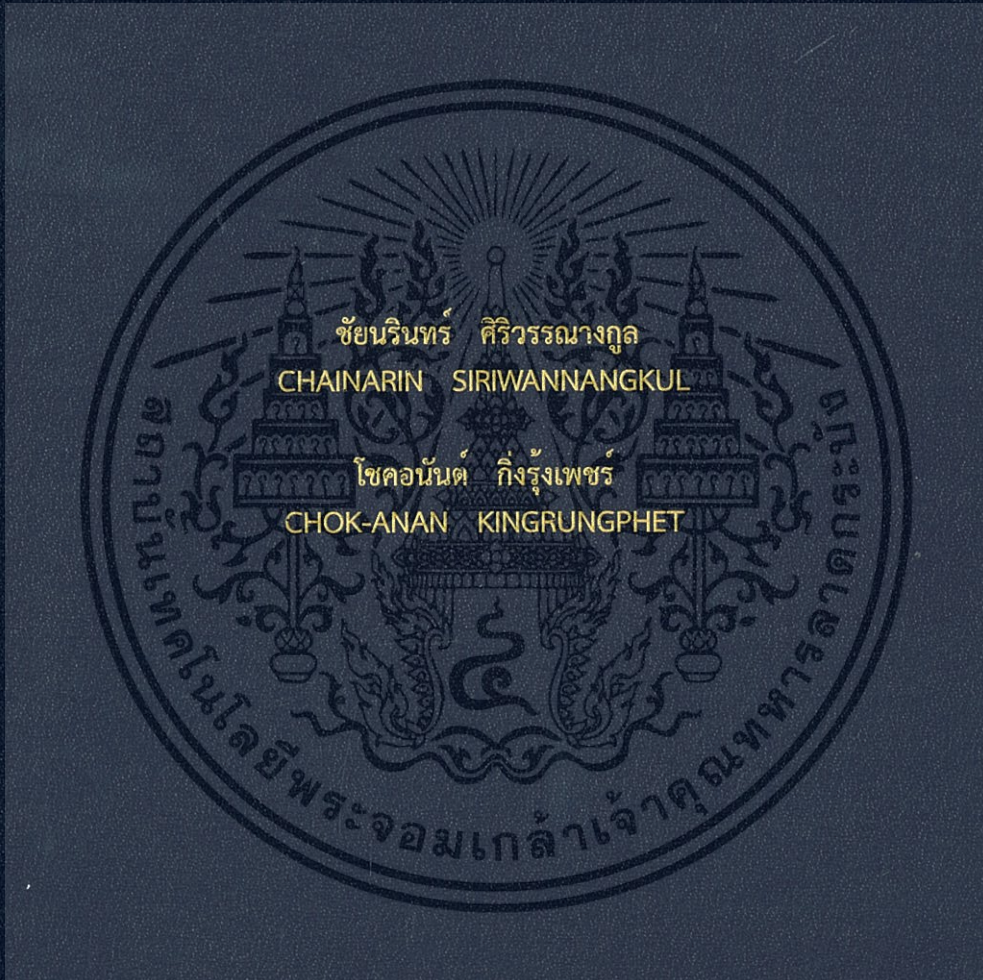


การสร้างเซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียดจากฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์
Fabrication of Strain Sensors Base on CNT Film



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การสร้างเซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียดจากฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์

Fabrication of Strain Sensors Base on CNT Film

โดย

ชัยนรินทร์ ศิริวรรณางกุล

โชคนันต์ กิ่งรุ่งเพชร

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.สุริชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสร้างเซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียดจากฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์

Fabrication of Strain Sensors Base on CNT Film

ผู้จัดทำ นายชัยนรินทร์ ศิริวรรณางกุล รหัสนักศึกษา 57010302

นายโชคอนันต์ กิ่งรุ่งเพชร รหัสนักศึกษา 57010334

ปริญญาานิพนธ์นี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการ	การสร้างเซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียดจากคาร์บอนนาโนทิวบ์	
นักศึกษา	นายชัยนรินทร์ ศิริวรรณางกุล	รหัสประจำตัว 57010302
	นายโชคอนันต์ กิ่งรุ่งเพชร	รหัสประจำตัว 57010334
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์	
ปีการศึกษา	2560	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.สุรัชชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์	

บทคัดย่อ

การใช้ท่อนาโนคาร์บอนสำหรับสร้างเซ็นเซอร์วัดความเครียดนั้นได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าและความยืดหยุ่น ซึ่งเราได้พูดถึงประเด็นสำคัญบางประการของท่อนาโนคาร์บอน เมื่อท่อนาโนคาร์บอนมีการเปลี่ยนโครงสร้างจากการทำให้เสียรูปเชิงกลส่งผลให้ค่าทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานกับการตรวจจับความเครียด โครงการฉบับนี้ได้แบ่งเป็นสามส่วน ส่วนแรกเป็นการนำเสนอการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆของเซ็นเซอร์ที่มีผลกระทบต่อค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงจากการโค้งงอ ในส่วนที่สองเราสร้างอุปกรณ์สำหรับวัดความเครียดแบบแรกเป็นการงอสเตรนเซ็นเซอร์โดยใช้ระยะทางในการดันเข้าแบบที่สองเป็นการงอสเตรนเซ็นเซอร์โดยใช้องศา ส่วนที่สามเป็นการประยุกต์เบื้องต้นโดยการนำสเตรนเซ็นเซอร์ที่ได้มาสร้างแขนกลที่ควบคุมระยะไกล จากผลการศึกษาส่วนที่หนึ่ง ผลคือช่วงเวลาที่ยาวกว่าหรือน้อยกว่า 30 นาที จะได้ท่อนาโนคาร์บอนที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงที่น้อยไม่เหมาะในการนำมาใช้งานและการเปลี่ยนชั่วคราวหรือฐาน ส่งผลต่อการใช้งาน ผลการทดลองในส่วนที่สอง เครื่ององวัดความต้านทานสามารถใช้งานได้โดยมีความผิดพลาด 3 องศา ในการทดลอง ผลการทดลองส่วนที่สาม สเตรนเกจที่ได้มีความไวที่สูงจึงนำมาประยุกต์กับแขนกลซึ่งสามารถควบคุมแขนกลให้งอตามองศาที่กำหนดได้ ซึ่งจากการวิจัยสเตรนเกจสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับวัสดุที่มีความยืดหยุ่นได้ แต่ยังมีค่าความผิดพลาดจากการทำซ้ำซึ่งต้องแก้ไข ในส่วนนี้วิเคราะห์ว่าเกิดจากรอยต่อระหว่างขั้วกับคาร์บอนนาโนทิวบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Fabrication of strain sensors based on CNT film
Student	Chainarin Siriwannangkul Student ID 57010302 Chok-anan Kingrunghphet Student ID 57010334
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Electronics Engineering
Year	2017
Thesis Adviser	Assoc. Prof. Dr. Sutichai Chaisitsak

ABSTRACT

The use of carbon nanotubes to create a strain gauge is of great interest because of its electrical properties and elasticity. We have discussed some of the key issues of carbon nanotubes. When carbon nanotubes change their structure from mechanical deformation, electrical values change. This phenomenon can be applied to stress detection. This project is divided into three parts. The first part presents the study of the parameters of the sensor that affect the change resistance of the bend. In the second part, we create the bending machine, first bending machine using the inlet distance. The second one is a bend with degrees. The third part is the initial application of the strain sensor to create a remote control arm. Experimental results in the first path. The result is that over a period of more than or less than 30 minutes, carbon nanotube tubes with less variation are unsuitable for use and polarity or substitution have effect on the use. Experiment results in the second part. The bending machine can be operated with a 3-degree error. Experiment results in the third part. The Strain sensor have high sensitivity, so they are applied to the robot arm, which can control the robot arm to bend per degree. The strain sensors can be applied to flexible materials, but there are also repetition errors that need to be corrected. In this section, we assumed the effect of contact carbon-nanotubes with electrode.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี อันเนื่องจากการได้รับคำแนะนำ การให้ความรู้ ความช่วยเหลือ และคำปรึกษาจาก รศ.ดร.สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์และขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัย Nano Electronic Materials and Devices (NEMD Lab) ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือและวัสดุในการทดลอง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และเป็นกำลังใจให้เสมอ

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้องที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้สามารถทำรายงานฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี



ชยันรินทร์ ศิริวรรณานกุล

โซคอนันต์ กิ่งรุ่งเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ท่อนาโนคาร์บอน.....	3
2.2 วิธีสังเคราะห์ CNT ด้วยวิธี CVD.....	4
2.3 Stepping Motor Control	5
2.4 อีลาสโตเมอร์(Elastomers).....	7
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	8
3.1 เตรียมสาร Ethanol (C ₂ H ₅ OH) + Ferrocene (C ₁₀ H ₁₀ Fe).....	8
3.2 ทดสอบเครื่องทำหมอก(Atomixer).....	9
3.3 เชื่อมต่อหลอดทดลองที่มีสารละลาย เตรียมทำการทดลอง.....	9
3.4 เซตฟิลเตอร์ทดสอบแก๊สอาร์กอนและการพาหมอกของแก๊สอาร์กอน.....	9
3.5 เร่งอุณหภูมิอยู่ในสถานะที่แก๊สอาร์กอน1L/min ไหลผ่านตลอด.....	10
3.6 ปฏิบัติการปลูกเมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการ.....	10
3.7 ลดอุณหภูมิอยู่ในสถานะที่แก๊สอาร์กอน1L/minไหลผ่านตลอด.....	11
3.8 การสร้างเครื่องงอเซ็นเซอร์.....	14
3.9 การเขียนโค้ด Arduino ลงบอร์ดใช้โค้ดตามดังนี้.....	15
3.10 การต่ออุปกรณ์.....	16
3.11 ปรับปรุงโครงสร้างเซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor).....	17
3.11.1 คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้บนแผ่นกรอง(Filter).....	17
3.11.2 เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่ 1	17
3.11.3 เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่ 2	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11.4 เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่ 3	19
3.11.5 เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่ 4	19
3.11.6 เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่ 4 ขนาดเล็ก.....	20
3.12 ประยุกต์เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) เข้ากับอุปกรณ์อื่น.....	21
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	22
4.1 การทดลอง.....	22
4.2 ผลการทดลอง.....	22
4.2.1 ผลการทดลองหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการนำมาทำเป็นเซ็นเซอร์.....	22
4.2.2 ผลการสร้างเครื่ององเซ็นเซอร์.....	23
4.2.3 ผลการปรับปรุงโครงสร้างเซ็นเซอร์.....	24
4.2.3.1 คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ บนแผ่นกรอง(Filter).....	24
4.2.3.2 เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่ 1	25
4.2.3.3 เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่ 2	26
4.2.3.4 เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่ 3	27
4.2.3.5 เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่ 4	28
4.2.4 ประยุกต์เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) เข้ากับอุปกรณ์อื่น.....	29
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	32
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	32
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	32
เอกสารอ้างอิง.....	34

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพจากเครื่อง SEM ของท่อนาโนคาร์บอน.....	3
2.2 ท่อนาโนคาร์บอน ที่โครงสร้างเป็นรูปลูกบอล.....	4
2.3 วิธี Hot-filament enhance chemical vapor deposition.....	5
2.4 โครงสร้างของ Stepping Motor แบบ 4 phase Stator Coil.....	5
2.5 การเสียบรูปของอีลาสโตเมอร์.....	7
3.1 เฟอโรซีน(Ferrocene).....	8
3.2 เครื่องUltrasonic.....	8
3.3 เครื่องทำหมอก(Atomixer).....	9
3.4 ทดสอบการทำหมอก.....	9
3.5 โตะคอนโทรลแก๊สอาร์กอน(Ar).....	10
3.6 เครื่องปลูกคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีCVD.....	12
3.7 แผนภาพโตะคอนโทรลแก๊สอาร์กอน(Ar).....	13
3.8 แผนภาพเครื่องส่งเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์.....	13
3.9 รางบอลสกรู.....	14
3.10 มอเตอร์ และ วงจรขับมอเตอร์.....	14
3.11 คัปปลิ่งมอเตอร์(Coupling motor).....	14
3.12 บอร์ด ArduinoUNO.....	14
3.13 แหล่งจ่ายไฟ(power supply).....	15
3.14 การต่อมอเตอร์กับวงจรขับมอเตอร์.....	16
3.15 การต่อรางบอลสกรูกับมอเตอร์.....	16
3.16 เครื่องงอวัดความต้านทาน 1	16
3.17 เครื่องงอวัดความต้านทาน 2	16
3.18 คาร์บอนนาโนทิวป์บนแผ่นฟิลเตอร์(Filter).....	17
3.19 แผนภาพ โครงสร้างของ คาร์บอนนาโนทิวป์บนแผ่นฟิลเตอร์(Filter).....	17
3.20 แผนภาพ โครงสร้างของ เซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด รุ่นที่ 1	17
3.21 เซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด รุ่นที่ 1	17
3.22 ขนาดของ แผ่นเซ็นเซอร์(Sensor) รุ่นที่ 1	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.23	แผนภาพ โครงสร้างของ เซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด รุ่นที่ 2	18
3.24	เซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด รุ่นที่ 2	18
3.25	ขนาดของ แผ่นเซ็นเซอร์(Sensor) รุ่นที่ 2	18
3.26	แผนภาพ โครงสร้างของ เซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด รุ่นที่ 3	19
3.27	เซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด รุ่นที่ 3	19
3.28	ขนาดของ แผ่นเซ็นเซอร์(Sensor) รุ่นที่ 3	19
3.29	แผนภาพ โครงสร้างของ เซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด รุ่นที่ 4	20
3.30	เซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด รุ่นที่ 4	20
3.31	ขนาดของ แผ่นเซ็นเซอร์(Sensor) รุ่นที่ 4	20
3.32	เซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด รุ่นที่ 4 ขนาดเล็ก.....	20
3.33	ขนาดของ แผ่นเซ็นเซอร์(Sensor) รุ่นที่ 4 ขนาดเล็ก.....	20
3.34	เซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่4 ในการนำไปประยุกต์ใช้กับแขนกล.....	21
3.35	ถุงมือควบคุม.....	21
3.36	แขนกล.....	21
4.1	กราฟความสัมพันธ์ ระหว่าง $\Delta R/R$ กับ อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน(Argon flow rate).....	22
4.2	เครื่องงอเซ็นเซอร์ 1	23
4.3	เครื่องงอเซ็นเซอร์ 2	23
4.4	กราฟความต้านทานจากการงอคาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่ 30° ทุก 60 วินาที กับ เวลา.....	24
4.5	กราฟความต้านทานจากการงอคาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่ 60° ทุก 60 วินาที กับ เวลา.....	24
4.6	กราฟความต้านทานจากการงอเซ็นเซอร์รุ่นที่ 1 ทุก 10 วินาที กับ เวลา.....	25
4.7	กราฟความต้านทานจากการงอเซ็นเซอร์รุ่นที่ 1 ทุก 30 วินาที กับ เวลา.....	25
4.8	กราฟความต้านทานจากการงอเซ็นเซอร์รุ่นที่ 2 ทุก 10 วินาที กับ เวลา.....	26
4.9	กราฟความต้านทานจากการงอเซ็นเซอร์รุ่นที่ 2 ที่ถูกปล่อยทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง.....	26
4.10	กราฟความต้านทานจากการงอที่ $10^\circ - 130^\circ$ ทุก 60 วินาที กับ เวลา (รอบที่1).....	27
4.11	กราฟความต้านทานจากการงอที่ $10^\circ - 130^\circ$ ทุก 60 วินาที กับ เวลา (รอบที่2).....	27
4.12	กราฟความต้านทานที่เปลี่ยนไปจากการงอที่ $10^\circ - 130^\circ$ ทุก 60 วินาที กับ เวลา.....	27
4.13	กราฟความต้านทานจากการงอที่ 30° ทุก 60 วินาที กับ เวลา.....	28
4.14	กราฟความต้านทานจากการงอที่ 60° ทุก 60 วินาที กับ เวลา.....	28

เอกสาร 4.15: กราฟความต้านทานจากการงอที่ $10^\circ - 130^\circ$ และ 0° ทุก 60 วินาที กับ เวลา นำไปตั้งประโยชน์ได้ 29 การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.16 กราฟความต้านทาน กับ องศาที่งอ.....	29
4.17 กราฟความต้านทานจากการงอที่ $0^\circ - 130^\circ - 0^\circ$ ทุก 60 วินาที กับ เวลา (ตัวที่001).....	30
4.18 กราฟความต้านทานจากการงอที่ $0^\circ - 130^\circ - 0^\circ$ ทุก 60 วินาที กับ เวลา (ตัวที่002).....	30
4.19 กราฟความต้านทานจากการงอที่ $0^\circ - 130^\circ - 0^\circ$ ทุก 60 วินาที กับ เวลา (ตัวที่003).....	31
4.20 กราฟความต้านทานจากการงอที่ $0^\circ - 130^\circ - 0^\circ$ ทุก 60 วินาที กับ เวลา (ตัวที่004).....	31
4.21 กราฟความต้านทานจากการงอที่ $0^\circ - 130^\circ - 0^\circ$ ทุก 60 วินาที กับ เวลา (ตัวที่005).....	32
4.22 กราฟความต้านทานจากการงอที่ $0^\circ - 130^\circ - 0^\circ$ ทุก 60 วินาที กับ เวลา (ตัวที่006).....	32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การควบคุม Stepping Motor แบบ 4 phase 1 exilation.....	6
2.2 การควบคุม Stepping Motor 4 phase ½ exilation(half- step).....	6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

สเตรนเกจ (strain gauge) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดการเปลี่ยนรูปของวัสดุ หรือที่เรียกว่า ความเครียด (strain) ค่าสัญญาณที่ได้จากการวัดเป็นผลมาจากการเปลี่ยนค่าความต้านทานของสเตรนเกจ ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเครียด และความเครียดนี้มีความสัมพันธ์อยู่กับแรงที่กระทำต่อวัสดุ ด้วยเหตุนี้ การวัดค่าความต้านทานจึงสามารถนำไปหาค่าแรงที่กระทำได้ สเตรนเกจโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบาง และใช้วัสดุที่ทำจากโลหะแผ่นบาง (foil) จากข้อมูล สเตรนเกจทำให้เราทราบว่าสเตรนเกจในปัจจุบันมีข้อจำกัดการใช้งานคือ ต้องใช้กับวัสดุที่แข็ง มีความยืดหยุ่นต่ำ อันเนื่องจากตัวสเตรนเกจเองที่มีความยืดหยุ่นที่ต่ำ ในจุดนี้เองที่มีความต้องการในการพัฒนาสเตรนเกจ ให้สามารถใช้งานกับวัสดุชนิดอื่นที่มีความยืดหยุ่นสูงขึ้น จึงต้องหาวัสดุที่นำมาสร้างเป็นสเตรนเกจ

ในช่วงเวลาเดียวกันแนวคิดเรื่องการใช้ท่อนาโนคาร์บอนสำหรับสร้างเซ็นเซอร์วัดความเครียดนั้นได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าและความยืดหยุ่น ซึ่งเราได้พูดถึงประเด็นสำคัญบางประการของท่อนาโนคาร์บอน เมื่อท่อนาโนคาร์บอนมีการเปลี่ยนโครงสร้างจากการทำให้เสียรูปเชิงกลส่งผลให้ค่าทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานกับการตรวจจับความเครียด

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1. เพื่อหาเงื่อนไขเหมาะสมในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีเคลือบผิวด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition : CVD)
2. เพื่อสร้างสเตรนเกจที่สามารถใช้งานได้สำหรับวัสดุที่มีความยืดหยุ่น
3. เพื่อสร้างเครื่องวัดความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์
4. เพื่อนำเซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียดที่ได้ไปใช้งานกับอุปกรณ์ชนิดอื่น

1.3 ขอบเขตของโครงการ

สร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อนำไปใช้งานเป็นเซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียดโดยข้อมูลจะแบ่งเป็นส่วน ส่วนแรกเป็นการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์บนฟิลเตอร์ด้วยวิธีเคลือบผิวด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition : CVD) มีเอทานอล และเฟอร์โรซีนเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน (Carbon : C) และเหล็ก (Iron : Fe) ส่วนที่สองเป็นการสร้างเครื่องวัดความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์โดยมีการควบคุมระบบด้วยโปรแกรม Arduino และใช้โปรแกรม Labview แสดงค่าทางไฟฟ้า ส่วนที่สาม เป็นการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ สเตรนเซ็นเซอร์ ส่วนที่สี่ เป็นการนำสเตรนเกจที่ได้มาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ชนิดอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้
2. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีเคลือบผิวด้วยไอเคมี
3. สามารถสร้างเครื่องวัดความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์ได้
4. สามารถสร้างสเตรนเกจที่นำไปใช้งานได้
5. สามารถนำสเตรนเกจไปประยุกต์ใช้งานได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ท่อนาโนคาร์บอน

นักวิทยาศาสตร์ได้ให้ความสนใจศึกษาเกี่ยวกับการศึกษาคุณสมบัติของ fullerenes โมเลกุลที่มีโครงสร้างประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบและมีโครงสร้างอยู่ระหว่างโครงสร้างของเพชรและแกรไฟต์ในตระกูลของคาร์บอน และเมื่อไม่นานมานี้มีการค้นพบโครงสร้างใหม่ของ fullerenes ที่มีลักษณะเป็นลูกบอลที่มีโครงสร้างเหมือนกรงปิดที่เป็นรูปทรงกลมซึ่งประกอบไปด้วย 60 อะตอมของคาร์บอนที่มีลักษณะสมมาตร(C60) ซึ่งเป็นการค้นพบการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมแบบใหม่ที่ไม่เคยพบมาก่อน นอกจากนั้นนักวิจัยได้ทำการดัดแปลงโมเลกุลที่ค้นพบนั้นให้ขยายยาวออกไปเป็นโครงสร้างที่เป็นท่อเรียวยาวเล็กได้สำเร็จและเรียกโครงสร้างนั้นว่า ท่อนาโนคาร์บอน(carbon nanotubes ; C1,000,000)

ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) มีรูปร่างเป็นโครงตาข่ายของคาร์บอน มีวนเชื่อมติดกันเป็นรูปทรงกระบอก และมีเส้นผ่าศูนย์กลางเพียงไม่กี่นาโนเมตร ท่อนาโนคาร์บอน มีคุณสมบัติที่แข็งแรงและเหนียวกว่า เหล็กกล้า สามารถนำไฟฟ้า หรือ กลายเป็นฉนวน (ไม่นำไฟฟ้า)ได้ ขึ้นอยู่กับทิศทางของแนวการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนบนผนังท่อนาโนคาร์บอน สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นสายไฟจิ๋ว ในเครื่องใช้ไฟฟ้า (nanoelectronics) ใช้ทอเป็นเส้นใยที่มีความละเอียดสูงและทนทานกว่าไหมเทียม หรือผลิตเป็น แบตเตอรี่ที่มีอายุการใช้งานนานนับสิบปี นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบา เป็นต้น

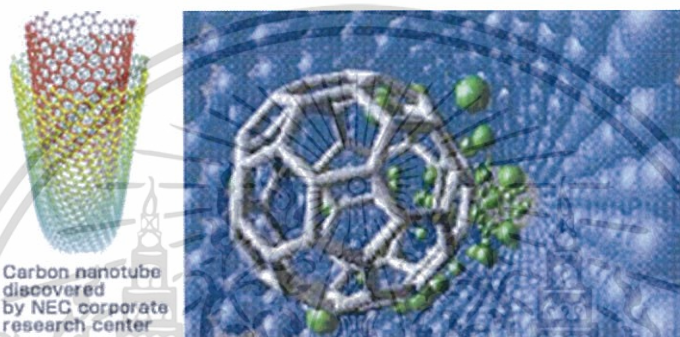


รูปที่ 2.1 ภาพจากเครื่อง SEM ของท่อนาโนคาร์บอน

โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน มีโครงสร้างเป็นแบบโมเลกุลเดี่ยวที่มีลักษณะเป็นแถวยาวของคาร์บอนเรียงตัวกันเป็นแนวยาวนับล้านๆเท่าของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อคาร์บอน โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes) จะโค้งตัวม้วนเป็นแกนจากด้านหนึ่งไปบรรจบอีกด้านหนึ่ง ซึ่งนักเคมีมีแนวความคิดว่าท่อนาโนคาร์บอนนี้มีลักษณะเป็น monoelemental polymer (โพลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยธาตุเพียงชนิดเดียว ซึ่งแตกต่างจากโพลิเมอร์ที่พบโดยทั่วไปที่

เอกละพั้ออะตอมของธาตุอื่นด้วย)รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองและการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า ท่อกลวงนี้มีความสามารถในการยืดหยุ่นเป็นพิเศษ มีความแข็งและมีคุณสมบัติที่ไม่ธรรมดาอีกหลายประการ ตัวอย่างเช่น สามารถหดกลับจากรูปหนึ่งไปสู่อีกรูปหนึ่งอย่างฉับพลัน และสามารถสร้างเป็นเชือกที่มีความแข็งแรงมากเป็นพิเศษ นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนยังมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าจึงทำให้มีการทดลองสร้างเป็นสายลวดนาโน (Nanowires) และตัวนำไฟฟ้าในขนาดนาโนสเกล (Nanoscale transistors) และในปัจจุบันท่อนาโนคาร์บอนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงและประสบความสำเร็จเป็นอย่างมากถึงแม้ว่าการผลิตโมเลกุลที่เป็นสายลวดขนาดเล็กจะเป็นเรื่องน่าท้าทายก็ตามอนึ่งถึงแม้ว่ามีการค้นพบท่อนาโนคาร์บอนมากกว่า 30 ปี โดยบริษัท NEC ของญี่ปุ่นแต่ท่อนาโนคาร์บอนที่ค้นพบในขณะนั้นก็ยังไม่สามารถนำมาใช้ได้จริง



รูปที่ 2.2 ท่อนาโนคาร์บอน ที่โครงสร้างเป็นรูปลูกบอล

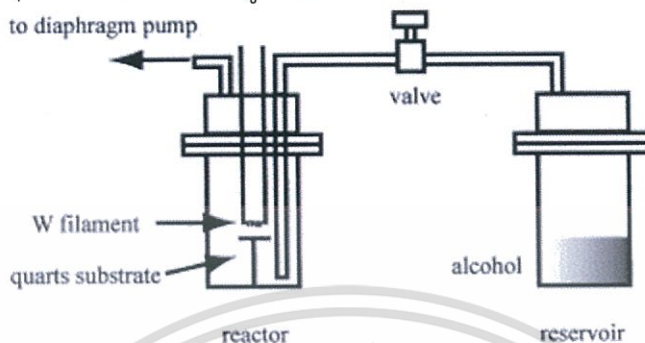
สินค้านาโนเทคโนโลยีที่ผลิตได้ในเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน มีอยู่หลายรายการด้วยกัน เช่น สก๊วกซ์ ของ Nanogate คุณภาพสูงที่ช่วยให้สก๊วกซ์และเส้นใยนำแข็งเส้นใยได้ดีและมีความแข็งแรง แจ็กเก็ตสก๊วกซ์ชนิดพิเศษที่ผลิตด้วยเส้นใยนาโน Franz Ziener GmbH & Co. มีคุณสมบัติกันลม กันน้ำ และกันคราบสิ่งสกปรกต่างๆ เสื้อผ้าไร้รอยยับและป้องกันรอยเปื้อนคราบสิ่งสกปรก กล้องดิจิทัลจอภาพ OLED (Organic light-emitting diodes) ของโกดักซึ่งแสดงภาพได้สว่างและคมชัดกว่าจอภาพ LCD (Liquid Crystals) แวนกันแดดของบริษัท Nanofilm ที่ใช้โพลีเมอร์ชนิดบางพิเศษ เคลือบ ลดการสะท้อนแสง ป้องกันรอยขีดข่วน และคราบสกปรกต่างๆ แร็กเก็ตที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนผสมกับกราไฟต์ ของบริษัท Baborat ที่มีคุณสมบัติแข็งแรงกว่าเหล็ก 100 เท่า แต่มีน้ำหนักเพียง 1 ใน 6 ทำให้การตีลูกมีพลังมากขึ้น ลดการเกร็งของกล้ามเนื้อ และลูกเทนนิสไฮเทคของบริษัท InMat ที่ใช้เทคนิคการผลิตแบบ Air D-Fense สามารถใช้งานได้ถึง 4 สัปดาห์

2.2 วิธีสังเคราะห์ CNT ด้วยวิธี CVD

วิธีตกสะสมไอเคมี (Chemical Vapor Deposition; CVD) เทคนิคนี้เป็นกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น ก๊าซอาร์กอน) บนโลหะ (เช่น Fe, Ni, Co) โดยใช้ความร้อนเข้ามาช่วยที่อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 500-1200 °C ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถควบคุมขนาดและความยาวของคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ง่าย สามารถสังเคราะห์

เอกสคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้ขึ้นเป็นรูปแบบตามที่ต้องการได้กษาน่า่นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธี Hot filament enhance chemical vapor deposition วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีหลักการคล้ายกับวิธี Thermal CVD แต่จะใช้ขดลวดความร้อน (Filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแทนการใช้เตาความร้อนโดยระบบของวิธี Hot-filament enhance chemical vapor deposition แสดงได้ดังรูป 2.3

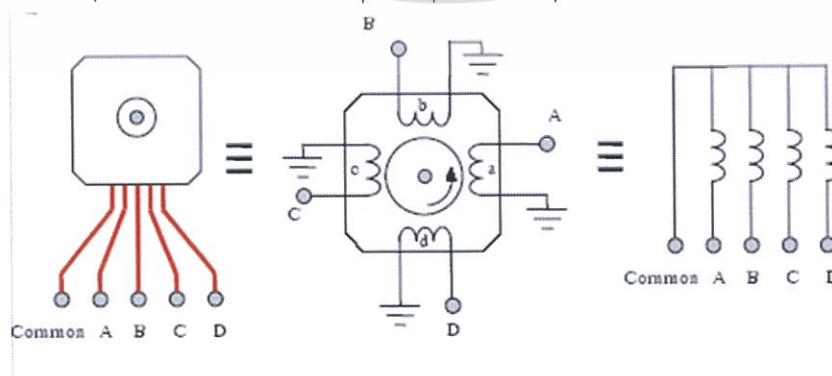


รูปที่ 2.3 วิธี Hot-filament enhance chemical vapor deposition

จากรูป 2.3 สามารถอธิบายการทำงานของระบบได้ดังนี้คือ จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อน เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขดลวดความร้อน แล้วปล่อยก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนเข้ามาในระบบ เมื่อก๊าซโดนความร้อนของขดลวดความร้อน จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนและลงมาทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ จะทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนได้แก่ ไอของแอลกอฮอล์ เป็นต้น ส่วนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้โลหะจำพวกเหล็ก (Fe) วิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้ไม่ยากและประหยัดค่าใช้จ่าย ส่วนคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ เช่น อุณหภูมิของฐานรอง, ชนิดโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหลของก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เป็นต้น

2.3 Stepping Motor Control

Stepping Motor เป็น Electrical Transducer ซึ่งเป็น input เป็นกลุ่มของ Binary Voltage และ Output การเคลื่อนที่ในเชิงมุม (หมุน) แกนหมุน (Shalf) เป็น step



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของ Stepping Motor แบบ 4 phase Stator Coil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทำงาน คือ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด stator Coil a,b,c,d ไม่พร้อมกันนั่นคือ ถ้าเราจ่ายกระแสให้ a ก่อนโดยไม่จ่ายให้ขดอื่น แล้วตามด้วย b,c และ d เรียงตามลำดับ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก หมุนวนในลักษณะทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งส่วนของ Rotor ที่เป็นแม่เหล็กถาวรก็จะหมุนตามสนามแม่เหล็กไปด้วย คือ ทวนเข็มนาฬิกา

ในทำนองเดียวกันถ้าเราจ่ายกระแสให้ขด d,c,b,a.... ก็จะทำให้ สนามแม่เหล็กหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ซึ่งส่งผลให้ Rotor หมุนตามเข็มนาฬิกาด้วย การกำหนดความเร็วของ stepping Motor ทำได้โดยการเปลี่ยนแปลง ความเร็วของการเปลี่ยนการจ่ายกระแสจากขดลวดหนึ่งไปยังอีกขดหนึ่งให้เร็วขึ้น

การควบคุม stepping Motor ดังที่กล่าวมาแล้ว เป็นมอเตอร์แบบ 4 phase 1 excitation ซึ่งมีลักษณะตามตารางที่ 1 (ตัวเลข 1 หมายถึง มีการจ่ายแรงดันให้กับขดลวด 0 คือไม่จ่ายแรงดันให้กับขดลวด

	Coil #	A	B	C	D
Step 1		1	0	0	0
Step 2		0	1	0	0
Step 3		0	0	1	0
Step 4		0	0	0	1
Step 5		ย้อนกลับ Step 1			

ตารางที่ 2.1 การควบคุม Stepping Motor แบบ 4 phase 1 excitation

จากวงจรของรูปตัวอย่าง Stepping Motor ในรูปที่ 1 จะเห็นว่าการกระตุ้น 1 ครั้ง (1 step) จะทำให้ Motor หมุนไป 90 องศา ซึ่งในกรณีของ Stepping Motor จริงๆจะซับซ้อนกว่านี้ โดยแต่ละ step ของการป้อน แกนของ Motor หมุนไปในมุมเล็กกว่านี้ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็น 0.1 องศาถึง 30 องศาขึ้นอยู่กับแต่ละ Stepping Motor

เราสามารถควบคุมให้ Stepping Motor หมุนครั้งละ $\frac{1}{2}$ step ได้โดยเปลี่ยนการควบคุมใหม่

	A	B	C	D
Step 1	1	1	0	0
Step 2	0	1	0	0
Step 3	0	1	1	0
Step 4	0	0	1	0
Step 5	0	0	1	1
Step 6	0	0	0	1
Step 7	1	0	0	1
Step 8	1	0	0	0
Step 9	ย้อนกลับ step 1			

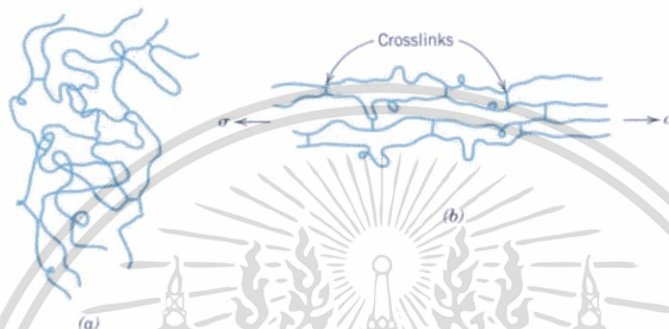
ตารางที่ 2.2 การควบคุม Stepping Motor 4 phase $\frac{1}{2}$ excitation (half-step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 อีลาสโตเมอร์ (Elastomers)

คุณสมบัติของยาง คือ %EL สูง และยืดหยุ่นได้สูง (ยืดเมื่อถูกดึงและหดเมื่อปลด แรง) แต่มี TS ค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้คุณสมบัติดังกล่าวได้มาจากการที่โครงสร้างของอีลาสโตเมอร์มีโมเลกุลที่โค้งงอและม้วนขด ได้แก่ยางธรรมชาติ (จากต้นยาง) และยางสังเคราะห์ (แข็งแรงกว่า และราคาถูกลงกว่า)

การเสีรูปของวัสดุอีลาสโตเมอร์ จากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ สามารถยืดออกได้ในระดับหนึ่งถึงจุดที่ โครงสร้างยืดออกคล้ายโครงข่ายเส้นตรง หากพันธะไม่ขาดอีลาสโตเมอร์ สามารถหดคืนรูปได้ โดยทั่วไปอีลาสโตเมอร์สามารถยืดได้ถึง 5-8 เท่า



รูปที่ 2.5 การเสีรูปของอีลาสโตเมอร์ (a) ก่อนถูกดึง โครงสร้างเป็นแบบยุ่งเหยิง (b) หลังถูกดึง โครงสร้างโครงข่ายเส้นตรง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึง ขั้นตอนที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD การสร้างเครื่องวัดค่าความต้านทาน การปรับปรุงโครงสร้างของสเตรนเซ็นเซอร์ และการนำสเตรนเซ็นเซอร์ไปประยุกต์ใช้

3.1 เตรียมสาร Ethanol (C_2H_5OH) + Ferrocene ($C_{10}H_{10}Fe$)

3.1.1 ล้างหลอดทดลองและเครื่องมือด้วยน้ำDI

3.1.2 ใช้เอทานอลเช็ดเครื่องมือ

3.1.3 เป่าอุปกรณ์ทำการทดลองด้วยแก๊สไนโตรเจน

3.1.4 ผสมสาร โดยใช้ – สารละลายเอทานอล 80 g

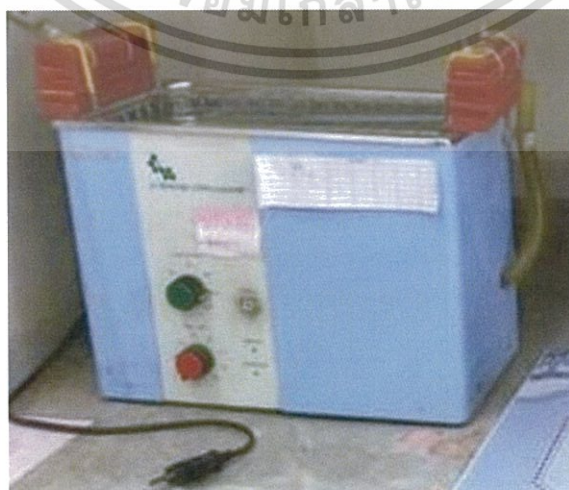
– ผง Ferrocene น้ำหนัก 0.25 เปอร์เซ็นต์เอทานอล



รูปที่ 3.1 เฟอโรซีน(Ferrocene)

3.1.5 เขย่าเล็กน้อยเพื่อให้สารเกิดการผสมกัน

3.1.6 ใช้เครื่อง Ultrasonic ทำให้สารผสมเข้ากัน



รูปที่ 3.2 เครื่องUltrasonic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เครื่องทำหมอก(Atomixer)



รูปที่ 3.4 ทดสอบการทำหมอก

3.2 ทดสอบเครื่องทำหมอก(Atomixer)

3.2.1 นำสารละลายที่ได้จากการผสม เอทานอล(Ethanol) กับ เฟอโรซีน(Ferrocene) ใส่ในหลอดทดลอง

3.2.2 ใส่อะตอมมิเซอร์เพื่อทดสอบการทำหมอก

3.3 เชื่อมต่อหลอดทดลองที่มีสารละลาย เตรียมทำการทดลอง

3.3.1 เช็ดจุกเสียบด้วยเอทานอล (ระวัง โอริงหล่น)

3.3.2 นำสายจากหลอดทดลองใหญ่ เสียบกับหลอดทดลองเล็กโดย ต่อสายกับท่อยาวของหลอดเล็ก

3.3.3 นำหลอดทดลองทั้ง 2 หลอด ต่อกับเครื่องปลุกคาร์บอนนาโนทิวป์

3.3.4 นำท่อจากวาล์ว 1 ต่อกับหลอดขนาดใหญ่ และท่อจากวาล์ว 2 ต่อกับหลอดขนาดเล็ก

3.4 เซตฟิลเตอร์ทดสอบแก๊สอาร์กอนและการพาทหมอกของแก๊สอาร์กอน

3.4.1 นำฟิลเตอร์ใส่ในแท่น และวางโอริงทับ

3.4.2 เชื่อมต่อแท่นฟิลเตอร์กับ ท่อภายใน

3.4.3 เซตท่อค้ำแท่นฟิลเตอร์ให้ตรง

3.4.4 ดันท่อค้ำไว้ด้วยแม่แรงโดยหมุนปรับแม่แรงจนขีดแดงขีดต้นบน

3.4.5 เปิดแก๊สอาร์กอนที่ประตู โดยเปิดที่ถังแก๊สก่อน แล้วเปิดที่เกจวัด

3.4.6 ต่อสายแก๊สอาร์กอน ที่วาล์ว 2 ทางด้านขวา

3.4.7 เปิดปั๊มลมด้านนอก เสียบปลั๊กและสับ คัตเอาท์

3.4.8 เช็คลมที่เครื่องต่างๆ ตู้อุดสาร ถ้าระบบลมรั่ว จะปิดไม่ได้

3.4.9 เปิดวาล์ว 2 ทางด้านขวา

3.4.10 เปิดวาล์วระหว่าง วาล์ว 2 และ 3 ทางด้านขวา

3.4.11 เปิดวาล์ว By Pass อันล่างสุด

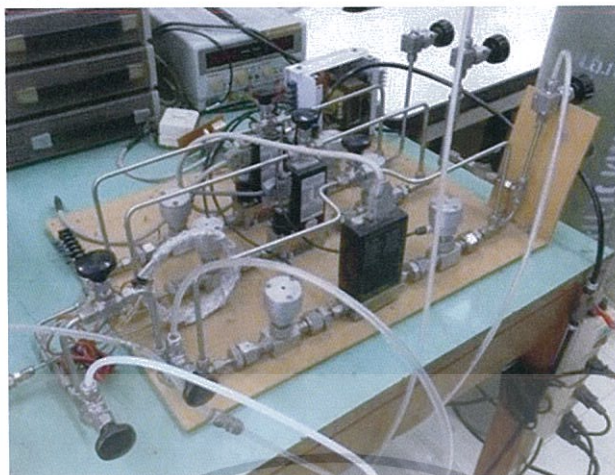
3.4.12 เปิดวาล์วลมสีแดง เข็มจะชี้ ประมาณ 0.4

3.4.13 เปิดวาล์ว กลุ่มริมโต๊ะด้านซ้าย เปิดวาล์วซ้าย (sccm)

3.4.14 เปิดวาล์ว 1 และ 2 อยู่บนสุดด้านหน้าของเครื่องสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.15 สั่งเปิดแก๊สอาร์กอน ใส่ค่าที่คอม ตามต้องการ (sccm) แล้วสั่ง RUN



รูปที่3.5 โต้ะคอนโทรลแก๊สอาร์กอน(Ar)

- 3.4.16 เอาท่อปล่อยลมจุ่มน้ำเพื่อไม่ให้อากาศภายในห้องเข้าไปในท่อ
- 3.4.17 เปิดเครื่องทำหมอก(อะตอมมิคเซอร์)จนหมอกเต็มหลอดทดลองใหญ่
- 3.4.18 ปิดเครื่องทำหมอก และดูการพาหมอกของแก๊สอาร์กอนประมาณ5นาที
- 3.4.19 เปิดวาล์วกลุ่มริมิโต้ะด้านซ้ายเปิดวาล์วขวา(1L/min)
- 3.4.20 หมุนเปิดวาล์ว3อยู่บนสุดด้านหลังของเครื่องสังเคราะห์
- 3.4.21 ปรับอาร์กอนที่โต้ะ1L/min
- 3.4.22 ปิดวาล์ว2 และ1 อยู่บนสุดด้านหน้าของเครื่องCNTs
- 3.4.23 สั่งปิดแก๊สอาร์กอน(SCCM) ที่คอม

3.5 เร่งอุณหภูมิอยู่ในสถานะที่แก๊สอาร์กอน1L/min ไหลผ่านตลอด

- 3.5.1 ทำความสะอาดแท่นวางแผ่นฟิลเตอร์และโอริง
- 3.5.2 ใส่โอริงภายในท่อให้พอดีติดกับแท่นฟิลเตอร์
- 3.5.3 ใส่ฟิลเตอร์ที่ฐานเครื่องCNTs
- 3.5.4 เปิดเครื่องควบคุมเตาความร้อนโดย ตั้งอุณหภูมิขึ้นทีละ100จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ
- 3.5.5 เมื่ออุณหภูมิเตาถึง800 ให้เปิดเครื่องหล่อเย็นโดยหมุนปุ่มขวาเพื่อเปิดเครื่อง
- 3.5.6 หมุนเปิดปุ่ม compressor และหมุนเปิดปุ่ม pump
- 3.5.7 เปิดวาล์วท่อน้ำสีเขียว เต็มน้ำ 1 ซิตแล้วปิดวาล์วให้ได้

3.6 ปฏิบัติการปลุกเมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการ

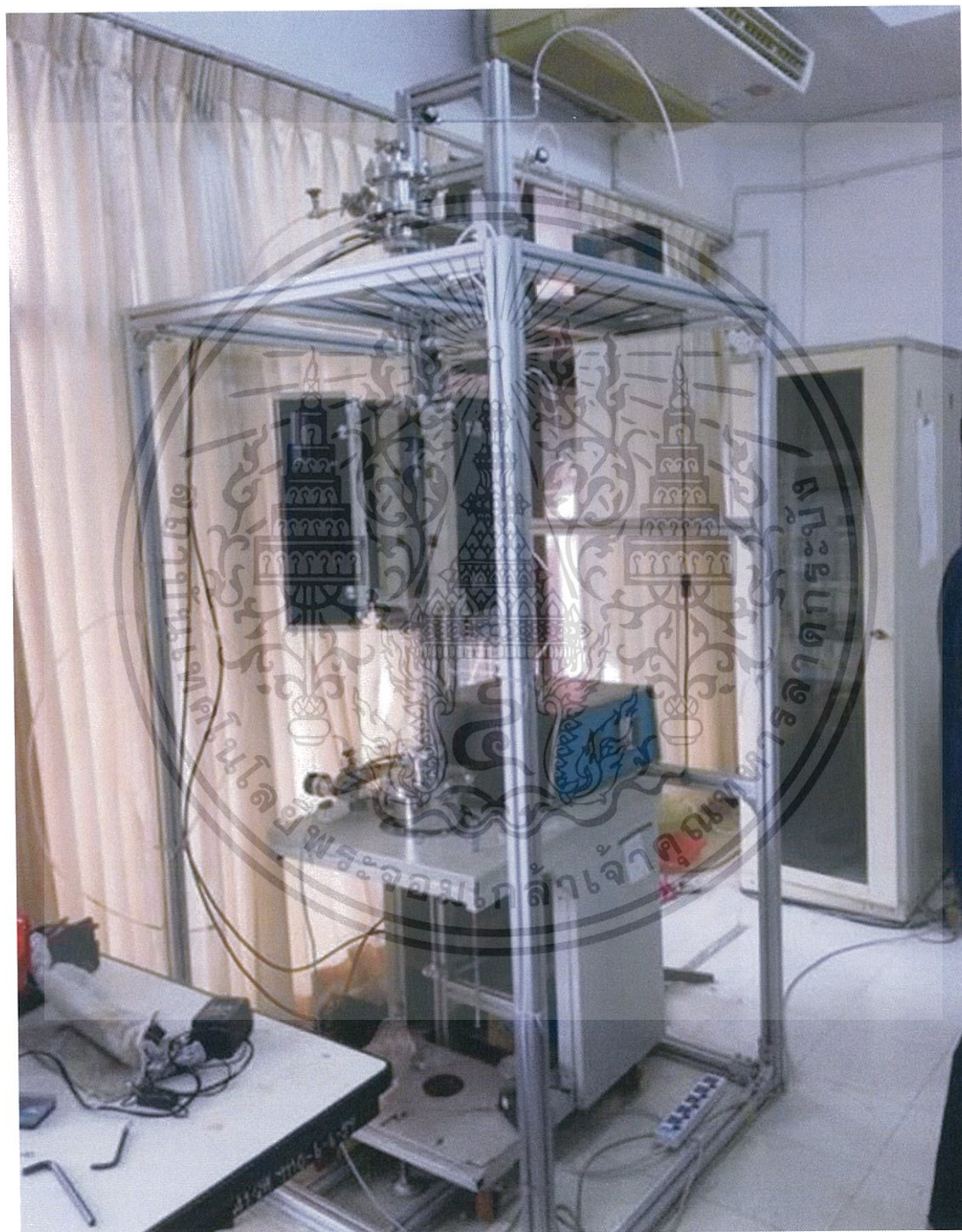
- 3.6.1 เปิดวาล์ว2 กับ วาล์ว1 บนเครื่องสังเคราะห์
- 3.6.2 สั่งเปิดแก๊สอาร์กอนใส่ค่าที่คอมตามต้องการ(sccm)แล้วสั่งRUN
- 3.6.3 ปิดวาล์ว3 อยู่บนสุดด้านหลังของเครื่องสังเคราะห์
- 3.6.4 เปิดเครื่องทำหมอก(อะตอมมิคเซอร์)
- 3.6.5 รอการพาหมอกประมาณ30นาที หรือตามระยะเวลาที่ต้องการ
- 3.6.6 ปิดหมอก รอ5 นาที ให้แก๊สอาร์กอนพาหมอกออกจนหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.6.7 ปิดวาล์ว2 และ1 อยู่บนสุดด้านหน้าของเครื่องสังเคราะห์
- 3.6.8 เปิดวาล์ว3 อยู่บนสุดด้านหลังของเครื่องสังเคราะห์
- 3.6.9 ปรับอาร์กอนที่โต๊ะ (1 L/min)
- 3.6.10 สั่งปิดแก๊สอาร์กอน(sccm) ที่คอมแล้วสั่งstop
- 3.6.11 ปิดวาล์วกลุ่มริมิโต๊ะด้านซ้าย ปิดวาล์วซ้าย(sccm)

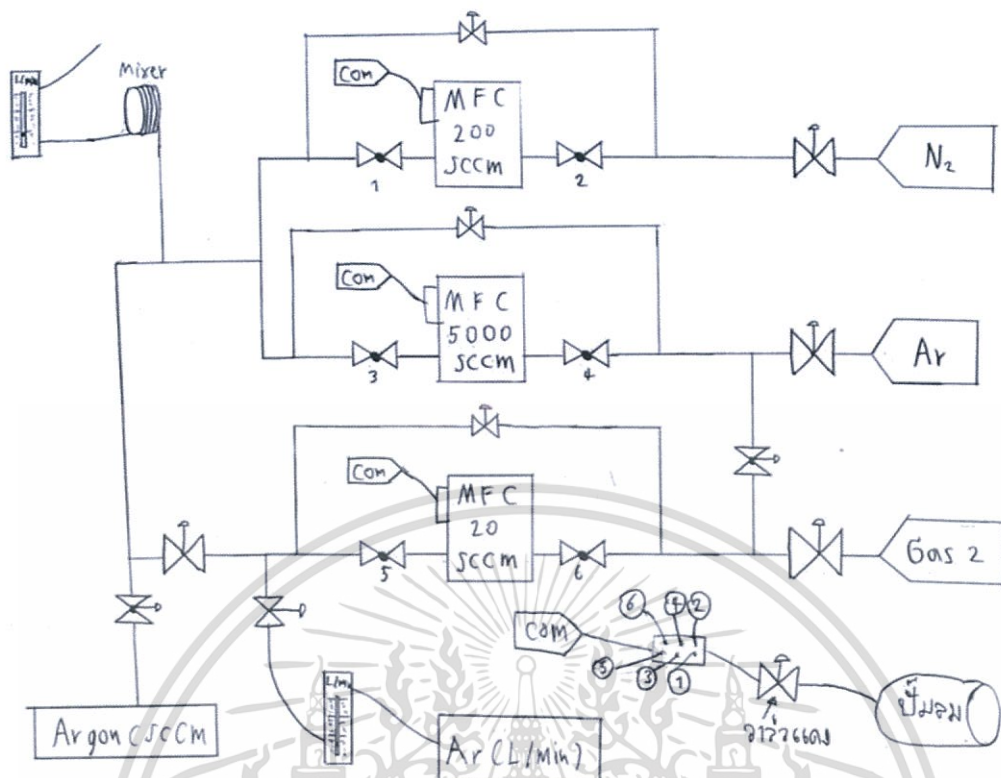
3.7 ลดอุณหภูมิอยู่ในสถานะที่แก๊สอาร์กอน1L/minไหลผ่านตลอด

- 3.7.1 ปรับลดอุณหภูมิโดยดึงอุณหภูมิลงทีละ200
- 3.7.2 นำหลอดทดลองทั้ง2ออกเพื่อทำความสะอาด
- 3.7.3 ปิดคอมปิดปั๊มลมปิดวาล์วลมสีแดง
- 3.7.4 เมื่ออุณหภูมิ450 ค่อยๆแง้มเตาเพื่อระบายความร้อน
- 3.7.5 เมื่ออุณหภูมิ250 ปิดอาร์กอน(1 L/min)
- 3.7.6 นำสายที่จุ่มน้ำออก
- 3.7.7 ปิดวาล์ว3 อยู่บนสุดด้านหลังของเครื่องสังเคราะห์
- 3.7.8 ปิดแก๊สอาร์กอนที่ประตูโดยปิดที่ถังแก๊สก่อนแล้วปิดที่เกจวัด
- 3.7.9 ปิดวาล์ว2 ทางด้านขวา
- 3.7.10 ปิดวาล์ว ระหว่างวาล์ว2และ 3 ทางด้านขวา
- 3.7.11 ปิดวาล์วBy Pass อันล่างสุด
- 3.7.12 เปิดวาล์วกลุ่มริมิโต๊ะด้านซ้ายปิดวาล์วขวา(1L/min)
- 3.7.13 เมื่ออุณหภูมิ210 ให้เอาแท่นฟิลเตอร์ออก
- 3.7.14 คลายแม่แรงนำแท่นออก
- 3.7.15 ไขที่หนีบคิป์โอริงและฟิลเตอร์ออก
- 3.7.16 เมื่ออุณหภูมิ200 ปิดเตาความร้อน
- 3.7.17 เมื่ออุณหภูมิ190 ปิดเครื่องหล่อเย็น
- 3.7.18 ปิดวาล์วท่อดำต่อด้วยวาล์วท่อส้ม
- 3.7.19 หมุนปิดปั๊มpump และ หมุนปิดปั๊มcompressor
- 3.7.20 กดปั๊มขาวเพื่อปิดเครื่อง
- 3.7.21 ดึงปลั๊กสับคัตเอาท์
- 3.7.22 เมื่ออุณหภูมิกติเซ็ดภายในท่อด้วยเอทานอล
- 3.7.23 ใช้ผ้าหุ้มกับขวดลวดแล้วสอดไปเซ็ดภายในท่อ

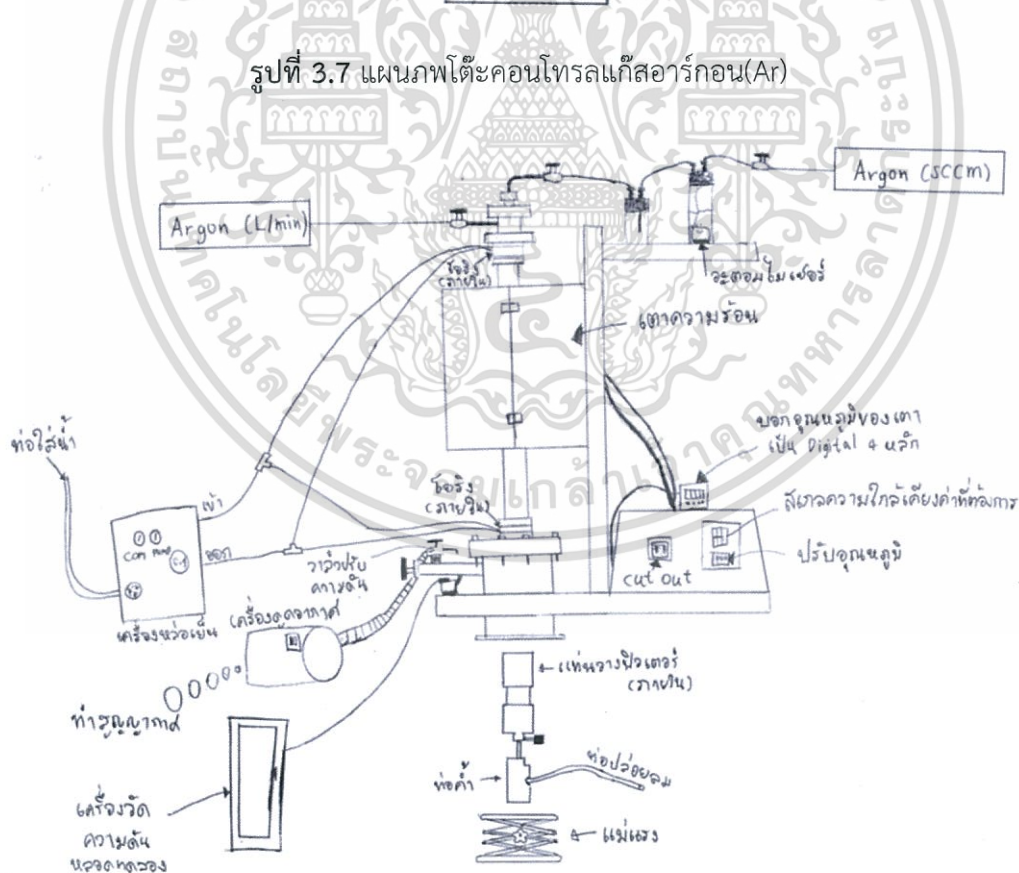


รูปที่ 3.6 เครื่องปลูกคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีCVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แผนภาพโต๊ะคอนโทรลแก๊สอาร์ก่อน(Ar)



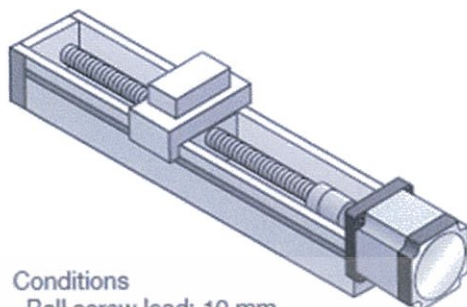
รูปที่ 3.8 แผนภาพเครื่องสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การสร้างเครื่องงอเซ็นเซอร์

การเตรียมอุปกรณ์ ประกอบด้วย

3.8.1 รางบอลสกรู



Conditions

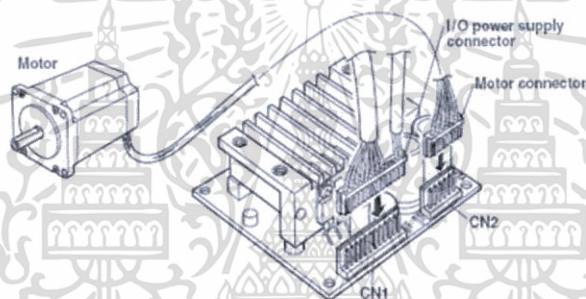
- Ball screw lead: 10 mm

- Motor to be used: **RK II** series

Stopping Accuracy $\pm 1.4 \mu\text{m}$

รูปที่ 3.9 รางบอลสกรู

3.8.2 มอเตอร์ และ วงจรขับมอเตอร์



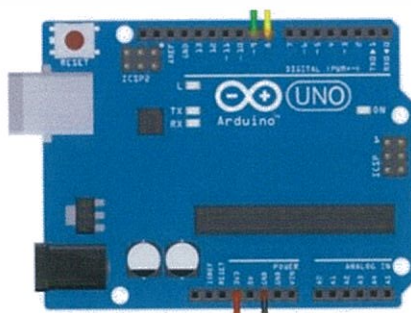
รูปที่ 3.10 มอเตอร์ และ วงจรขับมอเตอร์

3.8.3 คัปปลิงมอเตอร์



รูปที่ 3.11 คัปปลิงมอเตอร์(Coupling motor)

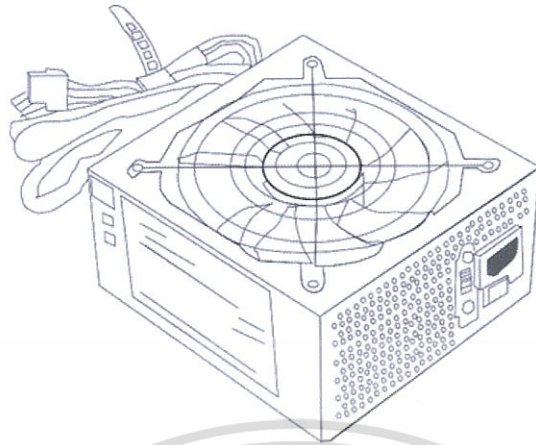
3.8.4 บอร์ดอาร์ดูโน้(Arduino)



รูปที่ 3.12 บอร์ด ArduinoUNO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.5 แหล่งจ่ายไฟ(power supply)



รูปที่ 3.13 แหล่งจ่ายไฟ(power supply)

3.9 การเขียนโค้ด Arduino ลงบอร์ดใช้โค้ดตามดังนี้

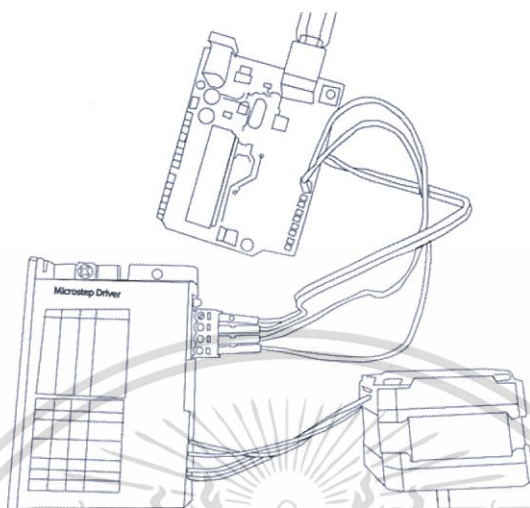
```
#include <Stepper.h>
const int stepsPerRevolution = 400
Stepper myStepper(stepsPerRevolution, 8, 9, 10, 11);
int stepCount = 0;
void setup() {
}
void loop() {
  int sensorReading = analogRead(A0);
  int motorSpeed = map(sensorReading, 0, 1023, 0, 100);

  if (motorSpeed > 0) {
    myStepper.setSpeed(motorSpeed);
    myStepper.step(stepsPerRevolution / 100);
  }
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

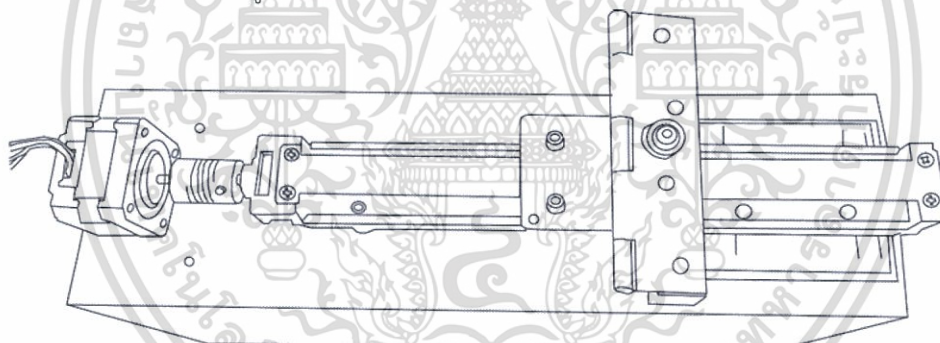
3.10 การต่ออุปกรณ์

3.10.1 นำสายไฟจากมอเตอร์ต่อเข้ากับวงจรขับมอเตอร์



รูปที่ 3.14 การต่อมอเตอร์กับวงจรขับมอเตอร์

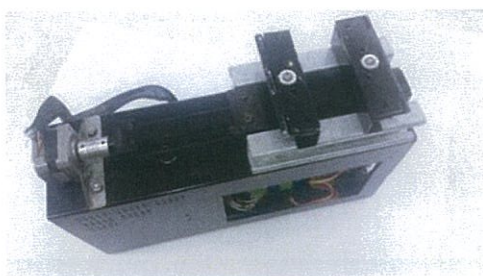
3.10.2 ต่อรางบอลสกรูกับมอเตอร์ด้วยคัปปีงมอเตอร์



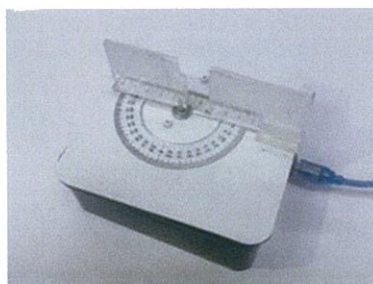
รูปที่ 3.15 การต่อรางบอลสกรูกับมอเตอร์

3.10.3 เชียนโค้ด Arduino ลงบอร์ดจากนั้นต่อสายจากอาร์ดูยโน่(Arduino) เข้าวงจรขับมอเตอร์

3.10.4 จ่ายไฟ 12 V จาก แหล่งจ่ายไฟ(power supply)



รูปที่ 3.16 เครื่องงอวัดความต้านทาน 1



รูปที่ 3.17 เครื่องงอวัดความต้านทาน 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11 ปรับปรุงโครงสร้างเซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor)

3.11.1 คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ที่ได้นบนแผ่นกรอง(Filter)เพื่อทดสอบคุณสมบัติในการงอ



รูปที่ 3.18 คาร์บอนนาโนทิวบ์บนแผ่นฟิลเตอร์(Filter)



รูปที่ 3.19 แผนภาพ โครงสร้างของ คาร์บอนนาโนทิวบ์บนแผ่นฟิลเตอร์(Filter)

3.11.2 เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่ 1

ฐาน – แผ่นใส, แผ่นกรอง(Filter)/ ขั้ว - เทปคาร์บอน, สายไฟ / ปิดคลุม – เทปใส

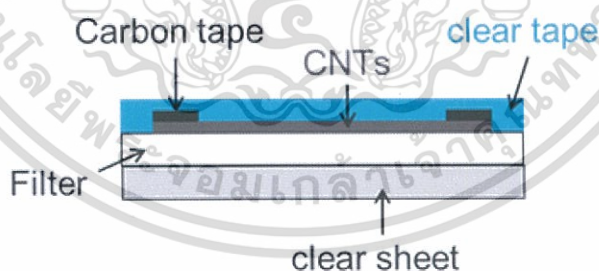
3.11.2.1 ตัดคาร์บอนนาโนทิวบ์ เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส 2.4cmX2.4cm

3.11.2.2 ตัดขั้วด้วยเทปคาร์บอน

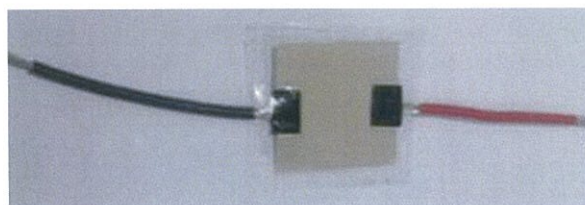
3.11.2.3 วางสายไฟบนเทปคาร์บอน

3.11.2.4 วางบนแผ่นใส

3.11.2.5 ปิดคลุมด้วยเทปใส

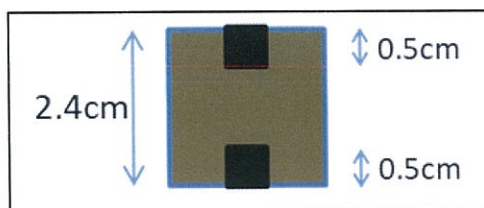


รูปที่ 3.20 แผนภาพ โครงสร้างของ เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด รุ่นที่ 1



รูปที่ 3.21 เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด รุ่นที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 ขนาดของ แผ่นเซ็นเซอร์(Sensor) รุ่นที่ 1

3.11.3 เซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่ 2

ฐาน - แผ่นใส / ขั้ว - เทปคาร์บอน, สายไฟ / ปิดคลุม - เทปใส

3.11.3.1 วางสายไฟแบบไม่มีฉนวนบนแผ่นใส

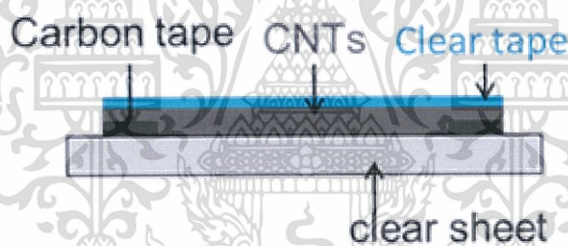
3.11.3.2 แปะเทปคาร์บอนทับคลุมสายไฟ

3.11.3.3 ตัดคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส 2.4cm X 2.4cm

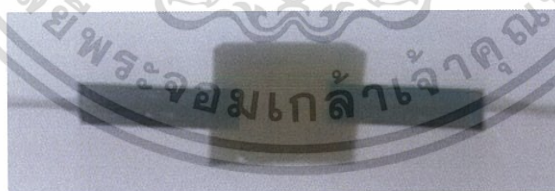
3.11.3.4 ปิดคลุมด้วยเทปใส เพื่อทำการลอกแผ่นกรอง(Filter)ออก

3.11.3.5 นำคาร์บอนนาโนทิวบ์บนเทปใสแปะทับลงไป

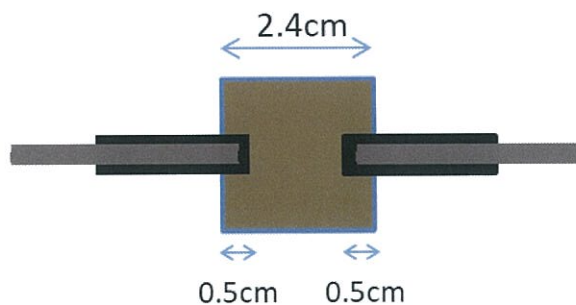
3.11.3.6 ปิดคลุมด้วยเทปใส



รูปที่ 3.23 แผนภาพ โครงสร้างของ เซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด รุ่นที่ 2



รูปที่ 3.24 เซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด รุ่นที่ 2



รูปที่ 3.25 ขนาดของ แผ่นเซ็นเซอร์(Sensor) รุ่นที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11.4 เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่ 3

ฐาน – แผ่นใส / ไข้ว – ทองแดง / ปิดคลุม – เทปใส

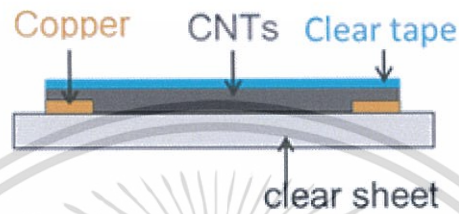
3.11.4.1 ตัดคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า 0.8cm X 2.4cm

3.11.4.2 เปิดคลุมด้วยเทปใส เพื่อทำการลอกแผ่นกรอง(Filter)ออก

3.11.4.3 ติดไข้วด้วยทองแดง

3.11.4.4 นำไปแปะลงบนแผ่นใส

3.11.4.5 ปิดคลุมด้วยเทปใส



รูปที่ 3.26 แผนภาพ โครงสร้างของ เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด รุ่นที่ 3



รูปที่ 3.27 เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด รุ่นที่ 3

2.4cm

0.5cm 0.5cm

รูปที่ 3.28 ขนาดของ แผ่นเซ็นเซอร์(Sensor) รุ่นที่ 3

3.11.5 เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่ 4

ฐาน – Polydimethylsiloxane(PDMS), ฟิล์มใส(Laminate film) / ไข้ว – กาวเงิน, สายไฟ / ปิดคลุม – Polydimethylsiloxane(PDMS)

3.11.5.1 นำคาร์บอนนาโนทิวบ์บนแผ่นกรอง(Filter)ไปเคลือบใส

3.11.5.2 ตัดคาร์บอนนาโนทิวบ์บนแผ่นกรอง(Filter) ที่ถูกเคลือบใสแล้ว ให้เป็น

สี่เหลี่ยมผืนผ้า 0.8cm X 2.4cm

3.11.5.3 ลอกฟิลเตอร์(Filter)ออก จากแผ่นเคลือบ

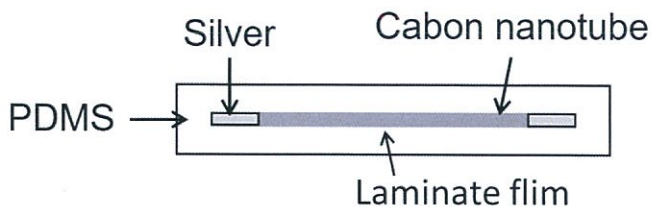
3.11.5.4 วางลงบนฐานยาง Polydimethylsiloxane(PDMS)

3.11.5.5 ทาไข้วด้วยเงินทั้ง 2 ด้าน

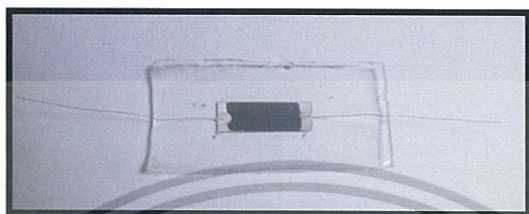
3.11.5.6 วางสายไฟพาดผ่าน

3.11.5.7 ปิดคลุมด้วย Polydimethylsiloxane(PDMS) ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

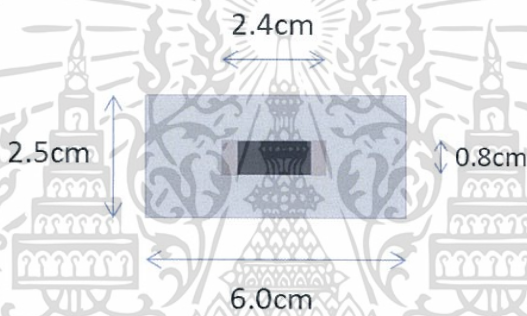
ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 แผนภาพ โครงสร้างของ เซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด รุ่นที่ 4



รูปที่ 3.30 เซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด รุ่นที่ 4

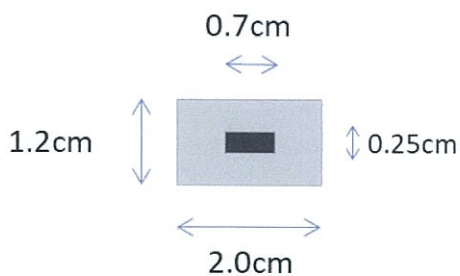


รูปที่ 3.31 ขนาดของ แผ่นเซ็นเซอร์(Sensor) รุ่นที่ 4

3.11.6 เซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่ 4 ขนาดเล็ก
เป็นการทดลองสร้าง Strain sensor ให้มีขนาดเล็กที่สุดโดยประมาณ



รูปที่ 3.32 เซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด รุ่นที่ 4 ขนาดเล็ก



รูปที่ 3.33 ขนาดของ แผ่นเซ็นเซอร์(Sensor) รุ่นที่ 4 ขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือทรัพย์สินทางปัญญาอื่นใดในเมื่อผู้ใดนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

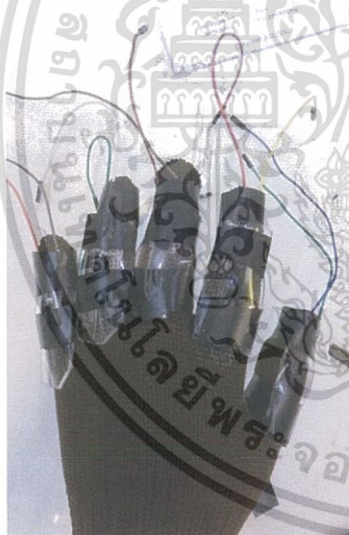
3.12 ประยุกต์เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) เข้ากับอุปกรณ์อื่น

นำเซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) ที่ได้มาติดเข้ากับถุงมือในแต่ละนิ้ว แล้วนำมาประมวลผล หาค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปจากการงอ แล้วนำค่ามาประยุกต์ใช้เข้ากับแขนกลผ่านการควบคุมมอเตอร์

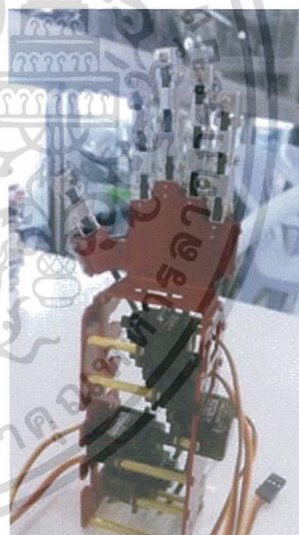


รูปที่ 3.34 เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่4 ในการนำไปประยุกต์ใช้กับแขนกล

ทำการสร้างเซ็นเซอร์ขึ้นมา เพื่อใช้ติดกับถุงมือเป็นถุงมือควบคุมที่จะส่งค่าการงอของเซ็นเซอร์ไปสั่งงานแขนกล



รูปที่ 3.35 ถุงมือควบคุม



รูปที่ 3.36 แขนกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลอง

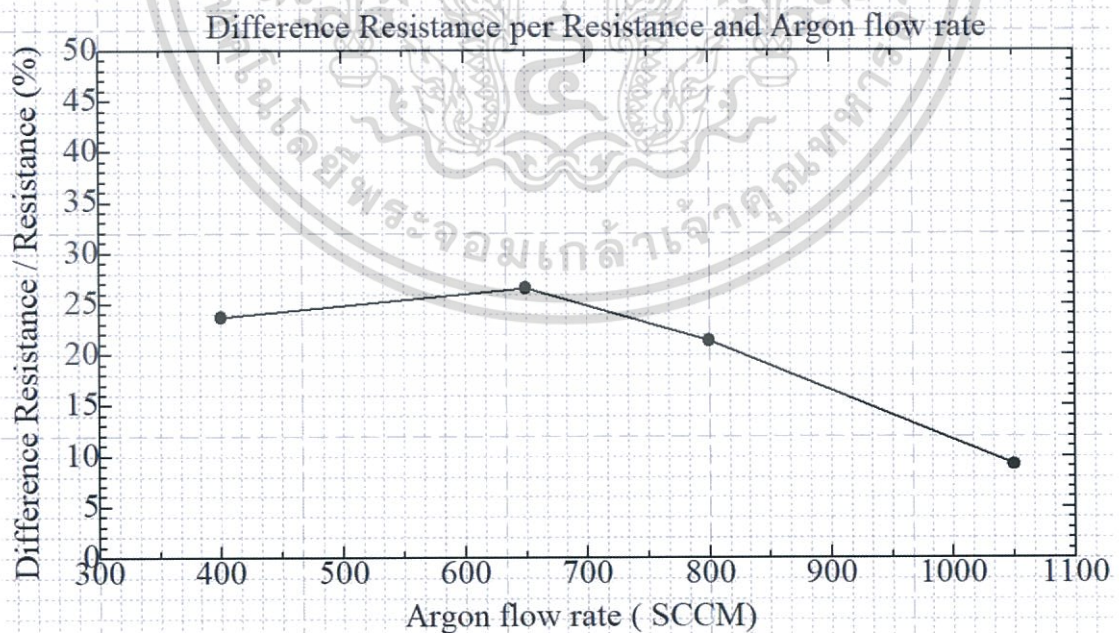
ในขั้นตอนการทดลองจะแบ่งการทดลองออกเป็น 4 หัวข้อ ได้ดังนี้

1. การทดลองหาค่าเงื่อนไขการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่ดีที่สุดในการนำมาทำเป็นเซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor)
2. การสร้างเครื่องจ่อเซ็นเซอร์
3. การปรับปรุงโครงสร้างเซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor)
4. ประยุกต์เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) เข้ากับอุปกรณ์อื่น

4.2 ผลการทดลอง

4.2.1 ผลการทดลองหาค่าเงื่อนไขการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่ดีที่สุดในการนำมาทำเป็นเซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor)

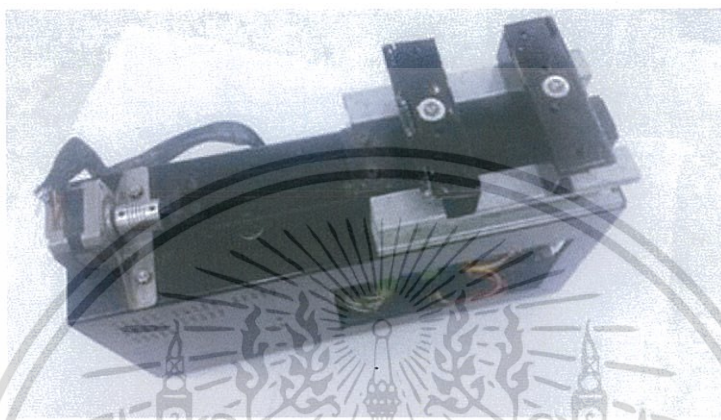
ในการทดลองจะทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เงื่อนไข เอทานอล(Ethanol) 80g, เฟอโรซีน(Ferrocene) 0.25%เอทานอล, อุณหภูมิ 950 °C, นาน 30นาที และเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน(Argon flow rate) 400, 650, 800, 950 SCCM นำมาจ่อ และ ไม้จ่อสลับกัน วัดค่าความต้านทาน แล้วพลอตกราฟความสัมพันธ์ ระหว่าง $\Delta R/R$ กับ อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน(Argon flow rate)



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ ระหว่าง $\Delta R/R$ กับ อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน(Argon flow rate)

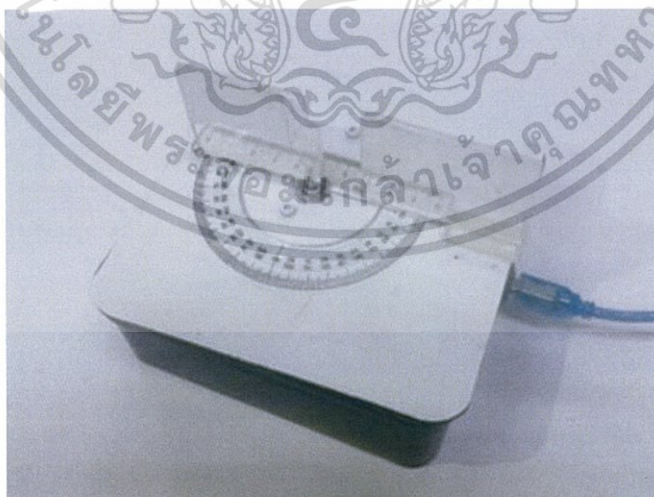
4.2.2 ผลการสร้างเครื่องงอเซ็นเซอร์

จากการทดสอบเครื่อง สามารถป้อนคำสั่งให้เครื่องวัดความต้านทานมีระยะการเคลื่อนตัวได้ดีควบคุมด้วย บอร์ดและโปรแกรมจากอาร์ดูโน้(Arduino Program) และสามารถวัดค่าความต้านทานขณะถูกงอได้แต่มีข้อจำกัดที่ การงอของเครื่องงอเซ็นเซอร์ 1 เป็นการงอเฉพาะระยะยืดหดเท่านั้น



รูปที่ 4.2 เครื่องงอเซ็นเซอร์ 1

จากการทดสอบเครื่อง สามารถป้อนคำสั่งให้เครื่องวัดความต้านทานมีระยะการงอได้ดีควบคุมด้วย บอร์ดและโปรแกรมจากอาร์ดูโน้(Arduino Program) และสามารถวัดค่าความต้านทานขณะถูกงอได้ ด้วยเครื่องงอเซ็นเซอร์ 2 นี้ เป็นการงอตามองศาการงอ ซึ่งทำให้สามารถใช้วิเคราะห์เซ็นเซอร์ได้ง่ายขึ้น



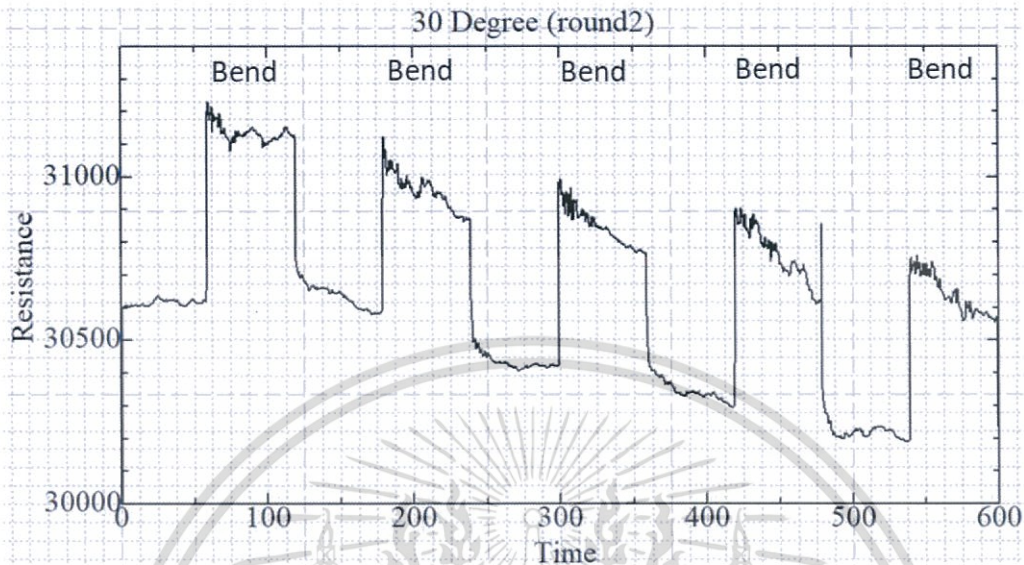
รูปที่ 4.3 เครื่องงอเซ็นเซอร์ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

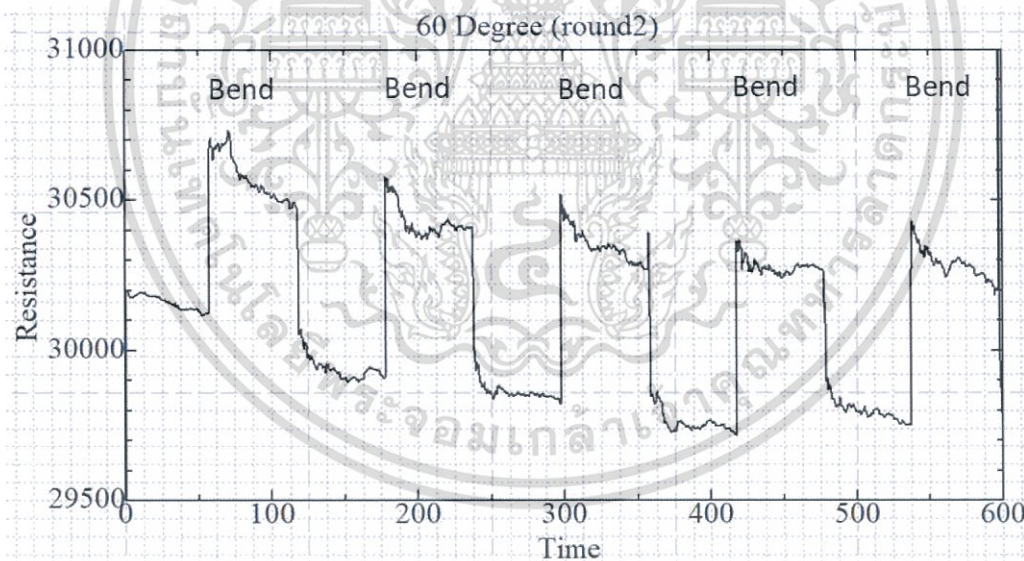
4.2.3 ผลการปรับปรุงโครงสร้างเซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor)

4.2.3.1 คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ บนแผ่นกรอง(Filter)

เมื่อทำการวัดความต้านทานจากการงอแล้วพลอตกราฟความสัมพันธ์



รูปที่ 4.4 กราฟความต้านทานจากการงอคาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่ 30° ทุก 60 วินาที กับ เวลา



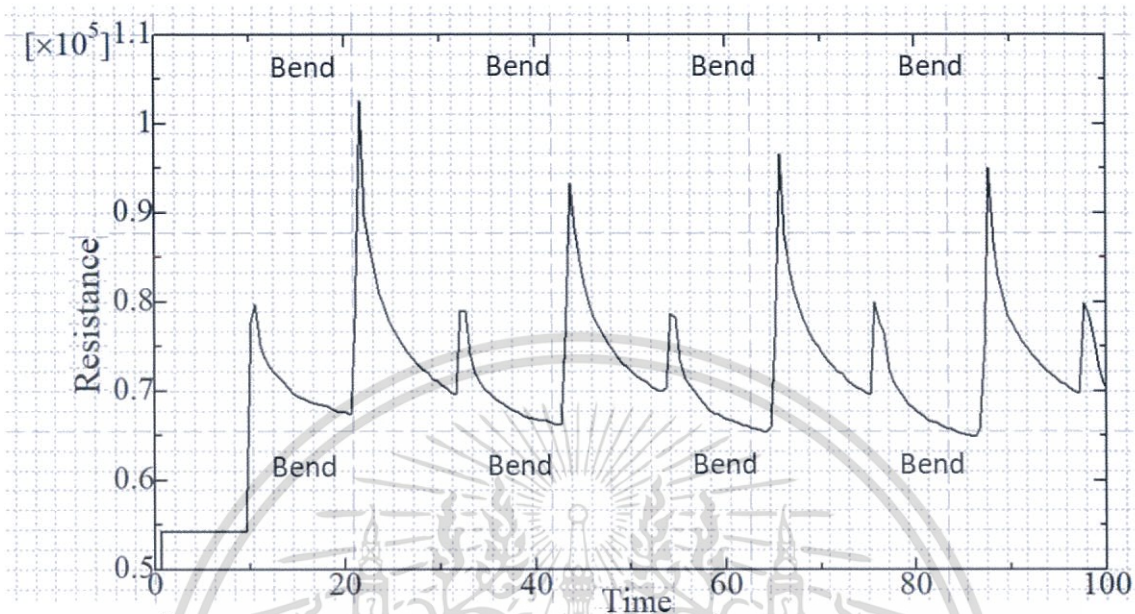
รูปที่ 4.5 กราฟความต้านทานจากการงอคาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่ 60° ทุก 60 วินาที กับ เวลา

จากการวิเคราะห์พบว่าการงอคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ บนแผ่นกรอง (Filter) จะทำให้ค่าความต้านทานเพิ่มสูงขึ้น

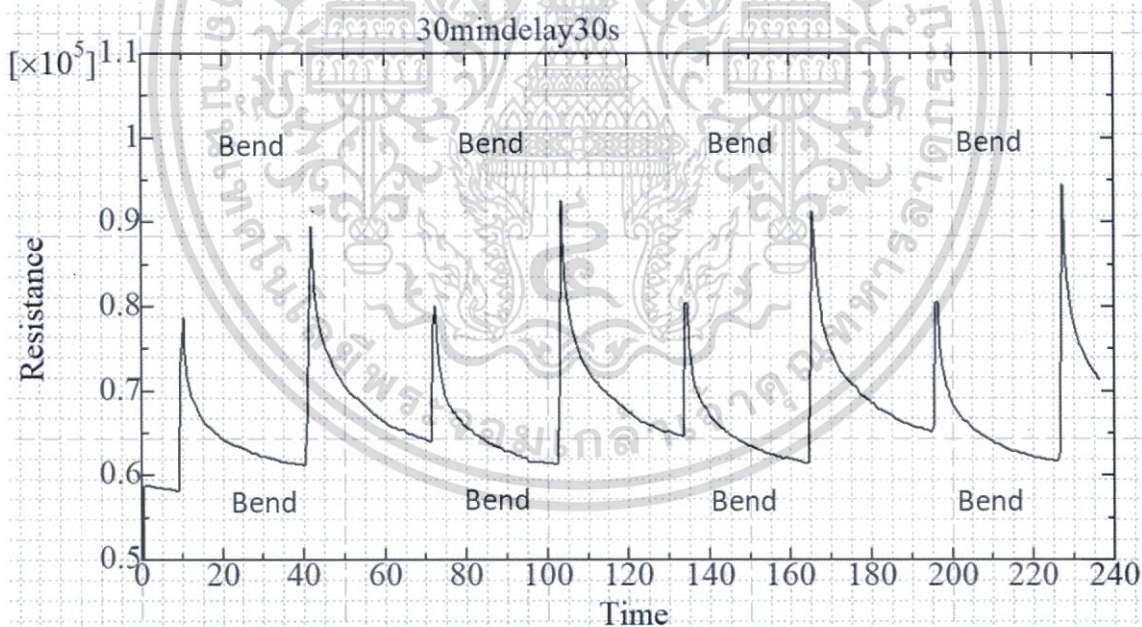
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.2 เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่ 1

เมื่อนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ บนแผ่นกรอง(Filter) มาติดซ้ำ ทำการวัดความต้านทานจากการงอ และ มาพลอตกราฟความสัมพันธ์



รูปที่ 4.6 กราฟความต้านทานจากการงอเซ็นเซอร์รุ่นที่ 1 ทุก 10 วินาที กับ เวลา



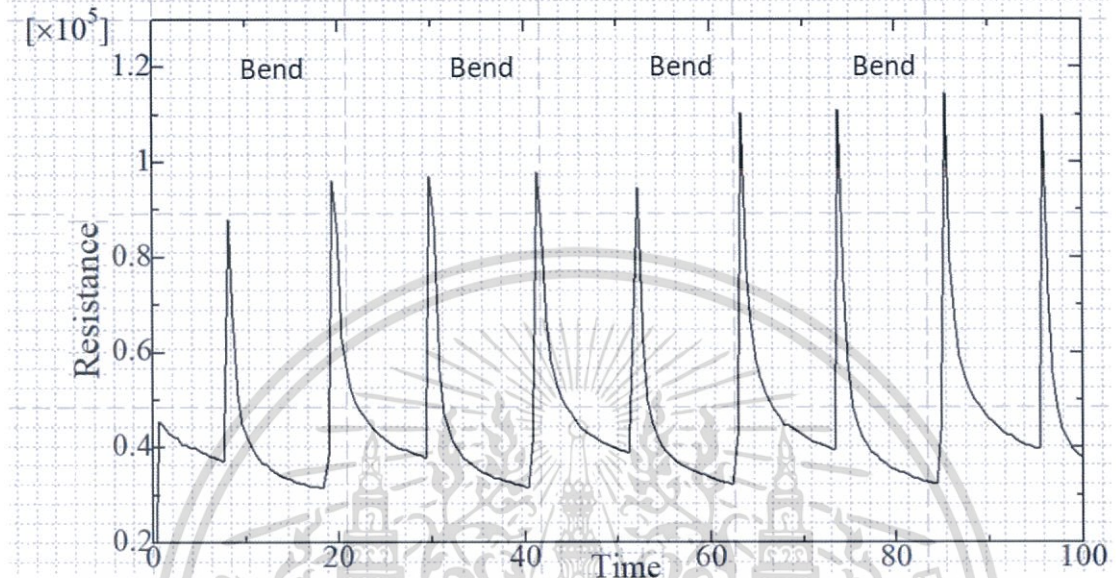
รูปที่ 4.7 กราฟความต้านทานจากการงอเซ็นเซอร์รุ่นที่ 1 ทุก 30 วินาที กับ เวลา

จากการวิเคราะห์พบว่าเซ็นเซอร์รุ่นที่ 1 มีค่าความผิดพลาดเนื่องจากค่าความต้านทานในช่วงที่ไม่ถูกงอ มีค่าเพิ่มและกลับมาน้อยกว่าค่าความต้านทานเมื่อไม่งอ ซึ่งไม่เป็นไปตามสมมุติฐาน เมื่อมีการทำงานนานขึ้นค่าจะลดลง เนื่องจากเกิดจากรอยพับเทปใสและรอยต่อของเทปคาร์บอนกับตัวแผ่นกรอง(Filter)

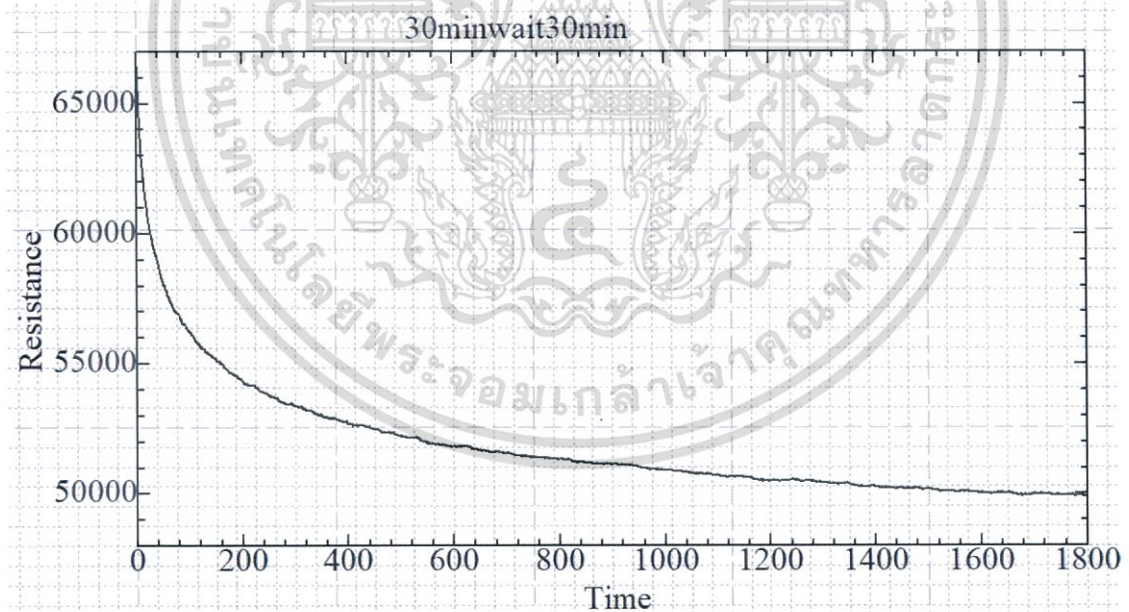
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.3 เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่ 2

หลังจากทำการนำเซ็นเซอร์รุ่นที่ 1 มาปรับปรุงด้วยการนำแผ่นกรอง(Filter) ออก เนื่องจากแผ่นกรอง(Filter) มีการบังอแดกหักง่ายและมีคุณสมบัติที่ติดไฟง่ายและทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า วัดความต้านทานจากการงอแล้วพลอตกราฟความสัมพันธ์



รูปที่ 4.8 กราฟความต้านทานจากการงอเซ็นเซอร์รุ่นที่ 2 ทุก 10 วินาที กับ เวลา



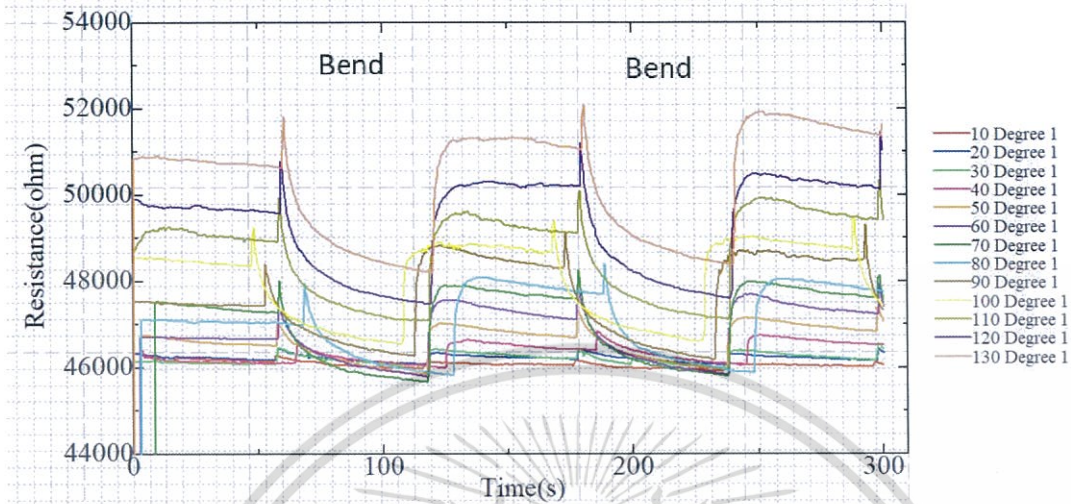
รูปที่ 4.9 กราฟความต้านทานจากการงอเซ็นเซอร์รุ่นที่ 2 ที่ถูกปล่อยทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง

จากการวิเคราะห์ พบว่าเซ็นเซอร์ รุ่นที่ 2 ยังคงคุณสมบัติเดียวกันกับ เซ็นเซอร์ รุ่นที่ 1 คือค่าความต้านทานในช่วงที่ไม่ถูกงอ มีค่าเพิ่มและกลับมาน้อยกว่าค่าความต้านทาน เมื่อไม่งอ และพบว่าค่าความต้านทานมีการลดลงตลอดเวลาแม้ไม่ถูกงอ

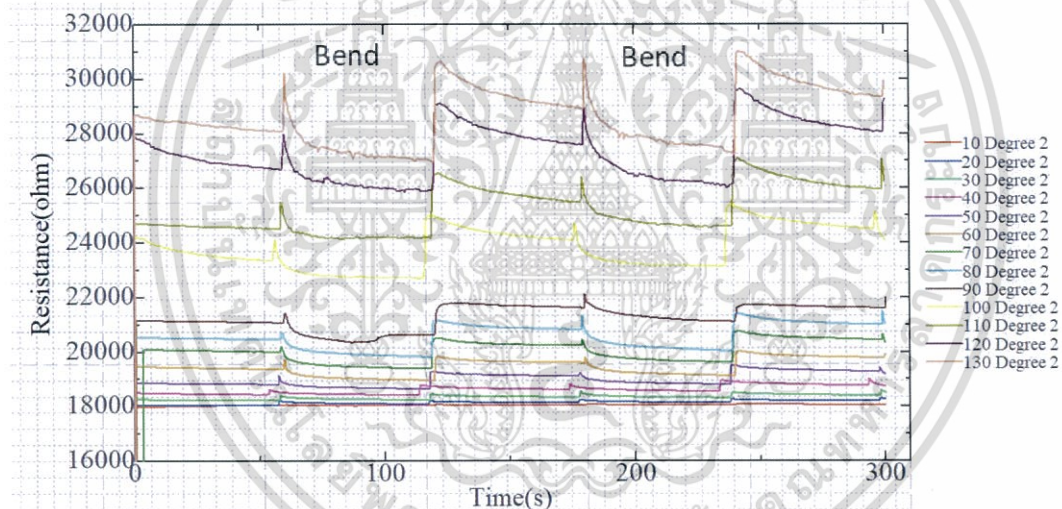
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.4 เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่ 3

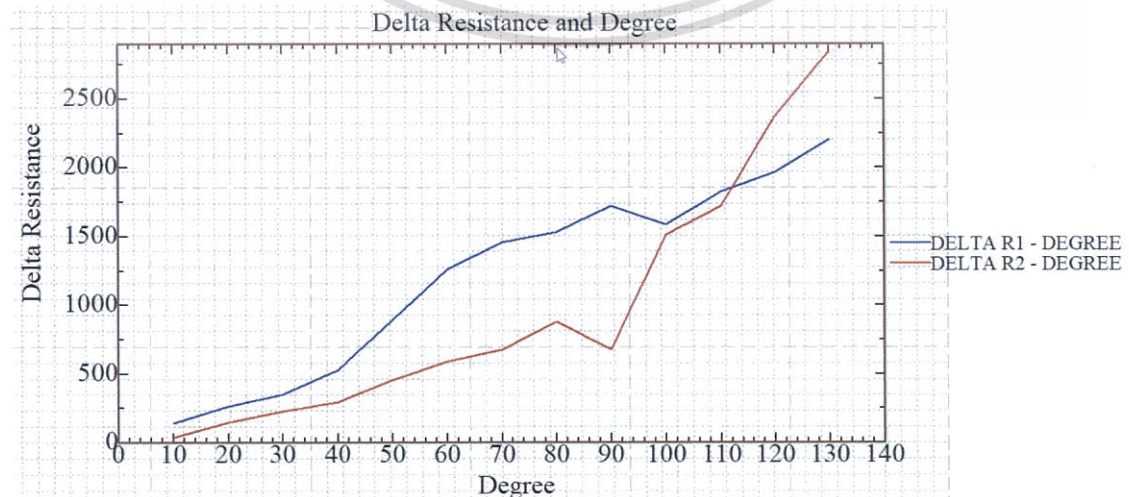
ทำการเปลี่ยนแปลงขั้วจากเทปคาร์บอนเป็นขั้วทองแดง เมื่อทำการวัดความต้านทานจากการงอแล้วพลอตกราฟความสัมพันธ์



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ความต้านทานจากการงอที่ 10° - 130° ทุก 60 วินาที กับ เวลา (รอบที่1)



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ความต้านทานจากการงอที่ 10° - 130° ทุก 60 วินาที กับ เวลา (รอบที่2)

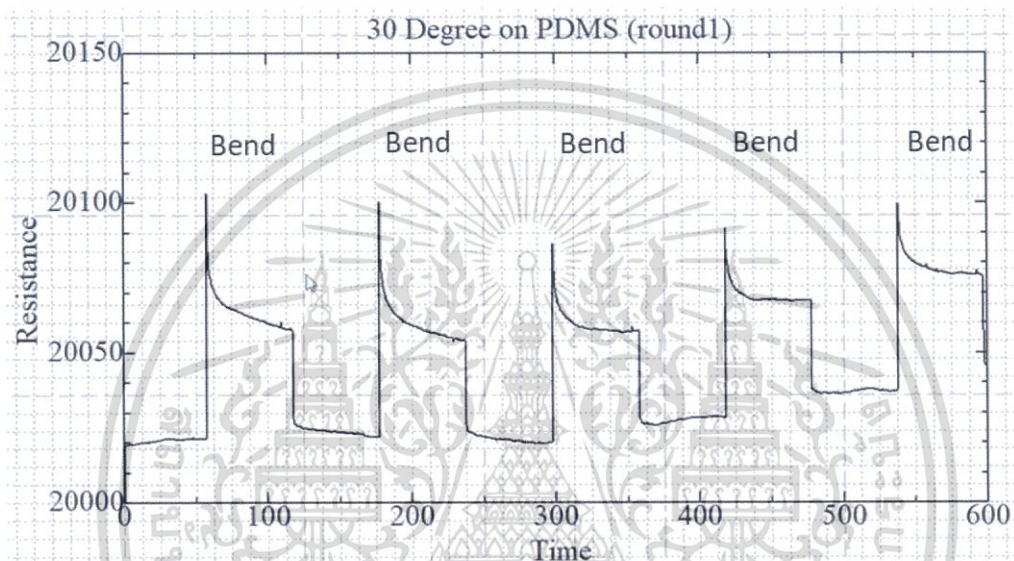


เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปจากการงอที่ 10° ถึง 130° ทุก 60 วินาที กับ เวลา (รอบที่ 1) ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

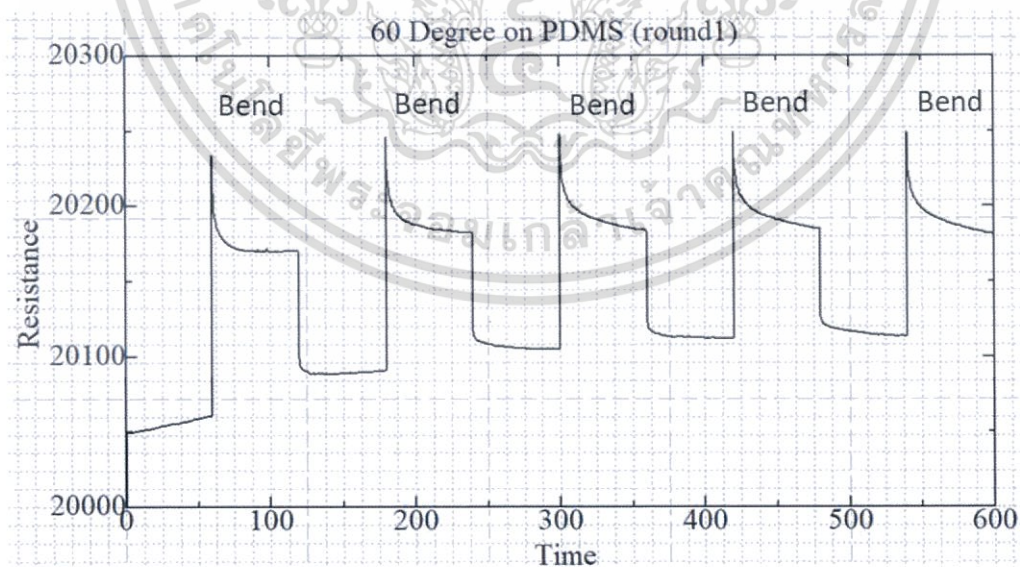
จากการวิเคราะห์ พบว่าเซ็นเซอร์ รุ่นที่ 3 ไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้ ค่าความต้านทานในช่วงที่ไม่ถูกงอ ยังคงมีค่าเพิ่มและกลับมาน้อยกว่าค่าความต้านทานเมื่อไม่งอ และจากการงอด้วยเครื่องงอ 2 ตามองศาการงอแล้ว พบว่าค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไป มีลักษณะที่เพิ่มขึ้นไปตามค่าองศาการงอด้วย ซึ่งคุณสมบัตินี้ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นเซ็นเซอร์ได้

4.2.3.5 เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) รุ่นที่ 4

ทำการเปลี่ยนแปลงขั้วจากเทปคาร์บอนเป็นขั้วทองแดง เมื่อทำการวัดความต้านทานจากการงอแล้วพลอตกราฟความสัมพันธ์

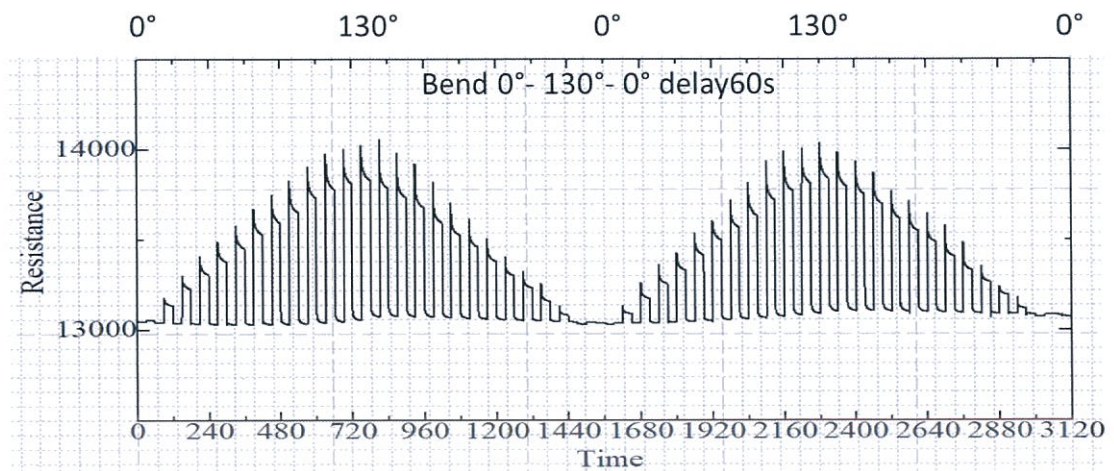


รูปที่ 4.13 กราฟความต้านทานจากการงอที่ 30° ทุก 60 วินาที กับ เวลา

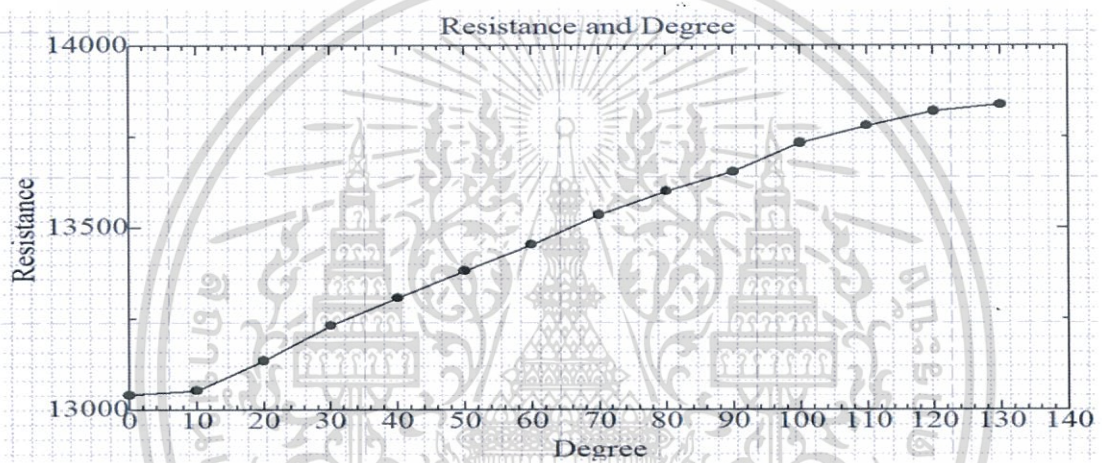


รูปที่ 4.14 กราฟความต้านทานจากการงอที่ 60° ทุก 60 วินาที กับ เวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กราฟความต้านทานจากการงอที่ $0^\circ - 130^\circ - 0^\circ$ ทุก 60 วินาที กับ เวลา

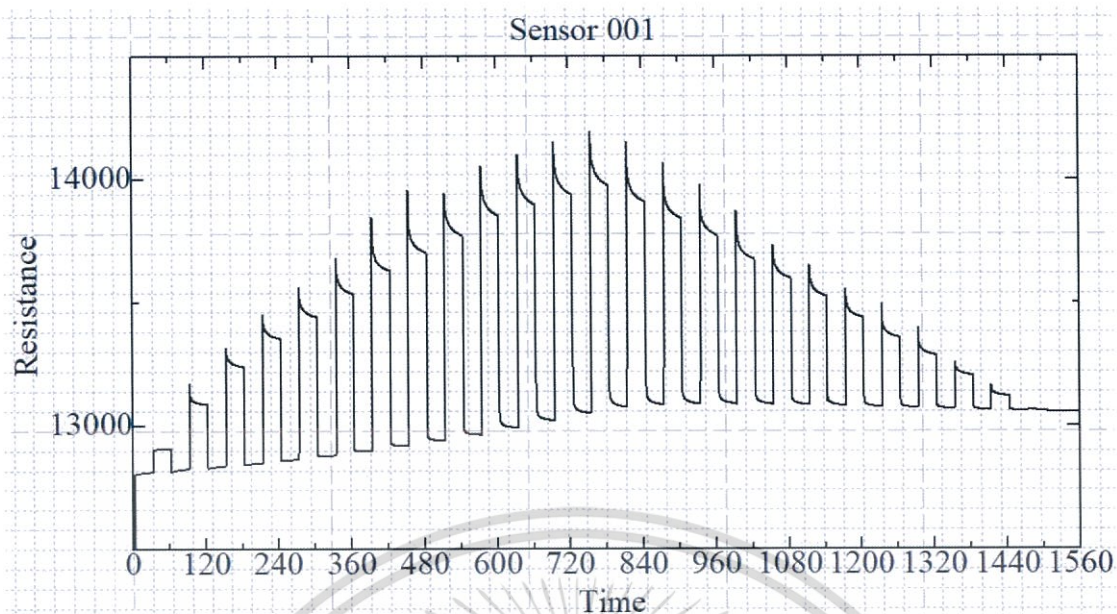


รูปที่ 4.16 กราฟความต้านทาน กับ องศาที่งอ

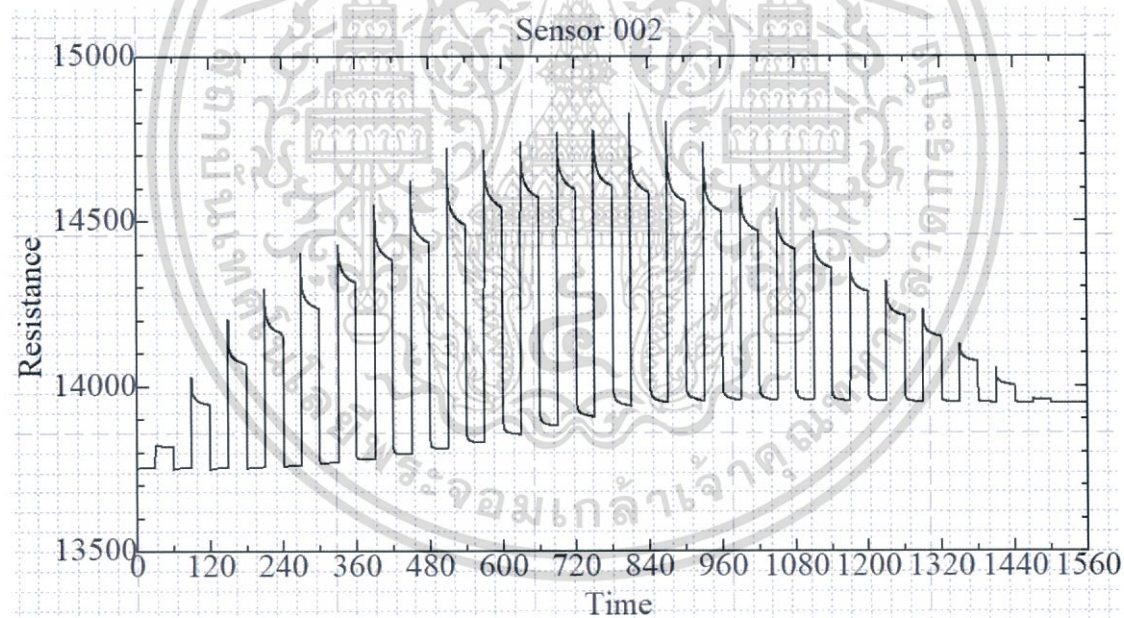
จากการวิเคราะห์ พบว่าเซ็นเซอร์ รุ่นที่ 4 เมื่อองศาที่มีการเพิ่มขึ้น เป็นไปตาม การงอของคาร์บอนนาโนทิวบ์บนแผ่นกรอง(Filter) ค่ามีความเสถียรและ ความต้านทานสูงขึ้น ตามองศาการงอ ในช่วงแรกของการใช้งานมีความไม่เสถียรเล็กน้อยและกลับสู่สภาพปกติ เมื่อ ถูกงอในระดับหนึ่ง แต่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ที่มีความยืดหยุ่นได้

4.2.4 ประยุกต์เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) เข้ากับอุปกรณ์อื่น

หลังจากได้เซ็นเซอร์วัดแรงตึงเครียด(Strain sensor) ที่เหมาะสมแล้วนั้นคือ รุ่นที่ 4 จึงนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ ในที่นี้ใช้กับแขนกล ด้วยเซ็นเซอร์ 5 ตัว และทดสอบการงอจากการ งอ $0^\circ - 130^\circ - 0^\circ$ ตามเวลา

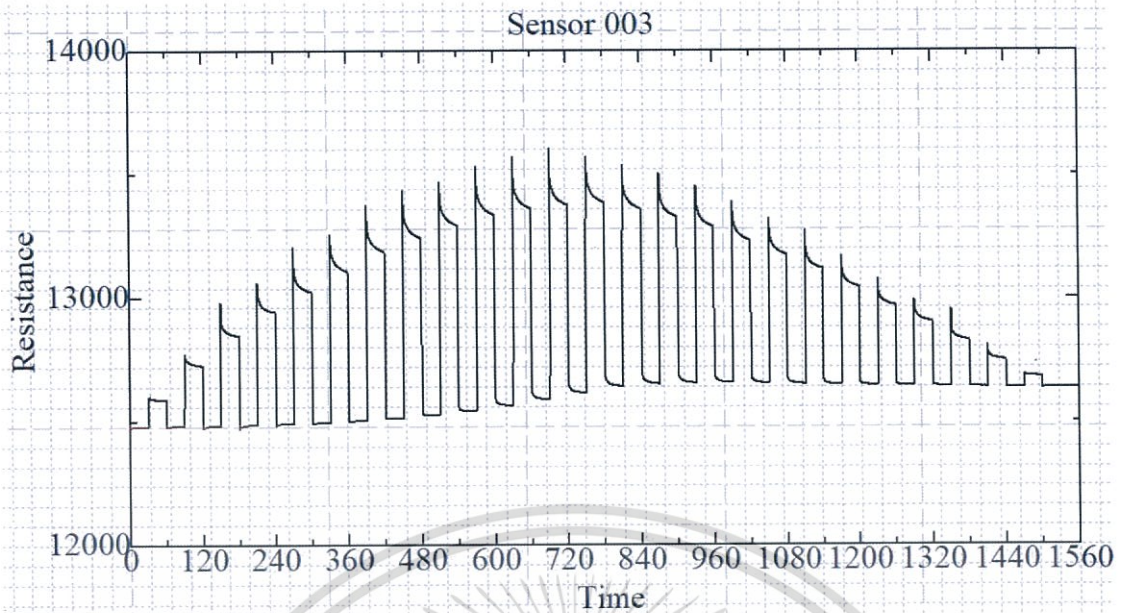


รูปที่ 4.17 กราฟความต้านทานจากการงอที่ $0^\circ - 130^\circ - 0^\circ$ ทุก 60 วินาที กับ เวลา (ตัวที่001)

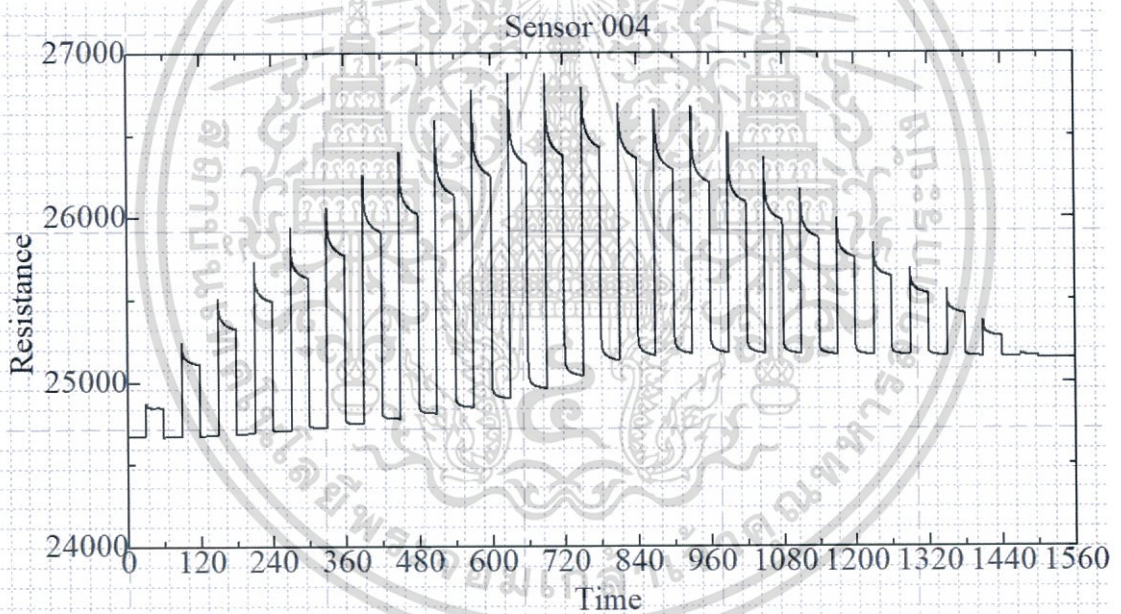


รูปที่ 4.18 กราฟความต้านทานจากการงอที่ $0^\circ - 130^\circ - 0^\circ$ ทุก 60 วินาที กับ เวลา (ตัวที่002)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

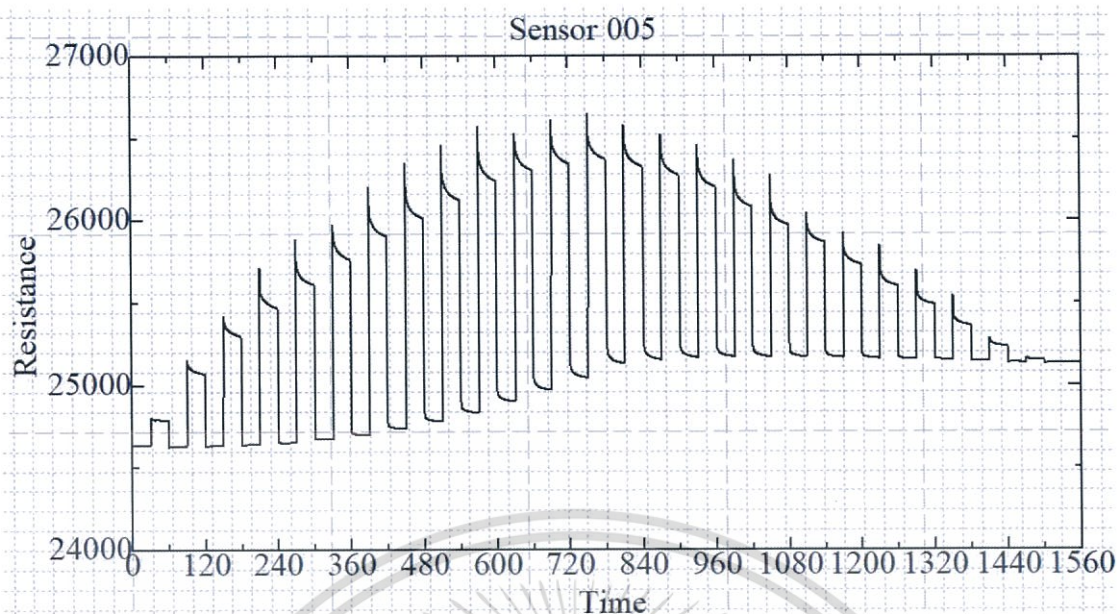


รูปที่ 4.19 กราฟความต้านทานจากการงอที่ $0^\circ - 130^\circ - 0^\circ$ ทุก 60 วินาที กับ เวลา (ตัวที่003)

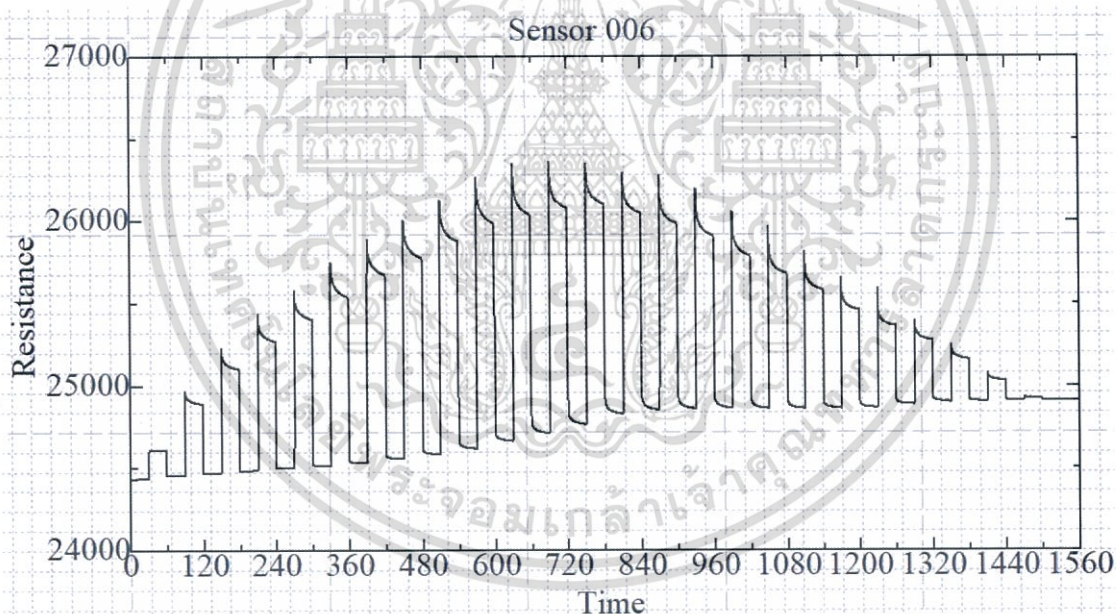


รูปที่ 4.20 กราฟความต้านทานจากการงอที่ $0^\circ - 130^\circ - 0^\circ$ ทุก 60 วินาที กับ เวลา (ตัวที่004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 กราฟความต้านทานจากการงอที่ $0^\circ - 130^\circ - 0^\circ$ ทุก 60 วินาที กับ เวลา (ตัวที่005)



รูปที่ 4.22 กราฟความต้านทานจากการงอที่ $0^\circ - 130^\circ - 0^\circ$ ทุก 60 วินาที กับ เวลา (ตัวที่006)

จากการทดลองและนำใช้งานจริงโดยสั่งงานผ่านโปรแกรมอาร์ดูইโน(Arduino Program) เพื่อไปหมุน Step motor พบว่าสามารถใช้งานได้แต่ยังมีความผิดพลาดจากการใช้งานซ้ำๆ ทำให้ค่าความต้านทานมีแนวโน้มที่สูงขึ้นไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการนี้มุ่งเน้นการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ ไปประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด เราได้ทำการสร้างและปรับปรุง จนสามารถนำมาใช้กับงานที่ต้องใช้ความยืดหยุ่นสูงได้ ซึ่งในที่นี้เราได้นำมาทดสอบใช้กับแขนกลและสามารถนำมาใช้งานได้สำเร็จในขอบเขตข้อจำกัดที่สามารถพัฒนาได้ต่อไป

จากการทดลองที่ 1 พบว่าการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่เอทานอล(Ethanol) 80g, เฟอโรซีน(Ferrocene) 0.25%เอทานอล, อุณหภูมิ 950 °C, และเปลี่ยนแปลงค่า อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน(Argon flow rate) 650 SCCM นาน 30 นาที จะได้เคราะห้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีความความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อถูกงอ

จากการทดลองที่ 2 การสร้างเครื่องวัดความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ 1 สามารถสร้างเครื่องวัดออกมาได้โดยที่ระยะเวลาการเลือนของรางไม่เกินจนทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ขาด มีการทำงานที่ต่อเนื่องไม่สะดุดและสามารถต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อวัดความต้านทานที่ได้จากการงอโดยพล็อตเป็นกราฟรวมถึงเครื่องวัดความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ 2 สามารถวัดโดยเทียบกับองค์ประกอบได้ปกติโดยมีความผิดพลาดที่ 3 องศา

จากการทดลองที่ 3 พบว่าการงอคาร์บอนนาโนทิวบ์โดยปกตอบนแผ่นกรอง(Filter) จะทำให้ค่าความต้านทานเพิ่มสูงขึ้น เมื่อทำการปรับปรุง พบว่า วัสดุที่ส่งผลต่อความผิดพลาดในการสร้างเซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด(Strain sensor) คือ 1. ฐานรองที่เป็นแผ่นกรอง(Filter) ติดไฟง่าย แดกหักง่ายและเกิดรอย 2. เทปคาร์บอนที่ส่งผลต่อความเสถียรของเซ็นเซอร์ 3. ขั้วที่ต่อไม่แนบสนิทกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ และ เซ็นเซอร์ที่ดีที่สุด ที่สามารถนำมาใช้งานได้ คือ เซ็นเซอร์รุ่นที่ 4 ซึ่งมีโครงสร้าง ประกอบด้วย(ฐาน – Polydimethylsiloxane(PDMS), ฟิล์มใส(Laminate film) /ขั้ว – กาวเงิน, สายไฟ /ปิดคลุม – Polydimethylsiloxane(PDMS))

จากการทดลองที่ 4 สามารถนำไปใช้งานได้ แต่มีข้อเสียที่การใช้งานซ้ำหลายรอบ ยังคงเกิดค่าความผิดพลาดที่ค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากความเครียดสะสมในตัวเซ็นเซอร์วัดแรงดึงเครียด(Strain sensor) ดังนั้น จึงต้องปรับค่าก่อนทุกครั้งที่จะใช้งาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- พัฒนาระบบการวัดและเครื่องมือวัด
- พัฒนาระบบโครงสร้างให้มีความเสถียรมากขึ้น
- พัฒนาการตอบสนองต่อการกดและยืด
- พัฒนาการความทนทานและการใช้ซ้ำ
- พัฒนาการนำไปประยุกต์ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Prof. Ruggero Vaglio, Dr. Rita Rizzoli, Dr. Vincenzo Vinciguerra. Chemical vapor deposition of carbon nanotubes on iron-patterned substrates: towards a control of the positioning and structure. Ph.D Thesis of MARIA FORTUNA BEVILACQUA (2005)
- [2] Le Cai, Li Song, Pingshan Luan, Qiang Zhang, Nan Zhang, ingqing Gao, DuanZhao, Xiao Zhang, Min Tu, Feng Yang, Wenbin Zhou, Qingxia Fan, Jun Luo, Weiya Zhou, Pulickel M. Ajayan, Sishen Xie. Super-stretchable, Transparent Carbon Nanotube-Based Capacitive Strain Sensors for Human Motion Detection; Scientific Reports volume3, Article number: 3048 (2018)
- [3] Gyeongrak Choi, Jong Won Lee, Ju Young Cha, Young-Ju Kim, Yeon-Sun Choi, Mark J. Schulz, Chang Kwon Moon, Kwon Tack Lim, Sung Yong Kim, and Inpil Kang. A Spray-On Carbon Nanotube Artificial Neuron Strain Sensor for Composite Structural Health Monitoring; Jandro L. Abot, Academic Editor (2016)
- [4] Cochrane, C., Koncar, V., Lewandowski, M. & Dufour, C. Design and development of a flexible strain sensor for textile structures based on a conductive polymer composite. Sensors 7, 473–492 (2007).
- [5] Takeo Yamada, Yuhei Hayamizu, Yuki Yamamoto, Kenji Hata. A Stretchable Carbon Nanotube Strain Sensor for Human-motion Detection; Nature Nanotechnology (2011)
- [6] Sreenivasulu Tadakaluru, Wiradej Thongsuwan and Pisith Singjai. Stretchable and Flexible High-Strain Sensors Made Using Carbon Nanotubes and Graphite Films on Natural Rubber; Chiangmai University (2013)
- [7] S M Vemuru, R Wahj, S Nagarajaiah, and P M Ajayan. Strain sensing using a multiwalled carbon nanotube film; Rice University; (2009), 10.1243/03093247JSA535
- [8] Schadler, L. S., Giannaris, S. C., and Ajayan, P. M. Load transfer in carbon nanotube epoxy composites. Appl. Phys. Lett., 1998, 73(26), 3842–3844.
- [9] Jandro L. Abot, Emílio C. N. Silva, César Y. Kiyono, Gilles P. Thomas. Strain Gauge Sensors Comprised Of Carbon Nanotube Yarn: Concept and Modeling; Blucher Material Science Proceedings (2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[10] I. P. Kang, M. J. Schulz, J. H. Kim, V. Shanov, D. L. Shi, “ A carbon nanotube strain sensor for structural health monitoring,” Smart Mater. Struct., vol. 15, pp. 737-748, (2006)

[11]<http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/Nano%20Tech49/Nanocarbon%20tube.html>

[12]<http://www.fujilloy.co.th/index.php/product/coating/cvd-coatng/>

[13]<https://www.circuitspecialists.com/blog/unipolar-stepper-motor-vs-bipolar-stepper-motors/>

[14]<https://www.arduino.cc/en/tutorial/stepperSpeedControl>”



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้