การสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่ควบคุมการเรียงตัวด้วยเทคนิคการกรองสุญญากาศ

FABRICATION OF ALIGNMENT - CONTROLLED CARBON NANOTUBE BUCKYPAPER BY VACUUM FILTRATION TECHNIQUE

จิราภา มีแสงเพชร

JIRAPA MEESAENGPET

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FABRICATION OF ALIGNMENT- CONTROLLED CARBON NANOTUBE BUCKYPAPER BY VACUUM FILTRATION TECHNIQUE

JIRAPA MEESAENGPET

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
2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2017

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงงานพิเศษ

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่ควบคุมการเรียงตัวด้วยเทคนิคการกรองสุญญากาศ
Special Project Title	FABRICATION OF ALIGNMENT-CONTROLLED CARBON NANOTUBE BUCKYPAPER BY VACUUM FILTRATION TECHNIQUE
นักศึกษา	นางสาวจิราภา มีแสงเพชร
รหัสประจำตัว	57110007
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์

คณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษ		**ลายมือชื่อ**
ดร.สากล	ระหงษ์	
ดร.มยุรี	พลเยี่ยม	
ผศ.ดร.วินัดดา	วงศ์วิริยะพันธ์	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่ 15 **เดือน** มิ.ย. **พ.ศ.** 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง	การสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่ควบคุมการเรียงตัวด้วยเทคนิคการกรองสุญญากาศ
นักศึกษา	นางสาวจิราภา มีแสงเพชร
รหัสประจำตัว	57110007
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์

บทคัดย่อ

ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวเป็นวัสดุหนึ่งมิติที่มีสมบัติทางไฟฟ้า ทางความร้อน ทางแสง ทางกลที่ขึ้นกับทิศทางการเรียงตัว ปัจจุบันมีการนำท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวมาสร้างเป็นแผ่นฟิล์มหรือแผ่นกระดาษเพื่อการประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ดังนั้นสิ่งที่สำคัญในการนำท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดคือการควบคุมท่อนาโนคาร์บอนซึ่งมีขนาดในระดับนาโนเมตรให้มีการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทางเพื่อให้สามารถแสดงสมบัติเดิมโดยไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นโครงงานพิเศษนี้ได้ศึกษาการสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวที่ควบคุมการเรียงตัวด้วยเทคนิคการกรองสุญญากาศ ขั้นตอนการทดลองประกอบด้วยการเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยว และทำการปั่นเหวี่ยงสารละลายให้เกิดการตกตะกอน หลังจากนั้นนำสารละลายด้านบนที่ไม่ตกตะกอนไปกรองด้วยเทคนิคการกรองสุญญากาศโดยใช้กระดาษกรองพอลิคาร์บอเนต ขนาดรูพรุน 200 นาโนเมตร ปัจจัยที่ศึกษาคือ ศึกษาผลของสารละลายท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 0.1% ถึง 0.8% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เวลาที่ใช้ในการปั่นเหวี่ยงสารละลายที่แตกต่างกันคือ 1-4 ชั่วโมง และความเร็วในการกรอง หลังจากนั้นนำกระดาษท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาและระดับการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทางด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวัดมุมเบี่ยงเบนของท่อนาโนคาร์บอน จากผลการวิเคราะห์พบว่ากระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจัดเรียงตัวอย่างมีทิศทางดีที่สุดคือกระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนทำมุมใกล้เคียงกับเส้นมาตรฐานมากที่สุด 93% โดยสร้างจากสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวความเข้มข้น 0.4% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เวลาที่ใช้ในการปั่นเหวี่ยงสารละลายท่อนาโนคาร์บอนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และใช้ความเร็วในการกรองแบบช้าประมาณ 1-3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ปัจจัยสำคัญคือการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนเส้นเดี่ยวและเวลาในการจัดเรียงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Fabrication of alignment-controlled carbon nanotube buckypaper by vacuum filtration technique
Student	Miss Jirapa Meesaengpet
Student ID	57110007
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterials Engineering
Year	2017
Special Project Advisor	Asst. Prof. Dr. Winadda Wongwiriyapan

Abstract

Single-walled carbon nanotube (SWCNT) is one-dimensional material with electrical, thermal, optical and mechanical properties, depending on its alignment. Nowadays, SWCNT is used for various applications in a form of thin film or buckypaper. Thus, to maximize the advantage of SWCNT, it is necessary to control the alignment of the nanoscale SWCNT to be able exhibit its pristine properties without degradation. This special project has studied on fabrication of alignment-controlled SWCNT buckypaper by vacuum filtration technique. Firstly, SWCNT was dispersed and centrifuged. Next, the supernatant dispersed solution of SWCNT was used for buckypaper fabrication by filtering the SWCNT dispersion via vacuum filtration technique using polycarbonate filter membrane with a pore size 200 nm. The effect of a surfactant concentration in a range of 0.1 to 0.8 %wt./v, a centrifugation time in a range of 1 to 4 hr, and a filtration speed on the SWCNT alignment have been studied. Under the studied conditions, it was found that the optimum condition for a well-aligned SWCNT is a surfactant concentration of 0.4 %wt./v, a centrifugation time of 4 hr, and a slow filtration speed of 1 to 3 ml/hr. The key factors are dispersion of isolated SWCNT and a time for alignment.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้สามารถประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการสนับสนุน ความช่วยเหลือ และคำปรึกษา คำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้จัดทำ จากบุคคลและหน่วยงาน ที่เกี่ยวข้องหลายฝ่ายดังนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำและการช่วยเหลือต่าง ๆ ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆใน โครงงานพิเศษ และขอขอบคุณที่ดูแลเอาใจใส่ข้าพเจ้าเป็นอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้โครงงาน พิเศษนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณ ดร. สากล ระหงษ์ และ ดร. มยุรี พลเยี่ยม สำหรับการเป็นประธานและกรรมการในการสอบ ตลอดจนการตรวจสอบ และการให้คำแนะนำที่ดี ในโครงงานพิเศษนี้ ขอขอบคุณบุคลากร วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับสถานที่และการอำนวยความสะดวกในการ ใช้เครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย และ บุคลากรสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่บริการเครื่องมือในการวัดและวิเคราะห์ผล ขอขอบคุณนายธันย์ธำรง หวานแช่ม นางสาวณัฐธยาน์ สุขกรและนายชินธันย์ ปิ่นมิ่ง สำหรับการช่วยเหลือและคำแนะนำต่าง ๆ เป็นอย่างดี รวมทั้งสมาชิกห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุนาโนคาร์บอน เพื่อน พี่ น้อง วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอม เกล้าลาดกระบัง ที่คอยให้การช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวของข้าพเจ้า ที่สนับสนุนส่งเสริมและ คอยให้กำลังใจมาโดยตลอด ทั้งนี้ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงงานพิเศษนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้อื่น ไม่มากก็น้อย

จิราภา มีแสงเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ i

Abstract ii

กิตติกรรมประกาศ iii

สารบัญ iv

สารบัญตาราง vi

สารบัญภาพ vii

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 สมมุติฐานงานวิจัย 2

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย 4

2.1 ลักษณะโครงสร้างและชนิดของวัสดุนาโนคาร์บอน 4

2.2 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes) 6

2.3 การประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอน 10

2.4 เครื่องมือวิเคราะห์ 16

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย 21

3.1 วัสดุอุปกรณ์และวิธีในการดำเนินงานวิจัย 21

3.2 การสร้างแผ่นกระดาษท่อนาโนคาร์บอน 22

3.3 การวิเคราะห์สมบัติกระดาษท่อนาโนคาร์บอน 25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล 26

4.1 สัณฐานวิทยาท่อนาโนคาร์บอนและกระดาษกรอง 26

4.2 โครงสร้างคาร์บอนของท่อนาโนคาร์บอน 27

4.3 ผลของปริมาณสารลดแรงตึงผิวต่อลักษณะการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอน แบบมีทิศทาง 28

4.4 การศึกษาผลของเวลาในการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) สารละลายท่อนาโนคาร์บอน ... 30

4.5 ศึกษาผลของความเร็วที่ใช้ในการกรองสารละลายท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิค การกรองแบบสุญญากาศ 34

บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ 36

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน 36

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา 37

บรรณานุกรม 38

ประวัติผู้เขียน 46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 ตารางระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย 3
2.1 ตารางแสดงค่าการเปรียบเทียบสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังเดี่ยวและท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น 10
2.2 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการสร้างกระดาษคาร์บอน 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 โครงสร้างอะตอมของคาร์บอนที่เกิดจากการสร้างพันธะ 4
2.2 แสดงภาพ a) โครงสร้างของกราฟีน (Graphene) และ b) โครงสร้างของกราไฟต์ 5
2.3 แสดงโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน 5
2.4 แสดงโครงสร้างของบัคมินสเตอฟูลเลอลีน (Buckminsterfullerene) 6
2.5 แสดงประเภทของท่อนาโนคาร์บอน a) ผนังเดี่ยว (Single-walled), b) ผนัง 2 ชั้น 7
2.6 แสดงรูปแบบโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน (a) ไครัลเวกเตอร์ (Chiral vector) 7
2.7 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีอาร์กดิสชาร์จ 8
2.8 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนวิธีการระเหยด้วยเลเซอร์ 8
2.9 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากการตกสะสมเคมีด้วยความร้อน 9
2.10 แสดงภาพ a) ตัวอย่างแผ่นกระดาษคาร์บอน b) ภาพถ่ายท่อนาโนคาร์บอนแบบสุ่มจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 11
2.11 แสดงภาพ a) ตัวอย่างแผ่นกระดาษคาร์บอน b) ภาพถ่ายท่อนาโนคาร์บอนแบบมีทิศทางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 11
2.12 ภาพแสดงการจำลองกระบวนการการสร้างแผ่นกระดาษคาร์บอนด้วยวิธีการกรองด้วย 12
2.13 ภาพแสดงการเตรียมแผ่นกระดาษคาร์บอนโดยใช้สนามแม่เหล็กเป็นตัวกำหนดทิศทางของท่อนาโนคาร์บอน 12
2.14 ภาพแสดงการจำลองกระบวนการการสร้างแผ่นกระดาษคาร์บอนด้วยวิธีการผลักแบบโดมิโน (Domino pushing method) 13
2.15 แสดงภาพตัวอย่างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีกระดาษคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ 14
2.16 แสดงกราฟ a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้า และ b) ค่าต้านทานแรงดึงกับความหนาแน่นของท่อนาโนคาร์บอนในกระดาษคาร์บอน โดยที่จุดสีแดงสีดำและสีฟ้าระบุว่าสร้างจากท่อนาโนคาร์บอน มีความสูง 1,500, 700 และ 350 μm ตามลำดับ 15
2.17 แสดงภาพเยื่อแผ่นกระดาษคาร์บอนที่มีท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นแสดงการเลือกและการซึมผ่านของสารปนเปื้อนอินทรีย์ 15
2.18 เครื่องรามานสเปคโตรสโกปี (Raman spectroscopy) 16
2.19 แสดงหลักการทำงานของรามานสเปคโทรสโกปี (Raman Spectroscopy) 16
2.20 แสดงรามานสเปคตรา (Raman spectra) ของท่อนาโนคาร์บอน 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.21	แสดงภาพตัวอย่างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	18
2.22	แสดงภาพการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	19
2.23	แสดงภาพตัวอย่างเครื่องมือวิเคราะห์การดูดกลืนแสง	19
2.24	แสดงภาพตัวอย่างส่วนประกอบของเครื่องมือวิเคราะห์การดูดกลืนแสง	20
3.1	ภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอน	22
3.2	ภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนโดยการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)	23
3.3	ภาพแสดงการสร้างแผ่นกระดาษท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิคการกรองแบบสุญญากาศ	23
3.4	แสดงแผนผังสรุปงาน	25
4.1	แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของ a) ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยว b) กระดาษกรอง	26
4.2	แสดงรามานสเปคตรัมของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยว	27
4.3	แสดงสัณฐานวิทยาของกระดาษท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	28
4.4	แสดงภาพถ่ายสารละลายท่อนาโนคาร์บอนโดยมีการใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงสารละลาย	30
4.5	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงของสารละลายท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงแตกต่างกัน	31
4.6	แสดงผลการวิเคราะห์กระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงสารละลาย	32
4.7	แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกระดาษท่อนาโนคาร์บอนใช้ความเร็วในการกรอง	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes , CNTs) เป็นวัสดุนาโนหนึ่งมิติที่มีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของแผ่นกราฟีนม้วนตัวเป็นท่อรูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร สามารถแบ่งออกได้สองประเภทหลักๆ คือ ท่อนาโนคาร์บอนแบบชนิดผนังเดี่ยว (Single-walled carbon nanotubes) และท่อนาโนคาร์บอนแบบชนิดผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes) [1] ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวเป็นหนึ่งในวัสดุที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเป็นวัสดุหนึ่งมิติที่โดดเด่นด้านสมบัติทางไฟฟ้า ทางความร้อน ทางแสง ทางกลที่ขึ้นกับทิศทางการเรียงตัว ทั้งนี้จึงมีการศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น เป็นตัวเสริมแรงในวัสดุ ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเซนเซอร์ตรวจจับแก๊ส เป็นต้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าได้มีการศึกษาคิดค้นนำท่อนาโนคาร์บอนมาสร้างเป็นแผ่นกระดาษคล้ายกับในลักษณะของฟิล์มบาง เรียกว่า กระดาษคาร์บอน (Buckypaper) หรือเป็นวัสดุผสม (Composites) เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานได้จริงในด้านต่าง ๆ แต่กระดาษท่อนาโนคาร์บอนส่วนใหญ่นั้นมีลักษณะการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนซ้อนทับกันเป็นแบบสุ่ม (Random) ซึ่งอาจทำให้สมบัติของท่อนาโนคาร์บอนเปลี่ยนไปไม่เทียบเท่าท่อนาโนคาร์บอนแบบเส้นเดี่ยว ดังนั้นจึงมีการศึกษาการสร้างแผ่นกระดาษท่อนาโนคาร์บอนโดยควบคุมให้มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบและมีทิศทาง (Aligned CNT) เพื่อให้สามารถแสดงสมบัติเดิมโดยไม่เปลี่ยนแปลงและเป็นไปตามที่ต้องการ อาทิเช่น การสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนจากวิธีการกรองโดยใช้สนามแม่เหล็กเป็นตัวกำหนดทิศทางของท่อนาโนคาร์บอน [2] หรือสร้างจากท่อนาโนคาร์บอนแบบแนวตั้งบนฐานรองรับซิลิกอนด้วยวิธีการผลักแบบโดมิโน [3] ซึ่งพบว่าจากวิธีดังกล่าวท่อนาโนคาร์บอนได้มีการจัดเรียงตัวอย่างมีทิศทางและเป็นระเบียบได้ดี แต่วิธีดังกล่าวค่อนข้างซับซ้อนมีต้นทุนสูงและยากต่อการขยายขนาด

ในงานวิจัยนี้จึงจะศึกษาการสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวที่ควบคุมการเรียงตัวด้วยเทคนิคการกรองสุญญากาศ (Vacuum filtration technique) ด้วยการควบคุมความเร็วในการกรอง ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายไม่ซับซ้อน ต้นทุนต่ำ สามารถขยายขนาดได้ง่าย โดยจะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนให้มีลักษณะจัดเรียงตัวแบบมีทิศทาง เช่น ท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยวที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว การใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่แตกต่างกัน และ ความเร็วที่ใช้ในการกรอง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวที่ควบคุมการเรียงตัวด้วยเทคนิคการกรองสุญญากาศ (Vacuum filtration technique)

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของลักษณะท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวต่อการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทาง

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของเวลาในการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) สารละลายท่อนาโนคาร์บอนต่อการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทาง

1.3 สมมุติฐานงานวิจัย

1.3.1 การใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงสารละลายนานมากขึ้นจะเกิดการแยกตัวของท่อนาโนคาร์บอนภายในสารละลาย ทำให้สามารถแยกท่อนาโนคาร์บอนแบบกลุ่มก้อนและแบบเส้นเดี่ยวได้

1.3.2 การกระจายตัวได้ดีของท่อนาโนคาร์บอนในสารละลาย (Dispersion) ส่งผลต่อความสามารถในการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทาง

1.3.3 การใช้ความเร็วในการกรองแบบช้าจะช่วยให้ท่อนาโนคาร์บอนมีเวลาเพียงพอในการสร้างจัดเรียงตัวแบบมีทิศทางก่อนที่จะสะสมลงบนแผ่นกรอง

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.4 กระดาษท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวที่สามารถควบคุมการเรียงตัวด้วยเทคนิคการกรองสุญญากาศ

1.4.1 สร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวจากสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่มีเงื่อนไขในการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) โดยใช้เวลาแตกต่างกัน คือ 1 ชั่วโมง , 2 ชั่วโมง , 3 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ

1.4.2 ศึกษาทดสอบวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิควิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometry) วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของกระดาษท่อนาโนคาร์บอน โดยใช้เทคนิควิเคราะห์กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy) ศึกษาลักษณะโครงสร้างคาร์บอน ด้วยเทคนิควิเคราะห์รามานสเปคโทรสโกปี(Raman Spectroscopy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัยสามารถแบ่งเป็นหัวข้อดังนี้

1.5.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย (Literature review)

1.5.2 ทำการสร้างแผ่นกระดาษท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิคการกรองสุญญากาศโดยใช้เงื่อนไขที่เหมาะสม

1.5.3 วิเคราะห์การแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาเพื่อดูการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอน

1.5.4 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 ตารางระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

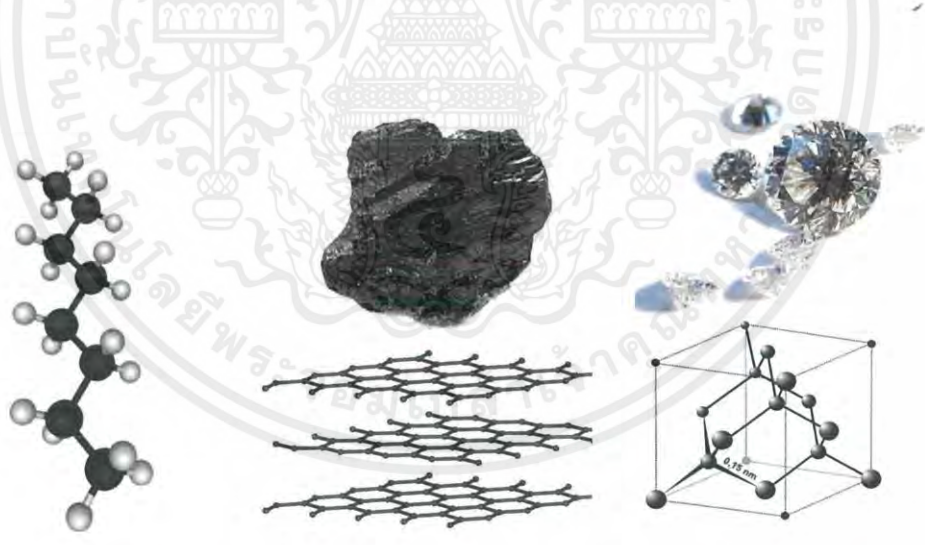
แผนการดำเนินงาน	ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย			
	สิงหาคม – ตุลาคม พ.ศ. 2560	พฤศจิกายน -ธันวาคม พ.ศ. 2560	มกราคม – กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561	มีนาคม – พฤษภาคม พ.ศ. 2561
1	●	●		
2	●	●		
3		●		
4			●	●

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 ลักษณะโครงสร้างและชนิดของวัสดุนาโนคาร์บอน

คาร์บอนเป็นธาตุที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายซึ่งส่วนใหญ่ประกอบอยู่ในสิ่งมีชีวิตเกือบทุกชนิดบนโลก และเป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์อีกทั้งยังสามารถสร้างพันธะกับคาร์บอนด้วยกันเองและธาตุอื่น ๆ ได้ ทำให้เกิดเป็นสารประกอบที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์เช่นเป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิง เป็นต้นนอกจากนี้ยังเป็นธาตุที่สำคัญสำหรับการพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีต่างๆมากมาย โดยธรรมชาติธาตุคาร์บอนมีอัญรูปที่มีโครงสร้างแตกต่างกันสองแบบคือ เพชร และ กราไฟต์ ซึ่งโครงสร้างแตกต่างกันดังกล่าว เกิดจากออบิทัลของวาเลนซ์อิเล็กตรอนรวมตัวกัน หรือ การเกิดไฮบริดไดเซชัน (Hybridization) ทั้งนี้ทำให้คาร์บอนสามารถสร้างพันธะได้ 3 แบบ ดังนี้ พันธะเดี่ยวหนึ่งแขน (sp - hybridization) พันธะเดี่ยวสองแขน (sp^2 - hybridization) และพันธะเดี่ยวสามแขน (sp^3 - hybridization) [4] แสดงดังภาพที่ 2.1



sp- สายโซ่คาร์บอน (carbon chain) sp^2- กราไฟต์ (Graphite) sp^3- เพชร (Diamond)

ภาพที่ 2.1 โครงสร้างอะตอมของคาร์บอนที่เกิดจากการสร้างพันธะที่แตกต่างกันและตัวอย่างของวัสดุ[5]

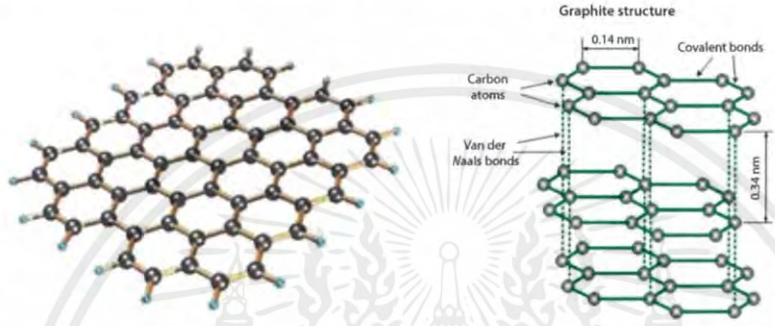
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ชนิดของวัสดุนาโนคาร์บอน

ตัวอย่างชนิดของวัสดุนาโนคาร์บอนที่น่าสนใจมีดังนี้

2.1.1.1 กราฟีนและกราไฟต์

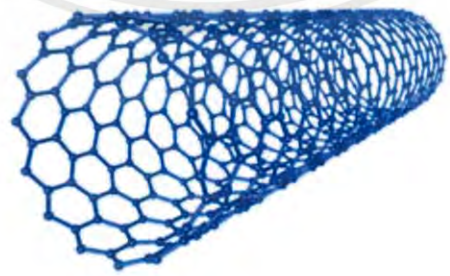
กราฟีนและกราไฟต์เป็นชนิดของวัสดุนาโนคาร์บอนที่มีโครงสร้างในรูปแบบโครงสร้างแบบสองมิติ (2D-nanomaterial) เป็นลักษณะของอะตอมคาร์บอนจัดเรียงตัวเป็นช่องตาข่ายคล้ายกับรังผึ้งวงหกเหลี่ยมเชื่อมต่อกันเป็นแผ่น กราฟีนจะมีลักษณะเป็นแผ่นชั้นเดียวส่วนกราไฟต์จะมีลักษณะเป็นแผ่นกราฟีนซ้อนกัน สองชั้นขึ้นไป แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แสดงภาพ a) โครงสร้างของกราฟีน (Graphene) และ b) โครงสร้างของกราไฟต์ (Graphite) [6]

2.1.1.2 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes)

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นชนิดของวัสดุนาโนคาร์บอน ที่มีโครงสร้างในรูปแบบโครงสร้างแบบหนึ่งมิติ (1D-nanomaterial) มีลักษณะคล้ายกับแผ่นกราฟีนม้วนตัวเป็นท่อกลวงทรงกระบอก เป็นเส้นใยและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 2.3 ซึ่งรายละเอียดจะอธิบายในหัวข้อ 2.2

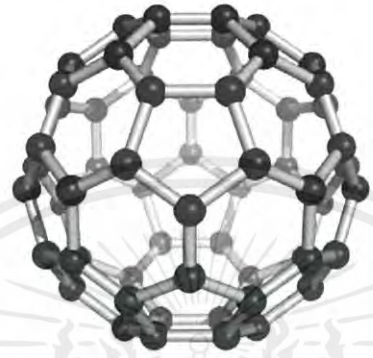


ภาพที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน[7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.3 บัคมินสเตอฟูลเลอลีน (Buckminsterfullerene)

บัคมินสเตอฟูลเลอลีน เป็นชนิดของวัสดุนาโนคาร์บอนในรูปแบบโครงสร้างแบบศูนย์มิติ (0D-nanomaterial) เกิดจากคาร์บอนจำนวน 60 อะตอมเรียงต่อกันเป็นผลึกทรงกลมคล้ายกับลูกฟุตบอล บัคมินสเตอฟูลเลอลีน สามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า บัคกี้บอล (Bucky ball) หรือ C60 แสดงดังภาพที่ 2.4

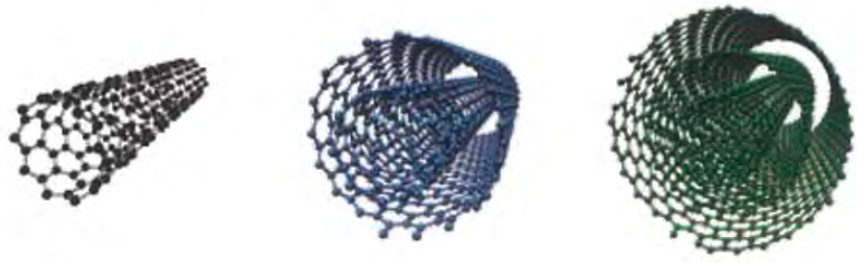


ภาพที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของบัคมินสเตอฟูลเลอลีน (buckminsterfullerene)[8]

2.2 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes)

ท่อนาโนคาร์บอน หรือ คาร์บอนนาโนทิวป์ (CNTs) [1] คือ อัญรูปหนึ่งของคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายกับแผ่น กราฟีน หรือ กราไฟต์ ม้วนตัวเป็นท่อทรงกระบอกกลวง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร เป็นชนิดของวัสดุนาโนในรูปแบบหนึ่งมิติ (1D-nanomaterial) ถูกค้นพบครั้งแรกโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นชื่อ Sumio Iijima โดยสามารถแบ่งประเภทของท่อนาโนคาร์บอนตามจำนวนชั้นของผนังท่อออกเป็น 3 ประเภทด้วยกัน ได้แก่ ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังเดี่ยว (Single-walled Carbon Nanotubes),ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังคู่ (Double-walled Carbon Nanotubes) และ ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Multi-walled Carbon Nanotubes) แสดงดังภาพที่ 2.5

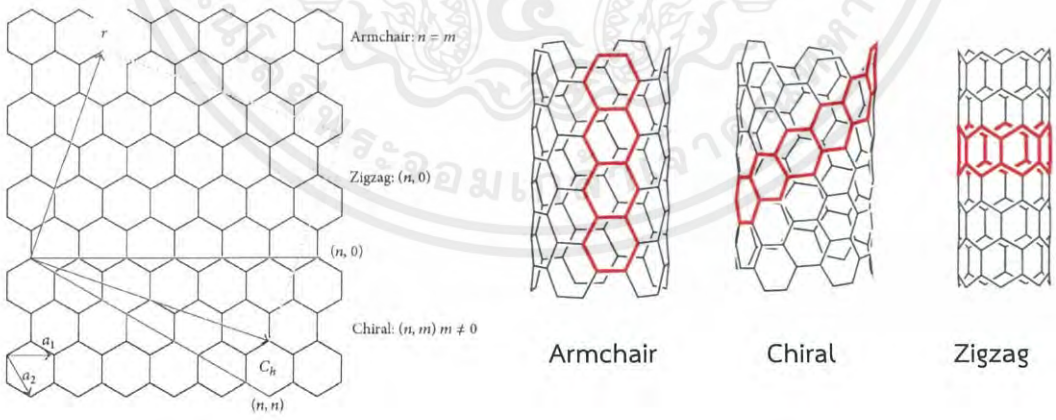
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b) (c)

ภาพที่ 2.5 แสดงประเภทของท่อนาโนคาร์บอน a) ผนังเดี่ยว (Single-walled), b) ผนัง 2 ชั้น (Double- walled) และ c) ผนังหลายชั้น (Multi-walled) [8]

โดยท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว สามารถแบ่งโครงสร้างออกได้อีก 3 รูปแบบ แต่ละรูปแบบเกิดจากการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอน และ รูปแบบการม้วนตัวของท่อในทิศทางที่แตกต่างกัน ตามเวกเตอร์ ที่เรียกว่า ไครัลเวกเตอร์ (Chiral vector, Ch) ซึ่งประกอบไปด้วย Armchair Zigzag และ Chiral โดย 3 รูปแบบดังกล่าวนี้มีดัชนี (n,m) บ่งบอกการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนบนการม้วนตัวของผนังท่อนาโนคาร์บอน โดยที่ ถ้า m = n จะได้ท่อนาโนคาร์บอนที่การจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนและการม้วนตัวของท่อเป็นแบบ Armchair ถ้า m = 0 การจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนและการม้วนตัวของท่อจะเป็นแบบ Zigzag และ $m \neq n$ การจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนและการม้วนตัวของท่อเป็นจะแบบ Chiral แสดงดังภาพที่ 2.6



(a) (b)

ภาพที่ 2.6 แสดงรูปแบบโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน (a) ไครัลเวกเตอร์ (Chiral vector) บนแผ่นกราฟีน (b) รูปแบบโครงสร้างแบบ Armchair , Chiral และ Zigzag [9]

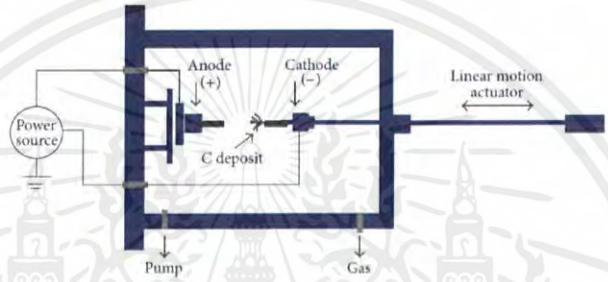
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

วิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน สามารถแบ่งเป็น 3 วิธีหลักๆ ได้ดังนี้ [2]

2.2.1.1 วิธีอาร์กดิสชาร์จ (Arc Discharge)

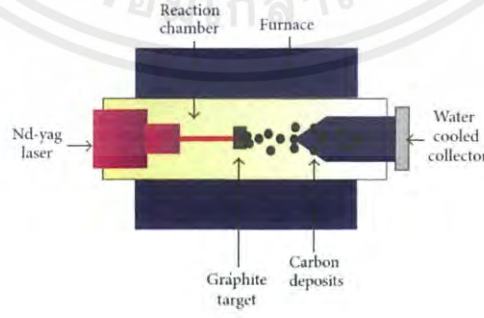
วิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีอาร์กดิสชาร์จเป็นกระบวนการสังเคราะห์ อาศัยหลักการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและมีอุณภูมิสูงโดยมีแท่งกราไฟต์ทำหน้าที่เป็นทั้งขั้วบวกและขั้วลบดังแสดงในภาพที่ 2.7 แท่งกราไฟต์ที่มีคะตะลิสต์ผสมอยู่จะระเหยจากขั้วบวก กลายเป็นไอแล้วมีการควบแน่นก่อตัวเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่ขั้วลบ ซึ่งระบบจะอยู่ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย และมีความดันต่ำอยู่ที่ประมาณ 50 – 700 mbar [10]



ภาพที่ 2.7 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีอาร์กดิสชาร์จ [2]

2.2.1.2 วิธีการระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser ablation)

วิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยการระเหยโดยใช้เลเซอร์ เป็นกระบวนการสังเคราะห์ที่ใช้แสงเลเซอร์ยิงเข้าไปที่แท่งกราไฟต์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่มีคะตะลิสต์ผสมอยู่ ทำให้คาร์บอนเกิดการระเหยแล้วก่อตัวขึ้นเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่ขั้วทองแดงดังแสดงในภาพที่ 2.8 ซึ่งวิธีการนี้จะอยู่ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย และ อุณหภูมิภายในระบบสูงประมาณ 800–1500 องศาเซลเซียส

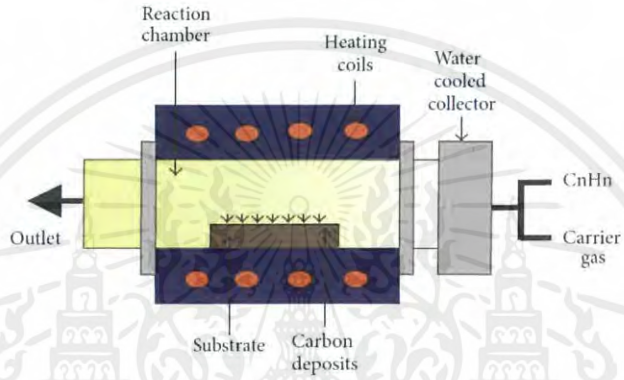


ภาพที่ 2.8 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนวิธีการระเหยด้วยเลเซอร์ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.3 วิธีการตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน (Chemical Vapor Deposition : CVD)

วิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยการตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน เป็นวิธีที่นิยมกันอย่างกว้างขวางเพราะมีกระบวนการที่ง่ายและต้นทุนต่ำ เป็นกระบวนการสังเคราะห์ที่อาศัยการระเหยของไอของสารตั้งต้นที่มีส่วนประกอบของคาร์บอนเข้าไปในระบบที่มีอุณหภูมิประมาณตั้งแต่ 600-1200 องศา [11] จากนั้นสารตั้งต้นจะเกิดการแตกตัวเป็นอะตอมของคาร์บอนและตกผลึกลงบนคะตะลิสต์เกิดเป็นโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งคะตะลิสต์จะอยู่ภายในระบบ และเป็นตัวควบคุมการเกิดโครงสร้างและชนิดของท่อนาโนคาร์บอนดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากการตกสะสมเคมีด้วยความร้อน [2]

2.2.2 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน (Properties of carbon nanotube)

2.2.2.1 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูงมากมีอัตราส่วนกว้างยาวและมีความแข็งแรงเชิงกลสูง ความต้านทานแรงดึงของท่อนาโนคาร์บอนพบว่าสูงกว่าเหล็กถึง 100 เท่าอีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นที่ดี โดยค่ายังโมดูลัส (Young's modulus) ของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังเดี่ยวมีค่าประมาณ 2.8-3.6 TPa และท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น มีค่าประมาณ 1.7-2.4 TPa [12]

2.2.2.2 สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

ท่อนาโนคาร์บอนมีความสามารถในการนำความร้อนสูงถึง 3500 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (W/mK) เมื่อเปรียบเทียบกับค่านำความร้อนของเพชร [13] จากสมบัติดังกล่าว ท่อนาโนคาร์บอนจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจ และถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมหลายด้าน เช่น เป็นตัวเสริมแรงในวัสดุพอลิเมอร์ ซึ่งอาจช่วยปรับปรุงสมบัติทางความร้อนและอุณหพลศาสตร์ของวัสดุผสมได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.3 สมบัติทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Electrical properties)

สมบัติทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนขึ้นกับทิศทางการม้วนตัวของท่อในรูปแบบที่แตกต่างกันตามไครัลเวกเตอร์ (Chiral vector, Ch) มีดัชนี (n,m) เป็นตัวบ่งบอกสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งเป็นได้ทั้ง โลหะ (Metallic) และ สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) โดยที่ ถ้าดัชนี (n-m) หารสามลงตัวจะแสดงสมบัติเป็นโลหะ ถ้าหารสามไม่ลงตัวจะแสดงสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ ค่าการนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนในทางทฤษฎีท่อนาโนคาร์บอนที่เป็นโลหะมีการนำไฟฟ้าได้ประมาณ 10^5 ถึง 10^6 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (S/cm) มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าประมาณ 4×10^9 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (A/cm^2) [14] ซึ่งเมื่อนำไปทำการเปรียบเทียบกับทองแดงนั้นมีค่ามากกว่าประมาณ 1000 เท่า ด้วยสมบัติดังกล่าวนี้ท่อนาโนคาร์บอนจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น เป็นส่วนประกอบของทรานซิสเตอร์ เซนเซอร์ตรวจจับแก๊ส เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าการเปรียบเทียบสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังเดี่ยวและท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น [14,15]

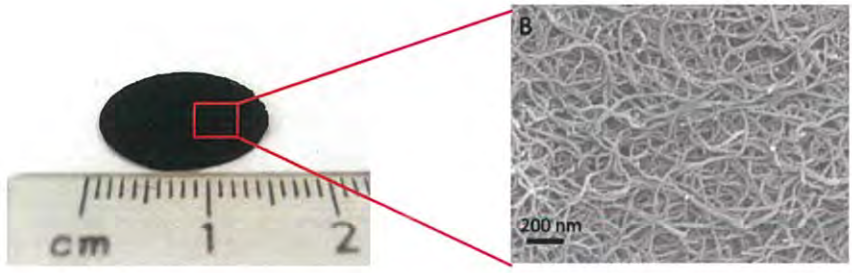
สมบัติ	ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังเดี่ยว (SWCNTs)	ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNT)
สมบัติเชิงกล	2.8-3.6 TPa	1.7-2.4 TPa
สมบัติทางความร้อน	3500 W /mk	~3,000 W /mk
สมบัติทางไฟฟ้า	~10^6 S/cm	~10^5 S/cm

2.3 การประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอน

2.3.1 กระดาษคาร์บอน (Buckypaper)

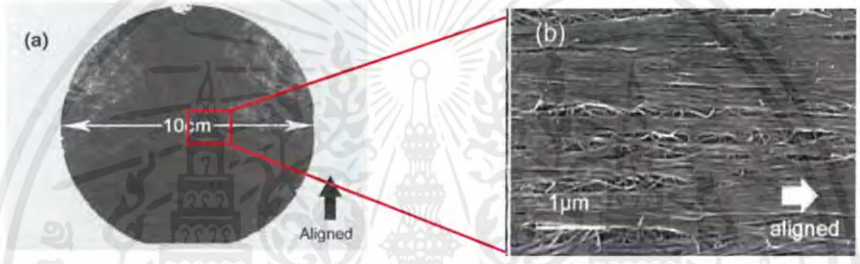
กระดาษคาร์บอนหรือเรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่า บัคกี้เปเปอร์ (Buckypaper) มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบาง เกิดจากการจัดเรียงตัวกันของเส้นใยท่อนาโนคาร์บอนซ้อนทับกันโดยอาศัยแรงระหว่างโมเลกุล เกิดขึ้นเป็นแผ่นกระดาษ แสดงดังรูปที่ 2.10 กระดาษคาร์บอน มีสมบัติเฉพาะขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งมีลักษณะการจัดเรียงตัวได้ 2 แบบคือ แบบสุ่ม (Random) แสดงดังภาพที่ 2.10 และ แบบมีทิศทาง (Aligned) แสดงดังภาพที่ 2.11 โดยสมบัติของแผ่นกระดาษสามารถป้องกันการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าEMI (Electro - magnetic interference) Shielding , สมบัติเชิงกลต้านทานความแข็งแรง (Mechanical properties) และ มีความเสถียรทางความร้อน เป็นต้น[14] ด้วยสมบัติดังกล่าวและมีลักษณะที่เป็นแผ่น คล้ายกับฟิล์มบาง กระดาษคาร์บอนจึงง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น แผ่นกรอง ตัวเก็บประจุ ขั้วไฟฟ้ายืดหยุ่นและเซ็นเซอร์ตรวจวัด เป็นต้น [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b)

ภาพที่ 2.10 แสดงภาพ a) ตัวอย่างแผ่นกระดาษคาร์บอน b) ภาพถ่ายท่อนาโนคาร์บอนแบบสุ่มจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [16]



(a) (b)

ภาพที่ 2.11 แสดงภาพ a) ตัวอย่างแผ่นกระดาษคาร์บอน b) ภาพถ่ายท่อนาโนคาร์บอนแบบมีทิศทางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [3]

2.3.2 การสร้างแผ่นกระดาษท่อนาโนคาร์บอน

2.3.3.1 วิธีการกรองด้วยสุญญากาศ (Vacuum filtration method)

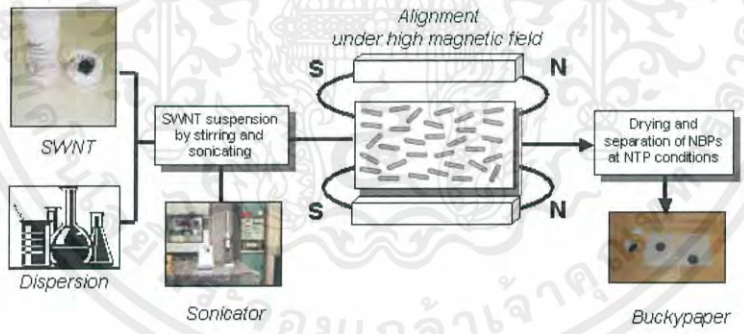
วิธีการกรองด้วยสุญญากาศถือว่าเป็นวิธีที่นิยมกันโดยทั่วไปในการทำกระดาษคาร์บอน หรือการทำให้ท่อนาโนคาร์บอนขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม โดยท่อนาโนคาร์บอนที่ก่อตัวขึ้นเป็นแผ่นสามารถมีลักษณะการจัดเรียงตัวได้ 2 แบบคือ แบบสุ่ม (Random) และ แบบมีทิศทาง (Aligned) โดยขั้นตอนแรกของวิธีนี้ จะต้องทำให้ท่อนาโนคาร์บอนอยู่ในรูปของสารละลายและมีการใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นตัวช่วยในการกระจายตัว [3] กรณีที่ต้องการให้แผ่นกระดาษคาร์บอนมีการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบมีทิศทาง สามารถทำการควบคุมตัวแปรสำคัญได้ดังนี้ [17] คือ ชนิดหรือสมบัติของแผ่นกรอง ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอน และความเร็วในการกรอง จากนั้นทำการเข้าสู่กระบวนการกรองเพื่อให้ท่อนาโนคาร์บอนขึ้นรูปเป็นแผ่นแสดงดังภาพที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.12 ภาพแสดงการจำลองกระบวนการการสร้างแผ่นกระดาษคาร์บอนด้วยวิธีการกรองด้วยสุญญากาศ (Vacuum filtration method)[18]

2.3.3.2 วิธีการสร้างกระดาษคาร์บอนโดยใช้สนามแม่เหล็ก (Magnetically aligned buckypaper)

การสร้างแผ่นกระดาษคาร์บอนด้วยวิธีการกรองโดยใช้สนามแม่เหล็ก วิธีการนี้จะคล้ายกับการกรองแบบสุญญากาศ แต่จะมีการติดตั้งระบบที่ต้องใช้สนามแม่เหล็กเป็นตัวควบคุมเพื่อกำหนดให้ท่อนาโนคาร์บอนจัดเรียงตัวแบบมีทิศทาง แต่อย่างไรก็ตามสำหรับวิธีดังกล่าวนี้ก็ยังมีข้อจำกัดซึ่งอาจควบคุมและติดตั้งระบบได้ค่อนข้างยากและซับซ้อน [2] แสดงดังภาพที่ 2.13



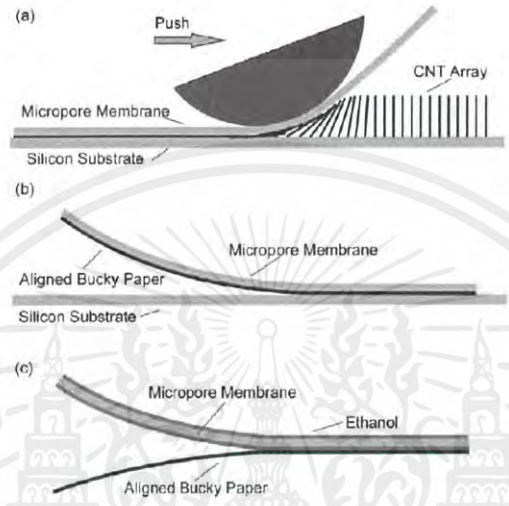
ภาพที่ 2.13 ภาพแสดงการเตรียมแผ่นกระดาษคาร์บอนโดยใช้สนามแม่เหล็กเป็นตัวกำหนดทิศทางของท่อนาโนคาร์บอน [2]

2.3.3.3 วิธีการผลักแบบโดมิโน (Domino pushing method)

วิธีการสร้างแผ่นกระดาษคาร์บอนด้วยวิธีการผลักแบบโดมิโน (Domino pushing) เป็นการสร้างแผ่นกระดาษคาร์บอนที่ส่วนใหญ่จะมีการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนในรูปแบบทิศทางเดียวกันหรือแบบอาเรย์ (Aligned CNT arrays) โดยขั้นตอนแรกของวิธีนี้จะทำการปลูกท่อนาโนคาร์บอนแบบอาเรย์บนแผ่นฐานรองรับเช่น แผ่นซิลิกอน ด้วยวิธีวิธีการตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อนจะได้ท่อนาโนคาร์บอนแบบแนวตั้งบนแผ่นฐานรองรับ จากนั้นนำใช้แผ่นเมมเบรนที่มีรูพรุน (Microporous

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

membrane) ทำการผลักท่อนาโนคาร์บอนลงไปในทิศทางเดียวกันระนาบกับฐานรองรับ ด้วยแรงดันคงที่ ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนถูกดึงเข้าด้วยกันด้วยแรงแวนเดอวาลส์ (van der Waals) และก่อตัวขึ้นเป็นกระดาษคาร์บอนโดยท่อนาโนคาร์บอนจัดเรียงตัวกันแบบมีทิศทาง (Aligned buckypaper) จากนั้นทำการลอกแผ่นกระดาษคาร์บอนออกจากแผ่นฐานรองรับและแผ่นเมมเบรน [3] แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 ภาพแสดงการจำลองกระบวนการการสร้างแผ่นกระดาษคาร์บอนด้วยวิธีการผลักแบบโดมิโน (Domino pushing method) [3]

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการสร้างกระดาษคาร์บอน

วิธีการ	กระบวนการไม่ซับซ้อน	ระยะเวลา	ต้นทุน
vacuum filtration method	★	★	★
Magnetically	★	★	★
Domino pushing	★	★	★

หมายเหตุ ★ หมายถึง ดีมาก
★ หมายถึง ปานกลาง
★ หมายถึง แย่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การประยุกต์ใช้กระดาษคาร์บอน

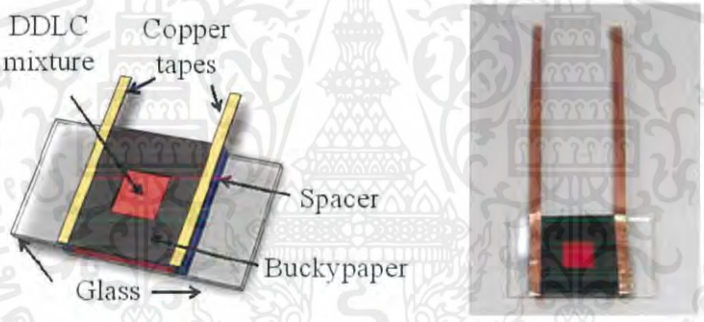
โดยจะยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้กระดาษคาร์บอน (Buckypaper) ดังนี้

2.3.1.1 ด้านอุปกรณ์หรือเซนเซอร์ตรวจวัด (Sensors)

การที่กระดาษคาร์บอนมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์ม สามารถนำมาพัฒนาเป็น เซนเซอร์ตรวจจับก๊าซต่าง ๆ ได้ โดยท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติทางไฟฟ้า เมื่อมีการตอบสนองต่อก๊าซจะมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าเกิดขึ้น

2.3.1.2 ด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และ ไฟฟ้า (Electronic and electric device)

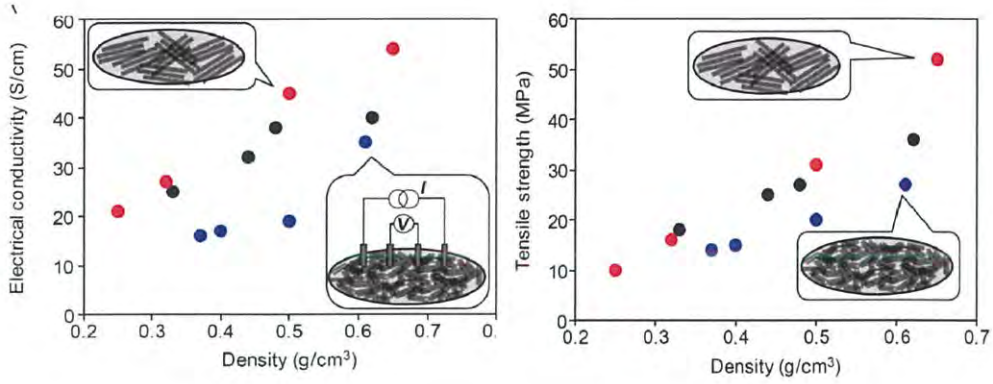
สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวป้องกันวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หรือ อุปกรณ์ภายในเครื่องบิน จากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่อาจทำให้อุปกรณ์เสียหายมีการเปลี่ยนแปลงการตั้งค่าได้ และสามารถใช้เป็นแผ่นกระดาษที่สามารถนำไฟฟ้าได้อีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น จากงานวิจัยของ Chien, P.-C. et al. [19] ได้ทำการนำกระดาษคาร์บอนมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นตัวทำหน้าที่เก็บรักษาอุณหภูมิให้คงที่ เป็นต้น แสดงดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 แสดงภาพตัวอย่างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีกระดาษคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ [19]

จากงานวิจัยของ S.Sakurai et al. [20] ได้ทำการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าและความแข็งแรงของกระดาษคาร์บอน โดยท่อนาโนคาร์บอนมีความยาวของท่อในหน่วยมิลลิเมตร และมีความสูงของท่อที่แตกต่างกันคือ 350 700 และ 1,500 ไมโครเมตร (μm) ผลการทดลองพบว่า กระดาษคาร์บอนมีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 19 ถึง 45 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (S/cm) และมีค่าความต้านทานแรงดึงประมาณ 27 ถึง 52 เมกะปาสคา (MPa) แสดงดังภาพที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

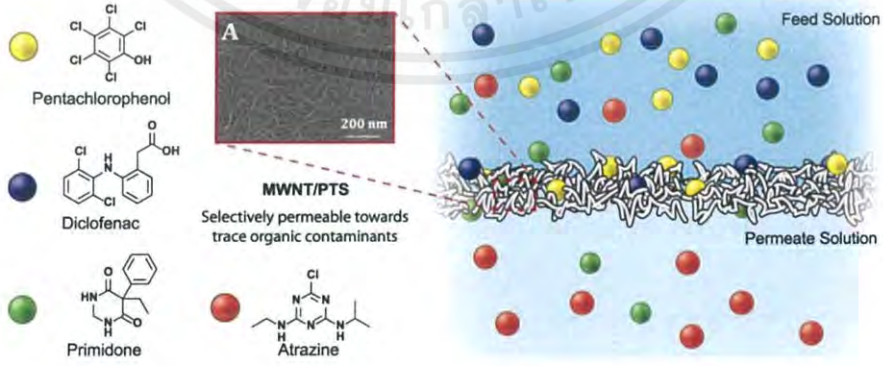


ภาพที่ 2.16 แสดงกราฟ a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้า และ b) ค่าต้านทานแรงดึง กับความหนาแน่นของท่อนาโนคาร์บอนในกระดาษคาร์บอนโดยที่จุดสีแดงสีดำและสีฟ้า ระบุว่าสร้างจากท่อนาโนคาร์บอน มีความสูง 1,500 700 และ 350 μmตามลำดับ [20]

2.3.1.3 ด้านแผ่นกรอง (Filter membrane)

สามารถนำไปใช้งานเป็นแผ่นกรอง ทำหน้าที่กรองเพื่อดักจับอนุภาคขนาดเล็กในอากาศหรือของเหลวอีกทั้งสามารถแยกแยะสารประกอบ ต่าง ๆ ได้ เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนที่ขึ้นรูปเป็นแผ่นมีช่องว่างหรือรูพรุนขนาดเล็กที่เกิดจากเส้นใยซ้อนทับกัน และไม่สามารถละลายหรือถูกกัดกร่อนได้ง่าย มีความทนทานต่อสารเคมี

จากงานวิจัยของ Md. Harun-OrRashid et al. [21] ได้ทำการสร้างแผ่นกระดาษคาร์บอนจากท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ด้วยวิธีการกรองด้วยสุญญากาศ และนำไปทดลองเป็นแผ่นกรองเพื่อศึกษาดูการเลือกดักจับและการซึมผ่านของสารปนเปื้อนอินทรีย์ (Trace organic contaminants, TrOC) โดยการทดลองกระดาษคาร์บอนมีประสิทธิภาพในการกำจัดหรือป้องกันไม่ให้สารอินทรีย์ส่งผ่านได้ มีค่ามากถึงร้อยละ แสดงดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 แสดงภาพเยื่อแผ่นกระดาษคาร์บอนที่มีท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นแสดงการเลือกและการซึมผ่านของสารปนเปื้อนอินทรีย์ (Trace organic contaminants, TrOC) [21]

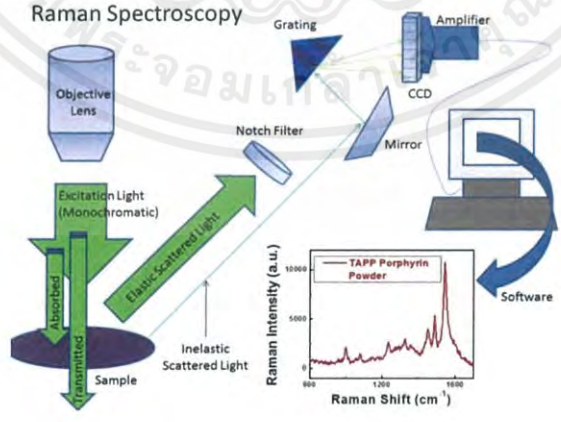
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 เครื่องมือวิเคราะห์

2.3.1 เครื่องมือวิเคราะห์รามานสเปคโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)

รามานสเปคโทรสโกปีเป็นเครื่องมือที่ใช้เทคนิคของการสั่นสะเทือนของโมเลกุลทำให้ทราบการสั่นของโมเลกุลและโครงสร้างของผลึกแสดงดังภาพที่ 2.18 โดยเทคนิคของเครื่องมือนี้จะใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ ยิงไปที่วัตถุที่ต้องการวัด จากนั้นโมเลกุลภายในจะถูกกระตุ้นและเกิดการกระเจิงแสงออกมา โดยเกิดปรากฏการณ์ 2 รูปแบบ คือ การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) แต่มีการชนส่วนน้อยอีก คือ การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ไปเล็กน้อยเรียกว่าการกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering) แสดงดังภาพที่ 2.19

ภาพที่ 2.18 เครื่องรามานสเปคโตรสโกปี (Raman spectroscopy)

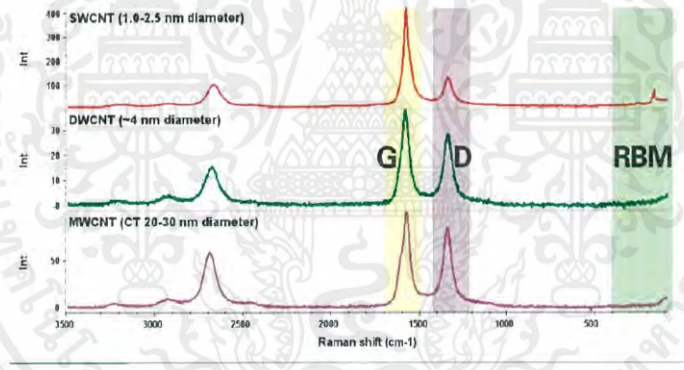


ภาพที่ 2.19 แสดงหลักการทำงานของรามานสเปคโทรสโกปี (Raman Spectroscopy) [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยผลลัพธ์ที่ได้จากเทคนิครามานจะเรียกว่า รามานสเปคตรา (Raman spectra) แสดงดังภาพที่ 2.20 ซึ่งเป็นข้อมูลที่เปรียบเทียบกับค่าพลังงานจากการกระเจิง (Raman shift) โดยเทคนิครามานสเปคโทรสโกปีถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งจะมีลักษณะพีคสำคัญของรามานสเปคตราที่คล้ายกัน 4 พีค [23] คือ

- พีค G band (Graphite-band) มีค่าอยู่ที่ประมาณระหว่าง 1580 cm^{-1}
- พีค D band (Disorder) มีค่าอยู่ที่ประมาณระหว่าง 1330 และ 1360 cm^{-1} ซึ่งเป็นโหมดที่เกี่ยวข้องกับความไม่เป็นระเบียบหรือบกพร่องของพันธะ
- พีค G' Band (Second-order) เป็นพีคที่มีความถี่เป็นประมาณ 2 เท่าของ D – band มีค่าอยู่ที่ประมาณ 2500 ถึง 2900 cm^{-1} เป็นโหมดที่เกี่ยวข้องกับท่อนาโนคาร์บอนและกราไฟต์
- พีค Radial breathing modes (RBMs) เป็นโหมดที่แสดงถึงการสั่นตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งเป็นพีคลักษณะเด่นของการมีท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังเดี่ยว (SWCNT) มีค่าอยู่ที่ประมาณระหว่าง 75 ถึง 300 cm^{-1}



ภาพที่ 2.20 แสดงรามานสเปคตรา (Raman spectra) ของท่อนาโนคาร์บอน [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

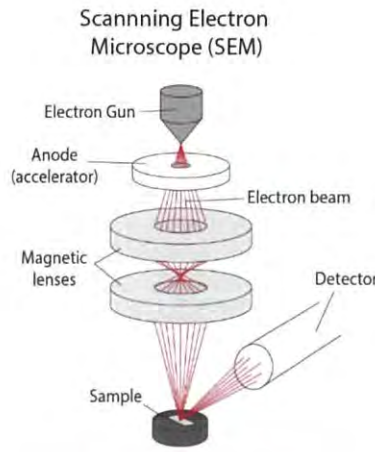
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [25] แสดงดังภาพที่ 2.21 เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์รายละเอียดของพื้นผิวบริเวณภายนอกของตัวอย่าง หรือ ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิววัสดุด้วยการถ่ายภาพซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะเป็นภาพแบบสามมิติและยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่นได้ ยกตัวอย่างเช่น Energy-dispersive spectroscopy (EDS) ในการหาองค์ประกอบของธาตุทาง เคมี เป็นต้น

ภาพที่ 2.21 แสดงภาพตัวอย่างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด[26]

2.4.3.1 หลักการทำงาน

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะใช้แหล่งกำเนิดของอิเล็กตรอนทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า และถูกรวบรวมกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ยิงลงไปบนบริเวณพื้นผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากนั้นจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิขึ้น (Secondary electron) ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และ แปลงไปเป็นสัญญาณภาพบนหน้าจอรับภาพ และสามารถทำการบันทึกภาพได้ตามต้องการ โดยตัวอย่างที่สามารถวิเคราะห์และทดสอบได้ จะต้องมีสมบัติการนำไฟฟ้า สามารถเป็นได้ทั้ง ตัวอย่างที่ เป็นของแข็ง แบบผง และ ฟิล์มเคลือบ หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงดังภาพที่ 2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.22 แสดงภาพการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [26]

2.4.3 เครื่องมือวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer)

เครื่องมือวิเคราะห์การดูดกลืนแสงสเปกโทรโฟมิเตอร์ แสดงดังภาพที่ 2.23 เป็นเครื่องมือที่ใช้ทดสอบตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสง (Intensity) ของตัวอย่าง ช่วงในการทดสอบการทะลุผ่านหรือการถูกดูดกลืนจะอยู่ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวโดยที่ตัวอย่างจะถูกวางอยู่ภายในเครื่อง ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวอย่างนั้นอีกด้วย หลักการและคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารคือเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายแสง เมื่อสารได้รับแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้เช่นกัน

ภาพที่ 2.23 แสดงภาพตัวอย่างเครื่องมือวิเคราะห์การดูดกลืนแสงสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

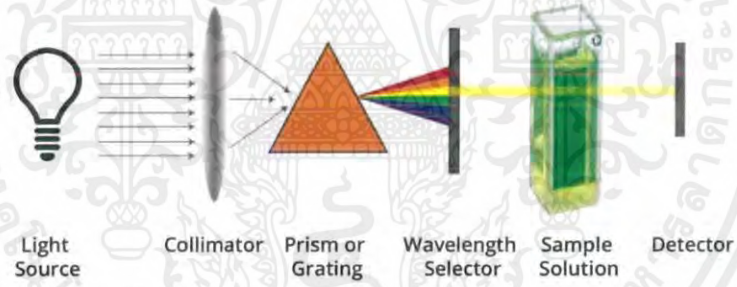
ส่วนประกอบของเครื่อง UV-vis Spectrophotometer แสดงดังภาพที่ 2.24

- แหล่งกำเนิดแสง (Light source) เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการออกมาอย่างต่อเนื่องและคงที่มีความเข้มแสงค่อนข้างมาก ตัวหลอดกำเนิดรังสีมีหลากหลายชนิดตามความยาวคลื่นรังสีที่เปล่งออกมา

- ตัวควบคุม (Monochromator) เป็นส่วนที่ใช้เป็นตัวควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงโมโนโครเมติก ซึ่งมีความยาวคลื่นเดียวใช้ฟิลเตอร์ปริซึมหรือเกรตติ้ง

- ภาชนะใส่ตัวอย่าง (Cell sample) เรียกว่าเซลล์เป็นตัวที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง ที่ต้องการทดสอบบางครั้งอาจเรียกว่า Cuvettes เซลล์ที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ เซลล์ที่ทำด้วยแก้วจะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิลเพราะแก้วจะสามารถดูดกลืนรังสีในช่วงยูวีได้ เซลล์ที่ทำจากซิลิกา และ ควอร์ตซ์ ซึ่งควอร์ตซ์จะสามารถใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล

- ตัวรับสัญญาณหรือตัวตรวจวัด (Detector) เป็นทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยใช้หลักการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้า ตัววัดรังสีมีหลายชนิดที่นิยม ได้แก่ Photomultiplier tube และ ตัววัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด Silicon diode detector



ภาพที่ 2.24 แสดงภาพตัวอย่างส่วนประกอบของเครื่องมือวิเคราะห์การดูดกลืน [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิคการกรองสุญญากาศ

3.1 วัสดุอุปกรณ์และวิธีในการดำเนินงานวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง มีดังต่อไปนี้

1. กระดาษกรอง Polycarbonate filter membrane ขนาดรูพรุน 200 นาโนเมตรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร
2. ชุดกรองสาร และ ขวดลดความดัน (Filter and Suction flask)
3. ปากคีบ (Forceps)
4. บีกเกอร์
5. ช้อนตักสาร
6. กระบอกตวง
7. เครื่องปั่นเหวี่ยงความเร็วสูง (Centrifuge)
8. เครื่องอัลตราโซนิค
9. เครื่องชั่งสาร
10. เครื่องปั๊มสุญญากาศ

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง มีดังต่อไปนี้

1. ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยว (Single-walled carbon nanotube:SWCNT) บริษัทยูนินาโนเทค (Uninanotech)
2. น้ำไร้ประจุ (DI Water)
3. เอทานอล
4. โซเดียมโดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนต (Sodium dodecylbenzenesulfonate : SDBS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การสร้างแผ่นกระดาษท่อนาโนคาร์บอน

ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่การเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอน การสร้างแผ่นกระดาษท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิคการกรองสุญญากาศ และการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาและการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอน

3.2.1 การเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิว

มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ แสดงดังภาพที่ 3.1

1. นำท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวปริมาณ 40 มิลลิกรัม และโซเดียมโดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนตที่ปริมาณแตกต่างกันคือ 0.1 0.4 และ 0.8 ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผสมในน้ำไร้ประจุปริมาณ 100 มิลลิลิตร
2. นำสารละลายท่อนาโนคาร์บอนทั้งหมดไปทำการสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ภาพที่ 3.1 ภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอน

3.2.2 การเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนโดยการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)

มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ แสดงดังภาพที่ 3.2

1. นำสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่เตรียมได้ทั้งหมด ดังข้อที่ 3.2.1 เทลงในหลอดเซนติฟิวก์เพื่อใช้ในการปั่นเหวี่ยง
2. นำหลอดเซนติฟิวก์ที่มีสารละลายท่อนาโนคาร์บอนใส่ลงในเครื่องปั่นเหวี่ยงความเร็วสูง โดยใช้เวลาในทดสอบคือ 4 ชั่วโมง ความเร็วรอบ 12000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
3. นำสารละลายด้านบนที่ไม่ได้เกิดการตกตะกอน ไปทำการเตรียมสร้างกระดาษคาร์บอน
4. นำสารละลายไปทำการสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

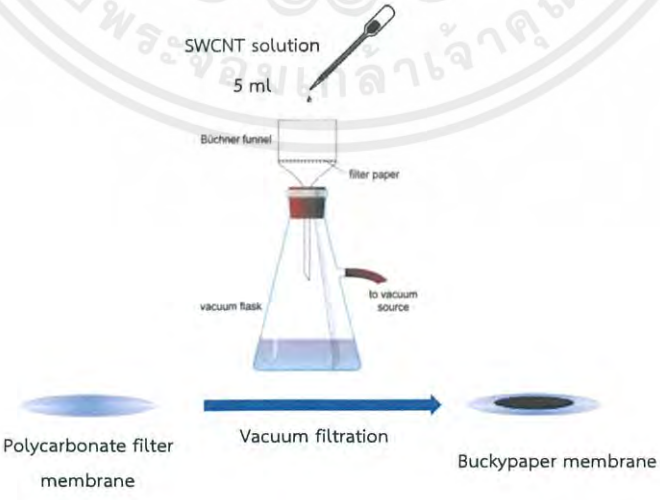
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3.2 ภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนโดยการปั่นเหวี่ยง(centrifuge)

3.2.3 การสร้างแผ่นกระดาษท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิคการกรองแบบสุญญากาศ

มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ แสดงดังภาพที่ 3.3

1. เตรียมชุดกรองสารและระบบปั๊มสุญญากาศ
2. นำกระดาษกรอง Polycarbonate filter membrane ขนาดรูพรุน 200 นาโนเมตรแผ่นขนาดเส้นผ่านศูนย์ 25 มิลลิเมตรวางลงบนตัวกรองเพื่อเป็นแผ่นรองรับท่อนาโนคาร์บอน
3. นำสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่เตรียมไว้หยดลงบนกระดาษกรองปริมาณ 5 มิลลิลิตร
4. เริ่มทำการเปิดปั๊มตามความเร็วที่ใช้ในการทดสอบโดยศึกษาที่ความเร็ว 1-3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง
5. เมื่อทำการสร้างแผ่นกระดาษท่อนาโนคาร์บอนเสร็จแล้ว ทำการลอกกระดาษท่อนาโนคาร์บอนออกจากตัวกรอง



ภาพที่ 3.3 ภาพแสดงการสร้างแผ่นกระดาษท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิคการกรองแบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนโดยการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)

ใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงแตกต่างกันมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ แสดงดังภาพที่ 3.1 และ 3.2

1. นำท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวปริมาณ 40 มิลลิกรัม และโซเดียมโดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนตที่ปริมาณ 0.4 ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผสมในน้ำไร้ประจุปริมาณ 100 มิลลิลิตร
2. นำสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่เตรียมได้ไปทำการสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. นำสารละลายท่อนาโนคาร์บอนเทลงในหลอดเซนติฟิวก์ จากนั้นนำไปใส่ในเครื่องปั่นเหวี่ยงความเร็วสูงโดยใช้เวลาในการทดสอบแตกต่างกันคือ 1 ชั่วโมง , 2 ชั่วโมง3 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง ความเร็วรอบ 12000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
4. นำสารละลายด้านบนที่ไม่ได้เกิดการตกตะกอน ไปทำการเตรียมสร้างกระดาษคาร์บอน แสดงวิธีทำดังหัวข้อที่ 3.2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวิเคราะห์สมบัติกระดาษท่อนาโนคาร์บอน

กระดาษคาร์บอนที่ทำการสร้างจากท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยว จะถูกนำไปทดสอบด้วยเทคนิคต่าง ๆ ต่อไปนี้

3.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างคาร์บอนของท่อนาโนคาร์บอน

เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างคาร์บอนของท่อนาโนคาร์บอนก่อนนำไปสร้างเป็นกระดาษท่อนาโนคาร์บอน ด้วยเทคนิควิเคราะห์รามานสเปคโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)

3.3.2 การวิเคราะห์สารละลายท่อนาโนคาร์บอน

เพื่อศึกษาการดูดกลืนแสงของสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงแตกต่างกันด้วยเทคนิควิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-vis spectrophotometer)

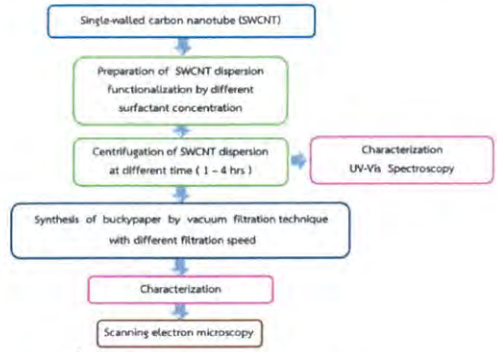
3.3.3 การวิเคราะห์เชิงกายภาพของท่อนาโนคาร์บอน

เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของกระดาษคาร์บอนว่ามีการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนเป็นแบบมีทิศทาง (Aligned) ตามสมมุติฐานหรือไม่ ด้วยเทคนิควิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

3.3.4 การศึกษาประสิทธิภาพการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอน

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเรียงตัวของท่อโนคาร์บอน โดยทำการวัดมุมการเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จำนวนทั้งหมด 30 มุมเทียบกับเส้นมาตรฐาน โดยกำหนดให้เส้นมาตรฐานเท่ากับ 0 องศา จากนั้นนำค่ามุมที่ได้ไปทำการพรอทกราฟฮิสโทรแกรมเพื่อดูค่าการเบี่ยงเบนของมุม ถ้าท่อนาโนคาร์บอนมีการทำมุมใกล้กับเส้นมาตรฐานมากที่สุด ท่อนาโนคาร์บอนจะมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันกราฟจะมีลักษณะอยู่ในช่วงแคบ แต่ถ้าทำมุมห่างออกไปท่อนาโนคาร์บอนมีจะแนวโน้มการจัดเรียงตัวไปในทิศทางที่แตกต่างกันกราฟจะมีลักษณะอยู่ในช่วงที่ค่อนข้างกว้าง

ขั้นตอนการดำเนินงานในโครงงานพิเศษ แสดงดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 แสดงแผนผังสรุปงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองของการสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จากเทคนิคการวิเคราะห์ต่างๆ ซึ่งแบ่งเป็น 4 หัวข้อดังนี้

(1) การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาท่อนาโนคาร์บอนและกระดาษกรอง

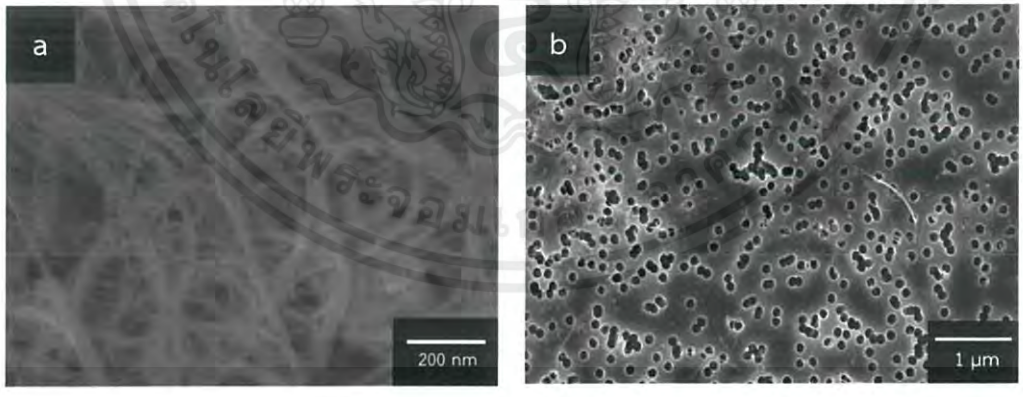
(2) การวิเคราะห์โครงสร้างคาร์บอนของท่อนาโนคาร์บอน

(3) การวิเคราะห์สารละลายท่อนาโนคาร์บอนและการวิเคราะห์เชิงกายภาพของท่อนาโนคาร์บอน

(4) การศึกษาผลของความเร็วที่ใช้ในการกรองสารละลายท่อนาโนคาร์บอน

4.1 สัณฐานวิทยาท่อนาโนคาร์บอนและกระดาษกรอง

ในงานวิจัยนี้ เริ่มจากการวิเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยว และกระดาษกรองพอลิคาร์บอเนตขนาดรูพรุน 200 นาโนเมตร ซึ่งได้วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างคาร์บอนของท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิควิเคราะห์รามานสเปคโทรสโกปีภาพที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



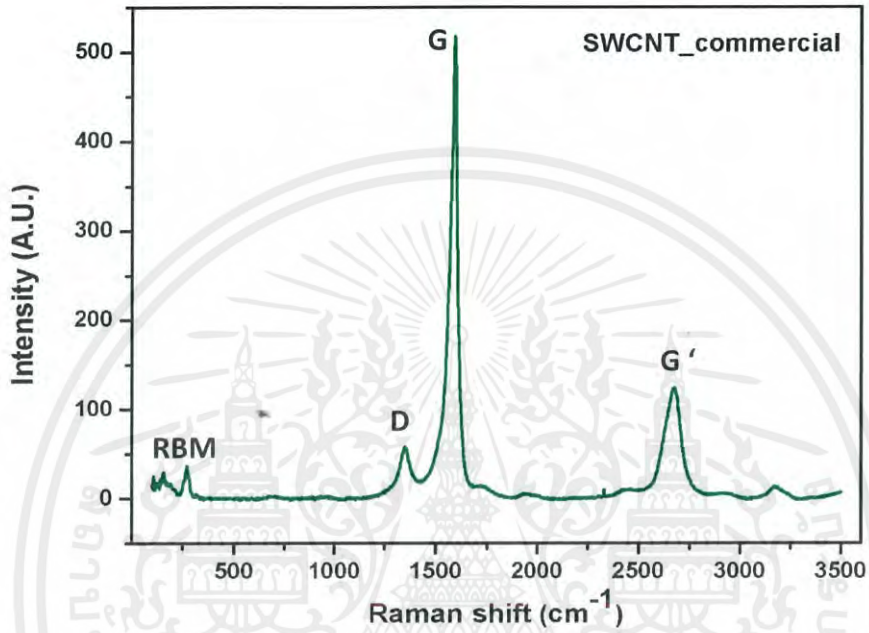
ภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของ a) ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยว b) กระดาษกรองพอลิคาร์บอเนต

จากภาพที่ 4.1 a) พบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวมีลักษณะเป็นเส้นใยพันกัน ส่วนภาพที่ 4.1 b) ซึ่งเป็นภาพถ่ายของกระดาษกรองพอลิคาร์บอเนต พบว่าพื้นผิวของกระดาษกรองมีลักษณะเป็นรูพรุนวงกลมคล้ายกับพื้นผิวของฟองน้ำทั่วทั้งแผ่น มีขนาดของรูพรุนอยู่ที่ 200 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 โครงสร้างคาร์บอนของท่อนาโนคาร์บอน

เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างคาร์บอนของท่อนาโนคาร์บอนก่อนนำไปสร้างเป็นกระดาษท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้เทคนิควิเคราะห์รามานสเปคโทรสโกปี (Raman Spectroscopy) แสดงกราฟผลการศึกษาดังภาพที่ 4.2



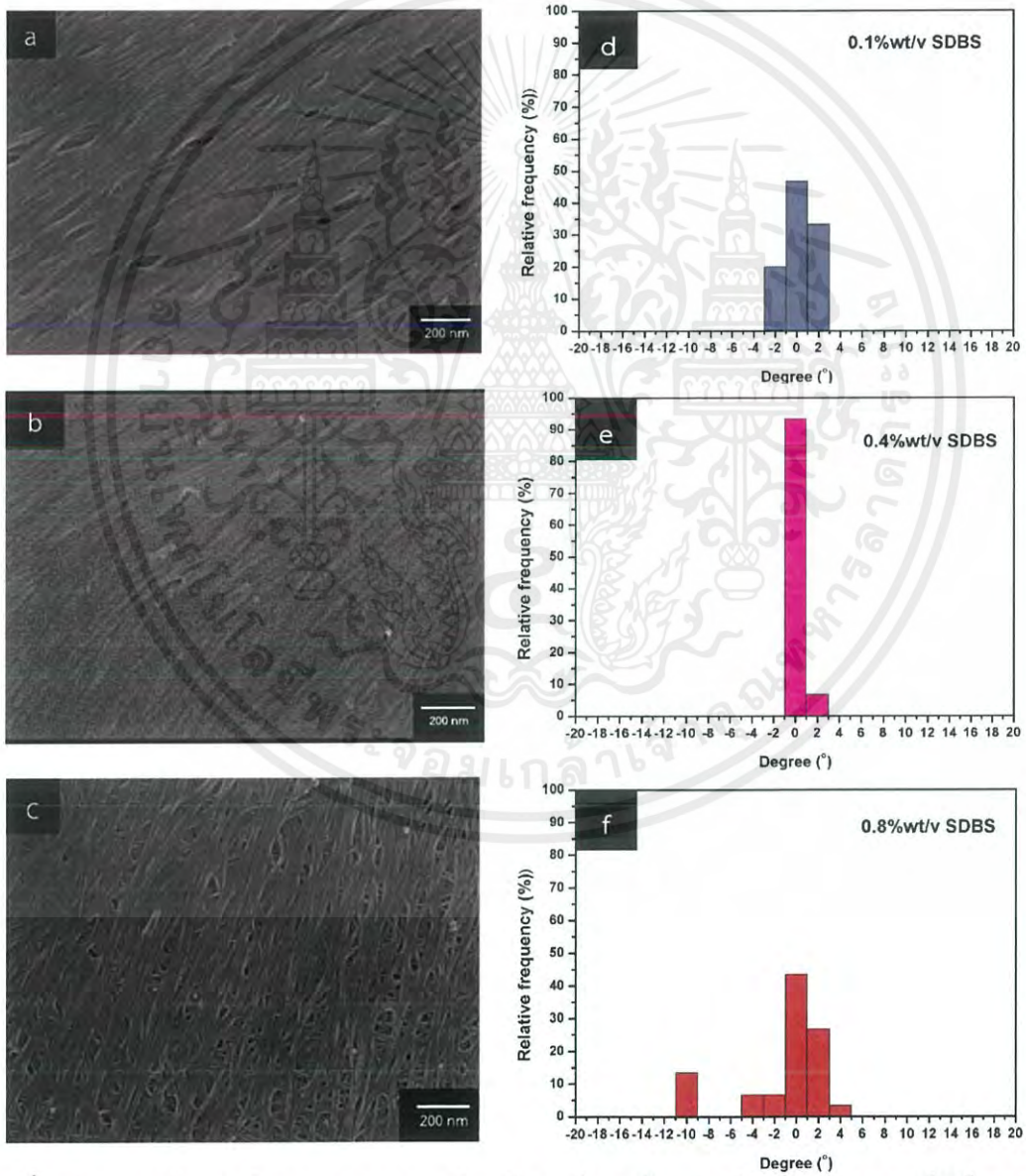
ภาพที่ 4.2 แสดงรามานสเปคตรัมของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยว

จากรามานสเปคตรัมของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยว แสดงพีคหลักคือ พีคของกราไฟต์ (sp^2) (Graphitic band : G band) และ พีคของโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ (Disorder band : D band) ที่ตำแหน่งการเลื่อนของรามาน (Raman shift) ที่ 1591 cm^{-1} และ 1348 cm^{-1} ตามลำดับ โดย G band แสดงถึงโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนที่มีความสมบูรณ์ของผลึก ส่วน D band แสดงถึงความบกพร่องในโครงสร้างของผลึก ซึ่งอัตราส่วนความเข้มระหว่างพีคของ G Band ต่อ D Band ($I_{(G\text{-band})}/I_{(D\text{-band})}$) ได้เท่ากับ 8.93 สามารถสรุปได้ว่าท่อนาโนคาร์บอนมีโครงสร้างที่มีความเป็นระเบียบและความเป็นผลึกสูง อีกทั้งกราฟยังแสดงพีคโหมดอาร์บีเอ็ม (Radial breathing mode : RBM) ซึ่งเป็นโหมดที่แสดงถึงการมีท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังเดี่ยวอยู่ (SWCNT) เกิดจากการสั่นของอะตอมคาร์บอน การหด และการขยายตัวของโครงสร้างท่อนาโนคาร์บอนในทิศทางตามรัศมีของท่อ โดยพบพีคโหมด RBM อยู่ที่ตำแหน่งประมาณอยู่ที่ 100 – 300 cm^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลของปริมาณสารลดแรงตึงผิวต่อลักษณะการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบมีทิศทาง

สร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทางโดยใช้เทคนิคการกรองแบบสุญญากาศ โดยการทดลองเริ่มจากการเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิว แสดงวิธีการเตรียมดังหัวข้อที่ 3.2.1 ซึ่งนำท่อนาโนคาร์บอนผสมกับโซเดียมโดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนตที่ความเข้มข้นแตกต่างกันคือ 0.1 0.4 และ 0.8 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสามารถวิเคราะห์ลักษณะการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบมีทิศทางด้วยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวัดมุมที่เบี่ยงเบน แสดงดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 แสดงสัณฐานวิทยาของกระดาษท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ ความสัมพันธ์ของจำนวนท่อนาโนคาร์บอนและมุมที่เบี่ยงเบน (a)(d) 0.1% (b)(e) 0.4% และ (c)(f) 0.8% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิเคราะห์กระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่สร้างจากสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน แสดงลักษณะทางกายภาพการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอน ในภาพที่ 4.3 a) กระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่สร้างจากสารละลายท่อนาโนคาร์บอนผสมสารลดแรงตึงผิวความเข้มข้น 0.1% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีการจัดเรียงตัวที่มีทิศทาง เส้นของท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะโค้งเล็กน้อยและเกิดช่องว่างระหว่างท่อทำให้การจัดเรียงตัวไม่ต่อเนื่อง ต่อมาเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเป็น 0.4% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แสดงดังภาพที่ 4.3 b) พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทาง (Aligned) พื้นผิวมีความเรียบ ไม่มีช่องว่างระหว่างท่อนาโนคาร์บอน นอกจากนี้ได้ทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเป็น 0.8% พบว่าการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอน มีลักษณะเป็นเส้นใยแบบสุ่มคล้ายร่างแห (Random) และเกิดช่องว่างระหว่างท่อนาโนคาร์บอน แต่อย่างไรก็ตามมีบางส่วนของท่อมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเรียงตัว ได้วัดมุมของการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งในการวัดมุมกำหนดให้เส้นมาตรฐานเท่ากับ 0 องศา พบว่าแต่ละเส้นทำมุมต่ำกว่าและสูงกว่าเส้นมาตรฐาน ภาพที่ 4.3 d) กระดาษท่อนาโนคาร์บอนเงื่อนไข 0.1% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าท่อนาโนคาร์บอนทำมุมกับเส้นมาตรฐานมีการกระจายตัวของมุมอยู่ในช่วง -3 ถึง 3 องศา โดยพบที่ -1 ถึง 1 องศามากที่สุดมีจำนวน 47% ส่วนภาพที่ 4.3 กราฟ e) กระดาษท่อนาโนคาร์บอนเงื่อนไข 0.4% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ท่อนาโนคาร์บอนทำมุมกับเส้นมาตรฐานมีการกระจายตัวของมุมอยู่ในช่วง -1 ถึง 3 องศา โดยพบที่ -1 ถึง 1 องศามากที่สุดมีจำนวน 93% และ ภาพที่ 4.3 กราฟ f) กระดาษท่อนาโนคาร์บอนเงื่อนไข 0.8% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ท่อนาโนคาร์บอนทำมุมกับเส้นมาตรฐานมีการกระจายตัวของมุมอยู่ในช่วง -10 ถึง -5 องศา โดยพบที่ -1 ถึง 1 องศามากที่สุดมีจำนวน 44% และการกระจายตัวของมุมอยู่ในช่วงที่ค่อนข้างกว้างเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอื่น

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาและกราฟการวัดมุมที่เบี่ยงเบน ค่อนข้างมีความสอดคล้องกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบกระดาษท่อนาโนคาร์บอน ทั้ง 3 เงื่อนไขสามารถสรุปได้ว่ากระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่สร้างจากสารละลายท่อนาโนคาร์บอนผสมสารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้น 0.4% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่ามีแนวโน้มการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันดีที่สุดและมีการกระจายตัวของมุมอยู่ในช่วงกราฟค่อนข้างแคบ เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไข 0.1% และ 0.8% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมากขึ้น เกิดสารลดแรงตึงผิวมากเกินไป เมื่อนำสารละลายไปสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอน สารลดแรงตึงผิวจึงไปขัดขวางการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทางของท่อโนคาร์บอน ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่มโอกาสในการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทางจึงลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาผลของเวลาในการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) สารละลายท่อนาโนคาร์บอนต่อลักษณะการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบมีทิศทาง

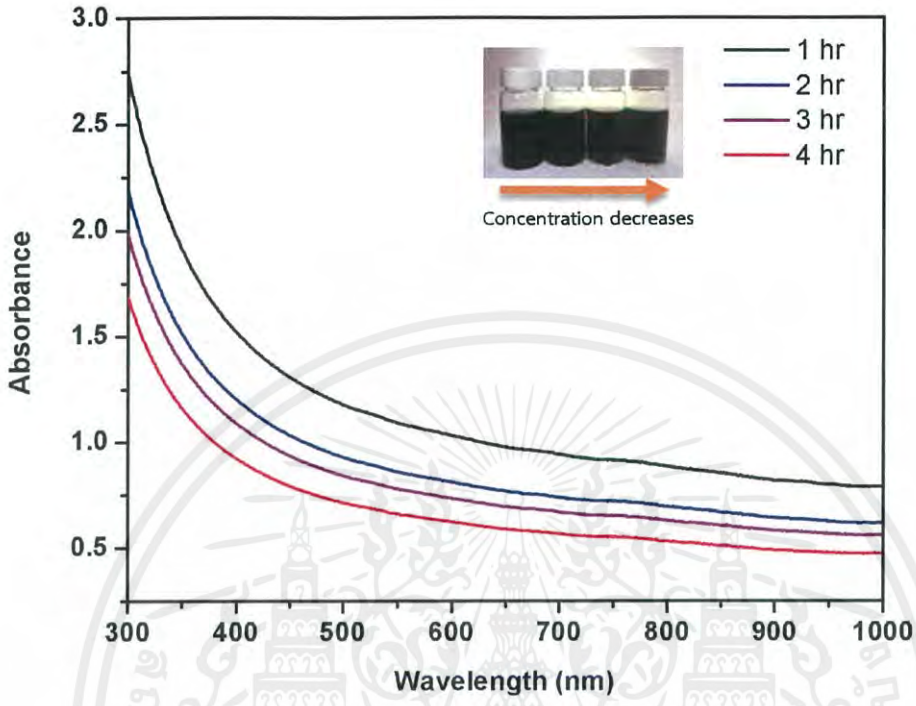
จากผลการทดลองหัวข้อที่ 4.3 แสดงผลของการสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทางโดยใช้เทคนิคการกรองแบบสุญญากาศ จากการเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิว พบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอน แบบมีทิศทาง คือ สารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่มีการผสมโซเดียมโดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนตที่ความเข้มข้น 0.4% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นจึงนำสารละลายดังกล่าวมาใช้ในการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการปั่นเหวี่ยง เพื่อศึกษาผลของลักษณะการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอน โดยสามารถวิเคราะห์สารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงแตกต่างกันด้วยเทคนิควิเคราะห์การดูดกลืนแสง และ วิเคราะห์ลักษณะการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบมีทิศทางด้วยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังภาพที่ 4.5 และ 4.6

ภาพที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายสารละลายท่อนาโนคาร์บอนโดยมีการใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงสารละลายแตกต่างกันคือ 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ

พบว่าจากภาพถ่ายจากการเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงสารละลายแตกต่างกันคือ 1 2 3 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่า สีของสารละลายเกิดการเปลี่ยนแปลง ลักษณะมีสีใส เมื่อใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงสารละลายเพิ่มมากขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 การวิเคราะห์สารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงสารละลายแตกต่างกันด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสง

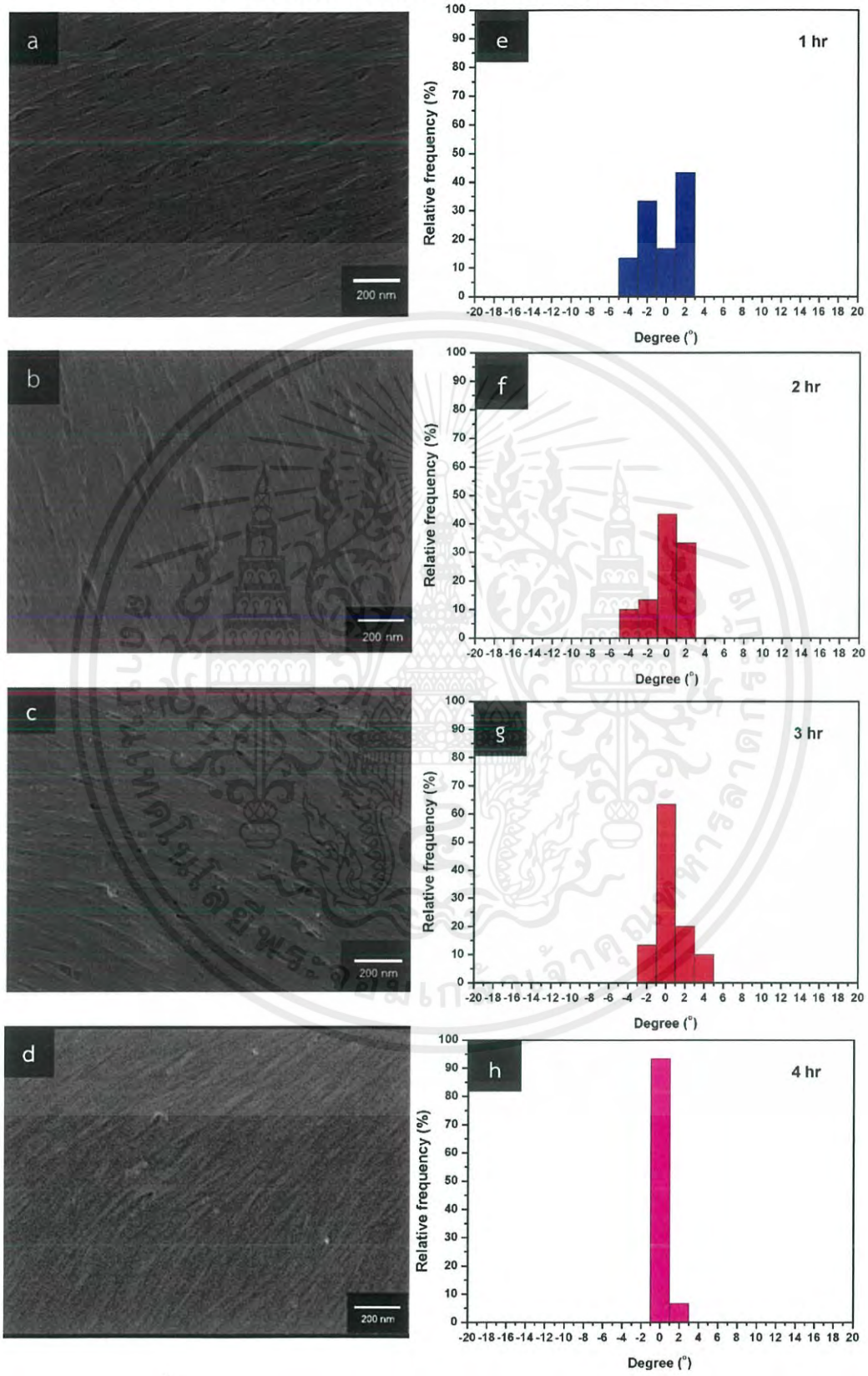


ภาพที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงของสารละลายท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงสารละลายแตกต่างกันคือ 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง ในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน

จากการทดลองเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอน เมื่อนำสารละลายท่อนาโนคาร์บอนไปทำการทดสอบวัดค่าการดูดกลืนแสง จากกราฟแสดงดังภาพที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่ทำการปั่นเหวี่ยงเป็นเวลานาน 4 ชั่วโมงมีค่าการดูดกลืนแสงน้อยที่สุดหรือสามารถให้แสงทะลุผ่านได้มากเมื่อเทียบกับเงื่อนไขที่ใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงที่เวลา 3 2 และ 1 ชั่วโมงตามลำดับ เป็นเพราะว่าเมื่อทำการใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงนานมากขึ้น จะเกิดการแยกตัวของท่อนาโนคาร์บอนภายในสารละลาย โดยที่ท่อนาโนคาร์บอนที่มีการเกาะกลุ่มกันเป็นเส้นใหญ่ (Bundle) จะตกตะกอนลงมาด้านล่างเป็นจำนวนมากขึ้น ทำให้เหลือเพียงท่อนาโนคาร์บอนเส้นเดี่ยว (Individual CNTs) กระจายตัวอยู่ภายในสารละลาย จึงทำให้ความเข้มข้นของสารละลายลดลง สีของสารละลายมีลักษณะสีใสและดูดกลืนแสงได้น้อยลงตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การวิเคราะห์เชิงกายภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทางด้วยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์กระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงสารละลายแตกต่างกันโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของกระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบมีทิศทางโดยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภาพที่ 4.6 (a–d) แสดงกระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทางโดยมีเงื่อนไขการใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงสารละลายที่แตกต่างกัน คือ 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ จากภาพพบว่ากระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกสร้างจากสารละลายที่ใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังภาพที่ 4.6 d) ซึ่งมีลักษณะท่อนาโนคาร์บอนเป็นเส้นขนาดเล็ก การจัดเรียงตัวของท่อไปในทิศทางเดียวกัน และมีแผ่นเรียบไม่มีช่องว่างระหว่างเส้นของท่อนาโนคาร์บอน เมื่อทำการเปรียบเทียบกับกระดาษท่อนาโนคาร์บอนจากสารละลายที่ใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยง 1 2 และ 3 ชั่วโมง ดังภาพที่ 4.6 (a-c) จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขในการปั่นเหวี่ยงที่เวลา 1 - 3 ชั่วโมงมีลักษณะการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนไปในทิศทางเดียวกัน แต่ท่อมีการรวมตัวกันเป็นเส้นใหญ่ และ มีช่องว่างระหว่างเส้นของท่อนาโนคาร์บอน

จากกราฟการวัดมุมเบี่ยงเบน ได้ทำการวัดมุมของการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งในการวัดมุมกำหนดให้เส้นมาตรฐานในการวัดเท่ากับ 0 องศา จากกราฟภาพที่ 4.6 e) การจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนเงื่อนไขในการปั่นเหวี่ยงที่เวลา 1 ชั่วโมง ท่อนาโนคาร์บอนทำมุมกับเส้นมาตรฐานมีการกระจายตัวอยู่ในช่วง -3 ถึง 3 องศา โดยพบที่ -1 ถึง 1 องศามากที่สุดจำนวน 17% ส่วนภาพที่ 4.6 f) การจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนเงื่อนไขในการปั่นเหวี่ยงที่เวลา 2 ชั่วโมง ท่อนาโนคาร์บอนทำมุมกับเส้นมาตรฐานมีการกระจายตัวอยู่ในช่วง -3 ถึง 3 องศา โดยพบที่-1 ถึง 1 องศามากที่สุดมีจำนวน 43% ภาพที่ 4.6 g) การจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนเงื่อนไขในการปั่นเหวี่ยงที่เวลา 3 ชั่วโมง ท่อนาโนคาร์บอนทำมุมกับเส้นมาตรฐานมีการกระจายตัวอยู่ในช่วง -3 ถึง 3 องศา โดยพบที่ -1 ถึง 1 องศามากที่สุดมีจำนวน 63% ภาพที่ 4.6 h) การจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนเงื่อนไขในการปั่นเหวี่ยงที่เวลา 4 ชั่วโมง ท่อนาโนคาร์บอนทำมุมกับเส้นมาตรฐานมีการกระจายตัวอยู่ในช่วง -1 ถึง 3 องศา โดยพบที่ -1 ถึง 1 องศามากที่สุดมีจำนวน 93% จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจะเห็นได้ว่า กระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวดีที่สุดคือการสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนจากสารละลายที่ใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยง เป็นเวลา 4 ชั่วโมงซึ่งจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาและกราฟวัดมุมเบี่ยงเบน ค่อนข้างมีความสอดคล้องกันทั้งนี้จากกราฟมีเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของมุมอยู่ในช่วงค่อนข้างแคบและสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอื่น

ดังนั้นจากผลวิเคราะห์ทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าเมื่อใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงสารละลายนานมากขึ้น จะทำให้สารละลายที่นำมาสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนเหลือเพียงท่อนาโนคาร์บอนเส้นเดี่ยวกระจายตัวอยู่ภายในสารละลายและลดการจับกลุ่มกันมากขึ้น เมื่อนำสารละลายดังกล่าวมาทำการสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนให้มีการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทางโดยใช้เทคนิคการกรองแบบสุญญากาศ จึงทำให้กระดาษท่อนาโนคาร์บอนมีการจัดเรียงตัวอย่างมีทิศทาง เพราะเมื่อทำการเทสารละลายท่อนาโนคาร์บอน ลงไปบนพื้นผิวของกระดาษกรองพอลิคาร์บอเนตที่มีความชอบน้ำ (Hydrophilic) หรือมีพื้นผิวเป็นประจุลบอยู่ (Negatively charged) แสดงดังการทดลองที่ 3.2.3 ซึ่งกลไกในการเกิดการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทางของท่อนาโนคาร์บอนนั้น ท่อนาโนคาร์บอนมีการ

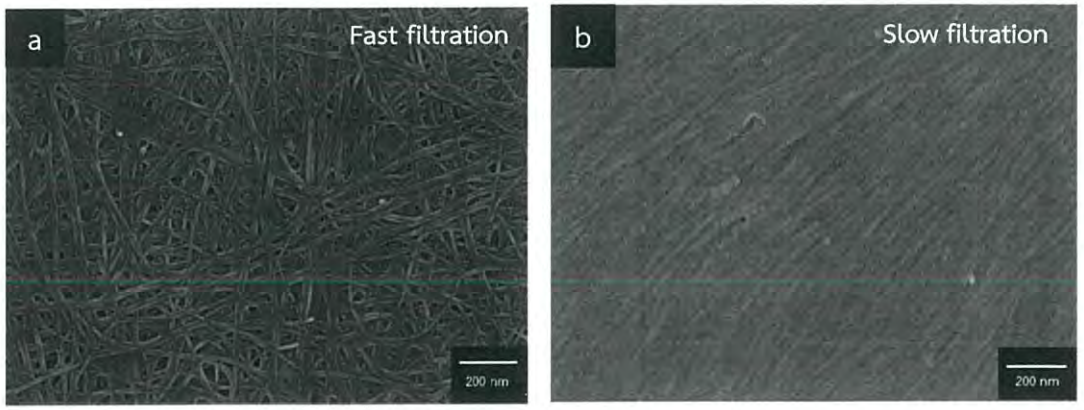
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวทำให้มีการกระจายตัวได้ดีภายในสารละลาย ท่อนาโนคาร์บอนที่มีการปรับปรุงพื้นผิวจะมีความชอบน้ำและบริเวณพื้นผิวจะมีประจุลบ (Negatively charged) เกิดขึ้นในระบบจะเกิดแรง 2 คือ แรงผลักทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic repulsion) ของพื้นผิวกระดาษกรองและท่อนาโนคาร์บอน และแรงระหว่างโมเลกุล (van der waals) ของท่อนาโนคาร์บอนกับท่อนาโนคาร์บอนด้วยกันเอง เริ่มแรกท่อนาโนคาร์บอนจะเกิดแรงผลักกับพื้นผิวของกระดาษกรอง โดยแรงผลักของกระดาษกรองจะผลักไม่ให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดการรวมกลุ่มกัน เมื่อถึงจุดหนึ่งท่อนาโนคาร์บอนกับพื้นผิวกระดาษกรองจะเกิดแรงดึงดูดกัน ในระยะเวลาที่เหมาะสมหรือเกิดความเสถียรของท่อนาโนคาร์บอนเส้นเดี่ยวจะเกิดแรงผลักระหว่างท่อข้างเคียงและค่อยๆเกิดการเรียงตัวกันเป็นระนาบ 1 ชั้นเรียกว่า 2D nematic phase [17] ดังนั้นท่อนาโนคาร์บอนด้านบนที่กำลังจะตกลงมาก็จะเรียงตัวตามระนาบชั้นด้านล่างต่อมาสะสมเป็นกระดาษท่อนาโนคาร์บอน ทั้งนี้เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ทำการปั่นเหวี่ยงสารละลายท่อนาโนคาร์บอนทำให้ภายในสารละลายมีเพียงท่อนาโนคาร์บอนแบบเส้นเดี่ยว (Individual CNTs) อยู่ จึงทำให้ไม่มีการเกาะกลุ่มของท่อนาโนคาร์บอนเส้นใหญ่สามารถทำให้เกิดการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทางได้ง่าย

4.5 ศึกษาผลของความเร็วที่ใช้ในการกรองสารละลายท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิคการกรองแบบสุญญากาศ

จากการศึกษาผลการทดลองหัวข้อ 4.4.2 การสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบมีทิศทาง พบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือ การใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงสารละลายท่อนาโนคาร์บอนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาความเร็วที่ใช้ในการกรองแสดงวิธีทำ 3.2.3 โดยจะเปลี่ยนความเร็วในการกรองจากเดิมเป็นการกรองแบบช้าคือ 1-3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ให้เป็นการกรองแบบเร็วประมาณ 1 มิลลิลิตรต่อนาที โดยสามารถวิเคราะห์ลักษณะการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนจากเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังภาพที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกระดาษท่อนาโนคาร์บอนใช้ความเร็วในการกรอง a) การกรองแบบเร็ว 1 มิลลิลิตรต่อนาที และ b) การกรองแบบช้า 1-3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

จากการทดลองสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้ความเร็วในการกรองแตกต่างกันคือการกรองแบบเร็วและการกรองแบบช้า แสดงผลดังภาพที่ 4.7 a) พบว่าเมื่อมีการเพิ่มความเร็วในการกรอง ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกระดาษท่อนาโนคาร์บอนมีการจัดเรียงตัวของท่อมีลักษณะพันกันเป็นแบบสุ่ม (Random) ส่วนภาพที่ 4.7 b) เมื่อลดความเร็วในการกรองเป็นแบบช้าการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนมีการจัดเรียงตัวอย่างมีทิศทาง (Aligned) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ความเร็วในการกรองส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งการใช้ความเร็วในการกรองแบบเร็วท่อนาโนคาร์บอนไม่มีเวลาเพียงพอในการจัดเรียงตัวก่อนที่จะสะสมลงบนแผ่นกระดาษกรองจึงทำให้ การจัดเรียงตัวเป็นแบบสุ่มไม่มีทิศทาง ทั้งนี้การกรองแบบช้าจึงช่วยให้ท่อนาโนคาร์บอนมีเวลาเพียงพอสามารถจัดเรียงตัวแบบมีทิศทางก่อนที่จะสะสมลงบนแผ่นกระดาษกรองได้

ทั้งนี้จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าการสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอน มีปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการจัดเรียงต่อแบบมีทิศทางของท่อนาโนคาร์บอนคือการใช้ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ 0.4% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งการใช้สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มากหรือน้อยจนเกินไปทำให้ท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวได้ดีในสารละลาย ซึ่งถ้ามีมากเกินไปก็จะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนได้ อีกทั้งเมื่อใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงสารละลายนานมากขึ้นเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อนำสารละลายไปทำการกรองเพื่อสร้างเป็นกระดาษท่อนาโนคาร์บอน โดยใช้ความเร็วในการกรองแบบช้าท่อนาโนคาร์บอนจะมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทาง แต่ถ้าไม่ทำการปั่นเหวี่ยงสารละลายท่อนาโนคาร์บอนและใช้เวลาในการกรองแบบเร็ว ท่อนาโนคาร์บอนก็จะมีแนวโน้มในการจัดเรียงตัวในทิศทางที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวที่ควบคุมการเรียงตัวด้วยเทคนิคการกรองสุญญากาศ (Vacuum filtration technique) โดยจะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนให้มีลักษณะจัดเรียงตัวแบบมีทิศทาง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาผลของลักษณะท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวต่อการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทาง (Aligned)

โดยการทดลองเริ่มจากการเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งนำท่อนาโนคาร์บอนผสมกับโซเดียมโดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนตที่ปริมาณแตกต่างกันคือ 0.1% 0.4% และ 0.8% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรและนำสารละลายที่เตรียมได้ไปสร้างเป็นกระดาษท่อนาโนคาร์บอน จากผลการทดลองพบว่ากระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่สร้างจากสารละลายท่อนาโนคาร์บอนผสมโซเดียมโดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนตปริมาณ 0.4% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีลักษณะการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบมีทิศทางดีที่สุดเมื่อเทียบกับเงื่อนไข 0.1% และ 0.8% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรตามลำดับ

5.1.2 การศึกษาผลของเวลาในการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) สารละลายท่อนาโนคาร์บอนต่อการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทาง

โดยจากการศึกษาผลของลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิว ซึ่งเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่มีปริมาณสารลดแรงตึงผิว 0.4% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จึงได้นำเงื่อนไขดังกล่าวมาศึกษาผลของเวลาในการปั่นเหวี่ยงสารละลาย เป็นเวลา 1 2 3 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ จากผลทดสอบการดูดกลืนของสารละลาย เมื่อใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยงสารละลายเพิ่มมากขึ้นสีของสารละลายจะมีลักษณะสีใส และดูดกลืนแสงได้น้อยลง จากนั้นนำไปทำการสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอน พบว่ากระดาษท่อนาโนคาร์บอนจากสารละลายที่ใช้เวลาในการปั่นเหวี่ยง 4 ชั่วโมง มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบมีทิศทางดีที่สุดเมื่อเทียบกับเงื่อนไขอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 การศึกษาผลของความเร็วที่ใช้ในการกรองสารละลายท่อนาโนคาร์บอน

จากการทดลองสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่มีความเร็วในการกรองแตกต่างกัน คือการกรองแบบช้าที่ความเร็ว 1-3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงและการกรองแบบเร็วที่ความเร็ว 1 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มความเร็วในการกรองกระดาษท่อนาโนคาร์บอนจะมีลักษณะการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนเป็นแบบสุ่ม (Random) แทนการจัดเรียงตัวแบบมีทิศทาง (Aligned) ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐาน

ดังนั้นจากผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า สามารถสร้างแผ่นกระดาษท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวโดยควบคุมการเรียงตัวให้มีทิศทางด้วยเทคนิคการกรองสุญญากาศได้ โดยการใช้เงื่อนไขที่เหมาะสม คือ สารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวปริมาณ 0.4%โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เวลาที่ใช้ในการปั่นเหวี่ยงสารละลายท่อนาโนคาร์บอนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และใช้ความเร็วในการกรองแบบช้าประมาณ 1-3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงโดยประมาณ

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

5.2.1 ในการสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอนสามารถใช้เทคนิคการสั่นนอกเหนือจากการอัลตราโซนิค เช่น การใช้อัลตราโซนิกแบบโพรบเพื่อให้ท่อนาโนคาร์บอนสามารถกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น

5.2.2 ในการสร้างกระดาษท่อนาโนคาร์บอน ควรติดตั้งระบบที่สามารถกำหนดความเร็วในการการกรองได้แน่นอนเพื่อลดความผิดพลาดในการสร้าง

5.2.3 ศึกษาปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบมีทิศทางเช่น ความเร็วรอบต่อนาทีในการปั่นเหวี่ยงสารละลาย ชนิดของตัวทำละลาย กระดาษกรอง เป็นต้น

5.2.4 ควรศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น เซนเซอร์ ส่วนประกอบของอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์และแผ่นกรองดักจับอนุภาคขนาดเล็ก เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. Saifuddin, N., Raziah, A. Z. and Junizah, A. R. Carbon nanotubes: A review on structure and their interaction with proteins. *J. Chem.* **vol. 2013**, pp. 1-18, (2012).
2. Shankar, K. R. Preparation and Characterization of Magnetically Aligned Carbon Nanotube Buckypaper and Composite. The florida state university, 2003.
3. Wang, D., Song, P., Liu, C., Wu, W. and Fan, S. Highly oriented carbon nanotube papers made of aligned carbon nanotubes. *Nanotechnology* **vol. 19**, no.7, pp. 07569 (2008).
4. Hirsch, A. The era of carbon allotropes. *Nat. Publ. Gr.* **vol. 9**, pp. 868–871 (2010).
5. Allotropes of carbon (Online). Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Allotropes_of_carbon. (Accessed: 27th November 2017)
6. Smita, M., Sanjay, K. N., Kaith, B. S., Susheel, K. Polymer Nanocomposites based on Inorganic and Organic Nanomaterials. Wiley Online library, 2015.
7. Carbon Nanotubes and Energy (Online). Available at: http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/kumar1/. (Accessed: 1st October 2017)
8. Shedding more light on CNTs (Online). Available at: http://nanotechweb.org/cws/article/tech/52410. (Accessed: 1st October 2017)
9. Sisto, T. J., Zakharov, L. N., White, B. M. and Jasti, R. Towards pi-extended cycloparaphenylenes as seeds for CNT growth: investigating strain relieving ring-openings and rearrangements. *Chem. Sci.* **vol. 7**, pp. 3681–3688 (2016).
10. Rastogi, V. *et al.* Carbon Nanotubes: An Emerging Drug Carrier for Targeting Cancer Cells. *J. Drug Deliv.* **vol. 2014**, pp. 1–23 (2014).
11. Kumar, M. and Ando, Y. Chemical Vapor Deposition of Carbon Nanotubes: A Review on Growth Mechanism and Mass Production. *J. Nanosci. Nanotechnol.* **vol. 10**, pp. 3739–3758 (2010).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. Ruoff, R. S., Qian, D. and Kam, W. Mechanical properties of carbon nanotubes : theoretical predictions and experimental measurements. **vol. 4**, pp. 993–1008 (2003).

13. De Volder, M. F. L., Tawfick, S. H., Baughman, R. H. and Hart, A. J. Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications. *Science.* **vol. 339**, pp. 535–539 (2013).

14. Applications & Basics of Bucky Paper (Online). Available at: http://www.cevgroup.org/applications-basics-of-bucky-paper/. (Accessed: 1st October 2017)

15. Cao, Q., Yu, Q., Connell, D. W. and Yu, G. Titania/carbon nanotube composite (TiO2/CNT) and its application for removal of organic pollutants. *Clean Technol. Environ. Policy* **vol. 15**, pp. 871–880 (2013).

16. Rashid, M. H. O. and Ralph, S. F. Carbon Nanotube Membranes: Synthesis, Properties, and Future Filtration Applications. *Nanomaterials* **vol. 7**, pp. 1-28 (2017).

17. He, X. *et al.* Wafer-scale monodomain films of spontaneously aligned single-walled carbon nanotubes. *Nat. Nanotechnol.* **vol. 11**, pp. 633–638 (2016).

18. Cha, J., Kim, S. and Lee, S. Effect of Continuous Multi-Walled Carbon Nanotubes on Thermal and Mechanical Properties of Flexible Composite Film. *Nanomaterials* **vol. 6**, pp. 1-11 (2016).

19. Chien, P. C. *et al.* Electrically controllable all-optical switches using dye-doped liquid crystal cells with buckypapers. *Opt. Mater. Express* **vol. 5**, 1399–1409 (2015).

20. Sakurai, S., Kamada, F., Futaba, D. N., Yumura, M. and Hata, K. Influence of lengths of millimeter-scale single-walled carbon nanotube on electrical and mechanical properties of buckypaper. *Nanoscale Res. Lett.* **vol. 8**, pp. 1-8 (2013).

21. Rashid, M. H. O. *et al.* Synthesis, properties, water and solute permeability of MWNT buckypapers. *J. Memb. Sci.* **vol. 456**, pp. 175–184 (2014).

22. Raman Spectroscopy.(Online). Available at: http://www.chem.umd.edu/wpcontent/uploads/2014/01/Raman Spectroscopy.jpg. (Accessed: 27th November 2017)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

23. DeltaNu, I. Characterization of Carbon Nanotubes (CNTs) with Raman Spectroscopy (Online). (2017). Available at: www.deltanu.com. (Accessed: 1st October 2017)

24. Hodkiewicz, J. and Scientific, T. F. Characterizing Carbon Materials with Raman Spectroscopy. *Prog. Mater. Sci.* **vol. 50**, pp. 929–961 (2005).

25. Scanning electron microscope (Online). Available at: https://cmrf.research.uiowa.edu/scanning-electron-microscopy. (Accessed: 1st October 2017)

26. Scanning Electron Microscopy (Online). Available at: http://www.laxmilab.com/scanning-electron-microscopy-sem-2531025.html. (Accessed: 1st October 2017)

27. UV-Vis Spectrophotometer (Thermo Scientific Orion) (Online).Available at: https://www.weberscientific.com/aquamate-8000-uv-vis-spectrophotometer-thermo-scientific-orion. (Accessed: 30th April 2018)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวจิราภา มีแสงเพชร
วัน เดือน ปีเกิด	5 มกราคม 2539
ที่อยู่ปัจจุบัน	57 หมู่ 6 ตำบลสลกบาตร อำเภอขาณุวรลักษบุรี จังหวัดกำแพงเพชร รหัสไปรษณีย์ 62140
การติดต่อ	เบอร์โทรศัพท์ 082-166-8499 อีเมลล์ mewma2539@gmail.com
ประวัติการศึกษา	ระดับชั้นมัธยมศึกษา โรงเรียนขาณุวิทยา จังหวัดกำแพงเพชร ระดับชั้นอุดมศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการทำงาน	พ.ศ.2560 ฝึกงานในห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ระดับนาโน (NCL: Nano Characterization Laboratory) ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้