

## บทที่ 2

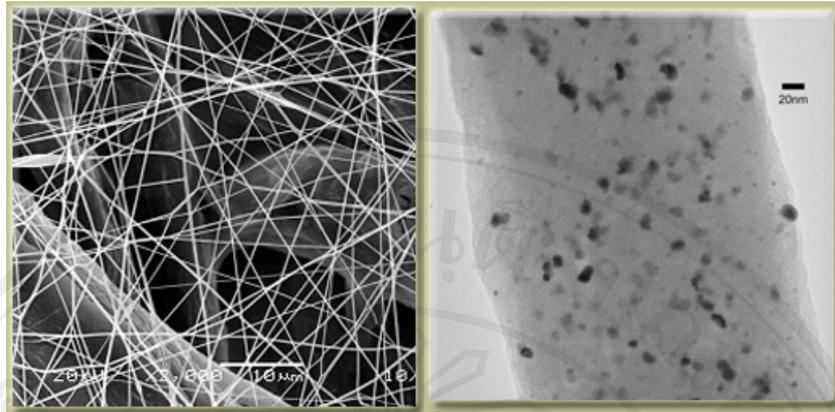
### วรรณกรรมปริทัศน์

#### 2.1 คำจำกัดความของพอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต

##### 2.1.1 พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ (Polymer nanofiber) [1-5]

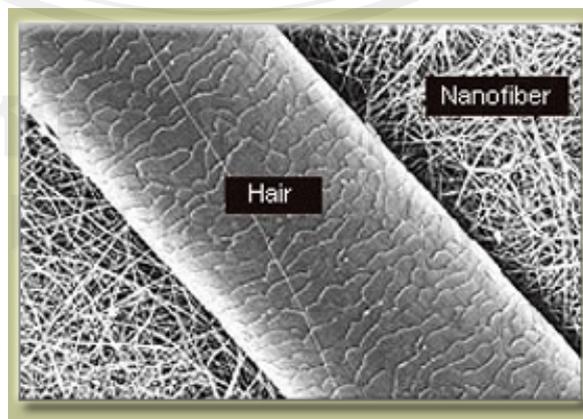
คำว่า “นาโน (Nano)” มีรากศัพท์มาจากภาษากรีกว่า “Nanos” แปลว่า “แคระ” และมักเรียกกันในอีกชื่อหนึ่งว่า “ตัวแคระ” ดังนั้น นาโน จึงเป็นสิ่งที่เล็กมาก

เส้นใยระดับนาโนเมตร หรืออาจเรียกสั้นๆว่า เส้นใยนาโน (Nanofiber) เป็นส่วนหนึ่งของนาโนเทคโนโลยีที่มีโครงสร้างของวัสดุสังเคราะห์ระดับนาโนเมตร มีลักษณะเป็นเส้นใยของแข็งอยู่ในกลุ่มของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร โดยเส้นใยนาโนนี้ ต้องเป็นเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 100 นาโนเมตร ทำให้มีข้อดีคือ มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Surface-to-volume ratio) สูง (เส้นใยนาโนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นาโนเมตร จะประกอบไปด้วยโมเลกุลของธาตุประมาณ 40 โมเลกุล และประมาณ 20 โมเลกุลนั้นเป็นส่วนที่อยู่บนพื้นผิวของเส้นใยนาโน) โดยมากแล้วโครงสร้างวัสดุต่างๆที่อยู่ในลักษณะของเส้นใยระดับนาโนจะเป็นลักษณะของโครงสร้างพื้นฐานที่ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง คือ เป็นพื้นผิวที่ทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันต่างๆได้เป็นอย่างดี เช่น เป็นโครงสร้างที่มีความสามารถในการยึดหยุ่นได้ดี มีความแข็งแรงและความทนทานที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานต่างๆได้อย่างหลากหลาย



รูป 2.1 แสดงภาพเส้นใยนาโนที่ได้จากเครื่อง SEM โดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ [1]

แต่แท้ที่จริงแล้ววัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นใยระดับนาโนเมตร ก็เป็นหน่วยโครงสร้างพื้นฐานของสิ่งมีชีวิตที่มีอยู่ในระบบธรรมชาติอยู่แล้ว เช่น เส้นใยโปรตีน ซึ่งเป็นส่วนที่ให้โครงร่างแก่เซลล์ (Cytoskeleton filament) ที่ประกอบไปด้วยเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 นาโนเมตร เซลล์แท่ง (Rod cell) ที่อยู่ภายในลูกนัยน์ตาที่ใช้เม็ดสีโรดอปซิน (Rhodopsin) ในการรับแสงมีดทับ (โรดอปซินมีขนาดประมาณ 4 ถึง 6 นาโนเมตร) เป็นต้น (นั่นคือเส้นใยนาโนก็มีอยู่ในระบบธรรมชาติอยู่แล้วเช่นเดียวกัน) และด้วยความสามารถเชิงหน้าที่ภายในเซลล์ทั้งหลายของเส้นใยเหล่านี้ ตัวอย่างเช่น การเป็นคลังเก็บรักษาพลังงาน เก็บรวบรวมข้อมูลและกักข้อมูล การซ่อมแซมตัวเองภายในเนื้อเยื่อและประสาทการรับสัมผัสต่างๆ จึงนำมาสู่การออกแบบเพื่อสังเคราะห์เส้นใยนาโนเพื่อนำมาใช้ในลักษณะเดียวกันด้วย



รูป 2.2 แสดงเส้นใยนาโนสังเคราะห์เมื่อเทียบกับเส้นผมซึ่งเป็นเส้นใยธรรมชาติ [1]

เส้นใยนาโนสังเคราะห์ที่มีการสังเคราะห์ขึ้นมานั้น โดยมากจะถูกสังเคราะห์เพื่อนำมาใช้งานด้วยคุณสมบัติพิเศษทางการนำไฟฟ้าและคุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างนี้ เช่น การสังเคราะห์เส้นใยนาโนพอลิเมอร์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตและสร้างอุปกรณ์ระดับนาโนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น การใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า สร้างตัวเก็บประจุ ทรานซิสเตอร์ไดโอด และนำมาใช้งานทางด้านเทคโนโลยีการเก็บข้อมูล หรือใช้ในระบบการส่งผ่านข้อมูล เช่น การสร้างหน่วยความจำและชิปสำหรับคอมพิวเตอร์และการสังเคราะห์เส้นใยวัสดุผสมระดับนาโน เพื่อนำมาใช้เตรียมหน่วยโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการสร้างอุปกรณ์ และโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถตอบสนองความต้องการในการใช้งานของมนุษย์ได้ เช่น การนำมาใช้งานทางด้านเทคโนโลยีด้านการแปรรูปพลังงานและการกักเก็บพลังงาน เช่น แบตเตอรี่หรือในเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) หรือใช้เป็นส่วนผสมในเชิงโครงสร้างสำหรับใช้งานในเทคโนโลยีการบินทั้งในอากาศและในอวกาศ หรือแม้กระทั่งประยุกต์ใช้สำหรับระบบการขนส่งยา ฝ่าปิดแผล และเกี่ยวกับวิศวกรรมเนื้อเยื่อ เป็นต้น

### 2.1.2 วัสดุผสมระดับนาโนเมตร (Nanocomposite materials) [1-5]

วัสดุผสมระดับนาโน เป็นวัสดุผสมสังเคราะห์ที่มีเนื้อวัสดุหลายอย่างผสมกัน (Multiphase material) โดยที่มีเนื้อวัสดุหนึ่งใดหรือหลายๆเนื้อวัสดุเป็น โครงสร้างที่มีมิติของขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 100 นาโนเมตร ซึ่งส่วนมากแล้ววัสดุผสมระดับนาโนจะเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยเนื้อวัสดุจำนวนสองรูปเป็นอย่างน้อยและสามารถที่จะจำแนกวัสดุผสมระดับนาโนได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ (1) วัสดุผสมที่เป็นเนื้อหลายอย่างแยกชั้นกัน (Nanolayers composite) เป็นโครงสร้างที่ประกอบขึ้นมาจากเนื้อของวัสดุชนิดต่างๆ โดยแบ่งเป็นชั้นๆ ซึ่งแต่ละชั้นมีขนาดในระดับนาโนเมตร (2) วัสดุผสมที่เป็นเนื้อหลายอย่างแยกเป็นเส้นใย (Nanofilamentary composite) เป็นโครงสร้างที่ประกอบขึ้นมาจากพื้นผิวที่มีการผสมเส้นใยฝังตัวลงไปไว้ภายในโครงสร้างโดยเป็นเส้นใยที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร (3) วัสดุผสมที่เป็นเนื้อหลายอย่างแยกอนุภาค (Nanoparticulate composite) เป็นโครงสร้างพื้นผิวที่มีการผสมเอาอนุภาคที่มีขนาดระดับนาโนเมตรฝังตัวไว้ภายในโครงสร้างนั้น (คล้ายกับประเภทที่ 2 แต่เป็นอนุภาคนาโนแทนที่จะเป็นเส้นใยนาโน) และโดยส่วนใหญ่วัสดุผสมระดับนาโนนั้นจะเป็น โครงสร้างแบบพอลิเมอร์ที่ถูกทำให้สร้างพันธะกับชั้นผิวของวัสดุเส้นใยนาโนหรืออนุภาคนาโนเพื่อปรับปรุงและผลิตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเฉพาะที่ดียิ่งขึ้น

## 2.2 การผลิตเส้นใยนาโน [5-6]

เทคนิคที่นำมาใช้ในการผลิตเส้นใยนาโนมีหลายเทคนิค เช่น การดึงยืด (Drawing) การสังเคราะห์ผ่านแม่แบบ (Template synthesis) การแยกวัฏภาค (Phase separation) การประกอบในตัวเอง (Self-assembly) และการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ (Electrospinning) ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป แต่ในงานวิจัยฉบับนี้จะขอกกล่าวถึงเฉพาะเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์เท่านั้น

การผลิตเส้นใยด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าสถิตย์ หรือที่เรียกกันว่า Electrospinning process ซึ่งย่อมาจาก Electrostatic spinning process กระบวนการนี้ถูกพัฒนาขึ้นมากกว่า 60 ปีแล้ว โดย Formulas แต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายเนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีในอดีต ซึ่งในปัจจุบันเทคนิคนี้กำลังได้รับความสนใจอย่างสูงเนื่องจากมีข้อดีหลายประการดังจะได้อีกกล่าวต่อไป

การผลิตเส้นใยนาโนโดยกระบวนการทางไฟฟ้าสถิตย์ต่างจากวิธีการผลิตเส้นใยนาโนวิธีอื่น คือ เป็นกระบวนการที่สามารถผลิตเส้นใยนาโนได้ยาวและต่อเนื่องโดยใช้อุปกรณ์ในการผลิตที่ง่าย มีความซับซ้อนน้อย และมีราคาไม่สูงมาก โดยกระบวนการนี้จะใช้แรงทางไฟฟ้าแทนแรงทางกล โดยพอลิเมอร์เหลวซึ่งอาจจะอยู่ในรูปสารละลายหรือสารหลอมเหลวที่อยู่ในรูขนาดเล็กจะถูกทำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวหน้าของของเหลวโดยสนามไฟฟ้ากำลังสูง เนื่องจากประจุที่เกิดขึ้นมีขั้วเหมือนกันจึงมีแรงผลักระหว่างประจุเกิดขึ้น แรงผลักระหว่างประจุนี้เรียกว่า Repulsive Columbic Force เมื่อมีมากพอถึงขั้นหนึ่งก็จะชนะแรงดึงผิวของพอลิเมอร์เหลว ดังนั้นเส้นพอลิเมอร์เหลวก็จะถูกฉีดออกมาและจะเปลี่ยนเป็นเส้นใย โดยการระเหยออกของตัวทำละลาย หรือ โดยการถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม

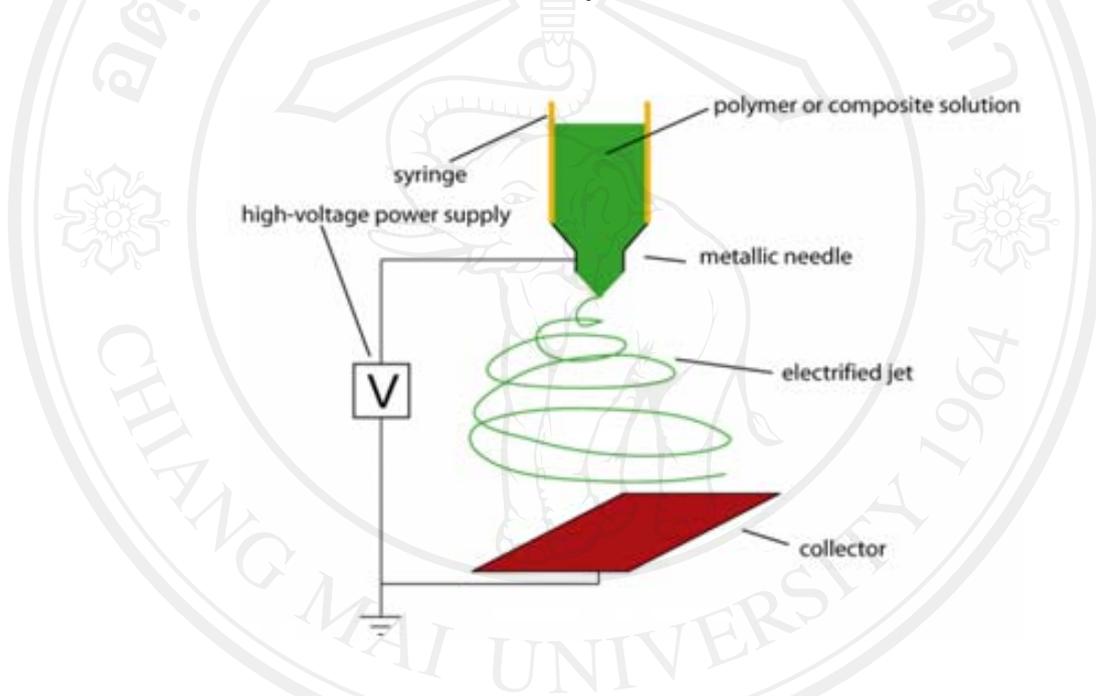
กระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์มีข้อดีหลายประการดังนี้ คือ

1. เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปจะมีขนาดตั้งแต่หลายสิบนานาเมตร จนถึงประมาณ 1 ถึง 2 ไมโครเมตร จึงมักจะถูกเรียกว่า เส้นใยขนาดนาโน หรือ เส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ไฟเบอร์
2. เนื่องจากเส้นใยมีขนาดเล็กจึงมีพื้นที่ผิวมากเป็นพิเศษในขณะที่มีน้ำหนักเบา
3. ผลึกภัณฑ์ที่ได้จากเส้นใยนี้จะมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้มีการส่งผ่านของเหลวหรือแก๊สได้ดี

ข้อดีต่างๆดังกล่าวทำให้ให้นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกแข่งขันกันพัฒนาด้วยการนำเส้นใยนาโนนี้ไปใช้งานด้านต่างๆ เช่น การกรองโมเลกุล การประดิษฐ์ชุดป้องกันอาวุธเคมีและอาวุธชีวภาพของทหาร การสร้างนาโนคอมโพสิตเป็นวัสดุโครงสร้างในวิศวกรรมเนื้อเยื่อ และเป็นวัสดุยึดติดสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

### 2.2.1 กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ (Electrospinning process) [6, 15]

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์เป็นกระบวนการเฉพาะเพื่อผลิตเส้นใยให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงไมโครเมตรถึงนาโนเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์และเงื่อนไขของกระบวนการทดลอง สำหรับระบบพื้นฐานของเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญเพียง 3 ส่วน มีดังนี้คือ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High voltage power supply) หลอดคาปิลลารีหรือหลอดฉีดยาที่มีเข็มโลหะที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก (Syringe with needle ) และวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ (Metal collector) ชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์แสดงดังรูปที่ 2.3



รูป 2.3 แสดงอุปกรณ์พื้นฐานสำหรับกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ [1]

#### 2.2.1.1 หลักการเกิดเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ปั่น [6, 15]

เมื่อยังไม่ให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่ระบบ สารละลายจำนวนหนึ่งจะรวมตัวกันเป็นหยดรูปครึ่งทรงกลมที่บริเวณปลายเข็มโลหะอันเป็นผลเนื่องมาจากแรงตึงผิว (Surface tension) จากนั้นให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่สารละลายพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าครอบคลุมบริเวณส่วนปลายของเข็มโลหะและมีประจุเกิดขึ้นที่ผิวของสารละลาย จึงเกิดแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic repulsive) ขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงตึงผิว ดังนั้น ถ้าสนามไฟฟ้ามีมากพอที่จะทำให้เกิดแรงผลักมากกว่าแรงตึงผิวจะทำให้หยดของสารละลายพอลิเมอร์ที่บริเวณปลายเข็มโลหะซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมยืดออกเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นลักษณะทรงกรวย

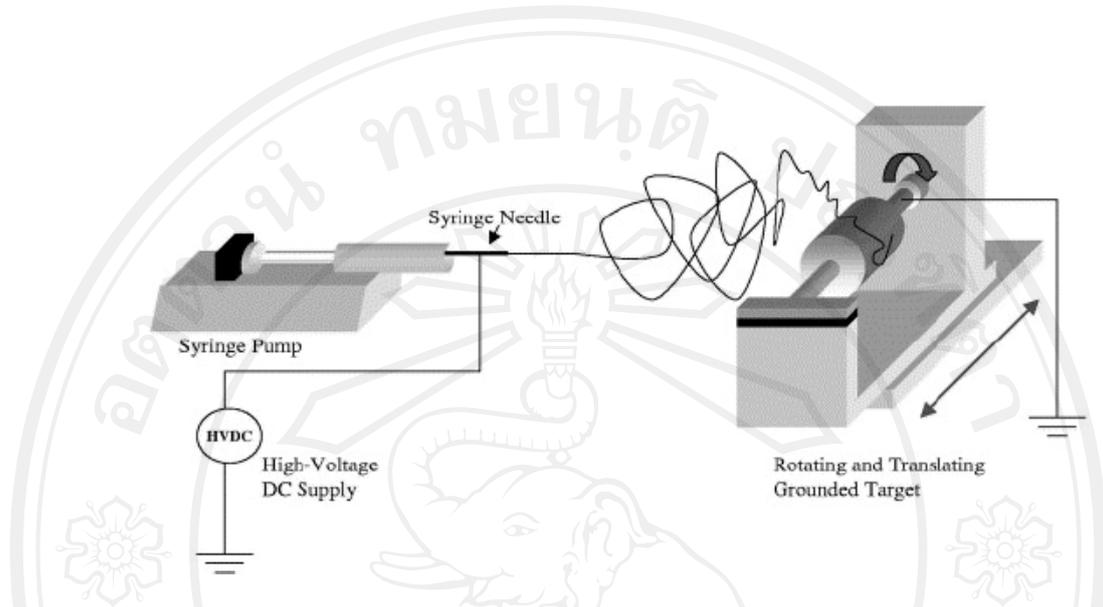
ที่เรียกว่า “กรวยของเทย์เลอร์” (Taylor’s cone) ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการผลักกันของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าขึ้นไปอีก ส่วนยอดโคนจะมีการสะสมของประจุเพิ่มมากขึ้นทำให้แรงผลักกันของประจุที่เพิ่มขึ้นนี้มากกว่าแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ ทำให้เกิดกระแสพอลิเมอร์พุ่งออกมา ซึ่งมีความเสถียรและยืดออก ทำให้ลำของพอลิเมอร์ที่พุ่งออกมามีความยาวและบางมาก โดยจะพุ่งไปยังอุปกรณ์รองรับ ในขณะที่ตัวทำลายเกิดการระเหยออกจากเส้นใยเล็ก โตรสปั้นทำให้ได้เส้นใยเล็กโตรสปั้นขนาดเล็กที่ไม่ได้ทักทอ หากใช้กล้องความเร็วสูงในการถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของลำพอลิเมอร์นี้ จะสามารถสังเกตการเคลื่อนที่ของลำพอลิเมอร์เป็นเส้นตรงในช่วงแรก จากนั้น ปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจากประจุไฟฟ้าสถิตย์ที่อยู่ภายในลำพอลิเมอร์และแนวสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของลำพอลิเมอร์ที่ไม่เสถียร ทำให้เกิดการเคลื่อนที่คล้ายกับการสะบัดตัวคล้ายไส้ ซึ่งการสะบัดตัว (Bending instability) ของลำพอลิเมอร์นี้ จะมีลักษณะการสะบัดเป็นสามมิติ โดยมีจุดศูนย์กลางการสะบัดอยู่ที่จุดสิ้นสุดของการเคลื่อนที่ของลำพอลิเมอร์ที่เป็นเส้นตรง โดยที่แนวของการสะบัดจะมีลักษณะเป็นทรงกรวย

การพันกันของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ (Polymer Chain Entanglement) ภายในสารละลายพอลิเมอร์นั้น จะทำให้ลำของพอลิเมอร์ที่พุ่งออกมาไม่เกิดการแตกออกเป็นหยดของสารละลาย และเมื่อลำพอลิเมอร์เคลื่อนที่ไปยังฉากรองรับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำพอลิเมอร์จะเล็กลงเรื่อยๆ ซึ่งเกิดจากแรงผลักกันของประจุกระแสไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดขึ้น และจะเกิดการสะบัดตัวในขณะที่ลำพอลิเมอร์เคลื่อนตัวไปยังฉากรองรับนั้น หากเป็นพอลิเมอร์หลอมเหลวสายพอลิเมอร์จะเกิดการแข็งตัวกลายเป็นเส้นใยได้โดยการเย็นตัวลง หรือ ในกรณีที่เป็นสารละลายพอลิเมอร์ ลำพอลิเมอร์จะเกิดการระเหยของตัวทำลายได้เป็นเส้นใยพอลิเมอร์ที่ฉากรองรับ เส้นใยที่ได้จากเทคนิคนี้ จะมีลักษณะเป็นแผ่นเส้นใยที่ไม่ได้ทอคล้ายแผ่นฟิล์ม

ซึ่งแนวทางการเคลื่อนที่ของกระแสพอลิเมอร์นี้จะเป็นเส้นตรงในช่วงแรก โดยระยะเป็นเส้นตรงนี้จะขึ้นกับค่าอัตราส่วนระหว่างศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงต่อระยะทางจากปลายเข็มฉีดถึงอุปกรณ์รองรับ ซึ่งหลักการเกิดเส้นใยโดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์นี้ แบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนด้วยกัน ได้แก่

1. ขั้นตอนการเกิดลำพอลิเมอร์ (เริ่มต้นด้วยจากการที่ลำของพอลิเมอร์เกิดการขยายตัวออกตามแนวเส้นตรง)
2. ขั้นตอนการยืดตัวของลำพอลิเมอร์ในระหว่างที่เคลื่อนตัวจากปลายเข็มฉีดไปยังฉากรองรับ (ซึ่งจะเกิดการคั้งงอที่ไม่เสถียรและเกิดการยืดตัวออกของลำพอลิเมอร์ ทำให้ลำพอลิเมอร์เกิดเป็นเส้นที่ยาวและบางมาก อีกทั้งลำของพอลิเมอร์เกิดการวนเป็นลูปและเกลียว)

3. ขั้นตอนการแข็งตัวของลําพอลิเมอร์เป็นเส้นใย (ตัวทำละลายระเหยออกจากเส้นใยแล้วแข็งตัวกลายเป็นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์) ซึ่งขั้นตอนการเกิดเส้นใยนี้จะแสดงไว้ดังรูปที่ 2.4



รูป 2.4 แสดงขั้นตอนการเกิดเส้นใยพอลิเมอร์โดยเทคนิคปั่นเส้นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ [1]

### 2.2.1.2 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อลักษณะและขนาดของเส้นใย [6, 15]

ถึงแม้ว่ากระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์จะใช้งานง่าย แต่ปัจจัยต่างๆก็มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปและลักษณะ โครงสร้างของเส้นใย กลุ่มของปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะเส้นใยสามารถจำแนกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ ปัจจัยของสารละลายพอลิเมอร์ ระบบ และสภาพแวดล้อม

#### 1. ปัจจัยของสารละลายพอลิเมอร์ (Polymer solution parameters)

สมบัติของสารละลายพอลิเมอร์มีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ รวมทั้งลักษณะและขนาดของเส้นใยที่ปั่นได้ สมบัติของสารละลายเหล่านี้ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ ความหนืดของสารละลาย การนำไฟฟ้าของสารละลาย และแรงตึงผิว

### 1.1 ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ (Polymer concentration)

ความเข้มข้นของสารละลายเป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดความเป็นไปได้ที่สารละลายพอลิเมอร์จะออกมาเป็นเส้นใยหรือไม่ สารละลายพอลิเมอร์จะต้องมีความเข้มข้นมากพอที่จะทำให้โมเลกุลจับกันเป็นโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์จนออกมาเป็นเส้นใย แต่อย่างไรก็ตามสารละลายพอลิเมอร์จะต้องไม่เข้มข้นเกินไปหรือเจือจางเกินไป ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์จะส่งผลกระทบต่อความหนืดและแรงดึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ ถ้าหากสารละลายพอลิเมอร์เจือจางเกินไปจะทำให้สายพอลิเมอร์ขาด ไม่เกาะกันเป็นเส้นใย แล้วถูกฉีดออกมาเป็นหยดก่อนที่จะมาถึงฉากรองรับ แต่ถ้าหากความเข้มข้นมากเกินไป พอลิเมอร์จะไม่สามารถเกิดเป็นเส้นใยได้เนื่องจากความหนืดที่มากเกินไป ซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะควบคุมให้สารละลายมีความเข้มข้นเหมาะสมกับอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ในเข็มฉีด ดังนั้นความเข้มข้นเหมาะสมที่สุดที่ทำให้เส้นใยพอลิเมอร์สามารถถูกฉีดออกมาได้เมื่อตัวแปรอื่นๆคงที่ โดย Doshi และ Reneker [12] ทำการฉีดเส้นใยด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าสถิตย์จากสารละลายพอลิเมอร์ Polyethylene oxide (PEO)/water ซึ่งมีความเข้มข้นต่างๆกัน พบว่าที่ความหนืด 800 centipoises สารละลายพอลิเมอร์จะแตกออกเป็นหยด แต่ที่ความหนืด 4000 centipoises สารละลายจะเหนียวกว่าเกินที่จะฉีดออกมาเป็นเส้นใยได้จากการทดลองทั้งหลายพบว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสมนั้นจะทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเล็กและเมื่อความเข้มข้นมากขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะเพิ่มขึ้น โดย Megelski et al. [13] พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นให้กับสารละลาย Polystyrene ใน Tetrahydrofuran (THF) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะเพิ่มขึ้นด้วยการกระจายตัวของขนาดรูพรุนจะแคบลง ซึ่ง Deitzel et al. [14] พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ของสารละลาย PEO/water มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของ PEO ด้วย power law relationship

### 1.2 ความหนืดของสารละลาย (Polymer viscosity)

ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์มีความสำคัญอย่างมากที่จะทำให้เกิดเส้นใยโดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ ทั้งนี้เนื่องจากแรงที่กีดกันการดึงยึดของสารละลายพอลิเมอร์ (หรือที่เรียกว่า เจ็ท) ออกมาจากปลายเข็มฉีดจนถึงแผ่นรองรับนั้น จะเกิดการพันกันของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ ที่สามารถป้องกันการขาดออกจากกันของสายเจ็ท และจะได้เส้นใยที่ยาว ดังนั้นความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์จะต้องสูงมากเพียงพอจึงจะเกิดการพันกันของสายโซ่โมเลกุลในปริมาณที่มาก ได้เส้นใยที่ยาวต่อเนื่อง และเมื่อเพิ่มความหนืดให้สูงขึ้น ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งอาจเกิดจากการที่สารละลายสามารถต้านทานการดึงยึดที่เกิดจากประจุบวกบนสายเจ็ท แต่ถ้าหากความหนืดสูงมากเกินไปก็อาจจะทำให้เกิดการไหล

ของสารละลายพอลิเมอร์ออกมาจากปลายเข็มฉีดได้ไม่ดีทำให้ปั่นเส้นใยยาก นอกจากนั้นการที่มีความหนืดสูงมากเกินไป สารละลายอาจจะแห้งอยู่ที่ปลายเข็มฉีด ก่อนที่จะเกิดการปั่นเส้นใยได้ ส่วนในกรณีที่มีความหนืดของสารละลายต่ำมากๆ จะเกิดการพันกันของสายโซ่โมเลกุลน้อย ดังนั้นสายเส้นจะขาดออกหรือแตกออกเป็นหยดเล็กๆ (Droplets) ของสารละลายพอลิเมอร์และเมื่อเพิ่มความหนืดขึ้นมาอีกเล็กน้อยแต่ยังอยู่ในช่วงความหนืดที่ต่ำอยู่ จะเกิดเป็นเส้นใยแต่เป็นเส้นใยที่มีเม็ดปม (Beaded fibers) ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดที่ต่ำนั้น ปริมาณตัวทำละลายในสารละลายมีมาก และเกิดการพันกันของสายโซ่สั้นๆ ดังนั้น แรงดึงผิวของสารละลายจึงมีอิทธิพลต่อสายเส้นมากกว่าความหนืดและแรงทางไฟฟ้า แต่เมื่อเพิ่มความหนืดของพอลิเมอร์ให้สูงขึ้น จะเกิดการพันกันของสายโซ่โมเลกุลมากขึ้น ประจุที่เกิดบนสายเส้นสามารถดึงยึดสารละลายออกไป เม็ดปมบนเส้นใยก็จะหายไป

การเตรียมสารละลายที่มีความหนืดสูงเพื่อให้ได้เส้นใยที่ยาวและเรียบสม่ำเสมอสามารถทำได้โดยเตรียมสารละลายให้มีความเข้มข้นสูง ซึ่งหากความหนืดหรือความเข้มข้นของสารละลายสูงมากขึ้นก็จะทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย ดังนั้นการเลือกใช้ตัวทำละลายเป็นเรื่องสำคัญ เพราะบ่งบอกถึงความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์เส้นใย และมีอิทธิพลต่อการเกิดรูพรุนในเส้นใย การระเหยของตัวทำละลายจะเกิดขึ้นในช่วงที่ลำเส้นใยพอลิเมอร์ถูกฉีดออกจากปลายเข็มฉีดไปยังจานรองรับ ในขณะที่เส้นใยกำลังเคลื่อนที่ในอากาศจะเกิดการแยกเฟสก่อนที่พอลิเมอร์จะแข็งตัวเป็นเส้นใย ขั้นตอนนี้จึงต้องใช้ความสัมพันธ์ของความหนืดของสารละลายเข้ามาช่วย โดย Megelski et al. [14] ได้ทดลองและศึกษาโครงสร้างสมบัติของเส้นใย Polystyrene ในสารละลาย Dimethylformamide (DMF) และ THF ที่อัตราส่วนต่างกัน พบว่า เส้นใยอิเล็กโตรสปิน จาก THF 100 เปอร์เซ็นต์ (มีความหนืดสูงมาก) ทำให้เส้นใยที่ได้มีรูพรุนสูง ซึ่งเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับเส้นใยประมาณ ร้อยละ 20 ถึง 40 ขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ส่วนเส้นใยอิเล็กโตรสปินจาก DMF 100 เปอร์เซ็นต์ (ซึ่งมีความหนืดน้อยกว่า) ปรากฏว่าโครงสร้างของเส้นใยในระดับไมโครเมตรแทบจะไม่มี การจับตัวกันเป็นเส้นใยเรียบเนียน จากตัวอย่างทั้งสองนี้ พบว่า ขนาดและความหนาแน่นของรูพรุนลดลง เมื่อความหนืดลดลง จากที่กล่าวมาข้างต้น การแยกเฟสของสารละลายในขณะที่ลำพอลิเมอร์กำลังพุ่งไปในอากาศ การแยกเฟสจะช่วยทำให้ตัวทำละลายเกิดการระเหย เมื่อเฟสที่ไม่มีตัวทำละลายแยกออกจากเฟสที่เป็นไอจากสารละลาย อย่างไรก็ตาม การเคลื่อนที่จากเฟสที่ไม่มีตัวทำละลายจากเฟสสารละลายด้วยการแพร่อย่างช้าๆที่ผิวเส้นใย สำหรับเส้นใยที่ระเหยง่าย บริเวณขอบของเส้นใยที่พื้นที่ผิวชุ่มไปด้วยตัวทำละลายก็จะกลายเป็นเฟสของไอได้ ซึ่งขัดจำกัดในเรื่องนี้จะทำให้สามารถพัฒนาความพรุนตัวของพื้นผิวได้

### 1.3 การนำไฟฟ้าของสารละลาย (Polymer conductivity)

สมบัติการนำไฟฟ้ามีบทบาทรองลงมาจากตัวแปรอื่นๆดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งจะส่งผลต่อขนาดเส้นใย สารละลายที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี จะสามารถรองรับประจุได้มากกว่าสารละลายที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้น้อย ดังนั้น ถ้าเส้นใยพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้ดีจะมีแรงดึงตัวมากกว่าสารละลายที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้น้อย จากงานวิจัยของ Baumgarten [19] พบว่า รัศมีของเส้นใยแปรผกผันกับรากที่สองของการนำไฟฟ้าของสารละลาย อย่างไรก็ตามสารละลายกึ่งตัวนำที่ใส่ลงในตัวทำละลาย เช่น น้ำมันปิโตรเลียม สามารถสร้างเส้นใยที่เสถียรได้ โดย Zhang et al [20]. ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเพิ่มประจุให้กับสารละลาย PVA/water กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิเมอร์ ด้วยการเพิ่มความเข้มข้นของเกลือ (ประมาณร้อยละ 0.05 ถึง 0.2) ในสารละลาย PVA/water ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิเมอร์ลดลง  $214 \pm 21$  นาโนเมตร โดยสรุปว่า การลดลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิเมอร์ เกิดการเพิ่มขึ้นของประจุที่ได้จากการเติม Sodium chloride (NaCl) ซึ่ง NaCl จะไปเพิ่มแรงทางไฟฟ้าให้กับลำพอลิเมอร์ และยังพบอีกว่า ที่สารละลายมีความสามารถในการนำไฟฟ้าตั้งแต่ 1.53 เป็น 10.2 mS/cm โดยการเพิ่มความเข้มข้นของ NaCl จากร้อยละ 0.05 ถึง 0.2 Jiang et al [21]. ทดลองใส่ Bovine serum albumin (BSA) ในเส้นใยอีเล็กโตรสปิน Dextran ให้มีคุณสมบัติทางการเยียวหรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าเป็นการประยุกต์ใช้กับการตกแต่งแผล พบว่าจากการเติม BSA ร้อยละ 5 จะช่วยลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 2.5 ไมโครเมตร เป็น 500 นาโนเมตร

### 1.4 แรงตึงผิว (Surface tension)

การที่จะเกิดสายเจ็ทนั้น แรงผลักดันของประจุไฟฟ้าภายในสารละลายพอลิเมอร์จะต้องมากกว่าแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ แต่เมื่อสายเจ็ทของสารละลายพอลิเมอร์ที่มีความหนืดต่ำพุ่งออกไปยังภากรองรับ แรงตึงผิวก็อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดเม็ดปมบนเส้นใยได้ดังที่กล่าวไปแล้ว โดยปกติการเกิดเม็ดปมในเส้นใยขนาดปกติ เราอาจถือว่าเป็นจุดบกพร่องของเส้นใย ดังนั้นจึงต้องหาวิธีแก้ไขเพื่อให้สารละลายพอลิเมอร์ที่มีความหนืดต่ำ มีแรงตึงผิวต่ำลงด้วย ก็อาจจะทำให้เม็ดปมมีปริมาณลดลงได้ ซึ่งการลดแรงตึงผิวของสารละลายอาจทำได้โดยการเติมตัวทำละลายที่มีค่าแรงตึงผิวต่ำ เช่น เมทานอล เป็นต้น อีกแนวทางหนึ่งในการลดแรงตึงผิวของสารละลาย ได้แก่การเติมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ลงไปก็จะได้เส้นใยที่เรียบสม่ำเสมอเช่นกัน

## 2. ปัจจัยของกระบวนการผลิต (Process condition) [6, 15]

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ เช่น ความต่างศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของสารละลาย ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดถึงวัสดุรองรับ อุณหภูมิ และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มฉีด

### 2.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้า

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์จะเกิดขึ้นได้ เมื่อแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) ในสารละลายพอลิเมอร์ สามารถเอาชนะแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ ดังนั้นศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงระดับกิโลโวลต์จะถูกป้อนให้กับสารละลายเพื่อทำให้เกิดประจุในสารละลายพอลิเมอร์ โดยทั่วไปแล้วศักย์ไฟฟ้าทั้งบวกและลบจะสามารถทำให้หยดสารละลายพอลิเมอร์ที่ปลายเข็มฉีดเกิดการเปลี่ยนรูปร่างเป็นกรวยเทย์เลอร์ได้ และเกิดเป็นสายเจ็ทพุ่งออกไป ซึ่งทั้งศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับสารละลายและสนามไฟฟ้าจะมีผลต่อการดึงยึดและเร่งการเคลื่อนที่ของสายเจ็ทดังกล่าว และมีผลต่อลักษณะเส้นใยที่ได้ ดังนั้นโดยส่วนใหญ่แล้ว เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการยืดของสายเจ็ท จึงทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงและยังทำให้เกิดการระเหยของตัวทำละลายเร็วขึ้น เส้นใยที่ได้จึงแห้งมากขึ้น แต่ในงานวิจัยบางงานกลับพบว่า เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้ากับสารละลายเพิ่มสูงขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารละลายมีความหนืดสูง อัตราของสารละลายที่ออกมาจากปลายเข็มฉีดอาจมากขึ้น ทำให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น ปริมาณศักย์ไฟฟ้ายังมีผลต่อการเกิดปมบนเส้นใยอีกด้วย โดยปริมาณเม็ดปมบนเส้นใยจะลดลงได้หากเพิ่มปริมาณศักย์ไฟฟ้าให้สูงขึ้น

ดังนั้นแรงดันสนามไฟฟ้าจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่สามารถใช้ควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยตั้งแต่ระดับไมโครเมตรถึงสิบนานาเมตร โดย Deitzel al. [12] ทดลองใช้ (PEO)/water system พบว่าเมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าให้มากพอจะทำให้รูปร่างกรวยของเทย์เลอร์เปลี่ยนไปจนกระทั่งลำของเส้นใยพุ่งออกมา ที่ความต่างศักย์ต่ำลงจะทำให้เกิดเฉพาะกรวยของเทย์เลอร์ที่ปลายหยดของของเหลว แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความต่างศักย์มากขึ้นจะทำให้ปริมาตรหยดของของเหลวลดลงจนเป็นทรงกรวยที่ปลายของเข็มฉีด ซึ่งจะเกิดเป็นเม็ดบีดส์มากขึ้นในเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ Meechaisue et al. [13] ได้ทำการทดลองอิทธิพลของการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้ากับสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆและตัวแปรต่างๆของเส้นใย Poly (desaminotyrosyl-tyrosine ethyl ester) carbonate (poly (DTE) carbonate) จากการทดลองพบว่า ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 ถึง 25 กิโลโวลต์/10 เซนติเมตร จะได้เส้นใยที่เรียบเนียน เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าไปที่ 20 ถึง 25

กิโลโวลต์/10 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะใหญ่ขึ้น จาก 1.9 ถึง 2.2 มิลลิเมตร Meechaisue et al. ได้ศึกษาถึงสาเหตุที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากอัตราการไหลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่สารละลาย Poly(DTE carbonate) 20%(w/v) เส้นใยจะมีลักษณะเรียบเนียนที่ทุกๆความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์/10 เซนติเมตร เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2.5 มิลลิเมตร เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เป็น 25 กิโลโวลต์/10 เซนติเมตร เส้นใยจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 5.4 มิลลิเมตร จากงานวิจัยของ Deitzel al. และ Meechaisue et al. รวมทั้งนักวิจัยท่านอื่น เป็นบทพิสูจน์ว่า ที่ระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดต่อสารละลายพอลิเมอร์ในระบบต่างๆ จะทำให้ได้เส้นใยเรียบเนียน แต่ถ้าความต่างศักย์ไฟฟ้ามากหรือน้อยเกินไปจะส่งผลให้เกิดเม็ดบีดส์เกิดขึ้น

## 2.2 อัตราการไหลของสารละลาย

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ที่ออกจากปลายเข็มฉีดและควบคุมปริมาณศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ จะพบว่าเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารละลายที่ถูกดึงออกจากปลายเข็มฉีดมีมากขึ้น ซึ่งหากสารละลายมีอัตราการไหลที่สูงมากเกินไป อาจมีข้อเสียที่ตามมาอีก นั่นคือ ตัวทำละลายมีระยะเวลาในการระเหยไม่พอเพียง ซึ่งอาจทำให้เส้นใยที่เล็กลง มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงต้องควบคุมอัตราการไหลให้พอเหมาะไม่ควรสูงมากเกินไป โดยอัตราการไหลของพอลิเมอร์จะส่งผลต่อขนาดเส้นใยและความพรุนของเส้นใย โดย เทย์เลอร์ พบว่ารูปทรงกรวยที่ปลายเข็มฉีดนั้นจะไม่ปรากฏขึ้นถ้าหากอัตราการไหลของสารละลายมีไม่มากพอที่จะพุ่งออกจากปลายเข็มฉีด Megelski et al. [13] .ศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลในโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของสารละลาย Polystyrene/ (THF) พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและรูพรุนจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของสารละลาย ยิ่งไปกว่านั้นที่อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น จะเกิดเม็ดลูกปัดเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากสารละลายแห้งไม่ทันก่อนที่ลำพอลิเมอร์จะไปถึงฉากรองรับ เส้นใยที่ยังไม่แห้งนั้นจะติดกันเป็นแผ่นแบนราบติดกับฉากรองรับ

## 2.3 ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดถึงตัวรองรับ

การปรับระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดและฉากรองรับมีผลโดยตรงต่อความแรงของสนามไฟฟ้า (Electric field strength) และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของสายเจ็ทจนตกบนฉากรองรับ (Flight time) ซึ่งในการเกิดเป็นเส้นใยนั้น ควรจะมีระยะเวลาพอที่จะทำให้ตัวทำละลายเกิดการระเหยออกไปจากสายเจ็ทได้มาก ดังนั้นหากลดระยะดังกล่าว สายเจ็ทจะมีระยะเวลาการเคลื่อนที่ไปยังฉากรองรับที่สั้นลง นอกจากนั้นความแรงของสนามไฟฟ้าก็เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจะไปเร่งการ

เคลื่อนที่ของสายเจ็ทไปยังฉากรองรับ จากผลดังกล่าว จะทำให้ระยะเวลาในการระเหยของตัวทำละลายมีไม่เพียงพอ ปริมาณตัวทำละลายที่มากเกินไปนั้นจะทำให้เส้นใยที่ได้บนฉากรองรับเกิดการรวมตัวกันและทำให้เส้นใยเกิดการเชื่อมตัวต่อกันทั้งในแผ่นเส้นใยนั้นและระหว่างชั้นของแผ่นเส้นใย (Intra and Inter layer Bonding) ซึ่งการที่ตัวทำละลายระเหยไม่หมดและเกิดการเชื่อมต่อกันบนแผ่นเส้นใยนี้ อาจเป็นผลดีต่อการนำไปใช้งานในการทำเป็น โครงร่างเทียมสำหรับเนื้อเยื่อเทียมที่ต้องการให้มีความพรุนตัวและมีความแข็งแรงสูง แต่ถ้าหากเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงฉากรองรับมีผลทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลง ซึ่งในการเพิ่มระยะห่างนั้นทำให้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของเจ็ทนานขึ้นและเกิดการยึดตัวก่อนที่จะสะสมอยู่บนอุปกรณ์รองรับ

ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงฉากรองรับจะมีอิทธิพลต่อขนาดเส้นใย 1 ถึง 2 เท่า ยิ่งกว่านั้น ระยะห่างจากปลายเข็มถึงฉากรองรับสามารถควบคุมได้ว่าจะให้เป็นการฉีดแบบการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ หรือ การปั่นเส้นใยแบบสเปรย์ (Electrospraying) โดย Doshi และ Reneker [12] พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะลดลงเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น จากการศึกษาของ Jaeger et al. [16] พบว่า เส้นใยอิเล็กโตรสปินจากสารละลาย PEO/water โดยการเปลี่ยนระยะต่างๆของกรวยของเทย์เลอร์ พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะลดลงจาก 19 ถึง 9 ไมโครเมตร หลังจากปรับระยะห่างจาก 1 เป็น 3.5 เซนติเมตร ตามลำดับ

## 2.4 อุณหภูมิ

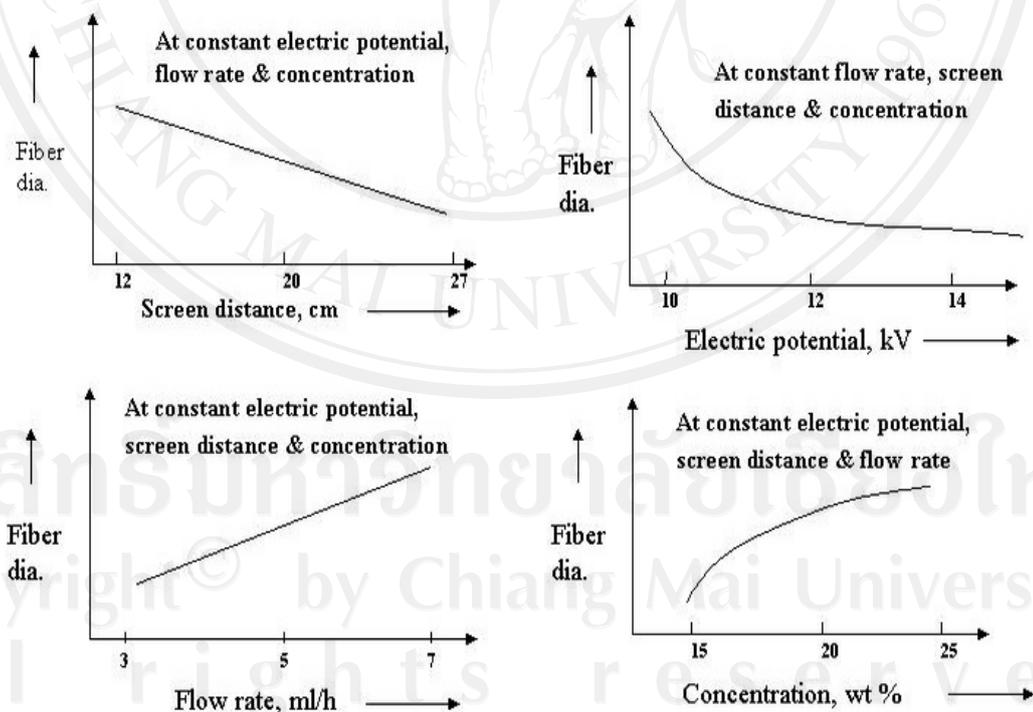
การเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายพอลิเมอร์มีผลทำให้ความหนืดของสารละลายลดลง ดังนั้นจึงพบว่าเส้นใยมีขนาดเล็กลง แต่หากมีการผสมสารชีวภาพ เช่น เอ็นไซม์โปรตีนลงไป สารละลายพอลิเมอร์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในการตรึงสารชีวภาพเหล่านี้บนแผ่นเส้นใย การเพิ่มอุณหภูมิอาจมีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของสารชีวภาพนี้ลดลงได้

## 2.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มฉีด

การลดลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเข็มฉีด พบว่า มีผลต่อการลดลงของขนาดเส้นใยได้ ซึ่งเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มฉีดเล็กลง ขนาดของหยดสารละลายที่อยู่ปลายเข็มจะลดลงด้วย ทำให้แรงตึงผิวของหยดสารละลายเพิ่มมากขึ้น การจะเกิดเป็นสายเจ็ทพุ่งออกมาได้จึงต้องการแรงทางไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น จากผลดังกล่าวสายเจ็ทจึงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วลดลงและมีระยะเวลาพอที่จะเกิดการดึงยึดเพิ่มมากขึ้น เส้นใยที่ได้บนฉากรองรับจึงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงด้วยเหตุผลดังกล่าว

### 3. ปัจจัยจากสภาพบรรยากาศขณะปั่นเส้นใย [6, 15]

การศึกษาผลจากปัจจัยของสภาพบรรยากาศขณะปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ที่มีต่อลักษณะและขนาดของเส้นใยมีค่อนข้างน้อย แต่มีนักวิจัยบางท่านศึกษา พบว่า ปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อลักษณะของเส้นใยเหมือนกัน ปัจจัยดังกล่าว เช่น ความชื้น ชนิดของบรรยากาศ และความดันอากาศ เป็นต้น โดยหากทำการปั่นเส้นใยในบรรยากาศที่มีความชื้นสูง พบว่าจะเกิดรูพรุนบนแผ่นเส้นใยที่ปั่นได้ ขนาดและความลึกของรูพรุนก็เพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มมากขึ้นด้วย ทั้งนี้ความชื้นมีผลต่ออัตราการระเหยของตัวทำละลายในสารละลายพอลิเมอร์ ถ้าทำการปั่นเส้นใยในบรรยากาศที่มีความชื้นต่ำ ตัวทำละลายที่ระเหยได้เร็วก็จะแห้งอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในการผลิตเส้นใยนาโนด้วยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์นั้น หากต้องการให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเล็กมาก มีความเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีเม็ดปมบนเส้นใยและได้แผ่นเส้นใยที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ เราสามารถที่จะปรับเปลี่ยนสภาวะต่างๆ ได้ดังที่กล่าวไว้แล้วนั้น ซึ่งปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อขนาดและลักษณะของเส้นใยแสดงไว้ดังรูปที่ 2.5



รูป 2.5 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโนที่ได้จากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ [6]

### 2.2.1.3 ประเภทของเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ [15]

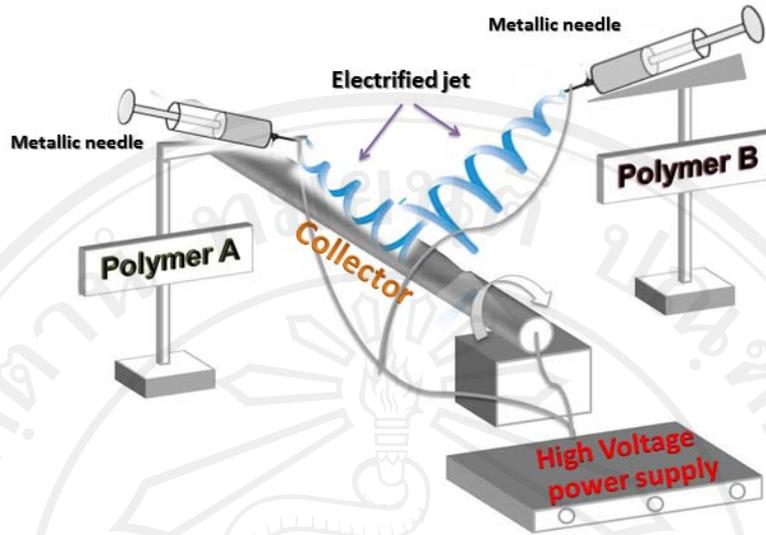
การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์สามารถจำแนกได้ดังนี้ คือ

1. การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบร่วมแกน (Coaxial-Electrospinning)
2. การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบหลอมละลาย (Melt-Electrospinning, Melt-ES)
3. การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบสนามใกล้ (Near field Electrospinning, NF-ES)
4. การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบใช้สนามแม่เหล็กร่วม (Magneto-Electrospinning, Magneto-ES)

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะไม่ได้อธิบายในรายละเอียดของแต่ละประเภทของการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ประดิษฐ์และคิดค้นประเภทของการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ขึ้นมาเอง ซึ่งจะได้อธิบายถึงรายละเอียดต่อไป

### 2.3 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบสองเข็มสองทิศทาง

กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบสองเข็มสองทิศทางนี้ได้ประดิษฐ์และคิดค้นขึ้นมาใหม่เพื่อให้มีความเหมาะสมต่องานวิจัย เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ใช้พอลิเมอร์สองชนิดที่ไม่สามารถนำมาละลายในตัวทำละลายเดียวกันได้ ดังนั้น จึงไม่สามารถนำสารละลายทั้งสองชนิดนี้มารวมอยู่ในหลอดเดียวกันได้ เนื่องจากจะทำให้เกิดการแยกชั้นขึ้นระหว่างพอลิเมอร์สองชนิดนี้ เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง คือ พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งมีคุณสมบัติในการไม่ชอบน้ำ ส่วนอีกชนิดหนึ่งมีคุณสมบัติในการชอบน้ำ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพัฒนาเครื่องมือขึ้นมาใหม่เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.6



รูป 2.6 แสดงอุปกรณ์การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบสองเข็มสองทิศทาง

ในการทำให้เส้นใยนาโนมีหน้าที่หรือสมบัติพิเศษเฉพาะตัว (Functionalization) โดยการรวมเอา โมเลกุล สาร วัตถุ หรือส่วนประกอบอื่น (โดยเฉพาะวิศวกรรมเนื้อเยื่อ ระบบการนำส่งยา และผ้า ปิดแผล) เข้ากับเส้นใยนาโน ในหลายกรณีและในงานวิจัยนี้ไม่สามารถทำได้โดยใช้เทคนิคการปั่น เส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์อย่างง่ายได้ ทั้งนี้เนื่องจากมีปัญหาที่สำคัญอยู่ 2 ประการ คือ หนึ่ง ปัญหา ความต้องการในการเก็บสารที่อยู่ร่วมกับเส้นใยนาโน (เช่น โมเลกุลชีวภาพ ได้แก่ เอ็นไซม์ โปรตีน ยา ไวรัส และแบคทีเรีย) ในสภาพแวดล้อมของเหลว เพื่อที่จะคงสภาพหรือหน้าที่และคุณสมบัติ เดิมของมันนั้นทำได้ยาก สอง ปัญหาของน้ำหนักโมเลกุลของสาร คุณสมบัติของพอลิเมอร์แต่ละ ชนิด ซึ่งส่วนมากมักเกิดกับพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถเข้ากันได้เมื่อตอนยังเป็นสารละลาย ทำให้การ ผลิตเส้นใยโดยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ประเภทอื่นเป็นไปได้ยาก อย่างไรก็ตามปัญหา ทั้งสองข้างต้นสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้เทคนิค “การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบสองเข็ม สองทิศทาง”

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบสองเข็มสองทิศทาง จะใช้เข็มฉีดยา 2 เข็ม โดยเข็มแต่ละ อันจะบรรจุพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเข็มฉีดยาจะขึ้นอยู่กับชนิด ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ซึ่งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงที่ให้กับเข็มฉีดยาทั้งสองอันจะมีขนาด เท่ากัน ถ้าของพอลิเมอร์ถูกขับให้พุ่งออกมาจากปลายเข็มฉีดยาเกิดเป็นเส้นใยนาโนคอมพอสิตที่ฉีก รงรับ เมื่อพิจารณาอย่างละเอียดจะพบว่า การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบสองเข็มสองทิศทาง มีกระบวนการทางกายภาพที่ซับซ้อน อีกทั้งยังมีการทดลองและมีการใช้แบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์มาอธิบายค่อนข้างน้อย ปัญหาสำคัญที่พบบ่อยในระหว่างการเกิดเส้นใยนาโนคอมพอสิตแบบสองเข็มสองทิศทาง คือ อัตราการไหลของพอลิเมอร์แต่ละชนิดไม่เท่ากัน ขนาดเส้นใยของพอลิเมอร์แต่ละชนิดก็ไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาใช้ได้

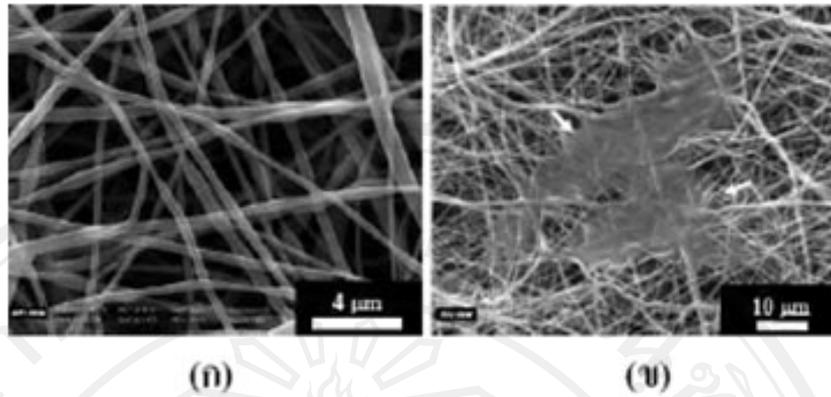
กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบสองเข็มสองทิศทางไม่เพียงแต่จะใช้ประจุเส้นใยนาโนคอมพอสิตเท่านั้น แต่ยังสามารถประจุเส้นใยนาโนที่มีลักษณะเป็นเส้นใยต่อเนื่องและเป็นเม็ดบีดส์ (หรือเม็ดลูกปัด) ที่เกิดขึ้นพร้อมกันได้อีกด้วย ข้อดีของการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบสองเข็มสองทิศทางคือ สามารถผลิตชิ้นงานที่เกิดจากพอลิเมอร์ต่างชนิดกันซึ่งไม่สามารถบรรจุในหลอดเดียวกันได้ (สามารถผลิตวัสดุคอมพอสิตได้ในขั้นตอนเดียว) ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการผลิต

## 2.4 การประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนที่เตรียมด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ [6]

เส้นใยนาโนที่ได้จากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ จะมีศักยภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ด้านการแพทย์ ด้านเทคโนโลยีวัสดุ ด้านสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยีชีวภาพ และด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และพลังงาน ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไปนี้

### 2.4.1 ด้านการแพทย์

เส้นใยนาโนที่ประจุขึ้นจากพอลิเมอร์ในธรรมชาติ เช่น ไหม (Silk) เจลลาติน (Gelatin) คอลลาเจน (Collagen) และไฟบริโนเจน (Fibrinogen) รวมทั้งพอลิเมอร์สังเคราะห์บางอย่าง เช่น พอลิคาร์โพรแลคโตน (PCL) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และกรดพอลิไกลออลิก (Polyglycolic) เป็นต้น เส้นใยเหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในร่างกายมนุษย์ได้ เนื่องจากมีสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) อีกทั้งยังมีสมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradability) จึงทำให้พอลิเมอร์เหล่านี้เกิดการย่อยสลายตัวเองได้ภายในร่างกายมนุษย์เหมือนไหมเย็บแผลที่ใช้ในปัจจุบัน (ดังรูปที่ 2.7 และ 2.8) ดังนั้นเส้นใยนาโนพอลิเมอร์เหล่านี้จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue engineering) เช่น ผ้าปิดแผล (Wound dressing) เนื้อเยื่อเทียมสำหรับใช้ซ่อมกระดูกอ่อนและเส้นประสาท และระบบการนำส่งยา เป็นต้น



รูป 2.7 แสดงการเลี้ยงเซลล์บนแผ่นเส้นใยนาโน PCL (ก) ก่อนเลี้ยง และ (ข) หลังเลี้ยงเซลล์เป็นเวลา 3 วัน ซึ่งพบการการเจริญของเซลล์บนเส้นใย [5]

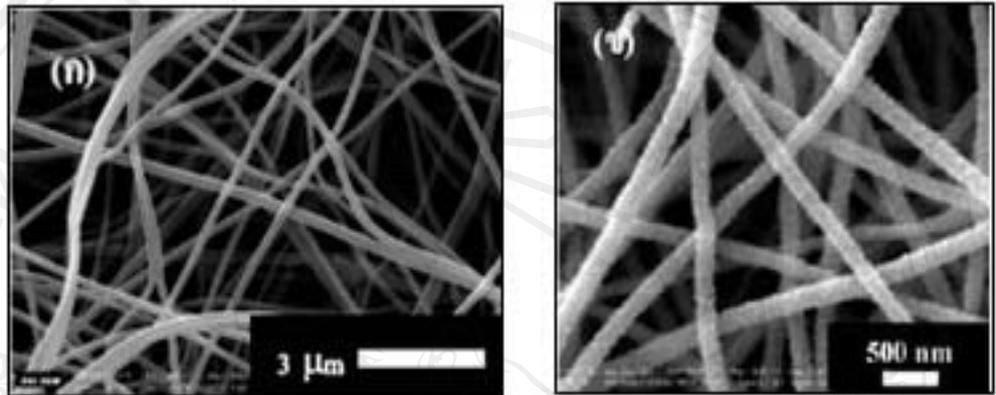


รูป 2.8 แสดงแผ่นเส้นใยนาโนพอลิคาร์โพรแลคโทนซึ่งกลุ่มวิจัย SSMG ประดิษฐ์ขึ้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ได้ [5]

#### 2.4.2 ด้านวัสดุศาสตร์

เส้นใยนาโนบางชนิดถูกนำไปเสริมกับวัสดุชนิดอื่นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ดีขึ้น ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับสมบัติของเส้นใยแต่ละชนิดด้วย เช่น เส้นใยนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) ซึ่งมีค้ำยั่งมอดูลัส (Young's modulus) และความแข็งแรง (Strength) สูง อีกทั้งค่าแรงต้านทานแรงดึงตามยาว (Tensile strength) ยังสูงกว่าเหล็กประมาณ 3 เท่า (รูปที่ 2.9 (ก)) ในขณะที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าเหล็กประมาณ 6 เท่า ดังนั้นจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิตให้มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ลักษณะเดียวกันกับการทำให้คอนกรีตให้มีความแข็งแรงมากขึ้นด้วยการเสริมเหล็กเส้น

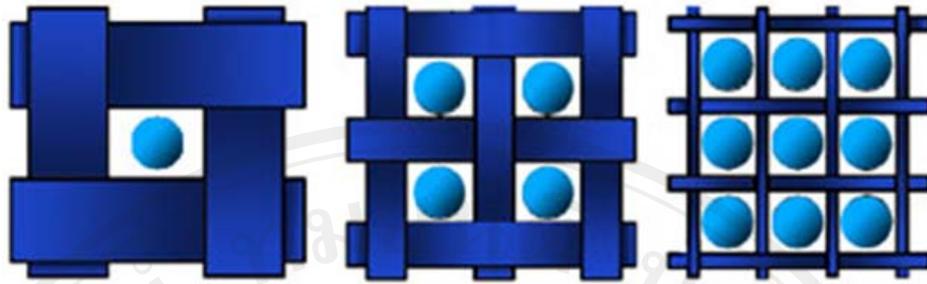
นอกจากนี้เส้นใยนาโนเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก (Ferroelectric ceramics) เช่น แบเรียมสตรอนเตรียมไททาเนต ((Ba,Sr)TiO<sub>3</sub>, BST) (รูปที่ 2.9 (ข)) เส้นใยชนิดนี้นอกจากจะสามารถใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิตให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีแล้วยังสามารถเพิ่มหน้าที่ความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิกให้แก่วัสดุอีกทางหนึ่งด้วย



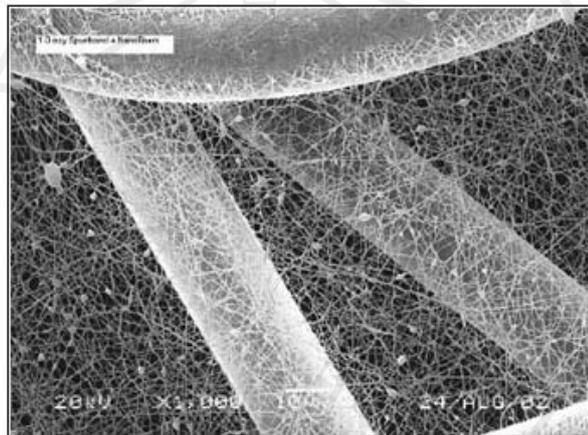
รูป 2.9 แสดง (ก) เส้นใยนาโนคาร์บอนผ่านการเคลือบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ ก๊าซอาร์กอน (ข) เส้นใยนาโนเฟอร์โรอิเล็กทริกแบเรียมสตรอนเตรียมไททาเนต ((Ba, Sr)TiO<sub>3</sub>, BST) [5]

#### 2.4.3 ด้านสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยีชีวภาพ

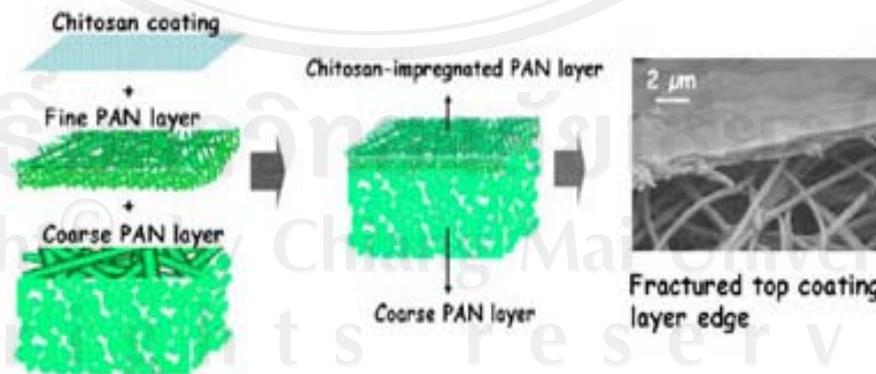
ในชีวิตประจำวัน เราจะพบว่าเสื้อผ้าที่ทอจากเส้นด้ายขนาดเล็ก ฝ้ายจะมีความละเอียด และมีช่องว่างขนาดเล็กกว่าผ้าที่ทอด้วยเส้นด้ายขนาดใหญ่ ดังนั้นแผ่นของเส้นใยที่ทอจากเส้นใยขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรจึงมีช่องว่างขนาดเล็กมากและสามารถกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้หลายเท่าตัว (รูปที่ 2.10) ดังนั้นแผ่นเส้นใยจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในระบบกรองที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อลดมลภาวะทางอากาศและทางน้ำหรือพัฒนาเป็นระบบกรองน้ำจืดจากน้ำทะเล หรือแม้กระทั่งการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย (ดังรูปที่ 2.11 แสดงระบบกรองของเส้นใยนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อกรองและดักจับอนุภาคที่มีขนาดเล็ก รูปที่ 2.12 แสดงระบบกรองที่ทำจากเส้นใยที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อพัฒนาสำหรับทำระบบกรองน้ำหรือของเหลว โดยมีแผ่นฟิล์มไคโตซานสำหรับด้านเชื้อแบคทีเรียและจับไอออนของโลหะหนักซึ่งอยู่ด้านบน)



รูป 2.10 แสดงประสิทธิภาพของการกรองเพิ่มมากขึ้น เมื่อเส้นใยมีขนาดเล็กลง [5]



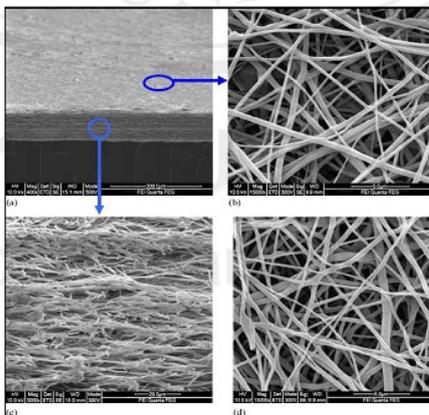
รูป 2.11 แสดงระบบกรองจากเส้นใยนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อกรองและจับอนุภาคขนาดเล็ก [5]



รูป 2.12 แสดงระบบกรองจากเส้นใยนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อพัฒนาใช้ทำระบบกรองน้ำหรือของเหลว [5]

นอกจากนี้ยังมีเส้นใยนาโนเซรามิกบางกลุ่มที่สามารถนำมาทำระบบบำบัดน้ำเสียหรือเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศได้ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นต้น วัสดุเหล่านี้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalysis) สามารถกำจัดสารพิษ แบคทีเรีย ที่กลิ่นเหม็นได้ อย่างเช่น ในอุตสาหกรรมเครื่องปรับอากาศที่มีการนำอนุภาคระดับนาโนเมตรของวัสดุเหล่านี้มากำจัดเชื้อโรคในอากาศ และนำมาใช้เคลือบเส้นใยของเสื้อผ้าเพื่อป้องกันกลิ่นอับจากเชื้อแบคทีเรีย หรือแม้กระทั่งใช้ผสมในสีทาบ้านเพื่อให้ทนต่อแสงแดดและต้านเชื้อรา ดังนั้นหากประดิษฐ์ให้วัสดุเหล่านี้มีขนาดเป็นเส้นใยขนาดเล็กระดับนาโนเมตร จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้มากขึ้น

สำหรับการประยุกต์ใช้ในด้านเทคโนโลยีชีวภาพ ได้มีการนำเส้นใยมาใช้เป็นแผ่นเมมเบรนคัดแยก (Affinity membrane) สำหรับการแยกโมเลกุลให้บริสุทธิ์โดยอาศัยสมบัติทางกายภาพ/เคมี หรือหน้าที่เฉพาะทางชีวภาพของ โมเลกุลนั้น แผ่นเมมเบรนคัดแยกทำการแยกโมเลกุล โดยการเลือกจับโมเลกุลซึ่งอาศัยการตรึงลิแกนด์ที่มีความจำเพาะต่อโมเลกุลที่ต้องการคัดแยกลงบนพื้นผิวเมมเบรน แผ่นเมมเบรนคัดแยกทำให้เกิดระบบคัดแยกที่มีข้อดีว่าการใช้คอลัมน์โครมาโตกราฟีแบบดั้งเดิม ซึ่งให้สารเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ตัวกลางที่บรรจุเม็ดคอลลอยด์ขนาดเล็ก เมื่อใช้แผ่นเมมเบรนคัดแยกในระบบคัดแยกจะทำให้สามารถคัดแยกโมเลกุลจากสารปริมาณน้อยกว่าได้ โดยใช้เวลาในการคัดแยกน้อยกว่า และคัดแยกโมเลกุลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า เนื่องจากความจำเพาะระหว่างโมเลกุลบนแผ่นเมมเบรนและโมเลกุลที่ต้องการ (ดังรูปที่ 2.13 แสดงแผ่นเมมเบรนคัดแยกที่ทำจากเส้นใยเซลลูโลสซึ่งมีผิวตรึงไว้กับ Cibacron blue สำหรับแยกแอลบูมิน (Albumin)) นอกจากนี้มีความพยายามนำเส้นใยนาโนมาเคลือบบนชุดเครื่องแบบทหารเพื่อป้องกันอาวุธทางชีวภาพ และสารพิษทางเคมี ดังรูปที่ 2.14



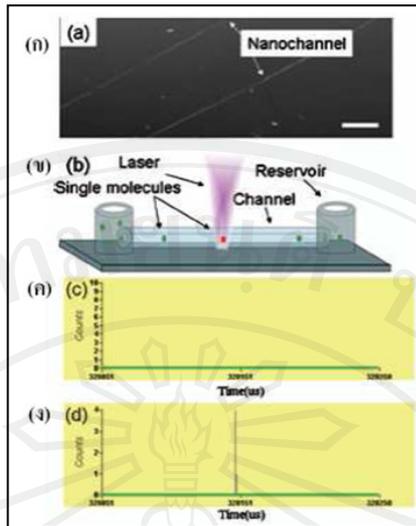
รูป 2.13 แสดงแผ่นเมมเบรนคัดแยกที่ทำจากเส้นใยเซลลูโลสซึ่งมีผิวตรึงไว้กับ Cibacron blue สำหรับแยกแอลบูมิน (Albumin) [5]



รูป 2.14 แสดงการเคลือบเส้นใยนาโนบนเครื่องแต่งกายทหาร เพื่อป้องกันอาวุธทางชีวภาพ [5]

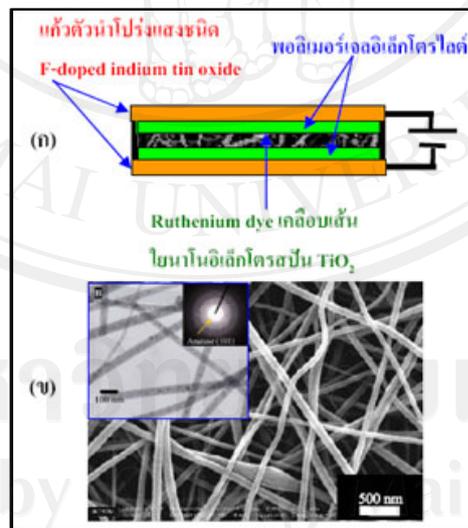
#### 2.4.4 ด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และพลังงาน

ในกรณีที่เส้นใยมีสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดีหรือสมบัติของสารกึ่งตัวนำสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะเทคโนโลยีด้านตัวตรวจจับต่างๆ เช่น ตัวตรวจจับก๊าซ (Gas sensor) ตัวตรวจจับความร้อน (Thermal sensor) เป็นต้น (ดังรูปที่ 2.15 แสดงอุปกรณ์ท่อนาโนของซิลิกา (Silica nano channels) ซึ่งเป็นเส้นใยแบบท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 25 นาโนเมตร) ประดิษฐ์ด้วยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์สำหรับตรวจวัดโมเลกุลเดี่ยว (Single molecule detection) ซึ่งอุปกรณ์นี้จะทำการตรวจวัดสัญญาณโฟตอนจากสารโมเลกุลเดี่ยวของ 5-Iodoacetamidofluorescein (IAF) ซึ่งละลายอยู่ใน 2-hydroxyethyl piperazine-1-propanesulfonic acid (EPPS) buffer (pH 9) และแพร่เข้าไปอยู่ในร่องนาโนของซิลิกา โดยสัญญาณโฟตอนจากโมเลกุลเดี่ยวจะตรวจวัดได้เมื่อร่องนาโนของซิลิกามี IAF บรรจุอยู่ และในทางตรงกันข้ามจะไม่มีสัญญาณโฟตอนจากโมเลกุลเดี่ยวเมื่อร่องนาโนของซิลิกาไม่มี IAF ข้อดีของอุปกรณ์นี้ คือ สามารถตรวจวัดได้โดยใช้สารปริมาณน้อยมากในระดับความเข้มข้นขนาดที่น้อยกว่า 200 นาโนโมล/ลิตร นอกจากนี้เส้นใยนาโนเซรามิกบางชนิดสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทน เช่น การนำเส้นใย  $\text{TiO}_2$  ไปเป็นส่วนประกอบหนึ่งในเซลล์แสงอาทิตย์แบบย้อมสี (Dye-sensitized solar cell) ดังรูปที่ 2.16 หรือ การนำเส้นใยโซเดียมโคบอลต์ออกไซด์ ( $\text{NaCO}_2\text{O}_4$ ) ซึ่งเป็นวัสดุประเภทเทอร์โมอิเล็กทริกส์ (วัสดุที่สามารถผันไฟฟ้าจากความร้อน) ไปประยุกต์ใช้ทำแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากความร้อนได้ และความสามารถของการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ในการจัดรูปแบบของเส้นใยที่เป็นแบบเส้นเดี่ยวได้ ทำให้เส้นใย  $\text{NaCO}_2\text{O}_4$  มีศักยภาพในการนำไปประดิษฐ์นาโนเทอร์โมคัปเปิ้ลได้ (ดังรูปที่ 2.17 สำหรับเส้นใยแบบเส้นเดี่ยวของ  $\text{NaCO}_2\text{O}_4$ )

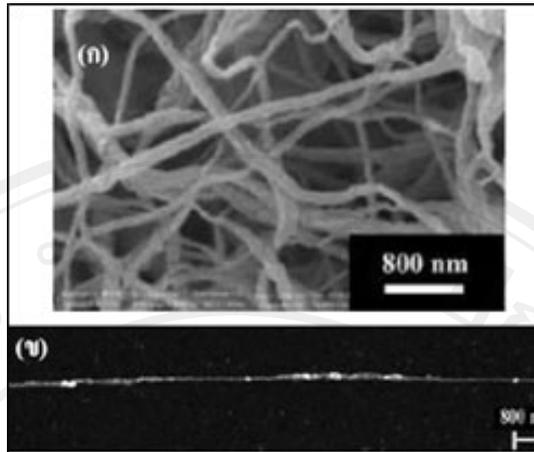


รูป 2.15 แสดงอุปกรณ์ท่อนาโนของซิลิกาสำหรับตรวจวัดโมเลกุลเดี่ยว [5]

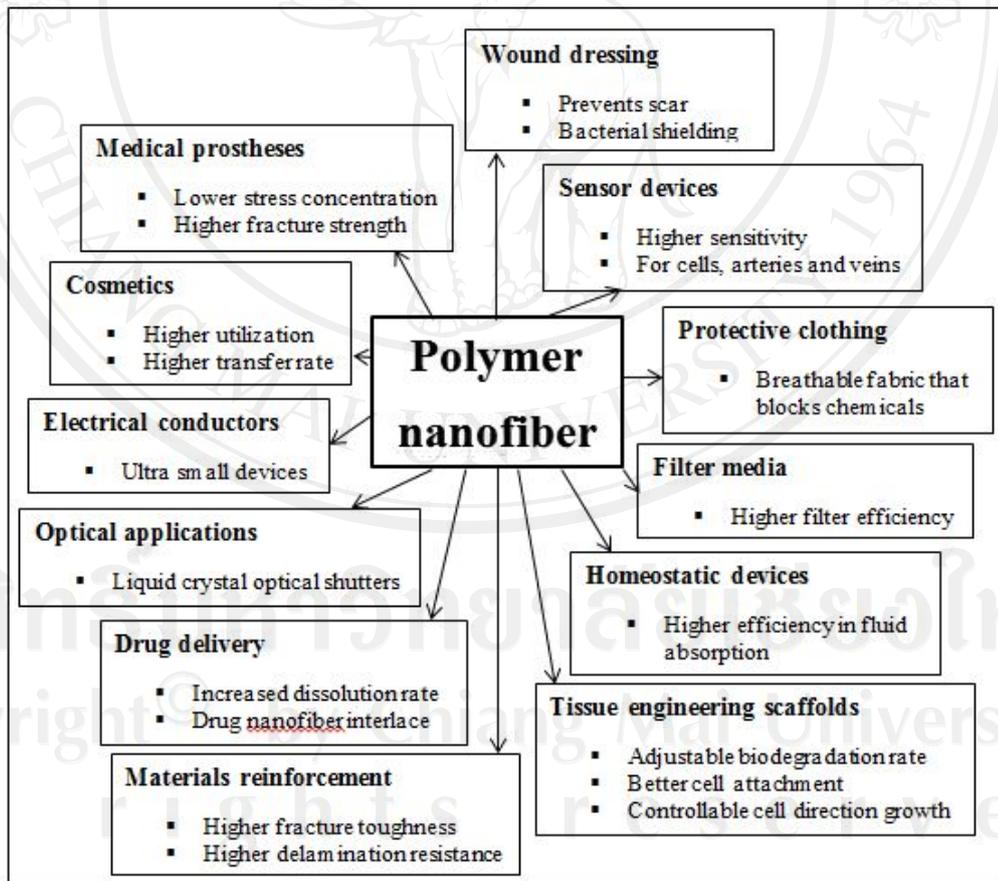
จากรูปที่ 2.15 (ก) ท่อนาโนของซิลิกาบรรจุด้วย IAF (สเกลบาร์เท่ากับ 10) แผนภาพแสดงการตรวจวัดโมเลกุลเดี่ยว (ข)  $\mu$  (ค) ผลการนับโฟตอนเมื่อร่องนาโนของซิลิกาไม่มี IAF (ง) ผลการนับโฟตอนเมื่อร่องนาโนของซิลิกามี IAF ซึ่งจะตรวจวัดสัญญาณโฟตอนจากโมเลกุลเดี่ยวได้



รูป 2.16 แสดง (ก) แผนภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมซึ่งมีเส้นใยนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) เป็นส่วนประกอบ และ (ข) ตัวอย่างเส้นใยนาโน Anatase TiO<sub>2</sub> ซึ่งกลุ่มวิจัย SSMG ประดิษฐ์ขึ้น [5]



รูป 2.17 แสดง (ก) เส้นใยนาโน  $\text{NaCo}_2\text{O}_4$  ซึ่งกลุ่มวิจัย SSMG ประดิษฐ์ขึ้น และ (ข) การจัดรูปแบบของเส้นใย  $\text{NaCo}_2\text{O}_4$  ให้เป็นแบบเส้นเดี่ยวบน Si (100) [5]



รูป 2.18 แสดงการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนทางด้านต่างๆ

## 2.5 พอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) [7]

### 2.5.1 คำจำกัดความของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ (Polymer) มาจากรากศัพท์ภาษากรีกสำคัญ 2 คำ คือ Poly (จำนวนมาก) และ Meros (ส่วนหรือหน่วย) พอลิเมอร์เป็นสารโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) ประกอบด้วยหน่วยซ้ำกัน (Repeating unit) ของมอนอเมอร์ (Monomer) หลายๆหน่วยมาทำปฏิกิริยากัน มอนอเมอร์นี้จัดเป็นสารไมโครโมเลกุล (Micromolecule) ชนิดหนึ่ง พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยหรือมอนอเมอร์ชนิดเดียวกันทั้งหมดจัดเป็นโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) แต่ถ้ามีมอนอเมอร์ต่างกันตั้งแต่หนึ่งชนิดขึ้นไปจัดเป็นโคพอลิเมอร์ (Copolymer)

### 2.5.2 คำจำกัดความของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradability) และความสามารถในการย่อยสลายได้ (Compostability) ถูกอธิบายไว้อย่างชัดเจนโดยสมาคมวิทยาศาสตร์ และสมาคมอเมริกาเพื่อการทดสอบวัสดุ (American Society for Testing and Materials: ASTM) ภายใต้การอ้างอิง ASTM D 6400-99 in July 1999. ซึ่งคำจำกัดความนี้ได้รับการยอมรับในหลายประเทศทั่วโลก โดย ASTM ได้ให้คำนิยามของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พอลิเมอร์ที่เกิดการย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ หรือ กระบวนการที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลง โครงสร้างทางเคมี อันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ วัสดุพอลิเมอร์จะจัดชื่อว่าเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ ถ้าสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ โดยสภาพแวดล้อมและอัตราการย่อยสลายจะถูกกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐานซึ่งมีหลายวิธี เช่น การใช้เอนไซม์ การใช้จุลินทรีย์ หรือการหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลาย (Composting) โดยสัญลักษณ์ที่บ่งบอกถึงพลาสติกย่อยสลายได้ คือ การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยทั่วไปมักใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 6 เดือน เช่น มาตรฐาน ASTM 5338 กำหนดไว้ว่าพลาสติกที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์เพียง 1 ชนิด จะต้องเกิดการย่อยสลายอย่างน้อย ร้อยละ 60 โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารประกอบอินทรีย์ สารชีวมวล ภายใต้สภาวะการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนภายในเวลา 6 เดือน และสำหรับพอลิเมอร์ผสมต้องเกิดการย่อยสลายร้อยละ 90 และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารปรับสภาพดินได้ และต้องไม่มีความเป็นพิษต่อพืชและสัตว์ จึงจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และสามารถกำจัดได้โดยกระบวนการหมักขยะอินทรีย์

### 2.5.3 การแยกประเภทของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

การจำแนกประเภทของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Classification of biodegradable polymers) สามารถจำแนกได้หลากหลายวิธี เช่น จำแนกตามวิธีการสังเคราะห์ ความสำคัญทางเศรษฐกิจ การนำไปประยุกต์ใช้ เป็นต้น ซึ่งการจำแนกแต่ละประเภทเหล่านี้จะให้ข้อมูลที่มีประโยชน์แตกต่างกัน สำหรับในงานวิจัยนี้ได้จำแนกประเภทของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า พอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer)) ได้เป็น 2 ประเภท คือ พอลิเมอร์ตามธรรมชาติ (Natural polymer) และ พอลิเมอร์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ (Synthesis polymer)

#### 2.5.3.1 พอลิเมอร์ตามธรรมชาติ จำแนกได้เป็น 6 กลุ่มย่อย คือ

- Polysaccharides (starch, cellulose, lignin, chitin)
- Protein (gelatin, casein, wheat gluten, silk, wood)
- Lipids (plant oil including castor oil and animal fats)
- Polyester ที่ผลิตจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กหรือพืช เช่น Polyhydroxyalcanoates
- Polyester synthesis from bio-derived monomers (Polylactic acid)
- Miscellaneous polymer (natural rubbers)

#### 2.5.3.2 พอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ จำแนกได้เป็น 4 กลุ่มย่อย คือ

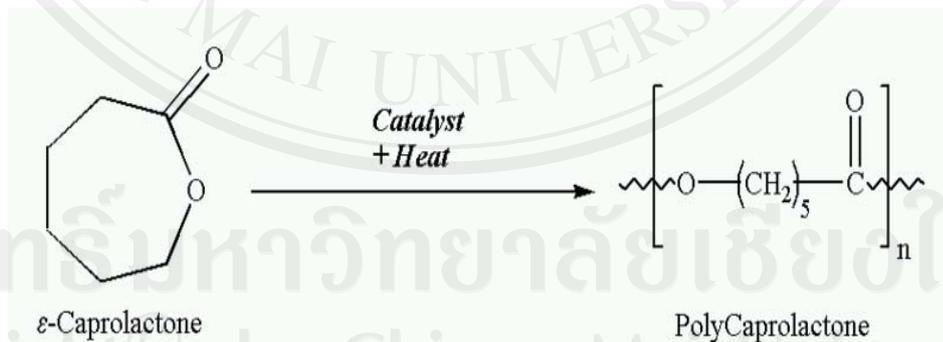
- Aliphatic polyester (polyglycolic acid, polybutylene succinate, polycaprolactone)
- Aromatic polyester or blends of the two steps (polybutylene succinate terephthalate)
- Polyvinyl alcohols
- Modified polyolefine (Polyethylene or polypropylent with specific agents sensitive to temperature or light)

สำหรับงานวิจัยในเล่มนี้จะได้กล่าวถึงเฉพาะพอลิเมอร์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้เท่านั้น ซึ่งพอลิเมอร์ทั้งหมดที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะอยู่ในกลุ่มพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ซึ่งจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

#### 2.5.4 พอลิคาร์โพรแลคโตน (Polycaprolactone: PCL) [23]

พอลิคาร์โพรแลคโตน เป็นอะลิฟาติก พอลิเอสเตอร์ กึ่งผลึก (Semi-crystalline aliphatic polyester) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์ที่อยู่ในกลุ่มอะลิฟาติก พอลิเอสเตอร์จะมีความรู้สึกรวดต่อการแยกสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis) และมีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ (Melting point) 60 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิสภาพแก้ว (Glass-transition temperature) ที่ - 60 องศาเซลเซียส

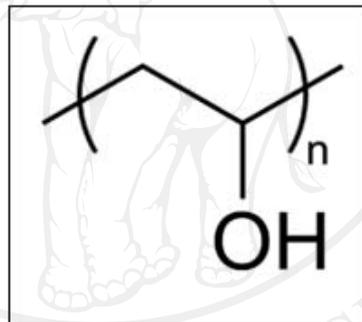
พอลิคาร์โพรแลคโตนเป็นพอลิเมอร์เอกพันธ์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลซ้ำกัน ซึ่งประกอบด้วย กลุ่มของเมทิลลีนที่ไม่มีขั้ว 5 กลุ่ม และกลุ่มของเอสเตอร์ที่มีขั้วอีก 1 กลุ่ม ด้วยโครงสร้างทางโมเลกุลเช่นนี้จึงทำให้พอลิคาร์โพรแลคโตนมีคุณสมบัติที่มีลักษณะเฉพาะ คือ คุณสมบัติเชิงกลมีความคล้ายคลึงกับพอลิโอเลฟิน เนื่องจากมีกลุ่มของโอเลฟินเยอะ ในขณะที่ปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยน้ำ (ไฮโดรไลซิส) ของการเชื่อมต่อของอะลิฟาติก-เอสเตอร์ มีความไม่เสถียร จึงทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังนั้นการรวมกันของพอลิคาร์โพรแลคโตนกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นจะทำให้มีคุณสมบัติที่ผิดปกติ ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะที่ดี เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดนี้มีความสามารถในการเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อ ซึ่งแต่เดิมถูกนำไปใช้ในด้านการแพทย์ คือ ผ้าปิดแผลชีวภาพ ในทวีปยุโรป เนื่องจากว่าเป็นพอลิเมอร์เอกพันธ์ที่มีเวลาในการย่อยสลายสองปีและเมื่อเป็นโคพอลิเมอร์ที่เกิดจากการสังเคราะห์จะเร่งอัตราการดูดซึมทางชีวภาพทำให้มีอัตราการย่อยสลายที่เร็วขึ้น



รูป 2.19 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของพอลิคาร์โพรแลคโตน [23]

### 2.5.5 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol: PVA) [24]

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ สามารถละลายน้ำได้ดี มีจุดเดือด (Boiling point) และจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ (Melting point) 228 และ 230 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งมีการผลิตเป็นจำนวนมากต่อปริมาณการใช้ทั่วโลก พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ มีคุณสมบัติที่ดีคือ สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้อย่างดีเยี่ยม อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในการยึดเกาะที่ดีด้วย มีความต้านทานต่อน้ำมัน จารบี และตัวทำละลาย ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีความต้านทานแรงดึงสูง มีความยืดหยุ่นที่ดี แต่คุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น ถ้ามีความชื้นมากจะทำให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ มีความสามารถในการต้านทานแรงดึงลดลง แต่ความสามารถในการยึดตัวจะสูงขึ้น อีกทั้งยังมีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพและจะย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เนื่องจากประกอบด้วยพันธะคาร์บอน-คาร์บอน



รูป 2.20 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [24]

## 2.6 ดอกอัญชัน (Butterfly pea) [28]



รูป 2.21 แสดงรูปร่างของดอกอัญชัน [28]

ดอกอัญชัน (Asian pigeonwings) มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Clitoria ternatea* L. อยู่ในตระกูล PAPILIONACEAE มีชื่อสามัญว่า Butterfly pea เป็นไม้เลื้อยเนื้ออ่อน อายุสั้น ใ้ช่ยอดเลื้อยพันลำ ต้นมีขนปกคลุม ใบประกอบแบบขนนก เรียงตรงข้ามยาว 6 ถึง 12 เซนติเมตร มีใบย่อยรูปไข่ 5 ถึง 7 ใบ กว้าง 2 ถึง 3 เซนติเมตร ยาว 3 ถึง 5 เซนติเมตร ปลายใบแหลม โคนใบมน ผิวใบด้านล่างมีขนหนาปกคลุมดอกสีขาว ฟ้ำ และม่วง ดอกออกเดี่ยวๆ รูปทรงคล้ายฝั่หอยเชลล์ออกเป็นคู่ตามซอกใบ กลีบดอก 5 กลีบ ดอกบานเต็มที่ยาว 2.5 ถึง 5 เซนติเมตร กลีบคลุมรูปกลม ปลายเว้าเป็นแฉ่ง ตรงกลางมีสีเหลือง มีทั้งดอกซ้อนและดอกลา ดอกชั้นเดียวกลีบชั้นนอกมีขนาดใหญ่ กลางกลีบมีสีเหลือง ส่วนกลีบชั้นในขนาดเล็ก แต่ดอกซ้อนกลีบดอกมีขนาดเท่ากันซ้อนเวียนเป็นเกลียว ออกดอกเกือบตลอดปี ผลแห้งแตกเป็นฝักแบนกว้าง 1 ถึง 1.5 เซนติเมตร ยาว 5 ถึง 8 เซนติเมตร เมล็ดรูปไตสีดำ มี 5 ถึง 10 เมล็ด มีดอกสีม่วงซึ่งจากการที่ดอกอัญชันมีสีม่วงนั้นเป็นตัวบ่งชี้ว่าในดอกอัญชันมีสารแอนโทไซยานิน ซึ่งคุณสมบัติของสารแอนโทไซยานินจะได้กล่าวดังต่อไปนี้

### 2.6.1 แอนโทไซยานิน (Anthocyanin) [28-31]

แอนโทไซยานิน คือ สารรงควัตถุที่มีสีตั้งแต่สีน้ำเงินเข้มในสภาวะที่เป็นด่าง (pH>7) มีสีม่วงเมื่อเป็นกลาง (pH=7) และจะเปลี่ยนเป็นสีแดงถึงสีส้มได้ในสภาวะที่เป็นกรด (pH<7) ซึ่งละลายน้ำได้ดี ไม่เสถียร และสลายตัวได้ง่ายด้วยความร้อน ออกซิเจน แสง ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) สามารถพบได้ในส่วนต่างๆของพืชชั้นสูง โดยเฉพาะส่วนดอกและผลที่มีสีม่วงและสีแดง เช่น ดอกผักบุ้ง ผลองุ่นแดง ดอกอัญชันและผลเบอร์รี่ชนิดต่างๆ ซึ่งนิยมบริโภคกันเป็นเวลานานทั้งในคนและสัตว์โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายแต่อย่างใด จึงมีความสนใจที่จะ

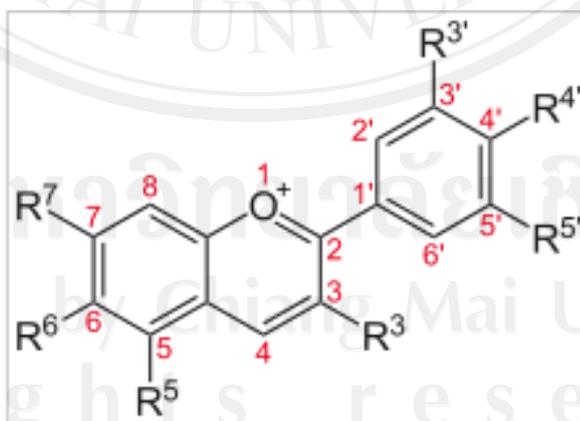
นำไปใช้เป็นสารแต่งสีอาหารทดแทนการใช้สารแต่งสีสังเคราะห์ หรือนำมารับประทานเพื่อหวังผลทางสุขภาพต่างๆ เช่น มีการส่งจ่ายสารสกัดผลแครนเบอร์รี่ ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญ คือ แอนโทไซยานิน ในใบสั่งแพทย์เพื่อรักษาโรคกระเพาะปัสสาวะอักเสบในบางประเทศและมีการศึกษาอย่างต่อเนื่องในการนำสารสกัดที่มีสารแอนโทไซยานินไปใช้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งแทนยาสำหรับรักษาโรคต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นอนุพันธ์หนึ่งของแอนโทไซยานินที่พบได้ในธรรมชาติ เกิดจากสารกลุ่มแอนโทไซยานินเป็นโมเลกุลให้สีที่มีส่วนประกอบสองส่วน คือ แอนโทไซยานิดิน (Anthocyanidin) และ น้ำตาล

คุณสมบัติสำคัญที่สุดของสารแอนโทไซยานิน คือ การเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ เนื่องจากฟลาโวนอยด์เป็นสารในกลุ่มสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compound) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic Ring) ที่มีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group) รวมอยู่ในโมเลกุล สามารถละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่มักพบรวมอยู่กับน้ำตาลในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ (Glycoside) สารในกลุ่มฟลาโวนอยด์มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) โดยทำหน้าที่ในการหน่วงเหนี่ยวหรือป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระได้ และมีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากการที่สารสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายตามธรรมชาติจึงอาจมีส่วนสำคัญเกี่ยวกับโรคต่างๆที่เกิดขึ้นจากอนุมูลอิสระได้ เช่น โรคเกี่ยวกับทำงานของหัวใจ การมองเห็น ระบบประสาทและสมอง ปกป้องผิวหนังจากรังสีบางชนิด ด้านการอักเสบ และที่สำคัญคือ การช่วยยับยั้งการเกิดมะเร็งชนิดต่างๆได้โดยไม่เป็นพิษต่อเซลล์ ในด้านการปกป้องผิวหนังนั้นได้มีการศึกษาโดย Enomoto และคณะ [27] ได้ทดสอบการใช้สารแอนโทไซยานินผสมกับกลูตาไรโอนทาที่เด้านมของผู้ป่วยหญิงที่เป็นมะเร็งเต้านมและต้องรับการฉายรังสีซึ่งมักก่อให้เกิดอาการระคายเคืองที่ผิวหนัง พบว่าอาจช่วยลดการระคายเคืองรุนแรงที่ผิวหนังจากการฉายแสงทำให้ผู้ป่วยสามารถทนต่อการรักษาจนครบระยะเวลาตามกำหนดได้ ในด้านการช่วยป้องกันโรคทางระบบหลอดเลือดและหัวใจนั้นจะเห็นได้จากการศึกษาฤทธิ์ของสารแอนโทไซยานินในไวน์แดงที่มีผลต่อเม็ดเลือดแดงของคนที่ทำโดย Tedesco และคณะ [28] ซึ่งใช้ทั้งไวน์แดงและสารสกัดแอนโทไซยานินจากไวน์แดง พบว่า สามารถป้องกันเม็ดเลือดแดงแตกจากการเกิดออกซิเดชันได้โดยไม่รบกวนระบบการทำงานของเอนไซม์อะตาลิซิสในเม็ดเลือดแดงหรือในการศึกษาของ Rechner และ Kroner [29] ถึงฤทธิ์ของสารแอนโทไซยานินกับการเกิดการเกาะตัวกันของเกล็ดเลือด (Platelet aggregation) ซึ่งในการทดสอบใช้เลือดจากคนหนุ่มสาวที่มีสุขภาพดี พบว่า สารแอนโทไซยานินและเมทาบอลไลต์ของสารแอนโทไซยานินที่เกิดขึ้นในลำไส้มีฤทธิ์ด้านการแข็งตัวของเกล็ดเลือด (Anti-thrombotic) นอกจากนี้ในส่วนของระบบประสาทและสมองนั้นมีการศึกษาของ Shin และคณะ [31] ที่นำหนูเพศผู้มาทดสอบผลของการ

ได้รับสารแอนโทไซยานิน 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ก่อนการเกิด Cerebral occlusion และ Reperfusion พบว่าสามารถลดการเกิดเซลล์ตายจากการขาดเลือดของสมองได้ จึงอาจป้องกันการเกิดความผิดปกติของระบบประสาทและสมองได้ เช่น ลดการเกิด Ischemia ที่สมอง

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัย พบว่า สารกลุ่มแอนโทไซยานินมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของไขมันแอลดีแอล (LDL) และยังทำให้เซลล์บุผนังหลอดเลือดมีความอ่อนนุ่ม จึงสามารถชะลอการเกิดโรคไขมันอุดตันในหลอดเลือดและโรคหลอดเลือดหัวใจแข็งตัวได้ สำหรับในประเทศไทยได้มีการใช้น้ำดอกอัญชันเพื่อช่วยปลูกผมปลูกิ้ว เพราะเชื่อว่าน้ำคั้นจากดอกอัญชันทำให้ผมดกดำได้อีกทั้งสารแอนโทไซยานินในดอกอัญชันยังเพิ่มความสามารถในการมองเห็นหรือชะลอความเสื่อมของดวงตา เนื่องจากสารดังกล่าวเพิ่มความสามารถในการไหลเวียนเลือดในหลอดเลือดเล็กๆ ส่วนปลาย ทำให้เลือดมาเลี้ยงรากผมและดวงตาได้ดีขึ้น อีกทั้งยังมีการใช้น้ำดอกอัญชันสดในการรักษาผู้ป่วยเบาหวานและแผลในกระเพาะอาหาร จึงมีคุณสมบัติด้านการเกิดโรคมะเร็ง ทำให้เซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวตายและต้านการเกิดสารก่อมะเร็งในสัตว์ทดลอง

จากการศึกษาถึงผลของสารแอนโทไซยานินในการรักษาโรคต่าง ๆ นั้นเป็นการใช้ในขนาดที่สูงกว่าการได้รับจากอาหารปกติมากและยังเป็นเพียงการศึกษาทางนอกร่างกาย (In vitro) และการศึกษาภายในร่างกาย (In vivo) เป็นส่วนมาก จึงควรต้องทำการศึกษาต่อไปเพื่อหาปริมาณสารที่เหมาะสมต่อการนำสารแอนโทไซยานินไปใช้ในคนอย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพต่อไป โดยเฉพาะในผู้ที่มีภาวะแทรกซ้อนต่างๆร่วมด้วย ดังนั้น การรับประทานอาหารที่มีสารแอนโทไซยานินอยู่จึงมีประโยชน์ต่อร่างกายในด้านการต้านอนุมูลอิสระชัดเจนกว่าด้านอื่น



รูป 2.22 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของแอนโทไซยานิน [29]

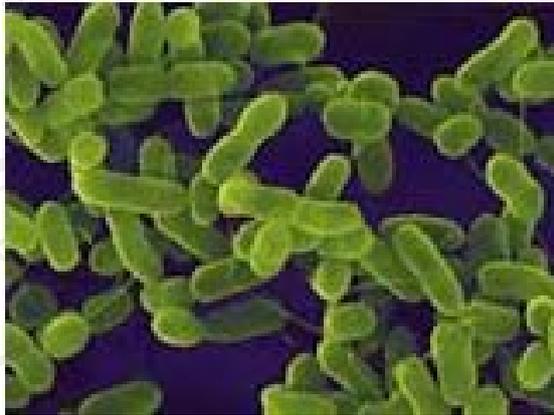
ตาราง 2.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของแอนโทไซยานิน [29]

Anthocyanidin	โครงสร้างพื้นฐาน	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>	R <sub>6</sub>	R <sub>7</sub>
Aurantidin		- H	- OH	- H	- OH	- OH	- OH	- OH
Cyanidin		- OH	- OH	- H	- OH	- OH	- H	- OH
Delphinidin		- OH	- OH	- OH	- OH	- OH	- H	- OH
Europinidin		- och <sub>3</sub>	- OH	- OH	- OH	- och <sub>3</sub>	- H	- OH
Luteolinidin		- OH	- OH	- H	- H	- OH	- H	- OH
Pelargonidin		- H	- OH	- H	- OH	- OH	- H	- OH
Malvidin		- och <sub>3</sub>	- OH	- och <sub>3</sub>	- OH	- OH	- H	- OH
Peonidin		- och <sub>3</sub>	- OH	- H	- OH	- OH	- H	- OH
Petunidin		- OH	- OH	- och <sub>3</sub>	- OH	- OH	- H	- OH
Rosinidin		- och <sub>3</sub>	- OH	- H	- OH	- OH	- H	- och <sub>3</sub>

## 2.7 จุลชีววิทยา (Microbiology)

### 2.7.1 Escherichia coli bacteria [32-33]

Escherichia coli bacteria (มีชื่อย่อว่า E.coli) เป็นแบคทีเรียแกรมลบ มีรูปร่างลักษณะเป็นแท่งไม่มีสปอร์ จะพบได้ที่ลำไส้ส่วนล่างของสิ่งมีชีวิตที่เลี้ยงลูกด้วยนม เชื้อแบคทีเรีย E.coli ที่พบส่วนใหญ่จะไม่เป็นอันตราย แต่บางสายพันธุ์สามารถก่อให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษร้ายแรงในมนุษย์ได้ ซึ่งสายพันธุ์ที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายจะเป็นส่วนหนึ่งที่อาศัยอยู่ในลำไส้เล็ก อีกทั้งยังก่อให้เกิดคุณประโยชน์ เนื่องจาก E.coli สามารถที่จะผลิตวิตามิน K2 ได้ เพื่อป้องกันการก่อโรคของเชื้อแบคทีเรียในลำไส้ โดยแบคทีเรีย E.coli และแบคทีเรียชนิดอื่นที่เกี่ยวข้องประมาณร้อยละ 0.1 จะเป็นแบคทีเรียเจ้าถิ่นที่อาศัยอยู่ในลำไส้ ซึ่งอุจจาระที่ถูกขับออกมาจะมีเชื้อแบคทีเรียปนเปื้อน ประมาณ  $10^{11}$  ถึง  $10^{13}$  เซลล์ สามารถที่จะก่อให้เกิดโรค ซึ่งเซลล์ของแบคทีเรียที่ถูกขับออกมาจากภายนอกจะสามารถอยู่รอดได้ในเวลาที่จำกัด ซึ่งทำให้แบคทีเรียเหล่านี้กลายเป็นตัวบ่งชี้การปนเปื้อนของอุจจาระในสภาพแวดล้อม แบคทีเรียเหล่านี้สามารถเติบโตได้อย่างรวดเร็วและง่ายคาย อีกทั้งยังมีราคาไม่แพงจึงได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้มีการศึกษาเกี่ยวกับแบคทีเรีย E.coli กันอย่างแพร่หลายและเป็นแบคทีเรียที่มีความสำคัญในด้านเทคโนโลยีชีวภาพและจุลชีววิทยา



รูป 2.23 แสดงสัณฐานวิทยาของแบคทีเรีย E.Coli ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า [33]

#### 2.7.1.1 ประวัติของแบคทีเรีย E.Coli [32-33]

Escherichia and Salmonella ได้กำเนิดขึ้นเมื่อประมาณ 102 ล้านปีมาแล้ว โดยค้นพบในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ภายหลังได้ถูกค้นพบเพิ่มในนกและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม โดย Escherichia สามารถจำแนกได้ 5 ชนิด คือ E. albertii, E. coli, E. fergusonii, E. hermannii and E. vulneris. โดยเชื้อสุดท้ายที่ถูกค้นพบคือ E.coli ซึ่งค้นพบเมื่อประมาณ 20 ถึง 30 ล้านปีที่ผ่านมา

ในปี ค.ศ. 1885 Theodor Escherich กุมารแพทย์ชาวเยอรมัน ได้ค้นพบเชื้อชนิดนี้ ในอุจจาระของบุคคลที่มีสุขภาพดีและได้เรียกชื่อชนิดนี้ว่า Bacterium coli commune เนื่องจากเชื้อชนิดนี้ถูกค้นพบในลำไส้ใหญ่ ซึ่งการจำแนกเบื้องต้นของเชื้อชนิดนี้จะจำแนกตามรูปร่างและการเคลื่อนที่ ซึ่งในขณะนั้น Ernst Haeckel ได้จำแนกเชื้อชนิดนี้อยู่ในอาณาจักร Monera หลังจากนั้นแบคทีเรียชนิดนี้ได้รับการจำแนกใหม่เป็น Bacillus coli โดย Migula ในปี ค.ศ. 1895 ซึ่งในภายหลังได้มีการกำหนดชื่อใหม่เป็น Escherichia ซึ่งเป็นชื่อสกุลที่อยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียที่รู้จักกันอย่างไม่เป็นทางการว่า "Coliforms" และเป็นสมาชิกในวงศ์ Enterobacteriaceae

#### 2.7.1.2 ชีววิทยาและชีวเคมี (Biology and biochemistry) [32-33]

E.coli เป็นแบคทีเรียแกรมลบ หายใจโดยไม่ใช้ออกซิเจน เซลล์มีรูปร่างเป็นแท่ง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 ไมครอน และยาวประมาณ 2.0 ไมครอน มีปริมาณเซลล์ 0.6 ถึง 0.7 ไมครอน สามารถอาศัยอยู่ในพื้นผิวที่หลากหลาย E.coli สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (98.6 องศาฟาเรนไฮต์) แต่บางสายพันธุ์สามารถเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิ 49 องศาเซลเซียส (102.2 องศาฟาเรนไฮต์) ซึ่งสามารถเจริญเติบโตได้ด้วยการหายใจทั้งสองแบบ คือ ทั้งแบบที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน สายพันธุ์ที่มีแฟลเจลลัมสามารถว่ายน้ำและเคลื่อนที่ได้ อีกทั้งยังสามารถถ่ายโอนดีเอ็นเอข้ามผ่านไปยังแบคทีเรียที่เชื่อมต่อกันได้ด้วย ซึ่งจะทำให้สารพันธุกรรม

สามารถที่จะแพร่กระจายในแนวนอนไปยังประชากรที่มีอยู่ ซึ่งกระบวนการนี้จะนำไปสู่การแพร่กระจายแบคทีเรียได้อย่างรวดเร็ว แม้ว่าโดยปกติแล้วแบคทีเรีย E.coli จะไม่ก่อให้เกิดโรค แต่ก็ยังมี 3 สาเหตุที่ทำให้แบคทีเรีย E.coli สามารถก่อให้เกิดการเจ็บป่วยได้ มีดังนี้ คือ

1. เมื่อแบคทีเรียออกจากลำไส้แล้วเข้าสู่ทางเดินปัสสาวะจะทำให้เกิดการติดเชื้อบางอย่าง “Honeymoon cystitis” เนื่องจากการมีเพศสัมพันธ์จะทำให้เชื้อเข้าสู่กระเพาะปัสสาวะได้ แม้ว่าจะพบมากในเพศหญิง แต่การติดเชื้อทางเดินปัสสาวะก็สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งเพศชายและเพศหญิง แต่จะพบในสัดส่วนเท่ากันในผู้สูงวัยเพศชายและเพศหญิง เนื่องจากแบคทีเรียจะอยู่ที่ท่อทางเดินปัสสาวะสม่ำเสมอ อีกทั้งห้องน้ำที่มีสุขอนามัยที่ไม่ดีก็ยังสามารถก่อให้เกิดโรคได้อีกทั้งยังมีปัจจัยอย่างอื่นอีกที่ทำให้เกิดโรคได้ (โดยเฉพาะในหญิงที่ตั้งครรภ์และในผู้ชายที่มีปัญหาต่อมลูกหมาก)
2. เมื่อแบคทีเรียออกจากลำไส้แล้วทะลุผ่านไปยังบริเวณที่เกิดการอักเสบ ซึ่งเกิดจากบาดแผลลงสู่ช่องท้องจะทำให้เกิดการติดเชื้อที่เรียกว่า โรคเยื่อกระเพาะอักเสบ (Peritonitis) แต่อย่างไรก็ตามแบคทีเรีย E.coli จะมีความรู้สึกไวต่อยาปฏิชีวนะ ยกตัวอย่าง เช่น Streptomycin ซึ่งจะสามารถรักษาได้ด้วยยาปฏิชีวนะทั่วไป
3. แบคทีเรีย E.coli บางสายพันธุ์จะมีความเป็นพิษ (สามารถผลิตสารพิษบางอย่างที่คล้ายคลึงกันกับโรคบิด) ทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษได้ ซึ่งเกิดจากการกินเนื้อสัตว์ที่ปนเปื้อนแบคทีเรียชนิดนี้เข้าไป ทำให้เกิดโรคท้องร่วง (ตัวอย่างเชื้อที่รุนแรง เช่น E.coli O157:H7.)

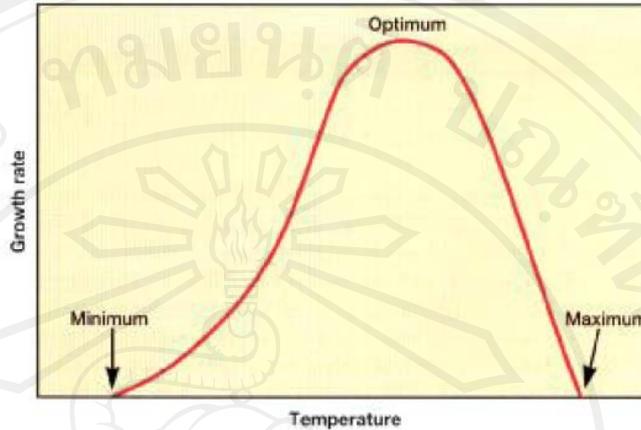
### 2.7.1.3 สภาพแวดล้อมที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย [32-33]

ข้อกำหนดสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียมีดังนี้ คือ

#### 1. อุณหภูมิ (Temperature)

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาตัวเร่งเอนไซม์คล้ายกับการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทั่วไป โดยจะเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 องศาเซลเซียส เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาผลาญอาหารเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้เชื้อแบคทีเรียเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่ออุณหภูมิถึงจุดหนึ่งอัตราการเติบโตของแบคทีเรียจะช้าลงและเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นไปอีกแบคทีเรียจะตายเนื่องจากเอนไซม์ที่แปลงสภาพและเอนไซม์ชนิดอื่น โดยเชื้อหุ้มแบคทีเรียเกิดการหยุดชะงักที่อุณหภูมิสูงและไขมันเกิดการหลอมเหลวแตกสลาย แม้ว่าการทำงานของเอนไซม์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นก็ตาม แบคทีเรียจะเกิดความเสียหายและไม่สามารถซ่อมแซมได้ ส่วนที่อุณหภูมิต่ำมากเชื้อเมมเบรน

จะเกิดการแข็งตัวและเอนไซม์ไม่สามารถทำงานได้ ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเจริญเติบโตของเอนไซม์แสดงไว้ดังรูปที่ 2.24



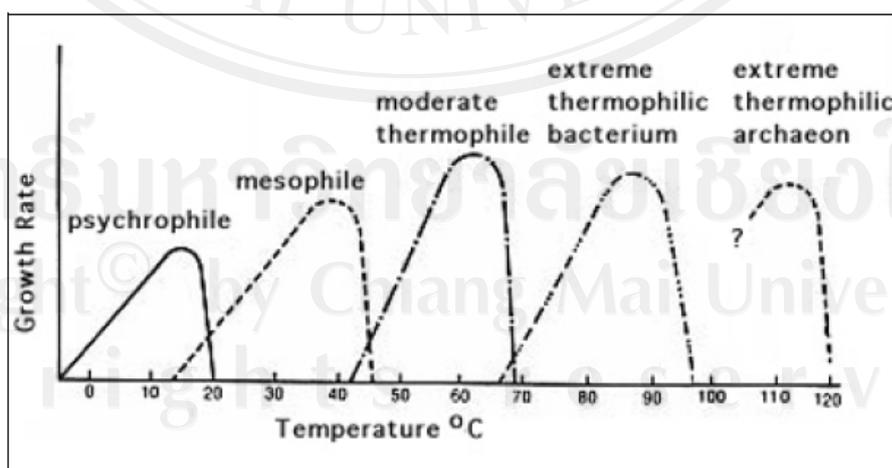
รูป 2.24 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อ E.Coli [33]

แบคทีเรียจะเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิภายในร่างกายมนุษย์ แบคทีเรียส่วนใหญ่จะเจริญเติบโตได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่จำกัด อุณหภูมิที่ทำให้เชื้อแบคทีเรียเจริญเติบโตได้ดีที่สุดคือที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสและจะเจริญเติบโตได้น้อยที่สุดที่อุณหภูมิต่ำมากๆและที่อุณหภูมิสูงมากๆ แบคทีเรียแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลักตามช่วงอุณหภูมิการเจริญเติบโตได้ดีของแบคทีเรียดังนี้ คือ แบคทีเรียที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ (Psychrophiles) แบคทีเรียที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิปานกลาง (Mesophiles) และแบคทีเรียที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิสูง (Thermophiles)

Prokaryotes ส่วนใหญ่จะเจริญเติบโตได้ดีในช่วงอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส จากเส้นโค้งในกราฟจะแสดงจุดสำคัญ 3 จุด คือ จุดที่อุณหภูมิต่ำสุด อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด และอุณหภูมิสูงสุดที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของแบคทีเรียในช่วงอุณหภูมิต่ำสุดถึงช่วงอุณหภูมิเหมาะสมที่สุด แต่เมื่อเลยจุดที่เหมาะสมเซลล์ของแบคทีเรียจะไม่ทนต่อความร้อน หลังจากนั้นอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นไปตามคำทำนายของ T.D. Brock โดยสิ่งมีชีวิตบนโลกนี้ที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิและอยู่ในน้ำจะมีสถานะเป็นของเหลว ดังนั้น Psychrophiles จะเติบโตในสารละลายหรือน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ซึ่งจะพบมากในยุคอาเคียส (Archaea) ส่วน Hyperthermophile มีการเติบโตในทะเลลึกที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

ตาราง 2.2 แสดงอุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุด และอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ Certain bacteria และ Archaea [33]

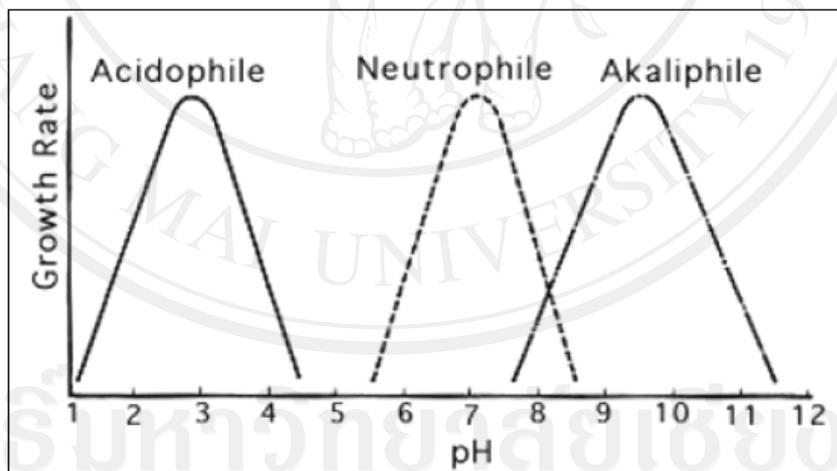
Bacterium	Temperature of growth (°C)		
	Minimum	Optimum	Maximum
Listeria monocytogenes	1	30-37	45
Vibrio marinus	4	15	30
Pseudomonas maltophilia	4	35	41
Thiobacillus novellus	5	25-30	42
Staphylococcus aureus	10	30-37	45
Escherichia coli	10	37	45
Clostridium kluyveri	19	35	37
Streptococcus pyogenes	20	37	40
Streptococcus pneumonia	25	37	42
Bacillus hermuslavo	30	60	72
Thermus aquaticus	40	70-72	79
Methanococcus jannaschii	60	85	90
Sulfolobus acidocaldarius	70	75-85	90
Pyrobacterium brockii	80	102-105	115



รูป 2.25 แสดงอัตราการเจริญเติบโตต่ออุณหภูมิของสภาพแวดล้อม Prokaryotes [33]

## 2. pH [33]

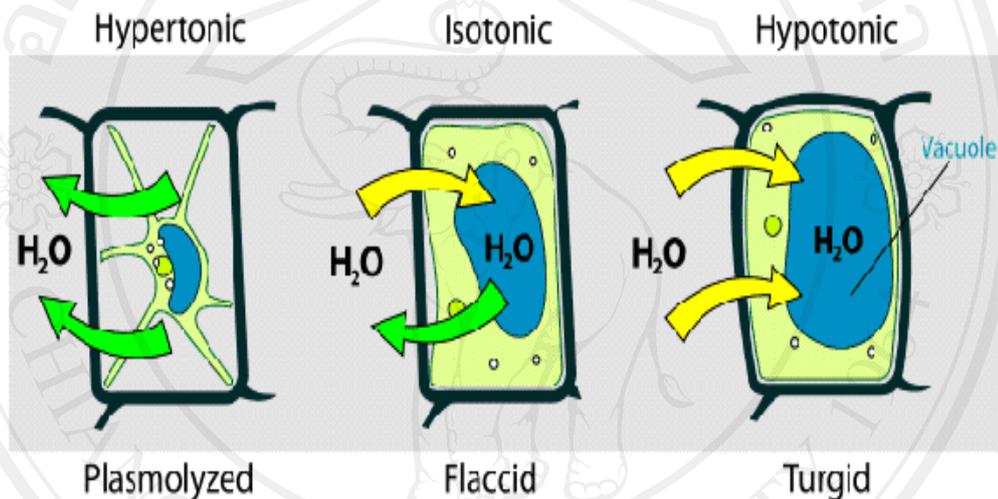
แบคทีเรียจะเจริญเติบโตได้ดีที่ค่า pH ต่ำกว่า 7 เรียกว่า Acidophile (จุลินทรีย์ทนกรด) จุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้ดีที่ค่า pH เป็นกลางเรียกว่า Neutrophiles (ชอบสิ่งแวดล้อมที่เป็นกลาง) และแบคทีเรียที่เจริญเติบโตได้ดีที่สภาวะเป็นด่างเรียกว่า Alkaliphiles (แบคทีเรียทนด่าง) ซึ่งแบคทีเรียส่วนใหญ่จะเจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH แคบ คือที่ pH 6.5 ถึง 7.5 ซึ่งมีแบคทีเรียจำนวนมากที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH ที่เป็นกรด คือที่ pH 4 โดยจะมีความอดทนอย่างยิ่งขาดต่อความเป็นกรด ยกตัวอย่างเช่น แบคทีเรีย Chemoautotrophic ซึ่งจะพบได้จากน้ำที่ถูกระบายออกจากเหมืองถ่าน ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลเฟอร์จากกรดซัลฟูริก มีค่า pH 1 ช่วง pH ที่อธิบายการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ ค่า pH ต่ำสุด แบคทีเรียจะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ส่วนที่ค่า pH สูงสุดแบคทีเรียจะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ แต่ที่ pH เหมาะสมที่สุด แบคทีเรียจะเจริญเติบโตได้ดี สำหรับแบคทีเรียส่วนใหญ่จะมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างเป็นระเบียบในช่วง pH ต่ำสุดถึงช่วง pH ที่เหมาะสมที่สุดและจะมีการเจริญเติบโตลดลงอย่างเป็นระเบียบจากช่วง pH ที่เหมาะสมไปยัง pH ที่สูง สะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลง  $H^+$  ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเอนไซม์



รูป 2.26 แสดงอัตราการเจริญเติบโตต่อค่า pH ของสภาพแวดล้อม Procarvates [33]

### 3. แรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) [33]

แบคทีเรียจะได้รับสารอาหารจากสารละลายที่เป็นน้ำจากน้ำที่อยู่ล้อมรอบ ดังนั้นแบคทีเรียเหล่านี้จำเป็นต้องใช้น้ำเพื่อการเจริญเติบโต แรงดันออสโมติกสูง มีผลกระทบต่อการขับออกของน้ำที่จำเป็นออกจากเซลล์ เมื่อเซลล์ของแบคทีเรียที่อยู่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นมากกว่าเซลล์ (Hypertonic) น้ำที่อยู่ภายในเซลล์ของแบคทีเรียจะซึมผ่านพลาสมาเมมเบรนไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่า การสูญเสียน้ำเนื่องจากแรงดันออสโมติกสูงเป็นสาเหตุให้เกิดพลาสโมลิซิส (Plasmolysis) หรือเกิดการหดลงของเซลล์ (Cell's cytoplasm) แสดงดังรูปที่ 2.27

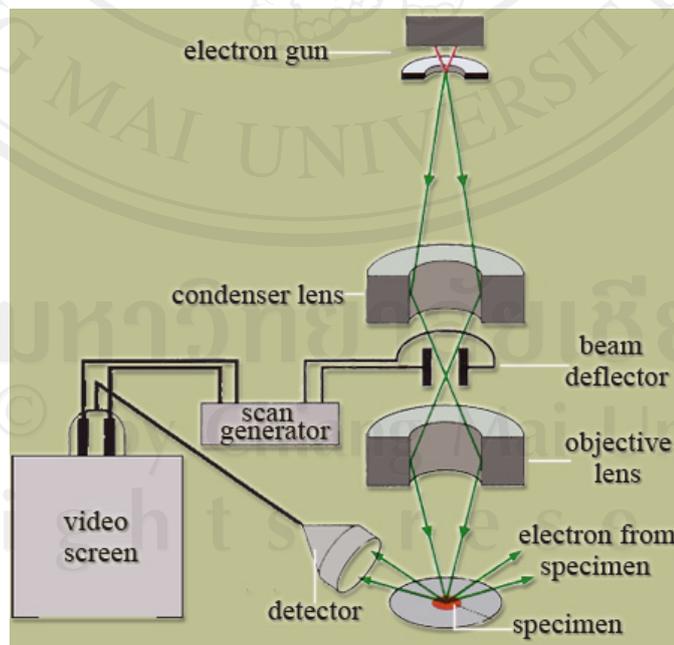


รูป 2.27 แสดง Plasmolysis ของแบคทีเรีย E.Coli [33]

## 2.8 เทคนิคในการวิเคราะห์

### 2.8.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) [34]

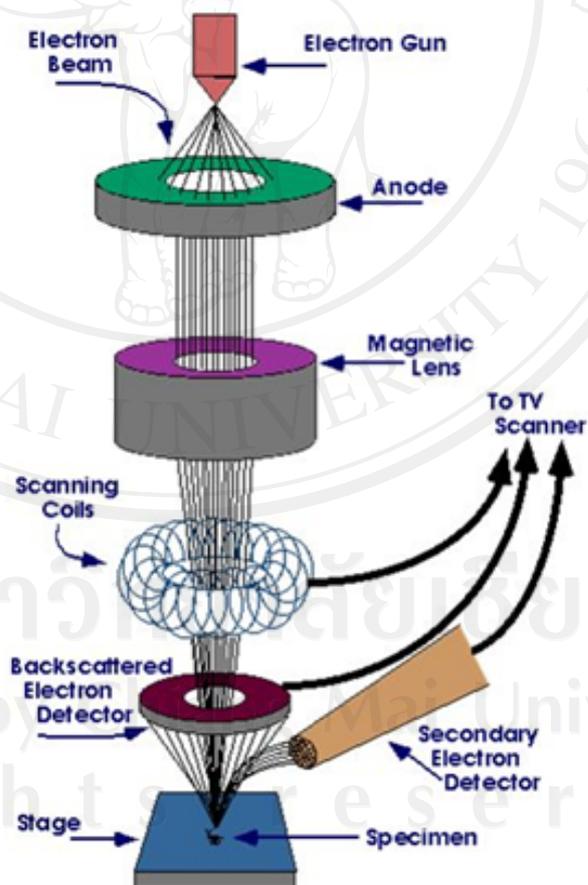
ในการศึกษาและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์นั้น กล้องจุลทรรศน์มีความสำคัญและมีบทบาทเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถใช้ศึกษาลักษณะของสารตัวอย่างในระดับที่เล็กลงไปมากกว่าที่จะมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และจำแนกรายละเอียดได้ ดังจะเห็นว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical or light microscope) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานสำหรับห้องปฏิบัติการเกือบทุกแห่ง ไม่ว่าจะเป็นห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ ชีววิทยา เคมี วัสดุศาสตร์ และอื่นๆอีกเป็นจำนวนมาก ในขณะที่ความรู้ทางวิทยาศาสตร์มีการพัฒนามากขึ้น นักวิทยาศาสตร์ยังมีความต้องการที่จะศึกษาในรายละเอียดที่ระดับเล็กลงไปเรื่อยๆ แต่ก็ประสบปัญหาตามมาจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการนี้ได้ ทำให้นักวิทยาศาสตร์ค้นคิดและประดิษฐ์เครื่องมือขึ้นมาเพื่อทดแทนกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง นั่นเป็นเหตุผลที่ทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดถูกพัฒนาขึ้นมาใช้แทนที่สาเหตุเนื่องจาก ข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเอง ได้แก่กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง มีกำลังขยาย (Magnification) ต่ำ อำนาจในการจำแนกของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Resolution) ต่ำความสามารถในการมองภาพที่มีความลึกได้ไม่ดี



รูป 2.28 แสดงลักษณะและองค์ประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [34]

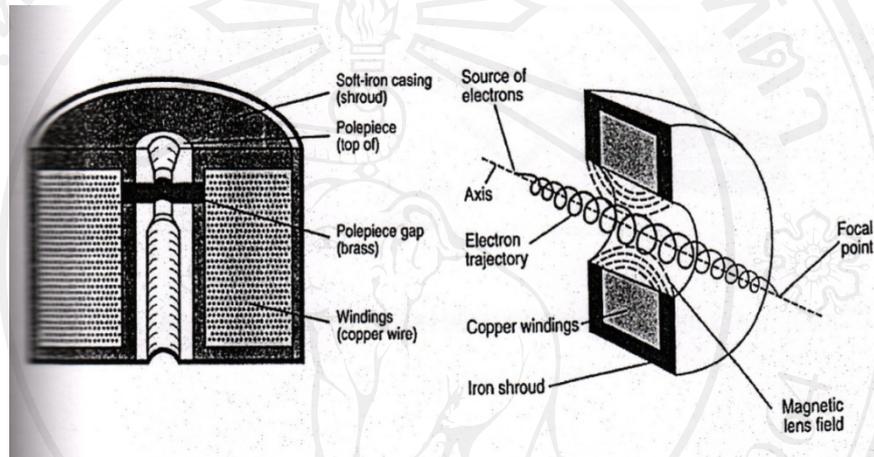
### 2.8.2 หลักการทำงาน (Operation) [34]

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับกรณีของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะใช้อิเล็กตรอนพลังงานสูง (High energy electron beam) แทนแสงที่ตามองเห็น ซึ่งผลิตขึ้นมาจากส่วนที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) โดยอาศัยหลักการ Thermionic emission กล่าวคือในปืนอิเล็กตรอนจะมีไส้หลอดโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง อาทิ ทังสเตน หรือ Lanthanum hexaboride หากเผาให้ไส้หลอดร้อน โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปจนอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 2,700 K อิเล็กตรอนวงนอกสุดได้รับพลังงานความร้อน ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์และหากว่าพลังงานจลน์ที่อิเล็กตรอนได้รับมานั้นมีค่ามากกว่าค่า Work function ( $\phi$ ) จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งค่า Work function ของทังสเตน และ Lanthanum hexaboride มีค่าเท่ากับ 4.5 และ 3 eV ตามลำดับ ภาพของปืนอิเล็กตรอนแสดงดังรูปที่ 2.29



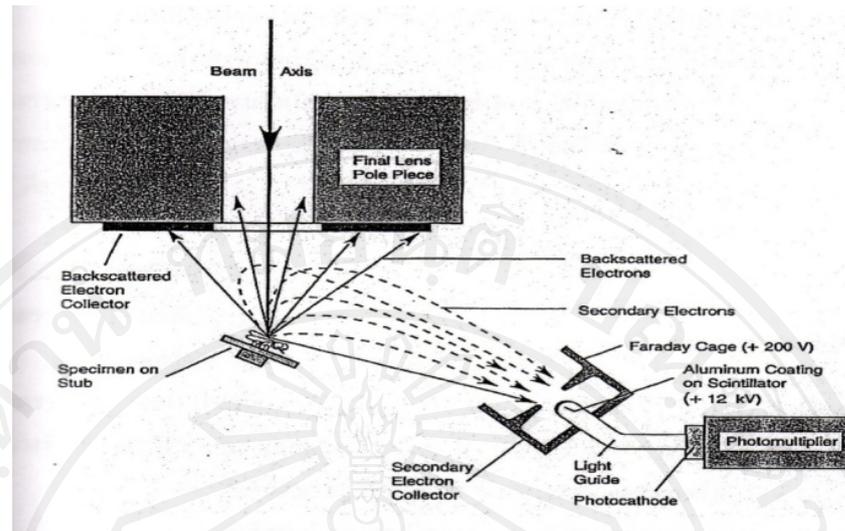
รูป 2.29 แสดงลักษณะ electron gun ที่มีไส้หลอดเป็นทังสเตนแบบตัววี [34]

อิเล็กตรอนที่ถูกผลิตขึ้นมาจากปืนอิเล็กตรอน จะถูกเร่งให้มีความเร็วสูงโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าสูง (High voltage) ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้นและสามารถปรับขนาดของลำอิเล็กตรอน (Electron beam) และทางยาวโฟกัส (Focus length) ด้วยเลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) ซึ่งมีจำนวน 2 ถึง 3 ตัว โดยเลนส์คอนเดนเซอร์จะเป็นส่วนที่ผลิตสนามแม่เหล็กความเข้มสูง โดยอาศัยหลักการทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า และเรียกว่า เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) ทำหน้าที่คล้ายเลนส์รวมแสง แสดงดังรูปที่ 2.30



รูป 2.30 แสดง electromagnetic lens และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน [34]

ลำอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสลงบนสารตัวอย่างด้วยเลนส์วัตถุ (Objective lens) ที่เป็นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับเลนส์คอนเดนเซอร์ โดยจะมีส่วน Scanning coils หรือ Deflection coils เป็นส่วนปรับตำแหน่งของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนสารตัวอย่าง โดยที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่ตกกระทบบนสารตัวอย่างนั้นจะเกิดอันตรกิริยากับอะตอมหรืออิเล็กตรอนที่อยู่บนผิวของสารตัวอย่าง ทำให้เกิดผลผลิตหลายชนิด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพลังงานของลำอิเล็กตรอนและลักษณะของการทำอันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนกับสารตัวอย่าง ผลผลิตที่กล่าวมานี้จะถูกตรวจจับโดยหัววัดซึ่งมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับว่าต้องการวิเคราะห์หรือตรวจสอบแบบใด หากต้องการดูภาพถ่ายก็นำสัญญาณที่ได้จากหัววัดเข้าไปขยายสัญญาณแล้วสัญญาณที่ได้จะถูกนำไปประมวลผลและแสดงผลออกมาที่จอภาพ



รูป 2.31 แสดงตัววัดของหัววัดในกล้อง SEM [34]

### 2.8.3 อันตรกิริยาและผลผลิต (Interaction and product) [34]

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าเมื่อลำอิเล็กตรอนที่เรียกว่า อิเล็กตรอนตกกระทบ (Incident electron) หรืออิเล็กตรอนลำดับที่หนึ่ง (Primary electron) จากปืนอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งให้มีพลังงานสูงและถูกปรับขนาดโดยคอนเดนเซอร์เลนส์ โฟกัสลงบนสารตัวอย่างจะเกิด อันตรกิริยาระหว่างอะตอมของสารที่อยู่ผิวของสารตัวอย่างกับลำอิเล็กตรอน ซึ่งจะเกิดเหตุการณ์ขึ้นได้ 3 กรณี คือ Elastic scattering นั่นคือ อิเล็กตรอนลำดับที่หนึ่งทำอันตรกิริยากับสารตัวอย่างโดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน หรือพลังงานที่สูญเสียไปมีค่าน้อยมาก และผลผลิตที่เกิดขึ้น คือ อิเล็กตรอนสะท้อนกลับ (Backscattered electron)

1. Inelastic scattering เกิดจากการที่อิเล็กตรอนลำดับที่หนึ่งทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในอะตอม โดยที่อิเล็กตรอนลำดับที่หนึ่งจะสูญเสียพลังงานไปบางส่วนหรือทั้งหมด ในระหว่างที่ทำอันตรกิริยาและผลผลิตที่ได้มีดังนี้

- อิเล็กตรอนลำดับที่สอง (Secondary electron)
- รังสีเอ็กซ์แบบต่อเนื่อง (Continuum or bremsstrahlung X-ray)
- รังสีเอ็กซ์เฉพาะ (Characteristic X-ray)
- Cathodoluminescence (Visible light)
- โอเจอิเล็กตรอน (Auger electron)
- โฟนอน (phonon)

- Unscattering electron นั่นคือ อิเล็กตรอนลำดับที่หนึ่งจะไม่เกิดอันตรกิริยากับอะตอมหรืออนุภาคใดๆ ผลผลิตที่ได้คือ อิเล็กตรอนแบบทะลุผ่าน (Transmitted electron) ในส่วนของการวิเคราะห์พื้นผิวของสารตัวอย่างนั้น จะใช้ประโยชน์จากผลผลิต 2 ชนิด คือ อิเล็กตรอนลำดับที่สอง และอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ ซึ่งสัญญาณจากหัววัดที่ตรวจวัดได้จะนำมาใช้สร้างภาพพื้นผิวของสารตัวอย่าง ทำให้สามารถมองเห็นรายละเอียดที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

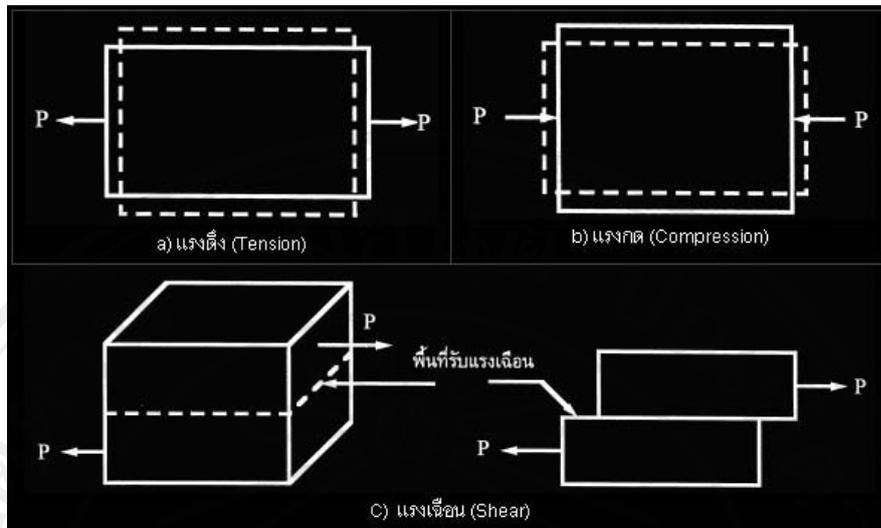
## 2.9 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) [35-36]

คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของวัสดุเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำต่อวัสดุ คุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรง ความแข็ง ความสามารถในการยืดตัว ความยืดหยุ่น ความเหนียว เป็นต้น ในงานวิศวกรรมคุณสมบัติเชิงกลมีความสำคัญมากที่สุดเพราะเมื่อเราจะเลือกใช้วัสดุใดๆก็ตามสิ่งแรกที่จะนำมาพิจารณาก็คือคุณสมบัติเชิงกลของมัน การที่เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ใดๆจะสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องจักรอุปกรณ์นั้นๆเป็นสำคัญ

### 2.9.1 ความเค้น (Stress)

ความเค้น หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติและความยากในการวัดค่านี้เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ด้วยเหตุผลที่ว่าแรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามลักษณะของแรงที่มากระทำ

- 1. ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress)** เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางโดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกันดังรูปที่ 2.32 (a)
- 2. ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress)** เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางเพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลงดังรูปที่ 2.32 (b)
- 3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress)** ใช้สัญลักษณ์  $\tau$  เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวางเพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังรูปที่ 2.32 (c) มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง  $A$  ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือนในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อมๆกัน



รูป 2.32 แสดงลักษณะของแรงกระทำชนิดต่างๆ [36]

## 2.9.2 ความเครียดและการเปลี่ยนรูป (Strain and Deformation)

ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุนี้เป็นผลเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะเช่นนี้สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

1. การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าสู่ตำแหน่งเดิมทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างเช่น พวงยางยืด สปริง ถ้าเราดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม
2. การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากกระทำหรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินพิกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ววัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation) ซึ่งนอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้วยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทพอลิเมอร์ เช่น พลาสติกที่เรียกว่า ความเครียดกึ่งยืดหยุ่น จะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรง

กระทำ วัสดุจะมีการคืนรูปแต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิมการวัดและคำนวณหา ค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ

- ก. **แบบเส้นตรง** ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ค่าของความเครียดจะเท่ากับ ความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม
- ข. **แบบเฉือน** เรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงกระทำมีลักษณะ เป็นแรงเฉือน ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่าง ระนาบ

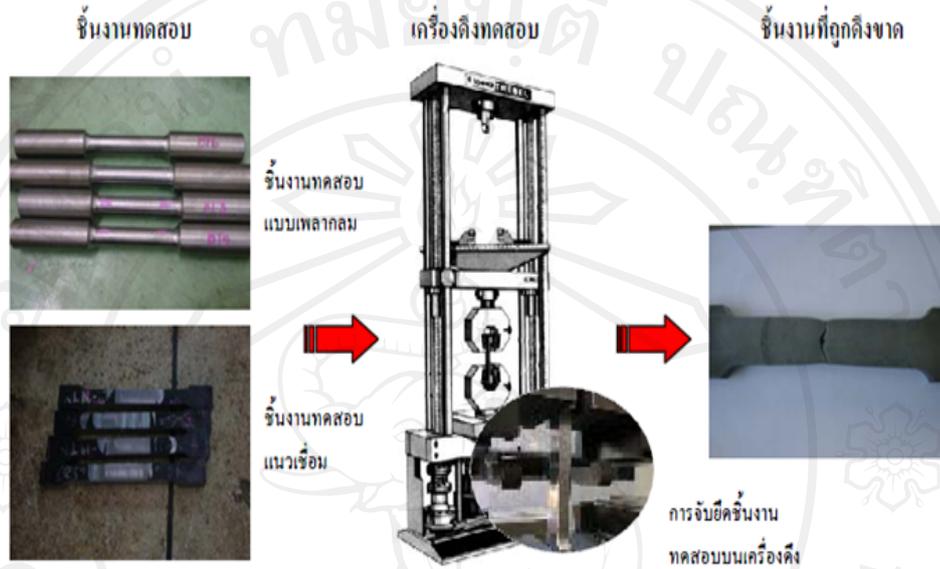
ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress - Strain Relationship) ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น- ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะ พล็อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอนดังรูปที่ 2.32 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด แล้วยังจะแสดงความสามารถในการรับ แรงดึงของวัสดุความเปราะเหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอก ความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย

### 2.9.3 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

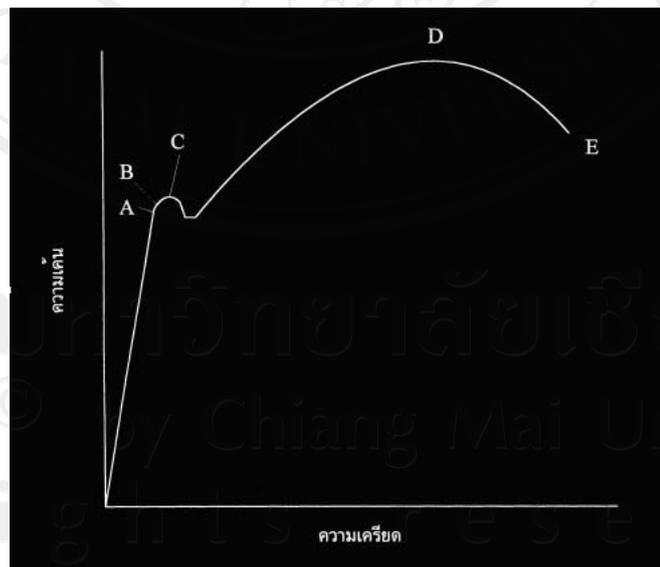
วิธีการทดสอบนั้นเราจะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้าๆแล้วบันทึกค่าของ ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้แล้วมาพล็อตเป็นเส้น โค้งดังรูปที่ 2.33 ขนาดและรูปร่างของ ชิ้นทดสอบมีต่างๆกันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้นๆ มาตรฐานต่างๆของการทดสอบเช่นมาตรฐาน ของ ASTM (American Society of Testing and Materials) BS (British Standards) JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก.(มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้ กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้พร้อมกับ กำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย

จากการศึกษาเส้น โค้งความเค้น-ความเครียด พบว่า เมื่อเราเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่าง ช้าๆชิ้นทดสอบจะค่อยๆยืดออกจนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความ เค้น-ความเครียด จะเป็นสัดส่วนคงที่ทำให้เราได้กราฟที่เป็นเส้นตรงตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่า ความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดจุด A นี้เรียกว่า พิกัดสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิกัดสัดส่วนนี้วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิมเมื่อเราเพิ่มแรง

กระทำต่อไปจนเกินพิกัดสัดส่วนเส้นกราฟจะค่อยๆ โค้งออกจากเส้นตรงวัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุดๆหนึ่ง (จุด B) เรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (Elastic limit)

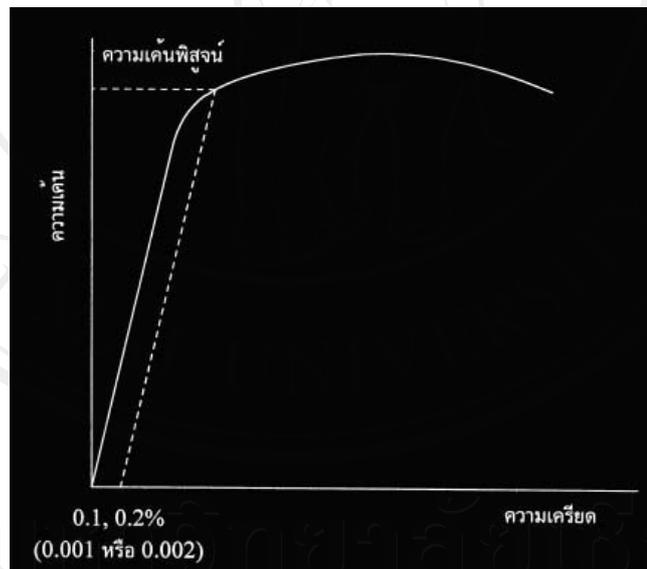


รูป 2.33 แสดงวิธีการทดสอบแรงดึง [36]



รูป 2.34 แสดงเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) [36]

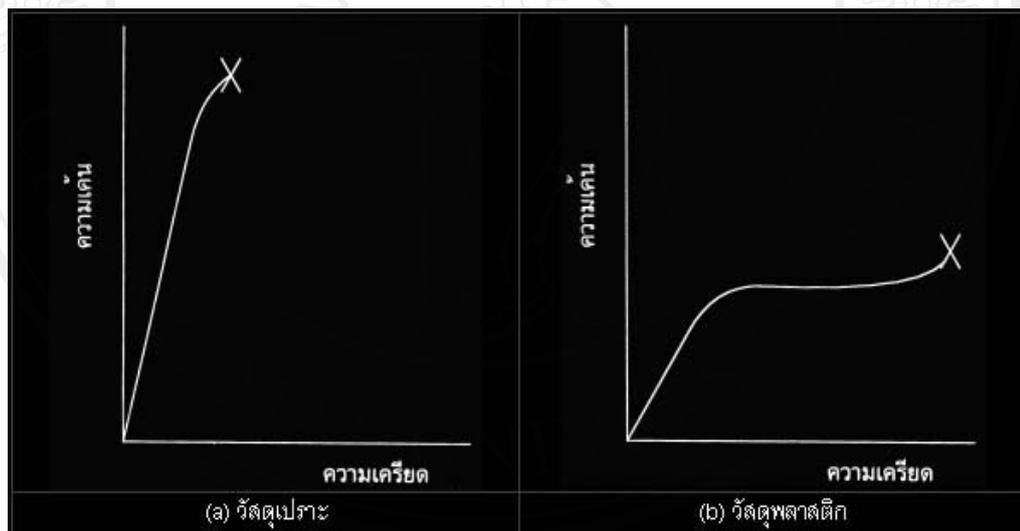
ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิด เช่น พวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างรวดเร็วโดยไม่มี的增加ความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่า จุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมากเพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูปและในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราจะใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหายวัสดุหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียมทองแดงจะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจนแต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 ถึง 0.20 เปอร์เซ็นต์ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้วลากเส้นขนาน



รูป 2.35 แสดงเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด แบบที่ไม่มีจุดคราก [36]

หลังจากจุดครากแล้ววัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อยๆเพิ่มอย่างช้าๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปร่างพลาสติกได้มากกว่าค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ค่านี้ยังใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบ

คุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยคำว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะหมายถึง ค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้ที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟเป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าค่าความเค้นสูงสุดเพราะเมื่อเลยจุด D ไปพื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลงทำให้พื้นที่ที่ต้านทานแรงดึงลดลงด้วยในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึงดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลงส่วนโลหะอื่นๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้วมันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุดโดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวางดังรูปที่ 2.36 (a) ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิกที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้นดังรูปที่ 2.36 (b)



รูป 2.36 แสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก [36]

เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด นั้นนอกจากจะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ความเค้นสูงสุดและความเค้นประลัยแล้วยังจะใช้บอกค่าต่างๆได้อีกดังนี้ คือ

1. ความเหนียว (Ductility) ค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percentage Elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of Area) ในทางปฏิบัติเรามักใช้ค่า %EI มากกว่า เพราะสะดวกในการวัดความเหนียวของวัสดุซึ่งจะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมัน คือ ถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (%EI สูง) ก็จะสามารถ

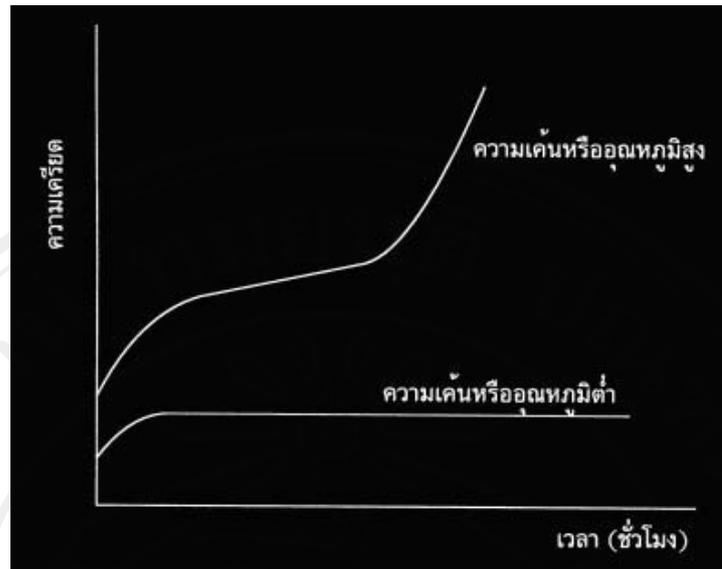
นำไปขึ้นรูป เช่น ริด ดี ขึ้นรูปดึงเป็นลวด ฯลฯ ได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำหรือเปราะ (Brittle) ก็จะนำไปขึ้นรูปยากหรือทำไม่ได้ เป็นต้น

- 2. Modulus of Elasticity or Stiffness** ภายใต้อิทธิพลของแรงที่กระทำซึ่งวัสดุจะมีพฤติกรรมความเป็นอิลาสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ค่าคงที่นี้ เรียกว่า Modulus of elasticity (E) หรือ Young's Modulus หรือ Stiffness มักมีหน่วยเป็น ksi (1 ksi=1000 psi) หรือ kgf/mm<sup>2</sup> หรือ GPa ถ้าแรงที่มากระทำเป็นแรงเฉือนเราเรียกค่าคงที่นี้ว่า Shear Modulus หรือ Modulus of Rigidity (G) ค่า E และ G ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าเฉลี่ยคงที่และเป็นตัวบอกความสามารถคงรูป (Stiffness, Rigidity) ของวัสดุนั้นคือ ถ้า E และ G มีค่าสูงวัสดุจะเปลี่ยนรูปอย่างอิลาสติกได้น้อยแต่ถ้า E และ G ต่ำมันก็จะเปลี่ยนรูปอย่างอิลาสติกได้มาก ค่า E และ G

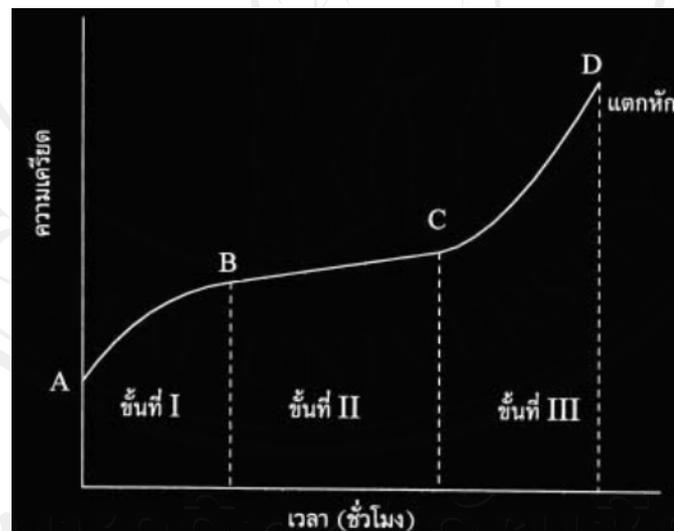
#### 2.9.4 ความคืบ (Creep)

วัสดุส่วนใหญ่เมื่ออยู่ภายใต้แรงที่มากระทำแม้ว่าจะต่ำกว่าขีดยืดหยุ่นหากทิ้งไว้นานๆแล้วก็อาจเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรหรือแบบพลาสติกได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ด้วยปรากฏการณ์เช่นนี้เราเรียกว่า ความคืบ ปริมาณของความคืบที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ปริมาณของความเค้น อุณหภูมิ และเวลา หากเราให้สภาวะที่เหมาะสมและมีเวลาเพียงพอความคืบจะเกิดขึ้นได้จนครบ 3 ขั้นตอน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.37 เมื่อเราใช้แรงกระทำคงที่จะเกิดความเครียด (OA) ขึ้นทันที ซึ่งค่าความเครียด OA นี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและสภาวะที่ให้ (ปริมาณของแรงกระทำ ความเค้น และอุณหภูมิ) และจะมีความสัมพันธ์กับค่า Modulus of elasticity (E) ของวัสดุนั้น หลังจากนั้นวัสดุก็จะเริ่มเกิดความคืบในขั้นที่ I ซึ่งอัตราการเกิดความเครียดจะค่อยๆลดลง (AB) ในขั้นที่ II (BC) อัตราการเกิดความเครียดจะคงที่และเป็นอัตราการเกิดความเครียดต่ำสุดในขณะที่วัสดุเกิด Creep ขึ้น อัตราการเกิดความเครียดนี้เรียกว่า Minimum Creep Rate จากนั้นเมื่อถึงขั้นที่ III (CD) อัตราการเกิดความเครียดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนวัสดุขาดหรือแตกออกจากกันที่จุด D การเกิดความคืบไม่จำเป็นจะต้องครบทั้ง 3 ขั้น ขึ้นอยู่กับสภาวะและเวลาที่ใช้ดังรูปที่ 2.38

เส้นบนถ้าเราให้แรงกระทำที่ทำให้เกิดความเค้นหรืออุณหภูมิสูงพอจะเกิดความคืบจนครบ 3 ขั้น แต่เส้นล่างนั้นความเค้นหรืออุณหภูมิต่ำจะมีแค่ 2 ขั้น นั่นคือ จะไม่เกิดการแตกหักขึ้นในกรณีของพวกพอลิเมอร์ซึ่งอาจเกิดความคืบขึ้นได้แม้ที่อุณหภูมิห้อง แต่โลหะส่วนใหญ่และพวกเซรามิกจะไม่เกิดความคืบที่อุณหภูมิต่ำ แต่ถ้าที่อุณหภูมิสูงก็อาจเกิดได้ ดังนั้นการใช้พวกโลหะหรือเซรามิกที่อุณหภูมิสูงจะต้องนำคุณสมบัติในการเกิดความคืบมาพิจารณาด้วย



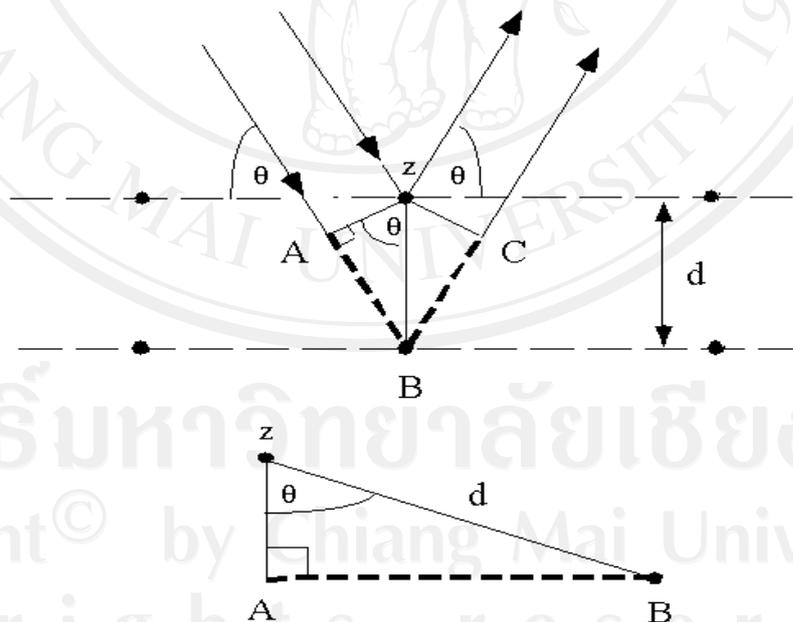
รูป 2.37 แสดงเส้นโค้งความเค้น [36]



รูป 2.38 แสดงขั้นตอนการเกิดความเค้น [36]

## 2.10 การตรวจสอบเฟสและองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) [37]

โครงสร้างแลตทิซ สามารถที่จะตรวจสอบได้โดยการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray) ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กที่มีพลังงานสูง และความยาวคลื่นสั้น ที่จัดอยู่ในเรอินเดียวกับระยะห่างระหว่างอะตอมของวัสดุที่เป็นของแข็ง เมื่อรังสีเอ็กซ์กระทบกับวัสดุจะเกิดการกระเจิงในทุกทิศทาง การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เกิดขึ้นเมื่อ รังสีเอ็กซ์ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบผลึกแล้วเกิดการกระเจิงโดยการชนกับอิเล็กตรอนในอะตอมของผลึก โดยรังสีเอ็กซ์ที่กระเจิงนี้ยังคงมีความยาวคลื่นไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมและเกิดการหักล้างหรือเสริมสร้างของคลื่น การกระเจิงหรือการเลี้ยวเบนของรังสีแบบนี้เป็นการกระเจิงแบบออปินซ์ (Coherent scattering) และเรียกว่า การกระเจิงแบบแบรกก์ (Bragg scattering) พิจารณาการเลี้ยวเบนของรังสีด้วยกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังรูปที่ 2.39 เมื่อรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นตกกระทบผลึก จะเกิดการกระเจิงจากระนาบเดียวกัน พิจารณารังสีตกกระทบแล้วเกิดการกระเจิงสำหรับระนาบ 2 ระนาบ พบว่า รังสีทั้งสองนี้มีความแตกต่างกันของทางเดิน (Path difference) เท่ากับ  $AB+BC$  และถ้ารังสีเอ็กซ์ทั้งสองอยู่ในเฟสเดียวกันจะมีค่า  $AB+BC$  เป็นจำนวนเท่าของความคลื่นที่ตกกระทบ



รูป 2.39 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [37]

Bragg's Law

$$n\lambda = AB + BC \quad (2.1)$$

$$AB = d\sin\theta \quad (2.2)$$

เนื่องจาก  $AB+BC$  ดังนั้น

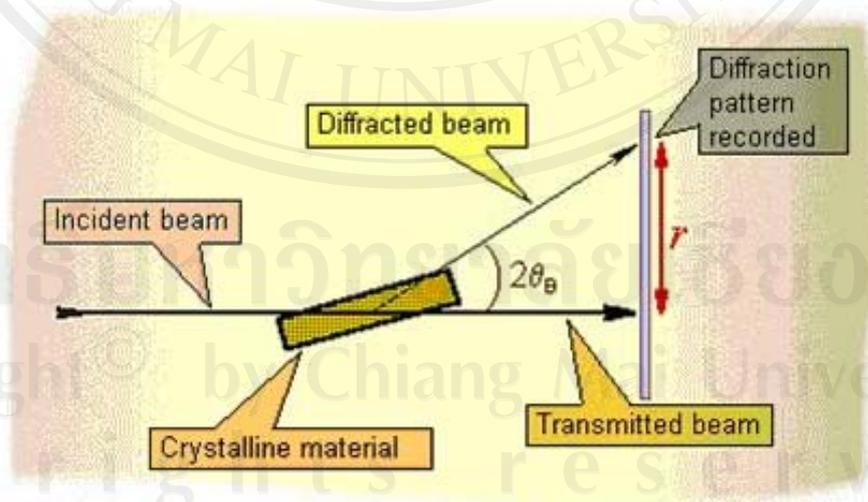
$$n\lambda = 2AB \quad (2.3)$$

จากสมการที่ 2.1 และ 2.2 จะได้

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (2.4)$$

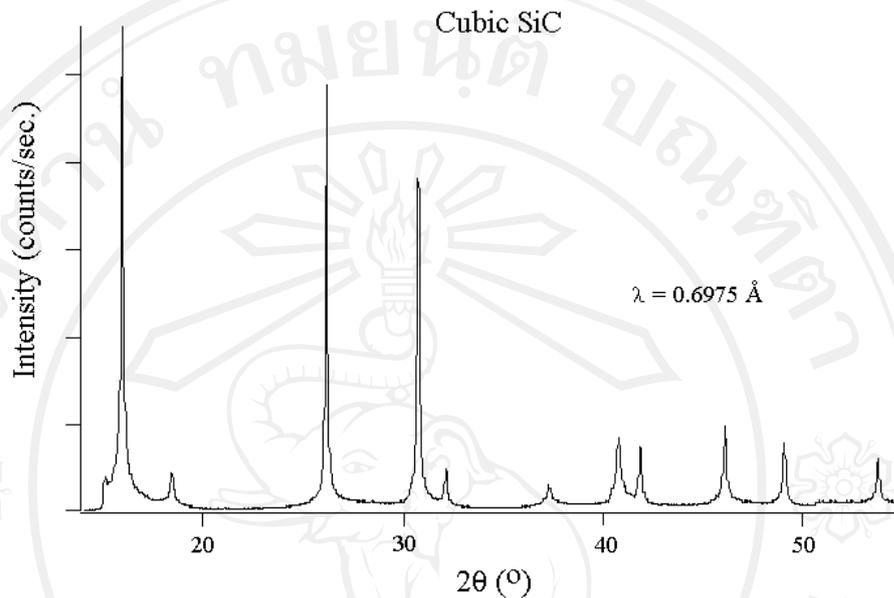
โดย  $\theta$  คือ มุมที่เกิดขึ้นระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบของผลึก  
 $d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

### 2.10.1 การทำงานของเครื่อง X-ray diffraction [37]



รูป 2.40 แสดงการทำงานของเครื่อง X-ray diffraction [37]

เครื่อง X-ray diffraction จะแสดงผลเป็น X-ray diffraction pattern ระหว่าง Intensity และ  $2\theta$  ดังรูปที่ 2.41



รูป 2.41 แสดง X-ray diffraction pattern ของ Cubic SiC [37]

เมื่อได้ X-ray diffraction pattern ของสารที่นำไปวิเคราะห์ ก็นำมาเทียบกับข้อมูล X-ray diffraction pattern มาตรฐาน หรือ JCPDS (Joint Committee Profile Diffraction Standards) ก็จะทราบว่าสารที่นำไปวิเคราะห์คือสารชนิดไหน

## 2.11 การวิเคราะห์พันธะและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) [39-40]

FT-IR spectroscopy ย่อมาจาก Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เป็นเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (Infrared light) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถบอกหมู่ฟังก์ชันคร่าวๆ ในสารที่ไม่ทราบว่าเป็นสารอะไร เช่น สารที่วิเคราะห์นี้อาจจะมีหมู่ Hydroxyl (-OH) methyl (-CH<sub>3</sub>) หรือ Carbonyl (-CO) โดยโมเลกุลของสารแต่ละชนิดจะดูดกลืนแสงอินฟราเรดในช่วงความถี่ที่มีค่าเฉพาะแตกต่างกันแล้วทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของพันธะ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกเป็นสเปกตรัมซึ่งแสดงลักษณะเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิดแต่ถ้าจะใช้เทคนิคนี้ในการระบุว่าเป็นสารชนิดใดต้องนำผลที่ได้ซึ่งเป็น

สเปกตรัม (Spectrum) ของสารนั้นไปเทียบกับสเปกตรัมของสารที่ทราบอยู่แล้ว (Reference) ถ้ามีสเปกตรัมเหมือนกันก็จะเป็นสารเดียวกัน

### 2.11.1 แสงอินฟราเรด (Infrared radiation) [39-40]

แสงอินฟราเรดเป็นคลื่นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่มองเห็น (Visible light) และ Microwave ส่วนที่นำมาใช้ประโยชน์ในอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี คือ ช่วงอินฟราเรดกลางซึ่งมีความยาวคลื่น 2.5 ถึง 25 ไมโครเมตร การบอกช่วงคลื่นของอินฟราเรดอาจบอกได้หลายหน่วย คือ ความยาวคลื่น ( $\lambda$  : wave length) ความถี่ ( $\nu$  : frequency) หรือ จำนวนคลื่นต่อระยะทาง 1 เซนติเมตร ( $\nu$ : wave number) หน่วยที่นิยมใช้ในการแสดงตำแหน่งของแสงอินฟราเรดคือ wave number ซึ่งเราสามารถแปลง wave length เป็น wave number ได้โดยอาศัยสูตร

$$\nu = 10^4/\lambda \quad (2.5)$$

ส่วนการบอกช่วงคลื่นในรูปของ frequency สามารถแปลงเป็นความยาวคลื่นได้เช่นกัน โดยอาศัยสูตร

$$\nu = c/\lambda \quad (2.6)$$

เมื่อ	$\nu$	=	ความถี่ (Hz)
	$c$	=	ความเร็วแสง ( $3.00 \times 10^8 \text{ cm.s}^{-1}$ )
	$\lambda$	=	ความยาวคลื่น (cm)

เนื่องจาก Wave number เป็นความถี่ใน 1 หน่วยระยะทาง ส่วน Frequency เป็นความถี่ใน 1 หน่วยเวลา ดังนั้นเราอาจพบว่าการเรียก Wave number ว่าความถี่ได้เช่นกัน

ตาราง 2.3 แสดงค่าของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า แบ่งตามความถี่ (Frequency) ความยาวคลื่น (Wavelength) และผลของรังสีต่อการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล [39]

Type of Radiation	Frequency Range ( $\nu$ : Hz)	Wavelength Range ( $\lambda$ : $\mu\text{m}$ )	Type of Transition
gamma-rays	$10^{20}$ - $10^{24}$	<1 pm	nuclear
X-rays	$10^{17}$ - $10^{20}$	1 nm-1 pm	inner electron
ultraviolet	$10^{15}$ - $10^{17}$	400 nm-1 nm	outer electron
visible	$4$ - $7.5 \times 10^{14}$	750 nm-400 nm	outer electron
infrared	$10^{13}$ - $10^{14}$	25 $\mu\text{m}$ -2.5 $\mu\text{m}$	Molecular vibrations
microwaves	$3 \times 10^{11}$ - $10^{13}$	1 mm-25 $\mu\text{m}$	molecular rotations, electron spin flips*
radio waves	$<3 \times 10^{11}$	>1 mm	nuclear spin flips*

ตาราง 2.4 แสดงช่วงคลื่นของอินฟราเรด [39]

Region	Wavelength range (mm)	Wavenumber range ( $\text{cm}^{-1}$ )
Near	0.78 - 2.5	12800 - 4000
Middle	2.5 - 50	4000 - 200
Far	50 -1000	200 - 10

### 2.11.2 การดูดกลืนแสงอินฟราเรด [39-40]

การดูดกลืนแสงอินฟราเรดของสารมีลักษณะเช่นเดียวกับการดูดกลืนแสงชนิดอื่นๆ นั่นคือ โมเลกุลหนึ่งๆจะดูดกลืนแสงที่มีพลังงานพอดีที่ทำให้เกิดการกระตุ้นหนึ่งๆ เท่านั้น แต่แสงอินฟราเรดมีพลังงานต่ำ เมื่อโมเลกุลดูดกลืนแสงจึงทำให้เกิดเพียงการเคลื่อนไหวของพันธะ โดยพันธะแต่ละชนิดจะดูดกลืนแสงที่มีความถี่เฉพาะแตกต่างกันไป การดูดกลืนขนาดพลังงานที่เฉพาะนี้ เราเรียกว่าเป็น Quantized energy ผลของการดูดกลืนพลังงานที่เฉพาะนี้ ทำให้เราทราบได้ว่าเป็นการดูดกลืนแสงที่เกิดจากพันธะชนิดใด อย่างไรก็ตาม หากการเคลื่อนไหวของพันธะเป็นการเคลื่อนไหวในลักษณะที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง Dipole moment แล้วเราจะตรวจไม่พบการดูดกลืนแสงของพันธะนั้นๆ ยิ่งการเคลื่อนไหวของพันธะที่ก่อให้เกิด Dipole moment มากเท่าใด สัญญาณที่ตรวจได้จะยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น

### 2.11.3 ลักษณะการสั่นของพันธะ [39-40]

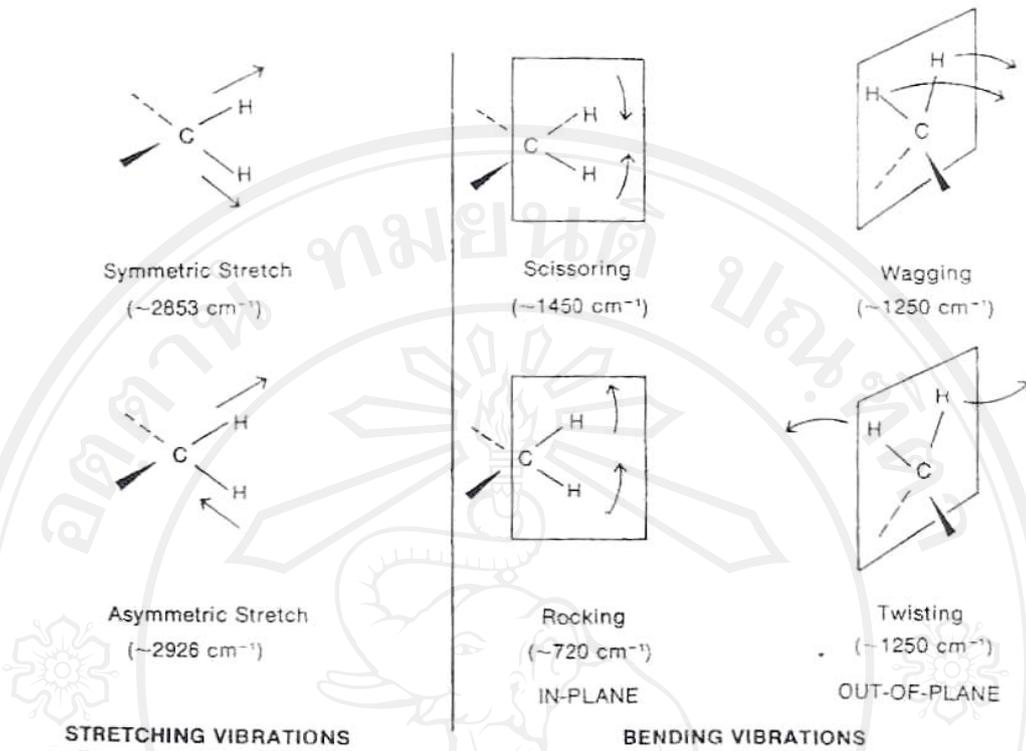
#### 1. การสั่นแบบพื้นฐาน (fundamental vibration) แบ่งได้เป็นสองชนิด คือ

- การยืด (Stretching) เป็นการเปลี่ยนแปลงระยะทางระหว่างอะตอมตามแนวแกนพันธะ แต่มุมของพันธะไม่เปลี่ยนแปลง
- การงอ (Bending) เป็นการสั่นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของมุมระหว่างอะตอม เช่น การขยับเข้าหากันและแยกกันแบบกรรไกร (Scissoring) การเหวี่ยง (Rocking) การกระดิก (Wagging) การบิด (Twisting)

โดยทั่วไปการยืดจะใช้พลังงานสูงกว่าการงอ สำหรับกลุ่มอะตอมที่มีอะตอมที่เหมือนกันอยู่สองอะตอม จะพบการยืดและการงอสองแบบ คือ แบบสมมาตร (Symmetric) และแบบอสมมาตร (Asymmetric) โดยพลังงานที่ทำให้เกิดการยืดแบบอสมมาตรจะสูงกว่าการยืดแบบสมมาตร (รูป 2.42)

#### 2. การสั่นแบบซับซ้อน (Complicated vibration) เป็นการสั่นที่มีผลสืบเนื่องมาจากการสั่นแบบพื้นฐาน แบ่งเป็น

- **Overtone** เป็นการสั่นที่มีผลมาจากการสั่นแบบพื้นฐานที่แรงมาก ทำให้เกิดระลอกคลื่นกระจายออก ซึ่งระลอกที่ถัดออกมาจะมีความถี่เป็นสองเท่า (Overtone ที่ 1) หรือสามเท่า (Overtone ที่ 2) ของความถี่เดิม
- **Combination band** เมื่อการสั่นแบบพื้นฐานของ 2 พันธะที่มีความถี่หนึ่ง ( $\nu_1$ ) มาประสานกันความถี่หนึ่ง ( $\nu_2$ ) band ที่เกิดขึ้นใหม่จะมีความถี่เท่ากับความถี่ของแต่ละอันมารวมกัน
- **Difference band** เป็นการสั่นที่เกิดจากการหักล้างกันของการสั่นแบบพื้นฐานของสองพันธะ
- **Fermi resonance** เกิดเนื่องจากตำแหน่งของความถี่ของการเกิด Overtone หรือ Combination band ใกล้เคียงกับตำแหน่งของความถี่ของ Fundamental band ทำให้เกิดการ Coupling กัน



รูป 2.42 แสดงการยืดและงอของกลุ่มอะตอมของ methyl หรือ methylene [40]

2.11.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดกลืนแสงของสาร [39-40]

พันธะที่อยู่ระหว่าง 2 อะตอม จะมีลักษณะคล้ายสปริง คือ มีการยืดหยุ่นตลอดเวลา พลังงานที่ทำให้เกิดการสั่นของพันธะจะเป็นสัดส่วนกับความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นสามารถคำนวณได้จากค่า force constant (k) ซึ่งเป็นความแข็งตึงของสปริงและมวล ค่า k จะแปรไปตามชนิดของพันธะ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright © by Chiang Mai University  
All rights reserved

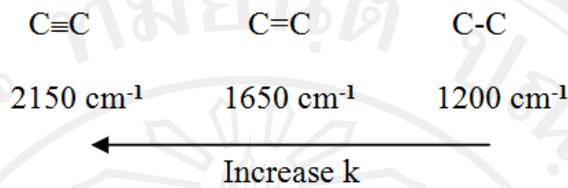
$$\bar{\nu} = 4.12 \sqrt{\frac{k(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} = 4.12 \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (2.7)$$

เมื่อ k = force constant  
m = มวลอะตอม

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (2.8)$$

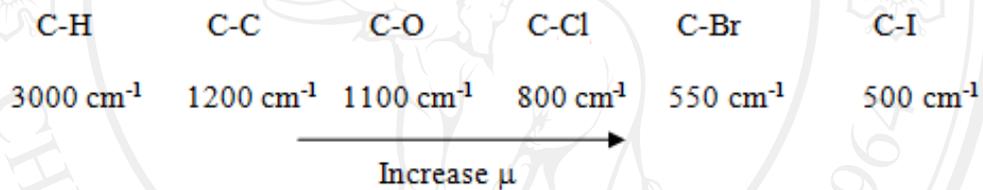
### 1. ความอึดตัวของพันธะ

พันธะที่แข็งแรงกว่า จะดูดกลืนแสงที่ค่าความถี่สูง โดยพันธะสาม > พันธะสอง > พันธะเดี่ยว



### 2. ขนาดอะตอม

อะตอมที่มีมวลมาก (ขนาดใหญ่) ทำให้ค่า  $\mu$  สูง จะดูดกลืนแสงที่ค่าความถี่ต่ำลง



### 3. ลักษณะของการสั่น

พลังงานที่ใช้ในการยืดจะสูงกว่าที่ใช้ในการงอ



#### 2.11.5 อินฟราเรดสเปกตรัม [39-40]

อินฟราเรดสเปกตรัมเป็นกราฟที่เกิดจากการพล็อตกราฟระหว่างแสงที่ผ่านตัวอย่างออกมา (Transmittance light) โดยคำนวณเป็น % Transmittance (%T) (อัตราส่วนระหว่างความเข้มของแสงที่ผ่านสารตัวอย่างต่อความเข้มของแสงที่ตกกระทบสารตัวอย่าง  $\times 100$ ) (แกน y) กับจำนวนคลื่น (แกน x) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีจะใช้แสงในช่วงอินฟราเรดกลาง คือ  $4000-400 \text{ cm}^{-1}$  ดังนั้นอินฟราเรดสเปกตรัมจึงมักจะพิจารณาในช่วง  $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$  เท่านั้น

โดยสามารถแบ่งสเปกตรัมเป็น 3 ส่วน คือ

### 1. Group frequency region

อยู่ระหว่าง  $4000-1300\text{ cm}^{-1}$  เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอม 2 อะตอม สเปกตรัมบริเวณนี้จะทำให้เราทราบชนิดพันธะและอะตอม

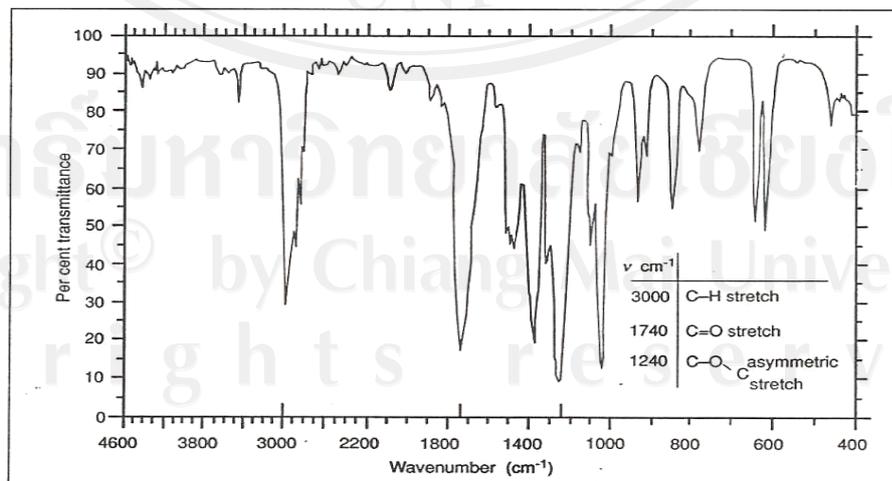
- **X-H stretching** region ( $4,000-2,500\text{ cm}^{-1}$ ) เป็นบริเวณที่เกิดการสั่นสะเทือนแบบ stretching ของพันธะเดี่ยวที่ต่อกับ hydrogen atom
- **Triple bond** region ( $2,500-2,000\text{ cm}^{-1}$ ) เป็นบริเวณที่เกิดการสั่นสะเทือนแบบ stretching ของพันธะสาม เช่น  $\text{C}\equiv\text{C}$  และ  $\text{C}\equiv\text{N}$
- **Double Bond** Region ( $2,000-1,500\text{ cm}^{-1}$ ) เป็นบริเวณที่เกิดการสั่นสะเทือนแบบ stretching ของพันธะคู่ เช่น  $\text{C}=\text{C}$  และ  $\text{C}=\text{O}$

### 2. Finger print region ( $1,500-910\text{ cm}^{-1}$ )

เป็นส่วนที่เกิดจากการปะปนกันของการสั่นสะเทือนแบบ Stretching และ bending ของหมู่อะตอมของสาร จึงยากที่จะใช้บอกชนิดของพันธะ อย่างไรก็ตามสารแต่ละชนิดจะมีส่วน Fingerprint ที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว ดังนั้นส่วนนี้จึงมีประโยชน์มากในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสาร

### 3. Aromatic region ( $910-650\text{ cm}^{-1}$ )

จะเป็นพิคเข้มของสารพวก Aromatic compound สามารถใช้บอก Substitution บน Ring ได้



รูป 2.43 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ ethyl ethanoate [40]

### 2.11.6 การแปลผลอินฟราเรดสเปกตรัม [39-40]

ในการแปลผลต้องพิจารณาทั้งในเรื่องตำแหน่ง ( $\text{cm}^{-1}$ ) รูปร่าง และความเข้ม เมื่อได้สเปกตรัมควรตรวจสอบว่ามีพีคที่มองเห็นง่าย เช่น พีคของ C=O, O-H, N-H, C-O, C=C, C≡C, C≡N และ NO<sub>2</sub> หรือไม่ ซึ่งจะทำให้ทราบหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบนั้น สำหรับการดูดกลืนของ C-H จะไม่ช่วยในการอ่านสเปกตรัมเท่าใดนัก เพราะว่ามีพีคเหล่านี้

### อินฟราเรดสเปกตรัมของสารชนิดต่างๆ [39-40]

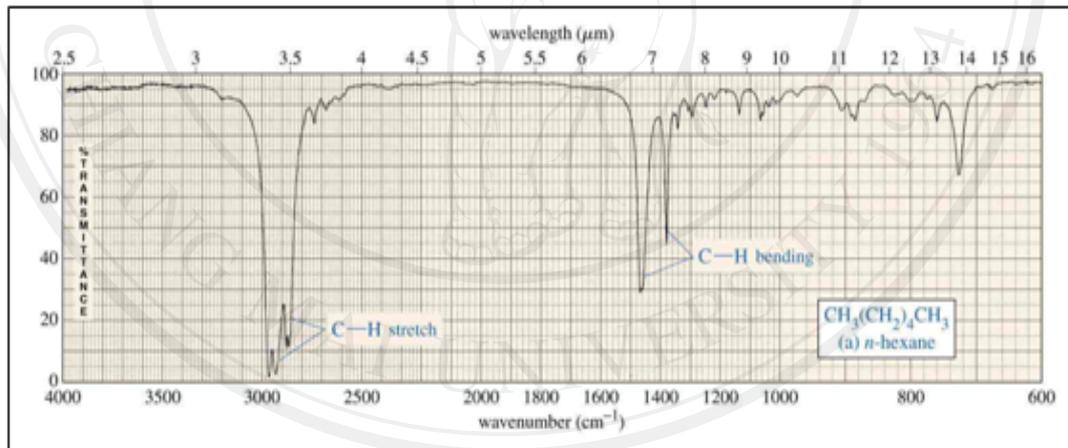
#### 1. Hydrocarbon

##### 1.1 Alkanes

C-H stretching : อยู่ที่ด้านขวาของ 3000  $\text{cm}^{-1}$

C-H bending : อยู่ที่ประมาณ 1,475-1,350  $\text{cm}^{-1}$

C-C stretching : จะไม่ค่อยมีประโยชน์ต่อการแปลผลเท่าใดนัก



รูป 2.44 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ Alkane [40]

##### 1.2 Alkenes

=C-H stretching

: อยู่ด้านซ้ายของ 3,000  $\text{cm}^{-1}$

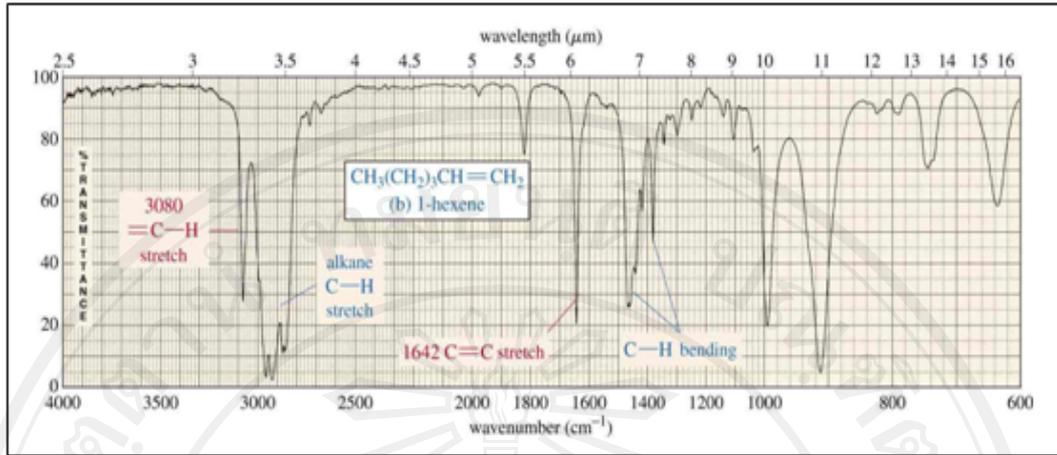
=C-H out-of-plane bending

: 1,000-650  $\text{cm}^{-1}$

C=C stretching

: 1,660-1600  $\text{cm}^{-1}$  พีคจะอ่อนถ้าเป็น conjugate

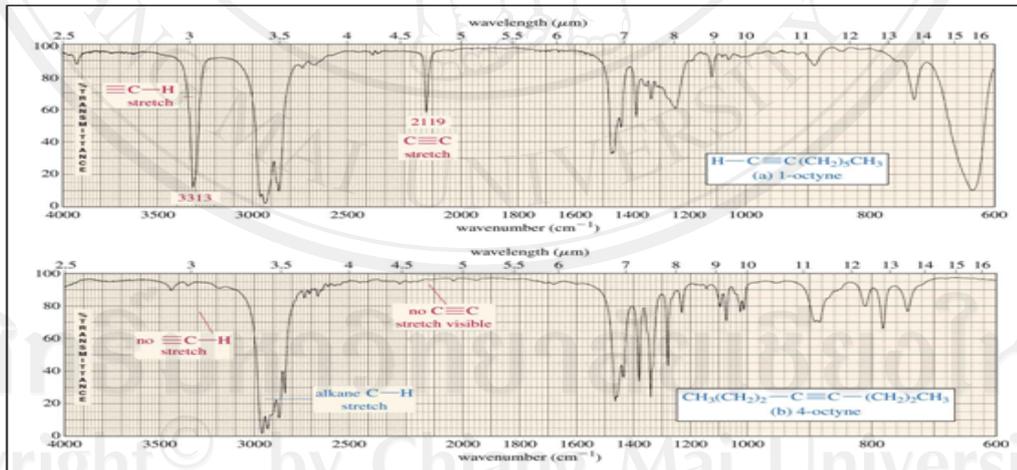
จะเลื่อนไปด้านขวา และมีความเข้มสูงขึ้น



รูป 2.45 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ Alkene [40]

1.3 Alkyne

- ≡C-H stretching : อยู่ที่ใกล้ๆ  $3,300\text{ cm}^{-1}$
- C≡C stretching : อยู่ที่ใกล้ๆ  $2,150\text{ cm}^{-1}$
- ถ้ามี conjugation จะเคลื่อนไปทางขวา



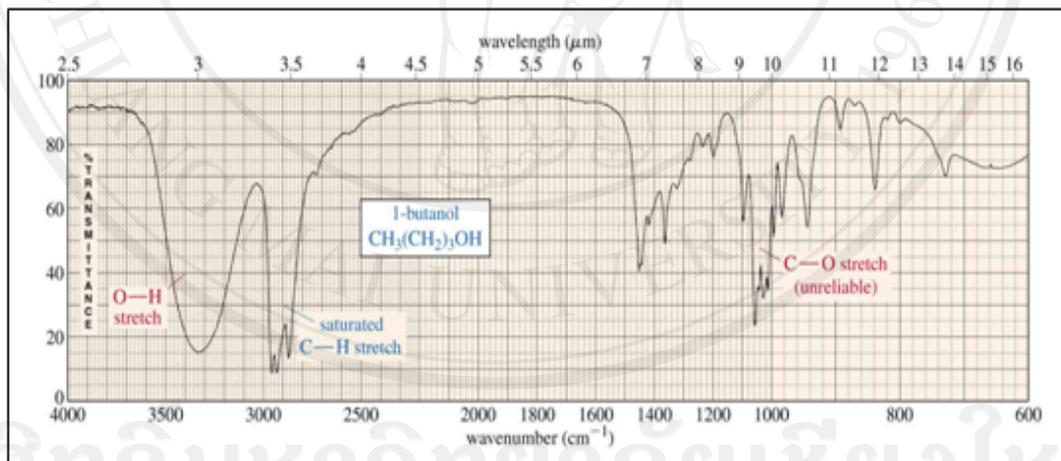
รูป 2.46 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ Alkyne [40]

### 1.4 Aromatic rings (Ar)

- =C-H stretching : อยู่ด้านซ้ายของ  $3,000\text{ cm}^{-1}$
- =C-H out-of-plane bending :  $900-690\text{ cm}^{-1}$
- C=C aromatic stretching : มี 2 peak อยู่ที่  $1,600-1,460\text{ cm}^{-1}$
- Overtone/combination bands : ปรากฏเป็น peak เล็กๆ ที่  $2,000-1,667\text{ cm}^{-1}$   
พีกเหล่านี้จะบอกตำแหน่งของ ring substitution ได้

### 2. Alcohols (R-OH) และ Phenols (Ar-OH)

- O-H stretching : ถ้าเป็น free O-H จะเห็นเป็นพีกแหลมที่  $3,650-3,600\text{ cm}^{-1}$   
โดยจะเห็นในตัวอย่างที่มีความเข้มข้นต่ำๆ หากความเข้มข้นสูงขึ้น  
พีกจะกว้างมาก เนื่องจากเกิด hydrogen bond และอยู่ที่บริเวณ  
 $3,500-3,000\text{ cm}^{-1}$  และอาจจะซ้อนทับกับ C-H stretching
- C-O stretching : จะอยู่ที่  $1,250-1,000\text{ cm}^{-1}$



รูป 2.47 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของหมู่ alcohols และ phenols [40]

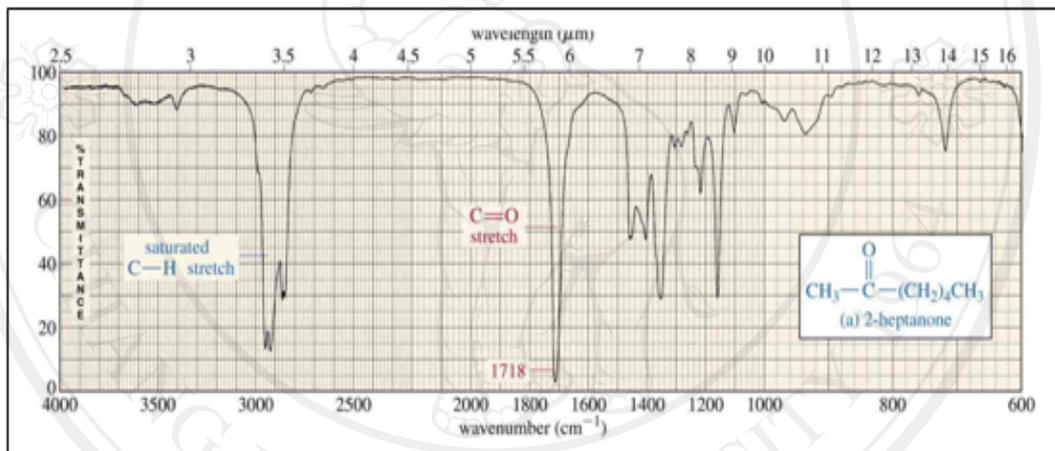
### 3. Carbonyl compounds (C=O)

Carbonyl พบใน Acid anhydride, Acid chloride, Ester, Aldehyde, Ketone, Carboxylic acid และ Amide โดย Carbonyl group จะดูดกลืนแสงอินฟราเรดในช่วง  $1,850-1,650\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งจะเข้มมาก เนื่องจากทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง dipole moment มาก

#### 3.1 Ketones

C=O stretching : ประมาณ  $1,715\text{ cm}^{-1}$

- Conjugation จะทำให้ absorption เคลื่อนไปทางขวา
- Ring strain จะทำให้ absorption เคลื่อนไปทางซ้าย



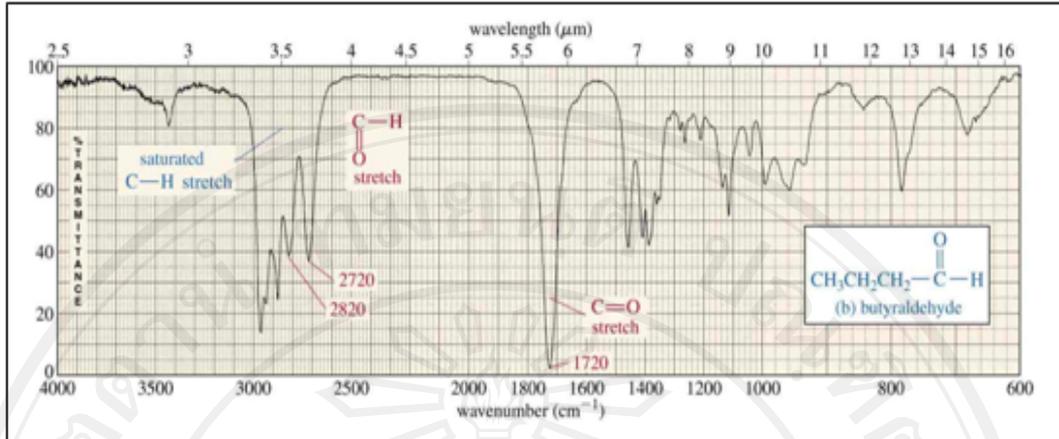
รูป 2.48 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ Ketones [40]

#### 3.2 Aldehydes

C=O stretching : ประมาณ  $1,725\text{ cm}^{-1}$

- Conjugation จะทำให้ absorption เคลื่อนไปทางขวา

C-H Stretching (aldehyde hydrogen, -CH=O) : มี weak band 2 band ที่  $2,880-2,660\text{ cm}^{-1}$



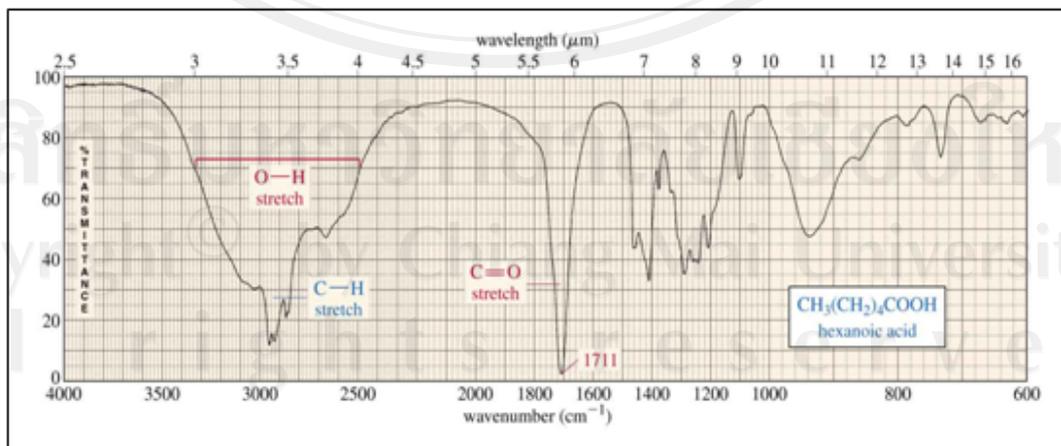
รูป 2.49 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ Aldehydes [40]

### 3.3 Carboxylic acid

O-H stretching : เป็นแถบที่กว้างมากที่สุดที่  $3,400-2,400\text{ cm}^{-1}$  เนื่องจากเกิด hydrogen bonding และมักจะรบกวนฟิสิกของ C-H ถ้าเป็น carboxylate salt ความถี่ของ C=O stretching จะสูงกว่า acid เนื่องจากไม่เกิด H-bonding

C=O stretching : broad อยู่ที่  $1,730-1,700\text{ cm}^{-1}$  หากมี conjugation จะเคลื่อนไปทางขวา

C-O stretching : อยู่ระหว่าง  $1,320-1,210\text{ cm}^{-1}$  มีความเข้มปานกลาง



รูป 2.50 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ Carboxylic acid [40]

## 4. Nitrogen compound

### 4.1 Amines (R-NH<sub>2</sub>)

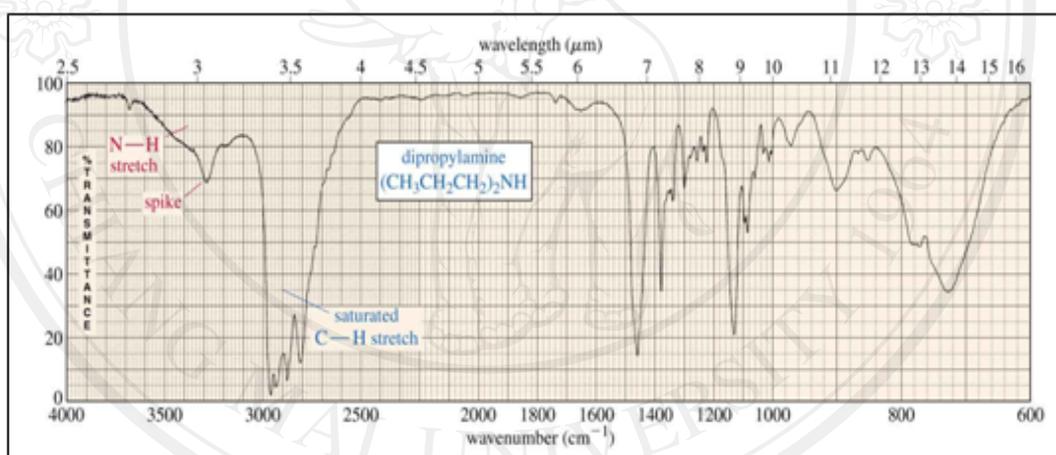
N-H stretching : 3,500-3,300 cm<sup>-1</sup>

- 1° amines จะมี 2 bands
- 2° amines จะมี 1 band
- ถ้าเป็น aliphatic จะอ่อนมาก ถ้าเป็น aromatic จะเข้มกว่า

N-H bending : ใน 1° amines จะเป็น broad band ที่ 1,640-1,540 cm<sup>-1</sup>  
 ใน 2° amines นั้น band จะอยู่ที่ 1,500 cm<sup>-1</sup>

N-H out of plane bending : อาจเห็นบริเวณ 800 cm<sup>-1</sup>

C-N stretching : 1,350-1,000 cm<sup>-1</sup>



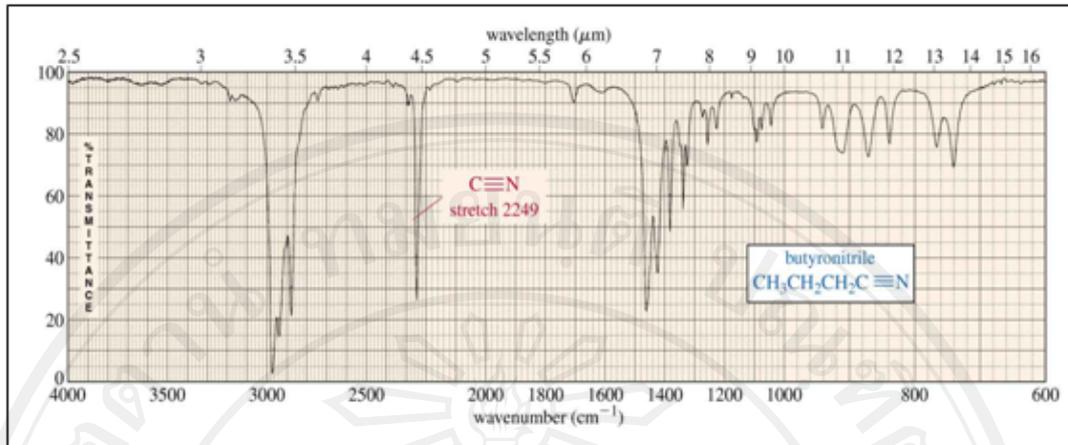
รูป 2.51 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ Amines [40]

### 4.2 Nitriles (R - C≡N)

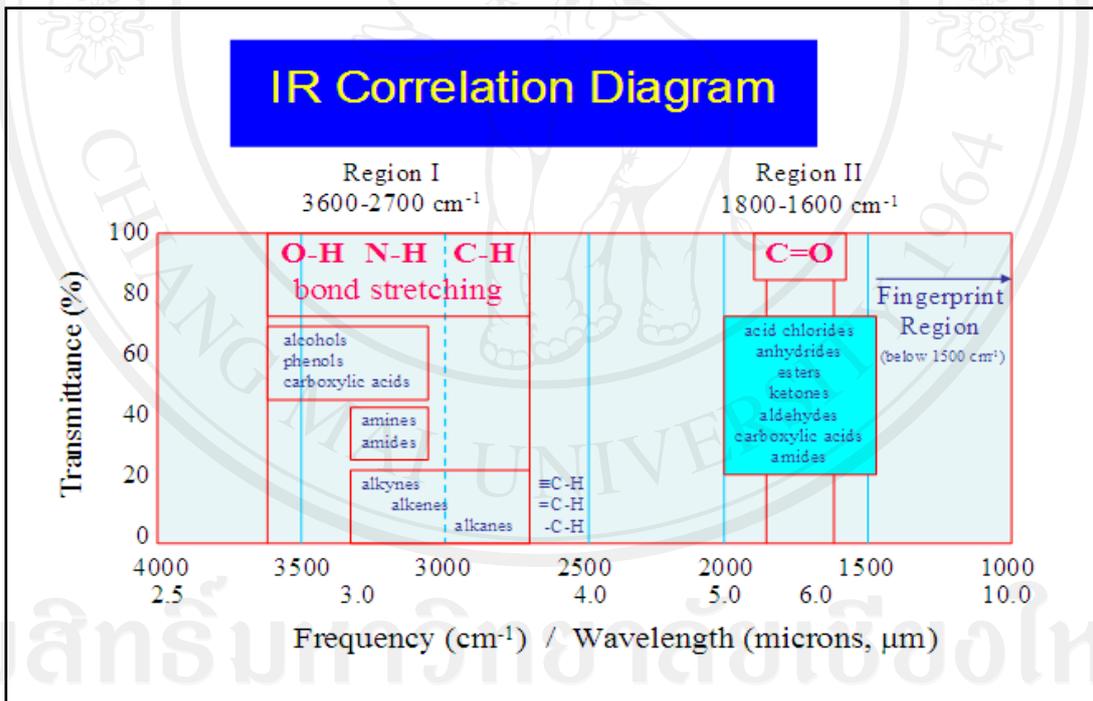
C - N : 1200 cm<sup>-1</sup>.

C = N : 1660 cm<sup>-1</sup> (เข้มกว่า C=C ในบริเวณเดียวกัน)

C ≡ N stretching : จะแหลมอยู่ที่ 2,300-2,000 cm<sup>-1</sup> หากมี conjugation กับ double bonds หรือ aromatic จะทำให้ตำแหน่งของพีค เคลื่อนไปด้านขวา



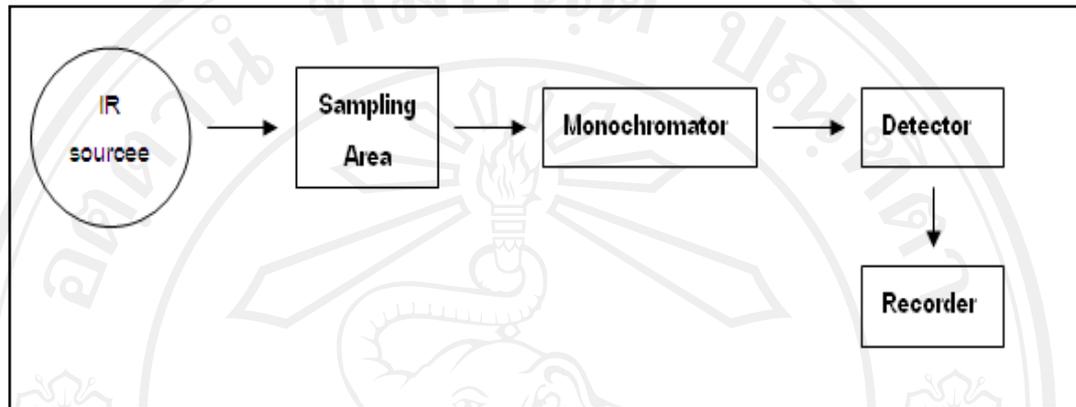
รูป 2.52 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ Nitriles [40]



รูป 2.53 แสดง IR Correlation Diagram [40]

## 2.11.7 เครื่องมือ (Instruments)

### 2.11.7.1 ส่วนประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีเตอร์ (Infrared Spectrophotometer)



รูป 2.54 แสดง Block diagram of an infrared spectrophotometer [40]

โดยทั่วไปประกอบด้วย 5 ส่วน คือ

**1. IR source** แหล่งกำเนิดแสง เป็นส่วนที่ผลิตหรือแปลงแสงให้เป็นแสงในช่วงจำนวนคลื่นที่ต้องการ หลอดที่นำมาใช้เป็นเครื่องกำเนิดแสงจะต้องมีไส้หลอดที่สามารถให้รังสีอินฟราเรดได้ ชนิดที่นิยมใช้ได้แก่ Nernst glower, Globar และ Nichrome coil

**2. Sampling area** ในระหว่างทางเดินของแสงจะมีบริเวณที่วางตัวอย่าง ลักษณะเป็นหน้าต่างและมีส่วนที่เสียบ Sample cell สารที่ใช้เป็นตัวกลางยึดจับ Sample ต้องทำด้วยวัสดุที่ยอมให้แสงอินฟราเรดผ่าน เช่น NaCl, KBr, AgCl, AgBr, CaF<sub>2</sub>, BaF<sub>2</sub> เป็นต้น การเลือกใช้ต้องคำนึงช่วงความถี่ของแสงที่สารเหล่านี้อยอมให้ผ่าน ลักษณะตัวอย่าง ช่วงความถี่ของแสงที่ Sample ดูดกลืน

**3. Monochromator** ตัวแยกความถี่แสง เป็นตัวแยกรังสีหรือจัดลำดับรังสีของแสง อาจทำได้ด้วย Prism หรือ Grating

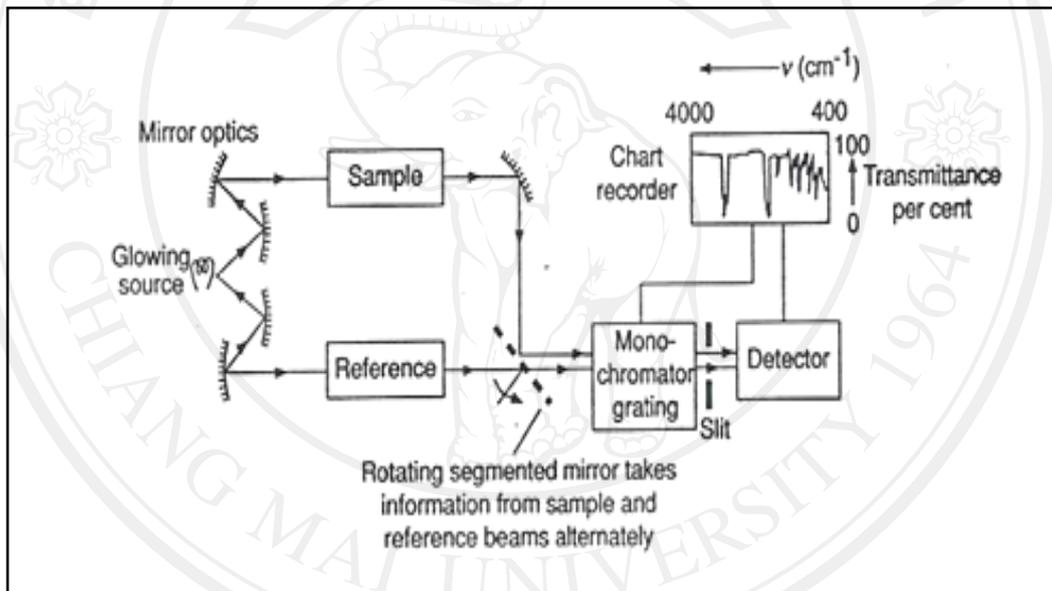
**4. Detector** เครื่องตรวจสัญญาณ เป็นส่วนที่รับพลังงานแสงขั้นสุดท้ายแล้วแปลออกมาเป็นสัญญาณส่งเข้าเครื่องบันทึกสัญญาณ

**5. Recorder** เครื่องบันทึกสัญญาณ ทำหน้าที่รับสัญญาณจาก Detector แล้วแสดงผลลัพธ์ออกมา โดยมากจะแสดงเป็นเส้นกราฟที่เรียกว่าสเปกตรัม

### 2.11.7.2 ชนิดของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

#### 1. Dispersive infrared spectrophotometer

โดยมากจะเป็นชนิด Double beams คือ ให้ลำแสงหนึ่งผ่านตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ (Sample) และอีกลำแสงหนึ่งผ่าน Reference (อาจเป็นอากาศ หรือ Cell เปล่า หรือตัวทำละลายที่ใช้เตรียม Sample) Sample จะดูดกลืนแสงส่วนหนึ่งไว้ จากนั้นแสงที่เหลือที่ผ่านออกมาจะถูกส่งเข้า Monochromator ซึ่งจะทำหน้าที่จัดลำดับจำนวนคลื่นของแสงที่ผ่านออกมาเป็นช่วงแล้วส่งเข้าสู่ Detector ซึ่งจะตรวจวัดแสงที่ผ่านออกมาทีละช่วงความถี่ โดยหักลบแสงที่ผ่านจากตัวอย่างและ Reference แล้วบันทึกด้วยเครื่อง Recorder ออกมาเป็นสเปกตรัม



รูป 2.55 แสดง Dispersive infrared spectrophotometer [40]

#### 2. Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) [39-40]

FT-IR มีหลักการทำงานคล้ายกับ Dispersive infrared spectrophotometer แต่ใช้ Interferometer แทน Monochromator โดย FT-IR จะวัดความเข้มของแสงที่จำนวนคลื่นต่างๆอย่างต่อเนื่องเทียบกับเวลา แล้วแปลผลด้วยสูตรทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Fourier transformation

FT-IR มีข้อดีเหนือกว่าชนิด Dispersive คือ สามารถตรวจวัด (Scan) ได้รวดเร็ว มีความไวและความเที่ยงตรงสูงกว่า ให้สเปกตรัมที่มีความละเอียดและชัดเจนกว่า แต่มีราคาแพง

### 2.11.8 การเตรียมตัวอย่าง

วิธีเตรียมตัวอย่างเป็นสิ่งที่สำคัญ เนื่องจากสารชนิดเดียวกันหากเตรียมด้วยวิธีต่างกันก็อาจทำให้ลักษณะหรือตำแหน่งของพีคเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นในการรายงานผลจะต้องระบุวิธีเตรียมตัวอย่างทุกครั้ง ก่อนที่จะนำสารตัวอย่างไปตรวจวัดจะต้องมีการเตรียมสารตัวอย่างให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมซึ่งจะต้องเลือกวิธีเตรียมภาชนะบรรจุ (Cell) หรือตัวกลางที่เหมาะสม โดยจะต้องไม่ดูดกลืนแสงในช่วงเดียวกับสารที่ต้องการศึกษา การเตรียมตัวอย่างแบ่งตามลักษณะตัวอย่างได้ดังนี้

ก. ตัวอย่างที่เป็นแก๊ส ทำได้โดยอัดแก๊สลงใน Cell แก้ว ที่ทำจาก NaCl หรือ NaBr

ข. ตัวอย่างที่เป็นของเหลว

- **Neat liquid** เตรียมได้โดยหยดตัวอย่างซึ่งเป็นของเหลวลงบนแผ่น Cell ที่ทำด้วย NaCl หรือ KBr แล้วกดทับด้วย Plate ชนิดเดียวกัน ตัวอย่างที่เตรียมโดยวิธีนี้เรียกว่า Neat liquid
- **Solution** สารที่เป็นของเหลวอาจเหนียวมากไม่เหมาะที่จะวัดแสง จึงต้องละลายในตัวทำละลายแล้วใส่ใน Cell สำหรับใส่ของเหลว ซึ่งตัวทำละลายที่ใช้นอกจากจะไม่ดูดกลืนแสงในความถี่เดียวกับตัวอย่างแล้ว ต้องแห้งและใส ไม่ทำปฏิกิริยากับตัวอย่างและ Cell ที่ใส่ตัวอย่าง ห้ามใช้ตัวทำละลายที่เป็นน้ำกับ Cell ที่เป็นเกลือที่ละลายน้ำเช่น NaCl หรือ KCl

ค. ตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

- **Mull** เตรียมได้โดยบด Sample 2 ถึง 5 มิลลิกรัม เข้ากับ Mulling agent (ได้แก่ Liquid paraffin (Nujol<sup>®</sup>) หรือของเหลวเหนียวชนิดอื่นที่ไม่ดูดกลืนแสงในความถี่เดียวกับตัวอย่าง ประมาณ 1 ถึง 2 หยด บดให้เนียนเป็น Emulsion แล้วนำไปวัดการดูดกลืนแสงด้วยวิธี Neat sample การบด Sample สำคัญมากหากผลึกยังเหลืออยู่จะทำให้เกิด Light scattering
- **Press disc** ทำได้โดยนำ Sample 0.5 ถึง 1.0 มิลลิกรัม บดให้เข้ากับผง KBr หรือ KCl ชนิดที่ผลิตขึ้นมาสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค IR แล้วอัดจนเป็นแผ่น ซึ่งจะต้องระวังเรื่องความชื้นเนื่องจากผงเกลือทั้งสองชนิดนี้สามารถดูดความชื้นได้ดี
- **Solution** การเตรียมเป็นสารละลายจะใช้หลักการเดียวกันกับการเตรียมสารละลายที่เป็นของเหลว

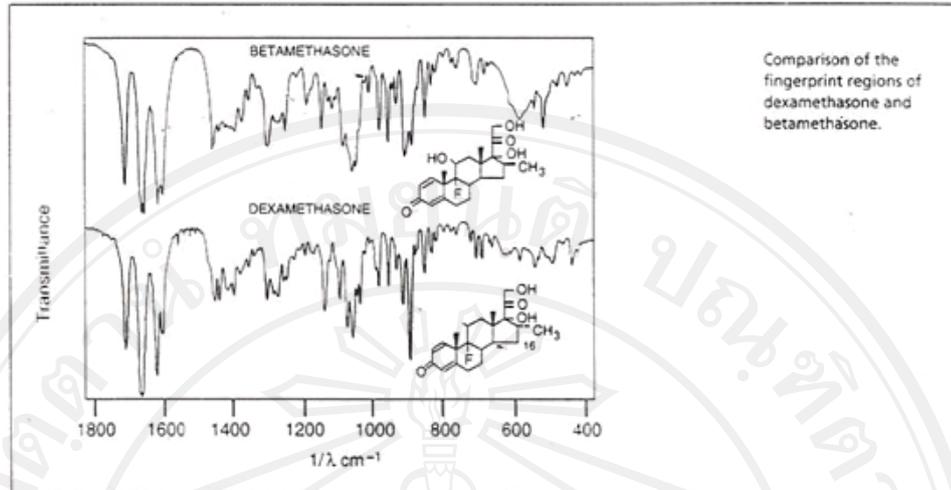
### 2.11.9 การประยุกต์ใช้ [39-40]

#### 1. การหาสูตรโครงสร้างของสาร (Structure elucidation)

ข้อมูลที่ได้จากอินฟราเรดสเปกตรัมมีข้อจำกัดในการหาสูตรโครงสร้างของสาร โดยจะบอกได้เพียงหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในโมเลกุลจากส่วนของ Group frequency region โดยทั่วไปจะใช้ข้อมูลจากอินฟราเรดสเปกตรัมเป็นส่วนสนับสนุนข้อมูลจากแหล่งอื่นๆ เช่น Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR) และ Mass spectrometry (MS) เป็นต้น

#### 2. การพิสูจน์เอกลักษณ์ (Identification)

การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยวิธีอินฟราเรดถือว่าเป็นวิธีที่ดีที่สุด กล่าวได้ว่า ถ้าอินฟราเรดสเปกตรัมของสารสองตัวเหมือนกันทุกประการ โดยเปรียบเทียบพีดต่อพีดแล้ว สารสองตัวนี้จะเป็นสารชนิดเดียวกันแน่นอน ยกเว้นสารสองตัวนั้นจะเป็น Enantiomer กัน ซึ่งเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีจะไม่สามารถแยกความแตกต่างของสารที่เป็น Enantiomer กันได้ วิธีพิสูจน์เอกลักษณ์ทำได้โดยนำสารมาตรฐาน (Reference compound) กับสารที่สงสัยมาตรวจวัดด้วยเครื่องมือเดียวกัน การเตรียมแบบเดียวกันสภาพแวดล้อมเหมือนกัน ถ้าสารที่สงสัยให้อินฟราเรดสเปกตรัมเหมือนกับสเปกตรัมของสารมาตรฐาน ก็แสดงว่าสารที่สงสัยเป็นสารชนิดเดียวกับสารมาตรฐาน บางครั้งหากไม่มีสารมาตรฐานก็อาจเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารมาตรฐาน (Reference spectra) สำหรับใน Thai pharmacopoeia ได้แสดงสเปกตรัมมาตรฐานของยาบางชนิดไว้ ดังได้กล่าวมาแล้วว่า Group frequency region (ส่วนความถี่ของหมู่อะตอม) ของอินฟราเรดสเปกตรัม เป็นส่วนที่บอกหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในโมเลกุล สำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์นั้น ส่วนที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาคือส่วน Fingerprint ซึ่งจะเป็ลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละสารตัวอย่างเช่นเมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของ Betamethasone และ Dexamethasone (รูปที่ 2.56) จะมีความคล้ายคลึงกันมาก แต่เมื่อดูจากส่วน Fingerprint จะมีความแตกต่างซึ่งสามารถบอกได้ว่าสารทั้งสองตัวเป็นคนละชนิดกัน



รูป 2.56 แสดงการเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของ Betamethasone และ Dexamethasone [40]

### 3. การวิเคราะห์หาปริมาณ (Quantitative analysis)

การวิเคราะห์หาปริมาณด้วยเทคนิคนี้จะใช้หลักการเดียวกับ UV-spectrophotometry คือใช้ Lambert-Beer's Law ซึ่งกล่าวไว้ว่า การดูดกลืนแสง (Absorbance) จะแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้น (c) และความหนาของ Cell ที่บรรจุ (b)

$$A = abc \quad (2.9)$$

สำหรับเครื่องอินฟราเรดที่ไม่สามารถอ่านค่าออกมาเป็น Absorbance แต่อ่านเป็น % Transmittance (%T) จะต้องคำนวณกลับให้เป็นค่า A ก่อน โดย

$$A = -\log (\%T/100) \quad (2.10)$$

การหาปริมาณด้วยเทคนิคนี้ยังไม่แพร่หลายเท่า UV และการวิเคราะห์หาปริมาณด้วยวิธีสำคัญในตำรายาต่าง ๆ ก็มีไม่มากนัก เนื่องจากวิธีนี้มีความไวต่ำ และบางครั้งให้ผลการวิเคราะห์ที่ไม่เป็นไปตาม Lambert-Beer's Law

## 2.12 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2002 Malinconico และ คณะ [1] ได้ทำการศึกษาความเหมาะสมของฟิล์มในกระบวนการหลอมอัดรีด (Melt extrusion) และ Post cure เพื่อใช้ป้องกันน้ำดินในการเพาะปลูกจากการผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และพอลิคาร์โพรแลคโตน การเตรียมสารจะทำได้โดยการนำพอลิคาร์โพรแลคโตน ที่มีมวลโมเลกุล 2000 มาผสมกับ Toluene-2,4-diisocyanate (TDI) เพื่อเตรียมเป็นสารละลาย ซึ่งพอลิคาร์โพรแลคโตนจะมีความสามารถในการละลายใน Toluene-2,4-diisocyanate จะผสมในอัตราส่วน 1:2 โมลาร์ จากนั้นก็นำสารที่ได้ไปผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และทำการละลายใน brabender discontinuous mixer operating ที่อุณหภูมิระหว่าง 180 กับ 200 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วน 100/25 และ 100/50 และเหวี่ยงที่ 30 และ 150 rpm หลังจากนั้น 10 นาที ก็ทำให้เย็นตัวลงภายใต้แก๊สไนโตรเจน จากนั้นขึ้นรูปด้วยการกดร้อนที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ทำการศึกษสมบัติการสะท้อน การส่องผ่าน และการดูดกลืนของแสง โดยใช้เครื่อง UV/VIS/NIR สมบัติเชิงกลด้วยการใช้ Instron machine Mod. 1122 และสมบัติการละลายในสารละลายน้ำ ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์/พอลิคาร์โพรแลคโตน พบว่า มีผลทำให้สมบัติเชิงกลลดลงเล็กน้อยเมื่อผสมกับพอลิคาร์โพรแลคโตน โดยดูจากค่าที่ลดลงของมอดูลัสและความต้านทานแรงดึง และเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการผสมอยู่ที่ใช้รอบในการเหวี่ยง 150 rpm และเป็นสารในอัตราส่วน 100/50 โดยให้ค่ามอดูลัสที่สูงและค่าการแตกหักจากแรงดึงที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอื่นๆ จากการศึกษาสมบัติทางแสงพบว่า ฟิล์มที่ได้มีการส่องผ่านที่สูงมาก มากกว่าร้อยละ 90 ที่ช่วงของ UV visible ในขณะที่การดูดกลืนของ IR อยู่ในช่วง 7 ถึง 12 ไมโครเมตร และการศึกษาผลของความร้อนของดินที่จะได้รับเมื่อคลุมด้วยฟิล์มนี้ จากการศึกษาด้วยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า ที่ระดับความลึกจากฟิล์ม 100 มิลลิเมตร จะมีอุณหภูมิ 47 องศาเซลเซียส

ดังนั้นการขึ้นรูปเป็นฟิล์มวัสดุผสมระหว่างพอลิคาร์โพรแลคโตนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ จึงเป็นสารที่น่าสนใจที่จะนำมาศึกษาต่อไปประกอบกับพอลิคาร์โพรแลคโตนมีความสามารถในทางชีวภาพ การขึ้นรูปฟิล์มจากพอลิคาร์โพรแลคโตนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพได้ แต่วิธีการจะขึ้นรูปเป็นฟิล์มโดยวิธีการจากข้างต้นนี้เป็นวิธีการที่ต้องใช้เทคนิคค่อนข้างสูง จึงได้มีการศึกษาเทคนิคการขึ้นรูปที่ง่ายกว่า จากการศึกษาของ Jaworek และคณะ ในปี 2009 [2] ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับการขึ้นรูปวัสดุผสมนาโนด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ และ Electrospraying ของสารโลหะออกไซด์ที่ผสมกับ PVC พบว่า วิธีการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ เป็นวิธีที่น่าสนใจกว่า

Electrospraying เพราะใช้เทคนิคที่ง่ายกว่า ซึ่งจะได้ฟิล์มที่มีลักษณะ เป็นเส้นใยขนาด น้อยกว่า 500 นาโนเมตร ข้อดีที่ได้จากวิธีการนี้ คือ จะได้ฟิล์มที่มีพื้นที่กว้างและการกระจายสม่ำเสมอ อีกทั้งสามารถควบคุมความหนาและอัตราการสะสมของฟิล์ม โดยการควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าและอัตราการไหล และอีกทั้งเป็นเทคนิคที่ใช้พลังงานและต้นทุนต่ำ ซึ่งในปีนี้อเอง Gaumer และ คณะ [3] ได้ทำการศึกษาเรื่องการขึ้นรูปพอลิคาร์โพรแลคโตน ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจากแหล่งจ่ายถึงแผ่นรองรับที่ความเข้มข้นร้อยละ 12 และ 18 พบว่า ระยะห่างมีอิทธิพลต่อการตกกระทบ และมีผลกระทบที่สำคัญต่อโครงสร้างภายในและความสามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility)

จากการศึกษางานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น จึงได้เกิดแนวความคิดการประดิษฐ์เส้นใยจากวัสดุผสมระหว่างพอลิคาร์โพรแลคโตนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ โดยไม่มีการผสมพอลิคาร์โพรแลคโตนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เข้าด้วยกัน แต่จะใช้วิธีการให้สารละลายของพอลิคาร์โพรแลคโตนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พร้อมกัน แต่มาจากแหล่งจ่ายสองจุด ซึ่งมีแนวโน้มจะเพิ่มประสิทธิภาพของเส้นใยมากขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้น่าจะสามารถสร้างองค์ความรู้ใหม่ที่มีประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าในเรื่องวัสดุทางชีวภาพ อีกทั้งสามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในด้านทางการแพทย์ต่อไป