

การเตรียมแกรฟีนออกไซด์สำหรับการประยุกต์ในกระดาษกราฟต์



นางสาวกชพร ตันกันภัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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
สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF GRAPHENE OXIDE FOR APPLICATION IN KRAFT PAPER



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Pulp and Paper Technology
Department of Imaging and Printing Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2017
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมแกรฟีนออกไซด์สำหรับการประยุกต์ในกระดาษกราฟต์
โดย	นางสาวกชพร ตันกันภัย
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.ชิเกรุ ทากาฮาร่า

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร.ชิเกรุ ทากาฮาร่า)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอพงศ์ จารุพันธ์)

กขพร ต้นกันภัย : การเตรียมแกรฟีนออกไซด์สำหรับการประยุกต์ในกระดาษkraft (PREPARATION OF GRAPHENE OXIDE FOR APPLICATION IN KRAFT PAPER) อ.ที่
 ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.ณัฐยานัน พงศ์สถาปติ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ศ. ดร.
 ชิเกรุ ทากายาร่า, 126 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการเติมแกรฟีนออกไซด์ต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบผลของแกรฟีนออกไซด์ที่เตรียม ด้วยวิธีโม่ติฟายด์ฮัมเมอร์และที่เตรียมด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าที่มีต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของ กระดาษ เพื่อดูว่าการเตรียมแกรฟีนออกไซด์วิธีไหนให้ผลต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษดี ที่สุดและนำผลที่ได้ไปใช้ในส่วนที่ 2 ต่อไป โดยในส่วนที่ 2 นั้นเป็นการนำแกรฟีนออกไซด์มาปรับปรุง โครงสร้างเพื่อเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าก่อนที่จะนำไปเคลือบผิวกระดาษ จากผลการทดลองพบว่าแกร ฟีนออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีโม่ติฟายด์ฮัมเมอร์ให้สมบัติของกระดาษดีกว่าแกรฟีนออกไซด์ที่เตรียม โดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า เนื่องจากแกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ติฟายด์ฮัมเมอร์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สมบูรณ์กว่า โดยการใส่แกรฟีนออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีโม่ติฟายด์ฮัมเมอร์ลงในกระดาษที่ความเข้มข้น ร้อยละ 15 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้งส่งผลให้ความแข็งแรงของกระดาษสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าการใส่สาร เพิ่มความแข็งแรงของกระดาษร่วมกับแกรฟีนออกไซด์ยิ่งส่งผลให้ต่อสมบัติด้านความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยพบว่าไคโทซานให้สมบัติด้านความแข็งแรงสูงกว่าแคทไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ เนื่องจากไคโท ซานมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวกมากกว่าทำให้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับแกรฟีนออกไซด์และเส้นใย ได้ดีกว่า จากนั้นทำการปรับปรุงแกรฟีนออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโม่ติฟายด์ฮัมเมอร์เพื่อเพิ่มสมบัติการ นำไฟฟ้า โดยนำมาทำปฏิกิริยารีดักชันกับไฮดราซีนโมโนไฮเดรตหรือ แอล-แอสคอบิก ที่สภาวะความ เป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9-10 จากการทดลองพบว่าการปรับปรุงแกรฟีนออกไซด์โดยใช้แอล-แอสคอบิก ให้ค่าการนำไฟฟ้าของแกรฟีนออกไซด์สูงกว่าการปรับปรุงแกรฟีนออกไซด์โดยใช้ไฮดราซีนโมโนไฮ เดรต และเมื่อนำแกรฟีนออกไซด์ที่ได้ไปเคลือบผิวกระดาษพบว่าค่าการนำไฟฟ้าลดลงเนื่องจาก กระดาษมีสมบัติเป็นฉนวน อย่างไรก็ตาม หากมีการนำกระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยแกรฟีนออกไซด์ ไปขัดผิวกลับพบว่าค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการขัดผิวช่วยให้รูพรุนในกระดาษ ลดลงและแกรฟีนออกไซด์มีการกระจายตัวอยู่ที่ผิวหน้าของกระดาษมากขึ้น

ภาควิชา	เทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2560	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5872118423 : MAJOR PULP AND PAPER TECHNOLOGY

KEYWORDS: GRAPHENE OXIDE / PAPER PROPERTIES / CONDUCTIVITY PROPERTIES /
REDUCTION REACTION

KOTCHAPORN THANGUNPAI: PREPARATION OF GRAPHENE OXIDE FOR
APPLICATION IN KRAFT PAPER. ADVISOR: PROF. NATTAYA PONGSTABODEE,
Ph.D., CO-ADVISOR: PROF. SHIGERU TAKAHARA, Ph.D., 126 pp.

This research studied the effects of graphene oxide (GO) addition on paper strength properties. The experiments were divided into 2 parts. The 1st part was comparing the effects of GO prepared by modified Hummer's method to that prepared by electrochemistry method on paper strength properties so that the suitable method was determined and further used. The 2nd part was modification of GO structure to increase its conductivity and this GO was then coated on paper surface. It was found that GO prepared by modified Hummer's method provided better paper strength properties than electrochemistry method since the oxidation of graphite to graphene oxide was more completed. Addition of GO prepared by modified Hummer's method at 15% based on oven dried pulp weight enhanced paper strength properties and the properties increased more by adding dry strength agents with GO. It was discovered that chitosan provided higher paper strength than cationic polyacrylamide (cPAM) since chitosan had higher positive potential so it could form better hydrogen bonding with GO and fibers. Then, the conductivity of GO prepared by modified Hummer's method was improved by reduction with hydrazine monohydrate or L-ascorbic acid at pH 9-10. The results indicated that L-ascorbic acid offered GO with higher conductivity than hydrazine monohydrate. When the GO was coated on paper, its conductivity decreased because paper was dielectric. However, when the GO-coated paper was calendared, the GO conductivity was gained back probably because paper porosity was reduced and this led to more GO at paper surface.

Department: Imaging and Printing Student's Signature

Technology Advisor's Signature

Field of Study: Pulp and Paper Co-Advisor's Signature

Technology

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือและความเมตตาจากผู้ช่วยเหลือหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร. ญัฐยานัน พงศ์สถาปติ และ อาจารย์สมพร ชัยอารีย์กิจ อาจารย์ที่ปรึกษาสำหรับคำแนะนำ ความช่วยเหลือความรู้คุณธรรม ขอบพระคุณ Prof.Dr. Shigeru Takahara และ Prof.Dr. Toshiharu Enomae อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่คอยสนับสนุน แนะนำ คอยให้ความรู้ และประสบการณ์ตลอดระยะเวลา 3 เดือนที่ทำวิจัยที่ญี่ปุ่น

ขอบพระคุณ อ.ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ สำหรับความกรุณาสละเวลามาเป็นประธานสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอบพระคุณ รศ.ดร. สีหนาท ประสงค์สุข สำหรับความกรุณาเสียสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และยังคงคอยให้คำปรึกษา คำแนะนำและตลอดระยะเวลาที่ได้ทำการศึกษาในรั้วจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอบพระคุณ ผศ.ดร.เลอพงศ์ จารุพันธ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่สละเวลามาให้คำแนะนำและทำการสอบวิทยานิพนธ์

ขอบพระคุณหลักสูตรเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ หน่วยวิจัย Electrochemistry and Optical Spectroscopy Research Unit (EOSRU) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สมาชิกกลุ่ม Takahara laboratory, Department of Image and Materials Science, Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba university และ Enomae laboratory, Laboratory of Paper Device and Eco-friendly Material Sciences, Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

ขอบคุณพีธีวิชช์ พี่ยุทธพันธ์ พี่ภูวเดช พี่วิศรุต พี่สุนิติและน้องภาณุพงศ์ ภาควิชาเคมีเทคนิค และขอบคุณพี่อาทิตย์ พี่พรพรรณ และพี่เบญจนาถ หลักสูตรเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ สำหรับความช่วยเหลือคำแนะนำและ คำปรึกษา ขอขอบคุณ ชีรวัดน์ ปิยวัฒน์ ญัฐพงศ์ ชาภิษฐ์ และสุชานาถ สำหรับอุปกรณ์ทำการทดลอง สารเคมี การให้ความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ คำปรึกษาและกำลังใจ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยให้โอกาสทางการศึกษา การทำวิจัย และการเงิน คอยให้กำลังใจและสนับสนุน ให้สำเร็จวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อย่างบริบูรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 สมมติฐาน.....	3
1.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แกรฟีนออกไซด์.....	5
2.2 เส้นใย.....	6
2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย.....	8
2.2.1.1 เซลลูโลส (Cellulose).....	8
2.2.1.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose).....	9
2.2.1.3 ลิกนิน (Lignin).....	10
2.2.1.4 สารแทรก (Extractives).....	11
2.2.2 การจำแนกเส้นใย.....	12
2.3 เยื่อกระดาษ.....	12
2.3.1 เยื่อปรีสุทธี.....	13

2.3.2 เยื่อรีไซเคิล	14
2.4 ยูคาลิปตัส	15
2.5 กระดาษคราฟต์.....	16
2.6 สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งของกระดาษ.....	17
2.7 ไคโทซาน.....	19
2.8 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะ	20
2.8.1 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR).....	20
2.8.2 เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction: XRD).....	21
2.8.3 การวัดความต่างศักย์ของผิวอนุภาคของคอลลอยด์และพอลิเมอร์ด้วยเครื่องซีต้าไซส์เซออร์ (Zeta sizer).....	22
2.8.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscopy : FESEM).....	22
2.8.5 การวิเคราะห์ความเสถียรของวัตถุด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง (Thermogravimetric Analysis; TGA).....	23
2.8.6 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (CHN elemental analyzer).....	23
2.9 สมบัติของกระดาษ.....	24
2.9.1 สมบัติทางโครงสร้าง.....	24
2.9.2 สมบัติด้านความแข็งแรง.....	25
2.9.3 สมบัติเชิงแสง	28
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย.....	35
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	35
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	36

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย	38
3.3.1 ขั้นตอนที่ 1 การสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์.....	39
3.3.1.1 การสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์ด้วยวิธีโมดิฟายด์ฮัมเมอร์	39
3.3.1.2 การสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า	40
3.3.2 ขั้นตอนที่ 2 การสังเคราะห์คอมโพสิตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์	40
3.3.3 ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์ลักษณะของแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์.....	44
3.3.3.1 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันเฉพาะ โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด.....	44
สเปกโทร สโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR).....	44
3.3.3.2 ศึกษาโครงสร้างผลึก ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction:	
XRD)	45
3.3.3.3 ศึกษาวัดความต่างศักย์ของผิวอนุภาคของคอลลอยด์และพอลิเมอร์ด้วย.....	45
เครื่องซีต้าไซส์เซอร์ (Zeta sizer)	45
3.3.3.4 ศึกษาลักษณะภายนอก ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มี	
สมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron	
Microscopy: FESEM).....	45
3.3.3.5 การวิเคราะห์ความเสถียรของวัตถุด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง	45
(Thermogravimetric Analysis; TGA).....	45
3.3.3.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (CHN elemental analyzer).....	46
3.3.4 ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบสมบัติด้านต่างๆของแผ่นทดสอบ.....	46
3.3.5 ขั้นตอนการรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์	49
3.3.5.1 การรีดิวซ์สารแกรฟีนออกไซด์ด้วยสารไฮดราซีนโมโนไฮเดรต ในภาวะต่าง....	49
3.3.5.2 การรีดิวซ์สารแกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอสคอร์บิก(L-ascorbic acid)	
ในภาวะที่ใช้สารละลายไฮดรอกไซด์เป็นต่าง	50
3.3.5.3 การรีดิวซ์สารแกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic	51

acid) ในภาวะที่ใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นต่าง	51
3.3.6 ขั้นตอนการเตรียมหมักนำไฟฟ้า	51
3.3.6.1 การเตรียมหมักนำไฟฟ้า.....	52
3.3.6.2 การทดสอบสมบัติการนำไฟฟ้าของหมักนำไฟฟ้า	53
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	54
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะของแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์	54
4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก.....	54
4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเฉพาะ.....	56
4.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณ.....	58
4.1.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (CHN elemental analyzer).....	59
4.1.5 การวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิว	59
4.2 สมบัติกระดาษกราฟต์ที่มีการเติมสารเพิ่มความแข็งแรง.....	61
4.3 สมบัติกระดาษกราฟต์ที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์.....	66
4.4 สมบัติกระดาษของคอมโพสิตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์.....	71
4.5 การวิเคราะห์ลักษณะของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์	78
4.5.1 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทร สโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR).....	78
4.5.1.1 การรีดิวซ์สารแกรฟีนออกไซด์ด้วยสารไฮดราซีนโมโนไฮเดรต ในภาวะ	79
ต่าง (pH= 9-10).....	79
4.5.1.2 การรีดิวซ์สารแกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic	81
acid) ในภาวะที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นต่าง (pH= 9-10).....	81
4.5.1.3 การรีดิวซ์สารแกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic	82
acid) ในภาวะที่ใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นต่าง (pH= 9-10).....	82

4.5.2 โครงร่างผลึกของ H ที่สังเคราะห์ ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X - ray Diffraction: XRD)	84
4.5.3 เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน ด้วยเทคนิคเทอร์โมแกรวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis: TGA)	85
4.5.4 เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscopy: FESEM).....	86
4.6 สมบัติความต้านทานไฟฟ้า.....	87
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	91
5.1 สรุปผลการวิจัย	91
5.2 ข้อเสนอแนะ	92
รายการอ้างอิง.....	93
ภาคผนวก	100
ภาคผนวก ก.....	101
ภาคผนวก ข.....	115
ภาคผนวก ค.....	122
ภาคผนวก ง.....	123
ภาคผนวก จ.....	125
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	126



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2-1 แสดงโครงสร้างแกรฟีนออกไซด์	5
ภาพที่ 2-2 โครงสร้างเส้นใย.....	7
ภาพที่ 2-3 โครงสร้างของเซลลูโลส.....	8
ภาพที่ 2-4 บริเวณส่วนที่เป็นผลึกและบริเวณที่เป็นอสัณฐานของเซลลูโลส.....	9
ภาพที่ 2-5 องค์ประกอบทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส	9
ภาพที่ 2-6 โครงสร้างของลิกนิน	11
ภาพที่ 2-7 โครงสร้างของ cPAM.....	19
ภาพที่ 2-8 แสดงโครงสร้างทางเคมีของไคตินและไคโทซาน.....	20
ภาพที่ 2-9 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FT-IR)	21
ภาพที่ 2-10 ตารางความยาวคลื่นและหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ.....	21
ภาพที่ 2-11 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray diffraction; XRD).....	22
ภาพที่ 2-12 Zeta sizer	22
ภาพที่ 2-13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิสชัน.....	23
ภาพที่ 2-14 เครื่องชั่งที่มีความไวสูง Thermogravimetric Analyzer (TGA).....	23
ภาพที่ 2-15 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (CHN elemental analyzer).....	24
ภาพที่ 2-16 เครื่องวัดความหนาของกระดาษ	25
ภาพที่ 2-17 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง	25
ภาพที่ 2-18 เครื่องวัดความต้านทานแรงดันทะลุ	26
ภาพที่ 2-19 เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก.....	28
ภาพที่ 2-20 เครื่องทดสอบแรงกดในแนววงแหวน	28
ภาพที่ 2-21 ปริภูมิ CIE L*a*b*	29

ภาพที่ 2-22 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสงของแผ่นทดสอบ (Color Touch PC).....	29
ภาพที่ 3-1 ภาพจำลองการสังเคราะห์แกรไฟีนออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า	40
ภาพที่ 3-2 เครื่องตีกระจายเยื่อ (hydrapulper).....	41
ภาพที่ 3-3 เครื่องตีกระจายเยื่อแบบ disintegrator	42
ภาพที่ 3-4 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid-Köthen.....	44
ภาพที่ 3-5 การตัดกระดาษตัวอย่างที่ทำการทดสอบเพื่อใช้ในการวัดค่าสมบัติด้านความแข็งแรง ...	47
ภาพที่ 3-6 สูตรการคำนวณ Tensile Index.....	48
ภาพที่ 3-7 สูตรการคำนวณ Tear Index.....	48
ภาพที่ 3-8 การตัดตัวอย่างเพื่อทดสอบความต้านทานแรงฉีก.....	48
ภาพที่ 3-9 การรีดิวซ์สารแกรไฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid)	50
ภาพที่ 3-10 ถ้วยสำหรับใช้ในการบดด้วยลูกบอล.....	52
ภาพที่ 4-1 ผลการทดสอบลักษณะด้วยเทคนิค X-ray diffraction เมื่อ G คือแกรไฟต์ H คือการ สังเคราะห์แกรไฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ดีฟายด์ฮัมเมอร์ E คือ การสังเคราะห์แกรไฟีนออกไซด์จากวิธี เคมีไฟฟ้า	55
ภาพที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะด้วยเทคนิค FTIR เมื่อ G คือแกรไฟต์ H คือการสังเคราะห์ แกรไฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ดีฟายด์ฮัมเมอร์ E คือ การสังเคราะห์แกรไฟีนออกไซด์จากวิธีเคมีไฟฟ้า.....	57
ภาพที่ 4-3 โครงสร้างของแกรไฟต์.....	58
ภาพที่ 4-4 โครงสร้างของแกรไฟีนออกไซด์.....	58
ภาพที่ 4-5 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FESEM เมื่อดูลักษณะสัญญาณของแกรไฟต์(ภาพ A)	58
ภาพที่ 4-6 ความหนาแน่นของกระดาษที่ทำการเติม cPAM เปรียบเทียบกับ ไคโทซาน.....	61
ภาพที่ 4-7 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ทำการเติม cPAM เปรียบเทียบกับ ไคโท ซาน.....	63
ภาพที่ 4-8 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ทำการเติม cPAM เปรียบเทียบกับ ไค โทซาน.....	64

ภาพที่ 4-9 ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีก ของกระดาษที่ทำการเติม cPAM เปรียบเทียบกับ ไคโทซาน.....	64
ภาพที่ 4-10 ค่าความต้านแรงกดในแนววงแหวนของกระดาษที่ทำการเติม cPAM เปรียบเทียบกับ ไคโทซาน	65
ภาพที่ 4-11 ค่า CIEL*a*b* ของกระดาษที่ทำการเติม cPAM เปรียบเทียบกับ ไคโทซาน	66
ภาพที่ 4-12 ค่าความหนาแน่นของกระดาษที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ติฟายด์ฮัมเมอร์ และทางเคมีไฟฟ้า.....	67
ภาพที่ 4-13 ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ติฟายด์ฮัมเมอร์และทางเคมีไฟฟ้า	68
ภาพที่ 4-14 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ติฟายด์ฮัมเมอร์และทางเคมีไฟฟ้า	68
ภาพที่ 4-15 ความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ติฟายด์ฮัมเมอร์และทางเคมีไฟฟ้า	69
ภาพที่ 4-16 ความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนของกระดาษที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ติฟายด์ฮัมเมอร์และทางเคมีไฟฟ้า	69
ภาพที่ 4-17 ค่า CIEL*a*b* ของกระดาษที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ติฟายด์ฮัมเมอร์ และทางเคมีไฟฟ้า	70
ภาพที่ 4-18 ค่าความหนาแน่นของกระดาษของคอมโพสิตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์	72
ภาพที่ 4-19 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษของคอมโพสิตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์	74
ภาพที่ 4-20 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษของคอมโพสิตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์	75
ภาพที่ 4-21 ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษของคอมโพสิตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์	76
ภาพที่ 4-22 ค่าความต้านทานแรงกดในแนววงแหวน ของกระดาษของคอมโพสิตกระดาษกราฟต์ แกรฟีนออกไซด์	76
ภาพที่ 4-23 ค่า CIEL*a*b* ของกระดาษของคอมโพสิตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์	78

<p>ภาพที่ 4-24 ผลการทดสอบลักษณะของแกรฟีนออกไซด์เปรียบเทียบกับบริดจ์แกรฟีนออกไซด์ด้วยไฮดราซีนโมโนไฮดรต ในภาวะที่ใช้สารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์เป็นต่างด้วยเทคนิค FTIR.....</p>	79
<p>ภาพที่ 4-25 กลไกการเกิดการบริดจ์แกรฟีนออกไซด์โดยใช้ ไฮดราซีนโมโนไฮดรต ในสภาวะที่เป็นต่าง.....</p>	80
<p>ภาพที่ 4-26 ผลการทดสอบลักษณะของแกรฟีนออกไซด์เปรียบเทียบกับบริดจ์แกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid) ในภาวะที่ใช้สารละลายไฮเดียม ไฮดรอกไซด์เป็นต่างด้วยเทคนิค FTIR.....</p>	81
<p>ภาพที่ 4-27 ผลการทดสอบลักษณะของแกรฟีนออกไซด์เปรียบเทียบกับบริดจ์แกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid) ในภาวะที่ใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นต่างด้วยเทคนิค FTIR.....</p>	82
<p>ภาพที่ 4-28 กลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการบริดจ์แกรฟีนออกไซด์โดยใช้กรดแอสคอร์บิกในสภาวะที่เป็นต่าง.....</p>	84
<p>ภาพที่ 4-29 ผลการทดสอบลักษณะของแกรฟีนออกไซด์เปรียบเทียบกับบริดจ์แกรฟีนออกไซด์จาก 3 วิธีด้วยเทคนิค X-ray diffraction.....</p>	84
<p>ภาพที่ 4-30 ผลการทดสอบลักษณะของแกรฟีนออกไซด์เปรียบเทียบกับบริดจ์แกรฟีนออกไซด์จาก 3 วิธีด้วยเทคนิค Thermogravimetry Analysis (TGA).....</p>	85
<p>ภาพที่ 4-31 ผลการทดสอบลักษณะของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์เปรียบเทียบกับบริดจ์ แกรฟีนออกไซด์จากทั้ง 3 วิธี ด้วยเทคนิค FESEM.....</p>	86

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 ลักษณะของกระดาษผิวกล่อง.....	17
ตารางที่ 2-2 ค่ามาตรฐานของค่าความแตกต่างสี (ΔE^*_{ab}).....	30
ตารางที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุ.....	59
ตารางที่ 4-2 ค่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวของเยื่อ KI CTS H E และ CP ณ ภาวะความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 6.5 ± 0.5	60
ตารางที่ 4-3 ค่า Delta E ของกระดาษที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ดีฟายด์ฮัมเมอร์ และทางเคมีไฟฟ้า.....	71
ตารางที่ 4-4 แสดงค่า Delta E ของกระดาษของคอมโพสิตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์.....	77
ตารางที่ 4-5 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของ H RHH _{NaOH} RHL _{NaOH} และ RHL _{NH3}	88
ตารางที่ 4-6 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของ H RHH _{NaOH} RHL _{NaOH} และ RHL _{NH3} หลังกระบวนการ ผสมเป็นหมึก	89
ตารางที่ 4-7 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของ H RHH _{NaOH} RHL _{NaOH} และ RHL _{NH3} หลังการ เคลือบบนกระดาษรีไซเคิลขนาด 70 แกรม	89
ตารางที่ 4-8 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของ H RHH _{NaOH} RHL _{NaOH} และ RHL _{NH3} หลังการ เคลือบบนกระดาษรีไซเคิลขนาด 70 แกรม และทำการเคลือบผิวของกระดาษด้วยเครื่อง Calender.....	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันได้มีการนำแกรฟีนออกไซด์มาใช้ในหลากหลายสาขา ไม่ว่าจะเป็นการใช้แกรฟีนออกไซด์ เป็นตัวกักเก็บประจุในเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ หรือใช้เป็นสารเคลือบเพื่อทำให้เกิดความทึบแสงและลดรูพรุนภายในวัสดุ รวมถึงการนำแกรฟีนออกไซด์ไปใช้เป็นสารเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความยืดหยุ่น การนำไฟฟ้าและการทนต่อความร้อนของวัสดุต่าง ๆ [1] รวมถึงเริ่มมีการนำแกรฟีนออกไซด์มาใช้ในกระดาษ เช่นในงานวิจัยของ Huang และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาการเติมแกรฟีนออกไซด์ลงในกระดาษที่มีปริมาณแอลฟาเซลลูโลสร้อยละ 93 ในเนื้อกระดาษ จากการทดลองพบว่าแกรฟีนออกไซด์มีผลต่อความแข็งแรงและความพรุนของกระดาษ คือ การเติมปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่มากขึ้นทำให้กระดาษมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและความพรุนลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะคุณสมบัติของแกรฟีนออกไซด์ที่มีโครงสร้างคล้ายพันธะไฮโดรเจน ทำให้เมื่อมีการเติมแกรฟีนออกไซด์ จึงส่งผลต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนมากขึ้น [3] อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยของ Huang และคณะนั้นกระดาษที่ใช้ในการศึกษาก็คือเป็นกระดาษที่มีลักษณะเฉพาะคือ เป็นกระดาษที่มีแอลฟาเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ ไม่ได้มีการทดลองกับกระดาษส่วนใหญ่ที่ใช้ในท้องตลาด รวมถึงกระดาษรีไซเคิล งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะทดลองนำแกรฟีนออกไซด์มาใช้กับกระดาษคราฟต์ ซึ่งมีฐานตลาดใหญ่มีการใช้งานมาก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแกรฟีนออกไซด์เป็นสารที่มีราคาสูง [4] ในงานวิจัยขึ้นนี้จึงสนใจที่จะศึกษาหาวิธีการสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์ที่เหมาะสมเพื่อลดต้นทุนในการผลิตจากนั้นจึงนำแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มาใช้กับกระดาษคราฟต์ต่อไป โดยในงานวิจัยนี้จะทดลองนำแกรฟีนออกไซด์มาผสมกับเยื่อรีไซเคิลที่เตรียมมาจากกระดาษคราฟต์ เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษคราฟต์ ซึ่งในปัจจุบันกระดาษคราฟต์ส่วนใหญ่เตรียมมาจากเยื่อบริสุทธิ์ และบางส่วนอาจผสมเยื่อรีไซเคิล ทั้งนี้เพื่อลดการใช้วัตถุดิบ ลดมลภาวะ และลดต้นทุนในการผลิต [5] โดยในการศึกษาครั้งนี้จะมีการศึกษาผลของการใช้แกรฟีนออกไซด์ต่อสมบัติของกระดาษโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านความแข็งแรง โดยศึกษาเปรียบเทียบกับพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก (cationic Polyacrylamide; cPAM) และไคโทซาน (Chitosan) รวมทั้งศึกษาถึงผลร่วมของพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกกับแกรฟีนออกไซด์ และผลร่วมของไคโทซานกับแกรฟีนออกไซด์ ที่มีต่อสมบัติกระดาษโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านความแข็งแรง ทั้งนี้เนื่องจากพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ ในขณะที่ไคโทซานมีลักษณะโครงสร้างคล้าย

เซลลูโลส แต่ต่างกันที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของเซลลูโลสจะมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เกาะอยู่ ส่วนของ ไคโทซานจะมีหมู่อะมิโน (NH_2) เกาะอยู่ โครงสร้างคล้ายเซลลูโลส [6] ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะประยุกต์ไคโทซานเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษ นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังครอบคลุมถึงการนำแกรฟีนออกไซด์มาใช้เคลือบผิวกระดาษเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านการนำไฟฟ้าของกระดาษ โดยการศึกษานี้อาจเป็นพื้นฐานในการต่อยอดงานวิจัยที่จะใช้กระดาษที่นำไฟฟ้าได้มาเป็นอุปกรณ์เซนเซอร์ต่าง ๆ ต่อไปในอนาคต โดยก่อนที่จะนำแกรฟีนออกไซด์มาเคลือบผิวกระดาษนั้น จะมีการนำแกรฟีนออกไซด์ไปทำปฏิกิริยารีดักชันก่อนเพื่อเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าให้กับแกรฟีนออกไซด์ และจะเรียกสารแกรฟีนออกไซด์ที่ผ่านปฏิกิริยารีดักชันว่า รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ซึ่งการที่รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์มีสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากเกิดสมบัติพายพายอิเล็กทรอนิกส์ในวงอะโรมาติกที่มากขึ้น โดยทั่วไปแล้ววิธีการสังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์นั้นมีอยู่ 4 วิธี คือ 1) การสังเคราะห์โดยใช้ความร้อนในภาวะแก๊สไนโตรเจน 2) การสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า 3) การสังเคราะห์ด้วยแสง และ 4) การใช้สารเคมีเป็นสารรีดิวซ์ (Reductant) ในการสังเคราะห์ [7] โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีที่ 4 ในการเตรียมรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลของแกรฟีนออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีโมดิฟายด์ฮัมเมอร์ (Modified Hummer) และทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemistry) ต่อสมบัติของกระดาษ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติด้านความแข็งแรง

1.2.2 ศึกษาผลของการใช้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ในการเคลือบผิวกระดาษที่มีต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของกระดาษ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 แกรฟีนออกไซด์ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีโมดิฟายด์ฮัมเมอร์ (Modified Hummer) และทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemistry)

1.3.2 กระดาษที่เลือกใช้ คือ กระดาษทำผิวกล่องชนิด KI ที่เตรียมมาจากเยื่อรีไซเคิลผสมกับเยื่อคาลิปตัส ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท กลุ่มสยามบรรจุภัณฑ์ จำกัด (โรงงานสระบุรี)

1.3.3 ศึกษาผลของสารพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก ไคโทซาน แกรฟีนออกไซด์ ผลร่วมของสารพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกกับแกรฟีนออกไซด์ และผลร่วมของไคโทซานกับแกรฟีนออกไซด์ ต่อสมบัติของกระดาษโดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติด้านความแข็งแรง

1.3.4 ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์โดยเลือกใช้การสังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์จากการใช้สารรีดิวซ์ 2 ชนิด คือ ไฮดราซีนโมโนไฮเดรต (Hydrazine monohydrate) และกรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid) รวมถึงศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าของกระดาษกราฟด์ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

1.4 สมมติฐาน

1.4.1 การเติมแกรฟีนออกไซด์จะช่วยเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ

1.4.2 แกรฟีนออกไซด์สามารถนำไฟฟ้าได้มากขึ้นหลังจากการนำแกรฟีนออกไซด์มาผ่านปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้ไฮดราซีนโมโนไฮเดรตและกรดแอสคอร์บิกมาเป็นสารรีดิวซ์

1.4.3 กระดาษที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์สามารถนำไฟฟ้าได้

1.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

1.5.1 การศึกษาแกรฟีนออกไซด์ต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ

ตัวแปรต้น คือ ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ ปริมาณพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก ปริมาณไคโทซาน ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ เมื่อใช้พอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกที่ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ เมื่อใช้ไคโทซานที่ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม

ตัวแปรตาม คือ สมบัติของกระดาษภายหลังการเติมแกรฟีนออกไซด์ พอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก ไคโทซาน แกรฟีนออกไซด์ร่วมกับพอลิอะคริลาไมด์ และแกรฟีนออกไซด์ร่วมกับไคโทซาน

ตัวแปรควบคุม คือ น้ำหนักกระดาษมาตรฐานที่ทำการขึ้นแผ่น เท่ากับ 120 กรัม/ตารางเมตร

1.5.2 การศึกษาการนำไฟฟ้าของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

ตัวแปรต้น คือ ชนิดสารรีดิวซ์ในการสังเคราะห์ และชนิดของต่างที่ใช้ในปฏิกิริยารีดักชัน

ตัวแปรตาม คือ สมบัติการนำไฟฟ้าภายหลังปฏิกิริยารีดักชัน

ตัวแปรควบคุม คือ แกรฟีนออกไซด์ที่ได้จากวิธีที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองเบื้องต้น

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถนำแกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ตีฟายด์ฮัมเมอร์ (Modified Hummer) และ ทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemistry) ไปเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงในกระดาษกราฟต์ (กระดาษทำผิวกล่อง)

1.6.2 สามารถปรับปรุงสมบัติด้านการนำไฟฟ้าของแกรฟีนออกไซด์ด้วยปฏิกิริยารีดักชันจากการใช้ไฮดรอกซีโนโนไฮเดรตและกรดแอล-แอสคอบิกเป็นสารรีดิวซ์

1.6.3 สามารถเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าให้กับกระดาษที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ได้



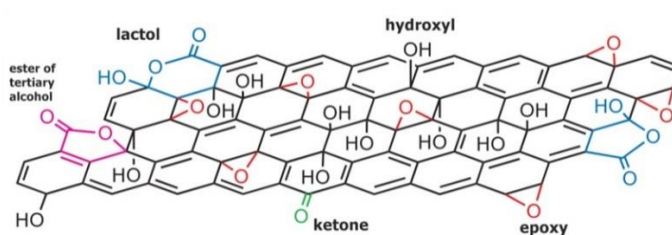
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนของทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้จะกล่าวถึง แกร์ฟีนออกไซด์ เส้นใย เยื่อกระดาษ ยูคาลิปตัส กระดาษคราฟต์ สารเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษ โคโโทซาน เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของแกร์ฟีนออกไซด์และสารอื่นที่เกี่ยวข้อง สมบัติของกระดาษ รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 แกร์ฟีนออกไซด์

แกร์ฟีนออกไซด์เป็นสารอนูภาคระดับนาโนที่มีโครงสร้างระนาบอะตอมคาร์บอนที่มีความแข็งแรงสูง โครงสร้างของสารประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอนที่มีวงหกเหลี่ยม ไฮโดรเจนและออกซิเจนของหมู่ไฮดรอกซี คาร์บอกซิลและอีพอกซี ดังแสดงภาพที่ 2-1 แกร์ฟีนออกไซด์สามารถละลายในน้ำและในสารอินทรีย์ได้ดี อีกทั้งยังช่วยเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรง ความยืดหยุ่น การนำไฟฟ้าและการทนต่อความร้อนเมื่อทำการผสมกับวัสดุต่าง ๆ [1] แกร์ฟีนออกไซด์เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของแกร์ไฟต์ โดยมีวิธีการสังเคราะห์หลากหลายวิธี ได้แก่ วิธี Brodie [8-10] วิธี Staudemier [11-13] วิธีทางเคมีไฟฟ้า [14] วิธี Hofmann [15] วิธี Hummer [16] และการประยุกต์วิธีของ Hummer (Modified Hummer) [17]



ภาพที่ 2-1 แสดงโครงสร้างแกร์ฟีนออกไซด์ [18]

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการสังเคราะห์แกร์ฟีนออกไซด์จากวิธี Modified Hummer และวิธีทางเคมีไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีของ Modified Hummer เป็นวิธีที่ให้ค่าผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (%Yield) สูงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น อีกทั้งวิธีนี้ยังใช้กรดเข้มข้นในการทำปฏิกิริยาเพียงแคตัวเดียวเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ ที่มีการใช้กรดเข้มข้นมากกว่าหนึ่งตัวขึ้นไป การสังเคราะห์แกร์ฟีนออกไซด์ด้วยวิธี Modified Hummer นี้ใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc.

H_2SO_4) และ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) เป็นสารออกซิไดซ์ (Oxidant) แผ่นแกรไฟต์ (Graphite flake) ที่มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งแผ่นแกรไฟต์มีคาร์บอนที่ต่อกันแบบพันธะคู่ เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างคาร์บอน (C) กับออกซิเจน (O) โดยคาร์บอนอะตอมยอมให้มีการเคลื่อนของพายอิเล็กตรอนในพันธะคู่ไปที่คาร์บอนอะตอมอื่น เพื่อให้โมเลกุลของแกรไฟต์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีความเสถียรมากขึ้น แกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้จะมีสีน้ำตาลอมเหลืองอยู่ในรูปของสารละลาย ซึ่งสามารถนำมากรองได้ทันทีหลังจากทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่ถ้านำสารละลายแกรไฟต์ออกไซด์ดังกล่าวมากระตุ้นต่อด้วยคลื่นความถี่สูง (Sonication) จะได้สารละลายแกรไฟต์ออกไซด์ และเนื่องจากโครงสร้างประกอบไปด้วยหมู่ที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนมาก จึงทำให้แกรไฟต์ออกไซด์มีความเป็นลบมาก [19] ในขณะที่การสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้านั้นเป็นวิธีที่ง่ายและให้ความปลอดภัยในการทดลอง เพราะไม่ได้เป็นการทำปฏิกิริยาของแกรไฟต์กับกรดเข้มข้นโดยตรง แต่เป็นการทำปฏิกิริยาผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จึงทำให้ผู้ทำการทดลองมีความปลอดภัยมากกว่าวิธีอื่น อย่างไรก็ตาม แกรไฟต์ออกไซด์ที่เตรียมได้จากวิธีนี้นั้นไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี เนื่องจากความเป็นพายอิเล็กตรอนในวงอะโรมาติกลดลง เพราะออกซิเจนไปทำให้พายเกิดการแตกออก ซึ่งพายอิเล็กตรอนเป็นสมบัติที่โดดเด่นในการช่วยการนำไฟฟ้า

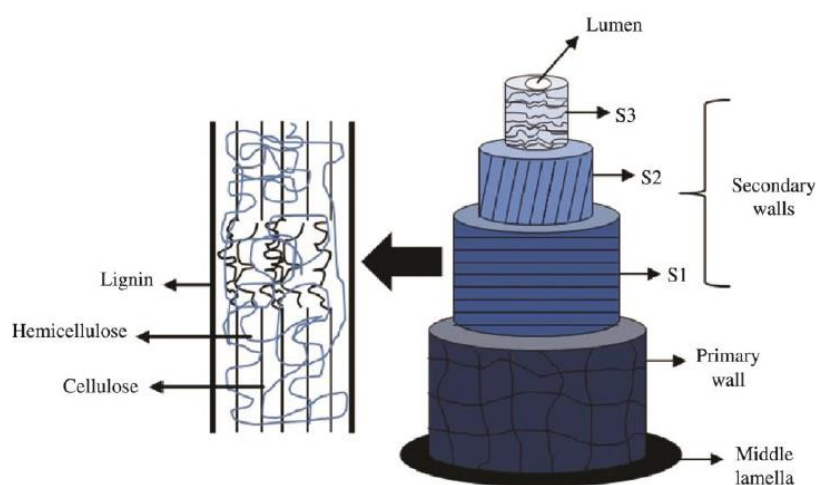
อย่างไรก็ตาม การนำไฟฟ้าของแกรไฟต์ออกไซด์สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ โดยการนำแกรไฟต์ออกไซด์ไปผ่านปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งจะเรียกสารที่เตรียมได้ว่า “รีดิวซ์แกรไฟต์ออกไซด์” ซึ่งวิธีการสังเคราะห์รีดิวซ์แกรไฟต์ออกไซด์ที่นิยมใช้แบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลัก ๆ คือ 1) ปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้สารเคมี 2) ปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้ความร้อนในภาวะแก๊สไนโตรเจน 3) ปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้แสง และ 4) ปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า [7] ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้สนใจการเตรียมรีดิวซ์แกรไฟต์ออกไซด์จากปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้สารเคมี เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการทั่วไป สารเคมีหาได้ง่ายและต้นทุนในการผลิตต่ำ โดยมีสารเคมีที่สามารถใช้เป็นสารรีดิวซ์แกรไฟต์ออกไซด์หลายตัว [20] ที่อาทิเช่น ไฮดราซีนโมโนไฮเดรต [21] และกรดแอสคอร์บิก [22] และเนื่องจากสารรีดิวซ์ทั้งสองตัวนี้เป็นสารที่หาได้ง่ายจากห้องปฏิบัติการทั่วไป ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารสองตัวดังกล่าวเป็นสารรีดิวซ์แกรไฟต์ออกไซด์โดยทำการทดลองในสภาวะที่เป็นต่าง เพื่อศึกษาเปรียบเทียบหาสารรีดิวซ์ที่ให้ค่าการนำไฟฟ้าของรีดิวซ์แกรไฟต์ออกไซด์สูงสุด

2.2 เส้นใย

โดยทั่วไปแล้วเส้นใยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เส้นใยธรรมชาติ และ เส้นใยประดิษฐ์ โดยในกลุ่มของเส้นใยธรรมชาตินั้นส่วนใหญ่เป็นเส้นใยที่ได้มาจากพืช เช่น ต้นสน ต้นยูคาลิปตัส ฝ้าย ลินิน ปอ รามี่ ป่าน หนุ่น ส่วนกลุ่มเส้นใยประดิษฐ์สามารถแยกออกเป็น เส้นใยที่

ประดิษฐ์จากธรรมชาติ เช่น เรยอน อะซิเตต ไตรอะซีเตต เส้นใยสังเคราะห์ เช่น โอลีฟินส์ โพลีเอสเตอร์ โพลีอามิด ไนลอน และเส้นใยที่ประดิษฐ์จากวัสดุอื่น ๆ เช่น เส้นใยที่เตรียมมาจากแก้ว เส้นใยที่เตรียมมาจากโลหะ [23]

สำหรับเส้นใยที่ใช้ในการทำกระดาษนั้นส่วนใหญ่เป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้มาจากพืช โดยเส้นใยดังกล่าวจะมีผนังเซลล์ที่แข็งแรงเพื่อให้สามารถรับแรงดันของของเหลวภายในได้ ซึ่งโครงสร้างของเส้นใยจะประกอบไปด้วยผนังเซลล์ของเส้นใยย่อย ๆ 4 ชั้น [24, 25] ดังแสดงในภาพที่ 2-2 และมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 2-2 โครงสร้างของเส้นใย [26]

ก. ผนังเซลล์ชั้นที่หนึ่ง (Primary wall layer; P) ผนังเซลล์ชั้นนี้ค่อนข้างบาง มีความหนาประมาณ 0.1-0.2 ไมครอน มีองค์ประกอบของน้ำประมาณร้อยละ 90 ไมโครไฟบริลเรียงตัวเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบ ผนังชั้นนอกสุดของเส้นใยแต่ละเส้นจะเชื่อมติดกันด้วยชั้นบาง ๆ ที่เรียกว่า มิติเดิลลามลลา (Middle lamella)

ข. ผนังเซลล์ชั้นที่สอง (Secondary wall layer; S) ผนังเซลล์ในชั้นนี้จะหนามากกว่าผนังเซลล์ชั้นที่หนึ่ง และมีไมโครไฟบริลซ้อนทับกันหลายชั้น ในผนังเซลล์ชั้นที่สองนี้จะประกอบไปด้วยผนังเซลล์ย่อยอีก 3 ชั้น โดยในแต่ละชั้นนั้นจะมีการยึดตัวซ้อนกันอย่างแน่นหนาของไมโครไฟบริลที่มีการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งชั้นต่าง ๆ ออกได้ดังนี้

ข.1 Outer secondary wall layer (S1) ผนังเซลล์ในชั้นนี้จะมีความหนาใกล้เคียงกับผนังเซลล์ชั้นที่หนึ่ง โดยโครงสร้างจะประกอบด้วยไมโครไฟบริลเรียงซ้อนกันเป็นแผ่นบาง 4-6 แผ่น และมีการจัดเรียงตัวเป็นแบบเกลียวหรือแบบบันไดเวียน (Spiral)

ข.2 Middle secondary wall layer (S2) ผนังเซลล์ชั้นนี้จะอยู่ถัดจากชั้น S1 เข้าไปข้างใน โดยเป็นชั้นที่มีความหนามากที่สุด คือ หนาประมาณ 10-30 ไมครอน หรือประมาณร้อยละ 70-90 ของความหนาของผนังเซลล์ชั้นที่สอง ในโครงสร้างของชั้นนี้ ไมโครไฟบริลจะเรียงซ้อนกันเป็นแผ่นบาง 150 แผ่น มีการเรียงตัวกันเป็นแบบก้นหอย (Helix) และในผนังเซลล์ชั้นนี้จะมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสสูงที่สุด ดังนั้นผนังเซลล์ชั้นนี้จึงมีความสำคัญอย่างมากต่อความแข็งแรงของเส้นใยที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษ

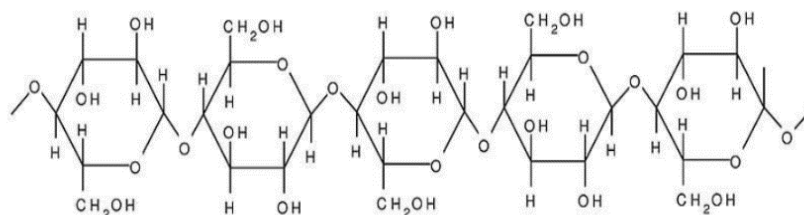
ข.3 Inner secondary wall layer (S3) หรือ Tertiary wall ผนังเซลล์ชั้นนี้จะอยู่ถัดจากชั้น S2 เข้าไปข้างใน มีความหนาประมาณร้อยละ 2-8 ของความหนาของผนังเซลล์ชั้นที่สอง โดยมีลักษณะโครงสร้างคือไมโครไฟบริลเรียงซ้อนทับกันเป็นแผ่นบางประมาณ 12 แผ่น ในทิศทางที่ขนานกับไมโครไฟบริลของชั้น S2 แต่ 4 แผ่นสุดท้ายข้างในสุดนั้นไมโครไฟบริลจะเรียงในทิศทางเกือบตั้งฉากกับแนวแกนตามความยาวของเส้นใย

2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย

องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเส้นใยแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และ สารแทรก (Extractive) โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

2.2.1.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นสารจำพวกพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง ประกอบไปด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคส (Glucose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า-ไกลโคซิดิก (β -1,4 glycosidic linkage) ซึ่งจะส่งผลต่อความเหนียวและความแข็งแรงของเส้นใย โดยแต่ละโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสจะเชื่อมต่อกันที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 (C_1) ของโมเลกุลแรก และคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 (C_4) ของโมเลกุลถัดไป ดังแสดงในภาพที่ 2-3 โดยทั่วไประดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (Degree of polymerization; DP) ของเซลลูโลสจะเกิดจากการรวมกันของหน่วยกลูโคสประมาณ 1000-3000 หน่วย เซลลูโลสมีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เซลลูโลสเป็นสารที่ไม่ละลายในน้ำ แต่มีความสามารถในการดูดน้ำ และสามารถละลายได้ดีในกรดเกลือและกรดกำมะถันเข้มข้น [27, 28]



ภาพที่ 2-3 โครงสร้างของเซลลูโลส [29]

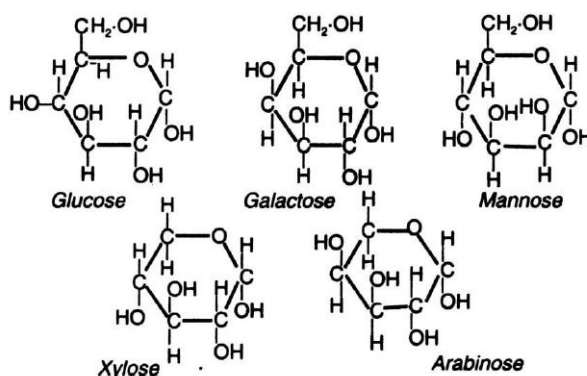
ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ แบบผลึก (Crystalline region) และ แบบอสัณฐาน (Amorphous region) ดังแสดงใน ภาพที่ 2-4 โดยทั่วไปโครงสร้างของเซลลูโลสแบบผลึกนั้นจะมีการจัดเรียงตัวของกลูโคสด้วยพันธะ ไฮโดรเจนอย่างเป็นระเบียบ โครงสร้างแบบผลึกจึงมีความแข็งแรงและความต้านทานต่อการซึมผ่าน ของสารเคมีหรือตัวทำละลายสูง ในขณะที่โครงสร้างแบบอสัณฐานนั้นโมเลกุลมีการเรียงตัวอย่างไม่ เป็นระเบียบ ทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างมีน้อยกว่าโครงสร้างแบบผลึก จึงส่งผลให้สารเคมีหรือ ตัวทำละลายต่าง ๆ เข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า



ภาพที่ 2-4 บริเวณส่วนที่เป็นผลึกและบริเวณที่เป็นอสัณฐานของเซลลูโลส [30]

2.2.1.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ลักษณะโครงสร้าง เป็นกิ่งก้านจับกันหลวม ๆ เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นน้ำตาลเกาะกันคล้ายเซลลูโลส แต่เฮมิ เซลลูโลสประกอบไปด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่แตกต่างกัน 5 ประเภท คือ กลูโคส กาแลกโตส (Galactose) ไชโลส (Xylose) แมนโนส (Mannose) และอะราบินอส (Arabinose) (ภาพที่ 2-5) รวมถึงมีกรดกาแลกทูโรนิก (Galacturonic acid) และกรดกลูโคนิก (Glucuronic acid) ร่วมด้วย เฮมิเซลลูโลสมีสูตรทางเคมีคือ $(C_6H_{12}O_5)_n$ [28]



ภาพที่ 2-5 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 5 ประเภทของเฮมิเซลลูโลส [31]

โดยปกติแล้วจะพบเฮมิเซลลูโลสอยู่ปะปนกับเซลลูโลสและสารอื่น ๆ เช่น ลิกนิน ซึ่งเฮมิเซลลูโลสจะทำหน้าที่เป็นสารยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกัน รวมถึงทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงให้กับเส้นใย โดยที่เฮมิเซลลูโลสนั้นจะละลายในตัวทำละลายและเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน มีการเกาะกันแบบหลวม ๆ ซึ่งเมื่อนำเส้นใยไปตีกระจายในน้ำ แล้วน้ำจะเข้าไปในเส้นใยได้ง่าย ส่งผลให้เส้นใยนั่นอุ้มน้ำได้ดี เส้นใยมีการพองตัว ผิวของเส้นใยเกิดการแตกแขนงออก มีพื้นที่ผิวมากขึ้น จึงทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยด้วยพันธะไฮโดรเจนขึ้น ส่งผลให้เยื่อและกระดาษมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น [28]

โดยทั่วไปส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรตของเส้นใยทั้งเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสมักเรียกรวมกันว่าโฮโลเซลลูโลส (Holocellulose) ซึ่งโฮโลเซลลูโลสประกอบด้วย 3 ชนิด ตามการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย ดังนี้คือ

ก. แอลฟาเซลลูโลส (α -cellulose) เป็นส่วนที่เรียกว่าเซลลูโลสที่แท้จริงซึ่งไม่สามารถละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้องได้ ในการผลิตเยื่อไม่สามารถแยกแอลฟาเซลลูโลสออกมาได้อย่างบริสุทธิ์ มักจะมีน้ำตาลกลูโคแมนแนน (Glucomanan) และแมนแนน (Mannan) ปนด้วยเสมอ เนื่องจากน้ำตาลทั้งสองชนิดนี้ไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 โดยน้ำหนักเช่นกัน แอลฟาเซลลูโลสมีโมเลกุลของกลูโคสหรือ DP (Degree of polymerization) ตั้งแต่ 200 หน่วยขึ้นไป

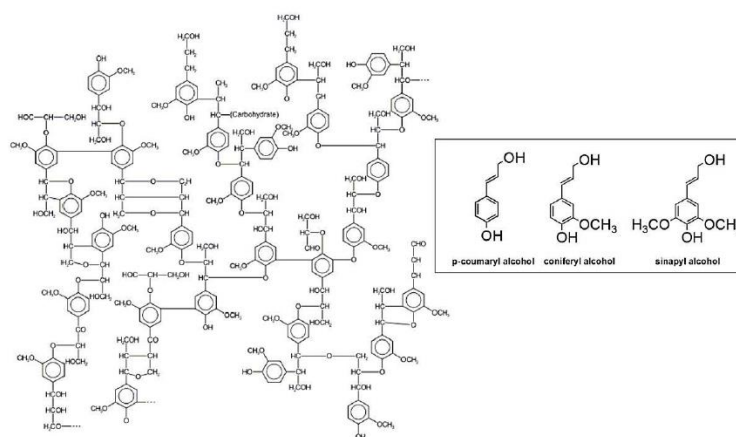
ข. เบต้าเซลลูโลส (β -cellulose) เป็นเซลลูโลสที่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง และจะตกตะกอนในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด เบต้าเซลลูโลสจึงแยกได้จากส่วนที่ตกตะกอนในต่าง ค่า DP ของเบต้าเซลลูโลสจะอยู่ระหว่าง 100-200 หน่วย

ค. แกมมาเซลลูโลส (γ -cellulose) เป็นเซลลูโลสที่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง และละลายได้ด้วยสารละลายที่เป็นกรด แต่จะตกตะกอนได้โดยใช้แอลกอฮอล์ ดังนั้นแกมมาเซลลูโลสจึงแยกได้จากส่วนที่เป็นของเหลวในสารละลายต่าง ค่า DP ของแกมมาเซลลูโลสจะต่ำกว่า 10 หน่วย

2.2.1.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ประกอบด้วยหน่วยพื้นฐานที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวนของเฟนิลโพรเพน (Phenylpropane) แม้นลิกนินในพืชจะมีโครงสร้างที่ไม่ชัดเจนแน่นอน แต่ลิกนินมีโครงสร้างจากหน่วยพื้นฐาน 3 ส่วน คือ พาราคูมาริลแอลกอฮอล์ (p-Coumaryl alcohol) ซินาพิลแอลกอฮอล์ (Sinapyl alcohol) และคอน

นิเฟอร์ลแอลกอฮอล์ (Coniferyl alcohol) ดังแสดงในภาพที่ 2-6 โดยทั่วไปแล้วลิกนินไม่ละลายในน้ำ และมีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบเนื่องจากไม่มีส่วนที่เป็นผลึก ซึ่งลิกนินนั้นสามารถที่จะเกิดพันธะโควาเลนต์กับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นสารประกอบลิกนินคาร์โบไฮเดรต (Lignin-carbohydrate complex) และลิกนินนั้นมีหน้าที่เปรียบเสมือนกาวที่เชื่อมเส้นใยไว้ด้วยกัน ดังนั้นจึงต้องมีการทำให้ลิกนินอ่อนตัวหรือกำจัดลิกนินออกในกระบวนการผลิตกระดาษเพื่อแยกเส้นใยออก อีกทั้งลิกนินนั้นยังมีองค์ประกอบทางเคมีที่เรียกว่า โครโมฟอร์ (Chromophore) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับความชื้นและแสง ซึ่งส่งผลให้เยื่อและกระดาษกลายเป็นสีเหลือง ฉะนั้นหากต้องการเยื่อและกระดาษที่มีความขาวสว่าง (Brightness) สูงจำเป็นที่จะต้องนำเยื่อไปฟอกก่อนเพื่อกำจัดลิกนินที่หลงเหลืออยู่และเพื่อเป็นการเพิ่มความขาวสว่าง (Brightness) ให้แก่เยื่อ [32]



ภาพที่ 2-6 โครงสร้างของลิกนิน [33]

2.2.1.4 สารแทรก (Extractives)

สารแทรกเป็นผลพลอยได้จากไม้ ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างในเนื้อไม้ มักแทรกอยู่เป็นองค์ประกอบของเนื้อไม้ ทำให้เนื้อไม้เกิดสี กลิ่น รส รวมถึงทำให้ต้นไม้ทนต่อแมลงและการเน่าผุ สารแทรกมีหน้าที่ตามแต่ชนิดของสารนั้นในเนื้อไม้ เช่น ป้องกันการเสื่อมสลายของไม้ เป็นต้น ความหลากหลายของสารแทรกขึ้นอยู่กับชนิดของไม้หรือพืช ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสารมอลโมเลกุลต่ำและอยู่ภายนอกเซลล์ โดยสารแทรกส่วนใหญ่เป็นสารจำพวกเรซิน กรดไขมัน ไช และแอลกอฮอล์ ซึ่งสามารถละลายได้ในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีสภาพเป็นกรด องค์ประกอบของสารแทรกจะแตกต่างกันตามแต่ชนิดของไม้ ในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษสารแทรกอาจส่งผลให้สีปนเปื้อนของสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อหรือฟอกเยื่อมากขึ้น อาจทำให้เกิดตะกอนตามท่อหรืออุปกรณ์ในกระบวนการผลิต รวมถึงอาจทำให้เกิดฟองมากขึ้นในขั้นตอนล้างเยื่อ จึงทำให้การล้างทำความสะอาดเยื่อยากขึ้น และอาจทำให้กระดาษขาดหรือรบกวนการเดินกระดาษส่งผลให้กระดาษเสียหายได้

2.2.2 การจำแนกเส้นใย

เส้นใยจากพืชสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ เส้นใยที่ได้จากไม้เนื้ออ่อน เส้นใยที่ได้จากไม้เนื้อแข็ง และเส้นใยที่ได้จากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ (Non wood plant) [27, 28, 34, 35] ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.2.2.1 เส้นใยจากไม้เนื้ออ่อน (Softwood fiber) ไม้เนื้ออ่อนเป็นไม้ในกลุ่มของพืชเมล็ดเปลือยหรืออาจเรียกว่าเป็นไม้ใบแคบ เนื่องจากใบมีลักษณะรูปร่างเหมือนรูปเข็ม เป็นไม้ที่ไม่มีการผลัดใบ ใบจึงเขียวตลอดทั้งปี พบมากในแถบประเทศเขตร้อน เซลล์เส้นใยในเนื้อไม้โดยรวมจะมีลักษณะยาวและตรง ทำให้กระบวนการจัดการต่าง ๆ เกี่ยวกับเนื้อไม้ทำได้ง่าย จึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ ได้แก่ สน (Coniferous species) และ สปรูซ (Spruce) เป็นต้น

2.2.2.2 เส้นใยจากไม้เนื้อแข็ง (Hardwood fiber) ไม้เนื้อแข็งเป็นไม้ในกลุ่มของพืชใบเลี้ยงคู่หรือเรียกว่าไม้ใบกว้าง (Broad leaves) เนื่องจากใบมีลักษณะใบกว้างและมีการผลัดใบในฤดูใบไม้ร่วง พืชประเภทนี้มักพบในแถบเขตร้อน เซลล์เส้นใยที่อยู่ในไม้เนื้อแข็งจะให้ความแข็งแรงแก่ลำต้น ในขณะที่การลำเลียงน้ำและแร่ธาตุจะเป็นหน้าที่ของเวสเซล ตัวอย่างของพืชที่จัดเป็นไม้เนื้อแข็ง เช่น ต้นยูคาลิปตัส ต้นกระถินณรงค์ และต้นกระถินเทพา เป็นต้น

เนื่องจากเส้นใยจากไม้เนื้ออ่อนมีความยาวมากกว่า ผนังเซลล์ของเส้นใยหนากว่า เส้นมีความกว้างของเส้นใยมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยจากไม้เนื้อแข็ง ดังนั้นกระดาษที่ผลิตจากไม้เนื้อแข็งมักมีความแข็งแรงต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกระดาษที่ผลิตจากไม้เนื้ออ่อน แต่กระดาษที่ผลิตจากไม้เนื้อแข็งมีความเรียบเนียนมากกว่ากระดาษที่ผลิตจากไม้เนื้ออ่อน

2.2.2.3 เส้นใยจากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ (Non wood fiber) พืชไม่มีเนื้อไม้ส่วนใหญ่เป็นพืชที่มีขนาดเล็ก ลำต้นอ่อน มีเนื้อเยื่อที่ทำให้เกิดความแข็งแรงน้อย คือ ส่วนใหญ่มีเนื้อเยื่อระยะแรก (Primary tissue) เพียงอย่างเดียว เซลล์เส้นใยที่ได้จากพืชชนิดนี้ส่วนใหญ่จะมีขนาดยาว ประเทศในเขตเมืองร้อนจึงนิยมนำมาผลิตเยื่อโดยนำมาใช้ทดแทนเส้นใยจากไม้เนื้ออ่อน ตัวอย่างของพืชกลุ่มนี้ ได้แก่ อ้อย ข้าว ใผ่ เป็นต้น

2.3 เยื่อกระดาษ

เยื่อกระดาษจัดเป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการการผลิตกระดาษและกระดาษบรรจุภัณฑ์ โดยเยื่อกระดาษในปัจจุบันประกอบด้วยแหล่งที่มา 2 แหล่งใหญ่ ๆ คือ เยื่อที่ได้จากการแปรรูปมาจากเนื้อไม้หรือเยื่อบริสุทธิ์ (Virgin pulp) และเยื่อที่ได้จากการนำกระดาษที่ผ่านการใช้งานมาแล้วมาเตรียมเป็นเยื่อใหม่หรือเยื่อรีไซเคิล (Recycled pulp) [24] ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.3.1 เยื่อบริสุทธิ์

เป็นเยื่อที่เตรียมได้จากการแปรรูปพืชหรือต้นไม้ด้วยกระบวนการต่าง ๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งเส้นใยเดี่ยว ๆ (Individual fiber) สำหรับนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษ กระบวนการผลิตเยื่อนั้นสามารถดำเนินการโดยมีการเอาลิกนินหรือไม่เอาลิกนินออกจากชิ้นไม้ก็ได้ กระบวนการผลิตเยื่อแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการใหญ่ ๆ ดังนี้คือ

2.3.1.1 กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล (Mechanical pulping)

เป็นกระบวนการที่ใช้แรงกลและอาจใช้ความร้อนร่วมด้วยในการทำให้ลิกนินอ่อนตัวลงเพื่อแยกเส้นใยออกจากไม้ เยื่อที่เตรียมได้จะเรียกว่า เยื่อเชิงกล (Mechanical pulp) การผลิตเยื่อเชิงกลให้ผลผลิตเยื่อ (Pulp yield) สูงประมาณร้อยละ 90-95% และเนื่องจากลิกนินไม่ได้ถูกกำจัดออกจึงส่งผลให้กระดาษที่ผลิตจากเยื่อชนิดนี้เมื่อทิ้งไว้นาน ๆ จะกลับมามีสีเหลือง ซึ่งเป็นผลจากลิกนินที่เหลืออยู่ทำปฏิกิริยากับแสง ความชื้น และความร้อน เส้นใยของเยื่อเชิงกลจะมีขนาดสั้นและมีความสมบูรณ์น้อยเนื่องจากถูกกระทำโดยแรงกล ส่งผลให้กระดาษที่ได้มีความเรียบและความทึบแสงสูง [36]

2.3.1.2 กระบวนการผลิตเยื่อเคมี (Chemical pulping)

เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีละลายลิกนินออกจากเนื้อไม้ (Delignification) เพื่อให้เส้นใยแยกออกจากกัน เยื่อที่เตรียมได้จะเรียกว่า เยื่อเคมี (Mechanical pulp) อย่างไรก็ตาม นอกจากลิกนินจะถูกละลายแล้ว เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสบางส่วนยังถูกทำปฏิกิริยาไปด้วย จึงส่งผลให้การผลิตเยื่อโดยวิธีนี้ให้ผลผลิตเยื่อต่ำกว่าเยื่อเชิงกล คือ ประมาณร้อยละ 40-50 เส้นใยของเยื่อเคมีจะมีขนาดยาวและมีความสมบูรณ์กว่าเส้นใยจากเยื่อเชิงกล จึงส่งผลให้กระดาษที่ได้มีความแข็งแรงสูง นอกจากนี้เยื่อเคมียังสามารถนำไปฟอกเยื่อต่อได้ง่าย เนื่องจากลิกนินถูกกำจัดออก จึงส่งผลให้การกลับมาเป็นสีเหลืองของเยื่อ (Yellowing and brightness reversion) เกิดขึ้นน้อยกว่าเยื่อเชิงกล โดยทั่วไปแล้วกระบวนการผลิตเยื่อเคมีแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

ก. กระบวนการผลิตเยื่อเคมีแบบกรด กระบวนการผลิตเยื่อเคมีแบบกรด หรือเรียกว่ากระบวนการผลิตเยื่อแบบซัลไฟต์ (Sulfite pulping) เป็นการใช้กรดซัลฟิวรัส (H_2SO_3) และไบซัลไฟต์ไอออน (HSO_3^-) เป็นสารต้มเยื่อในการละลายลิกนิน การผลิตด้วยวิธีนี้เยื่อที่ได้จะให้ค่าความขาวสว่างสูง ง่ายต่อการนำเยื่อไปฟอกต่อ

ข. กระบวนการผลิตเยื่อเคมีแบบด่าง เป็นกระบวนการที่ใช้ด่างในการต้มเยื่อ ตัวอย่างของกระบวนการนี้ได้แก่ กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา (soda pulping) ซึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการต้มเยื่อ และกระบวนการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ (Kraft pulping) โดยในกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดานั้นนิยมใช้กับพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ ส่วนวิธีการผลิตเยื่อแบบคราฟต์นั้นตัดแปลงมาจากวิธีการผลิตเยื่อแบบโซดา โดยสารเคมีที่ทำปฏิกิริยากับเนื้อไม้ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์

ไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) เยื่อที่ผลิตได้จากวิธีกราฟต์จะให้ความแข็งแรงสูง [35] รวมถึงเป็นกระบวนการที่สามารถนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย

2.3.1.3 กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลกึ่งเคมี (Chemi-mechanical pulping)

เป็นกระบวนการผลิตเยื่อที่ผสมระหว่างการใช้แรงกลและสารเคมีทำให้ชิ้นไม้อ่อนตัวและละลายลิกนินออกมา เยื่อที่ผลิตได้มีความแข็งแรงมากกว่าเยื่อเชิงกลแต่น้อยกว่าเยื่อเคมี การผลิตด้วยวิธีนี้ไม่นิยมนำเยื่อมาฟอกเพิ่มความขาวสว่างมากนัก เนื่องจากมีปริมาณลิกนินเหลืออยู่ค่อนข้างมาก ทำให้ขาวได้ยากและสิ้นเปลืองสารเคมี [37, 38]

2.3.2 เยื่อรีไซเคิล

เยื่อรีไซเคิลเตรียมได้จากการแปรรูปกระดาษที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยจะนำกระดาษดังกล่าวมาผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อแยกเส้นใยออกจากกัน แล้วนำเส้นใยที่ได้กลับมาผลิตเป็นกระดาษอีกครั้ง กระดาษที่มักใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเยื่อรีไซเคิลนั้น แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มหลัก คือ กระดาษหนังสือพิมพ์ ก่อกระดาษลูกฟูก กระดาษสำนักงาน และอื่น ๆ [39]

ปกติแล้วการนำกระดาษมารีไซเคิลสามารถทำได้สูงสุดประมาณ 4-6 ครั้ง เพราะเยื่อที่ผ่านการรีไซเคิลแล้วจะมีขนาดที่สั้นลงและมีคุณภาพด้อยลง ซึ่งส่งผลเสียต่อคุณภาพกระดาษที่ผลิตได้ อย่างไรก็ตาม การรีไซเคิลกระดาษ มีข้อดี คือ ลดปริมาณการตัดต้นไม้และการใช้ทรัพยากรป่าไม้ ลดปริมาณการใช้น้ำในการผลิตเยื่อกระดาษ ลดปริมาณขยะที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระดาษ ช่วยประหยัดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อ รวมถึงช่วยลดมลภาวะที่เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ เป็นต้น เนื่องจากกระบวนการรีไซเคิลกระดาษนั้นมีการใช้แรงกลในการตีกระจายกระดาษในน้ำให้แยกออกมาเป็นเส้นใย เป็นผลให้เส้นใยถูกทำลายไป ดังนั้นกระดาษที่ผลิตจากเยื่อรีไซเคิลจะไม่แข็งแรงเมื่อเทียบกับกระดาษเยื่อบริสุทธิ์โดยตรง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักจะนำเยื่อรีไซเคิลไปผลิตเป็นกระดาษที่คุณภาพต่ำกว่า กระดาษลูกฟูกมารีไซเคิล นอกจากนี้สมบัติของเยื่อกระดาษรีไซเคิลยังขึ้นอยู่กับชนิดของกระดาษที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตอีกด้วยว่ากระดาษนั้นเป็นกระดาษที่ผลิตจากเยื่อเคมีหรือเยื่อเชิงกล ซึ่งเยื่อแต่ละประเภทนี้เมื่อมีการนำมาผ่านกระบวนการรีไซเคิลก็จะให้ลักษณะของเยื่อที่ได้แตกต่างกัน [37] ดังรายละเอียดต่อไปนี้ คือ

2.3.2.1 เยื่อเคมีรีไซเคิล เป็นเยื่อที่ได้มาจากการนำกระดาษที่ผลิตจากเยื่อเคมีมารีไซเคิล เยื่อที่ผลิตได้จะมีลักษณะดังนี้ ความสามารถในการรับน้ำของเส้นใยลดลง ความสามารถในการพองตัวของเส้นใยลดลง เส้นใยดูดซับน้ำได้น้อยลง ความแข็งแรงของเส้นใยจะลดลง เส้นใยมีความกระด้างมากขึ้น เมื่อนำมาทำเป็นกระดาษเส้นใยจะไม่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันได้ดี ส่งผลให้กระดาษที่ผลิตได้มีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst strength) และความหนาแน่น (Density) ต่ำ แต่มีค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear

strength) และสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง (Light scattering coefficient) สูง ทั้งนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาที่เรียกว่า Hornification

ปฏิกิริยา Hornification เป็นปฏิกิริยาที่เส้นใยสูญเสียความสามารถในการรับน้ำ ซึ่งเป็นการสูญเสียอย่างสมบูรณ์ [40] การเกิด Hornification สามารถเกิดได้ทั้งกับเยื่อเคมีและเยื่อเชิงกล โดยเกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการอบแห้งของกระดาษ กล่าวคือ ในช่วงดังกล่าวน้ำจะถูกขับออกจากบริเวณระหว่างเส้นใย เส้นใยถูกดึงให้เข้ามาใกล้ชิดกันมากขึ้น เส้นใยเริ่มมีการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างกัน ซึ่งพันธะไฮโดรเจนดังกล่าวมีความแข็งแรงมากจนเมื่อนำกระดาษที่ได้หลังจากการอบแห้งแล้วไปรีไซเคิลโดยการนำไปตีกระจายในน้ำให้เป็นเยื่อใหม่ พันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยไม่ถูกแทรกด้วยน้ำ เส้นใยจึงไม่เปิดตัวรับน้ำอีก ส่งผลให้เส้นใยมีความแข็งแรงกระด้าง ความสามารถในการรับน้ำและการพองตัวของเส้นใยไม่ถูกทำลายไปมากนัก และเมื่อนำกระดาษที่เตรียมจากเยื่อเชิงกลไปรีไซเคิลโดยการนำไปตีกระจายในน้ำให้เป็นเยื่อใหม่ พันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยยังสามารถถูกแทรกด้วยน้ำได้ ความสามารถในการรับน้ำและการพองตัวของเส้นใยไม่ถูกทำลายไปมากนัก และเมื่อนำเยื่อที่มีเส้นใยประเภทนี้ไปทำกระดาษอีกกระดาษที่ได้จึงมีความแข็งแรงสูงกว่าเยื่อเคมีรีไซเคิล เนื่องจากเส้นใยยังคงสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันได้ดี

2.3.2.2 เยื่อเชิงกลรีไซเคิล เป็นเยื่อที่ได้มาจากการนำกระดาษที่ผลิตจากเยื่อเชิงกลมารีไซเคิล เยื่อที่ผลิตได้จะมีลักษณะดังนี้ เส้นใยยังคงมีความสามารถในการรับน้ำและสามารถในการพองตัวได้ดี เส้นใยมีความยืดหยุ่นสูง (Conformability) ความแข็งแรงของเส้นใยดี ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยา Hornification ที่เกิดในกรณีเยื่อเชิงกลรีไซเคิลมีความรุนแรงน้อยกว่าในกรณีเยื่อเคมีรีไซเคิล เมื่อนำเยื่อที่ได้มาทำเป็นกระดาษเส้นใยยังคงสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันได้ดี ส่งผลให้กระดาษที่ผลิตได้มีความแข็งแรงตึง (Tensile strength) ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst strength) และความหนาแน่น (Density) สูง แต่มีค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear strength) และสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง (Light scattering coefficient) ต่ำ

2.4 ยุกาลิปตัส

ยูกาลิปตัสเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตเยื่อและกระดาษในประเทศไทย จัดอยู่ในกลุ่มไม้เนื้อแข็ง ยูกาลิปตัสมีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปออสเตรเลีย โดยมีจำนวนมากกว่า 700 ชนิด [41-43]

สำหรับการปลูกยูคาลิปตัสในประเทศไทยนั้น เริ่มมีการนำเข้ามาปลูกครั้งแรกที่พระที่นั่งวิมานเมฆ สมัยรัชกาลที่ 5 เมื่อปี พ.ศ. 2444 ต่อมาในปี พ.ศ. 2492 กรมป่าไม้ได้นำยูคาลิปตัสเข้ามาทดลองปลูกที่จังหวัดเชียงใหม่เป็นแห่งแรก แต่การปลูกยูคาลิปตัสในช่วงนั้นยังไม่ได้รับความนิยม จนกระทั่งเกิดปัญหาขาดแคลนไม้ใช้สอย เพราะป่าธรรมชาติถูกทำลายลงอย่างรวดเร็ว อีกทั้งขาดแคลนวัตถุดิบของอุตสาหกรรมกระดาษ การปลูกยูคาลิปตัสจึงได้รับการสนับสนุนอย่างจริงจังอีกครั้ง ในปี 2519 จากรัฐบาล ส่งผลให้การปลูกยูคาลิปตัสได้รับความนิยมมากขึ้น ยูคาลิปตัสได้รับความนิยมในการปลูก เนื่องจากสามารถเจริญเติบโตได้ดีในแทบทุกสภาพพื้นที่ ทุกสภาพดิน ยกเว้นดินที่มีหินปูนสูง และมีอัตราการเจริญเติบโตสูง จึงจัดเป็นพืชโตเร็วไม้ผลัดใบ สามารถตัดได้ตั้งแต่อายุ 3-5 ปี ยูคาลิปตัสที่ปลูกในประเทศไทยส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษเท่ากับร้อยละ 60 ของจำนวนที่ปลูก โดยประเทศไทยสามารถส่งออกเยื่อกระดาษใยสั้นที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัสคิดเป็นสัดส่วน 1 ใน 3 ของเยื่อกระดาษใยสั้นที่ผลิตได้ทั้งหมด

ไม้ยูคาลิปตัสสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งทางตรงและทางอ้อมต่าง ๆ [43] ดังนี้

- ทำไม้ใช้สอย เฟอร์นิเจอร์ เครื่องเรือน ทำรั้ว ทำคอกปศุสัตว์ ทำเสา ใช้ในการก่อสร้างต่าง ๆ ไม้ยูคาลิปตัสสามารถนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของอาคารบ้านเรือนได้แต่ควรจะได้ทำการอาบน้ำยารักษาเนื้อไม้ไว้ก่อนเพื่อยืดอายุการใช้งานให้นานขึ้น
- ทำฟืน ถ่าน ถ่านไม้ยูคาลิปตัสใช้เป็นเชื้อเพลิงดีไฟได้ดีและมีชี้น้อย โดยไม้ฟืนยูคาลิปตัสให้พลังงานความร้อน 4,800 แคลอรีต่อกรัม ส่วนถ่านไม้ยูคาลิปตัสให้พลังงานความร้อน 7,400 แคลอรีต่อกรัม ซึ่งให้ความร้อนใกล้เคียงกับถ่านไม้โกงกางที่จัดว่าเป็นถ่านไม้เกรดดีที่สุด
- ทำชิ้นไม้สับ ไม้ยูคาลิปตัสเมื่อนำมาแปรรูปและสับทำชิ้นไม้สับแล้วสามารถนำไปผลิตเป็นแผ่นชิ้นไม้อัด แผ่นใยไม้อัด แผ่นปาร์ติเกิล และแผ่นไม้อัดซีเมนต์ได้
- ทำเยื่อและกระดาษ เยื่อกระดาษที่เตรียมจากไม้ยูคาลิปตัสมีคุณสมบัติเด่น คือ เส้นใยมีความแข็งแรงสูง เยื่อมีความฟูและมีความทึบแสงสูง จึงเหมาะกับการนำไปผลิตเป็นกระดาษพิมพ์เขียนประเภทต่าง ๆ

2.5 กระดาษคราฟต์

กระดาษคราฟต์ (Kraft Paper) หรือ กระดาษเหนียว [44] คือ กระดาษที่ผลิตจากเยื่อเคมีที่ได้จากกระบวนการคราฟต์ รวมถึงกระดาษที่เตรียมได้จากการนำเยื่อคราฟต์มาผสมกับเยื่อรีไซเคิลเพื่อต้นทุนการผลิต อุตสาหกรรมกระดาษคราฟต์จัดเป็นอุตสาหกรรมกระดาษชั้นกลาง ลักษณะของกระดาษคราฟต์ส่วนใหญ่จะมีเนื้อหยาบ มีความแข็งแรง เหนียว มีค่าความต้านทานแรงฉีกขาด ความแข็งแรงต่อแรงดึง และความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุค่อนข้างสูง มีการดูดซึมน้ำน้อยกว่ากระดาษ

ชนิดอื่น รวมถึงพื้นผิวกระดาษมีความเรียบสม่ำเสมอทำให้เหมาะสำหรับการพิมพ์ การติดกาว กระดาษคราฟต์จึงเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันมากในวงการกระดาษ รวมถึงอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ที่เตรียมมาจากกระดาษโดยนำมาทำเป็นกระดาษผิวกล่อง ซึ่งค่ามาตรฐานของกระดาษผิวกล่องได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-1 และด้วยคุณสมบัติด้านความแข็งแรงดังกล่าวข้างต้นส่งผลให้นิยมนำกระดาษคราฟต์มาผลิตเป็นเยื่อรีไซเคิลอีกด้วย

ตารางที่ 2-1 ลักษณะของกระดาษผิวกล่อง [45]

	หน่วย	เกณฑ์กำหนด		
		กระดาษผิวกล่องชั้นที่ 1	กระดาษผิวกล่องชั้นที่ 2	มาตรฐานที่ใช้
1. น้ำหนักมาตรฐาน (125 g/m ²) คลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน	%	± 5	± 5	ISO 536
2. ความต้านทานแรงกดวงแหวนแนวขวางเครื่อง ต้องไม่น้อยกว่า	kN/m	0.919	0.853	ISO 12192

2.6 สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งของกระดาษ

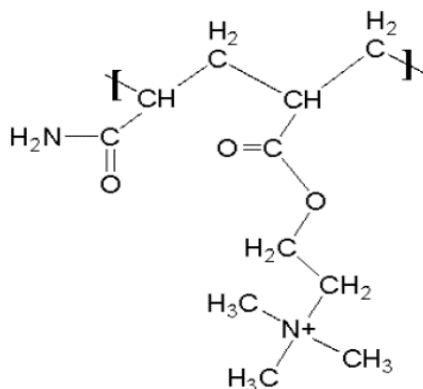
ความแข็งแรงของกระดาษนั้นขึ้นกับความแข็งแรงของเส้นใยเดี่ยว (Individual fiber) จำนวนพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใย การกระจายตัวของเส้นใย รวมถึงการเพิ่มสัดส่วนของเส้นใยยาว การเลือกใช้ชนิดของเยื่อ (เยื่อเคมีมีความแข็งแรงกว่าเยื่อเชิงกล) การลดปริมาณการใช้ตัวเติม (Filler) หรือการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งของกระดาษ (Dry strength additives) เป็นต้น การนำเยื่อรีไซเคิลโดยเฉพาะอย่างยิ่งเยื่อเคมีรีไซเคิลมาผลิตเป็นกระดาษอีกครั้ง ทำให้สมบัติด้านความแข็งแรงที่ต้องการมีค่าลดลงเนื่องจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Hornification ดังนั้นการผลิตกระดาษจากเยื่อรีไซเคิลส่วนใหญ่ต้องผ่านการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงก่อน ซึ่งโดยทั่วไปการเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษสามารถทำได้โดยวิธีเชิงกล เช่น การตีหรือบดเยื่อ ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้เส้นใย ทำให้เส้นใยสามารถดูดน้ำได้มากขึ้น เส้นใยมีความอ่อนตัว (Flexibility) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เส้นใยสามารถแนบตัวกันได้ดีมากขึ้น การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยจึงดีขึ้นด้วย ในขณะที่สารเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษนั้น ป็นสารเคมีที่ใส่ผสมลงในน้ำเยื่อระหว่างการผลิตกระดาษเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในกระดาษหลังจากกระดาษแห้งตัวแล้ว โดยไปช่วยเพิ่มจำนวนพันธะระหว่างเส้นใย ส่งผลให้ความแข็งแรงของกระดาษดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดการถอนผิวหน้ากระดาษ เพิ่มความคงรูป ลดการ

เกิดขุย (Linting) และลดการเกิดฝุ่น (Dusting) ของกระดาษ สารเพิ่มความแข็งแรงที่ดีควรมีสมบัติ ดังนี้ [46]

1. ละลายน้ำได้เพื่อให้ง่ายต่อกระบวนการผลิตกระดาษ
2. มีความเข้ากันได้กับผิวหน้าของเส้นใย เพื่อที่จะไม่รบกวนพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใย
3. สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับเส้นใยและช่วยกักเก็บเส้นใยขนาดเล็กรวมถึงสารเคมีต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
4. ต้องปลอดภัยและสามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ เพื่อความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

สารเพิ่มความแข็งแรงชนิดหนึ่งที่ยานิยมใช้ในการผลิตกระดาษ ได้แก่ กัม แป้ง แป้งประจุบวก แคทไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ (cPAM) เป็นต้น โดยในที่นี่จะพูดถึงเฉพาะแคทไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ (cPAM) เนื่องจากเป็นสารที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แคทไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ (cPAM) เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงที่สังเคราะห์ขึ้นมาด้วยวิธีการทางเคมี แคทไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษ เนื่องจากเอไมด์ กรุป (Amide group) ในตัวพอลิอะคริลาไมด์เป็นตัวที่ค่อนข้างไวต่อปฏิกิริยาในการที่จะทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนกับเส้นใย จึงส่งผลให้จำนวนพันธะไฮโดรเจนในกระดาษมีเพิ่มมากขึ้น และยังส่งผลให้สามารถกักเก็บเส้นใยขนาดเล็กรวมถึงสารเคมีต่าง ๆ ได้ดี ดังนั้นแคทไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์จึงสามารถทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มการกักเก็บ (Retention aids) ในกระบวนการผลิตกระดาษได้อีกด้วย พอลิอะคริลาไมด์นั้นมีหลายมวลโมเลกุล (Molecular weight) และหลายระดับกิ่งก้านสาขา (Branching) โดยขนาดของ cPAM ที่เลือกใช้ควรจะต้องยาวพอสมควรที่จะถูกดูดซับที่ผิวหน้าของเส้นใย และให้พื้นที่หรือบริเวณที่จะทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนได้ ภาพที่ 2-7 แสดงโครงสร้างของแคทไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์

นอกจากแคทไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์แล้ว ยังมีการใช้แอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ (aPAM) เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษด้วย แต่เนื่องจากแอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์มีประจุลบจึงค่อนข้างจะผลักรกกับเส้นใย ซึ่งผิวหน้ามีประจุเป็นลบด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้การใช้แอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์จึงต้องมีการใส่อลูมิเนียม (Alum) เพื่อช่วยในการยึดติดเส้นใยด้วย

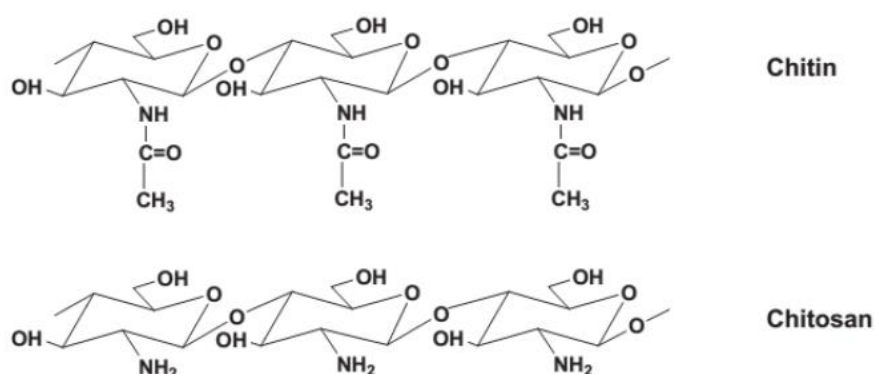


ภาพที่ 2-7 โครงสร้างของ cPAM [47]

2.7 ไคโทซาน

ไคโทซาน (Chitosan) หรือ poly [β -(1 \rightarrow 4)-2-amino-2-deoxy-D-glucopyranose] มีสูตรทางเคมีคือ $(C_6H_{11}NO_4)_n$ เป็นอนุพันธ์ของไคติน (Chitin) เกิดจากปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซิทิล (Deacetylation) ของไคตินด้วยสารละลายต่างเข้มข้น ทำให้โครงสร้างไคตินที่เป็น N-Acetyl Glucosamine กลายเป็น Glucosamine หรือทำให้โครงสร้างของไคตินเปลี่ยนไปโดยมีการแทนที่ของหมู่อะซีตามิโด ($-NHCOCH_3$) ด้วยหมู่เอมิโน ($-NH_2$) บริเวณคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ซึ่งไคตินเป็นพอลิเมอร์ที่มีมากในธรรมชาติเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส สามารถพบในเปลือกของสัตว์จำพวกปู กุ้ง และแกนหมึก เป็นต้น ดังนั้นไคโทซานจึงจัดเป็นไบโอโพลิเมอร์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำตาล N-Acetyl-D-Glucosamine และ Glucosamine อยู่ในสายพอลิเมอร์เดียวกัน ซึ่งระดับการกำจัดหมู่อะซิทิลนี้มีผลต่อสมบัติและการทำงานของไคโทซาน นอกจากนี้น้ำหนักโมเลกุลของไคโทซานยังบอกถึงความยาวของสายไคโทซาน ซึ่งมีผลต่อความหนืด เช่น ไคโทซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีสายที่ยาวและสารละลายมีความหนืดมากกว่าไคโทซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เป็นต้น นอกจากนี้ไคตินและไคโทซานยังมีสมบัติที่ชอบน้ำและมีความสามารถในการอุ้มน้ำแตกต่างกันไปตามชนิดของไคติน โดยความสามารถในการอุ้มน้ำของไคตินและไคโทซานเท่ากับร้อยละ 230-440 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) และไคโทซานมีค่าความสามารถในการอุ้มน้ำสูงกว่าไคติน ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของผลึกไคติน ปริมาณโปรตีนรวมทั้งหมู่ที่สามารถเกิดเกลือกับตัวทำละลาย นอกจากนี้ไคโทซานยังจัดเป็นวัสดุชีวภาพ (Biomaterial) สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ (Biodegradability) มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษและไม่ไวไฟ โดยปกติไคโทซานจะไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายได้ดีในสารละลายกรดอินทรีย์อ่อน เช่น กรดอะซิติก และกรดแลคติก เป็นต้น ซึ่งความสามารถในการละลายของไคโทซานจะขึ้นกับระดับการกำจัดหมู่อะซิทิล (Degree of deacetylation, %DD) ภาพที่ 2-8 แสดงถึงโครงสร้างทางเคมีของไคตินและไคโทซาน โดยไคติน

และไคโทซานมีโครงสร้างของโซ่หลักเหมือนกัน แต่ต่างกันบริเวณหมู่แทนที่คาร์บอนตำแหน่งที่สองของวงไพราโนส โดยไคตินจะมีหมู่แทนที่เป็นหมู่อะเซทาไมด์ (Acetamide group, $-\text{NHC}(\text{O})\text{CH}_3$) แต่ไคโทซานมีหมู่แทนที่เป็นหมู่อะมิโน (Amino group, $-\text{NH}_2$) [48, 49] โดยไคโทซานมีประจุบวกบนหมู่อะมิโนและอาจเรียกได้ว่าเป็นพอลิเมอร์ที่มีประจุบวก (Cationic polymer) รวมถึงเป็นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุบวก (Cationic polyelectrolyte) เนื่องจากหมู่อะมิโนในสารละลายกรดมีการรับโปรตอนและอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน ($-\text{NH}_3^+$) ซึ่งมีสมบัติในการดูดซับสารอินทรีย์ ไอออนโลหะ รวมถึงสีย้อมได้



ภาพที่ 2-8 แสดงโครงสร้างทางเคมีของไคตินและไคโทซาน [49]

ปัจจุบันไคโทซานถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรม การบำบัดน้ำเสีย การแพทย์และเภสัชกรรม การเกษตร อาหารและเครื่องสำอาง รวมถึงทางด้านเยื่อและกระดาษ โดยนำไปใช้งานเป็นสารกั้นซีม (Sizing agent) สารเติมแต่ง (Additive) และใช้ในการปรับปรุงสมบัติงานพิมพ์และความแข็งแรงของกระดาษ [50]

2.8 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะ

2.8.1 เทคนิคฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)

เทคนิคฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR) เป็นเทคนิค ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบและศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร การทำคุณภาพวิเคราะห์และยังเป็นเทคนิคที่นิยมใช้สำหรับหาเกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น หาหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ การวิเคราะห์ปริมาณ นิยมใช้เทียบกับสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว ด้วยเครื่องฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) ดังภาพที่ 2-9 [51]



ภาพที่ 2-9 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FT-IR) [52]

ภาพที่ 2-10 แสดงตารางหมู่ฟังก์ชันที่พบในแต่ละความยาวคลื่นในการวัดด้วยเทคนิค FT-IR โดยหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในการสังเคราะห์แกรไฟีนออกไซด์จะพบสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่น 3396 cm^{-1} ซึ่งแสดงลักษณะที่สำคัญของหมู่ไฮดรอกซิล (OH Stretching) อย่างชัดเจนและจะพบที่มีความยาวคลื่น 1600 และ 1700 cm^{-1} แสดงลักษณะของพันธะคู่ในวงอะโรมาติกและหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิล (C=O) ตามลำดับ ที่ความยาวคลื่น 1400 , 1261 , 1063 และ 802 cm^{-1} ซึ่งแสดงลักษณะของพันธะของคาร์บอนซึ่งต่ออยู่กับหมู่ไฮดรอกซิล พันธะของคาร์บอนที่ต่ออยู่กับออกซิเจนของหมู่อีพอกซีและแอลคอกซี และคาร์บอนที่ต่ออยู่กับไฮโดรเจนของพันธะคู่ ตามลำดับ

Major Functional Group	Absorption Frequency Region			
O-H	3650-3590			
N-H	3500-3300	1650-1590	900-650	
=CH-H	3100-3070	1420-1410	900-880	
=C-H	3100-3000	2000-1600		
C-H	2900-2700	1440-1320		
=CH ₃	2880-2860	2970-2950	1380-1370	1470-1430
O-H	2700-2500	1320-1210	950-900	
C≡C	2140-2100			
C=O	1750-1700			
C=C	1600-1500			
C-N	1340-1250			
C-O-C	1200-1180			
-C-H	770-730			

ภาพที่ 2-10 ตารางความยาวคลื่นและหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ [53]

2.8.2 เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction: XRD)

เป็นเทคนิค นำรังสี X มาใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction: XRD) ดังภาพที่ 2-11 และสามารถคำนวณขนาดของตัวอย่างจากสมการด้านล่าง

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

เมื่อ n คือ จำนวนเต็มที่แทนด้วยอันดับของการเลี้ยวเบน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (อังสตรอม)

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ (อังสตรอม)

θ คือ มุมที่รังสีเอกซ์ตกกระทบบนระนาบผลึก (องศา)



ภาพที่ 2-11 เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-Ray diffraction; XRD) [54]

2.8.3 การวัดความต่างศักย์ของผิวอนุภาคของคอลลอยด์และพอลิเมอร์ด้วยเครื่องซีต้าไซส์เซอร์ (Zeta sizer)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ประจุของสารละลายเพื่อบ่งบอกถึงค่าการกระจายของสารละลายด้วยเครื่องซีต้าไซส์เซอร์ (Zeta sizer) ดังแสดงภาพที่ 2-12 [55]



ภาพที่ 2-12 Zeta sizer [55]

2.8.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscopy : FESEM)

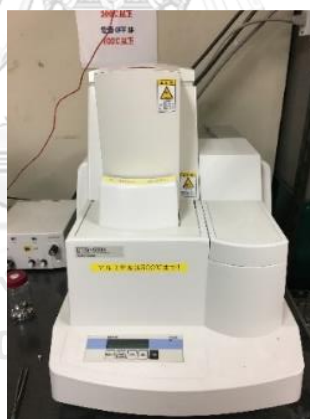
เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างในโครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาค ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscopy : FESEM) ดังแสดงภาพที่ 2-13 [56]



ภาพที่ 2-13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิสชัน [57]

2.8.5 การวิเคราะห์ความเสถียรของวัตถุด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง (Thermogravimetric Analysis; TGA)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุ โดยทำการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง (Thermogravimetric Analysis; TGA) แสดงดังภาพที่ 2-14 [58]



ภาพที่ 2-14 เครื่องชั่งความไวสูง Thermogravimetric Analyzer (TGA)

2.8.6 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (CHN elemental analyzer)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาปริมาณ Carbon Hydrogen และ Nitrogen ที่ได้จากการเผาไหม้ของตัวอย่าง โดยเทียบที่ค่าสูงสุดร้อยละ 100 ภาพที่ 2-15 แสดงเครื่อง CHN analyzer ที่ใช้ในการวิเคราะห์ [59]



ภาพที่ 2-15 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (CHN elemental analyzer) [59]

2.9 สมบัติของกระดาษ

แผ่นกระดาษทดสอบที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้จะถูกวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางโครงสร้าง (Structural properties) สมบัติด้านความแข็งแรง (Strength properties) และ สมบัติเชิงแสง (Optical properties) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.9.1 สมบัติทางโครงสร้าง

น้ำหนักมาตรฐาน (Basis weight หรือ grammage) หมายถึง น้ำหนักของกระดาษต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ที่เก็บในสภาวะอุณหภูมิและความชื้นที่ได้มีการควบคุมตามมาตรฐานกำหนด น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษเป็นประโยชน์ในด้านการควบคุมการผลิตกระดาษรวมถึงการซื้อขายกระดาษ หน่วยที่ใช้วัดน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษจะเป็น กรัมต่อตารางเมตร ตามระบบสากลทั่วไป ในปัจจุบันมาตรฐาน ISO และ TAPPI ซึ่งเป็นมาตรฐานในการทดสอบกระดาษให้ใช้คำว่า แกรมเมจ (Grammage) แทนน้ำหนักมาตรฐาน น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษนอกจากใช้เป็นเกณฑ์ในการซื้อขายกระดาษแล้ว ยังสามารถเปรียบเทียบสมบัติอื่น ๆ ของกระดาษได้ด้วย เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระดาษประเภทเดียวกันที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยสภาวะต่าง ๆ เหมือนกัน กระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐานมากกว่าจะมีความแข็งแรง ความหนา และความทึบแสงมากกว่ากระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐานต่ำกว่า

ความหนา (Caliper หรือ thickness) หมายถึง ระยะห่างที่ตั้งฉากระหว่างผิวด้านบนและผิวด้านล่างของกระดาษภายใต้สภาวะการทดสอบที่กำหนด สามารถวัดได้โดยใช้เครื่องวัดความหนาของกระดาษแสดงดังภาพที่ 2-16 ในสหรัฐอเมริกาหน่วยที่ใช้จะเป็นนิ้ว (inch) หรือมิล (mil) ส่วนในระบบ SI หน่วยที่ใช้จะเป็นไมโครเมตร (micrometer) แต่ส่วนใหญ่จะวัดเป็นมิลลิเมตร (millimeter) ความหนาของกระดาษจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับน้ำหนักมาตรฐาน แรงกดของลูกขณะเดินแผ่น การบดเยื่อและชนิดของเยื่อ



ภาพที่ 2-16 เครื่องวัดความหนาของกระดาษ

ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) เป็นค่าความหนาแน่นของกระดาษ โดยสามารถหาได้จากความหนาและน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{Apparent Density (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{Basis Weight (g/m}^2\text{)}}{\text{Thickness (m)}}$$

2.9.2 สมบัติด้านความแข็งแรง

ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) คือ ความแข็งแรงต่อแรงเค้น (Tensile stress) ที่กระทำต่อกระดาษในแนวยาว โดยเป็นค่าแรงสูงสุดของแผ่นทดสอบที่ทนได้ก่อนแผ่นทดสอบจะขาดออกจากกันเมื่อถูกดึง เป็นค่าที่ได้จากการวัดโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง ดังแสดงในภาพที่ 2-17 ตามมาตรฐานของ TAPPI T 494 [60] เมื่อนำค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมาหารด้วยน้ำหนักมาตรฐานจะได้ค่าที่เรียกว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index)



ภาพที่ 2-17 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง

ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษเป็นสมบัติที่สำคัญของกระดาษในระบบการพิมพ์ป้อนม้วนมากกว่ากระดาษในระบบการพิมพ์แบบป้อนแผ่น เนื่องจากการพิมพ์ในระบบป้อนม้วน

กระดาษต้องได้รับแรงดึงตลอดเวลา หากกระดาษที่ใช้มีความแข็งแรงต่อแรงดึงน้อยอาจทำให้เกิดการขาดของกระดาษในระหว่างการพิมพ์ได้ นอกจากนี้กระดาษที่ต้องการนำไปขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ จำเป็นต้องมีความแข็งแรงต่อแรงดึงด้วย เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปอาจมีแรงดึงกระทำต่อกระดาษไม่มากนัก โดยทั่วไปแล้วกระดาษในแนวขนานเครื่อง (Machine direction; MD) มีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากกว่ากระดาษในแนวขวางเครื่อง (Cross direction; CD) ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงของกระดาษ ได้แก่ ชนิดของเยื่อ ปริมาณการบดเยื่อ ปริมาณการกดรีดน้ำ น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ ปริมาณของสารเติมแต่ง (Filler) และปริมาณความชื้นในกระดาษ โดยกระดาษที่ทำจากเยื่อที่มีเส้นใยยาวและผ่านการบดเยื่อมากกว่าจะมีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษมากกว่ากระดาษที่ทำจากเยื่อที่มีเส้นใยสั้นกว่าและผ่านการบดเยื่อน้อยกว่า เพราะเยื่อใยยาวและการบดเยื่อมากทำให้เส้นใยสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันได้มากขึ้น จึงมีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น การกดรีดน้ำก็มีส่วนทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากมีผลทำให้เส้นใยมีการสัมผัสกันมากขึ้น การเกิดพันธะระหว่างเส้นใยจึงเกิดได้ดีขึ้น กระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐานสูงจะมีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูง ในขณะที่ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งให้กระดาษและเมื่อกระดาษมีปริมาณความชื้นมาก ทั้งนี้เนื่องจากสารเติมแต่งที่เติมเข้าไปจะเข้าไปแทรกระหว่างเส้นใย มีผลทำให้เส้นใยเกิดพันธะระหว่างกันได้น้อยลง ส่วนน้ำทำให้พันธะระหว่างเส้นใยมีความแข็งแรงน้อยลง

ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Bursting strength) หมายถึงความต้านทานต่อแรงที่กระทำกับพื้นที่ หนึ่งตารางเมตรของกระดาษในแนวตั้งฉากก่อนที่กระดาษจะเกิดการขาดทะลุ มีหน่วยเป็นกิโลปาสกาล (kPa) หรือ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือปอนด์ต่อตารางนิ้ว ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสามารถวัดโดยใช้เครื่องความต้านทานแรงดันทะลุ ดังแสดงในภาพที่ 2-18 ตามมาตรฐาน T 403 [60] เมื่อนำค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมาหารด้วยน้ำหนักมาตรฐานจะได้ค่าที่เรียกว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst index)



ภาพที่ 2-18 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุนี้มีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงต่อแรงดึงในแนวขนานเครื่อง ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะการกระจายตัวของแรงที่มากกระทำต่อขึ้น กล่าวคือ จากการที่พื้นที่ทดสอบมีลักษณะเป็นวงกลม เมื่อเครื่องทดสอบทำงาน แผ่นไดอะแฟรมจะถูกดันให้โป่งขึ้นจนทำให้กระดาษแตกทะลุ ก่อนที่กระดาษจะแตกออก กระดาษจะเกิดการยืดตัวออกไปในทุกทิศทาง แต่เนื่องจากกระดาษมีความยืดในแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน ดังนั้นความสามารถในการรับแรงที่มากกระทำจึงไม่เท่ากันทุกทิศทาง แนวรอยแตกของขึ้นทดสอบที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะตั้งฉากกับแนวขนานเครื่องของกระดาษ เพราะกระดาษมีการยืดตัวในแนวที่ต่ำกว่าแนวขวางเครื่อง ด้วยเหตุนี้จึงสามารถบอกได้ว่าแนวรอยแตกเป็นแนวเดียวกันกับแนวขนานเครื่องของกระดาษ ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวมีค่าสูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้น การเพิ่มปริมาณการบดเยื่อและการเติมสารเพิ่มความแข็งแรงทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของเพิ่มขึ้น ในขณะที่สารเติมแต่งทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุลดลง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุเป็นความแข็งแรงของกระดาษที่มีความสำคัญต่อการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำกระดาษไปทำเป็นบรรจุภัณฑ์

ความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tearing strength) หมายถึง ความสามารถของกระดาษที่จะต้านแรงกระทำซึ่งทำให้ชั้นทดสอบหนึ่งชั้นขาดออกจากรอยฉีกนำเดิม หน่วยที่วัดได้เป็น มิลลินิวตัน (mN) หรือ กรัม (gram) ความต้านทานแรงฉีกวัดโดยใช้เครื่องวัดโดยใช้วิธีแบบ Elmendorf internal tearing resistance test ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 [60] ดังแสดงในภาพที่ 2-19 เมื่อนำค่าความต้านทานแรงฉีกมาหารด้วยน้ำหนักมาตรฐานจะได้ค่าที่เรียกว่าค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก (Tear index)

กระดาษที่จำเป็นต้องตรวจสอบความต้านทานแรงฉีกขาด ได้แก่ กระดาษทำถุงกระดาษพิมพ์เขียน การทดสอบสามารถทำได้โดยใช้ชั้นทดสอบที่มีขนาดตามมาตรฐานกำหนด ในระหว่างปากจับบนแท่นเครื่องและบนลูกตุ้มซึ่งเคลื่อนที่ได้ ใช้ใบมีดตัดชั้นทดสอบซึ่งเป็นการฉีกนำยาวประมาณ 2 เซนติเมตร ทำการทดสอบโดยปล่อยให้ลูกตุ้มเคลื่อนที่ ชั้นทดสอบจะถูกฉีกขาดในที่สุด โดยทั่วไปแล้วกระดาษในแนวขนานเครื่องมีความต้านทานแรงฉีกน้อยกว่ากระดาษในแนวขวางเครื่อง นอกจากนี้ความต้านทานแรงฉีกนี้ยังขึ้นกับความยาวของเส้นใยเป็นสำคัญ โดยกระดาษที่มีเส้นใยยาวจะมีความต้านทานแรงฉีกสูงกว่าเส้นใยสั้น การเพิ่มการบดเยื่อมีผลทำให้ความต้านทานแรงฉีกของกระดาษเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากเพิ่มพันธะระหว่างเส้นใย อย่างไรก็ตาม หากบดเยื่อมากเกินไปจนทำให้เส้นใยมีขนาดสั้นลงมาก ความต้านทานแรงฉีกก็จะลดลง



ภาพที่ 2-19 เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก

ความต้านแรงกดในแนววงแหวน (Ring crush resistance) คือ การทดสอบความสามารถของกระดาษในการรับแรงกดในแนวระนาบเดียวกับความหนาของกระดาษโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่าเครื่องทดสอบแรงกดในแนววงแหวน (Crush tester) ดังแสดงภาพที่ 2-20 ตามมาตรฐาน TAPPI T818 [60] มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) โดยจะใช้เครื่องตัดกระดาษแบบใบมีดกด (Ring crush test sample cutter) ในการตัดชิ้นทดสอบ จากนั้นทำการทดสอบโดยนำกระดาษมาใส่ในตัวจับตัวอย่างในการทดสอบในรูปแบบที่โค้งงอเป็นวงแหวน แล้วทำการให้แรงกดในแนวระนาบเดียวกับความหนาของกระดาษจนกระดาษหักพับ

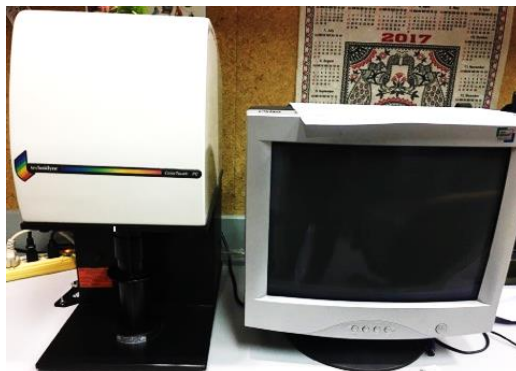


ภาพที่ 2-20 เครื่องวัดความต้านแรงกดในแนววงแหวน

2.9.3 สมบัติเชิงแสง

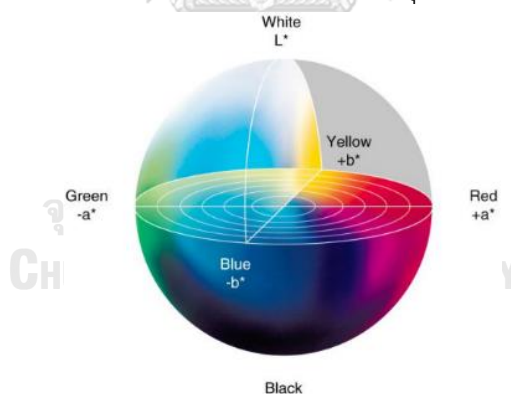
ค่าสี CIE $L^*a^*b^*$ วัดโดยใช้เครื่องวัดสมบัติเชิงแสงของแผ่นทดสอบ (Color touch PC) ดังแสดงในภาพที่ 2-21 ตามมาตรฐาน TAPPI 524 [60] โดยที่ L^* หมายถึง ค่าความสว่าง ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 (ดำ) จนถึง 100 (ขาว) $+a^*$ หมายถึง ค่าความเป็นสีแดง และ $-a^*$ หมายถึง ค่าความเป็นสี

เขียว $+b^*$ หมายถึง ค่าความเป็นสีเหลือง และ $-b^*$ หมายถึง ค่าความเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งลักษณะสี CIE $L^*a^*b^*$ ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2-22



ภาพที่ 2-21 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสงของแผ่นกระดาษ (Color Touch PC)

ค่าความแตกต่างสี (ΔE^*_{ab}) ใช้อธิบายความแตกต่างของสี เพื่อสื่อให้ทุกคนรู้และเข้าใจตรงกัน ซึ่งการมองเห็นสีของมนุษย์และการวัดสีจากเครื่องวัดต้องอาศัยปัจจัย 3 อย่าง คือ แหล่งกำเนิดแสง วัตถุมีสี และการอ่านค่าสี โดยการมองเห็นสีของมนุษย์แต่ละคนอาจจะอ่านค่าสีที่ได้แตกต่างกันไป ซึ่งบางครั้งอาจมองเห็นสีสองสีเป็นสีเดียวกัน สำหรับเครื่องวัดสีจะสามารถบอกค่าความแตกต่างของสีที่พบได้และจะได้ค่าจากการวัดสีในทางอุตสาหกรรมเป็นไปตามมาตรฐานสากล



ภาพที่ 2-22 ลักษณะสี CIE $L^*a^*b^*$ [61]

ดังนั้นจึงมีการกำหนดการวัดสีในระบบตัวเลข เพื่อให้สีที่ใช้ในอุตสาหกรรมเป็นไปตามมาตรฐานสากล และเพื่อใช้ในควบคุมคุณภาพของสินค้าในอุตสาหกรรม โดยค่าความแตกต่าง (ΔE^*_{ab}) ของสี 2 สี สามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง จากนั้นจะนำค่าความแตกต่างสี (ΔE^*_{ab}) ที่ได้จากการคำนวณจะนำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของค่าความแตกต่างสีที่แสดงไว้ในตารางที่ 2-2

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

ตารางที่ 2-2 ค่ามาตรฐานของค่าความแตกต่างสี (ΔE^*_{ab}) [61]

ΔE^*_{ab}	ความแตกต่าง
< 0.2	สังเกตเห็นความแตกต่าง
0.2 – 0.5	สังเกตเห็นความแตกต่างได้น้อยมาก
0.5 – 1.5	สังเกตเห็นความแตกต่างได้น้อย
1.5 – 3.0	สังเกตเห็นความแตกต่างได้ปานกลาง
3.0 – 6.0	สังเกตเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน
6.0 - 12.0	สังเกตเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนมาก
> 12.0	สังเกตเห็นความแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kuila และคณะ [7] ทำการศึกษาวิธีการสังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์จากแกรฟีนออกไซด์ โดยใช้ปฏิกิริยารีดักชันด้วยเทคนิคทางเคมี ความร้อน เคมีไฟฟ้าและการใช้แสง เพื่อให้พันธะระหว่างพวยพายอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อสมบัติการนำไฟฟ้า เพราะโครงสร้างของออกซิเจนที่ล้อมรอบอยู่ของไฮดรอกซี อีพอกซี คาร์บอนิลและคาร์บอกซิล ทำให้พันธะระหว่างพวยพายของวงอะโรมาติกในโครงสร้างถูกทำลาย การนำไฟฟ้าจึงลดลง ในส่วนแรกเป็นการรีดิวซ์โดยใช้กลุ่มสารเคมี ได้แก่ ไฮดราซีน ไฮดราซีนโมโนไฮเดรต ไดมethylไฮดราซีน โซเดียมโบโรไฮไดรไรด์ ไฮโดรควิโนโนน ไฮดรอกซีลามีน พาราฟินิลอินไดเอมีน และโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ โดยสารกลุ่มนี้เข้าไปทำปฏิกิริยารีดักชันที่บริเวณพื้นผิวของแกรฟีนออกไซด์ ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลง ยกตัวอย่างเช่น การรีดิวซ์โดยใช้ไฮดราซีน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า การเข้าทำปฏิกิริยาของไฮดราซีนจะเกิดการเปิดวงของวงอีพอกซี และเกิดการเปลี่ยนรูปกลายเป็นไฮดราซีนโน แอลกอฮอล์ จากนั้นจะกำจัดไดอิมิดออก ได้ผลิตภัณฑ์เป็นพันธะคูในวงอะโรมาติกเกิดขึ้น และถ้าปฏิกิริยารีดักชันสามารถเกิดได้อย่างสมบูรณ์ การรีดิวซ์โดยใช้ไฮดราซีนจะให้ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 145 ซีเมนส์ต่อเมตร อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของการใช้สารในกลุ่มนี้คือ มีความเป็นพิษและสารสามารถระเหยได้ และการใช้สารในกลุ่มนี้จำนวนมากจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการใช้สารในกลุ่มนี้จึงต้องใช้ในปริมาณและสภาวะที่เหมาะสม ส่วนสารเคมีอีกกลุ่มเป็นสารที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยสารในกลุ่มนี้ได้แก่ กรดแอสคอร์บิก สารในกลุ่มแอลกอฮอล์ กรดอะมิโน แอมโมเนีย สารในกลุ่มน้ำตาล เช่น กลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส กรดแทนนิก อาทิเช่น การรีดิวซ์โดยใช้กรดแอสคอร์บิก จะเกิดการให้สองโปรตรอนทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปเป็นกรดดีไฮโดรแอสคอร์บิก ภายหลังจากเกิดปฏิกิริยารีดักชันจะให้ค่าการนำไฟฟ้า 7700 ซีเมนส์ต่อเมตร โดยการใช้สารที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่

สูง มีค่าความจุไฟฟ้าที่จำเพาะและสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ การเอาหมู่ออกซิเจนออกจากโครงสร้างสามารถเอาออกได้ทั้งหมด โดยไม่ต้องใช้สภาวะที่รุนแรงมากนัก นอกจากนี้วิธีการใช้สารเคมีในการรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์แล้วยังมีการใช้ความร้อน ใช้เคมีไฟฟ้า รวมถึงใช้คลื่นไมโครเวฟ และแสงอีกด้วย การรีดิวซ์โดยใช้ความร้อนเพื่อให้หมู่ออกซิเจนออกจากโครงสร้างจะหลุดออกในรูปของน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยตัวอย่างจะถูกเตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 1000 ถึง 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 ถึง 45 วินาที วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย มีประสิทธิภาพและสามารถนำไปประยุกต์ในอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการนำไฟฟ้าได้ดี การรีดิวซ์โดยใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้าเป็นการใช้เครื่อง Cyclic voltammetry เพื่อผ่านกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วแคโทดให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน วิธีนี้ทำได้อย่างรวดเร็วมากและหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีที่เป็นอันตราย และวิธีสุดท้ายเป็นการรีดิวซ์โดยใช้คลื่นไมโครเวฟและแสงเพื่อเอาออกซิเจนออกจากโครงสร้าง เช่น การเตรียมฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์โดยมีตัวไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นแผ่นรองและใช้แสงเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการรีดิวซ์พบว่า ความเข้มข้นของหมู่คาร์บอนต่อกับไฮดรอกซี คาร์บอนนิล และกรดคาร์บอกซิลิกมีพันธะลดลงร้อยละ 73, 85 และ 72 ตามลำดับ โดยวิธีการรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์โดยใช้คลื่นไมโครเวฟและแสงนั้นจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีในช่วงสารที่มีขั้วและจะเป็นประโยชน์ต่อการใช้แสงในช่วงยูวี ซึ่งวิธีนี้ถือเป็นวิธีใหม่ที่จะใช้ในการผลิตวัสดุผสมแกรฟีนและตัวกึ่งการนำไฟฟ้า รวมถึงงานวิจัยในอนาคตที่อาจมีการใช้ตัวรีดิวซ์จากสารชีวภาพ ตัวอย่างของสารที่รีดิวซ์ เช่น sp. AS2.2241 ซึ่งจะถูกใช้เพื่อรีดิวซ์วงอะโรมาติกและโซ่ตรงของหมู่ฟังก์ชันคีโตนและเอสเทอร์

Wu และคณะ [21] ศึกษาอันตรกิริยาของพอลิเมอร์และแกรฟีนเพื่อใช้ในการสร้างคอมโพสิต โดยพันธะที่เชื่อมต่อกันระหว่างแกรฟีนและพอลิเมอร์จะส่งผลต่อการนำไฟฟ้าในคอมโพสิต ซึ่งข้อดีของแกรฟีน คือ ไม่สามารถละลายได้ดีในน้ำหรือสารละลายอินทรีย์ ทำให้การสร้างคอมโพสิตเกิดค่อนข้างยาก งานวิจัยนี้จึงนำแกรฟีนออกไซด์มาทำการเตรียมคอมโพสิตกับโพลีสไตรีน ก่อนนำไปผ่านปฏิกิริยารีดักชันด้วยไฮดราซีนโมโนไฮเดรต จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS เทคนิค FTIR เทคนิค FT-Raman และเทคนิค TGA จากผลการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคที่ได้กล่าวมาข้างต้นพบว่า การรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ในวัสดุผสม PS/r-GO ทำให้พันธะระหว่างพายและพายเกิดการเชื่อมต่อกัน เกิดการขยายระหว่างชั้นฟิล์มของวัสดุผสม ทำให้ฟิล์มเกิดความเปราะแตกง่ายขึ้น โดยพบว่าการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนการเตรียมและใช้ไฮดราซีนไฮเดรตจะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุผสมมีค่าเท่ากับ 22.68 ซีเมนต์

Xu และคณะ [22] ศึกษาผลของการสังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์โดยใช้สารรีดิวซ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและไม่เป็นอันตรายต่อผู้ทำการทดลอง โดยเลือกใช้สารในกลุ่มของวิตามินและน้ำตาล ในที่นี้คือ กรดแอสคอร์บิก น้ำตาลกลูโคส และแทนนิน (tea polyphenol) ในสภาวะที่มี

การเติมต่างและไม่มี การเติมต่าง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารที่ใช้ทั้ง 2 สภาวะ จากผลการทดลองพบว่า ในสภาวะที่ไม่มี การเติมต่าง แกรฟีนออกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ในกรดแอสคอบิก และแทนนิน แต่ไม่เกิดปฏิกิริยาในสภาวะที่มีการเติมน้ำตาลกลูโคส โดยพบว่า การเกิดรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์โดยการใช้น้ำตาลกลูโคสจะเกิดได้ก็ต่อเมื่อมีการใส่สารละลายแอมโมเนียเพื่อไปกระตุ้นหมู่แอลดีไฮด์ในโครงสร้างของน้ำตาลกลูโคส ส่วนการเกิดปฏิกิริยาของการรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์โดยใช้กรดแอสคอบิกและแทนนินเป็นกลไกการเกิดแบบ SN_2 ซึ่งการสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์โดยใช้กรดแอสคอบิกจะให้ค่าความเป็นไปได้มากสุดในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน

Marcano และคณะ [17] ศึกษาวิธีการสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์จากวิธีฮัมเมอร์ทั้ง 3 วิธี ได้แก่ วิธีฮัมเมอร์ วิธีการโมดิฟายด์ฮัมเมอร์ (Modified Hummer) และวิธีอิมพรูฟฮัมเมอร์ (Improved Hummer) ต่อประสิทธิภาพของแกรฟีนออกไซด์ โดยนำแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ เช่น เทคนิคการตรวจวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy เพื่อบ่งบอกอัตราส่วนของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ หรือการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Atomic force microscopy สำหรับตรวจวัดสมบัติทางด้านกายภาพของสาร เป็นต้น จากผลการทดลองพบว่า การสังเคราะห์ด้วยวิธีอิมพรูฟฮัมเมอร์ (Improved Hummer) ให้ผลการตรวจคุณลักษณะที่ดีกว่าวิธีฮัมเมอร์ (Hummer) เนื่องจากผลที่ได้ไม่ก่อให้เกิดแก๊สในกลุ่ม NO_x ซึ่งเป็นแก๊สพิษ และให้ค่าอัตราส่วนที่มีคาร์บอนที่มีขั้ว (Hydrophilic carbon) มากกว่า รวมถึงให้ผลของการออกซิไดซ์ออกซิเจนในโครงสร้างมากกว่าวิธีฮัมเมอร์ (Hummer) และโมดิฟายด์ฮัมเมอร์ (Modified Hummer)

Ghasemian A. และคณะ [62] ศึกษาผลของการใช้แป้งประจุบวกต่อสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากกระดาษรีไซเคิลจากกล่องลูกฟูกและเยื่อบริสุทธิ์กึ่งเคมี การศึกษานี้จะประเมินจากการใช้เยื่อรีไซเคิลจากกล่องลูกฟูกเป็นตัวเสริมในการผลิต โดยตัวอย่างกระดาษที่ผลิตขึ้นจะได้รับการผสมกันระหว่างเยื่อรีไซเคิลจากกล่องลูกฟูกและเยื่อบริสุทธิ์กึ่งเคมีในอัตราส่วน 0:100, 20:80, 30:70 และ 40:60 โดยน้ำหนัก และแป้งประจุบวกที่ปริมาณการเติมร้อยละ 0, 0.5, 1.2, 2 และ 3 ตามน้ำหนัก จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า กระดาษที่มีการผสมเยื่อบริสุทธิ์กึ่งเคมีกับกระดาษรีไซเคิลจากกล่องลูกฟูกและมีการใส่แป้งประจุบวกให้สมบัติความแข็งแรงที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่มีแค่เยื่อบริสุทธิ์กึ่งเคมีและกระดาษที่ไม่ได้ทำการเติมสารละลายแป้งประจุบวก โดยความแข็งแรงต่อแรงดึง ความต้านทานแรงฉีกและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการเติมเยื่อกระดาษรีไซเคิลจากกล่องลูกฟูกเพิ่มขึ้น ยกเว้นสมบัติความต้านทานต่อแรงกดและความต้านทานต่อแรงกดวงแหวน

Main และคณะ [63] ศึกษาการใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ในกลุ่มพอลิอะคริลาไมด์ประจุลบ (aPAM) และพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก (cPAM) ซึ่งเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง ต่อความแข็งแรงของกระดาษที่ทำจากเยื่อมะพร้าว จากผลการทดลองพบว่า เมื่อมีการใส่ cPAM และ aPAM

เพิ่มขึ้น ค่าสภาพการระบายน้ำและเวลาที่ใช้ในการระบายน้ำของเยื่อมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในกรณีของการเติม cPAM ส่วนค่าความหนาแน่น ความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษนั้นพบว่า การเติม cPAM และ aPAM ที่ระดับการเติมร้อยละ 0.5-2 ส่งผลให้ค่าความหนาแน่น ความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้ทำการเติมสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง ในขณะที่การเติม cPAM และ aPAM ไม่ได้ส่งผลต่อการเพิ่มของค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีก ค่าความต้านทานต่อแรงกดแนววงแหวนและค่าการต้านแรงกดลอนลูกฟูก การเติม aPAM จะส่งผลต่อกระดาษในด้านความหนาแน่น ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุและความแข็งแรงต่อแรงฉีกมากกว่า cPAM ยกเว้นค่าความต้านทานต่อแรงกดแนววงแหวนและค่าการต้านแรงกดลอนลูกฟูก

Habibie และคณะ [6] ศึกษาผลของการใช้ไคโทซานต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของกระดาษ ในงานวิจัยชิ้นนี้มีการใช้ไคโทซาน 2 ระดับ คือ ไคโทซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และไคโทซานที่มีน้ำหนักระดับปานกลาง จากผลการทดลองในขั้นต้นพบว่า ไคโทซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 ให้ค่ากระดาษที่มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำและให้ค่าความแข็งแรงของกระดาษสูงกว่ากระดาษที่มีการใส่ไคโทซานที่ความเข้มข้นเดียวกันแต่ใช้ไคโทซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง ในขั้นต้นสรุปได้ว่าน้ำหนักโมเลกุลของไคโทซานส่งผลต่อสมบัติของกระดาษ ส่วนไคโทซานทั้ง 2 น้ำหนักโมเลกุลที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 ให้ค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น โดยความเสถียรของไคโทซานและกระดาษจะดีที่สุดที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM พบว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 จะพบจุดสีขาว แสดงถึงการที่ไคโทซานไม่สามารถทำปฏิกิริยากับกระดาษ ส่วนการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อเป็นสารเติมแต่งพบว่า เมื่อนำไคโทซานใส่ไปลงไปกับแคลเซียมคาร์บอเนต ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะแคลเซียมคาร์บอเนตมีสมบัติการชอบดูดซึมน้ำในอากาศ

Hamzeh Y. และคณะ [64] ศึกษาการใช้ไคโทซานโมเลกุลต่ำและโมเลกุลสูง การใช้แป้งประจุบวก และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA) ในกระดาษลูกฟูก (Old corrugated carton) เพื่อหาปริมาณการใช้ที่เหมาะสมต่อการเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงสำหรับกระดาษทั้งในขณะแห้งและขณะเปียก โดยใส่ปริมาณสารละลายไคโทซานร้อยละ 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 ใส่สารละลายโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปริมาณร้อยละ 1, 2 และ 3 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง และใส่สารละลายแป้งประจุบวกที่ปริมาณร้อยละ 0.5, 1, 1.5 และ 2 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง นอกจากนี้ยังมีการนำสารละลายทั้ง 3 ชนิดไปทำการผสมโดยเลือกใช้สารละลายไคโทซานที่ร้อยละ 0.5 แป้งประจุบวกที่ร้อยละ 0.5 และสารละลายโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ร้อยละ 1 ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่มีการใส่สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งจะสูงกว่ากระดาษที่ไม่ได้ทำการใส่สารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งในทุก ๆ สภาวะการทดลอง การเติมสารละลายไคโทซานมีผลต่อ

ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมากกว่าการเติมสารละลายแบง์ประจุบวกและสารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังพบว่าสารละลายโคโทซานยังทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งและขณะเปียกได้ดีทั้ง 2 สภาวะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโคโทซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงจะให้ผลที่ดีในการเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งและขณะเปียก ค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นเกิดจากสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งจะทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมเส้นใยกับเส้นใยเข้าด้วยกัน นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมสารผสมระหว่างสารละลายโคโทซาน แบง์ประจุบวกและโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีลำดับชั้นในการเติมส่งผลต่อค่าความแข็งแรงขณะแห้งอย่างมีนัยสำคัญ

Huang และคณะ [2] ศึกษาการเติมแกรฟีนออกไซด์ลงในกระดาษเซลลูโลสสำหรับพัฒนาสมบัติด้านความต้านทานการผ่านเข้าออกของแก๊สออกซิเจนและสมบัติเชิงกลของกระดาษ ในการศึกษาทดลองมีการใส่แกรฟีนออกไซด์ลงในเยื่อเซลลูโลสที่มีการเติมสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกซึ่งพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกช่วยทำให้เกิดการรวมตัวกับจับตัวกันของเยื่อเซลลูโลสและแกรฟีนออกไซด์ซึ่งมีประจุเป็นลบทั้งคู่ จากการทดลองพบว่า เมื่อเติมปริมาณแกรฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้น ค่ายังมีมอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอันตรกิริยาของแรงวันเดอวาล์ และพันธะไฮโดรเจนของเยื่อและแกรฟีนออกไซด์ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับกระดาษเซลลูโลสที่ไม่ได้ทำการเติมสารใด ๆ พบว่า การเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 81.4 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการนำไปใช้กับบรรจุภัณฑ์ นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกก่อนหรือหลังการเติมแกรฟีนออกไซด์ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของกระดาษ ในส่วนสมบัติด้านความต้านทานการผ่านเข้าออกของแก๊สออกซิเจนพบว่า การเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความต้านทานการผ่านเข้าออกของแก๊สออกซิเจนสูงที่สุด โดยพบว่าสามารถต้านทานแก๊สได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 71.6 เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษเซลลูโลสที่ไม่ได้ทำการเติมสารใด ๆ ดังนั้นการเติมแกรฟีนออกไซด์จึงช่วยเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงและลดปริมาณการผ่านเข้าออกของแก๊สออกซิเจนในกระดาษ ทำให้กระดาษชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้ทำบรรจุภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ใช้เพียงกระดาษที่มีแอลฟาเซลลูโลสร้อยละ 93 และศึกษาเพียงอิทธิพลของพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกเท่านั้น ไม่ได้ทำการศึกษาสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งประจุบวกตัวอื่น

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึง วัสดุ สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย โดยมีรายละเอียด ดังนี้

ในบทนี้จะกล่าวถึง วัสดุ สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย รวมถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1 กระดาษคราฟต์ (กระดาษทำผิวกล่อง) ชนิด KI (KI Liner) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท กลุ่มสยามบรรจุกัมภ์ จำกัด (โรงงานสระบุรี) เป็นกระดาษที่ทำจากเยื่อใหม่ผสมกับเยื่อรีไซเคิล มีลักษณะเด่น คือ กระดาษมีสีน้ำตาลอ่อนสว่าง

3.1.2 แท่งแกรไฟต์ ขนาด 8x8 มิลลิเมตร บริษัท สุธีรยูไนเต็ลคาร์บอน จำกัด ประเทศไทย

3.1.3 ผงแกรไฟต์ (Graphite) ขนาดน้อยกว่า 20 ไมโครเมตร เกรดวิเคราะห์ บริษัท S.M. Chemical Supplies จำกัด ประเทศไทย

3.1.4 ไคโทซานแบบเกล็ด (Chitosan flake) มีร้อยละการกำจัดหมู่อะซิทิล (% Degree of Deacetylation; %DD) มากกว่าร้อยละ 95 และมีน้ำหนักโมเลกุล 75,000 กรัมต่อโมล บริษัท S.Y.K. Enterprise จำกัด ประเทศไทย

3.1.5 พอลิอะคริลามิโดประจุบวก (cPAM) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท Kemira (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.6 กรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นร้อยละ 98 บริษัท อาร์ซีไอ แล็บสแกน จำกัด ประเทศไทย

3.1.7 โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต บริษัท อาร์ซีไอ แล็บสแกน จำกัด ประเทศไทย

3.1.8 กรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้นร้อยละ 37 บริษัท อาร์ซีไอ แล็บสแกน จำกัด ประเทศไทย

3.1.9 โซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเกล็ด เกรดห้องปฏิบัติการ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98-100 บริษัท Loba chemis Pvt. จำกัด ประเทศอินเดีย

3.1.10 กรดอะซิติก บริษัท Merck KGaA จำกัด ประเทศเยอรมนี

3.1.11 สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 30 บริษัท อาร์ซีไอ แล็บสแกน จำกัด ประเทศไทย

3.1.12 สารละลายไฮดราซีนโมโนไฮเดรต (Hydrazine monohydrate; $\text{H}_2\text{N-NH}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) เกรดพิเศษ บริษัท Wako Pure Chemical Industries จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.1.13 กรดแอสคอร์บิก (L-Ascorbic acid; $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) JIS Special Grade บริษัท Wako Pure Chemical Industries จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.1.14 สารละลายแอมโมเนีย ความเข้มข้นร้อยละ 25 (25% Ammonia solution: NH_3) Wako 1st Grade บริษัท Wako Pure Chemical Industries จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.1.15 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ชนิด Gohsenx Z-200 (Polyvinylalcohol Gohsenx Z-200) Saponification Degree ร้อยละ 99 หรือมากกว่า ความหนืด 11.5-14.0 mPas บริษัท the Nippon Synthetic Chemical Industry จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.1.16 กรดโพลีอะคริลิก 5,000 (Polyacrylic acid 5,000) ความหนืด 40 mPas Wako 1st Grade บริษัท Wako Pure Chemical Industries จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.1.17 สารละลายมาตรฐานบัฟเฟอร์ 7 (Standard solution pH 7) บริษัท Horiba จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.1.18 เมมเบรน ฟิลเตอร์ (Membrane filter) ขนาด 0.2 ไมโครเมตร บริษัท Merck Millipore จำกัด ประเทศไอร์แลนด์

3.1.19 กระดาษกรองเบอร์ 1 ขนาดรูปวง 11 ไมโครเมตร ยี่ห้อ Whatman บริษัท Whatman International จำกัด ประเทศอังกฤษ

3.1.20 กระดาษกรองเบอร์ 40 ขนาดรูปวง 8 ไมโครเมตร ยี่ห้อ Whatman บริษัท Whatman International จำกัด ประเทศอังกฤษ

3.1.21 น้ำกลั่น (Distilled water)

3.1.22 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water; D.I. water) หรือน้ำ DI

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 เครื่องบดเยื่อ (Pulper) ยี่ห้อ FORMAX 450H บริษัท Adirondack Machine Corporation จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.2 เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Balance) ยี่ห้อ AND รุ่น GX- 20K บริษัท AND Corporate ประเทศญี่ปุ่น

3.2.3 เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง (Balance) ยี่ห้อ Denver รุ่น TB-4002 บริษัท Denver Instrument ประเทศเยอรมนี

3.2.4 ตู้อบ (Hot air oven) ยี่ห้อ MMM รุ่น Venticell บริษัท MMM Medcenter Einrichtungen GmbH ประเทศเยอรมนี

3.2.5 เครื่องตีกระจายเยื่อ (Disintegrator) ยี่ห้อ Formax บริษัท Adirondack Machine Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.6 เครื่องวัดค่าสภาพพระบายน้ำ (Freeness tester) รุ่น LTDA บริษัท Regmed Industria Technica de Frecisao ประเทศบราซิล

3.2.7 เครื่องวัดความชื้นแบบ IR (Infrared moisture determination balance); ยี่ห้อ Kett รุ่น FD-600 บริษัท Kett จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.2.8 เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic stirrer) รุ่น C-MAG HS 7 บริษัท IKA จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.9 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษด้วยวิธี Rapid Köthen (Rapid Köthen Sheet machine) ยี่ห้อ PTA ประเทศออสเตรเลีย

3.2.10 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile tester) บริษัท A&D จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.2.11 เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก (Elmendorf Tear tester); บริษัท Thwing-Albert instrument จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.12 เครื่องทดสอบแรงกดในแนววงแหวน (Crush tester) บริษัท Emerson Apparatus จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.13 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง (Optical tester) ยี่ห้อ Technidyne รุ่น Color-Touch PC บริษัท Technidyne Corporation จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.14 เครื่องวัดค่าความหนาแบบอัตโนมัติ (Digital micrometer) บริษัท Testing Machine จำกัด ประเทศฮอลแลนด์

3.2.15 เครื่องตัดกระดาษแบบใบมีดกด (Ring crush test sample cutter) บริษัท Hangzhou Pnshar Technology จำกัด ประเทศจีน

3.2.16 เครื่องตัดกระดาษสำหรับวัดความต้านทานแรงฉีก (Tearing sample cutter) บริษัท Universal Engineering Corporation จำกัด ประเทศอินเดีย

3.2.17 ปุ่มความดันสุญญากาศ (Dry vacuum pump) รุ่น GCD-051X บริษัท ULVAC KIKO จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.2.18 เครื่อง 4-point probe; รุ่น Loresta-AX MCP-T370 บริษัท Mitsubishi Chemical Analytech จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.2.19 เครื่องบดแบบลูกบอล (Ball mill) รุ่น Planetary micro mill PULVERISETTE 7 บริษัท Fritsch Japan จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.2.20 เตาอบสูญญากาศ (ETAC Thermovac) รุ่น GENTOS ET276 บริษัท Yamato จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.2.21 เครื่องทำความเย็น (NEO Cool dip) รุ่น BE200F บริษัท Yamato Scientific จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.2.22 กรวยกรอง (Kiryama-Rohto) บริษัท Kiriyama Glass จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.2.23 ตัวดูดสูญญากาศ (Vacuum flask/Bell jar) บริษัท Kiriyama glass จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.2.24 กระจกทรงเบอร์ 5B ขนาด 150 ไมโครเมตร บริษัท Kiriyama glass จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.2.25 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Bursting strength tester) รุ่น QC-115 บริษัท Comtech Testing Machines จำกัด ประเทศไทย

3.2.26 เครื่องทำลายเอกสาร KOBRA รุ่น 385 SS4 บริษัท ครีเตอูส คอร์โปเรชั่น จำกัด ประเทศไทย

3.2.27 แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar)

3.2.28 กรวยกรอง บุชเนอร์ (Buchner Funnel) เส้นผ่าศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร

3.2.29 ถุงพลาสติกซิปล็อคใส (zip-lock) ขนาด 25x35 เซนติเมตร

3.2.30 กระดาษยูนิเวอร์แซลเปปเปอร์ (Universal Indicator Paper)

3.2.31 พีเอชมิเตอร์แบบปากกา (pH meter) รุ่น LAQUA twin บริษัท Horiba จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.2.32 นาฬิกาจับเวลา (Stopwatch) บริษัท Citizen จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.2.33 ปีกเกอร์ ขนาด 25, 50, 250, 500 และ 1000 มิลลิลิตร

3.2.34 กระจกตวง ขนาด 25, 50, 100 และ 1000 มิลลิลิตร

3.2.35 ปีเปต ขนาด 1, 5, 10 และ 50 มิลลิลิตร

3.2.36 แท่งแก้วคน

3.2.37 เทอร์โมมิเตอร์

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนโดยส่วนที่หนึ่งเกี่ยวกับการสังเคราะห์คอมโพสิต กระจกกราฟต์แกรฟีนออกไซด์ดำเนินการทดลองที่คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ส่วน

ที่สองเกี่ยวกับการเตรียมหมึกนำไฟฟ้า ซึ่งดำเนินการทดลองที่มหาวิทยาลัยชิบะ เมืองชิบะ และ มหาวิทยาลัยสึคุบะ เมืองอิบารากิ ประเทศญี่ปุ่น แต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

ส่วนที่หนึ่ง การสังเคราะห์คอมโพสิตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์

งานวิจัยส่วนนี้สามารถแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นตอนที่ 1 การสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์ ขั้นตอนที่ 2 การสังเคราะห์คอมโพสิตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์ ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์ลักษณะของแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์และขั้นตอนที่ 4 การทดสอบสมบัติส่วนต่างๆของแผ่นทดสอบซึ่งจะทำการทดสอบความหนาแน่น สมบัติด้านความแข็งแรงและ CIEL*a*b* ของคอมโพสิตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์ แต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 ขั้นตอนที่ 1 การสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์

แกรฟีนออกไซด์สามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายวิธีโดยผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของแกรไฟต์ด้วยกรดเข้มข้นและสารออกซิไดซ์ โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการเลือกการสังเคราะห์จากวิธีโม่ตีพายด์ฮัมเมอร์ (Modified Hummer) และวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemistry)

3.3.1.1 การสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์ด้วยวิธีโม่ตีพายด์ฮัมเมอร์

3.3.1.1.1 นำกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ปริมาตร 46 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

3.3.1.1.2 เติมน้ำแกรไฟต์หนัก 1 กรัม

3.3.1.1.3 เติมน้ำโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจำนวน 3 กรัม

3.3.1.1.4 เติมน้ำ D.I. ปริมาตร 46 มิลลิลิตร หลังจากนั้นให้ความร้อนแก่สารแขวนลอยจนมีอุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส

3.3.1.1.5 เติมน้ำ D.I. ปริมาตร 140 มิลลิลิตร และกวนผสมด้วยความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที

3.3.1.1.6 เติมน้ำละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 8 โมลาร์ปริมาตร 82 มิลลิลิตร

3.3.1.1.7 นำสารแขวนลอยที่ได้กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 40 ด้วยเครื่อง vacuum dryer หลังจากนั้นจึงล้างด้วยน้ำ D.I. จนค่าความเป็นกรดต่างของน้ำล้าง มีค่าเท่ากับ 6

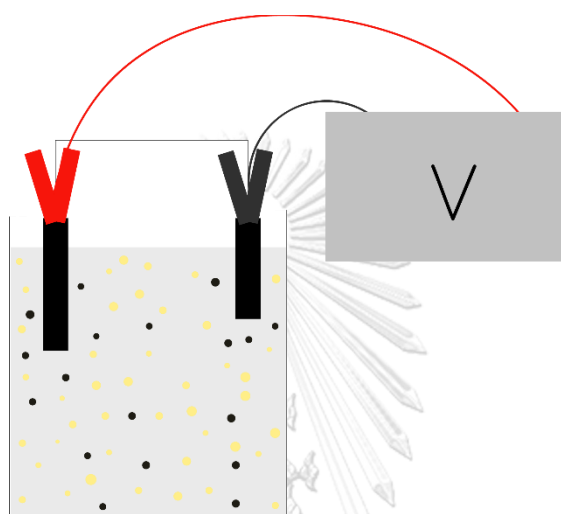
3.3.1.1.8 นำแกรฟีนออกไซด์อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

3.3.1.1.9 นำแกรฟีนออกไซด์ที่ผ่านการอบเก็บในตู้ดูดความชื้นเพื่อพร้อมนำไปใช้งาน

3.3.1.2 การสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

3.3.1.2.1 เตรียมสารละลายกรดซัลฟูริกที่ระดับความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

3.3.1.2.2 นำแท่งแกรไฟต์ที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดขนาด 8x8 ตาราง มิลลิเมตร ยาว 10 เซนติเมตร ต่อเข้ากับขั้วแอโนดและขั้วคาโทด แล้วต่อกับเครื่องกำเนิดความต่าง ศักย์ไฟฟ้า ดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 ภาพจำลองการสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

3.3.1.2.3 ขณะเดินเครื่องกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าจะพบว่าผงสีดำหลุด ออกจากแท่งแกรไฟต์ร่วงหล่นสู่ด้านล่างของสารละลายกรดซัลฟูริก

3.3.1.2.4 ทำการแยกผงแกรไฟต์ออกไซด์ออกจากสารละลายกรดซัลฟูริก ด้วยการกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 40 แล้วจึงล้างด้วยน้ำ D.I. จนกว่าน้ำล้างจะมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6

3.3.1.2.5 อบแกรฟีนออกไซด์ที่ได้จากขั้นตอน 3.3.1.2.4 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงจึงเก็บในตู้ดูดความชื้นเพื่อรอการใช้งานต่อไป

3.3.2 ขั้นตอนที่ 2 การสังเคราะห์คอมโพสิตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์

ขั้นตอนนี้จะเริ่มตั้งแต่การเตรียมสารละลาย cPAM สารละลายไคโทซานและสาร แขวนลอยแกรไฟต์ออกไซด์ ซึ่งจะกล่าวในขั้นตอนที่ 3.3.2.1-3.3.2.3 การเตรียมเยื่อซึ่งจะกล่าวใน ขั้นตอน 3.3.2.4-3.3.2.6 การผสมเยื่อและสารเคมีต่างๆภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดซึ่งจะกล่าวไว้ใน ขั้นตอน 3.3.2.7 และการขึ้นแผ่นซึ่งจะกล่าวไว้ในขั้นตอน 3.3.2.8-3.3.2.9

3.3.2.1 การเตรียมสารละลายแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์หรือสารละลาย cPAM

ใส่แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์หรือ cPAM หนัก 2 กรัมลงในน้ำ D.I. ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วทำการกวนด้วยเครื่องกวนสาร (stirrer) ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที นาน 1 ชั่วโมง จะได้สารละลายไอที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก

3.3.2.2 การเตรียมสารละลายโคโทซาน

นำโคโทซานหนัก 5 กรัมใส่ลงในสารละลายกรดอะซิติกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2.1 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 300 มิลลิลิตร จากนั้นทำการกวนด้วยเครื่องกวนสาร (stirrer) ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จะได้สารละลายโคโทซานที่มีความหนืดเล็กน้อย

3.3.2.3 การเตรียมสารแขวนลอยแกรไฟต์ออกไซด์

ซังแกรไฟต์ออกไซด์หนัก 0.5 กรัมใส่ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำ D.I. ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วนำไป sonication ที่ระดับ 4 นาน 60 นาที จะได้สารแขวนลอยสีดำ

การเตรียมเยื่อ

3.3.2.4 นำกระดาษคราฟต์ซึ่งใช้ในการทำกระดาษทำผิวกล่อง ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทกลุ่มสยามบรรจุภัณฑ์ จำกัด (โรงงานสระบุรี) ตัดให้มีขนาด A4 แล้วนำเข้าเครื่องทำลายเอกสารเพื่อตัดชิ้นงานให้มีขนาดเท่ากันทุกชิ้น

3.3.2.5 นำเยื่อคราฟต์ที่ผ่านการตัดขนาดน้ำหนัก 250 กรัมของน้ำหนักเยื่อแห้ง ใส่ลงในเครื่องตีกระจายเยื่อ (Hydrapulper) ดังแสดงในภาพที่ 3-2 ซึ่งวิธีการตีกระจายเยื่อจะทำตามมาตรฐาน TAPPI T200 sp-01 เติมน้ำปริมาตร 4 ลิตรลงในเครื่องตีกระจายเยื่อซึ่งปริมาตรน้ำที่เติมต้องคำนวณโดยให้ความเข้มข้นเยื่อเท่ากับร้อยละ 5 ของความเข้มข้นเยื่อ (5% consistency) ตามวิธีการคำนวณที่แสดงในภาคผนวก ง แล้วทำการปรับอุณหภูมิในเครื่องตีกระจายเยื่อที่ 50 ± 5 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3-2 เครื่องตีกระจายเยื่อ (hydrapulper)

3.3.2.6 ทำการตีกระจายเยื่อนาน 30 นาที ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เริ่มทำการบดเยื่อโดยเพิ่มความเร็วรอบจาก 150 รอบต่อนาที เป็น 200 รอบต่อนาที แล้วทำการตีกระจายเยื่อต่ออีก 40 นาที น้ำเยื่อที่ได้จากการตีกระจายจะมีความหนืดข้นมากขึ้น เพราะเยื่อมีขนาดที่เล็กลง เนื่องจากการตีกระจายระหว่างใบมีดและน้ำเยื่อทำให้ความละเอียดมากขึ้น

3.3.2.7 นำเยื่อคราฟต์ที่เตรียมได้จากการขั้นตอน 3.3.2.6 ลงในเครื่องตีกระจายเยื่อแบบ disintegrator ดังภาพที่ 3-3 จำนวน 37.3 กรัม ของน้ำหนักเยื่อแห้ง แล้วเติมน้ำเพื่อปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อเท่ากับร้อยละ 1 ของความเข้มข้นเยื่อ(1% consistency) ดังแสดงในภาคผนวก ค



ภาพที่ 3-3 เครื่องตีกระจายเยื่อแบบ disintegrator

แล้วทำการเติมสารที่ต้องการศึกษาอิทธิพลของสารนั้นต่อสมบัติด้านต่างๆของกระดาษคอมโพสิต แล้วตีกระจายเยื่อ 8000 รอบใช้เวลาประมาณ 2 นาที ซึ่งจะทำให้การศึกษาที่ละตัวแปรและที่ระดับของตัวแปรนั้นๆ กล่าวคือ ถ้าต้องการศึกษาผลของสาร cPAM (พอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก) ต่อสมบัติด้านต่างๆของกระดาษคอมโพสิต จึงทำการเติมสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกที่ระดับความเข้มข้น แล้วนำไปทำขึ้นแผ่นทดสอบที่แสดงในขั้นตอน 3.3.2.8 และถ้าต้องการศึกษาที่ระดับความเข้มข้นถัดไป จึงเติมสารนี้ที่ระดับความเข้มข้นที่ต้องการ แล้วขึ้นแผ่นทดสอบอีกครั้ง ทำเช่นนี้จนกว่าจะครบทุกตัวแปรและทุกระดับความเข้มข้นของตัวแปรที่ออกแบบไว้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตัวแปร	สัญลักษณ์ที่ใช้	ระดับความเข้มข้น	หน่วย
สารพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก หรือ cPAM	CP	ร้อยละ 0 0.06 0.1 0.5 1 2 3 4	ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
สารละลายไคโทซาน	CTS	ร้อยละ 0 0.5 1 2 3 4	ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer	H	ร้อยละ 0 1 5 10 15	ของน้ำหนัก เยื่อแห้ง
แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry	E	ร้อยละ 0 1 5 10 15	ของน้ำหนัก เยื่อแห้ง
สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ที่แสดงสมบัติความแข็งแรงมากที่สุด+แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer	CPH	ระดับความเข้มข้นที่แสดงสมบัติความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นกระดาษทดสอบ+ ร้อยละ 0 1 5 10 15	ของน้ำหนัก เยื่อแห้ง
สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ที่แสดงสมบัติความแข็งแรงมากที่สุด+แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry	CPE	ระดับความเข้มข้นที่แสดงสมบัติความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นกระดาษทดสอบ+ ร้อยละ 0 1 5 10 15	ของน้ำหนัก เยื่อแห้ง
สารละลายไคโทซานที่แสดงสมบัติความแข็งแรงมากที่สุด+แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer	CTSH	ระดับความเข้มข้นที่แสดงสมบัติความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นกระดาษทดสอบ+ ร้อยละ 0 1 5 10 15	ของน้ำหนัก เยื่อแห้ง
สารละลายไคโทซานที่แสดงสมบัติความแข็งแรงมากที่สุด+แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry	CTSE	ระดับความเข้มข้นที่แสดงสมบัติความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นกระดาษทดสอบ+ ร้อยละ 0 1 5 10 15	ของน้ำหนัก เยื่อแห้ง

3.3.2.8 การขึ้นแผ่นทดสอบ

นำเยื่อกราฟต์ที่ผ่านกระบวนการกระจายทำการขึ้นแผ่นทดสอบให้มึ้นน้ำหนัก 120 กรัมต่อตารางเมตร เพื่อนำแผ่นทดสอบไปทดสอบสมบัติในด้านต่างๆ โดยใช้เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid-Köthen (Rapid-Köthen sheet former) ดังแสดงในภาพที่ 3-4 ตามมาตรฐานการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ ISO 5269-2 โดยที่ตัวเครื่องของขึ้นแผ่นทดสอบจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือส่วนขึ้นแผ่นกระดาษ (sheet forming) และส่วนอบแห้ง (dryer) โดยมีขั้นตอนการขึ้นแผ่นทดสอบดังนี้ เทน้ำเยื่อที่ได้จากขั้นตอน 3.3.2.7 ลงในส่วนขึ้นแผ่นทดสอบดังภาพ 3-4(ก) แล้วทำการระบายน้ำ (drainage) ออกด้วยเครื่อง vacuum pump ซึ่งจะส่งผลให้เส้นใยเกิดการสานตัวกันกลายเป็นแผ่นทดสอบ น้ำเยื่อจะเกิดการฟอร์มเป็นกระดาษทดสอบดูดน้ำออกด้วย vacuum pump ลักษณะเป็นแผ่นกระดาษวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 เซนติเมตร

3.3.2.9 นำแผ่นตัวอย่างที่ขึ้นแผ่นเรียบร้อยแล้วมาปิดประกบด้วยกระดาษที่ใช้ขึ้นแผ่นแล้วนำมาอบแห้งในส่วนอบแห้งของเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษดังแสดงในภาพ 3-4(ข) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส โดยทำการอบแห้งเป็นเวลา 20 นาที



ภาพที่ 3-4 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid-Köthen [63]

3.3.3 ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์ลักษณะของแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์

วิเคราะห์ลักษณะที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer และ วิธีทางเคมีไฟฟ้า ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.3.3.1 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันเฉพาะ โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทร สโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)

นำแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์จากทั้ง 2 วิธี จำนวน 0.1 กรัม บดกับ โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) จากนั้นทำการอัดขึ้นรูปเป็นลักษณะแผ่นใส แล้วนำไปใส่ใน sample holder และนำมาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันเฉพาะเปรียบเทียบระหว่างแกรไฟต์ และแกรฟีนออกไซด์ที่

สังเคราะห์ได้จากทั้ง 2 วิธี ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer)

3.3.3.2 ศึกษาโครงสร้างผลึก ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction: XRD)

นำแกรไฟต์และแกรไฟน์ออกไซด์ที่สังเคราะห์จากทั้ง 2 วิธีมาบดละเอียด ใส่ลงในฐานรอง (Stub) แล้วกดให้เรียบ นำตัวอย่างที่เตรียมใส่ลงใน Holder จากนั้นทำการวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X – ray Diffraction: XRD)

3.3.3.3 ศึกษาวัดความต่างศักย์ของผิวอนุภาคของคอลลอยด์และพอลิเมอร์ด้วยเครื่องซีต้าไซส์เซอร์ (Zeta sizer)

นำสารแขวนลอยในน้ำเยื่อ สารละลายโคโทซาน สารละลาย cPAM และสารละลายแกรไฟน์ออกไซด์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร มาทำการวัดความต่างศักย์ของผิวอนุภาคโดยใส่กระแสไฟฟ้าให้กับตัวอย่าง ทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่ จากนั้นนำการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปทำการหาค่าความต่างศักย์ของผิว (Zeta Potential) ด้วยเครื่องซีต้าไซส์เซอร์ (Zeta sizer)

3.3.3.4 ศึกษาลักษณะภายนอก ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscopy: FESEM)

นำตัวแกรไฟต์ แกรไฟน์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้และคอมโพสิตกระดาษคาร์บอนแกรไฟน์ออกไซด์ที่ทำการสังเคราะห์ติดบนฐานรอง (stub) และทำการฉาบทองคำลงบน คอมโพสิตกระดาษคาร์บอนแกรไฟน์ออกไซด์ที่ทำการสังเคราะห์ได้ ด้วยเครื่อง sputter coater จากนั้นนำคอมโพสิตกระดาษคาร์บอนแกรไฟน์ออกไซด์ที่ทำการสังเคราะห์ได้ที่ผ่านการฉาบด้วยทองคำไปส่องดูลักษณะภายนอกของแกรไฟต์ แกรไฟน์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้และคอมโพสิตกระดาษคาร์บอนแกรไฟน์ออกไซด์ที่ทำการสังเคราะห์ได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิสชัน

3.3.3.5 การวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง (Thermogravimetric Analysis; TGA)

การวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเป็นการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง (Thermogravimetric Analysis; TGA) ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็กโดยจะทำการชั่งตัวอย่างจำนวน 4.113 มิลลิกรัมวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่ควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศ บรรยากาศภายในเป็นแก๊ส ไนโตรเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นจะแสดงในรูปของร้อยละ

3.3.3.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (CHN elemental analyzer)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาปริมาณ Carbon, Hydrogen และ Nitrogen ที่ได้จากการเผาไหม้ของตัวอย่าง การวิเคราะห์ตัวอย่างปริมาณประมาณ 2 มิลลิกรัมจะถูกบรรจุในแคปซูลดีบุกและนำไปวางในระบบสุ่มตัวอย่างอัตโนมัติ จากนั้นจะถูกนำไปหย่อนลงใน reaction chamber ที่มีออกซิเจนมากเกินพอ ที่อุณหภูมิประมาณ 990 °C ซึ่งอาจจะเกิดแก๊สต่าง ๆ รวมทั้งเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ขึ้นบ้างแม้จะมีออกซิเจนมากเกินพอ และจะเกิดออกซิเดชันโดยสมบูรณ์เมื่อผ่านไปยังคอลัมน์ที่บรรจุทั้งสเตนไดรอกไซด์ ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะให้แก๊สผสม CO₂, H₂O และ NO_x รวมทั้ง O₂ ที่เกินพอเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะไหลผ่าน silica tube ที่บรรจุด้วยผงโลหะทองแดง (copper granules) ซึ่งบริเวณนี้จะมีอุณหภูมิ 500 °C ซึ่ง O₂ ที่เหลือเข้ามาจะถูกจับไว้ และ NO_x จะถูกเปลี่ยนไปเป็น N₂ จากนั้นอาจมีคอลัมน์สำหรับจับ SO₂ และแก๊สเฮไลด์ ก่อนที่แก๊สผสมจะถูกพาโดยแก๊สฮีเลียมไปยัง chamber ที่ควบคุมปริมาตรและความดัน และจะถูกนำไปผ่านการแยกด้วยระบบ zone chromatography ซึ่งจะให้สัญญาณออกมาในรูปขั้นบันได (staircase) ความสูงของขั้นบันไดจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของแก๊สต่าง ๆ ที่ถูกแยกออกมา จึงสามารถหาปริมาณได้โดยเทียบกับสารมาตรฐาน โดยมี detection limit สำหรับกรณีใช้สารตัวอย่าง 2-3 มิลลิกรัม อยู่ที่ประมาณ 0.05 w% (~500 ppm) โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ ±0.02 w%

3.3.4 ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบสมบัติด้านต่างๆของแผ่นทดสอบ

นำแผ่นทดสอบที่ผ่านการขึ้นแผ่นทดสอบของทุกสภาวะจากข้อ 3.3.2.7 มาทดสอบความหนาแน่น (Apparent density) สมบัติด้านความแข็งแรง (strength properties) และสมบัติเชิงแสงของกระดาษ (optical properties) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.3.4.1 ความหนาแน่น (Apparent density)

ความหนาแน่น (apparent density)หาได้จากความสัมพันธ์

ระหว่างความหนาแน่นและน้ำหนักมาตรฐานได้เป็นความหนาแน่นเสมือน (apparent density) ซึ่งจะเป็นการเทียบหาความหนาแน่นของกระดาษที่ระดับน้ำหนักมาตรฐานเดียวกัน อาจมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน หน่วยของความหนาแน่นเสมือนที่นิยมใช้ในระบบ SI จะกำหนดเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$$\text{Apparent Density (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{Basis Weight (g./m}^2\text{)}}{\text{Thickness (m.)}}$$

น้ำหนักมาตรฐาน หาได้จากการชั่งน้ำหนักของแผ่นเยื่อทดลองโดยเครื่องชั่งที่มีความละเอียดถึง 0.001 กรัมจำนวน 5 แผ่น ซึ่งแต่ละแผ่นจะมีเนื้อที่ประมาณ 200 ตารางเซนติเมตร เมื่อคูณด้วย 10 จะเป็นค่าน้ำหนักมาตรฐานของแผ่นเยื่อทดลอง

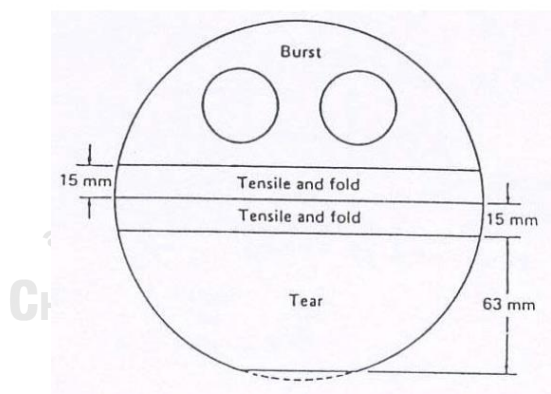
ความหนา หาได้จากการนำแผ่นเยื่อทดลองทั้ง 5 จากการหาค่าน้ำหนัก

มาตรฐานแล้วนำมาวางทับซ้อนกันและให้ส่วนที่เป็นผิวมันอยู่ด้านบน นำไปวัดความหนาด้วยเครื่องวัดความหนา โดยวิธีการสุ่มเป็นจำนวน 10 จุดแต่ละจุดจะต้องไม่มีความแตกต่างกันเกินกว่า 0.002 มิลลิเมตร ความหนาที่ได้จากการทดลองนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยโดยการหารด้วย 10 และ 5 จะเป็นค่าความหนาของแผ่นเยื่อทดลอง

3.3.4.2 สมบัติด้านความแข็งแรง (strength properties)

การวัดสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษจะทำการวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Strength) ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst Strength) ความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear Strength) และ ความต้านทานแรงกดวงแหวน (Ring Crush) โดยแต่ละค่าที่ทำการวัดจะทำการตัดตัวอย่างดังภาพที่ 3-5 [66] ดังนี้

ความแข็งแรงต่อแรงดึง มีความกว้าง 1.5 เซนติเมตร มีจำนวน 5 แผ่นย่อย
 ความต้านแรงดันทะลุ มีจำนวน 5 แผ่นย่อย
 ความต้านแรงฉีก มีความกว้าง 6.3 เซนติเมตร ต่อไปเรียกว่าส่วนที่ 2 มีจำนวน 5 แผ่นย่อย
 ความต้านแนวแรงกดวงแหวน มีความกว้าง 1.5 เซนติเมตร ความยาว 10 เซนติเมตร



ภาพที่ 3-5 การตัดกระดาษตัวอย่างที่ทำการทดสอบเพื่อใช้ในการวัดค่าสมบัติด้านความแข็งแรง [66]

3.3.4.2.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Strength) หาได้จากการนำแผ่นย่อยของกระดาษที่ทำการตัดขนาด มีความกว้าง 1.5 เซนติเมตรดังแสดงในภาพที่ 3-5 มาวัดความต้านแรงดึงด้วยเครื่องวัดความต้านแรงดึง ตามมาตรฐานของ TAPPI T 494 om-01 [60] มีระยะห่างระหว่างตัวหนีบเท่ากับ 10 เซนติเมตร จะวัดได้จำนวน 5 ค่า เมื่อผลรวมหารด้วย 5 จะเป็นค่าความต้านแรงดึงของแผ่นเยื่อกลุ่มนี้ จากนั้นนำไปคำนวณและรายงานผลในรูปของ Tensile index(mN/g) จากสูตรแสดงดังภาพที่ 3-6

$$\text{Tensile Index (mN/g.)} = \frac{\text{Load (N.)}}{\text{Basis Weight} * 0.015}$$

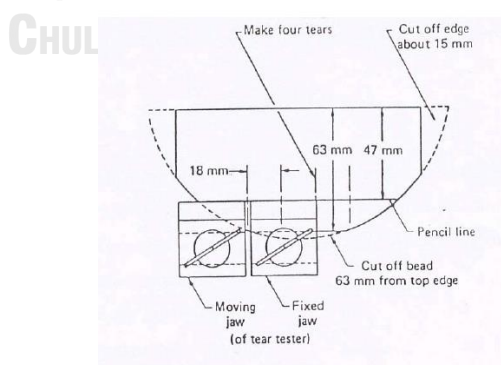
ภาพที่ 3-6 สูตรการคำนวณ Tensile Index

3.3.4.2.2 ความต้านทานแรงดันทะลุ (Burst strength) หาได้จากส่วนของกระดาษดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3-5 ไปวัดค่าความต้านทานแรงดันทะลุด้วยเครื่องวัดความต้านทานแรงดันทะลุ ตามมาตรฐาน T 403 om-15 [60] โดยให้ด้านที่มันติดกับตัวหนีบจะวัดได้แผ่นย่อยละ 2 ค่ารวม 5 แผ่นย่อยได้รวม 10 ค่า เมื่อผลรวมหารด้วย 10 จะเป็นค่าความต้านทานแรงดันทะลุของแผ่นกระดาษทดสอบของกลุ่มนี้ แล้วนำค่าความต้านทานแรงดันทะลุ ที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Burst index) โดยนำค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน

3.3.4.2.3 ความต้านทานแรงฉีก (tear resistance) หาได้จากการนำกระดาษไปตัดให้มีขนาดยาวอย่างน้อย 53 มม. และมีขนาดกว้าง 63 ± 0.15 มม. (หากเอาให้ง่ายให้ตัดเป็นขนาด 63 มม. X 63 มม. ก็ได้) ให้ได้ขนาดดังที่แสดงในภาพที่ 3-8 ตัดตัวอย่าง ทำการทดลอง (ด้านที่ทดสอบคือ 63 มม. อยู่ในแนวตั้ง) ด้วยเครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก โดยใช้วิธีแบบ Elmendorf internal tearing resistance test ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98 [60] แล้วนำค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index) โดยนำค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน ดังภาพที่ 3-7

$$\text{Tear Index (mN*m}^2\text{/g)} = \frac{\text{Tear Strength (mN.)}}{\text{Basis Weight (g/m}^2\text{)}}$$

ภาพที่ 3-7 สูตรการคำนวณ Tear Index



ภาพที่ 3-8 การตัดตัวอย่างเพื่อทดสอบความต้านทานแรงฉีก [66]

3.3.4.2.4 ความต้านแรงกดในแนววงแหวน (Ring crush resistance)

หาได้จากการนำกระดาษตัวอย่างไปตัดให้มีขนาดความกว้าง 1.5 เซนติเมตร และความยาว 10 เซนติเมตร โดยจะใช้เครื่องตัดกระดาษแบบใบมีดกด (Ring Crush Test Sample Cutter) ในการตัดขึ้นทดสอบ จากนั้นนำกระดาษที่ตัดได้ขนาดแล้วใส่ในฐานใส่ตัวอย่าง จากนั้นให้แรงกดในแนวระนาบเดียวกับกระดาษจนกระดาษปริแตก มาตรฐาน TAPPI T818 [60] มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความต้านแรงกดในแนววงแหวน คือ เครื่องทดสอบแรงกดในแนววงแหวน (Crush Tester)

3.3.4.3 CIEL*a*b*

ค่าสี CIEL*a*b* การวัดจะใช้ตามมาตรฐาน TAPPI 524 om-02 [60] ด้วยเครื่องวัดสมบัติเชิงแสงของแผ่นทดสอบ (Color Touch PC) โดยนำกระดาษตัวอย่างแผ่นทดสอบไปวางบริเวณจุดที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง จากนั้นกดโปรแกรมทดสอบจะได้ค่า $L^*a^*b^*$ โดยที่ L^* หมายถึง ค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0 (ดำ) จนถึง 100 (ขาว) $+a^*$ หมายถึง ค่าความเป็นสีแดง และ $-a^*$ หมายถึง ค่าความเป็นสีเขียว $+b^*$ หมายถึง ค่าความเป็นสีเหลือง และ $-b^*$ หมายถึง ค่าความเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งแสดงลักษณะสี CIEL*a*b*

ส่วนที่สอง การเตรียมหมึกนำไฟฟ้า

แกรฟีนออกไซด์ที่เลือกใช้ ในการวิจัยในส่วนที่ 2 นี้คือแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโมดิฟายด์ฮัมเมอร์ ส่วนสารที่ใช้ในการรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์มี 2 ชนิดได้แก่ ไฮดราซีนโมโนไฮเดรต (Hydrazine monohydrate) และ กรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid)

การเตรียมหมึกนำไฟฟ้าแบ่งได้ 2 ขั้นตอนหลักคือ ขั้นตอนแรกเป็นการเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของแกรฟีนออกไซด์โดยการรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ และ ขั้นตอนที่สองคือ การเตรียมหมึก

3.3.5 ขั้นตอนการรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

3.3.5.1 การรีดิวซ์สารแกรฟีนออกไซด์ด้วยสารไฮดราซีนโมโนไฮเดรต ในภาวะ

ต่าง

3.3.5.1.1 บดแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโมดิฟายด์ฮัมเมอร์ แล้วร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 200

3.3.5.1.2 เทสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ลงในสารละลายไฮดราซีนโมโนไฮเดรต ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วทำการผสมด้วยเครื่องกวนผสมสาร

3.3.5.1.3 ใส่แกรฟีนออกไซด์จากขั้นตอน 3.3.5.1.1 น้ก 5 มิลลิกรัม ลงในสารละลายที่ได้จากขั้นตอน 3.3.5.1.2

3.3.5.1.4 นำตัวอย่างไปหาหามู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)

3.3.5.1.5 ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอน 3.4.2.1.1 ถึง 3.3.5.1.4 แต่เปลี่ยนระยะเวลาการรีดิวซ์ในขั้นตอน 3.3.5.1.3 เป็น 2 3 4 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ

3.3.2.1.6 เมื่อทราบระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์แล้ว จึงเริ่มต้นขั้นตอน 3.3.2.1.1-3.3.2.1.3 โดยใช้ระยะเวลาเหมาะสมสุด แล้วจึงนำสารที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์ลักษณะด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) เพื่อวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์และเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) เพื่อหาความเสถียรของสารที่สังเคราะห์ได้ และความต้านทานไฟฟ้า

3.3.5.2 การรีดิวซ์สารแกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอสคอร์บิก(L-ascorbic acid) ในภาวะที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นต่าง

3.3.5.2.1 บดแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโมดิฟายด์ฮัมเมอร์ แล้วร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 200

3.3.5.2.2 นำสารจากข้อที่ 3.3.5.2.1 มาใส่ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำ D.I. ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วนำไป sonication ที่ระดับ นาน 30 นาที

3.3.5.2.3 ทำการเติมกรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid) 300 มิลลิกรัม และทำการปรับสภาพความเป็นต่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ จนกระทั่งค่าความเป็นต่างอยู่ในช่วง 9-10

3.3.5.2.4 ทำการตั้งปฏิกิริยาและควบคุมอุณหภูมิโดยให้อยู่ที่ 95 ± 5 องศาเซลเซียสโดยการใช้อ่างน้ำมันดังแสดงในภาพที่ 3-9



ภาพที่ 3-9 การรีดิวซ์สารแกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid)

ในภาวะที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นต่าง

3.3.5.2.5 นำตัวอย่างไปหาหุ้มฟังก์ชันบนพื้นผิวด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)

3.3.5.2.6 ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอน 3.3.5.2.1 ถึง 3.3.5.2.4 แต่เปลี่ยนระยะเวลาการรีดิวซ์ในขั้นตอน 3.3.5.2.3 เป็น 2 3 4 และ 5 ชั่วโมงตามลำดับ

3.3.5.2.7 เมื่อทราบระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์แล้ว จึงเริ่มต้นขั้นตอน 3.3.5.2.1-3.3.5.2.3 โดยใช้ระยะเวลาเหมาะสมที่สุด แล้วจึงนำสารที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์ลักษณะด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) เพื่อวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์และเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) เพื่อหาความเสถียรของสารที่สังเคราะห์ได้และความต้านทานไฟฟ้า

3.3.5.3 การรีดิวซ์สารแกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid) ในภาวะที่ใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นต่าง

3.3.5.3.1 บดแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโม่ดีฟายด์ฮัมเมอร์ แล้วร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 200

3.3.5.3.2 นำสารจากข้อที่ 3.3.5.2.1 มาใส่ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำ D.I. ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วนำไป sonication

3.3.5.3.3 ทำการเติมกรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid) จำนวน 300 มิลลิกรัม และทำการปรับสภาพความเป็นต่างด้วยสารละลายแอมโมเนียที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 25 จนกระทั่งค่าความเป็นต่างอยู่ในช่วง 9-10

3.3.5.3.4 ทำการตั้งปฏิกิริยาและควบคุมอุณหภูมิโดยให้อยู่ที่ 95 ± 5 องศาเซลเซียสโดยการใช้อ่างน้ำมันดังแสดงในภาพที่ 3-9

3.3.5.3.5 นำตัวอย่างไปหาหุ้มฟังก์ชันบนพื้นผิวด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)

3.3.5.3.6 ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอน 3.3.5.3.1 ถึง 3.3.5.3.4 แต่เปลี่ยนระยะเวลาการรีดิวซ์ในขั้นตอน 3.4.2.3.3 เป็น 2 3 4 และ 5 ชั่วโมงตามลำดับ

3.3.5.3.7 เมื่อทราบระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์แล้ว จึงเริ่มต้นขั้นตอน 3.3.5.3.1-3.3.5.3.3 โดยใช้ระยะเวลาเหมาะสมที่สุด แล้วจึงนำสารที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์ลักษณะด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) เพื่อวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์และเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) เพื่อหาความเสถียรของสารที่สังเคราะห์ได้ และความต้านทานไฟฟ้า

3.3.6 ขั้นตอนการเตรียมหมึกนำไฟฟ้า

ในขั้นตอนการเตรียมหมึกนำไฟฟ้านั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ ขั้นตอน

การเตรียมหมึกโดยใช้เทคนิคการบดด้วยลูกบอล และขั้นตอนการวัดการนำไฟฟ้า

3.3.6.1 การเตรียมหมึกนำไฟฟ้า

ขั้นตอนการเตรียมหมึกนำไฟฟ้าจะทำการหมึกทั้ง 4 ชนิดได้แก่ 1. หมึกที่เกิดจากการแกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ฟายด์ฮัมเมอร์ 2. หมึกที่เกิดจากการสังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ด้วยสารไฮดราซีนโมโนไฮดรต ในภาวะต่าง 3. หมึกที่เกิดจากการรีดิวซ์สารแกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid) ในภาวะที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นต่าง และ 4. หมึกที่เกิดจากการรีดิวซ์สารแกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid) ในภาวะที่ใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นต่าง โดยหมึกทั้ง 4 ชนิดจะทำการเตรียมด้วยขั้นตอนเดียวกัน ดังนี้

3.3.6.1.1 ชั่งสารรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ด้วยสารไฮดราซีนโมโนไฮดรต 300 มิลลิกรัม ใส่ลงในถ้วยที่มีลูกบอลขนาด 10 มิลลิเมตร จำนวน 7 ลูก ดังแสดงในภาพที่ 3-10 จากนั้นทำการเติมสารละลายโพลีอะคริลิกแอซิด (Polyacrylic acid:PAA) ที่มีระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวลต่อปริมาตร (ทำการชั่งโพลีอะคริลิกแอซิด 1 กรัมลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำ D.I. 99 มิลลิลิตร ทำการกวนสารด้วยอุณหภูมิตั้งที่ 40 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็ว 400 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง)



ภาพที่ 3-10 ถ้วยสำหรับใช้ในการบดด้วยลูกบอล

3.3.6.1.2 ทำการผสมสารที่เตรียมไว้จากข้อ 3.4.3.1.1 ด้วยเทคนิคการบดลูกบอล (Ball milling) เนื่องจากการจะทำให้หมึกนำไปใช้ได้ดีนั้นขนาดของสารจะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง $20 \pm 2 \mu\text{m}$. โดยทำการตั้งค่าเครื่องดังนี้ ความเร็วรอบที่ใช้ 450 ต่อนาที ให้ลูกบอลบดไปข้างหน้า 2 นาที และย้อนกลับ 2 นาที รวมเวลาที่ใช้ 4 นาที

3.3.6.1.3 จากนั้นเติมน้ำ D.I. ปริมาตร 1 มิลลิลิตร จากนั้นทำการบดด้วยเทคนิคการบดลูกบอล (Ball milling) โดยทำการตั้งค่าเครื่องดังนี้ ความเร็วรอบที่ใช้ 450 ต่อนาที ให้ลูกบอลบดไปข้างหน้า 2 นาที

3.3.6.1.4 จากนั้นทำการเติมน้ำ D.I. ปริมาตร 1 มิลลิลิตรและ สารละลาย โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวลต่อปริมาตร (ทำการชั่งโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ 5 กรัมลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำ D.I 95 มิลลิลิตร ทำการกวนสารด้วยอุณหภูมิตั้งที่ 95 องศาเซลเซียส ด้วย ความเร็ว 400 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในสารที่ได้จากข้อ 3.3.6.1.3 จากนั้นทำการบดด้วยเทคนิคการบดลูกบอล(Ball milling) โดยทำการตั้งค่าเครื่องดังนี้ ความเร็วรอบที่ใช้ 450 ต่อนาที ให้ลูกบอลบดไปข้างหน้า 2 นาที และย้อนกลับ 2 นาที บดซ้ำจำนวน 6 ครั้ง รวมเวลาที่ใช้ 24 นาที

3.3.6.1.5 จากนั้นเติมสารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวลต่อปริมาตรปริมาตร 1 มิลลิลิตรลงในสารที่ได้จากข้อ 3.3.6.1.4 จากนั้นทำการบดด้วย เทคนิคการบดลูกบอล (Ball milling) โดยทำการตั้งค่าเครื่องดังนี้ ความเร็วรอบที่ใช้ 450 ต่อนาที ให้ ลูกบอลบดไปข้างหน้า 2 นาที

3.3.6.1.6 ภายหลังจากเตรียมหมึกนำไฟฟ้า นำหมึกที่ได้ไปทดสอบสมบัติ ด้านความต้านทานไฟฟ้าด้วยเครื่อง 4-point probe เพื่อเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าที่ได้จากการ สังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ทั้ง 3 วิธี

3.3.6.2 การทดสอบสมบัติการนำไฟฟ้าของหมึกนำไฟฟ้า

การทดสอบสมบัติด้านความต้านทานไฟฟ้าจะตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง 4-point Probe ดังนี้ แกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ตีพายด์ฮัมเมอร์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ หมึกที่ เตรียมจากแกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ตีพายด์ฮัมเมอร์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ หมึกที่เตรียมจากแกร ฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ตีพายด์ฮัมเมอร์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ไปและเคลือบบนผิวกระดาษ และ หมึกที่เตรียมจากแกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ตีพายด์ฮัมเมอร์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์และเคลือบบน ผิวกระดาษหลังทำการขีดผิวกระดาษ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองมี 2 ส่วนหลักคือ ผลการศึกษาแกรฟีนออกไซด์ต่อสมบัติกระดาศของคอมโพสิตกระดาศกราฟต์แกรฟีนออกไซด์และผลการศึกษาการรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ต่อสมบัติการนำไฟฟ้า โดยใช้แกรฟีนออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีโม่ติพายด์ฮัมเมอร์

ส่วนที่ 1 คอมโพสิตกระดาศกราฟต์แกรฟีนออกไซด์

4.1 การวิเคราะห์ลักษณะของแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์

การวิเคราะห์ลักษณะของแกรไฟต์ (G) และแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีของโม่ติพายด์ฮัมเมอร์ (H) และวิธีทางเคมีไฟฟ้า (E) จะใช้เทคนิค XRD เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกของแกรไฟต์และแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์จาก 2 วิธี เทคนิค FTIR เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเฉพาะเทคนิควิเคราะห์องค์ประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิล์มอีมิสชันเพื่อดูลักษณะสัณฐานภายนอก

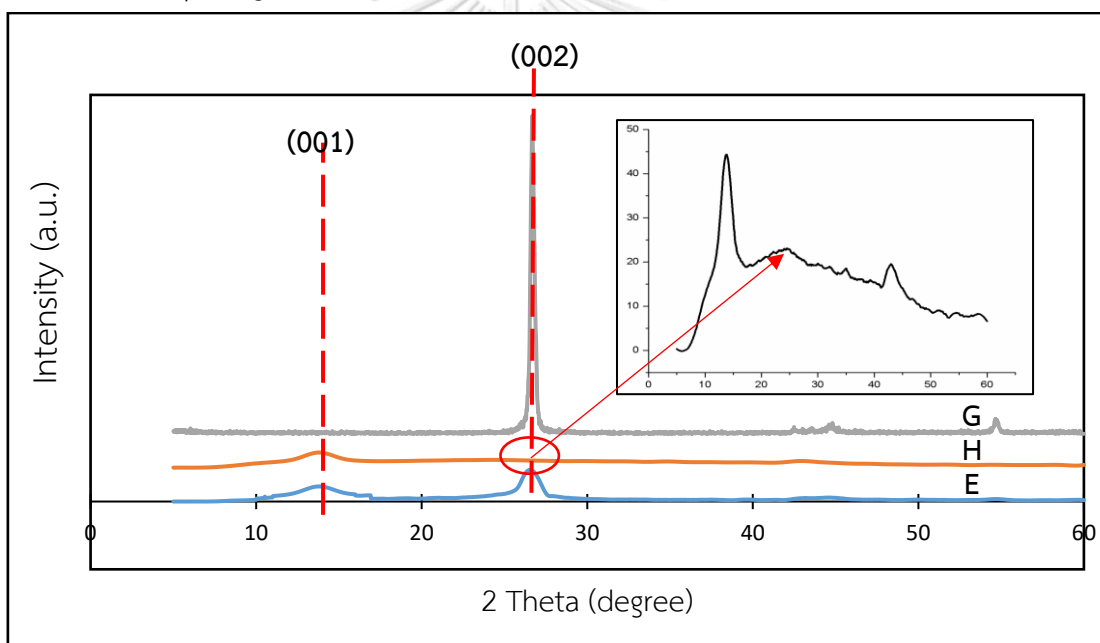
4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ G H และ E ด้วยเทคนิค XRD แสดงผลดังภาพที่

4-1

จากภาพที่ 4-1 พบว่า โครงสร้างของ G มีความเป็นโครงสร้างผลึกมากกว่า H และ E และยังพบว่า G แสดงตำแหน่ง 2Theta ต่างจากของ H และ E หากพืดปรากฏในช่วง 2Theta เท่ากับ 21-25 องศา จะแสดงถึงโครงสร้างผลึกเฉพาะของแกรฟีน ซึ่งเกิดจากโครงสร้างผลึกของคาร์บอนกับไฮโดรเจนของแกรฟีน หากพืดปรากฏในช่วง 2Theta เท่ากับ 10-15 องศา จะแสดงถึงโครงสร้างผลึกเฉพาะของแกรฟีนออกไซด์ที่เกิดจากคาร์บอนกับออกซิเจน ส่วนช่วง 2Theta เท่ากับ 26-28 องศา จะแสดงถึงโครงสร้างผลึกเฉพาะของแกรไฟต์ที่เกิดจากคาร์บอนต่อกับไฮโดรเจนในโครงสร้างของแกรไฟต์ จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ตำแหน่ง 2Theta ของ G พบบริเวณ 26.76 องศา ซึ่งแสดงลักษณะเฉพาะของแกรไฟต์ที่เป็นโครงสร้างระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจน ส่วนตำแหน่งที่บริเวณ 2Theta ของ E จะพบ 2 บริเวณ คือ 14.17 องศา และ 26.7 องศา ซึ่งแสดงถึงลักษณะเฉพาะของแกรฟีนออกไซด์ที่แสดงถึงโครงสร้างของคาร์บอนกับออกซิเจนและลักษณะเฉพาะของแกรไฟต์ที่เป็นโครงสร้างระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจน (ส่วนบริเวณ 21-25 องศา จะแสดงถึงโครงสร้างผลึกที่เกิดจากคาร์บอนต่อกับไฮโดรเจนที่จะปรากฏในแกรฟีนและที่บริเวณ 2 Theta เท่ากับ 10-15 องศา แสดงถึง

โครงสร้างผลึกที่เกิดจากคาร์บอนกับออกซิเจน) ส่วน H จะพบที่บริเวณ 2θ เท่ากับ 14.26 องศา ซึ่งแสดงถึงลักษณะที่เฉพาะของแกรไฟต์ที่คาร์บอนต่อกับออกซิเจนและที่บริเวณ 2θ เท่ากับ 24.88 องศา แสดงลักษณะความเป็นแกรไฟต์ที่แสดงถึงโครงสร้างผลึกที่เกิดจากคาร์บอนต่อกับไฮโดรเจนที่จะปรากฏในแกรไฟต์ จากผลการวิเคราะห์นี้จึงกล่าวได้ว่า การสังเคราะห์ H สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์เนื่องจากไม่พบโครงสร้างผลึกที่แสดงถึงความเป็นแกรไฟต์ในโครงสร้าง ส่วนการสังเคราะห์ E ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากยังคงพบโครงสร้างผลึกที่แสดงความเป็นแกรไฟต์ ลักษณะพีค XRD ของ H และ E ที่กว้างขึ้น (Broaden) และมีความเข้มลดลงเมื่อเทียบกับลักษณะพีคของแกรไฟต์ แสดงว่าเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแกรไฟต์ในระหว่างการเข้าทำปฏิกิริยาของออกซิเจนเพื่อเกิดการแทรกตัวของออกซิเจนภายในโครงสร้างส่งผลให้เกิดการสูญเสียความเป็นผลึกภายในโครงสร้างของแกรไฟต์ ซึ่งทำให้ระยะห่างระหว่างชั้น (d-spacing) ขยายขึ้น



ภาพที่ 4-1 ผลการทดสอบลักษณะด้วยเทคนิค X-ray diffraction เมื่อ G คือแกรไฟต์ H คือการสังเคราะห์แกรไฟต์จากวิธีโม่ดีฟายด์ฮัมเมอร์ E คือ การสังเคราะห์แกรไฟต์จากวิธีเคมีไฟฟ้า

ลักษณะโครงสร้างผลึกในแกรไฟต์จะมีระยะห่างระหว่างชั้นของแกรไฟต์ ณ บริเวณ 2θ เท่ากับ 26.76 องศา หรือระนาบ (002) [67] ประมาณ 3.3300 อังสตรอม ดังแสดงในภาพที่ 4-1 ระยะห่างระหว่างระนาบในโครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ที่แสดงถึงโครงสร้างผลึกที่เกิดจากคาร์บอนต่อกับไฮโดรเจนที่จะปรากฏในแกรไฟต์ของ H ณ บริเวณที่แสดงถึงโครงสร้างผลึกที่เกิดจากคาร์บอนต่อกับ

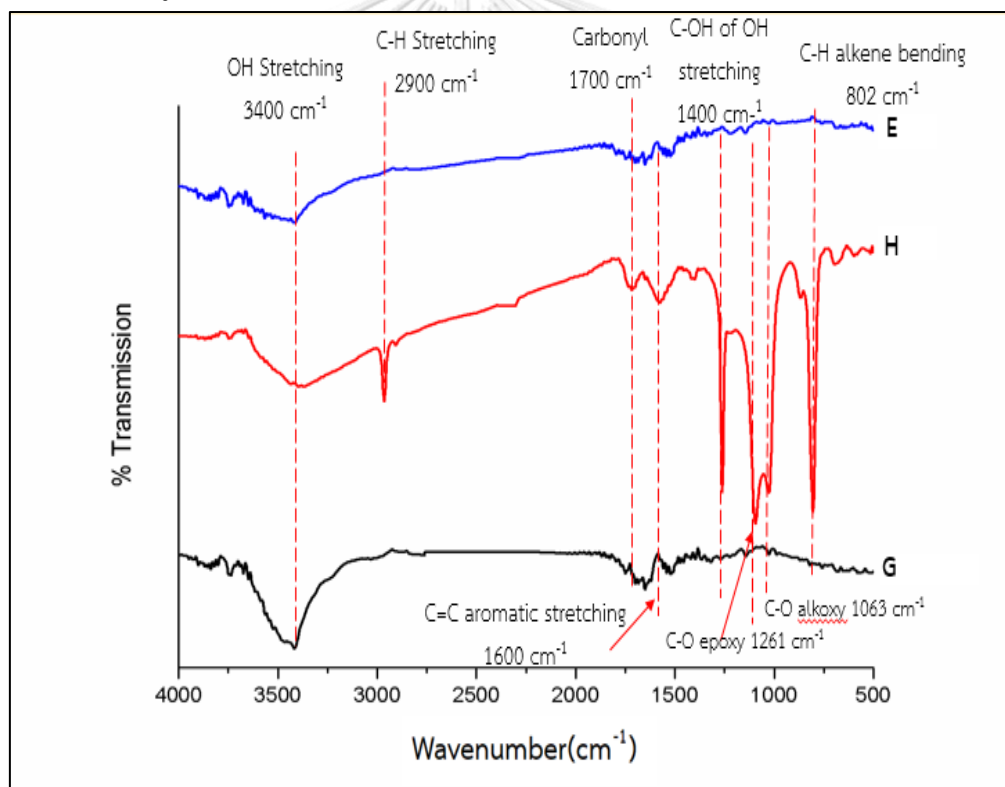
ไฮโดรเจนที่จะปรากฏในแกรฟีน 2Theta เท่ากับ 24.88 องศาที่แสดงถึงโครงร่างผลึกที่เกิดจากคาร์บอนต่อกับไฮโดรเจนที่จะปรากฏในแกรฟีน หรือระนาบ (002) เท่ากับ 3.5772 อังสตรอม ซึ่งค่าระยะห่างระหว่างระนาบเพิ่มขึ้น 0.2472 อังสตรอม และพบระยะห่างระหว่างระนาบในโครงร่างผลึกแกรฟีนออกไซด์ที่แสดงถึงโครงร่างผลึกที่เกิดจากคาร์บอนต่อกับไฮโดรเจนที่จะปรากฏในแกรฟีน ที่บริเวณ 2Theta เท่ากับ 14.26 องศาที่แสดงถึงโครงร่างผลึกที่เกิดจากคาร์บอนต่อกับไฮโดรเจนที่จะปรากฏในแกรฟีน หรือระนาบ (001) ประมาณ 7.2457 อังสตรอม [68] เพิ่มขึ้นอีก 1 ตำแหน่ง การเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างระนาบเกิดจากการแทรกตัวของออกซิเจนในโครงสร้างของแกรไฟต์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นมีระยะห่างมากขึ้น ส่วน E จากการคำนวณพบว่าระยะห่างของระนาบที่แสดงถึงโครงร่างผลึกที่เกิดจากคาร์บอนต่อกับไฮโดรเจนที่จะปรากฏในแกรฟีนในโครงร่างผลึก ณ ตำแหน่ง 2Theta 26.7 องศาที่แสดงถึงโครงร่างผลึกที่เกิดจากคาร์บอนต่อกับไฮโดรเจนที่จะปรากฏในแกรฟีน หรือระนาบ (002) [67] จะมีค่าเท่ากับ 3.3398 อังสตรอม มีค่าระยะห่างระหว่างระนาบเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแกรไฟต์ 0.0098 อังสตรอม และพบระยะห่างระหว่างระนาบอีก 1 ตำแหน่ง ณ บริเวณ 2Theta เท่ากับ 14.17 องศาที่แสดงถึงโครงร่างผลึกที่เกิดจากคาร์บอนต่อกับไฮโดรเจนที่จะปรากฏในแกรฟีน หรือระนาบ (001) [67] มีค่าเท่ากับ 6.2476 อังสตรอม จากผลการทดลองพบว่า ระยะห่างระหว่างระนาบของ G มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากการแทรกตัวของออกซิเจนในชั้นแกรไฟต์ เมื่อนำ H และ E มาทำการเปรียบเทียบจะพบว่า การสังเคราะห์ด้วยวิธีโม่ตีฟายด์ฮัมเมอร์จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นแกรฟีนออกไซด์มากกว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเฉพาะ

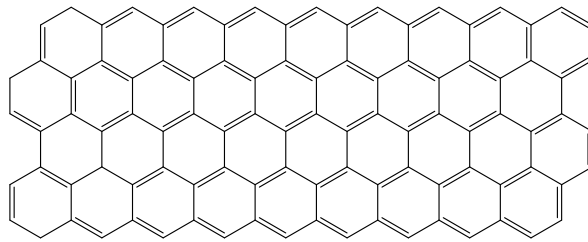
ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเฉพาะของ G H และ E ด้วยเทคนิค FT-IR แสดงดังภาพที่ 4-2 จากสเปกตรัมของ G จะมีความแตกต่างจากสเปกตรัมของ H และ E อย่างชัดเจนดังนี้

จากสเปกตรัมของ G จะสังเกตพบการสั่นที่ความถี่ประมาณ 1617 เซนติเมตร⁻¹ และ 1508 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งบ่งบอกถึงฟังก์ชันของพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนในวงอะโรมาติก (C=C aromatic) และพันธะเดี่ยวระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนตามลำดับ ซึ่งฟังก์ชันเหล่านี้จะเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักใน G ดังแสดงในภาพที่ 4-3 แต่ยังคงพบการสั่นที่ความถี่ 3421 เซนติเมตร⁻¹ บ่งบอกถึงฟังก์ชันไฮดรอกไซด์ (OH-Stretching) เนื่องจากแกรไฟต์ดูดกลืนความชื้นจากบรรยากาศ ส่วนสเปกตรัมของ H จะพบการสั่นที่ความถี่ 3424 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งบ่งบอกถึงฟังก์ชันของไฮดรอกไซด์ (OH-Stretching) การสั่นที่ความถี่ 1577 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งบ่งบอกถึงฟังก์ชันคาร์บอนและคาร์บอนในวงอะโรมาติก (C=C aromatic) การสั่นที่ความถี่ 2964 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งบ่งบอกถึงฟังก์ชันพันธะเดี่ยวระหว่างคาร์บอนต่อกับไฮโดรเจน (C-H Stretching) นอกจากนี้ยังพบ พีคที่แสดงถึงการสั่นของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (C=O Stretching) ที่ 1714 เซนติเมตร⁻¹ การสั่นของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนที่สร้าง

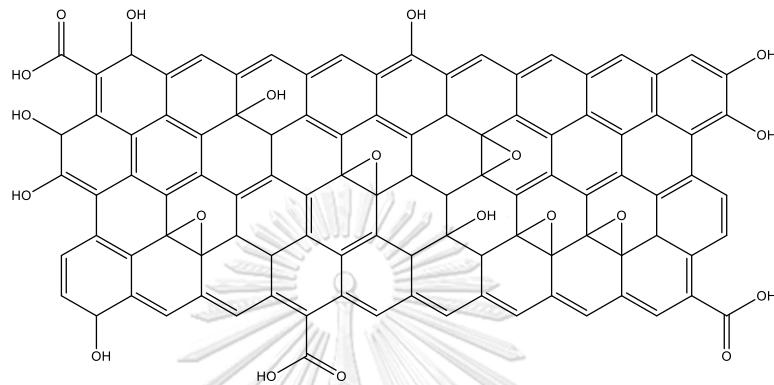
พันธะกับไฮดรอกไซด์ (C-OH Stretching) ณ 1415 cm^{-1} การสั่นของหมู่ฟังก์ชันพันธะระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนของหมู่อีพอกซี (C-O epoxy) ณ 1261 cm^{-1} การสั่นของหมู่ฟังก์ชันระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนของหมู่แอลคอกซี (C-O alkoxy) ณ 1095 cm^{-1} และการสั่นของหมู่ฟังก์ชันระหว่างไฮโดรเจนกับคาร์บอนที่ต่อแบบพันธะคู่ ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$ bending) ณ 806 cm^{-1} [67] ซึ่งจะพบในโครงสร้างของแกรไฟีนออกไซด์แสดงในภาพที่ 4-4 จากสเปกตรัมของ H จึงกล่าวได้ว่า ปฏิกริยาออกซิเดชันของแกรไฟต์เพื่อเกิดผลผลิตเป็นแกรไฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการของโมดิฟายด์ฮัมเมอร์สามารถเกิดขึ้นได้ในงานวิจัยนี้ เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของ E จะพบการสั่นลักษณะเดียวกันกับเส้นสเปกตรัมของ H ต่างกันตรงที่สเปกตรัมของ E จะมีความเป็นพีกต่ำกว่าของสเปกตรัมของ H จากผลการทดลองนี้จึงกล่าวได้ว่าการสังเคราะห์แกรไฟีนออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์ได้สำเร็จ และการสังเคราะห์แกรไฟีนออกไซด์ด้วยวิธีโมดิฟายด์ฮัมเมอร์จะมีความเป็นแกรไฟีนออกไซด์ที่สมบูรณ์กว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า



ภาพที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะด้วยเทคนิค FTIR เมื่อ G คือแกรไฟต์ H คือการสังเคราะห์แกรไฟีนออกไซด์จากวิธีโมดิฟายด์ฮัมเมอร์ E คือ การสังเคราะห์แกรไฟีนออกไซด์จากวิธีเคมีไฟฟ้า

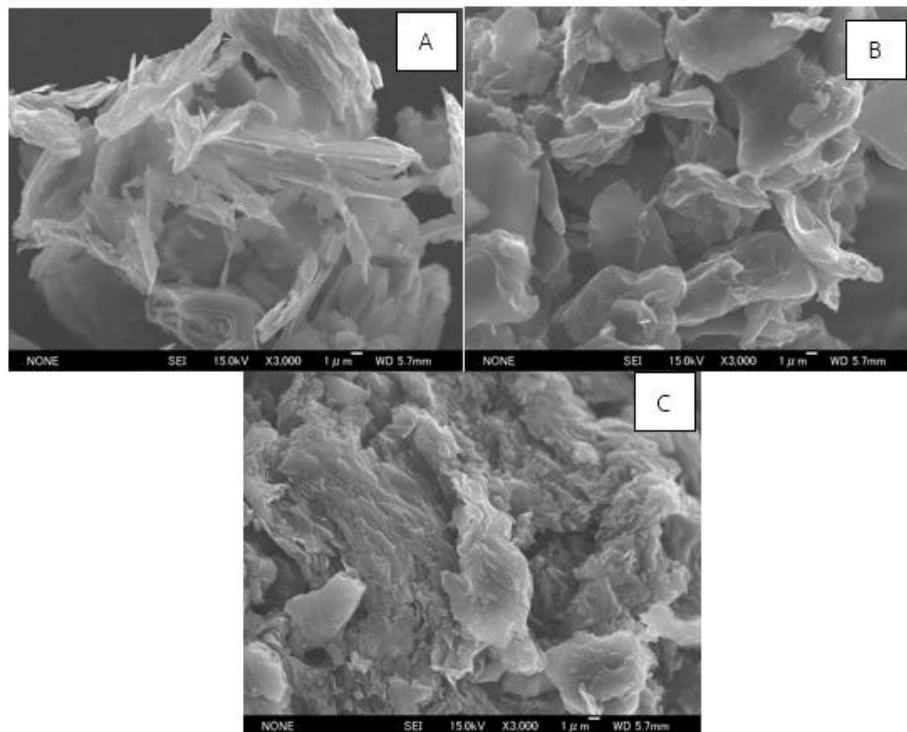


ภาพที่ 4-3 โครงสร้างของแกรไฟต์ [18]



ภาพที่ 4-4 โครงสร้างของแกรฟีนออกไซด์ [18]

4.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐาน



ภาพที่ 4-5 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FESEM เมื่อดูลักษณะพื้นฐานของแกรไฟต์(ภาพ A) แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า(ภาพ B) และแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี โม่ติฟายด์ฮัมเมอร์ (ภาพ C)

ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของ G H และ E ด้วยเทคนิค FESEM ที่อุณหภูมิห้อง ณ ความดันบรรยากาศ แสดงดังภาพที่ 4-5 จากภาพที่ 4-5 A แสดงให้เห็นถึงรูปร่างสัณฐานของ G ที่มีลักษณะเป็นผลึกพื้นผิวเรียบ ส่วนลักษณะสัณฐานของ E และ H แสดงในภาพที่ 4-5B และ 4-5C ตามลำดับ พบว่า ลักษณะสัณฐานของ E และ H มีความเป็นผลึกลดลงเมื่อเทียบกับ G แต่จากการสังเกตจะพบว่าลักษณะสัณฐานของ E จะมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมากกว่าสัณฐานของ H ซึ่งผลที่ได้ไปสอดคล้องกับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X – ray Diffraction: XRD) ที่บ่งชี้ว่า E จะมีทั้งความเป็นแกรไฟต์และแกรไฟต์ออกไซด์

4.1.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (CHN elemental analyzer)

เป็นเทคนิค การวิเคราะห์หาปริมาณ Carbon Hydrogen Oxygen และ Nitrogen ที่ได้จากการเผาไหม้ของตัวอย่าง โดยผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ

ตัวอย่าง	%C	%H	%N	%O
G	99.38	0.62	-	-
H	51.95	2.12	0.58	45.35
E	79.38	1.18	0.58	18.86

จากผลการทดลองพบว่า G มีองค์ประกอบของธาตุส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนและไฮโดรเจน โดยมีคาร์บอนอยู่ที่ร้อยละ 99.38 และไฮโดรเจนอยู่ที่ร้อยละ 0.62 ส่วน แกรไฟต์ออกไซด์สังเคราะห์ พบว่า H มีออกซิเจนในโครงสร้างถึงร้อยละ 45.35 ส่วน E จะพบออกซิเจนในโครงสร้างเพียงร้อยละ 18.86 นั้นแสดงให้เห็นถึงวิธีการสังเคราะห์ด้วยวิธีโม่ดีฟายด์ฮัมเมอร์จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นแกรไฟต์ออกไซด์ที่มากกว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ ในข้างต้น

4.1.5 การวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิว

ผลการวิเคราะห์ค่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวของเยื่อ KI CTS H E และ CP ณ ภาวะความเป็นกรดต่างเท่ากับความเป็นกรดต่างของน้ำเยื่อซึ่งเท่ากับ 6.5 ± 0.5 จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของเยื่อ KI มีค่าเท่ากับ -11.27 มิลลิโวลต์ เนื่องจากเยื่อมีองค์ประกอบของเซลลูโลสที่มีไฮดรอกซิลอยู่ในโครงสร้างซึ่งมีประจุไฟฟ้ามีค่าเป็นลบ ค่าความต่างศักย์โคโทซานมีค่าเท่ากับ +44.6 มิลลิโวลต์ เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากตอนเตรียมสารละลายโคโทซานต้องใช้สารละลายกรดอะซิติก ดังนั้น หมู่อะมิโนของโคโทซานสามารถแตกตัวเป็นไอออน (ionization) โดยที่โปรตอนจะเข้าไปจับกับหมู่อะมิโน ($-NH_2$) เกิดการโปรตอนตทำให้ หมู่อะมิโน ($-NH_2$) บนโคโทซานเปลี่ยนมา

อยู่ในรูปของแอมเนียมไอออน ($-\text{NH}_3^+$) [69] จึงเป็นเหตุให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นบวก ในขณะที่ค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในภาวะต่างหมู่อะมิโนจะไม่เกิดการโปรโตเนต ซึ่งจะอยู่ในรูปของ $-\text{NH}-$ [70] ส่วนสารแขวนลอย H และ E จะให้ค่าศักย์ไฟฟ้า -42.63 และ -0.32 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ เนื่องมาจากโครงสร้างของแกรฟีนออกไซด์ที่ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซีซึ่งมีสมบัติเป็นลบจึงเป็นเหตุที่ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นลบ แต่เนื่องด้วยวิธีการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีของ โมดิฟายด์อัมเมอร์มีการทำปฏิกิริยาโดยนำกรดซัลฟิวริกเข้มข้นเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงกับแกรไฟต์และใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตช่วยเพิ่มการออกซิไดซ์ในปฏิกิริยาที่มากขึ้น ทำให้ออกซิเจนที่เกิดในโครงสร้างของแกรฟีนออกไซด์ด้วยวิธีโมดิฟายด์อัมเมอร์อยู่ในรูปของหมู่ไฮดรอกซีที่สร้างพันธะกับวงอะโรมาติกมากกว่า ทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีประจุเป็นลบมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ที่มีการต่อกระแสไฟฟ้าเพื่อช่วยให้เกิดการถ่ายโอนของอิเล็กตรอนภายในระบบ ทำให้เกิดการกร่อนของแท่งแกรไฟต์ที่ทำการสังเคราะห์เกิดเป็นผงสีดำขนาดเล็ก แต่จากการวิเคราะห์ลักษณะด้วยเทคนิค XRD พบว่า การสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์จากวิธีทางเคมีไฟฟ้า จะให้บางส่วนที่มีลักษณะคล้ายกับแกรไฟต์จากผลของ FT-IR และส่วนเล็กๆ ปริมาณเล็กน้อยที่เก็บไปทำการทดลองซึ่งจะให้ผลเหมือนกับแกรฟีนซึ่งแสดงในภาคผนวก จ ซึ่งทำให้สรุปได้ว่า การสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าจะให้ผลิตภัณฑ์เป็น 3 ส่วนได้แก่ แกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์และแกรฟีน ด้วยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่หลากหลาย ทำให้ศักย์ไฟฟ้าของสารแขวนลอยที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากแกรฟีนออกไซด์ที่มีหมู่ไฮดรอกซีที่มีประจุเป็นลบ และส่วน CP มีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ $+31.2$ มิลลิโวลต์ เนื่องมาจากหมู่อะคริลาไมด์ที่มีการต่อระหว่างหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลซึ่งต่ออยู่เหมือนในรูปของเอไมด์เพียงแต่เปลี่ยนหมู่อะมิโนเป็นอะคริลาไมด์ที่มีโครงสร้างไนโตรเจนต่อกับแอลคิลที่ล้อมรอบ โดยไนโตรเจนจะทำหน้าที่เป็นประจุบวกที่เข้าทำปฏิกิริยา ดังนั้น ศักย์ไฟฟ้าของสารละลายที่เกิดขึ้นมีประจุเป็นบวก

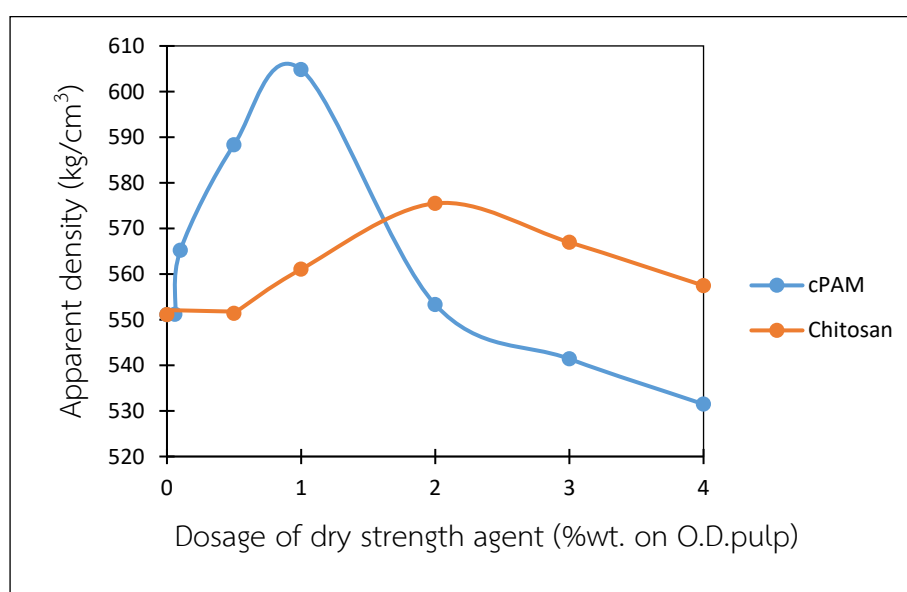
ตารางที่ 4-2 ค่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวของเยื่อ KI CTS H E และ CP ณ ภาวะความเป็นกรดต่างเท่ากับ 6.5 ± 0.5

	Zeta Potential (mV)
Pulp	-11.27
Chitosan	44.6
GOH	-42.63
GOE	-0.32
CPAM	31.2

4.2 สมบัติกระดาษกราฟที่มีการเติมสารเพิ่มความแข็งแรง

สมบัติกระดาษกราฟที่จะพิจารณาได้แก่ความหนาแน่น สมบัติด้านความแข็งแรงและ CIE $L^*a^*b^*$ ดังมีรายละเอียดดังนี้

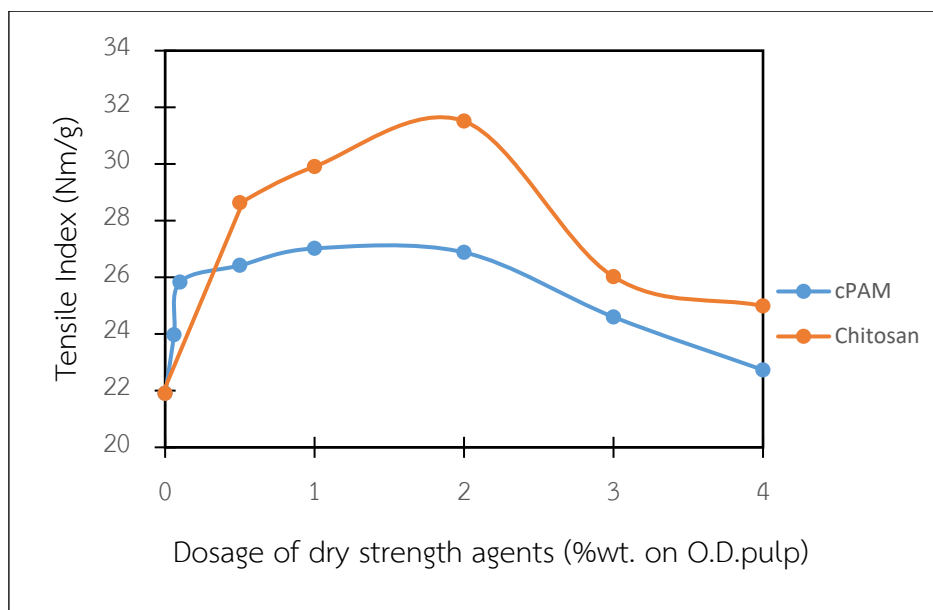
ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของกระดาษจะคำนวณจากน้ำหนักมาตรฐานหารความหนาของกระดาษแสดงดังภาพที่ 4-6 สมบัติด้านความแข็งแรงจะแสดงค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Index) ดังภาพที่ 4-7 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (Burst Index) ดังภาพที่ 4-8 ความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear Index) ดังภาพที่ 4-9 และความต้านแรงกดในแนววงแหวน (Ring crush resistance) ดังภาพที่ 4-10 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-6 ความหนาแน่นของกระดาษที่ทำการเติม cPAM เปรียบเทียบกับ ไคโทซาน

จากภาพที่ 4-6 พบว่าเมื่อทำการเติมสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งไม่ว่าจะเป็น CP หรือ CTS ต่างให้ผลในลักษณะเดียวกันกล่าวคือ เมื่อเติมสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นสูงขึ้นจนถึงจุดจุดหนึ่ง หากยังคงเติมสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งต่อไปอีกค่าความหนาแน่นกลับลดลง จากผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อใช้ CP เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งจะให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดที่ 604.83 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง แต่เมื่อใช้ CTS เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดที่ 588.35 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเติม CP ลงไปในน้ำเยื่อ หมู่อะคริลาไมด์ในโครงสร้างของแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์จะทำหน้าที่เหมือนสะพานเชื่อมระหว่างเส้นใยกับเส้นใยทำให้สามารถพาดผ่านได้ดีขึ้นส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น อีกทั้งหมู่อะคริลาไมด์ซึ่งมีประจุบวกจะทำให้เกิดการดูระหว่าง

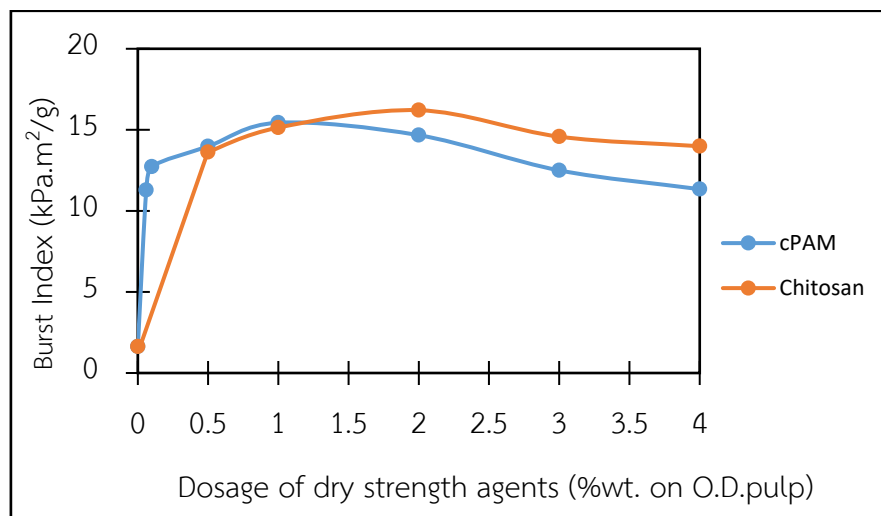
ประจุบวกและประจุลบบนเส้นใยด้วยแรงทางไฟฟ้า (Electrostatic interaction) โดยค่าความหนาแน่นมีค่าสูงสุดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง จากนั้นค่าความหนาแน่นจะลดลงเนื่องจากปริมาณประจุบวกที่มากเกินไปจะไปล้อมประจุลบและจะทำตัวเสมือนมีประจุล้อมรอบ ส่งผลให้ความหนาของกระดาษเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความหนาแน่นที่ได้มีค่าที่ลดลง [71] ส่วนการเติม CTS ก็ให้ผลในลักษณะเดียวกัน เนื่องจาก CTS มีประจุบวกจะทำหน้าที่ดูลประจุลบบนเส้นใย นอกจากนี้ยังมีการเกิดพันธะให้ไฮโดรเจนจากหมู่เอมีนของโคโทซานกับไฮดรอกไซด์ของเส้นใย โคโทซานจะทำหน้าที่เป็นตัวพาดผ่านระหว่างเส้นใยจึงทำให้ค่าความหนาแน่นมีค่ามากขึ้น แต่เมื่อทำการเติมมากไปโคโทซานซึ่งมีประจุบวกมากจะไปล้อมรอบประจุลบของเส้นใยและจะทำตัวเสมือนมีประจุบวกล้อมรอบจึงทำให้ความหนาของกระดาษมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลง แต่เมื่อนำค่าความหนาแน่นของ CTS มาทำการเปรียบเทียบกับ CP จะพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นในช่วงแรกของ CP (ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0-1 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง) จะมีค่าความหนาแน่นมากกว่า CTS เพราะ CP นอกจากจะทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงแล้วยังทำหน้าที่เป็นสารกักเก็บเส้นใยเมื่อเติมในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมก็จะช่วยในการกักเก็บเส้นใยขนาดเล็ก (fine) ได้มากขึ้นทำให้รูพรุนในกระดาษลดลง แต่หากเติมในระดับความเข้มข้นที่มากเกินไปจะทำให้ค่าความหนาแน่นลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากประจุบวกที่เกิดมากเกินไปของ CP จะทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนและแรงทางไฟฟ้าได้มากขึ้น เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็กส่งผลให้เกิดรูพรุนในกระดาษมากขึ้น ค่าความหนาแน่นที่ได้จึงมีค่าลดลงเมื่อเติม CP ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2-4 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้งลงในกระดาษ ส่วน CTS ต้องเติมในปริมาณมากกว่า เนื่องจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิว ตามตารางที่ 4-2 ของ CTS มีค่ามากกว่า CP แสดงให้เห็นถึงความเสถียรของ CTS ที่ชอบสร้างพันธะระหว่างโคโทซานเอง จึงพบว่าเมื่อมีการเติม CTS ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ค่าความหนาแน่นในช่วงระดับความเข้มข้นที่ร้อยละ 0-1 ไม่แสดงผลในทางที่ดีเท่าที่ควร แต่เมื่อมีการเติมปริมาณเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 2 ซึ่งให้ค่าความหนาแน่นสูงสุด แม้ค่าความหนาแน่นจะมีค่าลดลงแต่เมื่อเทียบกับ CP ก็ยังคงพบว่ามีค่าความหนาแน่นที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3-4 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้งที่มากกว่า CP เป็นสาเหตุมาจากขนาดศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวของ CTS มีประจุที่เยอะกว่า ขนาดของ CTS จึงใหญ่กว่า เมื่อทำการเติมในปริมาณที่มากเกินไป ประจุบวกของ CTS จะเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า ทำให้แม้จะเติมในปริมาณมากเกินไป ค่าความหนาแน่นของกระดาษที่เติม CTS จึงไม่ลดลงมากนักเมื่อเทียบกับ CP เนื่องจากเกิดรูพรุนภายในกระดาษที่มีขนาดเล็กกว่ากระดาษที่เติม CP



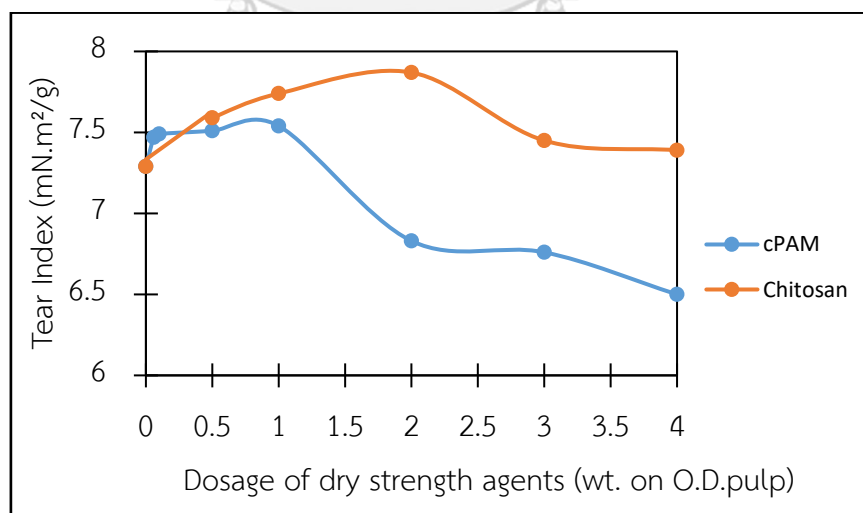
ภาพที่ 4-7 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ทำการเติม cPAM เปรียบเทียบกับ ไคโตซาน

นอกจากนี้ยังส่งผลต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษโดยพบว่า พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงด้านความแข็งแรงเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของ CP และ CTS ต่างแสดงผลเช่นเดียวกับพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงด้านความหนาแน่น ซึ่งจากภาพที่ 4-7 สำหรับความแข็งแรงต่อแรงดึง ภาพที่ 4-8 สำหรับความแข็งแรงต่อแรงด้นทะลุ ภาพที่ 4-9 สำหรับความแข็งแรงต่อแรงฉีก และภาพที่ 4-10 สำหรับความต้านแรงกดในแนววงแหวน (Ring crush resistance) พบว่า เมื่อทำการเติมสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งไม่ว่าจะเป็น CP หรือ CTS ต่างให้ผลในลักษณะเดียวกันกล่าวคือ เมื่อเติมสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงด้นทะลุ ความแข็งแรงต่อแรงฉีกและความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนของกระดาษสูงขึ้นจนถึงจุดจุดหนึ่ง หากยังคงเติมสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งต่อไปอีกค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงด้นทะลุ ความแข็งแรงต่อแรงฉีกและความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนของกระดาษกลับลดลง จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า เมื่อใช้ CP เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งจะให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงด้นทะลุ ความแข็งแรงต่อแรงฉีกและความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนของกระดาษสูงสุดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง แต่เมื่อใช้ CTS เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงด้นทะลุ ความแข็งแรงต่อแรงฉีกและความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนสูงสุดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง แต่เมื่อทำการเติม CP หรือ CTS ต่อไป ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงด้นทะลุ ความแข็งแรงต่อแรงฉีกและความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนมีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของกระดาษที่เมื่อนำค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงด้นทะลุ ความแข็งแรงต่อแรงฉีกและความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนเมื่อเติม CTS มาทำการเปรียบเทียบกับกรณีที่เติม

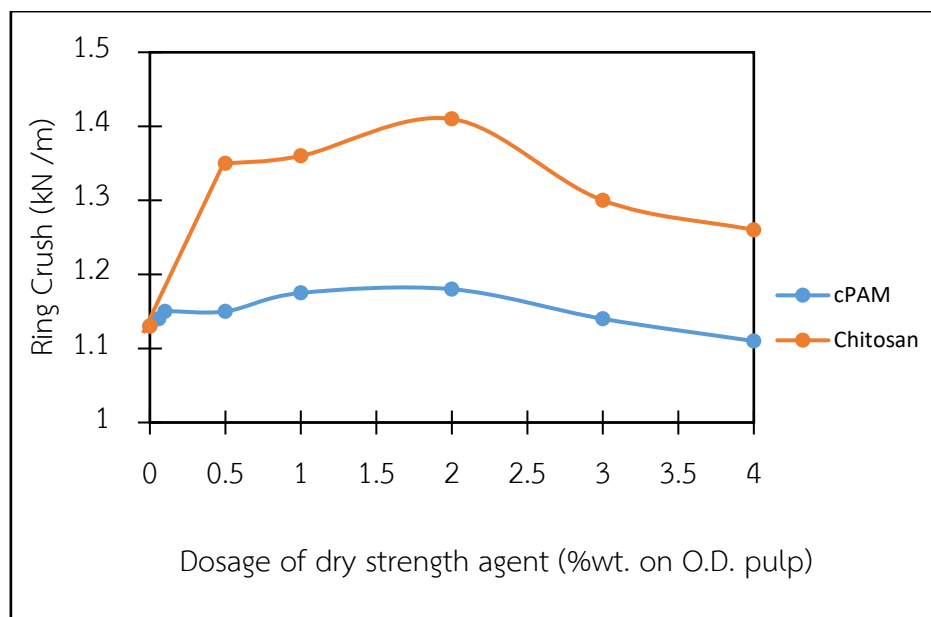
CP จะพบว่า ที่ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงด้นทะลุ ความแข็งแรงต่อแรงฉีกและความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนทุกระดับความเข้มข้น ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงในกรณีที่ได้เติม CTS จะมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงด้นทะลุ ความแข็งแรงต่อแรงฉีกและความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนในกรณีที่ได้เติม CP เป็นผลมาจากค่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวของ CTS มีค่าของศักย์ไฟฟ้าที่มากกว่า ทำให้เกิดการดูลประจุในระบบได้มากกว่า อีกทั้งยังสามารถเกิดการพาดผ่านเสมือนเป็นสะพานเชื่อมระหว่างเส้นใยและเส้นใยได้มากกว่า CP ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวที่ต่ำกว่า [72]



ภาพที่ 4-8 ค่าความแข็งแรงต่อแรงด้นทะลุของกระดาษที่ทำการเติม cPAM เปรียบเทียบกับ ไคโตซาน

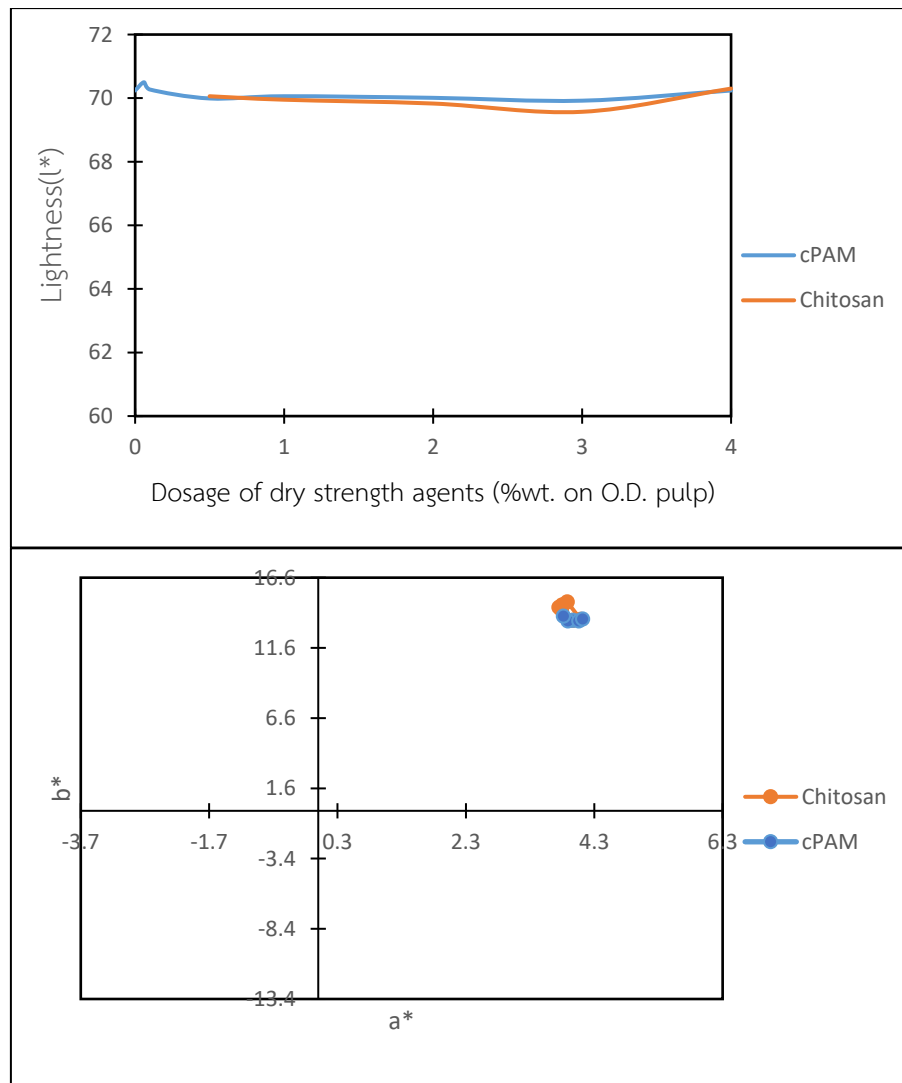


ภาพที่ 4-9 ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีก ของกระดาษที่ทำการเติม cPAM เปรียบเทียบกับ ไคโตซาน



ภาพที่ 4-10 ค่าความต้านแรงกดในแนววงแหวนของกระดาษที่ทำการเติม cPAM เปรียบเทียบกับ ไคโตซาน

ผลของ CIEL*a*b* ของกระดาษเมื่อเติมสาร CP และ CTS แสดงดังภาพที่ 4-11 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเติม CP ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ (ร้อยละ 0 0.06 0.1 0.5 1 2 3 และ 4 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง) และ เมื่อเติม CTS ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ (ร้อยละ 0 0.5 1 2 3 และ 4 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง) จะให้ค่าความสว่าง (L*) ไม่แตกต่างกัน เนื่องจาก CP และ CTS ที่เติมนั้นถูกทำให้อยู่ในรูปสารละลายและมีลักษณะสารละลายใสไม่มีสี จึงไม่ส่งผลต่อสีของกระดาษ ส่วนค่าสี CIEL*a*b* พบว่าค่า a* และ b* ไม่มีความแตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกระดาษที่มีการเติมสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งและไม่ทำการเติมสารเพิ่มความแข็งแรง และเมื่อนำมาเปรียบเทียบที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ก็พบว่าไม่เห็นความแตกต่าง ภาพที่ 4-11



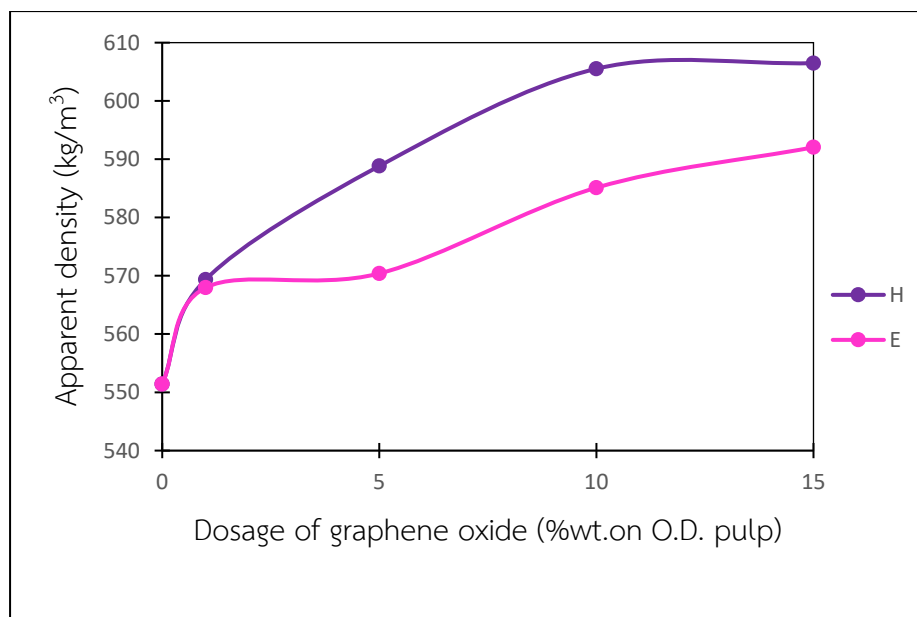
ภาพที่ 4-11 ค่า CIEL*a*b* ของกระดาษที่ทำการเติม cPAM เปรียบเทียบกับ ไคโทซาน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.3 สมบัติกระดาษคราฟต์ที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์

สมบัติกระดาษที่พิจารณาได้แก่ ความหนาแน่น สมบัติความแข็งแรง (ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ความแข็งแรงต่อแรงฉีก และความต้านทานแรงกดในวงแหวน) และ CIEL*a*b* โดยมีรายละเอียดดังนี้

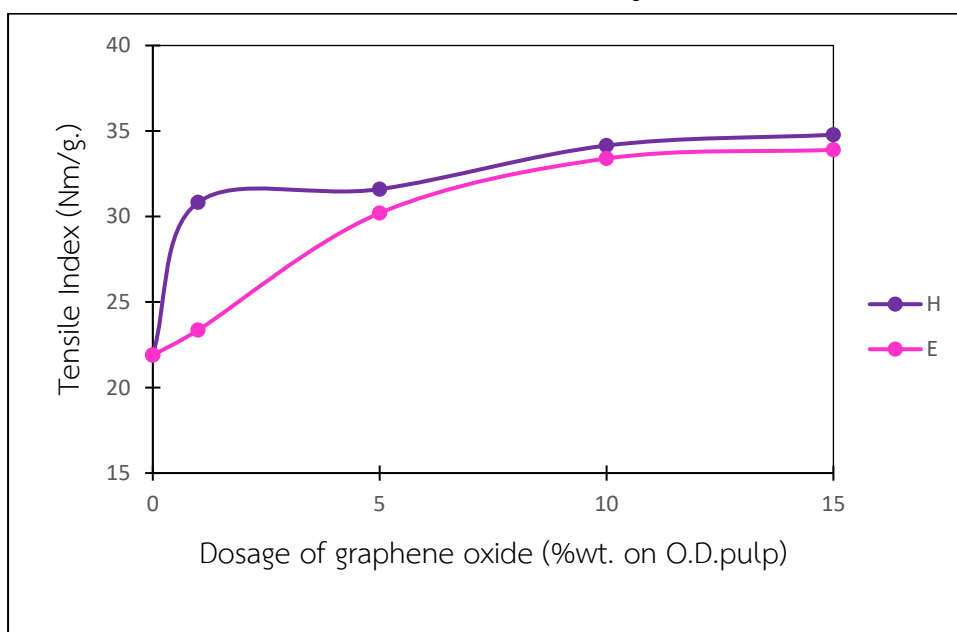
ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของกระดาษซึ่งคำนวณจากน้ำหนักมาตรฐานหารความหนาของกระดาษแสดงดังภาพที่ 4-12 สมบัติด้านความแข็งแรง โดยจะแสดงความแข็งแรงต่อแรงดึง ดังภาพที่ 4-13 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุดังภาพที่ 4-14 ความแข็งแรงต่อแรงฉีก ดังภาพที่ 4-15 และความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนดังภาพที่ 4-16 ตามลำดับ



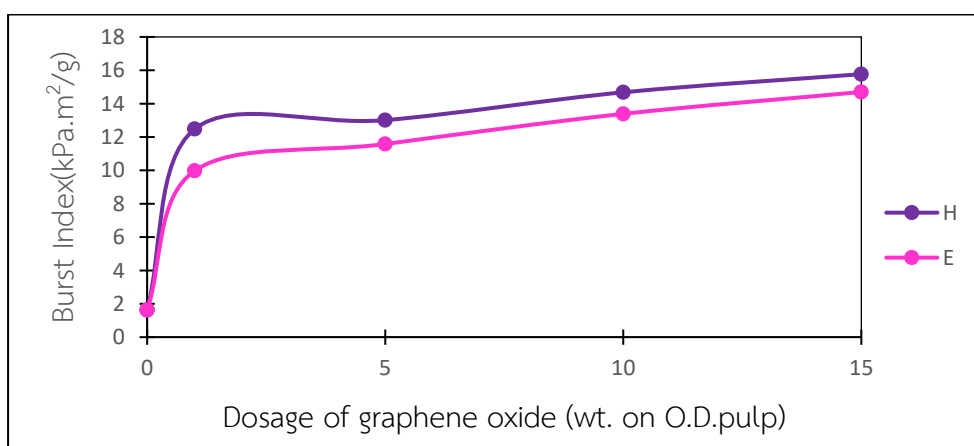
ภาพที่ 4-12 ค่าความหนาแน่นของกระดาษที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ตีฟายด์ฮัมเมอร์และทางเคมีไฟฟ้า

จากภาพที่ 4-12 พบว่าความหนาแน่นของกระดาษ ที่มีการเติม H มีค่าสูงกว่าความหนาแน่นของกระดาษที่ไม่มีการเติม H และเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของ H จากระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งเป็นร้อยละ 5 10 และ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง พบว่าความหนาแน่นของกระดาษมีค่าเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าจากการวิเคราะห์ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 4-2 พบว่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเยื่อมีค่า -11.27 มิลลิโวลต์และความต่างศักย์ไฟฟ้าของ H มีค่า -42.63 มิลลิโวลต์ จะทำให้เกิดการดึงดูดแบบไม่เสถียรของเยื่อและ H แต่เมื่อมีน้ำที่อยู่ในน้ำเยื่อ เป็นสื่อกลางจึงทำให้เยื่อและ H เข้าใกล้กัน โดยการสร้างพันธะผ่านพันธะไฮโดรเจนและพันธะโควาเลนต์ จึงทำให้เยื่อและ H เข้าใกล้กันและเมื่อนำเข้าสู่กระบวนการขึ้นแผ่น ซึ่งมีขั้นตอนการนำน้ำออกจากแผ่นกระดาษโดยใช้ปั๊มสูญญากาศ ซึ่งแรงดึงน้ำออกนี้ส่งผล ให้แกรฟีนออกไซด์และเส้นใยเกิดการแนบตัวเข้าหากันและสร้างพันธะให้ไฮโดรเจนและพันธะโควาเลนต์ นอกจากนี้ยังเกิดพาย-พาย ออบิทัลระหว่างเส้นใยกับแกรฟีนออกไซด์ จึงทำให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของ H และเมื่อทำการทดสอบสถิติ ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า การเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆมีผลต่อค่าความหนาแน่นของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญ (ดังภาคผนวก ก) ส่วนกระดาษคราฟต์ที่มีการเติม E แสดงผลความหนาแน่นเช่นเดียวกับกระดาษคราฟต์ที่มีการเติม H แต่จะแสดงค่าความหนาแน่นน้อยกว่าในทุกๆระดับความเข้มข้น (1 5 10 และ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจาก H มีหมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่พร้อมจะสร้างพันธะไฮโดรเจนและพันธะโควาเลนต์กับเส้นใยมากกว่าและยังพบ สัดส่วนร้อยละไฮโดรเจนและออกซิเจนสูงกว่าเมื่อเทียบกับ E (ดัง

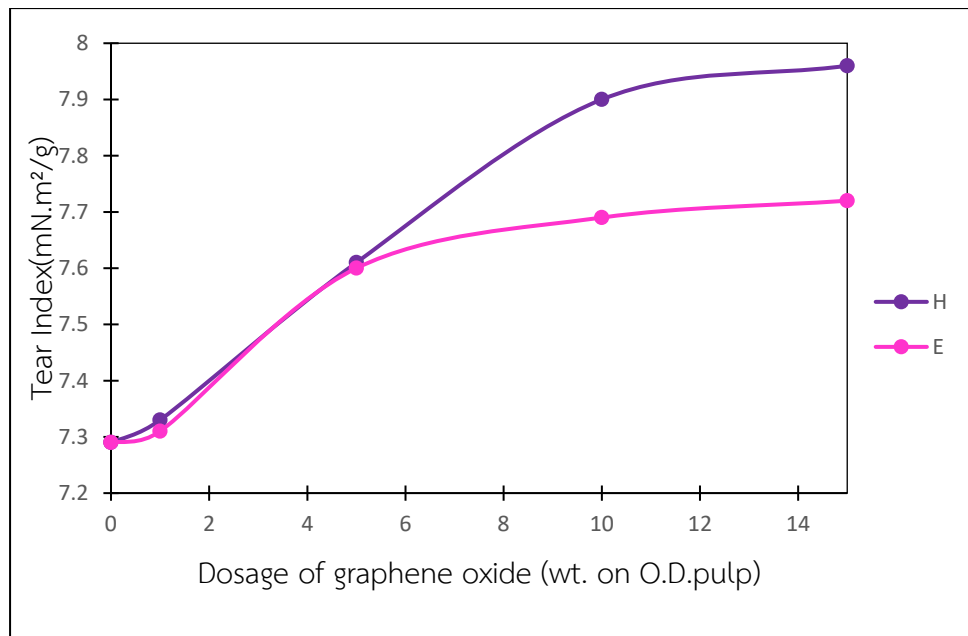
ผลวิเคราะห์ของ FTIR และ CHN analysis) จึงเป็นผลให้ความหนาของกระดาษมีค่ามากกว่า เมื่อเทียบกับกระดาษกราฟต์ที่มีการเติม H และกระดาษกราฟต์ที่มีการเติม E ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกันจึงส่งผลให้ความหนาแน่นของกระดาษกราฟต์ที่เติม H มากกว่ากระดาษกราฟต์ที่เติม E จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 606.48 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อเติม H ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้งและความหนาแน่นสูงสุดของ E 592.04 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อเติม E ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้งและเมื่อทำการทดสอบสถิติ ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่าความหนาแน่นของกระดาษที่เติม H และ E ความหนาแน่นของกระดาษที่เติม E มีความต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ(ดังแสดงในภาคผนวก ก)



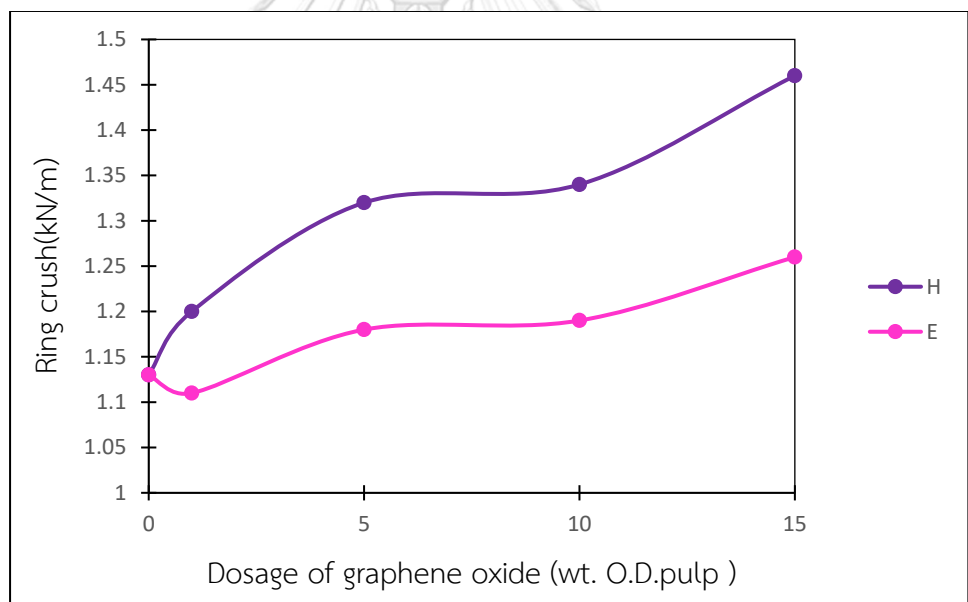
ภาพที่ 4-13 ความแข็งแรงตึงของกระดาษที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ตีพายด์ฮัมเมอร์และทางเคมีไฟฟ้า



ภาพที่ 4-14 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ตีพายด์ฮัมเมอร์และทางเคมีไฟฟ้า



ภาพที่ 4-15 ความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ดีฟายด์ฮัมเมอร์และทางเคมีไฟฟ้า

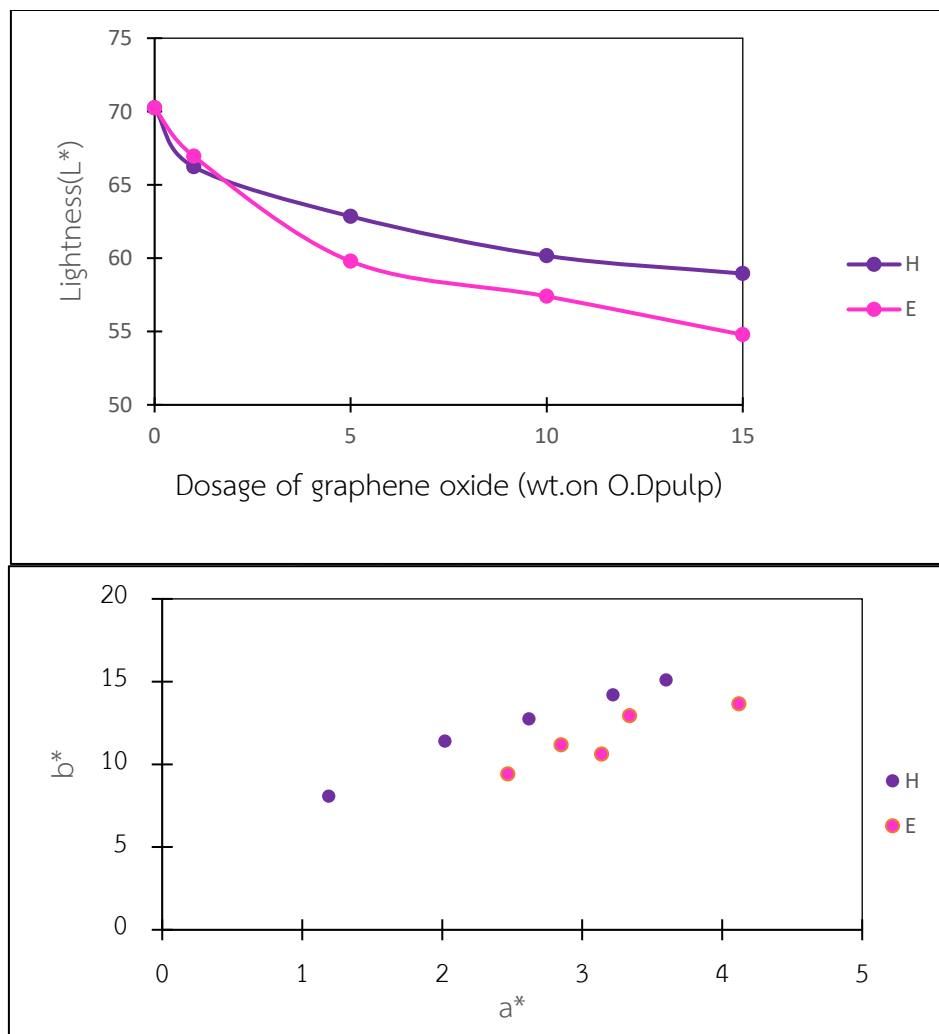


ภาพที่ 4-16 ความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนของกระดาษที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ดีฟายด์ฮัมเมอร์และทางเคมีไฟฟ้า

และยังส่งผลต่อสมบัติความแข็งแรงโดยพบว่าพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของ H และ E ต่างแสดงผลเช่นเดียวกับพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก และค่าความต้านทานแรงกดในแนววงแหวน

เมื่อมีการเติมแกรฟีนออกไซด์ แต่ดัชนีความแข็งแรงของกระดาษที่มีการเติม H จะมีค่าสูงกว่ากระดาษที่เติม E ทุกกรณี จึงทำการทดสอบสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า การเติมแกรฟีนออกไซด์ ชนิดแกรฟีนออกไซด์ ระดับความเข้มข้นของแกรฟีนออกไซด์ ต่างมีอิทธิพลต่อดัชนีความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญและยังพบว่ามีอันตรกิริยาระหว่างชนิดของแกรฟีนออกไซด์และระดับความเข้มข้นของแกรฟีนออกไซด์ต่างก็ส่งผลต่อดัชนีความแข็งแรง

CIEL*a*b*



ภาพที่ 4-17 ค่า CIEL*a*b* ของกระดาษที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์จากวิธีโมดิฟายด์ฮัมเมอร์และทางเคมีไฟฟ้า

ผลของ CIEL*a*b* เมื่อเติม H และ E แสดงดังภาพที่ 4-17 จากผลการทดลองพบว่า ค่าความสว่างลดลงเมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ลงในกระดาษ เนื่องจากแกรฟีนออกไซด์จาก H และ E เป็นผงสีดำ ดังนั้นเมื่อทำการเติมลงในกระดาษจึงลดค่าความสว่างของกระดาษ ส่วนค่าสี CIEL*a*b*

เมื่อเพิ่ม H หรือ E ระดับความเข้มข้นต่างๆจะให้ความเป็นสีแดง (a^* เป็นบวก) และความเป็นสีเหลือง (b^* เป็นบวก) มากขึ้น และสามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของสีอย่างชัดเจน เนื่องจาก Delta E มากกว่า 12 ดังแสดงในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ค่า Delta E ของกระดาษที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ดีฟายด์ฮัมเมอร์และทางเคมีไฟฟ้า

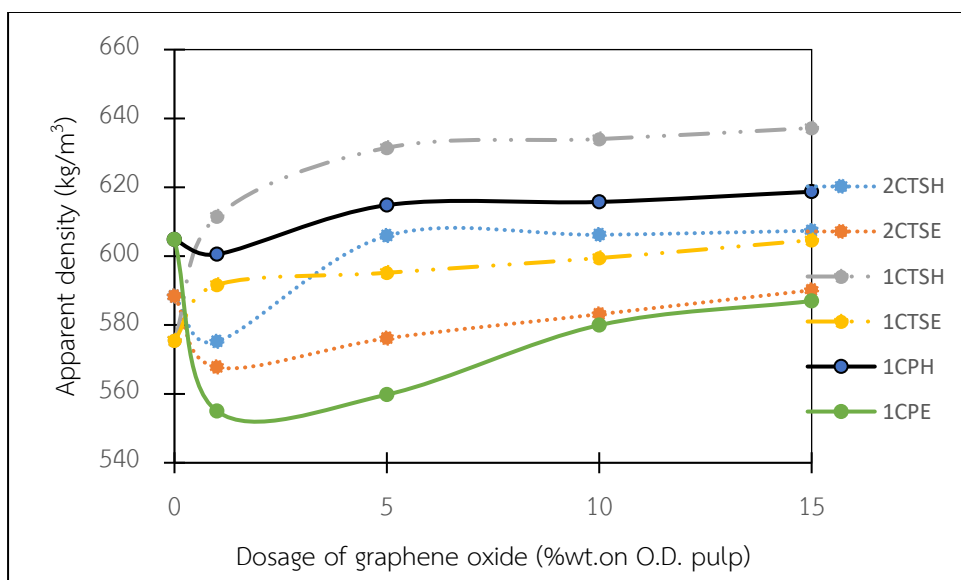
ระดับความเข้มข้นของ แกรฟีนออกไซด์ (ร้อยละ ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง)	Delta E	
	H	E
0	0	0
1	4.1807	4.2995
5	7.6336	12.475
10	10.4225	15.0673
15	11.875	17.3911

4.4 สมบัติกระดาษของคอมโพสิตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์

จากผลสมบัติกระดาษของกระดาษกราฟต์ที่มีการเติมสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งและกระดาษกราฟต์ที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ พบว่า เมื่อเติม CTS ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ให้สมบัติด้านความแข็งแรงสูงสุดและเมื่อเติม CP ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งให้สมบัติความแข็งแรงสูงสุด สมบัติด้านความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของแกรฟีนออกไซด์ ดังนั้นจึงเลือกใช้สถานะเหล่านี้ ในการจัดทำคอมโพสิตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์เพื่อศึกษาสมบัติกระดาษ เพื่อเปรียบเทียบผลของ CP กับ CTS ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน และมีการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ จึงเลือกศึกษาผลรวมของสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งกับแกรฟีนออกไซด์ โดย (ก) เลือกใช้ CP ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ผสมกับ H ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ 1CPH หากผสมกับ E ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ จะใช้สัญลักษณ์ 1CPE (ข) เลือกใช้ CTS ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ผสมกับ H ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ จะใช้สัญลักษณ์ 1CTSH หากนำมาผสมกับ E ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ จะใช้สัญลักษณ์ 1CTSE และ (ค) เลือกใช้ CTS ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 ของน้ำหนักเยื่อแห้งผสมกับ H ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ จะใช้สัญลักษณ์ 2CTSH ถ้าใช้ E แทน H ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ จะใช้สัญลักษณ์ 2CTSE สมบัติกระดาษที่พิจารณาได้แก่ ค่าความหนาแน่น

สมบัติความแข็งแรง (ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงด้นทะลุ ความแข็งแรงต่อแรงฉีก ความต้านทานแรงกดในแนววงแหวน) และ CIEL*a*b* โดยมีรายละเอียดดังนี้

ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของกระดาษซึ่งคำนวณจากน้ำหนักมาตรฐานหารความหนาของกระดาษแสดงดังภาพที่ 4-18 สมบัติด้านความแข็งแรงโดยแสดงค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ดังภาพที่ 4-19 ความแข็งแรงต่อแรงด้นทะลุดังภาพที่ 4-20 ความแข็งแรงต่อแรงฉีก ดังภาพที่ 4-21 และความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนดังภาพที่ 4-22 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-18 ค่าความหนาแน่นของกระดาษของคอมโพสิตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์

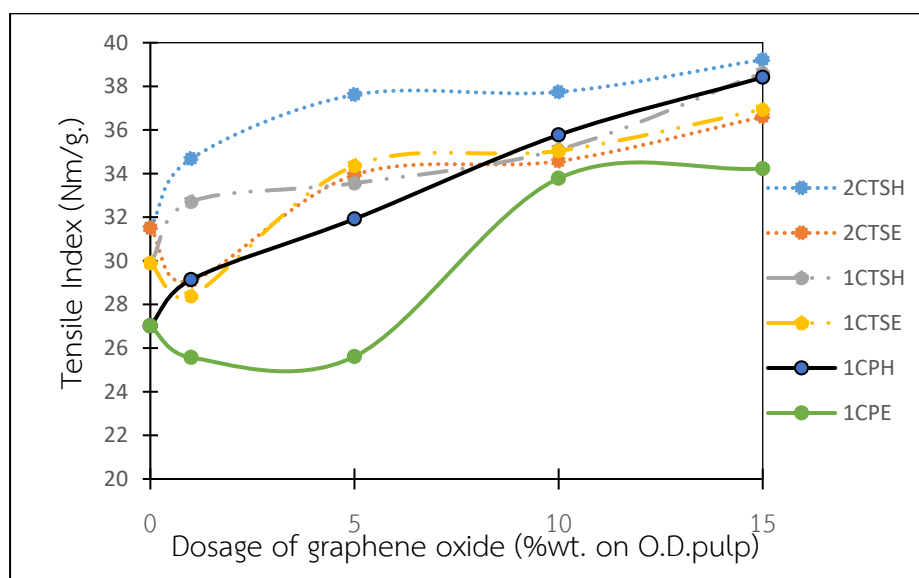
จากค่าความหนาแน่นที่แสดงดังภาพที่ 4-18 จะพบว่าเมื่อพิจารณา 1CPH ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 5 10 และ 15 พบว่า ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ ยกเว้นที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 เป็นผลมาจากค่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวของ H และ CP มีค่าเท่ากับ -42.63 มิลลิโวลต์และ 31.2 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ค่าศักย์บนพื้นผิวของทั้งคู่มีค่าสูงและมีประจุตรงข้ามกันจึงมีแรงดึงดูดให้เกิดการสร้างพันธะระหว่าง CP กับ H ก่อนที่จะไปสร้างพันธะกับเยื่อ ทำให้ค่าความหนาแน่นที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 มีค่าลดลง ส่วนแนวโน้มค่าความหนาแน่นของ 1CPE มีแนวโน้มลดลงเมื่อเติม E ที่ร้อยละ 1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และเมื่อทำการเติมที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5 10 และ 15 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง ค่าความหนาแน่นก็มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้ทำการเติม E จะพบว่า แม้จะเติมที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 ซึ่งเป็นการเติมที่ระดับความเข้มข้นสูงสุด ค่าความหนาแน่นที่ได้ก็ยังมีค่าน้อยกว่ากระดาษที่ไม่ได้ทำการเติม E สาเหตุมาจากผลการวิเคราะห์ของ FTIR และ CHN analysis ของ E มีหมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่พร้อมจะสร้างพันธะไฮโดรเจนและพันธะโควาเลนต์กับเส้นใยแต่มีค่าที่ค่อนข้างต่ำ ส่วนสัดส่วนร้อยละไฮโดรเจนและออกซิเจนก็มี

สัดส่วนของออกซิเจนต่ำกว่า อีกทั้งจากผลการวิเคราะห์จากข้อ 4.1 จะพบว่า E มีความหลากหลายทางผลิตภัณฑ์ที่ได้ จึงทำให้ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลง แนวโน้มค่าความหนาแน่นของ E มีค่าที่ไม่เป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ แต่หากเพิ่มปริมาณความเข้มข้น แนวโน้มของค่าความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้น [73] จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลค่าความหนาแน่นระหว่าง 1CPH และ 1CPE พบว่า 1CPH แสดงความค่าความหนาแน่นสูงกว่ากรณีของ 1CPE เนื่องจาก H มีศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิว -42.63 มิลลิโวลต์ ส่วน E มีเพียง -0.32 มิลลิโวลต์ และเส้นใย มีค่าศักย์ไฟฟ้า -11.2 มิลลิโวลต์ ขณะที่ CP มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 31.2 มิลลิโวลต์ ฉะนั้น H และเส้นใยจึงมีแรงดึงดูดที่จะทำให้ CP เข้าหา เพื่อสร้างพันธะมากกว่า E และเส้นใย จึงเป็นเหตุให้ค่าความหนาแน่นและความแข็งแรงของ 1CPH สูงกว่า 1CPE เมื่อพิจารณา 1CTSH และ 1CTSE ต่างแสดงผลลักษณะเดียวกับ 1CPH และ 1CPE กล่าวคือเมื่อเติม H กับสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง จะให้ค่าความหนาแน่นและสมบัติความแข็งแรงสูงกว่าเมื่อเติม E กับสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง

เมื่อพิจารณา 1CTSH ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 5 10 และ 15 พบว่า ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ เป็นผลมาจากค่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวของ H และ CTS สามารถเกิดการพาดผ่านระหว่างเส้นใยได้ดีเพราะ CTS และ H ต่างก็มีค่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวที่สูงและมีประจุตรงข้ามกัน ดังนั้นจึงมีโอกาสจะเกิดการพาดผ่านระหว่างเส้นใยได้ดียิ่งขึ้น และยิ่งมีการเติมปริมาณ H ที่เพิ่มขึ้น จะยิ่งเกิดพันธะไฮโดรเจน แรงทางไฟฟ้า พันธะไอออนิก มากยิ่งขึ้น ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของกระดาษที่เพิ่มขึ้นและยังส่งผลต่อสมบัติด้านความแข็งแรงอีกด้วย ส่วน 1CTSE มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับ 1CTSH แต่ค่าความหนาแน่นที่ได้มีค่าน้อยกว่า เนื่องจาก E มีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อเกิดปฏิกิริยาจึงทำให้ค่าความหนาแน่นไม่ดีเท่าที่ควร ส่วน 2CTSH และ 2CTSE จะพบว่า มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับ 1CTSH และ 1CTSE แต่จะพบค่าความหนาแน่นลดลงที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 ซึ่งเป็นผลมาจากค่าศักย์ไฟฟ้าของ CTS และ H มีค่าสูงจึงมีโอกาสการสร้างพันธะซึ่งกันละกัน [74] ทำให้ CTS และ H เกิดการสร้างพันธะกันก่อน ค่าความหนาแน่นที่ได้จึงมีค่าลดลง ส่วน 2CTSE เป็นไปดังเช่น 2CTSH เพียงแต่ค่าความหนาแน่นที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าที่ความเข้มข้นทุกระดับ

หากเปรียบเทียบคู่ของ 1CTSH กับ 1CTSE และ 2CTSH กับ 2CTSE ก็จะให้ผลในลักษณะนี้เช่นกัน ที่เป็นเช่นนี้เพราะโครงสร้างของ H มีหมู่ฟังก์ชันต่างๆ มากมาย (ดังผลวิเคราะห์จาก FTIR) ที่พร้อมจะสร้างพันธะไฮโดรเจนกับเส้นใยและสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง เมื่อเทียบกับ E นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลรวมของสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้ง ที่เติม E แล้วให้ผลต่ำกว่าเมื่อเติม H เนื่องจากแกรฟีนออกไซด์ที่ได้จากวิธีทางเคมีไฟฟ้ายังมีบางส่วนที่เป็นแกรไฟต์ ซึ่งเป็นสารที่ค่อนข้างเสถียรในการเกิดพันธะ ฉะนั้นจึงให้สมบัติความแข็งแรงต่ำกว่า นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบสถิติ ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อหาความสำคัญของระดับความเข้มข้นของแกรฟีน

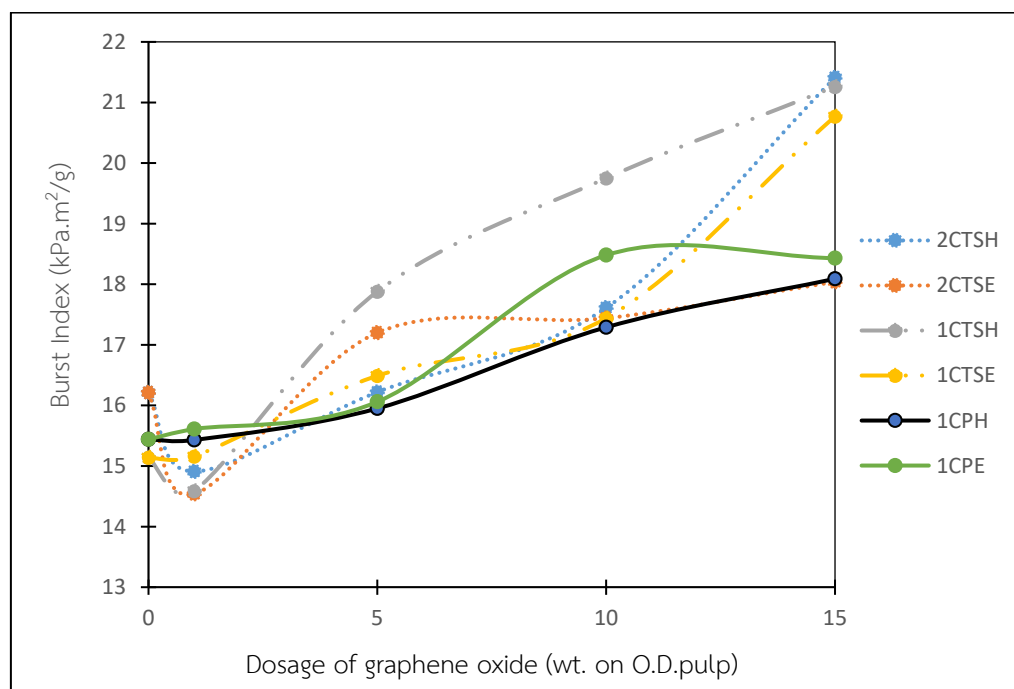
ออกไซด์ร้อยละ 0 1 5 10 และ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ชนิดของแกรฟีนออกไซด์ (H และ E) และ อันตรกิริยาของสารที่ระดับความเข้มข้นของแกรฟีนออกไซด์กับชนิดของแกรฟีนออกไซด์ พบว่า ต่าง ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความหนาแน่นและสมบัติความแข็งแรง (ดังภาคผนวก ก)



ภาพที่ 4-19 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษของคอมโพสิตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์

ส่วนค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ 2CTSH กับ 2CTSE พบว่ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีระดับความเข้มข้นของ H และ E เพิ่มขึ้น เนื่องจาก H และ E สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจน ให้เกิดการพาดผ่านระหว่างเส้นใยมากยิ่งขึ้น โดยพบว่ากระดาษที่มีการเติม H จะให้ค่าความแข็งแรง ต่อแรงดึงมากกว่า E ในทุกกรณี เนื่องจาก H มีศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิว -42.63 มิลลิโวลต์ ส่วน E มีเพียง -0.32 มิลลิโวลต์ และเส้นใย มีค่าศักย์ไฟฟ้า -11.2 มิลลิโวลต์ ขณะที่ CTS มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 44.6 มิลลิโวลต์ ฉะนั้น H และเส้นใยจึงมีแรงดึงดูดที่จะทำให้ CTS เข้าหา เพื่อสร้างพันธะมากกว่า E และ เส้นใย จึงเป็นเหตุให้ค่าความแข็งแรงของ 2CTSH สูงกว่าและ 2CTSE ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับ 1CTSH และ 1CTSE ส่วน 1CPH และ 1CPE จะมีแนวโน้มลักษณะเช่นเดียวกันกับ 1CTSH และ 1CTSE เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง CTS และ CP ที่การเติม H พบว่า ทุกระดับความเข้มข้นที่มีการเติม CTS ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่สูงกว่า CP โดยพบว่า กระดาษที่มีการเติม E 2CTSE 1CTSE และ 1CPE ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงจะมีค่าที่ลดลงเนื่องจากแกรฟีน ออกไซด์เป็นสารที่มีโครงสร้างที่มีความเป็นลบสูงจึงชอบที่จะสร้างพันธะกับพอลิเมอร์ที่มีลักษณะสาย ยาวที่ระดับความเข้มข้นต่ำๆ [75] ดังเช่น CTS และ CP มีลักษณะโครงสร้างพอลิเมอร์สายยาวทำให้ E ชอบที่จะจับกับ CTS และ CP ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง ซึ่งจะพบว่าผลการทดลองที่

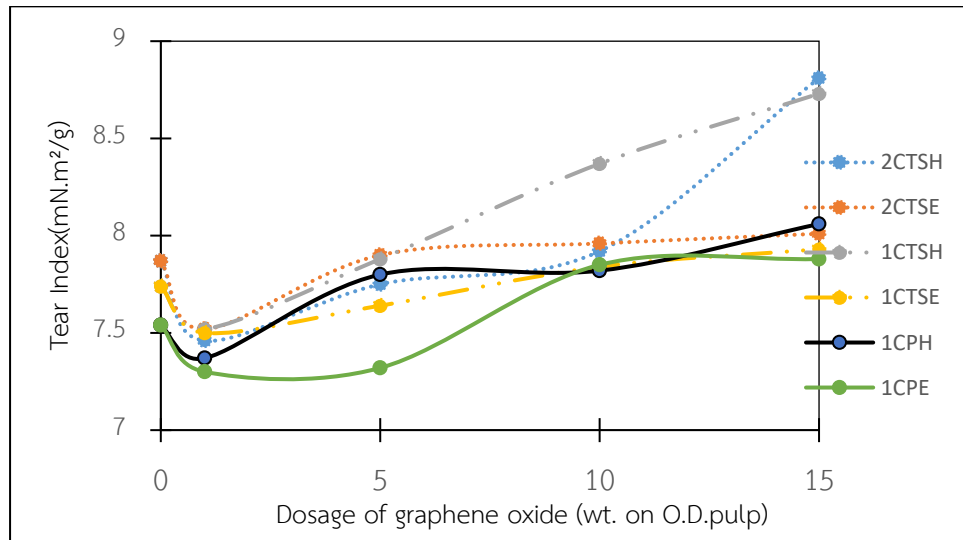
ได้ไม่สอดคล้องกับค่าความหนาแน่น เนื่องมาจากค่าความหนาแน่นจะหาได้จากการคำนวณค่าน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษหรรด้วยค่าเฉลี่ย 5 ตำแหน่งของความหนารอบกระดาษ แต่การวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงจะวัดแค่บริเวณตรงกลางแผ่นกระดาษเท่านั้น ค่าที่ได้จึงไม่สอดคล้องซึ่งกันและกัน



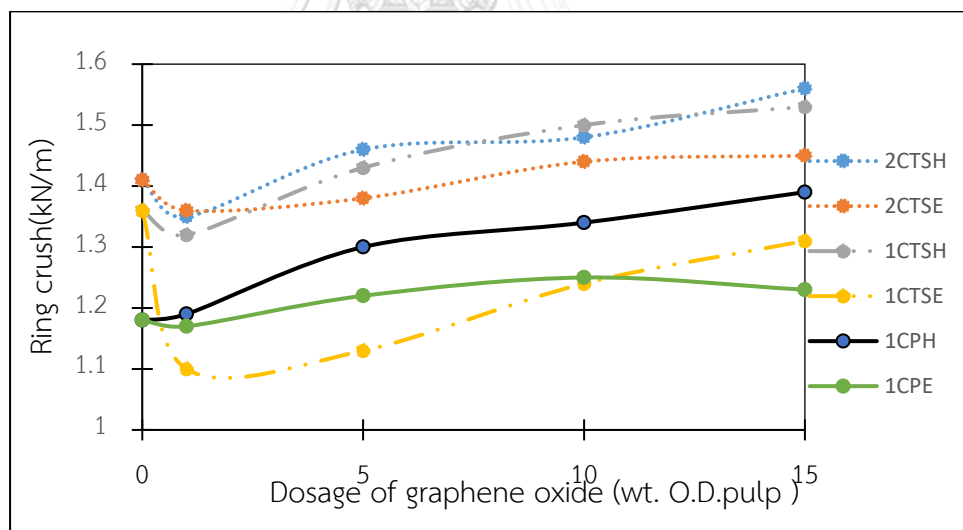
ภาพที่ 4-20 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงตันทะลุของกระดาษของคอมโพสิตกระดาษคราฟต์แกรฟีนออกไซด์

ส่วนแนวโน้มค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงตันทะลุของกระดาษ 2CTSH กับ 2CTSE และ 1CTSH กับ 1CTSE และ 1CPH กับ 1CPE พบว่ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีระดับความเข้มข้นของ H และ E เพิ่มขึ้น เนื่องมาจาก H และ E สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนให้เกิดการพาดผ่านระหว่างเส้นใยมากยิ่งขึ้น โดยพบว่ากระดาษที่มีการเติม H จะให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงตันทะลุมากกว่า E ในทุกกรณี เนื่องจาก H มีศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิว -42.63 มิลลิโวลต์ ส่วน E มีเพียง -0.32 มิลลิโวลต์ และเส้นใยมีค่าศักย์ไฟฟ้า -11.2 มิลลิโวลต์ ขณะที่ CTS มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 44.6 มิลลิโวลต์ ฉะนั้น H และเส้นใยจึงมีแรงดึงดูดที่จะทำให้ CTS เข้าหา เพื่อสร้างพันธะมากกว่า E และเส้นใย และในกรณีเดียวเมื่อมีการเติม CTS และ CP จะพบว่า CTS จะให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงตันทะลุที่มากกว่า CP ที่ระดับการเติมร้อยละ 1 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง เนื่องมาจาก CTS มีประจุบวกที่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับ H หรือ E และเส้นใยได้ดีกว่า เพราะมีค่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวที่มากกว่า CP โดยจากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นร้อยละ 1 ของการเติม H และ E ทุกชนิดกระดาษจะมีค่าลดลง ซึ่งมีสาเหตุมาจากแกรฟีนออกไซด์เป็นสารที่โครงสร้างที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวมีความเป็นลบมาก ดังนั้น แกรฟีนออกไซด์จึงชอบที่จะสร้างพันธะกับพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างสายยาวที่ระดับความเข้มข้นต่ำ จึงเป็นสาเหตุให้ที่

ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าลดลง [75] เพื่อยืนยันผลที่เกิดขึ้นจึงมีการนำสารแขวนลอยของคอมโพสิตไปทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวแสดงในหัวข้อ 4.1.5 ส่วนค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีก ดังภาพที่ 4-21 และความต้านทานแรงกดในแนววงแหวนดังภาพที่ 4-22 มีแนวโน้มเช่นเดียวกับ ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ



ภาพที่ 4-21 ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษของคอมโพสิตกระดาษคราฟต์แกรฟีนออกไซด์



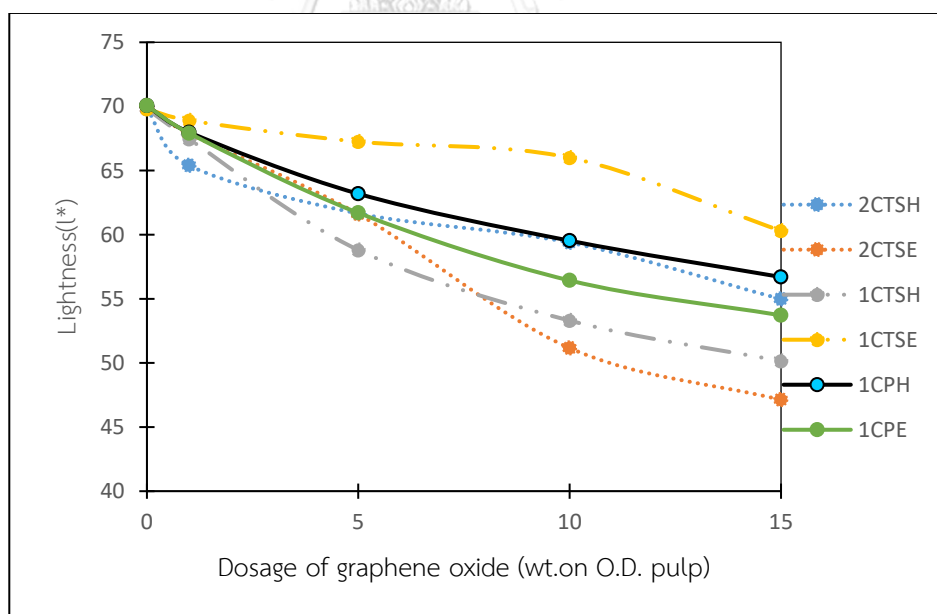
ภาพที่ 4-22 ค่าความต้านทานแรงกดในแนววงแหวน ของกระดาษของคอมโพสิตกระดาษคราฟต์แกรฟีนออกไซด์

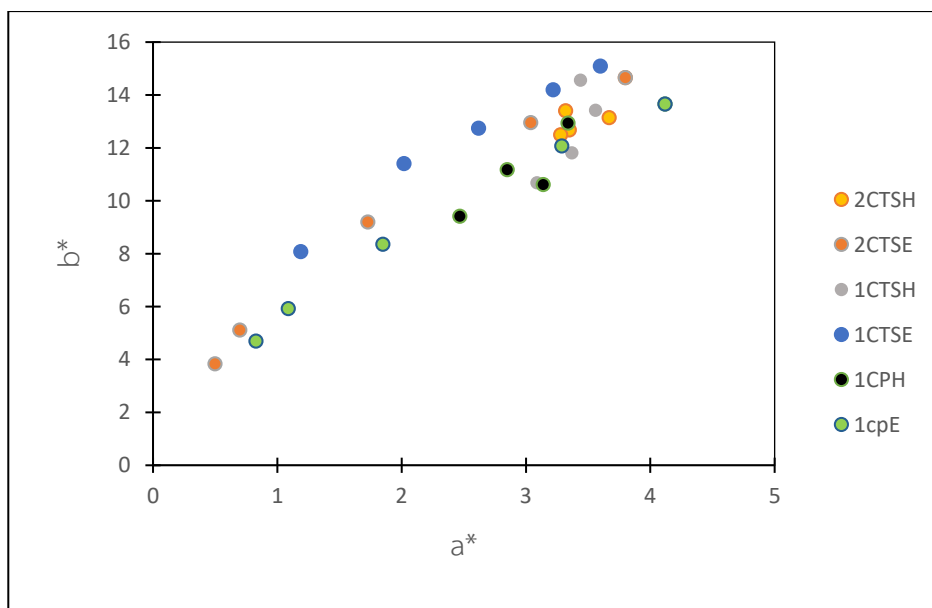
ผลของ CIEL*a*b* เมื่อเติมทั้งสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งกับแกรฟีนออกไซด์ ดังแสดงภาพที่ 4-23 จากผลการทดลองพบว่าค่าความสว่างลดลงเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของ H และ E ภาพที่ 4-23 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ (H และ E) จะแสดงความเป็นสีแดงมากขึ้น (a* มีค่าเป็นบวก) และแสดงความเป็นสีเหลือง (b* มีค่าเป็นบวก) จึงเป็นเหตุให้กระดาษที่มี

การเติม H หรือ E มีสีที่เข้มขึ้นเมื่อเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้ทำการเติม H และ E และสีจะเข้มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ H และ E ซึ่งสามารถสังเกตเห็นความแตกต่างได้ด้วยตาเปล่าจากค่า delta E >12 แสดงดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 แสดงค่า Delta E ของกระดาษของคอมโพสิตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์

ความเข้มข้น (ร้อยละน้ำหนักเยื่อแห้ง)	Delta E					
	2CTSH	2CTSE	1CTSH	1CTSE	1CPH	1CPE
0	0	0	0	0	0	0
1	4.6748	2.6098	2.4388	1.2991	2.8411	3.2017
5	8.5719	9.9127	11.1691	3.5479	8.1378	10.385
10	11.0785	20.9706	16.8969	5.419	12.2353	16.1704
15	15.3648	25.1659	20.2922	11.8213	14.604	19.1609





ภาพที่ 4-23 ค่า CIEL*a*b* ของกระดาษของคอมโพลีตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์

ส่วนที่ 2 หมึกนำไฟฟ้า

แกรฟีนออกไซด์ที่เลือกใช้ในส่วนนี้ คือแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโม่ติฟายด์ฮัมเมอร์ สารที่ใช้ในการรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ได้แก่ ไฮดราซีนโมโนไฮเดรต (Hydrazine monohydrate) ที่ระดับความเป็นกรดต่างเท่ากับ 9.5 ± 0.5 ซึ่งปรับความเป็นกรดต่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ RHH_{NaOH} และ กรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid) ที่ระดับความเป็นกรดต่างเท่ากับ 9.5 ± 0.5 ซึ่งปรับความเป็นกรดต่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และ สารละลายแอมโมเนีย ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ RHL_{NaOH} และ RHL_{NH_3} ตามลำดับ

4.5 การวิเคราะห์ลักษณะของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์

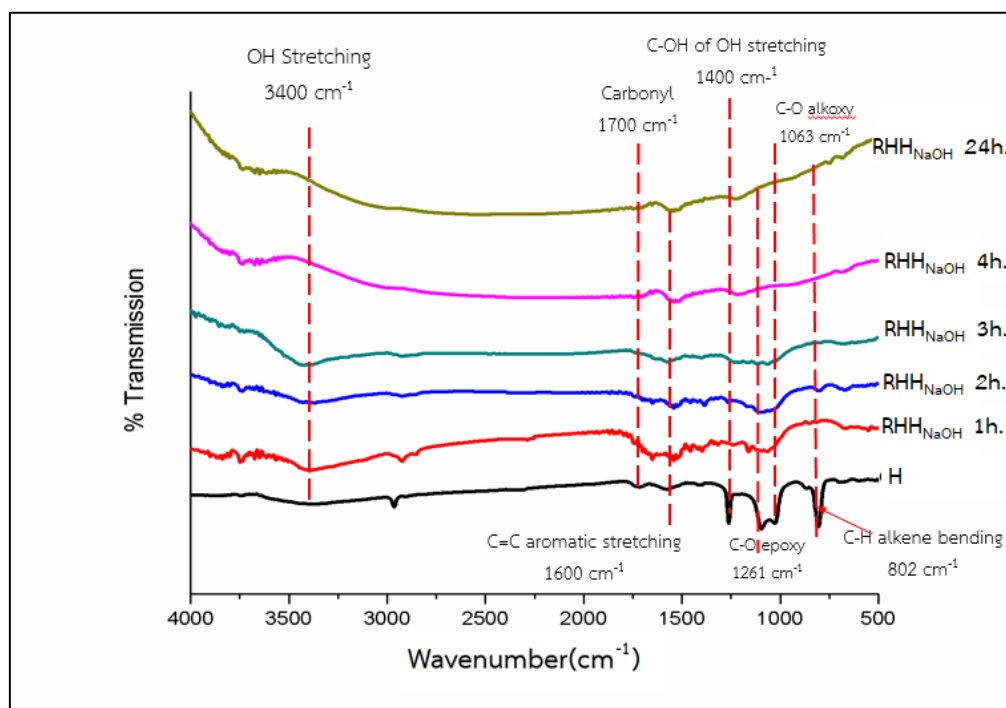
การวิเคราะห์ลักษณะของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์จะใช้เทคนิค FTIR เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชัน เฉพาะ ใช้เทคนิค XRD เพื่อศึกษาโครงร่างผลึก ใช้เทคนิค FESEM เพื่อศึกษาลักษณะสัญญาณ

4.5.1 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทร สโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเฉพาะของ RHH_{NaOH} RHL_{NaOH} และ RHL_{NH_3} ที่ใช้เวลาในการรีดิวซ์ต่างๆ ดังแสดงภาพที่ 4-24 ภาพที่ 4-26 และภาพที่ 4-27 ตามลำดับ เพื่อทราบเวลาที่ เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยารีดักชัน

4.5.1.1 การรีดิวซ์สารแกรฟีนออกไซด์ด้วยสารไฮดราซีนโมโนไฮเดรต ในภาวะ

ต่าง (pH= 9-10)



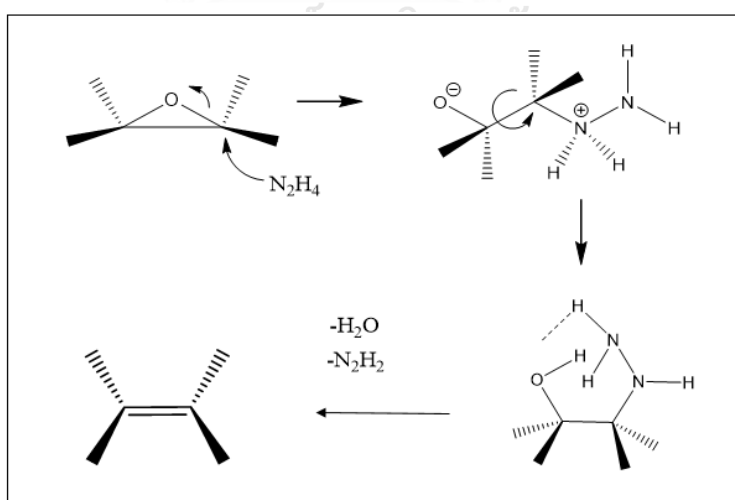
ภาพที่ 4-24 ผลการทดสอบลักษณะของแกรฟีนออกไซด์เปรียบเทียบกับรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ด้วยไฮดราซีนโมโนไฮเดรต ในภาวะที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นต่างด้วยเทคนิค FTIR

จากภาพที่ 4-24 พบว่า สเปกตรัมของ H แสดง การสั่นที่ความถี่ 3424 เซนติเมตร⁻¹ บ่งบอกถึงการสั่นของฟังก์ชันไฮดรอกไซด์ (OH-Stretching) การสั่นที่ความถี่ 1577 เซนติเมตร⁻¹ บ่งบอกถึงฟังก์ชันคาร์บอนและคาร์บอนในวงอะโรมาติก (C=C aromatic) และที่ความถี่ 2964 เซนติเมตร⁻¹ บ่งบอกถึงการสั่นของฟังก์ชันพันธะเดี่ยวระหว่างคาร์บอนต่อกับไฮโดรเจน (C-H Stretching) นอกจากนี้ยังพบ พีคที่แสดงถึงการสั่นของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (C=O Stretching) ที่ 1714 เซนติเมตร⁻¹ การสั่นของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนซึ่งต่างกับไฮดรอกไซด์ (C-OH Stretching) ณ 1415 เซนติเมตร⁻¹ การสั่นของหมู่ฟังก์ชันระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนของหมู่อีพอกซี (C-O epoxy) ณ 1261 เซนติเมตร⁻¹ การสั่นของหมู่ฟังก์ชันระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนของหมู่แอลคอกซี (C-O alkoxy) ณ 1095 เซนติเมตร⁻¹ และการสั่นของหมู่ฟังก์ชันระหว่างไฮโดรเจนกับคาร์บอนแบบพันธะคู่ (CH₂= CH₂ bending) ณ 806 เซนติเมตร⁻¹ [67] หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของแกรฟีนออกไซด์จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีโมดิฟายด์ฮัมเมอร์

ส่วนสเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์ที่ผ่านปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้ไฮดราซีนโมโน

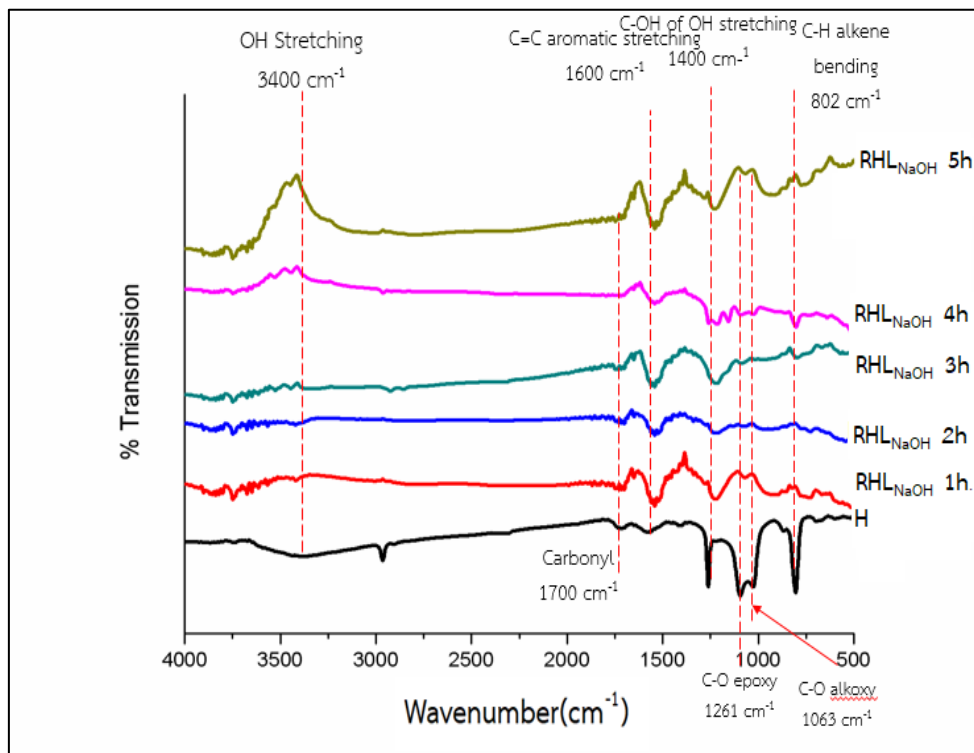
ไฮเดรตในสถานะที่เป็นต่างโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิค FTIR ที่ระยะเวลาการรีดิวซ์ 1-3 ชั่วโมง (RHH_{NaOH} 1h, RHH_{NaOH} 2h, RHH_{NaOH} 3h ในภาพที่ 4-24) ยังคงพบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวแต่ความเป็นพีคจะลดลงตามระยะเวลาที่มากขึ้นจนกระทั่งที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง (RHH_{NaOH} 4h ดังแสดงในภาพที่ 4-24) จะพบการสั่นที่มีความถี่ 1600 เซนติเมตร⁻¹ และ 1700 เซนติเมตร⁻¹ แสดงลักษณะของพันธะคู่ในวงอะโรมาติกและหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิล (C=O Stretching) ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการสังเคราะห์รีดิวซ์เกิดขึ้น ทำให้มีโครงสร้างเป็นคาร์บอนต่อกับไฮโดรเจนของวงอะโรมาติก ส่วนการสั่นที่มีความถี่ 3396 เซนติเมตร⁻¹ 1400 เซนติเมตร⁻¹ 1261 เซนติเมตร⁻¹ 1063 เซนติเมตร⁻¹ และ 802 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงลักษณะที่สำคัญของหมู่ไฮดรอกซิล (OH Stretching) พันธะของคาร์บอนซึ่งต่ออยู่กับหมู่ไฮดรอกซิล พันธะของคาร์บอนที่ต่ออยู่กับออกซิเจนของหมู่เอพอกซีและแอลคอกซี และคาร์บอนที่ต่ออยู่กับไฮโดรเจนของพันธะคู่ ตามลำดับ ได้หายไปอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มระยะเวลาที่รีดิวซ์เป็น 24 ชั่วโมง (RHH_{NaOH} 24h ดังแสดงในภาพที่ 4-24) จะพบลักษณะเช่นเดียวกันกับสเปกตรัมของ RHH_{NaOH} 4h จึงกล่าวได้ว่า H ได้ถูกรีดิวซ์ด้วยไฮดราซีนโมโนไฮเดรตเป็น RHH_{NaOH} เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยารีดิวซ์อย่างน้อย 4 ชั่วโมง ก็เพียงพอ ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้ RHH_{NaOH} 4h สำหรับการศึกษาขั้นต่อไป

เมื่อทำการรีดิวซ์โดยใช้ไฮดราซีนโมโนไฮเดรตในสถานะที่เป็นต่าง ไฮดราซีนโมโนไฮเดรตจะเข้าทำปฏิกิริยาผ่านกลไกการเกิดแบบ SN_2 เสมือนเป็นนิวคลีโอไฟล์วิ่งไปยังคาร์บอนที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโตรไฟล์ซึ่งต่ออยู่กับวงเอพอกซี ทำให้วงเอพอกซีเกิดการแตกออกอยู่ในรูปของ อะมิโนเอซีรีดิน จากนั้นน้ำและไดเอซีนเกิดการหลุดออก ได้ผลิตภัณฑ์เกิดเป็นพันธะคู่ [7] ดังแสดงในภาพ 4-25



ภาพที่ 4-25 กลไกการเกิดการรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์โดยใช้ ไฮดราซีนโมโนไฮเดรต ในสถานะที่เป็นต่าง [7]

4.5.1.2 การรีดิวซ์สารแกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอสคอบิก (L-ascorbic acid) ในภาวะที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นต่าง (pH= 9-10)

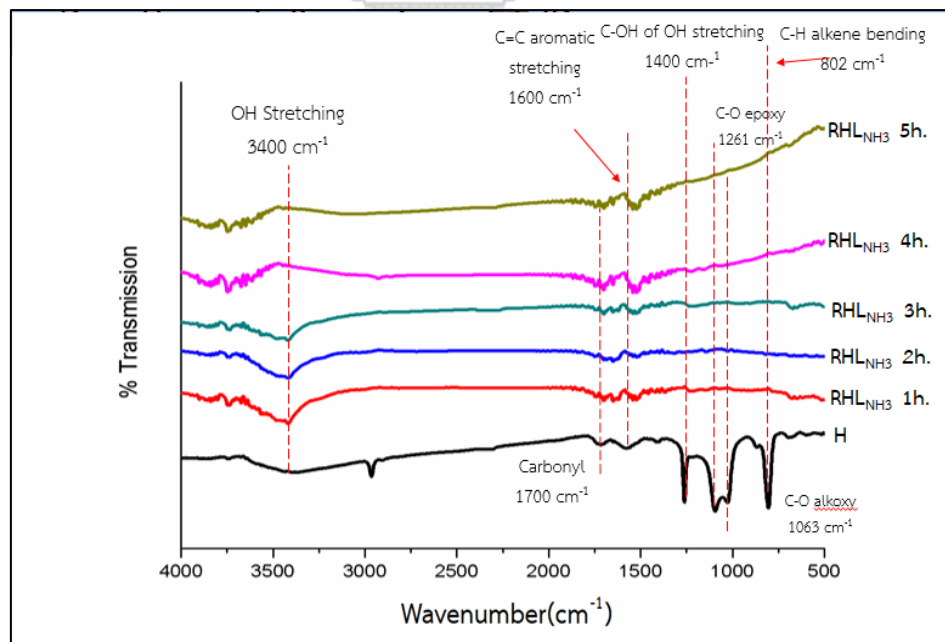


ภาพที่ 4-26 ผลการทดสอบลักษณะของแกรฟีนออกไซด์เปรียบเทียบกับรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอสคอบิก (L-ascorbic acid) ในภาวะที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นต่างด้วยเทคนิค FTIR

จากภาพที่ 4-26 พบว่า สเปกตรัมของ H แสดงการสั่น ที่ความถี่ 3424 เซนติเมตร⁻¹ บ่งบอกถึงการสั่นของฟังก์ชันไฮดรอกไซด์ (OH-Stretching) การสั่นที่ความถี่ที่ 1577 เซนติเมตร⁻¹ บ่งบอกถึงฟังก์ชันคาร์บอนและคาร์บอนในวงอะโรมาติก (C=C aromatic) และที่ความถี่ 2964 เซนติเมตร⁻¹ บ่งบอกถึงการสั่นของฟังก์ชันพันธะเดี่ยวระหว่างคาร์บอนต่อกับไฮโดรเจน (C-H Stretching) นอกจากนี้ยังพบ พีกที่แสดงถึงการสั่นของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (C=O Stretching) ที่ 1714 เซนติเมตร⁻¹ การสั่นของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนซึ่งต่างกับไฮดรอกไซด์ (C-OH Stretching) ณ 1415 เซนติเมตร⁻¹ การสั่นของหมู่ฟังก์ชันระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนของหมู่อีพอกซี (C-O epoxy) ณ 1261 เซนติเมตร⁻¹ การสั่นของหมู่ฟังก์ชันระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนของหมู่แอลคอกซี (C-O alkoxy) ณ 1095 เซนติเมตร⁻¹ และการสั่นของหมู่ฟังก์ชันระหว่างไฮโดรเจนกับคาร์บอนแบบพันธะคู่ (CH₂=CH₂ bending) ณ 806 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของแกรฟีนออกไซด์จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีโม่ดีฟายด์ฮัมเมอร์ ส่วนสเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์ที่ผ่าน

ปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้กรดแอสคอร์บิกในสภาวะที่เป็นต่างโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ด้วยเทคนิค FTIR ที่ระยะเวลาการรีดิวซ์ 1 ชั่วโมง (RHL_{NaOH} 1h. ดังภาพที่ 4-26) จะพบการสั่นที่ความถี่ $1400 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$ และ $1600 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$ แสดงลักษณะของพันธะของคาร์บอนซึ่งต่ออยู่กับหมู่ไฮดรอกซีและ พันธะคู่ในวงอะโรมาติกตามลำดับ ส่วนการสั่นที่ความถี่ $3396 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$ $1700 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$ $1261 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$ $1063 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$ และ $802 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$ ซึ่งแสดงลักษณะที่สำคัญของหมู่ไฮดรอกซิล (OH Stretching) หมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิล (C=O Stretching) พันธะของคาร์บอนซึ่งต่ออยู่กับหมู่ไฮดรอกซี พันธะของคาร์บอนที่ต่ออยู่กับออกซิเจนของหมู่อีพอกซีและแอลกอฮอล์ และคาร์บอนที่ต่ออยู่กับไฮโดรเจนของพันธะคู่ ตามลำดับ ได้หายไปอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการรีดิวซ์เป็น 2 3 4 และ 5 ชั่วโมง (RHL_{NaOH} 2h. RHL_{NaOH} 3h. RHL_{NaOH} 4h. และ RHL_{NaOH} 5h. ดังภาพที่ 4-26) ต่างแสดงผลสเปกตรัมเช่นเดียวกันกับสเปกตรัมที่ใช้ระยะเวลาในการรีดิวซ์ 1 ชั่วโมง จึงแสดงว่าเมื่อใช้แอล-แอสคอร์บิกเป็นสารรีดิวซ์ในสภาวะที่เป็นต่างซึ่งใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะใช้ระยะเวลาเพียง 1 ชั่วโมง ในการรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ เนื่องจากการใช้ไฮดราซีนโมโนไฮเดรตเป็นสารรีดิวซ์ต้องใช้เวลา 4 ชั่วโมงจึงทำการเลือก RHL_{NaOH} 4h และจากสเปกตรัมของ RHL_{NaOH} 1h ก็ไม่ต่างจาก RHL_{NaOH} 4h จึงเลือกใช้ RHL_{NaOH} 4h ในขั้นตอนต่อไป

4.5.1.3 การรีดิวซ์สารแกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid) ในภาวะที่ใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นต่าง (pH= 9-10)

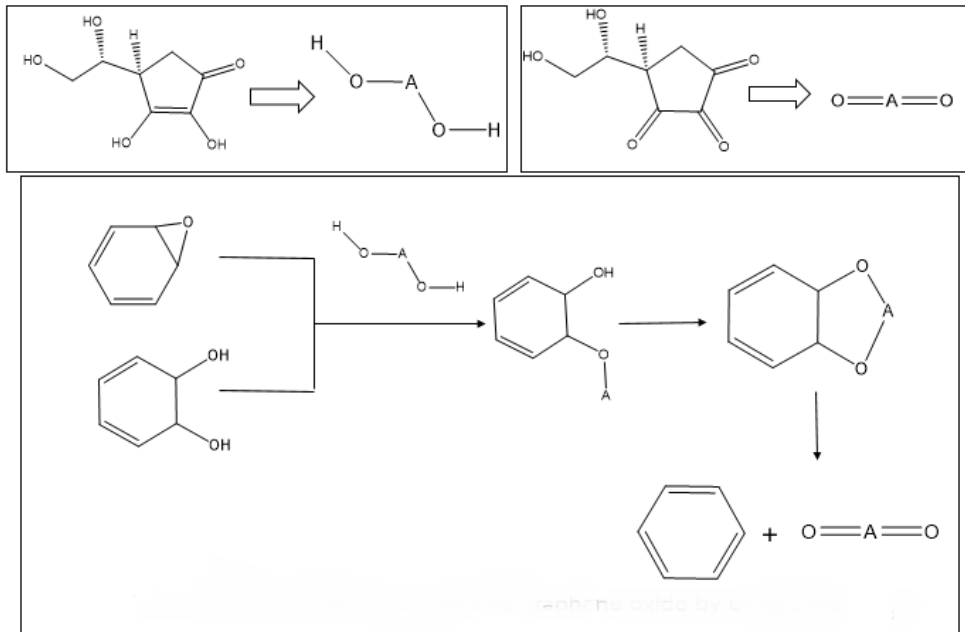


ภาพที่ 4-27 ผลการทดสอบลักษณะของแกรฟีนออกไซด์เปรียบเทียบกับรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid) ในภาวะที่ใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นต่างด้วยเทคนิค FTIR

จากภาพที่ 4-27 พบว่า สเปกตรัมของ H แสดงการสั่นที่ความถี่ 3424 เซนติเมตร⁻¹ บ่งบอกถึงฟังก์ชันไฮดรอกไซด์ (OH-Stretching) การสั่นที่ความถี่ 1577 เซนติเมตร⁻¹ บ่งบอกถึงฟังก์ชันคาร์บอนและคาร์บอนในวงอะโรมาติก (C=C aromatic) และที่ความถี่ 2964 เซนติเมตร⁻¹ บ่งบอกถึงการสั่นของฟังก์ชันพันธะเดี่ยวระหว่างคาร์บอนต่อกับไฮโดรเจน (C-H Stretching) นอกจากนี้ยังพบ พีคที่แสดงถึงการสั่นของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (C=O Stretching) ที่ 1714 เซนติเมตร⁻¹ การสั่นของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนซึ่งต่างกับไฮดรอกไซด์ (C-OH Stretching) ณ 1415 เซนติเมตร⁻¹ การสั่นของหมู่ฟังก์ชันระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนของหมู่อีพอกซี (C-O epoxy) ณ 1261 เซนติเมตร⁻¹ การสั่นของหมู่ฟังก์ชันระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนของหมู่แอลคอกซี (C-O alkoxy) ณ 1095 เซนติเมตร⁻¹ และการสั่นของหมู่ฟังก์ชันระหว่างไฮโดรเจนที่ต่อแบบพันธะคู่ (CH₂= CH₂ bending) ณ 806 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของแกรฟีนออกไซด์จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีโม่ดีฟายด์อัมเมอร์ ส่วนสเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์ที่ผ่านปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้กรดแอล-แอสคอบิกในสถานะที่เป็นต่างโดยใช้สารละลายแอมโมเนียด้วยเทคนิค FTIR ระยะเวลาการรีดิวซ์ 1 ชั่วโมง (RHL_{NH3} 1h. ดังภาพที่ 4-27) จะพบการสั่นที่ความถี่ 3396 เซนติเมตร⁻¹ และ 1600 เซนติเมตร⁻¹ แสดงลักษณะของหมู่ไฮดรอกซี (OH Stretching) และ พันธะคู่ในวงอะโรมาติกตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการสังเคราะห์รีดิวซ์เกิดขึ้น ทำให้มีโครงสร้างเป็นคาร์บอนต่อกับไฮโดรเจนของวงอะโรมาติก 1400 เซนติเมตร⁻¹ 1261 เซนติเมตร⁻¹ 1063 เซนติเมตร⁻¹ และ 802 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงลักษณะที่สำคัญของพันธะของคาร์บอนซึ่งต่ออยู่กับหมู่ไฮดรอกซี หมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิล (C=O Stretching) พันธะของคาร์บอนซึ่งต่ออยู่กับหมู่ไฮดรอกซี พันธะของคาร์บอนที่ต่ออยู่กับออกซิเจนของหมู่อีพอกซีและแอลคอกซี และคาร์บอนที่ต่ออยู่กับไฮโดรเจนของพันธะคู่ ตามลำดับ ได้หายไปอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการรีดิวซ์เป็น 2 3 4 และ 5 ชั่วโมง (RHL_{NH3} 2h. RHL_{NH3} 3h. RHL_{NH3} 4h. และ RHL_{NH3} 5h. ดังภาพที่ 4-27) ต่างแสดงผลสเปกตรัมเช่นเดียวกันกับสเปกตรัม RHL_{NH3} 1h. จึงแสดงว่าเมื่อใช้แอล-แอสคอบิกเป็นสารรีดิวซ์ในสถานะที่เป็นต่างซึ่งใช้สารละลายแอมโมเนีย จะใช้ระยะเวลาเพียง 1 ชั่วโมง ในการรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ เนื่องจากการใช้ไฮดราซีนโมโนไฮเดรตเป็นสารรีดิวซ์ต้องใช้เวลา 4 ชั่วโมงจึงทำการเลือก RHL_{NH3} 4h และจากสเปกตรัมของ RHL_{NH3} 1h ก็ไม่ต่างจาก RHL_{NH3} 4h จึงเลือกใช้ RHL_{NH3} 4h ในขั้นตอนต่อไป

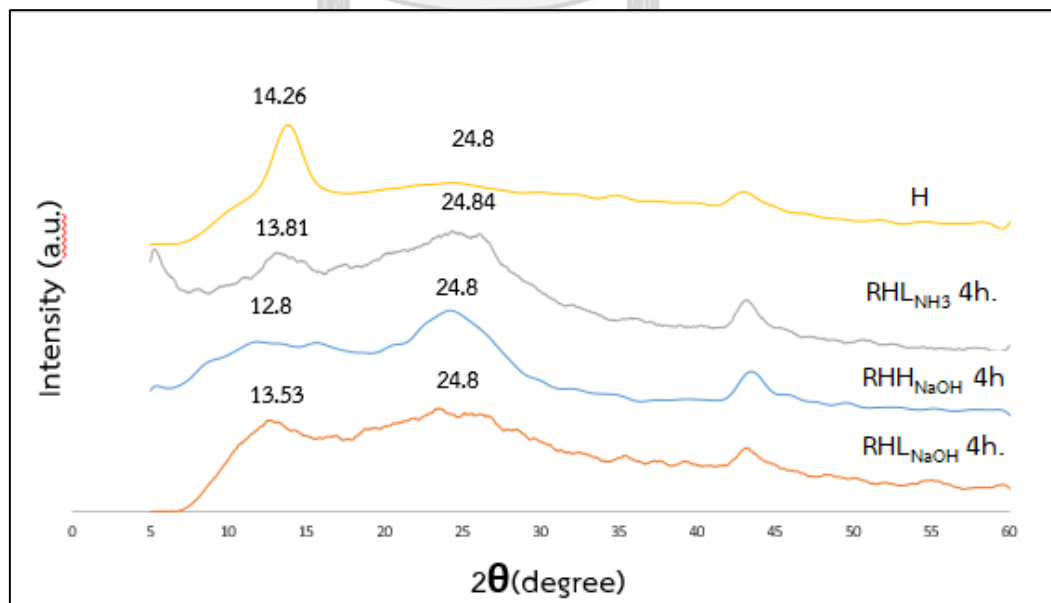
เมื่อทำการรีดิวซ์โดยใช้กรดแอล-แอสคอบิก กรดแอล-แอสคอบิกจะเปลี่ยนรูปโดยเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปของประจุลบของกรดแอล-แอสคอบิก ประจุลบของแอล-แอสคอบิกจะเข้าทำปฏิกิริยาผ่านกลไกการเกิดแบบ SN₂ แต่ประจุลบของแอล-แอสคอบิกจะเข้าทำที่บริเวณด้านหลังของวง เสมือนเป็นนิวคลีโอไฟล์วิ่งไปยังคาร์บอนที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโตรไฟล์ โดยสามารถทำได้สอง

ตำแหน่งคือ ตำแหน่งของวงอีพอกซีและบริเวณที่มีหมู่ไฮดรอกซี 2 ตำแหน่งหรือไดอัล เกิดสารชั้นมัธยฐาน จากนั้นจึงเกิดเป็นผลิตภัณฑ์รีติวซ์แกรฟีนและกรดแอล-แอสคอบิกเกิดการออกซิไดซ์เป็นกรดดีไฮโดรแอสคอบิก [22] ดังแสดงในภาพ 4-28



ภาพที่ 4-28 กลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์โดยใช้กรดแอล-แอสคอบิกในสถานะที่เป็นต่าง [22]

4.5.2 โครงร่างผลึกของ H ที่สังเคราะห์ ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction: XRD)

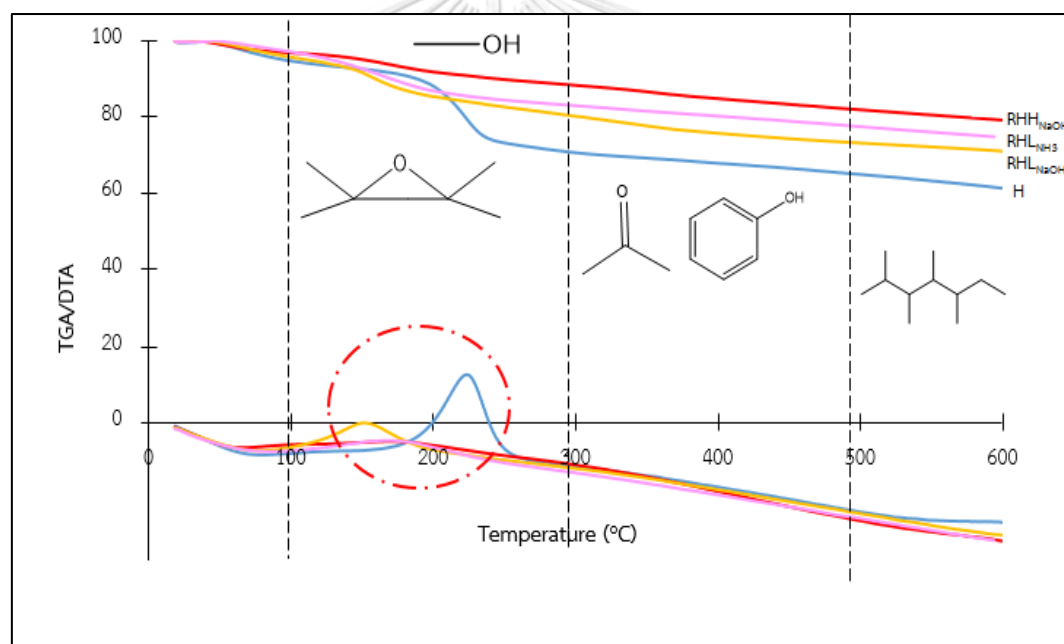


ภาพที่ 4-29 ผลการทดสอบลักษณะของแกรฟีนออกไซด์เปรียบเทียบกับรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์จาก 3 วิธีด้วยเทคนิค X-ray diffraction

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกแสดงดังภาพที่ 4-29 จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บน H จะพบพีคที่ 2Theta 14.26 องศาและ 24.8 องศา ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างของคาร์บอนที่ต่ออยู่กับออกซิเจนและโครงสร้างของคาร์บอนและไฮโดรเจนในโครงสร้างของวงอะโรมาติกของแกรไฟีน แสดงว่าขณะที่ทำการสังเคราะห์แกรไฟีนออกไซด์ด้วยวิธีฮัมเมอร์นั้นจะมีส่วนที่เป็นแกรไฟีนออกไซด์และแกรไฟีนในโครงสร้าง เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นั้น RHH_{NaOH} 4h, RHL_{NaOH} 4h, และ RHL_{NH₃} 4h. พบว่ามีการเลื่อนของพีคไปทาง 2Theta ที่ลดลง แสดงว่า เกิดการรีดิวซ์ และพบว่าทั้งสามจะพบพีคที่ 2Theta ที่ 24.8 ซึ่งแสดงโครงสร้างการมีโครงสร้างผลึกเป็นแกรไฟีน และความเข้มของพีคมีค่าสูงกว่า

4.5.3 เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน ด้วยเทคนิค

เทอร์โมแกรวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis: TGA)

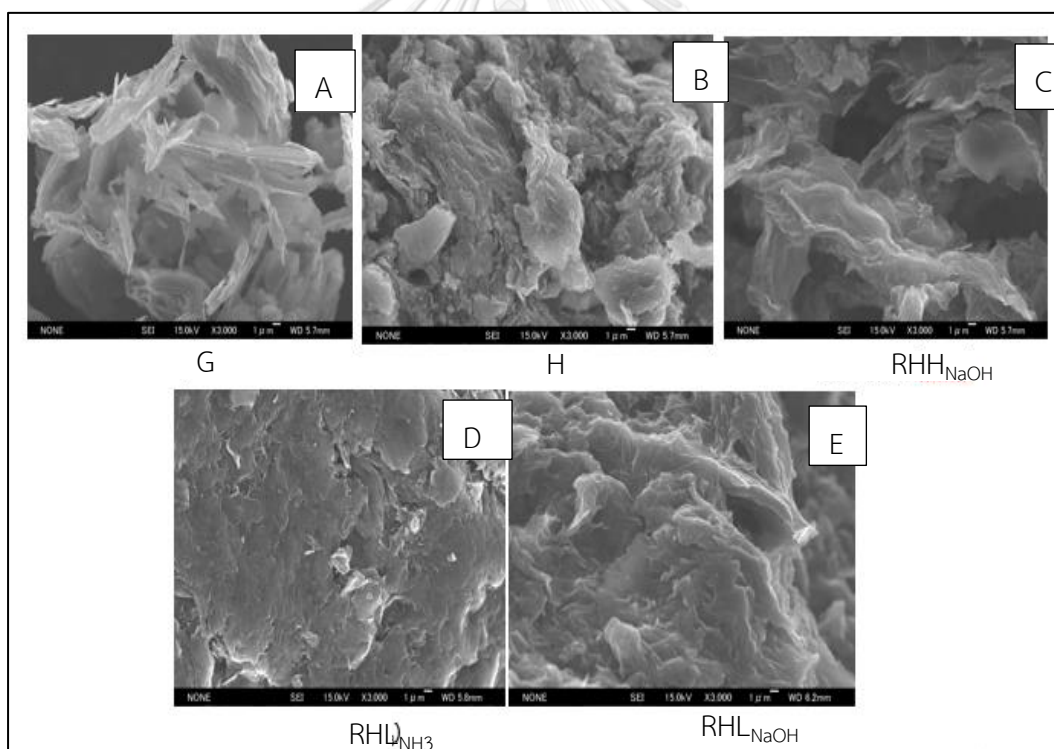


ภาพที่ 4-30 ผลการทดสอบลักษณะของแกรไฟีนออกไซด์เปรียบเทียบกับรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์จาก 3 วิธีด้วยเทคนิค Thermogravimetry Analysis (TGA)

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis เพื่อเป็นการทดสอบความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน โดยคำนวณและรายงานผลในรูปของร้อยละของน้ำหนักที่หายไป โดยจากภาพที่ 4-30 ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปในวัสดุระดับนาโนจะแบ่งออกเป็น 4 ช่วง อุณหภูมิ โดยช่วงแรกจะอยู่ที่อุณหภูมิ 0-100 องศาเซลเซียสเป็นน้ำหนักที่หายไปเนื่องจากน้ำในสภาวะบรรยากาศ ส่วนช่วงระหว่าง 100 ถึง 300 องศาเซลเซียส จะเป็นร้อยละของน้ำหนักที่หายไป

เนื่องจากออกซิเจนของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิเลท แอนไฮดรายด์ แลคโตน ไฮดรอกซี อีพอกซี และช่วงอุณหภูมิที่ 300-500 องศาเซลเซียสเป็นร้อยละของน้ำหนักของหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนที่มีความเสถียร เช่น คาร์บอนิลและฟีนอล และช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 500 องศาเซลเซียสขึ้นไปเป็นการหายไปของร้อยละน้ำหนักของคาร์บอน [76] ส่วนกราฟบริเวณด้านล่างเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ด้วย DTA [77] เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไปเทคนิค TGA จากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิในช่วงระหว่าง 100-300 องศาเซลเซียส น้ำหนักที่หายไปจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ของ H อยู่ในช่วงระหว่าง อุณหภูมิ 200-250 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นถึงออกซิเจนในโครงสร้างของแกรไฟีนออกไซด์ได้หายไปในช่วงการเผา ส่วนการจากการสังเคราะห์รีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์ RHH_{NaOH} RHL_{NaOH} และ RHL_{NH3} พบว่าการสังเคราะห์รีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์ในข้างต้น ไม่พบร้อยละของน้ำหนักที่หายไป

4.5.4 เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscopy: FESEM)



ภาพที่ 4-31 ผลการทดสอบลักษณะของแกรไฟต์ แกรไฟีนออกไซด์เปรียบเทียบกับรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์จากทั้ง 3 วิธี ด้วยเทคนิค FESEM

จากการนำแกรไฟต์ แกรไฟีนออกไซด์และการสังเคราะห์รีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์

โดยใช้กรดแอล-แอสคอบิกในสภาวะความเป็นด่างด้วยการใช้สารละลายแอมโมเนีย การสังเคราะห์ของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์โดยใช้ไฮดราซีนโมโนไฮเดรต ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และการรีดิวซ์สารแกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอล-แอสคอบิก ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ วิเคราะห์ดูลักษณะสัญญาณด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่อุณหภูมิห้อง ณ ความดันบรรยากาศ แสดงดังภาพ 4-31 ตามลำดับ จากภาพที่ 4-31(A) แสดงให้เห็นถึงรูปร่างสัญญาณของแกรไฟต์ที่มีลักษณะเป็นผลึกแท่งเข็มและพื้นผิวเรียบ เมื่อมีการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันให้เกิดการสร้างพันธะของออกซิเจนของหมู่ไฮดรอกซิล อีพอกซีและหมู่คาร์บอนิลของกรดคาร์บอกซิลิก ทำให้ลักษณะสัญญาณของแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์จากวิธีของฮัมเมอร์แสดงในภาพที่ 4-31(B) พบว่าลักษณะสัญญาณของแกรฟีนออกไซด์จากวิธีฮัมเมอร์มีพื้นผิวที่มีความขรุขระ อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับสัญญาณของแกรไฟต์ จากนั้นเมื่อทำการรีดิวซ์เอาออกซิเจนออกจากโครงสร้างเพื่อให้เกิดเป็นแกรฟีนจากทั้ง 3 วิธีมีความขรุขระบริเวณผิวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแกรฟีนออกไซด์จากฮัมเมอร์ โดยในภาพที่ 4-31(C) การรีดิวซ์สารแกรฟีนออกไซด์ด้วยสารไฮดราซีนโมโนไฮเดรต ในภาวะต่าง ภาพที่ 4-31(D) การรีดิวซ์สารแกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอล-แอสคอบิก ในภาวะที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นต่าง ภาพที่ 4-31(E) การรีดิวซ์สารแกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอล-แอสคอบิก ในภาวะที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นต่าง

4.6 สมบัติความต้านทานไฟฟ้า

จากการนำแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์และการรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์โดยใช้กรดแอล-แอสคอบิกในสภาวะความเป็นด่างด้วยการใช้สารละลายแอมโมเนีย การรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์โดยใช้ไฮดราซีนโมโนไฮเดรต ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และการรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอล-แอสคอบิกในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำไปทดสอบคุณสมบัติความต้านทานไฟฟ้าซึ่งมีค่าเป็นส่วนกลับของค่าการนำไฟฟ้า หมายความว่า หากสารที่ใดมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง แปลว่า สารนั้นนำไฟฟ้าได้ไม่ดี ในการทดลองนี้จึงทดสอบสมบัติความต้านทานไฟฟ้าของ $R_{HH_{NaOH}} 4h$, $R_{HL_{NaOH}} 4h$, และ $R_{HL_{NH_3}} 4h$. ดังแสดงในตารางที่ 4-5 ความต้านทานไฟฟ้าของหมึกที่เตรียมจาก H หมึกที่เตรียมจาก $R_{HH_{NaOH}} 4h$, หมึกที่เตรียมจาก $R_{HL_{NaOH}} 4h$, และ หมึกที่เตรียมจาก $R_{HL_{NH_3}} 4h$. ดังแสดงในตารางที่ 4-6 ความต้านทานไฟฟ้าของกระดาษที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยหมึกแต่ละชนิดดังแสดงในตารางที่ 4-7 และความต้านทานไฟฟ้าของกระดาษที่ทำการขัดผิวกระดาษและทำการเคลือบผิวด้วยหมึกแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4-8 ตามลำดับ จากตารางที่ 4-5 พบว่า H มีค่าความต้านทานสูงสุด เนื่องจากโครงสร้างแกรฟีนออกไซด์ที่มีพันธะระหว่างคาร์บอนและออกซิเจนในโครงสร้าง ทำให้สมบัติความเป็นพายออบิทัลลดลง [7] ส่งผลให้การนำไฟฟ้าลดลง เมื่อทำการใช้ตัวรีดิวซ์ไม่ว่าจะเป็นไฮดราซีนโมโนไฮเดรต และกรดแอล-แอสคอบิก พบว่า ค่าการต้านทานไฟฟ้า

RHH_{NaOH} RHL_{NaOH} และ RHL_{NH₃} ให้ค่าลดลงแสดงให้เห็นถึงการนำหมู่ออกซิเจนภายในโครงสร้างออก ทำให้เกิดสมบัติความเป็นพายอบัติมากขึ้น ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาที่ใช้กรดแอล-แอสคอบิกจะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงสุด เนื่องจากการเข้าทำปฏิกิริยาของกรดแอล-แอสคอบิกสามารถทำได้ 2 ตำแหน่งในโครงสร้างของแกรฟีนออกไซด์ คือบริเวณที่เป็นวงอีพอกซีและบริเวณที่เป็นไดอัล และการเลือกใช้สารละลายต่างมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยารีดักชันเช่นเดียวกัน โดยในที่นี้เลือกใช้สารละลายต่างที่หาได้ทั่วไปในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ สารละลายแอมโมเนีย และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อปรับค่าความเป็นกรดต่างให้อยู่ในช่วง 9.5 ± 0.5 เพื่อไม่ให้เกิดกรดแอล-แอสคอบิก เกิดการรวมตัวเป็นกรดแอล-แอสคอบิก ทำให้ประสิทธิภาพการรีดิวซ์ลดลง พบว่า การใช้สารละลายแอมโมเนียให้สมบัติความต้านทานไฟฟ้ามากกว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากแอมโมเนียทำหน้าที่เป็นนิวคลีโอไฟล์เข้าทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพราะโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อเกิดการแตกตัวเป็นโซเดียมไอออนในน้ำ สามารถเข้าทำกับหมู่ไฮดรอกซีในโครงสร้างของแกรฟีนออกไซด์ก่อน ทำให้การรีดิวซ์โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดปฏิกิริยาได้น้อยกว่า ส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ลดลง [78] ส่วนการใช้ไฮดราซีนโมโนไฮเดรตที่มีสมบัติความต้านทานที่สูงกว่าเนื่องจากการทำปฏิกิริยาของไฮดราซีนโมโนไฮเดรตสามารถทำได้แค่วงอีพอกซีในโครงสร้างเท่านั้น

ตารางที่ 4-5 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของ H RHH_{NaOH} RHL_{NaOH} และ RHL_{NH₃}

	Resistivity (Ω/cm)
H	209
RHH _{NaOH}	56
RHL _{NH₃}	16
RHL _{NaOH}	60

สมบัติความต้านทานเมื่อผสมเป็นหมึกแสดงดังตารางที่ 4-6 พบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการทำเป็นน้ำหมึก เพราะการผสมโพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีอะคริลิก เอซิดเพื่อช่วยให้น้ำหมึกที่มีการกระจายตัวของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์อย่างทั่วถึง แต่เนื่องจากสารทั้งสองนั้นมีสมบัติไม่นำไฟฟ้า ทำให้หลังการผสมเป็นน้ำหมึก ค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่วนหมึก RHH_{NaOH} ให้ความต้านทานสูงกว่า หมึก RHL_{NaOH} สูงกว่า RHL_{NH₃} เนื่องจาก RHH_{NaOH} มีสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิกสูงกว่า RHL_{NaOH} และ RHL_{NH₃} จึงทำให้เกิดการเข้ากันระหว่าง RHH_{NaOH} และโพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีอะคริลิก เอซิด ส่งผลให้การนำไฟฟ้าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับหมึก RHL_{NaOH} และหมึก RHL_{NH₃} ตามลำดับ ส่วนหมึก H ไม่นำไฟฟ้า

ตารางที่ 4-6 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของ H RHH_{NaOH} RHL_{NaOH} และ RHL_{NH₃} หลังกระบวนการผสมเป็นหมึก

	Resistivity(Ω/cm)
H	-
RHH _{NaOH}	1692.8
RHL _{NH₃}	593
RHL _{NaOH}	684

ตารางที่ 4-7 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของ H RHH_{NaOH} RHL_{NaOH} และ RHL_{NH₃} ภายหลังจากการเคลือบบนกระดาษรีไซเคิลขนาด 70 แกรม

Sample	Resistivity(Ω/cm)
H	-
RHH _{NaOH}	6550
RHL _{NH₃}	2390
RHL _{NaOH}	2736

จากตารางที่ 4-7 พบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกที่เคลือบบนกระดาษรีไซเคิลให้แนวโน้มเช่นเดียวกับหมึกนำไฟฟ้าจากเดิมกระดาษที่ทดสอบได้มีคุณสมบัติไม่นำไฟฟ้าหรือเป็นฉนวนในการนำไฟฟ้า เมื่อใช้หมึกที่เตรียมจาก RHH_{NaOH} RHL_{NaOH} และหมึก RHL_{NH₃} พบว่าค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามยังไม่เทียบเท่าหมึกที่ไม่เคลือบบนกระดาษ

ตารางที่ 4-8 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของ H RHH_{NaOH} RHL_{NaOH} และ RHL_{NH₃} ภายหลังจากการเคลือบบนกระดาษรีไซเคิลขนาด 70 แกรม และทำการเคลือบผิวของกระดาษด้วยเครื่อง Calender

Sample	Resistivity(Ω/cm)
H	-
RHH _{NaOH}	4870
RHL _{NH₃}	1800
RHL _{NaOH}	2052

จากตารางที่ 4-8 พบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าของหมึกที่เคลือบบนกระดาษรีไซเคิลที่ผ่านการขัดผิวด้วยเครื่อง Calender ให้แนวโน้มเช่นเดียวกับหมึกนำไฟฟ้าและกระดาษรีไซเคิลที่เคลือบด้วยหมึกนำไฟฟ้า โดยพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าจะดีกว่าหมึกที่เตรียมบนกระดาษรีไซเคิล เนื่องจากเมื่อทำการขัดผิวกระดาษด้วยเครื่อง Calender ผิวหน้ากระดาษ จะทำให้ความมีรูพรุนลดลง ดังนั้นเมื่อนำไปเคลือบด้วยหมึกนำไฟฟ้าจึงนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นกว่ากระดาษที่ไม่ผ่านการขัดผิวด้วยเครื่อง Calender แต่อย่างไรก็ตามมีค่าน้อยกว่าน้ำหมึก



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลวิจัยจากส่วนที่หนึ่ง คอมโพสิตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์ สามารถสรุปได้ว่า ปริมาณที่เหมาะสมของสารเพิ่มแข็งแรงขณะแห้ง คือ ไคโทซาน และ แคตไอออนิคพอลิอะคริลาไมด์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้งและที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้งตามลำดับ ให้สมบัติด้านโครงสร้างและสมบัติด้านความแข็งแรงสูงสุด ส่วนแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโม่ติฟายด์ฮัมเมอร์และวิธีทางเคมีไฟฟ้าความเข้มข้นร้อยละ 15 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง ให้สมบัติโครงสร้างและสมบัติด้านความแข็งแรงสูงสุด กระดาษที่มีการเติมไคโทซานความเข้มข้นร้อยละ 1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งและแกรฟีนออกไซด์จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีโม่ติฟายด์ฮัมเมอร์ให้ค่าสมบัติความแข็งแรงไม่ว่าจะเป็น ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก และค่าการต้านทานแรงกดในแนววงแหวนมากที่สุด แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโม่ติฟายด์ฮัมเมอร์ให้ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์สูงสุด แต่การสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า จะยังคงมีบางส่วนที่ยังคงความเป็นแกรไฟต์บางส่วน เป็นแกรฟีนออกไซด์และบางส่วนเป็นแกรฟีน ดังนั้นเมื่อผสมแกรฟีนออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า แสดงสมบัติของกระดาษที่ได้มีค่าไม่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติของกระดาษที่ได้ทำการใส่แกรฟีนออกไซด์จากวิธีโม่ติฟายด์ฮัมเมอร์ ส่วนการวัดสมบัติเชิงแสง ในที่นี้คือ CIE (*a*b* พบว่า เมื่อมีการเติมปริมาณแกรฟีนออกไซด์จากการสังเคราะห์ทั้งสองวิธี จะให้ค่าความขาวสว่างลดลง ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของกระดาษ เมื่อมีการเติมปริมาณแกรฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้น สีกระดาษยิ่งเข้มขึ้น แต่การใส่แคตไอออนิคพอลิอะคริลาไมด์และไคโทซานไม่ส่งผลต่อสีของกระดาษ

ผลการวิจัยส่วนที่สอง หมึกนำไฟฟ้าสามารถ สรุปได้ว่า การสังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์โดยใช้กรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid) ในสภาวะที่ปรับความเป็นด่างใช้สารละลายแอมโมเนีย จะให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุด รองลงมาคือ การสังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์โดยใช้กรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid) ในสภาวะต่างที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการรีดิวซ์โดยใช้ไฮดรารซินในสภาวะต่างที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้ผลการนำไฟฟ้าที่ น้อยลงตามลำดับ กลไกการเข้าทำปฏิกิริยา

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาผลของโคโทซานกับแกรฟีนออกไซด์ และเพิ่มระดับความเข้มข้นของแกรฟีนออกไซด์ให้สูงขึ้น
2. ควรศึกษาผลของแป้งประจุบวก เปรียบเทียบกับพอลิอะคริลาไมด์ ต่อผลร่วมกับแกรฟีนออกไซด์ในระดับที่สูงขึ้น
3. ควรศึกษาสารที่ใช้ในปฏิกิริยารีดิวส์แกรฟีนออกไซด์ตัวอื่น ในกลุ่มสารประเภท green reductant ต่อสมบัติด้านการนำไฟฟ้า



รายการอ้างอิง

- [1] Ray, S.C. Chapter 2. Application and Uses of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide. South Africa: ResearchGate, 2015.
- [2] Quanbo Huang, M.X., Runcang Sun, and Xiaohui Wang. Large scale preparation of graphene oxide/cellulose paper with improved mechanical performance and gas barrier properties by conventional papermaking method. Industrial Crops and Products 85 (2016): 198-203.
- [3] Owen C. Compton, S.W.C., Karl W. Putz, Zhi An, L. Catherine Brinson, Markus J. Buehler, and SonBinh T. Nguyen. Tuning the Mechanical Properties of Graphene Oxide Paper and Its Associated Polymer Nanocomposites by Controlling Cooperative Intersheet Hydrogen Bonding. ACS NANO 6(3) (2012): 2008-2019.
- [4] supermarket, G. Graphene oxide [Online]. 2009. Available from: https://graphene-supermarket.com/graphene_oxide/solutions [3 Mar]
- [5] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. การจำแนกและการจัดกลุ่มอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ เกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมกระดาษ [Online]. 2550. Available from: www2.dede.go.th/kmberc/datacenter/factory/paper/chapter2.doc [11 พฤศจิกายน]
- [6] Habibie, S., Hamzah, M., Anggaravidya, M., and Kalembang, E. . The effect of chitosan on physical and mechanical properties of paper. Vol. 7, 2016.
- [7] Kuila, T., Mishra, A.K., Khanra, P., Kim, N.H., and Lee, J.H. Recent advances in the efficient reduction of graphene oxide and its application as energy storage electrode materials. Nanoscale 5(1) (2013): 52-71.
- [8] Xu, T., Meng, Q., Shen, T., and Cao, B. Facile synthesis of submillimeter sized graphene oxide by a novel method. Vol. 5, 2015.
- [9] Ferrari, A.C., et al. Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems. Nanoscale 7(11) (2015): 4598-4810.
- [10] Dreyer, D.R., Park, S., Bielawski, C.W., and Ruoff, R.S. The chemistry of graphene oxide. Chemical Society Reviews 39(1) (2010): 228-240.

- [11] Zhang, X., et al. Reducing and Uniforming the Co_3O_4 Particle Size by Sulfonated Graphene Polymers for Electrochemical Applications. Nanoscale Research Letters 12 (2017): 165.
- [12] Senthilkumar, K., Prabakar, S.J.R., Park, C., Jeong, S., Lah, M.S., and Pyo, M. Graphene oxide self-assembled with a cationic fullerene for high performance pseudo-capacitors. Journal of Materials Chemistry A 4(5) (2016): 1663-1670.
- [13] Bandara, N., Esparza, Y., and Wu, J. Graphite Oxide Improves Adhesion and Water Resistance of Canola Protein–Graphite Oxide Hybrid Adhesive. Scientific Reports 7 (2017): 11538.
- [14] Sahoo, S.K., and Mallik, A. Simple, Fast and Cost-Effective Electrochemical Synthesis of Few Layer Graphene Nanosheets. NANO: Brief Reports and Reviews 10 (2015): 1-10.
- [15] Pattison, S., et al. Tuning graphitic oxide for initiator- and metal-free aerobic epoxidation of linear alkenes. Nature Communications 7 (2016): 12855.
- [16] Hummers, W.S. and Offeman, R.E. Preparation of Graphitic Oxide. Journal of the American Chemical Society 80(6) (1958): 1339-1339.
- [17] Marcano, D., Kosynkin, D., Berlin, J., Sinitskii, A., Sun, Z., Slesarev, A., Alemany, L., Lu, W., and Tour, J. Improved Synthesis of Graphene Oxide. ACS NANO 8 (2010): 4806-4814.
- [18] Singh, R.K., Kumar, R., and Singh, D.P. Graphene oxide: strategies for synthesis, reduction and frontier applications. RSC Advances 6(69) (2016): 64993-65011.
- [19] Physics, T.C.o.E.i. Chemical Exfoliation [Online]. 2013. Available from: http://thep-center.org/src/article_edu_t.php?article_edu_id=57 [September]
- [20] Chua, C.K. and Pumera, M. Chemical reduction of graphene oxide: a synthetic chemistry viewpoint. Chemical Society Reviews 43(1) (2014): 291-312.
- [21] Nan Wu, X.S., Dongjiang Yang, Xiaofeng Wu, Fabing Su and Yunfa Chen. Synthesis of network reduced graphene oxide in polystyrene matrix by a two-step reduction method for superior conductivity of the composite. Journal of Materials Chemistry 22(22) (2012): 17254.

- [22] Changyan Xu, X.S., An Ji, Lina Shi, Chen Zhou, Yunqi Cui. Fabrication and Characteristics of Reduced Graphene Oxide Produced with Different Green Reductants. PLOS ONE (2015).
- [23] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. เส้นใย (Fibers) [Online]. Available from: http://www2.mtec.or.th/th/research/textile/textile_sci.html [13 ธันวาคม]
- [24] Goldstein, M.L.a.I.S. Wood structure and composition. New York: Marcel Dekker, Inc., 1991.
- [25] Wardrop, A.B. Morphological Factors Involved in the Pulping and Beating of Wood Fibres. Svensk Papperstidning 66 (1963): 231-247.
- [26] Pereira, P.H.F., et al. Vegetal fibers in polymeric composites: a review. Polimeros 25(1) (2015): 9-22.
- [27] Roberts, J.C. The Chemistry of Paper. The Royal Society of Chemistry, 1996.
- [28] Sjöström, E.a.A.R. Analytical Methods in Wood Chemistry, Pulping, and Papermaking. Berlin: Springer-verlag, 1999.
- [29] Easychem. Cellulose [Online]. 2015. Available from: <http://www.easychem.com.au/production-of-materials/biomass-research/cellulose> [11 Oct]
- [30] Estela, R.a.L.J. Hydrolysis of Biomass Mediated by Cellulases for the Production of Sugars. (2013).
- [31] Biocyclopedia. Biomass : A Renewable Source of Energy [Online]. Available from: http://www.eplantscience.com/index/biotechnology/biotechnology_and_environment/biomass_a_renewable_source_of_energy/biotech_biomass_composition_of_biomass.php [11 Oct]
- [32] Casey, J.P. Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology. Vol. I: New York John Wiley & Sons, 1981.
- [33] Christopher, L.P., Yao B., and Ji Y. Lignin Biodegradation with Laccase-Mediator Systems. Frontiers in Energy Research 2 (2014).
- [34] Biermann, C.J. Essential of Pulping and Papermaking. San Diego: Academic Press, 1993.
- [35] พืชเส้นใยคืออะไร. พืชเส้นใยคืออะไร.

- [36] Sixta, H. Handbook of Pulp. Vol. II. Weinheim: Wiley-VCH, 2006.
- [37] Smook, G.A. Handbook for pulp and paper technologists. Atlanta: Ga TAPPI, 1986.
- [38] Gullichsen, J.a.P.H. Papermaking Science and Technology : Chemical Pulping Book 6A. Jyväskylä: Gummerus Printing, 2000.
- [39] Selke, S.E.M. Packaging and the environment: Alternatives, trends and Solutions. Pennsylvania: Technomic Publishing Co., Inc, 1994.
- [40] Mohammad Nemati, N.S., Ahmad Samariha, and Mohammad Javad Shakouri. Studying the Effect of Chemical Additives on Strength Properties of Recycled Paper. Journal of Basic and Applied Scientific Research 11 (2011): 2314-2318.
- [41] กรมป่าไม้. ข้อมูลสารสนเทศกรมป่าไม้ [Online]. Available from: <http://forestinfo.forest.go.th/55/> [สิงหาคม]
- [42] สำนักหอพรรณไม้. ยูคาลิปตัส คามาลดูลเลนซิส [Online]. 2556. Available from: <http://forestinfo.forest.go.th/pfd/Files/FileEBook/EB5.pdf> [ตุลาคม]
- [43] บริษัท ไทยซุმი จำกัด. การปลูกไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูลเลนซิส [Online]. Available from: <http://www.charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/yuka.php> [กันยายน]
- [44] ประวีร์รา โปธิสุวรรณ. รายงานการศึกษาภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมกระดาษคราฟท์. 2559.
- [45] กระทรวงอุตสาหกรรม. มอก 170-2550 [Online]. 2550. Available from: www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2559/E/282/7.PDF [กรกฎาคม]
- [46] Alireza Ashori, e.a. Enhancing dry-strength properties of kenaf (Hibiscus cannabinus) paper through chitosan. Polymer-Plastics Technology and Engineering 45(125-129) (2006).
- [47] Hubbe, M. Mini-Encyclopedia of Papermaking Wet-End Chemistry [Online]. Available from: <http://www4.ncsu.edu/~hubbe/COPL.htm> [11 Nov]
- [48] สุธิดา คงทอง. ไคติน-ไคโตซาน. วารสารวิชาการ อุตสาหกรรมศึกษา 1(2552): 1-7.
- [49] Ravi, K.a.M.N.V. A review of chitin and chitosan applications. Reactive and Functional Polymers 46(1) (2000): 1-27.
- [50] Ashori, A., Harun J., Zin W.M., and Mohd. Yusoff M.N. Enhancing Dry-Strength Properties of Kenaf (Hibiscus cannabinus) Paper Through Chitosan. Polymer-Plastics Technology and Engineering 45(1) (2006): 125-129.

- [51] Scientific and Technological Research Equipment Centre. General Information | Instrument ID 62 [Online]. Available from: https://app.strec.chula.ac.th/application/instrument/instrument_info.php?instr=62 [15 ตุลาคม]
- [52] BAMKO-SURPLUS PROCESS EQUIPMENT LLC. HORIBA FT-200 spectrometer [Online]. Available from: <http://www.bamko.com/lab.html> [15 Oct]
- [53] Z., E. What does infrared spectrum show in an IR? [Online]. 2015. Available from: www.chromatographytechniques.com [15 Oct]
- [54] Scientific and Technological Research Equipment Centre. General Information | Instrument ID 32 [Online]. Available from: https://app.strec.chula.ac.th/application/instrument/instrument_info.php?instr=32 [15 Oct]
- [55] Scientific and Technological Research Equipment Centre. General Information | Instrument ID 65 [Online]. Available from: https://app.strec.chula.ac.th/application/instrument/instrument_info.php?instr=65 [15 Oct]
- [56] Scientific and Technological Research Equipment Centre. General Information | Instrument ID 43 [Online]. Available from: https://app.strec.chula.ac.th/application/instrument/instrument_info.php?instr=43 [15 Oct]
- [57] Ali, A., Sidhu, R.S., and Samad, M.s.A. Fatigue Characteristics of Automotive Jounce Bumper. 2011.
- [58] ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC). Thermogravimetric Analysis (TGA) [Online]. Available from: https://www2.nanotec.or.th/th/?page_id=120 [11 Nov]
- [59] มหาวิทยาลัยมหิดล. Elemental Analyzer (CHNS) [Online]. Available from: <http://chemistry.sc.mahidol.ac.th/th/facilities/instruments/other-instruments/> [15 ตุลาคม]
- [60] TAPPI. TAPPI Test Methods. Atlanta: TAPPI Press, 2002.
- [61] DEE, S. ทฤษฎีสีของระบบสี Lab [Online]. Available from: <https://xn--12cf0dj0aaufr9l0ai2m6ab4p.blogspot.com/2014/06/lab.html> [15 ตุลาคม]

- [62] Ghasemian, A., Ghaffari, M., and Ashori, A. Strength-enhancing effect of cationic starch on mixed recycled and virgin pulps. Carbohydrate Polymers 87(2) (2012): 1269-1274.
- [63] Main, N., Talib, R., Rahman, R., Mohamed, A., Ibrahim, R., and Adnan, S. Effect of Amphoeteric and Cationic Polyacrylamide on the Structural and Strength Properties of Coir Paper. Procedia Manufacturing, 2 (2015): 28-34.
- [64] Yahya Hamzeh, e.a. Improving wet and dry strength properties of recycled old corrugated carton (OCC) pulp using various polymers. Carbohydrate Polymers 94 (2013): 577-583.
- [65] TEC, M.C. Sheet former rapid [Online]. Available from: <http://www.mctec.nl/en/producten/material-properties/pulp-en/sheet-former-rapid-kothen-kwt/> [March 5]
- [66] อรรถพานุรักษ์, น. การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพเยื่อและกระดาษสา [Online]. 2545. Available from: posaa.kapi.ku.ac.th/Document/PDF/ISBN1521/1521_11.pdf [15 ตุลาคม]
- [67] Zaaba, N.I., Foo, K. L., Hashim, U., Tan, S. J., Liu, Wei-Wen and Voon, C. H. Synthesis of Graphene Oxide using Modified Hummers Method: Solvent Influence. Procedia Engineering 184(Supplement C) (2017): 469-477.
- [68] Dubin, S., et al. A One-Step, Solvothermal Reduction Method for Producing Reduced Graphene Oxide Dispersions in Organic Solvents. ACS Nano 4(7) (2010): 3845-3852.
- [69] Ahmad, A.L., Sumathi, S., and Hameed, B.H. Residual oil and suspended solid removal using natural adsorbents chitosan, bentonite and activated carbon: A comparative study. Chemical Engineering Journal 108(1-2) (2005): 179-185.
- [70] Zhang, X. and Bai, R. Mechanisms and kinetics of humic acid adsorption onto chitosan-coated granules. Journal of colloid and interface science 264(1) (2003): 30-38.
- [71] Omid, Y., Ghasem, A., Esmail Rasooly, G., and Reza, I. Effect of Cationic Polyacrylamide and Antibacterial Nanosilver on Bank-note Paper Properties. Lignocellulose 14-3 :(2014) (1) .

- [72] Feng, L., Zheng, H., Wang, Y., Zhang, S., and Xu, B. Ultrasonic-template technology inducing and regulating cationic microblocks in CPAM: characterization, mechanism and sludge flocculation performance. RSC Advances 7(38) (2017): 23444-23456.
- [73] Pandey, A., Singh, K., and K Kar, K. Thermo-mechanical properties of graphite-reinforced high-density polyethylene composites and its structure-property corelationship. Vol. 51, 2016.
- [74] Yang, X., Tu, Y., Li, L., Shang, S., and Tao, X.-m. Well-Dispersed Chitosan/Graphene Oxide Nanocomposites. ACS Applied Materials & Interfaces 2(6) (2010): 1707-1713.
- [75] Chen, Y., Chen, L., Bai, H., and Li, L. Graphene oxide-chitosan composite hydrogels as broad-spectrum adsorbents for water purification. Journal of Materials Chemistry A 1(6) (2013): 1992-2001.
- [76] Chang, B.Y., et al. Facile hydrothermal preparation of titanium dioxide decorated reduced graphene oxide nanocomposite. (1178-2013 (Electronic)).
- [77] Melucci, M., et al. Facile covalent functionalization of graphene oxide using microwaves: bottom-up development of functional graphitic materials. Journal of Materials Chemistry 20(41) (2010): 9052-9060.
- [78] Chen, C., Kong, W., Duan, H., and Zhang, J. Theoretical simulation of reduction mechanism of graphene oxide in sodium hydroxide solution. Physical Chemistry Chemical Physics 16(25) (2014): 12858-12864.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ตารางที่ 1 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความหนาแน่นของคอมโพลีเมอร์ด้าย
กราฟต์แกรฟีนออกไซด์

ตัวแปร	One way factor		ตัวแปรที่ทำการศึกษา	Two way Factor	
	P-Value	F-Value		P-Value	F-Value
แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	191.21	Factor A = ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่ทำการเติมร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	132.22
			Factor B= ชนิดของแกรฟีนออกไซด์ที่ทำการสังเคราะห์จาก 2 วิธี	0.000	51.11
แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	28.86	FactorA*FactorB	0.000	7.89
สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 +แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	18.45	Factor A = ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่ทำการเติมร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	74.99
			Factor B= ชนิดของแกรฟีนออกไซด์ที่ทำการสังเคราะห์จาก 2 วิธี	0.000	817.05
			FactorA*FactorB	0.000	62.86

สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ที่ ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 +แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	115.2			
สารละลายโคโทซานที่ระดับ ความเข้มข้นร้อยละ 2 +แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ ด้วยวิธี Modified Hummer ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	30.22	Factor A = ปริมาณแกรฟีน ออกไซด์ที่ทำการ เติมร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	34.64
			Factor B= ชนิด ของ แกรฟีนออกไซด์ที่ ทำการสังเคราะห์ จาก 2 วิธี	0.000	95.16
			FactorA*FactorB	0.000	11.26
สารละลายโคโทซานที่ระดับ ความเข้มข้นร้อยละ 2 +แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	8.88			
สารละลายโคโทซานที่ระดับ ความเข้มข้นร้อยละ 1 +แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ ด้วยวิธี Modified Hummer	0.000	201.31	Factor A = ปริมาณแกรฟีน ออกไซด์ที่ทำการ เติมร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	186.19

ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15			Factor B= ชนิด ของ แกรฟีนออกไซด์ที่ ทำการสังเคราะห์ จาก 2 วิธี	0.000	419.41
			FactorA*FactorB	0.000	32.56
สารละลายโคโทซานที่ระดับ ความเข้มข้นร้อยละ 1 +แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	34.32			

ตารางที่ 2 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของคอมโพสิต
กระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์

ตัวแปร	One way factor		ตัวแปรที่ทำการศึกษา	Two way Factor	
	P- Value	F- Value		P- Value	F- Value
แกรฟีนออกไซด์ที่ สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer ที่ระดับ ความเข้มข้นร้อย ละ 0 1 5 10 15	0.000	22.95	Factor A = ปริมาณแก รฟีนออกไซด์ที่ทำการเติม ร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	372.85
			Factor B= ชนิดของ แกรฟีนออกไซด์ที่ทำการ สังเคราะห์จาก 2 วิธี	0.000	75.93
	0.000	98.94			

แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15			FactorA*FactorB	0.000	32.23
สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 +แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	430.76	Factor A = ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่ทำการเติม ร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	710.7
			Factor B= ชนิดของแกรฟีนออกไซด์ที่ทำการสังเคราะห์จาก 2 วิธี	0.000	478.16
			FactorA*FactorB	0.000	52.16
สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 +แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	337.60			
สารละลายโคโชนาที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2	0.000	46.49	Factor A = ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่ทำการเติม ร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	91.29

+แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15			Factor B= ชนิดของแกรฟีนออกไซด์ที่ทำการสังเคราะห์จาก 2 วิธี	0.000	131.38
			FactorA*FactorB	0.000	11.8
สารละลายโคโตนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 +แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	58.71			
สารละลายโคโตนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 +แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	85.44	Factor A = ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่ทำการเติม ร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	196.54
			Factor B= ชนิดของแกรฟีนออกไซด์ที่ทำการสังเคราะห์จาก 2 วิธี	0.000	27.29
			FactorA*FactorB	0.000	19.56
สารละลายโคโตนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 +แกรฟีนออกไซด์ที่	0.000	137.74			

สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ระดับความ เข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15					
--	--	--	--	--	--

ตารางที่ 3 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะเลของคอมโพสิตกระดาษกราฟต์แกรฟีนออกไซด์

ตัวแปร	One way factor		ตัวแปรที่ทำการศึกษา	Two way Factor	
	P-Value	F-Value		P-Value	F-Value
แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	68.78	Factor A = ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่ทำการเติมร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	1079.99
			Factor B= ชนิดของแกรฟีนออกไซด์ที่ทำการสังเคราะห์จาก 2 วิธี	0.000	73.24
แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	85.55	FactorA*FactorB	0.000	7.41
สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ที่ระดับความเข้มข้น	0.000	32.98	Factor A = ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่ทำการเติมร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	87.11

ร้อยละ 1 +แกรฟีนออกไซด์ที่ สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer ที่ระดับ ความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15			Factor B= ชนิดของ แกรฟีนออกไซด์ที่ทำการ สังเคราะห์จาก 2 วิธี	0.008	788
			FactorA*FactorB	0.043	2.71
สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ที่ ระดับความเข้มข้น ร้อยละ 1 +แกรฟีนออกไซด์ที่ สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ระดับความ เข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	57.81			
สารละลายโคโ ซานที่ระดับความ เข้มข้นร้อยละ 2 +แกรฟีนออกไซด์ที่ สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer ที่ระดับ ความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	148.04	Factor A = ปริมาณแกรฟีน ออกไซด์ที่ทำการเติมร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	202.23
			Factor B= ชนิดของ แกรฟีนออกไซด์ที่ทำการ สังเคราะห์จาก 2 วิธี	0.000	15.6
			FactorA*FactorB	0.000	41.7

สารละลายโคโท ซานที่ระดับความ เข้มข้นร้อยละ 2 +แกรฟีนออกไซด์ที่ สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ระดับความ เข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	80.95			
สารละลายโคโท ซานที่ระดับความ เข้มข้นร้อยละ 1 +แกรฟีนออกไซด์ที่ สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer ที่ระดับ ความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	166.38	Factor A = ปริมาณแกรฟีน ออกไซด์ที่ทำการเติมร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	291.11
			Factor B= ชนิดของ แกรฟีนออกไซด์ที่ทำการ สังเคราะห์จาก 2 วิธี	0.000	29.08
			FactorA*FactorB	0.000	14.35
สารละลายโคโท ซานที่ระดับความ เข้มข้นร้อยละ 1 +แกรฟีนออกไซด์ที่ สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ระดับความ เข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	135.69			

ตารางที่ 4 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกของคอมโพสิต
กระดาษกราฟด์แกรไฟีนออกไซด์

ตัวแปร	One way factor		ตัวแปรที่ทำการศึกษา	Two way Factor	
	P-Value	F-Value		P-Value	F-Value
แกรไฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	57.66	Factor A = ปริมาณแกรไฟีนออกไซด์ที่ทำการเติมร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	46.66
			Factor B= ชนิดของแกรไฟีนออกไซด์ที่ทำการสังเคราะห์จาก 2 วิธี	0.007	8.19
แกรไฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	44.98	FactorA*FactorB	0.057	2.50
สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 +แกรไฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	73.79	Factor A = ปริมาณแกรไฟีนออกไซด์ที่ทำการเติมร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	170.06
			Factor B= ชนิดของแกรไฟีนออกไซด์ที่ทำการสังเคราะห์จาก 2 วิธี	0.008	71.02
			FactorA*FactorB	0.043	26.82

สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 + แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	148.98			
สารละลายโคโชนาที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 + แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	417.06	Factor A = ปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่ทำการเติมร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	226.27
			Factor B= ชนิดของแกรฟีนออกไซด์ที่ทำการสังเคราะห์จาก 2 วิธี	0.000	31.93
			Factor A*Factor B	0.000	79.79
สารละลายโคโชนาที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 + แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	28.65			

สารละลายโคโท ซานที่ระดับความ เข้มข้นร้อยละ 1 +แกรฟีนออกไซด์ที่ สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer ที่ระดับ ความเข้มข้นร้อย ละ 0 1 5 10 15	0.000	358.93	Factor A = ปริมาณแกรฟีน ออกไซด์ที่ทำการเติมร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	213.36
			Factor B= ชนิดของ แกรฟีนออกไซด์ที่ทำการ สังเคราะห์จาก 2 วิธี	0.000	266.06
			FactorA*FactorB	0.000	63.39
สารละลายโคโท ซานที่ระดับความ เข้มข้นร้อยละ 1 +แกรฟีนออกไซด์ที่ สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ระดับความ เข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	20.83			

ตารางที่ 5 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของคอม
โพลีตกระตาขคราฟต์แกรฟีนออกไซด์

ตัวแปร	One way factor		ตัวแปรที่ทำการศึกษา	Two way Factor	
	P- Value	F- Value		P- Value	F- Value
แกรฟีนออกไซด์ที่ สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified	0.000	28.16	Factor A = ปริมาณแกร ฟีนออกไซด์ที่ทำการเติม ร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	31.66

Hummer ที่ระดับ ความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15			Factor B= ชนิดของ แกรฟีนออกไซด์ที่ทำการ สังเคราะห์จาก 2 วิธี	0.007	61.13
แกรฟีนออกไซด์ที่ สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ระดับความ เข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	16.37	FactorA*FactorB	0.001	5.58
สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ที่ ระดับความเข้มข้น ร้อยละ 1 +แกรฟีนออกไซด์ที่ สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer ที่ระดับ ความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	22.13	Factor A = ปริมาณแกร ฟีนออกไซด์ที่ทำการเติม ร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	21.32
			Factor B= ชนิดของ แกรฟีนออกไซด์ที่ทำการ สังเคราะห์จาก 2 วิธี	0.000	36.98
			FactorA*FactorB	0.000	5.86
สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ที่ ระดับความเข้มข้น ร้อยละ 1 +แกรฟีนออกไซด์ที่ สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ระดับความ	0.032	3.28			

เข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15					
สารละลายโคโท ซานที่ระดับความ เข้มข้นร้อยละ 2 +แกรฟีนออกไซด์ที่ สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified Hummer ที่ระดับ ความเข้มข้นร้อย ละ 0 1 5 10 15	0.000	10.98	Factor A = ปริมาณแก รฟีนออกไซด์ที่ทำการเติม ร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	10.21
			Factor B= ชนิดของ แกรฟีนออกไซด์ที่ทำการ สังเคราะห์จาก 2 วิธี	0.006	8.34
			FactorA*FactorB	0.044	2.71
สารละลายโคโท ซานที่ระดับความ เข้มข้นร้อยละ 2 +แกรฟีนออกไซด์ที่ สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ระดับความ เข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.13	2.02			
สารละลายโคโท ซานที่ระดับความ เข้มข้นร้อยละ 1 +แกรฟีนออกไซด์ที่ สังเคราะห์ด้วยวิธี Modified	0.000	17.95	Factor A = ปริมาณแก รฟีนออกไซด์ที่ทำการเติม ร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	24.12
			Factor B= ชนิดของ แกรฟีนออกไซด์ที่ทำการ สังเคราะห์จาก 2 วิธี	0.000	184.05

Hummer ที่ระดับ ความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15			FactorA*FactorB	0.000	12.59
สารละลายโคโตนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 + แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Electrochemistry ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 15	0.000	18.65			

ภาคผนวก ข

การเปรียบเทียบผลต่างเชิงซ้อน (Multiple Comparisons)

ตารางที่ 1 แสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณแคทไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ (c-PAM) ร้อยละ 0 0.06 0.1 0.5 และ 1 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้งของกระดาษต่อค่าความหนาแน่น ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกและความต้านทานแรงกดแนววงแหวน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้ Tukey Group Range Test ในการจัดแบ่งกลุ่ม

Dosage of c-PAM (%wt. on O.D.pulp)	0	0.06	0.1	0.5	1
Density	551.1 D	551.17 D	565.2 C	588.33 B	604.83 A
Tensile Index	21.9 B	21.97 B	25.83 A	26.42 A	27.02 A
Tear Index	7.29 B	7.47 AB	7.49 AB	7.51 A	7.54 A
Burst Index	1.63 E	11.29 D	12.73 C	13.98 B	15.44 A
Ring crush	1.13 A	1.14 A	1.15 A	1.15 A	1.18 A

ตารางที่ 2 แสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณไคโทซาน (Chitosan) ร้อยละ 0 0.5 1 2 3 และ 4 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้งของกระดาษต่อค่าความหนาแน่น ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกและความต้านทานแรงกดแนววงแหวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้ Tukey Group Range Test ในการจัดแบ่งกลุ่ม

Dosage of chitoan (%wt. on O.D.pulp)	0	0.5	1	2	3	4
Density	551.39 D	561.05 C	575.5 B	588.35 A	566.96 BC	557.46 CD
Tensile Index	21.9 D	28.63 B	29.91 AB	31.51 A	26.02 C	24.99 C
Tear Index	7.29 B	7.39 B	7.74 A	7.87 A	7.45 B	7.39 B
Burst Index	1.63 D	13.63 C	15.14 B	16.21 A	14.58 BC	13.99 C
Ring crush	1.13 C	1.35 AB	1.36 AB	1.41 A	1.3 AB	1.26 B

ตารางที่ 3 แสดงผลการเปรียบเทียบแกรฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) ร้อยละ 0 1 5 10 และ 15 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้งของกระดาษต่อค่าความหนาแน่น ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้ Tukey Group Range Test ในการจัดแบ่งกลุ่ม

Dosage of Grahene oxide (%wt. on O.D.pulp)	0	1	5	10	15
Density1	588.35 B	575.22 C	605.92 A	606.21 A	607.38 A
Density2	588.35 A	567.76 C	576.12 BC	583.14 AB	590.12 A
Density3	575.5 C	611.51 B	631.48 A	634.01 A	637.23 A

Density4	575.5 C	591.66 B	595.18 B	599.46 AB	604.65 A
Density5	604.83 B	600.54 B	614.83 A	615.75 A	618.72 A
Density6	604.83 A	554.98 C	559.78 C	579.96 B	586.98 B
Density7	551.39 D	569.35 C	588.83 B	605.52 A	606.48 A
Density8	551.39 C	567.96 B	570.39 B	585.11 A	592.04 A

หมายเหตุ ค่า 1 เป็นค่าความหนาแน่นของกระดาษที่มีการเติมปริมาณโคโทซานที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 ของน้ำหนักเยื่อแห้งและการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ได้จากวิธีฮัมเมอร์ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 และ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

ค่า 2 เป็นค่าความหนาแน่นของกระดาษที่มีการเติมปริมาณโคโทซานที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 ของน้ำหนักเยื่อแห้งและการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ได้จากวิธีทางเคมีไฟฟ้าปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 และ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

ค่า 3 เป็นค่าความหนาแน่นของกระดาษที่มีการเติมปริมาณโคโทซานที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งและการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ได้จากวิธีฮัมเมอร์ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 และ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

ค่า 4 เป็นค่าความหนาแน่นของกระดาษที่มีการเติมปริมาณโคโทซานที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งและการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ได้จากวิธีทางเคมีไฟฟ้าปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 และ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

ค่า 5 เป็นค่าความหนาแน่นของกระดาษที่มีการเติมปริมาณแคทไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งและการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ได้จากวิธีฮัมเมอร์ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 และ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

ค่า 6 เป็นค่าความหนาแน่นของกระดาษที่มีการเติมปริมาณแคทไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งและการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ได้จากวิธีทางเคมีไฟฟ้าปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 และ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

ค่า 7 เป็นค่าความหนาแน่นของกระดาษที่มีการเติมปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่ได้จากวิธีฮัมเมอร์ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 และ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

ค่า 8 เป็นค่าความหนาแน่นของกระดาษที่มีการเติมปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่ได้จากวิธีทางเคมีไฟฟ้าปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 1 5 10 และ 15 ของน้ำหนักระดาษ

ตารางที่ 4 แสดงผลการเปรียบเทียบเกรฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) ร้อยละ 0 1 5 10 และ 15 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้งของกระดาษต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้ Tukey Group Range Test ในการจัดแบ่งกลุ่ม

Dosage of Graphene oxide (%wt. on O.D.pulp)	0	1	5	10	15
Tensile 1	31.51 C	34.68 B	37.61 A	37.74 A	39.22 A
Tensile 2	31.51 C	29.08 D	33.94 B	34.57 B	36.6 A
Tensile 3	29.91 D	32.71 C	33.56 C	35.1 B	38.63 A
Tensile 4	29.91 C	28.39 D	34.36 B	35.04 B	36.94 A
Tensile 5	27.02 E	29.14 D	31.92 C	35.77 B	38.41 A
Tensile 6	27.02 B	25.57 C	25.61 C	33.78 A	34.22 A
Tensile 7	21.9 C	30.83 B	31.6 B	34.15 A	34.78 A
Tensile 8	21.9 C	23.36 C	30.2 B	33.39 A	33.9 A

หมายเหตุ ค่า 1-8 ชนิดของตัวอย่างเป็นเช่นเดียวกับหมายเหตุใต้ตารางที่ 3

ตารางที่ 5 แสดงผลการเปรียบเทียบแกรฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) ร้อยละ 0 1 5 10 และ 15 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้งของกระดาษต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้ Tukey Group Range Test ในการจัดแบ่งกลุ่ม

Dosage of Grahene oxide (%wt. on O.D.pulp)	0	1	5	10	15
Burst1	16.21 C	14.91 D	16.22 C	17.61 B	21.41 A
Burst 2	16.21 C	14.54 D	17.2 B	17.44 A	18.04 A
Burst 3	15.14 D	14.59 D	17.88 C	19.75 B	21.26 A
Burst 4	15.14 D	15.16 D	16.49 C	17.44 B	20.77 A
Burst 5	15.44 B	15.43 B	15.95 B	17.29 A	18.09 A
Burst 6	15.44 B	15.61 B	16.06 B	18.48 A	18.43 A
Burst 7	1.63 D	12.48 C	13.01 C	14.68 B	15.77 A
Burst 8	1.63 E	9.98 D	11.58 C	13.39 B	14.7 A

หมายเหตุ ค่า 1-8 ชนิดของตัวอย่างเป็นเช่นเดียวกับหมายเหตุได้ตารางที่ 3

ตารางที่ 6 แสดงผลการเปรียบเทียบแกรฟีนออกไซด์(Graphene oxide) ร้อยละ 0 1 5 10 และ 15 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้งของกระดาษต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้ Tukey Group Range Test ในการจัดแบ่งกลุ่ม

Dosage of Graphene oxide (%wt. on O.D.pulp)	0	1	5	10	15
Tear1	7.87 B	7.46 D	7.75 C	7.92 B	8.81 A
Tear 2	7.87 A	7.52 B	7.9 A	7.96 A	8.01 A
Tear 3	7.74 D	7.52 E	7.88 C	8.37 B	8.73 A
Tear 4	7.74 BC	7.5 D	7.64 CD	7.84 AB	7.93 A
Tear 5	7.54 C	7.37 D	7.8 B	7.82 B	8.06 A
Tear 6	7.54 B	7.3 C	7.32 C	7.85 A	7.88 A
Tear 7	7.29 C	7.33 C	7.61 B	7.9 A	7.96 A
Tear 8	7.29 B	7.31 B	7.6 A	7.69 A	7.72 A

หมายเหตุ ค่า 1-8 ชนิดของตัวอย่างเป็นเช่นเดียวกับหมายเหตุใต้ตารางที่ 3

ตารางที่ 7 แสดงผลการเปรียบเทียบแกรฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) ร้อยละ 0 1 5 10 และ 15 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้งของกระดาษต่อค่าความต้านทานแรงกดแนววงแหวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้ Tukey Group Range Test ในการจัดแบ่งกลุ่ม

Dosage of Graphene oxide (%wt. on O.D.pulp)	0	1	5	10	15
Ring Crush 1	1.41 BC	1.35 C	1.46 AB	1.48 AB	1.56 A
Ring Crush 2	1.41 A	1.36 A	1.38 A	1.44 A	1.45 A
Ring Crush 3	1.36 CD	1.32 D	1.43 BC	1.5 AB	1.53 A
Ring Crush 4	1.36 A	1.1 C	1.13 C	1.24 B	1.31 AB
Ring Crush 5	1.18 C	1.19 C	1.3 B	1.34 AB	1.39 A
Ring Crush 6	1.18 AB	1.17 B	1.22 AB	1.25 A	1.23 AB
Ring Crush 7	1.13 C	1.2 C	1.32 B	1.34 B	1.46 A
Ring Crush 8	1.13 B	1.11 B	1.18 AB	1.19 AB	1.26 A

หมายเหตุ ค่า 1-8 ชนิดของตัวอย่างเป็นเช่นเดียวกับหมายเหตุได้ตารางที่ 3

ภาคผนวก ค

คุณลักษณะของสารเพิ่มความแข็งแรงขณะแห้งที่ใช้ในงานวิจัย

1. แคทไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์

ตาราง ก คุณลักษณะของแคทไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์

Properties	Cationic polyacrylamide
Salt viscosity	3.8-4.5 mPas (0.1%, 25°C, 1 M NaCl)
Appearance	white, hygroscopic, odorless powder)
Chemical composition	polyacrylamide
Ionic character	cationic
Solubility	good
Particle size distribution	>2.0 mm max. 1% <0.15 mm max. 4%

2. ไคโทซาน

ตาราง ข คุณลักษณะของไคโทซาน

Properties	Chitosan
Form	Flake
Degree of deacetylation	95%
Molecular weight	75000 g/mol
Supplier	S.Y.K. Enterprise Co.,Ltd

ภาคผนวก ง

การเตรียมเยื่อ

1. วิธีการหาความชื้นของกระดาษทำผิวกล่อง KI

นำเยื่อ KI มาทำการชั่งน้ำหนักก่อนอบหลังจากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำออกจากตู้อบทิ้งไว้ให้เย็นใน desicator หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักหลังอบและนำมาคำนวณหาปริมาณความชื้นของเยื่อ KI ดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{ความชื้นของเยื่อ KI (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักเยื่อก่อนอบ} - \text{น้ำหนักเยื่อหลังอบ}}{\text{น้ำหนักเยื่อก่อนอบ}} \times 100$$

2. วิธีการคำนวณเยื่อในการตีกระจายเยื่อ

เนื่องจากการตีกระจายเยื่อด้วย hydrapulper ใช้น้ำหนักเยื่อแห้งในการตีกระจายเยื่อ 250 กรัม น้ำหนักแห้งโดยกำหนดให้มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยการคำนวณคำนวณได้ดังนี้

เยื่อมีความชื้นร้อยละ 10 แสดงว่าน้ำหนักเยื่อมีความชื้น 100 กรัม จะมีเยื่อแห้งอยู่ 90 กรัม

ถ้าต้องการเยื่อแห้ง 90 กรัม ต้องชั่งน้ำหนักเยื่อที่มีความชื้น 100 กรัม

ถ้าต้องการเยื่อแห้ง 250 กรัม ต้องชั่งน้ำหนักเยื่อที่มีความชื้นเท่ากับ $(250 \times 90) / 100 = 225$ กรัม

ดังนั้น ต้องชั่งเยื่อที่มีความชื้นร้อยละ 10 มา 225 กรัม เพื่อให้ได้น้ำหนักเยื่อแห้ง 250 กรัม

ถ้าต้องการให้มีความเข้มข้นเยื่อเท่ากับร้อยละ 5 หมายความว่า

กระดาษแห้ง 5 กรัม ตีกระจายในน้ำ 95 กรัม

ถ้ากระดาษแห้ง 250 กรัม จะต้องตีกระจายในน้ำ 4750 กรัม

3. วิธีการคำนวณหาปริมาณน้ำเยื่อสำหรับการหาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness)

เนื่องจากตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-94 กำหนดให้ใช้ความเข้มข้นของเยื่อเท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาตรทั้งหมด 1000 มิลลิลิตร ในการหาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ และในการหาจะตวงน้ำเยื่อมาจากเครื่องตีกระจายเยื่อซึ่งมีความเข้มข้นของน้ำเยื่อเท่ากับ 5 ดังนั้นจะใช้สูตรดังต่อไปนี้ในการตวงปริมาตรน้ำเยื่อเพื่อมาทำการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อตามมาตรฐานที่ต้องการคือ ร้อยละ 0.3

C_2 = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อในเครื่องบดเยื่อคือ ร้อยละ 1.56

V_1 = ปริมาณน้ำเยื่อที่ใช้ในการวัดค่าความสภาพระบายได้ของเยื่อ คือ 1000 มิลลิลิตร

V_2 = ปริมาณน้ำเยื่อที่ต้องตวงจากเครื่องบดเยื่อ

$$0.3 \times 1000 = 5 \times V_2$$

$$V_2 = (0.3 \times 1000) / 5$$

$$V_2 = 60 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้นต้องตวงน้ำเยื่อในเครื่องบดเยื่อที่ความเข้มข้นของน้ำเยื่อร้อยละ 5 มา 60 มิลลิลิตร แล้วทำการเติมน้ำจนมีปริมาณเป็น 1000 มิลลิลิตร แล้วนำไปหาค่าความเป็นอิสระของเยื่อ

4. วิธีการคำนวณน้ำเยื่อไว้ใช้สำหรับการขึ้นแผ่นทดสอบ

4.1 หาน้ำหนักกระดาษแห้ง (o.d weight)

จากกระดาษมีน้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) เท่ากับ 120 กรัมต่อตารางเมตรและมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่วงกลม} &= \pi r^2 \\ &= (3.14)(0.2/2)^2 \\ &= 0.0314 \text{ ตารางเมตร} \end{aligned}$$

ถ้าพื้นที่ 1 ตารางเมตร มีน้ำหนักเท่ากับ 120 กรัม

$$\therefore \text{พื้นที่ } 0.0314 \text{ ตารางเมตร จะมีน้ำหนักเท่ากับ } 0.0314 \times 120 = 3.70 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นกระดาษ 1 แผ่น จะมีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 3.70 กรัม และหากต้องการเตรียมน้ำเยื่อสำหรับกระดาษ 10 แผ่น จะต้องใช้เยื่อแห้งเท่ากับ 37 กรัม

4.2 วิธีคำนวณหาปริมาณน้ำเยื่อสำหรับการขึ้นแผ่นกระดาษ

$$\text{ฉะนั้นต้องใช้เยื่อทั้งหมด} = 101.89 \text{ g} \times 10$$

$$= 1018.9 \text{ g (ซึ่งเป็นเยื่อที่ความเข้มข้น 1.96 \%)}$$

$$\text{นำเยื่อมาเจือจางให้ได้ 1\% โดยจะเท่ากับน้ำหนักเยื่อแห้ง} = 3.77 \text{ g} \times 10$$

$$= 37.7 \text{ g}$$

$$\text{ฉะนั้น เยื่อแห้ง } 37.7 \text{ g ที่ความเข้มข้น } q \% \text{ มาจากน้ำเยื่อทั้งหมด} =$$

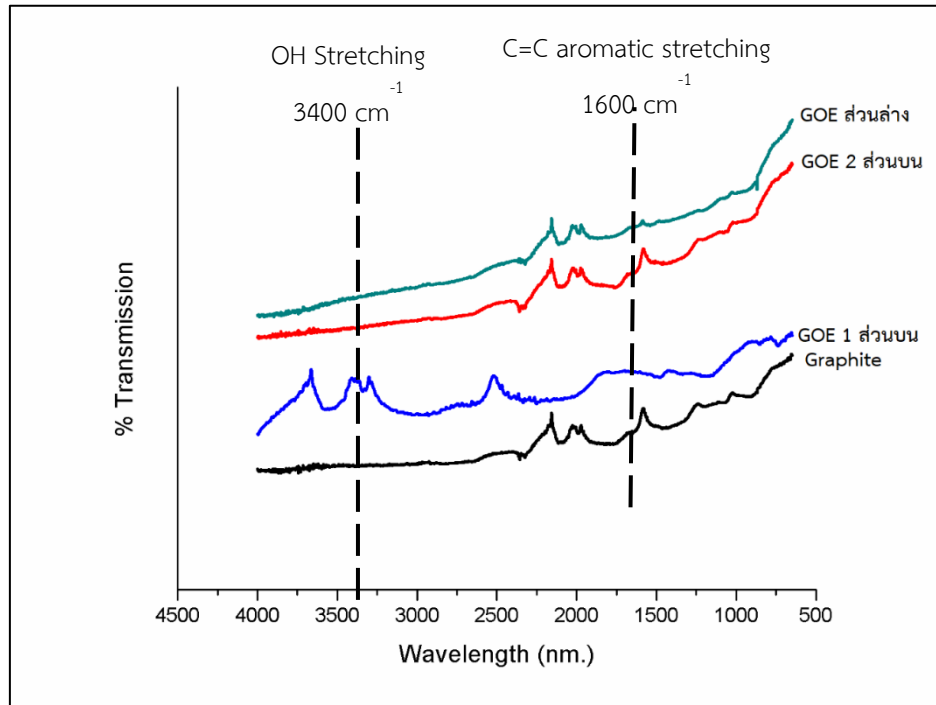
$$100/q \times 37.7 \text{ g}$$

$$= 3770 \text{ g}$$

$$\text{ฉะนั้นต้องเติมน้ำ} = 3770 \text{ g} - 1018.9 \text{ g}$$

$$= 2751 \text{ g}$$

ภาคผนวก จ



จากผลการทดลองพบว่า แกรไฟต์ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นจะพบสเปกตรัมที่แสดงลักษณะเฉพาะของแกรไฟต์จะพบที่การสั่นที่ความถี่ 1614 cm^{-1} เป็นลักษณะเฉพาะของหมู่ฟังก์ชันพันธะคู่ของคาร์บอนกับคาร์บอน (C=C aromatic) ส่วนการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าจะได้ผลิตภัณฑ์ออกเป็น 3 ส่วนดังแสดงในภาพ โดยส่วนที่ 1 จะเรียกว่า GOE 1 จะพบว่า การสั่นที่ความถี่ 3316 cm^{-1} ซึ่งแสดงคุณลักษณะที่สำคัญของหมู่ไฮดรอกซิล (OH Stretching) การสั่นที่ความถี่ 1614 cm^{-1} แสดงคุณลักษณะของพันธะคู่ในวงอะโรมาติก (C=C aromatic) จึงสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ในส่วนนี้คือ แกรฟีนออกไซด์หรือแกรไฟต์ออกไซด์ ส่วนที่ 2 จะเรียกว่า GOE 2 จะพบว่า การสั่นที่ความถี่ 1614 cm^{-1} แสดงคุณลักษณะของพันธะคู่ในวงอะโรมาติก (C=C aromatic) และส่วนที่ 3 จะเรียกว่า GOE ส่วนล่าง จะพบว่า การสั่นที่ความถี่ 1614 cm^{-1} แสดงคุณลักษณะของพันธะคู่ในวงอะโรมาติก (C=C aromatic) โดยทั้งส่วนที่ 2 และ 3 พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงสเปกตรัมของแกรไฟต์ จึงอาจสรุปได้ว่า ผลิตภัณฑ์ในสองส่วนนี้อาจเป็นแกรไฟต์หรือแกรฟีน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกชพร ตันกันภัย เกิดเมื่อวันที่ 5 เมษายน พ.ศ.2536 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

- ปี พ.ศ.2554 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรามคำแหง

- ปี พ.ศ.2558 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (ประสานมิตร) เกียรตินิยมอันดับ 2

เกียรติประวัติทางการศึกษา

- ได้รับการคัดเลือกเข้าร่วมโครงการ ASIA Workshop on Image science 2015 และได้รับทุน JASSO ณ มหาวิทยาลัยชิบะ ประเทศญี่ปุ่น

- ได้รับการคัดเลือกเข้าร่วมโครงการ TWINCLE Long Course Program 2017 และได้รับทุน JASSO ณ มหาวิทยาลัยชิบะ ประเทศญี่ปุ่น

- ได้รับทุนทำวิจัย ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช รุ่นที่ 3/2560

ผลงานวิชาการ

- Thangunpai, K., Shigeru, T., Enomae, T., Chairrekij, S.Pongsatabodee, S. and Pongsatabodee, S.(2017). Reduced graphene oxide paper. TWINCLE Symposium"Post TWINCLE program:New Direction of Sustainable Partnership".pp. 36. 18 Mar 2017. Chiba, Japan.

- Thangunpai, K., Shigeru, T., Enomae, T., Chairrekij, S.Pongsatabodee, S. and Pongsatabodee, S.(2017). Effect of graphene oxide on strength properties of paper. The 1st Suan Sunandha Academic National Conference on Science and Technology "The Creativity and Innovation to Thailand 4.0" (SANSCI2017). pp. 1328-1334. 10 Nov 2017. Bangkok, Thailand.