

เซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นสำหรับอุปกรณ์ที่สามารถสวมใส่ได้
บนวัสดุไฮโดรเจลแม่เหล็กที่ถูกปรับปรุงสมบัติด้วยไทเทเนียม
ไดออกไซด์นาโนชีท

FLEXIBLE SENSOR FOR WEARABLE DEVICE BASED ON
MAGNETIC HYDROGEL MODIFIED TITANIUM DIOXIDE
NANOSHEET

กวิณทิพย์ คุ่มแก้ว
ชนนิกานต์ วิริยสถิตย์กุล

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FLEXIBLE SENSOR FOR WEARABLE DEVICE BASED ON
MAGNETIC HYDROGEL MODIFIED TITANIUM DIOXIDE
NANOSHEET



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ เซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นสำหรับอุปกรณ์ที่สามารถสวมใส่ได้บนวัสดุไฮโดรเจลแม่เหล็กที่ถูกปรับปรุงสมบัติด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนชีท

Flexible sensor for wearable device based on magnetic hydrogel modified titanium dioxide nanosheet

ชื่อนักศึกษา นางสาวกวิณทิพย์ คุ่มแก้ว รหัสนักศึกษา 62050258

นางสาวชนิกานต์ วิริยสถิตย์กุล รหัสนักศึกษา 62050272




ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2565

อาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.นราธิป วิทยาการ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร ประธานกรรมการ	
รศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช กรรมการ	
ศ.ดร.นราธิป วิทยาการ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	เซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นสำหรับอุปกรณ์ที่สามารถสวมใส่ได้บนวัสดุไฮโดรเจลแม่เหล็กที่ถูกปรับปรุงสมบัติด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนซีท
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกวิณทิพย์ คุ่มแก้ว รหัสนักศึกษา 62050258 นางสาวชนิกานต์ วิริยสถิตย์กุล รหัสนักศึกษา 62050272
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศ.ดร.นราธิป วิทยาการ

บทคัดย่อ

วัสดุเชิงประกอบถูกสร้างขึ้นสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์แบบยืดหยุ่น โดยใช้ไฮโดรเจลแม่เหล็ก (MH) และไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนซีท (TiNSs) ในการสังเคราะห์เป็นวัสดุเชิงประกอบในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่าผลของการเติมบอแรกซ์ต่อคุณสมบัติเชิงกลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) โดยมีการเติมบอแรกซ์ลงใน PVA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ได้แก่ 0.25:4 (H1) 0.5:4 (H2) 1:4 (H3) และ 1.25:4 (H4) โดยไฮโดรเจลที่มีความหนืดสูงที่สุด (H4) จะมีสมบัติเชิงกลในด้านการคงตัวที่ดีที่สุด เมื่อมีการเติมบอแรกซ์ลงใน PVA ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ต่อมาได้มีการเติมผงแม่เหล็กนีโอดีเมียม (NdFeB) ลงไปส่งผลให้ไฮโดรเจลสามารถควบคุมได้โดยสนามแม่เหล็ก โดย NdFeB จะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลและยังสามารถทำให้ไฮโดรเจลสามารถถูกควบคุมการเคลื่อนที่ได้ ในส่วนต่อมาระยะนี้ได้ทำการศึกษาค่าผลของการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนซีท (TiNSs) ที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 5 10 และ 15 มิลลิกรัม ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณ TiNSs ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การเคลื่อนที่ของไฮโดรเจลแม่เหล็กช้าลง เนื่องจากความเป็นฉนวนของนาโนซีท อย่างไรก็ตามวัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลแม่เหล็กที่ถูกปรับปรุงสมบัติด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนซีทยังคงสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ได้ด้วยสนามแม่เหล็ก จากการวิเคราะห์เพิ่มเติมยืนยันว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมขึ้นมานี้มีหมู่ฟังก์ชัน โครงสร้างผลึก และลักษณะสัณฐานวิทยาภายในสอดคล้องกัน นอกจากนี้ในงานวิจัยได้มีการทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ถูกบรรจุในหลอดยางซิลิโคน พบว่า วัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลแม่เหล็กที่ถูกปรับปรุงสมบัติด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนซีทที่ 15 มิลลิกรัม (MH4T3) จะมีค่าความว่องไวในการตรวจจับเท่ากับ 23.8 ± 0.9 โอห์มต่อเซนติเมตร มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแม่นยำร้อยละ 99.1 และมีค่าความเสถียรร้อยละ 72.5 ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุด โดยวัสดุเชิงประกอบนี้จะถูกนำไปพัฒนาเพื่อสร้างเป็นเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นสำหรับการใช้งานเพื่อควบคุมบน ฤงมือไร้สายต่อไป

คำสำคัญ: ไฮโดรเจล ไฮโดรเจลแม่เหล็ก โทเทเนียมไดออกไซด์นาโนซีท เซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Flexible sensor for wearable device based on magnetic hydrogel modified titanium dioxide nanosheet	
Students	Miss Kawintip Kumkaew	Student ID 62050258
	Miss Chonnikan Wiriyasathitkul	Student ID 62050272
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)	
Department	Chemistry	
School	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2022	
Advisor	Prof. Dr. Naratip Vittayakorn	

Abstract

A composite material was created for flexible sensor fabrication using magnetic hydrogels (MH) and titanium dioxide nanosheets (TiNSs). Research was conducted on the effect of borax addition on the mechanical properties of polyvinyl alcohol (PVA). Borax was added to PVA in various ratios, namely 0.25:4 (H1), 0.5:4 (H2), 1:4 (H3), and 1.25:4 (H4). The hydrogel with the highest viscosity (H4) had the best mechanical stability when borax was added to polyvinyl alcohol (PVA) at different ratios. A magnetic field-controlled hydrogel received the addition of neodymium magnetic powder (NdFeB), which enhanced its mechanical characteristics and allowed for controlled movement. Our study analyzed the effects of different volumes of titanium dioxide nanosheet (TiNSs) fillers: 5ml, 10ml, and 15ml. The results showed that increasing volumes of TiNSs resulted in slower mobility due to the dielectric strength of the nanosheets. However, the composite still had controlled movement when exposed to a magnetic field. Further analysis confirmed that the composite material had the expected functional group, crystal structure, and internal morphology. The performance of the composite material in silicone rubber tubes was tested, and the highest sensitivity, accuracy, and stability were achieved with 15 ml of TiNSs (MH4T3). The MH4T3 boasts a remarkable sensitivity of 23.8 ± 0.9 ohms/cm. Additionally, it has an excellent accuracy rating of 99.1 percent and a noteworthy stability

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

rating of 72.5 percent. The composite material created a flexible sensor for operating electronic devices on a wireless glove.

Keywords: Hydrogel, Magnetic hydrogel, Titanium dioxide nanosheet, Flexible sensor



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ศ.ดร.นราธิป วิทยากร ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำปรึกษา สนับสนุนโครงการพิเศษงบประมาณในการทดลอง ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้ในทุก ๆ วิชาที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทางเคมี เจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาควิชาเคมี รวมไปถึงเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้การช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในเรื่องของอุปกรณ์สารเคมี เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ ในการทำงานโครงการพิเศษให้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ พี่ต้า พี่แนน พี่น้ำ พี่อัน พี่เนย พี่นิงค์ และพี่ตรีม ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และคอยให้การสนับสนุนการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว และเพื่อน ๆ ที่สนับสนุนพร้อมทั้งให้กำลังใจตลอดการทำโครงการพิเศษนี้จนสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กวิณทิพย์ คุ่มแก้ว
ชนนิกานต์ วิริยสถิตย์กุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฐ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 อุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor).....	4
2.2 หลักการทำงานของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น.....	5
2.2.1 ตัวแปรทางเซนเซอร์ (Sensor parameters).....	6
2.2.1.1 ความไวในการตรวจจับ (Sensitivity).....	6
2.2.1.2 ความแม่นยำในการตรวจจับ (Accuracy).....	6
2.2.1.3 ความเสถียรในการตรวจจับ (Stability).....	6
2.2.1.4 เวลาที่ใช้ในการตอบสนองและคืนกลับ (Response and Recovery time).....	6
2.2.1.5 ความสามารถในการตรวจจับระยะยาว (Long-term ability).....	6
2.3 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol: PVA).....	6
2.4 ไฮโดรเจล (Hydrogel: H).....	7
2.4.1 ไฮโดรเจลแม่เหล็ก (Magnetic hydrogel: MH).....	7
2.4.2 การเตรียม MH.....	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide).....	9
2.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนชีท (Titanium dioxide nanosheet: TiNSs).....	10
2.6.1 กระบวนการสังเคราะห์ TiNSs.....	10
2.7 วัสดุนาโน (Nanomaterial).....	11
2.7.1 ระบบศูนย์มิติ (Zero-dimensional: 0D).....	11
2.7.2 ระบบหนึ่งมิติ (One-dimensional: 1D).....	11
2.7.3 ระบบสองมิติ (Two-dimensional: 2D).....	11
2.7.3 ระบบสามมิติ (Three-dimensional: 3D).....	11
2.8 วัสดุเชิงประกอบ (Composite material).....	12
2.8.1 ส่วนประกอบของวัสดุเชิงประกอบ.....	12
2.8.1.1 เมทริกซ์ (Matrix).....	12
2.8.1.2 ส่วนเสริมแรง (Reinforcement).....	13
2.8.2 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ.....	13
2.8.2.1 วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal matrix composite).....	13
2.8.2.2 วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic matrix composite).....	13
2.8.2.3 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite).....	14
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1 สารเคมี.....	24
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	24
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	25
3.4 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่าง H กับ NdFeB.....	26
3.4.1 ขั้นตอนการเตรียม MH.....	26
3.5 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่าง MH กับ TiNSs.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่าง MH กับ TiNSs	27
3.6 เทคนิคในการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของ MH4T3.....	27
3.6.1 การพิสูจน์โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานซ์- ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared spectro- scopy: FTIR).....	27
3.6.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์เอกซเรย์โทโมกราฟิก (X-ray Tomographic Microscopy: XTM).....	28
3.6.3 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD).....	29
3.6.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM).....	31
3.7 วิธีการทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุ H และ MH.....	31
3.8 วิธีการทดสอบสมบัติในการเคลื่อนที่ของ MH4 และ MH4T3.....	33
3.9 การศึกษาความสามารถในการยืดหดของเซนเซอร์โดยการทดสอบแรงดึง (Tensile testing).....	33
3.10 การเตรียมตัวอย่างเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น.....	35
3.11 การตรวจสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น (Flexible sensor).....	36
3.11.1 การตรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น.....	36
3.11.1.1 ความไวในการตรวจจับ (Sensitivity).....	37
3.11.1.2 ความแม่นยำ (Accuracy).....	37
3.11.1.3 ความเสถียรในการตรวจจับ (Stability).....	38
3.11.1.4 เวลาในการตอบสนองและคืนกลับ (Response and recovery time)	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.11.1.5 ความสามารถในการตรวจจับระยะยาว (Long-term ability).....	39
3.12 การหาระยะที่ใช้ในการดิ่งยึดตามนิ้วมือจริง.....	40
3.13 การทดสอบค่าความต้านทานทางไฟฟ้าโดยการติดตั้งเซนเซอร์บนอุปกรณ์สั่งการ	41
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	42
4.1 การศึกษาวัสดุ MH4T3.....	42
4.1.1 ผลการศึกษาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของ MH4T3 ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Sprctro- scopy: FTIR).....	42
4.1.2 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุ MH4T3 ในรูปแบบ 3 มิติด้วย กล้องจุลทรรศน์เอกซเรย์โทโมกราฟฟิก (X-ray Tomographic Microscopy: XTM).....	46
4.1.3 ผลการศึกษาคือความเป็นผลึกของวัสดุ MH4T3 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD).....	47
4.1.4 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุ MH4T3 ในรูปแบบสองมิติ (2D) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM).....	49
4.1.6 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุ H4 และ MH4.....	52
4.1.7 ผลการศึกษสมบัติการเคลื่อนที่ของวัสดุ MH4 และ MH4T3.....	57
4.2 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3.....	59
4.2.1 ผลการศึกษาค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) ของวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3.....	60
4.2.2 ผลการศึกษาระสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหยุ่นโดยเปรียบเทียบ วัสดุ H4 MH4 และ MH4T3.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2.1 ผลการศึกษาความไวในการตรวจจับ (Sensitivity).....	62
4.2.2.2 ผลการศึกษาความแม่นยำในการตรวจจับ (Accuracy).....	63
4.2.2.3 ผลการศึกษาความเสถียรในการตรวจจับ (Stability).....	63
4.2.2.4 ผลการศึกษาเวลาในการตอบสนองและคืนกลับ (Response and recovery time).....	64
4.3 การศึกษาการเตรียมเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นบนวัสดุ MH4T3.....	66
4.3.1 ผลการศึกษาความสามารถในการยืดหดของเซนเซอร์โดยการทดสอบแรงดึง (Tensile testing).....	66
4.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นบนวัสดุ MH4T3.....	67
4.4.1 ผลการศึกษาระยะที่ใช้ในการดึงยึดของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น.....	67
4.4.2 ผลการศึกษาระยะที่ใช้ในการดึงยึดที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่ง การแบบยืดหยุ่นตามตัวแปรทางเซนเซอร์.....	69
4.4.2.1 ผลการศึกษาความไวในการตรวจจับ (Sensitivity).....	70
4.4.2.2 ผลการศึกษาความแม่นยำในการตรวจจับ (Accuracy).....	71
4.4.2.3 ผลการศึกษาความเสถียรในการตรวจจับ (Stability).....	71
4.4.2.4 ผลการศึกษาความสามารถในการตรวจจับระยะยาว (Long-term ability).....	72
4.4.3 ผลการศึกษาความแตกต่างของปริมาตร TiNSs ที่ส่งผลต่อความต้านทานทาง ไฟฟ้า (Resistance).....	75
4.4.4 ผลการศึกษาความแตกต่างของปริมาตร TiNSs ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของ เซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นตามตัวแปรทางเซนเซอร์.....	77
4.4.4.1 ผลการศึกษาความไวในการตรวจจับ (Sensitivity).....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.4.2 ผลการศึกษาความแม่นยำในการตรวจจับ (Accuracy).....	78
4.4.4.3 ผลการศึกษาความเสถียรในการตรวจจับ (Stability).....	79
4.4.4.4 ผลการศึกษาเวลาในการตอบสนองและคืนกลับ (Response and recovery time).....	80
4.5 การประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นบนวัสดุ MH4T3.....	83
4.5.1 ส่วนประกอบของเซนเซอร์.....	83
4.5.2 หลักการทำงานของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น.....	83
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	86
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	86
5.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของวัสดุ MH4T3.....	86
5.1.2 การศึกษาสมบัติในการเคลื่อนที่ของวัสดุ MH4 และ MH4T3.....	88
5.1.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น บนวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3.....	88
5.1.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น บนวัสดุ MH4T3.....	89
5.1.5 ผลการศึกษาความแตกต่างของปริมาตร TINSs ที่ส่งผลต่อความต้านทานทาง ไฟฟ้า (Resistance).....	90
5.1.6 ทดสอบการใช้งานของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นที่ถูกติดตั้งบนถूंมือไร้สาย..	91
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	92
เอกสารอ้างอิง.....	93
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก.....	98
ภาคผนวก ข.....	99
ภาคผนวก ค.....	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ช่วงการดูกลืนตามหมูฟังก์ชัน และพันธะที่พบในวัสดุเชิงประกอบ.....	46
4.2 เกณฑ์ที่ใช้ในการกำหนดประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการโดยมีการเปรียบเทียบวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ H4 MH4 และ MH4T3.....	60
4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหยุ่นวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3..	66
4.4 เกณฑ์ที่ใช้ในการกำหนดประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหยุ่น.....	67
4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหยุ่นโดยมีระยะที่ใช้ในการดึงยืดแตกต่างกัน ตามตัวแปรทางเซนเซอร์.....	74
4.6 เกณฑ์ที่ใช้ในการกำหนดประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหยุ่นโดยทำการเปรียบเทียบปริมาณของ TiNSs.....	77
4.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหยุ่นบนวัสดุ MH4 โดยมีปริมาตรของ TiNSs ที่ปริมาตรแตกต่างกัน.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ชิ้นส่วนของเซ็นเซอร์แบบยืดหยุ่นซึ่งประกอบด้วยวัสดุและการใช้งานแบบยืดหยุ่น.....	5
2.2 ไฮโดรเจลแม่เหล็ก (MH).....	8
2.3 วิธีการเตรียม MH.....	8
2.4 โครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พบได้ตามธรรมชาติ.....	9
2.5 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนซีท (TiNSs).....	10
2.6 แผนภาพโครงสร้างของวัสดุนาโนที่มีการจำแนกตามมิติของ.....	12
2.7 ส่วนประกอบของวัสดุเชิงประกอบ.....	13
2.8 (a) รูปแผนผังแสดงกลไกในการก่อตัวระหว่าง PVA และ Borax เป็นโครงสร้างเครือข่ายสามมิติ (3D crosslinking network) (b) แสดงรูปการณั้เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD) ของ H PVA บริสุทธิ์ 1.0-Borax-PVA 2.0-Borax-PVA 3.0-Borax-PVA และ 5.0-Borax-PVA ตามลำดับ.....	15
2.9 (a) แสดงการเคลื่อนที่ของสไลม์แม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็ก (b) แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการคืนรูปของสไลม์แม่เหล็ก (c) แสดงวงจรไฟฟ้าที่ถูกเชื่อมต่อกับสไลม์แม่เหล็กขณะปกติ ขณะเกิดการตัดขาด ขณะมีการคืนรูป และขณะที่ถูกดึงยืดออก.....	16
2.10 (a) ภาพถ่ายของอุปกรณ์ที่โต้ตอบระหว่างมนุษย์กับเครื่องจักรโดยทำเป็นเซ็นเซอร์วัดการเคลื่อนไหวของมนุษย์ (b) แผนภาพวงจรและสัญญาณต่าง ๆ (c) รูปแบบพื้นผิวของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบอาร์เรย์เซ็นเซอร์โดยใช้ H (d) ภาพถ่ายของผิวอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ 4 นิ้วแตะบนพื้นผิว.....	18
2.11 การวิเคราะห์สมบัติการรักษาตัวเองของ H (a) แผนผังความสามารถในการซ่อมแซมตัวเองของ H ที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้า (b) การทดลองหลอดไฟสำหรับ H นำไฟฟ้าได้ ก่อนและหลังซ่อมแซมตัวเอง (c) อิมพีแดนซ์ทางไฟฟ้าของ H หลังจากยืดตัวเป็นวงกลม 14 ครั้ง (d) ความต้านทานแรงดึงของ H ก่อนและหลังการซ่อมแซมตัวเอง (d) ความต้านทานไฟฟ้าของ H ภายใน 7 วัน.....	19
2.12 การเตรียมเซ็นเซอร์ผิวหนังเทียมที่สามารถสวมใส่ได้แบบชั่วคราว (a) การก่อตัวของ PVA-LMPs H (b) PVA-LMPs H ที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.13 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสและไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนซีทเพื่อใช้ในการสร้างเซนเซอร์ตรวจจับความเครียดแบบยืดหยุ่น.....	22
2.14 (a) และ (b) แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของวัสดุเชิงประกอบระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลส และแผ่นนาโนไททานเตนตโดยร้อยละต่าง ๆ (c) แสดงการตอบสนองแบบไดนามิก (Dynamics) ของ $3\text{Ti}_{0.91}\text{O}_2\text{NSs/BC}$ (d) แสดงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความจุสัมพัทธ์ของ BCCS ภายใต้การให้แรงที่แตกต่างกัน.....	23
3.1 วิธีการเตรียมไฮโดรเจลแม่เหล็ก (MH).....	26
3.2 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่าง MH กับ TiNSs.....	27
3.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer: FTIR) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น IRTracer-100.....	28
3.4 กล้องจุลทรรศน์เอกซเรย์โทโมกราฟิค (X-ray Tomographic Microscopy: XTM) ยี่ห้อ KOHZU.....	29
3.5 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Smart lab.....	30
3.6 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM) ยี่ห้อ Reich.....	31
3.7 การทดสอบสมบัติทางกายภาพด้านการคงตัวของ H และ MH.....	32
3.8 ภาพการทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตัวอย่างโดยมีการตั้งแม่เหล็กเหนี่ยวนำไว้ทางด้านซ้าย และตั้งชิ้นงานตัวอย่างไว้ทางด้านขวาโดยมีการกำหนดระยะห่างระหว่างตัวแม่เหล็กเหนี่ยวนำและชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทดสอบ.....	33
3.9 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) รุ่น QC-536M1 ยี่ห้อ Cometech.....	34
3.10 วิธีการเตรียมการทดสอบชิ้นงานหลอดยางซิลิโคนด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing).....	35
3.11 วิธีการเตรียมเซนเซอร์สั่งการเพื่อนำไปตรวจสอบค่าความต้านทานไฟฟ้า.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 การตรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดอุปกรณ์พาสซีฟ (Keysight Precision LCR Meter) รุ่น E4980A ยี่ห้อ Agilent.....	36
3.13 วิธีการหาค่าความไวในการตรวจจับ (Sensitivity).....	37
3.14 วิธีการหาค่าร้อยละความแม่นยำในการตรวจจับ (%Accuracy).....	38
3.15 วิธีการหาค่าร้อยละความเสถียร (%Stability).....	38
3.16 วิธีการหาเวลาในการตอบสนองและคืนกลับ (Response and recovery).....	39
3.17 ความยาวของเซนเซอร์สั่งการตามนิ้วมือทั้ง 5 นิ้ว.....	40
3.18 วิธีการหาระยะในการตั้งยึดตามการงอของนิ้วมือ.....	40
3.19 วิธีการทดสอบค่าความต้านทานทางไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์สั่งการ.....	41
4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของ H4 MH4 และ MH4T3 เปรียบเทียบกับบอแรกซ์ PVA และ TiNSs ในช่วง 400-4000 cm^{-1}	45
4.2 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาในรูปแบบสามมิติของวัสดุเชิงประกอบด้วยกล้องจุลทรรศน์เอกซเรย์โทโมกราฟิก (XTM) a.) H4 b.) MH4 c.) เฟสของ PVA และบอแรกซ์ d.) เฟสการกระจายตัวของ NdFeB.....	47
4.3 a.) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PVA บอแรกซ์ ผง NdFeB H4 และ MH4 b.) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตั้งต้น D และ E ที่ใช้ในการสังเคราะห์ MH4T3 และ MH4T3.....	49
4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาในรูปแบบสองมิติของ a.) H4 b.) MH4 และ c.) MH4T3 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope).....	50
4.5 การทดสอบความโปร่งแสงของวัสดุ a.) H4 b.) MH4 และ c.) MH4T3.....	51
4.6 ลักษณะการขยายตัวของ H ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อถูกตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 0 ถึง 120 นาที.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 a.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ H ที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับเวลา โดยมีช่วงเวลามาจาก 0 ถึง 2 นาที b.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ H ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับเวลาโดยมีช่วงเวลามาจาก 0 ถึง 120 นาที.....	54
4.8 a.) แสดงลักษณะการขยายตัวของ MH1 เมื่อถูกตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 0 ถึง 120 นาที และ b.) แสดงลักษณะการขยายตัวของ MH4 เมื่อถูกตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 0 ถึง 120 นาที.....	55
4.9 a.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ MH ที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับเวลา โดยมีช่วงเวลามาจาก 0 ถึง 2 นาที b.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ MH ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับเวลาโดยมีช่วงเวลามาจาก 0 ถึง 120 นาที.....	56
4.10 การทดสอบการเคลื่อนที่ และระยะเวลาในการเคลื่อนที่ระหว่างแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในการเหนี่ยวนำ MH ในระยะต่าง ๆ.....	58
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างและเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของ MH1 MH4 และ MH4T3 ไปยังแม่เหล็กเหนี่ยวนำ.....	59
4.12 ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔR) ของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหุ่นบน a.) H4 b.) MH4 และ c.) MH4T3.....	60
4.13 ความว่องไวในการตรวจจับของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหุ่นบนวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3.....	62
4.14 ความแม่นยำในการตรวจจับของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหุ่นบนวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3.....	63
4.15 ร้อยละความเสถียรในการตรวจจับของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหุ่นบนวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3.....	64
4.16 เวลาในการตอบสนองและคืนกลับของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหุ่นบนวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของเซนเซอร์ยืดหยุ่นเมื่อมีการให้แรงเชิงกลโดยการดึงยืดที่ระยะ a.) 1 เซนติเมตร b.) 3 เซนติเมตร c.) 5 เซนติเมตร และ d.) 7 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	68
4.18 ความว่องไวในการตรวจจับของเซนเซอร์โดยมีระยะที่ใช้ดึงยืดแตกต่างกัน.....	70
4.19 ร้อยละความแม่นยำในการตรวจจับของเซนเซอร์โดยมีระยะที่ใช้ในการดึงยืดแตกต่างกัน.....	71
4.20 ร้อยละความเสถียรของเซนเซอร์โดยมีระยะที่ใช้ดึงยืดแตกต่างกัน.....	72
4.21 การตรวจจับสัญญาณของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นโดยมีระยะที่ใช้ดึงยืดแตกต่างกันที่ ระยะ a.) 1 เซนติเมตร b.) 3 เซนติเมตร c.) 5 เซนติเมตร.....	73
4.22 ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔR) ของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นบนวัสดุ MH4T1 MH4T2 และ MH4T3 a.) T1 b.) T2 และ c.) T3 ตามลำดับ.....	76
4.23 ความว่องไวในการตรวจจับของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นบนวัสดุ MH4 โดยมีปริมาณของ TiNSs ที่ปริมาตรแตกต่างกัน.....	78
4.24 ความแม่นยำในการตรวจจับของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นบนวัสดุ MH4 โดยมีปริมาณ ของ TiNSs ที่ปริมาตรแตกต่างกัน.....	79
4.25 ร้อยละความเสถียรในการตรวจจับของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นบนวัสดุ MH4 โดยมี ปริมาณของ TiNSs ที่ปริมาตรแตกต่างกัน.....	80
4.26 ร้อยละความเสถียรในการตรวจจับของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นบนวัสดุ MH4 โดยมี ปริมาณของ TiNSs ที่ปริมาตรแตกต่างกัน.....	81
4.27 วิธีการทดสอบค่าความต้านทานทางไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์สั่งการ โดยการติดตั้งวัสดุตรวจจับ หรือเซนเซอร์ลงบนถุงมือ.....	84
4.28 a.) แสดงค่าสัญญาณที่ได้จากการงอนิ้วมือที่มีความยาว 5 (นิ้วโป้ง) เซนติเมตร b.) แสดงค่า สัญญาณที่ได้จากการงอนิ้วมือที่มีความยาว 6 (นิ้วก้อย) เซนติเมตร c.) แสดงค่าสัญญาณที่ ได้จากการงอนิ้วมือที่มีความยาว 7 (นิ้วชี้) เซนติเมตร d.) แสดงค่าสัญญาณที่ได้จากการงอ นิ้วมือที่มีความยาว 8 (นิ้วนาง) เซนติเมตร และ e.) แสดงค่าสัญญาณที่ได้จากการงอนิ้วมือ ที่มีความยาว 9 (นิ้วกลาง) เซนติเมตร.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเซนเซอร์จากวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3.....	89
5.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเซนเซอร์จากระยะยืดออกของเซนเซอร์ที่ 1 3 และ 5 เซนติเมตร.....	90
5.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเซนเซอร์จากวัสดุ MH4T1 MH4T2 และ MH4T3.....	91



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
PVA	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol)
TiNSs	ไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนชีท (Titanium dioxide nanosheet)
NdFeB	แม่เหล็กนีโอดีเมียม (Neodemium)
H	ไฮโดรเจล (Hydrogel)
H1	ไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของบอแรกซ์ต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่ 0.5:4
H2	ไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของบอแรกซ์ต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่ 0.75:4
H3	ไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของบอแรกซ์ต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่ 1.0:4
H4	ไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของบอแรกซ์ต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่ 1.25:4
MH	ไฮโดรเจลแม่เหล็ก (Magnetic hydrogel)
MH1	ไฮโดรเจลแม่เหล็กที่มีอัตราส่วนบอแรกซ์ต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่ 0.5:4
MH4	ไฮโดรเจลแม่เหล็กที่มีอัตราส่วนบอแรกซ์ต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่ 1.25:4
T1	ปริมาตรไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนชีท 5 มิลลิลิตร
T2	ปริมาตรไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนชีท 10 มิลลิลิตร
T3	ปริมาตรไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนชีท 15 มิลลิลิตร
MHT	ไฮโดรเจลแม่เหล็กที่ถูกปรับปรุงสมบัติด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนชีท
MH4T1	ไฮโดรเจลแม่เหล็กที่ถูกปรับปรุงสมบัติด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนชีทที่ 5 มิลลิลิตร
MH4T2	ไฮโดรเจลแม่เหล็กที่ถูกปรับปรุงสมบัติด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนชีทที่ 10 มิลลิลิตร
MH4T3	ไฮโดรเจลแม่เหล็กที่ถูกปรับปรุงสมบัติด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนชีทที่ 15 มิลลิลิตร
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectrometer
XTM	X-ray Tomographic Microscopy
XRD	X-ray Diffraction
OM	Optical Microscope
D	สารตั้งต้น $\text{Cs}_{0.7}\text{Ti}_{1.825}\text{O}_4$
E	สารตั้งต้น $\text{H}_{0.7}\text{Ti}_{1.825}\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีถือเป็นส่วนหนึ่งในการดำเนินชีวิตประจำวัน ซึ่งเป็นสิ่งที่สร้างขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ช่วยในการทำงานให้มีประสิทธิภาพ และสะดวกรวดเร็วขึ้นโดยมีการประยุกต์ใช้ความรู้ทางวิทยาศาสตร์เพื่อสร้างเป็นเทคโนโลยี อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ถือเป็นส่วนหนึ่งของเทคโนโลยี ถูกสร้างขึ้นเพื่อให้มนุษย์สามารถติดต่อสื่อสาร ค้นหาข้อมูล เก็บข้อมูลพร้อมทั้งแลกเปลี่ยนและรับข้อมูลระหว่างบุคคล จากองค์กรขนาดเล็กไปจนถึงองค์กรขนาดใหญ่ในระดับโลก จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่สามารถสวมใส่ได้ (Wearable device) [1] และคาดว่าจะมีการเติบโตมากขึ้นในอนาคต เนื่องจากความต้องการใช้เทคโนโลยีที่เพิ่มขึ้นตามยุคสมัย โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบสวมใส่ได้ที่พบเห็นในปัจจุบัน ได้แก่ นาฬิกา แว่นตา เสื้อผ้า และรองเท้า เป็นต้น ซึ่งเป็นอุปกรณ์อัจฉริยะที่สามารถใช้งานได้หลากหลายฟังก์ชัน (Multi-functional) มีขนาดเล็กสามารถพกพาได้สะดวก โดยถูกออกแบบให้สวมใส่ได้ตามส่วนต่าง ๆ ของร่างกายเพื่อเก็บข้อมูลจากการติดตามความเคลื่อนไหวด้วยตัวเซนเซอร์ (sensor) หรือตัวตรวจจับ แล้วเชื่อมต่อเข้ากับระบบของอุปกรณ์เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลและแสดงผลออกมาเป็นชุดข้อมูลที่จะนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

เซนเซอร์ทำหน้าที่เป็นตัวรับรู้หรือตัวตรวจจับเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงทางสภาพแวดล้อม ซึ่งอาจจะเป็นอุณหภูมิ พลังงานแสง การเคลื่อนไหวร่างกาย โดยเกิดจากปัจจัยต่าง ๆ มากกระตุ้น จากนั้นจะให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันออกมาและส่งไปยังศูนย์ควบคุม [2] โดยตัวเซนเซอร์จะเป็นตัวแปลงสัญญาณ (Transducer) ที่สามารถให้สัญญาณออกมาได้หลายชนิด โดยทั่วไปจะใช้เป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณแสง โดยเซนเซอร์จำเป็นที่จะต้องมีการออกแบบให้มีขนาดเล็กและมีความเหมาะสมกับอุปกรณ์ที่จะนำไปใช้งานเพื่อให้การทำงานนั้นมีประสิทธิภาพสูงสุด

จากการศึกษาพบว่าได้มีการเลือกวัสดุที่มีความยืดหยุ่นในการประดิษฐ์เป็นเซนเซอร์ที่สามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวจากการโค้งงอส่วนต่าง ๆ บนร่างกายมนุษย์ โดยวัสดุที่มีความยืดหยุ่นเหมาะสมสำหรับการเลือกใช้เป็นเซนเซอร์ ได้แก่ เส้นใย (Textile) อีลาสโตเมอร์ฟิล์ม (Elastomer film) และไฮโดรเจล (Hydrogel: H) ซึ่งวัสดุเหล่านี้ล้วนมีความอ่อนนุ่มและยืดหยุ่น แต่ H เป็นวัสดุที่มีสมบัติที่แตกต่าง คือ เมื่อเกิดการเสียรูปแล้วสามารถกลับคืนรูปเดิมได้ ดังนั้นในอนาคตหากต้องการพัฒนาเซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพที่ดีและใช้งานได้ยาวนาน H จึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมในการนำมาพัฒนาเป็นเซนเซอร์ยืดหยุ่น โดย H เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี มีความยืดหยุ่นสูง สามารถนำมาดัดแปลงสมบัติเพื่อการรับรู้และตอบสนองต่อสิ่งเร้าได้ตามต้องการ โดยสมบัติของพอลิเมอร์แต่ละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นข้อนี้ให้รีบแจ้งคืนให้เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีและกายภาพของพอลิเมอร์ ชนิดนั้น ๆ ในการดัดแปลงสมบัติสามารถทำได้โดยการรวมวัสดุพอลิเมอร์เข้ากับสารเติมแต่ง แร่ธาตุต่าง ๆ รวมไปถึงอนุภาคที่เป็นนาโน เป็นต้น เรียกว่าวัสดุเชิงประกอบ โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการเตรียม H โดยเลือกพอลิเมอร์ในการสังเคราะห์ คือ PVA (Polyvinyl alcohol) ที่ถูกปรับปรุงสมบัติเชิงกล โดยศึกษาด้านความหนืดและสมบัติในการคืนรูป ซึ่งเลือกใช้บอแรกซ์ (Borax) เป็นสารเชื่อมขวาง จากนั้นได้มีการเติมอนุภาคแม่เหล็กเข้าไปเพื่อให้ H สามารถเคลื่อนที่ได้โดยการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็ก อีกทั้งยังมีสมบัติในการนำไฟฟ้าเพิ่มเข้ามา ได้เป็น ไฮโดรเจลแม่เหล็ก (Magnetic hydrogel: MH) นอกจากนี้ยังได้มีการปรับปรุงสมบัติเพิ่มเติมโดยการเติม TiNSs (Titanium dioxide nanosheet) ที่มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีในการปรับปรุงสมบัติการทางไฟฟ้าของ MH ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การนำวัสดุเชิงประกอบที่มีความสามารถทางไฟฟ้า ความสามารถในการยืดหยุ่น และความสามารถในการคืนรูปได้ มาใช้ในการสร้างเป็นเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น (Flexible sensor) โดยออกแบบให้สามารถโค้งงอ และยืดหดได้ตามสรีระ เช่น บริเวณนิ้วมือ ข้อศอก และหัวเข่า เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกให้มีการติดตั้งบนถุงมือเพื่อสั่งการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาและออกแบบเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น (Flexible sensor)
2. เพื่อศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของบอแรกซ์ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ส่งผลให้ MH (Magnetic hydrogel) มีประสิทธิภาพในการนำไปสร้างเป็นเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น
3. เพื่อศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของ TiNSs ในการใช้ปรับปรุงสมบัติของ MH (Magnetic hydrogel) โดยการเพิ่มความสามารถในการกักเก็บประจุไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการเตรียม MH (Magnetic hydrogel)
2. ศึกษาการเตรียม MHT (Magnetic hydrogel Titanium dioxide nanosheet)
3. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของบอแรกซ์ซึ่งใช้ในการเตรียม H (Hydrogel)
4. ศึกษาและวิเคราะห์สมบัติของ MHT ดังนี้
 - 4.1 ศึกษาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานซ์ฟอร์มอิฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer: FTIR)
 - 4.2 ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์เอกซเรย์โทโมกราฟิค (X-ray Tomographic Microscopy: XTM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4.3 ศึกษาและวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD)
- 4.4 ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM)
5. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของ MHT เช่น ความสามารถในการคงตัว ความสามารถในการเคลื่อนที่ ความสามารถในการยืดหยุ่น และความสามารถในการคืนรูปร่าง เป็นต้น
6. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไฮโดรเจลแม่เหล็ก โดยการตรวจวัดความต้านทานไฟฟ้า (Resistance)
7. ศึกษาประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น โดยมีตัวแปรดังนี้
 - 7.1 ความไวในการตรวจจับ (Sensitivity)
 - 7.2 ความแม่นยำ (Accuracy)
 - 7.3 เสถียรภาพในการตรวจจับ (Stability)
 - 7.4 เวลาที่ใช้ในการตอบสนองและคืนกลับ (Response and recovery time)
 - 7.5 ความสามารถในการตรวจจับระยะยาว (Long-term ability)
8. ศึกษาและออกแบบเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นจาก MHT

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงวิธีการเตรียม MHT
2. ทราบถึงสมบัติทางกายภาพของ MHT
3. ทราบถึงสมบัติในการเคลื่อนที่ของ MHT จากการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้า
4. ทราบถึงสมบัติทางไฟฟ้าของ MHT และสามารถนำไปสร้างเป็นเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น (Flexible sensor)
5. ทราบถึงวิธีการนำ MHT มาสร้างเป็นเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น
6. ทราบถึงประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น
7. สามารถนำเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นมาประยุกต์ใช้ในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบสวมใส่ได้ (Wearable device)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบสวมใส่ (Wearable electronics) เป็นส่วนหนึ่งของเทคโนโลยีที่ช่วยให้การทำงานสะดวกมากขึ้น โดยถูกออกแบบและสร้างขึ้นในรูปแบบของเสื้อผ้าและเครื่องประดับ เช่น นาฬิกา สายรัดข้อมือ แว่นตา และรองเท้า เป็นต้น ในปัจจุบันสุขภาพถือเป็นเรื่องที่มีนุษย์ให้ความสำคัญ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบสวมใส่ได้จึงเป็นทางเลือกที่ถูกนำมาใช้งานมากขึ้น เนื่องจากมีความสะดวกในการพกพา มีการทำงานแบบหลากหลายฟังก์ชัน (Multi-functional) ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำวัสดุที่เป็นพอลิเมอร์มาใช้เป็นวัสดุเชิงประกอบร่วมกับ TINSs โดยวัสดุพอลิเมอร์ที่เลือกใช้มีความเป็นไฮโดรเจล (Hydrogel: H) ดังนั้นจึงสามารถนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ที่สามารถสวมใส่ได้ ซึ่งได้แก่ เซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น (Flexible sensor) จากงานวิจัยของ Xiaohang Sun [3] และคณะได้มีการศึกษาองค์ประกอบและสมบัติของ H ที่ถูกนำมาสร้างเป็นเซนเซอร์ตรวจจับ เนื่องจาก H มีความยืดหยุ่น และสามารถคืนรูปได้เมื่อเกิดความเสียหาย ต่างจากวัสดุที่มีความยืดหยุ่นชนิดอื่น ๆ ซึ่งได้แก่ เส้นใย (Textile) และอีลาสโตเมอร์ฟิล์ม (Elastomer film) ทำให้มีประสิทธิภาพในการนำไปพัฒนาและประดิษฐ์เป็นเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นได้ นอกจากนี้ยังพบว่า H ที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ต่างชนิดกันการตอบสนองและการตรวจจับสิ่งเร้าก็จะมีหน้าที่ต่างกัน จากงานวิจัยของ Mengmeng Sun [4] และคณะได้มีการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของ MH (Magnetic hydrogel) พบว่าเมื่อมีการเติมอนุภาคแม่เหล็กลงไปใน H ที่มีสมบัติในการยืดหยุ่นตัวสูงและความสามารถในการคืนรูปเป็นสมบัติหลักแล้วนั้น ก็จะมีการเพิ่มสมบัติในการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก การนำไฟฟ้าจึงเหมาะสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเป็นเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น

2.1 อุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor)

อุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงจากสภาพแวดล้อมภายนอก โดยตรวจจับในรูปแบบของสัญญาณ และส่งไปยังตัวแปลงสัญญาณ (Transducer) เพื่อทำการแปลงสัญญาณได้เป็นสัญญาณขาออก (Output signal) ซึ่งมีหลากหลายรูปแบบแต่โดยส่วนใหญ่จะเลือกใช้สัญญาณไฟฟ้า (Electrical signals) เพื่อนำไปใช้ในการสั่งการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

จากการศึกษาและค้นคว้า พบว่าได้มีการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ยืดหยุ่นได้เพื่อใช้ในการผลิตอุปกรณ์ทางการแพทย์ ซึ่งช่วยในการดูแลสุขภาพของมนุษย์ โดยจะมีการจับสัญญาณทางชีวภาพ (Biological signals) จากร่างกายของมนุษย์แล้วแปลงสัญญาณออกมาเพื่อช่วยให้มีความสะดวกในการ

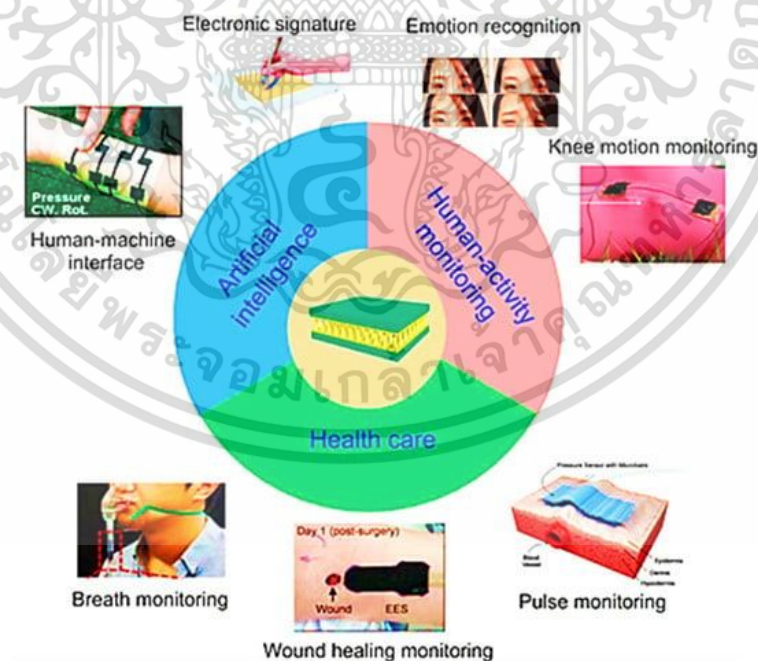
วินิจฉัยและรักษาทางการแพทย์ได้ โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นนั้นสามารถสวมใส่บนร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ (Wearable sensor) เช่น แหวน นาฬิกาข้อมือ สายรัดข้อมือ เป็นต้น โดยอาศัยสมบัติที่ยืดหยุ่นและอ่อนนุ่ม สามารถโค้งงอได้ตามสรีระของมนุษย์เพื่อให้สามารถใช้งานได้สะดวก ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุเพื่อสร้างเป็นเซนเซอร์ตรวจจับสัญญาณจึงต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมในการใช้งาน และต้องมีประสิทธิภาพที่ดีเพื่อให้การตรวจจับนั้นมีความแม่นยำ

2.2 หลักการทำงานของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น

เซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น (Flexible sensor) [5] ทำหน้าที่ในการตรวจจับสัญญาณจากภายนอกและแปลงสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้า (Electrical signals) ด้วยหน้าที่นี้จึงมีการนำมาพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้แบบยืดหยุ่น โดยแปลงสัญญาณจากการที่มนุษย์เคลื่อนไหวร่างกาย เช่น บริเวณข้อต่อร่างกาย โดยทั่วไปอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มักสร้างขึ้นจากโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ ส่งผลให้มีข้อจำกัดในด้านของความไว (Sensitivity) และความยืดหยุ่น (Flexibility) ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้หลากหลาย ในการเคลื่อนไหวของร่างกายโดยการยืดหดของส่วนข้อต่อจะทำให้เซนเซอร์สามารถตรวจจับค่าความต้านทานไฟฟ้าได้ และเมื่อได้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าแล้วก็จะสามารถหาการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้า (ΔR) ซึ่งจะถูกนำไปประมวลผลเพื่อใช้สั่งการหรือควบคุมการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.1 ชิ้นส่วนของเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นซึ่งประกอบด้วยวัสดุและการใช้งานแบบยืดหยุ่น [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ตัวแปรทางเซนเซอร์ (Sensor Parameters)

ตัวแปรทางเซนเซอร์ประกอบไปด้วย ความไวในการตรวจจับ (Sensitivity) ความแม่นยำ (Accuracy) ความเสถียรในการตรวจจับ (Stability) เวลาที่ใช้ในการตอบสนองและคืนกลับ (Response and recovery time) ความสามารถในการตรวจจับระยะยาว (Long-term ability) ความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability) ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะสามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของเซนเซอร์ได้

2.2.1.1 ความไวในการตรวจจับ (Sensitivity)

ค่าความไวในการตรวจจับ เป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถในการเลือกจับสัญญาณว่ามีความไวไวมากน้อยเท่าไร ค่าความไวในการตรวจจับสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขาออก (Output) ต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขาเข้า (Input)

2.2.1.2 ความแม่นยำ (Accuracy)

เป็นค่าที่บ่งบอกความแม่นยำในการตรวจจับสัญญาณ สำหรับเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น (Flexible sensor) สามารถหาค่าได้จาก ค่าความคลาดเคลื่อน (Error) จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ลบกับหนึ่งร้อยจะได้ค่าออกมาเป็นค่าร้อยละของความแม่นยำ (%Accuracy)

2.2.1.3 ความเสถียรในการตรวจจับ (Stability)

ความเสถียรในการตรวจจับเป็นการนำสัญญาณที่ได้จากการนำแรงเชิงกลโดยการดึงยืดชิ้นงานมาซ้อนทับกับสัญญาณที่ได้จากการปล่อยแรงเชิงกลหรือการหดกลับของชิ้นงาน และทำการคำนวณหาพื้นที่ทับซ้อน เรียกว่า ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวคือความไม่เสถียรจากการตรวจจับสัญญาณ ดังนั้นต้องนำร้อยละที่ได้มาลบด้วยหนึ่งร้อย จะได้ค่าร้อยละความเสถียร (%Stability)

2.2.1.4 เวลาที่ใช้ในการตอบสนองและคืนกลับ (Response and recovery time)

เวลาในการตอบสนองของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น (Response time) เริ่มต้นขึ้นเมื่อวัสดุเกิดการยืดออกจนถึงระยะที่กำหนด และเมื่อปล่อยให้วัสดุคืนกลับในตำแหน่งเริ่มต้น จะได้เวลาในการคืนกลับของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น (Recovery time)

2.2.1.5 ความสามารถในการตรวจจับระยะยาว (Long-term ability)

ความสามารถในการตรวจจับระยะยาว เป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถของเครื่องมือวัดเมื่อมีการใช้งานเป็นระยะเวลาที่ยาวนาน โดยเครื่องมือวัดต้องแสดงค่าเดิมเมื่อมีการใช้งานเป็นระยะเวลาที่ต่อเนื่องกัน

2.3 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol: PVA)

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) [6] เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดหนึ่งถูกค้นพบและนำมาใช้งานครั้งแรกในปี ค.ศ.1924 สมบัติของ PVA คือ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น สามารถละลายน้ำได้ ทนต่อการกัดกร่อนของน้ำมันและตัวทำละลาย มีความแข็งแรงเชิงกล มีความยืดหยุ่นและต้านทานแรงดึงสูง สามารถปรับเปลี่ยนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

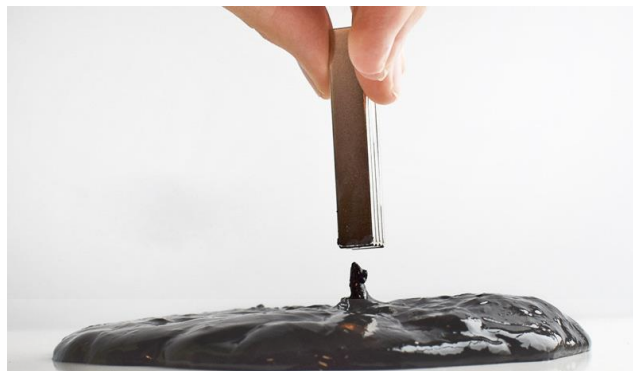
สายโซ่ได้โดยการเชื่อมขวางทางเคมีหรือทางกายภาพจากการที่มีหมู่ไฮดรอกซิลมาก และเนื่องจากความสามารถในการละลายน้ำที่ดีสารละลาย PVA จึงสามารถนำมาทำเป็น H ที่มีความบริสุทธิ์สูง ใช้ในการสร้างเป็นเซนเซอร์ตรวจจับความชื้น การตรวจวัดค่า pH เซนเซอร์ตรวจจับโลหะหนัก [3] และจากสมบัติของ PVA ที่มีความแข็งแรงเชิงกลและความยืดหยุ่นสูง ส่งผลให้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซนเซอร์ให้สามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวได้ เช่นการนำไปสร้างเป็นเซนเซอร์ยืดหยุ่นเพื่อตรวจจับการเคลื่อนไหวของร่างกายมนุษย์ สำหรับประยุกต์ใช้ PVA นั้นมีการนำไปใช้งานหลากหลายประเภท เช่นการนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ ด้านการเกษตร และด้านสิ่งทอ

2.4 ไฮโดรเจล (Hydrogel: H)

ไฮโดรเจล (H) [7] คือพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นโครงข่ายสามมิติ (3D crosslinking network) ด้วยลักษณะสายโซ่ที่ยาวและมีโมเลกุลที่ขดตัวอยู่ภายใน ส่งผลให้โครงสร้างมีรูพรุน โดย H จะมีกลุ่มที่ทำอันตรกิริยา (Interaction) กับโมเลกุลของน้ำ เรียกว่ากลุ่มไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic group) ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) และหมู่เอไมด์ (Amide group) เป็นต้น และมีกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำหรือกลุ่มไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic group) ได้แก่ หมู่-เมทิล (Methyl group) โดยสมบัติหลักของ H คือมีความสามารถในการดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้าง ทำให้สามารถขยายตัวออกได้ และเมื่อมีการเสียน้ำไปภายในโครงสร้างก็จะเกิดการหดตัว และนอกจากนี้ H ยังมีความยืดหยุ่นตัวสูง สามารถคืนรูปกลับได้ ดังนั้นในทางชีวการแพทย์จึงเลือกนำ H มาประยุกต์ใช้ในการสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแบบยืดหยุ่น (Flexible sensor)

2.4.1 ไฮโดรเจลแม่เหล็ก (Magnetic hydrogel: MH)

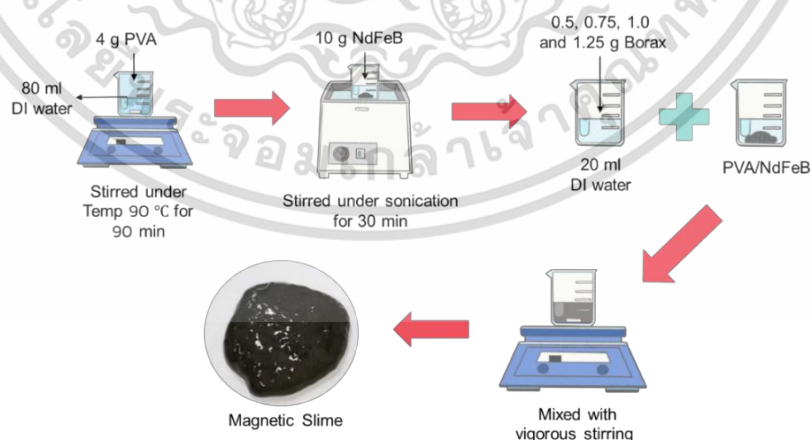
ไฮโดรเจลแม่เหล็ก (MH) เป็นวัสดุที่มีความเป็นไฮโดรเจล (H) เมื่อทำการเติมอนุภาคแม่เหล็กนีโอดีเมียม (Neodymium) ลงไปทำให้ได้เป็นไฮโดรเจลแม่เหล็กที่มีสมบัติในการยืดหยุ่นตัวสูง สามารถคืนรูปได้ สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็ก และยังสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี หลังจากการทดสอบสมบัติเหล่านี้ จึงสามารถสรุปได้ว่า MH สามารถนำมาประยุกต์ใช้และพัฒนาเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการส่งการแบบยืดหยุ่น (Flexible sensor) สำหรับงานวิจัยนี้ได้ แสดงลักษณะของ MH ได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ไฮโดรเจลแม่เหล็ก (MH) [8]

2.4.2 การเตรียม MH

เตรียมน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร ต้มที่อุณหภูมิ 90 °C ปิดกระจกนาฬิกาการอนสารเริ่มเดือด จากนั้นทำการชั่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 4 กรัม แล้วเติมลงในน้ำกลั่น ทำการปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสารเป็นเวลา 90 นาที สังเกตเห็นสารละลายเข้ากันดีได้เป็นสารละลายใสไม่มีสี ต่อมานำสารละลายที่เตรียมได้ไปทำการโซนิเคชัน (Sonication) ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที โดยทำการชั่ง NdFeB 10 กรัม เพื่อเติมลงในสารละลาย ระหว่างนั้นทำการเตรียมสารละลายบอแรกซ์โดยการชั่งสารบอแรกซ์ 1.25 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร เพื่อทำการเติมลงในสารละลายทำการโซนิเคชันหลังจากครบเวลาแล้วทำการปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารให้ความร้อนที่ความแรงสูงสุด ได้ MH ที่ใช้ในการทดสอบต่อไป แสดงขั้นตอนการเตรียมดังรูปที่ 2.3

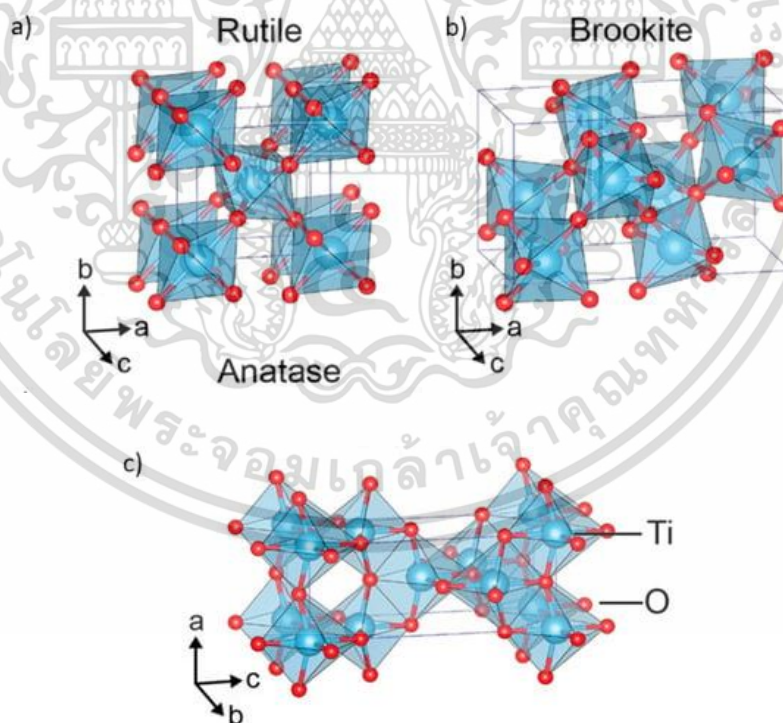


รูปที่ 2.3 วิธีการเตรียม MH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมหนึ่งอะตอม กับออกซิเจนหกอะตอมที่อยู่ล้อมรอบไทเทเนียม ลักษณะโดยทั่วไป คือ เป็นผงสีขาว ทึบแสง ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติมีอยู่ 3 รูปแบบ คือ แบบรูไทล์ (Rutile) บรูคไคท์ (Brookite) และอนาเทส (Anatase) [9] แสดงลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 2.4 โดยมีถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ เนื่องจากมีความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษ และราคาถูก มีชื่อทางการค้า คือ ไททานเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) ไททานิกแอนไฮไดรด์ (Titanic anhydride) และไททานีย (Titania) ใช้สัญลักษณ์แทนคือ Ti มีเลขอะตอมเท่ากับ 22 โดยมีสมบัติที่แข็งแรง สามารถทนต่อสภาพกัดกร่อนได้ดี ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยธรรมชาติจะพบน้อยมาก ส่วนใหญ่ไทเทเนียมไดออกไซด์มักถูกนำไปขึ้นรูปเป็นวัสดุนาโนที่มีโครงสร้างแบบต่าง ๆ เช่น อนุภาคนาโน (Nanoparticles) ท่อนาโน (Nanotubes) เส้นใยนาโน (Nanofibers) แท่งนาโน (Nanorods) นาโนริบบอน (Nanoribbons) และแผ่นนาโน (Nanosheet) ซึ่งขนาดอนุภาคและโครงสร้างของวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับวิธีการและสภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์

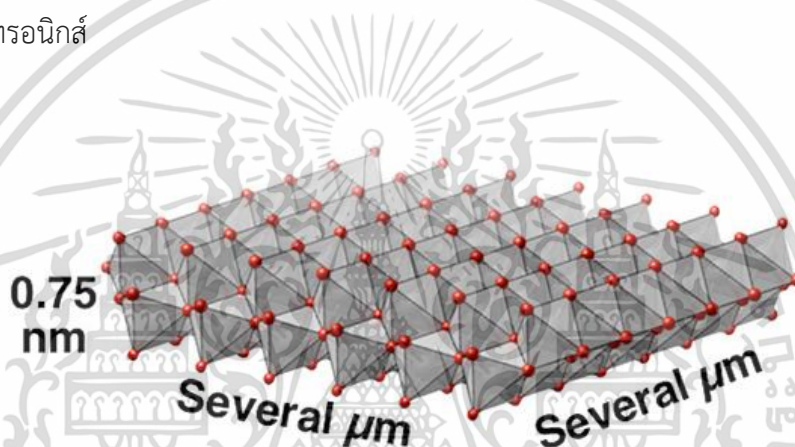


รูปที่ 2.4 โครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พบได้ตามธรรมชาติ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนชีท (Titanium dioxide nanosheet: TiNSs)

ไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนชีท (TiNSs) เป็นวัสดุนาโนที่มีโครงสร้างอยู่ในระบบสองมิติ (2D Dimensional) คือมีมิติทางกายภาพอยู่ในช่วงนาโนเมตรเพียง 1 มิติ ลักษณะเป็นแผ่น และมีพื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่ (Specific area) ส่งผลให้มีการเกิดปฏิกิริยาได้ดี มีความเสถียรทางเคมี และไม่เป็นพิษ [10] โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนชีทแสดงดังรูปที่ 2.5 สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนชีท เป็นวัสดุฉนวนไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่สามารถทำให้มีขั้วได้โดยใช้สนามไฟฟ้า คือ มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง (Dielectric constant) ซึ่งมีความสามารถในการมีขั้วที่สูง มีความเสถียรทางความร้อนมาก เหมาะสำหรับการนำไปปรับปรุงสมบัติให้แก่วัสดุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น โดยถูกนำมาใช้มากในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนชีท [11]

2.5.1 กระบวนการสังเคราะห์ TiNSs

เริ่มต้นทำการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (Solid state reaction) โดยการสังเคราะห์ผลึกสารตั้งต้น $Cs_{0.7}Ti_{1.825}O_4$ ทำการกำหนดสัดส่วนโมลของ Cs : Ti เท่ากับ 1 : 5.3 และเตรียมสารซีเซียมคาร์บอเนต (Cs_2CO_3) และไทเทเนียม (TiO_2) บด Cs_2CO_3 ผสมโดยละเอียด แล้วทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $800^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการเผาต่อที่อุณหภูมิ $800^{\circ}C$ เป็นเวลา 20 ชั่วโมง 2 รอบ จากนั้นเริ่มเข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) โดยนำสารตั้งต้น $Cs_{0.7}Ti_{1.825}O_4$ แช่ในสารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ และปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อเป็นการนำไอออนของ H^+ เข้ามาแทนที่ไอออนของ Cs ได้ออกมาเป็น $H_{0.7}Ti_{1.825}O_4 \cdot H_2O$ และกระบวนการสุดท้ายเป็นการแยกชั้นของสารประกอบออกไซด์นาโนชีท (Exfoliation) โดยกำหนดสัดส่วนโมลของโปรตอน H^+ ของสารเตตระบิวทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(TBAOH) : สาร $H_{0.7}Ti_{1.825}O_4 \cdot H_2O$ เท่ากับ 1:1 ทำการเขย่าขวดสารเป็นเวลา 7 วัน เพื่อให้สารทั้งสองทำปฏิกิริยากัน สุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนซีทสารคอลลอยด์สีขาวขุ่น [12]

2.7 วัสดุนาโน (Nanomaterial)

วัสดุนาโน [13] หรือวัสดุที่มีขนาดอนุภาคอยู่ที่ 1-100 นาโนเมตร ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กส่งผลให้มีพื้นที่ผิวมาก (Surface area) เมื่อเทียบกับวัสดุหยาบ (Bulk materials) โดยวัสดุนาโนเป็นวัสดุที่สามารถเป็นได้ทั้งโลหะ (Iron) เซรามิก (Ceramic) พอลิเมอร์ (Polymer) และคอมโพสิต (Composite) ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาโดยการดัดแปลงการเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลในช่วง 1-100 นาโนเมตร และยังสามารถเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นผลที่ได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ วัสดุนาโนถูกเลือกใช้ในอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งการดูแลสุขภาพ และการแพทย์ เครื่องสำอาง ไปจนถึงการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม วัสดุนาโนสามารถแบ่งออกได้หลายประเภท โดยแต่ละประเภทจะถูกนำไปประยุกต์ใช้ตามความเหมาะสม โดยประกอบไปด้วยหมุดควอนตัม (Quantum Dots) อนุภาคนาโน (Nanoparticles) ลวดนาโน (Nanowires) ท่อนาโน (Nanotubes) เส้นใยนาโน (Nanofiber) และแผ่นนาโน (Nanosheet) ประเภทของวัสดุนาโน [14] สามารถแบ่งออกได้ตามโครงสร้างที่มีระบบมิติ ดังนี้

2.7.1 ระบบศูนย์มิติ (Zero-dimensional: 0D)

วัสดุนาโนที่มีโครงสร้างในระบบศูนย์มิติ คือ โครงสร้างที่มีมิติทางกายภาพของวัสดุอยู่ในช่วงนาโนเมตรทั้งสามมิติ (กว้าง ยาว สูง) เช่น อนุภาคนาโน (Nanoparticles) หมุดควอนตัม (Quantum dots) เป็นต้น

2.7.2 ระบบหนึ่งมิติ (One-dimensional: 1D)

วัสดุนาโนที่มีโครงสร้างในระบบหนึ่งมิติ คือ โครงสร้างที่มีมิติทางกายภาพของวัสดุอยู่ในช่วงนาโนเมตรเพียงสองมิติ อีกหนึ่งมิติไม่ถูกจำกัดขนาด เช่น ท่อนาโน (Nanotubes) เส้นใยนาโน (Nanofiber) เป็นต้น

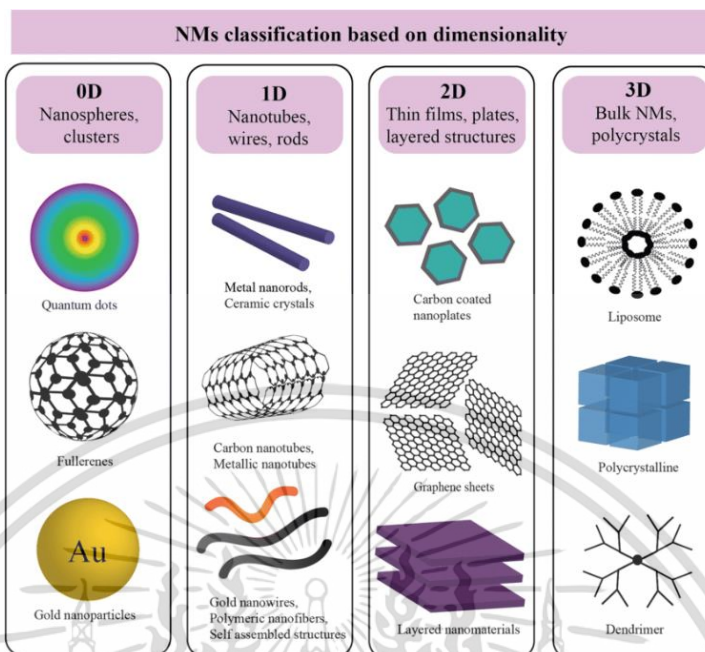
2.7.3 ระบบสองมิติ (Two-dimensional: 2D)

วัสดุนาโนที่มีโครงสร้างในระบบสองมิติ คือ โครงสร้างที่มีมิติทางกายภาพของวัสดุอยู่ในช่วงนาโนเมตรเพียงหนึ่งมิติ อีกสองมิติไม่ถูกจำกัดขนาด เช่น แผ่นนาโน (Nanosheet) เป็นต้น

2.7.4 ระบบสามมิติ (Three-dimensional: 3D)

สำหรับโครงสร้างในระบบสามมิติ คือ วัสดุไม่ถูกจำกัดอยู่ในระดับนาโนในทุกมิติ หรือไม่มิติทางกายภาพใดอยู่ในช่วงนาโนเมตร โดยจะมีขนาดที่มากกว่า 100 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แผนภาพโครงสร้างของวัสดุนาโนที่มีการจำแนกตามมิติของผลึก [15]

2.8 วัสดุเชิงประกอบ (Composite material)

วัสดุเชิงประกอบ [16] เป็นการนำเอาสมบัติที่ดีของวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดมาผนวกกันทำให้เกิดเป็นโครงสร้างและสมบัติที่แตกต่างไปจากเดิม และจะต้องไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันเพื่อให้สมบัติโครงสร้างไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้ประยุกต์ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบจะพบรอยต่อของสองวัสดุเรียกว่า อินเตอร์เฟส (Interface) โดยทั่วไปแล้วจะต้องทำให้วัสดุส่วนนี้มีความเข้ากันได้มากที่สุด ดังนั้นสมบัติของวัสดุจึงขึ้นอยู่กับความสามารถในการเข้ากันได้ของวัสดุที่นำมาประกอบกัน

2.8.1 ส่วนประกอบของวัสดุเชิงประกอบ

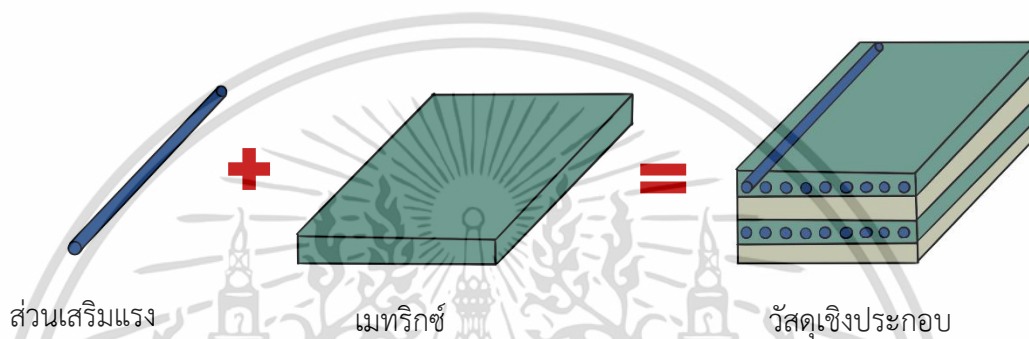
2.8.1.1 เมทริกซ์ (Matrix)

เป็นโครงสร้างหลักที่มีปริมาณมากในวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งเป็นเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) โดยทั่วไปนั้นเป็นส่วนที่ทำหน้าที่เป็นส่วนประกอบหลัก ๆ สำหรับวัสดุเชิงประกอบของพอลิเมอร์อาจเป็นได้ทั้งพอลิเมอร์ (Polymer) เซรามิก (Ceramic) และโลหะ (Iron) [17] ทำหน้าที่ปกป้องสารเสริมแรงจากความเสียหายที่อาจเกิดจากสภาพแวดล้อมและแรงที่กระทำกับวัสดุรวมถึงใช้เป็นตัวยึดสารเสริมแรงให้อยู่ด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1.2 ส่วนเสริมแรง (Reinforcement)

เป็นวัสดุส่วนที่มีปริมาณน้อยกว่าซึ่งเป็นเฟสกระจาย (Distribute phase) ที่กระจายตัวอยู่บนเมทริกซ์ ส่วนมากมักเป็นเส้นใยแต่บางครั้งก็อาจเป็นผลึกอนุภาคนาโน (Nano crystalline) โดยมีหน้าที่ในการเสริมความแข็งแรงให้กับสารเพื่อป้องกันไม่ให้อายุการใช้งานที่สูงขึ้น ส่วนประกอบของวัสดุเชิงประกอบแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของวัสดุเชิงประกอบ ดัดแปลงจาก [18]

2.8.2 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ

2.8.2.1 วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal matrix composite)

โลหะเมื่อได้รับแรงที่มากกระทำเป็นเวลานานจะเกิดความล้าขึ้นจึงต้องมีการเติมสารเสริมแรงลงในโลหะเพื่อเพิ่มสมบัติความทนทานต่อความล้าและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานยิ่งขึ้น โดยจะมีโลหะเป็นเมทริกซ์ (Matrix) มีเส้นใยและอนุภาคที่ทำมาจากแก้ว เซรามิกเป็นวัสดุเสริมแรง โดยใช้ลักษณะเด่นของเซรามิกคือมีความแข็งสูงและมีสมบัติที่ดีในการทนอุณหภูมิสูงมาเสริมให้กับเนื้อพื้นโลหะให้มีความต้านทานการสึกหรอที่ดีขึ้นและเพิ่มสมบัติที่อุณหภูมิสูงให้กับโลหะ

2.8.2.2 วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic matrix composite)

วัสดุเซรามิกมีความทนทานต่ออุณหภูมิสูง ทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี และไม่นำความร้อนแต่วัสดุเซรามิกนั้นมีความเปราะและแตกหักง่ายจึงต้องมีการเติมสารเสริมแรงให้แก่เมทริกซ์เซรามิกเพื่อให้เกิดความเหนียวขึ้น มีโลหะและพอลิเมอร์เป็นวัสดุเสริมแรงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับเนื้อพื้นที่เป็นเซรามิกซึ่งเดิมมีความแข็งแรงอยู่แล้วและทำให้มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น

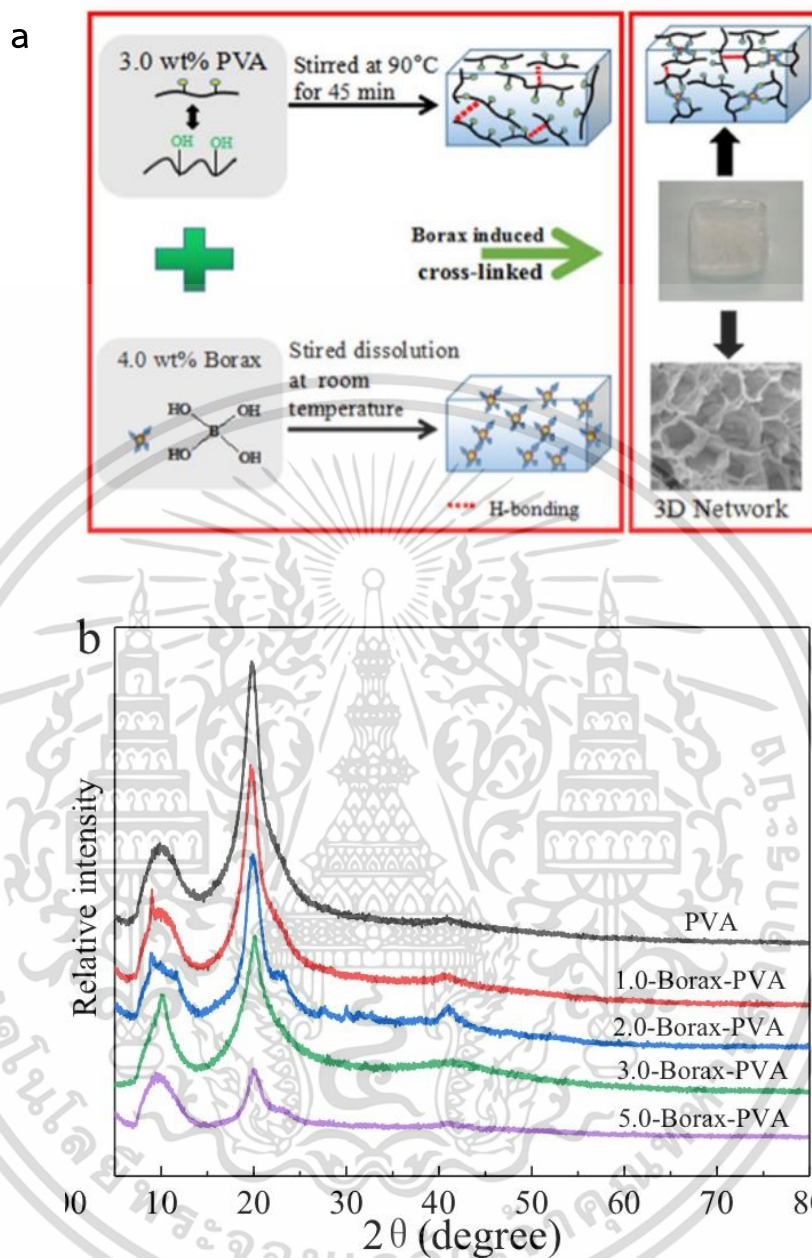
2.8.2.3 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite)

เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีหน่วยซ้ำมาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวพอลิเมอร์จึงมีความหนาแน่นต่ำและมีความแข็งแรงไม่มากนัก โดยพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ และมีเส้นใยที่เป็นแก้ว เซรามิก หรือโลหะเป็นวัสดุเสริมแรงเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลของเนื้อพื้นที่เป็นพอลิเมอร์ให้มีความแข็งแรงสูงขึ้น โดยที่เส้นใยเสริมแรงจะทำหน้าที่เป็นตัวรับแรงในขณะที่เนื้อพื้นที่ทำหน้าที่ในการกระจายแรงไปให้เส้นใยต่าง ๆ

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chen wang และคณะ [19] ได้ทำการผลิตวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮโดรเจลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้มข้น และบอแรกซ์ (Borax) ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวาง มีวิธีการเตรียมไฮโดรเจล (H) โดยการผสมทางกายภาพอย่างง่ายที่อุณหภูมิห้องโดยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ถูกละลายในน้ำปราศจากไอออน 97 มิลลิลิตร และทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 45 นาทีและวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นทำการเติมบอแรกซ์จำนวน 4 กรัมที่ถูกละลายในน้ำปราศจากไอออน 96 มิลลิลิตรโดยบอแรกซ์ถูกกำหนดให้มีปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกันที่ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก และทำการปั่นกวนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และบอแรกซ์ ได้เป็น H ที่มีโครงสร้างเป็นเครือข่ายสามมิติ (3D crosslinking network) ประกอบด้วยพันธะบอริกเอสเทอร์ (Boric ester bond) เป็นจุดเชื่อมขวาง ดังนั้นจากการเตรียม H จึงมีการศึกษาโครงสร้างเชิงพื้นที่ สมบัติการพองตัว การยืดหยุ่น ความหนืด และสมบัติแรงดึง อีกทั้งสมบัติในการคืนรูปของ H ที่มีอัตราส่วนบอแรกซ์และ PVA ที่ต่างกัน จากการทดลองเมื่อทำการเติมบอแรกซ์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ H ขยายตัวขึ้น โดยจากผล XRD ยืนยันว่า H ที่ได้มีโครงสร้างที่คล้ายกัน ใกล้กับค่า 2θ ที่ 10 และ 20 อย่างไรก็ตามจากกราฟ (b) แสดงให้เห็นว่าขนาดของโดเมนผลึกใน H ลดลงเมื่อมีการเติมบอแรกซ์ที่เพิ่มขึ้น เกิดจากการที่บอแรกซ์มารบกวนเครือข่ายพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้าง PVA นอกจากนี้ H เป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำและมีโครงสร้างเครือข่ายสามมิติที่เป็นเอกลักษณ์มีการดูดซึมน้ำที่ดีเยี่ยม และมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ H จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในด้านต่าง ๆ เช่น ผลิตเป็นอวัยวะเทียม วัสดุปิดแผล คอนแทค-เลนส์ และการทำงานทางด้านวิศวกรรม เป็นต้น ในปัจจุบันมีการใช้วัสดุเชิงประกอบที่เป็น H เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม ดังนั้นจึงมีการพัฒนา H ที่เกิดจากพันธะบอริกเอสเทอร์เนื่องจากสามารถตอบสนองต่อสิ่งเร้าภายนอก เช่น อุณหภูมิ ค่า pH สนามไฟฟ้า และความแรงของไอออนิก ซึ่งเป็นแนวทางใหม่ในการพัฒนา H อัจฉริยะที่มีฟังก์ชันการตอบสนองที่หลากหลาย

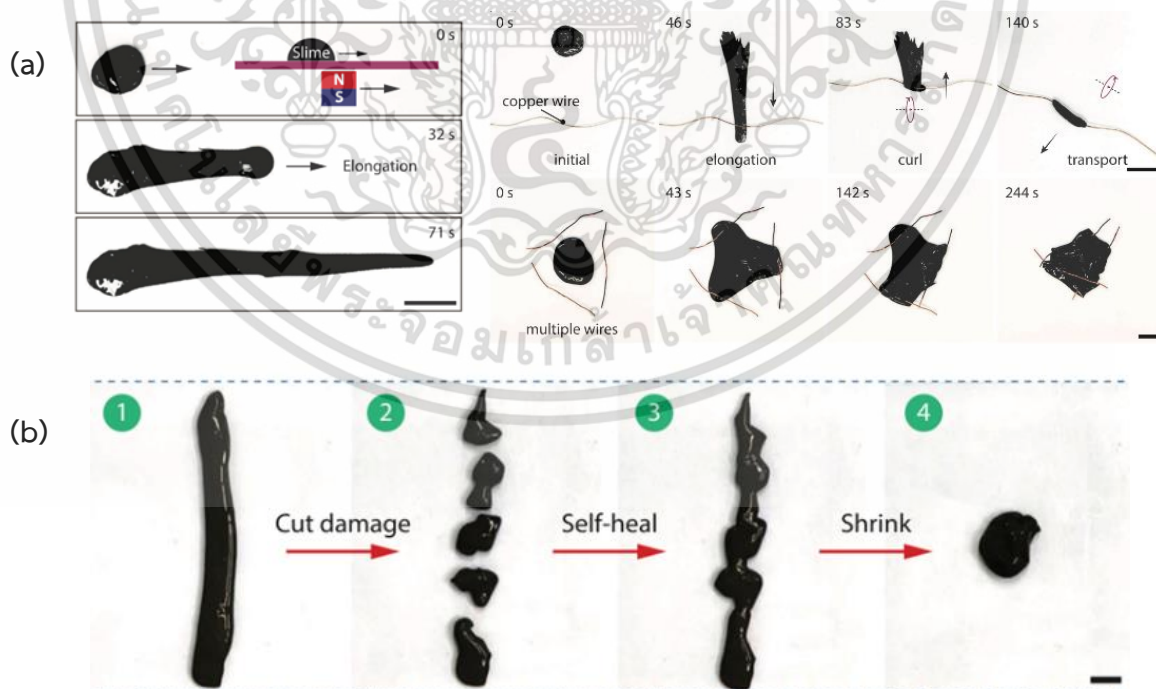
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



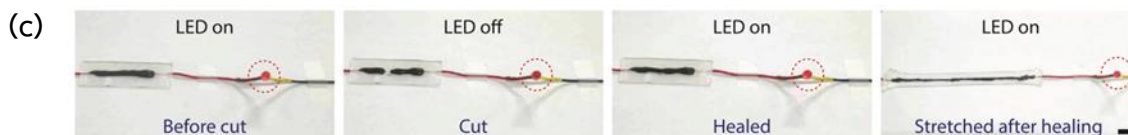
รูปที่ 2.8 (a) รูปแผนผังแสดงกลไกในการก่อตัวระหว่าง PVA และ Borax เป็นโครงสร้างเครือข่ายสามมิติ (3D crosslinking network) (b) แสดงรูปการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD) ของ H PVA บริสุทธิ์ 1.0-Borax-PVA 2.0-Borax-PVA 3.0-Borax-PVA และ 5.0-Borax-PVA ตามลำดับ [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mengmeng Sun และคณะ [4] ได้ทำการประดิษฐ์หุ่นยนต์สไลม์แม่เหล็กที่สามารถกำหนดค่าใหม่ได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยเกิดจากการเสีรูปร่าง และการปรับตัวตามสภาพแวดล้อมต่าง ๆ แบบมัลติฟังก์ชัน (Multifunction) ในการศึกษาหุ่นยนต์สไลม์แม่เหล็กจะถูกเตรียมขึ้นโดยการเติม PVA 1 กรัม ลงในน้ำปราศจากไอออน 20 มิลลิลิตร และทำการปั่นกวนที่ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการเติมผงแม่เหล็กนีโอดีเมียม (NdFeB) 10 กรัม ลงในสารละลายที่เตรียมไว้แล้วทำการปั่นกวนภายใต้คลื่นอัลตราโซนิคเป็นเวลา 30 นาที ขณะเดียวกันมีการเตรียมสารละลายบอแรกซ์โดยใช้บอแรกซ์จำนวน 1 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน 20 มิลลิลิตร หลังจากนั้นจึงทำการผสมสารละลายบอแรกซ์ และสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการกระจายตัวของ NdFeB อยู่ภายใน ซึ่ง จะทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องโดยมีอัตราส่วนสารละลายบอแรกซ์ต่อสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการกระจายตัวของ NdFeB ที่ 1:4 ของสไลม์แม่เหล็ก ได้เป็นหุ่นยนต์สไลม์ (Slime robot) โดยอนุภาคแม่เหล็กภายในทำให้มีความสามารถในการเคลื่อนที่ และมีสมบัติเป็นสื่อกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีวัสดุอีลาสโตเมอร์ (Elastomer-based) เป็นไฮโดรเจล (Hydrogel) ซึ่งช่วยในการปรับเปลี่ยนรูปร่างของหุ่นยนต์สไลม์แม่เหล็กให้สามารถผ่านช่องแคบได้ถึง 1.5 มิลลิเมตร และอนุภาคแม่เหล็กภายในที่เรียกว่า นีโอดีเมียม (NdFeB) ช่วยในการเคลื่อนที่ผ่านสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนได้ อีกทั้งสามารถตรวจจับวัตถุที่เป็นของแข็งได้ ผ่านการควบคุมโดยแม่เหล็กถาวร จึงทำให้สามารถขนส่งวัตถุที่เป็นอันตรายได้ รวมถึงสามารถตรวจสอบการเคลื่อนไหวของมนุษย์ การสับเปลี่ยนวงจรไฟฟ้า และการซ่อมแซมวงจรไฟฟ้า



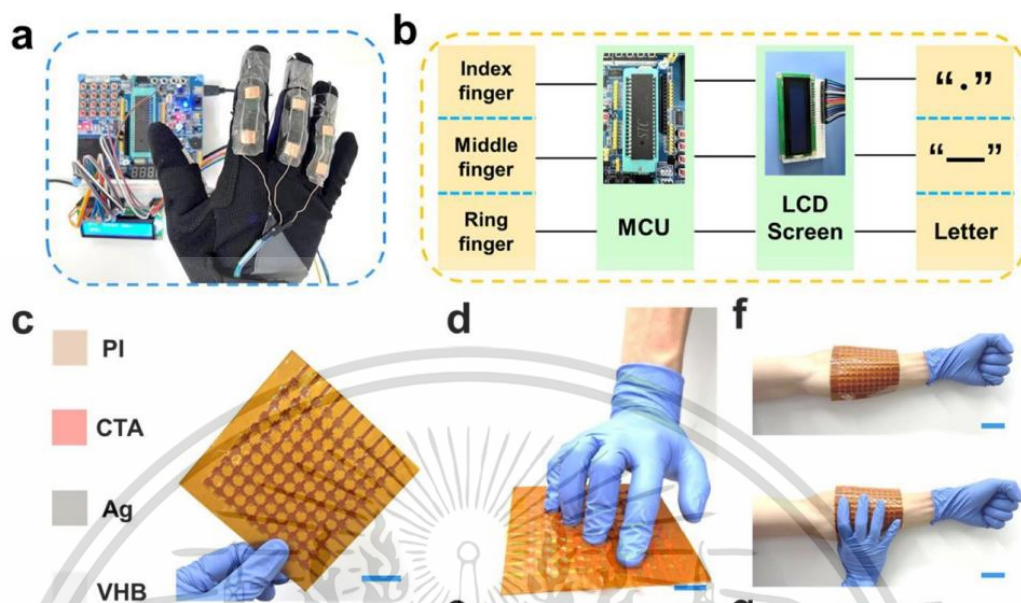
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 (a) แสดงการเคลื่อนที่ของสไลม์แม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็ก (b) แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการคืนรูปของสไลม์แม่เหล็ก (c) แสดงวงจรไฟฟ้าที่ถูกเชื่อมต่อกับสไลม์แม่เหล็กขณะปกติ ขณะเกิดการตัดขาด ขณะมีการคืนรูป และขณะที่ถูกดึงยืดออก [4]

Jipeng Zhang และคณะ [20] ได้ทำการพัฒนาไฮโดรเจลคาร์บอกซีเอทิลไคติน (Carboxyethyl Chitin) และพอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) เพื่อช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพที่สูงขึ้นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น (Flexible sensor) โดยไฮโดรเจลถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันโดยมีองค์ประกอบของเจลที่เรียกว่า CxTyAz โดยที่ C,T,A เป็นตัวแปรอัตราส่วนโมลาร์ของการป้อนระหว่างคาร์บอกซีเอทิลไคติน (CECT), CECT และ อะคริลาไมด์ (AAm) ตามลำดับ โดย x คืออัตราส่วนโมลของอะคริลาไมด์ต่อหน่วย y คือ อัตราส่วนน้ำหนักของ CECT (wt%) ในสารละลายพรีพอลิเมอร์ไรเซชัน และ z คืออัตราส่วนน้ำหนักของอะคริลาไมด์ (wt%) ในสารละลายพรีพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยวิธีการเตรียมไฮโดรเจลคาร์บอกซีเอทิลไคติน (Carboxyethyl Chitin) และพอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) จะถูกเตรียมโดยการสังเคราะห์ $C_{11}T_4A_{20}$, CECT-11 (0.6 g) AAm (3.0 g) MBA (0.0015 g, 0.05 wt% of AAm) APS (0.06 g, 2.0 wt% of AAm) และน้ำกลั่น 11.4 g ถูกเติมลงในหลอด และทำการปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเมื่อทำการผสมสารทั้งหมดจนละลายเป็นสารเนื้อเดียวกัน จากนั้นจึงได้เป็นสารละลายที่มีลักษณะโปร่งใส และทำการเทสารลงใน glass modules ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงได้เป็นเจล โดยวิธีการเตรียมเจล PAAm ที่บริสุทธิ์ใช้วิธีการเตรียมเช่นเดียวกัน โดยในการวิจัยนี้ได้มีการเลือกคาร์บอกซีเอทิลไคติน (CECT) เนื่องจากมีหน่วยโครงสร้างของ N-acetyl-D-glucosamine และ D-glucosamine ซึ่งมีหมู่ไฮโดรฟิลิกที่เป็นส่วนชอบน้ำ (hydrophilic groups) จำนวนมาก รวมถึงมีวงแหวนไพราโนสที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic pyranose ring) และหมู่อะซิติล (acetyl groups) ที่เหมาะกับการทำปฏิกิริยากับพอลิอะคริลาไมด์ (PAAm) ผ่านการสร้างพันธะโควาเลนต์ ที่นำไปสู่การเพิ่มสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจล (H) ซึ่งในปัจจุบันไฮโดรเจลได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในฐานะวัสดุนำไฟฟ้าที่ยืดหยุ่นได้ โดยมีฟังก์ชันต่าง ๆ ที่รวมไว้ในตัวเดียวแบบมัลติฟังก์ชัน (Multifunctional) ทั้งการนำไฟฟ้าที่สูง ความสามารถในการยืดหยุ่นตัวสูง ความเหนียว ความต้านทานต่อความล้าที่ดี จึงได้มีการประดิษฐ์เซนเซอร์ที่ใช้ H เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าในด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเป็นแหล่งพลังงานที่สวมใส่ได้แบบโทรโอบิเล็กทริกที่มความเป็นมิตรต่อมนุษย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

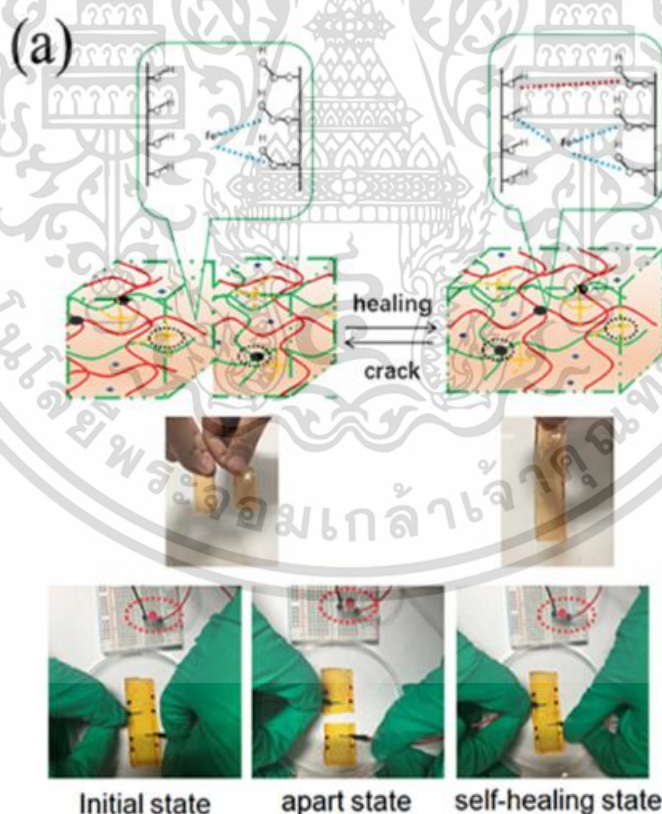


รูปที่ 2.10 (a) ภาพถ่ายของอุปกรณ์ที่ได้ต่อบระหว่างมนุษย์กับเครื่องจักรโดยทำเป็นเซนเซอร์วัดการเคลื่อนไหวของมนุษย์ (b) แผนภาพวงจรและสัญญาณต่าง ๆ (c) รูปแบบพื้นผิวของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบอาร์เรย์เซนเซอร์โดยใช้ H (d) ภาพถ่ายของผิวอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ 4 นิ้วตะบนพื้นผิว [20]

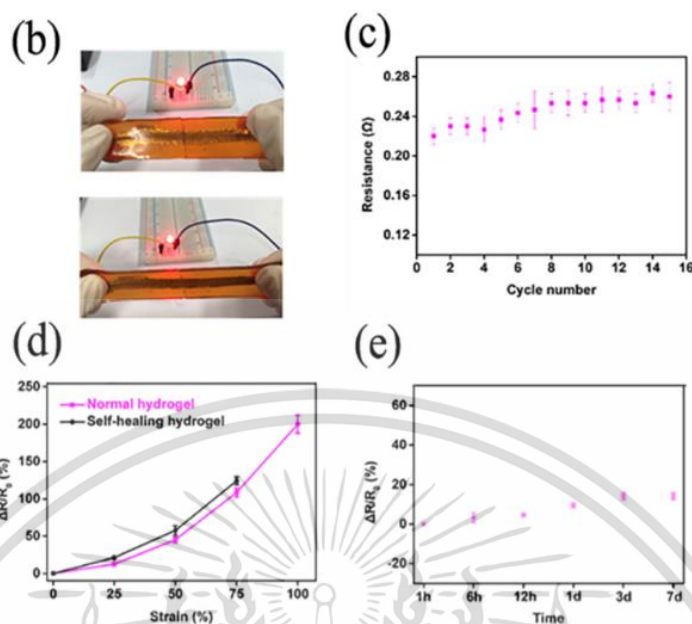
Danyang Wang และคณะ [21] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับเซนเซอร์ตรวจจับทางสรีระวิทยาจากไฮโดรเจล (H) ที่ถูกเพิ่มสมบัติโดย Galn และ PVA/PAA/Fe³⁺ ทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ วัสดุนำไฟฟ้าที่ใช้ใน H นำไฟฟ้าแบบดั้งเดิมมีความแข็ง ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุต่ำ นอกจากนี้การใช้พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) เพื่อสร้างเจลทำให้ H ไม่มีสมบัติในการสมานตัวเอง ซึ่งจำกัดการนำไฟฟ้า จากเหตุผลข้างต้นได้มีการใช้คุณลักษณะของความสามารถในการเคลื่อนที่ไอออนของเหล็กไตรวาเลนต์ที่แข็งแกร่งเพื่อเตรียม PVA/PAA/Fe³⁺ ระบบไฮโดรเจลโครงสร้างเครือข่ายสามมิติ และออกแบบโครงสร้างแบบประกบเพื่อห่อหุ้มโลหะเหลวเกลืออินเดียมดีบุก (Galn) ไว้ใน H ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าที่แข็งแกร่งของโลหะเหลวในขณะที่ปกป้องโลหะเหลวจากการถูกออกซิไดซ์ โดยมีวิธีการเตรียม H โดยขั้นตอนแรกพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) (8 % โดยน้ำหนักของน้ำ) ถูกเตรียมในขวดก้นกลมโดยทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนผง PVA ละลายทั้งหมดมีลักษณะเป็นสารละลายสีใส หลังจากนั้นทิ้งให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง โดยจะมีการเตรียมมอนอเมอร์ AA 6 มิลลิลิตร (30 % โดยน้ำหนัก) ถูกเติมลงในสารละลาย PVA ที่เตรียมไว้ที่ละหยด โดยการการเตรียมจะมีการตรวจสอบความสามารถของไอออนเหล็กต่อ H ที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำไฟฟ้าได้โดยการเติมแอนไฮดรัส เฟอร์ริก คลอไรด์ (anhydrous ferric chloride) 2 มิลลิลิตรที่มีความเข้มข้นแบบเกรเดียนต์ ที่ 0.25 0.5 0.75 และ 1 โมลต่อลิตรจะถูกเติมลงซ้ำ ๆ และคนเป็นเวลา 1 นาที ซึ่งสารละลายตั้งต้นของไฮโดรเจลที่ทำปฏิกิริยาแล้วจะถูกเทลงในแม่พิมพ์ และเชื่อมขวางที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ไฮโดรเจลที่นำไฟฟ้าได้โดยมีองค์ประกอบ PVA/PAA/Fe³⁺ ในขณะที่เดียวกันโลหะเหลว Galn จะถูกเติมลงในสารละลายตั้งต้น H ที่ทำปฏิกิริยาแล้ว และถูกเชื่อมขวางที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอีก 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนเพื่อขจัดรีเอเจนต์ที่ไม่ทำปฏิกิริยาแล้ว นอกจากนี้ยังมีสำรวจสมบัติเชิงกล การนำไฟฟ้า สมบัติการรักษาตัวเอง สมบัติการยึดเกาะ สมบัติการต้านแบคทีเรีย เป็นต้น และพิสูจน์สมบัติเหล่านี้โดยการทดลองกลไก ความเครียดแรงดึง-ความเครียด การทดลองอิมพีแดนซ์ไฟฟ้า การตรวจจับสัญญาณเซ็นเซอร์ความเครียด และการทดลองตรวจจับสัญญาณชีวภาพซึ่งจากผลการวิจัยพบว่า H ที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพการรักษาตัวเองที่ยอดเยี่ยมและมีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรีย อีกทั้งยังมีสมบัติเชิงกลที่พอดีกับ โมดูลัสยืดหยุ่นของผิวหนัง เมื่อเทียบกับอิเล็กโทรด Ag/AgCl แบบดั้งเดิม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

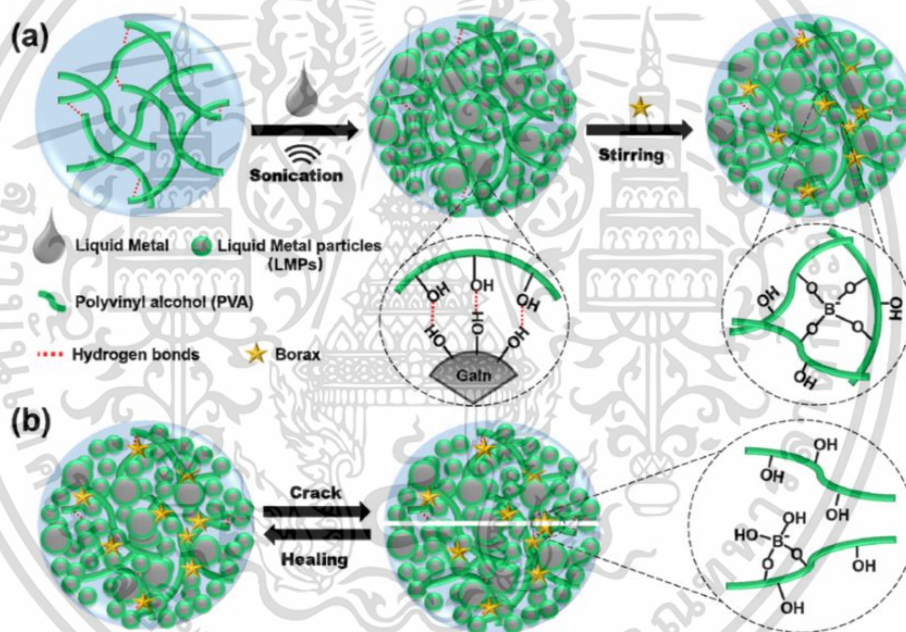


รูปที่ 2.11 การวิเคราะห์สมบัติการรักษาตัวเองของ H (a) แผนผังความสามารถในการซ่อมแซมตัวเองของ H ที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้า (b) การทดลองหลอดไฟสำหรับ H นำไฟฟ้าได้ ก่อนและหลังซ่อมแซมตัวเอง (c) อิมพีแดนซ์ทางไฟฟ้าของ H หลังจากยืดตัวเป็นวงกลม 14 ครั้ง (d) ความต้านทานแรงดึงของ H ก่อนและหลังการซ่อมแซมตัวเอง (e) ความต้านทานไฟฟ้าของ H ภายใน 7 วัน [21]

Meihong Liao และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาไฮโดรเจล (H) จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ที่เจือด้วยโลหะเหลวที่เสถียร (LMPs) เพื่อพัฒนาเป็นเซนเซอร์ผิวหนังเทียมที่มีความยืดหยุ่นและสามารถสวมใส่ได้ ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาเซนเซอร์ผิวหนังเทียมได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีน้ำหนักเบา พกพาได้สะดวก มีประสิทธิภาพการตรวจจับแบบเรียลไทม์ (Realtime) ที่ยอดเยี่ยม อย่างไรก็ตามเซนเซอร์ผิวหนังเทียมมักพบกับการฉีกขาดที่ง่ายส่งผลให้เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพทั้งทางเชิงกลและทางไฟฟ้า H จึงเป็นตัวเลือกที่ดีในการนำมาพัฒนาเป็นเซนเซอร์ โดยมีวิธีการเตรียม H จากสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) จาก PVA 1 กรัม ที่ถูกละลายในน้ำปราศจากไอออน 9 มิลลิลิตร จนได้สารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นการเตรียมสารละลาย PVA-LMPs ซึ่งสาร LM จำนวนหนึ่งจะถูกเติมลงในสารละลาย PVA ที่เป็นเนื้อเดียวกัน และทำการปั่นกวนภายใต้คลื่นอัลตราโซนิก โดยคลื่นจะถูกตั้งให้มีพลังงานเป็น 1,000 W โดยอุณหภูมิจะถูกควบคุมด้วยการใช้อ่างน้ำแข็ง ซึ่งในขณะเดียวกันจะมีการเตรียมสารละลายบอแรกซ์ 4 % โดยน้ำหนัก จากบอแรกซ์ 0.4 กรัมเติมลงในน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร เพื่อทำให้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน ณ อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นจึงทำการผสมสารละลายบอแรกซ์ 1 มิลลิลิตรลงในสารละลาย PVA-LMPs ซึ่งทำให้ออกการเกิดโครงร่างของ H ที่เป็นเช่นนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

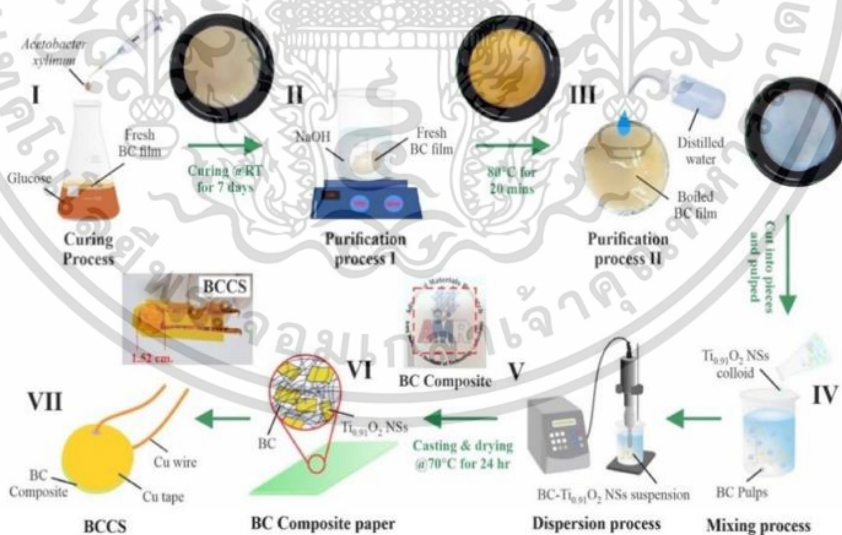
เนื่องจาก LMP ของ EGaln ถูกกระจายตัวในโครงร่างเครือข่ายแบบ 3 มิติของ PVA ที่ถูกเพิ่มสมบัติเชิงกล โดยบอแรต และก่อตัวเป็นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไฮโดรเจล LMPs ที่มีพันธะเชื่อมโยงแบบไดนามิกระหว่าง PVA และไอออนเตรไฮดรอกซีบอเรต ทำให้มีความสามารถในการซ่อมแซมตัวเองกลับสู่โครงสร้างเดิมได้โดยไม่เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพ อีกทั้งมีการเพิ่มสมบัติ H ด้วยการเติมโลหะเหลวที่เสถียร (LMPs) ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นโดยการกระจาย LMP ของแกเลียมและอินเดียม (EGaln) ลงในบอแรกซ์ด้วยวิธีการผสมแบบอัลตราโซนิกเพื่อกระจายอนุภาคให้มีความสม่ำเสมอ ทำให้ได้สมบัติที่มีการนำความร้อนสูง การนำไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม มีความยืดหยุ่น มีความเป็นพิษเล็กน้อยยืดหยุ่นได้ดี ซึ่งสามารถประดิษฐ์เป็นเซนเซอร์ผิวหนังที่มีความสามารถในการรักษาตัวเอง และมีสมบัติละลายน้ำได้ แสดงให้เห็นว่าเหมาะกับการทำเป็นเซนเซอร์อิเล็กทรอนิกส์แบบชั่วคราว



รูปที่ 2.12 การเตรียมเซนเซอร์ผิวหนังเทียมที่สามารถสวมใส่ได้แบบชั่วคราว (a) การก่อตัวของ PVA-LMPs H (b) PVA-LMPs H ที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ [22]

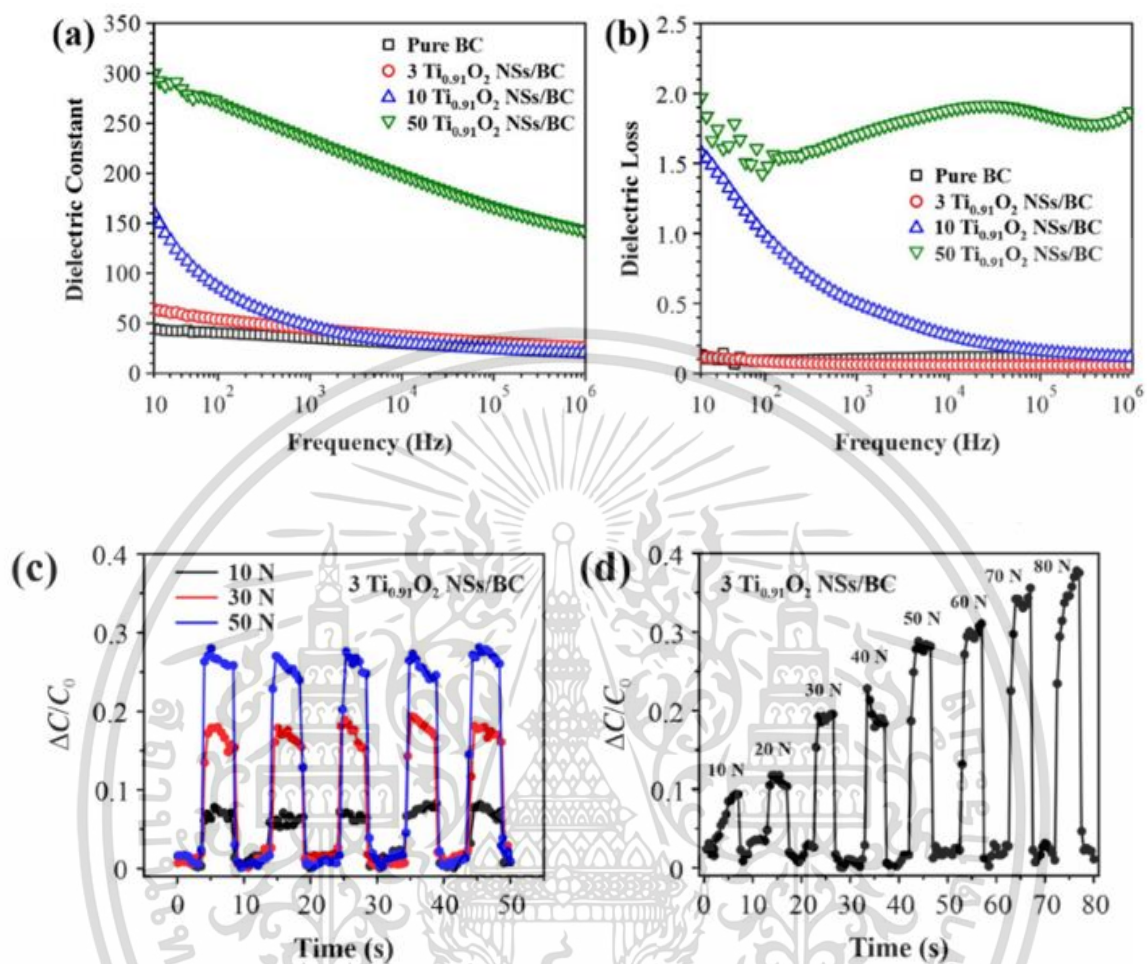
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Saichon Sriphan และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์ตรวจจับความเครียด (Capacitive) แบบยืดหยุ่น (Flexible sensor) โดยมีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบชีวภาพจากแบคทีเรียเซลลูโลส (BC) ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนซีท (TiNSs) ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state synthesis) ซึ่งในการทดลองได้มีการนำแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสที่มีความยืดหยุ่นและโปร่งแสงสูงเตรียมได้จากการหมักด้วยแบคทีเรียสายพันธุ์อะซิโตแบคเตอร์ไซลินัม (Acetobacter Xylinum) มาใช้เป็นเฟสหลัก และใช้แผ่นนาโนไททาเนตเป็นเฟสกระจาย ต่อมาได้ทำการสร้างเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นโดยนำแผ่นฟิล์มจากวัสดุเชิงประกอบที่ได้มาตัดให้เป็นวงกลมประกบด้วยแผ่นทองแดงทั้งลวด้านล่างและบน จากนั้นนำสายทองแดงมาติดบริเวณกึ่งกลางของทั้งสองด้านเพื่อใช้เป็นขั้วอิเล็กทริกและติดแคปตอนเทปเพื่อยึดให้แต่ละส่วนประกอบติดกัน เมื่อนำไปทดสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ดังกล่าว พบว่าเมื่อเติมแผ่นนาโนไททาเนตร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประมาณ 300 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอีก 2 ตัวอย่าง และจากการทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เติมแผ่นนาโนไททาเนตร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีความไวในการตรวจจับ (Sensitivity) มากที่สุดประมาณ $2.44 \times 10^{-3} \text{ kPa}^{-1}$ ภายใต้การให้แรงในช่วง 0-30 N แสดงดังรูปที่ 2.14 จากงานวิจัยนี้พบว่าวัสดุเชิงประกอบชีวภาพดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับแบบยืดหยุ่นได้ดีและสามารถนำไปต่อยอดในการใช้งานในอนาคตได้



รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสและแผ่นนาโนไทเทเนียมเพื่อใช้ในการสร้างเซนเซอร์ตรวจจับความเครียดแบบยืดหยุ่น [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 (a) และ (b) แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของวัสดุเชิงประกอบระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลส และแผ่นนาโนไททานเดียมโดยร้อยละต่าง ๆ (c) แสดงการตอบสนองแบบไดนามิก (Dynamics) ของ $3\text{Ti}_{0.91}\text{O}_2\text{NSs/BC}$ (d) แสดงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความจุสัมพัทธ์ของ BCCS ภายใต้การให้แรงที่แตกต่าง [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮโดรเจลแม่เหล็ก (Magnetic hydrogel: MH) และไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนชีท (Titanium dioxide nanosheet: TiNSs) เพื่อสร้างเป็นเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น (Flexible sensor) โดยในส่วนของขั้นตอนการเตรียมแบ่งออกเป็น ดังนี้ การเตรียม MH การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่าง MH กับ TiNSs และนอกจากนี้ยังมีวิธีการตรวจสอบและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุเชิงประกอบร่วมด้วย ในส่วนของรายละเอียดเกี่ยวกับสารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบรวมไปถึงเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงไว้ดังนี้

3.1 สารเคมี

1. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol: PVA) Mw 85,000-124,000, 99+% hydrolyzed ผลิตโดยบริษัทซิกมา-อัลดริช ประเทศไทย
2. บอแรกซ์ (Sodium tetraborate decahydrate: $\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) ผลิตโดยบริษัทคาร์โล เออร์บา รีโอเจนท์ ประเทศอิตาลี
3. ผงแม่เหล็กนีโอดีเมียม (Neodymium powder: NdFeB) 99.9% ผลิตโดยบริษัทนาโนเคมาโซน ประเทศแคนาดา
4. น้ำกลั่น (Distilled water)
5. สารคอลลอยด์ไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนชีท (Titanium dioxide: TiNSs) เตรียมได้จาก [12]

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. บีกเกอร์ขนาด 50, 80 และ 100 ml (Beaker)
2. กระจกตวงขนาด 10 และ 20 ml (Cylinder)
3. แท่งแก้วคนสาร (Stirring rod)
4. ช้อนตักสาร (Spatula Stainless)
4. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
5. แท่งแม่เหล็กกวนสารขนาด 40 mm (Magnetic Bar)
6. กระจกนาฬิกา (Watch Glass)
7. เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hot plate stirrer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic)
9. เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.0001 g รุ่น ML204/01 โดยบริษัท Mettler Toledo (Digital Laboratory Scale)
10. เตาอบ รุ่น Modell 100-800 โดยบริษัท MEMMERT (Oven)
11. ชุดกรองสุญญากาศ (Filtration assembly)
12. โถดูดความชื้น (Desiccator)
13. หลอดหยดสาร (Dropper)
14. ฟอर्सเซฟ (Forceps)
15. เวอร์เนีย (Vernier)
16. กระดาษกรอง เบอร์ 4 (Filter paper)
17. ขวดฉีดน้ำ (Wash bottle)
18. โกร่งบดสาร (Mortar and pestle)
19. เครื่องจ่ายไฟ (DC Power Supply) รุ่น UTP3305 ยี่ห้อ UNI-T
20. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) รุ่น UT39+ ยี่ห้อ UNI-T
21. กล้องควบคุมสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบตั้งโปรแกรมได้ รุ่น SH01-1CH โดยบริษัท S2 Innovation (Programmable Motion Control)
22. รางเลื่อนสไลด์บอลสกรู โดยบริษัท S2 Innovation (Ball Screw Slide)
23. เครื่องกรองแบบลดความดัน รุ่น WP6122050 โดยบริษัท Milliopore (Ultrafiltration)

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

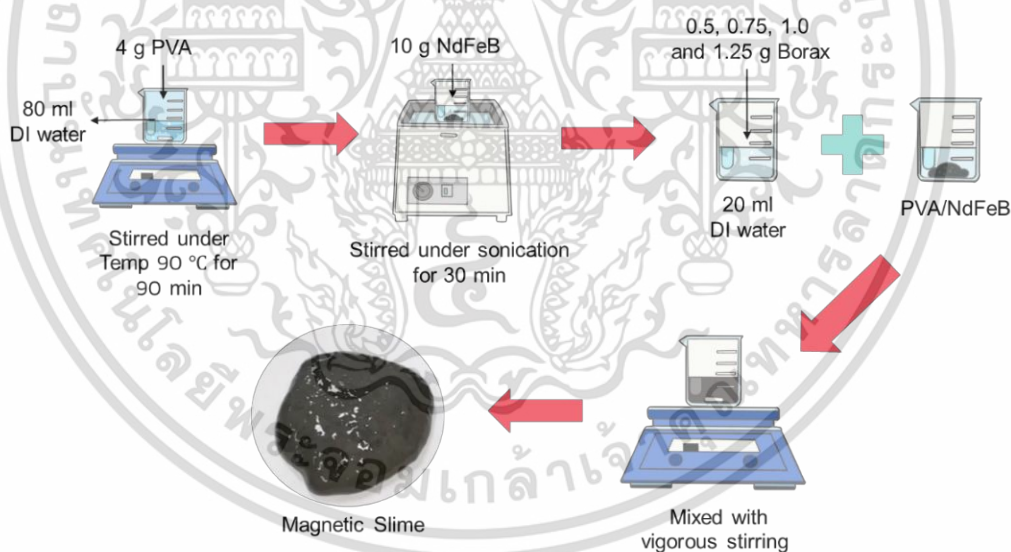
1. เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer: FTIR) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น IRTracer-100
2. กล้องจุลทรรศน์เอกซเรย์โทโมกราฟี (X-ray Tomographic Microscopy: XTM) ยี่ห้อ KOHZU
3. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer: XRD) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Smart lab
4. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopy: OM) ยี่ห้อ Reich
5. เครื่องวัดอุปกรณ์พาสซีฟ (Keysight Precision LCR Meter) รุ่น E4980A ยี่ห้อ Agilent
6. เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) รุ่น QC-536M1 ยี่ห้อ Comotech

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่าง H กับผง NdFeB

3.4.1 ขั้นตอนการเตรียม MH

เตรียมน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร ต้มที่อุณหภูมิ 90 °C ปิดกระจกนาฬิกาการจนสารเริ่มเดือด จากนั้นทำการชั่ง PVA 4 กรัม แล้วเติมลงในน้ำกลั่น ทำการปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสารเป็นเวลา 90 นาที สังเกตเห็นสารละลายเข้ากันดีได้เป็นสารละลายใสไม่มีสี ต่อมานำสารละลายที่เตรียมได้ไปทำการโซนิเคชัน (Sonication) ด้วยเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 30 นาที โดยทำการชั่งผง NdFeB 10 กรัม เพื่อเติมลงในสารละลายหลังจากครบเวลาทำการเตรียมสารละลายบอแรกซ์โดยการชั่งสารบอแรกซ์ที่ 4 อัตราส่วน ได้แก่ 0.5 0.75 1.0 และ 1.25 กรัมโดยจากการทดลองกำหนดให้อัตราส่วนบอแรกซ์ต่อ PVA ที่ใช้ในการเตรียม H เป็น H1 H2 H3 และ H4 ตามลำดับ และนำละลายในน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร เพื่อทำการเติมลงในสารละลาย จากนั้นจึงทำการปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารให้ความร้อนที่ความแรงสูงสุด ได้เป็น MH ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติต่อไป และเมื่อมีการเติมผง NdFeB 10 กรัม กำหนดให้เป็น M ลงใน H ทั้ง 4 อัตราส่วน กำหนดให้เป็น MH1 MH2 MH3 และ MH4 ตามลำดับ แสดงขั้นตอนการเตรียมดังรูปที่ 3.1



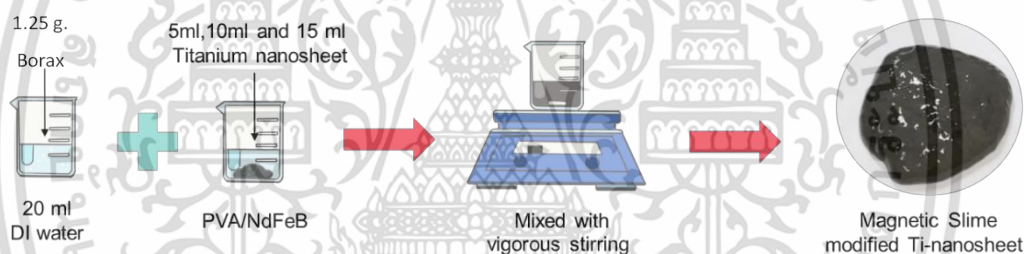
รูปที่ 3.1 วิธีการเตรียม MH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่าง MH กับ TiNSs

3.5.1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่าง MH กับ TiNSs

ทำการเตรียมน้ำกลั่นที่ 75 70 และ 65 มิลลิลิตร ตามลำดับ ต้มที่อุณหภูมิ 90 °C แล้วทำการชั่งสาร PVA 4 กรัมลงในน้ำกลั่นทั้งสามปริมาตร จากนั้นทำป่นกวนเป็นเวลา 90 นาที โดยทำการเตรียมเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 3.4.1 เมื่อถึงขั้นตอนของการป่นกวนด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ให้ทำการเตรียม TiNSs ที่ปริมาตร 5 10 และ 15 มิลลิลิตร เติมลงในสารละลาย PVA ที่ 75 70 และ 65 มิลลิลิตร ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการเติมผง NdFeB 10 กรัม ลงไปแล้วทำการโซนิเคทเป็นเวลา 30 นาที หลังจากครบเวลาให้ทำการเตรียมสารละลายบอแรกซ์ โดยการชั่งสารบอแรกซ์ 1.25 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ทั้งหมด 3 ชุด เพื่อเติมลงไปนสารละลายทุกตัว จากนั้นทำการป่นกวนที่ความแรงสูงสุดด้วยเครื่องกวนสารให้ความร้อน ได้เป็น MHT โดยกำหนดให้ MH ที่ถูกเติม TiNSs ที่ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เป็น T1 ที่ 10 มิลลิลิตร เป็น T2 และ 15 มิลลิลิตร เป็น T3 ดังนั้นจะได้ MH4T1 MH4T2 และ MH4T3 ตามลำดับ ขั้นตอนการเตรียมแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่าง MH กับ TiNSs

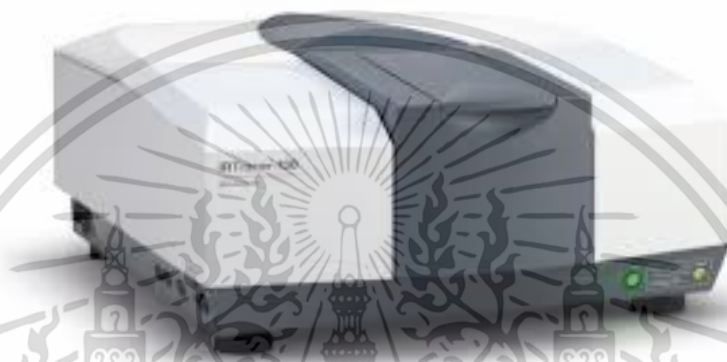
3.6 เทคนิคการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของ MH4T3

3.6.1 การพิสูจน์โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานซ์ฟอร์มอิฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)

เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์สารประกอบเคมีโดยจำแนกโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของโมเลกุล โดยอาศัยการดูดกลืนแสงช่วงอินฟราเรดซึ่งอยู่ที่ประมาณ $400-4000\text{ cm}^{-1}$ และเนื่องจากสารแต่ละชนิดนั้นมีช่วงในการดูดกลืนแสง หรือมีการสั่นจำเพาะที่แตกต่างกัน คือเมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานจากแสงอินฟราเรดตรงกับความถี่ของการสั่น หรือการหมุนของพันธะในโมเลกุลจะทำให้โมเลกุลนั้นเกิดการดูดกลืนแสง และข้อมูลที่ตรวจวัดได้จะถูกประมวลผลออกมาเป็นสเปกตรัม ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานซ์ฟอร์มอิฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Spectrometer: FTIR) แสดงดังรูปที่ 3.3 สามารถทำได้โดยการนำ PVA และบอแรกซ์มาทำการบดเป็นผงผสมกับ KBr โดย TiNSs H4 MH4 และ MH4T3 จะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และเมื่อนำสารไปตรวจวิเคราะห์จะทำการนำสารที่เตรียมได้มาทำการบดเป็นผงจนละเอียดเพื่อผสมกับ KBr แล้วอัดขึ้นรูปเพื่อทำการตรวจสอบในช่วงความยาวคลื่น $400-4000\text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 3.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer: FTIR) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น IRTracer-100 [24]

3.6.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์เอกซเรย์โทโมกราฟฟิก (X-ray Tomographic Microscopy: XTM)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างภายในชิ้นงานเพื่อสร้างภาพตัดขวางของชิ้นงานทำให้สามารถสร้างแบบจำลองเสมือนจริงแบบสามมิติได้โดยไม่ต้องทำลายชิ้นงานเดิม ซึ่งเหมาะสำหรับการวิจัยที่มีเป้าหมายเพื่อระบุลักษณะเฉพาะชิ้นงานในรูปแบบสามมิติ เช่น สัณฐานวิทยาภายใน ความพรุน การกระจายรูพรุนภายในตัวอย่าง และเฟสการกระจายตัวของสารประกอบที่แตกต่างกัน โดยเทคนิคนี้จะใช้ลำแสงเอกซเรย์ที่สร้างจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน ได้เป็นลำแสงเอกซเรย์ที่มีความเข้มสูง (source : Multipole wiggler, 2.18Tesla) เหมาะสำหรับการถ่ายภาพจุลภาคเพื่อได้รายละเอียดภาพตัดขวางของชิ้นงานมีความละเอียดสูงสุดที่ 1 ไมครอน (ขนาดพิกเซล 0.72 ไมครอน) ลักษณะการทำงานคือรังสีเอกซ์จะถูกฉายไปที่ชิ้นงานโดยใช้แสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอกซเรย์พลังงาน 5 – 20 eV เมื่อลำแสงเอกซเรย์ถูกฉายไปที่ชิ้นงานตัวอย่างโดยเอกซเรย์รอบๆตัวอย่างอย่างน้อย 180 องศา จะสร้างรูปแบบเอกซเรย์จากการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกันภายในชิ้นงานตัวอย่างโดยแสดงรายละเอียดออกมาเป็นภาพภาคตัดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของชิ้นงานตัวอย่างในรูปแบบสามมิติ โดยการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์เอกซเรย์โทโมกราฟิค (X-ray Tomographic Microscopy: XTM) แสดงดังรูปที่ 3.4 จะไม่ทำให้ชิ้นงานตัวอย่างที่นำไปตรวจสอบถูกทำลาย สำหรับการเตรียมตัวอย่างเพื่อตรวจสอบในครั้งนี้ได้ทำการเตรียมสารเชิงประกอบ H4 และ MH4 โดยเตรียมที่ 2 สภาวะด้วยกัน สภาวะที่หนึ่งได้ทำการนำสารใส่ในหลอดแคปปิดอลตัดตัวอย่างชิ้นงานที่ขนาด 3×10 มิลลิเมตร จากนั้นติดเข้ากับสตับ (Stub) และนำตัวอย่างไปทดสอบได้ที่ และในสภาวะที่สองได้ทำการนำสารใส่ในหลอดแคปปิดอล แล้วนำไปเข้าสู่กระบวนการฟรีซดราย (Freeze dried) หรือการทำให้แห้งเยือกแข็งแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ -110 องศาเซลเซียส และ 0.091 บาร์ เป็นเวลา 1 สัปดาห์ และตัดตัวอย่างชิ้นงานที่ขนาด 3×10 มิลลิเมตร หลังจากนั้นจากนั้นติดเข้ากับสตับ (Stub) จึงจะทำการนำตัวอย่างไปทดสอบในการตรวจสอบชิ้นงาน ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างไม่ควรเกิน 4×10 มิลลิเมตร เนื่องจากจะทำให้ไม่สามารถโฟกัสชิ้นงานได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์เอกซเรย์โทโมกราฟิค (X-ray Tomographic Microscopy: XTM) ยี่ห้อ KOHZU [25]

3.6.3 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของ PVA บอแรกซ์ ผง NdFeB TiNSs H4 MH4 และ MH4T3 ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer) แสดงดังรูปที่ 3.5 โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีหลอดเอกซเรย์เป็นเป้า ทองแดง โดยมีแรงดันไฟฟ้าที่ 40 กิโลโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อรังสีเอกซ์ถูกยิงไปตกกระทบที่ชิ้นงานตัวอย่างจะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนและสะท้อนออกมาที่ค่ามุมต่าง ๆ ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีองศาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารและการจัดเรียงตัวของผลึกที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับประจุ และขนาดของอะตอมนั้นๆส่งผลให้สารต่างๆมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD pattern) ที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวคล้ายกับลายนิ้วมือของมนุษย์ ดังนั้นจึงสามารถระบุได้ว่าสารที่ทำการวิเคราะห์คือสารชนิดใด และในการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบโดย PVA บอแรกซ์ และผง NdFeB จะถูกบดจนเป็นผงละเอียดจึงนำสารที่ได้ไปตรวจสอบ และในส่วน TiNSs H4 MH4 และ MH4T3 ที่มีลักษณะเป็นของเหลวและเจลมาทำการอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำมาบดจนเป็นผงละเอียด (ผงขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน) ซึ่งปริมาณผงตัวอย่างที่เหมาะสมประมาณ 1-2 กรัม (หากตัวอย่างมีน้อย สามารถอัดบนแผ่นวางตัวอย่างแบบ Zero background ได้) เพื่อใส่บนแท่นบรรจุตัวอย่าง (Sample holder) มีขนาด 20x20x0.5mm จากนั้นทำอัดด้วยแรงที่สม่ำเสมอเท่ากันทุกทิศทางและทำการปาดบริเวณผิวหน้า ของตัวอย่างให้มีความเรียบสม่ำเสมอ จากนั้นจึงทำการตรวจวัดด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์เพื่อศึกษาหาปริมาณผลึกของสารตัวอย่างต่อไป



รูปที่ 3.5 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Smart lab [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM)

เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่างในรูปแบบสองมิติ (2D) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM) แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยอาศัยหลักการทำงานของแสงที่มีการส่องไปยังวัตถุตัวอย่าง แล้วสะท้อนกลับเข้าสู่สายตาจากการมองผ่านเลนส์ ในการตรวจวัดสามารถปรับค่ากำลังขยายได้ โดยงานวิจัยของเราได้ทำการตรวจสอบลักษณะสัณฐานภายนอกของ H4 MH4 และ MH4T3 ซึ่งจะการศึกษาความแตกต่างของลักษณะพื้นผิวบริเวณภายนอกชิ้นงานเปรียบเทียบกัน โดยทำการตรวจวัดที่กำลังขยาย 5 เท่า และใช้กล้อง Microscope Digital Eyepiece (DCM-310) ซึ่งใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน โดยภาพที่ได้จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะถูกแสดงผลผ่านโปรแกรม ScopePhoto เพื่อนำภาพที่ได้มาทำการศึกษาลักษณะสัณฐานภายนอกของชิ้นงานต่อไป

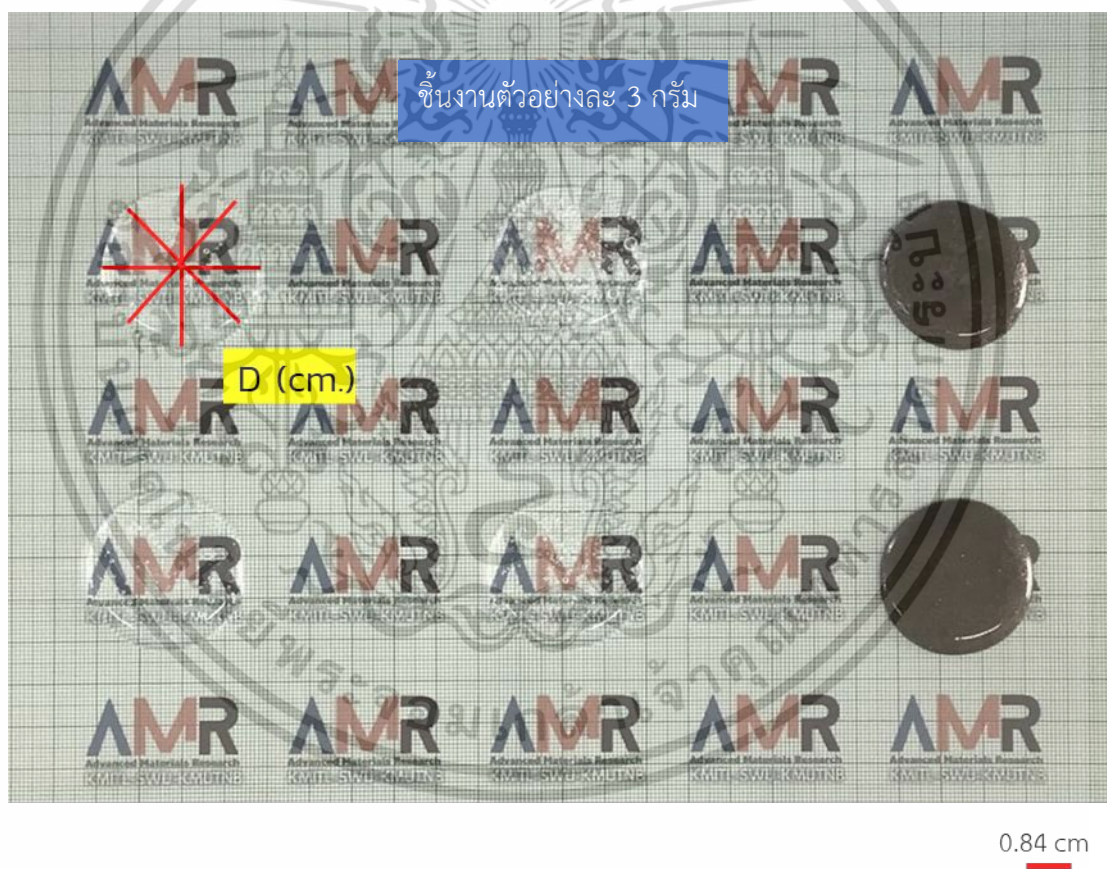


รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM) ยี่ห้อ Reich [26]

3.7 วิธีการทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุ H และ MH

ในงานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบสมบัติทางกายภาพของ H และ MH โดยศึกษาความสามารถในการคงตัวของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งเริ่มต้นได้มีการกำหนดอัตราส่วนของบอแรกซ์ต่อPVA เป็น H1 H2 H3 และ H4 ตามลำดับ เพื่อดูลักษณะการคงตัวของ H หลังจากที่ได้ทำการการเลือกอัตราส่วน H1 และH4 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ จะถูกนำมาเติมผง NdFeB ที่ 10 กรัม โดยกำหนดสัญลักษณ์เป็น M และเมื่อถูกเติมลงใน H จะได้เป็น MH1 และ MH4 ตามลำดับ และนำไปทำการทดสอบสมบัติของ H และ H ที่มีการเติมผง NdFeB ต่อไป ในการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบทำได้โดยการชั่ง H และ MH ที่ถูกเตรียมไว้ที่อัตราส่วนต่าง ๆ อย่างละ 3 กรัม จากนั้นนำชิ้นงานที่เตรียมได้มาวางไว้บนแผ่นพลาสติก และตั้งทิ้งไว้โดยใช้เวลาในทดสอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อศึกษาขนาดของ H ที่เปลี่ยนแปลง ไปโดยขนาดและระยะเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงของ H ที่อัตราส่วนต่าง ๆ จะแตกต่างกัน โดยจะทำการหาพื้นที่วงกลมของ H ซึ่งแสดงถึงการขยายตัวโดยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของ H ทั้งสี่ทิศทาง แสดงดังรูปที่ 3.7 จากนั้นนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยแล้วทำการหาพื้นที่ของวงกลมจากสูตร $2\pi r^2$ โดยที่ r หรือรัศมีของวงกลมสามารถนำค่า D หรือเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ทำการวัดได้จากรูปที่ 3.7 มาทำการแทนค่าเพื่อหาพื้นที่วงกลมต่อไป

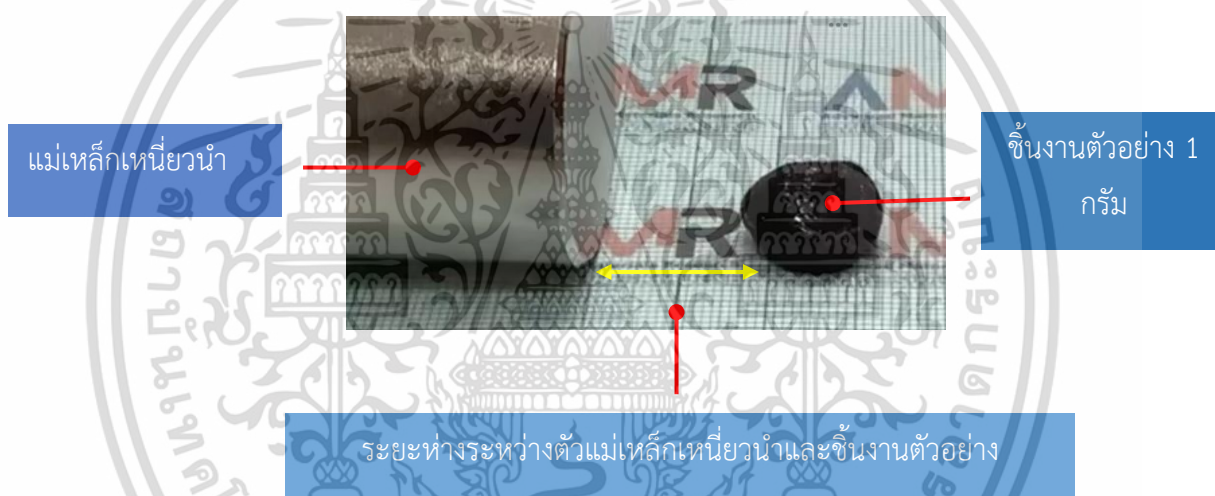


รูปที่ 3.7 แสดงการทดสอบสมบัติทางกายภาพด้านการคงตัวของ H และ MH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 วิธีการทดสอบสมบัติในการเคลื่อนที่ของ MH4 และ MH4T3

ในงานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่ของ MH4 และ MH4T3 โดยใช้สมบัติของผง NdFeB ที่มีความสามารถในการเหนี่ยวนำโดยสนามแม่เหล็ก ทำให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ได้ ในการทดสอบจะมีการใช้ MH1 และ MH4 ตามลำดับ จากนั้นจึงมีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ MH4 ด้วยการเติม TiNSs 15 มิลลิกรัม กำหนดให้เป็น T3 จะได้เป็น MH4T3 เพื่อทำการทดสอบเปรียบเทียบกัน ในการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง ได้มีการชั่ง MH1 MH4 และ MH4T3 อย่างละ 1 กรัม โดยวิธีการทดสอบจะทำการตั้งแม่เหล็กเหนี่ยวนำโดยให้มีระยะห่างจากชิ้นงานตัวอย่างที่ 1 1.25 และ 1.5 เซนติเมตร เพื่อศึกษาความสามารถในการเคลื่อนที่ของวัสดุเชิงประกอบจากระยะทางกับระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ไปยังแม่เหล็กเหนี่ยวนำ โดยแสดงภาพวิธีทำการทดสอบ แสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงภาพการทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตัวอย่างโดยมีการตั้งแม่เหล็กเหนี่ยวนำไว้ทางด้านซ้าย และตั้งชิ้นงานตัวอย่างไว้ทางด้านขวาโดยมีการกำหนดระยะห่างระหว่างตัวแม่เหล็กเหนี่ยวนำและชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทดสอบ

3.9 การศึกษาความสามารถในการยึดหดของเซนเซอร์โดยการทดสอบแรงดึง (Tensile testing)

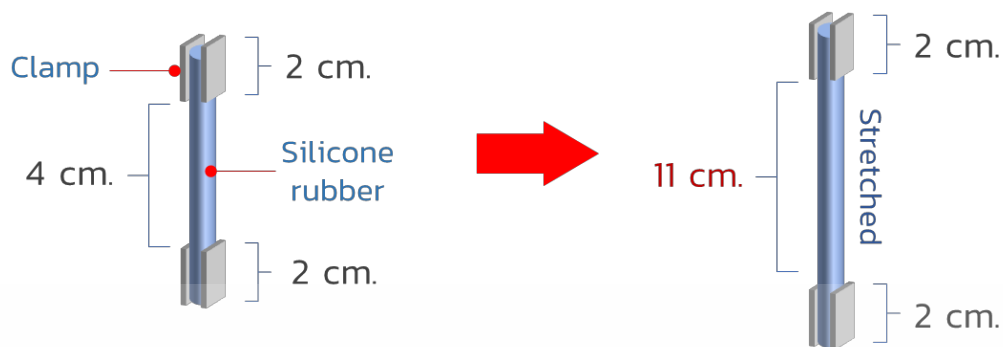
ในงานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบความสามารถในการยึดหดของเซนเซอร์สั่งการโดยการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing) แสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุเมื่อมีแรงกระทำในแนวเดียว จนกระทั่งวัสดุนั้นเกิดความเสียหายหรือแตกหัก โดยในการทดสอบจะทำการยึดปลายทั้งสองด้านของวัสดุด้วยตัวยึดจับชิ้นงาน (Clamp) จากนั้นใส่แรงกระทำเข้าไปยังชิ้นงานด้วยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราคงที่ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการเตรียมเซนเซอร์โดยการบรรจุ MH4T3 ลงในหลอดยางซิลิโคน (Silicone rubber) ซึ่งมีความยืดหยุ่น และเพื่อให้ทราบได้ว่าหลอดยางซิลิโคนนั้นมีความเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้หรือติดตั้งลงบนอุปกรณ์สั่งการหรือไม่ จึงได้มีการนำหลอดยางซิลิโคนไปทดสอบแรงดึงเพื่อหาระยะในการดึงยืดสูงสุด ที่จะส่งผลให้ชิ้นงานหรือหลอดยางซิลิโคนนั้นเกิดความเสียหายหรือฉีกขาด ในการทดสอบแรงดึงได้มีการเตรียมชิ้นงานหรือหลอดซิลิโคนที่มีความยาว 8 เซนติเมตร มาทำการยึดส่วนบนและส่วนปลายไว้ที่เครื่องทดสอบแรงดึง มีระยะห่างอยู่ที่ 4 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.10 โดยกำหนดความเร็วที่ใช้ในการดึงยืดอยู่ที่ 100 มิลลิเมตรต่อนาที และกำหนดทิศทางการดึงยืดในแกนเดียวกันโดยให้มีการดึงยืดขึ้น โดยเครื่องทดสอบจะมีการดึงยืดจนถึงจุดที่ชิ้นงานเกิดความเสียหาย ผลที่ได้จะสามารถบ่งบอกได้ว่าชิ้นงานหรือหลอดยางซิลิโคนสามารถดึงยืดได้สูงสุดที่ระยะเท่าใด ซึ่งเมื่อได้ระยะในการดึงยืดที่มากที่สุดก็จะมีสามารถนำค่าที่ได้ไปทำการกำหนดระยะในการดึงยืดเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการตามตัวแปรทางเซนเซอร์ต่อไป



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) รุ่น QC-536M1 ยี่ห้อ Cometechnik

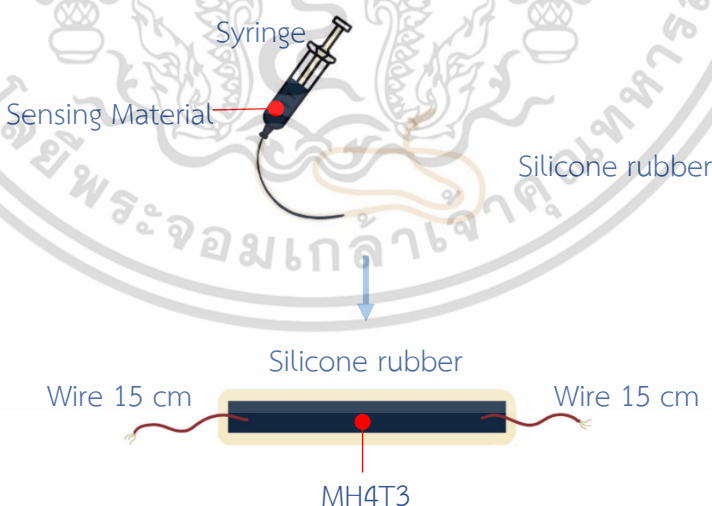
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 วิธีการเตรียมการทดสอบชิ้นงานหลอดยางซิลิโคนด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing)

3.10 การเตรียมตัวอย่างเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น

เซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นสามารถเตรียมได้จากการนำ MH4T3 บรรจุเข้าไปในหลอดที่ทำจากวัสดุที่มีความยืดหยุ่น หรือหลอดยางซิลิโคน (Silicone rubber) โดยขนาดของหลอดยางซิลิโคนที่เลือกใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.4 เซนติเมตร กำหนดความยาวที่ 5 ค่า ได้แก่ 5 6 7 8 และ 9 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นความยาวที่คลอบคลุมตามนิ้วมือทั้ง 5 นิ้ว ได้แก่ นิ้วโป้ง นิ้วก้อย นิ้วชี้ นิ้วนาง และนิ้วกลาง ตามลำดับ จากนั้นนำสายไฟตัดแบ่งที่มีความยาวประมาณ 15 เซนติเมตร สอดเข้าไปในหลอดยางซิลิโคนทั้งสองด้านเพื่อเชื่อมติดกับวัสดุตรวจจับที่ถูกบรรจุอยู่ภายใน เพื่อใช้ในการทดสอบค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) ต่อไป แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วิธีการเตรียมเซนเซอร์สั่งการเพื่อนำไปตรวจสอบค่าความต้านทานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11 การตรวจสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น (Flexible sensor)

3.11.1 การตรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) ของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง MH และ TiNSs เป็น MH4T1 MH4T2 และ MH4T3 ด้วยเครื่องวัดค่าความต้านทานแบบดิจิตอล (LCR Meter) ซึ่งในการตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นสามารถทำได้โดยการนำชิ้นงานที่ได้เตรียมไว้ ในขั้นตอนที่ 3.12 มาต่อเข้ากับเครื่องวัดค่าความต้านทาน (LCR Meter) โดยนำสายไฟปากจระเข้สองเส้นต่อเข้ากับสายไฟทั้งสองด้านที่ติดอยู่กับตัววัสดุ โดยอีกด้านของสายไฟปากจระเข้จะถูกต่อเข้ากับเครื่องวัดอุปกรณ์พาสซีฟ (LCR meter) แสดงดังรูปที่ 3.12 จากนั้นทำการตั้งค่าเครื่องเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการเก็บข้อมูล ในการทดสอบการดึงยืดชิ้นงานจะใช้รางเลื่อนสไลด์ (Linear slide rail) ในการดึงยืดชิ้นงานเพื่อให้ได้ค่าที่มีคลาดเคลื่อนจากการให้แรงน้อยที่สุด ซึ่งเครื่องจะถูกตั้งค่าให้ดึงยืดตามระยะที่กำหนด โดยระยะการดึงยืดจะอยู่ในช่วงที่ชิ้นงานสามารถดึงยืดแล้วไม่เกิดความเสียหายหรือฉีกขาด ซึ่งจะสามารถทราบได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing) จากขั้นตอนที่ 3.9 หลังจากนั้นจะมีการตั้งค่าเครื่องรางเลื่อนสไลด์ให้มีการปล่อยให้ชิ้นงานหดกลับไปยังตำแหน่งเริ่มต้น โดยทำงานครบจำนวนรอบทั้งหมด 5 ครั้ง ในขณะที่ให้แรงเชิงกลกระทำต่อชิ้นงานโดยการดึงยืดด้วยรางสไลด์จะส่งผลให้ได้ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป และเมื่อปล่อยชิ้นงานหดกลับมายังตำแหน่งเดิมค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้น จากนั้นข้อมูลที่ได้จากเครื่องทดสอบจะถูกนำไปใช้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเซนเซอร์ ดังนี้

Silicone rubber tube + MH4T3



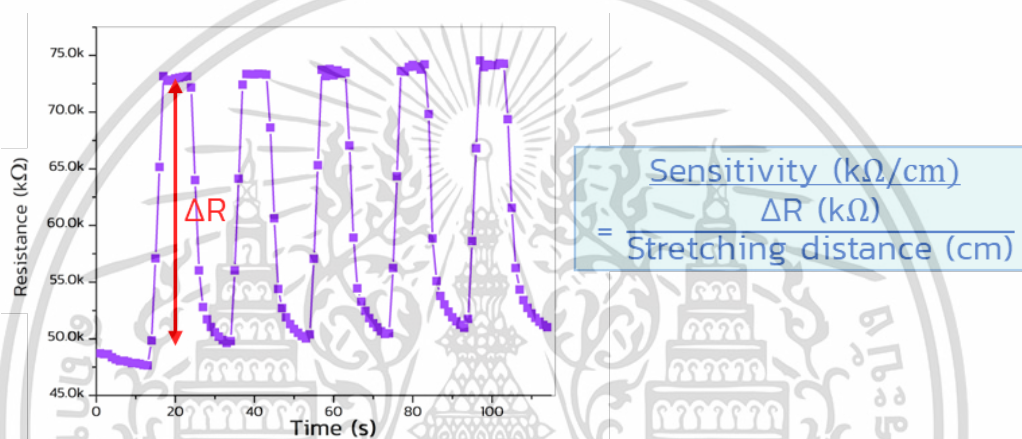
LCR meter

รูปที่ 3.12 การตรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดอุปกรณ์พาสซีฟ (Keysight Precision LCR Meter) รุ่น E4980A ยี่ห้อ Agilent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11.1.1. ความไวในการตรวจจับ (Sensitivity)

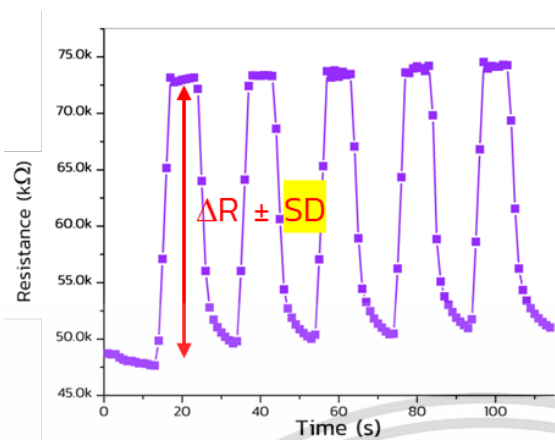
เป็นค่าที่แสดงถึงความไวในการตรวจจับสัญญาณ สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขาออก (Output) ต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขาเข้า (input) เมื่อมีการให้แรงเชิงกลต่อชิ้นงานจะส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานขึ้น โดยเราจะนำค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔR) ในหน่วยกิโลโอห์ม ($k\Omega$) มาใช้เพื่อหาค่าความไวในการตรวจจับ โดยกำหนดให้เป็นค่าสัญญาณขาออก และสัญญาณขาเข้า คือ ระยะยืดหดของวัสดุตรวจจับ (Stretching distance) เมื่อถูกดึงยืดด้วยเครื่องรางสไลด์ แสดงวิธีการหาค่าความไวในการตรวจจับได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงวิธีการหาค่าความไวในการตรวจจับ (Sensitivity)

3.11.1.2. ความแม่นยำ (Accuracy)

ค่าความแม่นยำ เป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถในการตรวจจับสัญญาณในแต่ละครั้ง โดยในการหาค่าความแม่นยำของเซนเซอร์สิ่งการนี้ สามารถหาได้จากการนำค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ที่ได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (Standard deviation of ΔR) ซึ่งเกิดจากการดึงยืดในแต่ละรอบมาลบกับหนึ่งร้อย และรายงานผลเป็นร้อยละความแม่นยำ (%Accuracy) แสดงวิธีการหาค่าความแม่นยำในการตรวจจับได้ดังรูปที่ 3.14

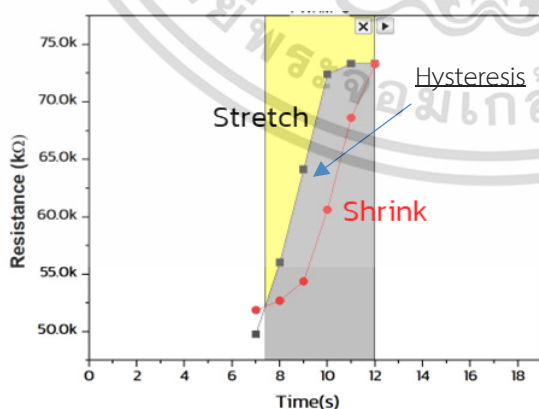


$$\%Accuracy = Error (SD \text{ of } \Delta R) - 100$$

รูปที่ 3.14 แสดงวิธีการหาค่าร้อยละความแม่นยำในการตรวจจับ (%Accuracy)

3.11.1.3. ความเสถียรในการตรวจจับ (Stability)

เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเสถียรในการตรวจจับสัญญาณ สามารถหาได้จากการนำค่าสัญญาณที่ได้จากการตอบสนองและคืนกลับมาซ้อนทับกัน ซึ่งสัญญาณที่ได้จากการตอบสนอง คือ สัญญาณที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุถูกให้แรงเชิงกลโดยการดึงยืดออก และเมื่อมีการปล่อยให้วัสดุหดกลับไปยังตำแหน่งเริ่มต้น จะได้เป็นสัญญาณที่ได้จากการคืนกลับ โดยพื้นที่ทับซ้อน (Overlap region) ที่เกิดขึ้นระหว่างสัญญาณทั้งสองจะเรียกว่า ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) โดยทั่วไปฮิสเทอรีซิส ถือเป็นข้อผิดพลาดหรือความไม่เสถียรที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับสัญญาณ ซึ่งเกิดจากการถูกสัญญาณภายนอกรบกวน คิดเป็นร้อยละฮิสเทอรีซิส (%Hysteresis) เมื่อนำมาลบกับหนึ่งร้อยจะแสดงถึงร้อยละความเสถียรของเซนเซอร์ (%Stability) แสดงวิธีการหาร้อยละความเสถียรได้ดังรูปที่ 3.15



$$\%Stability = \%Hysteresis - 100$$

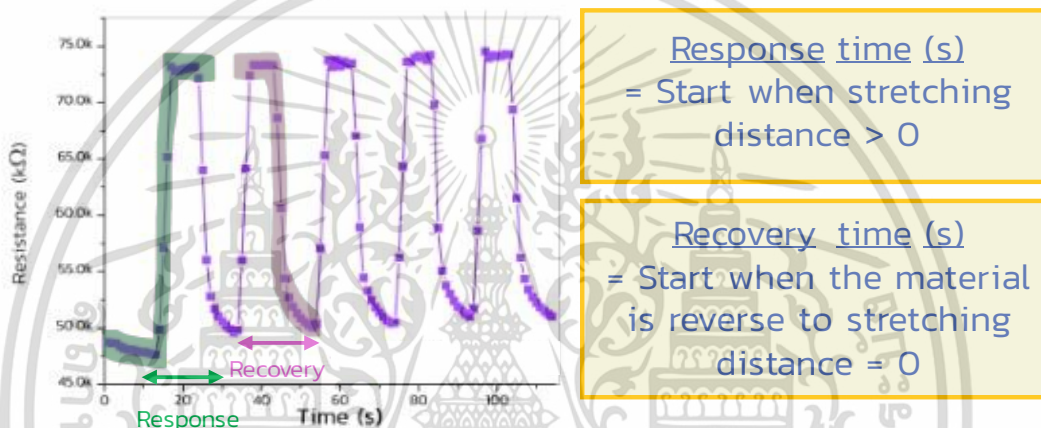
(%Hysteresis = overlapping region)

รูปที่ 3.15 แสดงวิธีการหาค่าร้อยละความเสถียร (%Stability)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11.1.4. เวลาในการตอบสนองและคืนกลับ (Response and recovery time)

เวลาในการตอบสนอง (Response time) บ่งบอกถึงความสามารถที่เซนเซอร์สั่งการตอบสนองเมื่อมีการให้แรงเชิงกลต่อวัสดุตรวจจับโดยการดัด ซึ่งเวลาในการตอบสนองจะเริ่มนับตั้งแต่มมีการดัดวัสดุจนถึงระยะสูงสุดที่กำหนด (Stretching distance > 0) และเวลาในการคืนกลับ (recovery time) บ่งบอกถึงความสามารถในการคืนกลับของสัญญาณเมื่อปล่อยให้วัสดุหดกลับไปยังตำแหน่งเริ่มต้น ซึ่งเวลาในการคืนกลับของวัสดุตรวจจับ จะเกิดขึ้นเมื่อปล่อยให้แรงเชิงกลทำให้วัสดุตรวจจับหดกลับมายังตำแหน่งเดิม หรือมีระยะในการดัดเท่ากับ 0 (Stretching distance = 0) แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงวิธีการหาเวลาในการตอบสนองและคืนกลับ (Response and recovery)

3.11.1.5. ความสามารถในการตรวจจับระยะยาว (Long-term ability)

เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของเซนเซอร์สั่งการในการแสดงค่าเดิมเมื่อมีการทดสอบในระยะยาว โดยต้องแสดงค่าเดิมเมื่อมีการใช้งานเป็นระยะเวลาที่ต่อเนื่องกัน ในการทดสอบความสามารถของเซนเซอร์สั่งการทำได้โดยการทดสอบการใช้งานด้วยการตรวจจับสัญญาณเป็นจำนวนหลายรอบ (Cycle) เพื่อประเมินว่าค่าสัญญาณที่ตรวจจับได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าเดิมเมื่อมีการใช้งานต่อเนื่อง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการให้แรงเชิงกลกระทำโดยการดัดเป็นระยะ 1 3 และ 5 เซนติเมตร จากนั้นปล่อยให้วัสดุหดกลับไปยังตำแหน่งเริ่มต้น โดยมีการทดสอบจนถึงจุดที่วัสดุเสียหาย หรือไม่สามารถแสดงค่าความต้านทานออกมาได้

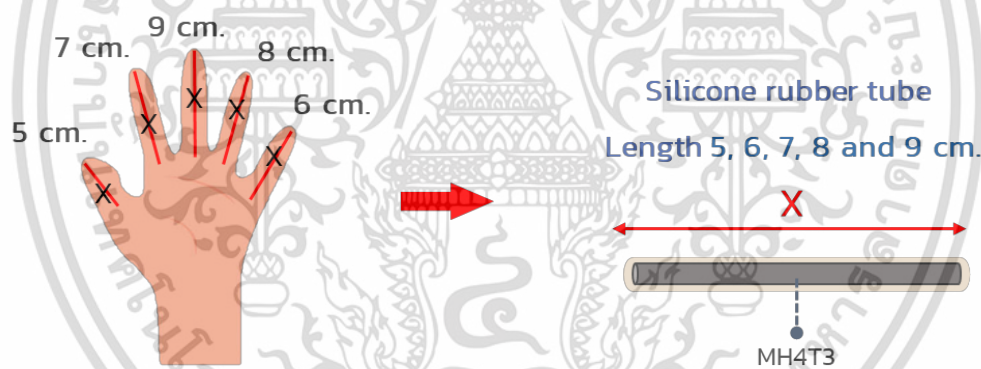
จากการทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการ จะสามารถบ่งบอกได้ว่าชิ้นงานตัวอย่างใดที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปพัฒนาเป็นเซนเซอร์สั่งการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป โดยชิ้นงานตัวอย่างที่เหมาะสม จะต้องมีค่าความไวในการตรวจจับที่สูง มีความแม่นยำและความเสถียรที่มาก อีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งควรมีความสามารถในการใช้งานในระยะยาวที่ดีที่สุด เนื่องจากในการนำไปใช้เป็นเซนเซอร์สั่งการต้องมีการติดตั้งลงบนถุงมือเพื่อให้มีการสั่งการผ่านการเคลื่อนไหวบริเวณข้อต่อนิ้วมือ ซึ่งอาจทำให้ชิ้นงานมีการสูญเสียรูปร่างได้หากมีการใช้งานต่อเนื่องเป็นเวลานาน ดังนั้นชิ้นงานที่จะถูกนำไปพัฒนาจะต้องสามารถทนต่อการใช้งานในระยะยาวได้ดีที่สุด

3.12 การหาระยะที่ใช้ในการดิ่งยึดตามนิ้วมือจริง

หลังจากที่มีการตรวจสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการเพื่อหาชิ้นงานที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งบนถุงมือแล้ว ต่อมาจึงได้มีการหาระยะในการดิ่งยึดโดยการงอนิ้วมือจริง โดยเซนเซอร์ที่เตรียมไว้ จะมีความยาวอยู่ที่ 5 6 7 8 และ 9 เซนติเมตร คลอบคลุมตามความยาวนิ้วมือทั้ง 5 นิ้ว ได้แก่ นิ้วโป้ง นิ้วก้อย นิ้วชี้ นิ้ววง และนิ้วกลาง ตามลำดับ กำหนดความยาวของแต่ละนิ้วให้เป็น X แสดงดังรูปที่ 3.17 จากนั้นวัดค่าความสูงที่ได้จากการงอนิ้วมือเพื่อนำมาลบกับค่าความยาวของเซนเซอร์ กำหนดให้เป็น L เมื่อนำค่าทั้งสองมาลบกันแล้วหารด้วย 2 จะได้เป็นระยะที่ใช้ดิ่งยึดเมื่อเกิดการงอนิ้วจริง แสดงวิธีการหาระยะในการดิ่งยึดดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 แสดงความยาวของเซนเซอร์สั่งการตามนิ้วมือทั้ง 5 นิ้ว

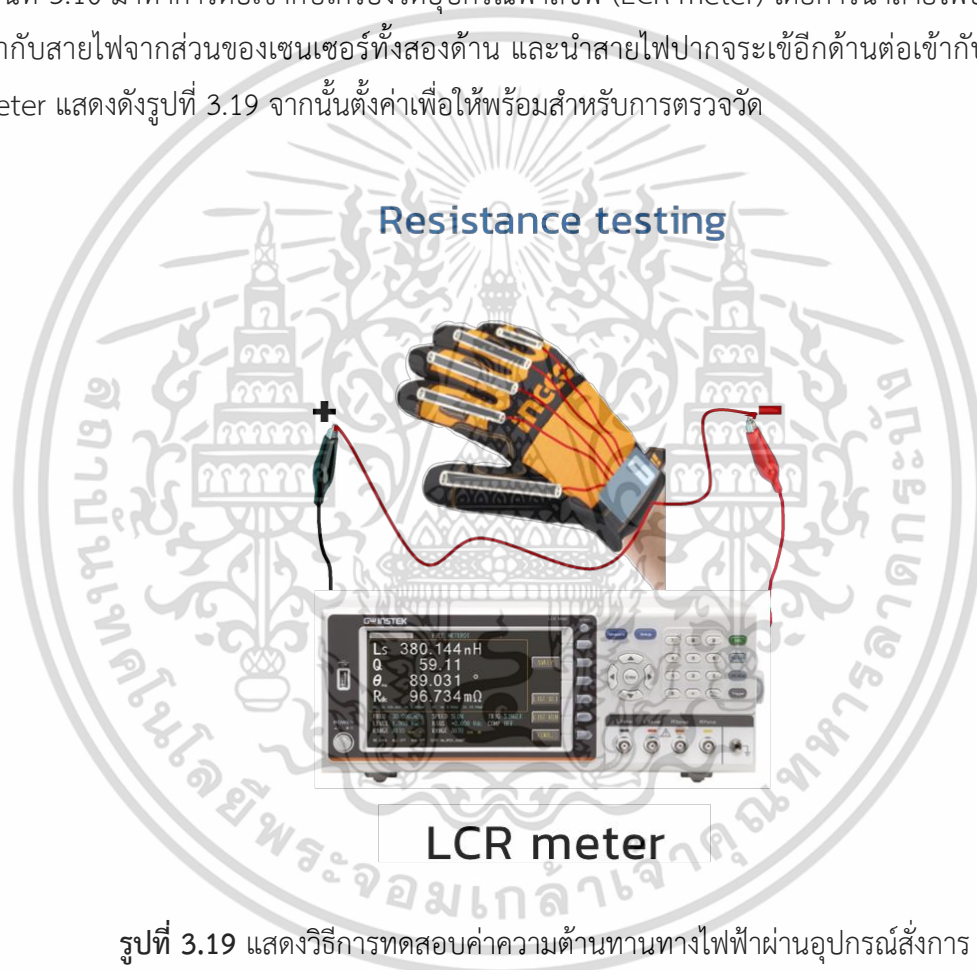


รูปที่ 3.18 แสดงวิธีการหาระยะในการดิ่งยึดตามการงอนิ้วมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.13 การทดสอบค่าความต้านทานทางไฟฟ้าโดยการติดตั้งเซนเซอร์บนอุปกรณ์สั่งการ

ในงานวิจัยนี้ได้มีการเตรียมอุปกรณ์สั่งการโดยการติดตั้งเซนเซอร์ลงบนถุงมือไร้สาย (Wireless glove) เพื่อนำไปควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยการสั่งการผ่านการเคลื่อนไหวบริเวณข้อต่อนิ้วมือ โดยมีการกำหนดค่าที่นำไปใช้ในการสั่งการจากค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของเซนเซอร์ (ΔR) ดังนั้นจึงได้มีการทดสอบค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) เมื่อมีการนำเซนเซอร์ไปติดตั้งลงบนถุงมือ และทำการงอนิ้วมือเพื่อดูการตอบสนองของเซนเซอร์ ในการทดสอบได้มีการนำเซนเซอร์ที่เตรียมได้จากตอนที่ 3.10 มาทำการต่อเข้ากับเครื่องวัดอุปกรณ์พาสซีฟ (LCR meter) โดยการนำสายไฟปากจระเข้ต่อเข้ากับสายไฟจากส่วนของเซนเซอร์ทั้งสองด้าน และนำสายไฟปากจระเข้อีกด้านต่อเข้ากับเครื่อง LCR meter แสดงดังรูปที่ 3.19 จากนั้นตั้งค่าเพื่อให้พร้อมสำหรับการตรวจวัด



รูปที่ 3.19 แสดงวิธีการทดสอบค่าความต้านทานทางไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์สั่งการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การศึกษาวัสดุ MH4T3

จากการเตรียม MH4T3 โดย H4 จะทำหน้าที่เป็นเฟสหลัก (Matrix phase) โดยมีผง NdFeB และ TiNSs เป็นเฟสกระจาย (Dispersed phase) โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการเลือกศึกษาอัตราส่วนของบอแรกซ์ ต่อ PVA เพื่อสังเคราะห์เป็น H ที่ 4 อัตราส่วนด้วยกัน ได้แก่ H1 H2 H3 และ H4 ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการเติมผง NdFeB ลงไป 10 กรัมกำหนดให้เป็น M ใน H1 และ H4 ตามลำดับ จะได้เป็น MH1 และ MH4 ตามลำดับ เพื่อเพิ่มสมบัติในการควบคุมการเคลื่อนที่โดยอาศัยการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็ก และเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าไฟฟ้า นอกจากนี้ได้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของ TiNSs ที่ 5 10 และ 15 มิลลิลิตรกำหนดให้เป็น T1 T2 และ T3 ตามลำดับ โดยเติมลงใน H4 ทั้ง 3 อัตราส่วนกำหนดให้เป็น MH4T1 MH4T2 และ MH4T3 ตามลำดับ เพื่อปรับปรุงสมบัติของ MH4 สำหรับการนำไปสร้างเป็น เซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น (Flexible sensor) โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาลักษณะทางกายภาพและ ตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของ MH4T3 ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

4.1.1 ผลการศึกษาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของ MH4T3 ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)

จากการตรวจสอบโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของ MH4T3 โดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) ในช่วง $400-4000\text{ cm}^{-1}$ จะสามารถตรวจพบพีคการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันหลักตามโครงสร้างของบอแรกซ์ ซึ่งปรากฏพีคการดูดกลืนแสงในช่วง $3522\ 3356$ และ 3186 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H Stretching vibration) โดยพบพีคการดูดกลืนแสงในช่วง 1678 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของหมู่คาร์บอนิล (C=O Stretching vibration) ต่อมาพบพีคการดูดกลืนแสงในช่วง 1392 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบบิดงอของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H Bending vibration) และปรากฏพีคการดูดกลืนแสงในช่วง 1030 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดหดของแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลที่เกาะกับอะตอมของคาร์บอนโดยจะมีออกซิเจนจับอยู่ที่คาร์บอนตัวที่สองของสายโซ่ (C-O Stretching vibration) และปรากฏพีคการดูดกลืนแสงในช่วง 813 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบบิดงอของหมู่เมทิล ($-\text{CH}_2$ Bending vibration) โดยจะปรากฏพีคการดูดกลืนแสงในช่วง 623 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบบิดงอของพันธะระหว่างพันธะโบรอนและออกซิเจน (O-B-O Bending vibration) เกิดการเชื่อมโยงเป็นเครือข่ายบอเรตในบอแรกซ์ จากข้อมูลของการตรวจสอบพีคการดูดกลืนแสง มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Enab Al-Emam และคณะ [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา โดยผู้ดูแลระบบจะไม่รับผิดชอบต่อเนื้อหาใดๆ

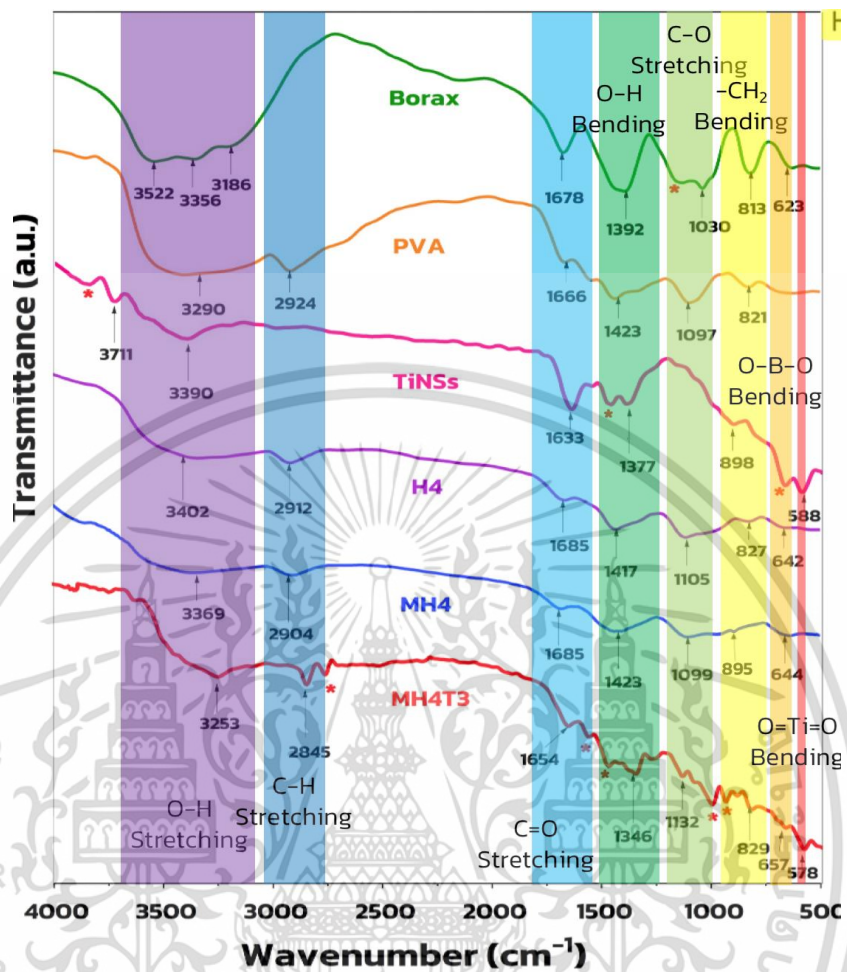
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อมาเมื่อพิจารณาหมู่ฟังก์ชันหลักตามโครงสร้างโมเลกุลของ PVA ที่มีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน จะปรากฏพีคการดูดกลืนแสงในช่วง 3290 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H Stretching vibration) และโดยจะพบพีคการดูดกลืนแสงเพิ่มเติมจากบอแรกซ์ในช่วง 2924 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นแบบยืดหดของหมู่เมทิล (C-H Stretching vibration) ช่วงพีคการดูดกลืนแสงที่ 1666 cm^{-1} แสดงถึงพีคการสั่นแบบยืดหดของหมู่คาร์บอนิล (C=O Stretching vibration) จากหมู่อะซิเตต (Acetate group) เนื่องจากพอลิไวโนลแอลกอฮอล์ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) จากพอลิไวโนลอะซิเตตจึงพบพีคของสารตั้งต้นดังกล่าว โดยต่อมาปรากฏพีคการดูดกลืนแสงในช่วง 1423 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบบิดงอของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H bending vibration) โดยต่อมาพบพีคในช่วงการดูดกลืนแสงที่ 1097 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบบิดงอ (C-O Stretching vibration) โดยจะมีออกซิเจนจับอยู่ที่คาร์บอนตัวที่สองของสายโซ่ ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลของ PVA โดยในพีคการดูดกลืนแสงในช่วง 821 cm^{-1} จะสอดคล้องกับการสั่นแบบบิดงอของหมู่เมทิลที่นอกระนาบ (-CH₂ Out of plane bending vibration) โดยจะมีช่วงการดูดกลืนแสงที่แตกต่างจากบอแรกซ์โดยจะปรากฏพีคการดูดกลืนแสงในช่วง 2924 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นแบบยืดหดของหมู่เมทิล (C-H Stretching vibration) จากข้อมูลของการตรวจสอบพีคการดูดกลืนแสง มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Enab Al-Emam และคณะ [27] ซึ่งต่อมาในงานวิจัยนี้ได้มีการเติม T3 เพื่อปรับปรุงสมบัติให้แก่ MH4 เป็น MH4T3 ดังนั้นจึงได้มีการตรวจสอบโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของ TiNSs โดยจะปรากฏพีคการดูดกลืนแสงในช่วง 3711 และ 3390 cm^{-1} ซึ่งแสดงการสั่นแบบยืดหดของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H Stretching vibration) ซึ่งในช่วงพีค 1633 cm^{-1} แสดงถึงพีคการสั่นแบบยืดหดของหมู่คาร์บอนิล (C=O Stretching vibration) ต่อมาจึงพบพีคในช่วง 1377 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H Bending vibration) โดยจะปรากฏพีคการดูดกลืนแสงในช่วง 898 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบบิดงอของหมู่เมทิล (-CH₂ Bending vibration) และในช่วงการดูดกลืนแสงในช่วงพีค 588 cm^{-1} จะปรากฏพีคที่แสดงถึงการสั่นแบบยืดหดระหว่างไทเทเนียมและออกซิเจน (O=Ti=O Bending vibration) ซึ่งจากข้อมูลการตรวจสอบพีคการดูดกลืนแสงของ TiNSs มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ahmed Mahdi Rheima และคณะ [28] ต่อมาเมื่อทำการศึกษาโครงสร้างตามหมู่ฟังก์ชันหลักของ PVA บอแรกซ์ และ TiNSs แล้ว จึงมีการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของ H4 โดยจากการตรวจสอบปรากฏพีคการดูดกลืนแสงของโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันหลักของบอแรกซ์ และ PVA โดยปรากฏพีคการดูดกลืนแสงในช่วง 1105 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดหดของแอลกอฮอล์ที่มีบอเรตไอออนเกาะกับอะตอมของคาร์บอนโดยจะมีออกซิเจนจับอยู่ที่คาร์บอนตัวที่สองของสายโซ่ (B-O-C Stretching vibration) เกิดเป็นการเชื่อมโยงกันระหว่างโครงสร้างของ PVA และบอเรตไอออนผ่านการก่อตัวของสารประกอบเชิงซ้อนแบบรูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) เกิดเป็น H4 โดยจากงานวิจัยของเราได้มีการเติมผง M ลงใน H4 จึงมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของ MH4 พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันและพีคการดูดกลืนแสงมีความสอดคล้องกันกับ H4 และไม่ปรากฏพีคการดูดกลืนแสงของวง NdFeB เนื่องจากวง NdFeB มีช่วงคลื่นในการดูดกลืนแสงที่ต่ำไม่เหมาะกับการตรวจด้วยเทคนิค FTIR และจากข้อมูลข้างต้นมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen Wang และคณะ [19] และเนื่องจากงานวิจัยนี้ได้มีการเติม TiNSs เพื่อปรับปรุงสมบัติให้แก่ MH4 เป็น MH4T3 ดังนั้นจึงได้มีการตรวจสอบโครงสร้างหลักและหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบดังกล่าวโดยจะปรากฏพีคการดูดกลืนแสงที่มีความสอดคล้องกับ MH4 และปรากฏพีคการดูดกลืนแสงของ TiNSs ในช่วงพีค 578 cm^{-1} ที่แสดงถึงการสั่นแบบบิดงอระหว่างไทเทเนียมและออกซิเจน (O=Ti=O Bending vibration) จากข้อมูลของการตรวจสอบพีคการดูดกลืนแสงของสารประกอบ MH4T3 มีความสอดคล้องกับ PVA บอแรกซ์ และ TiNSs จากการวิเคราะห์จึงสรุปได้ว่า H4 MH4 และ MH4T3 มีองค์ประกอบของโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันหลักที่สอดคล้องกับสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียม เมื่อเปรียบเทียบกับ H4 ที่ปรากฏพีคของสารตั้งต้น โดยลักษณะกราฟของ H4 และ MH4 พบว่ามีลักษณะที่คล้ายคลึงกันแต่เมื่อมีการเติม TiNSs ลงใน MH4 เป็น MH4T3 สังเกตได้ว่าเกิด Unknown peaks เนื่องจากใน TiNSs พบ Unknown peaks ในช่วง 3840 และ 682 cm^{-1} เมื่อเติม TiNSs ลงใน MH4 เกิดเป็น Unknown peaks ที่ช่วงการดูดกลืนแสง 2758 993 และ 995 cm^{-1} อาจเนื่องมาจาก TiNSs ทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นจึงเกิดเป็นพีคที่แตกต่างจาก H4 และ MH4 โดยช่วงการดูดกลืนตามหมู่ฟังก์ชันและพันธะที่พบ แสดงดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ H4 MH4 และ MH4T3 เปรียบเทียบกับบอแรกซ์ PVA และ TiNSs ในช่วง $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงช่วงการดูดกลืนตามหมู่ฟังก์ชันและพันธะที่พบในวัสดุเชิงประกอบ

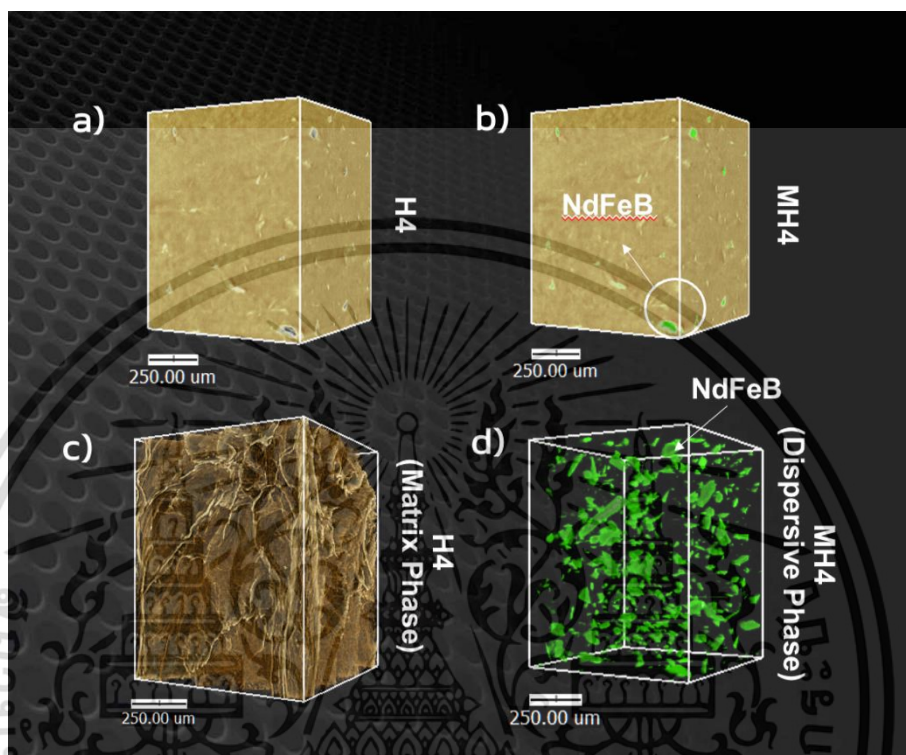
ช่วงการดูดกลืน (cm^{-1})	รูปแบบการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน/พันธะ
3522-3253	การสั่นแบบยืดหด	หมู่ไฮดรอกซิล (O-H group)
2924-2845	การสั่นแบบยืดหด	หมู่เมทิล (C-H band)
1685-1678	การสั่นแบบยืดหด	หมู่คาร์บอนิล (C=O group)
1423-1346	การสั่นแบบบิดงอ	หมู่ไฮดรอกซิล (O-H group)
1132-1097	การสั่นแบบยืดหด	พันธะระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน (C-O)
898-813	การสั่นแบบบิดงอ	หมู่เมทิล (CH_2 band)
657-623	การสั่นแบบบิดงอ	พันธะระหว่างโบรอนและออกซิเจน (O-B-O)
588-578	การสั่นแบบบิดงอ	พันธะระหว่างไทเทเนียมและออกซิเจน (O-Ti=O)

4.1.2 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุ MH4 ในรูปแบบ 3 มิติด้วยกล้องจุลทรรศน์เอกซเรย์โทโมกราฟิค (X-ray Tomographic Microscopy: XTM)

จากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาในรูปแบบ 3 มิติ (3D) ของวัสดุ MH4 ด้วยกล้องจุลทรรศน์โทโมกราฟิค (XTM) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างภายในที่อยู่ลึกลงไปในการทำงานตัวอย่าง เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของเฟสกระจาย (Dispersed phase) ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้แก่ NdFeB ที่ถูกกระจายในวัสดุ H4 ซึ่งทำหน้าที่เป็นเฟสหลัก (Matrix phase) แสดงถึงความแตกต่างระหว่างเฟสหลักและเฟสกระจายได้อย่างชัดเจนเนื่องจากเทคนิคดังกล่าวสามารถใช้ตรวจวิเคราะห์ลักษณะชิ้นงานเช่น ความพรุน รอยแตกร้าว รวมถึงเฟสที่แตกต่างกันในวัสดุเชิงประกอบ ได้โดยที่ตัวอย่างไม่ถูกทำลาย เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของเฟสกระจาย โดยจากรูปที่ 4.2 a.) แสดงถึงลักษณะสัณฐานภายในของวัสดุ H4 โดยรูป 4.2 b.) ลักษณะสัณฐานภายในของ MH4 ที่มีเฟสหลักคือ H4 และมีเฟสกระจายคือ NdFeB ซึ่งรูปที่ 4.2 d.) แสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของ NdFeB ซึ่งแทนด้วยสีเขียว พบว่าการกระจายตัวของ NdFeB ที่สม่ำเสมอ สังเกตได้จากในทุก ๆ บริเวณจะมีการกระจายของ NdFeB อยู่ โดยมีเพียงพื้นที่ส่วนเล็ก ๆ ที่ไม่พบ NdFeB แสดงให้เห็นว่าในการเตรียมสารประกอบระหว่าง H4 โดยมีสารตั้งต้นคือ PVA และบอแรกซ์ ซึ่งมีการปรับปรุงสมบัติด้วยผง NdFeB ทำหน้าที่เป็นเฟสกระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเตรียมสารประกอบขึ้นเป็น MH4 ได้สำเร็จ สอดคล้องกับผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope : OM)



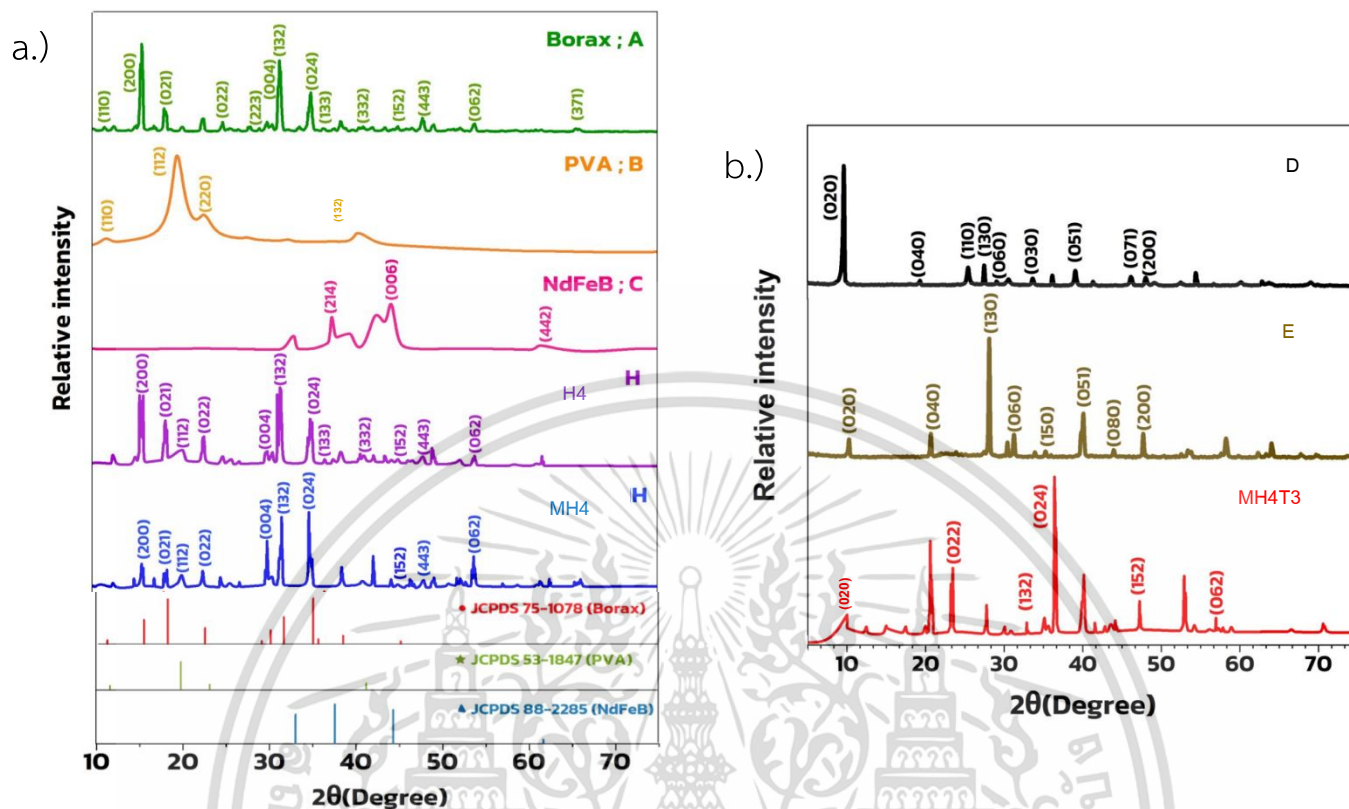
รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาในรูปแบบสามมิติของวัสดุเชิงประกอบด้วยกล้องจุลทรรศน์เอกซเรย์โทโมกราฟี (XTM) a.) H4 b.) MH4 c.) เฟสของ PVA และบอแรกซ์ d.) เฟสการกระจายตัวของ NdFeB

4.1.3 ผลการศึกษาความเป็นผลึกของวัสดุ MH4T3 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD)

จากการตรวจสอบความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของวัสดุเชิงประกอบโดยมีสารตั้งต้นได้แก่บอแรกซ์ PVA ผง NdFeB และ TiNSs และเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3 แสดงดังรูปที่ 4.3 จะปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของบอแรกซ์โดยปรากฏพีคเอกลักษณ์ ซึ่งสอดคล้องกับพีคเอกลักษณ์ของสารตั้งต้นของบอแรกซ์โดยมีการเปรียบเทียบกับ XRD Patterns File JDPDS card no. 75-1078 และใน PVA พบพีคเอกลักษณ์ซึ่งสอดคล้องกับ XRD Patterns File JDPDS card no. 53-1847 ตรงกับกับพีคเอกลักษณ์ของ PVA ต่อมาได้ทำการตรวจวิเคราะห์ผง NdFeB ซึ่งปรากฏพีคเอกลักษณ์ซึ่งสอดคล้องกับ XRD Patterns File JDPDS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

card no. 88-2285 ตรงกับกับพีคเอกลักษณ์ของ NdFeB โดยในงานวิจัยนี้ได้มีสังเคราะห์ H4 ที่ได้จากการเตรียมวัสดุเชิงประกอบจากบอแรกซ์และ PVA จากการตรวจสอบจะพบได้ว่าปรากฏพีคเอกลักษณ์ของบอแรกซ์ที่เห็นได้ชัดที่มุม 2-Theta ที่ 15.05 และ 31.49 องศา ซึ่งสอดคล้องกับผลึกที่ระนาบ 200 และ 132 และพบพีคเอกลักษณ์ที่เห็นได้ชัดของ PVA ที่มุม 2-Theta ที่ 19.81 องศา ซึ่งสอดคล้องกับผลึกที่ระนาบ 112 เนื่องจากพีค PVA มีลักษณะกว้าง และมี intensity ที่ต่ำมาจากความเป็นผลึกต่ำจึงไม่ปรากฏพีคเอกลักษณ์ในวัสดุเชิงประกอบ H4 ได้อย่างชัดเจน และจากงานวิจัยได้มีการเติมผง NdFeB ลงในวัสดุ H4 เป็น MH4 หลังจากการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบภายในพบพีคเอกลักษณ์ของบอแรกซ์และ PVA โดยไม่พบพีคเอกลักษณ์ของผง NdFeB เนื่องจากผง NdFeB มีองค์ประกอบของเหล็กที่สามารถเปล่งแสงได้เมื่อได้รับความร้อน จึงเกิดการสะท้อนของรังสีเอกซ์ได้อย่างไม่ชัดเจนทำให้ได้ค่าพีคเอกซเรย์ที่ต่ำกว่าปกติ โดยต่อมาได้มีการเติม TiNSs ใน MH4 เป็น MH4T3 ดังภาพ b) โดย TiNSs ที่นำมาใช้ได้มาจากกระบวนการการสังเคราะห์ในสถานะของแข็ง (Solid state) ได้เป็น $Cs_{0.7}Ti_{1.825}O_4$ กำหนดให้เป็น D โดย D ปรากฏพีคเอกลักษณ์ที่เห็นได้ชัดที่มุม 2-Theta 9.62 องศา ซึ่งสอดคล้องกับระนาบที่ 020 และเมื่อ D ถูกนำมาสังเคราะห์โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Synthesis-Proton) จนเกิดเป็นสาร $H_{0.7}Ti_{1.825}O_4 \cdot H_2O$ โดยกำหนดให้เป็นสาร E ดังนั้นสาร E ปรากฏพีคเอกลักษณ์ที่มุม 2-Theta ที่ 10.3 องศา ซึ่งสอดคล้องกับระนาบที่ 020 เนื่องจากสารได้เกิดปฏิกิริยาจึงเกิดการ shift ของพีคหลัก หลังจากนั้นสาร E จะถูกนำไปเข้ากระบวนการแยกชั้นของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทได้เป็น TiNSs ที่เป็นสารคอลลอยด์สีขาวขุ่น และจากการตรวจสอบ MH4T3 พบพีคเอกลักษณ์ของบอแรกซ์ และ PVA พบพีคเอกลักษณ์ของ TiNSs ที่มุม 2-Theta 10.3 องศา ซึ่งสอดคล้องกับระนาบที่ 020 โดยเปรียบเทียบพีคเอกลักษณ์ด้วยงานวิจัยของ Saichon Sriphan และคณะ [23] โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าในวัสดุ MH4T3 ปรากฏพีค Unknown ที่ 4 พีคด้วยกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค FTIR อาจเป็นผลมาจาก TiNSs ทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ H4



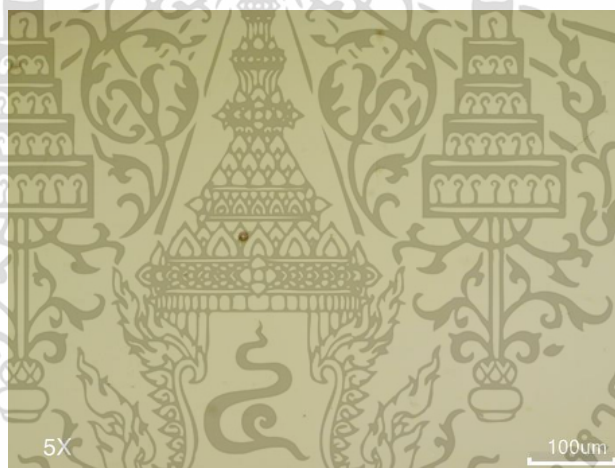
รูปที่ 4.3 a) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PVA บอแรกซ์ ผง NdFeB H4 และ MH4 b) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตั้งต้น D และ E ที่ใช้ในการสังเคราะห์ MH4T3 และ MH4T3

4.1.4 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุ MH4T3 ในรูปแบบสองมิติ (2D) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM)

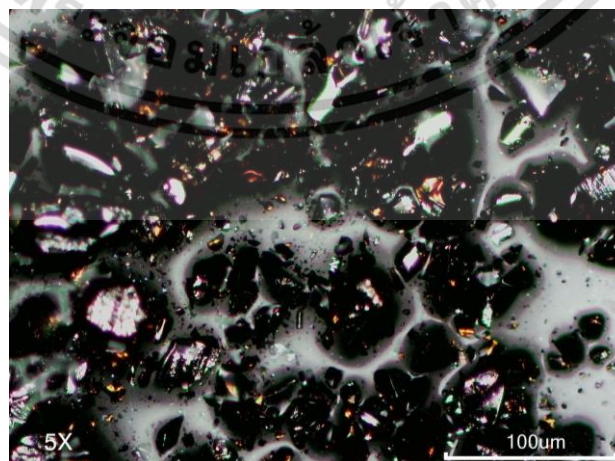
การตรวจสอบลักษณะสัณฐานภายนอกในรูปแบบ 2 มิติ (2D) ของวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยใช้กำลังขยายที่ 5 เท่า โดยในการทดสอบได้มีการตรวจสอบชิ้นงาน 3 ตัวอย่างด้วยกันโดย เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะภายนอกของชิ้นงานทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า จากภาพ 4.4 a.) เป็น H4 สังเกตได้ว่า H4 มีลักษณะที่ใส ซึ่งพิสูจน์ได้จากการนำ H4 มาทำการทดลองส่องด้วยแสงเลเซอร์ ดังภาพ 4.5 a.) พบว่า H4 มีลักษณะที่โปร่งแสง เนื่องจากยอมให้แสงทะลุผ่านชิ้นงานได้ และเมื่อตั้งทิ้งไว้บนแผ่นพลาสติกที่มีโลโก้ AMR พบว่าสามารถเห็นโลโก้ได้อย่างชัดเจน และเมื่อทำการตรวจสอบลักษณะภายนอกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพบว่า H4 มีฟองอากาศที่บริเวณพื้นผิวเล็กน้อย คาดว่าเป็นผลมาจากการแทรกตัวของอากาศภายใน H4 เนื่องจากสมบัติของ H คือ ยอมให้มีการแพร่ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลต่าง ๆ เช่น น้ำ โปรตีน รวมไปถึงแก๊ส หลักจากนั้นจึงได้มีการทำการทดสอบ H4 ที่มีการเติม M ลงไปเป็น MH4 สังเกตได้จากภาพ 4.4 และ 4.5 b.) จะพบว่า ลักษณะของ MH4 จะมีความทึบแสง เนื่องจากแสงเลเซอร์ไม่สามารถทะลุผ่านได้และเมื่อทำการตั้งทิ้งไว้บนแผ่นพลาสติกไม่ปรากฏโลโก้ AMR และเมื่อทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพบว่า ปรากฏอนุภาคของแม่เหล็กกระจายตัวอยู่ภายใน H4 โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ $107.9 \pm 25.7 \mu\text{m}$ ต่อมาจึงได้มีการทดสอบ MH4T3 จากภาพ 4.4 และ 4.5 c) พบว่ามีลักษณะทึบแสงเช่นเดียวกันกับ MH4 เนื่องจากไม่ยอมให้แสงเลเซอร์ทะลุผ่านได้ และเมื่อทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพบว่า มีอนุภาคแม่เหล็กกระจายตัวอยู่ภายใน H4 และมี TiNSs สังเกตได้จากลักษณะแถบสีขาวขุ่นที่อยู่รอบ ๆ NdFeB เป็นเฟสกระจายอยู่รอบ ๆ H4 ซึ่งสอดคล้องกับผล XTM ที่ H4 ทำหน้าที่เป็นเฟสหลัก มีเฟสกระจายเป็นผง NdFeB และ TiNSs เป็นเฟสกระจายอยู่รอบ ๆ H4

a.)

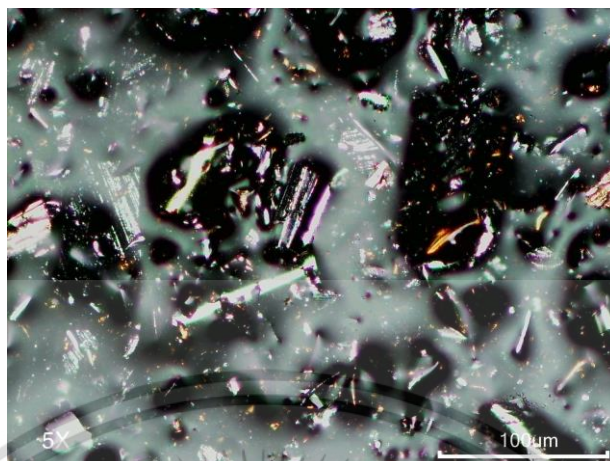


b.)



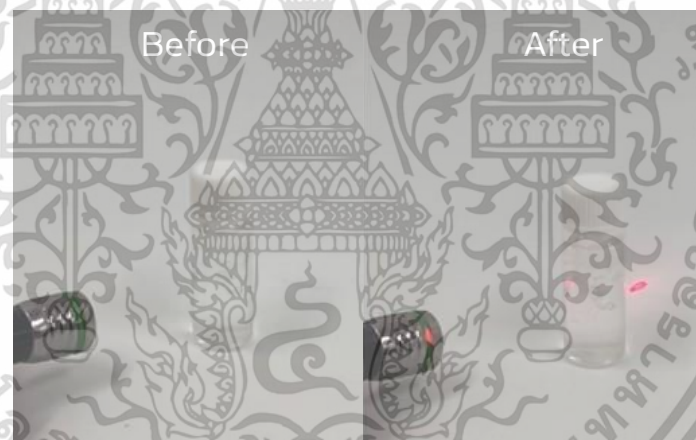
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

c.)



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาในรูปแบบสองมิติของ a.) H4 b.) MH4 และ c.) MH4T3 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)

a.)



b.)



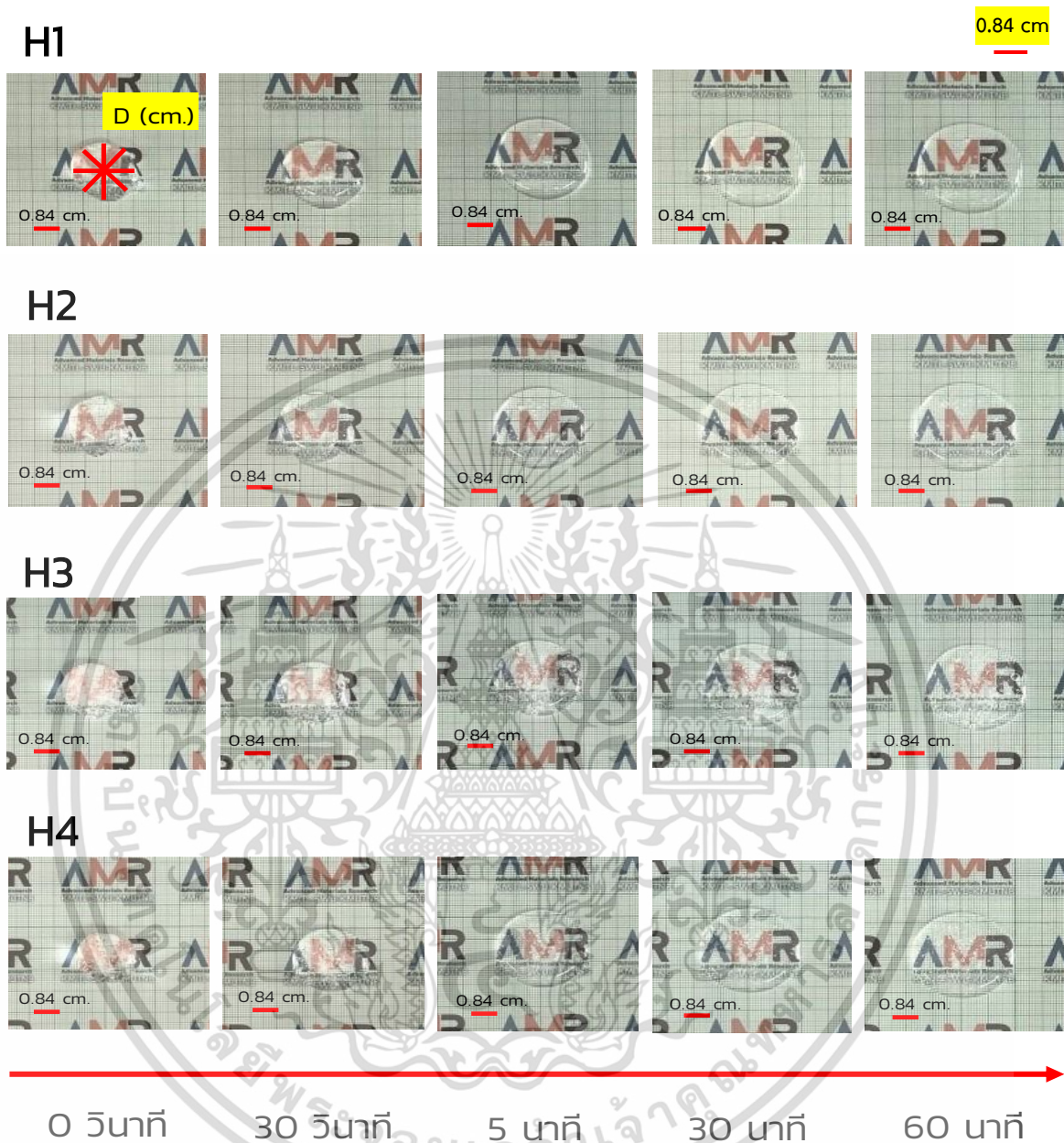
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงการทดสอบความโปร่งแสงของวัสดุ a.) H4 b.) MH4 และ c.) MH4T3

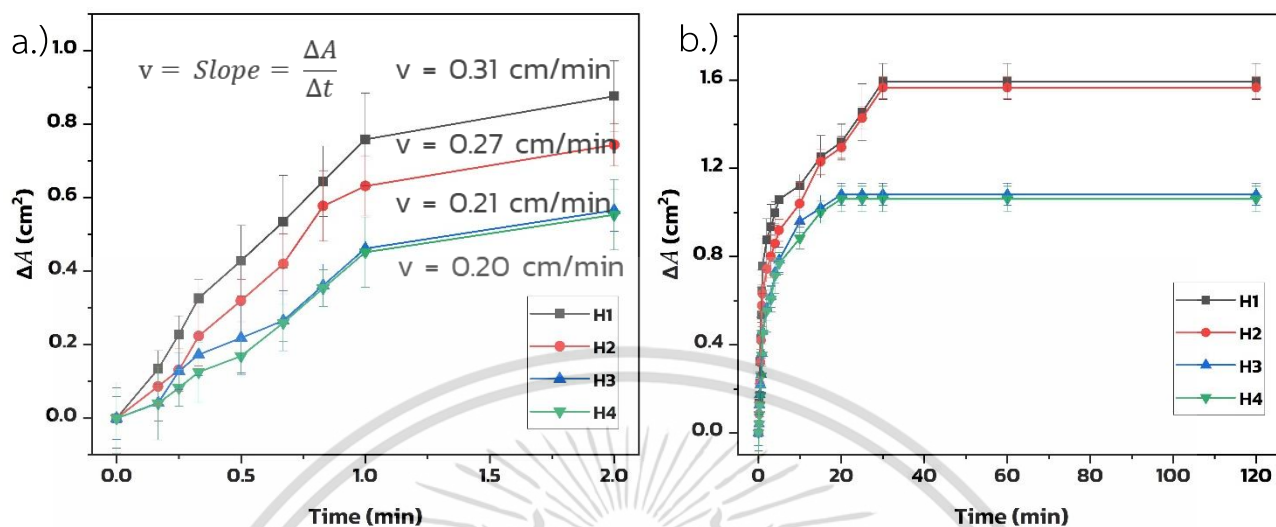
4.1.6 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุ H4 และ MH4

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของ MH4T3 เริ่มต้นได้มีการกำหนดอัตราส่วนของบอแรกซ์ต่อ PVA เพื่อศึกษาลักษณะการคงตัวของ H ก่อนที่จะมีการเติมผง NdFeB และ TiNSs ที่ 4 อัตราส่วนด้วยกัน ได้แก่ H1 H2 H3 และ H4 ตามลำดับ โดยในการทดสอบจะนำ H ทั้ง 4 อัตราส่วนมาวางไว้บนแผ่นพลาสติก สังเกตได้ว่าขนาดของ H จะเปลี่ยนแปลงไปโดยมีขนาดและระยะเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกัน โดยจะมีการหาพื้นที่วงกลมของ H ซึ่งแสดงถึงการขยายตัวโดยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของ H ทั้งสี่ทิศทาง แสดงดังรูปที่ 4.6 จากนั้นนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยแล้วทำการหาพื้นที่ของวงกลมจากสูตร $2\pi r^2$ ซึ่งในการทดสอบจะเริ่มตั้งวัดตั้งแต่เวลา 0 วินาที ไปจนถึง 2 ชั่วโมง H1 H2 H3 และ H4 จะใช้ความเร็วในการขยายตัวจากจุดเริ่มต้นของช่วงแรก คือช่วง 0 ถึง 2 นาที เท่ากับ 0.31 0.27 0.21 และ 0.2 เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.7 a.) โดย H1 และ H2 จะเริ่มมีการคงตัวที่เวลา 30 นาที และ H3 และ H4 จะเริ่มมีการคงตัวที่เวลา 20 นาที แสดงดังรูปที่ 4.7 b.)



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะการขยายตัวของ H ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อถูกตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 0 ถึง 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 a.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ H ที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับเวลา โดยมีช่วงเวลาจาก 0 ถึง 2 นาที b.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ H ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับเวลา โดยมีช่วงเวลาจาก 0 ถึง 120 นาที

จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณบอแรกซ์เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ H มีความสามารถในการคงตัวที่ดี สังเกตได้จากความเร็วในการขยายตัวของ H ในช่วงเวลาแรก และที่ระยะเวลาต่อมา H จะค่อย ๆ มีการขยายตัวที่คงที่และหยุดขยายตัวในที่สุด โดย H3 และ H4 จะหยุดการขยายตัวในช่วงระยะเวลา 20 นาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เร็วกว่า H1 และ H2 ที่มีปริมาณของบอแรกซ์ที่น้อยกว่า แต่ที่อัตราส่วน H4 จะมีความคงตัวที่มากที่สุดเนื่องจากมีความเร็วในการขยายตัวที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ โดยความสามารถในการคงตัวของ H นั้นมีผลมาจากความหนืด โดยบอแรกซ์จะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวาง ดังนั้นเมื่อมีปริมาณของบอแรกซ์ที่มากขึ้น จึงส่งผลให้พันธะภายในเกิดการเชื่อมกันได้อย่างแน่นหนาและเป็นผลให้ที่อัตราส่วน H4 มีความหนืดที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ โดยทั้งสองอัตราส่วนที่มีความหนืดน้อยที่สุดและมากที่สุด ได้แก่ H1 และ H4 จะถูกเลือกเพื่อนำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพของ H ที่มีการเติม M ต่อไป

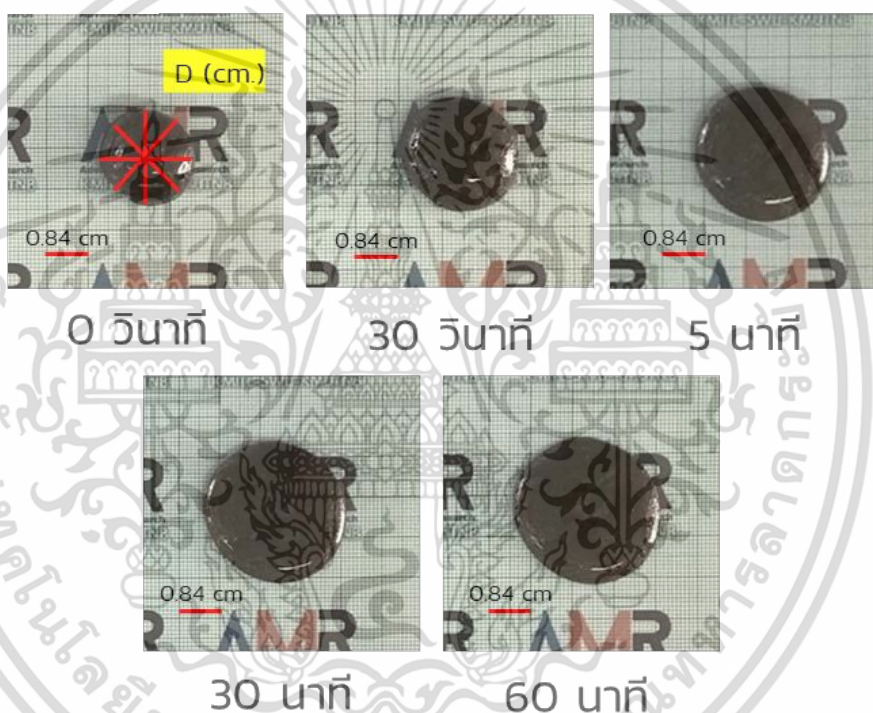
ซึ่งเมื่อมีการเลือกอัตราส่วน H1 และ H4 มาทำการศึกษาว่าในการเติมผง NdFeB นั้นส่งผลอย่างไรต่อสมบัติของ H โดยมีการกำหนดสัญลักษณ์ให้ H ทั้งสองอัตราส่วนที่นำมาเติมผง M คือ MH1 และ MH4 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการขยายตัวของ MH1 และ MH4 โดยสามารถหาพื้นที่วงกลม ซึ่งแสดงถึงการขยายตัวโดยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของ MH ทั้งสี่ทิศทาง จากนั้นนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยแล้วทำการหาพื้นที่ของวงกลมจากสูตร $2\pi r^2$ โดยจะพบว่าในการเติม M เพื่อปรับปรุงสมบัติให้แก่ H4 นั้น ส่งผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ MH1 และ MH4 มีความคงตัวที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับขณะที่ยังไม่มี การเติม สังกะสีได้จากความเร็วที่ใช้ในการขยายตัวที่มีค่าลดลงอยู่ที่ 0.26 และ 0.18 เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.9 a.) โดยอัตราส่วนที่มากยังคงมีการคงตัวที่ดีกว่าอัตราส่วนที่น้อยกว่า ซึ่งใช้ระยะเวลาในการคงตัวอยู่ในช่วง 20 นาที และ 30 นาที ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.9 b.) แสดงให้เห็นว่าในการเติมผง M ลงไปจะไม่ทำลายสมบัติเดิมที่มีอยู่ของ H4 อีกทั้งยังช่วยเพิ่มเสถียรภาพในการคงตัวให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นจากงานวิจัยของเราที่ต้องการเพิ่มสมบัติของ H ให้ดีขึ้นจึงมีการเลือกใช้ MH4 ไปประยุกต์เพื่อการใช้งานต่อไป

MH1

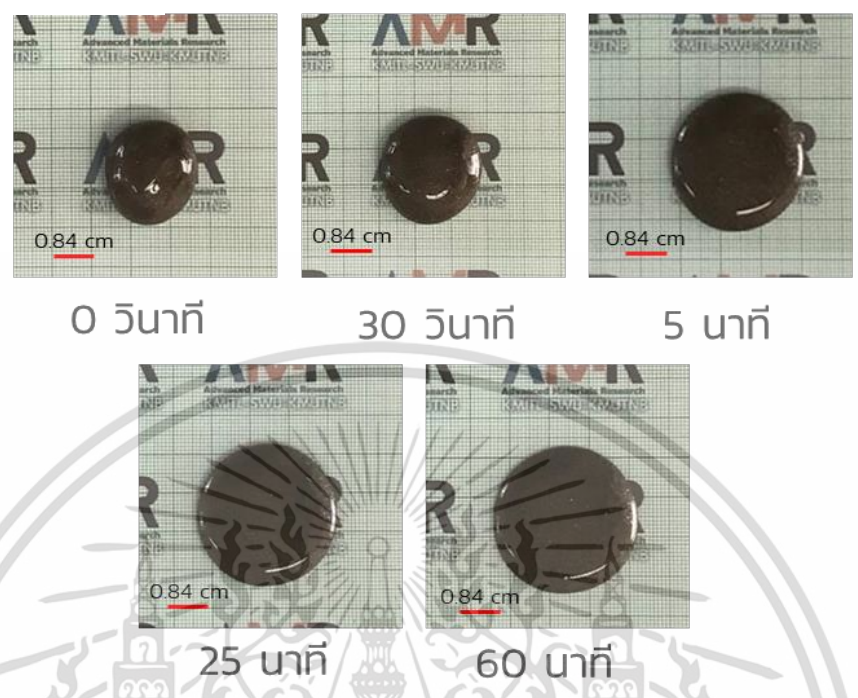
a)



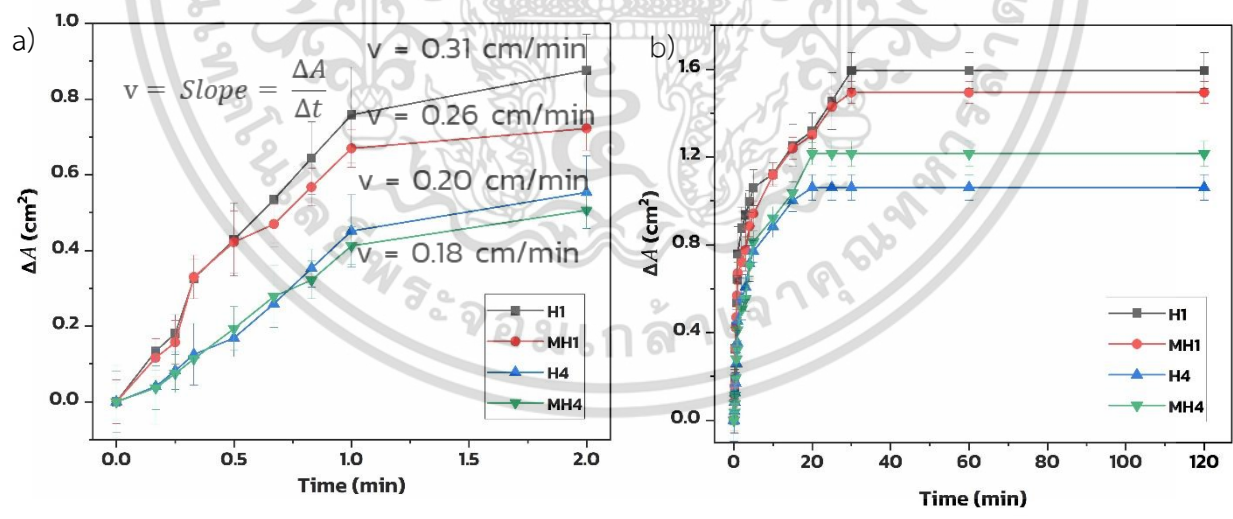
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MH4

b)



รูปที่ 4.8 a.) แสดงลักษณะการขยายตัวของ MH1 เมื่อถูกตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 0 ถึง 60 นาที และ b.) แสดงลักษณะการขยายตัวของ MH4 เมื่อถูกตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 0 ถึง 60 นาที



รูปที่ 4.9 a.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ MH ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับเวลา โดยมีช่วงเวลาจาก 0 ถึง 2 นาที b.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ MH ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับเวลาโดยมีช่วงเวลาจาก 0 ถึง 120 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

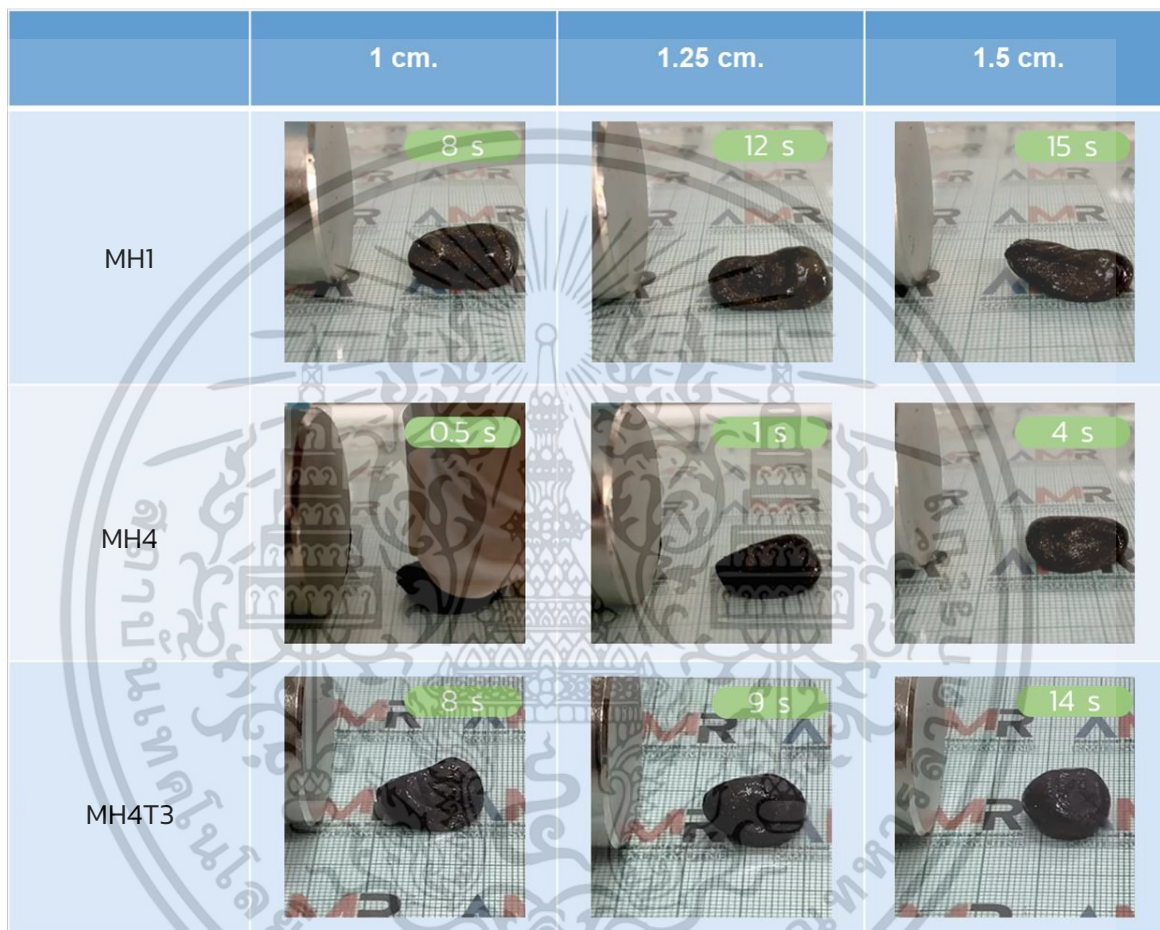
4.1.7 ผลการศึกษาสมบัติในการเคลื่อนที่ของวัสดุ MH4 และ MH4T3

ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาความสามารถในการเคลื่อนที่ของ MH4 และ MH4T3 โดยใช้สมบัติของผง NdFeB ที่มีความสามารถในการควบคุมการเคลื่อนที่โดยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก ทำให้สามารถควบคุม MH4 ให้สามารถเคลื่อนที่ได้ ในการทดลองได้มีการนำไฮโดรเจลที่มีความหนืดน้อยที่สุดและมากที่สุด ซึ่งทราบได้จากตอนที่ 4.1.5 ได้แก่ MH1 และ MH4 มาทำการทดสอบ เพื่อศึกษาว่าไฮโดรเจลที่มีการเติมผง NdFeB ลงไปจำนวน 10 กรัมกำหนดให้เป็น M จะสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของ H ได้หรือไม่ อีกทั้งความหนืดของ H ส่งผลอย่างไรต่อการเคลื่อนที่ จากรูปที่ 4.10 ได้มีการนำแม่เหล็กเหนี่ยวนำวางไว้ทางด้านซ้ายให้อยู่กับที่ เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ MH4 ให้เคลื่อนที่ และมีการนำ MH1 และ MH4 ที่มีขนาด 1 กรัม มาวางตั้งไว้ที่ฝั่งขวา โดยทำการกำหนดระยะทางเพื่อดูระยะที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของตัว MH ที่ 3 ระยะด้วยกัน ได้แก่ 1 1.25 และ 1.5 เซนติเมตร ซึ่งจากการทดลองพบว่า MH4 สามารถเคลื่อนที่ได้โดยการเหนี่ยวนำจากแม่เหล็ก โดย MH4 จะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ไปยังแม่เหล็กเหนี่ยวนำได้เร็วกว่า โดยในแต่ละระยะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ เท่ากับ 0.5 1 และ 4 วินาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมผง NdFeB ลงไปใน H จะสามารถทำให้ H มีความสามารถในการเคลื่อนที่โดยอาศัยการเหนี่ยวนำจากแม่เหล็ก อีกทั้งความหนืดยังมีผลต่อการเคลื่อนที่ของ H โดยความหนืดที่มากส่งผลให้ H เคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่ของ MH4 โดยศึกษาผลของการเติมบอแรกซ์ที่ปริมาณน้อยที่สุดและมากที่สุด จากนั้นทำการเติมผงแม่เหล็กเพื่อเปรียบเทียบกันแล้ว ได้ผลสรุปว่าความหนืดมีผลต่อการเคลื่อนที่ของ MH ต่อมาเพื่อทำการศึกษาว่าเมื่อมีการเติม TiNSs ในการปรับปรุงสมบัติให้แก่ MH จะส่งผลต่อสมบัติในการเคลื่อนที่หรือไม่ จึงได้ทำการเติม TiNSs ที่ปริมาตร 15 มิลลิลิตร กำหนดให้เป็น T3 ลงใน MH4 ซึ่งมีความหนืดที่มากที่สุด โดยกำหนดสัญลักษณ์คือ MH4T3 โดยวิธีการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 4.10 ซึ่งทำการทดลองเช่นเดียวกับ MH1 และ MH4 จากการทดลองพบว่า MH4T3 ยังคงมีความสามารถในการเคลื่อนที่โดยอาศัยการเหนี่ยวนำของแม่เหล็ก แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ MH4 พบว่า ระยะเวลาในการเคลื่อนที่จะช้าลง โดยมีระยะเวลาอยู่ที่ 8 9 และ 14 วินาที ที่ระยะห่าง 1 1.25 และ 1.5 เซนติเมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเติม T3 จะส่งผลให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ลดลง ซึ่งการที่ MH4T3 เคลื่อนที่ได้ช้าลงเป็นผลมาจาก TiNSs มีอนุภาคที่เล็กถึงระดับนาโนเมตรทำให้มีการกระจายตัวอยู่ภายในอย่างทั่วถึง จึงสามารถเข้าไปบดบังความเป็นแม่เหล็กภายใน H ได้ และเนื่องด้วยสมบัติที่ความเป็นฉนวนไฟฟ้าทำให้ประจุไฟฟ้าไหลผ่านได้ยาก ดังนั้น แม่เหล็กที่มีการกระจายตัวอยู่ใน H จึงเกิดการเคลื่อนตัวได้ยาก แต่ถึงอย่างไรก็ตาม MH4T3 ก็ยังคงมีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ดังเดิม จากการทดลองโดยศึกษาวัสดุทั้งสามชนิด ได้แก่ MH1 MH4 และ MH4T3 สรุปได้ว่าการเติมผง NdFeB ส่งผลให้ H มีความสามารถในการเคลื่อนที่โดยอาศัยการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็ก อีกทั้งความ

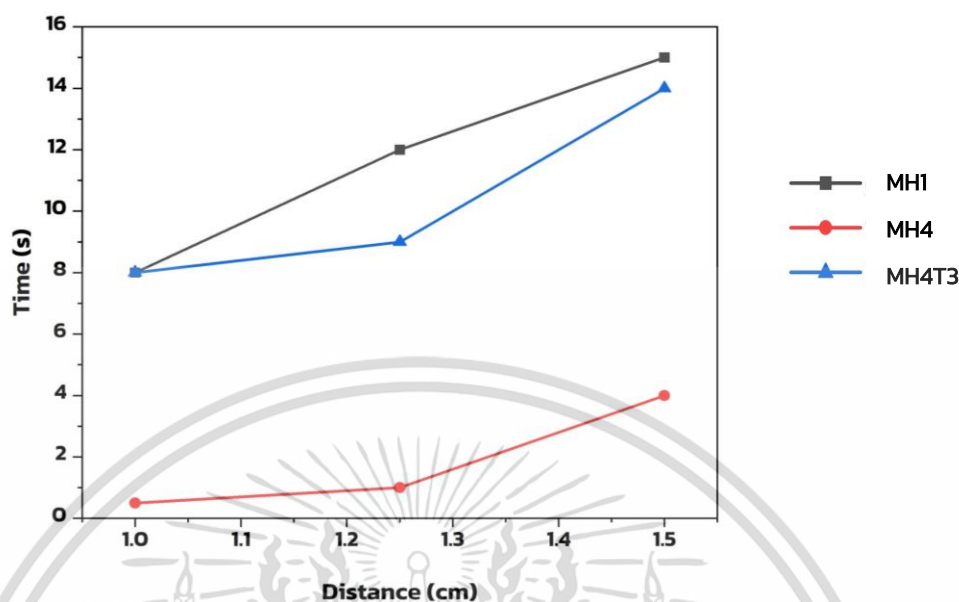
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนีดมีผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของ MH แต่เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติด้วย TiNSs จะส่งผลให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ลดลง โดยรูปที่ 4.11 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างและเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของ MH1 MH4 และ MH4T3 ไปยังแม่เหล็กเหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.10 แสดงการทดสอบการเคลื่อนที่ และระยะเวลาในการเคลื่อนที่ระหว่างแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในการเหนี่ยวนำ MH ในระยะต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างและเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของ MH1 MH4 และ MH4T3 ไปยังแม่เหล็กเหนียวน้ำ

4.2 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3

ในงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นบนวัสดุ H และได้มีการปรับปรุงสมบัติทางด้านต่าง ๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับการสร้างเป็นเซนเซอร์เพื่อสั่งการ ซึ่งมีการเติมผง NdFeB เพื่อเพิ่มสมบัติในการเคลื่อนที่โดยการเหนียวน้ำด้วยสนามแม่เหล็ก และเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้า แต่เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้สั่งการในงานวิจัยนี้ได้มีการนำค่าความต้านทาน (Resistance) ที่ได้จากการดัดยัดเซนเซอร์มาเป็นชุดคำสั่ง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติเพิ่มเติมให้แก่วัสดุตรวจจับ โดยการเติมวัสดุที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตร (Nanomaterial) ได้แก่ TiNSs เพื่อปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าอีกทั้งยังช่วยเพิ่มความไวในการตอบสนองของวัสดุ และเพื่อแสดงให้เห็นว่าในการเติมวัสดุเพื่อปรับปรุงชิ้นงาน H มีความเหมาะสมในการนำไปสร้างเป็นเซนเซอร์สั่งการต่อไป จึงได้มีการตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเมื่อดัดยัดที่ระยะ 1 เซนติเมตร และทำการกำหนดเกณฑ์ประสิทธิภาพของเซนเซอร์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุทั้งสามชนิด ได้แก่ H4 MH4 และ MH4T3 เปรียบเทียบกัน โดยจะมีเกณฑ์การให้คะแนนแต่ละตัวแปรที่ทดสอบ แสดงดังตารางที่ 4.2

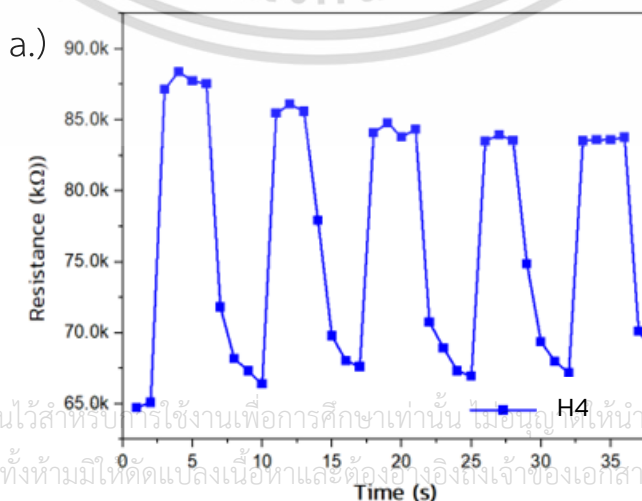
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงเกณฑ์ที่ใช้ในการกำหนดประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการโดยมีการเปรียบเทียบวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ H4 MH4 และ MH4T3

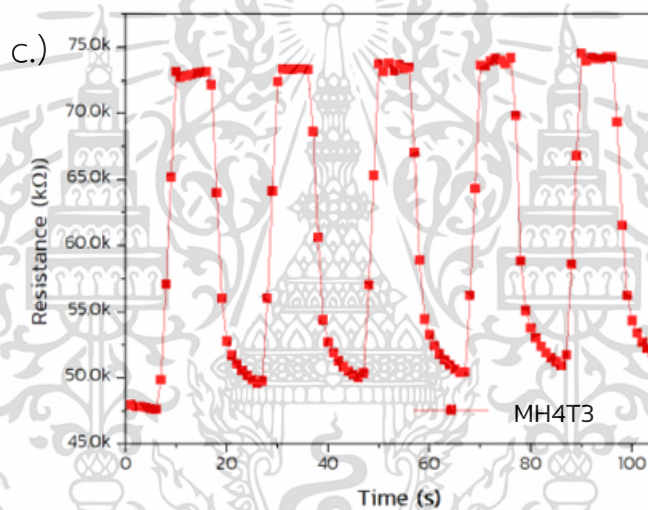
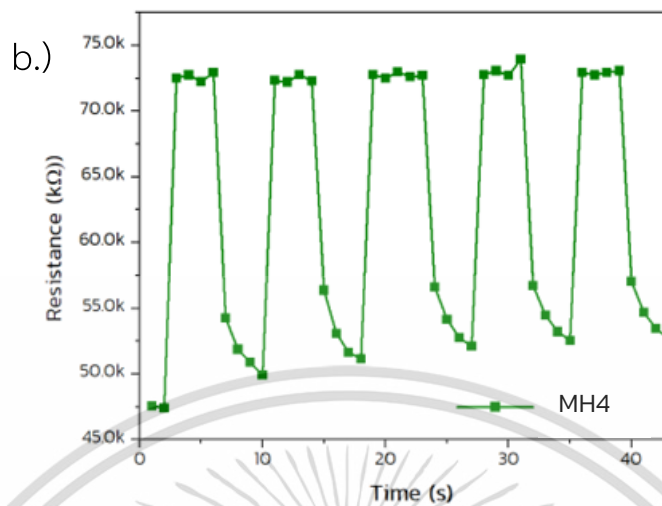
ตัวแปรทางเซนเซอร์	การให้คะแนน		
	1	2	3
ความว่องไวในการตรวจจับ (กิโลโอห์ม/เซนติเมตร)	≤19.9	20-22.9	≥23
ความแม่นยำในการตรวจจับ (ร้อยละ)	≤94.9	95-97.9	≥98
ความเสถียรในการตรวจจับ (ร้อยละ)	≤60.9	61-69.9	≥70
เวลาในการตอบสนอง (วินาที)	≥3.0	2.9-1.3	≤1.2
เวลาในการคืนกลับ (วินาที)	≥3.0	2.9-1.9	≤1.8

4.2.1 ผลการศึกษาความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) ของวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3

ในงานวิจัยนี้ยังได้มีการเตรียมวัสดุเพื่อพัฒนาเป็นเซนเซอร์สั่งการ โดยมีการศึกษาวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3 จากการศึกษาโดยนำวัสดุทั้งสามชนิดบรรจุลงในหลอดยางซิลิโคน แล้วทำการดัดงอเพื่อหาค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) โดยเลือกกระยะในการดัดงอที่ 1 เซนติเมตร จากผลการทดสอบพบว่า H4 MH4 และ MH4T3 จะมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเริ่มต้น (R_0) 65.9 50.6 และ 49.8 กิโลโอห์ม ตามลำดับ เมื่อให้แรงเชิงกลต่อชิ้นงานโดยการดัดงอออกที่ระยะ 1 เซนติเมตรส่งผลให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และเมื่อปล่อยชิ้นงานให้หดกลับมายังตำแหน่งเดิม พบว่า H4 MH4 และ MH4T3 มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔR) โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 18.8 ± 4.0 22.0 ± 2.0 และ 23.8 ± 0.9 กิโลโอห์ม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า MH4T3 มีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ๆ แสดงดังรูปที่ 4.12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔR) ของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นบน
a.) H4 b.) MH4 และ c.) MH4T3

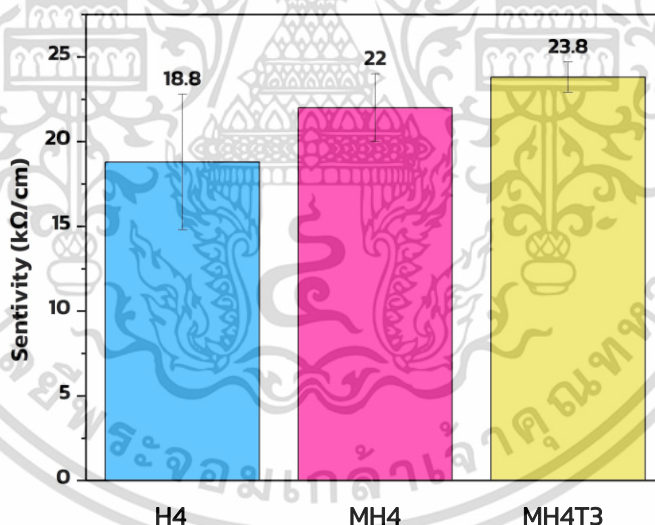
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นโดยเปรียบเทียบวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3

จากการตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) ของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น โดยการดึงยืดวัสดุที่ระยะ 1 เซนติเมตร จากการเปรียบเทียบวัสดุทั้งสามชนิด ได้แก่ H4 MH4 และ MH4T3 พบว่า วัสดุแต่ละชนิดจะให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการตรวจสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นตามตัวแปรทางเซนเซอร์ ดังนี้

4.2.2.1 ผลการศึกษาความไวในการตรวจจับ (Sensitivity)

จากการตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) ของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นทั้งสามชนิด โดยการให้แรงเชิงกลโดยการดึงยืดที่ระยะ 1 เซนติเมตรเท่ากัน แล้วทำการปล่อยกลับจะให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔR) แตกต่างกันไป โดยวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3 จะมีความไวในการตรวจจับ (Sensitivity) เท่ากับ 18.8 ± 4.0 22.0 ± 2.0 และ 23.8 ± 0.9 กิโลโอห์มต่อเซนติเมตร ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.13

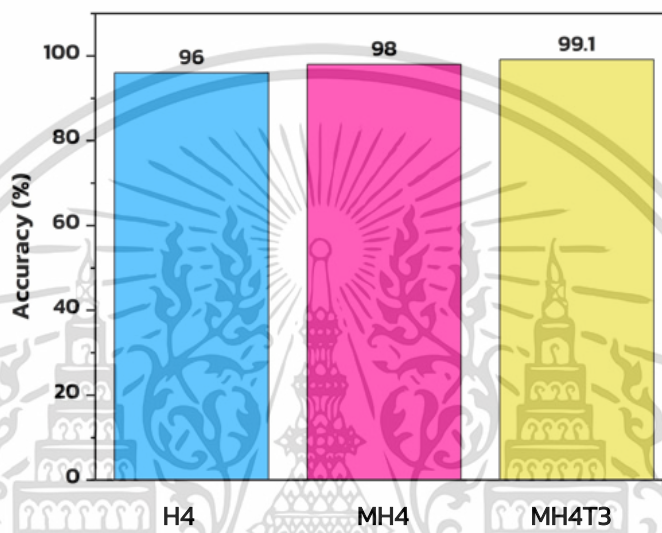


รูปที่ 4.13 แสดงความไวในการตรวจจับของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นบนวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3

จากรูปแสดงให้เห็นว่า MH4T3 มีประสิทธิภาพในการตรวจจับสูงที่สุด เนื่องจากมีความไวในการตรวจจับ (Sensitivity) เท่ากับ 23.8 ± 0.9 กิโลโอห์มต่อเซนติเมตร ซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.2 ผลการศึกษาความแม่นยำในการตรวจจับ (Accuracy)

จากการตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) ของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหุ่นบนวัสดุ ทั้งสามชนิด โดยมีการให้แรงเชิงกลโดยการดึงยึดที่ระยะ 1 เซนติเมตร แล้วปล่อยกลับ จากการศึกษาความแม่นยำในการตรวจจับ (Accuracy) สำหรับเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหุ่นทั้งสามชนิด ได้แก่ H4 MH4 และ MH4T3 พบว่า มีร้อยละความแม่นยำอยู่ที่ 96 98 และ 99.1 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงความแม่นยำในการตรวจจับของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหุ่นบนวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3

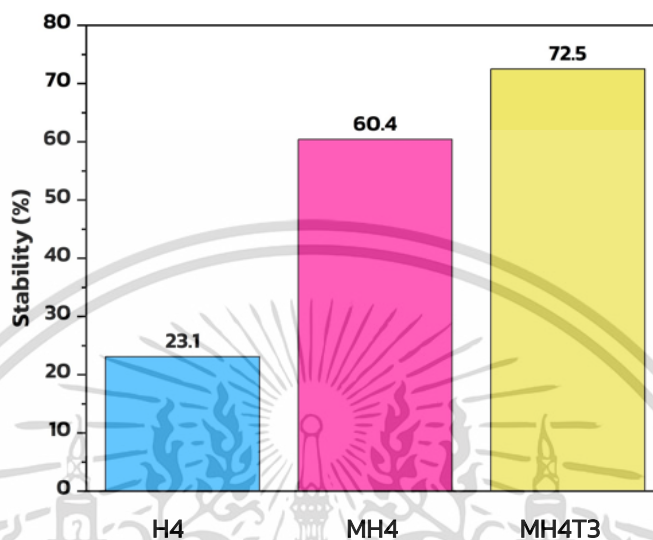
จากรูปแสดงให้เห็นว่าวัสดุทั้งสามชนิดจะมีร้อยละความแม่นยำที่สูง โดยมีความมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 96 โดย MH4T3 จะมีร้อยละความแม่นยำที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ๆ โดยมีร้อยละความแม่นยำในการตรวจจับสูงถึงร้อยละ 99.1

4.2.2.3 ผลการศึกษาความเสถียรในการตรวจจับ (Stability)

จากการตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) ของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหุ่นบนวัสดุ ทั้งสามชนิด โดยมีการให้แรงเชิงกลโดยการดึงยึดที่ระยะ 1 เซนติเมตร แล้วปล่อยกลับ จากการศึกษาหาพื้นที่ทับซ้อนของสัญญาณ พบว่า H4 MH4 และ MH4T3 จะมีพื้นที่ทับซ้อนของสัญญาณคิดเป็นร้อยละฮิสเทอรีซิส (%Hysteresis) เท่ากับ 76.9 39.6 และ 27.5 ตามลำดับ และเมื่อนำมาลบกับหนึ่งร้อยละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงถึงร้อยละความเสถียร (%Stability) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 23.1 60.4 และ 72.5 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.15



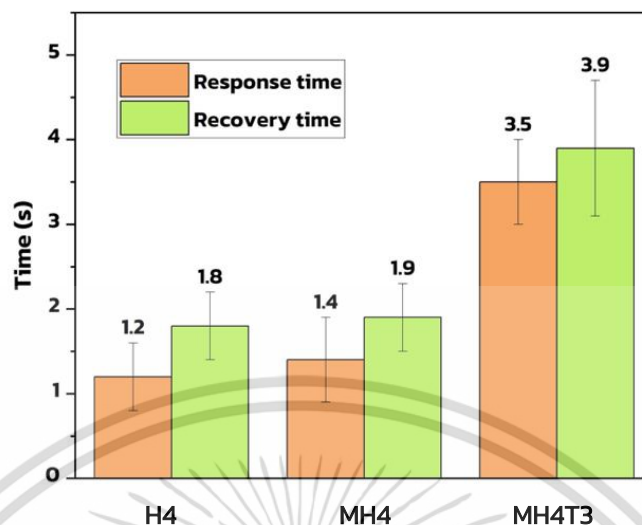
รูปที่ 4.15 แสดงร้อยละความเสถียรในการตรวจจับของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหยุ่นบนวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3

จากรูปแสดงให้เห็นว่า MH4T3 จะมีพื้นที่ทับซ้อนของสัญญาณน้อยที่สุด ส่งผลให้มีความเสถียรในการตรวจจับ (Stability) ที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ๆ โดยมีค่าร้อยละความเสถียรอยู่ที่ 72.5

4.2.2.4 ผลการศึกษาเวลาในการตอบสนองและคืนกลับ (Response and recovery time)

จากการสุ่มเลือกชุดข้อมูลจากการทดสอบค่าความต้านทานทางไฟฟ้าโดยการให้แรงและปล่อยกลับเป็นจำนวน 5 รอบ เพื่อศึกษาเวลาในการตอบสนอง (Response time) เมื่อมีการดึงยืดที่ระยะ 1 เซนติเมตร และเวลาในการคืนกลับ (Recovery time) ของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหยุ่น พบว่า H4 MH4 และ MH4T3 จะใช้เวลาในการตอบสนอง เท่ากับ 1.2 ± 0.4 1.4 ± 0.5 และ 3.5 ± 0.5 วินาที ตามลำดับ และใช้เวลาในการคืนกลับ เท่ากับ 1.8 ± 0.4 1.9 ± 0.4 และ 3.9 ± 0.8 วินาที ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงเวลาในการตอบสนองและคืนกลับของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหยุ่นบนวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3

จากรูปแสดงให้เห็นว่าวัสดุ H ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ H4 จะมีเวลาในการตอบสนองและคืนกลับที่รวดเร็วที่สุด เมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ๆ

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพของเซนเซอร์ตามตัวแปรต่าง ๆ ข้างต้น โดยพิจารณาการให้คะแนนตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 4.2 จะพบว่า เมื่อมีการปรับปรุงสมบัติให้แก่วัสดุ H โดยการเติมผง NdFeB และ TiNSs จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่เซนเซอร์สั่งการได้ โดยในการศึกษาจะกำหนดให้วัสดุที่มีประสิทธิภาพของแต่ละตัวแปรสูงที่สุดได้คะแนน 3 คะแนน ถัดมาคือ 2 คะแนน และ 1 คะแนน ตามลำดับ แต่ในส่วนของเวลาในการตอบสนองและคืนกลับจะมีการกำหนดให้วัสดุที่มีเวลาในการตอบสนองและคืนกลับที่เร็วที่สุดได้คะแนน 3 คะแนน และเมื่อมีเวลาที่ช้าลงจะได้คะแนน 2 และ 1 คะแนน ตามลำดับ โดยเริ่มต้นพิจารณาจากความไวในการตรวจจับ (Sensitivity) พบว่า MH3T4 จะมีความไวในการตรวจจับสูงที่สุด ดังนั้นจึงได้คะแนนเต็ม 3 คะแนน ต่อมาพิจารณาความแม่นยำในการตรวจจับ (Accuracy) พบว่า MH4T3 จะมีร้อยละความแม่นยำ (%Accuracy) ที่มากที่สุด ส่งผลให้ได้คะแนนเต็ม 3 คะแนน และเมื่อพิจารณาความเสถียรในการตรวจจับ (Stability) พบว่า MH4T3 ยังคงมีร้อยละความเสถียรที่มากที่สุด จึงได้คะแนนเต็ม 3 คะแนน และสุดท้ายพิจารณาเวลาในการตอบสนองและคืนกลับ (Response and recovery time) พบว่า H4 ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ จะมีเวลาในการตอบสนองและคืนกลับที่เร็วที่สุด เมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ๆ จึงได้คะแนนเต็ม 3 คะแนน แสดงดังตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3

ตัวแปรทางเซนเซอร์	วัสดุ		
	H4	MH4	MH4T3
ความว่องไวในการตรวจจับ (กิโลโอม/เซนติเมตร)	1	2	3
ร้อยละความแม่นยำ	1	3	3
ร้อยละความเสถียร	1	1	3
เวลาในการตอบสนอง (วินาที)	3	2	1
เวลาในการคืนกลับ (วินาที)	3	2	1
รวม	9	10	11

จากตารางแสดงให้เห็นว่า วัสดุตรวจจับทั้งสามชนิดจะแสดงประสิทธิภาพที่แตกต่างกันในแต่ละตัวแปรที่ทำการทดสอบ โดยทุก ๆ ตัวแปรล้วนมีความสำคัญต่อการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุตรวจจับทั้งสิ้น แต่อย่างไรก็ตามในการประเมินประสิทธิภาพต้องมีการพิจารณาจากภาพรวม ซึ่งจะพบว่า MH4T3 จะมีประสิทธิภาพที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับ H4 และ MH4 โดยมีคะแนนรวมของประสิทธิภาพอยู่ที่ 11 คะแนน แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเติมผง M และ T3 ให้แก่ H4 โดย TINSs จะเข้าไปช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับสัญญาณให้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้มีความว่องไวในการตรวจจับ ร้อยละความแม่นยำ รวมถึงร้อยละความเสถียรของ MH4T3 ที่มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ๆ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า MH4T3 มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์สำหรับการสั่งการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

4.3 การศึกษาการเตรียมเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นบนวัสดุ MH4T3

4.3.1 ผลการศึกษาความสามารถในการยึดหดของเซนเซอร์โดยการทดสอบแรงดึง (Tensile testing)

จากการทดสอบความสามารถในการยึดหดของวัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นเซนเซอร์สั่งการ ซึ่งได้แก่ หลอดยางซิลิโคน (Silicone rubber) โดยการนำไปดึงยึดด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing) โดยมีการกำหนดความยาวของชิ้นงานที่จะนำไปทดสอบไว้ที่ความยาว 8 เซนติเมตร พบว่าระยะดึงยึดสูงสุดอยู่ที่ 7 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระยะที่วัสดุเกิดการฉีกขาดออกจากกัน โดยความยาวของหลอดซิลิโคนสามารถดึงยึดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกได้สูงสุด 15 เซนติเมตร จากนั้นเมื่อได้ระยะดิ่งยึดที่สูงที่สุดของหลอดยางซิลิโคนแล้วจึงได้มีการบรรจุ MH4T3 ลงในหลอดเพื่อกำหนดระยะดิ่งยึดและนำไปทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการต่อไป

4.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหยุ่นบนวัสดุ MH4T3

ในงานวิจัยนี้ได้มีการเตรียมเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหยุ่นโดยการบรรจุ MH4T3 ลงในหลอดยางซิลิโคน (Silicone rubber) โดยจะมีการนำเซนเซอร์ที่เตรียมไว้ไปทำการตรวจสอบค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) จากนั้นทำการให้แรงเชิงกลโดยการดิ่งยึดที่ระยะต่าง ๆ เพื่อศึกษาระยะที่มีผลต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้า โดยมีการกำหนดตัวแปรทางเซนเซอร์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการ ซึ่งจะมีเกณฑ์การให้คะแนนในแต่ละตัวแปรที่ทำการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 4.4 ระยะการดิ่งยึดที่ได้คะแนนรวมมากที่สุดจะถูกนำไปใช้สำหรับการสั่งการอุปกรณ์ต่อไป

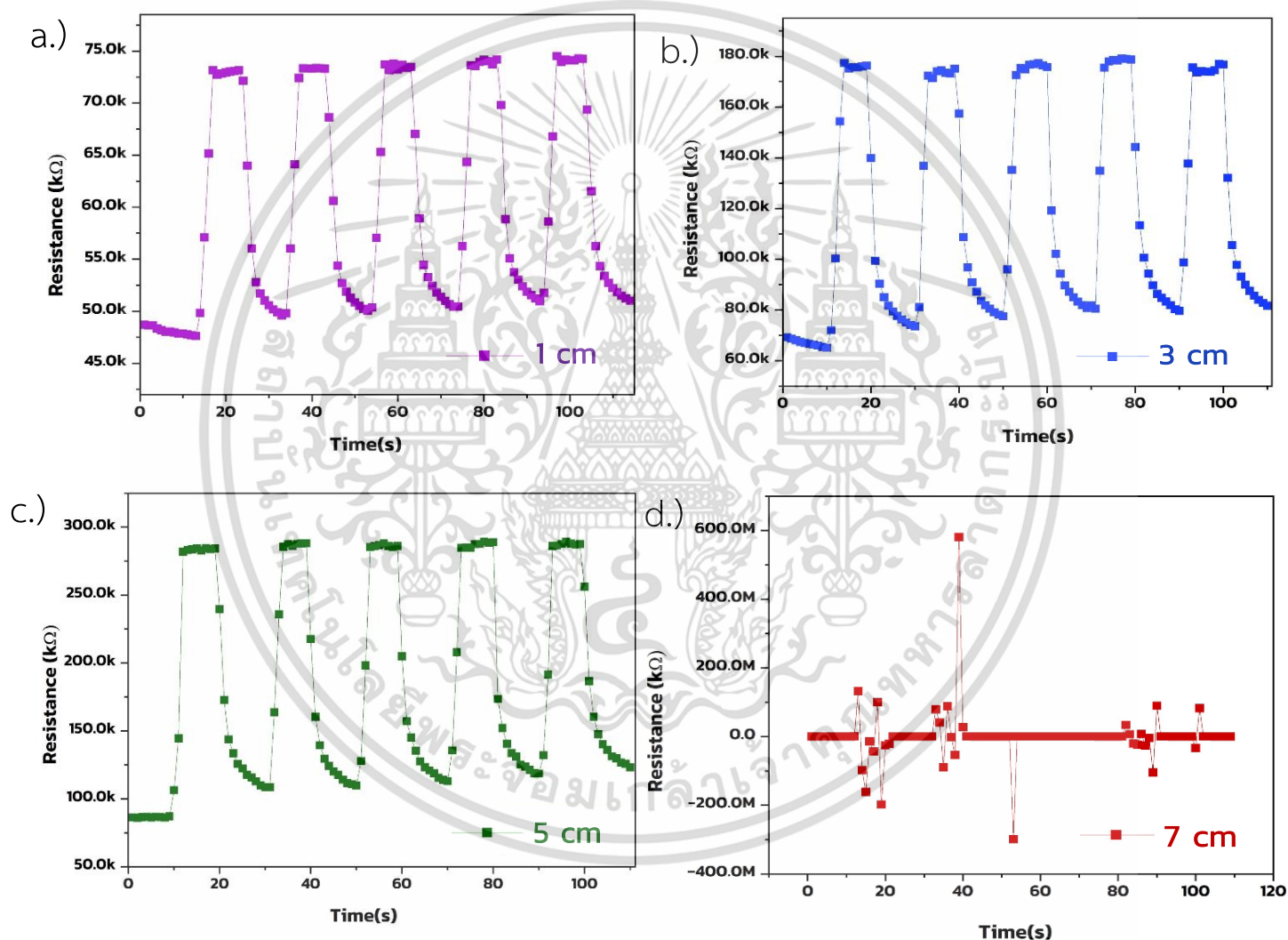
ตารางที่ 4.4 แสดงเกณฑ์ที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหยุ่น

ตัวแปรทางเซนเซอร์	การให้คะแนน		
	1	2	3
ความว่องไวในการตรวจจับ (กิโลโอห์ม/เซนติเมตร)	≤29.9	30-34.9	≥35
ความแม่นยำในการตรวจจับ (ร้อยละ)	≤60.9	70-95.9	≥96
ความเสถียรในการตรวจจับ (ร้อยละ)	≤39.9	40-54.9	≥55
การใช้งานในระยะยาว (รอบ)	≤89	90-140	≥150

4.4.1 ผลการศึกษาระยะที่ใช้ในการดิ่งยึดของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหยุ่น

เมื่อได้ระยะดิ่งยึดที่สูงที่สุดของหลอดยางซิลิโคน ซึ่งมีระยะอยู่ที่ 7 เซนติเมตร จึงได้มีการกำหนดระยะในการดิ่งยึดเพื่อทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า หรือการทดสอบความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance: R) ซึ่งระยะที่กำหนดเพื่อใช้ในการดิ่งยึด 4 ระยะ ได้แก่ 1 3 5 และ 7 เซนติเมตร โดยมีความยาวของหลอดซิลิโคนอยู่ที่ 8 เซนติเมตรเท่ากัน จากผลการทดสอบค่าความต้านทานทางไฟฟ้า พบว่า ที่ระยะ 1 3 และ 5 เซนติเมตร เซนเซอร์มีการตอบสนองและให้ค่าความต้านทานออกมาเมื่อเกิดการดิ่งยึดโดยที่หลอดซิลิโคนยังไม่เกิดความเสียหายหรือฉีกขาด โดยมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเริ่มต้น (R_0) 47.8 65.2 และ 87.0 กิโลโอห์ม ตามลำดับ เมื่อให้แรงเชิงกลต่อชิ้นงานโดยการดิ่งยึดออกที่ระยะต่าง ๆ ส่งผลให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และเมื่อปล่อยชิ้นงานให้หดกลับมายังตำแหน่งเดิม พบว่า มีค่าความต้านทานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔR) โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 23.8 ± 0.8 33.6 ± 1.9 และ 35.9 ± 2.0 กิโลโอห์มตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าในการให้แรงเชิงกลต่อชิ้นงานโดยดิ่งยึดที่ระยะ 5 เซนติเมตรจะมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับระยะอื่น ๆ และเมื่อมีการดิ่งยึดที่ระยะ 7 เซนติเมตร พบว่าเซนเซอร์มีค่าความต้านทานที่ไม่คงที่และสัญญาณขาดหายเนื่องจากเมื่อมีการดิ่งยึดออก MH4T3 ที่ถูกบรรจุอยู่ภายในเกิดการขาดออกจากกัน สำหรับค่าความต้านทานที่ได้จากการดิ่งยึดเซนเซอร์ทั้ง 4 ระยะ แสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของเซนเซอร์ยึดหุ่นเมื่อมีการให้แรงเชิงกลโดยการดิ่งยึดที่ระยะ a.) 1 เซนติเมตร b.) 3 เซนติเมตร c.) 5 เซนติเมตร และ d.) 7 เซนติเมตร ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีระยะในการดัดยัดที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔR) มีค่าที่สูงขึ้น ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (I) ความต่างศักย์ (V) และความต้านทาน (R) จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) แสดงดังสมการที่ 4.1 เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างความต่างศักย์และกระแส จะได้กราฟเส้นตรงโดยมีความชันของกราฟ เท่ากับส่วนกลับของความต้านทาน ($1/R$) แสดงให้เห็นว่าความต้านทานจะไม่ขึ้นกับกระแส แต่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัสดุและสภาพต้านทานจำเพาะ (Specific electrical resistivity) ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานกระแสไฟฟ้าของวัสดุ โดยวัสดุชนิดเดียวกันจะมีสภาพต้านทานจำเพาะที่เท่ากัน ดังนั้นความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปจากการให้แรงเชิงกลโดยการดัดยัดที่ระยะต่าง ๆ จึงส่งผลต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ 4.2 ดังนั้นจากการทดสอบจึงทำการเลือกระยะที่ใช้ในการดัดยัดที่ 1 3 และ 5 เซนติเมตร เพื่อนำไปหาประสิทธิภาพของเซนเซอร์ส่งการต่อไป เนื่องจากเป็นระยะที่เซนเซอร์ส่งการสามารถตอบสนองและได้เป็นค่าความต้านทานออกมาโดยที่วัสดุไม่เกิดความเสียหาย

$$V = IR \quad (4.1)$$

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage)

I คือ กระแสไฟฟ้า (Current)

R คือ ความต้านทาน (Resistance)

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (4.2)$$

ρ คือ สภาพต้านทานจำเพาะของวัสดุ (Specific electrical resistivity)

L คือ ความยาว (Length)

A คือ พื้นที่ (Area)

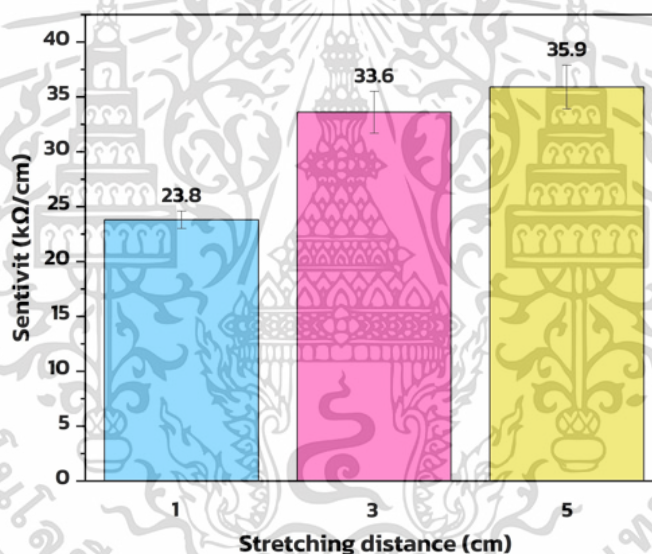
4.4.2 ผลการศึกษาระยะที่ใช้ในการดัดยัดที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซนเซอร์ส่งการแบบยืดหยุ่นตามตัวแปรทางเซนเซอร์

จากการศึกษาความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) ของเซนเซอร์ส่งการแบบยืดหยุ่นในการให้แรงเชิงกลโดยการดัดยัดที่ระยะแตกต่างกัน พบว่า ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔR) ของแต่ละระยะจะได้ค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการตรวจสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์โดยการให้คะแนนตามตัวแปรทางเซนเซอร์ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2.1 ผลการศึกษาความว่องไวในการตรวจจับ (Sensitivity)

จากการตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) ของเซนเซอร์เมื่อมีการให้แรงเชิงกลโดยการดึงยืดที่ระยะแตกต่างกัน ได้แก่ 1 3 และ 5 เซนติเมตร ส่งผลให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และเมื่อปล่อยชิ้นงานให้หดกลับมายังตำแหน่งเดิม พบว่าที่ระยะต่าง ๆ จะมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔR) ที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาความว่องไวในการตรวจจับ (Sensitivity) ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขาออก (Output) ซึ่งได้แก่ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔR) ในหน่วยกิโลโอห์ม ($k\Omega$) ต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขาเข้า (Input) ซึ่งได้แก่ระยะการยืดหด (Stretching distance) โดยเมื่อทำการทดสอบที่ระยะการยืดหดที่ 1 3 และ 5 เซนติเมตร จะมีค่าความว่องไวในการตรวจจับอยู่ที่ 23.8 ± 0.8 33.6 ± 1.9 และ 35.9 ± 2.0 กิโลโอห์มต่อเซนติเมตร ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.18

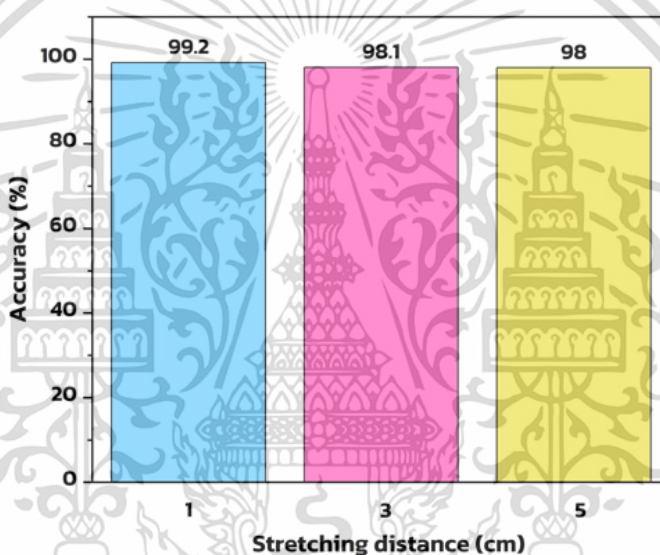


รูปที่ 4.18 แสดงความว่องไวในการตรวจจับของเซนเซอร์โดยมีระยะที่ใช้ดึงยืดแตกต่างกัน

จากรูปสามารถบ่งบอกได้ว่าเมื่อระยะที่ใช้ในการดึงยืดมากขึ้น จะมีความสามารถในการตรวจจับที่ดียิ่งขึ้น โดยที่ระยะ 5 เซนติเมตรจะมีความว่องไวในการตรวจจับที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับระยะที่ 1 และ 3 เซนติเมตร

4.4.2.2 ผลการศึกษาความแม่นยำในการตรวจจับสน (Accuracy)

จากการตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) ของเซนเซอร์เมื่อมีการให้แรงเชิงกลโดยการดึงยืดที่ระยะแตกต่างกัน ได้แก่ 1 3 และ 5 เซนติเมตร และปล่อยกลับเป็นจำนวนหลายรอบ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาความแม่นยำในการตรวจจับสน (Accuracy) สำหรับเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นชนิดนี้ ซึ่งหาได้จาก การนำค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ที่ได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (Standard deviation of ΔR) ซึ่งเกิดจากการดึงยืดแต่ละรอบมาลบกับหนึ่งร้อย และรายงานผลได้เป็นร้อยละความแม่นยำ (%Accuracy) โดยจากการศึกษา พบว่า ที่ระยะในการดึงยืด 1 3 และ 5 เซนติเมตร มีร้อยละความแม่นยำอยู่ที่ 99.2 98.1 และ 98 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.19



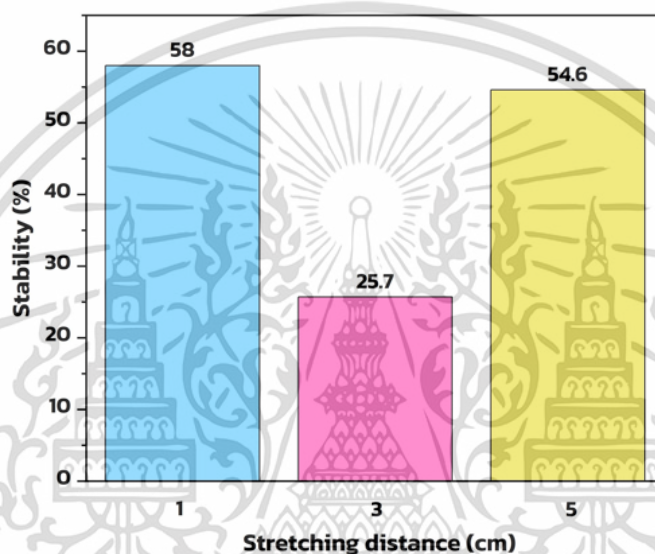
รูปที่ 4.19 แสดงร้อยละความแม่นยำในการตรวจจับสนของเซนเซอร์โดยมีระยะที่ใช้ในการดึงยืดแตกต่างกัน

จากรูปแสดงให้เห็นว่าที่ระยะในการดึงยืดทั้ง 3 ระยะ จะมีค่าร้อยละความแม่นยำที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสูงกว่าร้อยละ 96 แต่ในระยะที่ใช้ในการดึงยืดน้อยที่สุด ซึ่งได้แก่ 1 เซนติเมตร จะมีความแม่นยำในการตรวจจับสน (Accuracy) ที่มากที่สุด โดยมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 99.2

4.4.2.3 ผลการศึกษาความเสถียรในการตรวจจับสน (Stability)

จากการตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) ของเซนเซอร์เมื่อมีการให้แรงเชิงกลโดยการดึงยืดที่ระยะแตกต่างกัน ได้แก่ 1 3 และ 5 เซนติเมตร และปล่อยกลับเป็นจำนวนหลายรอบ ดังนั้นจึงได้มีการตรวจสอบความเสถียรในการตรวจจับสน (Stability) ซึ่งสามารถหาได้จากการนำสัญญาณจากการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอบสนองและคืนกลับมาซ้อนทับกัน โดยพื้นที่ทับซ้อน (Overlap region) เรียกว่า ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) หรือความไม่เสถียรที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับสัญญาณเมื่อถูกสัญญาณภายนอกรบกวน หลังจากการคำนวณหาพื้นที่ทับซ้อนของสัญญาณ พบว่า เซนเซอร์สั่งการที่มีการให้แรงเชิงกลโดยการดึงยืดที่ระยะ 1 3 และ 5 เซนติเมตร มีพื้นที่ทับซ้อนของสัญญาณคิดเป็นร้อยละฮิสเทอรีซิส (%Hysteresis) เท่ากับ 42.74.3 และ 45.4 ตามลำดับ และเมื่อนำมาลบกับหนึ่งร้อยจะแสดงถึงร้อยละความเสถียร (%Stability) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 58.25.7 และ 54.6 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.20



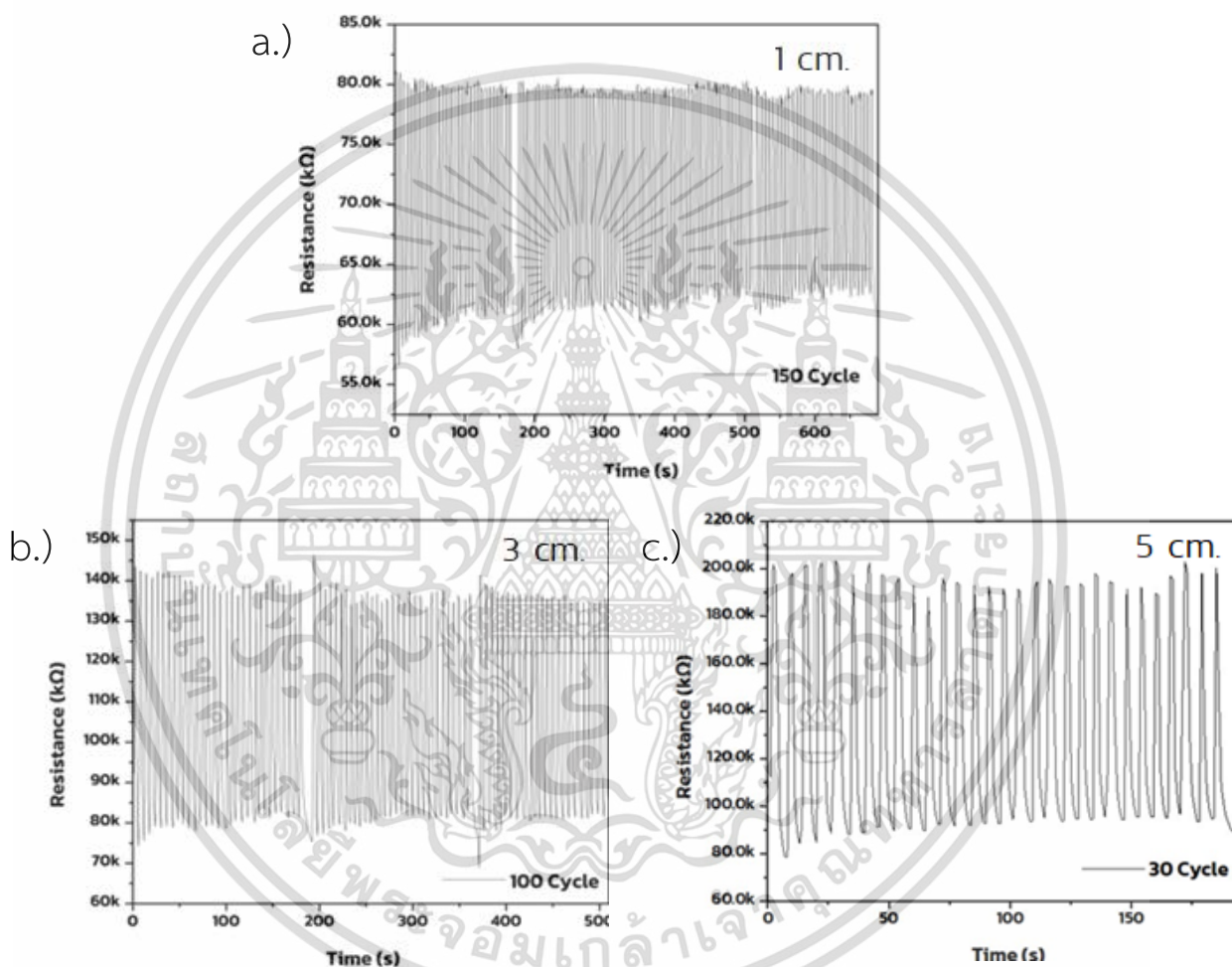
รูปที่ 4.20 แสดงร้อยละความเสถียรของเซนเซอร์โดยมีระยะที่ใช้ดึงยืดแตกต่างกัน

4.4.2.4 ผลการศึกษาความสามารถในการตรวจจับระยะยาว (Long-term ability)

ในการศึกษาความสามารถในการตรวจจับระยะยาว (Long-term ability) ของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นที่มีการให้แรงเชิงกลโดยการดึงยืดที่ระยะแตกต่างกัน และทำการปล่อยกลับ โดยมีการทำซ้ำในทุก ๆ ระยะ ได้แก่ 1 3 และ 5 เซนติเมตร จากการศึกษา พบว่า เมื่อมีแรงมากกระทำโดยการดึงยืดวัสดุจะมีการตอบสนองออกมาเป็นค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ค่า ๆ หนึ่ง และเมื่อปล่อยวัสดุให้หดกลับไปยังตำแหน่งเดิมก็จะมีค่าสัญญาณที่ใกล้เคียงกับค่าสัญญาณเริ่มต้น โดยในแต่ละระยะที่ใช้ดึงยืดจะแสดงค่าสัญญาณและระยะเวลาการใช้งานแตกต่างกัน ที่ระยะดึงยืด 1 เซนติเมตร จะมีระยะเวลาการใช้งานอยู่ที่ 150 รอบ ที่ระยะ 3 เซนติเมตร จะมีระยะเวลาการใช้งานอยู่ที่ 100 รอบ และระยะดึงยืดที่ 5 เซนติเมตรจะมีระยะเวลาการใช้งานอยู่ที่ 30 รอบ แสดงดังรูปที่ 4.17 โดยที่ระยะในการดึงยืด 5 เซนติเมตร หลอดอย่างซิลิโคนเกิดความเสียหายหรือฉีกขาดเมื่อมีการดึงยืดออกจากผ่านไป 30 รอบ แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการดึงยืดที่ระยะมากขึ้นการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้งานของหลอดยางซิลิโคนมีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับระยะเวลาดิงยึดที่น้อยกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔR) จนถึงจำนวนรอบสูงสุดของทั้ง 3 ระยะ ได้แก่ 1 3 และ 5 เซนติเมตร จะมีค่าอยู่ที่ 1.3 1.8 และ 14.9 ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 แสดงการตรวจจับสัญญาณของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหยุ่นโดยมีระยะที่ใช้ดิงยึดแตกต่างกันที่ระยะ a.) 1 เซนติเมตร b.) 3 เซนติเมตร c.) 5 เซนติเมตร

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพของเซนเซอร์ตามตัวแปรต่าง ๆ ข้างต้น โดยพิจารณาการให้คะแนนตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 4.4 จะพบว่า ระยะที่ใช้ในการดิงยึดส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซนเซอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแต่ละตัวแปรที่แตกต่างกัน โดยระยะที่มีประสิทธิภาพของแต่ละตัวแปรสูงที่สุดจะได้คะแนน 3 คะแนน ถัดมาคือ 2 คะแนน และ 1 คะแนน ตามลำดับ เริ่มต้นพิจารณาจากความไวในการตรวจจับ (Sensitivity) พบว่า ระยะในการดึงยึดที่ 5 เซนติเมตรจะมีความไวในการตรวจจับสูงที่สุด ถัดมาคือ ระยะ 3 เซนติเมตร และ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้นสำหรับการให้คะแนนความไวในการตรวจจับ ระยะ 5 เซนติเมตรได้คะแนนเต็ม 3 คะแนน ต่อมาจึงพิจารณาความแม่นยำในการตรวจจับ (Accuracy) พบว่า ที่ระยะในการดึงยึด 1 เซนติเมตร มีร้อยละความแม่นยำ (%Accuracy) ที่มากที่สุด ถัดมาคือระยะ 3 และ 5 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่งผลให้ที่ระยะ 1 เซนติเมตรได้คะแนนเต็ม 3 คะแนนตามเกณฑ์การให้คะแนนที่แสดงดังตารางที่ 4.4 และเมื่อพิจารณาความเสถียรในการตรวจจับ (Stability) พบว่า ที่ระยะในการดึงยึด 1 เซนติเมตร มีร้อยละความเสถียรที่มากที่สุด ถัดมาคือระยะ 5 เซนติเมตร และ 3 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่งผลให้ที่ระยะ 1 เซนติเมตรได้คะแนนเต็ม 3 คะแนน และสุดท้ายพิจารณาความสามารถในการตรวจจับระยะยาว (Long-term ability) พบว่า ที่ระยะในการดึงยึดที่ 1 เซนติเมตร จะสามารถใช้งานได้นานที่สุด ถัดมาคือระยะ 3 เซนติเมตร และ 5 เซนติเมตรตามลำดับ ดังนั้นที่ระยะ 1 เซนติเมตรจึงได้คะแนนเต็ม 3 คะแนน แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหุ่นโดยมีระยะที่ใช้ในการดึงยึดแตกต่างกัน ตามตัวแปรทางเซนเซอร์

ตัวแปรทางเซนเซอร์	ระยะในการดึงยึด (เซนติเมตร)		
	1	2	5
ความไวในการตรวจจับ (กิโลโหมม/เซนติเมตร)	1	2	3
ร้อยละความแม่นยำ	3	3	3
ร้อยละความเสถียร	3	1	2
การใช้งานในระยะยาว (รอบ)	3	2	1
รวม	10	8	9

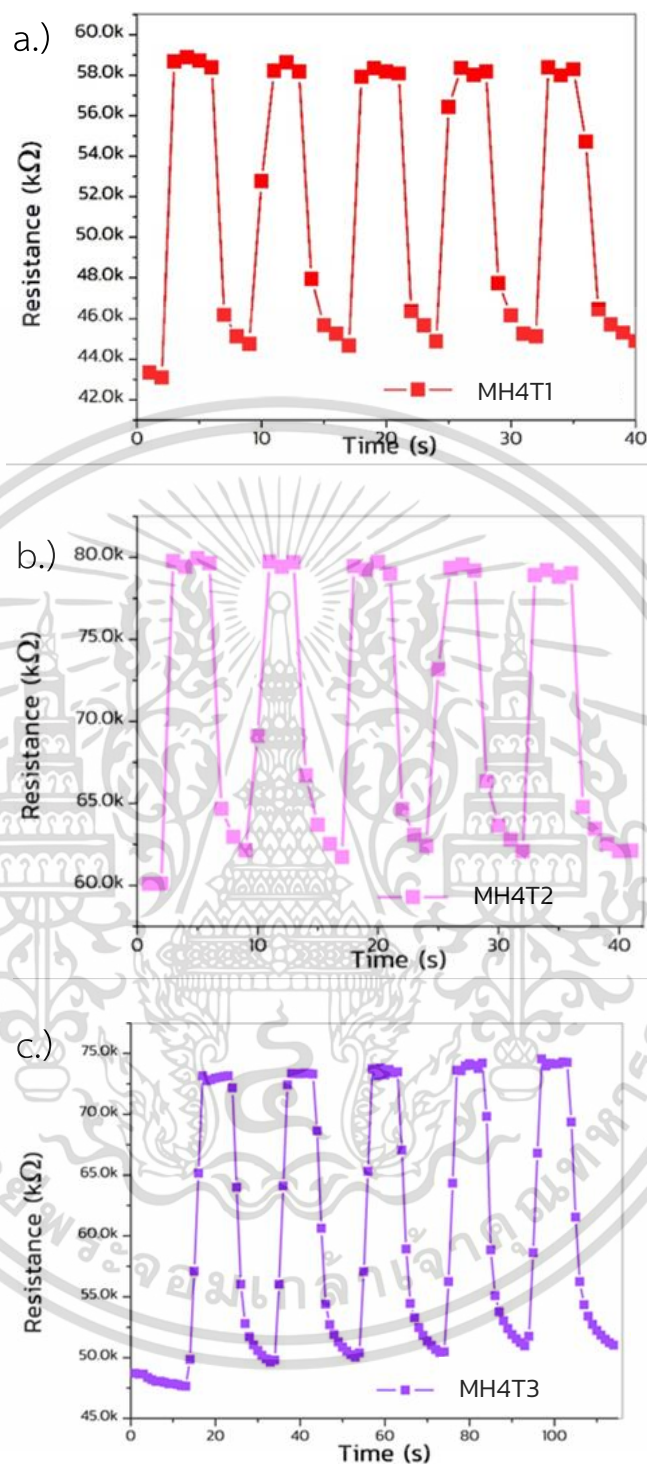
จากตารางข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ระยะที่ใช้ในการดึงยึดแต่ละระยะจะแสดงประสิทธิภาพที่ต่างกันในแต่ละตัวแปร ซึ่งทุกตัวแปรล้วนมีความสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของเซนเซอร์ทั้งสิ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากคะแนนรวมของระยะที่ใช้ในการดึงยึดแต่ละระยะแล้วนั้น พบว่า ระยะที่ใช้ในการดึงยึด 1 เซนติเมตร จะมีคะแนนรวมมากที่สุด คือ 10 คะแนน เมื่อเทียบกับระยะที่ใช้ในการดึงยึดที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 และ 5 เซนติเมตร แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการให้แรงเชิงกลโดยการดึงยืดเซนเซอร์ที่ระยะการดึงยืดที่ต่ำ ส่งผลให้เซนเซอร์มีประสิทธิภาพในการตรวจจับสัญญาณที่ดีโดยมีความแม่นยำและความเสถียรในการตรวจจับที่สูง อีกทั้งเมื่อมีการใช้งานต่อเนื่องในระยะยาวยังสามารถแสดงค่าสัญญาณที่เสถียรอย่างต่อเนื่อง โดยมีจำนวนรอบการใช้งานที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับระยะการดึงยืดอื่น ๆ แต่ในส่วนของความไวในการตรวจจับของระยะการดึงยืด 1 เซนติเมตร นั้นมีค่าที่ต่ำที่สุด เป็นผลมาจากการที่มีระยะการดึงยืดที่น้อย เมื่อทำการตรวจวัดค่าความต้านทานซึ่งต้องอาศัยแรงเชิงกลโดยการดึงยืดเพื่อให้เซนเซอร์เกิดการตอบสนองออกมาเป็นค่าสัญญาณทางไฟฟ้า ส่งผลให้มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับระยะการดึงยืดที่มากกว่า ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าระยะในการดึงยืดเซนเซอร์ที่ 1 เซนติเมตรมีประสิทธิภาพสูงที่สุด เหมาะสำหรับการนำไปใช้เพื่อดึงยืดเซนเซอร์ส่งการต่อไป

4.4.3 ผลการศึกษาความแตกต่างของปริมาตร TiNSs ที่ส่งผลต่อความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance)

ในงานวิจัยนี้ยังได้มีการศึกษาปริมาณของ TiNSs ที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของเซนเซอร์ส่งการบนวัสดุ MH4 โดยกำหนดปริมาณของ TiNSs ไว้ที่ 3 ปริมาตร ได้แก่ 5 10 และ 15 มิลลิลิตร กำหนดให้เป็น T1 T2 และ T3 ตามลำดับ แทนสัญลักษณ์ด้วย MH4T1 MH4T2 และ MH4T3 ตามลำดับ ซึ่งเป็นปริมาตรที่เมื่อเติมลงไปวัสดุ MH4 แล้วจะมีความเข้ากันได้ แต่เมื่อเติมมากกว่านี้ส่งผลให้เกิดการแยกเฟสกันระหว่าง MH4 และ TiNSs จากการศึกษาโดยนำ MH4T1 MH4T2 และ MH4T3 บรรจุลงในหลอดยางซิลิโคน แล้วทำการดึงยืดเพื่อหาค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) โดยเลือกกระยะในการดึงยืดที่ 1 เซนติเมตร เนื่องจากประสิทธิภาพของเซนเซอร์ที่เปรียบเทียบกับ 3 ระยะ ได้แก่ 1 3 และ 5 เซนติเมตร จะพบว่าที่ระยะ 1 เซนติเมตรจะมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเหมาะสำหรับนำไปใช้ในการดึงยืดเซนเซอร์ จากผลการทดสอบ พบว่า MH4T1 MH4T2 และ MH4T3 จะมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเริ่มต้น (R_0) 42.9 60.1 และ 49.8 กิโลโอห์ม ตามลำดับ เมื่อให้แรงเชิงกลต่อชิ้นงานโดยการดึงยืดออกที่ระยะ 1 เซนติเมตรส่งผลให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และเมื่อปล่อยชิ้นงานให้หดกลับมายังตำแหน่งเดิม พบว่า MH4T1 MH4T2 และ MH4T3 มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔR) โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 13.7 ± 1.1 17.8 ± 1.1 และ 23.8 ± 0.9 กิโลโอห์ม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณ TiNSs เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เซนเซอร์ส่งการมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าสูงที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔR) ของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหุ่นบนวัสดุ MH4T1 MH4T2 และ MH4T3 a.) T1 b.) T2 และ c.) T3 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 ผลการศึกษาความแตกต่างของปริมาณ TiNSs ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นตามตัวแปรทางเซนเซอร์

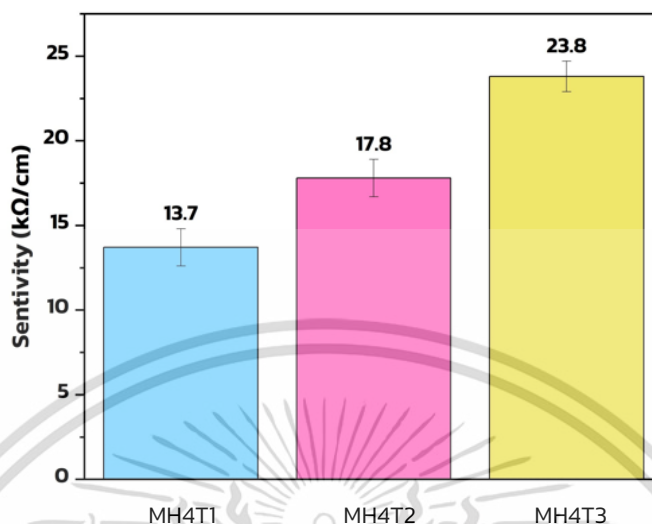
จากการตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) ของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น พบว่าความแตกต่างของ TiNSs ส่งผลต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าแตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการตรวจสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นบน บนวัด H4 โดยมีปริมาณของ TiNSs ที่ปริมาตรต่าง ๆ ตามตัวแปรทางเซนเซอร์ โดยมีเกณฑ์การให้คะแนนในแต่ละตัวแปรที่ทดสอบ แสดงดังตารางที่ 4.6 สำหรับเซนเซอร์ที่ได้คะแนนรวมมากที่สุดจะถูกนำไปประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์สำหรับสั่งการต่อไป

ตารางที่ 4.6 แสดงเกณฑ์ที่ใช้ในการกำหนดประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นโดยทำการเปรียบเทียบปริมาณของ TiNSs

ตัวแปรทางเซนเซอร์	การให้คะแนน		
	MH4T1	MH4T2	MH4T3
ความว่องไวในการตรวจจับ (กิโลโอห์ม/เซนติเมตร)	≤14.9	15-19.9	≥20
ความแม่นยำในการตรวจจับ (ร้อยละ)	≤79.9	80-95.5	≥96
ความเสถียรในการตรวจจับ (ร้อยละ)	≤64.9	65-69.9	≥70
เวลาในการตอบสนอง (วินาที)	≥4.0	3.9-1.4	≤1.3
เวลาในการคืนกลับ (วินาที)	≥4.0	3.9-1.4	≤1.3

4.4.4.1 ผลการศึกษาความว่องไวในการตรวจจับ (Sensitivity)

จากการตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) ของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นที่มีปริมาณของ TiNSs ต่างกัน จากนั้นให้แรงเชิงกลโดยการดึงยืดที่ระยะ 1 เซนติเมตรเท่ากัน แล้วทำการปล่อยกลับจะให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔR) แตกต่างกัน โดย MH4T1 MH4T2 และ MH4T3 จะมีความว่องไวในการตรวจจับ (Sensitivity) เท่ากับ 13.7 ± 1.1 17.8 ± 1.1 และ 23.8 ± 0.9 กิโลโอห์มต่อเซนติเมตร ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.23



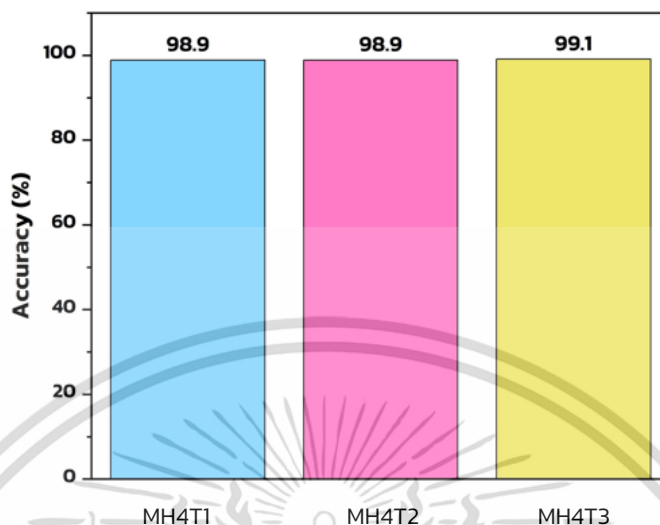
รูปที่ 4.23 แสดงความไวในการตรวจจับของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นบนวัสดุ MH4 โดยมีปริมาณของ TiNSs ที่ปริมาตรแตกต่างกัน

จากรูปแสดงให้เห็นว่า T3 มีประสิทธิภาพในการตรวจจับสูงที่สุด เนื่องจากมีความไวในการตรวจจับ (Sensitivity) เท่ากับ 23.8 ± 0.9 กิโลโอห์มต่อเซนติเมตร ซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับปริมาตรอื่น ๆ

4.4.4.2 ผลการศึกษาความแม่นยำในการตรวจจับ (Accuracy)

จากการตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) ของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นบนวัสดุ MH4 ที่ถูกปรับปรุงสมบัติด้วย TiNSs ปริมาตรแตกต่างกัน มีการให้แรงเชิงกลโดยการดึงยืดที่ระยะ 1 เซนติเมตร แล้วปล่อยกลับ โดยจากการศึกษาความแม่นยำในการตรวจจับ (Accuracy) สำหรับเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นชนิดนี้ พบว่า MH4T1 MH4T2 และ MH4T3 มีร้อยละความแม่นยำอยู่ที่ 98.9 98.9 และ 99.1 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



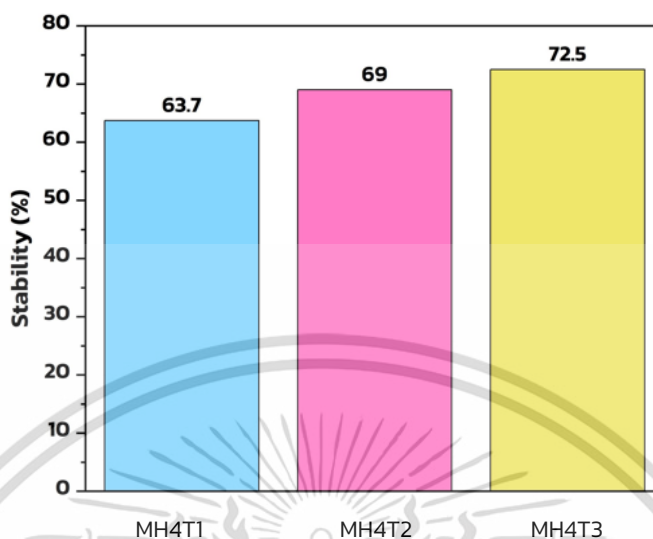
รูปที่ 4.24 แสดงความแม่นยำในการตรวจจับของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นบนวัสดุ MH4 โดยมีปริมาณของ TiNSs ที่ปริมาตรแตกต่างกัน

จากรูปแสดงให้เห็นว่าปริมาณของ TiNSs ที่ปริมาตรต่าง ๆ ส่งผลต่อความแม่นยำในการตรวจจับ (Accuracy) ที่ใกล้เคียงกัน โดยมีร้อยละความแม่นยำมากกว่า 98 แสดงให้เห็นว่าทั้งสามปริมาตรมีประสิทธิภาพในการตรวจจับที่แม่นยำ

4.4.4.3 ผลการศึกษาความเสถียรในการตรวจจับ (Stability)

จากการตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) ของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นบนวัสดุ MH4 ที่ถูกปรับปรุงสมบัติด้วย TiNSs ปริมาตรแตกต่างกัน มีการให้แรงเชิงกลโดยการดึงยืดที่ระยะ 1 เซนติเมตร แล้วปล่อยกลับ โดยจากการคำนวณหาพื้นที่ทับซ้อนของสัญญาณ พบว่า MH4T1 MH4T2 และ MH4T3 มีพื้นที่ทับซ้อนของสัญญาณคิดเป็นร้อยละฮิสเทอรีซิส (%Hysteresis) เท่ากับ 36.3 31 และ 27.5 ตามลำดับ และเมื่อนำมาลบกับหนึ่งร้อยจะแสดงถึงร้อยละความเสถียร (%Stability) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 63.7 69 และ 72.5 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



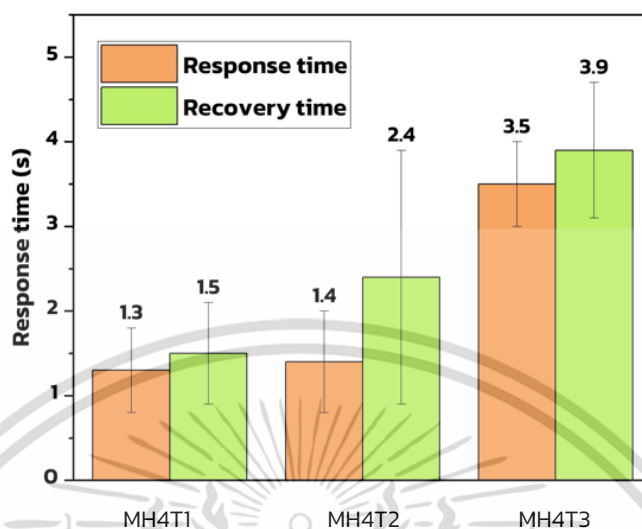
รูปที่ 4.25 แสดงร้อยละความเสถียรในการตรวจจับของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหุ่นบนวัสดุ MH4 โดยมีปริมาณของ TiNSs ที่ปริมาตรแตกต่างกัน

จากรูปแสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหุ่นบนวัสดุ MH4 ที่มี T3 จะมีพื้นที่ทับซ้อนของสัญญาณที่น้อยที่สุด ส่งผลให้มีความเสถียรในการตรวจจับ (Stability) ที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับปริมาตรอื่น ๆ

4.4.4.4 ผลการศึกษาเวลาในการตอบสนองและคืนกลับ (Response and recovery time)

จากการสุ่มเลือกชุดข้อมูลจากการทดสอบค่าความต้านทานทางไฟฟ้าโดยการให้แรงและปล่อยกลับเป็นจำนวน 5 รอบ เพื่อศึกษาเวลาในการตอบสนอง (Response time) เมื่อมีการดึงยึดที่ระยะ 1 เซนติเมตร และเวลาในการคืนกลับ (Recovery time) ของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหุ่น พบว่า MH4T1 MH4T2 และ MH4T3 จะใช้เวลาในการตอบสนอง เท่ากับ 1.3 ± 0.5 1.4 ± 0.6 และ 3.5 ± 0.5 วินาที ตามลำดับ และใช้เวลาในการคืนกลับ เท่ากับ 1.5 ± 0.6 2.4 ± 1.5 และ 3.9 ± 0.8 วินาที ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 แสดงเวลาในการตอบสนองและคืนกลับของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหุ่นบนวัสดุ MH4 โดยมีปริมาณของ TiNSs ที่ปริมาตรแตกต่างกัน

จากรูปภาพ 4.26 แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาตรของ T1 จะมีเวลาในการตอบสนองและคืนกลับที่รวดเร็วที่สุด เมื่อเทียบกับปริมาตรอื่น ๆ

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพของเซนเซอร์ตามตัวแปรต่าง ๆ ข้างต้น โดยพิจารณาการให้คะแนนตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 4.6 จะพบว่า TiNSs ที่ปริมาตรแตกต่างกันจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซนเซอร์ในแต่ละตัวแปรที่แตกต่างกัน โดยในการศึกษาจะกำหนดให้ปริมาตรที่มีประสิทธิภาพของแต่ละตัวแปรสูงที่สุดจะได้คะแนน 3 คะแนน ถัดมาคือ 2 คะแนน และ 1 คะแนน ตามลำดับ แต่ในส่วนของเวลาในการตอบสนองและคืนกลับจะมีการกำหนดให้ตัวที่มีเวลาในการตอบสนองและคืนกลับที่เร็วที่สุดได้คะแนน 3 คะแนน และเมื่อมีเวลาที่ช้าลงจะได้คะแนน 2 และ 1 คะแนน ตามลำดับ โดยเริ่มต้นได้ทำการพิจารณาจากความว่องไวในการตรวจจับ (Sensitivity) พบว่า MH4T3 จะมีความว่องไวในการตรวจจับสูงที่สุด ดังนั้นจึงได้คะแนนเต็ม 3 คะแนน ต่อมาพิจารณาความแม่นยำในการตรวจจับ (Accuracy) พบว่า MH4T1 MH4T2 และ MH4T3 จะมีร้อยละความแม่นยำ (%Accuracy) มากกว่าร้อยละ 96 ส่งผลให้ทั้งสามปริมาตรได้คะแนนเต็ม 3 คะแนน ต่อมาจึงทำการพิจารณาความเสถียรในการตรวจจับ (Stability) พบว่า MH4T3 มีร้อยละความเสถียรที่มากที่สุดเนื่องจากการคำนวณพื้นที่ทับซ้อนของสัญญาณ พบว่ามีค่าน้อยที่สุด เป็นผลมาจากการรบกวนจากสัญญาณภายนอกที่น้อยเมื่อเทียบกับปริมาตรอื่น ๆ จึงได้คะแนนเต็ม 3 คะแนน และสุดท้ายพิจารณาเวลาในการตอบสนองและคืนกลับ (Response and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

recovery time) พบว่า MH4T1 จะมีเวลาในการตอบสนองและคืนกลับที่เร็วที่สุด เมื่อเทียบกับปริมาณอื่น ๆ จึงได้คะแนนเต็ม 3 คะแนน แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยึดหุ่นบนวัสดุ MH4 โดยมีปริมาณของ TiNSs ที่ปริมาณแตกต่างกัน

ตัวแปรทางเซนเซอร์	วัสดุ		
	MH4T1	MH4T2	MH4T3
ความว่องไวในการตรวจจับ (กิโลโอห์ม/เซนติเมตร)	1	2	3
ร้อยละความแม่นยำ	3	3	3
ร้อยละความเสถียร	1	2	3
เวลาในการตอบสนอง (วินาที)	3	2	2
เวลาในการคืนกลับ (วินาที)	2	2	2
รวม	10	11	13

จากตารางแสดงให้เห็นว่า ปริมาณของ TiNSs ที่ถูกเติมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติของ MH4 จะแสดงประสิทธิภาพที่แตกต่างกันในแต่ละตัวแปร โดยทุก ๆ ตัวแปรที่ทำการทดสอบล้วนมีความสำคัญทั้งสิ้น อย่างไรก็ตามในการประเมินประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการต้องมีการพิจารณาจากภาพรวม ซึ่งพบว่า MH4T3 มีคะแนนรวมมากที่สุด คือ 13 คะแนน เมื่อเทียบกับปริมาณอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณของ TiNSs เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เซนเซอร์มีประสิทธิภาพในการตรวจจับสัญญาณที่ดียิ่งขึ้น เนื่องจากมีความว่องไวในการตรวจจับ ความแม่นยำ และความเสถียรในการตรวจจับที่สูงที่สุด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าที่ T3 มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติให้แก่ MH4 และสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการสั่งการอุปกรณ์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นบนวัสดุ MH4T3

จากการเตรียมวัสดุ MH4T3 โดยมีวัสดุ H4 เป็นเฟสหลัก (Matrix phase) และมีผง M รวมถึง T3 เป็นเฟสกระจาย (Dispersed phase) เมื่อทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ พบว่า วัสดุเชิงประกอบดังกล่าวเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติเชิงกล สมบัติการเคลื่อนที่โดยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก และสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี บ่งบอกได้ว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้เป็นวัสดุเชิงประกอบแบบอัจฉริยะ (Smart Composite) ที่มีความสามารถหลากหลายเหมาะแก่การนำไปประยุกต์การใช้งานได้แบบมัลติฟังก์ชัน (Multifunction) โดยงานวิจัยนี้ได้มีการมุ่งเน้นที่จะศึกษาและพัฒนาวัสดุ H4 โดยมีการเพิ่มสมบัติที่หลากหลายลงไปในวัสดุตัวเดียว ได้เป็นวัสดุเชิงประกอบ MH4T3 โดยมีการเลือกวัสดุที่มีประสิทธิภาพทางเซนเซอร์ที่สูงที่สุด ตรวจสอบได้จากตอนที่ 4.4 และนำไปพัฒนาเป็นวัสดุตรวจจับ (Sensing material) เพื่อประยุกต์การใช้งานสำหรับเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น (Flexible sensors) โดยมีการนำ MH4T3 บรรจุลงในหลอดยางซิลิโคน และนำไปติดตั้งบนถุงมือแบบไร้สาย (Wireless Gloves) โดยมีการแปลงสัญญาณทางกายภาพ (Physical signals) จากการยืดหดของวัสดุตรวจจับขณะเคลื่อนไหวนิ้วมือด้วยการโค้งงอ ได้เป็นค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔR) ซึ่งจัดว่าเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (Electrical signals) และนำไปประมวลผลเป็นคำสั่งในการสั่งการและควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในระยะไกลได้

4.5.1 ส่วนประกอบของเซนเซอร์

ในการทำงานของเซนเซอร์ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนส่งข้อมูล (Transmitter Part) ที่ติดตั้งอยู่บนถุงมือแบบไร้สาย (Wireless Gloves) และส่วนรับข้อมูล (Receiver Part) ซึ่งติดตั้งอยู่บนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และในแต่ละส่วนจะประกอบด้วยอุปกรณ์ย่อย 2 ชนิด ได้แก่ ชิพประมวลขนาดเล็ก หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller Unit; MCU) ซึ่งทำหน้าที่ในการประมวลผลสัญญาณ และโมดูลสื่อสารไร้สาย (Wireless Module) ทำหน้าที่เป็นตัวรับ-ส่งข้อมูลผ่านคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency)

4.5.2 หลักการทำงานของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น

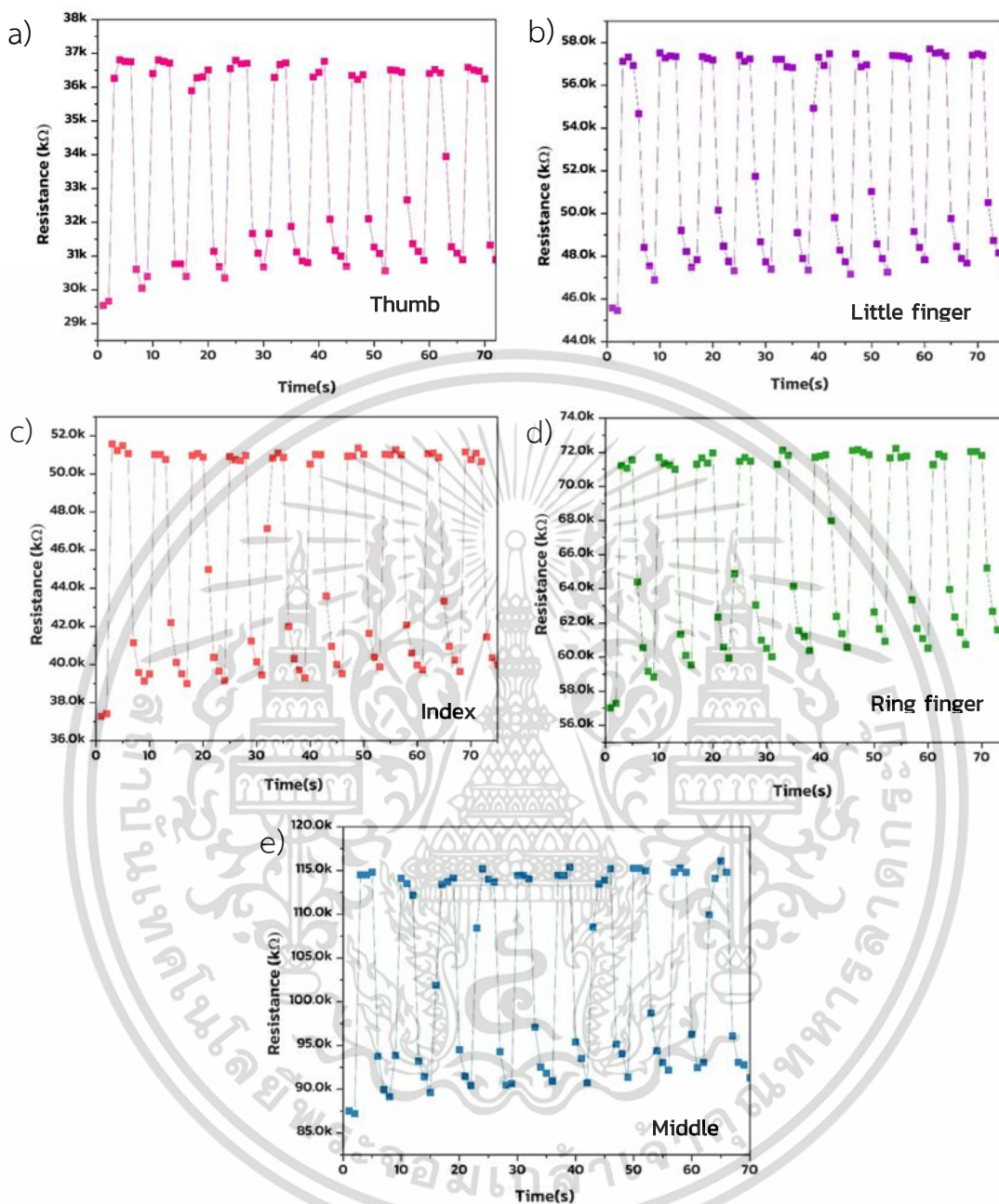
ในส่วนของการทำงานจะอาศัยหลักการแปลงสัญญาณทางกายภาพ (Physical signals) เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (Electrical signals) เพื่อนำไปประมวลผลเป็นคำสั่งในการควบคุมและการสั่งการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ สำหรับเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่น โดยมีการนำวัสดุเชิงประกอบจากวัสดุ MH4T3 5 ชั้น ซึ่งทำหน้าที่เป็นวัสดุตรวจจับ (Sensing materials) มาติดตั้งลงบนถุงมือ (Gloves) ในบริเวณที่เป็นนิ้วมือทั้ง 5 นิ้ว ของถุงมือ และทำการเชื่อมต่อกับส่วนส่งข้อมูล (Transmitter Part) ซึ่งใช้ในการควบคุมและออกคำสั่งการทำงานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเชื่อมต่อกับส่วนรับข้อมูล (Receiver Part)

เมื่อพิจารณาจากเซนเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บริเวณนิ้วมือทั้ง 5 นิ้ว ได้แก่ 5 (นิ้วโป้ง) 6 (นิ้วก้อย) 7 (นิ้วชี้) 8 (นิ้วนาง) และ 9 (นิ้วกลาง) เซนติเมตร ตามลำดับ โดยการงอนิ้วมือจนสุดเพื่อตรวจสอบของเซนเซอร์ โดยพิจารณาจากค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔR) ในการทดสอบได้มีการนำเซนเซอร์ที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3.10 มาทำการต่อเข้ากับเครื่องวัดค่าความต้านทานแบบดิจิตอล (LCR meter) จากนั้นนำสายไฟปากจระเข้ต่อเข้ากับสายไฟจากส่วนของเซนเซอร์ทั้งสองด้าน แสดงดังรูปที่ 4.27 เมื่อมีการเคลื่อนไหวของนิ้วมือวัสดุตรวจจับหรือเซนเซอร์ที่ถูกติดตั้งบนถุงมือจะเกิดการยืดหด ส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจากการทดสอบจะได้ค่า เท่ากับ 6.5 ± 0.4 10.4 ± 0.6 12.6 ± 1.2 12.3 ± 0.8 และ 24.9 ± 1.4 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.28 ซึ่งค่าที่ได้สามารถนำไปกำหนดเป็นคำสั่งที่ใช้ในการสั่งการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งคำสั่งจะถูกประมวลผลผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ในส่วนการรับข้อมูล และส่งสัญญาณผ่านโมดูลสื่อสารไร้สายตามคลื่นความถี่วิทยุไปยังโมดูลสื่อสารไร้สายชนิดเดียวกันในส่วนรับข้อมูล จากนั้นจะประมวลผลผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ในส่วนรับข้อมูล และสั่งการให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำงาน



รูปที่ 4.27 แสดงวิธีการทดสอบค่าความต้านทานทางไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์สั่งการ โดยการติดตั้งวัสดุตรวจจับหรือเซนเซอร์ลงบนถุงมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 a.) แสดงค่าสัญญาณที่ได้จากการงอนิ้วมือที่มีความยาว 5 (นิ้วโป้ง) เซนติเมตร b.) แสดงค่าสัญญาณที่ได้จากการงอนิ้วมือที่มีความยาว 6 (นิ้วก้อย) เซนติเมตร c.) แสดงค่าสัญญาณที่ได้จากการงอนิ้วมือที่มีความยาว 7 (นิ้วชี้) เซนติเมตร d.) แสดงค่าสัญญาณที่ได้จากการงอนิ้วมือที่มีความยาว 8 (นิ้วนาง) เซนติเมตร และ e.) แสดงค่าสัญญาณที่ได้จากการงอนิ้วมือที่มีความยาว 9 (นิ้วกลาง) เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบที่มีความยืดหยุ่นจาก MH4T3 ซึ่งในการทดลองนี้มีการศึกษาและพัฒนาวัสดุเชิงประกอบจากวัสดุ H โดยมีการเลือกศึกษาที่อัตราส่วนระหว่างบอแรกซ์และ PVA ที่ 0.25:4 0.5:4 1:4 และ 1.25:4 กำหนดเป็น H1 H2 H3 และ H4 ซึ่งเป็นการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และมีการเติม NdFeB 10 กรัม กำหนดให้เป็น M ลงในวัสดุ H ทั้งสี่อัตราส่วนเพื่อศึกษาสมบัติในการเคลื่อนที่ จากนั้นทำการศึกษาผลของ TiNSs ที่ปริมาตร 5 10 และ 15 มิลลิลิตร กำหนดให้เป็น T1 T2 และ T3 จะได้เป็นสารประกอบ MH4T1 MH4T2 และ MH4T3 ตามลำดับเพื่อปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าให้แก่ MH4 และทำการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ วิเคราะห์เอกลักษณ์ของวัสดุเชิงประกอบด้วยเทคนิคต่าง ๆ เพื่อนำวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวไปประยุกต์ในการใช้งานเป็นเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นโดยมีการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของ H ด้วยการเติมบอแรกซ์ โดยทำการทดสอบความคงตัวของวัสดุที่อัตราส่วนต่าง ๆ จากนั้นได้มีการเพิ่มสมบัติในการเคลื่อนที่โดยการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็ก และเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าด้วยผง NdFeB นอกจากนี้มีการปรับปรุงสมบัติของวัสดุเพื่อให้ได้ค่าความต้านทานที่หลากหลายเหมาะสำหรับการนำไปใช้สั่งการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จึงได้มีการเพิ่มวัสดุที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตร ได้แก่ TiNSs เพื่อเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กทริกซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ยาก และได้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเป็นชุดคำสั่งสำหรับสั่งการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป สำหรับผลการทดลองต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของ MH4T3

1. จากการตรวจสอบโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) ของวัสดุเชิงประกอบ MH4T3 มีการตรวจพบพีกที่เป็นไปตามหมู่ฟังก์ชันหลักของ PVA และ Borax โดยใน H มีพีคการดูดกลืนที่สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดระหว่างพันธะคาร์บอนและออกซิเจน ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงกันระหว่างระหว่าง PVA และบอแรกซ์ (Borax) โดยบอแรกซ์จะพบพีคการดูดกลืนที่สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดระหว่างพันธะโบรอนและออกซิเจน และเมื่อเพิ่ม TiNSs จะพบพีคหลักที่มีการดูดกลืนสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดระหว่างพันธะไทเทเนียมและออกซิเจน ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีองค์ประกอบของ PVA บอแรกซ์ และ TiNSs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาในรูปแบบ 3 มิติ (3D) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคของ NdFeB ด้วยกล้องจุลทรรศน์เอกซเรย์โทโมกราฟิค (XTM) แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของเฟสหลัก (Matrix phase) และเฟสกระจาย (Dispersed phase) ได้อย่างชัดเจน จากผลการตรวจสอบบ่งบอกว่าผงแม่เหล็กดังกล่าวมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอโดยในทุก ๆ บริเวณ แสดงให้เห็นว่าผงแม่เหล็กมีการกระจายตัวอยู่ใน H4 อย่างสม่ำเสมอและมีความเข้ากันได้ดี

3. จากการตรวจสอบความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่า MH4T3 จะปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์โดยปรากฏพีคเอกลักษณ์ที่ตรงกับพีคเอกลักษณ์ของสารตั้งต้นของบอแรกซ์และ PVA ที่ใช้ในการเตรียม H4 อีกทั้งวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่เป็นพีคเอกลักษณ์ของ TiNSs ตรงกับพีคเอกลักษณ์ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียม TiNSs นอกจากนี้ในงานวิจัยของเราได้มีการเติมผง NdFeB ซึ่งไม่ปรากฏพีคเอกลักษณ์ของ NdFeB เนื่องจากผง NdFeB มีความเป็นผลึก (Crystallinity) ที่ต่ำจึงไม่ปรากฏพีคเอกลักษณ์ได้อย่างชัดเจน

4. จากการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ H4 MH4 และ MH4T3 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) ซึ่ง H4 ทำหน้าที่เป็นเฟสหลัก (Matrix phase) โดยมี M และ T3 เป็นเฟสกระจาย (Dispersed phase) เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะสัณฐานภายนอกของวัสดุทั้งสามชนิด พบว่า ที่บริเวณพื้นผิวของ H4 ไม่พบอนุภาคใด ๆ และเมื่อเติม M ลงไปเป็น MH4 พบว่ามีอนุภาคของแม่เหล็กกระจายตัวอยู่ใน H4 โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 107.9 ± 25.7 ไมโครเมตร ต่อมาเมื่อมีการเติม T3 ลงไปเป็น MH4T3 พบว่ามีอนุภาคของแม่เหล็กกระจายอยู่ใน H4 เช่นเดียวกับ MH4 โดยใน MH4T3 พบลักษณะแถบสีขาวขุ่นล้อมรอบ NdFeB จึงทำการอนุมานว่าเป็น TiNSs เนื่องจาก TiNSs ที่เรานำมาใช้เป็นสารคอลลอยด์สีขาวขุ่น และด้วย TiNSs มีอนุภาคขนาดเล็กถึงระดับนาโนเมตรทำให้ไม่สามารถมองเห็นอนุภาคได้อย่างชัดเจนเมื่อทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ จึงปรากฏเป็นลักษณะของสารคอลลอยด์ขึ้น

5. จากการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของวัสดุ MH4T3 พบว่า วัสดุเชิงประกอบ H4 ได้เป็น H ที่มีลักษณะโปร่งแสง โดยความโปร่งแสงของ H ไม่ขึ้นกับปริมาณของบอแรกซ์ที่เติมลงไป นอกจากนี้จากการเติมบอแรกซ์ส่งผลให้ความคงตัวของ H นั้นแตกต่างกัน โดยความคงตัวของ H นั้นมีผลมาจากความหนืด โดยค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนบอแรกซ์ที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงมีการเลือกใช้ H4 มาทำการพัฒนาต่อไป และเมื่อมีการเติมผง M ลงใน H4 ส่งผลให้ H มีค่าความหนืดที่เพิ่มมากขึ้น และ MH4 จะมีความทึบแสงเนื่องจากมีอนุภาคแม่เหล็กอยู่ใน หลังจากนั้นก็มีการศึกษา MH4T3 โดยมีปริมาตรของ TiNSs ที่ 5 10 และ 15 มิลลิลิตร กำหนดให้เป็น T1 T2 และ T3 ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ MH4T1 MH4T2 และ MH4T3 ตามลำดับ พบว่า มีความทึบแสงเช่นเดียวกัน เป็นผลมาจากผงแม่เหล็กที่กระจายตัวอยู่ใน H4

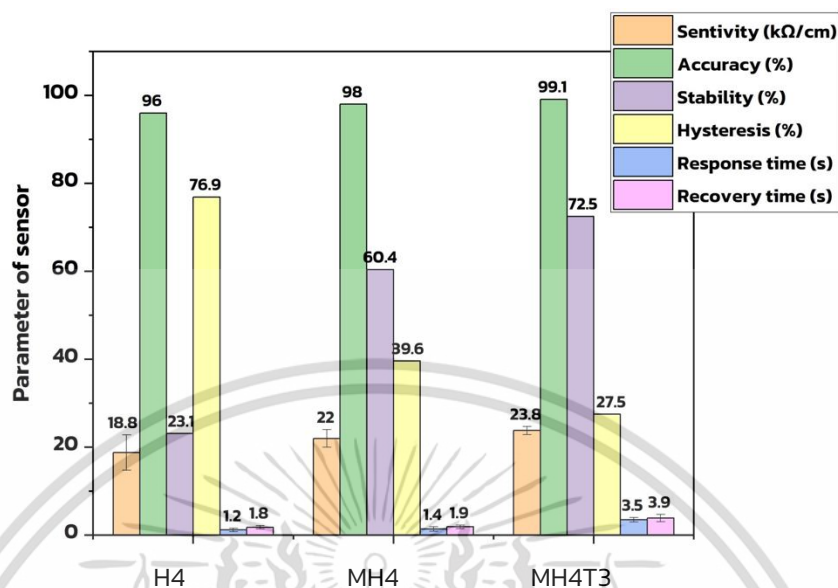
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 การศึกษาสมบัติในการเคลื่อนที่ของวัสดุ MH4 และ MH4T3

จากผลการศึกษาสมบัติในการเคลื่อนที่ของวัสดุ MH4 และ MH4T3 พบว่า MH4 มีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้โดยการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะมีการเหนี่ยวนำตัว MH4 ด้วยแม่เหล็กเหนี่ยวนำ กำหนดระยะที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ 1 1.25 และ 1.5 เซนติเมตร โดยเมื่อมีการนำ H1 และ H4 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีความหนืดน้อยที่สุดและมากที่สุด มาทำการเติมผง NdFeB ได้เป็น MH1 และ MH4 ตามลำดับ โดยการทดสอบพบว่า MH1 ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ไปยังตัวแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ 0.5 1 และ 4 วินาที ตามลำดับ และ MH4 ใช้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ที่ 8 12 และ 15 วินาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า MH4 ที่มีความหนืดมากส่งผลให้มีความสามารถในการเคลื่อนที่ต่ำกว่า H4 ที่มีความหนืดน้อยกว่า และเมื่อทดสอบการเคลื่อนที่ของ MH4T3 พบว่าจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ไปยังแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ 8 9 และ 14 วินาที โดยมีความสามารถในการเคลื่อนที่ลดลง แต่ยังคงความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ สรุปได้ว่า MH4 มีความสามารถในการเคลื่อนที่ที่ดีที่สุด ซึ่งในการที่ H4 มีคุณสมบัติการในการเคลื่อนที่เนื่องจากมีการเติม NdFeB ลงในวัสดุไฮโดรเจล โดยเมื่อเติม TiNSs ยังคงทำให้มีความสามารถในการเคลื่อนที่เช่นเดิม เพียงแต่ประสิทธิภาพลดลง

5.1.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นบนวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3

จากผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า โดยการตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance) พบว่า H4 MH4 และ MH4T3 จะมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔR) โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 18.8 ± 4.0 22.0 ± 2.0 และ 23.8 ± 0.9 กิโลโอห์ม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า MH4T3 มีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น และเมื่อมีการตรวจสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์สั่งการจากวัสดุทั้งสามชนิด พบว่า MH4T3 มีความไวในการตรวจจับ (Sensitivity) เท่ากับ 23.8 กิโลโอห์มต่อเซนติเมตร มีความแม่นยำ (Accuracy) ร้อยละ 99.1 มีความเสถียร (Stability) ร้อยละ 72.5 มีร้อยละฮิสเทรีซิส (%Hysteresis) 27.5 และใช้เวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนกลับอยู่ที่ 3.5 ± 0.5 และ 3.9 ± 0.8 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อรวมคะแนนประสิทธิภาพตามเกณฑ์ที่กำหนดจะได้คะแนนรวมมากที่สุด คือ 11 คะแนน บ่งบอกได้ว่า MH4T3 มีประสิทธิภาพทางเซนเซอร์สูงที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ๆ

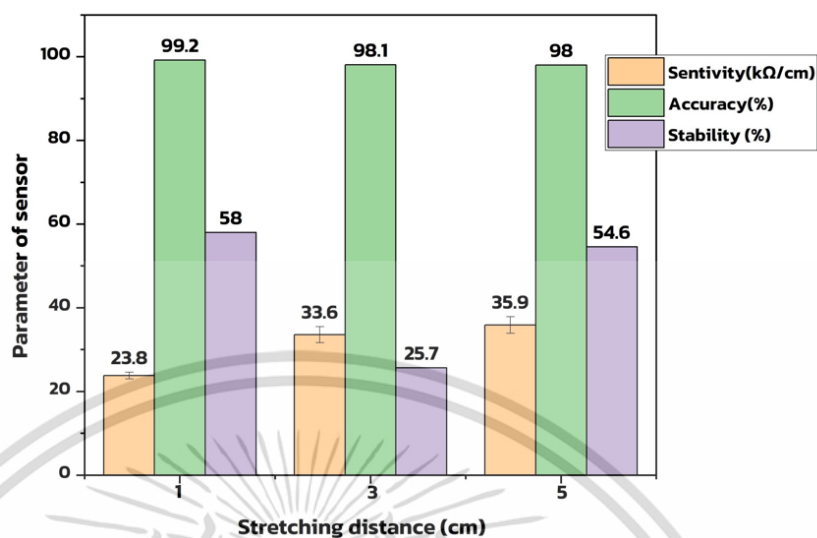


รูปที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเซนเซอร์จากวัสดุ H4 MH4 และ MH4T3

5.1.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซนเซอร์สังการแบบยืดหยุ่นบนวัสดุ MH4T3

เนื่องจากประสิทธิภาพของเซนเซอร์ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้วัสดุและระยะเวลาการยืดหดที่เหมาะสม ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดระยะที่ใช้ในการยืดหด 3 ระยะ ได้แก่ 1 3 และ 5 เซนติเมตร พบว่าที่ระยะในการดึงยืดชิ้นงานที่ 1 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพสูงสุดซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพตามตัวแปรทางเซนเซอร์ นอกจากนี้เมื่อมีการพิจารณาความสามารถในการตรวจจذبระยะยาว (Long-term ability) ซึ่งมีการทดสอบการใช้งานต่อเนื่อง 150 รอบ พบว่า ที่ระยะในการดึงยืดดังกล่าวมีสัญญาณที่ใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้น บ่งบอกถึงความเสถียรในการตรวจจذبสัญญาณแม้ผ่านการใช้งานอย่างต่อเนื่องในระยะยาว จึงนำระยะ 1 เซนติเมตร มาใช้เพื่อดึงยืดชิ้นงาน ต่อมาได้มีการกำหนดปริมาณของ TiNSs เพื่อใช้ปรับปรุงสมบัติให้แก่วัสดุ MH4 โดยมีปริมาตรที่ 5 10 และ 15 มิลลิลิตร เมื่อทำการตรวจสอบประสิทธิภาพตามตัวแปรทางเซนเซอร์ พบว่า ที่ปริมาตรของ TiNSs 15 มิลลิลิตร MH4T3 มีความไวในการตรวจจذب (Sensitivity) 23.8 ± 0.9 กิโลโอห์มต่อเซนติเมตร มีความแม่นยำ (Accuracy) ร้อยละ 99.1 มีความเสถียร (Stability) ร้อยละ 72.5 ร้อยละฮิสเทอรีซิส (%Hysteresis) ร้อยละ 27.5 และใช้เวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนกลับ คือ 3.5 ± 0.5 และ 3.9 ± 0.8 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์ที่ใช้ในการกำหนดประสิทธิภาพของเซนเซอร์ จึงบ่งบอกได้ว่าวัสดุ MH4T3 มีประสิทธิภาพทางเซนเซอร์สูงสุดเมื่อมีการดึงยืดวัสดุที่ระยะ 1 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

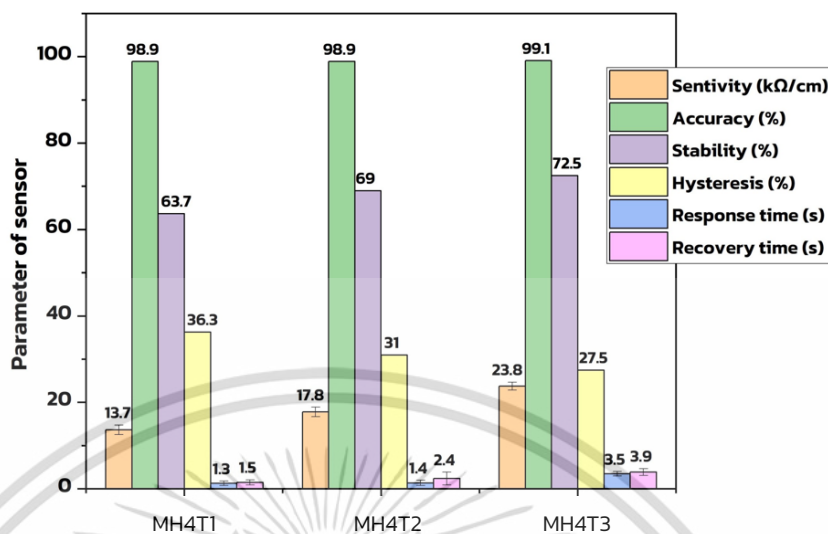


รูปที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเซนเซอร์จากระยะยืดออกของเซนเซอร์ที่ 1 3 และ 5 เซนติเมตร

5.1.5 ผลการศึกษาความแตกต่างของปริมาณ TiNSs ที่ส่งผลต่อความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistance)

หลังจากที่มีการตรวจสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์โดยศึกษาผลของระยะในการดึงยืด โดยพบว่าที่ระยะในการดึงยืด 1 เซนติเมตรจะมีประสิทธิภาพทางเซนเซอร์ที่สูงที่สุด จึงเลือกใช้ระยะการดึงยืดนี้มาทำการตรวจสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์ซึ่งการที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ TiNSs โดยมีการกำหนดปริมาณของ TiNSs เพื่อใช้ปรับปรุงสมบัติให้แก่ MH4 ที่ปริมาณ 5 10 และ 15 มิลลิกรัม กำหนดให้เป็น MH4T1 MH4T2 และ MH4T3 ตามลำดับ เมื่อทำการตรวจสอบประสิทธิภาพตามตัวแปรทางเซนเซอร์ พบว่า MH4T3 มีความไวในการตรวจจับ (Sensitivity) 23.8 ± 0.9 กิโลโอห์มต่อเซนติเมตร มีความแม่นยำ (Accuracy) ร้อยละ 99.1 มีความเสถียร (Stability) ร้อยละ 72.5 มีร้อยละฮิสเทอรีซิส (%Hysteresis) 27.5 และใช้เวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนกลับ คือ 3.5 ± 0.5 และ 3.9 ± 0.8 ตามลำดับ ซึ่งค่าความไวในการตรวจจับ ความแม่นยำ และความเสถียรมีค่าที่สูงที่สุดสอดคล้องกับเกณฑ์ที่ใช้ในการกำหนดประสิทธิภาพของเซนเซอร์ จึงบ่งบอกได้ว่า MH4T3 มีประสิทธิภาพทางเซนเซอร์สูงสุดเมื่อมีการดึงยืดตัวสุดที่ระยะ 1 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเซนเซอร์จากวัสดุ MH4T1 MH4T2 และ MH4T3

5.1.6 ทดสอบการใช้งานของเซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นที่ถูกติดตั้งบนถุงมือไร้สาย

ในงานวิจัยนี้ได้มีการเตรียมอุปกรณ์สั่งการโดยการติดตั้งเซนเซอร์ลงบนถุงมือไร้สาย (Wireless glove) เพื่อนำไปควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยการสั่งการผ่านการเคลื่อนไหวบริเวณข้อต่อนิ้วมือ โดยมีการกำหนดค่าที่นำไปใช้ในการสั่งการจากค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของเซนเซอร์ตามแต่ละความยาวของขนาดนิ้วมือที่ 5 ความยาว ได้แก่ 5 (นิ้วโป้ง) 6 (นิ้วก้อย) 7 (นิ้วชี้) 8 (นิ้วนาง) และ 9 (นิ้วกลาง) เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อมีการนำเซนเซอร์ไปติดตั้งลงบนถุงมือและทำการงอนิ้วมือจนสุดเพื่อดูการตอบสนองของเซนเซอร์ โดยการทดสอบได้มีการนำเซนเซอร์ที่เตรียมได้จากตอนที่ 3.10 มาทำการต่อเข้ากับเครื่องวัดอุปกรณ์พาสซีฟ (LCR meter) โดยการนำสายไฟปากจระเข้ต่อเข้ากับสายไฟจากส่วนของเซนเซอร์ทั้งสองด้าน และนำสายไฟปากจระเข้อีกด้านต่อเข้ากับเครื่อง LCR meter จากนั้นตั้งค่าเพื่อให้พร้อมสำหรับการตรวจวัด โดยเมื่อทำการงอนิ้วมือจนสุด ในแต่ละนิ้วมือค่าความต้านทานที่ได้ตั้งนี้ที่ความยาว 5 (นิ้วโป้ง) 6 (นิ้วก้อย) 7 (นิ้วชี้) 8 (นิ้วนาง) และ 9 (นิ้วกลาง) เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 6.5 ± 0.4 10.4 ± 0.6 12.6 ± 1.2 12.3 ± 0.8 และ 24.9 ± 1.4 ตามลำดับ ซึ่งค่าความต้านทานที่ได้จากการตรวจจับสัญญาณของการงอนิ้วมือ จะถูกนำไปใช้เพื่อกำหนดคำสั่งเพื่อใช้ในการสั่งการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการตรวจวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณภายในของ MH4T3 ด้วยเครื่องเอกซเรย์โทโมกราฟิก (XTM) เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของชิ้นงานเทียบกับชิ้นงานที่ยังไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วย TiNSs



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kinza Yasar. 2022. **Wearable technology**. [Online]. Available :
<https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/wearable-technology>
- [2] Robert Sheldon. 2022. **Sensor**. [Online]. Available :
<https://www.techtarget.com/whatis/definition/sensor>
- [3] Xiaohang Sun, Sachin Agate, Khandoker Samaher Salem, Lucian Lucia, and Lokendra Pal, 2021, "Hydrogel-Based Sensor Networks: Compositions, Properties, and Applications" *ACS Appl, Bio Mater*, no. 4, p. 140-162
- [4] Mengmeng Sun, Chenyao Tian, Liyang Mao, Xianghe Meng, Xingjian Shen, Bo Hao, Xin Wang, and Hui Xie, Li Zhang, 2022, "Reconfigurable Magnetic Slime Robot: Deformation, Adaptability, and Multifunction," *Advanced Functional Materials*, vol. 32, no. 26, p. 2112508
- [5] Bouchaib Zazoum, Khalid Mujasam Batoo, and Muhammad Azhar Ali Khan, 2022, "Recent Advances in Flexible Sensors and Their Applications" *Sensors*, vol. 22, no. 12, p. 4653
- [6] **Polyvinyl Alcohol**. [Online]. Available :
<https://thaiolychemicals.weebly.com/polyvinyl-alcohol.html>
- [7] Enas M.Ahmed, 2015, "Hydrogel: Preparation, Characterization, and Applications: A Review," *Journal of Advanced Research*, vol. 6, no. 2, p. 105-121
- [8] Jenniferfindley. **Magnetic Slime Science Activity**. [Online]. Available :
<https://jenniferfindley.com/magnetic-slime-science-activity/>
- [9] Metka Bencina, Ales Iglic, Miran Mozetic, and Ita Junkar, 2020, "Crystallized TiO₂ Nanosurfaces in Biomedical Applications," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 6, p. 1121
- [10] Lianzhou Wang, and Takayoshi Sasaki, 2014, "Titanium Oxide Nanosheets: Graphene Analogues with Versatile Functionalities," *Chemical Reviews*, vol. 114, no. 19, p. 9455-9486

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] Xiang Wang, Xiaoyu Li, Satoshi Aya, Fumito Araoka, Yasuhiro Ishida, Akiko Kikkawa, Markus Kriener, Yasujiro Tanguchi, Yasuo Ebina, Takayoshi Sasaki, Shogo Koshiya, Koji Kimoto, and Takuzo Aida, 2018, "Reversible Switching of the Magnetic Orientation of Titanate Nanosheets by Photochemical Reduction and Autoxidation," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 140, no. 48, pp. 16396-16401
- [12] ศุภรดา ไชสอาด อุดลวรรณ สวนการณ. 2562. "การเพิ่มประสิทธิภาพแบตเตอรี่รีไซเคิลโลหะสำหรับโทรโบอิเล็คทริกนาโนเจเนอเรเตอร์ด้วยสารประกอบออกไซด์นาโนซีท 2 มิติ." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ สาขาวิชาเคมี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [13] Nadeem Baig, Irshad Kammakam, and Wail Falath, 2021, "Nanomaterials: A Review of Synthesis method, Properties, Recent Progress, and Challenges," *Materials Advances*, vol. 2, no. 6, p. 1821-1871
- [14] R. K. Mohapatra. 2020. **Nanomaterials**. [Online]. Available : http://www.gcekjr.ac.in/pdf/lectures/2020/7166--_2nd%20Semester_ALL.pdf
- [15] Tuang Yeow Poh, Nur A'tikah Blinte Mohamed Ali, Micheal Mac Aogain, Mustafa Hussain Kathawala, Magdiel Ingrid Setyawati, Kee Woei Ng, and Sanjay Haresh Chotirmall, 2018, "Inhaled nanomaterials and the respiratory microbiome: clinical, immunological and toxicological perspectives," *Particle and Fibre Toxicology*, vol. 15, no. 1, p. 46
- [16] Britannica, The Editors of Encyclopaedia. 2023. **Composite material**. *Encyclopedia Britannica*. [Online]. Available : <https://www.britannica.com/technology/composite-material>
- [17] ธนัชพร เกษมพงษ์. 2560. "การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบของแบคทีเรียเซลล์ลูโลสและพอลิเอทิลีนไกลคอลและการทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของโลหะโครเมียม." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [18] Yadav Khagendra Kumar, Dr. Dalbir Singh Lohchab, 2016, "Influence of Aviation Fuel on Mechanical properties of Glass Fiber-Reinforced Plastic Composite," *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, vol. 3, no. 4
- [19] Chen Wang, Zhifeng Shen, Pengfei Hu, Tao Wang, Xing Zhang, Lidong Liang, Jianguang Bai, Leiwei Qiu, Xiaojuan Lai, Xiaowu Yang, and Kang Zhang, 2022, "Facile fabrication and characterization of high-performance Borax-PVA hydrogel," *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 101, no. 1, pp. 103-113
- [20] Jipeng Zhang, Yang Hu, Lina Zhang, Jinping Zhou, and Ang Lu, 2022, "Transparent, Ultra-Stretching, Tough, Adhesive Carboxyethyl Chitin/Polyacrylamide Hydrogel Toward High-Performance Soft Electronics," *Nano-Micro Letters*, vol. 15, no. 1, p. 8
- [21] Danyang Wang, Lu Qin, Weihu Yang, Ye He, Songyue Zhang, Yulu Yang, Kun Xu, Pengfei Gao, Jinxiu Yu, and Kaiyong Cai, 2021, "A Conductive Hydrogel Based on Galn and PVA/PAA/Fe³⁺ for Strain Sensor and Physiological Signal Detection," *ACS Applied Polymer Materials*, vol. 3, no. 10, pp. 5268-5276
- [22] Meihong Liao, Hui Liao, Jingjing Ye, Pengbo Wan, and Liqun Zhang, 2019, "Polyvinyl Alcohol-Stabilized Liquid Metal Hydrogel for Wearable Transient Epidermal Sensors," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 11, no. 50, pp. 47358-47364
- [23] Saichon Sriphan, Thitirat Charoonsuk, Supharada Khaisaat, Oubonwan Sawanakarn, Utchawadee Pharino, Saranya Phunpruch, Tosapol Maluangnont, and Naratip Vittayakorn, 2021, "Flexible capacitive sensor based on 2D-titanium dioxide nanosheets/bacterial cellulose composite film," *Nanotechnology*, vol. 32, p. 155502
- [24] "Rapid Scan Software and IRTracer-100."
https://www.shimadzu-webapp.eu/magazine/issue-2014-1_en/rapid-scan-software-and-irtracer-100/ (accessed).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [25] Chutimon Onsup, Kanokwan Chaithawee, Thitiworada Boontanoom, 2021, "Flexible Triboelectric Nanogenerator Based on Bacterial Cellulose-Titanium Dioxide Nanotubes Composite," B.S. Thesis of Industrial Chemistry, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
- [26] "REICH Stereo Zoom Microscopes SZM Series."
<https://www.powerstep.co.th/product/reich-zoom-stereo-microscopes-szm-series/>
- [27] Enab Al-Emam, Hilde Soenen, Joost Caen, and Koen Janssens, 2020
 "Characterization of polyvinyl alcohol-borax/agarose (PVA-B/AG) double network hydrogel utilized for the cleaning of works of art," *Herit Sci*, vol.8, no. 106
- [28] Ahmed Mahdi Rheima, Anees Abdullah Khadom, Mustafa M. Kadhim and Raheem A. H. A, 2022 "Electrochemical Synthesis of Rutile Phase Titanium Dioxide Nanosheets for Corrosion Protection of Mild Steel in Acidic Media," *Journal of Bio and Tribo-Corrosion*, vol.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

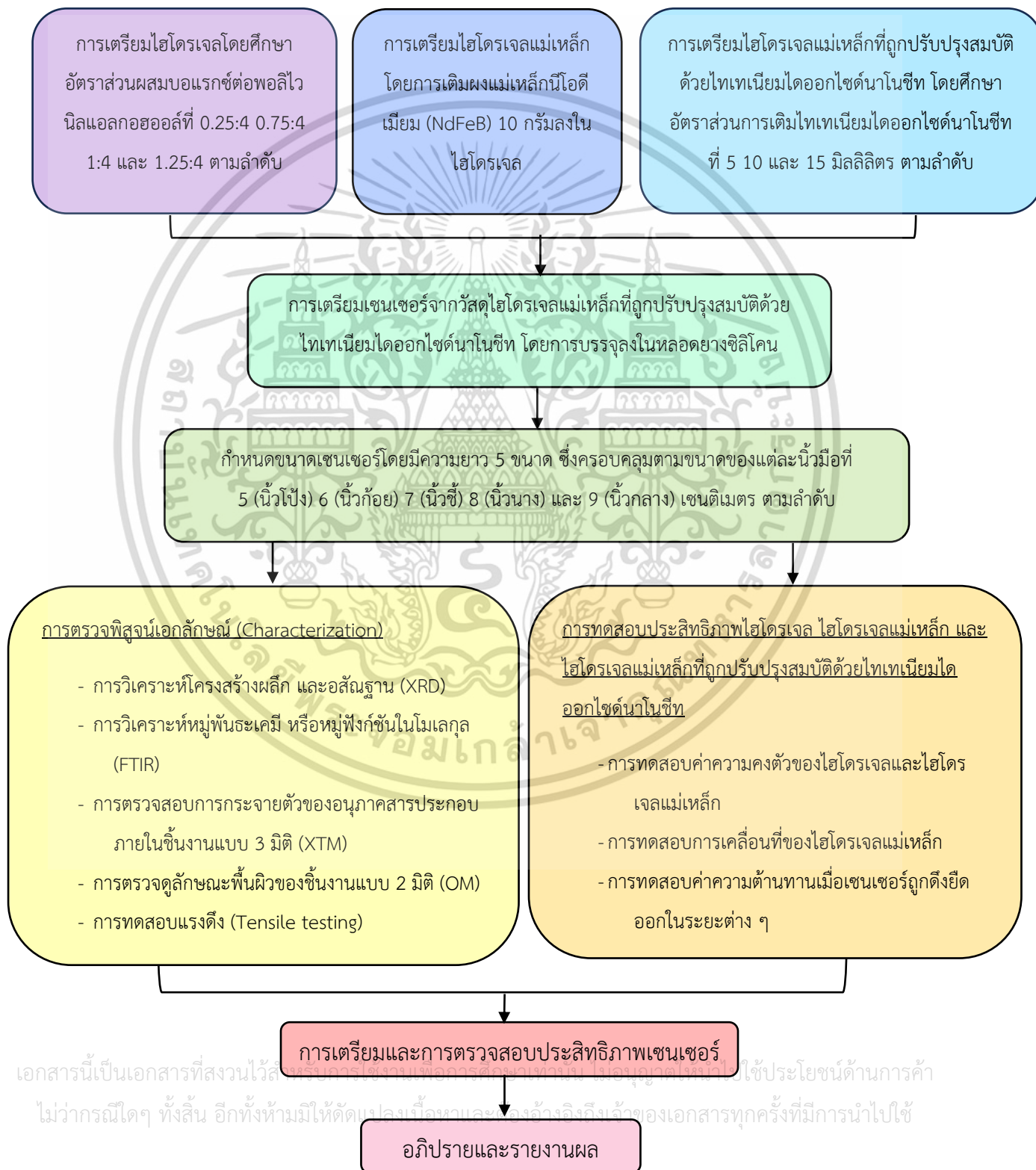


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

แผนการดำเนินการโครงการพิเศษ

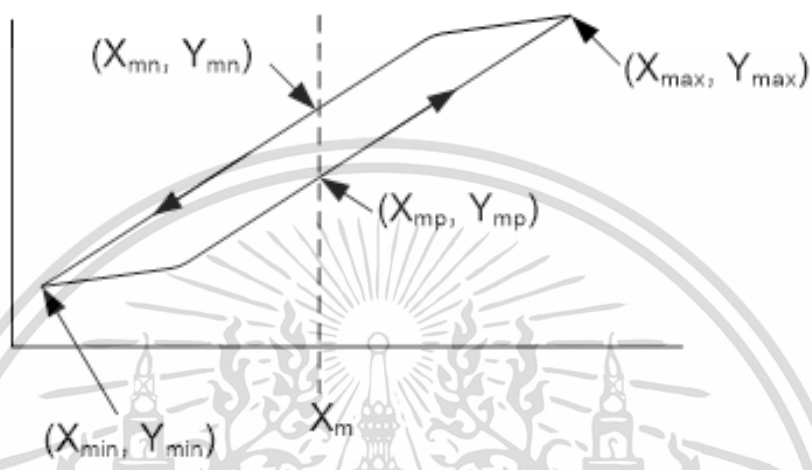
ในโครงการพิเศษนี้ มีแผนการดำเนินการโดยมีขั้นตอน ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ผู้สอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นักศึกษาใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและแจ้งอ้างอิงถึงตัวของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การคำนวณค่าร้อยละฮิสเทอรีซิส (%Hystereris)



ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) คือ ข้อผิดพลาดหรือความไม่เสถียรที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับสัญญาณ ซึ่งเกิดจากการถูกสัญญาณภายนอกรบกวน โดยจะได้เป็นพื้นที่ทับซ้อน (Overlap region) ที่เกิดจากการนำสัญญาณที่ได้จากการตอบสนองและคืนกลับ (Response and recovery time) มาซ้อนทับกัน โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการหาร้อยละฮิสเทอรีซิส (%Hystereris) จากสมการดังต่อไปนี้

สมการที่ 1 การหาจุดกึ่งกลาง (Midpoint location)

$$X_m = \left(\frac{X_{max} - X_{min}}{2} \right) + X_{min}$$

โดยที่ X_m คือ จุดกึ่งกลาง

X_{max} คือ จุดตัดแกน X ที่สูงที่สุด

X_{min} คือ จุดตัดแกน X ที่ต่ำที่สุด

สมการที่ 2 การคำนวณหาร้อยละฮิสเทอรีซิส (%Hystereris)

$$\%Hystereris = \left(\frac{Y_{mn} - Y_{mp}}{Y_{max} - Y_{mp}} \right) \times 100$$

โดยที่ Y_{max} คือ จุดตัดแกน Y ที่สูงที่สุด

Y_{min} คือ จุดตัดแกน Y ที่ต่ำที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ Y_{mn} คือ แกน Y ณ จุดกึ่งกลาง
ในช่วงการตอบสนอง

Y_{mp} คือ แกน Y ณ จุดกึ่งกลาง
ในช่วงการคืนกลับ

สำหรับค่าร้อยละฮิสเทอรีซิส จะถูกนำไปลบกับ 100 เพื่อหาค่าความเสถียรในการตรวจจับของ
เซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นต่อไป ซึ่งจะได้ออกมาเป็นค่าร้อยละความเสถียร (%Stability)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การเตรียมวัสดุไฮโดรเจล

ในงานวิจัยนี้ได้มีการเตรียมวัสดุไฮโดรเจล (H) โดยมีการศึกษาผลของการเติมบอแรกซ์ที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ H ซึ่ง H ที่ถูกเตรียมขึ้นนั้นจะมีสารตั้งต้น ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และบอแรกซ์ (Borax) สำหรับวิธีการเตรียมจะเริ่มต้นจากการนำ PVA ที่ 4 กรัม มาทำการละลายด้วยน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร จากนั้นจึงทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที เมื่อครบเวลาจึงทำการเติมสารละลายบอแรกซ์ลงในสารละลายที่เตรียมไว้ โดยสารละลายบอแรกซ์ถูกเตรียมขึ้นโดยมีปริมาณของบอแรกซ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งบอแรกซ์จะถูกละลายในน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ปริมาตรสุดท้ายของสารละลายที่ถูกเตรียมขึ้นเพื่อสังเคราะห์ H จะมีปริมาตรรวมที่ 100 มิลลิลิตร โดยปริมาณของบอแรกซ์ต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เตรียมขึ้น แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางแสดงปริมาณบอแรกซ์ต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปริมาตรรวม 100 มิลลิลิตร

บอแรกซ์ (กรัม)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์		รวม (มิลลิลิตร)
		(กรัม)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	
0.5	20	4	80	100
0.75	20	4	80	100
1.0	20	4	80	100
1.25	20	4	80	100

จากการศึกษาการเตรียม H โดยมีการเติมบอแรกซ์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้แก่ H ซึ่งได้มีการเตรียมบอแรกซ์ที่ปริมาณแตกต่างกัน พบว่า เมื่อมีปริมาณของบอแรกซ์ที่มากกว่า 1.25 กรัม ส่งผลให้บอแรกซ์ไม่สามารถละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตรได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาปริมาณของบอแรกซ์ที่ 0.5 0.75 1.0 และ 1.25 กรัม



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ

วันที่...31...เดือน.....สิงหาคม.....พ.ศ....2566.....

ข้าพเจ้า นางสาว.....ชนนิกันต์.....วิริยสถิตย์กุล..... รหัสประจำตัว.....62050272.....

นางสาว.....กวิณทิพย์.....คุ้มแก้ว..... รหัสประจำตัว.....62050258.....

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา.....เคมีอุตสาหกรรม.....ภาควิชา.....เคมี.....

ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ เรื่อง

ชื่อภาษาไทย.....เซนเซอร์สั่งการแบบยืดหยุ่นสำหรับอุปกรณ์ที่สามารถสวมใส่ได้บนวัสดุไฮโดรเจลแม่เหล็กที่ถูกปรับปรุงสมบัติด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนชีท.....

ชื่อภาษาอังกฤษ.....Flexible sensor for wearable device based on magnetic hydrogel modified titanium dioxide nanosheet.....

ปีการศึกษา.....2565.....

เป็นผลงานวิจัยที่มีได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์.....0.49.....% หรือโปรแกรม Turnitin.....%

ลงชื่อ ชนนิกันต์ วิริยสถิตย์กุล

ลงชื่อ กวิณทิพย์ คุ้มแก้ว

(นางสาวชนนิกันต์ วิริยสถิตย์กุล)

(นางสาวกวิณทิพย์ คุ้มแก้ว)

นักศึกษา

นักศึกษา

ข้าพเจ้า ศ.ดร.นราธิป...วิทยากร..... อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษของนักศึกษา

ข้างต้นแล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ นราธิป วิทยากร

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้