

สมบัติการตอบสนองสิ่งเร้าจากภายนอกของเจลาตินผสมอนุพันธ์ของกราฟีน

EXTERNAL STIMULI RESPONSE PROPERTIES OF  
GELATIN/GRAPHENE DERIVATIVE

สุพนิต จิงแยมปิ่น

ดุขฎฐินิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

# สมบัติการตอบสนองสิ่งเร้าจากภายนอกของเจลาตินผสมอนุพันธ์ของกราฟีน

สุพนิต จิ่งแย้มปิ่น

ดุขฎีนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

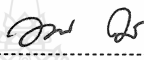
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

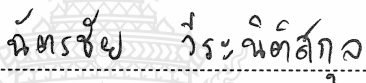
ปีการศึกษา 2566


ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี


หัวข้อวิทยานิพนธ์      สมบัติการตอบสนองสิ่งเร้าจากภายนอกของเจลาตินผสมอนุพันธ์ของกราฟีน  
External Stimuli Response Properties of Gelatin/Graphene  
Derivative  
ชื่อ - นามสกุล      นางสาวสุพนิต จิ่งแย้มปิ่น  
สาขาวิชา      วิศวกรรมศาสตร์  
อาจารย์ที่ปรึกษา      รองศาสตราจารย์สุมนมาลย์ เนียมกลาง, ปร.ด.  
ปีการศึกษา      2566


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพวรรณ ปาระดี, ปร.ด.)


  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉัตรชัย วีระนิตส์กุล, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์อนินท์ มิมนต์, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์สุมนมาลย์ เนียมกลาง, ปร.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาวสุปรีย์, Ph.D.)  
วันที่ 24 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2566

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติการตอบสนองสิ่งเร้าจากภายนอกของเจลลาตินไฮโดรเจลและวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและอนุพันธ์ของกราฟีน
ชื่อ – นามสกุล	นางสาวสุพนิต จิ่งแย้มปั้น
สาขาวิชา	วิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สุนนมาลย์ เนียมกลาง, ประ.ด.
ปีการศึกษา	2566

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติการตอบสนองของเจลลาตินไฮโดรเจลและวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและอนุพันธ์ของกราฟีน ซึ่งงานวิจัยนี้อนุพันธ์ของกราฟีนที่ใช้ศึกษา คือ กราฟีนออกไซด์ โดยศึกษาการตอบสนองต่อสิ่งเร้าภายนอก ได้แก่ ไฟฟ้า ความชื้นและความเป็นกรด-ด่างของสภาวะแวดล้อม

กราฟีนออกไซด์ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธี Hummers method ที่ปริมาณของกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $GP:KMnO_4$ ) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 สำหรับ GO1, GO2, GO3 และ GO4 ตามลำดับ และศึกษาสมบัติทางเคมี กายภาพ และทางไฟฟ้าของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ GO2 แสดงสมบัติทางไฟฟ้า และกายภาพที่ดีที่สุด เนื่องจาก GO2 แสดงสมบัติที่ดีที่สุดเนื่องจากสัดส่วนกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตถูกที่ใช้ในการสังเคราะห์นั้นเหมาะสม ส่งผลให้มีขนาดความหนาของชั้นกราฟีนที่เหมาะสมและความเป็นผลึกสูง ทำให้สมบัติทางไฟฟ้าให้มีค่าที่เหมาะสม เจลาตินไฮโดรเจลและวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ถูกทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสิ่งเร้าภายนอก ได้แก่ ไฟฟ้า ความชื้นและเคมี ผลการทดลองพบว่าเจลลาตินไฮโดรเจล และวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและ กราฟีนออกไซด์นั้นสามารถควบคุมการบดอง และการขยายตัวภายใต้การปรับความเข้มข้นไฟฟ้า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไฟฟ้าการตอบสนองผ่านการบดองและการขยายตัวเส้นวงกลมเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมการโค้งงอของวัสดุภายใต้ความเป็นกรดต่างของสภาวะแวดล้อมได้อีกด้วย

ดังนั้นเจลลาตินไฮโดรเจลและวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์สามารถใช้เป็นวัสดุสำหรับอุปกรณ์แอคทูเอเตอร์ที่สามารถขึ้นรูปได้ง่ายและตอบสนองต่อสิ่งเร้าภายนอกได้ดี

**คำสำคัญ:** กราฟีนออกไซด์ เจลาติน ตอบสนองต่อไฟฟ้า ตอบสนองต่อความชื้น ตอบสนองต่อเคมี



**Thesis Title** External Stimuli Response Properties of Gelatin/Graphene Derivative  
**Name – Surname** Miss Supanit Chungyampin  
**Program** Engineering  
**Thesis Advisor** Associate Professor Sumonman Niamlang, Ph.D.  
**Academic Years** 2023

## ABSTRACT

This research aimed to study the external stimuli response of gelatin hydrogel (GEL) and graphene derivative /gelatin hydrogel. In this work, the selected graphene derivative is graphene oxide (GO). The external stimuli are electrical stimuli, humidity, and pH.

GO was synthesized by Hummers method at various Graphite per Potassium permanganate ratios (GP:  $\text{KMnO}_4$ ) at 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 for GO1, GO2, GO3 and GO4, respectively. The electrical, physical, and chemical properties of the prepared GO were investigated. GO2 presented the suitable properties due to the optimal GP:  $\text{KMnO}_4$  ratio. GO2 showed the optimum thin layer of GO and high crystallinity resulting in good electrical properties. The response to external stimuli including electricity, humidity, and chemistry, of the GEL and GO/GEL was studied. The results showed that GEL and GO/GEL could control bending response and circular actuation when increasing electric field strength and decreasing humidity. Moreover, the degree of bending could be controlled under the pH of the environment.

Thus, GEL and GO/GEL could be alternative materials for actuator which can easily be formed and responded well to external stimuli.

**Keywords:** graphene oxide, gelatin, electrical response, humidity response, chemical response

## กิตติกรรมประกาศ

ดุษฎีนิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความกรุณาและความอนุเคราะห์เป็นอย่างยิ่ง จาก รองศาสตราจารย์ ดร.สุมนมาลย์ เนียมกลาง อาจารย์ที่ปรึกษาดุษฎีนิพนธ์ ที่ได้กรุณาเสียสละกำลัง ภาย กำลังทรัพย์และเวลาในการให้คำปรึกษา คำแนะนำและให้ข้อเสนอแนะ ในการแก้ไขปัญหาและ ติดตามการทำดุษฎีนิพนธ์ครั้งนี้อย่างใกล้ชิดตลอดมา นับตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสำเร็จเรียบร้อยสมบูรณ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพวรรณ ปาระดี ประธานกรรมการสอบดุษฎีนิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.อนินทร์ มีมนต์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย วีระนิติสกุล กรรมการสอบดุษฎีนิพนธ์ ที่ได้ให้ความกรุณาให้คำแนะนำและแก้ไขข้อผิดพลาด จนดุษฎีนิพนธ์เล่มนี้สำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ทุนอุดหนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติซึ่งได้สนับสนุนทำให้ได้รับ ทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ สัญญาเลขที่ N41D640012

ขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) 111 ถ. มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์เทคนิคการถ่ายภาพเอกซเรย์โทโมกราฟีด้วยซินโครตรอน (Synchrotron radiation X-ray Tomographic Microscopy: SRXTM)

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบและสารเคมี

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครู-อาจารย์ ที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้ และเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ที่คอยช่วยเหลือในการทำดุษฎีนิพนธ์และคอยให้กำลังใจให้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ดุษฎีนิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ หาก ดุษฎีนิพนธ์นี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

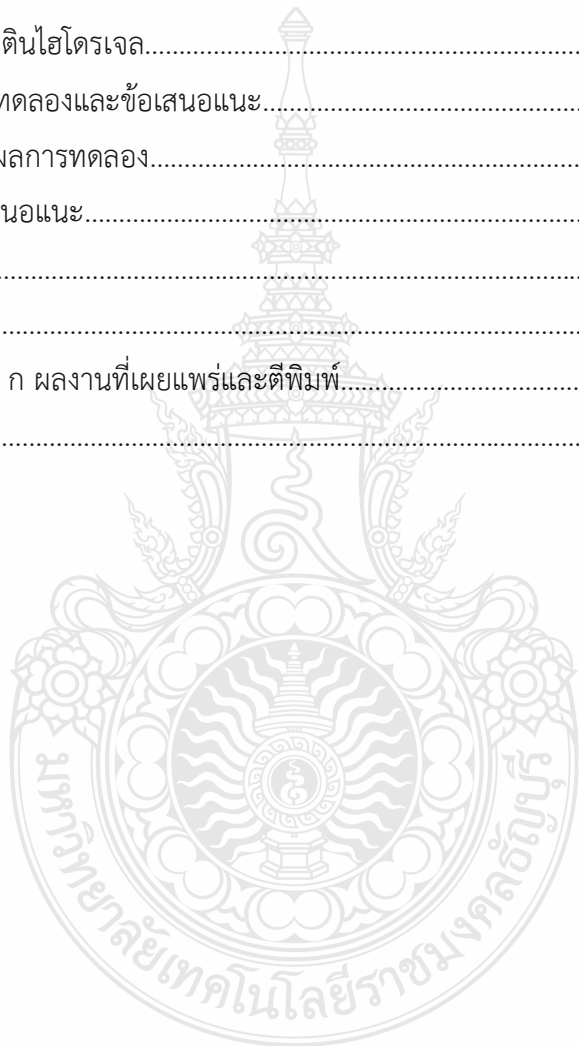
สุพนิต จิ่งแยมปิ่น

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(4)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(5)
กิตติกรรมประกาศ.....	(6)
สารบัญ.....	(7)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(10)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(18)
บทที่ 1 บทนำ.....	19
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	19
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	21
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	21
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	21
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.2 ทบทวนวรรณกรรม.....	36
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	68
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	69
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	70
3.3 วิธีการทดลอง.....	72
3.4 ระยะเวลาทำการวิจัยและแผนการดำเนินงานการวิจัย.....	79
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	80
4.1 การศึกษาผลของสัดส่วนกราไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตต่อสมบัติ ของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้.....	80
4.2 สมบัติของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์(GO/GEL).....	90
4.3 การศึกษาการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าจากภายนอกของกราฟีนออกไซด์/ เจลาตินไฮโดรเจล.....	92

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การศึกษาการตอบสนองต่อความชื้นจากภายนอกของกราฟีนออกไซด์/ เจลาตินไฮโดรเจล.....	102
4.5 การศึกษาการตอบสนองต่อความชื้นจากภายนอกของกราฟีนออกไซด์/ เจลาตินไฮโดรเจล.....	104
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	109
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	109
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	110
บรรณานุกรม.....	112
ภาคผนวก.....	122
ภาคผนวก ก ผลงานที่เผยแพร่และตีพิมพ์.....	124
ประวัติผู้เขียน.....	125



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	71
ตารางที่ 3.2 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย.....	79
ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของอนุภาค GO.....	84
ตารางที่ 4.2 ความจุไฟฟ้า (C) ความต้านทาน (R) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon$ ) ของอนุภาค GO และวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL).....	92
ตารางที่ 4.3 แรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (Fd) ของ GO/GEL, GP/GEL, และ GEL ที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก $E=0-400$ V/mm และที่ระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง 8-10 cm...	97
ตารางที่ 4.4 แรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (Fd) GO/GEL ที่ปริมาณของ GO2 ที่ 1.25, 2.5, 5, 10, and 20% w/w สนามไฟฟ้าจากภายนอก $E=0-400$ V/mm และที่ระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง 8-10 cm.....	98
ตารางที่ 4.5 %ความเครียดของ GP และ GO ต่างๆ ที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก $E=0-400$ kV/mm.....	100
ตารางที่ 4.6 เวลาที่ใช้ในการตอบสนองทางไฟฟ้าของ GP และ GO ที่สนามไฟฟ้าภายนอก 0-400 kV/mm.....	101
ตารางที่ 4.7 มุม เวลา และความเร็วของการตอบสนองทางความชื้นของ GO/GEL.....	103
ตารางที่ 4.8 เวลาในการเสียรูปและกลับสู่สภาพเดิมของ GO/GEL.....	107

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แอคชูเอเตอร์เชิงพาณิชย์ (a) วาล์ว (DV35) (b) ปัม (DP70) (c) ตัวควบคุมตำแหน่งเลนส์.....	22
รูปที่ 2.2 วิวัฒนาการของ Dielectric elastomer actuators.....	23
รูปที่ 2.3 फिल्मไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ (a) ระยะเริ่มต้น (b) ในสถานะสุดท้ายที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น.....	24
รูปที่ 2.4 พอลิเมอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกการประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้ากับฟิล์มของโมเลกุล PVDF ที่อยู่ในแนวเดียวกันคือคาดว่าจะนำไปสู่การปรับทิศทางของฟลูออรีนเชิงขั้วจากเฟสที่ไม่มีขั้ว.....	26
รูปที่ 2.5 การกระตุ้นพอลิเมอร์ โดยทั่วไปเชื่อกันว่าไอออนจะแทรกระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เพื่อนำไปสู่การขยายตัวของพอลิเมอร์ที่สังเกตได้จากการใช้แรงดันไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์.....	28
รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์และกราฟีนออกไซด์ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชันซึ่งทำให้จำนวนกลุ่มออกซิเจนลดลง.....	30
รูปที่ 2.7 ระบบการนำส่งยาผ่านผิวหนังด้วยไฟฟ้า (Electrical control drug delivery).....	33
รูปที่ 2.8 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำกับสายโซ่พอลิเมอร์.....	34
รูปที่ 2.9 เจลาติน.....	35
รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของเจลาติน.....	35
รูปที่ 2.11 การทำงานแผ่นฟิล์มไดอิเล็กทริกที่เคลือบทั้งสองด้านด้วยวัสดุอิเล็กโทรดโดยให้แรงดันไฟฟ้าและไม่ให้แรงดันไฟฟ้า.....	36
รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงความเครียดเมื่อถูกกระตุ้นรอบของการกระตุ้นในตาอบที่มีความชื้นสัมพัทธ์ $10 \pm 0.4\%$ และในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ $54 \pm 5\%$ A' คือความเครียดที่วัดได้หลังจากผ่านไปจำนวนหนึ่งรอบ A0 คือความเครียดที่วัดได้ในรอบแรก.....	37
รูปที่ 2.13 ตัวกระตุ้นแบบโปร่งใสที่สามารถเปลี่ยนรูปที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว.....	38

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 2.14	การกำหนดค่าไดโอดีเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ (a) โครงสร้างของตัวกระตุ้นแบบวงกลม (b) ใช้งานไฟฟ้าตัวกระตุ้นแบบวงกลม (c) โครงสร้างภายในของตัวกระตุ้นแบบสปริง (d) ตัวกระตุ้นแบบสปริงถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้าโดยที่มีมวลแขวน.....	39
รูปที่ 2.15	โครงสร้างของตัวกระตุ้นขยายแบบเชิงเส้น (a) โครงสร้างของตัวกระตุ้นแบบกรวย (b) โครงสร้างของตัวกระตุ้นแบบท่อ (c) โครงสร้างของตัวกระตุ้นแบบม้วน.....	39
รูปที่ 2.16	ไดโอดีลาสติกอีลาสโตเมอร์เคลื่อนที่แบบว้าย (a) หุ่นยนต์ปลา (b) หุ่นยนต์กบ.....	40
รูปที่ 2.17	เมมเบรนไดโอดีเล็กทริกแบบอ่อนซึ่งติดตั้งบนห้องถูกกดดันเข้าไปในบอลลูนหลังจากนั้นวาล์วจะปิดและใช้แรงดันไฟฟ้ากับทำให้บอลลูนขยายออกมีการวัดปริมาตรของบอลลูนด้วยกล้องวิดีโอในขณะที่ความดันในห้องบันทึกด้วยเซ็นเซอร์ความดัน..	40
รูปที่ 2.18	คุณสมบัติการตอบสนองต่อความชื้นของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่ไม่สมมาตร (a) กล้องควบคุมความชื้น (b) ลักษณะมุมเบี่ยงเบนเมื่อได้รับความชื้น (c) ลักษณะของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่ไม่สมมาตรที่ความชื้นต่างๆ (d) ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและมุมที่เปลี่ยนไป (e) ความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่เปลี่ยนไปและเวลา (f) ความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่เปลี่ยนไปและเวลาย้อนกลับที่ความชื้น 35%และ85% (g) การย้อนกลับของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่ไม่สมมาตร เมื่อให้ความชื้นซ้ำๆ ระหว่าง 35% ถึง 85% เป็นเวลา 30 รอบ.....	41
รูปที่ 2.19	ประสิทธิภาพทางกลไฟฟ้าของอีเล็กโทรดไฮโดรเจล CNT/PVA (a) โครงสร้าง CNT/PVA ไฮโดรเจล สำหรับการทดสอบการตอบสนองทางไฟฟ้า (b) แสดงกระแสแรงดันไฟฟ้าของอีเล็กโทรดที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ (c) ความสัมพันธ์ความต้านทานที่เปลี่ยนไปของอีเล็กโทรดที่ความเครียดต่างๆ (d) ประสิทธิภาพ Hysteresis ของอีเล็กโทรดที่ความเครียดตั้งแต่ 25% ถึง 200% (e) การทดสอบความทนทานของอีเล็กโทรดภายใต้ความเครียด 20%.....	42
รูปที่ 2.20	โครงสร้างพลังงานขั้นต่ำที่จัดตัวเอง(a)ยึดก่อนติดบนเฟรม (b) เฟรม (c) ถูกตัดจากฟิล์มพลาสติกบางๆ และติดกาวกับอีลาสโตเมอร์ก่อนยึด(d)เมื่อปล่อยออกกรอบวงกลมจัดระเบียบตัวเองให้เข้ากับแบบฟอร์ม (e) กรอบสี่เหลี่ยมในแบบฟอร์ม (f) พิมพ์กริด.....	43

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.21 ตัวกระตุ้นพลังงานขึ้นต่ำที่จัดตัวเอง (a) กรอบฟิล์มพลาสติกบาง (b) กรอบแข็ง 2 ชั้น (c) ด้านบนเมื่อยังไม่ให้แรงดันไฟฟ้าล่างเมื่อให้แรงดันไฟฟ้า.....	43
รูปที่ 2.22 ลำโพงอิลาสโตเมอร์อิเล็กทริกครึ่งวงกลม (a) ขนาด (b) รูปและหลักการ (c) ตัวกระตุ้นๆอิเล็กทริกอิลาสโตเมอร์ (d) โหมดครึ่งวงกลมของลำโพง.....	44
รูปที่ 2.23 (a) ภาพประกอบแผนผังของการออกแบบที่ใช้ฟิล์มกราฟีนออกไซด์เรดาร์ (b) การตัดแบบเลือกของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ในการตอบสนองต่อนิ้วของมนุษย์ที่สวมถุงมือในตำแหน่งต่างๆ (c) ภาพขยายในพื้นที่ของการตัดแบบเลือกของอาร์เรย์ฟิล์มกราฟีนออกไซด์.....	45
รูปที่ 2.24 (a) แสดงผังการเดินของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ (b) ภาพของการเคลื่อนไหวของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ด้วยการเคลื่อนไหวของนิ้วมือมนุษย์ซึ่งสามารถเลียนแบบท่ารำ.....	45
รูปที่ 2.25 ตัวกระตุ้นที่ผลิตขึ้นได้ (a) ส่วนประกอบของตัวกระตุ้น(b) เมื่อให้แรงดันไฟฟ้า (c) เมื่อไม่ให้แรงดันไฟฟ้า (d) เปลี่ยนแปลงเชิงเส้นของการกระตุ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน(e)ความทนทานของอุปกรณ์มากกว่าการทดสอบ 100 รอบที่ 10, 15 และ 20 V (f) ความคงทนของตัวกระตุ้นในช่วงหนึ่งเดือน.....	46
รูปที่ 2.26 (a) ตัวกระตุ้นวัสดุผสมระหว่างกราฟีนออกไซด์และพอลิโพรไพลีนเสียบรูปที่เกิดจากความชื้น 30 วินาทีและที่แสง 300 mW cm <sup>-2</sup> 15 วินาที (b) ทดสอบความสามารถในการทำซ้ำของการบิด (c) แขนหุ่นยนต์ที่ใช้ตัวกระตุ้นวัสดุผสมระหว่างกราฟีนออกไซด์และพอลิโพรไพลีนที่จับ/ปล่อยวัตถุ.....	47
รูปที่ 2.27 (a) การเคลื่อนที่ๆ บิดงอเมื่อให้และไม่ให้ความชื้นที่อุณหภูมิ 20 °c ที่ความชื้น 60% (b) มุมของการบิดงอเมื่อให้ความชื้นที่เวลาต่างๆ (c) มุมของการบิดงอเมื่อไม่ให้ความชื้นที่เวลาต่างๆ.....	48
รูปที่ 2.28 การโค้งงอเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าของ unimorphsที่มีโครงสร้างคล้ายกระดูกสันหลัง....	49
รูปที่ 2.29 หุ่นยนต์ตีนตะขาบที่ตอบสนองต่อความชื้นที่ทำจากฟิล์ม RGO/GO.....	50



## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.30	การกระตุ้น IR สำหรับนาโนคอมโพสิตที่ใช้กราฟีน (a) ซ้าย-รูปร่างก่อนถูกกระตุ้น ขวา-ฟิล์ม sG/TPU 0.1% หดตัวหลังจากกระตุ้นโดยการฉายรังสีอินฟราเรดแต่ TPU ไม่มีการตอบสนอง (b) ฟิล์ม sG/TPU 1% สามารถย่นน้ำหนัก 21.6 กรัม 3.1 ซม. ด้วยแรง 0.211 N ต่อการสัมผัสกับแสงอินฟราเรดและแสดงให้เห็น ถึงความหนาแน่นของพลังงานโดยประมาณ $0.33 \text{ J g}^{-1}$ .....	50
รูปที่ 2.31	อุปกรณ์ไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์แบบแกนเดี่ยวและสองแกน.....	51
รูปที่ 2.32	ไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์แบบสปริงม้วน แผ่นม้วนถูกประดิษฐ์ขึ้นโดยการบีบอัด สปริงระหว่าง endcaps การเพิ่มจำนวนชั้นที่พันรอบแกนสปริงช่วยเพิ่มแรง.....	51
รูปที่ 2.33	การทดสอบประสิทธิภาพเสียงของลำโพงฟิล์มบาง CNT (a) แผนผังของการตั้งค่า การทดลอง (b) ระดับความดันเสียง (dB) ความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกทั้งหมด ของชั้นเดี่ยว (สีแดง) และสี่ชั้น (สีน้ำเงิน) ลำโพง CNT เป็นระยะทาง 5 ซม. ระหว่างลำโพงและไมโครโฟนกำลังไฟฟ้าเข้าคือ 3 W และ 12 W สำหรับลำโพง ชั้นเดี่ยวและสี่ชั้นตามลำดับ (c) แรงดันเสียงที่เกิดจากลำโพง CNT สี่ชั้นเทียบกับ กำลังไฟฟ้าเข้าสี่เหลี่ยมสีดำแสดงถึงผลการทดลองและเส้นสีแดงคือผลลัพธ์ที่ เหมาะสม (d) สัญญาณของแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของลำโพงฟิล์มบาง CNT สี่ชั้นและ แรงดันเสียงที่ส่งออกจากไมโครโฟนแสดงว่าความถี่ของความดันเสียงเพิ่มขึ้นเป็น สองเท่าของแรงดันไฟฟ้าขาเข้าการเปลี่ยนเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและ สัญญาณความดันเสียงขาออกส่วนใหญ่เกิดจากการแพร่กระจายของเสียงจาก ฟิล์มบาง CNT ไปที่ไมโครโฟน.....	52
รูปที่ 2.34	(a) แรงต่อการเคลื่อนที่ของไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ออสซิลเลเตอร์ที่ไม่มีขั้ว อิเล็กโทรด (สีน้ำเงิน) น้ำมันพีช+20% คาร์บอนแบค (สีแดง) คาร์บอนจาระบี MG 824 (สีเขียว) Ecoflex 20 + 10% คาร์บอนแบค (สีม่วง) ซิลิโคนถูกยึดโดย $\lambda_p =$ $1.2 \times 1.2$ (b) เปรียบเทียบผลของอิเล็กโทรดที่ใช้คาร์บอนต่อซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ บน-จาระบีคาร์บอนที่กำหนดเอง กลาง-คาร์บอนจาระบีเชิงพาณิชย์ ล่าง- สารประกอบคาร์บอน/อีลาสโตเมอร์ ไม่มีการยึดก่อนของเมมเบรน ถ่ายภาพ 48 ซม. หลังจากใช้อิเล็กโทรด.....	53

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.35 ลักษณะของตัวกระตุ้น GO/CA (a) กระบวนการประดิษฐ์ตัวกระตุ้น (b) CA เมมเบรน (c) फिल्मกราฟีนออกไซด์ (d) ภาพตัดตัดขวางของตัวกระตุ้น GO/CA (e) ภาพตัดขวางและความยืดหยุ่นของตัวกระตุ้น.....	54
รูปที่ 2.36 ไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์โครงสร้างพลังงานขั้นต่ำ (a) มือจับรูปทิวลิป (b) ตัวกระตุ้นแบบบิดงอ (c) ปีก่อนของโครงสร้างพลังงานต่ำสุดไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์แบบสมมาตร.....	55
รูปที่ 2.37 การประดิษฐ์และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างตัวกระตุ้น a) รูปแบบ PPy บนฟิล์ม GO สำหรับการสร้างไฟตัวกระตุ้น GO/PPy b) ภาพ PPy บนฟิล์ม GO c) กลไกการทำงานของตัวกระตุ้นสองชั้น GO/PPy และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวกระตุ้นที่มีรูปสามเหลี่ยมปกติ รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปห้าเหลี่ยมปกติ หกเหลี่ยมปกติและรูปแบบ H-, U-, S- และ T ภายใต้สิ่งเร้าของความชื้นและแสง IR d) ตัวกระตุ้น GO/PPy.....	56
รูปที่ 2.38 ขั้นตอนตามเริ่มจากผงกราฟไฟท์คาร์บอนที่ไม่ชอบน้ำที่ถูกออกซิไดซ์วัสดุที่กักเก็บระหว่างการทำให้บริสุทธิ์ของ IGO, HGO และ HGO ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของวิธี IGO โดยที่ไม่ถูกออกซิไดซ์จำนวนน้อยมาก.....	58
รูปที่ 2.39 สรุปรูปโครงสร้างรุ่นเก่าหลายรุ่นของ GO.....	59
รูปที่ 2.40 รูปแบบต่างๆของโมเดล Lerf-Klinowski บ่งบอกถึงความคลุมเครือเกี่ยวกับการปรากฏตัวหรือไม่มีกรดคาร์บอกซิลิกที่ชอบของฐานระนาบของเกล็ดเลือกกราฟไฟติกของ GO.....	59
รูปที่ 2.41 พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างออกซิเจนการทำงานบน GO และน้ำ.....	60
รูปที่ 2.42 GO ที่เตรียมไว้กระจายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ 13 ตัวผ่านการอัลตราโซนิก (1 ชั่วโมง) บน-กระจายทันที หลังจากสันด้วยเครื่องอัลตราโซนิกคล่างการแพร่กระจาย 3 สัปดาห์ สีเหลืองของตัวอย่างไอโซลีนเกิดจากตัวทำละลายเอง.....	60
รูปที่ 2.43 ขั้นตอนการออกซิเดชันของกราฟไฟท์เป็นไปโดยวิธีของ Staudenmaier (GO-ST), Hofmann (GO-HO), Hummers (GOHU), และ Tour (GO-TO).....	62

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.44 การโค้งตัวของเจลาตินไฮโดรเจลที่ E=0 และ 600 V/mm (a) เจลาตินไฮโดรเจล (b) 0.1% ของวัสดุผสมไฮโดรเจล กราฟีน/เจลาติน (c) 1% ของวัสดุผสมไฮโดรเจล กราฟีน/เจลาติน.....	63
รูปที่ 2.45 XRD spectra ของกราฟีนออกไซด์, รีดิวกราฟีนออกไซด์และกราฟไฟต์.....	64
รูปที่ 2.46 Tensile stress (s) และ strain (e) ของเจลาตินแห้งและฟิล์ม RGO/Ge.....	64
รูปที่ 2.47 การเบี่ยงเบนของฟิล์ม PDMS (Nc/Nm=0.01) ของความแรงของสนามไฟฟ้า.....	65
รูปที่ 2.48 a) มุมที่มีการบิดงอ $\theta$ b) แรงอิเล็กทรอนิกส์โพเรซิส FD เทียบกับสนามไฟฟ้าของฟิล์ม PDMS ที่อัตราสารเชื่อมขวาง 0.01 และ 0.001.....	66
รูปที่ 2.49 การเบี่ยงเบนของฟิล์มตามความแรงของสนามไฟฟ้า.....	67
รูปที่ 2.50 a) มุมที่มีการบิดงอ b) แรงอิเล็กทรอนิกส์โพเรซิส FD เทียบกับสนามไฟฟ้าของฟิล์ม PPV/PDMS.....	67
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ การขึ้นรูปตัวกระตุ้นและการนำไปทดสอบต่างๆ.....	69
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์.....	72
รูปที่ 3.3 การทดสอบการตอบสนองทางไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกโพลีเมอร์โดยใช้ อนุภาค กราฟีนออกไซด์ GO ที่สัดส่วนของกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO <sub>4</sub> ) 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 (GO1, GO2, GO3 และ GO4) เป็นอิเล็กทรอนิกส์.....	74
รูปที่ 3.4 การทดสอบการตอบสนองทางไฟฟ้าวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์(GO/GEL) ที่สัดส่วนของกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO <sub>4</sub> ) ที่ สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 (GO1, GO2, GO3 และ GO4) ของ GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL.....	76
รูปที่ 3.5 กล้องควมคุมความชื้นอัตโนมัติ.....	77
รูปที่ 3.6 การตอบสนองต่อความชื้นของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) ที่สัดส่วนของกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO <sub>4</sub> ) ที่ สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 (GO1, GO2, GO3 และ GO4) ของ GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL.....	77

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.7 การตอบสนองทางเคมีของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) ที่ สัดส่วนของกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO <sub>4</sub> ) ที่ สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 (GO1, GO2, GO3 และ GO4) ของ GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL.....	78
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของกราฟไฟต์และกราฟีนออกไซด์: (a) GP, (b) GO1, (c) GO2, GO3, และ (e) GO4 วิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	82
รูปที่ 4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของกราฟไฟต์และกราฟีนออกไซด์: (a) GP, (b) GO1, (c) GO2, GO3, และ (e) GO4 วิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	83
รูปที่ 4.3 โครงสร้างผลึกของ GP.....	85
รูปที่ 4.4 โครงสร้างผลึกของ (a) GO1, (b) GO2, (c) GO3, และ (d) GO4.....	86
รูปที่ 4.5 หมู่ฟังก์ชัน: (a) GO4, (b) GO3, (c) GO2, (d) GO1, และ (e) GP.....	87
รูปที่ 4.6 โครงสร้างผลึกของความเป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบ: (a) GP, (b) GO1, (c) GO2, (d) GO3, และ (e) GO4.....	88
รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาและองค์ประกอบทางเคมีและปริมาณธาตุ: (a) GP, (b) GO1, GO2, (d) GO3, และ (e) GO4.....	89
รูปที่ 4.8 โครงสร้างภายในของ: (a) GEL, (b) GP/GEL, (c) GO1/GEL, (d) GO2/GEL, (c) GO3/GEL และ GO4/GEL .....	90
รูปที่ 4.9 การทดสอบการบิดงอของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL).....	93
รูปที่ 4.10 การบิดงอของ GO/GEL, GP/GEL, และ GEL ที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก E=0-400 V/mm และระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง 4 cm.....	94
รูปที่ 4.11 องศาของการบิดงอของ GO/GEL, GP/GEL, และ GEL ที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก E=0-400 V/mm และ ระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง 4 cm.....	94
รูปที่ 4.12 การบิดงอของ GO2/GEL ที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก E=0-400 V/mm และ ระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง 4 cm.....	95

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 การบดงอของ GO2/GEL ปริมาณของGO2 1.25, 2.5, 5, 10 และ 20% w/w สนามไฟฟ้าจากภายนอก E=400 V/mm และ ระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง 4 cm.....	95
รูปที่ 4.14 องศาของการบดงอของ GO2/GEL ที่ปริมาณ GO2 ที่ 1.25, 2.5, 5, 10 และ 20% w/w สนามไฟฟ้าจากภายนอก E=0-400 V/mm และระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง 4 cm.....	96
รูปที่ 4.15 แรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (Fd) ของ GO/GEL, GP/GEL, และ GEL ที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก E=0-400 V/mm และที่ระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง (a) 4 cm, (b) 6 cm, (c) 8 cm, และ (d) 10 cm.....	97
รูปที่ 4.16 แรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (Fd) ของ GO/GEL, GP/GEL, และ GEL ที่ปริมาณ GO2 ที่ 1.25, 2.5, 5, 10 and 20% w/w ที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก E=0-400 V/mm และที่ระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง (a) 4 cm, (b) 6 cm, (c) 8 cm, และ (d) 10 cm.....	99
รูปที่ 4.17 การตอบสนองทางไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกอิลาสโตเมอร์โดยที่ G และ GO2 เป็นขั้วอิเล็กโทรดที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก E=0-300 kV/mm.....	100
รูปที่ 4.18 การตอบสนองทางไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกอิลาสโตเมอร์ GP และ GO ภายใต้ความแรงของสนามไฟฟ้า 0-400 kV/mm.....	101
รูปที่ 4.19 การตอบสนองทางไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกอิลาสโตรเมอร์โดยที่ GO2 เป็นขั้วอิเล็กโทรดที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก E= 0-400 kV/mm.....	102
รูปที่ 4.20 มุมบดงอ: (a)-(b) GEL, (c)-(d) GP/GEL, (e)-(f) GR1/GEL, (g)-(h) GR2/GEL, (i)-(j) GR3/GEL, และ (k)-(l) ที่ ความชื้นสัมพัทธ์ 80-85% อุณหภูมิ 37°C.....	103
รูปที่ 4.21 โครงสร้างทางเคมีของGO/GELต่อการตอบสนองทางความชื้นดูดซับและคายไอน้ำ..	104
รูปที่ 4.22 %การบวมตัวใน (a) pH4, (b) pH7, (c) pH9, (d) urea, (e) PBS, และ (f) glucose	106
รูปที่ 4.23 การเสีรูปของ GO2/GEL ในสารละลาย Fe <sup>+</sup> .....	107
รูปที่ 4.24 การกลับสู่สถานะเดิม GO2/GEL ในสารละลาย EDTA.....	107
รูปที่ 4.25 การเสีรูปของ GEL ในสารละลาย Fe <sup>+</sup> .....	107
รูปที่ 4.26 การกลับสู่สถานะเดิม GEL ในสารละลาย EDTA.....	108

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant, $\epsilon$ )	เป็นสมบัติทางไฟฟ้า ของวัสดุเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความมีขั้วของวัสดุที่อุณหภูมิใดๆ
pF (Power Factor)	ตัวเลขที่บอกถึงกำลังงานไฟฟ้าที่เกิดการทำงานขึ้นจริง
M $\Omega$	เป็นหน่วยเอสไอของความต้านทานไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ $10^6$ โอห์ม
V/mm	เป็นหน่วยวัดแรงดันไฟฟ้า โวลต์ต่อมิลลิเมตร
$^{\circ}\text{C}^{-1}$	หน่วยอัตราการเปลี่ยนแปลงเชิงมุมองศาต่อวินาที
น้ำ DI (Deionized Water)	เป็นน้ำที่ผ่านระบบการกรองที่กำจัดไอออนต่างๆ ที่ผสมเจือปนออกไปจนหมด
E	แรงดันไฟฟ้า
wt%	น้ำหนักเป็นกรัมของตัวละลายในสารละลาย 100 g
ค่า pH	การวัดความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนซึ่งเป็นการวัดความเป็นกรด-ด่างหรือเบสของสารละลายของเหลวหรือน้ำ
VHB 4910	เทปกาวสองหน้าอะคริลิกโฟมเทป สีใส
Rh (relative humidity)	ความชื้นสัมพัทธ์อัตราส่วนของปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศต่อปริมาณไอน้ำอิ่มตัวที่สภาวะความดันและอุณหภูมิเดียวกัน แสดงในรูปร้อยละ

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันเทคโนโลยีก้าวกระโดด (Technology disruptive) ทำให้มนุษย์มีความต้องการใช้ชีวิตที่แตกต่างออกไปจากเดิม จึงมีความต้องการวัสดุขั้นสูงที่จะตอบสนองอุปกรณ์ที่อยู่บนแพลตฟอร์มอัตโนมัติมากยิ่งขึ้น วัสดุขั้นสูงเหล่านี้จะถูกนำไปเป็นวัสดุสำหรับอุปกรณ์เซนเซอร์ (Sensor) และแอคชูเอเตอร์ (Actuator) ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ถูกไปประยุกต์ใช้ใน อุปกรณ์ชิ้นส่วนหุ่นยนต์, กล้ามเนื้อเทียม, ลำโพง, วัสดุตรวจจับความชื้น, ตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้า [1, 2]

โดยทั่วไปวัสดุขั้นสูงหรือวัสดุฉลาดนั้นถูกนิยามว่าเป็นวัสดุที่สามารถรับรู้การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเหล่านั้นตามรูปแบบที่การกำหนดไว้ก่อนล่วงหน้า ตัวอย่างของวัสดุฉลาดได้แก่ เพียโซอิเล็กทริก, อิเล็กโตรแอคทีฟพอลิเมอร์, Relaxor ferroelectric polymers, Ionic actuators, Conducting polymers, Carbon nanotube actuators, Ionic polymer/Metal composites, Shape memory alloys มีความพยายามจากนักวิจัยในการพัฒนาวัสดุและผลิตภัณฑ์ออกเป็นสินค้าในตลาดมากมาย เช่น วาล์ว (DV35), บั้ม (DP70), ตัวควบคุมตำแหน่งเลนส์ [1, 2]

แอคชูเอเตอร์ (Actuator) เป็นอุปกรณ์ทางกลสำหรับเคลื่อนย้ายหรือควบคุมกลไกหรือระบบ โดยตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นภายนอกที่เหมาะสมภายใต้การควบคุมดังกล่าวสิ่งกระตุ้นภายนอกวัสดุตัวกระตุ้นในอุปกรณ์ได้รับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างปริมาตรโมดูลัสหรืออื่นๆสมบัติเชิงกลที่สอดคล้องกับการแปลงอีกรูปแบบพลังงานเป็นพลังงานกลกล่าวอีกนัยหนึ่งแอคชูเอเตอร์ยังสามารถใช้เป็นระบบการแปลงพลังงานได้ซึ่งแปลงพลังงานภายนอก (External stimuli) อื่นๆเป็นพลังงานกลสิ่งกระตุ้นอาจเป็นไฟฟ้า ความร้อน นิวเมติกหรือออปติคอลลื่นอยู่กับกลไกการกระตุ้นและการจ่ายพลังงานแอคชูเอเตอร์ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานต่างๆไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ สวิตช์ ตัวไมโครโรโบติกส์ กล้ามเนื้อเทียม รูปร่างวัสดุหน่วยความจำและโครงสร้างอัจฉริยะอื่นๆ อีกมากมาย โดยทั่วไปวัสดุกระตุ้น ได้แก่ วัสดุอนินทรีย์ (Inorganic materials) พอลิเมอร์ (Polymer), พอลิเมอร์ที่ตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยไฟฟ้า (Electroactive polymers, EAPs), ไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ (Dielectric elastomer) [3, 4]

Electroresponsive polymer (ER Polymer) คือ พอลิเมอร์ที่ตอบสนองด้วยไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือปริมาตรเพื่อตอบสนองต่อไฟฟ้า สิ่งเร้าที่สามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานเชิงกล [5] ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีประสิทธิภาพโดยรวมที่ดี มีน้ำหนักเบา, ต้นทุนต่ำ, มีสมบัติเชิงกลที่ดี, มีโครงสร้างที่เรียบง่าย, มีความทนทานและเป็นวัสดุอีกประเภทหนึ่งที่มีความนิยมเป็นอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาสำหรับประยุกต์ใช้ในงานแอคทูเอเตอร์และมีความพยายามที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์โดยเติมอนุภาคโพลาลิโพลาลิโกลไป เช่น Poly(p-phenylene vinylene), PPV ลงใน Polydimethylsiloxane, PDMS [6] คาร์บอนนาโนทิวใน Polyvinyl alcohol, PVA [7], และกราฟีนในเจลาติน [8] พบว่าให้การตอบสนองดีกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมอนุภาคเหล่านี้ลงไป นอกจากนี้ก็มีความพยายามที่จะใช้วัสดุไฮโดรเจล เช่น เจลาติน, PVA และ ไคโตซาน [6-8] เนื่องจากไฮโดรเจลมีความโดดเด่นในสมบัติด้านการดูดซับ ซึ่งรูปร่างง่ายจึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใน ER Polymer [9]

อนุภาคโพลาลิโกลที่นิยมเติมลงไปในพอลิเมอร์เพื่อให้มีสมบัติในการตอบสนองทางไฟฟ้ามากที่สุดนั้นควรจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแตกต่างจากพอลิเมอร์เมทริกซ์มากตามทฤษฎีของ Ronald Pelrine [2] ทำให้อนุภาคที่มีความสามารถนำไฟฟ้าได้ เช่น พอลิเมอร์นำไฟฟ้า ได้รับความนิยมน้อยมาก แต่เนื่องจากพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามีความซับซ้อนในการสังเคราะห์และปัญหาในการเพิ่มปริมาณการผลิตทำให้กราฟีนและอนุพันธ์ของกราฟีนได้รับความสนใจมากขึ้น

กราฟีนคือ แผ่นคาร์บอนอะตอมบาง  $sp^2$  2 มิติมีโครงสร้างแบบรังผึ้ง มีสมบัติเฉพาะที่โดดเด่น ความแข็งแรงเชิงกลสูง นำไฟฟ้าดีเยี่ยม ความสามารถในการกักโมเลกุล [10] ซึ่งกราฟีนได้จากการสังเคราะห์กราฟไฟต์มีอนุพันธ์ที่น่าสนใจได้แก่ กราฟีนออกไซด์และรีดิวกราฟีนออกไซด์ [11]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลการตอบสนองจากสิ่งเร้าจากภายนอกต่อเจลาตินไฮโดรเจลที่มีและไม่มีการเติมด้วยกราฟีนออกไซด์ โดยสิ่งเร้าจากภายนอกได้แก่ ไฟฟ้า ความชื้นและความดันเป็นกรด-ด่าง



## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์โดยวิธี Hummers method

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติการตอบสนองของเจลลาตินไฮโดรเจลและวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ต่อสิ่งเร้าภายนอก

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 สังเคราะห์กราฟีนออกไซด์โดยวิธี Hummers method โดยศึกษาสัดส่วนของกราฟีนต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 ตามลำดับ

1.3.2 สมบัติของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ เช่น การนำไฟฟ้า ความต้านทาน โครงสร้างผลึกองค์ประกอบทางเคมี

1.3.3 สมบัติทางกายภาพและพฤติกรรมการตอบสนองของสิ่งเร้าจากภายนอกของเจลลาตินไฮโดรเจลและวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ต่อสิ่งเร้าภายนอก ได้แก่ ไฟฟ้า ความชื้น และความเป็นกรด-ด่างของสภาวะแวดล้อม

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้วัสดุตอบสนองต่อสิ่งเร้าจากวัสดุเจลลาตินไฮโดรเจลและวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์

1.4.2 ได้ความรู้เกี่ยวกับสมบัติทางกายภาพและพฤติกรรมการตอบสนองทางไฟฟ้าในระบบที่มีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกของเจลลาตินไฮโดรเจลและวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์

1.4.3 ได้วัสดุตอบสนองต่อสิ่งเร้าภายนอกซึ่งสามารถพัฒนาเป็นวัสดุต้นแบบได้จากวัสดุจากธรรมชาติซึ่งสามารถผลิตภายในประเทศได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 แอคชูเอเตอร์ (Actuator)

แอคชูเอเตอร์คือ ตัวกระตุ้นหรืออุปกรณ์ที่ยอมรับคำสั่งควบคุม (ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้า) และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบทางกายภาพโดยการสร้างแรง การเคลื่อนไหว ความร้อนการไหลและอื่นๆ [12]



(a)

(b)



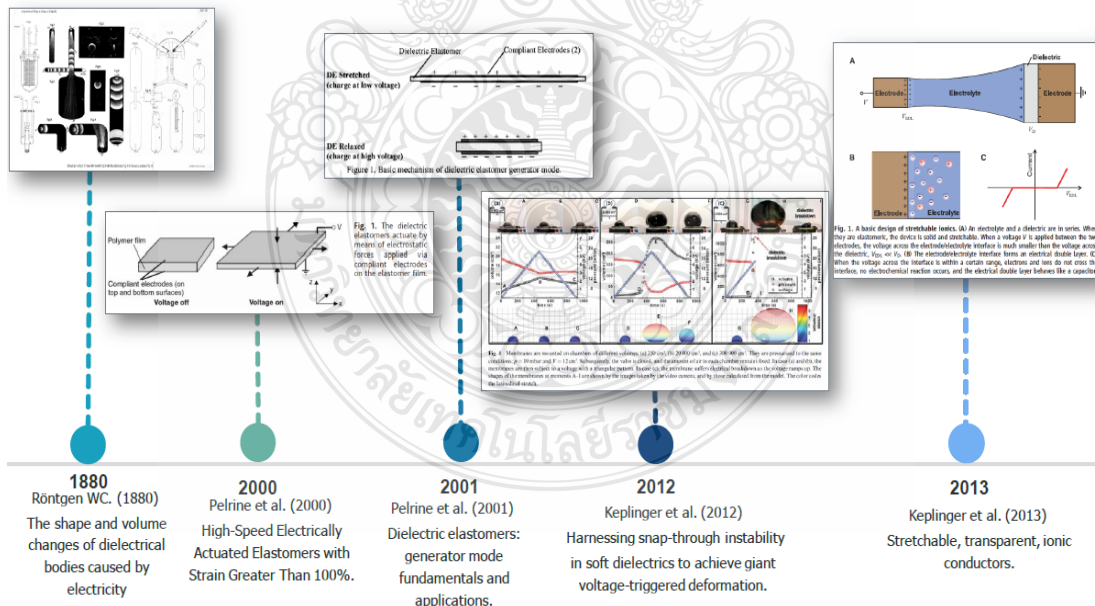
(c)

รูปที่ 2.1 แอคชูเอเตอร์เชิงพาณิชย์ (a) วาล์ว (DV35) (b) ปุ่ม (DP70) (c) ตัวควบคุมตำแหน่งเลนส์ [12]

## 2.1.2 ไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ (Dielectric elastomer)

ไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ คือ เครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้าหรือตัวแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลในโหมดของตัวกระตุ้นไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์แปลงจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล และในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำหน้าที่ย้อนกลับและแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าเป็นตัวกระตุ้นพอลิเมอร์อิเล็กโตรแอคทีฟ (Electroactive polymer) ใหม่ค้นพบในช่วงต้นทศวรรษ 1990 เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่น่าสนใจและเติบโตอย่างรวดเร็วซึ่งวัดได้จากจำนวนงานวิจัย ประสิทธิภาพของเทคโนโลยีและความหลากหลายของการใช้งานไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์เป็นเทคโนโลยีที่สามารถค้นพบได้หลายทศวรรษก่อนหน้านี้โดยมีแนวความคิดที่ว่าประจุเหมือนกันจะผลักกันประจุตรงข้ามจะดูดกัน วัสดุที่มีการตอบสนองต่อการกระตุ้น เช่น ปี ค.ศ 1940 พิล์มพอลิเมอร์และคาร์บอนแบค แต่ก่อนหน้านี้ Bar-Cohen และ Breazeal ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับประจุไฟฟ้าในยางสังเคราะห์การทดลองที่ทำด้วยประจุไฟฟ้ากับยางธรรมชาติโดย W.Roentgen ย้อนกลับไปในปี 1880 ในขณะที่ M. Sacerdote วัดการตอบสนองต่อความเครียดของไดอิเล็กทริกใช้สนามไฟฟ้าในปี ค.ศ.1899 [12, 1-2]

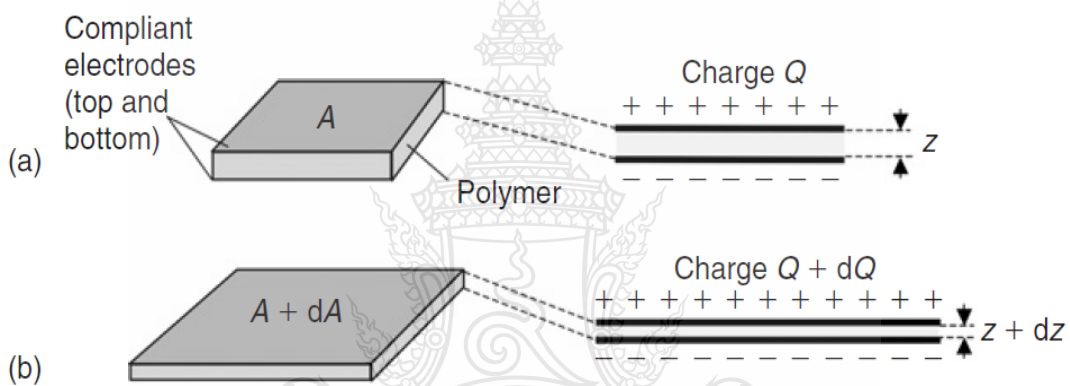
## Dielectric Elastomer Actuators



## รูปที่ 2.2 วิวัฒนาการของ Dielectric elastomer actuators [1-2]

### 2.1.3 หลักการพื้นฐานของไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์

ทำงานบนพื้นฐานของการเหนี่ยวนำเพื่อให้เสียรูปด้วยสนามไฟฟ้า เมื่อให้สนามไฟฟ้าจะเกิดการกระตุ้นทำให้ขยายตัวและกลับสู่สภาวะเดิมเมื่อไม่ให้สนามไฟฟ้าโดยที่พอลิเมอร์ฟิล์มถูกคั่นกลางระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว หากมีประจุไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าบนฟิล์มที่ขยายตัวในพื้นที่ฟิล์มจะแปลงไฟฟ้าเป็นพลังงานกลและทำงานในโหมดแอคชูเอเตอร์ แต่ถ้าหากประจุไฟฟ้าบนฟิล์มไม่ได้ขยายตัวในพื้นที่ฟิล์มจะพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าและฟิล์มกำลังทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [12, 2, 3]



รูปที่ 2.3 ฟิล์มไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ (a) ระยะเวลาเริ่มต้น (b) ในสถานะสุดท้ายที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น [2]

ฟิล์มไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์รวมถึงอีเล็กโทรไลต์เป็นที่ยอมรับว่าเป็นตัวเก็บประจุ โดยสมมติว่าเป็นโครงสร้างในอุดมคติที่มีความต้านทานเป็นศูนย์ในขั้วอีเล็กโทรไลต์และความต้านทานไม่มีที่สิ้นสุดในพอลิเมอร์พอลิเมอร์ยังถือว่าเป็นอีเล็กทริกที่สมบูรณ์แบบโดยมีค่าคงที่อีเล็กทริกสัมพัทธ์  $\epsilon$  และมีความยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์แบบโดยไม่มีการสูญเสียเชิงกลแบบกระจายด้วยสมมติฐานทางไฟฟ้าและลักษณะเชิงกลของระบบแยกจากกันและไม่สูญเสียร่วมกันในแง่ที่ว่าพลังงานได้รับการอนุรักษ์ระหว่าง การเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าบนฟิล์มไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์เป็นจุดเริ่มต้นในการตรวจสอบฟิสิกส์ ความจุของตัวเก็บประจุ C บนไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์สามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon A}{Z} \quad (1)$$

- เมื่อ  $\epsilon_0$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ  $8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}$ .
- $\epsilon$  คือ ค่าสภาพการนำไฟฟ้า
- $A$  คือ บริเวณพื้นที่ที่ใช้งาน
- $Z$  คือ ความหนาของพื้นที่ที่ใช้งาน [2]

### 2.1.3.1 ทฤษฎี Maxwell Stress

สมบัติการถ่ายโอนทางกลไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ขึ้นอยู่กับสภาพยอมรับภายในวัสดุนั้นๆ พารามิเตอร์นี้ควบคุมทั้งความเครียดและความเค้นที่ใช้งานได้ตามสัดส่วน ดังนั้นการที่จะเพิ่มสภาพยอมรับของวัสดุที่เหมาะสมจะต้องมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวกระตุ้น ไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์การตอบสนองทางไฟฟ้าของตัวกระตุ้นไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์จะถูกกำหนดโดยความเค้นอัดจริง  $p$  [2]

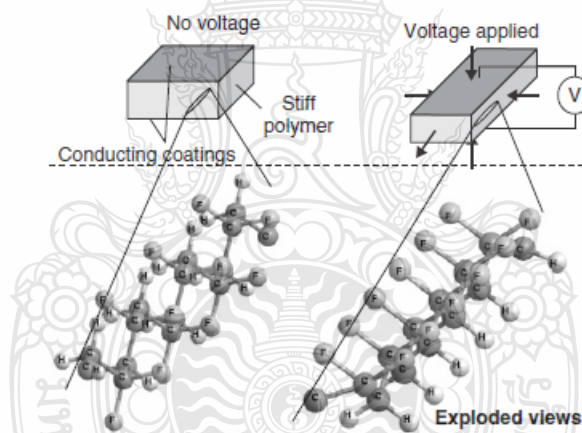
$$p = \epsilon_0 \epsilon E^2 \quad (2)$$

- เมื่อ  $\epsilon_0$  คือ  $8.854 \text{ pF/m}$  คือค่าสภาพการยอมรับของสุญญากาศ
- $E$  คือ แรงดันไฟฟ้า
- $\epsilon$  คือ ค่าความสัมพันธ์ของสภาพการยอมรับในไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์นั้นๆ

ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของสภาพการยอมรับของวัสดุให้ค่าเฉลี่ยสำหรับใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงเป็นอีเล็กโตแอคทีฟพอลิเมอร์ โดยมีการประยุกต์ใช้อย่างมากในกล้ามเนื้อเทียม ซึ่งมีกลไกที่ใช้ในวัสดุเหล่านี้เหมือนในกล้ามเนื้อซึ่งใช้การเคลื่อนที่แบบบวมล่อรวมของโปรตีนหลายชนิดเพื่อสร้างแรงและการเคลื่อนที่ความคล้ายคลึงกันก็คือ เช่นเดียวกับกล้ามเนื้อกล้ามเนื้อเทียมประกอบด้วยวัสดุที่เปลี่ยนความยาวเพื่อตอบสนองต่อสิ่งเร้า กล้ามเนื้อโครงร่างของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง (มากถึง 40%) สามารถปรับความแข็งแรงได้ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่มีประโยชน์ให้ความเครียดประมาณ 20% และให้แรง 350 kPa ต่อพื้นที่หน้าตัด [2, 3]

## 2.1.4 ไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงเป็นอิเล็กทรอนิกส์พอลิเมอร์

2.1.4.1 Relaxor ferroelectric polymer พอลิเมอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก เช่น พอลิไวนิลิเดนฟลูออไรด์ (PVDF) เป็นที่รู้จักกันดีเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าทำให้เกิดการตอบสนองทางไฟฟ้าขั้วพลูโอสลินบนสายโซ่หลักของ PVDF ปรับตัวให้เข้ากับสนามไฟฟ้าทำให้สายโซ่เรียงตัวตั้งฉากกับทิศทางของสนามไฟฟ้าที่จะขยายความยาว ตัวอย่างการเรียงตัวอย่างงานในรูปแบบที่ 2.4 แข็งที่ค่อนข้างใหญ่ของพอลิเมอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกแสดงให้เห็นว่าความเครียดที่เกิดจากแรงของ Maxwell มีค่อนข้างเล็ก PVDF เป็นพอลิเมอร์แบบเพียโซอิเล็กทริกที่มีจำหน่ายในท้องตลาด แต่จำเป็นต้องสังเคราะห์เพื่อให้มีสายโซ่หลัก ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ไม่มีจำหน่าย ไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์สามารถใช้ซิลิโคนหรืออะคริลิกที่มีจำหน่ายทั่วไปได้โดยไม่ต้องดัดแปลง มีข้อแม้คือไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์จะต้องมีการยืดก่อนใช้งานจึงจะทำให้เกิดการเสีรูปร่างมากที่สุดหรือนำไปดัดแปลงทางเคมี [2-4]



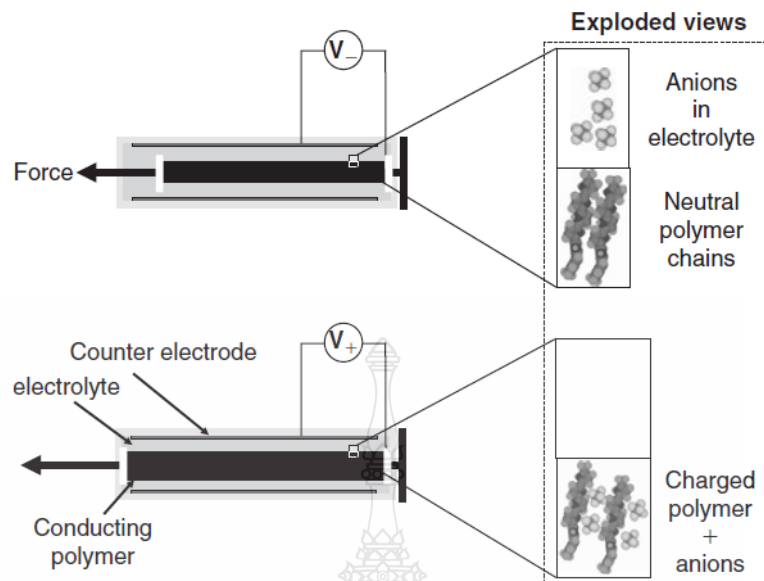
รูปที่ 2.4 พอลิเมอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกการประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้ากับฟิล์มของโมเลกุล PVDF ที่อยู่ในแนวเดียวกันคือคาดว่าจะนำไปสู่การปรับทิศทางของพลูออรีนเชิงขั้วจากเฟสที่ไม่มีขั้ว [2]

2.1.4.2 Ionic actuators การทำงานด้วยแรงดันไฟฟ้าต่ำมักเป็นที่ต้องการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้งานแบตเตอรี่อัตโนมัติหรือเซลล์เชื้อเพลิงมักจะยังคงใช้ไฟฟ้าแรงสูงในสถานการณ์เช่นนี้จะต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มเติมเพิ่มความต้องการด้านต้นทุนและปริมาณอีลาสโตเมอร์อิเล็กทริกโดยทั่วไปต้องการแรงดันไฟฟ้าเกินกว่า 1 kV ซึ่งสามารถรับได้โดยใช้ตัวแปลง DC เป็น DC ที่ค่อนข้างกะทัดรัดหรือหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเพียโซอิเล็กทริกที่มีขนาดกะทัดรัดมากบรรจุภัณฑ์

พิเศษอาจนอกจากนี้ยังจำเป็นสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเพื่อลดความเสี่ยงจากไฟฟ้าลัดวงจรไปยังบริเวณโดยรอบ การใช้ตัวกระตุ้นที่มีความบางที่มีค่าคงที่เป็นฉนวนที่สูงกว่าจะนำไปสู่การลดการทำงานที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์กระบวนการนี้นำไปสู่ความจุที่เพิ่มขึ้นและทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังนั้นในที่สุดจะต้องลดความต้านทานในการเคลือบที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าเพื่อรักษาความเร็วและพลังงานเพิ่มการนำไฟฟ้าโดยไม่เพิ่มความแข็งแรงมีแนวโน้มที่จะพิสูจน์ยาก วัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ คือ Conducting polymers, Carbon nanotubes and Ionic polymer-metal composites (IPMC) ซึ่งเป็นแบบไอออนย้อนกลับไอออนสามารถซึมผ่านวัสดุและเข้าใกล้ภายในหนึ่งนาโนเมตรของพื้นผิวที่นำไฟฟ้าให้การเคลื่อนที่แม้จะมีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า [2-4]

2.1.4.3 Conducting polymers ในการนำพอลิเมอร์เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าทางอิเล็กทรอนิกส์มีศักยภาพนำไปใช้กับพอลิเมอร์ผ่านอิเล็กโทรไลต์อิเล็กตรอนจะถูกเพิ่มหรือออกจากพอลิเมอร์ประจุนี้อสมดุลโดยพลั๊กซ์ของไอออนที่สามารถแทรกซึมเข้าไปภายในพอลิเมอร์ได้ไอออนมีขนาดเล็กพอที่จะอยู่ภายในพอลิเมอร์ได้ ดังนั้นไอออนเข้าไปแล้วพบว่าพอลิเมอร์พองตัว อาการบวมนี้เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับสายโซ่ทำให้ระยะห่างระหว่างสายโซ่เปลี่ยนไปกลไกได้อธิบายในรูปที่ 2.5 ความเครียดเป็นสัดส่วนกับจำนวนไอออนต่อหน่วยปริมาตรที่อยู่ในพอลิเมอร์หรือที่ถูกออกไปจากในพอลิเมอร์ การทำพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ค่อนข้างแข็งโดยมีโมดูลัสยืดหยุ่นในช่วง 100 MPa ถึงช่วง GPa ที่มีความเค้นสูงถึง 100 MPa แม้ว่าจะมากกว่าโดยทั่วไปความหนาแน่นของงานน้อยกว่า 10 MPa จะเข้าใกล้ 100 kJ/m<sup>3</sup> ดังนั้นจึงคล้ายกับค่าทั่วไปในไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ การประยุกต์ใช้แรงบนฟิล์มนำไปสู่การสร้างแรงดันไฟฟ้า ทำให้วัสดุทำหน้าที่เป็นเซ็นเซอร์ ซึ่งแตกต่างจากไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ [2-4]





รูปที่ 2.5 การกระตุ้นพอลิเมอร์ โดยทั่วไปเชื่อกันว่าไอออนจะแทรกกระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เพื่อนำไปสู่การขยายตัวของพอลิเมอร์ที่สังเกตได้จากการใช้แรงดันไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์ [2]

2.1.4.4 Carbon nanotube actuators ท่อนาโนคาร์บอนเป็นรูปแบบของคาร์บอนที่เพ็งค้นพบซึ่งประกอบด้วยกราฟไฟต์เหมือนแผ่นรีดเป็นท่อ ท่อนาโนที่มีผนังเดี่ยวมักมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 นาโนเมตร ในขณะที่ท่อมีหลายผนังมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นาโนเมตรหรือใหญ่กว่าท่อนาโนคาร์บอนสามารถเป็นโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ การแช่ฟิล์มหรือเส้นใยที่ประกอบด้วยท่อนาโนจำนวนมากในอิเล็กโทรไลต์และการให้แรงดันไฟฟ้าจะดึงดูดประจุไปยังอินเทอร์เฟซของท่อ สารละลายความเครียดอยู่ระหว่าง 0.1% - 0.6% ซึ่งคิดว่าเป็นผลมาจากแรงไฟฟ้าสถิตและการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอิเล็กตรอน การเปลี่ยนแปลงความยาวสัมพันธ์มีเล็กน้อย มีความท้าทายในการนำไปใช้ตัวกระตุ้น แม้ว่าความเครียดจะมีขนาดเล็ก ความเค้นในท่อนาโนแต่ละชิ้นคาดว่าจะมีจำนวนมหาศาล แต่ละท่อนาโนมีโมดูลัส 640 GPa ดังนั้นความเค้นในแต่ละท่อคาดว่าจะจะเป็น 600 MPa หากสามารถสร้างเส้นใยที่สามารถทนต่อความเครียดดังกล่าวได้โดยไม่ต้องมีความคืบมากและด้วยโมดูลัสคล้ายกับของแต่ละท่อ ดังนั้นจึงสามารถทำงานได้อย่างหนาแน่นมาก ในปัจจุบันความหนาแน่นของงานอยู่ใกล้ 100 kJ/m<sup>3</sup> [2-4]

2.1.4.5 Ionic polymer/Metal composites ประกอบด้วยฟิล์มพอลิเมอร์ที่นำไอออน เช่น Nafion® (Dupont) ซึ่งเคลือบในแต่ละด้านด้วยอิเล็กโทรดพื้นที่ผิวสูงมากพอลิเมอร์ที่ทำ



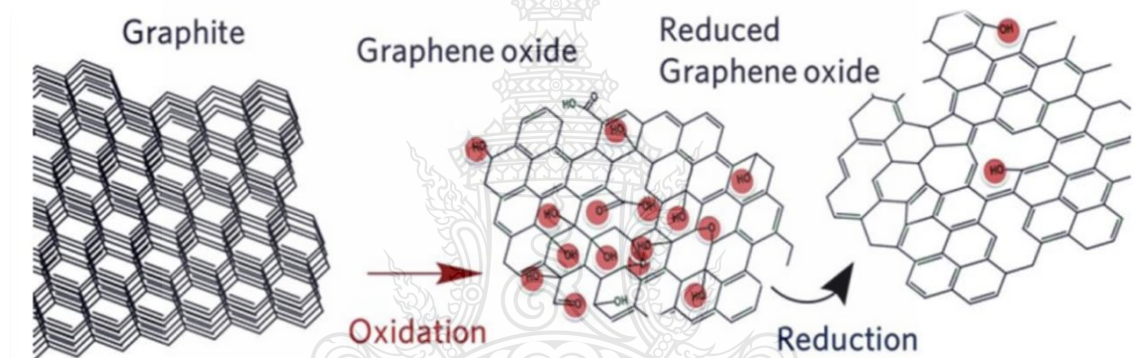
ปฏิกิริยากับไอออนมีประจุสายโซ่หลัก ด้วยประจุที่สมดุลโดยประจุตรงข้ามเคลื่อนที่ เช่น  $\text{Na}^+$  มักจะมีน้ำอยู่ด้วย บริเวณที่มีประจุของพอลิเมอร์กลุ่มที่ชอบน้ำจะมีรูพรุนให้แรงดันไฟฟ้าของอิเล็กโทรดโลหะไปในรูพรุน กระจายไอออนและสร้างปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิตภายใน ส่งผลให้เกิดการกระตุ้นให้โค้งงอโดยบวมด้านหนึ่งและหดตัวอีกด้านหนึ่งและทำให้เกิดการขยายเชิงกล มีความเครียด 0.5–3% และความเค้น 3 MPa หรือน้อยกว่าตัวกระตุ้นไอออนิกทำงานที่แรงดันไฟฟ้าต่ำมีความแข็งแกร่งสูงและให้ ความเครียดปานกลางถึงเล็กเมื่อเทียบกับไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ มีข้อได้เปรียบไอออนิกเหล่านี้ ตัวกระตุ้นที่สัมพันธ์กับไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์คือการทำงานด้วยแรงดันไฟฟ้าต่ำ IPMC ใช้งานได้ถึงประมาณ 7 V. ท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์ตัวนำโดยปกติจะทำงานที่ประมาณ 2 V หรือน้อยกว่า แรงดันไฟฟ้าเหล่านี้ มีขนาดต่ำกว่าที่ใช้ในไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ สามลำดับและทำให้การทำงานของแบตเตอรี่ ค่อนข้างง่าย อย่างไรก็ตามมีข้อบกพร่องและความท้าทายหลายประการที่เกี่ยวข้องกับสิ่งเหล่านี้ [2-4]

2.1.4.6 Shape memory alloys โลหะผสมของหน่วยความจำรูปร่างเป็นที่กล่าวถึงในภาพรวมของเทคโนโลยีตัวกระตุ้นแม้ว่าจะมีข้อเสียหลายประการคือความหนาแน่นของงานไม่ตรงกันและมีพลังต่อมวลสูงมากโลหะผสมเหล่านี้ผ่านการเปลี่ยนเฟสตามอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยเฉพาะในนิกเกิล – ไททาเนียมโลหะผสมที่มีความต้านทานเหมาะสม การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมิตินั้นโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 1% ถึง 8% ความเครียดเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้ภาวะที่สูงมากซึ่งนำไปสู่ระดับสูงความหนาแน่นในการทำงาน นอกจากนี้ด้วยการใช้การระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพการตอบสนองแรงกระตุ้นในช่วงเวลามีลิวินาที่สามารถเป็นได้เกิดจากความร้อนตามด้วยการระบายความร้อนอย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปจะเป็นโลหะผสมหน่วยความจำรูปร่างสัญญาณที่อุณหภูมิสูงและจำเป็นต้องมีความเค้นดึงเพื่อให้มันกลับสู่สภาวะยืดออกตามไประบายความร้อน [2-4]

#### 2.1.5 การเตรียมกราฟีนออกไซด์และรีดิวกราฟีนออกไซด์โดยวิธี Hummers Method

เตรียมกรดซัลฟิวริก 23 ml และกราไฟต์ 1 g ใส่รวมกันในบีกเกอร์ภายใต้สภาวะการกวนโดยที่ทำการทดลองในอ่างน้ำแข็งเพื่อควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน  $20^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นค่อยๆเติมโซเดียมไนเตรตปริมาณ 0.5 g ลงในบีกเกอร์และที่สัดส่วนของกราไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 ตามลำดับ เมื่อเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตแล้วนำอ่างน้ำแข็งออกภายใต้สภาวะการกวน 30 min ที่  $35^{\circ}\text{C}$  ค่อยๆเติมน้ำ DI 46 ml ภายใต้สภาวะการกวน 15 min และ

เติมน้ำ DI 140 ml และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 ml ภายใต้สภาวะการกวน 2 h. ทำการปรับสภาพผิว กราฟีนออกไซด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 4 wt% จำนวน 5 ครั้งและปรับสภาวะความเป็นกรด-ด่างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลางนำกราฟีนออกไซด์ที่ได้ ไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 12 h จะได้กราฟีนออกไซด์ ซึ่งกราฟีนออกไซด์ 1 g แล้วเทลงขวดรูปชมพู่เติมน้ำกลั่นลงในขวดรูปชมพู่ปริมาณ 200 ml ซึ่งวิตามินซี 100 mg ใส่ลงขวดรูปชมพู่ ทำการสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 min สังเกตสีของรีดิวกราฟีนออกไซด์ในน้ำกลั่น หากมีสีดำให้ทำการกรองด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง โดยใช้น้ำกลั่นครั้งละ 200 ml และทำการอบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 14 h จะได้รีดิวกราฟีนออกไซด์ แต่หากยังไม่เป็นสีดำให้ใส่วิตามินซีเพิ่มครั้งละ 100 mg และทำการสั่น จนกว่าสีรีดิวกราฟีนในน้ำกลั่นจะเป็นสีดำ [13]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์และกราฟีนออกไซด์ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชันซึ่งทำให้จำนวนกลุ่มออกซิเจนลดลง [11]

### 2.1.6 กราฟีนออกไซด์

กราฟีนออกไซด์คือ วัสดุโมเลกุลเชิงระนาบที่มีโครงสร้างและออกซิเจนสองมิติทั่วไป [14] ถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกโดย Brodie ในปี คศ.1895 ด้วยการเกิดออกซิเดชันของกราไฟต์ด้วยกรดไนตริกและโพแทสเซียมคลอเรตเป็นสารออกซิแดนซ์ ในปี คศ.1898 Staudenmaier ได้ปรับปรุงวิธีออกซิเดชัน โดยการเพิ่มโพแทสเซียมคลอเรตในปริมาณที่น้อยลงและใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น หลังจากนั้นในปี คศ. 1937 Hofmann ใช้กรดไนตริกในการผลิตกราฟีนออกไซด์ และปี คศ.1958 Hummers และ Offeman ได้คิดวิธีการสังเคราะห์ที่มีความปลอดภัยกว่าวิธีเดิมโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นสารออกซิแดนซ์ในส่วนผสมของกรดซัลฟิวริกเข้มข้นและโซเดียมไนเตรดในการสังเคราะห์ ซึ่งวิธีนี้ได้เป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน [15]

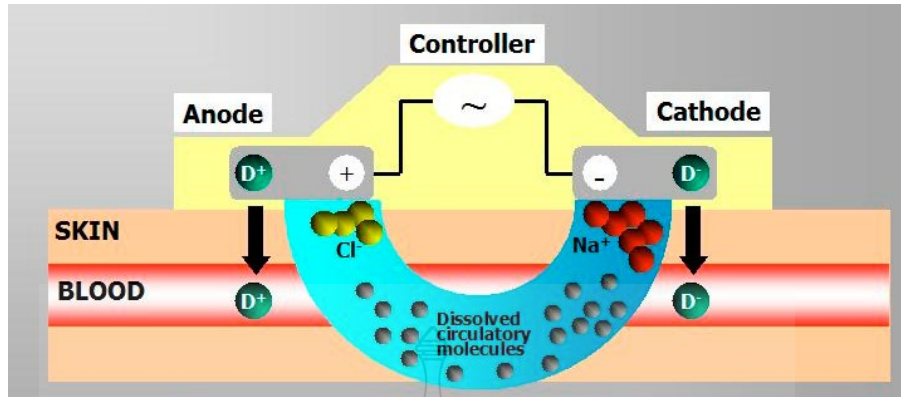
กราฟีน ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 2004 โดย ศ.ดร. อังเดรไกม์ (Andre Geim) และ ศ.ดร. คอนสแตนติน โนโวเซลอฟ (Konstantin Novoselov) จากมหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ สหราชอาณาจักร ซึ่งผลงานการ ค้นพบแกรฟีนดังกล่าว ทำให้ทั้งสองท่านได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 2010 มีลักษณะ 1 ชั้นอะตอมของคาร์บอนที่เรียงตัวต่อกันเป็นโครงสร้างรูปหกเหลี่ยม หากนำ กราฟีนมาวางซ้อนกันหลายๆชั้นจะได้กราฟไฟต์รู้จักกันดีในรูปของไส้ดินสอ เนื่องจากกราฟีนมีความหนา เพียงแค่คาร์บอนอะตอมเดียว ทำให้มีสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างออกไปจากคาร์บอนอื่นๆ ก่อน หน้าการค้นพบกราฟีน นักวิทยาศาสตร์มีความคิดว่า วัสดุสองมิติไม่มีความเสถียรมากพอที่จะแยก ออกมาให้มีความหนาเพียงแค่อะตอมชั้นเดียวได้เพราะแต่ละชั้นจะมีแรงดึงดูดระหว่างกันที่เรียกว่า แรง แวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) หรืออาจจะห่อตัวกันกลายเป็นทรงกลมเพื่อรักษาความเสถียรก็ได้แต่ อย่างไรก็ตาม นักฟิสิกส์รางวัลโนเบล ทั้งสองท่านก็สามารถแยกกราฟีนที่มีความหนา เพียงหนึ่งชั้นอะตอม ได้สำเร็จ การแยกชั้นแกรฟีนจากแกรไฟต์ในเบื้องต้นนั้นสามารถทำได้ง่ายๆ โดยเทคนิค micromechanical cleavage หรือการเอาสก็อตเทปทาบลงบนแกรไฟต์แล้วดึงออกจากนั้นก็นำไปทาบ ลงบนสก็อตเทปอีกอันหนึ่งแล้วดึงออกในแต่ละครั้งแผ่นแกรไฟต์ที่ติดอยู่ บนสก็อตเทปก็จะบางลงเรื่อยๆ จนกระทั่งได้แผ่นที่ บางที่สุดแค่อะตอมเดียวเท่านั้น กราฟีนประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเรียงตัว ต่อกัน เป็นวงหกเหลี่ยม (hexagonal) ด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่มีความแข็งแรง และเชื่อมต่อกันเป็น โครงสร้าง ลักษณะเหมือนกับรังผึ้ง ทำให้กราฟีนมีความแข็งแรงกว่าเพชร และแข็งแรงกว่าเหล็กกล้า ถึง 200 เท่า ขณะเดียวกันกราฟีนยังนำไฟฟ้าได้ดีกว่า โลหะทองแดง เพราะการส่งผ่านอิเล็กตรอนเป็นไปอย่าง รวดเร็ว และในทางทฤษฎีกราฟีนที่มีน้ำหนักเพียงแค่ 1 g จะมีพื้นที่ผิวมากถึง 2,360 ตารางเมตร หรือ เทียบได้กับสนามเทนนิสถึง 10 สนามรวมกัน หากนำวัสดุสองมิติอย่างกราฟีนมาต่อกันเป็นชั้นๆก็จะได้ วัสดุสามมิติคือ กราไฟต์แต่ถ้านำมาม้วนเป็นทรงกระบอก จะได้วัสดุหนึ่งมิติอย่างท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) และถ้าถูกห่อให้เป็นทรงกลมจะได้ฟูลเลอร์รินหรือ Buckyball [11]

2.1.6.1 การสังเคราะห์กราฟีน กราฟีนที่ได้จากวิธีการลอกด้วยสก็อตเทป นั้นมีขนาด เล็กและรูปร่างไม่สม่ำเสมอ นักวิทยาศาสตร์ จึงพยายามคิดค้นวิธีการผลิตกราฟีนให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และมีสมบัติที่ควบคุมได้จากการควบคุมโครงสร้าง การสังเคราะห์ที่นิยมและเหมาะสมกับการนำไป ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมมี 2 วิธี ได้แก่ วิธีที่ 1 การผลิตกราฟีนโดย Chemical Vapour Deposition หรือ CVD เป็นการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนบนแผ่นโลหะ โดยเริ่มต้นจากการปล่อยก๊าซมีเทนที่

อุณหภูมิห้องเข้าไปในเตาเผาที่มีก๊าซไฮโดรเจนอยู่ด้วยเล็กน้อยเมื่อก๊าซมีเทนสัมผัสกับโลหะ เช่น ทองแดงหรือนิกเกิล ที่อุณหภูมิสูงระดับ 1000°C จะเกิดการสลายตัวเหลือเพียงอะตอมของคาร์บอน เกาะอยู่บนแผ่นโลหะ และจัดเรียงโครงสร้างเป็นกราฟีนได้ในสภาวะที่เหมาะสม ตามหลักการแล้วการสลายตัวของก๊าซมีเทนและการเกิดโครงสร้างแบบกราฟีนต้องใช้ความร้อนสูงถึง 2500°C แต่โลหะทองแดงหรือนิกเกิล มีสมบัติ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้อุณหภูมิที่ลดลงเป็นอย่างมากจากนั้น กราฟีนที่อยู่บนโลหะจะถูกเคลือบผิวด้านบนด้วยโพลีเมอร์ PMMA (Poly(methyl methacrylate)) แล้วกำจัดเอาแผ่นโลหะออกโดยกระบวนการกัดกรวด (etching) และทำการเคลื่อนย้าย แผ่นกราฟีนที่เคลือบด้วย PMMA ไปวางบนวัสดุหรือชิ้นงานที่ต้องการ ตามด้วยการละลายเอา PMMA ออกในที่สุด กราฟีนที่ผลิตขึ้นโดยเทคนิค CVD นี้ เป็นกราฟีนที่มีคุณภาพสูงสามารถควบคุมจำนวนชั้นของกราฟีนได้และมีการนำไฟฟ้าที่ดี จึงเหมาะอย่างยิ่งกับการนำไปใช้ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ วิธีที่ 2 การผลิตกราฟีนโดยกระบวนการ ทางเคมี เริ่มจากการออกซิไดซ์แกรไฟต์ เพื่อให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่ปกักระหว่างชั้นของแกรไฟต์ให้ห่าง ออกจากกัน (exfoliation) และเรียกผลผลิตที่ได้ว่า แกรไฟต์ออกไซด์หรือกราฟีนออกไซด์ขึ้นอยู่กับ ความหนาของวัสดุ (กราฟีนออกไซด์ 1 ชั้น มีความหนาประมาณ 0.9 นาโนเมตรเท่านั้น) [11, 13] จากนั้นทำปฏิกิริยารีดักชันเพื่อลดจำนวนหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนลง และเพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าให้มากขึ้นด้วย ซึ่งวิธีการนี้มีข้อดีคือ สามารถผลิตกราฟีนได้ในจำนวนมากๆ และต้นทุนต่ำกว่าวิธีแรกมาก แม้กราฟีนที่ได้จะมีสมบัติหรือคุณรูปที่ ต่ำกว่าก็ตามแต่ก็ยังมีประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆได้เป็นอย่างดี เช่น การนำไปใช้ในวัสดุคอมโพสิตเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ [11]

หนึ่งในการประยุกต์ใช้วัสดุที่ตอบสนองต่อสิ่งเร้าจากภายนอก เช่น ไฟฟ้า ได้แก่ ระบบควบคุมการนำส่งยาผ่านผิวหนังควบคุมด้วยระบบไฟฟ้า

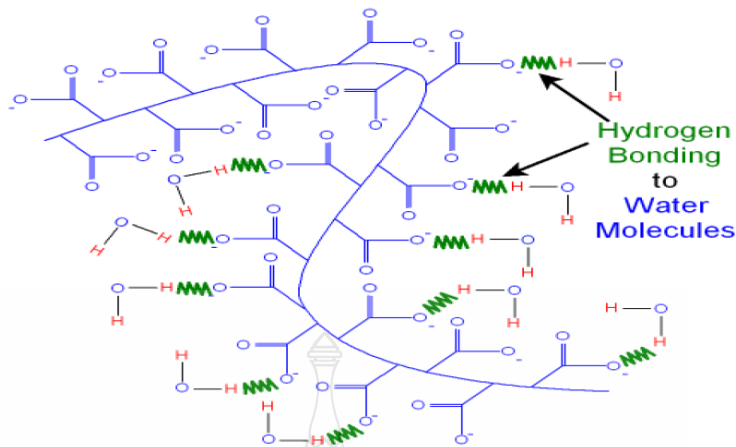
2.1.6.2 ระบบควบคุมการนำส่งยาผ่านผิวหนังควบคุมด้วยระบบไฟฟ้า (Electrical control drug delivery) เป็นระบบนำส่งยาผ่านผิวหนัง โดยใช้สนามไฟฟ้าจากภายนอกเป็นตัวกระตุ้น เป็นที่แพร่หลายเนื่องจากสามารถปลดปล่อยยาและสามารถควบคุมอัตราการแพร่ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งตัวยากับบรรจุภายในแมทริกซ์ของพอลิเมอร์มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับร่างกายมนุษย์ เมื่อให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างไอออนิกของยาและอิเล็กโทรดจะผลักไอออนิกยาผ่านสู่ผิวหนังเข้ากระแสเลือด นอกจากนี้สนามไฟฟ้าสามารถสร้างทางเดินขนาดเล็กผ่านผิวหนังได้ [16-18]



รูปที่ 2.7 ระบบการนำส่งยาผ่านผิวหนังด้วยไฟฟ้า (Electrical control drug delivery) [18]

### 2.1.7 ไฮโดรเจล (Hydrogel)

ไฮโดรเจลเป็นกลุ่มของวัสดุพอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบ hydrophilic ซึ่งทำให้สามารถซึมซับน้ำได้เป็นปริมาณมากในโครงสร้างตาข่ายสามมิติเป็นคุณลักษณะที่สำคัญที่สุดของไฮโดรเจล ไฮโดรเจลประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic groups) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic groups) โดยส่วนใหญ่ไฮโดรเจลสังเคราะห์ได้จากพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันชนิดกรด (Acid group) ประกอบอยู่ในสายโซ่โพลิเมอร์ เมื่อนำไฮโดรเจลไปแช่น้ำอะตอมไฮโดรเจนในสายโซ่พอลิเมอร์จะทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดประจุบวกและทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดประจุลบ ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างสายโซ่และดันให้สายโซ่ที่เกี่ยวข้องพันกันอยู่แยกออกจากกันจากนั้นอะตอมไฮโดรเจนในโพลิเมอร์ของน้ำซึ่งมีความเป็นประจุบวกอ่อนๆจะสร้างพันธะไฮโดรเจนกับอะตอมที่มีประจุลบในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เป็นการเหนี่ยวนำโมเลกุลน้ำเข้าสู่ไฮโดรเจลไฮโดรเจลจึงพองตัวและยืดหยุ่นขึ้น แต่ไม่ละลายน้ำ เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นแบบโครงร่างตาข่ายจึงทำให้มีความแข็งแรงเมื่อไฮโดรเจลมีการสูญเสียน้ำจะเกิดการหดตัวกลับสู่สภาพเดิมและสามารถดูดซับน้ำได้อีกแต่ประสิทธิภาพลดลง [9]



รูปที่ 2.8 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำกับสายโซ่พอลิเมอร์ [9]

ความสามารถในการดูดซับน้ำขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่

1. ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) ยิ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำมากไฮโดรเจลจะยิ่งดูดซับน้ำได้ดีขึ้น
2. แรงแดันออสโมติก (Osmotic pressure) ปริมาณน้ำภายในและภายนอกโครงสร้างไฮโดรเจลไม่เท่ากัน ทำให้เกิดความแตกต่างของแรงแดันออสโมติก ถ้าแรงแดันต่างกันมากโมเลกุลน้ำจะแพร่เข้าไปในไฮโดรเจลได้มากขึ้น
3. รูพรุนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ในไฮโดรเจล ถ้าช่องว่างหรือรูพรุนในโครงสร้างมีมาก จะทำให้น้ำแพร่เข้าสู่ไฮโดรเจลได้มากขึ้น

วิธีการสังเคราะห์ไฮโดรเจล ได้แก่ การเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical crosslink) การเชื่อมขวางทางเคมี (Chemical crosslink) การสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ (Copolymer) และการฉายรังสีผ่านสารละลายพอลิเมอร์เพื่อกระตุ้นให้สายโซ่เกิดการเชื่อมขวางกันเป็นโครงร่างตาข่าย

วัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลอาจเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic Polymer) เช่น พอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrilamide) พอลิเมทาคริลิกแอซิด (Polymethacrylic acid) พอลิเอทิลีนออกไซด์ (Polyethylene oxide) เป็นต้น หรือสังเคราะห์จากพอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymer) เช่น เซลลูโลส แป้ง ไคโตซาน โปรตีน เป็นต้น ซึ่งไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จากพอลิเมอร์ ธรรมชาติจะมีข้อดีคือ สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [9]

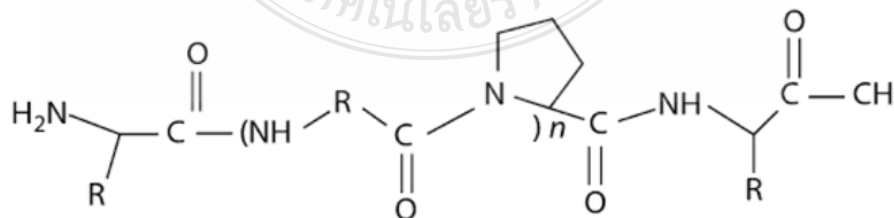


### 2.1.8 เจลาติน

เป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติชนิดหนึ่งเป็นของแข็งโปร่งแสง ไม่มีสี เปราะ ไม่มีรสชาติ สามารถละลายน้ำได้ เจลาตินได้จากการไฮโดรไลซ์คอลลาเจนด้วยความร้อนหรือสารอื่น เช่น กรดหรือเบสทำให้โครงสร้างคอลลาเจนถูกทำลายและเปลี่ยนแปลงเป็นสารเจลาติน เจลาตินสกัดได้จาก กระดูก เนื้อเยื่อเกี่ยวพันของโค กระบือ สุนัข สหรัยสีน้ำตาล ถูนำมาประยุกต์ใช้ทางเภสัชกรรมและทางการแพทย์ เนื่องจากมีสมบัติ เช่น ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ นอกจากนี้เจลาตินสามารถปรับเปลี่ยนประจุได้ง่ายเนื่องจากจุด isoelectric ช่วยให้สามารถเปลี่ยนจากค่าลบเป็นประจุบวกในสภาพแวดล้อมเหมาะสม คุณสมบัตินี้ของเจลาตินถูกใช้เป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพในการสร้างแนวคิดใหม่ๆ ในการส่งมอบยาและชีวการแพทย์อื่นๆ เจลาตินเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ใช้เป็นวัสดุรองรับสำหรับการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อจัดส่งยีนและในด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อเจลาตินถูกใช้ในอุตสาหกรรมฟิล์มอนุภาคนาโนและมีความสามารถในการควบคุมการปล่อยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ [19]



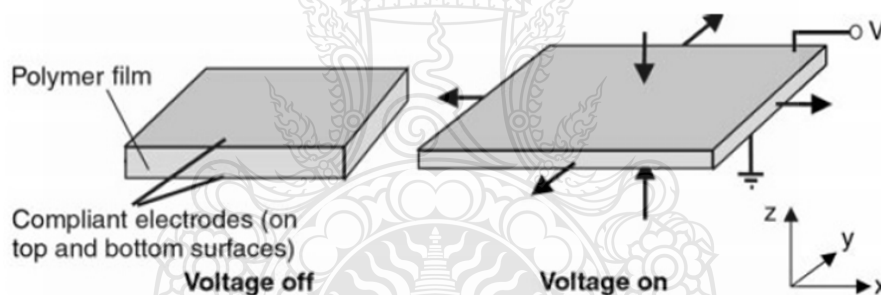
รูปที่ 2.9 เจลาติน [19]



รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของเจลาติน [19]

## 2.2 ทบทวนวรรณกรรม

Ron Pelrine และคณะ ทำการศึกษาการกระตุ้นไดอิเล็กทริกโพลีเมอร์ด้วยไฟฟ้าความเร็วสูงที่ให้ ความเครียดมากกว่า 100% โดยตัวกระตุ้นทางไฟฟ้าเป็นแผ่นฟิล์มไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ที่เคลือบทั้ง สองด้านด้วยวัสดุอิเล็กโทรดทำการศึกษาแผ่นฟิล์มไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ 3 ชนิด คือ HS3 silicone, CF19-2186 silicone และ VHB 4910 พบว่าเมื่อมีการให้แรงดันไฟฟ้าจะมีการบีบอัดแผ่นฟิล์มมีความ หนาลดลงและพื้นที่ขยายมากขึ้นโดยที่ HS3 silicone ให้ความเครียด 30-40%, CF19-2186 silicone ให้ความเครียด 117% และ VHB 4910 ให้ความเครียด 215% โดยที่ ความเครียด, ความดันและเวลา การตอบสนองของซิลิโคนเกินกล้ำเนื้อตามธรรมชาติ ความหนาแน่นของพลังงานที่มีความเฉพาะเกิน กว่าความหนาแน่นของพลังงานของวัสดุอย่างอื่นมากเนื่องจากกลไกการสั่งงานเร็วกว่าในโพลีเมอร์ อิเล็กโทรดที่ให้ความเครียดสูงอื่นๆ เทคโนโลยีนี้อาจเหมาะสำหรับการใช้งานที่หลากหลาย [20]

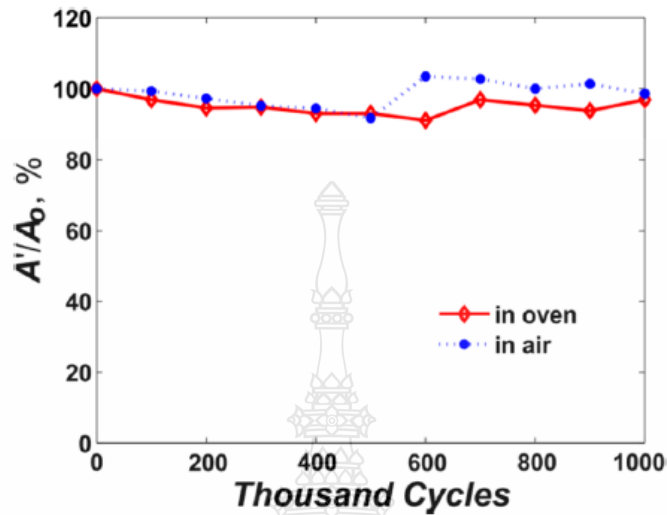


**รูปที่ 2.11** การทำงานแผ่นฟิล์มไดอิเล็กทริกที่เคลือบทั้งสองด้านด้วยวัสดุอิเล็กโทรดโดยให้แรงดันไฟฟ้า และไม่ให้แรงดันไฟฟ้า [20]

Baohong และคณะ ทำการศึกษาไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ทรานสดิวเซอร์ที่เป็นตัวนำไม่ ระบายมีความยืดหยุ่นและโปร่งแสง ซึ่งได้สังเคราะห์ไอโนเจลโดยกระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชันกรด อะคริลิกใน 1-ethyl-3-methylimidazolium methylsulfate ไอโนเจลที่ได้มีคุณลักษณะการนำไฟฟ้า ( $0.22 \text{ S m}^{-1}$ ) ค่าโมดูลัส ( $\sim 3 \text{ kPa}$ ) ค่าการยืด ( $\sim 4.6$ ) ไอโนเจลและอีลาสโตเมอร์อิเล็กทริกประดิษฐ์ เป็นทรานสดิวเซอร์ซึ่งเมื่อให้แรงดันไฟฟ้ามีความเครียด 140% ไอโนเจลที่ได้มีความอุ่มน้ำแต่ ทรานสดิวเซอร์ยังคงมีเสถียรภาพหลังจากถูกกระตุ้น 1,000,000 รอบ ในตู้อบและสภาวะปกติ ความ

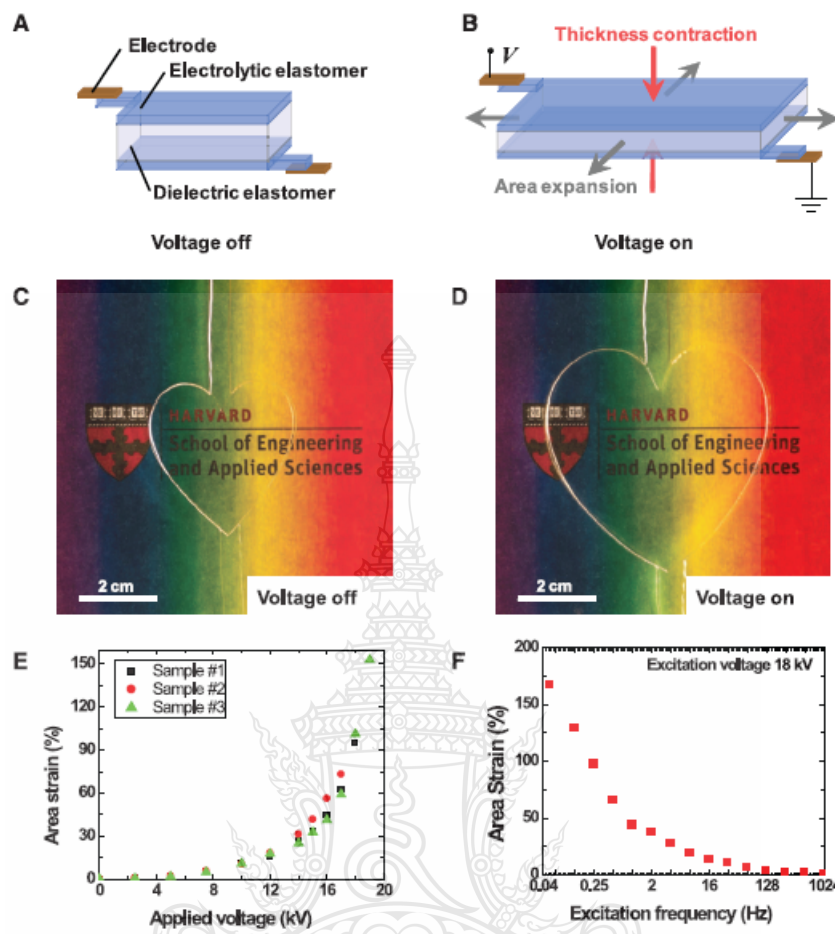


โพรงแสงของไอโวจลทำให้ทรานสดิวเซอร์ที่มีตัวนำอยู่ในเส้นทางของแสงและการไม่ระเหยของไอโวจลทำให้สามารถใช้ทรานสดิวเซอร์ในที่โล่งได้ [21]



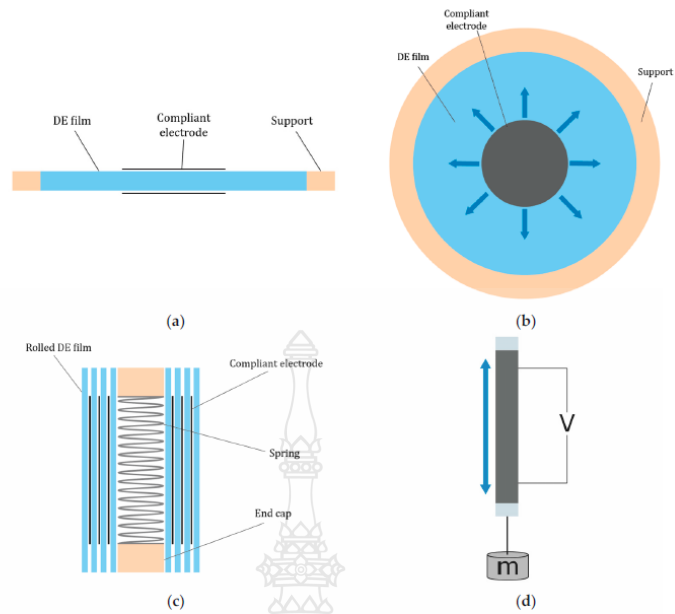
รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงความเครียดเมื่อถูกกระตุ้นรอบของการกระตุ้นในเตาอบที่มีความชื้นสัมพัทธ์  $10 \pm 0.4\%$  และในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์  $54 \pm 5\%$   $A'$  คือความเครียดที่วัดได้หลังจากผ่านไปจำนวนหนึ่งรอบ  $A_0$  คือความเครียดที่วัดได้ในรอบแรก [21]

Christoph และคณะ ทำการศึกษาความยืดหยุ่น ความโปร่งแสงของตัวนำไอออนิกส่วนใหญ่เป็นตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อ เซนเซอร์และตัวกระตุ้นซึ่งเป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นและอ่อนนุ่มได้ ความโปร่งแสงสามารถได้ทุกแสงทุกสีและสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงกว่า 10 Hz และแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 10 KV เป็นตัวกระตุ้นที่โปร่งแสงที่มีความเครียดขนาดใหญ่และสามารถเป็นลำโพงโปร่งแสงที่ให้เสียงซึ่งการถ่ายโอนทางไฟฟ้าทำได้โดยไม่ต้องทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีตัวนำไอออนิกมีความต้านทานสูงกว่าตัวนำอิเล็กทรอนิกส์หลายชนิด มีความยืดหยุ่นและการส่งผ่านสูงตัวนำไอออนิกมีความต้านทานแผ่นต่ำกว่ามากกว่าตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ที่มีอยู่ทั้งหมด [22]

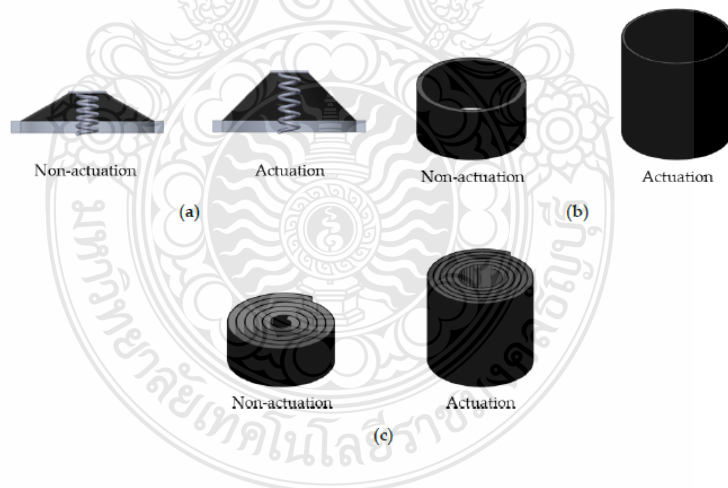


รูปที่ 2.13 ตัวกระตุ้นแบบโปร่งใสที่สามารถเปลี่ยนรูปที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว [22]

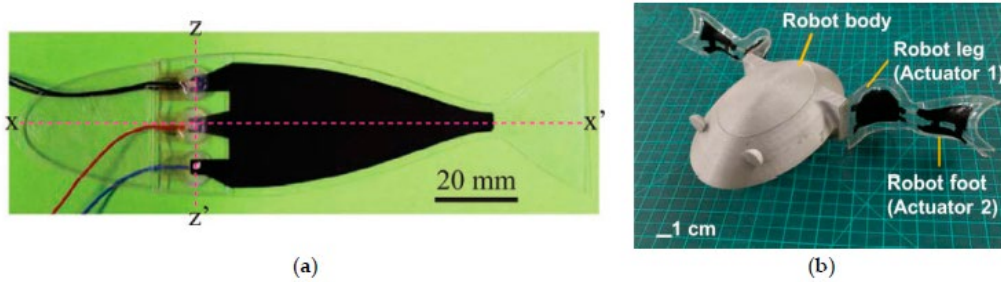
Jung-Hwan และคณะ ทำการศึกษาตัวกระตุ้นไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ใช้งานเป็นส่วนประกอบสำหรับหุ่นยนต์ที่อ่อนนุ่มโดยอธิบายวิธีการสร้างแบบจำลองทางทฤษฎี นอกจากนี้ยังแนะนำการประยุกต์ใช้ไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ มีอหุ่นยนต์นุ่มหุ่นยนต์เคลื่อนที่อุปกรณ์สวมใส่ และส่วนประกอบออปติคัลที่ปรับได้และแอปพลิเคชันที่มีศักยภาพอื่นๆ [23]



รูปที่ 2.14 การกำหนดค่าไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ (a) โครงสร้างของตัวกระตุ้นแบบวงกลม (b) ใช้  
งานไฟฟ้าตัวกระตุ้นแบบวงกลม (c) โครงสร้างภายในของตัวกระตุ้นแบบสปริง (d)  
ตัวกระตุ้นแบบสปริงถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้าโดยที่มีมวลแขวน [23]

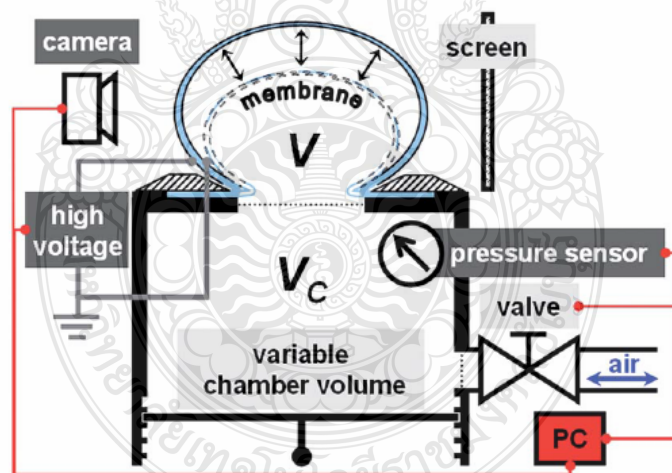


รูปที่ 2.15 โครงสร้างของตัวกระตุ้นขยายแบบเชิงเส้น (a) โครงสร้างของตัวกระตุ้นแบบกรวย (b)  
โครงสร้างของตัวกระตุ้นแบบท่อ (c) โครงสร้างของตัวกระตุ้นแบบม้วน [23]



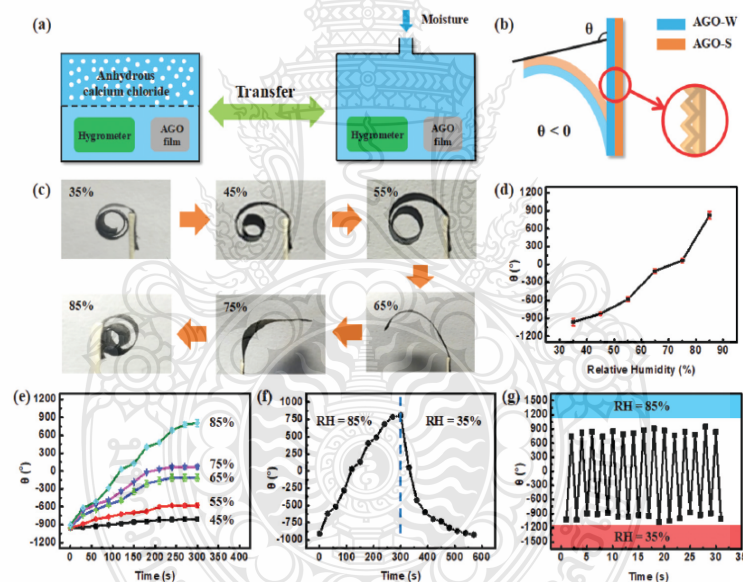
รูปที่ 2.16 ได้อีลาสติกอีลาสโตเมอร์เคลือบที่แบบง่าย (a) หุ่นยนต์ปลา (b) หุ่นยนต์กบ [23]

Christoph และคณะ ทำการศึกษาการควบคุมความไม่เสถียรในไดอิเล็กทริกอ่อนนุ่มเพื่อการเสียรูปขนาดใหญ่ที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า ได้นำเสนอทฤษฎีและการทดลองเพื่อแสดงให้เห็นว่าความไม่แน่นอนสามารถควบคุมเพื่อให้เกิดการเสียรูปที่กระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าขนาดยักษ์เมมเบรนในห้องที่มีปริมาตรเหมาะสม กดดันเมมเบรนเข้าไปสถานะที่ใกล้ไม่เสถียรและให้แรงดันไฟฟ้าโดยที่ไม่ทำให้ไดอิเล็กทริกอ่อนนุ่มเสียหายสำหรับเมมเบรนอะคริลิกถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าทำให้มีการขยายตัวของพื้นที่ 1692% การขยายตัวขนาดใหญ่สามารถคงไว้ได้หลังจากแรงดันไฟฟ้าถูกปิด [24]



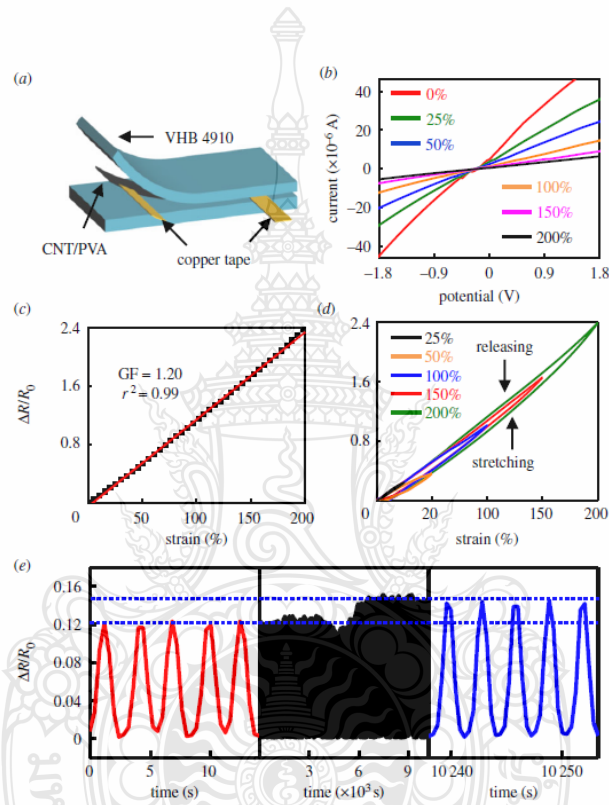
รูปที่ 2.17 เมมเบรนอิเล็กทริกแบบอ่อนซึ่งติดตั้งบนห้องถูกกดดันเข้าไปในบอลูน หลังจากนั้นวาล์วจะปิดและใช้แรงดันไฟฟ้ากับทำให้บอลูนขยายออก มีการวัดปริมาตรของบอลูนด้วยกล้องวิดีโอในขณะที่ความดันในห้องบันทึกด้วยเซ็นเซอร์ความดัน [24]

Yuanyou และคณะ ทำการศึกษาฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่ไม่สมมาตรสำหรับการพัฒนาตัวกระตุ้นความชื้น งานวิจัยนี้ใช้กราฟีนออกไซด์เพื่อสร้างฟิล์มกราฟีนออกไซด์ ด้วยโครงสร้างที่ไม่สมมาตรซึ่งประกอบด้วยชั้นหยักและชั้นเรียบ เนื่องจากโครงสร้างที่ไม่สมมาตรและการดูดความชื้นที่ดี ฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่ไม่สมมาตรขนาด ( $2.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ ) ตอบสนองต่อความชื้นและมีการโค้งงอสูงสุดเปลี่ยนมุม  $\approx 180^\circ$  เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ (RH) เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับรายงานอื่น ๆ เกี่ยวกับความชื้น ตัวกระตุ้นฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่ไม่สมมาตรฟิล์มออกไซด์นี้แสดงความสามารถในการดัดงอที่เหนือกว่า ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้เป็นที่จับเพื่อจับใบไม้และมีความสามารถในการพันรอบแท่งพลาสติกได้ดีเป็นแนวทางใหม่สำหรับการพัฒนาวัสดุที่ตอบสนองต่อความชื้นสำหรับการใช้งานที่มีศักยภาพในหุ่นยนต์กล้ามเนื้อเทียมและสวิตช์ [25]



รูปที่ 2.18 คุณสมบัติการตอบสนองต่อความชื้นของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่ไม่สมมาตร (a) กล่องควบคุมความชื้น (b) ลักษณะมุมเบี่ยงเบนเมื่อได้รับความชื้น (c) ลักษณะของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่ไม่สมมาตรที่ความชื้นต่างๆ (d) ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและมุมที่เปลี่ยนไป (e) ความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่เปลี่ยนไปและเวลา (f) ความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่เปลี่ยนไปและเวลาย้อนกลับที่ความชื้น 35% และ 85% (g) การย้อนกลับของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่ไม่สมมาตร เมื่อให้ความชื้นซ้ำๆระหว่าง 35% ถึง 85% เป็นเวลา 30 รอบ [25]

Yang และคณะ ทำการศึกษาตัวกระตุ้นไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นและเป็นไฮโดรเจลที่กลับสภาพเดิมได้ งานวิจัยนี้ได้พัฒนา CNT/PVA ไฮโดรเจลเป็นอิเล็กโทรด ซึ่ง CNT/PVA ไฮโดรเจล สามารถยืดได้ถึง 200% โดยมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานสัมผัสเล็กน้อย 1.2 โดยประมาณและความสามารถในการกลับสภาพเดิม ความเครียดไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ขึ้นอยู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจล CNT/PVA มากกว่า 40% ซึ่งสูงกว่าสูงกว่าอิเล็กโทรด PVA มาก [7]

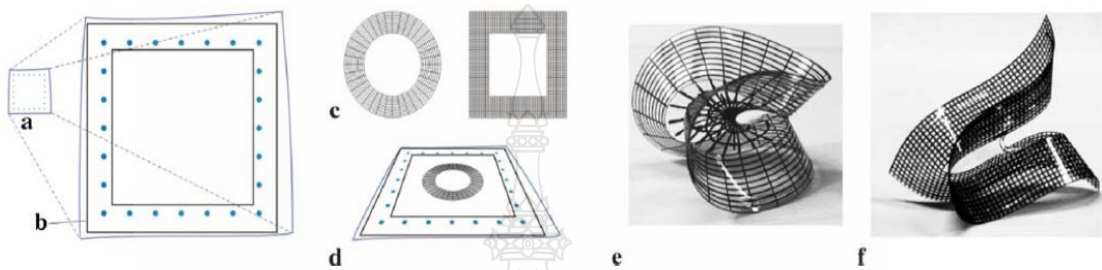


รูปที่ 2.19 ประสิทธิภาพทางกลไฟฟ้าของอิเล็กโทรดไฮโดรเจล CNT/PVA (a) โครงสร้าง CNT/PVA ไฮโดรเจล สำหรับการทดสอบการตอบสนองทางไฟฟ้า (b) แสดงกระแสแรงดันไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ (c) ความสัมพันธ์ความต้านทานที่เปลี่ยนไปของอิเล็กโทรดที่ความเครียดต่างๆ (d) ประสิทธิภาพ Hysteresis ของอิเล็กโทรดที่ความเครียดตั้งแต่ 25% ถึง 200% (e) การทดสอบความทนทานของอิเล็กโทรดภายใต้ความเครียด 20% [7]

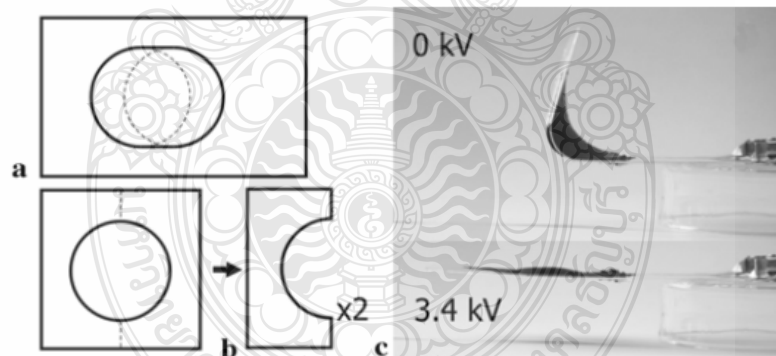
Kofod และคณะ ทำการศึกษาโครงสร้างพลังงานขั้นต่ำที่จัดขึ้นเองสำหรับตัวกระตุ้นไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ เมื่อยืดอีลาสโตเมอร์ถูกเคลือบให้เรียบรอบกรอบพลาสติกทำให้มีรูปร่างที่ซับซ้อน



เกิดขึ้นซึ่งเรียกว่าโครงสร้างพลังงานชั้นต่ำโครงสร้างสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาแอคซูเอเตอร์ด้วย  
 ซับซ็อน โหมดปีกเครื่องบินแนวคิดที่ผุดปกตินี้จากนั้นจะแสดงให้เห็นในกรณีของตัวกระตุ้นอิเล็กทรอนิกส์อิ  
 ลาสโตเมอร์ข้อดีของแนวทางนี้คือความเรียบง่ายในการผลิตความซับซ้อนที่อาจเกิดขึ้นของโครงสร้างที่  
 ผลิตและประโยชน์ทั่วไปของแนวคิดเมื่อนำไปใช้กับวัสดุที่ใช้งานทางกลไฟฟ้าอื่นๆ [26]



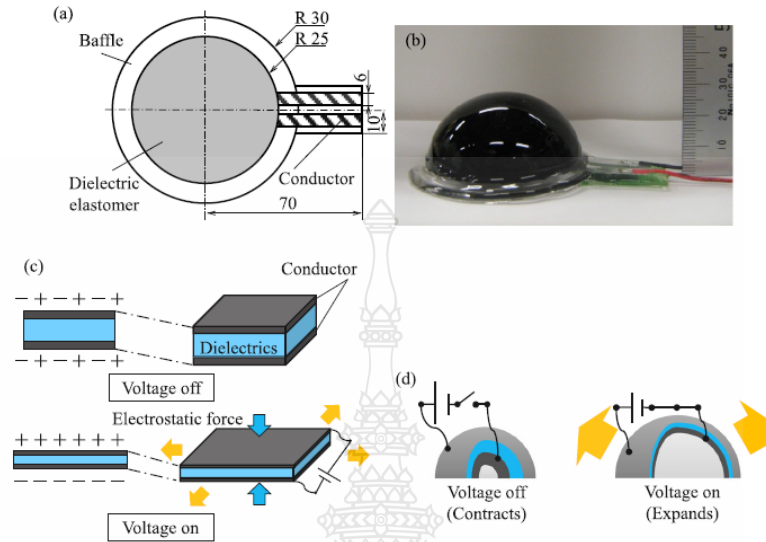
รูปที่ 2.20 โครงสร้างพลังงานชั้นต่ำที่จัดตัวเอง(a)ยึดก่อนติดบนเฟรม (b) เฟรม (c) ถูกตัดจากฟิล์ม  
 พลาสติกบางๆ และติดกาวกับอีลาสโตเมอร์ก่อนยึด(d)เมื่อปล่อยออกกรอบวงกลมจัด  
 ระเบียบตัวเองให้เข้ากับแบบฟอร์ม (e) กรอบสี่เหลี่ยมในแบบฟอร์ม (f) พิมพ์กริด [26]



รูปที่ 2.21 ตัวกระตุ้นพลังงานชั้นต่ำที่จัดตัวเอง (a) กรอบฟิล์มพลาสติกบาง (b) กรอบแข็ง 2 ชั้น (c)  
 ด้านบนเมื่อยังไม่ให้แรงดันไฟฟ้าง่ายเมื่อให้แรงดันไฟฟ้า [26]

Naoki และคณะ ทำการศึกษาตัวกระตุ้นอิเล็กทรอนิกส์อิลาสโตเมอร์ที่มีลักษณะทรงครึ่งวงกลมใช้  
 งานโหมดลำโพงซึ่งมีข้อดีคือลำโพงขนาดเล็กน้ำหนักเบาโดยใช้ตัวกระตุ้นอิลาสโตเมอร์อิเล็กทรอนิกส์การสั้น

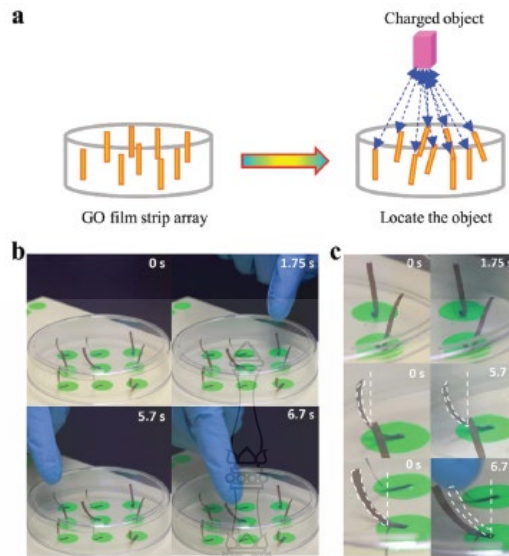
การทดสอบเกี่ยวกับเสียงโดยการให้ความดันเสียงซ้ำๆ การสั่นสะเทือนและรูปแบบการแผ่รังสีอะคูสติก [27]



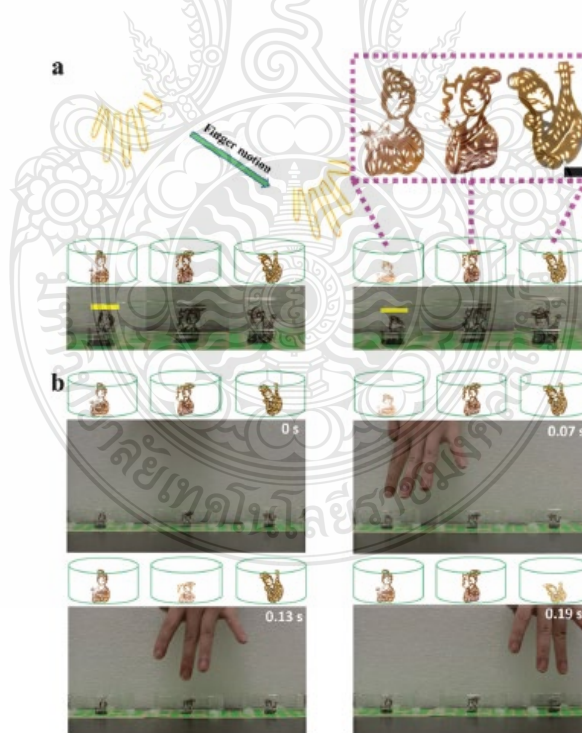
รูปที่ 2.22 ลำโพงอีลาสโตเมอร์อิเล็กทริกครึ่งวงกลม (a) ขนาด (b) รูปและหลักการ (c) ตัวกระตุ้นๆดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ (d) โหมดครึ่งวงกลมของลำโพง [27]

Yi และคณะ ทำการศึกษาฟิล์มกราฟีนออกไซด์เป็นตัวกระตุ้นที่เคลื่อนที่ด้วยไฟฟ้าสถิตโดยหลักการกระตุ้นไฟฟ้าสถิตที่ไม่ซับซ้อนการออกแบบเรียบง่ายและการผลิตตัวกระตุ้นที่ใช้ฟิล์มกราฟีนออกไซด์มีการตอบสนองการใช้งานที่รวดเร็ว การกระตุ้นที่ย้อนกลับได้ดีและเสถียรสูง ผลจากการกระตุ้นฟิล์มกราฟีนออกไซด์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายโดยที่วัสดุมีประจุไฟฟ้าเกือบทั่วทั้งหมดจาก 2 แอพลีเคชันที่แสดงให้เห็น “radar” ฟิล์มกราฟีนออกไซด์การติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ และ “dancers” ฟิล์มฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่สามารถเดินได้ตัดเป็นรูปตุ๊กตาดาวจิน ซึ่งเป็นช่องทางใหม่สำหรับการออกแบบและพัฒนาฟิล์มกราฟีนออกไซด์เป็นตัวกระตุ้นไปสู่การประดิษฐ์ของอื่นๆอุปกรณ์อัจฉริยะสำหรับการตรวจจับการเคลื่อนไหวหรือการเก็บพลังงาน [28]



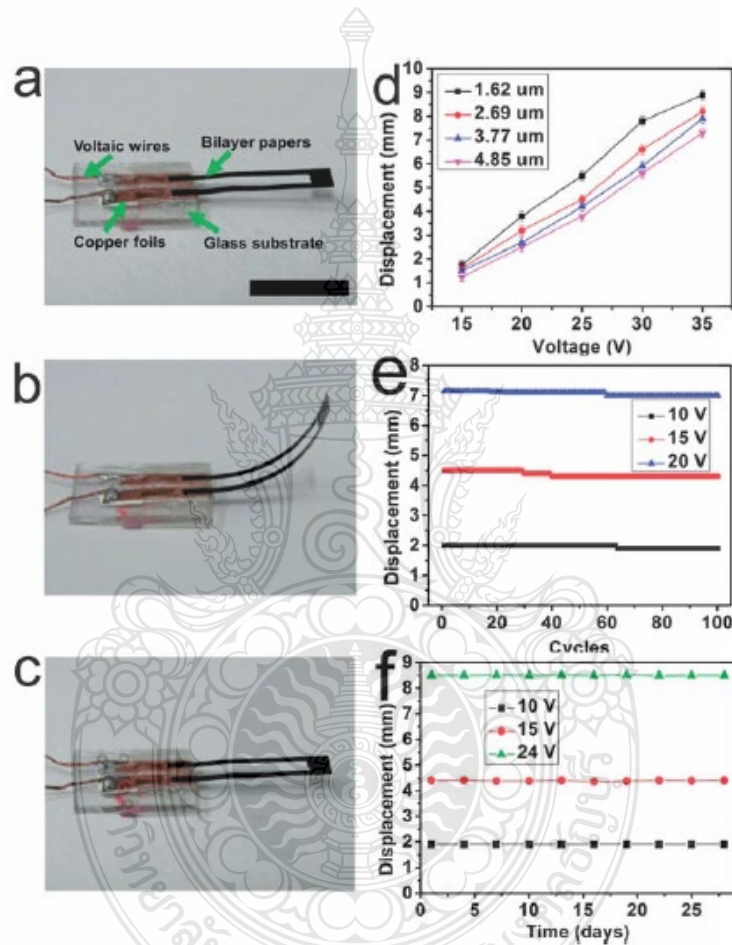


รูปที่ 2.23 (a) ภาพประกอบแผนผังของการออกแบบที่ใช้ฟิล์มกราฟีนออกไซด์เรตาร์ (b) การตัดแบบเลือกของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ในการตอบสนองต่อนิ้วของมนุษย์ที่สวมถุงมือในตำแหน่งต่างๆ (c) ภาพขยายในพื้นที่ของการตัดแบบเลือกของอาร์เรย์ฟิล์มกราฟีนออกไซด์ [28]



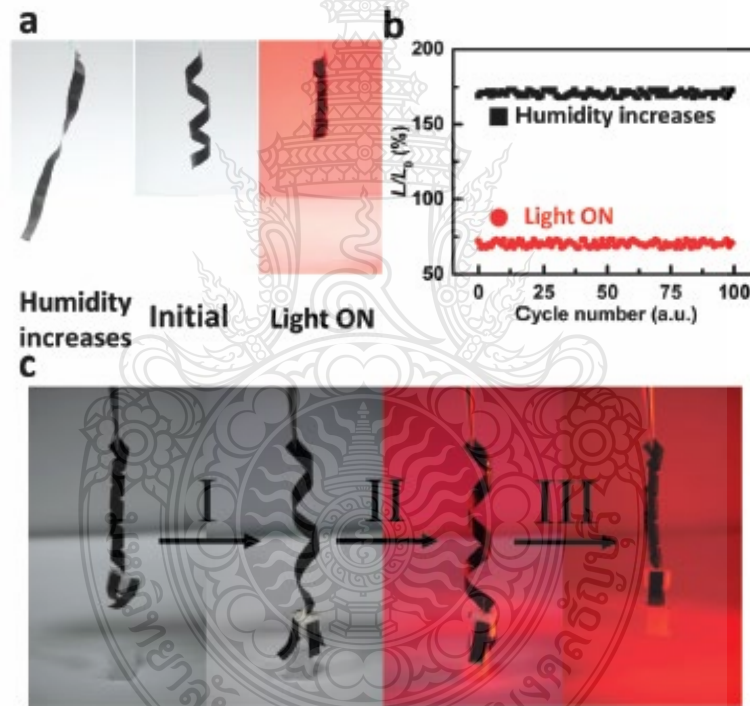
รูปที่ 2.24 (a) แสดงผังการเดินของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ (b) ภาพของการเคลื่อนไหวของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ด้วยการเคลื่อนไหวของนิ้วมือมนุษย์ซึ่งสามารถเลียนแบบท่ารำ [28]

Hengchang และคณะ ทำการศึกษาตัวกระตุ้นสองชั้นคือกราฟีนและกราฟีนออกไซด์มีการประดิษฐ์ตัวกระตุ้นแบบใหม่จากกราฟีน/กราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการที่เป็นไปได้ที่จะใช้สร้างกล้ามเนื้อเทียมเพื่อให้เกิดการเคลื่อนไหวที่สามารถควบคุมได้ของวัตถุในระนาบ 2 มิติเนื่องจากความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างการกระจัดและแรงดันไฟฟ้าความเครียดจากความร้อนที่เกิดจากความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของทั้งสองพบว่ามีการงอ มีความเสถียรและทนทาน [29]



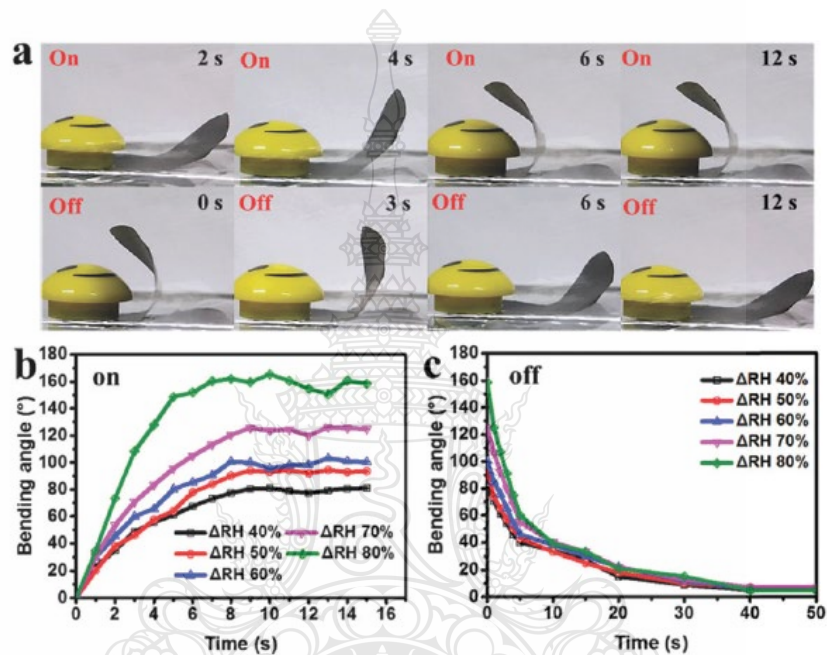
รูปที่ 2.25 ตัวกระตุ้นที่ผลิตขึ้นได้ (a) ส่วนประกอบของตัวกระตุ้น (b) เมื่อให้แรงดันไฟฟ้า (c) เมื่อไม่ให้แรงดันไฟฟ้า (d) เปลี่ยนแปลงเชิงเส้นของการกระจัดเมื่อแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน (e) ความทนทานของอุปกรณ์มากกว่าการทดสอบ 100 รอบที่ 10, 15 และ 20 V (f) ความคงทนของตัวกระตุ้นในช่วงหนึ่งเดือน [29]

Luzhuo และคณะ ทำการศึกษาตัวกระตุ้นวัสดุผสมกราฟีนออกไซด์และพอลิโพรไพลีนเป็นหุ่นยนต์อัจฉริยะแอฟลิเคชันทางชีวภาพออกแบบด้วยรูปทรงที่แตกต่างกัน ตัวกระตุ้นวัสดุผสมกราฟีนออกไซด์และพอลิโพรไพลีนมีการบิดงอเมื่อให้ความชื้น  $2.8 \text{ cm}^{-1}$  เมื่อเข้าใกล้แสงอินฟราเรด (NIR) การกระตุ้นมีประสิทธิภาพมากกว่าตัวกระตุ้นที่ใช้คาร์บอนอื่นๆ จากนั้นหุ่นยนต์วัสดุผสมระหว่างกราฟีนออกไซด์และพอลิโพรไพลีนถูกประดิษฐ์ขึ้นซึ่งสามารถสลับระหว่างโหมดการป้องกันและโหมดดักน้ำหนักพร้อมสิ่งเร้าภายนอกที่แตกต่างกันซึ่งได้รับแรงบันดาลใจจากไม้เลื้อยจำพวกพืชซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพืช แขนหุ่นยนต์นี้สามารถจับวัตถุที่มีน้ำหนักมากกว่าตัวมันเอง 2.9 เท่าแสดงให้เห็นว่ามีแนวโน้มที่ดีในการใช้เป็นแอฟลิเคชันทางชีวภาพ [30]



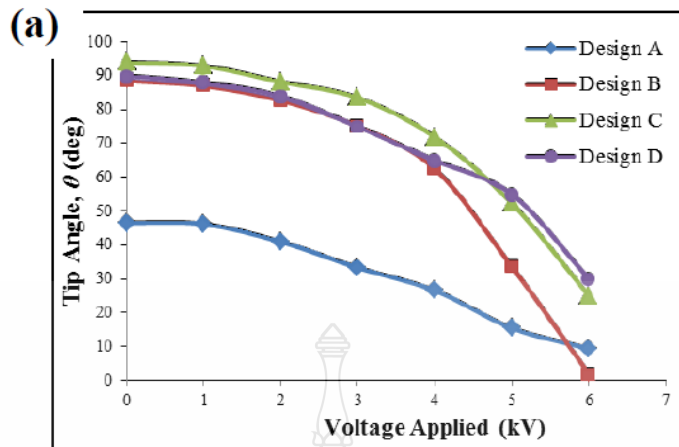
รูปที่ 2.26 (a) ตัวกระตุ้นวัสดุผสมระหว่างกราฟีนออกไซด์และพอลิโพรไพลีนเสียรูปที่เกิดจากความชื้น 30 วินาทีและที่แสง  $300 \text{ mW cm}^{-2}$  15 วินาที (b) ทดสอบความสามารถในการทำซ้ำของการบิด (c) แขนหุ่นยนต์ที่ใช้ตัวกระตุ้นวัสดุผสมระหว่างกราฟีนออกไซด์และพอลิโพรไพลีนที่จับ/ปล่อยวัตถุ [30]

Yuanhang และคณะ ทำการศึกษาตัวกระตุ้นที่เคลื่อนที่ด้วยการไล่ระดับความชื้นจากราฟีนออกไซด์เนื้อเดียวกันซึ่งได้แรงบันดาลใจจากทางชีวภาพ ตัวกระตุ้นที่ขับเคลื่อนด้วยการไล่ระดับความชื้นได้รับการพัฒนาจากฟิล์มแกรฟีนออกไซด์ที่เป็นเนื้อเดียวกันโดยอาศัยการก่อตัวที่มีโครงสร้าง Bilayer ที่เกิดจากการดูดซับน้ำ ตัวกระตุ้นนี้แสดงให้เห็นการเคลื่อนที่ที่มีประสิทธิภาพและควบคุมได้ ควบคุมไปกับความสามารถของการยกของหนักกว่าตัวเอง 8 เท่า [31]



รูปที่ 2.27 (a) การเคลื่อนที่ที่ บิดงอเมื่อให้และไม่ให้ความชื้นที่อุณหภูมิ 20 °c ที่ความชื้น 60% (b) มุมของการบิดงอเมื่อให้ความชื้นที่เวลาต่างๆ (c) มุมของการบิดงอเมื่อไม่ให้ความชื้นที่เวลาต่างๆ [31]

Kim และคณะ ทำการศึกษาพัฒนาออกแบบที่จับแบบอ่อนนุ่มเป็นตัวกระตุ้นไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ unimorph ประกอบด้วยการยึดบนเฟรมแบบยึดหยุ่นที่ไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์รองรับแบบไม่ต่อเนื่องมีลักษณะคล้ายกระดูกสันหลังยึดจากแผ่นโพลีไวนิลคลอไรด์ พบว่าเมื่อปล่อยไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์จะมีสมดุลงการโค้งงอ และเมื่อให้แรงดันทางไฟฟ้าจะมีการยืดออก ซึ่งไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ unimorph 3 กรัมสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เหนี่ยวนำให้เกิดการโค้งงอใกล้กับ 90 °c และให้แรงสูงถึง 168 mN [32]



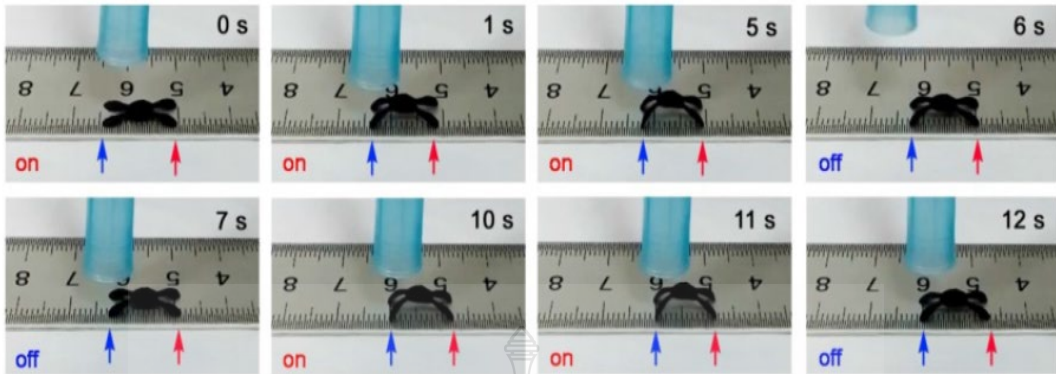
(b) Design C



รูปที่ 2.28 การโค้งงอเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าของ unimorphs ที่มีโครงสร้างคล้ายกระดูกสันหลัง [32]

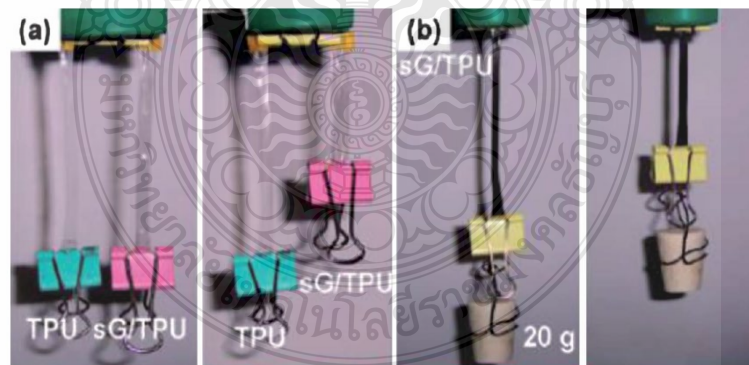
YU และคณะ ทำการศึกษาประดิษฐ์ตัวกระตุ้นที่ตอบสนองต่อความชื้นด้วยกราฟีนโดยใช้แพชเพื่อให้เกิดกระบวนการรีดักชันสำหรับฟิล์มกราฟีนออกไซด์ เนื่องจากข้อจำกัดด้านโปร่งแสงและการคายความร้อนจึงทำให้หม้อออกซิเจนหลุดออกจากแผ่นกราฟีนออกไซด์ในด้านที่โดนแสงแฟลชทำให้อ้านั้นเกิดเป็น RGO ได้เป็นฟิล์มสองชั้น คือ RGO/GO เมื่อได้รับความชื้นความสามารถในการดูดซึมที่แตกต่างกันทำให้เกิดการโค้งงอไปด้าน RGO จึงได้ใช้ประโยชน์จากการเสียรูปที่ควบคุมได้นี้สามารถประดิษฐ์เป็นหุ่นยนต์ตัวกระตุ้นที่ตอบสนองต่อความชื้น [33]





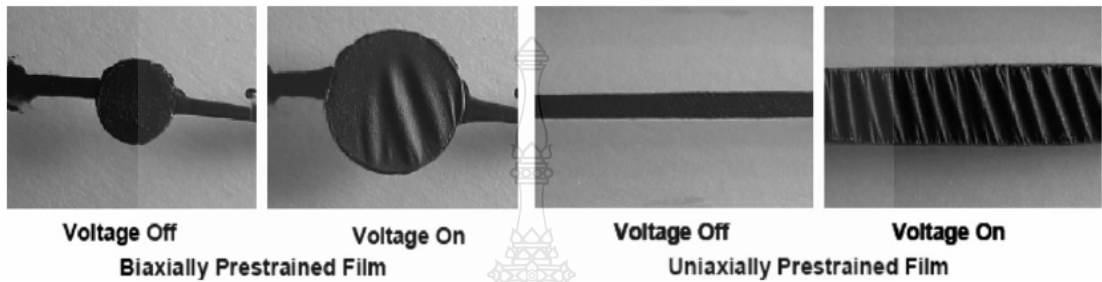
รูปที่ 2.29 หุ่นยนต์ตีนตะขาบที่ตอบสนองต่อความชื้นที่ทำจากฟิล์ม RGO/GO [33]

Yi และคณะ ทำการศึกษาตัวกระตุ้นโดยใช้กราฟีน เมื่อเทียบกับวัสดุกระตุ้นแบบดั้งเดิม เช่น เพียโซอิเล็กทริก เฟอร์โรอิเล็กทริกและวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นต่ำ แรงดันไฟฟ้าในการเคลื่อนที่สูง และประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำซึ่งแตกต่างจากกราฟีนที่แสดงลักษณะที่โดดเด่น ทั้งทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางแสงและเสถียรภาพทางเคมีที่ทำให้เป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับวัสดุการกระตุ้น จึงได้ศึกษาการใช้กราฟีนเป็นตัวกระตุ้นทางไฟฟ้า ไฟฟ้าเคมี การกระตุ้นด้วยแสงและอื่นๆ ซึ่งวัสดุกราฟีนมีการกระตุ้นที่ดีมาก [34]



รูปที่ 2.30 การกระตุ้น IR สำหรับนาโนคอมโพสิตที่ใช้กราฟีน (a) ซ้าย-รูปร่างก่อนถูกกระตุ้น ขวา-ฟิล์ม sG/TPU 0.1% หดตัวหลังจากกระตุ้นโดยการฉายรังสีอินฟราเรด แต่ TPU ไม่มีการตอบสนอง(b)ฟิล์ม sG/TPU 1% สามารถยกน้ำหนัก 21.6 กรัม 3.1 ซม. ด้วยแรง 0.211 N ต่อการสัมผัสกับแสงอินฟราเรดและแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของพลังงานโดยประมาณ  $0.33 \text{ J g}^{-1}$  [34]

Paul และคณะ ทำการศึกษาตัวกระตุ้นไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ที่ทำเป็นกล้ามเนื้อเทียม ซึ่งมีการสำรวจวัสดุจำนวนหนึ่งเพื่อใช้เป็นกล้ามเนื้อเทียม ไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์อิเล็กทริกให้คุณสมบัติที่ดีที่สุดการกระตุ้นเหมือนกล้ามเนื้อ สามารถเก็บประจุ หดและขยายตัวเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า มีความหนาแน่นของพลังงาน ความเครียดและประสิทธิภาพสูงในการประยุกต์ใช้เป็นกล้ามเนื้อเทียม [35]

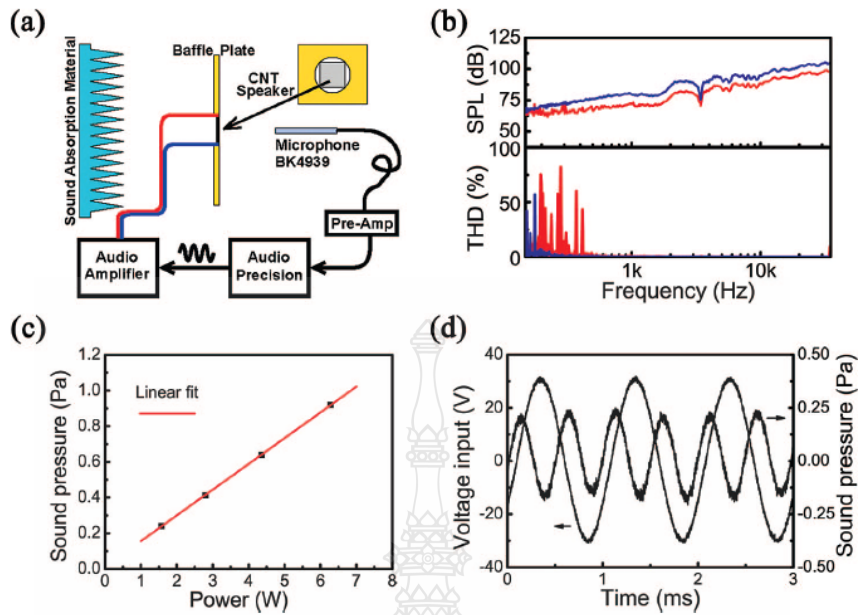


รูปที่ 2.31 อุปกรณ์ไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์แบบแกนเดียวและสองแกน [35]



รูปที่ 2.32 ไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์แบบสปริงม้วน แผ่นม้วนถูกประดิษฐ์ขึ้นโดยการบีบอัดสปริงระหว่าง endcaps การเพิ่มจำนวนชั้นที่พันรอบแกนสปริงช่วยเพิ่มแรง [35]

Lin และคณะ ทำการศึกษาฟิล์มบางท่อนาโนคาร์บอนทำเป็นลำโพง ที่มีความยืดหยุ่น โปร่งแสง โดยพบว่าฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่บางมากเมื่อให้กระแสไฟฟ้าและความถี่จะทำให้เกิดเสียงปรากฏการณ์นี้อาจเป็นผลมาจากเทอร์โมอะคูสติกความจุความร้อนขนาดเล็กพิเศษต่อพื้นที่หน่วยของฟิล์มบางของท่อนาโนคาร์บอนทำให้เกิดความกว้างช่วงตอบสนองความถี่และระดับความดันเสียงสูง จากการค้นพบนี้สามารถนำมาประดิษฐ์เป็นลำโพง ซึ่งมีข้อดีของความหนาแน่นนาโนเมตรและความโปร่งแสง ยืดหยุ่น ยึดได้และไม่ต้องใช้แม่เหล็ก ลำโพงฟิล์มบางสามารถปรับแต่งให้เข้ากับรูปร่างและขนาดใดก็ได้ [36]

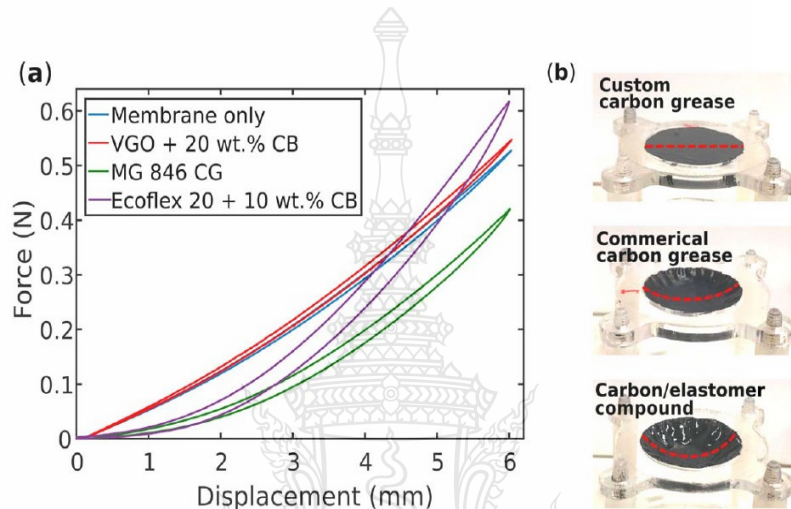


รูปที่ 2.33 การทดสอบประสิทธิภาพเสียงของลำโพงฟิล์มบาง CNT (a) แผนผังของการตั้งค่าการทดลอง (b) ระดับความดันเสียง (dB) ความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกทั้งหมดของชั้นเดียว (สีแดง) และสี่ชั้น (สีน้ำเงิน) ลำโพง CNT เป็นระยะทาง 5 ซม. ระหว่างลำโพงและไมโครโฟน กำลังไฟฟ้าเข้าคือ 3 W และ 12 W สำหรับลำโพงชั้นเดียวและสี่ชั้นตามลำดับ (c) แรงดันเสียงที่เกิดจากลำโพง CNT สี่ชั้นเทียบกับกำลังไฟฟ้าเข้าสี่เหลี่ยมสีดำแสดงถึงผลการทดลองและเส้นสีแดงคือผลลัพธ์ที่เหมาะสม (d) สัญญาณของแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของลำโพงฟิล์มบาง CNT สี่ชั้นและแรงดันเสียงที่ส่งออกจากไมโครโฟนแสดงว่าความถี่ของความดันเสียงเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของแรงดันไฟฟ้าขาเข้าการเปลี่ยนแปลงเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและสัญญาณความดันเสียงขาออกส่วนใหญ่เกิดจากการแพร่กระจายของเสียงจากฟิล์มบาง CNT ไปที่ไมโครโฟน [36]

Chongjing และคณะ ทำการศึกษาความไม่เป็นเชิงเส้นไม่ใช่เชิงเส้นของวงกลมไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ออสซิลเลเตอร์เป็นเทคโนโลยีการกระตุ้นแบบอ่อนที่เกิดขึ้นใหม่ซึ่งมีข้อดีในการกระตุ้นการทำงานขนาดใหญ่เป็นธรรมชาติและต้นทุนต่ำ การกระตุ้นแบบเรโซแนนซ์เพิ่มจังหวะการทำงานและกำลังขับเคลื่อนนำมาใช้ในการใช้งาน เช่น การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์และลำโพง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทดสอบไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ออสซิลเลเตอร์แบบวงกลมทำให้มีการเสียรูปออกจากระนาบมากถึง 80% การ



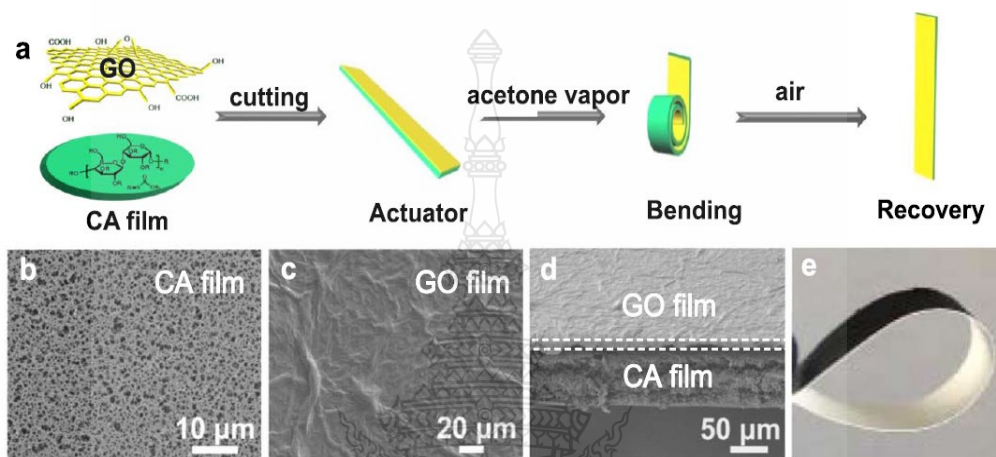
ทดลองและแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าเป็นการประดิษฐ์ที่เรียบง่ายและสามารถแสดงการตอบสนองแบบไม่เชิงเส้นที่ซับซ้อนได้ ประสิทธิภาพของไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ออสซิลเลเตอร์ พบว่าความถี่เรโซแนนซ์และแอมพลิจูดสามารถปรับได้อย่างง่ายดายเมื่อเปลี่ยนพารามิเตอร์เอาต์พุตจางหะขนาดใหญ่ และเรโซแนนซ์ที่ปรับได้สูงทำให้เป็นตัวเลือกที่มีแนวโน้มสำหรับการใช้งานเช่นการดูดซับแรงสั่นสะเทือน [37]



**รูปที่ 2.34** (a) แรงต่อการเคลื่อนที่ของไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ออสซิลเลเตอร์ที่ไม่มีขั้วอิเล็กโทรด (สีน้ำเงิน) น้ำมันพีช+20%คาร์บอนแบค (สีแดง) คาร์บอนจาระบี MG 824 (สีเขียว) Ecoflex 20 + 10% คาร์บอนแบค (สีม่วง) ซิลิโคนถูกยึดโดย  $\lambda_p = 1.2 \times 1.2$  (b) เปรียบเทียบผลของอิเล็กโทรดที่ใช้คาร์บอนต่อซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ บน-จาระบีคาร์บอนที่กำหนดเอง กลาง-คาร์บอนจาระบีเชิงพาณิชย์ ล่าง-สารประกอบคาร์บอน/อีลาสโตเมอร์ ไม่มีการยึดก่อนของเมมเบรน ถ่ายภาพ 48 ซม. หลังจากใช้อิเล็กโทรด [37]

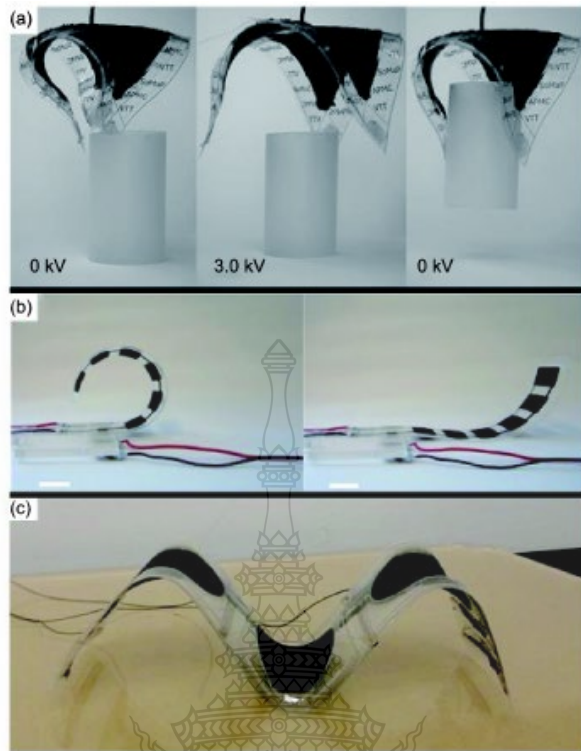
Jiangying และคณะ ทำการศึกษาตัวกระตุ้นที่ขับเคลื่อนด้วยกราฟีนออกไซด์/พอลิเมอร์ โดยไออะซิโตนทำให้เกิดการบิดงอขนาดใหญ่และมีการตอบสนองที่รวดเร็ว แนวทางง่าย ๆ ในการสร้างแอคชูเอเตอร์อัจฉริยะที่มีการบิดงอขนาดใหญ่และการตอบสนองที่รวดเร็วถูกประดิษฐ์โดยการประกอบของชั้นฟิล์มกราฟีนออกไซด์เมมเบรนโพลีเมอร์เซลลูโลสอะซิเตทเชิงพาณิชย์ที่มีความยืดหยุ่น ตัวกระตุ้น GO/CA ตอบสนองต่อไอของอะซิโตนและมีการบิดงอที่ขึ้นอยู่กับความยาวและความหนาของฟิล์มก

กราฟีนออกไซด์สามารถบดองได้ถึง 720 °C ภายใน 19 วินาที ในไออะซิโตนที่มีความยาวแถบคงที่ 30 mm. และความหนาของฟิล์ม 29  $\mu\text{m}$ . และย้อนกลับภายใน 38 วินาทีในอากาศ กลไกของ GO/CA เป็นตัวกระตุ้นสองชั้นขึ้นขึ้นอยู่กับผลการบวมของพอลิเมอร์ CA ในไอแอลกอฮอล์ การเคลื่อนถูกนำมาใช้งานสำหรับการออกแบบอุปกรณ์ต่างๆเพื่อแสดงให้เห็นถึงกระบวนการแบบไดนามิก [38]



รูปที่ 2.35 ลักษณะของตัวกระตุ้น GO/CA (a) กระบวนการประดิษฐ์ตัวกระตุ้น (b) CA เมมเบรน (c) ฟิล์มกราฟีนออกไซด์ (d) ภาพตัดตัดขวางของตัวกระตุ้น GO/CA (e) ภาพตัดขวางและความยืดหยุ่นของตัวกระตุ้น [38]

WANG และคณะ ทำการศึกษาความก้าวหน้าในเทคโนโลยีการกระตุ้นไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ได้รับความสนใจอย่างมากในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาเนื่องจากความยืดหยุ่นโดยธรรมชาติ ความเครียดขนาดใหญ่ ประสิทธิภาพสูงความหนาแน่นของพลังงานสูงและตอบสนองอย่างรวดเร็ว ซึ่งเรียกได้ว่ามีแนวโน้มประดิษฐ์เป็นกล้ามเนื้อเทียมได้แนะนำหลักการกระตุ้นและการสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าแนวทางของไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ ประสิทธิภาพของวัสดุไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ที่แตกต่างกันและอิเล็กโทรดที่เข้ากันได้กันอย่างแพร่หลาย เน้นถึงความเข้ากันได้ซึ่งเหมาะสมกับความหลากหลายของการออกแบบและการใช้งานตัวกระตุ้น [39]



รูปที่ 2.36 ไดโอดีเล็กทรอนิกส์อิลาสโตเมอร์โครงสร้างพลังงานขั้นต่ำ (a) มือจับรูปทิวลิป (b) ตัวกระตุ้นแบบปิดงอ (c) ปีกอ่อนของโครงสร้างพลังงานต่ำสุดไดโอดีเล็กทรอนิกส์อิลาสโตเมอร์แบบสมมาตร [39]

Yue และคณะ ศึกษาตัวกระตุ้นที่ตอบสนองต่อสิ่งเร้าได้หลากหลายทางชีวภาพ ตัวกระตุ้นขนาดเล็กที่ไม่มีการเชื่อมต้อมีแอฟพลิเคชันมีความหลากหลายในหลายสาขา งานวิจัยนี้นำเสนอตัวกระตุ้นที่สามารถตอบสนองได้หลายรูปแบบคือ ตอบสนองต่อความชื้น อุณหภูมิและแสง ความสามารถนั้นทำได้โดยเฉพาะด้วยวิธีการที่รวดเร็วและง่ายตายวิธีการที่ใช้ในการประดิษฐ์ตัวกระตุ้นที่มีรูปแบบที่แม่นยำบนฟิล์มกราฟีนออกไซด์ด้วย Hydrogel Microstamping ตัวกระตุ้นได้เลียนแบบทรงเล็บของเหยี่ยวเพื่อหยิบบล็อก ตัวกระตุ้นคลานได้ ตัวกระตุ้นพันเกลียวรอบๆ แล้วจับดอกไม้ตามรูปทรงเรขาคณิต ซึ่งสามารถใช้ตัวกระตุ้นเพื่อศึกษาการเคลื่อนไหวและทางชีววิทยาและสิ่งมีชีวิต [40]



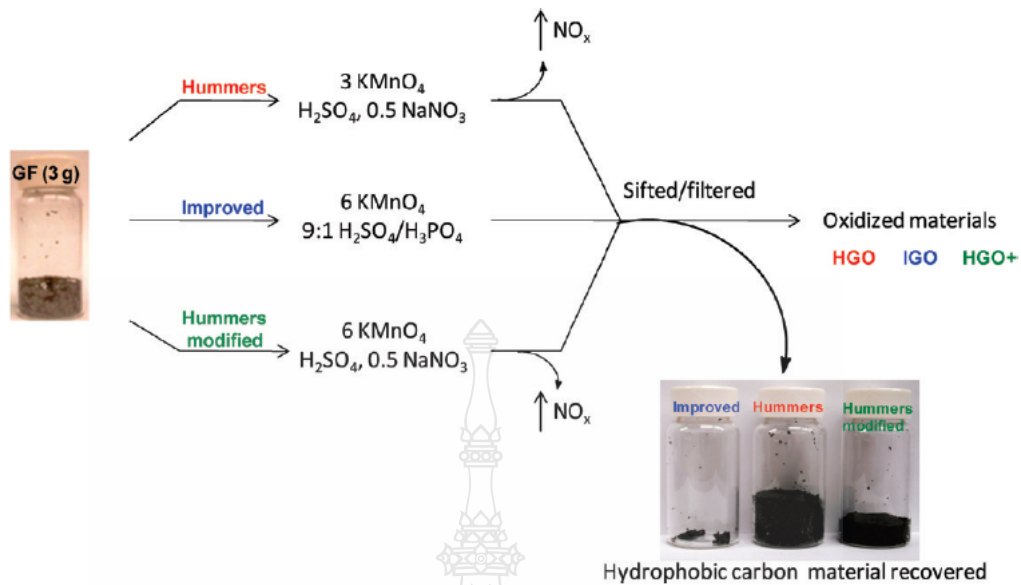
รูปที่ 2.37 การประดิษฐ์และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างตัวกระตุ้น a) รูปแบบ PPy บนฟิล์ม GO สำหรับการสร้างไฟตัวกระตุ้น GO/PPy b) ภาพ PPy บนฟิล์ม GO c) กลไกการทำงานของตัวกระตุ้นสองชั้น GO/PPy และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวกระตุ้นที่มีรูปสามเหลี่ยมปกติ รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปห้าเหลี่ยมปกติ หกเหลี่ยมปกติและรูปแบบ H-, U-, S- และ T ภายใต้สิ่งเร้าของความชื้นและแสง IR d) ตัวกระตุ้น GO / PPy [40]

William S.H และคณะ ศึกษาการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ซึ่งคือวิธี Hummer method ซึ่งเป็นวิธีการหลักที่ถูกนำมาพัฒนาอย่างแพร่หลาย โดยมีวิธีการเตรียมคือ 100 g กราไฟต์และ 50 g โซเดียมไนเตรตใน 2.3 L กรดซัลฟิวริกผสมในภาชนะ 15 L ที่ 0°C ในอ่างน้ำแข็งและใส่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 300 g โดยควบคุมอุณหภูมิไม่เกิน 20 °C หลังจากนั้นนำอ่างน้ำแข็งออกควบคุมอุณหภูมิ 35±3 °C เป็นเวลา 30 นาที (ให้เกิดปฏิกิริยาต่อ 20 นาที จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอมเทา) ใส่น้ำลงไปอย่างช้าๆ 4.6 L อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 98 °C จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ใส่น้ำอุ่นลงไปจนมีปริมาตร

14 L และใส่ 3% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะได้เป็นสีเหลืองอมน้ำตาล หลังจากนั้นล้างและกรองด้วยน้ำ 14L 3ครั้งได้สารเป็นสีเหลืองได้ศึกษาการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ซึ่งคือวิธี Hummer method ซึ่งเป็นวิธีการหลักที่ถูกนำมาพัฒนาอย่างแพร่หลาย โดยมีวิธีการเตรียมคือ 100 g กราไฟต์และ 50 g โซเดียมไนเตรตใน 2.3 L กรดซัลฟิวริกผสมในภาชนะ 15 L ที่ 0°C ในอ่างน้ำแข็งและใส่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 300 g โดยควบคุมอุณหภูมิไม่เกิน 20 °C หลังจากนั้นนำอ่างน้ำแข็งออกควบคุมอุณหภูมิ 35±3 °C เป็นเวลา 30 นาที (ให้เกิดปฏิกิริยาต่อ 20 นาที จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอมเทา)ใส่น้ำลงไปอย่างช้าๆ 4.6 L อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 98 °C จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ใส่น้ำอุ่นลงไปจนมีปริมาตร 14 L และใส่ 3% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะได้เป็นสีเหลืองอมน้ำตาล หลังจากนั้นล้างและกรองด้วยน้ำ 14 L 3ครั้งได้สารเป็นสีเหลือง [13]

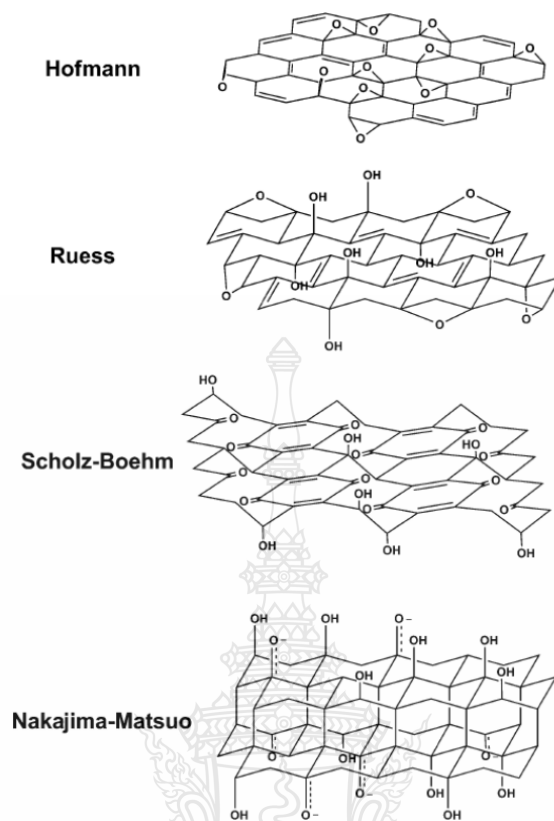
Daniela และคณะ ศึกษาการปรับปรุงการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์วิธีการที่ปรับปรุงการเตรียมกราฟีนออกไซด์ในปัจจุบันวิธี Hummers ( $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุดในการเตรียมกราฟีนออกไซด์การเพิ่มปริมาณ  $\text{KMnO}_4$  และทำปฏิกิริยาใน 9:1 ส่วนผสมของ  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_3\text{PO}_4$  ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการออกซิเดชัน วิธีการปรับปรุงนี้ให้ปริมาณ hydrophilic oxidized ของกราฟีนมากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นแม้ว่า GO ที่ผลิตโดยวิธีนี้จะถูกออกซิไดซ์มากกว่าที่เตรียมโดยวิธีการของ Hummers เมื่อทั้งสองลดลงในห้องเดียวกันด้วยไฮดราซีนกราฟีนที่แปลงทางเคมี (CCG) ที่ผลิตจากวิธีการใหม่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าเทียบเท่าตรงกันข้ามกับวิธีการของ Hummers วิธีใหม่นี้ไม่ก่อให้เกิดก๊าซพิษและควบคุมอุณหภูมิได้ง่ายการสังเคราะห์ที่ดีขึ้นนี้ของ GO อาจมีความสำคัญสำหรับการผลิต GO ขนาดใหญ่เช่นเดียวกับการสร้างอุปกรณ์ที่ประกอบด้วย CCG ที่ตามมา [41]



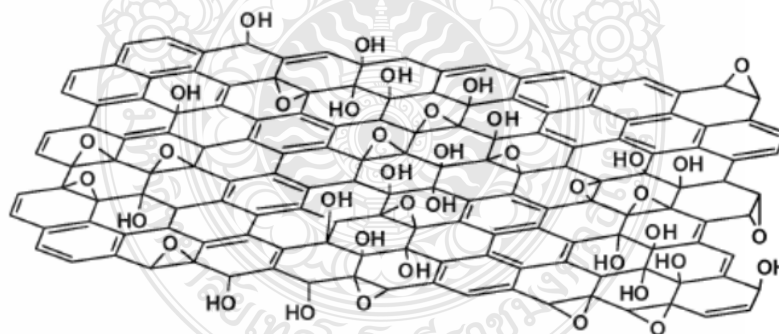


รูปที่ 2.38 ขั้นตอนตามเริ่มจากผงกราฟไฟต์คาร์บอนที่ไม่ชอบน้ำที่ถูกออกซิไดซ์ด้วยวัสดุที่กักเก็บระหว่างการทำให้บริสุทธิ์ของ IGO, HGO และ HGO+ ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของวิธี IGO โดยที่ไม่ถูกออกซิไดซ์จำนวนน้อยมาก [41]

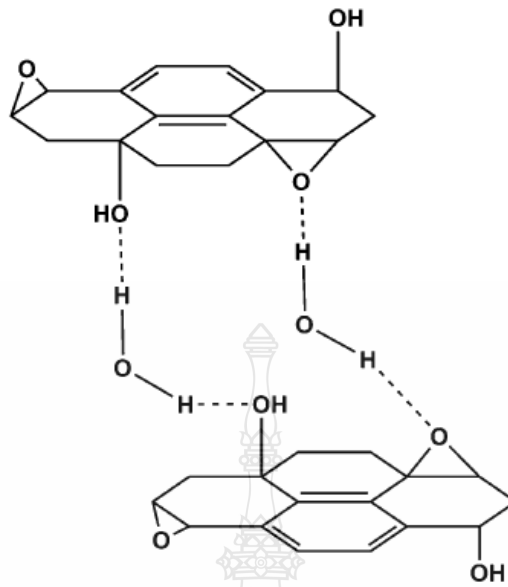
Daniel และคณะ ศึกษาเคมีของกราฟไฟต์ออกไซด์ กราฟไฟต์ออกไซด์เป็นสารตั้งต้นสำหรับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่หลากหลายรวมถึงวัสดุที่มีสมบัติคล้ายกราฟไฟต์ (RGO) ในช่วงครึ่งทศวรรษที่ผ่านมา กราฟไฟต์ดัดแปลงทางเคมี (CMG) ได้รับการศึกษาใช้งานจำนวนมาก เช่น พอลิเมอร์ผสม วัสดุที่เกี่ยวข้องกับพลังงาน เซนเซอร์ วัสดุคล้ายกระดาษ ตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้า และการใช้งานด้านชีวการแพทย์ เนื่องจากระบบกลไกไฟฟ้าและคุณสมบัติทางความร้อนที่ดี การดัดแปลงทางเคมีของกราฟไฟต์ออกไซด์ซึ่งสร้างจากกราฟไฟต์ออกไซด์ กราฟไฟต์ออกไซด์ประกอบด้วยกลุ่มการทำงานของออกซิเจนที่มีปฏิกิริยาหลายชนิด ซึ่งงานวิจัยนี้รวบรวมคุณสมบัติทางกายภาพของกราฟไฟต์และวิธีการทางเคมีในการผลิต CMGs การเตรียมโครงสร้างและการเกิดปฏิกิริยา [42]



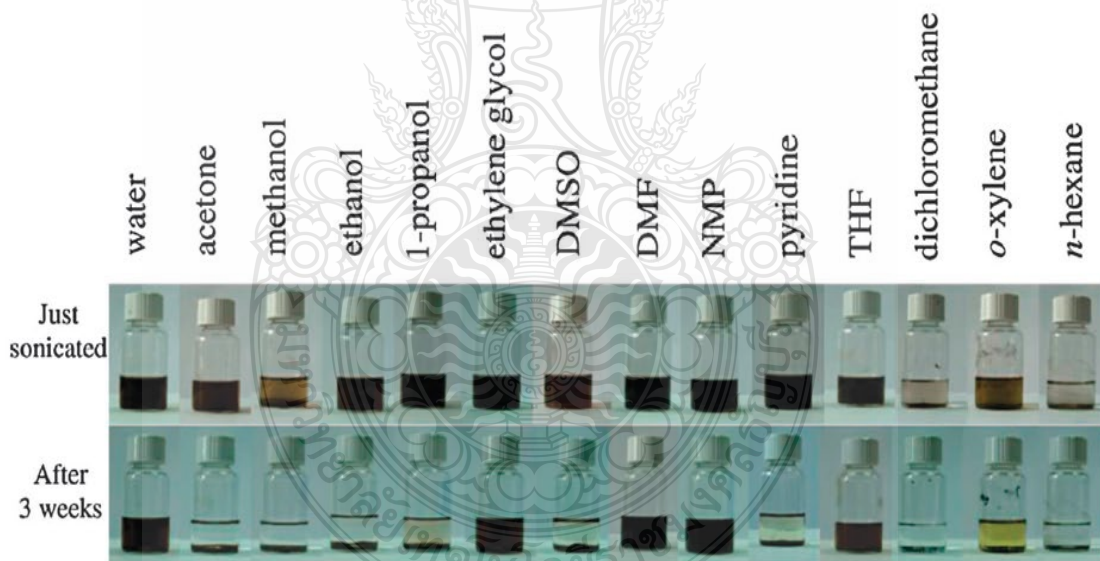
รูปที่ 2.39 สรุปลักษณะโครงสร้างรุ่นเก่าหลายรุ่นของ GO [42]



รูปที่ 2.40 รูปแบบต่างๆของโมเดล Lerf-Klinowski บ่งบอกถึงความคลุมเครือเกี่ยวกับการปรากฏตัวหรือไม่มีกรดคาร์บอกซิลิกที่ชอบของฐานระนาบของเกล็ดเล็กราไฟติกของ GO [42]



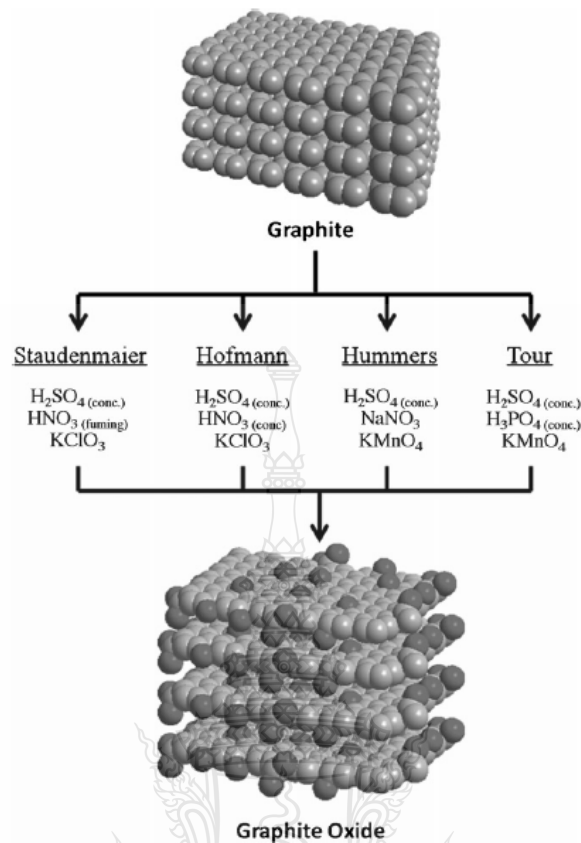
รูปที่ 2.41 พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างออกซิเจนการทำงานบน GO และน้ำ [42]



รูปที่ 2.42 GO ที่เตรียมไว้กระจายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ 13 ตัวผ่านการอัลตราโซนิก (1 ชั่วโมง) บน-กระจายทันที หลังจากสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิกกลางการแพร่กระจาย 3 สัปดาห์ สีเหลืองของตัวอย่างโอไซด์อินเกิดจากตัวทำละลายเอง [42]



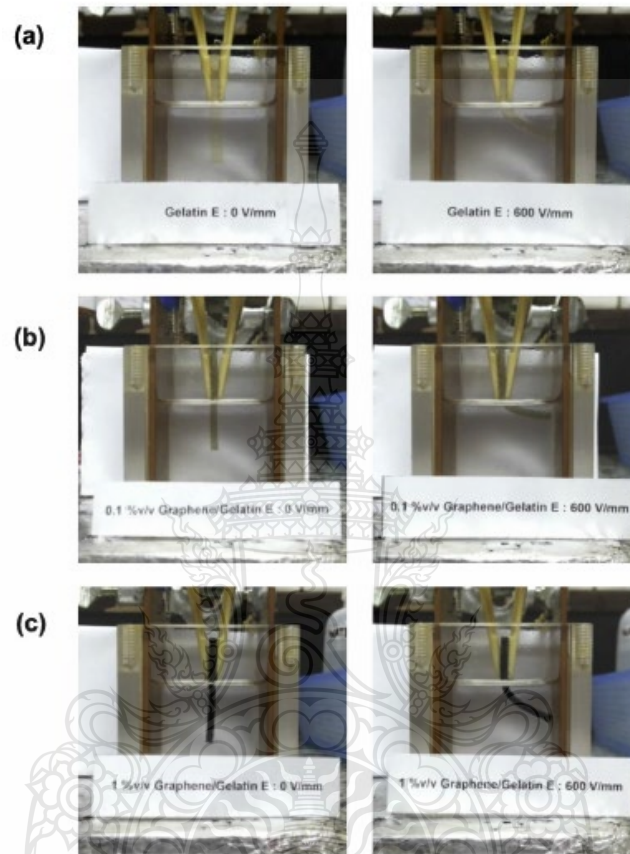
Chun และคณะ ศึกษาผลของเปอร์แมงกาเนตและคลอเรตออกซิแดนซ์ต่อองค์ประกอบของออกซิเจนการวิจัยวัสดุกราฟีนได้ให้ความสำคัญกับกราฟไฟต์ออกไซด์ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาการประดิษฐ์ของ GO สามารถทำได้โดยทั่วไปโดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร่วมกับกรดไนตริกและ  $\text{KClO}_3$  ออกซิแดนซ์ (Staudenmaier) กรดไนตริกและสารออกซิแดนซ์  $\text{KClO}_3$  (Hofmann) โซเดียมไนเตรตสำหรับในกรดไนตริกใน  $\text{KMnO}_4$  (Hummers) หรือ กรดฟอสฟอริกเข้มข้นด้วย  $\text{KMnO}_4$  (Tour) มีวิธีการเหล่านี้ถูกใช้แทนกันในการผลิตตั้งแต่คุณสมบัติของ GO ที่ผลิตโดยสิ่งต่างๆเหล่านี้ วิธีการถูกสันนิษฐานว่าเกือบจะคล้ายกัน การใช้งานที่กว้างขวางในงานนาโนเทคโนโลยี ซึ่งการมีออกซิเจนบางชนิดทำงานได้กลุ่มมีความสำคัญเป็นพิเศษเกี่ยวกับคุณสมบัติและฟังก์ชันการทำงานของ GO ที่ผลิตโดยใช้ทั้งสี่แบบนี้วิธีการลักษณะโครงสร้างของ GOs จะถูกตรวจสอบโดย X-ray photoelectron spectroscopy, nuclear magnetic resonance, Fourier transform infrared spectroscopy, และ Raman spectroscopy ประยุกต์ใช้งานด้านไฟฟ้าเคมีจะประเมินโดยใช้ electrochemical impedance spectroscopy และ cyclic voltammetry techniques การวิเคราะห์เน้นที่การเกิดออกซิเดชันวิธีการขึ้นอยู่กับสารออกซิแดนซ์เปอร์แมงกาเนต (Hummers and Tour methods) ให้ GOs กับความแตกต่างที่ต่ำกว่าอัตราการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและปริมาณสูงของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลและคาร์บอกซิลเมื่อเทียบกับเมื่อใช้คลอเรตออกซิแดนซ์ (Staudenmaier และ Hofmann methods) ข้อสังเกตเหล่านี้ชี้ให้เห็นความแตกต่างอย่างมากระหว่างวิธีการออกซิเดชัน GOs ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะให้ความรู้พื้นฐานสำหรับการใช้งานในอนาคต [15]



รูปที่ 2.43 ขั้นตอนการออกซิเดชันของกราฟไฟต์เป็นไปโดยวิธีของ Staudenmaier (GO-ST), Hofmann (GO-HO), Hummers (GOHU), และ Tour (GO-TO) [15]

Thawatchai และคณะ ศึกษาวัสดุผสม กราฟีน/เจลาตินไฮโดรเจล ที่มีโมดูลัสสูงความไวในการใช้เป็นตัวกระตุ้นไฟฟ้า: ผลกระทบของพื้นที่ผิวและความแรงของสนามไฟฟ้า คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุผสมไฮโดรเจล กราฟีน/เจลาติน ถูกตรวจสอบภายใต้ผลกระทบของพื้นที่ผิวกราฟีน ความแรงของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิต่อการใช้งานของตัวกระตุ้นทางชีวภาพ พื้นที่ผิวสูงสุดของกราฟีน วัสดุผสมเจลาตินไฮโดรเจลเหนียวนำโมดูลัสไดนามิกสูงสุด (G') ภายใต้สนามไฟฟ้าที่ใช้ 0.1% ของวัสดุผสม graphene(MG)/gelatin มีค่า  $\Delta G/G'_0$  352% เมื่อเทียบกับค่าอื่นๆ วัสดุในการศึกษาก่อนหน้านี้ แม้จะมีค่าต่ำที่สุด  $\Delta G/G'_0$  ค่าที่ได้จากวัสดุผสมไฮโดรเจล กราฟีน/เจลาติน ยังคงมีค่ามากกว่าวัสดุไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์อื่น ๆ ค่าโมดูลัสของเจลาตินและวัสดุผสมไฮโดรเจล กราฟีน/เจลาติน ระหว่าง 30°C และ 90°C การทดลองการโค้งตัว ระยะทางและแรงไดอิเล็กทริกโตรีโพรซิสมแรงเพิ่มขึ้นด้วยความแรงของ

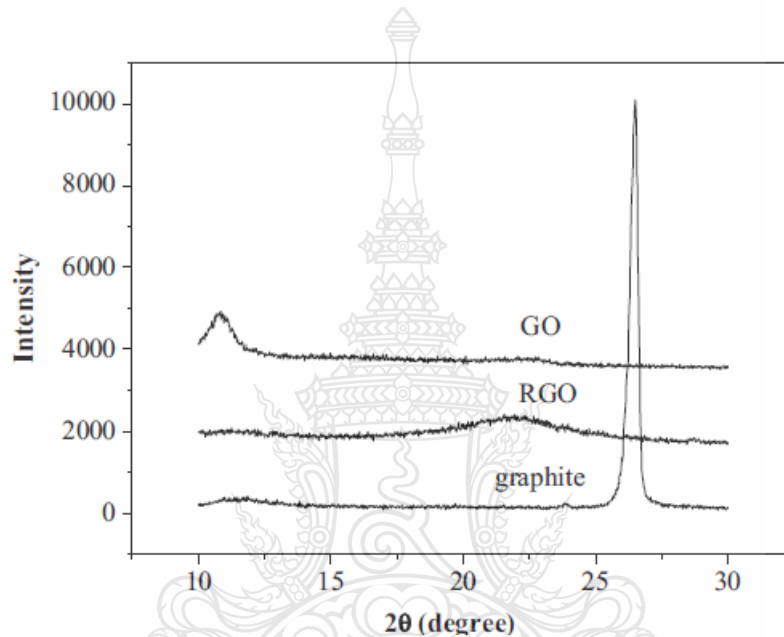
สนามไฟฟ้าที่ใช้กับการเป็ยงเบนไปทางด้านซ้ายบวกแสดงถึงแรงดึงดูดระหว่างขั้วบวกและขั้วหมู่คาร์บอกซิล เนื่องจากโครงสร้างเจลาตินมีประจุลบภายใต้สนามไฟฟ้าที่ใช้ [8]



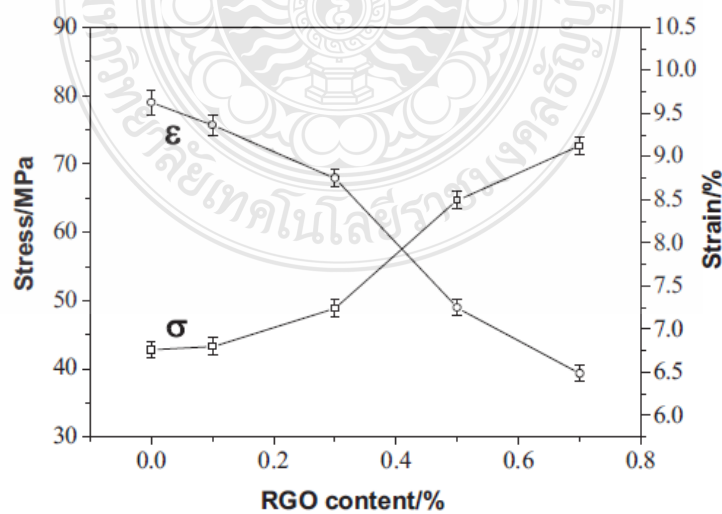
รูปที่ 2.44 การโค้งตัวของเจลาตินไฮโดรเจลที่ E=0 และ 600 V/mm (a) เจลาตินไฮโดรเจล (b) 0.1% ของวัสดุผสมไฮโดรเจล กราฟีน/เจลาติน (c) 1% ของวัสดุผสมไฮโดรเจล กราฟีน/เจลาติน [8]

Wenchao และคณะ ศึกษาการเตรียมฟิล์มจากวัสดุผสม กราฟีนออกไซด์/เจลาติน ที่การเสริมแรงความแข็งแรงเชิงกล กราฟีนออกไซด์รีดิวซ์โดยสารละลายไคโตซาน/เจลาตินและเติมลงในเจลาตินเพื่อประดิษฐ์ฟิล์มกราฟีนออกไซด์/เจลาติน ด้วยวิธี solvent-casting ใช้ genipin เป็นการเชื่อมขวาง โครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์ม ทดสอบโดย Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray Powder Diffraction (XRD), Thermogravimetric Analysis (TGA) และ UV-vis Spectroscopy การ

เพิ่ม RGO ช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึงของฟิล์ม RGO/Gel ทั้งในแบบแห้งและเปียก แต่ค่า elongation ลดลง การรวมกันของ RGO ลดการบวมตัวของฟิล์มในน้ำ ทำการเพาะเลี้ยงเซลล์เพื่อทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ของฟิล์ม เซลล์เดบโตและแพร์พันธุ์ได้ติดบนฟิล์ม RGO/Gel แสดงว่าการเพิ่ม RGO ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ ดังนั้นวัสดุผสม กราฟีนออกไซด์/เจลาตินสามารถนำมาใช้เป็น วัสดุชีวรูปที่มีคุณสมบัติทางกลที่ดีและมีความเข้ากันได้ของเซลล์ [43]

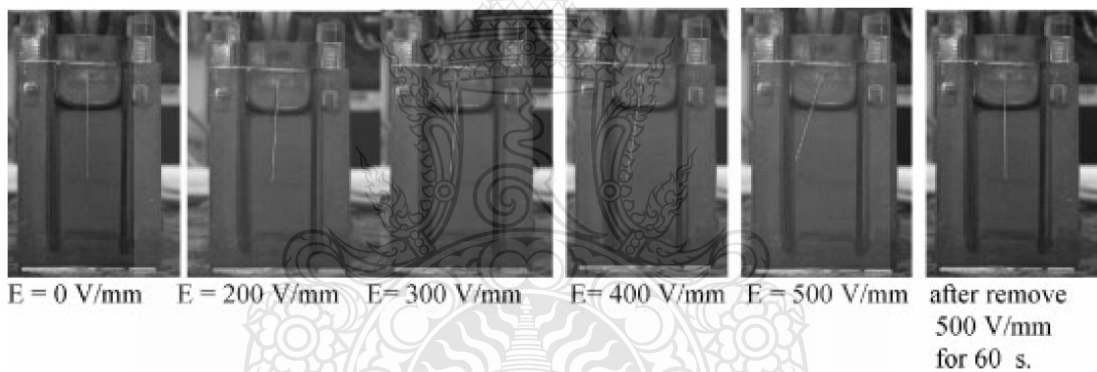


รูปที่ 2.45 XRD spectra ของกราฟีนออกไซด์, รีดีวกราฟีนออกไซด์และกราฟไฟต์ [43]

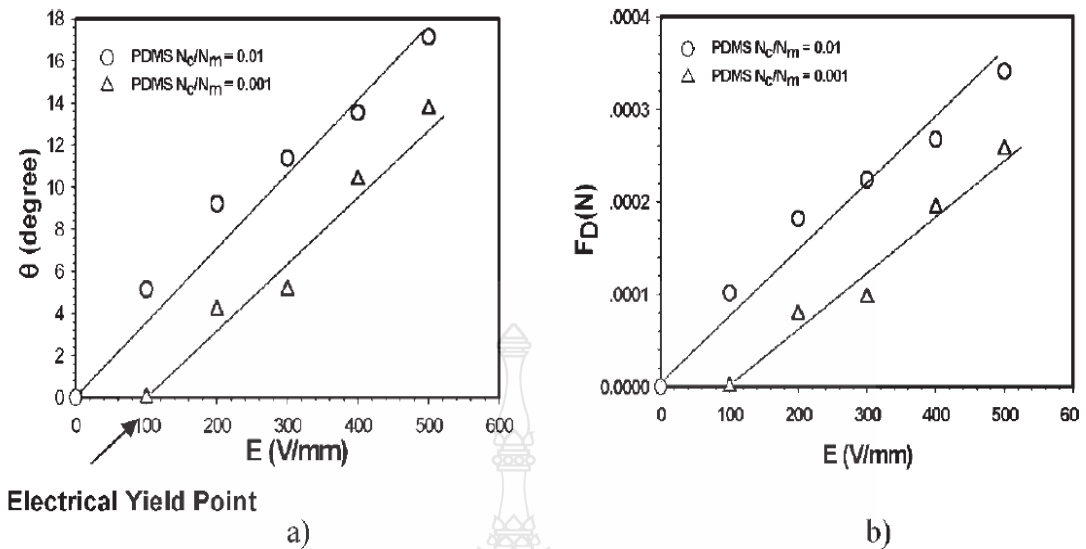


รูปที่ 2.46 Tensile stress (s) และ strain (e) ของเจลาตินแห้งและฟิล์ม RGO/Gel [43]

Sumonman และคณะ ศึกษาการตอบสนองทางกลไฟฟ้าของการเชื่อมขวาง โพลีไดเมทิลไซล๊อกเซน polydimethylsiloxane ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง คุณสมบัติทางกลไฟฟ้าของเจล PDMS ถูกวัดภายใต้โหมดคลื่นแบบสั้นที่อุณหภูมิของ 27 °C เพื่อกำหนดผลของอัตราส่วนการเชื่อมขวางและความแรงของสนามไฟฟ้า ค่า storage modulus  $G'$  ของเจล PDMS เพิ่มขึ้นเชิงเส้นด้วยความหนาแน่นของการเชื่อมขวางแต่ไม่ใช่เชิงเส้นด้วยสนามไฟฟ้า การเพิ่มขึ้นของ Storage Modulus ด้วยความหนาแน่นของสารเชื่อมขวางเกิดจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนจุดเชื่อมแต่ละเส้น ด้วยเพิ่มความแรงของสนามไฟฟ้า Storage Modulus เพิ่มขึ้นเมื่อไฟฟ้าสนามทำให้เกิดโมเมนต์ไดโพลที่สร้างแรงไฟฟ้าสถิตภายในเมทริกซ์ เจลที่มีอัตราส่วนการเชื่อมขวาง 0.01 ให้ค่าดีที่สุด  $G'$  41% ที่แรงดันไฟฟ้า 2 kV/mm และได้ทดสอบการตอบสนองต่อการโค้งงอของฟิล์ม PDMS แขนงอยู่ในน้ำมันซิลิโคนระหว่างอิเล็กโทรดทองแดง [44]



รูปที่ 2.47 การเบี่ยงเบนของฟิล์ม PDMS ( $N_c/N_m=0.01$ ) ของความแรงของสนามไฟฟ้า [44]

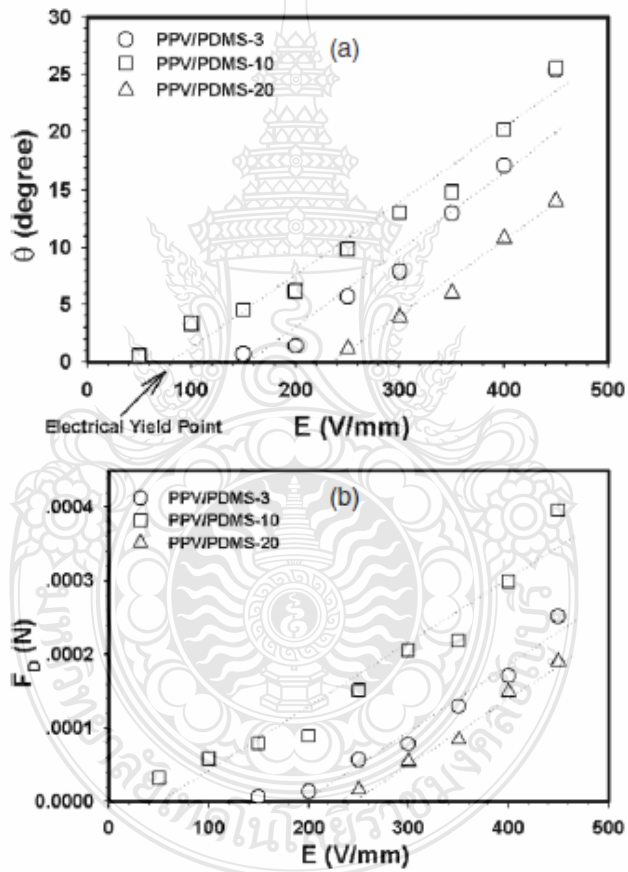


รูปที่ 2.48 a) มุมที่มีการบิดงอ  $\theta$  b) แรงอิเล็คโทรโฟรีซิส  $F_D$  เทียบกับสนามไฟฟ้าของฟิล์ม PDMS ที่อัตราสารเชื่อมขวาง 0.01 และ 0.001 [44]

Sumonman และคณะ ศึกษาแรงอิเล็คโทรโฟรีซิสและการโค้งตัวของพอลิเมอร์ผสมอิเล็คโทรแอคทีฟ (p-phenylene vinylene)/polydimethylsiloxane ผลกระทบของเศษส่วนปริมาตร p-phenylene vinyleneและความแรงของสนามไฟฟ้าบนคุณสมบัติทางไฟฟ้า และการโค้งตัวของพอลิเมอร์ผสม (p-phenylene vinylene)/polydimethylsiloxane (PPV/PDMS) คุณสมบัติทางไฟฟ้าของการผสม PPV / PDMS ถูกวัดภายใต้แรงเฉือนแบบสั่นที่อุณหภูมิ 27 °C ในการประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้า Storage Modulus Response  $G'$  เพิ่มขึ้นระหว่าง 7 และ 50% ขึ้นอยู่กับเศษส่วนปริมาตร PPV ที่ความแรงของสนามไฟฟ้ามีค่าระหว่าง 0 ถึง 2 kV mm<sup>-1</sup> ความเครียดที่เกิดขึ้นเกิดจากอนุภาค PPV โพลาริซที่เหนี่ยวนำซึ่งนำไปสู่ปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ฟิล์ม PPV/PDMS แขนงอยู่ในน้ำมันซิลิโคนระหว่างอิเล็คโทรดทองแดง ตอบสนองด้วยการเบี่ยงเบนอย่างรวดเร็วไปยังขั้วบวก เมื่อไม่ให้สนามไฟฟ้า ฟิล์ม PPV/PDMS เกือบจะอยู่ในตำแหน่งเดิมเนื่องจาก แรงโน้มถ่วง ความยืดหยุ่นและความสามารถในการย้อนกลับของ PPV แบบโพลาริซของอนุภาค ดังนั้นระบบ PPV/PDMS เป็นระบบโค้งงอที่ย้อนกลับได้ [6]



รูปที่ 2.49 การเบี่ยงเบนของฟิล์มตามความแรงของสนามไฟฟ้า [6]



รูปที่ 2.50 a) มุมที่มีการบิดงอ b) แรงอิเล็คโตรโฟรีซิส  $F_D$  เทียบกับสนามไฟฟ้าของฟิล์ม PPV/PDMS [6]

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

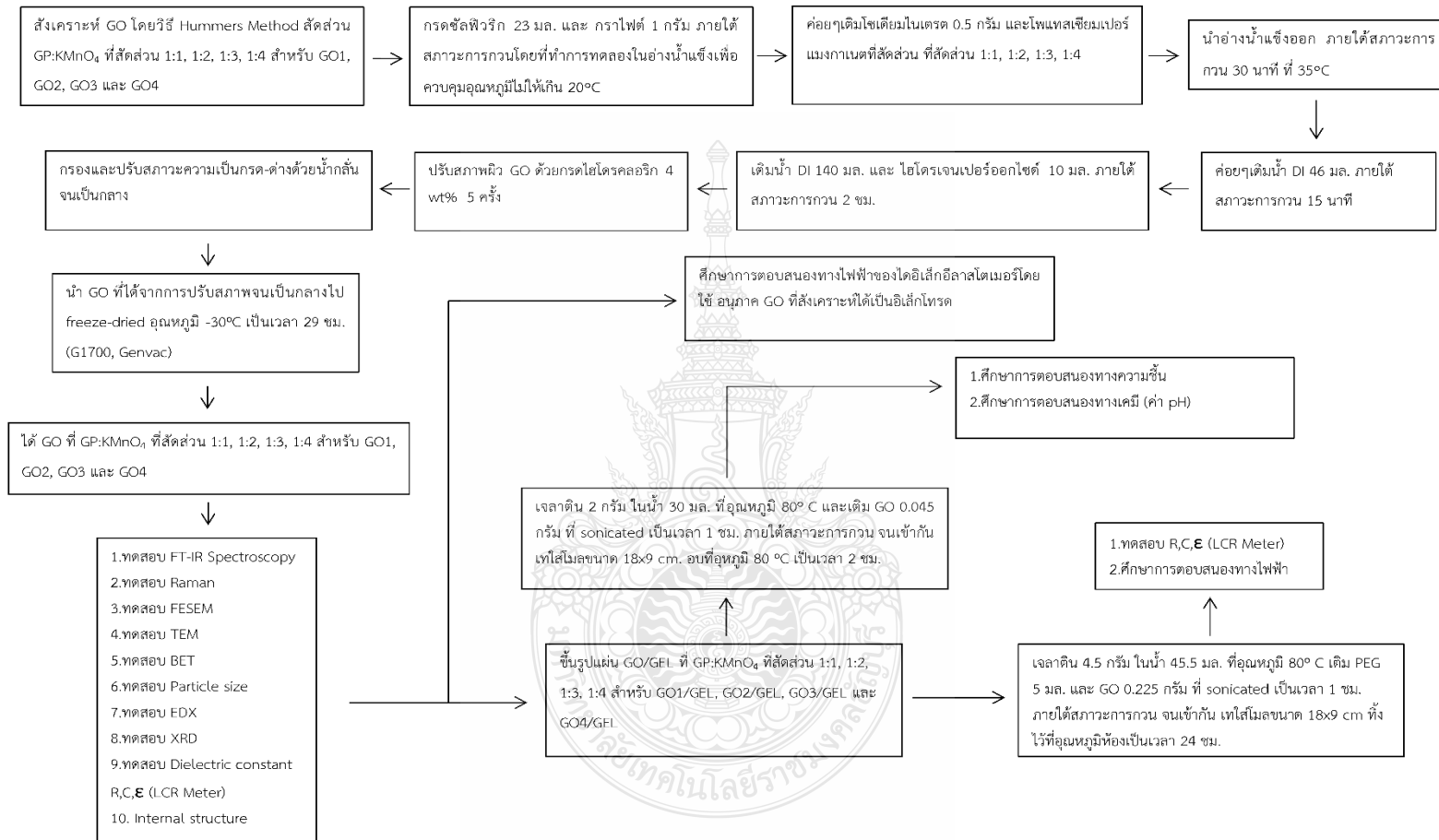
เพื่อเตรียมวัสดุตอบสนองต่อสิ่งเร้าภายนอกจากวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) สำหรับประยุกต์ใช้ในงานเป็นวัสดุตอบสนองต่อสิ่งเร้าภายนอก ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ (GO) โดยวิธี Hummers method โดยศึกษาสัดส่วนของกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 สำหรับ GO1, GO2, GO3 และ GO4 ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังศึกษาสภาวะที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) สำหรับ GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL ตามลำดับ ศึกษาการตอบสนองทางไฟฟ้าและสิ่งเร้าภายนอกอื่นต่อสมบัติเชิงกล (การตอบสนองต่อความชื้นและที่ค่า pH ต่างๆ) ของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) รวมถึงการขึ้นรูปต้นแบบอุปกรณ์อัตโนมัติที่ตอบสนองต่อสิ่งเร้าเพื่อเป็นพื้นฐานต่อยอดในการพัฒนาอุปกรณ์อัตโนมัติที่ควบคุมด้วยสิ่งเร้าในอนาคต

#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย







รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ การขึ้นรูปตัวกระตุ้นและการนำไปทดสอบต่างๆ

## 3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

### 3.2.1 อุปกรณ์

3.2.1.1 ปีกเกอร์

3.2.1.2 กระจกบอทวง

3.2.1.3 ขวดปริมาตร ขนาด 1000 ml

3.2.1.4 Magnetic stirrer และ Magnetic bar

3.2.1.5 เครื่องชั่งสาร

3.2.1.6 Vacuum Pump

3.2.1.7 Thermometer

3.2.1.8 Filter Papers

3.2.1.9 Power supply

3.2.1.10 Copper electrode

3.2.1.11 กล่องอะคริลิกใส

3.2.1.12 Aluminum tape

3.2.1.13 VHB 4910

3.2.1.14 Plastic ring frame

3.2.1.15 แปรงทาสีขนนุ่ม

3.2.1.16 กล่องควบคุมความชื้น

3.2.1.17 เครื่องให้ความชื้น

### 3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

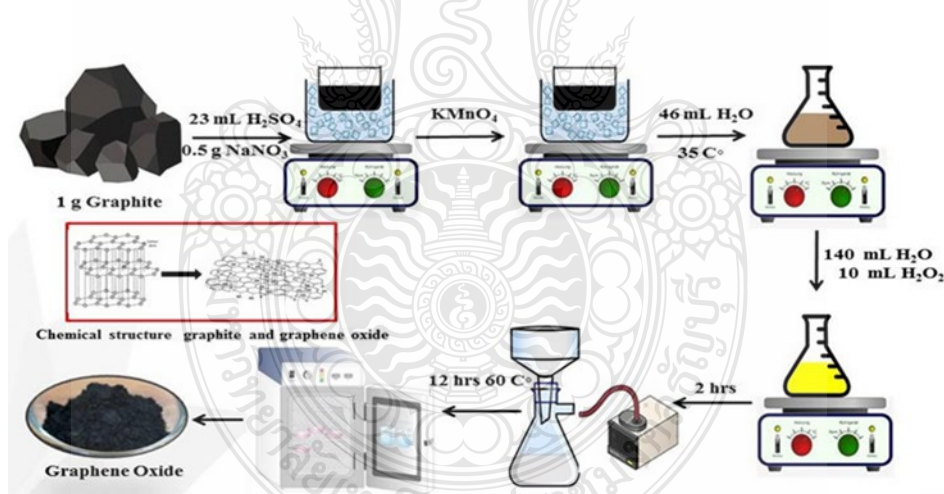
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี	เกรด	บริษัท	หน้าที่
Graphite powder < 20 $\mu\text{m}$ synthetic	AR	Sigma Aldrich (USA)	สารตั้งต้นสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์
Sulfuric acid AR, $\geq 98\%$	AR	Vetec Quimica Fina Ltda	สังเคราะห์กราฟีนออกไซด์
Potassium permanganate $\text{KMnO}_4$ = 158.03	AR	Ajax Finechem Pty Ltd	สังเคราะห์กราฟีนออกไซด์
Sodium nitrite 99%	AR	Loba Chemie Pvt Ltd	สังเคราะห์กราฟีนออกไซด์
Hydrogen peroxide 100 volumes >30% w/v	AR	Fisher Scientific UK	สังเคราะห์กราฟีนออกไซด์
Hydrochloric acid 35.4%	AR	Loba Chemie Pvt Ltd	ปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง
Gelatin	AR	ACROS	ขึ้นรูปแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล
Poly(ethylene glycol)	AR	Sigma Aldrich (USA)	ช่วยทำให้แผ่นฟิล์มอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่น
Silicone Oil, 200 Fluid 350CS	AR	Ajax Finechem Pty Ltd	ใช้ในการทดสอบการบิดงอ
สารมาตรฐาน pH 4	AR	InLab Storage Solution	ทดสอบการตอบสนองต่อ pH
สารมาตรฐาน pH 7	AR	InLab Storage Solution	ทดสอบการตอบสนองต่อ pH
สารมาตรฐาน pH 9	AR	InLab Storage Solution	ทดสอบการตอบสนองต่อ pH

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ (GO) และการทดสอบสมบัติต่างๆ

เตรียมกรดซัลฟิวริก 23 มิลลิลิตร และกราไฟต์ 1 กรัม ใส่รวมกันในบีกเกอร์ภายใต้สภาวะการกวนโดยที่ทำการทดลองในอ่างน้ำแข็งเพื่อควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 20°C หลังจากนั้นค่อยๆเติมโซเดียมไนเตรตปริมาณ 0.5 กรัม ลงในบีกเกอร์และที่สัดส่วนของกราไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 (GO1, GO2, GO3 และ GO4) ตามลำดับ เมื่อเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตแล้วนำอ่างน้ำแข็งออก ภายใต้สภาวะการกวน 30 นาที ที่ 35°C ค่อยๆเติมน้ำ DI 46 มิลลิลิตร ภายใต้สภาวะการกวน 15 นาที และเติมน้ำ DI 140 มิลลิลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 มิลลิลิตร ภายใต้สภาวะการกวน 2 ชั่วโมง สีของสารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอมเหลืองทำการปรับสภาพผิวกราฟีนออกไซด์ (GO) ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 4 wt% จำนวน 5 ครั้งและปรับสภาวะความเป็นกรด-ด่างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง นำกราฟีนออกไซด์ (GO) ที่ได้ไปทำให้แห้งโดยการฟรีชตาย ที่ อุณหภูมิ -30°C เป็นเวลา 29 ชั่วโมง



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ (GO)

3.3.1.1 การวิเคราะห์สมบัติของกราฟีนออกไซด์ (GO) ที่สังเคราะห์ได้ การวิเคราะห์โครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ (GO) ที่สังเคราะห์ได้โดย ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของกราฟีนออกไซด์ (GO) ที่สังเคราะห์ได้ ที่สัดส่วนต่างๆ ระหว่างกราไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>)

โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR spectroscopy (PerkinElmer, model Spectrum Two, PerkinElmer, Inc., Waltham, MA, USA) และ Raman Spectroscopy (RAM II FT-Raman Module, Bruker) ศึกษาลักษณะทางกายภาพของกราฟีนออกไซด์ (GO) ที่สังเคราะห์ได้ โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง field emission scanning electron microscope (FE-SEM Zeiss AURIGA FE-SEM/FIB/EDX, A Carl Zeiss SMT AG Company, Oberkochen, Germany) และ Transmission Electron Microscopy (TEM G2 20 200 kV TEM/STEM/EDX/Tomography, FEI Tecnai) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง energy dispersive X-ray diffraction (EDX JEOL JSM 7800F) การศึกษาโครงสร้างผลึกของกราฟีนออกไซด์ (GO) ที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-Ray Diffractometer (XRD) (X'Pert PRO MPD model pw3040/60, PANalytical) ศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างวิเคราะห์โดยเครื่อง Brunauer-Emmett-Teller (BET Bel-Japan/Bel sorp mini II) ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า สภาพความนำไฟฟ้า ความต้านทาน ความจุไฟฟ้า โดย LCR Meter (LCR-8101G GW INSTRON) และศึกษาโครงสร้างภายในของวัสดุเพื่อแสดงลักษณะการกระจายตัวของกราฟีนออกไซด์ (GO) ในแผ่นวัสดุผสมโดย Synchrotron radiation X-ray Tomographic Microscopy (SRXTM) (Synchrotron Light Research Institute, Nakhon Ratchasima, Thailand)

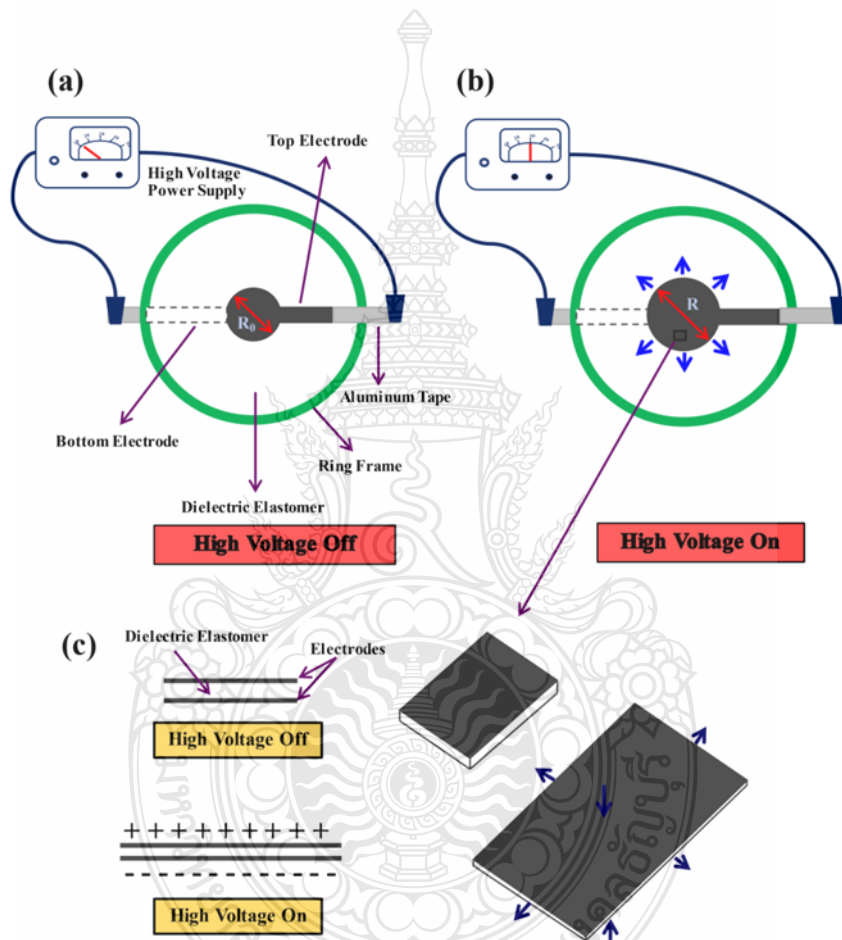
### 3.3.2 การทดสอบการตอบสนองทางไฟฟ้า

#### 3.3.2.1 การทดสอบการตอบสนองทางไฟฟ้าเชิงเส้นวงกลม

เพื่อทดสอบสมบัติการตอบสนองทางไฟฟ้าของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้เป็นอิเล็กโทรดของการตอบสนองทางไฟฟ้าเชิงเส้นวงกลมของวัสดุไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ กราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากสัดส่วนของกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 (GO1, GO2, GO3 และ GO4) ต่างๆ ถูกนำมาทดสอบ

วัสดุซิลิโคน VHB 4910 ถูกเลือกใช้เป็นไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ต้นแบบ โดยทำการยึด VHB 4910 300% ซึ่งบวมริงเฟรม และทำการประกบโมลทั้งด้านบนและด้านล่างของ VHB4910 ที่ซึ่งบวมริงเฟรม (โมลมีเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 60 มิลลิเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 15 มิลลิเมตร โดยมีเส้นทางเชื่อมกันระหว่างสองวงดังแสดงในรูปที่ 3.3 (a)) จากนั้นนำอนุภาค GO ระบายบวมริงเฟรมทั้งด้านบนและด้านล่าง (ทำหน้าที่อิเล็กโทรด) จากนั้นนำโมลออก และใช้ลูมิเนียมเทปเป็นทางเดินของ

สนามไฟฟ้าติดด้านบนและล่างลักษณะตรงข้ามกัน เมื่อให้สนามไฟฟ้าบริเวณที่ระบาย GO จะเกิดการบีบอัดทำให้ความหนาลดลงและเกิดการขยายตัวในแนวระนาบ เมื่อไม่ให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกจะกลับสู่สภาพเดิมโดยที่ไม่ทำให้เกิดการเสียรูป ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ทำการบันทึกด้วยวิดีโอคอล full hd (A327, KER) และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image J (version 1.52a, National Institutes of Health, Maryland, MD, USA)

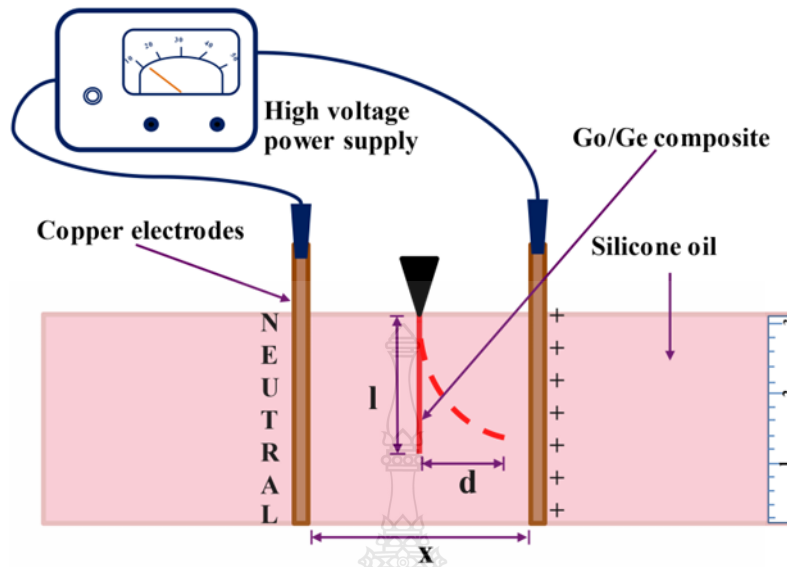


รูปที่ 3.3 การทดสอบการตอบสนองทางไฟฟ้าเชิงเส้นวงกลมของไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์โดยใช้ อนุภาค กราฟีนออกไซด์ GO ที่เป็นอิเล็กโทรด

3.3.2.2 การทดสอบการตอบสนองทางไฟฟ้าการบิดงอของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจล และกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL)

3.3.2.2.1 การเตรียมวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) สำหรับทดสอบการตอบสนองต่อสิ่งเร้าภายนอก การขึ้นรูปวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) โดยศึกษาสัดส่วนของกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 (GO1, GO2, GO3 และ GO4) ของ GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL เพื่อนำไปศึกษาการตอบสนองทางไฟฟ้า โดยละลายเจลาติน 4.5 กรัม ในน้ำ 45.5 มิลลิลิตร โดยใช้อุณหภูมิ 80°C หลังจากนั้นเติม Poly(ethylene glycol) 200 5 มิลลิลิตร และกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 (GO1, GO2, GO3 และ GO4) ที่ sonicated เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 0.225 กรัม ภายใต้สภาวะการกวน จนเข้ากัน จากนั้น เทใส่โมลที่มีขนาด 18 x 9 เซนติเมตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3.2.2.2 การทดสอบการบิดงอของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) เพื่อทดสอบการตอบสนองทางไฟฟ้าของวัสดุผสมที่ขึ้นรูปได้ เป็นการศึกษาความยืดหยุ่นและการตอบสนองทางไฟฟ้าของวัสดุเมื่อถูกกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าจากภายนอกโดยที่วัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) ขนาด 5x18 มิลลิเมตร ถูกแขวนอยู่ในน้ำมันซิลิโคนซึ่งอยู่ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดทองแดงที่ระยะ 4, 6, 8 และ 10 เซนติเมตร และให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกที่ความแรงของสนามไฟฟ้าที่ E=0-400 V/mm จะเกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าทำให้วัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) มีการบิดงอและเมื่อไม่ให้นำสนามไฟฟ้าจะกลับสู่ตำแหน่งเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ทำการบันทึกด้วยวิดีโอคอล full hd (A327, KER) และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image J (version 1.52a, National Institutes of Health, Maryland, MD, USA)



รูปที่ 3.4 การทดสอบการตอบสนองทางไฟฟ้าวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) ที่สัดส่วนของกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่ สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 (GO1, GO2, GO3 และ GO4) ของ GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL

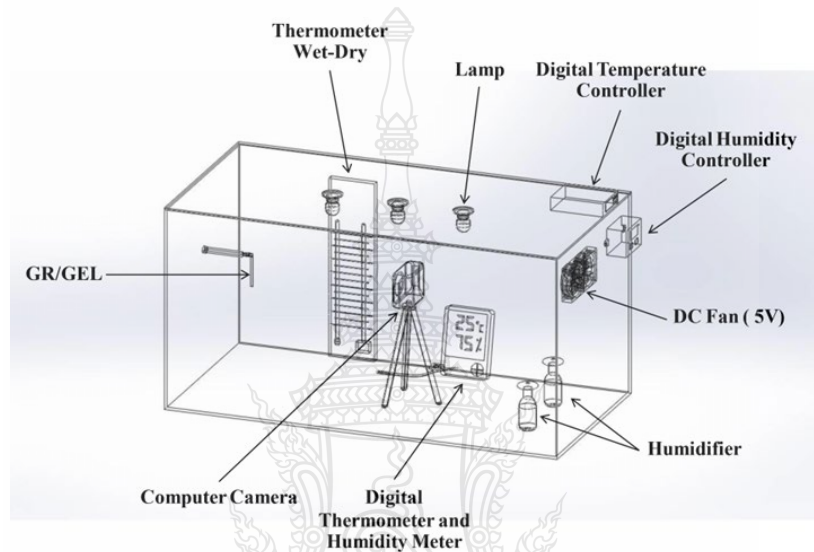
### 3.3.3 การทดสอบการตอบสนองต่อความชื้นและการตอบสนองต่อเคมี

3.3.3.1 ขึ้นวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) โดยศึกษา สัดส่วนของกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 (GO1, GO2, GO3 และ GO4) ของ GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL เพื่อนำไปศึกษาการตอบสนองทางความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่ในช่วง 80-85% ที่ 37°C โดยละลายเจลาติน 2 กรัม ใน น้ำ 30 มิลลิลิตร โดยใช้อุณหภูมิ 80° C จากนั้นเติมกราฟีนออกไซด์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 ที่ sonicated เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะการกวน จนเข้ากัน 0.045 กรัม จากนั้น เทใส่โมลที่มีขนาด 18 x 9 เซนติเมตร อบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

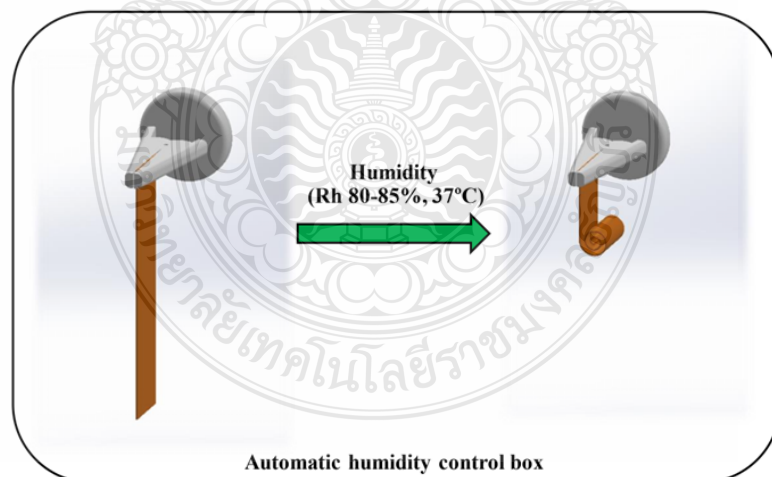
3.3.3.2 การทดสอบการตอบสนองทางความชื้นของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) โดยศึกษาสัดส่วนของกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 (GO1, GO2, GO3 และ GO4) ของ GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL โดยวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) ขนาด 5 มิลลิเมตร x 40



มิลลิเมตร x 0.057 มิลลิเมตร ถูกหนีบแนวดิ่งในกล่องควบคุมความชื้นอัตโนมัติที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่ในช่วง 80-85% ที่ 37°C เมื่อให้ความชื้นวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) มีลักษณะม้วนเป็นวงกลมหลายรอบและเมื่อไม่ให้ความชื้นจะกลับสู่สภาพเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ทำการบันทึกด้วยวิดีโอคอล full hd (A327, KER) และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image J (version 1.52a, National Institutes of Health, Maryland, MD, USA)



รูปที่ 3.5 กล่องควบคุมความชื้นอัตโนมัติ



รูปที่ 3.6 การตอบสนองต่อความชื้นของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) ที่สัดส่วนของกราฟีนต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 (GO1, GO2, GO3 และ GO4) ของ GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL

3.3.3.3 การทดสอบการตอบสนองต่อทางเคมีของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) ที่สัดส่วนของกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 (GO1, GO2, GO3 และ GO4) ของ GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL โดยวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) ขนาด 5 มิลลิเมตร x 40 มิลลิเมตร x 0.057 มิลลิเมตร ถูกวางในงานเพาะเชื้อและหยดด้วยสารละลาย Fe<sup>+</sup> 30 ไมโครลิตร จะเกิดการม้วนตัว และเมื่อหยดสารละลาย EDTA 30 ไมโครลิตร จะกลับสู่สภาพเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ทำการบันทึกด้วยวิธีไอคอลล full hd (A327, KER) และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image J (version 1.52a, National Institutes of Health, Maryland, MD, USA)

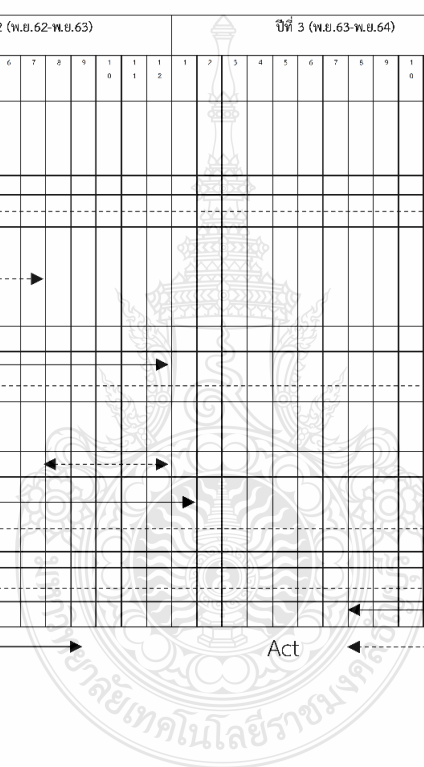


รูปที่ 3.7 การตอบสนองทางเคมีของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) ที่สัดส่วนของกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 (GO1, GO2, GO3 และ GO4) ของ GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL

### 3.4 ระยะเวลาทำการวิจัยและแผนการดำเนินงานการวิจัย

ตารางที่ 3.2 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

การดำเนินงานวิจัย	ปีที่ 1 (พ.ย.61-พ.ย.62)											ปีที่ 2 (พ.ย.62-พ.ย.63)											ปีที่ 3 (พ.ย.63-พ.ย.64)											ปีที่ 4 (พ.ย.64-พ.ย.65)											ปีที่ 5 (พ.ย.65-พ.ย.66)																																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																		
1.การเตรียมวัสดุ / สารเคมี / อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	←→																																																																													
2.ค้นหางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←→																																																																													
3.สังเคราะห์สารพิน ออกไซด์ ทดสอบสมบัติทางกายภาพ, สมบัติทางเคมีและสมบัติทางไฟฟ้า																																																																														
4.สอบวัดคุณสมบัติ	←→																																																																													
5.ขึ้นรูปวัสดุผสม GO/GEL																																																																														
6.ส่งบทความประชุมวิชาการระดับนานาชาติ																																																																														
7.สอนหัวข้องานวิจัย																																																																														
8.ทดสอบการตอบสนองทางไฟฟ้า, ทางความชื้นและทางเคมี																																																																														
9.วิเคราะห์ผลและส่งตีพิมพ์																																																																														
10.สอบคุชคู่มือ																																																																														



Plan ←→ Act ←→

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

วัสดุฉลาด (Smart material) เป็นวัสดุที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ขนาด สมบัติบางประการเมื่อมีสิ่งเร้าจากภายนอก เช่น กระแสไฟฟ้า ความชื้น ความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งวัสดุฉลาดนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์เซนเซอร์ แอคทูเอเตอร์ ระบบควบคุมการปล่อยยาผ่านผิวหนัง

ไฮโดรเจล (Hydrogel) นั้นเป็นวัสดุที่มีสมบัติที่โดดเด่นได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก มีสมบัติในการดูดซับน้ำได้สูงถึง 600 เท่าของน้ำหนักตัวเองและยอมให้โมเลกุลต่างๆสามารถแพร่ผ่านได้ สามารถเกิดการบวมตัวและการหดตัวอย่างเหมาะสม ดังนั้นจึงเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการศึกษาสำหรับการพัฒนาวัสดุฉลาดในงานวิจัยนี้ เจลาติน (Gelatin) ถูกเลือกเป็นวัสดุหลักในการศึกษาการตอบสนองต่อสิ่งเร้าจากภายนอก เนื่องจากเจลาตินเป็นไฮโดรเจลจากวัสดุจากธรรมชาติ สามารถเตรียมได้จากการสลาย คอลลาเจนของเนื้อเยื่อใน หนัง เอ็น และกระดูกของสัตว์ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพของมนุษย์

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองต่อสิ่งเร้าจากภายนอกของเจลาตินในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคกราฟีนออกไซด์ (GO) และศึกษาผลของการตอบสนองต่อสิ่งเร้าภายนอก เช่น ทางไฟฟ้า ความชื้นและทางเคมี ของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) โดยมีรายละเอียดดังนี้

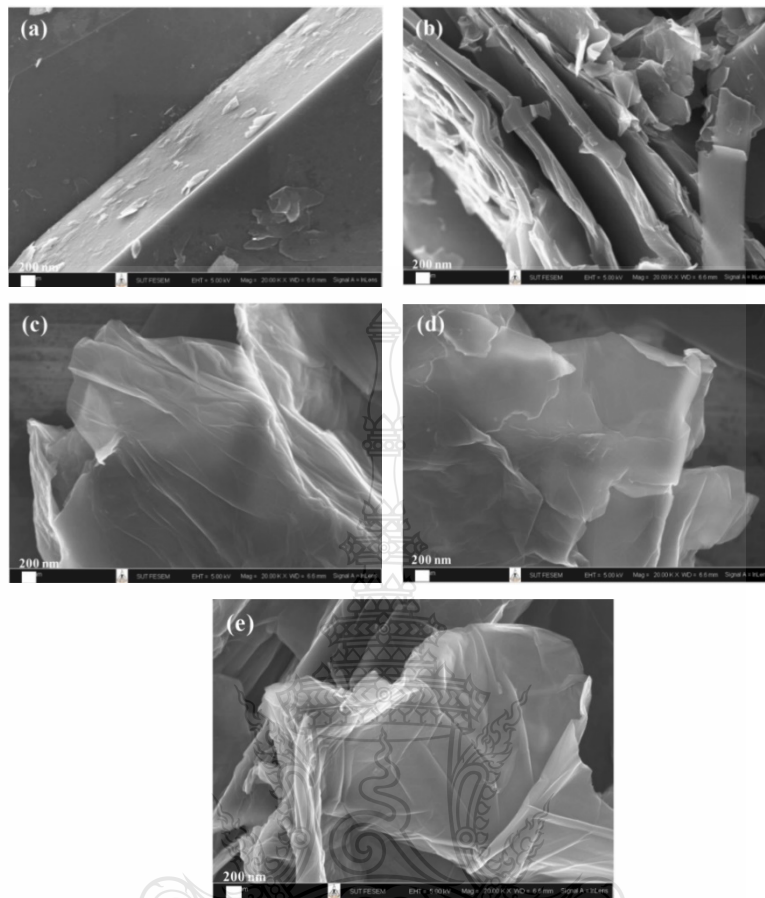
#### 4.1 การศึกษาผลของสัดส่วนกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตต่อสมบัติของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

งานวิจัยนี้สังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ด้วยวิธี Hummers method เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมของการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ กราฟีนออกไซด์ถูกสังเคราะห์ที่สัดส่วนกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 สำหรับ GO1, GO2, GO3 และ GO4 ตามลำดับ และทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี สมบัติทางไฟฟ้าของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1.1 สมบัติทางกายภาพของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

4.1.1.1 สัณฐานวิทยาของกราฟีนออกไซด์ การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ที่สัดส่วนของกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 สำหรับ GO1, GO2, GO3 และ GO4 ศึกษาลักษณะพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ โดยวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM Zeiss AURIGA FE-SEM/FIB/EDX, A Carl Zeiss SMT AG Company, Oberkochen, Germany) ดังแสดงในรูปที่ 4.1(a)-(e) รูปที่ 4.1(a) แสดงลักษณะพื้นผิวของ GP ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นหนาซ้อนกันหลายชั้น ความหนาของแผ่นประมาณ 1 ไมโครเมตร รูปที่ 4.1(b) แสดงลักษณะพื้นผิวของ GO1 สังเกตเห็นได้ว่าการแตกและลอกออกเป็นแผ่นที่บางลงกว่า GP รูปที่ 4.1(c)-(e) แสดงลักษณะพื้นผิวของ GO2, GO3 และ GO4 ตามลำดับ พบว่าเป็นแผ่นนาโนซีทที่มีขนาดความหนาประมาณ 1-40 nm. การหลุดลอกของกราฟไฟต์เกิดการแยกตัวแตกออกและหลุดเป็นชั้นๆ เมื่อสัดส่วน GP/KMnO<sub>4</sub> เพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่รุนแรงกว่า เมื่อระดับการแยกตัวแตกออกของ GP เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดชั้นบาง ๆ ของ GO ออกมา [41, 45-47]

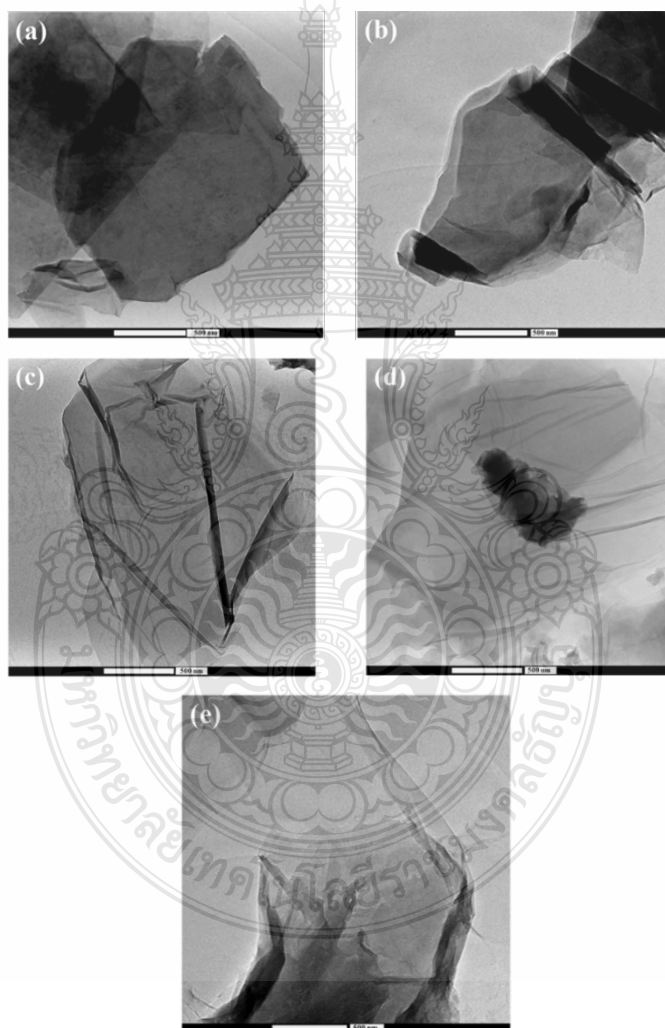




รูปที่ 4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของกราฟไฟต์และกราฟีนออกไซด์: (a) GP, (b) GO1, (c) GO2, GO3, และ (e) GO4 วิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยวิเคราะห์ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM G2 20 200kV TEM/STEM/EDX/Tomography, FEI Tecnai) ดังแสดงใน รูปที่ 4.2(a)-(e) รูปที่ 4.2 (a) แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ GP สังเกตได้ชัดเจนว่ามีพื้นที่สีดำทึบซึ่งแสดงว่า GP มีลักษณะเป็นก้อนซ้อนกันหลายๆ ชั้นมีขนาดความหนาของแต่ละชั้นประมาณ 50-100 nm. รูปที่ 4.2 (b) แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ GO1 มีการแตกตัวเป็นชั้นบางๆมากกว่า GP ในแต่ละชั้นมีความหนาประมาณ 10-50 nm. รูปที่ 4.2 (c) แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ GO2 พื้นที่โปร่งแสงมากแสดงถึงการซ้อนกันเป็นชั้นที่น้อยลงหรือไม่มีเลย มีความหนาของแต่ละชั้นเป็นระดับเป็นนาโน และมีขนาดความหนา

ประมาณ 2-10 nm. รูปที่ 4.2 (d) แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ GO3 พบว่าการซ้อนเป็นชั้นของกราฟีนออกไซด์มากกว่า GO2 ดังแสดงได้จากพื้นที่ที่มีบางส่วนที่มีสีดำ มีขนาดความหนาในแต่ละชั้นประมาณ 2-10 nm. และรูปที่ 4.2 (e) แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ GO4 มีการแยกเป็นชั้นเดี่ยว บางๆบริเวณขอบมีการซ้อนทับหลายชั้น มีขนาดความหนาในแต่ละชั้นประมาณ 10-30 nm. ความแรงของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นอยู่กับสัดส่วนของ GP/KMnO<sub>4</sub> ซึ่งทำให้การแยกตัวจากกราฟไฟต์เป็นแผ่นที่บางๆมากขึ้นเมื่อสัดส่วนของ GP/KMnO<sub>4</sub> เพิ่มขึ้น [41, 47-49 ]



รูปที่ 4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของกราฟไฟต์และกราฟีนออกไซด์ : (a) GP, (b) GO1, (c) GO2, GO3, และ (e) GO4 วิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

4.1.1.2 พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของอนุภาคของกราฟีนออกไซด์ พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของอนุภาค วิเคราะห์โดยเครื่อง Brunauer-Emmett-Teller (BET Bel-Japan/Bel sorp mini II) พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $A_p$ ), ขนาดของรูพรุน ( $D_p/\text{peak}$ ), ปริมาตรของรูพรุน ( $V_p$ ) และขนาดของอนุภาค ของกราฟีนออกไซด์ แสดงในตารางที่ 4.1 จากตารางจะเห็นได้ว่า พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $A_p$ ) และ ปริมาตรของรูพรุน

( $V_p$ ) ของ GO1, GO2 และ GO3 มีค่ามากกว่า GP และ GO2 มีพื้นที่ผิวจำเพาะและ ปริมาตรของรูพรุนมากที่สุด ( $218.453 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$  และ  $21.38 \times 10^{-2} \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ ) ขนาดของอนุภาค GO1, GO2, GO3 และ GO4 มีขนาดเล็กกว่า GP ซึ่ง GO2 มีขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดและพื้นที่ผิวจำเพาะของ GO2 สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก เมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดซ์ปฏิกิริยาออกซิเดชันรุนแรงขึ้นทำให้เกิดการหลุดลอกผิวที่สูงขึ้นและขนาดอนุภาค GO ก็จะมีขนาดลดลง เมื่อปริมาณสารออกซิไดซ์ มากเกินไป (GO3 และ GO4) เนื่องจากการรวมตัวกัน/รวมกลุ่มและการทับซ้อนกันของแผ่นบางส่วนการ หลุดลอกผิวจะลดลงทำให้ขนาดของอนุภาคของ GO ใหญ่ขึ้น [50-54]

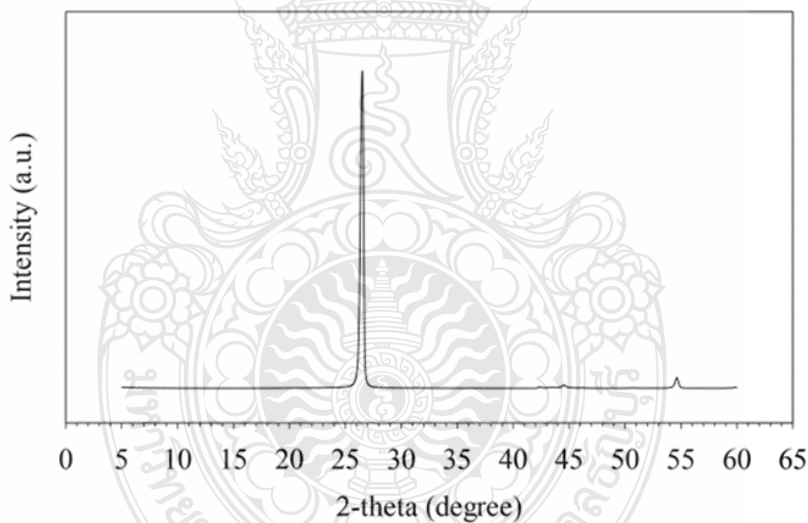
ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของอนุภาค GO

Sample	Particle size( $\mu\text{m}$ )	BET		
		$V_p[\text{cm}^3\text{g}^{-1}]$	$A_p[\text{m}^2\text{g}^{-1}]$	$D_p/\text{peak} [\text{nm}]$
GP	$17.41 \pm 0.72$	$6.78 \times 10^{-2}$	7.682	2.43
GO1	$12.97 \pm 0.37$	$7.42 \times 10^{-2}$	34.971	2.43
GO2	$3.32 \pm 0.24$	$21.38 \times 10^{-2}$	218.453	2.43
GO3	$3.89 \pm 0.41$	$20.14 \times 10^{-2}$	186.879	3.32
GO4	$4.46 \pm 0.52$	$16.92 \times 10^{-2}$	134.293	3.32

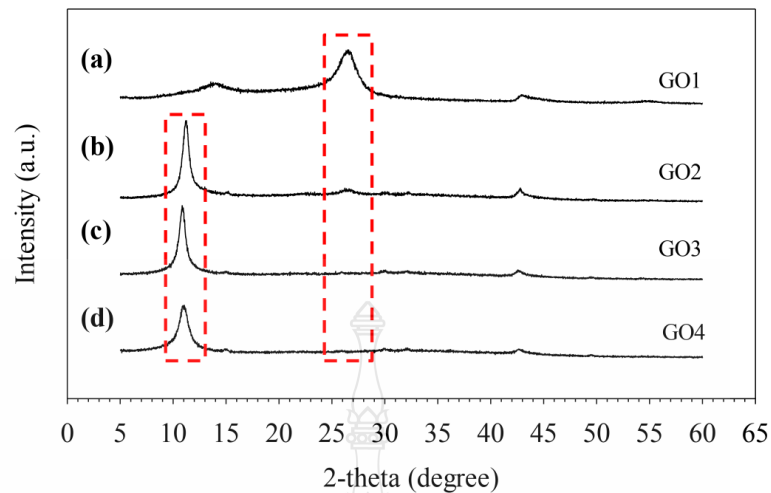
4.1.1.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ที่สัดส่วนของ กราไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $\text{GP}:\text{KMnO}_4$ ) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 สำหรับ GO1, GO2,



GO3 และ GO4 เพื่อยืนยันเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-Ray Diffractometer (XRD) (X'Pert PRO MPD model pw 3040/60, PANalytical) แสดงในรูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างผลึกของกราฟไฟต์แสดงการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $27^\circ$  และเมื่อกราฟไฟต์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเปลี่ยนเป็นกราฟีนออกไซด์โครงสร้างผลึกแสดงการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $11^\circ$  และเมื่อสัดส่วน GP:KMnO<sub>4</sub> เพิ่มขึ้นการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $27^\circ$  ลดลงและหายไป แสดงในรูปที่ 4.4 (a)-(d) GO1 แสดงการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง  $15^\circ$  และ  $27^\circ$  ซึ่งยังมีลักษณะคล้ายกราฟไฟต์ ส่วน GO2, GO3 และ GO4 แสดงการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่งที่  $11^\circ$  มีลักษณะความเป็นกราฟีนออกไซด์ สำหรับความเป็นผลึก GO1 มีความเป็นผลึกต่ำที่สุดและ GO2 มีความเป็นผลึกสูงที่สุด เนื่องจากผลของสัดส่วน GP:KMnO<sub>4</sub> ที่เหมาะสม โครงสร้างผลึกใหม่ของ GO ค่อยๆเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์และลดลงเมื่อความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์มากเกินไป [55-60]



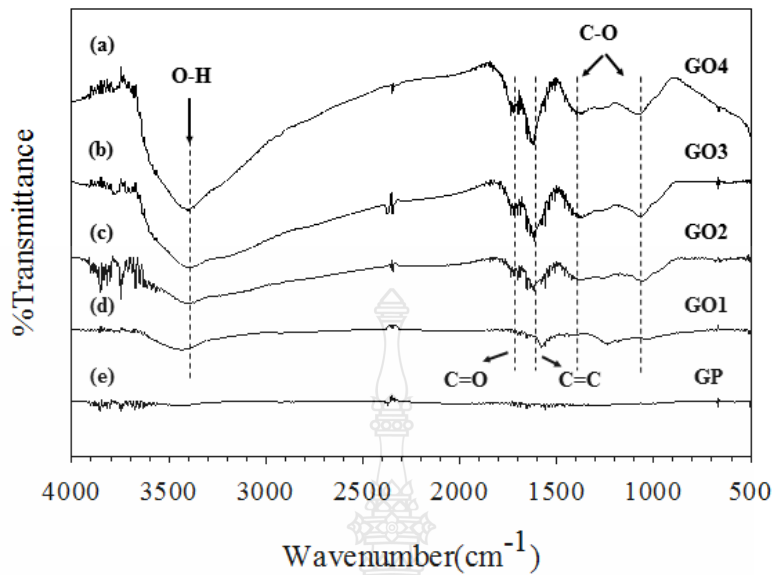
รูปที่ 4.3 โครงสร้างผลึกของ GP



รูปที่ 4.4 โครงสร้างผลึกของ (a) GO1, (b) GO2, (c) GO3, และ (d) GO4

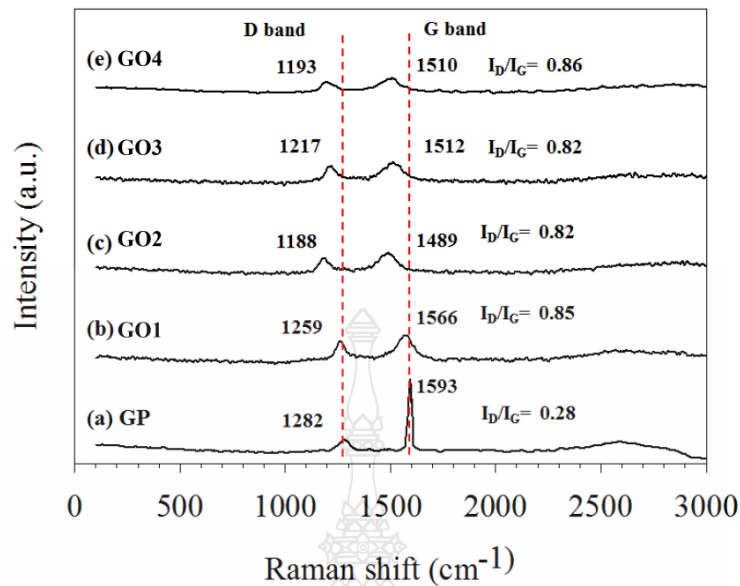
#### 4.1.2 สมบัติทางเคมีของกราฟีนออกไซด์

4.1.2.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ที่สัดส่วนของกราฟีนต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 สำหรับ GO1, GO2, GO3 และ GO4 โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR spectroscopy (PerkinElmer, model Spectrum Two, PerkinElmer, Inc., Waltham, MA, USA) แสดงในรูปที่ 4.5 (a)-(e) จากภาพแสดงให้เห็นว่ากราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีพีคเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 3050–3800 cm<sup>-1</sup>, 1720 cm<sup>-1</sup>, 1600-1650 cm<sup>-1</sup>, 1410 cm<sup>-1</sup> and 1080 cm<sup>-1</sup> ซึ่งตรงกับหมู่ฟังก์ชัน O-H stretching, carboxyl C=O stretching, aromatic C=C peak, O-H deformation และ C-O stretching และพบว่า GO2 มีพีคที่มีลักษณะกว้างและเด่นชัด เนื่องจากเมื่อสัดส่วน GP:KMnO<sub>4</sub> นั้นเพิ่มขึ้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้น จาก O-H stretching ที่กว้างและเด่นชัดขึ้นตามสัดส่วน GP:KMnO<sub>4</sub> ที่เพิ่มขึ้น [48, 61-65]



รูปที่ 4.5 หมู่ฟังก์ชัน: (a) GO4, (b) GO3, (c) GO2, (d) GO1, และ (e) GP

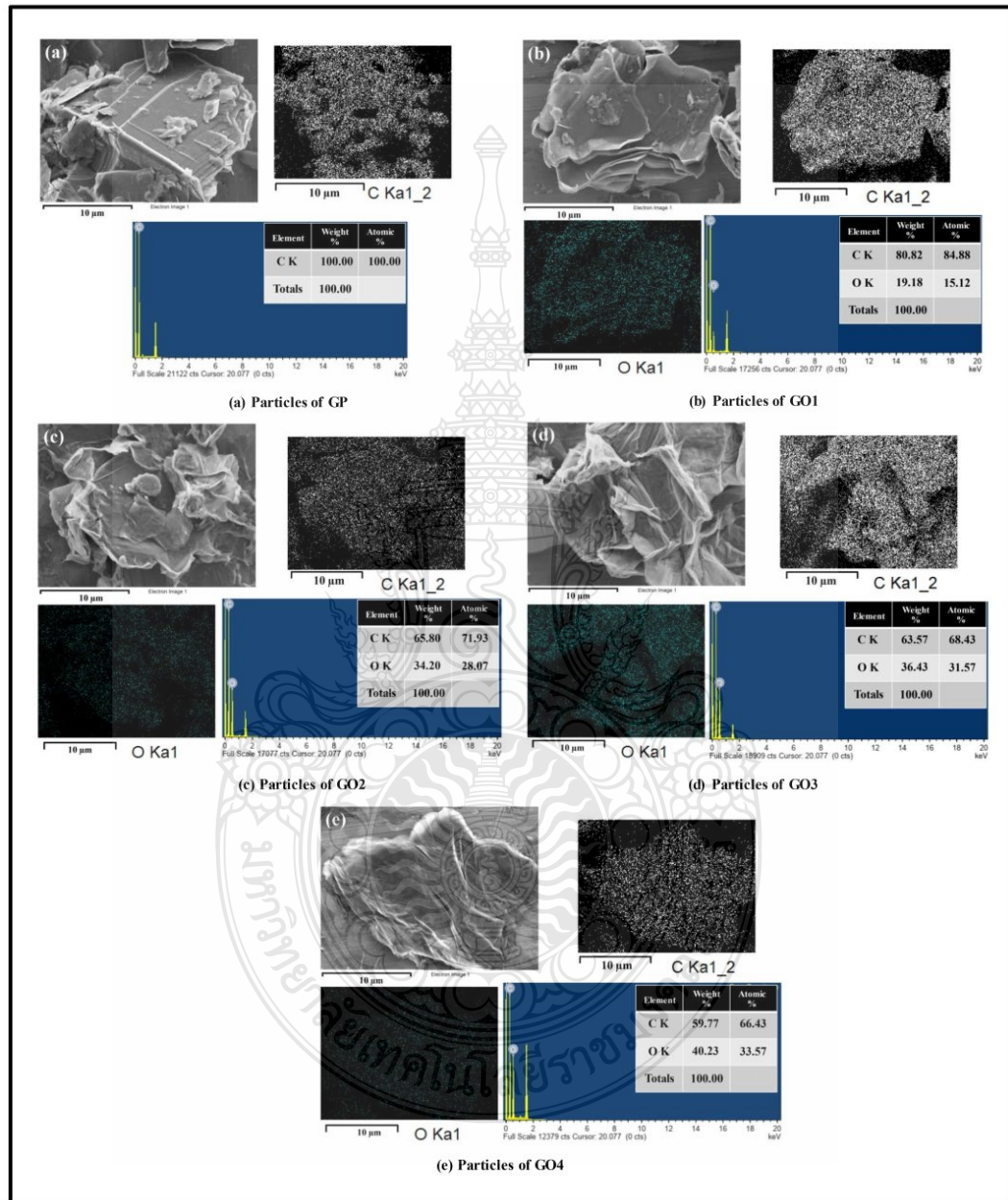
4.1.2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ที่สัดส่วนของกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 สำหรับ GO1, GO2, GO3 และ GO4 โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy (RAM II FT-Raman Module, Bruker) เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกที่เป็นระเบียบ (D band) และไม่เป็นระเบียบ (G band) ของกราฟีนออกไซด์ แสดงในรูปที่ 4.6 โดยมีพีคเกิดขึ้น 2 ตำแหน่ง คือ GP (1282 cm<sup>-1</sup>, 1593 cm<sup>-1</sup>), GO1 (1259 cm<sup>-1</sup>, 1566 cm<sup>-1</sup>), GO2 (1188 cm<sup>-1</sup>, 1489 cm<sup>-1</sup>), GO3 (1217 cm<sup>-1</sup>, 1512 cm<sup>-1</sup>) และ GO4 (1193 cm<sup>-1</sup>, 1510 cm<sup>-1</sup>) การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกของความเป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบเกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและการหลุตร้อนของกราฟีนออกไซด์ การหาปริมาณความบกพร่องและความผิดปกติภายในวัสดุสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนความเข้ม I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> ซึ่งตัวอย่างที่มีคุณภาพดีจะมีอัตราส่วนความเข้มที่น้อยค่าที่ได้คือ GP (0.28), GO1 (0.85), GO2 (0.82), GO3 (0.82), และ GO4 (0.86) จะพบว่ากราฟีนออกไซด์ GO2 และ GO3 มีอัตราส่วนความเข้มน้อยที่สุดแต่ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ยืนยันได้ว่า GO2 มีความเป็นผลึกที่สูงกว่า [30, 38, 63-67]



รูปที่ 4.6 โครงสร้างผลึกของความเป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบ: (a) GP, (b) GO1, (c) GO2, (d) GO3, และ (e) GO4

4.1.2.3 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและปริมาณธาตุของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ที่สัดส่วนของกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 สำหรับ GO1, GO2, GO3 และ GO4 โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด field emission scanning electron microscope (FE-SEM Zeiss AURIGA FE-SEM/FIB/EDX, A Carl Zeiss SMT AG Company, Oberkochen, Germany) แสดงในรูปที่ 4.7 (a)-(b) จุดสีขาวแสดงถึงคาร์บอนและจุดสีเขียวแสดงถึงออกซิเจน รูปที่ 4.7 (a) แสดงสัญญาณวิทยาของ GP มีลักษณะเกล็ดหนาหลายชั้นและพบองค์ประกอบของคาร์บอน 100% รูปที่ 4.7 (b) แสดงสัญญาณวิทยาของ GO1 มีลักษณะเกล็ดหนาหลายชั้นความหนาของชั้นบางกว่าของ GP มีองค์ประกอบของคาร์บอน 80.82% และออกซิเจน 19.18% รูปที่ 4.7 (c)-(e) แสดงสัญญาณวิทยาของ GO2, GO3 และ GO4 มีลักษณะเป็นแผ่นนาโนหลายแผ่นและแผ่นนาโนชั้นเดียวมีองค์ประกอบคาร์บอนและออกซิเจน คือ 65.80: 34.20, 63.57: 36.43, และ 59.77%: 40.23% ตามลำดับ องค์ประกอบของ คาร์บอนและออกซิเจนลดลงเมื่อปริมาณของสารออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แรงขึ้น ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แรงขึ้นจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน GP:KMnO<sub>4</sub> ที่เพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แรงขึ้นส่งผลให้องค์ประกอบของ

ออกซิเจนสูงขึ้น จะทำให้เกิดการแยกตัวจะแตกออกและการผลิตผิวหุ้ดร้อนหลุดออกมาเป็นแผ่นของ GO [55]



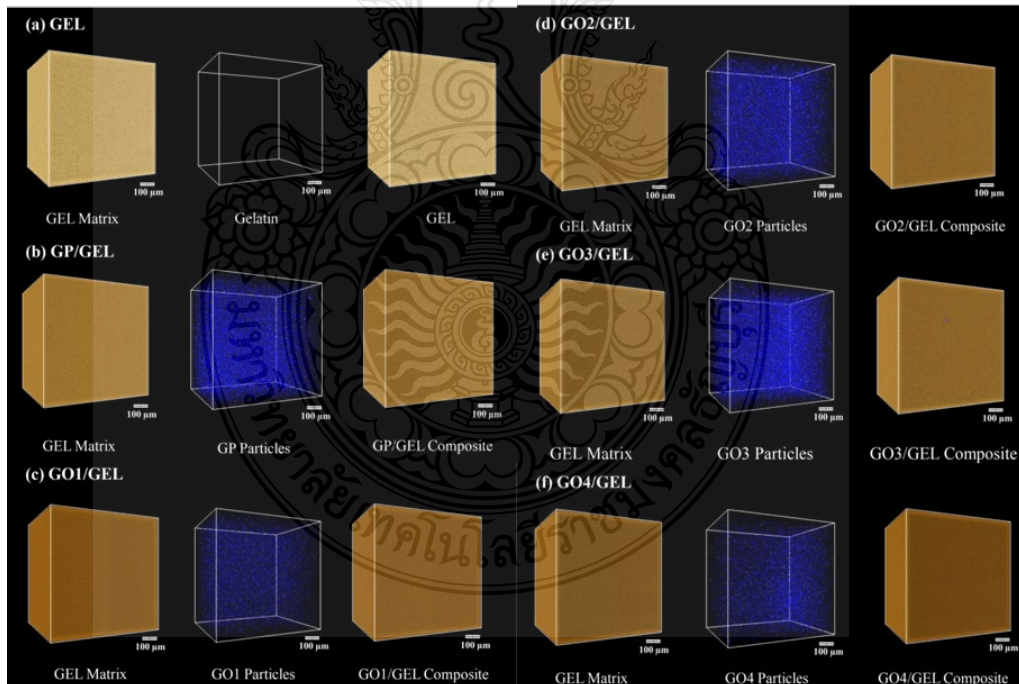
รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาและองค์ประกอบทางเคมีและปริมาณธาตุ: (a) GP, (b) GO1, (c) GO2, (d) GO3, และ (e) GO4



## 4.2 สมบัติของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL)

### 4.2.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL)

เพื่อศึกษาสมบัติการตอบสนองต่อแสงร้าวของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของกราฟีนออกไซด์ภายในแผ่นเจลาตินของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) ของกราฟีนต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่ สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 สำหรับ GO1, GO2, GO3 และ GO4 ของ GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy (SRXTM) ที่ BL1.2W แสดงในรูปที่ 4.8 (a)-(f) พื้นที่สีน้ำตาลแทนเมทริกซ์เจลและจุดสีน้ำเงินแทนด้วยอนุภาค รูปที่ 4.8 (a) แสดงลักษณะโครงสร้างภายในของไฮโดรเจลเมทริกซ์ จะเห็นได้ว่ามีความเป็นเนื้อเดียวกัน รูปที่ 4.8 (b)-(f) แสดงลักษณะโครงสร้างภายในของ GP/GEL, GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL ซึ่งจะเห็นได้ว่าอนุภาคของกราฟีนและกราฟีนออกไซด์ (จุดสีน้ำเงิน) มีขนาดเล็กและกระจายตัวอยู่ที่บริเวณด้านล่างของเมทริกซ์ไฮโดรเจล [68-72]



รูปที่ 4.8 โครงสร้างภายในของ: (a) GEL, (b) GP/GEL, (c) GO1/GEL, (d) GO2/GEL, (e) GO3/GEL, และ GO4/GEL

4.1.2 สมบัติทางไฟฟ้าของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้และของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) ของกราฟีนต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 สำหรับ GO1, GO2, GO3 และ GO4 ของ GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL

4.1.2.1 ศึกษาสภาพความนำไฟฟ้า ความต้านทาน ความจุไฟฟ้า ของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้และของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) ของกราฟีนต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 สำหรับ GO1, GO2, GO3 และ GO4 ของ GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง LCR Meter (LCR-8101G GW INSTEK) แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า ความจุไฟฟ้า (C) ความต้านทาน (R) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (E) ของอนุภาคกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นตามความเพิ่มขึ้นของ GP:KMnO<sub>4</sub> จนกระทั่งถึงที่สัดส่วน 1:2 หลังจากนั้นจึงมีค่าลดลง ปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน GP:KMnO<sub>4</sub> ที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้น ค่าที่เพิ่มขึ้นของ C, R, และ E เกิดจากการหลุดร่อนของ GO จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่สัดส่วน 1:2 มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุง C, R, และ E ที่สัดส่วน 1:3 และ 1:4 การหลุดร่อนของ GO ทำให้อิเล็กตรอนลดลง มีหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสูงขึ้น สำหรับวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) ค่า C, R, และ E มีค่าต่ำกว่าอนุภาคกราฟีนออกไซด์แต่มีค่าสูงกว่า GP/GEL และ GEL ซึ่งสามารถอธิบายตามหลักการผสม [31, 55, 70-75]

ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุผสมได้รับผลจาก GO จากผลการทดลอง GO2/GEL ได้ค่าที่ดีที่สุด โดยทั่วไป ค่า C, R, และ E ของวัสดุผสมมีแนวโน้มที่จะได้รับผลกระทบจากองค์ประกอบ GO โครงสร้างผลึก ความเป็นผลึก ความสามารถในการโพลาริซ์ การเปลี่ยนเฟส และสัญญาณวิทยาของโครงสร้าง ซึ่งรวมถึงขนาดเกรน ขอบเกรน และขนาดรูพรุน และได้ศึกษาค่า C, R, และ E ของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) ที่ปริมาณ GO2 ที่ปริมาณ 1.25, 2.5, 5, 10, และ 20% w/w สำหรับ GO/GEL\_2\_1.25%, GO/GEL\_2\_2.5%, GO/GEL\_2\_5%, GO/GEL\_2\_10%, และ GO/GEL\_2\_20% ค่า C, R, และ E จะเพิ่มตามปริมาณของ GO และได้นำไปทดสอบการตอบสนองทางไฟฟ้า ความชื้นและเคมี ต่อไป



ตารางที่ 4.2 ความจุไฟฟ้า (C) ความต้านทาน (R) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon$ ) ของอนุภาค GO และวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL)

Sample	Particle			Matrix/Composite		
	C (pF)	R ( $M\Omega$ )	$\epsilon_2$	C (pF)	R ( $M\Omega$ )	$\epsilon_1$
Gelatin powder	8.65±0.10	44.95±0.67	5.98			
GEL				8.65±0.21	48.22±1.06	4.21
GP	95.88±1.25	N/A	8.19	-	-	-
GO1	101.24±1.42	11.94±0.20	10.25	-	-	-
GO2	132.02±1.72	30.98±0.65	13.67	-	-	-
GO3	126.04±1.89	28.57±0.54	12.84	-	-	-
GO4	114.97±2.53	24.22±0.46	11.18	-	-	-
GP/GEL_5%	-	-	-	34.93±0.87	21.77±0.59	4.67
GO1/GEL_5%	-	-	-	47.26±1.04	32.83±0.79	6.88
GO2/GEL_5%	-	-	-	71.98±1.51	41.74±0.96	9.17
GO3/GEL_5%	-	-	-	68.80±1.93	41.64±1.29	8.69
GO4/GEL_5%	-	-	-	66.47±1.79	39.15±1.14	8.11
GO2/GEL_1.25%	-	-	-	42.69±1.15	40.87±1.06	6.85
GO2/GEL_2.50%	-	-	-	47.32±1.32	41.24±1.20	7.47
GO2/GEL_10%	-	-	-	76.15±1.98	42.83±1.16	10.48
GO2/GEL_20%	-	-	-	84.70±2.29	43.63±1.13	11.38

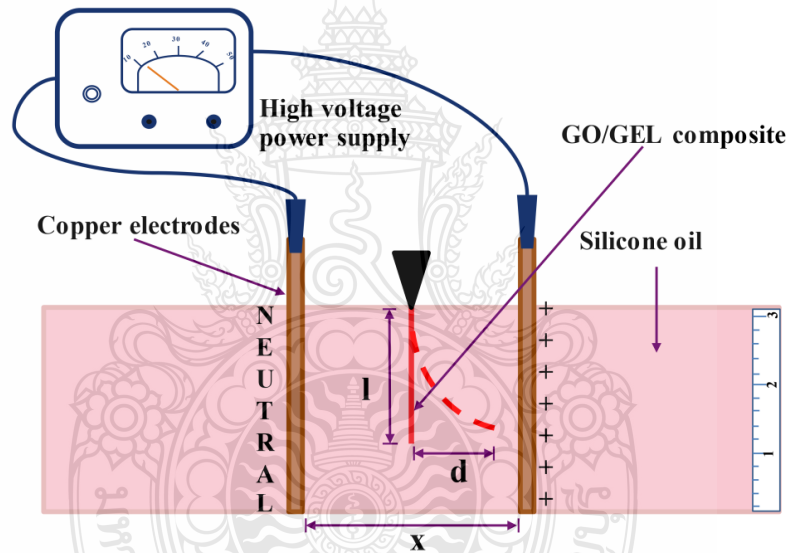
### 4.3 การศึกษาการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าจากภายนอกของกราฟีนออกไซด์/เจลาตินไฮโดรเจล

จากข้อมูลสมบัติทางเคมี กายภาพและสมบัติทางไฟฟ้า นำกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มาผสมกับเจลาตินไฮโดรเจล ที่สัดส่วน สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 สำหรับ GO1, GO2, GO3 และ GO4 ของ GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL โดยอนุภาคกราฟีนออกไซด์ที่ใส่ลงไปนั้นจะทำให้

หน้าที่เป็นอนุภาคโพลาลิไซในเมทริกซ์ เมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกจะมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลและรูปร่าง โดยมีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

#### 4.3.1 การทดสอบการบิดงอภายใต้สนามไฟฟ้าจากภายนอก (Bending Test)

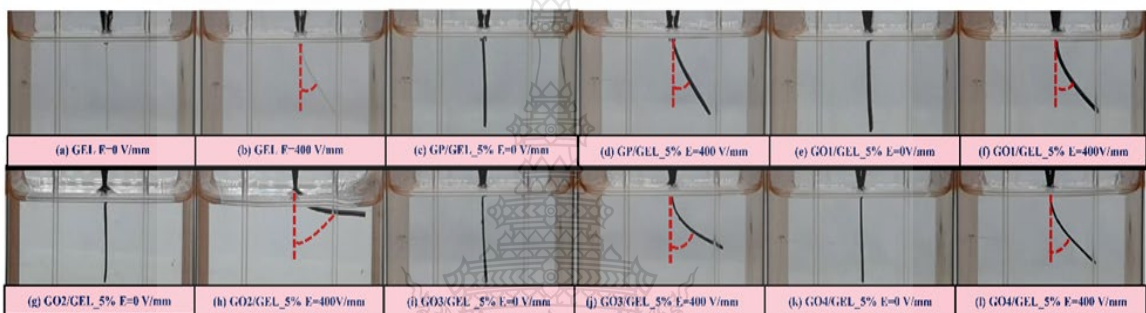
เพื่อศึกษาผลของสัดส่วนกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตต่อการบิดงอภายใต้การกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าจากภายนอก กราฟไฟต์ กราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ผสมกับเจลลาตินไฮโดรเจล ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 สำหรับ GO1, GO2, GO3 และ GO4 ของ GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL โดยชิ้นงานขนาด 0.5x1.8 cm. ถูกแขวนอยู่ระหว่างแผ่นทองแดง 2 แผ่นที่มีระยะห่าง 4, 6, 8, และ 10 cm. ในกล่องอะคริลิกที่มีน้ำมันซิลิโคนและให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกที่  $E=0-400$  V/mm ซึ่งพบว่า GO/GEL บิดเข้าหาขั้วบวก ดังแสดงในรูปที่ 4.9 [55]



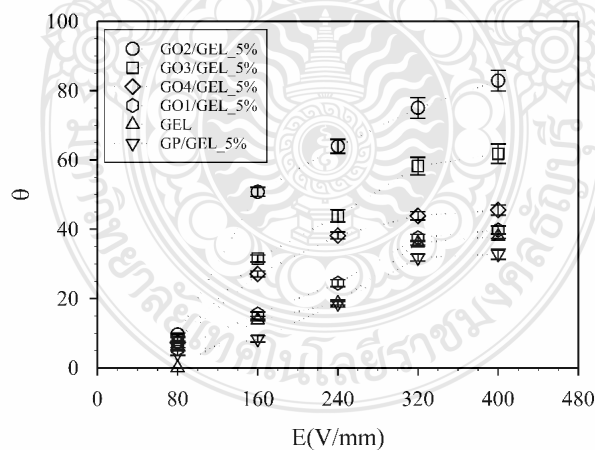
รูปที่ 4.9 การทดสอบการบิดงอของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) [55]

การบิดงอของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) ของกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 สำหรับ GO1, GO2, GO3 และ GO4 ที่ปริมาณของ GO 5% แสดงในรูปที่ 4.10-4.11 แสดงการบิดงอที่ระยะห่างระหว่างขั้วทองแดงที่ 4 cm และให้สนามไฟฟ้าภายนอกที่  $E=0-400$  V/mm องศาของการบิดงอของ GO1/GEL\_5%, GO2/GEL\_5%, GO3/GEL\_5%, GO4/GEL\_5%, GP/GEL\_5%, และ GEL คือ  $39.75 \pm 1.20^\circ$ ,  $82.88 \pm 3.00^\circ$ ,  $61.80 \pm 2.80^\circ$ ,  $45.55 \pm 1.50^\circ$ ,  $32.79 \pm 1.50^\circ$  และ  $37.87 \pm 0.63^\circ$  ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า

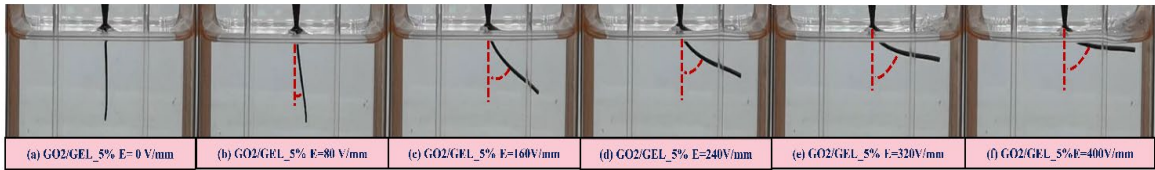
GO2/GEL\_5% มีการบิดงอสูงที่สุด แสดงในรูปที่ 4.12 แสดง GO2/GEL\_5% ที่ E=0-400 V/mm ระยะห่างระหว่างขั้วทองแดงที่ 4 cm. องศาของการบิดงอ คือ GO2/GEL\_5% (a) E = 0 V/mm (0°), (b) E = 80 V/mm (9.96±0.50°), (c) E = 160 V/mm (50.79±1.30°), (d) E = 240 V/mm (63.95±2.00°), (e) E = 320 V/mm (75.03±3.00°), และ (f) E = 400 V/mm (82.88±3.00°) เมื่อความแรงของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นองศาของการบิดงอเพิ่มขึ้น เกิดจากไดโพลโมเมนต์ที่เกิดขึ้นเมื่อความแรงของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการดึงดูดที่สูงระหว่าง GO/GEL และขั้วอิเล็กโทรด [55]



รูปที่ 4.10 การบิดงอของ GO/GEL, GP/GEL, และ GEL ที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก E=0-400V/mm และระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง 4 cm.



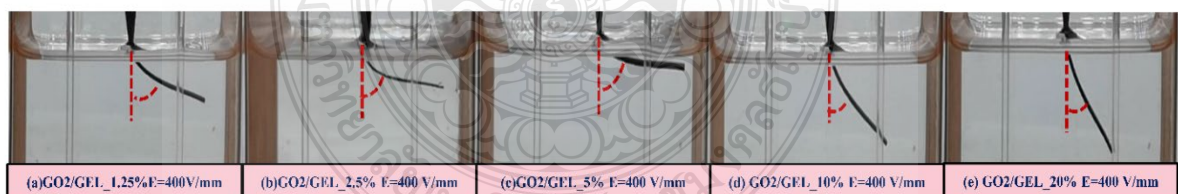
รูปที่ 4.11 องศาของการบิดงอของ GO/GEL, GP/GEL, และ GEL ที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก E=0-400 V/mm และ ระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง 4 cm.



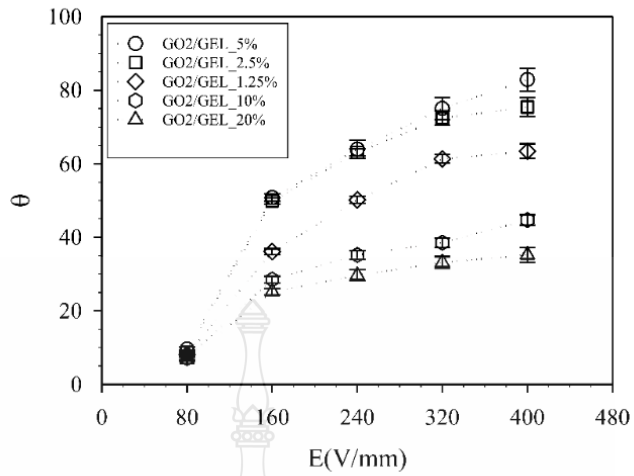
รูปที่ 4.12 การบิดงอของ GO2/GEL ที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก  $E=0-400$  V/mm และ ระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง 4 cm.

ศึกษาปริมาณของ GO2 ต่อการตอบสนองทางไฟฟ้าของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) โดยศึกษาที่ปริมาณ 1.25, 2.5, 5, 10 และ 20% w/w สำหรับ GO2/GEL\_1.25%, GO2/GEL\_2.5 %, GO2/GEL\_5%, GO2/GEL\_10% และ GO2/GEL\_20% ที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก  $E=0-400$  V/mm ระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง 4 cm. ดังแสดงในรูปที่ 4.13

ที่สนามไฟฟ้าภายนอก  $E=400$  V/mm องศาของการบิดงอของ GO2/GEL\_1.25%, GO2/GEL\_2.5%, GO2/GEL\_5%, GO2/GEL\_10%, และ GO2/GEL\_20% คือ  $63.44 \pm 2.00^\circ$ ,  $75.43 \pm 2.50^\circ$ ,  $82.88 \pm 3.00^\circ$ ,  $44.73 \pm 1.40^\circ$ , และ  $35.22 \pm 2.00^\circ$  แสดงในรูปที่ 4.14 การบิดงอเพิ่มขึ้นตามปริมาณอนุภาคที่เพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณที่เพียงพอซึ่งทำให้เกิดโพลาริซเมชันมากขึ้นได้รับแรงดึงดูดที่มากขึ้นระหว่างขั้วทองแดงและ GO สำหรับวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) แรงทั้งหมดที่มีบนอนุภาค GO จะถูกถ่ายโอนไปยังสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ส่งผลให้เกิดการบิดงอ [55]



รูปที่ 4.13 การบิดงอของ GO2/GEL ปริมาณของ GO2 1.25, 2.5, 5, 10 และ 20% w/w สนามไฟฟ้าจากภายนอก  $E=400$  V/mm และ ระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง 4 cm.

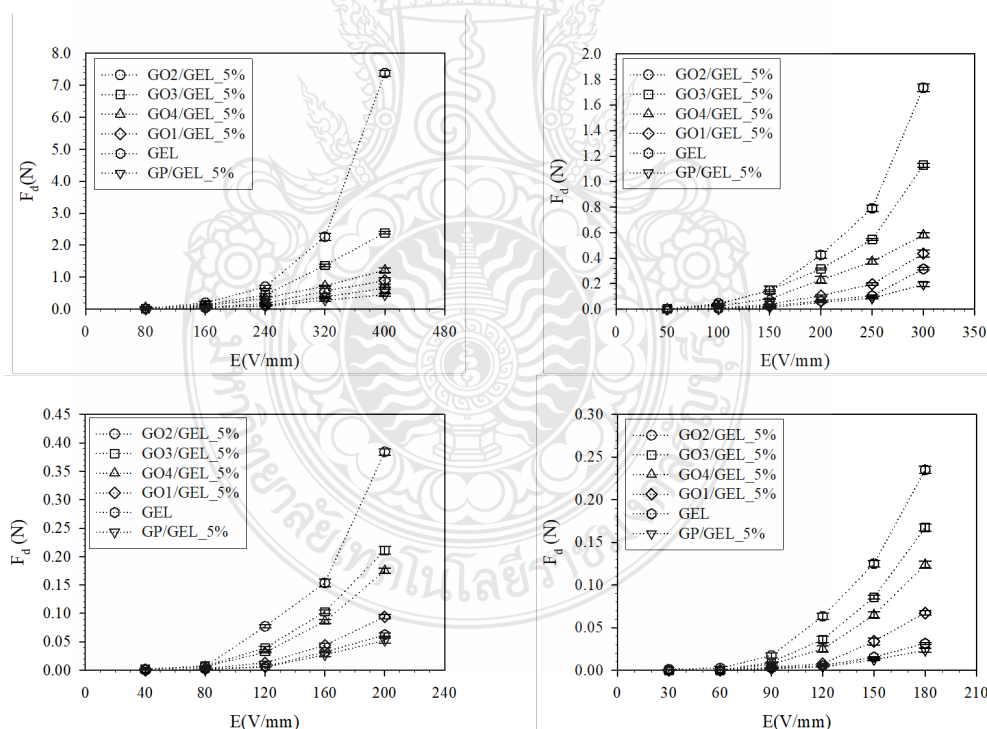


รูปที่ 4.14 องศาของการบิดงอของ GO2/GEL ที่ปริมาณ GO2 ที่ 1.25, 2.5, 5, 10 และ 20% w/w สนามไฟฟ้าจากภายนอก E=0-400 V/mm และระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง 4 cm.

ตารางที่ 4.3 และ รูปที่ 4.15 แสดงแรงไดอิเล็กทริกโพรพิริซิส ( $F_d$ ) ของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) แรงดึงดูดระหว่างขั้วทองแดงและโพลาริซ์ ทำให้เกิดประจุลบในโครงสร้างเจลาตินเมื่อให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกจะบิดงอไปทางขั้วบวกเล็กน้อย ผลของระยะห่างระหว่างขั้วทองแดงต่อแรงไดอิเล็กทริกโพรพิริซิส ( $F_d$ ) ลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างขั้วทองแดงมากขึ้นเนื่องจากความแรงของสนามไฟฟ้าลดลง ซึ่งทำให้แรงไดอิเล็กทริกโพรพิริซิสลดลง

ตารางที่ 4.3 แรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส ( $F_d$ ) ของ GO/GEL, GP/GEL, และ GEL ที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก  $E=0-400$  V/mm และที่ระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง 8-10 cm.

Sample	Dielectrophoresis Force ( $F_d$ )(N)/ Electric Field Strength (E)			
	4 cm	6 cm	8 cm	10 cm
	400 V/mm	300 V/mm	200V/mm	180 V/mm
GEL	0.650±0.034	0.320±0.012	0.060±0.048	0.030±0.001
GP/GEL	0.450±0.038	0.200±0.026	0.050±0.041	0.020±0.002
GO1/GEL_5%	0.910±0.136	0.440±0.083	0.090±0.053	0.070±0.003
GO2/GEL_5%	7.360±0.143	1.730±0.097	0.380±0.076	0.240±0.006
GO3/GEL_5%	2.390±0.046	1.110±0.052	0.210±0.009	0.170±0.005
GO4/GEL_5%	1.190±0.081	0.580±0.077	0.170±0.061	0.120±0.004



รูปที่ 4.15 แรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส ( $F_d$ ) ของ GO/GEL, GP/GEL, และ GEL ที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก  $E=0-400$  V/mm และที่ระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง (a) 4 cm, (b) 6 cm, (c) 8 cm, และ (d) 10 cm.

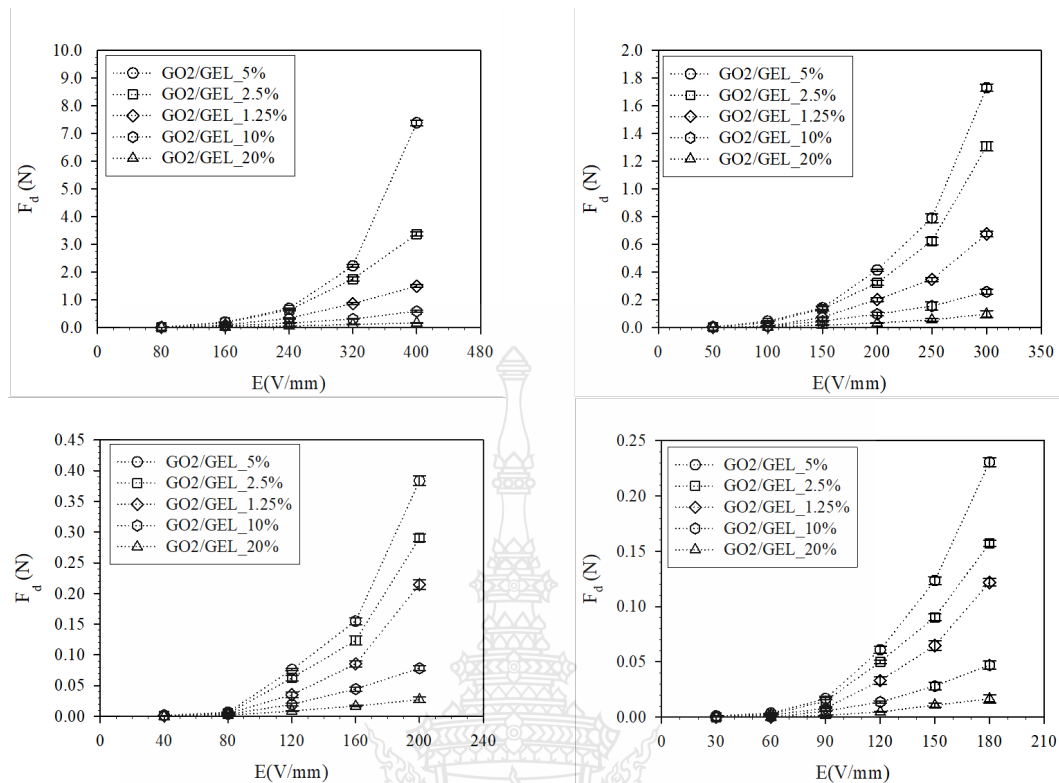


ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.16 แสดงแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส ( $F_d$ ) ของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) ที่ปริมาณของ GO2 ที่ 1.25, 2.5, 5, 10 และ 20% w/w สำหรับ GO2/GEL\_1.25%, GO2/GEL\_2.5 %, GO2/GEL\_5%, GO2/GEL\_10% และ GO2/GEL\_20% ที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก  $E=0-400$  V/mm และระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง 4, 6, 8, และ 10 cm การตอบสนองทางไฟฟ้าและแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส ( $F_d$ ) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอนุภาค GO2 เพิ่มขึ้นสูงถึง 5% w/w และจากนั้นลดลงเมื่อปริมาณอนุภาคสูงกว่า 5% w/w เนื่องจากการกระจายของอิเล็กตรอนและการเคลื่อนของประจุของไอออนภายในโพลิเมอร์ที่เหมาะสมทำให้เกิดการโพลาไรซ์ของกลุ่มคาร์บอนิล [55]

**ตารางที่ 4.4** แรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส ( $F_d$ ) GO/GEL ที่ปริมาณของ GO2 ที่ 1.25, 2.5, 5, 10, and 20% w/w สนามไฟฟ้าจากภายนอก  $E=0-400$  V/mm และที่ระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง 8-10 cm.

Sample	Dielectrophoresis Force ( $F_d$ )(N)/ Electric Field Strength (E)			
	4 cm	6 cm	8 cm	10 cm
	400 V/mm	300 V/mm	200V/mm	180 V/mm
GO2/GEL_1.25%	1.490±0.057	0.680±0.025	0.220±0.009	0.120±0.007
GO2/GEL_2.5%	3.350±0.088	1.340±0.036	0.300±0.008	0.160±0.006
GO2/GEL_5%	7.360±0.116	1.730±0.034	0.380±0.011	0.240±0.007
GO2/GEL_10%	0.580±0.049	0.260±0.023	0.080±0.007	0.050±0.007
GO2/GEL_20%	0.160±0.027	0.080±0.021	0.030±0.005	0.020±0.006



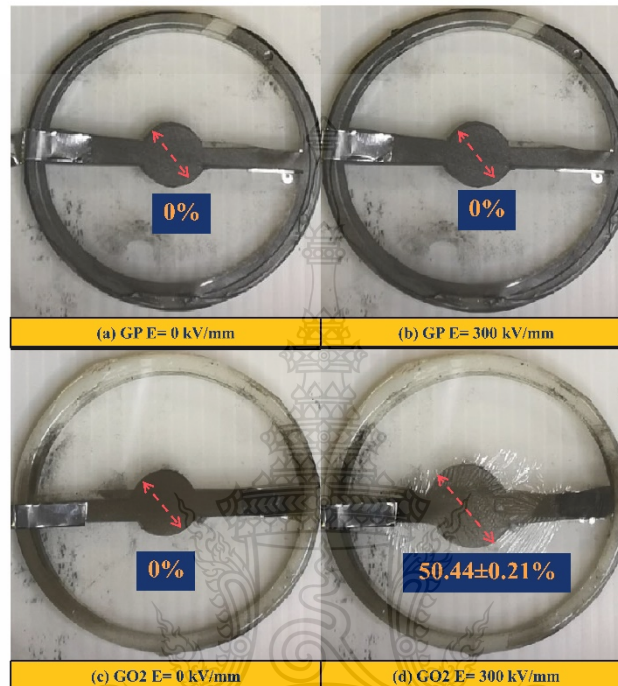


รูปที่ 4.16 แรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส ( $F_d$ ) ของ GO/GEL, GP/GEL, และ GEL ที่ปริมาณ GO2 ที่ 1.25, 2.5, 5, 10 and 20% w/w ที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก  $E=0-400$  V/mm และที่ระยะห่างระหว่างขั้วทองแดง (a) 4 cm, (b) 6 cm, (c) 8 cm, และ (d) 10 cm.

#### 4.3.2 การทดสอบการตอบสนองเชิงวงกลมภายใต้สนามไฟฟ้าจากภายนอก (Circular Actuator Test)

ศึกษาสมบัติการตอบสนองทางไฟฟ้าของอนุภาคกราฟีนออกไซด์ (GO) กราไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 สำหรับ GO1, GO2, GO3 และ GO4 โดยที่ GO ใช้เป็นขั้วไดอิเล็กโตร สำหรับตัวกระตุ้นไฟฟ้าแบบวงกลม การขยายตัวของไดอิเล็กทริกอิลาสโตเมอร์โดยสนามไฟฟ้าจากภายนอก  $E=0-400$  kV/mm แสดงในรูปที่ 4.17 การขยายตัวของไดอิเล็กทริกอิลาสโตรเมอร์ แสดงในรูปที่ 4.17 (a)-(b) GP เมื่อให้สนามไฟฟ้าจากภายนอก ไม่พบการตอบสนองการขยายตัวของไดอิเล็กทริกอิลาสโตเมอร์เนื่องจากอนุภาคของ GP ไม่มีขั้วและไม่มีปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ซึ่งการตอบสนองทางไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกอิลาสโตเมอร์จะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของ GP:KMnO<sub>4</sub>

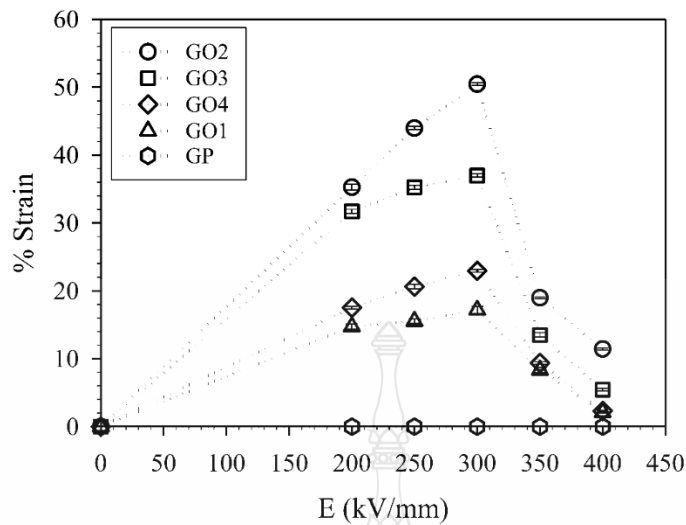
สูงสุดที่ GO2 ( $50.44 \pm 0.21\%$ ) ในรูปที่ 4.17 (c)-(d) และจะลดลงเมื่อ สัดส่วนของ GP:KMnO<sub>4</sub> เพิ่มขึ้น แสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.18 การขยายตัวเกิดจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด GO บนและล่างทำให้เกิดการบีบอัดความหนาของไดอิเล็กตริกโกลาสโตเมอร์



รูปที่ 4.17 การตอบสนองทางไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกโกลาสโตเมอร์โดยที่ GP และ GO2 เป็นขั้วอิเล็กโทรดที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก  $E=0-300$  kV/mm.

ตารางที่ 4.5 % ความเครียดของ GP และ GO ต่างๆ ที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก  $E=0-400$  kV/mm.

Sample	% Strain				
	200 kV/mm	250 kV/mm	300 kV/mm	350 kV/mm	400 kV/mm
GP	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
GO1	$14.73 \pm 0.42$	$15.53 \pm 0.34$	$17.18 \pm 0.49$	$8.33 \pm 0.37$	$2.13 \pm 0.13$
GO2	$35.27 \pm 0.42$	$43.98 \pm 0.23$	$50.44 \pm 0.21$	$18.96 \pm 0.14$	$11.42 \pm 0.17$
GO3	$31.73 \pm 0.36$	$35.27 \pm 0.31$	$37.00 \pm 0.27$	$13.51 \pm 0.32$	$5.42 \pm 0.20$
GO4	$17.51 \pm 0.23$	$20.62 \pm 0.32$	$22.93 \pm 0.20$	$9.36 \pm 0.17$	$2.31 \pm 0.10$

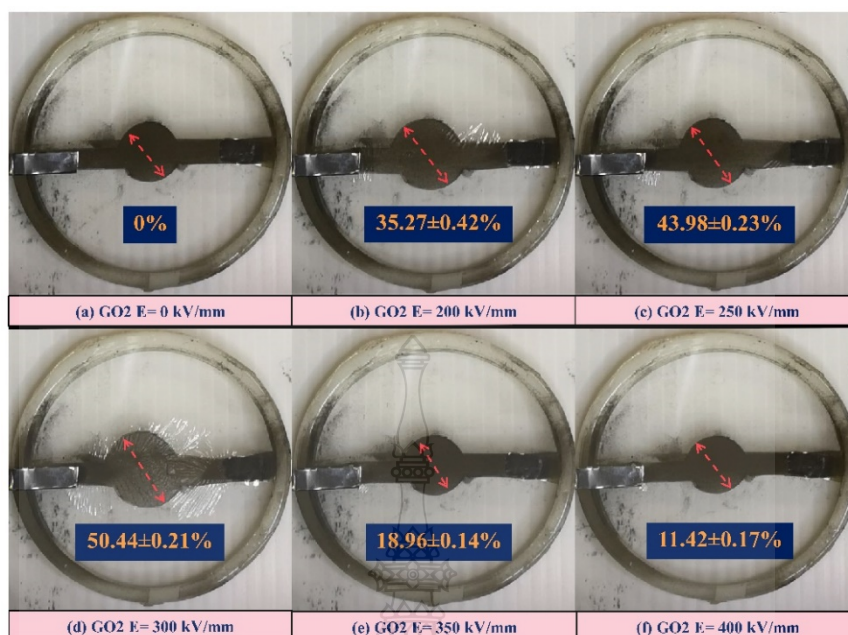


รูปที่ 4.18 การตอบสนองทางไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์ GP และ GO ภายใต้ความแรงของสนามไฟฟ้า 0–400 kV/mm.

ตารางที่ 4.6 แสดงเวลาของการตอบสนองทางไฟฟ้า จากการศึกษพบว่าที่ความแรงของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นใช้เวลาน้อยลงแต่การตอบสนองทางไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกอีลาสโตรเมอร์โดยที่ GO2 เป็นขั้วอิเล็กโทรดมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นจนกระทั่ง  $E=300$  kV/mm ( $50.44 \pm 0.21\%$ ) และลดลงเมื่อความแรงของสนามไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น  $E=400$  kV/mm ( $11.42 \pm 0.17\%$ ) แสดงในรูปที่ 4.19

ตารางที่ 4.6 เวลาที่ใช้ในการตอบสนองทางไฟฟ้าของ GP และ GO ที่สนามไฟฟ้าภายนอก 0-400 kV/mm.

Sample	Time of expansion response, $T_{er}$ (s)				
	200 kV/mm	250 kV/mm	300 kV/mm	350 kV/mm	400 kV/mm
GP	0	0	0	0	0
GO1	11	12	13	9	3
GO2	10	11	11	10	3
GO3	11	12	12	10	4
GO4	12	12	13	9	3



รูปที่ 4.19 การตอบสนองทางไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกอิลาสโตรเมอร์โดยที่ GO2 เป็นขั้วอิเล็กโทรดที่สนามไฟฟ้าจากภายนอก  $E = 0-400$  kV/mm.

#### 4.4 การศึกษาการตอบสนองต่อความชื้นจากภายนอกของกราฟีนออกไซด์/เจลไฮโดรเจล

ศึกษาสมบัติการตอบสนองทางความชื้นของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) ของกราฟิตต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (GP:KMnO<sub>4</sub>) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 สำหรับ GO1, GO2, GO3 และ GO4 ของ GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL แสดงในรูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.7 นำเสนอมุมบิดงอและความเร็วของ GEL, GP/GEL, GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL คือ  $0^\circ$  ( $0.00^\circ\text{S}^{-1}$ ),  $18.60 \pm 2.76^\circ$  ( $0.080 \pm 0.016^\circ\text{S}^{-1}$ ),  $33.35 \pm 3.11^\circ$  ( $0.190 \pm 0.021^\circ\text{S}^{-1}$ ),  $930.11 \pm 49.28^\circ$  ( $9.380 \pm 0.513^\circ\text{S}^{-1}$ ),  $726.49 \pm 37.53^\circ$  ( $6.430 \pm 0.335^\circ\text{S}^{-1}$ ), และ  $188.71 \pm 31.89^\circ$  ( $1.320 \pm 0.234^\circ\text{S}^{-1}$ ) การตอบสนองทางความชื้นของ GO/GEL เนื่องจากทางโครงสร้างเคมีมีความชอบน้ำ รูปที่ 4.21 เมื่อได้สัมผัสกับไอน้ำ ออกซิเจนของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิลถูกเหนี่ยวนำให้ไฮโดรเจนของไอน้ำเกิดพันธะไฮโดรเจน และช่องว่างระหว่างชั้น GO จะดูดซับไอน้ำแล้วขยายตัวเมื่อความชื้นลดลง ระยะห่างระหว่างชั้น GO จะแคบลง ทำให้พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย

และกลับสู่สภาพเดิม ซึ่งจะเห็นได้ว่า GO2/GEL มีมุมบิดงอที่มากที่สุด  $930.11 \pm 49.28^\circ$  ( $9.380 \pm 0.513^\circ \text{s}^{-1}$ ) จากการมีพีคที่มีลักษณะกว้างและเด่นชัดของ หมู่ฟังก์ชัน O-H stretching, carboxyl C=O stretching, aromatic C=C peak, O-H deformation และ C-O stretching [28, 30, 31, 38, 40, 76-79]

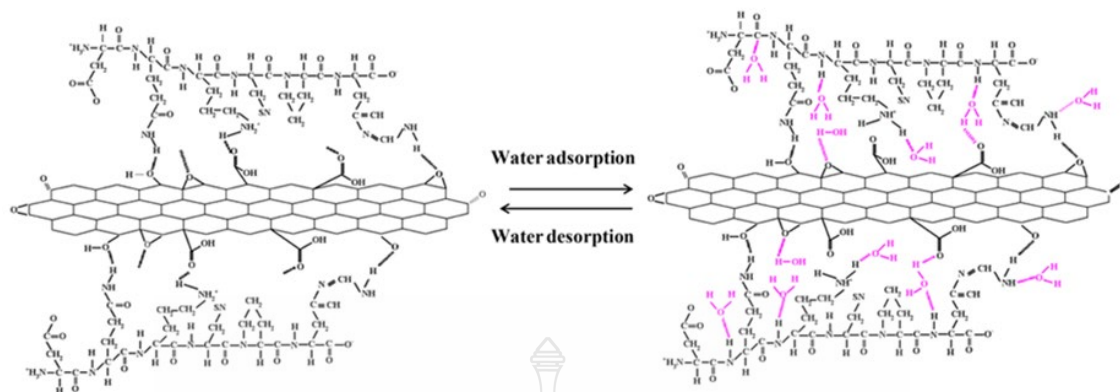
ตารางที่ 4.7 มุม เวลา และความเร็วของการตอบสนองทางความชื้นของ GO/GEL

sample	Angle ( $^\circ$ )	time (s)	The angular rate of change of the bending ( $^\circ \text{s}^{-1}$ )
GEL	0	180	0.000
GP/GEL	$18.60 \pm 2.76$	180	$0.080 \pm 0.016$
GO1/GEL	$33.35 \pm 3.11$	154	$0.190 \pm 0.021$
GO2/GEL	$930.11 \pm 49.28$	96	$9.380 \pm 0.513$
GO3/GEL	$726.49 \pm 37.53$	112	$6.430 \pm 0.335$
GO4/GEL	$188.71 \pm 31.89$	136	$1.320 \pm 0.234$



รูปที่ 4.20 มุมบิดงอ: (a)-(b) GEL, (c)-(d) GP/GEL, (e)-(f) GR1/GEL, (g)-(h) GR2/GEL, (i)-(j) GR3/GEL, และ (k)-(l) ที่ ความชื้นสัมพัทธ์ 80-85% อุณหภูมิ 37°C





รูปที่ 4.21 โครงสร้างทางเคมีของ GO/GEL ต่อการตอบสนองทางความชื้นดูดซับและคายไอน้ำ

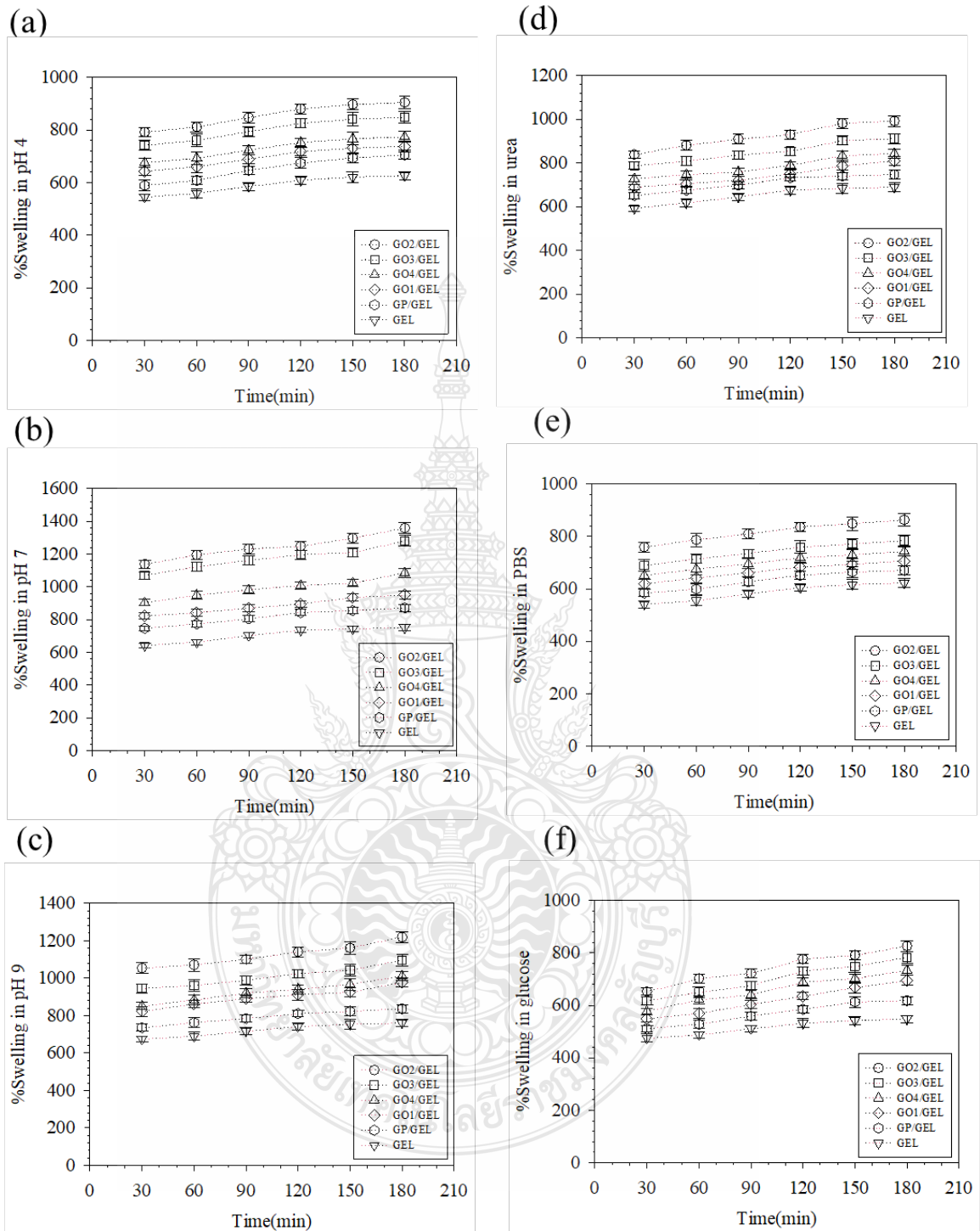
#### 4.5 การศึกษาการตอบสนองต่อสมบัติทางเคมีของกราฟีนออกไซด์/เจลาตินไฮโดรเจล

ศึกษาสมบัติการตอบสนองทางเคมีของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) ของกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $GP:KMnO_4$ ) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 สำหรับ GO1, GO2, GO3 และ GO4 ของ GO1/GEL, GO2/GEL, GO3/GEL และ GO4/GEL แสดงในรูปที่ 4.22 (a)-(f) จะเห็นได้ว่าการบวมตัวใน pH4, pH7 และ pH9 ของ GO2/GEL มีการบวมตัวที่มากที่สุดคือ  $905.29 \pm 22.63$ ,  $1358.55 \pm 27.73$  และ  $1219.18 \pm 28.04\%$  การที่ GO/GEL บวมตัวได้ดีใน pH7 เนื่องจาก พอลิเมอร์ทางชีวภาพที่ pH=7 หมู่คาร์บอกซิเลท ( $COO^-$ ) และกลุ่มเอไมด์สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดีจึงมีช่องว่างทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกตัวได้ดีขึ้น บวมตัวมากขึ้นและเมื่อทดสอบในสารละลายชีวภาพมีความเข้ากันได้กับมนุษย์ ยูเรีย ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (PBS) และกลูโคส GO2/GEL มีการบวมตัวมากที่สุด คือ  $992.46 \pm 20.25$ ,  $863.26 \pm 23.31$  และ  $826.47 \pm 20.66\%$  ในสารละลายยูเรีย ซึ่งเป็นเบสอ่อนและชอบน้ำ สามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่ม  $COOH$  ของไฮโดรเจล เมื่อยูเรียทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ความชอบน้ำมากขึ้นจึงทำให้มีการบวมตัวที่มากและการที่ GO2/GEL มีการบวมตัวสูงกว่าเนื่องจากอนุภาคของ GO2 มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรของรูพรุนที่มากกว่าความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่า เวลาที่ใช้ในการเสีรูปและกลับสู่สภาพเดิมของ GO/GEL แสดงในตารางที่ 4.8 จากตารางเห็นได้ว่า GO2/GEL ใช้เวลาในการเสีรูปและกลับสู่สภาพเดิมเร็วที่สุดซึ่งโดยทดสอบการเสีรูปในสารละลาย  $Fe^{+}$  แสดงในรูปที่ 4.23(a)-(c) เห็นได้ว่าการเสีรูปโดยการม้วนเข้าและเมื่อให้กลับสู่สภาวะเดิมในสารละลาย EDTA แสดงในรูปที่ 4.24(a)-(c) เห็นได้ว่า GO2/GEL การคลายตัวสู่สภาวะเดิมและมีการบวมตัวซึ่งแตกต่างจาก GEL ที่มีการเสีรูปในสารละลาย  $Fe^{+}$  แสดงในรูป

ที่ 4.25 และเมื่อทดสอบการกลับสู่สภาพเดิมในสารละลาย EDTA แสดงในรูปที่ 4.26 GEL ไม่สามารถ  
คลายกลับสู่สภาพเดิมได้ เนื่องจากไอออนบวกของโลหะต่างๆและพอลิเมอร์ชีวภาพสามารถทำงาน  
ร่วมกันได้และพันธะในสายโซ่โมเลกุล H, -OH, -NH<sub>2</sub> และระหว่าง GO และเจลาตินทำปฏิกิริยามีการ  
จดจำรูปร่างชั่วคราวในขณะที่จับไอออนบวกของโลหะทำให้มีการเสียรูปชั่วคราว ขณะที่ประจุลบของ  
โมเลกุลทำปฏิกิริยาโดยทำลายการเชื่อมขวางชั่วคราวของ GO/GEL โดยประจุลบที่มาทำปฏิกิริยากับ  
Fe<sup>+</sup> การเสียรูปของ GO/GEL สามารถกลับสู่สภาวะเดิมได้โดยการแช่ในสารละลาย EDTA เนื่องจาก -  
OH และ -NH<sub>2</sub> ทำปฏิกิริยากับ Fe<sup>+</sup> ทำให้เกิดการเสียรูป การทำให้กลับสู่สภาวะเดิมโดย EDTA [48, 80-  
81]







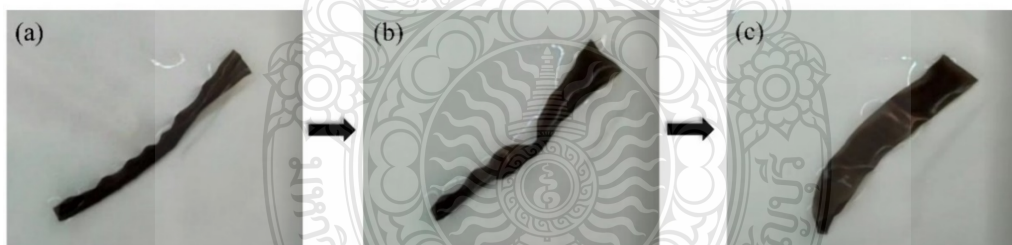
รูปที่ 4.22 %การบวมตัวใน (a) pH4, (b) pH7, (c) pH9, (d) urea, (e) PBS, และ (f) glucose.

ตารางที่ 4.8 เวลาในการเสียรูปและกลับสู่สภาพเดิมของ GO/GEL

Sample	Time of deformation (s)	Time of recover (s)
GEL	67	-
GP/GEL	61	-
GO1/GEL	53	87
GO2/GEL	33	51
GO3/GEL	41	68
GO4/GEL	49	79



รูปที่ 4.23 การเสียรูปของ GO2/GEL ในสารละลาย  $Fe^+$



รูปที่ 4.24 การกลับสู่สภาวะเดิม GO2/GEL ในสารละลาย EDTA



รูปที่ 4.25 การเสียรูปของ GEL ในสารละลาย  $Fe^+$



รูปที่ 4.26 การกลับสู่สภาวะเดิม GEL ในสารละลาย EDTA



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้มีการนำเจลาตินซึ่งเป็นวัสดุจากธรรมชาติมาพัฒนาและเติมสารตัวเติมที่เป็นอนุพันธ์ของกราฟีน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกกราฟีนออกไซด์เป็นต้นแบบอนุพันธ์ของกราฟีน โดยวัสดุที่ขึ้นรูปได้จากเจลาตินและเจลาตินผสมกราฟีนออกไซด์นั้นจะถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตอบสนองจากสิ่งเร้าภายนอก (Stimuli-responsive materials) ซึ่งเร้าจากภายนอกนั้นจะควบคุมสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของวัสดุ สิ่งเร้าจากภายนอกได้แก่ ไฟฟ้า ความชื้น ความเป็นกรด-ด่างของสิ่งแวดล้อม วัสดุตอบสนองจากสิ่งเร้าภายนอกนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์กล้ามเนื้อเทียม ระบบนำส่งยาผ่านผิวหนังควบคุมด้วยไฟฟ้า และเซนเซอร์

กราฟีนออกไซด์ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธี Hummers method ที่ปริมาณของกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $\text{GP}:\text{KMnO}_4$ ) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 สำหรับ GO1, GO2, GO3 และ GO4 ตามลำดับ และศึกษาสมบัติทางเคมี กายภาพ และทางไฟฟ้าของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ GO2 แสดงสมบัติทางไฟฟ้า และกายภาพที่ดีที่สุด โดย GO2 นั้นแสดงอัตราส่วนความเป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบความเข้มข้นที่สุด คือ 0.82 และแสดงองค์ประกอบของคาร์บอนและออกซิเจนเหมาะสมที่สุด คือ 65.80: 34.20

เพื่อศึกษาผลของการตอบสนองต่อสิ่งเร้าจากภายนอกของเจลาตินและเจลาตินผสมกราฟีนออกไซด์ GO2 ถูกเลือกมาผสมกับเจลาตินและนำไปทดสอบสมบัติการตอบสนองทางไฟฟ้า ความชื้น และความเป็นกรด-ด่างของสิ่งแวดล้อม

โดยผลการทดสอบการบิดงอภายใต้สนามไฟฟ้าจากภายนอก ที่ระยะห่างระหว่างแผ่นทองแดง 2 แผ่น ระยะห่าง 4 เซนติเมตร พบว่าเมื่อมีการเติม GO2 ที่สัดส่วน 5%w/w (GO2/GEL\_5%) เมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่ 400 V/mm มุมของการบิดงอ  $82.88^\circ$  และมีแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส ( $F_d$ ) 7.36 N/(V/mm) สูงที่สุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วน GO2 พบว่าการการบิดงอลดลงเนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาค GO ทำให้เกิดความแข็งของวัสดุเพิ่มขึ้น ลดประสิทธิภาพในการบิดงอ ยืดหยุ่นของวัสดุลง

นอกจากนี้ยังทำการศึกษาผลของการตอบสนองทางไฟฟ้าของวัสดุ เป็นการทดสอบการตอบสนองเชิงวงกลมภายใต้สนามไฟฟ้าจากภายนอกที่  $E=0-400$  kV/mm พบว่าเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก พบการขยายตัวของไดอิเล็กทริกอีลาสโตเมอร์สูงถึง 50.44% เนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาค GO ทำให้เกิดการบิดอัด ความหนาลดลงแต่ขยายตัวเพิ่มขึ้น

การศึกษาค้นคว้าการตอบสนองต่อความชื้นจากภายนอกของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ พบว่า มุมบิดงอและความเร็วของ GO2/GEL สูงที่สุด  $900^\circ$  ความเร็วในการตอบสนอง คือ  $9.38$   $^\circ/S^{-1}$  เนื่องจากมีโครงสร้างเคมีที่มีความชอบน้ำ ออกซิเจนของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิลถูกเหนี่ยวนำให้ไฮโดรเจนของไอน้ำเกิดพันธะไฮโดรเจน ช่องว่างระหว่างชั้น GO จะดูดซับไอน้ำแล้วขยายตัว และเมื่อความชื้นลดลง ระยะห่างระหว่างชั้น GO จะแคบลง ทำให้พันธะไฮโดรเจนถูกทำลายและกลับสู่สภาพเดิมได้ ซึ่งเหมาะสำหรับประยุกต์ใช้ในงานเซนเซอร์ความชื้นในอุปกรณ์ทางการแพทย์ได้

การศึกษาค้นคว้าการตอบสนองต่อสมบัติทางเคมีจากภายนอกของเจลลาตินและเจลลาตินผสมกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) พบว่า ที่ความเป็นกรด-ด่างที่ต่างกัน ส่งผลต่อพฤติกรรมการบวมตัวของวัสดุได้ โดยสารละลายต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ น้ำกลั่น สารละลายยูเรีย สารละลายเหล็ก สารละลาย EDTA พบว่าการตอบสนองการบวมตัวนั้นแตกต่างกันและเวลาที่ใช้ในการคืนรูปก็แตกต่างกันด้วย ทำให้สามารถประยุกต์ใช้วัสดุผสมนี้สำหรับเป็นเซนเซอร์วัดการมีอยู่ของสารละลายเหล่านี้ ซึ่งมีประโยชน์มากกับผู้ป่วยที่อยู่ในสภาวะการควบคุมการหลั่งของสารละลายเหล่านี้จากร่างกาย เช่น เลือด ปัสสาวะ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ด้วยวิธี Hummers method ที่สัดส่วนกราฟไฟต์ต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $GP:KMnO_4$ ) ที่สัดส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 สำหรับ GO1, GO2, GO3 และ GO4 ตามลำดับ เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี สมบัติทางไฟฟ้าของกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ และขึ้นรูปของวัสดุผสมระหว่างไฮโดรเจลและกราฟีนออกไซด์ (GO/GEL) เพื่อทดสอบการตอบสนองต่อ ไฟฟ้า ความชื้นและเคมี เพื่อพัฒนาเป็นต้นแบบใช้เป็นกัลลัมเนื้อเทียมในอนาคต

การตอบสนองต่อความชื้นวัสดุผสมสามารถพัฒนาเป็นวัสดุที่ใช้ในการพัฒนาซ่อมแซมและสร้างเนื้อเยื่อเลียนแบบพฤติกรรมการทำงานของอวัยวะของร่างกาย เช่น เซนเซอร์ความชื้นใช้ในการวัดและ

ตรวจสอบปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอากาศโดยรอบ ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เซมิคอนดักเตอร์ ชีวการแพทย์ สิ่งทอ การแปรรูปอาหาร ยา อุตุนิยมวิทยา ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เกษตรกรรม การตรวจสอบสุขภาพเชิงโครงสร้าง และการตรวจสอบสภาพแวดล้อม เนื่องจากมีอัตราส่วนพื้นผิวต่อปริมาตรสูง ซึ่งรองรับความไวสูงต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้น มีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา ราคาไม่แพง การตรวจสอบความชื้นในสภาพแวดล้อมที่เป็นอันตรายแบบเรียลไทม์ ช่วยเพิ่มความไวและความเสถียรของเซ็นเซอร์ความชื้น



## บรรณานุกรม

- [1] Giorcelli, M., Bartoli M. (2019). Carbon nanostructures for actuators: an overview of recent developments. **Actuators**, 8, 46.
- [2] Carpi, F., De Rossi, D., Kornbluh, R., Pelrine, R., Sommer-Larsen, P. (2008). **Dielectric elastomers as electromechanical transducers. Fundamentals, materials, devices, models and applications of an emerging electroactive polymer technology.** (pp. 1-329), Oxford, UK : Elsevier Press.
- [3] Huang, Y., Liang, J., Chen., Y. (2012). The application of graphene based materials for actuators. **Journal of Materials Chemistry**, 22, 3671-3679.
- [4] O'Halloran, A., O'Malley, F., McHugh, P. (2008). A Review on Dielectric Elastomer Actuators, Technology, Applications, and Challenges. **Journal of Applied Physics**, 104, 071101.
- [5] Kanaan, A.F., Pinho, A.C., Piedade, A.P. (2021). Electroactive polymers obtained by conventional and non-conventional technologies. **Polymers**, 13, 2713.
- [6] Niamlang, S., Sirivat, A. (2008). Dielectrophoresis force and deflection of electroactive poly (p-phenylene vinylene)/polydimethylsiloxane blends. **Smart Materials and Structures**, 17, 035036.
- [7] Gao, Y., Fang, X., Tran, D., Ju, K., Qian, B., Li, J. (2019). Dielectric elastomer actuators based on stretchable and self-healable hydrogel electrodes. **Royal Society open science**, 6, 182145.
- [8] Tungkavet, T., Seetapan, N., Pattavarakorn, D., Sirivat, A. (2015). Graphene/gelatin hydrogel composites with high storage modulus sensitivity for using as electroactive actuator: Effects of surface area and electric field strength. **Polymer**, 70, 242-251.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [9] Fu, J., in het Panhuis, M. (2019). Hydrogel properties and applications. **Journal of Materials Chemistry B**, 7, 1523-1525.
- [10] Smith, AT., LaChance, A.M., Zeng, S., Liu, B., Sun, L. (2019) Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites. **Nano Materials Science**, 1, 31-47.
- [11] Huang, Y., Wang, C., Shao, C., Wang, B., Chen, N., Jin, h., Cheng, H., Qu, L. (2021). Graphene oxide assemblies for sustainable clean-water harvesting and green-electricity generation. **Accounts of Materials Research**, 2, 97-107.
- [12] Yunas, J., Mulyanti, B., Hamidah, I., Said, M.M., Pawinanto, R.E., Ali, W.A.F.W., Subandi, A., Hamzah, A.A., Latif, R., Majlis, B.Y. (2020). Polymer-based MEMS electromagnetic actuator for biomedical application: a review. **Polymers**, 12, 1184.
- [13] Hummer, W.S., JR., Offeman, R.E. (1958). Preparation of graphitic oxide. **Journal of the American Chemical Society**, 80, 1339.
- [14] Ling, S. (2019). Structure and synthesis of graphene oxide. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, 27, 2251-2260.
- [15] Chua, C.K., Sofer, Z., Pumera, M. (2012). Graphite Oxides: Effects of permanganate and chlorate oxidants on the oxygen composition. **Chemistry - A European Journal**, 18, 13453-13459.
- [16] Thorngkham, P., Paradee, N., Niamlang, S., Sirivat, A. (2015). Permeation study of indomethacin from polycarbazole/natural rubber blend film for electric field controlled transdermal delivery. **Journal of Pharmaceutical Sciences**, 104, 1795-1803.



## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [17] Juntanon, K., Niamlang, S., Rujiravanit, R., Sirivat, A. (2008). Electrically controlled release of sulfosalicylic acid from crosslinked poly (vinyl alcohol) hydrogel. **International Journal of Pharmaceutics**, 356, 1–11.
- [18] Alkilani, AZ., McCrudden, M., T.C., Donnelly, R.F., (2015). Transdermal drug delivery: innovative pharmaceutical developments based on disruption of the barrier properties of the stratum corneum. **Pharmaceutics**, 7, 438-470.
- [19] Mikhailov, O.V. (2013). Gelatin as it is: History and modernity. **International Journal of Molecular Sciences**, 24, 3583.
- [20] Pelrine, R., Kornbluh, R., Pei, Q., Joseph, J. (2000). High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%. **Science**, 287, 836-839.
- [21] Chen, B., Lu, JJ., Yang, CH., Yang, JH., Zhou, J., Chen, YM., Suo, Z. (2014). Highly stretchable and transparent ionogels as nonvolatile conductors for dielectric elastomer transducers. **ACS Applied Materials & Interfaces**, 6, 7840-7845.
- [22] Keplinger, C., Sun, Jeong-Yun, Foo, CC., Rothemund, P., Whitesides, GM. (2013). Stretchable, transparent, ionic conductors. **SCIENCE**, 341, 984-987.
- [23] Youn, Jung-Hwan., Jeong, SM., Hwang, G., Kim, H., Hyeon, K., Park, J., Kyung, Ki-Uk. (2020). Dielectric elastomer actuator for soft robotics applications and challenges. **Applied Sciences**, 10, 640.
- [24] Keplinger, C., Li, T., Baumgartner, R., Suo, Z., Bauer, S. (2012). Harnessing snap-through instability in soft dielectrics to achieve giant voltage-triggered deformation. **Soft Matter**, 8, 285-288.
- [25] Qiu, Y., Wang, M., Zhang, W., Liu, Y., Li, YV., Pan, K. (2018). An asymmetric graphene oxide film for developing moisture actuators. **Nanoscale**, 10, 14060-14066.
- [26] Kofod, G., Paajanen, M., Bauer, S. (2006). Self-organized minimum-energy structures

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- for dielectric elastomer actuators. **Applied Physics A – Materials Science & Processing**, *85*, 141-143.
- [27] Hosoya, N., Baba, S., Maeda, S. (2015) Hemispherical breathing mode speaker using a dielectric elastomer actuator. **The Journal of the Acoustical Society of America**, *138*, 424-428.
- [28] He, Y., Sun, Y., Wang, Z., Ma, S., Zhang, N., Zhang, J., Soh, S., Wei, L. (2017). Pristine graphene oxide film-based contactless actuators driven by electrostatic force. **Journal of Materials Chemistry C**, *5*, 9534-9539.
- [29] Bi, H., Yin, K., Xie, X., Zhou, Y., Wan, S., Banhart, F., Sun, L. (2013). Microscopic bimetallic actuator based on a bilayer of graphene and graphene oxide. **Nanoscale**, *5*, 9123-9128.
- [30] Chen, L., Weng, M., Zhou, P., Zhang, L., Huang, Z., Zhang, W. (2017). Multi-responsive actuators based on a graphene oxide composite: intelligent robot and bioinspired applications. **Nanoscale**, *9*, 9825-9833.
- [31] Ge, Y., Cao, R., Ye, S., Chen, Z., Zhu, Z., Tu, Y., Ge, D., Yang, X. (2018). Bio-inspired homogeneous graphene oxide actuator driven by moisture gradients. **Chemical Communications**. *54*, 3126-3129.
- [32] Heng, Kim-Rui., Ahmed, AS., Ahmed, M., Lau, Gih-Keong. (2017). Strong dielectric elastomer grippers with tension arch flexures. **Proceedings of SPIE**, *10163*, 101631Z.
- [33] Liu, Yu-Qing., Ma, Jia-Nan., Liu, Yan., Han, Dong-Dong., Jiang, Hao-Bo., Mao, Jiang-Wei., Han, Chang-Hao., Jiao, Zhi-Zhen., Zhang, Yong-Lai. (2017). Facile fabrication of moisture responsive graphene actuators by moderate flash reduction of graphene oxides films. **Optical Materials Express**, *7*, 2617-2625.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [34] Huang, X., Yin, Z., Wu, S., Qi, X., He, Q., Zhang, Q., Yan, Q., Boey, F., Zhang, H. (2011). Graphene-Based materials: synthesis, characterization, properties, and applications. *Small*, 7, 1876-1902.
- [35] Brochu, P., Pei, Q. (2010). Advances in dielectric elastomers for actuators and artificial muscles. *Macromolecular Rapid Communications*. 31, 10-36.
- [36] Xiao, L., Chen, Z., Feng, Z., Liu, L., Bai, Zai-Qiao., Wang, Y., Qian, L., Zhang, Y., Li, Q., Jiang, K., Fan, S. (2008). Flexible, stretchable, transparent carbon nanotube thin film loudspeakers. *Nano Letters*, 8, 4539-4545.
- [37] Cao, C., Hill, TL., Conn, AT. (2019). On the nonlinear dynamics of a circular dielectric elastomer oscillator. *Smart Materials and Structures*, 28, 075020.
- [38] Qu, J., Gao, F., Zhao, J., Duan, L., Zang, Y., Wen, S. (2019). Graphene oxide/polymer actuator driven by acetone vapor enabling an ultra-large bending angle and fast response. *Smart Materials and Structures*, 28, 105043.
- [39] NianFeng, W., Yu, CC., Hao, G., BiCheng, C., XianMin, Z. (2018). Advances in dielectric elastomer actuation technology. *Science China Technological Sciences*, 61, 1512-1527.
- [40] Dong, Y., Wang, J., Guo, X., Yang, S., Ozen, M.O., Chen, P., Liu, X., Du, W., Xiao, F., Demirci, U., Liu, Bi-Feng. (2019). Multi-stimuli-responsive programmable biomimetic actuator. *Nature Communications*. 10, 4087.
- [41] Marcano, DC., Kosynkin, DV., Berlin, JM., Sinitskii, A., Sun, Z., Slesarev, A., Alemany, LB., Lu, W., Tour, JM. (2010). Improved synthesis of graphene oxide. *ACS Nano*, 4, 4806-4814.
- [42] Dreyer, DR., Park, S., Bielawski, CW., Ruoff, RS. (2010). The chemistry of graphene oxide. *Chemical Society Reviews*, 39, 228-240.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [43] Wang, W., Wang, Z., Liu, Y., Li, N., Wang, W., Gao, J. (2012). Preparation of reduced graphene oxide/gelatin composite films with reinforced mechanical strength. **Materials research bulletin.** 47, 2245-2251.
- [43] Niamlang, S., Sirivat, A. (2008). Electromechanical responses of a crosslinked polydimethylsiloxane. **Macromolecular Symposia**, 264, 176-183.
- [45] Bera, M., Chandravati., Gupta, P., Maji, PK. (2018). Facile one-pot synthesis of graphene oxide by sonication assisted mechanochemical approach and its surface chemistry. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, 18, 902-912.
- [46] Paulchamy, B., Arthi, G., Lignesh, BD. (2015). A simple approach to stepwise synthesis of graphene oxide nanomaterial. **Journal of Nanomedicine & Nanotechnology**, 6, 1000253.
- [47] Liu, J., Yang, H., Zhen, SG., Poh, CK., Chaurasia, A., Luo, J., Wu, X., Lee, E.K., Sahoo, N.G., Lin, J., Shen, Z. (2013). A green approach to the synthesis of high-quality graphene oxide flakes via electrochemical exfoliation of pencil core. **RSC Advances**, 3, 11745-11750.
- [48] Nath, J., Chowdhury, A., Dolui, SK. (2018). Chitosan/graphene oxide-based multifunctional pH-responsive hydrogel with significant mechanical strength, self-healing property, and shape memory effect. **Advances in Polymer Technology.** 37, 3665-3679.
- [49] Jana, M., Saha, S., Khanra, P., Samanta, P., Koo, H., Murmu, N.C., Kuila, T. (2015). Non-covalent functionalization of reduced graphene oxide using sulfanilic acid azocromotrop and its application as a supercapacitor electrode material. **Journal of Materials Chemistry A**, 3, 7323-7331.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [50] Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J.W., Potts, J.R., Ruoff, R.S. (2010). Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications. **Advanced Materials**, 22, 3906-3924.
- [51] Chen, D., Feng, H., Li, J. (2012). Graphene oxide: preparation, functionalization, and electrochemical applications. **Chemical reviews**, 112, 6027-6053.
- [52] Yadav, K.K., Wadhwa, R., Khan, N., Jha, M. (2021). Efficient metal-free supercapacitor based on graphene oxide derived from waste rice. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, 4, 100075.
- [53] Choi, Jung-Weon., Kim, H.J., Ryu, H., Oh, S., Choi, Sang-June. (2020). Three-dimensional double-network hydrogels of graphene oxide, alginate, and polyacrylonitrile for copper removal from aqueous solution. **Environmental Engineering Research**, 25, 924-929.
- [54] Ossoonon, B.D., Belanger, D. (2017). Synthesis and characterization of sulfophenyl functionalized reduced graphene oxide sheets. **RSC Advances**, 7, 27224.-27234.
- [55] Chungyampin, S., Niamlang, S. (2021). The soft and high actuation response of graphene oxide/gelatin soft gel. **Materials**, 14, 7553.
- [56] Namvari, M., Namazi, H. (2014). Synthesis of magnetic citric acid-functionalized graphene oxide and its application in the removal of methylene blue from contaminated water. **Polymer International**, 63, 1881-1888.
- [57] Tseng, I-Hsiang., Chang, Jen-Chi., Huang, Shih-Liang., Tsai, Mei-Hui. (2012). Enhanced thermal conductivity and dimensional stability of flexible polyimide nanocomposite film by addition of functionalized graphene oxide. **Polymer International**, 62, 827-835.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [58] Stobinski, L., Lesiak, B., Malolepszy, A., Mazurkiewicz, M., Mierzwa, B., Zemek, J., Jiricek, P., Bieloshapka, I. (2014). Graphene oxide and reduced graphene oxide studied by the XRD, TEM and electron spectroscopy methods. **Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena**, *195*, 145-154.
- [59] Dimiev, AM., Tour, JM. (2014). Mechanism of graphene oxide formation. **ACS Nano**, *8*, 3060-3068.
- [60] Alam, SN., Sharma, N., Kumar, L. (2017). Synthesis of graphene oxide (GO) by modified Hummers method and its thermal reduction to obtain reduced graphene oxide (rGO). **Graphene**, *6*, 1-18.
- [61] Pan, L., Li, P., Tao, Y. (2020). Preparation and properties of microcrystalline cellulose/fish gelatin composite film. **Materials**, *13*, 4370.
- [62] Prochon, M., Marzec, A., Szadkowski, B. (2019). Preparation and characterization of new environmentally friendly starch-cellulose materials modified with casein or gelatin for agricultural applications. **Materials**, *12*, 1684.
- [63] Vinayan, B.P., Nagar, R., Raman, V., Rajalakshmi, N., Dhathathreyan, K.S., Ramaprabhu, S. (2012). Synthesis of graphene-multiwalled carbon nanotubes hybrid nanostructure by strengthened electrostatic interaction and its lithium ion battery application. **Journal of Materials Chemistry**, *22*, 9949-9956.
- [64] Kim, Seon-Guk., Park, Ok-Kyung., Lee, JH., Ku, Bon-Cheol. (2013). Layer-by-layer assembled graphene oxide films and barrier properties of thermally reduced graphene oxide membranes. **Carbon Letters**, *14*, 247-250.
- [65] Xu, Z., Hu, G. (2012). Simple and green synthesis of monodisperse silver nanoparticles and surface enhanced Raman scattering activity. **RSC Advances**, *2*, 11404-11409.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [66] Sujiono, E.H., Zurnansyah, Zabrian, D., Dahlan, M.Y., Amin, B.D., Samnur., Agus, J. (2020). Graphene oxide based coconut shell waste: synthesis by modified Hummers method and characterization. **Heliyon**, 6, e04568.
- [67] Kaniyoor, A., Ramaprabhu, S. (2012). A Raman spectroscopic investigation of graphite oxide derived graphene. **AIP Advances**, 2, 032183.
- [68] Ybanez, M.G., Jr., Camacho, D.H. (2021). Designing hydrophobic bacterial cellulose film composites assisted by sound waves. **RSC Advances**, 11, 32873-32883.
- [69] Gupta, C., Agarwal, A.K., Singh, B., Gadkari, S.C., Madangopal, K. (2018). True damage state and cracking in highly deformed metal matrix composites revealed by synchrotron microtomography. **Materialia**, 3, 218-229.
- [70] Justice, I., Derby, B., Davis, G., Anderson, P., Elliott, J. Characterisation of void and reinforcement distributions in a metal matrix composite by X-ray edge-contrast microtomography. **Scripta Materialia**, 48, 1259-1264.
- [71] Williams, J.J., Flom, Z., Amell, A.A., Chawla, N., Xiao, X., Carlo, F.D. (2010). Damage evolution in SiC particle reinforced Al alloy matrix composites by X-ray synchrotron tomography. **Acta Materialia**, 58, 6194-6205.
- [72] Hosdez, J., Limodin, N., Najjar, D., Witz, J-F., Charkaluk, E., Osmond, P., Forré, A., Szmytka, F. (2020). **International Journal of Fatigue**, 131, 105319.
- [73] Ickecan, D., Zan, R., Nezir, S. (2017). Eco-friendly synthesis and characterization of reduced graphene oxide. **Journal of Physics: Conference Series**, 902, 012027.
- [74] Sudesh., Kumar, N., Das, S., Bernhard, C., Varma, GD. (2013). Effect of graphene oxide doping on superconducting properties of bulk MgB<sub>2</sub>. **Superconductor Science and Technology**. 26, 095008.



## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [75] Ciplak, Z., Yildiz, N., Calimli, A. (2014). Investigation of graphene/Ag nanocomposites synthesis parameters for two different synthesis methods. **Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures**, 23, 361-370.
- [76] Zhao, Y., Hua, M., Yan, Y., Wu, S., Alsaied, Y., He, X., (2022). Stimuli-responsive polymers for soft robotics. **Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems**, 5, 515-545.
- [77] Zhao, F., Zhao, H., Zhang, Z., Jiang, L., Qu, L. (2015). Direct power generation from a graphene oxide film under moisture. **Advanced Materials**, 27, 4351-4357.
- [78] Zhang, Y., Jiang, H., Li, F., Xia, Y., Lei, Y., Jin, X., Zhang, G., Li, H. (2017). Graphene oxide based moisture-responsive biomimetic film actuators with nacre-like layered structures. **Journal of Materials Chemistry A**, 5, 14604-14610.
- [79] Wang, J., Ma, H., Liu, Y., Xie, Z., Fan, Z. (2021). MXene-based humidity-responsive actuators: preparation and properties. **ChemPlusChem**, 86, 406-417.
- [80] Shah, R., Saha, N., Saha, P. (2015). Influence of temperature, pH and simulated biological solutions on swelling and structural properties of biomineralized (CaCO<sub>3</sub>) PVP-CMC hydrogel. **Progress in Biomaterials**, 4, 123-136.
- [81] Tian, K., Shao, Z., Chen, X. (2010). Natural electroactive hydrogel from soy protein isolation. **Biomacromolecules**, 11, 3638-3643.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

ผลงานที่เผยแพร่และตีพิมพ์

## ผลงานที่เผยแพร่และตีพิมพ์

### ตีพิมพ์ในวารสาร ระดับนานาชาติ

1. Chungyampin, S., Niamlang, S. (2023). Electrical stimuli-responsive gelatin/shellac gel blends for use as controllable transdermal delivery patches. *Journal of polymers and the environment*, 31(7), 3248–3258. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02808-y> (Scopus, Q1, Accepted 20 February 2023, Published online: 15 March 2023, Volume 31, Issue 7, 2023)
2. Chungyampin, S., Niamlang, S. (2021). The soft and high actuation response of graphene oxide/gelatin soft gel. *Materials*, 14(24), 7553. <https://doi.org/10.3390/ma14247553> (Scopus, Q2, Accepted 3 December 2021, Published 9 December 2021, Volume 14, Issue 24, 2021)
3. Chungyampin, S., Niamlang, S. Enhancement of controllable circular actuator using graphene oxide particles ( **Submitted for consideration in journal MRS Communications**)
4. Chungyampin, S.; Charentanom, W., Pakawanit, P., Niamlang, S\*. Humidity-responsive actuators from Graphene oxide. (**Submitted for consideration in journal Advanced Materials Technologies**)

### นำเสนอการประชุมวิชาการ (Proceeding) ระดับนานาชาติ

1. Chungyampin, S.; Thongpool V.; Niamlang, S. Effect of oxidizing agent on electrical and physical properties of graphene oxide, The 2020 Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2020) (PP.MN26-MN3), IMPACT Forum, Muangthong Thani, Nonthaburi, Thailand, 13-14 February 2020.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	สุพนิต จิงแยมปิ่น
วัน เดือน ปีเกิด	28 เมษายน 2527
ที่อยู่	101 หมู่ 5 ตำบล สระแก้ว อำเภอ ท่าศาลา จังหวัด นครศรีธรรมราช 80160
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สาขาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์	098-827-4833
อีเมลล์	supanit_c@mail.rmutt.ac.th

