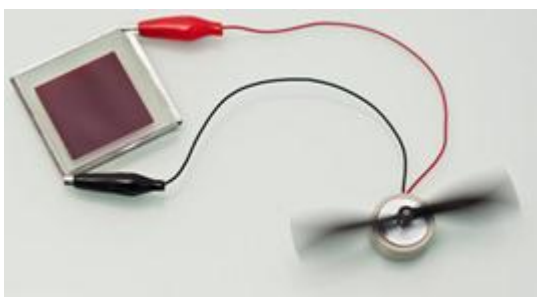


บทที่ 1 บทนำ

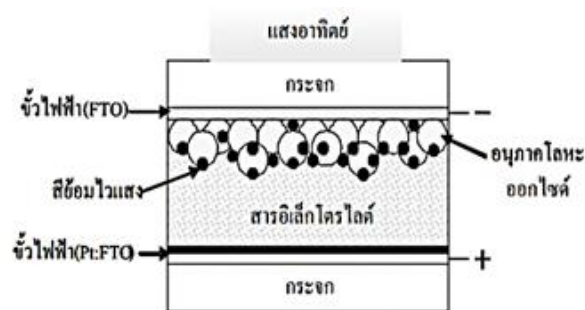
1.1 ที่มาของงานวิจัยและปัญหาในการทำวิจัย

1.1.1 ที่มาของงานวิจัย

เป็นที่ทราบกันดีว่าสารอินทรีย์โครโมโฟร์ หมายถึง สารที่ประกอบไปด้วยไอออนอิสระซึ่งสามารถแตกตัวได้เมื่ออยู่ในตัวทำละลายที่เหมาะสมทำให้สารดังกล่าวสามารถนำประจุได้ [1] และนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง [2] เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cell, DSSCs) (รูปที่ 1.1) [3] หรือ แบตเตอรี่ลิเทียม (Lithium batteries) (รูปที่ 1.2) [4] โดยทั่วไปแล้วสารอินทรีย์โครโมโฟร์จะมีลักษณะเป็นของเหลวซึ่งให้ประสิทธิภาพการขนส่งไอออนที่ดี แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียของระบบอินทรีย์โครโมโฟร์แบบของเหลวคือประกอบด้วยตัวทำละลายที่ระเหยง่ายและมักเกิดปัญหาการรั่วซึม ส่งผลต่อประสิทธิภาพ อายุการใช้งาน และความคงทนของอุปกรณ์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นแบตเตอรี่ลิเทียมหรือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งประเด็นดังกล่าวถือว่าเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไข [3]



(ก)

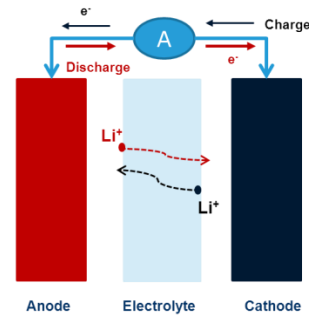


(ข)

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (ก) [5] และองค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (ข) [6]



(ก)

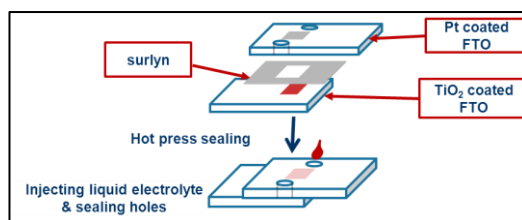


(ข)

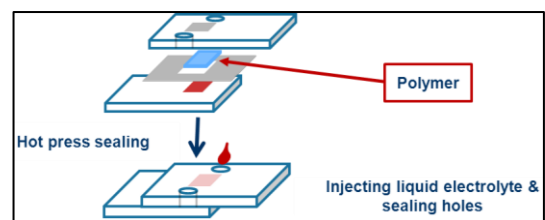
รูปที่ 1.2 ตัวอย่างของแบตเตอรี่ลิเทียม (ก) และองค์ประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียม (ข) [7]

จากปัญหาดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาสารพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์แบบของแข็ง เช่น การใช้พอลิเอทิลีนออกไซด์ (Polyethylene oxide, PEO) [8] ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาระงืดของสารอิเล็กโตรไลต์แต่อย่างไรก็ตามค่าการนำไอออนของสารอิเล็กโตรไลต์ระบบนี้อยู่ที่ประมาณ 10^{-6} S/cm [9] ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานจริง [8]

เพื่อที่จะเพิ่มค่าการนำไอออนของสารอิเล็กโตรไลต์แบบของแข็งจึงได้มีการพัฒนาสารพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์แบบเจล ซึ่งระบบดังกล่าวจะเติมสารอิเล็กโตรไลต์เหลวลงไปในพอลิเมอร์ โดยที่พอลิเมอร์จะดูดซับสารอิเล็กโตรไลต์แบบของเหลวไว้ ซึ่งสารพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์แบบเจลจะให้ค่าการนำไอออนสูงกว่าเมื่อเทียบกับสารพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์แบบของแข็ง และเมื่อเทียบกับสารพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์แบบของเหลวแล้วพบว่ามีความเสถียรและปลอดภัยมากกว่า อีกทั้งยังมีความสามารถขึ้นรูปได้หลากหลายรูปแบบมากกว่า [10]



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.3 องค์ประกอบ (ก) และลักษณะการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงในกรณีที่ใช้พอลิเมอร์เป็นสารอิเล็กโตรไลต์ (ข) [10]

ในด้านการนำไปใช้งานโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง พบว่าในขั้นตอนการประกอบเซลล์ (ในรูปที่ 1.3) สารอิเล็กโตรไลต์เหลวจะถูกเติมเข้าไปหลังจากที่เซลล์ถูก

ผนึกโดยความร้อนเรียบร้อยแล้ว แต่ในกรณีที่ใช้พอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์แบบของแข็งหรือแบบเจลจะไม่สามารถฉีดเข้าไปในรูปของเหลวได้ และจะต้องเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนแล้วจึงนำไปประกอบเป็นเซลล์ โดยที่แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์จะอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทด หลังจากนั้นจึงทำการผนึกเซลล์และเติมสารอิเล็กโตรไลต์เหลวเข้าไป ซึ่งในขั้นตอนการผนึกเซลล์นั้น จำเป็นจะต้องให้ความร้อนถึง 98 องศาเซลเซียส เพื่อให้แผ่น surlyn หลอมและทำหน้าที่เป็นสารยึดติดระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทด [10] ดังนั้นแล้วพอลิเมอร์ที่จะใช้ในระบบนี้ควรจะทนความร้อนและมีอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ค่อนข้างสูง ซึ่งจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่พบว่าพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์-เฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน (Polyvinylidene fluoride-hexafluoropropylene, PVdF-HFP) มีความน่าสนใจสำหรับใช้เป็นสารพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์เนื่องจากมีอุณหภูมิการหลอมเหลวสูงคือ 135 องศาเซลเซียส ในขณะที่พอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เช่น PEO จะมีค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวอยู่ที่ 65 องศาเซลเซียส [11] นอกจากนั้นแล้ว PVdF-HFP ยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีและให้ค่าการนำไอออนสูงที่อุณหภูมิสภาวะปกติ [12] ซึ่งเป็นผลมาจากความเป็นผลึกของไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Vinylidene fluoride, VdF) และความเป็นอสัณฐานของเฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน (Hexafluoropropylene, HFP) [13]

นอกจากนั้นเพื่อที่จะให้ได้สารพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์แบบเจลที่มีค่าการนำไอออนสูง ควรมีความสามารถในการดูดซับ (Uptake) ของเหลว เช่น ตัวทำละลายและสารละลายของสารกึ่งตัวนำสูง ซึ่งจากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนจะช่วยให้สามารถดูดซับสารอิเล็กโตรไลต์แบบของเหลวไว้ในปริมาณมากและส่งผลดีต่อการปรับปรุงค่าการนำไอออนให้เพิ่มขึ้น [14]

การขึ้นรูปโดยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) เป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับชักนำให้พอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบรูพรุนและมีค่าการดูดซับสูงขึ้น [15] นอกจากนั้นเทคนิคดังกล่าวยังสามารถทำได้ง่าย ให้โครงสร้างเป็นรูพรุนที่สามารถควบคุมได้จำนวนมากและมีความแข็งแรงสูงเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นเส้นใย [10]

แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่าในการขึ้นรูปเส้นใย PVdF-HFP โดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตนั้น มักจะทำให้พอลิเมอร์มีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น [15] ซึ่งจะส่งผลให้ค่าการนำไอออนลดลง เนื่องจากการนำไอออนเกิดขึ้นผ่านส่วนที่เป็นอสัณฐานของพอลิเมอร์ [16] การเติมสารตัวเติมที่เป็นอนุภาคเซรามิกเข้าไปในพอลิเมอร์เป็นแนวทางหนึ่งสำหรับการลดความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการศึกษาพบว่าอนุภาคนาโนแลนทานัมออกไซด์ (La_2O_3) สามารถลดความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ได้ [17] เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างผิวของอนุภาคนาโน La_2O_3 กับสายโซ่ PVdF-HFP ส่งผล

ต่อการขัดขวางการเกิดผลึก นอกจากนั้นแล้วการเติมอนุภาคออกไซด์ของธาตุหายากที่มีขนาดระดับนาโน (Rare earth oxide) ยังเป็นการเพิ่มความเสถียรทางความร้อนและเพิ่มค่าการนำไอออนของพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ได้อีกด้วย [18]

ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์แบบเจลสำหรับการนำไปใช้งานเป็นส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสงให้มีอายุการใช้งาน ความทนทาน และค่าการนำไอออนที่สูงขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะทำการเตรียมพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์แบบเจลของ PVdF-HFP ที่มีความเป็นรูพรุนสูงโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและลดความเป็นผลึกของพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์โดยการเติมอนุภาคนาโนแลนทานัมออกไซด์

1.1.2 ปัญหาที่นำไปสู่งานวิจัย

- 1) เนื่องจากในขั้นตอนของการประกอบเซลล์จำเป็นต้องบรรจุแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์เข้าไปก่อนทำการผนึกเซลล์ จึงทำให้ค่าการนำไอออนของสารอิเล็กโตรไลต์ที่ได้มีค่าต่ำ เนื่องจากการดูดซับสารอิเล็กโตรไลต์เหลวที่เติมลงไปภายหลังการผนึกเซลล์จะมีจำกัด ดังนั้นจึงต้องหาวิธีการเพิ่มค่าการดูดซับสารอิเล็กโตรไลต์เหลวโดยการทำให้พอลิเมอร์มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส
- 2) เนื่องจาก PVdF-HFP มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก ซึ่งส่วนที่เป็นผลึกจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของไอออนเป็นผลทำให้ค่าการนำไอออนต่ำ จากเหตุผลดังกล่าวจึงต้องลดความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ดังกล่าว โดยในงานวิจัยนี้จะทำการเติมอนุภาคนาโน La_2O_3 เพื่อเพิ่มส่วนที่เป็นอสัณฐานของ PVdF-HFP

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากบทความทบทวนวรรณกรรมของ Stephan และ Nahm [9] ได้ให้ข้อมูลไว้ว่า พอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์แบบเจลของพอลิอะคริโลไนไตรล์ (PAN) ให้การนำไอออนที่สูงถึง 10^{-3} S/cm ที่อุณหภูมิห้อง แต่ PAN มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่สูงคือ 125 องศาเซลเซียส ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้ยากซึ่งจะมีส่วนช่วยในการนำไอออนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำกว่า [11] ส่วนพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl methacrylate, PMMA) มีความเป็นไปได้ที่จะถูกใช้เป็นพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ [19] แต่สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ดังกล่าวนี้เมื่อเติมสารเสริมสภาพความเป็นพลาสติกลงไปจะมีค่าต่ำจึงไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน [20] สำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) นั้นพบว่าให้ค่าการนำไอออนต่ำเมื่อถูกใช้เป็นพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์

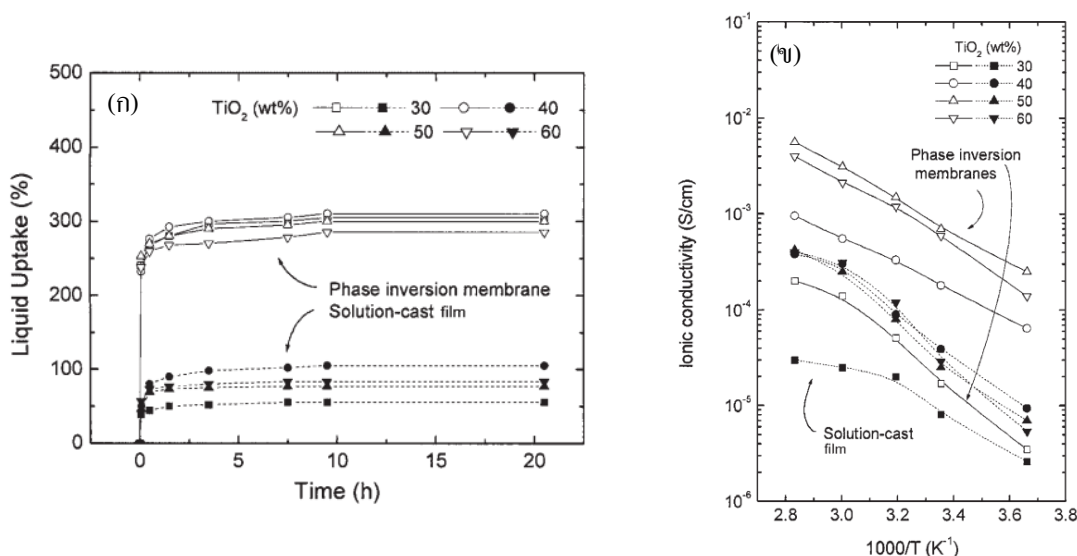
[9] จึงได้มีการนำ PMMA มาผสมกับ PVC เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงของ PMMA พบว่าสมบัติเชิงกลของ PMMA ดีขึ้น แต่ค่าการนำไอออนที่อุณหภูมิสถานะปกติก็ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ [4]

จากบทความทบทวนวรรณกรรมของ Stephan [20] ให้ข้อมูลว่าพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVdF) เป็นตัวเลือกหนึ่งสำหรับการนำไปใช้เป็นพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ เนื่องจากการมีหมู่แทนที่ที่เป็นหมู่คิงอิเล็กตรอน (-C-F) และมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant, ϵ) เท่ากับ 8.4 ซึ่งมีส่วนช่วยในการละลายเกลือลิเทียม

จากบทความทบทวนวรรณกรรมของ Yang และ Hou [21] ได้กล่าวไว้ว่า Bellcore และคณะฯ ได้ประสบความสำเร็จในการนำ PVdF-HFP มาใช้งานเป็นพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ โดยโคพอลิเมอร์ชนิดนี้ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็น HFP ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้โครงสร้างของพอลิเมอร์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นแบบอสัณฐาน ส่งผลให้พอลิเมอร์เมทริกซ์สามารถดูดซับสารอิเล็กโตรไลต์แบบของเหลวได้มากขึ้น และทำให้ค่าการนำไอออนเพิ่มขึ้น สำหรับส่วน PVdF ที่แสดงความเป็นผลึกจะให้สมบัติเชิงกลที่ดี รวมทั้งช่วยให้แผ่นฟิล์มสามารถคงรูปได้โดยไม่จำเป็นต้องทำการเชื่อมขวาง

Saika และ Kumar [13] ทำการศึกษาการนำไอออนของพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ 2 ชนิด คือ PVdF-HFP และ PVdF ในโพรพิลีนคาร์บอเนต (PC) ไดเอทิลคาร์บอเนต (DEC) และลิเทียมเปอร์คลอเรต (LiClO_4) ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูป (Casting method) พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ที่ใช้ PVdF-HFP ให้ค่าการนำไอออนสูงกว่า เนื่องจากพอลิเมอร์ดังกล่าวมีหมู่ CF_2 ที่ช่วยขัดขวางการเกิดผลึก ส่งผลให้พอลิเมอร์เมทริกซ์มีความเป็นอสัณฐานมากขึ้นและทำให้ไอออนสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น

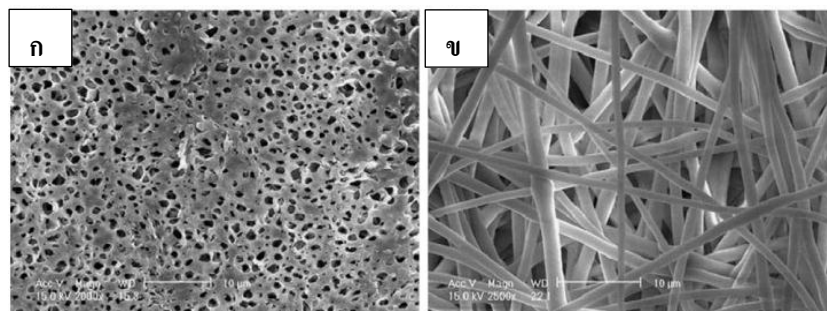
Kim และคณะฯ [14] ได้เตรียมพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนของ PVdF-HFP ที่เติมอนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) ด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟส (Phase inversion) โดยมีการใช้ไดเมทิลอะซิทาไมด์ (DMAc) เป็นตัวทำละลาย ใช้น้ำเป็นตัวไม่ทำละลายและสารละลายอิเล็กโตรไลต์ คือ 1 โมลาร์ของลิเทียมเฮกซะฟลูออโรฟอสเฟต (LiPF_6) ในเอทิลีนคาร์บอเนต (EC)/ DEC (1:1 ร้อยละโดยมวล) เมื่อเปรียบเทียบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูปและวิธีการเปลี่ยนเฟส พบว่าการขึ้นรูปด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟสทำให้ได้ พอลิเมอร์ที่สามารถในการดูดซับสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่สูงกว่าเนื่องจากมีความเป็นรูพรุนสูงกว่า ส่งผลให้มีค่าการนำไอออนสูงกว่าเมื่อเทียบกับการขึ้นรูปพอลิเมอร์โดยวิธีการหล่อขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 1.4



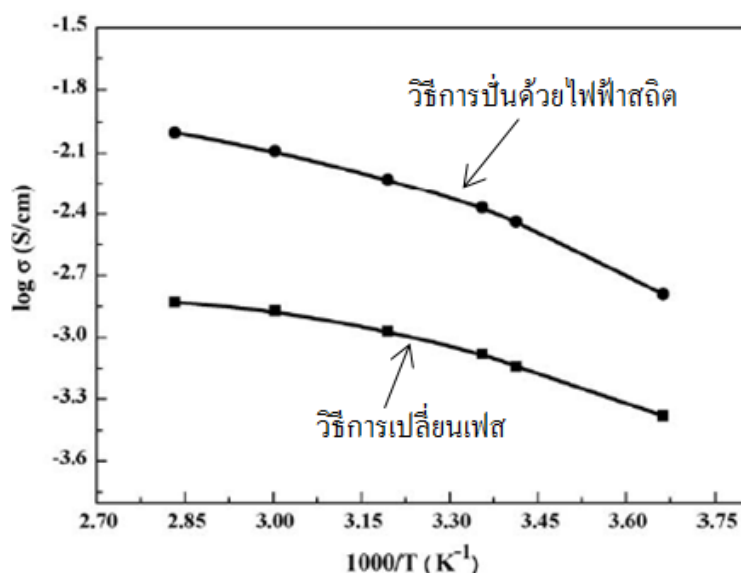
รูปที่ 1.4 ค่าร้อยละของการดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์ (ก) และกราฟอาร์เรเนียสของค่าการนำไอออน (ข) ของ PVdF-HFP/TiO₂ ที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูป (เส้นประ) และวิธีการเปลี่ยนเฟส (เส้นทึบ) [14]

Priya และคณะ [22] ได้เตรียมแผ่นเส้นใยจากสารละลายของ PVdF-HFP ในตัวทำละลาย อะซิโตน / DMAc (7:3 ร้อยละ โดยมวล) ขึ้นรูปโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต และหลังจากนั้นกระตุ้นแผ่นเส้นใยด้วย 0.6 โมลาร์ของ 1-hexyl-2,3-dimethylimidazolium iodide, 0.1 โมลาร์ของลิเทียมไอโอไดด์ (LiI) 0.05 โมลาร์ของไอโอดีน (I₂) และ 0.5 โมลาร์ของ 4-tert-butylpyridine ที่ละลายใน EC / PC (1:1 ร้อยละ โดยมวล) ได้สารอิเล็กโทรไลต์ที่มีค่าการนำไอออนเท่ากับ 10⁻⁵ S/cm ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ร้อยละ 7.3 นอกจากนั้นแล้ว เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ประกอบขึ้นโดยใช้แผ่นเส้นใยดังกล่าวเป็นองค์ประกอบในสารอิเล็กโทรไลต์จะให้ความเสถียรในระยะยาวมากกว่าเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารอิเล็กโทรไลต์แบบของเหลว แสดงให้เห็นว่าแผ่นเส้นใย PVdF-HFP สามารถดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์แบบของเหลวไว้ได้

Raghavan และคณะ [15] ศึกษาเกี่ยวกับผลของกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกันระหว่างการขึ้นรูปด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต และวิธีการเปลี่ยนเฟส จากผลการศึกษาพบว่า พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีสมบัติการนำไอออนและความเสถียรต่อข้อผิดพลาดที่ต่ำกว่า เนื่องจากการขึ้นรูปด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตทำให้ได้พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่มีความเป็นรูพรุนสูง (ร้อยละ 85) และมีลักษณะเป็นรูพรุนที่ต่อเนื่องกันดังแสดงในรูปที่ 1.5 ส่งผลให้สามารถดูดซับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้มาก (ร้อยละ 426) และมีการเคลื่อนที่ของไอออนลิเทียมที่ดี ทำให้ได้ค่าการนำไอออนที่สูงถึง 4.32 × 10⁻³ S/cm ดังแสดงในรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ PVdF-HFP ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟส (ก) และวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต (ข) [15]



รูปที่ 1.6 กราฟอาร์เรเนียสของค่าการนำไอออนของ PVdF-HFP ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟสและวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต [15]

Kim และคณะฯ [23] ได้ศึกษาผลของการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยของ PVdF-HFP ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 2 วิธี คือการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยโดยกระบวนการปั่นเคลือบ (Spin-coating) พบว่าการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตให้ค่าการนำไอออนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง คือ 4.53×10^{-3} S/cm และร้อยละ 5.21 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าเมื่อเทียบกับการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยโดยกระบวนการปั่นเคลือบที่ให้ค่าการนำไอออนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.37×10^{-3} S/cm และร้อยละ 1.43 ตามลำดับ

Stergiopoulos และคณะ [8] เตรียมสารพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์แบบของแข็งของ PEO โดยใช้ อะซิโตนไทรล์เป็นตัวทำละลาย สารอิเล็กโตรไลต์ คือ Li/I และเติมอนุภาคนาโน TiO_2 เป็นสารตัวเติม พบว่าการเติมอนุภาคนาโนดังกล่าวสามารถลดความเป็นผลึกของ PEO และสนับสนุนการเคลื่อนที่ของ ไอออน เมื่อมานาใช้เป็นสารอิเล็กโตรไลต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง พบว่าเซลล์ดังกล่าว ให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ร้อยละ 4.2

Raghavan และคณะ [24] เตรียมวัสดุเชิงประกอบนาโนพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์แบบเจลของ PVdF-HFP โดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต โดยสารละลาย อิเล็กโตรไลต์คือ 1 โมลาร์ของ LiPF_6 ใน EC / ไดเมทิลคาร์บอนเนต (DMC) (1:1 ร้อยละโดยปริมาตร) และเติมสารตัวเติมอนุภาคนาโนเซรามิกต่างชนิดกัน ได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และแบเรียมไททานเนต (BaTiO_3) พบว่าการเติมอนุภาคนาโน BaTiO_3 ให้ค่าการดูดซับสารอิเล็กโตรไลต์และค่าการนำไอออนมากที่สุดคือร้อยละ 462 และ $7.21 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ ตามลำดับ และยังทำให้ได้แผ่นเส้นใยที่มีสมบัติเชิงกลสูงกว่าเมื่อเทียบกับการเติมสารตัวเติมอนุภาคนาโนเซรามิกชนิดอื่น

Song และคณะ [17] ศึกษาผลของอนุภาค La_2O_3 ที่มีต่อความเป็นผลึกของ PVdF พบว่าการเติมอนุภาค La_2O_3 สามารถยับยั้งการเกิดผลึกและไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ดังกล่าว

Wei และคณะ [18] เตรียมวัสดุเชิงประกอบนาโนพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์แบบเจลของ PVdF-HFP ด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟส โดยสารละลายอิเล็กโตรไลต์คือ 1 โมลาร์ของ LiPF_6 ใน EC/DMC/เอทิลเมทิลคาร์บอนเนต (EMC) (1:1:1 อัตราส่วนโดยปริมาตร) และเติมอนุภาคออกไซด์ของธาตุหายากที่มีขนาดระดับนาโนเมตรต่างชนิดกัน ได้แก่ ซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) แลนทานัมออกไซด์ (La_2O_3) และอิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) พบว่าการเติมอนุภาคนาโนดังกล่าวในปริมาณร้อยละ 10 สามารถลดความเป็นผลึก เพิ่มปริมาณการดูดซับสารอิเล็กโตรไลต์เหลว และปรับปรุงค่าการนำไอออนของพอลิเมอร์ได้ โดยที่อนุภาคนาโน La_2O_3 สามารถลดความเป็นผลึกและเพิ่มปริมาณการดูดซับสารอิเล็กโตรไลต์เหลวของพอลิเมอร์ได้มากที่สุด และให้ค่าการนำไอออน $3.295 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ ขณะที่การใส่อนุภาค CeO_2 จะทำให้วัสดุเชิงประกอบนาโนมีค่าการนำไอออนมากที่สุดคือ $3.584 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ นอกจากนั้นยังพบว่าการเติมอนุภาคนาโน La_2O_3 ปริมาณร้อยละ 10 สามารถปรับปรุงความเสถียรต่อความร้อนได้ถึง 400 องศาเซลเซียส

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ทราบถึงชนิดของพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์คือ PVdF-HFP และทราบว่าการเตรียมพอลิเมอร์เพื่อให้ได้โครงสร้างที่เป็น

รูพรุนมีผลช่วยในการดูดซับสารอิเล็กทรอนิกส์ไหลวน นอกจากนั้นแล้วยังทราบว่าการลดความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ส่งผลทำให้ค่าการนำไอออนเพิ่มขึ้น โดยพบว่าอนุภาค La_2O_3 ที่มีขนาดนาโนสามารถลดความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ชนิดนี้ได้ อย่างไรก็ตามที่ผ่านมาไม่ปรากฏว่ามีผู้ทำการศึกษาวิจัยการขึ้นรูปเส้นใยโดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตร่วมกับการเติมสารเติมแต่งนาโนเพื่อชักนำให้เกิดโครงสร้างเส้นใยระดับนาโนและมีความเป็นผลึกลดลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาพอลิเมอร์อิเล็กทรอนิกส์แบบเจลของ PVdF-HFP ที่มีความเป็นรูพรุนซึ่งขึ้นรูปโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและลดความเป็นผลึกของพอลิเมอร์อิเล็กทรอนิกส์โดยการเติมอนุภาคนาโน La_2O_3

1.3 แนวคิดใหม่ในการทำวิจัย

การใช้เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตร่วมกับการเติมสารเติมแต่งนาโนเพื่อชักนำให้เกิดโครงสร้างเส้นใยนาโนที่มีรูพรุนและความเป็นผลึกลดลงยังไม่มีผู้ศึกษา ซึ่งเชื่อว่าน่าจะทำได้สารอิเล็กทรอนิกส์แบบเจลจากวัสดุเชิงประกอบนาโนที่มีค่าการนำไอออนสูงได้

1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาผลของสภาวะการเตรียมแผ่นเส้นใย PVdF-HFP โดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่มีต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของแผ่นเส้นใยพอลิเมอร์ดังกล่าว
- 2) เพื่อศึกษาผลของปริมาณของอนุภาคนาโน La_2O_3 ที่มีต่อโครงสร้าง ลักษณะพื้นฐานวิทยา ความเป็นผลึก และความเป็นรูพรุน ของวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต
- 3) เพื่อศึกษาผลของปริมาณของอนุภาคนาโน La_2O_3 ที่มีต่อค่าการนำไอออน ปริมาณการดูดซับสารอิเล็กทรอนิกส์ไหลวน และปริมาณการรั่วซึมของสารอิเล็กทรอนิกส์ออกจากแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP
- 4) เพื่อศึกษาผลของการใช้แผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนเป็นสารอิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง โดยพิจารณาในด้านของประสิทธิภาพและความคงทนของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) วัสดุที่ใช้ในการเตรียมแผ่นเส้นใย ได้แก่ PVdF-HFP ตัวทำละลายคือ อะซิโตน/DMAc: 7/3 อัตราส่วนโดยน้ำหนัก และ ใช้ออกไซด์ของ La_2O_3 เป็นสารตัวเติม
- 2) ศึกษาสภาวะในการเตรียมแผ่นเส้นใย PVdF-HFP ดังนี้
 - อัตราการป้อนสารละลาย 2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง
 - ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดกับวัสดุรองรับ 15 เซนติเมตร
 - ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์คือร้อยละ 12, 14, 16, 18 โดยน้ำหนัก
 - ความต่างศักย์ไฟฟ้าคือ 10, 12, 14, 16 กิโลโวลต์
- 3) ศึกษาผลของปริมาณของออกไซด์ของ La_2O_3 โดยปรับเปลี่ยนปริมาณการเติมคือ ร้อยละ 0, 2, 4, 6, 8, 10 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์
- 4) สารละลายอิเล็กโทรไลต์แบบของเหลวที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์แบบเจล คือ สารละลาย 1 โมลาร์ของ Li / 0.1 โมลาร์ของ I ใน EC/ DMC (1:1 สัดส่วนโดยปริมาตร)
- 5) ศึกษาโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ในด้านลักษณะพื้นฐานวิทยา ความเป็นผลึก และความเป็นรูพรุน
- 6) ทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์แบบเจลจากวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ในด้านการนำไอออนจากการวัดความต้านทานเชิงซ้อน (AC impedance analysis) ปริมาณการดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์แบบของเหลว ด้วยการทดสอบอัตราส่วนการดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte uptake) และหาปริมาณการรั่วซึมของอิเล็กโทรไลต์ด้วยการทดสอบการรั่วซึมออกของสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte leakage)
- 7) ประกอบเซลล์และวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสงด้วยเครื่องจำลองแสงเทียม (Solar simulator) ภายใต้เงื่อนไข AM 1.5 ความเข้มแสงเท่ากับ 100 mW/cm^2
- 8) เปรียบเทียบสมบัติดังกล่าวข้างต้นกับสารอิเล็กโทรไลต์แบบเจลที่ไม่ได้ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1) สามารถพัฒนาสารอิเล็กโตรไลต์แบบเจลจากเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่มีความสามารถในการดูดซับสารละลายอิเล็กโตรไลต์เหลวได้มากและมีค่าการนำไอออนสูงขึ้นเมื่อเทียบกับสารอิเล็กโตรไลต์แบบเจลที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อ
- 2) เส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้อาจจะสามารถนำไปใช้เป็นสารอิเล็กโตรไลต์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้

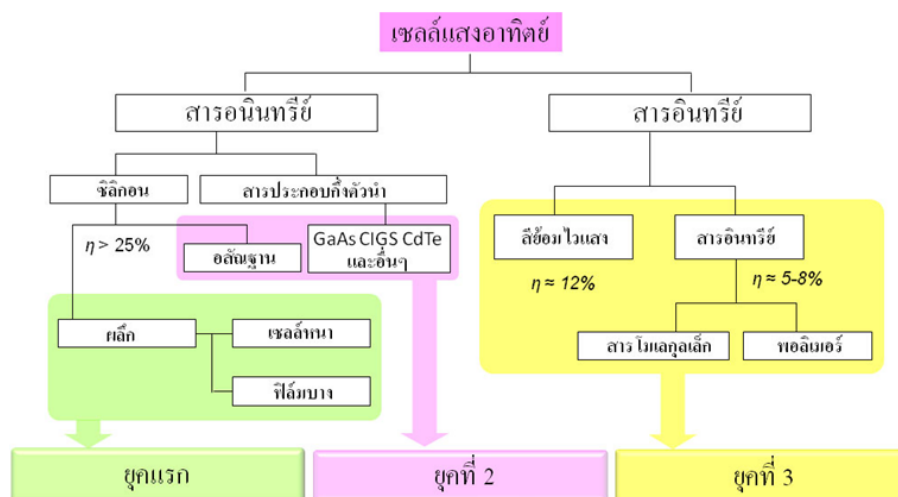
บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell)

เซลล์แสงอาทิตย์ หรือเรียกอีกชื่อว่า เซลล์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic cell, PV) หรือ เซลล์สุริยะ เป็นต้น เป็นอุปกรณ์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน สำหรับการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) ซึ่งเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำมีค่าแตกต่างกัน เมื่อได้รับแสงที่มีพลังงานมากพอ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ โดยการเปลี่ยนพลังงานดังกล่าวสามารถเกิดเป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้ในขั้นตอนเดียว โดยไม่มีส่วนเคลื่อนไหวใดๆ [25, 26]

2.1.1 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

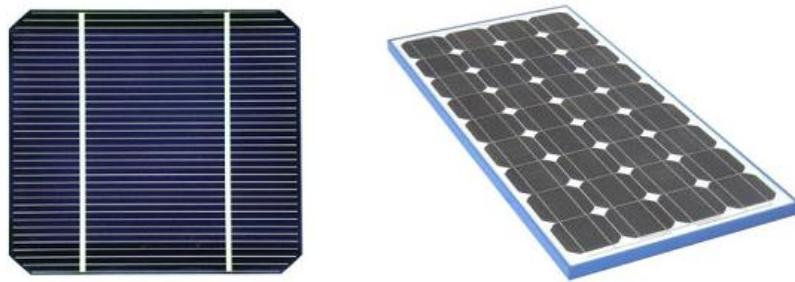
เซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกตามประเภทของสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้ดูดกลืนแสงและส่งผ่านประจุได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ [25] คือเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากสารอินทรีย์และเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากสารอนินทรีย์ นอกจากนี้เซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดสามารถแยกย่อยออกได้อีกเป็น 3 ประเภทตามการพัฒนา ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 1 (First-generation) เซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 2 (Second-generation) และเซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 3 (Third-generation) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [25]



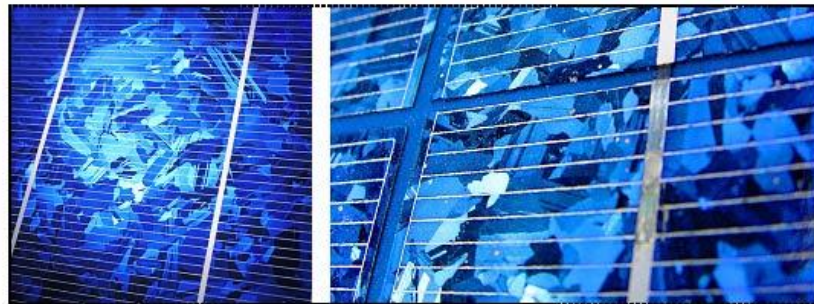
รูปที่ 2.1 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งตามประเภทของสารกึ่งตัวนำและยุคการพัฒนา [25]

2.1.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 1

เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาได้ในยุคแรกคือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว (Single crystalline crystal solar cells หรือ Monocrystalline silicon solar cells) และชนิดหลายผลึก (Polycrystalline silicon solar cells) ตัวเซลล์มีลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก เซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองแบบมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงกว่าร้อยละ 25 จึงเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้ในท้องตลาดมากที่สุด แต่ยังไม่ได้รับความนิยมใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาแพงและต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการผลิตและขึ้นรูปผลึก [25, 27]



รูปที่ 2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว [28]



รูปที่ 2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดหลายผลึก [28]

2.1.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 2

ต่อมาในยุคที่ 2 มีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จากสารกึ่งตัวนำซิลิคอนที่ไม่เป็นผลึก (โครงสร้างอสัณฐาน) ในรูปของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่ใช้กระบวนการผลิตที่ง่ายขึ้น สามารถสร้างบนวัสดุโค้งงอและยืดหยุ่นได้ แต่ประสิทธิภาพยังต่ำ นอกจากนั้นยังสามารถสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium arsenide, GaAs) คอปเปอร์-อินเดียมแกลเลียมเซเลไนด์ (Copper indium gallium selenide, CIGS) และแคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium telluride, CdTe) เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์เหล่านี้สามารถผลิตได้ง่ายกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่

ทำจากซิลิคอนผลึกเดี่ยว แต่ก็ยังคงมีข้อกั้วถึงผลของการใช้สารประกอบกึ่งตัวนำบางตัวที่อาจเป็นอันตราย เช่น สารประกอบแคดเมียม อย่างไรก็ตามในงานวิจัยบางเรื่องมีการกล่าวอ้างว่าการผลิตและใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมกับผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม [25, 26]



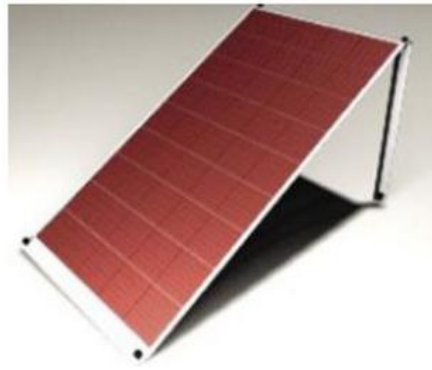
รูปที่ 2.4 เซลล์แสงอาทิตย์จากสารกึ่งตัวนำซิลิคอนที่ไม่เป็นผลึก [29]



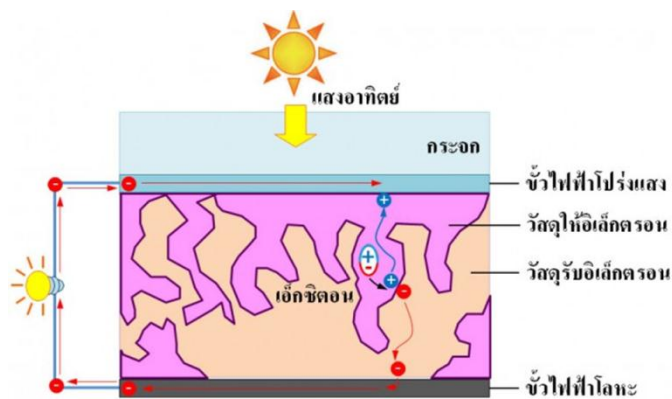
รูปที่ 2.5 เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง [28]

2.1.1.3 เซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 3

ในยุคที่ 3 มีการใช้สารกึ่งตัวนำที่เป็นสารอินทรีย์มาใช้เป็นส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น การใช้สีย้อมไวแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cell, DSSC) และการใช้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ (Organic photovoltaic cell, OPV) เป็นต้น การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มนี้ทำได้ง่ายด้วยกระบวนการทางสารละลาย รวมทั้งราคาในการผลิตที่ถูก แต่ประสิทธิภาพของเซลล์ก็ยังต่ำ คือประมาณร้อยละ 13 ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [30] และร้อยละ 12 ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ [31] จึงต้องมีการวิจัยและพัฒนาต่อไป



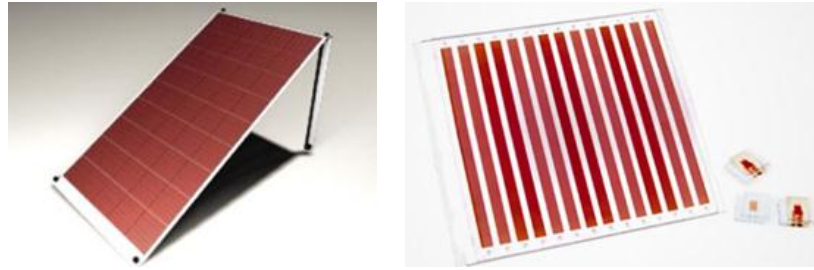
รูปที่ 2.6 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [26]



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ [32]

2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

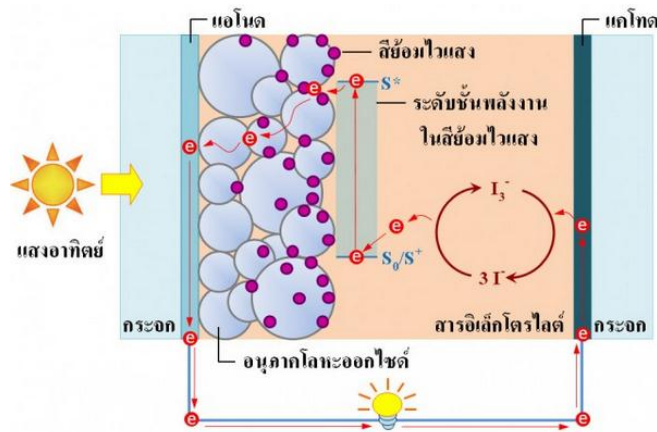
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้รับการคิดค้นโดย ไมเคิล เกรตเซล และ ไบรอัน โอเรแกน (Michael Grätzel and Brian O'Regan) ในปี ค.ศ. 1991 [33] เพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาใช้แทนที่เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน เนื่องจากเซลล์ดังกล่าวสามารถผลิตได้ง่าย ใช้วัสดุราคาไม่แพง และมีต้นทุนต่ำ จึงเหมาะสมอย่างมากในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เชิงการค้า โดยในปัจจุบันเซลล์ดังกล่าวให้ประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 13 [30]



รูปที่ 2.8 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [26, 34]

2.2.1 องค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ ขั้วไฟฟ้า อนุภาคโลหะออกไซด์ สีย้อมไวแสง และสารอิเล็กโทรไลต์ ดังรูปที่ 2.9 โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่และสมบัติที่สำคัญดังนี้



รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบและกลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [34]

2.2.1.1 ขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าจะมี 2 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด ขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงเพื่อให้แสงสามารถส่องผ่านได้และทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปสู่วงจรภายนอก โดยทั่วไปนิยมใช้กระจกที่เคลือบด้วยฟลูออรีนทินออกไซด์ (Fluorine doped tin oxide, FTO) และขั้วไฟฟ้าแคโทดซึ่งจะทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนกลับคืนสู่เซลล์ โดยส่วนมากจะทำจากโลหะแพลทินัมหรือแกรไฟต์ เคลือบอยู่บนกระจก [34]

2.2.1.2 อนุภาคโลหะออกไซด์

ชั้นของอนุภาคโลหะออกไซด์ทำหน้าที่รับและส่งผ่านอิเล็กตรอน รวมทั้งเป็นพื้นผิวสำหรับการยึดเกาะของโมเลกุลสีย้อมไวแสง ดังนั้นอนุภาคโลหะออกไซด์ควรเป็นอนุภาคที่มีความเป็นรูพรุนสูง

และเป็นกลุ่มสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานกว้าง เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ทินออกไซด์ (SnO_2) เป็นต้น และเนื่องจากต้องการให้โมเลกุลของสีย้อมมีการดูดกลืนแสงให้ได้มากที่สุด สารกึ่งตัวนำที่ใช้ต้องไม่ดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็น (Visible light) ทำให้ต้องเลือกใช้สารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้างมากกว่า 3 eV นอกจากนั้นสารกึ่งตัวนำยังต้องมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant, ϵ) ที่สูง มีความเสถียร ราคาถูก และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม [35]

สารกึ่งตัวนำในกลุ่มโลหะออกไซด์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปของโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส (Anatase) ซึ่งมีค่าพลังงานแถบเท่ากับ 3.2 eV เนื่องจากระดับพลังงานของขอบล่างของแถบการนำ (Conduction band edge) มีค่าน้อยกว่าค่าระดับพลังงานที่สถานะถูกกระตุ้นของโมเลกุลของสีย้อมไวแสง ทำให้เกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของสีย้อมไวแสงมายังสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ได้ และมีค่าดัชนีหักเหของแสงสูง ($n = 2.5$) ทำให้มีการสะท้อนของแสงกลับป้อนกลับมาได้ดี เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงของโมเลกุลสีย้อมไวแสง [36]

2.2.1.3 สีย้อมไวแสง

สีย้อมไวแสงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่เป็นที่มาของชื่อเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ โดยสีย้อมไวแสงจะยึดเกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้น แล้วส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังอนุภาคโลหะออกไซด์ ดังนั้นสีย้อมไวแสงจะต้องมีสมบัติที่สำคัญ เช่น มีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงกว้างในช่วงตาเห็นและใกล้อินฟราเรดเพื่อดูดกลืนแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจับแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ มีความเสถียรในสภาวะที่ถูกออกซิไดซ์ และยึดเกาะบนผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี [27]

2.2.1.4 สารอิเล็กโทรไลต์

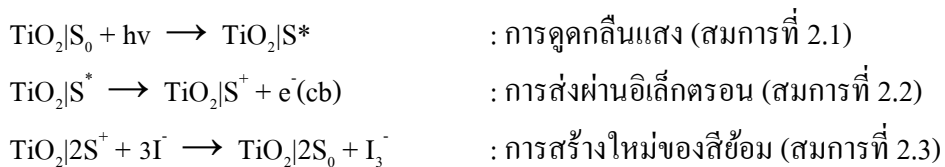
โดยทั่วไปแล้วเป็นชั้นส่งผ่านประจุที่มักอยู่ในรูปของเหลว ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดเพื่อลดเขยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมไวแสงโดยอาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) [34] โดยสมบัติของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมคือ จะต้องไม่มีการดูดกลืนแสงอาทิตย์ในช่วงที่ตามองเห็น มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชันได้ง่าย (เพื่อลดเขยอิเล็กตรอนให้แก่โมเลกุลสีย้อมไวแสงที่อยู่ในรูปตัวออกซิไดซ์ได้อย่างรวดเร็ว) และจะต้องมีความคงตัวสูง ไม่ก่อให้เกิดสารประกอบตัวใหม่ที่ไม่ต้องการขึ้นภายในเซลล์ [26] สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่นิยมใช้คือ สารอิเล็กโทรไลต์ของเหลวที่มีส่วนประกอบของสารคู่ควมรีดออกซ์ไอโอไดด์/ไตรไอโอไดด์ (I/I_3^-) ที่

ละลายในตัวทำละลายอิมทรีย์ เช่น อะซิโตรไนไตรล์ โพรพิโอนไนไตรล์ โพรพิลีนคาร์บอเนต เป็นต้น [27]

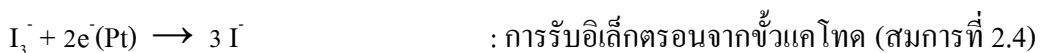
2.2.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

กลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีแสดงในรูปที่ 2.9 กล่าวคือ เมื่อมีแสงมาตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้โมเลกุลของสีย้อมไวแสงที่เกาะบนผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ (เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์) ดูดกลืนแสง ($h\nu$) อิเล็กตรอนของสีย้อมไวแสงที่อยู่ในสถานะพื้น (Ground state, S_0) จะถูกเร้าให้มีระดับพลังงานสูงขึ้นหรืออยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state, S^*) (สมการที่ 2.1) และอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะเคลื่อนที่เข้าไปสู่แถบการนำไฟฟ้า (Conduction band, cb) ของอนุภาคโลหะออกไซด์ (สมการที่ 2.2) จากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านจากสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ไปยังขั้วแอโนด (FTO) แล้วไหลผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอกเซลล์และจะเคลื่อนที่มายังขั้วแคโทดซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โลหะแพลทินัม (Pt) เคลือบอยู่ จากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านสารอิเล็กโทรไลต์โดยอาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์ สารอิเล็กโทรไลต์ (เช่น ไอโอไดด์/ไตรไอไดด์) จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (อิเล็กตรอนกับสีย้อมไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอน (S^+)) ที่ขั้วแอโนด ทำให้โมเลกุลสีย้อมกลับสู่สถานะพื้น (S_0) (สมการที่ 2.3) ในขณะเดียวกันสารอิเล็กโทรไลต์จะรับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทด (สมการที่ 2.4) โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดเป็นวงจรเข้าไปเรื่อยๆ トラบใดที่ยังมีแสงมาตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ แต่อย่างไรก็ตามความเป็นจริงในกระบวนการก็อาจมีปฏิกิริยาข้างเคียงที่ให้เกิดผลเสีย เช่น การรวมกันใหม่ของอิเล็กตรอน (ที่กำลังเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์) กับสีย้อมไวแสง (ที่สูญเสียอิเล็กตรอนไป) ทำให้สีย้อมไวแสงกลับสู่สถานะพื้นโดยไม่มีอิเล็กตรอนออกไปนอกเซลล์ จึงไม่เกิดกระแสไฟฟ้า (สมการที่ 2.5) และการรวมกันของอิเล็กตรอน (ที่กำลังเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์) กับสารอิเล็กโทรไลต์ที่ทำให้สูญเสียอิเล็กตรอนซึ่งไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ (สมการที่ 2.6) [27, 34, 37]

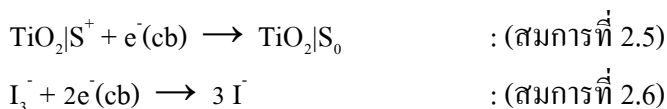
ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด



ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาที่ให้เกิดผลเสีย

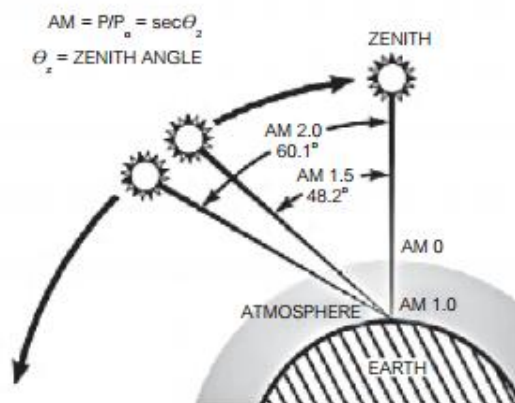


2.2.3 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยทั่วไปการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะอ้างอิงจากค่ามวลอากาศ (Air Mass, AM) โดยค่าของมวลอากาศ แสดงในสมการที่ 2.7

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z)} \quad \text{สมการที่ 2.7}$$

เมื่อ θ_z คือ มุมซีนิก (Zenith) ซึ่งเป็นมุมที่กระทำกับเส้นตั้งฉากจากดวงอาทิตย์มายังโลก เช่น เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ตรงศีรษะพอดี ค่ามุมซีนิก จะเท่ากับ 0° ดังนั้นมวลอากาศจะมีค่าเท่ากับ 1.0 และเนื่องจากการสร้างกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นกับความเข้มของแสงที่นำมาทดสอบ ดังนั้นสมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกัน (American Society for Testing and Materials, ASTM) จึงได้กำหนดค่ามวลอากาศขึ้นเพื่อใช้เป็นค่ามาตรฐานสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ กล่าวคือ มวลอากาศ 1.5 ที่มุมซีนิก เท่ากับ 48.2° ซึ่งเทียบได้กับค่าความเข้มแสงหรือกำลังไฟฟ้าที่ตกกระทบบนพื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 100 mW/cm^2 [27, 38]



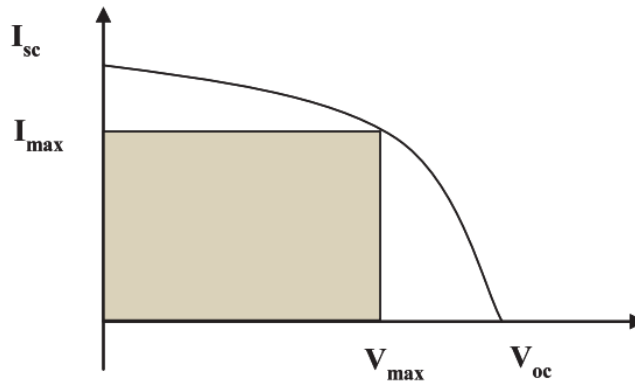
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่แสงอาทิตย์กระทำกับเส้นตั้งฉากที่ผิวโลกกับค่ามวลอากาศ [38]

ค่าที่ใช้บอกความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เรียกว่า ค่าร้อยละประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) คำนวณได้จากสมการที่ 2.9 [38]

$$\eta(\%) = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 2.8}$$

$$\eta(\%) = \frac{I_{max} V_{max}}{P_{in}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 2.9}$$

เมื่อ	$P_{\max}$	คือ	ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายให้กับวงจรภายนอก (วัตต์)
	P_{in}	คือ	ค่ากำลังไฟฟ้าของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ (วัตต์)
	$I_{\max}$	คือ	ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด (แอมแปร์)
	$V_{\max}$	คือ	ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด (โวลต์)



รูปที่ 2.11 กราฟลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ (I-V curve) ของเซลล์แสงอาทิตย์ [38]

โดยอุดมคติแล้วเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่มีการสูญเสียพลังงาน และค่าประสิทธิภาพของเซลล์เท่ากับ ร้อยละ 100 ซึ่งหมายความว่ากำลังไฟฟ้าที่เซลล์ผลิตได้จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้เซลล์ หรือเซลล์สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงที่ตกกระทบบนเซลล์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้หมดโดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน [38] แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติพบว่าการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องและสำคัญอีกหนึ่งค่าคือ ฟิลด์แฟกเตอร์ (Field Factor, FF) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ว่ามีความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าได้คงที่มากน้อยเพียงใดเมื่อความต้านทานของโหลดภายนอกเปลี่ยนไป ซึ่งค่าดังกล่าวหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์หรือคำนวณจากสมการที่ 2.10

$$F.F. = \frac{I_{\max} V_{\max}}{I_{sc} V_{oc}} \quad \text{สมการที่ 2.10}$$

เมื่อ $I_{\max}$ และ $V_{\max}$ คือพื้นที่ใต้กราฟที่มากที่สุดที่พลอตระหว่าง I_{sc} กับ V_{oc}

I_{sc} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าวงจรปิด (แอมแปร์) เป็นค่าของกระแสที่เกิดขึ้นเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์

V_{oc} คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (โวลต์) ซึ่งได้มาจากความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi level) ของสารกึ่งตัวนำกับระดับพลังงานของปฏิกิริยารีดอกซ์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ดังนั้น ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานในการบอกความสามารถของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.11

$$\eta = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times F.F}{P_{in}} \times 100 \% \quad \text{สมการที่ 2.11}$$

2.3 เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า

เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้าหรืออิมพีแดนซ์ของไฟฟ้ากระแสสลับ (AC impedance) เป็นเทคนิคที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าและหน้าสัมผัสที่มีความซับซ้อน (Complex interface) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการให้สัญญาณกระตุ้นในรูปฟังก์ชันไซน์ที่มีค่าแอมพลิจูดต่ำไปยังระบบและวัดสัญญาณตอบสนองในรูปของกระแสไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า หรือสัญญาณอื่นๆ [39]

2.3.1 หลักการทำงานของเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า

หลักการทำงานของเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (รูปที่ 2.12) คือการป้อนศักย์ไฟฟ้ารูปไซน์ที่มีแอมพลิจูด $\Delta E \sin(\omega t)$ เพิ่มขึ้นจากศักย์ไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสตรง E_0 ให้แก่ระบบ ส่งผลให้เกิดการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าเป็นคลื่นรูปไซน์ที่มีขนาด $\Delta I \sin(\omega t + \phi)$ ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าส่วนที่เกิดขึ้นเพิ่มจากไฟฟ้ากระแสตรง I_0 โดยการตอบสนองของค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีการเลื่อนมุมเฟส (Phase shift) เท่ากับ ϕ เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่ให้ ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสามารถคำนวณได้จากกฎของโอห์ม (Ohm's Law) ดังสมการที่ 2.12 [39, 40]

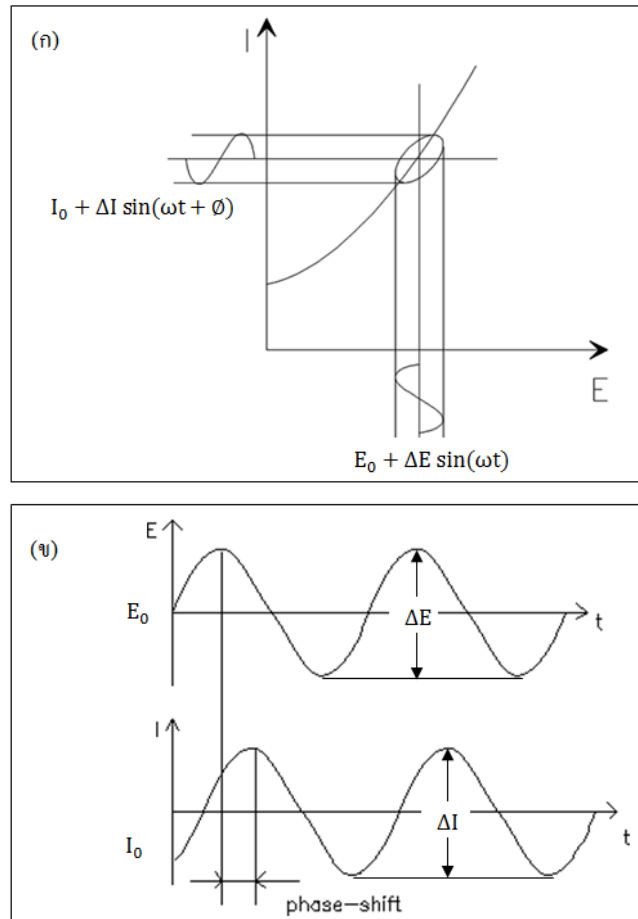
$$Z(\omega) = \frac{\Delta E(\omega)}{\Delta I(\omega)} \quad \text{สมการที่ 2.12}$$

เมื่อ $Z(\omega)$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งเป็นปริมาณเชิงซ้อน (โอห์ม)

$\Delta E(\omega)$ คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนต่างจากไฟฟ้ากระแสตรง (โวลต์)

$\Delta I(\omega)$ คือ กระแสไฟฟ้าส่วนต่างจากไฟฟ้ากระแสตรง (แอมแปร์)

ตัวแปรทั้ง 3 จะขึ้นอยู่กับความถี่เชิงมุม (ω) ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่สามัญ (Ordinary frequency, f) คือ ($\omega = 2\pi f$) โดยทั่วไปในระบบเคมีไฟฟ้าจะใช้ช่วงความถี่ประมาณ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ไปจนถึง 0.1 กิโลเฮิร์ตซ์



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (ก) และสัญญาณกระแสไฟฟ้าตอบสนอง (ข) [40]

ค่าอิมพีแดนซ์สามารถแสดงได้ในเทอมของพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate) ซึ่งจะแสดงผลรวมของส่วนจริง (Z_{Re} หรือ Z') และส่วนจินตภาพ (Z_{Im} หรือ Z'') ของอิมพีแดนซ์ดังกล่าวที่

$$Z(\omega) = Z_{Re} + jZ_{Im}$$

หรือ

$$Z(\omega) = Z' + jZ''$$

สมการที่ 2.13

เมื่อ $Z(\omega)$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งเป็นปริมาณเชิงซ้อน (โอห์ม)

Z_{Re} และ Z' คือ ค่าอิมพีแดนซ์ส่วนจริง (โวลต์)

Z_{Im} และ Z'' คือ ค่าอิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพ (โวลต์)

j คือ $\sqrt{-1}$

นอกจากนี้ค่าอิมพีแดนซ์ยังสามารถแสดงได้ในรูปของพิกัดเชิงขั้ว (Polar coordinate) ดังสมการที่ 2.14 ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์สามารถคำนวณได้จากขนาดของอิมพีแดนซ์ดังแสดงในสมการที่ 2.16 และ 2.17 และการเลื่อนมุมเฟสสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.18 [39, 41]

$$Z(\omega) = |Z(\omega)|e^{j\phi} \quad \text{สมการที่ 2.14}$$

$$|Z(\omega)| = \sqrt{Z_{Re}^2 + Z_{Im}^2} \quad \text{สมการที่ 2.15}$$

$$Z_{Re} = |Z(\omega)|\cos\phi \quad \text{สมการที่ 2.16}$$

$$Z_{Im} = |Z(\omega)|\sin\phi \quad \text{สมการที่ 2.17}$$

$$\phi = \frac{Z_{Im}}{Z_{Re}} \quad \text{สมการที่ 2.18}$$

เมื่อ $Z(\omega)$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งเป็นปริมาณเชิงซ้อน (โอห์ม)

ω คือ ความถี่เชิงมุม (เฮิรตซ์)

ϕ คือ มุมเฟส (องศา)

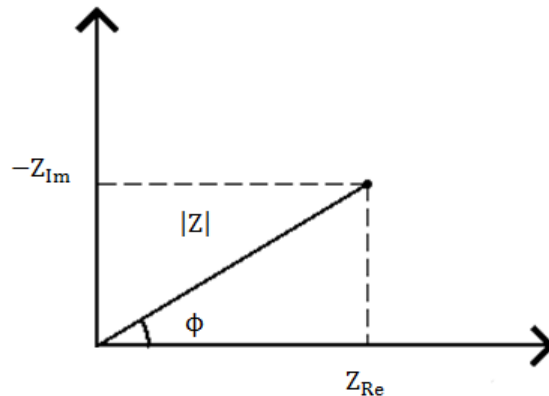
$|Z(\omega)|$ คือ ขนาดของอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)

Z_{Re} คือ ค่าอิมพีแดนซ์ส่วนจริง (โวลต์)

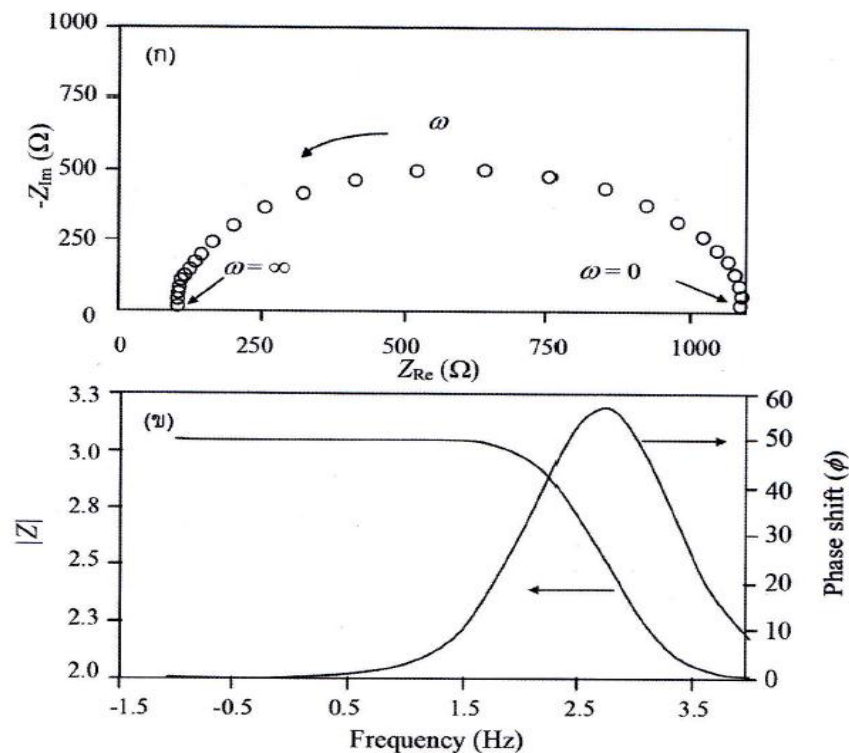
Z_{Im} คือ ค่าอิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพ (โวลต์)

อิมพีแดนซ์เป็นปริมาณเวกเตอร์จึงสามารถแสดงค่าได้ทั้งในระบบพิกัดฉากและระบบพิกัดเชิงขั้วดังแสดงในรูปที่ 2.13 ผลการทดลองที่ได้จากเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้าจะแสดงใน 2 รูปแบบ คือ รูปแบบของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริงของอิมพีแดนซ์ในแกน x กับส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ในแกน y เรียกว่า กราฟ Nyquist (รูปที่ 2.14 (ก)) ซึ่งกราฟดังกล่าวจะแสดงภาพรวมของข้อมูลและยังทำให้สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองในเชิงคุณภาพได้ โดยที่แกนของส่วนจริงจะมีค่าเท่ากับแกนของส่วนจินตภาพเพื่อไม่เป็นการบิดเบือนรูปร่างของเส้นกราฟ

เนื่องจากรูปร่างของเส้นกราฟจะใช้ในการอธิบายเชิงคุณภาพของข้อมูล แต่อย่างไรก็ตาม กราฟดังกล่าวไม่ได้แสดงค่าความถี่ของข้อมูลซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเขียนค่าความถี่ลงในกราฟ Nyquist นอกจากนี้ค่าอิมพีแดนซ์ยังสามารถแสดงในรูปของกราฟ Bode ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่บนแกน x กับค่าการเลื่อนเฟสหรือขนาดของอิมพีแดนซ์ในแกน y ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ข) [39, 42]



รูปที่ 2.13 อิมพีแดนซ์ในระบบพิกัดฉากและระบบพิกัดเชิงขั้ว [43]



รูปที่ 2.14 กราฟ Nyquist (ก) และกราฟ Bode ที่ความถี่ต่างๆ (ข) [39]

2.3.2 ส่วนย่อยของอิมพีแดนซ์และแบบจำลองของวงจรสมมูล

เมื่อทำการทดลองเพื่อวัดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบและได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ จะต้องมีการนำข้อมูลที่ได้อาวเคราะห์โดยการนำไปสร้างเป็นแบบจำลองวงจรสมมูล ซึ่งในแบบจำลองจะประกอบไปด้วยส่วนย่อยของอิมพีแดนซ์หลายชนิด เช่น ความต้านทาน ตัวเก็บประจุ และขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นต้น

2.3.2.1 ความต้านทาน (Resistance, R)

อิมพีแดนซ์ของความต้านทานจะประกอบด้วยส่วนจริงของอิมพีแดนซ์เท่านั้น ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์นี้จะไม่ขึ้นอยู่กับค่าความถี่และไม่มีส่วนจินตภาพ (สมการที่ 2.19) การเลื่อนมุมเฟสระหว่างกระแสไฟฟ้าตอบสนองและศักย์ไฟฟ้ากระตุ้นจะมีค่าเป็นศูนย์ ($\phi = 0$) [39, 41]

$$Z = R$$

สมการที่ 2.19

เมื่อ Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)

R คือ ความต้านทาน (โอห์ม)

ความต้านทานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้ามี 2 ชนิด คือ ความต้านทานโอห์มมิก (R_Ω) และความต้านทานการถ่ายโอนประจุ (R_{ct})

1) ความต้านทานโอห์มมิกเกิดจากความล่าช้าของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านวัสดุหรือองค์ประกอบต่างๆ ในระบบที่ไม่ซับซ้อนค่าความต้านทานโอห์มมิกของอิเล็กโทรไลต์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.20 สำหรับระบบที่มีความซับซ้อนและมีการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ นั้น การคำนวณหาความต้านทานจากสมการที่ 2.20 อาจไม่ถูกต้อง ดังนั้นจึงต้องใช้เทคนิคอิมพีแดนซ์ในการวัดหาความต้านทานดังกล่าว โดยสามารถอ่านค่าความต้านทานได้จากกราฟ Nyquist ที่จุดตัดบนแกน x [39]

$$R_\Omega = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{KA}$$

สมการที่ 2.20

เมื่อ R_Ω คือ ความต้านทานโอห์มมิก (โอห์ม)

ρ คือ สภาพต้านทานของอิเล็กโทรไลต์ (โอห์ม เมตร)

l คือ ระยะทางหรือความหนาของอิเล็กโทรไลต์ (เมตร)

- A คือ พื้นที่ (ตารางเมตร)
K คือ สภาพนำไฟฟ้า (ซีเมนส์ต่อเมตร)

2) ความต้านทานการถ่ายโอนประจุเกิดจากความช้าในการเกิดปฏิกิริยา เช่น สำหรับกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงความช้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเชื้อเพลิงและปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน [39]

2.3.2.2 ตัวเก็บประจุ (Capacitance, C)

ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุจะมีเฉพาะส่วนจินตภาพซึ่งจะขึ้นกับค่าความถี่ คือเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุจะมีค่าลดลง ดังสมการที่ 2.21 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีการเลื่อนมุมเฟสเท่ากับ -90 องศา เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้า ระบบที่มีส่วนย่อยของอิมพีแดนซ์เป็นตัวเก็บประจุแสดงว่ามีการสะสมของพลังงานไฟฟ้าสถิต (Electrostatic energy) หรือประจุไฟฟ้าในระบบ [39, 41]

$$Z = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C} \quad \text{สมการที่ 2.21}$$

- เมื่อ Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
 ω คือ ความถี่เชิงมุม (เฮิรตซ์ หรือ เรเดียนต่อวินาที)
C คือ ตัวเก็บประจุ (ฟารัด หรือ โอห์ม⁻¹ วินาที)
j คือ $\sqrt{-1}$

2.3.2.3 ค่าเฟสเอลิเมนต์แบบคงตัว (Constant phase element, CPE)

การสร้างแบบจำลองของระบบเคมีไฟฟ้าด้วยตัวเก็บประจุมักจะมีค่าไม่ค่อยถูกต้อง เนื่องจากระบบไม่ได้เป็นระบบอุดมคติและขั้วไฟฟ้าไม่ได้มีความเรียบสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น หรือขั้วไฟฟ้าไม่ได้มีสมบัติที่เหมือนกันทั้งแผ่น ดังนั้นการสะสมประจุที่ผิวหน้าสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์จะถูกแทนด้วยตัวเฟสเอลิเมนต์แบบคงตัว ซึ่งอิมพีแดนซ์ของเฟสเอลิเมนต์แบบคงตัวจะมีเฉพาะส่วนจินตภาพและขึ้นกับค่าความถี่ ดังสมการที่ 2.22 และมีการเลื่อนมุมเฟสเท่ากับ -90 องศา [39, 41]

$$Z = \frac{1}{(j\omega C)^\alpha}$$

สมการที่ 2.22

- เมื่อ Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
 ω คือ ความถี่เชิงมุม (เฮิรตซ์ หรือ เรเดียนต่อวินาที)
 C คือ ตัวเก็บประจุ (ฟารัด หรือ โอห์ม⁻¹ วินาที)
 j คือ $\sqrt{-1}$
 α คือ ค่าคงที่ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0-1 โดยถ้าค่า α มีค่าเข้าใกล้ 1 สเปกตรัมของเฟสเอลิเมนต์แบบคงตัวจะมีความชันมากขึ้น และที่ค่า α เท่ากับ 1 เฟสเอลิเมนต์แบบคงตัวจะทำหน้าที่เสมือนตัวเก็บประจุอุดมคติ

2.3.2.4 วาร์เบิร์กอิมพีแดนซ์ (Warburg impedance, W)

วาร์เบิร์กอิมพีแดนซ์จะใช้เมื่อระบบมีการแพร่ของไอออนที่รอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์ โดยมีข้อสมมุติว่าชั้นการแพร่ของไอออนมีความหนานันต์ ค่าวาร์เบิร์กอิมพีแดนซ์จะขึ้นกับค่าความถี่ของสัญญาณกระตุ้น โดยที่เมื่อความถี่สูงค่าวาร์เบิร์กอิมพีแดนซ์จะต่ำเนื่องจากการแพร่ของไอออนจะเกิดขึ้นในระยะทางสั้นๆ แต่ที่ความถี่ต่ำค่าวาร์เบิร์กอิมพีแดนซ์จะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากระยะทางในการแพร่ของไอออนยาวขึ้น ค่าวาร์เบิร์กอิมพีแดนซ์จะมีเฉพาะส่วนจินตภาพดังแสดงในสมการที่ 2.23 [39, 41]

$$Z = \frac{\sigma}{\sqrt{j\omega}}$$

สมการที่ 2.23

- เมื่อ Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
 σ คือ พารามิเตอร์วาร์เบิร์ก
 ω คือ ความถี่เชิงมุม (เฮิรตซ์ หรือ เรเดียนต่อวินาที)
 j คือ $\sqrt{-1}$

2.3.2.5 วาร์เบิร์กอิมพีแดนซ์แบบมีขอบเขต (Bounded warburg impedance, BW)

วาร์เบิร์กอิมพีแดนซ์จะใช้เมื่อระบบมีการแพร่ของไอออนผ่านชั้นของการแพร่ที่มีระยะทางจำกัด โดยจำแนกได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ ส่วนย่อยของวาร์เบิร์กอิมพีแดนซ์แบบมีขอบเขตชนิด O (O-element impedance) ชนิด T (T- element impedance) และชนิด G (G- element impedance) [39]

1) ส่วนย่อยของวาร์เบิร์กอิมพีแดนซ์แบบมีขอบเขตชนิด O จะใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองที่ระบบมีค่าความเข้มข้นของสารละลายที่อยู่บนระยะทางการแพร่เท่ากันและความเข้มข้นของสารจะลดลงในช่วงที่แพร่ผ่านชั้นการแพร่ อิมพีแดนซ์ของส่วนย่อยของวาร์เบิร์กแบบมีขอบเขตชนิด O แสดงในสมการที่ 2.24 [39]

$$Z = \frac{1}{Y_0 \sqrt{j\omega}} \tanh(\tau \sqrt{j\omega}) \quad \text{สมการที่ 2.24}$$

$$\tau = \frac{\delta^2}{D} \quad \text{สมการที่ 2.25}$$

- เมื่อ Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
 Y_0 คือ ขนาดของความนำเชิงซ้อน (Admittance) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $|Z|^{-1}$ (ซีเมนส์)
 ω คือ ความถี่เชิงมุม (เฮิร์ตซ์ หรือ เรเดียนต่อวินาที)
 j คือ $\sqrt{-1}$
 τ คือ ค่าคงตัวเวลา (Time constance) (วินาที)
 δ คือ ความหนาของฟิล์ม (เมตร)
 D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารในระบบ (เมตร²ต่อวินาที)

2) ส่วนย่อยของวาร์เบิร์กอิมพีแดนซ์แบบมีขอบเขตชนิด T จะใช้ในการจำลองระบบที่มีการแพร่ของสารผ่านฟิล์มบาง โดยปริมาณของสารคงที่ เช่น ตัวเก็บประจุยิ่งยวด หรือแบตเตอรี่ อิมพีแดนซ์ของส่วนย่อยของวาร์เบิร์กแบบมีขอบเขตชนิด T แสดงในสมการที่ 2.26 [39]

$$Z = \frac{1}{Y_0 \sqrt{j\omega}} \coth(\tau \sqrt{j\omega}) \quad \text{สมการที่ 2.26}$$

- เมื่อ Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
 Y_0 คือ ขนาดของความนำเชิงซ้อน (Admittance) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $|Z|^{-1}$ (ซีเมนส์)
 ω คือ ความถี่เชิงมุม (เฮิร์ตซ์ หรือ เรเดียนต่อวินาที)
 j คือ $\sqrt{-1}$
 τ คือ ค่าคงตัวเวลา (Time constance) (วินาที)

3) ส่วนย่อยของวาร์เบิร์กิมพีแดนซ์แบบมีขอบเขตชนิด G จะใช้ในการจำลองระบบที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น อิมพีแดนซ์ของส่วนย่อยของวาร์เบิร์กแบบมีขอบเขตชนิด G แสดงในสมการที่ 2.27

$$Z = \frac{1}{Y_0 \sqrt{k + j\omega}} \quad \text{สมการที่ 2.27}$$

เมื่อ Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)

Y_0 คือ ขนาดของconductance (Admittance) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $|Z|^{-1}$ (ซีเมนส์)

k คือ ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา

ω คือ ความถี่เชิงมุม (เฮิรตซ์ หรือ เรเดียนต่อวินาที)

j คือ $\sqrt{-1}$

2.3.2.6 ความเหนี่ยวนำ (Inductance, L)

ความเหนี่ยวนำจะมีเฉพาะส่วนจินตภาพซึ่งมีค่าเป็นบวกและขึ้นอยู่กับความถี่ การเลื่อนมุมเฟสของความเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับ 90 องศา ค่าอิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำแสดงในสมการที่ 2.28 ความเหนี่ยวนำจะถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองของระบบที่มีการดูดซึมสารตั้งต้นบนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า หรือระบบที่มีความคลาดเคลื่อนในการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์เนื่องจากการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ หรือเนื่องจากการตอบสนองที่ช้าของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง [39]

$$Z = j\omega L \quad \text{สมการที่ 2.28}$$

เมื่อ Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)

ω คือ ความถี่เชิงมุม (เฮิรตซ์ หรือ เรเดียนต่อวินาที)

L คือ ความเหนี่ยวนำ (เฮนรี)

j คือ $\sqrt{-1}$

2.3.3 แบบจำลองอิมพีแดนซ์พื้นฐาน

2.3.3.1 แบบจำลองสำหรับขั้วไฟฟ้าโพลาไรซ์อุดมคติ

แบบจำลองชนิดนี้จะใช้สำหรับระบบที่มีขั้วไฟฟ้าโพลาไรซ์อุดมคติที่ไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นบนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าและสารละลายมีความเข้มข้นสูง โดยแบบจำลองจะประกอบด้วยความต้านทาน (R_Ω) ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ (C) ค่าอิมพีแดนซ์ของแบบจำลองนี้แสดงในสมการที่ 2.29 โดยค่า R_Ω ของระบบสามารถอ่านค่าได้จากกราฟ Nyquist (รูปที่ 2.15 (ก)) ที่บริเวณจุดตัดของสเปกตรัม

อิมพีแดนซ์บนแกน x ที่ความถี่สูง ส่วนตัวเก็บประจุคำนวณได้จากกราฟ Bode (รูปที่ 2.15 (ข)) โดยแบบจำลองนี้จะสามารถเชื่อถือได้ในช่วงความถี่ 1-5 เมกะเฮิร์ตซ์ [39, 41]

$$Z = R_{\Omega} - \frac{1}{j\omega C} = R_{\Omega} + \frac{j}{\omega C} \quad \text{สมการที่ 2.29}$$

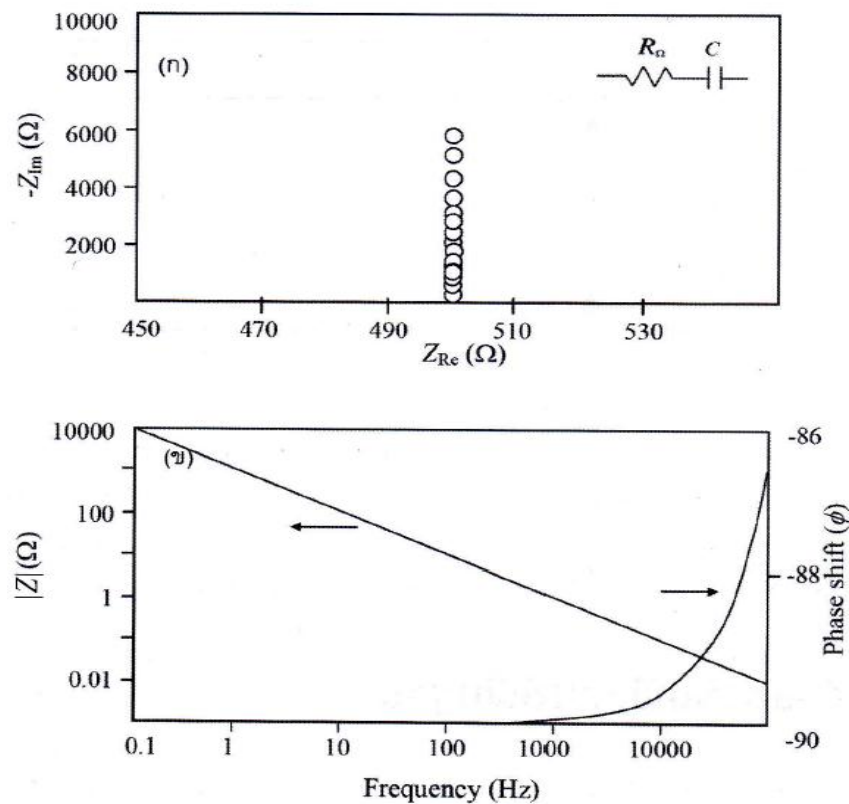
เมื่อ Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)

R_{Ω} คือ ความต้านทาน (โอห์ม)

ω คือ ความถี่เชิงมุม (เฮิร์ตซ์ หรือ เรเดียนต่อวินาที)

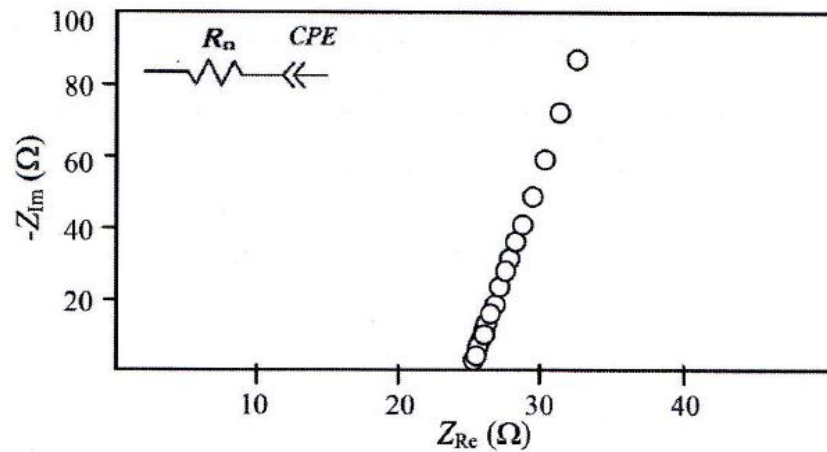
C คือ ตัวเก็บประจุ (ฟารัด หรือ โอห์ม⁻¹ วินาที)

j คือ $\sqrt{-1}$



รูปที่ 2.15 กราฟ Nyquist (ก) และกราฟ Bode (ข) ของวงจรสมมูลของขั้วไฟฟ้าโพลาริซัดอุมคิตี [39]

หากขั้วไฟฟ้ามีพื้นผิวที่ขรุขระไม่เรียบหรือไม่สม่ำเสมอ ค่าของตัวเก็บประจุจะถูกแทนด้วยเฟสเอลิเมนต์แบบคงตัวดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยค่าอิมพีแดนซ์แสดงในสมการที่ 2.30



รูปที่ 2.16 กราฟ Nyquist ของวงจรสมมูลของขั้วไฟฟ้าโพลาริซัดคอมคิตที่มีพื้นผิวไม่เรียบ [39]

$$Z = R_{\Omega} - \frac{1}{(j\omega C)^{\alpha}}$$

สมการที่ 2.30

- เมื่อ Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
 R_{Ω} คือ ความต้านทาน (โอห์ม)
 ω คือ ความถี่เชิงมุม (เฮิรตซ์ หรือ เรเดียนต่อวินาที)
 C คือ ตัวเก็บประจุ (ฟารัด หรือ โอห์ม⁻¹ วินาที)
 j คือ $\sqrt{-1}$
 α คือ ค่าคงที่ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0-1

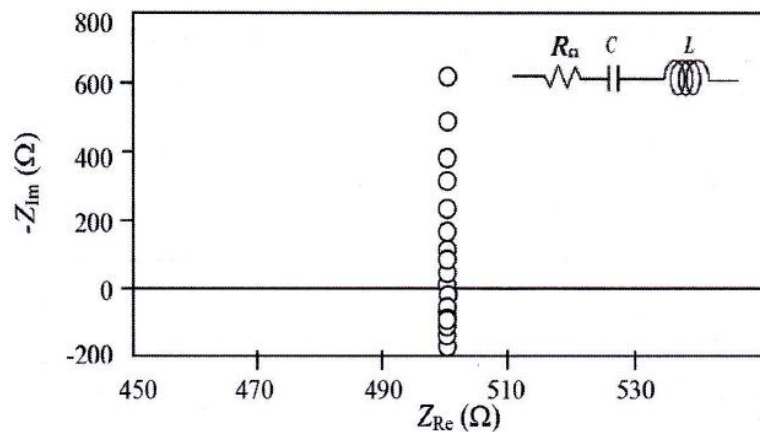
2.3.3.2 แบบจำลองของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

แบบจำลองของตัวเก็บประจุยิ่งยวดประกอบด้วย การต่อกันแบบอนุกรมของส่วนย่อย 3 ชนิด ได้แก่ ตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ สมการอิมพีแดนซ์จะคำนวณได้จากสมการที่ 2.31 เมื่อพิจารณากราฟ Nyquist (รูปที่ 2.17) จะเห็นว่าอิมพีแดนซ์ของระบบจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงในแนวตั้ง ค่าในแกน y มีทั้งค่าลบและค่าบวกที่แสดงถึงการมีส่วนย่อยของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ โดยจุดตัดของแกน x คือค่า R_{Ω} หากในกรณีที่ขั้วไฟฟ้าไม่เรียบสม่ำเสมอ ตัวเก็บประจุจะถูกแทนที่ด้วยเฟสอิลิเมนต์แบบคงตัว [39]

$$Z = R_{\Omega} - \frac{1}{j\omega C} + j\omega L$$

สมการที่ 2.31

- เมื่อ Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
 R_{Ω} คือ ความต้านทาน (โอห์ม)
 ω คือ ความถี่เชิงมุม (เฮิรตซ์ หรือ เรเดียนต่อวินาที)
 C คือ ตัวเก็บประจุ (ฟารัด หรือ โอห์ม⁻¹ วินาที)
 L คือ ความเหนี่ยวนำ (เฮนรี)
 j คือ $\sqrt{-1}$



รูปที่ 2.17 กราฟ Nyquist ของวงจรสมมูลของตัวเก็บประจุยิ่งยวด [39]

2.3.3.3 แบบจำลองสำหรับวงจรสมมูลแรนเดล

เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของระบบที่มีปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดขึ้นบนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีสมมุติฐานว่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาเป็นกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการสะสมตัวของประจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อต่างๆ โดยจะเรียกอิมพีแดนซ์ของกระแสนี้ว่าอิมพีแดนซ์ของฟาราเดย์ (Faradaic impedance, Z_F) วงจรสมมูลแรนเดลมีหลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น วงจรสมมูลแรนเดลที่ไม่มีการสูญเสียเนื่องจากการแพร่ของสารโดยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดขึ้นแบบขั้นตอนเดียว ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจะคำนวณได้จากสมการที่ 2.32 กราฟ Nyquist ของวงจรสมมูลแรนเดลไม่มีการสูญเสียเนื่องจากการแพร่ของสารโดยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดขึ้นแบบขั้นตอนเดียวแสดงในรูปที่ 2.18 พบว่าสเปกตรัมของอิมพีแดนซ์มีลักษณะเป็นครึ่งวงกลม โดยสามารถหาค่า R_{Ω} ได้จากจุดตัดบนแกน x ที่ความถี่สูง ส่วนจุดตัดบนแกน x ที่ความถี่ต่ำจะแสดงค่าของผลรวมระหว่าง R_{Ω} กับ R_{ct}

$$Z = R_{\Omega} + \frac{R_{ct}}{1 + \omega^2 \tau^2} - \frac{j\omega \tau R_{ct}}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

สมการที่ 2.32

เมื่อ Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)

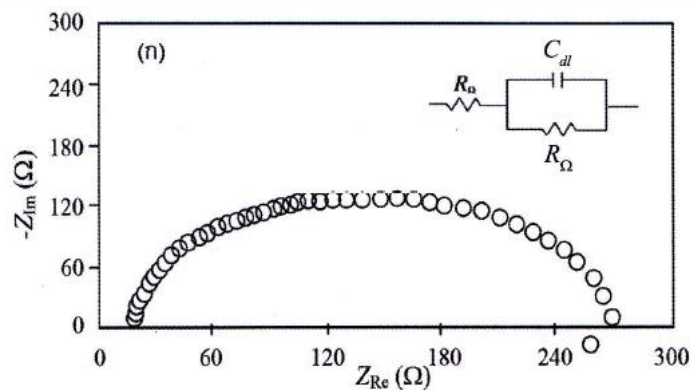
R_{Ω} คือ ความต้านทาน (โอห์ม)

R_{ct} คือ ความต้านทานการถ่ายโอนประจุ ซึ่งถูกใช้แทนที่ค่าอิมพีแดนซ์ของฟาราเดย์ (โอห์ม)

τ คือ ค่าคงตัวเวลา (Time constance) (วินาที)

ω คือ ความถี่เชิงมุม (เฮิรตซ์ หรือ เรเดียนต่อวินาที)

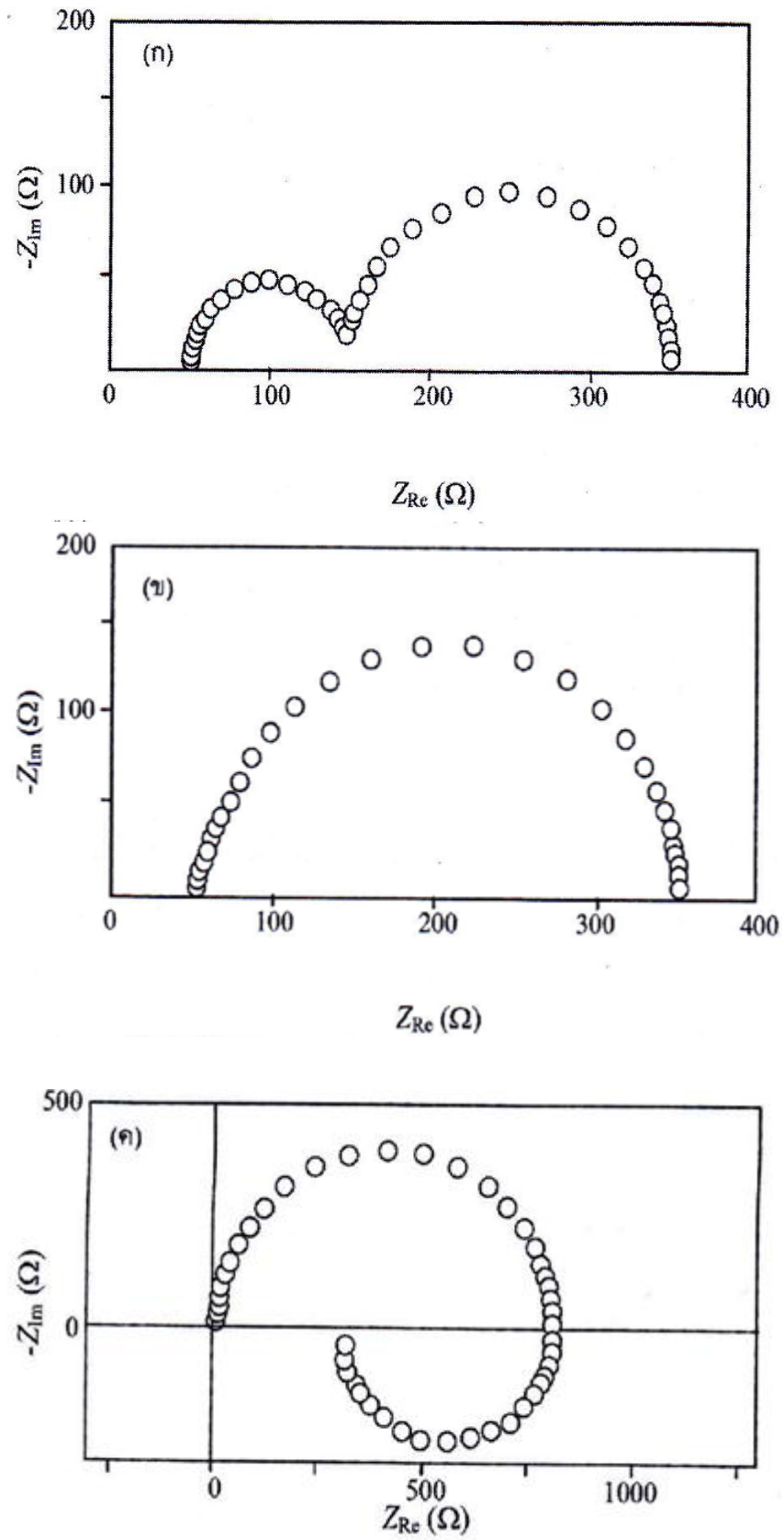
j คือ $\sqrt{-1}$



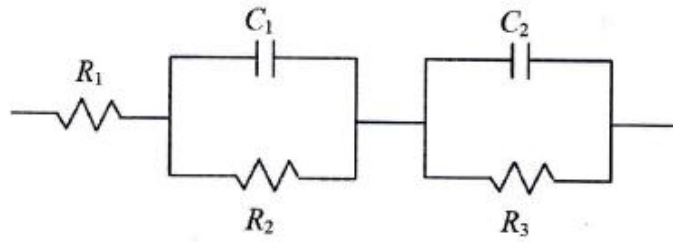
รูปที่ 2.18 กราฟ Nyquist ของแบบจำลองสำหรับวงจรสมมูลแรนเคิลที่ไม่มีการสูญเสียเนื่องจากการแพร่ของสาร [39]

2.3.3.4 แบบจำลองขั้วไฟฟ้าโพลาริสต์สำหรับปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

แบบจำลองชนิดนี้ใช้สำหรับระบบที่มีการเกิดปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous reaction) โดยกราฟ Nyquist ของแบบจำลองขั้วไฟฟ้าโพลาริสต์สำหรับปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์แสดงในรูปที่ 2.19 พบว่า สเปกตรัมมีลักษณะหลายรูปแบบ โดยสเปกตรัมในรูปที่ 2.19 (ก) จะมีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมที่ไม่สมบูรณ์ 2 วงเชื่อมต่อกัน ซึ่งแต่ละวงจะแสดงถึงการเชื่อมต่อกันของความต้านทานและตัวเก็บประจุแบบขนาน สเปกตรัมในรูปที่ 2.19 (ข) พบว่าที่ความถี่สูงจะมีการเบี่ยงของสเปกตรัมซึ่งเกิดจากการซ้อนทับกันของครึ่งวงกลมขนาดเล็กกับครึ่งวงกลมขนาดใหญ่ ส่วนสเปกตรัมในรูปที่ 2.19 (ค) เกิดจากครึ่งวงกลม 2 รูป โดยที่ครึ่งวงกลมที่ความถี่ต่ำมีส่วนจินตภาพเป็นบวก เนื่องจากกระแสไฟฟ้าตอบสนองที่ช้ากว่าศักย์ไฟฟ้ากระตุ้นเป็นมุมเฟสน้อยกว่าหรือเท่ากับ 90 องศา จากกราฟสามารถนำมาสร้างแบบจำลองสมมูลได้ดังแสดงในรูปที่ 2.20 โดยวงจรจะประกอบไปด้วยความต้านทานต่ออนุกรมกับความต้านทานซึ่งต่อขนานกับตัวเก็บประจุจำนวน 2 วงจร [39]



รูปที่ 2.19 กราฟ Nyquist ของแบบจำลองระบบที่มีขั้วไฟฟ้าโพลาไรส์สำหรับปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ [39]



รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลสำหรับระบบที่มีข้อไฟฟ้าโพลาริสสำหรับปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ [39]

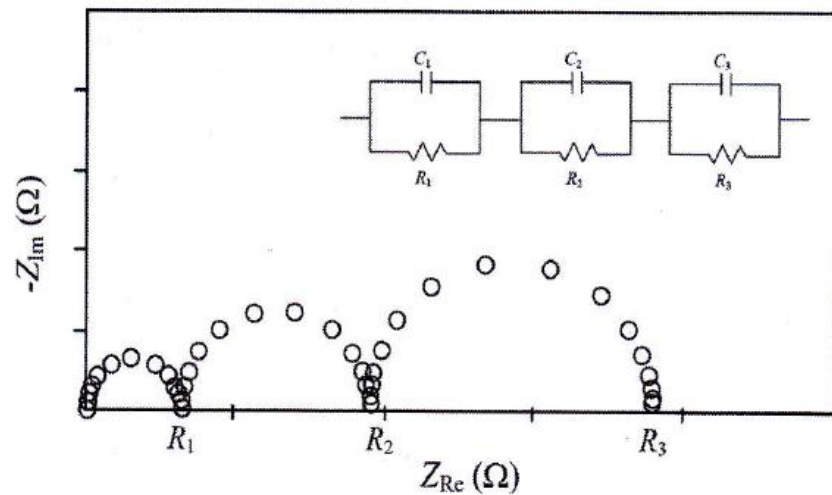
2.3.3.5 แบบจำลองของ Voigt

แบบจำลองชนิดนี้จะใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของวัสดุ องค์ประกอบของข้อไฟฟ้า และอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเก็บประจุ โดยค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.33

จากตัวอย่างกราฟ Nyquist ของระบบเซรามิกออกไซด์ของแข็ง (รูปที่ 2.21) พบว่าสเปกตรัมของอิมพีแดนซ์มีลักษณะเป็นครึ่งวงกลม 3 วงเชื่อมต่อกัน โดยครึ่งวงกลมแรกที่บริเวณความถี่สูงจะแสดงสมบัติส่วนใหญ่ของระบบ ส่วนครึ่งวงกลมที่สองจะแสดงสมบัติกลุ่มใหญ่ของขอบเกรน และครึ่งวงกลมสุดท้ายที่บริเวณความถี่ต่ำจะแสดงพฤติกรรมการตอบสนองของข้อไฟฟ้า ในความเป็นจริงมักจะไม่ค่อยพบอิมพีแดนซ์ที่มีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมแยกกันอย่างชัดเจนเนื่องจากมีค่าคงตัวเวลาใกล้เคียงกัน [39]

$$Z = \sum_{k=1}^n Z_k = \sum_{k=1}^n (R_k^{-1} + j\omega C_k)^{-1} \quad \text{สมการที่ 2.33}$$

- เมื่อ Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
 k คือ จำนวนของตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเก็บประจุ
 R คือ ความต้านทาน (โอห์ม)
 C คือ ตัวเก็บประจุ (ฟารัด หรือ โอห์ม⁻¹ วินาที)
 ω คือ ความถี่เชิงมุม (เฮิรตซ์ หรือ เรเดียนต่อวินาที)
 j คือ $\sqrt{-1}$



รูปที่ 2.21 กราฟ Nyquist และวงจรสมมูลของเซรามิกออกไซด์ของแข็ง [39]

2.4 ระบบอิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ระบบอิเล็กทรอนิกส์มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยสมบัติของสารละลายอิเล็กทรอนิกส์ที่ดีมีดังนี้ [44, 45]

- 1) สารอิเล็กทรอนิกส์ต้องมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชันได้ง่าย เพื่อชดเชยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมที่อยู่ในรูปตัวออกซิไดซ์ที่สถานะพื้นได้อย่างรวดเร็ว
- 2) สำหรับระบบอิเล็กทรอนิกส์เหลวนั้นตัวทำละลายที่เลือกใช้จะต้องช่วยให้เกิดการแพร่ของประจุได้อย่างรวดเร็ว และไม่เป็นสาเหตุให้เกิดการหลุดออกของโมเลกุลสีย้อมไวแสงจากพื้นผิวของขั้วโลหะออกไซด์
- 3) สารอิเล็กทรอนิกส์จะต้องมีความเสถียรต่อสารเคมี ความร้อน แสง ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน
- 4) สารอิเล็กทรอนิกส์จะต้องไม่มีการดูดกลืนแสงอาทิตย์ในช่วงที่ตามองเห็น

นอกจากนี้แล้วระบบอิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงสามารถแบ่งออกตามสถานะของสารอิเล็กทรอนิกส์ได้เป็น 3 ประเภทคือ ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบของเหลว (Liquid electrolyte) ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบของแข็ง (Solid-state electrolyte) และ ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบกึ่งของแข็ง (Quasi-solid electrolyte) [44]

2.4.1 ระบบอิเล็กโทรไลต์แบบของเหลว

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ได้รับการคิดค้นขึ้นครั้งแรกโดย เกรตเซล ในปี ค.ศ. 1991 [33] โดยเซลล์ดังกล่าวใช้ระบบอิเล็กโทรไลต์แบบของเหลวที่เป็นสารอินทรีย์ (Organic liquid electrolyte) ที่มีส่วนประกอบของลิเทียมไอโอไดด์ (LiI)/ไอโอดีน (I_2) โดยอิเล็กโทรไลต์ชนิดนี้สามารถให้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงถึงร้อยละ 7.1 ($AM\ 1.5, 100\ mW/cm^2$) ภายหลังได้มีการเตรียมสารอิเล็กโทรไลต์เหลวที่มีส่วนประกอบของสารคู่ควบรีดอกซ์ I/I_3^- ละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อะซิโตรไนไตรล์ เอทิลีนคาร์บอนเนต (EC) โพรพิลีนคาร์บอนเนต (PC) เป็นต้น [44] โดยพบว่าสารอิเล็กโทรไลต์ชนิดนี้สามารถให้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงถึงร้อยละ 11 เนื่องจากมีความสามารถสูงในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์เพื่อชดเชยอิเล็กตรอนให้แก่เม็ดสีย้อมที่อยู่ในรูปตัวออกซิไดซ์ [37]

แม้ว่าสารอิเล็กโทรไลต์ที่ทำจากสารคู่ควบรีดอกซ์ I/I_3^- จะมีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์เพื่อชดเชยอิเล็กตรอนให้แก่เม็ดสีย้อมไวแสงที่อยู่ในรูปตัวออกซิไดซ์ แต่อย่างไรก็ตามสารละลายไตรไอโอได์มักจะมีสีและแถบของการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วงที่ตามองเห็น ดังนั้นหากใช้ความเข้มข้นสูงอาจจะทำให้ความสามารถในการดูดกลืนแสงของสีย้อมไวแสงลดลง นอกจากนี้แล้วไอออนของไตรไอโอได์ยังสามารถไปปรับอิเล็กตรอนที่กำลังเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์ ซึ่งก่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ให้ผลเชิงลบหากใช้ความเข้มข้นสูงเกินไป ดังนั้นความเข้มข้นของสารคู่ควบรีดอกซ์ I/I_3^- ที่เตรียมจะต้องมีความเหมาะสม [45, 46]

นอกจากนั้นสารอิเล็กโทรไลต์ที่ทำจากสารคู่ควบรีดอกซ์ I/I_3^- ยังมีข้อเสียคือ สามารถกัดกร่อนวัสดุที่ใช้ผนึกเซลล์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุพวกโลหะ ส่งผลให้การประกอบและปิดผนึกเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงขนาดใหญ่ทำได้ยาก และส่งผลต่อการใช้งานในระยะยาว [47] จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาสารคู่ควบรีดอกซ์ชนิดอื่น เช่น $(SeCN)_2/SeCN^-$ และ $(SCN)_2/SCN^-$ ที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ (เช่น อะซิโตรไนไตรล์) ซึ่งสารคู่ควบรีดอกซ์เหล่านี้แสดงพลังงานศักย์ที่มีค่าเป็นบวกมากกว่าสารคู่ควบรีดอกซ์ I/I_3^- แต่ประสิทธิภาพของเซลล์ที่ได้ก็ยังคงต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้สารคู่ควบรีดอกซ์แบบเดิม (I/I_3^-) ทั้งนี้เป็นผลมาจากอัตราของการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์เพื่อชดเชยอิเล็กตรอนให้กับสีย้อมที่อยู่ในรูปตัวออกซิไดซ์ที่ต่ำกว่าเมื่อใช้สารคู่ควบรีดอกซ์ $(SeCN)_2/SeCN^-$ และ $(SCN)_2/SCN^-$ [48]

ยิ่งไปกว่านั้นสารอิเล็กโทรไลต์แบบของเหลวที่กล่าวมาข้างต้นนั้นมีข้อเสียที่สำคัญคือมักเกิดการรั่วซึม หรือการระเหยออกของตัวทำละลายในระบบอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นเมื่อนำมาใช้งานจึงจำเป็นต้องมีการผนึกเซลล์ที่ดี โดยวัสดุที่ใช้ผนึกเซลล์จะต้องมีความทนต่อสารเคมีที่ใช้เตรียมสารอิเล็กโทรไลต์ (เช่น สารคู่ควบรีดอกซ์ I/I_3^-)

จากปัญหาดังกล่าวจึงได้นำไปสู่ระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของเหลวไอออนิก ที่มีความเสถียรต่อสารเคมีและความร้อน จุดเดือดสูง มีค่าการนำไอออนสูง และไม่ติดไฟ [49] ระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของเหลวไอออนิกที่นิยมใช้คือสารประกอบ Imidazolium เช่น 1-methyl-3-propylimidazolium iodide, 1-methyl-3-ethylimidazolium dicyanamide (MHIImI) ซึ่งพบว่าช่วยให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีความเสถียรมากขึ้น เนื่องจากเป็นระบบอิเล็กโตรไลต์ที่ระเหยได้ยาก แต่อย่างไรก็ตามระบบอิเล็กโตรไลต์ดังกล่าวมักจะมีค่าความหนืดสูงกว่าระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของเหลว ทำให้ไอออนของไอโอดีนแพร่ได้ช้า [44] ต่อมาทีมงานวิจัยของ Wang และคณะ [49] ได้เตรียมระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของเหลวไอออนิกที่มีความหนืดต่ำจาก MHIImI และ LiI ทำให้ได้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงสูงขึ้นเป็นร้อยละ 6.6 โดยในปัจจุบันค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่มีการรายงานคือร้อยละ 8.4 [50]

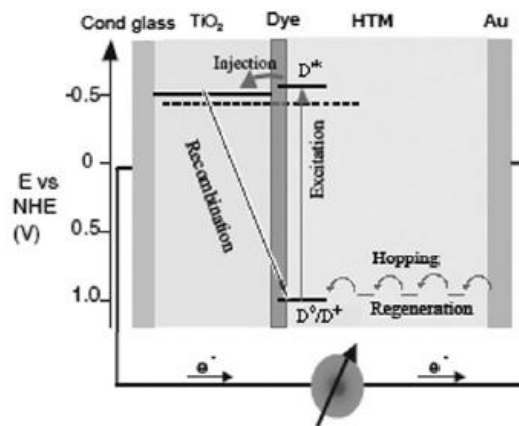
แม้ว่าระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของเหลวไอออนิกจะมีจุดเดือดสูง แต่มีข้อเสียที่สำคัญคือยังคงมีลักษณะเป็นของเหลว จึงมีโอกาสเกิดปัญหาการรั่วซึมของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้หากทำการผนึกเซลล์ไม่ดีพอ ส่งผลให้ประสิทธิภาพ อายุการใช้งาน และความคงทนของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับเซลล์ที่ใช้ระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของเหลว [22, 27, 51] ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของแข็งและระบบอิเล็กโตรไลต์แบบกึ่งของแข็งขึ้นมาเพื่อให้เซลล์มีความเสถียรเมื่อใช้งานในระยะยาว

2.4.2 ระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของแข็ง

โดยทั่วไปแล้วระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของแข็งมี 2 ประเภท คือ แบบที่ใช้วัสดุส่งผ่านโฮล (Hole transport material, HTMs) เป็นตัวกลาง และแบบที่ใช้สารคู่ควมบริดจิ้ง I/I_3^- เป็นตัวกลาง

2.4.2.1 ระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของแข็งที่ใช้วัสดุส่งผ่านโฮลเป็นตัวกลาง

โครงสร้างและหลักการทำงานของระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของแข็งที่ใช้วัสดุส่งผ่านโฮลเป็นตัวกลางแสดงในรูปที่ 2.22 สิ่งสำคัญของระบบนี้คือฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นรูพรุนจะต้องทำให้มีการสัมผัสกับตัวส่งผ่านประจุบวกของแข็ง (Solid-state hole conductor) มากที่สุด โดยหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงชนิดนี้จะคล้ายกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของเหลว ต่างกันที่ในระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของแข็งที่ใช้วัสดุส่งผ่านโฮลเป็นตัวกลางนั้นสีย้อมไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอนจะรับอิเล็กตรอนจากวัสดุส่งผ่านโฮล [44, 45, 52]



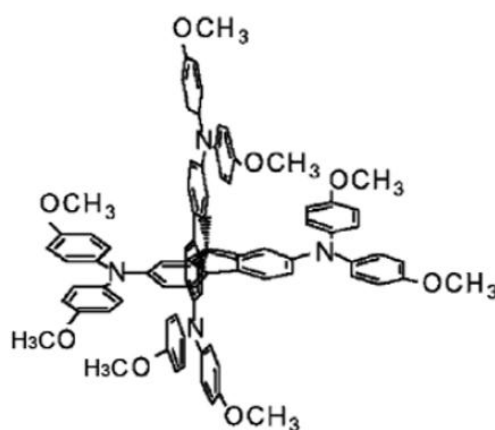
รูปที่ 2.22 โครงสร้างและส่วนประกอบของระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบของแข็งที่ใช้วัสดุส่งผ่านโฮลเป็นตัวกลาง [44]

วัสดุส่งผ่านโฮลที่มีแถบช่องว่างพลังงานกว้างซึ่งเป็นที่รู้จักกันดี ได้แก่ ซิลิกอนคาไบด์ (SiC) และ แกลเลียมไนไตรด์ (GaN) แต่ไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้งานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง เนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิในกระบวนการเคลือบสูง ซึ่งจะทำให้สีข้อมไวแสงที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมออกไซด์เสื่อมสภาพได้ [52] จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [52-54] พบว่าวัสดุส่งผ่านโฮลที่เป็นสารอินทรีย์ที่มีส่วนประกอบของทองแดง เช่น คอปเปอร์ไอโอไดด์ (CuI) คอปเปอร์โบรไมด์ (CuBr) คอปเปอร์ไทโอไซยาเนต (CuSCN) สามารถนำมาใช้งานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงได้ โดยวัสดุเหล่านี้สามารถนำมาเตรียมเป็นชั้นส่งผ่านโฮลได้โดยการเตรียมเป็นสารละลายแล้วหล่อขึ้นรูป หรือขึ้นรูปโดยการเคลือบในสุญญากาศ (Vacuum deposition) นอกจากนี้แล้วเมื่อพิจารณาถึงสภาพนำไฟฟ้าจะพบว่า CuI และ CuSCN มีค่าสูงถึง 10^{-2} S/cm ซึ่งเป็นผลดีต่อความสามารถในการเป็นตัวส่งผ่านโฮล Tennakone และคณะ [55] ได้ทำการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงระบบของแข็งที่ใช้ CuI เป็นวัสดุส่งผ่านโฮล พบว่าเซลล์ดังกล่าวให้ประสิทธิภาพร้อยละ 2.4 (AM 1.5, 100 mW cm^{-2}) อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ระบบดังกล่าว ยังมีข้อจำกัดในเรื่องความเสถียร โดยสามารถเกิดการเสื่อมสภาพของเซลล์ขึ้นเร็วกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์แบบของเหลว ซึ่งปัญหาดังกล่าวมักจะเกิดขึ้นเมื่อใช้วัสดุส่งผ่านโฮลที่เป็นสารอินทรีย์ จากปัญหาดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงที่ใช้วัสดุส่งผ่านโฮลที่เป็นสารอินทรีย์ (Organic HTMs) [52]

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวัสดุส่งผ่านโฮลที่เป็นสารอินทรีย์กับวัสดุส่งผ่านโฮลที่เป็นสารอนินทรีย์ พบว่า วัสดุส่งผ่านโฮลที่เป็นสารอินทรีย์มีข้อได้เปรียบคือ เป็นทรัพยากรที่มีอยู่มาก สามารถนำมาขึ้นรูปได้ง่าย และราคาไม่แพง [52] ในปี ค.ศ. 1998 Bach และคณะ [56] ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงระบบของแข็งที่ใช้ 2, 2', 7, 7'-tetrakis(N,N-di-p-methoxyphenylamine) 9, 9'-spirobifluorene

(OMeTAD, รูปที่ 2.23) ทำหน้าที่เป็นวัสดุส่งผ่านโฮลที่เป็นสารอินทรีย์ครั้งแรก ซึ่งประสิทธิภาพของเซลล์ดังกล่าวอยู่ที่ร้อยละ 0.74 (ภายใต้การฉายรังสีที่ความเข้มแสง 9.4 mW cm^{-2}) ต่อมาประสิทธิภาพของเซลล์ที่ใช้ OMeTAD เป็นวัสดุส่งผ่านโฮลที่เป็นสารอินทรีย์ ได้รับการพัฒนาให้สูงขึ้นเป็นร้อยละ 3.2 โดยการเติมไอออนเงินลงไปในสารละลายสีข้อมไวแสง [57]

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงระบบของแข็งที่ใช้วัสดุส่งผ่านโฮลที่เป็นสารอินทรีย์ และระบบที่ใช้วัสดุส่งผ่านโฮลที่เป็นสารอินทรีย์ (ตารางที่ 2.1) พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์เหล่านี้ยังคงต่ำกว่าเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพของเซลล์ที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์แบบของเหลว เนื่องจากวัสดุส่งผ่านโฮลมีสภาพการนำไฟฟ้าที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบของเหลว และมีโอกาสเกิดการรวมตัวกันของประจุระหว่างอิเล็กตรอนที่กำลังเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์กับ HTM^+ นอกจากนี้ยังมีปัญหาด้านการสัมผัสกันที่ไม่ดีระหว่างโมเลกุลของสีข้อมไวแสงกับวัสดุส่งผ่านโฮล เป็นสาเหตุให้วัสดุส่งผ่านโฮลไม่สามารถแทรกเข้าไปในรูพรุนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์ได้ [44]



รูปที่ 2.23 โครงสร้างทางเคมีของ OMeTAD [44]

ตารางที่ 2.1 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงระบบของแข็งที่ใช้ HTMs ที่แตกต่างกัน [44]

วัสดุส่งผ่านโฮล		ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (ร้อยละ)*
สารอนินทรีย์	CuI	2.40
	CuI	3.80
	CuSCN	1.50
	4CuBr ₃ S(C ₄ H ₉) ₂	0.60
สารอินทรีย์	OMeTAD	0.74**
	OMeTAD	2.56
	Spiro-OMeTAD	3.20
	Pentacene	0.80
	Polyaniline	1.15

หมายเหตุ : * ทดสอบภายใต้สภาวะ AM 1.5 ความเข้มแสง 100 mW cm⁻²

** ฉายรังสีที่ความเข้มแสง 9.4 mW cm⁻²

2.4.2.2 ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบของแข็งที่ใช้สารคู่ควมรีดออกซ์เป็นตัวกลาง

จากการที่ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบของแข็งที่ใช้วัสดุส่งผ่านโฮลเป็นตัวกลางทั้งที่เป็นสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ยังไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเนื่องจากให้ประสิทธิภาพของเซลล์ต่ำ จึงได้มีการพัฒนาระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบของแข็งที่ใช้สารคู่ควมรีดออกซ์ (I/I₃⁺) เป็นตัวกลางในเซลล์แสงอาทิตย์ระบบดังกล่าว ซึ่งพบว่าให้ผลที่น่าสนใจ ตัวอย่างเช่น เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์แบบของแข็งซึ่งประกอบด้วย PEO-TiO₂-สารคู่ควมรีดออกซ์ I/I₃⁺ ได้ประสิทธิภาพของเซลล์ถึงร้อยละ 4.2 (ภายใต้การส่องแสงแดดที่ความเข้มแสง 65.6 mW cm⁻²) [8] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบของแข็งที่ประกอบไปด้วยผลึกพลาสติก (Plastic crystal) ผสมกับสารคู่ควมรีดออกซ์ไอโอไดด์/ไตรไอโอไดด์ พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้คือร้อยละ 6.7 (AM 1.5, 51.9 mW cm⁻²) [58]

การที่ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบของแข็งที่มีสารคู่ควมรีดออกซ์เป็นตัวกลางมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับเซลล์ที่ใช้วัสดุส่งผ่านโฮลเป็นตัวกลาง เนื่องจากสารคู่ควมรีดออกซ์ I/I₃⁺ มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยารีดออกซ์เพื่อขจัดเซมิคอนดักเตอร์ให้แกสีย้อมไวแสงที่อยู่ในรูปตัวออกซิไดซ์ และ โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาที่ให้ผลเชิงลบ (Dark reactions) น้อยกว่า

เมื่อเทียบกับการใช้วัสดุส่งผ่านโพลีเมอร์เป็นตัวกลาง รวมทั้งมีการสัมผัสระหว่างพื้นผิวของสารคู่ควบปริศนาคือที่ใช้เป็นตัวกลางกับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับการใช้วัสดุส่งผ่านโพลีเมอร์เป็นตัวกลาง [44]

2.4.3 ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบคล้ายของแข็ง

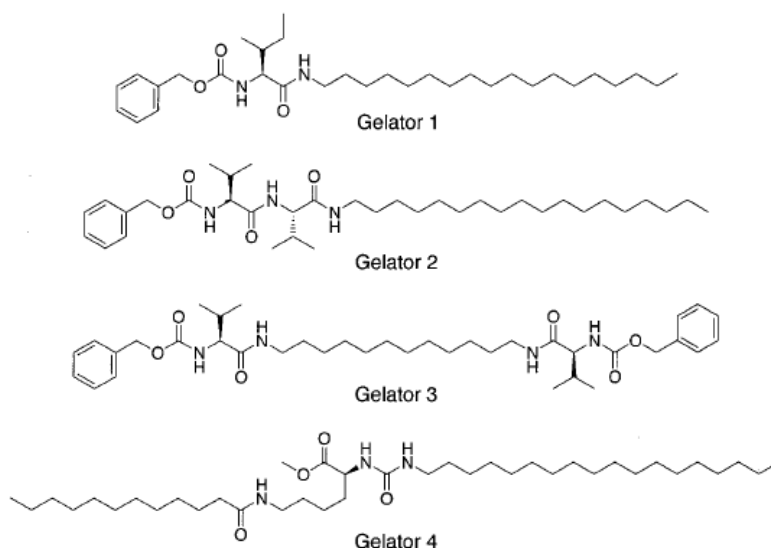
สถานะคล้ายของแข็งหรือสถานะเจล (Gel state) คือสถานะเฉพาะของวัสดุที่ไม่เป็นทั้งของเหลวและของแข็งโดยสิ้นเชิงหรือในทางตรงกันข้ามก็เป็นทั้งสถานะที่แสดงสมบัติอยู่ระหว่างของเหลวและของแข็ง โดยทั่วไประบบอิเล็กทรอนิกส์แบบคล้ายของแข็งคือระบบที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์และสารละลายอิเล็กโตรไลต์เหลว ซึ่งพอลิเมอร์จะบวมตัวอยู่ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์เหลว [59] ทำให้ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบคล้ายของแข็งมีความเสถียรระยะยาวดีกว่าเมื่อเทียบกับระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบของเหลว นอกจากนี้การที่มีสารละลายอิเล็กโตรไลต์เหลวอยู่ในระบบจึงส่งผลให้มีค่าการนำไอออนสูงที่สภาวะปกติ และยังมีการสัมผัสระหว่างพื้นผิวสัมผัสที่ดีอีกด้วย [45] จากลักษณะเด่นเหล่านี้จึงทำให้ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบคล้ายของแข็งได้รับความนิยมสำหรับนำมาใช้งานด้านต่างๆ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง แบตเตอรี่ลิเทียม และเซลล์เชื้อเพลิง [44, 45]

มีพอลิเมอร์หลายชนิดที่ได้รับความนิยมนำมาใช้งานในลักษณะเป็นเจลพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ เช่น พอลิเอทิลีนออกไซด์ (PEO) [20] พอลิอะคริโลไนไตรล์ (PAN) [60] พอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) [45] พอลิไวนิลลิควินฟลูออไรด์ (PVDF) [13] และพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) [61] เป็นต้น

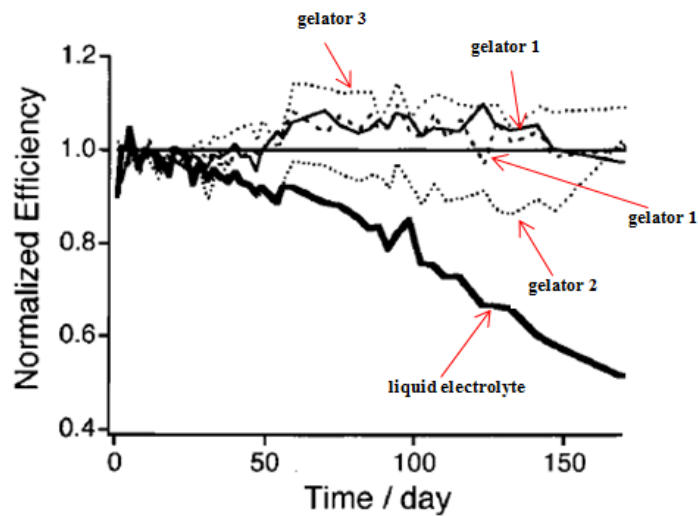
Cao และคณะ [62] ได้พยายามพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์แบบคล้ายของแข็งสำหรับใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยการผสมพอลิอะคริโลไนไตรล์ เอทิลีนคาร์บอเนต โพรพิลีนคาร์บอเนต อะซิโตนไนไตรล์ โซเดียมไอโอไดด์ (NaI) และ ไดโอดีน แล้วหล่อลงบนฟิล์มไทเทเนียมออกไซด์ที่มีสีย้อมไวแสงยึดเกาะอยู่ โดยประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้คือร้อยละ 3-5 (ความเข้มแสง 30 mW cm^{-2}) ซึ่งถือว่ายังต่ำเมื่อเทียบกับระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบของเหลว เนื่องจากเจลพอลิเมอร์แทรกเข้าไปในฟิล์มไทเทเนียมออกไซด์ได้น้อย

ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบเจลอิเล็กโตรไลต์เพื่อให้มีการแทรกเข้าไปในฟิล์มไทเทเนียมออกไซด์มากขึ้น โดยการใช้เจลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งเป็นอนุพันธ์ของกรดอะมิโน (รูปที่ 2.24) ผสมกับสารละลายอิเล็กโตรไลต์เหลว จากนั้นเจลอิเล็กโตรไลต์จะถูกให้ความร้อนประมาณ 100 องศาเซลเซียสเพื่อให้หลอมและง่ายต่อการซึมเข้าไปเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้ แล้วปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องกลายเป็นอิเล็กโตรไลต์ที่มีสถานะเป็นเจล และจากการศึกษาพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 4.67 (AM 1.5, 100 mW cm^{-2}) ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงเมื่อ

เทียบกับค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของเหลว (ร้อยละ 4.66) ยิ่งกว่านั้นงานวิจัยดังกล่าวยังพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้เจลอิเล็กโตรไลต์ระบบนี้มีความคงทนมากกว่าเมื่อเทียบกับเซลล์ที่ใช้ระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของเหลว (รูปที่ 2.25) อันเป็นผลเนื่องจากการใช้เจลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถลดการรั่วซึมและการระเหยออกของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ได้ [63] งานวิจัยดังกล่าวให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang และคณะฯ [64] ที่ได้ทำการศึกษาความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ระบบเจลพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ซึ่งประกอบด้วย พอลิไวนิลลิซีนฟลูออไรด์-เฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน (PVdF-HFP) ผสมกับสารละลายอิเล็กโตรไลต์เหลว (DMPH/ I_2 /NMBI ใน MPN) พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ระบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพร้อยละ 6.1 (AM 1.5, 100 mW cm^{-2}) ซึ่งไม่แตกต่างกับเซลล์ที่ใช้ระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของเหลว (ร้อยละ 6.2)

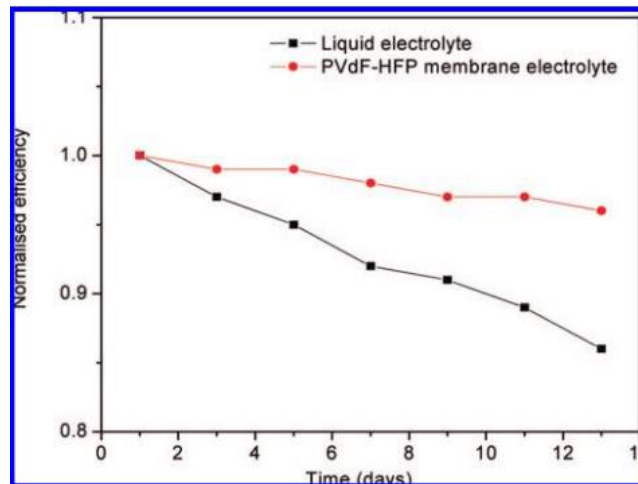


รูปที่ 2.24 โครงสร้างทางเคมีของเจลที่ทำจากอนุพันธ์ของกรดอะมิโนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ [63]



รูปที่ 2.25 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสงเมื่อเวลาผ่านไป [63]

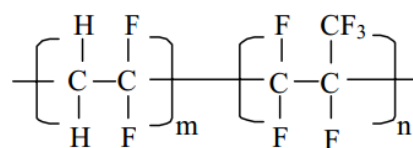
ในปี ค.ศ. 2008 Rathiya และคณะ [22] รายงานการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสงจากระบบอิเล็กโตรไลต์แบบคล้ายของแข็ง โดยระบบอิเล็กโตรไลต์ประกอบด้วยแผ่นเส้นใยของ PVdF-HFP ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตในสารละลายอิเล็กโตรไลต์เหลว พบว่าเซลล์ดังกล่าวให้ประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 7.3 (AM 1.5, 100 mW cm^{-2}) ในขณะที่เซลล์ที่ใช้ระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของเหลวให้ประสิทธิภาพร้อยละ 7.8 (AM 1.5, 100 mW cm^{-2}) ซึ่งถือว่าต่างกันเล็กน้อย และยังพบว่าแผ่นเส้นใยของ PVdF-HFP สามารถดูดซับสารละลายอิเล็กโตรไลต์เหลวไว้จึงสามารถป้องกันการรั่วซึมออกของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ไว้ได้ ทำให้เซลล์มีความเสถียรระยะยาวมากกว่าเมื่อเทียบกับเซลล์ที่ใช้ระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของเหลวดังแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เตรียมจากระบบอิเล็กโตรไลต์แบบ คล้ายของแข็งและระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของเหลวเมื่อเวลาผ่านไป [22]

2.5 พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์-เฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน

PVdF-HFP เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และ ฟลูออรีน โครงสร้างทางเคมีของ PVdF-HFP แสดงในรูปที่ 2.27 โดยที่ PVdF-HFP เป็นโคพอลิเมอร์ที่ ประกอบด้วยหน่วยซ้ำ 2 ชนิดคือ หน่วยซ้ำของไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Vinylidene fluoride, VdF) และ เฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน (Hexafluoropropylene, HFP) เป็นผลทำให้โคพอลิเมอร์ที่ได้มีระดับความ เป็นผลึกลดลงอย่างมากเนื่องจากการเติมหน่วยซ้ำ HFP ที่ทำให้ความเป็นผลึกของโคพอลิเมอร์ลดลง [65] ซึ่งการเพิ่มขึ้นของส่วนที่เป็นอสัณฐานจะช่วยปรับปรุงความสามารถในการดูดซับสารละลาย อิเล็กโตรไลต์เหลวให้สูงขึ้นได้ [59] นอกจากนี้แล้วการลดลงของผลึกนั้นจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกล ของโคพอลิเมอร์ กล่าวคือทำให้โคพอลิเมอร์ที่ได้มีความอ่อนนุ่ม (Flexible) เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVdF) หรือมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ลดลง [66] แต่ อย่างไรก็ดีตามความเป็นผลึกที่ยังเหลืออยู่ก็เพียงพอที่จะทำให้ พอลิเมอร์ดังกล่าวมีสมบัติเชิงกลที่ดี สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ [59] นอกจากนี้แล้ว PVdF-HFP ยังมีความเสถียรต่อความร้อนและ แสง จึงทำให้เหมาะสำหรับการนำมาใช้ในงานด้านเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [64, 67]



รูปที่ 2.27 โครงสร้างทางเคมีของ PVdF-HFP [13]

2.6 สารตัวเติมสำหรับพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์

จากข้อจำกัดที่สำคัญของการเติมพอลิเมอร์เข้าไปในระบบอิเล็กโตรไลต์คือ ทำให้ระบบอิเล็กโตรไลต์มีความสามารถในการนำไอออนต่ำลงเนื่องจากความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ จากปัญหาดังกล่าวจึงนำไปสู่การแก้ปัญหาโดยการเติมสารตัวเติมอินทรีย์ เพื่อช่วยลดความเป็นผลึกและปรับปรุงความสามารถในการเคลื่อนที่ของสารกึ่งตัวนำ [8, 68] ตัวอย่างของสารตัวเติมอินทรีย์ที่มีการใช้ในระบบนี้ เช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) [68] และ TiO_2 [8] เป็นต้น

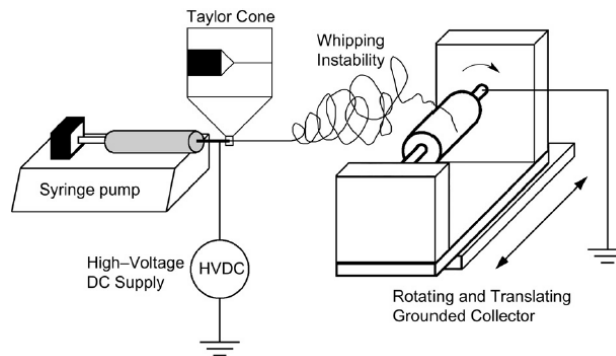
จากงานวิจัยของ Stergiopoulos และคณะฯ ที่ได้ทำการศึกษาผลของการเติมอนุภาคนาโน TiO_2 ลงในระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของแข็งที่ประกอบด้วย PEO- TiO_2 -สารกึ่งตัวนำ I/I_3^- พบว่าการเติมอนุภาคนาโน TiO_2 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้ เนื่องจากอนุภาคนาโน TiO_2 สามารถแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้ผลึกของพอลิเมอร์ลดลง ทำให้ไอออนของ I/I_3^- สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น [8] จากผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับการทดลองของ Zhao และคณะฯ [68] ที่พบว่าการเติมเส้นใยนาโนของซิลิกอนไดออกไซด์ลงในเจลพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์สามารถเพิ่มปริมาณการดูดซับสารอิเล็กโตรไลต์ของพอลิเมอร์และเพิ่มค่าการนำไอออนของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมเส้นใยนาโนของซิลิกอนไดออกไซด์ทำให้เกิดการสัมผัสกันที่ระหว่างเจลพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์กับฟิล์มของอนุภาค TiO_2 ที่อยู่บนขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้เกิดการขนส่งไอออนได้ดีขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้แล้วยังมีการศึกษาการสารตัวเติมชนิดอื่น เช่น วานาเดียมเพนทอกไซด์ (V_2O_5) พบว่าสามารถช่วยลดความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ ปรับปรุงความสามารถในการนำไอออนและเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ได้เช่นกัน [69]

2.7 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตหรืออิเล็กโตรสปินนิง เป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถใช้ขึ้นรูปเส้นใยที่มีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตรและนาโนเมตรได้ [70, 71] โดยจะอาศัยแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงต่อเข้าที่ปลายเข็มทำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวของสารละลายพอลิเมอร์ เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงถึงจุดที่แรงผลัทางไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงดึงดูดของสารละลายพอลิเมอร์จะทำให้สารละลายพอลิเมอร์พุ่งไปสู่แผ่นรองรับที่ทำด้วยโลหะ ทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเล็กและบาง เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตมีอุปกรณ์หลัก 3 อย่างได้แก่ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High voltage power supply) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก (Syringe with needle) และวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ (Metal collector) ซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์รองรับเส้นใย [70]

2.7.1 หลักการพื้นฐานของเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

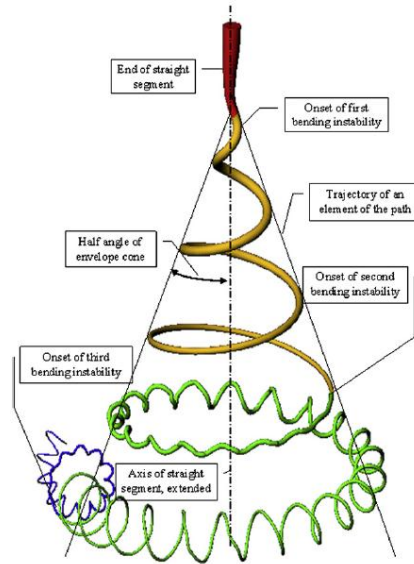
ขั้นตอนในการผลิตเส้นใยพอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กโดยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (กรณีเป็นสารละลายพอลิเมอร์) เริ่มจากเตรียมสารละลายพอลิเมอร์บรรจุในหลอดฉีดยาแล้วต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง โดยจะต่อขั้วประจุไฟฟ้าบวกเข้ากับปลายเข็มซึ่งต่อกับหลอดฉีดยาที่บรรจุสารละลายพอลิเมอร์ และต่อขั้วประจุไฟฟ้าลบที่วัสดุรองรับ (รูปที่ 2.28)



รูปที่ 2.28 แผนภาพชุดอุปกรณ์การผลิตเส้นใยโดยเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต [70]

เมื่อยังไม่ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง สารละลายพอลิเมอร์ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวหนืดจะรวมตัวกันเป็นหยดรูปร่างครึ่งทรงกลมที่บริเวณปลายเข็มโลหะเนื่องจากแรงตึงผิว (Surface tension) ที่พยายามยึดผิวของเหลวไว้ โดยแรงตึงผิวมีทิศขนานกับผิวของเหลวและตั้งฉากกับเส้นขอบที่ของเหลวสัมผัส จึงทำให้สารละลายพอลิเมอร์ไม่ไหลลงตามแรงโน้มถ่วงของโลกและเกิดเป็นรูปร่างทรงกลมขึ้น แต่เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงแก่สารละลายพอลิเมอร์ ส่วนปลายเข็มโลหะจะถูกเหนี่ยวนำให้มีประจุเป็นบวกและวัสดุรองรับมีประจุเป็นลบ ประจุบวกที่ผิวของหยดสารละลายพอลิเมอร์จะออกแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic repulsion) ในทิศทางตรงข้ามกับแรงตึงผิว ดังนั้นถ้าหากแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตมีค่าเท่ากับแรงตึงผิว จะส่งผลให้รูปร่างครึ่งทรงกลมของสารละลายพอลิเมอร์ที่อยู่ปลายเข็มยืดออกเป็นรูปร่างทรงกรวยที่เรียกว่า กรวยของเทเลอร์ (Taylor cone) และเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้ามากขึ้นไปอีกจนกระทั่งแรงทางไฟฟ้าสถิต (Electric force) มากกว่าแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ จะเกิดแรงขับเคลื่อนให้สารละลายพอลิเมอร์พุ่งออกมาเป็นลำ (Solution jet) จากบริเวณปลายของกรวยของเทเลอร์ โดยลำของสารละลายพอลิเมอร์ที่พุ่งออกมามีประจุเป็นบวกจึงพุ่งเข้าหาแผ่นวัสดุรองรับซึ่งเป็นประจุลบ และเกิดการยึดตัวทำให้ลำดังกล่าวยาวขึ้น และเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเล็กลง อย่างไรก็ตามประจุที่อยู่ภายในลำของสารละลายพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการผลักกันของประจุขึ้น ส่งผลให้ลำของสารละลายพอลิเมอร์ที่พุ่งออกมาไม่เป็นเส้นตรง เกิดการสั่นตามแนวขวางทำให้ลำของสารละลายพอลิเมอร์ เกิดการบิดโค้ง ซึ่งถือว่าเป็นการเคลื่อนที่แบบไม่เสถียรดังแสดงในรูปที่ 2.29 โดยความไม่เสถียรดังกล่าวจะทำให้ลำของสารละลายพอลิเมอร์ยืดออกส่งผลให้เส้นใยมีขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง ขณะเดียวกันตัวทำละลายก็จะระเหยออกไปจนเหลือไว้แต่เส้นใยพอลิเมอร์ที่ทับถมกันอย่างไม่เป็นระเบียบบนแผ่นรองรับเส้นใย [70, 72, 73]



รูปที่ 2.29 ลักษณะการเคลื่อนที่แบบไม่เสถียรของลำสารละลายพอลิเมอร์ [73]

2.7.2 ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อลักษณะฐานวิทยาของเส้นใย

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่สำคัญมี 3 ตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรเชิงสารละลายพอลิเมอร์ ตัวแปรเชิงกระบวนการ และตัวแปรเชิงสิ่งแวดล้อม

2.7.2.1 ตัวแปรเชิงสารละลายพอลิเมอร์

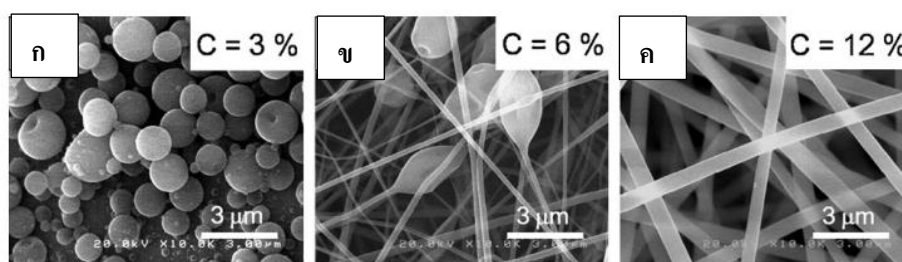
ตัวแปรเชิงสารละลายพอลิเมอร์เป็นตัวแปรที่เกิดจากสมบัติของสารละลายพอลิเมอร์ซึ่งส่งผลต่อลักษณะของเส้นใยที่ได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดและรูปร่างของเส้นใย ซึ่งได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ ตัวทำละลาย และน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์

1) ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์

ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์มีอิทธิพลต่อความหนืดและแรงตึงผิวของสารละลาย ซึ่งตัวแปรทั้งสองนี้มีความสำคัญต่อการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตอย่างมาก ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์จะต้องมีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์ภายในสารละลายพอลิเมอร์ หากสารละลายพอลิเมอร์เจือจางหรือมีความเข้มข้นต่ำเกินไปจะทำให้เกิดเป็นหยดของพอลิเมอร์ขึ้นที่วัสดุรองรับ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิวที่มีค่าสูง ในทางตรงกันข้าม หากความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์มีค่าสูงเกินไปจะทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ เนื่องจากไม่สามารถ

ควบคุมการไหลของสารละลายได้ และยังทำให้เกิดการอุดตันของสารละลายพอลิเมอร์ที่ปลายเข็มอีกด้วย [74] ดังนั้นแล้วความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์จะต้องมีค่าที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้

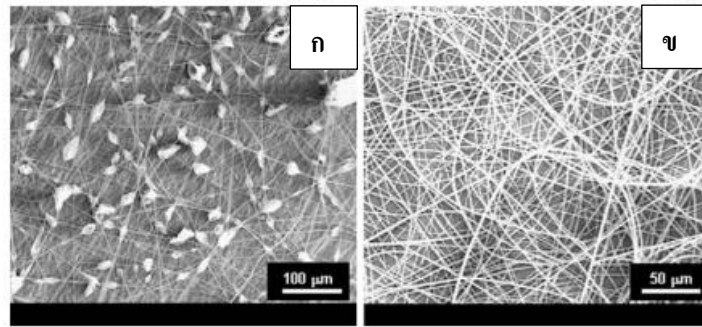
จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย PAN และ PMMA ในไดเมทิลฟอร์มาไรม์ (DMF) ที่มีผลต่อลักษณะการเกิดเส้นใย ของ Yun และคณะฯ [75] พบว่าการความเข้มข้นของพอลิเมอร์มีผลต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.30 โดยเมื่อความเข้มข้นของพอลิเมอร์ต่ำจะส่งผลให้ลำของสารละลายพอลิเมอร์ที่พุ่งออกมา แยกออกเป็นหยด และเมื่อสารละลายระเหยออกแล้วหยดดังกล่าวจะกลายเป็นอนุภาคของพอลิเมอร์ที่มีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตร ในทางตรงกันข้ามเมื่อความเข้มข้นของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ลำของสารละลายพอลิเมอร์ที่พุ่งออกมาจากบริเวณปลายของกรวยของเทอร์สามารถยืดยาวออกเป็นเส้นใยได้โดยไม่ขาดออกจากกัน ในขณะที่ Megelski และคณะฯ [76] พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของพอลิสไตรีนในเตตระไฮโดรฟูแรน (THF) ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.30 ผลของความเข้มข้นของพอลิเมอร์ที่มีต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย [75]

2) ตัวทำละลาย

ตัวทำละลายถือว่าเป็นตัวแปรสำคัญต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยและส่งผลต่อความเป็นรูพรุนของเส้นใย ตัวทำละลายที่เหมาะสมจะต้องสามารถละลายพอลิเมอร์ได้ดีและระเหยได้ง่ายในระหว่างที่ลำของสารละลายพอลิเมอร์พุ่งออกมาจากปลายเข็มไปยังวัสดุรองรับ [70] Megelski และคณะฯ [76] ศึกษาโครงสร้างและสมบัติของแผ่นเส้นใยพอลิสไตรีนในตัวทำละลายต่างชนิดกัน ได้แก่ DMF และ THF พบว่าการใช้ตัวทำละลาย THF ทำให้ได้เส้นใยที่มีความเป็นรูพรุนสูง ขณะที่ใช้ตัวทำละลาย DMF ทำให้ได้เส้นใยที่มีพื้นผิวเรียบกว่า เนื่องจาก DMF สามารถระเหยได้เร็วกว่า ในทำนองเดียวกันจากการศึกษาความสามารถในการระเหยของสารละลายพอลิสไตรีนในตัวทำละลาย THF และ DMF ของ Uyar และ Besenbacher [77] พบว่าการใช้ THF เป็นตัวทำละลายจะทำให้เกิดเส้นใยปนกับเม็ดปิดส่วนเมื่อใช้ DMF เป็นตัวทำละลายทำให้เส้นใยที่ได้มีพื้นผิวเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิเอทรีนที่เตรียมจากสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยใช้ตัวทำละลายต่างกัน (ก) THF และ (ข) DMF [77]

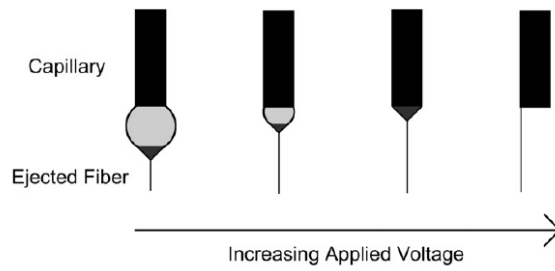
3) น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์

น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์มีผลต่อสมบัติการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ เช่น ความหนืด แรงตึงผิว โดยทั่วไปสารละลายของพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีความหนืดสูงเพียงพอที่จะขึ้นรูปโดยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เมื่อใช้สารละลายพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะทำให้เกิดเม็ดบีดมากกว่าเส้นใย และเมื่อใช้สารละลายพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ เนื่องจากพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์สูง ทำให้ลำของสารละลายพอลิเมอร์ที่พุ่งออกมาจากปลายเข็มสามารถต้านทานแรงดึงทางไฟฟ้าสถิตได้มากกว่า [78] Gupta และคณะฯ [79] ได้ทำการศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ที่มีต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใย พบว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นทำให้เม็ดบีดลดลง [78]

2.7.2.2 ตัวแปรเชิงกระบวนการ

1) ความต่างศักย์ไฟฟ้า

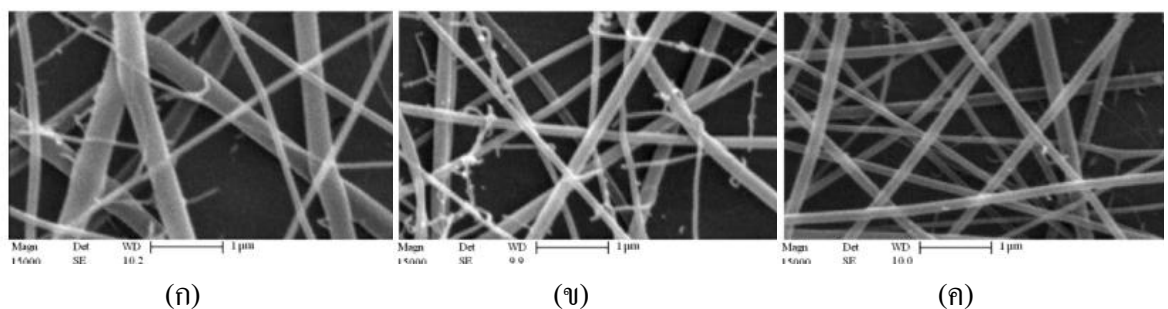
การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจากระดับไมโครเมตรให้เล็กลงถึงระดับนาโนเมตรได้ หรืออาจนำไปสู่เกิดเม็ดบีดขึ้นบนเส้นใย [70] โดยเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจะทำให้แรงทางไฟฟ้าสถิตสามารถเอาชนะแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการดึงยืดของลำสารละลายพอลิเมอร์ส่งผลให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง [78, 80, 81] Deitzel และคณะฯ [82] ได้เตรียมสารละลายพอลิเอทรีนออกไซด์ในน้ำ และนำไปขึ้นรูปเส้นใยโดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต พบว่าการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกรวยเทเลอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.32 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำกรวยเทเลอร์จะเกิดที่ปลายเข็มและมีลักษณะเป็นหยดครึ่งทรงกลมที่มีขนาดใหญ่ และเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นทำให้ปริมาตรของกรวยเทเลอร์จะลดลง



รูปที่ 2.32 ลักษณะการเกิดกรวยเทเลอร์เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า [70]

2) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใย

ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใยถือเป็นตัวแปรที่มีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยน้อย โดยระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับจะส่งผลโดยตรงต่อความแรงของสนามไฟฟ้า (Electric field strength) และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของลำสารละลายพอลิเมอร์ไปยังวัสดุรองรับ ดังนั้นระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับควรจะเพียงพอที่จะทำให้ตัวทำละลายสามารถระเหยออกไปจากลำของสารละลายพอลิเมอร์ได้ [70, 83] โดยที่หากระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับน้อยเกินไปจะทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของลำสารละลายพอลิเมอร์สั้นลง และความแรงของสนามไฟฟ้าก็จะสูงขึ้นทำให้การระเหยของตัวทำละลายไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เส้นใยที่เกิดขึ้นเกิดการเชื่อมต่อกัน ในทางตรงกันข้ามหากเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับจะทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลง เนื่องจากลำของสารละลายพอลิเมอร์มีเวลาในการยืดตัวนานขึ้น [84, 85] ดังแสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยไคโตซานที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับ 14 (ก) 15 (ข) และ 16 (ค) เซนติเมตร [85]

3) อัตราการป้อนสารละลายพอลิเมอร์

อัตราการป้อนสารละลายพอลิเมอร์เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของลำสารละลายพอลิเมอร์ โดยหากอัตราการป้อนสารละลายพอลิเมอร์ต่ำจะทำให้ตัวทำละลายมีเวลาเพียงพอที่จะเกิดการระเหย [78] แต่เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารละลายพอลิเมอร์จะส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเพิ่มขึ้น และเกิดเม็ดปืดขึ้นบนเส้นใย เนื่องจากการไหลของพอลิเมอร์ที่เร็วเกินไป ทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าไม่เพียงพอที่จะทำให้หยดของสารละลายพอลิเมอร์ยืดออกเป็นเส้นใย และยังส่งผลให้ตัวทำละลายระเหยได้ไม่สมบูรณ์ [76]

2.7.2.3 ตัวแปรเชิงสิ่งแวดล้อม

ตัวแปรเชิงสิ่งแวดล้อมในที่นี้ได้แก่ อุณหภูมิ และความชื้น เป็นต้น โดย Mit-Uppatham และคณะ [86] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตของ พอลิเอไมด์-6 ที่ช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส พบว่าการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สารละลายพอลิเมอร์มีความหนืดลดลงจึงทำให้ลำของสารละลายพอลิเมอร์สามารถยืดออกได้มาก นอกจากนี้แล้วความชื้นก็มีผลต่อลักษณะของเส้นใย โดยจากการศึกษาของ Casper และคณะ [87] พบว่าระบบที่มีความชื้นต่ำจะทำให้ตัวทำละลายสามารถระเหยออกจากสารละลายพอลิเมอร์ได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เส้นใยที่ได้มีพื้นผิวเรียบ แต่ถ้าหากความชื้นสูงจะเกิดหยดน้ำบนผิวของเส้นใยทำให้เกิดรูพรุนบนผิวของเส้นใยมากขึ้น

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

รายการสารเคมีสำหรับการดำเนินงานวิจัย แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี	เกรด/ผู้ผลิต	การใช้งาน
พอลิไวนิลคลอไรด์- เฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน แลนทานัมออกไซด์	Mw~455,000, ALDRICH Nanopower < 100 nm, 98 % trace, ALDRICH	พอลิเมอร์ สารตัวเติม
อะซิโตน	For analysis, MERCK	ตัวทำละลายสำหรับละลายพอลิเมอร์
บิวทานอล	Anhydrous, 99.8%, SIGMA- ALDRICH	ใช้สำหรับทดสอบความเป็นรูพรุน
ไดเมทิลอะซิทาไมด์	For analysis, MERCK	ตัวทำละลายสำหรับละลายพอลิเมอร์
เอทิลีนคาร์บอเนต	98 %, ALDRICH	ตัวทำละลายสำหรับเตรียมสาร อิเล็กโทรไลต์
ไดเมทิลคาร์บอเนต	Anhydrous, ≥ 99 %, SIGMA-ALDRICH	ตัวทำละลายสำหรับเตรียมสารละลาย อิเล็กโทรไลต์
ไอโอดีน	≥ 99.99 % trace, ALDRICH	ใช้สำหรับเตรียมสารละลาย อิเล็กโทรไลต์
ลิเทียมไอโอไดด์	Beads 99 %, ALDRICH	ใช้สำหรับเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์
ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์	For analysis, CARLO ERBA	ทำความสะอาดกระจก FTO
ไทเทเนียมไดออกไซด์	DSL 18NR-T, DYESOL	ใช้เคลือบบนกระจก FTO สำหรับเป็น ขั้วไฟฟ้าแอโนด
สีย้อมไวแสง	N719, DYESOL	เตรียมเป็นสารละลายสำหรับแช่ ขั้วไฟฟ้าแอโนด

ตารางที่ 3.1 รายการสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

สารเคมี	เกรด/ผู้ผลิต	การใช้งาน
เอทานอล	Absolute for analysis, MERCK	ตัวทำละลายสีย้อมไวแสง
แพตตินัม	Platisol T/SP, SOLARONIX	ใช้เคลือบบนกระจก FTO สำหรับเป็น ขั้วไฟฟ้าแคโทด
ฟิล์มเอทิลีน-อะคริลิก โค พอลิเมอร์	Surlyn TPS 109129-50, DYESOL	ใช้สำหรับผนึกเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด สีย้อมไวแสง
สารอิเล็กโตรไลต์	EL-HPE, DYESOL	สารอิเล็กโตรไลต์ในทางการค้า

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยมีดังนี้

- 1) ขวดเกลียว ขนาด 50 และ 100 มิลลิลิตร
- 2) กระบอกตวง ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 3) บีกเกอร์ ขนาด 25, 50, 100 และ 250 มิลลิลิตร
- 4) ขวดวัดปริมาตร ขนาด 25 และ 50 มิลลิลิตร
- 5) ขวดรูปชมพู่ ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 6) แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร ขนาด 15×6 มิลลิเมตร
- 7) อะลูมิเนียมฟอล์ย ขนาด 12×25 นิ้ว
- 8) เข็มฉีดยา ขนาด 24 G
- 9) กระบอกฉีดยา ขนาด 3 และ 5 มิลลิลิตร

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนดังนี้

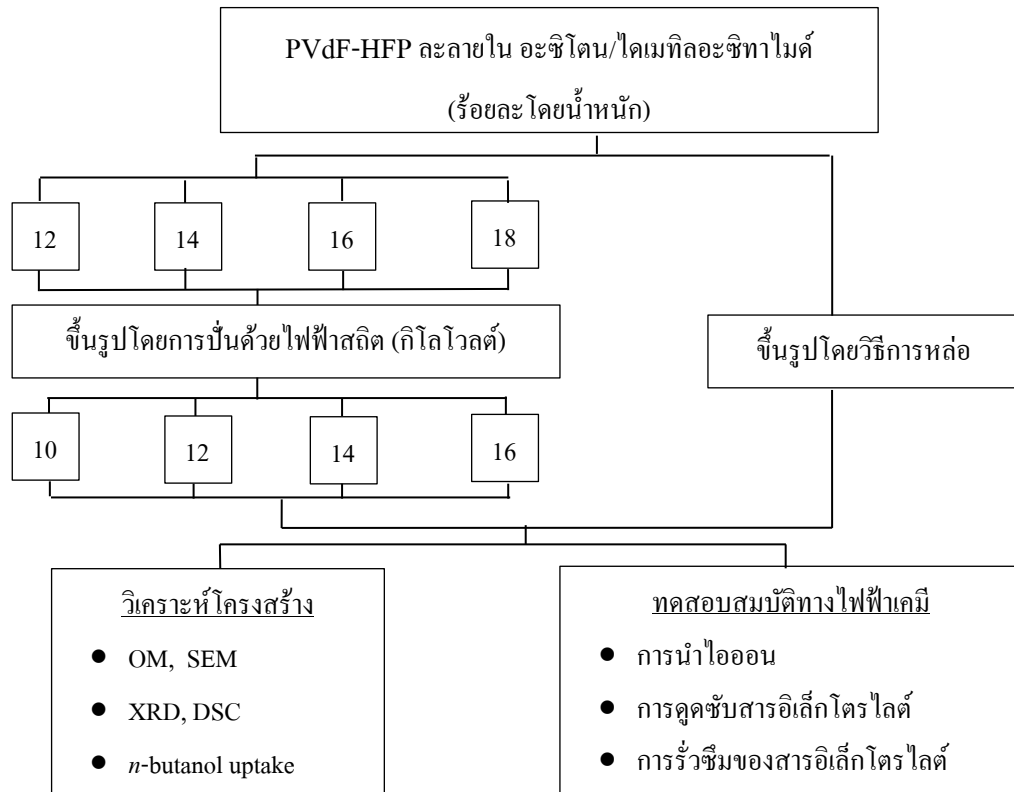
ส่วนที่ 1 การศึกษาผลของสภาวะการเตรียมต่อโครงสร้างและสมบัติของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์-เฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน

ส่วนที่ 2 การศึกษาผลของปริมาณอนุภาคนาโนแลนทานัมออกไซด์ที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของพอลิเมอร์ดังกล่าว

ส่วนที่ 3 การขึ้นรูปและทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสงที่ใช้แผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ โดยมีรายละเอียดของการทดลองแต่ละขั้นตอนดังนี้

3.2.1 การศึกษาผลของสภาวะการเตรียมต่อโครงสร้างและสมบัติของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์-เฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน

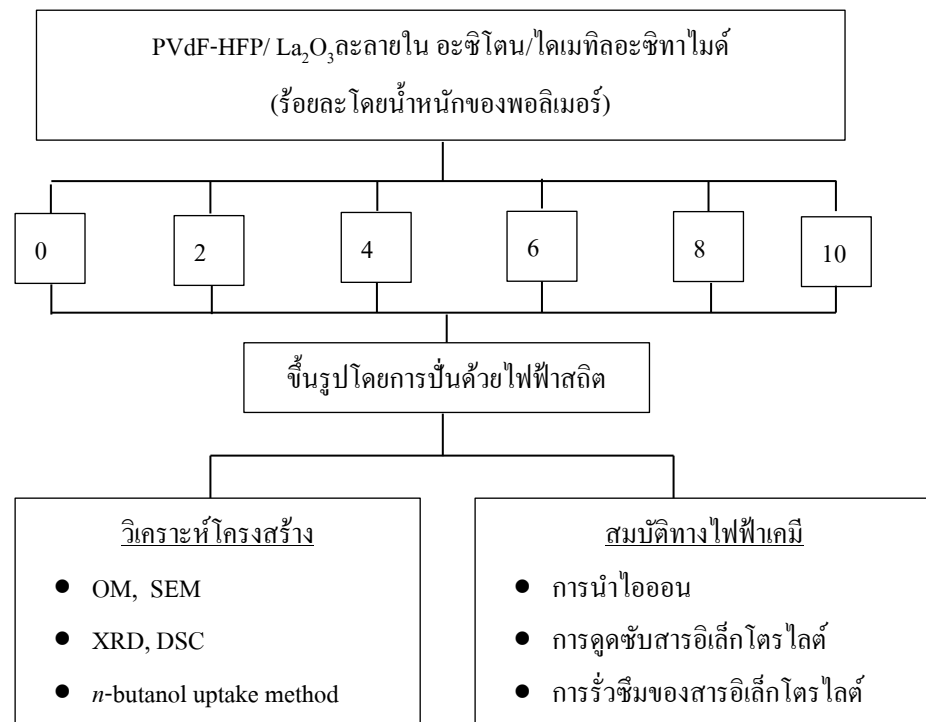
แผนผังการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์-เฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน (PVdF-HFP) จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยเริ่มจากการนำ PVdF-HFP มาละลายในตัวทำละลาย (อะซิโตน / โดเมทิลอะซิทาไมด์ : 7/3 อัตราส่วนโดยน้ำหนัก) ความเข้มข้นร้อยละ 12, 14, 16 และ 18 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยโดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและปรับเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 12, 14 และ 16 กิโลโวลต์ และนำชิ้นงานที่ได้ไปตรวจสอบลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณและโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ และเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ทดสอบความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิค *n*-butanol uptake method แล้วนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเคมีได้แก่ การนำไอออน การดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์เหลว และการรั่วซึมของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เปรียบเทียบสมบัติดังกล่าวข้างต้นกับ PVdF-HFP ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัยเพื่อศึกษาผลของสภาวะการเตรียมต่อโครงสร้างและสมบัติของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์-เฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน

3.2.2 การศึกษาผลของปริมาณอนุภาคนาโนแลนทานัมออกไซด์ที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบ

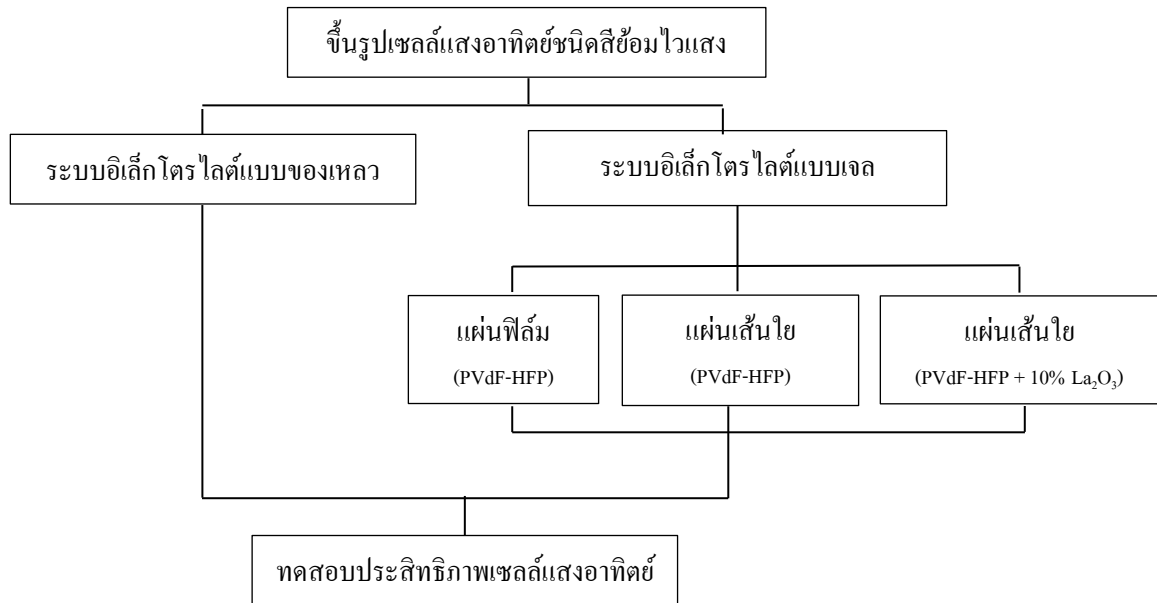
แผนผังการศึกษาค้นคว้าของปริมาณของอนุภาคนาโนแลนทานัมออกไซด์ (La_2O_3) ที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP แสดงในรูปที่ 3.2 โดยเริ่มจากการนำ PVdF-HFP ละลายในตัวทำละลาย (อะซิโตน / ไดเมทิลอะซิทาไมด์ : 7/3 อัตราส่วนโดยน้ำหนัก) และเติมของอนุภาคนาโน La_2O_3 ปริมาณร้อยละ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ จากนั้นทำการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยโดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต และนำชิ้นงานที่ได้ไปตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณและโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ และเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ทดสอบความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิค *n*-butanol uptake method แล้วนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเคมี ได้แก่ การนำไอออน การดูดซับสารอิเล็กโตรไลต์เหลว และการร่วซึมของสารละลายอิเล็กโตรไลต์



รูปที่ 3.2 แผนผังการดำเนินงานวิจัยเพื่อศึกษาผลของปริมาณของอนุภาคนาโน La_2O_3 ที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP

3.2.3 การขึ้นรูปและทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้แผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนเป็นสารอิเล็กโตรไลต์

ในการทดลองส่วนนี้เป็นการนำแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนมาใช้เป็นสารอิเล็กโตรไลต์ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์ดังกล่าวกับการใช้สารอิเล็กโตรไลต์ชนิดอื่น ดังแสดงในแผนผังการดำเนินงานวิจัย (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 แผนผังการดำเนินงานวิจัยเพื่อศึกษาผลของการใช้เส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนเป็นสารอิเล็กทรอนิกส์ที่มีต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสํย้อมไวแสง

3.3 การเตรียมวัสดุและกระบวนการจําแนกรูปจําแนก

สำหรับวิธีการเตรียมวัสดุ และกระบวนการจําแนกรูปจําแนก แสดงดังต่อไปนี้

3.3.1 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์-เฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน

การจําแนกรูปจําแนกโดยใช้วิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจําเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเตรียมพอลิเมอร์ให้อยู่ในรูปของสารละลาย โดยการเตรียมสารละลายพอลิเมอร์เริ่มจากนำ PVdF-HFP ไปละลายในตัวทำละลาย (อะซิโตน / ไดเมทิลอะซิทาไมด์ : 7/3 อัตราส่วนโดยน้ำหนัก) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย 12, 14, 16 และ 18 ร้อยละโดยน้ำหนัก ปั่นจนเป็นเวลา 52 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

3.3.2 การเตรียมสารละลายวัสดุเชิงประกอบนาโนของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์-เฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน

การเตรียมสารละลายวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP มีขั้นตอนดังนี้

- 1) อบอนุภาคนาโน La_2O_3 ภายใต้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- 2) นำอนุภาคนาโน La_2O_3 มาผสมกับอะซิโตน / ไดเมทิลอะซิทาไมด์ (7/3 อัตราส่วนโดยน้ำหนัก) โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
- 3) เติม PVdF-HFP ความเข้มข้นที่เหมาะสม กวนผสมสารละลายเป็นเวลา 3-4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนได้สารละลายของวัสดุเชิงประกอบนาโนของพอลิเมอร์ดังกล่าว

3.3.3 การขึ้นรูปแผ่นเส้นใยโดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

การขึ้นรูปแผ่นเส้นใยโดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำแผ่นอะลูมิเนียมฟอล์ยมาพับบนฉาก หรือพันรอบโรเตอร์เพื่อเตรียมเป็นอุปกรณ์รองรับเส้นใย
- 2) นำสารละลายพอลิเมอร์ที่เตรียมไว้บรรจุในกระบอกฉีดยาที่ต่อกับเข็มฉีดยา แล้วนำกระบอกฉีดยาไปประกอบเข้ากับเครื่องปรับอัตราการไหลของสารละลาย ยี่ห้อ Just Infussion รุ่น NE-300 ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับ 15 เซนติเมตร และปรับอัตราการป้อนสารละลายเป็น 2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง
- 3) ต่อสัคกีไฟฟ้าขั้วบวกเข้าที่ปลายเข็มฉีดยาและขั้วลบเข้าที่อุปกรณ์รองรับเส้นใย จากนั้นจ่ายกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดสัคกีไฟฟ้าแรงสูง ยี่ห้อ DMA รุ่น ES30P-5W โดยปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตามที่ต้องการ (10, 12, 14 และ 16 กิโลโวลต์)
- 4) ทำการปั่นสะสมเส้นใยเป็นเวลา 3 นาที ลงบนแผ่นอะลูมิเนียมฟอล์ย (รูปที่ 3.4) เพื่อนำแผ่นเส้นใยที่สะสมอยู่บนอะลูมิเนียมฟอล์ยไปทำตรวจสอบโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา หากต้องการเตรียมเป็นแผ่นเส้นใยเพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ จะต้องทำการปั่นสะสมเส้นใยเป็นเวลา 2 ชั่วโมง 30 นาที ลงบนโรเตอร์ (อัตราเร็วของการหมุนเท่ากับ 140 รอบต่อนาที) ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมฟอล์ยเป็นอุปกรณ์รองรับเส้นใย



รูปที่ 3.5 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้วัสดุรองรับแบบโรเตอร์

- 5) เมื่อได้แผ่นเส้นใยตามที่ต้องการแล้วให้ทำการปิดเครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (ก่อนปิดสวิตช์ต้องลดความต่างศักย์ไฟฟ้าลงก่อน)
- 6) นำแผ่นเส้นใยที่สะสมอยู่บนอะลูมิเนียมฟอล์ยไปอบภายใต้สภาวะสูญญากาศที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อกำจัดตัวทำละลายออกให้หมด จากนั้นจึงแผ่นเส้นใยออกจากอะลูมิเนียมฟอล์ยก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ โดยแผ่นเส้นใยที่ได้มีความหนาอยู่ในช่วง 20 – 32 ไมโครเมตร (รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ข) ตัวอย่างแผ่นเส้นใยแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผ่นเส้นใยที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

3.3.4 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยวิธีการหล่อ

การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยวิธีการหล่อมียขั้นตอนดังนี้

- 1) เตรียมสารละลาย PVdF-HFP ในตัวทำละลาย (อะซิโตน / ไดเมทิลอะซิทาไมด์ : 7/3 อัตราส่วนโดยน้ำหนัก) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย 10 ร้อยละโดยน้ำหนัก
- 2) นำสารละลายพอลิเมอร์มาเทลงในจานเพาะเชื้อ แล้วปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยออกอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิสถานะปกติ
- 3) นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปอบภายใต้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อกำจัดตัวทำละลายออกให้หมดก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ โดยความหนาของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้คือ 50 ไมโครเมตร

3.3.5 การเตรียมพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์

ในการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเคมี เช่น การนำไฟฟ้า และการรั่วซึมของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ จำเป็นจะต้องเตรียมชิ้นงานไม่ว่าจะเป็นแผ่นเส้นใยหรือแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ให้อยู่ในรูปของพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ก่อน โดยการนำชิ้นงานไปแช่ด้วยสารละลายอิเล็กโตรไลต์เหลวที่ประกอบด้วย 1 โมลาร์ของลิเทียมไอโอไดด์ / 0.1 โมลาร์ของไอโอดีน ในเอทิลีนคาร์บอนเนต/ไดเมทิลคาร์บอนเนต : 1/1 สัดส่วนโดยปริมาตร เป็นเวลา 30 นาที

3.3.6 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

1) เตรียมกระจกนำไฟฟ้า (กระจก FTO)

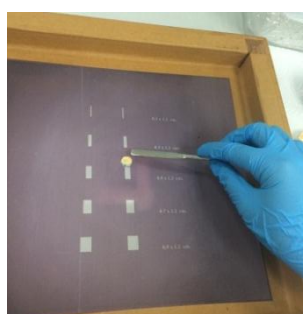
- 1.1 ตัดกระจกนำไฟฟ้าให้มีขนาด 2×3 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น (1 เซลล์ใช้กระจก 2 แผ่น)
- 1.2 เจาะรูกระจก 1 แผ่น (เจาะรู 2 รู หัวท้ายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร) เพื่อใช้เป็นช่องทางในการเดินสารอิเล็กโทรไลต์
- 1.3 ล้างกระจกทั้งสองด้วยน้ำยาล้างเครื่องแก้วโดยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำกระจกไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนโดยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที ล้างกระจกด้วยอะซิโตนโดยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที สุดท้ายล้างด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์โดยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที แล้วอบให้แห้ง

2) การเตรียมขั้วไฟฟ้าแอโนด

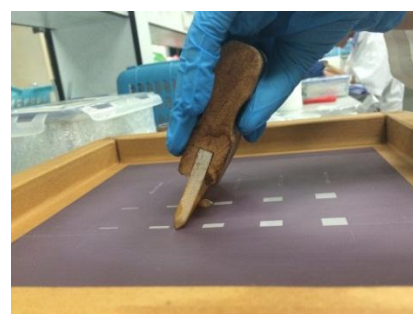
- 2.1 นำกระจก FTO ไปสกรีนด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้บล็อกสกรีนดังแสดงในรูปที่ 3.7



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.7 การสกรีนไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนกระจก FTO โดยใช้บล็อกสกรีน

(ก) ตักไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้แท่งโลหะที่มีลักษณะแบน

(ข) ป้ายไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนบล็อกสกรีน

(ค) ปาดไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ติดกระจก FTO โดยใช้ยางปาด

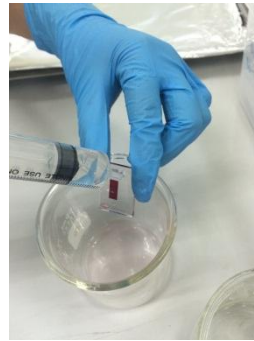
- 2.2 นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำซ้ำกัน 3 ครั้งเพื่อให้ได้ความหนาของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 15 ไมโครเมตร

- 2.3 นำกระจก FTO ที่สกรีนด้วยไทเทเนียมออกไซด์ไปเผาโดยใช้อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2.4 นำไปแช่สีย้อมไวแสงความเข้มข้น 0.3 มิลลิโมลาร์ (เจือจางสีย้อมในเอทานอล) ในที่มีดที่อุณหภูมิสภาวะปกติเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำออกมาล้างด้วยเอทานอล (รูปที่ 3.8) และนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.8 การล้างกระจกด้วยเอทานอลหลังจากแช่สีย้อมไวแสง

(ก) กระจก FTO ที่สกรีนด้วยไทเทเนียมออกไซด์แช่อยู่ในสีย้อมไวแสง

(ข) การล้างกระจกด้วยเอทานอล

3) การเตรียมขั้วไฟฟ้าแคโทด

3.1 นำกระจก FTO (เจาะรู 2 รู หัวท้ายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร) ไปสกรีนด้วยแพตตินัมดังแสดงในรูปที่ 3.9

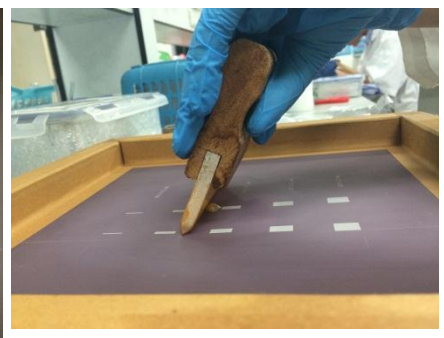
3.2 เฝ้าโดยใช้อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.9 การสกรีนแพตตินัมลงบนกระจก FTO โดยใช้บล็อกสกรีน

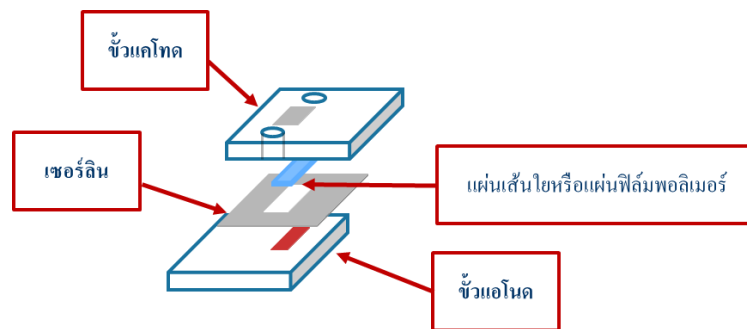
(ก) ตักแพตตินัม โดยใช้แท่งโลหะที่มีลักษณะแบน

(ข) ป้ายแพตตินัมลงบนบล็อกสกรีน

(ค) ปาดแพตตินัมให้ติดกระจก FTO โดยใช้ยางปาด

4) การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

- 4.1 ตัดแผ่นฟิล์ม Surlyn ขนาด 4×3 ตารางเซนติเมตร และเจาะรูตรงกลางให้มีช่องขนาด 2.5×1 ตารางเซนติเมตร
- 4.2 วางขั้วไฟฟ้าแอโนดไว้ด้านล่างโดยให้ด้านที่มีฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หงายขึ้น
- 4.3 วางแผ่นฟิล์ม Surlyn และแผ่นสื่อนิยหรือแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ จากนั้นวางขั้วไฟฟ้าแคโทดประกบลงบนแผ่นแผ่นฟิล์ม Surlyn และแผ่นสื่อนิยหรือแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ โดยให้ด้านที่มีฟิล์มแพตตินัมคว่ำลงดังแสดงในรูปที่ 3.10



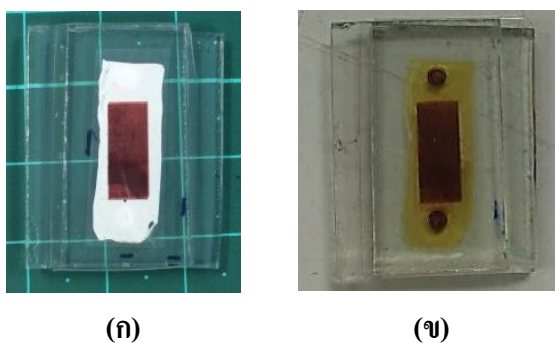
รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

- 4.4 นำคลิปหนีบกระดาษหนีบขั้วไฟฟ้าแคโทดและขั้วไฟฟ้าแอโนด และตัดแผ่นฟิล์ม Surlyn ส่วนเกินที่ยื่นออกจากตัวเซลล์
- 4.5 ทำการผนึกเซลล์โดยใช้เครื่องเป่าลมร้อนเป่าด้านบนของเซลล์ เมื่อแผ่นฟิล์ม Surlyn เริ่มหลอมให้กลับด้านเซลล์และใช้เครื่องเป่าลมร้อนเป่าต่อจนแผ่นฟิล์ม Surlyn หลอมสมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การผนึกเซลล์โดยใช้เครื่องเป่าลมร้อน

4.6 เมื่อเซลล์เย็นตัวลงที่อุณหภูมิสถานะปกติแล้ว นำคลิป์ที่หนีบเซลล์ออก จากนั้นหยอดสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าไปในเซลล์แล้วปิดผนึกรูเจาะด้วยเทปกาวยใส เพื่อทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ภายใต้เงื่อนไขที่ AM 1.5 ความเข้มแสงเท่ากับ 100 mW/cm^2



รูปที่ 3.12 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงก่อน (ก) และหลัง (ข) หยอดสารอิเล็กโทรไลต์

3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างและทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

3.4.1 โครงสร้างพื้นฐานวิทยา

ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มและแผ่นสื่อนำชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยตัดชิ้นงานเป็นสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก ดัดบนสตั๊ปด้วยเทปกาวคาร์บอนและนำไปเคลือบด้วยทองคำก่อน เพื่อให้ชิ้นงานนำไฟฟ้า จากนั้นนำไปสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-LV โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ (Detectors) แบบ back scattering และแบบ secondary electron และใช้กำลังศักย์ไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอน 10-15 กิโลโวลต์ ในการสแกนภาพ และตรวจสอบชนิดและการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy dispersive X-Ray spectroscopy, EDS)



รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.4.2 โครงสร้างผลึก

งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกของชิ้นงานด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น D8-Discover ดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยใช้รังสี $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1.54056$ อังสตรอม) ที่ 40 กิโลโวลต์ และ 40 มิลลิแอมป์ ตรวจวัดแบบ 2 θ -scan โดยสแกน 2 θ จาก 5° ถึง 60°



รูปที่ 3.14 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

3.4.3 สมบัติทางความร้อน

ทำการวิเคราะห์อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และความเป็นผลึกของชิ้นงานด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น 204F1 โดยเตรียมชิ้นงานที่มีน้ำหนักประมาณ 9-10 มิลลิกรัม บรรจุในภาชนะสุญญากาศ ให้ความร้อนแก่ชิ้นงานด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิ 30 – 200 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที พร้อมทั้งทำการคำนวณหาความเป็นผลึกในชิ้นงาน PVdF-HFP จากสมการที่ 3.1

$$X_c = \frac{\Delta H}{\Delta H_0} \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

เมื่อ X_c คือ ความเป็นผลึก (ร้อยละ)

ΔH คือ พลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึกของชิ้นงาน PVdF-HFP (จูลต่อกรัม)

ΔH_0 คือ พลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึกสมบูรณ์ของ PVdF-HFP (104.7 จูลต่อกรัม) [18]

3.4.4 การทดสอบความเป็นรูพรุน

ความเป็นรูพรุนของชิ้นงานสามารถหาได้จากการทดสอบความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิค *n*-butanol uptake method โดยทำการตัดแผ่นชิ้นงานให้ได้ขนาด 2×2 ตารางเซนติเมตร และชั่งน้ำหนักชิ้นงานแล้วแช่ลงในบิวทานอลเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นมาชั่งด้วยกระดาษกรองเบาๆ แล้วชั่งน้ำหนักแผ่นชิ้นงานหลังแช่บิวทานอล ความเป็นรูพรุนคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 [88]

$$P(\%) = \frac{M_{BuOH}/\rho_{BuOH}}{M_{BuOH}/\rho_{BuOH} + M_m/\rho_p} \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

เมื่อ P คือ ค่าความเป็นรูพรุน (ร้อยละ)

M_{BuOH} คือ น้ำหนักของบิวทานอลที่ถูกดูดซับเข้าไป (น้ำหนักของแผ่นชิ้นงานหลังจากแช่ในบิวทานอล ลบ น้ำหนักของแผ่นชิ้นงานก่อนแช่ในบิวทานอล) (กรัม)

M_m คือ น้ำหนักของแผ่นชิ้นงานก่อนแช่ในบิวทานอล (กรัม)

ρ_{BuOH} คือ ความหนาแน่นของบิวทานอล (มีค่าเท่ากับ 0.81 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

ρ_p คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ (มีค่าเท่ากับ 1.77 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

3.5 การทดสอบสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์

3.5.1 การทดสอบอัตราส่วนการดูดซับสารอิเล็กโตรไลต์

การทดสอบอัตราส่วนการดูดซับสารอิเล็กโตรไลต์สามารถทำได้โดยทำการตัดแผ่นชิ้นงานให้ได้ขนาด 2×2 ตารางเซนติเมตร และชั่งน้ำหนักแผ่นชิ้นงาน แล้วแช่ลงในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ 1 โมลาร์ของลิเทียมไอโอไดด์ / 0.1 โมลาร์ของไอโอดีน ในเอทิลีนคาร์บอนेट/ไดเมทิลคาร์บอนेट (1:1 สัดส่วนโดยปริมาตร) เป็นเวลา 1, 3, 5, 10, 15, 30, 45 และ 60 นาที จากนั้นนำแผ่นชิ้นงานออกใช้กระดาษกรองซับเบาๆ ที่แผ่นชิ้นงานเพื่อให้สารอิเล็กโตรไลต์ที่ผิวของแผ่นชิ้นงานหลุดออก แล้วนำไปชั่งน้ำหนักแผ่นชิ้นงานหลังการแช่สารละลายอิเล็กโตรไลต์ อัตราส่วนการดูดซับสารอิเล็กโตรไลต์คำนวณได้จากสมการที่ 3.3 [18]

$$A_{\text{uptake}}(\%) = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.3}$$

เมื่อ	A_{uptake}	คือ อัตราส่วนการดูดซับสารอิเล็กโตรไลต์ (ร้อยละ)
	M_0	คือ น้ำหนักของแผ่นชิ้นงานก่อนแช่ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ (กรัม)
	M_1	คือ น้ำหนักของแผ่นชิ้นงานหลังจากแช่ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ (กรัม)

3.5.2 การทดสอบการรั่วซึมออกของสารอิเล็กโตรไลต์

การทดสอบการรั่วซึมออกของสารอิเล็กโตรไลต์ทำได้โดย นำแผ่นชิ้นงานไปแช่ในสารอิเล็กโตรไลต์เป็นเวลา 30 นาที หรือจนกว่าแผ่นชิ้นงานจะอิ่มตัว จากนั้นนำแผ่นชิ้นงานออกจากสารอิเล็กโตรไลต์ แล้วชั่งน้ำหนักที่ช่วงเวลาต่างๆ (20, 40, 60, 80, 100 และ 120 นาที) โดยก่อนชั่งน้ำหนักจะต้องใช้กระดาษกรองซับเบาๆ ที่แผ่นชิ้นงานเพื่อให้สารอิเล็กโตรไลต์ที่ผิวของแผ่นชิ้นงานหลุดออกก่อน จากนั้นนำมาคำนวณดังสมการที่ 3.4 [24]

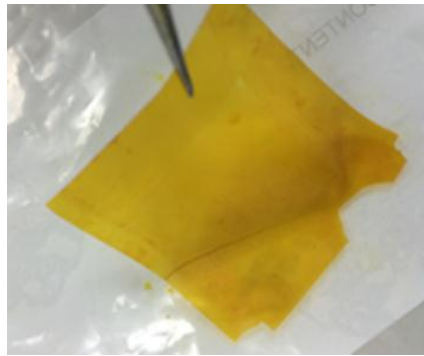
$$R_{\text{Re}} = \frac{M_p}{M_{p,\text{saturated}}} \quad \text{สมการที่ 3.4}$$

เมื่อ	R_{Re}	คือ อัตราส่วนการดูดซึมสัมพัทธ์
	M_p	คือ น้ำหนักของแผ่นชิ้นงานที่ช่วงเวลาต่างๆ (กรัม)
	$M_{p,\text{saturated}}$	คือ น้ำหนักของแผ่นชิ้นงานหลังจากแช่ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์จนอิ่มตัวแล้ว (กรัม)

3.5.3 การวัดค่าการนำไอออน

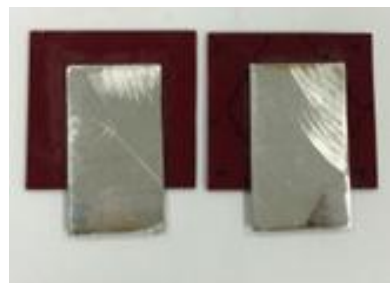
การวัดค่าการนำไอออนมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ตัดแผ่นชิ้นงานให้ได้ขนาด 4.5×4.5 ตารางเซนติเมตร แล้วนำไปแช่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จนอิ่มตัว (รูปที่ 3.15) จากนั้นซับสารอิเล็กโทรไลต์ที่ผิวของแผ่นชิ้นงานออก

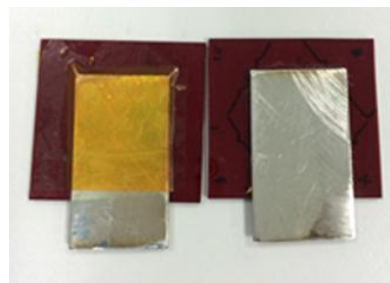


รูปที่ 3.15 แผ่นชิ้นงานหลังจากแช่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

- 2) นำแผ่นชิ้นงานไปวางบนแผ่นสแตนเลส (ขนาด 2.5×4.5 ตารางเซนติเมตร) (รูปที่ 3.16)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.16 แผ่นสแตนเลส (ก) และการวางแผ่นชิ้นงานลงบนแผ่นสแตนเลส (ข)

- 3) ประกอบด้วยแผ่นสแตนเลสที่มีขนาดเท่ากันอีกแผ่นและใช้คลิปหนีบกระดาษหนีบที่มุมทั้ง 4 (พื้นที่ของชิ้นงานที่ใช้วัดความต้านทานรวมคือ 2.5×2.5 ตารางเซนติเมตร) แล้วต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อวัดค่าความต้านทานรวมของระบบด้วยเครื่องทดสอบไฟฟ้าทางเคมี โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 ถึง 1×10^6 เฮิรตซ์ กำหนดแอมพลิจูดเท่ากับ 10 มิลลิโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.17 และทดสอบภายใต้สภาวะปกติ แล้วนำไปคำนวณค่าการนำไอออนดังสมการที่ 3.5 [18]



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.17 การใช้คลิปหนีบกระดาษหนีบที่มุมทั้ง 4 ของแผ่นสแตนเลส (ก) และลักษณะการต่อจั่วไฟฟ้า (ข) เพื่อวัดค่าความต้านทานรวมของระบบ

$$\sigma = \frac{1}{R \cdot S}$$

สมการที่ 3.5

เมื่อ σ คือ ค่าการนำไอออน (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)

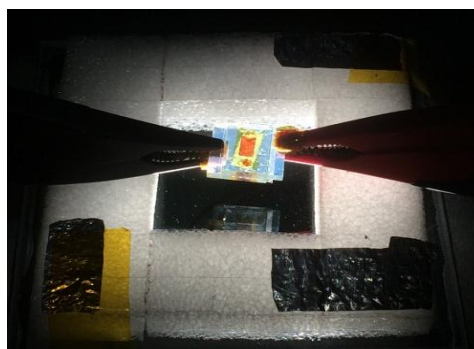
l คือ ความหนาของชิ้นงาน (เซนติเมตร)

R คือ ความต้านทานรวมของระบบได้จากจุดตัดแกน x ที่ความถี่สูงของกราฟ Nyquist (โอห์ม)

S คือ พื้นที่ของชิ้นงาน (ตารางเซนติเมตร)

3.6 การวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ทำการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงด้วยเครื่องจำลองแสงเทียม (solar simulator) ยี่ห้อ Sciencetech รุ่น SS150 ระบบควบคุมคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 4200-SCS โดยใช้หลอดซีนอน (Xe lamp, Osram) ซึ่งติดตั้งฟิลเตอร์ AM 1.5 และความเข้มของแสง 100 mW/cm^2 ภายใต้สภาวะปกติ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ประกอบขึ้นในงานวิจัยนี้มีพื้นที่เท่ากับ 0.6 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 3.18 การวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงด้วยเครื่องจำลองแสงเทียม

บทที่ 4 ผลการทดลอง

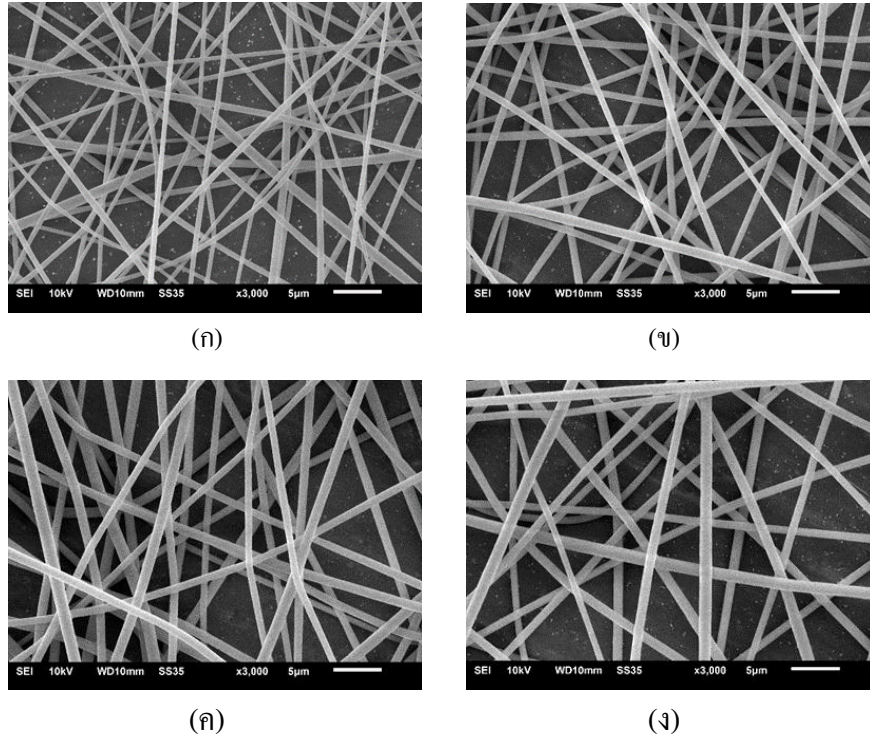
ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลการทดลองและวิจารณ์ผลโดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ การศึกษาผลของสถานะการเตรียมต่อโครงสร้างและสมบัติของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์-เฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน การศึกษาผลของปริมาณของอนุภาคนาโนแลนทานัมออกไซด์ที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของพอลิเมอร์ดังกล่าว และการขึ้นรูปและทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้วัสดุเชิงประกอบนาโนเป็นสารอเล็กโตรไลต์ ซึ่งผลการทดลองในแต่ละส่วนมีรายละเอียดและสาระสำคัญ ดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาผลของสถานะการเตรียมต่อโครงสร้างและสมบัติของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์-เฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน

4.1.1 โครงสร้างฐานานวิทยา

4.1.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์

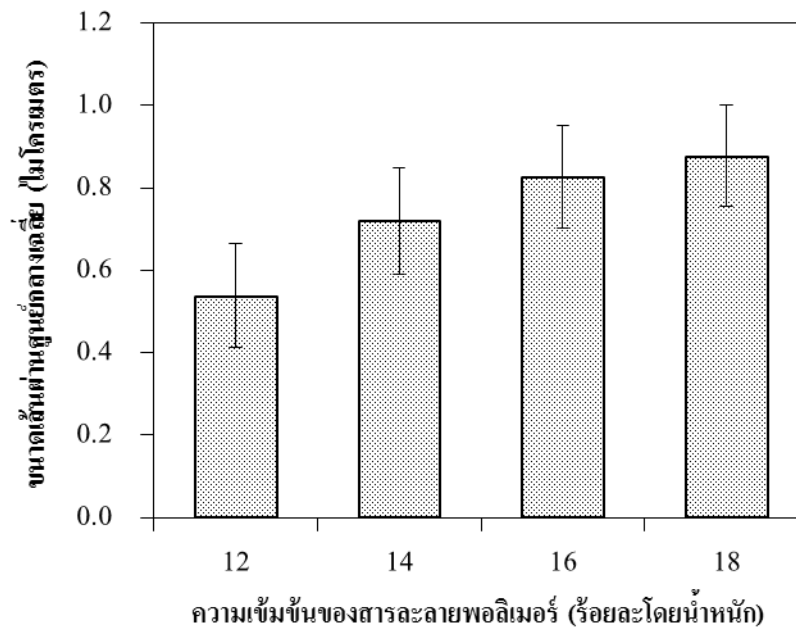
รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใย PVdF-HFP ที่ผ่านการขึ้นรูปโดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่ความเข้มข้นต่างๆ (ร้อยละ 12, 14, 16 และ 18 โดยน้ำหนัก) พบว่าสารละลายพอลิเมอร์ทุกความเข้มข้นสามารถผ่านการขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้สำเร็จ โดยเส้นใยที่ได้มีลักษณะยาวสม่ำเสมอ พื้นผิวเรียบปราศจากรูพรุนและเม็ดบีด (Bead) ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายมีความหนืดมากเพียงพอที่จะทำให้ลำของสารละลายที่พุ่งออกมาจากปลายเข็มในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตมีความต่อเนื่อง [71]



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใย PVdF-HFP ที่ความเข้มข้นต่างๆ ร้อยละ 12 (ก), ร้อยละ 14 (ข), ร้อยละ 16 (ค), และ ร้อยละ 18 (ง) โดยน้ำหนัก (ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์)

เมื่อพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย (รูปที่ 4.2) พบว่ามีขนาดเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 0.58 – 0.88 ไมโครเมตร โดยเมื่อความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจะทำให้ความหนืดของสารละลายสูงขึ้นและสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์มีโอกาสเกิดการเกี่ยวพันกันมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการยืดออกของเส้นใยได้น้อยลง [71, 89]

อย่างไรก็ตามเนื่องจากเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กจะช่วยให้แผ่นเส้นใยสามารถดูดซับสารอิเล็กโตรไลต์ไว้ได้มาก [90] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 12 โดยน้ำหนักในการนำไปศึกษาต่อไป

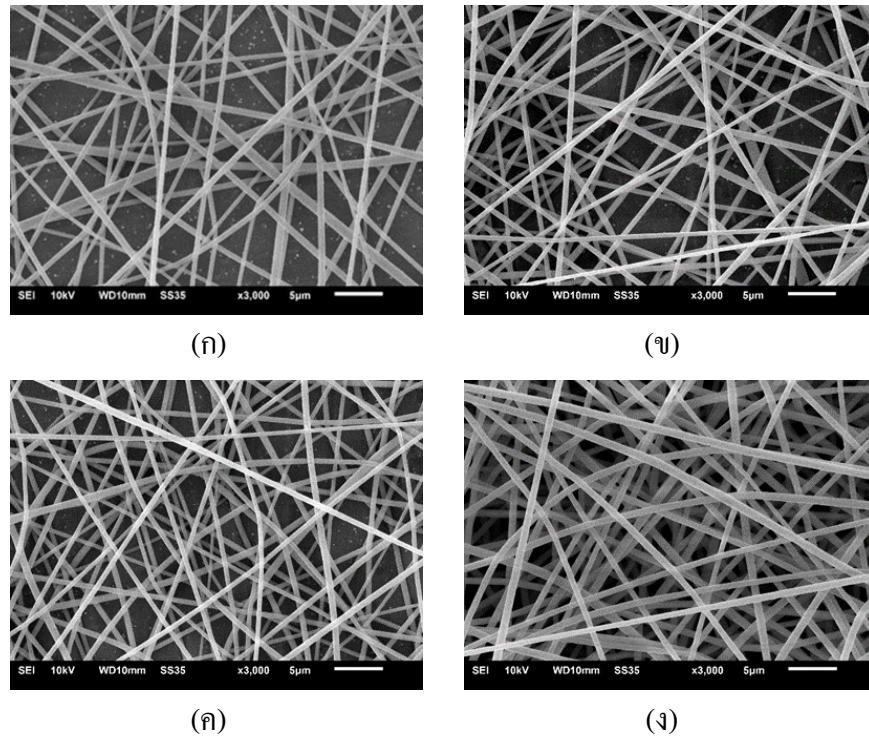


รูปที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย PVdF-HFP (ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์)

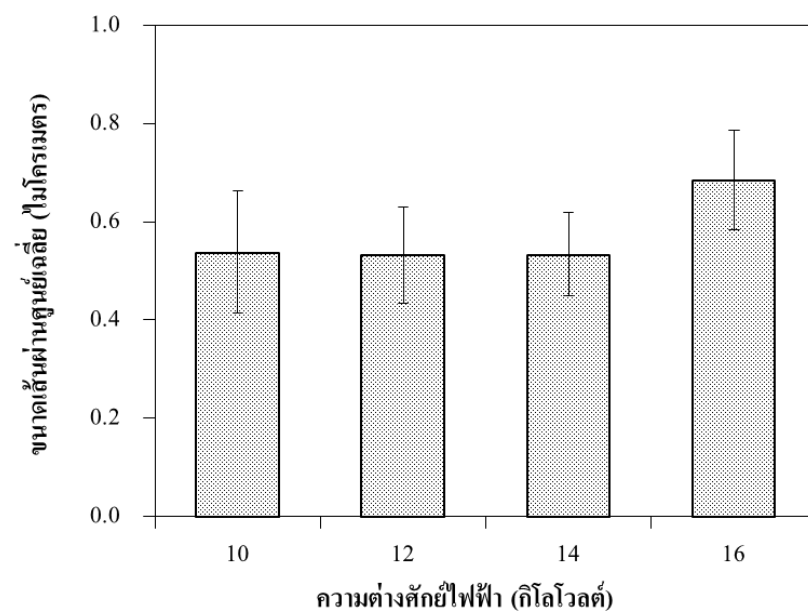
4.1.1.2 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้า พบว่าลักษณะทางกายภาพของเส้นใยโดยรวมไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 กล่าวคือ เส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นใยตรงสม่ำเสมอ พื้นผิวของเส้นใยเรียบไม่มีรูพรุนและไม่มีเม็ดบีดเกิดขึ้นบนเส้นใย และจากการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยที่ผ่านการขึ้นรูปที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ (รูปที่ 4.4) พบว่าการเพิ่มความต่างศักย์จาก 10 กิโลโวลต์ ถึง 14 กิโลโวลต์ ไม่ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย แต่เมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 16 กิโลโวลต์ พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

โดยทั่วไปแล้ว การเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าอาจจะส่งผลทำให้เกิดการยืดของลำสารละลายมากขึ้น ทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลง [78, 80, 81] อย่างไรก็ตามในทางตรงกันข้ามอาจเป็นไปได้ว่าการเพิ่มความต่างศักย์มีผลทำให้มวลของสารที่ออกจากปลายเข็มเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นจึงทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยเพิ่มขึ้น [70, 91] ดังตัวอย่างที่พบในงานวิจัยของ Meechaisue และคณะ ฯ [89] ซึ่งพบว่าการเพิ่มสนามไฟฟ้าจาก 10 ถึง 20 กิโลโวลต์/10 เซนติเมตร ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยไหมที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 480 นาโนเมตร เป็น 810 นาโนเมตร



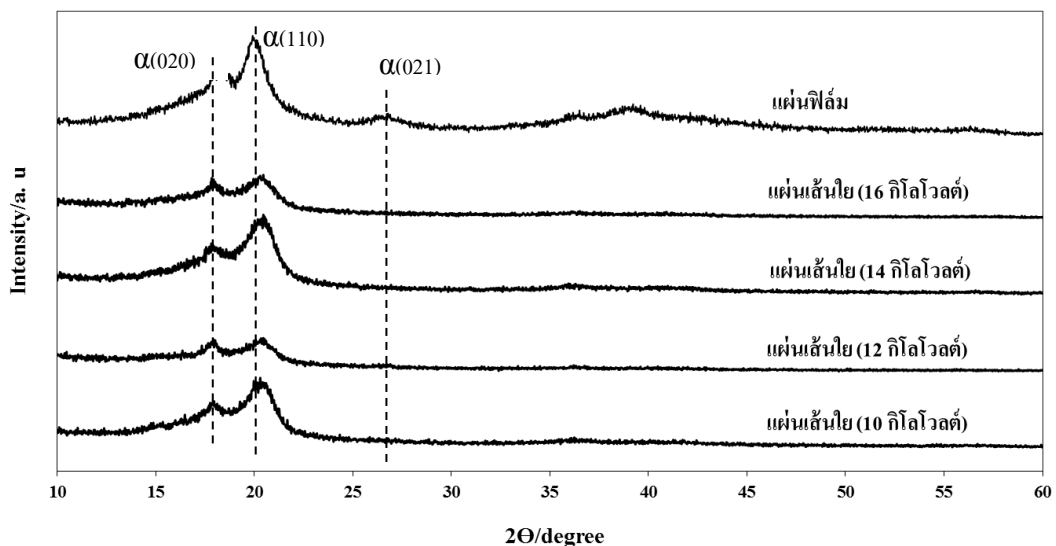
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใย PVdF-HFP ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ 10 (ก), 12 (ข), 14 (ค), และ 16 (ง) กิโลโวลต์ (ใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก)



รูปที่ 4.4 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย PVdF-HFP (ใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก)

4.1.2 โครงสร้างผลึกและสมบัติทางความร้อน

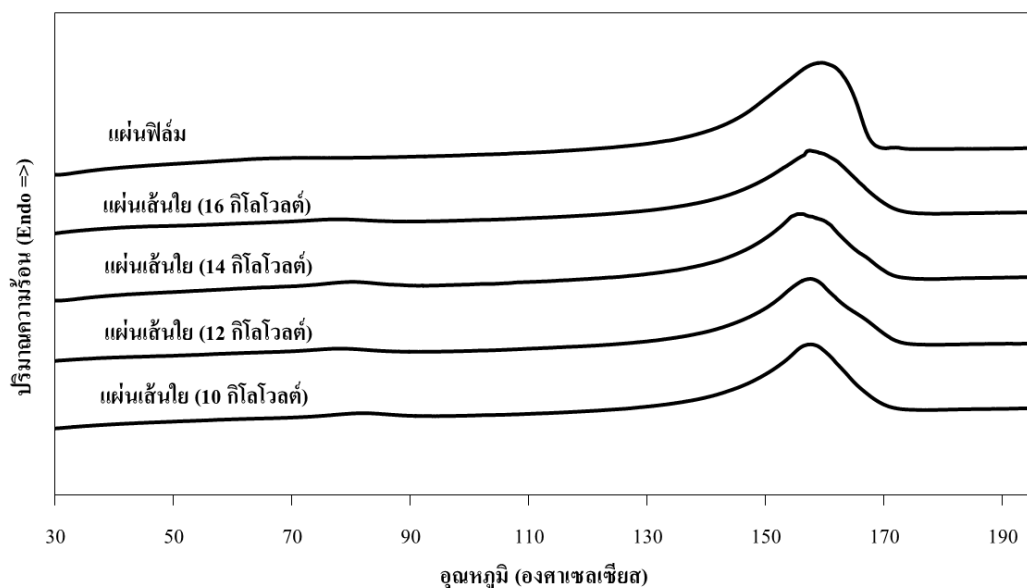
รูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแผ่นเส้นใย PVdF-HFP ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ จะสังเกตพบพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 18.3° , 20° และ 26.6° ตามลำดับ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงระนาบ (020), (110) และ (021) ของ PVdF โดยลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อ โดยตำแหน่งพีคเหล่านี้ยืนยันว่าพอลิเมอร์ดังกล่าวมีโครงสร้างผลึกรูปแบบ α [92] ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่ากระบวนการขึ้นรูปที่แตกต่างกันไม่ส่งผลทำให้ PVdF-HFP มีโครงสร้างผลึกต่างกัน นอกจากนี้แล้วเมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต พบว่าไม่ทำให้โครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงาน PVdF-HFP ประเภทต่างๆ (ใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก)

รูปที่ 4.6 แสดง DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นเส้นใย PVdF-HFP ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ พบว่าอุณหภูมิในการหลอมตัว (T_m) ของพอลิเมอร์ดังกล่าวอยู่ที่ 158°C องศาเซลเซียส และไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และเมื่อพิจารณาความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ พบว่าความเป็นผลึกของแผ่นเส้นใยที่ขึ้นรูปโดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต (ประมาณร้อยละ 47) มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปโดยการหล่อ (ประมาณร้อยละ 59) ซึ่งการที่พอลิเมอร์มีความเป็นผลึกลดลงจะส่งผลดีต่อสมบัติด้านการนำไอออนของพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ [13] สำหรับสาเหตุที่แผ่นเส้นใยที่ขึ้นรูปโดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีความเป็นผลึกน้อยกว่า สามารถอธิบายได้จากระยะเวลาในการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล โดยในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนั้น

ล้าของเส้นใยที่พุ่งออกมาจากปลายเข็มไปยังฉากรับจะได้รับอิทธิพลจากสองกระบวนการที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ได้แก่ การดึงยึดเส้นใยด้วยแรงจากไฟฟ้าสถิต และการระเหยออกของตัวทำละลาย [93] กล่าวคือในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจะมีการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงดังนั้นจะทำให้จำนวนของประจุที่อยู่ในสารละลายพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เกิดการยึดตัวของลำเส้นใยมากขึ้น นำไปสู่การจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เพิ่มขึ้น [94] แต่อย่างไรก็ตามการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงยังส่งผลทำให้ล้าของเส้นใยมีระยะเวลาในการเดินทางจากปลายเข็มไปยังฉากรับน้อย เนื่องจากล้าของเส้นใยที่พุ่งออกมาถูกแรง ส่งผลให้พอลิเมอร์มีเวลาไม่เพียงพอสำหรับกระบวนการการเกิดผลึก จึงทำให้มีความเป็นผลึกน้อยลง ในขณะที่การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยกระบวนการหล่อที่ตัวทำละลายระเหยออกอย่างช้าๆ จึงทำให้มีความเป็นผลึกที่มากกว่า [95] ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวคล้ายกับงานวิจัยของ Dhanalakshmi และ Jog [93] ที่ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการขึ้นรูปที่ส่งผลต่อระดับความเป็นผลึกของไนลอน 11 โดยพบว่าความเป็นผลึกของการขึ้นรูปในลอน 11 จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับความเป็นผลึกของไนลอน 11 ที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อ นอกจากนี้แล้วเมื่อพิจารณาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต พบว่าการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกันไม่ทำให้ความเป็นผลึกของ PVdF-HFP เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 DSC เทอร์โมแกรมของชิ้นงาน PVdF-HFP ประเภทต่างๆ (ใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก)

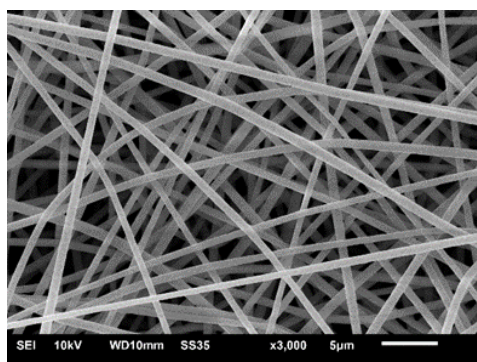
4.1.3 ความเป็นรูพรุน

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความเป็นรูพรุนของแผ่นฟิล์มและแผ่นเส้นใย PVdF-HFP ประเภทต่างๆ พบว่าแผ่นเส้นใยที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่ใช้ความต่างศักย์ต่างๆ มีค่าความเป็นรูพรุนใกล้เคียงกัน (มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 88.04 – 89.90) ซึ่งให้เห็นว่าความต่างศักย์ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความเป็นรูพรุนของแผ่นเส้นใย เนื่องจากผลของการมีลักษณะพื้นฐานวิทยาที่เป็นเส้นใยและมีรูปแบบการซ้อนทับกันของเส้นใยที่คล้ายคลึงกัน [24]

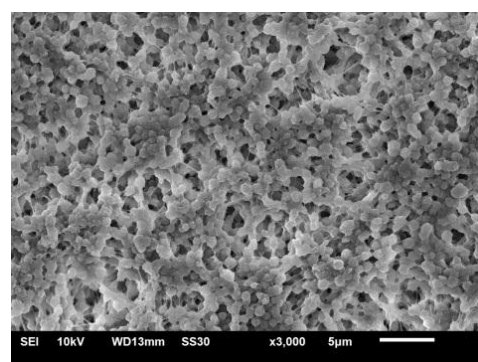
ในกรณีของตัวอย่างที่เป็นแผ่นฟิล์มพบว่ามีค่าความเป็นรูพรุนประมาณร้อยละ 43 ซึ่งต่ำกว่าของแผ่นเส้นใยทุกชนิด เนื่องจากลักษณะทางพื้นฐานวิทยาที่แตกต่างกัน โดยกรณีของแผ่นเส้นใยจะมีการซ้อนทับกันอย่างหลวมของเส้นใยทำให้มีรูพรุนเกิดขึ้นปริมาณมากกว่า [15] ดังแสดงในรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.1 ค่าความเป็นรูพรุนของแผ่นฟิล์มและแผ่นเส้นใย PVdF-HFP ประเภทต่างๆ (ใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก)

ชิ้นงาน	ความเป็นรูพรุน (ร้อยละ)
แผ่นฟิล์ม	42.72 (± 0.44)
แผ่นเส้นใย (10 กิโลโวลต์)	88.43 (± 0.43)
แผ่นเส้นใย (12 กิโลโวลต์)	89.80 (± 0.78)
แผ่นเส้นใย (14 กิโลโวลต์)	89.04 (± 0.60)
แผ่นเส้นใย (16 กิโลโวลต์)	89.90 (± 0.68)



(ก)

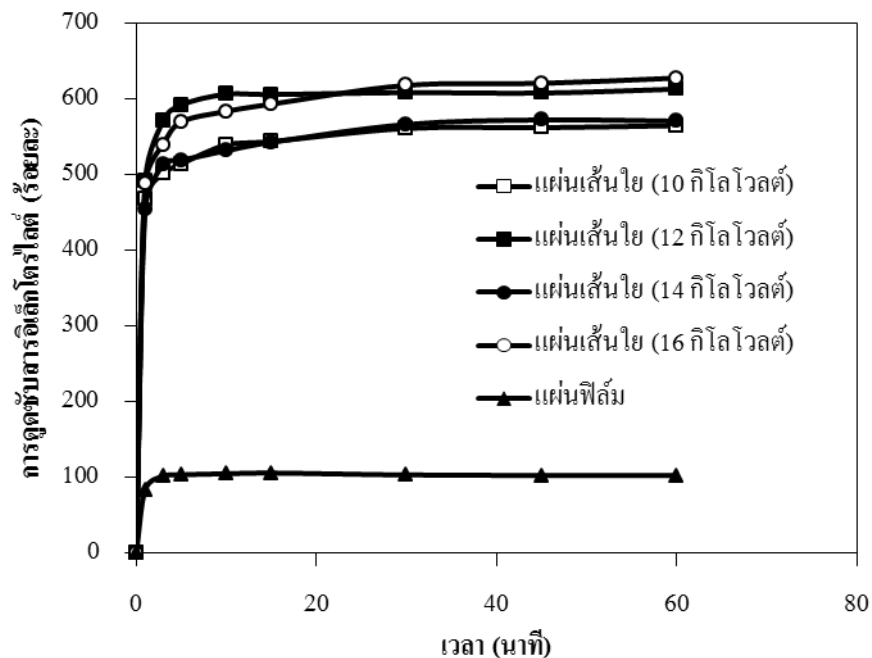


(ข)

รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ PVdF-HFP ที่ขึ้นรูปโดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต (ก) และการหล่อ (ข)

4.1.4 การดูดซับสารอิเล็กทรอนิกส์และการรั่วซึมออกของสารอิเล็กทรอนิกส์

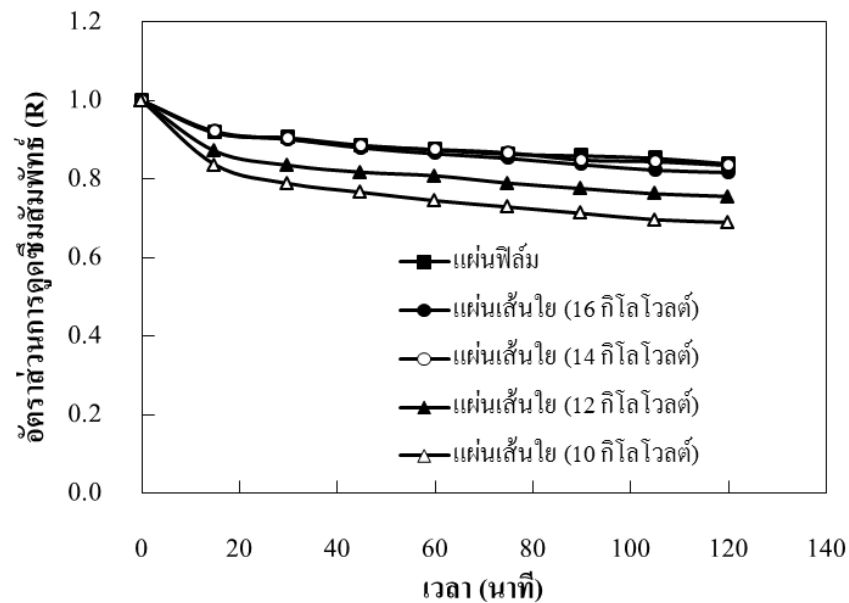
เมื่อนำแผ่นเส้นใยที่ขึ้นรูปโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ (10 - 16 กิโลโวลต์) และแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อไปทดสอบสมบัติการดูดซับสารอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าทั้งแผ่นเส้นใยและแผ่นฟิล์มสามารถดูดซับสารอิเล็กทรอนิกส์จุ่มตัวในเวลา 20 นาที (รูปที่ 4.8) โดยแผ่นเส้นใยมีค่าการดูดซับสารอิเล็กทรอนิกส์อยู่ในช่วงร้อยละ 572 - 620 ในขณะที่แผ่นฟิล์มให้ค่าการดูดซับสารอิเล็กทรอนิกส์ประมาณร้อยละ 103 สาเหตุเนื่องจากแผ่นเส้นใยมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนมากกว่า นอกจากนั้นยังพบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการขึ้นรูปไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญกับการดูดซับสารอิเล็กทรอนิกส์ของแผ่นเส้นใย



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับสารอิเล็กทรอนิกส์กับระยะเวลาของชิ้นงาน PVdF-HFP ประเภทต่างๆ (โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการดูดซึมสัมพัทธ์กับระยะเวลา (รูปที่ 4.9) โดยค่าอัตราส่วนการดูดซึมสัมพัทธ์จะสัมพันธ์กับการรั่วซึมออกของสารละลายอิเล็กทรอนิกส์ กล่าวคือ หากค่าอัตราส่วนการดูดซึมสัมพัทธ์มีค่าสูงหมายความว่ามีการรั่วซึมออกของสารอิเล็กทรอนิกส์น้อย ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสารอิเล็กทรอนิกส์แบบของเหลวมีการรั่วซึมออกตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยการรั่วซึมออกของสารอิเล็กทรอนิกส์จะเกิดขึ้นมากในช่วง 20 นาทีแรก หลังจากนั้นการรั่วซึมจะเกิดขึ้นน้อยลง ในขณะที่แผ่นเส้นใยที่ขึ้นรูปภายใต้สภาวะความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงจะมีการรั่วซึมของสารอิเล็กทรอนิกส์เหลวลดลง เป็นที่น่าสังเกตว่าแผ่นเส้นใยที่ขึ้นรูปที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 14 และ 16 กิโลโวลต์ มีการรั่วซึม

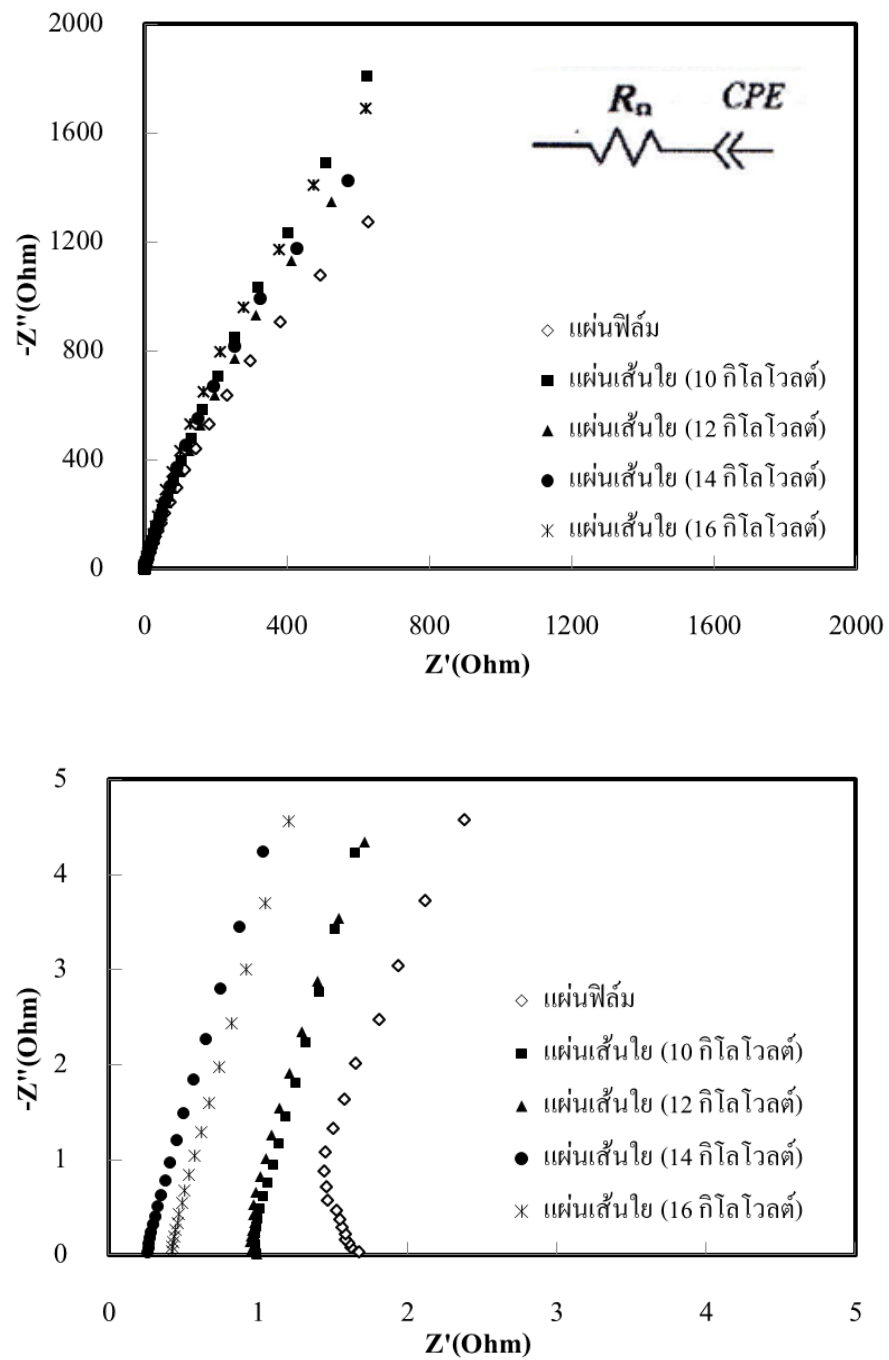
ของสารอิเล็กโทรไลต์เหลวใกล้เคียงกับแผ่นฟิล์มที่มีความเป็นรูพรุนต่ำ เนื่องจากการซ้อนทับกันของเส้นใยอย่างหนาแน่นดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ค) และ (ง)



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการดูดซึมสัมพัทธ์กับระยะเวลาของชิ้นงาน PVdF-HFP ประเภทต่างๆ (ใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก)

4.1.5 การนำไอออน

รูปที่ 4.10 แสดงกราฟ Nyquist ที่ได้จากการทดสอบความต้านทานเชิงซ้อนของพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่อุณหภูมิสถานะปกติ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่าการนำไอออนได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าการนำไอออนของพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากแผ่นเส้นใยที่ขึ้นรูปโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1.02×10^{-3} และ 1.22×10^{-3} ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อ (6.04×10^{-4} ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร) ทั้งนี้เนื่องจากแผ่นเส้นใยที่ขึ้นรูปโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีความเป็นรูพรุนและการดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์ที่มากกว่า นอกจากนี้แล้วการที่ชิ้นงานพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากแผ่นเส้นใยที่ขึ้นรูปโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีความเป็นผลึกต่ำก็ยังส่งผลช่วยให้มีค่าการนำไอออนที่สูงกว่าด้วย



รูปที่ 4.10 กราฟ Nyquist และวงจรสมมูลของชิ้นงาน PVdF-HFP ประเภทต่างๆ (ใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก) [41]

ตารางที่ 4.2 ค่าการดูดซับสารอิเล็กโตรไลต์ ความเป็นผลึก และค่าการนำไอออนของชิ้นงาน PVdF-HFP ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและการหล่อขึ้นรูป

ตัวอย่าง	การดูดซับสาร อิเล็กโตรไลต์ (%)	ความเป็นผลึก (%)	ค่าการนำไอออน (S/cm)
แผ่นเส้นใย (10 กิโลโวลต์)	562.24	46.62	1.02×10^{-3}
แผ่นเส้นใย (12 กิโลโวลต์)	607.95	43.87	1.11×10^{-3}
แผ่นเส้นใย (14 กิโลโวลต์)	572.59	48.55	1.22×10^{-3}
แผ่นเส้นใย (16 กิโลโวลต์)	620.78	49.36	1.12×10^{-3}
แผ่นฟิล์ม	102.89	59.49	6.04×10^{-4}

จากการศึกษาผลของสภาวะการเตรียมแผ่นเส้นใยที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติของแผ่นเส้นใย PVdF-HFP พบว่าสามารถขึ้นรูปเส้นใยที่มีลักษณะสม่ำเสมอและปราศจากเม็ดบีดได้สำเร็จ โดยสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในส่วนนี้คือ แผ่นเส้นใยที่ขึ้นรูปโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก และใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 14 กิโลโวลต์

4.2 การศึกษาผลของปริมาณของอนุภาคนาโนแลนทานัมออกไซด์ที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโน

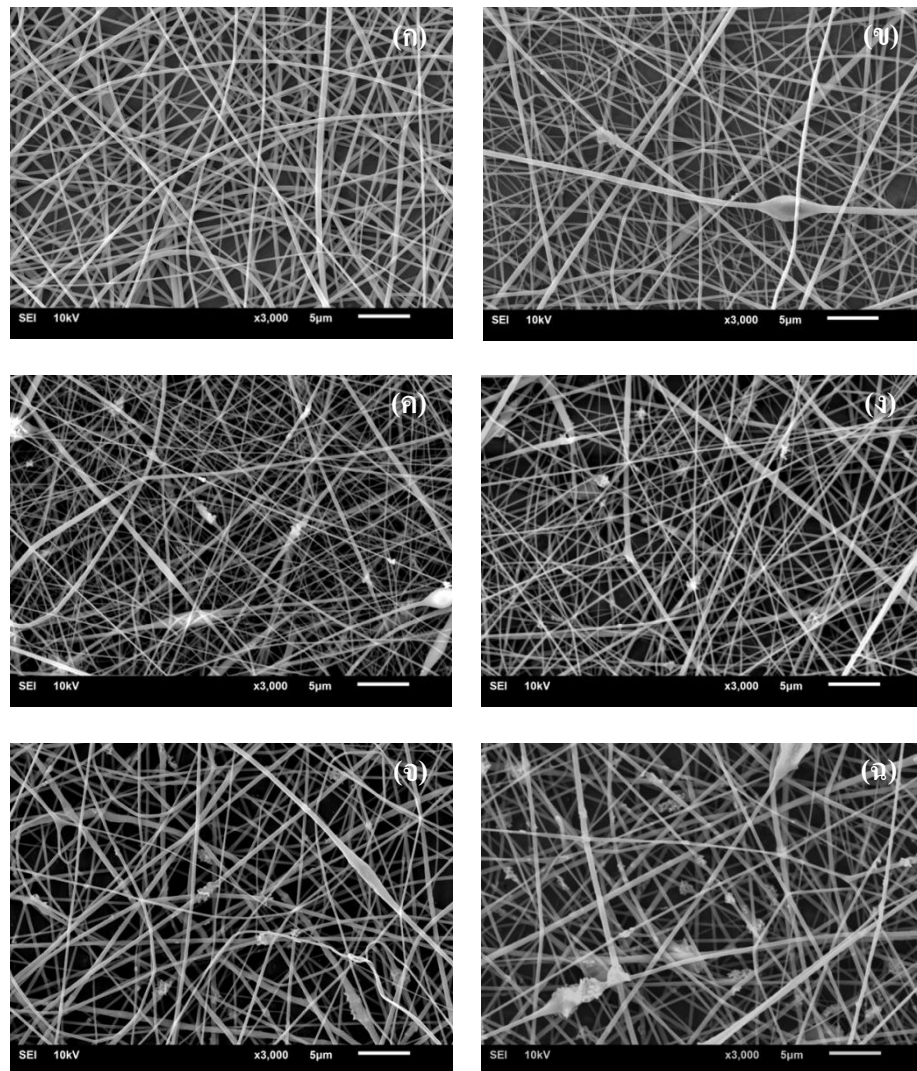
4.2.1 โครงสร้างฐานวิทยา

4.2.1.1 ผลปริมาณอนุภาคนาโนแลนทานัมออกไซด์

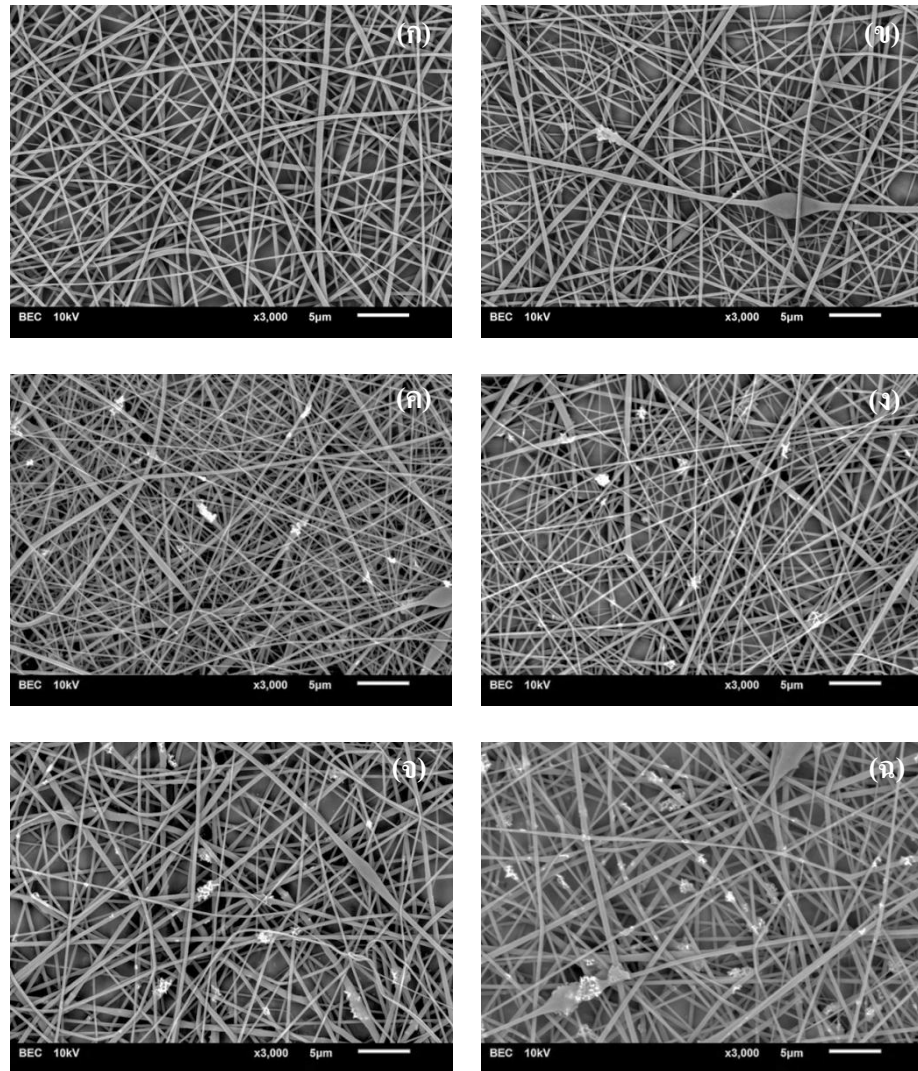
รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมอนุภาคนาโนแลนทานัมออกไซด์ (La_2O_3) ในปริมาณต่างกัน จะสังเกตเห็นได้ว่าการเติมอนุภาค La_2O_3 มีผลทำให้เส้นใยที่ได้มีเม็ดบีดรูปทรงกรวยเกิดขึ้น เนื่องจากอนุภาค La_2O_3 ไม่สามารถกระจายตัวได้ดีในสารละลายพอลิเมอร์ [96] การเกาะกลุ่มกัน (Agglomeration) ของอนุภาค La_2O_3 จะทำให้ประจุที่อยู่บนลำของสารละลายพอลิเมอร์ไม่สม่ำเสมอและส่งผลกระทบต่อแรงดึงที่เกิดจากไฟฟ้าสถิตไม่สม่ำเสมอ นำไปสู่การเกิดเม็ดบีดและโครงสร้างของเส้นใยที่ผิดปกติในที่สุด [97] นอกจากนี้ยังอาจเป็นไปได้ว่าการเกิดอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับอนุภาค La_2O_3 [18] จะส่งผลให้อันตรกิริยาและการเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ และความยืดหยุ่นของสารละลายลดลง นำไปสู่การเกิดเม็ดบีดขึ้น [98]

เมื่อพิจารณาภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวัสดุเชิงประกอบนาโนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณแบบ back scattering (รูปที่ 4.12) แสดงให้เห็นถึงความต่างเฟสระหว่างพอลิเมอร์และอนุภาคนาโน La_2O_3 โดยกรณีที่เป็นเฟสสีดำจะแสดงถึง PVdF-HFP ส่วนเฟสสีขาวคืออนุภาค La_2O_3 ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณของอนุภาค La_2O_3 เพิ่มขึ้นจะมีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาكدังกล่าวบนเส้นใยมากขึ้น

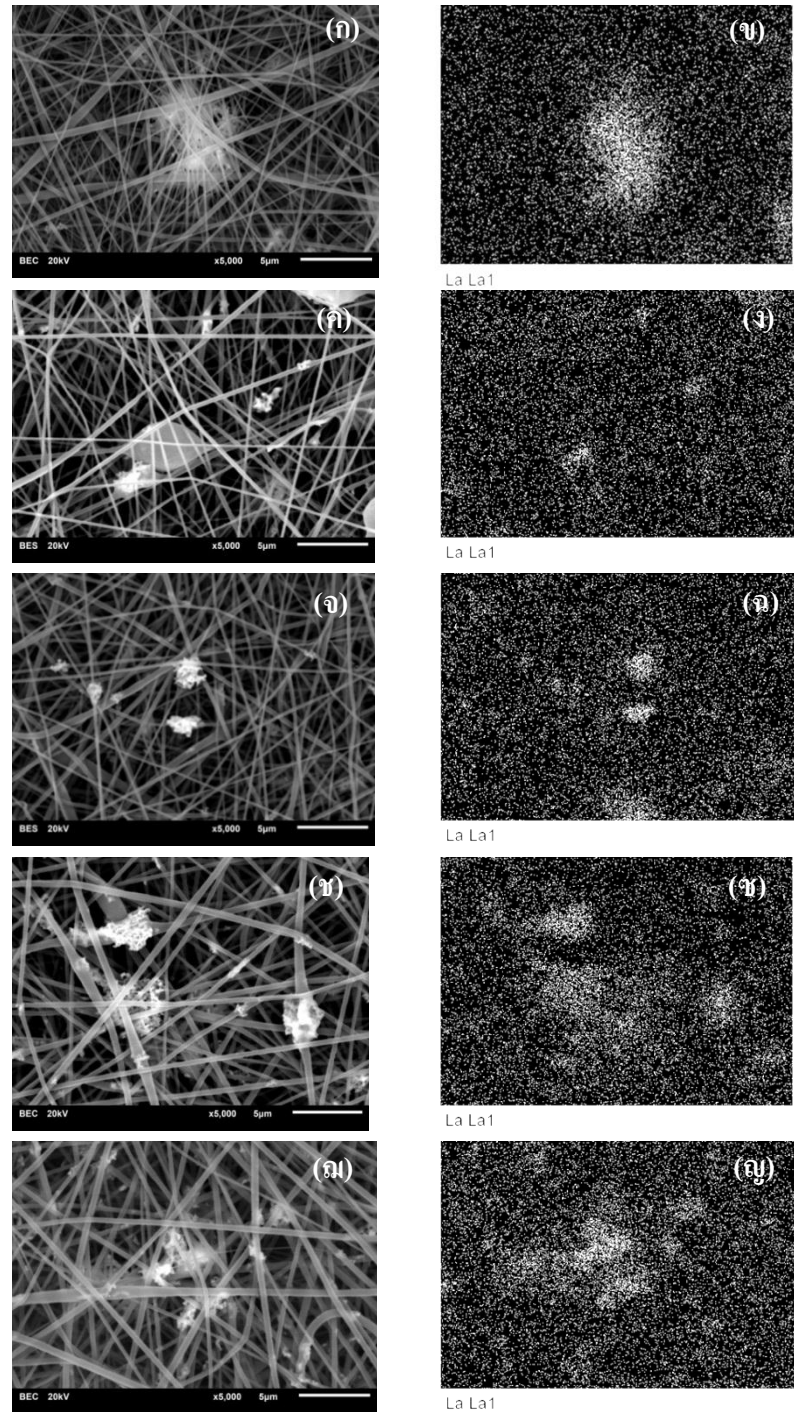
รูปที่ 4.13 แสดงสัญญาณ X-ray (La_α) ของธาตุแลนทานัมออกไซด์ที่กระจายตัวอยู่ในเส้นใย PVdF-HFP โดยที่ทำการวิเคราะห์แบบ dot mapping ซึ่งจากภาพดังกล่าวจะสังเกตพบว่าจุดสีขาวที่แสดงถึงการมีอยู่ของอนุภาค La_2O_3 ที่กระจายตัว (Distribution) อยู่ในเส้นใยพอลิเมอร์ทั่วทั้งบริเวณของแผ่นเส้นใยและยังมีการเกาะกลุ่มกันบางส่วนของอนุภากดังกล่าว



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมอนุภาค La_2O_3 ร้อยละ 0 (ก) 2 (ข) 4 (ค) 6 (ง) 8 (จ) และ 10 (ฉ) โดย น้ำหนักของพอลิเมอร์ (ใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก และใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 14 กิโลโวลต์) บันทึกโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณแบบ secondary electron

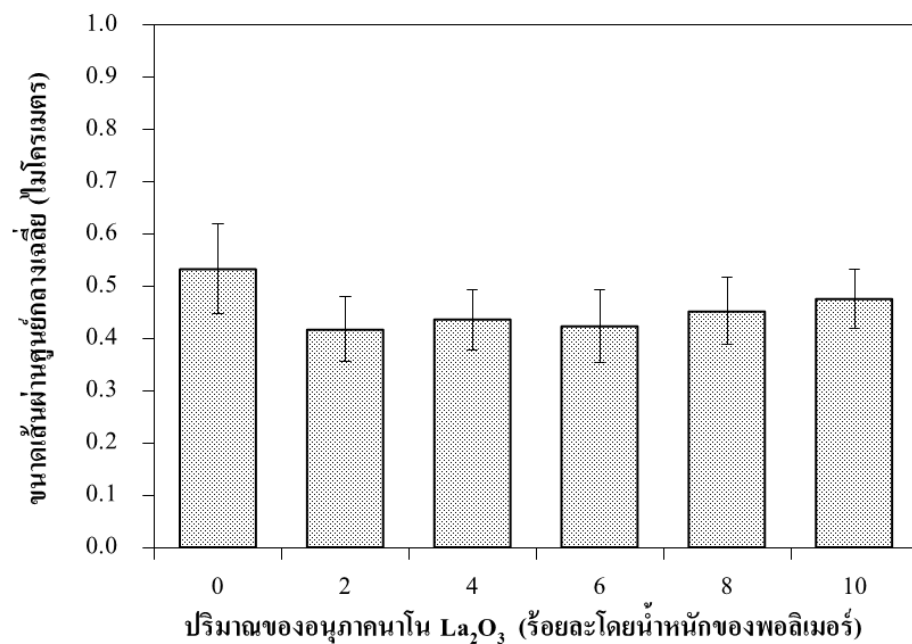


รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมอนุภาค La_2O_3 ร้อยละ 0 (ก) 2 (ข) 4 (ค) 6 (ง) 8 (จ) และ 10 (ฉ) โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ (ใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก และใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 14 กิโลโวลต์) บันทึกโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณแบบ back scattering



รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมอนุภาค La_2O_3 ร้อยละ 2 (ก, ข), 4 (ค, ง), 6 (จ, ฉ), 8 (ช, ช) และ 10 (ฉ, ญ) โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ (ใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก และใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 14 กิโลโวลต์) ภาพซ้ายบันทึกโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณแบบ backscattered electron และภาพขวาเป็นสัญญาณ X-ray (La_{α}) ของธาตุ La_2O_3 ที่วิเคราะห์แบบ dot mapping)

เมื่อพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโน (รูปที่ 4.14) พบว่าการเติมอนุภาค La_2O_3 ในปริมาณร้อยละ 2 - 10 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ ส่งผลทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.20 - 0.36 ไมโครเมตร ขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยที่ไม่ได้เติมอนุภาค La_2O_3 คือ 0.53 ไมโครเมตร อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาร่วมกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะพบว่าการเติมอนุภาค La_2O_3 ไม่ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ

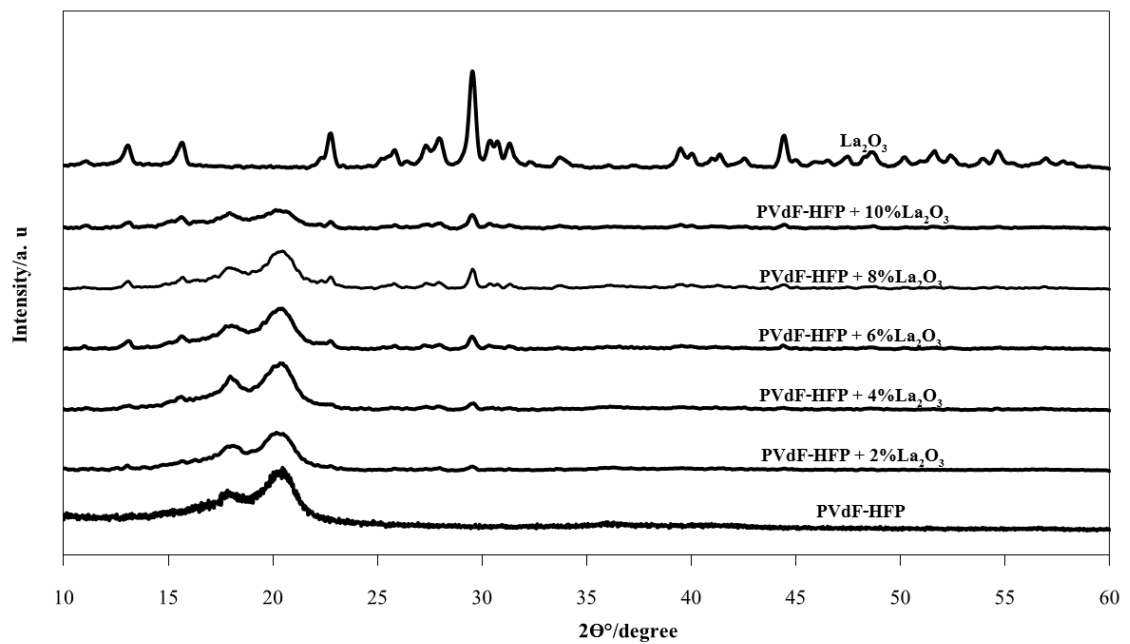


รูปที่ 4.14 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมอนุภาค La_2O_3 ปริมาณต่างกัน

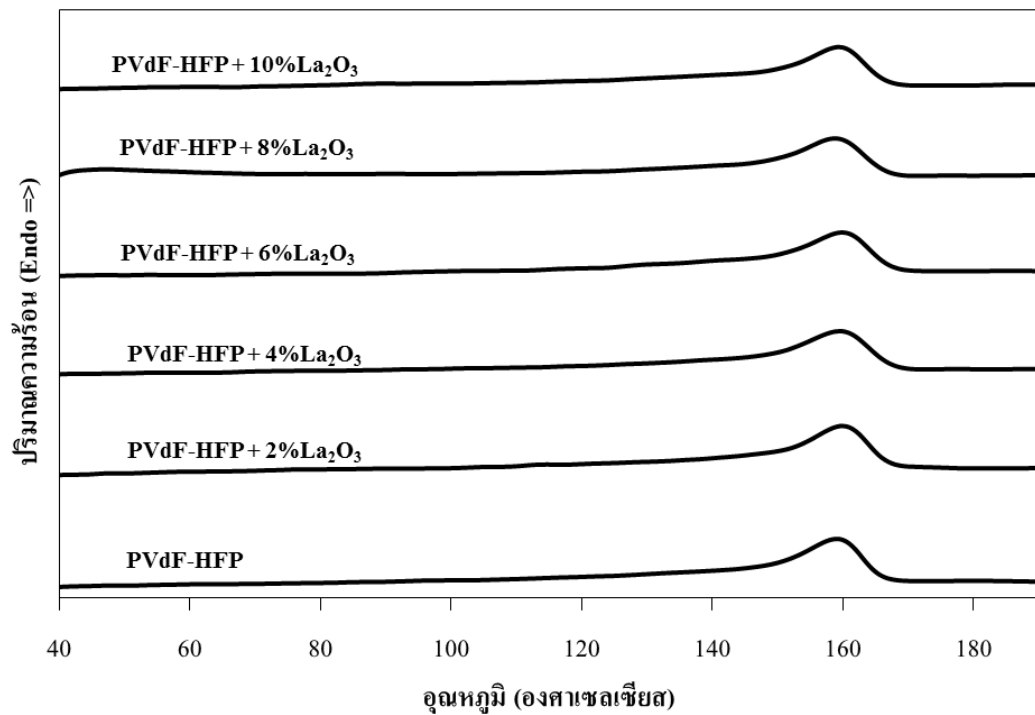
4.2.2 โครงสร้างผลึกและสมบัติทางความร้อน

จากรูปที่ 4.15 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมอนุภาค La_2O_3 ปริมาณต่างกัน ซึ่งจะสังเกตพบพิกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 18.3° และ 20° ที่แสดงถึงระนาบ (020) และ (100) ของผลึกรูปแบบ α ของหน่วยซ้ำ PVdF [92] และเมื่อปริมาณของอนุภาค La_2O_3 เพิ่มขึ้นพบว่าตำแหน่งพิกของผลึก PVdF ไม่เปลี่ยนแปลง แต่ความเข้มของพิกมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของอนุภาคเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าอนุภาค La_2O_3 ที่เติมเข้าไปในระบบไม่ทำให้โครงสร้างของ PVdF-HFP เปลี่ยนแปลง ซึ่งสอดคล้องกับผลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมาของ Song และคณะ [17]

จากการทดสอบ DSC (รูปที่ 4.16) พบว่าอุณหภูมิในการหลอมตัวของวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมอนุภาค La_2O_3 ในปริมาณต่างกันมีค่าคงที่อยู่ที่ประมาณ 159 องศาเซลเซียส และไม่มีการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามในด้านความเป็นผลึกของพอลิเมอร์พบว่ามีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 48 เป็นร้อยละ 44 เมื่อเติมอนุภาค La_2O_3 (ตารางที่ 4.3) ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาแบบกรด – เบสลิวีส ระหว่างผิวของอนุภาค La_2O_3 ที่เป็นกรดกับสายโซ่ PVdF-HFP ที่เป็นเบส ซึ่งอันตรกิริยานี้ส่งผลต่อการขัดขวางการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ [99]



รูปที่ 4.15 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมอนุภาค La_2O_3 ในปริมาณต่างๆ



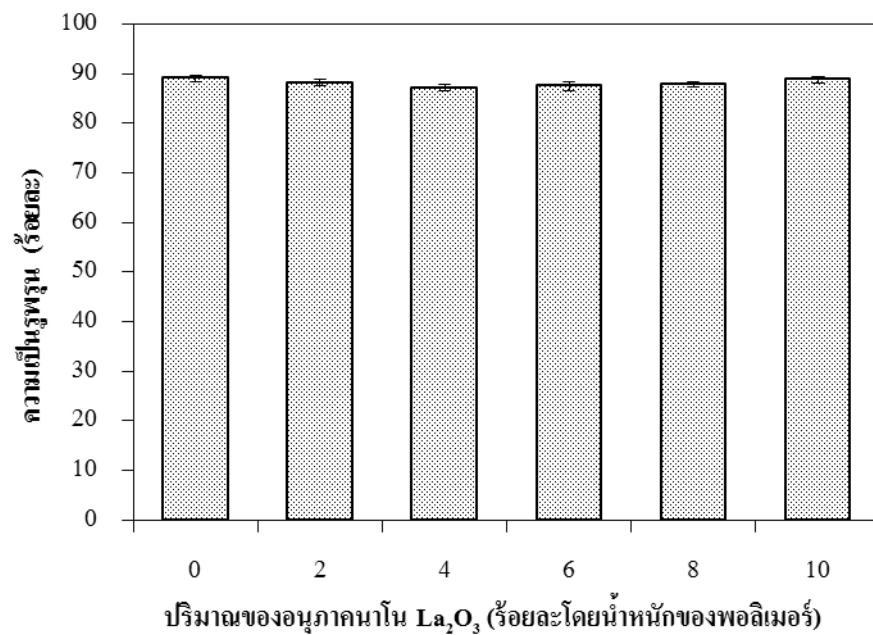
รูปที่ 4.16 DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมอนุภาค La_2O_3 ในปริมาณต่างๆ

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิในการหลอมตัว (T_m) เอนทาลปีของการหลอมเหลว (ΔH_m) และความเป็นผลึก (X_c) ของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมอนุภาค La_2O_3 ในปริมาณต่างๆ

ชิ้นงาน	อุณหภูมิในการหลอมตัว ($^{\circ}\text{C}$)	เอนทาลปีของการหลอมเหลว (J/g)	ความเป็นผลึก (%)
P(VdF-HFP)	159.1	50.83	48.55
P(VdF-HFP) + 2% La_2O_3	159.9	46.42	44.34
P(VdF-HFP) + 4% La_2O_3	159.5	46.79	44.69
P(VdF-HFP) + 6% La_2O_3	159.9	45.45	43.41
P(VdF-HFP) + 8% La_2O_3	158.8	45.29	43.26
P(VdF-HFP) + 10% La_2O_3	159.4	44.96	42.94

4.2.3 ความเป็นรูพรุน

รูปที่ 4.17 แสดงความเป็นรูพรุนของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมอนุภาค La_2O_3 ในปริมาณต่างกัน ซึ่งจะสังเกตพบว่าค่าความเป็นรูพรุนของแผ่นเส้นใยอยู่ระหว่างร้อยละ 87-89 และไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณอนุภาค La_2O_3 ซึ่งให้เห็นว่าการเติมอนุภาคดังกล่าวไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญกับความเป็นรูพรุนของแผ่นเส้นใย



รูปที่ 4.17 ความเป็นรูพรุนของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมอนุภาค La_2O_3 ในปริมาณต่างๆ

4.2.4 การดูดซับสารอิเล็กทรอนิกส์และการรั่วซึมออกของสารอิเล็กทรอนิกส์

เมื่อนำแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมอนุภาค La_2O_3 ในปริมาณต่าง ๆ มาทดสอบการดูดซับสารอิเล็กทรอนิกส์และการรั่วซึมออกของสารอิเล็กทรอนิกส์ (ตารางที่ 4.4) พบว่าการเติมอนุภาค La_2O_3 ในปริมาณร้อยละ 2 - 14 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ มีผลทำให้ค่าการดูดซับสารอิเล็กทรอนิกส์ของแผ่นเส้นใยลดลงเมื่อเทียบกับแผ่นเส้นใยที่ไม่ได้เติมอนุภาคดังกล่าว ซึ่งอาจเกิดจากช่องว่างที่สารอิเล็กทรอนิกส์จะแพร่เข้าไปได้ลดลงเมื่อเติมอนุภาค La_2O_3 อย่างไรก็ตามค่าการดูดซับสารอิเล็กทรอนิกส์ของแผ่นเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาค La_2O_3 เพิ่มขึ้นและมีค่ามากที่สุดเมื่อเติมอนุภาค La_2O_3 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ ทั้งนี้จะเป็นผลเนื่องจากความเป็นผลึกที่ลดลง [88] แต่เมื่อปริมาณอนุภาค La_2O_3 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 12 และ 14 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ พบว่าค่าการดูดซับสารอิเล็กทรอนิกส์ลดลง เนื่องจากปริมาณของอนุภาค La_2O_3 ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้

อนุภาสดังกล่าวเกิดการเกาะกลุ่มรวมตัวเป็นก้อนอยู่บนเส้นใยพอลิเมอร์ในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ช่องว่างที่สารอิเล็กโทรไลต์จะแพร่เข้าไปในแผ่นเส้นใยได้มีขนาดลดลง ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pereira และคณะ^๙ [100] ที่พบว่าเมื่อปริมาณของสารตัวเติมเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ขนาดของช่องว่างโดยเฉลี่ยของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ลดลง ส่วนการรั่วซึมออกของสารอิเล็กโทรไลต์พบว่ามีการลดลงเมื่อเติมอนุภาค La_2O_3 เนื่องจากสาเหตุเดียวกันกับการลดลงของค่าการดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์ดังที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้

ตารางที่ 4.4 ค่าการดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์ ค่าการรั่วซึมออกของสารอิเล็กโทรไลต์ ความเป็นผลึก และค่าการนำไอออนของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมอนุภาค La_2O_3 ในปริมาณต่างกัน

ชิ้นงาน	การดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์ (%)	การรั่วซึมออกของสารอิเล็กโทรไลต์	ความเป็นผลึก (%)	การนำไอออน (S/cm)
PVDF-HFP	572.59 (± 5.89)	0.84 (± 0.04)	48.55	1.22×10^{-3}
PVDF-HFP + 2% La_2O_3	352.94 (± 12.64)	0.82 (± 0.02)	44.34	1.20×10^{-3}
PVDF-HFP + 4% La_2O_3	382.95 (± 14.08)	0.81 (± 0.02)	44.69	1.32×10^{-3}
PVDF-HFP + 6% La_2O_3	379.97 (± 17.83)	0.82 (± 0.02)	43.41	1.12×10^{-3}
PVDF-HFP + 8% La_2O_3	445.69 (± 10.33)	0.83 (± 0.01)	43.26	1.30×10^{-3}
PVDF-HFP + 10% La_2O_3	512.12 (± 11.34)	0.81 (± 0.01)	42.94	1.43×10^{-3}
PVDF-HFP + 12% La_2O_3	468.58 (± 13.78)	-	42.31	-
PVDF-HFP + 14% La_2O_3	432.54 (± 14.13)	-	41.19	-

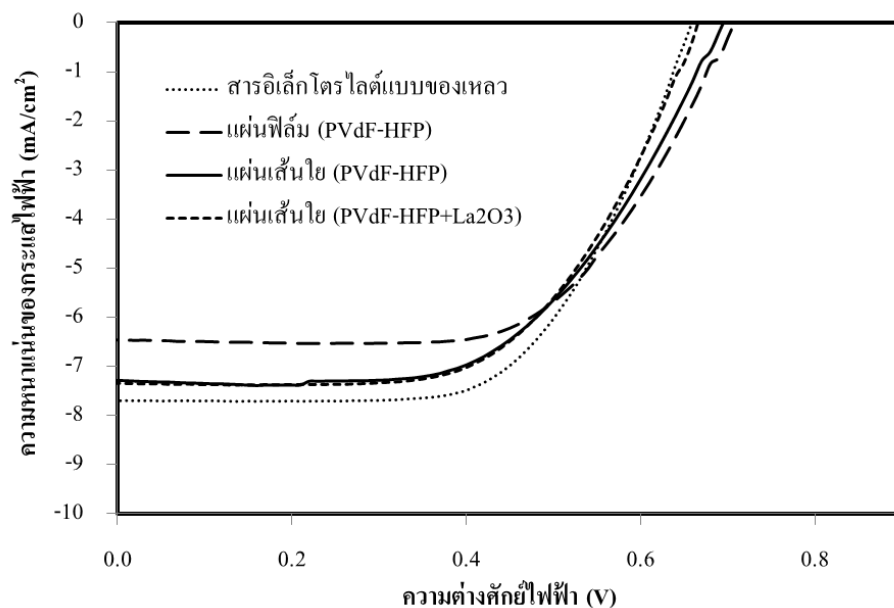
4.2.5 การนำไอออน

ค่าการนำไอออนที่อุณหภูมิสถานะปกติของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมอนุภาค La_2O_3 ในปริมาณต่างกันแสดงในตารางที่ 4.4 จากผลการทดลองพบว่าค่าการนำไอออนมีค่าอยู่ระหว่าง $1.22 \times 10^{-3} - 1.43 \times 10^{-3}$ ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณอนุภาค La_2O_3 อย่างเห็นได้ชัด

4.3 การขึ้นรูปและทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้วัสดุเชิงประกอบนาโนเป็นสารอิเล็กโทรไลต์

4.3.1 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

รูปที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า (I-V curve) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สารอิเล็กโทรไลต์แบบต่างๆ และจากกราฟดังกล่าวสามารถหาค่าตัวแปรต่างๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารอิเล็กโทรไลต์แบบของเหลวมีค่าสูงที่สุดคือร้อยละ 3.12 ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารอิเล็กโทรไลต์แบบเจลพบว่ามีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากการลดลงของค่ากระแสไฟฟ้าวงจรปิด (J_{sc}) เนื่องจากการใช้แผ่นฟิล์มหรือแผ่นเส้นใยเป็นสารอิเล็กโทรไลต์จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของไอออน (ไตรโอะไอโดคและไอโอดีค) ส่งผลทำให้การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ซึ่งจะช่วยลดเซมิคอนดักเตอร์ให้แก่มอเลกุลสีย้อมไวแสงที่อยู่ในรูปตัวออกซิไดซ์ลดลง [22] และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างเซลล์ที่มีการใช้แผ่นฟิล์มกับแผ่นเส้นใยเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ พบว่ากรณีหลังให้ค่า J_{sc} สูงกว่าซึ่งเป็นผลมาจากแผ่นเส้นใยมีความเป็นรูพรุนและความสามารถในการดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์มากกว่า [23] นอกจากนี้แล้ว การที่แผ่นเส้นใยพอลิเมอร์มีความเป็นผลึกน้อยกว่าแผ่นฟิล์มยังสามารถช่วยลดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของไอออนได้อีกด้วย [24] เมื่อพิจารณาในด้านของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) พบว่าเมื่อใช้แผ่นฟิล์มหรือแผ่นเส้นใยเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า V_{oc}



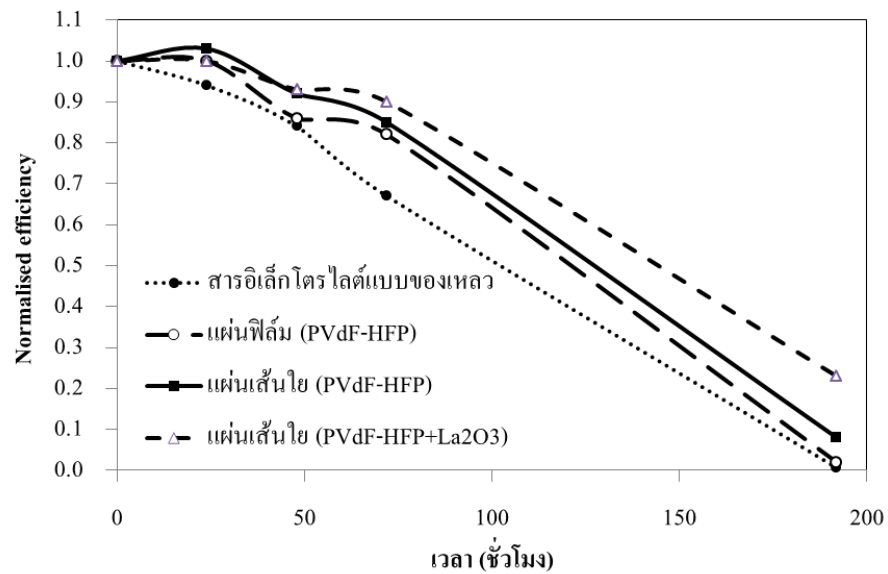
รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สารอิเล็กโทรไลต์แบบต่างๆ

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สารอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่างๆ

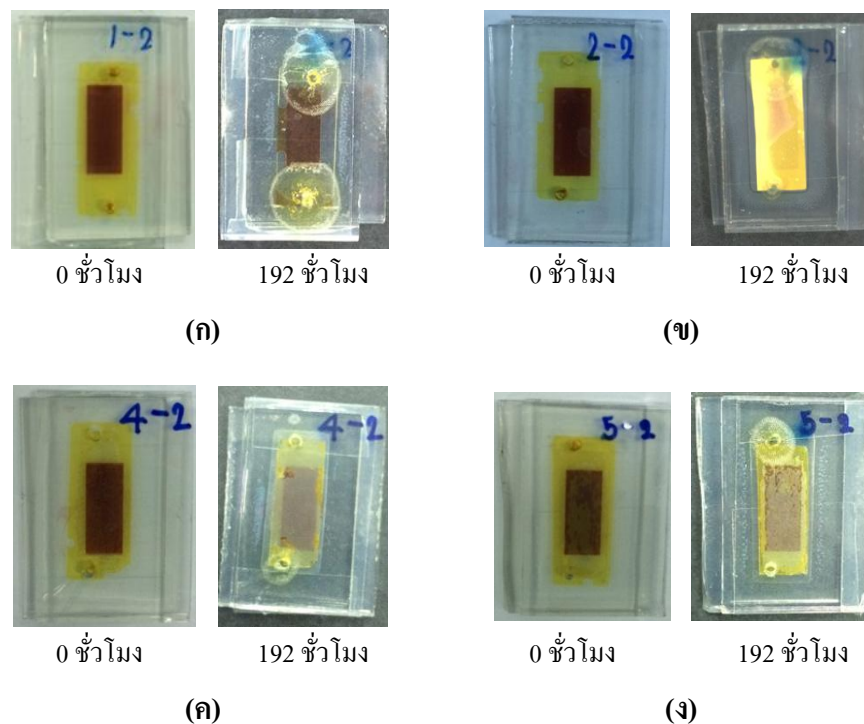
สารอิเล็กโทรไลต์	กระแสไฟฟ้าวงจรปิด, J_{sc} (mA/cm ²)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า วงจรเปิด, V_{oc} (V)	ฟิลด์แฟกเตอร์, FF	ประสิทธิภาพ, η (%)
สารอิเล็กโทรไลต์แบบของเหลว	7.50 (± 0.19)	0.67 (± 0.01)	0.62 (± 0.01)	3.12 (± 0.02)
แผ่นฟิล์ม (PVdF-HFP)	6.65 (± 0.32)	0.70 (± 0.01)	0.59 (± 0.03)	2.75 (± 0.07)
แผ่นเส้นใย (PVdF-HFP)	7.31 (± 0.49)	0.70 (± 0.02)	0.59 (± 0.01)	2.90 (± 0.11)
แผ่นเส้นใยวัสดุนาโน (PVdF-HFP + 10%La ₂ O ₃)	7.30 (± 0.01)	0.68 (± 0.01)	0.59 (± 0.00)	2.91 (± 0.01)

4.3.2 ความคงทนของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

รูปที่ 4.19 แสดงค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เวลาต่างๆ พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารอิเล็กโทรไลต์แบบของเหลวมีการลดลงของประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่อง และเมื่อเวลาผ่านไปเวลา 192 ชั่วโมง ค่าประสิทธิภาพเหลือ 0.006 จากค่าประสิทธิภาพเริ่มต้นเท่ากับ 1 (คิดเป็นร้อยละ 0.6) ซึ่งการลดลงของค่าประสิทธิภาพดังกล่าวเกิดจากการระเหยและการรั่วซึมของของเหลวที่อยู่ในสารอิเล็กโทรไลต์ออกทางบริเวณรูเจาะ ดังรูปที่ 4.20 ในขณะที่เซลล์ที่ใช้สารอิเล็กโทรไลต์แบบเจลมีการลดลงของค่าประสิทธิภาพช้ากว่า ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ของเหลวและสารอิเล็กโทรไลต์ถูกดูดซับอยู่ในแผ่นฟิล์มและแผ่นเส้นใย จึงทำให้การระเหยและการรั่วซึมออกของสารอิเล็กโทรไลต์ช้ากว่าเมื่อเทียบกับการใช้สารอิเล็กโทรไลต์แบบของเหลว [64] นอกจากนี้แล้วยังพบว่าที่เวลาเดียวกันเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้แผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนมีค่าประสิทธิภาพที่เหลืออยู่มากที่สุดคือ 0.23 (คิดเป็นร้อยละ 23) เมื่อเวลาผ่านไป 192 ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าเซลล์ที่ใช้แผ่นเส้นใยกับแผ่นฟิล์มที่ปราศจากอนุภาค La₂O₃ เนื่องจากแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนดังกล่าวมีความเป็นผลึกที่น้อยกว่าและมีพื้นที่ผิวมากกว่า จึงสามารถดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์ไว้ได้มาก นอกจากนั้นการมีความเป็นผลึกที่น้อยกว่ายังช่วยทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพเซลล์ของแสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสงที่ใช้สารอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่างๆ ตามเวลา



รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสงที่ใช้ (ก) สารอิเล็กโทรไลต์แบบของเหลว (ข) แผ่นฟิล์ม PVdF-HFP (ค) แผ่นเส้นใย PVdF-HFP และ (ง) แผ่นเส้นใย PVdF-HFP + 10%La₂O₃ เมื่อเวลา 0 ชั่วโมง และ 192 ชั่วโมง

4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันนี้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ทำการศึกษาและพัฒนาระบบอิเล็กโตรไลต์แบบเจลสำหรับใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงและแบตเตอรี่ลิเทียม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบอิเล็กโตรไลต์แบบเจลจากแผ่นเส้นใย PVdF-HFP และแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ โดยแต่ละงานวิจัยมักจะมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มการดูดซับสารอิเล็กโตรไลต์และปรับปรุงค่าการนำไอออน ผลการเปรียบเทียบของแต่ละงานวิจัยแสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.7

จากตารางที่ 4.6 และ 4.7 แสดงให้เห็นว่าค่าการนำไอออนที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น คืออยู่ในช่วง 10^{-3} ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร โดยความแตกต่างเล็กน้อยที่เกิดขึ้นอาจจะมีผลมาจากปัจจัยอื่นๆ เช่น ชนิดของสารเคมีในอิเล็กโตรไลต์และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าการดูดซับสารอิเล็กโตรไลต์และค่าการนำไอออนของสารอิเล็กโตรไลต์แบบเจลจากแผ่นเส้นใย PVdF-HFP

พอลิเมอร์	สารอิเล็กโตรไลต์	ค่าการดูดซับสารอิเล็กโตรไลต์ (%)	ค่าการนำไอออน (S/cm)	อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ (°C)	ที่มา
แผ่นเส้นใย PVdF-HFP	0.6 M 1-hexyl-2,3-dimethylimidazodium iodide, 0.1 M LiI, 0.05 M I ₂ , 0.5 M 4-ter-butylpyridine ใน EC/PC (1:1, wt. %)	-	1×10^{-5}	25	[22]
แผ่นเส้นใย PVdF-HFP	0.01 M I ₂ , 0.2 M TBAI, 0.3 M PMII ใน EC/PC/AN (8:2:5, v/v/v)	653	4.53×10^{-3}	อุณหภูมิห้อง	[23]
แผ่นเส้นใย PVdF-HFP	0.05 M I ₂ , 0.1 M LiI, 0.6 M PMImI, 0.5 M TBP ใน AN/VN (1:1, v/v)	627	1.87×10^{-3}	อุณหภูมิห้อง	[101]

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าการดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์และค่าการนำไอออนของสารอิเล็กโทรไลต์แบบเจลจากแผ่นเส้นใย PVdF-HFP (ต่อ)

พอลิเมอร์	สารอิเล็กโทรไลต์	ค่าการดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์ (%)	ค่าการนำไอออน (S/cm)	อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ (°C)	ที่มา
แผ่นเส้นใย PVdF-HFP	1 M LiPF ₆ ใน EC/DEC (1:1, w/w)	400	2.69×10^{-3}	25	[88]
แผ่นเส้นใย PVdF-HFP	1 M LiI ₂ , 0.1 M I ₂ ใน EC/DMC (1:1, v/v) และ EL-HPE (DYESOL)	527.59*	1.22×10^{-3} **	อุณหภูมิสถานะปกติ	***

หมายเหตุ : * ทดสอบโดยใช้สารอิเล็กโทรไลต์ 1 M LiI₂, 0.1 M I₂ ใน EC/DMC (1:1, v/v)

** ทดสอบโดยใช้สารอิเล็กโทรไลต์ EL-HPE (DYESOL)

*** ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าการดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์และค่าการนำไอออนของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

แผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ	สารอิเล็กโทรไลต์	ค่าการดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์ (%)	ค่าการนำไอออน (S/cm)	อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ (°C)	ที่มา
อนุภาคนาโน Al ₂ O ₃ (ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก)	1 M LiPF ₆ ใน EC/DEC (1:1, v/v)	459	5.92×10^{-3}	25	[24]
อนุภาคนาโน SiO ₂ (ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก)	1 M LiPF ₆ ใน EC/DEC (1:1, v/v)	459	6.45×10^{-3}	25	[24]
อนุภาคนาโน BaTiO ₃ (ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก)	1 M LiPF ₆ ใน EC/DEC (1:1, v/v)	462	7.21×10^{-3}	25	[24]
อนุภาคนาโน BaTiO ₃ (ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก)	0.05 M I ₂ , 0.1 LiI, 0.6 M PMImI, 0.5 M TBP ใน AN/VN (1:1, v/v)	692.3	2.93×10^{-3}	อุณหภูมิห้อง	[101]

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าการดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์และค่าการนำไอออนของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ (ต่อ)

แผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของ PVdF-HFP ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ	สารอิเล็กโทรไลต์	ค่าการดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์ (%)	ค่าการนำไอออน (S/cm)	อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ (°C)	ที่มา
Montmorillonite/smectite clay (ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก)	1 M LiPF ₆ ใน EC/DEC (1:1, w/w)	474	4.17×10^{-3}	25	[88]
อนุภาคนาโน La ₂ O ₃ (ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก)	1 M LiI ₂ , 0.1 M I ₂ ใน EC/DMC (1:1, v/v) และ EL-HPE (DYESOL)	512.12 *	1.43×10^{-3} **	อุณหภูมิสภาวะปกติ	***

หมายเหตุ : * ทดสอบโดยใช้สารอิเล็กโทรไลต์ 1 M LiI₂, 0.1 M I₂ ใน EC/DMC (1:1, v/v)

** ทดสอบโดยใช้สารอิเล็กโทรไลต์ EL-HPE (DYESOL)

*** ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนหลัก สามารถสรุปสาระสำคัญได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาผลของสภาวะการเตรียมต่อโครงสร้างและสมบัติของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์-เฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน

- 1) แผ่นเส้นใยที่เตรียมได้จากวิธีการปั่นไฟฟ้าสถิต มีลักษณะเป็นเส้นใยตรงสม่ำเสมอ พื้นผิวของเส้นใยเรียบปราศจากรูพรุนและเม็ดบิด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่สูงขึ้น และมีค่าไม่แตกต่างกันเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าอยู่ระหว่าง 10 -14 กิโลโวลต์ แต่เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 16 กิโลโวลต์ พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยเพิ่มขึ้น
- 2) กระบวนการขึ้นรูปที่แตกต่างกันระหว่างการขึ้นรูปโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและการหล่อขึ้นรูปนั้นไม่ทำให้โครงสร้างผลึกของ PVdF-HFP เปลี่ยนไป แต่มีผลต่อปริมาณความเป็นผลึก กล่าวคือการขึ้นรูปโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตทำให้พอลิเมอร์ดังกล่าวมีความเป็นผลึกต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการหล่อขึ้นรูป
- 3) ความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง 10 – 16 กิโลโวลต์ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความเป็นรูพรุนของแผ่นเส้นใย โดยแผ่นเส้นใยมีค่าความเป็นรูพรุนอยู่ระหว่างร้อยละ 88.04 - 89.90 ซึ่งสูงกว่าของแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่อแบบสารละลาย (ร้อยละ 43)
- 4) ความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง 10 – 16 กิโลโวลต์ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ไฮโดรไลซ์ โดยแผ่นเส้นใยมีค่าการดูดซับสารอินทรีย์ไฮโดรไลซ์อยู่ในช่วงร้อยละ 572-620 ในขณะที่แผ่นฟิล์มให้ค่าการดูดซับสารอินทรีย์ไฮโดรไลซ์ประมาณร้อยละ 103
- 5) ค่าการนำไอออนที่อุณหภูมิสถานะปกติของแผ่นเส้นใยที่ขึ้นรูปโดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0×10^{-3} – 1.2×10^{-3} ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าเมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบสารละลาย (6.04×10^{-4} ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)

5.1.2 การศึกษาผลของปริมาณของอนุภาคนาโนแลนทานัมออกไซด์ที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติของแผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนของพอลิเมอร์ดังกล่าว

- 1) การเติมอนุภาคนาโน La_2O_3 มีผลทำให้เส้นใยที่ได้มีเม็ดยึดเกิดขึ้น และเมื่อปริมาณของอนุภาคนาโน La_2O_3 เพิ่มขึ้นพบว่ามีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคดังกล่าวมากขึ้น
- 2) การเติมอนุภาคนาโน La_2O_3 ในปริมาณร้อยละ 2 – 10 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ ไม่ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.20 – 0.36 ไมโครเมตร
- 3) โครงสร้างผลึกของ PVdF-HFP ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเติมอนุภาคนาโน La_2O_3 แต่ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 48.55 เป็น ร้อยละ 42.94 เมื่อเติมอนุภาคนาโน La_2O_3 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์
- 4) การเติมอนุภาคนาโน La_2O_3 ลงในพอลิเมอร์ดังกล่าวไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความเป็นรูพรุนและการรั่วซึมออกของสารอิเล็กโทรไลต์
- 5) ค่าการดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์ลดลงเมื่อเติมอนุภาคนาโน La_2O_3 และค่าการดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์ของแผ่นเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาค La_2O_3 เพิ่มขึ้นและมีค่ามากที่สุดเมื่อเติมอนุภาค La_2O_3 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ คือร้อยละ 512.12
- 6) ค่าการนำไอออนมีค่าอยู่ระหว่าง $1.22 \times 10^{-3} - 1.43 \times 10^{-3}$ ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณอนุภาค La_2O_3 อย่างเห็นได้ชัด

5.1.3 การขึ้นรูปและทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้วัสดุเชิงประกอบนาโนเป็นสารอิเล็กโทรไลต์

- 1) การใช้แผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ร้อยละ 2.91 ซึ่งต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการใช้สารอิเล็กโทรไลต์แบบของเหลว (ร้อยละ 3.12)
- 2) การใช้แผ่นเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้แผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อ (ร้อยละ 2.75)
- 3) การนำเส้นใยวัสดุเชิงประกอบนาโนไปใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้เซลล์ดังกล่าวมีค่าประสิทธิภาพลดลงต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้สารอิเล็กโทรไลต์แบบของเหลวและการใช้แผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อเป็นสารอิเล็กโทรไลต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมด ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะว่าในอนาคตควรมีการทำการทดลองเพื่อปรับปรุงเทคนิคการขึ้นรูปเส้นใยและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงดังนี้

- 1) ควรปรับปรุงการแตกตัว (Dispersion) ของอนุภาคนาโน La_2O_3 ใน PVdF-HFP โดยการปรับปรุงผิวของอนุภาคนาโน La_2O_3 ด้วยสารลดแรงตึงผิว เช่น งานวิจัยของ Wei และคณะ [99] ที่ปรับปรุงผิวของอนุภาคนาโน La_2O_3 ด้วย vinyltrimethoxysilane ทำให้อนุภาคนาโน La_2O_3 สามารถกระจายตัว (Distribution) และแตกตัวใน PVdF-HFP ได้อย่างดี ส่งผลให้ค่าการดูดซับสารอินทรีย์ไตรโกลต์และค่าการนำไอออนเพิ่มขึ้นสูงกว่าเมื่อเทียบกับการเติมอนุภาคนาโน La_2O_3 ที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว หรือการใช้เครื่องมือที่มีความสามารถสูงในการทำให้อนุภาคนาโนแตกตัวได้ดี เช่น เครื่องอัลตราโซนิกแบบโพรบ
- 2) เสนอให้ปรับปรุงวิธีการปิดผนึกเซลล์บริเวณรูเจาะ โดยควรใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนที่สามารถให้ความร้อนแก่วัสดุเปลือกเซลล์เฉพาะจุดได้ เพื่อป้องกันการระเหยออกของสารอินทรีย์ไตรโกลต์เหลว ขณะทำการปิดผนึกบริเวณรูเจาะ และควรใช้วัสดุผนึกเซลล์ที่สามารถทนต่อการระเหยและรั่วซึมของสารอินทรีย์ไตรโกลต์ได้ เพื่อให้เซลล์มีความคงทนมากขึ้น เช่น การใช้แผ่น Surlyn ในการผนึกเซลล์
- 3) ควรใช้สารอินทรีย์ไตรโกลต์ชนิดเดียวกันในการทดสอบค่าการนำไอออนและการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
- 4) ควรพัฒนาเทคนิคการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยเพื่อควบคุมการจัดเรียงตัวของเส้นใยให้เป็นระเบียบมากขึ้นเพื่อเพิ่มค่าการนำไอออน โดย的增加ความเร็วรอบของโรเตอร์ที่ใช้เป็นอุปกรณ์รองรับเส้นใย เช่น จากงานวิจัยของ Ahmed และคณะ [102] ได้ศึกษาการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด โดยการปรับเปลี่ยนความเร็วของอุปกรณ์รองรับเส้นใยในช่วง 0 – 8.3 เมตรต่อวินาที พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของอุปกรณ์รองรับเส้นใยทำให้แผ่นเส้นใยที่ได้มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยเป็นระเบียบมากขึ้น
- 5) ควรเพิ่มระยะเวลาในการทดลองหาค่าการดูดซับสารอินทรีย์ไตรโกลต์
- 6) ควรปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงให้สูงขึ้นโดยมีแนวทางดังนี้
 - 6.1 ปรับปรุงการแตกตัว (Dispersion) และการกระจายตัว (Distribution) ของอนุภาคนาโน La_2O_3 ให้ดีขึ้นเพื่อให้ไอออนของไตรโกลต์และไอโอดีนสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ง่ายขึ้นและช่วยให้แผ่นเส้นใยสามารถดูดซับสารอินทรีย์ไตรโกลต์ได้มากขึ้น

6.2 ปรับปรุงขั้นตอนและวิธีการในการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

- ทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อศึกษาผลของความหนาของชั้น TiO_2 ที่เหมาะสมเนื่องจากชั้น TiO_2 ทำหน้าที่รับและส่งผ่านอิเล็กตรอน รวมทั้งเป็นพื้นผิวสำหรับการยึดเกาะของ โมเลกุลสีย้อมไวแสง
- ทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อศึกษาผลของความหนาของชั้น Surlyn เพื่อให้สามารถฉีดสาร อิเล็กโตรไลต์ให้ได้มากขึ้น และศึกษาผลของขนาดพื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
- ควบคุมสถานะในการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง เช่น ความชื้น