



รายงานวิจัย

โครงการ การสร้างฟิล์มบางของท่อคาร์บอนนาโน/แกรฟีน/
พอลิเมอร์นำไฟฟ้า ด้วยเทคนิค Layer-by-Layer สำหรับเป็น
ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

โดย

ดร.จุฬารัตน์ เอี่ยมสมัย

กรกฎาคม 2563

รายงานวิจัย

โครงการ การสร้างฟิล์มบางของท่อคาร์บอนนาโน/แกรฟีน/
พอลิเมอร์นำไฟฟ้า ด้วยเทคนิค Layer-by-Layer สำหรับ
เป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ดร.จุฬารัตน์ เอี่ยมสมัย

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

1. ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากตัวเก็บประจุแบบดั้งเดิมที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ยังไม่สามารถกักเก็บพลังงานได้อย่างเพียงพอหากเทียบกับปริมาตรและน้ำหนักที่มีอยู่ในปัจจุบัน แม้ว่าตัวเก็บประจุแบบดั้งเดิมจะเป็นทางเลือกในการประยุกต์ใช้งานในอดีต แต่ด้วยอายุการใช้งานและรอบในการใช้งานที่ยังคงเป็นปัญหาโดยเฉพาะอย่างยิ่งในแบตเตอรี่ ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยจำเป็นต้องยอมรับในจุดอ่อนนี้ที่ไม่มีทางเลือก ในเวลาต่อมาเกิดนิมิตรหมายที่ดีที่มีการพัฒนาและนำเสนอตัวเก็บประจุแบบยิ่งยวด (Supercapacitor) เข้ามาทดแทนตัวเก็บประจุแบบดั้งเดิม โดยตัวเก็บประจุแบบยิ่งยวดสามารถเพิ่มความสามารถในการเก็บประจุได้เป็นอย่างมาก ซึ่งเกิดจากระยะห่างระหว่างชั้นที่น้อยมากๆ พื้นที่ผิวสูงมาก สามารถนำไฟฟ้า และมีต้นทุนที่ยอมรับได้ จากข้อดีของ Supercapacitor ทำให้นักวิจัยทั่วโลกให้ความสนใจในการศึกษาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของ Supercapacitor โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นพื้นฐาน เช่น ท่อคาร์บอนนาโน แกรฟีน ซึ่งวัสดุนี้มีคุณสมบัติพิเศษเฉพาะตัว ได้แก่ พื้นที่ผิวสูง น้ำหนักเบา สามารถนำไฟฟ้าได้ดี สามารถเข้ากันได้กับวัสดุอื่นๆ มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง และสามารถควบคุมการกระจายตัวของขนาดรูพรุน อีกทั้งวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นพื้นฐานยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หากเทียบกับโลหะหนักที่มีอยู่ในแบตเตอรี่ทั่วไป เช่น แมงกานีส แคดเมียม ตะกั่ว นิกเกิล และปรอท

อย่างไรก็ตามเนื่องจากวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นพื้นฐาน เช่น ท่อคาร์บอนนาโน แกรฟีน หากไม่ผ่านการดัดแปรบริเวณพื้นผิวจะเกิดการรวมตัวกัน (aggregate) ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์และยากแก่การนำมาประยุกต์ใช้ แม้จะมีการพยายามที่จะนำวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นพื้นฐานดังกล่าวมาขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีต่างๆ เช่น slurry paste, sol-gel, electrophoretic deposition แต่ก็ยังมีขั้นตอนที่ยังยากซับซ้อน ทั้งยังยากในการควบคุมความสม่ำเสมอและประสิทธิภาพของฟิล์ม ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของ Supercapacitor ในเรื่องอายุการใช้งานและรอบในการใช้งาน การขึ้นรูปฟิล์มด้วยเทคนิค Layer-by-Layer เป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถสร้างฟิล์มบางหลายชั้นโดยอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุที่ตรงกันข้ามบนตัวรองรับ ซึ่งเทคนิคนี้สามารถสร้างฟิล์มบนตัวรองรับที่มีขนาด รูปร่าง และประเภทของตัวรองรับได้กว้างขวางและหลากหลาย อีกทั้งยังสามารถโหลดอนุภาคหรือโมเลกุลชนิดต่างๆลงไปในฟิล์มได้ตามความต้องการในการนำไปประยุกต์ใช้ โดยฟิล์มที่เกิดขึ้นจากเทคนิคนี้จะมีพื้นผิวที่สม่ำเสมอและสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้เป็นอย่างดี จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า การนำพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามาผสมกับวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นพื้นฐาน เช่น ท่อคาร์บอนนาโน แกรฟีน จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งาน ช่วยพัฒนาอายุการใช้งาน ตลอดจนช่วยเรื่องความเสถียรให้แก่ Supercapacitor งานวิจัยนี้จะใช้พอลิเมอร์นำไฟฟ้า คือ พอลิอะนิลีนไฮบริดพอลิไธรีนซัลโฟเนตแบบละลายน้ำ ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิค interfacial polymerization ซึ่งพอลิอะนิลีนไฮบริดพอลิไธรีนซัลโฟเนตแบบละลายน้ำ ทำให้พอลิอะนิลีนมีประจุ โดยนอกจากจะช่วยในการนำไฟฟ้าแล้วยังเพิ่ม affinity ในการเกิดฟิล์มได้มากขึ้นอีกด้วย ซึ่งจะเป็นสิ่งที่แตกต่างจากงานวิจัยอื่นที่โดยทั่วไปนิยมใช้พอลิอะนิลีนที่ละลายในตัวทำละลายไม่มีขั้วซึ่งเป็นอุปสรรคในการสร้างฟิล์มบางหลายชั้นด้วยเทคนิค Layer-by-Layer

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เพื่อสร้างฟิล์มบางหลายชั้นของท่อนาโนคาร์บอน/แกรฟีน/พอลิอะนิลีนไฮบริดพอลิไธรีนซัลโฟเนตแบบละลายน้ำ ด้วยเทคนิค Layer-by-Layer พร้อมหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มบางสำหรับเป็นตัวเก็บประจุแบบยิ่งยวด
- 2.2 เพื่อศึกษาความสามารถในการเก็บประจุของฟิล์มบางหลายชั้นของท่อนาโนคาร์บอน/แกรฟีน/พอลิอะนิลีนไฮบริดพอลิไธรีนซัลโฟเนตแบบละลายน้ำ
- 2.3 เพื่อศึกษาอันตรกิริยาระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/แกรฟีน กับพอลิอะนิลีนไฮบริดพอลิไธรีนซัลโฟเนตแบบละลายน้ำ โดยใช้ computational modeling

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในยุคที่มีการแข่งขันพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรมขั้นสูงที่มีมาอย่างต่อเนื่องและไม่หยุดยั้ง เป็นที่ยอมรับว่าความก้าวหน้าล้ำสมัยในด้านเทคโนโลยีของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาประเภทต่างๆ อุตสาหกรรมยานยนต์ที่หันมาพึ่งพาระบบไฟฟ้าแบบไฮบริด หรือแม้แต่ความพยายามในการพัฒนาอุปกรณ์เพื่อนำพลังงานทางเลือกและพลังงานสะอาด ไม่ว่าจะเป็น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม รวมถึงพลังงานในรูปแบบอื่นๆ มาใช้ทดแทนพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิล ไม่ว่าจะเป็น แหล่งถ่านหิน ปิโตรเลียม แก๊สธรรมชาติที่กำลังหมดไปทุกทีๆ ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีและนวัตกรรมเหล่านี้ล้วนเข้ามามีบทบาทและเป็นปัจจัยสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ส่งผลให้เกิดความต้องการในการใช้ตัวเก็บพลังงานเพื่อกักเก็บพลังงานไว้ในปริมาณสูงเช่นกัน เทคโนโลยีในการกักเก็บพลังงานจึงได้รับความสนใจ ถูกให้ความสำคัญ และมีการศึกษาพัฒนาอย่างจริงจังในวงกว้าง ทั้งในแวดวงวิชาการและวงการอุตสาหกรรม

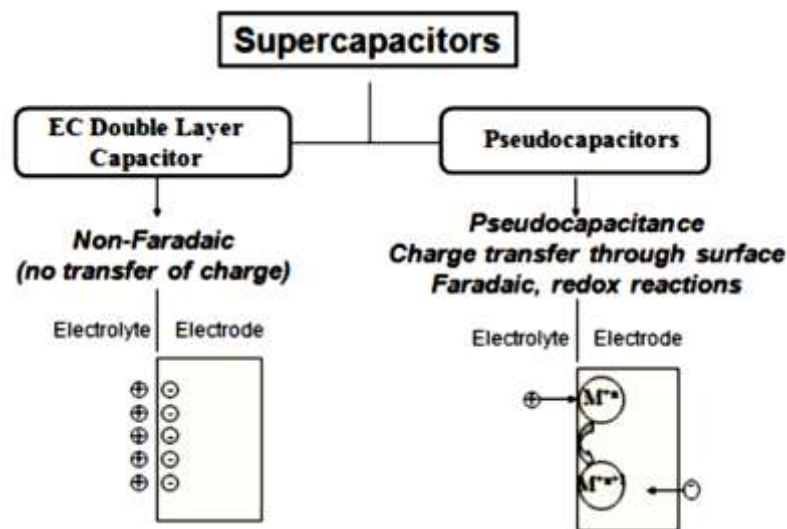
ตัวเก็บพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวด ที่มีประสิทธิภาพสูง จึงมีบทบาทและความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง อย่างไรก็ตาม ตัวเก็บพลังงานดังกล่าวยังคงมีข้อเสียที่ยังคงเป็นจุดที่ต้องได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน คือ มีประสิทธิภาพต่ำ มีความทนทานต่ำ ไม่เพียงพอต่อความต้องการ เก็บพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักของตัวเก็บพลังงานได้ต่ำ มีอายุการใช้งานสั้น เมื่อเลิกใช้งานกลายเป็นขยะที่ทำลายยากก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และมีราคาแพง ซึ่งข้อจำกัดที่กล่าวมานี้เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้พลังงานทางเลือกยังไม่ได้ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ประโยชน์มากเท่าที่ควร

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวด หรือ Supercapacitor หรือในบางครั้งเรียกกันว่า Ultracapacitor ได้รับความสนใจทำการศึกษาและพัฒนาในวงการวิจัยเป็นอย่างมาก เนื่องจาก Supercapacitor มีข้อได้เปรียบที่โดดเด่น ได้แก่ ความสามารถในการเก็บพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักของตัวเก็บประจุได้สูง เนื่องจากเก็บประจุไฟฟ้าเคมีที่พื้นผิวของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวด ยิ่งไปกว่านั้นตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าแบตเตอรี่ เนื่องจากในการเก็บพลังงาน

แต่แต่ละครั้งไม่มีปฏิกิริยาเคมีข้างเคียงเกิดขึ้น อีกทั้งอัตราเร็วในการเก็บและคายพลังงานของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดยังสูงกว่าแบตเตอรี่อีกด้วย

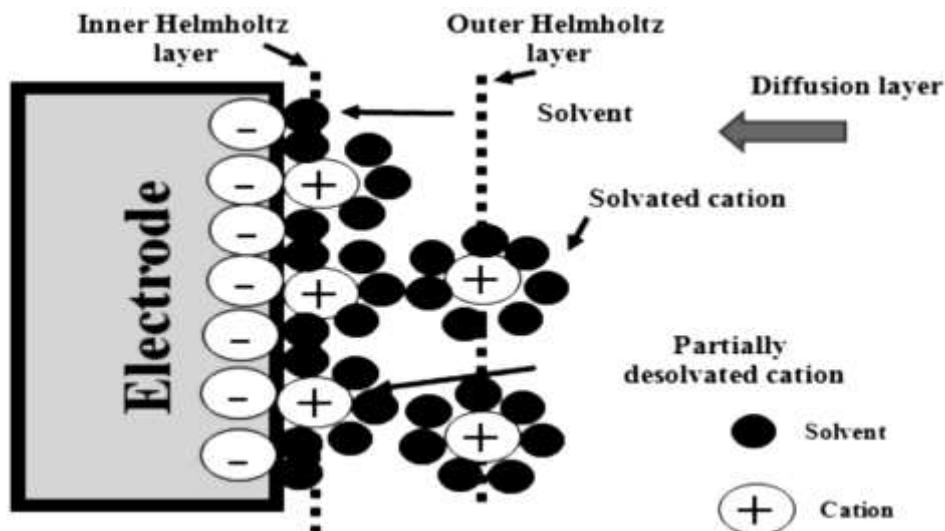
ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมี [1] แบ่งออกเป็น สองชนิด ดังแสดงในรูปที่ 1 คือ

1. ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีสองชั้น (EDLC, electrochemical double layer capacitor) โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะถูกดูดซับบนขั้วไฟฟ้าสองชั้นของตัวเก็บประจุ
2. ซูโดคาปาซิเตอร์ (Pseudocapacitors) จะเก็บประจุบนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกับอิตีแอลซี และมีถ่ายเทอิเล็กตรอน หรือปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้นภายในวัสดุที่ถูกใช้เป็นขั้วไฟฟ้าส่งผลให้ซูโดคาปาซิเตอร์สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้สูงกว่าอิตีแอลซี



รูปที่ 1 แผนภาพชนิดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวด

1. ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีอิตีแอลซี ถูกคิดค้นโดย H. I. Becker นักวิจัยของบริษัท General Electric Co. ในปี ค.ศ. 1957 ADDIN EN.CITE โดยพบว่า การเก็บประจุไฟฟ้าเคมีของอิตีแอลซีสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้สูงกว่าตัวเก็บประจุโดยทั่วไปหลายร้อยเท่า แผนภาพแสดงการเก็บประจุไฟฟ้าที่ยังยวดแบบอิตีแอลซี ดังแสดงในรูปที่ 2 ที่มีการเก็บประจุไฟฟ้าเคมีสองชั้นโดยชั้นใน คือ อินเนอร์ เฮล์มโฮลทซ์ และชั้นนอก คือ เอาเตอร์ เฮล์มโฮลทซ์



รูปที่ 2 แผนภาพการเก็บประจุไฟฟ้าเคมีสองชั้นของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดชนิดอีดีแอลซี

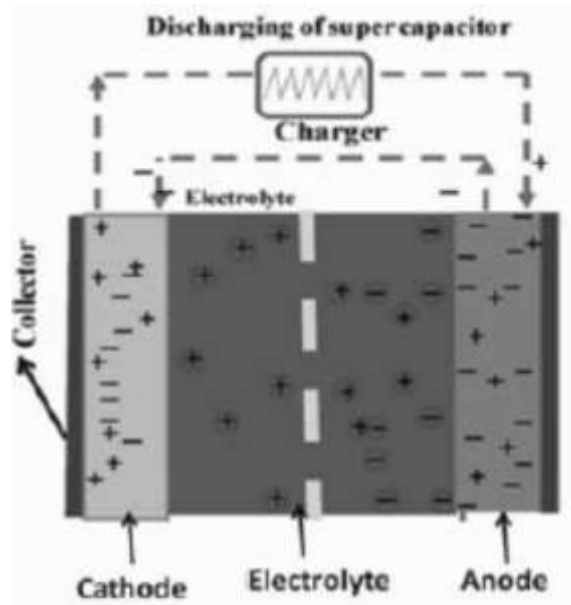
ชั้นอินเนอร์ เฮล์มโฮลทซ์ ประกอบด้วย ประจุบวกของสารอิเล็กโทรไลต์เกาะกันบริเวณผิวของขั้วไฟฟ้าในอีดีแอลซีที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดประจุลบด้วยศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอก โดยอิเล็กโทรไลต์ประจุบวกดังกล่าวก็ยังถูกล้อมรอบด้วยตัวทำละลายในลักษณะครึ่งทรงกลม

ชั้นเอาเตอร์ เฮล์มโฮลทซ์ ประกอบด้วย ประจุบวกของสารอิเล็กโทรไลต์ที่ถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลตัวทำละลาย มีลักษณะเป็นทรงกลม

ชั้นการแพร่ของสารละลาย Diffusion Layers

2. ซูโดคาร์ปาซิเตอร์

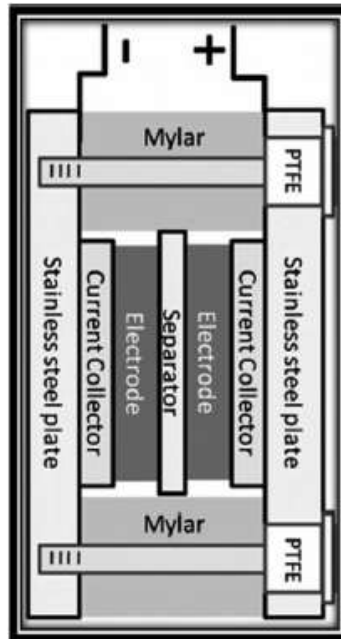
การเก็บประจุไฟฟ้าของซูโดคาร์ปาซิเตอร์จะมีค่าการเก็บประจุสูงกว่า อีดีแอลซี เนื่องจากซูโดคาร์ปาซิเตอร์เก็บประจุไฟฟ้า เช่น Na^+ และ H^+ ที่พื้นผิวเหมือนกับ อีดีแอลซี แล้วยังมีการเก็บประจุ (อิเล็กตรอน) ผ่านปฏิกิริยารีดอกซ์ภายในวัสดุที่ใช้ ทำขั้วไฟฟ้า โดยกระบวนการนี้คล้ายกับปฏิกิริยารีดอกซ์ของแบตเตอรี่ ทำให้มีค่าการเก็บประจุไฟฟ้าสูง แผนภาพตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดชนิดซูโดคาร์ปาซิเตอร์ แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดชนิด ซูโดคาร์ปาซิเตอร์

องค์ประกอบของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวด ส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4

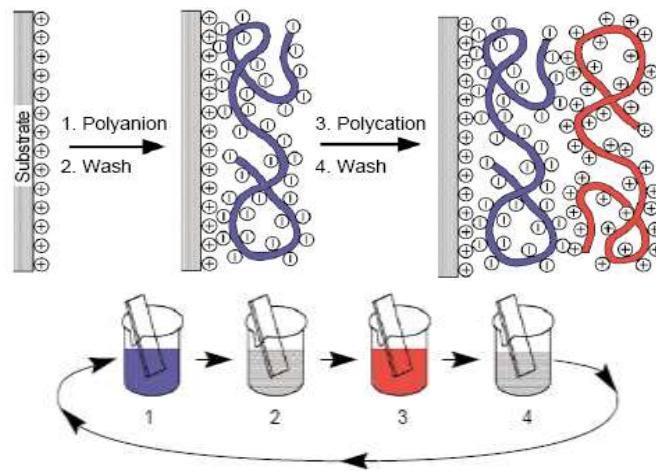
1. ขั้วไฟฟ้า (Electrodes) ที่ทำมาจากวัสดุที่สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้สูง เช่น กราฟีน แมกานีสออกไซด์ และ พอลิอะนิลีน เป็นต้น
2. ตัวแยกขั้วไฟฟ้า (Separators) ส่วนใหญ่จะต้องดูดซับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้ ไม่นำไฟฟ้า เช่น กระดาษไช และพอลิโพรพิลีน เป็นต้น
3. ตัวเก็บกระแส (Current collectors) ต้องนำไฟฟ้าได้ดี ราคาถูก เช่น กราไฟต์ เป็นต้น
4. ฉนวนป้องกันการรั่วซึมของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น ไมลาร์ (Mylar) เป็นต้น
5. แผ่นโลหะนำไฟฟ้า หุ้มส่วนประกอบต่างๆทั้งสาม เช่น เหล็กกล้าไม่เป็นสนิม (Stainless steel) เป็นต้น



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวด

พอลิอิเล็กโทรไลต์ และ การสร้างฟิล์มบางหลายชั้นด้วยเทคนิค Layer-by-Layer [2]

พอลิอิเล็กโทรไลต์ คือ พอลิเมอร์ที่มีประจุที่เกิดจากการสังเคราะห์หรือจากธรรมชาติ แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ 1) พอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุบวก(cationic polyelectrolyte) เช่น poly(diallyldimethyl ammonium chloride), Chitosan 2) พอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุลบ (anionic polyelectrolyte) เช่น poly(styrene sulfonate), Sodium Alginate และ 3) พอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ อยู่ในสายโซ่เดียวกัน (polyampholyte) การสร้างฟิล์มบางพอลิอิเล็กโทรไลต์หลายชั้น ด้วยเทคนิค Layer-by-Layer Self Assembly ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1990 โดย Gero และ Hong โดยการเกิดฟิล์มพอลิอิเล็กโทรไลต์ เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างประจุตรงกันข้าม (electrostatic attraction) ของพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุบวกและพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุลบ นอกจากนี้ยังสามารถเกิดฟิล์ม ได้จาก hydrogen bonding, hydrophobic interaction แม้กระทั่ง Vander Waals force โดยขั้นตอนการสร้างฟิล์มบางพอลิอิเล็กโทรไลต์หลายชั้นด้วยเทคนิค Layer-by-Layer Self Assembly แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ขั้นตอนการสร้างฟิล์มบางพอลิอิเล็กโทรไลต์หลายชั้นด้วยเทคนิค Layer-by-Layer Self Assembly

นำตัวรองรับที่ปรับพื้นผิวแล้ว จะถูกจุ่มลงในสารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุบวก จากนั้นกำจัดพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุบวกที่มากเกินไปในฟิล์มชั้นแรกโดยการล้างในน้ำกลั่น 3 ครั้ง เป็นฟิล์มบางชั้นที่ 1 จากนั้นจุ่มตัวรองรับดังกล่าวลงในสารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุลบ เป็นฟิล์มบางชั้นที่ 2 จากนั้นกำจัดพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุลบที่มากเกินไปโดยการล้างในน้ำกลั่น 3 ครั้ง โดยการเกิดฟิล์มบางจะเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างประจุตรงข้ามของพอลิอิเล็กโทรไลต์ ทำขั้นตอนต่อไปเหมือนที่กล่าวมาข้างต้น เพื่อเพิ่มจำนวนชั้นฟิล์ม โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟิล์มบางหลายชั้น ได้แก่ ชนิดของพอลิอิเล็กโทรไลต์ ความเข้มข้นของพอลิอิเล็กโทรไลต์ ระยะเวลาที่ substrate จุ่มอยู่ในสารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์ ความเข้มข้นของ NaCl สารละลาย buffer ข้อดีของเทคนิค Layer-by-Layer Self Assembly คือ 1) ขั้นตอนการทำและอุปกรณ์ไม่ซับซ้อน 2) เหมาะกับการ coat ตัวรองรับทุกประเภท ทุกขนาด และทุกรูปร่าง 3) สามารถเลือกใช้ชนิดของพอลิอิเล็กโทรไลต์ทั้งแบบสังเคราะห์หรือแบบธรรมชาติ หรืออนุภาคระดับนาโน-ไมโครเมตรที่เป็นประเภท organic-inorganic ได้หลากหลายเพื่อให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน 4) สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มบางได้ 5) ฟิล์มที่ได้มีความเสถียรที่ดี [15] การประยุกต์ใช้ฟิล์มบางพอลิอิเล็กโทรไลต์หลายชั้นด้วยเทคนิค Layer-by-Layer Self Assembly ได้แก่ control-release drug or small molecules, targeted drug delivery, anticorrosion, microfluidics devices, smart sensor, nanoparticles synthesis เป็นต้น

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด Supercapacitor หรือ Ultracapacitor ได้นำมาเป็นทางเลือกทดแทนเพื่อเพิ่มกำลังของระบบเก็บกักพลังงานโดยทั่วไปรวมทั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา โดยที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถกักเก็บและส่งผ่านพลังงานได้ในอัตราที่สูงมาก ๆ อันเนื่องมาจากกลไกในการกักเก็บพลังงานเป็นแบบการแยกประจุแบบง่าย โดยการเพิ่มการเก็บประจุอย่างมากของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเกิดจากระยะห่างระหว่างประจุตรงข้ามมีขนาดเล็กมาก ขั้วไฟฟ้ามีรูพรุนสูงทำให้มีพื้นที่ผิวในการเก็บประจุสูงไปด้วย [1] โดยมีวัสดุหลากหลายประเภทที่สามารถนำมาใช้ในการทำขั้วไฟฟ้า ได้แก่ polyacetylene, polypyrrole, polyaniline กลุ่มโลหะออกไซด์ เช่น RuO₂, Co₃O₄ เป็นต้น [2]

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด Supercapacitor หรือ Ultracapacitor ได้นำมาเป็นทางเลือกทดแทนเพื่อเพิ่มกำลังของระบบเก็บกักพลังงานโดยทั่วไปรวมทั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา โดยที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถกักเก็บและส่งผ่านพลังงานได้ในอัตราที่สูงมาก ๆ อันเนื่องมาจากกลไกในการกักเก็บพลังงานเป็นแบบการแยกประจุแบบง่าย โดยการเพิ่มการเก็บประจุอย่างมากของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเกิดจากระยะห่างระหว่างประจุตรงข้ามมีขนาดเล็กมาก ขั้วไฟฟ้ามีรูพรุนสูงทำให้มีพื้นที่ผิวในการเก็บประจุสูงไปด้วย [3] โดยมีวัสดุหลากหลายประเภทที่สามารถนำมาใช้ในการทำขั้วไฟฟ้า ได้แก่ polyacetylene, polypyrrole, polyaniline กลุ่มโลหะออกไซด์ เช่น RuO_2 , Co_3O_4 เป็นต้น [4]

เป็นที่ทราบกันว่า ท่อนาโนคาร์บอนได้ถูกนำมาศึกษากันอย่างกว้างขวาง ตั้งแต่เริ่มค้นพบในปี คศ 1991[5] และเป็นวัสดุที่ดึงดูดความสนใจอันเนื่องมาจากคุณสมบัติเฉพาะตัวที่มีประโยชน์และทรงประสิทธิภาพ ไม่ว่าจะเป็นด้านโครงสร้าง คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกล ท่อนาโนคาร์บอนนาโนแบบผนังเดี่ยวและผนังหลายชั้นได้ถูกนำมาศึกษาในการเป็นขั้วไฟฟ้าในตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบไฟฟ้าเคมีอันเนื่องมาจากคุณสมบัติเฉพาะตัว ได้แก่ มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง มีพื้นที่ผิวสูง คงทนต่อการกัดกร่อน คงทนต่ออุณหภูมิสูง สามารถควบคุมโครงสร้างของรูพรุน สามารถนำมาผสมผสานกับวัสดุประเภทอื่นได้

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ใช้แกรฟีนเป็นขั้วไฟฟ้าแสดงค่า specific energy density ถึง 85.6 Wh/kg ที่อุณหภูมิห้อง และ 136 Wh/kg ที่อุณหภูมิ 80C โดยวัดที่ความหนาแน่น 1 A/g ซึ่ง energy density ดังกล่าวเทียบเท่า Ni metal hydride battery แต่สามารถ charge หรือ discharge ได้ในระดับนาที่และวินาที ความสำเร็จดังกล่าวจึงเป็นที่มาของความพยายามในการนำแกรฟีนแบบ single layer มาใช้ในการเก็บประจุ [6]

พอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าเป็นทางเลือกที่สำคัญในการประยุกต์ใช้ในตัวเก็บประจุยิ่งยวดเนื่องจาก มี specific capacitance สูง เพราะ charge process เกี่ยวข้องกับมวล อีกทั้งยังมีค่าการนำไฟฟ้าในระดับ charge state อย่างไรก็ดีตามพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าไม่สามารถนำมาใช้เดี่ยวๆได้เนื่องจากมีข้อเสียคือ เสถียรของรอบในการ charge หรือ discharge ยังไม่ดีพอ เนื่องจากการหดตัว การแตกหัก รอยร้าวที่เกิดขึ้นขณะชาร์จรอบ พอลิอะนิลีนแบบละลายน้ำที่เกิดจากการสังเคราะห์จาก Interfacial Polymerization สามารถสังเคราะห์ขึ้นจาก polystyrenesulfonate ที่เข้าทำปฏิกิริยากับ aniline monomer แล้วเกิดเป็นพอลิอะนิลีนแบบละลายน้ำที่สามารถนำไฟฟ้า โดยสามารถนำมาสร้างเป็นฟิล์มบางหลายชั้นของพอลิเล็กโตรไลต์เพื่อประยุกต์ใช้ในงาน electrochromic film sensor electrocatalytic film เป็นต้น [7] และได้มีการศึกษา composite ระหว่าง ท่อนาโนคาร์บอน และ พอลิเมอร์นำไฟฟ้า เช่น polypyrrole และ polyaniline โดยพบว่าสามารถนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าได้ เนื่องจากมีรูพรุนสูงมาก ไม่เกิดการหดตัว และสามารถเก็บประจุได้เสถียรในระหว่างรอบการใช้งาน [8]

การสร้างฟิล์มบางพอลิเล็กโตรไลต์หลายชั้น ด้วยเทคนิค Layer-by-Layer Self Assembly เป็นการสร้างฟิล์มพอลิเล็กโตรไลต์ เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างประจุตรงกันข้าม (electrostatic attraction) ของพอลิเล็กโตรไลต์ประจุบวกและพอลิเล็กโตรไลต์ประจุลบ [9] โดยตัวรองรับที่ปรับพื้นผิวแล้ว จะถูกจุ่มลงในสารละลายพอลิเล็กโตรไลต์ประจุบวก จากนั้นกำจัดพอลิเล็กโตรไลต์ประจุบวกที่มากเกินไปใน

ฟิล์มชั้นแรกโดยการล้างในน้ำกลั่น เป็นฟิล์มบางชั้นที่ 1 จากนั้นจุ่มตัวรองรับดังกล่าวลงในสารละลายพอลิอิเล็กโตรไลต์ประจุลบ เป็นฟิล์มบางชั้นที่ 2 จากนั้นกำจัดพอลิอิเล็กโตรไลต์ประจุลบที่มากเกินไปโดยการล้างในน้ำกลั่น 3 ครั้ง โดยการเกิดฟิล์มบางจะเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างประจุตรงข้ามของพอลิอิเล็กโตรไลต์ทำขั้นตอนต่อไปเหมือนที่กล่าวมาข้างต้นเพื่อเพิ่มจำนวนชั้นฟิล์ม นอกจากนี้ยังสามารถเกิดฟิล์มได้จาก hydrogen bonding, covalent bonding แม้กระทั่ง donor-acceptor interaction การนำท่อนคาร์บอนนาโนมาสร้างฟิล์มบางด้วยเทคนิค Layer-by-Layer ได้ถูกศึกษากันอย่างแพร่หลาย โดยการดัดแปรพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นให้มีประจุบวกและลบ พบว่าฟิล์มบางที่ได้สามารถนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้สูงและสามารถเก็บประจุได้ดีเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์นำไฟฟ้ากับท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังเดี่ยว[10]

อย่างไรก็ตามการนำท่อนาโนคาร์บอนหรือแกรฟีนที่ไม่ผ่านการดัดแปรมาสร้างเป็นฟิล์มนั้นเป็นไปได้ยากมากเนื่องจากไม่สามารถกระจายตัวในสารละลายได้ จึงมีความพยายามในการดัดแปรพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนหรือแกรฟีน โดยอาจเป็นได้ทั้งแบบ noncovalent และ covalent surface modification เพื่อให้พื้นผิวมีประจุ และผลักกันโดยที่ยังเสถียรอยู่ในสารละลายได้ การดัดแปรแบบ noncovalent surface modification สามารถทำได้โดยใช้โคโตซานที่มี degree of deacetylation ที่แตกต่างกัน[11] โดยพบว่า degree of deacetylation ต่ำ สามารถเกาะบริเวณพื้นผิวของท่อนคาร์บอนนาโนได้ดีกว่าเนื่องจากมีหมู่ acetyl ปริมาณมากกว่า โดยที่ส่วนที่หมู่แอมโมเนียมจะหันออก ทำให้เกิดการผลักกัน และท่อนคาร์บอนนาโนสามารถกระจายตัวอยู่ในสารละลายได้ โดยปรากฏการณ์นี้สามารถยืนยันได้จากผลการศึกษาโดยใช้ Molecular Dynamic Simulation ออกแบบและดูพฤติกรรมที่เกิด interaction ที่เป็นไปในทำนองเดียวกัน[12]

การดัดแปรแบบ covalent surface modification สามารถทำได้โดยแกรฟีนสามารถกระจายตัวได้โดยใช้ hydrogen [13] โดยที่มิจัยพบว่า การดัดแปรพื้นผิวของแกรฟีนจะทำให้เพิ่มความสามารถในการเก็บประจุ เนื่องจากจะมีหมู่ active site สำหรับจับกับอนุภาค metal oxide และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ส่วนการดัดแปรท่อนคาร์บอนนาโน แบบ covalent surface modification สามารถทำได้โดยทำให้เกิดการ oxidation ด้วย Nitric acid โดยพบว่าจะช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของดัดแปรท่อนคาร์บอนนาโน ในน้ำ methanol และ N,N dimethylformamide [14]

อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยเพียงไม่มากที่ทำการศึกษการสร้างขั้วไฟฟ้าด้วยท่อนคาร์บอนนาโน แกรฟีน และพอลิเมอร์นำไฟฟ้าด้วยเทคนิค layer-by-layer การสร้างขั้วไฟฟ้าแบบฟิล์มบางด้วย Polyaniline Nanofiber และท่อนคาร์บอนนาโนดัดแปร ด้วย Layer-by-Layer นั้น พบว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็น Microbattery หรือ Electrochemical Supercapacitor โดยฟิล์มนี้จะบรรจุอยู่ใน lithium cell ซึ่งสามารถเก็บประจุได้ 32 F/cm^3 และมี Volumetric capacity 210 mAh/cm^3 [15] มีการนำพอลิเมอร์มาดัดแปรแกรฟีน โดยการนำ graphite oxide reduce ด้วย Polyethyleneimine แล้วสร้างฟิล์มบางด้วยเทคนิค Layer-by-Layer กับ oxidized ท่อนคาร์บอนนาโนผนังหลายชั้นพบว่าสามารถสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าในตัวเก็บประจุแบบยิ่งยวด โดยมีความสามารถในการเก็บประจุ 120 F/g [16]

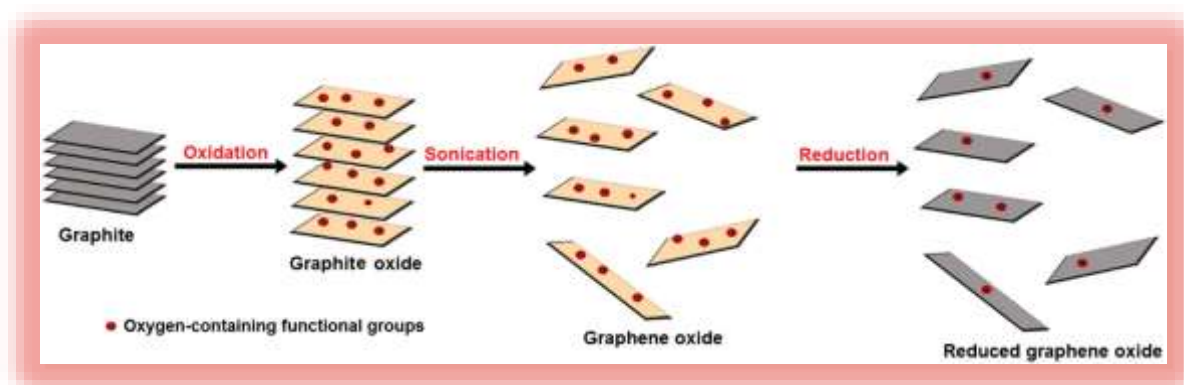
4. วิธีการทดลอง

ในการเตรียมฟิล์มบาง ด้วยเทคนิค Layer-by-Layer จำเป็นต้องเตรียม multiwalled carbon nanotubes, graphene และ polyaniline ให้มีประจุ เพื่อเกิด electrostatic interaction ซึ่งเป็น interaction หลักระหว่างการสร้างฟิล์มบางหลายชั้นด้วยเทคนิค Layer-by-Layer โดยทำการ treat MWCNT ด้วย $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{SO}_4$ เพื่อให้เกิดหมู่ฟังก์ชัน COOH , OH บริเวณพื้นผิว ส่วนการเตรียม graphene สามารถเตรียมได้โดยนำ graphite มาดัดแปรพื้นผิวด้วย H_2SO_4 และ KMnO_4 โดยวิธี Hummer เพื่อให้ได้ Graphene Oxide ที่มีหมู่ฟังก์ชัน COOH , OH , Epoxide ที่มีขั้ว ส่วน Polyaniline เตรียมได้จาก Interfacial Polymerization ของ Aniline Monomer และ Polystyrene sulfonate เพื่อให้มีหมู่ sulfonate ของ PSS hybrid อยู่กับ Polyaniline ในรูป emeraldine salt ที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้า

ทดสอบความเป็นไปได้ในการสร้างฟิล์มของ graphene oxide (GO), โดยสร้าง Primer film เพื่อเป็นชั้นรองรับที่มีความหนาแน่นของประจุสูง โดยเลือกใช้ strong polyelectrolyte ที่มีความเสถียรของประจุสูงทั้งในสภาวะกรดและด่าง ได้แก่ Polyanion: poly(4-sodium styrene sulfonate) และ Polycation: poly(diallyldimethylammonium chloride) โดยด้วยเทคนิค Layer-by-Layer บนกระจกสไลด์ โดยชั้นที่ 7 จะเป็น PDAD ซึ่งมีประจุบวกสำหรับรองรับ GO ที่มีประจุลบในสารละลายเบส NaOH เข้มข้น 0.1M เมื่อจุ่ม primer film ลงไปในสารละลายที่มี GO ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน (0.05, 0.1, 0.25 และ 0.5%wt) จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy พบว่า ค่า absorbance ที่ λ_{max} 540 nm เพิ่มขึ้น เมื่อ dipping time เพิ่มขึ้นภายในระยะเวลาสามชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า GO สามารถติดบน primer ได้เพิ่มขึ้น แต่ถ้า dipping time นานเกินไป (18 ชั่วโมง) จะพบว่าเกิดการ peel off ของฟิล์มบางโดย desorb กลับสู่สารละลาย GO ทำให้เกิดการ aggregate ของ GO และเกิดการตกตะกอนในที่สุด จึงเห็นได้ว่า ความเข้มข้นของ GO และระยะเวลาในการ dip มีผลต่อการเกิดฟิล์ม

จากนั้นเริ่มนำ graphene oxide (GO) มาทดลองสร้างฟิล์มบางหลายชั้นด้วยเทคนิค Layer-by-Layer โดยพบว่า ภายใต้อสภาวะเบส NaOH เข้มข้น 0.1M พบว่า anionic GO สามารถเกิด electrostatic interaction กับ cationic polyelectrolyte: poly(diallyldimethylammonium chloride): PDAD จนสามารถเกิดเป็นฟิล์มบางหลายชั้นได้สำเร็จ (3 - 41 layers) โดยดูได้จากการเพิ่มขึ้นของ absorbance ที่ λ_{max} 410 nm เมื่อจำนวนชั้นของฟิล์มบางมากขึ้น วิเคราะห์โดยเทคนิค UV-Vis spectroscopy

4.1 กระบวนการสังเคราะห์ Graphene Oxide (GO)



นำ Graphite 1 g ผสมกับกรด H_2SO_4 เข้มข้น ปริมาตร 50 ml จากนั้นกวนด้วย magnetic bar เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้ในอ่างน้ำแข็ง จากนั้นค่อยๆเติม KMnO_4 3-7 กรัม ลงใน mixture ดังกล่าวอย่างช้าๆ และกวน mixture ต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นให้ความร้อน mixture ที่อุณหภูมิ 45°C แล้วกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ให้เริ่มหยดน้ำกลั่น ปริมาตร 50 ml ลงใน mixture อย่างช้าๆ แล้วกวนต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 45°C

นำ Reacted mixture ที่ได้มาออกมาจาก oil bath แล้วทำการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเติม Hydrogen peroxide ปริมาตร 2 ml แล้ว stir ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

จากนั้นเติม HCl เข้มข้น 1 M ปริมาตร 100 ml และกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง นำ mixture ที่ได้มา centrifuge ที่ความเร็วรอบ 12,000 rpm 25°C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อตกตะกอน แกรฟีนออกไซด์ และกำจัด supernatant ออก จากนั้นทำการ rinse แกรฟีนออกไซด์ ด้วยน้ำกลั่น โดย centrifuge ที่ความเร็วรอบ 12,000 rpm, 25°C , เป็นเวลา 10 นาที จำนวน 3 ครั้ง และเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จำนวน 1 ครั้ง โดยทุกครั้งต้องนำเอา supernatant ออกแล้ว rinse ด้วยน้ำกลั่น เพื่อกำจัด by product ที่ปนอยู่ในแกรฟีนออกไซด์ออกให้มากที่สุด จนได้ Graphene oxide (GO) ออกมา

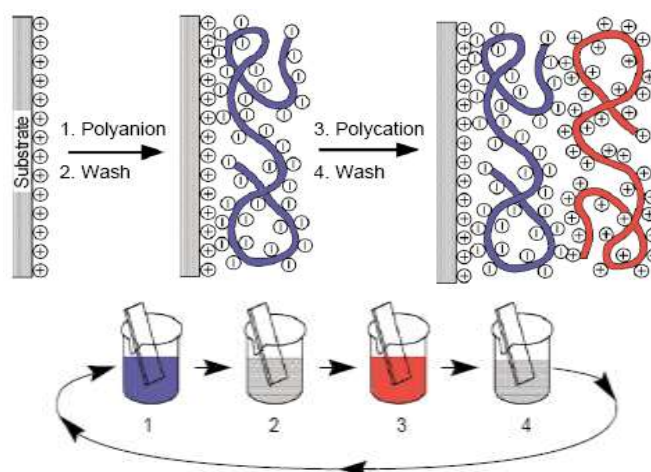
4.2 การเตรียม primer polyelectrolyte multilayers thin film บนกระจกสไลด์

4.2.1 เตรียมสารละลาย polyelectrolyte

1. ละลาย cationic polyelectrolyte : poly(diallyldimethyl ammonium chloride), PDAD ในน้ำกลั่น โดยมีความเข้มข้น 10 mM และเติม NaCl เข้มข้น 0.5 M.
2. ละลาย anionic polyelectrolyte solution: poly(sodium 4-styrene sulfonate), PSS ในน้ำกลั่น โดยมีความเข้มข้น 10 mM และเติม NaCl เข้มข้น 0.5 M.

4.2.2 การสร้างฟิล์ม primer ลงบนกระจกสไลด์

การสร้าง primer film บนกระจกสไลด์ทำได้โดย จุ่มกระจกสไลด์ลงในสารละลาย PDAD ที่มีความเข้มข้น 10 mM และ NaCl เข้มข้น 0.5 M. เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นล้าง excess PDAD ในน้ำกลั่น 3 ครั้ง แล้วจึงนำมาจุ่มในสารละลาย PSS ที่มีความเข้มข้น 10 mM และ NaCl เข้มข้น 0.5 M. เป็นเวลา 2 นาที แล้วล้าง excess PSS ในน้ำกลั่น 3 ครั้ง เช่นเดียวกัน ทำตามวิธีดังกล่าวจนได้ primer 7 layers โดยมี PDAD ซึ่งเป็นประจุบวก อยู่ชั้นบนสุด



4.3 ศึกษาผลของเวลาในการเกาะตัว dipping time และ ความเข้มข้นของ graphene oxide (GO) ต่อการ adsorb ของ GO monolayer บน primer film

graphene oxide (GO) (1:7 equivalent KMnO_4) ปริมาณ 0.05, 0.1, 0.25, และ 0.5%wt ใน 0.1 M NaOH จะผ่านการ sonicate เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ด้วย pulsed probe sonicator เพื่อให้ GO เกิดการกระจายตัวได้ดี ภายใต้สารละลายเบส GO จะมีประจุเป็นลบ

จากนั้นนำ กระจกสไลด์ที่มี primer 7 layers PDAD on top จุ่มลงในสารละลาย GO ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน; 0.05, 0.1, 0.25, 0.5%wt และ vary dipping time ดังนี้ 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180 และ 1080 นาที โดยในทุกๆช่วงเวลาดังที่กล่าวมาข้างต้น จะทำการวัดค่า absorbance ของ GO monolayer film ด้วย UV-Vis Spectrophotometer ในช่วงความยาวคลื่น 400-700 nm

4.4 ศึกษาความสามารถในการเกิด multilayers ระหว่าง GO และ PDAD ด้วยเทคนิค Layer-by-Layer

เตรียม sonicate graphene oxide (GO) 0.1 %wt ใน 0.1M NaOH เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ด้วย pulsed probe sonicator

จากนั้นนำ กระดาษไคต์ที่มี primer 7 layers PDAD on top จุ่มลงในสารละลาย GO ที่มีความเข้มข้น 0.1 %wt เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นล้าง excess GO ใน 0.1M NaOH 3 ครั้ง แล้วจึงนำมาจุ่มในสารละลาย PDAD ที่มีความเข้มข้น 1 mM เป็นเวลา 1 นาที แล้วล้าง excess PDAD ใน 0.1M NaOH 3 ครั้ง เช่นเดียวกัน ทำตามวิธีดังกล่าวจนได้ multilayers 3-41 layers โดยมี GO อยู่ชั้นบนสุด ทำการวัดค่า absorbance ของ GO multilayers film ด้วย UV-Vis Spectrophotometer ในช่วงความยาวคลื่น 350-750 nm

4.5 สังเคราะห์ oxidized MWCNT

นำ MWCNT มา treat ใน $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{HNO}_3$ ในอัตราส่วน 3:1 v/v และทำการ sonicate ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นรอให้อุณหภูมิลดลงมาที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำมาทำการ neutralize ด้วย NaOH แล้วทำการ dialysis เพื่อกำจัดเกลือออก แล้วนำ treated MWCNT ในน้ำกลั่นไป centrifuge 4000 rpm เป็นเวลา 30 นาที เอา supernatant ออกแล้วรอแห้ง

4.6 สังเคราะห์ Interfacial Polymerization of Polyaniline hybrid PSS

ใส่ 10 mM aniline monomer ละลายใน CHCl_3 จากนั้นด้านบนเติม 10 mM Poly(styrene sulfonate): PSS ที่ผสมกับ ammonium persulfate (oxidizing agent) เข้มข้น 5 mM จากนั้นทำให้เกิดปฏิกิริยาโดยอุณหภูมิที่ 4°C จะเกิด polyaniline บริเวณ interface organic และ aqueous phase ภายใน 15 นาที และปฏิกิริยาจะสิ้นสุดภายในเวลา 3 ชั่วโมง

4.7 การรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์บนฟิล์มบางหลายชั้นที่สร้างด้วยเทคนิค Layer-by-Layer

เตรียมสารละลาย reducing agent, Sodium Borohydride ความเข้มข้น 10 mM จากนั้นรีดิวซ์ฟิล์มบาง GO/PDAD 21 ชั้น และ 41 ชั้น มาแช่ในสารละลายเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา reduction

5. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

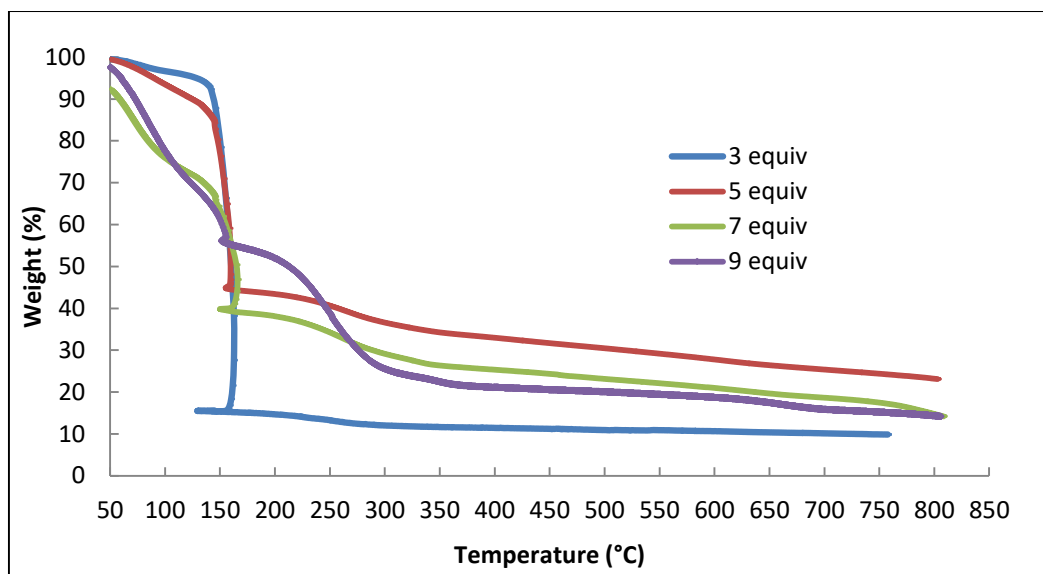
จากการสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์ โดยผ่านกระบวนการ Modified Hummer's Method โดยมีการเพิ่มปริมาณ KMnO_4 ในสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง แกรฟไฟท์ : KMnO_4 ได้แก่ 1:1,3,5,7,9 ได้ตัวอย่างหลังทำปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพและความสามารถในการกระจายตัวของแกรฟีนออกไซด์ ที่สังเคราะห์ด้วย สัดส่วนโดยน้ำหนักของแกรฟไฟท์ G : KMnO_4 , 1 : 1,3,5,7,9 ตามลำดับ

จากรูปที่ 1 จะพบว่า ความสามารถในการกระจายตัวของแกรฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณการเติม KMnO_4 สูงขึ้น เนื่องจากปริมาณ KMnO_4 จะส่งเสริมให้มีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบริเวณพันธะคู่ของ $\text{C}=\text{C}$ ในโครงสร้างของแกรฟไฟท์ได้เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ในสัดส่วน 1:1 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าตัวอย่างยังคงมีลักษณะกายภาพใกล้เคียงกับแกรฟไฟท์และมีความ hydrophobic สูง wettability ต่ำ เมื่อเทียบกับสัดส่วนอื่นๆ อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาความสามารถในการกระจายตัวของแกรฟีนออกไซด์จะแปรผันโดยตรงกับสัดส่วน G : KMnO_4 ที่เพิ่มขึ้น และพบว่า สัดส่วนที่ทำให้แกรฟีนออกไซด์กระจายตัวอยู่ในสารละลายได้ดีใกล้เคียงกันคือ 1:7 และ 1:9

ตัวอย่างแกรฟีนออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ได้ถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวที่เป็นลักษณะเฉพาะของแกรฟีนออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของแกรฟีนออกไซด์ ที่สังเคราะห์ด้วยสัดส่วนโดยน้ำหนักของ แกรไฟท์ G : KMnO_4 , 1 : 3,5,7,9

จากพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของแกรฟีนออกไซด์ ที่สังเคราะห์ด้วยสัดส่วนโดยน้ำหนักของแกรไฟท์ G : KMnO_4 , 1 : 3,5,7,9 พบว่า แกรฟีนออกไซด์ 1:7 และ 1:9 มี weight loss อย่างรวดเร็วในช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 50-150 °C ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของน้ำและความชื้น ตามมาด้วยมี weight loss ในช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิ 200-350 °C ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของ **Oxygen** ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในหมู่ฟังก์ชันต่างๆหลังเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน [17] โดยพบว่า แกรฟีนออกไซด์ จากสัดส่วน 1:9 มีการสลายตัวในช่วงที่ 2 อย่างชัดเจนที่สุด แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่เกิดหมู่ฟังก์ชันต่างๆหลังจากแกรไฟท์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนอื่น

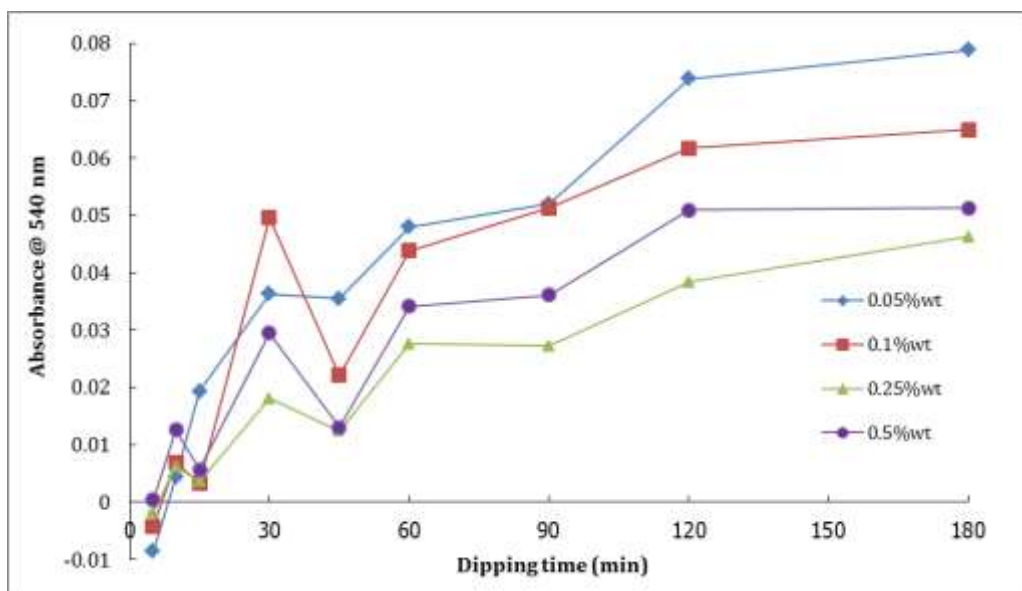
จากผลการทดลอง แม้แกรฟีนออกไซด์ จากสัดส่วน 1:9 จะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการกระจายตัวและมีแนวโน้มที่ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นมีมากกว่า แต่อย่างไรก็ตาม โอกาสที่จะ **reduce** แกรฟีนออกไซด์ ให้กลับมาเป็นแกรฟีนก็มีความยากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้เลือกนำแกรฟีนออกไซด์ ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยสัดส่วนโดยน้ำหนักแกรไฟท์ G : KMnO_4 1:7 ดังแสดงในรูปที่ 3 มาศึกษาความสามารถในการสร้างฟิล์มบางหลายชั้นด้วยเทคนิค **Layer-by-Layer** เนื่องจากมีความสามารถในการกระจายตัวในสารละลายได้ดีใกล้เคียงกับ 1:9 แต่มีแนวโน้มที่ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่เกิดหลังการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมีน้อยกว่าซึ่งมีโอกาที่จะ **reduce** ให้กลับมาเป็นแกรฟีนได้ค่อนข้างง่ายกว่า



รูปที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของ Graphene oxide ที่สังเคราะห์ได้จากสัดส่วนโดยน้ำหนักแกรไฟท์ (G : KMnO_4 , 1:7)

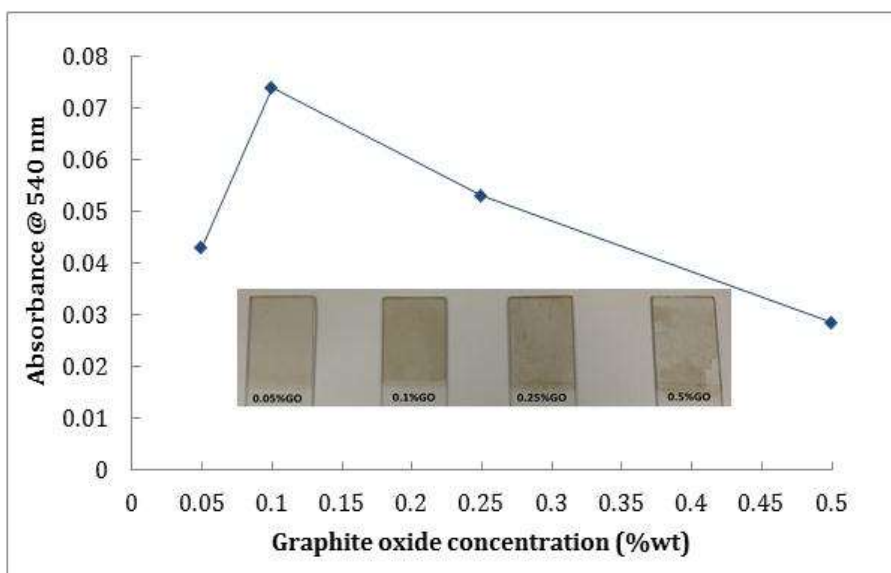
ผลของ dipping time และ ความเข้มข้นของ graphene oxide (GO) ต่อการ adsorb ของ GO monolayer บน primer film

ทดสอบความเป็นไปได้ในการสร้างฟิล์มของ graphene oxide (GO) แบบ monolayer, สร้าง Primer film ที่เป็นฟิล์มบาง 7 ชั้น ระหว่าง Polyanion: poly(4-sodium styrene sulfonate) และ Polycation: poly(diallyldimethylammonium chloride) ด้วยเทคนิค Layer-by-Layer บนกระจกสไลด์ โดยชั้นที่ 7 จะเป็น PDAD ซึ่งมีประจุบวกสำหรับรองรับ GO ที่มีประจุลบในสารละลายเบส NaOH เข้มข้น 0.1M เมื่อจุ่ม primer film ลงไปในสารละลายที่มี GO ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน (0.05, 0.1, 0.25 และ 0.5%wt) จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy พบว่า ค่า absorbance ที่ λ_{max} 540 nm เพิ่มขึ้น เมื่อ dipping time เพิ่มขึ้นภายในระยะเวลาสามชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสามารถในการ adsorb ของ GO monolayer บน primer ที่เวลา 5-180 นาที ที่ความเข้มข้น GO 0.05,0.1,0.25 และ 0.5%wt

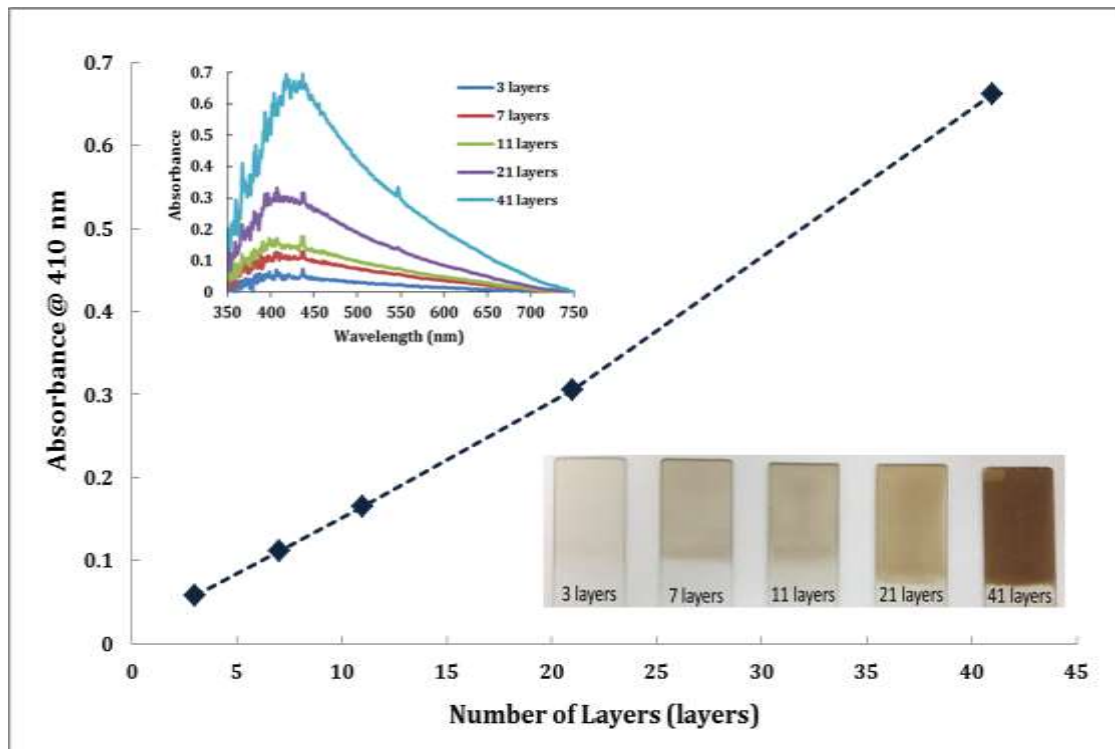
เมื่อพิจารณาเวลาในการ adsorb ของ GO ที่ 180 นาที พบว่า GO ที่มีความเข้มข้น 0.1%wt มีความสามารถในการ adsorb ลงบน primer ได้ดีและมีความเสถียร เมื่อเทียบกับ GO ที่มีความเข้มข้นอื่น นอกนั้นจะพบว่า เกิดการ peel off ของฟิล์มบางโดย desorb กลับสู่สารละลาย GO ทำให้เกิดการ aggregate ของ GO และเกิดการตกตะกอนในที่สุด จึงเห็นได้ว่า ความเข้มข้นของ GO และระยะเวลาในการ dip มีผลต่อการเกิดฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสามารถในการ adsorb ของ GO monolayer บน primer ที่เวลา 18 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น GO 0.05, 0.1, 0.25 และ 0.5%wt

ความสามารถในการเกิด multilayers ระหว่าง GO และ PDAD ด้วยเทคนิค Layer-by-Layer

จากนั้นเริ่มนำ graphene oxide (GO) มาทดลองสร้างฟิล์มบางหลายชั้นด้วยเทคนิค Layer-by-Layer โดยพบว่า ภายใต้สภาวะเบส NaOH เข้มข้น 0.1M พบว่า anionic GO สามารถเกิด electrostatic interaction กับ cationic polyelectrolyte: poly(diallyldimethylammonium chloride): PDAD จนสามารถเกิดเป็นฟิล์มบางหลายชั้นได้สำเร็จ (3-41 layers) โดยดูได้จากการเพิ่มขึ้นของ absorbance ที่ $\lambda_{\max}$ 410 nm เมื่อจำนวนชั้นของฟิล์มบางมากขึ้น วิเคราะห์โดยเทคนิค UV-Vis spectroscopy (รูปที่ 6)



รูปที่ 6 ความสามารถในการ multilayers ระหว่าง GO และ PDAD ที่จำนวนชั้น 3-41 layers

ฟิล์มบางหลายชั้นระหว่าง GO และ PDAD ที่จำนวนชั้น 21 และ 41 layers ที่ผ่านการแช่ในสารละลาย reducing agent, Sodium Borohydride ความเข้มข้น 10 mM เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน นั้น พบว่า ฟิล์มเกิดการ peel off หลุดลอกออกมาจากกระจกสไลด์ เนื่องจากไม่สามารถทนสภาวะการรีดิวซ์ได้ แม้มีการปรับลดความเข้มข้นของ Sodium Borohydride ลงแต่ก็ยังคงมีการหลุดลอกและไม่สามารถนำไฟฟ้าได้

6. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์ได้โดยกระบวนการ **modified Hummer's Method** โดยสัดส่วนโดยน้ำหนักของ แกรไฟท์ : KMnO_4 ที่เหมาะสมอยู่ที่ **1:7** แกรฟีนออกไซด์ที่ได้จะถูกนำมาศึกษาความสามารถในการ **adsorb** ลงบน **primer film** โดยพบว่า แกรฟีนออกไซด์ความเข้มข้น **0.1%wt** มาความสามารถในการ **adsorb** ลงบนพื้นผิวของ **primer film** ได้อย่างดีและมีความเสถียรต่อการละลายสูง ในการสร้างฟิล์มบางหลายชั้นของแกรฟีนออกไซด์ความเข้มข้น **0.1%wt** และพอลิไดอัลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ สามารถทำได้สำเร็จ โดยฟิล์มมีการเติบโต ตั้งแต่ **3** ถึง **41** ชั้น โดยชั้นบนสุดของฟิล์มบางจะเป็นแกรฟีนออกไซด์ โดยหากชั้นฟิล์มสูงมากกว่านี้อาจเกิดการ **peel off** หลุดลอกได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าชั้นฟิล์มที่สร้างเสร็จจึงถูกนำไป **reduce** ด้วย **sodium borohydride** เพื่อให้แกรฟีนออกไซด์กลับไปเกิดพันธะคู่เพิ่มขึ้นอีกครั้ง ขณะที่ทำการ **reduce** พบว่า ฟิล์มเกิดการหลุดลอกออกจากตัวรองรับ เนื่องจากไม่สามารถทนต่อสภาวะได้ ประกอบกับในชั้นฟิล์มแต่ละชั้นต่างยึดเกาะกันด้วยแรงดึงดูดระหว่างประจุ **electrostatic attraction** ซึ่งอาจไม่แข็งแรงเพียงพอที่จะทำให้ชั้นฟิล์มทนต่อสภาวะ **reduction** ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะโดยควรหาวิธีการ **crosslink** ฟิล์มบางแกรฟีนออกไซด์เพื่อตรึงแกรฟีนออกไซด์และเพิ่มเสถียรภาพของฟิล์มบางขณะทำการรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์กลับมาเป็นแกรฟีน และทดลองหาช่องทางอื่นๆในการรีดิวซ์ในสภาวะที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของฟิล์มให้น้อยที่สุด

บรรณานุกรม

1. มนตรี สว่างพฤษ์ Innovative Nanotechnology of Energy Storages: Supercapacitors ฉบับที่ 85 ปีที่ 26 กรกฎาคม - กันยายน 2556 หน้า 9-26
2. Decher, G. Fuzzy Nanoassemblies: Toward Layered Polymeric Multicomposites Science 277(1997): 232-1237.
3. Pandolfo, A.G., Hollenkamp, A.F. Carbon properties and their role in supercapacitors. Journal of Power Sources 157(2006): 11-27.
4. Pan, H., Li, J., Ping, F. Y. Carbon Nanotubes for Supercapacitor. Nanoscale Res Lett 5(2010): 654-668.
5. Iijima, S. Helical microtubules of graphitic carbon. Nature 354(1991): 56-58.
6. Liu, C., Yu, Z., Neff, D., Zhamu, A., and Jang, B. Z. Graphene-Based Supercapacitor with an Ultrahigh Energy Density Nano Lett. 10(2010): 4863-4868.
7. Detsri, E., Dubas, S.T. Interfacial Polymerization of Water-Soluble Polyaniline and Its Assembly Using the Layer-By-Layer Technique Journal of Metals, Materials and Minerals 19(2009): 39-44.
8. Peng, C., Zhang, S., Jewell, D., Chen, G.C. Carbon nanotube and conducting polymer composites for supercapacitors Progress in Natural Science 18(2008): 777-788.
9. Decher, G. Fuzzy Nanoassemblies: Toward Layered Polymeric Multicomposites Science 277(1997): 232-1237.
10. Lee, S.W., Kim, BS, Chen, S., Shao-Horn, Y., and Hammond, P.T. Layer-by-Layer Assembly of All Carbon Nanotube Ultrathin Films for Electrochemical Applications J. AM. CHEM. SOC. 131(2009): 671-679.

11. Iamsamai, C., Hannongbua, S., Ruktanonchai, U., Soottitantawat, A., Dubas, S.T. The effect of the degree of deacetylation of chitosan on its dispersion of carbon nanotubes. Carbon 48(2010): 25-30.
12. Rungrotmongkol, T., Arsawang, U., Iamsamai, C., Vongachariya, A., Dubas, S.T., Ruktanonchai, U., Soottiitawat, A., Hannongbua, S. Increased dispersion and solubility of carbon nanotubes noncovalently modified by the polysaccharide biopolymer, chitosan: MD simulations. Chemical Physics Letters 507 (2011): 134-137.
13. Mishra, A. K. and Ramaprabhu, S. Functionalized Graphene-Based Nanocomposites for Supercapacitor Application J. Phys. Chem. C 115(2011): 14006–14013.
14. Tchoul, M.N., Ford, W.T., Lolli, G., Resasco, D.E., and Arepalli, S. Effect of Mild Nitric Acid Oxidation on Dispersability, Size, and Structure of Single-Walled Carbon Nanotubes Chemistry of Materials.19(2007): 5765-5772.
15. Hyder, M.N., Lee, S.W., Cebeci, Z.C., Schmidt, D.J., Shao-Horn, Y., and Hammond, T.P. Layer-by-Layer Assembled Polyaniline Nanofiber/Multiwall Carbon Nanotube Thin Film Electrodes for High-Power and High-Energy Storage Applications ACS NANO 5(2011): 8552–8561.
16. Yu, D. and Dai, L. Self-Assembled Graphene/Carbon Nanotube Hybrid Films for Supercapacitors J. Phys. Chem. Lett. 1(2010): 467–470.
17. Wang, H., Gao, H., Chen, M., Xua, X., Wang, X., Pan, P., and Gao, J. Microwave-assisted synthesis of reduced graphene oxide/titaniananocomposites as an adsorbent for methylene blue adsorption Applied Surface Science 360 (2016): 840–848

แบบสรุปปิดโครงการวิจัย (จัดทำแยกต่างหากจากรายงานฉบับสมบูรณ์)

สัญญาเลขที่ TRG5780052 ชื่อโครงการ การสร้างฟิล์มบางของท่อคาร์บอนนาโน/แกรฟีน/พอลิเมอร์นำไฟฟ้า ด้วยเทคนิค Layer-by-Layer สำหรับเป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวด หัวหน้าโครงการ ดร.จุฬารัตน์ เอี่ยมสมัย หน่วยงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

โทรศัพท์ 081-384-0254 โทรสาร 02-889-5585-7 ต่อ 2621 อีเมล chularat.iam@rmutr.ac.th

สถานะผลงาน ☒ ปกปิด ☐ ไม่ปกปิด

ความสำคัญ / ความเป็นมา

.....เนื่องจากตัวเก็บประจุแบบดั้งเดิมที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ยังไม่สามารถกักเก็บพลังงานได้อย่างเพียงพอหากเทียบกับปริมาตรและน้ำหนักที่มีอยู่ในปัจจุบัน แม้ว่าตัวเก็บประจุแบบดั้งเดิมจะเป็นทางเลือกในการประยุกต์ใช้งานในอดีต แต่ด้วยอายุการใช้งานและรอบในการใช้งานที่ยังคงเป็นปัญหาโดยเฉพาะอย่างยิ่งในแบตเตอรี่ ด้วยเหตุนี้นักวิจัยจำเป็นต้องยอมรับในจุดอ่อนนี้โดยไม่มีทางเลือก ในเวลาต่อมาเกิดนิมิตรหมายที่ดีที่มีการพัฒนาและนำเสนอตัวเก็บประจุแบบยิ่งยวด (Supercapacitor) เข้ามาทดแทนตัวเก็บประจุแบบดั้งเดิม โดยตัวเก็บประจุแบบยิ่งยวดสามารถเพิ่มความสามารถในการเก็บประจุได้เป็นอย่างมาก ซึ่งเกิดจากระยะทางระหว่างชั้นที่น้อยมากๆ พื้นที่ผิวสูงมาก สามารถนำไฟฟ้า และมีต้นทุนที่ยอมรับได้ จากข้อดีของ Supercapacitor ทำให้นักวิจัยทั่วโลกให้ความสนใจในการศึกษาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของ Supercapacitor โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นพื้นฐาน เช่น ท่อคาร์บอนนาโน แกรฟีน ซึ่งวัสดุนี้มีคุณสมบัติพิเศษเฉพาะตัว ได้แก่ พื้นที่ผิวสูง น้ำหนักเบา สามารถนำไฟฟ้าได้ดี สามารถเข้ากันได้กับวัสดุอื่นๆ มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง และสามารถควบคุมการกระจายตัวของขนาดรูพรุน อีกทั้งวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นพื้นฐานยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หากเทียบกับโลหะหนักที่มีอยู่ในแบตเตอรี่ทั่วไป เช่น แมงกานีส แคดเมียม ตะกั่ว นิกเกิล และปรอท

.....อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นพื้นฐาน เช่น ท่อคาร์บอนนาโน แกรฟีน หากไม่ผ่านการดัดแปรบริเวณพื้นผิวจะเกิดการรวมตัวกัน (aggregate) ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์และยากแก่การนำมาประยุกต์ใช้ แม้จะมีการพยายามที่จะนำวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นพื้นฐานดังกล่าวมาขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีต่างๆ เช่น slurry paste, sol-gel, electrophoretic deposition, แต่ก็มีขั้นตอนที่ยังยากซับซ้อน ทั้งยังยากในการควบคุมความสม่ำเสมอและประสิทธิภาพของฟิล์ม ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของ Supercapacitor ในเรื่องอายุการใช้งานและรอบในการใช้งาน การขึ้นรูปฟิล์มด้วยเทคนิค Layer-by-Layer เป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถสร้างฟิล์มบางหลายชั้นโดยอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุที่ตรงกันข้ามบนตัวรองรับ ซึ่งเทคนิคนี้สามารถสร้างฟิล์มบนตัวรองรับที่มีขนาด รูปร่าง และประเภทของตัวรองรับได้กว้างขวางและหลากหลาย อีกทั้งยังสามารถโหลดอนุภาคหรือโมเลกุลชนิดต่างๆลงไปในฟิล์มได้ตามความต้องการในการนำไปประยุกต์ใช้ โดยฟิล์มที่เกิดขึ้นจากเทคนิคนี้จะมีพื้นผิวที่สม่ำเสมอและสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้เป็นอย่างดี จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การนำพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามาผสมกับวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นพื้นฐาน เช่น ท่อคาร์บอนนาโน แกรฟีน จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งาน ช่วยพัฒนาอายุการใช้งาน ตลอดจนช่วยเรื่องความเสถียรให้แก่ Supercapacitor งานวิจัยนี้จะใช้พอลิเมอร์นำไฟฟ้า คือ พอลิอะนิลีนไฮดรอกซิดพอลิไธรีนซัลโฟเนตแบบละลายน้ำ ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิค interfacial polymerization ซึ่งพอลิอะนิลีนไฮดรอกซิดพอลิไธรีนซัลโฟเนตแบบละลายน้ำ ทำให้พอลิอะนิลีนมีประจุ โดยนอกจากจะช่วยในการนำไฟฟ้าแล้วยังเพิ่ม affinity ในการเกิดฟิล์มได้มากขึ้นอีกด้วย ซึ่งจะเป็นสิ่งที่แตกต่างจากงานวิจัยอื่นที่โดยทั่วไปนิยมใช้พอลิอะนิลีนที่ละลายในตัวทำละลายไม่มีขั้วซึ่งเป็นอุปสรรคในการสร้างฟิล์มบางหลายชั้นด้วยเทคนิค Layer-by-Layer.....

วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อสร้างฟิล์มบางหลายชั้นของท่อคาร์บอนนาโน/แกรฟีน/พอลิอะนิลีนไฮดรอกซิดพอลิไธรีนซัลโฟเนตแบบละลายน้ำ ด้วยเทคนิค Layer-by-Layer พร้อมหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มบางสำหรับเป็นตัวเก็บประจุแบบยิ่งยวด
2. เพื่อศึกษาความสามารถในการเก็บประจุของฟิล์มบางหลายชั้นของท่อคาร์บอนนาโน/แกรฟีน/พอลิอะนิลีนไฮดรอกซิดพอลิไธรีนซัลโฟเนตแบบละลายน้ำ
3. เพื่อศึกษาอันตรกิริยาระหว่างท่อคาร์บอนนาโน/แกรฟีน กับพอลิอะนิลีนไฮดรอกซิดพอลิไธรีนซัลโฟเนตแบบละลายน้ำ โดยใช้

ผลการวิจัย (สั้น ๆ ที่บ่งชี้ประเด็นข้อค้นพบ กระบวนการ ผลผลิต และการเรียนรู้)

.....งานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์ได้โดยกระบวนการ modified Hummer's Method โดยสัดส่วนโดยน้ำหนักของแกรไฟท์ : KMnO_4 ที่เหมาะสมอยู่ที่ 1:7 แกรฟีนออกไซด์ที่ได้จะถูกนำมาสึกษาความสามารถในการ adsorb ลงบน primer film โดยพบว่า แกรฟีนออกไซด์ความเข้มข้น 0.1%wt มาความสามารถในการ adsorb ลงบนพื้นผิวของ primer film ได้อย่างดีและมีความเสถียรต่อสารละลายสูง ในการสร้างฟิล์มบางหลายชั้นของแกรฟีนออกไซด์ความเข้มข้น 0.1%wt และพอลิไดอัลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ สามารถทำได้สำเร็จ โดยฟิล์มมีการเติบโต ตั้งแต่ 3 ถึง 41 ชั้น โดยชั้นบนสุดของฟิล์มบางจะเป็นแกรฟีนออกไซด์ โดยหากชั้นฟิล์มสูงมากกว่านี้อาจเกิดการ peel off หลุดลอกได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าชั้นฟิล์มที่สร้างเสร็จจึงถูกนำไป reduce ด้วย sodium borohydride เพื่อให้แกรฟีนออกไซด์กลับไปเกิดพันธะคู่เพิ่มขึ้นอีกครั้ง ขณะที่ทำการ reduce พบว่า ฟิล์มเกิดการหลุดลอกออกจากตัวรองรับ เนื่องจากไม่สามารถทนต่อสภาวะได้ ประกอบกับในชั้นฟิล์มแต่ละชั้นต่างยึดเกาะกันด้วยแรงดึงดูดระหว่างประจุ electrostatic attraction ซึ่งอาจไม่แข็งแรงเพียงพอที่จะทำให้ชั้นฟิล์มทนต่อสภาวะ reduction ได้

คำสืบค้น (Keywords)

carbon nanotubes, grapheme, conducting polymer, supercapacitor, layer-by-layer, computational modeling

การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ (ดูคำจำกัดความ และตัวอย่างด้านหลังแบบฟอร์ม)

☐ ด้านนโยบาย โดยใคร (กรุณาให้ข้อมูลเจาะจง).....

มีการนำไปใช้อย่างไร

.....

☐ ด้านสาธารณะ โดยใคร (กรุณาให้ข้อมูลเจาะจง)

มีการนำไปใช้อย่างไร

.....

☐ ด้านชุมชนและพื้นที่ โดยใคร (กรุณาให้ข้อมูลเจาะจง)

มีการนำไปใช้อย่างไร

.....

☐ ด้านพาณิชย์ โดยใคร (กรุณาให้ข้อมูลเจาะจง)

มีการนำไปใช้อย่างไร

.....

☐ ด้านวิชาการ โดยใคร (กรุณาให้ข้อมูลเจาะจง)

มีการนำไปใช้อย่างไร

.....

☒ ยังไม่มีการนำไปใช้ (โปรดกรอกในกรอบถัดไป)

(กรณีที่ยังไม่มีการใช้ประโยชน์) ผลงานวิจัยมีศักยภาพในการนำไปใช้ประโยชน์

☐ ด้านนโยบาย ☐ ด้านสาธารณะ ☐ ด้านชุมชนและพื้นที่ ☐ ด้านพาณิชย์ ☒ ด้านวิชาการ

ข้อเสนอแนะเพื่อให้ผลงานถูกนำไปใช้ประโยชน์

ฟิล์มบางหลายชั้นของแกรฟีนออกไซด์และพอลิไดออกไซด์โพลิเอไมด์ที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค Layer-by-Layer Self Assembly นั้นมีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำมาก การเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมคือ การ reduce ฟิล์มบางแกรฟีนออกไซด์ เพื่อให้แกรฟีนออกไซด์กลับมาเป็นแกรฟีน โดยการรีดิวซ์ด้วย NaBH_4 เพื่อเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้า อย่างไรก็ตามในระหว่างกระบวนการรีดิวซ์นั้น ฟิล์มบางเกิดการหลุดลอกออกจากตัวรองรับเนื่องจากฟิล์มบางหลายชั้นดังกล่าวไม่สามารถทนสภาวะของการรีดิวซ์ได้ เพื่อให้ผลงานนี้สามารถถูกนำไปใช้ประโยชน์จึงเสนอแนะให้หาวิธีการ crosslink ฟิล์มบางแกรฟีนออกไซด์เพื่อตรึงแกรฟีนออกไซด์เพิ่มเสถียรภาพของฟิล์มบาง ก่อนทำการรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์กลับมาเป็นแกรฟีน และทดลองหาช่องทางอื่นๆในการรีดิวซ์ในสภาวะที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของฟิล์มให้น้อยที่สุด

การเผยแพร่/ประชาสัมพันธ์ (กรุณาให้รายละเอียด พร้อมแนบหลักฐาน)

1. สิ่งพิมพ์ หรือสื่อทั่วไป

☐ หนังสือพิมพ์ ☐ วารสาร ☐ โทรทัศน์ ☐ วิทยุ ☐ เว็บไซต์ ☐ คู่มือ/แผ่นพับ ☐ จัดประชุม/อบรม ☐ อื่น ๆ

.....

.....

2. สิ่งพิมพ์ทางวิชาการ (วารสาร, การประชุม ให้ระบุรายละเอียดแบบการเขียนเอกสารอ้างอิง เพื่อการค้นหาซึ่งควรประกอบด้วย ชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง แหล่งพิมพ์ ปี พ.ศ. (ค.ศ.) ฉบับที่ หน้า)

.....

.....