

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เส้นใยนาโน (Nanofibers) [12]

เส้นใยนาโนเป็นหนึ่งในนาโนเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยม และเป็นโครงสร้างของวัสดุสังเคราะห์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยของแข็ง และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1-100 nm ซึ่งโครงสร้างของวัสดุที่เป็นเส้นใยนาโนจะเป็นโครงสร้างที่ทำให้เกิดอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Surface to volume ratio) และความเป็นรูพรุน (Porous) สูง

2.2 วิธีการผลิตเส้นใยนาโน

ในการผลิตเส้นใยนาโนสามารถผลิตได้จากเทคนิคต่างๆ ดังนี้ การดึงยัด (Drawing) การใช้แม่พิมพ์ (Template synthesis) การแยกเฟส (Phase separation) การประกอบในตัวเอง (Self-assembly) และกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง (Electrospinning process) ซึ่งตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบเทคนิคที่ใช้ในการผลิตเส้นใยนาโน และตารางที่ 2.2 แสดงข้อดีและข้อเสียของแต่ละเทคนิค

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบเทคนิคที่ใช้ในการผลิตเส้นใยนาโน [12]

เทคนิค	ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี	ความสามารถขยายสเกล	การทำซ้ำ	ความสะดวกในการผลิต	ความสามารถในการควบคุมขนาดและรูปร่างของเส้นใย
การดึงยัด	ห้องทดลอง	X	✓	✓	X
การใช้แม่พิมพ์	ห้องทดลอง	X	✓	✓	✓
การแยกเฟส	ห้องทดลอง	X	✓	✓	X
การประกอบในตัวเอง	ห้องทดลอง	X	✓	X	X
กระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง	ห้องทดลอง, อุตสาหกรรม	✓	✓	✓	✓

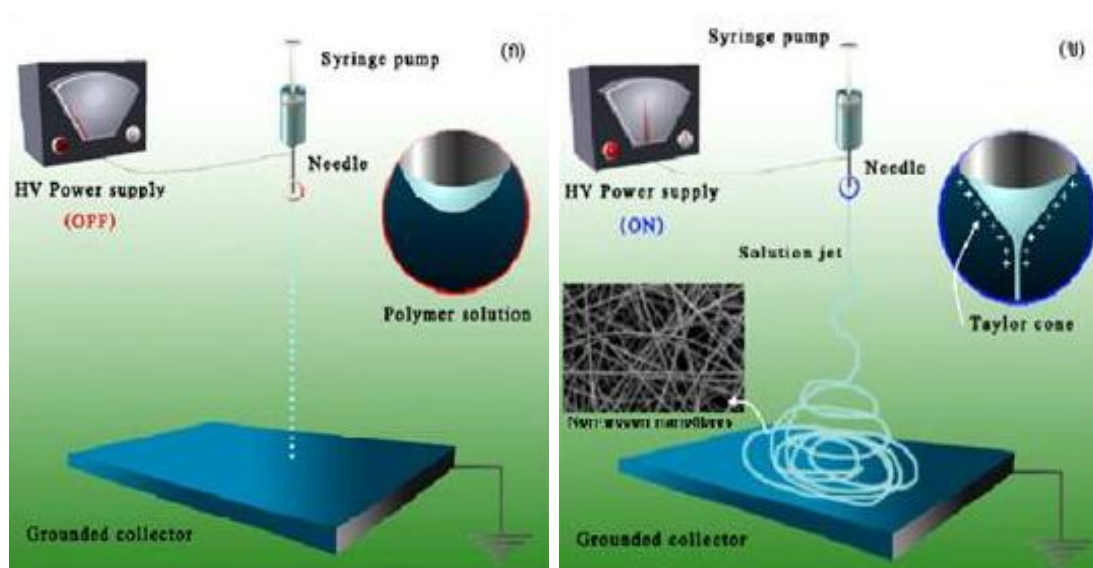
ตารางที่ 2.2 แสดงข้อดีและข้อเสียของแต่ละเทคนิค [12]

เทคนิค	ข้อดี	ข้อเสีย
การดึงยึด	ใช้เครื่องมือน้อย	เป็นเทคนิคที่ไม่ต่อเนื่อง
การใช้แม่พิมพ์	ผลิตเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่างๆได้ง่ายด้วยแม่แบบที่ต่างกัน	-
การแยกเฟส	ใช้เครื่องมือน้อย สามารถผลิตเส้นใยนาโนได้โดยสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลได้ด้วยการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์	จำกัดเฉพาะพอลิเมอร์บางชนิดเท่านั้น
การประกอบในตัวเอง	ได้เส้นใยขนาดเล็ก	เป็นกระบวนการที่ซับซ้อน
กระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง	มีประสิทธิภาพคุ้มค่ากับการลงทุน สามารถผลิตเส้นใยนาโนที่ยาวและมีขนาดต่อเนื่องได้	สารละลายพุ่งออกมาไม่มีความเสถียร

2.3 กระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning process) [12]

กระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงเป็นการผลิตเส้นใยเส้นโนด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) ซึ่งจะให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่สารละลายพอลิเมอร์ที่บรรจุในหลอดบรรจุสารละลาย โดยต่อศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกไว้ที่ปลายเข็มโลหะและศักย์ศูนย์ (Ground) ที่อุปกรณ์รองรับเส้นใย ซึ่งสารละลายจำนวนหนึ่งจะรวมตัวกันเป็นหยดรูปร่างครึ่งทรงกลมที่บริเวณปลายเข็มโลหะอันเป็นผลเนื่องมาจากแรงตึงผิว (Surface tension) แต่เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าครอบคลุมส่วนปลายของเข็มโลหะ ทิศของสนามไฟฟ้ามีทิศทางพุ่งออกเนื่องจากเกิดประจุไฟฟ้าบวกเกิดขึ้นที่ผิวของหยดสารละลายจึงเกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic repulsion) ขึ้นในทิศตรงกันข้ามกับแรงตึงผิว ดังนั้นหากศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้มีความพอที่จะทำให้เกิดแรงผลัก (Repulsive force) มากกว่าแรงตึงผิวจะส่งผลให้รูปร่างครึ่งทรงกลมของสารละลายที่อยู่ปลายเข็มยึดออกเป็นรูปร่างทรงกรวยที่เรียกว่า “กรวยของเทเลอร์” (Taylor's cone) และเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่ามากขึ้นจนกระทั่งถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะเกิดแรงขับเคลื่อนให้สารละลายพุ่งออกมาเป็นลำ (Solution jet) และยึดออกจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงถึงเป็นเส้นใยพุ่ง

ไปยังวัสดุรองรับในลักษณะที่ไม่เกิดการถักทอ (Nonwoven nanofibers) ความไม่เสถียรของการบิดโค้งของเส้นใยอธิบายได้จากรูปขยายในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบและหลักการของกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง [13]

(ก) ในช่วงก่อนการให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง และ

(ข) ให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงที่มีค่ามากพอแก่ระบบจนกระทั่งเกิดเส้นใยนาโนขึ้น

บริเวณที่หยดของสารละลายยืดยาวออกจากปลายเข็มโลหะ พบว่าสารละลายถูกเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ผิวของสารละลาย และด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกที่เกิดจากความต่างศักย์ระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับที่เป็นตัวนำ จึงส่งผลให้เกิดลำของประจุขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้จึงเกิดแรงที่ไม่สมดุลทำให้ลำสารละลายยืดยาวออกในเส้นทางที่ซับซ้อนอันนำมาซึ่งเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงอย่างมาก และรอบของการบิดโค้งมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้สารละลายยืดยาวออกเป็นเส้นที่เล็กพร้อมกับการระเหยออกของตัวทำละลาย ในที่สุดเกิดเส้นใยแห่งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตร ได้ซึ่งขนาดและรูปร่างของเส้นใยจะมีลักษณะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างดังนี้

2.3.1 ปัจจัยที่เกิดจากสารละลายพอลิเมอร์

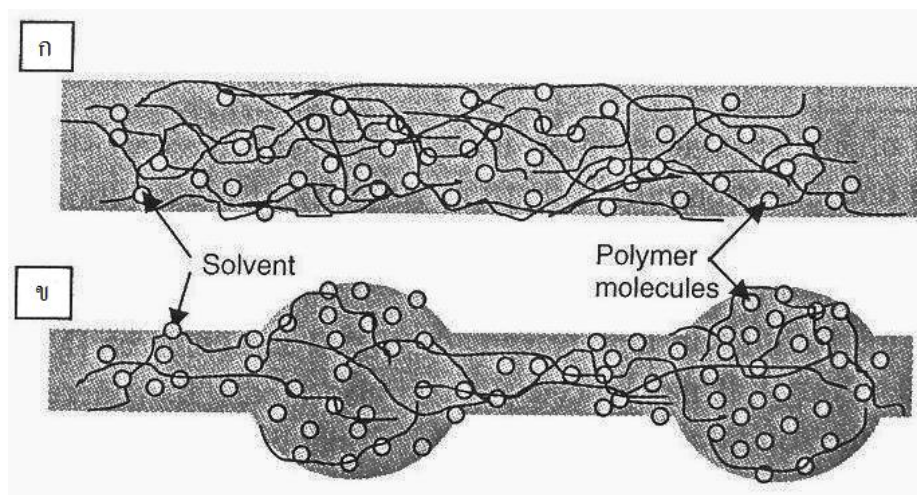
1. น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของสารละลาย (Molecular Weight and Solution Viscosity)

พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเมื่อนำมาละลายในตัวทำละลายจะทำให้สารละลายมีความหนืดสูงกว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ในกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงสารละลายจะต้องมีความหนืดที่เหมาะสมจึงจะเกิดเป็นเส้นใยได้ เมื่อสารละลายถูกฉีดออกมาจากปลายเข็มทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดการยืดออกไปยังฉากรองรับเส้นใย ทำให้เส้นใยที่ได้เป็นเส้นยาวต่อเนื่องกัน น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์บ่งบอกถึงความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์และความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ ดังนั้นถ้าต้องการเพิ่มความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์เพื่อให้เหมาะสมสำหรับกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง จึงต้องเพิ่มความเข้มข้นของพอลิเมอร์เพื่อจะให้มีความหนืดของพอลิเมอร์มากขึ้น ถ้าสารละลายพอลิเมอร์มีความหนืดมากเกินไปสารละลายอาจจะแห้งติดที่ปลายเข็มโลหะก่อนที่จะถูกยืดออกไปยังฉากรองรับเส้นใยได้ การเกี่ยวพันของสายโซ่พอลิเมอร์มีผลต่อขนาดและรูปร่างของเส้นใย โดยสารละลายที่มีความหนืดสูงจะทำให้ความเกี่ยวพันของพอลิเมอร์สูงมากขึ้นจะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากสารละลายมีความต้านทานต่อการยืดออกสูงและทำให้มีเนื้อของพอลิเมอร์ออกมาอีกด้วย

2. แรงตึงผิวของสารละลาย (Surface Tension)

การที่สารละลายจะพุ่งไปยังอุปกรณ์รองรับเส้นใยได้จะต้องปรับให้มีแรงผลักรองรับประจุไฟฟ้าบนสารละลาย โดยที่แรงตึงผิวของสารละลายจะทำให้พื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรลดลง ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโมเลกุลของสารละลายจึงจะทำให้แนวโน้มของการเกิดเม็ดเกิดขึ้น และถ้าความหนืดมากจะทำให้แรงกระทำระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์และตัวทำละลายมากขึ้น ดังนั้นเมื่อสารละลายถูกฉีดออก โมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์จะยืดออกทำให้ตัวทำละลายสามารถกระจายตัวไปทั่วโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ปริมาณตัวทำละลายมีแนวโน้มลดลงดังรูปที่

2.2



รูปที่ 2.2 แสดงแรงดึงผิวของพอลิเมอร์ (ก) ที่ความหนืดสูง โมเลกุลตัวทำละลายกระจายอยู่รอบพอลิเมอร์อย่างสม่ำเสมอ (ข) ที่ความหนืดต่ำ โมเลกุลตัวทำละลายจะรวมตัวกันเนื่องจากผลของแรงดึงผิว [12]

3. การนำไฟฟ้าของสารละลาย (Solution Conductivity)

เนื่องจากกระบวนการอิเล็กโทรสปีนนิ่งเป็นกระบวนการที่ใช้แรงผลักดันทางประจุไฟฟ้าที่ผิวของสารละลายพอลิเมอร์ หากสารละลายพอลิเมอร์มีค่าการนำไฟฟ้ามากจะทำให้ที่ผิวของสารละลายจะมีประจุทางไฟฟ้ามาก ดังนั้นการยืดของสารละลายไปยังฉากรองรับเส้นใยจะเพิ่มมากขึ้นทำให้ได้เส้นใยที่พื้นผิวที่เรียบและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลง อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงค่าความหนืดของสารละลายด้วย เนื่องจากแรงที่เกิดจากความหนืดสูงมากจะมีแรงต้านทานทางไฟฟ้ามาก ดังนั้นการยืดอาจจะไม่สมบูรณ์ทำให้เส้นใยเกิดเป็นเม็ดหรือฉีกขาดได้

2.3.2 ปัจจัยที่เกิดจากกระบวนการผลิต

เป็นปัจจัยภายนอกในกระบวนการผลิตที่มีตัวแปรสำคัญต่อการยืดออกของสารละลายพอลิเมอร์จากปลายเข็มโลหะไปยังฉากรองรับ ได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างจากปลายเข็มโลหะถึงฉากรองรับเส้นใย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มโลหะ อัตราการไหลของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลาย และชนิดของฉากรองรับเส้นใย เป็นต้น ซึ่งปัจจัยภายนอกมีผลต่อการเกิดขนาดและรูปร่างของเส้นใยแต่น้อยกว่าปัจจัยที่เกิดจากสารละลายพอลิเมอร์

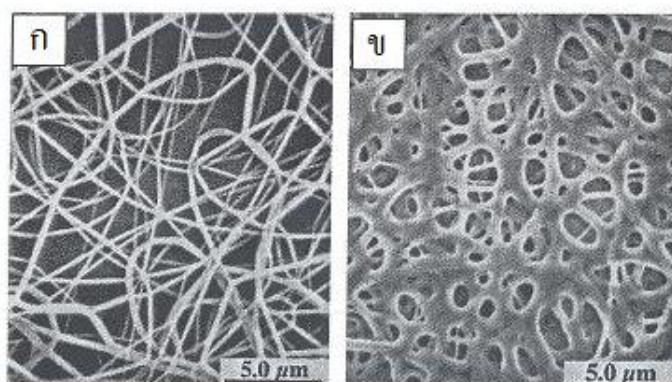
1. ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage)

เนื่องจากการเหนี่ยวนำของประจุไฟฟ้าที่ผิวของสารละลายทำให้สารละลายเกิดการยืดออกเป็นเส้นใยได้ ดังนั้นจึงนำความต่างศักย์ไฟฟ้าศักย์สูงมาประยุกต์ใช้ ถ้าให้ค่าความต่างศักย์แก่

สารละลายสูงจะทำให้เกิดประจุที่ผิวของสารละลายและสนามไฟฟ้าภายนอกขึ้น ในกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงจะเริ่มต้นเมื่อแรงทางไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงตึงผิวของสารละลายทำให้สารละลายยืดออกไปยังฉากรองรับได้ เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบจะมีผลต่อการยืดและความเร่งของสารละลายที่พุ่งออกจากปลายเข็มโลหะจึงส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของเส้นใย ถ้าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากจะทำให้สารละลายเกิดการยืดออกได้มาก ซึ่งเกิดจากแรงคูลอมบ์ (Coulombic force) ที่มากขึ้นทำให้เส้นใยยืดออกอย่างรวดเร็วและอัตราการระเหยของตัวทำละลายสูงขึ้น ดังนั้นเส้นใยที่ได้จะแห้งและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง นอกจากค่าความต่างศักย์ที่สูงจะส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของเส้นใยแล้วยังส่งผลต่อความเป็นผลึกของเส้นใยได้อีก เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของสารละลายเกิดการเรียงตัวเป็นผลึกในเส้นใย ถ้าค่าความต่างศักย์ที่มากเกินไปทำให้ความเร่งของสารละลายเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาการยืดและการระเหยของตัวทำละลายลดลง ดังนั้นเส้นใยที่ได้จะเป็นเม็ดและไม้แห้งเพราะ โมเลกุลของพอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวกันยังไม่สมบูรณ์

2. ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงฉากรองรับเส้นใย (Distance between tip and collector)

การเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงฉากรองรับเส้นใยมีผลโดยตรงต่อเวลาในการยืดและความเร่งของสนามไฟฟ้า ในการที่จะผลิตเส้นใยเดี่ยว สารละลายที่พุ่งออกมาจะต้องมีเวลาเพียงพอที่จะระเหยตัวทำละลายออกไปเพื่อให้ได้เส้นใยที่แห้ง หากลดระยะห่างลงจะทำให้การเคลื่อนที่ของสารละลายที่พุ่งออกมาสั้นลงทำให้ตัวทำละลายระเหยออกไม่หมด เส้นใยที่ได้ก็จะหลอมรวมกันดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เส้นใยในลอน 6, 6 ที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงโดยใช้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มและฉากรองรับดังนี้ (ก) 2 เซนติเมตร (ข) 0.5 เซนติเมตร [12]

การเปลี่ยนแปลงระยะห่างอาจจะมีหรือไม่มีผลต่อลักษณะของเส้นใยที่ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารละลายด้วย ในบางกรณีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างอาจจะมีผลกระทบต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อระยะห่างที่ใช้ลดลงอาจจะทำให้มีเม็ดเกิดขึ้น เนื่องจากสนามไฟฟ้ามากขึ้น ในบางกรณีการเพิ่มระยะห่างจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยลดลง เนื่องจากระยะห่างที่มากขึ้นสารละลายจะมีเวลาในการยืดออกมากขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มระยะห่างอาจจะทำให้ขนาดของเส้นใยเพิ่มขึ้นได้เนื่องจากสนามไฟฟ้าอ่อนลงทำให้สารละลายยืดได้น้อยลง

3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเข็มโลหะ (Diameter of metal tip)

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเข็มที่ใช้จะมีผลต่อกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มที่ใช้มีขนาดเล็กจะทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเล็กลง แต่จะต้องไม่เล็กจนเกินที่สารละลายไม่สามารถไหลออกไปยังปลายเข็มได้

4. อัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ (Feed rate of solution)

อัตราการป้อนสารละลายจะเป็นตัวกำหนดปริมาณสารละลายที่เพียงพอต่อกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง ซึ่งจะต้องสัมพันธ์กับความต่างศักย์เพื่อที่จะยังคงทำให้เกิดกรวยเทเลอร์อยู่ได้ เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารละลายจะเป็นผลทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยหรือขนาดของเม็ดมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากมีสารละลายปริมาณมากอยู่ที่ปลายเข็ม แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการเพิ่มขึ้นของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเนื่องจากอัตราการป้อนสูง เมื่ออัตราการป้อนสูงจะทำให้เส้นใยที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากปริมาตรมากขึ้น และที่สำคัญเมื่อใช้อัตราการป้อนสูงจะต้องใช้เวลานานในการที่จะทำให้เส้นใยแห้ง จึงเป็นผลให้ตัวทำละลายระเหยไม่ทันทำให้เส้นใยหลอมรวมกัน ส่วนที่อัตราการป้อนต่ำตัวทำละลายจะมีเวลาในการระเหยมากกว่าทำให้ได้เส้นใยที่แห้ง

5. อุณหภูมิของสารละลายพอลิเมอร์ (Temperature of solution)

การเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายจะส่งผลให้อัตราการระเหยมากขึ้นและความหนืดของสารละลายลดลง เช่น เมื่อทำอิเล็กโตรสปินนิงพอลิยูรีเทน (Polyurethane) ที่อุณหภูมิสูงจะได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างคงที่ เนื่องจากสารละลายมีความหนืดต่ำและพอลิเมอร์สามารถละลายในตัวทำละลายได้ดีขึ้นซึ่งจะทำให้สารละลายสามารถยืดออกได้มากขึ้น และเมื่อความหนืดลดลงแรงทางประจุจะผลักดันให้สารละลายสามารถยืดออกได้ดีขึ้นจึงเป็นผลทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาด

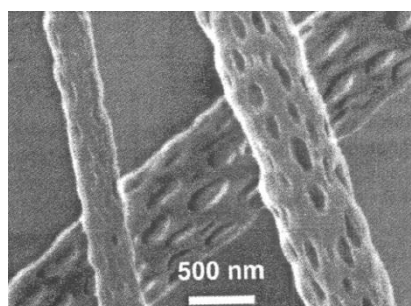
เส้นผ่าศูนย์กลางเล็กลง และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะไปเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของโมเลกุลทำให้แรงทางประจุสามารถดึงสารละลายให้ยืดออกไปได้มาก

2.3.3 ลักษณะและรูปร่างของเส้นใยนาโน (Morphology of nanofibers)

เมื่อสภาวะในการทำอิเล็กโตรสปินนิ่งเปลี่ยนไปจะทำให้ได้ลักษณะและรูปร่างของเส้นใยนาโนที่ต่างออกไป ปัจจัยบางอย่างมีความสัมพันธ์กับ การเกิดเม็ดในเส้นใยดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามรูปแบบของเส้นใยยังมีลักษณะอื่นๆอีก ซึ่งในกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิ่งสามารถผลิตเส้นใยนาโนที่มีลักษณะต่างๆ ได้แก่

1. เส้นใยที่มีรูพรุน (Porous nanofibers)

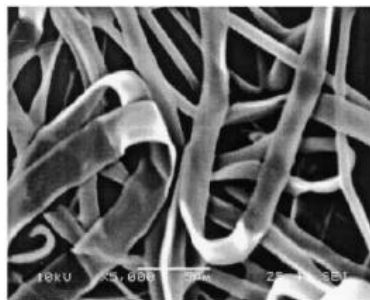
เส้นใยที่มีรูพรุนเกิดจากมีความชื้นในระหว่างกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิ่ง แต่อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลทำให้เกิดรูพรุนในเส้นใยนาโนอีกด้วย



รูปที่ 2.4 แสดงเส้นใยที่มีรูพรุนของสารละลายกรดพอลิ แอล.แลคติก(PLLA) ในไดคลอโรมีเทน [12]

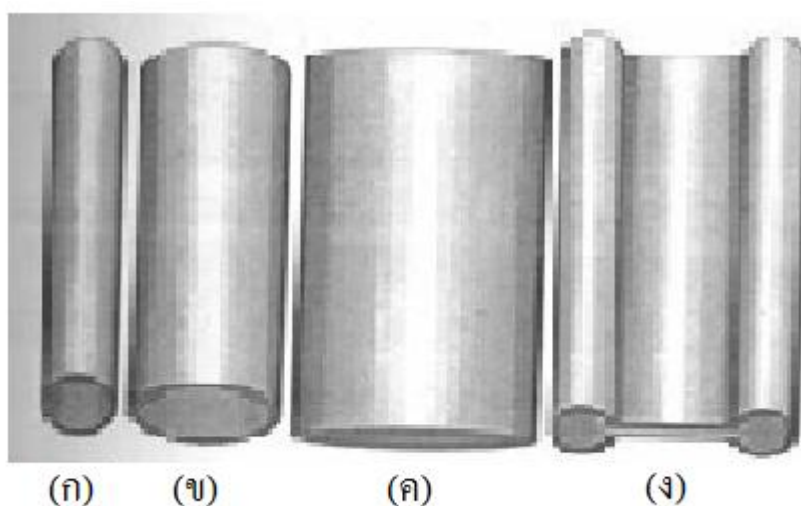
2. เส้นใยที่มีลักษณะแบนหรือมีลักษณะคล้ายริบบิ้น (Flattened or Ribbon-like Fibers)

เส้นใยลักษณะนี้เกิดจากการใช้สภาวะในการทำอิเล็กโตรสปินนิ่งที่แน่นอนซึ่งการเกิดลักษณะเช่นนี้เนื่องมาจากอัตราการระเหยของตัวทำละลายในระหว่างกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิ่ง สำหรับเส้นใยที่มีลักษณะแบนของ PVA นี้เกิดขึ้นจากการใช้ PVA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นสูง ทำให้อัตราการระเหยของน้ำที่ใช้เป็นตัวทำละลายลดลงเนื่องจากมีความหนืดสูงทำให้เส้นใยที่พุ่งไปยังคงมีความชื้นอยู่สูง จึงไปติดที่ฉากในลักษณะรูปร่างแบนๆ ส่วนกลไกการเกิดเส้นใยที่มีลักษณะคล้ายริบบิ้นแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงเส้นใยนาโนจากกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) ที่มีลักษณะแบน [12]

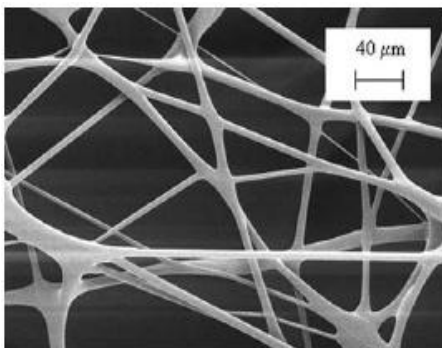
จากรูปบริเวณผิวหน้าของสารละลายพอลิเมอร์ที่พุ่งออกมาจะมีการระเหยของตัวทำละลาย กลายเป็นชั้นของแข็งบางๆ ส่วนภายในยังเป็นของเหลวอยู่ดังรูป (a) เมื่อตัวทำละลายระเหยออกจาก แกนกลางจะทำให้ท่อที่ได้แบนลง พื้นที่หน้าตัดจะเปลี่ยนจากวงกลมกลายเป็นวงรีดังรูป (b) จากนั้นจะกลายเป็นรูปร่างคล้ายรีบบิ้นดังรูป (c) และในบางกรณีอาจมีการเกิดท่อเล็กๆ ขึ้นที่ ขอบทั้งสองด้านของรีบบิ้นดังรูป (d)



รูปที่ 2.6 แสดงกลไกการเกิดเส้นใยที่มีลักษณะคล้ายรีบบิ้น [12]

3. เส้นใยที่มีกิ่งก้านสาขา (Branched Fibers)

เส้นใยที่มีกิ่งก้านสาขาได้จากการแยกตัวออกจากเส้นหลักของสารละลายที่พุ่งออกมาจากหยดประจุ ทำให้ได้สารละลายที่พุ่งออกมา 2 สายเล็กๆ ความยาวของสารละลายที่พุ่งออกมาและการระเหยของตัวทำละลายจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างและประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่



รูปที่ 2.7 เส้นใยที่มีกิ่งก้านสาขาของ Poly(urethane urea) จากอิเล็กโตรสปินนิ่งที่ 20 kV/20 cm [12]

4. เส้นใยที่เป็นรูปขดลวด (Helical Fibers)

เส้นใยนี้นำไปใช้ในการออกแบบระบบ Microelectromechanical องค์ประกอบที่เกี่ยวกับการมองเห็นและระบบการขนส่งยาซึ่งเส้นใยนี้ทำจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนออกไซด์ (Polyethylene oxide, PEO) กับพอลิอนิลีนซัลโฟนิคแอซิด (Poly (aniline sulfonic acid), PASA)

2.4 ความเป็นพิษของโลหะทองแดง [14]

ในการแพร่กระจายของโลหะทองแดงในน้ำเกิดจากการใช้ทองแดงเป็นวัสดุดิบในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมเครื่องมือที่ใช้สายไฟ และการถลุงแร่ เป็นต้น ซึ่งจะก่อให้เกิดสารละลายของโลหะทองแดงปนเปื้อนมากับน้ำ และนอกจากนี้ยังมีการใช้สารเคมีในการกำจัดศัตรูพืช ทำให้สารละลายทองแดงเกิดการฟุ้งกระจายในอากาศและปนมากับแหล่งน้ำในดิน ดังนั้นโลหะทองแดงสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ โดยการปนเปื้อนในการหายใจ อาหาร และน้ำดื่มได้ แม้ในร่างกายจะมีทองแดงซึ่งเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการสร้างฮีโมโกลบินก็ตาม หากร่างกายได้รับปริมาณของโลหะทองแดงเกินความต้องการจะทำให้ร่างกายเกิดความอ่อนเพลีย เวียนศีรษะ ท้องร่วง เบื่ออาหาร การทำงานของม้าม ไต กระดูก ระบบน้ำเหลือง และระบบสืบพันธุ์ทำงานผิดปกติ ระบบภูมิคุ้มกันบกพร่องอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางจิต หากได้รับโลหะทองแดงติดต่อกันนานจนเกิดอาการเรื้อรังจะส่งผลให้การทำงานของม้ามไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติส่งผลให้กล้ามเนื้อแข็งเกร็ง มีน้ำมูก น้ำลายไหล และควบคุมการพูดลำบาก (กลุ่มอาการ Wilson' Diseases)

2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process) [15]

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ของการสะสมสารประกอบชนิดหนึ่งหรือสารประกอบหลายชนิดไว้บนผิวของของแข็ง โดยไม่เปลี่ยนโครงสร้างของของแข็งนั้น ซึ่งของแข็งที่เก็บสะสมสารประกอบอื่นๆไว้บนผิว เรียกว่า “ตัวดูดซับ (Adsorbant)” ส่วนสารประกอบต่างๆที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับ เรียกว่า “ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate)” ในกระบวนการดูดซับตัวดูดซับส่วนมากจะเป็นของแข็งที่มีโพรงจำนวนมาก เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากยิ่งขึ้นจึงจะส่งผลให้สามารถดูดซับได้มากขึ้นตามสัดส่วนพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น แต่โพรงขนาดเล็กอาจจะเป็นอุปสรรคต่อการแพร่ของตัวถูกดูดซับ ดังนั้นโพรงของตัวดูดซับควรมีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาคของตัวถูกดูดซับในสถานะก๊าซเพื่อให้ตัวถูกดูดซับสามารถแพร่เข้าไปยังพื้นผิวในโพรงได้สะดวก เนื่องจากกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นด้วยแรงระหว่างอนุภาคของตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ จึงแบ่งแรงได้เป็น 2 ชนิดคือ การดูดซับแบบเคมี และการดูดซับแบบกายภาพ

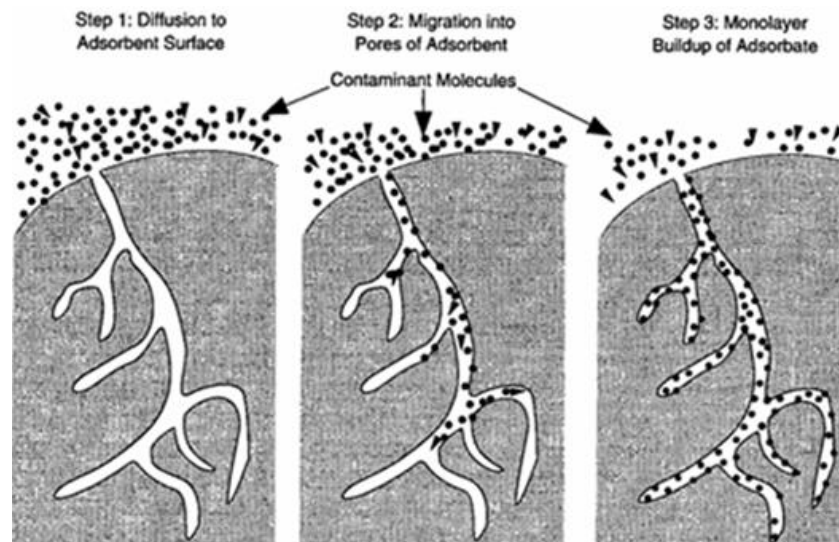
การดูดซับแบบเคมี (Chemisorption)

การเกิดพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ โดยมีพลังงานเข้ามากระตุ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีและเร็วที่อุณหภูมิสูง การดูดซับเคมีเป็นการดูดซับที่เกิดได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น (Monolayer adsorption) ซึ่งการดูดซับประเภทนี้จะมีความร้อนสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ นอกจากนั้นการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ยากและไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้

การดูดซับแบบกายภาพ (Physisorption)

เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน หรือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิดคือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีการคายพลังงานความร้อนค่อนข้างน้อยและสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งสารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารดูดซับในชั้นก่อนหน้า

2.5.1 กลไกการดูดซับ



รูปที่ 2.8 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างการดูดซับมี 3 ขั้นตอนดังรูปที่ 2.8

- ขั้นตอนที่ 1 เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคของตัวถูกดูดซับเข้าหาตัวดูดซับ
- ขั้นตอนที่ 2 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกิดการแพร่ผ่านชั้นของตัวดูดซับเข้าไปในโพรงของตัวดูดซับ
- ขั้นตอนที่ 3 เกิดการดูดซับระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวภายในโพรง หรือช่องว่างภายในของการดูดซับ ซึ่งอาจจะดูดติดผิวด้วยแรงทางเคมี แรงทางกายภาพ หรือเกิดขึ้นได้ทั้งสองแรงพร้อมกัน

ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลืออยู่ ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ เมื่อนำค่าความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลืออยู่ไปพล็อตกราฟกับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ จะได้เส้นโค้งแนวโน้มน้ำที่เกิดจากการลากเส้นผ่านจุดที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเรียกว่าไอโซเทอมของการดูดซับ

สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir's adsorption isotherm) เป็นการอธิบายการดูดซับโมเลกุลของก๊าซบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอน ซึ่งในการดูดซับเกิดขึ้นได้เพียงชั้นเดียว โดยที่ไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งของไอออนหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับและไม่มีการทำปฏิกิริยากันระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับที่อยู่ใกล้กันซึ่งสามารถวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับได้ดังสมการ 2.1

$$q = \frac{(C_i - C_f)V}{M} \quad (2.1)$$

q	=	ความสามารถในการดูดซับโลหะ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
C_i	=	ความเข้มข้นของสารละลายก่อนการดูดซับ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
C_f	=	ความเข้มข้นของสารละลายหลังการดูดซับที่เวลาต่างๆ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
V	=	ปริมาตรของสารละลาย (L)
M	=	มวลของวัสดุดูดซับ (g)

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับของสารจะดูดซับได้ดีขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ดังนี้

1. ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวดูดซับคือ ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ พบว่าความสามารถในการดูดซับแปรผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราเร็วในการดูดซับที่ผิวได้สูงกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่ และพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะแปรผันตรงกับความความสามารถในการดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก สารที่ถูกดูดซับจะสามารถเกาะที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย

2. ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ

ขนาดของอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยที่ตัวดูดซับที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็กจะเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับได้ดีกว่าสารที่ถูกดูดซับที่มีขนาดใหญ่

3. ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ผ่านชั้นของตัวดูดซับ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนมากจะทำให้สารที่ถูกดูดซับเคลื่อนที่ผ่านตัวดูดซับได้และไม่เกิดการสะสมตัวหนาที่ผิวของตัวดูดซับทำให้อัตราเร็วในการดูดซับได้ดี

4. อุณหภูมิ

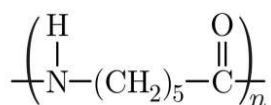
การดูดซับทางกายภาพอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนการดูดซับทางเคมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีเร็วขึ้นทำให้สารที่ถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตัวดูดซับได้มากขึ้น ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน

5. ค่าความเป็นกรด-เบส

ในกรณีที่สารที่ถูกดูดซับมีประจุบวกและตัวดูดซับมีประจุลบ ถ้าสารละลายมีความเป็นกรด-เบสต่ำๆ จะเกิดการแย่งกันของสารที่ถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง

2.6 ไนลอน (Nylon) [16]

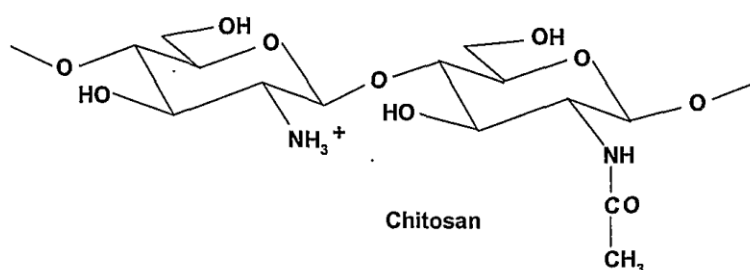
ไนลอนเป็นเส้นใยสังเคราะห์ที่เป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอไมด์ (-C-O-NH-) อยู่ในสายโซ่โมเลกุลทำให้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (H-bond) กับโมเลกุลอื่นๆ ได้ ส่งผลให้ไนลอนเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเหนียว (Toughness), ทนต่อการสึกหรอ (Wear), และมีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของไนลอน-6 [16]

2.7 ไคโตซาน (Chitosan) [17]

ไคโตซานมีชื่อทางเคมีว่า Poly (2-Amino-2-Deoxy-D-Glucose) หรือ Poly (N-Glucosamine) มีสูตรทางเคมีคือ $C_6H_{12}NO_4$ ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของไคตินที่ได้จากการดึงหมู่อะซิโตนออกจากโมเลกุลของไคตินด้วยสารละลายด่างเข้มข้น ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปโดยที่หมู่ฟังก์ชันอะซิโตมิโด ($-NHCOCH_3$) ที่ตำแหน่งคาร์บอนตัวที่สองเปลี่ยนเป็นหมู่เอมีน ($-NH_2$) ทำให้เป็นไคโตซานได้ ไคโตซานสามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่เป็นกรดและมีความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนรวมทั้งไอออนของโลหะทรานซิชันได้ สมบัติทางกายภาพของไคโตซานเป็นสายพอลิเมอร์ประจุบวก (Cationic polymer) เนื่องจากมีหมู่เอมีน และหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ทำให้มีสมบัติในการดูดซับโลหะได้ทั้งไอออนบวกและไอออนลบ ดังนั้นจึงถูกนำมาใช้ในกระบวนการจับไอออนต่างๆในสารละลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการกำจัดน้ำเสีย และกระบวนการกำจัดไขมัน



รูปที่ 2.10 โครงสร้างโมเลกุลของไคโตซาน [18]

คุณสมบัติที่สำคัญของไคโตซาน

1. เป็นวัสดุทางชีวภาพ (Biomaterial) ที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพและย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (Biodegradable)
2. เป็นสารพอลิเมอร์ประจุบวก สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยากับอินทรีย์สาร (Organic solid) และพื้นผิวเซลล์ (Cell surface) ที่มีประจุลบจึงนิยมนำมาใช้ในกระบวนการกำจัดน้ำเสีย
3. ไคโตซานไม่ละลายในน้ำด่างแต่สามารถละลายในกรดและกรดอินทรีย์ที่มีค่า pH น้อยกว่า 6

การประยุกต์ใช้งานของโคโตซาน

ทางการแพทย์

โคโตซานไม่ก่อให้เกิดการต่อต้านจากร่างกายช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ต่อมนุษย์ นอกจากนี้แล้วโคโตซานสามารถย่อยสลายได้เองจึงนำโคโตซานมาเป็นวัสดุสำหรับปิดแผล ด้ายเย็บแผล ผงงไคเทียม และแคลซูลยาเป็นต้น

ทางการเกษตร

ในทางการเกษตรได้นำโคโตซานมาใช้ในการยับยั้งแบคทีเรีย เชื้อรา และเร่งการเจริญเติบโต ทำให้ช่วยยืดอายุของผลผลิตและป้องกันอันตรายจากศัตรูพืชได้ อีกทั้งยังไม่เป็นพิษและสารตกค้างกับเกษตรกร

ทางด้านความงาม

เนื่องจากโคโตซานมีคุณสมบัติที่ไม่ละลายน้ำและดูดซับความชื้นได้ดี จึงนำโคโตซานมาทำเป็นยา สีฟัน ครีมบำรุงผม บำรุงผิว และในเครื่องสำอางที่มีส่วนผสมของกรดผลไม้มัธรรมาชาติ (AHA) ช่วยกระตุ้นให้ผิวหนังเก่าหลุดลอกออกเพื่อสร้างผิวใหม่ขึ้น นอกจากนี้แล้วโคโตซานได้ถูกนำมาเป็นผลิตภัณฑ์ลดความอ้วน เนื่องจากโคโตซานมีประจุบวกทำให้สามารถจับกับกรดไขมัน และคอเลสเตอรอลที่มีประจุลบได้

ทางด้านสิ่งทอ

นำมาเคลือบเส้นใยในสิ่งทอเพื่อลดกลิ่นเหม็นและกลิ่นอับชื้น นอกจากนี้แล้วยังสามารถยับยั้งเชื้อราและแบคทีเรียได้อีกด้วย

ทางการบำบัดน้ำเสีย [19]

เนื่องจากโคโตซานมีประจุบวก สามารถนำมาจับกับโปรตีนและไขมันได้ดี นอกจากนี้แล้วโคโตซานสามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักได้ ซึ่งกลไกของการดูดซับโลหะหนักของโคโตซานเกิดขึ้นได้จากประจุบวกของโคโตซานซึ่งเกิดจากหมู่อะมิโน (NH_2) ทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนของ NH_3^+ จับกับหมู่ฟังก์ชันของโคโตซานและเกิดหมู่ของ OH^- ซึ่งทำหน้าที่ในการจับไอออนของโลหะหนักที่เป็นไอออนประจุลบได้ ดังสมการที่ 2.2 แต่โดยส่วนมากแล้วโคโตซานจะละลายได้ดีในสารละลายกรดดังนั้นในสารละลายมีปริมาณของ H^+ มากจึงไปจับพันธะกับหมู่ NH_2 ของโคโตซาน ทำให้เกิดประจุของ NH_3^+ ดังสมการที่ 2.3



ดังนั้นในการในการจับคู่ไอออนโลหะหนักประจุบวกจะเกิดปรากฏการณ์ของประจุ NH_3^+ ล้อมจับ (Chelation) ประจุบวกไอออนของโลหะหนักประจุบวก (M^+) ด้วยแรงผลัทางไฟฟ้า (Electrostatic repulsion) ทำให้สามารถคัดแยกไอออนโลหะหนักออกจากน้ำได้ ดังสมการ 2.4



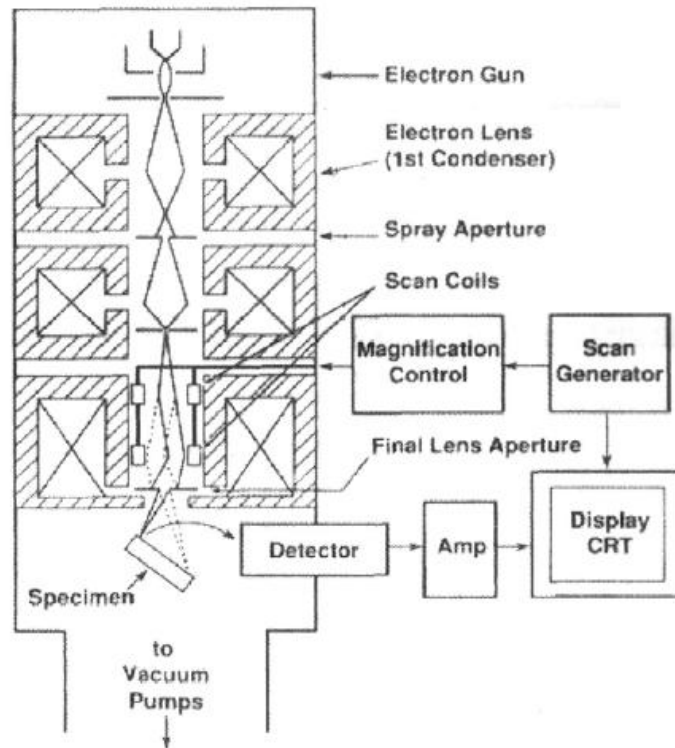
2.8 เทคนิคการตรวจวัดวัสดุนาโน (Characterization of nanoparticles)

2.8.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) [20]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเครื่องมือที่อธิบายหรือวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของวัตถุได้ภาพที่มีความชัดลึก (Depth of field) และภาพที่ได้มีความละเอียดสูงซึ่งสามารถเห็นรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาด 2-5 nm ได้ โดยภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งมีกำลังขยาย 100,000 เท่า จะมีความชัดเจนมากกว่าภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาที่มีกำลังขยาย 1,000 เท่า

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เริ่มจากการป้อนความต่างศักย์ให้กับ Filament จนถึงค่า Breakdown voltage เพื่อเร่งการปลดปล่อยอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electrons) อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกบีบโดยใช้เลนส์ (Condenser lens) เพื่อรวบรวมลำอิเล็กตรอนให้หนาแน่นขึ้นลงมายังเลนส์โฟกัสภาพ (Objective lens) และโฟกัสลงบนชิ้นงาน โดย Scanning coil จะเป็นตัวบังคับให้ลำอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปทั่วชิ้นงานบนระนาบ x-y ทำให้เกิดสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ สัญญาณนี้จะเข้าสู่ detector แล้วแปลงเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์และนำไปขยายสัญญาณเพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอ (Cathode Ray Tube: CRT)



รูปที่ 2.11 แสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [20]

ตัวอย่างสัญญาณภาพที่เกิด

อิเล็กตรอนแบบทุติยภูมิ (Secondary Electron: SE) ให้ข้อมูลลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง และนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electron: BSE) ให้ข้อมูลส่วนประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของตัวอย่าง ลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว นอกจากนี้ยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่จะให้ข้อมูลแตกต่างกันไป

2.8.2 อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Infrared spectroscopy) [21]

อินฟราเรดสเปกโตรสโคปีเป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาธรรมชาติทางเคมีของสารโดยอาศัยรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่น 0.8-200 μm ซึ่งเรียกว่ารังสีอินฟราเรด (Infrared radiation: IR) ที่นำมาใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ (Identity) ของสารประกอบได้ โดยตรวจหาหมู่ที่มีสมบัติเฉพาะตัวที่เรียกว่า หมู่ฟังก์ชันของสารประกอบนั้นๆ

หลักการของอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

โมเลกุลของสารใดๆประกอบขึ้นด้วยอะตอมมายึดจับกันเป็นพันธะเคมี ซึ่งอะตอมเหล่านี้ไม่ได้อยู่นิ่งแต่จะมีการสั่น (Vibrate) ไปมาด้วย การสั่นมี 2 ชนิดคือ การสั่นแบบยืด (Stretching) ซึ่งเกิดจากการสั่นในแนวแกนของพันธะทำให้ระยะห่างระหว่างอะตอมทั้งสองมากขึ้นหรือน้อยลง และการสั่นแบบงอ (Bending) เกิดขึ้นเมื่อตำแหน่งของอะตอมเปลี่ยนไปจากแนวแกนเดิมของพันธะ ซึ่งพลังงานการสั่นของพันธะใน โมเลกุลจะตรงกับความถี่ของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในย่าน IR โดยที่การยืดและการงอของแต่ละพันธะจะมีความถี่ที่มีค่าเฉพาะ (Quantized frequency) เมื่อโมเลกุลได้รับรังสี IR ที่มีความถี่ตรงกับการสั่นของพันธะใดๆก็จะดูดกลืนรังสีที่มีความถี่นั้นในรูปของพลังงาน ทำให้มีแอมพลิจูด (Amplitude) มากที่สุด เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าเรโซแนนซ์ (Resonance) ในขณะนั้น โมเลกุลจะมีพลังงานมากกว่าปกติ (สภาวะเร้า) เมื่อโมเลกุลกลับสู่สภาวะปกติก็จะปลดปล่อยพลังงานที่รับไว้ออกมาในรูปของความร้อน

สมบัติสำคัญที่ทำให้อินฟราเรดสเปกโตรสโคปีเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาสารเคมี คือตำแหน่งและลักษณะแบนด์การดูดกลืนรังสีที่ปรากฏในสเปกตรัมเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งหมู่ฟังก์ชันต่างกับการดูดกลืนรังสีด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี แสดงดังตารางผนวก ข.1

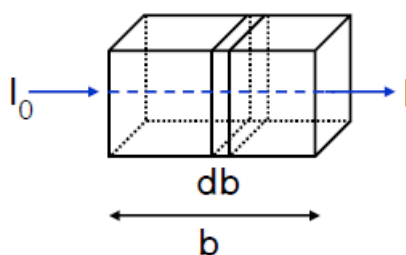
2.8.3 อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (Ultraviolet and visible spectroscopy) [22]

โมเลกุลที่ดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิล (Ultraviolet and visible light) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในโมเลกุลไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นกว่าเดิม ซึ่งพลังงานที่โมเลกุลดูดกลืนเข้าไปขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นหรือความถี่ของคลื่นแสงนั้น รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วง UV-VIS มีช่วงความยาวคลื่นคือ

1. รังสีอัลตราไวโอเลต มีความยาวคลื่นในช่วงประมาณ 200-400 nm
2. รังสีวิสิเบิล มีความยาวคลื่นในช่วงประมาณ 400-800 nm

ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และสารประกอบเชิงซ้อน ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สมบัติของสารดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยทั่วไปเทคนิคการวิเคราะห์นี้บางครั้งนิยมเรียกว่า “ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมตรี (UV-VIS spectrometry)” แต่ถ้าสารที่ทำกรวิเคราะห์มีสีหรือทำให้เกิดสีขึ้น สารที่มีสีนั้นจะดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิลซึ่งเรียกว่า คัลเลอร์ิเมตรี (Colorimetry) เมื่อให้ลำแสงที่ต่อเนื่องกันผ่านเข้าไปในวัตถุใสจะพบว่าแสงบางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนเกิดการสะท้อน บางส่วนเกิดการกระเจิง และบางส่วนผ่านทะลุออกไป ถ้าให้แสงที่ทะลุออกไปนั้นผ่านเข้าเครื่องกระจายแสงเช่น ปริซึม จะเห็นว่ามิสเปกตรัมหายไปส่วนหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า สเปกตรัมการดูดกลืน (Absorption spectrum)

ในการวัดปริมาณแสงหรือรังสีที่ถูกดูดกลืนด้วยสารตัวอย่างนั้น สามารถทำได้โดยให้ลำแสงผ่านเข้าไปในสารตัวอย่าง แล้ววัดปริมาณของแสงที่ผ่านทะลุออกมาโดยเปรียบเทียบกับแสงที่ทะลุออกมาเมื่อไม่มีสารตัวอย่างได้ตามกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) ซึ่งกล่าวไว้ว่า “แสงที่มีความยาวคลื่นเดี่ยวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืนไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสง แต่จะขึ้นอยู่กับความหนาของตัวกลาง” ดังนั้นตัวกลางชนิดเดียวกันที่มีความหนาเท่ากันจะดูดกลืนพลังงานแสงได้เท่ากัน ได้ดังสมการ 2.5



รูปที่ 2.12 แสดงการดูดกลืนแสงผ่านตัวกลาง

$$\log \frac{I_0}{I} = \frac{k}{2.303} b \quad (2.5)$$

I_0	คือความเข้มแสงเมื่อเริ่มตกกระทบสาร ($b=0$)
I	คือความเข้มแสงหลังผ่านสารตัวกลาง
b	คือความหนาของตัวกลาง
k	คือค่าคงที่

กฎของเบียร์ (Beer's law) กล่าวไว้ว่า “อัตราการลดลงของความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืน เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร”

กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law) จะได้ว่า “ความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและความหนาของสารละลายตัวกลาง” ดังสมการ 2.6

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon bc \quad (2.6)$$

A	คือค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
ϵ	คือค่าโมลาร์แอฟซอร์ปทิวิตี (Molar absorptivity) หน่วย $\text{dm}^3 \text{cm}^{-1} \text{g}^{-1}$
c	คือความเข้มข้นของสารละลาย (Concentration) หน่วย $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$
b	คือความหนาของตัวกลาง หน่วย cm

ส่วนประกอบของเครื่องยูวี-วิส สเปกโตรมิเตอร์

1. แหล่งกำเนิดแสง

- Deuterium หรือ hydrogen lamp ซึ่งให้กำเนิดแสงทั้งช่วงยูวี (160-400 nm) และ วิสิเบิล (400-800 nm)
- Tungsten filament lamp หรือ Tungsten/halogen lamp ให้กำเนิดแสงในช่วงวิสิเบิล ที่ความยาวคลื่น 350-2500 nm

2. **Monochromator** ทำหน้าที่แยกลำแสงจากแหล่งกำเนิดแสง ให้ได้ความยาวคลื่นเดียวที่ต้องการเท่านั้น

3. อุปกรณ์สำหรับใส่ตัวอย่าง (Cuvette)

อุปกรณ์สำหรับใส่ตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์จะต้องมีลักษณะโปร่งแสง ซึ่งวัสดุที่นิยมใช้ได้แก่ ควอทซ์ (Quartz) หรือ fused silica สำหรับการวิเคราะห์ในช่วงยูวี และวัสดุที่เป็นแก้วซิลิเกต (silicate glasses) สำหรับการวิเคราะห์ช่วงวิสิเบิล

4. อุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดแสง (Detector) มีหลายชนิดเช่น

- Photomultiplier tube เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดที่ไวต่อแสงทั้งในช่วงยูวี และวิสิเบิล โดยสามารถตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว และตรวจวัดสารที่มีปริมาณต่ำๆได้ดี ในช่วงความยาวคลื่น 190-900 nm
- Photodiode array detector เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดที่สามารถตรวจวัดในทุกความยาวคลื่นของแสงได้ในเวลาเดียวกัน โดยมีราคาถูกและตรวจวัดได้ตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่น 190-1100 nm

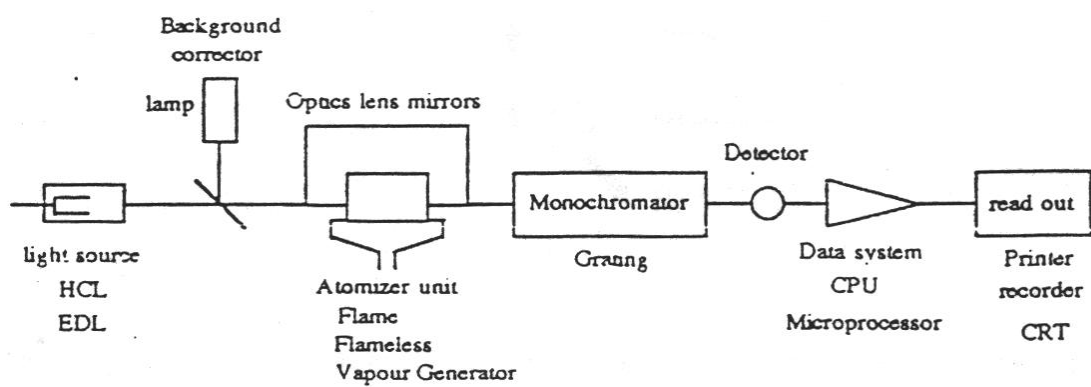
2.8.4 อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption spectroscopy) [22]

หลักการของอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี เป็นกระบวนการที่เกิดจากอะตอมอิสระของธาตุดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ ธาตุแต่ละชนิดจะมีระดับพลังงานที่แตกต่างกัน จึงมีการดูดกลืนพลังงานที่แตกต่างกันด้วย เช่น อะตอมของแคดเมียมดูดกลืนแสงได้ดีที่มีความยาวคลื่น 228.8 นาโนเมตร อะตอมของปรอทดูดกลืนแสงได้ดีที่มีความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร แสงที่มีความยาวคลื่นดังกล่าวจะมีพลังงานพอดีที่จะทำให้อิเล็กตรอนของอะตอมแคดเมียมและปรอทเกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นไปสู่สถานะเร้า ในการทำให้อะตอมของธาตุในสารประกอบเกิดเป็นอะตอมอิสระนั้นต้องใช้พลังงานในรูปแบบต่างๆ เช่น พลังงานความร้อนจากเปลวไฟ หรือ ไฟฟ้า เป็นต้น

การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโดยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี จะอาศัยหลักการวัดปริมาณแสงที่ธาตุดูดกลืนเข้าไป เพื่อทำให้อะตอมอิสระที่อยู่ในสถานะพื้นขึ้นไปอยู่ในสถานะเร้าซึ่งปริมาณแสงที่ดูดกลืนเข้าไปจะแปรตามความเข้มข้นของสาร

องค์ประกอบที่สำคัญต่างๆของเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญ 5 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 2.1

1. แหล่งกำเนิดแสง (light source) ส่วนใหญ่เป็น hallow cathode lamp (HCL) และ eletrodeless discharge lamp (EDL) ซึ่งมีใช้เฉพาะบางธาตุเท่านั้น
2. ส่วนที่ทำให้เกิดอะตอมอิสระ (atomizer unit) เป็นส่วนที่ทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมอิสระด้วยเปลวไฟหรือไฟฟ้า เป็นต้น
3. ส่วนแยกแสง (monochormator) เป็นส่วนที่ใช้แยกแสงให้ได้ความยาวคลื่นที่ต้องการ อาจเป็นแผ่นกรองแสง (filter) เกรตติง (grating) หรือปริซึม (prism)
4. ส่วนวัดสัญญาณ (detector) ส่วนใหญ่เป็นหลอดโฟโตมัลติพลีเออร์ (photomultiplier tube) ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณที่ได้จากการวิเคราะห์ในรูปของพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า
5. ส่วนประมวลผลและอ่านผล (data system and readout unit) ทำหน้าที่แปลสัญญาณที่ได้รับจากส่วนวัดสัญญาณให้เป็นข้อมูลสื่อให้ผู้ใช้เข้าใจ



รูปที่ 2.13 องค์ประกอบของเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ [22]