



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประดิษฐ์ ศึกษาลักษณะเฉพาะและสมบัติของวัสดุไฮบริดที่
ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กโดยมีเซลลูโลสจากแบคทีเรียเป็น
ส่วนประกอบหลัก

**Fabrication, Characteristics and Properties of Magneto-
Responsive Hybrid Materials Based on Bacterial Cellulose**

โดย รศ.ดร. สุปรีย์ พิณสุนทร

พฤษภาคม พ.ศ. 2562

สัญญาเลขที่ DBG6080002

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การประดิษฐ์ ศึกษาลักษณะเฉพาะและสมบัติของ
วัสดุไฮบริดที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กโดยมีเซลลูโลสจาก
แบคทีเรียเป็นส่วนประกอบหลัก

**Project: Fabrication, Characteristics and Properties of
Magneto-Responsive Hybrid Materials Based on Bacterial
Cellulose**

ผู้วิจัย รศ.ดร. สุปรีย์ พิณสุนทร
สังกัด สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.
และสกอ. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: DBG6080002

ชื่อโครงการ: การประดิษฐ์ ศึกษาลักษณะเฉพาะและสมบัติของวัสดุไฮบริดที่ตอบสนองต่อ

สนามแม่เหล็กโดยมีเซลลูโลสจากแบคทีเรียเป็นส่วนประกอบหลัก

ชื่อนักวิจัย: รศ.ดร. สุปรีย์ พิณสุนทร มหาวิทยาลัยขอนแก่น

อีเมล: psupree@kku.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 2 ปี

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรีย *Gluconacetobacter xylinum* ได้สำเร็จ ได้แผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส (BC) ที่มีลักษณะเหมือนวุ้นขาวใส ซึ่งสามารถนำไปทำแห้งด้วยกระบวนการ freeze dry หรือการอบแห้งได้ จากนั้นศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตของ BC กับอนุภาคแม่เหล็กนาโน Fe_3O_4 โดยจุ่มในสารละลาย ferrofluid ทำให้ได้สารคอมโพสิต BC แม่เหล็กตามที่ต้องการ ซึ่งพบว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและไม่ทำลายโครงสร้างของแผ่น BC ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นหากใส่อนุภาคแม่เหล็กนาโนในปริมาณที่ไม่มากเกินไป สามารถตอบสนองกับแม่เหล็กภายนอกได้ดี อีกส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ได้พยายามปรับปรุงสีของเมมเบรนแม่เหล็กให้มีสีขาว โดยสังเคราะห์อนุภาคนาโน ZnO ในโครงสร้างของ BC เพื่อให้ได้กระดาษสีขาว และนำมาประกบกับกระดาษแม่เหล็ก BC ซึ่งมีสีดำ ผลปรากฏว่าวัดค่าความขาวไปมากกว่า 80% และมีค่าสะท้อนแสงในช่วงตามองเห็นได้กว่า 70% สมบัติเชิงกลดีขึ้น และสามารถดึงดูตได้ด้วยแท่งแม่เหล็กถาวร

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยได้ศึกษาเส้นใยคาร์บอนนาโน (CNF) จากแผ่น BC โดยการนำแผ่นแม่เหล็ก BC ไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ทำให้ได้คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอน (CNF) กับอนุภาคแม่เหล็ก ค่าแมกนีไทเซชันอิ่ม (M_s) ตัวของ $\text{CNF}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ มีค่าสูงกว่า $\text{BC}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ มาก อนุภาคแม่เหล็กมีการกระจายตัวที่ดีในโครงสร้างของเส้นใยนาโนคาร์บอน สามารถดูดซับน้ำมันได้มากกว่า 1000% ของน้ำหนักตัวมันเอง และยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการแยกด้วยแรงทางแม่เหล็ก

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการเตรียมเจลจาก BC โดยมีหลายขั้นตอนเริ่มจากการปั่น BC ให้เป็นชิ้นส่วนเล็กๆ แล้วย่อยด้วยกรด H_2SO_4 เข้มข้น แยกส่วนของสารละลายและเนื้อออกจากกัน แล้วบรรจุใน Dialysis tube แช่น้ำเพื่อให้เกิดการแพร่แลกเปลี่ยนสารละลาย ปรับ pH ให้เป็นกลาง สั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิกตามด้วยการปั่นเหวี่ยง นำส่วนที่เป็นของเหลวเก็บใน Dialysis tube อีกครั้ง ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งน้ำ BC ที่กลายเป็นเจล

คำหลัก: แบคทีเรียเซลลูโลส; คอมโพสิต; อนุภาคนาโน; สมบัติแม่เหล็ก; เส้นใยคาร์บอน

Abstract

Project Code: DBG6080002

Project Title: Fabrication, Characteristics and Properties of Magneto-Responsive Hybrid Materials Based on Bacterial Cellulose

Investigator: Assoc. Prof. Supree Pinitsoontorn Khon Kaen University

E-mail Address: psupree@kku.ac.th

Project Period: 2 years

In this project, nanocellulose was bio-synthesized successfully from bacteria *Gluconacetobacter xylinum*. The obtained bacterial cellulose (BC) showed a hydrogel characteristic in which the water could be evaporized by freeze-drying or oven-drying. The BC/Fe₃O₄ nanoparticle composites were prepared by simply immersing BC in the ferrofluid solution. This simple method was proved to maintained the structure of BC and improved the strength for the optimized nanoparticle concentration. The magnetic BC showed good response with external magnetic fields. The other section of this project studied the fabrication of white magnetic paper from BC nanocomposites. By synthesizing ZnO nanoparticles in the structure of BC, and then sandwiched with magnetic BC paper, the white magnetic paper was successfully obtained. The whiteness of over 80% and the visible-light reflectance of over 70% were observed. The mechanical properties and magnetic response were improved.

Some portions of BC composites were pyrolyzed to change the cellulose nanofibers into carbon nanofiber. The composites of carbon nanofiber (CNF) and magnetic nanoparticles were achieved. The saturation magnetization of CNF/Fe₃O₄ was higher than that of BC/Fe₃O₄. The magnetic particles were uniformly dispersed in the structure of CNF. Furthermore, it showed excellent oil absorption ability of over 1,000% of its own weight. It can be recycled via magnetic force attraction.

Lastly, the preparation of BC in a gel state was studied. The BC was blended into small pieces before dissolved by a concentrated H₂SO₄ acid. The solute and solvent were separated before loading in a dialysis tube. The tube was immersed in water for the solution exchange. It was then pH neutralized, ultrasonicated and centrifuged. The solvent was kept in the dialysis tube again in ambient condition. The BC was subsequently turned into a gel state.

Keywords: bacterial cellulose; composite; nanoparticle; magnetic property; carbon fiber;

1. บทนำ

แบคทีเรียเซลลูโลส (bacterial cellulose, BC) เป็นวัสดุธรรมชาติที่น่าสนใจมาก เพราะมีสมบัติเด่นหลายอย่าง เช่น สมบัติเชิงกลที่ดี ความมีรูพรุนสูง ดูดซับน้ำได้มาก ขึ้นรูปได้ง่าย ย่อยสลายตามธรรมชาติได้ และไม่มีความเป็นพิษ [1-5] ดังนั้นจึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับ BC โดยส่วนมากจะศึกษาการสังเคราะห์ทางชีวภาพเพื่อให้มีราคาถูกลง และสามารถนำไปใช้งานได้ในหลายสาขาเช่น ด้านสิ่งทอ ด้านวัสดุเสริมแรง หรือด้านที่เกี่ยวข้องกับการแพทย์ อย่างไรก็ตามยังมีสมบัติพิเศษอื่นๆที่น่าสนใจอีกมากสำหรับแบคทีเรียเซลลูโลส

แบคทีเรียเซลลูโลส (BC) ด้วยตัวมันเองยังขาดสมบัติอีกหลายๆด้าน แต่การทำให้เป็นวัสดุผสมหรือคอมโพสิตสามารถเพิ่มสมบัติได้อีกมาก ด้วยการที่ BC มีพื้นที่ผิวสูงและมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากทำให้อะตอมหรือโมเลกุลของสารอื่นๆสามารถยึดเกาะได้ดี ทำให้สามารถสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตจาก BC ที่มีสมบัติที่น่าสนใจอื่นๆ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา สมบัติเชิงแสงและไฟฟ้า หรือสมบัติทางแม่เหล็ก เป็นต้น

เมื่อไม่นานมานี้ วัสดุผสมระหว่างเส้นใยนาโนจาก BC และอนุภาคแม่เหล็กนาโน ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เพราะสามารถนำไปใช้งานได้ผลิตภัณฑ์หลายอย่างเช่น แอคชูเอเตอร์ [6, 7], การปริ้นท์เชิงแม่เหล็ก [6, 8], เซนเซอร์ทางแม่เหล็ก [6, 8, 9], การป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [6, 8, 10, 11], การเก็บข้อมูล [6, 8, 9, 12], การป้องกันการโจรกรรม [6], สิ่งทอ [9], ตัวกรองทางแม่เหล็ก [7, 9], การดูดซับโลหะหนัก [10, 13, 14] นอกจากนี้ การเติมอนุภาคแม่เหล็กนาโนลงใน BC ยังมีข้อได้เปรียบหลายประการเมื่อเทียบกับเซลลูโลสแม่เหล็กชนิดอื่นๆ เพราะ BC ให้ความแข็งแรง ค่ามอดูลัส ที่สูงมาก ทำให้สามารถได้แผ่นเมมเบรนแม่เหล็กที่ทั้งมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นได้ดี การที่ BC มีรูพรุนระดับนาโนเป็นจำนวนมากและมีพื้นที่ผิวสูงทำให้สามารถเติมอนุภาคชนิดอื่นเพื่อเพิ่มสมบัติต่างๆได้อีก และสุดท้าย BC มีน้ำหนักเบาและอุ้มน้ำได้ดี จึงมีประโยชน์กับการใช้งานที่หลากหลาย

ในรายงานงานวิจัยที่ผ่านมา วัสดุคอมโพสิตระหว่าง BC และอนุภาคแม่เหล็กนาโน มีการรายงานมาแล้วบ้างพอสมควร แต่ส่วนใหญ่จะใช้อนุภาคแม่เหล็กชนิดอ่อน ได้แก่ Fe_3O_4 [6, 9, 11, 12, 14] ซึ่งวัสดุชนิดนี้ให้สมบัติแม่เหล็กอ่อน ประกอบกับการที่มีขนาดระดับนาโนจึงได้สมบัติแม่เหล็กเป็นแบบ superparamagnetic หมายความว่าไม่มีฮิสเทอรีซิสลูป ซึ่งน่าสนใจสำหรับงานวิจัยบางประเภท อย่างไรก็ตามวัสดุแม่เหล็กชนิดอื่นๆ ก็เป็นที่น่าสนใจเช่นเดียวกัน แต่ยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใส่วัสดุแม่เหล็กชนิดอื่นๆเข้าไปในโครงสร้างของ BC อยู่ไม่มากนัก

วิธีการใส่อนุภาคแม่เหล็กเข้าไปในโครงสร้างของ BC ก็มีความสำคัญไม่แพ้กัน ในงานวิจัยที่ผ่านมา มีการศึกษาวิธีการดังกล่าวหลายวิธี [9, 12, 13] และศึกษาสมบัติที่เปลี่ยนไปของวัสดุคอมโพสิต เช่น การตอบสนองกับสนามแม่เหล็กภายนอก [8] การดูดซับไอออนของโลหะหนัก [14] และสมบัติเชิงกล [15] เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษากลไกการยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคแม่เหล็กนาโนกับพื้นผิวของเส้นใยนาโนของ BC ความเข้าใจในเรื่องนี้จะช่วยให้สามารถควบคุมการกระจายตัวของอนุภาคแม่เหล็กนาโนได้ดี ซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับสมบัติของวัสดุ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาการประดิษฐ์วัสดุไฮบริดที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กโดยมีเซลลูโลสจากแบคทีเรียเป็นส่วนประกอบหลัก และศึกษาลักษณะเฉพาะของวัสดุที่สังเคราะห์ได้ รวมทั้งสมบัติต่างๆ เพื่อให้ได้วัสดุคอมโพสิตจาก BC กับอนุภาคแม่เหล็กนาโน ที่มีสมบัติเหมาะสมจะไปใช้งานด้านต่างๆ

2. วัตถุประสงค์

- 2.1. เพื่อศึกษาการเติม MNP ชนิดต่างๆเข้าไปในโครงสร้าง BC แล้วศึกษาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในด้านโครงสร้าง ลักษณะสัณฐาน การกระจายตัวของ MNP และสมบัติแม่เหล็ก
- 2.2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในการสังเคราะห์และลักษณะเฉพาะของวัสดุไฮบริด MNP/BC ที่ได้ ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมสมบัติแม่เหล็กของวัสดุคอมโพสิต
- 2.3. เพื่อสามารถที่จะปรับปรุงสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุไฮบริด MNP/BC ให้ได้ตามที่ต้องการโดยยังคงมีสมบัติเชิงกลที่ดีตามเดิม

3. วิธีการทดลอง

3.1. การสังเคราะห์และศึกษาโครงสร้างของแบคทีเรียเซลลูโลส

แบคทีเรียเซลลูโลสได้จากการเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *Gluconacetobacter xylinum* (strain TISTR975) ซึ่งได้มาจาก ศูนย์จุลินทรีย์ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย เลี้ยงเชื้อแบคทีเรียในอาหารที่มีน้ำตาล D-glucose เป็นส่วนประกอบหลัก ทำการบ่มไว้ที่อุณหภูมิ 30 °C ภายใต้สภาวะนิ่ง เป็นเวลา 5-14 วัน แล้วแต่ความหนาที่ต้องการ หลังจากนั้นทำการเก็บเกี่ยว จะได้แผ่นวุ้นแบคทีเรียเซลลูโลส ซึ่งต้องนำไปต้มเพื่อฆ่าเชื้อแบคทีเรีย และจุ่มในสารละลาย NaOH เพื่อปรับค่า pH จากนั้นล้างทำความสะอาดด้วยน้ำ DI อีกหลายๆรอบจนกว่าจะได้ pH เท่ากับ 7 จะได้แบคทีเรียเซลลูโลสในสภาพชุ่มน้ำในลักษณะวุ้น หากต้องการทำแห้ง สามารถทำได้สองวิธีคือ หนึ่งทำการอบแห้ง (oven dry) ซึ่งจะได้แผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสเป็นฟิล์มแบนราบ แต่หากทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง (freeze dry) จะทำให้ได้แผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสที่มีความฟู และมีรูพรุนสูง

ทำการวิเคราะห์เฟสและโครงสร้างของแบคทีเรียเซลลูโลสด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) และส่องกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) รวมทั้งหาค่าสมบัติทางกายภาพอื่นๆ เช่น ความหนาแน่น ขนาด ปริมาณน้ำที่ดูดซับไว้ ฯลฯ

3.2. อนุภาคแม่เหล็กนาโนของโคบอลต์เหล็กแพลทตินัม

อนุภาคแม่เหล็กนาโน $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Pt}$ ($x = 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0$) ถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการโพลิออล เพิ่มต้นด้วยสารตั้งต้น Cobalt (III) acetylacetonate ($\text{Co}(\text{acac})_2$), iron acetylacetonate ($\text{Fe}(\text{acac})_2$) และ platinum acetylacetonate ($\text{Pt}(\text{acac})_2$) โดยชั่งในปริมาณสัดส่วนที่เหมาะสมและละลายในสารละลาย trimethylene glycol (TMEG) เติม NaOH ในปริมาณที่เหมาะสม จากนั้นให้ความร้อนที่ 230 °C โดยมีการคนอย่างสม่ำเสมอ และรีฟลักซ์ไว้เป็นเวลา 3.5 ชั่วโมง หลังจาก

รีฟลักซ์เสร็จ ทำให้สารละลายเย็นตัวลง จะเริ่มเห็นการตกตะกอนซึ่งเป็นอนุภาคนาโนของ $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Pt}$ ทำการแยกอนุภาคนาโนโดยการปั่นเหวี่ยง และล้างด้วยเอทานอลหลายรอบเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนอื่น ทำการอบอนุภาคที่ได้ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนที่ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ทำการวิเคราะห์เฟสและโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ตรวจสอบลักษณะและขนาดของอนุภาคนาโนด้วยเทคนิค transmission electron microscopy (TEM) ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค thermogravimetric (TGA) ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค energy dispersive X-ray (EDX) และวัดสมบัติทางแม่เหล็กด้วยเทคนิค VSM นอกจากนี้ยังใช้แสงซินโครตรอนในการวิเคราะห์โครงสร้างเฉพาะบริเวณของ Co ด้วยเทคนิค X-ray absorption spectroscopy (XAS)

3.3. การศึกษาแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสที่มีความยืดหยุ่นและมีสมบัติแม่เหล็ก

เริ่มต้นด้วยแผ่น BC ที่สังเคราะห์ในตอนแรก นำไปจุ่มในสารละลาย ferrofluid โดยเปลี่ยนความเข้มข้นตั้งแต่ 1, 3, 5, 10, 20 % โดยปริมาตร ในกระบวนการนี้ นำแผ่น BC แช่ในสารละลาย ferrofluid ที่ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีการคนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะทำให้แผ่น BC สีขาวเปลี่ยนสีไปเป็นสีดำ แสดงว่าเกิดนาโนคอมโพสิตของ $\text{BC}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ นำไปทำแห้งแบบ freeze dry

การวิเคราะห์ทำด้วยเทคนิค XRD, SEM, FTIR, TGA, SEM VSM นอกจากนี้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง universal testing machine (UTM) โดยใช้ความยาวเกจ 20 mm อัตราการดึง 10 mm/นาที

3.4. การสังเคราะห์กระดาษแม่เหล็กสีขาวจากแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิต

ในงานนี้ใช้แผ่น BC ที่สังเคราะห์ได้ในตอนต้นมาเตรียมเป็นคอมโพสิตสองชนิดได้แก่ $\text{BC}/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ และ BC/ZnO วิธีการมีดังนี้ สำหรับแผ่น $\text{BC}/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ เริ่มต้นด้วยการใช้ $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ในอัตราส่วน 1:2 ผสมลงในน้ำ DI จุ่มแผ่น BC ลงในสารละลายดังกล่าว และเพิ่มอุณหภูมิเป็น $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทิ้งไว้ 4 ชั่วโมง จากนั้นเติม NaOH แล้วล้างน้ำเปล่าหลายครั้งเพื่อปรับ pH ส่วนแผ่นคอมโพสิต BC/ZnO ทำได้โดยละลาย ZnCl_2 ในน้ำ DI และแช่แผ่น BC ไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนที่จะเติม NaOH จากนั้นล้างด้วยน้ำสะอาดหลายครั้ง

ในการประดิษฐ์กระดาษแม่เหล็กสีขาว นำแผ่น $\text{BC}/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ และ BC/ZnO มาประกบกันในลักษณะแซนวิช ในชั้น BC/ZnO อยู่ด้านนอก แล้วนำไปอัดด้วยความร้อนที่ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA, XRD, SEM, UTM, VSM นอกจากนี้วิเคราะห์การสะท้อนแสงด้วยเทคนิค UV-visible spectrometer ที่ความยาวคลื่น 200 – 800 nm ทดสอบความขาวของกระดาษตามมาตรฐาน ISO 11476:2010 ดัชนีชี้วัดด้านการฉีกขาด ทดสอบตามมาตรฐาน ISO1974:2014

3.5. เส้นใยคาร์บอนนาโนจากแบคทีเรียเซลลูโลสผสมกับอนุภาคแม่เหล็กนาโน

ในงานวิจัยนี้ เริ่มต้นจาก BC ที่มีขายอยู่ในรูปวุ้นมะพร้าว (ชาวเกาะ) นำมาล้างหลายรอบเพื่อกำจัดน้ำตาลหรือสารเจือปนอื่นๆ จากนั้นทำให้บางลงจนมีความหนาเป็น 0.25 cm ก่อนที่จะจุ่มใน

สารละลาย ferrofluid (สารละลายของอนุภาคนาโน Fe_3O_4) เพื่อให้อนุภาคนาโน Fe_3O_4 แพร่เข้าสู่โครงสร้างเส้นใยนาโนของ BC ในงานนี้ทำการเปลี่ยนความเข้มข้นของ ferrofluid เป็น 1, 3, 5, 10, และ 20 % โดยปริมาตร เมื่อได้วุ้นของคอมโพสิตระหว่าง BC กับ Fe_3O_4 แล้ว นำไปทำแห้งแบบ freeze dry

ในขั้นตอนมานำวัสดุคอมโพสิต BC/ Fe_3O_4 ไปผ่านกระบวนการไฟโรไลซิสโดยอบในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน ใช้อัตราการให้ความร้อนที่ $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$ จากอุณหภูมิห้องถึง $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากนั้นเพิ่มอัตราเป็น $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$ จนถึงอุณหภูมิ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ แล้วแช่ไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะทำให้ BC เปลี่ยนไปเป็นเส้นใยคาร์บอนนาโนที่มีอนุภาคแม่เหล็ก Fe_3O_4 อยู่ในโครงสร้าง

ทำการศึกษาความเสถียรเชิงความร้อนด้วยเทคนิค TGA และหุ้มน้ำด้วยเทคนิค FTIR ศึกษาโครงสร้างผลึกและเฟสที่ได้ด้วย XRD ศึกษาลักษณะสัณฐานด้วยเทคนิค SEM และ TEM และศึกษาสมบัติแม่เหล็กด้วยเทคนิค VSM

3.6. เส้นใยคาร์บอนนาโนแม่เหล็กจากแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตเพื่อการดูดซับน้ำมัน

เตรียมสารละลายของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ในอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยการผสมเกลือ FeCl_2 และ FeCl_3 ในน้ำ ให้ความร้อนที่ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ คนจนละลายเข้ากันได้ดี จากนั้นแช่แผ่น BC ที่สังเคราะห์ในตอนแรกลงในสารละลายดังกล่าว ไอออนของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} จะมาเกาะที่ผิวของเส้นใย BC แล้วเติมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 1.2M ทั้งไว้เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ไอออนของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} เปลี่ยนเป็นอนุภาคนาโนของ Fe_3O_4 เกาะที่ผิวของเส้นใยนาโนของ BC ทำการล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดหลายๆรอบเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนตกค้าง แล้วนำวัสดุคอมโพสิตที่ได้ไปผ่านกระบวนการทำแห้งแบบ freeze dry

ขั้นตอนมา เผาแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ แล้วแช่ไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะทำให้ BC เปลี่ยนไปเป็นเส้นใยคาร์บอนนาโนที่มีอนุภาคแม่เหล็ก Fe_3O_4 อยู่ในโครงสร้าง ทดสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ต่างๆ แล้วนำไปทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำมัน โดยการชั่งน้ำหนักของ BC/ Fe_3O_4 ก่อนจุ่มน้ำมันและหลังจุ่มน้ำมัน คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับได้ ทดสอบการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยการละลายน้ำมันออกด้วยตัวทำละลาย และทำแห้ง จากนั้นทดสอบการดูดซับอีกครั้งหนึ่ง

3.7. การสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลสเจล

ในงานนี้ใช้แผ่น BC ที่สังเคราะห์ได้ในตอนต้นมาปั่นด้วยเครื่องปั่นอาหาร เพื่อบดให้มีขนาดเล็กลง ทำการไล่น้ำออกจากส่วนผสมที่ถูกปั่นให้ได้มากที่สุด นำตัวอย่างไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ แล้วทำให้แห้งด้วยวิธีการแช่แข็ง (Freeze dry) เป็นเวลา 3 วัน จะได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นกลุ่มของเส้นใย สีขาว นำเส้นใยที่ได้ไปทำปฏิกิริยากับสารละลาย H_2SO_4 ความเข้มข้น 60% ที่อุณหภูมิ $51\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลา เติมน้ำกลั่น ปริมาณ 2 เท่าของปริมาตรของเหลวทั้งหมด แล้วจึงนำสารแขวนลอยไปปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) 6 นาที หรือตามความเหมาะสม เพื่อทำการแยกส่วนของสารละลายและเนื้อสารออกจากกัน และเทส่วนของสารละลายทิ้ง ล้างเนื้อสารด้วยน้ำ DI สลับกับการนำไปปั่นเหวี่ยง จนกระทั่งเนื้อสารตกตะกอนได้น้อยลง จึงเติมน้ำ DI แล้วนำสารแขวนลอยไปบรรจุใส่ใน Dialysis tube แล้วนำไปแช่น้ำ DI เปลี่ยนน้ำ DI จนกระทั่ง ค่า pH มีค่าใกล้เคียง เทสารแขวนลอยลงในบีก

เกอร์แล้วปรับ pH ด้วย NaOH ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลลาร์ จนกระทั่งค่า pH ของเซลลูโลสมีค่าเท่ากับ 7 นำเซลลูโลสไปทำการสั่นด้วยความถี่สูง (Sonicate) เป็นเวลา 30 นาที ตามด้วยปั่นเหวี่ยง 6 นาที นำส่วนที่เป็นของเหลว เทเก็บไว้ใน Dialysis tube และส่วนที่เป็นตะกอนจะทิ้ง วาง Dialysis tube ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งน้ำระเหยออกไประดับหนึ่ง จะทำได้แบคทีเรียเซลลูโลสที่มีลักษณะข้นเหมือนเจล

4. ผลการทดลอง

4.1. การสังเคราะห์และศึกษาโครงสร้างของแบคทีเรียเซลลูโลส

- สามารถสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลส (bacterial cellulose, BC) จากเชื้อแบคทีเรีย *Gluconacetobacter xylinum* ได้สำเร็จดังรูป



- BC ที่ได้ จะมีสีเหลืองส้ม (สีของสารละลายกลูโคส) มีความเป็นกรดเนื่องจากปฏิกิริยาของแบคทีเรีย) และมีแบคทีเรียอยู่ จึงต้องทำการล้าง BC ด้วยน้ำเปล่าหลายๆครั้ง และใช้ความร้อนในระหว่างการล้างด้วย เพื่อฆ่าเชื้อแบคทีเรีย และทำให้ BC มีลักษณะใสไม่มีสี จากนั้นล้าง BC ด้วยสารละลาย NaOH แล้วแช่ค้างคืนไว้ และปรับ pH = 7 ด้วยน้ำเปล่า



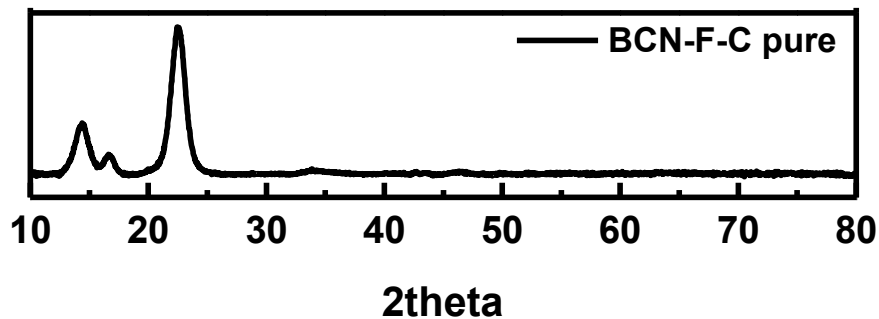
- เมื่อล้างฆ่าเชื้อแบคทีเรีย และปรับ pH ให้เป็นกลางแล้ว BC ที่ได้จะมีลักษณะเหมือนวุ้นขาวใสดังรูป



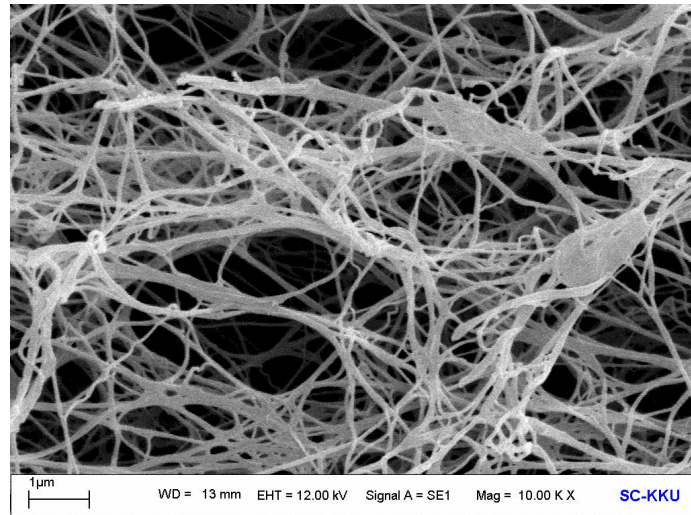
- นำไปผ่านกระบวนการ Freeze dry เพื่อไล่น้ำออก ซึ่งจะทำให้ได้เป็นแผ่นเมมเบรนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสดังรูป



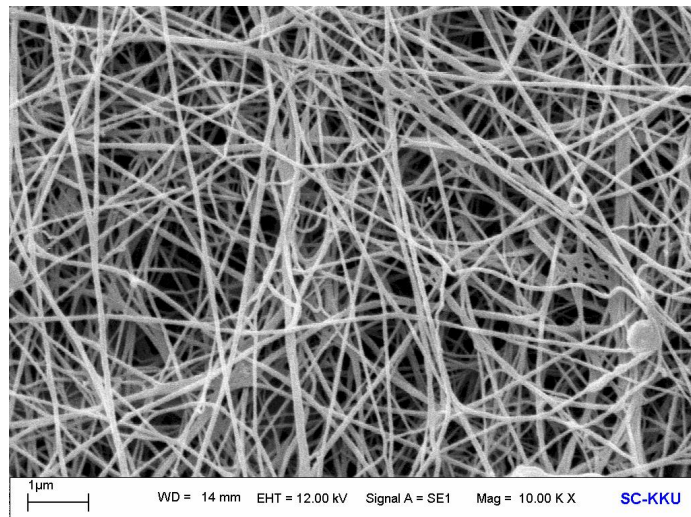
- เมื่อนำไปทดสอบความเป็นผลึกของ BC ที่ได้ โดยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) พบว่าได้ผลดังรูป จะเห็นว่ามีพีคความเป็นผลึกขึ้นหลักๆอยู่ 3 พีค ซึ่งสอดคล้องกับฐานข้อมูลของ BC และตรงกับงานวิจัยอื่นๆก่อนหน้านี้



- นำ BC ไปตรวจสอบลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) พบว่าทั้งที่บริเวณภาคตัดขวางหรือบริเวณผิวหน้าแสดงลักษณะของเส้นใยระดับนาโนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 นาโนเมตร ถักทอกันในลักษณะของโครงข่าย 3 มิติ



ภาคตัดขวาง



ผิวหน้า

4.2. อนุภาคแม่เหล็กนาโนของโคบอลต์เหล็กแพลทตินัม

- ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กนาโนของโคบอลต์เหล็กแพลทตินัม ($\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Pt}$) ด้วยวิธีโพลีออล โดยเปลี่ยนปริมาณของ Co และ Fe จากนั้นเผาเพื่อให้วัสดุเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสแม่เหล็กแรงตามที่ต้องการ แล้วทำการวัดลักษณะเฉพาะพร้อมกับสมบัติของวัสดุด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ TG/DTA, FTIR, XRD, SAXS, EDS, VSM,
- ผลการทดลองที่ได้ พบว่าสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโน ($\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Pt}$) ได้เฟสบริสุทธิ์ ก่อนการเผา มีขนาดเล็กประมาณ 2-3 nm แต่เมื่อเผาแล้วจะเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสแม่เหล็กแข็ง และขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้นมาก การปรับเปลี่ยนอัตราส่วน Co กับ Fe พบว่าทำให้สมบัติทางแม่เหล็กเปลี่ยนไป โดยถ้าอัตราส่วน Co:Fe = 0.50:0.50 จะได้ค่าแม่เหล็กไคเซชันอิ่มตัวสูงที่สุด แต่ถ้า Co = 1.00 หรือ Fe = 1.00 จะทำให้ได้ค่า coercivity ที่สูงที่สุด
- ผลการทดลองสรุปได้ดังรูปข้างล่าง

สังเคราะห์



$x = 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$

Chemicals

- Cobalt acetylacetonate ($\text{Co}(\text{acac})_2$)
 - Iron(III) acetylacetonate ($\text{Fe}(\text{acac})_3$)
 - Platinum acetylacetonate ($\text{Pt}(\text{acac})_2$)
 - Trimethylene glycol (TMEG) : 25 ml
 - NaOH : 0.4 g
- } 0.01 M



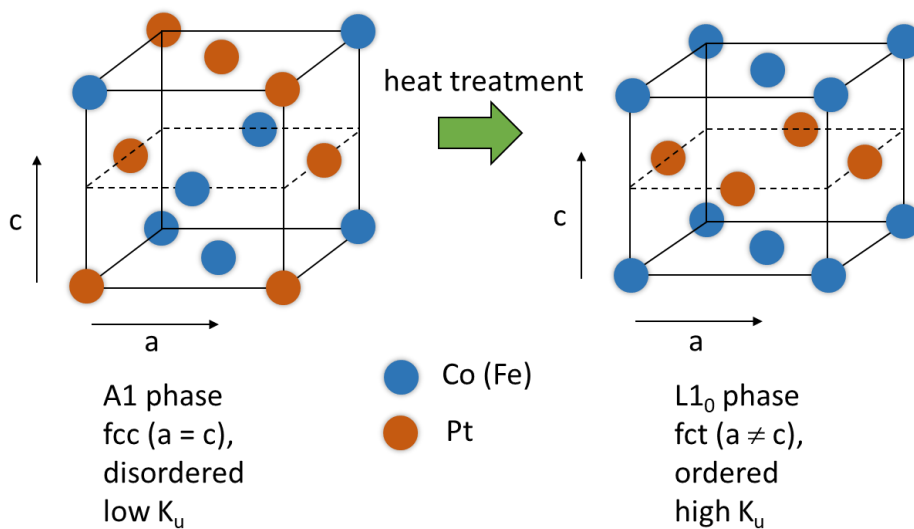
Heat, **Reflux**, Stirred

washed with ethanol several time

(FCC (A_1) structure)

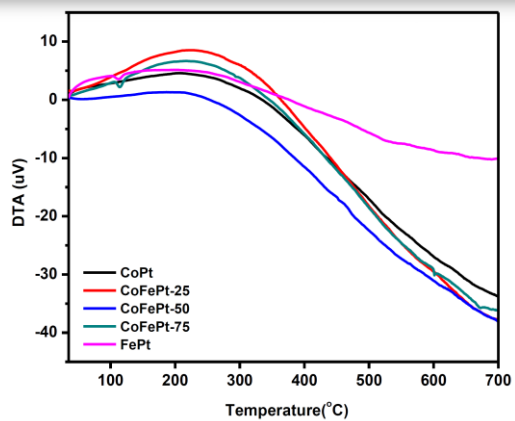
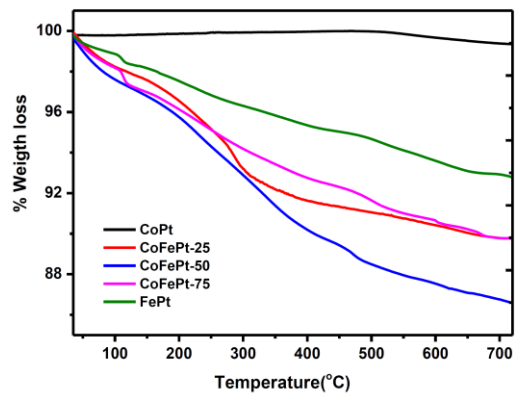
Annealed
Ar atmosphere at 700 °C

(FCT (L_{10}) structure)



TG-DTA

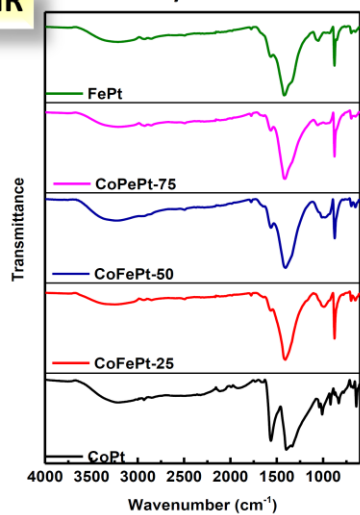
RT-700 °C



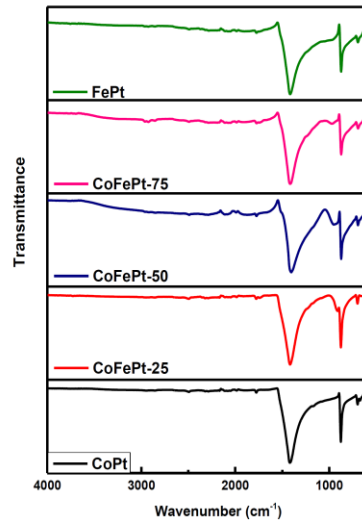
6

FTIR

As-synthesized

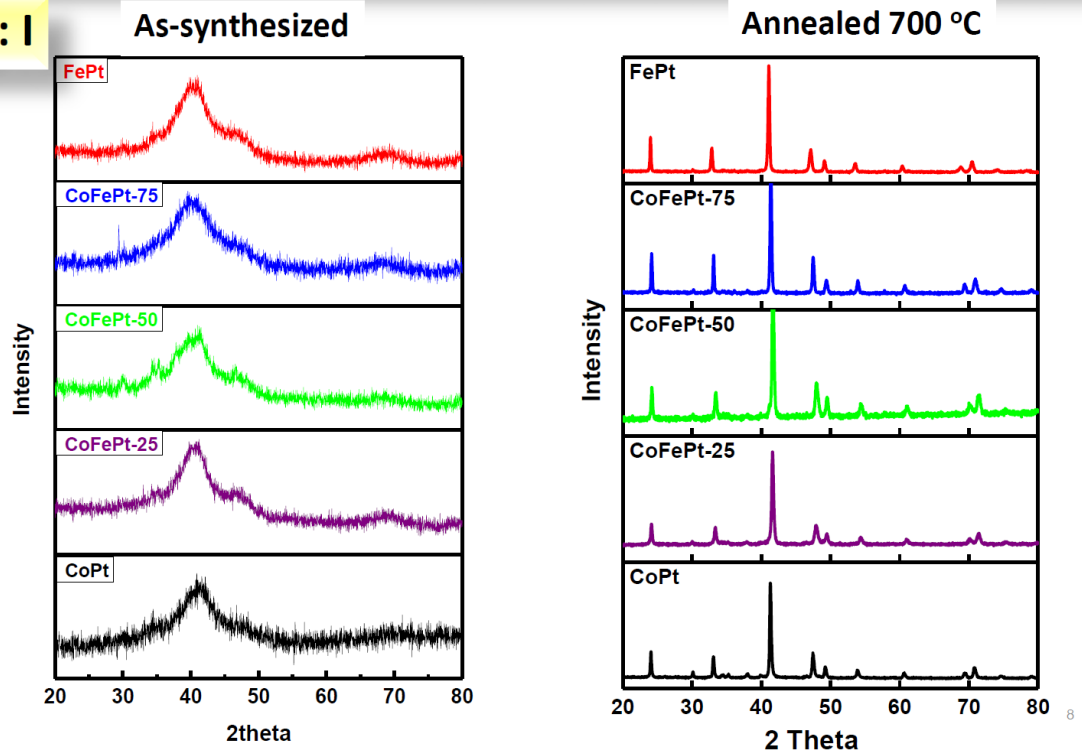


Annealed 700 °C

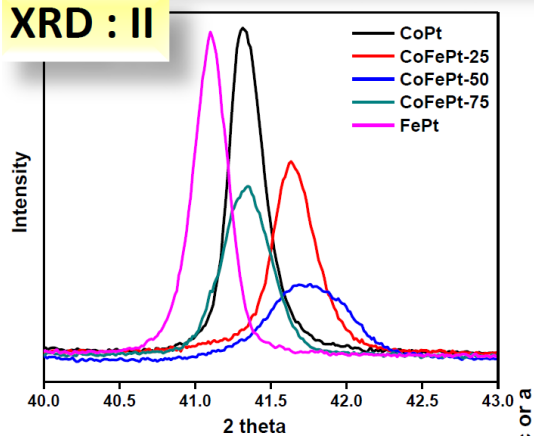


7

XRD : I

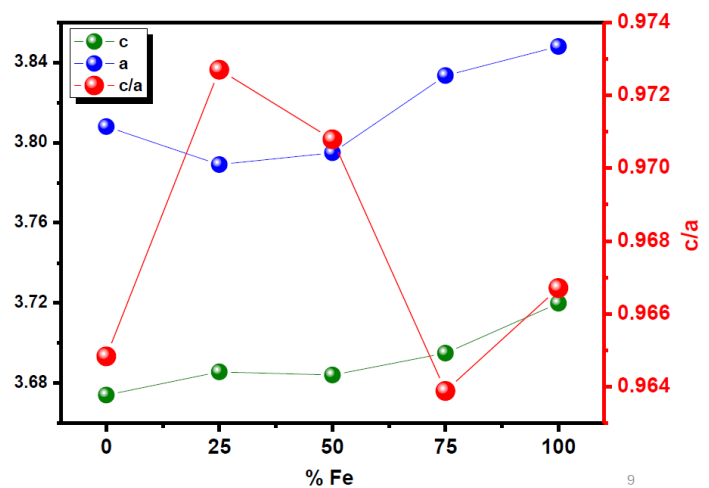


XRD : II



$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \text{.....(1)}$$

$$d^2 = \frac{a^2}{h^2 + k^2} + \frac{c^2}{l^2} \quad \text{.....(2)}$$

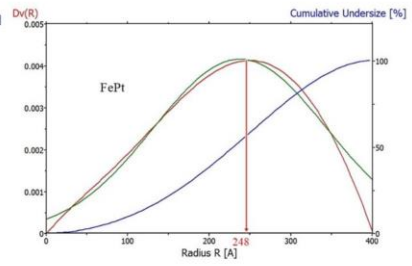
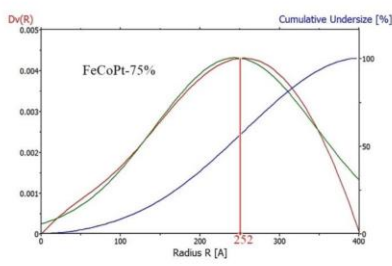
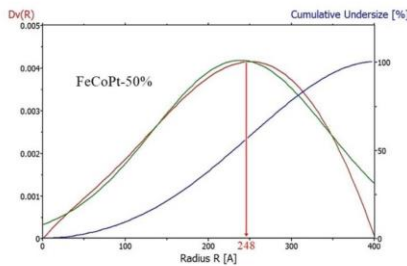
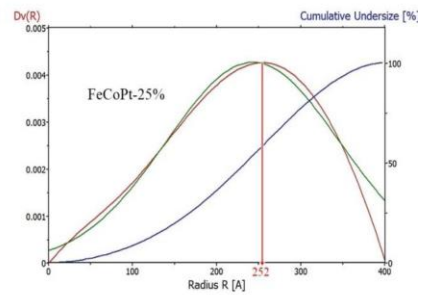
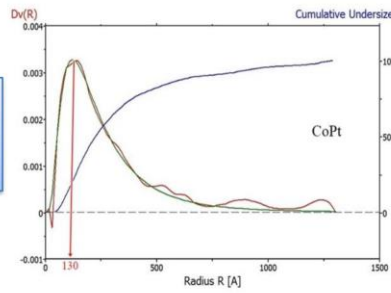


SAXS

Annealed 700 °C

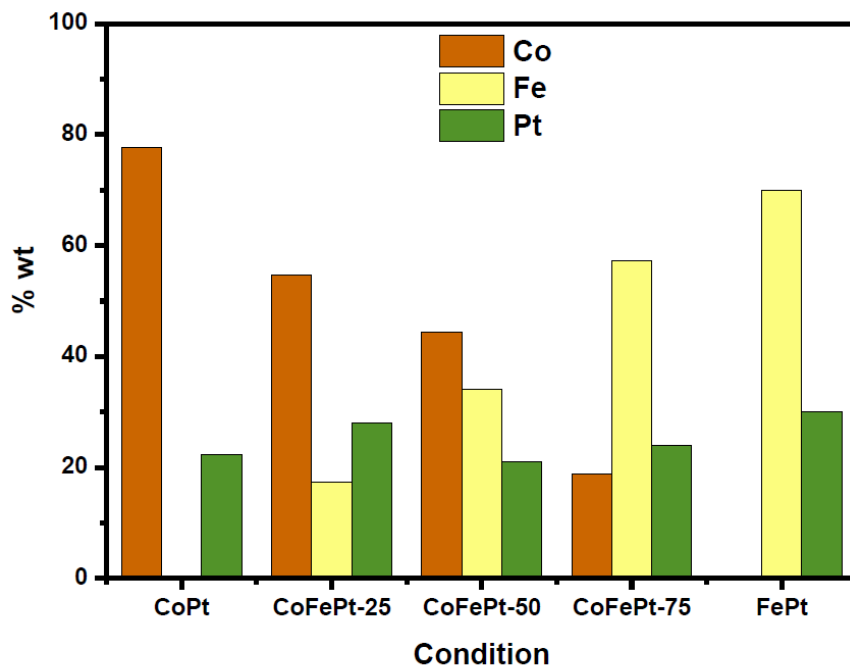
Small-Angle X-ray
Scattering (SAXS)

ขนาดรัศมีของอนุภาค



10

EDS



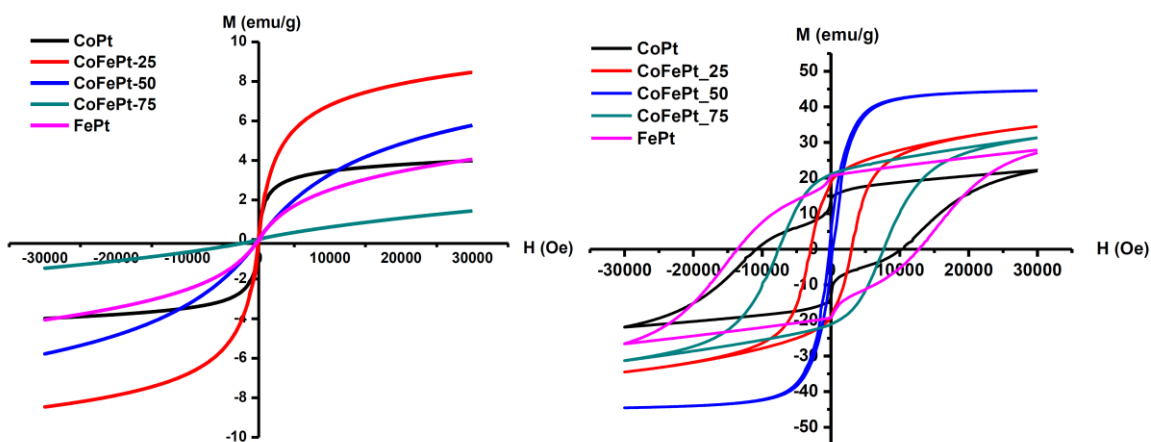
11

VSM : I

M-H 300 K

As-synthesized

Annealed 700 °C

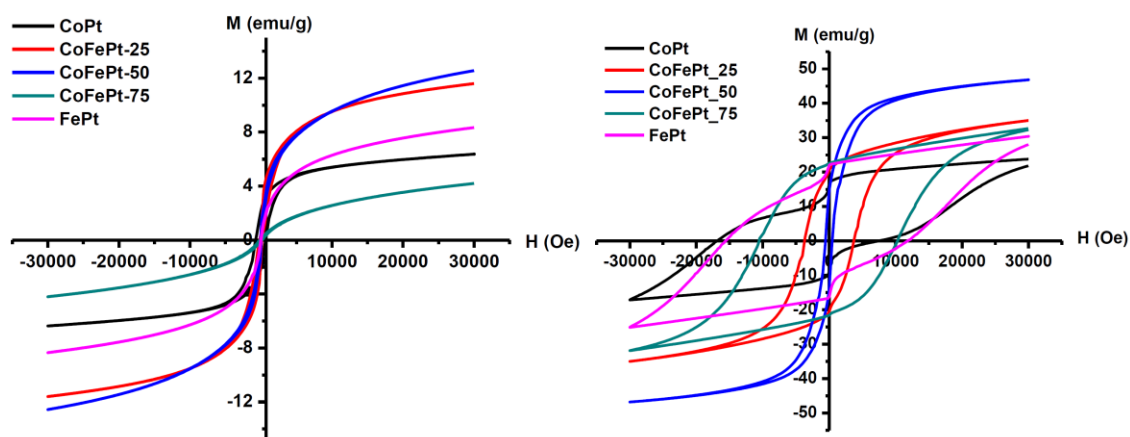


VSM : II

M-H 50 K

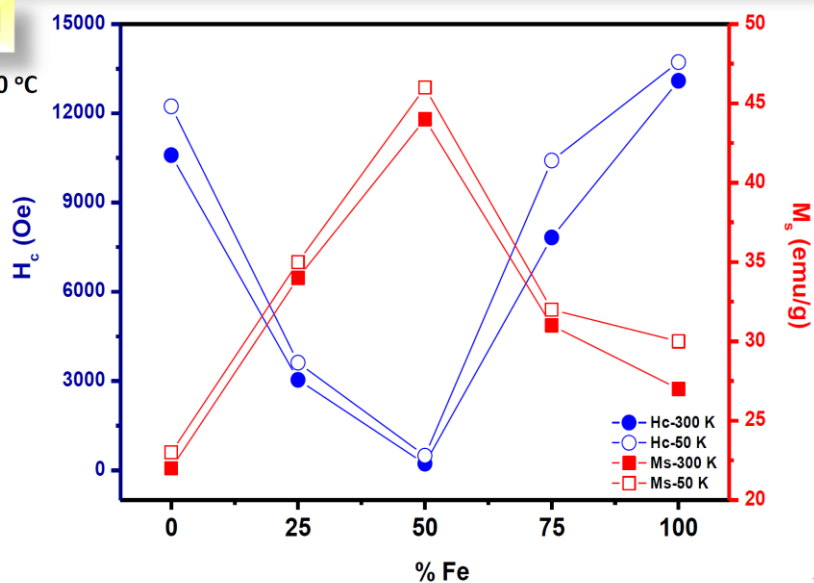
As-synthesized

Annealed 700 °C



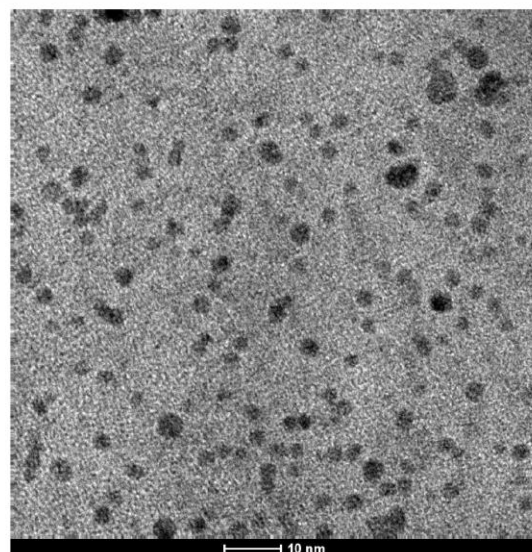
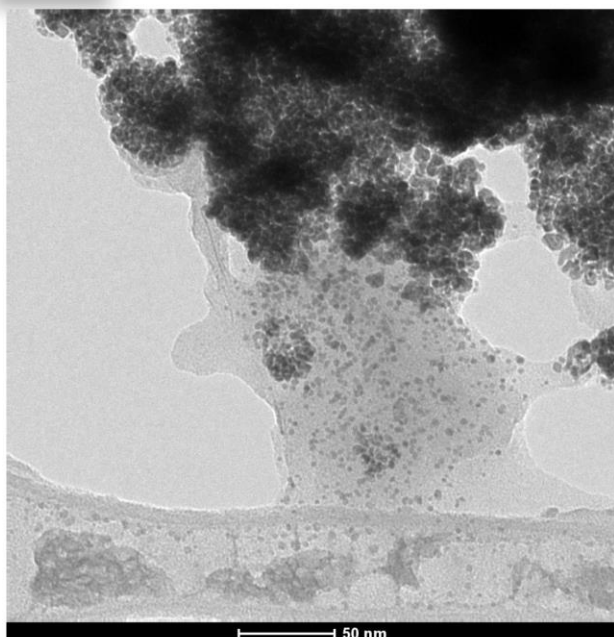
VSM : VI

Annealed 700 °C

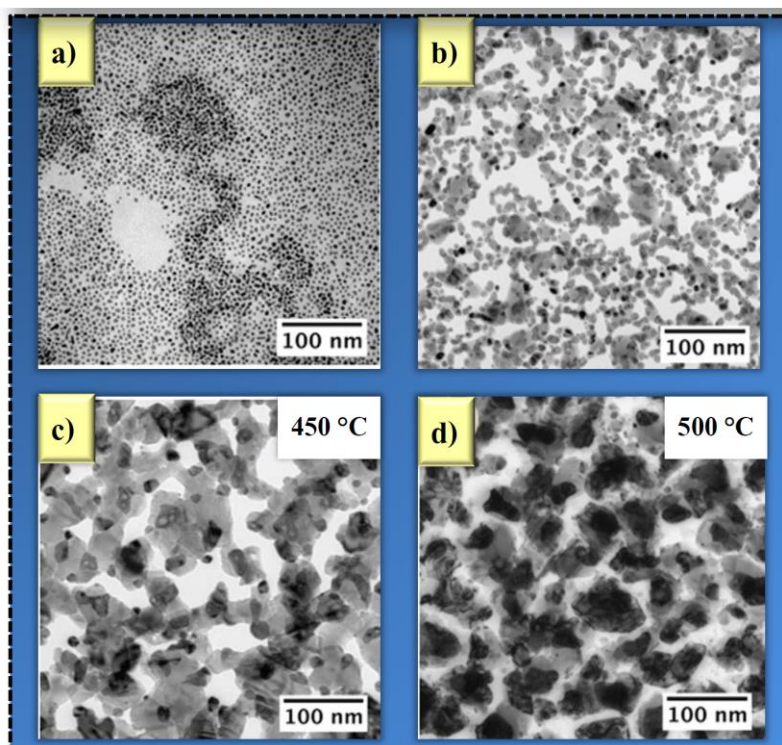


TEM

CoPt NPs As-synthesized



18



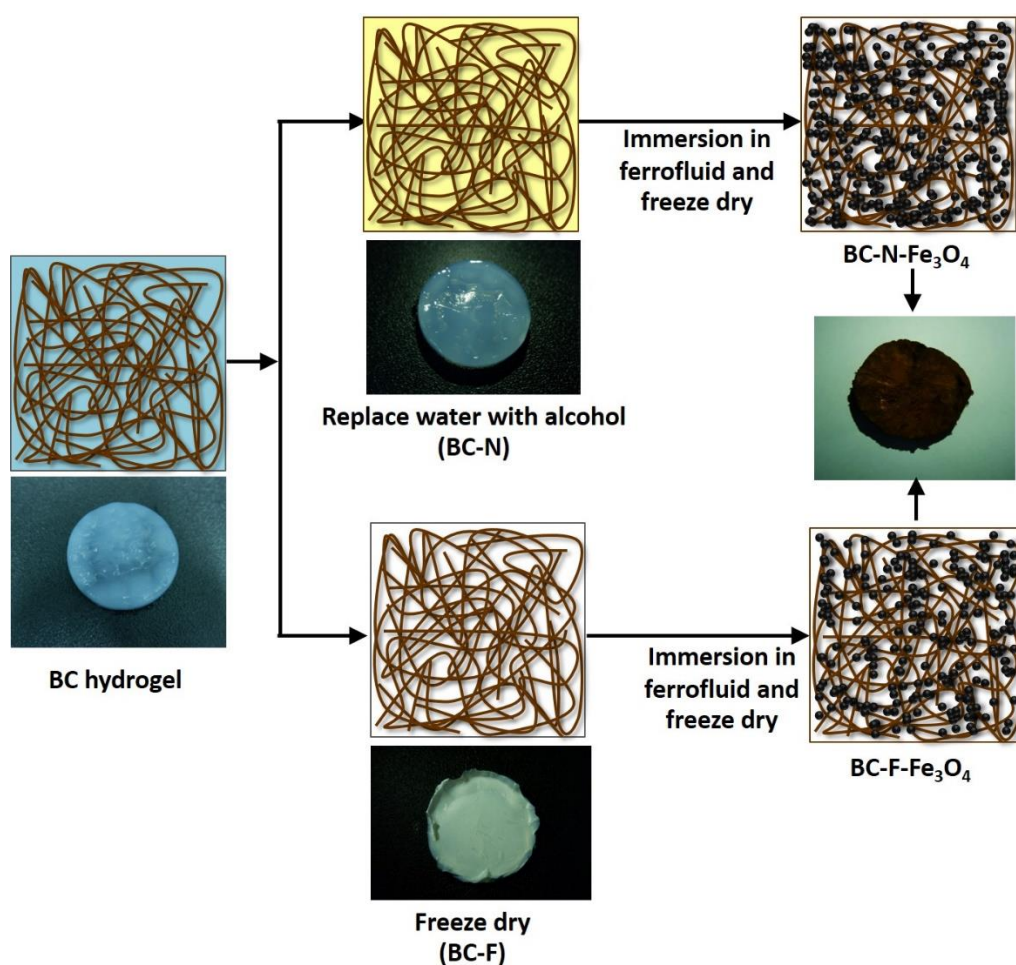
TEM images of CoPt NCs after annealing treatment at 350 °C (a), 400 °C (b), 450 °C (c), 500 °C (d)

20

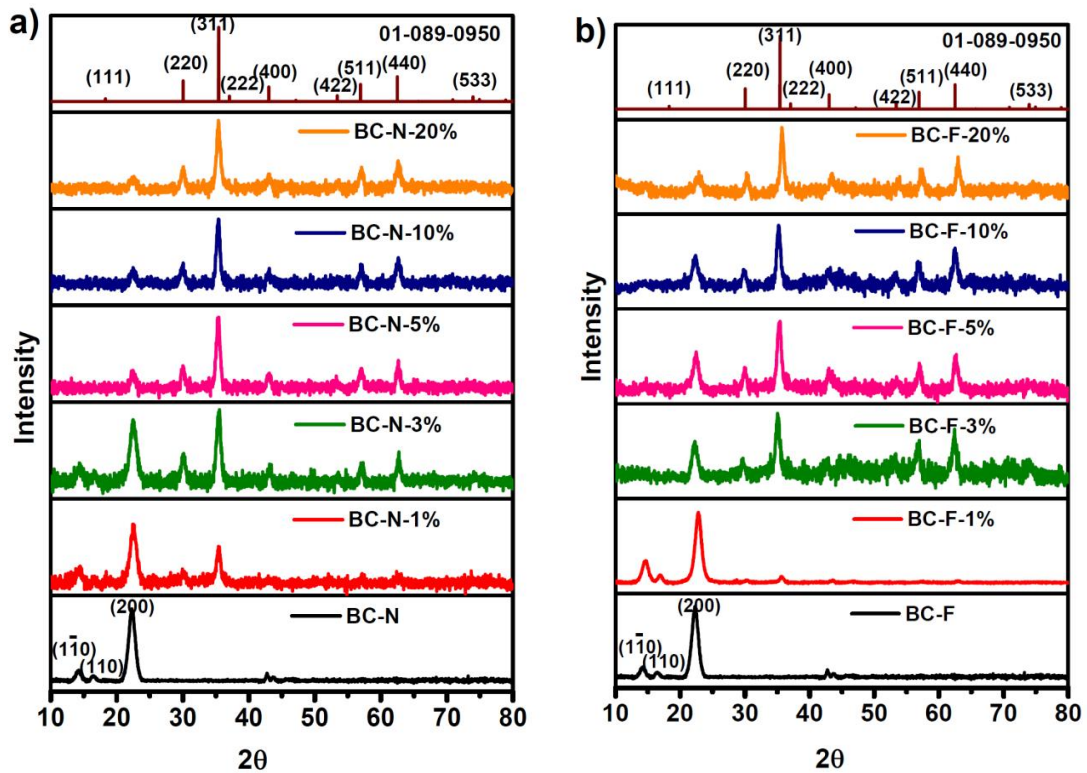
6

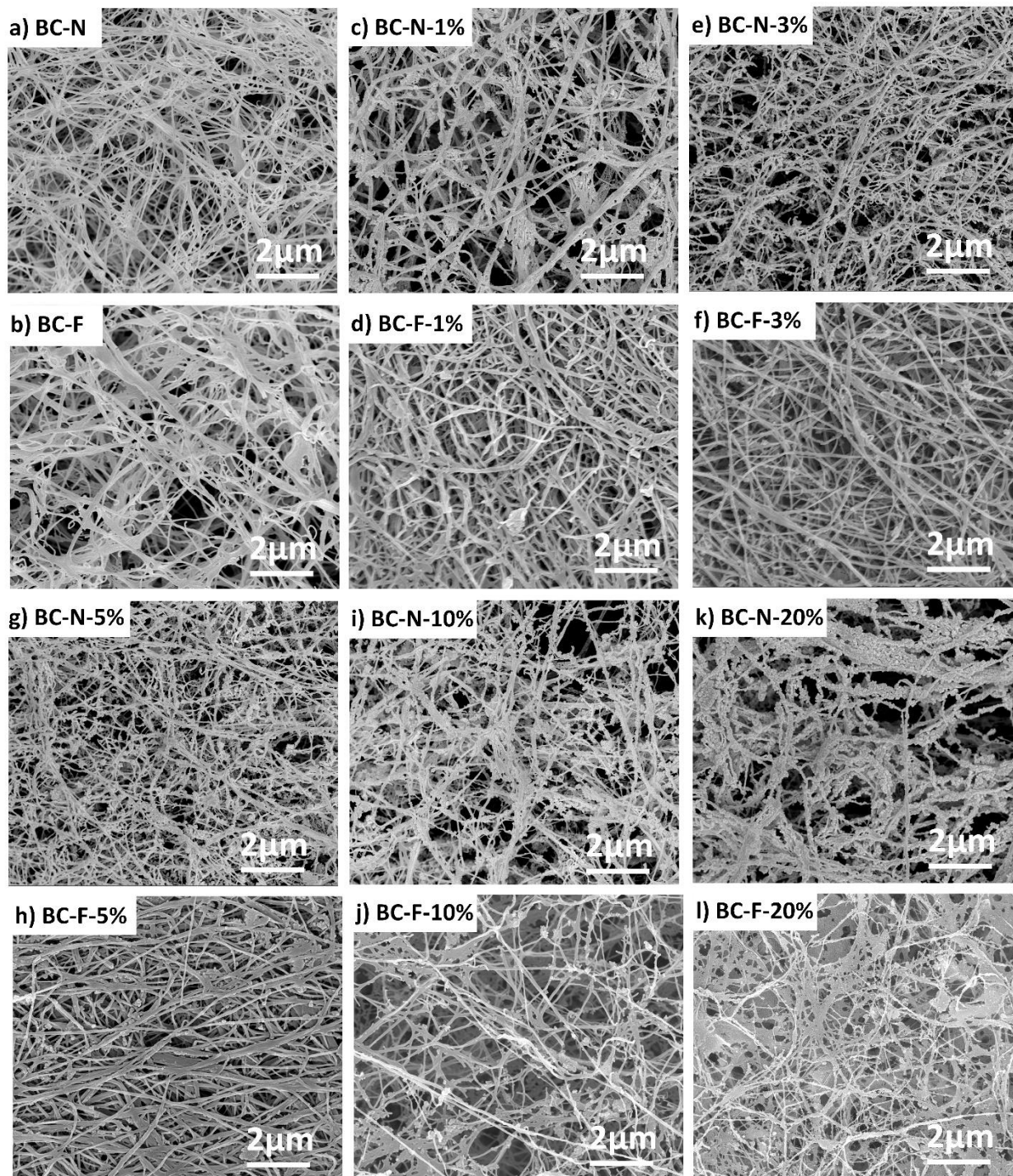
4.3. การศึกษาแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสที่มีความยืดหยุ่นและมีสมบัติแม่เหล็ก

- ในงานวิจัยส่วนนี้ได้นำเสนอวิธีใหม่ในการสังเคราะห์แผ่นเมมเบรน bacterial cellulose (BC) ซึ่งมีสมบัติแม่เหล็ก ด้วยการจุ่มแผ่น BC ลงในสารละลาย ferrofluid ซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาคแม่เหล็กนาโนกระจายตัวอยู่ในสารละลาย เรียกวิธีนี้ว่าวิธี simple diffusion วิธีการนี้ง่ายกว่าวิธีที่ผ่านๆมาและไม่ทำลายโครงสร้างของแผ่น BC นอกจากนี้ยังทดสอบผลของกระบวนการ freeze-dried ต่อวิธีการสังเคราะห์และแผ่นเมมเบรน BC ที่ได้ ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์ทั้งหมดในงานวิจัยนี้สรุปได้ดังรูปข้างล่าง

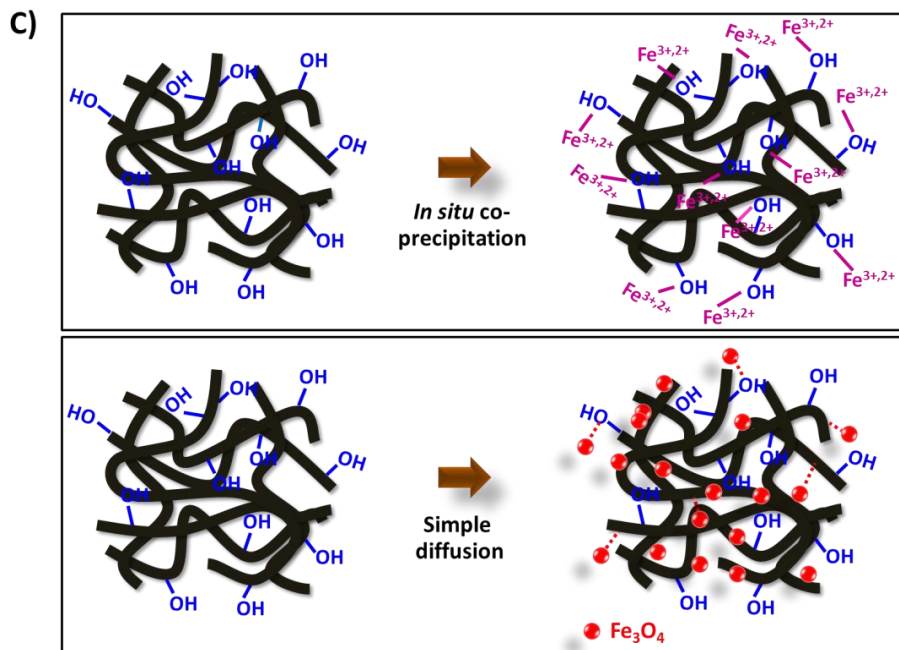


- การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่า ได้เฟสที่เป็นผลึกของ BC และของอนุภาคแม่เหล็กนาโน Fe_3O_4 ซึ่งความสูงของ peak XRD ขึ้นกับปริมาณของ ferrofluid ที่ใส่เข้าไป ส่วนเทคนิค SEM ให้ข้อมูลขนาดของอนุภาคแม่และการกระจายตัวของอนุภาค ซึ่งพบว่าอนุภาคมีขนาดประมาณ 80 – 100 nm และมีการกระจายตัวที่ดี ต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่จะพบการกระจุกตัวของอนุภาค

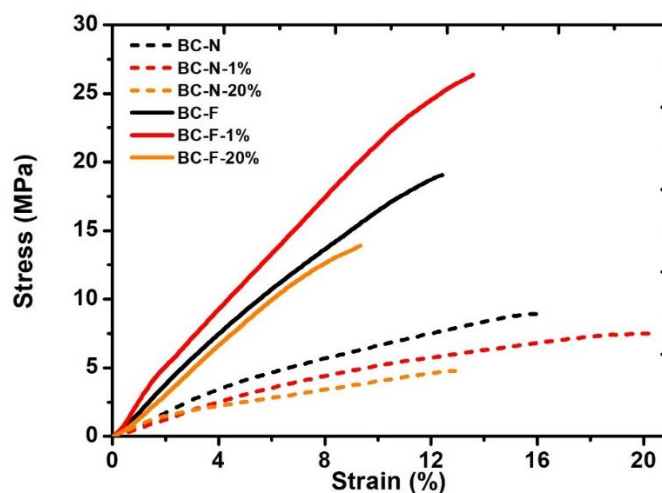




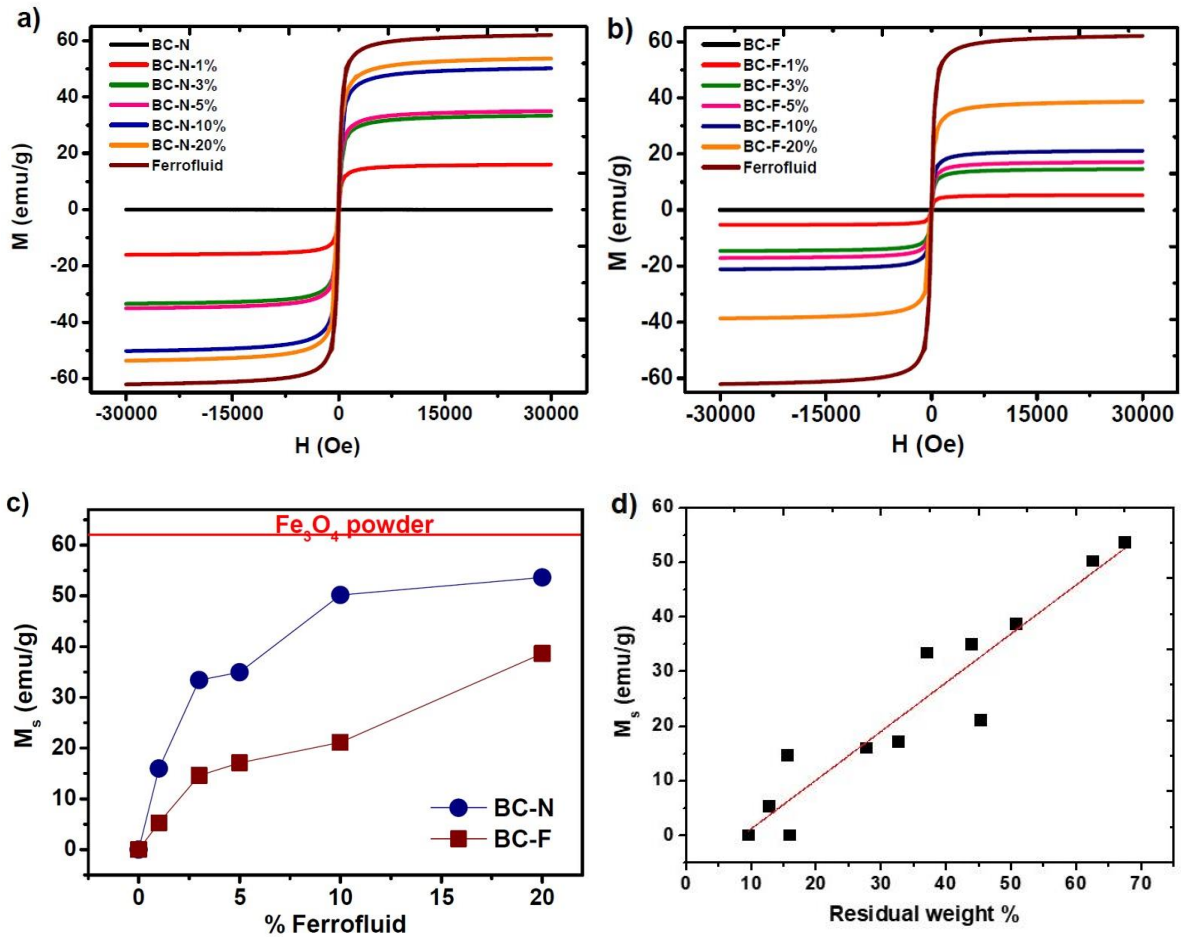
- สาเหตุที่อนุภาคแม่เหล็กนาโนกระจายตัวได้ดีกว่าเทคนิคอื่นๆ คาดว่ามาจากสาเหตุดังนี้ ในวิธีอื่นที่นิยมใช้คือ In situ co-precipitation จะเริ่มต้นจากไอออนของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ซึ่งมีประจุบวก จึงมักจะกระจุกตัวกันที่หมู่ $-\text{OH}$ ของ BC แต่วิธี simple diffusion เริ่มต้นด้วยอนุภาคของ Fe_3O_4 ซึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้า จึงทำให้อนุภาคสามารถเกาะได้ทุกบริเวณของ BC จึงมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ



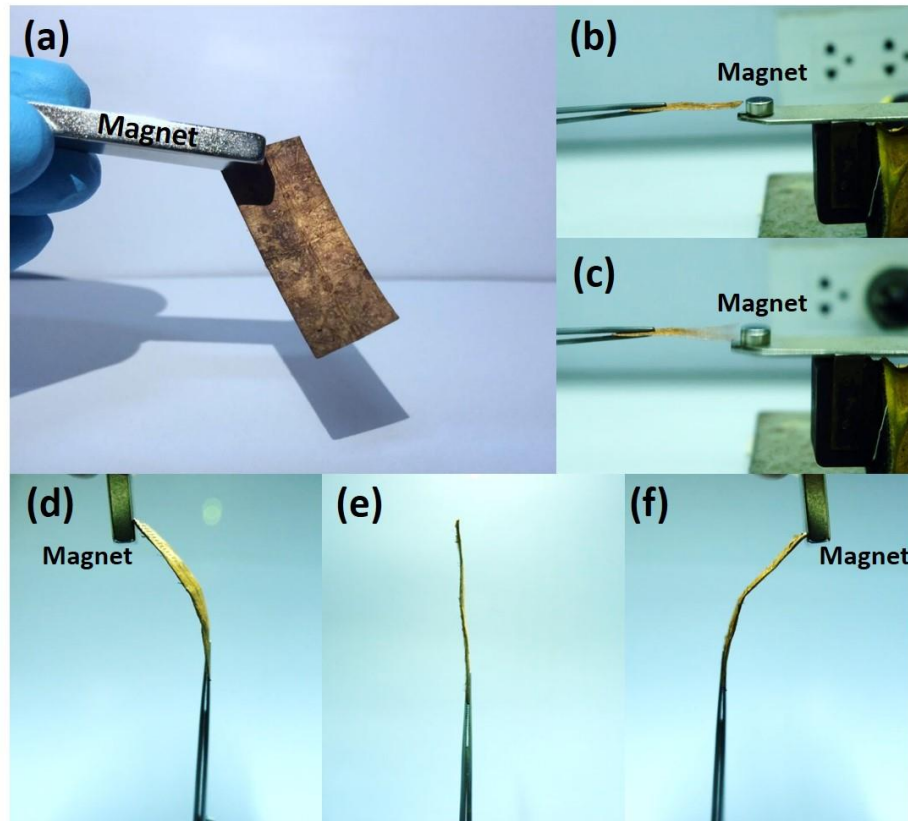
- ผลการทดสอบความแข็งแรงด้วยเทคนิค Tensile test พบว่าความแข็งแรงสามารถเพิ่มขึ้นได้หากใส่อนุภาคแม่เหล็กนาโนในปริมาณที่ไม่มากเกินไป



- ผลการทดสอบสมบัติทางแม่เหล็กพบว่าได้สมบัติแม่เหล็กแบบ superparamagnetic มีค่าแม่เหล็กอิ่มตัว (Saturation magnetization, M_s) เพิ่มขึ้นตามปริมาณ ferrofluid ที่ใส่เข้าไป และยังสัมพันธ์กับปริมาณมวลที่หลงเหลือจากการทดสอบด้วยเทคนิค TG-DTA นอกจากนี้ยังพบว่า sample ที่ผ่านการ Freeze-dried (FD) จะมีค่าแม่เหล็กต่ำกว่าที่ไม่ได้ผ่านการ Freeze-dried

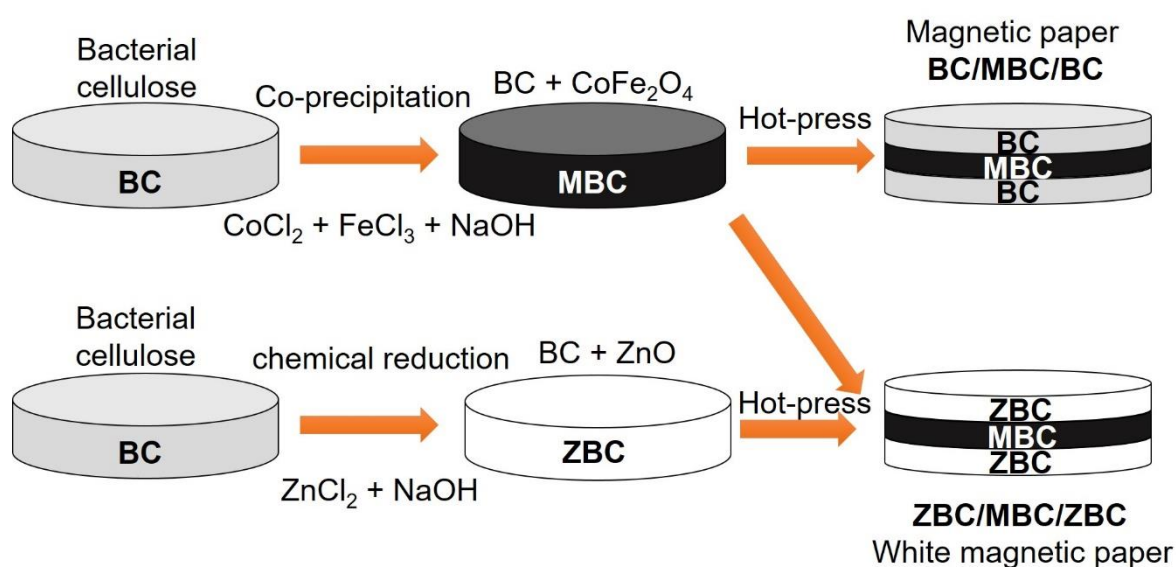


- เมื่อนำแผ่นเมมเบรน BC แม่เหล็กไปทดสอบการตอบสนองกับแม่เหล็กจากภายนอก พบว่าสามารถดูดจับกับแท่งแม่เหล็กถาวรได้ และตอบสนองกับแม่เหล็กภายนอกได้ดีมากทั้งกับสนามแม่เหล็กแบบทางเดียวหรือเปลี่ยนทิศทางตามความถี่

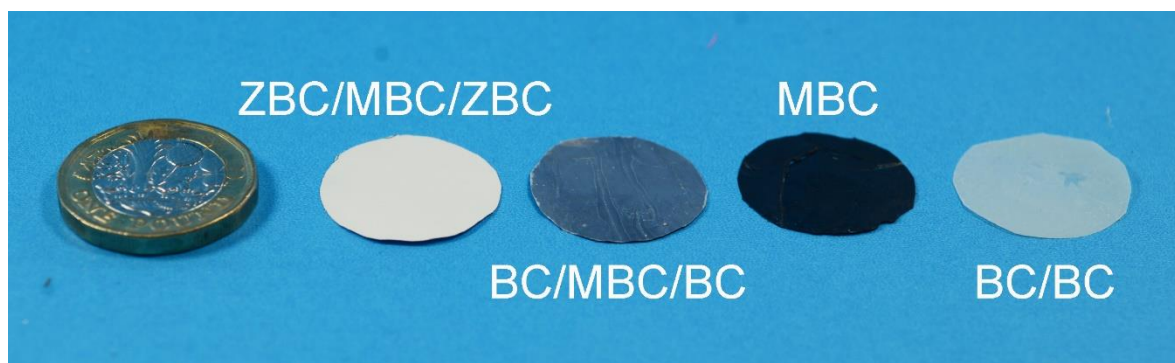


4.4. การสังเคราะห์กระดาษแม่เหล็กสีขาวจากแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิต (White magnetic paper based on bacterial cellulose nanocomposite)

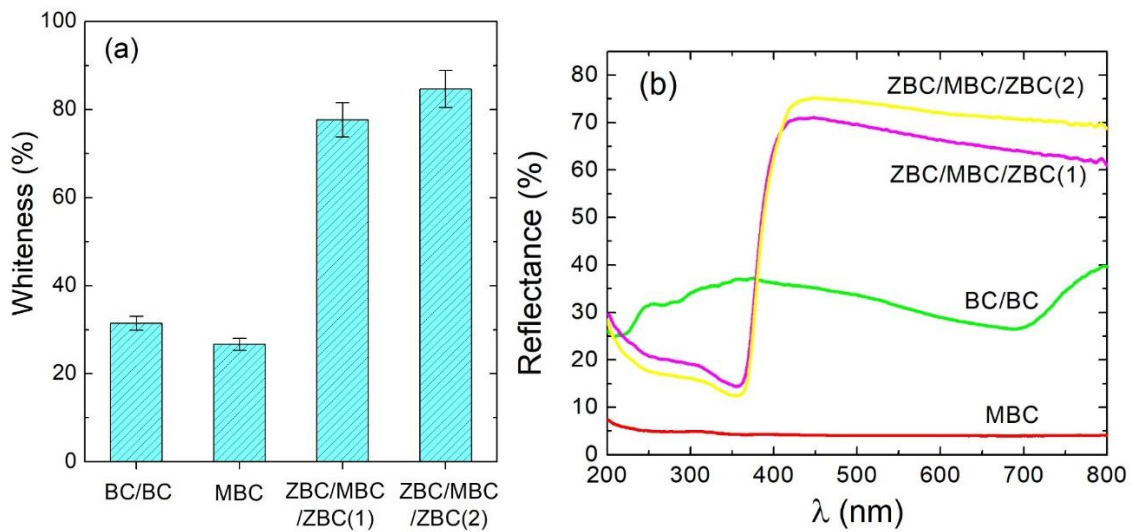
- ได้ทำการประดิษฐ์กระดาษแม่เหล็กสีขาวของการคอมโพสิตของแผ่นเมมเบรน BC ในส่วนของกระดาษแม่เหล็กได้สังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กนาโนของโคบอลต์เฟอไรต์ในโครงสร้างของ BC (MBC) ส่วนกระดาษสีขาวได้จากการสังเคราะห์อนุภาคนาโน ZnO ในโครงสร้าง BC (ZBC) จากนั้นนำแผ่นทั้งสองชนิดมาประกบกันในลักษณะแซนวิช ZBC/MBC/ZBC ก่อนนำไปอบด้วยความร้อน
- ขั้นตอนการสังเคราะห์กระดาษแม่เหล็กสีขาวจาก BC สามารถสรุปได้ดังรูปข้างล่าง



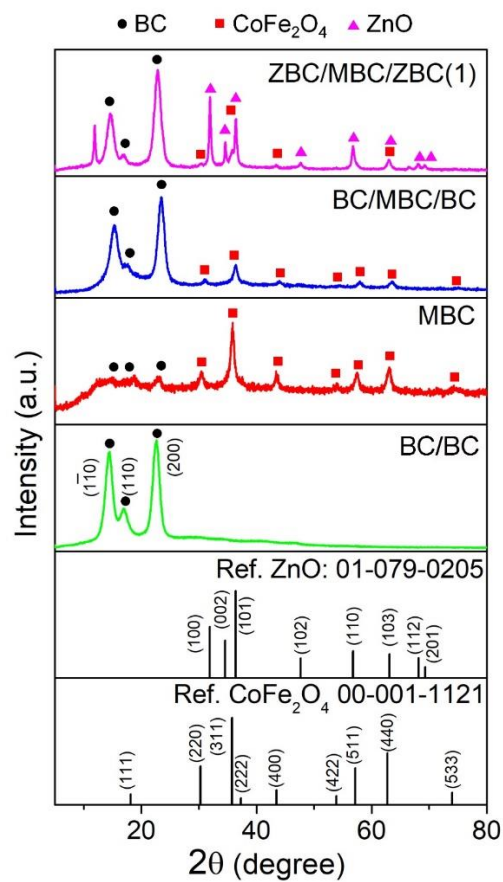
- ชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้สังเกตได้ดังรูป



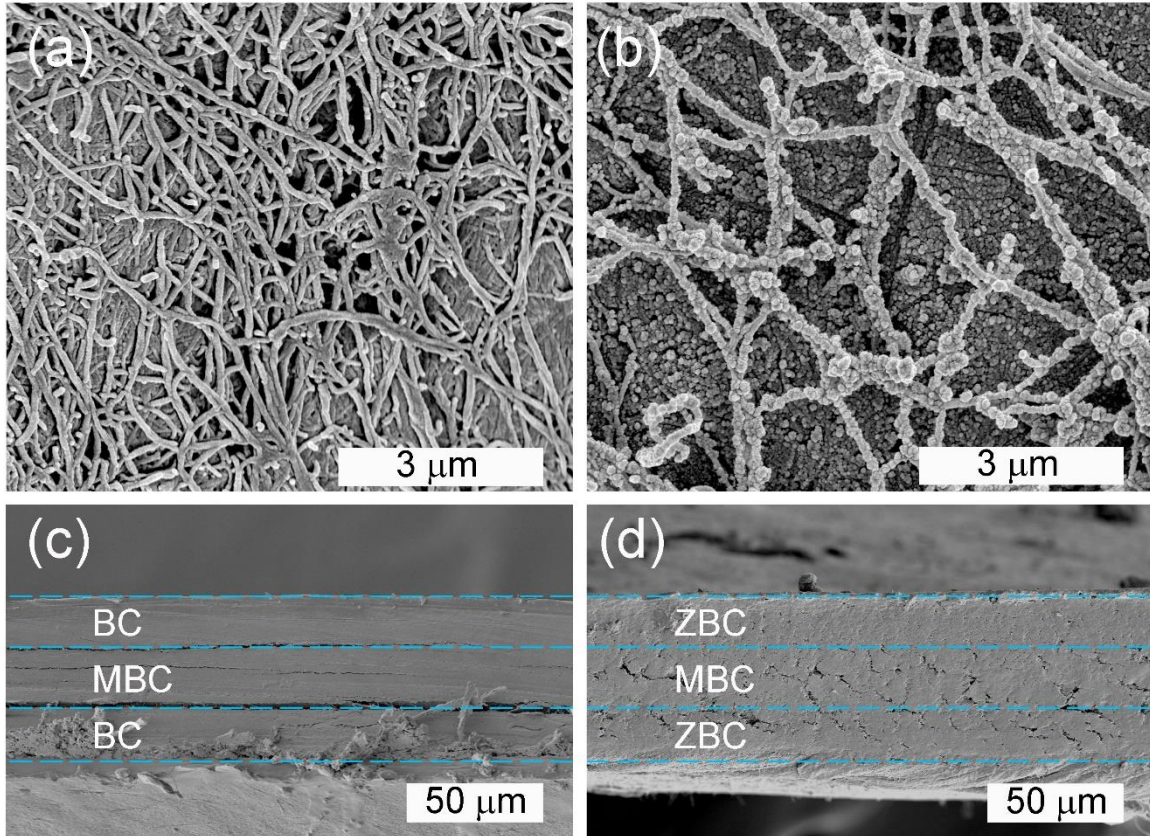
- ผลการวัดความขาวได้ค่า >80% และมีค่าการสะท้อนแสงในช่วงตามองเห็นได้กว่า 70%



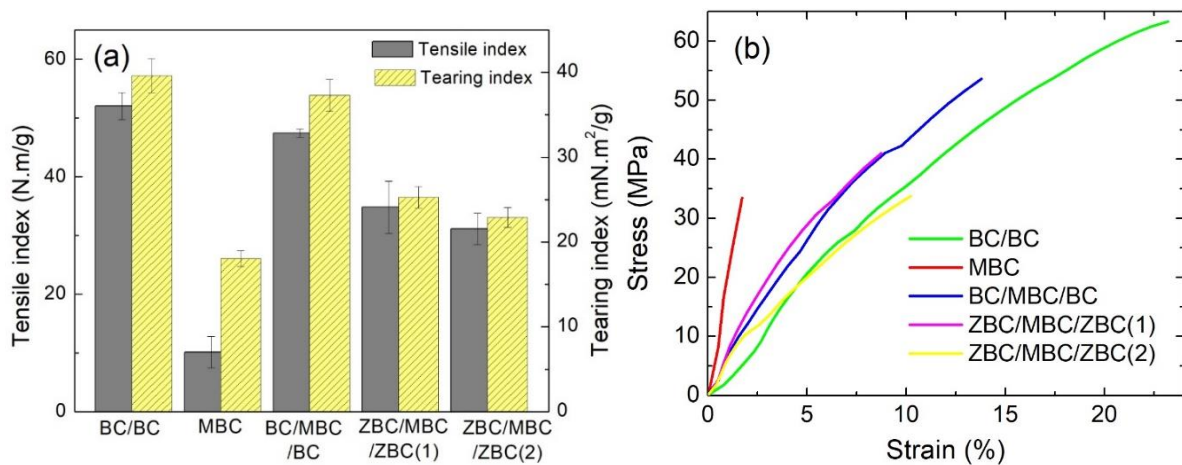
- ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD พบการผสมของเฟส BC, CoFe_2O_4 และ ZnO



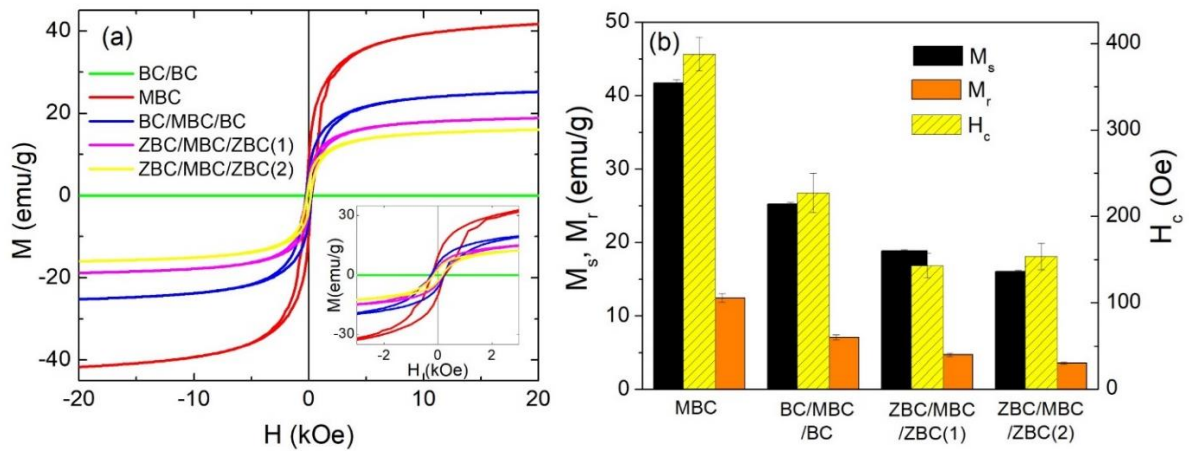
- ภาพถ่าย SEM พบเส้นใยนาโนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 100 nm (a) ส่วนภาพ (b) แสดงอนุภาคนาโนของ CoFe_2O_4 ที่เคลือบอยู่บนเส้นใย BC ภาพ (c) และ (d) แสดงภาคตัดขวางของกระดาษแม่เหล็ก BC/MBC/BC และ ZBC/MBC/ZBC ตามลำดับ



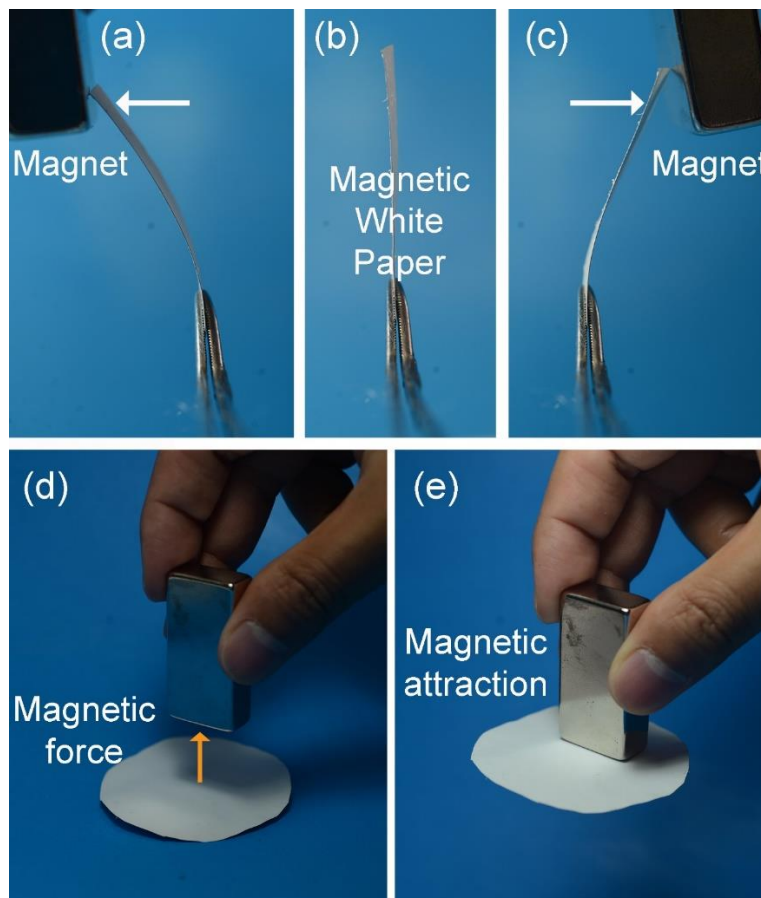
- ผลการวัดค่าความแข็งแรง Tensile index และ ความต้านแรงฉีก Tearing index พบว่า ตัวอย่าง BC/BC มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด ตัวอย่าง MBC มีค่าแย่ที่สุด หากทำเป็น composite BC/MBC/BC จะได้ค่าเพิ่มขึ้น แต่ลดลงอีกครั้งเมื่อเติม ZnO



- ผลการวัดสมบัติแม่เหล็กด้วยเทคนิค VSM พบว่าค่าแม่เหล็กมีค่าสูงสุดสำหรับตัวอย่าง MBC และมีค่าลดลงในวัสดุคอมโพสิต BC/MBC/BC และ ZBC/MBC/ZBC ตามลำดับ

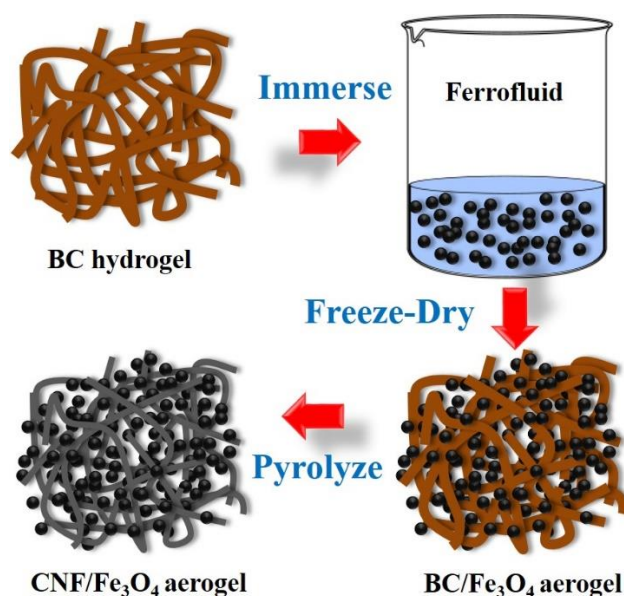


- ผลการทดสอบการตอบสนองกับแม่เหล็กภายนอก พบว่ากระดาษแม่เหล็กสีขาวที่สังเคราะห์ได้ในงานนี้สามารถดึงดูดได้ด้วยแท่งแม่เหล็กถาวร

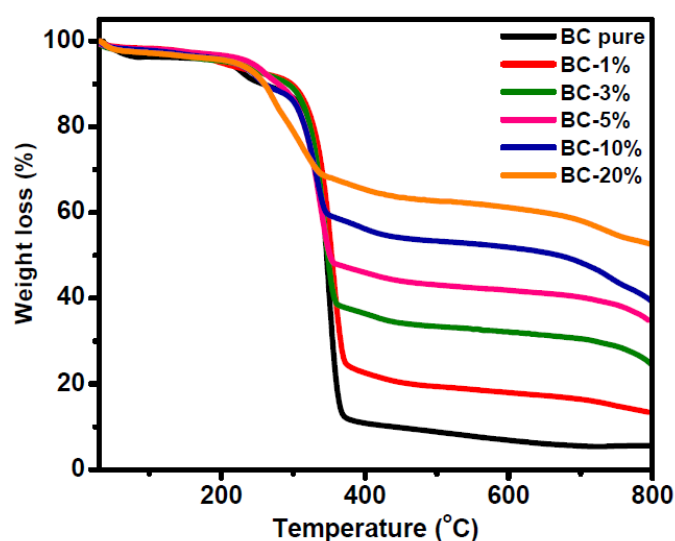


4.5. เส้นใยคาร์บอนนาโนจากแบคทีเรียเซลลูโลสผสมกับอนุภาคแม่เหล็กนาโน

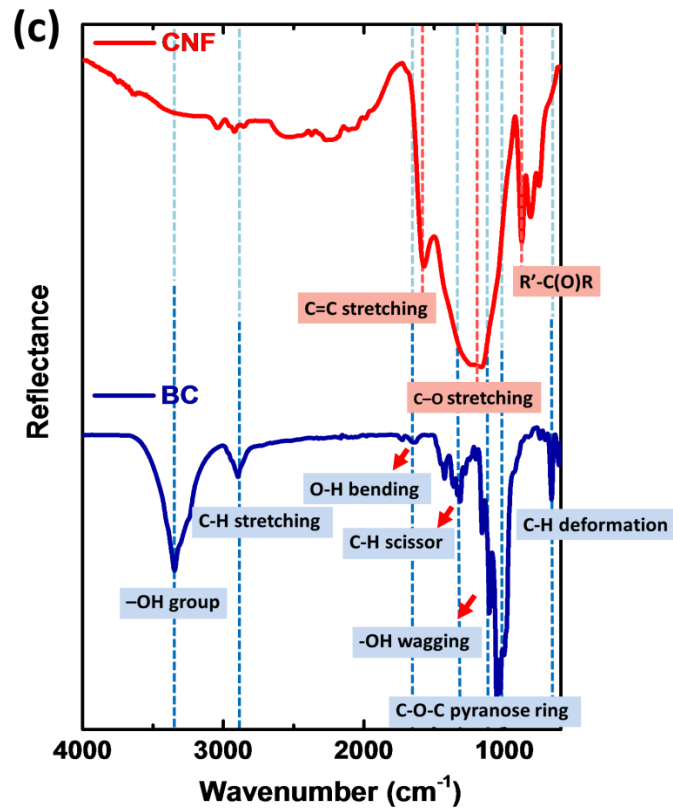
- การเตรียมวัสดุคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลลูโลสกับอนุภาคแม่เหล็กนาโน Fe_3O_4 มีขั้นตอนดังรูป กล่าวคือนำแบคทีเรียเซลลูโลสในสถานะไฮโดรเจลจุ่มลงในสารละลาย ferrofluid ที่ประกอบไปด้วยอนุภาค Fe_3O_4 ในน้ำ แช่ทิ้งไว้ที่เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสม จะได้สารประกอบคอมโพสิตตามที่ต้องการ หลังจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิส เส้นใยเซลลูโลสจะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นเส้นใยคาร์บอนนาโน ทำให้ได้คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอนกับอนุภาคแม่เหล็ก



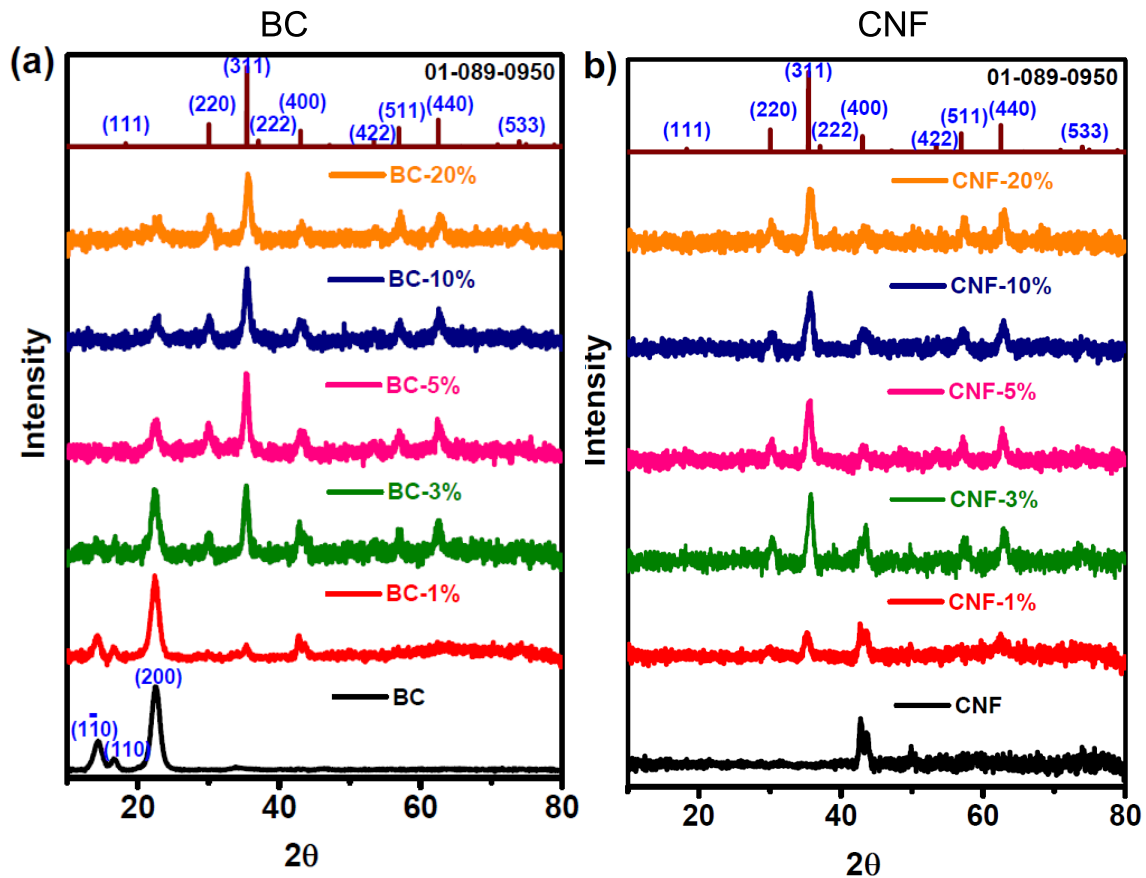
- การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนตามปริมาณอนุภาคแม่เหล็กนาโนที่ใส่เข้าไปได้ผลดังรูป ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อให้อุณหภูมิสูงกว่า $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของมวลที่ชัดเจน แสดงว่าเส้นใยเซลลูโลสเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสกลายเป็นเส้นใยคาร์บอนนาโน



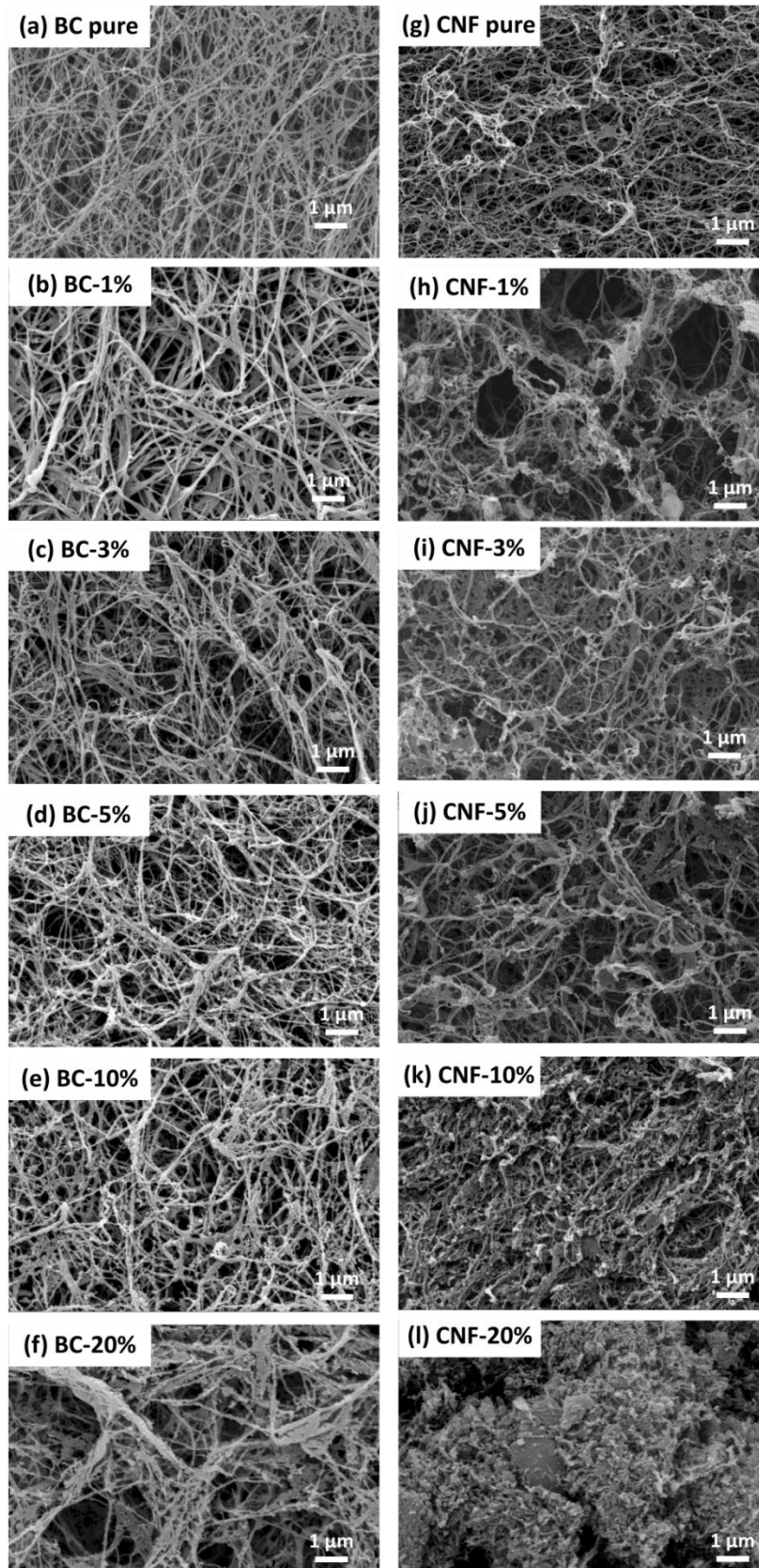
- ผลการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR พบว่ามีความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลส (BC) กับเส้นใยคาร์บอนนาโน (CNF) ดังรูปข้างล่าง ซึ่งจะพบว่าหมู่ฟังก์ชันต่างๆที่พบใน BC อาทิ เช่น -OH group, C-H stretching, C-O-C หายไป ใน CNF แสดงว่าเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเส้นใยคาร์บอนนาโน



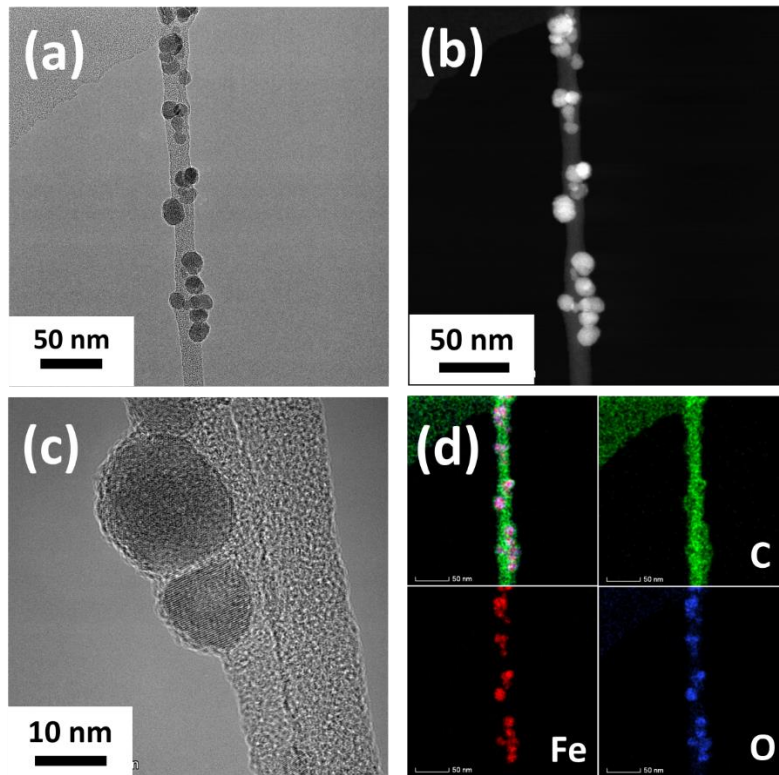
- ผลการทดสอบด้วย XRD พบว่า เมื่อมีการไฟโรไลซิส เส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเส้นใยคาร์บอนนาโน โดยมีกราฟ XRD ที่เปลี่ยนไปอย่างชัดเจน ส่วนปริมาณการเติมอนุภาคแม่เหล็กนาโน ส่งผลให้กราฟ XRD ของเฟส Fe_3O_4 ชัดเจนขึ้น



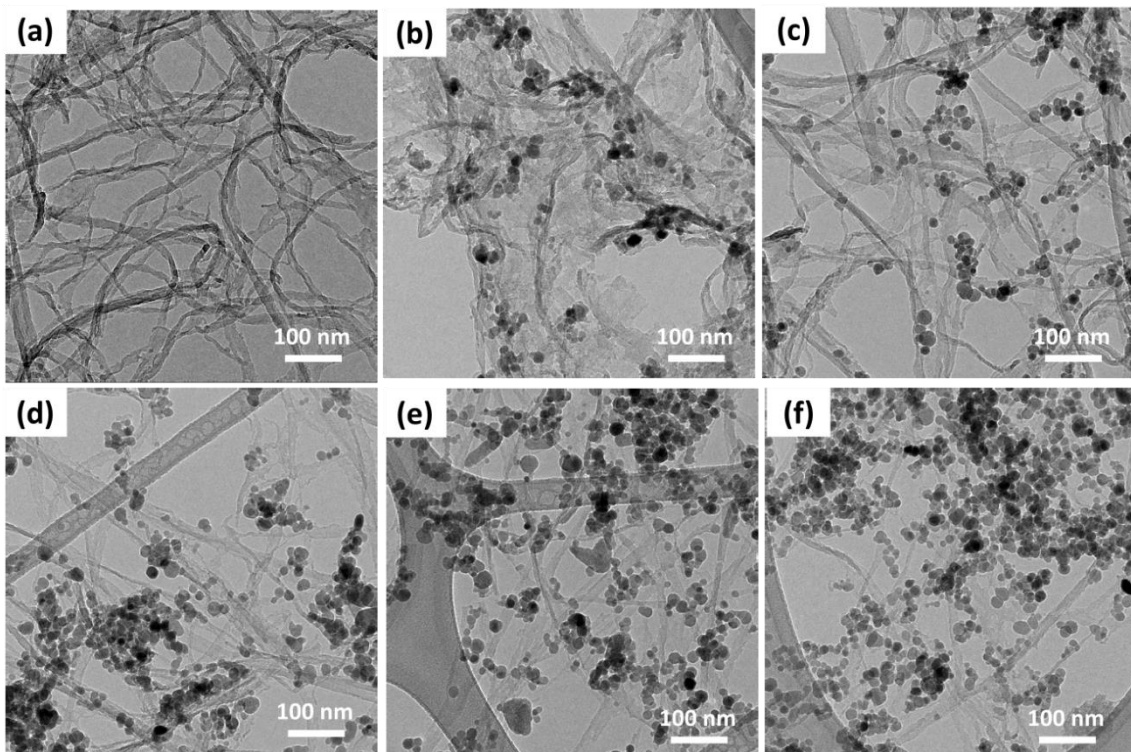
- เมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ถึงแม้ว่า BC จะเปลี่ยนเป็น CNF แต่โครงสร้างเส้นใยนาโน 3 มิติก็ยังอยู่เหมือนเดิม โดยสังเกตได้จากรูป SEM ข้างล่าง อนุภาคแม่เหล็กมีการกระจายตัวที่ดี ยกเว้นที่เติม Fe_3O_4 ในปริมาณมาก (20%) จะได้วัสดุคอมโพสิตที่มีอนุภาคแม่เหล็กกระจุกตัวกัน



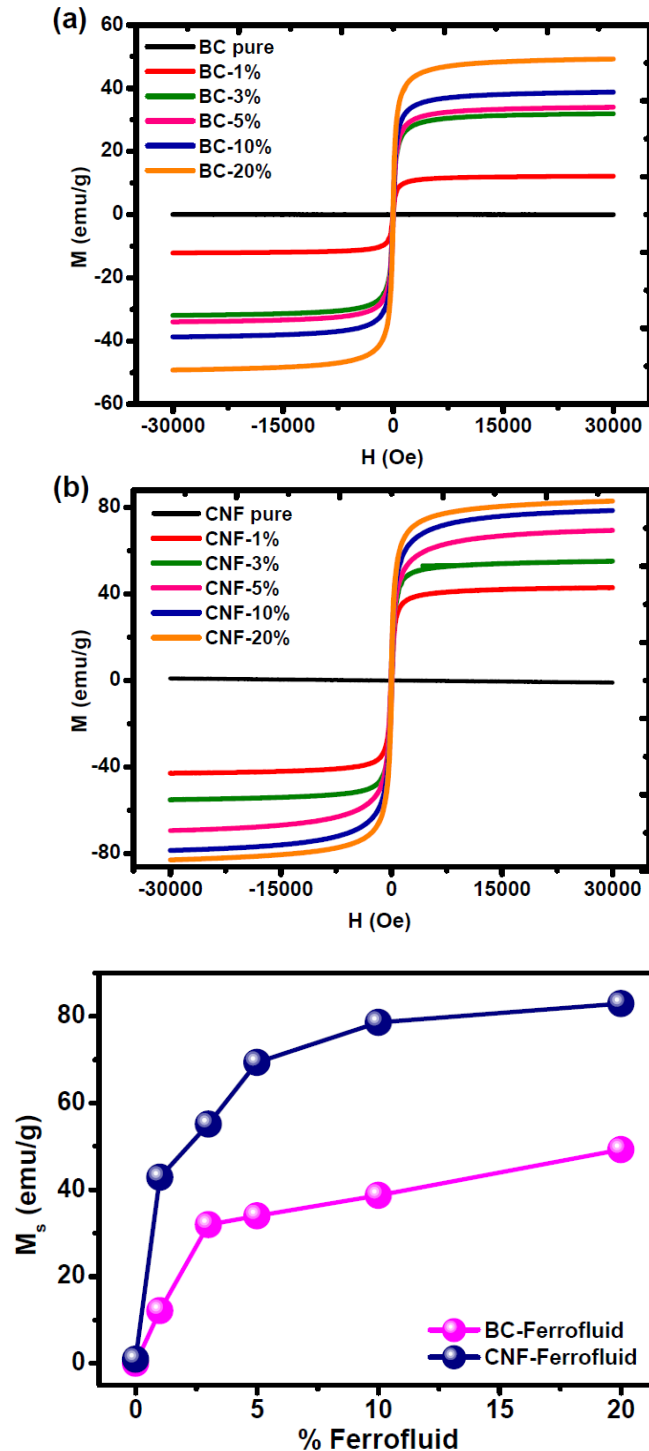
- เมื่อนำไปทดสอบด้วยเทคนิค TEM พบว่าเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสมีอนุภาคแม่เหล็กกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุโดยเทคนิค EDX สามารถยืนยันได้ว่าอนุภาคดังกล่าวเป็นเฟส Fe_3O_4



- ภาพถ่าย SEM ของวัสดุคอมโพสิตเส้นใยคาร์บอนนาโน/อนุภาค Fe_3O_4

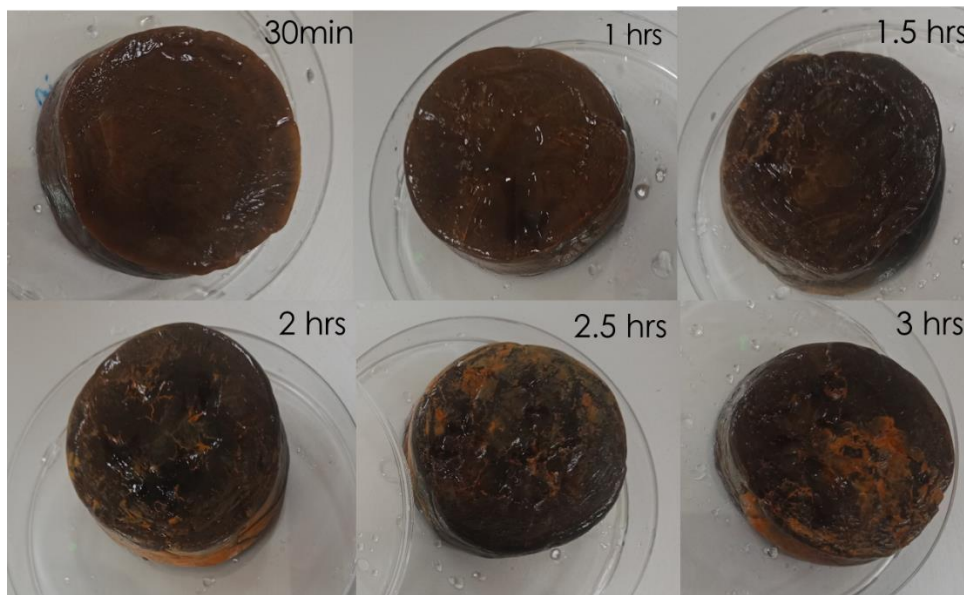


- ผลการวัดสมบัติแม่เหล็กของ BC/ Fe_3O_4 และ CNF/ Fe_3O_4 จะเห็นว่าค่าแม่เหล็กอิ่มตัว (M_s) ตัวของวัสดุทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นตามปริมาณแม่เหล็กที่เติมเข้าไป แต่ CNF/ Fe_3O_4 มีค่า M_s สูงกว่า BC/ Fe_3O_4 มาก

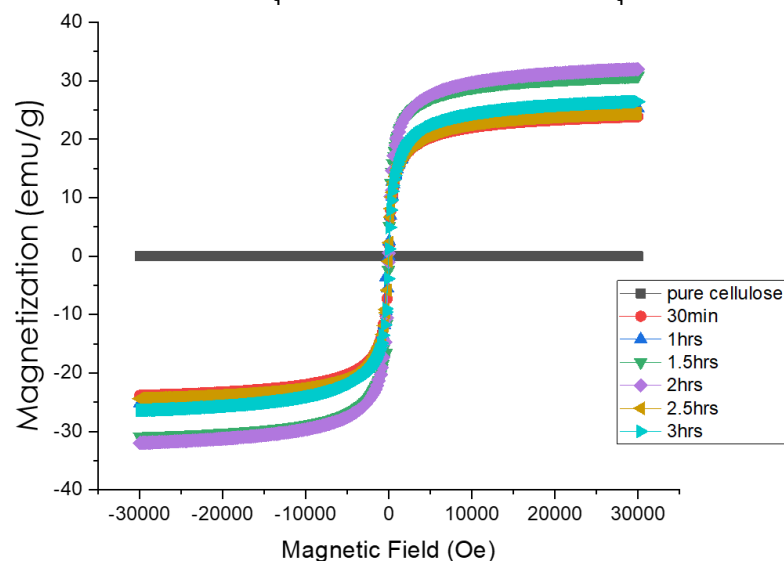


4.6. เส้นใยคาร์บอนนาโนแม่เหล็กจากแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตเพื่อการดูดซับน้ำมัน

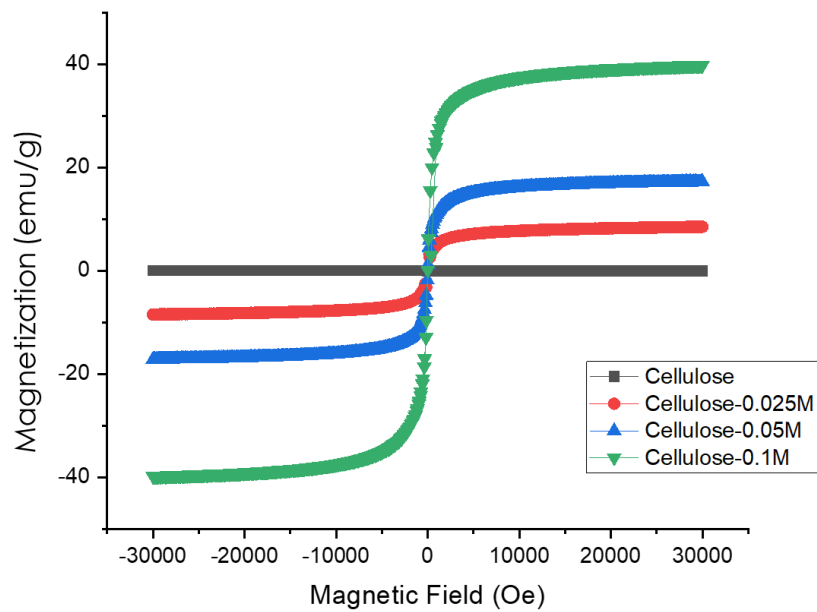
- เริ่มต้นด้วยการเตรียมวัสดุคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลลูโลสกับอนุภาคแม่เหล็กนาโน Fe_3O_4 นำแบคทีเรียเซลลูโลสในสถานะไฮโดรเจลจุ่มลงในสารละลายของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ศึกษาอิทธิพลของเวลาในการแช่สารละลายต่อลักษณะทางกายภาพที่เกิดขึ้นและสมบัติแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ซึ่งพบว่าการแช่ในสารละลายนานเกินไปกลับไม่ได้ทำให้ผลดีขึ้น เพราะเกิดการตกตะกอนของอนุภาค Fe_3O_4 หรืออนุภาคเหล็กออกไซด์อื่นๆ ทำให้ชิ้นงานที่ได้ไม่สม่ำเสมอ แต่การแช่เพียง 30 นาที ถึง 1 ชั่วโมง จะได้ชิ้นงานที่สม่ำเสมอมากกว่า



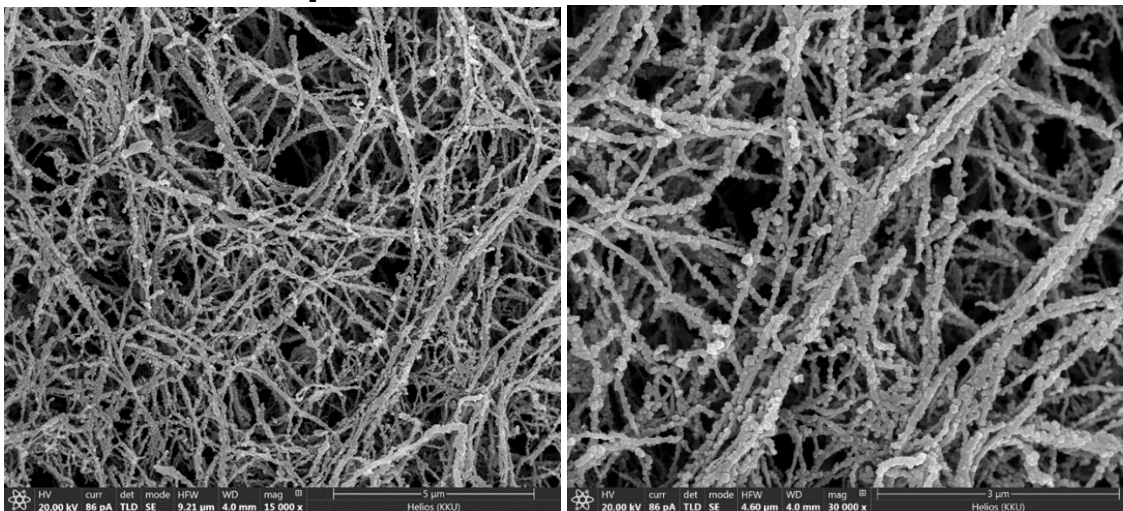
- ผลการทดสอบทางแม่เหล็กพบว่าวัสดุคอมโพสิตระหว่าง BC กับอนุภาค Fe_3O_4 เป็



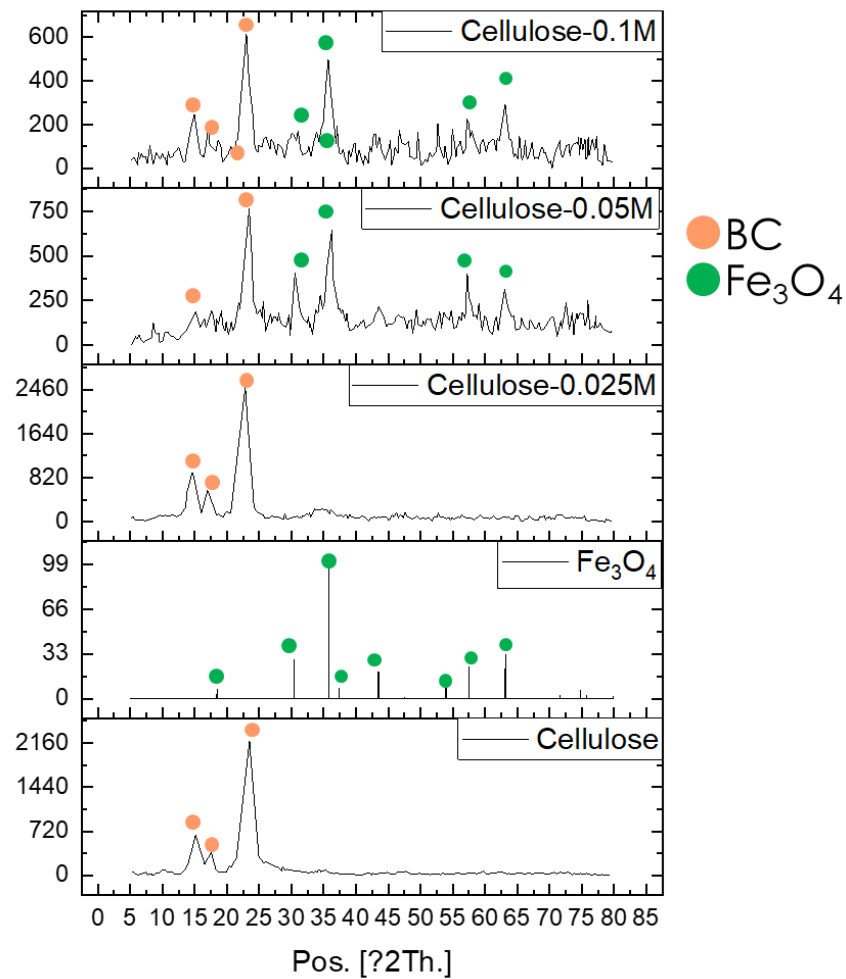
- นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่อการเตรียมวัสดุคอมโพสิต BC/ Fe_3O_4 พบว่าความเข้มข้นที่สูงขึ้นจะส่งผลโดยตรงกับค่าแมกนีไทเซชัน



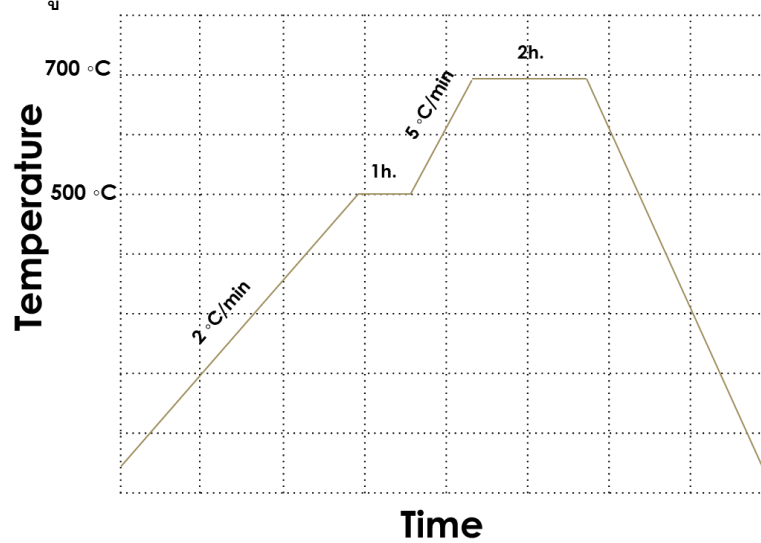
- ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยายต่างกัน พบว่าได้เส้นใยนาโนที่มีโครงข่ายเป็น 3 มิติ เส้นใยขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร เมื่อสังเกตดูในภาพถ่ายกำลังขยายสูง พบว่ามีอนุภาคนาโนแม่เหล็กของ Fe_3O_4 เคลือบอยู่อย่างสม่ำเสมอ



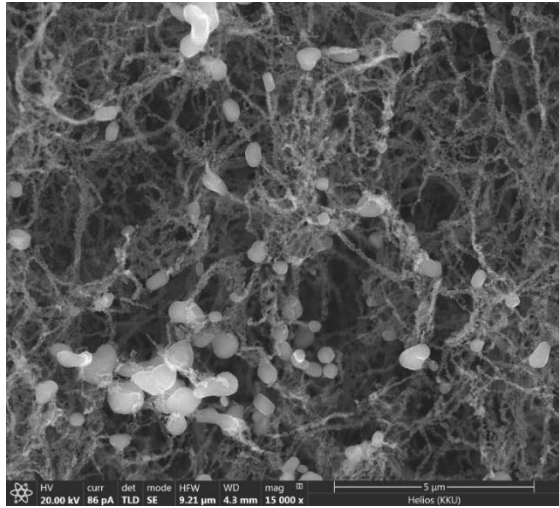
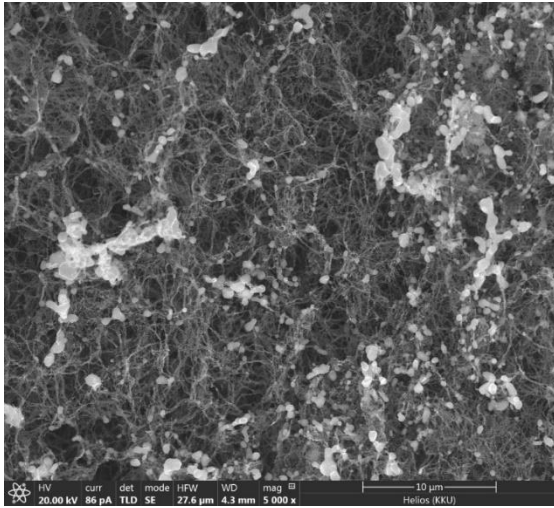
- ผลการทดสอบด้วยเทคนิค XRD ยืนยันการเกิดเฟสผสมระหว่างเฟสของ BC และ Fe_3O_4



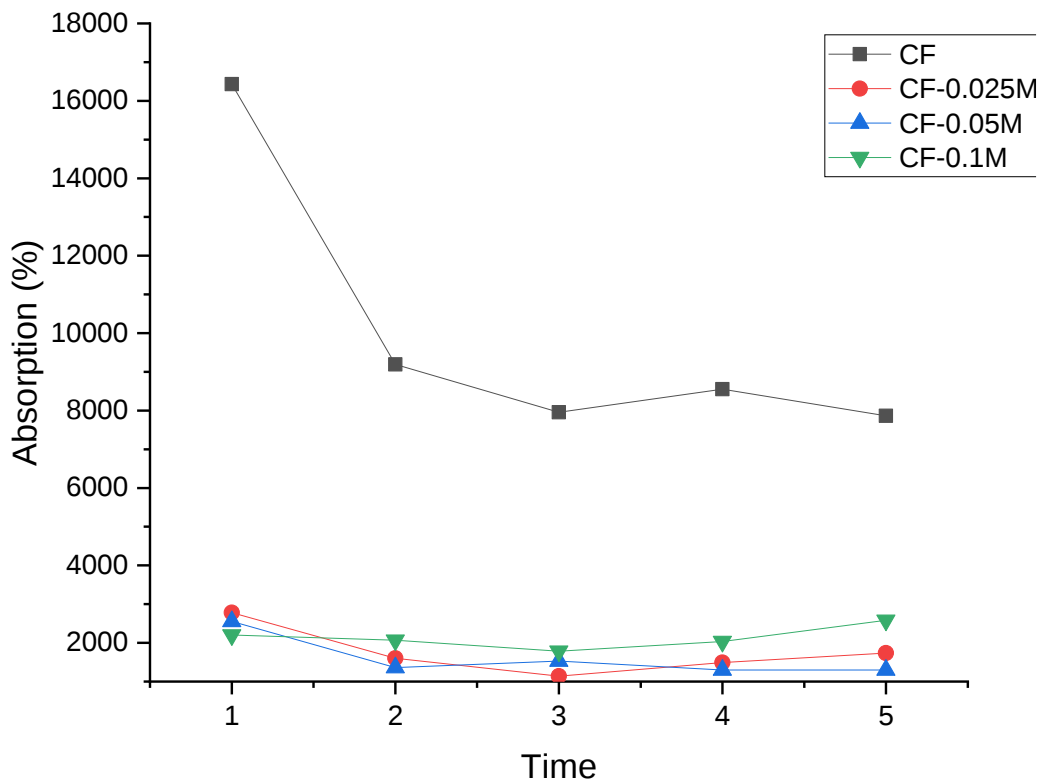
- ทำการเผาในบรรยากาศอาร์กอนเพื่อเปลี่ยน BC ให้กลายเป็นเส้นใยคาร์บอน ใช้อัตราการให้ความร้อนตามรูป



- การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM แสดงลักษณะเส้นใยนาโนคาร์บอนที่มีอนุภาค Fe₃O₄ เกาะอยู่บนเส้น ซึ่งจะเห็นว่าอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นผลมาจากการได้รับความร้อน

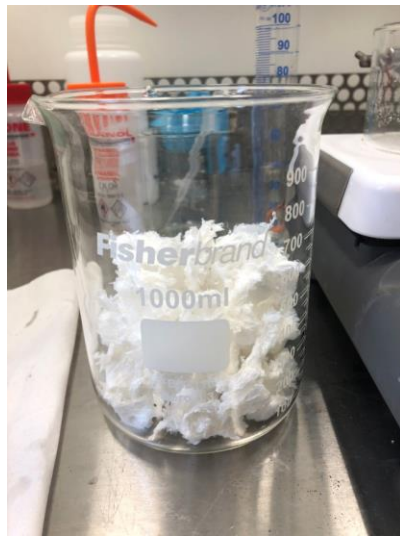


- เมื่อนำไปทดสอบการดูดซับน้ำมัน ได้การดูดซับน้ำมันถึง 16,000% สำหรับเส้นใยคาร์บอนที่ไม่ได้เติมอนุภาคแม่เหล็ก และค่ามากกว่า 2000% สำหรับเส้นใยคาร์บอนแม่เหล็ก นอกจากนี้วัสดุที่ไดยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยยังสามารถดูดซับน้ำมันได้มากกว่า 1,000% เพิ่มกับน้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุ



4.7. การสังเคราะห์แบคทีเรียเซลล์โลสเจล

- เริ่มต้นด้วยการเตรียม cellulose nanocrystal (CNC) โดยการนำ BC ที่ผ่านการ freeze-dried แล้ว มาทำปฏิกิริยา hydrolysis กับกรดซัลฟูริก ให้ความร้อนแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



- ทำการ centrifuge และปรับ pH ให้เป็นกลาง จากนั้น sonicate แล้วจะได้ตัวอย่างที่เป็นเจล CNC



Centrifuge และปรับ pH

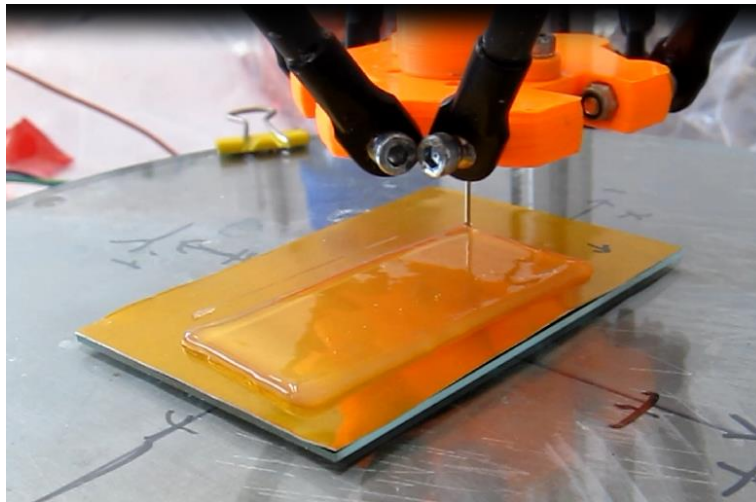


Sonication

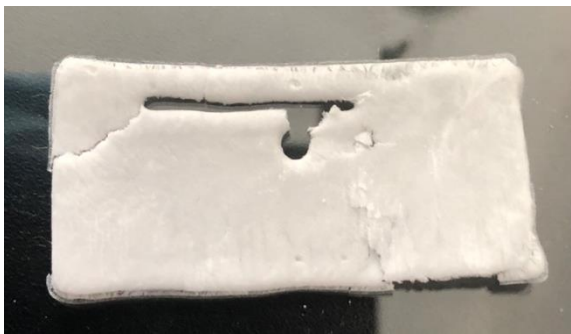


เจล CNC

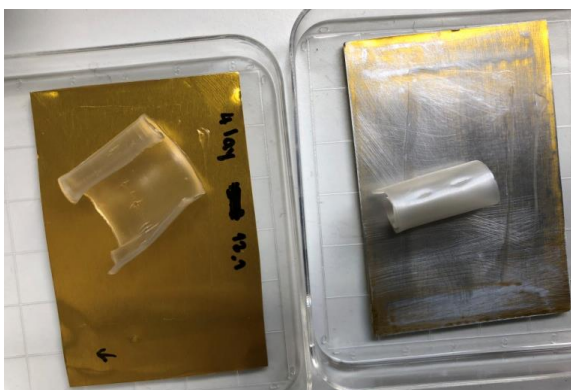
- ปรับพารามิเตอร์การพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อให้ได้ฟิล์มในลักษณะที่ต้องการ



- ทดสอบการทำแห้งของฟิล์ม CNC ด้วยการ freeze-dry หรือการปล่อยให้แห้งเองที่อุณหภูมิห้อง



ฟิล์มที่ผ่านการ Freeze-dry



ฟิล์มที่ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

5. สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรียด้วยกระบวนการเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *Gluconacetobacter xylinum* ได้สำเร็จ ได้แผ่น BC ที่มีลักษณะเหมือนวุ้นขาวใส ซึ่งสามารถนำไปทำแห้งด้วยกระบวนการ freeze dry หรือการอบแห้งได้ แผ่น BC มีความเป็นผลึกสูง ประกอบไปด้วยเส้นใยนาโนขนาดน้อยกว่า 100 นาโนเมตร ถักทอกันเป็นโครงข่าย 3 มิติ

การศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลลูโลสกับอนุภาคแม่เหล็กนาโน Fe_3O_4 โดยจุ่มในสารละลาย ferrofluid ทำให้ได้สารคอมโพสิต BC แม่เหล็กตามที่ต้องการ ซึ่งพบว่าวิธีนี้เป็วิธีที่ง่ายและไม่ทำลายโครงสร้างของแผ่น BC อนุภาคของแม่เหล็กนาโนกระจายตัวในโครงสร้าง BC ได้ดี ทั้งนี้เนื่องมาจากอนุภาคของ Fe_3O_4 มีความเป็นกลางทางไฟฟ้า จึงสามารถเกาะได้ทุกบริเวณพื้นผิวของ BC จึงมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นหากใส่อนุภาคแม่เหล็กนาโนในปริมาณที่ไม่มากเกินไป เมื่อนำแผ่นเมมเบรน BC แม่เหล็กไปทดสอบการตอบสนองกับแม่เหล็กจากภายนอก พบว่าสามารถดูดจับกับแท่งแม่เหล็กถาวรได้ และตอบสนองกับแม่เหล็กภายนอกได้ดีมากทั้งกับสนามแม่เหล็กแบบทางเดียวหรือเปลี่ยนทิศทางตามความถี่ อย่างไรก็ตามแผ่นเมมเบรน BC ที่ได้เปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีดำเนื่องจากสีของอนุภาค Fe_3O_4 จึงมีอีกส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ได้พยายามปรับปรุงสีของเมมเบรนแม่เหล็กให้มีสีขาวเช่นเดิม กล่าวคือ ได้ศึกษาการสังเคราะห์กระดาษแม่เหล็กสีขาวจากแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิต โดยสังเคราะห์อนุภาคนาโน ZnO ในโครงสร้างของ BC เพื่อให้ได้กระดาษสีขาว และนำมาประกบกับกระดาษแม่เหล็ก BC ซึ่งมีสีดำ ผลปรากฏว่าวัดค่าความขาวไปมากกว่า 80% และมีค่าสะท้อนแสงในช่วงตามองเห็นได้กว่า 70% ผลการวัดค่าความแข็งแรง Tensile index และ ความต้านแรงฉีก Tearing index พบว่า ตัวอย่าง BC/BC มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด ตัวอย่าง MBC มีค่าแย่ที่สุด หากทำเป็น composite BC/MBC/BC จะได้ค่าเพิ่มขึ้น แต่ลดลงอีกครั้งเมื่อเติม ZnO ส่วนผลการทดสอบการตอบสนองกับแม่เหล็กภายนอก พบว่ากระดาษแม่เหล็กสีขาวที่สังเคราะห์ได้ในงานนี้สามารถดึงดูดได้ด้วยแท่งแม่เหล็กถาวร

ในส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาเส้นใยคาร์บอนนาโนจากแผ่น BC โดยการนำแผ่นแม่เหล็ก BC ไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิส โดยการเผาในบรรยากาศของอาร์กอน ที่อุณหภูมิในช่วง 600-700 °C เส้นใยเซลลูโลสจะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นเส้นใยคาร์บอนนาโน ทำให้ได้คอมโพสิตของเส้นใยคาร์บอน (CNF) กับอนุภาคแม่เหล็ก ค่าแมกนีไทเซชันอิ่ม (M_s) ตัวของ $\text{CNF/Fe}_3\text{O}_4$ มีค่าสูงกว่า $\text{BC/Fe}_3\text{O}_4$ มาก และได้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติด้วยเทคนิคหลายอย่าง เช่น XRD, SEM, TEM, FTIR, UV-Vis, VSM พบว่า อนุภาคแม่เหล็กมีการกระจายตัวที่ดีในโครงสร้างของเส้นใยนาโนคาร์บอน เมื่อทดสอบสมบัติการดูดซับน้ำมัน พบว่าเส้นใยคาร์บอนนาโนจาก BC สามารถดูดซับน้ำมันได้มากกว่า 1000% ของน้ำหนักตัวมันเอง และยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการแยกด้วยแรงทางแม่เหล็ก

อีกส่วนหนึ่งของงานวิจัย ยังได้ศึกษาการเตรียมเจลจาก BC โดยการปั่น BC ในเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ แล้วทำการย่อยด้วยกรด H_2SO_4 เข้มข้น จากนั้นทำการปั่นเหวี่ยง เพื่อแยกส่วนของสารละลายและเนื้อออกจากกัน ล้างทำความสะอาดแล้วบรรจุใน Dialysis tube แช่น้ำเพื่อให้เกิดการแพร่ แลกเปลี่ยนสารละลาย ปรับ pH ด้วย NaOH จนกระทั่ง pH เป็นกลาง สั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิกตาม

ด้วยการปั่นเหวี่ยง แล้วนำส่วนที่เป็นของเหลวเก็บใน Dialysis tube อีกครั้ง ทั้งไว้ทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง จนกระทั่งน้ำระเหยออกไประดับหนึ่ง จะทำได้ BC ที่มีลักษณะชั้นเหมือนเจล

นอกจากนี้ยังได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กนาโนของโคบอลต์เหล็กแพลทตินัม ($\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Pt}$) ด้วยวิธีโพลีออล โดยเปลี่ยนปริมาณของ Co และ Fe จากนั้นเผาเพื่อให้วัสดุเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสแม่เหล็กแรงตามที่ต้องการ แล้วทำการวัดลักษณะเฉพาะพร้อมกับสมบัติของวัสดุด้วยเทคนิคต่างๆ ผลการทดลองที่ได้ พบว่าสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโน ($\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Pt}$) ได้เฟสบริสุทธิ์ ก่อนการเผา มีขนาดเล็กประมาณ 2-3 nm แต่เมื่อเผาแล้วจะเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสแม่เหล็กแข็ง และขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้นมาก การปรับเปลี่ยนอัตราส่วน Co กับ Fe พบว่าทำให้สมบัติทางแม่เหล็กเปลี่ยนไป โดยถ้าอัตราส่วน Co:Fe = 0.50:0.50 จะได้ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวสูงที่สุด แต่ถ้า Co = 1.00 หรือ Fe = 1.00 จะทำให้ได้ค่า coercivity ที่สูงที่สุด

6. ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

- ศึกษาวัสดุแม่เหล็กประเภทอื่นด้วยเช่นวัสดุแม่เหล็กแข็ง เพื่อให้มีการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น
- ศึกษาการนำไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิต BC หรือเส้นใยคาร์บอนนาโนจาก BC
- ศึกษาการปรีนท์ 3 มิติของเจลจาก BC เพิ่มเติม เพราะในงานวิจัยนี้เป็นแค่เพียงขั้นเริ่มต้น
- ศึกษาแนวทางการนำผลงานวิจัยที่ได้ไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์หรือเชิงอุตสาหกรรม เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hu WL, Chen SY, Yang JX, Li Z, Wang HP. Functionalized bacterial cellulose derivatives and nanocomposites. *Carbohydr Polym.* 2014;101:1043-60.
- [2] Huang Y, Zhu CL, Yang JZ, Nie Y, Chen CT, Sun DP. Recent advances in bacterial cellulose. *Cellulose.* 2014;21(1):1-30.
- [3] Klemm D, Kramer F, Moritz S, Lindstrom T, Ankerfors M, Gray D, et al. Nanocelluloses: A New Family of Nature-Based Materials. *Angewandte Chemie-International Edition.* 2011;50(24):5438-66.
- [4] Rajwade JM, Paknikar KM, Kumbhar JV. Applications of bacterial cellulose and its composites in biomedicine. *Appl Microbiol Biot.* 2015;99(6):2491-511.
- [5] Shah N, Ul-Islam M, Khattak WA, Park JK. Overview of bacterial cellulose composites: A multipurpose advanced material. *Carbohydr Polym.* 2013;98(2):1585-98.
- [6] Zhang W, Chen SY, Hu WL, Zhou BH, Yang ZH, Yin N, et al. Facile fabrication of flexible magnetic nanohybrid membrane with amphiphobic surface based on bacterial cellulose. *Carbohydr Polym.* 2011;86(4):1760-7.
- [7] Barud HS, Tercjak A, Gutierrez J, Viali WR, Nunes ES, Ribeiro SJL, et al. Biocellulose-based flexible magnetic paper. *J Appl Phys.* 2015;117(17):17B734.
- [8] Vitta S, Drillon M, Derory A. Magnetically responsive bacterial cellulose: Synthesis and magnetic studies. *J Appl Phys.* 2010;108(5):053905.
- [9] Katepetch C, Rujiravanit R. Synthesis of magnetic nanoparticle into bacterial cellulose matrix by ammonia gas-enhancing in situ co-precipitation method. *Carbohydr Polym.* 2011;86(1):162-70.
- [10] Marins JA, Soares BG, Barud HS, Ribeiro SJL. Flexible magnetic membranes based on bacterial cellulose and its evaluation as electromagnetic interference shielding material. *Materials Science & Engineering C-Materials for Biological Applications.* 2013;33(7):3994-4001.
- [11] Park M, Cheng J, Choi J, Kim J, Hyun J. Electromagnetic nanocomposite of bacterial cellulose using magnetite nanoclusters and polyaniline. *Colloids and Surfaces B-Biointerfaces.* 2013;102:238-42.
- [12] Zheng Y, Yang JX, Zheng WL, Wang X, Xiang C, Tang L, et al. Synthesis of flexible magnetic nanohybrid based on bacterial cellulose under ultrasonic irradiation. *Materials Science & Engineering C-Materials for Biological Applications.* 2013;33(4):2407-12.
- [13] Nata IF, Sureshkumar M, Lee CK. One-pot preparation of amine-rich magnetite/bacterial cellulose nanocomposite and its application for arsenate removal. *RSC Adv.* 2011;1(4):625-31.

- [14] Zhu HX, Jia SR, Wan T, Jia YY, Yang HJ, Li J, et al. Biosynthesis of spherical Fe₃O₄/bacterial cellulose nanocomposites as adsorbents for heavy metal ions. *Carbohydr Polym.* 2011;86(4):1558-64.
- [15] Olsson RT, Samir MASA, Salazar-Alvarez G, Belova L, Strom V, Berglund LA, et al. Making flexible magnetic aerogels and stiff magnetic nanopaper using cellulose nanofibrils as templates. *Nat Nanotechnol.* 2010;5(8):584-8.

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (ระบุชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง ชื่อวารสาร ปี เล่มที่ เลขที่ และ หน้า) หรือผลงานตามที่คาดไว้ในสัญญาโครงการ ประกอบไปด้วย
 - 1.1. Nipaporn Sriplai, Sireemas Koowattanasuchat, Pinit Kidkhunthod, Narong Chanlek, Stephen J. Eichhorn, Supree Pinitsoontorn*, "Magnetic behavior of novel alloyed L10-phase Co_{1-x}FePt nanoparticles", Journal of Alloys and Compounds, 739 (2018) 19-29. (IF2017: 3.779).
 - 1.2. Nipaporn Sriplai, Wiyada Mongkolthanaruk, Stephen J. Eichhorn, Supree Pinitsoontorn*, "Magnetically responsive and flexible bacterial cellulose membranes", Carbohydrate Polymers, 192 (2018) 251-262. (IF2017: 5.158).
 - 1.3. Nipaporn Sriplai, Pornkanok Sirima, Dulayawit Palaporn, Wiyada Mongkolthanaruk, Stephen J. Eichhorn and Supree Pinitsoontorn*, "White magnetic paper based on a bacterial cellulose nanocomposite", Journal of Materials Chemistry C, 6 (2018) 11427-11435. (IF2017: 5.976).
 - 1.4. Nipaporn Sriplai, Wiyada Mongkolthanaruk, Stephen J. Eichhorn, Supree Pinitsoontorn*, "Magnetic bacterial cellulose and carbon nanofiber aerogel by simple immersion process and pyrolysis", Small, (2019). (Submitted)
 - 1.5. Pimchanok leamviteevanich, Wiyada Mongkolthanaruk, Stephen J. Eichhorn, Supree Pinitsoontorn*, "Highly effective and reusable magnetic carbon aerogel derived from bacterial cellulose as oil sorbent materials", ACS Applied Materials and Interfaces, (2019). (Manuscript in preparation)
2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ (ในเชิงวิชาการ)
 - การนำไปใช้ในการเรียนการสอนในหลักสูตรวัสดุศาสตร์และนาโนเทคโนโลยี ในรายวิชา 301340 วัสดุแม่เหล็ก สำหรับนักศึกษาระดับปริญญาตรี และในรายวิชา 301706 วัสดุแม่เหล็ก สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา
 - มีการต่อยอดผลงานวิจัย โดยได้นำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้พัฒนาต่อไป และมีความร่วมมือกับนักวิจัยอื่นๆทั้งในไทยและต่างประเทศ รวมทั้งผลงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์ผลงานไปแล้วมีการอ้างอิง (citation) เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป
3. อื่นๆ (เช่น ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ หนังสือ การจดสิทธิบัตร)

- 3.1.การนำเสนอผลงาน (Oral presentation) ในงานประชุมวิชาการ The Twenty-Fifth Annual International Conference on COMPOSITES/NANO ENGINEERING (ICCE-25), ระหว่างวันที่ 16 ถึง 22 กรกฎาคม 2560 ณ โรงแรม Sheraton Parco de'Medici Rome Hotel, Rome, Italy หัวข้อการนำเสนอ "Characteristics And Magnetic Properties Of Fe₃O₄ Nanoparticle Dispersions In Bacterial Cellulose And Carbon Nanofiber Scaffoldings"
- 3.2.การนำเสนอผลงานแบบโปสเตอร์ในงานประชุมวิชาการ The First Materials Research Society of Thailand International Conference (MRS Thailand), ระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม ถึง 3 พฤศจิกายน 2017 ณ โรงแรม The Empress Convention Center, เชียงใหม่ ประเทศไทย หัวข้อการนำเสนอ "Fabrication and characterization of 3D carbon nanofiber derived from bacterial cellulose for liquid absorption"
- 3.3. การจัดงานประชุมวิชาการ NAF-TRF Workshop on Nanocellulose 2017 ระหว่างวันที่ 11-14 กันยายน 2560 ณ โรงแรม Pullman Hotel จ.ขอนแก่น ประเทศไทย มี Keynote Speaker ได้แก่ Prof. Stephen Eichhorn จาก University of Bristol, UK และ Invited Speaker จากนักวิจัยชั้นนำในประเทศไทยอีก 11 ท่าน มีผู้ร่วมงานทั้งสิ้นกว่า 80 คน
- 3.4. การจัดงานประชุมวิชาการ NAF-TRF Workshop on Nanocellulose 2019 ระหว่างวันที่ 6-9 มีนาคม 2562 ณ โรงแรม Garden Sea View Research พัทยา จ.ชลบุรี ประเทศไทย มี Keynote Speaker ได้แก่ Prof. Stephen Eichhorn จาก University of Bristol, UK และ Invited Speaker จากนักวิจัยชั้นนำในประเทศไทยอีก 11 ท่าน มีผู้ร่วมงานทั้งสิ้นกว่า 90 คน
- 3.5. การเยี่ยมชมห้องปฏิบัติการของ Professor Stephen Eichhorn ณ Cellulose and Renewable Materials Division, College of Engineering, Mathematics and Physical Sciences, University of Exeter ระหว่างวันที่ 14 – 18 สิงหาคม 2560
- 3.6. การเยี่ยมชมห้องปฏิบัติการของ Professor Stephen Eichhorn ณ Bristol Composites Institute (ACCIS), University of Bristol ระหว่างวันที่ 5 – 9 มีนาคม 2561
- 3.7. การแลกเปลี่ยนวิจัยระหว่าง รศ.ดร.สุปรีย์ พิณสุมนทร มหาวิทยาลัยขอนแก่น และ Professor Stephen Eichhorn, University of Bristol โดยทางมหาวิทยาลัยขอนแก่นได้ส่งนักวิจัยให้แก่ ดร.ปัญญาธิ์ พยัคฆนิธิ เพื่อทำวิจัยที่ Bristol Composites Institute (ACCIS), University of Bristol เป็นระยะเวลาประมาณ 4 เดือน ตั้งแต่เดือนมีนาคม 2561 ถึง สิงหาคม 2561 ส่วนทาง University of Bristol ได้ส่ง Dr. Marcus Johns มาทำวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการวัสดุศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ตั้งแต่วันที่ 5-15 มีนาคม 2562

ภาคผนวก ก.

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

1. Nipaporn Sriplai, Sireemas Koowattanasuchat, Pinit Kidkhunthod, Narong Chanlek, Stephen J. Eichhorn, Supree Pinitsoontorn*, "Magnetic behavior of novel alloyed L10-phase Co_{1-x}Fe_xPt nanoparticles", Journal of Alloys and Compounds, 739 (2018) 19-29. (IF2017: 3.779).
2. Nipaporn Sriplai, Wiyada Mongkolthanaruk, Stephen J. Eichhorn, Supree Pinitsoontorn*, "Magnetically responsive and flexible bacterial cellulose membranes", Carbohydrate Polymers, 192 (2018) 251-262. (IF2017: 5.158).
3. Nipaporn Sriplai, Pornkanok Sirima, Dulayawit Palaporn, Wiyada Mongkolthanaruk, Stephen J. Eichhorn and Supree Pinitsoontorn*, "White magnetic paper based on a bacterial cellulose nanocomposite", Journal of Materials Chemistry C, 6 (2018) 11427-11435. (IF2017: 5.976).

ภาคผนวก ข.

ผลงานอื่นๆ

1. การจัดงานประชุมวิชาการ NAF-TRF Workshop on Nanocellulose 2017 ระหว่างวันที่ 11-14 กันยายน 2560 ณ โรงแรม Pullman Hotel จ.ขอนแก่น ประเทศไทย









ภาคผนวก ข.

ผลงานอื่นๆ

2. การจัดงานประชุมวิชาการ NAF-TRF Workshop on Nanocellulose 2019 ระหว่างวันที่ 6-9 มีนาคม 2562 ณ โรงแรม Garden Sea View Research พัทยา จ.ชลบุรี ประเทศไทย







