

การศึกษาการแสดงลักษณะเฉพาะของวัสดุผสมคาร์บอนกับพอลิเมอร์
ในช่วงคลื่นความถี่วิทยุ

RADIO-FREQUENCY CHARACTERIZATION OF CARBON
NANOMATERIAL/POLYMER COMPOSITES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RADIO-FREQUENCY CHARACTERIZATION OF CARBON
NANOMATERIAL/POLYMER COMPOSITES



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING
IN NANOMATERIALS ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาการแสดงลักษณะเฉพาะของวัสดุผสมคาร์บอนกับ
พอลิเมอร์ในช่วงคลื่นความถี่ย่านวิทยุ

Special Project Title Radio-Frequency Characterization of Carbon
Nanomaterial/Polymer Composites

นักศึกษา นางสาว ญัฐธยาน์ สุขกร

รหัสประจำตัว 55110019

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

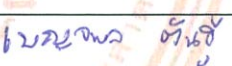



ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน

ปีการศึกษา 2558

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ชัตติยา ชลาพัฒน์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์
ดร. ชัญชนา ธนชยานนท์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. เบญจพล ตันอู๋	
ดร. กนกทิพย์ บุญยรัตกลิน	
ดร. ชัตติยา ชลาพัฒน์	
ผศ.ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์	

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติ
ให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชูดีไพจิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่..... เดือน..... พ.ศ. 2559

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาการแสดงลักษณะเฉพาะของวัสดุผสมคาร์บอนกับ
	พอลิเมอร์ที่ความถี่ย่านวิทยุ
นักศึกษา	นางสาวณัฐธยาน์ สุขกร
รหัสประจำตัว	55110019
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. ชัตติยา ชลาพัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์ ดร. ชัญชนา ธนชยานนท์

บทคัดย่อ

ระบบการสื่อสารทั่วไปในปัจจุบันมีการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ย่านวิทยุเป็นตัวกลางในการรับและส่งสัญญาณ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างดงกล่าวสามารถส่งผลต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางชนิดยกตัวอย่างเช่น เครื่องมือที่ใช้ในโรงพยาบาล โดยอาจก่อให้เกิดความเสียหายเนื่องจากเป็นสัญญาณรบกวน ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ โดยการป้องกันด้วยวัสดุที่มีสมบัติสะท้อนหรือดูดกลืนสัญญาณรบกวนความถี่วิทยุ ทั้งนี้ประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุแต่ละชนิดมีค่าขึ้นกับค่าการนำไฟฟ้าและค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าเป็นต้น ในงานวิจัยนี้จึงนำวัสดุนาโนคาร์บอนชนิดต่างๆที่นำไฟฟ้าและมีน้ำหนักต่อปริมาตรน้อยกว่าโลหะทั่วไปมาศึกษาสมบัติเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ย่านวิทยุ โดยเลือกพอลิแลคติกแอซิดซึ่งเป็นไบโอพอลิเมอร์มาเป็นตัวกลางประสานให้วัสดุนาโนคาร์บอนครบรูปได้ วัสดุนาโนคาร์บอนที่เลือกมาศึกษา คือ คาร์บอนแบล็ค กราไฟต์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรม และคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ขึ้นเองจากน้ำมันมะพร้าว ทั้งนี้ได้เตรียมวัสดุผสมของคาร์บอนแบล็คและกราฟไฟต์ที่ความเข้มข้น 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเตรียมวัสดุผสมของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 และ 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นนำวัสดุผสมที่เตรียมได้ไปวัดสมบัติทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ และวัดค่าสภาพยอมได้ทางไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเครือข่ายเชิงเวกเตอร์ ในช่วงความถี่ 1 ถึง 13 กิกะเฮิร์ต จากผลการวัดพบว่าวัสดุผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้งสองชนิดที่ผสมในอัตราส่วนเพียง 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าและสมบัติการดูดกลืนพลังงานที่สูงกว่าวัสดุผสมคาร์บอนแบล็คและวัสดุผสมกราฟไฟต์ที่ผสมในอัตราส่วน 0.5 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Radio-Frequency Characterization of Carbon Nanomaterial/Polymer Composites
Student	Miss Nuttaya Sukgorn
Student ID	5110019
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterials Engineering
Year	2015
Special Project Advisor	Dr. Khattiya Chalapat
Special Project Co-Advisor	Assistant Prof. Dr. Winadda Wongwiriyanon Dr. Chanchana Thanachayanont

Abstract

Nowadays radio frequencies are widely used in wireless broadcastings and communications. But these waves can cause electromagnetic interferences (EMI) and failures in some electronic devices including the equipment used in hospitals. The problems of the electromagnetic interference can be solved by using materials that can reflect and/or absorb radio frequency waves. The shielding effectiveness of a material depends on its physical properties such as the conductivity and electrical permittivity. In this work, five types of carbon nanomaterials (CNMs), that have good conducting properties and small weight-to-volume ratio compared to conventional metals, are chosen for the study of EMI properties at radio frequencies. A biodegradable polymer, namely poly-lactic acid, is used as a binder for CNMs composites. The CNMs chosen are carbon black particles, graphite powder, multi-walled carbon nanotubes, commercial single-walled carbon nanotubes and in-house prepared single-walled carbon nanotubes. The carbon black and the graphite composites are prepared at the concentrations of 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 %wt, while the carbon nanotube composites are prepared at 0.1, 0.2, 0.3 and 0.4 %wt. Then, the composites are morphologically characterized by optical microscope. The RF characterization is measured by vector network analysis in the range of 1 to 13 GHz. The measuremental results show that the single-walled carbon nanotube and multi-walled carbon nanotube composites at the concentration of 0.1 wt% exhibit higher

electrical permittivity and larger energy absorption, when compared to the carbon black and graphite composites at the higher concentration of 0.5 to 2.0 wt%.



กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้ได้รับการสนับสนุน ให้คำแนะนำ และคำปรึกษาเป็นอย่างดีตั้งแต่เริ่มต้น ตลอดจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากหลายฝ่าย

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชัตติยา ชลาพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์ และ ดร.ชญชญา ธนชยานนท์ ที่มอบโอกาสในการทำงาน การดูแลเอาใจใส่ข้าพเจ้ามาเป็นอย่างดี ทำให้ได้รับประสบการณ์และความรู้ที่มีประโยชน์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ต่อไปในภายภาคหน้า ขอขอบพระคุณ ดร.กฤษณา ศิริเลิศมุกุล สำหรับคำแนะนำ และความเอื้อเฟื้อสำหรับวัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างมาก ขอขอบคุณโครงการสร้างปัญญาวิทย์ ผลิตนักเทคโนโลยี (Young Scientist and Technologist Program : YSTP) ภายใต้ความดูแลของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่มอบทุนสนับสนุนและโอกาสในการดำเนินงานวิจัยร่วมกับนักวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) ขอขอบคุณ อาคารวิจัยนาโนเทคโนโลยีสิรินธร วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย, ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์เฉพาะทางฟิสิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และ ภาควิชาการสื่อสารข้อมูลและเครือข่าย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการวัดและวิเคราะห์ผล และท้ายที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่และครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ให้ความสนับสนุน และกำลังใจเสมอมา

ณัฐธยาน์ สุขกร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	IX
สารบัญภาพ (ต่อ).....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 สมมติฐาน.....	3
1.5 ขอบเขตการดำเนินการ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วัสดุคาร์บอน.....	4
2.2 คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	6
2.3 พอลิเมอร์.....	13
2.4 วัสดุกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	14
2.5 เครื่องมือวิเคราะห์.....	19
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	26
3.1 สารเคมี.....	26
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	26
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์.....	27
3.4 การเตรียมวัสดุผสมคาร์บอนกับพอลิเมอร์และการทดสอบลักษณะเฉพาะในช่วง คลื่นความถี่วิทยุ.....	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	35
4.1 สมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์จากน้ำมันมะพร้าว.....	35
4.2 สมบัติของวัสดุนาโนคาร์บอน.....	38
4.3 วัสดุผสมคาร์บอนกับพอลิแลคติกแอซิด.....	42
4.4 ลักษณะเฉพาะในช่วงคลื่นความถี่วิทยุของแผ่นพลาสติกของวัสดุผสมคาร์บอน และพอลิแลคติกแอซิด.....	44
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	58
บรรณานุกรม.....	60
ประวัติผู้เขียน.....	64

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ความหนาของแผ่นพลาสติกจากพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุผสมคาร์บอน	46



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แผนภาพแสดงการดำเนินงาน	2
2.1 โครงสร้างอะตอมที่เกิดจากพันธะไฮบริดชนิดต่างๆของคาร์บอนและตัวอย่างวัสดุ	4
2.2 แบบจำลองโครงสร้างของคาร์บอนแบล็ค (Carbon black).....	5
2.3 โครงสร้างของบัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์รีน (Buckminsterfullerene).....	5
2.4 a) โครงสร้างของกราฟีน และ b) โครงสร้างของกราฟาइट.....	6
2.5 ชนิดของท่อนาโนคาร์บอน a) ผนังเดี่ยว (Single-walled), b) ผนัง 2 ชั้น (Double-walled) และ c) ผนังหลายชั้น (Multi-walled).....	7
2.6 ไครัลเวกเตอร์ บนแผ่นกราฟีน	8
2.7 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์แบ่งตามไครัลเวกเตอร์	8
2.8 ตัวอย่างการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปประยุกต์ใช้งานแบบเส้นเดี่ยว a) ทรานซิสเตอร์ (Single electron transistor) b) เข็มในกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM tip)	9
2.9 บัคกี้เปเปอร์ (Buckypaper) จากคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีการเรียงตัวแบบสุ่ม (Randomly oriented).....	9
2.10 วัสดุผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์กับพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวของเฟสผสม a) แบบสุ่ม (Randomly alignment) และ b) แบบมีทิศทาง (Alignment).....	10
2.11 กระบวนการระเหยด้วยเลเซอร์	11
2.12 กระบวนการอาร์กติสซาร์จ	12
2.13 กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์จากไอระเหยเคมีโดยใช้ความร้อน	12
2.14 ตัวอย่างโมเลกุลพอลิเมอร์ธรรมชาติ a) เซลลูโลส b) พอลิแลคติกแอซิด.....	13
2.15 ตัวอย่างโมเลกุลมอนอเมอร์ของพอลิเมอร์สังเคราะห์ a) พอลิโพรพิลีน b) พอลิสไตรีน.....	13
2.16 ปรากฏการณ์กรงของฟาราเดย์ (Faraday's cage phenomena).....	14
2.17 การเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านวัสดุป้องกัน (Shielding) และการวัดค่า Skin depth	15
2.18 ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงภายในวัสดุที่ขึ้นกับความถี่.....	16
2.19 ค่าที่ได้จากความถี่ที่เกิดการสั้นพ้องที่จะนำไปคำนวณเป็นค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า.....	17
2.20 กระบวนการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	18
2.21 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	18
2.22 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	19

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.23 การเกิดสัญญาณภาพโดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด a) การเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ b) การสะท้อนกลับ (Back-scatter electron) c) การเกิดรังสีเอ็กซ์ (X-rays emission) และการเกิดโอเจอิเล็กตรอน (Auger electron emission)	20
2.24 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	21
2.25 เครื่องรามานสเปกโตรสโกปี (Raman spectroscopy).....	22
2.26 รามานสเปกตราของกราฟีนบนแผ่นรองรับซิลิกอน (ภาพบน)และ กราไฟต์ (ภาพล่าง).....	23
2.27 รามานสเปกตราของคาร์บอนนาโนทิวบ์	24
2.28 ซ้าย) เครื่องมือวิเคราะห์ทางด้านโครงข่ายและสัญญาณ (Vector Network Analyzer) และ ขวา) วิธีการวัดแบบใช้ฐานรองรับ (Substrate measurement system).....	25
2.29 แผนผังการวัดค่าการกระเจิง (Scattering parameter) โดยใช้การวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเครือข่ายเชิงเวกเตอร์สองหัววัด (Two-probe measurement).....	25
3.1 แผนภาพระบบเตาสำหรับการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์	28
3.2 โปรแกรมการทำงานของเตาที่ 1 และ เตาที่ 2	28
3.3 ระบบกรองสาร โดยชุดกรองสุญญากาศ ประกอบด้วย ชุดกรอง (Filtration) ขวดลดความดัน (Suction flask) และ ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)	30
3.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่นพลาสติก (Solvent casting).....	32
3.5 ภาพวาดแผ่นเรโซเนเตอร์ a) แบบเส้นตรง และ b) แบบวงกลม	33
3.6 ลักษณะของข้อมูลตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้ a) ค่าการกระเจิง (S ₂₁) ที่ค่าความถี่ช่วง 1 – 13 กิกะเฮิร์ต และ b) ข้อมูลที่ใช้สำหรับการคำนวณค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า	33
4.1 a-b) ลักษณะสัญญาณวิทยา และ c-d) โครงสร้างภายใน ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้	36
4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของคาร์บอนนาโนทิวบ์ a) ที่สังเคราะห์ได้ b) การแทรกครั้งที่หนึ่ง c) การให้ความร้อนครั้งที่สอง.....	37
4.3 ผลการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด a) Carbon black b) Graphite c) MWNT d) Synthesized SWNT และ e) Commercial SWNT	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.4 ผลการวิเคราะห์วัสดุคาร์บอนโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน a) Carbon black b) Graphite c) MWNT และ d) Synthesized SWNT.....	40
4.5 รามานสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโกปี.....	41
4.6 สารละลายของวัสดุผสมพอลิแลคติกกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เตรียมโดยการปั่นกวนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	42
4.7 ผลการขึ้นรูปวัสดุผสมพอลิแลคติกกับคาร์บอน โดยใช้สารละลายปริมาณ 100 มิลลิลิตร.....	43
4.8 ภาพถ่ายของแผ่นพลาสติกที่ขึ้นรูปได้ a) แผ่นพลาสติกจากพอลิแลคติกแอซิด และ b) แผ่นพลาสติกจากวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น.....	44
4.9 ลักษณะการกระจายตัวของวัสดุคาร์บอนในพอลิแลคติกแอซิดที่กำลังขยาย 5 เท่า a) พอลิแลคติกแอซิด b) 0.5% คาร์บอนแบล็ค c) 0.5% กราไฟต์ d) 0.1% คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น e) 0.1% คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้ และ f) 0.1% คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรม	45
4.10 ค่าสัญญาณการส่งผ่านของแผ่นพลาสติกชนิดพอลิแลคติกแอซิด ในช่วงความถี่ 1-13 กิกะเฮิร์ต	47
4.11 ค่าสัญญาณการส่งผลของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนแบล็ค ในช่วงความถี่ 1-13 กิกะเฮิร์ต.....	48
4.12 ค่าสัญญาณการส่งผ่านของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับกราไฟต์ ในช่วงความถี่ 1-13 กิกะเฮิร์ต.....	49
4.13 ค่าสัญญาณการส่งผ่านของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น ในช่วงความถี่ 1-13 กิกะเฮิร์ต	49
4.14 ค่าสัญญาณการส่งผ่านของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้ ในช่วงความถี่ 1-13 กิกะเฮิร์ต.....	50
4.15 ค่าสัญญาณการส่งผ่านของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรมในช่วงความถี่ 1-13 กิกะเฮิร์ต.....	51
4.16 ค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q-factor) ของวัสดุผสมคาร์บอนกับพอลิแลคติกแอซิดที่สัดส่วนของสารเติมโดยน้ำหนักต่างกัน.....	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.17 a) ส่วนจริง และ b) ส่วนจินตภาพของสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าของแผ่นพลาสติกชนิด พอลิแลคติกแอซิด	53
4.18 a) ส่วนจริง และ b) ส่วนจินตภาพของสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าของวัสดุผสมพอลิแลคติก แอซิดกับคาร์บอนแบล็ค	53
4.19 a) ส่วนจริง และ b) ส่วนจินตภาพของสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าของวัสดุผสมพอลิแลคติก แอซิดกับกราฟไฟต์.....	54
4.20 a) ส่วนจริง และ b) ส่วนจินตภาพของสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าของวัสดุผสมพอลิแลคติก แอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น	55
4.21 a) ค่าส่วนจริง และ b) ค่าส่วนจินตภาพของสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าของวัสดุผสม พอลิ แลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้และคาร์บอน นาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรม	55
4.22 ค่าสัดส่วนแทนเจนต์ของการสูญเสียของวัสดุผสมพอลิแลคติกกับวัสดุนาโนคาร์บอนที่ สัดส่วนการเติมโดยน้ำหนักต่างกัน	57

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันการติดต่อสื่อสารถือเป็นปัจจัยหนึ่งในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เนื่องจากทำให้มนุษย์สามารถรับและส่งข้อมูลหรือข่าวสาร จากต้นทางไปยังปลายทางได้อย่างรวดเร็ว โดยผ่านทางหลายช่องทางการสื่อสาร เช่น โทรศัพท์ อินเทอร์เน็ต การสื่อสารทางไกลผ่านดาวเทียม เป็นต้น โดยมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ที่ความถี่วิทยุ (Radio-frequency) เป็นตัวกลางในการรับและส่งสัญญาณ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่วิทยุที่ใช้ในระบบการสื่อสารดังกล่าว อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ หรือ อาจเรียกได้ว่า เป็นสัญญาณรบกวน (Interference)¹ โดยอาจทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีการทำงานผิดปกติ หรือ เกิดความเสียหาย เช่น การใช้เครื่องมือสื่อสารในโรงพยาบาล บริเวณที่มีเครื่องมือทางการแพทย์ แต่การใช้โลหะเป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์² เพื่อป้องกันคลื่นรบกวน ทำให้อุปกรณ์มีน้ำหนักมากขึ้น และนอกจากนี้โลหะยังมีราคาสูงอีกด้วย จึงมีความต้องการที่จะพัฒนาวัสดุชนิดอื่นขึ้นมาเพื่อใช้แทนโลหะ โดยที่วัสดุเหล่านี้ จะสามารถแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าวของโลหะได้ คือ มีอัตราส่วนน้ำหนักต่อพื้นที่รับคลื่นตกกระทบที่ต่ำกว่า ทั้งนี้วัสดุคาร์บอน³ ได้แก่ คาร์บอนแบล็ค กราไฟต์ และคาร์บอนนาโนทิวบ์ จึงเป็นตัวเลือก สำหรับการนำมาศึกษาสมบัติที่เกี่ยวข้องกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แต่การจะขึ้นรูปวัสดุคาร์บอนให้เป็นแผ่นและคงรูปอยู่ทำได้ยาก โดยทั่วไป การขึ้นรูปวัสดุคาร์บอน สามารถทำได้ในรูปแบบวัสดุผสม (Composite) หรือ กระดาษคาร์บอน (Buckypaper) ที่ขึ้นรูปจากท่อคาร์บอน

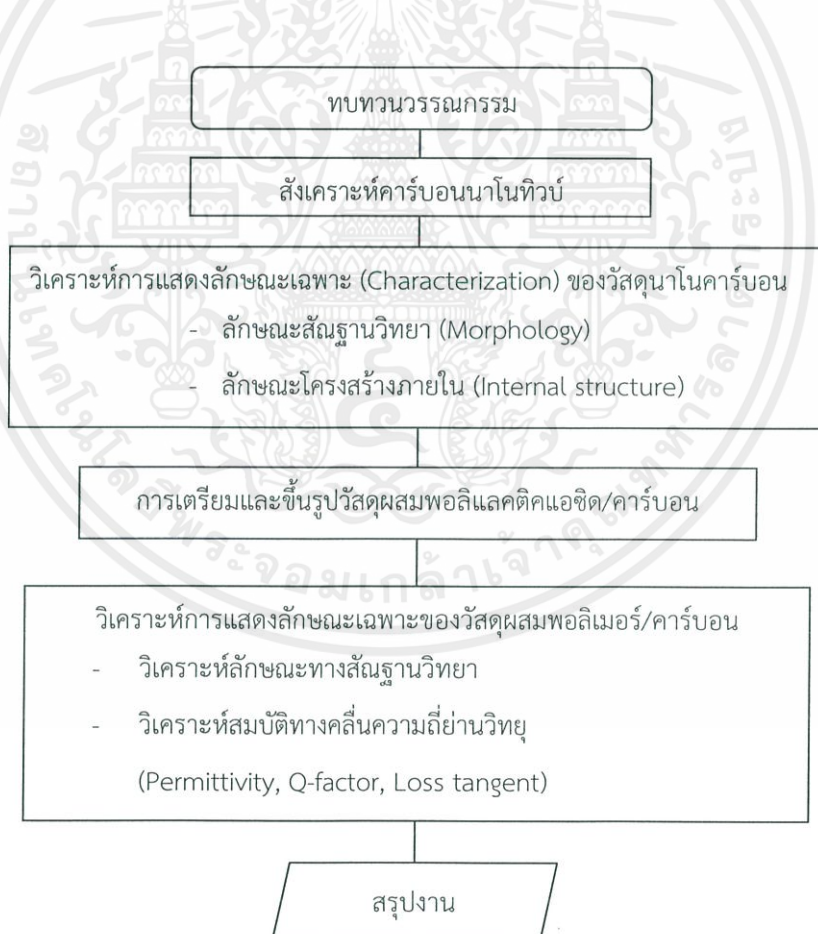
ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกพอลิเมอร์มาเป็นวัสดุตัวกลางเพื่อทำให้วัสดุคาร์บอนคงรูปได้ โดยในงานวิจัย จะทำการศึกษาการขึ้นรูปวัสดุผสมคาร์บอนกับพอลิเมอร์ โดยศึกษาตัวแปรความเข้มข้นของวัสดุคาร์บอน ต่อสมบัติที่ความถี่วิทยุ คือ ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยใช้การตกเคลือบด้วยไอเคมี
- 1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการขึ้นรูปวัสดุผสมจากพอลิเมอร์/วัสดุคาร์บอน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติที่คลื่อนความถี่ย่านวิทยุของวัสดุผสมพอลิเมอร์กับวัสดุคาร์บอนชนิดต่างๆ
- 1.2.4 เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของวัสดุคาร์บอนต่อสมบัติที่คลื่อนความถี่วิทยุ

1.3 แผนการดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงานแสดงดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 แผนภาพแสดงการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 สมมติฐาน

- 1.4.1 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารตั้งต้น ด้วยวิธีการเคลือบไฮโรเธียมเคมีด้วยความร้อนทำให้ได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว
- 1.4.2 การสร้างหมู่ฟังก์ชันทำให้วัสดุคาร์บอนกระจายตัวในสารละลายพอลิเมอร์ได้
- 1.4.3 ชนิดของวัสดุคาร์บอนที่ผสมในพอลิเมอร์มีผลต่อสมบัติที่เกี่ยวข้องกับคลื่นความถี่ย่านวิทยุ
- 1.4.4 ความเข้มข้นของวัสดุคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นทำให้แผ่นพลาสติกมีค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าไฟฟ้าสูงขึ้น

1.5 ขอบเขตการดำเนินการ

- 1.5.1 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยวิธีการตกเคลือบทางเคมี มีเงื่อนไขคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการระเหยสารตั้งต้นเป็น 350 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็น 850 องศาเซลเซียส
- 1.5.2 การสร้างหมู่ฟังก์ชันให้กับวัสดุคาร์บอนใช้สารละลายกรดออกแทนิกเข้มข้น คือ กรดซัลฟิวริก และ กรดไนตริก ในอัตราส่วน 3 ต่อ 1
- 1.5.3 การศึกษาการขึ้นรูปวัสดุผสมพอลิเมอร์/วัสดุคาร์บอน โดยมีพอลิเมอร์เป็นเมตริกเฟส (Matrix phase) ของวัสดุผสม คือ พอลิแลคติกแอซิด และมีวัสดุคาร์บอนเป็นเฟสเสริมแรง (Reinforce phase) คือ คาร์บอนแบล็ค แกรไฟต์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว และ คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้
- 1.5.4 สัดส่วนของการเติมวัสดุคาร์บอนลงในพอลิแลคติกแอซิด คือ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0% โดยน้ำหนัก สำหรับคาร์บอนแบล็คและกราไฟต์ และ 0.1 0.2 0.3 และ 0.4% โดยน้ำหนัก สำหรับคาร์บอนนาโนทิวบ์
- 1.5.5 การวิเคราะห์ตัวอย่าง คือ วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope) วิเคราะห์โครงสร้างภายในของวัสดุคาร์บอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscope) วิเคราะห์ชนิดและความเป็นผลึกด้วยเครื่องรามานสเปกโตรสโกป (Raman spectroscopy) และ วิเคราะห์ค่าสภาพยอมได้ทางไฟฟ้า (Electrical permittivity) ด้วยเครื่องวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเครือข่ายเช็กเวกเตอร์ (Vector network analysis) ในช่วงความถี่ 1-13 กิกะเฮิร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

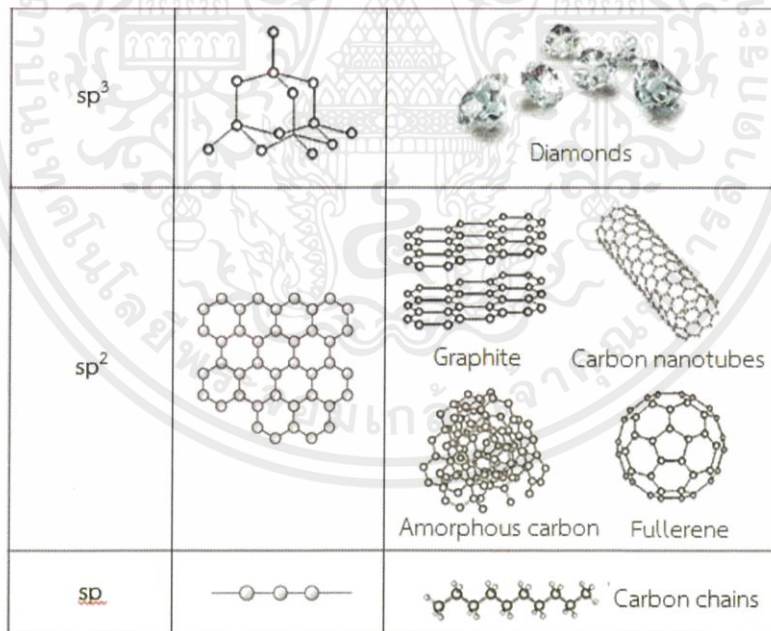
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุคาร์บอน

2.1.1 อัญรูปของคาร์บอน

อัญรูป (Allotropes) คือ ธาตุเดียวกันที่มีสมบัติและโครงสร้างต่างกัน โดยธรรมชาติคาร์บอนจะมีอัญรูปเพียงสองแบบ คือ เพชร และ กราไฟต์ ทั้งนี้โครงสร้างที่แตกต่างกัน เกิดจากการรวมตัวกันของออร์บิทัลของวาเลนซ์อิเล็กตรอน เรียกว่า การเกิดไฮบริด (Hybridization)⁴ ทำให้คาร์บอนสร้างพันธะแตกต่างกัน 3 ชนิด คือ พันธะเดี่ยวสี่แกน (sp^3 Hybridization) พันธะเดี่ยวสามแกน (sp^2 Hybridization) และ พันธะเดี่ยวหนึ่งแกน (sp Hybridization) แสดงดังภาพที่ 2.1



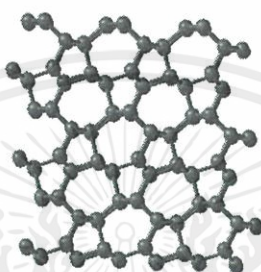
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างอะตอมที่เกิดจากพันธะไฮบริดชนิดต่างๆของคาร์บอนและตัวอย่างวัสดุ (ที่มา Avinash C. T., Carbon Nanotropes: A Contemporary Paradigm in Drug Delivery, Materials, 8, 3068-3100, 2015)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะยกตัวอย่างอัญรูปของคาร์บอนที่น่าสนใจดังนี้

2.1.1.1 คาร์บอนแบล็ค

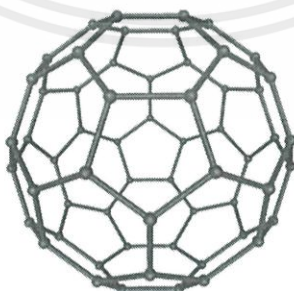
เป็นคาร์บอนที่ถูกค้นพบมาเป็นเวลานาน คาร์บอนแบล็คเป็นผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สังกะสีได้จากการเกิดควันสีดำ โดยสีดำมาจากสีของคาร์บอนแบล็ค เรียกว่า เขม่าควัน โดยคาร์บอนแบล็คมีรูปร่างเป็นก้อนกลม (Sphere shape) ประกอบด้วยโครงสร้างไม่เป็นผลึกของคาร์บอน (amorphous carbon) หากมีสมบัติดูดซับกลิ่น หรือ อนุภาค จะถูกเรียกว่า ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)



ภาพที่ 2.2 แบบจำลองโครงสร้างของคาร์บอนแบล็ค (Carbon black)
(ที่มา Theoretical M-Carbon matched to Superhard compressed Graphite,
<http://nextbigfuture.com/>)

2.1.1.2 บักมินสเตอร์ฟูลเลอร์รีน

เป็นโครงสร้างวัสดุนาโนแบบ 3 มิติ (3D-nanomaterial) มีโครงสร้างเป็นรูปทรงกลมกลวง ประกอบด้วยวงคาร์บอนรูปหกเหลี่ยม 20 รูป และห้าเหลี่ยม 12 รูป มีคาร์บอน 60 อะตอม รูปร่างคล้ายกับลูกฟุตบอล⁵ เป็นโครงสร้างที่สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ

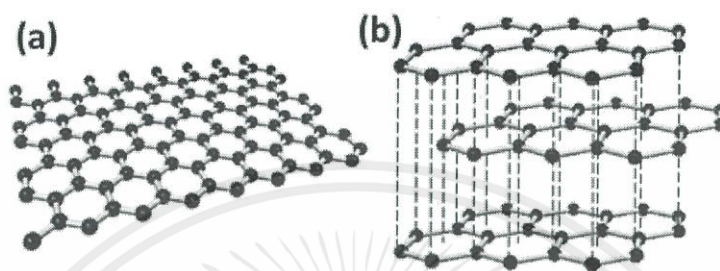


ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของบักมินสเตอร์ฟูลเลอร์รีน (Buckminsterfullerene)
(ที่มา Fullerene, Wikipedia)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.3 กราฟีนและกราฟไฟต์

เป็นโครงสร้างวัสดุนาโนแบบ 1 มิติ (1D-nanomaterial)⁴ ซึ่งมีลักษณะคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb) คือ วงคาร์บอนรูปหกเหลี่ยมต่อกันเป็นแผ่น โดยกราฟไฟต์เป็นโครงสร้างที่เกิดจากแผ่นกราฟีนหลายๆแผ่นซ้อนกันและยึดเหนี่ยวด้วยแรงแวนเดอวาลส์ (Van der waals force) ซึ่งแผ่นกราฟีนมีความหนาเท่ากับคาร์บอน 1 อะตอม



ภาพที่ 2.4 a) โครงสร้างของกราฟีน และ b) โครงสร้างของกราฟไฟต์

(ที่มา A. Kumar and C. H. Lee, Synthesis and Biomedical Applications of Graphene: Present and Future Trends, Advances in Graphene Science, 2013)

2.1.1.4 คาร์บอนนาโนทิวบ์

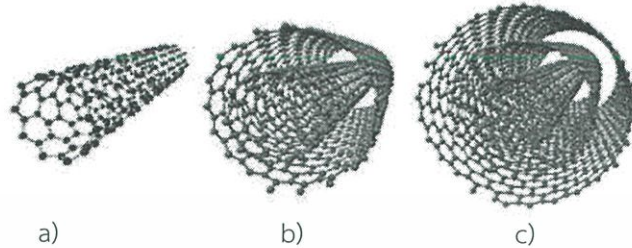
เป็นโครงสร้างคาร์บอนแบบทรงกระบอกกลวง (Hollow-cylindrical) เกิดจากการม้วนตัวของแผ่นกราฟีน⁶ มีสมบัติพิเศษคือ อัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 100 - 1000 โดยรายละเอียดจะอธิบายในหัวข้อ 2.2

2.2 คาร์บอนนาโนทิวบ์

คาร์บอนนาโนทิวบ์ คือ วัสดุนาโนคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวง เกิดจากการม้วนตัวของแผ่นกราฟีน 1 หรือ 2 ชั้นขึ้นไป⁷ เป็นวัสดุนาโนแบบ 2 มิติ (2D-nanomaterial) โดยแผ่นกราฟีนเป็นฟิล์มบางที่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนเชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์แบบไฮบริดไฮเซชัน ชนิดพันธะเดี่ยวสามพันธะ (sp^2 - Hybridization) มีลักษณะเป็น แผ่นฟิล์มบางที่มีรูปหกเหลี่ยม (Hexagon) หลายๆรูปต่อกันคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb) โดยแบ่งประเภทของท่อนาโนคาร์บอนตามจำนวนชั้นของกราฟีนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กราฟีน 1 ชั้น เป็นโครงสร้างผนังเดี่ยว (Single-walled Carbon Nanotubes)
- กราฟีน 2 ชั้น เป็นโครงสร้างผนังสองชั้น (Double-walled Carbon Nanotubes)
- กราฟีน 2 ชั้นขึ้นไป เป็นโครงสร้างผนังหลายชั้น (Multi-walled Carbon Nanotubes)



ภาพที่ 2.5 ชนิดของท่อนาโนคาร์บอน a) ผนังเดี่ยว (Single-walled), b) ผนัง 2 ชั้น (Double-walled) และ c) ผนังหลายชั้น (Multi-walled)

(ที่มา O. Jonghwa, 10 th IOHA London, 2015)

โดยคาร์บอนนาโนทิวบ์จัดเป็นในวัสดุนาโนประเภทเส้นใยนาโน (Nanowire) เนื่องจากมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) อยู่ในช่วง 100 ถึง 1000⁸ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร โดยจะกล่าวถึงสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เกิดจากโครงสร้างของท่อและสมบัติที่เกิดจากการที่คาร์บอนนาโนทิวบ์มีลักษณะเป็นร่างแหดังหัวข้อต่อไปนี้

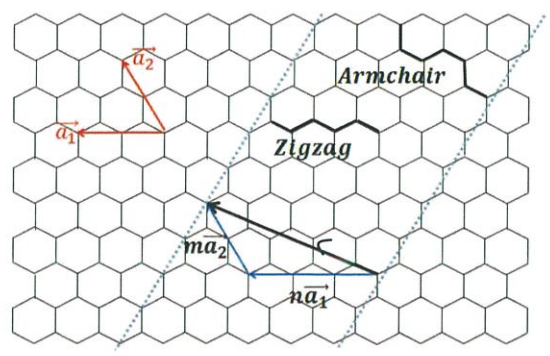
2.2.1 สมบัติของคาร์บอนที่เกิดจากโครงสร้าง

2.2.1.1 สมบัติไครลิตีและสมบัติทางไฟฟ้า

ไครลิตี (Chirality) เป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว ใช้ในการอธิบายสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยไครลิตี หมายถึง การม้วนตัว (Roll-up) ของแผ่นกราฟีน 1 แผ่นขึ้นเป็นท่อ⁹ มีปริมาณเป็นเวกเตอร์ เรียกว่า ไครลเวกเตอร์ (Chiral vector) แสดงถึงทิศทางการม้วนตัวของแผ่นกราฟีนขึ้นเป็นท่อ มีขนาดดังสมการที่ 1

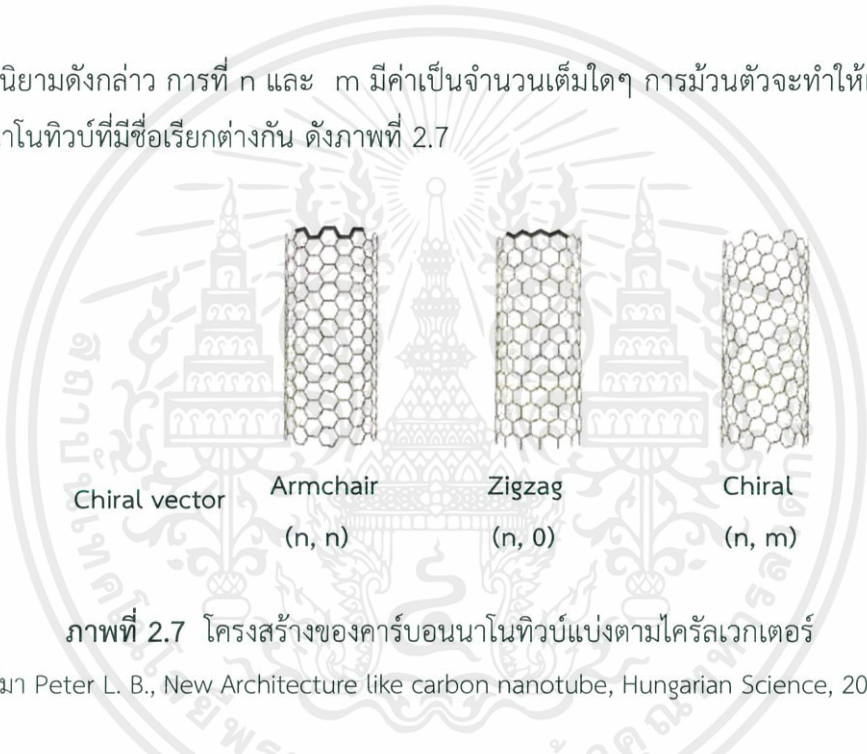
$$\text{Chiral vector } (C_h) = na_1 + ma_2 \quad (1)$$

โดย n และ m คือ จำนวนวงคาร์บอนตามเวกเตอร์ a_1 และ a_2 มีค่าเป็นเลขจำนวนเต็มใดๆ



ภาพที่ 2.6 ไครัลเวกเตอร์บนแผ่นกราฟีน

จากนิยามดังกล่าว การที่ n และ m มีค่าเป็นจำนวนเต็มใดๆ การม้วนตัวจะทำให้เกิดลักษณะคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีชื่อเรียกต่างกัน ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์แบ่งตามไครัลเวกเตอร์

(ที่มา Peter L. B., New Architecture like carbon nanotube, Hungarian Science, 2003)

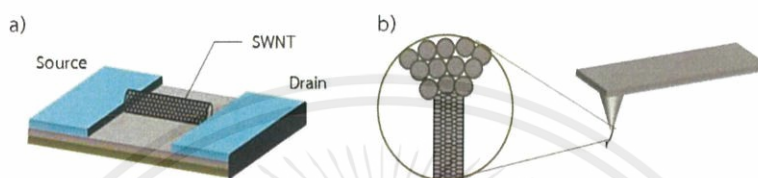
ซึ่งทิศทางการม้วนตัวของแผ่นกราฟีนเป็นโครงสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ คือ ไครัลเวกเตอร์ (Chiral vector) จะเกี่ยวข้องกับ โดยสมบัติทางไฟฟ้า กล่าวคือการทราบไครัลเวกเตอร์ จะทำให้ทราบได้ว่านาโนทิวบ์มีสมบัติเป็นโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ⁹ ดังสมการที่ 2 และ 3

$$n-m/3 = \text{จำนวนเต็ม} \rightarrow \text{มีสมบัติเป็นโลหะ (Metallic)} \tag{2}$$

$$n-m/3 \neq \text{จำนวนเต็ม} \rightarrow \text{มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)} \tag{3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ซึ่งเป็นได้ทั้งโลหะ (Metallic) และสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานแบบเส้นเดี่ยว (Individual nanotubes) ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลาย เช่น การนำท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวเป็นเส้นทางส่งผ่านประจุ (Channel) ในทรานซิสเตอร์⁷ และการเพิ่มความคมชัดของเข็มในกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy) ด้วยการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ติดที่ปลายเข็ม¹⁰ ดังภาพที่ 2.8



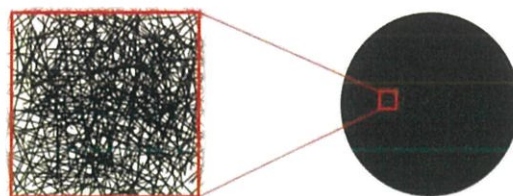
ภาพที่ 2.8 ตัวอย่างการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปประยุกต์ใช้งานแบบเส้นเดี่ยว a) ทรานซิสเตอร์ (Single electron transistor) b) เข็มในกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM tip)

2.2.2 สมบัติจากคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบร่างแห

จากสมบัติของวัสดุนาโน (Nanomaterial) ที่มีพื้นที่ผิวสูงเมื่อเทียบกับวัสดุทั่วไปที่มีขนาดใหญ่ (Bulk material) สำหรับคาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่มีอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาวอยู่ในช่วง $100 - 1000^{\circ}$ ซึ่งถูกจัดให้เป็นวัสดุนาโนประเภทเส้นใยนาโน (Nanowire) โดยจะยกตัวอย่างการใช้งานคาร์บอนนาโนทิวบ์ในลักษณะร่างแห ดังนี้

2.2.2.1 บัคกี้เปเปอร์

เป็นวัสดุที่เกิดจากการที่คาร์บอนนาโนทิวบ์เรียงตัว และ ซ้อนทับกันคล้ายกับเส้นใยกระดาษ และมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ซึ่งอาจมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า กระดาษคาร์บอน แสดงดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 บัคกี้เปเปอร์ (Buckypaper) จากคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีการเรียงตัวแบบสุ่ม (Randomly oriented)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยบัคกี้เปเปอร์มีลักษณะเป็นแผ่นคงรูป ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้จริง ทั้งนี้การนำไปใช้งานมีหลายด้าน¹¹ เช่น แผ่นกรอง (Filter) ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นขั้วไฟฟ้าในตัวเก็บประจุ หรือ แบตเตอรี่ และเป็นตัวระบายความร้อน เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความเป็นรูพรุนสูง (High pore volume) มีค่าความนำไฟฟ้าและความร้อนสูง (High electrical and thermal conductivity) ในขณะที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ (Low thermal expansion efficiency) แต่ไม่เทียบเท่ากับคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเส้นเดี่ยว ซึ่งสมบัติเชิงกลของบัคกี้เปเปอร์ไม่มีความโดดเด่นมากนัก เนื่องจากการจับตัวกันของคาร์บอนนาโนทิวบ์เกิดเป็นแผ่น อาศัยแรงระหว่างโมเลกุล คือ แรงแวนเดอวาลส์ (Van der waals) ทำให้บัคกี้เปเปอร์สามารถทนแรงได้น้อยกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเส้นเดี่ยว ซึ่งมีค่าความเค้นอยู่ในช่วง MPa¹²

2.2.2.2 วัสดุผสม

วัสดุผสม คือ วัสดุที่เกิดจากการผสมกันของสารสองชนิดขึ้นไป โดยสารที่มาผสมกัน ไม่เกิดปฏิกิริยาต่อกัน และ ในสภาวะสุดท้าย จะยังคงสามารถจำแนกความแตกต่างของสารที่มาผสมแต่ละชนิดได้ เช่น ความต่างเฟส ความเป็นผลึกที่ต่างกันของแต่ละสาร เป็นต้น

โดยการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาเป็นสารเติม (Filler) ในวัสดุต่างๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติที่มีอยู่เดิมให้ดีขึ้น หรือ เพิ่มคุณสมบัติใหม่ ซึ่งเป็นการใช้งานที่แพร่หลาย และพบมากในปัจจุบัน โดยสารกลุ่มพอลิเมอร์มักเป็นสารที่ถูกเติมด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์ เนื่องจากเป็นสารกลุ่มที่สามารถเตรียมให้เป็นสารผสมได้ง่าย คือ มีจุดหลอมเหลวต่ำ ยืดหยุ่นแต่คงรูปอยู่ได้ ซึ่งเหมาะจะใช้เป็นเฟสหลัก (Matrix phase) ยกตัวอย่าง เช่น เติมเพื่อให้พอลิเมอร์สามารถนำไฟฟ้าได้ซึ่งเดิมมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า¹³ เติมเพื่อให้พอลิเมอร์สามารถรับแรง (Load) ได้มากขึ้น¹⁴



ภาพที่ 2.10 วัสดุผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์กับพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวของเฟสผสม a) แบบสุ่ม (Randomly alignment) และ b) แบบมีทิศทาง (Alignment)

จากภาพที่ 2.10 การจัดเรียงตัวของคาร์บอนนาโนทิวบ์ หรือ เส้นใยนาโนในวัสดุผสม ส่งผลโดยตรงกับสมบัติเชิงกล โดยวัสดุผสมที่เฟสรอง ในที่นี้คือคาร์บอนนาโนทิวบ์เรียงตัวอย่างมีทิศทาง จะสามารถรับแรงตามยาวของเส้นใยนาโนได้มาก ในขณะที่การจัดเรียงตัวแบบสุ่มจะสามารถรับแรงได้ทุกทิศทาง แต่วัสดุจะทนแรงได้น้อยกว่า

โดยการประยุกต์ใช้วัสดุผสมของคาร์บอนนาโนทิวบ์ในระดับอุตสาหกรรมมีหลายด้าน ดังนี้

- 1) อุตสาหกรรมรถยนต์ เช่น ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ก้านชน
- 2) อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น อุปกรณ์ป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI shielding) วัสดุโปร่งแสงนำไฟฟ้า (Transparent conductor)
- 3) อุตสาหกรรมกีฬา เช่น อุปกรณ์แบดมินตัน (Racket) โครงสร้างเรือสปีดโบ๊ท
- 4) อุตสาหกรรมด้านพลังงาน เช่น ไบโพลาร์ของกึ่งตัวนำ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

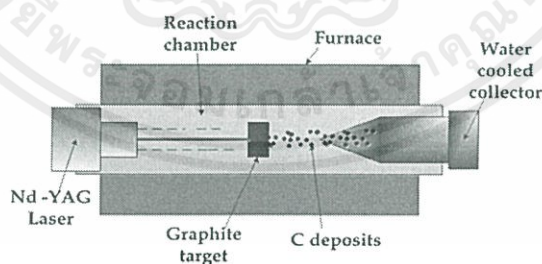
ซึ่งในการประยุกต์ใช้งานของวัสดุผสม จะต้องคำนึงถึงสมบัติของทั้งเฟสหลัก ในที่นี้คือ พอลิเมอร์ และเฟสรอง โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดของพอลิเมอร์ในหัวข้อ 2.3

2.2.3 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์มี 3 กระบวนการ ดังนี้

2.3.3.1 การระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser ablation)

เป็นกระบวนการสังเคราะห์ที่มีสารตั้งต้นเป็นกราไฟต์ โดยใช้แสงเลเซอร์พลังงานสูง กระตุ้นเข้าที่แท่งกราไฟต์ ทำให้คาร์บอนและอนุภาคโลหะหลุดออกโดยมีแก๊สเฉื่อยเป็นตัวพา ไปตกที่ขั้วทองแดง (Cu collector) และเกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยเป็นการสังเคราะห์ภายใต้อุณหภูมิสูง (ประมาณ 1200 องศาเซลเซียส)



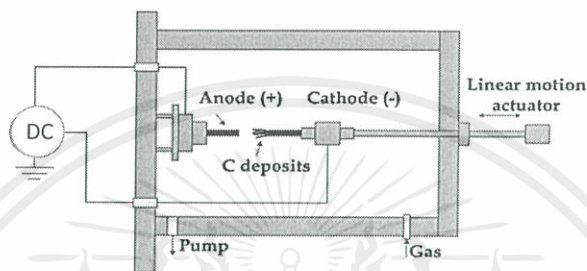
ภาพที่ 2.11 กระบวนการระเหยด้วยเลเซอร์

(ที่มา Gore and Anup Sane, Carbon Nanotubes - Synthesis, Characterization, Applications, Nanotechnology and Nanomaterials, 2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.2 อาร์กดิสชาร์จ (Arc discharge method)

เป็นกระบวนการสังเคราะห์ที่อาศัยหลักการแตกตัวจากประจุไฟฟ้า โดยมีกราฟไฟต์เป็นขั้วบวกและขั้วลบ และใช้การจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงและใช้อุณหภูมิภายในระบบสูงกว่า 3000 องศาเซลเซียส ทำให้คาร์บอนแตกตัวจากขั้วบวก ซึ่งเป็นแท่งกราฟไฟต์ที่มีโลหะเป็นคะตะลิสต์ เช่น เหล็ก นิกเกิล หรือโคบอลต์ผสมอยู่ และเคลื่อนที่ตามสนามไฟฟ้าไปติดและเกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ขั้วลบ

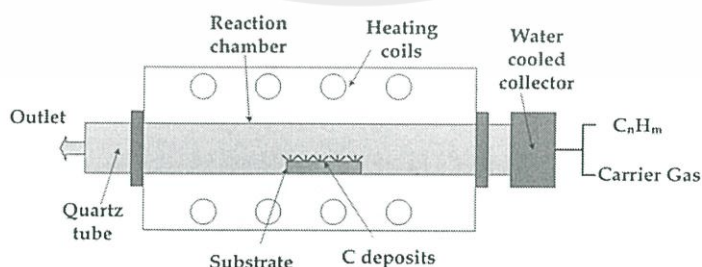


ภาพที่ 2.12 กระบวนการอาร์กดิสชาร์จ

(ที่มา Gore and Anup Sane, Carbon Nanotubes - Synthesis, Characterization, Applications, Nanotechnology and Nanomaterials, 2011)

2.3.3.3 การเคลือบด้วยไอเคมีโดยใช้ความร้อน (Thermal chemical vapor deposition)

เป็นกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยการระเหยสารตั้งต้นที่ประกอบด้วยคาร์บอน (Carbon source) และตกผลึกไอระเหยด้วยความร้อน เกิดเป็นโครงสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งกระบวนการนี้ใช้อุณหภูมิตกผลึกสาร 600 – 1200 องศาเซลเซียส¹⁵ ขึ้นกับระบบ สารตั้งต้น และคะตะลิสต์ที่ใช้ โดยคะตะลิสต์เป็นตัวแปรสำคัญของการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ เนื่องจากคะตะลิสต์ มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและชนิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์¹⁶



ภาพที่ 2.13 กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์จากไอระเหยเคมีโดยใช้ความร้อน

(ที่มา Gore and Anup Sane, Carbon Nanotubes - Synthesis, Characterization, Applications, Nanotechnology and Nanomaterials, 2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

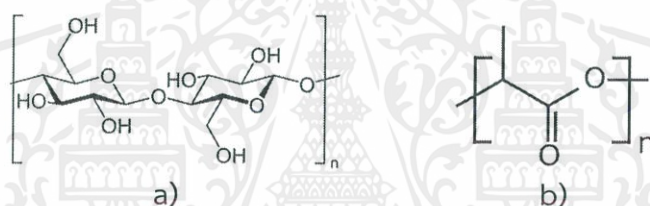
2.3 พอลิเมอร์

พอลิเมอร์ (Polymer) คือ สารประกอบอินทรีย์ (Organic) ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบขึ้นจากโมเลกุลขนาดเล็ก ที่เรียกว่า มอนอเมอร์ (Monomer) หลายๆโมเลกุลมาต่อกัน ซึ่งมอนอเมอร์ที่ประกอบขึ้นเป็นพอลิเมอร์นั้น เป็นชนิดเดียวกัน หรือ ต่างชนิดกันก็ได้ ซึ่งสมบัติทางกายภาพ เช่น ความเหนียว ความหนาแน่น ของพอลิเมอร์จะขึ้นกับ มวลโมเลกุลและส่วนประกอบของพอลิเมอร์นั้น โดยจะกล่าวถึงชนิดของพอลิเมอร์ที่แบ่งตามแหล่งกำเนิดเป็นดังนี้

2.3.1 ชนิดของพอลิเมอร์

2.3.1.1 พอลิเมอร์ธรรมชาติ

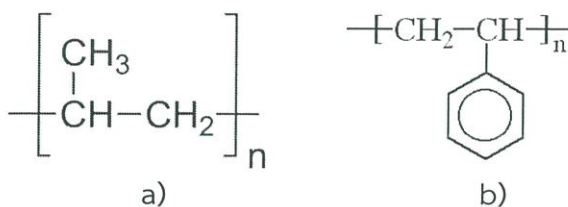
เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ สามารถสกัดได้จากสิ่งมีชีวิตจำพวก พืช และ สัตว์ โดยเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ไบโพลิเมอร์ (Biopolymer) ยกตัวอย่างเช่น เซลลูโลส พอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ที่เป็นส่วนประกอบหลักของพืช ยางที่พบในลำต้นพืชบางชนิด เป็นต้น



ภาพที่ 2.14 ตัวอย่างโมเลกุลพอลิเมอร์ธรรมชาติ a) เซลลูโลส b) พอลิแลคติกแอซิด
(ที่มา cellulose and PLA, wikipedia)

2.3.1.2 พอลิเมอร์สังเคราะห์

เป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาเคมี (Synthetic polymer) ซึ่งผลิตขึ้นโดยมนุษย์ (Man-made polymer) โดยผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ได้ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีชื่อเรียกทั่วไปว่า พลาสติก (Plastic) ยกตัวอย่างพอลิเมอร์สังเคราะห์ดังภาพที่ 2.15



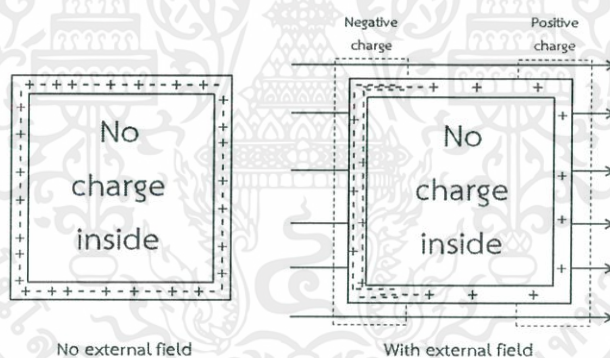
ภาพที่ 2.15 ตัวอย่างโมเลกุลมอนอเมอร์ของพอลิเมอร์สังเคราะห์ a) โพลีโพรพิลีน b) โพลิสไตรีน
(ที่มา cellulose and PLA, wikipedia)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วัสดุกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2.4.1 วัสดุนำไฟฟ้า

เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบนผิวของวัสดุนำไฟฟ้า (Conductive material) วัสดุที่มีสมบัตินำไฟฟ้าจะเกิดอันตรกิริยาโดยมีพฤติกรรมคล้ายกับเกราะป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอธิบายได้จากหลักการกรงของฟาราเดย์ (Faraday's cage effect)¹⁷ คือ เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electric field) ในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบนผิวโลหะ ซึ่งโลหะเป็นวัสดุนำไฟฟ้าที่มีอิเล็กตรอนอิสระ (Electron sea) ภายในเนื้อสาร ซึ่งตามทฤษฎีของแม่เหล็กไฟฟ้าแผนเดิม เมื่ออิเล็กตรอนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศตรงข้าม ทำให้เกิดการแยกส่วนของประจุลบและประจุบวก และเกิดสนามไฟฟ้าใหม่ซึ่งหักล้างสนามไฟฟ้าเดิม กล่าวคือ สนามไฟฟ้าจะไม่สามารถผ่านเข้าไปยังอีกด้านหนึ่งของแผ่นตัวนำไฟฟ้าได้ จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในทิศตรงข้ามกับทิศทางที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบน สนามไฟฟ้าภายในกรงของฟาราเดย์จึงเกิดการหักล้างกัน จึงพบว่าสนามแม่เหล็กดังกล่าวไม่สามารถผ่านเข้าไปในกรงเหล็กนั้นได้ แสดงดังภาพที่ 2.16

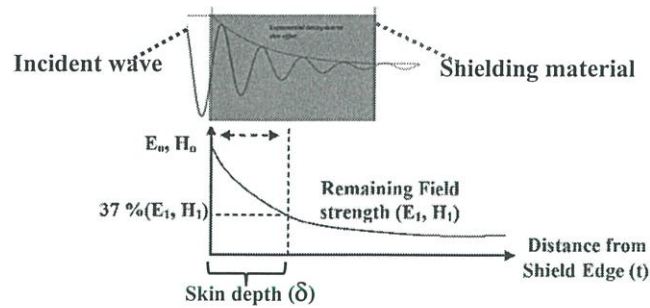


ภาพที่ 2.16 ปรัชญาการกรงของฟาราเดย์ (Faraday's cage phenomena)

(ที่มา <https://backyardbrains.com/experiments/faraday>)

ทั้งนี้เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบนผิววัสดุที่มีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า จะมีบางส่วนที่สามารถเข้าไปในชั้นผิวได้ถึงระดับความลึกค่าหนึ่ง ดังภาพที่ 2.17 เนื่องมาจากการลดลงของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามระดับความลึกแบบฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential function)¹⁸ ซึ่งค่าสนามไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับค่าความลึกจากผิววัสดุ (Skin depth) ที่นิยามโดยสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.17 การเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านวัสดุป้องกัน (Shielding) และการวัดค่า Skin depth

โดยสามารถคำนวณค่าความลึกจากผิววัสดุ (Skin depth: δ) โดยใช้สมการที่ 4

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (4)$$

โดย μ คือ ค่าสภาพซึมซับทางแม่เหล็ก (Magnetic permeability)

f คือ ความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Frequency)

σ คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity)

2.4.2 วัสดุไดอิเล็กทริก

วัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric material) เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าโดยการแทนที่กระแส (Displacement current) หรือ การเปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้าภายในโครงสร้างผลึก มีสมบัติพิเศษได้หลากหลาย เช่น สมบัติเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานกลกับพลังงานไฟฟ้าได้ เป็นต้น

กระบวนการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding mechanism) ของวัสดุไดอิเล็กทริก จะคล้ายกับหลักการป้องกันของวัสดุนำไฟฟ้า คือ เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะเกิดการตอบสนองต่อคลื่นดังกล่าว โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างผลึก เช่น การเคลื่อนที่ไอออนของ ไอออนอิสระ สิ่งเจือปน (impurities) หรือ ที่ว่างจากการหายไปของอะตอม (Vacancies) การเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่มีประจุ (Charge molecule) หรือแม้แต่การสั่นในระดับอะตอม¹⁹ แต่จะต่างจากตัวนำไฟฟ้าตรงที่อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในระยะไกล (เทียบกับขนาดโครงสร้างผลึก)

สมบัติเชิงไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริกที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงภายใต้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีดังนี้²⁰

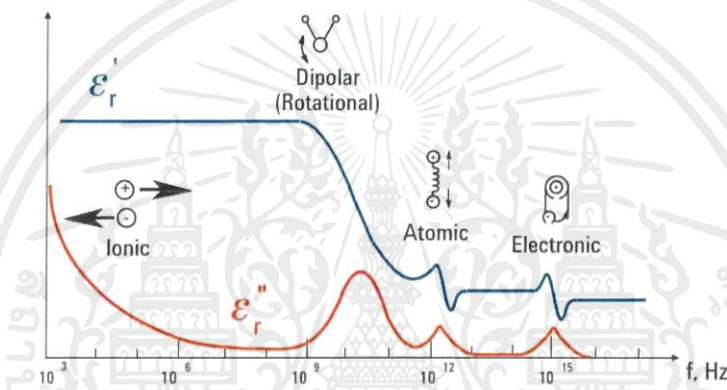
1) ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative electrical permittivity) เป็นจำนวนเชิงซ้อนที่ประกอบด้วย ส่วนจริงของค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า เขียนแทนด้วย ϵ_r' ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการเก็บพลังงานของระบบประจุ (Electrical energy storage) และ ส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้เชิงไฟฟ้า เขียนแทนด้วย ϵ_r'' ที่แสดงถึง ค่าการสูญเสียพลังงานเชิงไดอิเล็กทริก (Dielectric energy loss) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0 = \epsilon_r' + i\epsilon_r'' \quad (5)$$

โดยทั่วไปค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริกจะขึ้นกับความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบ โดยมีค่าลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้นดังภาพที่ 2.18 ซึ่งเป็นผลโดยตรงมาจากการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก²¹



ภาพที่ 2.18 ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงภายในวัสดุที่ขึ้นกับความถี่

จากภาพที่ 2.18 การตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กทริกต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ระดับกิโลเฮิร์ตถึงเมกะเฮิร์ต ทำให้เกิดโพลาริเซชันในระดับโมเลกุล คือ โมเลกุลที่มีขั้ว (Dipole molecule) จะเกิดการหมุนและเปลี่ยนทิศทาง เนื่องจากขั้วบวกและขั้วลบมีการเคลื่อนที่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ซึ่งส่วนจริงของค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าในช่วงนี้อาจมีค่าลดลงตามความถี่ที่สูงขึ้น และส่วนจินตภาพจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ความถี่ซึ่งสอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของโมเลกุลหรือผลึก เมื่อความถี่เพิ่มถึงระดับพันล้านรอบต่อวินาที (กิกะเฮิร์ต: GHz) หรือช่วงความถี่ไมโครเวฟ วัสดุไดอิเล็กทริกส่วนใหญ่จะมีส่วนจริงของค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าที่ต่ำมาก และเมื่อความถี่เพิ่มถึงระดับเอ็กซ์เรย์ ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าจะเข้าใกล้ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าของสุญญากาศ ($\epsilon_r = 1$)

- ค่าสัดส่วนแทนเจนต์ของการสูญเสีย (Loss tangent: δ) คืออัตราส่วนระหว่างส่วนจินตภาพและส่วนจริงของค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าหรือสภาพยอมซิมซิบทางแม่เหล็ก ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\delta = \epsilon_r'' / \epsilon_r' = \mu_r'' / \mu_r' \quad (6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

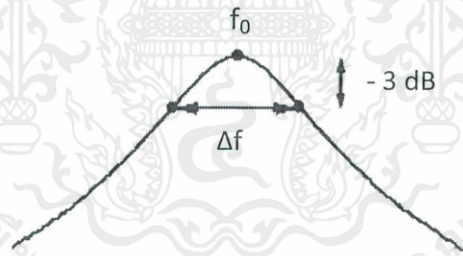
เมื่อค่าสภาพยอมซึมซับทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative magnetic permeability: μ_r) มีนิยามดังนี้

$$\mu_r = \mu/\mu_0 = \mu_r' + \mu_r'' \quad (7)$$

โดย μ_0 คือ ค่าคงที่แม่เหล็ก (Magnetic constant) μ_r' คือส่วนจริงของค่าสภาพยอมซึมซับทางแม่เหล็ก ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการเก็บพลังงานแม่เหล็ก (Magnetic energy storage) ส่วน μ_r'' คือ ส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมซึมซับทางแม่เหล็ก ที่แสดงถึง ค่าการสูญเสียพลังงานแม่เหล็ก (Magnetic energy loss)

การวัดสมบัติเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก ไม่ว่าจะเป็น ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า (Electrical permittivity) ค่าสัดส่วนแทนเจนต์ของการสูญเสีย (Loss tangent) ทำได้โดยการวิเคราะห์การกระเจิงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic scattering) โดยการวัดสัญญาณสะท้อนและสัญญาณส่งผ่าน (Reflection and Transmission measurement) ของวัสดุ

เทคนิคการวัดที่นิยมใช้ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การวัดแบบอาศัยกระบวนการสั่นพ้องของระบบ (Resonance method) และการวัดแบบไม่อาศัยกระบวนการสั่นพ้องของระบบ (Non-resonance method) โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการวัดแบบอาศัยกระบวนการสั่นพ้องของระบบ ซึ่งมีขั้นตอนการวัดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2.19 ค่าที่ได้จากความถี่ที่เกิดการสั่นพ้องที่จะนำไปคำนวณเป็นค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า

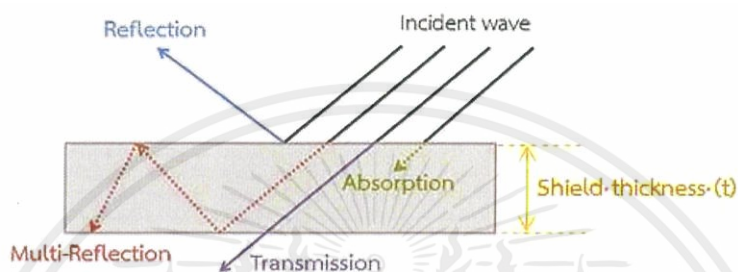
ซึ่งค่าที่ได้จากภาพที่ 2.19 สามารถนำมาใช้คำนวณค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor: Q) ซึ่งแสดงถึงการกระจายพลังงานของคลื่นในระบบรอบๆความถี่สั่นพ้อง (Resonance frequency) โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 8

$$Q = \frac{f @ -3 \text{ dB}}{\Delta f} \quad (8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

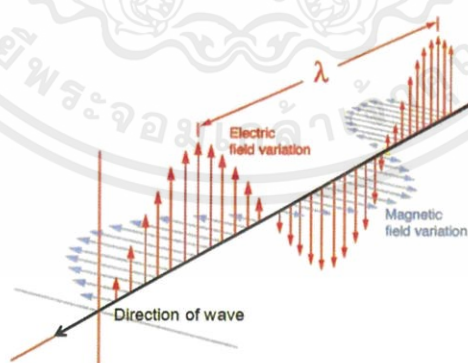
2.4.3 กระบวนการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference shielding) คือ การที่วัสดุมีพฤติกรรมคล้ายสิ่งกีดขวาง (Barrier) โดยไม่ให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทะลุผ่าน (Transmission) วัสดุนั้นได้¹ โดยการป้องกันจะมี 4 กระบวนการ²² คือ การสะท้อน (Reflection) การสะท้อนหลายครั้ง (Multi-Reflection) การดูดซับ (Absorption) และการทะลุผ่าน (Transmission) โดยกระบวนการป้องกัน (Shielding mechanism) ทั้ง 4 แบบจะแสดงดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 กระบวนการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

โดยการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อาศัยหลักการสะท้อนเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด เห็นได้จากการนำแผ่นโลหะไปครอบที่ส่วนที่ปล่อยคลื่น (Radiation of electromagnetic signal) ทั้งนี้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ประกอบด้วยสนามไฟฟ้า (Electric field) และสนามแม่เหล็ก (Magnetic field) ที่เรียงตัวในแนวตั้งฉากกัน ดังภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

(ที่มา Electromagnetic wave, hyperphysics)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้ประสิทธิภาพการป้องกัน (Shielding effectiveness: SE) ของวัสดุจะคำนวณได้จากผลรวมค่าลดทอน (Reduction) ของคลื่นที่ตกกระทบ (Incident wave) หรือ อัตราส่วนกำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบและทะลุผ่านวัสดุป้องกันออกมา¹ จากสมการต่อไปนี้²³

$$\text{ประสิทธิภาพการป้องกัน (SE)} = 10\log(P_T/P_I) \quad (7)$$

โดย P_I และ P_T คือ กำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบและทะลุผ่านวัสดุ

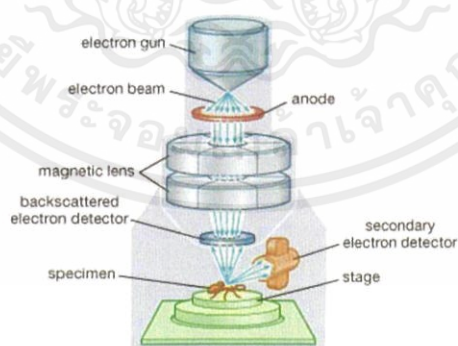
2.5 เครื่องมือวิเคราะห์

2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเทคนิควิเคราะห์ตัวอย่าง (Specimen) ด้วยการถ่ายภาพ ซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณของพื้นผิววัสดุ โดยภาพที่ได้จะเป็นภาพแบบสามมิติ

2.5.1.1 หลักการทำงาน

- 1) ลำอิเล็กตรอน เกิดจากการที่อิเล็กตรอนหลุดออกจากลวดทังสเตน (Tungsten filament) โดยอาศัยหลักการปลดปล่อยอิเล็กตรอนโดยใช้ความร้อน (Thermionic emission)
- 2) ลำอิเล็กตรอนถูกโฟกัสและบังคับทิศทางโดยใช้เลนส์แม่เหล็ก ซึ่งแสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดดังภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

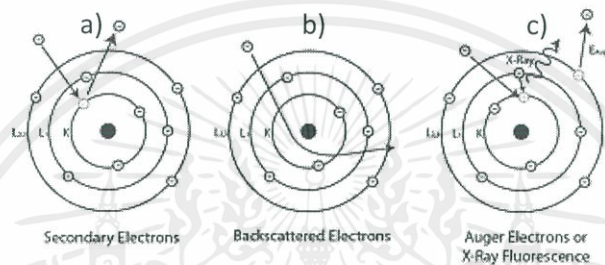
(ที่มา Eric M., Aberration-Corrected Electron Microscopy, Chemistry, 334, 2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การเกิดเป็นสัญญาณภาพ จากอิเล็กตรอนที่ออกมาจากตัวอย่างดังนี้

- อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron emission) ได้ภาพพื้นผิวของตัวอย่าง
- การสะท้อนกลับ (Back-scatter electron) ได้เป็นความเข้ม-สว่าง (Contrast) ที่ขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุนั้นๆ
- รังสีเอ็กซ์ (X-rays) ได้เป็นสัญญาณของค่าการกระจายพลังงาน (Energy-dispersive X-ray spectrometer)

โดยแผนภาพปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการตกกระทบของอิเล็กตรอนบนผิวตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 การเกิดสัญญาณภาพโดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด a) การเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ b) การสะท้อนกลับ c) การเกิดรังสีเอ็กซ์ และการเกิดไอเจอิเล็กตรอน (Auger electron emission)

(ที่มา Canadian centre for welding and joining, Microscopy,

<http://www.ualberta.ca/~ccwj/teaching/microscopy/>)

2.5.1.2 สมบัติของเครื่องมือ

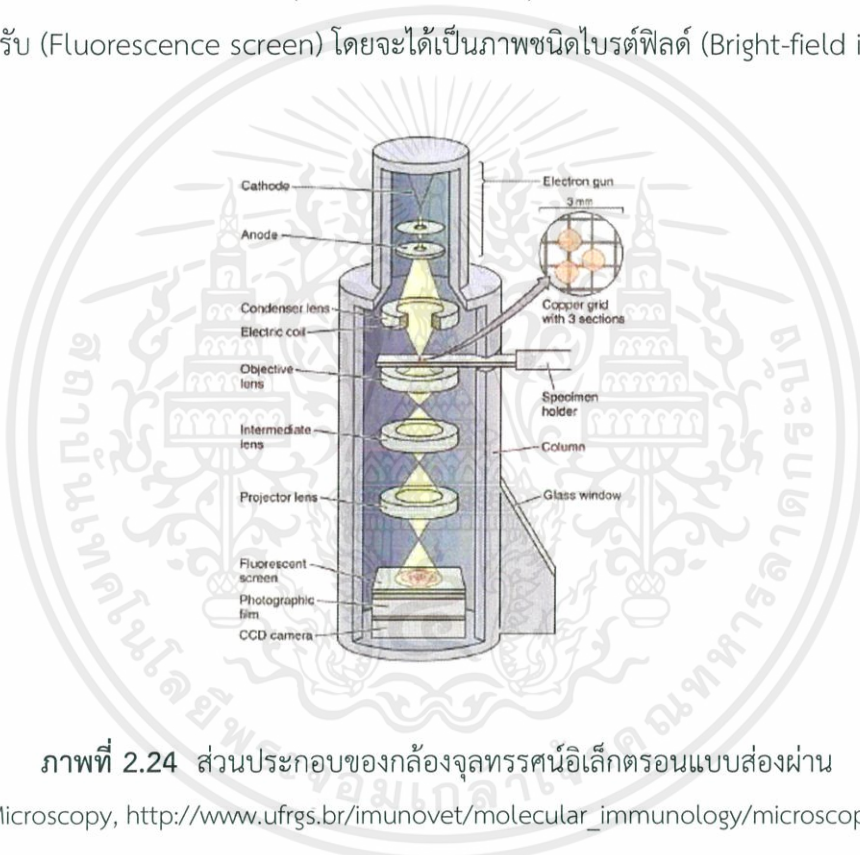
- 1) แสดงภาพสามมิติของพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งแสดงลักษณะสัญญาณวิทยา เช่น พื้นผิวขรุขระ พื้นผิวมีลักษณะเป็นร่อง ความสม่ำเสมอของฟิล์มบาง
- 2) วิเคราะห์ปริมาณธาตุนบนพื้นผิว จากโหมตวิเคราะห์การกระจายตัวของพลังงาน โดยจะบอกเป็นสัดส่วนและสร้างเป็นแผนที่ (Mapping) ของธาตุแต่ละชนิด
- 3) ตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์มีสมบัตินำไฟฟ้า และมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

2.5.2.1 หลักการทำงาน

- 1) การกำเนิดลำอิเล็กตรอน อาศัยหลักการการปลดปล่อยอิเล็กตรอนโดยใช้ความร้อน (Thermionic emission) จากเส้นลวดทังสเตน (Tungsten filament) หรือ แลนทานัมเฮกซะโบรไมด์ (LaB₆)
- 2) ลำอิเล็กตรอนถูกโฟกัสและบังคับทิศทางด้วยเลนส์รวมแสง (Condenser lens)
- 3) เมื่อลำอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างที่มีความบาง อิเล็กตรอนจะทะลุผ่านตัวอย่าง ผ่านเลนส์โฟกัสและขยายภาพ (Intermediate lens) และภาพที่เกิดขึ้นจะตกกระทบบนฉากรับ (Fluorescence screen) โดยจะได้เป็นภาพชนิดไบรต์ฟิลด์ (Bright-field image)



ภาพที่ 2.24 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

(ที่มา Microscopy, http://www.ufgrs.br/imunovet/molecular_immunology/microscopy.html)

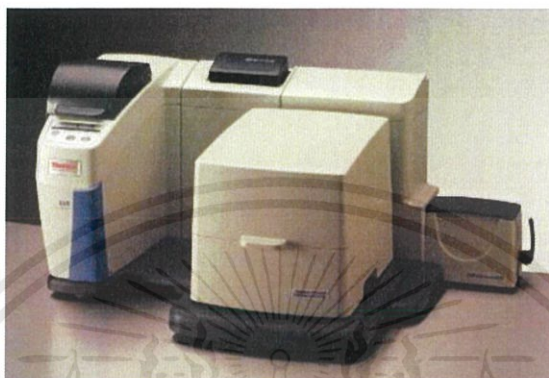
2.5.2.2 สมบัติของเครื่องมือ

- 1) วิเคราะห์โครงสร้างภายใน (Internal structure) ของตัวอย่าง จากภาพ 2 มิติ ชนิดไบรต์ฟิลด์ (Bright-field image)
- 2) วิเคราะห์โครงสร้างผลึก (Crystal structure) ของตัวอย่างจากภาพแพทเทิร์นการหักเหแสง (Diffraction pattern) โดยใช้โหมดหักเหแสง เช่น การหาระนาบจากจุดหักเหแสงแต่ละจุด ระยะห่างระหว่างอะตอม เป็นต้น
- 3) กำลังแยกแยะภาพ (Resolution) สูงที่สุดอยู่ในระดับนาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 รามานสเปกโตรสโกปี

เป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Quantitative analysis) ที่แสดงถึงลักษณะเฉพาะของวัสดุ และบ่งบอกชนิดของวัสดุนั้นๆ โดยอาศัยหลักการกระเจิง (Scattering) ของเลเซอร์ที่ตกกระทบที่ผิวตัวอย่าง ภาพถ่ายของเครื่องรามานแสดงดังภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 เครื่องรามานสเปกโตรสโกปี (Raman spectroscopy)

(ที่มา Raman spectroscopy, <https://www.thermofisher.com>)

2.5.3.1 หลักการทำงาน

- 1) เลเซอร์สีเขียว ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตรถูกใช้เป็นพลังงานกระตุ้นตัวอย่าง
- 2) เลเซอร์ตกกระทบที่ผิวตัวอย่างโดยจะเกิดปรากฏการณ์ 2 แบบ ดังนี้
 - การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) ไม่เกิดการถ่ายเทพลังงาน เรียกว่า การกระเจิงแบบเรย์เลห์ (Rayleigh scattering)
 - การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) จะเกิดการถ่ายเทพลังงานระหว่างโฟตอนกับอิเล็กตรอน เรียกว่า การกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering) โดยมี 2 กรณี คือ โฟตอนมีพลังงานลดลง (Stoke) และ พลังงานสูงขึ้น (Anti-stoke)

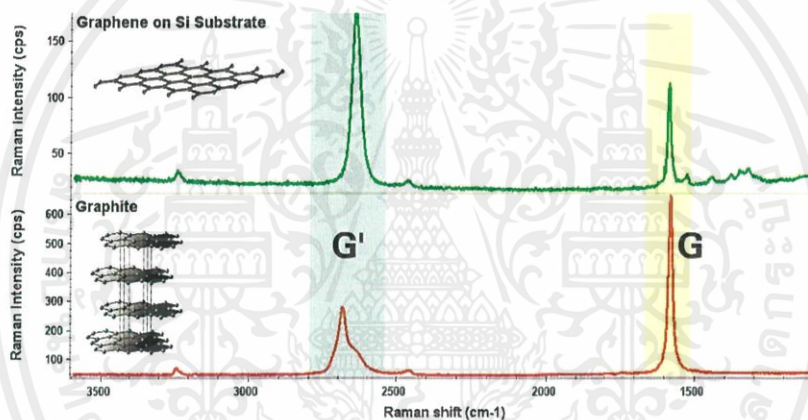
2.5.3.2 การวิเคราะห์วัสดุคาร์บอนโดยใช้เทคนิครามาน

ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จากเทคนิครามาน จะเรียกว่า รามานสเปกตรัม (Raman spectra) โดยเป็นข้อมูลที่เปรียบเทียบกับค่าพลังงานแสงที่ได้จากการกระเจิง (Raman shift) มีหน่วยเป็นส่วนกลับของเซนติเมตร (cm^{-1}) ซึ่งในการวิเคราะห์วัสดุจำพวกคาร์บอน รามานสเปกตรัมจะแสดงลักษณะเฉพาะของวัสดุคาร์บอน โดยจะเกิดค่าพลังงานจากการกระเจิงที่สูงคล้ายกัน 4 พีค คือ

- ดิสออเดอร์แบนด์ (Disorder band: D-band) ที่ค่าประมาณ 1300 cm^{-1}
 - กราฟิติกแบนด์ (Graphitic-band: G) ที่ค่าประมาณ 1550 cm^{-1}
 - กราฟิติกไพร์มแบนด์ (Graphitic'-band: G') หรือ ดิสออเดอร์แบนด์ที่สอง (2D band) ที่ 2700 cm^{-1}
 - โหมดอาร์บีเอ็ม (Radial breathing mode: RBM) ที่ช่วง $150-300 \text{ cm}^{-1}$
- โดยแสดงลักษณะรามานสเปกตรตามชนิดวัสดุคาร์บอนดังนี้²⁴

1) กราฟีนและกราฟไฟต์

เป็นวัสดุคาร์บอนประเภทพันธะเดี่ยวสามแขน ซึ่งสำหรับกราฟไฟต์จะเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยกราฟีนที่มีลักษณะเป็นแผ่นหลายชั้นซ้อนกัน โดยลักษณะรามานสเปกตรของกราฟีนและกราฟไฟต์จะแสดงดังภาพที่ 2.26



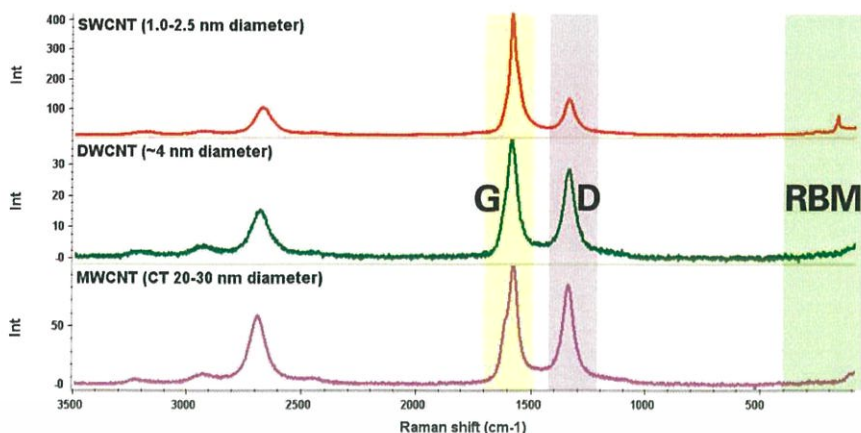
ภาพที่ 2.26 รามานสเปกตรของกราฟีนบนแผ่นรองรับซิลิกอน (ภาพบน) และ กราฟไฟต์ (ภาพล่าง)²⁴

โดยจะเกิดค่าพลังงานจากการกระเจิงสองค่าที่ 1550 cm^{-1} คือ กราฟิติกแบนด์ หมายถึงจำนวนชั้นกราฟีนในโครงสร้าง สังเกตได้จากค่าความเข้ม (Intensity) ของที่สูงขึ้นตามจำนวนชั้น และ 2700 cm^{-1} คือ กราฟิติกไพร์มแบนด์ หรือ ดิสออเดอร์แบนด์ที่สอง ซึ่งจะใช้จำแนกความแตกต่างของกราฟีนกับกราฟไฟต์ ทั้งนี้จากภาพที่ 2.26 สังเกตเห็นว่า เมื่อกราฟีนมีจำนวนชั้นมากขึ้น ค่าพลังงานจากการกระเจิงจะเกิดการเลื่อนไปทางพลังงานสูงขึ้น และลักษณะพีคมีการเปลี่ยนแปลง²⁵

2) คาร์บอนนาโนทิวบ์

เป็นวัสดุคาร์บอนประเภทพันธะเดี่ยวสามแขน ที่มีลักษณะเป็นท่อกลวง (Hollow tube) ซึ่งแบ่งเป็นสองชนิด คือ คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว และผนังหลายชั้น (Single-walled and multi-walled carbon nanotubes) โดยลักษณะรามานสเปกตรของคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดต่างๆ จะแสดงดังภาพที่ 2.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



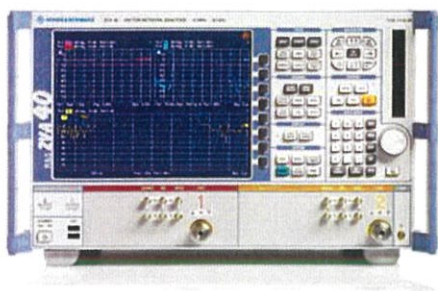
ภาพที่ 2.27 รามานสเปกตร้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์²⁴

โดยจะเกิดค่าพลังงานจากการกระเจิง สามค่า คือ ที่ 1350 cm^{-1} คือ ดิสออเดอร์แบนด์ซึ่งเกิดจากจุดบกพร่อง (Defect), ที่ 1550 cm^{-1} คือ กราฟิติกแบนด์ ซึ่งบ่งบอกความเป็นผลึก ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ในเชิงคุณภาพ และ ที่ 2700 cm^{-1} คือ ดิสออเดอร์แบนด์ที่สอง สามารถใช้วิเคราะห์จำนวนผนังชั้นของท่อ

ทั้งนี้จากภาพที่ 2.27 พบว่ามีค่าพลังงานจากการกระเจิง อีกค่าที่พบในคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเท่านั้น คือที่ $100-300 \text{ cm}^{-1}$ โดยบ่งบอกถึงลักษณะเฉพาะ ที่ใช้ในการจำแนกชนิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทั้งนี้อาร์บีเอ็มเกิดจากการขยายและหดของท่อเมื่อได้รับพลังงาน²⁶

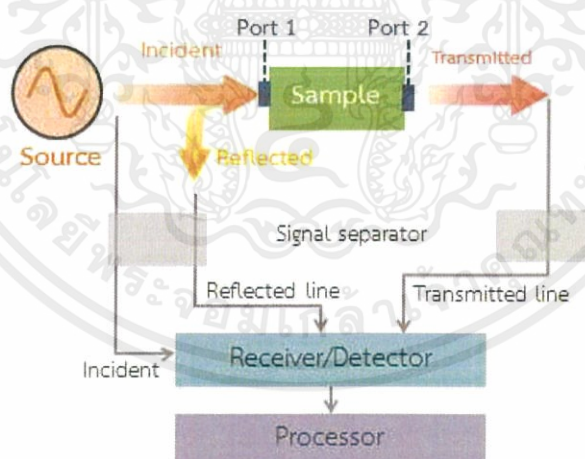
2.5.4 เครื่องมือวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเครือข่ายเชิงเวกเตอร์

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีวิธีการวัดเป็นแบบฐานรองรับ (Substrate measurement system) โดยหลักการคือ การส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง เข้าไปที่ตัวอย่าง และวัดกำลังของคลื่นที่ทะลุผ่าน (Transmission line) และ คลื่นที่สะท้อนกลับ (Reflection line) ผ่านทางหัววัดซึ่งในที่นี้เป็นแบบสองหัววัด (Two-probe measurement) แสดงดังภาพที่ 2.28



ภาพที่ 2.28 ซ้าย) เครื่องมือวิเคราะห์ทางด้านโครงข่ายและสัญญาณ (Vector Network Analyzer) และ ขวา) วิธีการวัดแบบใช้ฐานรองรับ (Substrate measurement system) (ที่มา ภาพซ้าย Network Analyzers, <http://www.axiomtest.com/Network-Analyzers/>)

กระบวนการวัดและเก็บข้อมูลของเครื่องมือวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเครือข่ายเชิงเวกเตอร์ แบบสองหัววัด จะเรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหลังจากเกิดอันตรกิริยากับตัวอย่างและกลับเข้ามาที่พอร์ตรับสัญญาณว่า ค่าการกระเจิง (Scattering parameter or S-parameter) แบ่งเป็นคลื่นที่สะท้อน (Reflected signal) คือ S11 และ S22 และคลื่นที่ทะลุผ่าน (Transmitted signal) คือ S12 และ S21 โดยจะแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมดังภาพที่ 2.29



ภาพที่ 2.29 แผนผังการวัดค่าการกระเจิง (Scattering parameter) โดยการใช้การวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเครือข่ายเชิงเวกเตอร์สองหัววัด (Two-probe measurement)²¹

โดยเครื่องมือวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเครือข่ายเชิงเวกเตอร์ (Vector network analyzer) จะทำการเก็บข้อมูลค่าการกระเจิง (S-parameters) ที่ขึ้นกับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมี

- 3.1.1 คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังเดี่ยว (Single-Walled Carbon Nanotubes) ท้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุคาร์บอน, วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง, สจล.
- 3.1.2 คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังเดี่ยวที่มีหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Single-Walled Carbon Nanotubes) บริษัท ยูนินาโนเทค (Uninanotech) เกรดอุตสาหกรรม (Commercial grade)
- 3.1.3 คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังหลายชั้น (Multi-Walled Carbon Nanotubes) บริษัท นาโนซิล (Nanocyl) เกรดอุตสาหกรรม (Commercial grade)
- 3.1.4 กราไฟต์ (Graphite) บริษัท Sigma-Aldrich เกรดสังเคราะห์
- 3.1.5 คาร์บอนแบล็ค (Carbon black) วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง, สจล.
- 3.1.6 กรดพอลิแลคติก บริษัท เนเจอร์เวิร์ค (Natureworks) เกรด 2002D
- 3.1.7 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) กรดไนตริก (Nitric acid) กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) และ ตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) บริษัท Carlo-erba

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.2.1 จานเพาะเชื้อแก้ว (Petri-dish) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร
- 3.2.2 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (4-digit scaler)
- 3.2.3 เครื่องให้ความร้อนและปั่นกวน (Hotplate and stirrer)
- 3.2.4 ชุดกรอง และ ขวดลดความดัน (Filter and Suction flask) และเครื่องปั๊มสุญญากาศ
- 3.2.5 เตาท่อให้ความร้อน (Tube-furnace)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เครื่องมือวิเคราะห์

- 3.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope) รุ่น JSM-6301F ยี่ห้อ JEOL เพื่อวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยา
- 3.3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscope) รุ่น JEM-2010 ยี่ห้อ JEOL เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างภายใน และขนาดของวัสดุนาโนคาร์บอนชนิดต่างๆ
- 3.3.3 เครื่องมือวิเคราะห์รามานสเปกโตรสโกปี (Raman spectroscopy) รุ่น DXR2 ยี่ห้อ Thermofisher scientific เพื่อวิเคราะห์ความเป็นผลึก
- 3.3.4 เครื่องมือวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเครือข่ายเชิงเวกเตอร์ (vector network analyzer) รุ่น ZNB20 ยี่ห้อ Rohde-schwarz เพื่อวิเคราะห์ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า

3.4 การเตรียมวัสดุผสมคาร์บอนกับพอลิเมอร์และการทดสอบลักษณะเฉพาะในช่วงคลื่นความถี่วิทยุ

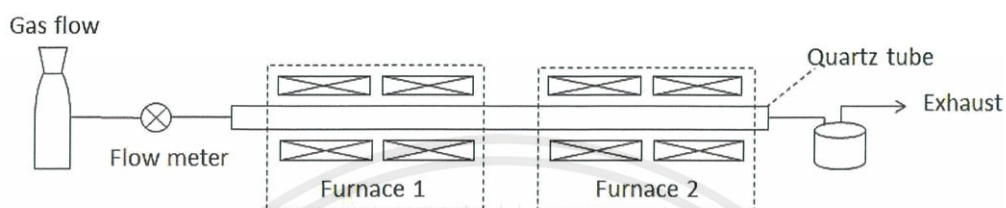
ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ การวิเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอนและสร้างหุ้ฟังก์ชัน การเตรียมสารละลายและขึ้นรูปแผ่นพลาสติก และการวิเคราะห์ตัวอย่างแผ่นพลาสติก

3.4.1 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

จากวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.2.3 ซึ่งมี 3 วิธี สรุปได้ว่าวิธีการตกเคลือบไอระเหยเคมี (Chemical vapor deposition) จะเป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เนื่องจาก วิธีนี้สามารถใช้สารตั้งต้นได้หลากหลาย เช่น แก๊สมีเทน เอทานอล²⁷ น้ำมันปาล์ม²⁸ เป็นต้น อีกทั้งคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จะมีความบริสุทธิ์สูงกว่าวิธีอื่น²⁹ และสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ให้ได้ปริมาณมาก (Mass production)³⁰ โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกน้ำมันมะพร้าวมาเป็นสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์

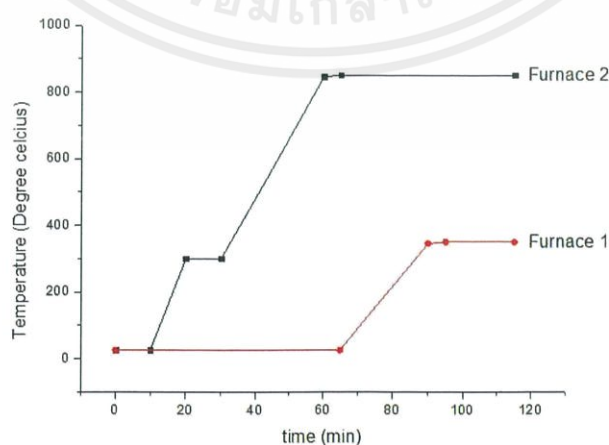
3.4.1.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

- 1) เตรียมระบบเตา (Furnace system) ของการสังเคราะห์ด้วยวิธีตกเคลือบไอระเหยเคมีโดยใช้เตาให้ความร้อน 2 เตา ซึ่งเตาที่หนึ่งใช้สำหรับระเหยสารตั้งต้น (Carbon source) และเตาที่สองใช้สำหรับการตกเคลือบของคาร์บอน (Deposited) แสดงระบบดังแผนภาพในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนภาพระบบเตาสำหรับการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

- 2) เตรียมสารตั้งต้น ตวงน้ำมันมะพร้าวโดยใช้ไมโครปิเปตต์ให้ได้ปริมาตร 3 มิลลิลิตร และใส่ลงในอะลูมินาไบท์
- 3) เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคเหล็ก โดยชั่งให้ได้ปริมาณ 0.5 กรัม และใส่ลงในอะลูมินาไบท์
- 4) นำอะลูมินาไบท์ที่มีสารตั้งต้น และอะลูมินาไบท์ที่มีอนุภาคเหล็กใส่เข้าไปในท่อควอซ โดยให้อยู่บริเวณกลางเตาที่ 1 และเตาที่ 2 ตามลำดับ
- 5) นำจุกปิดปลายท่อ ที่ต่อกับระบบแก๊สอาร์กอนมาต่อเข้ากับปลายท่อฝั่งเตาที่ 1 และนำจุกปิดที่ต่อกับระบบปล่อยแก๊สทิ้งออกภายนอกระบบมาต่อเข้ากับปลายท่อฝั่งเตาที่ 2
- 6) ตั้งโปรแกรมการทำงานของเตาที่ 1 และ 2 ตามภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 โปรแกรมการทำงานของเตาที่ 1 และ เตาที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 7) เปิดแก๊สอาร์กอน ให้ไหลเข้าสู่ระบบ โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊ส (Flow rate) ที่มีเตอร์วัดเป็น 500 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
- 8) หลังจากเปิดแก๊สอาร์กอน 10 นาที ทำการเปิดสวิตซ์ให้เตาที่ 2 เริ่มทำงาน
- 9) เมื่อเตาที่ 2 มีอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ให้เปิดสวิตซ์เตาที่ 1
- 10) อุณหภูมิสุดท้ายของเตาที่ 1 และ 2 คือ 350 และ 850 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ 20 นาที

3.4.1.2 การทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์บริสุทธิ์

เนื่องจากในการสังเคราะห์มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นอนุภาคเหล็ก และอาจมีโครงสร้างอื่นของคาร์บอนที่ไม่ต้องการปะปนอยู่ เพื่อให้ได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีความบริสุทธิ์ซึ่งเหมาะสมจะนำไปใช้งาน ต่อ ขั้นตอนนี้จึงเป็นขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างก่อนนำไปใช้งาน

- 1) นำผงตัวอย่างหลังการสังเคราะห์ (As grown) แช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และทำการล้างกรดออกด้วยวิธีการกรอง (Filtration) ผ่านน้ำปราศจากประจุ (Deionize water)
- 2) นำผงตัวอย่างไปอบไล่ความชื้นและระเหยเอาสารตกค้างออกที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 3) ทำซ้ำในข้อที่ 1 ใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นเช่นเดียวกัน
- 4) นำผงตัวอย่างไปอบไล่ความชื้นและระเหยเอาสารตกค้างออกที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที
- 5) นำผงตัวอย่างมาทำการกำจัดโลหะเหล็กออกด้วยการแช่ในกรดไนตริกเข้มข้น เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งใช้อัตราส่วนกรดไนตริก 150 มิลลิลิตรต่อผงตัวอย่าง 1 กรัม จากนั้นนำผงตัวอย่างไปล้างสารละลายกรดออกด้วยการกรองโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ

3.4.2 การวิเคราะห์วัสดุคาร์บอนและสร้างหมู่ฟังก์ชัน

3.4.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะของวัสดุคาร์บอน

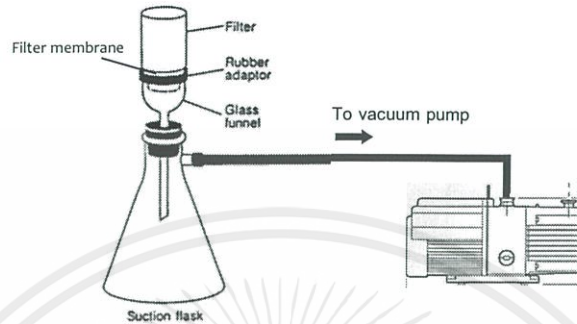
ขั้นตอนนี้เป็นการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง เพื่อบ่งบอกปริมาณเชิงคุณภาพเบื้องต้น โดยนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้ คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังคาร์บอนแบล็ค กราไฟต์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้นไปวิเคราะห์ผลดังนี้

- 1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อวิเคราะห์ลักษณะภายนอกและสัณฐานวิทยา
- 2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างภายใน และขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.2 การสร้างหมูฟังก์ชั้นให้กับวัสดุนาโนคาร์บอน

- 1) นำวัสดุนาโนคาร์บอนผสมในสารละลายเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ผสมกับกรดไนตริก อัตราส่วน 3 ต่อ 1 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 2) เตรียมระบบกรองสารโดยใช้ปั๊มสุญญากาศดังรูป



ภาพที่ 3.3 ระบบกรองสาร โดยชุดกรองสุญญากาศ ประกอบด้วย ชุดกรอง ขวดลดความดัน และ ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)

(ที่มา Introduction to the environmental laboratory, <http://www.ecs.umass.edu>)

- 3) เทสารละลายกรดกับวัสดุนาโนคาร์บอนลงไปบนกระดาษกรอง จากนั้นเติมน้ำปอดประจุให้ได้ปริมาณ 3 ใน 5 ของความจุระบอบอกเติมสาร ซึ่งคือส่วนของ Filter ในภาพที่ 3.3
- 4) เปิดสวิตซ์ให้ปั๊มสุญญากาศทำงาน ปั๊มจะดูดเอาอากาศจากขวดลดความดัน และทำให้ของเหลวด้านบนไหลผ่านแผ่นกรองลงมา
- 5) หากสังเกตว่าปริมาณของเหลวเหลือน้อย ประมาณ 1 ใน 5 ส่วน ให้เติมน้ำปอดประจุลงไปอีก และรอให้ปริมาณของเหลวเหลือน้อยและเติมน้ำอีกครั้ง ทำเช่นนี้จนตรวจพบว่าค่าความเป็นกรดต่างในของเหลวด้านบนแผ่นกรองอยู่ที่ประมาณ 7
- 6) ดูอากาศต่อจนสังเกตเห็นว่าวัสดุนาโนคาร์บอนมีลักษณะเปียกหมาด
- 7) นำวัสดุนาโนคาร์บอนที่อยู่บนแผ่นกรองใส่ในบีกเกอร์ และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 30 นาที

3.4.3 การขึ้นรูปแผ่นพลาสติก

เพื่อเตรียมตัวอย่างวัสดุสำหรับการวัดผล โดยตัวอย่างที่ใช้มีลักษณะเป็นแผ่น ซึ่งวิธีการเตรียมจะใช้วิธีการขึ้นรูปจากสารละลาย (Solvent casting)³¹ เนื่องจากเป็นวิธีที่เตรียมเป็นวัสดุผสมและนำมาขึ้นรูปได้ง่าย มีขั้นตอนดังนี้

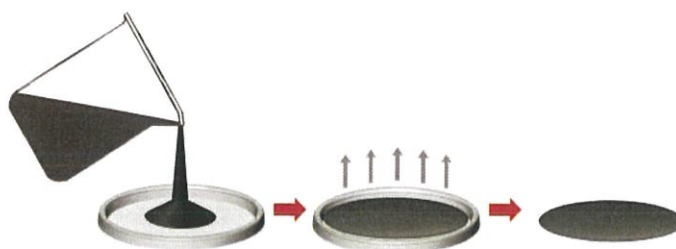
3.4.2.1 การขึ้นรูปแผ่นพลาสติกจากพอลิแลคติกแอซิด

- 1) เตรียมเม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด และ พลาสติกอโคเฟล็ก โดยนำไปชั่งน้ำหนักให้ได้ 7 กรัม และ 0.49 กรัม ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นความเข้มข้นอโคเฟล็ก 7% โดยน้ำหนักในสารละลายพอลิแลคติก
- 2) นำเม็ดพลาสติกอโคเฟล็ก ที่ชั่งน้ำหนักแล้ว ผสมลงในตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ทำการปั่นกวนที่ความเร็วประมาณ 350 รอบต่อนาที
- 3) รองนเม็ดพลาสติกอโคเฟล็กละลายจนหมด จากนั้นจึงเติมเม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด ปริมาณ 7 กรัมลงไปในสารละลาย ทำการปั่นกวนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง
- 4) เทสารละลายลงในแผ่นจานเพาะเชื้อ รองนตัวทำละลายระเหยไปจนหมด จากนั้นแกะแผ่นพลาสติกออกจากจานเพาะเชื้อ

3.4.3.2 การขึ้นรูปแผ่นพลาสติกจากวัสดุผสมพอลิเมอร์/คาร์บอน

- 1) เตรียมสารละลายพอลิเมอร์ ของพอลิเมอร์ธรรมชาติพอลิแลคติกแอซิด ที่ความเข้มข้น 7% โดยน้ำหนัก โดยนำเม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด และ พลาสติกอโคเฟล็ก โดยนำไปชั่งน้ำหนักให้ได้ 7 กรัม และ 0.49 กรัม ตามลำดับ
- 2) นำเม็ดพลาสติกอโคเฟล็ก ที่ชั่งน้ำหนักแล้ว ผสมลงในตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ทำการปั่นกวนที่ความเร็วประมาณ 350 รอบต่อนาที
- 3) ทำการปั่นกวนจนกระทั่งเม็ดพลาสติกอโคเฟล็ก ละลายไปทั้งหมด จากนั้นเติมเม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด ปริมาณ 7 กรัมลงไปในสารละลาย ทำการปั่นกวนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง
- 4) เติมวัสดุนาโนคาร์บอนลงในสารละลายพอลิเมอร์ โดยสำหรับคาร์บอนแบล็คและกราฟไฟต์จะเติมในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 1 1.5 และ 2 และสำหรับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้นและผนังเดี่ยวจะเติมในอัตราส่วนร้อยละ 0.1 0.2 0.3 และ 0.4 โดยน้ำหนักของเม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด และปั่นกวนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 5) เทสารละลายลงในแผ่นจานเพาะเชื้อ รองนตัวทำละลายระเหยไปจนหมด จากนั้นแกะแผ่นพลาสติกออกจากจานเพาะเชื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่นพลาสติก (Solvent casting)

3.4.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างแผ่นพลาสติก

เพื่อวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแผ่นพลาสติก

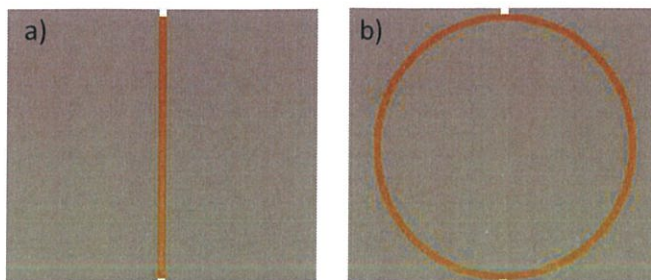
3.4.3.1 วิเคราะห์การกระจายตัวของวัสดุคาร์บอนในพอลิเมอร์

นำแผ่นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุผสมของพอลิแลคติกแอซิดกับวัสดุคาร์บอนที่มีความเข้มข้นต่างๆ มาวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) โดยทำการตัดแผ่นพลาสติกให้ได้ขนาดประมาณ กว้าง 0.5 และยาว 0.5 เซนติเมตร และวางบนแท่นวาง (Sample holder) โดยนำเทปใสยึดให้แผ่นพลาสติกติดกับแท่นวาง

3.4.3.2 การวิเคราะห์ค่าการกระเจิงแบบส่งผ่านและค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า

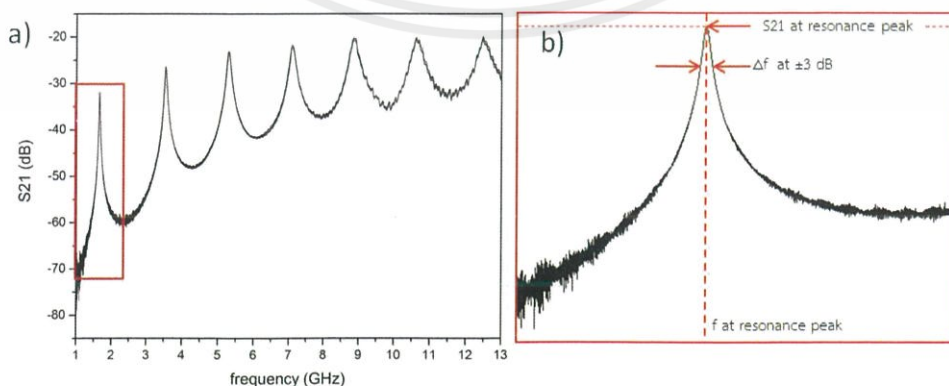
โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเครือข่ายเชิงเวกเตอร์ มีขั้นตอนการวัดดังนี้ การประกอบและวิเคราะห์ตัวอย่างแผ่นพลาสติกกับอุปกรณ์สำหรับการวัดแบบใช้ฐานรองรับ³² มีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำแผ่นพลาสติกวางลงบนชั้นกราวด์ และนำอุปกรณ์เชื่อมต่อที่เรียกว่า SMA connector ขนาดความยาวหัว 1.0 มิลลิเมตร วางลงที่ขอบด้านกว้าง (5.6 เซนติเมตร) ทั้งสองด้านโดยให้หัววางบนแผ่นพลาสติกพอดี
- 2) จากนั้นนำแผ่นไมโครสตริป (Microstrip) แบบเส้นตรง (Straight resonator) แสดงดังภาพที่ 3.5 วางลงบนแผ่นพลาสติกโดยหันด้านที่มีลายทองแดงลงด้านล่างและวางให้ช่องบาก (notches) ตรงกับหัวของอุปกรณ์เชื่อมต่อ (SMA connector)พอดี



ภาพที่ 3.5 ภาพวาดแผ่นเรโซเนเตอร์ a) แบบเส้นตรง และ b) แบบวงกลม

- 3) ประกอบสายส่งสัญญาณเข้ากับอุปกรณ์เชื่อมต่อ และตั้งค่าช่วงความถี่สัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเครือข่ายเชิงเวกเตอร์ โดยให้ค่าเริ่มต้นที่ 1 กิกะเฮิร์ต และสิ้นสุดที่ 13 กิกะเฮิร์ต จากนั้นกำหนดค่าในการวัดจำนวน 60001 จุดโดยมีความถี่ของการวัดแต่ละจุดที่ 1 กิโลเฮิร์ต
- 4) นำแผ่นโพลิเมอร์วางบนแผ่นไมโครสตริป จากนั้นประกอบเปลือกพลาสติกสำหรับยึดแผ่นฟิล์มเข้ากับแท่นวัดทั้งสี่มุมและประกอบน็อตโดยการหมุนน็อตเข้าทั้งสี่มุมให้แน่น โดยพิจารณาจากการที่แผ่นฟิล์มประกบชิดกับแผ่นเรโซเนเตอร์พอดี
- 5) สังเกตที่หน้าจอเครื่องมือ รอให้การวัดเริ่มตั้งแต่ 1 กิกะเฮิร์ตจนครบถึง 13 กิกะเฮิร์ต และบันทึกข้อมูล
- 6) ทำการวัดซ้ำจำนวน 2 ครั้ง โดยทำซ้ำในข้อ 4 และ 5
- 7) ทำการประมวลผลชุดข้อมูลของค่าการกระเจิง (S_{21}) ที่วิเคราะห์ได้ ในช่วงความถี่รอบค่าความถี่สั่นพ้อง และบันทึกผลค่าการสัญญาณ S_{21} ที่จุดสูงสุดของพีค, ค่าความถี่สั่นพ้อง (Resonance frequency) และขนาดความกว้างของช่วงความถี่ ณ ตำแหน่ง -3 เดซิเบล จากค่าสูงสุดของ S_{21} ที่ความถี่สั่นพ้อง (Δf at -3 dB) ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ลักษณะของข้อมูลตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้ a) ค่าการกระเจิง (S_{21}) ที่ค่าความถี่ช่วง

1 – 13 กิกะเฮิร์ต และ b) ข้อมูลที่ใช้สำหรับการคำนวณค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 8) ทำการวัดความหนาของแผ่นพลาสติกจากพอลิแลคติกแอซิดและแผ่นพลาสติกจากวัสดุผสม โดยใช้เวอร์เนีย (Vernier caliper) วัดตรงกลางแผ่น
- 9) นำข้อมูลที่ประมวลผลได้และความหนาของแผ่นพลาสติก มาคำนวณค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมเอสเอ็มเอส ซึ่งจะได้ข้อมูลที่คำนวณแล้วจำนวน 3 ค่า คือ ค่าตัวประกอบคุณภาพของระบบ (Q-factor) ส่วนจริงของค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า (Real part permittivity: ϵ_r') และ ค่าสัดส่วนแทนเจนต์ของการสูญเสีย (Loss tangent: δ) ของวัสดุที่ความถี่นั้นๆ โดยสามารถนำไปหาส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า (Imaginary part permittivity) จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\delta = \epsilon_r''/\epsilon_r'$$

ในการวิเคราะห์ผล จะนำข้อมูลที่ได้ดังกล่าวจากการวัดทั้งหมด 3 ครั้ง มาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งจะได้เป็นข้อมูลโดยเฉลี่ยที่ขึ้นกับความถี่นั้นๆ โดยในการแสดงผลของค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า ค่าสัดส่วนแทนเจนต์ของการสูญเสีย และ ค่าตัวประกอบคุณภาพของระบบ ของวัสดุผสมพอลิแลคติกกับวัสดุนาโนคาร์บอนที่สัดส่วนการเติมต่างกัน จะแสดงข้อมูลโดยเฉลี่ยจากข้อมูลทั้งสี่ค่าที่ขึ้นกับความถี่

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

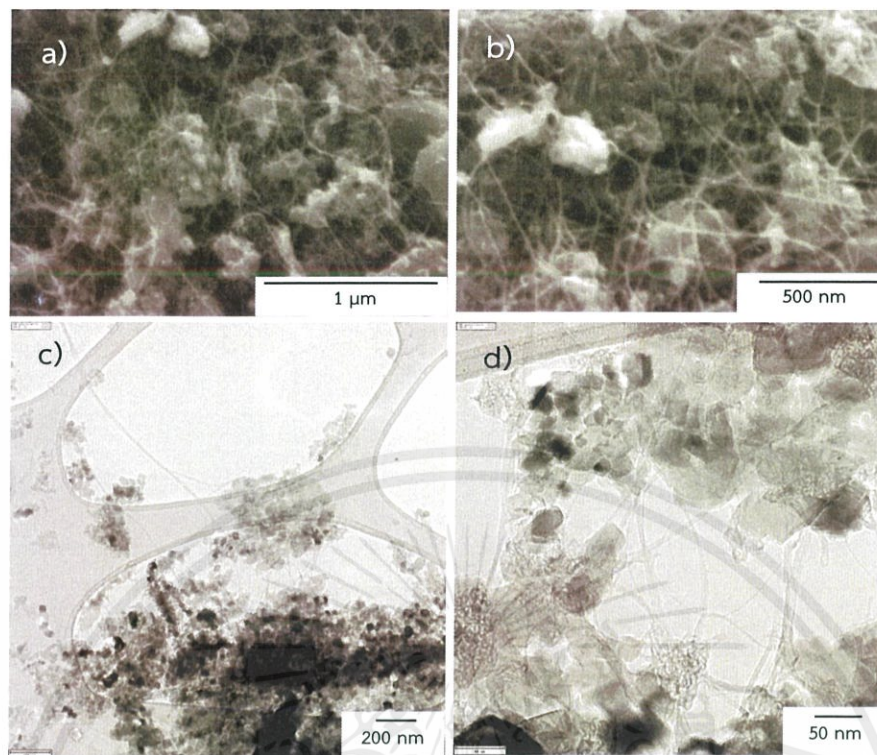
ในบทที่ 4 จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากเทคนิคการวิเคราะห์ต่างๆดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ซึ่งได้แบ่งผลการทดลองตามขั้นตอนการทดลองเป็น 4 หัวข้อดังนี้

- 1) สมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์จากน้ำมันมะพร้าว
 - 2) สมบัติของวัสดุคาร์บอน
 - 3) วัสดุผสมคาร์บอนกับพอลิแลคติกแอซิด
 - 4) ลักษณะเฉพาะในช่วงคลื่นความถี่วิทยุของวัสดุผสมคาร์บอนและพอลิแลคติกแอซิด
- โดยรายละเอียดจะกล่าวต่อไปในหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 สมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์จากน้ำมันมะพร้าว

4.1.1 การศึกษาผลของการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยใช้เทคนิคการเคลือบไอระเหยเคมีด้วยความร้อน

แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาจากเทคนิคการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด และลักษณะโครงสร้างภายในจากเทคนิคการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน ของคาร์บอนนาโนทิวป์จากการสังเคราะห์โดยใช้เทคนิคการเคลือบไอระเหยเคมีด้วยความร้อนจากน้ำมันมะพร้าว และใช้อนุภาคเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 4.1 a-b) ลักษณะสัณฐานวิทยา และ c-d) โครงสร้างภายใน ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้

โดยลักษณะทางสัณฐานวิทยา แสดงถึงตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ ที่ประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา คือ อนุภาคโลหะเหล็ก (Iron particle) วัสดุที่ทำหน้าเป็นตัวรองรับ (Supporting material) และ อัญรูปอื่นของคาร์บอน เช่น คาร์บอนอสัณฐาน เป็นต้น โลหะเหล็กจะถูกเตรียมให้อยู่บนพื้นผิวของวัสดุรองรับ เพื่อให้โลหะเหล็กมีการกระจายตัว ทั้งนี้กระบวนการเกิด (Growth mechanism) ของคาร์บอนนาโนทิวป์จะเกิดตรงบริเวณที่มีอนุภาคเหล็ก

ในกระบวนการสังเคราะห์ท่อคาร์บอน ซึ่งใช้อนุภาคเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อขนาดของอนุภาคเหล็ก โดยจะทำให้อนุภาคเหล็กมีขนาดเล็กลง ซึ่งจากข้อมูลงานวิจัยของ ฮีโรกิ ปี ค.ศ.2004¹⁶ ได้ทดลองให้ความร้อนที่อุณหภูมิ ตั้งแต่ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส กับอนุภาคโลหะ พบว่าอนุภาคโลหะจากการเตรียมซึ่งมีขนาด 8-12 นาโนเมตร เมื่อผ่านการให้ความร้อน จะมีขนาดลดลงอยู่ในช่วง 2-6 นาโนเมตร โดยเป็นขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังเดี่ยวและผนังสองชั้น (Single and double walled carbon nanotubes)³³

จากภาพที่ 4.1 c) และ d) พบว่าอนุภาคเหล็กมีขนาด 20-100 นาโนเมตร โดยประมาณ แต่ทั้งนี้ไม่พบอนุภาคเหล็กที่มีขนาดเล็กกว่า 5 นาโนเมตร ทั้งนี้คาด อนุภาคเหล็กเกิดการรวมตัวกันเป็น

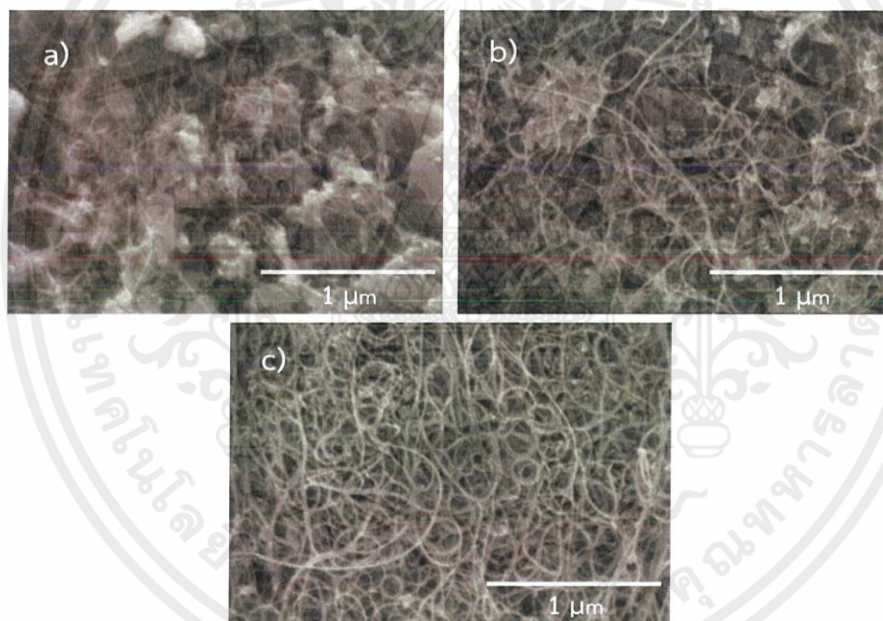
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดใหญ่ในขั้นตอนการเย็นตัว (Cooling down) หลังจากเกิดกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

สรุปได้ว่า สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวจากน้ำมันมะพร้าวที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสโดยใช้อนุภาคเหล็กที่อยู่บนแมกนีเซียมออกไซด์ที่เป็นวัสดุรองรับ ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์จะเกิดรอบๆบริเวณที่มีอนุภาคเหล็ก

4.1.2 การศึกษาผลของการทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์มีความบริสุทธิ์

ทั้งนี้ขั้นตอนการทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์มีความบริสุทธิ์ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ การแช่กรดครั้งที่หนึ่ง (1st Acid treatment) การให้ความร้อนครั้งที่หนึ่ง (1st Heat treatment) การแช่กรดครั้งที่สอง (2nd Acid treatment) และการให้ความร้อนครั้งที่สอง (2nd Heat treatment) โดยขั้นตอนต่างๆดังกล่าว เป็นการกำจัดส่วนประกอบที่ไม่ต้องการออก เช่น คาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) และ วัสดุรองรับคือแมกนีเซียมออกไซด์ เป็นต้น โดยแสดงผลดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ a) ที่สังเคราะห์ได้ b) การแช่กรดครั้งที่หนึ่ง c) การให้ความร้อนครั้งที่สอง

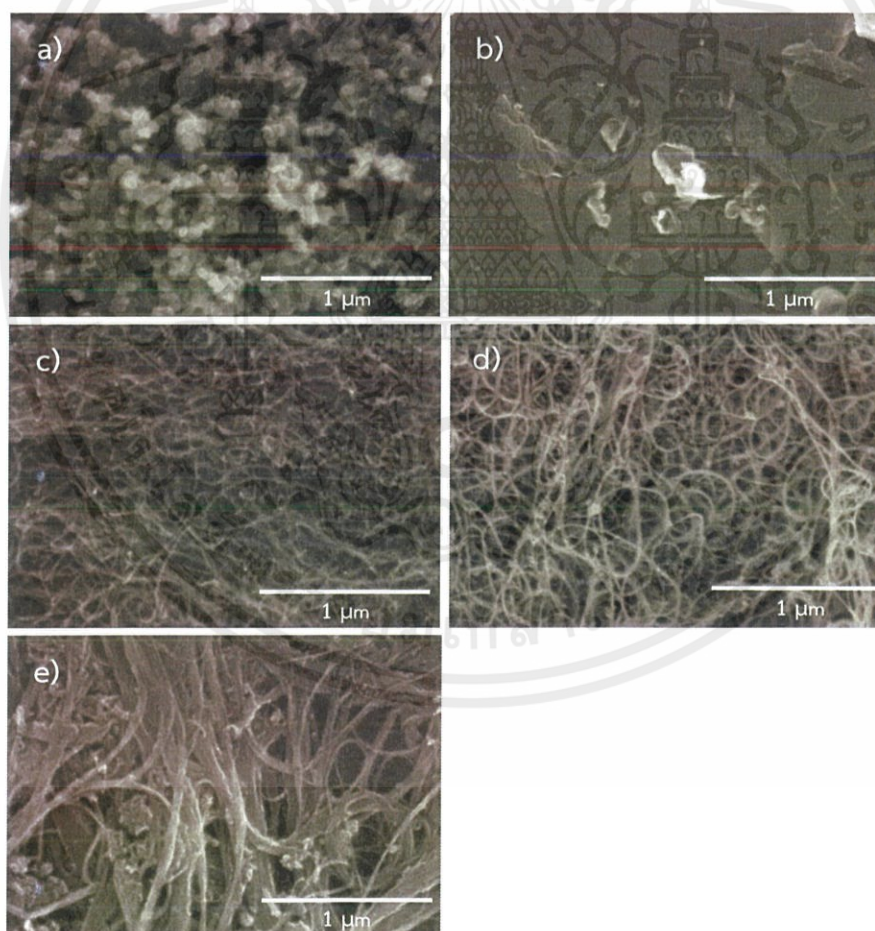
จากผลของการทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์บริสุทธิ์โดยใช้กระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางความร้อน พบว่ากระบวนการทางเคมี คือ การนำตัวอย่างแช่ในกรดไฮโดรคลอริกเป็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ของกรดเข้มข้นต่อวัสดุรองรับ ซึ่งเป็นวัสดุประเภทโลหะออกไซด์ (Metal-oxide)³⁴ ซึ่งในที่นี้คือแมกนีเซียมออกไซด์ ส่วนกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) เป็นกระบวนการการสลายตัวของคาร์บอนอัญรูปอื่น เช่น คาร์บอนอสัณฐาน โดยข้อมูลจากงานวิจัยของจอห์น ปี ค.ศ. 2011³⁵ ได้ศึกษาสมบัติการสลายตัวของคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดเอกสสารเป็นเอกสสารทงส่วนวิเคราะห์การเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญาติเห่นาไปเซประยชนดานการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนังหลายชั้นโดยใช้ความร้อน และวิเคราะห์ผลโดยใช้เทคนิคทีจีเอ (Thermogravimetric analysis: TGA) พบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Purify and Pristine MWNT) จะสลายตัวโดยความร้อนที่อุณหภูมิโดยประมาณ 450 และ 550 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

4.2 สมบัติของวัสดุคาร์บอนนาโน

4.2.1 การวิเคราะห์เชิงกายภาพของวัสดุคาร์บอนนาโน

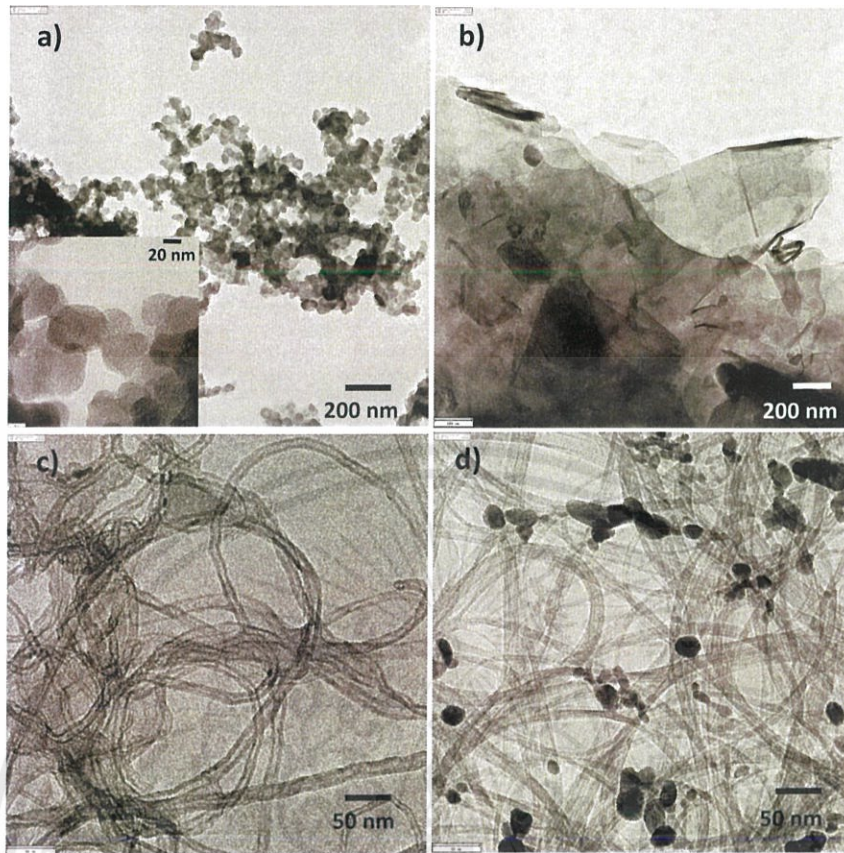
เพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา และขนาดของวัสดุคาร์บอนชนิดต่างๆ เช่น คาร์บอนแบล็ค กราไฟต์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้ และ คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรม โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด a) Carbon black b) Graphite c) MWNT d) Synthesized SWNT และ e) Commercial SWNT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าลักษณะทางกายภาพของวัสดุคาร์บอนแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง โดยคาร์บอนแบล็ค ในภาพ 4.3 a) มีลักษณะเป็นเม็ด (Granular) มีขนาดใกล้เคียงกันโดยประมาณ ส่วนกราฟไฟต์ในภาพ 4.3 b) มีลักษณะเป็นแผ่นขนาดใหญ่ เรียงกันเป็นชั้น ซึ่งสังเกตจากด้านซ้ายของในภาพมีขอบของกราฟไฟต์ซ้อนกันอยู่ แต่ทั้งนี้กราฟไฟต์ไม่มีขนาดที่แน่นอน ทั้งนี้จากภาพที่ 4.3 c) ถึง e) คาร์บอนนาโนทิวบ์ มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง << ความยาว (มีลักษณะเป็นเส้นยาว) โดยมีการจัดเรียงตัวอย่างไร้ทิศทาง และ จับตัวกันแบบเกี่ยวพันกัน (Entanglement) ส่วนคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้นจากภาพ (SEM image) พบว่ามีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากไม่พบคาร์บอนอัญรูปหรือสิ่งเจือปนอื่นๆ โดยสังเกตจากภาพที่ส่วนใหญ่พบโครงสร้างลักษณะเป็นเส้น (Fibrous) ทั้งนี้สำหรับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้ยังคงมีสิ่งเจือปนอื่นๆเหลืออยู่ (ด้านซ้ายของภาพ 4.3 d)) ส่วนคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรมมีความบริสุทธิ์ต่ำ เนื่องจากพบสิ่งเจือปนที่คาดว่าเป็นคาร์บอนอัญรูปอื่นในภาพ โดยในการเตรียมตัวอย่าง คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรม ไม่ได้ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Purification) ก่อนการนำไปใช้ ซึ่งจากผลของภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) สามารถแสดงได้เพียงลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยขนาดและลักษณะภายในของวัสดุคาร์บอนจะทราบได้จากเทคนิคการถ่ายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.4



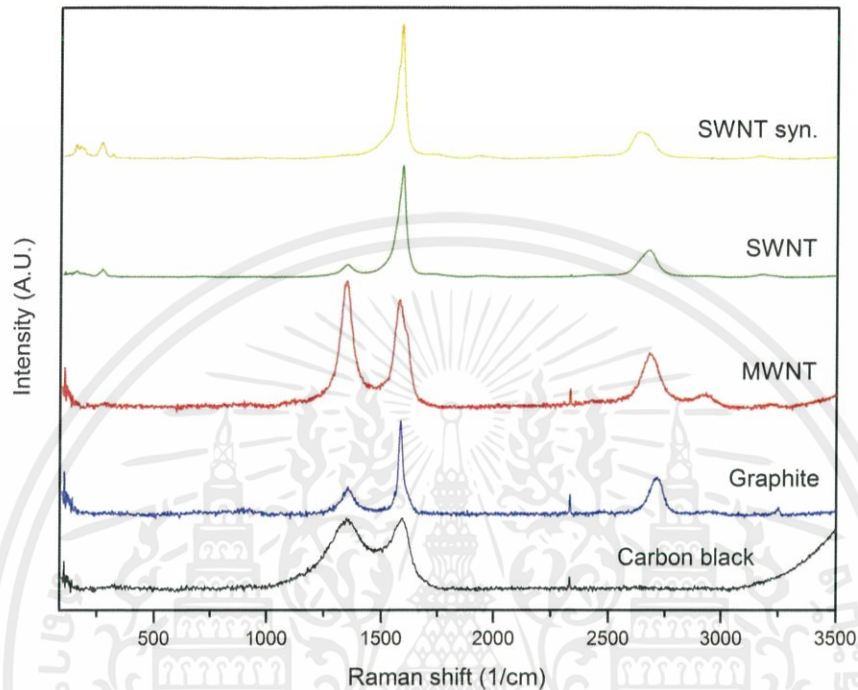
ภาพที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์วัสดุคาร์บอนโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน a) Carbon black b) Graphite c) MWNT และ d) Synthesized SWNT

พบว่าคาร์บอนแบล็คมีลักษณะเป็นเม็ด (Granular) เป็นทรงกลม มีขนาดต่างกันตั้งแต่ 20-60 นาโนเมตร โดยประมาณ ส่วนกราฟไฟต์มีลักษณะเป็นแผ่นซ้อนกัน โดยสามารถเห็นได้จากสีของ กราไฟต์ที่เข้มข้นจากบริเวณริมของกลุ่มกราฟไฟต์ที่เกาะกันซึ่งมีสีอ่อนที่สุด และมีขนาดใหญ่ซึ่งไม่สามารถบอกขนาดที่แท้จริงของกราฟไฟต์ได้ และสำหรับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น พบว่ามีการจัดเรียงตัวกันเป็นเส้นเดี่ยว (Individual fibrous) และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20-30 นาโนเมตร ซึ่งไม่พบโลหะที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนการสังเคราะห์ที่ในท่อคาร์บอน ส่วนคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะการจัดเรียงตัวเป็นมัด (Bundle) เนื่องจากแรงระหว่างโมเลกุลที่ผิวท่อ เรียกว่า แรงแวนเดอ วาลส์ (Van der waals) คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวจึงเกาะกลุ่มกันเป็นมัดมากกว่าที่จะอยู่เป็นเส้นเดี่ยว³⁶ ทั้งนี้สังเกตได้จากภาพที่ 4.4 d) จากแนวเส้นขนานตลอดความกว้างของเส้นใยขนาดใหญ่ ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์อยู่ที่ 2-5 นาโนเมตร และพบตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคเหล็กที่มีขนาดประมาณ 10-100 นาโนเมตรหลงเหลืออยู่ ส่วนคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรมไม่ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ ซึ่งทำให้ไม่ทราบว่า มีอนุภาคเหล็กอยู่หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การวิเคราะห์เชิงผลึกของวัสดุคาร์บอน

เพื่อศึกษาลักษณะความเป็นผลึกของวัสดุคาร์บอน โดยใช้เทคนิครามานสเปกโตรสโกปี แสดงผลดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 รามานสเปกตรัมของวัสดุคาร์บอน

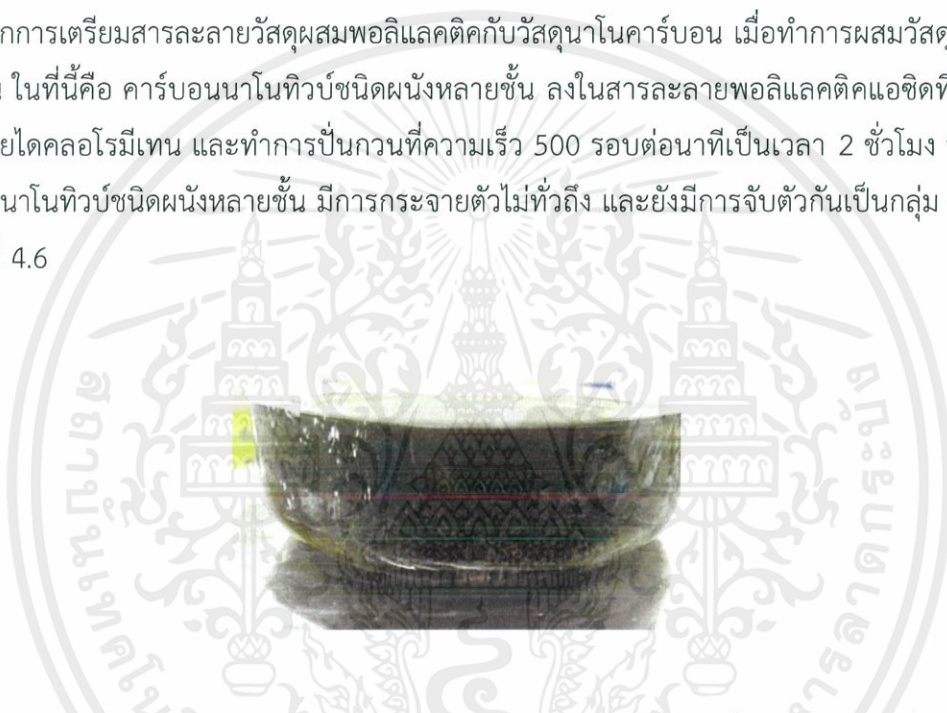
ทั้งนี้การวิเคราะห์คุณภาพเชิงผลึกของวัสดุ จะทำการวิเคราะห์ในรูปแบบของอัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มของกราฟิติกแบนด์กับดีสออเดอร์แบนด์ ($I_{G\text{-band}}/I_{D\text{-band}}$) ที่ค่าพลังงานจากการกระเจิง ที่ 1550 cm^{-1} และ 1350 cm^{-1} โดยประมาณ ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลรามานสเปกตรัม พบว่าวัสดุคาร์บอนชนิดต่างๆ คือ คาร์บอนแบล็ค กราไฟต์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น วัสดุคาร์บอนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยว และ คาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้ มีค่าอัตราส่วน $I_{G\text{-band}}/I_{D\text{-band}}$ เท่ากับ 0.99 3.42 0.85 8.93 และ 46.16 ตามลำดับ ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นผลึกมากที่สุด และมีค่าพลังงานจากการกระเจิงเกิดขึ้นในช่วง $100 - 300 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่เกิดจากการหดและขยายตัว²⁴ ที่เกิดขึ้นเฉพาะคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว

4.3 วัสดุผสมคาร์บอนกับพอลิแลคติกแอซิด

เนื่องจากในการเตรียมสารละลายวัสดุผสมพอลิเมอร์กับวัสดุนาโนคาร์บอน ตามวิธีการดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.4.3 เป็นวิธีการที่ทำให้ได้วัสดุผสมเป็นแผ่นเรียบและมีการกระจายตัวของวัสดุนาโนคาร์บอนทั่วถึง ในหัวข้อนี้จะอภิปรายผลการทดลองโดยแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนการเตรียมสารละลาย และ ส่วนการขึ้นรูปวัสดุผสม ดังนี้

4.3.1 ผลของการเตรียมสารละลาย

จากการเตรียมสารละลายวัสดุผสมพอลิแลคติกกับวัสดุนาโนคาร์บอน เมื่อทำการผสมวัสดุนาโนคาร์บอน ในที่นี้คือ คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น ลงในสารละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ใช้ตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน และทำการปั่นกวนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น มีการกระจายตัวไม่ทั่วถึง และยังมีการจับตัวกันเป็นกลุ่ม แสดงดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 สารละลายของวัสดุผสมพอลิแลคติกกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เตรียมโดยการปั่นกวนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ดังนั้นจึงทำการปั่นกวนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาเพิ่มขึ้นเป็น 24 ชั่วโมง เพื่อให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว หรือวัสดุนาโนคาร์บอนอื่นๆ เช่น คาร์บอนแบล็ค กราไฟต์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้ และคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว เกิดการกระจายตัวอย่างทั่วถึง ทั้งนี้การปั่นกวนโดยใช้เวลามากกว่า 24 ชั่วโมง เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า พบว่าสีของสารละลายไม่มีการเปลี่ยนแปลง

4.3.2 ผลของการขึ้นรูปวัสดุผสม

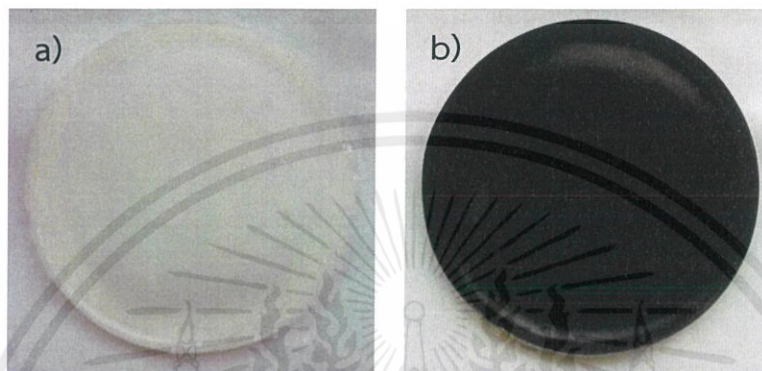
การขึ้นรูปวัสดุผสมโดยใช้วิธีการขึ้นรูปจากสารละลาย (Solvent casting) เป็นการนำสารละลายที่เตรียมได้ มาเทลงในแม่แบบ (Mold) ซึ่งในที่นี้เป็นจานเพาะเชื้อแก้ว ขนาด 9 เซนติเมตร ทั้งนี้การนำสารละลายที่เตรียมได้ ซึ่งมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร มาเทลงในจานเพาะเชื้อ และรอให้สารละลายระเหยออกไป พบว่าวัสดุผสมที่ขึ้นรูปได้ มีการพองที่ขอบ และมีฟองอากาศจำนวนมาก แสดงดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 ผลการขึ้นรูปวัสดุผสมพอลิแลคติกกับคาร์บอน โดยใช้สารละลายปริมาณ 100 มิลลิลิตร

ทั้งนี้ฟองอากาศและการพองที่เกิดในแผ่นพลาสติกอาจเกิดจากการระเหยของตัวทำละลายที่ใช้ ในที่นี้คือ ไทคลอโรมีเทน ที่มีจุดเดือดอยู่ที่ 39.6 องศาเซลเซียส ซึ่งระเหยง่ายที่อุณหภูมิปกติ ในการนำสารละลายปริมาณ 100 มิลลิลิตร ไปขึ้นรูป เป็นปริมาณที่มากเกินไป เนื่องจาก ปริมาณสารละลายดังกล่าว เมื่อเทลงในจานเพาะเชื้อ สารละลายมีความสูงประมาณ 6 มิลลิเมตรและการทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง ทำให้ตัวทำละลายบริเวณผิวด้านบนระเหยออกไปก่อน พอลิเมอร์ด้านบนจึงแห้ง ตัวทำละลายด้านล่างจึงไม่สามารถระเหยออกมาได้ แผ่นพลาสติกที่ขึ้นรูปได้จึงมีฟองอากาศและเกิดการพองที่ขอบ

ในการทดลองได้ทำการปั่นกวนให้ตัวทำละลายระเหยออกไปก่อน 50 เปอร์เซ็นต์แล้วจึงนำสารละลายเทลงในแม่แบบ และเพื่อลดอัตราการระเหยของตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน จึงได้ทำการทดลองขึ้นรูปภายใต้อุณหภูมิตั้งที่ 22-25 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าสารละลายวัสดุผสมที่มีปริมาตร 50 มิลลิลิตร ทำให้ได้แผ่นพลาสติกของวัสดุผสมที่ไม่มีฟองอากาศ และมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.8



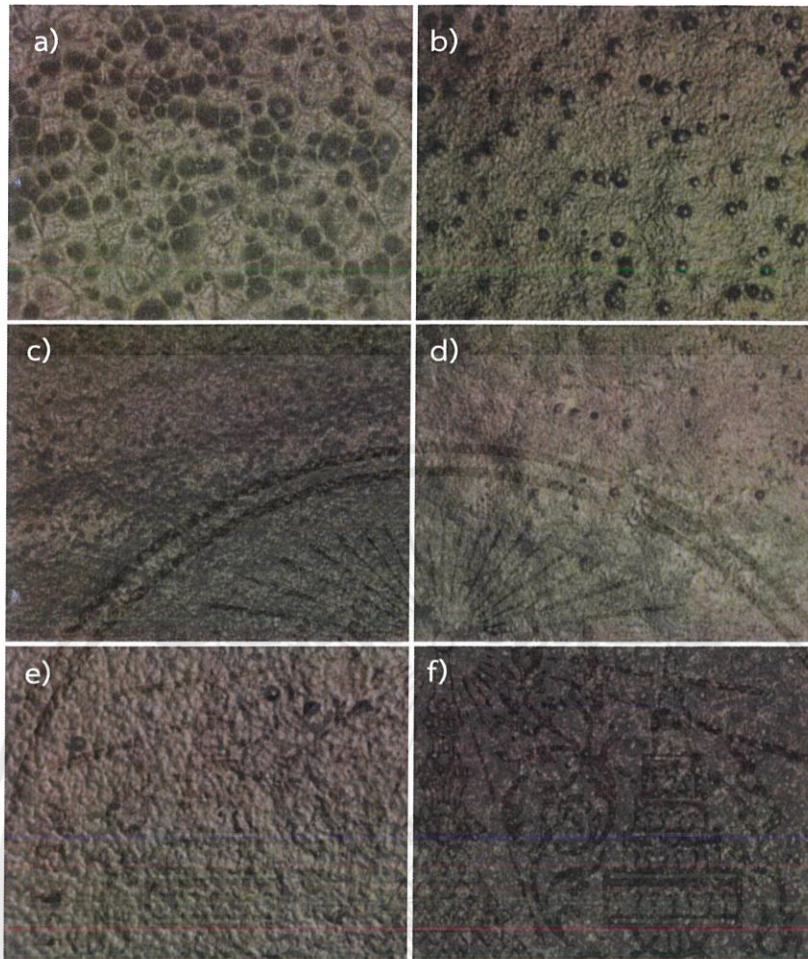
ภาพที่ 4.8 ภาพถ่ายของแผ่นพลาสติกที่ขึ้นรูปได้ a) แผ่นพลาสติกจากพอลิแลคติกแอซิด และ b) แผ่นพลาสติกจากวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น

4.4 ลักษณะเฉพาะในช่วงคลื่นความถี่วิทยุของวัสดุผสมคาร์บอนและพอลิแลคติกแอซิด

การวิเคราะห์แผ่นพลาสติกจากวัสดุผสมและแผ่นพลาสติกจากพอลิแลคติกแอซิดแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การศึกษาลักษณะทางกายภาพและการศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ

เป็นการศึกษาลักษณะการกระจายตัวและสัณฐานวิทยาของวัสดุคาร์บอนชนิดต่างๆในพอลิแลคติกแอซิด โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง แสดงดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 ลักษณะการกระจายตัวของวัสดุนาโนคาร์บอนในพอลิแลคติกแอซิดที่กำลังขยาย 5 เท่า
 a) พอลิแลคติกแอซิด b) 0.5% คาร์บอนแบล็ค c) 0.5% กราไฟต์ d) 0.1% คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น e) 0.1% คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้ และ f) 0.1% คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรม

พบว่าแผ่นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด มีพื้นผิวไม่เรียบ ซึ่งมีลักษณะเป็นหลุมตื้น ส่วนวัสดุผสมคาร์บอนแบล็คและกราฟิต์ในภาพที่ 4.9 มีการกระจายตัวในลักษณะก้อนกลม ซึ่งมีขนาดใหญ่ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แต่สำหรับวัสดุผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดต่างๆจะสังเกตลักษณะการกระจายตัวได้ยาก เนื่องจากขนาดของวัสดุเองมีขนาดเล็ก เมื่อทำการวิเคราะห์จะเห็นแต่ส่วนที่จับตัวกันเป็นก้อนใหญ่เท่านั้น

โดยแผ่นพลาสติกจากพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุผสมที่ขึ้นรูปได้มีความหนาแตกต่างกัน ทั้งนี้ได้ทำการขึ้นรูปแผ่นพลาสติกในแต่ละเงื่อนไข จำนวน 1 แผ่น และได้ทำการวัดความหนาบริเวณตรงกลางแผ่นพลาสติก มีผลดังตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ความหนาของแผ่นพลาสติกจากพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุผสมคาร์บอน

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารเติม	ความหนา (มิลลิเมตร)
Polylactic acid (PLA)	0 %	0.65
PLA + Carbon black	0.5 %	0.85
	1.0 %	0.80
	1.5 %	0.85
	2.0 %	0.95
PLA + Graphite	0.5 %	0.85
	1.0 %	0.90
	1.5 %	0.85
	2.0 %	0.85
PLA + MWNT	0.1 %	0.85
	0.2 %	0.75
	0.3 %	0.90
	0.4 %	0.95
PLA + Synthesized SWNT	0.1 %	0.85
PLA + Commercial SWNT	0.1 %	0.90
	0.2 %	0.90
	0.3 %	0.90
	0.4 %	0.95

จากตารางที่ 4.1 พบว่า แผ่นพลาสติกที่ขึ้นรูปได้ มีความหนาไม่เกิน 1 มิลลิเมตร ซึ่งในขั้นตอนการขึ้นรูป ใช้สารละลายตั้งต้นที่ 100 มิลลิลิตรเท่ากัน และนำไปปั่นจนให้ตัวทำละลายระเหยจนสารละลายมีปริมาณ 50 มิลลิลิตร ทั้งนี้ความแตกต่างของความหนาของแผ่นพลาสติกที่ขึ้นรูปได้ อาจเกิดจากในขั้นตอนการขึ้นรูป โดยการเทสารละลายลงในจานเพาะเชื้อ จะมีสารละลายบางส่วนเหลืออยู่ในปีกเกอร์ ซึ่งจากตารางที่ 4.1 พบว่าแผ่นพลาสติกที่ขึ้นรูปได้ ส่วนใหญ่มีความหนาอยู่ที่ 0.85-0.95 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการขึ้นรูปเป็น 5-15% (เปรียบเทียบกับความหนาของแผ่นพลาสติกที่ต้องการ คือ 1 มิลลิเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

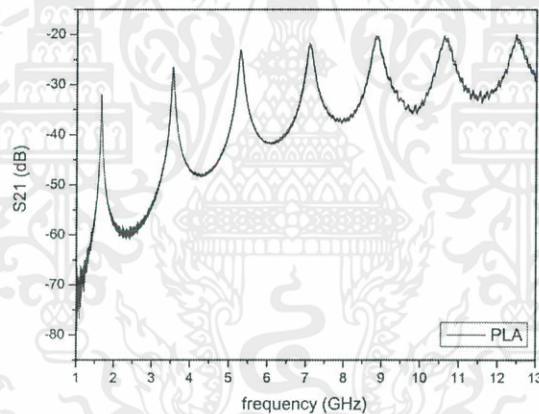
4.3.2 การศึกษาสมบัติทางคลื่นความถี่วิทยุ

4.3.2.1 การวิเคราะห์ค่าสัญญาณการส่งผ่านและค่าตัวประกอบคุณภาพ

จากเทคนิคการวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเครือข่ายเชิงเวกเตอร์ (Vector network analysis) ในช่วงความถี่ 1-13 กิกะเฮิรต์ โดยวิเคราะห์ค่าสัญญาณการส่งผ่าน (S21) ที่ถูกปล่อยออกมาจากหัววัดที่ 1 ผ่านแผ่นตัวอย่างและเข้าไปที่หัววัดที่ 2 และวิเคราะห์ค่าตัวประกอบคุณภาพที่แสดงถึงการสูญเสียพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของการสั้นพ้องในวงจร ทั้งนี้ในการวิเคราะห์จะใช้ตัวส่งสัญญาณแบบสั้นพ้องชนิดเส้นตรง (Straight-line resonator) โดยมีผลการวิเคราะห์ดังนี้

1) แผ่นพลาสติกชนิดพอลิแลคติกแอซิด

เป็นแผ่นพลาสติกชนิดไบโอพลาสติกที่สังเคราะห์ได้จากธรรมชาติ ในขั้นตอนการขึ้นรูปใช้สัดส่วนของเม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน และเม็ดพลาสติกอีโคเฟลิก ร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของพอลิแลคติกแอซิด มีผลการวิเคราะห์ค่าสัญญาณการส่งผ่าน (S21) ดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 ค่าสัญญาณการส่งผ่านของแผ่นพลาสติกชนิดพอลิแลคติกแอซิดในช่วงความถี่ 1-13 กิกะเฮิรต์

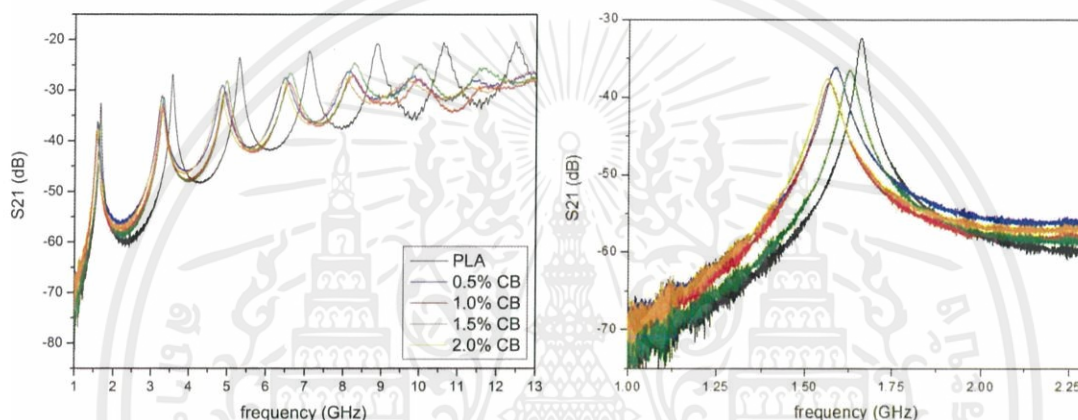
พบว่าแผ่นพลาสติกชนิดพอลิแลคติกแอซิดทำให้เกิดการสั้นพ้องของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในวงจรที่ความถี่ทั้งหมด 7 ความถี่ คือ 1.6 3.5 5.2 7.1 8.9 10.6 และ 12.5 กิกะเฮิรต์ โดยหากเฉลี่ยค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q-factor) จากทั้ง 7 ค่าความถี่จะได้ค่าตัวประกอบคุณภาพเท่ากับ 56.4 ทั้งนี้การสั้นพ้องที่ความถี่ 1.6 กิกะเฮิรต์ มีค่าตัวประกอบคุณภาพสูงที่สุด คือ 67.4

ค่าตัวประกอบคุณภาพซึ่งสัมพันธ์กับการสูญเสียพลังงาน (Energy loss) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในวงจรสั้นพ้อง มีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้นนั้นขึ้นกับสมบัติการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแผ่นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) วัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนแบล็ค

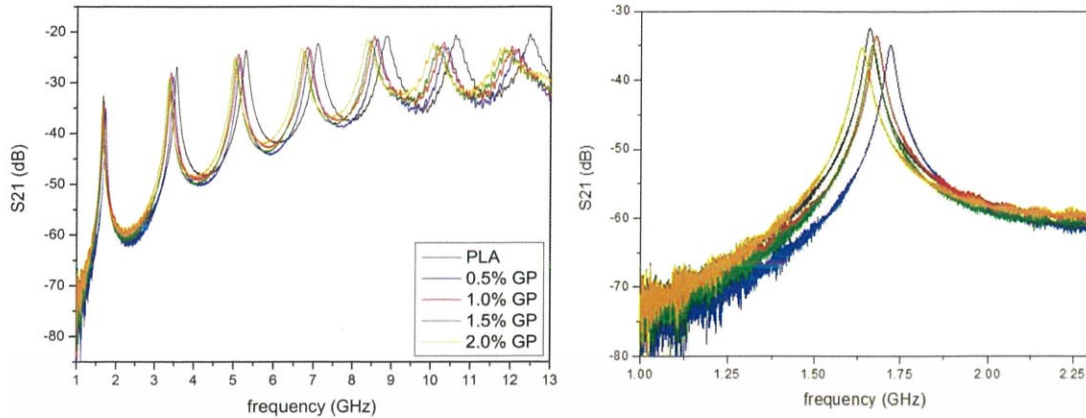
จากการวัดค่าสัญญาณการส่งผ่าน (S21) ณ ความถี่ที่เกิดการสั่นพ้องในวงจรที่มีฉนวนเป็นวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนแบล็คได้ผลแสดงดังภาพที่ 4.11 โดยที่ความถี่ของการสั่นพ้องโหมดแรก (ประมาณ 1.6 กิกะเฮิร์ต) มีค่าตัวประกอบคุณภาพเท่ากับ 51.8 49.7 57.7 และ 41.4 สำหรับวัสดุผสมที่เติมคาร์บอนแบล็ค 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ทั้งนี้การเติมคาร์บอนแบล็คลงในพอลิแลคติกแอซิด ทำให้คลื่นมีการสูญเสียพลังงาน (Energy loss) มากขึ้น สังเกตจากภาพที่ 4.11 ที่พบว่าพีคของการสั่นพ้องมีลักษณะกว้างขึ้น เมื่อเทียบกับพีคของแผ่นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งค่าตัวประกอบคุณภาพจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าความถี่ของคลื่นสูงขึ้น



ภาพที่ 4.11 ค่าสัญญาณการส่งผ่านของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนแบล็ค ในช่วงความถี่ 1-13 กิกะเฮิร์ต

3) วัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับกราฟไฟต์

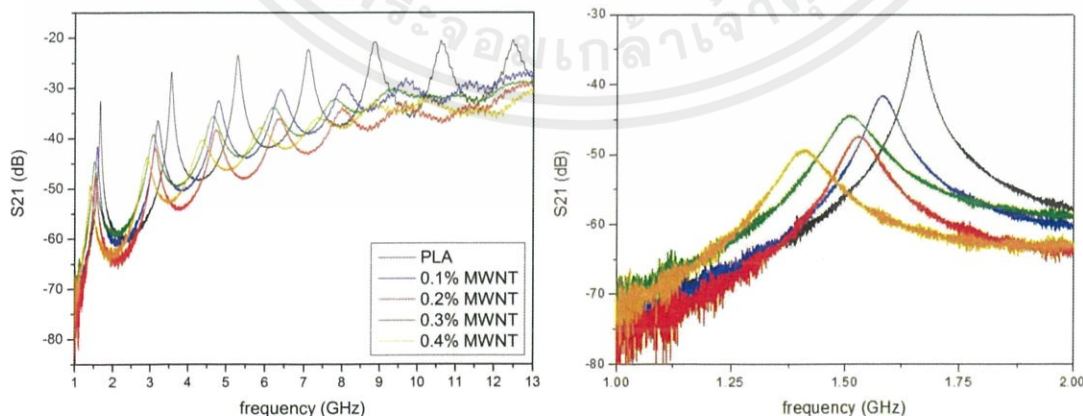
จากการวัดค่าสัญญาณการส่งผ่าน (S21) ที่ความถี่ที่เกิดการสั่นพ้องในวงจร ซึ่งมีวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับกราฟไฟต์เป็นฉนวนดังภาพที่ 4.12 พบว่าค่าตัวประกอบคุณภาพที่ความถี่ 1.6 กิกะเฮิร์ตโดยประมาณ มีค่าเท่ากับ 65.1 63.5 60.0 และ 48.7 สำหรับวัสดุผสมที่มีสัดส่วนการเติมกราฟไฟต์ที่ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยจากภาพที่ 4.12 สังเกตได้ว่า ลักษณะพีคของการสั่นพ้องของวัสดุผสมกราฟไฟต์ เมื่อเปรียบเทียบกับพีคของแผ่นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด มีลักษณะคล้ายกัน คือ ค่าตัวประกอบคุณภาพมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ซึ่งสรุปได้ว่า การเติมกราฟไฟต์ในวัสดุผสม ทำให้คลื่นมีการสูญเสียพลังงานไม่แตกต่างจากแผ่นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด



ภาพที่ 4.12 ค่าสัญญาณการส่งผ่านของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับกราฟไฟต์ ในช่วงความถี่ 1-13 กิกะเฮิร์ต

4) วัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังหลายชั้น

จากการวัดค่าสัญญาณการส่งผ่าน (S_{21}) ของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังหลายชั้นแสดงดังภาพที่ 4.13 พบว่าที่ความถี่ประมาณ 1.6 กิกะเฮิร์ต มีค่าตัวประกอบคุณภาพเท่ากับ 28.9 20.4 16.6 และ 15.4 สำหรับคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังหลายชั้นที่มีสัดส่วนของการเติมที่ 0.1 0.2 0.3 และ 0.4 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยแสดงถึงการสูญเสียพลังงานของคลื่นที่มากขึ้นเมื่อสัดส่วนการเติมคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังหลายชั้นสูงขึ้น โดยเห็นได้ชัดจากลักษณะของพีคการสั่นพ้องของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในวงจรที่ความถี่ต่างๆ มีความกว้าง (Board) มากขึ้น ทั้งนี้ค่าตัวประกอบคุณภาพมีแนวโน้มลดลง เมื่อความถี่ของคลื่นสูงขึ้น และจากภาพที่ 4.13 ภาพขวา พบว่าเมื่อสัดส่วนการเติมคาร์บอนนาโนทิวป์มากขึ้น ส่งผลต่อการสั่นพ้องของคลื่นในวงจร โดยทำให้เกิดที่ความถี่ต่ำลง

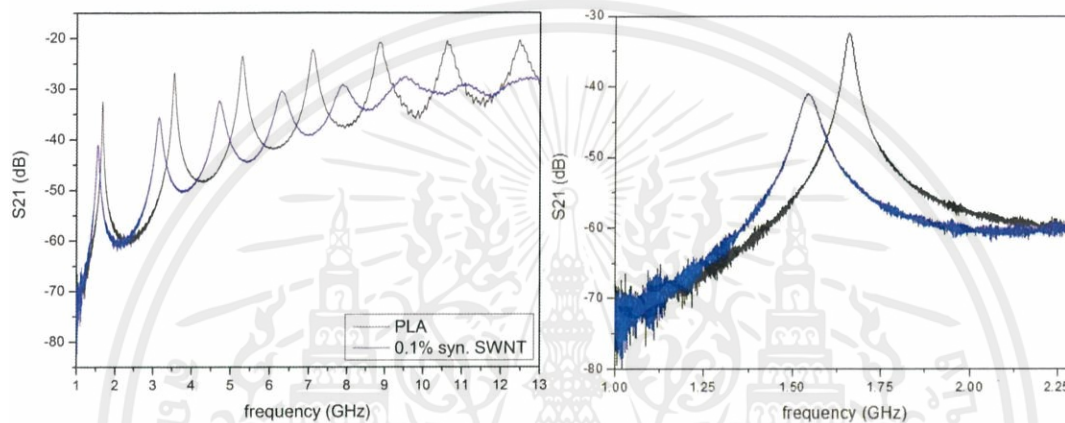


ภาพที่ 4.13 ค่าสัญญาณการส่งผ่านของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังหลายชั้น ในช่วงความถี่ 1-13 กิกะเฮิร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) วัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้

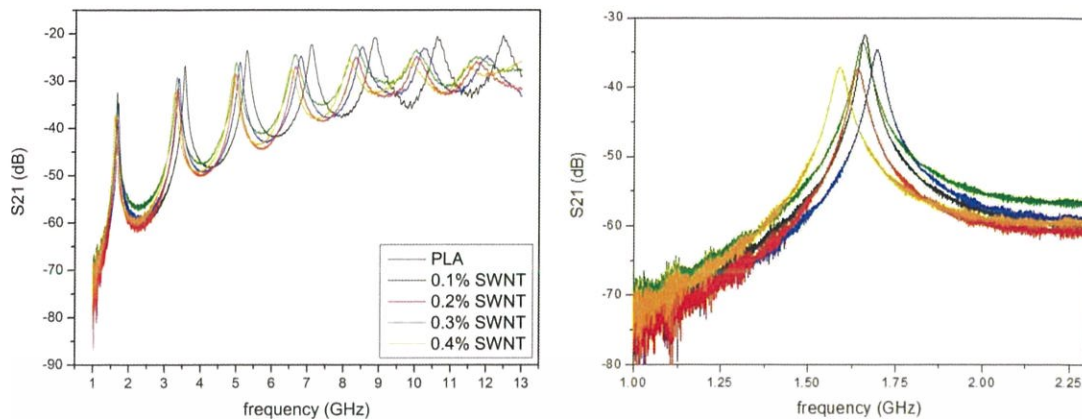
จากการวัดค่าสัญญาณการส่งผ่านของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้ มีผลดังภาพที่ 4.14 พบว่าที่การสั่นพ้องโหมดแรกที่มีความถี่ 1.6 กิกะเฮิร์ต โดยประมาณ วัสดุผสมที่มีสัดส่วนการเติม 0.1% โดยน้ำหนัก มีค่าตัวประกอบคุณภาพเท่ากับ 28.4 โดยจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่ของคลื่นสูงขึ้น และพบว่าความถี่ของการสั่นพ้องแต่ละโหมดมีค่าต่ำลง สำหรับวัสดุผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้ เมื่อเทียบกับแผ่นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด



ภาพที่ 4.14 ค่าสัญญาณการส่งผ่านของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้ ในช่วงความถี่ 1-13 กิกะเฮิร์ต

6) วัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรม

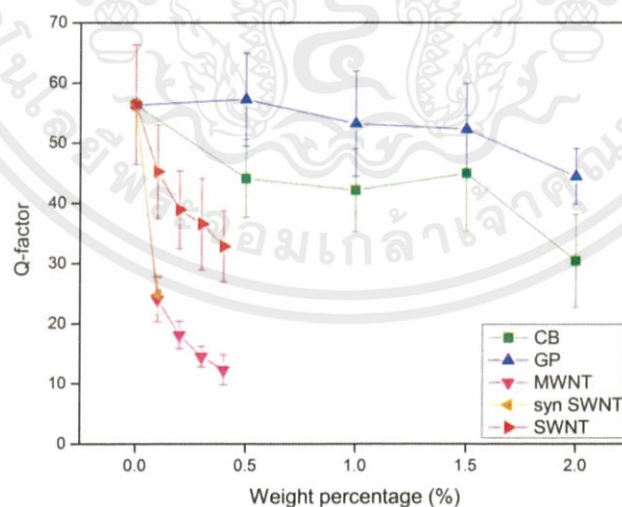
จากการวัดค่าสัญญาณการส่งผ่านของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรมดังภาพที่ 4.15 พบว่าที่ความถี่ของการสั่นพ้องโหมดแรก (ประมาณ 1.6 กิกะเฮิร์ต) มีค่าตัวประกอบคุณภาพเท่ากับ 54.3 46.1 45.6 และ 39.9 สำหรับสัดส่วนการเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรมในวัสดุผสมที่ 0.1 0.2 0.3 และ 0.4% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และพบว่าค่าตัวประกอบคุณภาพมีค่าต่ำลงเมื่อความถี่ของคลื่นสูงขึ้น



ภาพที่ 4.15 ค่าสัญญาณการส่งผ่านของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรม ในช่วงความถี่ 1-13 กิกะเฮิร์ต

7) ค่าตัวประกอบคุณภาพของวัสดุผสมคาร์บอนกับพอลิแลคติกแอซิด

จากการวิเคราะห์ค่าสัญญาณการส่งผ่านของวัสดุผสมคาร์บอนชนิดต่างๆ คือ คาร์บอนแบล็ค กราไฟต์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรม และคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้ พบว่าค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) ของสัญญาณการส่งผ่านที่ความถี่ต่างๆ มีค่าลดลง เมื่อสัดส่วนของวัสดุนาโนคาร์บอนที่ผสมเพิ่มมากขึ้น ($Q \propto 1/(\text{frequency} \times \text{weight percentage})$) ดังภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.16 ค่าตัวประกอบคุณภาพของวัสดุผสมคาร์บอนกับพอลิแลคติกแอซิดที่สัดส่วนของสารเติมโดยน้ำหนักต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้รูปร่างและขนาดของวัสดุคาร์บอนยังส่งผลต่อค่าตัวประกอบคุณภาพด้วย โดยวัสดุผสมคาร์บอนแบล็คและกราไฟท์ที่ความเข้มข้น 0.5 % โดยน้ำหนัก มีค่าตัวประกอบคุณภาพโดยเฉลี่ย (เป็นค่าเฉลี่ยจากค่าความถี่การสั่นพ้องที่สี่โหมดแรก) เท่ากับ 44.15 และ 57.275 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าวัสดุผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น วัสดุผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้ และ วัสดุผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรม ที่ความเข้มข้น 0.1% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าตัวประกอบคุณภาพโดยเฉลี่ย (เป็นค่าเฉลี่ยจากค่าความถี่การสั่นพ้องที่สี่โหมดแรก) เท่ากับ 24.24.725 และ 45.25 ตามลำดับ ทั้งนี้วัสดุผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้นมีค่าตัวประกอบคุณภาพต่ำที่สุด ซึ่งหมายถึงคลื่นมีการสูญเสียพลังงานสูงที่สุด

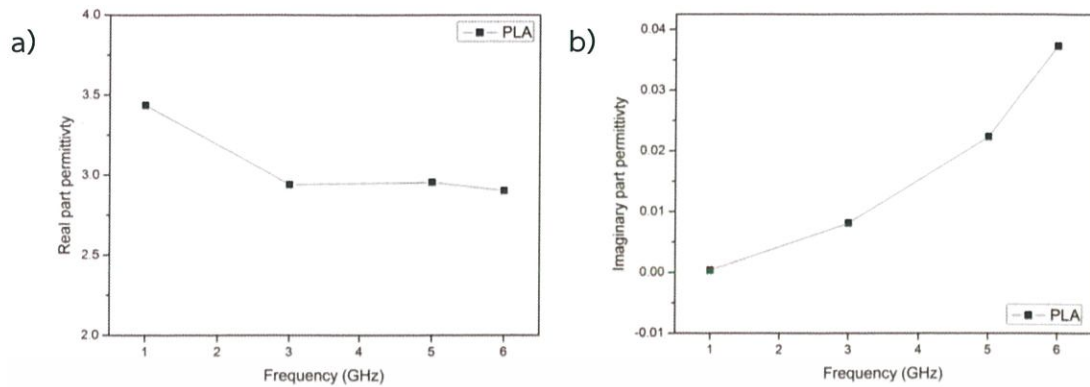
4.3.2.2 การวิเคราะห์ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า

ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า (Electrical permittivity) คำนวณได้จากโปรแกรมการวัดวัสดุฐานรองรับ (SMS) โดยใช้ข้อมูลจากการสั่นพ้องสี่โหมดแรกของระบบที่ความถี่ 1 3 5 และ 6 กิกะเฮิร์ตโดยประมาณ

โปรแกรมการวัดวัสดุฐานรองรับถูกออกแบบไว้ให้เหมาะกับฉนวน (Dielectric material) ที่มีค่าสัดส่วนแทนแจนต์ของการสูญเสีย (Loss tangent) ต่ำ โดยวิธีการใส่ข้อมูลได้อภิปรายไว้แล้วในบทที่ 3 หัวข้อ 3.4.3.3 ผลการคำนวณจะแสดงแยกตามชนิดของวัสดุดังนี้

1) แผ่นพลาสติกชนิดพอลิแลคติกแอซิด

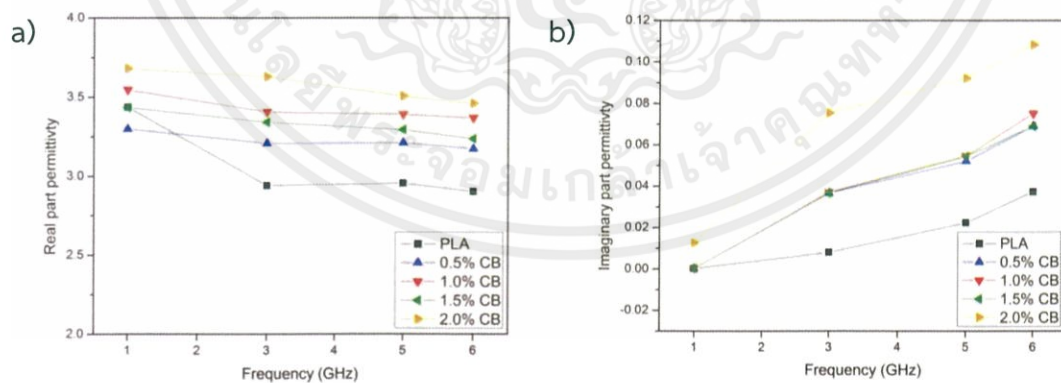
จากการคำนวณค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า ที่แสดงดังภาพที่ 4.17 พบว่าส่วนจริงของค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าโดยเฉลี่ยของแผ่นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดมีค่าเท่ากับ 3.06 ซึ่งจากข้อมูลงานวิจัยของฟูจิตะ เมื่อปีค.ศ.2003³⁷ ที่ศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริกของพลาสติกย่อยสลายได้ในคลื่นความถี่ 1 และ 100 กิโลเฮิร์ต พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่าส่วนจริงของสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า (ϵ_r') เท่ากับ 2.46 และ 2.43 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิดจากการทดลองที่วัดในคลื่นความถี่สูง (ระดับกิกะเฮิร์ต) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะพอลิแลคติกแอซิดที่นำมาศึกษาในงานนี้มีการผสมของสารเติม คือ อีโคเพล็กซ์ และจากภาพที่ 4.17 พบว่าค่าส่วนจริงของสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น แต่ส่วนจินตภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความถี่สูงขึ้น โดยที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ต ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าโดยเฉลี่ย (จากการวัดสามครั้ง) มีค่าเท่ากับ $2.95+i0.022$



ภาพที่ 4.17 a) ส่วนจริง และ b) ส่วนจินตภาพของสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าของแผ่นพลาสติกชนิดพอลิแลคติกแอซิด

2) วัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนแบล็ค

เช่นเดียวกับผลการคำนวณค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าของแผ่นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด พบว่าค่าส่วนจริงของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนแบล็ค มีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่ของคลื่นสูงขึ้น แต่ส่วนจินตภาพมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามความถี่ของคลื่น ดังภาพที่ 4.18 โดยที่ความถี่ 5 กิโลเฮิร์ตมีค่าสัดส่วนแทนเจนต์ของการสูญเสีย โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.0162 0.0161 0.0165 และ 0.026 และค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า ($\epsilon_r = \epsilon_r' + i\epsilon_r''$) โดยเฉลี่ยเท่ากับ $3.211 + i0.052$ $3.391 + i0.054$ $3.294 + i0.054$ และ $3.505 + i0.092$ สำหรับวัสดุผสมคาร์บอนแบล็คที่มีอัตราส่วนการเติม 0.5 1.0 1.5 และ 2.0% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

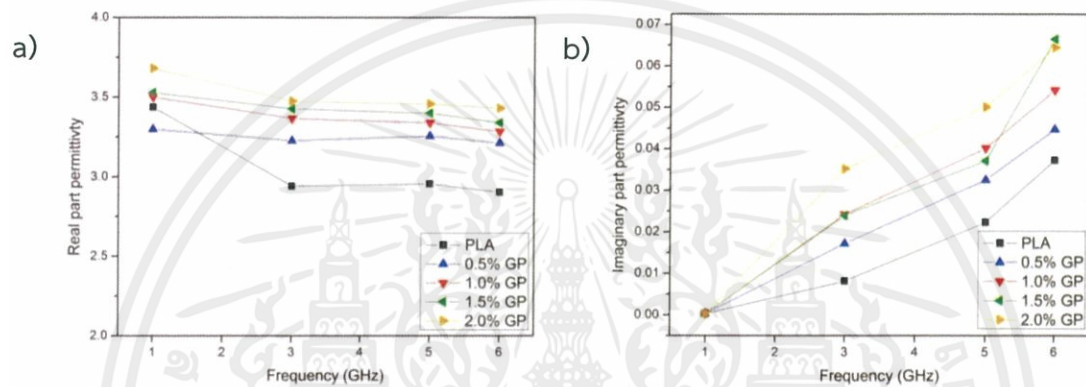


ภาพที่ 4.18 a) ส่วนจริง และ b) ส่วนจินตภาพของสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนแบล็ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) วัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับกราไฟต์

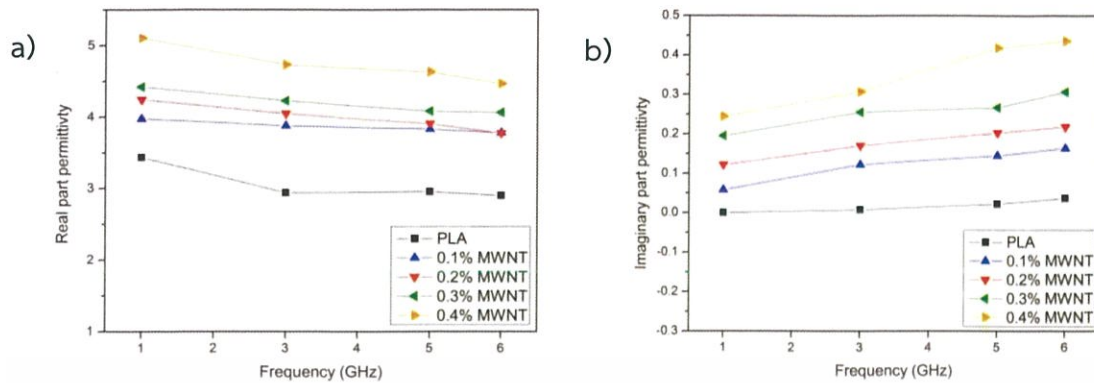
จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมการวัดแบบใช้ฐานรองรับ ได้ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าดังภาพที่ 4.19 พบว่าสำหรับวัสดุผสมวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับกราไฟต์อัตราส่วนการเติม 0.5 1.0 1.5 และ 2.0% โดยน้ำหนัก มีค่าส่วนจริงของสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ต เท่ากับ 3.255 3.338 3.398 และ 3.456 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามสัดส่วนของกราไฟต์ที่เติม ดังภาพที่ 4.19 a) ทั้งนี้ส่วนจริงจะมีค่าลดลงเมื่อค่าความถี่ของคลื่นสูงขึ้น แต่ส่วนจินตภาพจะมีค่าสูงขึ้นตามค่าความถี่



ภาพที่ 4.19 a) ส่วนจริง และ b) ส่วนจินตภาพของสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับกราไฟต์

4) วัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น

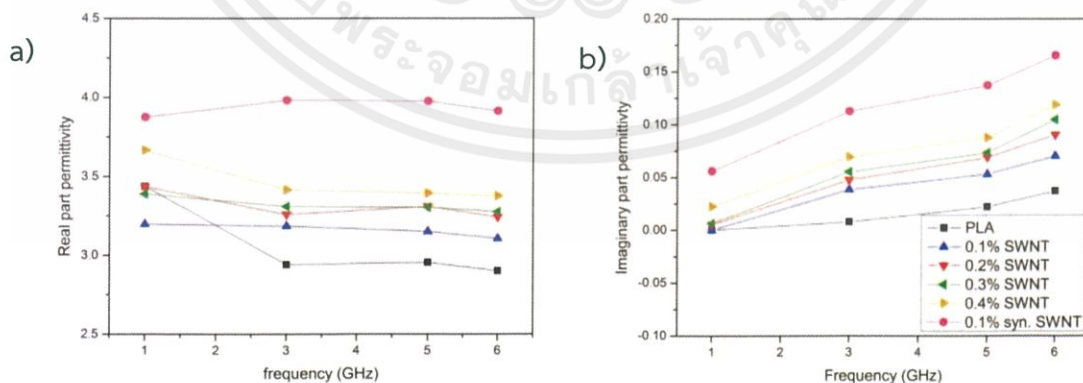
จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมการวัดแบบใช้ฐานรองรับ ได้ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 4.20 พบว่าแนวโน้มของส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น มีค่าสูงขึ้นตามสัดส่วนของคาร์บอนที่เติม โดยค่าสัดส่วนแทนแฉงนของการสูญเสียที่ความถี่ของการสั่นพ้อง 6 กิกะเฮิร์ตมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 0.097 ที่สัดส่วนการเติม 0.4% โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ค่าการสูญเสียดังกล่าวเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าส่วนจินตภาพและส่วน และค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า ($\epsilon_r = \epsilon_r' + i\epsilon_r''$) ของวัสดุผสมที่สัดส่วนของการเติม 0.1 0.2 0.3 และ 0.4% โดยน้ำหนัก ที่ความถี่การสั่นพ้อง 5 กิกะเฮิร์ตมีค่าเท่ากับ $3.832+i0.145$ $3.906+i0.202$ $4.083+i0.267$ และ $4.631+i0.418$ ตามลำดับ



ภาพที่ 4.20 a) ส่วนจริง และ b) ส่วนจินตภาพของสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น

5) วัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้และคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรม

จากการคำนวณ ได้ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวดังภาพที่ 4.21 โดยที่ความถี่การสั่นพ้อง 5 กิกะเฮิร์ต สำหรับวัสดุผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรมที่สัดส่วนการเติม 0.1 0.2 0.3 และ 0.4% โดยน้ำหนัก มีค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าเท่ากับ $3.151+i0.053$ $3.310+i0.069$ $3.305+i0.074$ และ $3.393+i0.087$ และวัสดุผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้ที่สัดส่วนการเติม 0.1% โดยน้ำหนัก มีค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าที่ความถี่การสั่นพ้อง 5 กิกะเฮิร์ตเท่ากับ $3.976+i0.137$ ซึ่งสรุปได้ว่าค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามสัดส่วนการเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว



ภาพที่ 4.21 a) ค่าส่วนจริง และ b) ค่าส่วนจินตภาพของสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้ และ คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรม

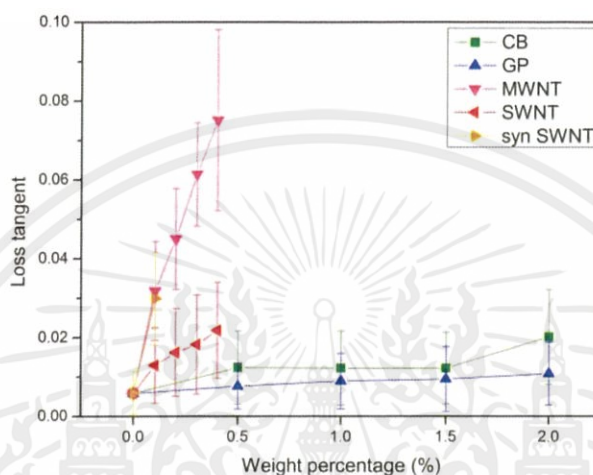
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยผลดังกล่าวอาจเป็นเพราะคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรมยังมีโครงสร้างอื่นปะปนอยู่ จากเทคนิค SEM หรือกล่าวได้ว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังมีความบริสุทธิ์ไม่มาก ในการผสมสารที่คิดเป็นส่วนโดยน้ำหนัก ทำให้วัสดุผสมมีสัดส่วนคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว น้อยกว่าสัดส่วนที่ต้องการเติมจริง จึงทำให้ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว เกรดอุตสาหกรรมมีค่าต่ำกว่าวัสดุผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ แต่ทั้งนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้ ที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์แล้ว ยังมีอนุภาคเหล็กเหลืออยู่จากเทคนิคการวิเคราะห์ด้วย TEM ซึ่งคาดว่าจะจะเป็นผลโดยตรงกับค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า โดยจากข้อมูลงานวิจัยของกฤษ ปี ค.ศ. 2009³⁸ พบว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ผ่านกระบวนการกำจัดโลหะเหล็ก ภายในท่อแล้ว จะมีค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าต่ำกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีโลหะเหล็ก แต่สำหรับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวเกรดอุตสาหกรรมไม่ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM ทำให้ไม่สามารถอธิบายได้ว่า ยังมีอนุภาคเหล็กเหลืออยู่หรือไม่

จากผลการวิเคราะห์ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับวัสดุคาร์บอน พบว่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของวัสดุคาร์บอนที่เติมลงในพอลิเมอร์มีผลต่อส่วนจริงและส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมวัสดุคาร์บอนมากขึ้น และรูปร่างของวัสดุคาร์บอนแต่ละชนิดที่ต่างกันมีผลต่อส่วนจริงและส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า โดยวัสดุคาร์บอนที่มีรูปร่างเป็นเส้นใย (Fibrous structure) ในที่นี้คือคาร์บอนนาโนทิวบ์ จะให้ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าสูงกว่าวัสดุคาร์บอนที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมและแผ่นบาง คือ คาร์บอนแบล็คและกราไฟต์

4.3.2.3 การวิเคราะห์ค่าสัดส่วนแทนเจนต์ของการสูญเสีย

จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมการวัดวัสดุแบบฐานรองรับ (SMS) เพื่อหาค่าสัดส่วนแทนเจนต์ของการสูญเสีย (Loss tangent) ของการสั่นพ้องของคลื่นในวงจร ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างส่วนจินตภาพกับส่วนจริงของค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า โดยถ้านำค่าที่คำนวณได้จากความถี่การสั่นพ้องสี่โหมดแรกมาเฉลี่ย จะได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4.22 ค่าสัดส่วนแทนเจนต์ของการสูญเสียของวัสดุผสมพอลิแลคติกกับวัสดุนาโนคาร์บอนที่สัดส่วนการเติมโดยน้ำหนักต่างกัน

จากรูปสังเกตเห็นว่าค่าสัดส่วนแทนเจนต์ของการสูญเสีย (Loss tangent) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อสัดส่วนการเติมวัสดุนาโนคาร์บอนมากขึ้น และที่สัดส่วนการเติม 0.1% โดยน้ำหนัก พบว่าวัสดุผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ได้ และ วัสดุผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น มีค่าสัดส่วนแทนเจนต์ของการสูญเสียสูงที่สุดเท่ากับ 0.0298 และ 0.0318 ตามลำดับ และสำหรับวัสดุผสมกราฟิตที่สัดส่วนการเติม 0.5% มีค่าสัดส่วนแทนเจนต์ของการสูญเสียต่ำที่สุดเท่ากับ 0.0077 เมื่อเทียบกับวัสดุผสมชนิดอื่น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการขึ้นรูปวัสดุผสมจากผงคาร์บอนและสารละลายพอลิเมอร์ (Carbon/polymer solvent casting) และวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงไฟฟ้าแม่เหล็กที่คลื่นความถี่วิทยุ โดยได้ศึกษาปัจจัยจากการเติมผงนาโนคาร์บอน (Carbon nanopowder) ในเนื้อพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางธรรมชาติที่ได้จากพอลิแลคติกแอซิด วัสดุนาโนคาร์บอนที่ใช้ในการศึกษา คือ ผงคาร์บอนแบล็ค ผงกราฟต์ ผงคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น ผงคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวและผงคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ขึ้นจากน้ำมันมะพร้าว

จากการศึกษาได้ข้อสรุปว่า

1) การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยใช้วิธีการเคลือบไอระเหยเคมีด้วยความร้อน (Thermal-Chemical vapor deposition) โดยใช้อุณหภูมิระเหยน้ำมันมะพร้าวซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ 350 องศาเซลเซียส และ ใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่ 850 องศาเซลเซียส ทำให้ได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-6 นาโนเมตร

2) วิธีการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Acid treatment) และการเกิดออกซิเดชันโดยใช้ความร้อนสูง (Heat treatment) สามารถทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์มีความบริสุทธิ์มากขึ้นได้ โดยการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเป็นขั้นตอนการกำจัดวัสดุรองรับ และการเกิดออกซิเดชันโดยใช้ความร้อนสูงเป็นขั้นตอนการกำจัดโครงสร้างอื่นของคาร์บอนที่ไม่ต้องการได้ เช่น คาร์บอนอสัณฐาน กราไฟต์

3) การขึ้นรูปแผ่นพลาสติกจากวัสดุผสมโดยใช้วิธีการขึ้นรูปจากสารละลาย (Solvent casting) เป็นวิธีที่มีปัจจัยหลายอย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อแผ่นพลาสติกที่ขึ้นรูปได้ เช่น อุณหภูมิภายนอก อัตราการระเหยของตัวทำละลาย ระยะเวลาที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย ปริมาณของสารละลาย เป็นต้น ทั้งนี้ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาปัจจัยดังกล่าว โดยพบว่า สำหรับการขึ้นรูปวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับวัสดุนาโนคาร์บอน ในขั้นตอนการเตรียมสารละลาย ควรทำการปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมงขึ้นไป และในขั้นตอนการขึ้นรูปโดยใช้แม่แบบ ควรทำการระเหยตัวทำละลายที่อุณหภูมิห้องจนสารละลายมีปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร (สำหรับแม่แบบงานเพาะเชื้อขนาด 9 เซนติเมตร) และทำการขึ้นรูปภายใต้อุณหภูมิประมาณ 22-24 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้แผ่นพลาสติกที่ไม่มีการพองตัวที่ขอบด้านข้างและไม่มีฟองอากาศบริเวณตรงกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การศึกษาสมบัติเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่วิทยุ (Radio-frequency electromagnetic wave) ได้แก่ ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้า (Electrical permittivity: ϵ_r) และค่าสัดส่วนแทนเจนต์ของการสูญเสีย (Loss tangent) ในช่วงความถี่ 1-13 กิกะเฮิร์ต โดยเทคนิคการวิเคราะห์ค่าการกระเจิงแบบส่งผ่านระบบเครื่องวัดวัสดุแบบฐานรองรับ ได้ผลสรุปดังต่อไปนี้

4.1) อัตราส่วนของวัสดุคาร์บอนที่เติมลงในพอลิแลคติกแอซิด มีผลต่อค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรการสั่นพ้อง เพราะวัสดุคาร์บอนสามารถรับและเปลี่ยนพลังงานจากคลื่นวิทยุไปเป็นพลังงานชนิดอื่นได้ กล่าวคือมีการสูญเสียพลังงาน (Energy loss) ในวัสดุผสมมากขึ้น

4.2) ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าที่คำนวณได้จากโปรแกรมการวัดวัสดุแบบฐานรองรับ (Substrate measurement system) แสดงให้เห็นว่า ค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าสัมพันธ์กับอัตราส่วนของวัสดุคาร์บอนแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) โดยส่วนจริงมีแนวโน้มลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น และ ส่วนจินตภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความถี่

4.3) รูปร่างและขนาดของวัสดุคาร์บอนที่เติมในวัสดุผสม (คาร์บอนแบล็คที่มีลักษณะเป็นทรงกลม กราไฟต์ที่มีลักษณะเป็นแผ่น คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยกลวงคล้ายท่อ (Tubular structure)) มีผลต่อค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าของวัสดุผสม ดังนี้คือ วัสดุคาร์บอนที่มีรูปร่างเป็นเส้นใยคล้ายท่อซึ่งมีความยาวระดับไมโครเมตร จะมีค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าสูงกว่าวัสดุคาร์บอนรูปทรงอื่น (จากการเฉลี่ยที่ความถี่ของการสั่นพ้องสี่โหมดแรก คือ 1 3 5 และ 7 กิกะเฮิร์ต โดยประมาณ สำหรับวัสดุผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้นและวัสดุผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวที่สังเคราะห์ขึ้นได้ที่สัดส่วนการเติม 0.1% โดยน้ำหนัก มีค่า $\epsilon_r = 3.87+i0.122$ และ $3.94+i0.118$ ตามลำดับ ส่วนวัสดุผสมคาร์บอนแบล็คและวัสดุผสมกราฟิตที่สัดส่วนการเติม 0.5% โดยน้ำหนัก มีค่า $\epsilon_r = 3.22+i0.396$ และ $3.25+i0.024$)

5) จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่วิทยุของวัสดุผสมพอลิแลคติกกับวัสดุคาร์บอน พบว่าวัสดุผสมที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ต่อเป็นวัสดุป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding materials) คือ วัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้นที่สัดส่วนการเติม 0.4% โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีส่วนจริงและส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมได้เชิงไฟฟ้าสูงที่สุดที่ $4.73+i0.351$ ซึ่งสัมพันธ์กับการสะท้อนของคลื่นที่รอยต่อระหว่างวัสดุกับอากาศ และการสูญเสียพลังงานในวัสดุนั้นๆ แต่ทั้งนี้การนำวัสดุผสมดังกล่าวไปใช้งานจริงจะต้องคำนึงถึงราคาต่อประสิทธิภาพที่ได้รับด้วย ซึ่งการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นสารเติมเพียงชนิดเดียวอาจทำให้วัสดุผสมดังกล่าวมีราคาสูง ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าวัสดุที่ผสมวัสดุคาร์บอนมากกว่าหนึ่งชนิด จะเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ไปใช้เป็นวัสดุป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มากกว่าวัสดุที่ผสมวัสดุคาร์บอนเพียงชนิดเดียว ซึ่งต้องมีการวิจัยและพัฒนาต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] Saini, P., Arora, M. Microwave Absorption and EMI Shielding Behavior of Nanocomposites Based on Intrinsically Conducting Polymers, Graphene and Carbon Nanotubes. *New Polym. Spec. Appl.* **2012**, 71–112.
- [2] Chung, D.D.L. Materials for Electromagnetic Interference Shielding. *J. Mater. Eng. Perform.* **2000**, 9, 350–354.
- [3] Nambiar, S., Yeow, J. T. W. Polymer-Composite Materials for Radiation Protection. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2012**, 4, 5717–5726.
- [4] Hirsch, A. The Era of Carbon Allotropes. *Nat. Mater.* **2010**, 9, 868–871.
- [5] Yadav, B. Structure, Properties and Applications of Fullerenes. *J. Nanotechnol. Appl.* **2008**, 2, 15–24.
- [6] Mauter, M. S., Elimelech, M. Environmental Applications of Carbon-Based Nanomaterials. *Environ. Sci. Technol.* **2008**, 42, 5843–5859.
- [7] Komarov, F. F., Mironov, a M., Introduction, I. Carbon Nanotubes: Present and Future. **2004**, 3, 411–429.
- [8] April, R. V; Re, V., Recei, M., May, V. Polymer Nanocomposites Containing Carbon Nanotubes. *Macromolecules*, **2006**, 39, 5194–5205.
- [9] Eatemadi, A., Daraee, H., Karimkhanloo, H., Kouhi, M., Zarghami, N. Carbon Nanotubes: Properties, Synthesis, Purification, and Medical Applications. *Nanoscale Res. Lett.* **2014**, 9, 1–13.
- [10] Stevens, R. M., Frederick, N. a., Smith, B. L., Morse, D. E., Stucky, G. D., Hansma, P. K. Carbon Nanotubes as Probes for Atomic Force Microscopy. *Nanotechnology*. **2000**, 11, 1.
- [11] Wang, D., Song, P., Liu, C., Wu, W., Fan, S. Highly Oriented Carbon Nanotube Papers Made of Aligned Carbon Nanotubes. *Nanotechnology* **2008**, 19, 075609.
- [12] Oh, J. Y., Yang, S. J., Park, J. Y., Kim, T., Lee, K., Kim, Y. S., Han, H. N., Park, C. R. Easy Preparation of Self-Assembled High-Density Buckypaper with Enhanced Mechanical Properties. *Nano Lett.* **2015**, 15, 190–197.

- [13] Bauhofer, W., Kovacs, J. Z. A Review and Analysis of Electrical Percolation in Carbon Nanotube Polymer Composites. *Compos. Sci. Technol.* **2009**, *69*, 1486–1498.
- [14] Chou, T. W., Gao, L., Thostenson, E. T., Zhang, Z., Byun, J. H. An Assessment of the Science and Technology of Carbon Nanotube-Based Fibers and Composites. *Compos. Sci. Technol.* **2010**, *70*, 1–19.
- [15] Kumar, M., Ando, Y. Chemical Vapor Deposition of Carbon Nanotubes: A Review on Growth Mechanism and Mass Production. *J. Nanosci. Nanotechnol.* **2010**, *10*, 3739–3758.
- [16] Ago, H., Nakamura, K., Uehara, N., Tsuji, M. Roles of Metal - Support Interaction in Growth of Single- and Double-Walled Carbon Nanotubes Studied with Diameter-Controlled Iron Particles Supported on MgO. *J. Phys. Chem. B.* **2004**, *108*, 18908–18915.
- [17] Thomassin, J. M., Jérôme, C., Pardoën, T., Bailly, C., Huynen, I., Detrembleur, C. Polymer/carbon Based Composites as Electromagnetic Interference (EMI) Shielding Materials. *Mater. Sci. Eng. R Reports.* **2013**, *74*, 211–232.
- [18] Chung, D. D. L. Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Carbon Materials. *Carbon N. Y.* **2001**, *39*, 279–285.
- [19] Baker-jarvis, J. The Interaction of Radio-Frequency Fields With Dielectric Materials at Macroscopic to Mesoscopic Scales. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* **2012**, *117*, 1–60.
- [20] Saini, P., Arora, M. Microwave Absorption and EMI Shielding Behavior of Nanocomposites Based on Intrinsically Conducting Polymers , Graphene and Carbon Nanotubes. *New Polymers for special applications*; **2012**; 71–112.
- [21] Agilent Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials; *Agilent technologies.* **2005**.
- [22] Jagatheesan, K., Ramasamy, A., Das, A., Basu, A. Electromagnetic Shielding Behaviour of Conductive Filler Composites and Conductive Fabrics - a Review. *Indian J. Fibre Text. Res.* **2014**, *39*, 329–342.
- [23] Al-Saleh, M. H., Sundararaj, U. Electromagnetic Interference Shielding Mechanisms of CNT/polymer Composites. *Carbon N. Y.* **2009**, *47*, 1738–1746.
- [24] Hodkiewicz, J., Scientific, T. F. Characterizing Carbon Materials with Raman Spectroscopy. *Appl. Note 51901.* 1–5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] Hodkiewicz, J. Characterizing Graphene with Raman Spectroscopy. Application note: 51946. 2010.
- [26] Dresselhaus M.S., Dresselhaus, G., Jorio, A., Filho, A. G. S., Saito, R. Raman Spectroscopy on Isolated Single Wall Carbon Nanotubes. *Carbon*. 2002, 40, 2043–2061.
- [27] Kimura, H., Goto, J., Yasuda, S., Sakurai, S., Yumura, M., Futaba, D. N., Hata, K. The Infinite Possible Growth Ambients That Support Single-Wall Carbon Nanotube Forest Growth. *Sci. Rep.* 2013, 3, 3334.
- [28] Suriani, A. B., Azira, A. A., Nik, S. F., Md Nor, R., Rusop, M. Synthesis of Vertically Aligned Carbon Nanotubes Using Natural Palm Oil as Carbon Precursor. *Mater. Lett.* 2009, 63, 2704–2706.
- [29] Maruyama, S., Kojima, R., Miyauchi, Y., Chiashi, S., Kohno, M. Low-Temperature Synthesis of High-Purity Single-Walled Carbon Nanotubes from Alcohol. *Chem. Phys. Lett.* 2002, 360, 229–234.
- [30] Mayne, M., Grobert, N., Terrones, M., Kamalakaran, R., Kroto, H. W. High Yield Synthesis of Carbon Nanotube Arrays By Pyrolysis of Benzene / Metallocene Aerosols.
- [31] Mathur, R. B., Pande, S., Singh, B. P., Dhama, T. L. Electrical and Mechanical Properties of Multi-Walled Carbon Nanotubes Reinforced PMMA and PS Composites. *Polym. Compos.* 2008, 29, 717–727.
- [32] Heuermann. Substrate Measurement System (SMS): Resonance-Based Electromagnetic Measurement of Planar Dielectrics; 2014.
- [33] Agoa, H., Nakamura, K., Imamura, S., Tsuji, M. Growth of Double-Wall Carbon Nanotubes with Diameter-Controlled Iron Oxide Nanoparticles Supported on MgO. *Chem. Phys. Lett.* 2004, 391, 308–313.
- [34] Zheng, B., Li, Y., Liu, J. CVD Synthesis and Purification of Single-Walled Carbon Nanotubes on Aerogel-Supported Catalyst. *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* 2002, 74, 345–348.
- [35] Lehman, J., Terrones, M., Mansfield, E., Hurst, K., Meunier, V. Evaluating the Characteristics of Multiwall Carbon Nanotubes. *Carbon*. 2011, 49, 2581–2602.
- [36] Liu, W. W., Aziz, A., Chai, S. P., Mohamed, A. R., Hashim, U. Synthesis of Single-Walled Carbon Nanotubes: Effects of Active Metals, Catalyst Supports, and Metal Loading Percentage. *J. Nanomater.* 2013, 2013 1-8.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [37] Shinyama, K., Fujita, S. Study on the Electrical Properties of a Biodegradable Plastic. *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Material*. 2003, 707–710.
- [38] XuChun, G., KunLin, W., JinQuan, W., RuiTao, L., QinKe, S., Yi, J., Chen, W.; HongWei, Z., DeHai, W. Microwave Absorbing Properties and Magnetic Properties of Different Carbon Nanotubes. *Sci. China Ser. E Technol. Sci.* 2009, 52, 227–231.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	ณัฐธยาน์ สุขกร
วัน เดือน ปีเกิด	16 มกราคม 2537
ที่อยู่ปัจจุบัน	51 ม. 5 ซ.นนทบุรี 12 ถ. นนทบุรี 1 ต.บางกระสอ อ.เมือง จ.นนทบุรี
การติดต่อ	เบอร์โทรศัพท์ 092-993-8287 อีเมลล์ nuttaya3024.grace@gmail.com
ประวัติการศึกษา	ระดับชั้นมัธยมศึกษา โรงเรียนสตรีนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี ระดับชั้นอุดมศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการได้รับทุน	พ.ศ. 2558 ได้รับทุนสนับสนุนด้านการวิจัยวิทยานิพนธ์ระดับอุดมศึกษา ในโครงการสร้างนักวิจัย ผลิตนักเทคโนโลยี (Young Scientist and Technologist Programme, YSTP) ร่วมกับศูนย์เทคโนโลยีโลหะและ วัสดุแห่งชาติ (MTEC) จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งชาติ (NSTDA)
ประวัติการทำงานด้านวิจัย	1) พ.ศ. 2556-2557 เป็นผู้ช่วยนักวิจัยในงานวิจัยหัวข้อ Synthesis Carbon Nanotubes from natural oils precursor by Thermal Chemical Vapor Deposition ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุนาโน คาร์บอน (Carbon nanomaterial research laboratory) 2) พ.ศ. 2557 เข้าร่วมนำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการ Siam physics congress (SPC 2014) 3) พ.ศ. 2558 เข้าฝึกงานในศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์เชิงฟิสิกส์ (Physical Characterization Laboratory) 4) พ.ศ. 2558 เข้าฝึกงานในงานวิจัยทางด้านพอลิเมอร์ ห้องปฏิบัติการ วิจัยโคตินและโคโดซาน ที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้