



สิ่งทอทางการแพทย์

MEDICAL TEXTILES

รองศาสตราจารย์ปิยะพร คามภักรภาพพันธ์

สิ่งทอทางการแพทย์ MEDICAL TEXTILES

รองศาสตราจารย์ปิยะพร คามภิรภาพพันธ์

สิ่งทอทางการแพทย์ Medical Textiles

รองศาสตราจารย์ปิยะพร คามภิรภาพพันธ์

ISBN (e-book) 978-616-623-821-1

ราคา 700 บาท

จัดทำครั้งที่ 1 พ.ศ. 2568

จัดทำโดย รองศาสตราจารย์ปิยะพร คามภิรภาพพันธ์

เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

โทร. 087-594-4594 E-mail: piyaporn.k@mail.rmutk.ac.th

สั่งซื้อได้ที่ ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

ศาลาพระแก้ว โทร. 0-2218-7000-3 โทรสาร 0-2255-4441

สยามสแควร์ โทร. 0-2218-9881-2 โทรสาร 0-2254-9495

Call Center โทร. 08-6323-3703-4 <http://www.chulabook.com>

คำนิยม

หนังสือ “สิ่งทอทางการแพทย์” เล่มนี้เป็นผลงานที่มีคุณค่าทางวิชาการอย่างยิ่ง โดยผู้เขียนได้รวบรวมข้อมูลที่ครอบคลุมและลึกซึ้งเกี่ยวกับการพัฒนาและนวัตกรรมของสิ่งทอที่นำมาใช้ในทางการแพทย์ ซึ่งเป็นหัวข้อที่มีความสำคัญอย่างมากในปัจจุบัน เนื้อหาถูกนำเสนออย่างเป็นระบบและชัดเจน ตั้งแต่การเลือกใช้วัสดุไปจนถึงการออกแบบและการผลิต รวมถึงการพิจารณาด้านความปลอดภัยและการใช้งานจริงในสภาพแวดล้อมทางการแพทย์

ผู้เขียนได้แสดงให้เห็นถึงความเข้าใจอย่างลึกซึ้งในศาสตร์ด้านสิ่งทอและการแพทย์ ผ่านการอ้างอิงข้อมูลวิจัยที่ทันสมัยและเชื่อถือได้ ทำให้หนังสือเล่มนี้เหมาะสำหรับนักวิจัย นักวิชาการ ตลอดจนบุคลากรทางการแพทย์ที่สนใจในการใช้วัสดุทางวิทยาศาสตร์เพื่อตอบสนองต่อความต้องการด้านสุขภาพของมนุษย์

ข้าพเจ้าขอชื่นชมในความพยายามและความตั้งใจของผู้เขียนในการรวบรวมและเรียบเรียงข้อมูลที่เป็นประโยชน์แก่ผู้อ่านทุกท่าน และมั่นใจว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นหนึ่งในแหล่งอ้างอิงที่สำคัญในวงการสิ่งทอทางการแพทย์ในอนาคต

รศ.ดร.เข็มชัย เหมะจันทร์

รองศาสตราจารย์ ดร. เข็มชัย เหมะจันทร์
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมษายน 2568

คำนำ

ปัจจุบัน สิ่งทอทางการแพทย์มีบทบาทสำคัญหลายด้านในวงการสาธารณสุข และการดูแลรักษาผู้ป่วย ตั้งแต่การผลิตชุดป้องกันสำหรับบุคลากรทางการแพทย์ไปจนถึงการใช้เป็นวัสดุฝังในร่างกาย เช่น วัสดุเย็บแผล และโครงเลี้ยงเซลล์ โดยวิทยาการด้านสิ่งทอมีการพัฒนาด้วยการประยุกต์เทคโนโลยีใหม่เพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติพิเศษทั้งในแง่การใช้งานที่ปลอดภัยต่อร่างกายมนุษย์ และความคงทนต่อสภาพแวดล้อม

หนังสือเล่มนี้จัดทำขึ้นเพื่อให้ความรู้เกี่ยวกับสิ่งทอทางการแพทย์ที่ใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน รวมถึงการพัฒนานวัตกรรมและเทคโนโลยีใหม่ในการสร้างสรรค์วัสดุที่ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพในงานด้านการแพทย์ นอกจากนี้ยังนำเสนอแนวคิดการออกแบบวัสดุสิ่งทอที่สามารถลดความเสี่ยงในการติดเชื้อ และส่งเสริมการฟื้นฟูเนื้อเยื่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของวงการแพทย์สมัยใหม่

ภาพวาดทั้งหมดในหนังสือเล่มนี้จัดทำโดยผู้เขียน ส่วนรูปถ่าย ผู้เขียนเป็นผู้ถ่ายด้วยตนเองหรือได้รับจากแหล่งที่อนุญาตให้ใช้งานต่อได้อย่างอิสระ ให้เผยแพร่ ดัดแปลงได้ แต่ต้องให้เครดิตเจ้าของผลงาน เพื่อใช้ประกอบการอธิบายเนื้อหาในหนังสือเล่มนี้

ผู้เขียนหวังว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นแหล่งความรู้และแรงบันดาลใจสำหรับนักวิจัย นักวิชาการ และบุคลากรทางการแพทย์ที่สนใจในเรื่องสิ่งทอทางการแพทย์ ตลอดจนผู้ที่มีส่วนร่วมในการพัฒนาสิ่งทอเพื่อการแพทย์ในอนาคต

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	ก
สารบัญรูป	ฅ
สารบัญตาราง	ถ
บทที่ 1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวัสดุและเส้นใย	1
1.1 วัสดุในการผลิตเส้นใย	1
1.1.1 พอลิเมอร์	1
1.1.2 เซรามิก	7
1.1.3 โลหะ	9
1.2 เส้นใย	12
1.2.1 ประเภทของเส้นใย	12
1.2.2 การผลิตเส้นใย	13
1.2.3 สมบัติของเส้นใย	16
1.3 บทสรุป	35
เอกสารอ้างอิง	35
บทที่ 2 เส้นด้ายและผ้า	45
2.1 เส้นด้าย	46
2.1.1 ประเภทของเส้นด้าย	46
2.1.2 การผลิตเส้นด้าย	51
2.1.3 สมบัติของเส้นด้าย	54
2.2 ผ้า	58
2.2.1 ประเภทของผ้า	58

	หน้า
2.2.2 สมบัติผ้า	59
2.2.3 ผ้าทอและการผลิตผ้าทอ	59
2.2.4 ผ้าถักและการผลิตผ้าถัก	64
2.2.5 ผ้าไมทอและการผลิตผ้าไมทอ	71
2.3 บทสรุป	80
เอกสารอ้างอิง	81
บทที่ 3 การย้อมและการพิมพ์สี	87
3.1 สารให้สี	88
3.1.1 สีย้อม	89
3.1.2 ผงสี	95
3.2 การย้อมสี	99
3.2.1 หลักการย้อมสี	99
3.2.2 ขั้นตอนการย้อมสี	103
3.2.3 เทคนิคการย้อมสีให้เกิดลวดลาย	106
3.3 การพิมพ์สี	108
3.3.1 ส่วนประกอบของแป้งพิมพ์	108
3.3.2 รูปแบบการพิมพ์	109
3.3.3 วิธีการพิมพ์	112
3.3.4 ขั้นตอนหลังการพิมพ์ผ้า	115
3.4 น้ำสำหรับย้อมผ้าและพิมพ์วัสดุสิ่งทอ	117
3.4.1 สมบัติของน้ำ	117
3.4.2 การปรับสภาพน้ำให้เหมาะสมกับการย้อมและพิมพ์	119
3.4.3 การย้อมโดยใช้น้ำปริมาณต่ำ	120
3.5 บทสรุป	122
เอกสารอ้างอิง	122
บทที่ 4 การตกแต่งสำเร็จผ้า	129
4.1 ประเภทของการตกแต่งสำเร็จ	129
4.1.1 แบ่งตามจุดประสงค์	129
4.1.2 แบ่งตามความคงทน	130
4.1.3 แบ่งตามกระบวนการ	131
4.2 การตกแต่งสำเร็จเชิงกล	131
4.2.1 การเซตตัวด้วยความร้อน	131
4.2.2 การอัดรีดด้วยลูกกลิ้ง	135

	หน้า
4.2.3 การตกแต่งสำเร็จด้านขนผ้า	138
4.2.4 การตกแต่งสำเร็จด้านความคงรูปของผ้า	140
4.3 การตกแต่งสำเร็จสิ่งทอทางเคมี	142
4.3.1 การตกแต่งสำเร็จด้านผิวสัมผัสของผ้า	143
4.3.2 การตกแต่งเพื่อเพิ่มสมบัติของผ้า	150
4.4 บทสรุป	164
เอกสารอ้างอิง	164
บทที่ 5 ผลิตภัณฑ์สิ่งทอและบรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์	171
5.1 สิ่งทอทางการแพทย์	171
5.1.1 ประเภทของสิ่งทอทางการแพทย์	173
5.1.2 กระบวนการผลิตและสมบัติของสิ่งทอทางการแพทย์	176
5.2 บรรจุภัณฑ์	177
5.2.1 ประเภทของบรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์	177
5.2.2 การทดสอบคุณภาพของบรรจุภัณฑ์	180
5.3 การทำให้ปราศจากเชื้อ	184
5.3.1 วิธีทางกายภาพ	184
5.3.2 วิธีทางเคมี	194
5.4 บทสรุป	205
เอกสารอ้างอิง	205
บทที่ 6 อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล	215
6.1 อุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจ	216
6.1.1 ประเภทของอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจ	216
6.1.2 วัสดุสำหรับอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจ	221
6.1.3 การประเมินประสิทธิภาพการกรองของอุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจ	228
6.2 ชุดกาว์ทางการแพทย์	230
6.2.1 ประเภทของชุดกาว์	230
6.2.2 ลักษณะของชุดกาว์ทางการแพทย์	232
6.3 อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลประเภทอื่น	239
6.3.1 หมวกคลุมผม	240
6.3.2 ผ้าคลุมรองเท้า	242
6.4 บทสรุป	243
เอกสารอ้างอิง	244

	หน้า
บทที่ 7 วัสดุเย็บแผลและปิดแผล	259
7.1 บาดแผล	259
7.1.1 ประเภทของบาดแผล	259
7.1.2 กระบวนการหายของบาดแผล	261
7.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการหายของบาดแผล	264
7.2 วัสดุเย็บแผล	265
7.2.1 ประเภทของวัสดุเย็บแผล	267
7.2.2 ลักษณะและสมบัติของวัสดุเย็บแผล	275
7.2.3 ประวัติกรรมของวัสดุเย็บแผล	281
7.3 วัสดุปิดแผล	284
7.3.1 สมบัติของวัสดุปิดแผล	284
7.3.2 ประเภทของวัสดุปิดแผล	284
7.3.3 ผ้าปิดแผลที่มีสมบัติพิเศษ	290
7.4 บทสรุป	294
เอกสารอ้างอิง	294
บทที่ 8 โครงเลี้ยงเซลล์สำหรับวิศวกรรมเนื้อเยื่อ	309
8.1 วิศวกรรมเนื้อเยื่อ	309
8.1.1 องค์ประกอบของวิศวกรรมเนื้อเยื่อ	309
8.1.2 การเลี้ยงเซลล์	312
8.2 เทคโนโลยีการผลิตโครงเลี้ยงเซลล์	317
8.2.1 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง	318
8.2.2 การขึ้นรูปแบบใช้ตัวทำละลายและการชะละลาย	321
8.2.3 การเกิดโฟมโดยใช้แก๊ส	322
8.2.4 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	325
8.3 ปัจจัยที่ต้องพิจารณาสำหรับการเลือกใช้โครงเลี้ยงเซลล์	331
8.3.1 ลักษณะของโครงเลี้ยงเซลล์ในอุดมคติ	332
8.3.2 สมบัติของโครงเลี้ยงเซลล์	333
8.4 การใช้งานของโครงเลี้ยงเซลล์	336
8.4.1 ด้านผิวหนัง	337
8.4.2 ด้านกระดูก	339
8.4.3 การรักษาการบาดเจ็บ	340
8.5 บทสรุป	342
เอกสารอ้างอิง	342

บทที่ 9 เครื่องพุงการทำงานของอวัยวะ	359
9.1 เครื่องพุงการทำงานของหัวใจและปอด	359
9.1.1 ประเภทและส่วนประกอบของเครื่องพุงการทำงานของหัวใจและปอด	360
9.1.2 ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในการใช้เครื่องพุงการทำงานของหัวใจและปอด	364
9.1.3 เยื่อเลือกผ่านสำหรับเครื่องพุงการทำงานของหัวใจและปอด	366
9.2 เครื่องฟอกไตเทียม	374
9.2.1 หลักการฟอกเลือดด้วยเครื่องไตเทียม	375
9.2.2 ประเภทของเยื่อฟอกเลือด	376
9.2.3 การปรับปรุงพื้นผิวของเยื่อ	378
9.3 บทสรุป	385
เอกสารอ้างอิง	386
บทที่ 10 สิ่งทออิเล็กทรอนิกส์ทางการแพทย์	401
10.1 สิ่งทออัจฉริยะ	401
10.1.1 ประเภทของสิ่งทออัจฉริยะ	402
10.1.2 ความแตกต่างระหว่างสิ่งทออิเล็กทรอนิกส์และสิ่งทออัจฉริยะ	402
10.2 เส้นใยนำไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้	403
10.2.1 เส้นใยนำไฟฟ้า	404
10.2.2 เทคโนโลยีการผลิตเส้นใยนำไฟฟ้า	408
10.3 อุปกรณ์ดูแลสุขภาพที่สวมใส่ได้	411
10.3.1 ประเภทของอุปกรณ์ดูแลสุขภาพที่สวมใส่ได้	412
10.3.2 การใช้งานสิ่งทออิเล็กทรอนิกส์ทางการแพทย์และสุขภาพ	413
10.3.3 การพัฒนาสิ่งทออิเล็กทรอนิกส์เพื่อสุขภาพสำหรับทางการแพทย์	429
10.4 บทสรุป	431
เอกสารอ้างอิง	431
บทที่ 11 กฎระเบียบด้านสิ่งทอทางการแพทย์	449
11.1 กฎหมายไทย	449
11.1.1 ที่มาของกฎหมายไทย	450
11.1.2 ลำดับศักดิ์และผลของการจัดลำดับศักดิ์ของกฎหมายลายลักษณ์อักษร	451
11.2 กฎหมายเกี่ยวกับเครื่องมือแพทย์และผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	453
11.2.1 นิยามเกี่ยวกับเครื่องมือแพทย์	453
11.2.2 ประเภทของเครื่องมือแพทย์	456
11.2.3 การควบคุมเครื่องมือแพทย์	466
11.3 มาตรฐานผลิตภัณฑ์วัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์	470

	หน้า
11.3.1 ลำลี	470
11.3.2 หน้ากากและอุปกรณ์ปกป้องทางเดินหายใจ	472
11.3.3 ผ้าและผลิตภัณฑ์จากผ้า	478
11.3.4 ผ้าพันแผล ปลาสเตอร์และวัสดุปิดแผล	488
11.4 บทสรุป	491
เอกสารอ้างอิง	491
บทที่ 12 การทดสอบวัสดุสิ่งทอและผลิตภัณฑ์สิ่งทอทางการแพทย์	499
12.1 การทดสอบสมบัติทั่วไปของวัสดุสิ่งทอทางการแพทย์	499
12.1.1 สมบัติเชิงกล	499
12.1.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	506
12.1.3 สมบัติทางชีวภาพ	522
12.2 การทดสอบสมบัติเฉพาะของวัสดุสิ่งทอและผลิตภัณฑ์สิ่งทอทางการแพทย์	529
12.2.1 ลำลี	529
12.2.2 หน้ากากอนามัย	533
12.2.3 ปลาสเตอร์แบบม้วน: ผ้าเคลือบกาวซิงก์ออกไซด์	537
12.2.4 ผ้ากันสารก่อภูมิแพ้ไรฝุ่น	538
12.3 บทสรุป	539
เอกสารอ้างอิง	540
บทที่ 13 สิ่งทอทางการแพทย์ กรณีศึกษาการใช้วัสดุหรือสารสกัดจากธรรมชาติ	547
13.1 วัสดุเย็บแผล	547
13.1.1 รามีและบอระเพ็ด	548
13.1.2 มะพร้าวและป่านศรนารายณ์	552
13.1.3 กล้วย	554
13.1.4 ว่านงาช้าง	555
13.2 โครงเลี้ยงเซลล์	556
13.2.1 โครงเลี้ยงเซลล์ที่มีการเสริมแรงด้วยผลึกนาโนเซลลูโลส	556
13.2.2 โครงเลี้ยงเซลล์ที่มีส่วนประกอบของไฮดรอกซีอะพาไทต์	561
13.3 สิ่งทอยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์จากวัสดุธรรมชาติ	564
13.3.1 แผ่นผ้าไม่ทอต้านเชื้อจุลินทรีย์จากเส้นใยฝ้าย	565
13.3.2 ผ้าฝ้ายยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่มีส่วนผสมจากขมิ้น	566
13.4 ผ้าปิดแผล	567
13.4.1 พืชสมุนไพรธรรมชาติ	567
13.4.2 สารสกัดจากสัตวี	570

	หน้า
13.5 บทสรุป	573
เอกสารอ้างอิง	573
บทที่ 14 การจัดการของเสียและทิศทางผลิตภัณฑ์สิ่งทอทางการแพทย์ในอนาคต	585
14.1 ผลกระทบของการใช้ผลิตภัณฑ์สิ่งทอทางการแพทย์	585
14.1.1 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	586
14.1.2 ผลกระทบต่อสุขภาพ	591
14.2 การจัดการของเสียของผลิตภัณฑ์สิ่งทอทางการแพทย์	597
14.2.1 การจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องมือแพทย์ในต่างประเทศ	599
14.2.2 การจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องมือแพทย์ในประเทศไทย	603
14.3 ทิศทางของวัสดุและผลิตภัณฑ์สิ่งทอทางการแพทย์ในอนาคต	607
14.3.1 การพัฒนาวัสดุที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	607
14.3.2 การพัฒนาสิ่งทออิเล็กทรอนิกส์สวมใส่ได้	612
14.4 บทสรุป	616
เอกสารอ้างอิง	616
บรรณานุกรม	633
ดัชนีภาษาไทย	723
ดัชนีภาษาอังกฤษ	735

ช

สารบัญ

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	การเกิดพอลิเมอร์
1.2	การสังเคราะห์พอลิเอทิลีน
1.3	โคพอลิเมอร์ (ก) แบบสลับ (ข) แบบกราฟต์ (ค) แบบกลุ่ม (ง) แบบไม่เป็นระเบียบ
1.4	โครงสร้างพอลิเมอร์ (ก) แบบเส้น (ข) แบบกิ่ง (ค) แบบร่างแห
1.5	โครงสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ (ก) รูปผลึก (ข) รูปอสัณฐาน
1.6	ประเภทของโลหะแบ่งตามส่วนประกอบ
1.7	รูปร่างของชิ้นงาน (ก) ชิ้นงานเดิม (ข) การขาดของโลหะเปราะ (ค) การขาดของโลหะเหนียว
1.8	การจำแนกชนิดของเส้นใย
1.9	เส้นใยธรรมชาติจากพืช
1.10	กระบวนการผลิตเส้นใยประดิษฐ์ (ก) การปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลว (ข) การปั่นเส้นใยแบบแห้ง (ค) การปั่นเส้นใยแบบเปียก
1.11	ลักษณะเส้นใยฝ้าย
1.12	ภาคตัดขวางของฝ้าย (ก) ฝ้ายอ่อน (ข) ฝ้ายโตเต็มวัย
1.13	ลักษณะเส้นใยขนุน
1.14	ลึนิจากลำต้นแฟลกซ์
1.15	ลักษณะของ (ก) ลำต้นปอกระเจา (ข) กลุ่มเส้นใยจากลำต้นปอกระเจา
1.16	ลักษณะของ (ก) ลำต้นกล้วย (ข) กลุ่มเส้นใยกล้วย
1.17	ภาคตัดขวางของลำต้นกล้วย
1.18	ลักษณะของ (ก) บัว (ข) เส้นใยบัวจากการหักก้านบัว
1.19	เส้นใยไผ่
1.20	เส้นใยไหม

รูปที่		หน้า
1.21	ชนสัตว์	23
1.22	ภาคตัดขวางของเส้นใยประดิษฐ์ชนิดต่าง ๆ	24
1.23	ขั้นตอนการผลิตวิสโคสเรยอน	24
1.24	ขั้นตอนการผลิตเส้นใยไลโอเซลล์	26
1.25	การเกิดขนของเส้นใยไลโอเซลล์	26
1.26	โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสแอซีเตตและไตรแอซีเตต	27
1.27	การผลิตเส้นใยเคซีน	28
1.28	การผลิตพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต	29
1.29	โครงสร้างส่วนที่มีความอ่อนนุ่มและแข็งของพอลิยูรีเทน	30
1.30	กระบวนการผลิตเส้นใยโลหะ (ก) การดึงยืดลดแบบกลุ่ม (ข) การตัดพอยต์ (ค) การตัดเฉือนหรือสกัดเนื้อวัสดุออกให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการ (ง) การปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลว	34
2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของเส้นใย เส้นด้ายและผ้า	45
2.2	กระบวนการผลิตเส้นด้ายจากใยสั้น	46
2.3	กระบวนการผลิตเส้นด้ายจากใยยาว	47
2.4	เส้นด้ายใยยาว (ก) เส้นใยยาวเส้นเดียว (ข) เส้นใยยาวหลายเส้น	47
2.5	ลักษณะของเส้นด้าย (ก) เกลียวต่ำ (ข) เกลียวปกติ (ค) เกลียวสูง	47
2.6	ทิศทางการตีเกลียวแบบ (ก) s (ข) z	48
2.7	ลักษณะของเส้นด้ายจากกระบวนการปั่นด้าย (ก) แบบวงแหวน (ข) แบบปลายเปิด	48
2.8	เส้นด้ายแบ่งตามจำนวนเส้น (ก) เส้นด้ายเดี่ยว (ข) เส้นด้ายรวม (ค) เส้นด้ายเชือก	49
2.9	ลักษณะเส้นด้ายพิเศษ	50
2.10	ตัวอย่างของเส้นด้ายพิเศษแบ่งตามโครงสร้าง (ก) เส้นด้ายสลับ (ข) เส้นด้ายห่าง (ค) เส้นด้ายบูเคล (ง) เส้นด้ายกิมป์ (จ) เส้นด้ายเกลียว (ฉ) เส้นด้ายสนาร์ล (ช) เส้นด้ายเชนีส	50
2.11	ขั้นตอนการผสมเส้นใย สางใยและการทำเส้นสไลเวอร์	52
2.12	การรีดปูย	52
2.13	การดึงลดขนาด	53
2.14	การปั่นเส้นด้ายแบบวงแหวน	53
2.15	จำนวนเส้นใยในพื้นที่หน้าตัดของเส้นด้าย (ก) พื้นที่หน้าตัดของเส้นด้ายเท่ากัน (ข) ขนาดเส้นใยเท่ากัน	57
2.16	การกรอด้ยจากหลอดขนาดเล็กให้มีขนาดใหญ่ขึ้น	60
2.17	การสืบด้าย	60
2.18	อ้างอิงสารลงแบ่ง	61
2.19	ลักษณะลูกกลิ้งบีบอัดกำจัดสารลงแบ่งส่วนเกินจากเส้นด้ายยีน	61

รูปที่	หน้า
2.20 การร้อยตะกอ	62
2.21 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องทอผ้า	62
2.22 ลักษณะผ้าทอ (ก) ลายขัด (ข) ลายสอง (ค) ลายตัวน	63
2.23 ผ้าถัก (ก) การถักผ้าแฉนวนอน (ข) การถักผ้าแฉวนตั้ง	64
2.24 ลักษณะการคล้องห่วง (ก) ห่วงด้านหน้า (ข) ห่วงด้านหลัง	64
2.25 ผ้าเพลน (ก) ด้านหน้าผ้า (ข) ด้านหลังผ้า	65
2.26 ผ้าเพิร์ล 1×1	65
2.27 ผ้าริบ 1×1	66
2.28 ผ้าอินเตอร์ล๊อค	66
2.29 ลักษณะการคล้องห่วง (ก) ห่วงปิด (ข) ห่วงเปิด	67
2.30 ชนิดเข็ม (ก) เข็มสปริง (ข) เข็มแล็ช (ค) เข็มคอมพาวด์	67
2.31 ผ้าทริคอต (ก) ฟลูทริคอต (ข) ควินส์คอร์ด	68
2.32 ผ้าราเซล (ก) ผ้าตาข่ายหกเหลี่ยม (ข) ผ้ามาร์ควิสเซิต	69
2.33 ผ้าซิมเพลกซ์	69
2.34 ผ้าถักมิลานิส	70
2.35 การแบ่งประเภทของผ้าไม่ทอตามขั้นตอน วัตถุดิบและสมบัติ	71
2.36 ชนิดของผ้าไม่ทอ	72
2.37 การเตรียมเส้นใยแบบแห้ง	72
2.38 การเตรียมเส้นใยแบบเปียก	73
2.39 เครื่องผลิตสปีนบอนด์	73
2.40 การเป่าแบบหลอมเหลว	74
2.41 ลักษณะของเส้นใยเมื่อเข็มแทงผ่านผ้าไม่ทอ	75
2.42 การยึดติดโดยใช้ด้ายเย็บ	75
2.43 การยึดติดโดยใช้แรงดันน้ำ	76
2.44 วิธีการผ่านผ้าไม่ทอลงในอ่างสารเคมี	77
2.45 วิธีการพิมพ์	77
2.46 วิธีการสเปรย์	78
2.47 การใช้ลูกกลิ้งร้อนยึดติดผ้าไม่ทอ	79
2.48 ลักษณะของผ้าไม่ทอที่ผ่านการยึดติดด้วยลูกกลิ้งร้อน	79
2.49 การยึดติดผ้าไม่ทอด้วยอัลตราโซนิค	80
3.1 โครงสร้างที่ประกอบด้วยพันธะคู่สลับเดี่ยว	88
3.2 ตัวอย่างสีเอโซ (ก) สีแอกซิดสีแดง 2 (ข) สีดิสเพิร์สสีเหลือง 7	91
3.3 ตัวอย่างสีแอนทราควิโนน (ก) สีดิสเพิร์สสีแดง 60 (ข) สีแอกซิดสีน้ำเงิน 25	92
3.4 โครงสร้างพื้นฐานของสีเบนโซไดฟิราโนน	92

รูปที่	หน้า
3.5 โครงสร้างของสีพทาโลไซยานิน	92
3.6 โครงสร้างพื้นฐานของสีฟอร์มาซาน	93
3.7 โครงสร้างของสีอินดิโก	93
3.8 โครงสร้างของสีไชยานิน	93
3.9 โครงสร้างของสีดิสเพิร์สสีเหลือง 26	93
3.10 โครงสร้างทางเคมีของสีซัลเฟอร์สีดำ (C.I. sulfur black 1)	94
3.11 รูปร่างของผงสี (ก) กลม (ข) สีเหลี่ยมลูกบาศก์ (ค) แท่ง (ง) แผ่น	98
3.12 กำลังการผสม (ก) ผงสีกำลังการผสมสูง (ข) ผงสีกำลังการผสมต่ำ	98
3.13 สันฐานวิทยาของเส้นใย	100
3.14 การย้อมสีวัสดุสิ่งทอ (ก) สีย้อมเคลื่อนที่จากน้ำย้อมไปที่ผิวเส้นใย (ข) สีเคลื่อนที่เข้าไปในเส้นใย (ค) สีแทรกซึมเข้าในเส้นใยบริเวณที่รับสีได้ (ง) สีเคลื่อนที่จากบริเวณสีเข้มไปบริเวณสีอ่อน	100
3.15 อันตรกิริยาระหว่างสีแอซิดและเส้นใยฝ้าย (ก) การย้อมทั่วไป (ข) การปรับปรุงพื้นผิวฝ้ายเป็นประจุบวก	101
3.16 ลักษณะของเส้นด้ายฝ้ายย้อมด้วยครามที่สีติดเฉพาะพื้นผิวด้านนอกของเส้นด้าย	102
3.17 การย้อมสีวัสดุดิบ	103
3.18 เครื่องย้อมเส้นด้ายแบบใบ	104
3.19 เครื่องย้อมเส้นด้ายแบบม้วน	104
3.20 เครื่องย้อม (ก) วินช์ (ข) จิกเกอร์	105
3.21 การย้อมผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (ก) เครื่องย้อมแพดเดิล (ข) ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่ผ่านการย้อมสีบางส่วน	105
3.22 การมัดย้อม (ก) ลักษณะการมัด (ข) ลวดลายมัดย้อม	106
3.23 กระบวนการทำผ้าบาติก	107
3.24 ลักษณะลวดลายการมัดย้อมแบบย้อนกลับ	108
3.25 การพิมพ์ลายฉลุ (ก) การปาดสีพิมพ์บนแม่พิมพ์ลายฉลุ (ข) การยกแม่พิมพ์ลายฉลุขึ้นภายหลังการพิมพ์แล้ว	110
3.26 ลักษณะผ้าพิมพ์ด้วยการกำจัดเส้นใยบางชนิด	111
3.27 การพิมพ์แบบถ่ายโอนสี (ก) นำกระดาษที่มีลวดลายประกบกับผ้าพอลิเอสเตอร์ (ข) ให้ความร้อนและแรงกดอัด สีจะระเหิดจากกระดาษไปสู่ผ้า (ค) หลังจากถ่ายโอนสี ลวดลายปรากฏบนผ้า	112
3.28 การพิมพ์แบบบล็อก (ก) บล็อกไม้ (ข) ลายพิมพ์	112
3.29 การพิมพ์ด้วยลูกกลิ้ง	113
3.30 ขั้นตอนการพิมพ์สกรีน (ก) เทแบงพิมพ์บนสกรีน (ข) ใช้ยางปาดก้นน้ำหนกพอประมาณ ปาดสีส่วนที่เป็นลวดลายทั้งหมด (ค) ยกสกรีนขึ้นจากวัสดุสิ่งทอ	115

รูปที่	หน้า
3.31 ลักษณะภาคตัดขวางของเส้นใยหลังการพิมพ์ผ้า (ก) เส้นใยหลังการพิมพ์และทำให้แห้ง (ข) การฉีกเส้นใย (ค) หลังการฉีกเส้นใย (ง) หลังการชักล้าง	116
3.32 กลไกของเส้นใยกับสารในของไหลเหนือวิกฤต (ก) การละลายของตัวถูกละลายในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (ข) โมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์และสีย้อมเคลื่อนที่เข้าใกล้เส้นใย (ค) โมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์และสีย้อมดูดซับและดูดซึมเข้าเส้นใย (ง) ลดความดันเพื่อให้คาร์บอนไดออกไซด์ระเหยออกจากเส้นใย (จ) เส้นใยที่มีสีย้อมในเส้นใย	121
4.1 ลักษณะของผ้าที่ผ่านการเซตตัวด้วยความร้อน (ก) การอัดพลีท (ข) การขึ้นรูปผ้าเป็นรูปร่างสามมิติ	132
4.2 ลักษณะสายโซ่พอลิเมอร์ (ก) ความไม่เป็นระเบียบของพอลิเมอร์หลังการปั่นเส้นใย (ข) สายโซ่โมเลกุลเรียงตัวขนานกันเมื่อเส้นใยผ่านการดึงยืด	133
4.3 กลไกการเซตตัวด้วยความร้อน (ก) พันธะระหว่างสายโซ่โมเลกุลในเส้นใย (ข) ลักษณะเส้นใยที่ผิดรูปส่งผลให้พันธะระหว่างสายโซ่โมเลกุลมีความเครียด (ค) เมื่อเส้นใยได้รับความร้อน พันธะระหว่างสายโซ่โมเลกุลเกิดการแตกหัก (ง) เกิดพันธะใหม่เมื่อเส้นใยเย็นตัวลง	133
4.4 เครื่องอัดรีดด้วยลูกกลิ้ง	135
4.5 ลักษณะภาคตัดขวางของผ้า (ก) ก่อนการอัดรีดให้ผ้ามันเงา (ข) หลังการอัดรีดให้ผ้ามันเงา	136
4.6 แผนภาพการทำงานของเครื่องอัดลาย	136
4.7 การอัดดอกบนพื้นผิวเส้นใย	136
4.8 ลูกกลิ้งโลหะที่แกะสลักเป็นเส้นเอียง	137
4.9 ผ้าลายน้ำ	137
4.10 ลักษณะเส้นด้าย (ก) ก่อนการเผาขน (ข) หลังการเผาขน	138
4.11 เครื่องตกแต่งให้ขึ้นขน	139
4.12 หลักการทำงานของเครื่องตัดขน	139
4.13 ลูกกลิ้งแปรขน	140
4.14 การตีแคทที่ไซซิงแบบไม่ต่อเนื่อง	141
4.15 การทำงานของลูกกลิ้งทำให้เส้นด้ายพุ่งเป็นเส้นตรงและตั้งฉากกับเส้นด้ายยืน	141
4.16 การจัดเรียงของสายช่วยให้นุ่มบนพื้นผิวเส้นใย (ก) สารช่วยให้นุ่มประจุบวก (ข) สารช่วยให้นุ่มประจุลบ (ค) สารช่วยให้นุ่มไม่มีประจุบนพื้นผิวเส้นใยชอบน้ำ (ง) สารช่วยให้นุ่มไม่มีประจุบนพื้นผิวเส้นใยไม่ชอบน้ำ	143
4.17 โครงสร้างทางเคมีของอัลคิลไดเมทิลเอมีน ออกไซด์	145
4.18 ปฏิกิริยาการเพิ่มน้ำหนักไหม (ก) การเกิดอนุมูลอิสระ (ข) การเกิดพอลิเมอร์	147
4.19 กลไกการลดน้ำหนักผ้าพอลิเอสเตอร์ด้วยสารละลายต่าง	148

รูปที่	หน้า
4.20 กลไกการปรับอุณหภูมิของสารพีซีเอ็ม	155
4.21 เปรียบเทียบการส่งผ่านรังสียูวีสู่ผิวหนัง (ก) ผ้าที่ไม่มีสารดูดกลืนรังสียูวี (ข) ผ้าที่มีสารดูดกลืนรังสียูวี	157
4.22 โครงสร้างทางเคมีของสารดูดกลืนแสง (ก) ฟีนิลซาลิไซเลต (ข) เบนโซฟีโนน (ค) เบนโซไทรอะโซล	158
4.23 สารป้องกันไฟฟ้าสถิต (ก) เกลือควอเตอร์นารีแอมโมเนียม (ข) เอสเทอร์ของกรดฟอสฟอริก	160
4.24 มุมสัมผัสบนพื้นผิวของแข็งที่มี (ก) พลังงานพื้นผิวสูง (ข) พลังงานพื้นผิวดำ	161
4.25 การเกิดปฏิกิริยาของเกลือของกรดไขมันกับพื้นผิวเส้นใย	161
4.26 พอลิไดเมทิลไซลอกเซนบนพื้นผิวเส้นใย	162
4.27 สารฟลูออโรคาร์บอนบนพื้นผิวเส้นใย	162
4.28 ลักษณะพื้นผิวของใบบัวที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด	163
5.1 ประเภทของผลิตภัณฑ์สิ่งทอทางการแพทย์	173
5.2 ผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพและสุขอนามัย (ก) หน้ากาก (ข) ผ้าอ้อม (ค) ผ้าเช็ดทำความสะอาด	173
5.3 เอ็นเทียม	174
5.4 วัสดุใยกายนอกร่างกาย (ก) พลาสเตอร์ (ข) ผ้าก๊อซ	175
5.5 กระบวนการผลิตสิ่งทอทางการแพทย์	176
5.6 วัตถุประสงค์สำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์และบรรจุภัณฑ์ (ก) บรรจุภัณฑ์ (ข) ทุติยภูมิ (ค) ตติยภูมิ	178
5.7 ส่วนประกอบของบรรจุภัณฑ์สำหรับวัคซีน	179
5.8 การทำให้ปราศจากเชื้อ	184
5.9 การทำให้ปราศจากเชื้อด้วยการต้ม	185
5.10 เครื่องหนึ่งฆ่าเชื้อ	185
5.11 ตู้บลมร้อน	187
5.12 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	189
5.13 การถ่ายภาพโครงสร้างกระดูก	190
5.14 การสลายตัวของโคบอลต์-60	191
5.15 เครื่องเร่งลำแสงอิเล็กตรอน	192
5.16 แผ่นกรองที่ให้อนุภาคขนาดเล็กผ่าน	193
5.17 เอทิลีนออกไซด์	194
5.18 พอร์มัลดีไฮด์	197
5.19 กลูตารัลดีไฮด์	199
5.20 สถานะของสาร	201
6.1 อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล	215
6.2 หน้ากากแบ่งตามลักษณะการปิดคลุมใบหน้า (ก) หน้ากากชนิดคลุมเฉพาะส่วนสำคัญของ ใบหน้า (ข) หน้ากากชนิดคลุมครึ่งหน้า (ค) หน้ากากชนิดคลุมเต็มใบหน้า	217

รูปที่	หน้า
6.3 โครงสร้างสับบอนด์-การเป่าแบบหลอมเหลว-สับบอนด์	222
6.4 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	223
6.5 กระบวนการผลิตแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์	224
6.6 แผนภาพขั้นตอนการผลิตหน้ากากจากเส้นใยขนาดนาโนเมตร	225
6.7 บริเวณที่สำคัญของชุดกาว (ก) ชุดกาวผ้าตัด (ข) ชุดกาวชนิดไอโซเลต	232
6.8 การเปลี่ยนแปลงสมบัติความชอบน้ำภายใต้แสงยูวี	235
6.9 ลักษณะของ (ก) ผิวหนังมนุษย์ (ข) ผ้าที่มีการส่งผ่านของเหลวเหมือนผิวหนัง	235
6.10 หมวกคลุมผมตัวนอน	240
6.11 หมวกคลุมไม่มีปีกสวมแบบศีรษะ	241
6.12 การใช้ผ้าคลุมรองเท้า	243
7.1 บาดแผลตามลักษณะการฉีกขาดของผิวหนัง (ก) แผลปิด (ข) แผลเปิด	260
7.2 ระยะของกระบวนการหายของบาดแผล	261
7.3 กระบวนการหายของบาดแผล (ก) ระยะห้ามเลือด (ข) ระยะอักเสบ (ค) ระยะเพิ่มจำนวนเซลล์ (ง) ระยะปรับรูปร่าง	262
7.4 เทคนิคการเย็บแผล (ก) การเย็บธรรมดาชนิดปล้อง (ข) การเย็บธรรมดาแบบต่อเนื่อง (ค) การเย็บต่อเนื่องภายในชั้นผิวหนัง (ง) การเย็บชั้นทางตั้ง	266
7.5 รอยตะขาคจากการกรัดของวัสดุเย็บแผล	267
7.6 การแบ่งประเภทของวัสดุเย็บแผล	267
7.7 เส้นใยยาวเส้นเดียว (ก) พื้นผิวเรียบ (ข) พื้นผิวมีเงี่ยง	273
7.8 เส้นใยยาวหลายเส้น	274
7.9 เข็มและวัสดุเย็บแผล	278
7.10 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุจุ่มรูป	282
7.11 การเกิดไฮโดรเจล	287
7.12 โครงสร้างเซลล์ของโฟม	289
8.1 องค์ประกอบของวิศวกรรมเนื้อเยื่อ	310
8.2 การเลี้ยงเซลล์แบบสองมิติ	313
8.3 การเลี้ยงเซลล์แบบสามมิติ (ก) มีโครงเลี้ยงเซลล์ (ข) ไม่มีโครงเลี้ยงเซลล์	313
8.4 การเพาะเลี้ยงเซลล์ในภาชนะที่มีการเคลือบด้วยสารที่มีความเหนียว	315
8.5 เทคนิคหัดแขวน	315
8.6 การเพาะเลี้ยงเซลล์แม่เหล็กสามมิติ (ก) เซลล์ซีมีซบอนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโนเมตร เข้าภายในเซลล์ (ข) แยก นับและเลี้ยงเซลล์ที่มีความเป็นแม่เหล็กในอาหารเลี้ยงเซลล์ (ค) ชักนำให้เกิดการรวมตัวของกลุ่มเซลล์ด้วยแม่เหล็ก (ง) นำจานเลี้ยงเซลล์ออกจากแม่เหล็ก	316
8.7 สันฐานวิทยาของโครงเลี้ยงเซลล์	318

รูปที่	หน้า
8.7	สัณฐานวิทยาของโครงเลี้ยงเซลล์ 318
8.8	กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (ก) สารละลายพอลิเมอร์ (ข) การเกิดผลึกน้ำแข็งของตัวทำละลาย (ค) โครงเลี้ยงเซลล์ที่มีรูพรุน 318
8.9	การขึ้นรูปแบบใช้ตัวทำละลายและการชะละลาย (ก) สารละลายพอลิเมอร์ (ข) สารละลายพอลิเมอร์ผสมกับอนุภาคที่ทำให้เกิดรูพรุน (ค) ชะละลายอนุภาคที่ทำให้เกิดรูพรุนออก (ง) โครงเลี้ยงเซลล์ที่มีรูพรุน 321
8.10	ลักษณะรูพรุนของโฟม (ก) เซลล์ปิด (ข) เซลล์เปิด 323
8.11	กระบวนการเกิดโฟม 323
8.12	ส่วนประกอบของการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต 325
8.13	การเปลี่ยนแปลงหยดพอลิเมอร์เมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น (ก) เมื่อไม่ให้ศักย์ไฟฟ้า หยดพอลิเมอร์ไม่เสียรูป (ข) เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าต่ำ จะเกิดการสะสมประจุรอบหยดพอลิเมอร์ (ค) แรงผลักของประจุชนะแรงดึงดูด ทำให้หยดพอลิเมอร์เริ่มเกิดโคนเทเลอร์ (ง) ที่ศักย์ไฟฟ้าสูง โคนเทเลอร์เริ่มพ่นเส้นใยบริเวณปลายโคนเทเลอร์ 326
8.14	หยดพอลิเมอร์บริเวณปลายเข็มเมื่อใช้อัตราการไหล (ก) 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ข) 1.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง 329
9.1	อวัยวะในร่างกาย (ก) ปอด (ข) หัวใจ 360
9.2	เครื่องพุงการทำงานของหัวใจและปอด (ก) ทำหน้าที่แทนทั้งปอดและหัวใจ (ข) ทำหน้าที่แทนปอดเท่านั้น 361
9.3	ส่วนประกอบของเครื่องพุงการทำงานของหัวใจและปอด 362
9.4	การเกิดฟองอากาศในกระแสเลือด 365
9.5	เยื่อเลือกผ่านประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในเครื่องพุงการทำงานของหัวใจและปอด (ก) เยื่อที่เป็นเนื้อเดียวกัน (ข) เยื่อที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (ค) เยื่อสมมาตร (ง) เยื่อคอมพอลิต 367
9.6	ลักษณะของเส้นใยกลวงของเยื่อสมมาตร 369
9.7	ไต 374
9.8	ขั้นตอนการฟอกเลือดด้วยเครื่องไตเทียม 375
9.9	กลไกการดูดซับโปรตีนบนเยื่อพอลิเมทิลเมทาคริเลต (ก) การยึดเกาะของเกล็ดเลือดบนเยื่อพอลิเมทิลเมทาคริเลต (ข) การยับยั้งการเกาะตัวของเกล็ดเลือดบนเยื่อพอลิเมทิลเมทาคริเลตระดับนาโนเมตร 380
10.1	ระบบสิ่งทออิเล็กทรอนิกส์ 403
10.2	โครงสร้างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า (ก) พอลิพีโรส (ข) พอลิอะนิลีน 405
10.3	แกรฟีน 406
10.4	อุปกรณ์ดูแลสุขภาพที่สวมใส่ได้ 412
11.1	ที่มาของกฎหมายไทย 450
11.2	ลำดับศักดิ์กฎหมาย 451

รูปที่	หน้า
12.1 การเลือกพื้นที่ทดสอบจากตำแหน่งตัวอย่างทดสอบ	505
12.2 การทำเครื่องหมายบนชิ้นทดสอบ	507
12.3 การทำเครื่องหมายบนชิ้นตัวอย่าง (ก) ตามระยะที่กำหนด (ข) ตามความยาวและความกว้างของชิ้นงานทั้งหมด	511
12.4 บริเวณการยับยั้งเชื้อจุลชีพ	523
13.1 เส้นใยจากเปลือกลำต้น	549
13.2 รามี	550
13.3 บอระเพ็ด	551
13.4 มะพร้าว	552
13.5 ป่านศรนาภย์	553
13.6 ว่านงาช้าง	555
13.7 ขั้นตอนการเตรียมผงเปลือกข้าวโพด	557
13.8 สันฐานวิทยาของผลึกนาโนเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพดเมื่อใช้กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรดที่ระยะเวลาต่างกัน (ก) 15 นาที (ข) 30 นาที (ค) 45 นาที (ง) 60 นาที	558
13.9 กระจกโคdex ของอุฐ (ก) ตัดกระจกเป็นก้อนสี่เหลี่ยม (ข) กระจกหลังกำจัดไขมัน (ค) กระจกหลังกำจัดโปรตีน	562
13.10 ใบชาเขียว	567
13.11 ว่านหางจระเข้	569
13.12 แหล่งวัตถุดิบในการสกัดไคโตซาน (ก) ปู (ข) กุ้ง (ค) จักจั่น	571
14.1 การผูกของขยะพลาสติกก่อให้เกิดไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติก	587
14.2 วงจรชีวิตของฟิล์มชีวภาพ (ก) การรวมกลุ่มของจุลชีพ (ข) จุลชีพแนบติดกับวัสดุ (ค) จุลชีพเจริญเติบโต (ง) จุลชีพเจริญเติบโตเต็มที่ (จ) การกระจายตัวของจุลชีพ	589
14.3 การปนเปื้อนในสายใยอาหารเนื่องจากไมโครและนาโนพลาสติก (ก) ขยะพลาสติก (ข) การผูกของขยะพลาสติก (ค) ไมโครและนาโนพลาสติกที่เกิดจากขยะพลาสติก (ง) ปลากินไมโครและนาโนพลาสติกและสะสมในร่างกาย (จ) ผู้บริโภคซื้อปลาที่มีการปนเปื้อนไมโครและนาโนพลาสติก (ฉ) อาหารที่มีการปนเปื้อนของไมโครและนาโนพลาสติก	592
14.4 ไมโครและนาโนพลาสติกจากพื้นผิวของถุงลมนิรภัยเคลื่อนที่ไปยังส่วนอื่นของร่างกาย	594
14.5 สายใยอาหารที่มีการปนเปื้อนไมโครและนาโนพลาสติก	595
14.6 การดูดซึมนาโนพลาสติกผ่านผนังลำไส้เล็กเข้าสู่เส้นเลือด	596
14.7 การซึมผ่านของนาโนพลาสติกทางผิวหนัง	596
14.8 ขั้นตอนการจัดการของเสียทางการแพทย์	599

๓

สารบัญรูป

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ความแตกต่างระหว่างพฤติกรรมการละลายของพอลิเมอร์กับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ	5
1.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์	16
2.1 ลักษณะของเส้นด้าย	55
2.2 หน่วยของเบอร์ด้าย	55
2.3 ประเภทของเครื่องถักผ้าแนวตั้ง	67
3.1 ความแตกต่างของการย้อมและการพิมพ์	87
3.2 ความแตกต่างของสีย้อมและผงสี	88
3.3 ตัวอย่างสีย้อมธรรมชาติจากพืชแบ่งตามส่วนของพืช	89
3.4 การแบ่งประเภทสีย้อมตามการใช้งาน	90
3.5 เปรียบเทียบสมบัติของผงสีอินทรีย์และอนินทรีย์	97
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่มนุษย์มองเห็นและความยาวคลื่นแสงที่วัตถุดูดกลืน	99
3.7 คุณภาพน้ำสำหรับกระบวนการย้อมและการพิมพ์	117
4.1 การตกแต่งสำเร็จเพื่อเพิ่มสมบัติด้านประโยชน์ใช้สอยของผ้า	130
4.2 ข้อกำหนดของการตกแต่งสำเร็จสิ่งทอเชิงเคมี	142
4.3 สมบัติของสารช่วยให้นุ่ม	144
4.4 ไวนิลมอนอเมอร์ที่ใช้ในการเพิ่มน้ำหนักไหม	148
4.5 โครงสร้างทางเคมีของสารเรืองแสง	150
4.6 สมบัติของชนิดเส้นใยต่อความร้อน	152
4.7 สารเคมีที่ใช้ในการตกแต่งกันยูง	154
4.8 วัสดุที่ใช้เป็นเปลือกและแกนกลางของฟิซีเอ็ม	156
4.9 การตอบสนองของรังสียูวีต่อผิวหนังมนุษย์	157

ตารางที่	หน้า
4.10 สารป้องกันไฟฟ้าสถิตสำหรับวัสดุสิ่งทอ	159
4.11 การเปียกของน้ำบริสุทธิ์บนพื้นผิว	161
5.1 ประเภทของสิ่งทอเทคนิค	172
5.2 ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพและสุขอนามัย	174
5.3 ตัวอย่างวัสดุที่ฝังในร่างกายได้	175
5.4 ตัวอย่างวัสดุที่ใช้ภายนอกร่างกาย	175
5.5 ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับวัคซีน	179
5.6 มาตรฐานและการทดสอบบรรจุภัณฑ์ของสหรัฐอเมริกา	181
5.7 มาตรฐานผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์ของไทย	183
5.8 เวลาและอุณหภูมิสำหรับการทำให้ปราศจากเชื้อด้วยไอน้ำร้อน	186
5.9 อุณหภูมิและเวลาสำหรับการทำให้ปราศจากเชื้อด้วยเตาอบ	188
5.10 การเปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์หลังจากการฉายรังสี	191
5.11 พอลิเมอร์ที่เข้ากับการทำให้ปราศจากเชื้อด้วยแก๊สเอทิลีนออกไซด์	195
5.12 ข้อดีและข้อเสียของการใช้ไอน้ำและฟอร์มัลดีไฮด์	198
5.13 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการทำให้ปราศจากเชื้อ	204
6.1 มาตรฐานหน้ากากอนามัยสำหรับทางการแพทย์	216
6.2 อุปกรณ์ป้องกันระบบทางเดินหายใจที่มีอุปกรณ์กรองอากาศประเภทใช้แล้วทิ้ง ประเภทต่าง ๆ	218
6.3 สมบัติของหน้ากากป้องกันฝุ่น	219
6.4 ประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากผ้า เมื่อใช้อัตราการไหล 1.2 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที	220
6.5 ประเภทของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์แบ่งตามสมบัติด้านการซึมผ่านของแก๊ส และของเหลว ตามมาตรฐาน ASTM F2100-21	221
6.6 ประสิทธิภาพของแผ่นกรองจากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตสำหรับการใช้งาน หน้ากากอนามัย ทดสอบด้วยอนุภาคโซเดียมคลอไรด์	223
6.7 ความเหมือนและความแตกต่างของการเป่าแบบหลอมเหลวกับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	224
6.8 สมบัติและประสิทธิภาพของหน้ากากที่ผลิตจากพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	225
6.9 ระดับการใช้งานชุดป้องกันตามมาตรฐาน ANSI/AAMI PB70	231
6.10 ลักษณะที่จำเป็นสำหรับชุดกาวน์ทางการแพทย์	233
6.11 ผลกระทบ ความท้าทายและมุมมองในอนาคตในการจัดการปัญหาขยะที่เกิดจาก อุปกรณ์ป้องกันทางการแพทย์	238
6.12 คำแนะนำสำหรับบุคลากรทางการแพทย์เกี่ยวกับอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลสำหรับศีรษะ และผมในสถานพยาบาล	239
6.13 คำแนะนำสำหรับบุคลากรทางการแพทย์เกี่ยวกับอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลสำหรับ รองเท้าในสถานพยาบาล	240

ตารางที่	หน้า
7.1 ส่วนประกอบของอุปกรณ์เย็บแผล	265
7.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวัสดุเย็บแผลจากพอลิเมอร์ธรรมชาติและสังเคราะห์	268
7.3 หน่วยซ้ำของวัสดุเย็บแผลจากการสังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้	270
7.4 สมบัติของวัสดุเย็บแผลบางชนิดและระยะเวลาที่ย่อยสลาย	271
7.5 ขนาดของวัสดุเย็บแผลตามเภสัชตำรับยาของสหรัฐอเมริกาและมาตรฐานตำรายาของสหภาพยุโรป	275
7.6 สมบัติเชิงกลของวัสดุเย็บแผลบางชนิด	277
7.7 สีสำหรับวัสดุเย็บแผลที่ผ่านการรับรองจากองค์การอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา	279
7.8 วัสดุปิดแผลสมัยใหม่ที่ใช้ในการปฏิบัติการทางคลินิก	286
7.9 ภาพรวมของบาดแผลชนิดต่าง ๆ และชนิดของผ้าปิดแผลที่เหมาะสม	290
8.1 ปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบโครงสร้างของเซลล์	311
8.2 เปรียบเทียบลักษณะของเซลล์ที่เพาะเลี้ยงแบบสองมิติและสามมิติ	312
8.3 ข้อดีและข้อเสียของเทคนิคการผลิตโครงสร้างเซลล์	317
8.4 ภาวะที่ใช้ในการเตรียมโครงสร้างเซลล์ด้วยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง	319
8.5 ผลของอัตราการเย็นตัวในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง	320
8.6 ปัจจัยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใย	326
8.7 ตัวอย่างโครงสร้างเซลล์สามมิติทางการค้า	332
8.8 ขนาดของรูพรุนที่เหมาะสมสำหรับการแทรกซึมของเซลล์และการฝังตัวของเนื้อเยื่อ	336
8.9 ข้อดีและข้อเสียของโครงสร้างเซลล์ที่ใช้ในวิศวกรรมเนื้อเยื่อผิวหนัง	337
8.10 เส้นใยอิเล็กทริกสำหรับวิศวกรรมเนื้อเยื่อผิวหนัง	338
9.1 เปรียบเทียบค่าที่สำคัญของปอดมนุษย์และเยื่อเลือกผ่านของปอดเทียม	360
9.2 ความแตกต่างของเครื่องฟุ้งการทำงานของหัวใจและปอดที่ทำหน้าที่แทนทั้งปอดและหัวใจและทำหน้าที่แทนปอดเท่านั้น	361
9.3 การพัฒนาเยื่อเลือกผ่านสำหรับการแลกเปลี่ยนแก๊สและเลือดในเครื่องฟุ้งการทำงานของหัวใจและปอด	371
9.4 ผู้ผลิตเยื่อสำหรับเครื่องฟุ้งการทำงานของหัวใจและปอดและวัสดุเคลือบ	371
9.5 น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของรูพรุนของเยื่อชนิดต่าง ๆ	376
9.6 การจำแนกและลักษณะของเยื่อฟอกเลือด	378
10.1 ความแตกต่างของสิ่งทออัจฉริยะแต่ละประเภท	402
10.2 เส้นใยอิเล็กทริกทอติกส์	404
10.3 สารกระตุ้น	406
10.4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการพิมพ์เพื่อให้วัสดุมีสมบัตินำไฟฟ้า	409
10.5 ตัวอย่างงานวิจัยสิ่งทออิเล็กทริกทอติกส์ที่เกี่ยวข้องกับโรคหัวใจ	414
10.6 ข้อกำหนดบางประการของชีวไฟฟ้าสำหรับตรวจคลื่นไฟฟ้าหัวใจแบบใช้แล้วทิ้ง	415

ตารางที่	หน้า
10.7 อุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจแบบไม่สัมผัส	415
10.8 ผลของการเปลี่ยนรูปเชิงกลของขั้วไฟฟ้าสิ่งทอต่อประสิทธิภาพทางไฟฟ้า	418
10.9 ประสิทธิภาพของสิ่งทออิเล็กทรอนิกส์หลังการซักล้าง	419
10.10 ส่วนประกอบทั่วไปของเหงื่อและการวินิจฉัยโรค	425
10.11 การเปรียบเทียบกลไกต่าง ๆ ของอุปกรณ์ตรวจวัดเหงื่อ	426
10.12 ไดโอดเปล่งแสงและความยาวคลื่นสำหรับการรักษาโรคผิวหนัง	428
10.13 สิ่งทออัจฉริยะในเชิงพาณิชย์สำหรับการใช้งานด้านสุขภาพและการออกกำลังกาย	430
11.1 คุณลักษณะของสำลีที่ใช้ในทางการแพทย์	471
11.2 คุณลักษณะของสำลีพันก้าน	472
11.3 คุณลักษณะด้านความปลอดภัยของผ้าสำหรับหน้ากากผ้า	473
11.4 คุณลักษณะทางกายภาพของผ้าสำหรับหน้ากากผ้า	473
11.5 คุณลักษณะด้านสมรรถนะของหน้ากากผ้า	474
11.6 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของหน้ากากอนามัย	475
11.7 คุณสมบัติด้านสมรรถนะของหน้ากากใช้ครั้งเดียวชนิด N95	476
11.8 คุณลักษณะของอุปกรณ์ป้องกันทางเดินหายใจจ่ายอากาศบริสุทธิ์แบบหมวกคลุมศีรษะ	478
11.9 คุณลักษณะการป้องกันแบคทีเรีย	479
11.10 คุณลักษณะด้านความปลอดภัยสำหรับสิ่งทอสถานพยาบาล	480
11.11 คุณลักษณะทางกายภาพและความคงทนของสีสำหรับผลิตภัณฑ์สิ่งทอสำหรับเตียงนอน	481
11.12 คุณลักษณะทางกายภาพและความคงทนของสีสำหรับผลิตภัณฑ์สิ่งทอสำหรับ สิ่งทอป้องกันที่นอน	482
11.13 คุณลักษณะทางกายภาพและความคงทนของสีสำหรับผลิตภัณฑ์สิ่งทอสำหรับผ้าห่ม	483
11.14 คุณลักษณะทางกายภาพและความคงทนของสีสำหรับผลิตภัณฑ์สิ่งทอสำหรับผ้าเช็ดตัว	484
11.15 คุณลักษณะทางกายภาพและความคงทนของสีสำหรับผลิตภัณฑ์สิ่งทอสำหรับเสื้อผ้า ผู้ป่วยและเสื้อผ้าเด็กอ่อน	485
11.16 คุณลักษณะทางกายภาพและความคงทนของสีสำหรับผลิตภัณฑ์สิ่งทอสำหรับ เสื้อผ้าบุคลากรในสถานพยาบาล	486
11.17 คุณลักษณะด้านความปลอดภัยของผ้ากันสารก่อภูมิแพ้ไรฝุ่น	487
11.18 คุณลักษณะของพลาสติกแบบมันวาว: ผ้าเคลือบกาวยิงก้ออกไซด์	488
11.19 ชนิด จำนวนเส้นด้ายและน้ำหนัก	489
11.20 คุณลักษณะของผ้าโปร่งดูดซึม ผ้าพันแผลและผ้าซับ	490
11.21 คุณลักษณะที่ต้องการของวัสดุปิดแผลกาวหน้า: โครงร่างตาข่ายเคลือบไฮโดรเจล	490
12.1 อัตราเร็วของระยะยืดหรืออัตราเร็วในการยืด	501
12.2 การเลือกใช้แรงดึงเริ่มต้น	501
12.3 ระยะเวลาสำหรับการปรับภาวะขึ้นทดสอบก่อนการทดสอบ	502

ตารางที่	หน้า
12.4 ความแตกต่างระหว่างมาตรฐานในการทดสอบความทนแรงดึง	502
12.5 ความแตกต่างระหว่างมาตรฐานในการทดสอบความทนแรงดึงโดยวิธีแเกรบ	504
12.6 ตำแหน่งที่วัดระยะสำหรับเส้นผ่าสำเร็จรูป	508
12.7 ขึ้นผ้าเพิ่มน้ำหนัก	509
12.8 ชนิดของผงซักฟอกอ้างอิง	509
12.9 ผ้ามัลติไฟเบอร์	511
12.10 ผ้าประกบประเภทเส้นใยชนิดเดียว	512
12.11 ภาวะการทดสอบ	512
12.12 เปรียบเทียบมาตรฐานการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อตามปีที่ต่างกัน	514
12.13 เปรียบเทียบความแตกต่างของมาตรฐานในการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ	515
12.14 ความแตกต่างของสีเทียบกับความคงทนของสี	516
12.15 เปรียบเทียบความแตกต่างของมาตรฐานในการทดสอบความคงทนของสีต่อการขัดถู	517
12.16 ภาวะที่ใช้ในการทดสอบ	519
12.17 เปรียบเทียบความแตกต่างของมาตรฐานการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงซินอนอาร์ก	520
12.18 เปรียบเทียบวิธีการประเมินสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย	525
12.19 การประเมินระดับความเป็นพิษต่อเซลล์เพาะเลี้ยง	526
12.20 ระดับความเป็นพิษจากการทดสอบด้วยวิธีสัมผัสโดยตรงและทางอ้อม	527
12.21 วัตถุประสงค์ ประเภทรทดสอบ และตัวอย่างสารทดสอบสำหรับทดสอบ การระคายเคืองและการแพ้ทางผิวหนัง	528
12.22 เปรียบเทียบข้อกำหนดที่สำคัญของมาตรฐาน ASTM และ NIOSH สำหรับ การทดสอบหน้ากาก	534
13.1 เส้นผ่านศูนย์กลางและอัตราส่วนระหว่างแนวตั้งกับแนวนอนของผลึกเซลลูโลส	558
13.2 องค์ประกอบและปริมาณไคทินของสัตว์น้ำที่มีเปลือกแข็งและแมลงบางชนิด	571
14.1 สรุปลักษณะในการทดลองและการปลดปล่อยไมโครพลาสติก	588
14.2 ผลของไมโครพลาสติกที่เกิดจากการสูดดมและการกินในลำดับขั้นของสิ่งมีชีวิต	593
14.3 ตัวอย่างของเสียทางการแพทย์จากแหล่งต่าง ๆ	598
14.4 ชนิดของของเสียทางการแพทย์และสุขภาพและวิธีการจัดการของเสีย	603
14.5 รายชื่อพอลิเมอร์ที่ใช้ในสิ่งทอทางการแพทย์และการแทนที่อย่างยั่งยืน	610
14.6 ภาพรวมการเพิ่มมูลค่าของพลาสติกที่เกิดจากสถานพยาบาล	612
14.7 ข้อกำหนดด้านประสิทธิภาพสำหรับสิ่งทออินเทอร์แอคทีฟ	615

บทที่ 1

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวัสดุและเส้นใย

เส้นใย (fiber) หมายถึง วัสดุหรือสารใด ๆ ที่เกิดจากธรรมชาติ (natural) และมนุษย์สร้างขึ้น (synthetic) มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (length to diameter ratio) มากกว่าหรือเท่ากับ 100 เส้นใยสามารถปั่นเป็นเส้นด้ายหรือผลิตเป็นผ้าด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การถัก การทอและการอัด ปัจจุบัน มีการพัฒนาเส้นใยชนิดใหม่ที่มีสมบัติพิเศษและนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเฉพาะ เช่น เลือกระบายกันกระสุน ส่วนประกอบในยางรถยนต์ ถูกลมนิรภัย รวมถึงการนำเส้นใยเหล่านี้ไปใช้ในการแพทย์ เช่น เส้นเลือดเทียมและวัสดุปิดแผล ดังนั้น ความเข้าใจพื้นฐานของวัสดุและเส้นใยจะช่วยให้สามารถออกแบบการใช้เส้นใยและการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการใช้งานแต่ละประเภท

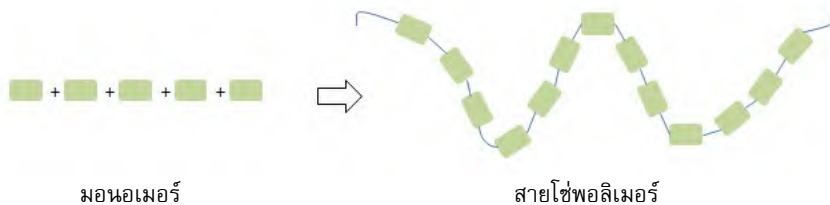
1.1 วัสดุในการผลิตเส้นใย

วัสดุในการผลิตเส้นใยแบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก คือ พอลิเมอร์ (polymer) เซรามิก (ceramic) และโลหะ (metal) วัสดุแต่ละประเภทมีสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น โลหะเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดี มีความแข็งแรงสูงและเหนียว ส่วนเซรามิกเป็นวัสดุที่มีความแข็ง (hardness) สูง แต่เปราะ (brittle) นอกจากนี้วัสดุหลักสามประเภทแล้ว ยังมีวัสดุคอมโพสิต (composite) ที่เกิดจากการรวมของวัสดุพื้นฐานสองประเภทขึ้นไปมาประกอบกันเพื่อรวมจุดเด่นของวัสดุแต่ละชนิดเข้าด้วยกัน

1.1.1 พอลิเมอร์

พอลิเมอร์ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและธาตุอื่น ๆ เช่น ออกซิเจนและไนโตรเจน มีโมเลกุลขนาดใหญ่ประกอบด้วยหน่วยย่อยที่เรียกว่า

มอนอเมอร์ (monomer) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเคมีซึ่งส่วนใหญ่เป็นพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) (รูปที่ 1.1) เช่น เซลลูโลส (cellulose) เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีหน่วยย่อยคือกลูโคส (glucose) ต่อกันเป็นสายยาว หรือพอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) ที่มีหน่วยย่อยคือเอทิลีน (ethylene) ต่อกัน



รูปที่ 1.1 การเกิดพอลิเมอร์

1.1.1.1 ประเภทของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์แบ่งได้หลายวิธี เช่น แบ่งตามแหล่งกำเนิด (by source of origin) ตามส่วนประกอบ (by composite) ตามโครงสร้าง (by structure) และตามการตอบสนองต่อความร้อน (by thermal response)

แบ่งตามแหล่งกำเนิด

พอลิเมอร์จำแนกตามแหล่งกำเนิดได้ 2 ประเภท คือ พอลิเมอร์ธรรมชาติ (natural polymer) และพอลิเมอร์สังเคราะห์ (synthetic polymer)

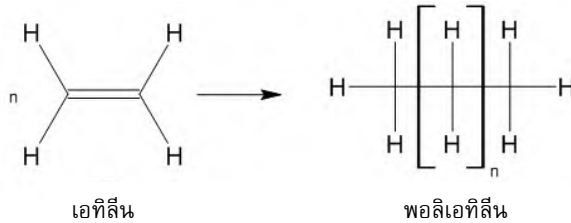
1) พอลิเมอร์ธรรมชาติ คือ พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น เส้นใยพืช และไคติน (chitin) สิ่งมีชีวิตผลิตพอลิเมอร์ได้โดยอาศัยกระบวนการทางเคมีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ และเก็บสะสมไว้ใช้ประโยชน์ตามส่วนต่าง ๆ ดังนั้น พอลิเมอร์ธรรมชาติจึงมีความแตกต่างกันตามชนิดและตำแหน่งของสิ่งมีชีวิต

2) พอลิเมอร์สังเคราะห์ คือ พอลิเมอร์ที่เกิดจากการสังเคราะห์โดยนำมอนอเมอร์มาทำปฏิกิริยาเคมีภายใต้ภาวะที่เหมาะสมเกิดเป็นพอลิเมอร์ มอนอเมอร์ที่เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์มักเป็นผลพลอยได้จากการกลั่นน้ำมันดิบและการแยกแก๊สธรรมชาติ เช่น เอทิลีนและพรอพิลีน (propylene)

แบ่งตามส่วนประกอบ (ไชยวัฒน์ รักษกุลพิวัฒน์ และตติยา ตรงสถิตกุล, 2558)

วิธีนี้เป็นการแบ่งประเภทของพอลิเมอร์จากลักษณะมอนอเมอร์ที่เข้ามาสร้างพันธะร่วมกันโดยจำแนกได้ 2 ประเภท คือ โฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) และโคพอลิเมอร์ (copolymer)

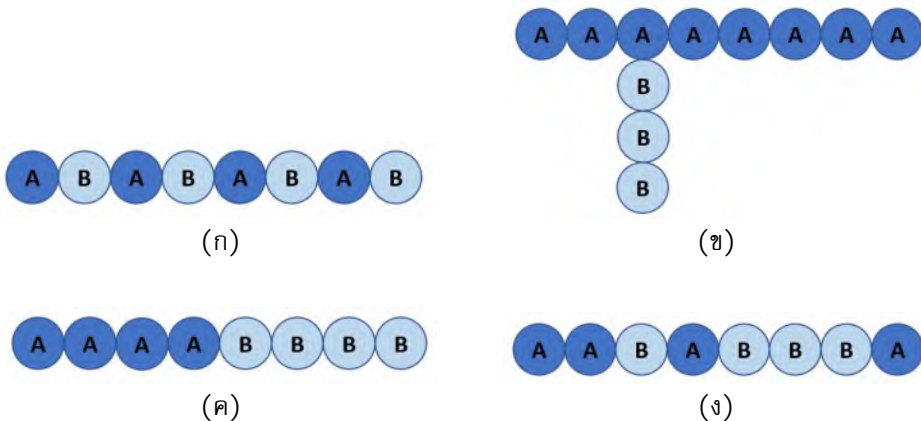
1) โฮโมพอลิเมอร์ เป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่สายโซ่ประกอบด้วยมอนอเมอร์เพียงหนึ่งชนิด เช่น แป้ง เซลลูโลส พอลิเอทิลีน (รูปที่ 1.2) และพอลิพรอพิลีน (polypropylene)



รูปที่ 1.2 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีน

2) โคพอลิเมอร์ เป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์มากกว่า 1 ชนิด เช่น โพรตีนเกิดจากการต่อมีโนหลายชนิดมาเชื่อมต่อกัน โคพอลิเมอร์มีหลายประเภทตามการจัดเรียงตัวของมอนอเมอร์ในสายโซ่พอลิเมอร์ ได้แก่ แบบกลุ่ม (block copolymer) แบบไม่เป็นระเบียบ (random copolymer) แบบสลับ (alternating copolymer) และแบบกราฟต์ (graft copolymer) (รูปที่ 1.3)

โคพอลิเมอร์แบบสลับมีการจัดเรียงมอนอเมอร์สลับกัน (รูปที่ 1.3 ก) โคพอลิเมอร์แบบกราฟต์ประกอบด้วยสายโซ่ข้างติดกับสายโซ่พอลิเมอร์หลัก (รูปที่ 1.3 ข) โคพอลิเมอร์แบบกลุ่มประกอบด้วยโฮโมพอลิเมอร์สองชนิดขึ้นไปมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (รูปที่ 1.3 ค) และโคพอลิเมอร์แบบไม่เป็นระเบียบคือมอนอเมอร์จัดเรียงตัวกันแบบสุ่ม (รูปที่ 1.3 ง)



รูปที่ 1.3 โคพอลิเมอร์ (ก) แบบสลับ (ข) แบบกราฟต์ (ค) แบบกลุ่ม (ง) แบบไม่เป็นระเบียบ

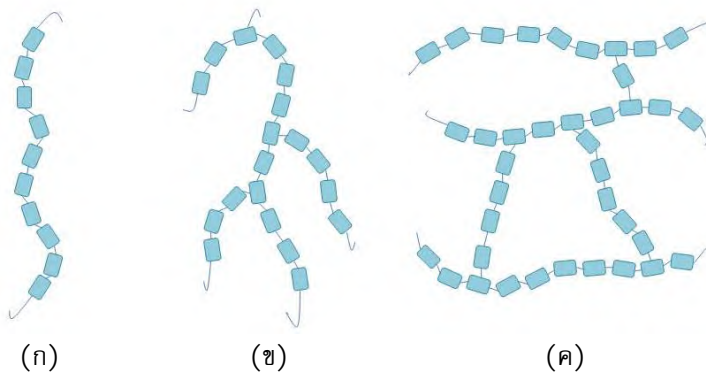
แบ่งตามโครงสร้างของพอลิเมอร์ (McKeen, 2018)

พอลิเมอร์แบ่งตามโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้ 3 ประเภท คือ พอลิเมอร์แบบเส้น (linear polymer) พอลิเมอร์แบบกิ่ง (branched polymer) และพอลิเมอร์แบบร่างแห (crosslinked polymer)

1) พอลิเมอร์แบบเส้น (รูปที่ 1.4 ก) สายโซ่พอลิเมอร์เกิดจากมอนอเมอร์ต่อกันเป็นสายโซ่ยาว สายโซ่พอลิเมอร์เรียงตัวชิดกันมากกว่าโครงสร้างแบบอื่นจึงมีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวสูง เช่น พอลิเอทิลีน พอลิพรอพิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride, PVC) และพอลิสไตรีน (polystyrene, PS)

2) พอลิเมอร์แบบกึ่ง (รูปที่ 1.4 ข) สายโซ่พอลิเมอร์มีการแตกกิ่งจากพอลิเมอร์สายโซ่หลัก มีทั้งสายโซ่สั้นและสายโซ่ยาวทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ไม่สามารถเรียงชิดกันได้มากส่งผลให้มีความยืดหยุ่นสูงกว่า ความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวต่ำกว่าพอลิเมอร์แบบเส้น เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE)

3) พอลิเมอร์แบบร่างแห (รูปที่ 1.4 ค) เป็นโครงสร้างที่พอลิเมอร์เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างสายโซ่ต่อเนื่องกันเป็นร่างแห ถ้าจำนวนพันธะที่เชื่อมโยงระหว่างสายโซ่หลักน้อย พอลิเมอร์มีสมบัติยืดหยุ่นตัวได้ แต่ถ้าจำนวนพันธะที่เชื่อมระหว่างสายโซ่หลักมาก เมื่อนำพอลิเมอร์มาขึ้นรูปแล้วจะไม่สามารถหลอมตัวหรือเปลี่ยนรูปร่างได้ เช่น ยางคงรูป (vulcanized rubber) และเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ (melamine formaldehyde)



รูปที่ 1.4 โครงสร้างพอลิเมอร์ (ก) แบบเส้น (ข) แบบกึ่ง (ค) แบบร่างแห

แบ่งตามการตอบสนองต่อความร้อน (Asim et al., 2017)

พอลิเมอร์แบ่งตามการตอบสนองต่อความร้อนได้ 2 ประเภท ได้แก่ เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) และเทอร์โมเซต (thermoset)

1) เทอร์โมพลาสติก โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ประเภทนี้เป็นโซ่ตรงหรือมีกิ่งสั้น ๆ เมื่อได้รับความร้อน เทอร์โมพลาสติกจะอ่อนตัวและหลอมเหลวเป็นของเหลวหนืดและแข็งตัวเมื่อวัสดุเย็นตัวลง การหลอมเหลวและเย็นตัวลงสามารถเกิดกลับไปมาได้โดยไม่ทำให้สมบัติทางกายภาพและเคมีของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงมาก เช่น พอลิเอทิลีน พอลิพรอพิลีนและพอลิสไตรีน

2) เทอร์โมเซต มีโครงสร้างเป็นร่างแหซึ่งจะหลอมเหลวได้ในการขึ้นรูปครั้งแรกเท่านั้น หลังจากขึ้นรูปแล้ว พอลิเมอร์ประเภทนี้จะมีรูปร่างถาวร เปลี่ยนแปลงรูปร่างไม่ได้ หากพอลิเมอร์นี้ได้รับความร้อนสูงมากเกินไป จะทำให้พันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลแตกออก เทอร์โมเซตจะไหม้และสลายตัวเป็นสีดำโดยไม่เกิดการหลอม เช่น อีพอกซีเรซิน (epoxy resin) เมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ ฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ (phenol formaldehyde) และยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ (urea formaldehyde)

1.1.1.2 สมบัติของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีลักษณะเฉพาะทั้งสมบัติทางกายภาพและทางเคมี เนื่องจากพอลิเมอร์มีขนาดใหญ่ สมบัติของพอลิเมอร์จึงขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ มากมาย เช่น ชนิดของมอนอเมอร์ การจัดเรียงตัวของมอนอเมอร์และน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) ของพอลิเมอร์ (Qin, 2016) ในที่นี้จะยกตัวอย่างสมบัติที่สำคัญของพอลิเมอร์ ได้แก่ สมบัติการละลาย สมบัติความเป็นผลึก (crystalline) สมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงกล ดังนี้

สมบัติการละลาย

เนื่องจากพอลิเมอร์มีโมเลกุลขนาดใหญ่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเกี่ยวพันกันได้ พอลิเมอร์จึงมีความสามารถในการละลายที่ต่ำกว่าและแตกต่างจากสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (ตารางที่ 1.1) การละลายของพอลิเมอร์มี 2 ขั้นตอน คือ เมื่อเติมตัวทำละลายลงไปในพอลิเมอร์ ตัวทำละลายจะซึมหรือแทรกเข้าไประหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ห่างออกจากกัน เรียกสภาวะการนี้ว่าการบวมตัวของพอลิเมอร์ (polymer swelling) จากนั้น สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ห่างกันมากขึ้นจนกระทั่งสายโซ่หลุดออกจากกัน สภาวะการนี้เรียกว่าการละลายของพอลิเมอร์ (polymer solubility)

ตารางที่ 1.1 ความแตกต่างระหว่างพฤติกรรมของการละลายของพอลิเมอร์กับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

สาร	ลักษณะการละลาย
สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ	- ละลายทันที - ถ้าไม่ละลายเพิ่มขึ้นจะเกิดการอิมัตว์ - ความเข้มข้นของสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำไม่ส่งผลต่อความหนืดของสารละลายมาก
พอลิเมอร์	- บวมตัวก่อนเกิดการละลาย - ไม่มีขีดจำกัดการอิมัตว์ - ความเข้มข้นของพอลิเมอร์มากขึ้นทำให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้น - แม้ว่าพอลิเมอร์มีความสามารถในการละลายต่ำแต่เมื่อพอลิเมอร์ละลายจะให้ความหนืดที่สูงกว่าความหนืดของสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

ที่มา: ดัดแปลงจาก Bahadur & Sastry, 2005

พอลิเมอร์แบบกึ่งมีสมบัติการละลายที่แตกต่างจากพอลิเมอร์แบบเส้น และสำหรับพอลิเมอร์แบบร่างแหจะเกิดการบวมตัวในตัวทำละลายโดยไม่เกิดการละลาย การบวมตัวขึ้นกับระดับการเชื่อมขวาง กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีระดับการเชื่อมขวางสูงจะมีการบวมตัวน้อย (Havelka, 2000)

สมบัติความเป็นผลึก

ความสามารถในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะสายโซ่พอลิเมอร์ (regularity in polymer chain) ความยืดหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์ (polymer chain flexibility) และการจัดเรียงสายโซ่พอลิเมอร์ให้ชิดกัน (packing of chains) ความเป็นผลึกส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ เช่น จุดหลอมเหลว ความหนาแน่นและความทนแรงดึง

การดัดยัดพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous) ให้ยืดออกตามแนวแรง ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดตัวเป็นระเบียบมากขึ้นส่งผลให้พอลิเมอร์มีผลึกและความแข็งแรงสูงขึ้น นอกจากนี้ ลักษณะของสายโซ่พอลิเมอร์ก็ส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์เช่นกัน เช่น พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงสามารถเรียงตัวชิดกันส่งผลให้พอลิเมอร์มีความหนาแน่นสูง มีความเป็นผลึกสูงและมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่มีโครงสร้างแบบกิ่ง

สมบัติเชิงความร้อน

สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวที่ชัดเจน แต่สำหรับพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงนั้น ลักษณะของจุดเดือดและจุดหลอมเหลวจะแตกต่างจากสารโมเลกุลขนาดเล็ก โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ พอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงได้ 3 สถานะ คือ สถานะคล้ายแก้ว (glassy state) สถานะคล้ายยาง (rubbery state) และสถานะหลอมเหลว (melting state)

อุณหภูมิที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสถานะของพอลิเมอร์มี 2 แบบ คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) และอุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature, T_m) ซึ่งอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว หมายถึง อุณหภูมิที่พอลิเมอร์เปลี่ยนสภาพจากลักษณะแข็งเปราะคล้ายแก้วเป็นลักษณะยืดหยุ่นคล้ายยาง ส่วนอุณหภูมิหลอมเหลวเป็นอุณหภูมิที่ทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวได้ พอลิเมอร์ทั่วไปมีลักษณะกึ่งผลึก (semicrystalline polymer) จะแสดงการเปลี่ยนสถานะทั้งอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมเหลว

ทั้งอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมเหลวสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยเปลี่ยนแปลงระดับของโซ่กิ่ง การเชื่อมขวางหรือการเติมสารพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) (Qin, 2016) นอกจากนี้ โครงสร้างพอลิเมอร์ยังส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและการหลอมเหลว เช่น อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิการหลอมเหลวเพิ่มขึ้น เมื่อความยืดหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง ความยืดหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์ลดลงได้ หากสายโซ่พอลิเมอร์มีหมู่แทนที่ขนาดใหญ่ หมู่แทนที่ที่หมุนได้ยาก (non-rotational group) หรือหมู่แทนที่เป็นสารประกอบอะโรมาติก

สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลของวัสดุ หมายถึง ความสามารถของวัสดุในการตอบสนองต่อแรงภายนอกที่มากระทำ เช่น แรงดึง แรงกดและแรงกระแทก เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำ วัสดุจะพยายามปรับตัวเพื่อลดผลของแรงที่มากระทำเหล่านั้นโดยเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เช่น ยืดตัวเมื่อได้รับแรงดึง หดตัวเมื่อได้รับแรงกดหรือแตกหักเสียหาย หากแรงที่มากระทำมากกว่าที่วัสดุจะรับได้

พอลิเมอร์มีสมบัติเชิงกลที่หลากหลาย ตั้งแต่แข็งและคงตัวจนถึงอ่อนนุ่มและยืดหยุ่นสูง สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์สามารถควบคุมได้ตั้งแต่การเลือกชนิดของมอนอเมอร์ กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ กระบวนการผลิตและแปรรูป

1.1.2 เซรามิก

เซรามิกมีรากศัพท์มาจากภาษากรีกว่า keramos มีความหมายว่า วัสดุที่ผ่านการเผา (Richerson, 1982) เซรามิกเป็นวัสดุอนินทรีย์ที่ประกอบด้วยธาตุโลหะ (metallic element) และอโลหะ (non-metallic element) ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไอออนิกและโควาเลนต์ ผลิตภัณฑ์เซรามิกต้องผ่านการเผาด้วยความร้อนเพื่อเปลี่ยนเนื้อวัสดุให้แข็งแรงและคงรูปได้ (Henricke & Hesse, 1991) ส่วนใหญ่เซรามิกอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ (oxides) ไนไตรต์ (nitrides) และคาร์ไบด์ (carbides) (Peng, 2013)

1.1.2.1 ประเภทของเซรามิก

เซรามิกแบ่งประเภทได้หลายวิธี เช่น แบ่งตามวัตถุดิบ ตามกระบวนการและตามความเป็นผลึก

แบ่งตามวัตถุดิบ (สมศักดิ์ ขวาลาวัณย์, 2543; Zawrah et al., 2016)

วัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกแบ่งได้ 2 ประเภท คือ วัตถุดิบที่มีความเหนียว (plastic raw material) และวัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียว (non-plastic raw material)

1) วัตถุดิบที่มีความเหนียว คือ ดินชนิดต่าง ๆ ที่เมื่อผสมวัตถุดิบเหล่านี้ในน้ำ วัตถุดิบจะแสดงสมบัติความเป็นพลาสติก (plasticity) กล่าวคือ วัสดุสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปเมื่อได้รับแรงกระทำและเมื่อหยุดแรงกระทำ วัสดุเปลี่ยนรูปร่างไปอย่างถาวรโดยไม่ฉีกขาดหรือแตกหัก เช่น ดินขาว (kaolin) ดินดำ (ball clay) และดินทนไฟ (fire clay)

2) วัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียว เป็นพวกหินแร่ธาตุ (minerals) และสารเคมีสังเคราะห์ (artificial chemicals) ที่เมื่อวัตถุดิบเหล่านี้ผสมกับน้ำจะไม่แสดงสมบัติความเป็นพลาสติก เช่น ทราาย หินฟันม้า (feldspar) ทัลค์ (talc) หินปูน (limestone) และแร่โดโลไมต์ (dolomite)

แบ่งตามกระบวนการ (Salamon, 2014)

วัสดุเซรามิกแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ เซรามิกแบบดั้งเดิม (traditional ceramic) และเซรามิกขั้นสูง (advanced ceramic)

1) เซรามิกแบบดั้งเดิม วัตถุดิบสำหรับเซรามิกดั้งเดิมมักได้จากธรรมชาติ เช่น ดิน ซิลิกา (silica) และหินฟันม้า ตัวอย่างการใช้งานของเซรามิกประเภทนี้ เช่น เครื่องปั้นดินเผา (pottery) ปูนปลาสเตอร์ (plaster) ปูนซีเมนต์ (cement) และแก้ว (glass)

2) เซรามิกขั้นสูง วัตถุดิบประเภทนี้ได้จากการสังเคราะห์โดยมีการควบคุมองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค (microstructure) อาศัยความรู้ทางวิทยาศาสตร์วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีผสมผสานเพื่อให้เซรามิกมีสมบัติเฉพาะด้านที่ดีมากขึ้น เช่น ทนต่อการสึกหรอ ทนการกัดกร่อนและทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน เหมาะกับการใช้งานโครงสร้าง

อิเล็กทรอนิกส์เซรามิก (electroceramic) และงานด้านการแพทย์ เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ (silicon carbide, SiC) และอะลูมิเนียมไนไตรด์ (aluminium nitride, AlN)

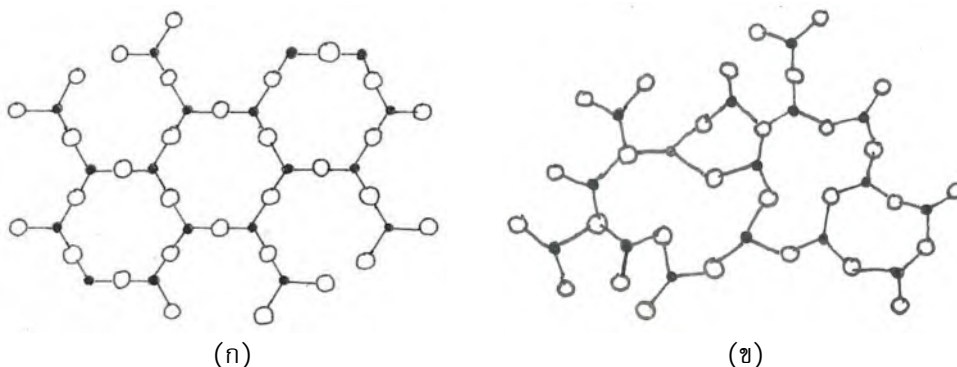
แบ่งตามความเป็นผลึก

วัสดุเซรามิกแบ่งตามความเป็นผลึกได้ 2 ประเภท คือ วัสดุที่เป็นผลึก (crystalline material) และวัสดุอสัณฐานหรือไม่เป็นผลึก (amorphous material)

1) วัสดุที่เป็นผลึก อะตอมหรือไอออนของโมเลกุลในวัสดุมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ

2) วัสดุอสัณฐาน อะตอมของโมเลกุลในวัสดุมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ

วัสดุเซรามิกบางชนิด เช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide, SiO_2) มีโครงสร้างได้ทั้งรูปผลึกหรืออสัณฐาน (รูปที่ 1.5) การใช้ความเร็วในการเย็นตัวต่างกันส่งผลให้ซิลิกอนไดออกไซด์มีความเป็นผลึกต่างกัน กล่าวคือ ซิลิกอนไดออกไซด์อยู่ในรูปผลึกเมื่อทำให้วัสดุเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ ส่วนการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจะได้ซิลิกอนไดออกไซด์ในรูปอสัณฐาน (Atif et al., 2020)



รูปที่ 1.5 โครงสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ (ก) รูปผลึก (ข) รูปอสัณฐาน

1.1.2.2 สมบัติของเซรามิก

ชนิดของพันธะ (พันธะไอออนิกหรือโควาเลนต์) และโครงสร้างภายใน (ผลึกหรืออสัณฐาน) ส่งผลต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของวัสดุเซรามิก

สมบัติเชิงกล

เซรามิกมีความแข็งแรง (strong) ความแข็งเกร็ง (stiffness) สูง แต่ทนการกระแทก (impact) ต่ำ พันธะเคมีในวัสดุเซรามิกมักเป็นพันธะไอออนิกและโควาเลนต์ซึ่งวัสดุที่ยึดกันด้วยพันธะทั้งสองประเภทนี้ มีแนวโน้มที่จะแตกหักก่อนที่จะสูญเสียรูป จึงส่งผลให้เซรามิกเปราะหรือมีความเหนียวต่ำ

สมบัติทางเคมี

เซรามิกเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไอออนิกหรือโควาเลนต์ซึ่งพันธะเหล่านี้มีความคงทนต่อสารเคมีได้ดี เช่น กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl) กรดซัลฟิวริก (sulfuric acid, H_2SO_4) กรดไนตริก (nitric acid, HNO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH)

สมบัติทางไฟฟ้าและความร้อน

เซรามิกเป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนที่ไม่ดีเนื่องจากเซรามิกไม่มีอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) ที่จะนำไฟฟ้าและความร้อนได้ พันธะในวัสดุเซรามิกส่วนใหญ่เป็นพันธะไอออนิกซึ่งมีการจัดเรียงตัวเหมือนแก๊สเฉื่อย มีความเสถียรสูง จึงทำให้เซรามิกมีจุดหลอมเหลวสูง (Park, 1979) เซรามิกส่วนใหญ่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (thermal expansion coefficient) และค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity) ต่ำเมื่อเทียบกับคอนกรีตและโลหะ (Nigay et al., 2017) อย่างไรก็ตาม มีการพัฒนาเซรามิกที่สามารถนำไฟฟ้าได้ เช่น เซรามิกกึ่งตัวนำ (semiconductor ceramic) ที่สามารถนำไฟฟ้าได้ขึ้นกับศักย์ไฟฟ้าที่ให้และอุณหภูมิ (Ostadfar, 2016) หรือเซรามิกบางชนิดเป็นตัวนำความร้อนที่ดีมาก เช่น โบรอนไนไตรด์ (boron nitride, BN)

1.1.3 โลหะ

โลหะเป็นวัสดุที่ได้จากการถลุงสินแร่ต่าง ๆ เช่น เหล็ก ทองแดง นิกเกิล ดีบุก สังกะสี ทองคำ และตะกั่ว

1.1.3.1 ประเภทของโลหะ

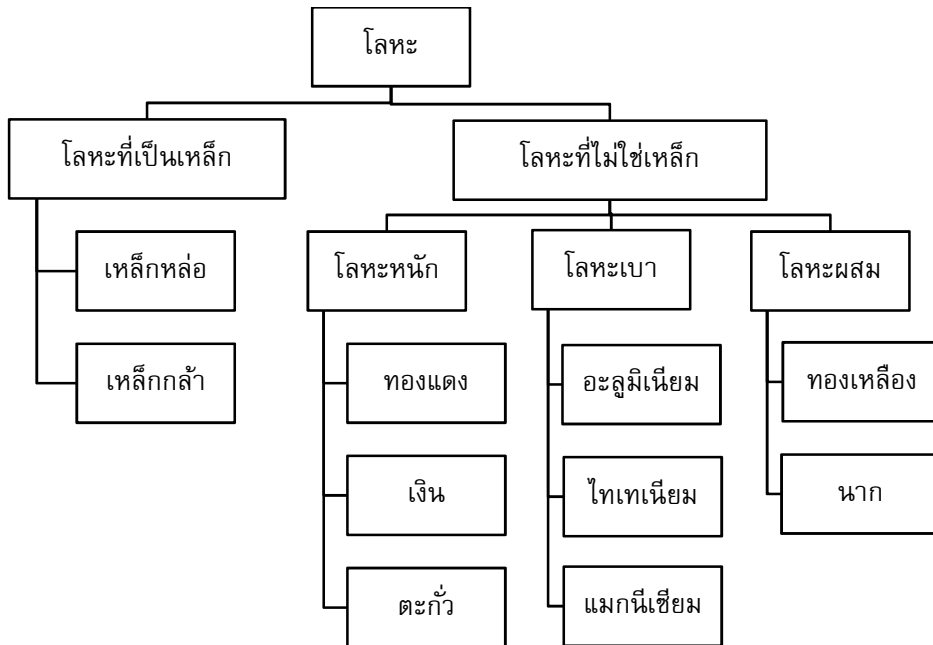
โลหะเป็นวัสดุที่นำไปใช้ประโยชน์ได้กว้างขวาง เนื่องจากมีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น นำความร้อนและไฟฟ้าดี มีความแข็งแรงสูง มีความคงทน ไม่เสื่อมสลายง่าย ผิวโลหะสามารถขัดให้แวววาวและสามารถตีเป็นแผ่นหรือดัดเป็นเส้นได้ โลหะแบ่งได้หลายวิธี เช่น แบ่งตามส่วนประกอบ แบ่งตามความเป็นแม่เหล็ก (by magnetism) แบ่งตามสมบัติเชิงกล (by mechanical properties) และแบ่งตามความสามารถในการทำปฏิกิริยาเคมี (by chemical reactivity)

แบ่งตามส่วนประกอบ

โลหะแบ่งตามส่วนประกอบเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มโลหะที่เป็นเหล็ก (ferrous metals) และกลุ่มโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (non-ferrous metals) (รูปที่ 1.6) (Kamble & Kulkarni, 2017)

1) โลหะที่เป็นเหล็ก แบ่งเป็นเหล็กกล้า (steel) และเหล็กหล่อ (cast iron) ซึ่งมีธาตุคาร์บอนผสมในปริมาณต่างกันตั้งแต่ร้อยละ 0.1–4 โดยน้ำหนัก ปริมาณคาร์บอนมีผลต่อความแข็งแรง ความแข็งและความเปราะของเหล็ก เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) และเหล็กกล้าผสม (alloy steel)

2) โลหะที่ไม่ใช่เหล็ก เป็นโลหะที่ไม่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ เช่น อะลูมิเนียม สังกะสี โครเมียม ไทเทเนียม ตะกั่วและทองแดง



รูปที่ 1.6 ประเภทของโลหะแบ่งตามส่วนประกอบ

ที่มา: ดัดแปลงจาก Lahiri, 2017

แบ่งตามความเป็นแม่เหล็ก (Cycleback, 2015)

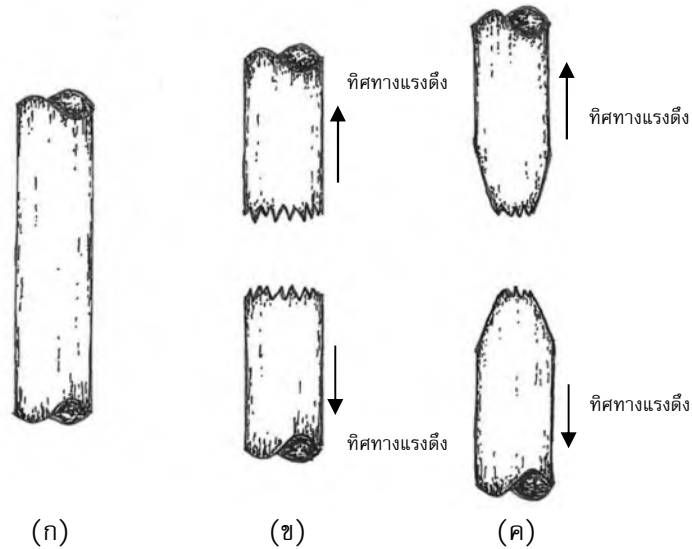
โลหะแบ่งตามสมบัติความเป็นแม่เหล็กได้ 2 ประเภท คือ โลหะที่มีสภาพแม่เหล็ก (magnetic metal) และโลหะที่ไม่มีสภาพแม่เหล็ก (non-magnetic metal)

1) โลหะที่มีสภาพแม่เหล็ก ความเป็นแม่เหล็กในโลหะเกิดจากอิเล็กตรอนกระจายไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดไดโพลแม่เหล็ก (magnetic dipoles) โดยการเปลี่ยนประจุภายในอะตอมไปมา ไดโพลแม่เหล็กจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันก่อให้เกิดขั้วเหนือและขั้วใต้ การเกิดขั้วตรงข้ามทำให้เกิดแรงแม่เหล็ก (magnetic force) จากขั้วเหนือสู่ขั้วใต้ สร้างสนามแม่เหล็กขึ้นและทำให้วัสดุมีสภาพแม่เหล็ก ตัวอย่างโลหะที่มีสภาพแม่เหล็ก เช่น เหล็ก นิกเกิลและโคบอลต์

2) โลหะที่ไม่มีสภาพแม่เหล็ก เป็นโลหะที่ไม่เกิดการตอบสนองต่อแรงดึงดูดหรือแรงผลักในสนามแม่เหล็ก เช่น อะลูมิเนียม สังกะสี แมกนีเซียม ทอง เงินและทองแดง

แบ่งตามสมบัติเชิงกล (Case et al., 1999)

โลหะแบ่งตามสมบัติเชิงกลได้ 2 ประเภท คือ โลหะเหนียว (ductile metal) และโลหะเปราะ (brittle metal) (รูปที่ 1.7) โลหะส่วนใหญ่มีความเหนียวที่อุณหภูมิห้อง หมายถึง วัสดุสามารถยืดได้ก่อนที่จะขาดจากกัน เช่น เหล็ก อะลูมิเนียม ทอง เงินและทองแดง แต่มีโลหะบางประเภทที่เปราะ กล่าวคือ วัสดุยืดตัวได้น้อยหรือไม่สามารถยืดได้ก่อนการขาด เช่น โครเมียม เหล็กหล่อ แมงกานีสและบิสมาท



รูปที่ 1.7 รูปร่างของชิ้นงาน (ก) ชิ้นงานเดิม (ข) การขาดของโลหะเปราะ (ค) การขาดของโลหะเหนียว

แบ่งตามความสามารถในการทำปฏิกิริยาเคมี (Ardelean et al., 2015)

โลหะแบ่งตามความสามารถในการทำปฏิกิริยาเคมีได้ 2 ประเภท คือ โลหะพื้นฐาน (base metal) และโลหะมีตระกูล (noble metal) โลหะพื้นฐาน คือ โลหะที่เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย เช่น เหล็ก สังกะสี ตะกั่วและนิกเกิล ส่วนโลหะมีตระกูลเป็นกลุ่มโลหะที่ทนการกัดกร่อนได้ดี เช่น ทอง ทองคำขาว โรเดียมและเงิน

1.1.3.2 สมบัติของโลหะ (Aran, 2007)

สมบัติทางกายภาพ

โลหะมีความมันเงาและความหนาแน่นสูง มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง เนื่องจากพันธะโลหะที่มีความแข็งแรงสูง อะตอมจึงแตกออกเป็นของเหลวหรือแก๊สยาก

สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างภายใน เช่น ขนาดเกรน (grain size) และโครงสร้างผลึก นอกจากนี้ สมบัติเชิงกลยังขึ้นกับกระบวนการผลิต เนื่องจากการจัดเรียงโครงสร้างภายในใหม่ โลหะส่วนใหญ่มีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นดี แต่มีโลหะบางชนิดที่มีสมบัติไม่แข็งแรงและไม่ยืดหยุ่น เช่น โครเมียมและแมงกานีส

สมบัติทางไฟฟ้าและความร้อน

โลหะโดยทั่วไปนำไฟฟ้าและความร้อนสูง เนื่องจากอะตอมของโลหะอยู่ร่วมกันเป็นกลุ่มจากการใช้อิเล็กตรอนวงนอกร่วมกัน จึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนตลอดเวลา หากอิเล็กตรอนอยู่ในตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูง อิเล็กตรอนนั้นจะมีพลังงานจลน์สูงและพร้อมที่จะเคลื่อนที่ไปยังโลหะบริเวณอื่นจึงเป็นการถ่ายเทความร้อนให้บริเวณอื่นได้

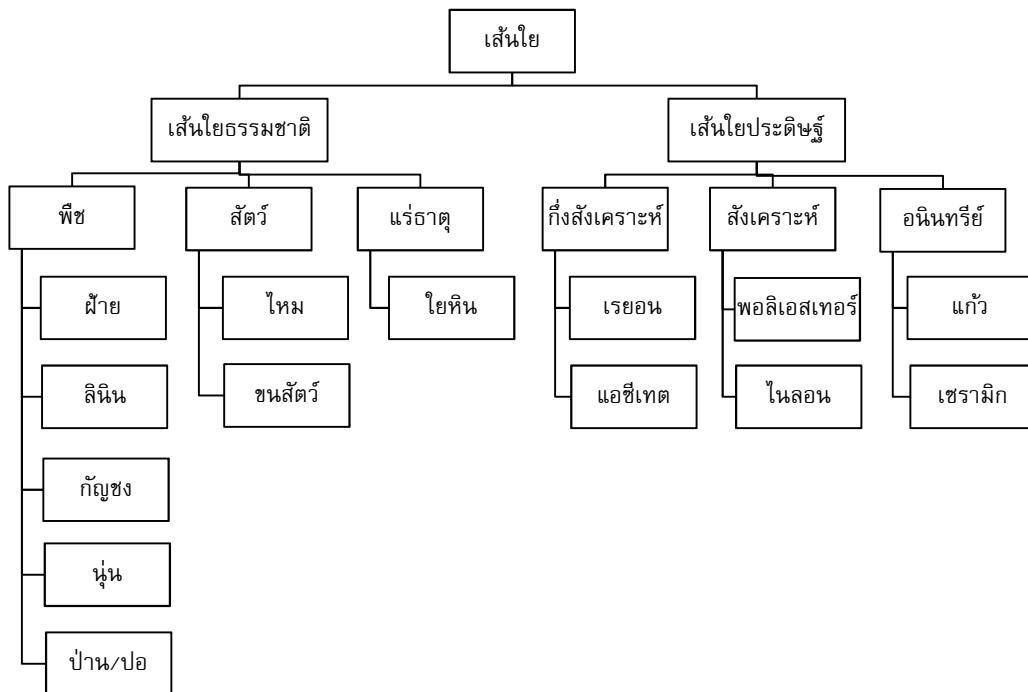
1.2 เส้นใย

1.2.1 ประเภทของเส้นใย

เส้นใยแบ่งได้หลายประเภทขึ้นอยู่กับลักษณะการแบ่ง เช่น แบ่งตามแหล่งกำเนิด แบ่งตามความยาวของเส้นใยและแบ่งตามความชอบน้ำ

แบ่งตามแหล่งกำเนิด

เส้นใยแบ่งตามแหล่งกำเนิดของเส้นใยได้ 2 ประเภท คือ เส้นใยธรรมชาติ (natural fiber) และเส้นใยประดิษฐ์ (man-made fiber) (รูปที่ 1.8)



รูปที่ 1.8 การจำแนกชนิดของเส้นใย
ที่มา: ดัดแปลงจาก Jiang et al., 2020

เส้นใยธรรมชาติแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ เส้นใยจากพืช (vegetable fiber) สัตว์ (animal fiber) และแร่ธาตุ (mineral fiber) ส่วนเส้นใยประดิษฐ์แบ่งเป็นเส้นใยกึ่งสังเคราะห์ (regenerated fiber) เส้นใยสังเคราะห์ (synthetic fiber) และเส้นใยอนินทรีย์ (inorganic fiber)

แบ่งตามความยาวของเส้นใย (Dai & Li, 2006)

ความยาวของเส้นใยมีผลต่อสมบัติและการนำไปใช้งานของผลิตภัณฑ์สิ่งทอ เส้นใยแบ่งตามความยาวได้ 2 ประเภท คือ เส้นใยสั้น (staple fiber) และเส้นใยยาว (filament fiber)

1) เส้นใยสั้น เป็นเส้นใยที่มีความยาวในช่วง 2-46 เซนติเมตร เส้นใยธรรมชาติทุกชนิดเป็นเส้นใยสั้น ยกเว้นไหม (silk) ที่เป็นเส้นใยยาว ตัวอย่างเส้นใยสั้น เช่น ฝ้าย (cotton) นุ่น (kapok) และขนสัตว์ (wool)

2) เส้นใยยาว เป็นเส้นใยที่มีความยาวต่อเนื่อง มีหน่วยวัดเป็นเมตรหรือหลา เส้นใยยาวส่วนใหญ่เป็นเส้นใยประดิษฐ์ เช่น ไนลอน (nylon) พอลิเอสเตอร์ (polyester) และเรยอน (rayon) ยกเว้นไหมที่เป็นเส้นใยยาวจากธรรมชาติ

แบ่งตามความชอบน้ำ

เส้นใยแบ่งตามความชอบน้ำได้ 2 ประเภท คือ เส้นใยชอบน้ำ (hydrophilic fiber) และเส้นใยไม่ชอบน้ำ (hydrophobic fiber)

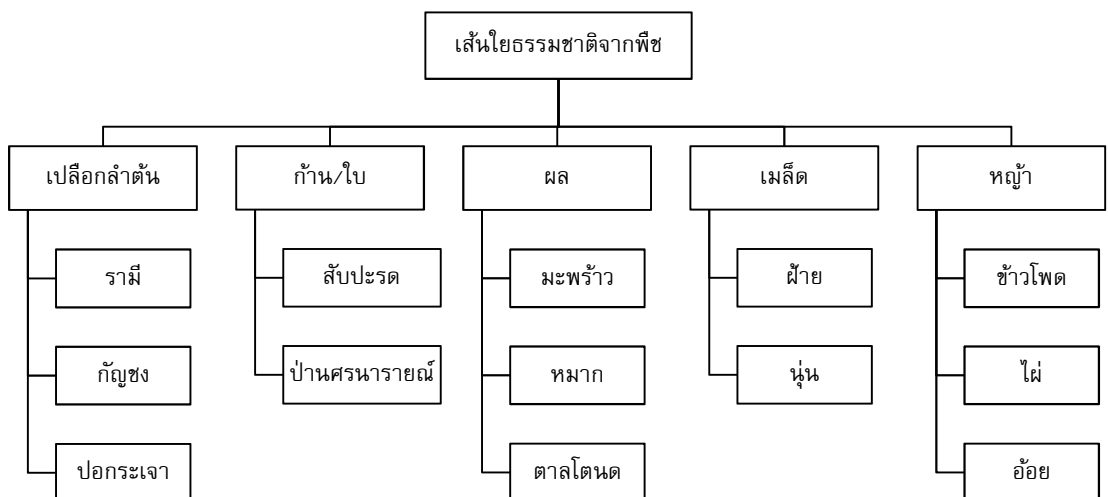
1) เส้นใยชอบน้ำ เส้นใยกลุ่มนี้ดูดซึมน้ำได้ดี มักมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) และหมู่เอมิโน (amino group) เช่น เส้นใยเซลลูโลสและเส้นใยโปรตีน

2) เส้นใยไม่ชอบน้ำ เป็นเส้นใยที่ดูดซึมน้ำต่ำ มักเป็นเส้นใยประเภทเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอสเตอร์และพอลิพรอพิลีน

1.2.2 การผลิตเส้นใย

การผลิตเส้นใยแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ การผลิตเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยประดิษฐ์
การผลิตเส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติได้มาจากส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ใบ (leaf) เปลือกลำต้น (bast) และผล (fruit) ของพืช (รูปที่ 1.9) และขนของสัตว์ชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 1.9 เส้นใยธรรมชาติจากพืช
ที่มา: ดัดแปลงจาก Güven et al., 2016

ในที่นี้จะกล่าวถึงการผลิตเส้นใยธรรมชาติบางชนิด ได้แก่ ฝ้าย ไหม ขนสัตว์และเส้นใยจาก ลำต้นพืช

1) ฝ้าย การผลิตเส้นใยฝ้ายมีขั้นตอนดังนี้ แยกสิ่งแปลกปลอมจากสมอฝ้ายที่แก่เต็มที่แล้ว จากนั้นแยกเมล็ดออกจากปุยฝ้าย สางใย (carding) และหวี (combing) เส้นใยฝ้ายเพื่อแยกเส้นใยฝ้ายที่สั้นมาก ๆ ออก

2) ไหม การผลิตเริ่มจากต้มรังไหมเพื่อให้เส้นใยไหมคลายตัว จากนั้นดึงเส้นใยไหมจากรังไหม เรียกว่า การสาวไหม (silk reeling) และนำเส้นไหมที่สาวได้เข้าเครื่องกรอ (winding machine)

3) ขนสัตว์ การผลิตเส้นใยขนสัตว์ เริ่มจากการแบ่งคุณภาพของเส้นใยขนสัตว์ จากนั้นผสมขนสัตว์ที่มีคุณภาพระดับเดียวกันเข้าด้วยกัน นำขนสัตว์ไปล้างเพื่อกำจัดไขมันและสิ่งสกปรก สางและหวีเส้นใยขนสัตว์เพื่อกำจัดเส้นใยขนสัตว์ที่สั้นมาก ๆ ออก

4) เส้นใยจากลำต้นพืช เป็นเส้นใยที่ได้จากส่วนชั้นนอกสุดของลำต้นพืช โดยทั่วไป เส้นใยนี้มีความยาวตามความยาวของลำต้นพืชและความแข็งแรง เช่น งามี (ramie) กัญชง (hemp) และลินิน (flax) วิธีการแยกเส้นใยออกจากลำต้นพืช มีหลายวิธี ดังนี้ (Paridah et al., 2011; Hulle et al., 2015)

- การแยกเส้นใยด้วยมือ (hand decortication) นิยมใช้ในอุตสาหกรรมภายในครอบครัว เป็นกระบวนการแยกเส้นใยที่ช้าและต้องใช้แรงงานจำนวนมาก

- การแยกเส้นใยด้วยปฏิกิริยาของแบคทีเรียและความชื้น (retting extraction) เป็นกระบวนการแยกเส้นใยโดยใช้น้ำหรือจุลินทรีย์เพื่อกำจัดเนื้อเยื่อและกัม (gum) ออกจากบริเวณรอบเส้นใยเมื่อกำจัดสารเหล่านี้ออกไป เส้นใยจะแยกออกจากลำต้นได้ง่ายขึ้น

- การแยกเส้นใยด้วยเครื่องจักรกล (mechanical extraction) การแยกเส้นใยด้วยมือเป็นกระบวนการแยกเส้นใยที่ช้ามากและสิ้นเปลืองแรงงาน จึงมีการพัฒนาแยกเส้นใยโดยใช้เครื่องจักรทดแทนการแยกเส้นใยด้วยมือซึ่งนับว่าสะดวกและทุ่นแรงได้มาก แต่คุณภาพของเส้นใยชนิดนี้ด้อยกว่าการแยกเส้นใยด้วยปฏิกิริยาของแบคทีเรียและความชื้น

- การแยกเส้นใยด้วยสารเคมี (chemical extraction) เป็นวิธีการสกัดเส้นใยโดยใช้สารเคมีต่าง ๆ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate, Na_2CO_3) โซเดียมซัลเฟต (sodium sulfate, Na_2SO_4) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) วิธีนี้ใช้เวลาน้อยกว่าการแยกเส้นใยด้วยปฏิกิริยาของแบคทีเรียและความชื้นและเป็นวิธีที่ประหยัดแรงงาน

การผลิตเส้นใยประดิษฐ์

กระบวนการผลิตเส้นใยประดิษฐ์แบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ การเตรียมพอลิเมอร์ตั้งต้น (polymer preparation) และการขึ้นรูปเส้นใย (fiber spinning)

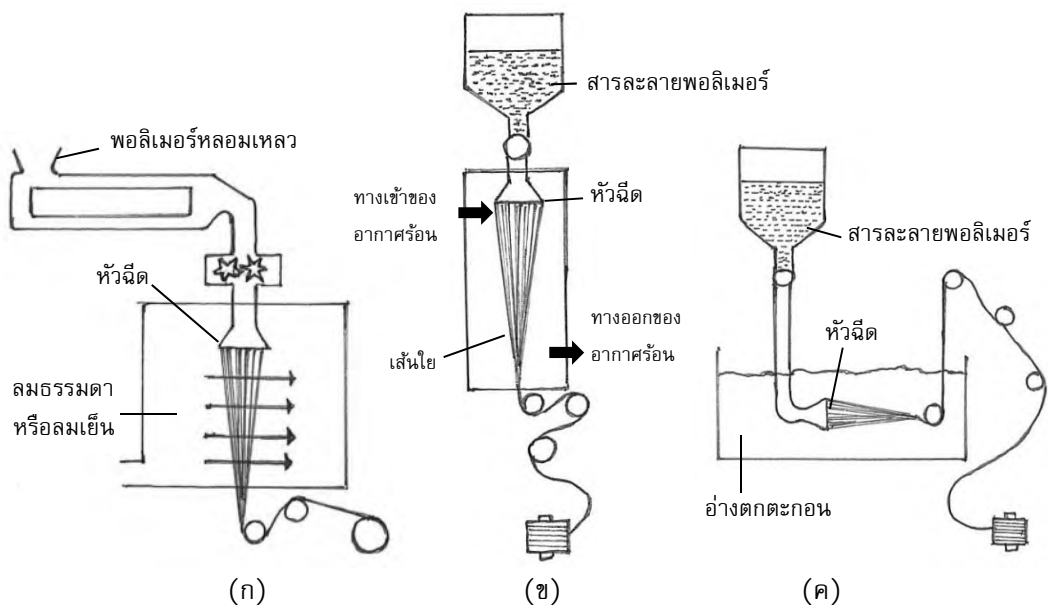
1) การเตรียมพอลิเมอร์ตั้งต้น ในการผลิตเส้นใยจากวัตถุดิบธรรมชาติ เช่น เรยอน ขั้นตอนการเตรียม คือ ย่อยวัตถุดิบซึ่งเป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติให้เป็นชิ้นเล็กๆ ด้วยแรงกลและเติมสารเคมีเพื่อละลายวัตถุดิบให้อยู่ในรูปสารละลายเข้มข้น ส่วนเส้นใยสังเคราะห์ เริ่มจากการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากมอนอเมอร์ซึ่งอาจเป็นปฏิกิริยาแบบเติม (addition polymerization) หรือแบบควบแน่น (condensation polymerization) ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์

2) การขึ้นรูปเส้นใย การขึ้นรูปเส้นใยประดิษฐ์แบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ การปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลว (melt spinning) การปั่นเส้นใยแบบแห้ง (dry spinning) และการปั่นเส้นใยแบบเปียก (wet spinning) (Hatch, 1993)

- การปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลว (รูปที่ 1.10 ก) นำพอลิเมอร์มาหลอมเหลวแล้วฉีดเส้นใยผ่านหัวฉีด (spinneret) เส้นใยที่ฉีดออกมาอาจผ่านลมธรรมดาหรือลมเย็นเพื่อทำให้เส้นใยแข็งตัว การปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลวเป็นกระบวนการที่ประหยัดกว่าการปั่นเส้นใยด้วยสารละลายพอลิเมอร์ เนื่องจากไม่มีตัวทำละลายที่ระเหยไปในระหว่างกระบวนการ ไม่มีขั้นตอนการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ และไม่มีขั้นตอนการล้างเส้นใย อัตราการปั่นเส้นใยด้วยวิธีนี้ค่อนข้างสูง เส้นใยที่ใช้การปั่นวิธีนี้ เช่น เส้นใยไนลอน พอลิเอสเตอร์และพอลิโอเลฟินส์ (polyolefin)

- การปั่นเส้นใยแบบแห้ง (รูปที่ 1.10 ข) เลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมกับชนิดของพอลิเมอร์เพื่อละลายพอลิเมอร์ ตัวทำละลายที่ใช้ต้องเป็นสารที่ระเหยง่าย เฉื่อย มีเสถียรภาพต่อความร้อนดี นำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายและความเป็นพิษต่ำ เส้นใยที่ฉีดออกมาต้องผ่านลมร้อนเพื่อทำให้ตัวทำละลายระเหยไปและเส้นใยแข็งตัว ตัวทำละลายสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เหมาะกับการผลิตเส้นใยแอซีเตต (acetate) ไตรแอซีเตต (triacetate) และอะคริลิก (acrylic)

- การปั่นเส้นใยแบบเปียก (รูปที่ 1.10 ค) เป็นวิธีการปั่นเส้นใยที่เก่าแก่ที่สุด เมื่อฉีดเส้นใยจากหัวฉีด เส้นใยจะผ่านลงในอ่างตกตะกอน (coagulation bath) ซึ่งสารในอ่างนี้อาจเป็นน้ำหรือสารละลายที่เหมาะสมในการทำให้เส้นใยแข็งตัว เส้นใยจากวิธีนี้ต้องผ่านการล้างสารเคมีในเส้นใยออกก่อนนำเส้นใยไปใช้งาน วิธีการนี้ใช้กับการผลิตเส้นใยเรยอนและอะคริลิก



รูปที่ 1.10 กระบวนการผลิตเส้นใยประดิษฐ์ (ก) การปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลว

(ข) การปั่นเส้นใยแบบแห้ง (ค) การปั่นเส้นใยแบบเปียก

ที่มา: ดัดแปลงจาก วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2542

1.2.3 สมบัติของเส้นใย

เส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 1.2) การเลือกใช้เส้นใยชนิดใดนั้นขึ้นกับความต้องการใช้งาน

ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์

ชนิดของเส้นใย	ข้อดี	ข้อเสีย
เส้นใยธรรมชาติ	สวมใส่สบาย	อายุการใช้งานค่อนข้างสั้น
	ย่อยสลายง่าย	ไม่ทนต่อการซักล้าง
	ย้อมติดสีง่าย	มีข้อจำกัดในการใช้งาน
	ระบายอากาศได้ดี	ปรับปรุงสมบัติได้น้อย
เส้นใยสังเคราะห์	นำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย	สวมใส่แล้วร้อน
	ทนต่อการซักล้าง	ย่อยสลายยาก
	สามารถปรับปรุงสมบัติได้หลากหลาย	ระบายอากาศได้น้อย

ที่มา: ดัดแปลงจาก Ali et al., 2018

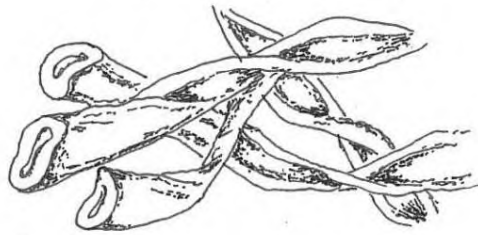
1.2.3.1 เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติ คือ เส้นใยที่มีอยู่ในธรรมชาติ แบ่งได้เป็นเส้นใยจากพืช สัตว์และแร่ธาตุ

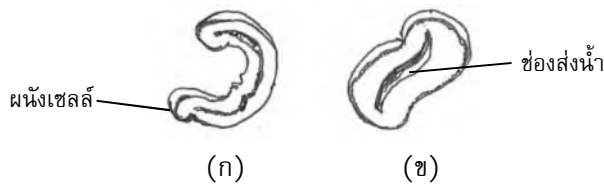
เส้นใยจากพืช

เส้นใยจากพืชเป็นเส้นใยจากเซลลูโลสที่ได้จากส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ฝ้าย ลิ้นปือ รามี่และหนุ่น

1) ฝ้าย ทางพฤกษศาสตร์จัดฝ้ายอยู่ในสกุลกอสไซเพียม (*Gossypium*) ตัวอย่างชื่อวิทยาศาสตร์ของฝ้าย คือ *Gossypium hirsutum* *Gossypium barbadense* และ *Gossypium hermaceum* ฝ้ายเป็นเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากเมล็ดฝ้าย มีความยาวเส้นใยตั้งแต่ 0.5-2 นิ้ว มีภาคตัดขวางเป็นรูปถั่วตามยาวมีลักษณะแบนบิดตัวคล้ายริบบิ้น (flat ribbon-like shape) (รูปที่ 1.11) ฝ้ายในระยะแรกหรือฝ้ายอ่อนมีลักษณะภาคตัดขวางเป็นรูปตัวยู ผนังเซลล์บาง ต่อมาเมื่อเส้นใยฝ้ายมีอายุมากขึ้น ผนังเซลล์เริ่มหนาจึงมีภาคตัดขวางคล้ายรูปถั่วมากขึ้น (รูปที่ 1.12) ฝ้ายทนต่างได้ดีแต่ไม่ทนกรด ทนต่อความร้อนและแสงแดดได้ดี ฝ้ายเป็นเส้นใยที่นำความร้อนและระบายความร้อนได้ดีทำให้สวมใส่สบาย มีสมบัติการคืนตัวต่ำจึงยับง่าย คุณภาพของผ้าฝ้ายขึ้นอยู่กับพันธุ์ฝ้าย ความยาวของเส้นใยและความเรียบของเส้นใย

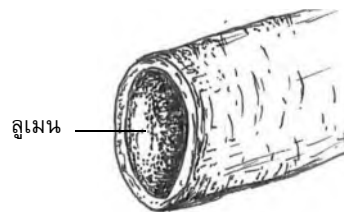


รูปที่ 1.11 ลักษณะเส้นใยฝ้าย



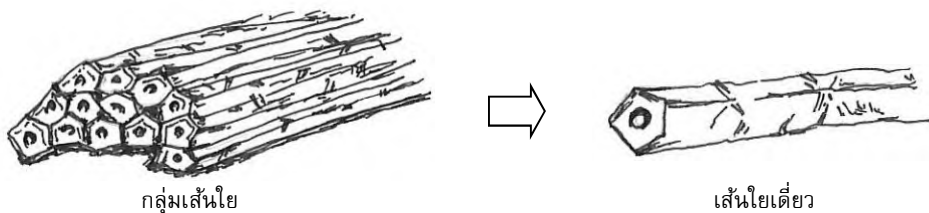
รูปที่ 1.12 ภาคตัดขวางของฝ้าย (ก) ฝ้ายอ่อน (ข) ฝ้ายโตเต็มวัย

2) หนุ่น (*Ceiba pentandra* (L.) Gaertn) ประกอบด้วยเซลลูโลสร้อยละ 35-50 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 22-45 ลิกนินร้อยละ 15-22 และไขมันร้อยละ 2-3 เส้นใยหนุ่นมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวง ผนังบาง เรียบ มีความหยิกงอ (crimp) ต่ำ ลูเมน (lumen) มีขนาดใหญ่ที่เต็มไปด้วยอากาศ (รูปที่ 1.13) ทำให้หนุ่นมีสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนและเสียงที่ดีเยี่ยม (Smole et al., 2013)



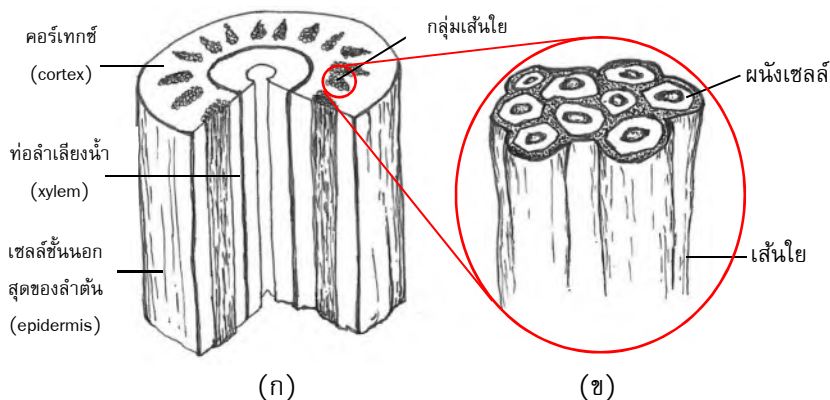
รูปที่ 1.13 ลักษณะเส้นใยหนุ่น

3) ลิ้น (Linum usitatissimum L.) เป็นเส้นใยธรรมชาติที่เก่าแก่และมีความทนทาน ได้จากลำต้นแฟลกซ์ (รูปที่ 1.14) ผ้าที่ทำจากเส้นใยชนิดนี้มีความเงามัน ผิวเรียบแข็ง ดูดซึมความชื้นได้ดี แห้งเร็วกว่าผ้าฝ้าย ถ้าต้องการเก็บผ้าลินินไว้นาน ๆ ต้องม้วนผ้าใส่แกนไว้เพื่อป้องกันการหักของเส้นใยเนื่องจากรอยพับ (อภิชาติ สนธิสมบัติ, 2556)



รูปที่ 1.14 ลิ้นจากลำต้นแฟลกซ์

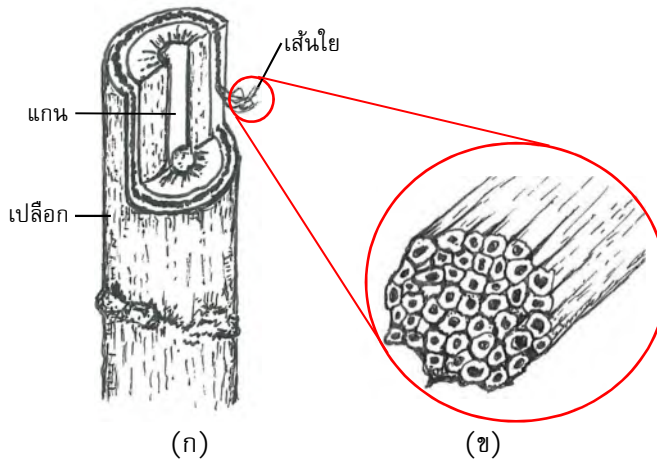
4) ปอกระเจา (*Corchorus capsularis* L.) เป็นเส้นใยที่ได้จากลำต้น (รูปที่ 1.15) ราคาถูกและมีการใช้อย่างกว้างขวางเป็นอันดับที่สองรองจากฝ้าย (อุษารัตน์ รัตนคำวน, 2557) แหล่งปลูกปอกระเจาต้องร้อนและมีความชื้นสูง นอกจากนี้ เนื่องจากเส้นใยจากปอกระเจามีขนาดใหญ่และแข็งแรงต่าง จึงนิยมนำเส้นใยนี้มาผลิตเป็นเชือกกระสอบหรือพื้นด้านในของพรมต่าง ๆ



รูปที่ 1.15 ลักษณะของ (ก) ลำต้นปอกระเจา (ข) กลุ่มเส้นใยจากลำต้นปอกระเจา

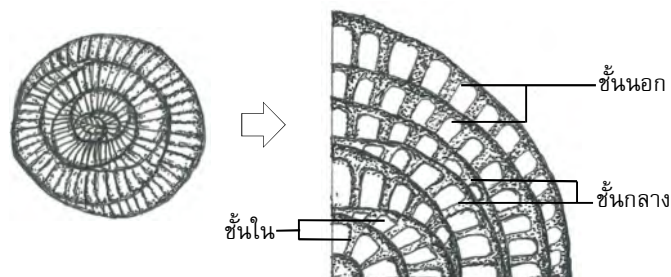
5) รามี่ (*Boehmeria nivea* (L.) Gaudich) เป็นเส้นใยที่ได้จากลำต้นพืช เส้นใยรับสีย้อมได้ง่าย มีความคงทนและมีปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 65-75 โดยน้ำหนักซึ่งสูงกว่าเส้นใยจากลำต้นพืชอื่น ๆ เช่น กล้วยงและลินิน (Yuan et al., 2016) มีความทนต่อแรงดึง (tensile strength) สูงเมื่อเทียบกับเส้นใยธรรมชาติอื่น เช่น ฝ้าย กล้วยงและลินิน แต่มีข้อเสียคือ แข็งกระด้าง เปราะและยับง่าย เนื่องจากเส้นใยมีความเป็นผลึกสูง ทำให้มีความสามารถในการคืนตัวต่ำ (Kozlowski et al., 2005)

6) กล้วยง (*Cannabis sativa* L.) เป็นพืชตระกูลเดียวกับกัญชา ขึ้นอยู่ในเขตอบอุ่นของทวีปเอเชีย พื้นที่ทางตอนใต้ของแคว้นไซบีเรีย ทางตอนเหนือของอินเดียและประเทศจีน (Johnson, 2015) สำหรับในประเทศไทยพบว่าการปลูกกล้วยงทางตอนเหนือของประเทศ เช่น จังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย ตากและแม่ฮ่องสอน (สริตา ปิ่นมณี, 2558) เส้นใยกล้วยงได้จากเปลือกลำต้น (รูปที่ 1.16) เส้นใยมีขนาดประมาณ 15-25 ไมโครเมตร มีความแข็งแรงและความทนทานสูง (มณูญ จิตติใจจำ และปิยะพร คามภิรภาพพันธ์, 2557) เมื่อทำเป็นผ้าจะช่วยให้ความอบอุ่นในฤดูหนาวและเย็นในฤดูร้อน เนื้อผ้าไม่อมฝุ่นและระบายความอับชื้นได้ดี ทำให้ไม่เกิดเชื้อราและแบคทีเรีย นอกจากนี้ ฝักกล้วยงมีกลิ่นเฉพาะตัวซึ่งยากต่อการลอกเลียนแบบด้วย (Suwansaard, 2022)



รูปที่ 1.16 ลักษณะของ (ก) ลำต้นกล้วย (ข) กลุ่มเส้นใยกล้วย

7) กล้วย (*Musa sapientum* L.) เป็นพืชที่ปลูกมากในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในประเทศไทยนิยมปลูกต้นกล้วยแทบทุกครัวเรือน เนื่องจากกล้วยสามารถใช้ประโยชน์ได้เกือบทุกส่วน เช่น ใบตองนำมาห่อขนมและอาหารคาวหวาน ผลกล้วยและปลีกล้วยสามารถรับประทานได้ แต่ลำต้นกล้วยจะใช้ประโยชน์ได้ไม่มากนักและมักจะถูกตัดทิ้งเป็นขยะจำนวนมาก ดังนั้นในปี 2003 Nisshinbo Textile Inc. ประเทศญี่ปุ่น พัฒนาผ้าที่ทำจากเส้นใยจากลำต้นกล้วยได้สำเร็จซึ่งผ้าที่ได้มีสมบัติดูดซึมน้ำได้ดี แห้งเร็วและระบายอากาศได้ดี แต่ละชั้นของกาบกล้วยมีลักษณะเส้นใยแตกต่างกัน (รูปที่ 1.17) เช่น ชั้นนอกของลำต้นมีลักษณะเส้นใยหยาบจึงเหมาะกับการผลิตภัณฑ์ประเภทผ้าปูโต๊ะ ส่วนเส้นใยจากชั้นในของลำต้นมีลักษณะที่ละเอียดกว่า มีความเงามันกว่า (ปิยะพร คามภักภาพพันธ์ และณัฐวัชร นิธิทองสกุล, 2564)



รูปที่ 1.17 ภาคตัดขวางของลำต้นกล้วย

8) ข้าวโพด (*Zea mays* L.) ข้าวโพดเป็นพืชตระกูลหญ้า มีลำต้นสูงเฉลี่ย 2.2 เมตร นิยมปลูกในแถบอเมริกาและแคนาดา สำหรับในประเทศไทย ปลูกข้าวโพดได้เกือบทุกภาคของประเทศ และเมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิตแล้วพบว่ามีเศษเหลือ เช่น ต้นข้าวโพดและปลีข้าวโพดเป็นจำนวนมาก และมีเกือบตลอดปี ในปี 2005 นักวิทยาศาสตร์ทางด้านสิ่งทอ ชื่อ Yang และ Reddy จาก University of

Nebraska-Lincoln ประเทศสหรัฐอเมริกา สกัดเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดและถักเป็นเสื้อกันหนาว ผ้าที่ได้มีลักษณะนุ่มและสวมใส่สบาย นอกจากนี้ เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดมีสีขาวจึงง่ายต่อการย้อมสีด้วย

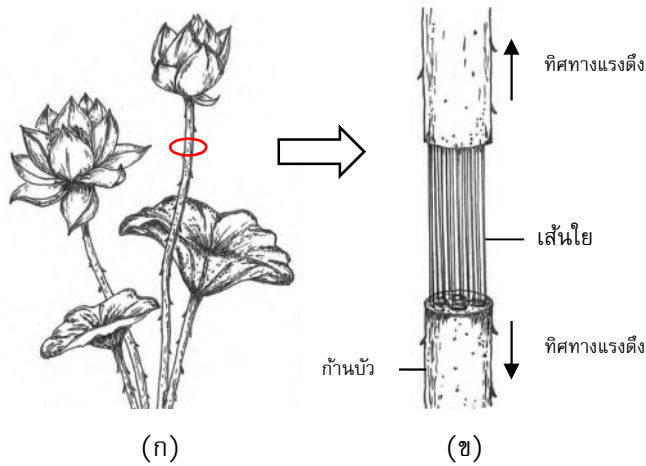
9) ชิง (*Zingiber officinale* R.) และชำ (*Alpinia galangal* L.) ทั้งชิงและชำเป็นพืชล้มลุกที่มีลำต้นเป็นกอ มีเหง้าอยู่ใต้ดิน เหง้ามีสีน้ำตาลอมแดง เนื้อในเหง้าของชำมีสีขาว มีรสขมเผ็ดร้อน แต่ไม่เผ็ดเท่ากับชิง ที่ประเทศญี่ปุ่น ใช้ใบชิงในการทอขนมโมจิ เนื่องจากใบชิงมีกลิ่นหอมเฉพาะตัวและสามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้ (วาริรัตน์ หนูหิต, 2556) อย่างไรก็ตาม ลำต้นของชิงและชำ ไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์จึงเหลือทิ้งเป็นขยะจำนวนมาก ดังนั้น Kurabo Industries Ltd. จึงมีแนวความคิดผลิตผ้าที่ทำจากเส้นใยชิงผสมกับเส้นใยฝ้าย (Keiser & Garner, 2012) ส่วนในประเทศไทย บริษัท ไทยนาโซคเท็กซ์ทีล จำกัด (ชาญชัย สิริเกษมเลิศ, 2554^a) ใช้เส้นใยจากต้นชำผสมกับฝ้ายเพื่อทำเป็นผ้า ผ้าทั้งสองชนิดมีกลิ่นหอมเฉพาะตัวและมีสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียด้วย

10) ตาลโตนด (*Borassus flabellifer* L.) เป็นพืชตระกูลปาล์มชนิดหนึ่งในประเทศไทย มีการปลูกตาลมากที่จังหวัดสุพรรณบุรี นครปฐมและเพชรบุรี (จุฑารัตน์ นกแก้ว, 2564) ต้นตาลใช้ประโยชน์ได้หลากหลายและให้ผลิตภัณฑ์มากมาย เช่น น้ำตาลสด น้ำตาลโตนด ใบตาล ผลตาล และอื่น ๆ เมื่อผลตาลสุก ชาวบ้านจะนำผลตาลมาบีบเพื่อนำเนื้อตาลไปผสมกับแป้งข้าวเจ้าเพื่อทำขนมตาล กากใยของผลตาลจึงเป็นวัสดุเหลือทิ้งในท้องถิ่นชนิดหนึ่งที่ทำให้ง่ายจากกระบวนการสกัดเนื้อผลตาลสุก ผลตาลสุกให้เส้นใยร้อยละ 23-37 ของน้ำหนักผลตาล เส้นใยที่สกัดได้เป็นเส้นใยสั้น มีความคงทนต่อการขัดถูดี ระบายความร้อนได้ดี มีความเหนียวสูง มีความมันวาวและมีกลิ่นหอมจากผลตาล ผ้าจากเส้นใยตาลมีลักษณะคล้ายผ้าลินิน นอกจากนี้ ยังสามารถนำเส้นใยตาลมาผสมกับเส้นใยอื่น ๆ เพื่อให้ผ้าที่ได้มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานแต่ละประเภทมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่สามารถผลิตได้ เช่น ผ้า màn ชุดสูทและชุดผลิตภัณฑ์บนโต๊ะอาหาร (ชาญชัย สิริเกษมเลิศ, 2554^b)

11) ต้นธูปฤาษีหรือกกช้าง (*Typha angustifolia* L.) เป็นพืชที่พบแพร่กระจายเกือบทั่วโลก ในประเทศไทยพบต้นธูปฤาษีได้ทั่วทุกภาคของประเทศ พืชชนิดนี้จัดเป็นวัชพืชชนิดหนึ่งที่น่าไปใช้ประโยชน์น้อย เช่น ใช้ตกแต่งเป็นไม้ประดับและทำเครื่องจักสาน อย่างไรก็ตาม ในปี 2538 พรณี รัตนชัยสิทธิ์ และกฤษฎา บุญนิล ศึกษาการผลิตผ้าจากเส้นใยต้นธูปฤาษี พบว่าเส้นใยมีความเหนียวปานกลางและสามารถปั่นเป็นเส้นด้ายได้ ผ้าจากเส้นใยต้นธูปฤาษี มีลักษณะใกล้เคียงกับผ้าลินิน สามารถฟอกขาวและย้อมสีได้ และงานวิจัยของ Srisuk และคณะ ที่เตรียมผ้าไม่ทอจากดอกธูปฤาษีผสมเส้นใยพอลิแลกติกแอซิด (polylactic acid, PLA) ด้วยการกดด้วยความร้อน (hot pressing) พบว่า วัสดุคอมพอลิตมีสีน้ำตาลอมเหลือง มีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของน้ำและหลังจากการกดอัดด้วยความร้อน เส้นใยพอลิแลกติกแอซิดยังคงมีลักษณะเป็นเส้นใยจึงรักษาความสามารถในการซึมผ่านอากาศได้

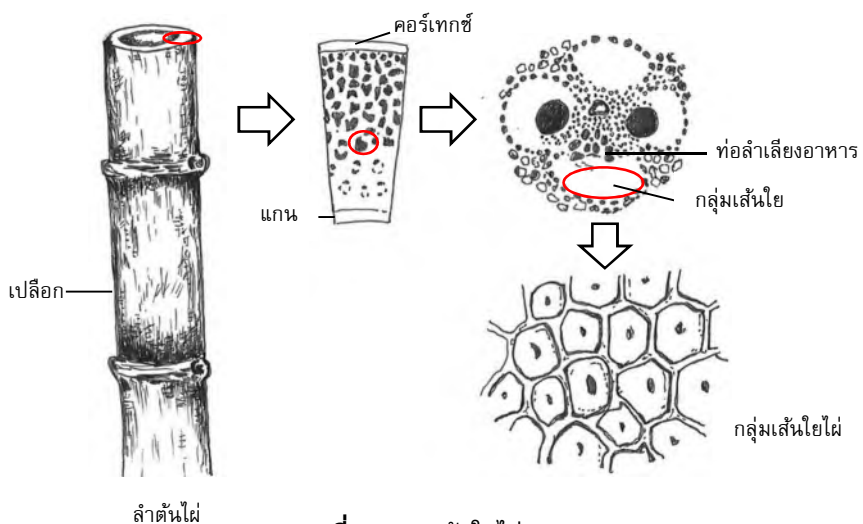
12) บัว (*Nymphaea lotus* L.) เป็นพืชล้มลุกที่มีถิ่นกำเนิดในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยทั่วไป ใช้บัวเพื่อประดับตกแต่ง ใช้ห่อข้าวห่อของหรือแม่กระทังใช้รับประทานได้ แต่ในประเทศไทยพม่า มีการนำใยบัวมาทอเป็นผืนผ้า โดยหักก้านบัวแก่และดึงเส้นใยออกมาพันกันเป็นเส้นด้าย (รูปที่ 1.18) และทอผ้าจากใยบัวเพื่อทำเป็นจีวรถวายวัด (รัตนพล มงคลรัตนสิทธิ์ และณัฐดนัย รุ่งเรืองกิจไกร, 2555) ปัจจุบัน นอกจากทำจีวรแล้ว ยังดัดแปลงผ้าจากใยบัวเพื่อทำผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้หลากหลาย เช่น กระโปรงที่รองถ้วยชามและผ้าพันคอ ผ้าจากใยบัวมีสมบัติในการปรับอุณหภูมิได้ดี ดูดซับความชื้นได้ดีและมี

สีเฉพาะตัวเมื่อไม่ได้ผ่านการฟอกขาว นอกจากนี้ การทอผ้าใยบัว 1.09 หลาต้องใช้ก้านบัวถึง 32,000 ก้าน ดังนั้นราคาขายของผ้าชนิดนี้จึงสูงมาก (Patil, 2018)



รูปที่ 1.18 ลักษณะของ (ก) บัว (ข) เส้นใยบัวจากการหักก้านบัว

13) ไม้ (*Bambusa vulgaris*) เป็นพืชที่พบมากในประเทศจีนและเป็นพืชที่โตเร็ว พืชชนิดอื่น ๆ อาจใช้เวลามากถึง 20 ปีในการโตเต็มวัย แต่ไม้ใช้เวลาน้อยกว่า 4 ปีในการโตเต็มวัย (Sulaeman et al., 2018) ดังนั้นจึงมีหลายบริษัทศึกษาค้นคว้าที่จะนำไม้มาผลิตเป็นเส้นใยทดแทนสำหรับงานด้านสิ่งทอ (รูปที่ 1.19) เช่น Shanghai Tenbro Bamboo Textile Co., Ltd. ในประเทศจีน ผลิตเส้นใยเส้นด้ายและผ้าจากใยไม้ในชื่อทางการค้าว่า Tenbro® สมบัติของผ้าที่ได้จากเส้นใยไม้มีความยืดหยุ่นดี มีความมันวาวใกล้เคียงไหม ถ้าย่อยอากาศได้ดีกว่าผ้าฝ้าย ไม่ดูดซับสิ่งสกปรกจึงทำความสะอาดได้ง่ายและยังมีสมบัติในการควบคุมอุณหภูมิและป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิตได้ดีอีกด้วย (Yu, 2010)



รูปที่ 1.19 เส้นใยไม้

ที่มา: ดัดแปลงจาก Kadivar et al., 2020

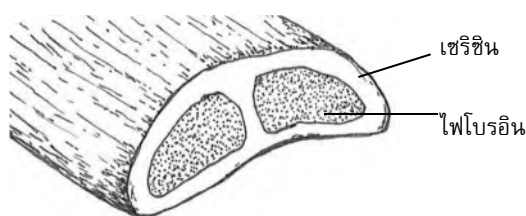
14) สับปะรด (*Ananas comosus* (Linn.) Merr.) เป็นผลไม้ชนิดหนึ่งที่ประเทศไทยปลูกมากเป็นอันดับต้น ๆ ของโลก โดยปลูกมากในแถบจังหวัดราชบุรี ประจวบคีรีขันธ์ ระยอง เพชรบุรีและชลบุรี (ปริยาพร ทองผุด และนิติพัฒน์ แก้วประสิทธิ์, 2561; Popluechai et al., 2007) ส่วนใหญ่ ประเทศไทยส่งออกสับปะรดในรูปผลสดและผลิตภัณฑ์แปรรูปต่าง ๆ ดังนั้นเมื่อเก็บเกี่ยวผลแล้ว ใบสับปะรดจึงเหลือทิ้งในไร่เป็นจำนวนมากและไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากนัก แต่ในปัจจุบัน ใบสับปะรดเป็นหนึ่งในแหล่งเส้นใยที่ใช้ในการทอผ้าซึ่งในประเทศฟิลิปปินส์ เรียกผ้าชนิดนี้ว่า Piña (Singh, 2017) เส้นใยสับปะรดประกอบด้วยเซลลูโลสร้อยละ 67-85 และลิกนินร้อยละ 4.4-15 มีความแข็งแรงกว่าเส้นใยกล้วย (Das, 2018) สมบัติของผ้าที่ได้จากเส้นใยสับปะรด คือ นุ่ม เงามันเหมือนไหม เหมาะสำหรับทำผ้ามรองจาน พรม กระเป๋าและเครื่องนุ่งห่มได้เป็นอย่างดี

15) หมากรุก (*Areca catechu* L.) เป็นพืชเขตร้อนที่พบได้หลายประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เอเชียใต้และบางส่วนของทวีปแอฟริกา (นาวิ เป็ลยิวจิตร, 2562) ในปัจจุบันมีนักวิจัยศึกษาการสกัดเส้นใยจากส่วนต่าง ๆ ของหมากรุก เช่น กาบหมากรุก (ณภัค แสงจันทร์ และคณะ, 2561) ผลหมากรุก (มณูญ จิตต์ใจฉ่ำ และคณะ, 2557; Lazim et al., 2014; Devaki & Sangeetha, 2017) และใบหมากรุก (Arifuzzaman Khan et al., 2012) ซึ่งเส้นใยจากแต่ละส่วนของหมากรุกมีขนาดและสมบัติที่แตกต่างกัน

เส้นใยจากสัตว์

เส้นใยจากสัตว์เป็นเส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์และไหม สมบัติของเส้นใยโปรตีนส่วนใหญ่ คือ ไม่ทนแดด ความเหนียวและความแข็งแรงของเส้นใยลดลงเมื่อเส้นใยเปียกน้ำ

1) ไหม เป็นเส้นใยโปรตีนที่ได้จากรังไหมและเป็นเส้นใยธรรมชาติเพียงชนิดเดียวที่เป็นเส้นใยยาว ไหมประกอบด้วยโปรตีน 2 ชนิด คือ เส้นใยไฟโบรอิน (fibroin) ถูกห่อหุ้มด้วยโปรตีนกาวไหมที่เรียกว่า เซรีซิน (sericin) (รูปที่ 1.20)

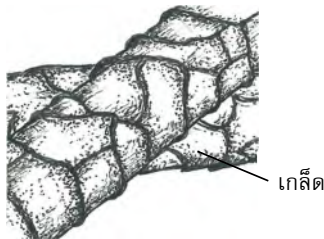


รูปที่ 1.20 เส้นใยไหม

เนื่องจากกาวไหมที่เคลือบบนเส้นใยไฟโบรอินทำให้เส้นไหมแข็งกระด้างจึงต้องกำจัดกาวไหมรวมทั้งสิ่งสกปรกอื่น ๆ ออกเพื่อทำให้เส้นใยนุ่มและมีความเงามันขึ้น ผ้าไหมมีความงามมันคงรูปร่างได้ดี คุณความชื้นได้ดีทำให้การย้อมหรือพิมพ์ลายบนผ้าไหมทำได้ง่ายและเนื่องจากพื้นผิวที่เรียบของไหมทำให้เส้นใยไม่ติดฝุ่น ดังนั้นผ้าไหมจึงทำความสะอาดได้ง่าย

2) ขนสัตว์ ความหมายของคำว่า ขนสัตว์ ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ หมายถึง ขนที่ปกคลุมผิวของแกะเท่านั้น ถ้าเป็นขนสัตว์ชนิดอื่นจะเรียกว่า “ขน (hair)” เช่น ขนม้า ขนแพะและขนอูฐ (อภิชาติ สนธิสมบัติ, 2545) ขนสัตว์เป็นโปรตีนที่ซับซ้อนประเภทเคราติน (keratin) (Cardamone et al.,

2009) ขนสัตว์มีความหยิกงอจึงช่วยให้เส้นใยพันกันได้ดีขึ้นเมื่อตีเกลียวเป็นเส้นด้ายและยังช่วยในด้านการคืนตัวกลับสู่สภาพเดิมด้วย ขนสัตว์ดูดซึมความชื้นและให้ความอบอุ่นได้ดี นอกจากนี้ เส้นใยขนสัตว์มีเอกลักษณ์ที่เฉพาะตัว คือ การหดตัวถาวร กล่าวคือ ภายใต้อิทธิพลกระทำ เช่น การกวน ความร้อน ความดัน และการเปียกน้ำ ขนสัตว์จะหดตัวไปในทิศทางของรากและเมื่อกลับสู่ภาวะปกติ ขนสัตว์จะพยายามคืนตัวกลับ แต่เนื่องจากเกล็ดที่ผิวของขนสัตว์ (รูปที่ 1.21) เกิดการขัดกันทำให้ขนสัตว์ไม่สามารถคืนตัวกลับในสภาพเดิมได้ส่งผลให้ผ้าขนสัตว์หดตัวอย่างชัดเจน (Siddoway, 2015)



รูปที่ 1.21 ขนสัตว์

3) เส้นใยแมงมุม เมื่อหลายพันปีก่อน มนุษย์ใช้เส้นใยแมงมุมในการห้ามเลือด ใช้เป็นสายเบ็ดสำหรับตกปลาและเป็นไหมเย็บแผล (Römer & Scheibel, 2008) สมบัติของเส้นใยแมงมุม คือ มีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กที่มีน้ำหนักเท่ากันถึง 5 เท่าและมีความเหนียวกว่าเคฟลาร์ (Kevlar®) ถึง 3 เท่า (Scott, 2014) การผลิตเส้นใยแมงมุมมีปัญหาหลายประการ เช่น แมงมุมเป็นสัตว์กินเนื้อทำให้แมงมุมกินกันเองเมื่อเลี้ยงรวมกัน เส้นใยแข็งตัวเมื่อเจออากาศและเนื่องจากเส้นใย แมงมุมมีขนาดเล็กมาก จึงทำให้ต้องใช้แมงมุมถึง 400 ตัว ในการผลิตผ้าขนาดหนึ่งตารางหลา วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าว คือ การใช้เทคโนโลยีวิศวกรรมพันธุศาสตร์ เช่น Spiber Inc. จากประเทศญี่ปุ่น ดัดแปลงพันธุกรรมของแบคทีเรีย *Escherichia coli* และนำมาประยุกต์ใช้เข้ากับการผลิตเส้นใยแมงมุมเทียม (McCarty, 2019)

เส้นใยจากแร่ธาตุ

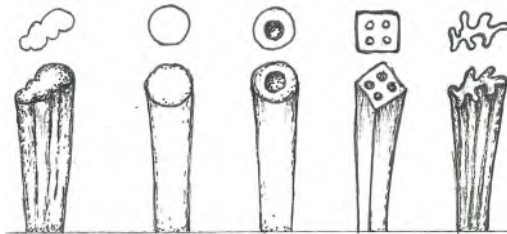
เส้นใยจากแร่ธาตุไม่ค่อยนิยมใช้ในงานสิ่งทอปกติแต่นิยมใช้กับงานด้านความคงทนต่อเปลวไฟและความร้อน โดยเฉพาะเส้นใยหิน (asbestos)

เส้นใยหิน เป็นเส้นใยละเอียดที่ปนอยู่ในเนื้อหินประกอบด้วยธาตุแมกนีเซียม เหล็ก ซิลิกาและธาตุอื่น ๆ มีสมบัติพิเศษ คือ ทนไฟ ไม่นำความร้อนและไฟฟ้า ทนกรดและด่างได้ดีจึงใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น กระเบื้องมุงหลังคา ผ้าเปดานและผ้าเบรก (Virta, 2002) ปัจจุบันมีการณรงค์ให้เลิกใช้เส้นใยหิน เนื่องจากเส้นใยนี้มีขนาดเล็กมาก สามารถฟุ้งกระจายในอากาศได้ง่าย เมื่อเส้นใยเข้าสู่ร่างกาย เส้นใยจะสะสมในเนื้อปอด ส่งผลให้เนื้อเยื่อปอดอักเสบและมีโอกาสพัฒนาเป็นโรคมะเร็งปอดได้ (Saracci, 1977)

1.2.3.2 เส้นใยประดิษฐ์

เส้นใยประดิษฐ์ คือ เส้นใยที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น การผลิตเส้นใยประดิษฐ์ทุกชนิด ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การเตรียมสารละลายตั้งต้น การอัดสารละลายตั้งต้นผ่านหัวฉีดเป็นเส้นใยยาว

และการทำให้เส้นใยยาวอยู่ตัวด้วยการระเหยของตัวทำละลาย การตกตะกอนและการเย็นตัวของเส้นใย (Baird, 2001) เส้นใยประดิษฐ์สามารถผลิตให้มีขนาดและภาคตัดขวางที่แตกต่างกัน (รูปที่ 1.22) นอกจากนี้ เส้นใยประดิษฐ์แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ เส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยอนินทรีย์

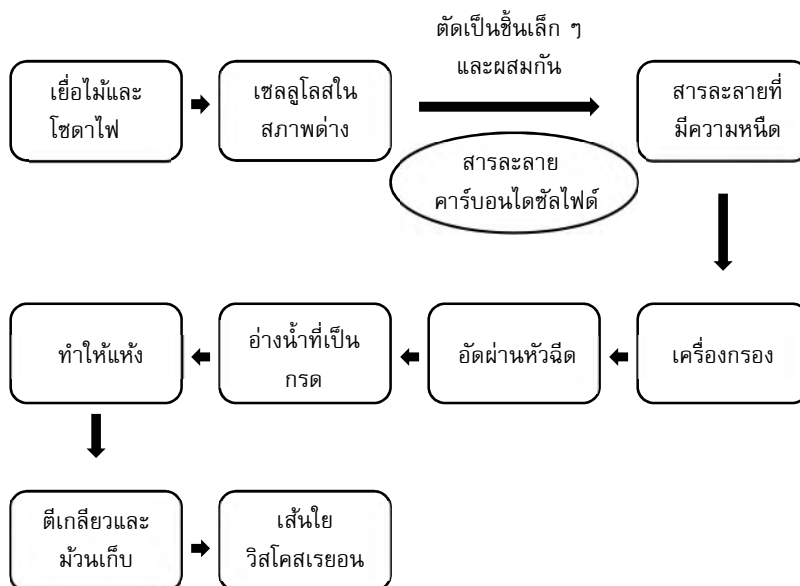


รูปที่ 1.22 ภาคตัดขวางของเส้นใยประดิษฐ์ชนิดต่าง ๆ

เส้นใยกึ่งสังเคราะห์

เส้นใยกึ่งสังเคราะห์เป็นเส้นใยที่ได้จากการนำวัสดุธรรมชาติ เช่น เปลือกไม้มาทำปฏิกิริยากับสารเคมีและอัดรีดออกมาเป็นเส้นใย เช่น เรยอน ไลโอเซลล์ (lyocell) เซลลูโลสแอซีเตต (cellulose acetate) และไตรแอซีเตต

1) เรยอน กระบวนการผลิตเรยอนมีอยู่ 2 วิธี คือ คิวพรัมโมเนียมเรยอน (cuprammonium rayon) และวิสโคสเรยอน (viscose rayon) แต่ในปัจจุบันนิยมใช้กระบวนการผลิตชนิดวิสโคสเรยอนเป็นส่วนใหญ่ (รูปที่ 1.23)

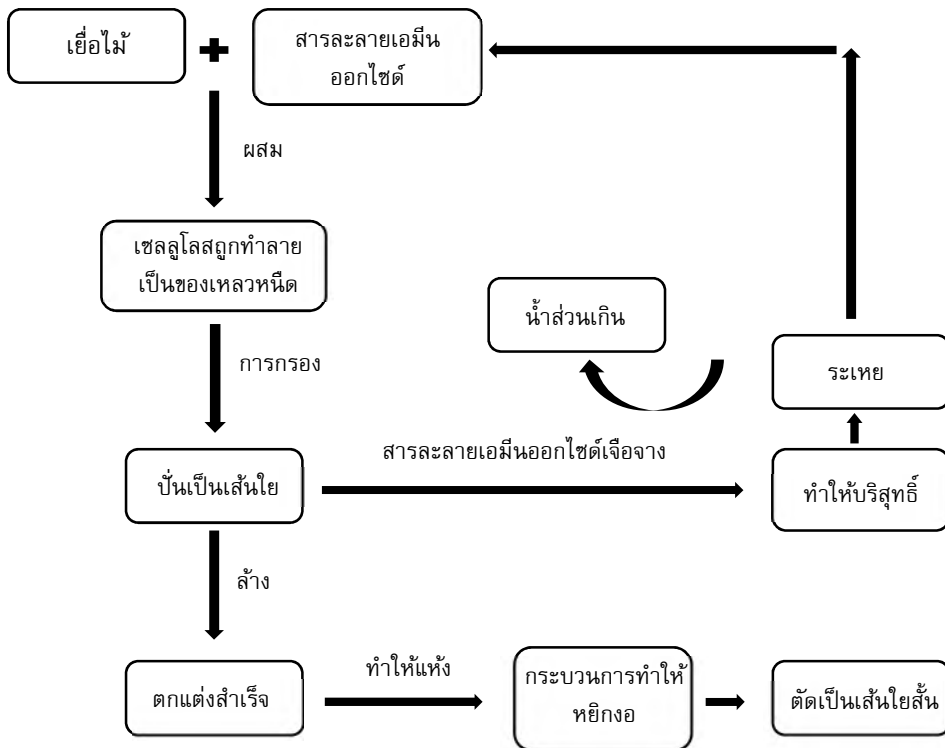


รูปที่ 1.23 ขั้นตอนการผลิตวิสโคสเรยอน

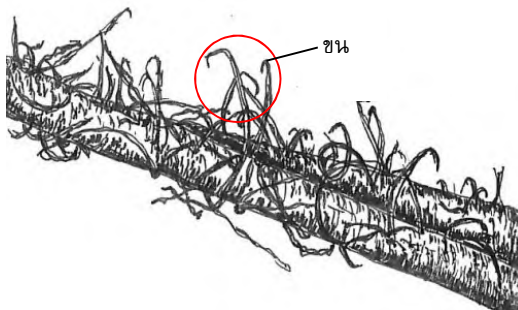
ที่มา: ดัดแปลงจาก วีระศักดิ์ อุทมภิขิตเตชา, 2542

เส้นใยเรยอนผลิตโดยการแช่วัตถุดิบคือเยื่อไม้ในโซดาไฟหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้เซลลูโลสในสภาพต่าง จากนั้นเซลลูโลสในสภาพต่างทำปฏิกิริยากับสารละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ได้เป็นเซลลูโลสแซนเทต (cellulose xanthate) มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด สีเหลืองอำพัน ของเหลวหนืดผ่านขั้นตอนการกรองเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเจือปนในของเหลวหนืด จากนั้นอัดรีดของเหลวหนืดผ่านหัวฉีดด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยแบบเปียกและผ่านของเหลวเส้นเล็ก ๆ นั้นลงอ่างตกตะกอนที่ประกอบด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก เส้นใยจะแข็งตัวได้เป็นเซลลูโลส (เรยอน) และคาร์บอนไดซัลไฟด์ ล้างเส้นใยเพื่อกำจัดสารเคมีต่าง ๆ ที่หลงเหลือบนเส้นใย ทำให้แห้งและม้วนเก็บเส้นใย การผลิตวิสโคสเรยอนสามารถควบคุมการผลิตได้จึงทำให้วิสโคสเรยอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความมัน และความยาวที่หลากหลาย เส้นใยเรยอนมีความแข็งแรงดีกว่าขนสัตว์แต่ต่ำกว่าไหม ความแข็งแรงจะลดลงเมื่อเส้นใยเปียก วิสโคสเรยอนดูดซึมความชื้นได้ดีและเป็นตัวนำความร้อนที่ดีจึงเหมาะกับการใช้งานในฤดูร้อน

2) ไลโอเซลล์ การผลิตไลโอเซลล์เป็นกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมาก เนื่องจากกระบวนการที่ใช้เป็นระบบปิด สามารถนำตัวทำละลายกลับมาใช้ได้เกือบทั้งหมด เส้นใยมีความขาวสูงจึงไม่จำเป็นต้องใช้สารฟอกขาวเพิ่ม เส้นใยมีประสิทธิภาพในการรับสีย้อมและสารเคมีได้ดี นอกจากนี้เส้นใยสามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพด้วย (Joshi et al., 2010; Chavan & Patra, 2004) กระบวนการผลิตเส้นใยเริ่มจากการสกัดไม้ให้ได้เยื่อไม้ที่เป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์และนำมาละลายด้วยสารละลายเอมีนออกไซด์ (amine oxide solution) ซึ่งไม่เป็นพิษ ได้เป็นสารละลายชั้นหนืด ผ่านการกรองแล้วจึงอัดรีดสารละลายชั้นหนืดนี้เป็นเส้นใย จากนั้นนำเส้นใยไปล้างทำความสะอาดและทำให้แห้ง (รูปที่ 1.24) สมบัติเด่นของไลโอเซลล์ คือ การเกิดขน (รูปที่ 1.25) ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งจุดเด่นหรือจุดด้อยของผลิตภัณฑ์ (Udomkichdecha & Chiarakorn, 2001)

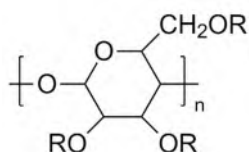


รูปที่ 1.24 ขั้นตอนการผลิตเส้นใยไลโอเซลล์
ที่มา: ดัดแปลงจาก วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2542



รูปที่ 1.25 การเกิดชนของเส้นใยไลโอเซลล์

3) เซลลูโลสแอซีเตตและไตรแอซีเตต ความแตกต่างระหว่างเส้นใยชนิดนี้กับเรยอน คือ โครงสร้างของเรยอนเป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์ ส่วนโครงสร้างของเซลลูโลสแอซีเตตและไตรแอซีเตตเป็นเซลลูโลสดัดแปรโดยมีหมู่แอซีทิล (acetyl group) มาแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล ในกรณีของไตรแอซีเตต หมู่แอซีทิลจะแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของเซลลูโลสทั้งหมด ส่วนในกรณีของแอซีเตต หมู่แอซีทิลจะแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลเพียงบางส่วน (รูปที่ 1.26)

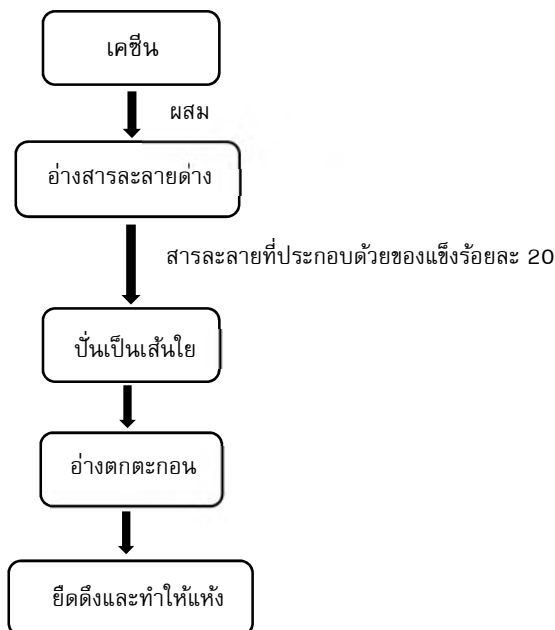


เมื่อ R คือ H หรือ COCH_3

รูปที่ 1.26 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสแอซีเตตหรือไตรแอซีเตต

เนื่องจากการเส้นใยแอซีเตตและไตรแอซีเตตมีการดัดแปรโครงสร้างของเซลลูโลสทำให้ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลลดลง จึงส่งผลให้เส้นใยแอซีเตตและไตรแอซีเตตดูดซึมน้ำลดลง การย้อมสีจึงยากขึ้น (LaNieve, 2006) และเนื่องจากเส้นใยเหล่านี้มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกจึงทำให้ผ้าที่ผลิตด้วยเส้นใยนี้สามารถอัดฟลิตได้ (Nirenberg, 1960) ขั้นตอนการผลิตเส้นใยแอซีเตต คือ แช่วีเอไม่ในกรดแอซีติก (acetic acid) ทั้งไวัระยะเวลาหนึ่งและควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม จากนั้นนำไปผสมกับแอซีติกแอนไฮไดรด์ (acetic anhydride) เกิดเป็นของเหลวข้นใสซึ่งก็คือสารละลายเซลลูโลสแอซีเตต หมักสารละลายนั้นนาน 8 ชั่วโมงแล้วนำไปผสมกับน้ำเพื่อให้เซลลูโลสแอซีเตตตกตะกอน ล้างด้วยน้ำแล้วทำให้แห้ง จากนั้นละลายผงเซลลูโลสแอซีเตตในอะซิโตน (acetone) แล้วกรองหลาย ๆ ครั้งเพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมออกได้เป็นของเหลวหนืดใส นำไปอัดรีดผ่านหัวฉีดเป็นเส้นใย (Yabune & Uchida, 1983) ส่วนในกรณีของการผลิตเส้นใยไตรแอซีเตต หลักการผลิตคล้ายกับการผลิตเส้นใยแอซีเตต ต่างกันตรงที่เส้นใยไตรแอซีเตตไม่ต้องผ่านการหมักและใช้เมทิลีนคลอไรด์ (methylene chloride) ในการละลายแทนที่การใช้อะซิโตน

4) เคซีน (casein) เคซีนเป็นโปรตีนที่พบมากในน้ำนม สามารถแยกเคซีนออกจากน้ำนมได้โดยการตกตะกอนด้วยกรด จุลินทรีย์ที่ผลิตแล็กติก (lactic acid bacteria) และเอนไซม์เรนนิน (rennin enzyme) การผลิตเส้นใยเคซีนหรือเส้นใยนมใช้กระบวนการปั่นเส้นใยแบบเปียก (Mckenna, 2012) (รูปที่ 1.27) โดยนำเคซีนละลายในสารละลายต่างความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ได้เป็นของเหลวหนืดที่มีโปรตีนร้อยละ 20-25 กรองเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเจือปนในของเหลวหนืด จากนั้นอัดรีดของเหลวหนืดเป็นเส้นใยลงในอ่างตกตะกอน (Tasnim, 2019) เคซีนอาจนำมาผสม (blend) หรือกราฟต์ (graft) กับอะคริโลไนไตรล์ (acrylonitrile) เพื่อทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงขึ้น เส้นใยชนิดนี้มีสมบัติเด่น คือ ด้านทานเชื่อกและเชื่อบดที่เรีย ดูดซึมน้ำได้ดีมาก มีความเงามันคล้ายไหม ง่ายต่อการย้อมสีและสามารถผสมกับเส้นใยอื่น ๆ ได้ดี (Bier et al., 2017)



รูปที่ 1.27 การผลิตเส้นใยเคซีน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Ryder et al., 2017

5) โปรตีนถั่วเหลือง (soybean) เส้นใยโปรตีนถั่วเหลืองเป็นเส้นใยจากโปรตีนคืนสภาพใหม่ (regenerated protein fiber) ผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol, PVA) (Janarthanan, 2013) โดยใช้กระบวนการปั่นเส้นใยแบบเปียก เส้นใยมีสีครีม มีความเงามัน นุ่ม น้ำหนักเบา ดูดซึ่มความชื้นได้ดีเท่ากับฝ้าย แต่ให้ความชื้นซึมผ่านได้ดีกว่าฝ้าย ย้อมสีง่าย ความต้านทานการแตกหักมีค่าสูงกว่าขนสัตว์ ฝ้ายและไหม แต่น้อยกว่าพอลิเอสเตอร์ การหดตัวต่ำ ไม่ยับง่าย แห้งเร็ว ต้านทานเชื้อแบคทีเรีย (*Staphylococcus aureus* และ *Candida albicans*) และป้องกันรังสียูวีได้ (Vynias, 2011)

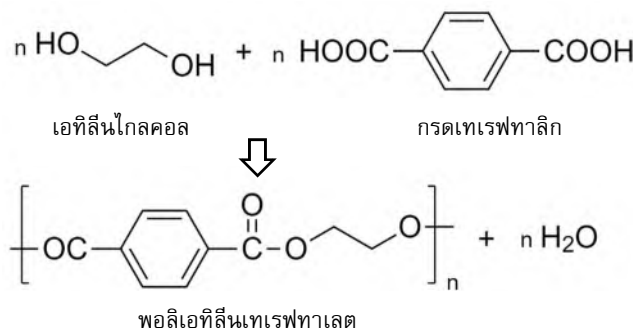
เส้นใยสังเคราะห์

เส้นใยสังเคราะห์เป็นเส้นใยที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้ทดแทนเส้นใยจากธรรมชาติ เช่น พอลิเอสเตอร์ พอลิเอไมด์ (polyamide) พอลิเอทิลีนและพอลิยูรีเทน (polyurethane)

1) พอลิเอไมด์ พอลิเอไมด์มีชื่อทางการค้าว่า “ไนลอน” มีหลายชนิด เช่น ไนลอน 6 ไนลอน 6,6 และไนลอน 6,10 ตัวเลขที่เขียนกำกับหลังชื่อไนลอนแสดงจำนวนอะตอมของคาร์บอนในมอนอเมอร์ (Deopura, 2008) ไนลอนเป็นเส้นใยสังเคราะห์ชนิดแรกที่มีมนุษย์ค้นพบขึ้นโดยที่นักวิจัยของ Wallace H. Carothers (Trossarelli, n.d.) การผลิตเส้นใยไนลอนใช้วิธีการปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลว กล่าวคือ หลอมเหลวพอลิเมอร์ให้เป็นของเหลวหนืดแล้วอัดรีดผ่านหัวฉีดเป็นเส้นใยยาว จากนั้นเส้นใยที่ได้จะแข็งตัวเนื่องจากเส้นใยเย็นตัวลง สมบัติของไนลอน คือ มีความแข็งแรงสูง ทนต่อการขัดถู มีการยืดตัวสูงและสามารถจับจีบถาวรได้ด้วยความร้อน แต่ไนลอนมีข้อเสีย คือ เส้นใยเสื่อมสภาพได้เมื่อ

สัมผัสแต่เป็นเวลานาน ๆ (Hedge, 2004) ต่อมาในปี 2014 Kind และคณะ พัฒนาการผลิตไนลอนชีวภาพ 5,10 จากการผสมผสานกระบวนการทางชีวภาพและเคมี สมบัติเชิงกลและอุณหภูมิหลอมเหลวของไนลอนชนิดนี้ใกล้เคียงกับไนลอน 6 และไนลอน 6,6 ที่ผลิตจากปิโตรเคมี นอกจากนี้ สมบัติด้านความหนาแน่นของไนลอนชีวภาพต่ำกว่าไนลอนจากปิโตรเคมีร้อยละ 6 จึงช่วยประหยัดพลังงานในการขนส่งได้

2) พอลิเอสเทอร์ ขั้นตอนการผลิตเส้นใยพอลิเอสเทอร์เหมือนกับการผลิตเส้นใยไนลอน คือเป็นการปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลวแต่ใช้สารตั้งต้นแตกต่างกัน เช่น สารตั้งต้นในการผลิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate, PET) ซึ่งเป็นพอลิเอสเทอร์ชนิดหนึ่ง คือ เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) และกรดเทเรฟทาลิก (terephthalic acid) (รูปที่ 1.28) สมบัติของเส้นใยพอลิเอสเทอร์ คือ น้ำหนักเบา คีนตัวได้ดี ทนทานต่อแสงแดด ทนทานต่อเหงื่อและนำไปผสมกับเส้นใยอื่นได้ดี (Brown & Reinhart, 1971)

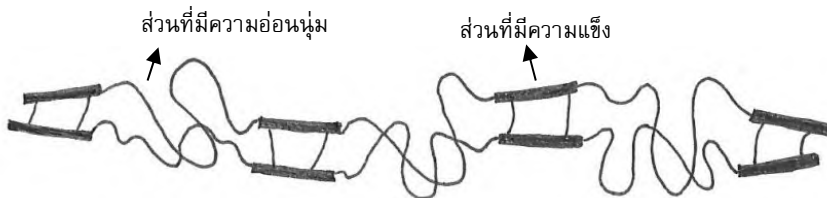


รูปที่ 1.28 การผลิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

3) พอลิอะครีโลไนไทรล์ เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีอะครีโลไนไทรล์เป็นองค์ประกอบหลัก อะครีลิกเป็นเส้นใยสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยอะครีโลไนไทรล์อย่างน้อยร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2542) กระบวนการผลิตเส้นใยนี้มีการปั่นเส้นใยแบบเปียกและแบบแห้ง อะครีลิกเป็นเส้นใยที่นุ่ม เบา มีความยืดหยุ่นน้อย สามารถคืนตัวกลับได้ดี ทนต่อแสง สารฟอกขาว เหงื่อ รา และแมลงได้ดี ไม่นำความร้อนจึงอุ่นใกล้เคียงขนแกะ อะครีลิกจึงเหมาะสำหรับใช้ทำขนสัตว์เทียม (Cox, 2005) นอกจากนี้ เส้นใยอะครีลิกยังเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเส้นใยคาร์บอนคุณภาพสูงด้วย (Qin, 2016) ส่วนมอดอะครีลิก (modacrylic) ย่อมาจากคำว่า “modified acrylic” เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยอะครีโลไนไทรล์ร้อยละ 35 ถึง 85 โดยน้ำหนัก (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2542 และ Goswami et al., 2004) มอดอะครีลิกมีปริมาณอะครีโลไนไทรล์น้อยกว่าอะครีลิกจึงทำให้สมบัติบางอย่างแตกต่างจากอะครีลิก โดยทั่วไป โคพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในมอดอะครีลิก คือ ไวนิลคลอไรด์ (vinyl chloride) ซึ่งทำให้มอดอะครีลิกมีสมบัติเด่นด้านการทอผ้า ส่วนสมบัติอื่น ๆ ใกล้เคียงกับอะครีลิก

4) พอลิยูรีเทน เกิดจากมอนอเมอร์อย่างน้อย 2 ชนิดโดยเกิดปฏิกิริยาควบนั่นระหว่างหมู่ไอโซไซยาเนต (isocyanate group) และไฮดรอกซิล พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะมีพันธะยูรีเทน (urethane bond) ภายในสายโซ่ ลักษณะของพอลิยูรีเทนมีตั้งแต่แข็งเหนียวจนถึงพูนุ่มแบบฟองน้ำ สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น เส้นใย กาว โฟมและสารเคลือบผิว สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ

พอลิยูรีเทนได้รับการปรับปรุงและพัฒนาเป็นเส้นใยที่มีความยืดหยุ่นตัวสูงหรือสแปนเดกซ์ (spandex) (Qin, 2016) สแปนเดกซ์ เป็นวัสดุประเภทสารยืดหยุ่น มีการยืดตัวสูงร้อยละ 450-700 และสามารถคืนกลับตัวได้ทั้งหมดเมื่อนำแรงดึงออก (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2542) สแปนเดกซ์เป็นที่รู้จักกันในนาม Lycra® โครงสร้างของเส้นใยสแปนเดกซ์มีความซับซ้อนโดยมีโครงสร้างหลัก 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีความอ่อนนุ่ม (soft segment) ส่งผลต่อสมบัติด้านความยืดหยุ่นของเส้นใยและส่วนที่มีความแข็ง (hard segment) ส่งผลต่อสมบัติด้านความแข็งแรง (รูปที่ 1.29) (Reisch, 1999)



รูปที่ 1.29 โครงสร้างส่วนที่มีความอ่อนนุ่มและแข็งของพอลิยูรีเทน

เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ ส่วนที่มีความอ่อนนุ่มจะยืดตัวออกและเมื่อปล่อยแรงกระทำนั้น ส่วนที่อ่อนนุ่มจะคืนตัวกลับสู่สภาพเดิม การผลิตเส้นใยชนิดนี้มีหลายวิธีขึ้นอยู่กับเทคนิคของบริษัท เช่น การปั่นเส้นใยแบบเปียกและแบบหลอมเหลว การใช้งานเส้นใยสแปนเดกซ์นี้จะใช้เส้นใยสแปนเดกซ์ปริมาณเล็กน้อยผสมกับเส้นใยอื่นเพื่อเพิ่มสมบัติด้านความยืดหยุ่น

5) พอลิพรอพิลีน กระบวนการปั่นเส้นใยพอลิพรอพิลีนเป็นแบบหลอมเหลวโดยหลอมเหลวเม็ดพอลิพรอพิลีนแล้วอัดรีดเป็นเส้นใย จากนั้นดึงยืดเส้นใยเพื่อให้โมเลกุลจัดเรียงตัวได้ดี มีความเป็นผลึกสูง เส้นใยมีความแข็งแรง สมบัติโดยทั่วไปของเส้นใยพอลิพรอพิลีน คือ มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับไนลอนและพอลิเอสเตอร์ ทนต่อการขัดสีได้ดี เป็นฉนวนที่ดี แต่มีข้อเสียคือ มีความคงทนต่อแสงต่ำ การดูดซึมน้ำต่ำและย่อยสลายเส้นใยยาก (Elmaaty et al., 2018) แต่ปัจจุบัน มีงานวิจัยที่ศึกษาการย่อยสลายเส้นใยพอลิพรอพิลีนให้ดีขึ้น เช่น การผสมแบบหลอมเหลว (melt blending) ของพอลิพรอพิลีนกับพอลิเมอร์อื่นและย่อยด้วยสปีดสเฟียร์ส (Mirjalili et al., 2013; Sahinbaskan et al., 2017) การย่อยพอลิพรอพิลีนด้วยสปีดสเฟียร์สโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ (microwave) และอัลตราโซนิก (ultrasonic) (Yigit & Teker, 2011) ใช้นาโนเคลย์ (nanoclay) ที่ปรับปรุงด้วยสารควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (quaternary ammonium compound) และย่อยด้วยสปีดและสปีดสเฟียร์ส (Fan et al., 2003) การใช้นาโนเคลย์ที่ผ่านการปรับปรุงผสมกับพอลิพรอพิลีนและย่อยด้วยสปีดสเฟียร์ส (Bahrami & Mirzaie, 2011) และการย่อยสลายพอลิพรอพิลีนภายใต้ภาวะคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (supercritical carbon dioxide) (Elmaaty et al., 2018)

6) พอลิเอทิลีน เป็นพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ เนื่องจากมีราคาถูกและจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นจึงทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำ พอลิเอทิลีนแบ่งประเภทตามความหนาแน่นได้ 3 ประเภท ได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กลาง (medium density polyethylene, MDPE) และสูง (high density polyethylene, HDPE) โดยมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 105-130 องศาเซลเซียส (Qin, 2016) เส้นใยพอลิเอทิลีนมีน้ำหนักเบา สามารถลอยน้ำได้และเนื่องจากพอลิเอทิลีนมีการยืดเกาะ

พื้นผิว (surface adhesion) ต่ำ เส้นใยนี้จึงไม่เหมาะกับการใช้งานด้านการเคลือบผิว (Houtman, 2015) สมบัติของพอลิเอทิลีนขึ้นกับโครงสร้างโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุลและความเป็นผลึก เช่น พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ (ultra high molecular weight polyethylene, UHMWPE) เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงทำให้วัสดุมีความเหนียวมาก นอกจากนี้ ในปัจจุบันเริ่มมีการใช้พอลิเอทิลีนชีวภาพที่สังเคราะห์จากวัตถุดิบธรรมชาติผ่านกระบวนการหมัก เช่น อ้อย (sugarcane) และหัวบีท (sugar beet) แทนพอลิเอทิลีนจากกระบวนการปิโตรเคมีมากขึ้น พอลิเอทิลีนชีวภาพมีสมบัติเหมือนพอลิเอทิลีนจากกระบวนการปิโตรเคมี แต่มีอัตราการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าพอลิเอทิลีนจากปิโตรเคมีถึง 2-2.5 กิโลกรัมต่อการผลิตพอลิเอทิลีน 1 กิโลกรัม (Morschbacker, 2009; Medieta et al., 2019; Siracusa & Blanco, 2020)

7) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ไม่สามารถผลิตได้โดยตรงแต่ต้องไฮโดรไลซิส (hydrolysis) พอลิไวนิลแอสีเทต (polyvinyl acetate, PVAc) เพื่อเปลี่ยนเป็นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Sakurada, 1985) เนื่องจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ละลายน้ำ ดังนั้นในการฉีดเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จึงต้องผ่านพอร์มัลดีไฮด์เพื่อให้เส้นใยไม่ละลายน้ำ (Sakurada & Okaya, 2006) สมบัติของเส้นใยนี้ คือ ทนต่อการกรด ต่างและตัวทำละลายอินทรีย์ส่วนใหญ่ ยกเว้นฟีนอล (phenol) ครีซอล (cresol) และกรดฟอร์มิก (formic acid) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส (Karmakar, 1999; Islam et al., 2020)

8) พอลิแลกติกแอซิด เป็นพอลิเอสเทอร์ที่มีสายโซ่ตรง (aliphatic polyester) สังเคราะห์ได้จากกรดแลกติก (lactic acid) ที่ได้จากการหมักพืชที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น มันสำปะหลังและข้าวโพด พอลิแลกติกแอซิดจึงเป็นพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบที่สร้างทดแทนใหม่ได้ (renewable material) และย่อยสลายได้ทางชีวภาพเมื่อนำไปฝังกลบในดิน พอลิแลกติกแอซิดจะเกิดการไฮโดรไลซีก่อนจึงจะย่อยสลายได้ซึ่งการไฮโดรไลซต้องใช้เวลาที่ความชื้นสัมพัทธ์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 98 และอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.25 ย้อมติดสีด้วยสีย้อมเพอร์ส คงทนต่อแสงยูวีได้สูง มีสมบัติการต้านการซึมผ่านของแก๊สและของเหลวใกล้เคียงกับพอลิสไตรีนและพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต (Dugan, 2001)

9) พอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต (polyhydroxybutyrate, PHB) จัดเป็นพอลิเอสเทอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพสังเคราะห์ครั้งแรกได้จากแบคทีเรีย *Bacillus megaterium* (Nair et al., 2014) ต่อมามีการศึกษาพบว่าแบคทีเรียหลายชนิดที่ผลิตพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรตได้ เช่น *Bacillus subtilis* (Singh et al., 2009) *Alcaligenes latus* (Wang, et al., 2013) และ *Bacillus cereus* (Andler et al., 2021) ปัจจุบัน มีการพัฒนาใช้แหล่งคาร์บอนจากผลผลิตทางการเกษตร เช่น ข้าว อ้อยและมันสำปะหลัง และผลพลอยได้ในอุตสาหกรรม เช่น กากน้ำตาลและหางนม มาเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับแบคทีเรียเพื่อใช้สำหรับผลิตพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต พอลิเมอร์นี้มีความเป็นผลึกสูงเนื่องจากสายโซ่เป็นเส้นตรง ยืดหยุ่นตัวน้อยกว่าพอลิพรอพิลีน ทนทานต่อการซึมผ่านของน้ำและออกซิเจนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Reddy et al., 2003, McAdam et al., 2020)

10) พอลิเทระฟลูออโรเอทิลีน (polytetrafluoroethylene, PTFE) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงประกอบด้วยคาร์บอนและฟลูออรีน (Qin, 2016) มีสมบัติไม่ชอบน้ำ

มีความลื่นสูง ทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี ทนความร้อนสูง ทนต่อแสงยูวีและสารออกซิไดส์ (Islam et al., 2020)

เส้นใยอนินทรีย์

นอกจากเส้นใยกึ่งสังเคราะห์และเส้นใยสังเคราะห์ที่กล่าวมาแล้ว ยังมีเส้นใยอนินทรีย์ที่ประกอบด้วยสารประกอบเคมีอนินทรีย์ที่ได้จากธาตุต่าง ๆ เช่น คาร์บอน ซิลิกอน (silicon) และโบรอน (boron) เส้นใยเหล่านี้มีน้ำหนักเบา ความแข็งแรงสูง ทนต่อความร้อนดีและมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าเส้นใยทั่วไป ตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในการผลิตเส้นใยอนินทรีย์ เช่น ซิลิกา ซิลิกอนคาร์ไบด์ โบรอน โบรอนคาร์ไบด์ (boron carbide) และแกรไฟต์ (graphite) (Liu et al., 2019)

1) คาร์บอน เส้นใยคาร์บอนผลิตจากเรยอนและพอลิอะครีโลไนไทรล์โดยให้ความร้อนแก่เส้นใยจนถึงอุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส (Iqbal & Goyal, 2010) เส้นใยนี้ประกอบด้วยคาร์บอนได้ถึงร้อยละ 95 ในขณะที่ถ้าให้ความร้อนแก่เส้นใยจนถึงอุณหภูมิสูงกว่า 2,500 องศาเซลเซียส จะได้เส้นใยแกรไฟต์ที่มีปริมาณคาร์บอนถึงร้อยละ 99 เส้นใยคาร์บอนมีน้ำหนักเบา มีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม นำไฟฟ้าและความร้อนที่ดีมาก (Bhatt & Goe, 2017; Liu et al., 2019)

2) โบรอน เส้นใยโบรอนผลิตจากการเคลือบโบรอนบนลวดทังสเตน เส้นใยแก้วหรือคาร์บอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12 ไมโครเมตร โดยกระบวนการเคลือบผิวด้วยไอเคมี (chemical vapor depositon) (Vasiliev & Morozov, 2018) เส้นใยโบรอนมีความหนาแน่นต่ำ มีความต้านทานแรงดึงและแรงกดอัดสูง และมีความแข็งแรงสูงมาก กล่าวคือ มีความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยแก้วถึง 5 เท่า จึงทำให้การทอหรือบิดเกลียวเส้นใยโบรอนทำได้ยาก (Meola et al., 2015; Hasan, 2020)

3) เซรามิก เส้นใยเซรามิกโดยทั่วไปทำจากวัสดุอนินทรีย์ เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ (aluminium oxide) เส้นใยเซรามิกแบบยาวจะใช้กระบวนการปั่นเส้นใยแบบแห้งหรือแบบหลอมเหลว เช่น เส้นใยอะลูมินา เริ่มต้นจากการฉีดพอลิเมอร์ตั้งต้นเป็นเส้นใย จากนั้นให้ความร้อนกับเส้นใยเพื่อเปลี่ยนเป็นเส้นใยเซรามิก (alumina fiber) ซึ่งการให้ความร้อนนี้เป็นกระบวนการที่ใช้เวลาและพลังงานจึงทำให้เส้นใยเซรามิกมีราคาแพง (Clauss & Schawaller, 2006) เส้นใยเซรามิกโดยทั่วไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 1,260 องศาเซลเซียส และหากมีการเติมเซอร์โคเนียมออกไซด์ (zirconium oxide, ZrO_2) ลงไปเล็กน้อย จะช่วยให้เส้นใยนี้ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 1,600 องศาเซลเซียส (Gillert, 2010; Bilisik, 2021) ส่วนการผลิตเส้นใยเซรามิกแบบสั้น อาจใช้การหมุนเหวี่ยงโดยใช้จานหมุน (centrifugal spinning using rotating discs) หรือเทคนิคการเป่าลม (air-blow techniques) ซึ่งเส้นใยเซรามิกแบบสั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่สม่ำเสมอน้อยกว่าเส้นใยเซรามิกแบบยาว นอกจากนี้ เส้นใยเซรามิกอาจใช้กระบวนการเคลือบชั้นเซรามิกบาง ๆ บนเส้นใยอื่นโดยใช้กระบวนการเคลือบผิวด้วยไอเคมีได้ (Gillert, 2010; Bilisik, 2021)

4) แก้ว เส้นใยแก้วเป็นเส้นใยที่มีองค์ประกอบที่ประกอบด้วยซิลิกา กระบวนการผลิตเริ่มจากหลอมเหลวแก้วและผ่านสารหลอมเหลวไปที่หัวฉีดแล้วฉีดออกเป็นเส้นใยสั้นหรือเส้นใยยาว (Wallenberger et al., 2001) ความแข็งแรงของเส้นใยแก้วเพิ่มขึ้นเมื่อเส้นใยมีขนาดเล็กลง (Liu et al., 2019) เส้นใยนี้มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูงมาก ทนการกัดกร่อนและทนสารเคมีต่าง ๆ ได้ดี

นอกจากนี้ วัตถุประสงค์ในการผลิตเส้นใยแก้วมีราคาถูกกว่าเส้นใยคาร์บอนมากจึงเหมาะกับการใช้งานเป็นฉนวน เส้นใยเสริมแรงและเส้นใยแก้วนำแสง (Poopakdee & Thammawichai, 2021)

5) โลหะ ปัจจุบันเส้นใยโลหะผลิตได้จากโลหะบริสุทธิ์ โลหะผสม (alloys) และกึ่งโลหะ (metalloid) โดยใช้กระบวนการเชิงกลหรือความร้อน (Küster et al., 2018) เส้นใยโลหะผลิตได้หลากหลายวิธี (รูปที่ 1.30) เช่น การดึงยืดลดแบบกลุ่ม (bundle drawing) การตัดฟอยด์ (foil-shaving technology) การตัดเฉือนหรือสกัดเนื้อวัสดุออกให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการ (machining) และการปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลว (Baerdemaeker & Vleurinck, 2017; Küster et al., 2018)

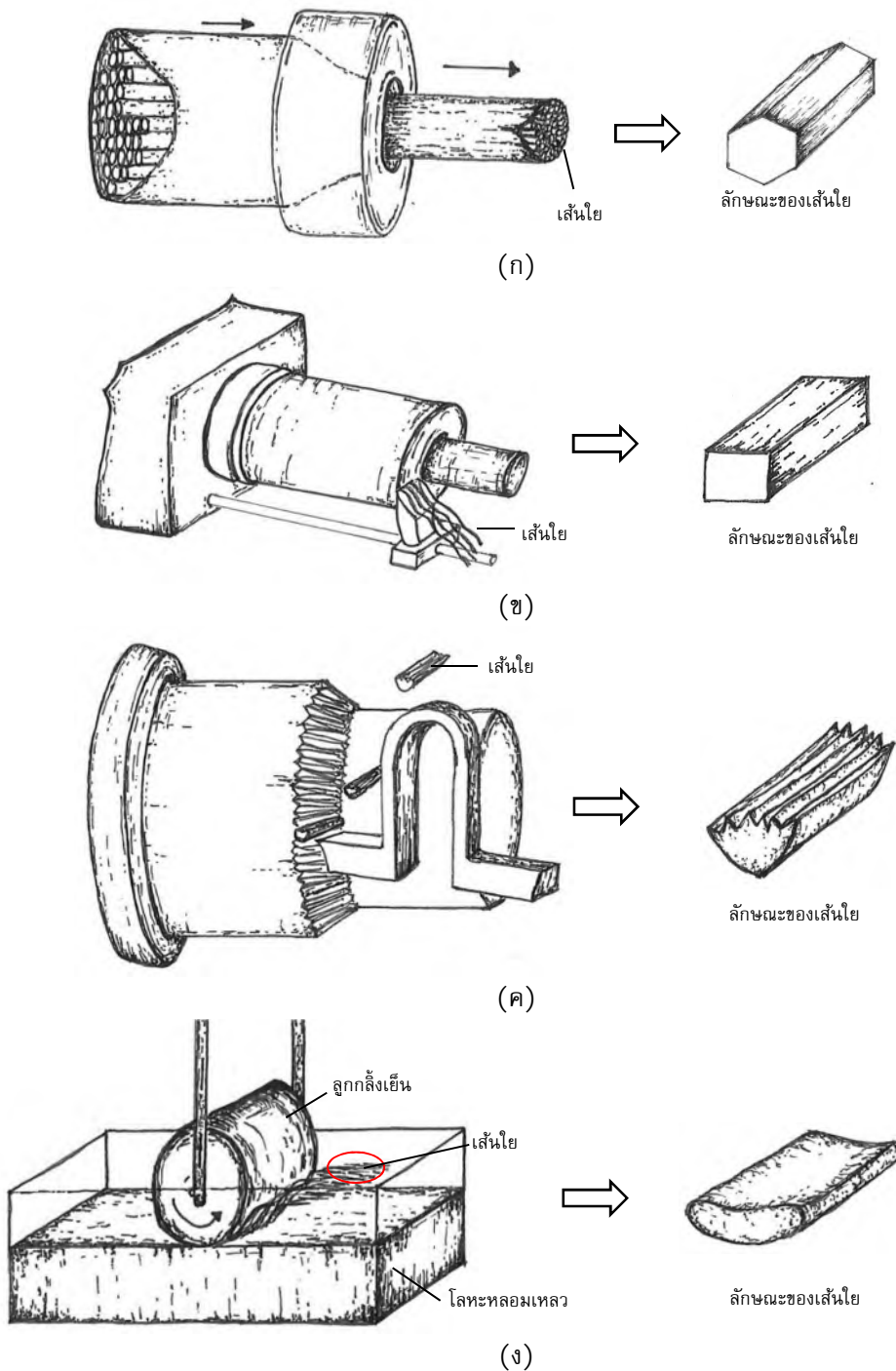
- การดึงยืดเส้นใยแบบกลุ่ม (รูปที่ 1.30 ก) เริ่มจากการมัดเส้นใยเข้าด้วยกันเป็นกลุ่ม และนำกลุ่มเส้นใยนั้นผ่านแม่พิมพ์เพื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยลง จากนั้นล้างสารที่มัดเส้นใยโลหะเข้าด้วยกันออกในอ่างกรดเพื่อให้ได้เส้นใยโลหะเส้นเดี่ยวที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปหกเหลี่ยม (hexagonal) กระบวนการนี้สามารถผลิตเส้นใยโลหะแบบต่อเนื่องและสามารถผลิตเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 200 ไมโครเมตร

- เทคโนโลยีการตัดฟอยด์ (รูปที่ 1.30 ข) เป็นกระบวนการผลิตเส้นใยสั้น โดยลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยลงเหลือ 14 ไมโครเมตรและเส้นใยมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular)

- การตัดเฉือนหรือสกัดเนื้อโลหะให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการ (รูปที่ 1.30 ค) กระบวนการนี้เป็นการผลิตเส้นใยสั้นแบบกึ่งต่อเนื่องที่เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ไมโครเมตร

- กระบวนการปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลว (รูปที่ 1.30 ง) เป็นการผลิตเส้นใยแบบกึ่งต่อเนื่องผ่านการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของโลหะเหลวบนลูกกลิ้งเย็น เส้นใยที่ได้มีขนาดใหญ่ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40–250 ไมโครเมตร

ตัวอย่างเส้นใยโลหะมีหลากหลายชนิด เช่น เหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิม ทองแดง (copper) ไทเทเนียม (titanium) ดีบุก (tin) และทองเหลือง (brass) เส้นใยจากเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเส้นใยโลหะที่ใช้กันมากที่สุดเนื่องจากสมบัติการนำความร้อนและนำไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม มีความยืดหยุ่นตัวดี มีความคงทนต่อความร้อนและคงทนต่อการกัดกร่อนได้ดี (Küster et al., 2018; Sun et al., 2011) เหล็กกล้าไร้สนิมมีโครเมียมเป็นองค์ประกอบอย่างน้อยร้อยละ 10.5 ซึ่งโครเมียมในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมนี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นฟิล์มบาง ๆ ของโครเมียมออกไซด์ (chromium oxide, Cr_2O_3) เคลือบผิวไว้ จึงป้องกันการกัดกร่อนเนื้อเหล็กได้เป็นอย่างดี (O'Brien et al., 2017)



รูปที่ 1.30 กระบวนการผลิตเส้นใยโลหะ (ก) การดึงยึดลดแบบกลุ่ม (ข) การตัดพอยต์ (ค) การตัดเฉียง หรือสกัดเนื้อวัสดุออกให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการ (ง) การปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลว

ที่มา: ดัดแปลงจาก Baerdemaeker & Vleurinck, 2017

1.3 บทสรุป

วัสดุศาสตร์ เป็นการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับวัสดุโดยการนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มาใช้เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบพื้นฐานของวัสดุและสมบัติของวัสดุ วัสดุแต่ละประเภท ประกอบด้วยโครงสร้าง สมบัติและกระบวนการผลิตที่ต่างกัน วัสดุชนิดหลัก ๆ ในปัจจุบัน ได้แก่ โลหะ เซรามิกและพอลิเมอร์ ความรู้พื้นฐานทางวัสดุศาสตร์จะช่วยให้เลือกใช้วัสดุได้อย่างเหมาะสม ตรงตามสมรรถนะการใช้งาน รวมทั้งสามารถต่อยอดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสมบัติของวัสดุและพัฒนาวัสดุใหม่ ๆ ได้ในอนาคต

เส้นใยเป็นวัสดุพื้นฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ คือเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยประดิษฐ์ เส้นใยธรรมชาติมีทั้งเส้นใยที่ได้จากพืช (ฝ้าย ลินิน ป่านและปอ) เส้นใยที่ได้จากสัตว์ (ขนแกะ ขนแพะและไหม) และเส้นใยแร่ (ใยหิน) ส่วนเส้นใยประดิษฐ์จำแนกเป็นสามประเภท คือเส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยอนินทรีย์ โดยเส้นใยกึ่งสังเคราะห์เป็นเส้นใยที่ได้จากวัสดุธรรมชาติ เช่น เรยอน ไลโอเซลล์ เซลลูโลสแอซีเตตและไตรแอซีเตต ได้จากวัสดุประเภทเซลลูโลสจากธรรมชาติ และเส้นใยเคซินได้จากน้ำมันซึ่งเป็นโปรตีนจากธรรมชาติ ส่วนเส้นใยสังเคราะห์เป็นเส้นใยที่สังเคราะห์จากสารเคมี เช่น พอลิเอไมด์ พอลิเอสเตอร์ พอลิยูรีเทนและอะคริลิกเป็นเส้นใยสังเคราะห์จากสารอินทรีย์ และเส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้วและเส้นใยโลหะ เป็นเส้นใยสังเคราะห์จากสารอนินทรีย์ สมบัติของเส้นใยมีผลโดยตรงต่อสมบัติของผ้าที่ทำขึ้นจากเส้นใยนั้น ๆ ผ้าที่ทำจากเส้นใยที่แข็งแรงก็จะมี ความแข็งแรงทนทานด้วย หรือเส้นใยที่สามารถดูดซับน้ำได้ดีจะส่งผลให้ผ้าสามารถดูดซับน้ำและความชื้นได้ดี

ดังนั้น ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวัสดุและเส้นใยประเภทต่าง ๆ ตลอดจนความเข้าใจสมบัติของเส้นใย ทำให้สามารถทำนายสมบัติของผ้าที่มีเส้นใยนั้น ๆ เป็นองค์ประกอบ รวมไปถึงผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ ซึ่งจะช่วยให้สามารถเลือกชนิดของผลิตภัณฑ์ในเบื้องต้นได้ถูกต้องตามความต้องการ

เอกสารอ้างอิง

จุฑารัตน์ นกแก้ว. (2564). ภูมิปัญญาท้องถิ่นตาลโตนดของไทย: การสังเคราะห์องค์ความรู้จากงานวิจัย.

วารสารห้องสมุด. 65(1), 35-56.

ชาญชัย สิริเกษมเลิศ. (2554^b). นวัตกรรมเส้นใยรักโลก: เส้นใยลูกตาล. *TTIS Textile Digest*. 9(172), 34-35.

ชาญชัย สิริเกษมเลิศ. (2554^a). เส้นใยข้าว วัตถุดิบใหม่ของสิ่งทอ. *TTIS Textile Digest*. 9(173), 40-41.

ไชยวัฒน์ รักสกุลพิวัฒน์, และตติยา ตรงสถิตกุล. (2558). *Engineering materials part: Polymers*.

<http://eng.sut.ac.th/polymer/2015/newversion/administrator/document/subjectDocument/14850672621264.pdf>

ณภัค แสงจันทร์, นาวี เป็ลยจิตร, และจุฑาทิพย์ นามวงษ์. (2561). การแยกเส้นใยจากกากหมากสำหรับเป็นแนวทางในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์. [เอกสารนำเสนอ]. งานประชุมวิชาการระดับชาติวิจัย รำไพพรรณี ครั้งที่ 12 เนื่องในวโรกาสคล้ายวันพระราชสมภพสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณี ครอบ 114 ปี. จันทบุรี, ประเทศไทย.

- นาวิ เป็ลยวจิตร. (2562). การวิจัยเส้นใยจากกาบหมากเพื่อพัฒนาเป็นเคหะสิ่งทอ. *วารสารวิจัยรำไพพรรณี*. 13(3), 90-100.
- ปรียาพร ทองผุด, และนิติพัฒน์ แก้วประสิทธิ์. (2561). กระบวนการเรียนรู้วิถีชีวิตวัฒนธรรมและภูมิปัญญาการปลูกสับปะรดแบบมีส่วนร่วมของชุมชนตำบลบ้านคา อำเภอบ้านคา จังหวัดราชบุรี. [เอกสารนำเสนอ]. การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 6 ราชภัฏหมู่บ้านจอมบึงวิจัย. ราชบุรี, ประเทศไทย.
- ปิยะพร คามภักภาพันธุ์, และณัฐวัชร นิธิทองสกุล. (2564). การปรับปรุงคุณภาพเส้นใยกล้วยสำหรับผ้าทอ (รายงานผลการวิจัย). กรุงเทพฯ: สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ.
- พรรณี รัตนชัยสิทธิ์, และกฤษฎา บุญนิล. (2538). การผลิตผ้าจากเส้นใยต้นธูปฤาษี. [เอกสารนำเสนอ]. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 33. กรุงเทพฯ, ประเทศไทย.
- มนูญ จิตดีใจน้ำ, พิชัย จันทรมณี, ปิยะพร คามภักภาพันธุ์, และกมลพงศ์ แจ่มกมล. (2557). การสร้างเครื่องแยกเส้นใยหมากและการใช้เส้นใยหมากเพื่องานสิ่งทอเทคนิค (รายงานผลการวิจัย). กรุงเทพฯ: สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ.
- มนูญ จิตดีใจน้ำ, และปิยะพร คามภักภาพันธุ์. (2557). การผลิตเส้นด้ายจากใยกล้วยด้วยระบบการผลิตเส้นด้ายแบบวงแหวน (รายงานผลการวิจัย). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- รัตนพล มงคลรัตนสิทธิ์, และณัฐดนัย รุ่งเรืองกิจไกร. (2555). ผ้าทอใยบัวจากประเทศพม่า. *คัลเลอร์เวย์*. 18(101), 46-48.
- วาริรัตน์ หนูหิต. (2556). การย้อมยั้งเชื้อแบคทีเรียก่อโรคที่ปนเปื้อนบนพื้นผิวสัมผัสโดยใช้สารสกัดจากพืชตระกูลขิง. [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์]. คลังปัญญา. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. <http://kb.psu.ac.th/psukb/handle/2010/9720>
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. (2542). *วิทยาศาสตร์เส้นใย*. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมศักดิ์ ขวาลาวณีย์. (2543). วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกส์. *วารสารศิลปกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*. 8(2), 9-16.
- สรिता ปิ่นมณี. (2558). การพัฒนาเส้นใยเฮมพ์สู่พืชเศรษฐกิจในประเทศไทย. <http://www.nstda.or.th/nac2015/download/presentation/April2/CC404-Sarita.pdf>
- อภิชาติ สนธิสมบัติ. (2545). *กระบวนการทางเคมีสิ่งทอ*. คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล.
- อภิชาติ สนธิสมบัติ. (2556). สมบัติของเส้นใยสิ่งทอ. http://www.en.rmutt.ac.th/prd//2013intro_cotton_flax_wool_silk.pdf
- อุษารัตน์ รัตนคำนวน. (2557). *วิทยาศาสตร์เส้นใยและผ้า*. http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/u_ratanakamnuan/IC%20361%20วิทยาศาสตร์เส้นใยและผ้า1-57.pdf
- Ali, A., Shaker, K., Nawab, Y., Jabber, M., Hussain, T., Miliaty, J., & Baheti, V. (2018). Hydrophobic treatment of natural fibers and their composites—a review. *Journal of Industrial Textiles*. 47(8), 2153-2183. <https://doi.org/10.1177/1528083716654468>

- Andler, R., Pino, V., Moya, F., Soto, E., Valdés, C., & Andreeßen, C. (2021). Synthesis of poly-3-hydroxybutyrate (PHB) by *Bacillus cereus* using grape residues as sole carbon source. *International Journal of Biobased Plastics*. 3(1), 98–111.
<https://doi.org/10.1080/24759651.2021.1882049>
- Aran, A. (2007). *Manufacturing properties of engineering materials: Lecture notes*.
<https://www2.isikun.edu.tr/personel/ahmet.aran/mfgprop.pdf>
- Ardelean, L., Reclaru, L., Bortun, C.M., & Rusu, L.C. (2015). Assessment of dental alloys by different methods. In Aliofkhazraei, M. (Ed.). *Superalloys*. IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/61115>
- Arifuzzaman Khan, G.M., Shahrear Palash, S.R., Shamsul Alam, M., Chakraborty, A.K., Gafur, M.A., & Terano, M. (2012). Isolation and characterization of betel nut leaf fiber: Its potential application in making composites. *Polymer Composites*. 33(5), 764–772.
<https://doi.org/10.1002/pc.22204>
- Asim, M., Jawaid, M., Saba, N., Nasir, M., & Sultan, M.T.H. (2017). Processing of hybrid polymer composites–A review. In Thakur, V.K., Thakur, M.K., & Gupta, R.K. (Eds.). *Hybrid polymer composite materials: Processing* (pp. 1–22). Woodhead Publishing.
- Atif, R., Khaliq, J., Combrinck, M., Hassanin, A.H., Shehata, N., Elnabawy, E., & Shyha, I. (2020). Solution blow spinning of polyvinylidene fluoride based fibers for energy harvesting applications: A review. *Polymers*. 12(6), 1–29. <https://doi.org/10.3390/polym12061304>
- Baerdemaeker, J.D., & Vleurinck, J. (2017). *An introduction to metal fiber technology*.
<https://www.bekaert.com>
- Bahadur, P., & Sastry, N.V. (2005). *Principles of polymer science* (2nd ed). Alpha Science International.
- Bahrami, S.H., & Mirzaie, Z. (2011). Polypropylene/modified nanoclay composite–Processing and dyeability properties. *World Applied Sciences Journal*. 13(3), 493–501.
- Baird, D.G. (2001). Polymer processing. In Meyers, R.A. (Ed.). *Encyclopedia of physical science and technology: Polymers* (3rd ed., pp. 611–643). Academic Press.
- Bhatt, P., & Goe, A. (2017). Carbon fibres: Production, properties and potential use. *Material Science Research India*. 14(1), 52–57. <https://doi.org/10.13005/msri/140109>
- Bier, M.C., Kohn, S., Stierand, A., Grimmelsmann, N., Homburg, S.V., Rattenholl, A., & Ehrmann, A. (2017). Investigation of eco-friendly casein fibre production methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 254, 1–4.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/254/19/192004>

- Bilisik, K. (2021). Aramid fiber reinforced composites. In Kuruvilla, J., Oksman, K., Gejo, G., Wilson, R., & Appukuttan, S. (Eds.). *Fiber reinforced composites: Constituents, compatibility, perspectives, and applications* (pp. 515–559). Woodhead Publishing.
- Brown, A.E., & Reinhart, K.A. (1971). Polyester fiber: From its invention to its present position. *Science*. 173(3994), 287–293.
- Cardamone, J.M., Nuñez, A., Garcia, R.A., & Ramos, M.A. (2009). Characterizing wool keratin. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2009, 147175.
<https://doi.org/10.1155/2009/147175>
- Case, J., Chilver, L., & Ross, C.T.F. (1999). *Strength of materials and structures* (4th ed.). John Wiley & Sons Inc.
- Chavan, R.B., & Patra, A.K. (2004). Development and processing of lyocell. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*. 29, 483–492.
- Clauss, B., & Schawaller, D. (2006). Modern aspects of ceramic fiber development. *Advances in Science and Technology*. 50(1), 1–8.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.50.1>
- Cox, R. (2005). Acrylic fibres. In McIntyre, J.E. (Ed.). *Synthetic fibres: Nylon, polyester, acrylic, polyolefin* (pp. 167–231). Woodhead Publishing.
- Cycleback, D. (2015). *Identifying common materials in antiques: A pocket guide*. LuLu.
- Dai, X.Q., & Li, Y. (2006). Fiber mechanics. In Li, Y., & Dai, X.Q. (Eds.). *Biomechanical engineering of textiles and clothing* (pp. 21–34). Woodhead Publishing.
- Das, S., Rahman, M., & Hasan, M. (2018). Physico-mechanical properties of pineapple leaf and banana fiber reinforced hybrid polypropylene composites: Effect of fiber ratio and sodium hydroxide treatment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 438(1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/438/1/012027>
- Deopura, B.L. (2008). Polyamide fibers. In Deopura, B.L., Alagirusamy, R., Joshi, M., & Gupta, B. (Eds.). *Polyesters and polyamides* (pp. 41–60). Woodhead Publishing.
- Devaki, E., & Sangeetha, K. (2017). Extraction and characterisation of natural cellulosic husk fibre *Areca catechul*. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*. 5, 1468–1472.
- Dugan, J.S. (2001). Novel properties of PLA fibers. *International Nonwovens Journal*. 10(3), 29–33. <https://doi.org/10.1177/15589250010S-01000308>
- Elmaaty, T.A., El-Taweel, F., Elsis, H., & Okubayashi, S. (2018). Water free dyeing of polypropylene fabric under supercritical carbon dioxide and comparison with its aqueous analogue. *The Journal of Supercritical Fluids*. 139, 114–121.
<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.05.018>

- Fan, Q., Ugbohue, S.C., Wilson, A.R., Dar, Y.S., & Yang, Y. (2003). Nanoclay-modified polypropylene dyeable with acid and disperse dye. *AATCC Review*. 3(6), 25–28.
- Gillert, R. (2010). Inorganic mineral materials for insulation in buildings. In Hall, M.R. (Ed.). *Materials for energy efficiency and thermal comfort in building* (pp. 193–228). Woodhead Publishing.
- Goswami, B.C., Anandjiwala, R.D., & Hall, D.M. (2004). *Textile sizing*. Marcel Dekker.
- Güven, O., Monteiro, S.N., Moura, E.A.B., & Drelich, J.W. (2016). Re-emerging field of lignocellulosic fiber-polymer composites and ionizing radiation technology in their formulation. *Polymer Reviews*. 56(4), 702–736.
<https://doi.org/10.1080/15583724.2016.1176037>
- Hasan, Z. (2020). *Tooling for composite aerospace structures: Manufacturing and applications*. Butterworth-Heinemann.
- Hatch, K.L. (1993). *Textile science*. West Publishing.
- Havelka, K.O. (2000). Specialty polymers: Diverse properties and applications. In Havelka, K.O., & McCormick, C.L. (Eds.). *Specialty monomers and polymers: Synthesis, properties, and applications* (pp. 2–10). American Chemical Society.
- Hedge, R.R., Dahiya, A., & Kamath, G. (2004). *Nylon fibers*.
<http://www.engr.utk.edu/mse/textiles/nylon%20fibers.htm>
- Hennicke, H.W., & Hesse, A. (1991). Traditional ceramics. In Brook, R.J. (Ed.). *Concise encyclopedia of advanced ceramic materials* (pp. 488–494). Pergamon Press.
- Houtman, R. (2015). Materials used for architectural fabric structures. In Llorens, L.I. (Ed.). *Fabric structure in architecture* (pp. 101–120). Woodhead Publishing.
- Hulle, A., Kadole, P., & Katkar, P. (2015). Agave americana leaf fibers. *Fibers*. 3, 64–75.
<https://doi.org/10.3390/fib3010064>
- Iqbal, Z., & Goyal, A. (2010). Carbon nanotubes/nanofibers and carbon fibers. In Xanthos, M. (Ed.). *Functional fillers for plastics* (2nd ed., pp. 175–193). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Islam, M.T., Rahman, M., & Mazumder, N. (2020). Polymers for textile production. In Shabbir, M., Ahmed, S., & Sheikh, J.N., (Eds.). *Frontiers of textile materials: Polymers, nanomaterials, enzymes, and advanced modification techniques* (pp. 15–39). Scrivener Publishing.
- Janarthanan, M. (2013). Soya protein fibre for textile applications. *Indian Textile Journal*. 123(4), 23–25.
- Jiang, X., Bai, Y., Chen, X., & Liu, W. (2020). A review of raw materials, commercial production and properties of lyocell fiber. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 5(1), 16–25.
<https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.03.002>

- Johnson, R. (2015). *Hemp as agricultural commodity*.
<https://www.fas.org/sgp/crs/misc/RL32725.pdf>
- Joshi, H.D., Joshi, D.H., & Patel, M.G. (2010). Dyeing and finishing of lyocell union fabrics: An industrial study. *Coloration technology*. 126(4), 194–200.
<https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2010.00248.x>
- Kadivar, M., Gauss, C., Ghavami, K., & Savastano, H., Jr. (2020). Densification of bamboo: State of the art. *Materials*. 13(19), 4346. <https://doi.org/10.3390/ma13194346>
- Kamble, A., & Kulkarni, V. (2017). *A text book of metallurgy: Properties and applications of ferrous and non-ferrous alloys*. Harshal Publication.
- Karmakar, S.R. (1999). *Chemical technology in the pre-treatment processes of textiles, Vol 12*. Elsevier Science.
- Keiser, S.J., & Garner, M.B. (2012). *Beyond design: The synergy of apparel product development* (3rd ed.). Fairchild Books.
- Kind, S., Neubauer, S., Becker, J., Yamamoto, M., Völkert, M., Abendroth, Gv., Zelder, O., & Wittmann, C. (2014). From zero to hero – Production of bio-based nylon from renewable resources using engineered *Corynebacterium glutamicum*. *Metabolic Engineering*. 25, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2014.05.007>
- Kozlowski, R., Baraniecki, P., & Barriga-Bedoya, J. (2005). Bast fibres (flax, hemp, jute, ramie, kenaf, abaca). In Blackburn, R.S. (Ed.). *Biodegradable and sustainable fibres* (pp. 36–88). Woodhead Publishing.
- Küster, K., Barburski, M., Lomov, S.V., & Vanclooster, K. (2018). Metal fibers–steel. In Mahltig, B., & Kyosev, Y. (Eds.). *Inorganic and composite fibers: Production, properties, and applications* (pp. 219–241). Woodhead Publishing.
- Lahiri, A.K. (2017). *Applied metallurgy and corrosion control*. Springer.
- LaNieve, H.L. (2006). Cellulose acetate and triacetate fibers. In Lewin, M. (Ed.). *Handbook of fiber chemistry* (3rd ed., pp. 774–808). CRC Press.
- Lazim, Y., Salit, S.M., Zainudin, E.S., Mustapha, M., & Jawaid, M. (2014). Effect of alkali treatment on the physical, mechanical, and morphological properties of waste betel nut (*Areca catechu*) husk fibre. *Bioresources*. 9(4), 7721–7736.
<https://doi.org/10.15376/BIORES.9.4.7721-7736>
- Liu, W., Ma, J., Yao, X., & Fang, R. (2019). Inorganic fibers for biomedical engineering applications. In Grumezescu, V., & Grumezescu, A.M. (Eds.). *Materials for biomedical engineering: Bioactive materials, properties, and applications* (pp. 1–32). Elsevier.

- McAdam, B., Brennan Fournet, M., McDonald, P., & Mojicevic, M. (2020). Production of polyhydroxybutyrate (PHB) and factors impacting its chemical and mechanical characteristics. *Polymers*. 12(12), 2908. <https://doi.org/10.3390/polym12122908>
- McCarty, N. (2019). *Spiber's biomaterials stack: From new production facility to fashion runway*. <https://synbiobeta.com/spibers-biomaterials-stack-from-new-production-facility-to-fashion-runway/>
- McKeen, L. (2018). *The Effect of sterilization methods on plastics and elastomers* (4th ed.). William Andrew.
- Mckenna, K.F. (2012). *The case for casein fiber: Local design solutions for sustainability in manufacturing*. [Master degree] University of Kansas.
- Medieta, C.M., Vallejos, M.E., Felissia, F.E., Chinga-Carrasco, G., & Area, M.C. (2019). Review: Bio-polyethylene from wood wastes. *Journal of Polymers and the Environment*. 28, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01582-0>
- Meola, C., Boccardi, S., & Carlomagno, G. (2015). *Infrared thermography in the evaluation of aerospace composite materials: Infrared thermography to composites*. Woodhead Publishing.
- Mirjalili, F., Moradian, S., & Ameri, F. (2013). Enhancing the dyeability of polypropylene fibers by melt blending with polyethylene terephthalate. *The Scientific World Journal*. 2013, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2013/468542>
- Morschbacker, A. (2009). Bio-ethanol based ethylene. *Journal of Macromolecular Science Part C: Polymer Reviews*. 49(2), 79–84. <https://doi.org/10.1080/15583720902834791>
- Nair, A.M., Annamalai, K., Kannan, S.K., & Kuppusamy, S. (2014). Characterization of polyhydroxyalkanoates produced by *Bacillus subtilis* isolated from soil samples. *Malaya Journal of Biosciences*. 1(1), 8–12.
- Nigay, P.M., Nzihou, A., White, C.E., & Soboyejo, W.O. (2017). Structure and properties of clay ceramics for thermal energy storage. *Journal of the American Ceramic Society*. 100(10), 1–12. <https://doi.org/10.1111/jace.15014>
- Nirenberg, R.P. (1960). *Pleating process for fabrics of thermoplastics fibers* (US Patent No 2,924,361). US Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US2924361A/en>
- O'Brien, C., McBride, A., Zaghi, A.E., Burke, K.A., & Hill, A. (2017). Mechanical behavior of stainless steel fiber-reinforced composites exposed to accelerated corrosion. *Materials*. 10(7), 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma10070772>
- Ostadfar, A. (2016). *Biofluid mechanics: Principles and applications*. Academic Press.

- Paridah, T., Basher, A.B., SaifulAzry, S., & Ahmed, Z. (2011). Retting process of some bast plant fibres and its effect on fibre quality: A review. *Bioresources*. 6(4), 5260–5281.
<https://doi.org/10.15376/BIORES.6.4.5260-5281>
- Park, J.B. (1979). *Biomaterials: An introduction*. Plenum Press.
- Patil, K. (2018). Lotus fiber: A new fact in textile and fashion. *International Journal of Humanities and Social Science Invention*. 7(12), 71–75.
- Peng, H. (2013). Brazing of oxide, carbide, nitride and composite ceramics. In Sekulić, D.P. (Ed.). *Advances in brazing* (pp. 194–220). Woodhead Publishing.
- Poopakdee, M., & Thammawichai, W. (2021). Improvement on cost–performance ratio of fiberglass/carbon fiber hybrid composite. *Journal of Metals, Materials and Minerals*. 31(1), 35–43. <https://doi.org/10.14456/jmmm.2021.5>
- Popluechai, S., Onto, S., & Eungwanichchayapant, P.D. (2007). Relationships between some Thai cultivars of pineapple (*Ananas comosus*) revealed by RAPD analysis. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 29(6), 1491–1497.
- Qin, Y. (2016). *Medical textile materials*. Elsevier.
- Reddy, C.S.K., Ghai, R., Rashmi, & Kalia, V.C. (2003). Polyhydroxyalkanoates: An overview. *Bioresource Technology*. 87(2), 137–146.
[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00212-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00212-2)
- Reddy, N., & Yang, Y. (2005). Properties and potential applications of natural cellulose fibers from cornhusks. *Green Chemistry*. 4, 190–195. <https://doi.org/10.1039/B415102J>
- Reisch, M. (1999). What’s that stuff?. *Chemical & Engineering News*. 77(7), 70.
- Richerson, D.W. (1982). *Modern ceramic engineering: Properties, processing, and use in design*. Marcel Dekker.
- Römer, L., & Scheibel, T. (2008). The elaborate structure of spider silk structure and function of a natural high performance fiber. *Prion*. 2(4), 154–161.
<https://doi.org/10.4161/pri.2.4.7490>
- Ryder, K., Ali, M.Z., Came, A., & Billakanti, J. (2017). The potential use of dairy by-products for the production of nonfood biomaterials. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 47(8), 621–642. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1322875>
- Sahinbaskan, B., Koçak, E.D., Merdan, N., & Akalin, M. (2017). Dyeing of polypropylene blends by using microwave energy. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 12(2), 20–27.
<https://doi.org/10.1177/155892501701200203>
- Sakurada, I. (1985). *Polyvinyl alcohol fibers*. Marcel Dekker.
- Sakurada, I., & Okaya, T. (2006). Vinyl fibers. In Lewin, M. (Ed.). *Handbook of fiber chemistry* (3rd ed., pp. 261–330). CRC Press.

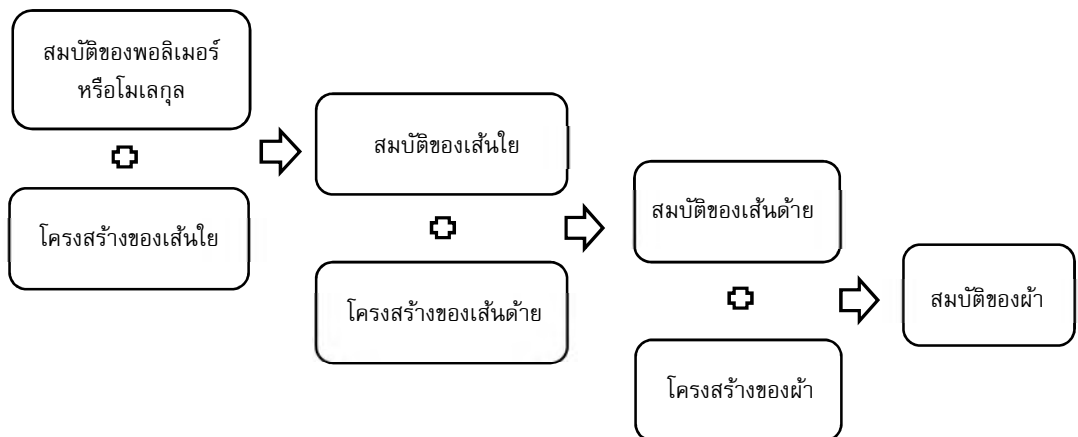
- Salamon, D. (2014). Advanced ceramics. In Shen, J.Z., & Kosmač, T. (Eds.). *Advanced ceramics for dentistry* (pp. 103–122). Butterworth–Heinemann.
- Saracci, R. (1977). Asbestos and lung cancer: An analysis of the epidemiological evidence on the asbestos–smoking interaction. *International Journal of Cancer*. 20(3), 323–331.
- Scott, A. (2014). Spider silk poised for commercial entry. *Chemical & Engineering News*. 92(9), 24–27.
- Siddoway, D. (2015). *How do wool and other fabrics shrink?*
<https://www.quora.com/How-do-wool-and-other-fabrics-shrink>
- Singh, A. (2017). A different approach towards textile by pineapple fiber. *Asian Journal of Multidisciplinary Studies*. 5(9), 107–108.
- Singh, M., Patel, S.K., & Kalia, V.C. (2009). *Bacillus subtilis* as potential producer for polyhydroxyalkanoates. *Microbial Cell Factories*. 8, 38.
<https://doi.org/10.1186/1475-2859-8-38>
- Siracusa, V., & Blanco, I. (2020). Bio–polyethylene (Bio–PE), bio–polypropylene (Bio–PP) and bio–poly(ethylene terephthalate) (Bio–PET): Recent developments in bio–based polymers analogous to petroleum–derived ones for packaging and engineering application. *Polymers*. 12(8), 1641. <https://doi.org/10.3390/polym12081641>
- Smole, M.S, Hribernik, S., Kleinschek, K.S., & Kreže, T. (2013). Plant fibres for textile and technical applications. In Grundas, S., & Stepniewski, A. (Eds.). *Advances in agrophysical research* (pp. 369–397). IntechOpen.
- Srisuk, T., Charoenlarp, K., & Kampeerapapun, P. (2024). Utilization of waste natural fibers mixed with polylactic acid (PLA) bicomponent fiber: Incorporating kapok and cattail fibers for nonwoven medical textile applications. *Polymers*. 16(1), 76.
<https://doi.org/10.3390/polym16010076>
- Sulaeman, A., Dungani, R., Nurudin, N., Hartati, S., Karliati, T., Aditiawati, P., Hadiyane, A., Suhaya, Y., & Sulistyono. (2018). Review on quality enhancement of bamboo utilization: Preservation, modification and applications. *Asian Journal of Plant Sciences*. 17, 1–18.
<https://doi.org/10.3923/ajps.2018.1.18>
- Sun, Y.C., Cheng, Z.H., & Zhang, Y.M. (2011). Analysis on tensile properties of stainless–steel fiber and yarn quality. *Advanced Materials Research*. 399–401, 176–179.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.399-401.176>
- Suwansaard, A., Kongpun, T., & Khemkhao, M. (2022). Properties of mortars mixed with polystyrene and hemp fiber wastes. *Applied Science and Engineering Progress*. 15(1), 1–11.
<https://doi.org/10.14416/j.asep.2021.09.004>

- Tasnim, N. (2019). Eco-friendly manufacturing process of casein fiber with it's sustainable features & comfortable uses. *American Journal of Environmental Engineering*. 9(2), 31–35.
<https://doi.org/10.5923/j.ajee.20190902.02>
- Trossarelli, L. (n.d.) *The history of nylon*. <http://www.caimateriali.org/?id=32>
- Udomkichdech, W., & Chiarakorn, S. (2001). Factors to predict the fibrillation tendency of lyocell fibers. *Journal of Scientific Research Chulalongkorn University*. 26(1), 49–56.
- Vasiliev, V.V., & Morozov, E.V. (2018). *Advanced mechanics of composite materials and structures* (4th ed., pp. xvii–xxv). Elsevier.
- Virta, R.L. (2002). *Asbestos: Geology, mineralogy, mining, and uses*.
<https://pubs.usgs.gov/of/2002/of02-149/of02-149.pdf>
- Vynias, D. (2011). *Soybean fibre: A novel fibre in the textile industry, soybean-biochemistry, chemistry and physiology*. In Ng, T.B. (Ed.). *Soybean – Biochemistry, chemistry and physiology* (pp. 461–494). Intechopen.
- Wallenberger, F.T., Watson, J.C., & Li, H. (2001). Glass fibers In Miracle, D.B., & Donaldson, S.B. (Eds.). *ASTM Handbook Vol. 21, composites* (pp. 27–34), American Technical Publishers Ltd.
- Wang, B., Sharma-Shivappa, R.R., Olson, J.W., & Khan, S.A. (2013). Production of polyhydroxybutyrate (PHB) by *Alcaligenes latus* using sugarbeet juice. *Industrial Crops and Products*. 43, 802–811. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.08.011>
- Yabune, H., & Uchida, M. (1983). *Process for preparation of cellulose acetate* (US patent No 4,415,734). US Patent and Trademark Office.
<https://patents.google.com/patent/US4415734A/en>
- Yiğit, E.A., & Tekler, M. (2011). Disperse dyeability of polypropylene fibres via microwave and ultrasonic energy. *Polymer and Polymer Composites*. 19(8), 711–716.
https://doi.org/10.1177/09_6739111101900812
- Yu, G. (2010). *Interview with Mr. Ganggang Yu*.
<http://www.fibre2fashion.com/interviews/face2face/shanghai-tenbro-bamboo-textile-co-ltd/mr-ganggang-yu/302-1/>
- Yuan, J.M., Feng, Y.R., & He, L.P. (2016). Effect of thermal treatment on properties of ramie fibers. *Polymer Degradation and Stability*. 133, 303–311.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.09.012>
- Zawrah, M.F., Gado, R.A., Feltin, N., Ducourtieux, S., & Devoille, L. (2016). Recycling and utilization assessment of waste fired clay bricks (Grog) with granulated blast-furnace slag for geopolymer production. *Process Safety and Environmental Protection*. 103, 237–251.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.08.001>

บทที่ 2

เส้นด้ายและผ้า

การขึ้นรูปวัสดุสิ่งทออาจใช้กระบวนการถัก ทอหรืออัดเข้าด้วยกันเพื่อผลิตโครงสร้างแบบสองหรือสามมิติ โดยทั่วไป เส้นใยต้องผ่านกระบวนการปั่นเป็นเส้นด้าย (yarn) ก่อนทำเป็นผืนผ้า (fabric) ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของเส้นใย เส้นด้ายและผ้า (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของเส้นใย เส้นด้ายและผ้า

ที่มา: ดัดแปลงจาก Long et al., 2011