

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุนาโน

วัสดุนาโน (nanomaterials) เป็นวัสดุที่กำลังดึงดูดความสนใจของนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกในช่วงทศวรรษนี้อย่างมากมาย และเป็นไปด้วยความรวดเร็วอย่างที่วัสดุอื่นๆ ไม่เคยได้รับมาก่อน สาเหตุสำคัญอาจจะเนื่องมาจากศักยภาพของวัสดุนาโนที่สามารถทำการปฏิวัติงานด้านวัสดุศาสตร์ให้เกิดขึ้นและนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมหาศาล โดยผ่านโครงสร้างในระดับอะตอม ซึ่งเป็นตัวควบคุมสมบัติทางด้านวิศวกรรมสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมี เช่น สภาพแม่เหล็ก ตัวกระตุ้นปฏิกิริยา (catalysis) หรือพฤติกรรมทางแสง เป็นต้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีด้านต่างๆ เช่น อิเล็กทรอนิกส์ เซรามิกส์ ตัวเก็บข้อมูลแม่เหล็ก (magnetic data storage) รวมทั้งพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุกลุ่มพลาสติกยิ่งยวด (superplastic) ตลอดจนวิทยาศาสตร์และวิทยาการด้านอื่นๆ มากมาย การพัฒนาโครงสร้างนาโนของวัสดุก่อให้เกิดคำถามที่เพิ่มขึ้นอย่างมากมายว่าทำคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุจึงเปลี่ยนแปลงไป เมื่อลดสเกลโครงสร้างจากระดับไมโครสเกล (10^{-6} เมตร) ลงสู่ระดับนาโนสเกล (10^{-9} เมตร) เช่น มีค่าความเครียดเชิงกลสูงขึ้น (mechanical strength) การกระจายแสงเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนจำเพาะสูงขึ้นและสภาพความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไป

2.2 นาโนซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์เป็นวัสดุในกลุ่มโลหะออกไซด์ที่มีการนำมาใช้งานในรูปแบบของวัสดุนาโนตัวอย่างการใช้นาโนซิงค์ออกไซด์ ได้แก่ การใช้งานในกลุ่มของอิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์ตรวจจับแก๊สสำหรับการยับยั้งแบคทีเรียในทางทันตกรรม [3] ใช้ในการบำบัดสิ่งแวดล้อมเนื่องจากมีสมบัติที่ดีในด้านการดูดซับแสง และสมบัติด้านการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการ นอกจากนี้ยังใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ใช้กับคนโดยตรงคือเครื่องสำอางโดยเฉพาะอย่างยิ่งโลชั่นกันแดดที่เริ่มนิยมนำซิงค์ออกไซด์ขนาดนาโนมาใช้เป็นองค์ประกอบ เนื่องจากมีระดับความสามารถในการป้องกันรังสียูวีได้ในระดับเดียวกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์ขนาดใหญ่กว่านาโน แต่ข้อได้เปรียบที่เห็นได้ชัดของโลชั่นกันแดดที่มีอนุภาคนาโนเป็นองค์ประกอบคือการส่งผ่านแสงได้ดีกว่า ทำให้ไม่ทึบ ร่องรอยให้เป็นเป็นสีขาวอย่างชัดเจนบนผิวเมื่อเทียบกับโลชั่นกันแดดที่ใช้อนุภาคขนาดใหญ่ จากเหตุที่วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ได้รับความสนใจในการใช้ประโยชน์มากขึ้น ทำให้เกิดการผลิตในภาคอุตสาหกรรมมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งผลที่ตามมาคือการศึกษาด้านความเป็นพิษของนาโนซิงค์ออกไซด์ในแง่มุมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านสิ่งแวดล้อมหรือด้านความเป็นพิษต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิต

2.3 ความรู้เบื้องต้นของซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ เป็นสารประกอบที่สามารถพบเห็นได้ในธรรมชาติ และสามารถเตรียมขึ้นมาให้บริสุทธิ์ได้ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) นอกจากนี้ ซิงค์ออกไซด์ มีช่องว่างแถบพลังงาน (Band-gap energy) ที่อุณหภูมิห้องกว้างประมาณ 3.37 eV เป็นสารที่มีสมบัติพิเศษทางแสง โดยเรืองแสงได้และมีค่าความต่างศักย์ต่ำ มีความยาวคลื่นสั้นในช่วงแสงสีเขียวยถึงฟ้า จึงนำไปใช้เป็นไดโอดที่เปล่งแสงได้

สารซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal structure) โดยมีสมบัติทางกายภาพบางประการแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติกายภาพบางประการของสารซิงค์ออกไซด์ [4]

สมบัติทางกายภาพ	ลักษณะ
สูตรโมเลกุล	ZnO
ลักษณะและสี	ผงสีขาวหรือขาวเหลือง
น้ำหนักโมเลกุล	81.389
ความหนาแน่น	5.600 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิห้อง	5.643 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว (Melting Point)	1800 องศาเซลเซียส
จุดเดือด (Boiling Point)	2248 องศาเซลเซียส
ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat)	0.125 แคลลอรี่/กรัม

2.4 บทบาทของนาโนซิงค์ออกไซด์ [5]

2.4.1 ด้านเภสัชกรรม

นาโนซิงค์ออกไซด์เป็นสารที่สามารถเติมในอาหารได้โดยมีความปลอดภัยสูง สามารถใช้ได้ทั้งในอาหารคนและอาหารสัตว์ เนื่องจากธาตุสังกะสีเป็นธาตุที่จำเป็นต่อร่างกาย โดยปกติร่างกายผู้ใหญ่ต้องการสังกะสีวันละ 15 มิลลิกรัม และเพิ่มขึ้นเป็น 25 มิลลิกรัม ในสตรีที่ให้นมบุตร ซิงค์ออกไซด์เป็นยาสมานแผล ลดการอักเสบ และยับยั้งแบคทีเรียได้ดี โดยนำมาใช้เป็นยาสมานผิว และรักษาโรคติดเชื้อที่ผิวหนังบางชนิด เช่น โรคเรื้อนกวาง โรคผิวหนังเป็นตุ่มพุพองจากเชื้อแบคทีเรีย โรคกลากเกลื้อน ฝี อาการคันตามผิวหนังและผิวหนังระคายเคือง โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ใช้จะอยู่ประมาณ 10 ถึง 20 นาโนเมตร จากการสังเกตภายใต้กล้องกำลังขยายสูง พบว่ามีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียด มีความบริสุทธิ์สูง มีสีขาวและไม่เปลี่ยนสี

2.4.2 ด้านเครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์กันแดด

2.4.2.1 นาโนซิงค์ออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงในการป้องกันรังสี UVA และ UVB [1] นอกจากนั้นยังมีอนุภาคเล็กละเอียด มีความบริสุทธิ์สูงและปลอดภัย เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์กันแดด สำหรับผิวเพื่อปกป้องรังสี UV ซิงค์ออกไซด์มีความปลอดภัยและอ่อนโยนต่อร่างกาย โดยได้รับการยืนยันจาก Food and Drug Administration (FDA) ว่าเป็นสารกันแดดที่เป็นส่วนผสมในประเภทผลิตภัณฑ์ดูแลผิวซึ่งสามารถป้องกันได้ทั้ง UVA และ UVB

2.4.2.2 อนุภาคปกติของซิงค์ออกไซด์ จะมีสีขาวเมื่อนำมาทาลงบนผิว ดังนั้นซิงค์ออกไซด์ จึงไม่นิยมนำมาใช้ในการเป็นครีมหรือผลิตภัณฑ์กันแดดสำหรับผิวแต่เมื่อมีขนาดของอนุภาคเป็นนาโนจะไม่ปรากฏสีขาวให้เห็นจึงได้นำมาใช้เป็นครีมทาผิว อย่างไรก็ตาม นาโนซิงค์ออกไซด์ได้รับการทดสอบ Australian commonwealth scientific & Industrial research Organization (ACSIRO) พบว่านาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมของครีมกันแดดจะแสดงสมบัติ โปร่งใส และไม่มีสีหลังจากที่ทานาโนซิงค์ออกไซด์จึงเหมาะที่จะนำมาผสมเป็นสารกันแดดในเครื่องสำอาง

2.4.3 อุตสาหกรรมอาหารสัตว์และยา

อาหารสัตว์ที่มีนาโนซิงค์ออกไซด์จะให้ผลดีกว่าการเติมไมโครซิงค์ออกไซด์ โดยจะทำให้ อัตราการดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้สูงกว่า ทำให้ลดปริมาณการเติมซิงค์ออกไซด์ในอาหารได้

2.4.4 อุตสาหกรรมการผลิตยาง

นาโนซิงค์ออกไซด์ถูกใช้เป็นสารลดแรงตึงผิว ช่วยในการยืดอายุการใช้งานของยางและใช้ ในการผลิตยางที่สามารถป้องกันรอยขีดข่วน

2.4.5 อุตสาหกรรมเซรามิก

ปกติในอุตสาหกรรมเซรามิกจะใช้ซิงค์ออกไซด์ในการให้สีขาวเพราะจากการใช้ นาโนซิงค์ออกไซด์พบว่าสามารถช่วยลดอุณหภูมิการเผาเซรามิกให้เหลือเพียง 400 ถึง 600 เซลเซียส โดย หลังการเผาพบว่าผิวของเซรามิกที่ได้มีความมันวาวราวคล้ายกับกระจก

2.4.6 อุตสาหกรรมสิ่งทอและอุตสาหกรรมเคมีอื่นๆ

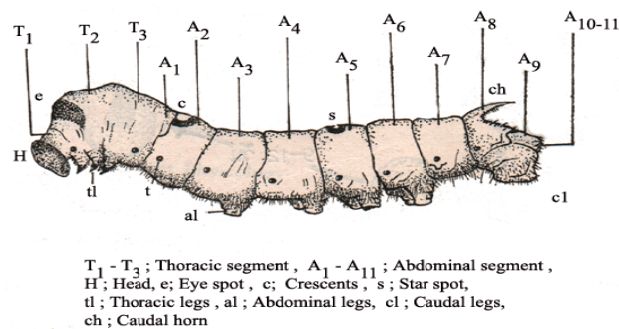
ผลิตสิ่งทอป้องกันแบคทีเรียและเชื้อราการกำจัดกลิ่นของเสื้อผ้า เสื้อผ้าทำความสะอาด ตัวเองผลิตเส้นใยและสิ่งทอที่สามารถป้องกันรังสี UV ได้

2.4.7 อุตสาหกรรมสี

นาโนซิงค์ออกไซด์เป็นสารป้องกันไฟฟ้าสถิตตัวใหม่ ซึ่งมีความสามารถเป็นสารกึ่งตัวนำ การเติมนาโนซิงค์ออกไซด์ในเรซินจะสามารถนำมาใช้ป้องกันไฟฟ้าสถิตได้ทั้งยังสามารถผลิตสีป้องกันรังสี UV สีที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้

2.5 ไหม

ไหมเป็นแมลงที่มีการเจริญเติบโตและเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบสมบูรณ (Holometabolous หรือ complete metamorphosis) คือ มีระยะไข่ (egg) หนอน (larva) ดักแด้ (pupa) และ ตัวเต็มวัย (adult) ซึ่ง ในแต่ละระยะจะมีช่วงการเจริญเติบโตและมีลักษณะที่แตกต่างกันไปไหม (Bombyx mori L.) สามารถแบ่งชั้น ได้ดังนี้ Phylum Arthropoda Class Insecta or Hexapoda Sub-class Pterygota Division Endopterygota Order Lepidoptera Family Bombycidae ไข่ของผีเสื้อหนอนไหมมีลักษณะค่อนข้างกลม เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กมาก น้ำหนักไข่ 2,000 ฟองหนักเพียง 1 กรัม ไข่ไหม พันธุ์ของประเทศยุโรปมักมีขนาดค่อนข้างใหญ่และหนักกว่าพันธุ์เอเชีย รูปร่างคล้ายทรงไข่แบน เส้นยาว พระจันทร์ เป็นต้น พันธุ์ที่ให้รังไหมสีขาวมักมีไข่เป็นสีเหลืองซีด ๆ ส่วนพวกที่ให้ไหมสีเหลืองมักมีไข่สีเหลือง เข้ม ใน 2 กรณีดังกล่าว ไหมพันธุ์ญี่ปุ่นจะมีไข่สีเข้มกว่าไข่ของไหมพันธุ์จีน สำหรับไข่ที่อยู่ข้ามฤดูหนาว (มีการ พักตัว) ชนิด bivoltine และ univoltine ไข่จะมีสีเปลี่ยนแปลงไปกลายเป็นสีน้ำตาลเข้มหรือม่วงเข้มยิ่งขึ้น หลังจากวางไข่ได้ 2-3 วัน หนอนไหมที่ฟักออกมาจากไข่ไหม ๆ มักมีสีดำหรือน้ำตาลเข้ม หัวค่อนข้างใหญ่ ตามผิวลำตัวมีขนขึ้นปกคลุมทั่วไป เมื่อหนอนไหมเจริญเติบโตขึ้นเรื่อย ๆ ผืนหนังลำตัวจะเริ่มเรียบขึ้นและสี ผิวก็นวลขึ้น (นวลขึ้น) เนื่องมาจากการยืดออกของผืนหนังลำตัว (cuticle) อย่างรวดเร็ว รูปร่างจึงเหมือนกับหนอน ของแมลงชนิดอื่น คือมี หัว (head) อก (thorax) ท้อง (abdomen) และ มีขาเทียม (abdominal legs) อยู่ที่ ปล้องท้องปล้อง ที่ 3 - 6 และปล้องสุดท้าย (caudal legs) ผันระยะนี้จะยืดหยุ่น สามารถยืดออกได้เต็มที่ เป็นการรองรับการเจริญเติบโตของหนอนจากระยะหนึ่งสู่อีกระยะหนึ่ง ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบของหนอนไหม [6]

2.5.1 ชนิดของไหม

เส้นใยของไหมนั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตเชิงการค้าและอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี หนอนไหมที่ให้เส้นใย สามารถจำแนกได้ 4 ชนิด คือ

- ไหมกินใบหม่อน (Mulberry silkworms)
- ไหมอีรี (Eri silkworms)
- ไหมทาสาร์ (Tasar silkworms)
- ไหมมูกา (Muga silkworms)

ผลผลิตใยไหมร้อยละ 95 ของผลผลิตใยไหมทั่วโลก มาจากไหมกินใบหม่อน ส่วนใยไหมที่ได้จากไหมชนิดอื่น (ประมาณร้อยละ 5) มีการผลิตน้อยและใช้ประโยชน์เฉพาะบางพื้นที่เท่านั้น

2.5.1.1 ไหมกินใบหม่อน (Mulberry silkworms)

ไหมกินใบหม่อนเป็นแมลงชนิดหนึ่งที่มนุษย์เรารู้จักกันมาเป็นอาชีพนานกว่า 4,000 ปีมาแล้ว ตัวไหมที่ใช้เลี้ยงกันอยู่ถึงปัจจุบันนี้ มีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Bombyx mori* L. ซึ่งนักวิทยาศาสตร์เชื่อกันว่า เป็นไหมที่กลายพันธุ์มาจากไหมต้นกำเนิด *Bombyx* (*Theophila*) *mandarina* ตามปกติแล้ว *B. mandarina* มี haploid chromosome (n) อยู่ 27 และไข่ เมื่อเกิดการแยกตัวของ chromosome 1 ตัวในพ่อแม่โดยไม่ทราบสาเหตุ ทำให้มี haploid chromosome (n) เพิ่มขึ้นเป็น 28 กลายเป็นพันธุ์ไหมที่เรียกว่า *B. mori* มีการจำแนกไหมจำแนกออกเป็นพันธุ์ต่าง ๆ ได้อีกหลายชนิด โดยเรียกชื่อไปตามท้องถิ่นที่มีการเลี้ยงไหมชนิดนี้ เช่น พันธุ์ญี่ปุ่น พันธุ์จีน พันธุ์ยุโรป พันธุ์อินเดีย หรือตั้งชื่อไปตามพันธุ์ที่จำนวนการฟักออกตามธรรมชาติในรอบ 1 ปี เช่น ฟักออกปีละ 1 ครั้ง (univoltine) ฟักออกปีละ 2 ครั้ง (bivoltine) และฟักออกตลอดปี (multivoltine หรือ polyvoltine) นอกจากนี้อาจจำแนกเป็นชนิดโดยใช้จำนวนการลอกคราบของตัวหนอนไหมเป็นหลัก เช่น พวกที่ลอกคราบ 3 ครั้ง (trimolters) 4 ครั้ง (tetramolters) และ 5 ครั้ง (pentamolters) เส้นใยไหมที่ได้จากการกินใบหม่อนนี้มีลักษณะพิเศษคือ เส้นใยยาวติดต่อกันไม่ขาดเป็นช่วง และมีขนาดเท่ากัน จึงเหมาะสำหรับสาวด้วยเครื่องจักรในระดับอุตสาหกรรมไหมที่ได้จากการสาวนี้เรียกว่า ไหมดิบ (Raw silk)

2.5.1.2 ไหมอีรี (Eri silkworms)

ไหมป่าพันธุ์นี้ประกอบด้วย 2 สายพันธุ์ คือ *Philosamia eyrithia* เป็นพันธุ์ป่าดั้งเดิม และ *Philosamia ricini* เป็นพันธุ์ที่เพาะเลี้ยงในระดับท้องถิ่น กินใบละหุ่งเป็นอาหาร เนื่องจากเป็นไหมที่ชอบกินใบละหุ่งมากกว่าใบของพืชชนิดอื่น ไหมที่ได้จะมีสีขาวหรือสีแดงอิฐซึ่งนิยมเรียกกันว่า อีรี อย่างไรก็ตามเส้นไหมที่ได้มักไม่ติดต่อกันเป็นเส้นเดียวกัน เส้นไหมไม่สม่ำเสมอ ทำให้การสาวลำบาก ดังนั้น จึงมักเก็บรังไหมหลังจากที่ดักได้กลายเป็นผีเสื้อบินออกไปแล้วและนำไปปั่นเป็นเส้นด้าย หรือเป็นเส้นไหมถัก

2.5.1.3 ไหมทาสาร์ (Tasar silkworms)

ไหมพวกนี้จัดอยู่ในสกุล *Antheraea* และเป็นไหมป่าทุกสายพันธุ์ ตัวอย่างคือ พันธุ์จีน (Chinese tasar silkworm) ชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Antheraea pernyi* ถือว่าเป็นไหมป่าที่ให้เส้นไหมมากที่สุด รองลงมาจากไหมกินใบหม่อน พันธุ์อินเดีย (Indian tasar silkworm) ชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Antheraea mylitta* ซึ่งผลิตได้มาก รองลงมาจากพันธุ์จีน พันธุ์ญี่ปุ่น (Japanese tasar silkworm) ชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Antheraea Yamanai* นิยมเลี้ยงกันในญี่ปุ่นประเทศเดียวและให้เส้นไหมออกมาเป็นสีเขียว ทั้งไหมพันธุ์ญี่ปุ่นและพันธุ์จีนมักชอบกินใบโอ๊คและใบพืชสกุลช่างเคียงอีกหลายชนิดเป็นอาหาร ส่วนไหมพันธุ์อินเดียชอบกินใบ *Terminalia* sp. และใบไม้อื่นอีกหลายชนิด หนอนไหมดังกล่าวอาจเป็นพวก univoltine หรือ bivoltine ก็ได้ รังไหมป่าพวกนี้อาจนำไปสาวให้เป็นไหมดิบเช่นเดียวกับรังไหมพวกที่กินใบหม่อน

2.5.1.4 ไหมมูกา (Muga Silkworms)

เป็นไหมที่อยู่ในสกุลเดียวกันกับพวก tasar silkworms คือ *Antheraea assama* แต่ให้เส้นไหมที่มีสีเหลืองทองเป็นประกายสวยงาม คุณภาพเส้นไหมเหนียวมาก เป็นไหมที่เลี้ยงกันในเฉพาะแคว้นอัสสัมของอินเดียเท่านั้น ไหมพวกนี้จะกินใบพืชที่เรียก som (*Machilus bombycina*) และใบพืชอื่น ๆ อีกหลายชนิด ปริมาณเส้นไหมที่ผลิตได้ในแต่ละปีค่อนข้างน้อยและใช้ประโยชน์กันในแคว้นอัสสัมโดยเฉพาะ นอกจากนี้ยังมีไหม *Eriogyna pyretorum* ซึ่งต้องเลี้ยงกันในท้องที่แห้งแล้ง เช่นบนเกาะไหหลำของจีน เส้นไหมที่ได้นิยมนำมาใช้เป็นราวหรือสายเบ็ดตกปลา เป็นตัวไหมที่เลี้ยงด้วยใบ *Liquidambar formosan*

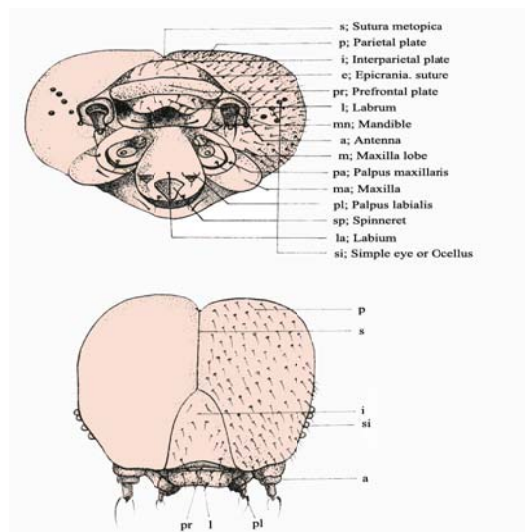
2.5.2 ลักษณะวิทยาและสรีรวิทยาของไหม

2.5.2.1 ลักษณะหนอนไหม

หนอนไหมประกอบด้วยส่วนหัว (Head) อก (thorax) และท้อง (abdomen) ลำตัวเป็นปล้อง ๆ มี 14 ปล้อง ส่วนอกมีขา 3 คู่ มีขาเทียมที่ส่วนท้อง 4 คู่ และ caudal leg อยู่ที่ส่วนปลายของลำตัวอีก 1 คู่ ส่วนผิวจะประกอบด้วยสาร chitin ซึ่งเป็นสารประกอบพวก nitrogenous polysaccharide ด้านข้างของลำตัวทั้ง 2 ข้างจะมีรูเล็ก ๆ ซึ่งใช้สำหรับหายใจเรียกว่า spiracles มีอยู่ 9 คู่

2.5.2.2 ส่วนประกอบภายนอกของหนอนไหม

ส่วนหัว หัวของหนอนไหมมีสีน้ำตาลดำ ประกอบด้วย ตาเดี่ยว (ocelli) ซึ่งอยู่ทางด้านข้างของส่วนหัว ข้างละ 6 ตา ส่วนของปาก ได้แก่ ริมฝีปากบน (labrum) กราม (mandible) ฟัน (maxillae) ริมฝีปากล่าง (labium) นอกจากนี้ยังมีหนวด (antenna) และท่อคายเส้นไหม (spinneret) หนอนไหมจะใช้ส่วนของกรามในการกัดกินใบหม่อน และใช้ maxillary palpus และ maxillary lobe เป็นอวัยวะรับกลิ่นและรส ดังภาพที่ 2.2



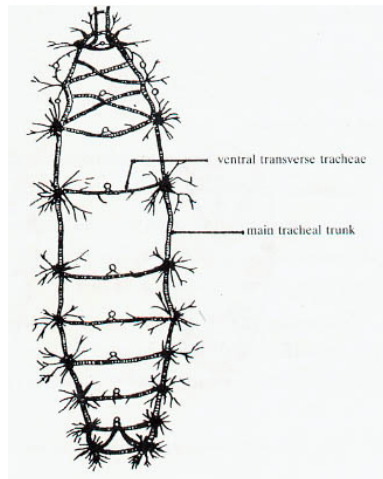
ภาพที่ 2.2 ส่วนหัวของหนอนไหม [6]

ส่วนนอก ส่วนนอกจะอยู่ระหว่างส่วนหัวและส่วนท้อง ประกอบด้วยปล้อง 3 ปล้อง แต่ละปล้องมีขาแท้ปล้องละ 1 คู่ ขาแท้คู่แรกจะเล็กที่สุด ส่วนปลายสุดของขาจะมีเล็บ ซึ่งใช้ในการจับอาหารกิน

ส่วนท้อง ประกอบด้วยปล้อง 11 ปล้อง ตั้งแต่ปล้องที่ 3 ถึงปล้องที่ 6 จะมีขาเทียมปล้องละ 1 คู่ ลักษณะขาเทียมไม่เป็นปล้อง แต่เป็นกล้ามเนื้อที่โป่งออกมา (muscular protuberance) ส่วนปลายขาจะมีรูปร่างคล้ายถ้วย โดยมีแผ่น chitin เล็ก ๆ (small chitin band) สีดำอยู่บริเวณขอบ ๆ เป็นรูปครึ่งวงกลมภายในอุ้งเท้าจะมีขนอยู่ลักษณะคล้ายกับขอ (hooks) ซึ่งใช้เป็นอวัยวะเกาะยึดของตัวหนอนไหม ปริมาณของขนดังกล่าวจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพันธุ์ไหม เช่น ไหมพันธุ์จีนจะมีน้อย พันธุ์ญี่ปุ่น และยุโรปจะมีมาก ดังนั้นในบางครั้งจึงสามารถนำเอามาใช้ประโยชน์ในจำแนกพันธุ์ไหมได้

ผิวหนัง ผิวหนังของหนอนไหมประกอบด้วยผิวหนังชั้นนอก epidermis และ basement membrane ผิวหนังชั้นนอก (cuticle) แบ่งออกเป็น epicuticle และ procuticle โดย epicuticle อยู่ชั้นนอกสุดจะประกอบด้วยสารพวกไข เป็นชั้นบาง ๆ ไม่มี chitin และมีปุ่ม (nodule) ซึ่งจุดหรือแต้ม (marking) บนผิวของหนอนไหมก็อยู่ในชั้นนี้ และ procuticle เป็นชั้นอยู่ถัดเข้าไปจาก epicuticle ประกอบด้วยสาร chitin preotein และสารประกอบอื่น ๆ epidermis เป็นชั้นผิวที่อยู่ถัดเข้าไปจากชั้น cuticle ชั้นนี้ประกอบด้วยเซลล์ที่มีนิวเคลียสขนาดใหญ่ เซลล์มีความหนาแน่นมาก แต่ในช่วงที่ไหมลอกคราบเซลล์จะเล็กมากทำให้มองเห็นไม่ชัดเจน เซลล์นี้จะทำหน้าที่สร้างผิวชั้นนอกขึ้นมาใหม่ทดแทนเซลล์เก่าที่สลายไปและยังทำหน้าที่ในการสร้างขนด้วยในชั้น epidermis จะมีสารพวกกรดยูริก (uric acid) และสาร pterin ซึ่งทำให้ผิวของหนอนไหมทึบไม่โปร่งแสง เมื่อไหมวัยแก่หรือใกล้สุก ผิวก็จะโปร่งแสง เนื่องจาก พวกเม็ดสีน้อยลงและจะจางหายไปเมื่อไหมสุก Basement membrane เป็นชั้นเนื้อเยื่อบาง ๆ ที่อยู่ถัดเข้าไปด้านในจากชั้น epidermis และอยู่ติดกับชั้นกล้ามเนื้อของหนอนไหม

รูหายใจ หนอนไหมมีอวัยวะสำหรับหายใจเป็นรูเล็ก ๆ อยู่ด้านข้างลำตัว ซึ่งจะเป็นระบบเข้าออกของอากาศใช้หายใจ (tracheal system) มีอยู่ด้วยกัน 9 คู่ คู่แรกจะอยู่ที่ส่วนอกปล้องแรก คู่ที่ 2-9 อยู่ที่ส่วนท้องปล้องที่ 1-8 โดยที่คู่ที่ 2 จะมีขนาดเล็กที่สุด ส่วนคู่ที่ 3-9 จะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับ บริเวณรูหายใจจะมี chitin ring สีดำยื่นออกมา และบริเวณปากรูหายใจจะมีแผ่นเนื้อเยื่อปิดอยู่เรียกว่า sieve plate เพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำของตัวหนอนไหม รูหายใจนี้จะเปิดก็ต่อเมื่อเนื้อเยื่อของหนอนไหมมีออกซิเจนน้อย แต่มีคาร์บอนไดออกไซด์มาก โดยที่ขนาดของรูหายใจและสีของ sieve plate จะแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ไหม ดังภาพที่ 2.3



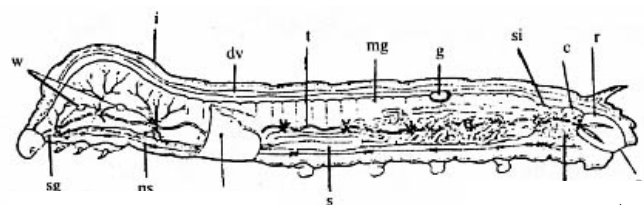
ภาพที่ 2.3 ระบบทางเดินหายใจ [6]

Caudal legs อยู่ที่ส่วนปลายสุดของลำตัว เป็นส่วนของกล้ามเนื้อ คล้ายกับขาเทียมที่ส่วนท้อง (abdominal legs) ของไหม

ลักษณะบ่งชี้แยกเพศไหม หนอนไหมในช่วงวัยอ่อนจะไม่สามารถแยกเพศได้ จนกระทั่งหนอนไหมอยู่ในวัย 4 วัย 5 จึงจะมีลักษณะบ่งชี้แยกเพศเกิดขึ้น โดยเฉพาะในวันแรก ๆ ของไหมวัย 5 จะเห็นลักษณะดังกล่าวได้ชัดเจน คือ หนอนไหมเพศเมียจะมีจุดสีขาวนํ้านมอยู่ที่ส่วนท้องบริเวณปล้องที่ 8 และ 9 ปล้องละ 1 คู่ ซึ่งเราเรียกจุดที่เกิดขึ้นนี้ว่า Ishiwata's fore and hind glands ส่วนในหนอนไหมเพศผู้จะเป็นจุดสีขาวนํ้านมเพียงจุดที่ส่วนท้องระหว่างปล้องที่ 8 และ 9 เรียกว่า Herold's gland

2.5.2.3 อวัยวะภายในของตัวไหม

หนอนไหมจะมีอวัยวะต่าง ๆ ที่อยู่ภายในมากมาย ซึ่งแต่ละชนิดจะทำหน้าที่ที่แตกต่างกันออกไปเพื่อการเจริญเติบโต เช่น ระบบทางเดินอาหาร ระบบขับถ่าย ระบบการหายใจ ระบบการสร้างเส้นไหม ภายในและการพันสารเส้นใยไหมเพื่อการสร้างรังไหม เป็นต้น ดังภาพที่ 2.4

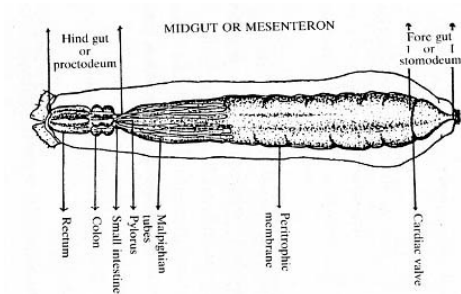


a: anus	ns: nervous system
c: colon	r: rectum
dv: dorsal vessel	si: small intestine
g: gonad	sg: salivary gland
i: integument	sl: silk gland
mg: mid-gut	sp: spiracle
mv: malpighian vessel	t: trachea
	wd: wing disc

ภาพที่ 2.4 อวัยวะภายในของหนอนไหม [6]

ทางเดินอาหาร (alimentary canal) ทางเดินอาหารทำหน้าที่เกี่ยวกับการย่อยและดูดซึมอาหาร (digestion & absorption) มีลักษณะเป็นท่อ ประกอบด้วย epithelial tissue บุตลอดตั้งแต่ปากถึงทวารหนัก (anus) ท่อทางเดินอาหารจะเชื่อมติดกันกับร่างกายโดยอาศัยกล้ามเนื้อเป็นตัวยึดให้ติดกันอยู่ได้ ท่อทางเดินอาหารจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ลำไส้ตอนต้น (fore-gut) มีกำเนิดมาจาก stomodoeum ส่วนนี้จะบุด้วย cuticle ที่เรียกว่า intima fore gut epithetium ซึ่งจะไปติดต่อกับส่วนของผนังที่คลุมลำตัว โดยจะมีกล้ามเนื้อ (muscle) ล้อมอยู่รอบ ๆ ลำไส้เพื่อช่วยให้เกิดการยืดตัวของลำไส้เมื่อมีอาหารอยู่ภายในกระเพาะ ลำไส้ตอนต้นประกอบด้วยช่องเปิดที่ปาก (oral cavity) คอหอย (pharynx) และหลอดอาหาร (oesophagus) ที่มีลักษณะรูปกรวย ซึ่งจะไปสิ้นสุดที่ cardiac valve (stomodoeal valve) ภายในช่องปากทั้งด้านซ้าย และขวาจะมีต่อมน้ำลายสีเหลืองอ่อนทำหน้าที่สร้างน้ำลายซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่างอ่อน ๆ ประกอบด้วย diastasic enzyme หรือที่เรียกว่า amylase ที่ส่วนของคอหอยจะมีกล้ามเนื้อ 2 คู่ เพื่อทำหน้าที่ในการบีบส่งอาหารไปยังหลอดอาหาร (oesophagus) อาหารที่กินเข้าไปจะถูกเก็บไว้ที่ส่วนนี้ระยะหนึ่งโดยมีอวัยวะที่เรียกว่า cardiac valve ซึ่งในบางครั้ง อวัยวะส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการป้องกันการไหลย้อนกลับของอาหาร จากลำไส้ตอนกลางมายังลำไส้ตอนต้น ลำไส้ตอนกลาง (mid-gut) มีกำเนิดจาก endodermal เป็นส่วนเชื่อมระหว่างลำไส้ตอนต้นและลำไส้ตอนปลาย ลำไส้ตอนกลางจัดเป็นอวัยวะที่มีขนาดใหญ่และสำคัญที่สุดของระบบย่อยอาหาร อยู่ระหว่างบริเวณปล้องที่ 2 ถึงปล้องที่ 9 ซึ่งจะมีชั้นของกล้ามเนื้อล้อมรอบผนังของลำไส้ตอนกลาง ประกอบด้วยชั้นของกล้ามเนื้อ (muscular layer), epithelial cell layer และ peritrophic membrane ในชั้นของ epithelial cell จะประกอบด้วย cylinder cell globlet cell และ generative cell Cylinder cell ทำหน้าที่ดูดซึมอาหาร (absorb) และบางครั้งทำหน้าที่ทั้งดูดซึมและขับ ถ่ายออกเป็นของเสียด้วย Globlet cell ทำหน้าที่ขับถ่ายกากอาหารออกเป็นของเสีย (secretion) หลังจากที่ยอดหนอนไหมกินใบหม่อนเข้าไปจะมีน้ำย่อยจากกระเพาะอาหารสีเขียวเหลืองซึ่งมีพวกเอนไซม์ต่าง ๆ ออกมาช่วยย่อย เช่น Amylase lipase protease ฯลฯ พวกธาตุอาหารจะถูกดูดซึม ส่วนกากใบหม่อนจะถูกขับถ่ายออกมาในรูปของมูลไหมเป็นก้อนเล็ก ๆ ลำไส้ตอนปลาย (hind-gut) มีกำเนิดมาจาก proctodoeum ประกอบด้วยชั้นต่าง ๆ เช่นเดียวกับลำไส้ตอนต้น แต่ว่า epithelial cell ค่อนข้างใหญ่กว่า และอยู่ในแนวตั้งเห็นได้ชัดมี cuticle บางกว่า และต่างกับลำไส้ส่วนหน้า คือ ยอมให้น้ำผ่านเข้าออกได้ ลำไส้ตอนปลายเป็นส่วนที่ต่อจากลำไส้ตอนกลางไปจนถึงทวารหนัก (anus) ประกอบด้วยลำไส้เล็ก (small intestine) ลำไส้ใหญ่ (colon) และ rectum ที่ปลายของลำไส้ตอนกลาง ซึ่งต่อกับลำไส้เล็กจะมี pyloric sphincter ทำหน้าที่ปิด-เปิด รับของที่มาจากลำไส้ตอนกลาง โดย

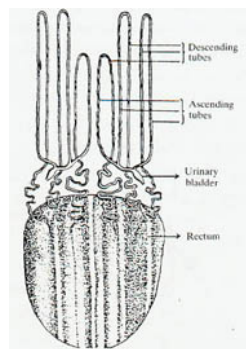
ปกติเมื่อส่วนนี้ปิดอยู่ลำไส้ตอนปลายจะรับของที่มาจาก Malpighian tube เท่านั้น ลำไส้ตอนปลายจะทำหน้าที่ในการดูดน้ำจากกากอาหารที่ผ่านเข้ามาทำให้กากอาหารแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของ rectum ซึ่งมีกล้ามเนื้ออยู่ 6 กลุ่ม และ rectal gland กากอาหารจะเปลี่ยนเป็น dry pellet เป็นรูปหกเหลี่ยม (hexagonal) ก่อนที่จะไปถึง anus และถ่ายออกมาเป็นมูลไหม ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ระบบท่อทางเดินอาหารของหนอนไหม [6]

2.5.2.4. อวัยวะที่ใช้ในการขับถ่าย (excretory organ)

Malpighian tube เป็นอวัยวะทำหน้าที่เกี่ยวกับการขับถ่ายของเหลว ประกอบด้วยท่อสีเหลือง 6 ท่อ แบ่งเป็น 2 ชุด ๆ ละ 3 ท่อ ซึ่งต่อกันและขดอยู่ในส่วนของ rectum ท่อนี้จะโยงติดกันไปตามส่วนของลำไส้ใหญ่ (colon) ลำไส้เล็ก (small intestine) และยาวต่อไปจนถึงผนังลำไส้ตอนกลาง หน้าที่หลักของ malpighian tube คือการขับถ่ายของเสียออกจากเลือดในรูปของยูรีน (urine) นอกจากนี้ในช่วงไหมสุก (mature) ยังสร้างสารพวก calcium oxalate Vitamin B₂ ซึ่งจะช่วยให้ผนังลำตัวมีสีเหลือง ดังภาพที่ 2.6

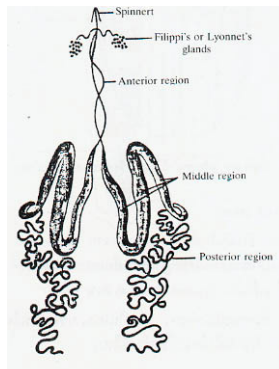


ภาพที่ 2.6 อวัยวะที่ใช้ในการขับถ่าย [6]

2.5.2.5 ต่อมสร้างเส้นไหม (silk gland)

หนอนไหมมีต่อมสร้างเส้นไหม 1 คู่ เจริญมาจาก ectodermal ที่อยู่ในส่วนปาก เมื่อไหมเจริญเต็มที่แล้วต่อมนี้อจะขยายใหญ่อยู่ในส่วนท้องระหว่างปล้องที่ 4 และ 8 โดยตั้งอยู่ด้านซ้าย - ขวา ต่อมสร้างเส้นไหมจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ตอนหน้า ลักษณะเป็นท่อยาว เพื่อเป็นทางผ่านของสารเส้นไหม (silk substance) จากนั้นก็จะถูกพ่นออกมาเป็นเส้นใยไหมเพื่อสร้างรังไหม ตอนกลาง เป็นส่วนที่ใหญ่ที่สุดจะขดอยู่เป็นรูปตัวเอส (S) มีหน้าที่เก็บพัก mature fibroin และสร้าง sericin (gelatinous protein) ล้อมรอบ fibroin ตอนปลาย มีลักษณะเป็นท่อขดไปมา มีหน้าที่ในการสร้าง fibroin (silk protein หรือ elastic

protein) บริเวณส่วนหน้าของต่อมสร้างเส้นไหมตอนหน้าท่อนทั้งด้านซ้าย-ขวา จะมารวมกันเป็นท่อเดียวกัน และด้านข้างของท่อนดังกล่าวจะมี Filippi's หรือ Lyonnet's glands 1 คู่ แยกอยู่ด้านข้างของท่อนด้านซ้าย-ขวา ต่อมาคู่นี้จะทำหน้าที่ช่วยในการพันสารเส้นใยไหมต่อมสร้างเส้นไหมจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อไหมวัย 4 และวัย 5 โดยมีการเจริญเพิ่มขนาดขึ้นอย่างรวดเร็วและแทนที่ท่อทางเดินอาหาร จนกระทั่งท่อทางเดินอาหารไปอยู่ในส่วนท้ายของลำตัว เส้นไหมที่เกิดขึ้นเป็นสารโปรตีนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารโปรตีนในเนื้อเยื่อของหนอนไหมแต่ไม่ใช่โปรตีนจากใบหม่อนโดยตรง ต่อมาสร้างเส้นไหมจะสร้างและส่งเส้นไหมในรูปของเหลวไปยังท่อนคายเส้นไหมที่อยู่ด้านหน้าของต่อม เพื่อพันทำรังไหมในช่วงนี้เส้นไหมที่พันออกมาจะแข็งตัวเป็นเส้นไหมที่อยู่ในรูปรังไหม ดังภาพที่ 2.7



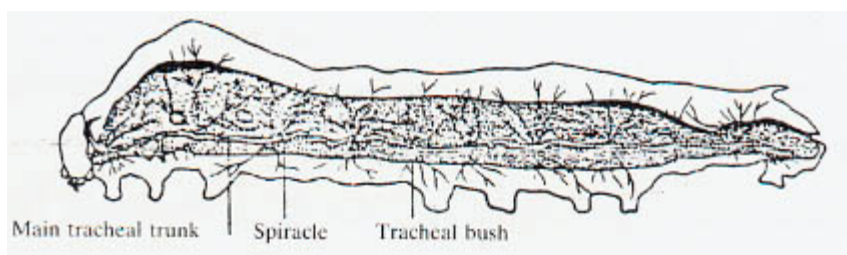
ภาพที่ 2.7 ต่อมสร้างเส้นไหม [6]

ลักษณะการพันเส้นใยของหนอนไหมจะพันออกมา 2 ลักษณะ คือ ลักษณะตัวเอส S (S-type) หนอนไหมจะพันออกมาในช่วงการสร้างรังระยะแรก ซึ่งเป็นส่วนของรังนอกการเรียงตัวของเส้นใยในลักษณะนี้จะสวยงาม ลักษณะเลขแปด (8 type) ซึ่งมักพบช่วงทำรังตอนใน เส้นไหมที่พันออกมาจะเล็ก สวยงาม และขาดบ่อย

2.5.2.6 อวัยวะที่ใช้ในระบบไหลเวียนโลหิต (circulatory organ) ระบบการไหลเวียนโลหิตของหนอนไหมเป็นระบบเปิด (open system) ซึ่งเกิดจากการบีบตัวโดยอัตโนมัติของ dorsal vessel ซึ่งเป็นท่ออยู่บริเวณสันหลังของลำตัว dorsal vessel มีลักษณะเป็นท่อยาวไปตามความยาวของลำตัวหนอนไหม ตั้งแต่ส่วนหัวจนถึงส่วนท้าย อยู่ด้านสันหลังของหนอนไหม ปลายท่อของส่วนหัวจะเป็นช่องเปิดแต่ของส่วนท้ายจะปิดและหนา dorsal vessel ตั้งแต่ส่วนหัวถึงปล้องแรกของส่วนอกจะมีลักษณะเป็นท่อแคบ ๆ เรียกว่า เส้นโลหิต (aorta) ส่วนที่ถัดเข้าไปเป็นส่วนของหัวใจ (heart) มีลักษณะท่อโป่งเป็นระยะมีทั้งหมด 9 แห่ง หรืออาจจะเรียกว่า หัวใจของหนอนไหมมีทั้งหมด 9 ห้อง แต่ละห้องด้านบน จะมีรูเล็ก ๆ 2 รู เรียกว่า ostium ซึ่งเราสามารถสังเกตเห็นเป็นคู่ ๆ ได้บน dorsal vessel ตั้งแต่ปล้องที่ 2 ถึงปล้องที่ 12 รวม 11 คู่ โดยอีก 2 คู่ จะอยู่ในส่วนของ aorta ซึ่งรูนี้จะเป็นทางให้โลหิตไหลเข้าสู่หัวใจ โดยมีลิ้นปิดบังคับเพื่อป้องกันไม่ให้โลหิตไหลออกหัวใจก็จะทำหน้าที่ในการสูบฉีดโลหิตเข้าสู่เส้นโลหิตซึ่งเป็นท่อแบบง่าย ๆ ปลายเปิดให้โลหิตมีการไหลเวียนไปทางเดียวกันไปสิ้นสุดที่ส่วนของสมอง ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งของเส้นโลหิตจะติดกับหัวใจ Alary muscles เป็นแผ่นกล้ามเนื้อที่ยึดติดกับ dorsal vessel ในปล้องที่ 5 ถึงปล้องที่ 11 ซึ่งแต่ละปล้องจะมีกล้ามเนื้อ 1 คู่ ยกเว้นในปล้องที่ 11 จะมี 2 คู่ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งของกล้ามเนื้อนี้จะไปติดอยู่กับท่ออากาศ alary muscles มีหน้าที่ช่วยในการบีบตัวของ dorsal vessel ที่อยู่ทางตอนปลายของลำตัว ทำให้โลหิตเกิดการไหลเวียนได้ดี

2.5.2.7 เลือด (blood) เลือดของหนอนไหมประกอบไปด้วย blood plasma และ blood corpuscles สำหรับ blood corpuscles ยังจำแนกออกเป็น proleucocyte, phagocyte, globulated-leucocyte และ oenocytoides น้ำในเลือดมี 90 – 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะสูงสุดในระยะวัย 4 และจะต่ำลงเมื่อไหมสุก ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของหนอนไหม

2.5.2.8 อวัยวะที่ใช้ในการหายใจ (Respiratory organ) การหายใจของหนอนไหมจะผ่านทางรูหายใจ (spiracles) และท่ออากาศ (tracheae) รูหายใจจะอยู่ข้างลำตัวหนอนไหมทั้ง 2 ข้าง มีด้วยกัน 9 คู่ แต่ละ spiracle ประกอบด้วย peritreme sieve plate และ atrium peritreme มีลักษณะเป็นวงแหวนรอบรูหายใจ sieve plate เป็นแผ่นตะแกรงซึ่งมีรูเล็ก ๆ อยู่เป็นจำนวนมากทำหน้าที่ป้องกันฝุ่น atrium จะอยู่ด้านในเป็นช่องว่าง ซึ่งจะมีแผ่นเนื้อเยื่อบาง ๆ 2 แผ่น ปิดอยู่และ สามารถเคลื่อนไหวได้ ต่อจาก atrium จะเป็นช่อง (cavity) และเป็นจุดเริ่มต้นของท่ออากาศที่ต่อเชื่อมกันเป็นท่อมียาวไปตามลำตัว เรียกว่า lateral trunk หรือ main tracheal trunk อยู่ด้านข้างของลำตัวด้านละ 1 ท่อ โดยทั้ง 2 ท่อนี้จะมีท่ออากาศเชื่อมอยู่ ท่อที่ขวางลำตัวเรียกว่า ventral transverse tracheae นอกจากนี้ยังมีท่ออากาศเล็ก ๆ (tracheole) มากมายแทงลงไปในเซลล์ของกล้ามเนื้อต่าง ๆ เพื่อเป็นทางให้อากาศผ่านไปเลี้ยงเซลล์ของเนื้อเยื่อต่าง ๆ ได้ พร้อมทั้งรับเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เซลล์ไม่ต้องการแล้วออกมาด้วย ดังภาพที่ 2.8



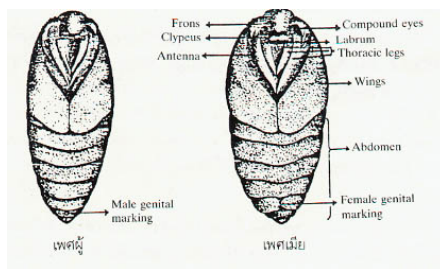
ภาพที่ 2.8 อวัยวะที่ใช้ในการหายใจ [6]

2.5.2.8. ไขมัน (fat body) ไขมันจะมีลักษณะเป็นขุยสีขาวและอ่อนนุ่ม อยู่กระจายทั่วไปในร่างกายใต้ผิวหนังวิวัฒนาการมาจากเนื้อเยื่อ mesoderm ของตัวอ่อน (embryo) ทำหน้าที่ในการเก็บสะสมอาหารซึ่งประกอบด้วยโปรตีน glycogen และสารชนิดอื่น ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับขบวนการเผาผลาญ (metabolism) เพื่อให้ได้ fat globules ไขมันในหนอนไหมพอจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ parietal fat tissue อยู่บริเวณใต้ผิวหนังหรือกล้ามเนื้อ visceral fat tissue จะอยู่รอบลำไส้เล็กไขมันจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (irregular shape) มีนิวเคลียสรูปทรงกลมรี (spherical) และมี fat granules ในส่วน cytoplasm การเปลี่ยนแปลงของ protein ใน fat body เพื่อการใช้ประโยชน์ของไหมจะขึ้นอยู่กับสรีรวิทยา และ metabolism ที่เกิดขึ้นในหนอนไหม

2.5.3 ระยะดักแด้ (pupal stage)

โดยทั่ว ๆ ไป เรียกว่า ระยะ resting stage ซึ่งจะหยุดกินอาหารและไม่มีการเคลื่อนไหวระยะดักแด้นี้เป็นระยะ transitional stage ระหว่างระยะที่เป็นหนอน ซึ่งมีการเจริญเติบโตที่เรียกว่า vegetative growth กับผีเสื้อซึ่งมีการเจริญเติบโตที่เรียกว่า reproductive growth ในช่วงที่หนอนไหมเริ่มเข้าระยะดักแด้นั้นอวัยวะที่อยู่ภายในหลายชนิด เช่น Silk gland, ocelli, molting gland, digestive organ และ caudal

horn จะถูกย่อยสลายสูญหายไป (histolysis) พร้อม ๆ กับการวิวัฒนาการของอวัยวะต่าง ๆ โดยเฉพาะอวัยวะเพศก่อนที่จะถือกำเนิดเป็นผีเสื้อ ดังภาพที่ 2.9

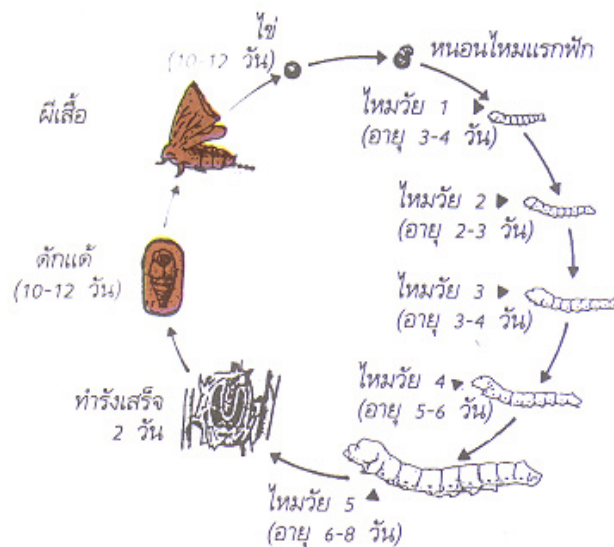


ภาพที่ 2.9 ลักษณะภายนอกของดักแด้ไหม [6]

2.5.4. ระยะผีเสื้อ (moth or imago stage)

ระยะผีเสื้อเป็นระยะที่เจริญเปลี่ยนแปลงต่อมาจากระยะดักแด้ ลำตัวผีเสื้อแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนหัว ส่วนอก และส่วนท้อง รอบ ๆ ลำตัวผีเสื้อจะถูกปกคลุมไปด้วยขนมีขนาดเล็ก ๆ ทั่วทั้งหมด

2.5.4.1 วงจรชีวิตของไหมไหมก็เช่นเดียวกับผีเสื้อชนิดอื่น ๆ ที่มีขั้นตอนการเจริญเติบโต 4 ขั้น ได้แก่ ระยะไข่ ระยะหนอน ดักแด้ และตัวเต็มวัย ระยะเวลาดังแต่ ระยะไข่จนถึงตัวเต็มวัย อาจยาวนานจาก 6 - 8 สัปดาห์ ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะของสายพันธุ์ และสภาพลมฟ้าอากาศ พันธุ์ที่เป็น multivoltine ซึ่งพบในเขตร้อนมักมีวงจรชีวิตสั้น กล่าวคือ ระยะไข่ 9 - 12 วัน ระยะหนอน 20 - 24 วัน ระยะดักแด้ 10 - 12 วัน ระยะตัวเต็มวัย 3 - 6 วัน ชนิด univoltine หรือ bivoltine มีวงจรชีวิต ดังนี้ ระยะไข่ 11 - 14 วัน ระยะหนอน 24 - 28 วัน ระยะดักแด้ 12 - 15 วัน ระยะตัวเต็มวัย 6 - 10 วัน ตามธรรมชาติโดยทั่วไป univoltine มักมี 1 รุ่นต่อปี และเริ่มฟักในฤดูใบไม้ผลิ ส่วนรุ่นต่อไปนั้น ต้องมีช่วงที่ต้องพักตัวในฤดูหนาวจนกระทั่งฤดูใบไม้ผลิเวียนมาจบอีกครั้งหนึ่ง จึงเริ่มฟักออกเป็นวงจรชีวิตใหม่ของรุ่นต่อไป ส่วนพวก bivoltine นั้น รุ่นที่ 2 ไข่ที่ออกจากรุ่นที่ 1 จะไม่พักตัว หากแต่จะฟักออกมาเป็นตัวหนอนภายใน 11-12 วัน ภายในฤดูร้อนนั้น แต่เมื่อมีการผสมเพื่อให้ได้รุ่นที่ 3 ไข่จะต้องผ่านช่วงเวลาพักตัวจนถึงฤดูใบไม้ผลิฤดูหนาวจึงจะฟักตัวออกมาอีกครั้ง จึงกล่าวได้ว่ามี 2 รุ่นต่อปี ส่วนชนิดที่เป็น multivoltine นั้น มีวงจรชีวิตที่สั้นกว่าชนิดแรก เกิดจากสภาพแวดล้อมที่อยู่อาศัย หรือที่เพาะเลี้ยงอยู่มีอุณหภูมิอบอุ่นมาก จนทำให้สามารถผลิตได้ถึง 7-8 รุ่นภายในปีเดียว โดยเฉพาะในเขตร้อนซึ่งมีหลายประเทศ เช่น อินเดีย ไทย และ ประเทศใกล้เคียงอื่น ๆ ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า การเลี้ยงไหมสามารถกระทำติดต่อกันได้ตลอดทั้งปีในเขตร้อน ในขณะที่ประเทศในเขตอบอุ่น (subtropical temperate zone) มีช่วงอายุที่พบปะอยู่เพียงช่วงเดียว คือ ช่วงฤดูใบไม้ผลิ - ฤดูใบไม้ร่วงในการเลี้ยงไหม ระยะหนอนไหมเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดสำหรับผู้เลี้ยงไหม เพราะจะต้องดูแลเอาใจใส่ และทะนุถนอมหนอนไหมอย่างดีและระมัดระวังที่สุด อายุของตัวหนอนอาจมีช่วง 20 - 24 วัน ในกรณีของพวก multivoltine ในเขตร้อน ระยะการเป็นตัวหนอนจะสั้นลงเมื่อมีสภาพอากาศอบอุ่นขึ้นในฤดูร้อนและใบไม้ร่วง และช่วงระยะการเป็นหนอนจะยาวนานขึ้นเมื่ออุณหภูมิหนาวเย็น ในช่วงฤดูใบไม้ผลิ ในระยะที่เป็นตัวหนอนนี้ แมลงจะลอกคราบทั้งหมด 4 ครั้ง เพื่อเจริญเติบโตกลายเป็นตัวเต็มวัย หนอนไหมลอกคราบ 4 ครั้ง สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ระยะ หรือ 5 วัย (instar of larva) ช่วงแรกวัยที่ 1 - 3 จัดเป็นวัยอ่อน ส่วนช่วงหลังวัยที่ 4 - 5 จึงเป็นวัยแก่ จากนั้นจะเข้าสู่ระยะดักแด้ซึ่งทำรังห่อหุ้มไว้ และเข้าระยะตัวเต็มวัยเพื่อสืบพันธุ์และวางไข่ต่อไป ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 วงจรชีวิตของหนอนไหม [6]

2.5.5 การเลี้ยงไหม

ไหมวัยอ่อน หมายถึง ไหมวัย 1, วัย 2 และ วัย 3 การเลี้ยงไหมวัยอ่อนมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและความแข็งแรงของไหมวัยแก่เป็นอย่างมาก เนื่องจากในช่วงไหมวัยอ่อนนี้มีความต้านทานต่อโรคน้อย อาจติดเชื้อและตายง่าย และมักปรากฏเสมอว่าหนอนไหมเกิดอาการเป็นโรคอย่างมากในวัย 4 - 5 ทำให้สูญเสียผลผลิต สาเหตุการสูญเสีย เกิดจากการเลี้ยงไหมวัยอ่อนที่ไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการ ขาดการดูแลเอาใจใส่ ใกล้ชิดเป็นพิเศษ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องวางแผนการเลี้ยงไหมวัยอ่อนเพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียผลผลิตมากเกินไป การเลี้ยงเองที่บ้าน ผู้เลี้ยงจะนำไข่ไหมที่ต้องการเลี้ยงไปเลี้ยงเองที่บ้าน โดยวิธีเตรียมการต่าง ๆ เช่นเดียวกัน การเตรียมไข่ไหม ลักษณะของไข่ไหมมี 2 ประเภทคือ แผ่นไข่เตรียมโดยให้ผีเสื้อประมาณ 50-60 แม่ วางไข่ติดบนแผ่นกระดาษขนาดประมาณ 30 x 209 ตาราง เซนติเมตร โดย 1 แผ่นจะมีไข่ไหมประมาณ 20,000 ฟอง ไข่บรรจุกล่อง จัดเตรียมโดยให้แม่ผีเสื้อวางไข่บนแผ่นกระดาษที่เหมาะสมหรือบนผ้าที่ทาด้วยแปรงเปียก จากนั้นใช้น้ำล้างไข่ให้ร่วงจากกระดาษ นำไข่ที่ได้บรรจุลงในกล่องตาข่ายผ้า โดยกำหนดจำนวนไข่แต่ละกล่องให้มีน้ำหนัก 10 กรัมหรือ 20,000 ฟอง ซึ่งพร้อมจะนำออกจำหน่ายได้ เมื่อได้รับไข่ไหมมาแล้วประมาณ 10 วัน ไข่ไหมจะฟักออกเป็นตัว นำมาเก็บไว้ในที่มีความชื้น โดยปกติเก็บในห้อง 25 องศาเซลเซียส ความชื้นเกินกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ หากเก็บไว้ในที่แห้ง มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ตัวไหมที่ฟักออกมาจะไม่แข็งแรงและตายได้ ในขณะเดียวกันห้องเลี้ยงไหมต้องป้องกันแมลงและสัตว์อื่น ๆ ที่อาจเป็นอันตรายได้ เช่น แมลงวันลาย มด จิ้งจก จิ้งเหลน หนู และข้อสำคัญห้องที่ใช้เลี้ยงไหมต้องสะอาด การเตรียมเลี้ยงไหมแรกฟัก ในกรณีที่ไข่ไหมเป็นแผ่น เมื่อจะทำการเลี้ยงไหมแรกฟัก ควรใช้ชนกปิดตัวไหมลงบนภาชนะที่เลี้ยง ซึ่งมีกระดาษรอง ห้องเลี้ยงไหมควรจะควบคุมอุณหภูมิ 25 - 28 องศาเซลเซียส ความชื้นประมาณ 90 % โดยการพรมน้ำลงบนพื้นห้อง ปิดห้องเก็บความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิ แต่ในปัจจุบันพบว่าการเพิ่มความชื้นและอุณหภูมิให้สูงขึ้น ทำให้โรคแพร่กระจายได้ดี ฉะนั้นจึงเปลี่ยนวิธีการโดยการเพิ่มจำนวนครั้งการให้ใบหม่อน และหาวัสดุคลุมกระดังเลี้ยงไหม เช่น ผ้า กระดาษพาราฟินหรือกระดาษอื่นที่สามารถทำให้ใบหม่อนสดอยู่เสมอได้ วันและเวลาเลี้ยงไหมแรกฟัก วันและเวลาเลี้ยงไหมแรกฟักต้องกำหนดให้แน่นอนก่อนที่จะให้ไหมฟักออกควรให้แผ่นไข่ได้รับแสงสว่างประมาณ 16 ชั่วโมง และให้อุณหภูมิ 8 ชั่วโมง แสง

จะเป็นตัวกระตุ้นการฟักออกของไหม หลังจากไขไหมได้รับแสงสว่างในวันก่อนการฟักออก ไหมจะเริ่มฟักออก ตั้งแต่ตอนเย็นเรื่อยไปจนประมาณ 10.00 น. ของวันรุ่งขึ้นเปอร์เซ็นต์การฟักจะค่อย ๆ ลดลง รุ่งต่อไปก็เก็บรวบรวมไหมที่ฟักในวันรุ่งขึ้น ดังนั้นเวลาฟักออกที่เหมาะสมควรเป็น 9.00 - 10.00 น. เมื่อประมาณเวลาฟักออกแล้ว ไบหม่อนสำหรับไหมวัยอ่อนควรเตรียมไว้ล่วงหน้า หากเป็นวันที่มีฝนตกชุก ควรเก็บไบหม่อนในตอนเย็นก่อนวันที่จะใช้ วิธีการเลี้ยงไหมแรกฟัก การเลี้ยงไหมแรกฟักที่ใช้อาจทำได้ 2 วิธี ในกรณีที่ไหมวางไข่บนกระดาษวางไขไหม วิธีที่ 1 เปิดแผ่นไขไหมวางบนภาชนะที่ใช้เลี้ยง โรยยาฆ่าเชื้อบนตัวหนอนไหมด้วยตะแกรงร่อน อัตราการใช้ประมาณ 1 กรัม ต่อพื้นที่ 1 ตารางฟุต เพื่อป้องกันเชื้อ *Aspergillus* และเชื้อ *muscadine* ลักษณะนิสัยของไหมฟักใหม่ มักจะคลานไปรอบ ๆ บริเวณเมื่อโรยยาแล้ว รอประมาณ 10 - 15 นาที หรือประมาณว่ายาที่โรยติดทั่วตัวหนอนไหมดีแล้วหั่นไบหม่อนเป็นฝอย ประมาณ 40 กรัมต่อไหม 50 แม่ หรือ 20,000 ตัว เพื่อล่อตัวไหมเข้ามารวมกันและให้ไบหม่อนพวกนั้นเป็นตัวกันการกระทบกระเทือนในการขยายพื้นที่ที่จัดเลี้ยงไหมรอประมาณ 10 - 15 นาที หรือประมาณว่าไหมมารวมตัวกันแล้วปิดไหมที่อยู่บนกระดาษวางไขไหม และบนกระดาษห่อไขไหมลงพื้นที่เลี้ยง หรือเคาะแผ่นไข โดยการจับกระดาษขนานกับพื้น แล้วเคาะลงโดยใช้มือ หรือด้ามขนนกตีสบหลังของแผ่นไขนั้นปิดด้วยขนนกให้มารวมกันไหมจำนวน 20,000 ตัว ควรขยายพื้นที่ประมาณ 2 เท่าแผ่นไขหรือประมาณ 80 X 100 ตารางเซนติเมตร ในขณะเดียวกันก็กระจายไหมให้อยู่สม่ำเสมอหั่นไบหม่อนขนาด 0.5 X 0.5 ตารางเซนติเมตร น้ำหนักประมาณ 80 กรัม โรยบนตัวไหมให้สม่ำเสมอไขไหมที่ยังไม่ฟักในเวลานี้ควรห่อกระดาษไว้เพื่อฟักในวันรุ่งขึ้น และทำวิธีเดียวกันวิธีที่ 2 เป็นวิธีที่คล้ายคลึงกัน ยกเว้นการโรยยาฆ่าเชื้อ ให้ทำในมือที่ 2 ทั้งนี้จากการค้นคว้าของสถานีทดลองไหมในประเทศญี่ปุ่น ได้มีการทดลองและเสนอแนะในปี พ.ศ. 2519 ว่าการโรยยาฆ่าเชื้อในขณะไหมแรกฟัก ยาอาจไปทำอันตรายผิวหนังอ่อน ๆ ของไหมได้ จึงควรใช้ยาในมือที่ 2 ของการให้อาหาร ในกรณีที่ไขไหมบรรจุกล่อง ก่อนที่ไหมจะฟักออก หากกระดาษที่มีรูทั้งแผ่นวางทับบนภาชนะที่ใช้รองไขซึ่งมีขนาดเท่ากับแผ่นไข ธรรมชาติไหมจะคลานไปทั่ว ๆ และเคลื่อนที่เข้าหาแสงสว่าง เมื่อให้ไบหม่อนลงบนแผ่นกระดาษที่มีรูนั้นตัวไหมจะขึ้นมาหาอาหารเมื่อหนอนไหมขึ้นมาหมดแล้ว ยกแผ่นกระดาษขึ้นไปปิดและเลี้ยงบนภาชนะที่ใช้เลี้ยง จะทำให้ตัวไหมกับไขไหมแยกจากกัน การทำงานจะสะดวกขึ้น จากนั้นโรยยาในมือที่สองของการให้อาหาร การเลี้ยงไหมวัยอ่อน การที่จะให้ไหมทำรังได้ผลผลิตสูง ต้องเลี้ยงไหมให้แข็งแรง เติบโตสม่ำเสมอ ต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้ ไหมควรเลี้ยงในสภาพแวดล้อมที่สะอาด ไบหม่อนจำเป็นต้องเป็นไบอ่อนเหมาะสมกับวัย สะอาด สด และปริมาณที่มากตามความต้องการ หากให้ไบหม่อนหยาบและเหี่ยวหนอนไหมวัยอ่อนไม่สามารถกินไบหม่อนได้ ไหมก็จะเจริญเติบโตไม่สม่ำเสมอถ้าต้องการให้ไหมได้กินไบหม่อนสดอยู่เสมอน่าจะต้องเพิ่มจำนวนครั้งในการให้อาหารหรือหาวัสดุคลุม หากพบว่าอุณหภูมิสูงควรระบายอากาศ โดยเปิดหน้าต่างเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพที่ไหมวัยอ่อนต้องการ คือ อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 25 - 28 องศาเซลเซียส ความชื้นประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ หากอุณหภูมิต่ำกว่า 18 องศาเซลเซียสและความชื้นต่ำ ไหมจะกินไบหม่อนได้น้อย การเจริญเติบโตช้าและอ่อนแอ จึงง่ายต่อการเป็นโรค ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไป ไหมก็จะอ่อนแอ ทำให้เกิดโรคแทรกได้ง่าย โดยเฉพาะแกรสเซอร์ (grassery) หรือถ้าความชื้นสูงเกินไป เชื้อราก็จะเจริญเติบโตได้ดี จึงต้องมีการป้องกันเชื้อราโดยโรยสารเคมีบนตัวหนอน ในขณะที่ไหมตื่นและก่อนนอนเพราะระยะนั้นไหมอ่อนแอที่สุด ในระยะที่ไหมนอน ควรจะลดความชื้นด้วยการถ่ายมูลไหมและงดการให้อาหาร เพื่อให้ความชื้นน้อยลง ความชื้นสัมพัทธ์ในระยะไหมนอนควรเป็น 60 - 70 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้หนอนไหมลอกคราบได้สะดวก และไม่มีเชื้อโรคเข้าทำลายเมื่อหนอนไหมลอก ถ้าไบหม่อนแห้งไหมที่ตื่นก่อนไม่มีอาหารก็จะรอไหมที่ตื่นทีหลัง เมื่อได้รับอาหารไหมก็จะเติบโตไปพร้อม ๆ กัน ทำให้สม่ำเสมอ สำหรับในเมืองไทย ระยะฤดูฝนมีความชื้นสูงควรระวังโรยเกลือเพาหรือปูนขาวในขณะไหมนอน ไหมวัยแก่ หมายถึง ไหมวัย 4 และ 5 ที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและต้องการอาหารมาก เมื่อโต

เต็มที่มีน้ำหนักตัวมากกว่าไหมแรกฟัก 8,000 – 10,000 เท่า แต่มีการย่อยน้อยกว่าไหมวัยอ่อน ไหมวัย 5 ส่วนของน้ำภายในร่างกายจะลดลงตามระบบทางสรีรวิทยา ดังนั้น การเลี้ยงไหมวัย 5 จึงต้องปรับสภาพแวดล้อมให้มีความชื้นต่ำหลักการเลี้ยงไหมวัยแก่ เลี้ยงในสภาพที่อากาศถ่ายเทได้ดี ให้ใบหม่อนสดและมีคุณค่าทางอาหารเพียงพอ ในกรณีที่หนอนไหมกินใบหม่อนที่ไม่มีคุณภาพ มีผลทำให้คุณภาพของเส้นใยลดลงได้ เลี้ยงไหมวัยแก่ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม คืออุณหภูมิ 24 – 30 องศาเซลเซียส ความชื้น 70 – 75 เปอร์เซ็นต์ จำเป็นต้องปลูกต้นไม้รอบ ๆ โรงเลี้ยงไหมเพื่อไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินไปข้อพิจารณาในการให้ใบหม่อน ใบหม่อนที่ดีต้องมีคุณค่าอาหารที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของหนอนไหม การให้ใบหม่อนควรให้ใบหม่อนที่สด เวลาที่เหมาะสมในการเก็บใบหม่อนคือ เวลาเช้า 6.00 น. เมื่อเก็บใบหม่อนแล้วใช้น้ำพรมเพื่อไม่ให้ใบหม่อนเหี่ยว หนอนไหมวัยแก่ต้องการปริมาณใบหม่อนมาก ปริมาณใบหม่อนที่ให้นั้นจะต้องเพียงพอับความต้องการของหนอนไหม การเลี้ยงไหม 1 กล่อง (ไข่ไหม 20,000 ฟอง) ต้องการใบหม่อน ประมาณ 450 กิโลกรัม จะได้รังไหม 30 กิโลกรัม ปริมาณใบหม่อนที่ให้ พิจารณาจากใบหม่อนที่เหลืออยู่ในกระด้ง ถ้าใบหม่อนเหลืออยู่ในกระด้งมากแสดงว่าให้ใบหม่อนมากเกินไป แต่ถ้าหนอนไหมกินใบหม่อนหมดจนเหลือก้านใบแสดงว่าให้ใบหม่อนน้อยเกินไป จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงปริมาณความต้องการอาหารที่เพียงพอของหนอนไหม การขยายพื้นที่ การขยายพื้นที่ตามความเจริญเติบโตของหนอนไหม เป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะต้องมีการขยายพื้นที่ให้เหมาะสม ไม่หนาแน่นหรือน้อยจนเกินไป ซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของหนอนไหมด้วย ขนาดของพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงไหมวัยแก่ วัยที่ 4 วันที่ 1 จำนวนหนอนไหม 350 ตัวต่อ 1 กระด้ง วันที่ 2 จำนวนหนอนไหม 240 ตัวต่อ 1 กระด้ง วันที่ 3 เป็นต้นไป จำนวนหนอนไหม 200 ตัวต่อ 1 กระด้ง วัยที่ 5 วันที่ 1 จำนวนหนอนไหม 200 ตัวต่อ 1 กระด้ง วันที่ 2 จำนวนหนอนไหม 180 ตัวต่อ 1 กระด้ง วันที่ 3 เป็นต้นไป จำนวนหนอนไหม 150 ตัวต่อ 1 กระด้ง การถ่ายมูลไหมวัยแก่ควรทำบ่อย ๆ เพื่อรักษาสภาพอากาศในห้องเลี้ยงไหมให้ดี และป้องกันการสูญเสียของจำนวนหนอนไหม สำหรับหนอนไหมวัย 4 ควรถ่ายมูลวันเว้นวัน และถ่ายมูลทุกวันสำหรับหนอนไหมวัย 5 วิธีการถ่ายมูล อาจใช้ตาข่ายถ่ายมูลเช่นเดียวกับไหมวัยอ่อน แต่เป็นตาข่ายที่มีตาใหญ่กว่า ไหมนอนไหมตื่น การสังเกตว่าไหมนอนหรือกำลังลอกคราบนั้น มีหลายวิธีการคือ ก่อนไหมจะนอนนั้น ลำตัวจะเริ่มใสสะท้อนแสง กินอาหารน้อยลงจนหยุดกินอาหารเมื่อโตเต็มที่ จะอยู่นิ่งไม่เคลื่อนไหว ชูหัว เมื่อพบลักษณะดังกล่าวควรหยุดให้อาหาร เมื่อไหมลอกคราบเสร็จจะสังเกตได้จาก ลำตัวจะเหี่ยวและมีสีเทา ส่วนหัวจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เคลื่อนไหวไปมาและเริ่มต้องการอาหาร ถ้าสังเกตเห็นลักษณะดังกล่าว ควรเริ่มให้อาหารกับไหมที่ลอกคราบเสร็จแล้ว หรือไหมตื่น สิ่งที่สำคัญที่สุดก็คือในระยะไหมนอน หรือลอกคราบนั้น จำเป็นต้องให้อยู่ในสภาพแวดล้อมที่พอเหมาะ มีการระบายถ่ายเทอากาศที่ดี และเมื่อไหมลอกคราบเสร็จแล้ว การเริ่มให้อาหารครั้งแรกก็มีความสำคัญคือ ต้องค่อย ๆ ให้ทีละน้อยแล้วเพิ่มปริมาณให้มากขึ้นเรื่อย ๆ ไหมสุกไหมวัย 5 เมื่อเข้าสู่วันที่ 5 – 6 ไหมจะกินอาหารน้อยลง ถ่ายมูลเหลว ลำตัวโปร่งแสงเพราะต่อมผลิตเส้นไหมเจริญเติบโตเต็มที่ปิดทางเดินอาหาร ตัวไหมจะไต่ไปรอบ ๆ เพื่อหาที่ทำรังและไต่ขึ้นที่สูง แล้วขับถ่ายปัสสาวะ ไหมสุกจะพ่นเส้นใยด้านในออกมาเป็นรูปเลขแปด ไหมจะทำรังเสร็จ ภายใน 48 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความยาวของเส้นใยขึ้นกับไหมแต่ละสายพันธุ์

2.5.6 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลี้ยงไหม

2.5.6.1 อุณหภูมิ

ไหมเป็นสัตว์เลือดเย็น อุณหภูมิเป็นสิ่งสำคัญ อุณหภูมิภายนอกเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายในของตัวไหมแล้ว จะสูงกว่าอุณหภูมิภายนอก 1 องศาเซลเซียส ไหมจะทนอุณหภูมิได้ระหว่าง 7 - 40 องศาเซลเซียสการควบคุมอุณหภูมิเป็นสิ่งสำคัญ เมื่ออุณหภูมิสูงควรให้อากาศถ่ายเท

โดยเปิดหน้าต่างให้อากาศร้อนกระจายออกไปหรือใช้น้ำฉีดพ่นหลังคาหรือใช้จากมุ้งทับหลังคาเดิมอีกชั้น การปลูกต้นไม้รอบ ๆ บริเวณโรงเลี้ยงไหม สามารถช่วยให้สิ่งแวดล้อมดีขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มออกซิเจนให้หนอนไหมหายใจและกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ในฤดูหนาวบางพื้นที่อุณหภูมิต่ำ การเลี้ยงไหมควรเพิ่มอุณหภูมิโดยใช้เตาไฟฟ้าเข้าไปไว้ในห้องเลี้ยงไหมหรืออาจใช้วิธีต้มน้ำซึ่งสามารถเพิ่มความชื้นได้

2.5.6.2 ความชื้นสัมพัทธ์

เป็นส่วนประกอบสำคัญที่จะทำให้ระยะเวลาการเลี้ยงไหมสั้นหรือยาว ผลทางอ้อม ถ้าความชื้นในอากาศต่ำกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ไบหม่อนจะเหี่ยวเร็ว หนอนไหมก็จะกินอาหารไม่ได้เต็มที่ หนอนไหมจะอ่อนแอและเติบโตช้า การเพิ่มความชื้นทำได้โดยใช้ผ้าสะอาดชุบน้ำวางไว้รอบ ๆ กองไบหม่อน แต่ไหมจะแข็งแรงดีหากมีความชื้นสูง หม่อนจะสดอยู่นาน ไหมกินไบหม่อนได้เรื่อย ๆ ก่อนที่ไบหม่อนจะแห้งไปไหมจะสมบูรณ์ดี เมื่อความชื้นสูงเกิน 90 เปอร์เซ็นต์ เชื้อราเข้าทำอันตรายได้ง่ายซึ่งจะทำให้ไหมอ่อนแอ การลดความชื้นทำได้โดยใช้พัดลมช่วยระบายความชื้นออกจากโรงเลี้ยงไหม

ตารางที่ 2.2 ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเลี้ยงไหม

วัย	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	หมายเหตุ
1	90	28	ในระยะไหมนอน ความชื้นสัมพัทธ์ควรอยู่ ระหว่าง 60-70 เปอร์เซ็นต์
2	85-90	27	
3	80-85	26	
4	75-80	25	
5	70-75	24	

2.5.6.3 อากาศ

ไหมต้องการออกซิเจนสำหรับหายใจและคายคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นห้องเลี้ยงไหมจึงควรจัดระบบการถ่ายเทอากาศให้ดี เพื่อขจัดคาร์บอนไดออกไซด์ การปลูกต้นไม้รอบบริเวณจะช่วยทำให้สภาพแวดล้อมดีขึ้น มีผลให้อากาศบริสุทธิ์ ป้องกันอากาศหนาวเย็นและกันลมร้อนโดยทางอ้อมด้วย

2.5.6.4 แสงสว่าง

เป็นปัจจัยในการเจริญเติบโตของไหมด้วยอีกทางหนึ่งมักพบว่าที่เลี้ยงแห่งไหนใกล้รังสีของแสงผ่าน มักจะมีการลอกคราบและสุกก่อนส่วนที่ได้รับรังสีของแสงน้อย โรงเลี้ยงไหมจึงควรวางอยู่ในแนวเหนือใต้ กระดังไหมควรสลับทุกวัน เพื่อให้ไหมเจริญเติบโตและสุกพร้อมกัน

2.5.6.5 อาหาร

เนื่องจากการเจริญเติบโตและพัฒนาการของไหมวัยอ่อนอยู่ในอัตราที่สูงมาก ดังนั้นควรเตรียมไบหม่อนสดไว้ให้พอเพียง การให้ไบหม่อนควรปฏิบัติดังนี้ ขนาดของไบหม่อน หนอนไหมวัย 1-3 หากหั่นไบหม่อนสี่เหลี่ยมควรจะเป็น 2 เท่าความยาวลำตัว หากหั่นขวางความกว้างควรจะเป็น 1 เท่าความยาวลำตัว การหั่นไบหม่อนเพื่อให้หนอนไหมกินอาหารได้ง่ายขึ้นและหนอนไหมทุกตัวสามารถกินไบหม่อนได้พร้อม ๆ กัน จะทำให้การเจริญเติบโตเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ปริมาณไบหม่อน การให้ไบหม่อนควรให้พอเหมาะ ไม่น้อยหรือมากเกินไป ถ้ามากเกินไป ไบหม่อนจะเหลือมาก ทำให้สูญเสียโดยเปล่าประโยชน์ ถ้าให้น้อยเกินไป หนอนไหมกินอาหารไม่เพียงพอทำให้ไหมอ่อนแอ ปริมาณการให้อาหารขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ พันธุ์ไหม ระยะเวลาให้อาหาร ควรให้ไบหม่อนในอัตราส่วน 30 20 50 โดยคิดการให้อาหารวันละ 3 ครั้งเป็นทั้งหมด

100 เปอร์เซ็นต์ การใช้ประสบการณ์และการสังเกตในการเลี้ยงไหมจะสามารถกำหนดปริมาณการให้อาหารได้เหมาะสม ไม่สิ้นเปลืองโดยการให้ในปริมาณที่หนอนไหมกินได้หมดพอดี

2.5.6.5.1. จำนวนครั้งของการให้อาหาร

หนอนไหมจะกินใบหม่อนอย่างสม่ำเสมอ ก่อนกินใบหม่อน หนอนไหมต้องมีระยะเวลาหยุดพักสั้น ๆ เพื่อพักและหยุดการเคลื่อนไหว เมื่อกินอาหารอิ่มแล้วหนอนไหมจะไม่เคลื่อนไหว จนกระทั่งใบหม่อนถูกย่อยหมดแล้วหนอนไหมจะเริ่มหิว ดังนั้น ต้องหมั่นสังเกตลักษณะนิสัยของหนอนไหม เพื่อให้เกิดความเหมาะสมในการให้อาหาร ทั้งช่วงเวลาและปริมาณอาหาร โดยทั่วไปจะให้อาหาร 3 ครั้ง คือ เวลา 07.00 น, 12.00 น. และ 17.00 น.

2.6 การพัฒนาเทคโนโลยีเส้นใยไหม

การปรับเปลี่ยนสมบัติของเส้นไหม มีการพัฒนาและดำเนินการในหลายประเทศ ทั้งประเทศที่ผลิตเส้นไหม เช่น จีน อินเดีย ญี่ปุ่น และ ไทย รวมทั้งประเทศที่ไม่มีการผลิตเส้นไหม แต่มีอุตสาหกรรมสิ่งทอจากไหม เช่น อิตาลี และ ฝรั่งเศส อย่างไรก็ตามดูเหมือนว่าญี่ปุ่นจะมีความก้าวหน้ากว่าประเทศอื่นๆ ในด้านการพัฒนาเทคโนโลยีเส้นไหม ดังนี้ พันธุ์ไหม มีการปรับปรุงพันธุ์ไหมชื่อว่า “ฮาคุคิน (Hagukin)” สามารถสร้างเส้นใยที่มีความละเอียดมากมีขนาดเพียง 1.6 ดีเนียร์ (denier) (1 ดีเนียร์ = เส้นไหมที่มีความยาว 9,000 เมตร มีน้ำหนัก 1 กรัม) เมื่อนำไปทอผ้าจะให้ความรู้สึกจากการสัมผัสที่นุ่มมากเช่นเดียวกับไหมพันธุ์ไทย แต่ซึ่งเป็นที่นิยมของคนทั่วโลก จะเห็นได้จากผ้าไหมที่ใช้ไหมพันธุ์ไทย จะมีความนุ่มกว่าพันธุ์ต่างประเทศลูกผสม การสาวไหม (reeling) การสาวรังสดจะได้เส้นใยที่ฟูตัว (bulky) ดีกว่าเส้นไหมที่สาวหลังการอบรังแล้ว การสาวไหมด้วยการใช้แอลกอฮอล์และอนุพันธ์แอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิต่ำ แล้วทำเส้นไหมให้ฟูด้วยสารฟู (swelling agents) เพื่อเพิ่มความนุ่มเส้นใยที่จะมีความนุ่มและฟูตัวเหมาะสำหรับการทำกิโมโนและผลิตภัณฑ์ผ้าถัก หรือการสาวด้วยเครื่องที่มีระบบหมุนและสั่น เพื่อให้เส้นใยเกิดโครงสร้างเหมือนตาข่าย มีการยืดตัวได้ดีกว่าเส้นไหมปกติ เหมาะสำหรับการทำเสื้อแจ็คเก็ต สเวตเตอร์ และเสื้อถัก อีกทั้งมีการนำเส้นไหมมาจัดให้แบนด้วยลูกกลิ้ง จะทำให้เส้นไหมมีความมันวาวสูงเพื่อใช้ทำผ้ากิโมโน การควบเกลียว (throwing) สามารถสร้างเส้นใยแบบขนสัตว์ (woolly silk) ด้วยการนำเส้นไหมดิบหลายๆเส้นมาควบตีเกลียวเข้าด้วยกันให้แน่นแล้วผ่านความร้อน จะทำให้เส้นด้ายคลายเกลียวออกและฟูตัวเหมาะสำหรับการทำผลิตภัณฑ์ชุดชั้นใน และผ้าถัก หรือการนำเส้นไหมและเส้นไพลอนมาควบกัน การใช้สารเคมี อาจใช้สารฟูตัวหรือการใช้เส้นไหมจุ่มในสารละลายไฟโบรอิด เคราติน และคอลลาเจน (fibroid keratin and collagen) อบให้แห้ง ตีเกลียว จุ่มในน้ำอีกครั้ง เพื่อให้เส้นไหมเปื่อย ทำเส้นไหมให้อยู่ตัวด้วยความร้อนที่ 110 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที ภายใต้ความดันสูง (200-300 Kpa) แล้วทำการคลายเกลียว ผ่านความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส อีกครั้ง เส้นไหมจะหยิก (crimp) และฟูตัว มีการยืดตัวสูง เรียกว่า shape memory silk สามารถนำไปทำผลิตภัณฑ์สิ่งทอได้หลากหลายและแปลกตา การผสมกับเส้นใยอื่น (hybrid silk or composite silk) ขณะนี้นักวิจัยได้พัฒนาเส้นใยผสมได้ถึง 6 ชนิด ได้แก่ ซิลราน (silran) เป็นเส้นใยที่เกิดจากการใช้ด้ายไพลอนเป็นแกนพันด้วยเส้นไหม 5 เส้น แต่ละเส้นมีขนาด 2 ดีเนียร์ เพื่อใช้ผลิตถุงน่อง ถุงเท้า และชุดชั้นใน เพียวราซี (puracy) เป็นเส้นใยที่ได้จากเส้นด้ายอะควิลิกเป็นเส้นแกน พันด้วยเส้นไหมขนาดเล็ก ใช้ผลิตถุงน่อง ชุดชั้นในและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง เช่นเดียวกับซิลราน คูปราไหม (Cupra-to-silk) เป็นเส้นใยที่ได้จากการนำเส้นไหมพันรอบ cupra นำไปผลิตเครื่องนุ่งห่มทั่วไป เช่น เสื้อผ้าบุรุษสตรี ชุดราตรี ฯลฯ เส้นใยเคลือบไหม (Bio skin silk) เป็นเส้นใยไพลอนเคลือบด้วยโปรตีนไหม เช่น ไฟโบรอิน (fibroin) หรือ เซรีซิน (sericin) เพื่อให้ได้เส้นใยที่ให้ความรู้สึกเหมือนสัมผัสไหม เส้นไหมผสมพิเศษ (Super hybrid-silk) เป็นเส้นไหมผสมไพลอน 66 ชนิด TFY โดยใช้ไพลอนเป็น

แกนกลางต้องใช้เครื่องสาวไหมที่มีความเร็วสูงกว่าเครื่องสาวไหมปกติ 2 เท่า เส้นใยชนิดนี้ใช้ผลิตถุงน่อง เส้นไหมอีลาสติก (Elastic composite yarn) พัฒนาขึ้นโดยใช้เส้นไหมพันรอบเส้นด้ายสแปนเด็กซ์ หรืออาจใช้เส้นไหมเป็นแกนแล้วพันด้วยเส้นด้ายสแปนเด็กซ์ ทำให้เส้นใยมีความยืดหยุ่นสูงอีกชนิดหนึ่งเหมาะสมในการผลิตถุงน่อง ถุงเท้า เป็นต้น

2.7 การพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ จากโปรตีนไหม

เส้นใยไหม ประกอบด้วยโปรตีน 2 ชนิด ได้แก่ ไฟโบรอิน ที่เป็นเส้นแกน 2 เส้นประกบกัน หุ้มหรือเคลือบด้วยโปรตีนเซรีซิน ซึ่งจะละลายออกเมื่อนำไปต้มในน้ำร้อนหรือสารละลายต่าง เป็นต้น ญี่ปุ่นเป็นชาติแรกที่นำไฟโบรอินและเซรีซินมาใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ จนเกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ หลายชนิด ไฟโบรอิน ปัจจุบัน ญี่ปุ่น จีน ไทย ผลิตเครื่องสำอาง สารเคลือบผิว คอนแทคเลนส์ ที่มีผงไหมไฟโบรอินเป็นส่วนประกอบ บริษัท คาเนโบ ซึ่งเป็นเอกชนที่ผลิตเครื่องสำอางจากโปรตีนไหมเป็นบริษัทแรกได้ผลิตแป้งรองพื้น โลชั่น ครีมนวดผม โฟมล้างหน้า จนมีชื่อเสียงไปทั่วโลกด้วย สิ่งสกปรกที่เป็นไขมัน จะถูกกำจัดได้ด้วยสบู่ แต่สิ่งสกปรกที่เป็นโปรตีนไม่สามารถกำจัดได้ด้วยสบู่ จำเป็นต้องใช้เอนไซม์โปรติเอสไฮโดรไลส เอนไซม์นี้จะไม่คงตัว แต่โปรติเอสในไฟโบรอินไหม (Encapsulating protease in fibroin) จะมีความคงตัว และคงทนยาวนานกว่าจึงมีคุณสมบัติที่ดีในการใช้เป็นส่วนผสมของสบู่ มีการนำไฟโบรอินไปไฮโดรไลสเป็นผงไหมที่มีรสเปรี้ยว รสหวาน และกลิ่นหอม นำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด เช่น ลูกกวาด บะหมี่ และน้ำดื่ม ฯลฯ เซรีซิน มีสมบัติกำจัดจุลินทรีย์ ต้านแสงอัลตราไวโอเลต (UV) สามารถดูดและคายความชื้นได้ง่าย ใช้เป็นส่วนผสมของเครื่องสำอางหลายชนิด มีการใช้เซรีซินเคลือบเส้นใยสังเคราะห์ และเส้นใยธรรมชาติ ใช้เป็นวัสดุที่สลายได้ทางชีวภาพ วัสดุทางการแพทย์ และผืนผ้าที่มีคุณสมบัติพิเศษต่อการใช้งาน เช่น การใช้ฟิล์มที่เคลือบด้วยเซรีซินบนผิวของตู้เย็น เครื่องทำความเย็น ตู้คอนเทนเนอร์ ด้วยฟิล์มดังกล่าวมีคุณสมบัติด้านการแข็งตัวของน้ำแข็ง (anti-frosting) ใช้เคลือบหลังคาหรือผิวถนน สามารถป้องกันการกัดทำลายของหิมะและกำจัดหิมะได้ง่ายขึ้น

2.8 การพัฒนารูปแบบและขอบเขตการใช้ไหมให้หลากหลาย

จากแนวทางการพัฒนาเส้นใยไหมให้มีคุณสมบัติที่หลากหลายและแปลกใหม่ ตลอดจนการพบและพัฒนาคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเส้นไหมทั้งไฟโบรอินและเซรีซิน ทำให้มีการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่หลากหลาย เช่น ใช้ผลิตถุงน่อง ชุดชั้นในหรือใช้ในอุตสาหกรรมด้านอื่นๆ เช่น เครื่องสำอาง อาหารและเครื่องดื่ม เครื่องไฟฟ้า การแพทย์ การคมนาคม การขนส่ง และในอนาคตฟิล์มจากไฟโบรอินและเซรีซินจากไหมสามารถทำหระจากตาเทียม (ใช้รังไหม 1 กรัม ละลายด้วยไตรฟลูออโรอะซิติก (CF₃COOH) 98% ปริมาตร 3 มิลลิลิตร จะได้สารละลายคล้ายวุ้น เทลงในแม่แบบ) ทำนองเดียวกันอาจนำไปผลิตคอนแทคเลนส์และหลอดเลือดเทียม หรือนำโปรตีนไหมไปผลิตวัสดุชีวภาพที่เป็นสารต้านการตกตะกอน (anticoagulant) ใช้ทางการแพทย์ เพื่อให้เลือดแข็งตัวช้า นำไปใช้ผสมในยาสีฟันและครีมโกนหนวด ป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อเอชไอวี (HIV)[7] นักวิจัยญี่ปุ่นมีความพยายามทำให้อุตสาหกรรมไหมแข่งขันได้ในตลาดโลกและอยู่รอด แม้จะไม่มี การปลูกหม่อนเลี้ยงไหมเพื่อผลิตเส้นไหมแล้วแต่ก็ยังสร้างอุตสาหกรรมต่อเนื่องและต่อยอดเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้เส้นไหมมากยิ่งขึ้นมากกว่าการผลิตเส้นไหมเพื่อสิ่งทอแบบเดิมๆ เพียงอย่างเดียว ดังนั้นนักวิจัยด้านหม่อนไหมของไทยที่ได้เริ่มมองหาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ มาตั้งแต่ปี 2535 แม้จะเชิงช้าแต่ก็มาถูกทางแล้ว แต่ควรเร่งประสานความร่วมมือระหว่างภาครัฐ ภาคเอกชน และภาคประชาชน ให้มีเอกภาพในการวิจัย เพื่อผลประโยชน์ของประเทศไทยมิใช่หน่วยงานใดหน่วยงานหนึ่ง ศูนย์นวัตกรรมไหม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่อยู่ระหว่างการพัฒนาบุคลากร แต่ก็พร้อมที่จะร่วมมือกับทุกหน่วยงาน เพื่อร่วมสร้างฝันนวัตกรรมไหมของไทย

ในอนาคตไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในทางการผลิตเครื่องนุ่งห่มเป็นเวลานานกว่า 5 พันปี มาแล้วนับตั้งแต่สมัยจีนโบราณ และมีกระบวนการผลิตเครื่องนุ่งห่มจากเส้นใยไหมที่ได้รับการพัฒนาเรื่อยมา จนถึงปัจจุบัน ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์จากผ้าไหมของไทยมีคุณภาพดี และถือได้ว่าเป็นผ้าไหมจากเอเชียที่มีความสวยงามที่สุด เนื่องจากผ้าไหมไทยมีลักษณะเด่นอันเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว เมื่อนำไปตัดเป็นเสื้อผ้าเครื่องแต่งกายต่าง ๆ แล้วจะมีความสวยงาม เพราะมีความมันวาวลื่นเป็นประกายเงางามอันเกิดจากการทอแสงของเส้นไหมที่ใช้ผลิต อีกทั้งยังมีลวดลายสวยงามและสีสดใส ผ้าไหมไทยจึงมีเสน่ห์พิเศษ สามารถดึงดูดความสนใจ และจูงใจให้เกิดความต้องการซื้อหาไปไว้ใช้หรือเป็นของฝากพิเศษ ดังจะเห็นได้จากในแต่ละปีจะมีนักท่องเที่ยวต่างชาติเดินทางเข้ามาซื้อหาผ้าไหมไว้เป็นของที่ระลึกเป็นจำนวนมาก และผ้าไหมยังเป็นสินค้าส่งออกที่ทำรายได้ให้กับประเทศเป็นอย่างดี เส้นไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติชนิดหนึ่งที่ได้จากตัวหนอนไหม ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีหน่วยงานของทั้งภาครัฐและภาคเอกชนส่งเสริมให้เลี้ยงไหมอย่างจริงจัง เพื่อเป็นอาชีพเสริมแก่ อีกทั้งมีการวิจัยด้านตัวหนอนไหมเพื่อให้มีคุณภาพผลิตเส้นใยได้ดีและทนทานต่อโรคต่าง ๆ พร้อม ๆ กับการพัฒนาหม่อนสำหรับเลี้ยงไหม เพื่อที่จะให้ได้เส้นไหมที่มีคุณภาพดี สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าและตลาดโลกได้ โดยธรรมชาติของเส้นใยไหมแล้วจะมีความแข็งแรงค่อนข้างมาก มีความยืดหยุ่น ความเหนียวสูง แต่มีความอ่อนนุ่ม จึงมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเส้นใยและสิ่งทอ สำหรับผลิตเป็นเครื่องนุ่งห่มอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน นอกจากนี้แล้วยังได้มีการนำไปเส้นใยไหมไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ประดิษฐ์เป็นสื่อเกราะกันกระสุนเนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของมันที่มีทั้งความเหนียวและความยืดหยุ่นสูง จึงทำให้มันสามารถรองรับแรงกระแทกและดูดซับแรงได้เป็นอย่างดี ยังสามารถใช้งานได้คล่องตัวสูงด้วยเพราะว่ามีน้ำหนักเบาและไม่ใหญ่/หนักเมื่อเทียบกับสื่อเกราะกันกระสุนที่ทำจากวัสดุที่เป็นโลหะ

2. การนำเส้นไหมและผลิตภัณฑ์จากไหมมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ เช่น เครื่องสำอางแต่งหน้า ดูแลผิว แชมพู ครีมนวดน้ำ สบู่ โลชั่นต่าง ๆ โดยทำการย่อยเส้นไหมให้เป็นพอลิเมอร์ขนาดเล็ก อาจจะเล็กลงถึงอยู่ในรูปของกรดอะมิโน จากนั้นจึงนำมาผสมเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางต่อไป ซึ่งนับว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจมาก ที่จะสามารถเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ในประเทศให้สูงขึ้นได้อีก

3. ประโยชน์ในทางการแพทย์อย่างมากอีกด้วย เช่น การประยุกต์ทำฟิล์มปิดแผล (tissue-engineered scaffolds), wound dressing, ไหมเย็บแผล, ระบบนำส่งยา (drug delivery system) ทั้งนี้ เพราะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง (high specific surface area) รวมทั้งมีความแข็งแรง และทนต่อความร้อนและการนำไฟฟ้าได้ดี

4. นอกจากนี้ยังสามารถใช้ผลิตเป็น hydrogel การผลิตเป็นเยื่อเลือกผ่าน (membrane) ใช้สำหรับผลิตอุปกรณ์ตรวจวัดสารทางชีวโมเลกุล (biological sensor) และใช้ในงานทางด้านพอลิเมอร์ผสม เป็นต้น

สำหรับประเทศไทยจะเน้นการใช้ไหมในอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่มเป็นหลักเพราะนอกจากจะนำเงินเข้าประเทศปีละหลายร้อยล้านบาทแล้ว ยังสร้างงานและสร้างรายได้อย่างงามแก่ตามท้องถิ่นอีกเป็นจำนวนมาก จึงทำให้มีหน่วยงานต่างๆ เข้ามาส่งเสริมและให้ความรู้แก่ ตั้งแต่โครงการปลูกหม่อนเลี้ยงไหม โครงการทอผ้าไหมในพระตำริของสมเด็จพระบรมราชินีนาถ หรือแม้จะเป็นกรมส่งเสริมการเกษตร หรือหน่วยงานเอกชนก็เข้ามาลงทุนตรงส่วนนี้มาก และยิ่งปัจจุบันมีการส่งเสริมหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (OTOP) ก็ยิ่งสร้างงานและรายได้แก่มากยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากเส้นไหมหรือผ้าไหมที่ย้อมโดยตามจังหวัดต่างๆ โดยเฉพาะในภาคอีสานซึ่งมักจะย้อมโดยสีเคมีหรือด้วยสีย้อมธรรมชาติหรือตามภูมิปัญญาท้องถิ่นก็ตาม จะเกิดการตกสีหรือมีสีซีด

จากหลังจากผ่านการใช้เป็นได้ระยะหนึ่งหรือมีการชักล้างมากๆ จนทำให้สีสนของผลิตภัณฑ์ผ้าไหมไม่น่าสวมใส่ อีกต่อไป ซึ่งปัญหาการตกสี/สีซีดจางของผลิตภัณฑ์ผ้าไหม น่าจะมีสาเหตุมาจากกรรมวิธีในการย้อมสีเส้นไหม ของที่ยังไม่เหมาะสมหรือยังไม่ดีเพียงพอที่จะทำให้สีย้อมยึดติดกับผ้าไหมอย่างคงทนไม่หลุดง่ายเวลาซักล้าง ดังนั้นถ้าหากปัญหานี้ได้รับการแก้ไขหรือมีการพัฒนาปรับปรุงกรรมวิธีในการย้อมสีให้ดียิ่งขึ้น ก็จะส่งผลดีต่อ ผ้าไหมของที่จะได้รับความนิยมมากยิ่งขึ้น และจะเป็นการเพิ่มมูลค่าเพิ่มแก่ผลิตภัณฑ์ผ้าไหมให้สูงขึ้น สุดท้ายรายได้ของก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย และดังนั้นการศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการติดสีย้อมของเส้นไหม จึงเป็นเรื่องที่สมควรทำการศึกษาวิจัยยิ่ง รวมทั้งการพัฒนาวิธีการหรือเทคนิคที่จะช่วยให้ความสามารถในการ ติดสีย้อมของเส้นไหมดีขึ้น แต่ก่อนที่จะพัฒนากรรมวิธีการย้อมติดสีได้ สิ่งที่สำคัญอันดับแรก คือ จำเป็นจะต้อง ทราบคุณสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของเส้นไหมก่อน เช่น โครงสร้างทางเคมี (chemical structure) ของไหมพื้นบ้านในเขตภูมิภาคนี้ หมู่ฟังก์ชันต่างๆ (functional groups) การละลายด้วยตัวทำ ละลายต่าง ๆ สารเคมีที่ใช้กำจัดเชรีซินได้ดีควรจะเป็นสารอะไร สภาพพื้นผิวของไหม (morphology) ในแต่ละ ขั้นตอนเป็นอย่างไร สภาพการทนต่อความร้อนของเส้นไหม (thermal properties) ลักษณะการจัดเรียงตัว ของโครงสร้างภายใน และ สมบัติเชิงกล

2.9 เส้นใย (Fiber)

ความหมายของเส้นใย

เส้นใย หมายถึง สิ่งที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวเรียวยาว องค์ประกอบของเซลล์ ส่วนใหญ่ เป็นเซลลูโลส เกิด จากการรวมตัวของพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ของกลูโคส (glucose) ซึ่งโมเลกุลของเซลลูโลสเรียงตัว กันในผนังเซลล์ของพืชเป็นหน่วยเส้นใยขนาดเล็กมาก เกิดการเกาะจับตัวกันเป็นเส้นใยขึ้นประเภทของเส้นใย เส้นใยจากธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยที่มีอยู่ในธรรมชาติ แบ่งได้เป็น เส้นใยจากพืช ได้แก่ เส้นใยจากเซลลูโลส เป็น เส้นใยที่ประกอบด้วยเซลลูโลส ซึ่งได้จากส่วนต่างๆของพืช เช่น ป่าน ปอ ลินิน ไยสับปะรด ไยมะพร้าว ฝ้าย หนุ่น ทรนารายณ์ เป็นต้น เซลลูโลส เป็น โฮโมพอลิเมอร์ ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสจำนวนมาก มี โครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา เส้นใยจากสัตว์ ได้แก่ เส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ (wool) ไหม (silk) ผม (hair) เล็บ เขา ไยไหม เป็นต้น เส้นใยเหล่านี้ มีสมบัติ คือ เมื่อเปียกน้ำ ความเหนียวและความแข็งแรงจะลดลงถ้า สัมผัสแสงแดดนานๆ จะสลายตัว เส้นใยจากสินแร่ เช่น แร่ใยหิน (asbestos) ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทนไฟ ไม่นำไฟฟ้า เส้นใยสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นจากสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ใช้ ทดแทนเส้นใยจากธรรมชาติ แบ่งเป็น 3 ประเภท เส้นใยพอลิเอสเตอร์ เช่น เทโทรอน ใช้บรรจุในหมอน เพราะ มีความพืดหยุ่นไม่เป็นอันตรายต่อผิวหนัง สำหรับดาครอน (Dacron) เป็นเส้นใยสังเคราะห์พวกพอลิเอสเตอร์ อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Mylar มีประโยชน์ทำเส้นใยทำเชือก และฟิล์ม เส้นใยพอลิเอไมด์ เช่น ไนลอน (Nylon) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์มีหลายชนิด เช่น ไนลอน 6,6 ไนลอน 6,10 ไนลอน 6 ซึ่งตัวเลขที่ เขียนกำกับหลังชื่อจะแสดงจำนวนคาร์บอนอะตอมในมอนอเมอร์ของเอมีนและกรดคาร์บอกซิลิก ไนลอน จัดเป็นพวกเทอร์มอพลาสติก มีความแข็งแรงมากกว่าพอลิเมอร์แบบเติมชนิดอื่น (เพราะมีแรงดึงดูดที่แข็งแรงของ พันธะเพปไทด์) เป็นสารที่ติดไฟยาก (เพราะไนลอนมีพันธะ C-H ในโมเลกุลน้อยกว่าพอลิเมอร์แบบเติมชนิด อื่น) ไนลอนสามารถทดสอบโดยผสมโซดาหลาม ($\text{NaOH} + \text{Ca(OH)}_2$) หรือเผาจะให้ก๊าซแอมโมเนีย ประโยชน์ ของไนลอน ใช้ในการทำเสื้อผ้า ถุงเท้า ถุงน่อง ขนแปรงต่างๆ สายกีตาร์ สายเอ็น ไม้แร็กเก็ต เป็นต้น เส้นใย อะคริลิก เช่น ออร์ใช้ในการทำเสื้อผ้า ผ้านวม ผ้าขนแกะเทียม ร่มชายหาด หลังคากันแดด ผ้าม่าน พรม เป็น ต้น เซลลูโลสแอซีเตด เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากการใช้เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับกรดอะซิติกเข้มข้น โดยมี กรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้ประโยชน์จากเซลลูโลสอะซีเตด เช่น ผลิตเป็นเส้นใยอาร์แนล 60 ผลิต

เป็นแผ่นพลาสติกที่ใช้ทำแผงสวิทช์และหุ้มสายไฟ เส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่ได้จากการนำสารจากธรรมชาติ มาปรับปรุงโครงสร้างให้เหมาะกับการใช้งาน เช่น การนำเซลลูโลสจากพืชมาทำปฏิกิริยากับสารเคมีบางชนิด เส้นใยกึ่งสังเคราะห์ นำมาใช้ประโยชน์ได้มากกว่าเส้นใยธรรมชาติ ตัวอย่างเส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เช่น วิสคอสเรยอง แอมเบอร์เกรยอง เป็นต้น

2.9.1 สมบัติของเส้นใย

โครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และการเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย เป็นสมบัติซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมบัติของผ้าที่ทำขึ้นจากเส้นใยนั้นๆ เส้นใยโดยทั่วไปควรมีคุณสมบัติดังนี้คือ มีความแข็งแรงและทนทาน (strength and durability) สามารถปั่นได้ (can be spun) มีความสามารถในการดูดซับดี (absorbency) โดยทั่วไปผ้าที่ผลิตจากเส้นใยที่แข็งแรงจะมีความแข็งแรงทนทานตามไปด้วย หรือผ้าที่ผลิตขึ้นจากเส้นใยที่สามารถดูดซับน้ำได้ดีจะส่งผลให้ผ้าสามารถดูดซับน้ำและความชื้นได้ดี เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในส่วนที่มีการสัมผัสกับผิวและดูดซับน้ำ เช่น ผ้าเช็ดตัว ผ้าอ้อม เป็นต้น ดังนั้นการทราบสมบัติของเส้นใย จะทำให้สามารถทำนายสมบัติของผ้าที่มีเส้นใยนั้น ๆ ได้และทำให้ผู้ใช้สามารถเลือกชนิดของผลิตภัณฑ์ประเภทได้ถูกต้องตามความต้องการ ที่จะนำไปใช้งาน

2.9.2 การผลิตเส้นใยใหม่

2.9.2 .1 การตรวจสอบสมบัติเส้นใย

การที่จะทราบว่าเส้นใยชนิดหนึ่ง ๆ มีสมบัติอย่างไรนั้น นอกจากการสังเกตได้ด้วยตา และการจับต้องสัมผัสด้วยมือแล้ว การตรวจสอบเพื่อหารายละเอียดต่าง ๆ มาประกอบการพิจารณาถึงความเห็นเกี่ยวกับสมบัติของเส้นใยชนิดหนึ่ง ๆ นั้นอาจ ทำได้หลายวิธี เนื่องจากสมบัติของเส้นใยแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับส่วนประกอบสำคัญ 3 ประการคือ

1. โครงสร้างหรือรูปร่างภายนอก
2. โครงสร้างภายใน
3. ส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใย

การตรวจสอบเพื่อหาสมบัติของเส้นใยอาจทำได้โดย การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อดูลักษณะและรูปร่างภายนอกของเส้นใยว่าพื้นผิวภายนอกของเส้นใยนั้นเป็นอย่างไร เช่น เรียบขรุขระ กลม หรือแบน นอกจากนี้ยังใช้ดูโครงสร้างภายใน และรูปร่างด้านหน้าตัดของเส้นใยอีกด้วย เพราะลักษณะโครงสร้างทั้งภายในและภายนอกของเส้นใยแต่ละลักษณะย่อมทำให้สมบัติของเส้นใยแตกต่างกัน การตรวจสอบด้วยน้ำยาเคมี ซึ่งจะใช้หลักวิชาเคมีช่วยตรวจสอบหาส่วนประกอบมูลฐานของเส้นใยและความทนต่อสารเคมี เพื่อใช้ประโยชน์ในการตกแต่ง การย้อมสี และการนำไปใช้ การตรวจสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางกายภาพ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีอยู่ตามโรงงานผลิตผ้า หรือห้องปฏิบัติการทดสอบเส้นใยโดยใช้ทดสอบสมบัติทางกายภาพ เช่น ความเหนียว

2.9.2 .2 การแบ่งสมบัติของเส้นใย

การแบ่งสมบัติของเส้นใยอาจแบ่งได้หลายวิธี เช่น แบ่งตามความสำคัญมากน้อย หรือแบ่งตามลักษณะการใช้ การแบ่งตามความสำคัญ ซึ่งจะได้สมบัติความสำคัญออกเป็น 3 กลุ่มคือ สมบัติหลัก (primary properties) คือสมบัติจำเป็นที่เส้นใยทุกชนิดต้องมีอย่างเพียงพอที่จะนำมาปั่นเป็นเส้นด้าย สมบัติที่จำเป็นได้แก่ อัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง ความเหนียว การโค้งงอหรือปรับสภาพ สมบัติรอง (secondary properties) เป็นสมบัติที่มีความสำคัญรองลงมา ซึ่งช่วยเสริมให้ผ้ามีสมบัติน่าใช้ยิ่งขึ้น ได้แก่

ลักษณะรูปร่างของเส้นใย สมบัติเสริม (additional properties) เป็นสมบัติเฉพาะหรือสมบัติพิเศษซึ่งมีผลต่อสมบัติการนำไปใช้ของผ้าและมีอิทธิพลต่อการเลือกใช้ สมบัติเหล่านี้เช่น ความทนต่อการขัดสี การแบ่งสมบัติของเส้นใยตามประโยชน์ใช้สอยหรือลักษณะการใช้แบ่งได้ 4 กลุ่มคือ สมบัติของเส้นใยที่เกี่ยวกับความทนทาน ได้แก่ ความเหนียว ความทนต่อการขัดถู สมบัติของเส้นใยที่เกี่ยวกับความสบาย ได้แก่ สมบัติในการดูดซับน้ำและความชื้น การระบายความร้อน สมบัติของเส้นใยที่เกี่ยวกับการดูแลรักษา ได้แก่ ความทนทานต่อสารเคมี การดูดซับน้ำ การทนต่อความร้อน สมบัติของเส้นใยที่เกี่ยวกับความงาม ได้แก่ ความมัน การย้อมมีติด การจับจีบ ความนุ่ม สมบัติของเส้นใยซึ่งแบ่งตามความสำคัญคือ อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเส้นใยที่จะนำมาปั่นเป็นเส้นด้ายที่จำเป็นต้องมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 100 แต่เส้นใยส่วนใหญ่จะมีมากกว่านี้ เส้นใยยาวจะมีโมเลกุลต่อกัน ซึ่งโมเลกุลหลาย ๆ โมเลกุลมาเรียงต่อกันเป็นโซ่ เรียกว่า โพลีเมอร์ เส้นใยยาวจะมีสมบัติต่างกับเส้นใยสั้น การจำแนกเส้นใยโดยวัดขนาดความยาวอาจจำแนกออกเป็น 2 ชนิดคือ เส้นใยที่มีขนาดวัดได้เป็นนิ้วจะเรียกว่า ใยสั้น เส้นใยที่วัดได้เป็นเมตร เป็นหลา เป็นกิโลเมตร หรือเป็นไมล์เรียกว่า ใยยาว สมบัติหลักข้อต่อไปของเส้นใยคือความเหนียว ซึ่งใยสิ่งทอจะต้องมีความเหนียวเพียงพอจนสามารถผ่านกระบวนการผลิตขั้นสุดท้ายเป็นผลิตภัณฑ์สิ่งทอได้ ใยสิ่งทอแต่ละชนิดจะมีความเหนียวแตกต่างกัน ซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อความเหนียวของผ้า ความเหนียว ในที่นี้หมายถึงความสามารถในการทนต่อแรงดึงก่อนถึงจุดขาดของเส้นใย ซึ่งเส้นได้และผ้าจะมีเครื่องมือวัดเฉพาะโดยมีหน่วยวัดเป็นปอนด์ต่อนิ้ว ใยบางชนิดจะเพิ่มความเหนียวขึ้นและบางชนิดจะลดความเหนียวลงเมื่อใยเปียก บางชนิดก็ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเลย การปรับสภาพได้หรือการโค้งงอได้โดยไม่หักหรือขาด (Flexibility or pliability) ความเกาะติดกันได้ดี (Cohesiveness) สมบัติที่จำเป็นอีกอย่างหนึ่งของเส้นใยที่ใช้ทอผ้า คือความเกาะกลุ่มกันได้ดีของเส้นใย เพราะการนำเส้นใยมารวมกันและเข้าเกลียวเป็นเส้นด้าย เส้นใยจะต้องมีแรงดึงดูดระหว่างกันและเกาะติดกันได้ดี ความมีลักษณะเหมือนกันหรือรูปแบบเดียวกัน(Uniformity) ในการปั่นเส้นใยให้เป็นเส้นด้าย ถ้าเส้นใยนั้นมีขนาดใกล้เคียงกัน มีลักษณะคล้ายคลึงกันมีแรงเกาะกัน และปรับสภาพให้โค้งงอได้ดีก็จะเข้าเกลียวได้ดี และปั่นเส้นด้ายที่มีขนาดสม่ำเสมอ เส้นใยสังเคราะห์มีสมบัติข้อนี้สูง เนื่องจากเราสามารถควบคุมการผลิตได้ เส้นใยมักจะเรียบเท่ากัน สมบัติรองคือ รูปร่างของเส้นใย (Physical shape) ความแตกต่างกันของรูปร่างหรือโครงสร้างภายนอกของเส้นใย เช่น อัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง ผิวสัมผัสภายนอก ขนาดและลักษณะของรูปร่างด้านหน้าตัด มีส่วนทำให้สมบัติของเส้นใยผิดแผกแตกต่างกันออกไปทั้งสิ้นซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อเรื่องสมบัติประกอบของเส้นใยต่อไป ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ(Density and specific gravity) ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะของเส้นใยบอกถึงน้ำหนักของผ้าความหนาแน่นของเส้นใยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนความถ่วงจำเพาะของเส้นใยคือ อัตราส่วนน้ำหนักของเส้นใยเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เส้นใยที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ ย่อมเบากว่าเส้นใยที่มีความถ่วงจำเพาะสูง น้ำหนักของผ้าจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นหรือน้ำหนักของเส้นใย สมบัติในการดูดความชื้นของเส้นใย หมายถึงความสามารถในการดูดหรือเก็บความชื้นของเส้นใย ซึ่งความชื้นนี้อาจเป็นความชื้นจากร่างกายหรือในบรรยากาศแวดล้อมโดยวัดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักความชื้นที่เพิ่มขึ้นในเส้นใยภายใต้สภาวะมาตรฐานคือ มีความชื้นสัมพัทธ์ 65 เปอร์เซ็นต์ หรือเรียกว่าการดูดความชื้นของเส้นใย เส้นใยหรือผ้าที่มีสมบัติในการดูดความชื้นได้ดีนอกจากจะสวมใส่สบายแล้วยังย้อมสีได้ดี หรือย้อมสีได้ง่ายด้วย ซึ่งเป็นการเพิ่มความงามให้กับผ้าด้วย นอกจากนั้นยังเกี่ยวข้องไปถึงการคืนตัวของผ้า สำหรับเปอร์เซ็นต์ของการดูดซับน้ำและความชื้นขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมีและโครงสร้างโมเลกุลของเส้นใย การดูดซับน้ำและความชื้นนอกจากเป็นสมบัติที่ทำให้ผ้าสวมใส่สบายแล้ว ยังเป็นสมบัติอีกอย่างหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการซักล้างและการทำความสะอาดเสื้อผ้าด้วย ความยืดได้หมายถึงเส้นใยที่สามารถยืดได้ถึงจุด ๆ หนึ่งก่อนถึงจุดขาดคิดเป็น

เปอร์เซ็นต์ของการยืดหรือความสามารถในการยืดออกได้ของเส้นใยและผ้าอาจแตกต่างกันได้ตามอุณหภูมิ ความเปียก และความแห้งของเส้นใยหรือผ้า เส้นใยที่จับตึงยืดไว้ได้ชั่วระยะเวลาหนึ่งแล้วปล่อยมือหากเส้นใย สปริงตัวกลับเท่าขนาดเดิมได้เรียกว่าเส้นใยนั้นมีความยืดแล้วหดกลับที่เดิมได้ การวัดความยืดแล้วหดนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบสำคัญ 2 ประการคือ ช่วงเวลาที่ดึงให้ยืดและยืดเป็นเวลานานเท่าใด ความคืนตัวหมายถึงความสามารถของเส้นใยที่คืนตัวได้ภายหลังการกดอัด โค้งงอ หรือยับ ฉะนั้นเส้นใยที่คืนตัวได้ดี คือเส้นใยที่นำไปใช้แล้วสามารถคืนสภาพเดิมได้โดยเร็ว เช่น พรมเช็ดเท้าซึ่งเมื่อเหยียบผ่านไปแล้วขนของพรมจะตั้งเรียบเหมือนเดิมและกระโปรงผ้าขนสัตว์ที่สวมแล้วแขนทั้งไว้ เมื่อถูกความชื้นผ้าจะหายยับและคืนสภาพเดิมโดยไม่ต้องนำไปรีด ผ้าที่มีสมบัติข้อนี้ดีจะมีสมบัติเกี่ยวกับความยืดหยุ่น ความยืดได้ และความคงรูปที่ดีด้วย สมบัติเสริมได้แก่ สมบัติทนต่อการขัดถูของเส้นใย คือ ความสามารถของเส้นใยที่ยังคงสภาพเดิมไว้ได้นานเมื่อได้รับการขัดสีมาก ๆ จากการใช้ผ้าจะไม่ขาด ไม่เป็นขุยเป็นเม็ด และสีไม่ซีดไม่จางง่ายใยที่มีสมบัติต่อการขัดถูได้ดีเยี่ยมได้แก่ ฝ้าย โพลีเอสเตอร์ ความคงรูปหรือความคงตัวของเส้นใย(Dimensional stability) สมบัติข้อนี้มีความสำคัญมากต่อการใช้และการดูแลรักษาผ้า เพราะจะทำให้ผ้าใช้อยู่ได้นาน ไม่ยืดและไม่หดง่าย เมื่อใส่ไม่ทำให้คับหรือหลวมง่ายแม้จะโดนความร้อน ความเย็น และความชื้น ใยที่คงตัวจะได้ผ้าที่คงรูปด้วย ใยขนสัตว์มักจะหดง่าย เพราะโครงสร้างของใยมีลักษณะเป็นสเกลซ้อนกัน ความอ่อนตัวเหนียวเมื่อโดนความร้อน (Plasticity) สมบัติข้อนี้หมายถึงเส้นใยจะเปลี่ยนรูปและหดย่างถาวรหรือชั่วคราวเมื่อถูกความชื้น ความร้อน และแรงกด หรือเมื่อถูกความร้อนแต่เพียงอย่างเดียวก็เปลี่ยนรูปได้ สมบัติข้อนี้มีประโยชน์ที่ทำให้ผ้าเปลี่ยนรูปได้โดยใช้ความร้อนช่วยเช่น การอัดกลีบกระโปรง การทนต่อความร้อน(Heat tolerance) สมบัติข้อนี้มีผลต่อการซักกรีดเกี่ยวกับอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ซักผ้าและเวลารีดผ้า ผ้าใยสังเคราะห์จะไม่ทนต่อความร้อน เมื่อถูกความร้อนมากผ้าจะย่น ยับ อ่อนตัวและละลาย การนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ผ้าที่ดูดซับน้ำและความชื้นได้ดีจะเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี ไม่ทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตทำให้สวมใส่สบาย ไม่เกิดความรำคาญ โดยเฉพาะในวันที่อากาศร้อนและแห้งผ้าที่ดูดน้ำและความชื้นได้ดี เช่น ฝ้ายฝ้ายหรือผ้าจากใยเซลลูโลสจะมีคุณสมบัติข้อนี้ดีกว่าผ้าใยสังเคราะห์จากสารเคมี

2.9.2 .3 การนำความร้อนและการเก็บความร้อน

ใยไหมบางชนิดโดยธรรมชาติแล้วจะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีและเก็บความร้อนไว้ได้ดีซึ่งจะมีผลไปถึงความสบายเมื่อใช้หรือสวมใส่นั่นๆ โครงสร้างภายนอกของเส้นใยทำให้ผ้านั้นรู้สึกอุ่นหรือเย็นได้ ผ้าที่นำความร้อนจากร่างกายออกไปจะทำให้รู้สึกสบาย แต่ถ้าผ้านั้นเก็บความร้อนก็จะทำให้รู้สึกร้อนเพราะความร้อนไม่สามารถระบายออกไปได้ ผ้าเนื้อหนาที่ทอจากด้ายฟูจะเก็บความร้อน ส่วนผ้าเนื้อบางที่ทอจากใยธรรมชาติจากพืช เช่นผ้าป่านและผ้าฝ้ายเนื้อบางจะนำหรือระบายความร้อนได้ดี ความทนไฟหรือไม่ติดไฟง่ายเป็นสมบัติข้อหนึ่งของผ้าที่จะทำให้ใช้ได้อย่างปลอดภัย ซักกรีดและดูแลรักษาง่าย และเวลาใช้ไม่ต้องระมัดระวังมาก โดยเฉพาะเสื้อผ้านเด็ก ผ้าผ้าน ควรจะไม่ติดไฟง่ายเพื่อความปลอดภัยเมื่อใช้ ผ้าที่ทนไฟหรือไม่ติดไฟ (Flameproof) จะไม่ติดไฟแม้จะโดนเปลวไฟ ซึ่งได้แก่ ผ้าใยแก้ว การตกแต่งให้ทนไฟทำได้โดยวิธีการทางเคมี ซึ่งเราจะทราบได้ว่าผ้านั้นใดตกแต่งให้ทนไฟหรือไม่ด้วยการอ่านรายละเอียดจากผ้าฝ้าย

2.9.2 .4 ความมัน

ความมันของผ้าเป็นคุณสมบัติที่ทำให้เกิดความงามซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาโดยขึ้นอยู่กับปริมาณของแสงสะท้อนจากเส้นใย คือยิ่งแสงสะท้อนได้มากก็มันมากพื้นผิวสัมผัสของผ้ายังเรียบเป็นมันและสีอ่อนยิ่งสะท้อนแสงได้มาก ผ้าที่มีผิวสัมผัสขรุขระ สีดำน และทึบจะเก็บแสง ผ้าใยธรรมชาติที่มีเนื้อมันได้แก่ผ้าไหม ซึ่งโดยธรรมชาติใยสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะมันมาก ต้องทำให้ความร้อนมันลดลงโดยการเติมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในสารละลายเหลวก่อนที่จะใส่เครื่องฉีดออกมาเป็นเส้นใย

2.9.2 .5 ความโปร่งแสง

สมบัติความบางและโปร่งแสงของผ้าจะทำให้แสงผ่านได้ ซึ่งผ้าบางและโปร่งแสงมากหรือน้อยจะสวayıไปคนละอย่างตามวัตถุประสงค์และประโยชน์ใช้สอยของผ้านั้นๆ เช่น ผ้าบางมากแม้จะสวayıก็คงจะไม่เหมาะที่จะนำไปทำผ้าปูที่นอนในห้องนอน ซึ่งต้องการความมืดซิด ผ้าจะดูบางหรือหนามากน้อยขึ้นอยู่กับสีและความมันของผ้านั้นด้วย ซึ่งผ้าสีอ่อนจะดูโปร่งแสงมากกว่าผ้าสีแก่ ทั้งสี ความมัน และความโปร่งแสง เป็นสมบัติที่เห็นด้วยตา

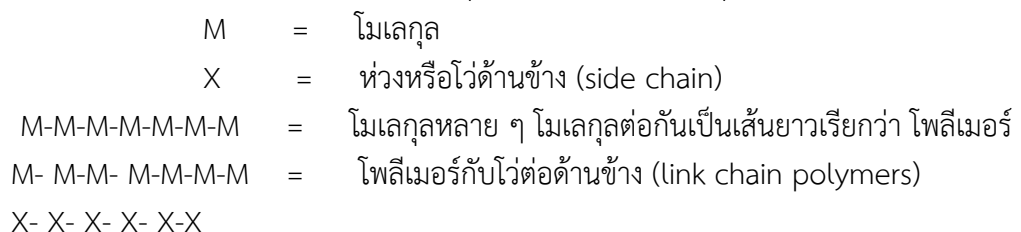
2.9.2 .6 ความทนทานทางชีวภาพของเส้นใยหรือความทนทานในเนื้อของเส้นใย

สมบัติข้อนี้มีผลมากต่อการใช้และการดูแลรักษาผ้า ผงซักฟอกชนิดเข้มข้นจะทำลายเนื้อผ้าดี หรือทำให้ผ้าเสื่อมคุณภาพ ทั้งนี้เพราะโครงสร้างทางชีวภาพและส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน จึงมีความทนทานต่างกัน ตามปกติแมลง สัตว์ และเชื้อราจะทำลายเส้นใยซึ่งมีเนื้อไม่ทน ใยขนสัตว์จะมีส่วนประกอบของกำมะถันและโปรตีนมาก มอดจึงชอบกินใยขนสัตว์ และรามักขึ้นผ้าที่เป็นใยเซลลูโลสเมื่ออยู่ในภาวะอากาศค่อนข้างอุ่น ชื้น และมีมืด ดังนั้นถ้าจะเก็บผ้าไว้ไม่ให้ขึ้นรา ควรเก็บไว้ในที่ที่ค่อนข้างเย็นและแห้ง และมีแสงสว่างเพียงพอผ้าที่มีความทนทานต่ำจะขึ้นราง่าย และแมลงชอบกิน ซึ่งจะแก้ไขได้โดยการตากแดดให้ทนรา ทนมอด และแมลง ด้วยการใส่สารเคมีผสมเข้าไปในเนื้อผ้าหรือฉีดหรือพ่นก่อนเก็บ มีแมลงกินผ้าบางชนิดชอบกินแป้ง ซึ่งจะกัดผ้าที่มีส่วนประกอบที่ทำจากสารเคมีไว้ในตู้เก็บด้วย ความทนต่อแสงแดด (Sunlight resistance) ผ้าที่จากไหมบางชนิดจะเสื่อมคุณภาพเมื่อตากแดดจัดนานๆ จะสังเกตได้จากดกสีที่ซิดจางลง และเนื้อผ้าที่อ่อนตัว ซึ่งเมื่อปล่อยทิ้งไว้นานๆ ผ้าจะขาด ผ้าที่จำเป็นต้องเลือกใช้โดยมรสมบัติข้อนี้คือผ้าปูที่นอน ใยที่ทนแสงแดดได้ดีเยี่ยมได้แก่ ใยแก้วอะคริลิก และโมดอะคริลิก ที่ทนได้ดี รองลงมาได้แก่ ซาเรน โพลีเอสเตอร์ ลินิน ฝ้าย เรยอน และอะซิเตด และที่ทนได้ต่ำได้แก่ ไนลอน ขนสัตว์ และไหมองค์ประกอบที่ทำให้เส้นใยมีสมบัติต่างกัน ดังได้กล่าวมาแล้วว่าเส้นใยมีสมบัติต่างๆมากมาย ปัจจัยสำคัญที่จะทำให้เส้นใยมีสมบัติแตกต่างกันออกไปคือโครงสร้างของเส้นใย ซึ่งอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ โครงสร้าง

2.9.3 ทางกายภาพของเส้นใย และ โครงสร้างหรือส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใย

โครงสร้างทางกายภาพของเส้นใยได้แก่ ความยาว ความกว้าง หรือเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ภาพตามขวางหรือภาพทางด้านหน้าตัดของเส้นใยและการเรียงตัวและการยึดติดกันของโมเลกุลในเส้นใย ความยาวของเส้นใย (Fiber length) แบ่งตามความยาวได้เป็น 2 ชนิดคือ ใยสั้น (staple fibers) วัดได้เป็นนิ้ว มีตั้งแต่ 0.5-1.5 นิ้ว ใยธรรมชาติทุกชนิดเป็นเส้นใยยกเว้นเส้นใยไหม ใยประดิษฐ์บางชนิดก็เป็นใยสั้นเหมือนกัน ใยยาว (filaments) วัดได้เป็นหลา ใยไหมเป็นธรรมชาติชนิดเดียวที่เป็นใยยาว ใยสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะเป็นประเภทใยยาว ทั้งนี้เพราะการผลิตใยสังเคราะห์นั้นสามารถควบคุมความยาวของเส้นใยได้ ซึ่งใยยาวมี 2 ชนิดคือ ใยยาวเดี่ยว และ ใยยาวรวม ความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (Fiber diameter) ความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะบอกขนาดของเส้นใย เส้นใยขนาดเล็ก หรือใยละเอียด เมื่อนำมาทอเป็นผ้าจะได้ผ้าเนื้อนุ่มและบาง แต่ถ้าใยเส้นใหญ่จะได้ผ้าเนื้อหนา หยาบ และแข็งกระด้าง พื้นผิวภายนอกของเส้นใย (Surface contour) ใยธรรมชาติจะมีพื้นผิวภายนอกที่ไม่เรียบเสมอกันหมดตลอดทั้งเส้น เหมือนกับใยประดิษฐ์ หรือจะกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่า ใยธรรมชาติจะมีรูปร่างลักษณะไม่เป็นรูปแบบเดียวกันตลอดความยาวเส้นใยเส้นหนึ่ง ๆ แต่ใยประดิษฐ์จะมีรูปร่างเหมือนกันตลอดทั้งเส้นฉะนั้นการที่จะนำใยประดิษฐ์มาผสมกับใยธรรมชาติ ผู้ผลิตจะต้องผลิตใยประดิษฐ์ออกมาให้มีรูปร่างเหมือนใยธรรมชาติชนิดนั้น ๆ จึงจะรวมหรือผสมกันได้ดี ใยขนสัตว์เป็นเส้นใยชนิดเดียวที่มีรูปร่างลักษณะภายนอกเป็นเกล็ดเรียง ซ้อนกันเหมือนเกล็ดปลา ใยบางชนิดหยักเหมือนฟันปลา ความหยักของเส้นใยจะทำให้เส้นใยรวมตัวหรือเกาะกลุ่มกันได้ดีเมื่อปั่นเป็น

เส้นด้าย ความหยิกงอที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือของใยธรรมชาติจะมีลักษณะโค้งมน ความหยิกงออันเกิดจากการผลิตใยประดิษฐ์มักจะมีลักษณะงอเป็นมุมหัก ลักษณะความหยิกงอของใยธรรมชาติ ลักษณะความหยิกงอของใยประดิษฐ์ ใยที่หยิกงอจะรวมตัวกันง่ายและเข้ากันได้ดี โดยจะให้ใยเหนียว นุ่ม หนา ดูดซึมน้ำได้ดี ให้ความอบอุ่น และเก็บความร้อนได้ดี ความหยิกงอของเส้นใยอาจแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ ใยที่ทำให้หยิกงอโดยวิธีการทางเชิงกล (mechanical crimp) โดยใช้ลูกกลิ้งกดอัดและบิดให้หยิกเป็นคลื่นมุมของเส้นใยจะหักเป็นเหลี่ยม ซึ่งความร้อนจะช่วยให้เส้นใยหยิกงออย่างถาวรได้ ใยที่หยิกงอเองตามธรรมชาติ (natural or inherent crimp) มักจะพบในใยฝ้ายและใยขนสัตว์ ใยฝ้ายจะบิดเป็นเกลียวกลับไปมาคล้ายจับรีบับนั้นมาบิด (convolution) ส่วนใยขนสัตว์หยิกงอมากมองเห็นได้ทั้ง 3 ด้านคือ ด้านกว้าง ยาว และหนา ใยที่ทำให้หยิกงอโดยทางเคมี (latent or chemical crimp) หรือใช้วิธีการทางเคมี ซึ่งจะใช้ในขณะผลิตเส้นใยหรือตอนตกแต่งผ้าก็ได้โดยการจุ่มเส้นใยหรือผ้าลงในน้ำยาเคมี ซึ่งหลังจากนั้นเส้นใยก็จะหยิกงอ โครงสร้างภายในของเส้นใย (Internal fiber structure) เป็นพื้นฐานเบื้องต้นที่ทำให้เส้นใยมีคุณภาพแตกต่างกัน ตามปกติเส้นใยแต่ละเส้นจะประกอบด้วยโมเลกุลเป็นล้านๆ เรียงตัวต่อกันและยึดติดกันด้วยวิธีต่างๆ กัน โมเลกุลเรียงตัวยาวเรียกว่า Linear Polymers ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างการต่อกันของโมเลกุลด้วยวิธีการง่ายๆ สมมุติให้



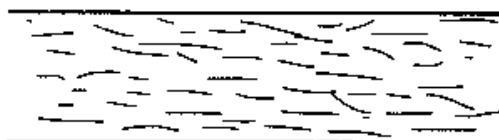
โครงสร้างภายในของเส้นใยทำให้สมบัติของเส้นใยแตกต่างกันด้วยเหตุผล 3 ประการคือ

1. ความยาวของห่วงโมเลกุล
2. ลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุล
3. การยึดกันและแรงยึดภายในระหว่างโซ่โมเลกุล

โครงสร้างภายในของเส้นใยประดิษฐ์จะได้เปรียบเส้นใยธรรมชาติก็เพราะว่าการผลิตใยประดิษฐ์นั้นสามารถควบคุมการผลิตได้ ต้องการเส้นใยชนิดใด ให้มีคุณภาพอย่างไรก็ทำได้ ส่วนเส้นใยธรรมชาตินั้นเป็นมาเองโดยธรรมชาติ

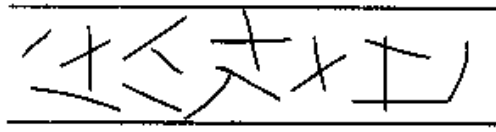
2.9.3 1การเรียงตัวของโมเลกุล (Molecular arrangement)

การเรียงตัวของโมเลกุลในเส้นใยหรือโมเลกุลที่ต่อเชื่อมกันภายในเส้นใยแต่ละชนิดจะไม่เหมือนกัน โดยลักษณะการเรียงตัวที่แตกต่างกันจะทำให้คุณภาพของผ้าต่างกัน เช่น มีความเหนียว การดูดซึมน้ำและความชื้น ความยืด การสปริงตัวกลับ ความยืดหยุ่น ความอ่อนนุ่ม ความคืนตัว และความทนต่อสารเคมี ซึ่งรวมทั้งความร้อน ความดัน และอื่น ๆ ต่างกัน ดังรูปที่ 2.11



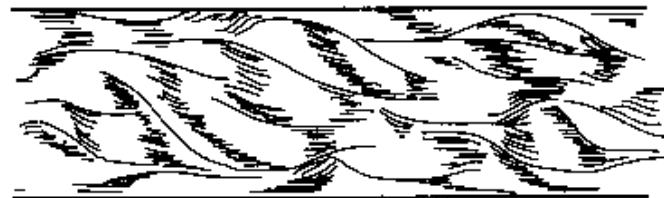
ภาพที่ 2.11 เส้นใยที่มีการเรียงตัวของโซ่โมเลกุลสูง [7]

เส้นใยที่มีโมเลกุลเรียงตัวกันดีและขนานไปกับแกนของเส้นด้ายเรียกว่าหันเหไปทางเดียวกันมาก (High orientation)



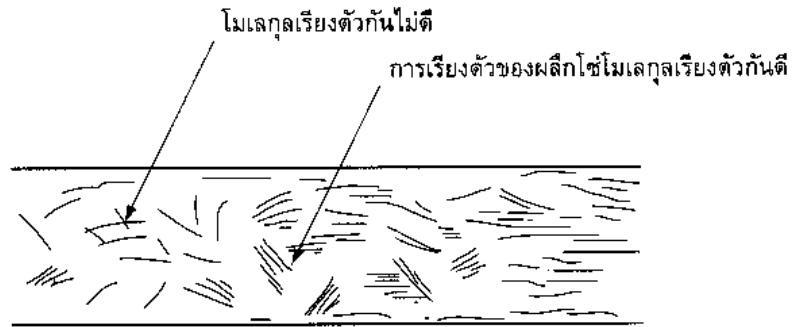
ภาพที่ 2.12 เส้นใยที่มีการเรียงตัวของโซ่โมเลกุลต่ำ [7]

เส้นใยที่มีการเรียงตัวของโมเลกุลดีและมีการยึดกันระหว่างโซ่โมเลกุลแน่นเมื่อนำมาทำเป็นเส้นด้ายและทอเป็นผืนผ้า ผ้านั้นจะเหนียวหรือมีความทนทานมาก แต่ยืดได้น้อย ในทำนองเดียวกัน ผ้าที่ทอจากใยที่มีการเรียงตัวของโมเลกุลต่ำหรือการยึดกันระหว่างโซ่โมเลกุลไม่แน่นและไม่ทน เนื้อผ้าก็จะไม่เหนียว ตัวยึดห้วงโมเลกุล (Bond) มี 2 ชนิดคือ Hydrogen Bonds คือพันธะเคมีหรือตัวยึดที่จับกันระหว่างไฮโดรเจน อะตอมที่มีอิเล็กโตรเนกาทีฟ เช่น ฟลูออรีน ออกซิเจน และไนโตรเจน การยึดกันแบบนี้จะมีแรงยึดที่แข็งแรงและเหนียวแน่น ซึ่งพบในบริเวณการของเส้นใยที่มีการเรียงตัวของโมเลกุลดี หรือประเภทเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ Van Der Waals Forces เป็นตัวยึดที่ไม่ทนทานและไม่แข็งแรง และมีแรงยึดต่ำเกิดในบริเวณของเส้นใยที่มีการเรียงตัวของโมเลกุลไม่ดีหรือเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ การยึดกันนี้จะมีลักษณะคล้ายๆ กับแรงดึงดูดของแม่เหล็ก เส้นใยที่มีการเรียงตัวของโซ่โมเลกุลไม่อยู่ในแนวเดียวกันตัวยึดห้วงโมเลกุลหรือตัวที่ยึดจะไม่แข็งแรง ขาดง่าย และเลื่อนทับกันง่ายกว่าตัวยึดในเส้นใยที่มีการเรียงตัวของโมเลกุลดี ซึ่งชนิดแรกจะทำให้ใยยืดหยุ่นได้ดีกว่า เมื่อโซ่โมเลกุลเรียงตัวขนานกันดี และยึดกันแน่นเป็นกลุ่มๆ เรียงซ้อนกันเรียกผลึก (Crystalline)

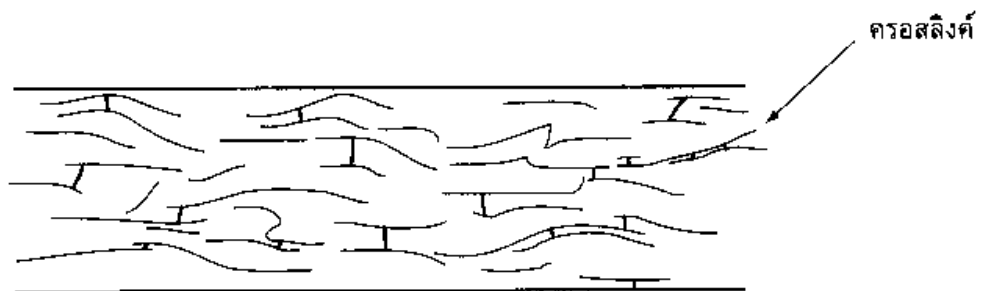


ภาพที่ 2.13 เรียงตัวของโซ่โมเลกุลที่เป็นผลึกไม่เป็นระเบียบ [7]

ภาพที่ 2.14 การเรียงตัวของโซ่โมเลกุลที่เป็นระเบียบและขนานไปตามแกนของเส้นใยแบบในใยเส้นเดียวกัน [7]



ภาพที่ 2.15 การเรียงตัวของโมเลกุลและผลึกโมเลกุลหยาบ ๆ [7]



ภาพที่ 2.16 การเชื่อมกันของโซโมเลกุลแบบยึดข้ามกัน [7]

แรงดึงในเส้นเชือก (Tension force) คือ แรงที่เกิดขึ้นในเส้นเชือกที่ถูกขึงตึงโดยที่ในเส้นเชือกเดียวกัน ย่อมมีแรงดึงเท่ากันทุกจุด และทิศทางของแรงดึงมีทิศทางอยู่ในแนวของเส้นเชือก

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผ้านาโนสะอาดไม่เปื้อนแรงขี้ เคลือบสารกันรอยเปื้อนเกาะติด นักวิจัยสหรัฐ นำนาโนเทคโนโลยี มาเพิ่มมูลค่าอุตสาหกรรมสิ่งทอ ชูคุณสมบัติสารเคลือบที่รวมเป็นเนื้อเดียวกับเส้นใยผ้า ช่วยสลัดสิ่งสกปรกให้หลุดออกเพียงฉีกน้ำใส่ ทำให้ไม่เปื้อนแรงขี้ และผงซักฟอก คัดไม่เกินห้าปีให้ซื้อหาแน่นอน นักวิจัยมหาวิทยาลัย เคมบริดจ์ค้นพบสารเคลือบที่สามารถฝังตัวเป็นเนื้อเดียวกับใยผ้าได้เป็นผลสำเร็จ โดยมีคุณสมบัติพิเศษตรงที่สามารถทำความสะอาดเสื้อผ้าได้โดยง่าย อาจใช้วิธีการฉีดพ่นน้ำใส่จุดที่เปื้อน หรือจะใช้ผ้าหมาดๆ เช็ดก็ไม่ผิดกติกา ทีมวิจัยบอกว่า สารเคลือบที่พัฒนาขึ้นมานี้ มีกลุ่มเป้าหมายหลักไปที่บรรดาผู้ผลิตสิ่งทอ และคาดว่าในอนาคตจะวางจำหน่ายสารเคลือบในรูปแบบเปรยให้กับลูกค้าทั่วไปด้วย แต่คงไม่ใช่ในเร็ววันนี้ เฉพาะเส้นใยที่ผสมรวมตัวกับสารเคลือบดังกล่าวยังต้องใช้เวลาอีกราว 5 ปี ถึงจะวางตลาดได้ ศูนย์สิ่งทอแห่งชาติ ซึ่งเป็นพันธมิตรวิจัยร่วมระหว่างมหาวิทยาลัย 8 แห่ง รวมทั้งมหาวิทยาลัย เคลมสันด้วย ทำวิจัยชิ้นนี้ขึ้นมาภายใต้การสนับสนุนงบประมาณหลักของกระทรวงพาณิชย์สหรัฐ ขณะที่กลุ่มผู้ค้าสิ่งทอแห่งสหรัฐ เชื่อว่าสิ่งนี้จะนำประโยชน์มาให้ผู้ผลิตเสื้อผ้าได้อย่างมหาศาล แต่ดูเหมือนจะมีอุปสรรคบางอย่างที่เทคโนโลยีดังกล่าวอาจไปเติบโตนอกประเทศ ลอยด์ วูด โฆษกของกลุ่ม กล่าวว่า นวัตกรรมนี้เป็นสิ่งที่สุดยอดมาก แต่โชคไม่ดีที่งานวิจัยและพัฒนาดังกล่าวอาจถูกใช้จากชาติอื่นๆ ทัวโลกที่เป็นเจ้าตลาดสิ่งทออยู่ ปัจจุบันมีการนำนาโนเทคโนโลยีเข้ามาใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลาย ตั้งแต่การพัฒนาผ้าที่ไม่ยับย่น ไปจนถึงหน่วยความจำ

คอมพิวเตอร์ โดยสารเคลือบเส้นใยถือเป็นแอปพลิเคชันล่าสุดในศาสตร์แขนงนี้ ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างฟิล์มโพลีเมอร์และอนุภาคเงินระดับนาโนและถูกนำไปฉีดเข้าเป็นเนื้อเดียวกับเส้นใยผ้า ส่วนผสมดังกล่าวทำให้เส้นใยผ้ามีคุณสมบัติเหมือนเป็นกันชน ที่จะป้องกันไม่ให้สิ่งสกปรกหรือสารอื่นใด เข้ามาเกาะติดเส้นใยได้ และจะหลุดออกมาเองเมื่อโดนน้ำโดยไม่ต้องไปขยี้ให้เมื่อยมือเหมือนก่อน ฟิลิปส์ บราวน์ นักเคมีสิ่งทอ หนึ่งในทีมวิจัยของมหาวิทยาลัยเคลมสัน บอกว่า คุณสมบัติดังกล่าวทำให้สารเคลือบของพวกเขาต่างจากสารเคลือบที่ใช้กับเสื้อกันฝน อย่าง เทฟลอน ของบริษัท ดูปองท์ โค. รวมทั้งต่างจากวัสดุกันน้ำทั่วไปที่มักจะนำมาเคลือบเส้นใยอีกชั้นหนึ่งมากกว่าจะรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ที่สำคัญฟิล์มนาโนที่ว่ายยังไม่ทำให้เส้นใยดูมันหรือเงา เพราะโดยทางทฤษฎีแล้ว อนุภาคที่ใช้มีขนาดเล็กเกินกว่าจะมองเห็นได้ และด้วยขนาดที่เล็กจึงกว่าคลื่นความยาวแสง ทำให้อนุภาคนั้นดูไม่มีสีมันเกาะติดเส้นใยให้เห็นแม้แต่น้อย นอกจากสารเคลือบจะประยุกต์ใช้ในใยผ้าได้แล้ว ยังอาจนำไปใช้เป็นส่วนผสมในเฟอร์นิเจอร์สนาม หลังคารถยนต์ และเต็นท์พักแรมได้เช่นกัน มีรายงานการวิจัยจากงานวิจัยครั้งนี้เป็นการพัฒนาเทคโนโลยี ในการผลิตอนุภาคนาโนของซิงออกไซด์ที่มีขนาดเหมาะสมทั้งในกระบวนการทางเคมี เพื่อใช้งานร่วมกับอุตสาหกรรมสิ่งทอ ทางแพทย์ โดยเฉพาะวิธีการตรึงอนุภาคนาโนของซิงออกไซด์ให้คงทนอยู่บนผลิตภัณฑ์ รวมถึงคุณสมบัติการต้านเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักของการพัฒนาเสื้อกันหนาว ป้องกันการติดเชื้อ ผ้าที่ใช้ตัวชุดป้องกันการติดเชื้อหรือเสื้อกันหนาวของแพทย์ที่ใช้ในการผ่าตัดปัจจุบัน จะต้องปลอดเชื้อโรค โดยหลังจากใช้งานแล้วจะต้องผ่านการซักด้วยคลอรีนและอบด้วยอุณหภูมิสูงเพื่อฆ่าเชื้อโรค ซึ่งกระบวนการดังกล่าวใช้ต้นทุนค่อนข้างสูงหากสามารถพัฒนาเส้นใยที่ป้องกันการติดเชื้อได้ภายในตัวก็จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ไปได้มากผู้อำนวยการฝ่ายส่งเสริมเทคโนโลยีกล่าว จากงานวิจัยพบว่า อนุภาคนาโนของซิงออกไซด์ ที่ผลิตได้สามารถออกฤทธิ์ทำลายเชื้อจุลินทรีย์และแบคทีเรียบางชนิดได้ดีในห้องปฏิบัติการ และเมื่อใช้ซิงออกไซด์ในปริมาณ 50 มิลลิกรัมต่อตารางเมตร สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียและจุลินทรีย์สูงสุดที่ 7-8 ชนิดจึงนำซิงออกไซด์ที่ผลิตได้มาทดสอบลงบนผ้าฝ้ายด้วยวิธีจุ่ม อัดสารละลายลงบนผ้าเพื่อวัดประสิทธิภาพหลังจากที่ได้ผ้าที่ผ่านการอัดสารละลายซิงออกไซด์แล้ว ทีมวิจัยได้นำผ้าดังกล่าวมาทำการทดสอบประสิทธิภาพความคงทนของสารละลายเมื่อผ่านการซักล้างกระทั่งพบว่า ชุดดังกล่าวสามารถซักล้างทำความสะอาดได้ 50 ครั้งโดยยังมีอนุภาคนาโนของซิงออกไซด์ติดอยู่ จากความสำเร็จดังกล่าวในเบื้องต้นทีมงานได้ตัดเย็บต้นแบบเสื้อกันหนาวทางการแพทย์เพื่อนำไปศึกษาความคุ้มค่าของการตัดเย็บ รวมถึงนำเสนอให้บริษัทเอกชนที่สนใจเข้ารับการถ่ายทอดเทคโนโลยีเพื่อไปผลิตในระดับอุตสาหกรรม[8]

สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ ได้ทำการทดลอง เรื่องการศึกษาวิธีการ coat zinc oxide nano บนผ้าทอสีขาว ว่าวิธีการใดเหมาะสมมากที่สุด โดยใช้สารละลาย ZnO 2000 ppm และ น้ำยารีดผ้า ผลการทดสอบพบว่า วิธีที่ใช้นาโนซิงออกไซด์ 2000 ppm แช่ไว้ 1 ชั่วโมง แล้วนำไปตากแดด เป็นวิธีที่ดีที่สุด เพราะว่าการแช่ผ้าทอสีขาวในสารละลาย ZnO nano 2000 ppm เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซิงออกไซด์จะเกิดการเชื่อมต่อกับเส้นใยเซลลูโลสในเนื้อผ้าฝ้ายได้มากที่สุด

รศ.วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ร่วมมือด้านการวิจัยและพัฒนา ร่วมกับมูลนิธิสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อพัฒนาสิ่งทอที่มีคุณสมบัติพิเศษ (Functional textile)[9]

นายวิรัตน์ ตันเดชา นรัตน์ ผู้อำนวยการสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ มีความต้องการเส้นใยที่มีความพิเศษ เช่น เส้นใยที่ด้านในกลวง เส้นใยที่มีหลายแกนสำหรับตัดเย็บเป็นถุงลมนิรภัยในรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งแต่เดิมเทคโนโลยีที่ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นใย จะอยู่ที่กระบวนการฟอกย้อม ซึ่งเป็นขั้นตอนการผลิตระดับกลางน้ำ แต่ข้อจำกัดคือคุณสมบัติพิเศษที่ต้องการนั้นไม่มีความคงทน เมื่อเทียบกับการพัฒนาเทคโนโลยีต้นน้ำในระดับเส้นใย[10]

ปัจจุบัน สวทช.อยู่ระหว่างดำเนินการสร้างโรงงานต้นแบบเส้นใยประดิษฐ์ผสม (Bi component) โดยร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ คาดว่าจะสามารถพัฒนาคุณสมบัติใหม่เส้นใย ทั้งเส้นใยโพลิเอสเตอร์ ไนลอน อะคลิลิกและเลเยอน เช่น หน่วงไฟ ด้านแบคทีเรีย และโรงงานดังกล่าวติดตั้งระบบปั่นแบบหลอมละลาย ซึ่งนำเข้าเทคโนโลยีที่พัฒนาร่วมกันจากเยอรมนีและอเมริกา น่าจะผลิตเส้นใยที่มีคุณสมบัติพิเศษได้ตามต้องการ เช่น เส้นใยที่มีน้ำหนักเบา เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง[11]

นักวิจัยได้พัฒนาสิ่งทอให้มีคุณสมบัติดีขึ้นมาโดยตลอด เช่น ฝ้าย ทำให้ไม่ยับและรีดง่าย หรือ Wiggle free เส้นใยสังเคราะห์ อย่างโพลิเอสเตอร์ก็มีการพัฒนาให้มีคุณสมบัติป้องกันแบคทีเรีย และติดไฟยาก เหมาะสำหรับทอผ้าปูที่นอน พรม ในโรงแรม และโรงพยาบาล เพื่อป้องกันการติดไฟและควัน [12]

2.11 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ [13]

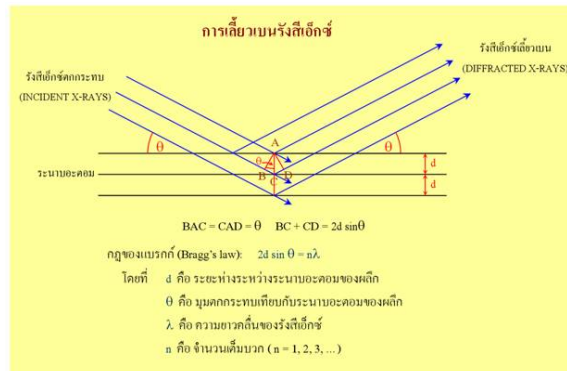
เครื่อง X-ray diffraction (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมตกกระทบที่ต่างกันผลการวิเคราะห์ที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อระบุลักษณะโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง



ภาพที่ 2.16 เครื่อง X-ray diffraction (XRD)

2.11.1 หลักการและวิธีการวิเคราะห์

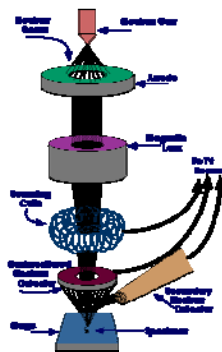
วัสดุที่เป็นผลึกคือวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบใน 3 มิติ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกอาจมองเห็นในลักษณะเป็นระนาบเส้นตรง 2 มิติได้ ซึ่งแต่ละระนาบอยู่ห่างกันเป็นระยะ d (d -spacing) ดังภาพที่ ซึ่งค่าระยะห่าง d มีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับมุมมองผลึกในแต่ละด้าน เมื่อ ค.ศ. 1912 W.H.Bragg และ W.L.Bragg นักวิทยาศาสตร์สองพ่อลูกได้เสนอแนวคิดที่สำคัญสำหรับการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โดยหลักการจำลองที่เขาเสนอคือกำหนดให้ผลึกมีลักษณะการจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นคือระนาบของอะตอม (plane of atoms) ระนาบเหล่านี้สามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนถ้าความแตกต่างระหว่างวิถีทางเดิน (Path difference) ของคลื่นสะท้อนที่อยู่ใกล้เคียงกันมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบจะทำให้คลื่นสะท้อนมีการรวมกันแบบเสริมสร้างและทำให้ความเข้มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคลื่นสะท้อนเดี่ยว ๆ จากแนวคิดนี้โดยการแสดงความสัมพันธ์ที่เรียกว่าสมการของแบรกก์ (Bragg's Equation) ซึ่งมีสมการดังนี้



ภาพที่ 2.17 ลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยระนาบของอะตอมที่มีระยะห่างระหว่างระนาบเท่ากับ d

2.11.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำแสงส่องกราด

หลักการทำงานของ SEM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้ระบบโดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าจากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอนซึ่งสามารถปรับขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามความต้องการภาพที่มีความชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็กหลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้ตัววัตถุลงไปยังผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษาหลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย



ภาพที่ 2.18 แผนภาพแสดงให้เห็นส่วนประกอบที่สำคัญของ SEM ที่เป็นจุดกำเนิดของภาพ [14]

2.11.3 ส่วนประกอบพื้นฐานของ SEM ประกอบด้วย

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) อยู่ด้านปลายบนสุดของ Column ซึ่งต่อกับสายไฟฟ้าแรงสูงที่ต่อจากถังแปลงไฟฟ้าแรงสูงซึ่งแปลงจาก 110 volts หรือ 220 volts เป็นไฟฟ้าที่มีความดันไฟฟ้าสูงคือระหว่าง 1-30 kilovolts ซึ่งเพียงพอสำหรับ SEM แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนประกอบด้วยลวดโลหะ Tungsten ที่บิดเป็นรูปตัววีเรียกว่า filament และล้อมด้วยโลหะรูปกรวย (Wehnelt cylinder) มีรูอยู่ปลายกรวยเมื่อกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 1000 volts จะไปเข้ามาสู่ filament ลวดตัววัดดังกล่าวก็จะมีความร้อนสูงประจุอิเล็กตรอนก็จะกระจายออกมาในสภาวะสุญญากาศภายใน column ประจุอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบจะถูก

ดึงดูดด้วยแผ่นขั้วบวก (anodeplate) ที่อยู่ด้านล่างของ electron gun ประจุอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกดึงผ่านรูของกรวยไปยังทิศทางที่กำหนดคือลงสู่สนามแม่เหล็กที่สามารถรวบรวมประจุอิเล็กตรอนที่มีอยู่ให้เป็นลำแสงอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นเพียงพอสำหรับฉายลงบนตัวอย่าง Electron gun ซึ่งมี filament และ Wehnelt cylinder อยู่ภายในสามารถทำให้ขยับเขยื้อนได้ด้วยสกรูที่อยู่รอบๆ ด้านนอก electron gun ทั้งนี้เพื่อปรับให้ electron gun อยู่ในแนวตรงได้ ศูนย์กลางหรือตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กของเลนส์สนามแม่เหล็กภายใน column ใน SEM สมัยใหม่นอกจากจะมีปุ่มหรือสกรูที่ช่วยปรับ electron gun ให้ได้ศูนย์แล้วยังมีขดลวดที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณแผ่น anode เพื่อจะช่วยปรับลำแสงอิเล็กตรอนให้อยู่ศูนย์กลางของสนามแม่เหล็กในเลนส์ชุดแรกขดลวดดังกล่าวเรียกว่า alignment coil ซึ่งสามารถควบคุมและปรับได้ตามต้องการโดยหมุนและปรับปรุง (alignment knobs) บนแผงของ console unit เหตุที่ต้องปรับ electron gun ก็เพื่อให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์เป็นรูปทรง กระบอกที่ไม่บิดเบี้ยวหรือเชวออกไปจากศูนย์กลางหากมีการบิดของลำแสงอิเล็กตรอนออกนอกทิศทางอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) บางส่วนจะถูกกั้นออกไปซึ่งมีผลกระทบต่อปริมาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) เลนส์ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอน (Electromagnetic lens) และขดลวดควบคุมการเคลื่อนของลำแสงอิเล็กตรอน (Scan coil) เป็นชุดอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันทำหน้าที่รวบรวมอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้เป็นลำแสงรูกรวยที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ลำแสงดังกล่าวไปตกกระทบ บนผิวตัวอย่างและจะใช้สนามแม่เหล็กขับหรือผลักให้ลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนไปบนผิวตัวอย่างในแนวที่ต้องการเป็นบริเวณ รูปลี่เหลี่ยมจัตุรัสเลนส์แต่ละชุดมี aperture ซึ่งเป็นโลหะประเภททองขาว ทองเหลืองมีรูขนาดต่างๆ กัน (50um-400um) และสามารถเปลี่ยนได้ตามขนาดที่ต้องการ aperture ดังกล่าวมักจะจัดไว้ในเลนส์แต่ละชุดภายในบริเวณที่รับสนามแม่เหล็กของเลนส์ aperture เหล่านี้ทำหน้าที่กำหนดให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่ผ่านสนามแม่เหล็กของเลนส์แต่ละชุดให้มีรูปกรวยที่สมมาตร aperture ของเลนส์ชุดสุดท้ายก่อน ที่ลำแสงอิเล็กตรอนจะมาสัมผัสกับตัวอย่างเป็น aperture พิเศษเรียกว่า objective aperture มีไว้เพื่อกั้นกรองลำแสงอิเล็กตรอนให้เป็นรูปกรวยขนาดเล็กที่มีความสมมาตรที่สุดและกำหนดขนาดและปริมาณของอิเล็กตรอนให้กระทบจุดต่างๆ บนผิวตัวอย่างเพื่อให้ภาพที่มีความลึกมากกว่าปกติขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้กราดไปบนผิวของตัวอย่างชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์นี้เรียกว่า scan coils ซึ่งควบคุมโดยระบบไฟฟ้าและยังควบคุมการกราดของลำแสงที่เป็นเส้นในจอรับภาพ (crt) ให้เคลื่อนที่ไปในทิศทาง และเวลาเดียวกันกับลำแสงอิเล็กตรอน ช่องตัวอย่าง (Specimen Chamber) ของ SEM เป็นช่องว่างใต้เลนส์สุดท้ายส่วนที่สำคัญของช่องใส่ตัวอย่างคือฐานวางตัวและปุ่มควบคุมโดยใช้เฟืองขนาดต่างๆ เพื่อเลื่อนฐานนี้ให้เลื่อนไปมาภายในช่องตัวอย่างได้อย่างน้อย 6 ทิศทางฐานวางตัวอย่างที่มีส่วนประกอบและคุณสมบัติเหล่านี้เรียกว่า goniometer stage อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (Collector & scintillator) เป็นแท่งแก้วใสมีปลายมลทำด้วยพลาสติกฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมและส่วนปลายของแท่งนี้ล้อมด้วยตาข่ายโลหะที่ต่อกับวงจรไฟฟ้าประจุ+ขนาด 30-250 โวลต์เพื่อดึงดูดประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิอันเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างประจุอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบกับผิวของตัวอย่าง อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ (Imaging photographic devices) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่ได้รับเป็นภาพและภาพที่ปรากฏบนจอ CRT ก็พร้อมที่จะทำการบันทึกอุปกรณ์สร้างภาพประกอบด้วยท่อนำแสงและเครื่องขยายและเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นแสงไฟฟ้าการสร้างภาพเริ่มจากประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งประจุอิเล็กตรอนชุดนี้จะถูกจับและรวบรวมไว้แล้วนำสู่แท่งแก้วใสประเภทท่อนำแสงในลักษณะของแสงแสงที่ผ่านท่อแท่งแก้วนี้จะเคลื่อนไปสู่เครื่องขยายแสง (photomultiplier) ซึ่งจะเปลี่ยนแสงชนิด photons นี้ไป อิเล็กตรอนอีกครั้งหนึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะผ่านเครื่องขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าให้ปรากฏในจอภาพ (CRT) ที่ติดตั้งไว้บน console unit

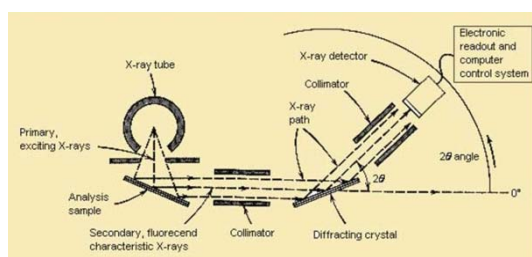


ภาพที่ 2.19 เครื่อง X-ray fluorescence Spectrometry [15]

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง โดยใช้การวัดปริมาณรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence) ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง X-ray fluorescence (XRF) Spectrometry เป็นเทคนิคที่นิยมใช้แพร่หลายในการวิเคราะห์ธาตุทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพไม่ว่าจะเป็นงานด้านสิ่งแวดล้อม เช่นการวิเคราะห์ธาตุที่มีความเป็นพิษที่อยู่ในอากาศ ด้านธรณีวิทยา เช่นการวิเคราะห์แร่ ดิน หิน โดยไม่ทำลายตัวอย่าง มีการเตรียมตัวอย่างเล็กน้อย และให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว ด้านชีววิทยา ด้านการแพทย์ เช่นการวิเคราะห์สารที่อยู่ในเส้นผมและเล็บ การตรวจวัดโบรมีนในซีรัม ด้านอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในการควบคุมกระบวนการและควบคุมคุณภาพ การตรวจวัดตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นพิษในน้ำมันดิบ และอื่นๆ อีกมากมาย

2.11.4 เครื่อง X-ray Spectrometry

โดยทั่วไปแล้วเครื่อง X-ray Spectrometry จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดรังสี (X-ray tube หรือใช้ไอโซโทปกัมมันตรังสี) และเครื่องตรวจวัดรังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นเมื่อ X-ray tube เร่ง อิเล็กตรอนให้มีศักย์สูงพุ่งเข้าชนกับเป้าโลหะแล้วให้รังสีเอกซ์ที่มีความเข้มสูงออกมา ทั้งนี้การเลือกชนิดของเป้าขึ้นอยู่กับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ทั้งสแตน โรเดียม โมลิบดีนัม หรือโครม ส่วนไอโซโทปกัมมันตรังสีที่นิยมใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสี ได้แก่ Fe-55, Co-57, Cd-109 และ Am-241 เครื่องตรวจวัดแบบสถานะของแข็ง (solid-state) เหมาะสำหรับการตรวจวัดรังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากอะตอมของตัวอย่าง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็น Si(Li) และ HPGe ซึ่งทำงานที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลว เครื่อง XRF Spectrometer สามารถแบ่งย่อยออกเป็นหลายประเภทตามเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งจะขอกกล่าวถึงเฉพาะเทคนิคที่มีการใช้งานทั่วไปคือ Wavelength Dispersive XRF(WDXRF) และ Energy Dispersive XRF (EDXRF) ข้อดีของเครื่อง XRF เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็น AAS, ICPS คือ เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์ธาตุได้หลายๆตัวพร้อมกัน ให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง



ภาพที่ 2.20 แผนภาพแสดงส่วนประกอบหลักของเครื่อง XRF [16]

การคำนวณหาค่าความยาวคลื่น (Wavelength, λ) ของรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์จากสารตัวอย่างจะทำได้โดยแทนค่าในสมการ Bragg's law

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

ค่าความยาวคลื่นที่คำนวณได้จะสามารถชี้บ่งได้ว่ารังสีเอกซ์-ฟลูออเรสเซนซ์ของสารตัวอย่างประกอบด้วยธาตุใดบ้าง เทคนิคการวิเคราะห์นี้เรียกว่า Wavelength dispersive XRF

2.11.5 เครื่องทดสอบแรงดึง Texture Analyzer



ภาพที่ 2.21 เครื่อง Texture Analyzer [17]

การทดสอบแรงดึง Tension Test หรือ Tensile Test คือ วิธีการทดสอบเนื้อสัมผัส (texture analysis) โดยใช้แรงดึง (tensile force) ดึงวัสดุอย่างช้าๆ ทำให้วัสดุจะยืดยาวขึ้นแล้วบันทึกความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นดึง (tensile stress) หรือ Force กับ ความเครียดตามแนวดึง (tensile strain) หรือ Deformation ซึ่งเป็นระยะที่วัสดุยืดตัวออกจากระยะเดิม นำมาให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่ง ขึ้นทดสอบขาด