

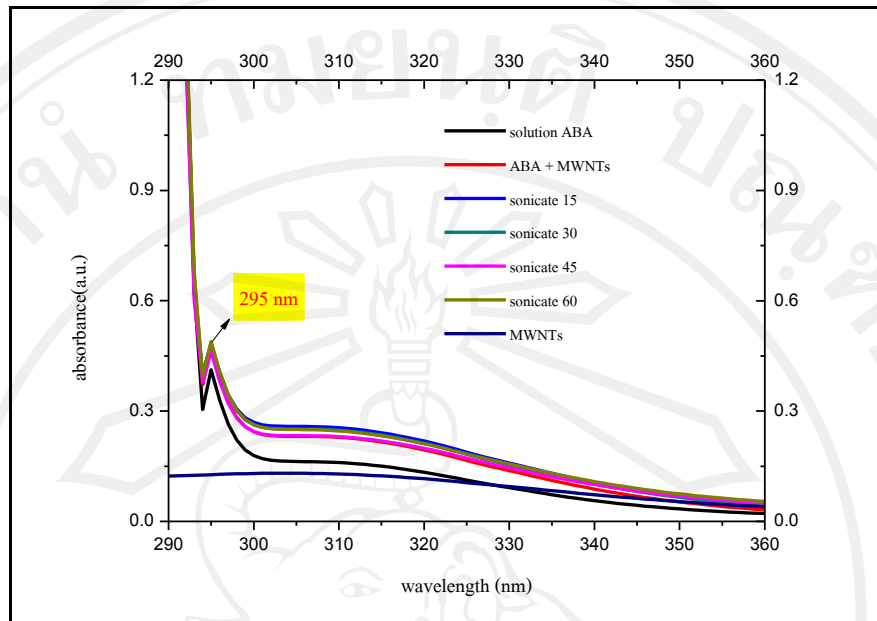
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในการเตรียมแผ่นฟิล์มบางของพอลิ(3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิด) คอมโพสิตกับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (PABA/MWNTs) ในขั้นแรกเป็นการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการเขย่าสารผสมระหว่างมอนอเมอร์ (3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิด) ความเข้มข้น 50 mM กับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นในปริมาณดังนี้คือ 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 mg/ml ตามลำดับ ในกรดซัลฟูริก 0.5 M โดยใช้คลื่นความถี่สูง (Ultra-sonication) ได้ทำการทดสอบที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที จากนั้นนำไปศึกษาผลของความเร็วที่ใช้ในการปั่นเหวี่ยง (centrifugation) ที่ 4000, 4500, 5000 rpm ตามลำดับ และขั้นที่สอง เป็นการประดิษฐ์แผ่นฟิล์มบางของ PABA/MWNTs บนแผ่นแก้วเคลือบอินเดียมทินออกไซด์ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชันของสารละลายผสมที่เตรียมไว้ โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ ประกอบด้วย แผ่นแก้วเคลือบอินเดียมออกไซด์ ITO เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้ว Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง และลวด Pt เป็นขั้วไฟฟ้าช่วย ซึ่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงาน เมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้าทำงานในช่วง 0 ถึง 1.1 V โดยมอนอเมอร์ที่อยู่ในสารละลายเกิดกระบวนการแพร่ (diffusion) เพื่อเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงาน แล้วจึงเกิดเป็นแผ่นฟิล์มบางของ PABA/MWNTs เคลือบที่ผิวแผ่นแก้วเคลือบ ITO

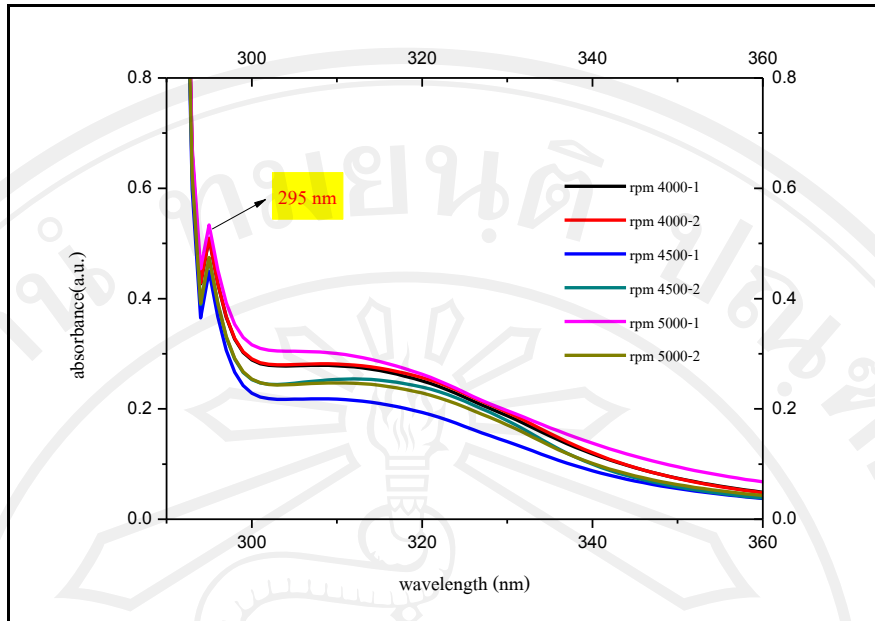
จากนั้นนำแผ่นฟิล์มบางที่ได้ ไปวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ โดยใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโคปี กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมและ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การวัดการดูดกลืนแสงของสารละลายผสม ABA/PABA ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี



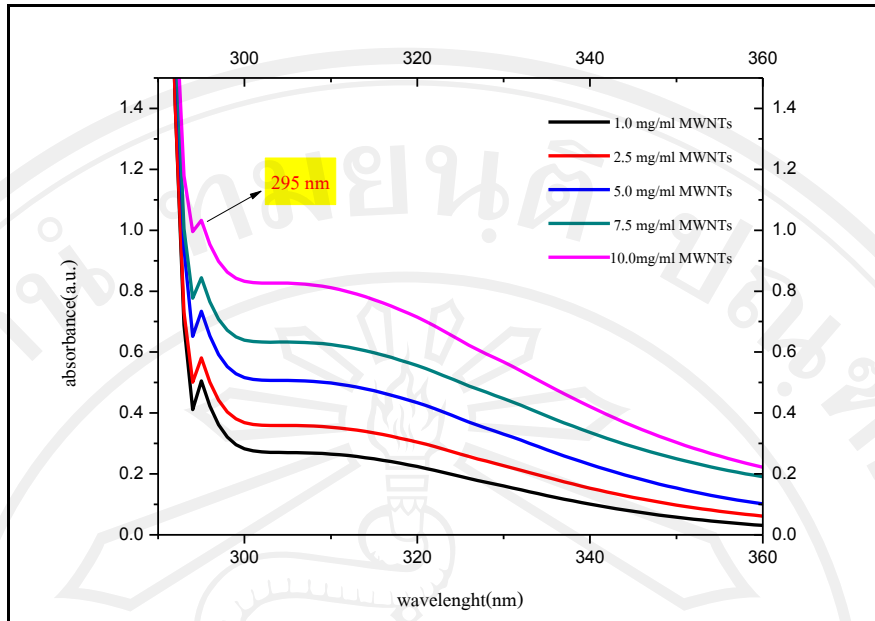
ภาพที่ 4.1 UV-vis spectra ของสารละลายผสมระหว่าง ABA/MWNTs โดยใช้เวลาให้การเขย่าด้วยความถี่สูง ดังนี้คือ 15, 30, 45 และ 60 นาที

จากการวัดการดูดกลืนแสง UV-vis ของสารละลายผสมระหว่าง 3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิดกับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น(ABA/MWNTs) โดยใช้เวลาให้การเขย่าด้วยความถี่สูง ดังนี้คือ 15, 30, 45 และ 60 นาที พบว่ามีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 295 nm ซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมอนอเมอร์ 3-aminobenzoic acid เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น(MWNTs) ไม่มีการดูดกลืนแสงในการทดลองดังกล่าว ดังแสดงผลในภาพที่ 4.1 ข้างต้น



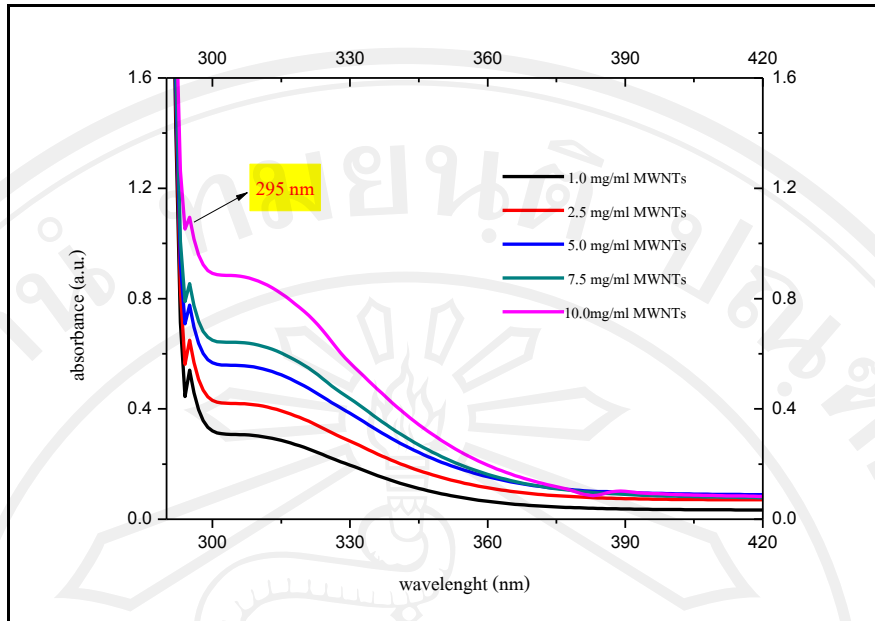
ภาพที่ 4.2 UV-vis spectra ของสารละลายผสม ABA/MWNTs โดยใช้เวลาให้การเขย่าด้วยความถี่สูง 30 นาที และใช้ความเร็วในการหมุนเหวี่ยง(rpm) ดังนี้คือ 4000, 4500, 5000 rpm ตามลำดับ

จากการวัดการดูดกลืนแสง UV-vis ของสารละลายผสมระหว่าง 3-aminobenzoic acid กับ ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น(MWNTs) โดยใช้เวลาให้การเขย่าด้วยความถี่สูง 30 นาที และใช้ความเร็วในการหมุนเหวี่ยง(rpm) ดังนี้คือ 4000, 4500, 5000 rpm ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 4.2 พบว่ามีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 295 nm ซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมอนอเมอร์ 3-aminobenzoic acid เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น ไม่มีการดูดกลืนแสงในการทดลองดังกล่าว ดังแสดงผลในภาพ 4.1 ข้างต้น



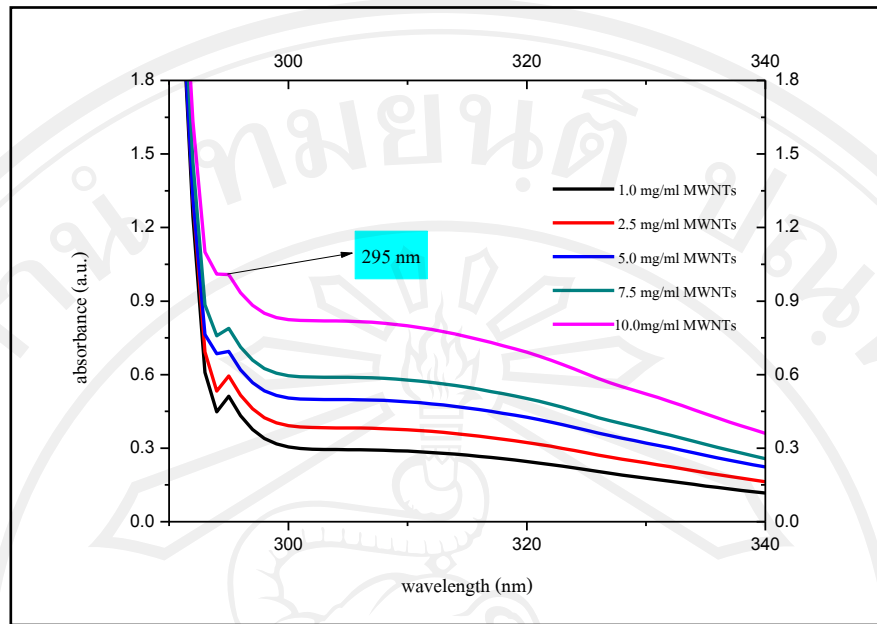
ภาพที่ 4.3 UV-vis spectra ของสารละลายผสม ABA/MWNTs โดยวัดก่อนที่จะทำการเขย่าด้วยความถี่สูงและมีการใช้ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น 1.0, 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 mg/ml ตามลำดับ

พบว่ามีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 295 nm ซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมอนอเมอร์ 3-aminobenzoic acid เท่านั้นดังแสดงในรูป 4.3 ทั้งนี้เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (MWNTs) ไม่มีการดูดกลืนแสงในการทดลองดังกล่าว ดังแสดงผลในภาพ 4.1 ข้างต้น



ภาพที่ 4.4 UV-vis spectra ของสารละลายผสม ABA/MWNTs โดยวัดหลังทำการเขย่าด้วยความถี่สูง 30 นาที และมีการใช้ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น 1.0, 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 mg/ml

พบว่ามีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 295 nm ซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมอนอเมอร์ 3-aminobenzoic acid เท่านั้น ดังแสดงในรูป 4.4 ทั้งนี้เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นไม่มีการดูดกลืนแสงในการทดลองดังกล่าว ดังแสดงผลในภาพ 4.1 ข้างต้น



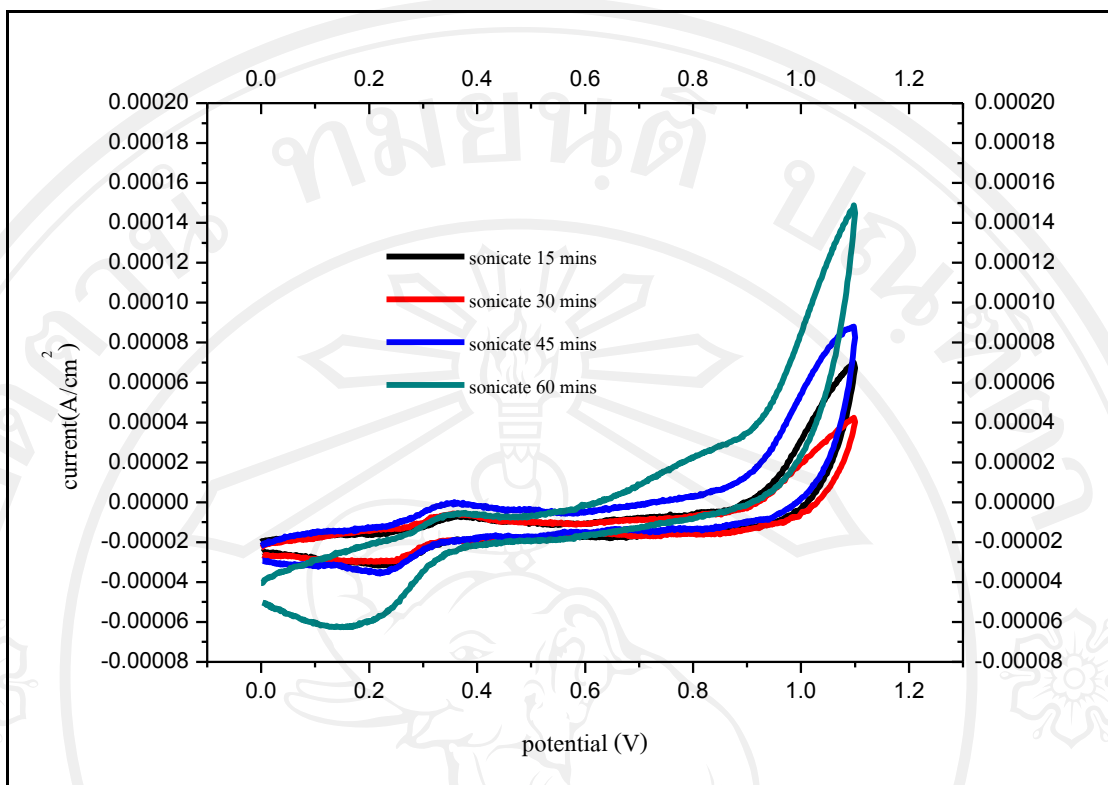
ภาพที่ 4.5 UV-vis spectra ของสารละลายผสม ABA/MWNTs โดยวัดหลังทำการเขย่าด้วยความถี่สูง 30 นาที ใช้ความเร็วในการหมุนเหวี่ยง 4,000 rpm และใช้ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น 1.0, 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 mg/ml

พบว่ามีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 295 nm ซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมอนอเมอร์ 3-aminobenzoic acid เท่านั้น ดังแสดงในรูป 4.5 ทั้งนี้เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นไม่มีการดูดกลืนแสงในการทดลองดังกล่าว ดังแสดงผลในภาพ 4.1 ข้างต้น

การอธิบายผลของการดูดกลืนแสงยูวี-วิสิเบิล ของสารละลายผสม ABA/MWNTs และฟิล์มบาง PABA/MWNTs จะได้กล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 4.3 ต่อไป

4.2 การเตรียมแผ่นฟิล์มบาง PABA/MWNTs ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

ในการเตรียมสารละลายผสมระหว่างมอนอเมอร์คือ 3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิด กับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นนั้น ได้มีการศึกษาผลของการเขย่าสารผสมโดยใช้ความถี่สูง (Ultrasonication) ซึ่งได้ทำการทดสอบที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาทีตามลำดับ หลังจากนั้นนำสารละลายผสมมาประดิษฐ์แผ่นฟิล์มบางจะได้ไซคลิกโวลแทมโมแกรมดังภาพที่ 4.6 และได้นำมาหาค่าการนำไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 4.1



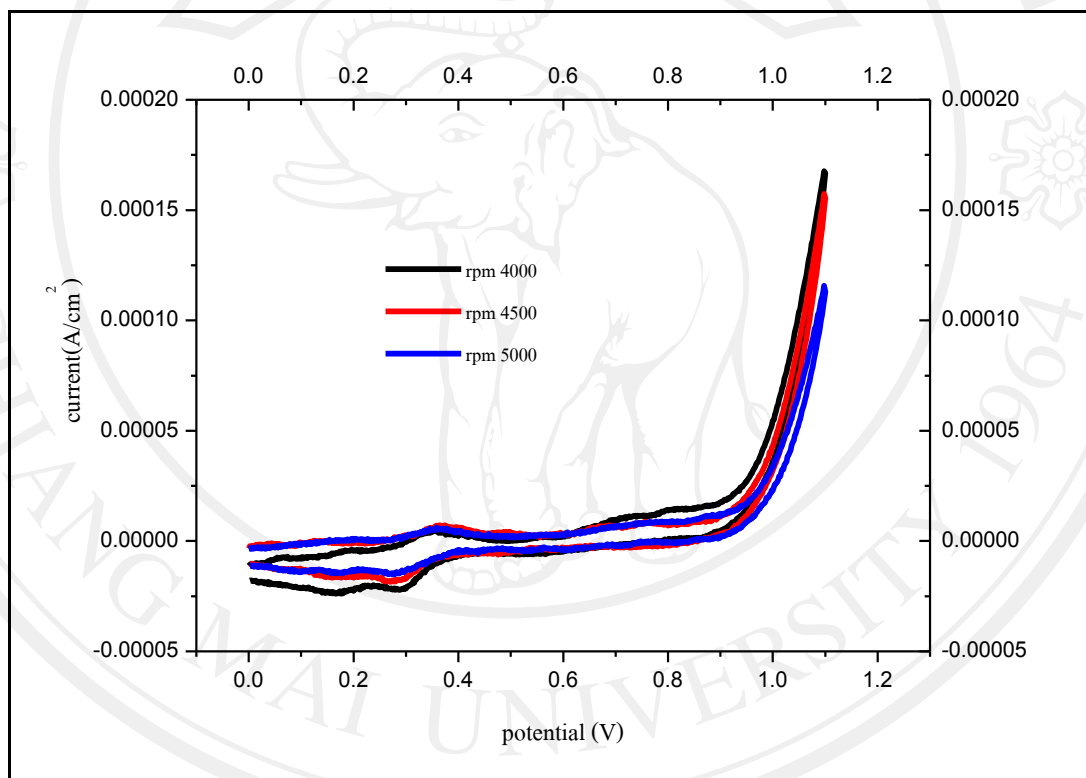
ภาพที่ 4.6 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการเตรียมแผ่นฟิล์มบาง PABA/MWNTs จากสารละลายผสม ABA/MWNTs ความเข้มข้น 1.0 mg/ml ในกรดซัลฟิวริก ที่ช่วงศักย์ไฟฟ้า 0-1.1 V อัตราการสแกน 20 mV/s โดยใช้เวลาให้การเขย่าด้วยความถี่สูง 15, 30, 45 และ 60 นาที

ตารางที่ 4.1 ค่ากระแสไฟฟ้าของฟิล์มบาง PABA/MWNTs ซึ่งเตรียมจากสารละลายผสม ABA/MWNTs ความเข้มข้น 1.0 mg/ml ที่ใช้เวลาในการเขย่าด้วยความถี่สูงต่างกัน

เวลาที่ใช้ในการเขย่า (นาที)	$ I_{pa} - I_{pc} \times 10^{-5}$ (A)	(MWNTs) $ I_{pa} - I_{baseline} \times 10^{-5}$ (A)
15	2.4593	2.2957
30	2.2271	2.3957
45	3.2574	1.3680
60	5.8037	1.5082

จากตารางการที่ 4.1 พบว่า เวลาที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมสารละลายผสมระหว่าง 3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิด กับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น คือ 30 นาที ทั้งนี้เพราะค่าการนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นมีค่ามากที่สุด ซึ่งจากผลการทดลองทำให้ทราบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการเขย่าสารผสมจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนนั้นลดลง

ในการเตรียมสารละลายผสมระหว่างมอนอเมอร์คือ 3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิด กับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นนั้น เมื่อนำสารผสมเขย่าโดยใช้ความถี่สูง 30 นาที จึงได้มีนำไปศึกษาผลของความเร็วที่ใช้ในการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4000, 4500, 5000 rpm ตามลำดับ หลังจากนั้นนำสารละลายผสมมาประดิษฐ์แผ่นฟิล์มบางจะได้ไซคลิกโวลแทมโมแกรมดังภาพที่ 4.7 และได้นำมาหาค่าการนำไฟฟ้างดังตารางที่ 4.2



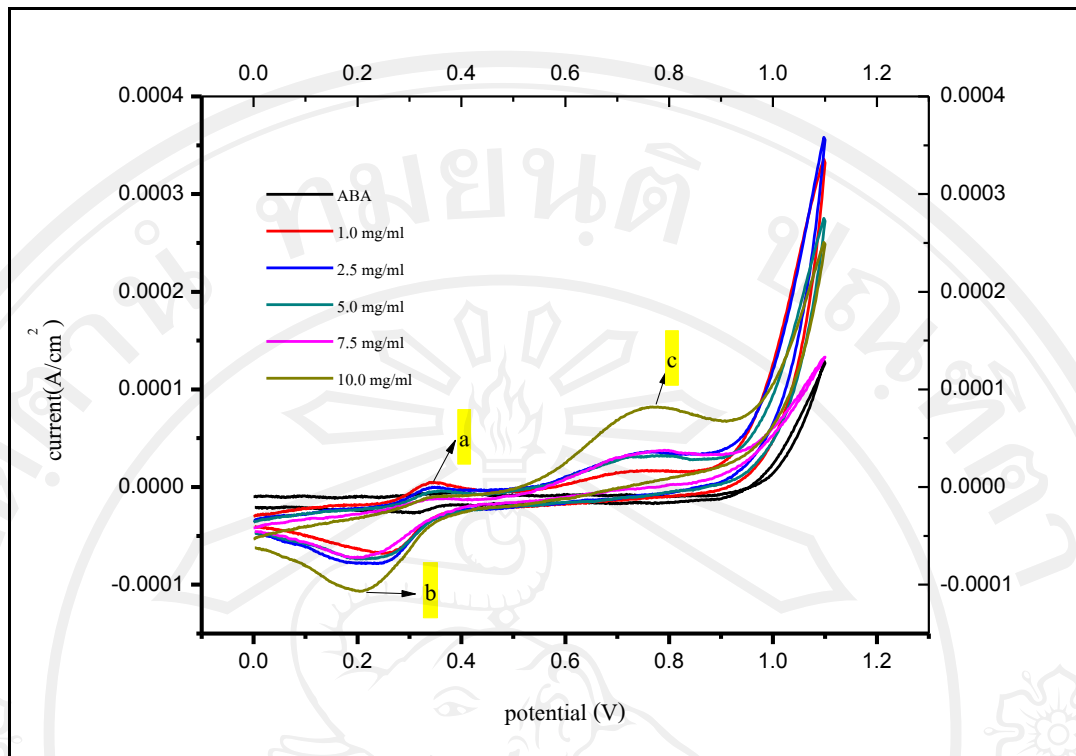
ภาพที่ 4.7 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการเตรียมแผ่นฟิล์มบาง PABA/MWNTs จากสารละลายผสม ABA/MWNTs ความเข้มข้น 1.0 mg/ml ในกรดซัลฟิวริก ที่ช่วงศักย์ไฟฟ้า 0-1.1 V อัตราการสแกน 20 mV/s โดยใช้เวลาให้การเขย่าด้วยความถี่สูง 30 นาที และใช้ความเร็วในการปั่นเหวี่ยง 4000, 4500, 5000 rpm

ตารางที่ 4.2 ค่ากระแสไฟฟ้าของฟิล์มบาง PABA/MWNTs ซึ่งเตรียมจากสารละลายผสม ABA/MWNTs ความเข้มข้น 1.0 mg/ml ที่ใช้เวลาในการเขย่าโดยใช้ความถี่สูง 30 นาที และใช้ความเร็วในการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4000, 4500, 5000 rpm

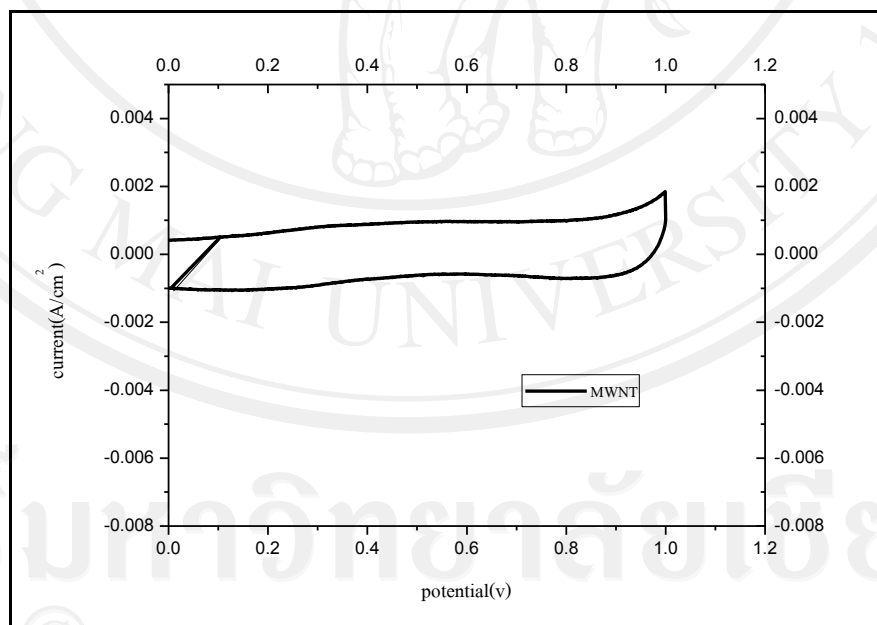
ความเร็วในการหมุน เหวี่ยง (rpm)	$ I_{pa} - I_{pc} \times 10^{-5}$ (A)	(MWNTs) $ I_{pa} - I_{baseline} \times 10^{-5}$ (A)
4000	3.7347	1.9878
4500	2.0676	1.2695
5000	2.6262	1.2695

จากตารางที่ 4.2 พบว่า ความเร็วในการหมุนเหวี่ยงที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมสารละลายผสมระหว่าง 3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิด กับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น คือ 4000 rpm ทั้งนี้เพราะค่ากระแสไฟฟ้าของพอลิเมอร์กับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นมีค่ามากที่สุด ซึ่งจากผลการทดลองทำให้ทราบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วในการปั่นเหวี่ยงสารผสม ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน นั้นลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วในการปั่นเหวี่ยงทำให้ท่อนาโนคาร์บอนจับตัวเป็นตะกอนได้มากขึ้น เมื่อคูดเอาสารละลายผสมส่วนที่ใสด้านบนไปทำฟิล์มบางด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนลดลง

จากการทดลองข้างต้น เพื่อหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการประดิษฐ์แผ่นฟิล์มบางนั้นจึงเลือกการเตรียม ABA/MWNTs ด้วยการเขย่าด้วยความถี่สูง 30 นาที และปั่นเหวี่ยงที่ 4,000 rpm ในการแปรปริมาณของ MWNTs ที่ 1.0, 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 mg/ml ดังแสดงผลในภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการเตรียมแผ่นฟิล์มบาง PABA/MWNTs ในกรดซัลฟิวริก ที่ช่วงศักย์ไฟฟ้า 0-1.1 V อัตราการสแกน 20 mV/s จำนวน 5 รอบ โดยใช้ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น 1.0, 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 mg/ml



ภาพที่ 4.9 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น ในกรดซัลฟิวริก

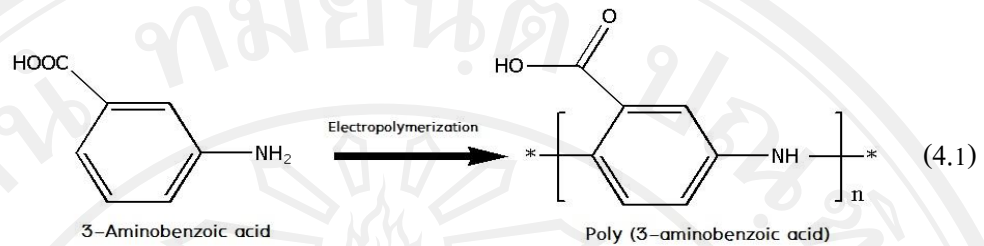
ตารางที่ 4.3 ค่ากระแสไฟฟ้าของฟิล์มบาง ที่ใช้เวลาในการเขย่าโดยใช้ความถี่สูง 30 นาที และใช้ความเร็วในการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4000 rpm และมีการผสมท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น 1.0, 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 mg/ml

ปริมาณท่อนาโนคาร์บอน ผนังหลายชั้น (mg of MWNTs)/ml	$ I_{pa} - I_{pc} \times 10^{-5}$ (A)	(MWNTs) $ I_{pa} - I_{baseline} \times 10^{-5}$ (A)
0	1.9822	-
1.0	8.4809	2.8363
2.5	5.9857	5.3089
5.0	5.4924	4.5980
7.5	7.3987	6.9116
10.0	0.771	9.4112

จากตารางที่ 4.3 พบว่าไซคลิกโวลแทมโมแกรมของฟิล์มบาง PABA/MWNTs เกิดพีคทั้งหมด 3 ตำแหน่งคือ 0.35 (a), 0.2 (b) และ 0.8 (c) เมื่อทำการเปรียบเทียบกราฟไซคลิกโวลแทมโมแกรมในภาพที่ 4.8 และ 4.9 พบว่า MWNTs จะไม่ปรากฏพีคเมื่อไม่มีการผสมกับสารละลาย ABA และเมื่อนำมาคอมโพสิตกับ ABA จะปรากฏพีคทั้งหมด 3 ตำแหน่งคือ ปรากฏพีคออกซิเดชันในศักย์ไฟฟ้าที่ 0.35 (a) กับ 0.8 (c) V ตามลำดับ และเกิดพีคแคโทดิกที่ศักย์ไฟฟ้า 0.2 (b) V โดยกราฟของ ABA ที่ไม่มีการเติม MWNTs ลงไปนั้นจะไม่ปรากฏพีค (c) และพบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ MWNTs ที่ 1.0, 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 mg/ml จะทำให้พีคตำแหน่ง 0.8 (c) มีค่าเพิ่มขึ้น โดยจะทำให้พีคตำแหน่ง 0.35 (a) ลดลงไปด้วย ซึ่งปริมาณที่มีค่าการนำไฟฟ้ามากที่สุดคือใช้ปริมาณของ MWNTs 7.5 mg/ml ทั้งนี้เนื่องจาก MWNTs มีสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี เมื่ออยู่ในสารละลายผสม แต่ทั้งนี้ต้องมีสัดส่วนที่พอเหมาะในการทำคอมโพสิตกับพอลิเมอร์ด้วย

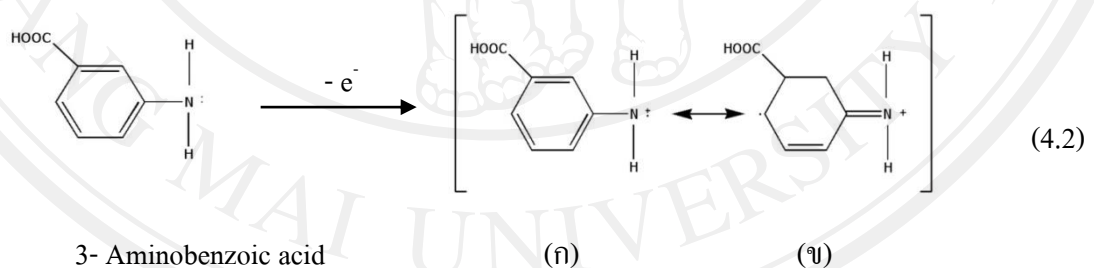
ไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการเตรียมแผ่นฟิล์มบาง PABA/MWNTs ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชันของสารละลายผสมระหว่างมอนอเมอร์ 3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิด กับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ในช่วงศักย์ไฟฟ้า 0 ถึง 1.1 V อัตราการสแกน 20 mV/s จำนวน 5 รอบ แสดงดังภาพที่ 4.8 พบว่า เมื่อทำการสแกนศักย์ไฟฟ้าไปข้างหน้าจาก 0 ไปยัง 1.1 V ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเริ่มเกิดขึ้นที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.35 V และเกิดกระแสสูงสุดที่ 1.1 V แสดงให้เห็นว่าเกิดแผ่นฟิล์มบาง PABA/MWNTs ขึ้นดังสมการ (4.1) เมื่อสแกนศักย์ไฟฟ้าย้อนกลับจะปรากฏพีคแคโทดิกขึ้นที่ค่าศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.2 V

แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะของไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่เกิดขึ้น

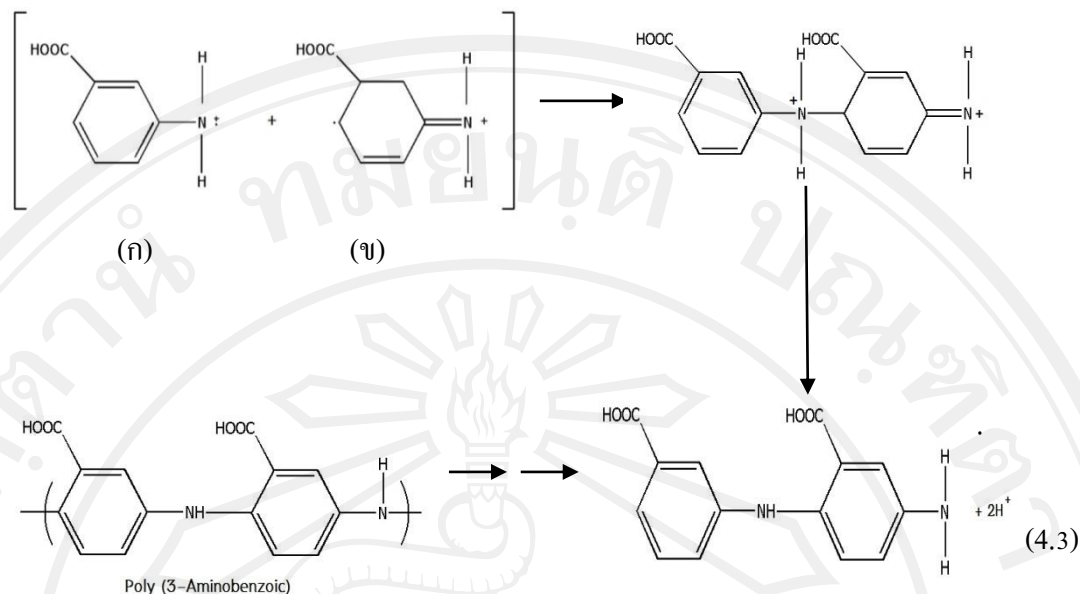


กลไกการเกิดปฏิกิริยาในการสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้า พอลิ(3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิด) ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีที่น่าจะเป็นไปได้ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน [3] ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : เมื่อผ่านศักย์ไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าทำงาน (ITO-coated glass substrate) ที่จุ่มอยู่ในสารละลายมอนอเมอร์(PABA/MWNTs) ซึ่งมีสารละลาย H_2SO_4 ทำหน้าที่เป็นทั้งสารอิเล็กโทรไลต์และตัวทำละลาย เพื่อให้มอนอเมอร์เกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า โดยมอนอเมอร์จะสูญเสียอิเล็กตรอนเกิดเป็นประจุบวกและอนุมูลอิสระที่ศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่า มอนอเมอร์ 3-aminobenzoic acid เริ่มเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่ศักย์ไฟฟ้า โดยโครงสร้างที่เป็นประจุบวกและอนุมูลอิสระของมอนอเมอร์เกิดขึ้นได้ 2 รูปแบบ คือ (ก) และ (ข) ดังสมการ (4.2)



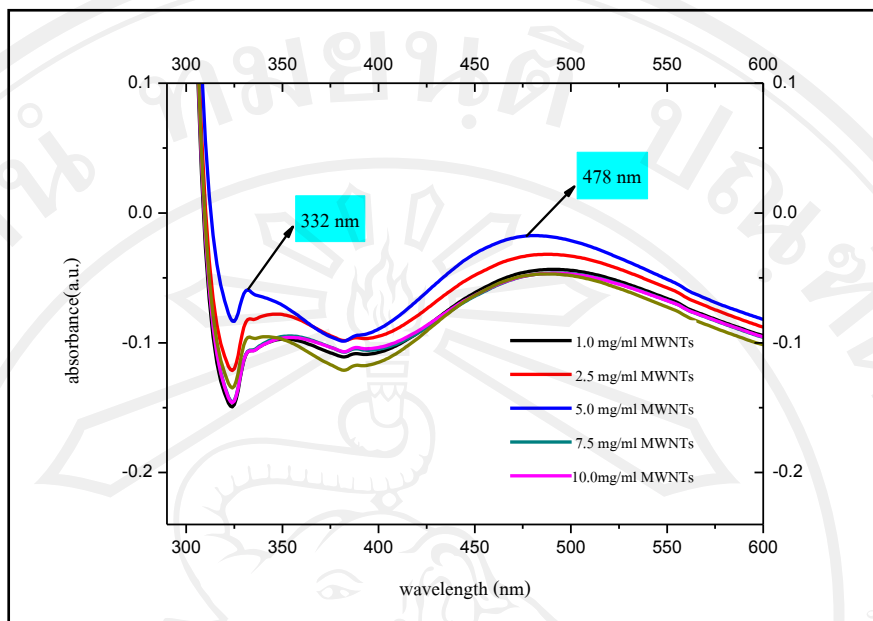
ขั้นตอนที่ 2 : โครงสร้างที่เป็นประจุบวกและอนุมูลอิสระของมอนอเมอร์ (a) และ (b) เกิดการคู่ควบกันเกิดเป็นไดเมอร์ จากนั้นไดเมอร์ที่เกิดขึ้นเกิดการคู่ควบกับโครงสร้างที่เป็นประจุบวกและอนุมูลอิสระของมอนอเมอร์ตัวใหม่หรือไดเมอร์ตัวอื่นกลายเป็นโพลิโเมอร์และพอลิเมอร์ ดังสมการ (4.3)



นอกจากนี้ในไซคลิกโวลแทมโมแกรมยังปรากฏพีคแคโทดิก (ปฏิกิริยารีดักชัน) ในขณะที่การสแกนศักย์ไฟฟ้าย้อนกลับ ซึ่งจากการศึกษาของ Chailapakul, A และคณะ(2008) [50] ได้ทำนายกลไกที่เกิดขึ้นในการศึกษาปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชันว่าน่าจะเกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของ poly(3-aminobenzoic acid) ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนสายโซ่ของพอลิเมอร์แล้วสามารถเกิดเรโซแนนซ์ผ่านคอนจูเกตได้ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชันที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้จึงไม่ทำให้เกิดการเสถียรภาพของพอลิเมอร์ที่เตรียมได้

ส่วนท่อนานาโนคาร์บอนที่เติมลงไปในสารละลายนั้นไม่ได้เกิดปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ (3-aminobenzoic acid) หรือพอลิเมอร์ poly(3-aminobenzoic acid) แต่ท่อนานาโนคาร์บอนจะละลายอยู่ในสารผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous mixture) เพื่อจะช่วยให้การตอบสนองต่อไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบางที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มมากขึ้น

4.3 การหาลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มบาง PABA/MWNTs ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี



ภาพที่ 4.10 UV-vis spectra ของฟิล์มบาง PABA/MWNTs เมื่อใช้ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นต่างกัน

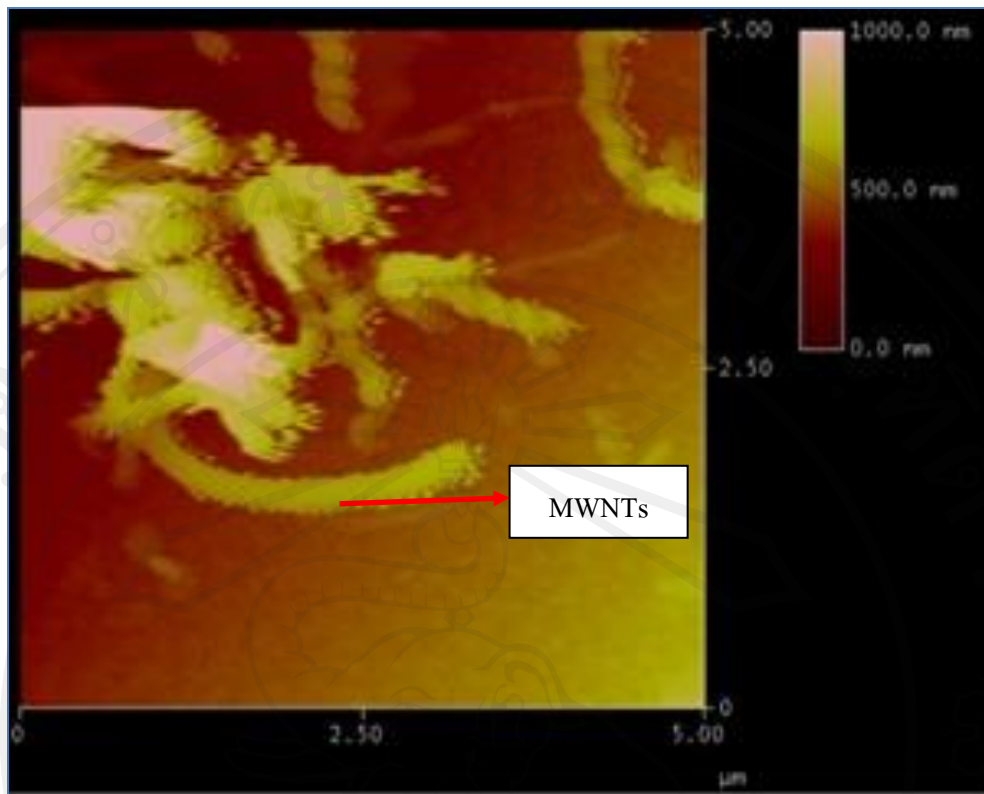
พบว่ามีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 332 และ 480 nm ซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางพอลิเมอร์ poly(3-aminobenzoic acid) เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น ไม่มีการดูดกลืนแสงในการทดลองดังกล่าว ดังแสดงผลในภาพที่ 4.1 ข้างต้น

จากการวัดการดูดกลืนแสง UV-Vis ของสารละลาย 3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิดกับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นและแผ่นฟิล์มบาง PABA/MWNTs ดังแสดงในภาพที่ 4.1-4.5 และ 4.10 พบว่าสารละลายมอนอเมอร์ ABA/MWNTs ให้ผลการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 295 nm ในขณะที่แผ่นแก้วเคลือบอินเดียมทินออกไซด์ที่ผ่านการสแกนศักย์ไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีในสารละลายมอนอเมอร์ ให้ผลการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 332 nm และ 478 nm จะเห็นได้ว่าตำแหน่งความยาวคลื่นที่สารสามารถดูดกลืนแสงได้ของ PABA/MWNTs แตกต่างไปจากเดิมที่เป็นสารละลาย ABA/MWNTs แสดงว่าเกิดพอลิ(3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิด) คอมโพสิตกับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (PABA/MWNTs) ขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบ UV-Vis spectra ของแผ่นแก้วเคลือบอินเดียมทินออกไซด์ซึ่งเป็นอิเล็กโทรดเปลว และพอลิ(3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิด) คอมโพสิตกับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (PABA/MWNTs) ที่เคลือบบนอิเล็กโทรด ทำให้ทราบว่าแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์เคลือบบนแผ่นแก้วเคลือบอินเดียมทินออกไซด์หลังจากผ่าน

กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โพสิทีฟโพลีเมอไรเซชันด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีในสารละลายของมอนอพอลิ(3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิด) คอมโพลิติกกับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น

เมื่อพิจารณาจากทิศทางด้านโครงสร้างที่ทำให้มอนอเมอร์ ABA/MWNTs เกิดการดูดกลืนแสงได้ที่มีความยาวคลื่น 295 nm พบว่าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในโครงสร้างแบบ $\pi \rightarrow \pi^*$ เนื่องจากโครงสร้างประกอบด้วยหมู่โครโมฟอร์ (หมู่คาร์บอกซิลิกและวงอะโรมาติก) ที่ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200-800 nm ในขณะที่แผ่นฟิล์มบาง PABA/MWNTs ให้ผลการดูดกลืนแสง 2 ตำแหน่ง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นได้ 2 รูปแบบ คือ $\pi \rightarrow \pi^*$ (ความยาวคลื่น 332 nm) เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในพันธะ π ของพันธะคู่ และ $n \rightarrow \pi^*$ (ความยาวคลื่น 480 nm) เกิดจากอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวบนอะตอมออกซิเจนหรือไนโตรเจน โดยที่การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบบ $n \rightarrow \pi^*$ เกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นสูงกว่า $\pi \rightarrow \pi^*$ เพราะใช้พลังงานในการทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนน้อยกว่า (ความยาวคลื่นแปรผกผันกับพลังงาน) แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างของ ABA/MWNTs พบว่า ควรให้ผลการดูดกลืนแสงที่เกิดจาก $n \rightarrow \pi^*$ เช่นเดียวกับ PABA/MWNTs เนื่องจากมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวบนอะตอมออกซิเจนหรือไนโตรเจนเหมือนกัน ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจาก $n \rightarrow \pi^*$ ใน ABA/MWNTs เกิดขึ้นได้น้อยจึงไม่สามารถสังเกตเห็นผลการดูดกลืนแสงดังกล่าวได้ และความยาวคลื่นสำหรับ $\pi \rightarrow \pi^*$ ในโครงสร้างของพอลิเมอร์เคลื่อนที่ออกไปในทิศทางที่ความยาวคลื่นสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอนอเมอร์ เนื่องมาจากโครงสร้างของ PABA/MWNTs เป็นสายโซ่ยาว ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ของอิเล็กตรอนผ่านพันธะคู่ที่เป็นคอนจูเกตได้อย่างอิสระมากขึ้น จึงใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนน้อยกว่า ส่งผลให้ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงกว่า ABA/MWNTs

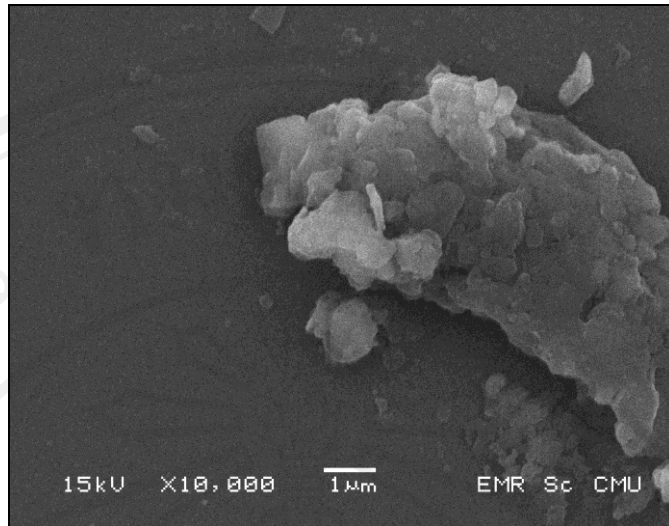
4.4 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มบาง PABA/MWNTs ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม



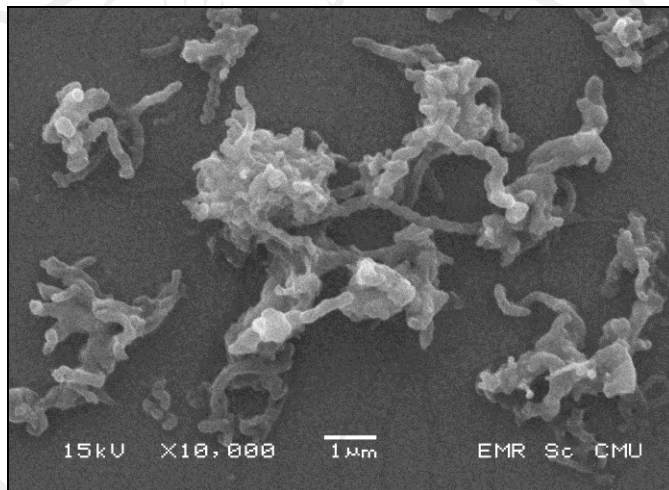
ภาพที่ 4.11 ลักษณะพื้นผิวสองมิติของแผ่นฟิล์มบาง PABA/MWNTs โดยใช้ท่อนาโนคาร์บอน
ผนังหลายชั้นปริมาณ 7.5 mg/ml

จากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของแผ่นแก้วเคลือบอินเดียมทินออกไซด์ที่มี
PABA/MWNTs พบว่าลักษณะของแผ่นฟิล์มบางมีโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนปรากฏอยู่
ชัดเจน โดยขนาดของท่อนาโนคาร์บอนวัดได้ มีค่าอยู่ในช่วง 10-100 nm

4.5 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มบาง PABA/MWNTs ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



(ก)

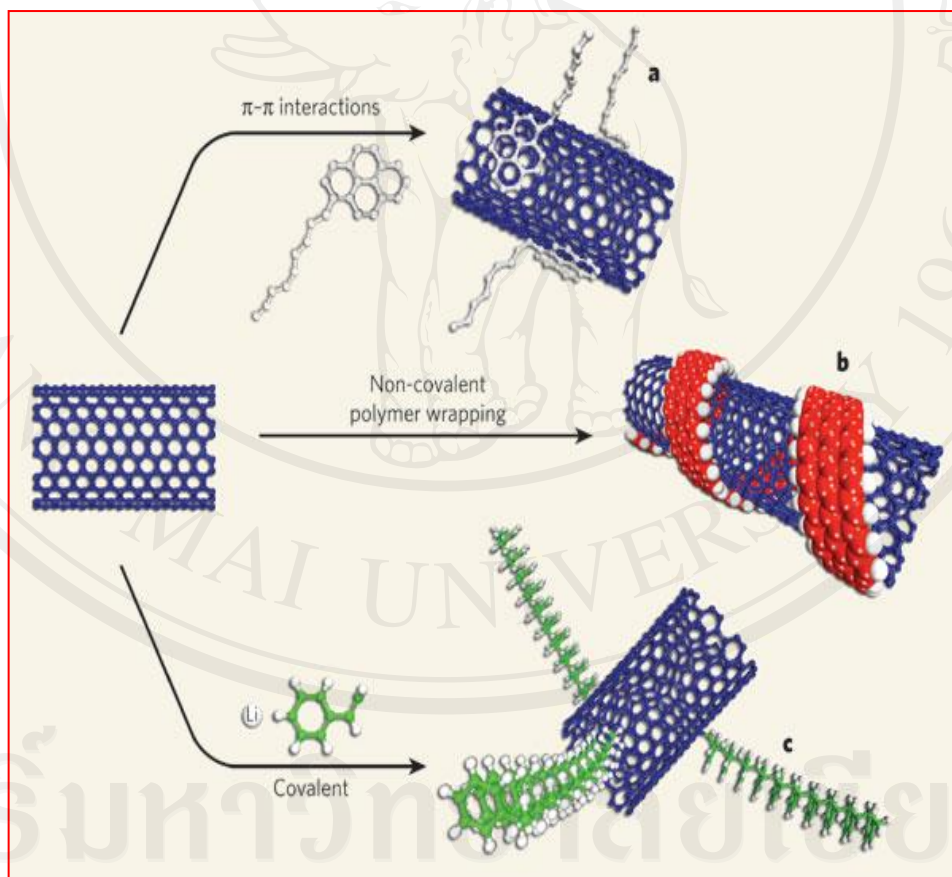


(ข)

ภาพที่ 4.12 ลักษณะพื้นผิวของ (ก) แผ่นฟิล์มบาง PABA กับ (ข) แผ่นฟิล์มบาง PABA/MWNTs โดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นปริมาณ 7.5 mg/ml ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

จากภาพที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของ (ก) แผ่นฟิล์มบางพอลิ(3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิด) กับ (ข) แผ่นฟิล์มบางพอลิ(3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิด) กับ ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น(MWNTs) โดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (MWNTs) ปริมาณ 7.5 mg/ml ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่าลักษณะพื้นผิวของแผ่นอิเล็กโทรดที่เคลือบด้วยฟิล์มของพอลิ(3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิด) พบพอลิเมอร์เกาะกลุ่มกันเป็นก้อนอย่างชัดเจนแสดงดังภาพที่ 4.12(ก) และเมื่อมีการผสมท่อนาโนคาร์บอนลงไป สารละลายมอนอเมอร์เพื่อเตรียมฟิล์มบางของพอลิ(3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิด) กับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (MWNTs) นั้น ปรากฏว่าลักษณะของแผ่นฟิล์มได้เปลี่ยนแปลงไป โดยจากที่

มีแค่พอลิเมอร์ของพอลิ(3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิด)อย่างเดี่ยวเกาะกันเป็นกลุ่มดั่งข้างต้น ได้มีลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนเกาะอยู่กับพอลิเมอร์ด้วย 4.12(ข) ทั้งนี้จากลักษณะดังกล่าวเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของแผ่นฟิล์ม ทำให้มีการนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น ท่อนาโนคาร์บอนที่เติมลงไปในสารละลายนั้น ไม่ได้เกิดปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ (3-aminobenzoic acid) หรือพอลิ(3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิด) แต่ท่อนาโนคาร์บอนจะละลายอยู่ในสารผสมเป็นเนื้อเดียวกัน(homogeneous mixture) เพื่อจะช่วยให้การตอบสนองต่อการนำไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบางที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนที่วัดได้มีความยาวประมาณ 67.25 nm ดังนั้นจึงไม่มีการสร้างพันธะระหว่างอะตอม แต่มีลักษณะการเกิด interaction ระหว่างพอลิ(3-อะมิโนเบนโซอิกแอซิด) กับ ท่อนาโนคาร์บอนซึ่งเป็นอิเล็กตรอนของคาร์บอนในท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นก็อิเล็กตรอนในวงแหวนเบนซีนในโครงสร้างของมอนอเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดได้ในสองลักษณะคือ $\pi - \pi$ interaction หรือ non-covalent [20-21] ดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 รูปแบบของลักษณะการเกิด interaction ระหว่างพอลิเมอร์และท่อนาโนคาร์บอน [20-21]