



การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก โดยใช้เซราม
จากหางน้ำยางธรรมชาติและการประยุกต์ใช้

โดย

นางสาวภณิตา พงษ์เดช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก โดยใช้เซราม
จากหางน้ำยางธรรมชาติและการประยุกต์ใช้

โดย

นางสาวภณิตา พงษ์เดช



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

SYNTHESIS OF COPPER/IRON BIMETALLIC NANOPARTICLES
USING SERUM FROM SKIM NATURAL RUBBER LATEX
AND APPLICATION

BY

MISS PANITA PONGDACH



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
(ENERGY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY MANAGEMENT)
DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2018
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาวภณิตา พงษ์เดช

เรื่อง

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก โดยใช้เซรามิกจากหางน้ำยางธรรมชาติ
และการประยุกต์ใช้

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 8 มกราคม พ.ศ. 2562

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ลอ ด

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพบุษย์ เอกแสงศรี)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร. ภณิตา พงษ์เดช

(รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ ตำนานิชกุล)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ภณิตา พงษ์เดช

(รองศาสตราจารย์ ดร.ภณิตา ชัยขวัญ)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ดร. ภณิตา พงษ์เดช

(อาจารย์ ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ)

คณบดี

ดร. ภณิตา พงษ์เดช

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีร เจียศิริพงษ์กุล)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก โดยใช้เซรามิกจากหางน้ำยางธรรมชาติและการประยุกต์ใช้
ชื่อผู้เขียน	นางสาวภณิตา พงษ์เดช
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	เทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ ด่านวานิชกุล
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็กด้วยกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้เซรามิกจากหางน้ำยางธรรมชาติ เป็นการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ลดการใช้สารเคมีอันตรายลดมลพิษที่เกิดจากการกำจัดหรือทำลายวัสดุ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าและนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ การนำหางน้ำยางมาจับก้อนเนื้อยางออกด้วยสารโพลีอะคริลาไมด์ (PAM) จะได้เซรามิกที่มีสารที่มีโพลีเมอร์หลงเหลืออยู่ ซึ่งนำมาใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโน ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดง (Cu(II)) เหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) และอนุภาคนาโนของโลหะคู่ทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ด้วยเซรามิกจากหางน้ำยางธรรมชาติซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ใช้คอปเปอร์ (II) ซัลเฟตเป็นแหล่งไอออนของ Cu(II) เพอร์ส (II) ซัลเฟตเป็นแหล่งไอออนของ Fe(II) และเพอร์ริค (III) คลอไรด์เป็นแหล่งไอออนของ Fe(III) แล้วจึงตรวจสอบด้วยการวัดค่าความเป็นกรด-เบส ค่าการนำไฟฟ้า ค่าการดูดกลืนแสง TEM-EDS และ XRD ในการสังเคราะห์พบว่าสารละลายเปลี่ยนสีทันทีเมื่อผสมกัน ที่ความเข้มข้น 1.2 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดในการสังเคราะห์ทองแดง Cu(II) เหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ตามลำดับ เมื่อเวลาทำปฏิกิริยามากขึ้นค่าดูดกลืนแสงก็สูงยิ่งขึ้น ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe ได้เลือกใช้อัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างทองแดงกับเหล็ก (Cu:Fe) เป็น 0:2.4, 0.6:1.8, 1.2:1.2, 1.8:0.6 และ 2.4:0 มิลลิโมลาร์ สารละลายเปลี่ยนสีทันทีเมื่อผสมเช่นเดียวกัน พบค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 380-500 และน้อยกว่า 350 นาโนเมตร นำมาทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู โดยนำอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ปริมาณ 5 มิลลิกรัม ต่อ 2 มิลลิลิตรของสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 10 ppm ที่สภาวะภายใต้แสงอาทิตย์ แสงจากตู้ยูวี (UV) และสภาวะในที่ไม่มีแสง วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร พบว่า

ค่าการดูดกลืนแสงลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) และ Fe(III) สามารถกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้สูงสุดถึง 74.17 และ 69.74% ตามลำดับ ภายในเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการใช้งานร่วมกันของทองแดง/เหล็กในรูปแบบของอนุภาคนาโนโลหะคู่

คำสำคัญ: อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก, หางน้ำยางธรรมชาติ, การสังเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม, เมทิลีนบลู



Thesis Title	SYNTHESIS OF COPPER/IRON BIMETALLIC NANOPARTICLES USING SERUM FROM SKIM NATURAL RUBBER LATEX AND APPLICATION
Author	Miss Panita Pongdach
Degree	Master of Engineering
Major Field/Faculty/University	Energy and Environmental Technology Management Engineering Thammasat University
Thesis Advisor	Associate Professor Panu Danwanichakul, Ph.D
Academic Years	2018

ABSTRACT

Copper/iron bimetallic nanoparticles (Cu/FeNPs) were synthesized via an environmentally friendly process by using serum from skim natural rubber latex. This could reduce environmental problems by decreasing the use of hazardous chemicals, reducing pollution caused by material removal or destruction and it is a way of recycling waste materials to add value to skim natural rubber latex. Rubber was coagulated by using polyacrylamide (PAM) and the serum was obtained. The syntheses of nanoparticles of copper (Cu(II)), iron (Fe(II) or Fe(III)) and copper/iron (Cu/Fe) bimetallic were performed at room temperature with copper (II) sulphate as a source of Cu(II), ferrous (II) sulfate as a source of Fe(II) and ferric (III) chloride as a source of Fe(III). The obtained products were checked with pH meter, conductivity meter, visible-spectroscopy, TEM-EDS and XRD. When mixing with serum as a reducing and capping agent, the solution color changed immediately upon mixing. At 1.2 and 2.4 mM, the absorption peak was highest in the copper (Cu(II)) and iron (Fe(II) or Fe(III)) synthesis, respectively and at longer reaction times, the absorbance was higher. In the synthesis of Cu/Fe bimetallic nanoparticles, Cu:Fe ratio was varied to 0:2.4, 0.6:1.8, 1.2:1.2, 1.8:0.6 and 2.4:0 mM. When mixing with serum the solution, the color changed

immediately upon mixing. The absorbance was in the range 380-500 and less than 350 nm. Nanoparticles were then applied in the removal of methylene blue dye, using 5 mg of nanoparticles in 2 ml of methylene blue solution at 10 ppm under various conditions, which are exposure to sunlight, UV lamp and without light. The measurement of absorbance at 664 nm showed that the removal efficiency increased with time. Cu/Fe bimetallic nanoparticles from Fe(II) and Fe(III) could remove methylene blue dye within 3 hours up to 74.17 and 69.74 %, respectively, demonstrating the better performance of Cu/Fe in the form of bimetallic nanoparticles.

Keywords: Copper/Iron bimetallic nanoparticles, skim natural rubber latex, green synthesis, methylene blue

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ ประสบความสำเร็จได้ด้วยความรู้จากบุคคลต่าง ๆ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ แนวทางแก้ไขข้อบกพร่อง ตลอดจนความอนุเคราะห์ต่าง ๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง

รองศาสตราจารย์ ดร. ภาณุ ด่านวานิชกุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และอาจารย์ที่ปรึกษาของงานวิจัยนี้ ผู้ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำต่าง ๆ รวมถึงแนวทางในการคิดและแก้ไข ตลอดจนให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยนี้จนสำเร็จ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร. ทิพบุษย์ เอกแสงศรี รองศาสตราจารย์ ดร.ภณิดา ซ้ายขวัญ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และอาจารย์ ดร. ณัฐพล ภูตระกูลโชติ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ให้คำแนะนำและเสนอแนะแนวทางในการดำเนินงานให้งานวิจัยนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

บริษัท ไทยอีสเทิร์นกรุ๊ป จำกัด ผู้สนับสนุนจากความอนุเคราะห์สำหรับทางน้ำยางในการทำวิจัยครั้งนี้

นางสาวภณิดา พงษ์เดช

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญตาราง	(10)
สารบัญภาพ	(12)
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	(19)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 อนุภาคนาโนโลหะคู่	4
2.2 โลหะ	6
2.2.1 โลหะทองแดงและอนุภาคนาโนทองแดง	7
2.2.1.1 โลหะทองแดง	7
2.2.1.2 อนุภาคนาโนทองแดง	8
2.2.2 โลหะเหล็กและอนุภาคนาโนเหล็ก	10

2.2.2.2 อนุภาคนาโนเหล็ก	12
2.3 น้ำยางธรรมชาติ	13
2.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับแสงและการดูดกลืนแสง	15
2.5 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก	17
2.6 สีย้อมเมทิลีนบลู	19
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
 บทที่ 3 วิธีการวิจัย	 29
3.1 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้	29
3.1.1 วัสดุ อุปกรณ์	29
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	30
3.2 วิธีการ	30
3.2.1 การหาปริมาณเนื้อยางแห้งในทางน้ำยาง	30
3.2.2 การเตรียมสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต	30
3.2.3 การเตรียมสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต	30
3.2.4 การเตรียมสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์	31
3.2.5 การเตรียมเซรัมจากทางน้ำยางธรรมชาติ	31
3.2.6 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง Cu(II) ในเซรัมจาก ทางน้ำยางที่อุณหภูมิห้อง	31
3.2.7 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก Fe(II) และ Fe(III) ในเซรัม จากทางน้ำยางที่อุณหภูมิห้อง	31
3.2.8 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ในเซรัมจากทางน้ำยางที่อุณหภูมิห้อง	32
3.2.9 การเตรียมตัวอย่างเพื่อตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านพร้อมการวิเคราะห์ธาตุ เชิงพลังงาน (TEM-EDS)	32
3.2.10 การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเครื่องวัดการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)	33
3.2.11 การทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยอนุภาคนาโนโลหะคู่ ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe)	33

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	34
4.1 ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง Cu(II) เหล็ก Fe(II) และ Fe(III) ในเซรัมจากหางน้ำยางที่อุณหภูมิต้อง	34
4.1.1 ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง Cu(II) ในเซรัมจากหางน้ำยางที่อุณหภูมิต้อง	34
4.1.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	34
4.1.1.2 ผลของสัดส่วนการเจือจางเซรัมจากหางน้ำยางที่ใช้ในการสังเคราะห์	37
4.1.1.3 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	40
4.1.1.4 ผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านพร้อมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (TEM-EDS)	43
4.1.2 ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ในเซรัมจากหางน้ำยางที่อุณหภูมิต้อง	45
4.1.2.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต และเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	45
4.1.2.2 ผลของสัดส่วนการเจือจางเซรัมจากหางน้ำยางที่ใช้ในการสังเคราะห์	49
4.1.2.3 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	53
4.1.2.4 ผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านพร้อมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (TEM-EDS)	56
4.2 ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ในเซรัมจากหางน้ำยางที่อุณหภูมิต้อง	59
4.2.1 ผลของอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างทองแดงกับเหล็ก (Cu:Fe) ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโน	59
4.2.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	63

4.2.3 ผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านพร้อมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (TEM-EDS)	66
4.2.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ (XRD)	74
4.3 ผลการทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยอนุภาคนาโนโลหะคู่ของ ทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe)	78
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	87
5.1 สรุปผลการวิจัย	88
5.1.1 ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง Cu(II) เหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ในเซรัมจากหางน้ำยางที่อุณหภูมิห้อง	86
5.1.2 ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ในเซรัมจากหางน้ำยางที่อุณหภูมิห้อง	89
5.1.3 ผลการทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยอนุภาคนาโนโลหะ คู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe)	92
5.2 ข้อเสนอแนะ	92
รายการอ้างอิง	93
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณในงานวิจัย	97
ภาคผนวก ข ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า ของสารแขวนลอย	100
ภาคผนวก ค การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู	106
ภาคผนวก ง ข้อมูลอื่น ๆ ในงานวิจัย	113
ประวัติผู้เขียน	114

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างองค์ประกอบของส่วนอนุภาคยางในน้ำยางสด	13
2.2 ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นระหว่างแสงสีที่มองเห็นกับแสงสีที่ถูกดูดกลืน	16
4.1 ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์	35
4.2 ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของเซรั่มจากหางน้ำย่างมีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3	37
4.3 ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่สังเคราะห์ด้วยเซรั่มจากหางน้ำย่างมีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 กับสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ 1.2 มิลลิโมลาร์	39
4.4 ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ด้วยสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ 1.2 มิลลิโมลาร์ กับเซรั่มจากหางน้ำย่างที่ไม่เจือจางที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที	41
4.5 ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์	45
4.6 ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(III)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์	46
4.7 ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรั่มจากหางน้ำย่างที่สัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3	50

4.8	ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(III)) ที่พื้นที่ผสมด้วยสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางนํ้ายาง ที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3	50
4.9	ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II)) ด้วยสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตที่ 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางนํ้ายางที่ไม่เจือจาง ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที	54
4.10	ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(III)) ด้วยสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ที่ 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางนํ้ายางที่ไม่เจือจาง ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที	54
4.11	ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่อัตราส่วน Cu:Fe เท่ากับ 0:2.4, 0.6:1.8, 1.2:1.2, 1.8:0.6 และ 2.4:0 มิลลิโมลาร์	61
4.12	ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe (III) ที่อัตราส่วน Cu:Fe เท่ากับ 0:2.4, 0.6:1.8, 1.2:1.2, 1.8:0.6 และ 2.4:0 มิลลิโมลาร์	61
4.13	ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที	64
4.14	ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe (III) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที	64
4.15	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe เท่ากับ 0.6/1.8, 1.2/1.2 และ 1.8/0.6 มิลลิโมลาร์	73
5.1	ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) เหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) จากเซรัมจากหางนํ้ายาง ที่อุณหภูมิห้อง	89
5.2	ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) และ Cu/Fe จาก Fe(III) จากเซรัมจากหางนํ้ายาง ที่อุณหภูมิห้อง	91

ข.1	ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที	100
ข.2	ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 1.2 มิลลิโมลาร์ กับเซรั่มจากหางน้ำยางที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับ ไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที	101
ข.3	ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที	102
ข.4	ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(III)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที	103
ข.5	ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรั่มจากหางน้ำยางที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับ ไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที	104
ข.6	ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(III)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรั่มจากหางน้ำยางที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับ ไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที	105
ค.1	ความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร	106
ค.2	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ภายใต้แสงอาทิตย์ ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที	107

- ค.3 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe 108
จาก Fe(III) ภายใต้แสงอาทิตย์ ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90,
120, 150 และ 180 นาที
- ค.4 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe 109
จาก Fe(II) ภายใต้แสงจากตู้ยวี่ ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90,
120, 150 และ 180 นาที
- ค.5 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe 110
จาก Fe(III) ภายใต้แสงจากตู้ยวี่ ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90,
120, 150 และ 180 นาที
- ค.6 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe 111
จาก Fe(II) สภาวะในที่ไม่มีแสง ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90,
120, 150 และ 180 นาที
- ค.7 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe 112
จาก Fe(III) สภาวะในที่ไม่มีแสง ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90,
120, 150 และ 180 นาที
- ง.1 ผลการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 113
(XRD) ของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคนาโนโลหะคู่	4
2.2 ลักษณะโครงสร้างของอนุภาคนาโนโลหะคู่แบบต่าง ๆ	5
2.3 Unit cells ของโครงสร้างผลึกแบบต่าง ๆ	7
2.4 Unit cells ของโครงสร้างผลึกแบบ Face centered cubic (FCC) ของทองแดง	8
2.5 อนุภาคหรือผงนาโนทองแดง ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)	9
2.6 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของเหล็กตามช่วงอุณหภูมิเย็นตัว	10
2.7 Unit cells ของโครงสร้างผลึกแบบ Body centered cubic (BCC) และ Face centered cubic (FCC) ของเหล็ก	11
2.8 อนุภาคหรือผงนาโนเหล็ก ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)	12
2.9 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติจากต้นยางพารา (cis-1,4-polyisoprene)	14
2.10 กระบวนการผลิตน้ำยางข้น	15
2.11 กลไกการเกิดกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชัน	18
2.12 สูตรโครงสร้างของสีย้อมเมทิลีนบลู	20
4.1 สีของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ทันทีที่ผสม ที่ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจาง	36
4.2 ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ทันทีที่ผสม ที่ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจาง	36
4.3 สีของเซรัมจากหางน้ำยางที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3	38
4.4 ค่าการดูดกลืนแสงของเซรัมจากหางน้ำยางที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3	38

- 4.5 สีของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่พื้นที่ผสมด้วย สารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 1.2 มิลลิโมลาร์ กับเซรุ่ม จากหางนํ้ายางที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 39
- 4.6 ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่พื้นที่ผสมด้วย สารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 1.2 มิลลิโมลาร์ กับเซรุ่ม จากหางนํ้ายางที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 40
- 4.7 สีของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที ด้วยสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ 1.2 มิลลิโมลาร์ กับเซรุ่ม จากหางนํ้ายางที่ไม่เจือจาง 41
- 4.8 ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที ด้วยสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ 1.2 มิลลิโมลาร์ กับ เซรุ่มจากหางนํ้ายางที่ไม่เจือจาง 42
- 4.9 อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรุ่มจากหางนํ้ายางที่ไม่เจือจาง 44
- (a) ที่กำลังขยาย 80,000 เท่า
- (b) ที่กำลังขยาย 800,000 เท่า
- (c) ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)
- 4.10 สีของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองเหลือง (Fe(II) หรือ Fe(III)) ที่พื้นที่ ผสม ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ ของ 47
- (a) สารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต
- (b) สารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์
- 4.11 ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ที่พื้นที่ผสม ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ ของ 48
- (a) สารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต
- (b) สารละลายเฟอร์ริก (II) คลอไรด์
- 4.12 สีของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ที่พื้นที่ผสม 51
- ด้วยเซรุ่มจากหางนํ้ายางที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 กับ
- (a) สารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์
- (b) สารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์

- 4.13 ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ที่พัฒนาด้วยเซรัมจากหางน้ำยางที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 กับ
- (a) สารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์
 - (b) สารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์
- 4.14 ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที ด้วยเซรัมจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจาง กับ
- (a) สารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์
 - (b) สารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์
- 4.15 อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจาง
- (a) ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า
 - (b) ที่กำลังขยาย 800,000 เท่า
 - (c) ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)
- 4.16 อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(III) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจาง
- (a) ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า
 - (b) ที่กำลังขยาย 800,000 เท่า
 - (c) ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)
- 4.17 สีของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe ที่อัตราส่วน Cu:Fe เท่ากับ 0:2.4, 0.6:1.8, 1.2:1.2, 1.8:0.6 และ 2.4:0 มิลลิโมลาร์ ที่พัฒนาของ
- (a) Cu/Fe จาก Fe(II)
 - (b) Cu/Fe จาก Fe(III)
- 4.18 ค่าการดูดกลืนแสงของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe ที่อัตราส่วน Cu:Fe เท่ากับ 0:2.4, 0.6:1.8, 1.2:1.2, 1.8:0.6 และ 2.4:0 มิลลิโมลาร์ ที่พัฒนาของ
- (a) Cu/Fe จาก Fe(II)
 - (b) Cu/Fe จาก Fe(III)

- 4.19 ค่าการดูดกลืนแสงของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe ที่อัตราส่วน Cu:Fe เท่ากับ 0:2.4, 0.6:1.8, 1.2:1.2, 1.8:0.6 และ 2.4:0 มิลลิโมลาร์ ที่เวลา 0 และ 60 นาที 65
- (a) Cu/Fe จาก Fe(II)
- (b) Cu/Fe จาก Fe(III)
- 4.20 อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่ 0.6/1.8 มิลลิโมลาร์ 67
- (a) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย TEM ที่กำลังขยาย 80,000 เท่า
- (b) ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)
- 4.21 อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ 68
- (a) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย TEM ที่กำลังขยาย 40,000 เท่า
- (b) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย TEM ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า
- (c) ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)
- 4.22 อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่ 1.8/0.6 มิลลิโมลาร์ 69
- (a) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย TEM ที่กำลังขยาย 80,000 เท่า
- (b) ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)
- 4.23 อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) ที่ 0.6/1.8 มิลลิโมลาร์ 70
- (a) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย TEM ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า
- (b) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย TEM ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า
- (c) ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)
- 4.24 อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ 71
- (a) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย TEM ที่กำลังขยาย 40,000 เท่า
- (b) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย TEM ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า
- (c) ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)
- 4.25 อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) ที่ 1.8/0.6 มิลลิโมลาร์ 72
- (a) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย TEM ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า
- (b) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย TEM ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า
- (c) ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)
- 4.26 ดิฟแฟรกโตแกรมของตัวอย่างอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ เปรียบเทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิงของคอปเปอร์-ไฮดรอกไซด์ ไฮดรอกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ 75

4.27	พีคของดิฟแฟรกโตแกรมของตัวอย่างอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ เปรียบเทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิงของ คอปเปอร์ไอรอนออกไซด์ ไอรอนออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์	76
4.28	การทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยอนุภาคนาโนภายใต้แสงจากตู้ยูวี	78
4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร กับเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยากำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ (a) อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) เปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนของทองแดง Cu(II) เหล็ก Fe(II) และสีย้อมเมทิลีนบลู (MB) (b) อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) เปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนของทองแดง Cu(II) เหล็ก Fe(III) และสีย้อมเมทิลีนบลู (MB)	80
4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร กับเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยากำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงจากตู้ยูวี (a) อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) เปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนของทองแดง Cu(II) เหล็ก Fe(II) และสีย้อมเมทิลีนบลู (MB) (b) อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) เปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนของทองแดง Cu(II) เหล็ก Fe(III) และสีย้อมเมทิลีนบลู (MB)	81
4.31	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร กับเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยากำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูสถานะในที่ไม่มีแสง (a) อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) เปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนของทองแดง Cu(II) เหล็ก Fe(II) และสีย้อมเมทิลีนบลู (MB) (b) อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) เปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนของทองแดง Cu(II) เหล็ก Fe(III) และสีย้อมเมทิลีนบลู (MB)	82
4.32	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของ 3 สภาวะ (a) สีย้อมเมทิลีนบลู (b) อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ (c) อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์	84
ค.1	กราฟมาตรฐานของสีย้อมเมทิลีนบลู	102

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์/คำย่อ	คำเต็ม/คำจำกัดความ
Cu(II)	การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดงด้วย CuSO_4 เป็นแหล่งไอออน
Fe(II)	การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของเหล็กด้วย FeSO_4 เป็นแหล่งไอออน
Fe(III)	การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของเหล็กด้วย FeCl_3 เป็นแหล่งไอออน
Cu/Fe	อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Copper/iron bimetallic nanoparticles)
Cu/Fe จาก Fe(II)	อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก ที่สังเคราะห์ จาก CuSO_4 กับ FeSO_4 เป็นแหล่งไอออน
Cu/Fe จาก Fe(III)	อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก ที่สังเคราะห์ จาก CuSO_4 กับ FeCl_3 เป็นแหล่งไอออน
Cu:Fe	อัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างทองแดง (CuSO_4) กับเหล็ก (FeSO_4 หรือ FeCl_3)
เซรัม	ของเหลวเหลืองใสที่ได้จากการจับก้อนเนื้อมีเยื่อไขมัน จากหางน้ำอย่างธรรมชาติ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาอนุภาคนาโนของโลหะคู่ (Bimetallic nanoparticles) กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากจากงานวิจัยทั่วโลก เนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ดี ยังแตกต่างเมื่อเทียบกับอนุภาคนาโนของโลหะเดี่ยว (Monometallic nanoparticles) ได้แก่ ขนาด องค์ประกอบ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่แตกต่าง รวมถึงการทำงานร่วมกันของโลหะทั้งสองชนิด คุณสมบัติของอนุภาคนาโนของโลหะคู่ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบและโครงสร้างในการ จัดเรียงตัวของอะตอมทำให้เกิดอนุภาคที่มีโครงสร้างแตกต่างจากเดิม ได้แก่ โลหะผสม (Alloy) เปลือกหุ้มแกนกลาง (Core-shell) และอื่น ๆ สำหรับสารตั้งต้นหรือตัวทำละลายยังถือเป็นปัจจัย สำคัญที่จะช่วยให้อนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้เสถียรขึ้น (Dang-Bao et al. 2017)

คุณสมบัติที่โดดเด่นของอนุภาคนาโน (Nanoparticle) คือการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี เนื่องจากมีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวสูง มีความจำเพาะ และความเสถียรสูง รวมทั้งอนุภาคนาโนยังสามารถ แยกออกจากปฏิกิริยาได้ง่าย จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงเป็นเหตุผลให้นักวิทยาศาสตร์เกิดความสนใจ อย่างกว้างขวางเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ทั้งวิทยาศาสตร์ วิศวกรรม การแพทย์ เกษตรกรรม ตลอดจนสิ่งแวดล้อม ซึ่งยังถือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุให้มากขึ้นแล้ว และเพิ่ม มูลค่าทางเศรษฐกิจได้เป็นอย่างดี สำหรับอนุภาคนาโนของโลหะ อนุภาคนาโนทองแดงได้รับการ สรรวจว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่พิเศษตัวใหม่ ใช้ปริมาณที่น้อยแต่เร่งปฏิกิริยาได้สูง ราคาถูก ใช้เวลาใน การทำปฏิกิริยาสั้นลง และยังสามารถรีไซเคิลเพื่อใช้ซ้ำได้ ถือเป็นข้อได้เปรียบเหนือตัวเร่งปฏิกิริยา ของโลหะชนิดอื่น ๆ (Zyryanov et al. 2017) ซึ่งทองแดงยังเป็นโลหะอีกชนิดที่นิยมใช้กันอย่าง แพร่หลายตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ด้วยราคาถูก หาซื้อได้ง่าย และมีคุณสมบัติที่สามารถผสมกับวัสดุ อื่น ๆ ได้ดี เช่นเดียวกันกับเหล็กที่เป็นโลหะที่รู้จักและนิยมใช้มากที่สุด มีคุณสมบัติที่เด่นคือ ความ ทนทาน อีกทั้งยังนำไฟฟ้า และความร้อนได้ดี สำหรับอนุภาคนาโนของเหล็กยังสามารถทำปฏิกิริยา ริตวซ์กับสารอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารที่เป็นพิษสามารถทำให้มีพิษน้อยลงหรือจนไม่ส่งผลกระทบ ต่อสิ่งแวดล้อม ถูกนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยอนุภาคนาโนของเหล็กถือเป็น เทคโนโลยีการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมยุคใหม่และมีค่าใช้จ่ายน้อยในการแก้ไขปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม (Reddy et al. 2016)

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอย่างต่อเนื่อง โดยวิธีการสังเคราะห์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากเป็นวิธีการที่ลดการใช้สารเคมีอันตรายและลดมลพิษที่เกิดจากการกำจัดหรือทำลายวัสดุ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าและนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) โดยพบงานวิจัยที่สนับสนุนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจำนวนมาก รวมถึงปริญญาานิพนธ์ของชัยญานุช ชนะกิจการโชค และนภดาว หริพัฒน์กุล (2559) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดงโดยใช้หางน้ำยางด้วยกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยนี้จึงสนใจการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของโลหะคู่ โดยใช้เซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติด้วยกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ที่อุณหภูมิห้อง เลือกใช้โลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ ได้แก่ อัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างทองแดงกับเหล็ก (Cu:Fe) และทดสอบประสิทธิภาพในการนำไปใช้ประโยชน์โดยเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากำจัดสีย้อมเมทิลินบลู

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดง Cu(II) เหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) โดยใช้เซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติ

1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ด้วยเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Green synthesis)

1.2.3 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการนำไปใช้ประโยชน์โดยเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากำจัดสีย้อมเมทิลินบลู

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดง Cu(II) เหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) และโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ด้วยเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติ ที่อุณหภูมิห้อง

(1) สังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดง Cu(II) โดยใช้สารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต

(2) สังเคราะห์อนุภาคนาโนของเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) โดยใช้สารละลายเพอร์ส (II) ซัลเฟต หรือเพอร์ริค (II) คลอไรด์

1.3.2 ตรวจสอบคุณสมบัติของอนุภาคนาโนของทองแดง Cu(II) เหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) และโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ด้วยเซรัมจากทางน้ำยางธรรมชาติ โดยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส (pH meters) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meters) เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Visible spectrophotometer) ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) พร้อมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDS) และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

1.3.3 พิจารณาผลของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดง Cu(II) เหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) และโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) โดยใช้ปัจจัยที่แตกต่างกัน ดังนี้

- (1) สัดส่วนการเจือจางเซรัมจากทางน้ำยางธรรมชาติเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2, และ 1:3
- (2) ความเข้มข้นตั้งต้นได้แก่ สารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต เพอร์ส (II) ซัลเฟต และเพอร์ริก (III) คลอไรด์ ที่ 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์
- (3) อัตราส่วนความเข้มข้นของโลหะคู่ระหว่างทองแดงกับเหล็ก (Cu:Fe) ที่ 0:2.4, 0.6:1.8, 1.2:1.2, 1.8:0.6 และ 2.4:0 มิลลิโมลาร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดง Cu(II) เหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ด้วยเซรัมจากทางน้ำยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง

1.4.2 สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ด้วยเซรัมจากทางน้ำยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นการสังเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Green synthesis)

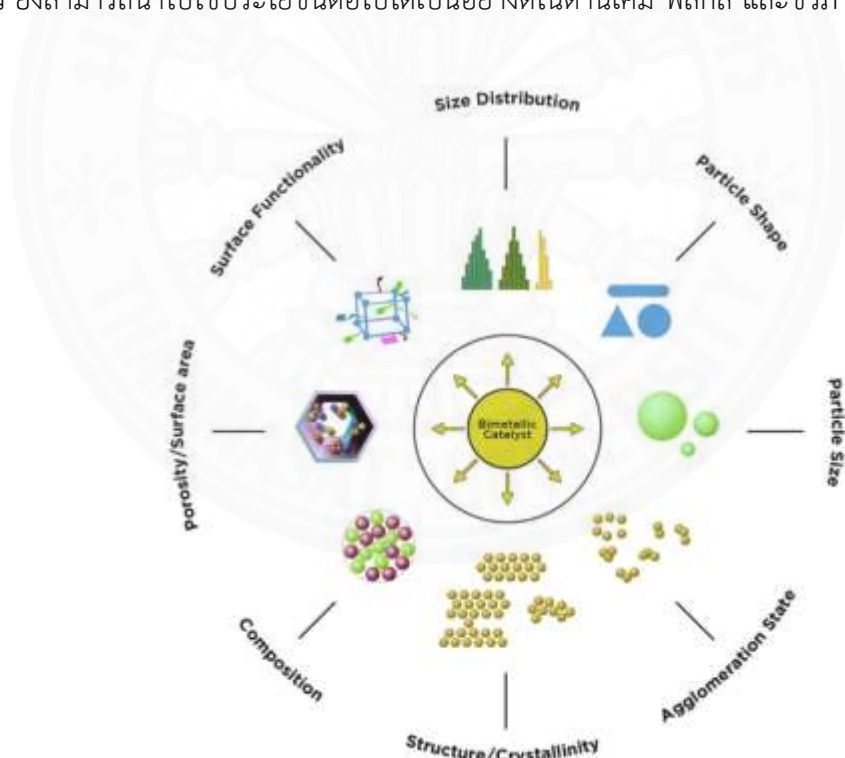
1.4.3 สามารถทดสอบประสิทธิภาพในการนำอนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ที่สังเคราะห์ได้ไปใช้ประโยชน์โดยเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

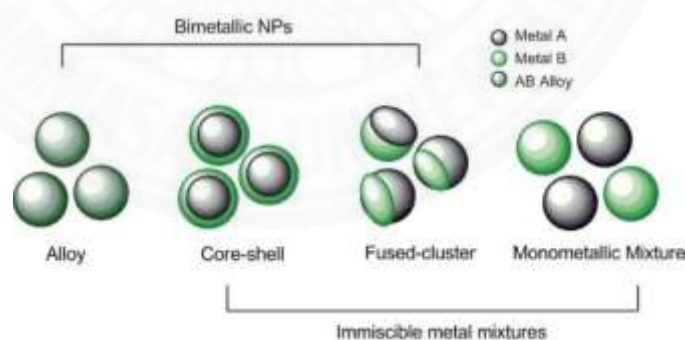
2.1 อนุภาคนาโนโลหะคู่

อนุภาคนาโน (Nanoparticle) เป็นอนุภาคขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตรที่ได้จากนาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ผ่านกระบวนการต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการสร้าง วิเคราะห์ จัดการ หรือสังเคราะห์ ทำให้สิ่งเหล่านั้นมีขนาดอนุภาคที่เล็กมากถึงระดับนาโนเมตรประมาณ 1–100 นาโนเมตร นอกจากนี้มีการออกแบบหรือใช้เครื่องมือสร้างวัสดุซึ่งอยู่ในระดับที่เล็กมาก ๆ หรืออาจเป็นการเรียงโมเลกุลและอะตอมให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ ทำให้วัสดุอุปกรณ์หรือโครงสร้างเหล่านั้นเกิดสสารที่มีความพิเศษมากขึ้น ซึ่งนอกจากจะเป็นการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ดีแล้ว ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้อย่างดีในด้านเคมี ฟิสิกส์ และชีวภาพ



ภาพที่ 2.1 คุณสมบัติที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคนาโนโลหะคู่. จาก *Bimetallic Catalysts Containing Gold and Palladium for Environmentally Important Reactions*, โดย Alshammari et al., 2016.

จากการศึกษาและพัฒนาของนาโนเทคโนโลยี ทำให้ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการสนใจ และประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนของโลหะคู่ (Bimetallic nanoparticles) จากนักวิจัยทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ผลที่ได้มาจากการสังเคราะห์ของโลหะสองชนิดผสมกัน โดยรวมกันแบบโลหะคู่จึงเกิดคุณสมบัติที่พิเศษดีกว่าคุณสมบัติของโลหะเดี่ยว (Monometallic) มีความน่าสนใจและยังมีความสำคัญมากในเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สำหรับอนุภาคนาโนมีคุณสมบัติที่โดดเด่นในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากมีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวสูง มีความจำเพาะและความเสถียรสูง รวมทั้งอนุภาคนาโนยังสามารถแยกออกจากปฏิกิริยาได้ง่าย ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ได้ให้ความสนใจอย่างมาก ในออกแบบโครงสร้างระดับนาโนที่มีขนาด รูปร่าง การกระจายตัว และองค์ประกอบของอนุภาค เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยา และการตรวจสอบกลไกเร่งปฏิกิริยาระดับอะตอม อ้างอิงงานวิจัยของ Liu และคณะ (2012) ได้เสนอบทความเกี่ยวกับการพัฒนาล่าสุดในการสังเคราะห์และคุณสมบัติของวัสดุนาโนแบบโลหะคู่ (Bimetallic) โดยอันดับแรกพบงานวิจัยที่พัฒนาวิธีในการสังเคราะห์ของอนุภาคนาโนของโลหะคู่ เกิดลักษณะและโครงสร้างที่แตกต่างไปจากวัสดุเดิม โดยมีการเปลี่ยนแปลงทั้ง Crown-jewel structure, Hollow structure, Heterostructure, Core-shell structure และ Alloyed structure and porous structure นอกจากนี้ยังมีการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของอนุภาค เช่น โครงสร้างพื้นผิว องค์ประกอบ ขนาด และลักษณะทางสัณฐานวิทยา ซึ่งมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุนาโนของโลหะคู่เป็นอย่างมาก



ภาพที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของอนุภาคนาโนโลหะคู่แบบต่าง ๆ. จาก *Metal oxide and bimetallic nanoparticles in ionic liquids: Synthesis and application in multiphase catalysis*, โดย Precht and Campbell., 2013.

นอกจากนี้ Dang-Bao และคณะ (2017) ยังกล่าวถึงอนุภาคนาโนแบบโลหะคู่ ว่าเป็นตัวบ่งชี้ถึงระบบตัวเร่งปฏิกิริยาที่น่าสนใจด้วยการทำงานร่วมกันระหว่างคูโลหะในระดับอะตอม โดย

ส่วนใหญ่เกิดจากผลของอิเล็กตรอนซึ่งจะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างที่สอดคล้องกัน (อัลลอยด์หรือโลหะผสม, แกนเปลือก และอื่น ๆ) อนุภาคประเภทนี้สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของจลนพลศาสตร์ของกระบวนการเร่งโดยการแปรผัน Electrophilicity/Nucleophilicity ของโลหะที่เกี่ยวข้องและส่งเสริมผลที่เกิดขึ้นร่วมกัน เพื่อสนับสนุนการแปลงเปลี่ยนสารอินทรีย์ รวมทั้งเปลี่ยนแปลงหลายองค์ประกอบ และเปลี่ยนแปลงในหลายๆขั้นตอน โดยตัวทำละลายถือเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการเร่งปฏิกิริยา เพราะมีผลต่อการรักษาโครงสร้างของโลหะคู่ และผลต่อระหว่างการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา

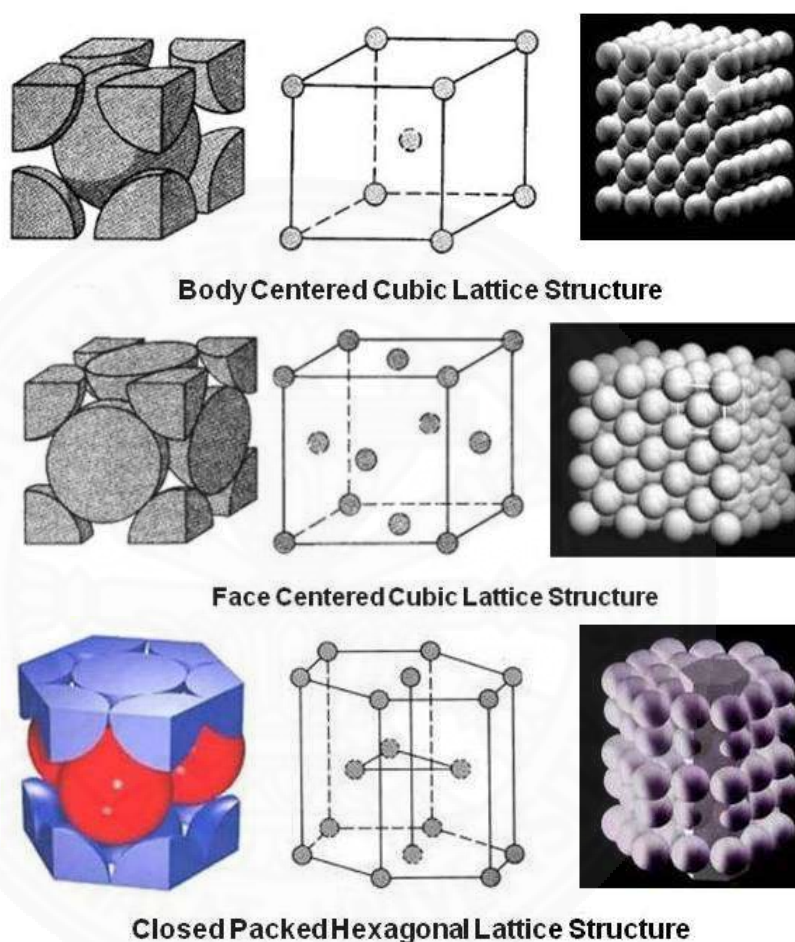
2.2 โลหะ

โลหะ (Metals) เป็นวัสดุที่ได้จากการถลุงสินแร่ต่าง ๆ ได้แก่ เหล็ก ทองแดงอลูมิเนียม นิกเกิล ดีบุก สังกะสี ทองคำ ตะกั่ว เป็นต้น โลหะเมื่อถลุงได้จากสินแร่ในตอนแรกนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นโลหะเนื้อค่อนข้างบริสุทธิ์ โลหะเหล่านี้มักจะมีเนื้ออ่อนไม่แข็งแรงเพียงพอที่จะนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมโดยตรง ส่วนมากจะนำไปปรับปรุงคุณสมบัติก่อนการใช้งาน โดยโลหะมีคุณสมบัติ ได้แก่ เป็นตัวนำความร้อนได้ดี เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี มีความคงทนการตามสภาพ ไม่เสื่อมสลายหรือเปลี่ยนแปลงสถานะง่าย เป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติ ยกเว้นโลหะปรอท มีความแข็งและความเหนียวสูง ผิวมันขาว และมีการขยายตัวที่อุณหภูมิสูง

โลหะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ วัสดุโลหะประเภทเหล็ก (Ferrous metals) โลหะที่มีพื้นฐานเป็นเหล็กประกอบอยู่ ได้แก่ เหล็กเหนียว เหล็กหล่อ เหล็กกล้า ฯลฯ เป็นวัสดุโลหะที่ใช้กันมากที่สุดในวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง สามารถปรับปรุงคุณภาพและเปลี่ยนแปลงรูปทรงได้หลายวิธี เช่น การหล่อ การกลึง การอัดรีดขึ้นรูป เป็นต้น และวัสดุโลหะประเภทไม่ใช่เหล็ก (Non-ferrous metals) หมายถึง โลหะที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับเหล็กเลยในขณะที่เป็นโลหะบริสุทธิ์ ได้แก่ ดีบุก อลูมิเนียม สังกะสี ตะกั่ว ทองแดง ทองคำ เงิน ทองคำขาว แมกนีเซียม พลวง เป็นต้น วัสดุโลหะประเภทที่ไม่ใช่เหล็กนี้ บางชนิดราคาสูงกว่าเหล็กมาก จึงต้องกำหนดใช้กับงานทางอุตสาหกรรมบางประเภทที่เหมาะสมเท่านั้น เช่น ทองแดงใช้กับงานไฟฟ้า ดีบุกใช้กับงานที่ต้องการทนต่อการกัดกร่อนเป็นสนิม อลูมิเนียมใช้กับงานที่ต้องการน้ำหนักเบา เป็นต้น

โครงสร้างผลึก (Structure of crystal) ของโลหะเป็นของแข็ง เนื้อวัสดุมีความหนาแน่น มีลักษณะโครงสร้างหลายรูปแบบต่าง ๆ โดยคุณสมบัติของโลหะมีความสัมพันธ์อย่างมากกับโครงสร้างผลึกที่อะตอมเรียงเกาะตัวกันอยู่ ซึ่งโครงสร้างของผลึกของโลหะจะเกี่ยวข้องกับสเปซ

แลตทิซ (Space lattice) รูปแบบของสเปซแลตทิซ หน่วยเซลล์ (Unit cell) โดยโครงสร้างผลึกที่สำคัญของโลหะสามารถแบ่งออกเป็น 3 โครงสร้าง นั่นคือ Body centered cubic (BCC), Face centered cubic (FCC) และ Hexagonal closed packed (HCP)



ภาพที่ 2.3 Unit cells ของโครงสร้างผลึกแบบต่าง ๆ จาก *Structure of atoms and crystals*, โดย K.P Shah, 2012. สืบค้นจาก <http://practicalmaintenance.net/?p=1051>

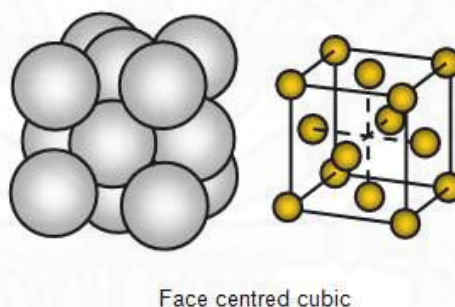
2.2.1 โลหะทองแดงและอนุภาคนาโนทองแดง

2.2.1.1 โลหะทองแดง (Copper, Cu)

โลหะทองแดงถือเป็นโลหะที่ถูกใช้ประโยชน์มาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และเป็นโลหะที่ถูกใช้มากรองลงมาจากเหล็ก และอลูมิเนียม ปัจจุบันมีการนำโลหะทองแดงมาใช้เป็นส่วนผสมของทอง และเงินมากขึ้นเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความสวยงาม และทนต่อการกัดกร่อน โดยใช้โลหะทองแดงในรูปทองแดงเจือสำเร็จรูป ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้ง่าย โดยทั่วไปโลหะทองแดง

บริษัทที่ใช้เรียกโลหะทองแดงที่มีส่วนผสมไม่เกิน 0.5% โดยน้ำหนัก และใช้คำว่า โลหะทองแดงผสมกับโลหะทองแดงที่มีทองแดงไม่ต่ำกว่า 40% แต่ไม่มากกว่า 99% โดยน้ำหนัก (Siamchemi.ออนไลน์)

โครงสร้างผลึกของทองแดงเป็นแบบ Face centered cubic (FCC) ลักษณะโครงสร้างของหน่วยเซลล์ (Unit cell) จะประกอบด้วยอะตอมอยู่ตรงมุมของหน่วยเซลล์ในลักษณะที่ใช้ร่วมกับหน่วยเซลล์อื่น และอีก 6 อะตอม จะอยู่กึ่งกลางของผิวทั้งหกด้านของหน่วยเซลล์ ในลักษณะที่จะร่วมใช้กับอีก 1 หน่วยเซลล์ ที่วางอยู่ติดกัน ในโครงสร้างแบบ FCC จะมีพันธะการเกิดแรงโดยรวมเท่ากับ 4 อะตอม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (สถาบันราชภัฏเพชรบุรี, 2543, ออนไลน์)



ภาพที่ 2.4 Unit cells ของโครงสร้างผลึกแบบ Face centered cubic (FCC) ของทองแดง. จาก *The structure of solids*, โดย Schoolphysics, 2013. สืบค้นจาก http://www.schoolphysics.co.uk/age1619/Properties%20of%20matter/Elasticity/text/Structure_of_solids/index.html

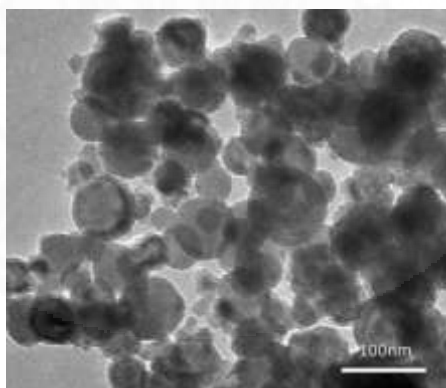
2.2.1.2 อนุภาคนาโนทองแดง (Copper nanoparticles, CuNPs)

(American Elements, ออนไลน์; Azonano, ออนไลน์)

อนุภาคนาโนทองแดงเป็น Nanodots หรือ Nanopowder เป็นอนุภาคโลหะพื้นผิวทรงกลมสีดำดำทรงกลม อนุภาคนาโนทองแดงมีขนาด 10-30 นาโนเมตร ที่มีพื้นที่ผิวเฉพาะ (SSA) ในช่วง 30-70 ตารางเมตรต่อกรัม และยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 5-10 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 70-100 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าอนุภาคนาโนทองแดงมีความสามารถในการกักตร่อน (Passivated) เมื่อมีความบริสุทธิ์สูง และสามารถเคลือบคาร์บอน (Carbon-coated) และกระจายตัวได้ดี มีการกระจายตัวโดย AE Nanofluid production group

ซึ่งเป็นอนุภาคนาโนที่แขวนอยู่ในสารละลายโดยใช้เทคโนโลยีลดแรงตึงผิวหรือพื้นผิว โดยใช้สารตัวทำละลายรวมถึงสารอินทรีย์ฟอสเฟตซึ่งอยู่ในรูปของเอสเทอร์ (Organic phosphates ester) เอทานอล และน้ำมันแร่ นอกจากพบในรูปของไหลนาโน (Nanofluid) แล้วยังพบความสามารถการกระจายและการเคลือบสารของโครงสร้างนาโนอื่น ๆ ได้แก่ Nanorods, Nanowhiskers, Nanohorns, Nanopyramids, Nanocomposites และอื่น ๆ เช่นเดียว

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานอนุภาคนาโนทองแดง ได้แก่ ทำหน้าที่เป็นสารต่อต้านชีวภาพป้องกันจุลินทรีย์และป้องกันเชื้อราเมื่อเพิ่มลงในพลาสติกสารเคลือบและสิ่งทอ อาหารเสริมทองแดงที่มีลักษณะการจัดส่งที่มีประสิทธิภาพ โลหะและโลหะผสมที่มีความแข็งแรงสูง การป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI shielding) อ่างความร้อนและวัสดุที่มีความร้อนสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสำหรับปฏิกิริยาทางเคมีและสำหรับการสังเคราะห์เมทานอลและไกลคอลเป็นสารเติมแต่งและวัสดุตัวเก็บประจุ หมึกพิมพ์ที่มีอนุภาคนาโนทองแดงสามารถนำมาใช้แทนโลหะอัลลอยที่มีราคาแพงมากที่ใช้ในงานพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์การแสดงผลและการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้า การเคลือบด้วยไฟฟ้าเป็นสื่อนำไฟฟ้าจากโลหะและโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก การผลิตอิเล็กทรอนิกส์ภายใน MLCC และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ในสารละลายอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการย่อขนาดของอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ และเป็นสารเติมแต่งหล่อลื่นแบบนาโนเมตร



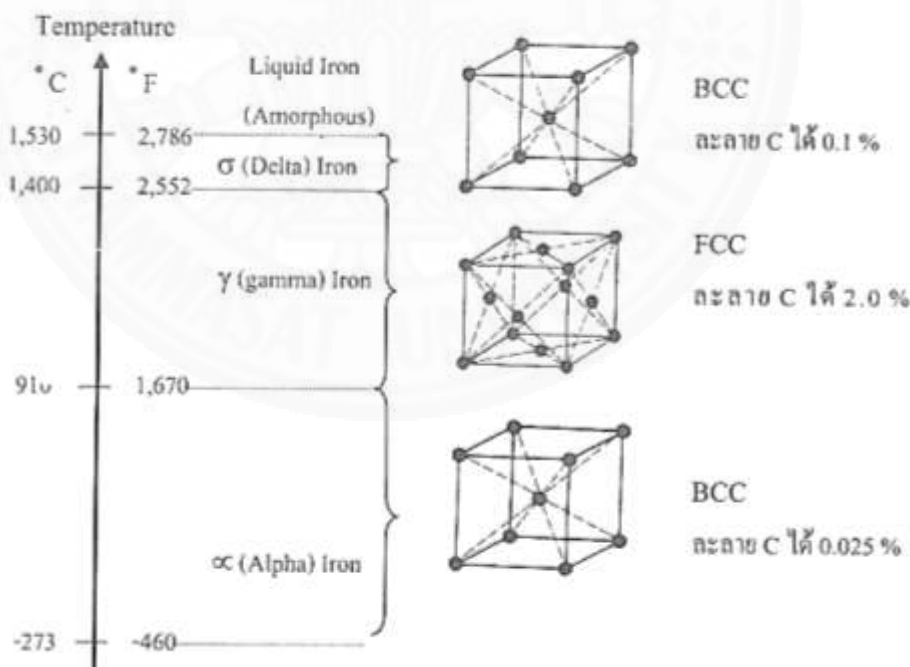
ภาพที่ 2.5 อนุภาคหรือผงนาโนทองแดง ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM). จาก *Copper Nanoparticles/Nanopowder* (Cu, 99.9% 40-60 nm), โดย SkySpring Nanomaterials, Inc., 2016. สืบค้นจาก http://ssnano.com/inc/sdetail/copper_nanoparticles/267

2.2.2 โลหะเหล็กและอนุภาคนาโนเหล็ก (Iron, Fe)

2.2.2.1 โลหะเหล็ก (Iron, Fe) (สถาบันราชภัฏเพชรบุรี, 2543, ออนไลน์)

โลหะในกลุ่มเหล็ก (Ferrous metals) เป็นโลหะที่นิยมใช้กันมาก เพราะหาซื้อได้ง่าย ราคาถูก มีกำลังวัสดุอยู่ในเกณฑ์สูง เหมาะสำหรับการใช้งานด้านวิศวกรรมทั่วไป สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลได้ด้วยการอบชุบความร้อน (Heat treatment) ในปัจจุบันวัสดุหลายประเภท เช่น โลหะผสมนอกกลุ่มเหล็ก เซรามิคและพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนเหล็กได้เนื่องจากมีคุณสมบัติเท่าเทียมกันหรือดีกว่า แต่โลหะในกลุ่มเหล็กยังคงได้รับความนิยมใช้งานกันมากกว่า เนื่องจากราคาค่อนข้างถูกกว่าวัสดุชนิดอื่น

เหล็กบริสุทธิ์เหล็กบริสุทธิ์จะมีจุดหลอมเหลวที่ 1,538 องศาเซลเซียส ภาวะการเย็นตัวลงจากสถานะของเหลวมาเป็นสภาพแข็ง จะมีผลต่อระบบโครงสร้างผลึกของเหล็ก และมีอิทธิพลต่อสมบัติของเหล็กนั้น ๆ โครงสร้างผลึกของเหล็กมีการเปลี่ยนแปลง 4 ลักษณะ ที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ นั่นคือเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะทำให้โครงสร้าง (Phase diagram) ของเหล็กเปลี่ยนไป และจะมีผลต่อการเปลี่ยนคุณสมบัติของเหล็กดังนี้



ภาพที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของเหล็กตามช่วงอุณหภูมิเย็นตัว. จาก สถานะของสาร, โดย คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันราชภัฏเพชรบุรี. สืบค้นจาก <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/48/crystal/A07.htm>

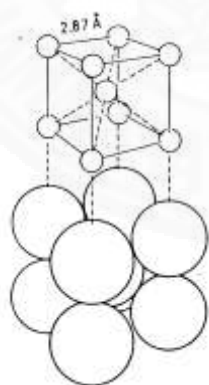
(1) เหล็กบริสุทธิ์จะแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1538 องศาเซลเซียส และเกิดภาวะการเกาะตัวกันมากขึ้นในรูปของ Body center cubic (BCC) ซึ่งเรียกเหล็กในโซนนี้ว่า เหล็กเดลต้า (δ -Iron)

(2) เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 1392 องศาเซลเซียส เหล็กจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นแบบ Face center cubic (FCC) หรือเรียกว่า เหล็กแกมมา (γ -Iron) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น Non-magnetic คือ ไม่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก

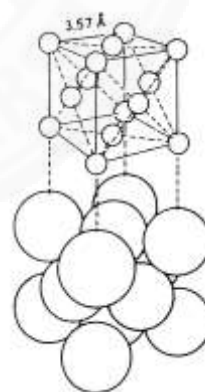
(3) ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 911 องศาเซลเซียส เหล็กจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นแบบ Body center cubic (BCC) ซึ่งเรียกเหล็กในโซนนี้ว่า เหล็กเบต้า (β -Iron) มีคุณสมบัติเป็น Non-magnetic

(4) หลังจากอุณหภูมิต่ำกว่า 723 องศาเซลเซียส เหล็กยังมีโครงสร้างเป็น Body center cubic (BCC) ซึ่งเรียกเหล็กในโซนนี้ว่า เหล็กแอลฟา (α -Iron) ซึ่งมีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก

นั่นคือเหล็กบริสุทธิ์มีอยู่ 2 ลักษณะ คือ BCC และ FCC ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยสามารถเรียกเหล็กแอลฟาว่า เหล็กเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเหล็กแกมมาเรียกว่า เหล็กออสเทนไนต์ (Austenite)



Ferrite (BCC)



Austenite (FCC)

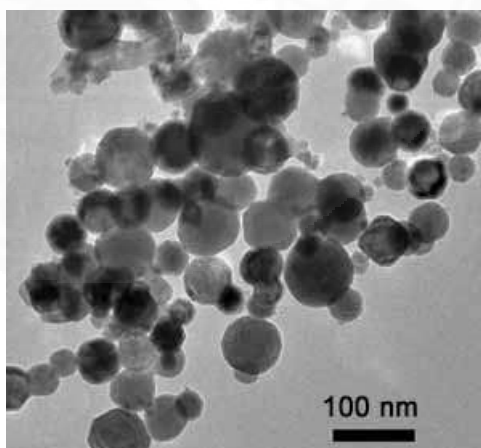
ภาพที่ 2.7 Unit cells ของโครงสร้างผลึกแบบ Body centered cubic (BCC) และ Face centered cubic (FCC) ของเหล็ก. จาก การอบชุบทางความร้อนของโลหะ, โดย หน่วยวิจัยการประยุกต์ใช้ความรู้ทางโลหะวิทยาสำหรับการขึ้นรูปโลหะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. สืบค้นจาก http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Carbon_Steel.html

2.2.2.2 อนุภาคนาโนเหล็ก (Iron nanoparticles, FeNPs) (American

Elements, ออนไลน์; Azonano, ออนไลน์)

อนุภาคนาโนเหล็กเป็นอนุภาคขนาดเล็กกว่าเศษของโลหะเหล็ก โดยโลหะเหล็กเกิดปฏิกิริยาสูงกับทั้งอากาศและน้ำ ซึ่งสำหรับอนุภาคนาโนเหล็กก็จะยิ่งเพิ่มปฏิกิริยาขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีปริมาณหรือจำนวนที่สูงขึ้น ทั้งนี้ข้อจำกัดอยู่ที่ลักษณะการใช้งานและสภาพแวดล้อม โดยอนุภาคนาโนเหล็กไม่เป็นพิษ อนุภาคนาโนเหล็กมักกระจายตัวเป็นสารแขวนลอยอยู่ในน้ำหรือตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆ เช่น เอทานอล หรือน้ำมันแร่ นอกจากนี้ยังพบเป็น Nanopowders โดยทั่วไปของอนุภาคนาโนเหล็กมีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 10-200 นาโนเมตร และพบอยู่ในรูปแบบที่เคลือบพื้นผิว

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานอนุภาคนาโนเหล็ก ได้แก่ ใช้ในการบำบัดบริเวณอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนด้วยสารประกอบคลอรีนอินทรีย์ ใช้บำบัดการปนเปื้อนในดินหลายประเภท เช่น บริเวณที่ปนเปื้อนด้วย Polychlorate biphenyls (PCBs) สารกำจัดศัตรูพืชคลอรีน และตัวทำละลายอินทรีย์ที่คลอรีน เป็นสีหลักในแก้วและเซรามิกและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สมบัติทางแม่เหล็กของอนุภาคนาโน ในการใช้งานทางการแพทย์และห้องปฏิบัติการ ในการจัดเก็บข้อมูลแม่เหล็กและการถ่ายภาพด้วยคลื่นเรโซแนนซ์ (MRI) ใช้ Nanowire ในพลาสติก และใช้ Nanofibres ในการเคลือบและสิ่งทอ และในการประยุกต์ใช้งานโลหะผสมและตัวเร่งปฏิกิริยาบางอย่าง



ภาพที่ 2.8 อนุภาคหรือผงนาโนเหล็ก ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน จาก *Iron Nanoparticles/ Nanopowder (Fe, 99.7%, 60~80nm)*, โดย SkySpring Nanomaterials, Inc., 2016. สืบค้นจาก http://www.ssnano.com/inc/sde-tail/iron_nanoparticles/18615

2.3 น้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex) เป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่จัดเป็นสารประกอบจำพวกพอลิเมอร์ (Polymer) มีคุณสมบัติเป็นสารคอลลอยด์ (Colloids) ที่มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวที่กรีดได้จากต้นยางพาราที่มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า ฮีเวีย บราซิลเลียนซิส (*Hevea brasiliensis*) มีแหล่งกำเนิดเดิมจากประเทศบราซิล สภาวะที่เหมาะสมในการปลูกต้นยางคือ พื้นที่ที่มีฝนตกชุกและอากาศอบอุ่นตลอดทั้งปี ประเทศไทยที่มีชื่อเสียงด้านการผลิตยางธรรมชาติมีพื้นที่ปลูกสำคัญในภาคใต้ เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีฝนตกชุกและอากาศอบอุ่นตลอดทั้งปี โดยของเหลวสีขาวที่กรีดได้เรียกว่า น้ำยางสดหรือน้ำยางดิบ (Latex)

ตารางที่ 2.1

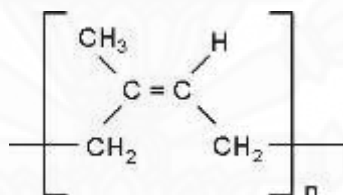
ตัวอย่างองค์ประกอบของส่วนอนุภาคยางในน้ำยางสด

องค์ประกอบ	ส่วน (%wt) ของน้ำยาง
ยางไฮโดรคาร์บอน	36
โปรตีน	1.4
คาร์โบไฮเดรต	1.6
นิวทรัลไลปิด	1.0
ไกลโคไลปิด + ฟอสโฟไลปิด	0.6
อนินทรีย์สาร	0.5
อื่นๆ	0.4
น้ำ	58.5

หมายเหตุ. จาก ยางธรรมชาติ : การผลิตและการใช้งาน (Natural Rubber : Production and Applications) (น.17), โดย วราภรณ์ ขจรไชยกูล, 2549, กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

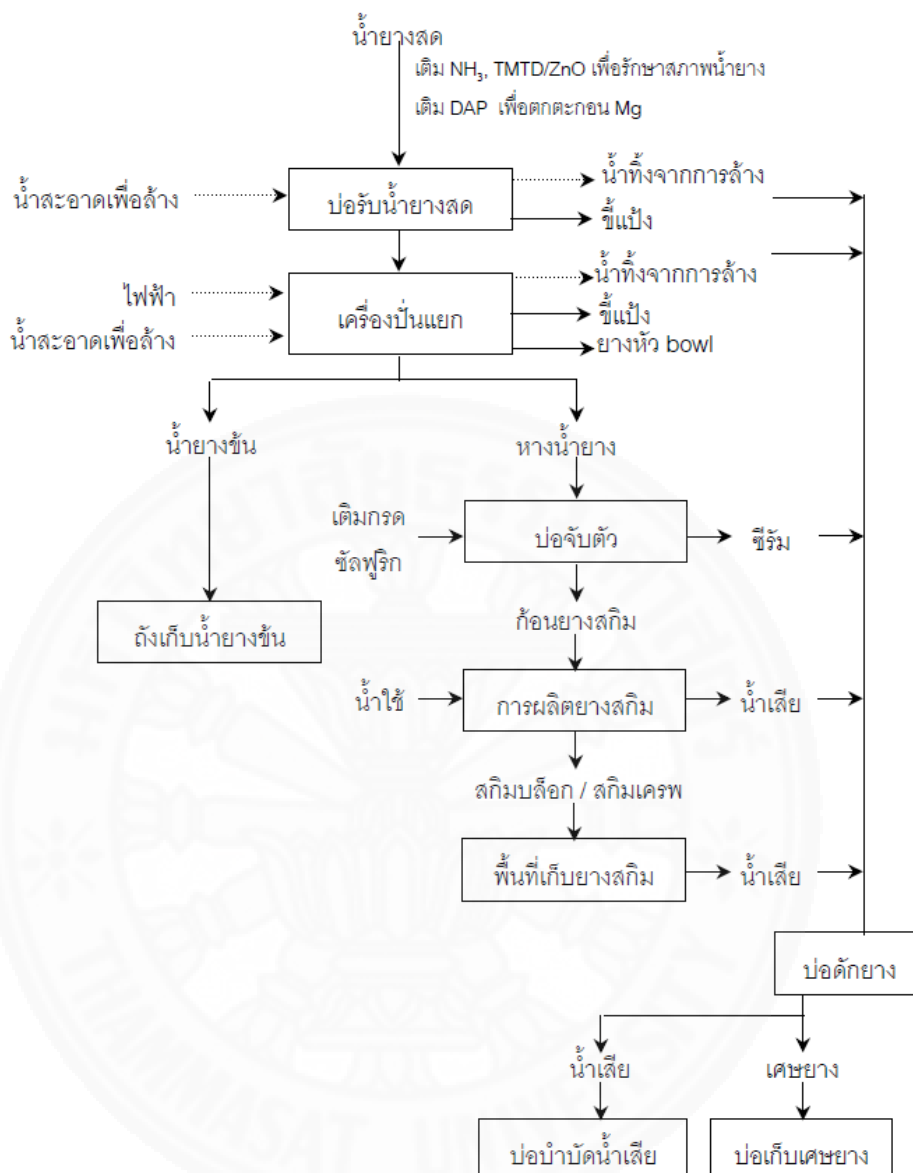
ยางธรรมชาติประกอบด้วยส่วนที่เป็นเนื้อยาง (Dry rubber content, DRC) 35% ส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยาง (Non-rubber content, NRC) 5% เช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เป็นต้น ที่เหลือเป็นน้ำประมาณ 60% ทั้งนี้ น้ำยางสดจะมีส่วนของอนุภาคยางที่ไม่แน่นอน ซึ่งประกอบด้วยสารต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.3 โดยจะมีประมาณ 20-45% โดยน้ำหนักน้ำยาง ซึ่งความแปรปรวนของปริมาณเนื้อยางขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ พันธุ์ยาง อายุต้นยาง วิธีการตัดและฤดูกาล เป็นต้น โดยอนุภาคยางส่วนใหญ่จะมีรูปร่างเป็นทรงกลม มีขนาดตั้งแต่ 20-5000 นาโนเมตร

โครงสร้างทางเคมีของประกอบด้วยมอนอเมอร์ไอโซพรีน ยางธรรมชาติที่ได้จากต้นยางพารามีสูตรทางเคมีคือ $-C_5H_8-$ มีชื่อเรียกว่า ไอโซพรีน (Isoprene) และมีการจัดเรียงตัวโมเลกุลของยางธรรมชาติเป็นแบบ cis-1,4-polyisoprene ดังภาพที่ 2.9 นอกจากนี้ยางธรรมชาติที่ได้จากต้นยางกัตตา ต้นยางบาลาฮา และต้นยางซิคเคิล มีสูตรโครงสร้างแบบทรานส์ ซึ่งเคยใช้เป็นส่วนผสมของหมากฝรั่ง มีความยืดหยุ่นน้อยกว่ายางพารา



ภาพที่ 2.9 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติจากต้นยางพารา (cis-1,4-polyisoprene). จาก ยางธรรมชาติ (Natural Rubber), โดย พิสิษฐ์ราชมงคล. สืบค้นจาก http://www.electron.rmutphysics.com/sciencenews/index.php?option=com_content&task=view&id=141&Itemid=4

ในกระบวนการแปรรูปน้ำยางธรรมชาติจะถูกทำให้เข้มข้นขึ้นซึ่งจะเรียกว่า น้ำยางข้นธรรมชาติหรือน้ำยางข้น (Natural rubber latex concentrate) โดยการหมั่นเหวี่ยงหรือการแยกครีม รักษาสภาพน้ำยางข้นโดยเติมแอมโมเนียประมาณ 0.7% ต่อน้ำหนักของน้ำยาง ได้น้ำยางที่มีปริมาณเนื้อยางเพิ่มขึ้นเป็น 60% ทั้งนี้เพื่อเป็นการแยกเซรัม (Serum) ที่มีองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน กรดอะมิโน และไขมัน ซึ่งเป็นตัวกลางในการกระจายตัวสำหรับอนุภาคยางออก จะได้หางน้ำยาง (Skim latex) เป็นผลพลอยได้ โดยมีปริมาณเนื้อยางอยู่ประมาณ 5% สามารถนำไปแปรรูปเป็นยางดิบแท่งชนิดสกินบล็อก (Skim block) หรือสกินเครพ (Skim crepe) โดยใช้กรดซัลฟูริกเพื่อระเหยแอมโมเนีย



ภาพที่ 2.10 กระบวนการผลิตน้ำยางข้น. จาก แนวปฏิบัติที่ดีด้านการป้องกันและลดมลพิษอุตสาหกรรมน้ำยางข้น โดย กรมควบคุมมลพิษ, 2548.

2.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับแสงและการดูดกลืนแสง

แสงที่มองเห็น (Visible light) เป็นแสงสีขาวที่เกิดจากการรวมกันของแสงสีต่าง ๆ ประกอบด้วยสีหลัก 7 สี ได้แก่ สีม่วง สีคราม สีน้ำเงิน สีเขียว สีเหลือง สีแสด และสีแดง เมื่อแสงสีขาวตกกระทบวัตถุแล้วทำให้มองเห็นวัตถุเป็นสีใด แสดงว่าวัตถุดูดกลืนแสงสีอื่น ๆ หหมด แต่สะท้อน

แสงที่ตามองเห็นออกมา แต่ถ้าวัตถุนั้น ๆ ดูดกลืนแสงทุกสีไว้ได้หมดจะมองเห็นวัตถุเป็นสีดำ โดยคลื่นแสงที่ตามองเห็นอยู่ในช่วงประมาณ 400-700 นาโนเมตร ถ้านัยน์ตาถูกกระตุ้นด้วยแสงตลอดทั้งช่วงความยาวคลื่นดังกล่าว ผลก็คือจะมองเห็นแสงนั้นเป็นแสงขาว แต่ถ้าคลื่นแสงถูกดูดกลืนแสงไปบางส่วน แสงที่ตามองเห็นจะเป็นสีเติมเต็ม (Complementary colors) หรือสีที่อยู่ตรงข้ามของสีที่ถูกดูดกลืน ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทรานซิชันเป็นสารที่มีสีสดใสสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์กับสีเติมเต็ม ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2

ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นระหว่างแสงสีที่มองเห็นกับแสงสีที่ถูกดูดกลืน

ความยาวคลื่น (nm)	สีที่ถูกดูดกลืน	สีที่มองเห็น
380-420	ม่วง	เขียว-เหลือง
420-440	ม่วง-ฟ้า	เหลือง
440-470	น้ำเงิน	ส้ม
470-500	เขียว-น้ำเงิน	แดง
500-550	เขียว-เหลือง	ม่วง
550-580	เหลือง	ม่วง-น้ำเงิน
580-620	ส้ม	น้ำเงิน
620-780	แดง	น้ำเงิน

หมายเหตุ. จาก สีและแสงการวัดการดูดกลืน, โดย สถาบันวัดกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้มหาวิทยาลัยมหิดล, 2555. สืบค้นจาก http://www.atom.rmutphysics.com/charud/old-news/0/286/12/6/CD/colorandLight/page1_4.html.

การดูดกลืนแสงสีของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทรานซิชันเกี่ยวข้องกับพลังงานการแยกออร์บิทัลระดับพลังงานย่อย d ของไอออนโลหะที่เป็นอะตอมกลางของสารประกอบนั้น ๆ โดยในระดับพลังงานหลัก (n) สเปกตรัมของธาตุต่าง ๆ ประกอบด้วยระดับพลังงานย่อยหรือเรียกว่า ซับเชลล์ (Sub-levels หรือ Sub-shells) กำหนดเป็นสัญลักษณ์คือ s p d และ f ซึ่งในแต่ละระดับ

พลังงานย่อยจะมีอิเล็กตรอนได้ไม่เท่ากันและมีพลังงานไม่เท่ากัน สำหรับระดับพลังงานย่อย d มีอิเล็กตรอนได้ไม่เกิน 10 อิเล็กตรอน และมี 5 ออร์บิทัล จากทฤษฎีสถานะผลึก (Crystal field theory) อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการจัดวางตำแหน่งของลิแกนด์จะทำให้ออร์บิทัลระดับพลังงานย่อย d ของโลหะไอออนที่มีพลังงานเท่ากัน แต่มีความแตกต่างกันของพลังงานเกิดขึ้น โดยจะเกี่ยวข้องกับรูปร่าง ทิศทางการจัดตัวและการกระจายของอิเล็กตรอนในออร์บิทัลระดับพลังงานย่อย d ซึ่งอิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานต่ำจะมีออร์บิทัลอยู่ใกล้นิวเคลียส อิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานสูงจะอยู่ห่างจากนิวเคลียสเป็นระยะทางเพิ่มขึ้น และพบว่าพลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าห่างกันเป็นช่วงคงที่ (Quantized)

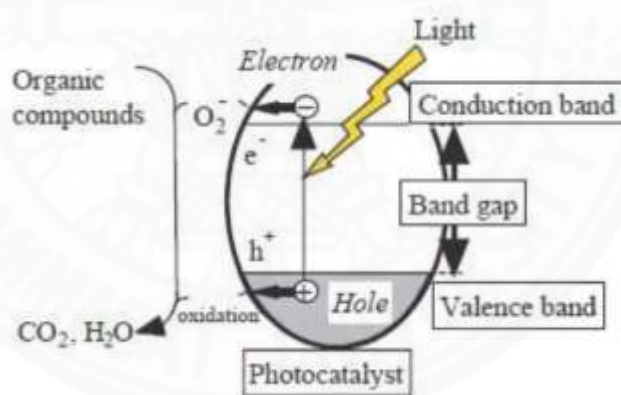
นอกจากนี้สำหรับแสงอัลตราไวโอเล็ต มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่น้อยกว่าแสงที่มองเห็น (Visible light) โดยที่ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 นาโนเมตร รังสีจะอยู่ในช่วงสุญญากาศ จะถูกดูดกลืนในอากาศจนหมดในช่วงระยะเวลานั้น ๆ ที่แสงเดินทาง แสงอาทิตย์มีช่วงความยาวคลื่นที่กว้างมาก ความเข้มของแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงขาวที่ส่องลงมาพื้นผิวโลกจะถูกทำให้ลดลงอย่างมากในชั้นบรรยากาศจากการถูกดูดกลืนและการกระเจิงของแสง ที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 320 นาโนเมตร ความเข้มแสงจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยแสงอัลตราไวโอเล็ตสามารถแบ่งออกได้ 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงคลื่นยาว (Long wave UV, UV-A หรือ Black light) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 315-400 นาโนเมตร มีระดับพลังงาน 3.10-3.94 eV ช่วงคลื่นกลาง (Middle wave UV, UV-B หรือ Sunburn radiation) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 280-315 นาโนเมตร มีระดับพลังงาน 3.94-4.43 eV และช่วงคลื่นสั้น (Short wave UV, UV-C หรือ Germicidal radiation) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 200-280 นาโนเมตร มีระดับพลังงาน 4.43-12.4 eV

2.5 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (อดิศร จำตุรพิริย์, 2549; วีระชัย แสงฉาย และพัชรี เพิ่มพูน, 2553)

กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photo catalytic process) เป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัว แคตตาลิสต์หรือตัวเร่งปฏิกิริยา นั่นคือ โลหะตัวนำ (Transition metal) เช่น ทองแดง โคโรเมียม นิกเกิล เป็นต้น หรือสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ สังกะสีออกไซด์ เป็นต้น โดยตัวแคตตาลิสต์นี้จะทำหน้าที่ลดพลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยา ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยกระตุ้นด้วยแสงที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ในการเกิดกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกจะต้องประกอบด้วยน้ำ และออกซิเจนหรือตัวออกซิแดนท์ อื่น ๆ

หลักการทำงานของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชัน (Photocatalytic oxidation) คือ การให้พลังงานแสงเข้าไปในระบบเพื่อเอาชนะค่าแถบพลังงาน (Energy band gap) ซึ่งเป็นค่าของความแตกต่างระหว่างการทำงานของแถบนำไฟฟ้า (Conduction band, CB) กับแถบพลังงานที่เต็มแล้ว (Valence band, VB) ซึ่งเมื่อพลังงานแสงที่ให้แก่ระบบมากกว่าแถบพลังงานแล้วจะมีการสร้างอิเล็กตรอนที่มีประจุบวก (Electron hole pairs) ที่ผิวของโลหะตัวนำหรือสารกึ่งตัวนำ สำหรับกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชัน แสงที่ให้แก่ระบบมักเป็นแสงอัลตราไวโอเลต ดังภาพที่ 2.11

พื้นฐานของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกประกอบด้วยการปล่อยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ ไปยังแถบไฟฟ้าของโลหะตัวนำหรือสารกึ่งตัวนำและการสร้างโฮลในแถบวาเลนซ์ เพราะว่ารังสีอัลตราไวโอเลต มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าแถบพลังงาน กระบวนการนี้จึงสามารถถูกใช้ในการทำลายมลสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับปรากฏการณ์ของกระบวนการที่เกิดขึ้นจากการส่องแสงลงบนสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดตัวพาประจุอิสระอิเล็กตรอนและโฮล (e^-h^+) โดยประจุที่เกิดขึ้นนี้มีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันในสารละลาย



ภาพที่ 2.11 กลไกการเกิดกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชัน. จาก อิทธิพลของทั้งสเทโนออกไซด์ต่อสมบัติโฟโตแคตตาไลติกและการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของผงไทเทเนียมไดออกไซด์, โดย วีระชัย แสงฉายและ พัทธี เพิ่มพูน, 2561.

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก มีรายละเอียด ดังนี้

1) ความเข้มของแสง โดยการเพิ่มความเข้มแสงจะเป็นการเพิ่มจำนวนโฟตอนให้มากขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น

2) ปริมาณตัวแคตตาลิสต์ เนื่องจากตัวแคตตาลิสต์ทำหน้าที่เป็นสารดูดซับซึ่งทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกเกิดขึ้นที่ผิวของแคตตาลิสต์

3) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกมักจะลดลงทั้งนี้อาจมาจากขณะที่มีการเกิดปฏิกิริยาเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นจะเกิดสารอินเตอร์มีเดียตเพิ่มขึ้นซึ่งสารพวกนี้จะเข้าไปยับยั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้น้อยลง รวมทั้งเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นความหนาแน่นของสารภายในสารละลายเพิ่มขึ้นทำให้การส่องผ่านของแสงไปยังสารละลายไม่ทั่วถึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดลดลงอีกด้วย

4) ออกซิเจนและตัวรับอิเล็กตรอนตัวอื่น ๆ จะจับตัวกับอิเล็กตรอนทำให้การกลับมารวมตัวกันอีกครั้งของอิเล็กตรอนกับโฮลเป็นไปได้ยากขึ้น ออกซิเจนจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ตัวหนึ่งซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลนี้อาจทำปฏิกิริยาต่อกับไฮโดรเจนไอออนเกิดเป็นเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งก็เป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่รุนแรงตัวหนึ่งซึ่งประสิทธิภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์ขึ้นกับปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลายเป็นอย่างมาก

5) ค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นผลมาจากการลดลงของไฮดรอกไซด์ไอออน เนื่องจากการทำปฏิกิริยากับโฮลเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส และผลิตภัณฑ์สุดท้ายของปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชัน

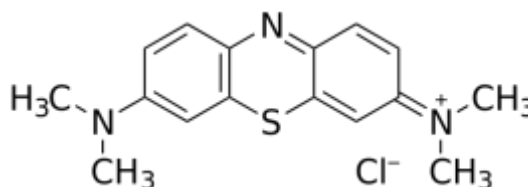
6) อิเล็กโตรไลต์ ทั้งนี้ นอกจากสารประกอบอินทรีย์แล้วไอออนบางตัวก็อาจจะถูกดูดติดบนผิวแคตตาลิสต์ได้ในทำนองเดียวกัน ไอออนเหล่านี้จึงถือเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยา ดังนั้นไอออนเหล่านี้จึงมีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและจลศาสตร์โดยรวมของปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส

2.6 สีย้อมเมทิลีนบลู (ขนิษฐา เจริญลาก และปทุมทิพย์ ปราบพาล, 2556)

สีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue dye) เป็นสีย้อมประเภทสีเบสิก (Basic dye) เป็นสีประจุบวก (Cationic dye) มีสูตรทางเคมีเป็น $C_{16}H_{18}N_3SCl$ และมีสูตรโครงสร้างดังภาพที่ 2.12 ที่อุณหภูมิห้องจะมีลักษณะเป็นของแข็ง เป็นผงสีเขียวเข้ม ไม่มีกลิ่น ละลายน้ำได้ เมื่อละลายน้ำจะกลายเป็นสีฟ้า

สีย้อมเมทิลีนบลูนิยมนำไปใช้ย้อมสีกระดาษ สิ่งทอ หนังกนิม และเส้นใยอะคริลิก เนื่องจากสีสามารถถูกดูดซึมและยึดติดกับสายโซ่พอลิเมอร์ได้เร็ว ทำให้การย้อมเกิดความไม่สม่ำเสมอของสี น้ำเสียจากการใช้สีในการย้อมผ้า น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ จะก่อให้เกิดการ

ปนเปื้อนสีย้อมในน้ำ ซึ่งเป็นมลพิษและส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำ รวมทั้งสิ่งมีชีวิตในน้ำต่อไป ดังนั้นจึงต้องมีการบำบัดสีก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำ



ภาพที่ 2.12 สูตรโครงสร้างของสีย้อมเมทิลีนบลู. จาก Methylene Blue โดย Chemkart. สืบค้นจาก <http://www.chemkart.com/product/Methylene-Blue/>

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาอนุภาคนาโนได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นอนุภาคที่เกิดจากการสังเคราะห์ทำให้มีจัดเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของสารต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ จึงมีโครงสร้างและมีประสิทธิภาพสูงที่สุด ในกลุ่มอนุภาคนาโนของโลหะ โลหะทองแดงถือเป็นอีกหนึ่งโลหะที่ได้รับความสนใจ อ้างอิงจาก Zyryanov และคณะ (2017) กล่าวว่า อนุภาคนาโนทองแดงได้รับการสำรวจว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่พิเศษตัวใหม่ จากการสำรวจการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ให้มีประโยชน์มากที่สุด โดยใช้อนุภาคนาโนทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบข้อได้เปรียบเหนือกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจากโลหะชนิดอื่น ๆ โดยมีใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่น้อยแต่ให้ผลได้สูง ราคาถูก ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่สั้นลง และยังสามารถนำมารีไซเคิลได้

Dong และคณะ (2014) ได้ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงโดยเติมกัมอะคาเซีย (Gum acacia) โดยวิธีการเตรียมอนุภาคนาโนคอลลอยด์ทองแดงอย่างง่าย ใช้สารตั้งต้นเป็นคอปเปอร์ซัลเฟตกับกัมอะคาเซีย และไฮดราซีนไฮเดรต (N_2H_2) สำหรับเป็นสารช่วยควบคุมขนาดและตัวรีดิวซ์ นำอนุภาคที่ได้แล้วนำไปปั่นเหวี่ยง แล้วตรวจสอบอนุภาคนาโนทองแดงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบ UV-Visible, Transmission electron microscope (TEM) และ Scanning Electron Microscopy (SEM) พบว่า อนุภาคนาโนทองแดงมีลักษณะทรงกลม มีการกระจายขนาดอนุภาคแคบอยู่ในช่วง 3-9 นาโนเมตร และตรวจสอบโครงสร้างด้วยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรดด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) พบว่า อนุภาคนาโนทองแดงมีกัมอาร์บิกเคลือบผิวอยู่

Zhou และคณะ (2015) ได้ศึกษาการสังเคราะห์และตรวจสอบวิธีการควบคุมขนาดของอนุภาคนาโนทองแดงที่สังเคราะห์ขึ้น โดยใช้วิธีสังเคราะห์แบบ Supercritical hydrothermal synthesis method โดยนำมาใช้กับเครื่อง Flow-type reaction และ Batch-type quartz tube apparatus ในการสังเคราะห์ที่ได้ใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นแหล่งไอออนของทองแดง ใช้กรดเอทิลีนไดเอมีนเตตราอะซีติก ไดโซเดียม-ซอลท์ ($\text{EDTA}\text{Na}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เป็นสารประกอบเชิงซ้อน ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อควบคุมขนาดให้ใกล้เคียงกับตอนเริ่มต้น และฟอร์มัลดีไฮด์เป็นตัวรีดิวซ์ผสมจนเข้ากันเป็นเนื้อเดียว จากการทดลองพบว่า อนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้มีความไวต่อความเข้มข้นของคอปเปอร์ซัลเฟตและความเป็นด่างของสารตั้งต้น เมื่อความเข้มข้นของคอปเปอร์ซัลเฟตเพิ่มขึ้น 0.05-0.5 โมลต่อลิตร ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 14-50 นาโนเมตร และยังมีผลต่อความสม่ำเสมอในการกระจายตัวของอนุภาค ความเป็นด่างของสารตั้งต้นมีอิทธิพลสำคัญต่อขนาดของอนุภาค เมื่ออัตราส่วนโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อไอออนทองแดงเพิ่มขึ้นจาก 0:1 เป็น 2:1 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลง 14-85 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของ EDTA มีผลต่อการเป็นเนื้อเดียวกัน การกระจายตัวของอนุภาค และการดูดซับบนพื้นผิวทำให้ไฮดรอกไซด์บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนทองแดง (CuOH) จะมี Cu^0

นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติ เพื่อเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งนำกลับมาใช้ใหม่แทนการทำการกำจัดและทำลาย ดังตัวอย่างงานวิจัยดังนี้

Nazara และคณะ (2017) ได้ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดงด้วยวิธีเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยใช้สารสกัดจากเมล็ดพันธุ์ของทับทิม (*P. granatum*) ในการสังเคราะห์ ได้ใช้สารละลายคอปเปอร์คลอไรด์กับสารสกัดจากเมล็ดพันธุ์ของทับทิม ที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส สารละลายเกิดการเปลี่ยนสีจากสีฟ้าอมเขียวเป็นสีน้ำตาลอออก จากนั้นทำการวิเคราะห์การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงโดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบ UV-Vis, X-ray diffraction measurements (XRD), SEM, วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS), FTIR และ Atomic force microscopy analysis พบว่าอนุภาคนาโนของทองแดงที่สังเคราะห์ (CuNPs) ได้เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันของไอออนโลหะตามด้วยการเกิดนิวเคลียส มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 40-80 นาโนเมตร (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 43.9 นาโนเมตร) มีรูปทรงกึ่งทรงกลมและกระจายสม่ำเสมอ นอกจากนั้นยังประเมินกระบวนการการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis process) โดยการย้อมสีเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ปริมาณอนุภาค 10-100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า มีการย่อยสลายเมทิลีนบลูภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ถึง 87.11%

ทั้งนี้ยังพบงานวิจัยของภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดงและยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมด้วยเช่นเดียวกัน ของชัญญานุช ชนะกิกการโชค และนภดาว หริพัฒน์กุล (2559) ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดงโดยใช้ทางน้ำยางด้วยกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้เซรั่มที่ได้จากการจับก้อนระหว่างทางน้ำยางกับสารโพลีอะคริลาไมด์ (PAM) ซึ่งมีโพลิเมอร์หลงเหลืออยู่ผสมกับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดง ตรวจสอบคุณสมบัติของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบ Visible และเครื่อง TEM นอกจากนี้ยังศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดงพบว่า มีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 437-445 นาโนเมตร ขนาดและปริมาณของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเซรั่ม และเวลาในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ในการทดสอบการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูพบว่า อนุภาคนาโนทองแดงที่สังเคราะห์ได้สามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ถึง 79.19% ในเวลา 3 ชั่วโมง

นอกเหนือจากอนุภาคนาโนของทองแดงที่ได้รับความสนใจแล้ว ยังพบอนุภาคนาโนของโลหะอื่น ๆ ที่ได้รับความสนใจเช่นเดียวกัน เช่น เหล็ก เงิน สังกะสี ไทเทเนียม เป็นต้น สำหรับอนุภาคนาโนของเหล็กมีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์สารอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารที่เป็นพิษหรือก่อให้เกิดมลภาวะ ให้กลายเป็นสารที่มีพิษน้อยลงหรือจนไม่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม ถูกนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม อนุภาคนาโนของเหล็กจึงเป็นอีกหนึ่งโลหะที่น่าสนใจในการพัฒนา ซึ่งพบงานวิจัยที่ศึกษาและรวบรวมรายมาอย่างต่อเนื่อง ดังตัวอย่างงานวิจัยต่อไปนี้ โดยอ้างอิงจาก Reddy และคณะ (2016) ได้กล่าวถึงอนุภาคนาโนที่มีส่วนผสมของเหล็ก โดยรวบรวมความก้าวหน้าในการศึกษาการสังเคราะห์ คุณสมบัติ ลักษณะ และการประยุกต์ใช้งานด้านสิ่งแวดล้อมเหล็ก พบว่าเป็นเทคโนโลยีการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมยุคใหม่และค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดในการแก้ไขปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เพราะบริเวณพื้นผิวของอนุภาคนาโนเหล็กมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาพื้นผิวสูง อนุภาคมีรูพรุน การปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคยังช่วยเพิ่มความเร็วและประสิทธิภาพในการฟื้นฟูให้มากขึ้น โดยการรวบรวมในงานนี้มีรายละเอียดถึงปฏิกิริยาของอนุภาคนาโนที่มีรูพรุน การพัฒนาอนุภาคนาโนเหล็กสำหรับการฟื้นฟู การขนส่งอนุภาคนาโนที่มีรูพรุน กระบวนการและการเปลี่ยนแปลงด้านสิ่งแวดล้อม การสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยเหล็ก การสังเคราะห์ของอนุภาคนาโนของเหล็กที่มีโครงสร้าง Bimetallic การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเพื่อปรับปรุงพื้นผิว การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ (IONPs) ลักษณะของอนุภาคนาโนที่มีรูพรุน และการใช้งานด้านสิ่งแวดล้อมของอนุภาคนาโนที่มีส่วนผสมของเหล็ก

Kwon และคณะ (2017) ได้ศึกษาและรวบรวมเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของอนุภาคนาโนที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบ พบว่า อนุภาคนาโนที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบมีคุณสมบัติพิเศษขึ้น ทั้งคุณสมบัติการใช้งานด้านแม่เหล็ก โครงสร้างที่มีความแข็งแกร่งกว่าวัสดุอื่น ๆ สมบัติเชิงแสงของวัสดุ และสมบัติ Superparamagnetic มีการเสนอวิธีการสังเคราะห์วัสดุที่มีส่วนผสมของเหล็กแบบ Binary chalcogenides, Ternary chalcogenides และ Bimetallic nanoparticles นอกจากนี้ยังศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของอนุภาคนาโนที่มีอนุพันธ์เหล็ก ซึ่งรวมถึงอนุภาคนาโนของแกนกลาง (Core-shell) และเปลือกหุ้ม (Core-satellite) จากเหล็ก Janus nanoparticles และ Yolk-shell nanoparticles โดยวัสดุที่มีส่วนผสมของเหล็กยังสามารถปรับเปลี่ยนพื้นผิวได้โดยใช้โมเลกุลที่แตกต่างกัน สำหรับการใช้งานด้านการเหนี่ยวนำแรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้า (Spintronics) การใช้งานทางชีวการแพทย์และอิเล็กทรอนิกส์

นอกจากนี้ยังพบงานวิจัยที่เกี่ยวกับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของเหล็กด้วยวิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเช่นเดียวกันกับอนุภาคนาโนของทองแดง ดังตัวอย่างงานวิจัยต่อไปนี้

Devatha และคณะ (2016) ได้ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของเหล็กด้วยวิธีเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมโดยใช้สารสกัดจากใบพืชต่าง ๆ ได้แก่ *Magnifera indica*, *Murraya koenigii*, *Azadiracta indica* และ *Magnolia champaca* จากนั้นประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียภายในประเทศ ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของเหล็กได้ใช้เฟอร์รัส (II) ซัลเฟต กับสารสกัดจากใบพืช ที่อัตราส่วน 1:2 ที่อุณหภูมิห้อง วิเคราะห์คุณสมบัติของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้จากเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบ UV-Visible, เครื่อง SEM, EDS และ FTIR เพื่อศึกษาขนาด องค์ประกอบของธาตุ และสัญญาณวิทยาของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ จากผลการทดลองพบว่า ทันทีที่ผสมเกิดการเปลี่ยนสีทันทีเป็นการยืนยันว่าเกิดอนุภาคนาโนเหล็กขึ้น โดยพีคค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 300-500 นาโนเมตร ซึ่งเหมือนกันกับค่าที่ดูดกลืนแสงของโลหะเหล็ก อนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้พบธาตุ F และ O ในสารสกัดจากใบพืชทุกชนิดจึงแสดงถึงการก่อตัวของเหล็กออกไซด์ โดยประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียโดยรวมของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์จาก *Azadiropha indica* ให้ผลดีกว่าสารสกัดจากใบอื่น ๆ ในการบำบัดน้ำเสียในประเทศสามารถกำจัดปริมาณฟอสเฟต ไนเตรท และซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD) ลดลงถึง 98.1%, 84.3% และ 82.4% ตามลำดับ นอกจากนี้ในการศึกษายังพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างยังมีบทบาทสำคัญต่ออนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้ในการบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพ โดยช่วงพีเอชที่ 6.5-8 เป็นช่วงพีเอชที่ให้ผลทดลองดีที่สุด

Wei และคณะ (2016) ได้ศึกษาการการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของเหล็กด้วยวิธีเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมโดยใช้สารสกัดจากเปลือกส้มโอ (*Citrus maxima* peels) เพื่อลด Cr(VI) ในน้ำ ตรวจสอบและวิเคราะห์ด้วย TEM, EDS, XPS, FTIR, DLS และ Zeta potential methods โดยใน

การสังเคราะห์ที่ได้ใช้เฟอร์ริก (III) คลอไรด์ ผสมกับสารที่สกัดได้จากเปลือกส้มโอในอัตราส่วน 3:1 ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเปลี่ยนสีทันทีจากสีเหลืองเป็นสีดำ พบว่า อนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาด 10-100 นาโนเมตร และยังประกอบด้วย FeO ซึ่งเคลือบด้วยสารชีวโมเลกุลต่าง ๆ นอกจากนี้ได้นำไปบำบัดกับสารละลายที่มี Cr(VI) พบว่า สามารถกำจัด Cr(VI) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 30.53-96.87%

Santos และคณะ (2017) ได้ศึกษาการสังเคราะห์และการศึกษาลักษณะของอนุภาคนาโนของเหล็กที่มีประจุเป็นศูนย์ (F^0 , Zero-valent iron) บนนาโนซิลิกาชนิด SBA-15 ภายใต้ปฏิกิริยาพอลิเมอร์กับกรดไฮโดรคลอริกภายใต้ในอุณหภูมิที่ควบคุมได้ ในการสังเคราะห์ที่ได้ใช้เฟอร์ริก (III) ไนเตรต, โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ($NaBH_4$) และเฮกเซน แล้วจึงสังเคราะห์อนุภาคนาโนที่มีเหล็กอยู่บนนาโนซิลิกาชนิด SBA-15 จากนั้นนำไปตรวจสอบลักษณะด้วยเครื่อง XRD, XRF, TEM และ EDS พบว่า อนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้มีธาตุเหล็ก (FeO) 11.9% และซิลิคอน 14.0% มีธาตุเหล็กบนผิวของนาโนซิลิกาชนิด SBA-15 คิดเป็น 73.0% และซิลิคอน 27.0% โดยอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้สามารถนำมาใช้เป็นตัวเลือกหนึ่งในการปฏิกิริยา Fenton สำหรับการย่อยสลายสารเบนโซโพรไพโอหรือการใช้งานอื่นๆ ในระบบบำบัดน้ำใต้ดินและน้ำเสีย

นอกจากการศึกษากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของเหล็กข้างต้นนี้ ยังพบการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของคูโลหะ (Bimetallic) นั่นคือการนำโลหะกับโลหะรวมกันเป็นอนุภาคนาโน ซึ่งก็มีงานวิจัยที่สนใจและศึกษานำเหล็กไปเป็นองค์ประกอบในอนุภาคนาโนด้วยอย่างมากมาย เนื่องจากเหล็กมีแนวโน้มก่อให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแกร่ง อีกทั้งคุณสมบัติที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ เช่น การเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การดูดซับสารพิษ และความเป็นแม่เหล็ก เป็นต้น จึงเป็นเหตุให้มีการศึกษาอนุภาคนาโนของคูโลหะที่มีเหล็ก ดังตัวอย่างงานวิจัยต่อไปนี้

Wang และคณะ (2009) ได้ศึกษาศักยภาพในการลดคลอรีนของ Chlorinated methanes รวมทั้ง Dichloromethane (DCM), chloroform (CF) และ Carbon tetrachloride (CT) โดยใช้อนุภาคนาโนโลหะคู่ของแพลเลเดียม/เหล็ก (Pd/Fe) ในวิธีการตกตะกอนทางเคมีในรูปของเหลว การสังเคราะห์อนุภาคนาโนจากแพลเลเดียมอะซิเตต ($[Pd(C_2H_3O_2)_2]_3$) และเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ทำการตรวจสอบด้วยเครื่อง TEM, SEM, XRD และตรวจลักษณะเฉพาะของพื้นที่ผิวด้วยเครื่อง Brunauer-Emmett-Teller (BET) พบว่า อนุภาคนาโนของ Pd/Fe มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30-50 นาโนเมตร และมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดคลอรีนของ Chlorinated methanes ได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อพื้นผิวของอนุภาคมีปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นและตัวกลางมีความเข้มข้นต่ำ สามารถลดคลอรีนของ CT ได้มีประสิทธิภาพดีที่สุด ตามด้วย CF และ DCM และค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยา ได้แก่ พีเอช 7

Parshetti และ Doong (2009) ได้ศึกษาการกำจัดคลอรีนของไตรคลอโรเอธิลีน (Trichloroethylene, TCE) โดยใช้อนุภาคนาโนของเหล็ก/นิกเกิล (Fe/Ni) บน PEG/PVDF, PEG/Nylon 66 ในการสังเคราะห์ได้ใช้นิกเกิล (II) คลอไรด์กับเพอร์ส (II) ซัลเฟต หลังจากนั้นนำไปสังเคราะห์บนเมมเบรนแล้วนำไปทำปฏิกิริยา TCE ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ตรวจสอบคุณลักษณะด้วยเครื่อง SEM และ Electron probe microanalysis (EPMA) พบว่า มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาคนาโนเหล็กในไนลอน และพบชั้นอนุภาคนาโนนิกเกิลที่สูงกว่า PVDF ขนาดอนุภาคของ Fe/Ni ใน PVDF และไนลอน มีค่า 81 ± 12 และ 55 ± 14 นาโนเมตร ตามลำดับ และขนาดชั้นของนิกเกิล 12 ± 3 และ 15 ± 2 นาโนเมตร ตามลำดับ จากการทดสอบปฏิกิริยากับ TCE พบว่า อนุภาคนาโนของ Fe/Ni เกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีคลอรีเนชันกับ TCE กับอัตราเป็นผลิตภัณฑ์หลัก โดยการกำจัดคลอรีนของ TCE บนไนลอนและ PVDF เท่ากับ 6.44 ± 0.32 และ 1.66 ± 0.08 ชั่วโมง⁻¹ ตามลำดับ นอกจากนี้อนุภาคนาโนของ Fe/Ni บนเมมเบรนต่าง ๆ ยังคงเสถียรภาพสามารถใช้ซ้ำหลายครั้ง โดยเฉพาะบนไนลอน

ทั้งนี้ยังพบงานวิจัยอื่น ๆ ที่สนับสนุนการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของคูลโลหะอื่น ๆ ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ รวมถึงการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดง/เหล็ก (Copper/Iron bimetallic nanoparticles) ซึ่งมีความสนใจไม่ต่างจากคูลโลหะชนิดอื่น ๆ แม้จะมีข้อมูลไม่มากนักที่สามารถนำไปใช้ได้ แต่ยังคงมีการศึกษาและพัฒนาการอย่างต่อเนื่อง ดังเช่นงานวิจัยของทองแดง/เหล็ก ดังต่อไปนี้

Ma และคณะ (2004) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีย้อมเมทิลีนบลูที่ละลายในน้ำและน้ำเสียจากโรงงานโดยระบบ Fe/Cu bimetallic ซึ่งเป็นการนำวัสดุของเหลือทิ้งจากกระบวนการได้แก่ FeO และ CuO นำกลับมาใช้ประโยชน์ (Recycle) ภายใต้สภาวะไร้อากาศ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะหรือต่อเนื่อง (Batch or continuous reactors) โดยใช้ปัจจัยในการทดสอบ 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณของ Fe/Cu ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา และค่าความเป็นกรด-เบส พบว่า ระบบ Fe/Cu สามารถช่วยให้สีย้อมเมทิลีนบลูที่ละลายในน้ำและน้ำเสียจากโรงงานมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 98% และ 88% ตามลำดับ ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 120 นาที โดยประสิทธิภาพการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อใช้ Fe/Cu ในการทำปฏิกิริยาจะค่อย ๆ เริ่มต้นและเสถียรภาพ ช่วงพีเอชที่เหมาะสมได้แก่ พีเอชในช่วงกลาง (7.0-8.3) จากการศึกษาอย่างต่อเนื่องยังพบว่า ระบบ Fe/Cu สามารถกำจัดสีของน้ำเสียโรงงานได้อย่างยาวนานและมีความเสถียรภาพจากการทดลองอย่างต่อเนื่องกว่า 140 วัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีโดยเฉลี่ย 63% ภายใต้สภาวะที่เป็นกลางและ HRT 2 ชั่วโมง

Wen-ying และ Ting-yao (2007) ได้ศึกษาการลดคลอรีนในคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride, CT) โดยในกระบวนการได้ใช้เหล็กร่วมกับทองแดง (Fe-Cu) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเปรียบเทียบกับธาตุเหล็กต้นแบบ (Master Builders) พบว่า ในการบำบัดน้ำที่มี CT กระบวนการ Fe-Cu มีปฏิกิริยาดีกว่าธาตุเหล็กต้นแบบ โดยกระบวนการ Fe-Cu สามารถลด CT โดยตรงบนพื้นผิวของทองแดงที่เกิดจากแคโทดในกระบวนการ Fe-Cu ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แทนที่จะเป็นไฮโดรเจนอะตอมอย่างของธาตุเหล็กต้นแบบ เมื่อใช้เศษโลหะ 100 กรัม โดยใช้ ในอัตราส่วน Fe:Cu เป็น 10:1 (w/w) สามารถลดเป็นไตรคลอโรมีเทนและไดคลอโรมีเทนได้ ในเวลา 2.25 ชั่วโมง นอกจากนี้ในสภาวะที่เป็นต่าง (พีเอช 9) ส่งผลให้กระบวนการของ Fe-Cu ลดลงแต่ก็ยังคงมีปฏิกิริยาเร็วกว่าธาตุธาตุเหล็กต้นแบบประมาณ 55%

นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Sharma และคณะ (2017) ได้ศึกษาทบทวนการพัฒนาของอนุภาคนาโนของโลหะเดี่ยว (Monometallic) และอนุภาคนาโนของโลหะคู่ (Bimetallic) โดยอนุภาคนาโนของโลหะคู่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคนาโนของโลหะเดี่ยว นั่นคือในการสังเคราะห์สามารถสังเคราะห์ได้ทั้งรูปร่าง ขนาด และโครงสร้างที่แตกต่างกัน อีกทั้งการมีขนาดที่เล็กลงยังเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการเป็นเร่งปฏิกิริยาให้มากยิ่งขึ้น จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นทั้งหมดจึงถือเป็นการสนับสนุนให้เกิดศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคู่โลหะของทองแดง/เหล็ก ซึ่งได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

Xiong และคณะ (2015) ได้เปรียบเทียบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคเหล็ก/ทองแดง (Fe/Cu bimetallic) กับผงเหล็ก (Fe^0 , Zero valent iron) ในการย่อยสลาย P-nitrophenol (PNP) ภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งมีก๊าซไนโตรเจนหรือไม่มีการเติมอากาศ เพื่อเป็นแนวโน้มสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เป็นพิษ โดยพบว่า อนุภาค Fe/Cu สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า Fe^0 ถึง 18 เท่า และ 11 เท่า จากอัตราการให้ไนโตรเจนเท่ากับ 1.5 ลิตร/นาที่ และอัตราการระบายอากาศอากาศที่เท่ากันที่ 1.5 ลิตร/นาที่ ตามลำดับ นอกจากนี้ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ยังแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของประสิทธิภาพการกำจัด COD ของอนุภาค Fe/Cu ที่ดีกว่า Fe^0 เมื่อนำมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง UV-vis, FTIR และ GC-MS พบว่า อนุภาค Fe/Cu สามารถทำลายแหวนเบนซีนและโครงสร้าง NO_2 ของ PNP ได้อย่างสมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์ไม่เป็นพิษและย่อยสลายทางชีวภาพได้ ส่วนใหญ่ของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ถูกนำไปทำเป็นแร่คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงขึ้น (83.8%)

Savitha และคณะ (2016) ได้ศึกษาและรวบรวมเกี่ยวกับอนุภาคนาโนคู่ของโลหะแบบไครัล (Bimetallic chiral) เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์แบบอสมมาตร (Asymmetric synthesis) โดยกล่าวถึงคู่ของโลหะกับโลหะต่างๆ เมื่อเกิดปฏิกิริยากันทำให้เกิดการปรับเปลี่ยน

พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งทางอิเล็กทรอนิกส์และทางเรขาคณิต มีเสถียรภาพที่ดีขึ้นกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจากโลหะแบบเดี่ยว (Monometallic) โดยได้ศึกษาคู่ของโลหะดังนี้ Rh/Co, Cu/Fe, Pd/Fe, Pt/Fe, Pd/Au, Rh/Ag ตลอดจนการประยุกต์ใช้ในสภาวะต่าง ๆ สำหรับ Cu/Fe จากการศึกษาพบว่า เป็นอนุภาคนาโนที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Hydrosilylation ของคีโตนที่เป็นอนุพันธ์อะโรมาติกได้ดี ตรวจสอบด้วยเครื่อง TEM มีขนาดอนุภาค 10-12 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อทำปฏิกิริยาได้ถึง 3 ครั้ง โดยไม่มีการสูญเสียในประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยา

Sun และคณะ (2016) ได้ศึกษาการใช้งานเหล็ก/ทองแดง (Fe/Cu bimetallic) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดการย่อยสลายไนโตรเบนซินภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนอิสระ (Oxic Condition) โดยใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตในอัตราส่วนที่แตกต่างกันผสมกับผงเหล็ก (Fe^0) นำไปทดสอบค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ ค่าพีเอชเริ่มต้น, ความเข้มข้นไนโตรเบนซินเริ่มต้น, Fe/Cu bimetallic dose และอุณหภูมิขณะทำปฏิกิริยา ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนอิสระ ($\text{DO} > 6.5$ มิลลิกรัมต่อลิตร) แล้วจึงนำไปตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM, EDS, BET และ XRD พบว่า ทองแดงเกาะอยู่บนพื้นผิวของเหล็กซึ่งช่วยย่อยสลายไนโตรเบนซิน และที่ชั้นทองแดงเองที่มีอยู่หนาแน่นก็สามารถช่วยย่อยสลายไนโตรเบนซินได้อย่างมาก ในสภาวะสิ่งแวดล้อมที่เป็นกลางจะสามารถย่อยสลายไนโตรเบนซินได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ส่งผลให้ค่า DO เพิ่มขึ้น นอกจากการย่อยสลายไนโตรเบนซินยังสามารถดูดซับเหล็กไฮดรอกไซด์ได้โดย Fe^0

Wang และคณะ (2017) ได้ศึกษาการรวมตัวกันของอนุภาคนาโนเหล็ก/ทองแดง (Iron/Copper bimetallic particles) ในคาร์บอนนาโนไฟเบอร์เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพนตัน (Fenton) จากการศึกษาพบว่า อนุภาคนาโนของเหล็ก-ทองแดงที่สังเคราะห์ได้ในคาร์บอนนาโนไฟเบอร์ (FeCu/CNF) มีลักษณะเป็นเส้นใยโครงสร้างรูพรุนที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีกระจายตัวของอนุภาคนาโนเหล็กและทองแดง โดยเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ ได้แก่ อนุภาคนาโนของทองแดงที่สังเคราะห์ได้ในคาร์บอนนาโนไฟเบอร์ (Cu/CNF), อนุภาคนาโนของเหล็กที่สังเคราะห์ได้ในคาร์บอนนาโนไฟเบอร์ (Fe/CNF) และอนุภาคนาโนของเหล็ก-ทองแดงที่สังเคราะห์ได้ในอนุภาคคาร์บอน (FeCu/C) มีการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา Fenton ด้วยสีย้อม Acid Orange II (AOII) พบว่า FeCu/CNF ให้ผลดีที่สุดโดยสามารถกำจัดสีย้อมได้ถึง 97.7% ในเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ ในสภาวะการทดลองเดียวกัน ทั้งนี้ยังพบว่า FeCu/CNF มีความสามารถในการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างได้ดีกว่า Fe/CNF จากการผลของการตรวจ OH และความต้านทานการถ่ายเทมวล (Resistance of mass transfer) ในตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ FeCu/CNF ยังได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการกลับคืนสภาพ (Recoverability) ได้อีกด้วย

Antonoglou และคณะ (2017) ได้ศึกษาและเปรียบเทียบการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดง (CuNPs) กับทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe bimetallic nanoparticles, CuFeNPs) ภายในเซลล์ PEGylated (Pegylated) เพื่อต่อต้านเชื้อจุลชีพ โดยใช้ระบบปิดภายในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ซึ่งไม่มีขั้นตอนของทองแดงออกไซด์และเหล็กออกไซด์ โดยใช้ไอรอน (III) ไนเตรทและคอปเปอร์ (II) ไนเตรทเป็นสัดส่วนของ Cu_xFe_y NP ผสมกับโพลีออล (Polyol) ได้แก่ 1,2-Propylene glycol (PG), Tetraethylene glycol (TEG) และ Polyethylene glycol (PEG 8000) ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ต่างกันถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมขนาด โครงสร้าง องค์ประกอบ และพื้นผิว ทางเคมีของอนุภาค จากการศึกษาพบว่า กลไกของระบบขึ้นอยู่กับปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) และการสลายตัวที่เกิดขึ้นระหว่างทองแดง เหล็ก และโพลีออล นอกจากนี้การใช้โพลีออลที่สามารถ เข้ากันได้ทางชีวภาพยังสามารถเป็นได้ทั้งตัวทำละลาย ตัวรีดิวซ์ และสารลดแรงตึงผิวในผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้ ซึ่งนำไปสู่การแยกตัวของการเคลือบอนุภาคนาโน โดยผลการทดลองพบว่า ในการผลิตอนุมูลอิสระ (Reactive oxygen species, ROS) ภายในเซลล์ PEGylated ของ CuFeNPs มีฤทธิ์ต้านจุลชีพสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ CuNPs

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้

3.1.1 วัสดุ อุปกรณ์

- เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ OHAUS รุ่น Pioneer PA214
- เครื่องกวนสารละลายพร้อมเตาให้ความร้อน ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS7
- เครื่องผสมสารละลาย ยี่ห้อ Gemmy industrial Corp รุ่น VM-300
- เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ยี่ห้อ WiseSpin รุ่น CF-10
- ตู้อบ ยี่ห้อ GRIEVE รุ่น LW-201C
- ไมโครปิเปต ยี่ห้อ Microlit และ Nichiryo
- เครื่องแก้ว
- ตู้ยูวี (UV) ขนาด 45×75×35 เซนติเมตร ภายในติดหลอด UVA รุ่น F20T10BL ยี่ห้อ Sankyo Denki ขนาด 10 วัตต์ ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 315-400 นาโนเมตร จำนวน 2 หลอด
- เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส ยี่ห้อ EUTECH INSTRUMENT รุ่น pH510
- เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า ยี่ห้อ Horiba รุ่น COM-100
- เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง Visible (Visible spectrophotometer) ยี่ห้อ METASH รุ่น V-5100
- เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง UV-Vis (UV-visible spectrophotometer) ยี่ห้อ UNICO รุ่น 1200
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron Microscope, TEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JEM-2010
- เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) ยี่ห้อ Philips รุ่น X'Pert

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- หางน้ำยางธรรมชาติ ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยอีสเทิร์นกรุ๊ป จำกัด
- คอปเปอร์ (II) ซัลเฟต (Copper (II) Sulphate, CuSO_4) ยี่ห้อ Ajax Finechem
- เฟอรัส (II) ซัลเฟต (Ferrous Sulphate, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ยี่ห้อ Ajax Finechem
- เฟอริก (III) คลอไรด์ (Ferric Chloride, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ยี่ห้อ Loba Chemie
- แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ (Cationic polyacrylamide, C-PAM)
- เมทิลีนบลู 0.1% (Methylene blue 0.1%, $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{SCL} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)

3.2 วิธีการ

3.2.1 การหาปริมาณเนื้อยางแห้งในหางน้ำยาง (DRC)

ชั่งน้ำหนักจานแก้วกลม (Petri Dish) พร้อมบันทึกค่า จากนั้นเติมน้ำยางปริมาตร 5 กรัม และเติมกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 2%W/V ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ลงในจานแก้ว เพื่อให้ยางจับก้อน จากนั้นนำสารละลายที่ได้มากรองเพื่อแยกเนื้อยางออก ทำการกรองซ้ำหลาย ๆ ครั้ง นำก้อนยางที่ได้เข้าไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักยางแห้งที่ได้พร้อมบันทึกค่า โดยปริมาณเนื้อยางแห้งในหางน้ำยางสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\% \text{DRC} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำยางแห้งหลังจากการอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักของหางน้ำยางตอนเริ่มต้น}} \times 100$$

3.2.2 การเตรียมสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต

ชั่งสารคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต (CuSO_4) น้หนัก 0.0191 กรัม เติมน้ำกลั่นจนสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตมีปริมาตร 15 มิลลิลิตร

3.2.3 การเตรียมสารละลายเฟอรัส (II) ซัลเฟต

ชั่งสารเฟอรัส (II) ซัลเฟตหนัก ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 0.0445 กรัม เติมน้ำกลั่นจนสารละลายเฟอรัส (II) ซัลเฟตมีปริมาตร 20 มิลลิลิตร

3.2.4 การเตรียมสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์

ชั่งสารเฟอร์ริก (III) คลอไรด์หนัก ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 0.0432 กรัม เติมน้ำกลั่นจนสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ มีปริมาตร 20 มิลลิลิตร

3.2.5 การเตรียมเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติ

เตรียมสารละลายแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ (Cationic Polyacrylamide, C-PAM) ความเข้มข้น 0.5%W/V ปริมาตร 360 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายที่ได้เติมลงในหางน้ำยางปริมาตร 500 มิลลิลิตร กวนจนหางน้ำยางจับกันเป็นเนื้อเดียวกัน และนำมากรองด้วยผ้ากรองเพื่อแยกเนื้อยางออกจากเซรัม

3.2.6 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง Cu(II) ในเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง

ผสมสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่เตรียมไว้ที่ความเข้มข้น 8 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางน้ำยางที่ใช้เป็นตัวรีดิวซ์ จนได้สารละลายปริมาตร 11 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตเท่ากับ 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ และสัดส่วนการเจือจางเซรัมเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 ในขณะที่ผสมกวนสารละลายด้วยแท่งแก้วที่อุณหภูมิห้อง ทันทันทีที่ผสมสีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีฟ้าอ่อนเป็นสีน้ำตาลที่มีลักษณะเป็นสารแขวนลอย จากนั้นทิ้งสารละลายไว้เป็นเวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที และตรวจสอบอนุภาคนาโนทองแดงที่เกิดขึ้นโดยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง สำหรับการวัดค่าการดูดกลืนแสงใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อน้ำกลั่นเป็น 1:1 และทำการเตรียมตัวอย่างในการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

3.2.7 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ในเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง

ผสมสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตที่เตรียมไว้ที่ความเข้มข้น 8 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางน้ำยางที่ใช้เป็นตัวรีดิวซ์ จนได้สารละลายปริมาตร 11 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตเท่ากับ 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ และสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 ในขณะที่ผสมกวนสารละลายด้วยแท่งแก้วที่อุณหภูมิห้อง ทันทันทีที่ผสมสีของสารละลายจากสีขาวใสเป็นสีน้ำตาลอ่อนที่มีลักษณะเป็นสารแขวนลอย จากนั้นทิ้งสารละลายไว้เป็นเวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที และตรวจสอบอนุภาคนาโนเหล็กที่เกิดขึ้นโดยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง สำหรับการวัด

ค่าการดูดกลืนจะใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อน้ำกลั่นเป็น 1:1 และทำการเตรียมตัวอย่างในการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

สำหรับสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ทำเช่นเดียวกัน โดยทันทีที่ผสมสีของสารละลายจากสีเหลืองอ่อนเป็นน้ำตาลอ่อนที่มีลักษณะเป็นสารแขวนลอย

3.2.8 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ในเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง

ผสมสารละลายของทองแดง/เหล็ก โดยใช้สารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต แทนแหล่งไอออนของ Cu(II) สารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตแทนแหล่งไอออนของ Fe(II) และสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์แทนแหล่งไอออนของ Fe(III) ผสมกับเซรัมจากหางน้ำยางที่ใช้เป็นตัวรีดิวซ์ จนได้สารละลายปริมาตร 11 มิลลิลิตร ในอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างทองแดงกับเหล็ก (Cu/Fe) เป็น 0/2.4, 0.6/1.8, 1.2/1.2, 1.8/0.6 และ 2.4/0 มิลลิโมลาร์ ในขณะที่กวนสารละลายด้วยแท่งแก้วที่อุณหภูมิห้อง ทันทีที่ผสมสีของสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลที่มีลักษณะเป็นสารแขวนลอย จากนั้นทิ้งสารละลายไว้เป็นเวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที และตรวจสอบอนุภาคนาโนทองแดงที่เกิดขึ้นโดยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง สำหรับการวัดค่าการดูดกลืนจะใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อน้ำกลั่นเป็น 1:1 และทำการเตรียมตัวอย่างในการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

3.2.9 การเตรียมตัวอย่างเพื่อตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) พร้อมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDS)

ปิเปตสารละลายอนุภาคนาโนของทองแดง (Cu(II)) เหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) และอนุภาคนาโนของโลหะคู่ทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ที่สังเคราะห์ได้ปริมาตร 1000 ไมโครลิตร ลงในหลอดเซนตริฟิวจ์ (Centrifuge Tube) เติมน้ำกลั่นลงไปปริมาตร 500 ไมโครลิตร จากนั้นนำมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 13,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นทำการปิเปตของเหลวด้านบนออก ให้เหลือแค่ตะกอนของอนุภาคนาโนที่ต้องการเท่านั้น จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 100 ไมโครลิตร แล้วเขย่าด้วยเครื่องผสมสารละลาย (Vortex Mixture) เพื่อให้ตะกอนของอนุภาคนาโนกระจายตัวเป็นสาอีกครั้งหนึ่ง ทำเช่นเดิมจนกระทั่งได้สารตัวอย่างเพื่อนำไปตรวจปริมาตร 200 ไมโครลิตร และนำมาเก็บในหลอดเซนตริฟิวจ์ที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อนำไปตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านพร้อมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน

3.2.10 การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

เติมสารละลายเอทานอลลงในสารละลายอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้ จากนั้นนำมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 13,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ทำการรวบรวมตะกอนแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนได้ผงของอนุภาคนาโนแล้วนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

3.2.11 การทดสอบการกำจัดสีด้วยอนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe)

เติมสารละลายเอทานอลลงในสารละลายอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้ จากนั้นนำมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 13,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ทำการรวบรวมตะกอนแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนได้ผงอนุภาคนาโน จากนั้นทำการทดสอบการกำจัดสีด้วยอนุภาคนาโน โดยการนำอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้ปริมาณ 5 มิลลิกรัมต่อ 2 มิลลิลิตรของสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 10 ppm ภายใต้แสงอาทิตย์ ภายใต้แสงจากตู้ยวี่ และสถานะในที่ไม่มีแสง เขย่าอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการทดสอบที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ช่วงละ 100 ไมโครลิตร พร้อมกับเติมน้ำ 900 ไมโครลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตรและเปรียบเทียบกับกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (Calibration curve) ของสารละลายสีด้วยเมทิลีนบลู

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)), เหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) และโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้เซรามิกจากหางน้ำยางธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วยสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ นั่นคือการให้อิเล็กตรอน และตัวควบคุมขนาดอนุภาค (Capping agent) ซึ่งเป็นการลดการใช้สารเคมีในการสังเคราะห์ โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงและเหล็ก ที่อุณหภูมิห้อง ได้แก่ สัดส่วนการเจือจางเซรามิกจากหางน้ำยาง และความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต เพอร์ส (II) ซัลเฟต และเพอร์ริค (III) คลอไรด์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ใช้เป็นแหล่งไอออน ในส่วนของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ที่อุณหภูมิห้อง ได้แก่ อัตราส่วนความเข้มข้นของโลหะคู่ระหว่างทองแดงกับเหล็ก (Cu:Fe) นอกจากนี้ทดสอบประสิทธิภาพในการนำไปใช้ประโยชน์ โดยเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากำจัดสีย้อมเมทิลินบลู

4.1 ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง Cu(II) เหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ในเซรามิกจากหางน้ำยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง

หางน้ำยางธรรมชาติที่ใช้ในการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) เหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ครั้งนี้มีปริมาณเนื้อยางแห้งในหางน้ำยาง (DRC) เท่ากับ 3.877%

4.1.1 ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง Cu(II) ในเซรามิกจากหางน้ำยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง

4.1.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ใช้เป็นสารตั้งต้นเท่ากับ 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ ทำปฏิกิริยากับเซรามิกจากหางน้ำยางธรรมชาติ จนได้สารละลายปริมาตร 11 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส) ทันทิที่ผสมสีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีฟ้าอ่อนเป็นสีน้ำตาลอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่าเกิดอนุภาคนาโนทองแดงขึ้น (Nazara และคณะ, 2015; ชาญญาณุชและนภดาว, 2559) จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า จากการตรวจสอบค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการ

นำไฟฟ้า พบว่า ทั้งค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า ลดลงตามความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1

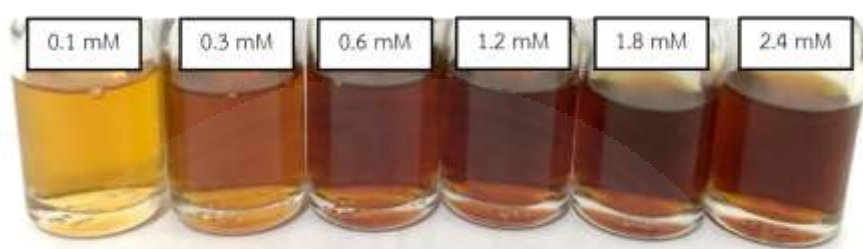
ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์

CuSO_4 (mM)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)
0.1	9.68	6890
0.3	9.67	6620
0.6	9.67	6430
1.2	9.55	5960
1.8	9.44	5500
2.4	9.41	5120

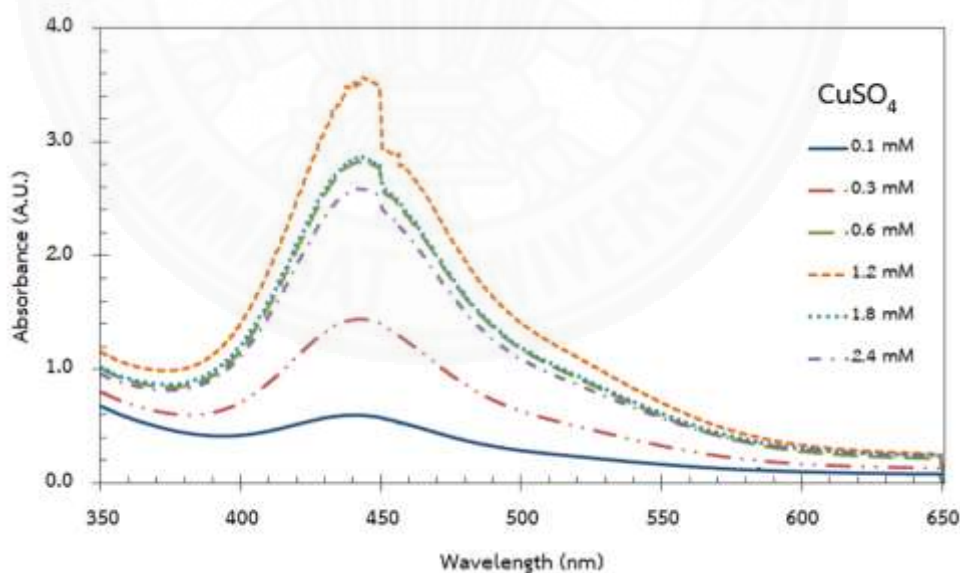
เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่เป็นสารตั้งต้น พบว่า ที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ เป็นความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่น้อยที่สุด จะได้เป็นสารละลายเป็นสีเหลือง และเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นมากขึ้น สีของสารละลายก็ยิ่งเข้มข้นเรื่อย ๆ ตามความเข้มข้นของสารตั้งต้น โดยที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ เป็นความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มากที่สุด พบว่า สารละลายเป็นสีน้ำตาล ซึ่งสารละลายดังกล่าวมีลักษณะเป็นสารแขวนลอย ดังภาพที่ 4.1

จากการตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ต่างกัน พบว่า มีการค่าดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 380-550 นาโนเมตร โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของชัยญานุชและนภดาว, 2559 (434-445 นาโนเมตร) ทั้งนี้ช่วงพีคของค่าการดูดกลืนแสงจะขยับเล็กน้อยอยู่ในช่วง 435-455 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าการดูดกลืนแสงยังสามารถบ่งบอกได้ถึงจำนวนอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้น ถ้ามีค่าการดูดกลืนแสงมาก จำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นก็ยิ่งเพิ่มมากขึ้น และถ้าช่วงค่าการดูดกลืนแสงแคบ การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคก็จะกระจายตัวได้ไม่มากนัก ดังภาพ

ที่ 4.2 พบว่า ค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ 1.2 มิลลิโมลาร์ มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (สัญญาณรบกวนและนภาดาว, 2559) เกิดพีคที่ความยาวคลื่น 443 และ 450 นาโนเมตร จึงคาดว่าที่ความเข้มข้น 1.2 มิลลิโมลาร์ พบการกระจายตัวของอนุภาคทั้งขนาดใหญ่ (ด้านขวา ที่พีค 450 นาโนเมตร) และขนาดเล็ก (ด้านซ้าย ที่พีค 443 นาโนเมตร) และมีจำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นสูงสุด



ภาพที่ 4.1 สีของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ทันทีที่ผสม ที่ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจาง



ภาพที่ 4.2 ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ทันทีที่ผสม ที่ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจาง

จากการศึกษาดังกล่าว พบว่าความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลไฟด์ (II) เฟต ส่งผลต่อปริมาณและขนาดของอนุภาคนาโนทองแดงที่เกิดขึ้น โดยการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงในเซรัมจากหางนํ้ายาง ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 1.2 มิลลิโมลาร์ ในการสังเคราะห์คาดว่าจะเกิดอนุภาคนาโนปริมาณมากที่สุด แม้จะเพิ่มความเข้มข้นสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลไฟด์มากขึ้นเป็นความเข้มข้นที่ 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ ซึ่งถือเป็น 1.5 และ 2 เท่า ตามลำดับ แต่พิกัดการดูดกลืนแสงยังคงน้อยกว่าที่ความเข้มข้น 1.2 มิลลิโมลาร์ ดังนั้นที่มีความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลไฟด์ 1.2 มิลลิโมลาร์ จึงเป็นความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลไฟด์ที่เหมาะสมแก่การสังเคราะห์มากที่สุด และจึงเลือกใช้ในการทดลองต่อไป

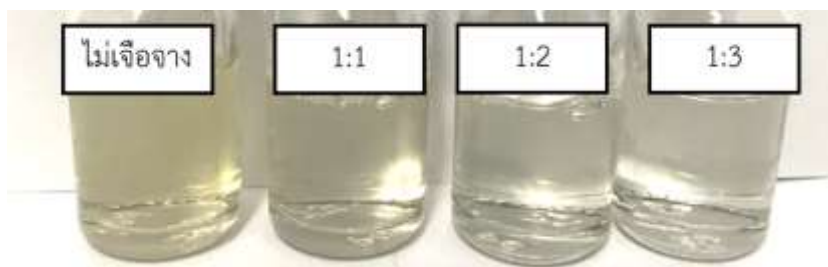
4.1.1.2 ผลของสัดส่วนการเจือจางเซรัมจากหางนํ้ายางธรรมชาติที่ใช้ในการสังเคราะห์

ศึกษาผลของสัดส่วนการเจือจางเซรัมจากหางนํ้ายางธรรมชาติที่ใช้ในการสังเคราะห์ เจือจางเซรัมจากหางนํ้ายางโดยนำมาผสมกับน้ำกลั่นให้เท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 จนได้ปริมาตร 11 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส) ดังภาพที่ 4.3 จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า พบว่า ทั้งค่าการดูดกลืนแสง ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า ลดลงตามสัดส่วนการเจือจางเซรัมจากหางนํ้ายาง ดังรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.2

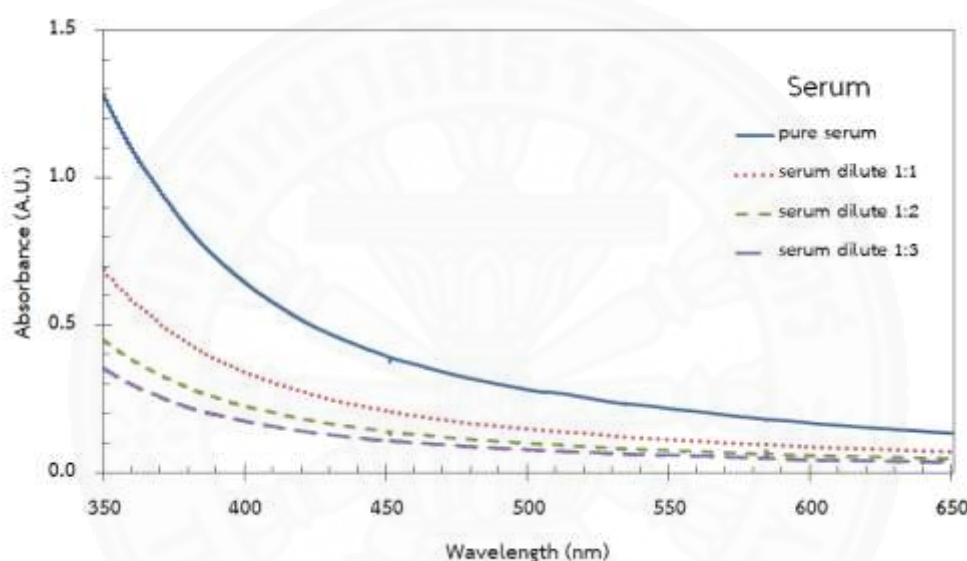
ตารางที่ 4.2

ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของเซรัมจากหางนํ้ายางที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับ ไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3

สัดส่วนการเจือจางเซรัม	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)
ไม่เจือจาง	10.02	6830
1:1	9.98	3870
1:2	9.88	2680
1:3	9.75	2090



ภาพที่ 4.3 สีของเซรัมจากหางน้ำยางที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3



ภาพที่ 4.4 ค่าการดูดกลืนแสงของเซรัมจากหางน้ำยางที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3

จากภาพที่ 4.4 เมื่อนำเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติที่ไม่เจือจางมาทำปฏิกิริยากับสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตความเข้มข้น 1.2 มิลลิโมลาร์ จนได้สารละลายปริมาตร 11 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง ทันทีที่ผสมสีของสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตจะเปลี่ยนจากสีฟ้าอ่อนเป็นสีน้ำตาลอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่าเกิดอนุภาคนาโนทองแดงขึ้น เมื่อพิจารณาสัดส่วนการเจือจางเซรัมจากหางน้ำยาง พบว่า ยิ่งสัดส่วนการเจือจางเซรัมมากขึ้น สีของสารละลายหลังการผสมจะมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเหลือง แต่เมื่อสัดส่วนการเจือจางเซรัมน้อยลง สารละลายจะเป็นสีน้ำตาลมากยิ่งขึ้น เนื่องจากการใช้เซรัมที่ไม่ได้เจือจางจะทำให้ในระบบจะมีสารอินทรีย์มากกว่าทำให้สีของสารละลายเข้มกว่า ภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 สีของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ทันทีที่ผสม ด้วยสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 1.2 มิลลิโมลาร์ กับเซรัม จากหางนํ้าYang ที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3

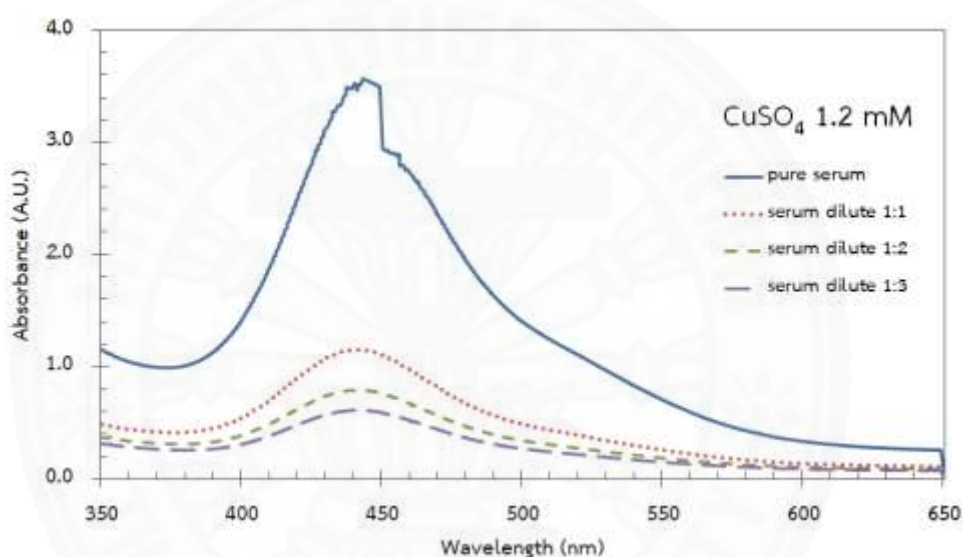
ตารางที่ 4.3

ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ทันทีที่ผสม ด้วยเซรัมจากหางนํ้าYang มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 กับสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ 1.2 มิลลิโมลาร์

CuSO_4 1.2 mM กับสัดส่วนการเจือจางเซรัม	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)
ไม่เจือจาง	10.78	6050
1:1	10.36	6010
1:2	9.37	2480
1:3	9.45	2000

จากตารางที่ 4.3 เมื่อตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสง ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที จากการตรวจสอบค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า ที่ระยะเวลาต่าง ๆ พบว่า ทั้งค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า ลดลงตามระยะเวลาที่ตรวจสอบและลดลงตามสัดส่วนการเจือจางเซรัมจากหางนํ้าYang ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และเซรัมจากหางนํ้าYang ที่เจือจางในสัดส่วนต่าง ๆ

ในส่วนของการดูดกลืนแสงจากภาพที่ 4.6 พบว่า ค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยจะมีค่ามากขึ้น เมื่อสัดส่วนการเจือจางเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติน้อยลง ดังนั้น สัดส่วนการเจือจางเซรัมจากหางน้ำยางจึงมีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่อุณหภูมิห้อง สารแขวนลอยที่สังเคราะห์ได้มีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วงประมาณ 390-560 นาโนเมตร โดยค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยที่ใช้สารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ 1.2 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางน้ำที่ไม่เจือจาง มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ซึ่งคาดว่าจะเกิดอนุภาคนาโนทองแดงปริมาณมากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้เซรัมจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจางในการทดลองต่อไป



ภาพที่ 4.6 ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่ขึ้นที่ผสมด้วยสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 1.2 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางน้ำยางที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3

4.1.1.3 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา หลังจากทำการศึกษาปัจจัยผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และผลของสัดส่วนการเจือจางเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติที่ใช้ในการสังเคราะห์ ที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) แล้ว ทำให้ทราบถึงปัจจัยในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่ได้ดีที่สุด ในระบบนี้ สำหรับการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา จะใช้เซรัมจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจาง ทำปฏิกิริยากับสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 1.2 มิลลิโมลาร์ จนได้สารละลาย

ปริมาตร 11 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที โดยทันทีที่ผสมสีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีฟ้าอ่อนเป็นสีน้ำตาลอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาเท่ากับ 0 นาที ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่าเกิดอนุภาคนาโนทองแดงขึ้น และเมื่อปล่อยให้สารทำปฏิกิริยาต่อไป พบว่าสารละลายมีสีเข้มขึ้นเล็กน้อย ดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 สีของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที ด้วยสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ 1.2 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจาง

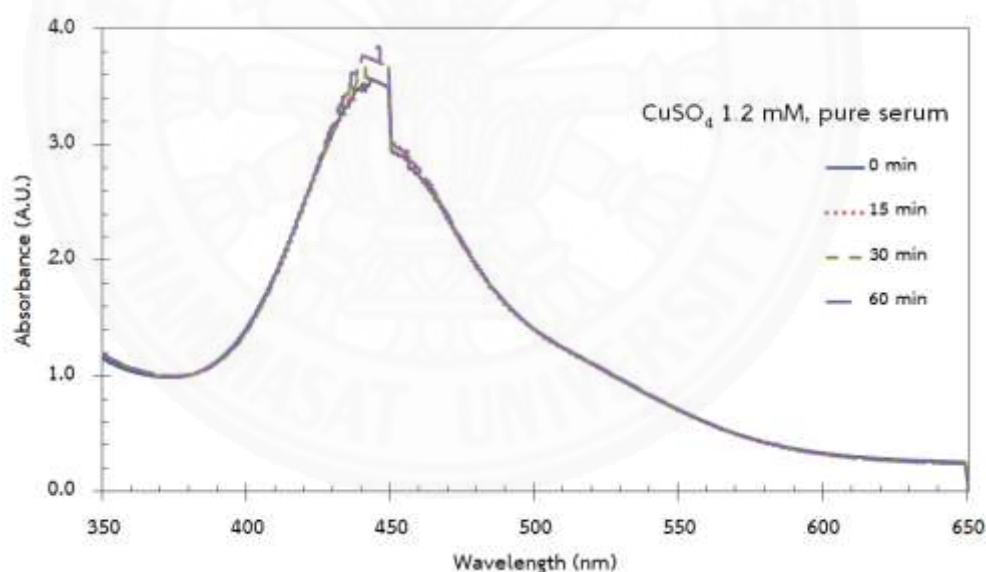
ตารางที่ 4.4

ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ด้วยสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ 1.2 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจางที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที

ระยะเวลา (นาที)	CuSO ₄ 1.2 mM กับเซรัมที่ไม่เจือจาง	
	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)
0	10.78	6050
15	10.73	6000
30	10.66	5980
60	10.55	5980

จากตารางที่ 4.4 การตรวจสอบค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 1.2 มิลลิโมลาร์ กับ เซรั่มจากหางน้ำยางธรรมชาติที่ไม่เจือจางพบว่า ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า ลดลงตาม ระยะเวลาที่ตรวจสอบ

จากการตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงค่าดูดกลืนแสงน้อยมาก ที่เวลาใช้ทำปฏิกิริยา 30 และ 60 นาที พบพีกค่าการดูดกลืนแสงสูงขึ้น อยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 332-450 นาโนเมตร โดยที่ เวลาใช้ทำปฏิกิริยา 60 นาที มีพีกค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงปริมาณการเกิด อนุภาคนาโนทองแดงที่เพิ่มขึ้น ยังสอดคล้องกับสีของสารละลายที่เข้มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป จึงสามารถ คาดการณ์ได้ว่า ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณอนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่ สังเคราะห์ได้มากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการหลงเหลืออยู่ของสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ และสาร ตั้งต้น ในระบบจึงทำให้สามารถทำปฏิกิริยาและเกิดอนุภาคนาโนทองแดงขึ้น

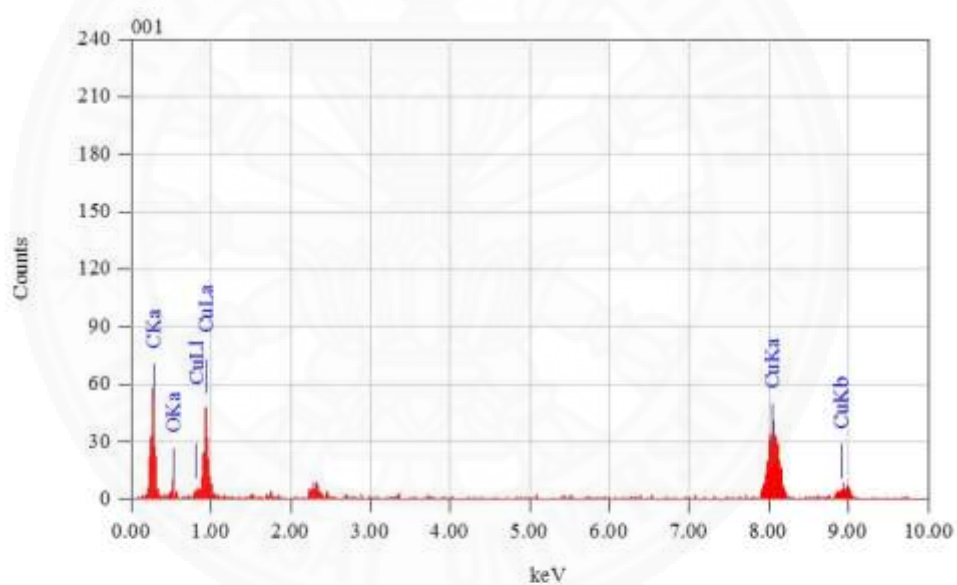
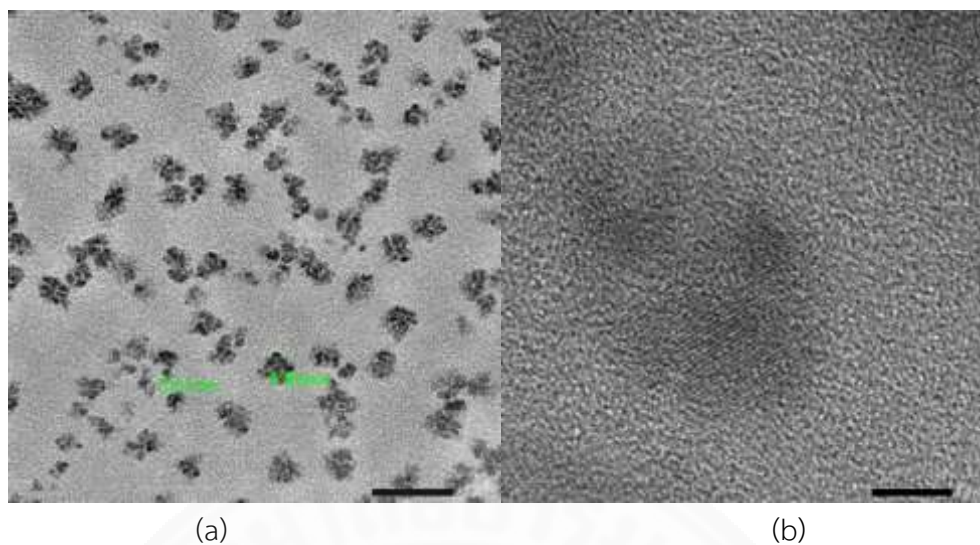


ภาพที่ 4.8 ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที ด้วย สารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ 1.2 มิลลิโมลาร์ กับเซรั่มจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจาง

4.1.1.4 ผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์

อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พร้อมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)

เมื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) แล้ว สามารถสรุปได้ว่าการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่เหมาะสมที่สุด เมื่อใช้เซิร์มจากทางน้ำยางธรรมชาติเป็นตัวรีดิวซ์ นั่นคือ การสังเคราะห์โดยใช้เซิร์มจากทางน้ำยางที่ไม่เจือจางทำปฏิกิริยากับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 1.2 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พร้อมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานจะเลือกใช้อนุภาคจากการสังเคราะห์ของสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซิร์มที่ไม่เจือจาง เนื่องจากในขั้นตอนการเก็บตะกอน อนุภาคที่ความเข้มข้น 1.2 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณน้อยมากไม่เพียงพอต่อการตรวจสอบ จึงเลือกใช้ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นสูงสุดในการตรวจสอบ โดยพบว่า ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคมีรูปร่างค่อนข้างกลม เกะกะกันเป็นกลุ่มกระจุกเล็ก ๆ ประมาณ 30-50 นาโนเมตร อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-10 นาโนเมตร ดังภาพที่ 4.9 และจากการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน พบว่าอนุภาคประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) และทองแดง (Cu) ทั้งนี้ธาตุทองแดงส่วนหนึ่งมาจาก Copper grid ที่ใช้ในการตรวจสอบจึงไม่สามารถบอกปริมาณธาตุทองแดงของอนุภาคที่แน่นอนได้



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.1404

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation
C K ⁺	0.277	85.15	2.42	92.42			
O K ⁺	0.525	7.43	1.41	6.06			
Cu K	8.040	7.41	0.36	1.52			
Total		100.00		100.00			

(c)

ภาพที่ 4.9 อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจาง (a) ที่กำลังขยาย 80,000 เท่า (b) ที่กำลังขยาย 800,000 เท่า และ (c) ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)

4.1.2 ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ในเซรัมจากหางน้ำ ยางธรรมชาติ ที่อุณหภูมิห้อง

4.1.2.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตหรือเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตและเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นเท่ากับ 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ ผสมเพื่อทำปฏิกิริยากับเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติ จนได้สารละลายปริมาตร 11 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส) ทันทีที่ผสมสีของสารละลายจะเปลี่ยนอย่างรวดเร็ว จากสีเหลืองใสของสารตั้งต้นเป็นสีเหลืองเข้ม เป็นข้อบ่งชี้ว่าเกิดอนุภาคนาโนเหล็กขึ้น (Devatha และคณะ, 2016) สำหรับการใส่สารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตเป็นสารตั้งต้นเป็น เปลี่ยนจากสีเหลืองใสเป็นสีเขียวใสในตอนแรก และจะยังมีสีเขียวเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตสูงขึ้น แต่เมื่อวางทิ้งไว้ระยะหนึ่งจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเข้ม จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า พบว่า ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยของสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตและเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ ลดลงตามความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5

ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์

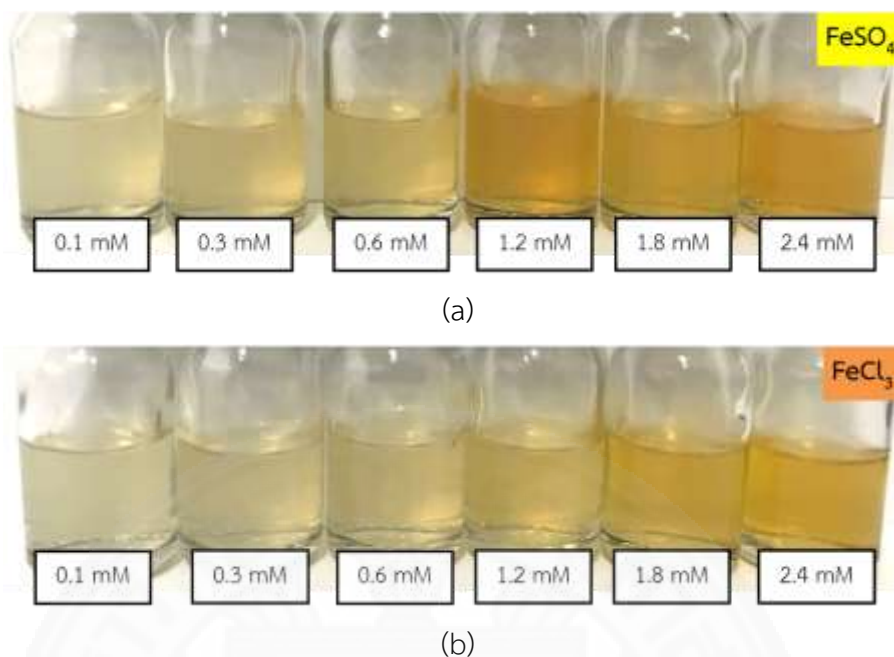
FeSO ₄ (mM)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)
0.1	9.64	6910
0.3	9.62	6680
0.6	9.60	6510
1.2	9.53	5820
1.8	9.49	5710
2.4	9.46	5230

ตารางที่ 4.6

ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(III)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์

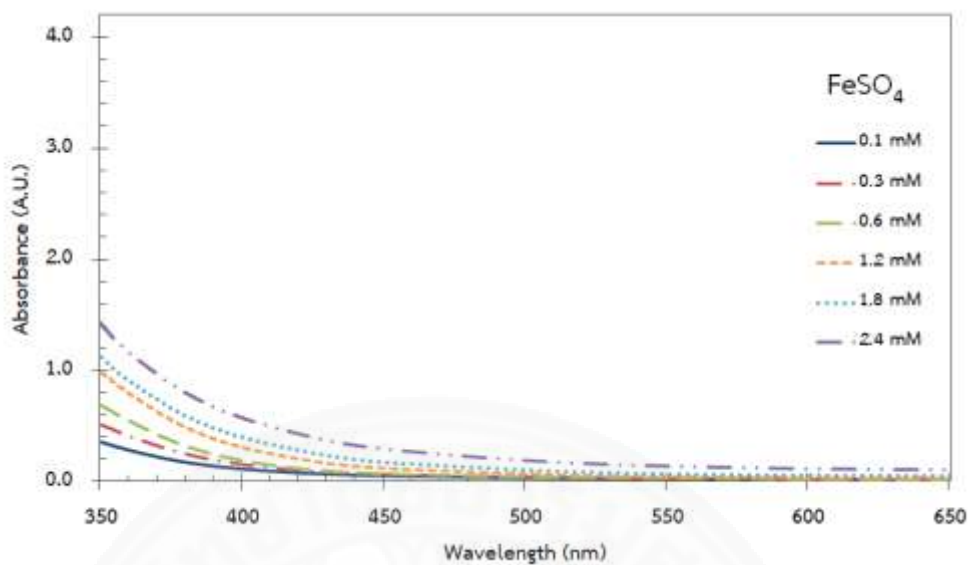
FeCl ₃ (mM)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)
0.1	9.62	6920
0.3	9.66	6660
0.6	9.65	6580
1.2	9.61	6400
1.8	9.51	6060
2.4	9.44	5710

เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริก (II) ซัลเฟตและเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ ที่เป็นสารตั้งต้น โดยจะใช้สารใดสารหนึ่งเป็นแหล่งให้อิออนในการสังเคราะห์เพียงสารเดียวเท่านั้น พบว่าที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่น้อยที่สุด จะได้สารละลายสีเหลืองเข้ม และเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นมากขึ้น สีเหลืองของสารละลายก็ยิ่งเข้มขึ้นตามความเข้มข้นของสารตั้งต้น โดยที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ เป็นความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มากที่สุด และพบว่า สารละลายเป็นสีเหลืองเข้ม มีลักษณะเป็นสารแขวนลอย เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) โดยสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต ดังภาพที่ 4.10

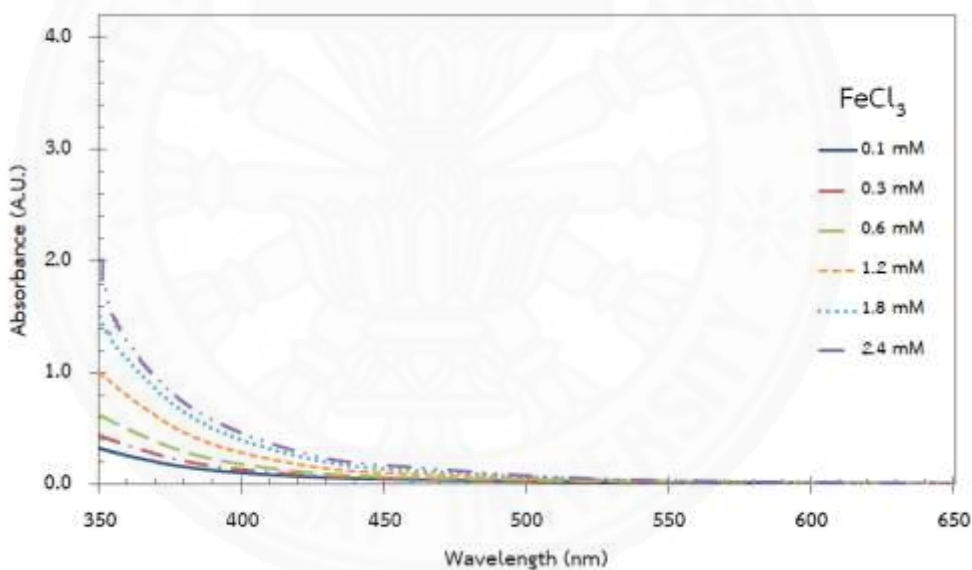


ภาพที่ 4.10 สีของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ที่ที่ผสม ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ ของ (a) สารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต และ (b) สารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์

จากการตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตและสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ที่ต่างกัน พบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่น้อยกว่า 450 นาโนเมตร เป็นต้นไป ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนเหล็ก ทั้งนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Devatha และคณะ, 2016 (300-500 นาโนเมตร) และค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มขึ้นตามความเข้มข้นของสารตั้งต้น นอกจากนี้สำหรับการใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงแบบ Visible (350-850 นาโนเมตร) สารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไวกว่าสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต และยังมีค่าการดูดกลืนแสงสูง เมื่อเทียบกับในช่วงค่าการดูดกลืนแสง 350-650 นาโนเมตร ที่เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงแบบ Visible สามารถทำงานได้ ทั้งนี้สามารถคาดการณ์ได้ว่า อนุภาคนาโนเหล็กที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็ก เนื่องจากมีช่วงค่าการดูดกลืนแสงที่น้อยกว่า 350 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วง UV-visible ดังภาพที่ 4.11



(a)



(b)

ภาพที่ 4.11 ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ที่พื้นที่ผสม ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ ของ (a) สารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต และ (b) สารละลายเฟอร์ริก (II) คลอไรด์

จากการศึกษาดังกล่าว พบว่าความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตและเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ส่งผลต่อปริมาณและขนาดของอนุภาคนาโนเหล็กที่เกิดขึ้น โดยการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็กในเซรัมจากหางนํ้ายางที่อุณหภูมิห้อง พบช่วงค่าการดูดกลืนแสงที่น้อย

กว่าช่วงของ Visible (400-700 นาโนเมตร) เนื่องจากค่าการดูดกลืนแสงของความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตและเฟอร์ริก (III) คลอไรด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารตั้งต้น ซึ่งสังเกตได้ชัดจากสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ ดังนั้นจึงจะเลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตและเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ ในการทดลองต่อไป

4.1.2.2 ผลของสัดส่วนการเจือจางเข้มข้นจากหางน้ำยางธรรมชาติที่ใช้ในการสังเคราะห์

ศึกษาผลของสัดส่วนการเจือจางเข้มข้นจากหางน้ำยางธรรมชาติที่ใช้ในการสังเคราะห์ เจือจางเข้มข้นจากหางน้ำยางโดยนำมาผสมกับน้ำกลั่นให้เท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 จนได้ปริมาตร 11 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าเช่นเดียวกันกับในข้อ 4.1.1.2 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในผลของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง เมื่อนำสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตและเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ ทำปฏิกิริยากับเข้มข้นจากหางน้ำยางที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 ปริมาตร 11 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าทันทีที่ผสมสีของสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตและเฟอร์ริก (III) คลอไรด์เปลี่ยนจากสีเหลืองใสเป็นสีเหลืองขุ่นเข้มอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่าเกิดอนุภาคนาโนเหล็กขึ้น เมื่อพิจารณาสัดส่วนการเจือจางเข้มข้นจากหางน้ำยาง พบว่ายิ่งสัดส่วนการเจือจางเข้มข้นมากขึ้น หลังการผสมสีของสารละลายจะมีลักษณะเป็นสีเหลืองขุ่นน้อยลง แต่เมื่อสัดส่วนการเจือจางเข้มข้นน้อยลง สารละลายจะเป็นสีเหลืองขุ่นขึ้นเล็กน้อย ดังภาพที่ 4.12

เมื่อตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสง ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า พบว่า สารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตและเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ มีแนวโน้มของค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าเป็นไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ ลดลงตามสัดส่วนการเจือจางเข้มข้นจากหางน้ำยางธรรมชาติ ดังตารางที่ 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.7

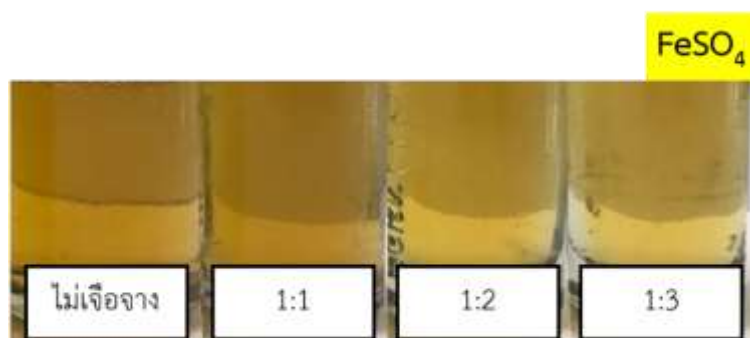
ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II)) ที่พื้นที่ผสมด้วยสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางนํ้ายางที่สัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3

FeSO_4 2.4 mM กับสัดส่วนการเจือจางเซรัม	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)
ไม่เจือจาง	10.42	5350
1:1	9.96	3220
1:2	9.79	2500
1:3	9.43	1900

ตารางที่ 4.8

ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(III)) ที่พื้นที่ผสมด้วยสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางนํ้ายาง ที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3

FeCl_3 2.4 mM กับสัดส่วนการเจือจางเซรัม	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)
ไม่เจือจาง	10.29	5970
1:1	9.92	3700
1:2	9.04	2760
1:3	7.26	2280



(a)

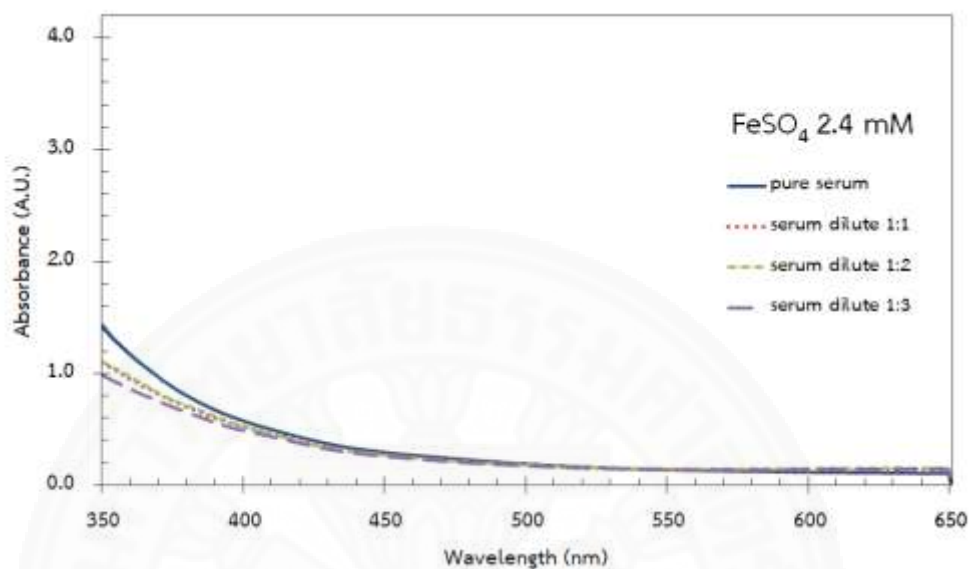


(b)

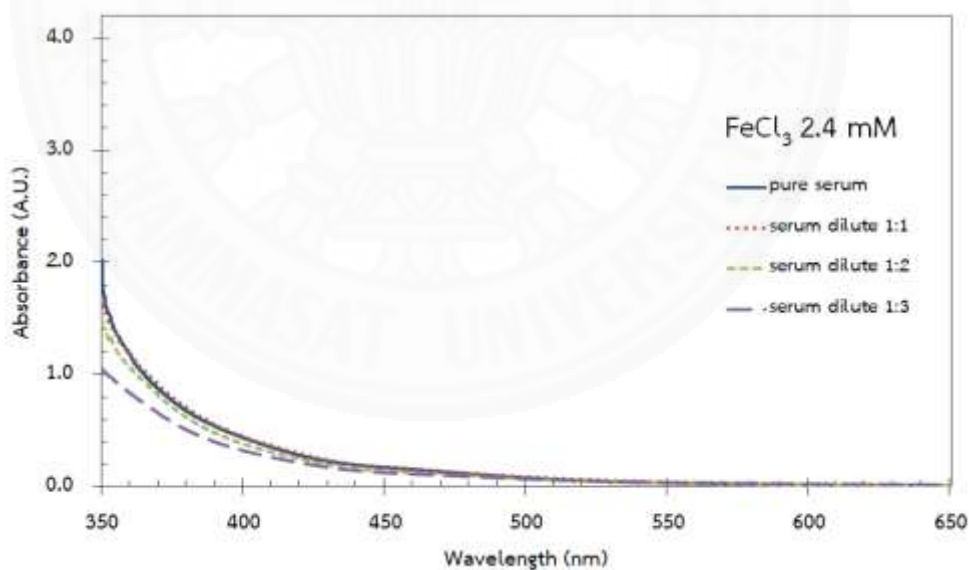
ภาพที่ 4.12 สีของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ทันทีที่ผสม ด้วยเซรัมจากหางน้ำยางที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 กับ (a) สารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต และ (b) สารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์

จากภาพที่ 4.13 การตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยที่มีสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตและเฟอร์ริก (III) คลอไรด์เป็นสารตั้งต้น พบว่า ทั้งสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตและเฟอร์ริก (III) คลอไรด์มีค่าดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่น้อยกว่า 450 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนเหล็ก และมีค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยมากขึ้นเมื่อสัดส่วนการเจือจางเซรัมจากหางน้ำยางน้อยลง แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนการเจือจางเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติมีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็กที่อุณหภูมิห้อง โดยค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจาง ซึ่งในการตรวจสอบได้ใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงแบบ Visible มีช่วงค่าการดูดกลืนแสง 350-650 นาโนเมตร สารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาที่ไวกว่า มีค่าการดูดกลืนแสงสูง ในแต่ละสัดส่วนการเจือจางเซรัมจากหางน้ำยาง ดังนั้นจึงจะเลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัส (II)

ซัลเฟตและเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางนํ้ายางธรรมชาติที่ไม่เจือจางในการทดลองต่อไป



(a)



(b)

ภาพที่ 4.13 ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ทันที่ผสมด้วยเซรัมจากหางนํ้ายางที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 กับ (a) สารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต และ (b) สารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์

4.1.2.3 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา หลังจากทำการศึกษาปัจจัยผลของความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตและเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และผลของสัดส่วนการเจือจางเข้มข้นจากทางน้ำยางธรรมชาติที่ใช้ในการสังเคราะห์ ที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็กแล้ว ทำให้ทราบถึงปัจจัยในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็กที่ดีที่สุด ในระบบนี้ สำหรับการศึกษาค้นคว้าผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา จะใช้เข้มข้นจากทางน้ำยางที่ไม่เจือจาง ทำปฏิกิริยากับสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตและเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ จนได้สารละลายปริมาตร 11 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที โดยทันทีที่ผสมสีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองใสเป็นสีเหลืองเข้มอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาเท่ากับ 0 นาที ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่าเกิดอนุภาคนาโนเหล็กขึ้น และเมื่อปล่อยให้สารทำปฏิกิริยาต่อไป พบว่าสารละลายมีสีเข้มขึ้นเล็กน้อย

จากตารางที่ 4.9 และ 4.10 การตรวจสอบค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตและเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเข้มข้นจากทางน้ำยางที่ไม่เจือจาง พบว่าค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า ลดลงตามระยะเวลาที่ตรวจสอบ ยกเว้นค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงที่เวลา 60 นาที

ตารางที่ 4.9

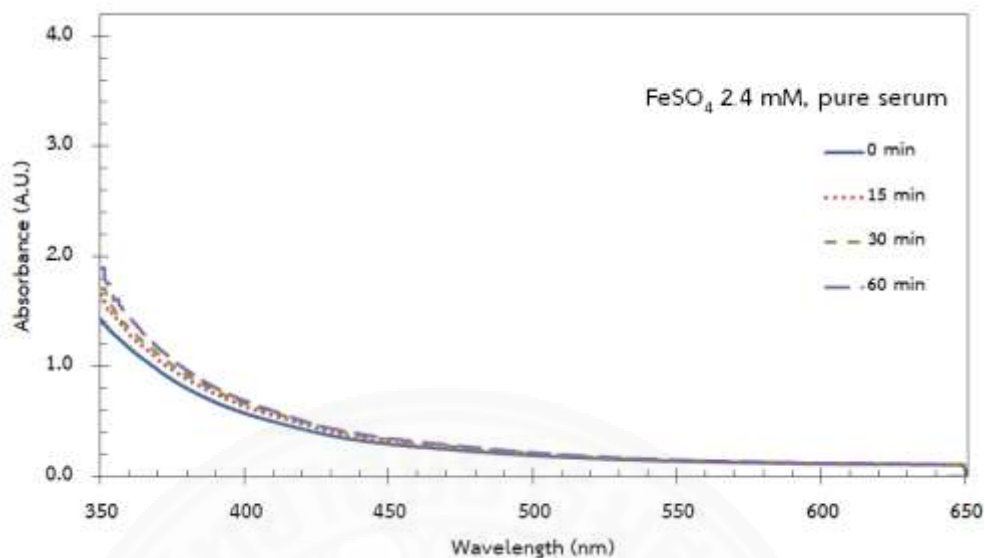
ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก ($Fe(II)$) ด้วยสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตที่ 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางนํ้าย่างที่ไม่เจือจาง ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที

ระยะเวลา (นาที)	FeSO ₄ 2.4 mM กับเซรัมที่ไม่เจือจาง	
	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)
0	9.46	5230
15	9.43	5230
30	9.40	4970
60	9.39	3210

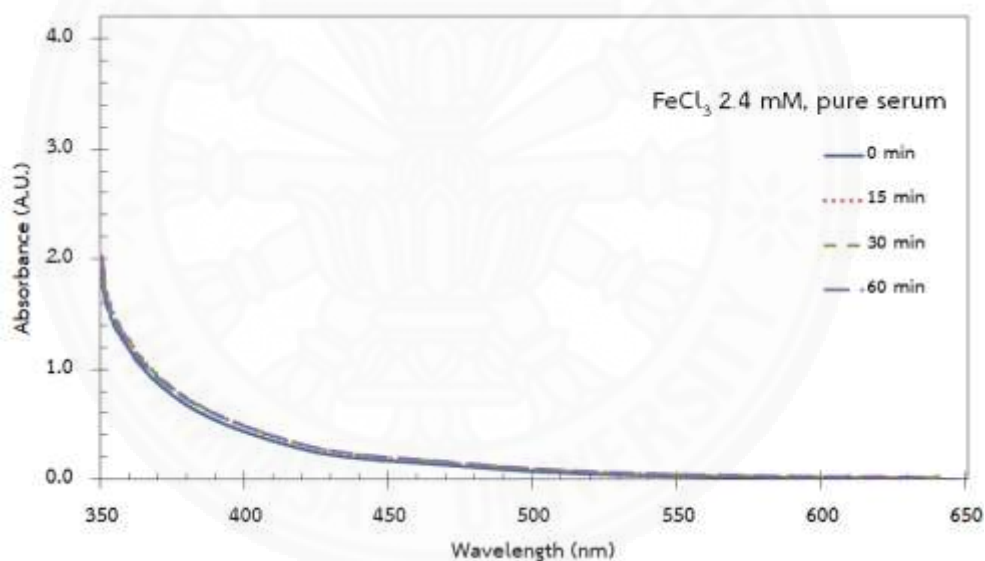
ตารางที่ 4.10

ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก ($Fe(III)$) ด้วยสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ที่ 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางนํ้าย่างที่ไม่เจือจาง ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที

ระยะเวลา (นาที)	FeCl ₃ 2.4 mM กับเซรัมที่ไม่เจือจาง	
	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)
0	9.44	5710
15	9.43	5630
30	9.42	5600
60	9.41	5490



(a)



(b)

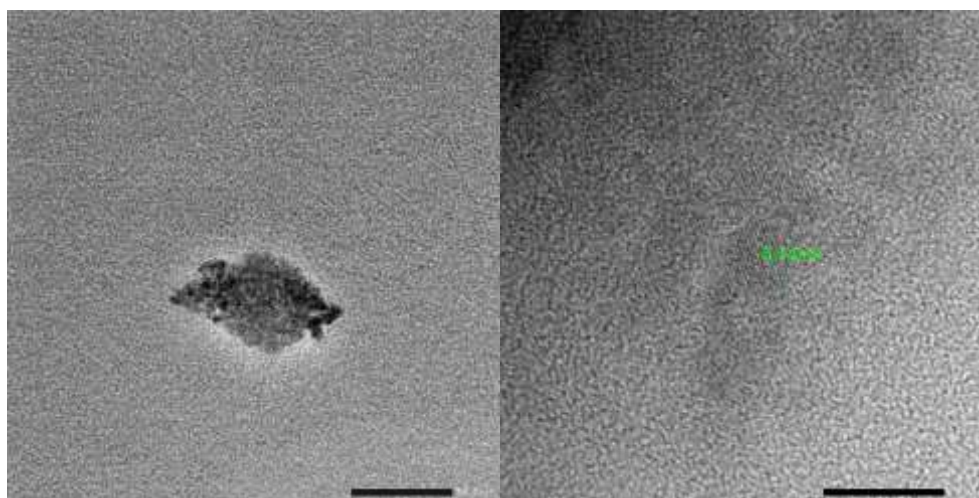
ภาพที่ 4.14 ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที ด้วยเซรัมจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจาง กับ (a) สารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต และ (b) สารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์

จากการตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที พบว่า ในช่วงค่าการดูดกลืนแสง 350-650 นาโนเมตร สารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต มีแนวโน้มของค่าดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา และสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์มีการเปลี่ยนแปลงค่าดูดกลืนแสงน้อยมาก ๆ ดังภาพที่ 4.14 การเพิ่มขึ้นของค่าดูดกลืนแสงตามระยะเวลา เป็นการบ่งบอกถึงปริมาณการเกิดอนุภาคนาโนเหล็กที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสีของสารละลายที่เข้มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป จึงสามารถคาดการณ์ได้ว่า ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณอนุภาคนาโนเหล็กที่สังเคราะห์ได้มากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการหลงเหลืออยู่ของสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ และสารตั้งต้น ในระบบจึงทำให้สามารถทำปฏิกิริยากันและเกิดอนุภาคนาโนเหล็กขึ้น

4.1.2.4 ผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์

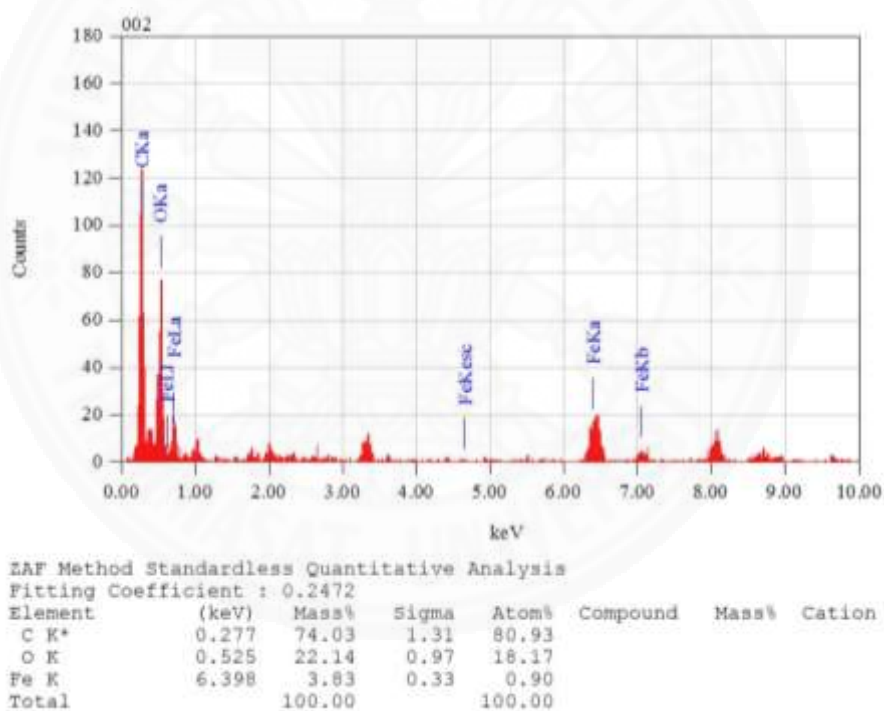
อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พร้อมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)

เมื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) แล้ว สามารถสรุปได้ว่าการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ที่เหมาะสมที่สุดเมื่อใช้เซิร์มจากหางน้ำยางธรรมชาติเป็นตัวรีดิวซ์ นั่นคือ การสังเคราะห์โดยใช้เซิร์มจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจางทำปฏิกิริยากับสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตและเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พร้อมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานจะเลือกใช้อ่อนุภาคจากการสังเคราะห์ของสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตและเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซิร์มที่ไม่เจือจาง ในการตรวจสอบพบว่า ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคจากสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต มีรูปร่างไม่แน่นอน เกะก้างเป็นกลุ่มเป็นกระจุกเล็ก ๆ ประมาณ 50 นาโนเมตร อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 นาโนเมตร ดังภาพที่ 4.15 (a) และ (b) สำหรับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคจากสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ มีรูปร่างไม่แน่นอน เกะก้างเป็นกลุ่มเล็ก ๆ มีการกระจายตัวมากกว่าอนุภาคจากสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 นาโนเมตร ดังภาพที่ 4.16 (a) และ (b) สำหรับการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานพบว่า อนุภาคจากสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตและเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ทั้งสองชนิด ประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) และเหล็ก (Fe) ดังภาพที่ 4.15(c) และ 4.16(c)



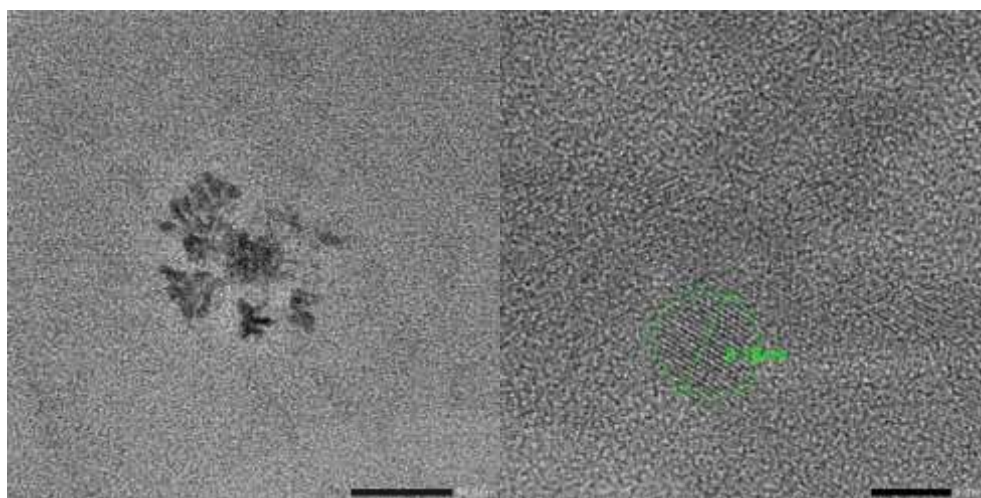
(a)

(b)



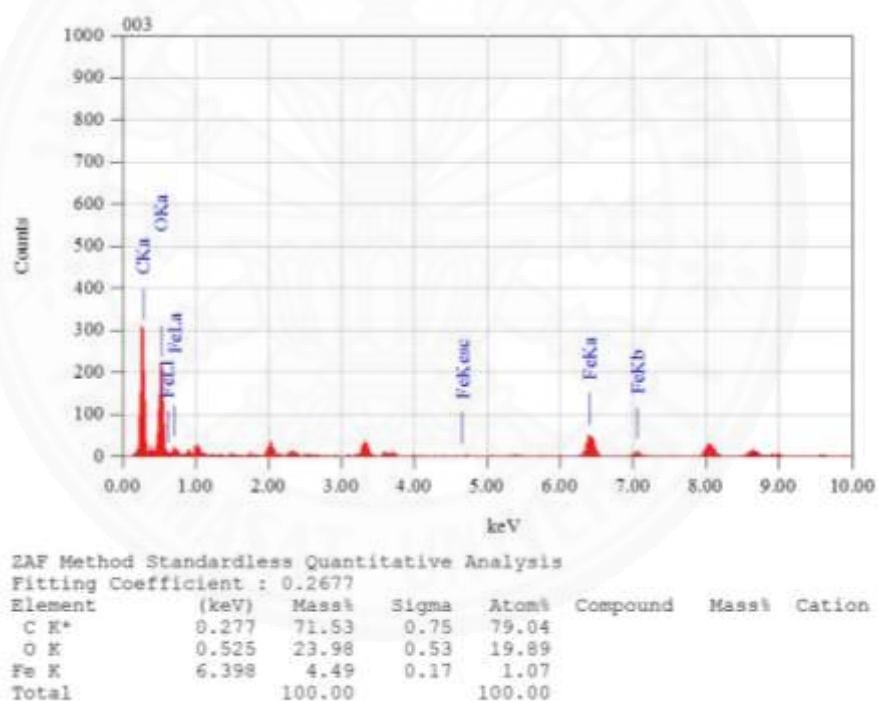
(c)

ภาพที่ 4.15 อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเซรัมจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจาง (a) ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า และ (b) ที่กำลังขยาย 800,000 เท่า และ (c) ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)



(a)

(b)



(c)

ภาพที่ 4.16 อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(III)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ 2.4 มิลลิ-โมลาร์ กับเซรัมจากหางนํ้ายางที่ไม่เจือจาง (a) ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า (b) ที่กำลังขยาย 800,000 เท่า และ (c) ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)

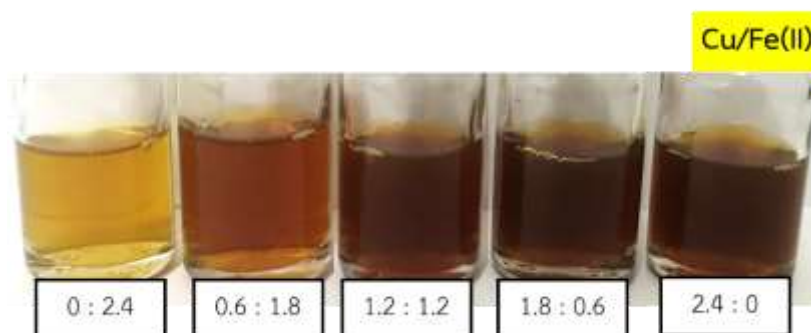
4.2 ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ในเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติ ที่อุณหภูมิห้อง

หางน้ำยางธรรมชาติที่ใช้ในการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ครั้งนี้ มีปริมาณเนื้อยางแห้งในหางน้ำยาง (DRC) เท่ากับ 3.877% จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) และเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ที่อุณหภูมิห้องแล้ว สามารถสรุปได้ว่า สำหรับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) เหมาะสมที่สุด เมื่อใช้สารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ ทำปฏิกิริยากับเซรัมจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจางซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์ และสำหรับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ที่เหมาะสมที่สุด เมื่อใช้สารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตและเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ ทำปฏิกิริยากับเซรัมจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจาง

ในการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) จะใช้เซรัมจากหางน้ำยางที่ไม่เจือจางทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น ได้แก่ สารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต แทนแหล่งไอออนของ Cu(II) สารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตแทนแหล่งไอออนของ Fe(II) และสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์แทนแหล่งไอออนของ Fe(III) ในการศึกษาครั้งนี้

4.2.1 ผลของอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างทองแดงกับเหล็ก (Cu:Fe) ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโน

ศึกษาผลของอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างทองแดงกับเหล็ก (Cu:Fe) เป็น 0:2.4, 0.6:1.8, 1.2:1.2, 1.8:0.6 และ 2.4:0 มิลลิโมลาร์ ผสมเพื่อทำปฏิกิริยากับเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติที่ไม่เจือจาง จนได้สารละลายปริมาตร 11 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส) ทันทีที่ผสมสีของสารละลายจะเปลี่ยนสีอย่างรวดเร็วและมีลักษณะเป็นสารแขวนลอย จากเริ่มต้นเซรัมจากหางน้ำยางเป็นสีเหลืองอ่อนใส สารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตเป็นสีฟ้า สารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตหรือสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์เป็นสีเหลือง ทันทีที่ผสมสารแขวนลอยเปลี่ยนตามอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างทองแดงกับเหล็กที่เพิ่มขึ้น นั่นคือ สีของสารแขวนลอยจะเข้มข้นเมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างทองแดงมากขึ้น ซึ่งจะกลายเป็นสีน้ำตาลจนถึงน้ำตาลเข้ม ดังภาพที่ 4.17



(a)



(b)

ภาพที่ 4.17 สีของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe ที่อัตราส่วน Cu:Fe เท่ากับ 0:2.4, 0.6:1.8, 1.2:1.2, 1.8:0.6 และ 2.4:0 มิลลิโมลาร์ ที่ pH ที่เหมาะสม ของ (a) Cu/Fe จาก Fe(II) และ (b) Cu/Fe จาก Fe(III)

จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า จากการตรวจสอบค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า พบว่า สารแขวนลอยอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) Cu/Fe จาก Fe(III) มีค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 4.11 และ 4.12

ตารางที่ 4.11

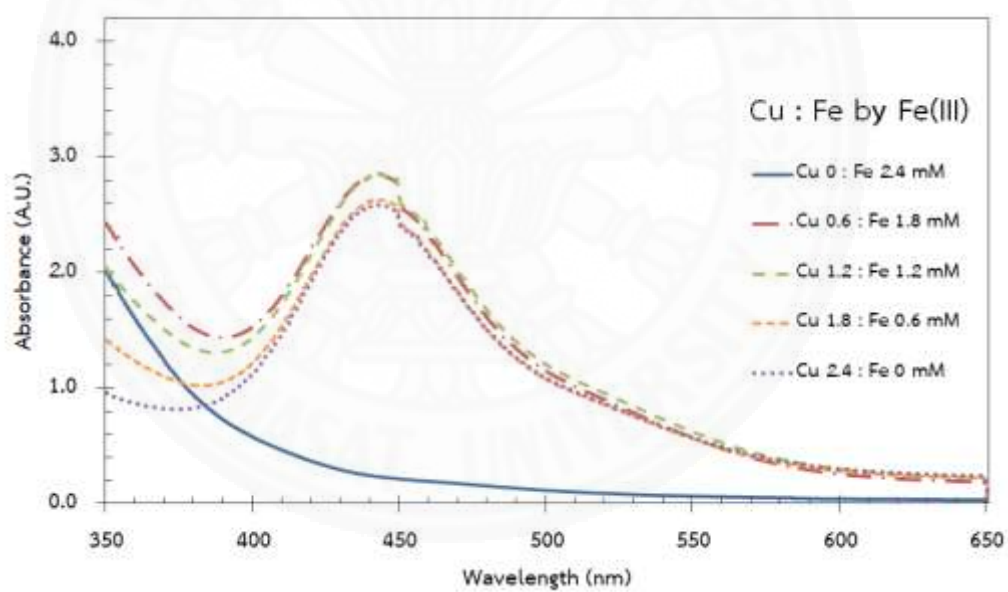
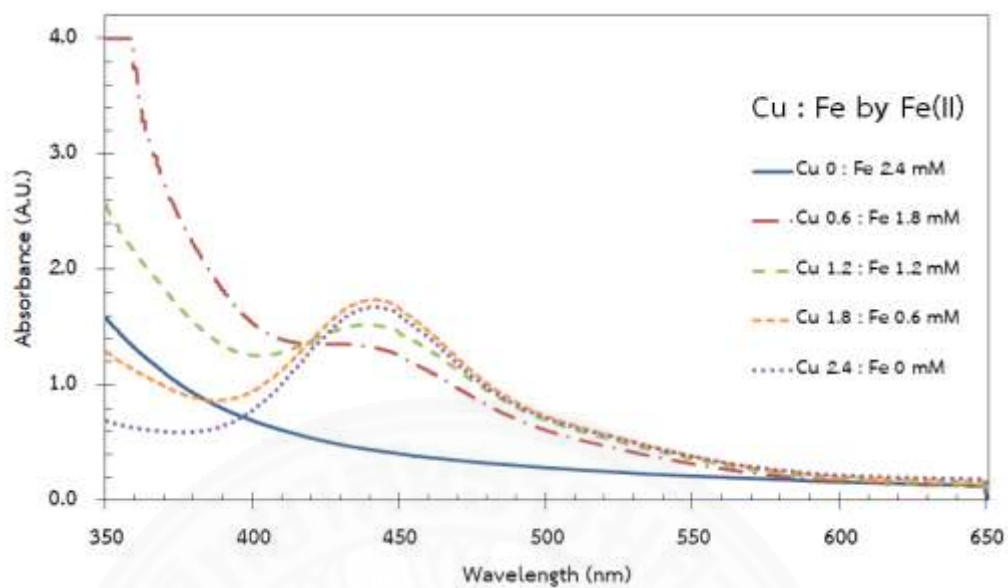
ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่อัตราส่วน Cu:Fe เท่ากับ 0:2.4, 0.6:1.8, 1.2:1.2, 1.8:0.6 และ 2.4:0 มิลลิโมลาร์

Cu/Fe จาก Fe(II) (mM)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)
0/2.4	9.45	5230
0.6/1.8	9.41	5170
1.2/1.2	9.43	5220
1.8/0.6	9.47	5280
2.4/0	9.46	5140

ตารางที่ 4.12

ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe (III) ที่อัตราส่วน Cu:Fe เท่ากับ 0:2.4, 0.6:1.8, 1.2:1.2, 1.8:0.6 และ 2.4:0 มิลลิโมลาร์

Cu/Fe จาก Fe(III) (mM)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)
0/2.4	9.44	5710
0.6/1.8	9.41	5330
1.2/1.2	9.43	5570
1.8/0.6	9.41	5240
2.4/0	9.46	5210



ภาพที่ 4.18 ค่าการดูดกลืนแสงของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe ที่อัตราส่วน Cu:Fe เท่ากับ 0:2.4, 0.6:1.8, 1.2:1.2, 1.8:0.6 และ 2.4:0 มิลลิโมลาร์ ทั้งนี้ที่ผสม ของ (a) Cu/Fe จาก Fe(II) และ (b) Cu/Fe จาก Fe(III)

ภาพที่ 4.18 แสดงผลการตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย พบว่า การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) และ Cu/Fe จาก Fe(III) มีลักษณะช่วงค่าการดูดกลืนแสงที่คล้ายกัน โดยที่อัตราส่วนความเข้มข้นระหว่าง Cu:Fe เท่ากับ 0.6:1.8, 1.2:1.2 และ 1.8:0.6 มิลลิโมลาร์ พบแนวโน้มการดูดกลืนแสง 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกเป็นค่าการดูดกลืนแสงตั้งแต่ 380-500 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองแดง (Nazara และคณะ, 2015; ชัยญานุชและนภดาว, 2559) และช่วงที่สองเป็นค่าการดูดกลืนแสงที่น้อยกว่า 350 นาโนเมตร เป็นต้นไป ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนเหล็ก (Devatha และคณะ, 2016) ดังนั้นจึง คาดการณ์ได้ว่า ในพบว่า การสังเคราะห์ครั้งนี้ได้เกิดอนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็กขึ้นในระบบ

4.2.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา หลังจากศึกษาปัจจัยผลของอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างทองแดงกับเหล็ก (Cu:Fe) ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ที่อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที โดยทันทีที่ผสมสีของสารแขวนลอย เปลี่ยนสีอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาเท่ากับ 0 นาที และเมื่อปล่อยให้สารทำปฏิกิริยาต่อไป พบว่าสารแขวนลอยมีสีเข้มขึ้นเล็กน้อย

จากตารางที่ 4.13 และ 4.14 การตรวจสอบค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า ที่ระยะเวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที ของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ทองแดง/เหล็ก พบว่า ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า มีช่วงค่าใกล้เคียงกันและลดลงตามระยะเวลาที่ตรวจสอบ

ตารางที่ 4.13

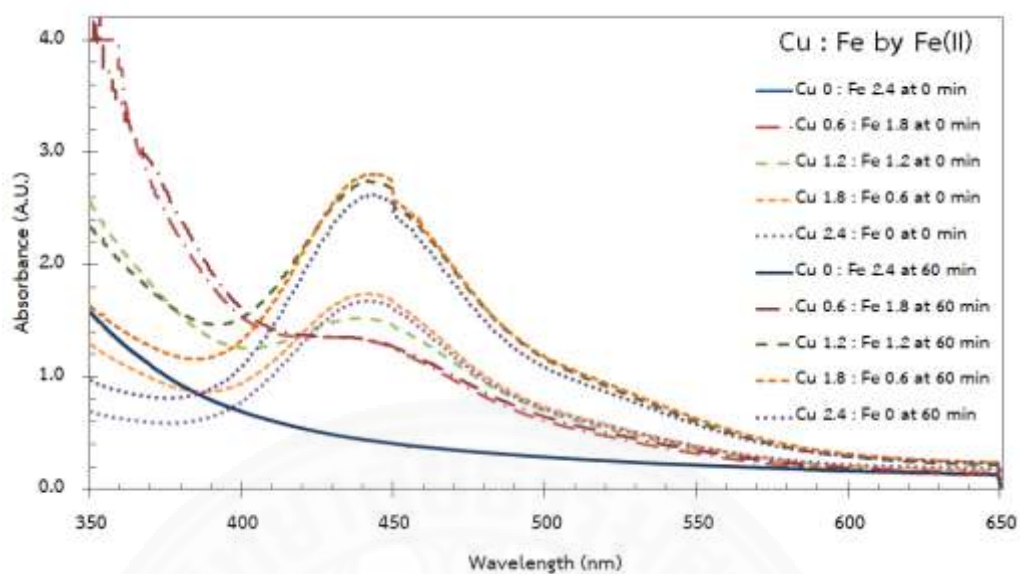
ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที

เวลา	การตรวจสอบ	อัตราส่วนความเข้มข้น Cu:Fe จาก Fe(II) (mM)				
		0:2.4	0.6:1.8	1.2:1.2	1.8:0.6	2.4:0
0 นาที	ค่า pH	9.45	9.41	9.43	9.47	9.46
	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	5230	5170	5220	5280	5140
15 นาที	ค่า pH	9.42	9.38	9.44	9.45	9.45
	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	5220	5130	5190	5210	5110
30 นาที	ค่า pH	9.41	9.39	9.44	9.46	9.44
	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	5200	5120	5120	5170	5100
60 นาที	ค่า pH	9.39	9.38	9.43	9.44	9.42
	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	4460	4780	5060	5160	5080

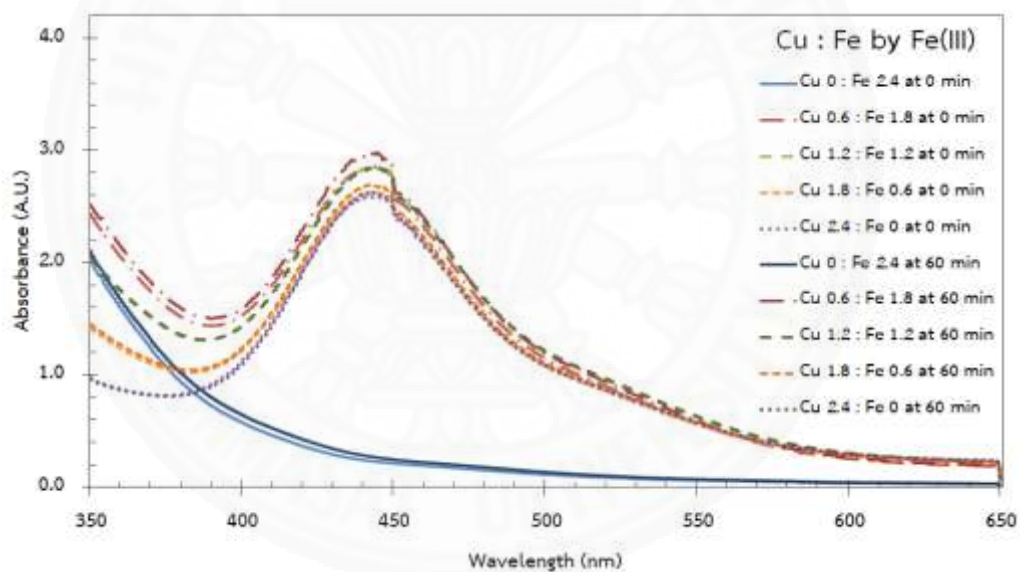
ตารางที่ 4.14

ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe (III) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที

เวลา	การตรวจสอบ	อัตราส่วนความเข้มข้น Cu:Fe จาก Fe(III) (mM)				
		0:2.4	0.6:1.8	1.2:1.2	1.8:0.6	2.4:0
0 นาที	ค่า pH	9.44	9.41	9.43	9.41	9.46
	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	5710	5330	5570	5240	5210
15 นาที	ค่า pH	9.43	9.39	9.42	9.41	9.45
	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	5630	5320	5380	5180	5180
30 นาที	ค่า pH	9.42	9.37	9.43	9.40	9.41
	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	5600	5310	5160	5130	5060
60 นาที	ค่า pH	9.41	9.36	9.43	9.33	9.40
	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	5490	5300	5040	5090	5010



(a)



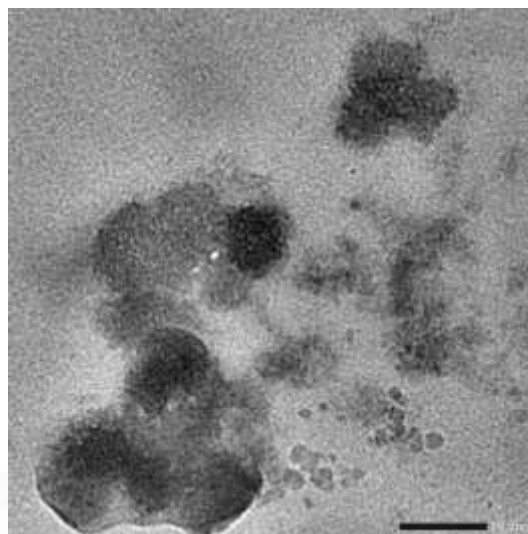
(b)

ภาพที่ 4.19 ค่าการดูดกลืนแสงของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe ที่อัตราส่วน Cu:Fe เท่ากับ 0:2.4, 0.6:1.8, 1.2:1.2, 1.8:0.6 และ 2.4:0 มิลลิโมลาร์ ที่เวลา 0 และ 60 นาที ของ (a) Cu/Fe จาก Fe(II) และ (b) Cu/Fe จาก Fe(III)

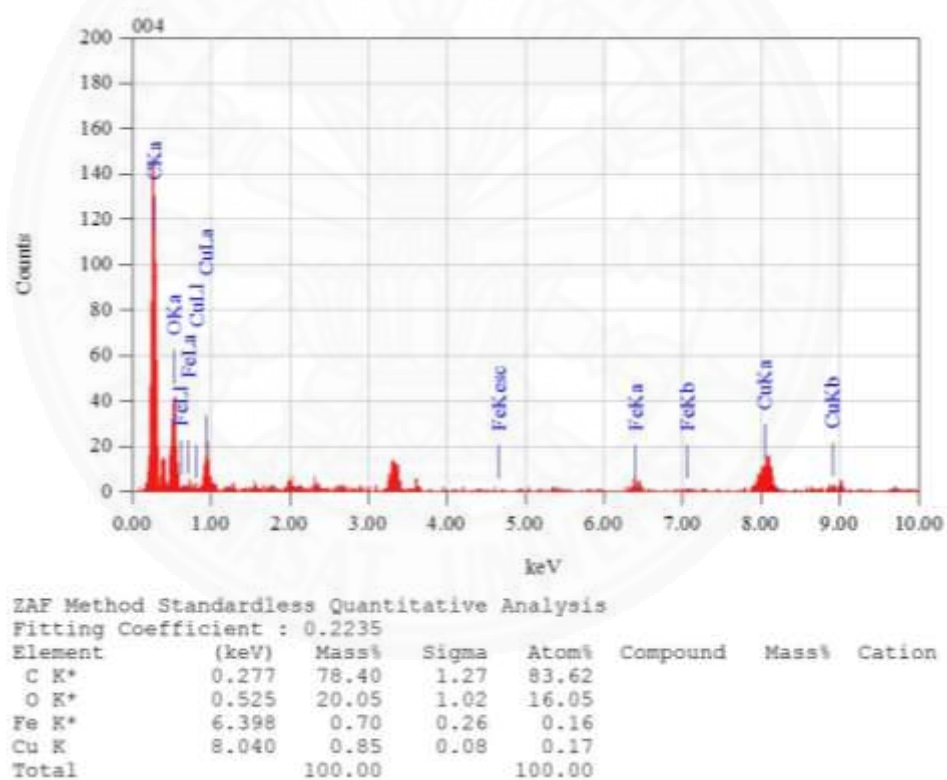
จากการตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยที่ระยะเวลาต่าง ๆ พบว่า ค่าการดูดกลืนแสงของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) และ Cu/Fe จาก Fe(III) มีลักษณะช่วงค่าการดูดกลืนแสงที่คล้ายกัน ทั้งนี้การดูดกลืนแสงจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาการทำปฏิกิริยามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสีของสารละลายที่เข้มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป จึงคาดการณ์ได้ว่า ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณอนุภาคนาโนเหล็กที่สังเคราะห์ได้มากขึ้นตามไปด้วย สำหรับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก จาก Fe(II) แสดงให้เห็นถึงผลของระยะเวลาที่มีผลต่อค่าการดูดกลืนแสงที่สูงขึ้นได้อย่างชัด ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที ในขณะที่การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก จาก Fe(III) เพิ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังภาพที่ 4.19

4.2.3 ผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พร้อมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)

สำหรับการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พร้อมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานจะเลือกใช้อุณหภูมิจากการสังเคราะห์ของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe ที่ 0.6/1.8, 1.2/1.2 และ 1.8/0.6 มิลลิโมลาร์ ดังภาพที่ 4.20-4.25 โดยพบว่า อนุภาคนาโนโลหะคู่ทองแดง/เหล็กมักเกาะกันอยู่เป็นกลุ่มเป็นก้อน ลักษณะการจับกลุ่มเป็นรูปร่างค่อนข้างกลมเป็นส่วนมาก มีรายละเอียดดังตารางที่ 4.15

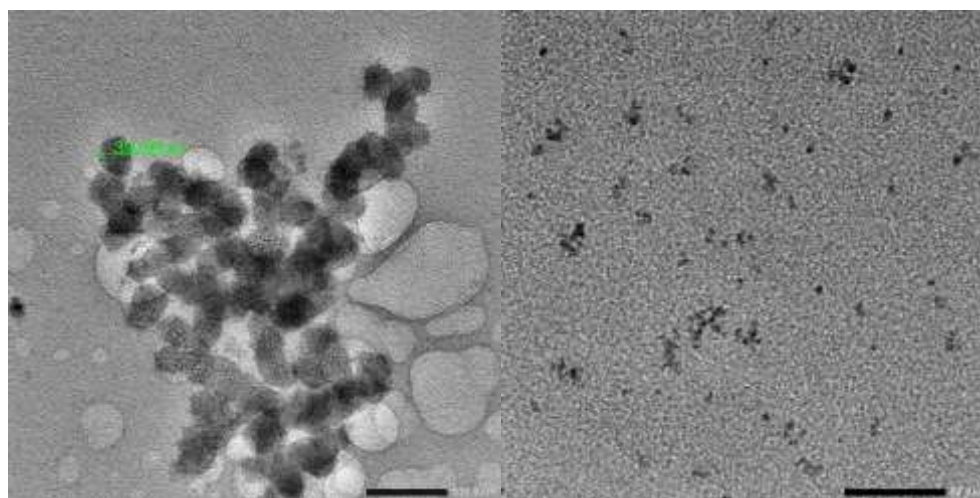


(a)



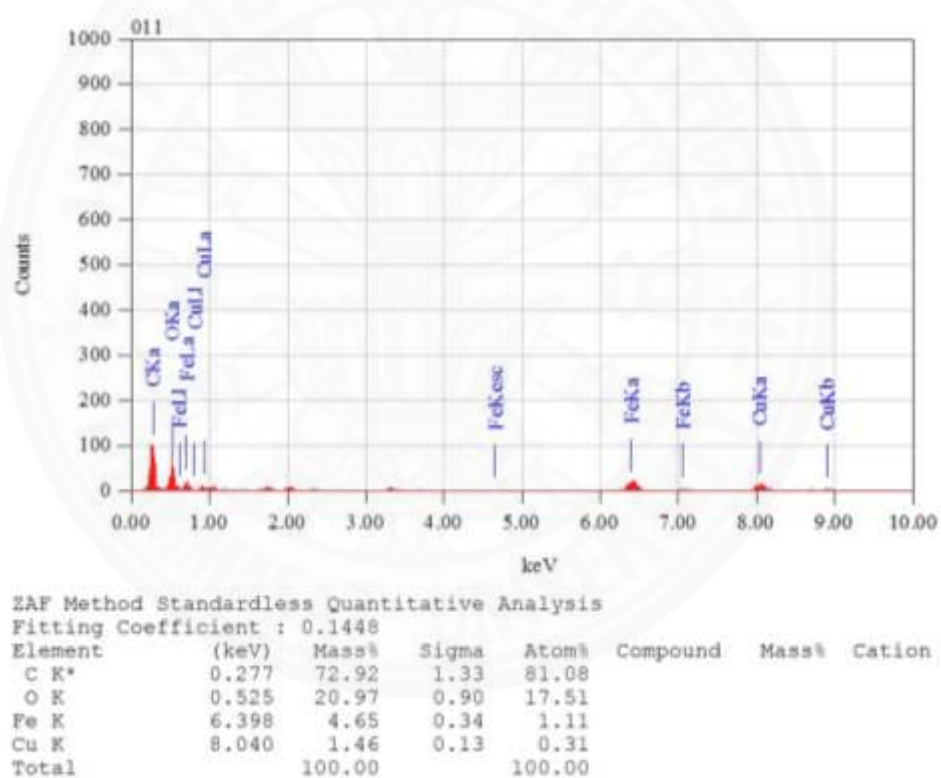
(b)

ภาพที่ 4.20 อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่ 0.6/1.8 มิลลิโมลาร์ ของ (a) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย TEM ที่กำลังขยาย 80,000 เท่า และ (b) ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)



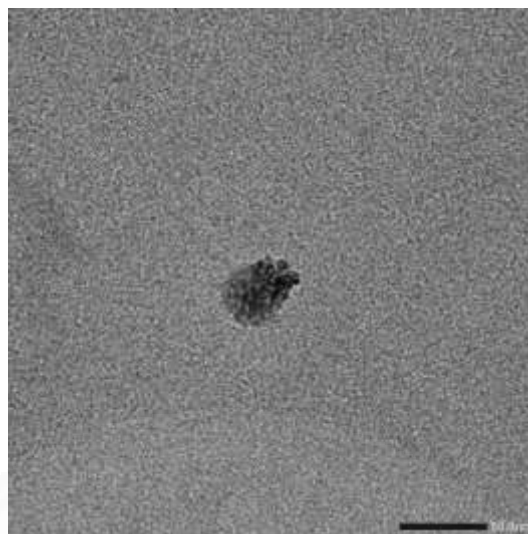
(a)

(b)

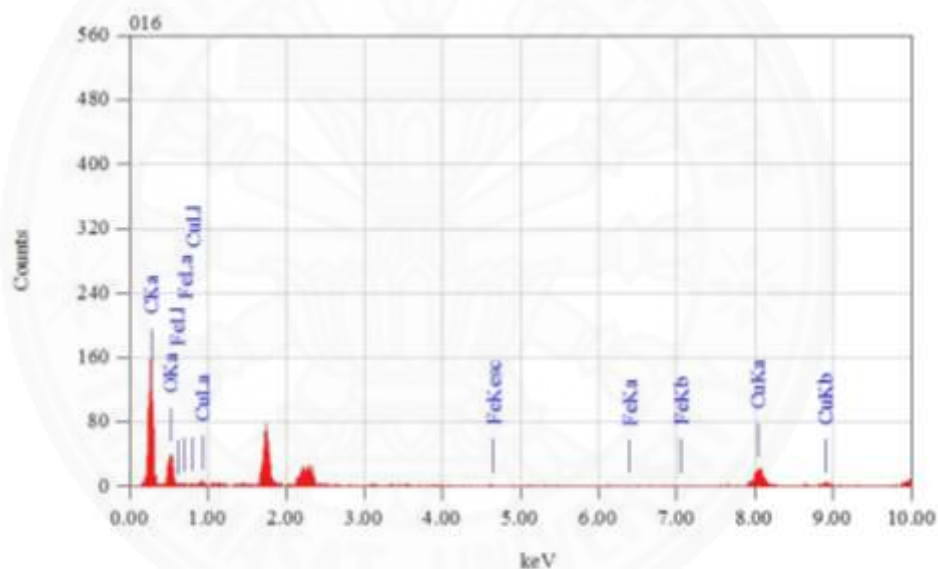


(C)

ภาพที่ 4.21 อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ ของ (a) ลักษณะทาง
 สัณฐานวิทยาด้วย TEM ที่กำลังขยาย 40,000 เท่า (b) 100,000 เท่า และ (c) ผลการวิเคราะห์ธาตุ
 เชิงพลังงาน (EDS)



(a)

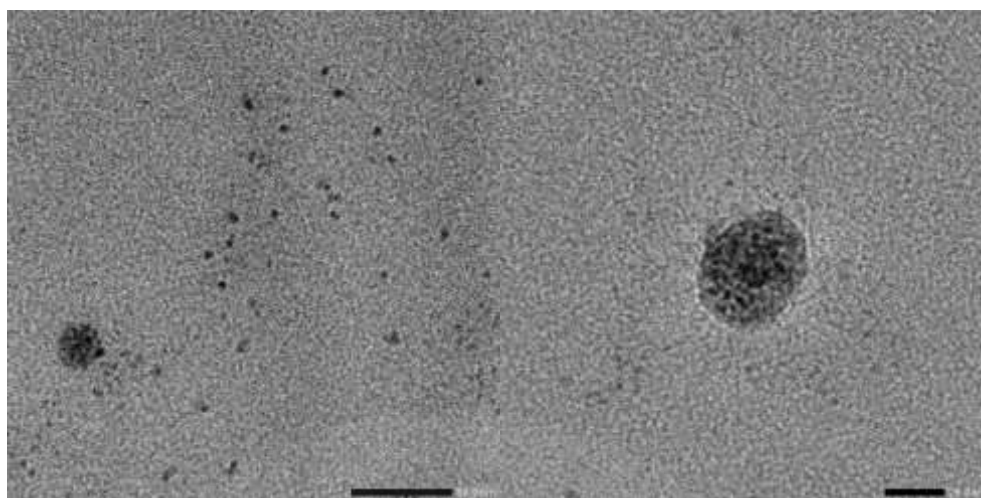


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.2938

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation
C K*	0.277	80.59	1.22	85.44			
O K*	0.525	17.92	0.96	14.26			
Fe K	6.398	0.09	0.27	0.02			
Cu K	8.040	1.41	0.09	0.28			
Total		100.00		100.00			

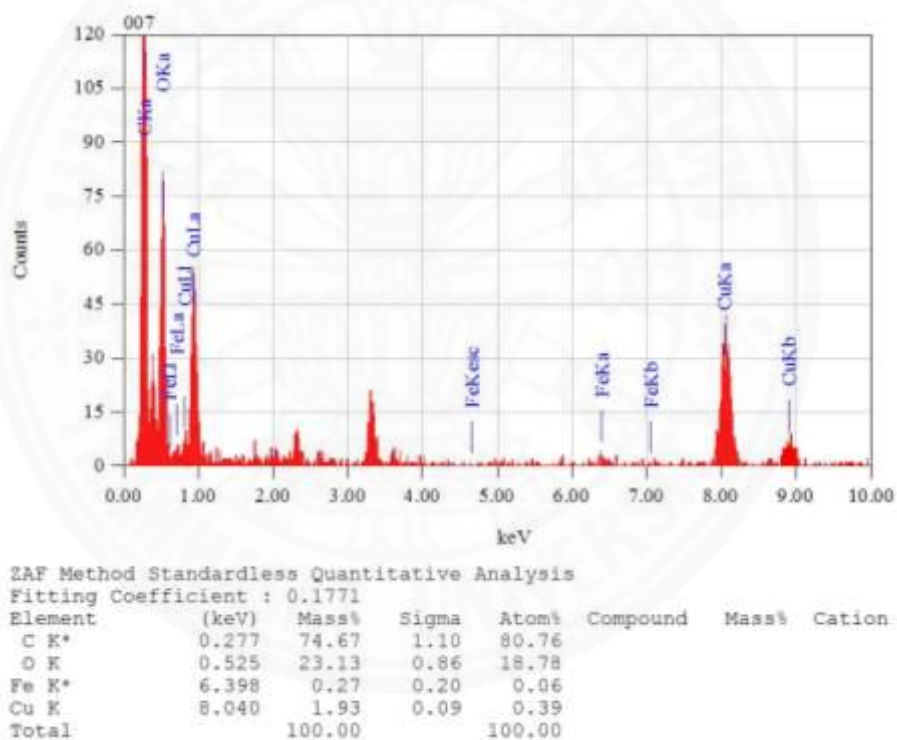
(b)

ภาพที่ 4.22 อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่ 1.8/0.6 มิลลิโมลาร์ ของ (a) ลักษณะทาง
สัณฐานวิทยาด้วย TEM ที่กำลังขยาย 80,000 เท่า และ (b) ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)



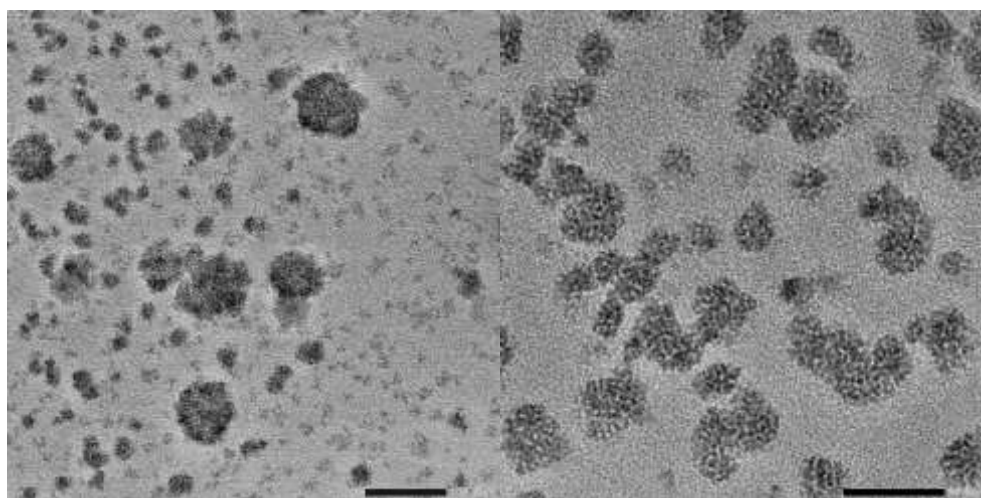
(a)

(b)



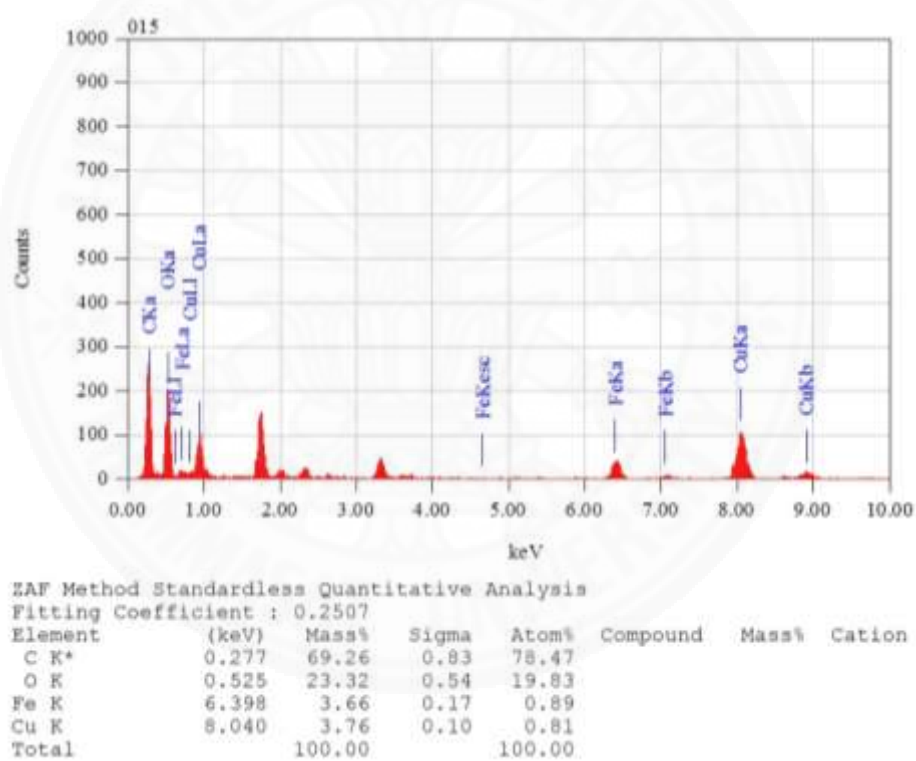
(c)

ภาพที่ 4.23 อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) ที่ 0.6/1.8 มิลลิโมลาร์ ของ (a) ลักษณะทาง
สัณฐานวิทยาด้วย TEM ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า (b) 150,000 เท่า และ (c) ผลการวิเคราะห์ธาตุ
เชิงพลังงาน (EDS)



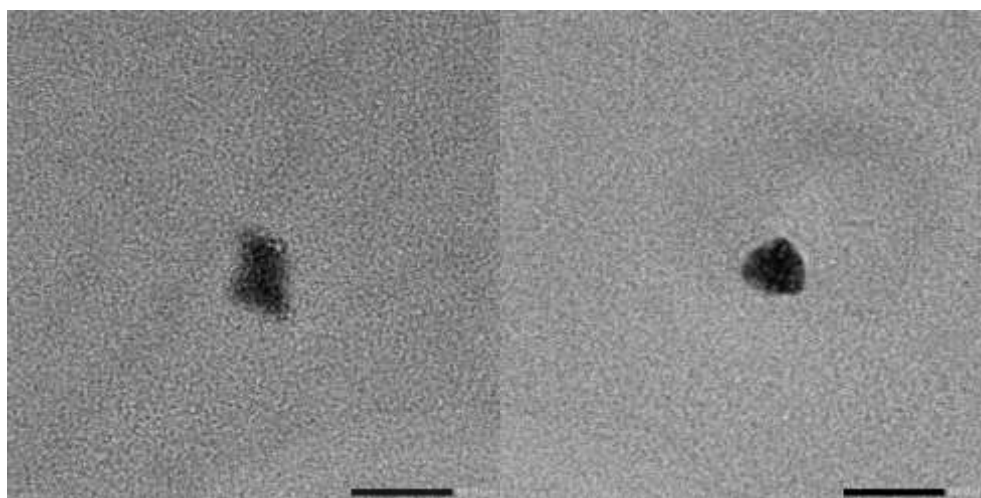
(a)

(b)



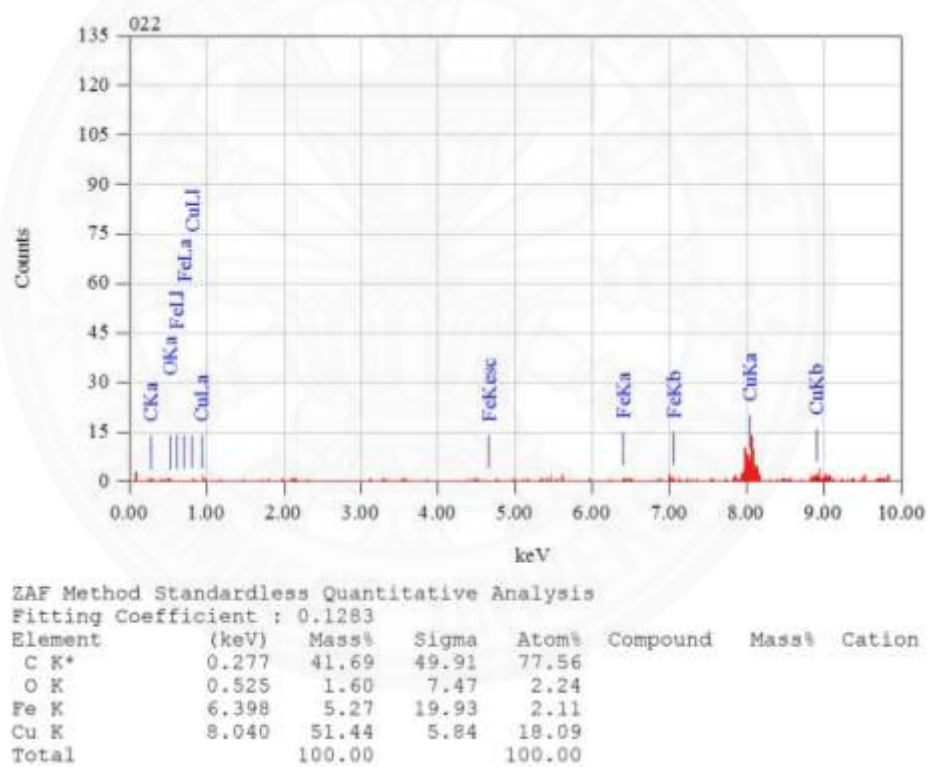
(c)

ภาพที่ 4.24 อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ ของ (a) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย TEM ที่กำลังขยาย 40,000 เท่า (b) 100,000 เท่า และ (c) ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)



(a)

(b)



(c)

ภาพที่ 4.25 อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) ที่ 1.8/0.6 มิลลิโมลาร์ ของ (a) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย TEM ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า (b) 100,000 เท่า และ (c) ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)

ตารางที่ 4.15

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe เท่ากับ 0.6/1.8, 1.2/1.2 และ 1.8/0.6 มิลลิโมลาร์

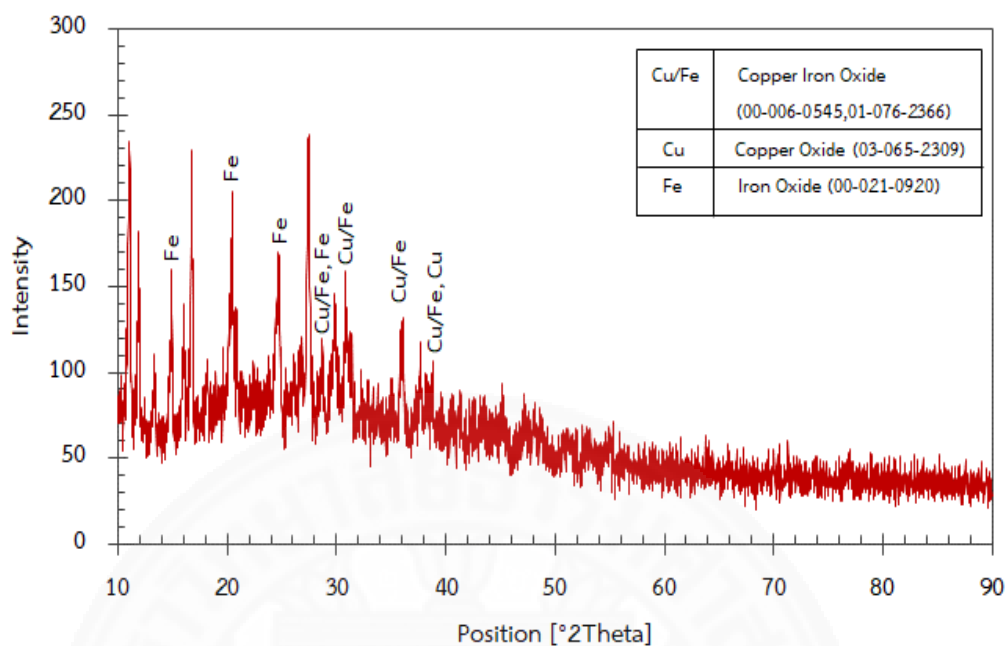
อนุภาคนาโนโลหะคู่	อัตราส่วนของ Cu/Fe (mM)	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ตรวจด้วย TEM
Cu/Fe จาก Fe(II)	0.6/1.8	จับกันเป็นกลุ่มก้อนกลม ๆ ขนาดประมาณ 50-60 nm
	1.2/1.2	จับกันเป็นกลุ่มก้อนกลม ๆ ขนาดประมาณ 30-45 nm และพบอนุภาคกระจายตัวอยู่ ขนาดประมาณ 3-5 nm
	1.8/0.6	จับกันเป็นกลุ่ม ลักษณะค่อนข้างกลม ขนาดประมาณ 50 nm
Cu/Fe จาก Fe(III)	0.6/1.8	จับกันเป็นกลุ่มก้อนกลม ๆ ขนาดประมาณ 25-35 nm และพบอนุภาคกระจายตัวอยู่ ขนาดประมาณ 3-5 nm
	1.2/1.2	จับกันเป็นกลุ่มเล็ก-ใหญ่ ลักษณะค่อนข้างกลม พบปริมาณเยอะมาก ขนาดประมาณ 15-100 nm
	1.8/0.6	จับกันเป็นกลุ่ม ลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน ขนาดประมาณ 40-50 nm

สำหรับการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน พบว่า อนุภาคนาโนโลหะคู่ทองแดง/เหล็ก ประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ทองแดง (Cu) และเหล็ก (Fe) ทั้งนี้ธาตุทองแดงส่วนหนึ่งมาจาก Copper grid ซึ่งใช้ในการตรวจสอบจึงไม่สามารถบอกปริมาณธาตุทองแดงของอนุภาคที่แน่นอนได้ แต่สำหรับอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ พบธาตุทองแดงและเหล็กปริมาณมาก ซึ่งมากกว่าที่อัตราส่วนอื่น ๆ อย่างชัดเจนดังภาพข้างต้น ทั้งของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) และ Cu/Fe จาก Fe (III)

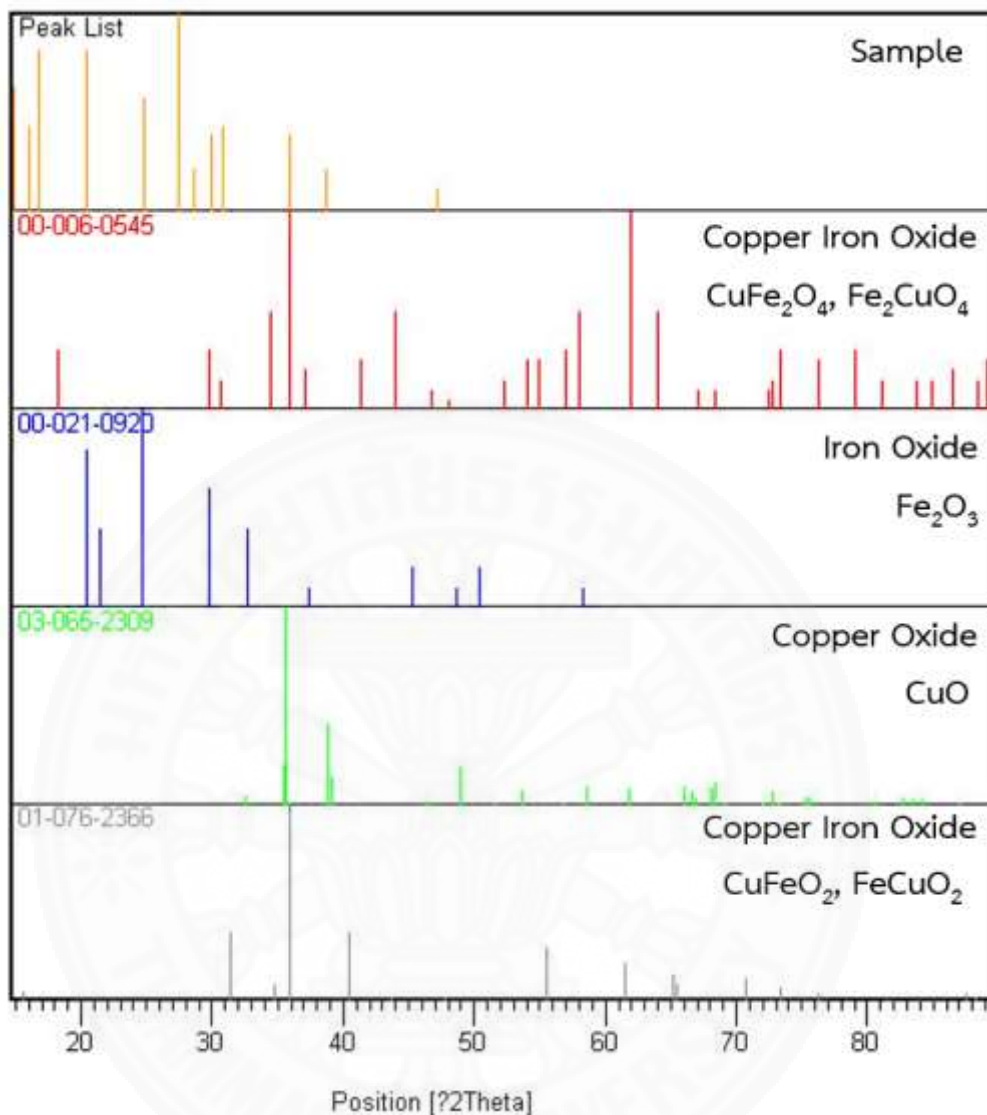
4.2.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

(XRD)

จากการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พร้อมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS) พบว่า การสังเคราะห์ของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ พบของปริมาณธาตุทองแดงและเหล็กปริมาณมาก ซึ่งมากกว่าที่อัตราส่วนอื่น ๆ สำหรับในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จำเป็นต้องใช้ปริมาณตัวอย่างอนุภาคในการวิเคราะห์ค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงเลือกใช้อนุภาคนาโนโลหะคู่ทองแดง/เหล็ก(II) ที่อัตราส่วน 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ มาวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ในโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนทองแดง/เหล็กที่สังเคราะห์ได้ โดยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ใช้ Cu K α เป็นแหล่งกำเนิดรังสี ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) และสแกนที่ 2θ ตั้งแต่ $10-90^\circ$ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่กระทบกับหน้าผลึกของวัสดุด้วยมุมต่าง ๆ กัน และเทียบผลวิเคราะห์กับฐานข้อมูลอ้างอิง



ภาพที่ 4.26 ดิฟแฟรกโตแกรมของตัวอย่างอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ เปรียบเทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิงของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ไฮดรอกไซด์และ คอปเปอร์ออกไซด์



ภาพที่ 4.27 พิกของดิฟแฟรกโตแกรมของตัวอย่างอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ เปรียบเทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิงของคอปเปอร์ไอรอนออกไซด์ ไอรอนออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์

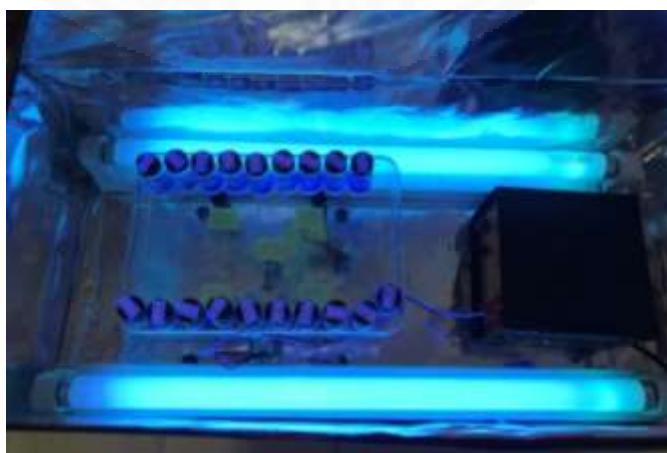
จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลการทดลองที่ได้จะแสดงเป็นดิฟแฟรกโตแกรม (Diffractogram) โดยการพลอตกราฟระหว่างค่า Intensity กับมุมการเลี้ยวเบน 2θ (deg.) ดังภาพที่ 4.26 จากภาพแสดงพิกซึ่งเกิดขึ้นที่หลาย ๆ ตำแหน่ง โดยดิฟแฟรกโตแกรมที่ปรากฏมีลักษณะเตี้ย อาจเป็นผลมาจากเซิร์มจากทางน้ำยางธรรมชาติซึ่งเป็นสารที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่อาจจะยังหลงเหลือโพลิเมอร์อยู่ในอนุภาค สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการ

เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ยังคงสามารถวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุและโครงสร้างผลึกของอนุภาค โดยพบพีคที่สอดคล้องกับฐานข้อมูลอ้างอิงของคอปเปอร์ไอรอนออกไซด์ หรือไอรอนคอปเปอร์ออกไซด์ (CuFeO_2 , FeCuO_2 , CuFe_2O_4 , Fe_2CuO_4) หมายเลขอ้างอิง 00-006-0545 และ 01-076-2366 ได้แก่ พีคที่ตำแหน่ง 29.8641, 30.8565 และ 35.986 พีคที่สอดคล้องกับฐานข้อมูลอ้างอิงของไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) หมายเลขอ้างอิง 00-021-0920 ได้แก่ พีคที่ตำแหน่ง 14.8995, 20.4782, 24.7481 และ 29.8641 และพีคที่สอดคล้องกับฐานข้อมูลอ้างอิงของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) หมายเลขอ้างอิง 03-065-2309 ได้แก่ พีคที่ตำแหน่ง 38.7446 ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่า อนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยเซรามิกจากหางน้ำยางเป็นอนุภาคนาโนโลหะคู่ทองแดง/เหล็กจริง สำหรับในการวิเคราะห์ที่พบไอรอนออกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์อยู่ด้วย อาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบและโครงสร้างในการจัดเรียงตัวของอะตอม เมื่อผสมกันโลหะสองชนิดผสมกัน ทำให้เกิดอนุภาคที่มีโครงสร้างที่แตกต่างจากเดิม ซึ่งอาจจะเป็น โลหะผสม (Alloy) เปลือกหุ้มแกนกลาง (Core-shell) หรือลักษณะอื่น ๆ ลักษณะการเกิดโครงสร้างของโลหะทองแดงและเหล็กเมื่อผสมกัน ซึ่งอาจจะเป็นลักษณะแบบอัลลอยด์หรือโลหะผสม

จากการตรวจสอบคุณสมบัติของอนุภาคนาโนของโลหะคู่ทองแดง/เหล็ก ด้วยเซรามิกจากหางน้ำยางธรรมชาติ โดยการวัดค่าความเป็นกรด-เบส ค่าการนำไฟฟ้า ค่าการดูดกลืนแสง รวมทั้งตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พร้อมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS) และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่า ผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านพร้อมการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน และเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สามารถให้ข้อมูลผลการวิเคราะห์ของอนุภาคได้อย่างละเอียด ทั้งขนาด ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และองค์ประกอบธาตุของอนุภาค ทั้งนี้ในวิเคราะห์ดังกล่าวยังคงเป็นเพียงตัวอย่างบางส่วน ซึ่งผลข้อมูลการวิเคราะห์จึงเป็นเพียงส่วนหนึ่งในการยืนยันการเกิดอนุภาคนาโนของโลหะคู่ทองแดง/เหล็ก และสำหรับการวัดค่าการดูดกลืนแสงเป็นอีกวิธีหนึ่งในการตรวจสอบที่ทำการวิเคราะห์จากตัวอย่างทั้งหมดในระบบ จึงถือเป็นอีกวิธีการวิเคราะห์ที่สามารถให้แนวโน้มและความเป็นไปได้ในการยืนยันการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของโลหะคู่ทองแดง/เหล็กที่เกิดขึ้น

4.3 ผลการทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยอนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe)

ในการทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยอนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีทางน้ำยางธรรมชาติที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งในทางน้ำยาง (DRC) เท่ากับ 3.877% ที่อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส) โดยใช้สารตั้งต้น ได้แก่ สารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตเป็นแหล่งไอออนของ Cu(II) สารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตเป็นแหล่งไอออนของ Fe(II) และ สารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์เป็นแหล่งไอออนของ Fe(III) ในการทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้ใช้อัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างทองแดงกับเหล็ก (Cu:Fe) เป็น 0.6:1.8, 1.2:1.2 และ 1.8:0.6 มิลลิโมลาร์ ซึ่งทันทีที่ผสมสารละลายเกิดการเปลี่ยนสีทันที จากนั้นนำสารละลายที่สังเคราะห์ได้มาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 13,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เติมสารละลายเอทานอลลงในสารละลาย แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงอีกครั้ง ทำการรวบรวมตะกอนแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนได้ผงอนุภาคนาโน แล้วนำมาทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยการนำอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้ปริมาณ 5 มิลลิกรัมต่อ 2 มิลลิลิตรของสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 10 ppm ที่สภาวะภายใต้แสงอาทิตย์ ภายใต้แสงจากตู้ยูวี และสภาวะในที่ที่ไม่มีแสง จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยอนุภาคนาโนของทองแดง (Cu(II)) เหล็ก (Fe(II) หรือ เหล็ก Fe(III)) ที่ความเข้มข้น 1.2 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ และสีย้อมเมทิลีนบลูที่ปราศจากอนุภาคนาโน

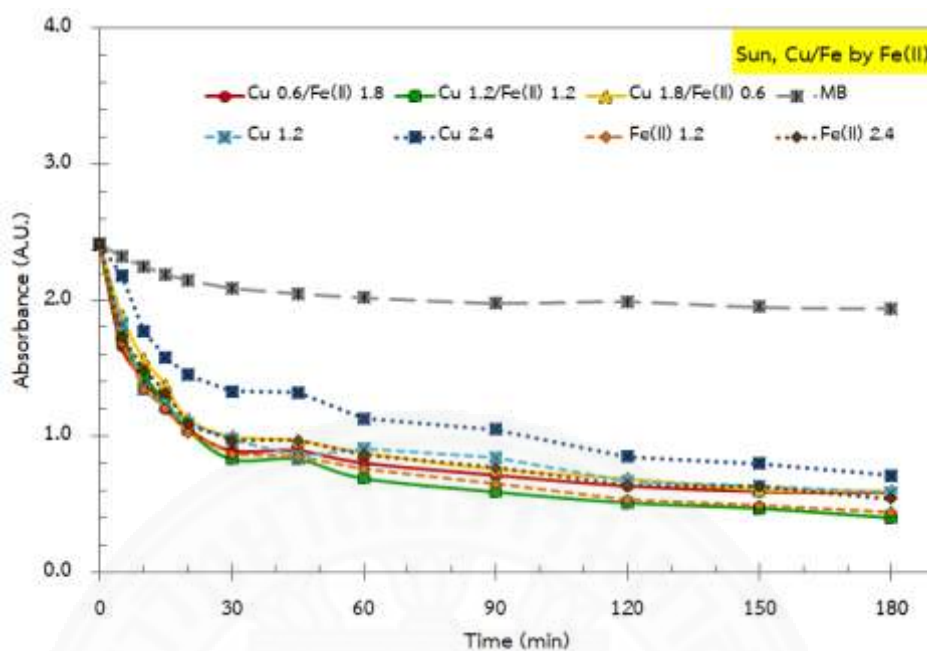


ภาพที่ 4.28 การทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยอนุภาคนาโนภายใต้แสงจากตู้ยูวี

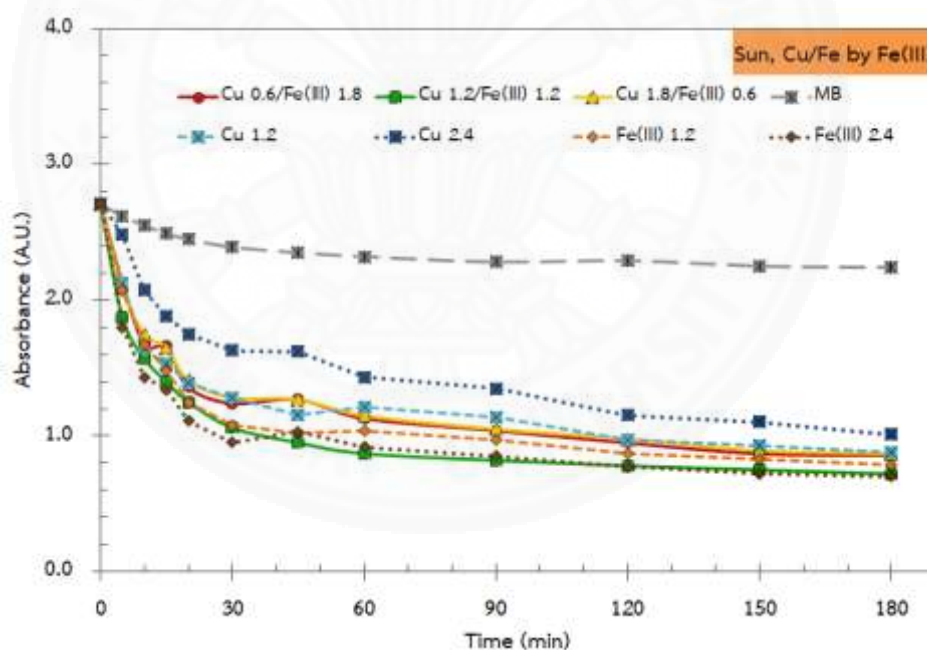
จากการทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ ภายใต้แสงจากตู้ยวี่ และสถานะที่ไม่มีแสง โดยนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ที่ระยะเวลาต่าง ๆ พบว่า ค่าการดูดกลืนแสงมีค่าลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยในช่วงเวลา 0-30 นาทีแรก พบค่าการดูดกลืนแสงลดลงอย่างรวดเร็วและค่อย ๆ ลดช้าลง ตามภาพที่ 4.29-4.31

จากภาพที่ 4.29(a) การทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนภายใต้แสงอาทิตย์ของอนุภาคนาโน พบว่า ที่เวลาทำปฏิกิริยา 180 นาที อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ มีค่าการดูดกลืนแสงลดลงต่ำที่สุด สามารถลดลงได้เท่ากับ 83.40% ตามมาด้วยอนุภาคนาโนของ Fe(II) 1.2 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ เท่ากับ 81.74 และ 77.59% ตามลำดับ และจากภาพที่ 4.29(b) ที่เวลาทำปฏิกิริยา 180 นาที อนุภาคนาโนโลหะ Fe(III) 2.4 มิลลิโมลาร์ มีค่าการดูดกลืนแสงลดลงต่ำที่สุด สามารถลดลงได้เท่ากับ 83.40% ตามมาด้วยอนุภาคนาโนของ Cu/Fe จาก Fe(III) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ และ Fe(III) 1.2 และอนุภาคนาโนโลหะคู่ เท่ากับ 82.57 และ 79.67% ตามลำดับ ทั้งนี้จากการทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ของอนุภาคนาโนโลหะคู่เปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนจากโลหะเดี่ยวของทองแดง (Cu(II)) เหล็ก (Fe(II)) หรือเหล็ก Fe(III)) สามารถแสดงให้เห็นประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) และ Cu/Fe จาก Fe(III) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ โดยมีค่าการดูดกลืนแสงลดลงต่ำสุดและลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งพบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงลดลงต่ำกว่าอนุภาคโลหะเดี่ยวของทองแดง Cu ที่ 1.2 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ อย่างชัดเจน และแม้จะพบมีค่าการดูดกลืนแสงลดลงต่ำสุดใกล้เคียงกับอนุภาคนาโนจากโลหะเดี่ยวของ Fe(II) หรือ Fe(III) ที่ความเข้มข้น 1.2 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ แต่เมื่อเปรียบเทียบจากปริมาณการใช้งานที่เท่ากันที่ 5 มิลลิกรัมต่อสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 10 ppm อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) และ Cu/Fe จาก Fe(III) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ ก็สามารถกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูและการดูดกลืนแสงลดลงได้ใกล้เคียงหรือต่ำกว่า Fe(II) หรือ Fe(III) เมื่อใช้อนุภาคนาโนโลหะคู่มีอัตราส่วน Cu:Fe เป็น 1.2:1.2 มิลลิโมลาร์ ที่ปริมาณการใช้งานที่เท่ากัน

เมื่อพิจารณาที่การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) และ Cu/Fe จาก Fe(III) พบว่า มีแนวโน้มค่าการดูดกลืนแสงเป็นไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือค่าการดูดกลืนแสงของ Cu/Fe ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ มีค่าการดูดกลืนแสงลดลงต่ำที่สุด ตามด้วย Cu/Fe ที่ 0.6/1.8 และ 1.8/0.6 มิลลิโมลาร์ แสดงให้เห็นผลของอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างทองแดงกับเหล็ก (Cu:Fe) เมื่อเหล็กเพิ่มขึ้น การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ก็มากขึ้นด้วย เมื่อเทียบกับ การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนทองแดง

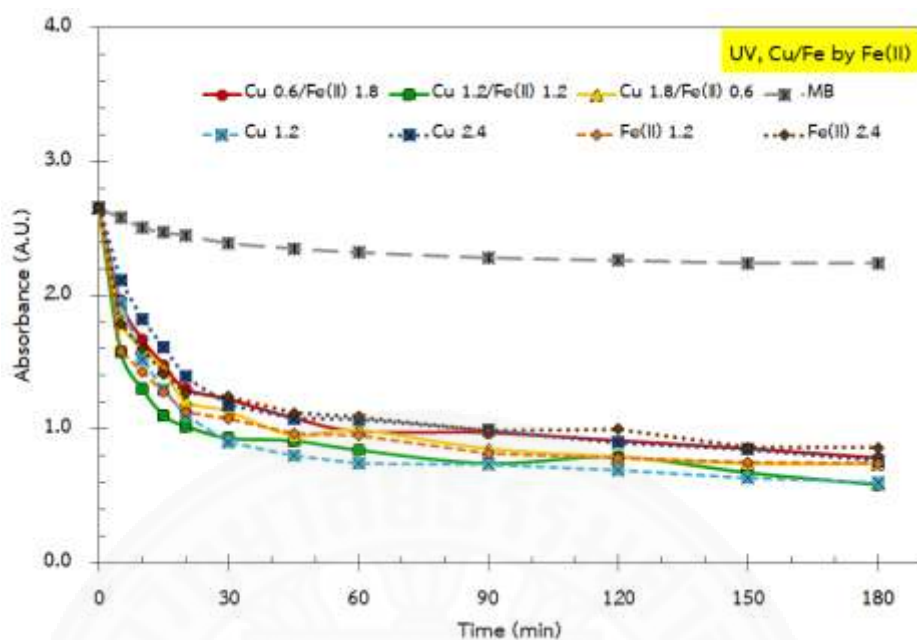


(a)

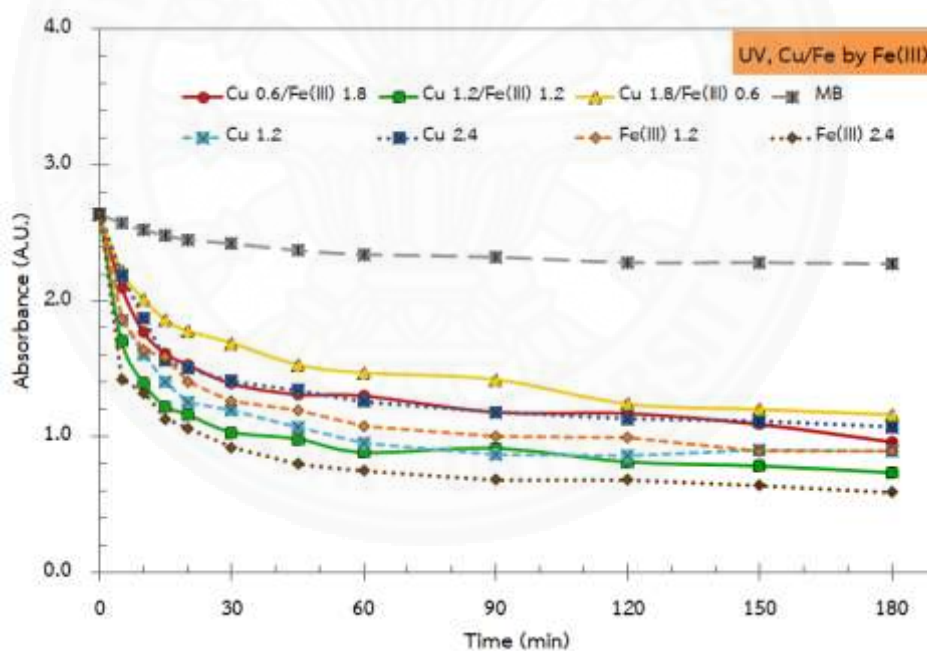


(b)

ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร กับเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยากำจัดสีของเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ ของ (a) อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) เปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนของทองแดง Cu(II) เหล็ก Fe(II) และสีย้อมเมทิลีนบลู (MB) และ (b) อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) เปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนของทองแดง Cu(II) เหล็ก Fe(III) และสีย้อมเมทิลีนบลู (MB)

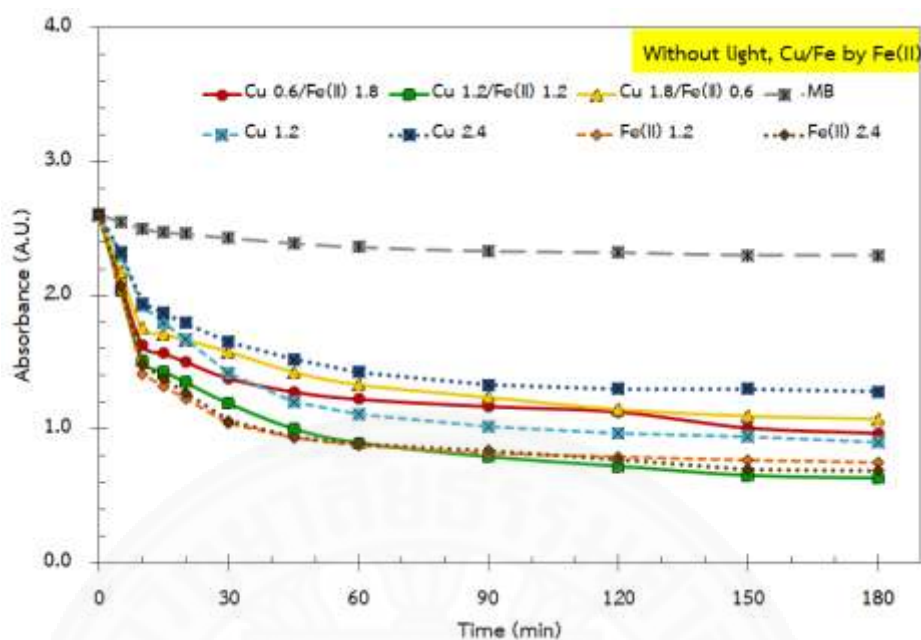


(a)

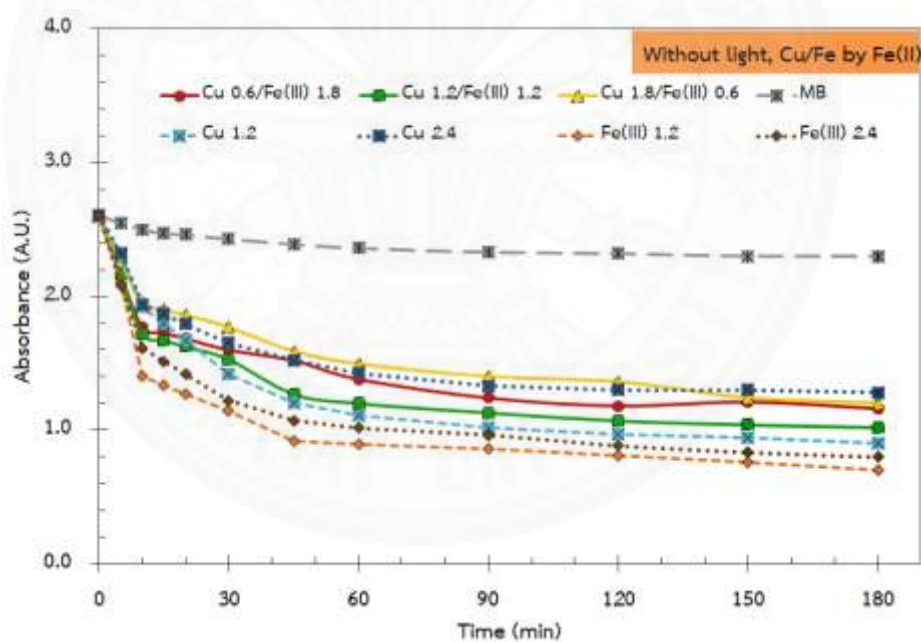


(b)

ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร กับเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยากำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงจากตู้ยวี่ ของ (a) อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) เปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนของ ทองแดง Cu(II) เหล็ก Fe(II) และสีย้อมเมทิลีนบลู (MB) (b) อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) เปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนของทองแดง Cu(II) เหล็ก Fe(III) และสีย้อมเมทิลีนบลู (MB)



(a)



(b)

ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร กับเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยากำจัดสีของเมทิลินบลูสภาวะในที่ไม่มีแสง ของ (a) อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) เปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนของ ทองแดง Cu(II) เหล็ก Fe(II) และสีย้อมเมทิลินบลู (MB) (b) อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) เปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนของทองแดง Cu(II) เหล็ก Fe(III) และสีย้อมเมทิลินบลู (MB)

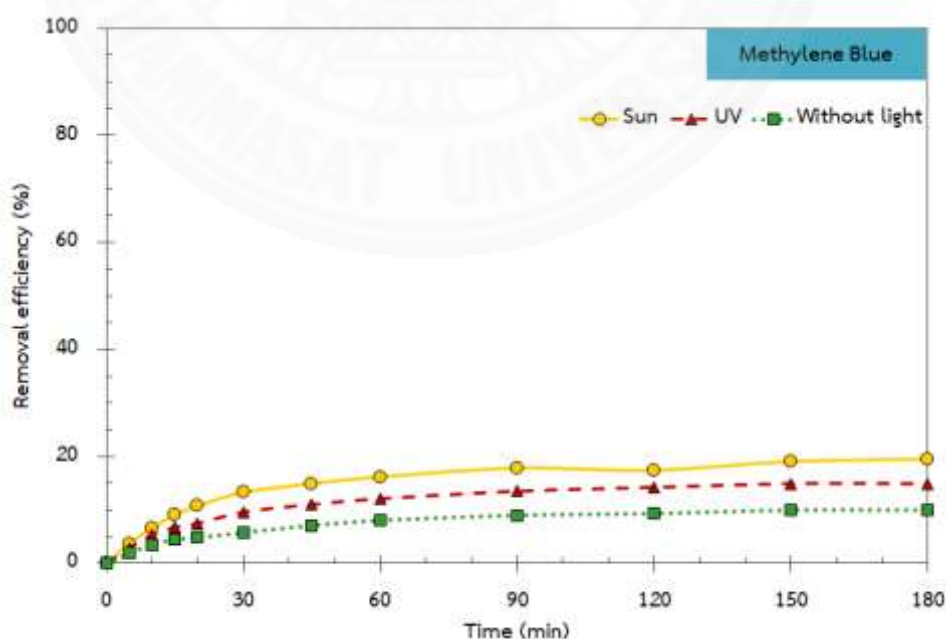
จากภาพที่ 4.30(a) การทดสอบการกำจัดสีของเมทิลีนบลูภายใต้แสงจากตู้ยูวี (UVA) ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 315-400 นาโนเมตร ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความเข้มแสงและความยาวคลื่นที่แน่นอนตลอดระยะเวลาทำปฏิกิริยา 180 นาที พบว่า อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ มีค่าการดูดกลืนแสงลดลงต่ำที่สุด เช่นเดียวกันกับการทดสอบการกำจัดสีของเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ โดยสามารถลดลงได้ 73.31% ตามมาด้วยอนุภาคนาโนของ Cu 1.2 และ Fe(II) 2.4 มิลลิโมลาร์ เท่ากับ 72.24 และ 64.06% และจากภาพที่ 4.30(b) ที่เวลาทำปฏิกิริยา 180 นาที อนุภาคนาโนของ Fe(III) 2.4 มิลลิโมลาร์ มีค่าการดูดกลืนแสงลดลงต่ำสุด เท่ากับ 77.65% ตามด้วยอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ และ Cu 1.2 กับ Fe(III) 1.2 มิลลิโมลาร์ เท่ากับ 72.348 และ 66.29% ตามลำดับ

ทั้งนี้จากการทดสอบการกำจัดสีของเมทิลีนบลูภายใต้แสงจากตู้ยูวีของอนุภาคนาโนโลหะคู่เปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนจากโลหะเดี่ยวของทองแดง (Cu(II)) เหล็ก (Fe(II)) หรือเหล็ก Fe(III)) สามารถแสดงให้เห็นประสิทธิภาพการกำจัดสีของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) และ Cu/Fe จาก Fe(III) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ โดยมีค่าการดูดกลืนแสงลดลงต่ำสุดและลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยพบค่าการดูดกลืนแสงลดลงต่ำสุดใกล้เคียงกับอนุภาคนาโนจากโลหะเดี่ยวของ Cu ที่ความเข้มข้น 1.2 และ Fe(II) หรือ Fe(III) ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ให้ผลการสังเคราะห์อนุภาคทองแดงและเหล็กที่ดีที่สุดและเลือกใช้ในการสังเคราะห์ทองแดงและเหล็กต่อมา ดังหัวข้อที่ 4.1 แต่เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการใช้งานที่เท่ากันที่ 5 มิลลิกรัมต่อสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 10 ppm อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) และ Cu/Fe จาก Fe(III) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ ก็สามารถกำจัดสีของเมทิลีนบลูและการดูดกลืนแสงลดลงได้ใกล้เคียงหรือต่ำกว่า Cu 1.2 และ Fe(II) หรือ Fe(III) 2.4 มิลลิโมลาร์ เมื่อใช้อนุภาคนาโนโลหะคู่มีอัตราส่วน Cu:Fe เป็น 1.2:1.2 มิลลิโมลาร์ ที่ปริมาณการใช้งานที่เท่ากัน

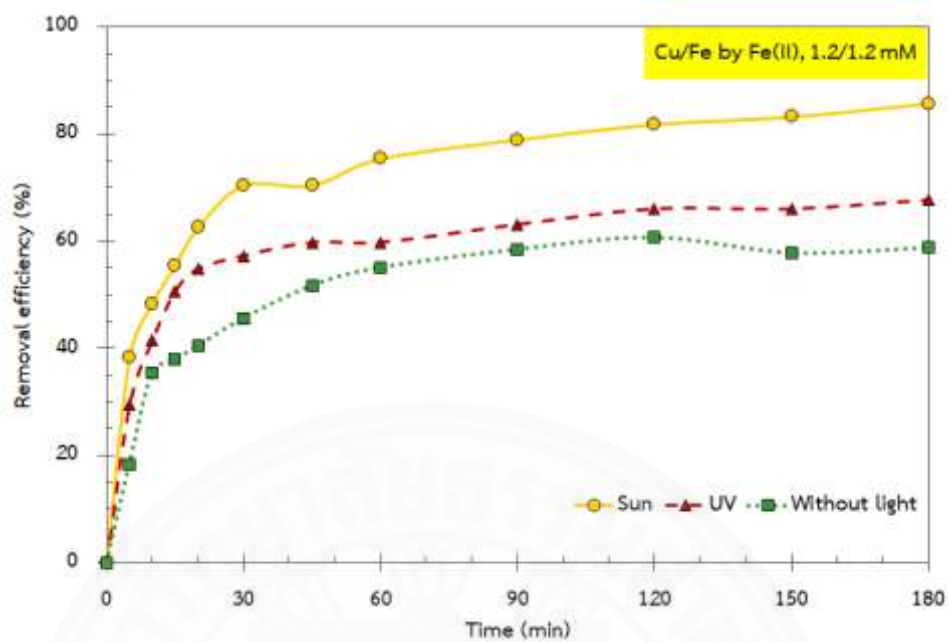
เมื่อพิจารณาที่การกำจัดสีของเมทิลีนบลูด้วยอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) และ Cu/Fe จาก Fe(III) พบว่า มีแนวโน้มค่าการดูดกลืนแสงเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการกำจัดสีของเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ นั่นคือ ค่าการดูดกลืนแสงของ Cu/Fe ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ มีค่าการดูดกลืนแสงลดลงต่ำที่สุด แต่แตกต่างกันที่ตามด้วย Cu/Fe ที่ 1.8/0.6 และ 0.6/1.8 มิลลิโมลาร์ ซึ่งเป็นไปตามผลของอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างทองแดงกับเหล็ก (Cu:Fe) เมื่อทองแดงเพิ่มขึ้น การกำจัดสีของเมทิลีนบลูภายใต้แสงจากตู้ยูวีก็มากขึ้นด้วย

จากการทดสอบการกำจัดสีของเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์กับภายใต้แสงจากตู้ยูวี มีแนวโน้มของการกำจัดสีของเมทิลีนบลูที่ต่างกันตามแหล่งกำเนิดแสง จะพบว่าแสงอาทิตย์มีผลต่อการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนที่มีเหล็ก และภายใต้แสงจากตู้ยูวีมีผลต่อการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนที่มีทองแดง ทั้งนี้เนื่องจากแสงด้วยตู้ยูวีมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 315-400 นาโนเมตร ในขณะที่แสงจากอาทิตย์มีช่วงค่าการดูดกลืนแสงที่กว้าง ครอบคลุมทั้งในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต (100-380 นาโนเมตร) และช่วงแสงที่ตามองเห็น (380-780 นาโนเมตร) ซึ่งจะสอดคล้องกับหัวข้อ 4.2 ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ในเซรั่มจากหางน้ำยางที่อุณหภูมิห้อง ที่พบแนวโน้มการดูดกลืนแสง 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกเป็นค่าการดูดกลืนแสงตั้งแต่ 380-500 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองแดง และช่วงที่สองเป็นค่าการดูดกลืนแสงที่น้อยกว่า 350 นาโนเมตร เป็นต้นไป ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนเหล็ก

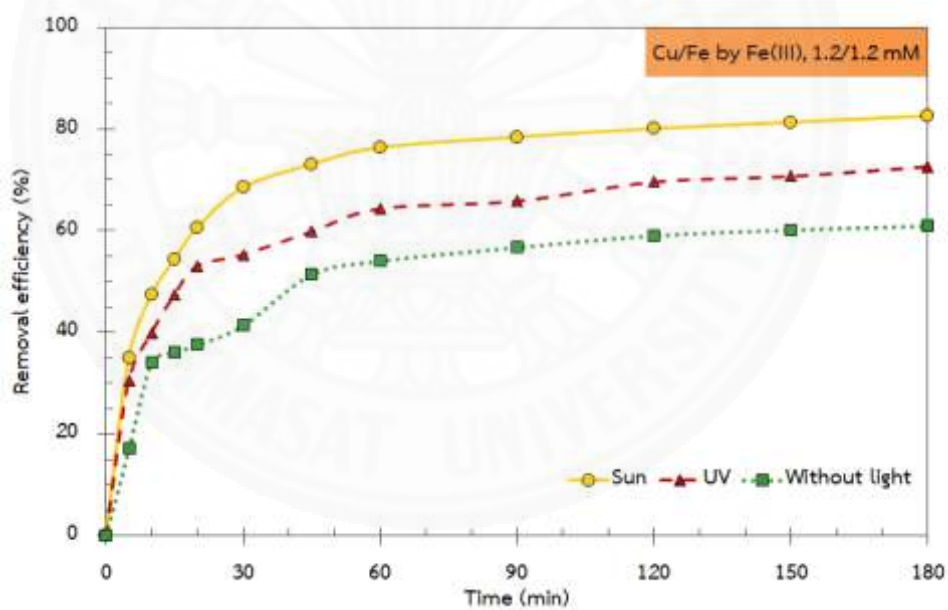
จากภาพที่ 4.31 สำหรับการทดสอบการกำจัดสีของเมทิลีนบลูภายในที่ไม่ใช่แสง เมื่อพิจารณาการกำจัดสีของเมทิลีนบลูด้วยอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) และ Cu/Fe จาก Fe(III) พบว่า มีแนวโน้มของค่าการดูดกลืนแสงเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการกำจัดสีของเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์และตู้ยูวี นั่นคือ ค่าการดูดกลืนแสงของ Cu 1.2/Fe 1.2 มิลลิโมลาร์ มีค่าการดูดกลืนแสงลดลงต่ำที่สุด เช่นเดียวกัน



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 4.32 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีของ 3 สภาวะ ของ (a) สีของเมทิลีนบลู (b) อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ และ (c) อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูของทั้ง 3 สภาวะ ได้แก่ สภาวะภายใต้แสงอาทิตย์ แสงจากตู้ยูวี และสภาวะในที่ที่ไม่มีแสง ของสีย้อมเมทิลินบลูที่ปราศจาก อนุภาคนาโน และอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนความเข้มข้น ระหว่างทองแดงกับเหล็ก (Cu:Fe) ที่สามารถกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูได้ประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ พบว่า อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) และ Cu/Fe จาก Fe(III) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ ที่สภาวะภายใต้แสงอาทิตย์สามารถกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูได้มีประสิทธิภาพสูงสุด ถึง 83.40% และ 82.57% แสดงให้เห็นถึงแสงอาทิตย์มีผลต่อการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลู ซึ่งปริมาณ และความเข้มของแสงที่แตกต่างกันของทั้ง 3 สภาวะ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลู ได้แตกต่างกัน โดยหลักการแล้วกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุที่เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาแบบใช้แสงได้รับการกระตุ้นด้วยแสงจะดูดซับพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าแถบช่องว่าง พลังงานทำให้อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ถูกกระตุ้นแล้วกระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบการนำ ทำให้แถบ เวเลนซ์เกิดหลุมประจุบวกขึ้น เมื่อสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำจะเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH) และ ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน (O_2^-) โดยที่วัสดุที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงคือ อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) และเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลและซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์แล้วเกิดการสลายตัวได้ ทั้งนี้ ประสิทธิภาพการกำจัดเมทิลินบลูจะขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและความเข้มของแสงในการทำปฏิกิริยา โดยประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่รองจากสภาวะแสงอาทิตย์คือ แสงจากตู้ยูวีซึ่งมี ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูได้สูงสุด 72.24% และ 72.348% และสภาวะในที่ที่ไม่มีแสง 55.84% และ 60.92 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.34

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) เหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) และอนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) จากเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยหางน้ำยางประกอบด้วยมีสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ และตัวควบคุมขนาดอนุภาค (Capping agent) ซึ่งเป็นการลดการใช้สารเคมีในการสังเคราะห์ เมื่อใช้สารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต เพอร์ส (II) ซัลเฟต และเพอร์ริค (III) คลอไรด์ เป็นสารตั้งต้นในการเป็นแหล่งให้ออกซิเจนในการสังเคราะห์ โดยอนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ที่สังเคราะห์ได้จากเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 3-5 นาโนเมตร ลักษณะมีรูปร่างค่อนข้างกลมและพบรูปร่างไม่แน่นอนเกาะกันเป็นกลุ่มเป็นก้อน ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าอนุภาคนาโนโลหะทองแดง (Cu(II)) เหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) และจากการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลู แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูที่ลดลงอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งมีแนวโน้มสูงกว่าหรือไม่น้อยกว่าอนุภาคนาโนจากโลหะเดี่ยว ถึงแม้จะใช้อนุภาคนาโนโลหะคู่ปริมาณ Cu:Fe เป็น 1.2:1.2 มิลลิโมลาร์ และใช้ปริมาณในการทดสอบที่เท่ากันนั้นคือ ปริมาณ 5 มิลลิกรัมต่อสารละลายเมทิลินบลูที่ความเข้มข้น 10 ppm แต่ก็สามารถกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูได้สูงสุดถึง 83.40% และ 82.57% ของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) และ Cu/Fe จาก Fe(III) ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของประสิทธิภาพจากการใช้อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ที่สังเคราะห์ด้วยเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติ โดยกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว นอกจากนี้ยังเป็นการลดภาระค่าใช้จ่ายจากการใช้งานอนุภาคนาโนโลหะเดี่ยว ซึ่งเป็นการลดปริมาณสารเคมี ลดมลพิษ และลดพลังงานในการสังเคราะห์ให้น้อยลง เนื่องจากอนุภาคนาโนโลหะคู่ทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) สามารถใช้งานในปริมาณที่น้อยลงแต่เพิ่มประสิทธิภาพได้สูงกว่าหรือใกล้เคียงกับอนุภาคนาโนทองแดง อนุภาคนาโนเหล็ก

5.1.1 ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) เหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) ในเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง

จากการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) เหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) จากเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยหางน้ำยางประกอบด้วยมีสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ และตัวควบคุมขนาดอนุภาค (Capping agent) เมื่อใช้สารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต เฟอรัส (II) ซัลเฟต และเฟอริก (III) คลอไรด์ เป็นสารตั้งต้นในการเป็นแหล่งไอออนในการสังเคราะห์ โดยสารแขวนลอยของอนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่สังเคราะห์ได้ มีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 380-550 นาโนเมตร สำหรับอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) มีช่วงที่น้อยกว่า 450 นาโนเมตร เป็นต้นไป เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พบว่าลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) มีรูปร่างค่อนข้างกลม เกะกันเป็นกลุ่มกระจุกเล็ก ๆ ประมาณ 30-50 นาโนเมตร อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-10 นาโนเมตร สำหรับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคจากสารละลายเฟอรัส (II) ซัลเฟต และสารละลายเฟอริก (III) คลอไรด์ มีรูปร่างไม่แน่นอน เกะกันเป็นกลุ่มเป็นกระจุกเล็ก ๆ ประมาณ 50 นาโนเมตร อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-8 นาโนเมตร และจากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1

ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) เหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) จากเซรัมจาก
หางน้ำยาง ที่อุณหภูมิห้อง

ปัจจัยที่มีผลต่อ การสังเคราะห์	ปริมาณของ อนุภาค	ขนาดของ อนุภาค*	เหตุผล
ความเข้มข้น ของสารตั้งต้น	มากขึ้นตามความ เข้มข้นของสาร ตั้งต้นที่มากขึ้น	ใหญ่ขึ้นตาม ความเข้มข้น ของสารตั้งต้นที่ มากขึ้น	เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นมากขึ้น ส่งผลให้ในระบบมีความเข้มข้นไอออน มากขึ้นด้วย จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ มากขึ้นและเร็วขึ้น
สัดส่วนการเจือ จางเซรัมจาก หางน้ำยาง	น้อยลงตาม สัดส่วนการ เจือจางเซรัม	เล็กลงตาม สัดส่วนการ เจือจางเซรัม	เมื่อสัดส่วนการเจือจางเซรัมมากขึ้น ปริมาณสารอินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งทำหน้าที่ เป็นตัวรีดิวซ์ในระบบน้อยลง
เวลาที่ใช้ในการ ทำปฏิกิริยา	มากขึ้นตาม ระยะเวลาทำ ปฏิกิริยา	ใหญ่ขึ้นตาม ระยะเวลาทำ ปฏิกิริยา	เมื่อในระบบมีสารตั้งต้นเหลืออยู่ ปฏิกิริยาก็จะยังคงดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ

หมายเหตุ. ขนาดของอนุภาค* เป็นไปตามผลของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II))
เนื่องจากการตรวจสอบด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงแบบ Visible มีช่วงค่าการดูดกลืนแสง
350-650 นาโนเมตร จึงไม่สามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II)
หรือ Fe(III)) ได้

5.1.2 ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ในเซรัม จากหางน้ำยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง

จากการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe)
โดยเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม พบว่า สามารถเกิด
การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ที่อุณหภูมิห้องได้ โดยหางน้ำยางทำ
หน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์และควบคุมขนาดอนุภาค และสารตั้งต้นเป็นสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตแทน
แหล่งไอออนของ Cu(II) สารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตแทนแหล่งไอออนของ Fe(II) และสารละลาย

เฟอร์ริก (III) คลอไรด์แทนแหล่งไอออนของ Fe(III) ในการสังเคราะห์ โดยสารแขวนลอยของอนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก พบค่าการดูดกลืนแสง 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกเป็นค่าการดูดกลืนแสงตั้งแต่ 380-500 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) และช่วงที่สองเป็นค่าการดูดกลืนแสงที่น้อยกว่า 350 นาโนเมตร เป็นต้นไป ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พบว่า ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคนาโนโลหะคู่ทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) มีรูปร่างค่อนข้างกลมและพบรูปร่างไม่แน่นอน เกะกันเป็นกลุ่มเป็นก้อนสำหรับเฉลี่ยประมาณ 10-50 นาโนเมตร อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 3-5 นาโนเมตร ซึ่งอนุภาคนาโนโลหะคู่ทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) มีขนาดเล็กกว่าอนุภาคนาโนโลหะเดี่ยว ได้แก่ ทองแดง (Cu(II)) เหล็ก (Fe(II) หรือ Fe(III)) เมื่อใช้เซิร์มจากทางน้ำยางธรรมชาติในการสังเคราะห์และสังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องเช่นเดียวกัน และนอกจากนี้ผลของการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2

ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) และ Cu/Fe จาก Fe(III) จาก เซลล์จากหางน้ำยาง ที่อุณหภูมิห้อง

อนุภาคนาโนโลหะคู่	ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์	ปริมาณของอนุภาค	เหตุผล
Cu/Fe จาก Fe(II)	อัตราส่วน Cu:Fe จาก Fe(II)	ช่วงแรกค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของทองแดงที่เพิ่มขึ้น และเพิ่มสูงขึ้นอีกตามอัตราส่วนของแดงที่เพิ่มขึ้น	เมื่อความเข้มข้นของทองแดง (Cu(II)) และเหล็ก (Fe(II)) มากขึ้น ส่งผลให้ในระบบมีแหล่งให้อิออนของทองแดงและเหล็กขึ้นด้วยจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น
	เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	มากขึ้นตามระยะเวลาทำปฏิกิริยา	เมื่อในระบบมีสารตั้งต้นเหลืออยู่ ปฏิกิริยาก็จะยังคงดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ
Cu/Fe จาก Fe(III)	อัตราส่วน Cu:Fe จาก Fe(III)	เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของเหล็กที่เพิ่มขึ้น	เมื่อความเข้มข้นของเหล็ก (Fe(III)) มากขึ้น ส่งผลให้ในระบบสามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้นและเร็วขึ้น
	เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	มากขึ้นตามระยะเวลาทำปฏิกิริยา	เมื่อในระบบมีสารตั้งต้นเหลืออยู่ ปฏิกิริยาก็จะยังคงดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ

5.1.3 ผลการทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยอนุภาคนาโนโลหะคู่ของ

ทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe)

เมื่อนำอนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/เหล็ก (Cu/Fe) ที่สังเคราะห์ได้ จาก เซรามิกทางน้ำยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง มาทดสอบการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู โดยการนำอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้ปริมาณ 5 มิลลิกรัมต่อ 2 มิลลิลิตรของสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 10 ppm ที่สภาวะภายใต้แสงอาทิตย์ แสงจากตู้ยูวี และสภาวะในที่ไม่มีแสง แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร พบว่า อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) และ Cu/Fe จาก Fe(III) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ ภายในระยะเวลาทำปฏิกิริยา 180 นาที ทั้งที่สภาวะภายใต้แสงอาทิตย์ แสงจากตู้ยูวี และสภาวะในที่ไม่มีแสง สามารถแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีประสิทธิภาพสูง เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนของทองแดง (Cu(II)) เหล็ก (Fe(II)) หรือเหล็ก Fe(III)) ที่ความเข้มข้นที่ให้ผลการสังเคราะห์อนุภาคทองแดงและเหล็กที่ดีที่สุด โดยที่สภาวะใช้แสง ได้แก่ ภายใต้แสงอาทิตย์และแสงจากตู้ยูวี อนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์ ซึ่งมีปริมาณ Cu:Fe เป็น 1.2:1.2 มิลลิโมลาร์ นำมาทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ที่ปริมาณการใช้งานที่เท่ากับกับอนุภาคนาโนของทองแดงและเหล็กที่ปริมาณ 5 มิลลิกรัมต่อสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 10 ppm แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่ลดลงอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งมีแนวโน้มสูงกว่าหรือเท่ากับอนุภาคนาโนจากโลหะเดี่ยว สามารถการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้สูงที่สุดถึง 83.40% และ 82.57% ของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) และ Cu/Fe จาก Fe(III) ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1). ทางน้ำยางธรรมชาติที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์ควรไม่ควรเก็บไว้เป็นเวลานาน เนื่องจากจะส่งผลต่อคุณสมบัติของทางน้ำยางและเซรามิกจากทางน้ำยาง
- 2). เซรามิกจากทางน้ำยางธรรมชาตินำมาใช้ในการทดลองควรเป็นเซรามิกที่มาจาก การเตรียมภายในครั้งเดียวกัน เพื่อเป็นการควบคุมคุณสมบัติ การวิเคราะห์และการเปรียบเทียบผลการทดลองได้อย่างถูกต้องที่สุด
- 3). ศึกษาการใช้และการทดสอบประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนโลหะคู่ทองแดง/เหล็ก ด้วยวิธีอื่น ๆ เพื่อให้ได้ทดสอบประสิทธิภาพที่เหมาะสมและให้ผลดียิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

หนังสือและบทความในหนังสือ

- วรภรณ์ ขจรไชยกูล. (2549). *ยางธรรมชาติ: การผลิตและการใช้งาน (Natural Rubber : Production and Applications)*. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), น.38
- กรมควบคุมมลพิษ. (2548). *แนวปฏิบัติที่ดีด้านการป้องกันและลดมลพิษอุตสาหกรรมน้ำยางชั้น*. กรุงเทพฯ

บทความวารสาร

- A. Vijaya Bhaskar Reddya, Zulkifli Yusopa, Jafariah Jaafarb, Y. Veera Manohara Reddyd, Azmi Bin Arisa, Zaiton Abdul Majidb, Juhaizah Taliba, & G. Madhavid. (2016). Recent progress on Fe-based nanoparticles: Synthesis, properties, characterization and environmental applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.
- C.P. Devatha, Arun Kumar Thalla, & Shweta Y. Katte. (2016). Green synthesis of iron nanoparticles using different leaf extracts for treatment of domestic waste water. *Journal of Cleaner Production*.
- Felipe Sombra dos Santos, Fernanda Rodrigues Lago, Lídia Yokoyama, & Fabiana Valéria Fonseca. (2017). Synthesis and characterization of zero-valent iron nanoparticles supported on SBA-15. *Journal of Materials Research and Technology*.
- Ganesh K. Parshetti, & Ruey-an Doong. (2009). Dechlorination of trichloroethylene by Ni/Fe nanoparticles immobilized in PEG/PVDF and PEG/nylon 66 membranes. *Water Research* 3086–3094.
- Gurunathan Savitha, Rajib Saha, & G. Sekar. (2016). Bimetallic chiral nanoparticles as catalysts for asymmetric synthesis. *Tetrahedron Letters*.

- Jing Wang, Chao Liu, Jiansheng Li, Rui Luo, Xingru Hu, Xiuyun Sun, Jinyou Shen, Weiqing Han, & Lianjun Wang. (2017). In-situ incorporation of iron-copper bimetallic particles in electrospun carbon nanofibers as an efficient Fenton catalyst. *Applied Catalysis B: Environmental*.
- Junyoung Kwon, Xiang Mao, & Jaebeom Lee. (2017). Fe-based multifunctional nanoparticles with various physicochemical properties. *Current Applied Physics*.
- Liang Sun, Haiou Song, Qiang Li, & Aimin Li. (2016). Fe/Cu bimetallic catalysis for reductive degradation of nitrobenzene under oxic conditions. *Chemical Engineering Journal*.
- Lu Zhoua, Shuzhong Wangb, Honghe Maa, Suxia Maa, Donghai Xub, & Yang Guo. (2015). Size-controlled synthesis of copper nanoparticles in supercritical water. *Chemical Engineering Research and Design*.
- Nisha Kant Ojha, Grigory V. Zyryanov, Adinath Majee, Valery N. Charushin, Oleg N. Chupakhin, & Sougata Santra. (2017). Copper nanoparticles as inexpensive and efficient catalyst: A valuable contribution in organic synthesis. *Coordination Chemistry Reviews*.
- Nosheen Nazara, Ismat Bibia, Shagufta Kamalb, Munawar Iqbalc, Shazia Nourend, Kashif Jilanie, Muhammad Umaira, & Sadia Ata (2017). Cu nanoparticles synthesis using biological molecule of P. granatum seeds extract as reducing and capping agent: Growth mechanism and photo-catalytic activity. *International Journal of Biological Macromolecules*.
- O. Antonogloua, K. Giannousia, J. Arvanitidis, S. Mourdikoudis, A. Pantazakib, & C. Dendrinos-Samaras. (2017). Elucidation of one step synthesis of PEGylated CuFe bimetallic nanoparticles. Antimicrobial activity of CuFe@PEG vs Cu@PEG. *Journal of Inorganic Biochemistry*.
- Trung Dang-Bao, Daniel Pla, Isabelle Favier, & Montserrat Gómez. (2017). Bimetallic Nanoparticles in Alternative Solvents for Catalytic Purposes. *Journal of Catalysts*.

- Xiangwen Liu, Dingsheng Wang, & Yadong Li. (2012). Synthesis and catalytic properties of bimetallic nanomaterials with various architectures. *Nanotoday*.
- XU Wen-ying, & GAO Ting-yao. (2007). Dechlorination of carbon tetrachloride by the catalyzed Fe-Cu process. *Journal of Environmental Sciences*.
- Yufen Weia,b, Zhanqiang Fanga, Liuchun Zhenga, Lei Tana,b, & Eric Pokeung Tsangb. (2016). Green synthesis of Fe nanoparticles using Citrus maxima peels aqueous extracts. *Materials Letters*.
- Zhaokun Xionga, Bo Laia, Ping Yanga, Yuexi Zhou, Juling Wangb, & Shuping Fangc. (2015). Comparative study on the reactivity of Fe/Cu bimetallic particles and zero valent iron (ZVI) under different conditions of N₂, air or without aeration. *Journal of Hazardous Materials*.

วิทยานิพนธ์

- ชัยญานุช ชนะกิจการโชค และนภดาว หริพัฒน์กุล. (2559). การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดง โดยใช้ทางน้ำยางและการประยุกต์ใช้. (ปริญญาานิพนธ์). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี.

สื่ออิเล็กทรอนิกส์

- คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันราชภัฏเพชรบุรี. *สถานะของสสาร*. สืบค้นจาก <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/48/crystal/A07.htm>
- สถาบันวิศวกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. (2555). *สีและแสงการวัดการดูดกลืน*. สืบค้นจาก http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/286/12/6/CD/colorandLight/page1_4.html.
- SkySpring Nanomaterials, Inc. (2016). *Nanoparticles/Nanopowder*. สืบค้นจาก <http://ssnano.com/inc/sdetail/>



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณในงานวิจัย

ก.1 การคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ก.1.1 การคำนวณหาปริมาณเนื้อยางแห้งในยางน้ำยาง (DRC)

ครั้งที่ 1

เมื่อ น้ำหนักยางน้ำยางอบแห้งหลังจากจับยาง เท่ากับ 0.3880 กรัม
 น้ำหนักยางน้ำยางเริ่มต้น เท่ากับ 10 กรัม

ครั้งที่ 2

เมื่อ น้ำหนักยางน้ำยางอบแห้งหลังจากจับยาง เท่ากับ 0.3870 กรัม
 น้ำหนักยางน้ำยางเริ่มต้น เท่ากับ 10 กรัม

ครั้งที่ 3

เมื่อ น้ำหนักยางน้ำยางอบแห้งหลังจากจับยาง เท่ากับ 0.3866 กรัม
 น้ำหนักยางน้ำยางเริ่มต้น เท่ากับ 10 กรัม

$$\text{จากสูตร ปริมาณเนื้อยางแห้ง (DRC)} = \frac{\text{น.น.ทางน้ำยางอบแห้งหลังจากจับยาง}}{\text{น.น.ทางน้ำยางเริ่มต้น}} \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ ปริมาณเนื้อยางแห้ง (DRC)} &= \frac{0.3880 + 0.3870 + 0.3866}{10 + 10 + 10} \times 100 \\ &= 3.877\% \end{aligned}$$

ก.1.2 การคำนวณหาปริมาณสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ใช้ในการทำ

ปฏิกิริยา

เตรียมสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต (CuSO_4) ที่มีความเข้มข้น 8 มิลลิโมลาร์

ต่อลิตร ปริมาตร 15 มิลลิลิตร จะต้องเตรียมปริมาณ

$$\begin{aligned} &= \frac{8 \text{ mmol}}{1 \text{ L}} \times 15 \text{ mL} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times \frac{159.6 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \times \frac{1 \text{ mol}}{1000 \text{ mmol}} \\ &= 0.0191 \text{ g} \end{aligned}$$

นั่นคือซังสารคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตปริมาณ 0.0191 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นจนมีปริมาตรรวมเท่ากับ 15 มิลลิลิตร จะได้สารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตความเข้มข้น 8 มิลลิโมลาร์ต่อลิตร กรณีต้องการให้ในสารแขวนลอยปริมาตร 11 มิลลิลิตร มีความเข้มข้นของ Cu^{2+} เท่ากับ 1.2 มิลลิโมลาร์ต่อลิตร จะต้องใช้สารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตความเข้มข้น 8 มิลลิโมลาร์ต่อลิตร ปริมาตร

$$= \frac{1.2 \text{ mmol}}{1 \text{ L}} \times 11 \text{ mL} \times \frac{1 \text{ L}}{8 \text{ mmol}}$$

$$= 1.65 \text{ mL}$$

ก.1.3 การคำนวณหาปริมาณสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

เตรียมสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ที่มีความเข้มข้น 8 มิลลิโมลาร์ต่อลิตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร จะต้องเตรียมปริมาณ

$$= \frac{8 \text{ mmol}}{1 \text{ L}} \times 20 \text{ mL} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times \frac{278.01 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \times \frac{1 \text{ mol}}{1000 \text{ mmol}}$$

$$= 0.0445 \text{ g}$$

นั่นคือซังสารเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตปริมาณ 0.0445 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นจนมีปริมาตรรวมเท่ากับ 20 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตความเข้มข้น 8 มิลลิโมลาร์ต่อลิตร กรณีต้องการให้ในสารแขวนลอยปริมาตร 11 มิลลิลิตร มีความเข้มข้นของ Fe^{2+} เท่ากับ 1.2 มิลลิโมลาร์ต่อลิตร จะต้องใช้สารละลายสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตความเข้มข้น 8 มิลลิโมลาร์ต่อลิตร ปริมาตร

$$= \frac{1.2 \text{ mmol}}{1 \text{ L}} \times 11 \text{ mL} \times \frac{1 \text{ L}}{8 \text{ mmol}}$$

$$= 1.65 \text{ mL}$$

ก.1.4 การคำนวณหาปริมาณสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

เตรียมสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ที่มีความเข้มข้น 8 มิลลิโมลาร์ต่อลิตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร จะต้องเตรียมปริมาณ

$$= \frac{8 \text{ mmol}}{1 \text{ L}} \times 15 \text{ mL} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times \frac{270.30 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \times \frac{1 \text{ mol}}{1000 \text{ mmol}}$$

$$= 0.0432 \text{ g}$$

นั่นคือซังสารเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ปริมาณ 0.0432 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นจนมีปริมาตรรวมเท่ากับ 20 มิลลิลิตร จะได้สารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ความเข้มข้น 8 มิลลิโมลาร์ต่อลิตร กรณีต้องการให้ในสารแขวนลอยปริมาตร 11 มิลลิลิตร มีความเข้มข้นของ Fe^{3+} เท่ากับ 1.2 มิลลิโมลาร์ต่อลิตร จะต้องใช้สารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ความเข้มข้น 8 มิลลิโมลาร์ต่อลิตร ปริมาตร

$$= \frac{1.2 \text{ mmol}}{1 \text{ L}} \times 11 \text{ mL} \times \frac{1 \text{ L}}{8 \text{ mmol}}$$

$$= 1.65 \text{ mL}$$

ก.1.5 การคำนวณหาปริมาณเซรัมจากทางน้ำยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

จากข้อ ก.1.2 - ก.1.4 เนื่องจากต้องการให้ในสารแขวนลอยปริมาตร 11 มิลลิลิตร เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ 1.2 มิลลิโมลาร์ต่อลิตร ใช้ปริมาตร 1.65 มิลลิลิตร ดังนั้นจะต้องใช้เซรัมปริมาตร เท่ากับ $11 \text{ mL} - 1.65 \text{ mL} = 9.35 \text{ mL}$

ก.1.6 การคำนวณหาปริมาณน้ำกลั่นที่ใช้ในการเจือจาง ในการทำปฏิกิริยา

จากข้อที่ ก.1.5 เนื่องจากต้องการให้ในสารแขวนลอยปริมาตร 11 มิลลิลิตร และต้องการใช้สัดส่วนการเจือจางเซรัมเป็น 1:2 ในการทำปฏิกิริยา

$$\text{จะต้องใช้เซรัมปริมาตร} = \frac{9.35 \text{ mL}}{2} = 4.675 \text{ mL}$$

$$\text{และจะต้องใช้น้ำกลั่นปริมาตร} = 9.35 \text{ mL} - 4.675 \text{ mL} = 4.675 \text{ mL}$$

ก.17 การคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลู

$$\text{จากสูตร Removal efficiency (\%)} = \frac{(A_0 - A_t)}{A_0} \times 100$$

เมื่อ A_0 = ค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูเริ่มต้น

A_t = ค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูที่เวลา t

t = ที่เวลาทดสอบใด ๆ

ภาคผนวก ข
ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้า ของสารแขวนลอย

ข.1 ผลความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II))

ตารางที่ ข.1

ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที

CuSO ₄ (mM)	0 นาที		15 นาที		30 นาที		60 นาที	
	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)
0.1	9.68	6890	9.67	6810	9.65	6710	9.57	4880
0.3	9.67	6620	9.66	6550	9.65	6250	9.57	5490
0.6	9.67	6430	9.66	6350	9.64	6310	9.58	5870
1.2	9.55	5960	9.54	5860	9.52	5130	9.38	3840
1.8	9.44	5500	9.47	5500	9.46	5300	9.38	5320
2.4	9.41	5120	9.42	4910	9.41	4380	9.35	4630

ข.2 ผลของสัดส่วนการเจือจางเข้มข้นจากทางน้ำยางธรรมชาติในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II))

ตารางที่ ข.2

ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนทองแดง (Cu(II)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 1.2 มิลลิโมลาร์ กับเข้มข้นจากทางน้ำยางที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับ ไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที

CuSO ₄ 1.2 mM กับสัดส่วนการเจือจางเข้มข้น	0 นาที		15 นาที		30 นาที		60 นาที	
	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)
ไม่เจือจาง	10.78	6050	10.73	6000	10.66	5980	10.55	5980
1:1	10.36	6010	10.34	6010	10.36	5970	10.23	5960
1:2	9.37	2480	9.31	2470	9.29	2470	9.22	2450
1:3	9.45	2000	9.48	1980	9.41	1970	9.39	1960

ข.3 ผลความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II))

ตารางที่ ข.3

ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที

FeSO ₄ (mM)	0 นาที		15 นาที		30 นาที		60 นาที	
	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)
0.1	9.64	6910	9.62	6880	9.56	6790	9.4	6390
0.3	9.62	6680	9.58	6610	9.52	6120	9.50	5830
0.6	9.60	6510	9.61	6450	9.60	6350	9.57	6370
1.2	9.53	5820	9.51	5810	9.50	5780	9.48	5600
1.8	9.49	5710	9.46	5650	9.45	5620	9.44	5480
2.4	9.46	5230	9.43	5230	9.40	4970	9.39	3210

ข.4 ผลความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(III))

ตารางที่ ข.4

ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(III)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที

FeCl ₃ (mM)	0 นาที		15 นาที		30 นาที		60 นาที	
	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)
0.1	9.62	6920	9.62	6900	9.60	6870	9.58	6620
0.3	9.66	6660	9.66	6550	9.65	6460	9.63	3990
0.6	9.65	6580	9.64	6550	9.64	6550	9.61	6000
1.2	9.61	6400	9.56	6340	9.60	6190	9.56	5000
1.8	9.51	6060	9.49	5990	9.49	5930	9.48	5770
2.4	9.44	5710	9.43	5630	9.42	5600	9.41	5490

ข.5 ผลของสัดส่วนการเจือจางเข้มข้นจากทางน้ำยางธรรมชาติในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II)) จากสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟต

ตารางที่ ข.5

ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(II)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายเฟอร์รัส (II) ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเข้มข้นจากทางน้ำยางที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที

FeSO ₄ 2.4 mM กับสัดส่วนการเจือจางเข้มข้น	0 นาที		15 นาที		30 นาที		60 นาที	
	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)
ไม่เจือจาง	10.42	5350	10.40	5340	10.35	5330	10.21	5320
1:1	9.96	3220	9.96	3200	9.92	3200	9.81	3180
1:2	9.79	2500	9.77	2490	9.71	2480	9.57	2480
1:3	9.43	1900	9.38	1890	9.33	1890	9.29	1860

ข.6 ผลของสัดส่วนการเจือจางเข้มข้นจากทางน้ำยางธรรมชาติในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(III)) จากสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์

ตารางที่ ข.6

ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนเหล็ก (Fe(III)) ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายเฟอร์ริก (III) คลอไรด์ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ กับเข้มข้นจากทางน้ำยางที่มีสัดส่วนการเจือจางเท่ากับไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 ที่เวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที

FeCl ₃ 2.4 mM กับสัดส่วนการเจือจางเข้มข้น	0 นาที		15 นาที		30 นาที		60 นาที	
	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)
ไม่เจือจาง	10.29	5970	10.24	5920	10.23	5890	10.11	5820
1:1	9.92	3700	9.89	3690	9.89	3680	9.77	3650
1:2	9.04	2760	9.02	2740	9.12	2730	8.92	2720
1:3	7.26	2280	7.21	2150	7.13	1460	6.95	1270

ภาคผนวก ค
การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

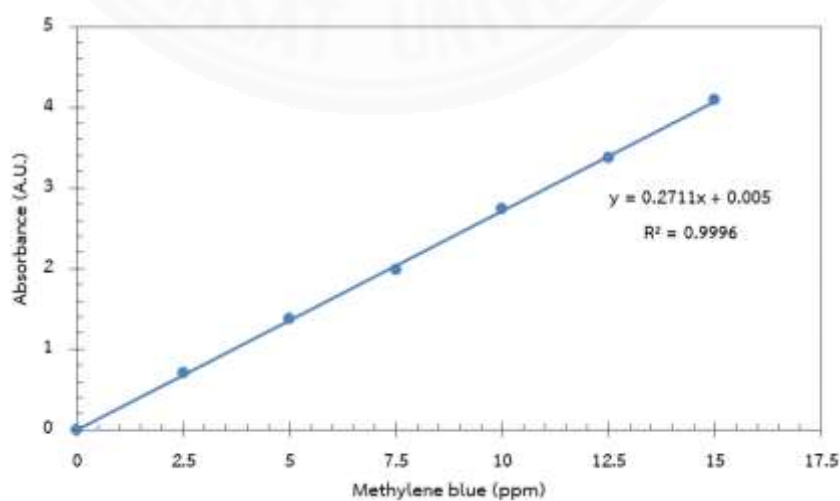
ค.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของสีย้อมเมทิลีนบลู

ใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5 และ 15 ppm จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1

ความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร

ความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.00
2.5	0.71
5	1.37
7.5	1.98
10	2.74
12.5	3.38
15	4.09



ภาพที่ ค.1 กราฟมาตรฐานของสีย้อมเมทิลีนบลู

ค.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ภายใต้แสงอาทิตย์

ตารางที่ ค.2

ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ภายใต้แสงอาทิตย์ ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที

เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (%)							
	MB	Cu /Fe จาก Fe(II)			Cu		Fe(II)	
		0.6/1.8	1.2/1.2	1.8/0.6	1.2	2.4	1.2	2.4
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	3.73	31.12	28.22	21.58	24.48	9.54	29.88	28.22
10	6.64	41.08	39.83	34.85	44.40	26.56	44.40	38.17
15	9.13	50.21	48.13	42.74	48.96	34.44	50.21	45.23
20	10.79	56.43	56.43	53.11	54.77	39.83	57.26	54.77
30	13.28	63.07	65.56	58.51	59.34	44.81	63.90	59.75
45	14.94	63.07	65.56	59.75	64.73	45.23	64.73	59.75
60	16.18	66.80	71.37	63.49	62.24	53.11	68.46	64.32
90	17.84	70.54	75.52	68.46	65.15	56.43	73.03	68.05
120	17.43	73.86	78.84	71.37	72.20	64.73	78.01	73.44
150	19.09	75.52	80.50	74.69	73.86	66.80	79.67	73.86
180	19.50	75.93	83.40	75.10	75.93	70.54	81.74	77.59

ค.3 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) ภายใต้แสงอาทิตย์

ตารางที่ ค.3

ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) ภายใต้แสงอาทิตย์ ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที

เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (%)							
	MB	Cu /Fe จาก Fe(III)			Cu		Fe(III)	
		0.6/1.8	1.2/1.2	1.8/0.6	1.2	2.4	1.2	2.4
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	3.73	24.07	34.85	25.73	24.48	9.54	26.56	37.76
10	6.64	43.15	47.30	39.83	44.40	26.56	43.15	53.11
15	9.13	43.57	54.36	43.98	48.96	34.44	51.04	56.85
20	10.79	56.02	60.58	53.94	54.77	39.83	60.58	66.39
30	13.28	61.00	68.46	59.34	59.34	44.81	67.63	73.03
45	14.94	59.75	73.03	59.75	64.73	45.23	70.12	69.71
60	16.18	65.56	76.35	64.73	62.24	53.11	69.29	74.27
90	17.84	69.29	78.42	68.88	65.15	56.43	72.20	77.18
120	17.43	73.03	80.08	71.78	72.20	64.73	76.35	80.50
150	19.09	76.35	81.33	75.52	73.86	66.80	78.01	82.57
180	19.50	76.76	82.57	76.35	75.93	70.54	79.67	83.40

ค.4 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) แสงภายใต้ตู้ยว

ตารางที่ ค.4

ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) ภายใต้แสงจากตู้ยว ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที

เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (%)							
	MB	Cu /Fe จาก Fe(II)			Cu		Fe(II)	
		0.6/1.8	1.2/1.2	1.8/0.6	1.2	2.4	1.2	2.4
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	3.01	24.91	39.50	30.25	25.62	19.57	38.43	30.96
10	5.64	35.23	49.82	37.37	40.57	29.89	43.77	37.72
15	7.14	41.99	57.65	43.06	48.75	37.37	49.11	44.48
20	7.89	48.40	61.21	51.60	55.52	45.20	54.45	49.47
30	10.15	51.25	63.35	54.45	62.63	52.67	56.23	50.53
45	11.65	56.23	65.48	60.85	66.19	56.23	60.14	54.80
60	12.78	59.79	65.48	59.43	68.33	56.58	60.85	55.87
90	14.29	60.14	68.33	64.41	68.68	59.43	65.48	59.43
120	15.04	62.28	70.82	66.55	70.11	62.63	66.90	59.07
150	15.79	64.41	70.82	68.33	72.24	64.41	67.97	64.06
180	15.79	66.90	73.31	68.33	72.24	67.62	68.33	64.06

**ค.5 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) แสง
ภายใต้ตู้ยวี่**

ตารางที่ ค.5

ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) ภายใต้แสงจาก
ตู้ยวี่ ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที

เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (%)							
	MB	Cu /Fe จาก Fe(III)			Cu		Fe(III)	
		0.6/1.8	1.2/1.2	1.8/0.6	1.2	2.4	1.2	2.4
0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.65	20.46	35.61	15.91	29.92	17.05	29.55	46.21
10	4.55	32.96	47.35	23.86	39.39	29.17	37.88	50.00
15	6.06	39.02	53.79	29.55	46.97	40.91	39.77	57.20
20	7.198	42.05	56.06	32.57	52.65	43.18	46.97	59.85
30	8.33	47.35	60.99	35.99	54.92	46.59	52.27	65.15
45	10.23	50.38	62.88	42.05	59.47	49.24	54.92	69.70
60	11.36	50.76	66.67	44.32	64.02	52.27	59.09	71.59
90	12.12	55.30	65.53	46.21	67.05	55.30	62.12	74.24
120	13.67	55.68	69.32	53.03	67.42	57.2	62.50	74.24
150	13.67	58.71	70.46	54.55	65.91	57.96	66.29	75.76
180	14.02	63.64	72.35	56.06	66.29	59.47	66.29	77.65

ค.6 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) สภาวะในที่ไม่มีแสง

ตารางที่ ค.6

ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(II) สภาวะในที่ไม่มีแสง ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที

เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (%)							
	MB	Cu /Fe จาก Fe(II)			Cu		Fe(II)	
		0.6/1.8	1.2/1.2	1.8/0.6	1.2	2.4	1.2	2.4
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	2.30	19.54	21.84	16.48	11.88	11.11	22.22	20.69
10	4.21	37.55	42.15	32.57	26.44	25.67	45.98	43.30
15	5.36	39.94	45.21	34.29	31.23	28.45	49.52	47.32
20	5.75	42.34	48.28	36.02	36.02	31.23	53.07	51.34
30	6.90	47.13	54.41	39.46	45.59	36.78	60.15	59.39
45	8.43	50.96	61.69	45.21	54.02	41.76	64.37	63.98
60	9.58	53.07	65.71	48.85	57.47	45.40	66.48	65.90
90	10.73	55.17	69.73	52.49	60.92	49.04	68.58	67.82
120	11.11	56.70	72.41	55.94	62.84	50.19	69.73	70.50
150	11.88	61.30	75.10	57.85	63.98	50.19	70.50	73.18
180	11.88	62.84	75.86	58.62	65.52	50.96	71.26	73.56

ค.7 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) สภาวะในที่ไม่มีแสง

ตารางที่ ค.7

ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) สภาวะในที่ไม่มีแสง ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที

เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (%)							
	MB	Cu /Fe จาก Fe(III)			Cu		Fe(III)	
		0.6/1.8	1.2/1.2	1.8/0.6	1.2	2.4	1.2	2.4
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	2.30	16.86	17.24	13.03	11.88	11.11	19.54	20.31
10	4.21	32.18	34.10	25.29	26.44	25.67	46.36	38.31
15	5.36	33.81	35.92	27.01	31.23	28.45	48.85	42.05
20	5.75	35.44	37.74	28.74	36.02	31.23	51.34	45.79
30	6.90	38.70	41.38	32.18	45.59	36.78	56.32	53.26
45	8.43	41.76	51.34	39.08	54.02	41.76	64.75	59.00
60	9.58	47.13	54.02	42.72	57.47	45.40	65.90	61.11
90	10.73	52.49	56.70	46.36	60.92	49.04	67.05	63.22
120	11.11	54.79	59.00	47.89	62.84	50.19	68.97	66.28
150	11.88	53.64	60.15	52.49	63.98	50.19	70.88	68.20
180	11.88	55.56	60.92	54.02	65.52	50.96	73.18	69.35

ภาคผนวก ง
ข้อมูลอื่น ๆ ในงานวิจัย

ง.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

ตารางที่ ง.1

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของอนุภาคนาโนโลหะคู่ Cu/Fe จาก Fe(III) ที่ 1.2/1.2 มิลลิโมลาร์

No.	Pos. [2θ .]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]	FWHM [2θ .]	Matched by	Area [cts*? 2θ .]	Backgr [cts]	Height [cts]
1	11.0544	8.00405	100	0.1378	/	23.33	62	171.7
2	11.9111	7.4302	59.75	0.1574	/	15.93	62	102.59
3	13.3304	6.64213	20.98	0.2362	/	8.39	62	36.02
4	14.8995	5.946	54.03	0.1574	00-021-0920	14.41	65	92.77
5	16.0186	5.53302	36.37	0.1574	/	9.7	68	62.45
6	16.7587	5.29029	70.22	0.1968	/	23.41	70	120.57
7	20.4782	4.33705	70.19	0.1181	00-021-0920	14.04	80	120.52
8	24.7481	3.59759	49.31	0.1574	00-021-0920	13.15	78	84.66
9	27.493	3.24432	85.65	0.1574	/	22.84	75	147.06
10	28.6693	3.11383	18.32	0.2362	/	7.33	75	31.45
11	29.8641	2.99191	33.48	0.3149	00-006-0545; 00-021-0920	17.86	74	57.49
12	30.8565	2.89792	37.02	0.2362	00-006-0545	14.81	73	63.56
13	35.986	2.49574	33.7	0.3149	00-006-0545; 01-076-2366	17.97	64	57.86
14	38.7446	2.32416	18.34	0.2362	03-065-2309	7.34	63	31.5
15	47.2514	1.9221	10.33	0.576	/	13.62	58	17.73

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวภณิตา พงษ์เดช
 วันเดือนปีเกิด 28 ตุลาคม 2535
 วุฒิการศึกษา ปีการศึกษา 2557: วิทยาศาสตร์บัณฑิต
 (เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม
 เกล้าพระนครเหนือ

ผลงานทางวิชาการ

ภณิตา พงษ์เดช และ ภาณุ ตำนานิชกุล. (2561). การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ของทองแดง/
 เหล็กโดยใช้เซรามิกจากหางน้ำยางธรรมชาติและการประยุกต์ใช้: การประชุมวิชาการ
 ระดับชาติด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม ครั้งที่ 4 (น. 33). อุบลราชธานี.

กาญจนาพร พุ่มพันธุ์, ภณิตา พงษ์เดช และ จันทิยา อีสณพงษ์. (2557). การนำวัสดุเหลือทิ้งทาง
 การเกษตรมาประยุกต์ใช้ในการผลิตเอนไซม์แลคเคสโดยเห็ดขอนขาว. มหาวิทยาลัย
 เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์, สาขาเทคโนโลยี
 สิ่งแวดล้อม.

ประสบการณ์ทำงาน 2559-2561 : นักวิชาการเคมี
 บริษัท แกมมาโก้ (ประเทศไทย) จำกัด