

สมบัติของฟิล์มนาโนคอมพอสิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/รีดิซ์แกรฟีนออกไซด์

นางสาวจุฑามาศ อ่ำไพลงษ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROPERTIES OF CARBOXYMETHYL CELLULOSE/REDUCED GRAPHENE OXIDE NANO
COMPOSITE FILMS

Miss Jutamas Ampaiwong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติของฟิล์มนาโนคอมพอสิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/ รีดิวิซ์แกรฟีนออกไซด์
โดย	นางสาวจุฑามาศ อำไพวงษ์
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.นิภาพรรณ โสถถิยานนท์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.นิภาพรรณ โสถถิยานนท์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีภูถกิจ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

5871925323 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: CARBOXYMETHYL CELLULOSE/ REDUCED GRAPHENE OXIDE

JUTAMAS AMPAIWONG: PROPERTIES OF CARBOXYMETHYL CELLULOSE/REDUCED GRAPHENE OXIDE NANO COMPOSITE FILMS. ADVISOR: ASSOC. PROF. PRANUT POTIYARAJ, Ph.D., CO-ADVISOR: NIPHAPHUN SOATTHIYANON, Ph.D., 101 pp.

This research aimed to improve the properties of the carboxymethyl cellulose (CMC) film incorporated with graphene oxide (GO) and reduced graphene oxide (rGO), especially mechanical properties and electrical conductivity. In addition, the film treatment with citric acid in 90% methanol was able to reduce the water solubility of the CMC film, and the shape of the treated film was nearly stable in high moisture condition. The proper citric acid concentration was 1.00%w/v of 90% methanol. The CMC/GO and CMC/rGO nanocomposite films with 0, 0.25, 0.50, 0.75 and 1.00 wt% GO and rGO loadings were prepared by solution mixing and casting. The nanocomposite films were also treated with 1.00%w/v citric acid in 90% methanol. In addition, the untreated CMC/GO and CMC/rGO nanocomposite films with 0 and 0.50 wt% GO and rGO loadings were prepared and compared with the treated films. It was found that the mechanical properties of the treated CMC film were higher than those of the untreated film. However, the electrical conductivity of the treated CMC film was similar to that of the untreated CMC film. The surface morphology of untreated CMC film was smoother than that of the treated CMC film. For the CMC/GO and CMC/rGO nanocomposite films with 0.50 wt% GO and rGO, the trend of their properties was similar. In the case of the treated films, it was found that both the CMC/GO and CMC/rGO films had higher water solubility, water absorption, mechanical properties, electrical conductivity, and thermal decomposition than the neat CMC film. The effects of the filler addition on the water solubility and water absorption were also more pronounced for the CMC/rGO film. The tensile strength and Young's modulus of the CMC/GO and CMC/rGO films were almost the same. However, the elongation at break of the films decreased with increasing GO and rGO contents. The addition of GO and rGO had positive effects on the electrical conductivity of the CMC film, particularly for the 1.00 wt% rGO addition. The thermal degradation behavior of the CMC nanocomposite films incorporated with the GO and the rGO was similar.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer Student's Signature

Science Advisor's Signature

Academic Year: 2016 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องมาจากความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่านด้วยกัน

ผู้ทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และดร.นิภาพรรณ โสถถียนนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้ความช่วยเหลือในด้านข้อมูล ความรู้ทางวิชาการ ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งเยี่ยม

ขอขอบพระคุณ ประธานกรรมการและกรรมการที่สอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำในการเขียนวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ตลอดจนให้ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ นักวิจัย บุคลากร เจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบพระคุณ ดร.นาฏนิตดา รอดทองคำ คุณปราณี รัตนวลีดิโรจน์ และคุณกนกวรรณ แสงเกียรติยศ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ทั้งทางด้านอุปกรณ์ สถานที่เครื่องมือในการทดลอง รวมไปถึงชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหาในการทำวิจัย และขอขอบพระคุณบุคลากรในศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ความสะดวกในการวิเคราะห์ทดสอบต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ Ms. Karen Abouhamad สังกัดภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัย Massachusetts เมือง Amherst ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นอย่างดี ในการทดสอบค่าการนำไฟฟ้า

ขอบคุณเพื่อน ๆ และพี่ ๆ หลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี

ขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยให้งานวิจัยนี้สามารถดำเนินงานจนสำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ผู้ทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุนการศึกษาและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

นางสาวจุฑามาศ อำไพพงษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....	3
2.1 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	3
2.2 คอมพอสิต (composite).....	5
2.2.1 การแบ่งประเภทของวัสดุคอมพอสิตตามประเภทของเมทริกซ์	5
2.2.2. การแบ่งประเภทของวัสดุคอมพอสิตตามลักษณะของสารเสริมแรง	6
2.3 โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หรือโซเดียม-ซีเอ็มซี (sodium-carboxymethyl cellulose, Na-CMC).....	8
2.4 รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (reduced graphene oxide)	9
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	14
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนงานวิจัย.....	14
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	14
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	15

3.4	ขั้นตอนการทดลอง	16
3.4.1	การเตรียมฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์	16
3.4.1.1	การเตรียมฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหรือซีเอ็มซี (CMC) ความเข้มข้นร้อยละ 3	16
3.4.1.2	การเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ (CMC/GO).....	17
3.4.1.3	การเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (CMC/rGO).....	18
3.4.2	การปรับสภาพฟิล์มด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล.....	20
3.4.3	การทดสอบสมบัติของฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์	21
3.4.3.1	การทดสอบการละลายน้ำ (water solubility)	21
3.4.3.2	การทดสอบการบวมตัว (swelling).....	22
3.4.3.3	การทดสอบการดูดซึมน้ำ (water absorption).....	22
3.4.3.4	การทดสอบสมบัติเชิงกล (mechanical properties).....	22
3.4.3.5	สัณฐานวิทยา (morphology).....	23
3.4.3.6	การนำไฟฟ้า (electrical conductivity).....	24
3.4.3.7	การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (thermal properties).....	25
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	26
4.1	ผลการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกต่อฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหรือซีเอ็มซี	26
4.1.1	การละลายน้ำ (water solubility) ของฟิล์มซีเอ็มซี	26
4.1.2	การบวมตัว (swelling) ของฟิล์มซีเอ็มซี	27

4.2 การทดสอบฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล	29
4.2.1 การละลายน้ำ (water solubility) ของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล	29
4.2.2 การดูดซึมน้ำ (water absorption) ของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล	30
4.2.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล	32
4.2.3.1 ความทนแรงดึง (tensile strength).....	32
4.2.3.2 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break).....	34
4.2.3.3 ยังส์มอดุลัส (Young's modulus).....	37
4.2.4 สัณฐานวิทยา (morphology) ของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล.....	39
4.2.5 สมบัติการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ของฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล	46
4.2.6 การสลายตัวทางความร้อน (thermal properties) ของฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล.....	49
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	53
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะ	54
รายการอ้างอิง.....	55
ภาคผนวก.....	58

ภาคผนวก ก การละลายน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้กรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นแตกต่างกันและการละลายน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90.....	59
ภาคผนวก ข การบวมตัวของฟิล์มซีเอ็มซีที่ใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นแตกต่างกันในการปรับสภาพ	60
ภาคผนวก ค การดูดซึมน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์	61
ภาคผนวก ง สมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์	63
ภาคผนวก จ การนำไฟฟ้าของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์	69
ภาคผนวก ฉ TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และซีเอ็มซีรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์.....	70
ภาคผนวก ช ค่าทดสอบทางสถิติโดยใช้ t-test และ ANOVA สำหรับสมบัติการละลายน้ำ การบวมตัว และสมบัติเชิงกล ของฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.....	75
ภาคผนวก ซ ปริมาณอะตอมของคาร์บอน ออกซิเจน และโซเดียมในฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟิล์มซีเอ็มซีที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 0.50-1.50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90	100
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	101

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	14
ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	15
ตารางที่ 3.3 ปริมาณของสารที่ใช้เตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ (CMC/GO) โดยปริมาณร้อยละของแกรฟีนออกไซด์ที่เติมคือ 0.25-1.00 โดยน้ำหนัก.....	17
ตารางที่ 3.4 ปริมาณของสารที่ใช้เตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (CMC/rGO) โดยปริมาณร้อยละของแกรฟีนออกไซด์ที่เติมคือ 0.25-1.00 โดยน้ำหนัก	19
ตารางที่ 3.5 ฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกใน เมทานอลและฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ที่ ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล.....	21

สารบัญรูปร่างภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติก (Mueller, 2006).....	4
รูปที่ 2.2 อนุภาคที่เสริมแรงในเมทริกซ์	6
รูปที่ 2.3 เส้นใยที่เสริมแรงในเมทริกซ์	7
รูปที่ 2.4 โครงสร้างแผงประกอบแซนด์วิช (sandwich panels).....	7
รูปที่ 2.5 รูปร่าง ขนาด ลักษณะของการกระจาย และการจัดเรียงตัวของสารเสริมแรงในเมทริกซ์....	8
รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการเตรียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากสารตั้งต้นเซลลูโลส.....	9
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของแกรฟีน แกรฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (Griggs, 2016)	10
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหรือซีเอ็มซี (CMC)	16
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ (CMC/GO).....	18
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (CMC/rGO)	19
รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบอบเนกประสงค์ ยี่ห้อ HOUNSFIELD รุ่น H10KM	23
รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-7610F	24
รูปที่ 3.6 เครื่องวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด ยี่ห้อ KEITHLEY รุ่น 2450	24
รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) ยี่ห้อ NETZCH รุ่น TG 209 F3 Tarsus	25
รูปที่ 4.1 การละลายน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (CMC-U) และฟิล์มซีเอ็มซีที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 0.50, 1.00 และ 1.50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 (CMC-T-0.50, CA CMC-T-1.00CA และ CMC-T-1.50CA ตามลำดับ).....	27

- รูปที่ 4.2** การบวมตัวของฟิล์มซีเอ็มซีที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 0.50, 1.00 และ 1.50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 (CMC-T-0.50CA, CMC-T-1.00CA และ CMC-T-1.50CA ตามลำดับ)..... 28
- รูปที่ 4.3** การละลายน้ำของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก..... 30
- รูปที่ 4.4** การดูดซึมน้ำของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือ แกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก ที่เวลา 2 นาที ถึง 1440 นาที 31
- รูปที่ 4.5** การสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่าง โซเดียม-ซีเอ็มซี (Na-CMC) กับ แกรฟีนออกไซด์ (GO) (Layek et al., 2013)..... 31
- รูปที่ 4.6** ความทนแรงดึงของฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก (CMC/GO 0.50 และ CMC/rGO 0.50 ตามลำดับ) โดยฟิล์มไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล 33
- รูปที่ 4.7** กลไกการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างกรดซิตริกและพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) (Azeredo et al., 2015) 33
- รูปที่ 4.8** ความทนแรงดึงของฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือ แกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก 34
- รูปที่ 4.9** ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก (CMC/GO 0.50 และ CMC/rGO 0.50 ตามลำดับ) โดยที่ฟิล์มไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล..... 35
- รูปที่ 4.10** ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือ แกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก 36

รูปที่ 4.11 ยังสัมมูล์ของฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก (CMC/GO 0.50 และ CMC/rGO 0.50 ตามลำดับ) โดยที่ฟิล์มไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิดริกในเมทานอล.....	37
รูปที่ 4.12 ยังสัมมูล์ของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิดริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก.....	38
รูปที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (CMC-U) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา).....	40
รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซีที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิดริกในเมทานอล (CMC-T) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา).....	40
รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (CMC/GO 0.50-U) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา).....	41
รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (CMC/rGO 0.50-U) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา) .	41
รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิดริกในเมทานอล (CMC/GO 0.25-T) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา).....	42
รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิดริกในเมทานอล (CMC/GO 0.50-T) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา).....	42
รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิดริกในเมทานอล (CMC/GO 0.75-T) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา).....	43
รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิดริกในเมทานอล (CMC/GO 1.00-T) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา).....	43

รูปที่ 4.21 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟริกในเมทานอล (CMC/rGO 0.25-T) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา).....	44
รูปที่ 4.22 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟริกในเมทานอล (CMC/rGO 0.50-T) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา).....	44
รูปที่ 4.23 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟริกในเมทานอล (CMC/rGO 0.75-T) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา).....	45
รูปที่ 4.24 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟริกในเมทานอล (CMC/rGO 1.00-T) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา).....	45
รูปที่ 4.25 ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีน-ออกไซด์และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก (CMC/GO 0.50 และ CMC/rGO 0.50 ตามลำดับ) โดยที่ฟิล์มไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟริกในเมทานอล	47
รูปที่ 4.26 ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิด คือแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์-แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก.....	48
รูปที่ 4.27 ลักษณะการส่งกระแสไฟฟ้าในพอลิเมอร์ที่มีสารตัวเติมเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ-สารตัวเติม (Rallini and Kenny, 2017).....	48
รูปที่ 4.28 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์-แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก.....	50
รูปที่ 4.29 DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟริกในเมทานอลโดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์-แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก.....	50

- รูปที่ 4.30** อุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อน (onset decomposition temperature, T_{onset}) ของฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก..... 51
- รูปที่ 4.31** อุณหภูมิสลายตัวทางความร้อนสูงสุด (maximum decomposition temperature, T_{max}) ของฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก..... 51
- รูปที่ 4.32** ส่วนร้อยละมวลที่เหลือ (residue) หลังจากการสลายตัวทางความร้อน ของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก..... 52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์พลาสติกมีปริมาณการใช้งานเป็นจำนวนมาก เพราะน้ำหนักเบา ราคาถูก ขึ้นรูปง่าย จึงทำให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกสะสม เนื่องจากพลาสติกที่ใช้งานส่วนใหญ่ได้มาจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งพอลิเมอร์สังเคราะห์ส่วนใหญ่เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายยากต้องใช้เวลาหลายร้อยปี ดังนั้นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงได้รับความสนใจที่จะนำมาใช้งานมากขึ้น ประกอบกับความแปรปรวนทางด้านราคาของแหล่งวัตถุดิบปิโตรเลียมที่ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์สังเคราะห์ ทำให้มีการพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์จากแหล่งวัตถุดิบทางธรรมชาติเพื่อใช้ทดแทนพอลิเมอร์สังเคราะห์ งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการบดซีเมทิลเซลลูโลสหรือซีเอ็มซี (carboxymethyl cellulose, CMC) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ที่เป็นหนึ่งในอนุพันธ์ของเซลลูโลส มีสมบัติย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradability) ไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต (non-toxicity) มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) สามารถละลายน้ำได้ (water solubility) และเป็นพอลิเมอร์ที่มีความสำคัญทางอุตสาหกรรม จึงมีความพยายามในการนำไปใช้ทดแทนพอลิเมอร์สังเคราะห์ทั่วไปที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านบรรจุภัณฑ์ การใช้งานของซีเอ็มซีมีหลายรูปแบบ ส่วนมากจะอยู่ในรูปไฮโดรเจล (hydrogel) หรือฟิล์ม (film) สำหรับฟิล์มซีเอ็มซีพบว่าฟิล์มดังกล่าวมีสมบัติเชิงกลต่ำ และไม่สามารถทนต่อการใช้งานที่ภาวะความชื้นสูง ส่งผลให้จำกัดการนำฟิล์มซีเอ็มซีไปใช้งาน ด้วยเหตุนี้จึงมีหลายงานวิจัยพยายามปรับปรุงสมบัติดังกล่าวโดยการผสมกับตัวเติม (filler) ต่าง ๆ สำหรับงานวิจัยนี้สนใจปรับปรุงฟิล์มซีเอ็มซีด้วยการใช้แกรฟีน (graphene) เป็นตัวเติม ซึ่งแกรฟีนเป็นวัสดุที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติเด่นจากโครงสร้างของคาร์บอนอะตอมที่จัดเรียงเป็นระนาบสองมิติซึ่งเป็นส่วนช่วยเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งแกรฟีนยังช่วยเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าให้กับพอลิเมอร์ ทำให้สามารถนำฟิล์มที่ผ่านการปรับปรุงแล้วนั้นไปประยุกต์ใช้งานได้มากขึ้น

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มซีเอ็มซีโดยใช้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (reduced graphene oxide, rGO) เป็นตัวเติมเสริมแรง อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วการผสมแกรฟีนกับพอลิเมอร์ทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้เทคนิคการนำแกรฟีนออกไซด์ซึ่งสามารถเข้ากับซีเอ็มซีได้ง่ายกว่ามาผสมกับซีเอ็มซีก่อน จากนั้นทำปฏิกิริยารีดักชันเพื่อรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ให้กลายเป็นแกรฟีน รวมทั้งปรับปรุงฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซีให้ละลายน้ำได้ยากขึ้นและมี

ความคงรูปโดยใช้กรดซัลฟิวริกในเมทานอล โดยคาดว่าฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มซีเอ็มซีและสามารถนำไฟฟ้าได้เพื่อลดการเกิดไฟฟ้าสถิต รวมทั้งทนต่อการใช้งานในภาวะความชื้นสูงได้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- (1) ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโดยใช้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เป็นตัวเติมเสริมแรง
- (2) เตรียมฟิล์มที่มีความคงรูปของฟิล์มนาโนคอมพอสิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เพื่อให้สามารถใช้งานในภาวะความชื้นสูงได้

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ฟิล์มนาโนคอมพอสิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่มีความคงรูปและมีสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำไฟฟ้าดีขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มคอมพอสิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเสริมแรงด้วยแกรฟีนออกไซด์และฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

เนื่องจากในปัจจุบันเกิดปัญหาขยะพลาสติกสะสม เนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่ที่ใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์จากพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ได้จากแหล่งวัตถุดิบของปิโตรเลียม ซึ่งมี น้ำหนักเบา ราคาถูก และสามารถขึ้นรูปง่าย แต่การย่อยสลายยากต้องใช้เวลาหลายร้อยปี อีกทั้งราคาของแหล่งวัตถุดิบปิโตรเลียมที่ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์สังเคราะห์มีราคาสูงขึ้น ซึ่งทำให้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่พัฒนามาจากวัสดุพอลิเมอร์จากธรรมชาติได้รับความสนใจศึกษาและนำมาใช้งานมากขึ้นเพื่อใช้ทดแทนพอลิเมอร์สังเคราะห์ได้ ทั้งนี้การพัฒนาสมบัติของพอลิเมอร์สามารถเตรียมในรูปของคอมพอสิต และอาศัยการผสมสารตัวเติมเพื่อช่วยในการปรับปรุงสมบัติเป็นส่วนใหญ่

2.1 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้ คือพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้โดยอาศัยกลไกการย่อยสลายของสารอินทรีย์โดยใช้จุลินทรีย์ โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างโดยใช้ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ทำให้เกิดเป็นสารชีวมวลใหม่ ซึ่งสามารถวัดได้โดยวิธีการทดสอบตามมาตรฐานการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น (Avérous, 2004)

การย่อยสลายของพลาสติกสามารถแบ่งเป็น 5 ประเภท ดังนี้ การย่อยสลายด้วยแสง (photodegradation) การย่อยสลายทางกล (mechanical degradation) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation degradation) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis degradation) และการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) (Shah et al., 2008)

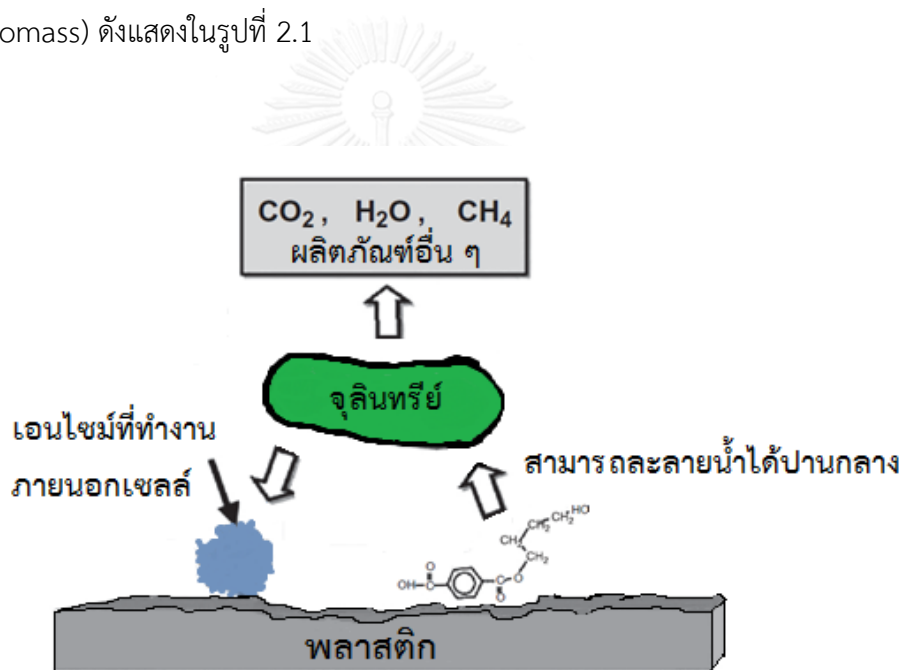
(1) การย่อยสลายด้วยแสงของพอลิเมอร์ เกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสียูวี เช่น หมู่คีโตน (ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะทำให้พันธะแตกออกกลายเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่

(2) การย่อยสลายทางกลของพลาสติก คือ การให้แรงกระทำแก่พอลิเมอร์ ทำให้แตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ

(3) การย่อยสลายของพลาสติกผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือ การเติมหมู่ออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยการให้ความร้อนและแสงยูวีเป็นตัวทำให้เกิดสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) ซึ่งจะแตกตัวต่อไปเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH แล้วเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีในสายโซ่พอลิเมอร์

(4) การย่อยสลายพลาสติกโดยอาศัยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งเป็นการทำให้สายพอลิเมอร์เกิดการแตก ทั้งนี้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมีอยู่ 2 ประเภท คือปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไม่ใช้แคตาไลสต์ (non-catalytic hydrolysis) และปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสใช้แคตาไลสต์ (catalytic hydrolysis) การใช้แคตาไลสต์เป็นการช่วยเร่งการย่อยสลายโมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยอาศัยเอนไซม์ (enzyme) เบส และกรด ช่วยในการย่อยสลาย

(5) การย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติก คือ การย่อยโดยอาศัยจุลินทรีย์ หลักการทำงานมี 2 ขั้นตอน เริ่มแรกจุลินทรีย์ปล่อยเอนไซม์ทำให้พันธะภายในของพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็ก จากนั้นจุลินทรีย์จะย่อยโมเลกุลเล็ก ๆ ของพอลิเมอร์ ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้ายคือพลังงานและสารประกอบขนาดเล็ก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่าง ๆ และมวลชีวภาพ (biomass) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติก (Mueller, 2006)

2.2 คอมพอสิต (composite)

คอมพอสิต คือวัสดุมากกว่า 1 ชนิดมาผสมกันแต่ไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน สมบัติของคอมพอสิตขึ้นอยู่กับวัสดุที่มาผสม ซึ่งสมบัติหลักเป็นการรวมสมบัติที่ดีของวัสดุแต่ละชนิดและคำนึงถึงความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน คอมพอสิตประกอบด้วย 2 เฟส (phase) หลัก ๆ คือ เมทริกซ์ (matrix phase) และสารเสริมแรง (reinforcement phase) (Shah et al., 2008)

(1) เมทริกซ์ คือวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก หรือ เฟสต่อเนื่อง (continuous phase) ทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักของชิ้นงานและยึดสารเสริมแรง (reinforcement) เข้าด้วยกันและยังช่วยเป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (load transfer medium) เมทริกซ์ส่วนมากที่นิยมใช้คือ พอลิเมอร์ (polymers) โลหะ (metals) และเซรามิก (ceramics)

(2) สารเสริมแรง คือส่วนที่กระจายตัว แทรกอยู่ในเมทริกซ์ ทำหน้าที่ช่วยให้วัสดุคอมพอสิตมีความแข็งแรง ส่วนมากเป็นเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง (discontinuous phase)

2.2.1 การแบ่งประเภทของวัสดุคอมพอสิตตามประเภทของเมทริกซ์

คอมพอสิตสามารถแบ่งตามชนิดของเมทริกซ์ได้ 3 ประเภทหลัก ๆ คือ โลหะคอมพอสิต (metal matrix composite, MMC) เซรามิกคอมพอสิต (ceramic matrix composite, CMC) และ พอลิเมอร์คอมพอสิต (polymer matrix composite, PMC) (Shah et al., 2008)

(1) โลหะคอมพอสิต เป็นวัสดุที่มีโลหะเป็นเมทริกซ์ ซึ่งมีความแข็งแรงและความเหนียวสูง แต่มีการทนต่อความล้าที่ต่ำ โดยเฉพาะอะลูมิเนียมและไทเทเนียม

(2) เซรามิกคอมพอสิต เป็นคอมพอสิตที่มีเซรามิกเป็นเมทริกซ์ ซึ่งเซรามิกเป็นวัสดุที่สามารถทนต่อการกัดกร่อน ไม่นำความร้อน ใช้งานที่อุณหภูมิสูง และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับความร้อนต่ำมาก แต่เซรามิกมีข้อเสียคือ มีความเหนียวน้อย ทำให้เปราะและแตกหักง่าย

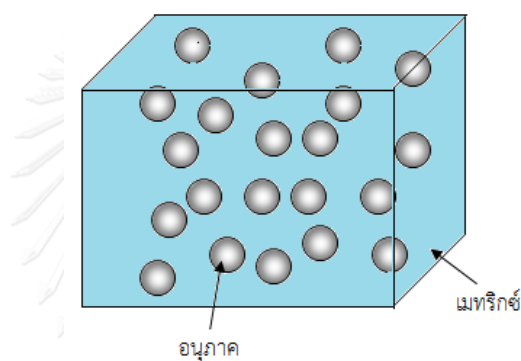
(3) พอลิเมอร์คอมพอสิต เป็นวัสดุที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ ซึ่งพอลิเมอร์เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เกิดจากหน่วยซ้ำที่เชื่อมต่อกันเป็นสายยาว แต่พบว่าพอลิเมอร์มีสมบัติที่ไม่ค่อยแข็งแรง และมีความหนาแน่นต่ำ พอลิเมอร์สามารถแบ่งเป็น เทอร์โมเซตติง (thermosetting polymer) และ เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic polymer) โดยที่เทอร์โมเซตติงมีโครงสร้างแบบเชื่อมขวาง (crosslink) เมื่อเกิดการเชื่อมโยงแล้วไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก ส่วนเทอร์โมพลาสติกสามารถหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อน และเกิดการแข็งตัวเมื่อทำให้เย็นลง ทั้งนี้พลาสติกที่แข็งตัวแล้วสามารถนำมาหลอมซ้ำได้

2.2.2. การแบ่งประเภทของวัสดุคอมพอสิตตามลักษณะของสารเสริมแรง

สารเสริมแรง คือสารที่เติมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ที่มีการใช้งานอยู่มีหลายลักษณะเช่น แผ่น อนุภาค และเส้นใย เป็นต้น ทั้งนี้วัสดุคอมพอสิตสามารถแบ่งตามลักษณะของสารเสริมแรงได้ 3 แบบคือ

(1) วัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยอนุภาค (particle-reinforced composite)

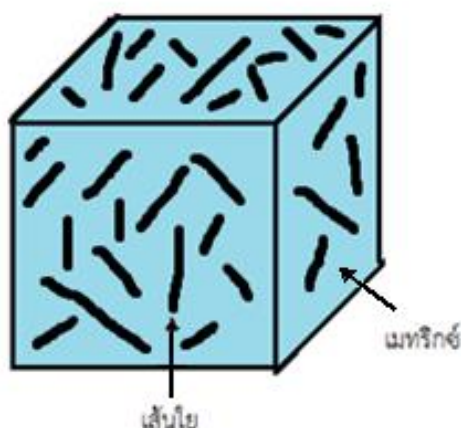
คอมพอสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็น เม็ด (beads) แผ่น (flake) หรือผง (powder) ที่มีขนาดเล็ก (มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยความแข็งแรงขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคความสามารถในการเข้ากันได้กับเมทริกซ์ ซึ่งอนุภาคของสารเสริมแรงที่เล็กจะสามารถกระจายตัวได้ดีและลดการเคลื่อนที่ของเมทริกซ์ จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น



รูปที่ 2.2 อนุภาคที่เสริมแรงในเมทริกซ์

(2) วัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย (fibrous composite)

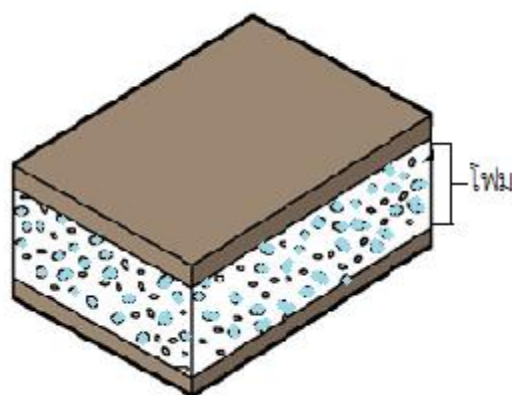
การเสริมแรงด้วยเส้นใย (fibers) อาจมีลักษณะเป็นแถบหรือเป็นเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งมีลักษณะที่เป็นเส้นใยสั้น (short fibers) หรือเส้นใยยาวต่อเนื่อง (continuous fibers) ส่วนใหญ่มักใช้เส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง เพื่อทำหน้าที่ในการรับและกระจายแรง สมบัติของวัสดุที่ได้จากการเสริมแรงด้วยเส้นใยจะขึ้นกับหลายปัจจัย ได้แก่ ปริมาณของเส้นใย ปริมาณของตัวประสานระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ ชนิดของเมทริกซ์ที่ใช้ และการกระจายตัวของเส้นใย



รูปที่ 2.3 เส้นใยที่เสริมแรงในเมทริกซ์

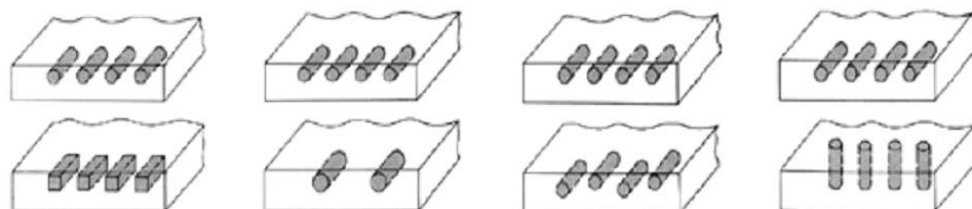
(3) วัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างอื่น ๆ (other composite structures)

การเสริมแรงด้วยโครงสร้าง เกิดจากคอมโพสิตในลักษณะเป็นชั้นหรือแผ่น ที่ยึดติดกันกับเมทริกซ์ สมบัติของวัสดุนอกจากขึ้นกับองค์ประกอบแล้ว ยังขึ้นกับรูปทรงของโครงสร้างด้วย โครงสร้างของวัสดุที่นิยมคือ โครงสร้างลามิना (lamina) และโครงสร้างแผงประกอบแซนด์วิช (sandwich panels) แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยโครงสร้างลามิनाจะเกิดจากการเรียงตัวซ้อนกันของแผ่นที่มีลักษณะ 2 มิติ ส่งผลให้โครงสร้างลามิनाมีความแข็งแรงที่สูงและสามารถรองรับแรงกระทำได้ทุกทิศทุกทาง ส่วนโครงสร้างแผงประกอบแซนด์วิช มีองค์ประกอบ 2 ส่วนคือชั้นนอกและชั้นใน โดยชั้นนอกเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง เพื่อทำหน้าที่ในการรับแรงที่มากกระทำในแนวระนาบและรับแรงโค้งงอแนวขวาง ส่วนชั้นในเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า เช่น โฟมพอลิเมอร์ และยางสังเคราะห์ เป็นต้น



รูปที่ 2.4 โครงสร้างแผงประกอบแซนด์วิช (sandwich panels)

ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของคอมพอลิโอมมีหลายอย่าง เช่น รูปร่าง ปริมาณ ขนาด และลักษณะการกระจายตัวของสารเสริมแรง ดังแสดงในรูปที่ 2.5



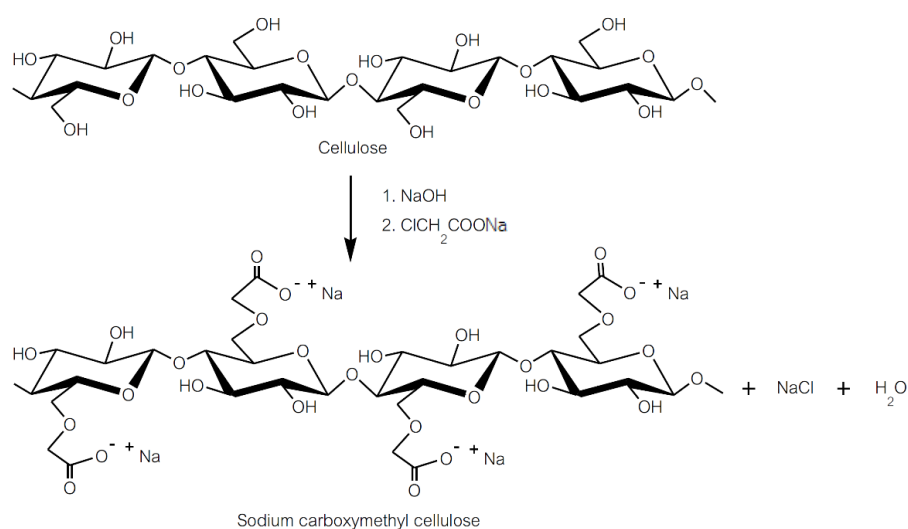
รูปร่างของสารเสริมแรง ขนาดของสารเสริมแรง ลักษณะของการกระจาย ลักษณะการจัดเรียงตัว

รูปที่ 2.5 รูปร่าง ขนาด ลักษณะของการกระจาย และการจัดเรียงตัวของสารเสริมแรงในเมทริกซ์

ในงานวิจัยนี้สนใจที่ศึกษาและพัฒนาพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ ให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี และสามารถใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น พอลิเมอร์ที่สนใจศึกษาคือ โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หรือโซเดียม-ซีเอ็มซี (sodium-carboxymethyl cellulose, Na-CMC) โดยใช้ โซเดียม-ซีเอ็มซีเป็นเมทริกซ์ในการเตรียมเป็นวัสดุคอมพอลิโอม และปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์โดยอาศัยสารตัวเติมคือ แกรฟีนออกไซด์ (graphene oxide) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ เป็นสารที่ช่วยในการเสริมแรงให้พอลิเมอร์ รวมไปถึงการปรับปรุงการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์

2.3 โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หรือโซเดียม-ซีเอ็มซี (sodium-carboxymethyl cellulose, Na-CMC)

โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หรือ โซเดียม-ซีเอ็มซี เป็นหนึ่งในอนุพันธ์ของเซลลูโลส (cellulose) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติและเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ ชนิดประจุลบ (anionic linear polysaccharide) ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ เบตา-1,4 ไกลโคซิดิก (β -1,4 glycosidic) โดยภายในโมเลกุลมีหมู่คาร์บอกซีเมทิล (carboxymethyl group) ที่ตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 โซเดียม-ซีเอ็มซีเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilicity) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสในรูปต่าง (alkali cellulose) กับโซเดียม-โมโนคลอโรอะซิเตต (sodium monochloroacetate) (Heinze and Pfeiffer, 1999) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซีเอ็มซีมีลักษณะเป็นผงสีขาว เมื่อเป็นสารละลายมีลักษณะหนืดใส ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส (Cheng and Biswas, 2011)



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการเตรียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากสารตั้งต้นเซลลูโลส
(Heinze and Pfeiffer, 1999)

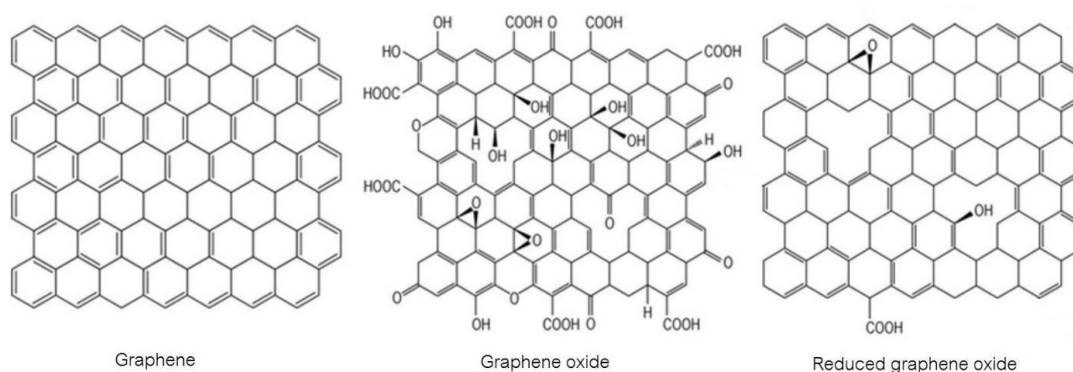
โซเดียม-ซีเอ็มซีมีสมบัติเด่นมากมาย ซึ่งสมบัติเด่นที่สำคัญได้แก่ สมบัติชอบน้ำ จึงสามารถละลายน้ำได้ดี สามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพ อีกทั้งสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ นอกจากนี้ยังไม่มีพิษ อีกด้วย

โซเดียม-ซีเอ็มซีสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ การใช้เป็นสารทำให้ข้น (thickening agent) สารที่ช่วยในการยึดเกาะ (binding agent) สารคงสภาพ (stabilizing agent) สารกันน้ำ (water resistance agent) หรือในรูปไฮโดรเจล (hydrogel) และฟิล์ม อีกทั้งยังใช้เป็นตัวเติม (filler) เพื่อปรับปรุงสมบัติการย่อยสลายและช่วยเสริมแรงในวัสดุอื่น ๆ (Almasi et al., 2010)

2.4 รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (reduced graphene oxide)

แกรฟีน เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนที่มีความหนาเพียง 1 ชั้น การจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนอยู่ในรูปแบบ 2 มิติ มีลักษณะคล้ายตาข่ายรูปหกเหลี่ยม (hexagonal structure) มีพันธะโคเวเลนต์ยึดเหนี่ยวกันระหว่างอะตอมคาร์บอนภายในโครงสร้าง ส่งผลให้แกรฟีนมีสมบัติเด่นด้านอิเล็กทรอนิกส์ มีสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลดี อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่น รวมถึงมีน้ำหนักเบา แต่พบว่าแกรฟีนมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) และจับตัวกันในตัวทำละลาย

แกรฟีนถูกเตรียมขึ้นครั้งแรกด้วยวิธีเชิงกลเปลี่ยนแกรไฟต์ (graphite) ให้กลายเป็นแกรฟีน โดยอาศัยการแยกชั้นด้วยเทปกาว ซึ่งใช้เศษแกรไฟต์ วางด้านบนเทปกาวที่มีความเหนียว จากนั้นทาบปลายอีกด้านของเทปกาวให้ประกบกันและติดกับเศษแกรไฟต์ให้แน่น จากนั้นดึงแยกเทปกาวออกจากกันอย่างช้า ๆ แกรไฟต์จะติดอยู่ที่เทปกาวทั้ง 2 ด้าน การทำเช่นนี้เป็นการแยกกันของชั้นแกรไฟต์ เมื่อทำซ้ำแบบเดิมไปเรื่อย ๆ ด้วยเทปกาวแผ่นใหม่ชั้นแกรไฟต์จะถูกแยกให้บางลงเรื่อย ๆ จนเหลือเพียงชั้นเดียวในที่สุด (Novoselov et al., 2004) จากการที่แกรฟีนมีสมบัติไม่ชอบน้ำและจับตัวกันในสารละลาย จึงมีการพัฒนาการเตรียมแกรฟีนโดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ของแกรไฟต์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแกรไฟต์ออกไซด์ จากนั้นแยกชั้นได้เป็นแกรฟีนออกไซด์ (graphene oxide, GO) ซึ่งแกรฟีนออกไซด์มีหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจนเป็นจำนวนมาก เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) และหมู่อีพอกซี (epoxy group) เป็นต้น จึงทำให้แกรฟีนออกไซด์มีสมบัติชอบน้ำ สามารถเข้ากับวัสดุอื่นได้ง่ายและมีการกระจายตัวในน้ำหรือตัวทำละลายอื่น ๆ ได้ดี จากนั้นใช้ปฏิกิริยารีดักชันกับแกรฟีนออกไซด์เพื่อให้ได้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ หากสามารถกำจัดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนได้หมดก็จะได้แกรฟีน ซึ่งวิธีการนี้ถือเป็นการเตรียมที่มีประสิทธิภาพมาก สำหรับโครงสร้างของแกรฟีน แกรฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 2.7 (Yang et al., 2015)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของแกรฟีน แกรฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (Griggs, 2016)

การเตรียมรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การรีดักชันด้วยความร้อน (thermal reduction) การรีดักชันด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave) การรีดักชันด้วยแสง (flash) การรีดักชันทางเคมี (chemical reduction) เป็นต้น

การรีดักชันด้วยความร้อนเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการเตรียมรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ โดยใช้ความร้อนประมาณ 300 องศาเซลเซียส และต้องอาศัยความดันในการช่วยทำปฏิกิริยาประมาณ

40 เมกะปาสคาล (McAllister et al., 2007) และพบว่าเมื่อมีข้อจำกัดเกี่ยวกับสารตั้งต้นที่ใช้ เช่น สารตั้งต้นที่เป็นพอลิเมอร์โปร่งใสจะไม่สามารถใช้ได้ เนื่องจากมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ต่ำ (Shin et al., 2009)

วิธีการรีดักชันด้วยคลื่นไมโครเวฟคล้ายกับการรีดักชันด้วยความร้อนคืออาศัยความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องแต่เป็นความร้อนจากการแผ่รังสี ให้ความร้อนโดยตรงกับแกรฟีนออกไซด์ในลักษณะผง ข้อดีของวิธีนี้คือใช้เวลาไม่นาน แต่สารตั้งต้นที่ใช้ต้องทนต่อความร้อน (Zhu et al., 2010)

การรีดักชันด้วยแสง ใช้หลอดซีนอน (xenon lamp) อาศัยแสงจากหลอดในการทำปฏิกิริยา และต้องถ่ายในระยะเวลาใกล้ (น้อยกว่า 2 มิลลิเมตร) อีกทั้งต้องทำซ้ำหลายครั้ง (Cote et al., 2009) อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของวิธีนี้คืออุปกรณ์และขั้นตอนในการทำค่อนข้างยาก

การรีดักชันทางเคมี เป็นวิธีที่สามารถเตรียมได้ง่าย โดยใช้ตัวรีดิวซ์ (reducing agent) เป็นพื้นฐานในการทำปฏิกิริยากับแกรฟีนออกไซด์ ตัวรีดิวซ์ที่นิยมใช้ ได้แก่ ไฮโดรเจนไอโอไดด์ (hydrogen iodide) วิตามินซี (ascorbic acid) โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (sodium borohydride) ไฮไดรราซีน (hydrazine) และอนุพันธ์ ซึ่งพบว่าไฮไดรราซีนและอนุพันธ์เป็นตัวรีดิวซ์ที่มีประสิทธิภาพที่สุด และช่วยให้สมบัติการนำไฟฟ้าดี แต่สารดังกล่าวมีความเป็นพิษสูง ถ้าหากเปรียบเทียบตัวรีดิวซ์ต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ถือว่าเป็นตัวรีดิวซ์อีกตัวที่มีประสิทธิภาพ ไม่เป็นพิษ ไม่กัดกร่อน และราคาถูก (Toh et al., 2014)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของโซเดียมคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส หรือโซเดียม-ซีเอ็มซีส่วนใหญ่ พบว่าโซเดียม-ซีเอ็มซีมักใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อช่วยเพิ่มสมบัติความแข็งแรง การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และช่วยในการดูดซับน้ำ เช่น Tongdeesoontorn และคณะ (2011) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของซีเอ็มซีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง พบว่าการใช้ซีเอ็มซีเป็นสารตัวเติมช่วยเพิ่มความทนแรงดึง ลดความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์ม และลดการละลายน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้เติมซีเอ็มซี (Tongdeesoontorn et al., 2011) และซีเอ็มซียังถูกนำไปใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล และสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซของฟิล์มแป้งที่ทำจากถั่ว (Ma et al., 2008) นอกจากนี้ซีเอ็มซีจะเป็นสารตัวเติมเพื่อช่วยเรื่องความแข็งแรงแล้ว ซีเอ็มซียังถูกนำมาใช้ งานเพื่อช่วยในการย่อยสลายของพอลิเมอร์อื่น ๆ (Roy et al., 2012) การพัฒนาซีเอ็มซีมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น การพัฒนาในรูปแบบของไฮโดรเจล (Sung et al., 2016) และรูปแบบของฟิล์ม โดยมีหลายงานวิจัยต้องการพัฒนาฟิล์มซีเอ็มซีให้มีสมบัติดีขึ้นเช่น

Yadav และคณะ (2013) เตรียมฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล โดยใช้แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เติมลงในคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ด้วยเทคนิคการผสมสารละลาย (solution mixing) และการระเหย (evaporation) จากการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง พบว่าเมื่อมีการเติมแกรฟีนออกไซด์เข้าไป ส่งผลให้ความทนแรงดึงมีค่ามากขึ้น เมื่อเทียบกับฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ได้เติมแกรฟีนออกไซด์ และยังพบว่าแกรฟีนออกไซด์มีอันตรกิริยา (interact) กับซีเอ็มซีผ่านพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุล (Yadav et al., 2013)

Ebrahimzadeh และคณะ (2016) ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มนาโนคอมพอสิต-คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสผสมกับเกร็ดนาโนแกรฟีน ด้วยวิธีการผสมสารละลาย (mixed solvent) และการหล่อแบบ (casting) แต่เนื่องจากสารทั้งสองไม่สามารถผสมให้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอได้ จึงจำเป็นต้องใช้สารกลีเซอรอลเป็นตัวช่วยในการยึดติด โดยได้ศึกษาปริมาณความเข้มข้นของแกรฟีนที่ใส่ร้อยละ 0.50, 1.00, 1.50, และ 2.00 โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่าการเติมแกรฟีนในฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสส่งผลให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มเปลี่ยนไปคือ ฟิล์มมีความเปราะมากขึ้น และพบว่าการใส่แกรฟีนที่ปริมาณร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนักเป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับสมบัติเชิงกล เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติทางกายภาพพบว่าฟิล์มที่ใส่แกรฟีนออกไซด์ แสดงสมบัติที่ดีกว่าฟิล์มที่ไม่ใส่แกรฟีนออกไซด์ ซึ่งการเตรียมฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับเกร็ดนาโนแกรฟีน ให้มีความเข้ากัน ทำได้ยาก (Ebrahimzadeh et al., 2016)

Son และคณะ (2015) ได้เตรียมฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสผสมกับรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ โดยใช้โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate) เป็นสารช่วยในการกระจายตัวของรีติวซ์-แกรฟีนออกไซด์ เนื่องจากสารทั้ง 2 ตัวไม่สามารถผสมให้เข้ากันและมีการกระจายตัวที่ดีได้ โดยใช้วิธีการผสมสารละลาย และการหล่อแบบ ใช้ความเข้มข้นของรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พบว่าการเติมรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ลงในฟิล์มซีเอ็มซีช่วยทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น (Son et al., 2015)

งานวิจัยของ Lee และคณะ (2015) ได้ศึกษาวิธีการควบคุมสมบัติการละลายน้ำของโพลิเมอร์-คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ใช้วิธีการปรับสภาพด้วยกรดซิตริก (citric acid) เข้มข้น 1-15 อัตราส่วนโมลต่อหน่วยซ้ำกลูโคสของซีเอ็มซีใน เมทานอล (methanol) เข้มข้นร้อยละ 90 ซึ่งการปรับสภาพด้วยกรด-ซิตริกเป็นการแทนที่ไอออนของโซเดียมในโครงสร้างโมเลกุลของซีเอ็มซีด้วยไอออนของไฮโดรเจน ส่งผลให้ซีเอ็มซีไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำบางส่วน เมื่อทดสอบด้วยเทคนิค Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometer (ICP-AES) พบว่าปริมาณของโซเดียมลดลง เมื่อเพิ่ม

ความเข้มข้นของกรดซิตริกและเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งเป็นการยืนยันว่าการแทนที่ไอออนของโซเดียมด้วยไอออนของไฮโดรเจนทำได้สำเร็จ และพบว่าค่าการดูดน้ำมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของพันธะไฮโดรเจน (Lee et al., 2015)



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนงานวิจัย

- (1) สืบค้นงานวิจัยและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
- (2) ออกแบบการทดลอง และจัดหาอุปกรณ์รวมทั้งสารเคมี
- (3) เตรียมฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ฟิล์มนาโนคอมพอสิตคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ (GO) และฟิล์มนาโนคอมพอสิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO)
- (4) ปรับสภาพฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิต โดยใช้กรดซิตริกในเมทานอล
- (5) ทดสอบสมบัติของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิต
- (6) วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	เกรด	บริษัทผู้ผลิต
1. โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (sodium carboxymethyl cellulose, Na-CMC) น้ำหนักโมเลกุล 250,000 ระดับการแทนที่เท่ากับ 0.9	วิเคราะห์	SIGMA-ALDRIH
2. แกรฟีนออกไซด์ (graphene oxide, GO)	ห้องปฏิบัติการ	GRAPHENE SUPERMARKET
3. โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (sodium borohydride, NaBH ₄)	ห้องปฏิบัติการ	KEMAUS
4. กรดซิตริก (citric acid)	ห้องปฏิบัติการ	CARLO ERBA
5. เมทานอล (methanol)	การค้า	RCI LABSCAN

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

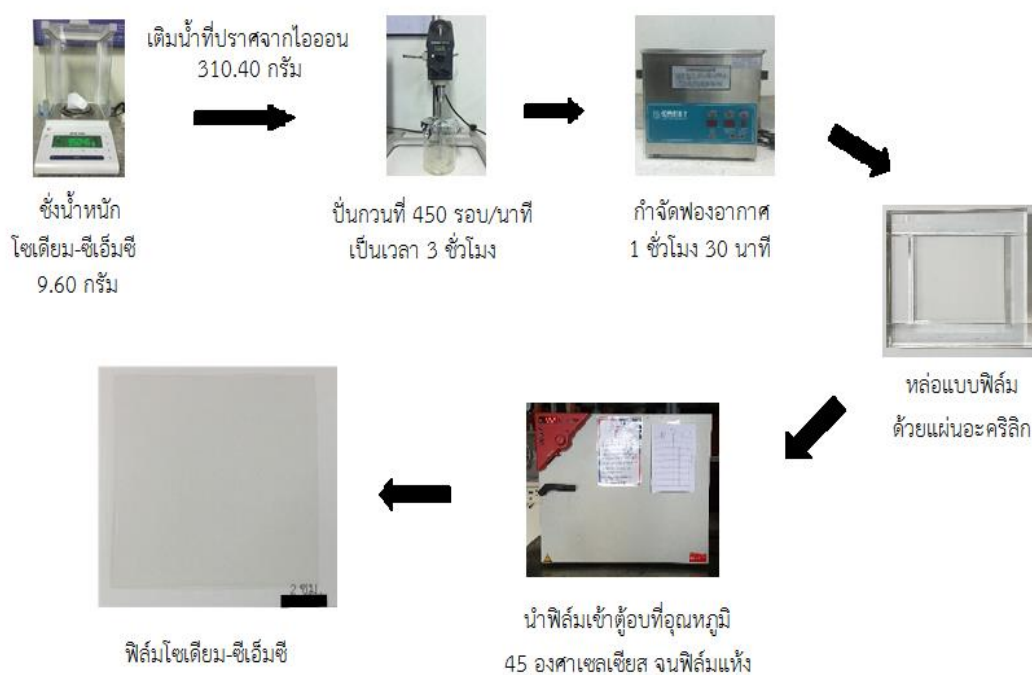
ชื่อเครื่องมือ/อุปกรณ์	ยี่ห้อ/รุ่น
1. เครื่องกวนแบบเชิงกล (mechanical stirrer)	HEIDOLPH/RZR 2021
2. เครื่องอัลตราโซนิค (ultrasonication)	CREST ULTRASONICS/ CP230D
3. เครื่องกวนสารแบบแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน (magnetic stirrer)	IKA/ C-MAG HS 7
4. เครื่องชั่งดิจิทัล (digital balance) ทศนิยมสองตำแหน่ง	SARTORUS/LP6200S
5. เครื่องชั่งดิจิทัล (digital balance) ทศนิยมสี่ตำแหน่ง	METTLER TOLEDO/ MS304S
6. ตู้อบ (hot air oven)	BINDER/ED/FD
7. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (thermogravimetric analyzer, TGA)	NETZCH/ TG 209 F3 Tarsus
8. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (universal testing machine)	HOUNSFIELD/H10KM
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน (field emission scanning electron microscope, FE-SEM)	JEOL/JSM-7610F
10. เครื่องวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด (four-point probe)	KEITHLEY/2450

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การเตรียมฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

3.4.1.1 การเตรียมฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหรือซีเอ็มซี (CMC) ความเข้มข้นร้อยละ 3

ชั่งโซเดียม-ซีเอ็มซี 9.6 กรัม ในปิอกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำที่ปราศจากไอออน 310.40 กรัม ปั่นกวนโซเดียม-ซีเอ็มซีด้วยเครื่องกวนแบบเชิงกลโดยใช้ความเร็ว 450 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายมากำจัดฟองอากาศด้วยเครื่องอัลตราโซนิค เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที แล้วขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบในแม่พิมพ์อะคริลิก (ขนาด 10 × 10 เซนติเมตร) นำไปอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสจนฟิล์มแห้ง ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มซีเอ็มซีแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหรือซีเอ็มซี (CMC)

3.4.1.2 การเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/แกรฟีนออกไซด์ (CMC/GO)

ซังโซเดียม-ซีเอ็มซี ตามปริมาณที่ระบุในตารางที่ 3.3 ลงในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำที่ปราศจากไอออน โดยห้กลับปริมาณของแกรฟีนออกไซด์และโซเดียม-ซีเอ็มซี เริ่มปั่นกวนโซเดียม-ซีเอ็มซีด้วยเครื่องกวนแบบเชิงกลโดยใช้ความเร็ว 450 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเติมแกรฟีนออกไซด์ (ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ที่ผ่านการแยกชั้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคเป็นเวลา 3 ชั่วโมง) ลงในสารละลายโซเดียม-ซีเอ็มซี ซึ่งใช้ปริมาณของแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.25, 0.50, 0.70 และ 1.00 โดยน้ำหนักของซีเอ็มซี ต่อมาผสมสารผสมต่ออีก 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำของผสมมากำจัดฟองอากาศด้วยเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที และขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบในแม่พิมพ์อะคริลิก (ขนาด 10 x 10 เซนติเมตร) จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสจนแห้ง รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์

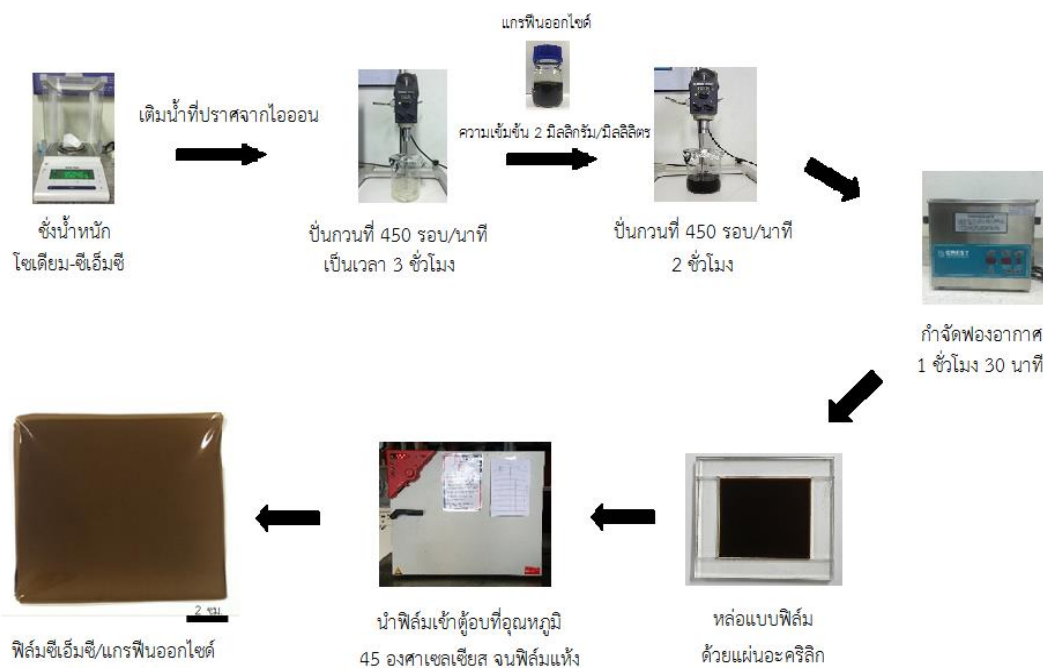
ตารางที่ 3.3 ปริมาณของสารที่ใช้เตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ (CMC/GO) โดยปริมาณร้อยละของแกรฟีนออกไซด์ที่เติมคือ 0.25-1.00 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	ร้อยละของ GO ¹ โดยน้ำหนัก	Na-CMC ² (กรัม)	DI water ³ (กรัม)	GO ¹ เข้มข้น 2 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร (มิลลิลิตร)
CMC/GO 0.25	0.25	9.576	298.42	12
CMC/GO 0.50	0.50	9.552	286.45	24
CMC/GO 0.75	0.75	9.526	274.47	36
CMC/GO 1.00	1.00	9.504	262.49	48

หมายเหตุ ¹แกรฟีนออกไซด์

²โซเดียม-ซีเอ็มซี

³น้ำที่ปราศจากไอออน



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรพีนออกไซด์ (CMC/GO)

3.4.1.3 การเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรพีนออกไซด์ (CMC/rGO)

ชั่งโซเดียม-ซีเอ็มซี ตามปริมาณที่ระบุในตารางที่ 3.4 ลงในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร และเติมน้ำที่ปราศจากไอออนโดยหักลบปริมาณของแกรพีนออกไซด์และปริมาณโซเดียม-ซีเอ็มซี จากนั้นปั่นกวนโซเดียม-ซีเอ็มซีด้วยเครื่องกวนแบบเชิงกลโดยใช้ความเร็ว 450 รอบต่อนาที ที่ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเติมแกรพีนออกไซด์ เข้มข้น 2 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และผ่าน กระบวนการแยกชั้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งใช้ปริมาณของแกรพีนออกไซด์ ร้อยละ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 โดยน้ำหนักของซีเอ็มซี กวนสารผสมต่ออีกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ อุณหภูมิห้อง จากนั้นเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (sodium borohydride) ซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์ ในปริมาณ 10 เท่าของเนื้อแกรพีนออกไซด์ และกวนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยเครื่อง กวนสารแบบแม่เหล็ก จากนั้นกวนต่อที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 18 ชั่วโมง นำของผสมมากำจัด ฟองอากาศด้วยเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที จากนั้นนำสารผสมมาขึ้นรูปด้วยวิธีการ หล่อแบบในแม่พิมพ์อะคริลิก (ขนาด 10 × 10 เซนติเมตร) และนำไปอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส จนฟิล์มแห้ง ขั้นตอนการเตรียมแสดงในรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.4 ปริมาณของสารที่ใช้เตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (CMC/rGO) โดยปริมาณร้อยละของแกรฟีนออกไซด์ที่เติมคือ 0.25-1.00 โดยน้ำหนัก

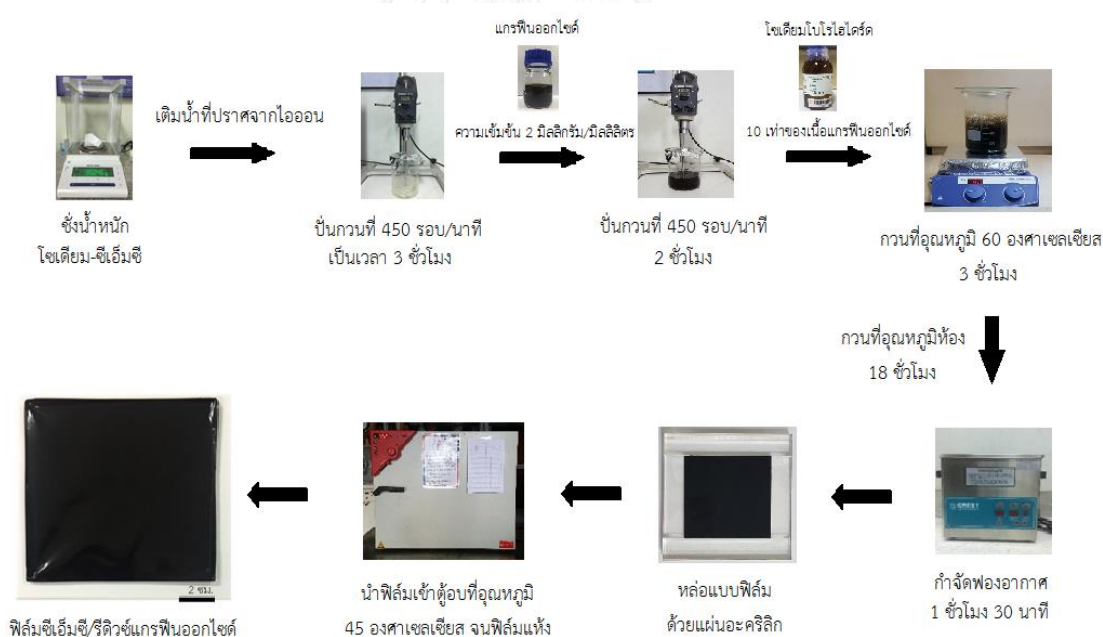
ตัวอย่าง	ร้อยละของ GO ¹ โดยน้ำหนัก	Na-CMC ² (กรัม)	GO ¹ เข้มข้น 2 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร (มิลลิลิตร)	DI water ³ (กรัม)	NaBH ₄ ⁴ (กรัม)
CMC/rGO 0.25	0.25	9.576	12	298.42	0.24
CMC/rGO 0.50	0.50	9.552	24	286.45	0.48
CMC/rGO 0.75	0.75	9.526	36	274.47	0.72
CMC/rGO 1.00	1.00	9.504	48	262.49	0.96

หมายเหตุ ¹แกรฟีนออกไซด์

²โซเดียม-ซีเอ็มซี

³น้ำที่ปราศจากไอออน

⁴โซเดียมโบโรไฮไดรด์



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (CMC/rGO)

3.4.2 การปรับสภาพฟิล์มด้วยกรดซिटริกในเมทานอล

นำฟิล์มที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมฟิล์มมาผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซिटริกในเมทานอล ซึ่งจะมีการเตรียมอยู่ 2 ชุดคือ

(1) การใช้กรดซिटริกที่ความเข้มข้นต่างกันในการปรับสภาพของฟิล์มซีเอ็มซีเพื่อลดการละลายน้ำและทำให้ฟิล์มสามารถคงสภาพที่บริเวณที่มีความชื้นสูงได้

เตรียมกรดซिटริกความเข้มข้นร้อยละ 0.50, 1.00 และ 1.50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 โดยชั่งกรดซिटริก 10, 20 และ 30 กรัม ตามลำดับ จากนั้นเติมเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 ปริมาตร 2 ลิตร แล้วกวนให้กรดซिटริกละลายที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 20 นาที โดยใช้เครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 60 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำฟิล์มซีเอ็มซี ใส่ลงในสารละลายและกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำฟิล์มมาล้างด้วยเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 จนกระทั่งมีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 6.5 แล้วจึงนำฟิล์มแช่ในเมทานอลเป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้ฟิล์มแห้งที่อุณหภูมิห้อง ได้ฟิล์ม CMC-T-0.50CA, CMC-T-1.00CA และ CMC-T-1.50CA ตามลำดับ

(2) การปรับสภาพฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ และซีเอ็มซีรีดิวซ์/แกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดซिटริกความเข้มข้นร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 โดยฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซिटริกแสดงในตารางที่ 3.5

ละลายกรดซिटริก 20 กรัม ในเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 60 องศาเซลเซียส ต่อมานำฟิล์มซีเอ็มซี ที่ต้องปรับสภาพ ใส่ลงในสารละลายและกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็ก จากนั้นนำฟิล์มมาปรับค่าความเป็นกรดต่างให้ได้ค่าประมาณ 6.5 นำฟิล์มดังกล่าวแช่ในเมทานอลนาน 16 ชั่วโมง และปล่อยให้ฟิล์มแห้งที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 3.5 พิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ที่ปรับสภาพด้วยการกรดซิตริกในเมทานอล

ชื่อตัวอย่างฟิล์ม	การปรับสภาพ ด้วยกรดซิตริก	ร้อยละ ซีเอ็มซี*	ร้อยละแกรฟีน- ออกไซด์ (GO)*	ร้อยละรีดิวซ์แกรฟีน- ออกไซด์ (rGO)*
CMC-U	×	100.00	0.00	0.00
CMC/GO 0.50-U	×	99.50	0.50	0.00
CMC/rGO 0.50-U	×	99.50	0.00	0.50
CMC-T	√	100.00	0.00	0.00
CMC/GO 0.25-T	√	99.75	0.25	0.00
CMC/GO 0.50-T	√	99.50	0.50	0.00
CMC/GO 0.75-T	√	99.25	0.75	0.00
CMC/GO 1.00-T	√	99.00	1.00	0.00
CMC/rGO 0.25-T	√	99.75	0.00	0.25
CMC/rGO 0.50-T	√	99.50	0.00	0.50
CMC/rGO 0.75-T	√	99.25	0.00	0.75
CMC/rGO 1.00-T	√	99.00	0.00	1.00

หมายเหตุ U หมายถึง ไม่ผ่านการปรับสภาพ (untreated) และ T หมายถึง ผ่านการปรับสภาพ (treated)

* โดยน้ำหนัก

3.4.3 การทดสอบสมบัติของฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

3.4.3.1 การทดสอบการละลายน้ำ (water solubility)

การทดสอบการละลายน้ำของฟิล์ม ใช้ตัวอย่างขนาดความกว้าง 2 เซนติเมตร ความยาว 2 เซนติเมตร และความหนาประมาณ 0.10-0.15 มิลลิเมตร ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากนำฟิล์มไปอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาเก็บไว้ในหม้อดูดความชื้น ต่อมานำฟิล์มมาชั่งน้ำหนัก โดยน้ำหนักที่ชั่งได้กำหนดให้เป็นน้ำหนักเริ่มต้น (W_0) นำฟิล์มไปแช่ในน้ำที่ปราศจากไอออนปริมาตร 50 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำฟิล์มไปอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำฟิล์มมาชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่ชั่งได้กำหนดให้เป็นน้ำหนักสุดท้ายที่

เปลี่ยนแปลงไป (W_t) นำค่าน้ำหนักมาคำนวณค่าการละลายน้ำของฟิล์มตามสมการที่ 3.1 การละลายน้ำของฟิล์มแต่ละประเภท ทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง

$$\text{ร้อยละการละลายน้ำของฟิล์ม} = ((W_0 - W_t) / W_0) \times 100 \dots \dots \dots (3.1)$$

3.4.3.2 การทดสอบการบวมตัว (swelling)

การบวมตัว (swelling) เป็นการวัดความสามารถในการบวมตัวของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ซึ่งตัวอย่างมีขนาดปริมาตร (ความกว้าง×ความยาว×ความสูง) ประมาณ 49-65 ลูกบาศก์มิลลิเมตร โดยค่าที่ได้กำหนดให้เป็น V_d จากนั้นนำฟิล์มแช่ในน้ำที่ปราศจากไอออนปริมาณ 50 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาวัดขนาดปริมาตร (ความกว้าง×ความยาว×ความสูง) ซึ่งค่าที่ได้กำหนดให้เป็น V_s นำค่าที่ได้มาคำนวณร้อยละการบวมตัว (swelling) ดังสมการที่ 3.2 โดยฟิล์มแต่ละประเภท ทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง

$$\text{ร้อยละการบวมตัวของฟิล์ม} = ((V_s - V_d) / V_d) \times 100 \dots \dots \dots (3.2)$$

3.4.3.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (water absorption)

ฟิล์มที่ทดสอบการดูดซึมน้ำมีขนาด กว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร และหนาประมาณ 0.10-0.15 มิลลิเมตร น้ำหนักของแผ่นฟิล์มก่อนการทดสอบมีค่าประมาณ 0.05-0.07 กรัม การดูดซึมน้ำทำโดยนำฟิล์มไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นฟิล์มไปชั่งน้ำหนักและกำหนดน้ำหนักดังกล่าวเป็นน้ำหนักเริ่มต้น (W_0) และนำไปแช่ในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง โดยชั่งน้ำหนักฟิล์มเมื่อแช่น้ำเวลา 2, 4, 6, 8, 10, 30, 60, 120, 180 และ 1440 นาที นำฟิล์มออกมาชั่งน้ำหนักแล้วชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่ได้คือน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (W_n) การคำนวณร้อยละการดูดซึมน้ำแสดงในสมการที่ 3.3 ฟิล์มแต่ละประเภท ถูกทดสอบการดูดซึมน้ำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = ((W_n - W_0) / W_0) \times 100 \dots \dots \dots (3.3)$$

3.4.3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล (mechanical properties)

การทดสอบสมบัติเชิงกลในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติความทนแรงดึง (tensile strength) ยังส์มอดุลัส (Young's modulus) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ของฟิล์มตามมาตรฐาน ASTM D882 ด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ (universal testing machine) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความกว้าง

0.5 เซนติเมตร ความยาว 8 เซนติเมตร และความหนาประมาณ 0.10-0.16 มิลลิเมตร ใช้ load cell ขนาด 500 นิวตัน อัตราเร็วในการดึง 5 มิลลิเมตร/นาที และระยะที่วัดการยืดออก (gauge length) 5 เซนติเมตร ทดสอบตัวอย่าง 5 ชิ้นต่อประเภทของฟิล์ม



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ HOUNSFIELD รุ่น H10KM

3.4.3.5 สัณฐานวิทยา (morphology)

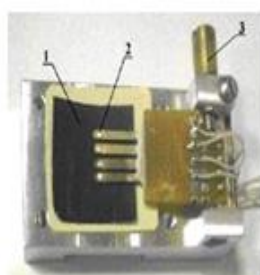
สัณฐานวิทยาของฟิล์มศึกษาจากภาคตัดขวาง (cross section) ของฟิล์ม ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ฟิล์มที่ศึกษาถูกนำไปแช่ไนโตรเจนเหลว (liquid nitrogen) และนำมาหัก เพื่อศึกษาการกระจายตัวของสารตัวเติมในแผ่นฟิล์ม และศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม โดยฟิล์มถูกเคลือบด้วยแพลทินัมเพื่อให้นำไฟฟ้า และใช้ความต่างศักย์เร่งอิเล็กตรอนที่ 5 กิโลโวลต์ (kV) และกำลังขยายในการถ่ายภาพคือ 5,000 และ 10,000 เท่า



รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-7610F

3.4.3.6 การนำไฟฟ้า (electrical conductivity)

การนำไฟฟ้าของฟิล์มทดสอบด้วยเครื่องวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด แสดงในรูปที่ 3.6 การวัดใช้เข็มวัด 2 คู่ โดยคู่หนึ่งใช้จ่ายกระแสให้กับชิ้นงานและเข็มอีกคู่ใช้วัดแรงดันไฟฟ้า การวัดแบบนี้ลดผลกระทบจากความต้านทานของสายไฟ ทำให้ค่าการวัดที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้นเมื่อเทียบกับการวัดที่ใช้มัลติมิเตอร์ การวัดการนำไฟฟ้าใช้แผ่นฟิล์มขนาดความกว้าง 6 เซนติเมตรและยาว 6 เซนติเมตร แต่ละตัวอย่างวัดซ้ำ 5 ครั้ง โดยวางตัวอย่างบนซับสเตรต (substrate) และหัววัดด้านข้างเป็นโลหะเงิน (silver)



1. ตัวอย่าง (sample)
2. หัววัด 4 จุด (four-point probe)
3. ตัวหมุนสำหรับควบคุมแรงกดของหัววัด (probe)
4. เครื่องวัดค่าแรงดันไฟฟ้า

รูปที่ 3.6 เครื่องวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด ยี่ห้อ KEITHLEY รุ่น 2450

3.4.3.7 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (thermal properties)

การศึกษาสมบัติทางความร้อนเพื่อวิเคราะห์หาอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มคอมพอสิตด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.7 การทดสอบทำภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 35 ถึง 800 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที



รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น TG 209 F3 Tarsus

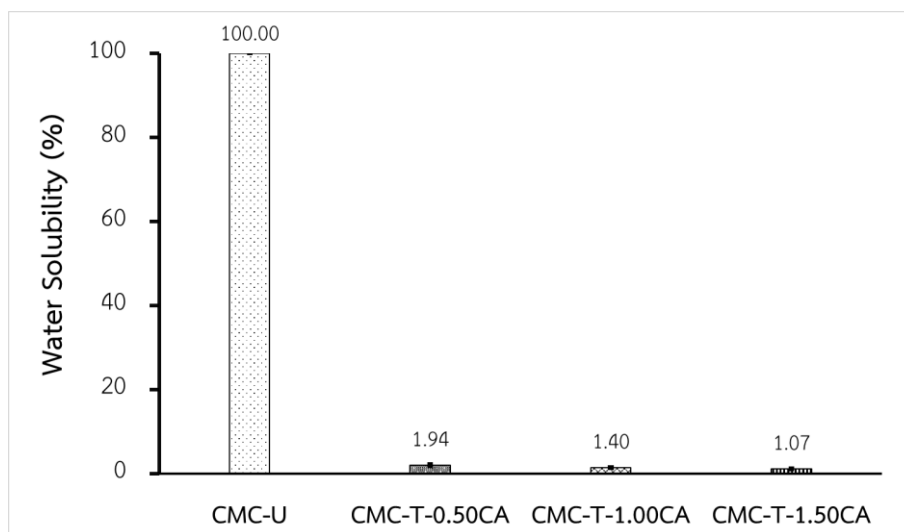
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการปรับสภาพด้วยกรดซिटริกต่อฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหรือซีเอ็มซี

4.1.1 การละลายน้ำ (water solubility) ของฟิล์มซีเอ็มซี

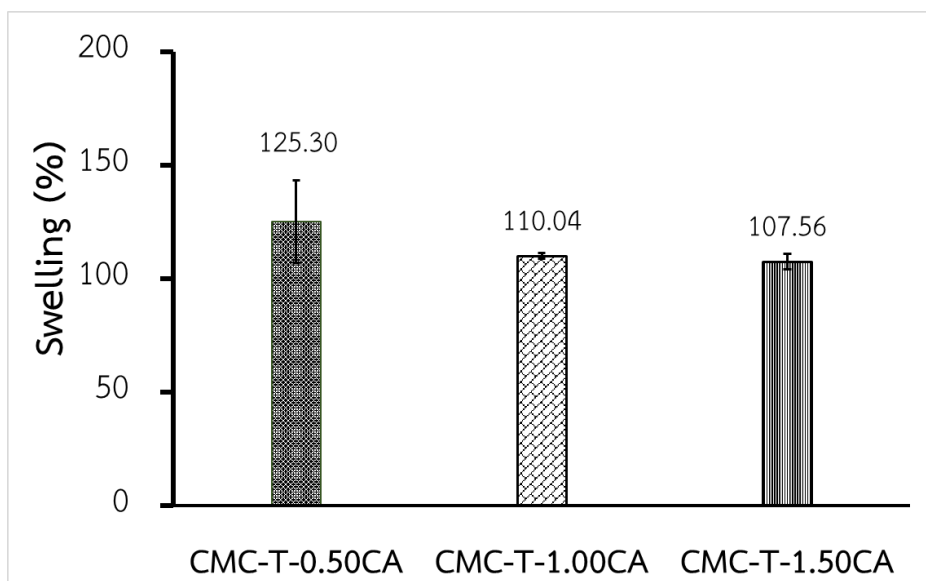
จากการเปรียบเทียบการละลายน้ำของฟิล์ม ระหว่างฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซिटริก (CMC-U) และฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซिटริกเข้มข้นร้อยละ 0.50, 1.00 และ 1.50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 (CMC-T-0.50CA, CMC-T-1.00CA และ CMC-T-1.50CA ตามลำดับ) พบว่าฟิล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซिटริกมีการละลายน้ำร้อยละ 100 และฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซिटริกมีการละลายน้ำร้อยละ 1.94, 1.40 และ 1.07 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และภาคผนวก ก โดยฟิล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซिटริกมีค่าการละลายน้ำสูงกว่าฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซिटริกมากถึงร้อยละ 98.06, 98.60 และ 98.93 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่ากระบวนการปรับสภาพฟิล์มด้วยกรดซिटริกมีผลต่อการลดการละลายน้ำของฟิล์ม เมื่อพิจารณาฟิล์มซีเอ็มซีที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซिटริก พบว่าเมื่อใช้กรดซिटริกเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การละลายน้ำของฟิล์มมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณอะตอมไฮโดรเจนลดลง ซึ่งยืนยันด้วยการทดสอบด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) โดยเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (energy dispersive X-ray spectroscopy, EDX) (ภาคผนวก ข) พบว่าฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซिटริก มีปริมาณอะตอมไฮโดรเจนร้อยละ 8.10 โดยน้ำหนัก และฟิล์ม CMC-T-0.50CA, CMC-T-1.00CA และ CMC-T-1.50CA มีปริมาณอะตอมไฮโดรเจนร้อยละ 0.47, 0.37 และ 0.12 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Lee และคณะ (2015) โดยการละลายน้ำของไฮโดรเจน-ซีเอ็มซี เกิดจากการสร้างพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ภายในและภายนอกโครงสร้างของซีเอ็มซี และเนื่องจากซีเอ็มซีเกิดจากการเติมหมู่ไฮโดรเจนคาร์บอกซีเมทิล (sodium carboxymethyl) เข้าไปในโครงสร้างของเซลลูโลส (cellulose) ทำให้พันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างไม่แข็งแรง ทำให้น้ำสามารถซึมเข้าไปได้ง่าย แต่เมื่อไฮโดรเจน-ซีเอ็มซีถูกปรับสภาพด้วยกรดซिटริก อะตอมไฮโดรเจนถูกแทนที่ด้วยอะตอมไฮโดรเจน ไฮโดรเจน-ซีเอ็มซี (Na-CMC) กลายเป็นไฮโดรเจน-ซีเอ็มซี (H-CMC) ซึ่งส่งผลให้ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้บางส่วน (Lee et al., 2015)



รูปที่ 4.1 การละลายน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (CMC-U) และฟิล์มซีเอ็มซีที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 0.50, 1.00 และ 1.50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 (CMC-T-0.50, CA CMC-T-1.00CA และ CMC-T-1.50CA ตามลำดับ)

4.1.2 การบวมตัว (swelling) ของฟิล์มซีเอ็มซี

การบวมตัวของฟิล์มซีเอ็มซี ได้ทดสอบเฉพาะฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 0.50, 1.00 และ 1.50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 (CMC-T-0.50CA, CMC-T-1.00CA และ CMC-T-1.50CA ตามลำดับ) เนื่องจากฟิล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (CMC-U) ละลายน้ำและไม่สามารถคงสภาพในรูปฟิล์ม ผลจากการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.2 และภาคผนวก ข พบว่าฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพมีการบวมตัวร้อยละ 125.30, 110.04 และ 107.56 ตามลำดับ เห็นได้ว่าเมื่อใช้ปริมาณของกรดซิตริกที่มากขึ้นส่งผลให้การบวมตัวของฟิล์มลดลง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการละลายน้ำของฟิล์ม และจากการสังเกตพบว่าการขยายตัวของฟิล์มที่ CMC-T-0.50CA มีการขยายตัวมากกว่าฟิล์ม CMC-T-1.00CA และมีร้อยละการบวมตัวของฟิล์มที่แตกต่างกัน ร้อยละ 13.86 เมื่อพิจารณาฟิล์ม CMC-T-1.00CA และ CMC-T-1.50CA พบว่าการขยายตัวออกของแผ่นฟิล์มใกล้เคียงกันรวมถึงร้อยละการบวมตัวของฟิล์ม 2 ชนิดแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ (ภาคผนวก ข)



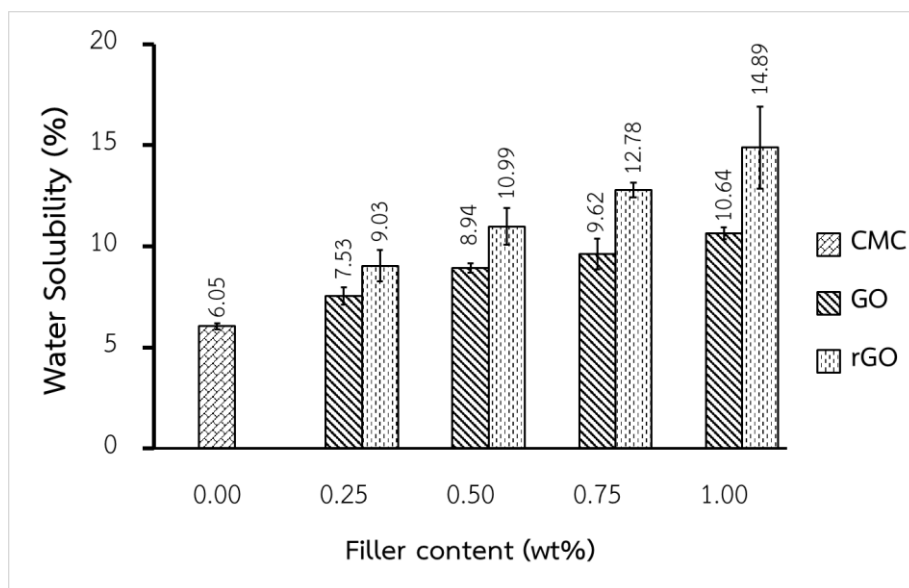
รูปที่ 4.2 การบวมตัวของฟิล์มซีเอ็มซีที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 0.50, 1.00 และ 1.50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 (CMC-T-0.50CA, CMC-T-1.00CA และ CMC-T-1.50CA ตามลำดับ)

จากการทดสอบการละลายน้ำและการบวมตัวของฟิล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (CMC-U) และผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 0.50, 1.00 และ 1.50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 (CMC-T-0.50CA, CMC-T-1.00CA และ CMC-T-1.50CA ตามลำดับ) พบว่าการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล ส่งผลให้การละลายน้ำและการบวมตัวของฟิล์มซีเอ็มซีลดลง และความเข้มข้นของกรดซิตริกที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพของฟิล์มคือร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 เนื่องจากกรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 1.00 และ 1.50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 มีผลต่อการละลายน้ำและการบวมตัวของฟิล์มที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ (ภาคผนวก ข) ดังนั้นกระบวนการเตรียมฟิล์มต่อจากนี้จะปรับสภาพฟิล์มทั้งหมดด้วยกรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90

4.2 การทดสอบฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซिटริกในเมทานอล

4.2.1 การละลายน้ำ (water solubility) ของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซिटริกในเมทานอล

ผลจากการทดสอบการละลายน้ำของฟิล์มนาโนคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 4.3 จากการศึกษาพบว่า การละลายน้ำของฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (CMC/rGO) มีร้อยละการละลายน้ำมากกว่าฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ (CMC/GO) และฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) ฟิล์ม CMC/GO มีการละลายน้ำมากกว่าฟิล์มซีเอ็มซี ประมาณ 0.24 ถึง 0.76 เท่า ทั้งนี้การที่ฟิล์ม CMC/rGO มีการละลายน้ำสูงที่สุดเป็นผลมาจากโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (sodium borohydride) ที่ทำหน้าที่เป็นรีดิวซ์ และเนื่องจากการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการหล่อแบบ (casting) ซึ่งเป็นการทำฟิล์มให้แห้งโดยอาศัยการระเหยไปของตัวทำละลาย ทำให้มีโซเดียมที่เป็นผลพลอยได้จากการทำปฏิกิริยา หลงเหลืออยู่ในแผ่นฟิล์ม (Yang et al., 2015) และเมื่อนำฟิล์มดังกล่าวมาปรับสภาพด้วยกรดซिटริก ส่งผลให้โปรตอนของกรดซिटริกสามารถทำปฏิกิริยากับโซเดียมที่เป็นผลพลอยได้ที่เหลืออยู่ในฟิล์ม ทำให้การทำปฏิกิริยาของกรดซिटริกกับโซเดียมในโครงสร้างของซีเอ็มซีไม่สามารถทำได้เท่ากับฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่เติมสารตัวเติม การละลายน้ำจึงมากขึ้น ในส่วนของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ที่มีการละลายน้ำสูงกว่าฟิล์มซีเอ็มซีเนื่องจากสารตัวเติมแกรฟีนออกไซด์มีโครงสร้างที่มีหมู่ที่ประกอบด้วยออกซิเจน เช่น หมู่คาร์บอกซิล หมู่ไฮดรอกซิล และหมู่อีพอกซี เป็นต้น ซึ่งการที่มีหมู่ที่ประกอบด้วยออกซิเจนในโครงสร้างของสารตัวเติมส่งเสริมให้ฟิล์มมีการละลายน้ำได้มากขึ้น (Yang et al., 2015) นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ เพิ่มมากขึ้น ทำให้การละลายน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีเพิ่มสูงขึ้นด้วย

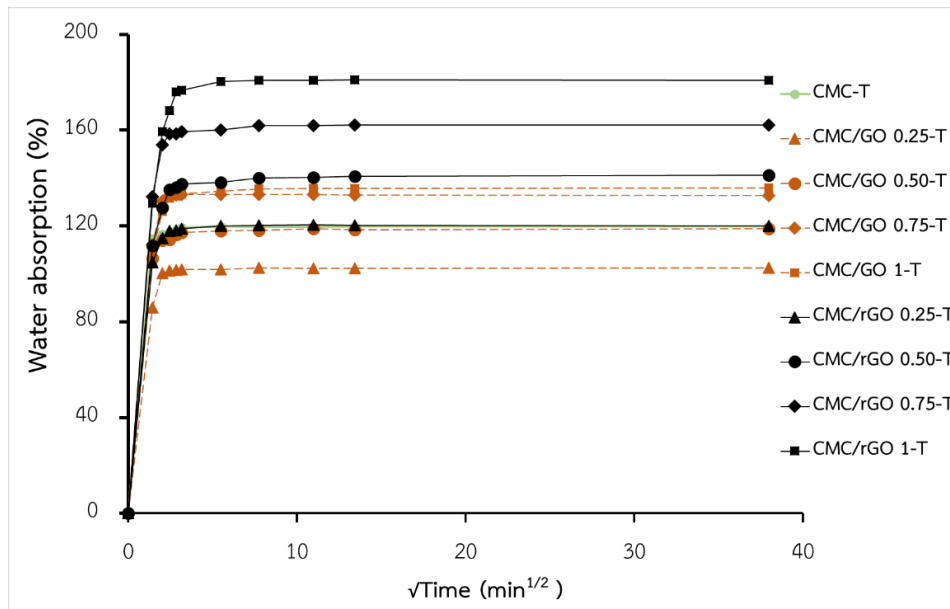


รูปที่ 4.3 การละลายน้ำของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอลโดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก

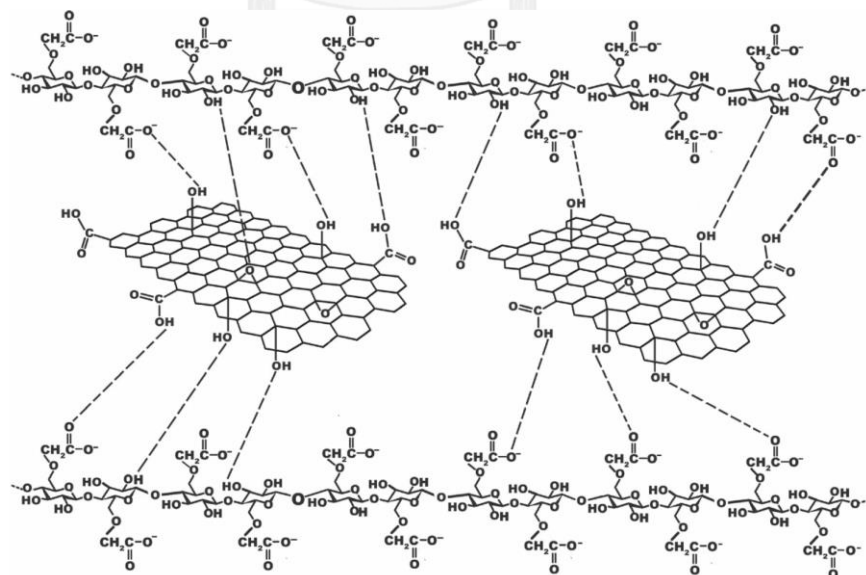
4.2.2 การดูดซึมน้ำ (water absorption) ของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล

การดูดซึมน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มมีสารตัวเติมคือ แกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 4.4 และภาคผนวก ค เห็นได้ว่าฟิล์มนาโนคอมพอสิตมีการดูดซึมน้ำที่รวดเร็วกว่าในช่วงแรกและจากนั้นการดูดซึมน้ำของฟิล์มจะคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที การดูดซึมน้ำของฟิล์มที่มี rGO สูงกว่าที่มี GO (ในกรณีที่มีสารตัวเติมในปริมาณที่เท่ากัน) และการดูดซึมน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของสารตัวเติม ยกเว้นการเติม GO ในปริมาณร้อยละ 0.50 และการเติม rGO ในปริมาณร้อยละ 0.25 ไม่มีผลต่อการดูดซึมน้ำของฟิล์มมากนัก เนื่องจากการเติมสารตัวเติมในปริมาณที่ไม่มาก ทำให้การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจนในฟิล์มมีปริมาณน้อย เมื่อ GO มีหมู่ฟังก์ชันน้อยส่งผลให้การสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโครงสร้างของโซเดียม-ซีเอ็มซีได้มาก เนื่องจากแผ่น GO ถูกล้อมรอบด้วยซีเอ็มซี ลักษณะการสร้างพันธะไฮโดรเจนดังแสดงในรูปที่ 4.5 (Layek et al., 2013) ซึ่งทำให้ GO เหลือหมู่ฟังก์ชันที่จะช่วยในการดูดซึมน้ำน้อยมาก เมื่อเทียบกับการเติม GO ในปริมาณที่มากขึ้น และการสร้างพันธะไฮโดรเจนของ GO และซีเอ็มซี ส่งผลให้หมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของซีเอ็มซีที่สามารถดูดซึมน้ำมีปริมาณลดลง จึงทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของฟิล์มที่เติมสารตัวเติมดังกล่าวไม่สูงมากนัก และพบว่าฟิล์ม CMC/rGO 1.00-T

มีการดูดซึมน้ำมากที่สุดเนื่องจากการเติมสารตัวเติมในปริมาณที่สูงที่สุดและมีการใช้ตัวรีดิวซ์ในปริมาณมากส่งผลให้ฟิล์มมีการดูดซึมน้ำสูงที่สุด



รูปที่ 4.4 การดูดซึมน้ำของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือ แกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก ที่เวลา 2 นาที ถึง 1440 นาที



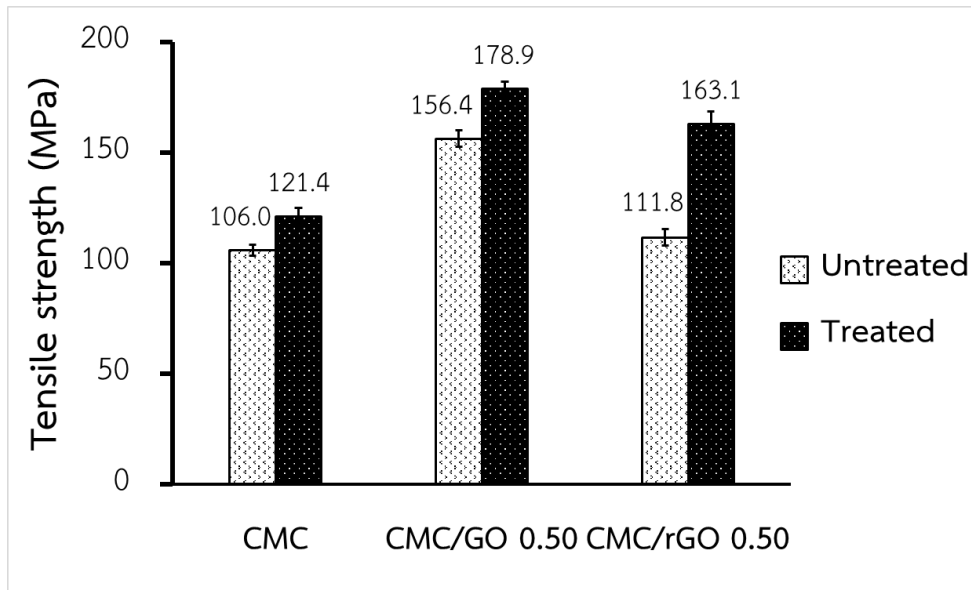
รูปที่ 4.5 การสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่าง โซเดียม-ซีเอ็มซี (Na-CMC) กับ แกรฟีนออกไซด์ (GO) (Layek et al., 2013)

4.2.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล

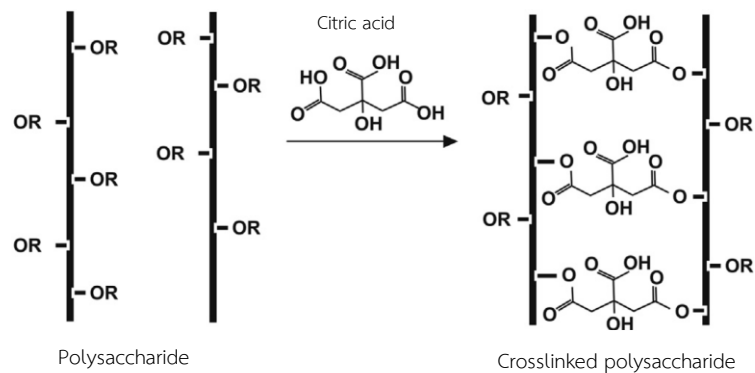
4.2.3.1 ความทนแรงดึง (tensile strength)

การทดสอบความทนแรงดึงของฟิล์มนาโนคอมพอสิตมีการเปรียบเทียบการทดสอบ 2 ชุดคือ

(1) การเปรียบเทียบฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีน-ออกไซด์ และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก (CMC, CMC/GO 0.50 และ CMC/rGO 0.50 ตามลำดับ) ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริก ความเข้มข้นร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และภาคผนวก ง ซึ่งค่าความทนแรงดึงของฟิล์มซีเอ็มซีที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกมีค่าสูงกว่าฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (0.14 เท่า) จากการทดลองพบว่าการใช้กรดซิตริกในการปรับสภาพแผ่นฟิล์มรวมทั้งการให้ความร้อนในกระบวนการเตรียม ส่งผลให้ความเปราะของแผ่นฟิล์มลดลง และฟิล์มสามารถโค้งงอได้ การปรับสภาพของแผ่นฟิล์มด้วยกรดซิตริกในเมทานอลมีส่วนช่วยให้ความทนแรงดึงของฟิล์มคอมพอสิตมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากกรดซิตริกสามารถใช้งานเป็นสารช่วยในการเชื่อมขวาง (crosslinking agent) และเป็นสารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer) (Ghanbarzadeh et al., 2011; Hashem et al., 2013) ทำให้มีโอกาสที่โครงสร้างของซีเอ็มซีสามารถเกิดการเชื่อมขวางได้ โดยอาศัยกรดซิตริกเป็นตัวเชื่อมขวาง ลักษณะการเชื่อมขวางแสดงในรูปที่ 4.7 เป็นผลให้ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มซีเอ็มซีเพิ่มขึ้นจาก 106.0 เมกะปาสคาล เป็น 121.4 เมกะปาสคาล เมื่อผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริก เช่นเดียวกับฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ และฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีน-ออกไซด์ ที่ค่าการทนแรงดึงเพิ่มขึ้นจาก 156.4 เป็น 178.9 เมกะปาสคาล (เพิ่มขึ้น 0.14 เท่า) และเพิ่มจาก 111.8 เป็น 163.1 เมกะปาสคาล (เพิ่มขึ้น 0.46 เท่า) ตามลำดับ และฟิล์มซีเอ็มซีที่มีการเติมสารตัวเติมคือ แกรฟีนออกไซด์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ มีค่าความทนแรงดึงสูงกว่าฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ได้ใส่สารตัวเติม เป็นผลมาจากแกรฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์แกรฟีน-ออกไซด์ เป็นสารตัวเติมที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ทำให้มีพื้นที่ผิวในการช่วยรับแรงกระทำได้มากขึ้น และสามารถกระจายแรงได้ดี (Yang et al., 2010) นอกจากนี้การที่กรดซิตริกสามารถทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพพลาสติก จึงช่วยลดความเปราะของฟิล์มที่เตรียมได้



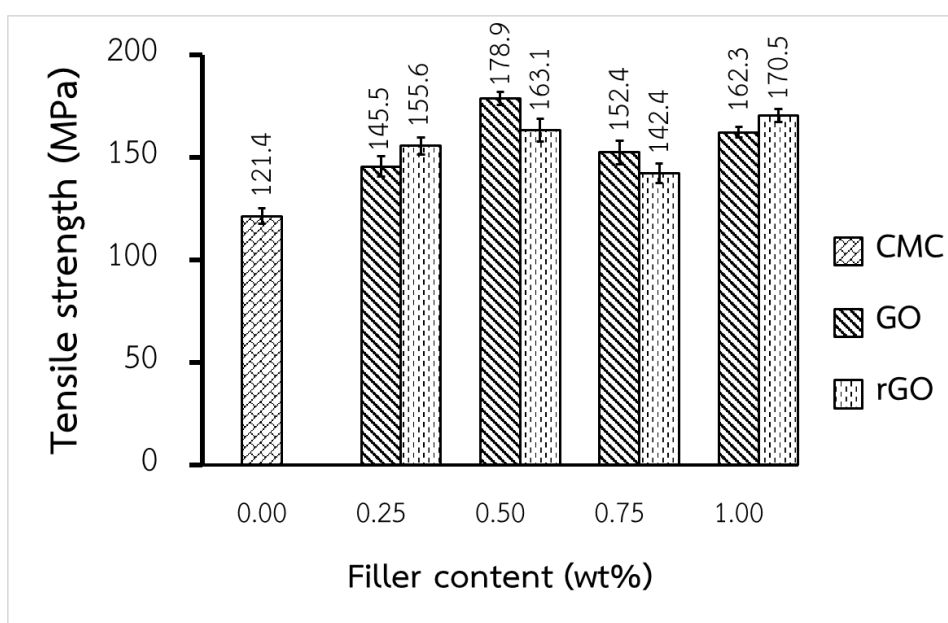
รูปที่ 4.6 ความทนแรงดึงของฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก (CMC/GO 0.50 และ CMC/rGO 0.50 ตามลำดับ) โดยฟิล์มไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกใน เมทานอล



รูปที่ 4.7 กลไกการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างกรดซิตริกและพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) (Azeredo et al., 2015)

(2) การเปรียบเทียบผลของการเติมแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์-แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก ลงในซีเอ็มซี (CMC) ที่มีผลต่อความทนแรงดึงของฟิล์มซีเอ็มซี โดยฟิล์มทั้งหมดถูกปรับสภาพด้วยกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 พบว่าค่าความทนแรงดึงของฟิล์มเมื่อใส่สารตัวเติมส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มมีค่าสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มซีเอ็มซี (ประมาณ

0.19 ถึง 0.40 เท่า) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และภาคผนวก ง ซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติของสารตัวเติมที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความทนแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของแกรฟีนออกไซด์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ถึงร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมมากกว่าร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มมีค่าลดลง หรือเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ซึ่งคาดว่าอาจเป็นผลจากการเกาะกลุ่มของสารตัวเติม หรือการกระจายตัวที่ไม่ดีของสารตัวเติมในเมทริกซ์ซีเอ็มซี



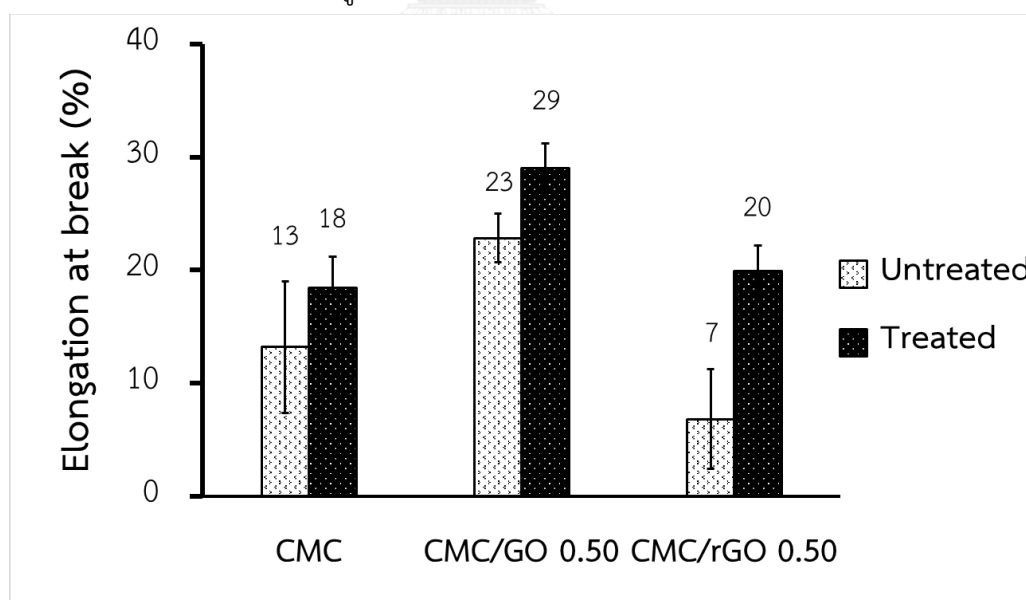
รูปที่ 4.8 ความทนแรงดึงของฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือ แกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก

4.2.3.2 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break)

ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของฟิล์มนาโนคอมพอสิตมีการเปรียบเทียบการทดสอบ 2 ชุด เช่นเดียวกับสมบัติความทนแรงดึง

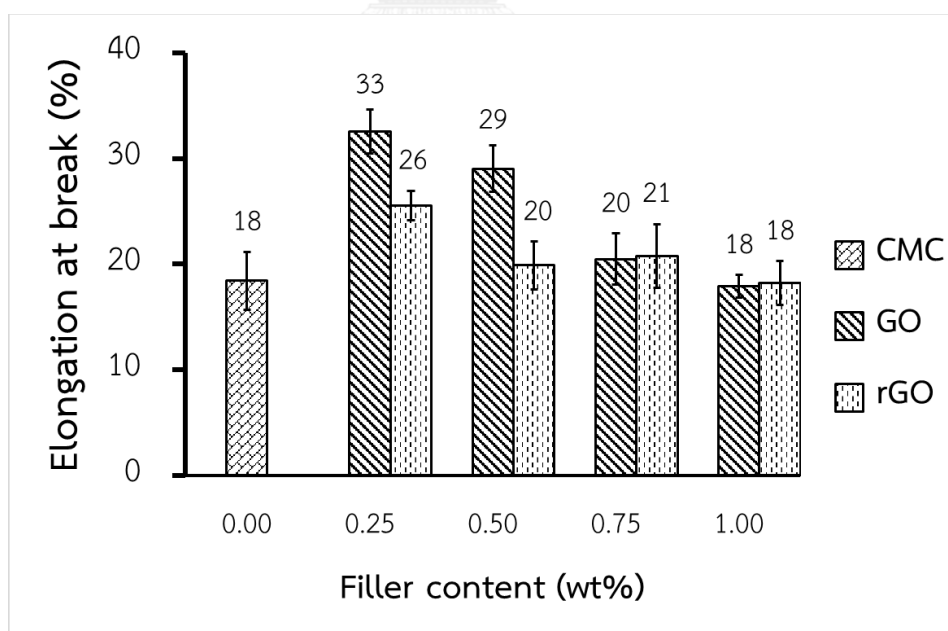
(1) การเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก (CMC/GO 0.50 และ CMC/rGO 0.50 ตามลำดับ) ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและฟิล์มดังกล่าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล มีความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และภาคผนวก ง

เห็นได้ว่าฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพ มีความยืดสูงสุด ณ จุดขาด สูงกว่าฟิล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าความทนแรงดึง อีกทั้งยังพบว่า ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของฟิล์ม CMC/GO 0.50 สูงกว่า ฟิล์ม CMC/rGO 0.50 และฟิล์มซีเอ็มซี แสดงให้เห็นว่าแกรฟีนออกไซด์มีความเข้ากันได้กับซีเอ็มซีมากกว่ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ เนื่องจากการเตรียมฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์-แกรฟีนออกไซด์ เริ่มจากการผสมโซเดียมซีเอ็มซีกับแกรฟีนออกไซด์ก่อนจากนั้นจึงทำปฏิกิริยารีดักชัน โดยเริ่มแรกแกรฟีนออกไซด์สามารถสารพันธะไฮโดรเจนกับโซเดียม-ซีเอ็มซี ซึ่งสารทั้งสองมีความเข้ากันได้จึงทำให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดสูง แต่เมื่อทำการรีดักชันพบว่า มีฟองอากาศภายในโครงสร้างของฟิล์มเพิ่มขึ้น (จากผลการทดสอบสัญญาณวิทยาของฟิล์ม) ซึ่งเป็นผลทำให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มมีค่าน้อยกว่า และเห็นได้ว่าค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ที่ผ่านการปรับสภาพมีค่าสูงกว่าฟิล์มที่ไม่ได้ปรับสภาพ เป็นผลมาจากการปรับสภาพด้วยกรดซิตริก ซึ่งกรดซิตริกสามารถใช้งานเป็นสารช่วยในการเชื่อมขวาง และเป็นสารเสริมสภาพพลาสติก โดยปกติเมื่อเกิดการเชื่อมขวางค่าความทนแรงดึงของฟิล์มสูงขึ้น และค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มลดลง ซึ่งจะตรงข้ามกับสารเสริมสภาพพลาสติกที่เมื่อเติมลงไปค่าความทนแรงดึงลดลง และค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดจะสูงขึ้น (Yang et al., 2010) แต่เนื่องจากกรดซิตริกสามารถแสดงสมบัติทั้งสองได้ จึงเป็นผลทำให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพสูงขึ้น



รูปที่ 4.9 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก (CMC/GO 0.50 และ CMC/rGO 0.50 ตามลำดับ) โดยที่ฟิล์มไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล

(2) การเปรียบเทียบผลของการเติมแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์-แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก ลงในซีเอ็มซี ที่มีผลต่อความยืด-สูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มซีเอ็มซี โดยฟิล์มทั้งหมดถูกปรับสภาพด้วยกรดซิดริกในเมทานอล ความยืด-สูงสุด ณ จุดขาด ของฟิล์มนาโนคอมพอสิต CMC/GO และ CMC/rGO ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และภาคผนวก ง จากการศึกษาพบว่า การเติม GO และ rGO มีแนวโน้มทำให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มซีเอ็มซีมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการเติมสารตัวเติมเข้าไปทำให้โครงสร้างภายในของฟิล์มซีเอ็มซีถูกแทรกด้วยแผ่นของ GO และ rGO เห็นได้จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์ม ซึ่งการแทรกตัวของสารตัวเติมส่งผลให้การจัดเรียงตัวของซีเอ็มซีมีความแน่นน้อยลง ทำให้สามารถยืดได้มากขึ้น พบว่าการเติมทั้ง GO และ rGO ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 0.25 มีผลให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดสูงสุด นอกจากนี้พบว่าการเติม GO ทำให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มซีเอ็มซีสูงกว่าการเติม rGO สำหรับการเติมในปริมาณร้อยละ 0.25 และ 0.50 แต่สำหรับการเติม GO และ rGO ในปริมาณร้อยละ 0.75 และ 1.00 ให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ (ภาคผนวก ข) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเติมสารปริมาณมากขึ้น ซึ่งปริมาณสารตัวเติมในฟิล์มมากส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งเพิ่มขึ้น อีกทั้งอาจเป็นผลจากการจัดเรียงตัวและการกระจายของสารตัวเติม และฟองอากาศที่ปรากฏในแผ่นฟิล์ม

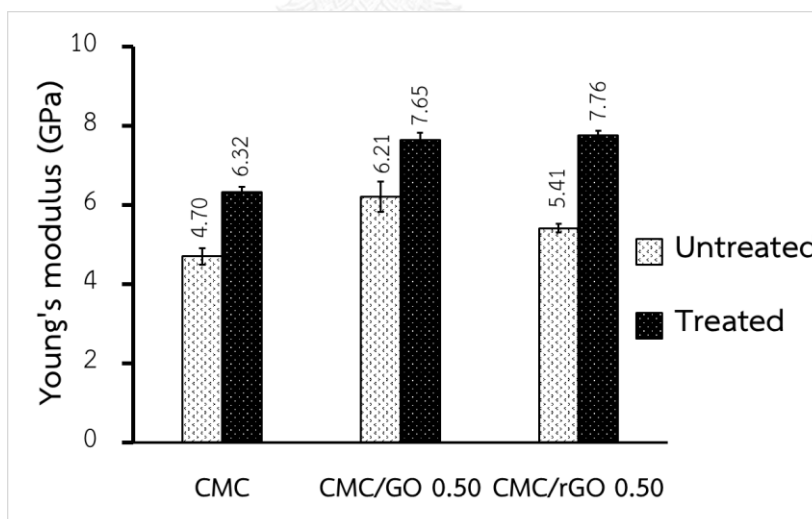


รูปที่ 4.10 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิดริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือ แกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์-แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก

4.2.3.3 ยังส์มอดุลัส (Young's modulus)

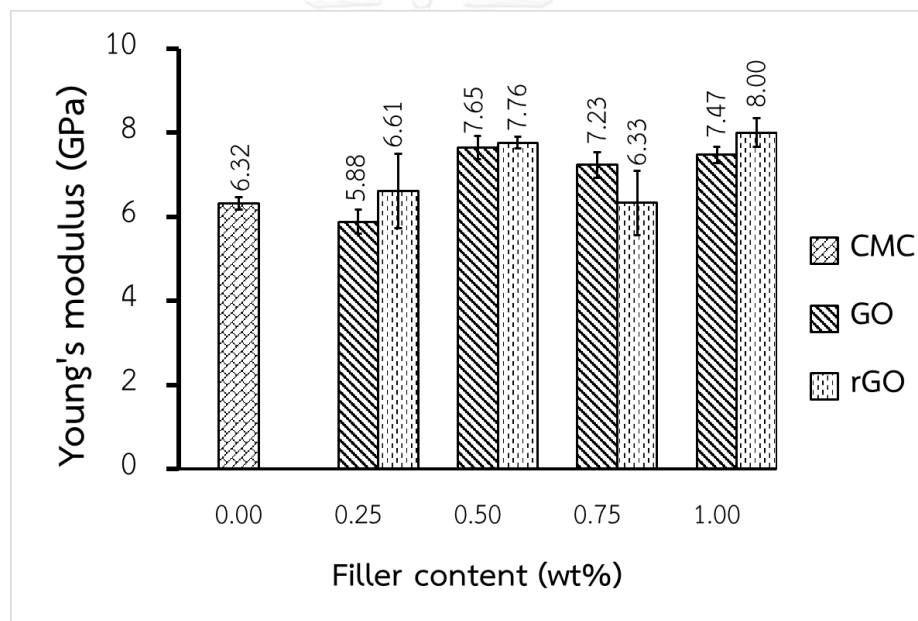
ค่ายังส์มอดุลัสของฟิล์มนาโนคอมพอสิตเปรียบเทียบ 2 การทดสอบเช่นเดียวกับสมบัติความทนแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด

(1) การเปรียบเทียบระหว่างค่ายังส์มอดุลัสของฟิล์มเอ็มซี (CMC) และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก (CMC/GO 0.50 และ CMC/rGO 0.50 ตามลำดับ) ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและฟิล์มดังกล่าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 แสดงในรูปที่ 4.11 และภาคผนวก ง โดยพบว่าฟิล์มซีเอ็มซีที่ผ่านการปรับสภาพมีค่ายังส์มอดุลัสสูงกว่าฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพประมาณ 0.34 เท่า ซึ่งเป็นผลมาจากการปรับสภาพของฟิล์มด้วยกรดซัลฟิวริก โดยกรดซัลฟิวริกมีสมบัติที่สามารถช่วยให้โครงสร้างเกิดการเชื่อมขวาง และเป็นสารเสริมสภาพพลาสติก จึงมีส่วนช่วยให้ฟิล์มสามารถต้านทานแรงได้มาก นอกจากนี้พบว่าการเติม GO และ rGO ลงในซีเอ็มซีมีผลทำให้ค่ายังส์มอดุลัสของซีเอ็มซี เพิ่มขึ้น ประมาณ 0.32 และ 0.15 เท่า ตามลำดับ สำหรับฟิล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และประมาณ 0.21 และ 0.23 เท่า ตามลำดับ สำหรับฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพ



รูปที่ 4.11 ยังส์มอดุลัสของฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก (CMC/GO 0.50 และ CMC/rGO 0.50 ตามลำดับ) โดยที่ฟิล์มไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก ในเมทานอล

(2) การเปรียบเทียบผลของการเติมแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก ลงในซีเอ็มซี ที่มีผลต่อค่ามอดูลัสของฟิล์มซีเอ็มซี โดยฟิล์มทั้งหมดถูกปรับสภาพด้วยกรดซिटริกในเมทานอล แสดงในรูปที่ 4.12 และภาคผนวก พบว่าฟิล์มที่มีสารตัวเติมมีค่ายังส์มอดูลัสสูงกว่าฟิล์มซีเอ็มซีประมาณ 0.22 เท่า และเมื่อพิจารณาปริมาณที่เติมพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเติมส่งผลให้ค่ามอดูลัสมีค่าสูงขึ้น โดยฟิล์มซีเอ็มซีที่เติมรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์มีค่ามอดูลัสสูงกว่าฟิล์มที่เติมแกรฟีนออกไซด์เพียงเล็กน้อย เนื่องจากรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์มีความแข็งแรงจากอะตอมคาร์บอนที่จัดเรียงตัวในลักษณะ 2 มิติ ทำให้สามารถต้านทานแรงที่มากกว่าทำได้ดีกว่า (Yang et al., 2015) ทั้งนี้การเติมแกรฟีนออกไซด์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.50 และ 0.75 โดยน้ำหนักให้ผลที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ (ภาคผนวก ข) ในกรณีที่เติมในปริมาณเท่ากัน



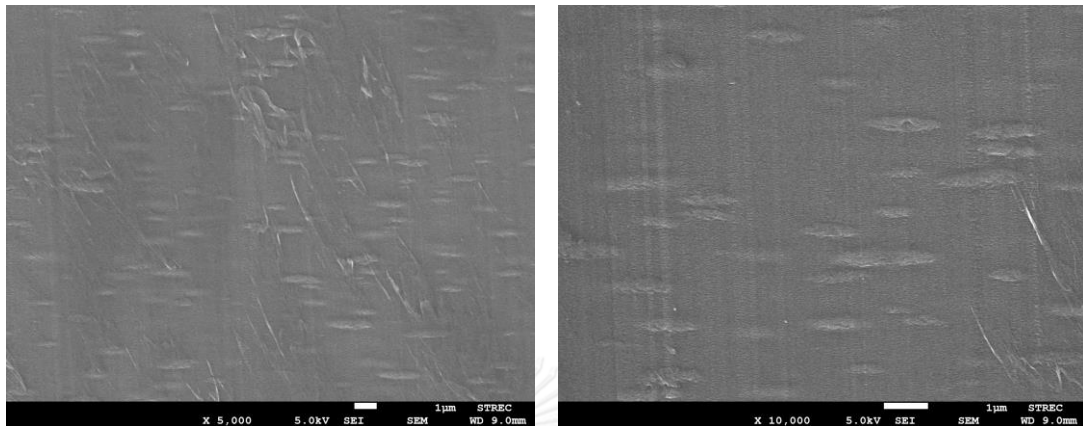
รูปที่ 4.12 ยังส์มอดูลัสของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิทริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก

4.2.4 สัณฐานวิทยา (morphology) ของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล

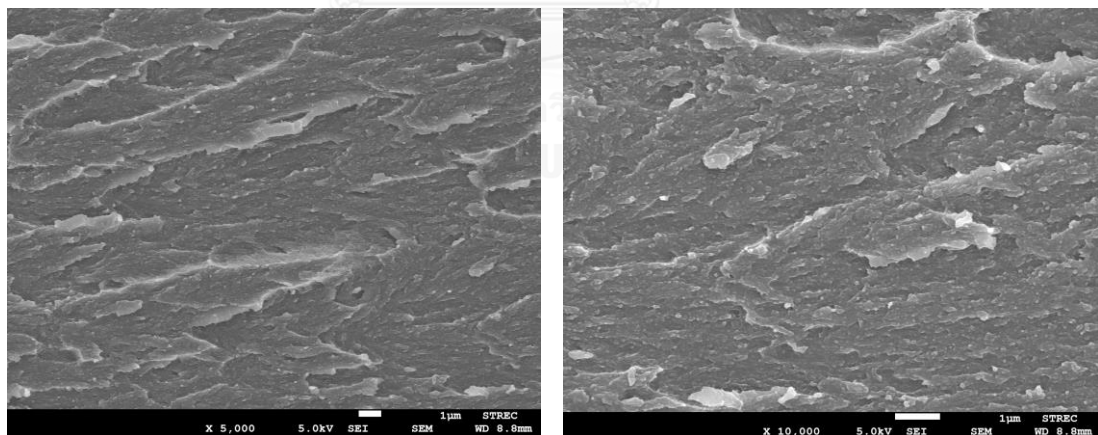
การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีน-ออกไซด์และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก โดยที่มีการเปรียบเทียบทั้งฟิล์มไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล และสัณฐานวิทยาของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล โดยฟิล์มดังกล่าวมีสารตัวเติม 2 ชนิดคือ แกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก แสดงในรูป 4.13-4.24 จากสัณฐานวิทยาของฟิล์มพบว่าฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (CMC-U) และผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริก (CMC-T) แสดงลักษณะที่แตกต่างกัน โดยที่ฟิล์ม CMC-T จะมีลักษณะพื้นผิวที่ไม่เรียบมากกว่าฟิล์ม CMC-U โดยลักษณะที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการใช้กรดซิตริกในเมทานอลในการปรับสภาพ เนื่องจากกรดซิตริกสามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยในการเชื่อมขวาง และเป็นสารเสริมสภาพพลาสติก ซึ่งผลที่ได้คล้ายกับการศึกษาโดย Tong และคณะ (2008) ซึ่งได้ศึกษาสมบัติของฟิล์มผสม pullulan-alginate-carboxymethyl cellulose โดยพบว่าการผสมอัลจิเนต (alginate) กับซีเอ็มซี ทำให้สัณฐานวิทยาของฟิล์มมีความขรุขระ ซึ่งอัลจิเนตเป็นพอลิเมอร์ชนิดเชิงเส้น (linear polymer) และอัลจิเนตมีสมบัติละลายน้ำได้ แต่เมื่อเกิดปฏิกิริยาจะเปลี่ยนเป็น อัลจิเนตในรูปเกลือ และเมื่อทำปฏิกิริยาต่อกับแคลเซียมซัลเฟต (calcium sulfate, CaSO_4) ส่งผลให้อัลจิเนตไม่ละลายน้ำ (Tong et al., 2008)

เมื่อพิจารณาฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.25-1.00 โดยน้ำหนักพบว่าการเติมแกรฟีนออกไซด์ ส่งผลให้ฟิล์มมีลักษณะของแผ่นเรียงซ้อนกันหลายชั้น เช่นเดียวกับผลของ Yadav และคณะ (2013) ที่พบว่าการเติมแกรฟีนออกไซด์ลงในฟิล์ม ส่งผลให้สัณฐานวิทยาของฟิล์มมีลักษณะเป็นแผ่นเรียงซ้อนกันเป็นชั้น ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมแกรฟีนออกไซด์มากขึ้นทำให้เห็นลักษณะเป็นชั้นจำนวนมากขึ้น (Yadav et al., 2013)

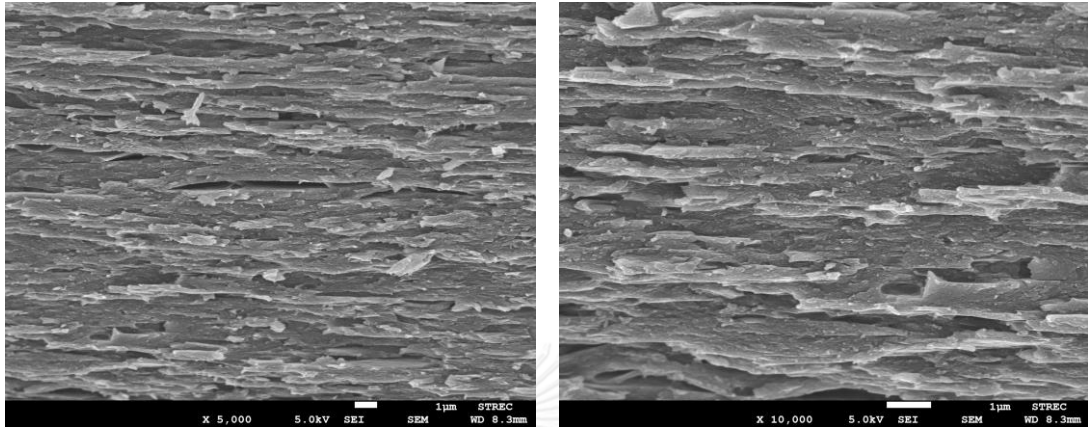
สำหรับสัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ พบว่าฟิล์มมีลักษณะการเรียงตัวคล้ายกับฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์แต่พบว่าฟิล์มนาโนคอมพอสิตดังกล่าวมีฟองอากาศขนาดระดับนาโนเมตร ถึงระดับไมโครเมตรกระจายอยู่ในฟิล์มนาโนคอมพอสิต ซึ่งเป็นผลมาจากตัวรีดิวซ์ที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 4.21-4.24



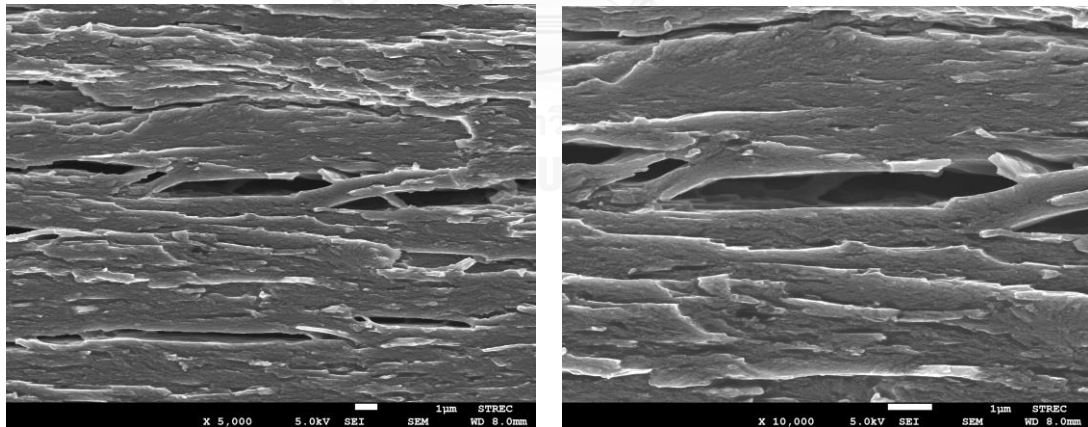
รูปที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (CMC-U) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา)



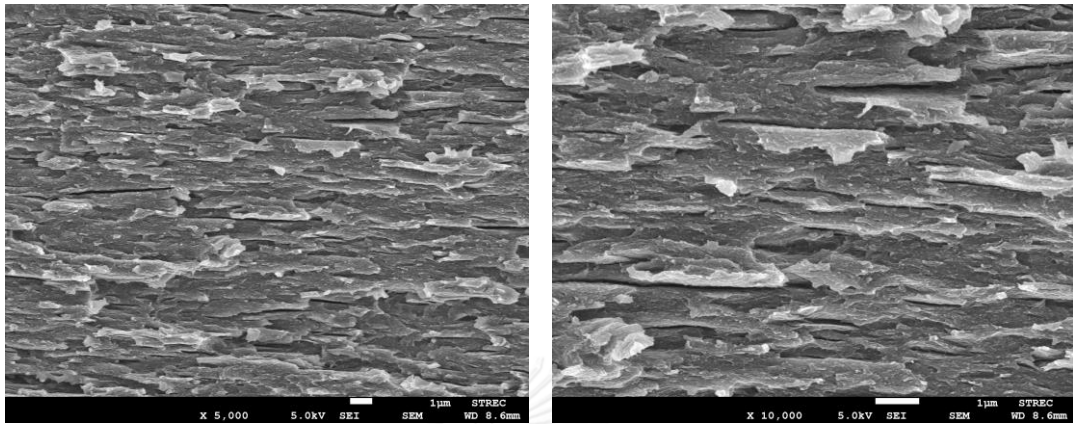
รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซีที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล (CMC-T) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา)



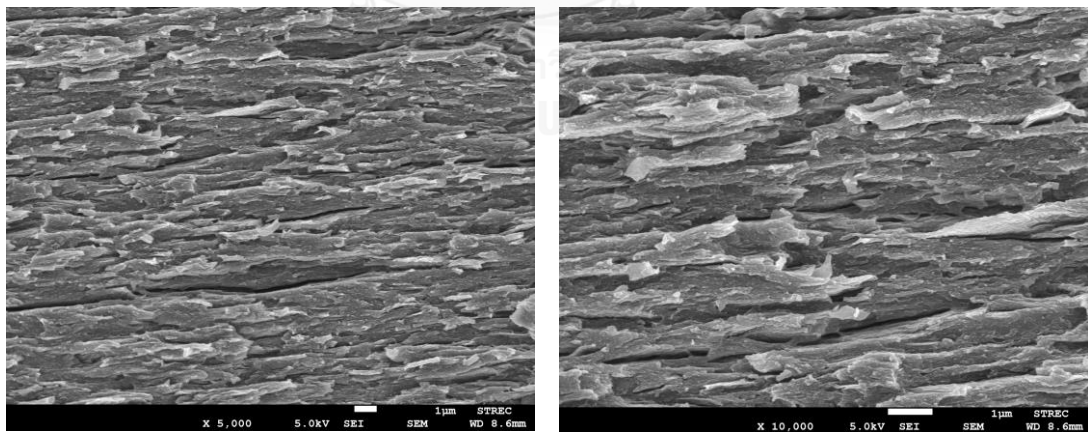
รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (CMC/GO 0.50-U) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา)



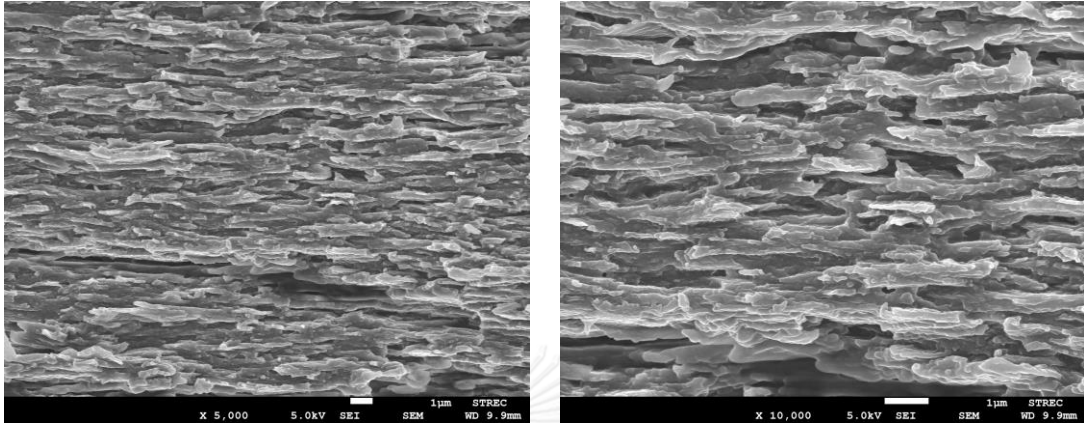
รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (CMC/rGO 0.50-U) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา)



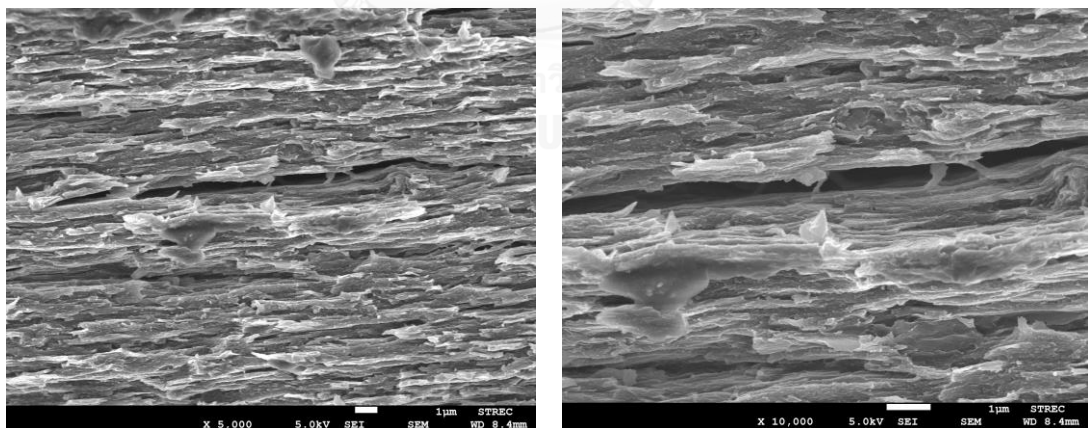
รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล (CMC/GO 0.25-T) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา)



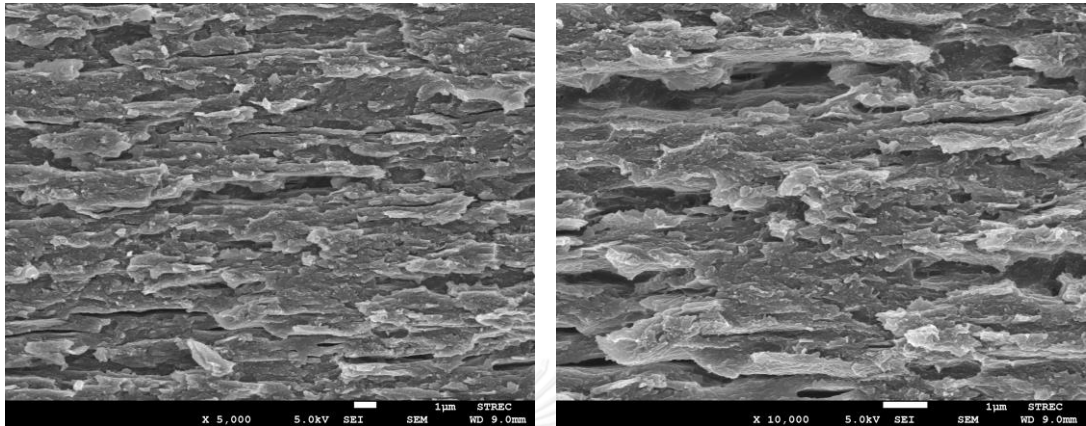
รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล (CMC/GO 0.50-T) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา)



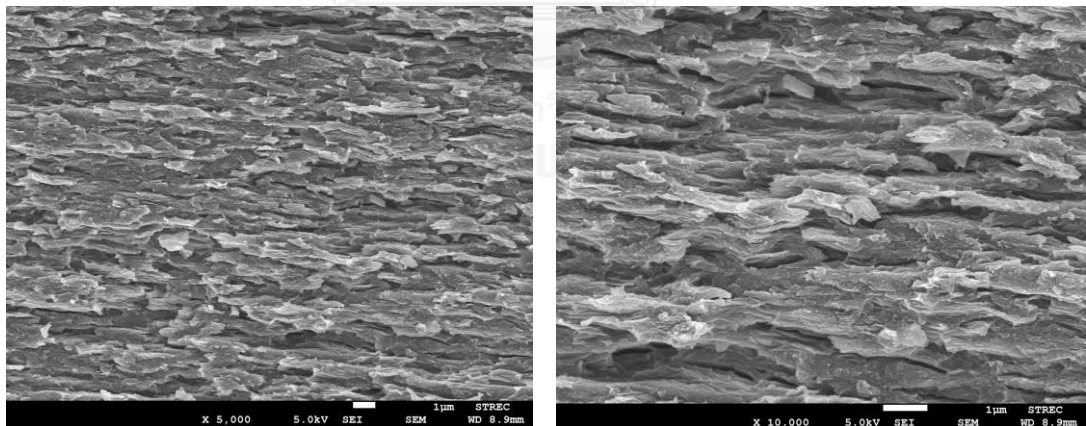
รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซिटริกในเมทานอล (CMC/GO 0.75-T) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา)



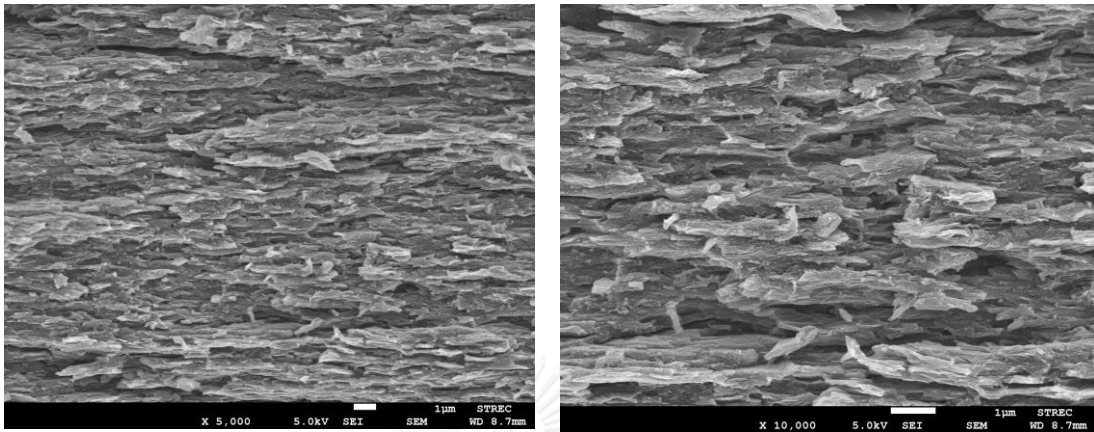
รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิทริกในเมทานอล (CMC/GO 1.00-T) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา)



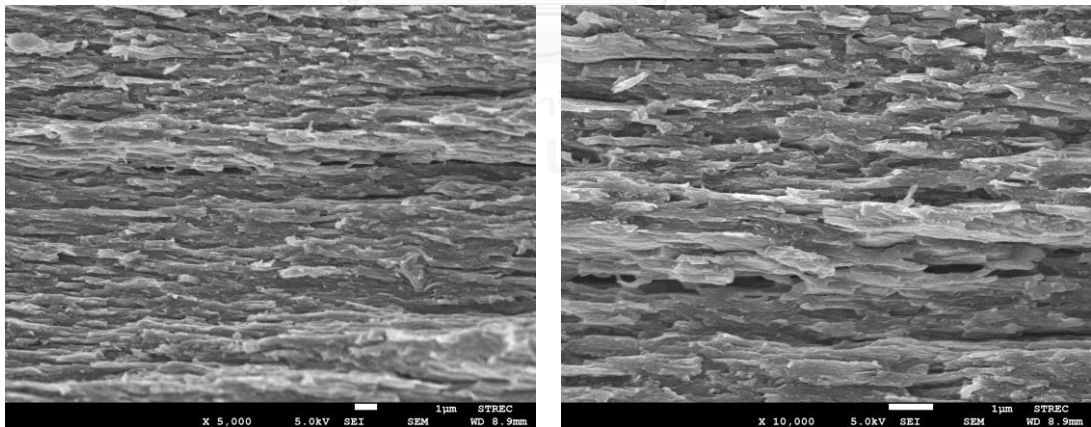
รูปที่ 4.21 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล (CMC/rGO 0.25-T) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา)



รูปที่ 4.22 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล (CMC/rGO 0.50-T) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา)



รูปที่ 4.23 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล (CMC/rGO 0.75-T) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา)



รูปที่ 4.24 สัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล (CMC/rGO 1.00-T) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) และ 10,000 เท่า (ขวา)

4.2.5 สมบัติการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ของฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโน-คอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิดริกในเมทานอล

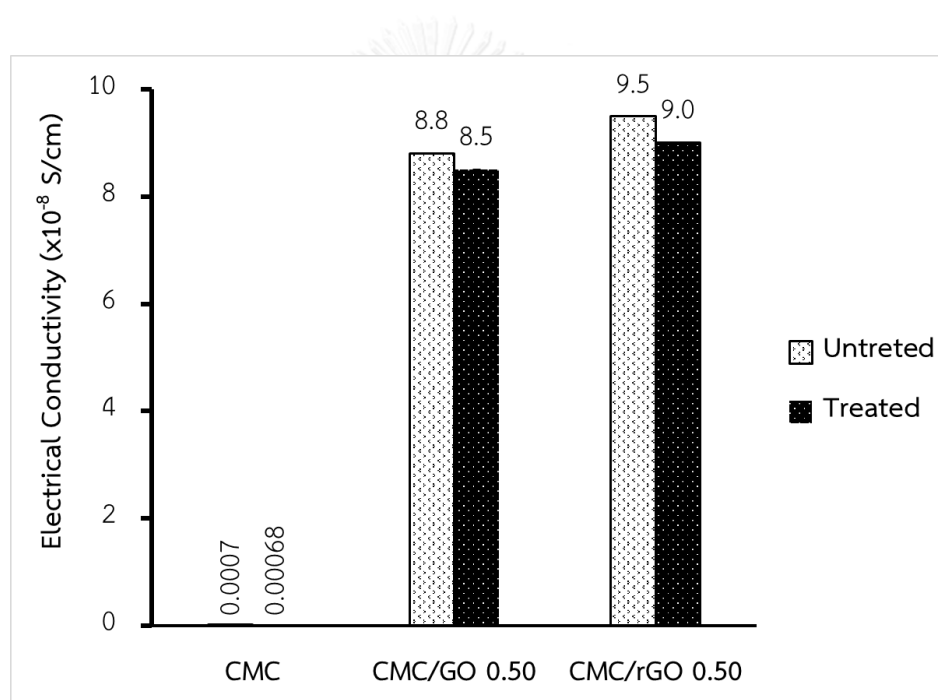
ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีน-ออกไซด์และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก (CMC/GO 0.50 และ CMC/rGO 0.50 ตามลำดับ) โดยที่ฟิล์มไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิดริกในเมทานอล แสดงในรูปที่ 4.25 และภาคผนวก จ ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิดริกในเมทานอล โดยฟิล์มซีเอ็มซีมีสารตัวเติม 2 ชนิด คือ แกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 4.26 และภาคผนวก จ จากการทดสอบการนำไฟฟ้าของฟิล์มด้วยเครื่องวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิดริกในเมทานอล พบว่าฟิล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพประมาณ 0.03 ถึง 0.05 เท่า เนื่องจากกรดซิดริกที่ใช้ในการปรับสภาพ สามารถทำหน้าที่ในการเชื่อมขวาง (Azeredo et al., 2015) ทำให้สามารถมีโอกาสเกิดการเชื่อมขวางภายในโครงสร้างของฟิล์มได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มความเกาะกันในโครงสร้างของฟิล์มเป็นผลทำให้การส่งกระแสไฟฟ้าภายในฟิล์มทำงานได้ลดลง แต่ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มทั้ง 2 แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ฟิล์มซีเอ็มซีที่มีการเติมสารตัวเติมแกรฟีนออกไซด์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ และไม่ผ่านการปรับสภาพ (CMC/GO 0.50 และ CMC/rGO 0.50 ตามลำดับ) มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (CMC-U) ถึง 12,570 เท่า และ 13,570 เท่า ตามลำดับ เป็นผลมาจากโครงสร้างของสารตัวเติมที่เป็นคาร์บอนจัดเรียงตัวเป็นวงหกเหลี่ยมเรียงต่อกันเป็นแผ่นบาง ซึ่งมีความสามารถช่วยในการส่งกระแสไฟฟ้าได้ แต่ฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์จะนำไฟฟ้าได้น้อยกว่าฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ เนื่องจากบนโครงสร้างของคาร์บอนอะตอมมีหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจนเกาะอยู่บนพื้นผิว เกิดความเกาะบนเส้นทางการส่งผ่านของกระแสไฟฟ้าจึงส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าพ้าน้อยกว่า

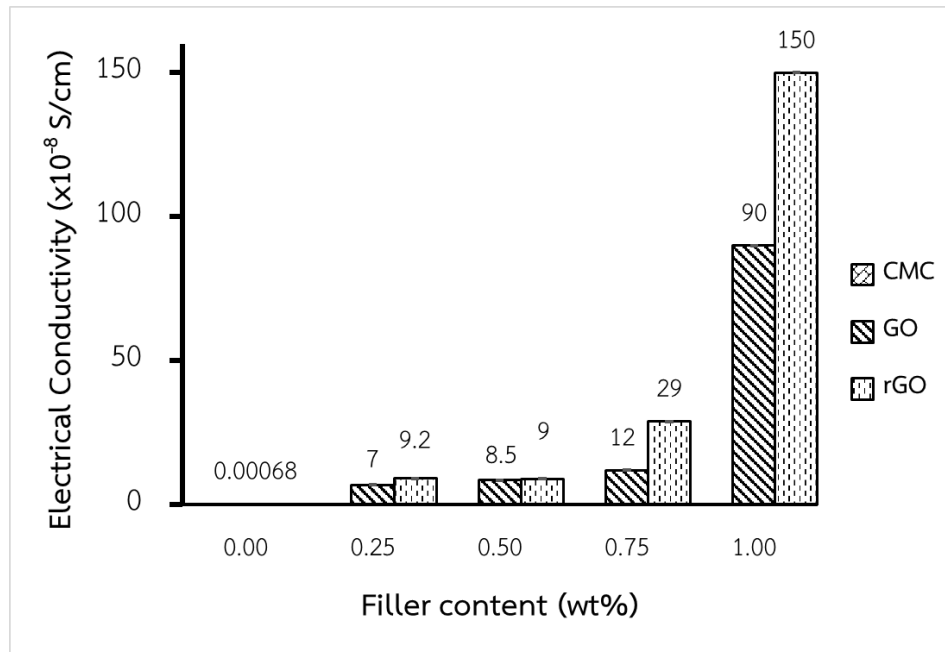
ผลจากการศึกษาฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิต ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิดริกในเมทานอล พบว่าการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาการเติมสารตัวเติมในปริมาณแตกต่างกัน พบว่าเมื่อเติมสารตัวเติมปริมาณมากขึ้น ทำให้ช่องว่างของสารตัวเติมลดลง ส่งผลต่อการส่งต่อของกระแสไฟฟ้าในโครงสร้าง การเติมสารตัวเติมในปริมาณน้อยทำให้เกิดช่องว่างระหว่างสารตัวเติมมาก จึงทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ยาก ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าต่ำ เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมมากพอ กระแสไฟฟ้าสามารถส่งต่อกันได้ดี ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น แต่ถ้าเติมสารตัวเติมในปริมาณมากเกินไป ทำให้เกิดความเกาะในโครงสร้างของฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.27 รวมไปถึงเป็นผลมาจากสารตัวเติมที่ใช้ เนื่องจากโครงสร้างของรีดิวซ์-

แกรฟีนออกไซด์ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนที่จัดเรียงตัวในลักษณะ 2 มิติ และมีลักษณะคล้ายตาข่ายรูปหกเหลี่ยม จากโครงสร้างที่มีอะตอมคาร์บอนต่อกันจึงทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนผ่านได้ (Novoselov et al., 2004) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์ม CMC/rGO 1.00 มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าฟิล์ม CMC/GO 1.00 คิดเป็น 0.67 เท่า และมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าฟิล์ม CMC คิดเป็น 220,587 เท่า

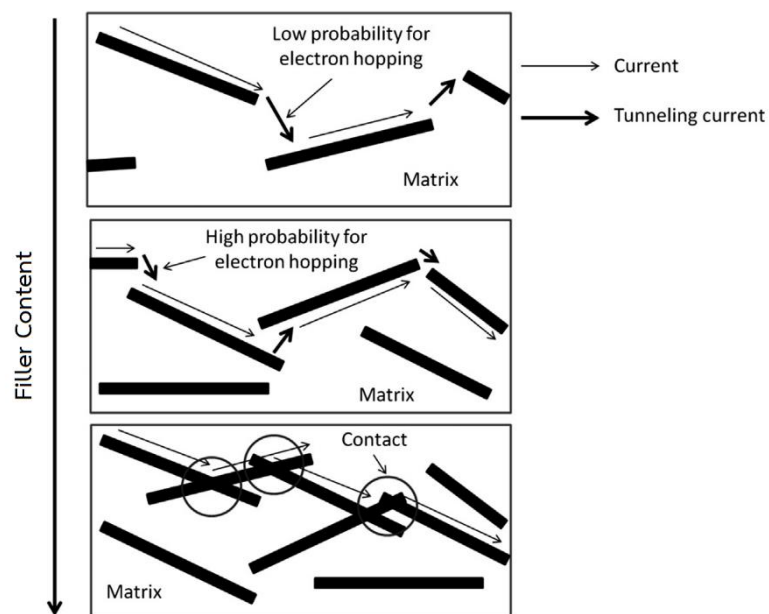
ค่าการนำไฟฟ้าเมื่อนำมาแปลงหน่วยให้อยู่ในรูปของค่าความต้านทานไฟฟ้าพบว่าฟิล์มซีเอ็มซีมีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่เป็นพลาสติก ส่วนฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์มีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วงของสารกึ่งตัวนำ (เมื่อพิจารณาสารตัวเต็มที่เท่ากันคือร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนัก)



รูปที่ 4.25 ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก (CMC/GO 0.50 และ CMC/rGO 0.50 ตามลำดับ) โดยที่ฟิล์มไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก ในเมทานอล



รูปที่ 4.26 ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิด คือแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.27 ลักษณะการส่งกระแสไฟฟ้าในพอลิเมอร์ที่มีสารตัวเติมเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของสารตัวเติม (Rallini and Kenny, 2017)

4.2.6 การสลายตัวทางความร้อน (thermal properties) ของฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์ม-นาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล

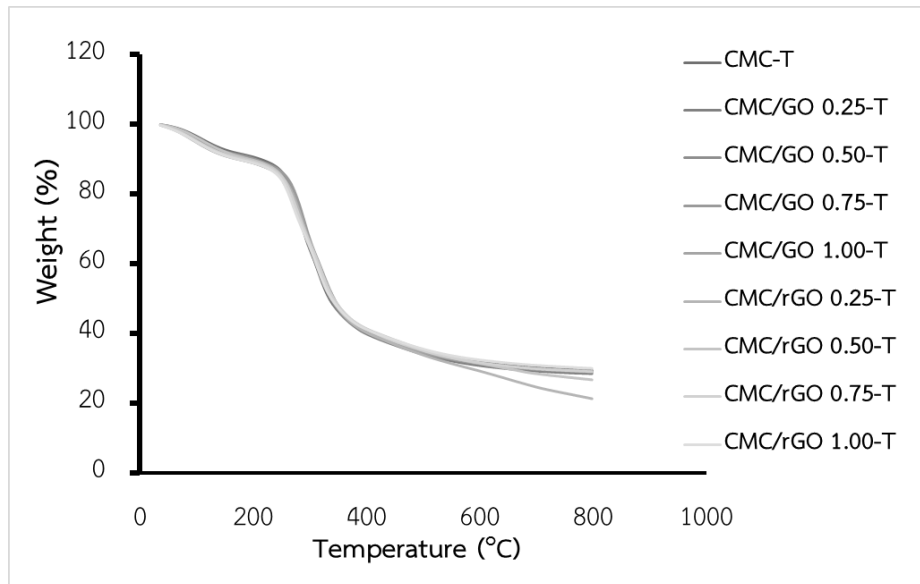
TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล แสดงในรูปที่ 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ จาก TGA เทอร์โมแกรมพบว่าช่วงแรกมีการหายไปของน้ำหนักซึ่งเป็นน้ำหนักของน้ำที่อยู่ในฟิล์ม ในช่วง 35-100 องศาเซลเซียส ช่วงแรกที่มีการเริ่มสลายตัวทางความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 140-250 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของหมู่ไฮดรอกซิล และหมู่คาร์บอกซิเมทิล ที่อยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์สายโซ่หลัก โดยพบว่าการหายไปประมาณร้อยละ 8.65 โดยน้ำหนัก และช่วงที่สองที่เกิดการสลายตัวคือช่วงอุณหภูมิ 275-350 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวทางความร้อนของสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ โดยมีการเปลี่ยนแปลงประมาณร้อยละ 62 โดยน้ำหนัก และเมื่อพิจารณาการใส่สารตัวเติมเข้าไป พบว่า TGA เทอร์โมแกรมไม่มีความแตกต่างกัน สำหรับ DTG เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิสูงสุดของการสลายตัวในแต่ละขั้นของการสลายตัวด้วยความร้อน

อุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อน (onset decomposition temperature, T_{onset}) และอุณหภูมิสลายตัวทางความร้อนสูงสุด (maximum decomposition temperature, T_{max}) ของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล โดยฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือ แกรฟีนออกไซด์ (GO) และ รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 4.30 และ 4.31 ตามลำดับและภาคผนวก ฉ ส่วนร้อยละมวลที่เหลือ (residue) หลังจากการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มดังกล่าว แสดงในรูปที่ 4.32 และภาคผนวก ฉ

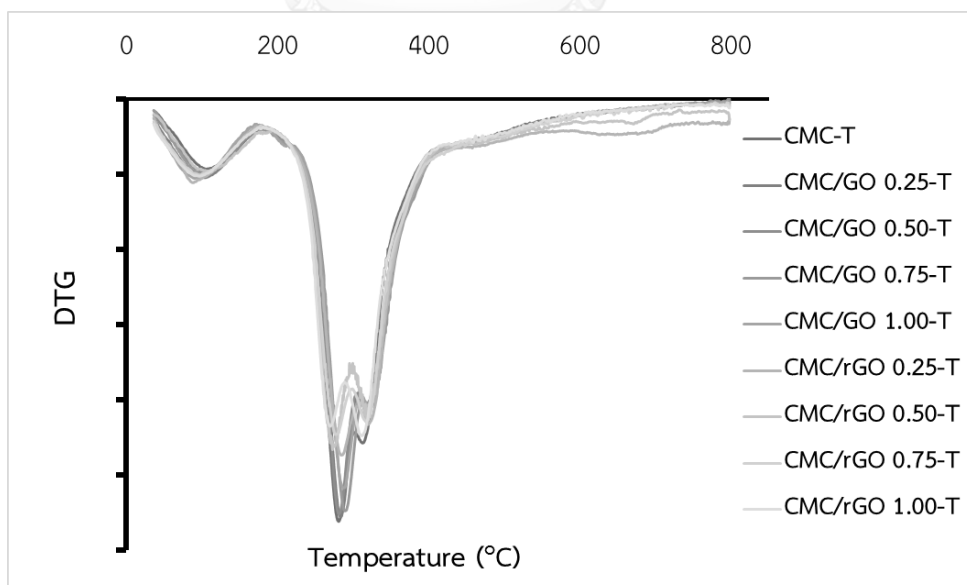
สำหรับอุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มซีเอ็มซี มีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติม GO สำหรับการเติม rGO ในปริมาณมากกว่าร้อยละ 0.25 มีผลทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ส่วนการเติม GO ทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวสูงกว่าการเติม rGO เพียงเล็กน้อยเท่านั้น (ประมาณ 0.03 เท่า) ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตัวเติมมีผลน้อยมากต่ออุณหภูมิเริ่มสลายตัวของฟิล์มซีเอ็มซี

ส่วนอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงสุดของฟิล์ม CMC-T และฟิล์มนาโนคอมพอสิต CMC/GO 0.25-T และ CMC-rGO 0.25 T มีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อมีการเติม GO และ rGO ในปริมาณมากกว่าร้อยละ 0.25 ลงในซีเอ็มซี พบว่าฟิล์ม CMC/GO-T มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงสุดมากกว่า ฟิล์ม CMC/rGO-T ประมาณ 0.04 เท่า เนื่องจากฟิล์ม CMC/GO มีความสามารถในการเข้ากันได้สูงกว่าและไม่มีฟองอากาศมากเช่นเดียวกับฟิล์ม CMC/rGO

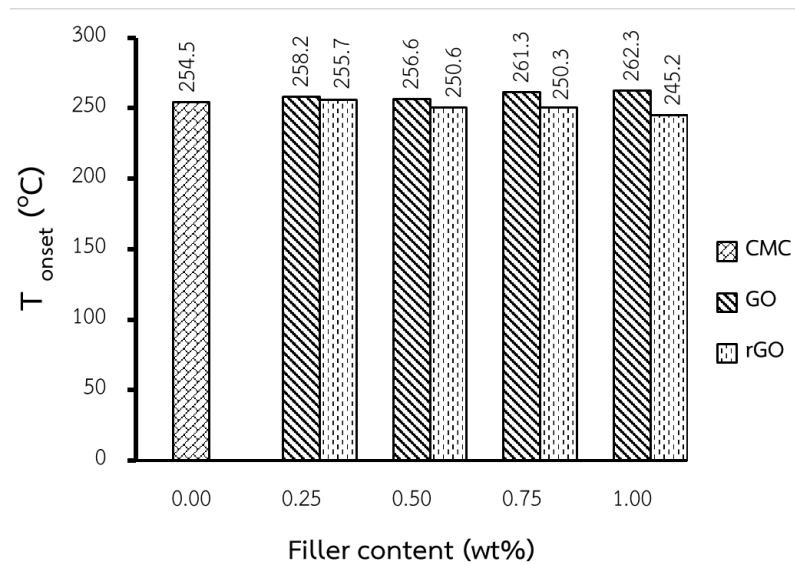
ร้อยละมวลที่เหลือของฟิล์ม CMC-T และฟิล์มนาโนคอมพอสิต CMC/GO-T และ CMC/rGO-T มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ยกเว้นฟิล์ม CMC/rGO 0.25-T มีมวลที่เหลือน้อยกว่าฟิล์มอื่น ๆ



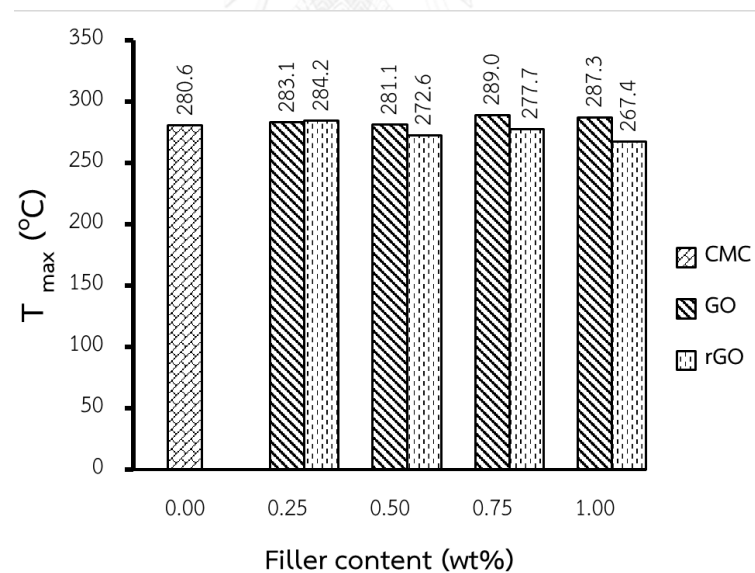
รูปที่ 4.28 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิดริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก



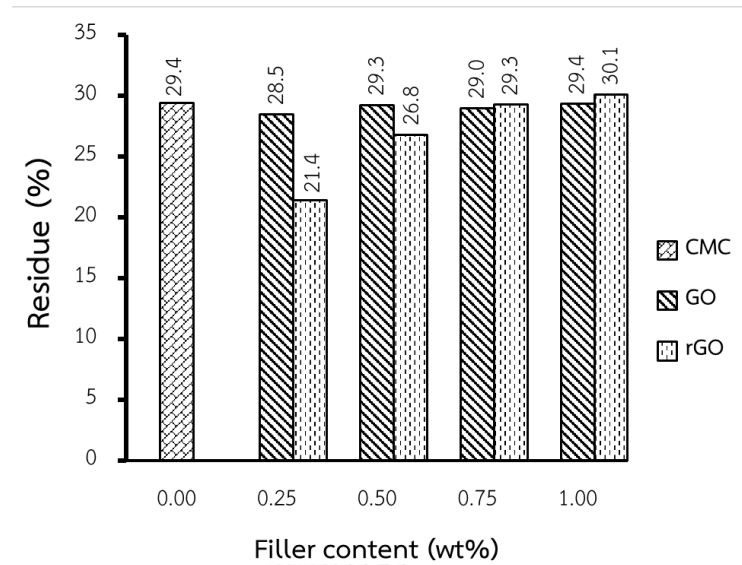
รูปที่ 4.29 DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิดริกในเมทานอลโดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.30 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อน (onset decomposition temperature, T_{onset}) ของฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.31 อุณหภูมิสลายตัวทางความร้อนสูงสุด (maximum decomposition temperature, T_{max}) ของฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.32 ส่วนร้อยละมวลที่เหลือ (residue) หลังจากการสลายตัวทางความร้อน ของฟิล์มนาโน-คอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล โดยที่ฟิล์มซีเอ็มซี (CMC) มีสารตัวเติม 2 ชนิดคือแกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลสหรือซีเอ็มซีโดยใช้สารตัวเติมรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำไฟฟ้าให้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มคอมพอสิตซีเอ็มซีที่ใช้สารตัวเติมแกรฟีนออกไซด์ และฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ใส่สารตัวเติม รวมไปถึงการปรับปรุงฟิล์มนาโนคอมพอสิตให้มีความคงรูปในภาวะที่มีความชื้นสูง โดยมีการปรับสภาพฟิล์มด้วยกรดซิตริกในเมทานอล จากผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

(1) ความเข้มข้นของกรดซิตริกในเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 ที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพฟิล์มซีเอ็มซีคือร้อยละ 1.00 โดยสามารถลดการละลายน้ำได้มากถึง 98.6 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

(2) การปรับสภาพฟิล์มซีเอ็มซีด้วยกรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 1.00 ในเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 มีผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซี โดยเพิ่มความทนแรงดึง ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และยังสัมมอดูลัสของฟิล์มดังกล่าว แต่การปรับสภาพฟิล์มดังกล่าวไม่มีผลกระทบต่อค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มซีเอ็มซีที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยเติมสารตัวเติมแกรฟีนออกไซด์ และรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ ปริมาณร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก พบว่าฟิล์มดังกล่าวที่ผ่านการปรับสภาพมีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น แต่มีสมบัติการนำไฟฟาลดเพียงเล็กน้อย (ไม่มีนัยสำคัญ) โดยการเติมแกรฟีนออกไซด์ทำให้ความทนแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาด เพิ่มสูงกว่าการเติมรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ แต่การเติมแกรฟีนออกไซด์และรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ให้ผลที่ไม่แตกต่างกันมากนักสำหรับค่ายังสัมมอดูลัสและค่าการนำไฟฟ้า

(3) ในกรณีของฟิล์มซีเอ็มซีที่มีการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 1.00 ในเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 พบว่าการเติมแกรฟีนและรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ ลงในฟิล์มดังกล่าวในปริมาณร้อยละ 0.25–1.00 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้การละลายน้ำ การดูดซึมน้ำ ความทนแรงดึง ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ยังสัมมอดูลัส การนำไฟฟ้า และอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม

สำหรับสมบัติการละลายน้ำของฟิล์มเพิ่มขึ้น (ประมาณ 0.24 ถึง 1.46 เท่า) เมื่อเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิด โดยการเติมรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์เพิ่มการละลายน้ำของฟิล์มมากกว่าการเติมแกรฟีนออกไซด์ นอกจากนี้การเติมรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ มีการดูดซึมน้ำมากกว่าการเติมแกรฟีนออกไซด์ด้วยเช่นกัน

ส่วนสมบัติเชิงกลนั้นการเติมแกรฟีนออกไซด์และรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ มีผลต่อค่าความทนแรงดึงและมอดุลัสของฟิล์มในแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม มีแนวโน้มในการเพิ่มความทนแรงดึงและมอดุลัส ส่วนค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของฟิล์มมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ซึ่งการเติมแกรฟีนออกไซด์ ในปริมาณร้อยละ 0.25 และ 0.50 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด มีค่าสูงกว่าการเติมรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ ในปริมาณเท่ากัน ส่วนการเติมแกรฟีนออกไซด์และรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ ปริมาณร้อยละ 0.75 และ 1.00 โดยน้ำหนัก มีผลต่อค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ใกล้เคียงกัน

สำหรับการนำไฟฟ้าของฟิล์มที่เติมแกรฟีนและรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ ในปริมาณร้อยละ 0.25 และ 0.50 มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่การเติมรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ในปริมาณมากกว่าร้อยละ 0.50 มีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์ม สูงกว่าการเติมแกรฟีนออกไซด์ ซึ่งจะเพิ่มสูงกว่า 0.67 เท่า สำหรับการเติมสารตัวเติมในปริมาณร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนัก

ส่วนอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์และรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ โดยภาพรวมไม่แตกต่างกันมากนัก

จากผลการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ พบว่าฟิล์มดังกล่าวสามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้เป็นส่วนประกอบหนึ่งในอุปกรณ์ส่งสัญญาณ (sensor) และสามารถใช้ห่อหุ้มอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (electronic devices) เพื่อป้องกันฝุ่นและสามารถช่วยในการส่งผ่านกระแสไฟฟ้าได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการเตรียมฟิล์มซีเอ็มซี/รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์โดยใช้ตัวรีติวซ์ชนิดอื่น
2. ศึกษาการละลายและการดูดซึมน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีในสภาวะที่สารละลายเป็นกรดและเบส
3. ศึกษาการปรับสภาพของฟิล์มซีเอ็มซีด้วยสารละลายอื่น

รายการอ้างอิง

- ALMASI, H., GHANBARZADEH, B. & ENTEZAMI, A. A. 2010. Physicochemical properties of starch–CMC–nanoclay biodegradable films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 46, 1-5.
- AVÉROUS, L. 2004. Biodegradable multiphase systems based on plasticized starch: A review. *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, 44, 231-274.
- AZEREDO, H. M. C., KONTOU-VRETTOU, C., MOATES, G. K., WELLNER, N., CROSS, K., PEREIRA, P. H. F. & WALDRON, K. W. 2015. Wheat straw hemicellulose films as affected by citric acid. *Food Hydrocolloids*, 50, 1-6.
- CHENG, H. & BISWAS, A. 2011. Chemical modification of cotton-based natural materials: Products from carboxymethylation. *Carbohydrate polymers*, 84, 1004-1010.
- COTE, L. J., CRUZ-SILVA, R. & HUANG, J. 2009. Flash reduction and patterning of graphite oxide and its polymer composite. *Journal of the American Chemical Society*, 131, 11027-11032.
- EBRAHIMZADEH, S., GHANBARZADEH, B. & HAMISHEHKAR, H. 2016. Physical properties of carboxymethyl cellulose based nano-biocomposites with Graphene nanoplatelets. *International Journal of Biological Macromolecules*, 84, 16-23.
- GHANBARZADEH, B., ALMASI, H. & ENTEZAMI, A. A. 2011. Improving the barrier and mechanical properties of corn starch-based edible films: Effect of citric acid and carboxymethyl cellulose. *Industrial Crops and Products*, 33, 229-235.
- HASHEM, M., SHARAF, S., ABD EL-HADY, M. M. & HEBEISH, A. 2013. Synthesis and characterization of novel carboxymethylcellulose hydrogels and carboxymethylcellulose-hydrogel-ZnO-nanocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 95, 421-7.
- HEINZE, T. & PFEIFFER, K. 1999. Studies on the synthesis and characterization of carboxymethylcellulose. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 266, 37-45.

- LAYEK, R. K., KUNDU, A. & NANDI, A. K. 2013. High-Performance Nanocomposites of Sodium Carboxymethylcellulose and Graphene Oxide. *Macromolecular Materials and Engineering*, 298, 1166-1175.
- LEE, J. Y., IM, J. N., KIM, T. H., CHUNG, D. J. & DOH, S. J. 2015. Structure and liquid handling properties of water-insoluble carboxymethyl cellulose foam. *Fibers and Polymers*, 16, 726-734.
- MA, X., CHANG, P. R. & YU, J. 2008. Properties of biodegradable thermoplastic pea starch/carboxymethyl cellulose and pea starch/microcrystalline cellulose composites. *Carbohydrate Polymers*, 72, 369-375.
- MCALLISTER, M. J., LI, J.-L., ADAMSON, D. H., SCHNIEPP, H. C., ABDALA, A. A., LIU, J., HERRERA-ALONSO, M., MILIUS, D. L., CAR, R. & PRUD'HOMME, R. K. 2007. Single sheet functionalized graphene by oxidation and thermal expansion of graphite. *Chemistry of materials*, 19, 4396-4404.
- MUELLER, R.-J. 2006. Biological degradation of synthetic polyesters—Enzymes as potential catalysts for polyester recycling. *Process Biochemistry*, 41, 2124-2128.
- NOVOSELOV, K. S., GEIM, A. K., MOROZOV, S. V., JIANG, D., ZHANG, Y., DUBONOS, S. V., GRIGORIEVA, I. V. & FIRSOV, A. A. 2004. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306, 666-669.
- RALLINI, M. & KENNY, J. M. 2017. Nanofillers in Polymers In Jasso-Gastinel. *Modification of Polymer Properties*, 47-86.
- ROY, N., SAHA, N., KITANO, T. & SAHA, P. 2012. Biodegradation of PVP-CMC hydrogel film: a useful food packaging material. *Carbohydrate Polymers*, 89, 346-53.
- SHAH, A. A., HASAN, F., HAMEED, A. & AHMED, S. 2008. Biological degradation of plastics: a comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 26, 246-65.
- SHIN, H. J., KIM, K. K., BENAYAD, A., YOON, S. M., PARK, H. K., JUNG, I. S., JIN, M. H., JEONG, H. K., KIM, J. M. & CHOI, J. Y. 2009. Efficient reduction of graphite oxide by sodium borohydride and its effect on electrical conductance. *Advanced Functional Materials*, 19, 1987-1992.
- SON, Y.-R., RHEE, K. Y. & PARK, S.-J. 2015. Influence of reduced graphene oxide on mechanical behaviors of sodium carboxymethyl cellulose. *Composites Part B: Engineering*, 83, 36-42.

- SUNG, Y., KIM, T.-H. & LEE, B. 2016. Syntheses of carboxymethylcellulose/graphene nanocomposite superabsorbent hydrogels with improved gel properties using electron beam radiation. *Macromolecular Research*, 24, 143-151.
- TOH, S. Y., LOH, K. S., KAMARUDIN, S. K. & DAUD, W. R. W. 2014. Graphene production via electrochemical reduction of graphene oxide: synthesis and characterisation. *Chemical Engineering Journal*, 251, 422-434.
- TONG, Q., XIAO, Q. & LIM, L.-T. 2008. Preparation and properties of pullulan–alginate–carboxymethylcellulose blend films. *Food Research International*, 41, 1007-1014.
- TONGDEESOONTORN, W., MAUER, L. J., WONGRUONG, S., SRIBURI, P. & RACHTANAPUN, P. 2011. Effect of carboxymethyl cellulose concentration on physical properties of biodegradable cassava starch-based films. *Chemistry Central Journal*, 5, 6.
- YADAV, M., RHEE, K. Y., JUNG, I. H. & PARK, S. J. 2013. Eco-friendly synthesis, characterization and properties of a sodium carboxymethyl cellulose/graphene oxide nanocomposite film. *Cellulose*, 20, 687-698.
- YANG, X., TU, Y., LI, L., SHANG, S. & TAO, X. M. 2010. Well-dispersed chitosan/graphene oxide nanocomposites. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2, 1707-13.
- YANG, Z.-Z., ZHENG, Q.-B., QIU, H.-X., JING, L. & YANG, J.-H. 2015. A simple method for the reduction of graphene oxide by sodium borohydride with CaCl_2 as a catalyst. *New Carbon Materials*, 30, 41-47.
- ZHU, Y., MURALI, S., STOLLER, M. D., VELAMAKANNI, A., PINER, R. D. & RUOFF, R. S. 2010. Microwave assisted exfoliation and reduction of graphite oxide for ultracapacitors. *Carbon*, 48, 2118-2122.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การละลายน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้กรดซิตริกที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน และการละลายน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ปรับสภาพด้วยกรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90

ตารางที่ ก-1 ร้อยละการละลายน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 0.50, 1.00 และ 1.50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90

ร้อยละการละลายน้ำ					
ตัวอย่าง	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
CMC-U	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00
CMC-T-0.50CA	2.32	1.81	1.69	1.94	0.33
CMC-T-1.00CA	1.56	1.44	1.20	1.40	0.18
CMC-T-1.50CA	0.99	1.01	1.21	1.07	0.13

ตารางที่ ก-2 ร้อยละการละลายน้ำของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ใช้สารตัวเติมแกรฟีนออกไซด์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.00–1.00 โดยน้ำหนัก โดยฟิล์มดังกล่าวผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90

ร้อยละการละลายน้ำ					
ตัวอย่าง	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
CMC-T	5.91	6.22	6.00	6.05	0.16
CMC/GO 0.25-T	7.90	7.63	7.07	7.53	0.42
CMC/GO 0.50-T	8.70	7.95	9.16	8.94	0.23
CMC/GO 0.75-T	10.48	9.30	9.62	10.23	0.75
CMC/GO 1.00-T	10.30	10.72	10.90	10.64	0.31
CMC/rGO 0.25-T	8.15	9.36	9.60	9.03	0.78
CMC/rGO 0.50-T	10.94	11.91	10.10	10.99	0.91
CMC/rGO 0.75-T	13.16	12.74	12.45	12.78	0.36
CMC/rGO 1.00-T	14.63	17.03	13.00	14.89	2.03

ภาคผนวก ข

การบวมตัวของฟิล์มซีเอ็มซีที่ใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นแตกต่างกันในการปรับสภาพ

ตารางที่ ข-1 ร้อยละการบวมตัวของฟิล์มซีเอ็มซีที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 0.50, 1.00 และ 1.50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90

ร้อยละการบวมตัว					
ตัวอย่าง	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
CMC-T-0.50CA	104.36	135.52	136.01	125.30	18.13
CMC-T-1.00CA	108.72	111.11	110.30	110.04	1.22
CMC-T-1.50CA	110.38	103.94	108.36	107.56	3.30



ภาคผนวก ค

การดูดซึมน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และซีเอ็มซี/
รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

ตารางที่ ค-1 ร้อยละการดูดซึมน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ปรับสภาพด้วย
กรดซิตริก

ตัวอย่าง	เวลา (นาที)	ร้อยละการดูดซึมน้ำ									
		2	4	6	8	10	30	60	120	180	1440
CMC-T	1	113.3	114.7	117.9	119.1	120.1	120.2	120.0	120.7	120.9	120.7
	2	115.5	117.6	117.4	117.8	118.8	119.5	119.5	118.8	118.6	118.8
	3	115.2	117.1	117.9	118.6	119.1	119.5	119.3	119.1	119.5	119.5
	AV	114.7	116.5	117.7	118.5	119.4	119.7	119.6	119.6	119.7	119.7
	SD	0.98	1.26	0.24	0.51	0.58	0.31	0.30	0.85	0.94	0.78
CMC/GO 0.25-T	1	80.7	99.6	101.6	101.7	101.8	102.0	102.9	103.2	103.3	103.3
	2	82.4	99.2	99.4	100.3	100.2	99.2	99.8	99.2	99.5	99.7
	3	94.8	101.7	102.9	102.5	103.2	104.1	104.7	104.6	104.3	104.6
	AV	86	100.2	101.3	101.5	101.8	101.8	102.5	102.3	102.4	102.5
	SD	6.28	1.08	1.45	0.89	1.26	2.01	2.02	2.27	2.05	2.08
CMC/GO 0.50-T	1	115.4	125.2	124.8	125.5	126.1	126.9	127.3	126.6	126.8	126.6
	2	98.4	108.5	107.7	111.1	113.1	113.9	115.4	116.4	115.9	116.6
	3	105.6	108.3	110.2	112.4	112.6	112.8	111.9	113.4	112.8	113.2
	AV	106.5	114.0	114.2	116.3	117.3	117.9	118.2	118.8	118.5	118.8
	SD	6.98	7.89	7.56	6.49	6.26	6.42	6.59	5.68	5.99	5.71
CMC/GO 0.75-T	1	113.7	131.1	133.5	133.9	134.2	133.9	133.9	133.6	133.6	133.6
	2	110.8	130.9	133.4	133.2	133.0	133.0	133.3	133.0	132.4	131.8
	3	112.0	129.2	131.9	132.0	132.2	132.4	132.6	132.6	132.4	131.7
	AV	112.2	130.4	132.9	133.0	133.1	133.2	133.2	133.1	132.9	132.8
	SD	1.18	0.89	0.74	0.76	0.85	0.64	0.53	0.43	0.50	0.78
CMC/GO 1.00-T	1	103.6	122.3	129.4	130.1	130.9	133.3	132.9	133.7	133.8	134.2
	2	122.5	130.0	133.1	134.1	134.2	134.2	136.4	136.7	136.9	136.7
	3	109.6	125.8	132.1	132.9	135.2	136.3	137.0	137.0	136.0	136.9
	AV	108.5	126.0	131.6	132.4	133.4	134.6	135.5	135.8	135.6	135.9
	SD	3.72	3.15	1.55	1.66	1.79	1.27	1.77	1.51	1.31	1.22
CMC/rGO 0.25-T	1	102.8	113.4	116.1	115.8	116.6	117.8	116.9	117.8	117.1	117.3
	2	103.3	116.9	121.1	121.8	121.8	123.4	123.3	123.4	123.4	122.9
	3	108.3	114.6	116.8	116.9	118.4	118.9	120.4	120.3	120.2	120.1
	AV	104.8	115.0	118.0	118.2	119.0	120.1	120.2	120.5	120.2	120.1
	SD	2.50	1.46	2.20	2.61	2.15	2.45	2.56	2.30	2.57	2.32
CMC/rGO 0.50-T	1	120.8	149.8	160.2	161.2	132.4	162.5	166.3	165.3	166.4	166.8
	2	111.9	124.0	133.9	135.9	138.0	137.9	140.8	142.0	142.0	142.4
	3	102.3	109.1	111.4	111.4	111.9	114.1	113.0	113.5	114.0	114.0
	AV	111.7	127.6	135.2	136.2	137.5	138.2	140.0	140.3	140.8	141.1

ตัวอย่าง	เวลา (นาที)	ร้อยละการดูดซึมน้ำ									
		2	4	6	8	10	30	60	120	180	1440
	SD	7.55	16.81	19.94	20.31	20.61	19.79	21.76	21.17	21.39	21.56
CMC/rGO 0.75-T	1	100.9	138.8	147.8	147.9	150.5	151.8	152.8	135.6	153.6	153.7
	2	152.0	163.5	165.1	164.9	164.6	165.3	166.9	165.7	166.9	166.9
	3	143.5	159.5	162.4	162.7	163.1	162.9	166.2	166.6	165.8	165.8
	AV	132.2	153.9	158.5	158.6	159.4	160.0	162.0	162.0	162.1	162.2
	SD	22.36	10.82	7.59	7.54	6.33	5.90	6.49	5.94	6.05	5.99
CMC/rGO 1.00-T	1	128.9	158.9	161.3	164.5	164.9	167.5	169.2	169.2	169.2	168.8
	2	154.8	193.5	217.4	235.4	238.0	242.6	242.3	242.0	242.3	242.6
	3	104.7	125.5	126.0	127.9	126.9	130.8	131.0	131.2	131.3	131.2
	AV	129.5	159.4	168.2	176.0	176.7	180.3	180.8	180.8	180.9	180.9
	SD	20.49	27.85	37.61	44.61	46.09	46.53	46.20	46.02	46.09	46.29

หมายเหตุ AV หมายถึง ค่าเฉลี่ย (average) และ SD หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)



ภาคผนวก ง
สมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอลิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์
และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

ตารางที่ ง-1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (CMC-U)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด	ยังส์มอดุลัส (จิกะปาสคาล)
1	104.28	18.2	3.49
2	106.60	15.2	4.84
3	108.04	18.6	5.11
4	108.16	6.2	4.81
5	102.86	7.8	5.23
ค่าเฉลี่ย	105.99	13.2	4.70
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.21	5.8	0.69

ตารางที่ ง-2 สมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีที่ผ่านการปรับสภาพ (CMC-T)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด	ยังส์มอดุลัส (จิกะปาสคาล)
1	117.21	17.7	6.21
2	124.24	22.0	6.52
3	119.04	16.9	6.44
4	120.08	15.3	6.23
5	126.26	20.4	6.19
ค่าเฉลี่ย	121.37	18.4	6.32
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.76	2.7	0.15

ตารางที่ ง-3 สมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล (CMC/GO 0.50-U)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด	ยังส์มอดุลัส (จิกะปาสคาล)
1	160.71	18.2	5.68
2	153.52	15.2	5.71
3	159.31	18.6	5.80
4	156.24	6.2	6.18
5	152.06	7.8	6.21
ค่าเฉลี่ย	156.37	13.2	5.91
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.68	5.8	0.25

ตารางที่ ง-4 สมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล (CMC/rGO 0.50-U)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด	ยังส์มอดุลัส (จิกะปาสคาล)
1	116.49	14.6	5.06
2	109.01	4.9	5.55
3	114.01	5.2	5.61
4	107.33	3.8	5.34
5	112.00	5.6	5.48
ค่าเฉลี่ย	111.77	6.8	5.4
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.70	4.3	0.21

ตารางที่ ง-5 สมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล (CMC/GO 0.25-T)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด	ยังส์มอดุลัส (จิกะปาสคาล)
1	137.10	30.4	5.42
2	148.21	35.2	5.76
3	146.03	30.6	6.01
4	149.90	33.6	6.03
5	146.11	33.0	6.17
ค่าเฉลี่ย	145.47	32.5	5.88
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.95	2.0	0.29

ตารางที่ ง-6 สมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล (CMC/GO 0.50-T)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด	ยังส์มอดุลัส (จิกะปาสคาล)
1	183.97	32.4	7.14
2	179.44	29.6	7.76
3	176.81	27.0	7.86
4	175.76	29.0	7.78
5	178.71	27.2	7.70
ค่าเฉลี่ย	178.94	29.0	7.65
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.17	2.2	0.28

ตารางที่ ง-7 สมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล (CMC/GO 0.75-T)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด	ยังส์มอดุลัส (จิกะปาสคาล)
1	144.34	18.2	7.12
2	149.50	17.7	7.59
3	152.54	21.6	6.87
4	157.73	22.0	7.53
5	157.97	23.0	7.03
ค่าเฉลี่ย	152.42	20.5	7.23
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	5.76	2.4	0.31

ตารางที่ ง-8 สมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล (CMC/GO 1.00-T)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด	ยังส์มอดุลัส (จิกะปาสคาล)
1	163.33	18.7	7.27
2	165.86	18.6	7.59
3	161.59	16.4	7.25
4	162.11	17.1	7.59
5	158.59	18.8	7.64
ค่าเฉลี่ย	162.30	17.9	7.47
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.65	1.1	0.19

ตารางที่ ง-9 สมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล (CMC/rGO 0.25-T)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด	ยังส์มอดุลัส (จิกะปาสคาล)
1	149.50	23.8	6.93
2	158.55	25.6	7.19
3	157.86	26.2	5.03
4	153.24	24.8	7.09
5	158.97	27.4	6.82
ค่าเฉลี่ย	155.62	25.6	6.61
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.12	1.4	0.89

ตารางที่ ง-10 สมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล (CMC/rGO 0.50-T)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด	ยังส์มอดุลัส (จิกะปาสคาล)
1	162.62	21.6	7.51
2	158.53	17.9	7.79
3	166.81	21.2	7.84
4	170.47	21.8	7.87
5	157.29	16.9	7.80
ค่าเฉลี่ย	163.14	19.8	7.76
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	5.54	2.3	0.14

ตารางที่ ง-11 สมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล (CMC/rGO 0.75-T)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด	ยังส์มอดุลัส (จิกะปาสคาล)
1	148.41	24.6	6.468
2	144.39	22.0	7.18
3	135.45	20.6	5.36
4	143.24	20.2	6.90
5	140.35	16.4	5.73
ค่าเฉลี่ย	142.37	20.7	6.33
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.83	2.9	0.76

ตารางที่ ง-12 สมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล (CMC/rGO 1.00-T)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด	ยังส์มอดุลัส (จิกะปาสคาล)
1	175.3	20.6	8.18
2	168.1	18.1	8.03
3	168.1	15.2	8.46
4	172.6	17.5	7.72
5	168.5	19.6	7.61
ค่าเฉลี่ย	170.50	18.2	8.00
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.29	2.1	0.34

ภาคผนวก จ
การนำไฟฟ้าของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์
และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

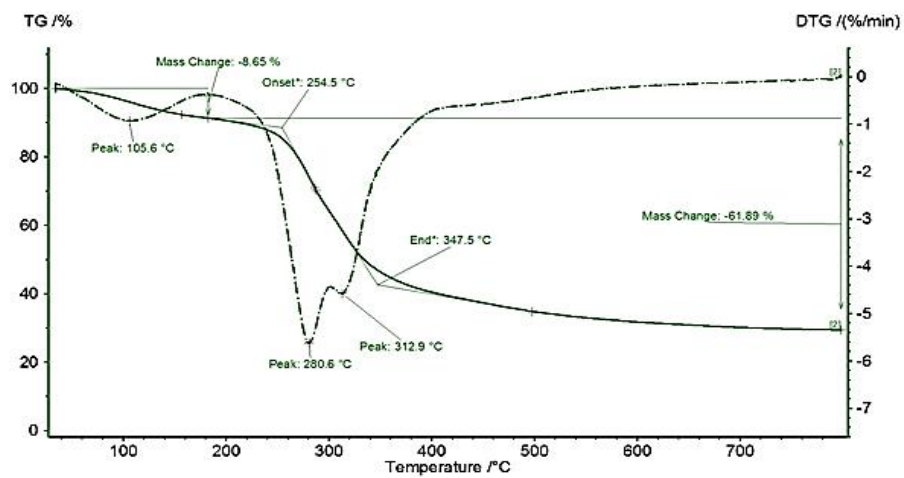
ตารางที่ จ-1 ค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริก

ตัวอย่าง	ค่าการนำไฟฟ้า ($\times 10^{-8}$ ซีเมนต์ต่อ เซนติเมตร)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)
CMC-U	0.0007	8.4×10^{-13}
CMC/GO 0.50-U	8.80	1.85×10^{-8}
CMC/rGO 0.50-U	9.50	2.76×10^{-8}
CMC-T	0.00068	8.7×10^{-13}
CMC/GO 0.25-T	7.00	1.3×10^{-8}
CMC/GO 0.50-T	8.50	1.5×10^{-8}
CMC/GO 0.75-T	12.00	3.0×10^{-8}
CMC/GO 1.00-T	90.00	2.3×10^{-7}
CMC/rGO 0.25-T	9.20	3.0×10^{-8}
CMC/rGO 0.50-T	9.00	3.4×10^{-8}
CMC/rGO 0.75-T	29.00	1.6×10^{-7}
CMC/rGO 1.00-T	150.00	3.3×10^{-7}

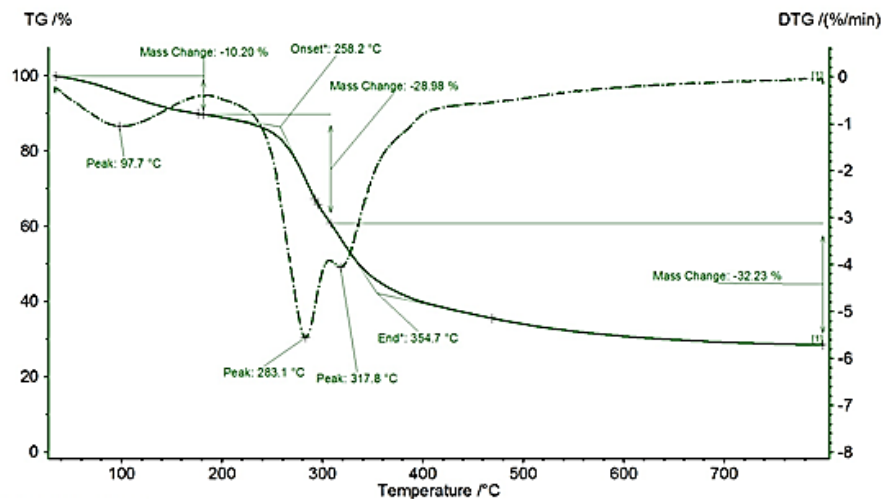
ภาคผนวก ฉ

TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์
และซีเอ็มซีรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

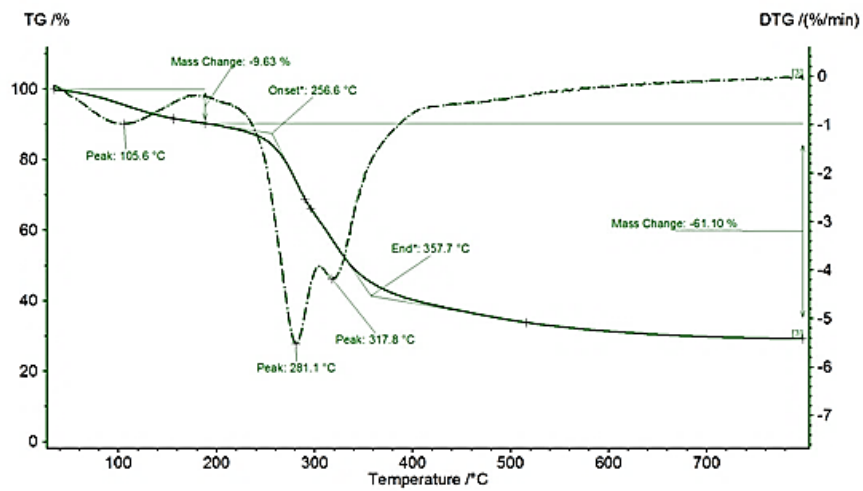
ฉ-1 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่เติมแกรฟีนออกไซด์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.00, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 โดยน้ำหนัก โดยฟิล์มดังกล่าวผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90



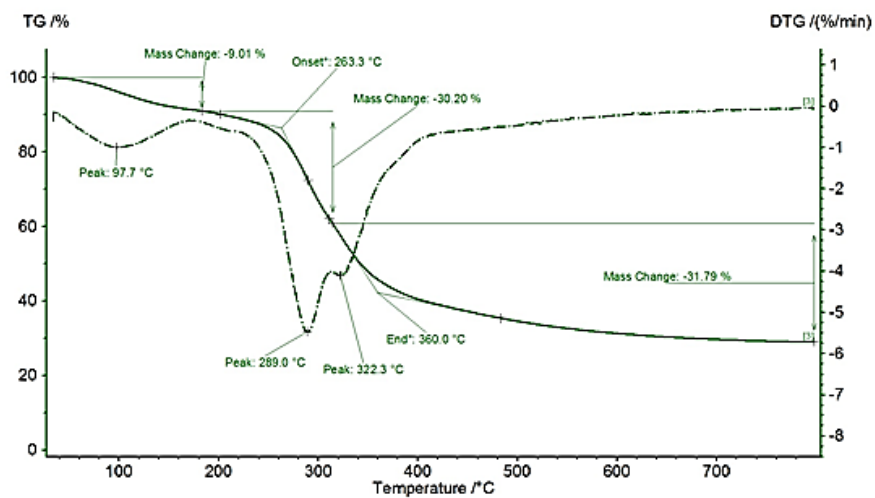
รูปที่ ฉ-1.1 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล (CMC-T)



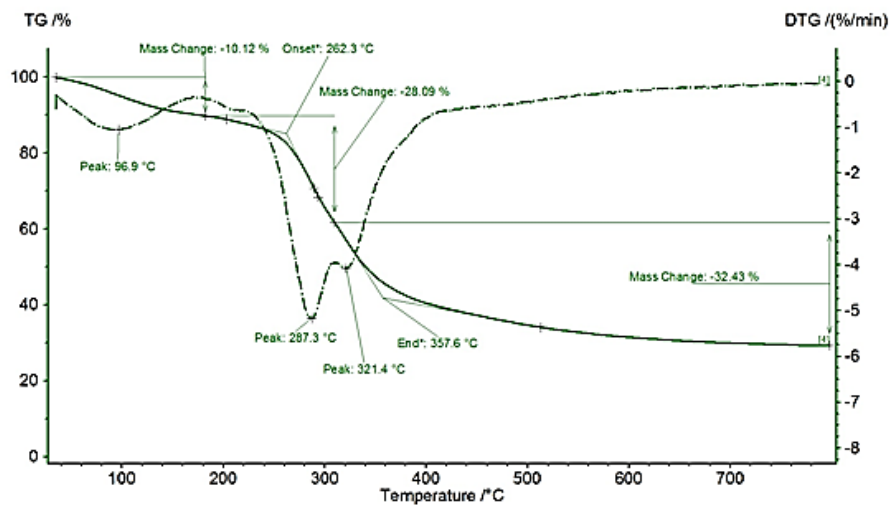
รูปที่ ฉ-1.2 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล (CMC/GO 0.25-T)



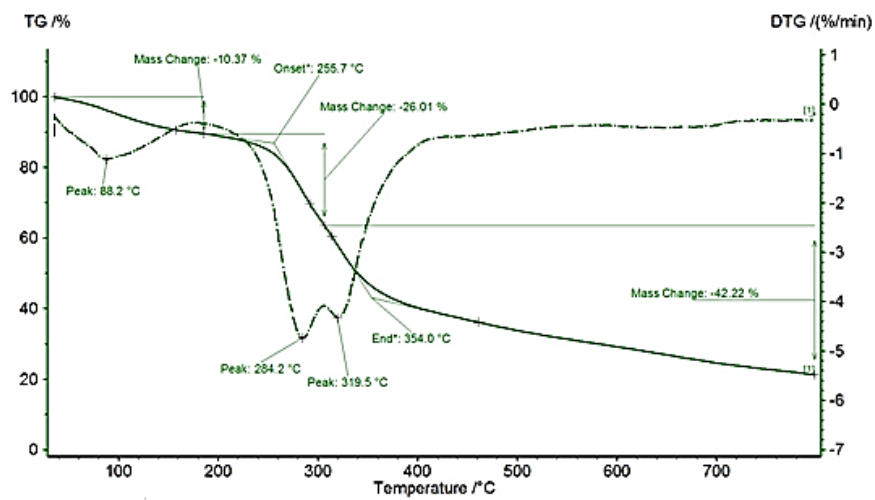
รูปที่ ฉ-1.3 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล (CMC/GO 0.50-T)



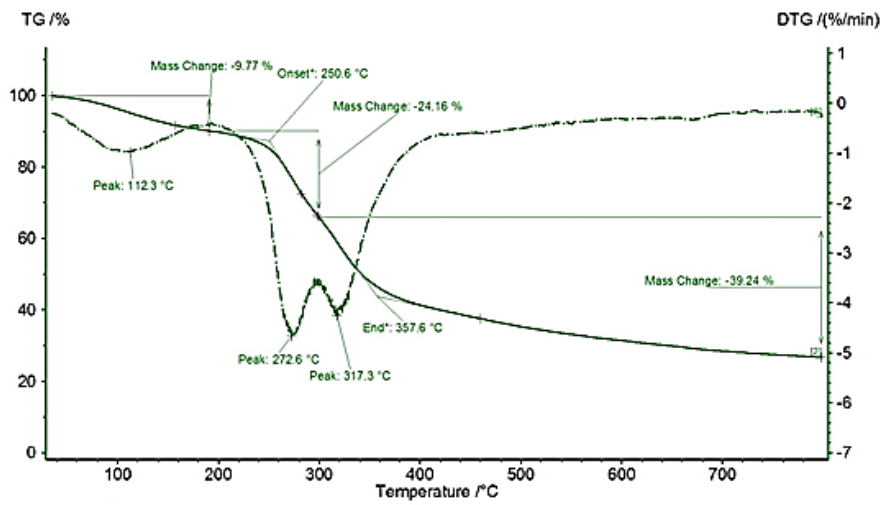
รูปที่ ฉ-1.4 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล (CMC/GO 0.75-T)



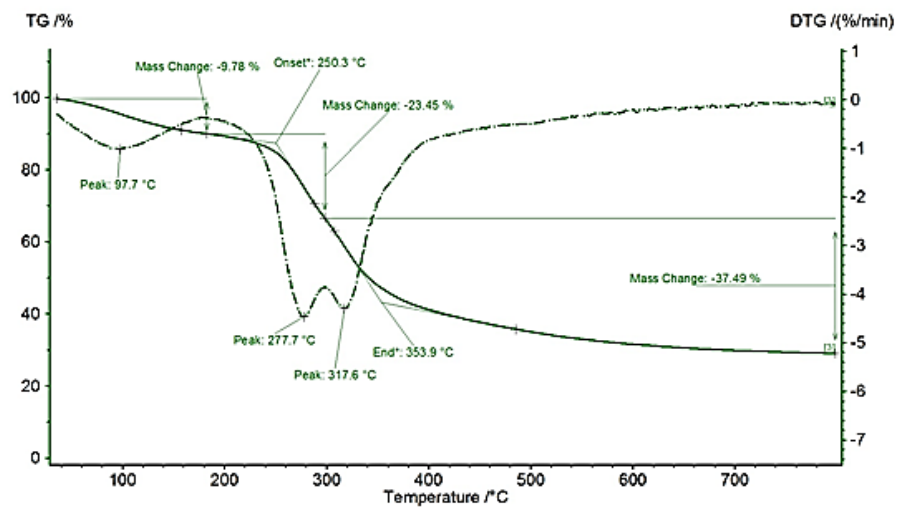
รูปที่ ฉ-1.5 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟริกในเมทานอล (CMC/GO 1.00-T)



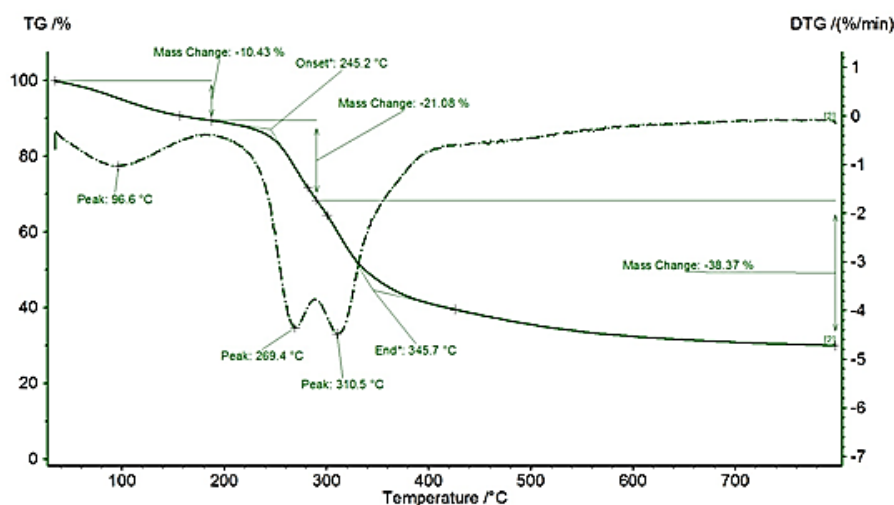
รูปที่ ฉ-1.6 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟริกในเมทานอล (CMC/rGO 0.25-T)



รูปที่ ฉ-1.7 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล (CMC/rGO 0.50-T)



รูปที่ ฉ-1.8 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอล (CMC/rGO 0.75-T)



รูปที่ ฉ-1.9 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล (CMC/rGO 1.00-T)

ตารางที่ ฉ-1 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนและมวลที่เหลือหลังการสลายตัวทางความร้อน ของฟิล์มซีเอ็มซีและฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.25-1.00 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอล

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิสลายตัวสูงสุด (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิสุดท้ายที่สลายตัว (องศาเซลเซียส)	ร้อยละมวลที่เหลือ
CMC-T	245.5	280.6	374.5	29.5
CMC/GO 0.25-T	258.2	283.1	354.7	28.6
CMC/GO 0.50-T	256.6	281.1	357.7	29.3
CMC/GO 0.75-T	261.3	289.0	360.0	29.0
CMC/GO 1-T	262.3	287.3	357.6	29.4
CMC/rGO 0.25-T	255/7	284.2	354.0	21.4
CMC/rGO 0.50-T	250.6	272.6	357.6	26.8
CMC/rGO 0.75-T	250.3	277.7	353.9	29.3
CMC/rGO 1-T	245.2	267.4	345.7	30.1

ภาคผนวก ข

ค่าทดสอบทางสถิติโดยใช้ t-test และ ANOVA สำหรับสมบัติการละลายน้ำ การบวมตัว และ สมบัติเชิงกล ของฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และซีเอ็มซี/ ไรตซ์แกรฟีนออกไซด์ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ ข-1 ค่าการทดสอบทางสถิติของสมบัติการละลายน้ำของฟิล์มที่ไม่ปรับสภาพและปรับสภาพ ด้วยกรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 1.00 และ 1.50 โดยน้ำหนักต่อปริมาณของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90

Samples	N	Mean	Std. Deviation	t	df	P value	Sig.?
CMC-T-1.00CA	3	1.40	0.1833	2.602	4	0.0599	No
CMC-T-1.50CA	3	1.07	0.1250				

ตารางที่ ข-2 ค่าการทดสอบทางสถิติของสมบัติการบวมตัวของฟิล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 1.00 และ 1.50 โดยน้ำหนักต่อปริมาณของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90

Samples	N	Mean	Std. Deviation	t	df	P value	Sig.?
CMC-T-1.00CA	3	110.0	1.215	1.225	4	0.2877	No
CMC-T-1.50CA	3	107.6	3.294				

ตารางที่ ข-3 ค่าการทดสอบทางสถิติของสมบัติการละลายน้ำของฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโน-คอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก โดยที่มีทั้งฟิล์มไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซिटริกในเมทานอล และฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซिटริกในเมทานอล โดยฟิล์มซีเอ็มซีมีสารตัวเติม 2 ชนิดคือ แกรฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก

ANOVA table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Treatment (between columns)	54783	11	4980	9089	<0.0001
Residual (within columns)	13.15	24	0.548		
Total	54796	35			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC-U vs. CMC/GO 0.50-U	0	0	No	-2.179 to 2.179
CMC-U vs. CMC/rGO 0.50-U	0	0	No	-2.179 to 2.179
CMC-U vs. CMC-T	93.96	219.8	Yes	91.78 to 96.14
CMC-U vs. CMC/GO 0.25-T	92.47	216.4	Yes	90.29 to 94.65
CMC-U vs. CMC/GO 0.50-T	91.06	213.1	Yes	88.88 to 93.24
CMC-U vs. CMC/GO 0.75-T	90.38	211.5	Yes	88.2 to 92.56
CMC-U vs.	89.36	209.1	Yes	87.18 to 91.54

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/GO 1-T				
CMC-U vs. CMC/rGO 0.25-T	90.96	212.8	Yes	88.78 to 93.14
CMC-U vs. CMC/rGO 0.50-T	89.02	208.3	Yes	86.84 to 91.2
CMC-U vs. CMC/rGO 0.75-T	87.22	204.1	Yes	85.04 to 89.4
CMC-U vs. CMC/rGO 1-T	85.11	199.2	Yes	82.93 to 87.29
CMC/GO 0.50-U vs. CMC/rGO 0.50-U	0	0	No	-2.179 to 2.179
CMC/GO 0.50-U vs. CMC-T	93.96	219.8	Yes	91.78 to 96.14
CMC/GO 0.50-U vs. CMC/GO 0.25-T	92.47	216.4	Yes	90.29 to 94.65
CMC/GO 0.50-U vs. CMC/GO 0.50-T	91.06	213.1	Yes	88.88 to 93.24
CMC/GO 0.50-U vs. CMC/GO 0.75-T	90.38	211.5	Yes	88.2 to 92.56
CMC/GO 0.50-U vs. CMC/GO 1-T	89.36	209.1	Yes	87.18 to 91.54
CMC/GO 0.50-U vs. CMC/rGO 0.25-T	90.96	212.8	Yes	88.78 to 93.14
CMC/GO 0.50-U vs. CMC/rGO 0.50-T	89.02	208.3	Yes	86.84 to 91.2
CMC/GO 0.50-U vs. CMC/rGO 0.75-T	87.22	204.1	Yes	85.04 to 89.4

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/GO 0.50-U vs. CMC/rGO 1-T	85.11	199.2	Yes	82.93 to 87.29
CMC/rGO 0.50-U vs. CMC-T	93.96	219.8	Yes	91.78 to 96.14
CMC/rGO 0.50-U vs. CMC/GO 0.25-T	92.47	216.4	Yes	90.29 to 94.65
CMC/rGO 0.50-U vs. CMC/GO 0.50-T	91.06	213.1	Yes	88.88 to 93.24
CMC/rGO 0.50-U vs. CMC/GO 0.75-T	90.38	211.5	Yes	88.2 to 92.56
CMC/rGO 0.50-U vs. CMC/GO 1-T	89.36	209.1	Yes	87.18 to 91.54
CMC/rGO 0.50-U vs. CMC/rGO 0.25-T	90.96	212.8	Yes	88.78 to 93.14
CMC/rGO 0.50-U vs. CMC/rGO 0.50-T	89.02	208.3	Yes	86.84 to 91.2
CMC/rGO 0.50-U vs. CMC/rGO 0.75-T	87.22	204.1	Yes	85.04 to 89.4
CMC/rGO 0.50-U vs. CMC/rGO 1-T	85.11	199.2	Yes	82.93 to 87.29
CMC-T vs. CMC/GO 0.25-T	-1.49	3.486	No	-3.669 to 0.6893
CMC-T vs. CMC/GO 0.50-T	-2.893	6.77	Yes	-5.073 to -0.7141
CMC-T vs. CMC/GO 0.75-T	-3.58	8.377	Yes	-5.759 to -1.401
CMC-T vs. CMC/GO 1-T	-4.597	10.76	Yes	-6.776 to -2.417

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC-T vs. CMC/rGO 0.25-T	-2.993	7.004	Yes	-5.173 to -0.8141
CMC-T vs. CMC/rGO 0.50-T	-4.94	11.56	Yes	-7.119 to -2.761
CMC-T vs. CMC/rGO 0.75-T	-6.74	15.77	Yes	-8.919 to -4.561
CMC-T vs. CMC/rGO 1-T	-8.843	20.69	Yes	-11.02 to -6.664
CMC/GO 0.25-T vs. CMC/GO 0.50-T	-1.403	3.284	No	-3.583 to 0.7759
CMC/GO 0.25-T vs. CMC/GO 0.75-T	-2.09	4.89	No	-4.269 to 0.08926
CMC/GO 0.25-T vs. CMC/GO 1-T	-3.107	7.269	Yes	-5.286 to -0.9274
CMC/GO 0.25-T vs. CMC/rGO 0.25-T	-1.503	3.518	No	-3.683 to 0.6759
CMC/GO 0.25-T vs. CMC/rGO 0.50-T	-3.45	8.072	Yes	-5.629 to -1.271
CMC/GO 0.25-T vs. CMC/rGO 0.75-T	-5.25	12.28	Yes	-7.429 to -3.071
CMC/GO 0.25-T vs. CMC/rGO 1-T	-7.353	17.21	Yes	-9.533 to -5.174
CMC/GO 0.50-T vs. CMC/GO 0.75-T	-0.6867	1.607	No	-2.866 to 1.493
CMC/GO 0.50-T vs. CMC/GO 1-T	-1.703	3.986	No	-3.883 to 0.4759
CMC/GO 0.50-T vs. CMC/rGO 0.25-T	-0.1	0.234	No	-2.279 to 2.079

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/GO 0.50-T vs. CMC/rGO 0.50-T	-2.047	4.789	No	-4.226 to 0.1326
CMC/GO 0.50-T vs. CMC/rGO 0.75-T	-3.847	9.001	Yes	-6.026 to -1.667
CMC/GO 0.50-T vs. CMC/rGO 1-T	-5.95	13.92	Yes	-8.129 to -3.771
CMC/GO 0.75-T vs. CMC/GO 1-T	-1.017	2.379	No	-3.196 to 1.163
CMC/GO 0.75-T vs. CMC/rGO 0.25-T	0.5867	1.373	No	-1.593 to 2.766
CMC/GO 0.75-T vs. CMC/rGO 0.50-T	-1.36	3.182	No	-3.539 to 0.8193
CMC/GO 0.75-T vs. CMC/rGO 0.75-T	-3.16	7.394	Yes	-5.339 to -0.9807
CMC/GO 0.75-T vs. CMC/rGO 1-T	-5.263	12.32	Yes	-7.443 to -3.084
CMC/GO 1-T vs. CMC/rGO 0.25-T	1.603	3.752	No	-0.5759 to 3.783
CMC/GO 1-T vs. CMC/rGO 0.50-T	-0.3433	0.8033	No	-2.523 to 1.836
CMC/GO 1-T vs. CMC/rGO 0.75-T	-2.143	5.015	No	-4.323 to 0.03592
CMC/GO 1-T vs. CMC/rGO 1-T	-4.247	9.937	Yes	-6.426 to -2.067
CMC/rGO 0.25-T vs. CMC/rGO 0.50-T	-1.947	4.555	No	-4.126 to 0.2326
CMC/rGO 0.25-T vs. CMC/rGO 0.75-T	-3.747	8.767	Yes	-5.926 to -1.567

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/rGO 0.25-T vs. CMC/rGO 1-T	-5.85	13.69	Yes	-8.029 to -3.671
CMC/rGO 0.50-T vs. CMC/rGO 0.75-T	-1.8	4.212	No	-3.979 to 0.3793
CMC/rGO 0.50-T vs. CMC/rGO 1-T	-3.903	9.133	Yes	-6.083 to -1.724
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC/rGO 1-T	-2.103	4.921	No	-4.283 to 0.07592

ตารางที่ ข-4 ค่าการทดสอบทางสถิติของความทนแรงดึงของฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟริกในเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90

Samples	N	Mean	Std. Deviation	t	df	P value (One-tailed)	Sig.?
CMC-U	5	106	2.345	7.76	8	0.3829	Yes
CMC-T	5	121.4	3.76				

ตารางที่ ข-5 ค่าการทดสอบทางสถิติของความทนแรงดึงของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพและไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟริกในเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90

Samples	N	Mean	Std. Deviation	t	df	P value (One-tailed)	Sig.?
CMC/GO 0.5-U	5	156.4	3.681	10.39	8	0.7802	Yes
CMC/GO 0.5-T	5	178.9	3.172				

ตารางที่ ข-6 ค่าการทดสอบทางสถิติของความทนแรงดึงของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวิซ์แกรฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพและไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิดริกในเมทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 90

Samples	N	Mean	Std. Deviation	t	df	P value (One-tailed)	Sig.?
CMC/rGO 0.5-U	5	111.8	3.697	17.24	8	0.4519	Yes
CMC/rGO 0.5-T	5	163.1	5.544				

ตารางที่ ข-7 ค่าการทดสอบทางสถิติของความทนแรงดึงของฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิต ซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ และซีเอ็มซี/รีดิวิซ์แกรฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิดริก

ANOVA table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.?
Treatment (between columns)	7601	2	3801	348.5	Yes
Residual (within columns)	130.9	12	10.91		
Total	7732	14			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/GO 0.5-U vs. CMC-U	50.38	34.11	Yes	44.81 to 55.95
CMC/rGO 0.5-U vs. CMC-U	5.78	3.914	Yes	0.2077 to 11.35
CMC/rGO 0.5-U vs. CMC/GO 0.5-U	-44.6	30.2	Yes	-50.17 to -39.03

ตารางที่ ข-8 ค่าการทดสอบทางสถิติของความทนแรงดึงของฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรด-ซिटริกในเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90

ANOVA table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.?
Treatment (between columns)	9064	4	2266	127.5	Yes
Residual (within columns)	355.6	20	17.78		
Total	9420	24			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/GO 0.25-T vs. CMC-T	24.1	12.78	Yes	16.12 to 32.08
CMC/GO 0.5-T vs. CMC-T	57.57	30.53	Yes	49.59 to 65.55
CMC/GO 0.75-T vs. CMC-T	31.05	16.47	Yes	23.07 to 39.03
CMC/GO 1-T vs. CMC-T	40.93	21.71	Yes	32.95 to 48.91
CMC/GO 0.5-T vs. CMC/GO 0.25-T	33.47	17.75	Yes	25.49 to 41.45
CMC/GO 0.75-T vs. CMC/GO 0.25-T	6.946	3.684	No	-1.034 to 14.93
CMC/GO 1-T vs. CMC/GO 0.25-T	16.83	8.923	Yes	8.846 to 24.81

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/GO 0.75-T vs. CMC/GO 0.5-T	-26.52	14.06	Yes	-34.5 to -18.54
CMC/GO 1-T vs. CMC/GO 0.5-T	-16.64	8.825	Yes	-24.62 to -8.662
CMC/GO 1-T vs. CMC/GO 0.75-T	9.88	5.239	Yes	1.9 to 17.86

ตารางที่ ข-9 ค่าการทดสอบทางสถิติของความทนแรงดึงของฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/ริตวิซ์แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกในเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90

ANOVA table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.?
Treatment (between columns)	7509	4	1877	97.85	Yes
Residual (within columns)	383.7	20	19.18		
Total	7893	24			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/rGO 0.25-T vs. CMC-T	34.26	17.49	Yes	25.97 to 42.55
CMC/rGO 0.5-T vs. CMC-T	41.78	21.33	Yes	33.49 to 50.07
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC-T	21	10.72	Yes	12.71 to 29.29

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/rGO 1-T vs. CMC-T	49.15	25.09	Yes	40.86 to 57.44
CMC/rGO 0.5-T vs. CMC/rGO 0.25-T	7.52	3.839	No	-0.7693 to 15.81
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC/rGO 0.25-T	-13.26	6.767	Yes	-21.55 to -4.967
CMC/rGO 1-T vs. CMC/rGO 0.25-T	14.9	7.605	Yes	6.607 to 23.19
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC/rGO 0.5-T	-20.78	10.61	Yes	-29.07 to -12.49
CMC/rGO 1-T vs. CMC/rGO 0.5-T	7.376	3.766	No	-0.9133 to 15.67
CMC/rGO 1-T vs. CMC/rGO 0.75-T	28.15	14.37	Yes	19.86 to 36.44

ตารางที่ ข-10 ค่าการทดสอบทางสถิติของความทนแรงดึงของฟิล์มนาโนคอมพอลิทีซีเอ็มซี/แกรฟีน-ออกไซด์ และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90

ANOVA table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.?
Treatment (between columns)	5363	7	766.1	39.15	Yes
Residual (within columns)	626.2	32	19.57		
Total	5989	39			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/rGO 0.25-T vs. CMC/GO 0.25-T	10.15	5.133	Yes	1.091 to 19.22
CMC/rGO 0.5-T vs. CMC/GO 0.25-T	17.67	8.934	Yes	8.611 to 26.74
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC/GO 0.25-T	-3.102	1.568	No	-12.16 to 5.961
CMC/rGO 1-T vs. CMC/GO 0.25-T	25.05	12.66	Yes	15.99 to 34.11
CMC/rGO 0.25-T vs. CMC/GO 0.5-T	-23.31	11.79	Yes	-32.38 to -14.25
CMC/rGO 0.5-T vs. CMC/GO 0.5-T	-15.79	7.984	Yes	-24.86 to -6.731
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC/GO 0.5-T	-36.57	18.49	Yes	-45.63 to -27.51
CMC/rGO 1-T vs. CMC/GO 0.5-T	-8.418	4.255	No	-17.48 to 0.6446
CMC/rGO 0.25-T vs. CMC/GO 0.75-T	3.208	1.622	No	-5.855 to 12.27
CMC/rGO 0.5-T vs. CMC/GO 0.75-T	10.73	5.423	Yes	1.665 to 19.79
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC/GO 0.75-T	-10.05	5.079	Yes	-19.11 to -0.9854
CMC/rGO 1-T vs. CMC/GO 0.75-T	18.1	9.151	Yes	9.041 to 27.17
CMC/rGO 0.25-T vs. CMC/GO 1-T	-6.672	3.373	No	-15.73 to 2.391

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/rGO 0.5-T vs. CMC/GO 1-T	0.848	0.4287	No	-8.215 to 9.911
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC/GO 1-T	-19.93	10.07	Yes	-28.99 to -10.87

ตารางที่ ข-11 ค่าการทดสอบทางสถิติของความยืดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90

Samples	N	Mean	Std. Deviation	t	df	P value (One-tailed)	Sig.?
CMC-U	5	13.2	5.838	1.82	8	0.0525	No
CMC-T	5	18.46	2.706				

ตารางที่ ข-12 ค่าการทดสอบทางสถิติของความยืดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพและไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90

Samples	N	Mean	Std. Deviation	t	df	P value (One-tailed)	Sig.?
CMC/GO 0.5-U	5	13.2	5.838	5.68	8	0.0002	Yes
CMC/GO 0.5-T	5	29.05	2.187				

ตารางที่ ข-13 ค่าการทดสอบทางสถิติของความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีน-ออกไซด์ ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพและไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิดริกในเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90

Samples	N	Mean	Std. Deviation	t	df	P value (One-tailed)	Sig.?
CMC/rGO 0.5-U	5	6.82	4.4	5.88	8	0.0002	Yes
CMC/rGO 0.5-T	5	19.88	2.295				

ตารางที่ ข-14 ค่าการทดสอบทางสถิติของความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิดริก

ANOVA table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.?
Treatment (between columns)	135.7	2	67.84	2.325	No
Residual (within columns)	350.1	12	29.17		
Total	485.8	14			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/GO 0.5-U vs. CMC-U	0	0	No	-9.114 to 9.114
CMC/rGO 0.5-U vs. CMC-U	-6.38	2.641	No	-15.49 to 2.734
CMC/rGO 0.5-U vs. CMC/GO 0.5-U	-6.38	2.641	No	-15.49 to 2.734

ตารางที่ ข-15 ค่าการทดสอบทางสถิติของความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโน-คอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90

ANOVA table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.?
Treatment (between columns)	891.6	4	222.9	47.96	Yes
Residual (within columns)	92.95	20	4.648		
Total	984.6	24			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/GO 0.25-T vs. CMC-T	14.1	14.62	Yes	10.02 to 18.18
CMC/GO 0.5-T vs. CMC-T	10.59	10.98	Yes	6.506 to 14.67
CMC/GO 0.75-T vs. CMC-T	2.032	2.108	No	-2.048 to 6.112
CMC/GO 1-T vs. CMC-T	-0.548	0.5684	No	-4.628 to 3.532
CMC/GO 0.5-T vs. CMC/GO 0.25-T	-3.514	3.645	No	-7.594 to 0.566
CMC/GO 0.75-T vs. CMC/GO 0.25-T	-12.07	12.52	Yes	-16.15 to -7.988
CMC/GO 1-T vs. CMC/GO 0.25-T	-14.65	15.19	Yes	-18.73 to -10.57

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/GO 0.75-T vs. CMC/GO 0.5-T	-8.554	8.872	Yes	-12.63 to -4.474
CMC/GO 1-T vs. CMC/GO 0.5-T	-11.13	11.55	Yes	-15.21 to -7.054
CMC/GO 1-T vs. CMC/GO 0.75-T	-2.58	2.676	No	-6.66 to 1.5

ตารางที่ ข-16 ค่าการทดสอบทางสถิติของความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกในเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90

ANOVA table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.?
Treatment (between columns)	176.7	4	44.16	97.85	Yes
Residual (within columns)	110.4	20	5.522		
Total	287.1	24			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/rGO 0.25-T vs. CMC-T	7.094	6.75	Yes	2.647 to 11.54
CMC/rGO 0.5-T vs. CMC-T	1.424	1.355	No	-3.023 to 5.871
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC-T	2.3	2.189	No	-2.147 to 6.747

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/rGO 1-T vs. CMC-T	-0.242	0.2303	No	-4.689 to 4.205
CMC/rGO 0.5-T vs. CMC/rGO 0.25-T	-5.67	5.395	Yes	-10.12 to -1.223
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC/rGO 0.25-T	-4.794	4.562	Yes	-9.241 to -0.3466
CMC/rGO 1-T vs. CMC/rGO 0.25-T	-7.336	6.98	Yes	-11.78 to -2.889
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC/rGO 0.5-T	0.876	0.8335	No	-3.571 to 5.323
CMC/rGO 1-T vs. CMC/rGO 0.5-T	-1.666	1.585	No	-6.113 to 2.781
CMC/rGO 1-T vs. CMC/rGO 0.75-T	-2.542	2.419	No	-6.989 to 1.905

ตารางที่ ข-17 ค่าการทดสอบทางสถิติของความยืดหยุ่นสุด ณ จุดขาดของฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกในเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90

ANOVA table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.?
Treatment (between columns)	1021	7	145.9	7.997	Yes
Residual (within columns)	144.8	32	4.525		
Total	1166	39			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/rGO 0.25-T vs. CMC/GO 0.25-T	-7.006	7.364	Yes	-11.36 to -2.648
CMC/rGO 0.5-T vs. CMC/GO 0.25-T	-12.68	13.32	Yes	-17.03 to -8.318
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC/GO 0.25-T	-11.8	12.4	Yes	-16.16 to -7.442
CMC/rGO 1-T vs. CMC/GO 0.25-T	-14.34	15.08	Yes	-18.7 to -9.984
CMC/rGO 0.25-T vs. CMC/GO 0.5-T	-3.492	3.671	No	-7.85 to 0.8663
CMC/rGO 0.5-T vs. CMC/GO 0.5-T	-9.162	9.63	Yes	-13.52 to -4.804
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC/GO 0.5-T	-8.286	8.71	Yes	-12.64 to -3.928
CMC/rGO 1-T vs. CMC/GO 0.5-T	-10.83	11.38	Yes	-15.19 to -6.47
CMC/rGO 0.25-T vs. CMC/GO 0.75-T	5.062	5.321	Yes	0.7037 to 9.42
CMC/rGO 0.5-T vs. CMC/GO 0.75-T	-0.608	0.6391	No	-4.966 to 3.75
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC/GO 0.75-T	0.268	0.2817	No	-4.09 to 4.626
CMC/rGO 1-T vs. CMC/GO 0.75-T	-2.274	2.39	No	-6.632 to 2.084
CMC/rGO 0.25-T vs. CMC/GO 1-T	7.642	8.033	Yes	3.284 to 12

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/rGO 0.5-T vs. CMC/GO 1-T	1.972	2.073	No	-2.386 to 6.33
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC/GO 1-T	2.848	2.994	No	-1.51 to 7.206
CMC/rGO 1-T vs. CMC/GO 1-T	0.306	0.3216	No	-4.052 to 4.664

ตารางที่ ข-18 ค่าการทดสอบทางสถิติของยังส์มอดูลัสของฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซिटริกในเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90

Samples	N	Mean	Std. Deviation	t	df	P value (One-tailed)	Sig.?
CMC-U	5	4.696	0.6973	5.0	8	0.0005	Yes
CMC-T	5	6.318	0.1512	8			

ตารางที่ ข-19 ค่าการทดสอบทางสถิติของยังส์มอดูลัสของฟิล์มซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพและไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซिटริกในเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90

Samples	N	Mean	Std. Deviation	t	df	P value (One-tailed)	Sig.?
CMC/GO 0.5-U	5	5.916	0.2587	9.97	8	<0.0001	Yes
CMC/GO 0.5-T	5	7.648	0.2897				

ตารางที่ ข-20 ค่าการทดสอบทางสถิติของยังส์มอดูลัสของฟิล์มซีเอ็มซี/รีดิวิซ์แกรฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพและไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซिटริกในเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90

Samples	N	Mean	Std. Deviation	t	df	P value (One-tailed)	Sig.?
CMC/rGO 0.5-U	5	5.408	0.219	20.06	8	<0.0001	Yes
CMC/rGO 0.5-T	5	7.762	0.1445				

ตารางที่ ข-21 ค่าการทดสอบทางสถิติของยังส์มอดูลัสของฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ และซีเอ็มซี/รีดิวิซ์แกรฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซिटริก

ANOVA table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.?
Treatment (between columns)	3.756	2	1.878	9.372	Yes
Residual (within columns)	2.404	12	0.2004		
Total	6.16	14			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/GO 0.5-U vs. CMC-U	1.22	6.095	Yes	0.4647 to 1.975
CMC/rGO 0.5-U vs. CMC-U	0.712	3.557	No	-0.04326 to 1.467

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/rGO 0.5-U vs. CMC/GO 0.5-U	-0.508	2.538	No	-1.263 to 0.2473

ตารางที่ ข-22 ค่าการทดสอบทางสถิติของยังส์มอดุลัสของฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรด-ซिटริกในเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90

ANOVA table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.?
Treatment (between columns)	11.86	4	2.966	44.8	Yes
Residual (within columns)	1.324	20	0.0662		
Total	13.19	24			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/GO 0.25-T vs. CMC-T	-0.44	3.824	No	-0.9269 to 0.04694
CMC/GO 0.5-T vs. CMC-T	1.33	11.56	Yes	0.8431 to 1.817
CMC/GO 0.75-T vs. CMC-T	0.91	7.909	Yes	0.4231 to 1.397
CMC/GO 1-T vs. CMC-T	1.15	9.994	Yes	0.6631 to 1.637
CMC/GO 0.5-T vs. CMC/GO 0.25-T	1.77	15.38	Yes	1.283 to 2.257

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/GO 0.75-T vs. CMC/GO 0.25-T	1.35	11.73	Yes	0.8631 to 1.837
CMC/GO 1-T vs. CMC/GO 0.25-T	1.59	13.82	Yes	1.103 to 2.077
CMC/GO 0.75-T vs. CMC/GO 0.5-T	-0.42	3.65	No	-0.9069 to 0.06694
CMC/GO 1-T vs. CMC/GO 0.5-T	-0.18	1.564	No	-0.6669 to 0.3069
CMC/GO 1-T vs. CMC/GO 0.75-T	0.24	2.086	No	-0.2469 to 0.7269

ตารางที่ ข-23 ค่าการทดสอบทางสถิติของยังส์มอดุลัสของฟิล์มซีเอ็มซี และฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการดซิทริกในเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90

ANOVA table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.?
Treatment (between columns)	13.24	4	3.31	10.63	Yes
Residual (within columns)	6.227	20	0.3114		
Total	19.47	24			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/rGO 0.25-T vs. CMC-T	0.294	1.178	No	-0.762 to 1.35

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/rGO 0.5-T vs. CMC-T	1.444	5.786	Yes	0.388 to 2.5
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC-T	0.0096	0.03847	No	-1.046 to 1.066
CMC/rGO 1-T vs. CMC-T	1.682	6.74	Yes	0.626 to 2.738
CMC/rGO 0.5-T vs. CMC/rGO 0.25-T	1.15	4.608	Yes	0.09395 to 2.206
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC/rGO 0.25-T	-0.2844	1.14	No	-1.34 to 0.7716
CMC/rGO 1-T vs. CMC/rGO 0.25-T	1.388	5.562	Yes	0.332 to 2.444
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC/rGO 0.5-T	-1.434	5.748	Yes	-2.49 to -0.3784
CMC/rGO 1-T vs. CMC/rGO 0.5-T	0.238	0.9537	No	-0.818 to 1.294
CMC/rGO 1-T vs. CMC/rGO 0.75-T	1.672	6.702	Yes	0.6164 to 2.728

ตารางที่ ข-24 ค่าการทดสอบทางสถิติของยังส์มอดุลัสของฟิล์มนาโนคอมพอสิตซีเอ็มซี/แกรฟีน-ออกไซด์ และซีเอ็มซี/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ในสัดส่วนร้อยละ 0.00-1.00 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกในเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90

ANOVA table	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.?
Treatment (between columns)	20.13	7	2.876	12.49	Yes
Residual (within columns)	7.368	32	0.2303		
Total	27.5	39			

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/rGO 0.25-T vs. CMC/GO 0.25-T	0.734	3.42	No	-0.2491 to 1.717
CMC/rGO 0.5-T vs. CMC/GO 0.25-T	1.884	8.779	Yes	0.9009 to 2.867
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC/GO 0.25-T	0.4496	2.095	No	-0.5335 to 1.433
CMC/rGO 1-T vs. CMC/GO 0.25-T	2.122	9.888	Yes	1.139 to 3.105
CMC/rGO 0.25-T vs. CMC/GO 0.5-T	-1.036	4.828	Yes	-2.019 to -0.05291
CMC/rGO 0.5-T vs. CMC/GO 0.5-T	0.114	0.5312	No	-0.8691 to 1.097
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC/GO 0.5-T	-1.32	6.153	Yes	-2.303 to -0.3373
CMC/rGO 1-T vs. CMC/GO 0.5-T	0.352	1.64	No	-0.6311 to 1.335

Tukey's multiple comparisons test	Mean Difference	q	Sig.?	95% Confidence Interval of diff.
CMC/rGO 0.25-T vs. CMC/GO 0.75-T	-0.616	2.87	No	-1.599 to 0.3671
CMC/rGO 0.5-T vs. CMC/GO 0.75-T	0.534	2.488	No	-0.4491 to 1.517
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC/GO 0.75-T	-0.9004	4.196	No	-1.883 to 0.08269
CMC/rGO 1-T vs. CMC/GO 0.75-T	0.772	3.597	No	-0.2111 to 1.755
CMC/rGO 0.25-T vs. CMC/GO 1-T	-0.856	3.989	No	-1.839 to 0.1271
CMC/rGO 0.5-T vs. CMC/GO 1-T	0.294	1.37	No	-0.6891 to 1.277
CMC/rGO 0.75-T vs. CMC/GO 1-T	-1.14	5.314	Yes	-2.123 to -0.1573
CMC/rGO 1-T vs. CMC/GO 1-T	0.532	2.479	No	-0.4511 to 1.515

ภาคผนวก ข

ปริมาณอะตอมของคาร์บอน ออกซิเจน และโซเดียมในฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟิล์มซีเอ็มซีที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 0.50-1.50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90

ตารางที่ ข-1 ปริมาณอะตอมของคาร์บอน ออกซิเจน และโซเดียมในฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (CMC-U) และฟิล์มซีเอ็มซีที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 0.50, 1.00 และ 1.50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 90 (CMC-T-0.50CA, CMC-T-1.00CA และ CMC-T-1.50 ตามลำดับ) ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (SEM-EDX)

ตัวอย่าง	ร้อยละอะตอมคาร์บอน	ร้อยละอะตอมออกซิเจน	ร้อยละอะตอมโซเดียม
CMC-U	52.40	39.50	8.10
CMC-T-0.50CA	52.33	47.21	0.47
CMC-T-1.00CA	52.12	47.50	0.37
CMC-T-1.50CA	53.01	53.01	0.12

หมายเหตุ * โดยน้ำหนัก

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจุฑามาศ อ่ำไพวงษ์ เกิดวันที่ 5 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ในปีการศึกษา 2555 และได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2558 ในภาคต้น และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปี 2559

การนำเสนอผลงาน

Ampaiwong, J., Soatthiyanon, N. and Potiyaraj, P. 'Properties of carboxymethyl cellulose/reduced graphene oxide nanocomposite films', in Proceedings of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-7), June 1-2, 2017, Bangkok, Thailand.

