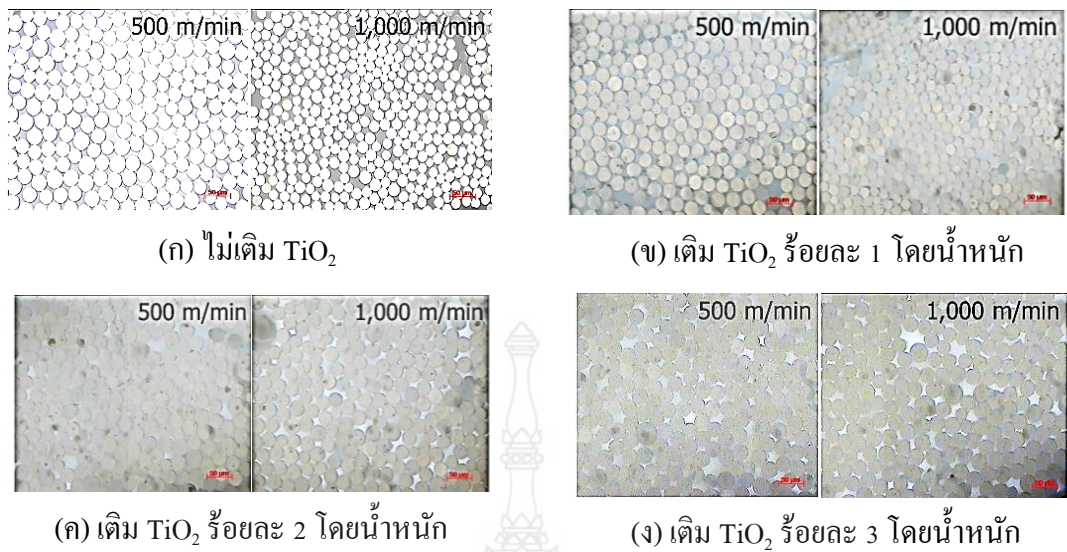
จากการขึ้นรูปเส้นใยแบบเต็มเส้นและเส้นใยแบบสององค์ประกอบของ RPET/TiO₂ ที่อัตราส่วนของ core/shell เป็น 10/90, 30/70, 50/50, 70/30 และ 90/10 โดยเทคนิคการปั่นแบบ หลอมเหลว (Melt Spinning) ด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใย Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine รุ่น Hill's Lab Modal-100 ที่เติม TiO₂ เท่ากับร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เพื่อทำการ ทดสอบสมบัติต่างๆ ของเส้นใยแบบเต็มเส้นและเส้นใยแบบสององค์ประกอบ แสดงผลการทดสอบ ดังนี้

ตอนที่ 1 การขึ้นรูปเส้นใยแบบเต็มเส้น

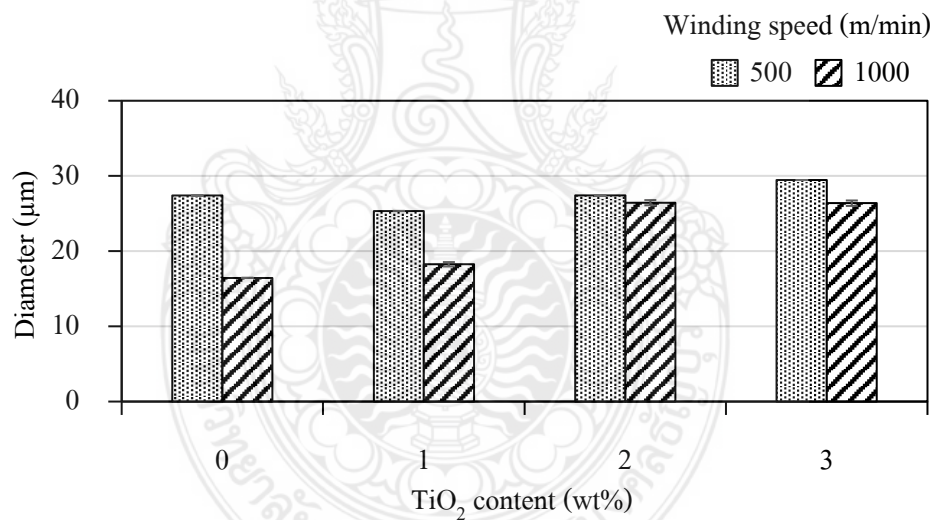
4.1 ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)

เส้นใยแบบเต็มเส้นที่ไม่เติม TiO₂ และเติม TiO₂ ร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเท่ากับ 500 และ 1000 เมตรต่อนาที นำมาทำการตัดขวางเส้นใยโดยใช้แผ่นไมโครโทมและนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสง (Optical Microscope) ผลการทดสอบแสดง ดังรูปที่ 4.1 จากรูปจะเห็นว่าเส้นใยที่ไม่เติม TiO₂ เส้นใยมีลักษณะเป็นรูปวงกลมและใสไม่มีสีใส แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของ TiO₂ พบว่าเมื่อนำเส้นใยไปส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงสีของเส้นใยจะพุ่งขึ้น

ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยที่ 1000 เมตรต่อนาที ลักษณะรูปของเส้นใยที่ไม่เติม TiO₂ เล็ก ลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยเท่ากับ 500 เมตรต่อนาที และขนาดจะใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ TiO₂ ที่เติมลงในเส้นใย ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



รูปที่ 4.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย RPET/TiO₂

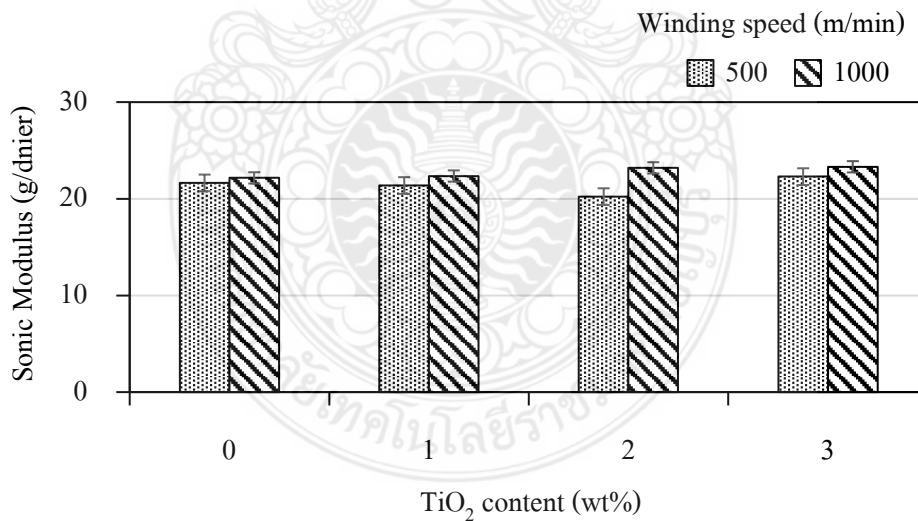
เส้นใยถูกม้วนเก็บที่ความเร็ว 500 และ 1,000 เมตรต่อนาที ที่ทำการตัดขวางเส้นใยนำมาทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย RPET/TiO₂ โดยใช้โปรแกรม Axiovision Rel 4.8 ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 4.2

เส้นใย RPET ที่ถูกม้วนเก็บด้วยความเร็ว 500 เมตรต่อนาที ที่ไม่เติม TiO₂ และเติม TiO₂ ร้อยละ 1, 2, และ 3 โดยน้ำหนัก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเส้นใย เท่ากับ 27.40, 25.35, 27.40 และ 29.46 ไมโครเมตร ตามลำดับ

เส้นใย RPET ที่ถูกม้วนเก็บด้วยความเร็ว 1,000 เมตรต่อนาที ที่ไม่เติม TiO₂ และเติม TiO₂ ร้อยละ 1, 2, และ 3 โดยน้ำหนัก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเส้นใย เท่ากับ 16.45, 18.28, 26.44 และ 26.38 ไมโครเมตร ตามลำดับ

ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยเพิ่มขึ้นจาก 500 เมตรต่อนาที เป็น 1,000 เมตรต่อนาที ส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเส้นใยมีขนาดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัดที่ไม่เติม TiO₂ และที่เติม TiO₂ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลมีมากขึ้นและเมื่อปริมาณของ TiO₂ ที่เติมลงในเส้นใยเพิ่มขึ้นที่ TiO₂ ร้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้นเนื่องจากอนุภาคของ TiO₂ ไปขัดขวางการยึดตัวขณะม้วนเก็บเส้นใย [26]

4.2 ผลการทดสอบการเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย (Dynamic Modulus Tester)



รูปที่ 4.3 ค่าการเรียงตัวโมเลกุลของเส้นใย RPET/TiO₂

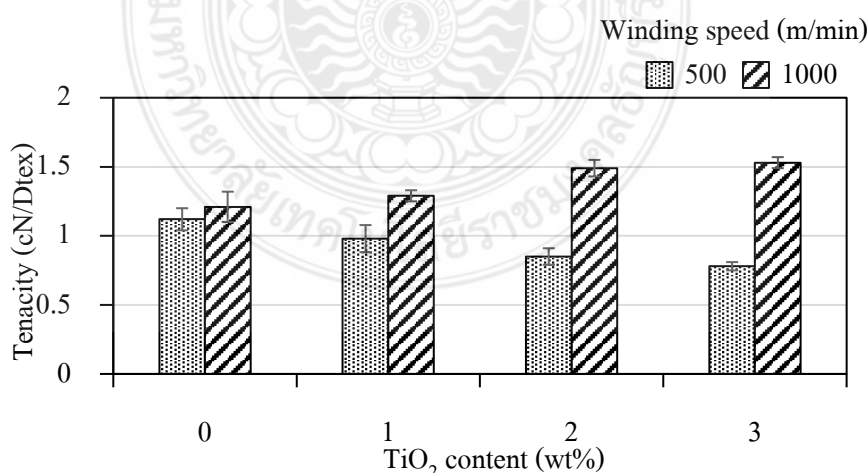
การเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย (Sonic Modulus Tester) เป็นการวัดความเร็วของเสียงที่วิ่งผ่านเส้นใย ซึ่งความเร็วที่ผ่านนั้นจะสะท้อนถึงลักษณะโครงสร้างและการจัดเรียงองค์ประกอบของเส้นใย RPET/TiO₂ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.3

เส้นใย RPET ที่ถูกม้วนเก็บด้วยความเร็ว 500 เมตรต่อนาที ที่ไม่เติม TiO₂ และเติม TiO₂ ร้อยละ 1, 2, และ 3 โดยน้ำหนัก มีค่าการเรียงตัวโมเลกุลของเส้นใยเท่ากับ 21.64, 21.37, 20.22 และ 22.29 กรัมต่อดีเนียร์ ตามลำดับ

เส้นใย RPET ที่ถูกม้วนเก็บด้วยความเร็ว 1,000 เมตรต่อนาที ที่ไม่เติม TiO₂ และเติม TiO₂ ร้อยละ 1, 2, และ 3 โดยน้ำหนัก มีค่าการเรียงตัวโมเลกุลของเส้นใยเท่ากับ 22.16, 22.35, 23.20 และ 23.31 กรัมต่อดีเนียร์ ตามลำดับ

ค่าการเรียงตัวของโมเลกุลเส้นใย RPET มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติม TiO₂ ลงในเส้นใย เนื่องจากอนุภาคของ TiO₂ ช่วยให้เสียงที่วิ่งผ่านเส้นใยดีขึ้นและเมื่อเพิ่มความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยจาก 500 เมตรต่อนาที เป็น 1,000 เมตรต่อนาที ค่าการเรียงตัวของโมเลกุลเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากแรงดึงที่สูงขึ้นขณะม้วนเก็บเส้นใยส่งผลให้การเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย RPET/TiO₂ ดีขึ้น [27]

4.3 ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tenacity)



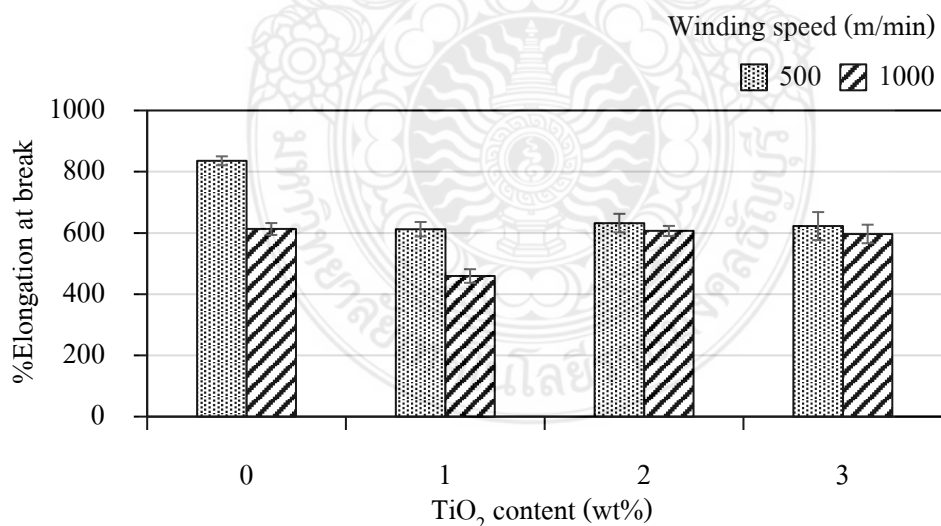
รูปที่ 4.4 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใย RPET/TiO₂

รูปที่ 4.4 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใย RPET พบว่าที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยเท่ากับ 500 เมตรต่อนาที ที่ไม่เติม TiO₂ และเติม TiO₂ ร้อยละ 1, 2, และ 3 โดยน้ำหนัก มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยเท่ากับ 1.12, 0.98, 0.85 และ 0.78 เซนตินิวตันต่อดีเทกซ์ ตามลำดับ จะเห็นว่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากอนุภาคของ TiO₂ ที่เติมลงในเส้นใยมากขึ้นทำให้เกิดรวมตัวกัน

ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย RPET เท่ากับ 1,000 เมตรต่อนาที ที่ไม่เติม TiO₂ และเติม TiO₂ ร้อยละ 1, 2, และ 3 โดยน้ำหนัก มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยเท่ากับ 1.21, 1.29, 1.49 และ 1.53 เซนตินิวตันต่อดีเทกซ์ ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากอนุภาคของ TiO₂ ที่เติมลงเป็นตัวช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเส้นใย

เมื่อความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยเพิ่มขึ้นจาก 500 เมตรต่อนาที เป็น 1,000 เมตรต่อนาที ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดึงที่สูงช่วยลดการรวมตัวของอนุภาค TiO₂ ในเส้นใย RPET/TiO₂ [28]

4.4 ผลการทดสอบค่าร้อยละการยืดตัวของเส้นใย ณ จุดขาด (%Elongation at break)



รูปที่ 4.5 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของเส้นใย RPET/TiO₂

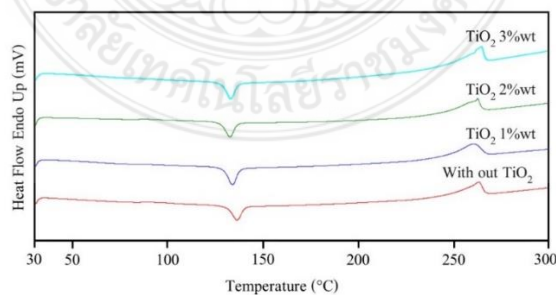
รูปที่ 4.5 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของเส้นใย RPET/ TiO₂ พบว่าที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย RPET เท่ากับ 500 เมตรต่อนาที ที่ไม่เติม TiO₂ และเติม TiO₂ ร้อยละ 1, 2, และ 3 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของเส้นใยเท่ากับร้อยละ 835, 612, 632 และ 622 ตามลำดับ

ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย RPET เท่ากับ 1,000 เมตรต่อนาที ที่ไม่เติม TiO₂ และเติม TiO₂ ร้อยละ 1, 2, และ 3 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของเส้นใยเท่ากับร้อยละ 612, 459, 606 และ 596 ตามลำดับ

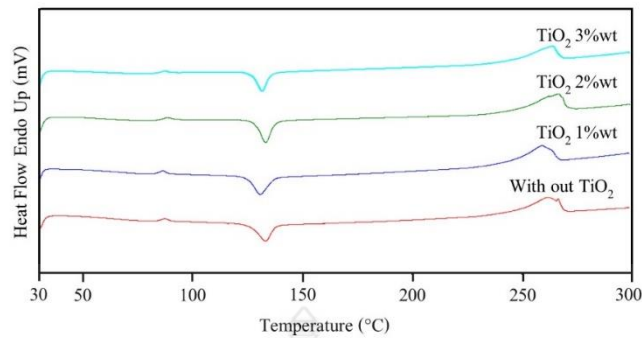
เห็นได้ว่าเส้นใยที่ไม่เติม TiO₂ มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดสูงกว่าเส้นใยที่เติม TiO₂ เพราะว่า TiO₂ เป็นอนุภาคของแข็งจึงทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงขึ้นและที่ปริมาณ TiO₂ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ให้ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดน้อยสุดเมื่อเทียบกับความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยเดียวกัน เนื่องจาก TiO₂ มีการกระจายตัวที่ดีในเส้นใย [29]

4.5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)

ทำการขึ้นรูปเส้นใยแบบเติมเส้นใยที่ไม่เติม TiO₂ และเติม TiO₂ ร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเท่ากับ 500 และ 1000 เมตรต่อนาที นำมาทดสอบสมบัติทางความร้อน โดยการเตรียมเส้นใยให้ได้น้ำหนัก 0.5-1.0 มิลลิกรัมต่อตัวอย่าง ใส่แผ่น (Pan) และดำเนินการวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ที่สภาวะการทดสอบดังตารางที่ 3.2 และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที ผลดำเนินการแสดงดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 เทอร์โมแกรมสมบัติทางความร้อนของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยเท่ากับ 500 เมตรต่อนาที



รูปที่ 4.7 เทอร์โมแกรมสมบัติทางความร้อนของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย เท่ากับ 1,000 เมตรต่อนาที

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางความร้อนของเส้นใย RPET/TiO₂

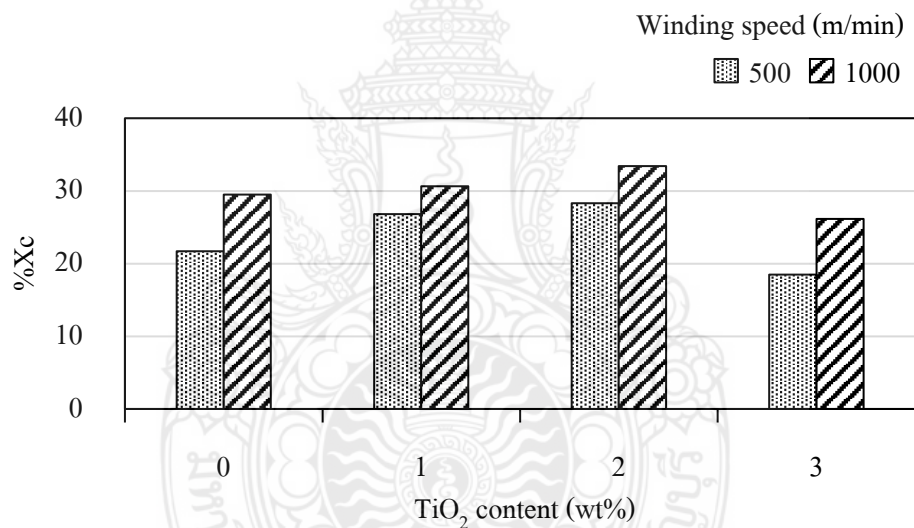
Winding Speed (m/min)	TiO ₂ (wt%)	T _g (°C)	T _c (°C)	ΔH _c (J/g)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	%X _c
500	0	86.9	136.2	-22.9	262.6	29.5	21.7
	1	85.4	133.8	-23.3	260.2	36.5	26.8
	2	89.1	133.9	-25.2	263.5	38.5	28.3
	3	88.7	133.0	-20.4	264.3	25.1	18.5
1000	0	86.6	130.9	-24.1	259.2	40.1	29.5
	1	88.4	133.4	-24.1	266.5	41.7	30.7
	2	87.6	133.4	-25.6	266.7	45.4	33.4
	3	87.5	131.9	-23.6	264.3	35.5	26.1

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) อุณหภูมิการหลอมผลึก (T_m) และเอนทาลปีของการหลอม (ΔH_m) เพื่อกำหนดหาค่าความเป็นผลึกของเส้นใยตามสมการที่ 2.7 และแสดงผลดังรูปที่ 4.7

ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยเป็น 500 เมตรต่อนาที อุณหภูมิการเกิดผลึกมีค่าเท่ากับ 136.2, 133.8, 133.9 และ 133.0 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการหลอมผลึก มีค่าเท่ากับ 262.6, 260.2, 263.5 และ 264.3 องศาเซลเซียส

เมื่อความเร็วในการเก็บเส้นใยเป็น 1,000 เมตรต่อนาที ค่าอุณหภูมิการเกิดผลึกมีค่าเท่ากับ 130.9, 133.4, 133.4 และ 131.9 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการหลอมผลึก มีค่าเท่ากับ 259.2, 266.5, 280.7 และ 264.3 องศาเซลเซียส

จะเห็นได้ว่า TiO_2 ที่เติมลงในเส้นใย RPET ทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และอุณหภูมิการหลอมผลึก (T_m) มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ แสดงว่า TiO_2 ที่เติมลงในเส้นใย RPET ไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน [30]



รูปที่ 4.8 ค่าความเป็นผลึกของเส้นใย RPET/ TiO_2

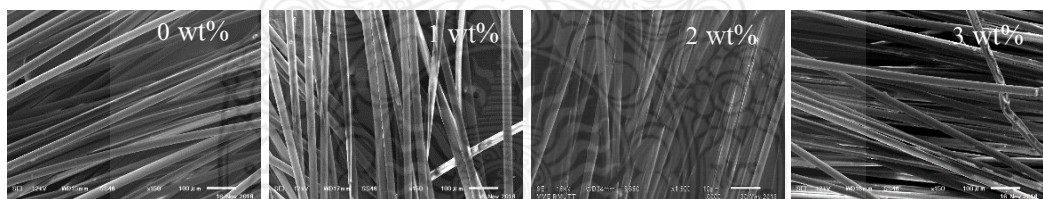
ค่าความเป็นผลึกของเส้นใยแสดงดังรูปที่ 4.8 เส้นใย RPET ที่ถูกม้วนเก็บด้วยความเร็ว 500 เมตรต่อนาที ที่ไม่เติม TiO_2 และเติม TiO_2 ร้อยละ 1, 2, และ 3 โดยน้ำหนัก มีค่าความเป็นผลึกของเส้นใย เท่ากับ 21.70, 26.80, 28.30 และ 18.50 ตามลำดับ

เส้นใย RPET ที่ถูกม้วนเก็บด้วยความเร็ว 1,000 เมตรต่อนาที ที่ไม่เติม TiO_2 และเติม TiO_2 ร้อยละ 1, 2, และ 3 โดยน้ำหนัก มีค่าความเป็นผลึกของเส้นใยเท่ากับ 29.50, 30.65, 33.42 และ 26.14 ตามลำดับ

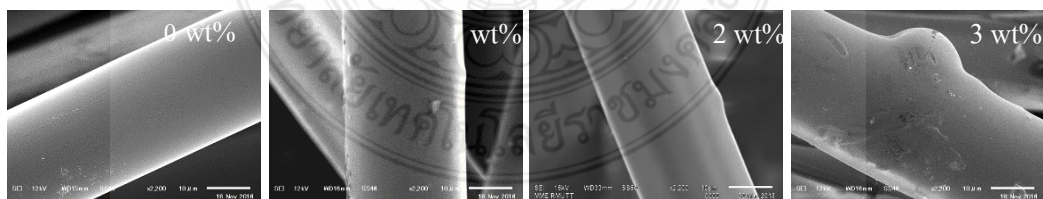
เส้นใยที่ม้วนเก็บด้วยความเร็ว 500 และ 1,000 เมตรต่อนาที มีค่าร้อยละความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อเติม TiO_2 ลงในเส้นใยที่ปริมาณร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักเนื่องจาก TiO_2 หน้าที่เป็นสารที่ช่วยในการก่อผลึก แต่เมื่อเติม TiO_2 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักค่าร้อยละความเป็นผลึกมีค่าลดลงเนื่องจากอนุภาคของ TiO_2 ที่มีมากขึ้นทำให้เกิดการรวมตัวขึ้นภายในเส้นใย [31]

4.6 ผลการทดสอบลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใยแบบเติมเส้นที่ไม่เติม TiO_2 และเติม TiO_2 ร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเท่ากับ 500 และ 1000 เมตรต่อนาที วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 150 เท่า และ 2200 เท่า เพื่อดูลักษณะพื้นผิวของเส้นใย RPET/ TiO_2



(ก) 150 เท่า



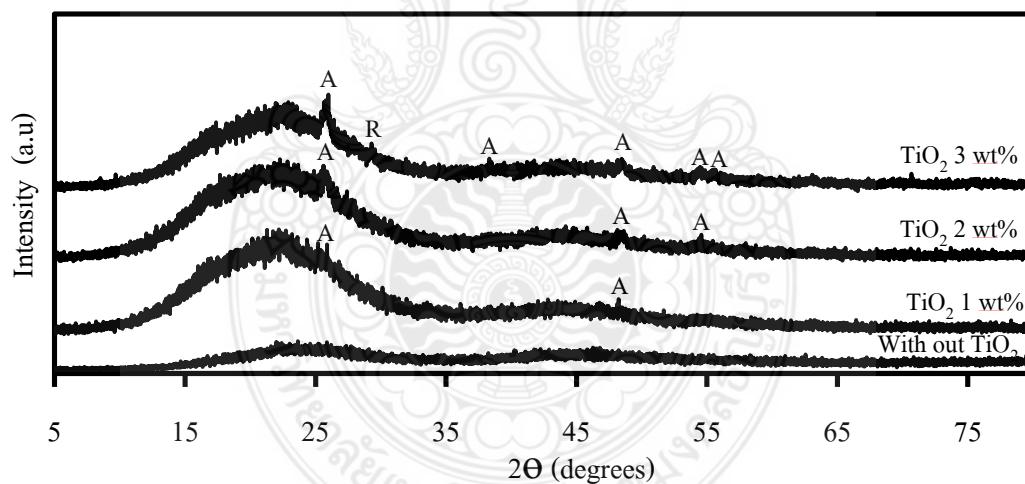
(ข) 2200 เท่า

รูปที่ 4.9 ลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใย RPET/ TiO_2

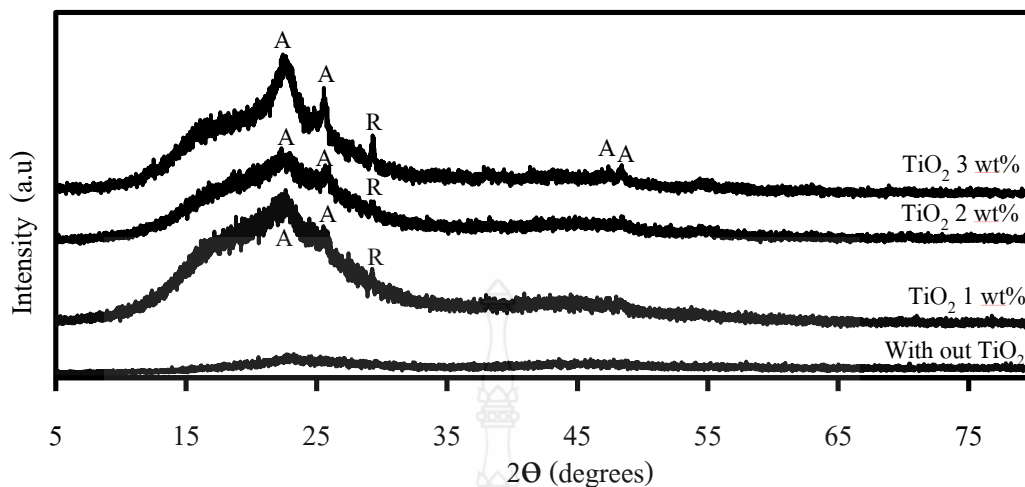
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาพื้นผิวของเส้นใยแสดงดังรูปที่ 4.9 ที่กำลังขยาย 2200 เท่า พบว่าเส้นใยที่ไม่ได้เติม TiO_2 ผิวของเส้นใยมีลักษณะเรียบตลอดเส้น แต่เมื่อเติม TiO_2 ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ผิวของเส้นใยมีลักษณะเป็นเม็ดที่ปูดขึ้นที่บริเวณผิวของเส้นใยและสังเกตเห็นชัดเจนเมื่อปริมาณของ TiO_2 เพิ่มขึ้น โดยที่ TiO_2 ไม่ได้ทะลุขึ้นมาอยู่บนพื้นผิว ยังโดนคลุมด้วยเนื้อพลาสติก RPET ที่กำลังขยาย 150 เท่า เส้นใย RPET ที่เติม TiO_2 ปริมาตรร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ลักษณะเม็ดที่ปูดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของเส้นใยเกิดขึ้นตลอดทั้งเส้นใย

4.7 ผลการทดสอบความเป็นผลึก ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟเฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer)

ผลการทดสอบของเส้นใย RPET/ TiO_2 ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟเฟรคโตมิเตอร์ทดสอบในช่วง 2θ เท่ากับ 5-80 องศา ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบ XRD ของเส้นใย RPET/ TiO_2 ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 500 เมตรต่อนาที



รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบ XRD ของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 1,000 เมตรต่อนาที

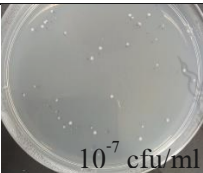
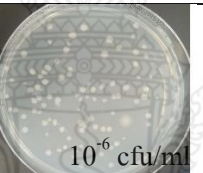
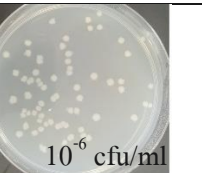
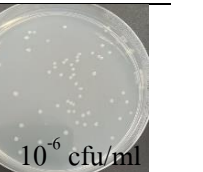




รูปที่ 4.9 พิก (Peak) แสดงความเป็นผลึกของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยเท่ากับ 500 เมตรต่อนาที พิกที่เกิดขึ้นในช่วง 2θ ของเส้นใย RPET ที่เติม TiO₂ ร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก โดยพิกที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อเติม TiO₂ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พิกที่เกิดขึ้น ได้แก่ 25.43°, 37.92°, 48.03°, 53.97° และ 55.05° เป็นการเลี้ยวเบนของระนาบผลึก (101), (112), (200), (105) และ (211) ของรูปแบบผลึกอนาเทส (JCPDS01-078-2486C) และ 27.49° เป็นการเลี้ยวเบนของระนาบผลึก (110) ของรูปแบบผลึกรูไทน์ (01-089-0553C)

รูปที่ 4.10 พิกที่เกิดขึ้น ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย PRET เท่ากับ 1,000 เมตรต่อนาที เห็นได้ชัดที่สุดเมื่อเติม TiO₂ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พิกที่เกิดขึ้น ได้แก่ 22.64°, 25.43°, 53.97° และ 55.05° เป็นการเลี้ยวเบนของระนาบผลึก (116), (101), (105) และ (211) ของรูปแบบผลึกอนาเทส (JCPDS01-078-2486C) และ 27.49° เป็นการเลี้ยวเบนของระนาบผลึก (110) ของรูปแบบผลึกรูไทน์ (01-089-0553C) เห็นได้ว่าความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็ว 1,000 เมตรต่อนาที ทำให้พิกของ TiO₂ แสดงออกมาชัดเจนกว่าเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ม้วนเก็บด้วยความเร็ว 500 เมตรต่อนาที [32,33]


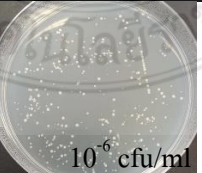
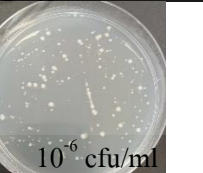
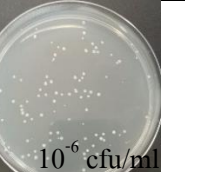
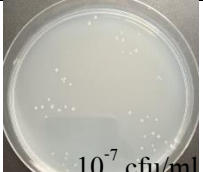
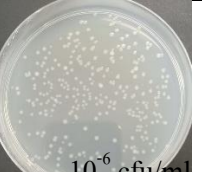


4.8 การยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus*

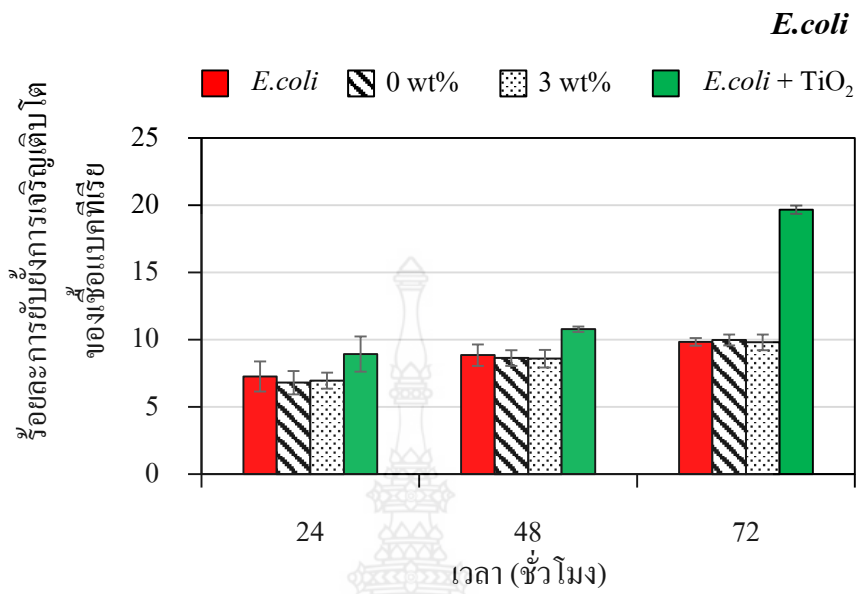
การทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะใช้ตัวอย่างเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บ เท่ากับ 1,000 เมตรต่อนาที เพราะว่าจะทำให้ TiO₂ แสดงประสิทธิภาพได้ดีขึ้น โดยทำการทดสอบภายใต้การให้แสง UV เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และเก็บตัวอย่างผลการทดลองทุกๆ 24 ชั่วโมง จากนั้นนับจำนวนโคโลนีที่เกิดบริเวณผิวหน้าของอาหารแข็ง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli*

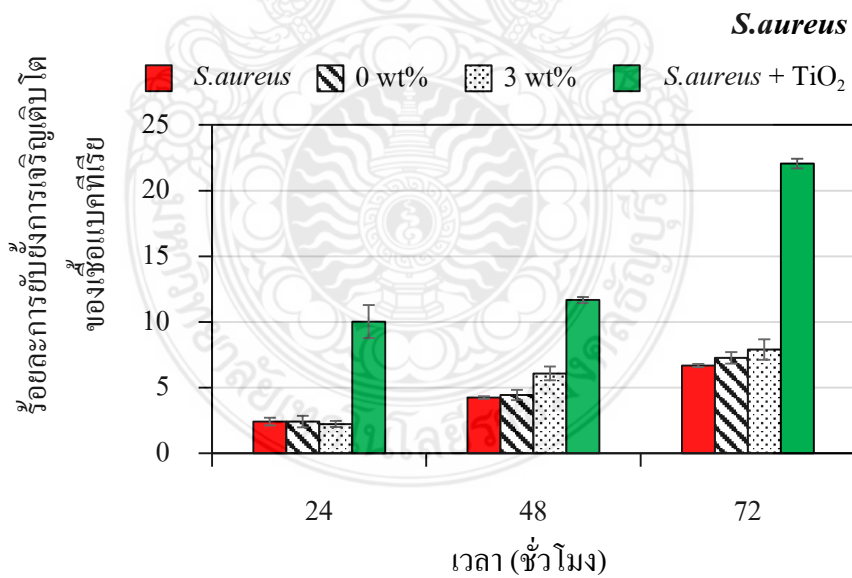
TiO ₂ (wt%)	Time (hr)			
	0	24	48	72
0	 10 ⁻⁷ cfu/ml	 10 ⁻⁶ cfu/ml	 10 ⁻⁶ cfu/ml	 10 ⁻⁶ cfu/ml
3	 10 ⁻⁷ cfu/ml	 10 ⁻⁶ cfu/ml	 10 ⁻⁶ cfu/ml	 10 ⁻⁶ cfu/ml

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus*

TiO ₂ (wt%)	Time (hr)			
	0	24	48	72
0	 10 ⁻⁷ cfu/ml	 10 ⁻⁶ cfu/ml	 10 ⁻⁶ cfu/ml	 10 ⁻⁶ cfu/ml
3	 10 ⁻⁷ cfu/ml	 10 ⁻⁶ cfu/ml	 10 ⁻⁶ cfu/ml	 10 ⁻⁶ cfu/ml



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *E.coli* ของเส้นใย RPET/TiO₂



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *S.aureus* ของเส้นใย RPET/TiO₂

ร้อยละการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียภายใต้การใช้แสง UV ที่เวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง *E.coli* มีค่าเท่ากับ 7.26, 8.85 และ 9.84 และ *S.aureus* มีค่าเท่ากับ 2.41, 4.24 และ 6.66 ตามลำดับ

ร้อยละการยับยั้งการเจริญเติบโตของเส้นใย RPET ที่เวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ของ *E.coli* มีค่าร้อยละ 6.81, 8.85 และ 9.98 และเส้นใย RPET ที่เติม TiO_2 ร้อยละ 3 เท่ากับ 6.96, 8.60 และ 9.81 ตามลำดับ

ร้อยละการยับยั้งการเจริญเติบโตของเส้นใย RPET ที่เวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ของ *S.aureus* มีค่าร้อยละ 2.40, 4.24 และ 6.66 และเส้นใย RPET ที่เติม TiO_2 ร้อยละ 3 เท่ากับ 2.22, 6.07 และ 7.89 ตามลำดับ

ร้อยละการยับยั้งการเจริญเติบโตของ TiO_2 ที่เวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ของ *E.coli* มีค่าเท่ากับ 8.94, 10.78 และ 19.68 และ *S.aureus* มีค่าเท่ากับ 10.02, 11.67 และ 22.06 ตามลำดับ เห็นได้ชัดว่า TiO_2 มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus*

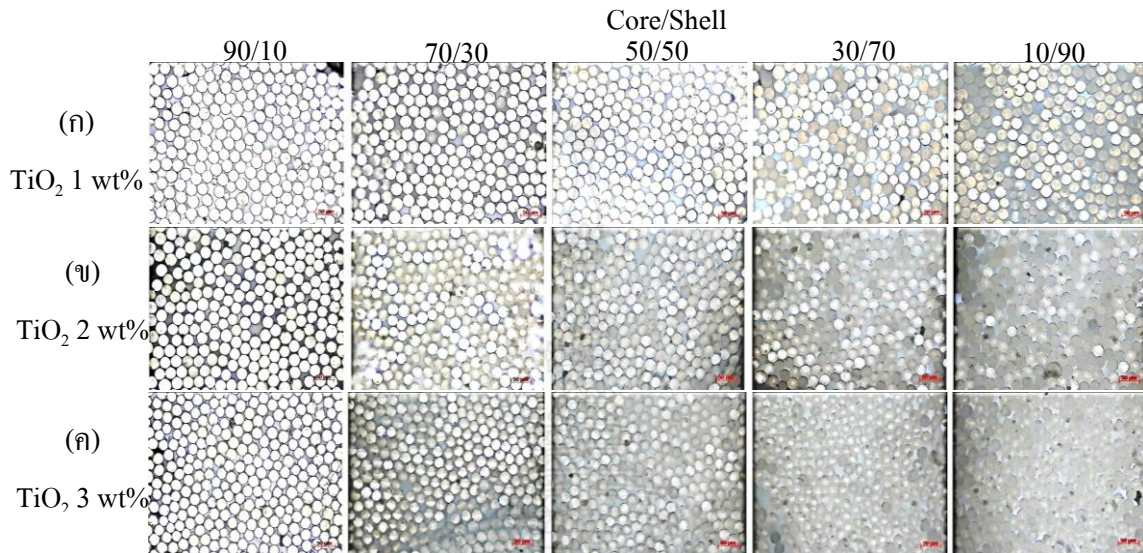
เส้นใยที่ขึ้นรูปแบบเต็มเส้นที่ปริมาณ TiO_2 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักไม่แสดงผลของการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* เนื่องจากการขึ้นรูปเส้นใยแบบเต็มเส้นทำให้อนุภาคของ TiO_2 รวมตัวกันอยู่ภายในเส้นใยจึงทำให้ TiO_2 ไม่สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรีย

ตอนที่ 2 เส้นใยแบบสององค์ประกอบ

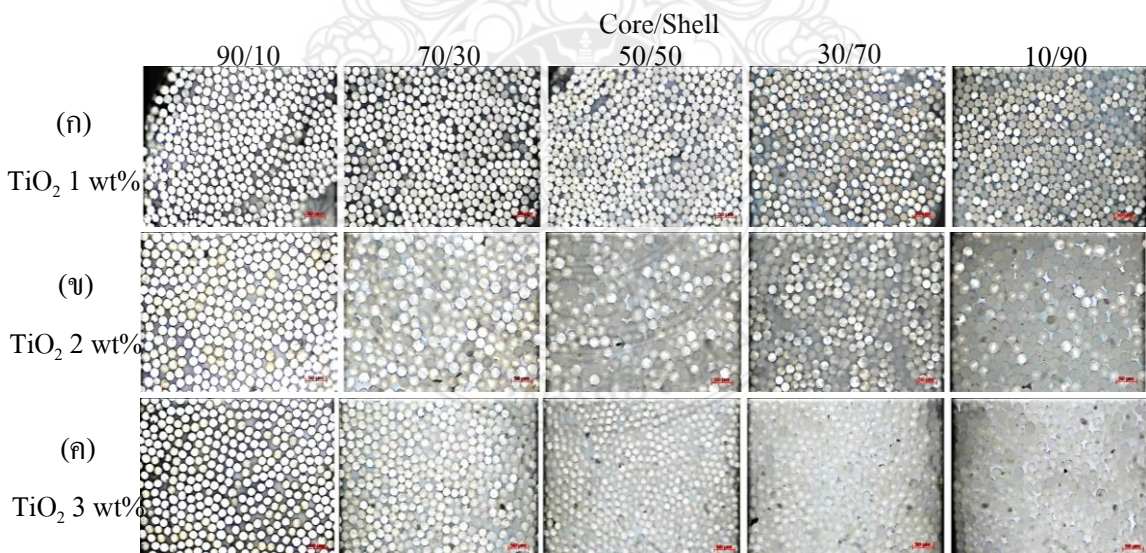
4.9 ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)

เส้นใยแบบสององค์ประกอบที่อัตราส่วน Core/Shell เท่ากับ 90/10, 70/30, 50/50, 30/70 และ 10/90 ที่เติม TiO_2 ร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเท่ากับ 500 และ 1000 เมตรต่อนาที นำมาทำการตัดขวางเส้นใยโดยการใช้แผ่นไมโครโทมและนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสง (Optical Microscope) ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.14 และ 4.15 จากรูปจะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนของ Core ที่มากกว่าส่วนของ Shell เส้นใยมีลักษณะเป็นรูวงกลมและมีสี่เหลี่ยม แต่เมื่ออัตราส่วนของ Shell เพิ่มขึ้น เส้นใยเมื่อส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงสีของเส้นใยจะขุ่นขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณของ TiO_2 เส้นใยจะขุ่นมากขึ้น

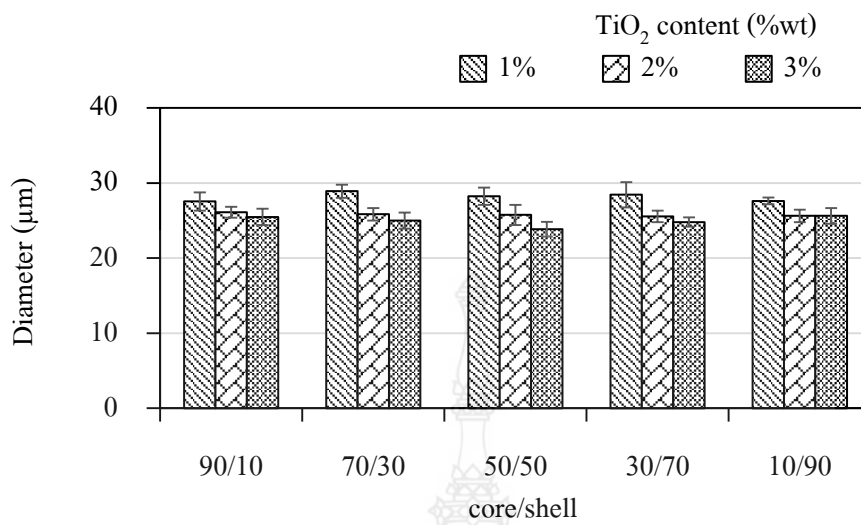
ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยที่ 1000 เมตรต่อนาที ลักษณะรูปของเส้นใย มีขนาดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยเท่ากับ 500 เมตรต่อนาที และขนาดจะใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ TiO_2 ที่เติมลงในเส้นใย



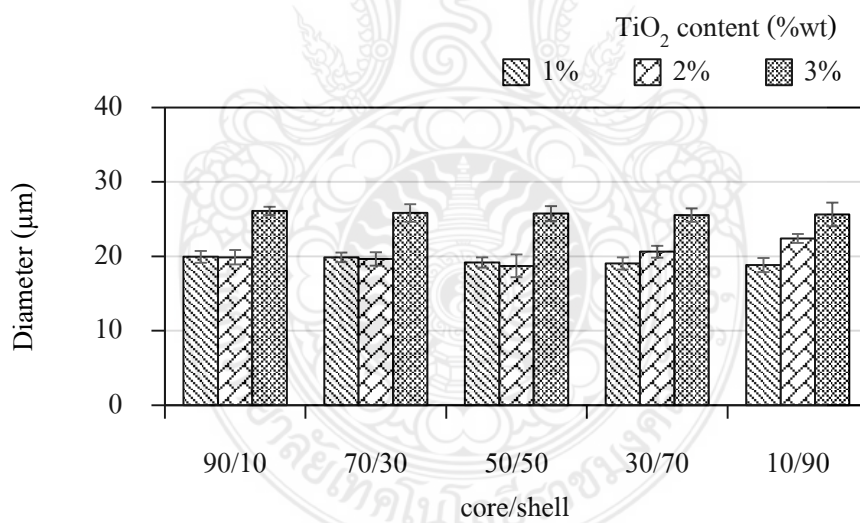
รูปที่ 4.14 ภาพตัดขวางของเส้นใย RPET/ TiO_2 ที่ส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่เติมปริมาณ TiO_2 ร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็ว 500 เมตรต่อนาที



รูปที่ 4.15 รูปภาพตัดขวางของเส้นใย RPET/ TiO_2 ที่ส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่เติมปริมาณ TiO_2 ร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็ว 1000 เมตรต่อนาที



รูปที่ 4.16 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 500 เมตรต่อนาที



รูปที่ 4.17 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 1000 เมตรต่อนาที

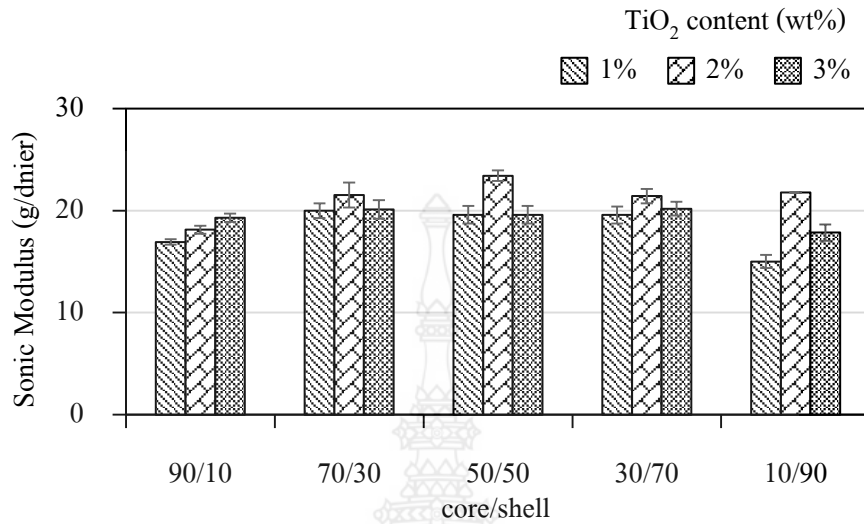
เส้นใยถูกม้วนเก็บที่ความเร็ว 500 และ 1,000 เมตรต่อนาที ที่อัตราส่วน Core/Shell เท่ากับ 90/10, 70/30, 50/50, 30/70 และ 10/90 ทำการตัดขวางเส้นใยและนำมาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย RPET/TiO₂ โดยใช้โปรแกรม Axiovision Rel 4.8 ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 4.16 และ 4.17

รูปที่ 4.16 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแบบสององค์ประกอบที่ม้วนเก็บด้วยความเร็ว 500 เมตรต่อนาที ที่อัตราส่วน Core/Shell เท่ากับ 90/10, 70/30, 50/50, 30/70 และ 10/90 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่เติม TiO₂ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 27.54, 28.91, 28.23, 28.43 และ 27.61 ไมโครเมตร เส้นใยที่เติม TiO₂ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 26.10, 25.83, 25.76, 25.55 และ 25.62 ไมโครเมตร และเส้นใยที่เติม TiO₂ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 25.48, 25.00, 25.76, 25.55 และ 25.61 ไมโครเมตร ตามลำดับ

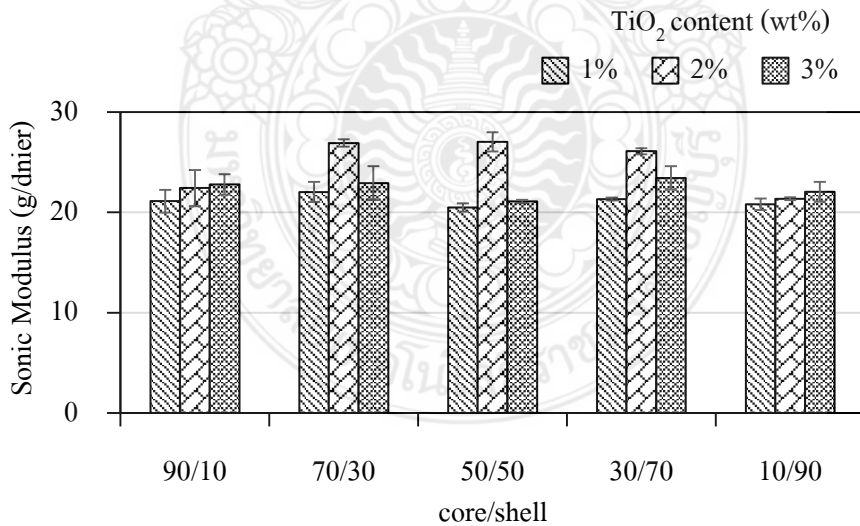
รูปที่ 4.17 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแบบสององค์ประกอบที่ม้วนเก็บด้วยความเร็ว 1,000 เมตรต่อนาที ที่อัตราส่วน Core/Shell เท่ากับ 90/10, 70/30, 50/50, 30/70 และ 10/90 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่เติม TiO₂ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 19.93, 19.87, 19.18, 19.04 และ 18.04 ไมโครเมตร เส้นใยที่เติม TiO₂ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 19.88, 19.66, 18.71, 20.26 และ 22.40 ไมโครเมตร และเส้นใยที่เติม TiO₂ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 26.10, 25.83, 23.84, 24.80 และ 25.62 ไมโครเมตร ตามลำดับ

ที่อัตราส่วน Core/Shell และความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยเดียวกันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยใกล้เคียงกัน ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 500 เมตรต่อนาที เส้นใยมีขนาดเล็กลงเมื่อเติม TiO₂ ลงในเส้นใยมากขึ้นเนื่องจากเส้นใยยังยึดตัวไม่สุด แต่เมื่อความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยเป็น 1,000 เมตรต่อนาที เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่ม TiO₂ เนื่องจากเส้นใยมีความแข็งแรงขึ้นทำให้การยึดตัวลดลงในขณะที่ม้วนเก็บเส้นใย

4.10 ผลการทดสอบการเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย (Dynamic Modulus Tester)



รูปที่ 4.18 ค่าการเรียงตัวโมเลกุลของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 500 เมตร ต่อนาที



รูปที่ 4.19 ค่าการเรียงตัวโมเลกุลของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 1000 เมตร ต่อนาที

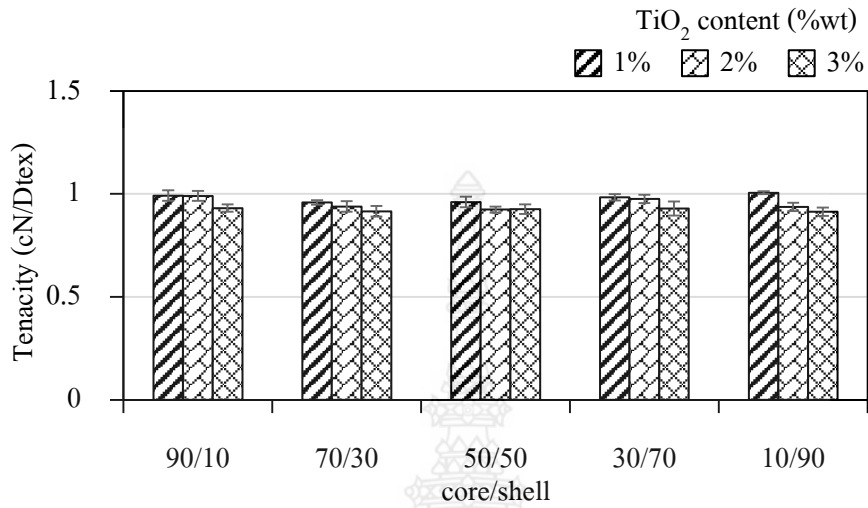
การเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย (Sonic Modulus Tester) เป็นการวัดความเร็วของเสียงที่วิ่งผ่านเส้นใย ซึ่งความเร็วที่ผ่านนั้นจะสะท้อนถึงลักษณะโครงสร้างและการจัดเรียงองค์ประกอบของเส้นใยสององค์ประกอบผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.18 และ 4.19

รูปที่ 4.17 แสดงค่าการเรียงตัวโมเลกุลของเส้นใยแบบสององค์ประกอบที่ม้วนเก็บด้วยความเร็ว 500 เมตรต่อนาที ที่อัตราส่วน Core/Shell เท่ากับ 90/10, 70/30, 50/50, 30/70 และ 10/90 มีค่าการเรียงตัวโมเลกุลของเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 16.93, 19.99, 19.60, 19.57 และ 15.02 กรัมต่อดีเนียร์ เส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 18.31, 21.53, 23.42, 21.42 และ 21.78 กรัมต่อดีเนียร์ และเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 19.29, 20.12, 19.60, 20.19 และ 17.84 กรัมต่อดีเนียร์ ตามลำดับ

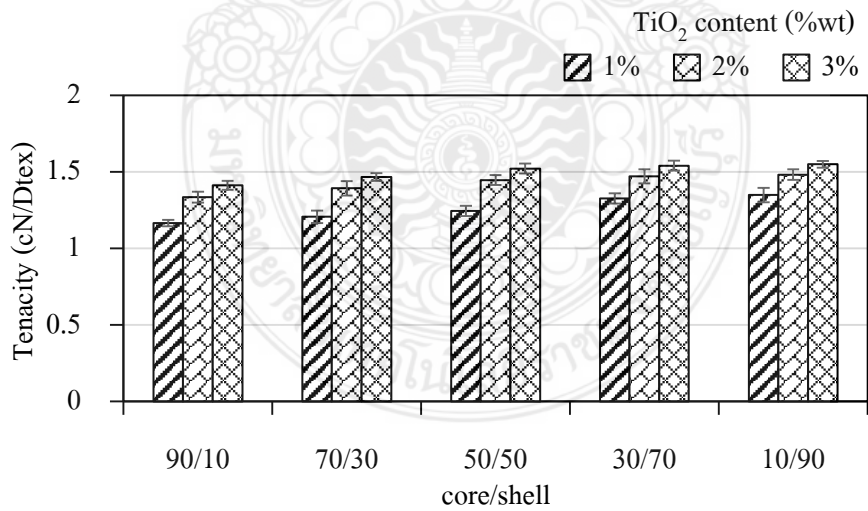
รูปที่ 4.18 แสดงค่าการเรียงตัวโมเลกุลของเส้นใยแบบสององค์ประกอบที่ม้วนเก็บด้วยความเร็ว 1,000 เมตรต่อนาที ที่อัตราส่วน Core/Shell เท่ากับ 90/10, 70/30, 50/50, 30/70 และ 10/90 มีค่าการเรียงตัวโมเลกุลของเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 21.12, 22.04, 20.49, 21.33 และ 20.08 กรัมต่อดีเนียร์ เส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 19.88, 19.66, 18.71, 20.26 และ 22.40 กรัมต่อดีเนียร์ และเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 22.43, 26.92, 27.04, 26.11 และ 21.37 กรัมต่อดีเนียร์ ตามลำดับ

ค่าการเรียงตัวของเส้นใยสององค์ประกอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติม TiO_2 ลงในเส้นใยที่อัตราส่วน Core/Shell เป็น 90/10 แต่เมื่ออัตราส่วนเป็น 70/30, 50/50, 30/70 และ 90/10 ค่าการเรียงตัวสูงสุดที่ปริมาณ TiO_2 ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เนื่องจากอนุภาคของ TiO_2 มีการจัดเรียงตัวมากขึ้นที่อัตราส่วนของ Core ลดลง เช่นเดียวกับที่ความเร็วในการเก็บเส้นใยเท่ากับ 1,000 เมตรต่อนาที

4.11 ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tenacity)



รูปที่ 4.20 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 500 เมตรต่อนาที



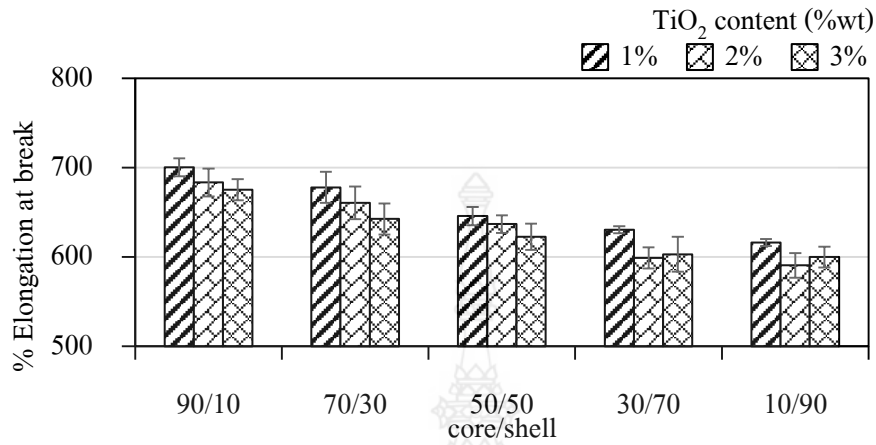
รูปที่ 4.21 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 1,000 เมตรต่อนาที

รูปที่ 4.20 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยแบบสององค์ประกอบที่ม้วนเก็บด้วยความเร็ว 500 เมตรต่อนาที ที่อัตราส่วน Core/Shell เท่ากับ 90/10, 70/30, 50/50, 30/70 และ 10/90 มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 0.99, 0.96, 0.96, 0.98 และ 1.00 เซนติวัตตันต่อดีเทกซ์ เส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 0.99, 0.93, 0.92, 0.98 และ 0.94 เซนติวัตตันต่อดีเทกซ์ และเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 0.93, 0.92, 0.93, 0.93 และ 0.91 เซนติวัตตันต่อดีเทกซ์ ตามลำดับ จะเห็นว่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยมีแนวโน้มลดลงในแต่ละอัตราส่วนของ Core/Shell เนื่องจากอนุภาคของ TiO_2 ที่เติมลงในเส้นใยมากขึ้นทำให้เกิดรวมตัวกัน

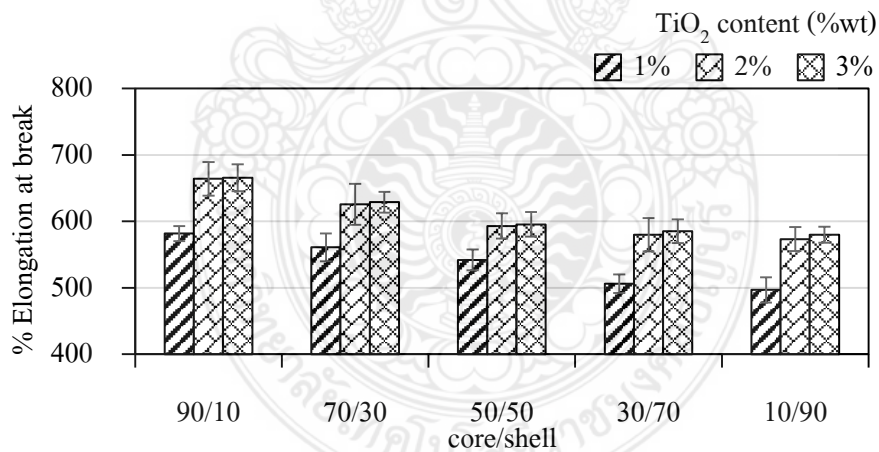
รูปที่ 4.21 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยแบบสององค์ประกอบที่ม้วนเก็บด้วยความเร็ว 1,000 เมตรต่อนาที ที่อัตราส่วน Core/Shell เท่ากับ 90/10, 70/30, 50/50, 30/70 และ 10/90 มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 1.17, 1.21, 1.24, 1.33 และ 1.35 เซนติวัตตันต่อดีเทกซ์ เส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 1.33, 1.39, 1.45, 1.47 และ 1.48 เซนติวัตตันต่อดีเทกซ์ และเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 1.41, 1.47, 1.52, 1.54 และ 1.55 เซนติวัตตันต่อดีเทกซ์ ตามลำดับ จะเห็นว่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในแต่ละอัตราส่วนของ Core/Shell เนื่องจากอนุภาคของ TiO_2 ที่เติมเป็นตัวช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเส้นใย

ที่อัตราส่วน Core/Shell และความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยเดียวกันค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยใกล้เคียงกัน เมื่อความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยเพิ่มขึ้นจาก 500 เมตรต่อนาที เป็น 1,000 เมตรต่อนาที ค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาดของเส้นใยเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดึงที่สูงช่วยลดการรวมตัวของอนุภาค TiO_2 ในเส้นใย RPET/ TiO_2

4.12 ผลการทดสอบค่าร้อยละการยืดตัวของเส้นใย ณ จุดขาด (%Elongation at break)



รูปที่ 4.22 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 500 เมตร ต่อนาที



รูปที่ 4.23 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 500 เมตร ต่อนาที

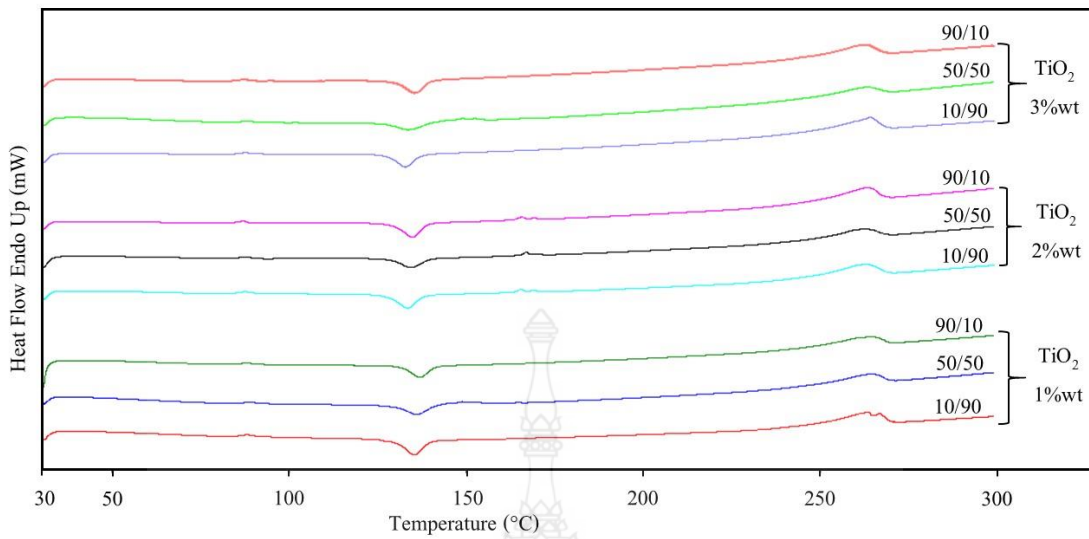
รูปที่ 4.22 แสดงค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดของเส้นใยแบบสององค์ประกอบที่ม้วนเก็บด้วยความเร็ว 500 เมตรต่อนาที ที่อัตราส่วน Core/Shell เท่ากับ 90/10, 70/30, 50/50, 30/70 และ 10/90 มีค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดของเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เท่ากับ ร้อยละ 700, 678, 646, 630 และ 616 เส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เท่ากับ ร้อยละ 683, 661, 637, 599 และ 591 และเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เท่ากับ ร้อยละ 676, 643, 623, 603 และ 600 ตามลำดับ เนื่องจาก TiO_2 เป็นผลึกของแข็งเมื่อเติมลงในพอลิเมอร์ส่งผลให้ค่าการยึดตัวของพอลิเมอร์มีค่าลดลง

รูปที่ 4.23 แสดงค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของเส้นใยแบบสององค์ประกอบที่ม้วนเก็บด้วยความเร็ว 1,000 เมตรต่อนาที ที่อัตราส่วน Core/Shell เท่ากับ 90/10, 70/30, 50/50, 30/70 และ 10/90 มีค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดของเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เท่ากับ ร้อยละ 582, 561, 542, 506 และ 497 เส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เท่ากับ ร้อยละ 664, 626, 593, 580 และ 573 และเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เท่ากับ ร้อยละ 666, 629, 596, 585 และ 580 ตามลำดับ เนื่องจากความเร็วในการเก็บเส้นใยที่เพิ่มขึ้นทำให้ TiO_2 มีการจัดเรียงตัวในพอลิเมอร์ดีมากขึ้นและยังช่วยลดการรวมตัวกันของ TiO_2 ในเส้นใยสององค์ประกอบ

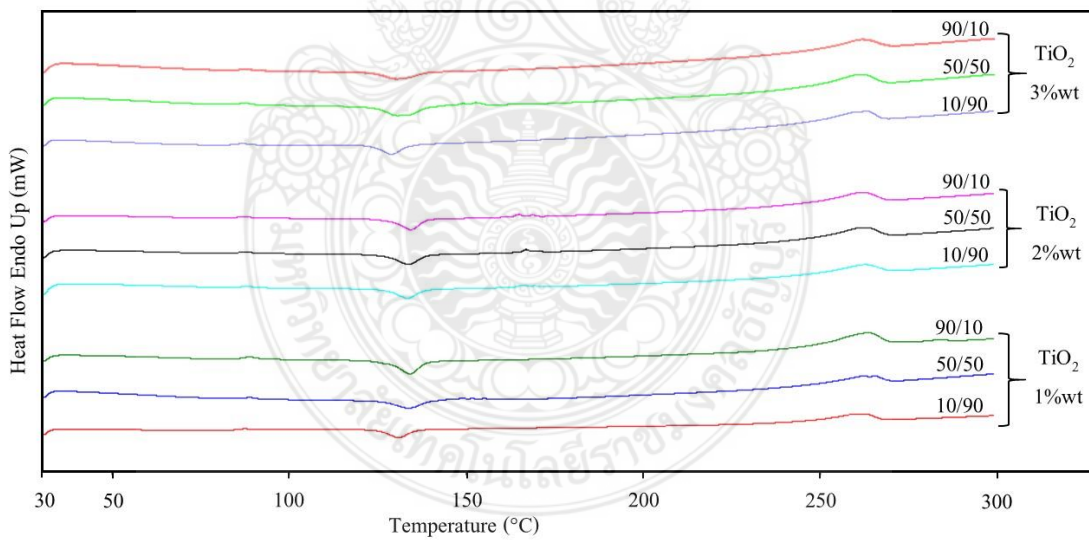
ที่อัตราส่วน Core/Shell ของเส้นใยเมื่อ Core ใหญ่ขึ้นทำให้ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของเส้นใยเพิ่มขึ้นเนื่องจาก TiO_2 ที่อยู่ในส่วน Shell มีน้อยลงทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง เมื่อความเร็วการม้วนเก็บเส้นใยเท่ากับ 1,000 เมตรต่อนาที ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของเส้นใยมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อ TiO_2 ที่เติมลงในเส้นใยมากขึ้นเนื่องจากอนุภาคของ TiO_2 ถูกแรงดึงที่สูงทำให้เกิดการกระจายตัวในเส้นใยมากขึ้น

4.13 สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)

เส้นใยแบบสององค์ประกอบที่อัตราส่วน Core/Shell เท่ากับ 90/10, 70/30, 50/50, 30/70 และ 10/90 ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเท่ากับ 500 และ 1,000 เมตรต่อนาที นำมาทดสอบสมบัติทางความร้อน โดยการเตรียมเส้นใยให้ได้น้ำหนัก 0.5-1.0 มิลลิกรัมต่อตัวอย่าง ใส่พาน (Pan) และดำเนินการด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ที่สภาวะการทดสอบดังตารางที่ 3.2 และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที ผลดำเนินการแสดงดังรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.24 เทอร์โมแกรมสมบัติทางความร้อนของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 500 เมตรต่อนาที



รูปที่ 4.25 เทอร์โมแกรมสมบัติทางความร้อนของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 1000 เมตรต่อนาที

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของเส้นใย RPET/TiO₂ แบบสององค์ประกอบ

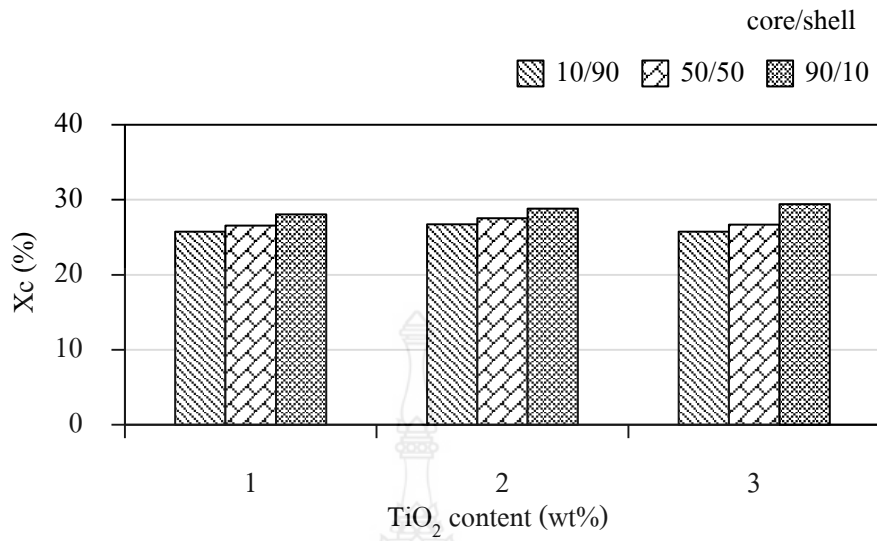
Titanium dioxide 1%wt							
Winding Speed (m/min)	Core/shell	T _g (°C)	T _c (°C)	ΔH _c (J/g)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	X _c (%)
500	10/90	86.07	135.32	-23.47	263.02	36.09	25.76
	50/50	87.56	136.10	-29.49	263.41	37.22	26.57
	90/10	86.05	136.92	-24.35	261.38	39.28	28.03
1000	10/90	85.56	130.92	-19.79	259.86	36.71	26.20
	50/50	87.22	133.80	-31.60	262.21	37.67	26.89
	90/10	87.24	134.12	-23.56	263.07	40.23	28.71
Titanium dioxide 2%wt							
Winding Speed (m/min)	Core/shell	T _g (°C)	T _c (°C)	ΔH _c (J/g)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	X _c (%)
500	10/90	85.51	133.43	-25.42	262.25	37.43	26.72
	50/50	86.29	134.34	-25.17	261.95	38.55	27.52
	90/10	86.01	134.80	-25.93	262.75	40.37	28.82
1000	10/90	86.81	133.33	-22.11	262.32	37.80	26.98
	50/50	85.95	133.60	-22.22	261.87	39.88	28.47
	90/10	85.55	134.38	-23.89	261.43	40.59	28.97

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของเส้นใย RPET/TiO₂ แบบสององค์ประกอบ (ต่อ)

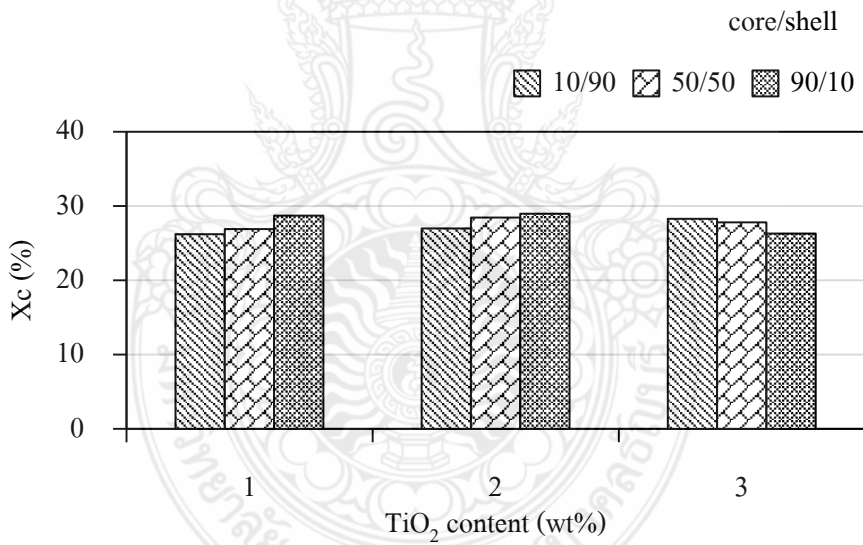
Titanium dioxide 3%wt							
Winding Speed (m/min)	Core/shell	T _g (°C)	T _c (°C)	ΔH _c (J/g)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	X _c (%)
500	10/90	85.14	132.84	-23.13	263.91	36.07	25.75
	50/50	86.55	133.66	-31.51	262.54	37.35	26.66
	90/10	85.04	135.54	-25.69	262.34	41.21	29.41
1000	10/90	84.66	128.90	-22.68	263.13	39.64	28.29
	50/50	86.10	130.73	-26.54	260.75	38.95	27.80
	90/10	86.04	130.46	-22.48	261.74	36.82	26.28

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) อุณหภูมิการหลอมผลึก (T_m) และเอนทาลปีของการหลอม (ΔH_m) เพื่อคำนวณหาค่าร้อยละความเป็นผลึกของเส้นใยตามสมการที่ 2.7 และแสดงผลดังรูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26

จะเห็นได้ว่า TiO₂ ที่เติมลงในเส้นใย RPET ที่ขึ้นรูปแบบสององค์ประกอบในอัตราส่วน Core/Shell ต่างๆ ทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และอุณหภูมิการหลอมผลึก (T_m) มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ ในทำนองเดียวกันกับการขึ้นรูปเส้นใยแบบเต็มเส้น แสดงว่า TiO₂ ที่เติมลงในเส้นใย RPET ไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน



รูปที่ 4.26 ค่าความเป็นผลึกของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 500 เมตรต่อนาที



รูปที่ 4.27 ค่าความเป็นผลึกของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 1,000 เมตรต่อนาที

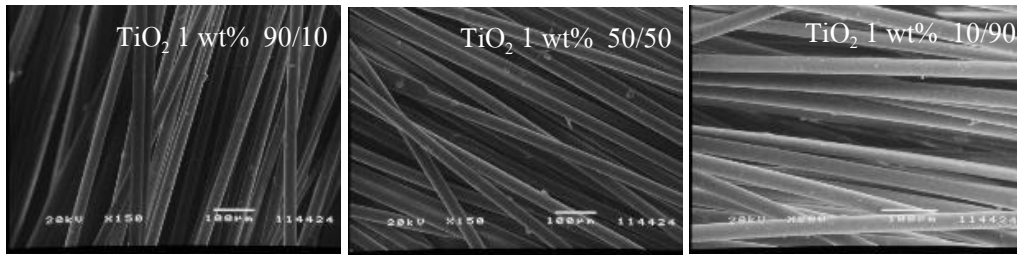
รูปที่ 4.26 แสดงค่าความเป็นผลึกของเส้นใยของเส้นใยแบบสององค์ประกอบที่มีม้วนเก็บด้วยความเร็ว 500 เมตรต่อนาที ที่อัตราส่วน Core/Shell เท่ากับ 90/10, 50/50, และ 10/90 ค่าความเป็นผลึกของเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 25.76, 26.57 และ 28.03 เส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 26.72, 27.52 และ 28.82 และเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 25.75, 26.66 และ 29.41 ตามลำดับ

รูปที่ 4.27 แสดงค่าร้อยละความเป็นผลึกของเส้นใยแบบสององค์ประกอบที่มีม้วนเก็บด้วยความเร็ว 1,000 เมตรต่อนาที ที่อัตราส่วน Core/Shell เท่ากับ 90/10, 50/50, และ 10/90 ค่าความเป็นผลึกของเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 26.20, 26.89 และ 28.71 เส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 26.98, 28.47 และ 28.97 และเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 28.29, 27.80 และ 26.28 ตามลำดับ

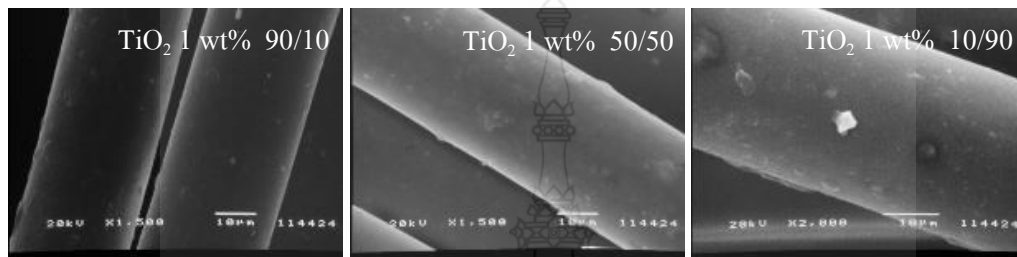
ความเร็วเส้นใยที่มีม้วนเก็บ 500 และ 1,000 เมตรต่อนาที มีค่าร้อยละความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นและอัตราส่วน Core/shell เป็น 90/10 มีค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงกว่า อัตราส่วน Core/Shell 50/50 และ 10/90 เนื่องจาก อนุภาคของ TiO_2 มีการกระจายอยู่บนผิวหน้าของเส้นใยดีขึ้น แต่ที่ปริมาณ TiO_2 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ของความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยเป็น 1,000 เมตรต่อนาที ค่าร้อยละความเป็นผลึกมีค่าลดลงเนื่องจากอนุภาคของ TiO_2 มีปริมาณลดลงเมื่อ Core มีขนาดใหญ่ขึ้น

4.14 ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยแบบสององค์ประกอบที่อัตราส่วนของ Core/Shell เท่ากับ 90/10, 50/50 และ 10/90 ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเท่ากับ 500 และ 1000 เมตรต่อนาที ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 150X และ 2200X เพื่อดูลักษณะผิวหน้าของเส้นใย RPET/ TiO_2



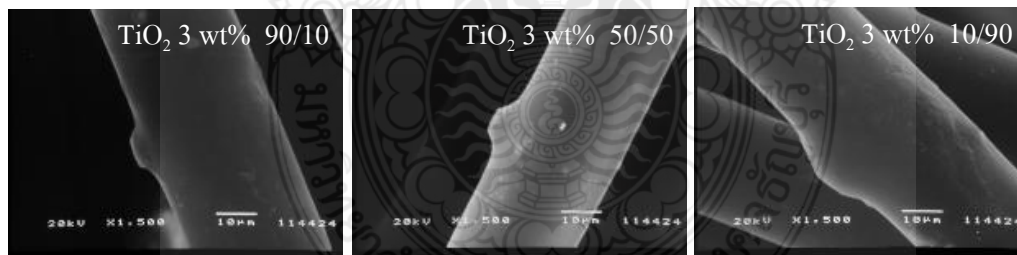
(ก) 150 เท่า TiO_2 1 wt%



(ข) 2200 เท่า TiO_2 1 wt%

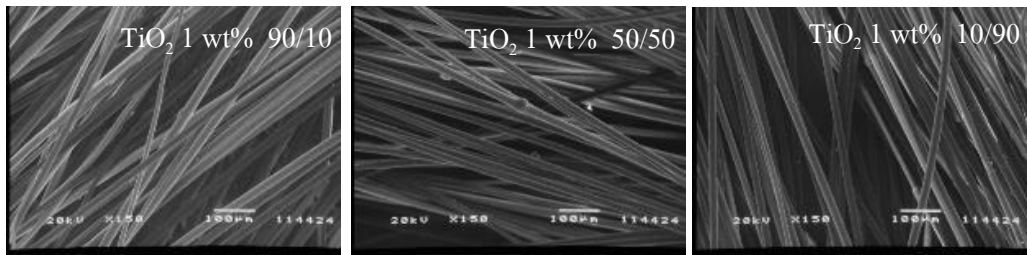


(ค) 150 เท่า TiO_2 3 wt%

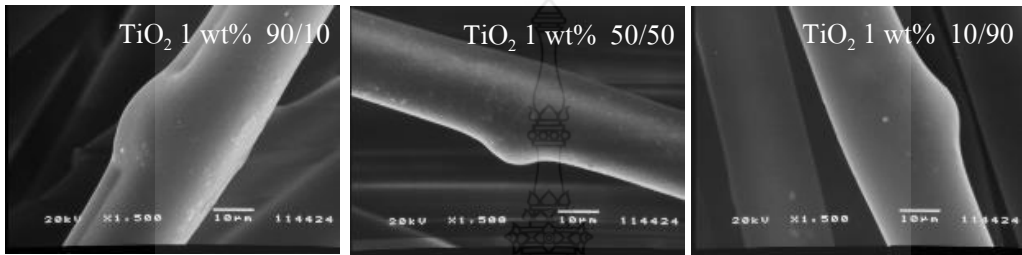


(ง) 2200 เท่า TiO_2 3 wt%

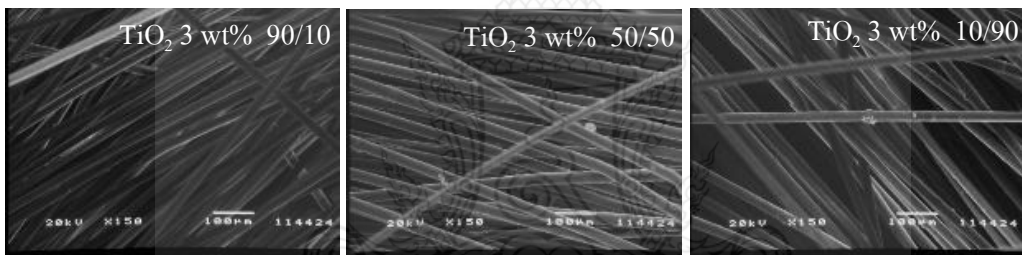
รูปที่ 4.28 สัณฐานวิทยาของเส้นใย RPET/ TiO_2 ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 500 เมตรต่อนาที



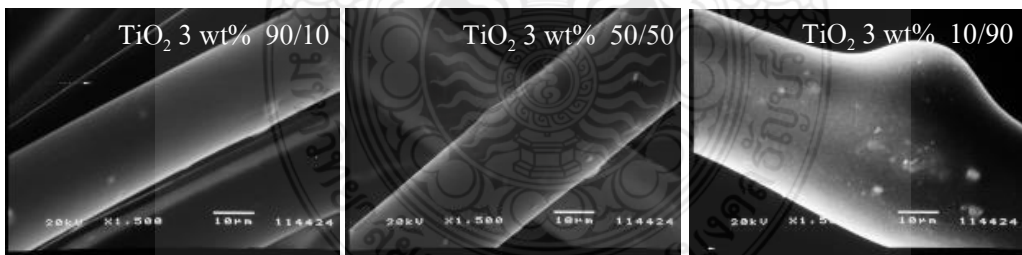
(ก) 150 เท่า TiO₂ 1 wt%



(ข) 2200 เท่า TiO₂ 1 wt%



(ค) 150 เท่า TiO₂ 3 wt%



(ง) 2200 เท่า TiO₂ 3 wt%

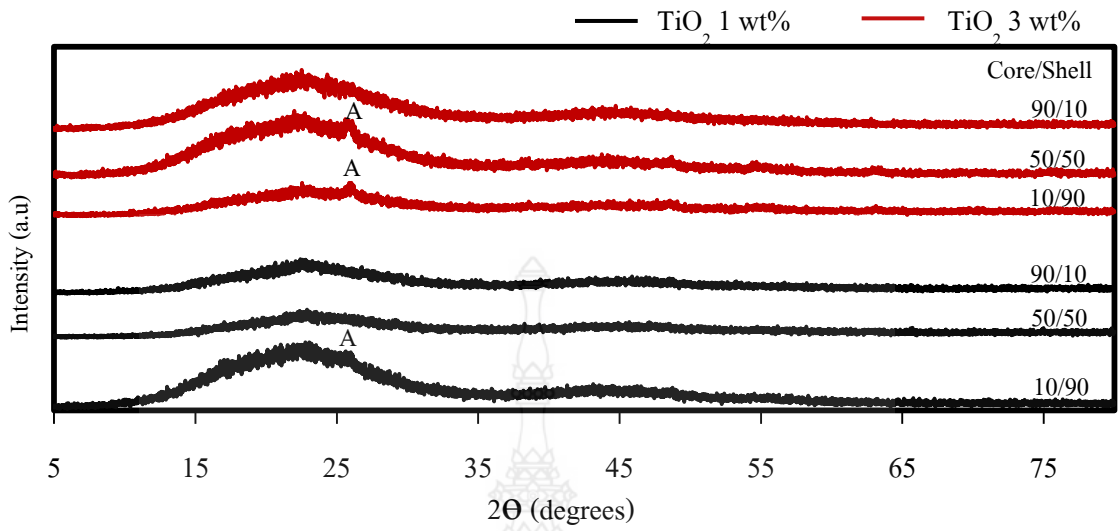
รูปที่ 4.29 สัณฐานวิทยาของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 1,000 เมตรต่อนาที

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาพื้นผิวของเส้นใยแบบสององค์ประกอบที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยเท่ากับ 500 เมตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.28 ที่ปริมาณ TiO_2 ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักที่กำลังขยาย 2200 เท่า จะเห็นว่าเส้นใยไม่เรียบและมี TiO_2 รวมตัวอยู่บนผิวของเส้นใยซึ่งจะเห็นชัดเจนเมื่อปริมาณ TiO_2 ที่เติมลงในเส้นใย เท่ากับ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก จะสังเกตได้ว่าเส้นใยมี TiO_2 รวมตัวอยู่บริเวณผิวของเส้นใยตลอดเส้นใยเมื่อดูจากภาพกำลังขยาย 150 เท่า

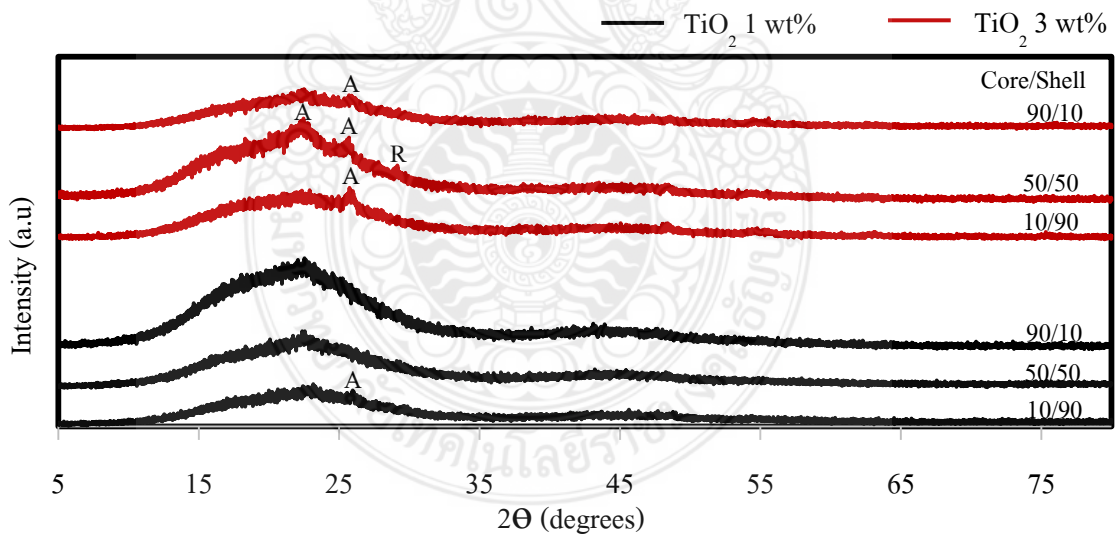
เมื่อความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยเท่ากับ 1,000 เมตรต่อนาที สัณฐานวิทยาพื้นผิวของเส้นใยแบบสององค์ประกอบ แสดงดังรูปที่ 4.29 จะเห็นได้ชัดว่า TiO_2 ที่เติมลงไปนั้นเกิดการรวมตัวกันทำให้ผิวของเส้นใยมีลักษณะที่นูนออกมาเห็นได้ชัดที่อัตราส่วน Core/Shell เท่ากับ 10/90 และปริมาณ TiO_2 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักเมื่อดูจากภาพกำลังขยาย 2200 เท่า และการรวมตัวของ TiO_2 จะลดลงเมื่ออัตราส่วน Core/Shell เป็น 50/50 และ 90/10 ทำให้เส้นใยมีลักษณะขรุขระเพียงเล็กน้อยตลอดเส้นใยเมื่อดูจากภาพกำลังขยาย 150 เท่า

4.15 การทดสอบความเป็นผลึก ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer)

ผลการทดสอบของเส้นใยสององค์ประกอบที่อัตราส่วน Core/Shell เท่ากับ 90/10 ,50/50 และ 10/90 ที่เติม TiO_2 ร้อยละ 1 และ 3 โดยน้ำหนักด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ทดสอบที่ช่วง 2θ เท่ากับ 5-80 องศา $\text{Cu K}\alpha$ แผ่รังสีด้วยความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ 1.5418 อังสตรอม แรงดันไฟฟ้า (Voltage) เท่ากับ 40 กิโลโวลต์ และกระแสไฟฟ้า (Current) เท่ากับ 30 มิลลิแอมป์ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.29 และ 4.30



รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบ XRD ของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 500 เมตรต่อ
นาที



รูปที่ 4.31 ผลการทดสอบ XRD ของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการปั่นเก็บเส้นใย 1,000 เมตร
ต่อนาที

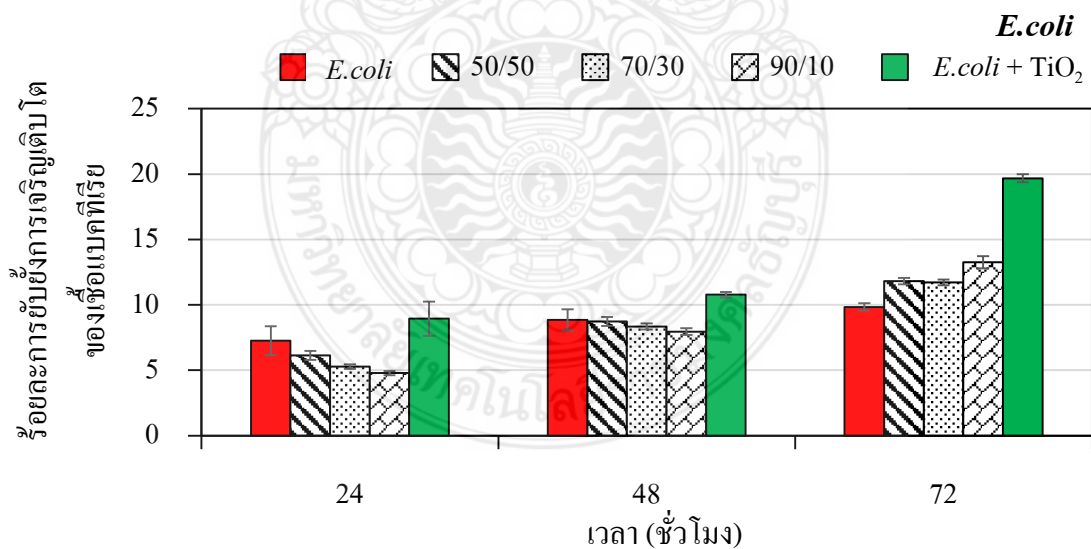
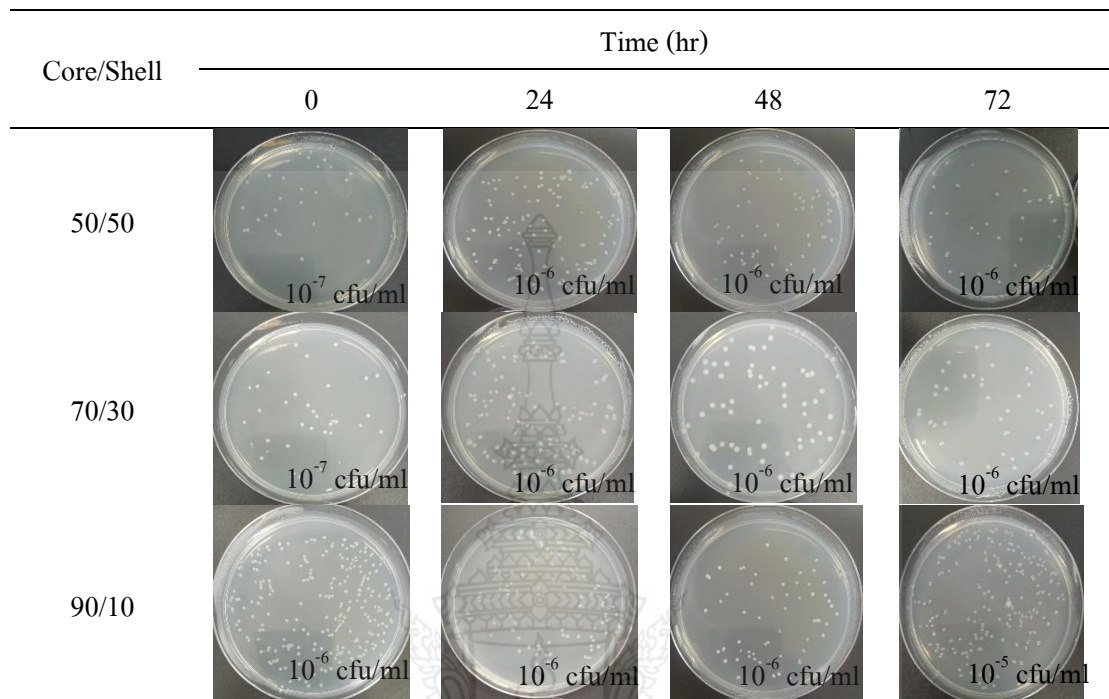
พิกแสดงความเป็นผลึกของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยเท่ากับ 500 เมตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.30 พิกที่เกิดขึ้นในช่วง 2θ ที่อัตราส่วน Core/Shell เป็น 10/90 ของเส้นใย RPET ที่เติม TiO₂ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และที่อัตราส่วน Core/Shell เป็น 50/50 และ 10/90 ของเส้นใย RPET ที่เติม TiO₂ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก แสดงพิกที่เหมือนกัน คือ 25.43° เป็นการเลี้ยวเบนของระนาบผลึก (101) ของรูปแบบผลึกอานาเทส

รูปที่ 4.31 แสดงระนาบความเป็นผลึกของเส้นใยที่ม้วนเก็บด้วยความเร็วเท่ากับ 1,000 เมตรต่อนาที พิกที่เกิดคล้ายกับความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 500 เมตรต่อนาที แต่แสดงพิกของ TiO₂ ชัดเจนที่สุด ที่อัตราส่วน Core/Shell เป็น 50/50 ของเส้นใยที่เติม TiO₂ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยพิกที่เกิดขึ้นได้แก่ 22.64° และ 25.43° เป็นการเลี้ยวเบนของระนาบผลึก (116) และ (101) ของรูปแบบผลึกอานาเทสและ 27.49° เป็นการเลี้ยวเบนของระนาบผลึก (110) ของรูปแบบผลึกรูไทน์

4.16 การยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus*

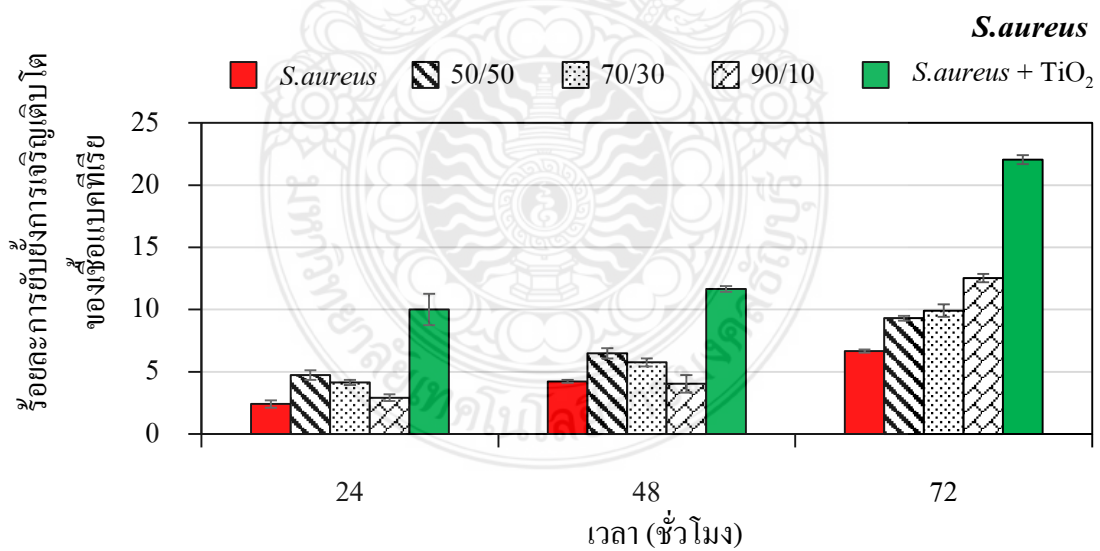
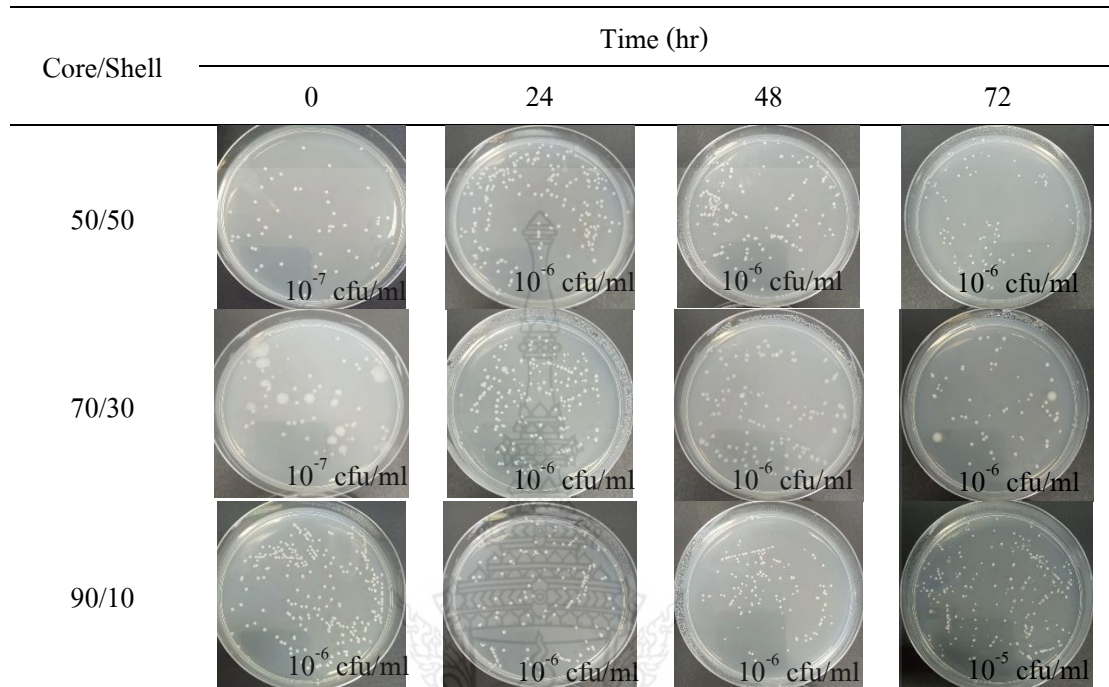
การทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียของเส้นใยแบบสององค์ประกอบที่เติม TiO₂ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วน Core/Shell เท่ากับ 50/50, 70/30 และ 90/10 โดยทำการทดสอบภายใต้การให้แสง UV เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และเก็บตัวอย่างผลการทดลองทุกๆ 24 ชั่วโมง จากนั้นนับจำนวนโคโลนีที่เกิดบริเวณผิวหน้าของอาหารแข็ง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ของเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.32 ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *E.coli* ของเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ของเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.33 ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *S.aureus* ของเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

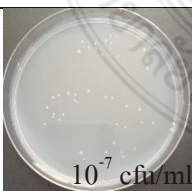
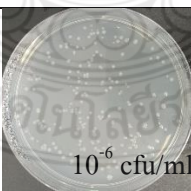
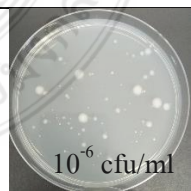
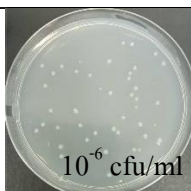
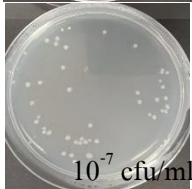
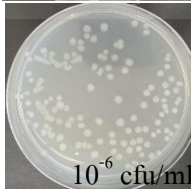
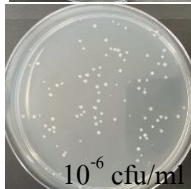
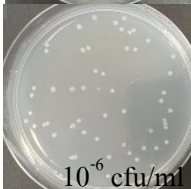
ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *E.coli* และ *S.aureus* ของเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักที่อัตราส่วน Core/Shell เท่ากับ 50/50, 70/30 และ 90/10 แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 4.31 และ 4.32

ร้อยละการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *E.coli* ของเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ที่เวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 50/50 มีค่าร้อยละ 6.14, 8.73 และ 11.82 ที่อัตราส่วน 70/30 มีค่าร้อยละ 5.28, 8.34 และ 11.72 และที่อัตราส่วน 90/10 มีค่าร้อยละ 4.79, 7.96 และ 13.26 ตามลำดับ

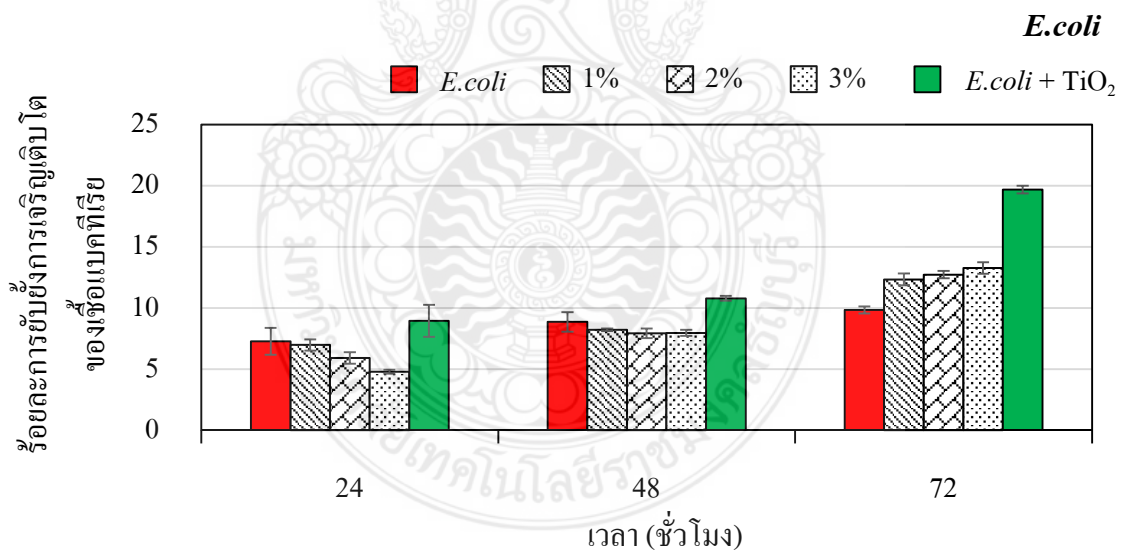
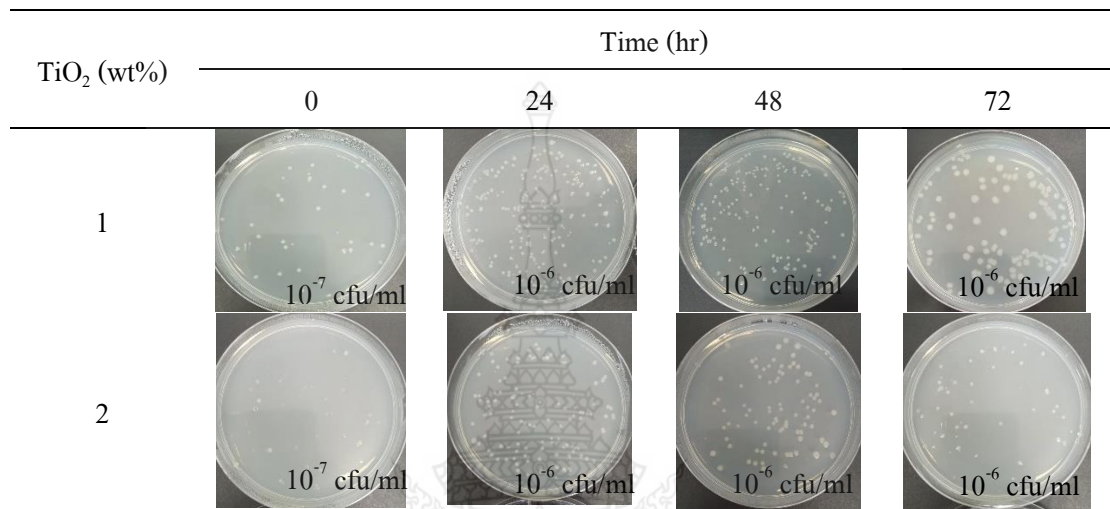
ร้อยละการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *S.aureus* ของเส้นใยที่เติม TiO_2 ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ที่เวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 50/50 มีค่าร้อยละ 4.74, 6.48 และ 9.31 ที่อัตราส่วน 70/30 มีค่าร้อยละ 4.16, 5.76 และ 9.91 และที่อัตราส่วน 90/10 มีค่าร้อยละ 2.29, 4.04 และ 12.52 ตามลำดับ

เส้นใยที่ขึ้นรูปแบบสององค์ประกอบที่อัตราส่วนของ Core มากขึ้นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ TiO_2 เนื่องจากทำให้ TiO_2 อยู่ที่ผิวของเส้นใยมากขึ้นจึงทำให้แสงยูวีทำปฏิกิริยากับ TiO_2 ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสามารถทำลายโครงสร้างและยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

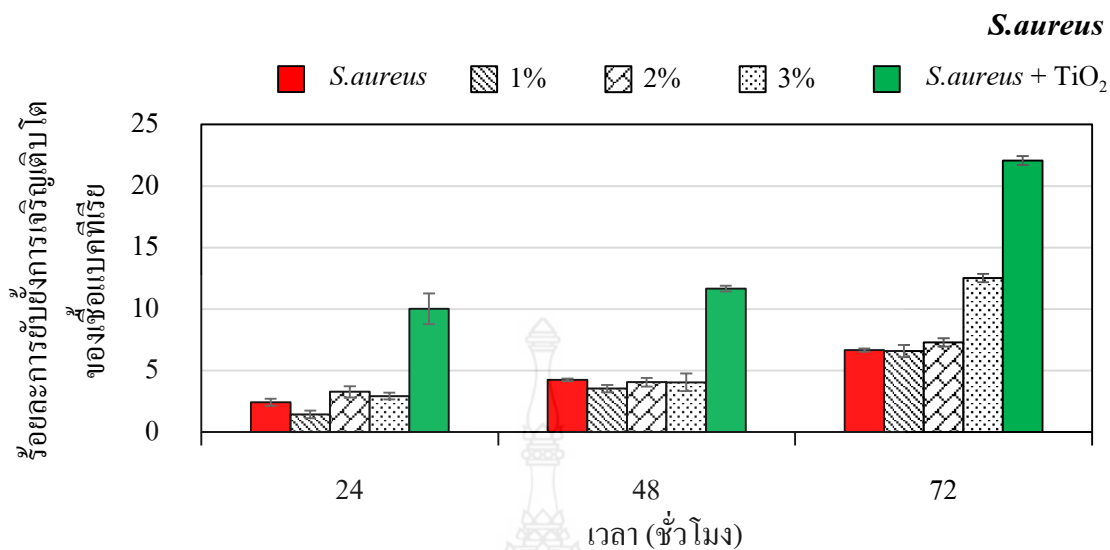
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ของเส้นใย RPET/ TiO_2 ที่อัตราส่วน 90/10

TiO ₂ (wt%)	Time (hr)			
	0	24	48	72
1	 10 ⁻⁷ cfu/ml	 10 ⁻⁶ cfu/ml	 10 ⁻⁶ cfu/ml	 10 ⁻⁶ cfu/ml
2	 10 ⁻⁷ cfu/ml	 10 ⁻⁶ cfu/ml	 10 ⁻⁶ cfu/ml	 10 ⁻⁶ cfu/ml

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* ของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่อัตราส่วน 90/10



รูปที่ 4.34 ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *E.coli* ของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่อัตราส่วน 90/10



รูปที่ 4.35 ผลการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *S.aureus* ของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่อัตราส่วน 90/10

นำเส้นใยในสององค์ประกอบที่อัตราส่วน Core/Shell เท่ากับ 90/10 ที่ปริมาณ TiO₂ ร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนัก มาทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตเพื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยในสององค์ประกอบที่ปริมาณ TiO₂ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 4.34 และ 4.35

ร้อยละการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่เวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงของเชื้อ *E.coli* ของเส้นใยที่เติม TiO₂ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละ 6.97, 8.20 และ 12.32 ที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละ 5.90, 7.92 และ 12.72 และที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละ 4.79, 7.96 และ 13.26 ตามลำดับ

ร้อยละการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่เวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงของเชื้อ *S.aureus* ของเส้นใยที่เติม TiO₂ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละ 1.43, 3.53 และ 6.59 ที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละ 3.27, 4.05 และ 7.29 และที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละ 2.92, 4.04 และ 12.52 ตามลำดับ

เส้นใยสององค์ประกอบที่ปริมาณ TiO₂ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ให้การยับยั้งการเจริญเติบโตของ *E.coli* และ *S.aureus* ดีที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นใยที่เติม TiO₂ ร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนัก เนื่องจากปริมาณของ TiO₂ ที่มากกว่าทำให้เกิดปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมได้ดีกว่า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของเส้นใยที่ขึ้นรูปแบบเต็มเส้นและแบบสององค์ประกอบที่อัตราส่วน 90/10, 70/30, 50/50, 30/70 และ 10/90 ด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใย Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine รุ่น Hill's Lab Modal-100 แสดงให้เห็นว่ามาสเตอร์แบทช์ (Master Batch) ที่เติมลงในเส้นใยแสดงประสิทธิภาพในการเพิ่มปริมาณความเป็นผลึกให้กับเส้นใยจากสารเนื้อเดียวของเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตรีไซเคิล (Recycled poly(ethylene terephthalate)) เป็นสารเนื้อผสมและเมื่อความเร็วในการเก็บเส้นใยเพิ่มขึ้นจาก 500 เมตรต่อนาทีเป็น 1,000 เมตรต่อนาที ทำให้ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide) มีแนวโน้มการรวมตัวน้อยลงและการเติมไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางกายภาพแสดงให้เห็นว่าความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยนั้นเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเรียงตัวของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์เนื่องจากความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยที่สูงช่วยลดการรวมตัวของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ และยังทำให้เห็นพีก (Peak) ที่แสดงประสิทธิภาพของผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ได้ชัดเจนขึ้น ทำให้การเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใยดีขึ้นและทำให้ค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาดของเส้นใยเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่ในขณะเดียวกันค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของเส้นใยนั้นมียาลดลงเนื่องจากอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ เป็นของแข็งเมื่อผสมกับพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์มีความเป็นผลึกมากขึ้นประกอบกับความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยที่สูงทำให้พอลิเมอร์มีค่าการยืดตัวของตัวพอลิเมอร์เองลดลง

ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยแบบเต็มเส้นและแบบสององค์ประกอบทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) แสดงให้เห็นถึงการรวมตัวของไททาเนียมไดออกไซด์ เมื่อเติมลงในเส้นใยในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้เส้นใยมีลักษณะเป็นเม็ดที่หูนอกมาบริเวณผิวของเส้นใยดูได้ชัดจากกำลังขยาย 2200 เท่า แต่เมื่อปรับการขึ้นรูปเส้นใยแบบสององค์ประกอบลักษณะดังกล่าวนี้ลดลงเมื่ออัตราส่วนระหว่างพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลต (Core)/มาสเตอร์แบทช์ (Shell) ที่ปริมาณมาสเตอร์แบทช์ (Shell) ลดน้อยลง เห็นได้ชัดจาก อัตราส่วน Core/Shell เท่ากับ 90/10 ของเส้นใยที่มีปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Escherichia Coli (E. coli)* และ *Staphylococcus Aureus (S. aureus)* ภายใต้การใส่แสงยูวีเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ของเส้นใยที่ขึ้นรูปแบบเต็มเส้นนั้นไม่แสดงผลการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ เนื่องจากอนุภาคของไททานเนียมไดออกไซด์ รวมตัวกันอยู่ภายในเส้นใยจึงไม่สัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียทำให้ไม่แสดงประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย แต่เมื่อขึ้นรูปเส้นใยเป็นแบบสององค์ประกอบแสดงผลการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ดีขึ้น เนื่องจากไททานเนียมไดออกไซด์ อยู่บริเวณผิวของเส้นใยมากขึ้นจึงทำให้แสงยูวีทำปฏิกิริยากับไททานเนียมไดออกไซด์ ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสามารถทำลายโครงสร้างและยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรปรับอัตราส่วนของ Core/Shell ของเส้นใย RPET/TiO₂ ที่มีอัตราส่วนของ Shell น้อยๆ เช่น 80/20, 85/15, 95/5 เป็นต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ TiO₂
- 2) ควรนำ Zinc Oxide มาเคลือบบนผิวของเส้นใย RPET/TiO₂ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

บรรณานุกรม

- [1] ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. (2556). พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต. สืบค้นจาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1912/pet-polyethylene-terephthalate>
- [2] ธนาวดี ลีจากภัย. (2556). สมบัติทั่วไปของ PET. สืบค้นจาก <http://www.vchar.kam.com/varticle/38232>
- [3] ดร.ธนาวดี ลีจากภัย. (2547). ค่าความหนืดที่เหมาะสม ของ PET. สืบค้นจาก https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/216_31-34.pdf
- [4] ไททานเนียมไดออกไซด์. สืบค้นจาก <http://www.siamchemi.com/ไททานเนียมไดออกไซด์>
- [5] ชลดา ชีรการุณวงศ์. (2555). ไททานเนียมไดออกไซด์: วัสดุฆ่าเชื้อแบคทีเรีย (น. 1049-1058). KKU Science Journal.
- [6] Textile terms and definitions. (1963). **Textile Institute** (Manchester, England), The Textile Institute.
- [7] การผลิตเส้นใยแบบปั่นหลอม. สืบค้นจาก <http://www.mechscience.com/fiber-and-filament-production-spinning/>
- [8] นที ศรีสวัสดิ์. (2016). เส้นใยสององค์ประกอบ: ชนิด การผลิต และการนำไปใช้ (น. 179-192). RMUTP Research Journal.
- [9] ส่วนประกอบพรม. สืบค้นจาก <http://www.carpets-rugs-guide.com/a-carpet.htm>
- [10] วัสดุที่นำมาใช้ทำพรม. สืบค้นจาก <http://www.geyecarpet.com/article-th-117733-วัสดุที่นำมาใช้ทำพรม.html>
- [11] มาตรฐานแบทซ์. สืบค้นจาก capital.sec.or.th/webapp/corp_fin/datafile/56/20121097T06_PRODUCT.DOC
- [12] เกศินี เหมวิเชียร และ พริยารุ สวรรณมาลา. การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ ตอนที่ 1 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Polymer Characterization I : Differential Scanning Calorimeter (DSC). กลุ่มวิจัยและพัฒนานิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน).
- [13] ปิ่นสุภา ปิติรักษสกุล. (2548). หนังสือการวิเคราะห์ลักษณะพอลิเมอร์. สำนักมหาวิทยาลัย.
- [14] นที ศรีสวัสดิ์. (2558). **Dynamic Modulus Tester (DMT PPM-5R)**. เอกสารประกอบการเรียนวิชา Synthetic Material Characterization. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

บรรณานุกรม (ต่อ)

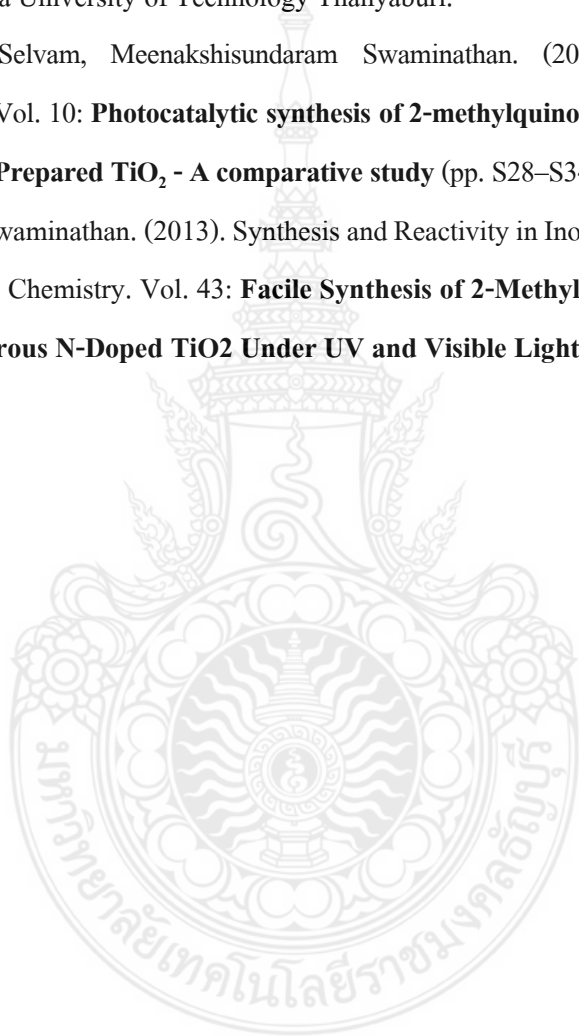
- [15] สุพัตรา วงศ์แสนใหม่. (2556). การพัฒนาวัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากผงแบเรียมออกไซด์ไทเทเนต (น. 11-15). มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- [16] ปิ่นสุภา ปิติรักษีสกุล. (2545). การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- [17] อัจฉราพร ศรีอ่อน. (2559). หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (น. 78-79). MTEC.
- [18] ศ.ดร.พิชญ์ ศุภผล และคณะ. (2553). โครงการพัฒนาระบบนำส่งสารออกฤทธิ์สมุนไพรไทยด้วยระบบเส้นใยอิเล็กโตรสปิน (น. 12-13). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [19] J.H. Hsieh, C.C. Chang, C. Li, S.J. Liu, Y.K. Chang. (2010). Surface & Coatings Technology. Vol. 205: **Effects of Ag contents on antibacterial behaviors of TaON–Ag nanocomposite thin films** (pp. S337–S340). Ming Chi University of Technology.
- [20] Liang Zhang, Xue Bai, Hua Tian, Lvling Zhong, Cailian Ma, Yuanzhen Zhou, Shuangli Chen, Dongliang Li. (2012). Carbohydrate Polymers. Vol. 89: **Synthesis of antibacterial film CTS/PVP/TiO₂/Ag for drinking water system** (pp. 1060-1066). Xi'an University of Architecture and Technology.
- [21] Walid Bahloul, Flavien Mélis, Véronique Bounor-Legaré, Philippe Cassagnau. (2012). Materials Chemistry and Physics. Vol. 134: **Structural characterisation and antibacterial activity of PP/TiO₂ nanocomposites prepared by an in situ sol–gel method** (pp. 399–406). Lyon, France: Université de Lyon.
- [22] Zhisong Lu, Jing Xiao, Ying Wang, Mei Meng. (2015). Journal of Colloid and Interface Science. Vol. 452: **In situ synthesis of silver nanoparticles uniformly distributed on polydopamine-coated silk fibers for antibacterial application** (pp. 8–14). Chongqing Key Laboratory for Advanced Materials & Technologies of Clean Energies, Southwest University.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [23] Suttipan Pavasupree, Stephan T. Dubas, Rattapol Rangkupan. (2015). Journal of Environmental Science. Vol. 37: **Surface modification of polypropylene non-woven fibers with TiO₂ nanoparticles via layer-by-layer self assembly method : Preparation and photocatalytic activity** (pp. 59-66). Chulalongkorn University.
- [24] Mei Meng, Huawei He, Jing Xiao, Ping Zhao, Jiale Xie, Zhisong Lu. (2016). Journal of Colloid and Interface Science. Vol. 461: **Controllable in situ synthesis of silver nanoparticles on multilayered film-coated silk fibers for antibacterial application** (pp. 369–375). State Key Laboratory of Silkworm Genome Biology, Southwest University.
- [25] **Degussa p25 Titanium Dioxide**. สืบค้นจาก : <https://www.nanoshel.com/product/degussa-p25-titanium-dioxide>.
- [26] Komsan Sunyikhan, Nanjaporn Rounpaisan, Natee Srisawad, Takanori Nagoro, Weraporn Pivsa-Art. (2016). EMSES. **Effect of nano Titanium Dioxide (TiO₂) Addition on Mechanical Property of Recycled Poly(ethylene Terephthalate) (RPET) Fiber** (pp. 219-222). Rajamangala University of Technology Thanyaburi.
- [27] Saisy Kudilil Esthappan, Suma Kumbamala Kuttappan, Rani Joseph. (2012). Materials and Design. Vol. 37: **Thermal and mechanical properties of polypropylene/titanium dioxide nanocomposite fibers** (pp. 537–542). Cochin University of Science & Technology.
- [28] Feifei Deng, Yu Guan, Zhiqing Shi, Fei Wang, Xinyuan Che, Yawei Liu, Yinghan Wang. (2017). Composites Science and Technology. Vol. 150: **The effect of dopamine modified titanium dioxide nanoparticles on the performance of Poly (vinyl alcohol)/titanium dioxide composites** (pp. 120-127). Sichuan University.
- [29] D.R. Paul, L.M. Robeson. (2008). Polymer. Vol. 49: **Polymer nanotechnology: Nanocomposites** (pp. 3187-3204). University of Texas at Austin.
- [30] Zhichao Shan, Wendeng Wang, Xiping Lin, Hanming Ding, Fuqiang Huang. (2018). Solid State Chemistry. Vol. 181: **Photocatalytic degradation of organic dyes on visible-light responsive photocatalyst PbBiO₂Br** (pp. 1361-1366). East China Normal University, China.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [31] Komson Sunyikhan, Nanjaporn Roungpaisan, Natee Srisawad, Takanori Nagoro, Weraporn Pivsa-Art. (2017). The Polymer Society of Thailand. **Effect of Winding Speed on Property of Recycled Poly(ethylene Terephthalate) (RPET) Fiber** (pp. 33-37). Rajamangala University of Technology Thanyaburi.
- [32] Kaliyamoorthy Selvam, Meenakshisundaram Swaminathan. (2017). Arabian Journal of Chemistry. Vol. 10: **Photocatalytic synthesis of 2-methylquinolines with TiO₂ Wackherr and Home Prepared TiO₂ - A comparative study** (pp. S28–S34). Annamalai University.
- [33] K. Selvam, M. Swaminathan. (2013). Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry. Vol. 43: **Facile Synthesis of 2-Methylquinolines From Anilines on Mesoporous N-Doped TiO₂ Under UV and Visible Light** (pp. 500–508). Annamalai University.



ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์



-[PCT-7]-_n

The International Polymer Conference of Thailand (PCT-7)

PROCEEDINGS

June 1st-2nd, 2017

Ameri Watergate Hotel,
Bangkok, Thailand



Organized by
Polymer Society of Thailand (PST)

$-\text{[PCTI-7]}_n-$

PROCEEDINGS

$-\text{[PCTI-7]}_n-$

The International Polymer Conference of Thailand

Annual Polymer Conference

June 1st – 2nd, 2017

**Amari Watergate Hotel, Bangkok
Thailand**

Organized by



The Polymer Society of Thailand (PST)

Conference Committee

Chair

Assoc. Prof. Pranee Phinyocheep

Mahidol University

(President of the Polymer Society of Thailand)

International Advisory Committee

- | | |
|---|---|
| 1. Prof. Garry L. Rempel | University of Waterloo, Canada |
| 2. Prof. Laurent Fontaine | Universitat du Maine, France |
| 3. Prof. Philippe Daniel | Universitat du Maine, France |
| 4. Prof. Jean Francois Pilard | Universitat of Le Maine, France |
| 5. Prof. Bruno Vergnes | Ecole des Mines de Paris – CEMEF, France |
| 6. Prof. Anke Blume | University of Twente, Netherlands |
| 7. Prof. Jacques W.M. Noordermeer | University of Twente, Netherlands |
| 8. Prof. Masayoshi Okubo | Nanjing Tech University, China |
| 9. Prof. Mikihiro Takenaka | Kyoto University, Japan |
| 10. Prof. Yuko Ikeda | Kyoto Institute of Technology, Japan |
| 11. Assoc. Prof. Seiichi Kawahara | Nagaoka University of Technology, Japan |
| 12. Prof. Shen Zexiang | Nanyang Technological University (NTU), Singapore |
| 13. Assoc. Prof. Joachim Loo | Nanyang Technological University (NTU), Singapore |
| 14. Prof. Hyoung Jin Choi | Inha University, Korea |
| 15. Assoc. Prof. Sugeun Yang | Inha University, Korea |
| 16. Prof. Hazizan Md Akil | Universiti Sains Malaysia, Malaysia |
| 17. Assoc. Prof. Nadras Othman | Universiti Sains Malaysia, Malaysia |
| 18. Assoc. Prof. Vannajan Sanghiran Lee | University of Malaya, Malaysia |
| 19. Prof. Bhuvanesh Gupta | Indian Institute of Technology, India |
| 20. Assoc. Prof. Kinsuk Naskar | Indian Institute of Technology Kharagpur, India |
| 21. Assoc. Prof. Chi-How Peng | National Tsing Hua University, Taiwan |

Scientific Committee

- | | |
|--|---|
| 1. Prof. Garry L. Rempel | University of Waterloo, Canada |
| 2. Prof. Bruno Vergnes | Ecole des Mines de Paris – CEMEF, France |
| 3. Prof. Anke Blume | University of Twente, Netherlands |
| 4. Prof. Jacques W.M. Noordermeer | University of Twente, Netherlands |
| 5. Prof. Masayoshi Okubo | Nanjing Tech University, China |
| 6. Prof. Yuko Ikeda | Kyoto Institute of Technology, Japan |
| 7. Prof. Shen Zexiang | Nanyang Technological University (NTU), Singapore |
| 8. Assoc. Prof. Joachim Loo | Nanyang Technological University (NTU), Singapore |
| 9. Prof. Hyoung Jin Choi | Inha University, Korea |
| 10. Assoc. Prof. Sugeun Yang | Inha University, Korea |
| 11. Prof. Bhuvanesh Gupta | Indian Institute of Technology, India |
| 12. Assoc. Prof. Kinsuk Naskar | Indian Institute of Technology Kharagpur, India |
| 13. Assoc. Prof. Chi-How Peng | National Tsing Hua University, Taiwan |
| 14. Assoc. Prof. Nadras Othman | Universiti Sains Malaysia, Malaysia |
| 15. Assoc. Prof. Vannajan Sanghiran Lee | University of Malaya, Malaysia |
| 16. Assoc. Prof. Norased Nasongkla | Mahidol University |
| 17. Assoc. Prof. Pranee Phinyocheep | Mahidol University |
| 18. Assoc. Prof. Panya Sunintaboon | Mahidol University |
| 19. Assoc. Prof. Sombat Thanawan | Mahidol University |
| 20. Assoc. Prof. Taweechai Amornsakchai | Mahidol University |
| 21. Asst. Prof. Chayanisa Chitichotpanya | Mahidol University |
| 22. Dr. Anyarat Watthanaphanit | Mahidol University |
| 23. Dr. Thanchanok Ratvijitvech | Mahidol University |
| 24. Assoc. Prof. Duangdao Aht-ong | Chulalongkorn University |
| 25. Assoc. Prof. Napida Hinchiranan | Chulalongkorn University |

26. Assoc. Prof. Sirilux Poompradub	Chulalongkorn University
27. Assoc. Prof. Voravee Hoven	Chulalongkorn University
28. Asst. Prof. Kanoktip Boonkerd	Chulalongkorn University
29. Asst. Prof. Varawut Tangpasuthadol	Chulalongkorn University
30. Asst. Prof. Wanpen Tachaboonyakiat	Chulalongkorn University
31. Assoc. Prof. Apirat Laobuthee	Kasetsart University
32. Assoc. Prof. Siripon Anantawaraskul	Kasetsart University
33. Asst. Prof. Amornrat Lertworasirikul	Kasetsart University
34. Asst. Prof. Songwut Suramitr	Kasetsart University
35. Asst. Prof. Wanvimol Pasanphan	Kasetsart University
36. Dr. Chantiga Choochottiros	Kasetsart University
37. Asst. Prof. Paranee Sriromreun	Srinakharinwirot University
38. Assoc. Prof. Pakorn Opaprakasit	Thammasat University
39. Asst. Prof. Paiboon Sreearunothai	Thammasat University
40. Asst. Prof. Siwarutt Boonyarattanakalin	Thammasat University
41. Asst. Prof. Chonlada Ritvirulh	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
42. Asst. Prof. Suparat Rukchonlatee	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
43. Assoc. Prof. Ploenpit Boochathum	King Mongkut's University of Technology Thonburi
44. Dr. Nonsee Nimitsiriwat	King Mongkut's University of Technology Thonburi
45. Asst. Prof. Suttinun Phongtamrug	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
46. Dr. Sunanta Chuayprakong	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
47. Asst. Prof. Amorn Chaiyasat	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
48. Dr. Chatchai Veranitisakul	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
49. Dr. Robert Molloy	Chiang Mai University
50. Asst. Prof. Piyarat Nimmanpipug	Chiang Mai University
51. Asst. Prof. Sakhorn Rimjaem	Chiang Mai University
52. Asst. Prof. Winita Punyodom	Chiang Mai University
53. Dr. Janchai Yana	Chiang Mai Rajabhat University
54. Assoc. Prof. Sunan Saikrasun	Maharakham University
55. Assoc. Prof. Metha Rutnakornpituk	Naresuan University
56. Asst. Prof. Chor. Wayakron Phetphaisit	Naresuan University
57. Dr. Gareth Michael Ross	Naresuan University
58. Asst. Prof. Anoma Thitithammawong	Prince of Songkla University, Pattani Campus
59. Asst. Prof. Kannika Sahakaro	Prince of Songkla University, Pattani Campus
60. Dr. Sunisa Suchat	Prince of Songkla University, Surat Thani Campus
61. Asst. Prof. Polpat Ruamcharoen	Songkhla Rajabhat University
62. Assoc. Prof. Sayan Saengsuwan	Ubon Ratchathani University
63. Asst. Prof. Supaporn Dokmaisrijan	Walailak University
64. Dr. Wonchalerm Rungswang	SCG Chemicals Company Limited
65. Dr. Supanan Patthamasang	SCG Chemicals Company Limited

Organizing Committee

1. Assoc. Prof. Pranee Phinyocheep	Mahidol University
2. Asst. Prof. Krisda Suchiva	Mahidol University
3. Prof. Supawan Tantayanon	Chulalongkorn University
4. Prof. Suwabun Chirachanchai	Chulalongkorn University
5. Prof. Suda Kiatkamjornwong	Chulalongkorn University
6. Prof. Pattarapan Prasassarakich	Chulalongkorn University
7. Dr. Banja Junhasavasdikul	Innovation Group
8. Assoc. Prof. Taweechai Amornsakchai	Mahidol University
9. Assoc. Prof. Apirat Laobuthee	Kasetsart University
10. Assoc. Prof. Thanyalak Chaisuwan	Chulalongkorn University
11. Assoc. Prof. Pakorn Opaprakasit	Thammasat University
12. Assoc. Prof. Panya Sunintaboon	Mahidol University
13. Asst. Prof. Kannika Sahakaro	Prince of Songkla University, Pattani Campus
14. Asst. Prof. Varawut Tangpasuthadol	Chulalongkorn University
15. Asst. Prof. Wanvimol Pasanphan	Kasetsart University
16. Asst. Prof. Winita Punyodom	Chiang Mai University

17. Dr. Chaya Chandavas
18. Dr. Pasaree Laokijcharoen
19. Dr. Wonchalerm Rungswang
20. Mr. Somsak Borrisuttanakul
21. Mr. Bamrung Jadsadaphongphaibool
22. Ms. Rattanapatum Piladang

-[PCTI-7]-

PTT Global Chemical Public Company Limited
 National Metal and Materials Technology Center (MTEC)
 SCG Chemicals Company Limited
 TPBI Public Company Limited
 M.B.J Enterprise Company Limited
 Plastics Institute of Thailand

Regional Organizing Committee

1. Dr. Robert Molloy
2. Assoc. Prof. Metha Rutnakornpituk
3. Asst. Prof. Chiraphon Chaibundit
4. Asst. Prof. Polphat Ruamcharoen
5. Asst. Prof. Rukkiat Jitchat
6. Asst. Prof. Suttinun Phongtamrug
7. Dr. Patchara Punydamoonwongsa
8. Dr. Piyaporn Na Nongkhai
9. Dr. Sunisa Suchat
10. Dr. Uthen Thubsuang
11. Ms. Boontharika Thapsukhon

Chiang Mai University
 Naresuan University
 Prince of Songkla University, Hat Yai Campus
 Songkha Rajabhat University
 Ubon Ratchathani University
 King Mongkut's University of Technology North Bangkok
 Mae Fah Luang University
 Burapha University
 Prince of Songkla University, Surat Thani Campus
 Walailak University
 University of Phayao



Session Code	Title / Speaker	page
I. Session: Advanced and Functional Polymers		
FUNC-O6	Development of Poly(Methyl Methacrylate) Products with Superhydrophobic Surfaces <i>N. Sriprasert, P. Chaiyasat, A. Chaiyasat, M. Opaprakasit, A. Petchsuk and P. Opaprakasit</i>	25-28
FUNC-P1	Aptamer Immobilization onto Microsphere via Amide Bond Coupling <i>P. Khomweerawatong, P. Rattanasemsab and B. Soontornworajit</i>	29-32
II. Session: Bioplastics and Polymers for Sustainability		
BIOP-O3	Effect of Winding Speed on Property of Recycled Poly(ethylene Terephthalate) (RPET) Fiber <i>K. Sunyikhhan, N. Rungpaisan, N. Srisawad, T. Nagoro, W. Pivsa-Art</i>	33-37
BIOP-O4	Effect of PLA Grade and Tensile Test Methods on Tensile Property POM/PLA Multifilament <i>A. Wongkorn, W. Pivsa-Art, N. Rungpaisan, S. Mathurosemontri, T. Umemura, H. Hamada, M. Nagata and S. Pivsa-Art</i>	38-43
BIOP-O6	The Secondary Backing Part of Green Carpet from PLA Nonwoven <i>P. Wannid, W. Pivsa-Art, N. Srisawad, T. Negoro and S. Pivsa-Art</i>	44-49
BIOP-P2	Preparation and Characterization of Malic Acid Modified Starch from Cassava Starch <i>N. Theessrimuang and J. Prachayawarakorn</i>	50-53
BIOP-P7	Preparation and properties of cassava starch grafted by methyl methacrylate (MMA) <i>C. Weerapoprasit and J. Prachayawarakorn</i>	54-58
BIOP-P8	Preparation and properties of crosslinked starch using borax as a crosslinking agent <i>Y. Tanetrungroj and J. Prachayawarakorn</i>	59-63
BIOP-P9	Effect of the Long-Chain Saturated Fatty Acids on the Accelerated Hydrolytic Degradation of Poly(lactic acid)/poly(butylene succinate) Blend Films <i>N. Ratsameetammajak, R. Molloy and R. Somsunan</i>	64-68
BIOP-P11	Investigation of starch fiber by electrospinning <i>R. Chaisuwan and S. Woramongkolchai</i>	69-73
BIOP-P12	Properties of Carboxymethyl Cellulose Nanocomposite Films Incorporated with Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide <i>J. Ampaiwong, N. Soatthyanon and P. Potiyaraj</i>	74-78
BIOP-P13	Properties of Poly(Butylene Succinate)/Graphene Oxide/Microcrystalline Cellulose Composites <i>S. Wangpunya, N. Soatthyanon and P. Potiyaraj</i>	79-84
BIOP-P17	Properties of modified corn stover xylan by citric acid <i>S. Jeenapak, I. Suppavorasatit, S. Prasongsuk and P. Potiyaraj</i>	85-89

Effect of Winding Speed on Property of Recycled Poly(ethylene Terephthalate) (RPET) Fiber

Komson Sunvikhan¹, Nanjaporn Roungpaisan², Natee Srisawad², Takanori Nagoro³, Weraporn Pivsa-Art^{1*}

¹Department of Chemical and Materials Engineering, ²Department of Textile Engineering,

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani, 12110, Thailand

³Thai Negoro Co., Ltd., Bangpoo Industrial Estate, Samut Prakarn, Thailand

*Corresponding E-mail: weraporn.p@en.rmutt.ac.th

Phone +66 2549 4605, Fax +66 2549 4600, *E-Mail: weraporn.p@en.rmutt.ac.th

Abstract

Multifilament of recycled poly(ethylene terephthalate) (RPET) has been significantly used for carpet production. To improve the utilization quality of the carpet, effect of addition of nano titanium dioxide (TiO₂) to the multifilament on anti-bacterial property was investigated. The TiO₂ compounded RPET was prepared using a bicomponent extruder spinning machine. The effect of winding speed (500 and 1,400 m/min) and different TiO₂ content (1 and 3 wt%) on mechanical property of multifilament was investigated. The master batch of recycle poly(ethylene terephthalate) and 10 wt% nano titanium dioxide was prepared using a twin screw extruder. Size of multifilaments was measured using an optical microscopy technique. The effect of winding speed on tenacity, elongation and thermal property of multifilaments was investigated. The tenacity of fibers increased with increasing winding speed whereas the thermal property was unchanged regardless of the TiO₂ content.

Keywords: Recycled poly(ethylene terephthalate) (RPET), nano TiO₂, Winding speed, Multifilament.

1. Introduction

Poly(ethylene terephthalate) (PET) is a polyester which is widely used in the various applications such as soft drink bottles, packaging, fibers, films and textile applications. The extensive use and non-biodegradable PET have led to waste disposal problems of post-consumer products. Chemical recycling is assumed to be one of the best approaches to solve the accumulation of PET waste problems [1-3]. PET is reportedly the most recyclable commodity plastic, however only a small fraction of this polymer is practically recycled, due to relatively high cost of the recycled product [4]. Recycled PET (R-PET) is used for a variety of applications. The extrusion of plastic filaments from flakes of R-PET has received particular attention in the technical literature, since it has been shown that R-PET fibers can conveniently replace virgin plastic fibers in a variety of engineering applications [5-8]. Giraldi *et al.* reported the intention to correlate thermal properties; the mechanical properties and processing conditions of glass

fiber reinforced recycled PET composites for extrusion [9]. For the application of carpets that always touch with several objects including dust, dirt, dampness which will be a source of disease and accumulation of bacteria. Therefore, the development of materials for carpet with anti-bacteria property will be useful to carpet industry and customer requirement.

The addition of additives to RPET is one of the practical methods to produce the anti-bacterial filaments. Titanium dioxide (TiO₂) is one of the most studied metal oxides for its many applications, such as photo-catalysis, solar cells, biological (anti-bacteria) coatings, and sensors [10-12]. For different applications, TiO₂ has been coated onto various substrates through different deposition techniques, *e.g.* spin-coating, dip-coating, evaporation-deposition, and sol-gel processing [13-15]. Peng F. *et al.* studied the bamboo fiber/HDPE composites/rutile nano-TiO₂ composites and the effects of rutile nano-TiO₂ on the weathering resistance of the composites and its mechanism



were evaluated and analyzed from multiple perspectives [16]. Most of TiO_2 applications reported were coating of nanoparticles on the surface of fibers which had limitation of period of utilization. However, the improvement of mixing process of TiO_2 with has not been reported.

In this research we studied the preparation process of nano- TiO_2 /RPET bicomponent multifilament for the carpet manufacturing. The master batch of RPET/ TiO_2 was prepared and fabricated to multifilament by melt spinning process. The effects of winding speed of multifilament melt spinning and nano- TiO_2 contents on mechanical property were evaluated.

2. Experimental

2.1 Materials

The recycled PET (RPET) pellets recycled from PET plastic bottle were supplied by Negoro Sangyo Co., Ltd, Japan, with IV of 0.65 dl/g and molecular weight of 12,600 g/mol. Nano-Titanium dioxide (TiO_2), P25 grade, was used as received.

2.2 Master Batch Preparations

The RPET and 10 wt% TiO_2 master batch was compounded by Salec Colour Public Co., Ltd. The process mixed temperatures in the range of 260-270 °C. The characterization of master batch shows bulk density of 0.85 g/cm³, density 1.4 g/cm³ at 23 °C.

2.3 Multifiber preparation

Master batch (10 wt% TiO_2 /RPET) and RPET were first dried in an oven at 150°C for 5 h prior to processing. The master batch and the RPET were processed by melt-spun through 24 holes with diameter 0.5 mm per hole, using a Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine Model LBS-100, Hills, Inc., USA. The barrel temperature was 270, 275, 285, 275 and 270 °C. The multifilaments of RPET/ TiO_2 were collected at winding speed of 500 and 1400 m/min. The ratios of TiO_2 /RPET calculated after mixed with the master batch were 0, 1 and 3 wt% (total weight 300 g) as shown in Fig. 1.

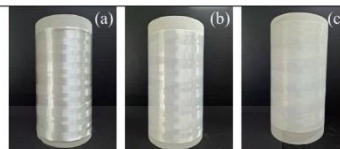


Fig. 1 Multifilament of RPET with TiO_2 content (a) 0 wt%, (b) 1 wt% (c) 3 wt% (Winding speed of 500 m/min)

2.4 Optical Microscopy (OM)

The multifilament was cross section cut and subjected to analyze by optical microscope with 10 times magnification. The fiber diameter was measured using a size analysis program.

2.5 Thermal property

DSC scans were recorded on a differential scanning calorimeter (DSC800, Perkin Elmer) in inert atmosphere (nitrogen), with a heating rate of 10 °C/min. The samples (~10 mg) were placed into alumina crucibles. After the first heating 30 °C to 300 °C at a rate of 10 °C/min, hold at that temperature for 3 min, then cooled to 30 °C with cooling rate of 10 °C/min, hold at that temperature for 3 min, then heating to 300 °C at a rate of 10 °C/min before second step where the samples were heated again and thermograms for second heating were recorded. Glass transition temperature (T_g), cold crystallization temperature (T_c), melting temperature (T_m), and heat of fusion (ΔH_m) were determined from the second heating scans.

2.6 Tensile properties

The tensile strength measurement with standard ASTM D 3822 01 was carried out. The diameter (Denier) of fibers collected from winder with different speed of 500 and 1,400 m/min, were measured using a Fiber Fineness by winding 9 rounds and the weighed with 4 digits. The diameter measurement was carried out 3 times for each sample. The values received were calculated the size of fiber compare with weight (g) of fiber 900 m length. The data will be parameters of tensile strength of the fibers.

The fibers were prepared with C-Camp shape with length of 2.3 cm. 10 Samples of each fiber were analyzed. The samples were subjected to tensile strength test using 50 kN load cell. The gate length is 250 mm and winding speed of 50 mm/min.

3. Results and discussion

3.1 Optical Microscopic (OM) image and Diameter of multifilament of RPET

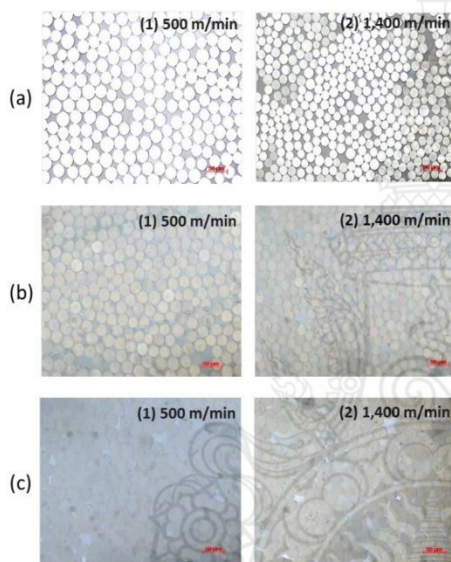


Fig. 2 OM image of multifilament of RPET with different TiO₂ content and winding speed
(a) without TiO₂ (b) TiO₂ 1 wt% (c) TiO₂ 3 wt%

Fig. 1 shows the RPET multifilament with different TiO₂ contents. The RPET multifilament without TiO₂ is white and glossy. Addition of TiO₂ resulted in cloudy filament. The fiber was winding at different speed of 500 and 1400 m/min and different TiO₂ content of 1 and 3 wt%. The fiber was cut by cross section to analyze by optical microscope. The results are shown in Fig. 2. The size of fiber at winding speed of 500 is larger than that of 1400 m/min. The diameter of fibers from Fig. 2 was measured and plotted as shown in Fig. 3. The RPET multifilaments without addition of TiO₂ drawn at speed 500 m/min had

diameter of 27 μm. Diameter of fiber decreased when increasing the speed to 1400 m/min. With draw ratio speed of 1400 m/min the fiber diameter decreases to half of the speed of draw ratio 500 m/min. Addition of TiO₂ to fiber gave the higher diameter due to the TiO₂ particles may impede the extensibility of the fiber.

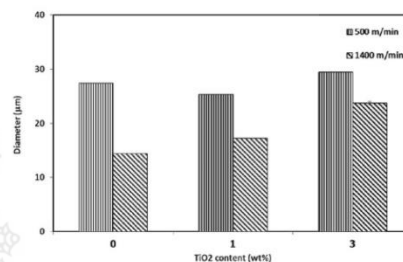


Fig. 3 Diameter of multifilament of RPET/TiO₂

3.2 Differential Scanning Calorimetry (DSC)

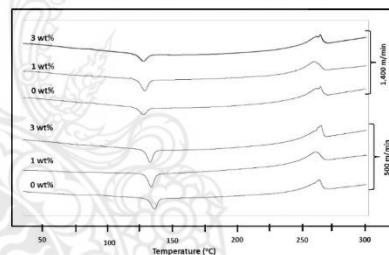


Fig. 4 1st heating thermogram of multifilament of RPET/TiO₂

Table 1 Thermal analysis (DSC) of multifilament of RPET/TiO₂

Speed	TiO ₂ (wt%)	T _g	T _c	ΔH _c	T _m	ΔH _m	%Xc
500	0	86.9	136.2	-22.9	262.6	29.5	21.7
	1	85.4	133.8	-23.3	260.2	36.5	27.0
	3	88.7	133.0	-20.4	264.3	25.1	18.5
1400	0	86.1	130.5	-16.1	258.6	24.1	17.7
	1	85.8	128.8	-21.7	259.2	26.8	19.7
	3	84.7	127.9	-16.8	263.7	21.5	15.8

DSC measurements were carried out on RPET/TiO₂ prepared with drawing speed of 500 and 1400 m/min. A heating run was performed from 30 °C to 300 °C at a rate

of 10 °C/min. The percent of crystallinity, X_c , for all RPET samples was calculated from Eq. 1:

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_m^0} \times 100$$

Where $\Delta H_m^0 = 32.5$ cal/g, is a heat of fusion of a 100% crystalline PET and ΔH_{cc} is 0. The calculated percent of crystallinity of all samples are shown in Table 1. It has been reported that % crystallinity of virgin PET is 49%. From Table 1 all RPET samples present low % crystallinity. The results also show contrary effect of % crystallinity and the effect of drawing speed. With 1400 m/min drawing speed, the crystallinity of polymer decreased. Addition of 1 wt% of TiO₂, the crystallinity of polymer increased while the higher content may lead to particle agglomeration.

3.3 Tensile properties

Fig. 5 shows tenacity of multifilament of RPET without and with TiO₂. The tendency of fibers tenacity was clearly observed. The tenacity of multifilament increased with increasing the winding speed from 500 to 1,400 m/min as well as addition of TiO₂. The drawing speed resulted in well orientation of polymer molecules which resulted in higher strength. Due to TiO₂ showed effect of nucleating agent, small amount of TiO₂ will enhance the crystallinity of the fiber molecules. However, increased content of TiO₂ to 3 wt% the tenacity was not improved due to agglomeration of high content TiO₂ particles. For the winding speed of 500 m/min when increased TiO₂ contents, the tenacity reduced as a result of TiO₂ particles in matrix may by agglomerated.

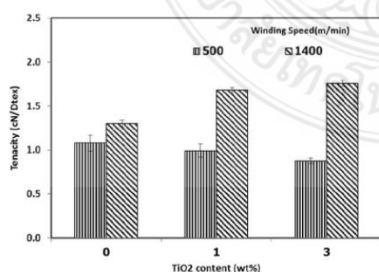


Fig. 5 Tenacity of multifilament of RPET/TiO₂

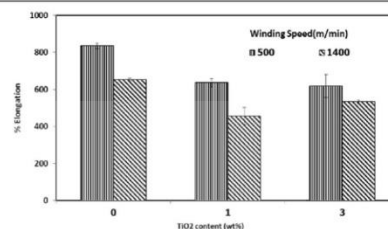


Fig. 6 Elongation at break of multifilament of RPET/TiO₂

Fig. 6 shows elongation at break of multifilament of RPET/TiO₂. It was found that increasing winding speed to 1400 m/min the elongation of fibers decreased regardless of without or with addition of TiO₂. The % elongation at break reduced when TiO₂ was added in RPET matrix due to TiO₂ is a rigid material that changed morphology of fiber from soft phase to hard phase.

4. Conclusion

The effect of winding speed and addition of TiO₂ on mechanical property of multifilament of recycled poly(ethylene terephthalate) (RPET) was investigated. The winding speed was varied at 500 and 1400 m/min and addition of TiO₂ content on RPET matrix was 1 and 3 wt%. The winding speed showed effect to the fiber size. The diameter of fiber was reduced due to orientation of fiber molecules that extended during drawing. However, addition of TiO₂ resulted in increasing of the fiber diameter because the additive particles may obstruct the extension of polymer molecules. Winding speed shows effect to tenacity of multifilament. At high winding speed, high tenacity of fiber was observed. The elongation at break of fibers reduced with addition of TiO₂ in RPET matrix due to its rigid phase.

References

- [1] N. Kawabata, "Recycle for Polymers, Polymeric Materials Premised for Recycled Use Kobunshi", 48, 774–777 (1999).
- [2] Y.S. Parab, N.D. Pingale, S.R. Shukla, "Aminolytic depolymerization of poly(ethylene terephthalate) bottle

- waste by conventional and microwave irradiation heating", *J. Appl. Polym. Sci.* 125, 1103–1107, (2012).
- [3] R.V. Shah, V.S. Borude, S.R. Shukla, "Recycling of PET waste using 3-amino-1-propanol by conventional or microwave irradiation and synthesis of bis-oxazin there from", *J. Appl. Polym. Sci.* 127 (1) 323–328, (2013) <http://dx.doi.org/10.1002/app.37900>.
- [4] R.P. Borg, O. Baldacchino, L. Ferrara, "Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete", *Construction and Building Materials*. 108, 29–47, (2016).
- [5] De Oliveira Santos, R.P., Oliveira Castro, D., Colla Ruvolo-Filho, A., Frollini, E, "Processing and thermal properties of composites based on recycled PET, sisal fibers, and renewable plasticizers". *J. Appl. Polym. Sci.* 131 (13), 40386–40399, (2014).
- [6] Fernando Fraternali, Saverio Spadea, Valentino P. Berardi, "Effects of recycled PET fibres on the mechanical properties and seawater curing of Portland cement-based concretes", *Construction and Building Materials*. 61, 293–302, (2014).
- [7] Rachel P.O. Santos, Bruno V.M. Rodrigues, Elaine C. Ramires, Adhemar C. Ruvolo-Filho, Elisabete Frollini, "Bio-based materials from the electrospinning of lignocellulosic sisal fibers and recycled PET", *Industrial Crops and Products*, 72, 69–76, (2015).
- [8] Alireza Dehghani, Sara Madadi Ardekani, Mariam A. Al-Maadeed, Azman Hassan, Mat Uzir Wahit, "Mechanical and thermal properties of date palm leaf fiber reinforced recycled poly (ethylene terephthalate) composites", *Materials and Design*, 52, 841–848, (2013).
- [9] A.L.F. de M. Giraldo, J.R. Bartoli, J.I. Velasco, L.H.I. Mui, "Glass fibre recycled poly(ethylene terephthalate) composites: mechanical and thermal properties", *Polymer Testing*, 24 (4), 507-512, (2005).
- [10] M. Zukalova, A. Zukal, L. Kavan, M.K. Nazeeruddin, P. Liska, M. Gratzel, "Organized mesoporous TiO₂ films exhibiting greatly enhanced performance in dye-sensitized solar cells" *Nano Lett.* 5, 1789–1792, (2005).
- [11] S.H. Oh, R.R. Finones, C. Daraio, L.H. Chen, S.H. Jin, "Growth of nano-scale hydroxyapatite using chemically treated titanium oxide nanotubes", *Biomaterials*, 26, 4938–4943, (2005).
- [12] S.Q. Liu, A.C. Chen, "Coadsorption of horseradish peroxidase with thionine on TiO₂: nanotubes for biosensing", *Langmuir*, 21, 8409–8413, (2005).
- [13] K. Wang, M.A. Morris, J.D. Holmes, "Preparation of mesoporous titania thin films with remarkably high thermal stability. C", *Chem. Mater.* 17, 1269–1271, (2005)
- [14] B. Chi, T. Jin, "Synthesis of Titania Nanostructure Films via TiCl₄ Evaporation–Deposition Route", *Cryst. Growth & Des.*, 7, 815–819, (2007).
- [15] J.H. Xia, C.T. Hsu, D.D. Qin, "Cotton fibers nano-TiO₂ composites prepared by as-assembly process and the photocatalytic activities", *Materials Research Bulletin* 47, 3943–3946, (2012)
- [16] Peng Fei, Benhua Fei, Yan Yu, Hanguo Xiong, Jun Tan, "Thermal properties and crystallization behavior of bamboo fiber/high-density polyethylene composites: Nano-TiO₂ effects", *J. Appl. Polym. Sci.*, 131, 39846, (2014).



CERTIFICATE OF ATTENDANCE

This is to certify that

Komsan Sunyikhan

has presented the paper (oral) titled

*Effect of Winding Speed on Property of Recycled Poly(ethylene Terephthalate) (RPET) Fiber
at the*

The International Polymer Conference of Thailand (PCI-7)

June 1st - 2nd, 2017

Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand

Pranee Phinyocheep

*Associate Professor
Chairperson*

T. Ammonkham

*Associate Professor
Scientific Committee Chair*

"May I be your humble
servant in reincarnations"

th
13 Eco - Energy and
Materials Science and
Engineering Symposium 2016

Smart Future
Smart Grids, Smart Materials, Smart Innovation,
Smart Society, Smart Communication, Smart Building and Home

Proceeding

Organized by



Sponsored by



EMSES Conference Committee

Honorary Advisory Chair:

Prasert PINPATHOMRAT (Pr RMUTT, Thailand)

Honorary Advisory Co-Chair:

Masao FURUYAMA (KIT, Japan)

Hideaki OHGAKI (Kyoto University, Japan)

International Advisory Committees

Hiroyuki HAMADA (KIT, Japan)

Akinori SEITO (Kyoto University, Japan)

Hitomi OHARA (KIT, Japan)

Nadarajah MITHULANANTHAN (UQ, Australia)

Takeshi YAO (Kayawa College., Japan)

Yuichi ANADA (Hokkaido Info. Uni., Japan)

Young S. CHAI (Youngnam Uni., Korea)

Seonghyuk KO (Yonsei Uni., Korea)

Nipon TANGTHAM (KU, Thailand)

Kumron SIRATHANAKUL (NPU, Thailand)

General Chair

Sommai PIVSA-ART (RMUTT, Thailand)

General Co-Chair

Sivakorn ANGTHONG (RMUTT, Thailand)

Technical Program Committee Chair

Krischonme BHUMKITTIPICH (RMUTT, Thailand)

Technical Program Committee Co-Chair

Supakit SUTIRUENGWONG (SU, Thailand)

Sumonman NIAMLANG (RMUTT, Thailand)

Technical Conference Committees

T. INOUE (Yamagata Uni, Japan)

Sakorn RIMJEAM (CMU, Thailand)

K. YAMADA (KIT, Japan)

T. ITO (Kagawa College, Japan)

M. OKOSHI (KIT, Japan)

Nagahiro SAITO (Nagoya Uni., Japan)

Bawornkit NEKHAMANURAK (RMUTR, Thailand)

Pimolpan NIAMLANG (RMUTR, Thailand)

Wanchai SUBSINGHA (RSU, Thailand)

Monthon NAWONG (RMUTT, Thailand)

Y. ANADA (HIU, Japan)

Yuqiu YANG (Dong Hua University, China)

Pimnapat IEMSOMBOON, RMUTT, Thailand

Boonyang PLANGKLANG (RMUTT, Thailand)

Sorapong PAVASUPREE (RMUTT, Thailand)

Yuttana KUMSUWAN (CMU, Thailand)
Kaan KERDCHERN (RMUTI, Thailand)
Uthen KAMNAN (RMUTL, Thailand)
Tanapong SUWANNASRI (TGGS, Thailand)
Wirachai ROYNARIN (RMUTT, Thailand)
Napaporn PHUANGPORNPIKAK (KU, Thailand)
Jakkree SRINONCHAT (RMUTT, Thailand)
Pramook UNHALEKHAKA (RMUTSB, Thailand)
Nattapong PHANTHUNA (RMUTP, Thailand)
Sakorn PO-NGAM (KMUTT, Thailand)
Nattawoot SUWANTHA (MSU, Thailand)
Boonrit PRASARTKAEW (RMUTT, Thailand)
Kittiwan NIMKERDPOL (RMUTT, Thailand)

Publicity and Website Chair

Somchai BIANSONGNERN (RMUTT, Thailand)
Nathabhat PHANKONG (RMUTT, Thailand)

Registration Chair

Anin MEMON (RMUTT, Thailand)

Financial Chair

Weeraporn PIVSA-ART (RMUTT, Thailand)

Local Arrangement Chair

Amnoiy REUNGWAREE (RMUTT, Thailand)

Local Arrangement Committee

Wasan PHETPHIMOON (RMUTT, Thailand)

General Secretariat

Porakoch SIRISUWAN (RMUTT, Thailand)
Yuttana KONGJEEN (RMUTT, Thailand)

List of Reviewers

Hiroyuki Hamada	Kyoto Institute of Technology
Akinori Seito	Kyoto University
Hitomi Ohara	Kyoto Institute of Technology
Nadarajah Mithulanathan	University of Queensland
Takeshi Yao	Kayawa College
Yuichi Anada	Hokkaido Information University
Young S. Chai	Youngnam University
Seonghyuk Ko	Yonsei University
Nipon Tangtham	Kasetsart University
Kumron Sirathanakul	Nakhon Panom University
Pimnapat Iemsomboon	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Boonyang Plangklang	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Sorapong Pavasupree	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Pimolpan Niamlang	Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Yuttana Kumsuwan	Chiang Mai University
Kaan Kerdchern	Rajamangala University of Technology Isan
Uthen Kamnan	Rajamangala University of Technology Lanna
Tanapong Suwannasri	The Siridhorn International Thai-German Graduate School Of Engineering, KMUTNB
Wirachai Roynarin	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Napaporn Phuangpornpitak	Kasetsart University
Jakkree Srinonchat	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Pramook Unhalekhaka	Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
Nattapong Phanthuna	Rajamangala University of Technology Pha Nakon
Sakorn Po-Ngam	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Nattawoot Suwantha	Maharakham University
Tawatchai Charinpanitkul	Chulalongkorn University
Mbaitiga Zacharie	National Institute of Technology, Okinawa College
Natha Kuptasthien	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Pongsri Siwarasak	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Yuji Aso	Kyoto Institute of Technology
Krischonme Bhunkittipich	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Sutham Niyomwas	Prince of Songkla University
Napaporn Phuangpornpitak	Kasetsart University
Pramoch Rangsunvigit	Chulalongkorn University
Kaan Kerdchuen	Rajamangala University of Technology Isan
Winadda Wongwiriyan	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chanchai Thongpin	Silpakorn University
Boonrit Prasartkaew	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Wirachai Roynarin	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Thammasak Rojviroon	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Nathabhat Phankong	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Supakij Suttiruengwong	Silpakorn University
uthen kamnan	Rajamangala University of Technology Lanna
Pimnapat Bhumkittipich	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Boonyang Plangklang	Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Pramuk Unahalekhaka	Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
Nattachote Rugthaicharoencheep	Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
Nattakarn Hongsrirphan	Silpakorn University
Surawut Chuangchote	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Chuntip Sakulkhacmaruchai	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Sirichai Torsakul	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Somma Pivsa-Art	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Supaphorn Thumsorn	Kyoto Institute of Technology
Putinun Uawongsuwan	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Leong Yew Wei	Institute of Materials Research and Engineering
Chatchai Suppitaksakul	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Apisit Kositchaitong	PTT Global Chemical Public Company Limited
Weraporn Pivsa-Art	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Sumonman Niamlang	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Natee Srisawat	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Atitaya Tohsan	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Watthanaphon	
heewawuttipong	Rajamangala University of Technology Srivijaya
Supattana Nirukkanaporn	Rangsit University
Winai Chanpeng	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Supawat kamtip	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Nithiwatth Choosakul	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Pimolpun Niamlang	Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Teerin Kongpun	Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Thirawat Mueansichai	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Taro Sonobe	Kyoto University
Noppawan Motong	Naresuan University
Hideaki Ohgaki	Kyoto University
Tetsuo Tezuka	Kyoto University
Khampone Nanthong	National University of Laos
Hitomi Ohara	Kyoto Institute of Technology

CONTENT

SM19	Effect of Oxyethylene co-Monomer on POM/PLA Multifilament <i>A. Wongkorn, W. Pivsa-Art, N. Roungpaisan, S. Mathurosemontri, T. Umemura, H. Hamada and S. Pivsa-Art</i>	213
SM20	Effect of nano Titanium Dioxide (TiO ₂) Addition on Mechanical Property of Recycled Poly(ethylene Terephthalate) (RPET) Fiber <i>K. Sunyikhan, N. Roungpaisan, N. Srisawad, T. Nagoro and W. Pivsa-Art</i>	219
SM21	Effect of PEG Plasticizer on PLA Nonwoven <i>P. Wannid, W. Pivsa-Art, N. Srisawad, T. Negoro and S. Pivsa-Art</i>	223
SM22	Proposal of Liquid Membrane FTIR Spectroscopy for Investigation of Soluble Fraction of Degradative Solvent-Extraction <i>K. Watcharakorn, M. Trairat, W. Janewit, H. Zen, T. Kii1, K. Miura1 and H. Ohgaki</i>	228
SM23	Polypropylene / Polyethylene Bi-layers One Step Rotational Molding <i>N. O-Charoen and E. Jansri</i>	232
SM24	The effect of maleic acid-modified PP on interfacial shear strength and mechanical properties <i>Y. Takagaki, N. Kajioka, H. Yamada, A. Nakai, H. Hamada and A. ohtani</i>	233
SM25	Fracture Behavior of Fracture Behavior of Fracture Behavior of Multi-axial Warp Knitted Composites Effect of Knitted Yarn Density on Fracture Behavior <i>S. Yasuda, S. Mori, Y. Yang, K. Banba and E. Fukui</i>	237
SM26	Effect of Hybrid Nucleating Agents on Crystallization Behavior of Poly(lactic acid) <i>T. Khwanpipat, S. Thongnop, K. Trakoolnuch, M. Seadan, and S. Suttiruengwong</i>	238
SM27	Storage Time of Dried Orchids Coated with Biodegradable and Conventional Polymers <i>S. Jaibangyang, S. Suttiruengwong, P. Janngam and K. Obsuwan</i>	243
SM28	Prediction of Surface Roughness in Turning of Aluminum Casting Semi-Solid 7075 Using Response Surface Methodology <i>S. Rawangwong, R. Burapa and J. Rodjananugoon</i>	244
SM29	Recent Development of Direct Fiber Feeding Injection Molding Mechanical Properties of GF/ABS Composite by DFFIMS. <i>A. Imajo, X. Yan, H. Hamada, A. Kataoka, Y. Hisakura and M. Sugihara</i>	251
SM30	Effect of Coupling Agent on the Mechanical Properties of Glass Fiber/ Carbon Fiber Reinforced Polypropylene Hybrid Composites Fabricated by Direct Fiber Feeding Injection Molding Process <i>X. Yan, P. Uawongsuwan, and Y. Yang</i>	252

Effect of nano Titanium Dioxide (TiO₂) Addition on Mechanical Property of Recycled Poly(ethylene Terephthalate) (RPET) Fiber

Komson Sunyikhan¹, Nanjaporn Roungpaisan², Natee Srisawad², Takanori Nagoro³, Weraporn Pivsa-Art^{1*}

¹Department of Chemical and Materials Engineering,

²Department of Textile Engineering,

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani, 12110, Thailand

³Negoro Sangyo Co., Ltd., Sakai-shi, Osaka, 592-8352, Japan

*Corresponding E-mail: weraporn.p@en.rmutt.ac.th

Abstract—Multifilament of recycled poly(ethylene terephthalate) (RPET) with addition of nano titanium dioxide (TiO₂) was prepared using a bicomponent extruder fed spinning machine. The effect of winding speed (500, 1000 and 1,400 m/min) and different TiO₂ content (1, 2, 3 wt%) on mechanical property of multifilament was studied. The master batch of recycle poly(ethylene terephthalate) and 10 wt% nano titanium dioxide was prepared using a twin screw extruder. The size of multifilament was measured by cut cross section of fiber and evaluates the diameter using an optical microscopy technique. The mechanical property including tenacity, elongation at break and sonic modulus of multifilament was evaluated. The winding speed showed effect on tenacity of multifilament. The high draw ratio resulted in small diameter of fiber and molecular orientation and high tenacity was achieved.

Keywords—; Recycled PET, nano TiO₂, Multifilament

I. INTRODUCTION

Recycled PET (R-PET) is used for a variety of applications. The clear, higher grade pellets and flakes are primarily used for the food packaging industry. But the flakes that cannot apply for food contact, or coloured flakes are used for coloured applications. The recycling of PET is far from a straight-forward process due to contamination can result in the downgrading of the material. [1] Research on the development of recycled PET-based materials is of great interest in order to maximize the exploitation of urban solid waste and to produce materials with favorable properties and prices [2]. Fraternali, F. *et al.* reported a study on mechanical properties of recycled poly(ethylene terephthalate) fibre-reinforced concrete (RPETFRC) and its durability in an aggressive seawater environment [3]. Santos, R.P.O. *et al.* reported a preparation mats of ultrathin and nanoscale fibers from the electrospinning of lignocellulosic sisal fibers and recycled PET [4]. Deghani, A. *et al.* studied a development of a recycled poly(ethylene terephthalate) (PETr) reinforced with surface treated date palm leaf fiber (DPLF) composites with enhanced mechanical

properties have been studied [5]. For the application of carpets that always touch with several objects including dust, dirt, dampness which will be a source of disease and bacteria accumulation. Therefore, the development of materials for carpet with anti-bacteria property will be useful to carpet industry and customer requirement.

The addition of additives to RPET is one of the practical methods to produce the anti-material filaments. Titanium dioxide (TiO₂) is one of the most studied metal oxides for its many applications, such as photo-catalysis, solar cells, biological (anti-bacteria) coatings, and sensors [6–9]. For different applications, TiO₂ has been coated onto various substrates through different deposition techniques, *e.g.* spin-coating, dip-coating, evaporation-deposition, and sol-gel processing [10–13]. Xia J.H. *et al.* studied a preparation of cotton fibers nano-TiO₂ composites by as-assembly process and reported that the photocatalytic activities (Titanium dioxide nanoparticles (nano-TiO₂)) in the anatase form are an effective type of photocatalyst. They efficiently absorb solar energy to produce active superoxide anions and hydroxyl radicals, which can decompose the organic and biological species. Nano-TiO₂ is utilized by the textile industry to produce clothes with excellent anti-bacteria and anti-fungus properties [14]. Most of TiO₂ applications reported were coating of nanoparticles on the surface of fibers which had limitation of period of utilization. However, the mixing process of TiO₂ with fibers has not been reported.

In this research we studied the preparation of nano-TiO₂/RPET multifilament for the carpets. The master batch of RPET/TiO₂ was prepared and fabricated to multifilament by melt spinning process. The effects of winding speed and nano-TiO₂ contents on mechanical property were evaluated.

II. EXPERIMENTAL

A. Materials

The recycled PET (RPET) pellets recycled from PET plastic bottle were supplied by Negoro Sangyo Co., Ltd, Japan, with IV of 0.65 dl/g and molecular weight of 12,600 g/mol. Nano-Titanium dioxide (TiO₂), P25 grade, was used as received.

B. Master Batch Preparations

The RPET and 10 wt% TiO₂ master batch was compounded by Salee Colour Public Co., Ltd. The process mixed temperatures in the range of 260-270 °C. The characterization of master batch shows bulk density of 0.85 g/cm³, density 1.4 g/cm³ at 23 °C. Fig. 1(a) shows pellets of RPET before mixed and Fig. 1 (b) RPET/TiO₂ master batch after mixed.

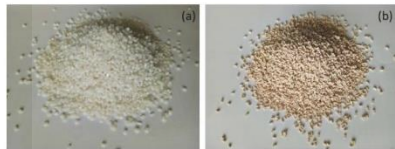


Fig. 1 Pellets of (a) RPET (b) master batch of RPET/TiO₂

C. Multifiber preparation

Master batch (10 wt% TiO₂/RPET) and RPET were first dried in an oven at 150°C for 5 h prior to processing. The master batch and the RPET were processed by melt-spun through 24 hole which diameter 0.5 mm per hole, using a Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine Model LBS-100, Hills, Inc., USA as shown in Fig. 1. The barrel temperature was 270, 275, 285, 275 and 270 °C. The multifilament of RPET/TiO₂ were collected at winding speed of 500, 1000, and 1400 m/min. The ratios of TiO₂/RPET calculated after mixed with the master batch were 0, 1, 2 and 3 wt% (total weight 300 g).

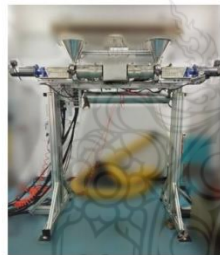


Fig. 2 Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine

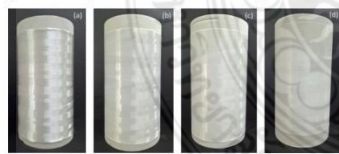


Fig. 3 Multifilament of RPET with TiO₂ content
(a) 0 wt%, (b) 1 wt% (c) 2 wt% (d) 3 wt%
(winding speed 500 m/min)

D. Sonic Modulus

The molecular orientation analysis was carried out using a Dynamic Modulus Tester DMT PPM-5R, LAWSON-HEMPHILL, INC. The fiber sample was prepared with length 50 cm. The fiber was placed across a vibration detector and measured with different lengths 200, 190, 180, 170, 160 and 150 cm. The transducer and the DMT software calculate a sonic modulus.

F. Tensile properties

The tensile strength measurement with standard ASTM D 3822 01 was carried out. The diameter (Denier) of fibers collected from winder with different speed of 500, 1000 and 1,400 m/min, were measured using a Fiber Fineness by winding 9 rounds and the weighed with 4 digits. The diameter measurement was carried out 3 times for each sample. The values received were calculated the size of fiber compare with weight (g) of fiber 900 m length. The data will be parameters of tensile strength of the fibers.

The fibers were prepared with C-Camp shape with length 2,3 cm. 10 Samples of each fiber were analyzed. The samples were subjected to tensile strength test using 50 kN load cell. The gate length is 250 mm and winding speed 50 mm/min.

G. Optical Microscopy (OM)

The multifilament was cross section cut and subjected to analyze by optical microscope with 10 times magnification. The pictures were measured the fiber diameter using a size analysis program.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Optical Microscopic (OM) image and Diameter of Multifilament of RPET

Fig. 3 shows multifilament of RPET with different TiO₂ contents. The RPET multifilament without TiO₂ is white and glossy. Addition of TiO₂ resulted in cloudy filament. The multifilament was winding at different speed of 500, 1000 and 1400 m/min. The fiber was cut by cross section to analyze by optical microscope. The results are shown in Fig. 4. The diameter of fibers from Fig. 4 was measured and plotted as shown in Fig. 5. It was found that the RPET multifilament without TiO₂ drawn at speed 500 m/min had diameter of 27 μm. Diameter of fiber decrease when increase the speed of draw ratio to 1000 and 1400 m/min. With draw ratio speed of 1400 m/min the fiber diameter decreases to half of the speed of draw ratio 500 m/min. Addition of TiO₂ to fiber gave the higher diameter due to the TiO₂ particles may impede the extensibility of the fiber.

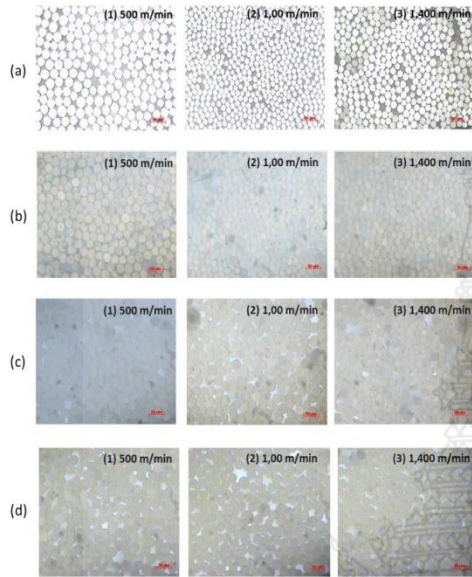


Fig. 4 OM image of multifilament of RPET/TiO₂

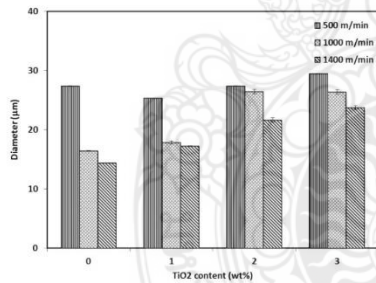


Fig. 5 Diameter of multifilament of RPET/TiO₂

B. Sonic Modulus

Sonic modulus is determined using the resonant frequency in the flexural mode of vibration. The sonic modulus indicates the arrangement of fiber molecules. Fig. 6 shows the sonic modulus of multifilament of RPET with TiO₂. It was found that with TiO₂ content has no significant effect on the sonic modulus of fiber. With 3 wt% of TiO₂ the sonic modulus decreased due to the agglomeration of particles in matrix. The results are in agreement with the tenacity measurement.

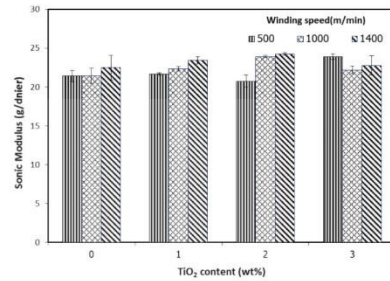


Fig. 6 Sonic Modulus of multifilament of RPET/TiO₂

C. Tenacity properties

Fig. 7 shows tenacity of multifilament of RPET without and with TiO₂. The tendency of fibers tenacity was clearly observed. The tenacity of multifilament increased with increasing the winding speed from 500 to 1,400 m/min as well as addition of TiO₂. The drawing speed resulted in well orientation of polymer molecules which resulted in higher strength. Due to TiO₂ showed effect of nucleating agent, small amount of TiO₂ will enhance the crystallinity of the fiber molecules. However, increased content of TiO₂ to 3 wt% the tenacity was not improved due to agglomeration of high content TiO₂ particles. For the winding speed of 500 m/min when increased TiO₂ contents, the tenacity reduced as a result of TiO₂ particles in matrix may be agglomerated.

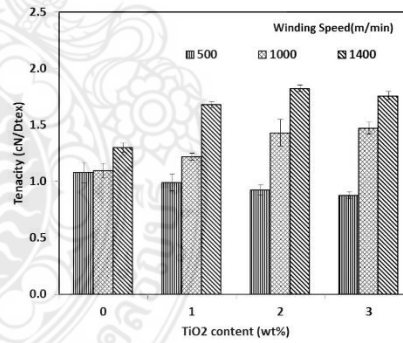


Fig. 7 Tenacity of multifilament of RPET/TiO₂

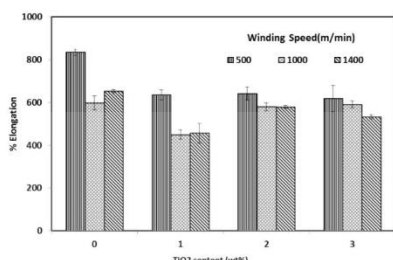


Fig. 8 Elongation at break of multifilament of RPET/TiO₂

Fig. 8 shows Elongation at break of multifilament of RPET/TiO₂. It was found that at winding speed of 500 m/min show clear results compare between RPET without TiO₂ and RPET with TiO₂. The % elongation at break reduced when TiO₂ was added in RPET matrix due to TiO₂ is a rigid material that changed morphology of fiber from soft phase to hard phase.

IV. COCLUSION

The effect of winding speed and additive on mechanical property of multifilament of recycled poly(ethylene terephthalate) (RPET) was investigated. The winding speed was varied at 500, 1000 and 1400 m/min and addition of TiO₂ content on RPET matrix was 1, 2 and 3 wt%. The winding speed showed effect to the fiber size. The diameter of fiber was reduced due to orientation of fiber molecules that extended during drawing. However, addition of TiO₂ resulted in increasing of the fiber diameter because the additive particles may obstruct the extension of polymer molecules. Winding speed shows effect to tenacity of multifilament. At high winding speed, high tenacity of fiber was observed. The elongation at break of fibers reduced with addition of TiO₂ in RPET matrix due to its rigid phase.

V. ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to acknowledge the Thai Negoro Co., LTD. for materials support and Assist. Prof. Dr. Sorapong Pavasupree, for Nano-Titanium dioxide (TiO₂) support.

REFERENCES

- [1] R.P. Borg, O. Baldaechino, J. Ferrara, "Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete", *Construction and Building Materials* 108, 2016, pp. 29-47.
- [2] De Oliveira Santos, R.P., Oliveira Castro, D., Colla Ruvolo-Filho, A., Frollini, E., 2014. Processing and thermal properties of composites based on recycled PET, sisal fibers, and renewable plasticizers. *J. Appl. Polym. Sci.* 131 (13), 40386-40399.
- [3] Fernando Fraternali, Saverio Spadea, Valentino P. Berardi,

- "Effects of recycled PET fibres on the mechanical properties and seawater curing of Portland cement-based concretes" *Construction and Building Materials* Volume 61, 30 June 2014, Pages 293-302
- [4] Rachel P.O. Santos, Bruno V.M. Rodrigues, Elaine C. Ramires, Adhemar C. Ruvolo-Filho, Elisabete Frollini, "Bio-based materials from the electrospinning of lignocellulosic sisal fibers and recycled PET", *Industrial Crops and Products* 72 (2015) 69-76.
- [5] Alireza Dehghani, Sara Madadi Ardekani, Mariam A. Al-Maadeed, Azman Hassan, Mat Uzir Wahit, "Mechanical and thermal properties of date palm leaf fiber reinforced recycled poly (ethylene terephthalate) composites", *Materials and Design* 52 (2013) 841-848
- [6] S.S. Madaeni, N. Ghaemi, *J. Membr. Sci.* 303 (2007) 221-233.
- [7] M. Zukalova, A. Zukal, L. Kavan, M.K. Nazeeruddin, P. Liska, M. Gratzel, *Nano Lett.* 5 (2005) 1789-1792.
- [8] S.H. Oh, R.R. Finones, C. Daraio, L.H. Chen, S.H. Jin, *Biomaterials* 26 (2005) 4938-4943.
- [9] S.Q. Liu, A.C. Chen, *Langmuir* 21 (2005) 8409-8413.
- [10] K. Wang, M.A. Morris, J.D. Holmes, *Chem. Mater.* 17 (2005) 1269-1271.
- [11] L. Malfatti, M.G. Bellino, P. Innocenzi, G.J.A.A. Soler-Illia, *Chem. Mater.* 21 (2009) 2763-2769.
- [12] B. Chi, T. Jin, *Cryst. Growth Des.* 7 (2007) 815-819.
- [13] V.R. Koganti, D. Dunphy, V. Gowrishankar, M.D. McGehee, X. Li, J. Wang, S.E. Rankin, *Nano Lett.* 6 (2006) 2567-2570.
- [14] J.H. Xia, C.T. Hsu, D.D. Qin, Cotton fibers nano-TiO₂ composites prepared by as-assembly process and the photocatalytic activities, *Materials Research Bulletin* 47 (2012) 3943-3946
- [15] Weraporn Pivsa-Art, Sommai Pivsa-Art, Kazunori Fujii, Keiichiro Nomura, Kiyooki Ishimoto, Yuji Aso, Hideki Yamane and Hitomi Ohara, Compression Molding and Melt-spinning of the Blends of Poly(lactic acid) and Poly(butylene succinate-co-adipate), *Applied Polymer Science* 2015, DOI: 10.1002/APP.41856.



The 13th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium

December 1 – 4, 2016 Udon Thani, Thailand

Present this honor certificate to

**Komson Sunyikhan, Nanjaporn Rounpaisan,
Natee Srisawad, Takanori Nagoro, Weraporn Pivsa-Art**

for your kind participation on titled of

**“Effect of nano Titanium Dioxide (TiO₂) Addition on Mechanical Property
of Recycled Poly(ethylene Terephthalate) (RPET) Fiber”**

***Assoc. Prof. Dr. Prasert Pinpathomrat
President of RMUTT, Thailand
EMSES 2016 Honorary Advisory Chair***

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายคมสัน สุญย์จันทร์
วัน เดือน ปีเกิด	21 มกราคม พ.ศ. 2537
ที่อยู่	27/1 หมู่ 16 ตำบล คลองสี่ อำเภอลองหลวง จังหวัด ปทุมธานี 12120
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์	096-272-9990
อีเมลล์	komsan.rmutt@gmail.com

