



การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดงโดยใช้เซรามิกจากหางน้ำยางและการ
เคลือบอนุภาคนาโนทองแดงบนอนุภาคของแข็ง

โดย

นางสาวแพร แยม่วงค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดงโดยใช้เซรามิกจากหางน้ำยางและการ
เคลือบอนุภาคนาโนทองแดงบนอนุภาคของแข็ง

โดย

นางสาวแพร แยมวงศ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

SYNTHESIS OF COPPER NANOPARTICLES USING SERUM FROM
SKIM NATURAL RUBBER LATEX AND COATING OF NANOPARTICLES
ON SOLID SURFACES

BY

MISS PARE YAMWONG



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

นางสาวแพร แยมวงศ์

เรื่อง

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดงโดยใช้เซรามิกจากหางน้ำยางและการเคลือบอนุภาคนาโน
ทองแดงบนอนุภาคของแข็ง

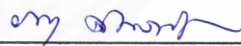
ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 8 มกราคม พ.ศ. 2562

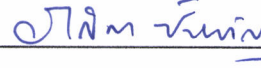
ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพบุษย์ เอกแสงศรี)

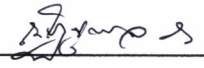
กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์


(รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ ด่านวานิชกุล)

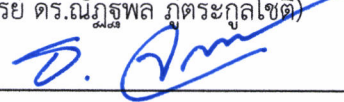
กรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(รองศาสตราจารย์ ดร.ภณิดา ชัยขวัญ)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(อาจารย์ ดร.ณัฐพล มุ่ตระกูลโชติ)

คณบดี


(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีร เจียรพงษ์กุล)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดงโดยใช้เซรามิกจาก หางน้ำยางและการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงบน อนุภาคของแข็ง
ชื่อผู้เขียน	นางสาวแพรว แยมวงศ์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	เทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ ตำนานิชกุล
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้อนุภาคนาโนทองแดงถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้หางน้ำยางธรรมชาติที่เป็นผลพลอยได้จากการปั่นเหวี่ยงในการผลิตน้ำยางข้น จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับหางน้ำยาง เริ่มต้นจากการจับก้อนยางออกด้วยพอลิเอทิลีน (PAM) จะได้เซรามิกที่มีพอลิเมอร์หลงเหลืออยู่ จากนั้นนำเซรามิกที่ได้ไปผสมกับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 0.1, 0.3, 1.2 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ เมื่อนำไปตรวจค่าการดูดกลืนแสงพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต พิกของค่าการดูดกลืนแสงจะเพิ่มสูงขึ้นโดยพิกของค่าการดูดกลืนแสงที่สูงที่สุดเป็นของสารละลายที่มีความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ จึงเลือกความเข้มข้นที่ 2.4 มิลลิโมลาร์นี้เพื่อสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงพร้อมไปกับการเคลือบบนผิวพอลิเอทิลีน และสังเคราะห์อนุภาคนาโนก่อนแล้วจึงไปเคลือบบนผิวอนุภาคของแข็งคือพอลิเอทิลีน พอลิโพรไพลีนและซิลิกาเจล โดยใช้เวลาในการเคลือบนาน 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามการเคลือบผิวของอนุภาคของแข็งจำเป็นต้องเคลือบด้วยพอลิไดอามีนก่อนจึงจะทำให้อนุภาคนาโนทองแดงเคลือบติดดีขึ้น ผลการทดลองพบว่าการเคลือบอนุภาคพอลิเอทิลีน พอลิโพรไพลีนและซิลิกาเจลด้วยอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ไว้ก่อนมีการเคลือบที่ดีที่สุดเมื่อใช้เวลาเคลือบนาน 12 ชั่วโมง และพบว่าอนุภาคพอลิเอทิลีน พอลิโพรไพลีนและซิลิกาเจล ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 10 ppm ภายใต้แสงอาทิตย์ สูงที่สุดคือ 91.77, 88.98 และ 100 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ภายในระยะเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อนำอนุภาคของแข็งมาใช้งานซ้ำรอบที่ 2 อนุภาคพอลิเอทิลีน พอลิโพรไพลีนและซิลิกาเจล จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ลดลงเป็น 65.80, 61.86 และ

99.58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อทำการทดสอบโดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอนุภาคนาโนทองแดงอย่างเดียวและอนุภาคนาโนทองแดงแบบเคลือบบนอนุภาคของแข็งในการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูภายใต้แสงอาทิตย์ พบว่าอนุภาคนาโนทองแดงและอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบบนพอลิเอทิลีนมีประสิทธิภาพการกำจัดสี 58.43 และ 86.27 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ อนุภาคนาโนทองแดงและอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบบนพอลิโพรไพลีนมีประสิทธิภาพการกำจัดสีเมทิลินบลู 56.86 และ 81.18 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ อนุภาคนาโนทองแดงและอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบบนซิลิกาเจลมีประสิทธิภาพการกำจัดสี 62.75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

คำสำคัญ: อนุภาคนาโนทองแดง, หางน้ำยางธรรมชาติ, การสังเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม, การเคลือบอนุภาคนาโน, การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

Thesis Title	SYNTHESIS OF COPPER NANOPARTICLES USING SERUM FROM SKIM NATURAL RUBBER LATEX AND COATING OF NANOPARTICLES ON SOLID SURFACES
Author	Miss Pare Yamwong
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

In this research, to add values to skim natural rubber latex, which is a by-product from concentrated rubber latex production, it was used in the green synthesis of copper nanoparticles. First, the rubber particles coagulated with polyacrylamide (PAM) were removed and the serum with remaining PAM was obtained. The serum was then mixed with copper sulfate solution at 0.1, 0.3, 1.2 and 2.4 mM. The formation of copper nanoparticles was detected via spectrophotometry. When the concentration of the copper sulfate solution was increased, the absorbance peak was increased. Considering the peak, 2.4 mM solution was chosen in nanoparticles synthesis and coating either by the synthesis at the same time of coating on polyethylene (PE) particles or the synthesis first and then coating on PE particles. The time for nanocoating was varied to be 1, 6, 12, and 24 h. It was essentially found that that prior to nanocoating, polyethylene, polypropylene and silica gel particles had to be coated with polydopamine to enhance nanocoating process. It was also found that samples from the latter way of coating process was better and the coating time was 12 h. When applied in photodegradation of 10 ppm methylene blue solution for 4 h, nanocoated

polyethylene, polypropylene and silica gel samples gave the best removal efficiencies of 91.77, 88.98 and 100 %, respectively. When the samples of nanocoated polyethylene, polypropylene and silica gel were reused, the removal efficiencies were lowered to be 65.80, 61.86 and 99.58 %, respectively. When nanoparticles alone and nanoparticles coated on solid surfaces were compared in the photodegradation of methylene blue solution, the results showed that for polyethylene, the obtained removal efficiencies were 58.43 and 86.27 %, respectively, that for polypropylene, those were 56.86 and 81.18 %, respectively, and that for silica gel, those were 62.75 % and 100 %, respectively.

Keywords: nanoparticles, natural rubber latex, green synthesis, nanocoating, Photocatalysis

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ ประสบความสำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากบุคคลต่างๆ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ แนวทางแก้ไขข้อบกพร่อง ตลอดจนความอนุเคราะห์ต่างๆ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง

รองศาสตราจารย์ ดร. ภาณุ ด่านวานิชกุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และอาจารย์ที่ปรึกษาของงานวิจัยนี้ ผู้ที่ให้คำปรึกษา แนวทางในการคิดคำแนะนำต่างๆ รวมถึงแนวทางในการแก้ไข ตลอดจนสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

บริษัท ไทยอีสเทิร์นกรุ๊ป จำกัด ผู้สนับสนุนจากความอนุเคราะห์สำหรับทางน้ำยางในการทำวิจัยครั้งนี้

นางสาวแพร แยมวงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญตาราง	(10)
สารบัญภาพ	(12)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับหางน้ำยาง	5
2.1.1 ส่วนประกอบยางพารา	5
2.1.2 สมบัติยางพารา	7
2.1.3 ทองแดง	9
2.1.4 วัสดุนาโน	12
2.1.5 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส	13
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14

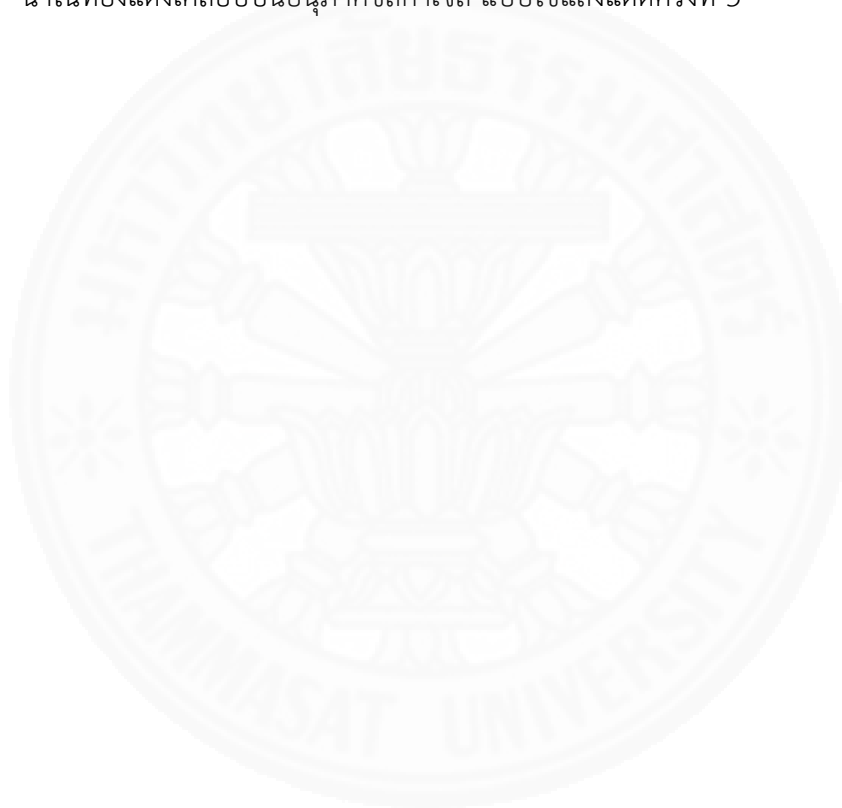
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	20
3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้	20
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์	20
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	20
3.2 วิธีการ	21
3.2.1 การหาปริมาณเนื้อเยื่อแห้งในหางน้ำยาง (DRC)	21
3.2.2 การเตรียมสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต CuSO_4	21
3.2.3 การเตรียมเซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติ	21
3.2.4 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงในเซรัมจากหางน้ำยาง	21
3.2.5 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์ (TEM)	21
3.2.6 การเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงบน Polyethylene Powder (PE), Polypropylene Powder (PP) และซิลิกาเจล	22
3.2.7 การทดสอบหาปริมาณของอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบติดอนุภาคของแข็ง PE, PP และซิลิกา	22
3.2.8 การทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู	23
3.2.9 ทดสอบการนำอนุภาคนาโนทองแดงที่ผ่านการเคลือบบนอนุภาคของแข็ง PE, PP และซิลิกา ที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ซ้ำ	23
3.2.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูระหว่างอนุภาคนาโนทองแดงและอนุภาคนาโนทองแดงที่ผ่านการเคลือบบนอนุภาคของแข็ง PE, PP และซิลิกาเจล	24
3.2.11 ตารางสรุปรวมวิธีการ	25
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	26
4.1 ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง	26
4.1.1 ค่าความเป็นกรด – เบส	27

5.1.2 การเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงบนพอลิเอทิลีน พอลิโพร- พิลีนและซิลิกาเจล	79
5.1.3 การทดสอบหาปริมาณอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบติด อนุภาคของแข็งพอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีนและซิลิกาเจล	80
5.1.4 การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู	81
5.1.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมระหว่างอนุภาค นาโนทองแดงและอนุภาคนาโนทองแดงที่ผ่านการเคลือบบน อนุภาคของแข็ง	82
5.2 ข้อเสนอแนะ	83
บรรณานุกรม	84
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณในงานวิจัย	88
ภาคผนวก ข ผลการทดลองอื่นๆ	91
ประวัติผู้เขียน	104

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงตัวอย่างสารประกอบทองแดงที่ใช้ในอุตสาหกรรม	10
4.1 ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของเซรั่มจากหางน้ำยางธรรมชาติ ที่มีสัดส่วนการเจือจางคือ ไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 เท่า	27
4.2 ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตต่างกันคือ 0.1, 0.3, 1.2 และ 2.4 มิลลิโมลาร์	28
5.1 ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงในเซรั่มจากหางน้ำยางที่อุณหภูมิห้อง	79
5.2 การทดสอบหาปริมาณอนุภาคนาโนทองแดงที่ติดบนอนุภาคของแข็ง	80
5.3 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบบนอนุภาคของแข็ง	81
5.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูระหว่างอนุภาคนาโนทองแดงและอนุภาคนาโนทองแดงที่ผ่านการเคลือบบนอนุภาคของแข็ง	82
ข.1 ค่าการนำไฟฟ้า ค่ากรด-เบส	91
ข.2 ค่าการวัดขนาดอนุภาคพอลิเอทิลีนด้านกว้าง	92
ข.3 ค่าการวัดขนาดอนุภาคพอลิเอทิลีนด้านยาว	93
ข.4 ค่าการวัดอนุภาคซิลิกาเจลด้านกว้าง	94
ข.5 ค่าการวัดอนุภาคซิลิกาเจลด้านยาว	95
ข.6 ค่าการวัดขนาดอนุภาคพอลิโพรไพลีน	96
ข.7 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของอนุภาคนาโนทองแดงเคลือบบนอนุภาคพอลิเอทิลีน พอลิโพรไพลีนและซิลิกาเจล แบบไม่ใช้แสงแดด	97
ข.8 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของอนุภาคนาโนทองแดงเคลือบบนอนุภาคพอลิเอทิลีน พอลิโพรไพลีนและซิลิกาเจล แบบใช้แสงแดดครั้งที่ 1	98
ข.9 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของอนุภาคนาโนทองแดงเคลือบบนอนุภาคพอลิเอทิลีน พอลิโพรไพลีนและซิลิกาเจล แบบใช้แสงแดดครั้งที่ 2	99
ข.10 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของอนุภาคนาโนทองแดงเคลือบซิลิกาเจลแบบใช้แสงแดดครั้งที่ 3	100

- ข.11 ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมทิลีนบลูจากการกำจัดสีย้อมของอนุภาคนาโนทองแดงเคลือบบนอนุภาคพอลิเอทิลีน พอลิโพรไพลีนและซิลิกาเจล แบบใช้แสงแดดครั้งที่ 1 101
- ข.12 ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมทิลีนบลูจากการกำจัดสีย้อมของอนุภาคนาโนทองแดงเคลือบบนอนุภาคพอลิเอทิลีน พอลิโพรไพลีนและซิลิกาเจล แบบใช้แสงแดดครั้งที่ 2 102
- ข.13 ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมทิลีนบลูจากการกำจัดสีย้อมของอนุภาคนาโนทองแดงเคลือบบนอนุภาคซิลิกาเจล แบบใช้แสงแดดครั้งที่ 3 103

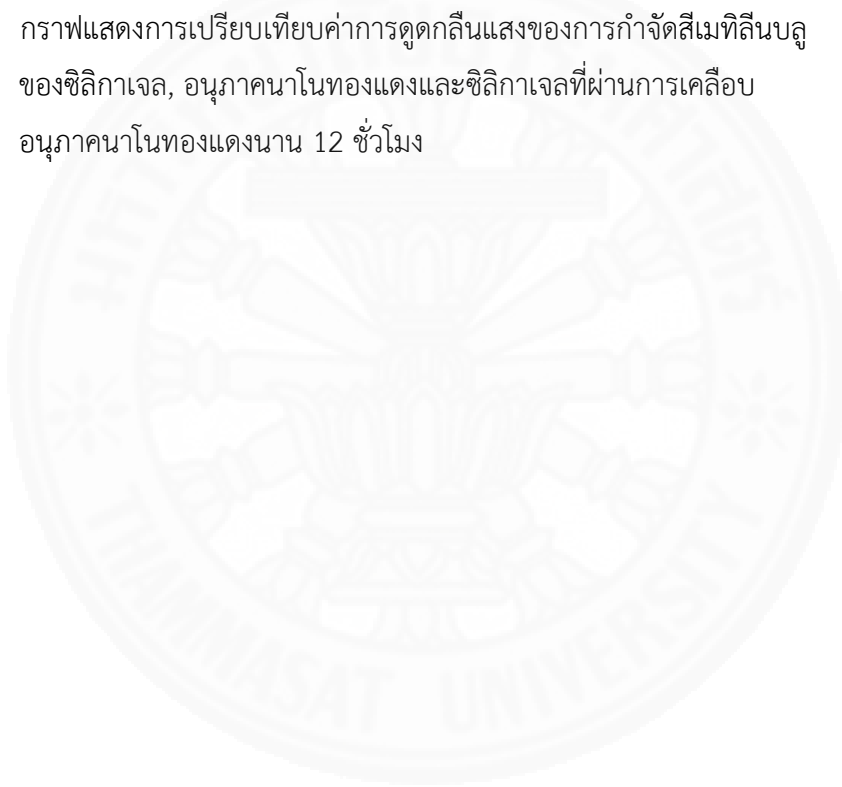


สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แผนผังกระบวนการของน้ำยางธรรมชาติ	7
2.2 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ	7
2.3 แสดงลักษณะความเสถียรและไม่เสถียรของอนุภาคยาง	8
2.4 แสดงลักษณะความเสถียรและไม่เสถียรของอนุภาคยาง	9
4.1 ผลการทดลองความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	29
4.2 ผลการทดลองแสดงฟิคของการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองแดงที่ความเข้มข้นของเซรัมจากหางน้ำยางต่างกัน	30
4.3 ผลการทดลองแสดงฟิคของการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองแดงที่ความเข้มข้นของเซรัมจากหางน้ำยางต่างกัน	31
4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ CuNPs ที่ความเข้มข้น CuSO_4 2.4 mmol	32
4.5 ลักษณะผงพอลิเอทิลีน	33
4.6 ลักษณะผงพอลิโพรไพลีน	34
4.7 ลักษณะซิลิกา	35
4.8 การกระจายตัวจากการสุม 100 ตัวอย่างของผงพอลิเอทิลีน	36
4.9 การกระจายตัวจากการสุม 100 ตัวอย่างของผงพอลิโพรไพลีน	37
4.10 การกระจายตัวจากการสุม 100 ตัวอย่างซิลิกาเจล	38
4.11 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบบนอนุภาคของ PE	39
4.12 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบบนอนุภาคของ PP	41
4.13 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบบนซิลิกาเจล	43
4.14 กราฟแสดงค่าความเปลี่ยนแปลงของอนุภาค PE ด้วยเครื่อง TGA	45
4.15 กราฟแสดงค่าความเปลี่ยนแปลงของอนุภาค PP ด้วยเครื่อง TGA	47
4.16 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของอนุภาคพอลิเอทิลีน	49

4.17	การกำจัดสีย้อมของอนุภาคพอลิเอทีลีน	52
4.18	กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของอนุภาคพอลิเอทีลีนที่ช่วงโมเมนต์ต่างๆ	53
4.19	กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของอนุภาคพอลิโพรไพลีน	54
4.20	การกำจัดสีย้อมของอนุภาคพอลิโพรไพลีน	56
4.21	กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของอนุภาคพอลิโพรไพลีน	57
4.22	กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของซิลิกาเจล	58
4.23	การกำจัดสีย้อมของซิลิกาเจล	60
4.24	กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของซิลิกาเจล	61
4.25	กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของอนุภาคพอลิเอทีลีนหลังการใช้งาน 1 รอบ	62
4.26	กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของอนุภาคพอลิเอทีลีนที่เวลาต่างๆ ที่ผ่านการใช้งานแล้ว 1 รอบ	64
4.27	กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของอนุภาคพอลิโพรไพลีนหลังการใช้งาน 1 รอบ	65
4.28	กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของอนุภาคพอลิโพรไพลีนที่เวลาต่างๆ ที่ผ่านการใช้งานแล้ว 1 รอบ	67
4.29	กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของซิลิกาเจลหลังการใช้งาน 1 รอบ	68
4.30	กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของซิลิกาเจลที่เวลาต่างๆ ที่ผ่านการใช้งานแล้ว 1 รอบ	70
4.31	กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของซิลิกาเจลหลังการใช้งาน 2 รอบ	71
4.32	กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของซิลิกาเจลที่เวลาต่างๆ ที่ผ่านการใช้งานแล้ว 2 รอบ	73

- 4.33 แสดงการเปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมระหว่างอนุภาคนาโนทองแดงและ
แบบอนุภาคนาโนทองแดงเคลือบบนอนุภาคของแข็ง 74
- 4.34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีเมทิลีนบลู
ของผงพอลิเอทิลีน, อนุภาคนาโนทองแดงและผงพอลิเอทิลีนที่ผ่านการ
เคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง 75
- 4.35 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีเมทิลีนบลู
ของผงพอลิโพรไพลีน, อนุภาคนาโนทองแดงและผงพอลิโพรไพลีนผ่าน
การเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง 76
- 4.36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีเมทิลีนบลู
ของซิลิกาเจล, อนุภาคนาโนทองแดงและซิลิกาเจลที่ผ่านการเคลือบ
อนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง 77



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยที่มีการผลิตมากเป็นอันดับ 1 ของโลก ประเทศไทยถือว่าเป็นผู้ผลิตและผู้ส่งออกอันดับหนึ่ง จากสถานการณ์ที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันหากพิจารณาในด้านราคา พบว่าราคายางพารามีแนวโน้มปรับลดลงอย่างต่อเนื่องโดยราคายางพารา ในปี 2554 นับเป็นราคาที่สูงสุดในประวัติศาสตร์ ตามราคาตลาดโลกซึ่งเฉลี่ยทั้งปีอยู่ที่กิโลกรัมละ 119.2 บาท (สำนักพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2558) แต่ในภายหลังนั้นราคากลับมีแนวโน้มลดลงต่อเนื่องจนถึงปีปัจจุบันอยู่ที่กิโลกรัมละ 54.65 บาท (การยางแห่งประเทศไทย, 2561) ซึ่งเป็นระดับราคาที่ต่ำกับต้นทุนการผลิต จึงเป็นปัญหา ที่สำคัญที่ภาครัฐยังไม่สามารถแก้ไขให้สำเร็จได้ แม้ว่ารัฐบาลพยายามเข้ามาพยุงราคายางนั้น หากต้องการแก้ไขปัญหาในระยะยาว จะต้องพัฒนาระบบการผลิตยางพาราในประเทศเพื่อสร้างมูลค่าเศรษฐกิจให้มากขึ้น โดยมีแนวทางดังนี้ 1) การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตของเกษตรกรให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง 2) ขยายกระบวนการผลิตจากอุตสาหกรรมยางแปรรูปขั้นต้นไปสู่อุตสาหกรรมปลายน้ำเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มยางพาราให้มากขึ้น 3) ส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มมูลค่าสินค้ายางพาราในรูป End Products และให้ตรงกับความต้องการของตลาด ซึ่งรวมถึงการวิจัยเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัตถุดิบจากต้นยางพารา และให้ตรงกับความต้องการของตลาดและ ให้ได้มาตรฐานสากล

โดยปกติน้ำยางสดเป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตน้ำยางข้นโดยน้ำยางสด 100 ตันสามารถผลิตน้ำยางข้นที่มีเนื้อยางแห้ง 60% ประมาณ 40 ตัน และหางน้ำยาง 60 ตัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2548) โดยการผลิตจะได้หางน้ำยางเป็นผลพลอยได้ซึ่งปกติแล้วจัดว่าเป็นของเสียในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีส่วนประกอบหลักเป็นโปรตีนและน้ำตาลจึงย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วโดยแบคทีเรียในน้ำยาง ทั้งในดิน น้ำ หรืออากาศ ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นรุนแรง และเมื่อสารนี้ถูกทิ้งลงแหล่งน้ำจะส่งผลให้เกิดน้ำเสียในที่สุด (จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณีย์) โดยส่วนที่เป็นของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำยางนั้นสามารถนำไปใช้เพื่อประยุกต์โดยการนำองค์ประกอบต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำยางมาทำให้เกิดประโยชน์มากที่สุดด้วย ถือเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีต่อยอดจากภาคการเกษตรของประเทศไทยที่สำคัญ ทำให้มีการยอมรับจากอุตสาหกรรมในต่างประเทศ เพื่อจะได้มีเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าและ

เพิ่มมูลค่าสินค้าทางการเกษตร ปัจจุบันอนุภาคนาโนเริ่มเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้นทั้งในด้านการนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ในงานไบโอเซ็นเซอร์ เป็นต้น อนุภาคนาโนคืออนุภาคที่มีขนาดเล็กในช่วง 1-100 นาโนเมตร มีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่พิเศษแตกต่างไปจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่สูงจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวได้ดี (Wang et al., 2006)

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเมื่อพิจารณาจากจำนวนงานวิจัยที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง อาทิ เช่นในปี 2012 มีจำนวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคนาโนจำนวน 20,125 งานวิจัยเมื่อเทียบกับปี 2018 มีงานวิจัยจำนวน 43,226 งานวิจัยซึ่งถือเป็นการเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัว ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนสามารถทำได้หลากหลายวิธีซึ่งการสังเคราะห์ในรูปแบบของคอลลอยด์ก็ถือว่าเป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนได้ โดยจำเป็นต้องใส่สารตั้งต้นของโลหะชนิดนั้นๆและตัวรีดิวซ์รวมถึงการใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อควบคุมขนาดของอนุภาคนาโน ปัจจุบันกระบวนการสังเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นมีการพัฒนาวิธีการและการใช้งานที่เป็นไปได้ของอนุภาคนาโนสอดคล้องกับหลักการของกระบวนการทางเคมีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมไม่ว่าจะเป็นการใช้ตัวรีดิวซ์จากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร กระบวนการผลิตที่ไม่ก่อให้เกิดของเสียและผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ลดระยะเวลาในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนรวมถึงลดการใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายและปรับปรุงประสิทธิภาพของวิธีการที่ได้ปริมาตรที่ต้องการและวัสดุที่มีคุณภาพดี

งานวิจัยนี้จึงสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงโดยใช้เซรามิกจากหางน้ำยางเนื่องจากอนุภาคของนาโนทองแดงมีประโยชน์หลากหลาย เช่น สามารถทนความร้อนได้ดีจึงใช้ต่อเชื่อมอุปกรณ์ในวงจรรวม (integrated circuit) เพื่อให้ไฟฟ้าผ่านได้ ใช้เป็นส่วนผสมของสารเร่งปฏิกิริยาเคมี ใช้เป็นส่วนผสมของน้ำมันหล่อลื่นนอกจากนี้ยังมีรายงานว่าอนุภาคนาโนทองแดงมีสมบัติดูดซับไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุซีเซียม (cesium) ได้ จึงใช้ในการบำบัดขยะรังสีได้ รวมถึงเมื่อนำอนุภาคนาโนทองแดงใช้ผสมในสารเคลือบผิว พลาสติก และเส้นใยเพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์และเชื้อราได้ (เลอสรและคณะ, 2012) งานวิจัยนี้จึงประยุกต์โดยนำอนุภาคนาโนทองแดงเคลือบ (Nano Coating) บนอนุภาคของแข็ง คือ พอลิเอทิลีน (Polyethylene Powder (PE)) พอลิโพรไพลีน (polypropylene powder (PP)) และซิลิกาเจล ข้อดีของการเคลือบนาโนคือสามารถเก็บรักษาวัสดุเคลือบได้ง่าย พร้อมใช้งาน เป็นการช่วยรักษาสภาพแวดล้อมรวมทั้งเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและเพิ่มอัตราการนำกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และนำอนุภาคของแข็งที่ผ่านการเคลือบแล้วนำไปประยุกต์ใช้โดยงานวิจัยนี้สนใจการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูด้วยวิธีโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic) เมทิลีนบลูเป็นสีที่นิยมใช้ในการย้อมเส้นใยอุตสาหกรรมย้อมผ้า สีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมพอกย้อมซึ่งสีเหล่านี้มักตกค้างอยู่ในน้ำทิ้งและบำบัดได้ยากซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้สร้างปัญหามลภาวะอย่างมาก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1). เพื่อศึกษาวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงจากเซรัมของหางนํ้ายาง
- 2). เพื่อเปรียบเทียบการเคลือบอนุภาคแบบการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงก่อนเคลือบและแบบสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงขณะเคลือบที่ระยะเวลาต่างๆ รวมถึงเปรียบเทียบผลของการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงบนพื้นผิวพอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรไพลีน (PP) และซิลิกาเจล
- 3). เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากอนุภาคนาโนทองแดงที่อยู่บนพื้นผิวพลาสติกพอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรไพลีน (PP) และซิลิกาเจลที่ผ่านการเคลือบแล้ว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1). การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงด้วยเซรัมจากหางนํ้ายางที่อุณหภูมิห้อง
- 2). ตรวจสอบคุณสมบัติของอนุภาคนาโนทองแดงด้วยเครื่องวัดการนำไฟฟ้า (conductivity), เครื่องวัดความเป็นกรด – เบส (pH) และค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Visible spectrophotometer
- 3). พิจารณาผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงจากปัจจัยที่แตกต่างกัน
 - ผลของความเข้มข้นสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ 0.1, 0.3, 1.2, 2.4 mM
 - ผลของความเข้มข้นเซรัมจากหางนํ้ายางที่เจือจางไม่เจือจาง, 1:1, 1:2, 1:3
 - ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 0, 15, 30, 60 นาที
- 4). พิจารณาประสิทธิภาพจากการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงบนพื้นผิวของแข็งที่แตกต่างกัน
 - ผงพลาสติกพอลิเอทิลีน (PE)
 - ผงพลาสติกพอลิโพรไพลีน (PP)
 - ซิลิกาเจล
- 5). พิจารณาประสิทธิภาพการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงที่ลักษณะการเคลือบแตกต่างกัน
 - การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงก่อนทำการเคลือบอนุภาคของแข็ง
 - การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงขณะทำการเคลือบอนุภาคของแข็ง
- 6). พิจารณาประสิทธิภาพการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงตามระยะเวลาที่
 - 1 ชั่วโมง

- 6 ชั่วโมง
 - 12 ชั่วโมง
 - 24 ชั่วโมง
- 7). พิจารณาประสิทธิภาพการใช้งานของแข็งที่ผ่านการเคลือบที่ระยะเวลา
- 30 นาที
 - 60 นาที
 - 120 นาที
 - 240 นาที
- 8). พิจารณาการใช้งานอนุภาคนาโนทองแดงบนอนุภาคของแข็งซ้ำ
- การใช้ซ้ำครั้งที่ 1 (PE, PP, ซิลิกาเจล)
 - การใช้ซ้ำครั้งที่ 2 (PE, PP, ซิลิกาเจล)
 - การใช้ซ้ำครั้งที่ 3 (ซิลิกาเจล)
- 9). การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งาน
- อนุภาคนาโนทองแดงที่สังเคราะห์ได้แบบไม่ผ่านการเคลือบบนอนุภาคของแข็ง
 - อนุภาคนาโนทองแดงที่สังเคราะห์ได้ผ่านการเคลือบบนอนุภาคของแข็ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1). สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงจากการใช้ประโยชน์จากหางน้ำยางให้เกิดประโยชน์
- 2). ทราบผลเปรียบเทียบการเคลือบอนุภาคแบบการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงก่อนเคลือบและแบบสังเคราะห์อนุภาคทองแดงขณะเคลือบบนพื้นผิว PE, PP และซิลิกาเจลให้มีประสิทธิภาพสูงสุด
- 3). ทราบระยะเวลาที่เหมาะสมในการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงของพลาสติก PE, PP และซิลิกาเจล
- 4). สามารถนำนาโนทองแดงที่ผ่านการเคลือบแล้วไปประยุกต์ใช้ในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับน้ำยางธรรมชาติ (วราภรณ์ ขจรไชยกูล, 2555)

ยาง (rubber) เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (macromolecule) ซึ่งทางเคมีได้จัดเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ (polymer) ซึ่งมีคุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ประการหนึ่งคือมีความยืดหยุ่น (elasticity) สูง จากคุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ดังกล่าวทำให้น้ำยางถูกนำมาเป็นวัตถุดิบที่สำคัญ ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยวัตถุดิบยางที่นำมาใช้นั้นได้มาจากธรรมชาติคือจากต้นพืชที่เรียกว่า “ยาง”(Hevea Brasiliensis) และนับว่าต้นยางพาราเป็นแหล่งวัตถุดิบยางธรรมชาติที่สำคัญที่สุดในปัจจุบัน

น้ำยางพารา (Latex) น้ำยางเป็นของเหลวสีขาวถึงขาวปนเหลือง ชุ่นข้น อยู่ในท่อน้ำยางซึ่งเรียงตัวกันอยู่ในส่วนเปลือกของต้นยางพารา การที่จะเอาน้ำยางออกจากต้นยาง จะต้องใช้มีดกรีดยางเพื่อตัดท่อน้ำยางให้ขาดออกจากกัน ในน้ำยางจะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง (เนื้อยางแห้ง) และส่วนที่ไม่ใช่ยาง

เนื้อยางแห้ง หมายถึง ปริมาณของเนื้อยางที่อยู่ในน้ำยาง ตามปกติในน้ำยางจะมีเนื้อยางแห้งประมาณ 25-45% เนื้อยางแห้งนี้เองที่มนุษย์นำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อการดำรงชีพ จนกลายเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับชีวิตประจำวัน

น้ำยาง มีความหนาแน่น 0.98 มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ประมาณ 6.8 เมื่อตรวจดูในห้องปฏิบัติการจะพบว่า มีอนุภาคขนาดต่างๆ กันแขวนอยู่ในของเหลว อนุภาคเหล่านี้จะมีประจุเป็นลบ ผลักกันอยู่ตลอดเวลา ทำให้อนุภาคเหล่านั้น แขนวลอยและคงสภาพเป็นน้ำยางอยู่ได้ จนกว่าจะมีสภาพแวดล้อมและปัจจัยต่าง ๆ มารบกวน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะทำให้น้ำยางเสียเสถียรภาพและจับตัวกันเป็นก้อน

1) ส่วนที่เป็นน้ำยาง

- เป็นอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในน้ำยาง
 - เป็นสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน
 - เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.002 – 0.003 ไมครอน
- ไม่ละลายน้ำรูปทรงมีทั้งทรงกลมและทรงรี
- ในสภาพของน้ำยางจะถูกห่อหุ้มด้วยชั้นของสารจำพวกไขมันและสารจำพวกโปรตีนในเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content) ประกอบด้วย
 - ยาง (Hydrocarbon) 86%, น้ำ (การกระจายอยู่ใน Hydrocarbon) 10%, สารพวกไขมัน 3% สารพวกโปรตีน 1%
 - โลหะบางชนิด เช่น แมกนีเซียม โพแทสเซียม และทองแดงประมาณ 0.5%

2) ส่วนที่ไม่ใช่น้ำยาง

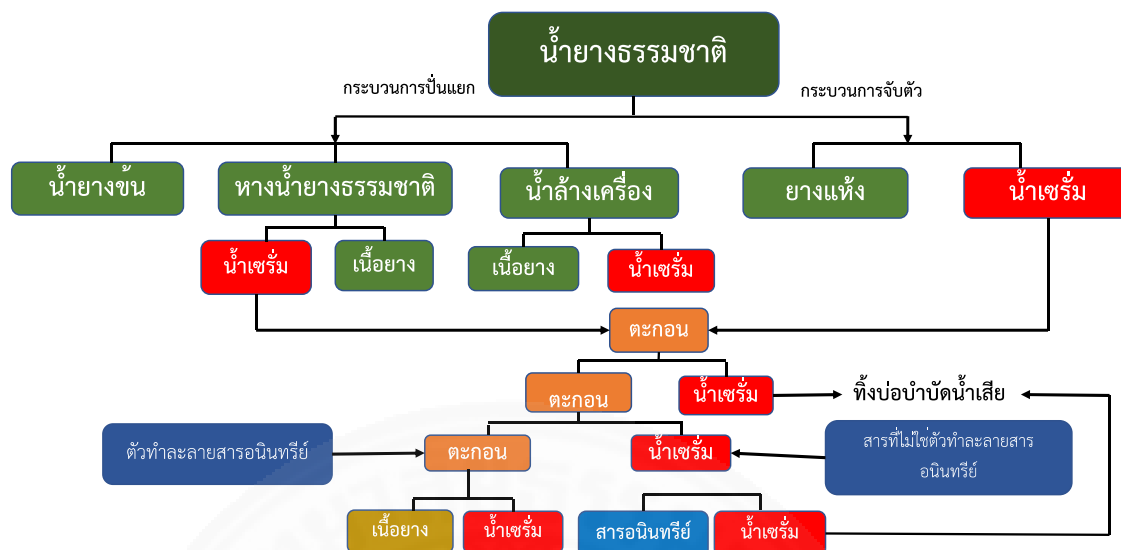
ส่วนนี้ประกอบด้วย ส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นน้ำหรือที่เรียกว่า เซรัม (Serum) และส่วนของลูตอยด์ (Lutoid) และสารอื่น

2.1 ส่วนที่เป็นน้ำหรือเรียกว่า เซรัม (Serum)

- มีความหนาแน่น ประมาณ 1.02
- ประกอบด้วยสารพวกคาร์โบไฮเดรต และกรดอะมิโน

2.2 ส่วนของลูตอยด์ (Lutoid) และสารอื่น

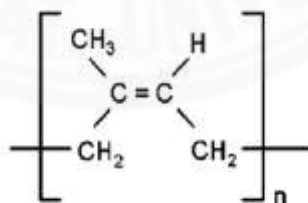
- เป็นอนุภาคกลม มีเยื่อบางหุ้มอยู่
- ขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของยางมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-5 ไมครอน
- ภายในเยื่อบาง ประกอบด้วยส่วนที่เรียกว่า บี-ซีรัม ที่มีส่วนของสารละลายกรด กลีเซอรีน น้ำตาล และโพลีฟีนอลออกซิเดส ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ยางมีสีคล้ำเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ
- ลูตอยด์จะบวมพองและแตกออกเมื่อเติมน้ำลงไป ในน้ำยาง เป็นผลให้ยางมีความหนืดเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.1 ภาพแสดงแผนผังกระบวนการของน้ำยางธรรมชาติ. จาก นวัตกรรมการนำกลับเนือยางและสารอินทรีย์จากการตะกอนของเสียในอุตสาหกรรมน้ำยางพารา, โดย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. สืบค้นจาก <https://www.nstda.or.th/th/nstda-r-and-d/781-nstda-research-development-tlo-02>

2.1.1.1 สมบัติของยางธรรมชาติ

1) สมบัติทางเคมี



ภาพที่ 2.2 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ จาก โครงสร้างของยางธรรมชาติ (น. 494), โดย ภิญญะ วงษ์ทอง, 2560, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 40. สืบค้นจาก <http://www.mdrthai.com/index.php/knowledge-layout=edit&id=126>

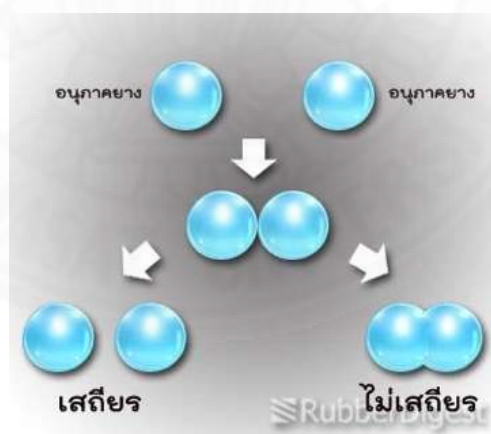
ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene กล่าวคือ มี isoprene (C_5H_8)_n โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15-20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็น

ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยาง สามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด จึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจาก อุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น คือยางจะมีความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) สูง

2) เสถียรภาพของน้ำยาง

ความเสถียรของน้ำยาง (Stability) หมายถึงความสามารถที่อนุภาคน้ำยาง สามารถรักษาสภาพการมีรูปร่างขนาดเดิมไว้ได้ หรือการที่น้ำยางสามารถรักษาสภาพความเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำได้แบบคอลลอยด์

ความไม่เสถียร (Destability) หมายถึงการสูญเสียความสามารถในการคงสภาพของการมีรูปร่างขนาดเท่าเดิมของแต่ละอนุภาคในน้ำยาง จึงหมายถึงการที่อนุภาคน้ำยางรวมเข้าด้วยกัน



ภาพที่ 2.3 แสดงลักษณะความเสถียรและไม่เสถียรของอนุภาคน้ำยาง จาก *Management of knowledge in rubber manufacturing*, โดย สมคิด ชื่นอารมณ สืบค้นจาก <http://rubber-digest.com/?p=110>

ตามหลักเทอร์โมไดนามิกส์ น้ำายเป็นสารที่ไม่เสถียร อนุภาคยางจะพยายามรวมตัวกันให้มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น เพื่อให้มีพื้นที่ผิวโดยรวมน้อยลง คล้ายกับฟองสบู่ที่พยายามรวมตัวกันเป็นฟองใหญ่ขึ้น เพื่อให้ฟองมีความเสถียรเพิ่มขึ้น

การที่อนุภาคยางสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่มีอยู่รอบๆอนุภาคยาง ทำให้มีคุณสมบัติผลักกันเนื่องจากประจุเหมือนกันและคุณสมบัติของแรงแวลเดอร์วาลส์ (Van der Waal force) ทำให้อนุภาคของยางดูดเข้าหากัน นอกจากนี้อนุภาคยางยังมีลักษณะเป็นอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในน้ำจึงมีคุณสมบัติของคอลลอยด์ด้วย จึงทำให้ยางสามารถรักษาสภาพเป็นน้ำยางอยู่ได้



ภาพที่ 2.4 แสดงลักษณะความเสถียรและไม่เสถียรของอนุภาคยาง จาก *Management of knowledge in rubber manufacturing*, โดย สมคิด ชื่นอารมณ สืบค้นจาก <http://rubber-digest.com/?p=110>

ความเสถียรของน้ำยางโดยปกติน้ำยางธรรมชาติมีความเสถียร เพราะมีสารที่เป็นโปรตีนเกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาคยาง สารเหล่านี้มีประจุเป็นลบจึงผลักกันและป้องกันไม่ให้อนุภาคยางที่เข้าใกล้กันหรือมารวมกัน น้ำยางธรรมชาติจะมีโปรตีนห่อหุ้ม จะมีความเสถียรเชิงกลไม่สูงนัก แต่เมื่อตั้งทิ้งไว้ในสภาวะที่เป็นด่าง ฟอสโฟไลปิดที่ห่อหุ้มอนุภาคยาง จะเกิดการไฮโดรไลซิสเกิดเป็นสบู่กรดไขมันที่จะไปห่อหุ้ม อนุภาคยางให้เกิดความเสถียรขึ้น ดังนั้นน้ำยางที่เก็บรักษาด้วยแอมโมเนียสูงจะเกิดการไฮโดรไลซิสของฟอสโฟไลปิดได้ดีกว่าน้ำยางที่เก็บรักษาด้วยแอมโมเนียต่ำ

2.1.2 ทองแดง

ทองแดง (copper) ถือเป็นโลหะที่ถูกใช้ประโยชน์มาตั้งแต่ยุคสัมฤทธิ์ (Bronze Age) จนถึงปัจจุบัน และเป็นโลหะที่ถูกใช้มากรองลงมาจากเหล็ก และอลูมิเนียม

ปัจจุบันมีการนำโลหะทองแดงมาใช้เป็นส่วนผสมของทอง และเงินมากขึ้น เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและทนต่อการกัดกร่อน โดยใช้โลหะทองแดงในรูปทองแดงเจือสำเร็จรูป ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้ง่าย โลหะทองแดงบริสุทธิ์ใช้เรียกโลหะทองแดงที่มีส่วนผสมไม่เกิน 0.5% โดยน้ำหนัก และใช้คำว่า โลหะทองแดงผสมกับโลหะทองแดงที่มีทองแดงไม่ต่ำกว่า 40% แต่ไม่มากกว่า 99% โดยน้ำหนัก

ทองแดงเป็นโลหะที่มีคมเหนียว และเนื้ออ่อน สามารถดัดให้มีรูปร่างตามที่ต้องการได้ มีคุณสมบัติเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี (รองจากเงิน) เป็นโลหะที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน มีเลขออกซิเดชัน +1, +2 และ +3 แต่โดยทั่วไปพบทองแดงที่มีเลขออกซิเดชัน +1 (cuprous ion) และ +2 (cupric ion) เท่านั้น ซึ่งในสารละลายคิวปริกไอออน (Cu^{2+}) มีความเสถียรมากกว่า คิวปรัสไอออน (Cu^+) เนื่องจาก คิวปรัสไอออนจะเกิดออกซิเดชันและรีดักชันได้ง่ายกว่า แต่ความเสถียรของทั้ง Cu^+ และ Cu^{2+} นั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนลบหรือลิแกนด์ ค่าคงที่ในการละลายและชนิดของอะตอมในผลึกด้วย

ตารางที่ 2.1

แสดงตัวอย่างสารประกอบทองแดงที่ใช้ในอุตสาหกรรม

สารประกอบทองแดง	ประเภทอุตสาหกรรม
1. คิวปริกออกไซด์ (CuO)	ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ส่วนประกอบแบตเตอรี่ สี ผลิตสารฆ่าแมลง และการเชื่อมโลหะ
2. คิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O)	ใช้ผลิตสารฆ่าเชื้อรา สารกันเสียในสี เซลล์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric cells) ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำเม็ดสีในแก้ว และกระจกเงา
3. คิวปริกอะซีเตต ($\text{Cu}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	ผลิตเม็ดสี สารฆ่าเชื้อรา สีย้อมผ้า ดอกไม้ประดับ
4. คิวปริกอะซีโตอาร์ซีไนท์ ($\text{Cu}_3\text{As}_2\text{O}_3\text{Cu}(\text{C}_2\text{H}_2)_2$)	ผลิตสารฆ่าแมลง และสีที่ใช้ในทะเล
5. คิวปริกอาซิเนต (CuHAsO_3)	ผลิตเม็ดสี สารรักษาเนื้อไม้ สารฆ่าเชื้อรา แมลงและหนู
6. คิวปริกคาร์บอเนต (CuCO_3)	ช่วยรักษาเมล็ดพันธุ์ ผลิตสารฆ่าเชื้อรา ทำดอกไม้เพลิง ผลิตเม็ดสี สารเติมแต่งในอาหาร (feed additive)
7. คิวปริกคลอไรด์ ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารที่ใช้ติดสีย้อม ใช้ดับกลิ่นของสารปิโตรเลียม ทำน้ำหมัก การชุบโลหะ ถ่ายภาพ เม็ดสี รักษาเนื้อไม้ สารป้องกันเชื้อรา
8. คิวปริโครเมต (CuCrO_4)	สารฆ่าเชื้อรา รักษาเมล็ดพันธุ์ รักษาเนื้อไม้ รักษาเส้นใย และสิ่งทอ
9. คิวปริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Cu}(\text{OH})_2$)	การผลิตเส้นใยสังเคราะห์ (rayon) แบตเตอรี่ อิเล็กโทรด เม็ดสี สารฆ่าเชื้อรา แมลง ตัวเร่งปฏิกิริยา สารเติมแต่งในอาหาร รักษากระดาก
10. คิวปริกไนเตรต ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	การอัดรูปภาพ สารให้สี สารที่ใช้ติดสีย้อม ใช้ขัดเงาทองแดง สังกะสี และอลูมิเนียม สารรักษาเนื้อไม้ กำจัดวัชพืช เชื้อรา ผลิตดอกไม้ไฟ
11. คิวปริกซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)	สารฆ่าเชื้อรา แบคทีเรีย กำจัดสาหร่าย สีย้อม การฟอกหนัง สารรักษาเนื้อไม้ การชุบโลหะ

หมายเหตุ. จาก สารประกอบทองแดงและการใช้ประโยชน์จาก “ประโยชน์และพิษของทองแดง”

[บทความภาษาไทยออนไลน์]. สืบค้นจาก <http://www.siamchemi.com/ทองแดง/>

ประโยชน์ทองแดง เป็นโลหะที่มีความสำคัญในการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงเครื่องเรือนต่างๆ เพราะมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ ได้แก่ เป็นโลหะที่สื่อไฟฟ้า และถ่ายเทความร้อนได้ดี มีความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง สามารถรีดขึ้นรูปได้ง่าย อุตสาหกรรมที่มีการใช้ทองแดง ได้แก่ อุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเครื่องประดับ อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมผลิตเครื่องใช้ เครื่องเรือน อุตสาหกรรมเครื่องทำความเย็น และอุตสาหกรรมการผลิตกระป๋องบรรจุภัณฑ์

2.1.3 วัสดุนาโน

วัสดุนาโนหรืออนุภาคนาโนเป็นอนุภาคที่มีขนาดในระดับ 1 - 100 นาโนเมตร โดยประมาณจะเทียบได้กับขนาดเฉลี่ยของไวรัส หรือมีขนาดเล็กกว่าเส้นผมของคน ประมาณ 1000 ถึง 100000 เท่า อนุภาคทองแดงนาโนมักถูกเตรียมขึ้นจากปฏิกิริยาการรีดิวซ์ไอออนทองแดง (copper ion) ให้กลายเป็นโลหะทองแดง โดยใช้สารช่วยการกระจายตัวเพื่อไม่ให้อนุภาคเกาะกันเป็นก้อนใหญ่ตามปกติ โลหะทองแดงมีจุดหลอมเหลวที่ 1084.62 องศาเซลเซียส หรือ 1357.77 เคลวิน แต่อนุภาคโลหะทองแดงนาโนมีจุดหลอมเหลวที่พื้นผิวลดลงอย่างมากขึ้นกับขนาดของอนุภาค (Yeshchenko et al, 2007) โดยที่แท่งโลหะทองแดงนาโน (copper nano rods) ก็มีจุดหลอมเหลวที่ลดลงเช่นกัน (Karabacak et al, 2006)

อนุภาคทองแดงนาโนใช้ผสมในสารเคลือบผิว พลาสติก และเส้นใย เพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์และฆ่าเชื้อรา ใช้ต่อเชื่อมอุปกรณ์ในวงจรรวม (integrated circuit) เพื่อให้ไฟฟ้าผ่านได้ ใช้เป็นส่วนผสมของสารเร่งปฏิกิริยาเคมี ใช้เป็นส่วนผสมของน้ำมันหล่อลื่น นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าอนุภาคทองแดงนาโนมีสมบัติดูดซับไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุซีเซียม (cesium) ได้ จึงใช้ในการบำบัดขยะรังสี

2.1.4 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

โฟโตเคมี (Photochemistry) เป็นปฏิกิริยาที่ใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นโมเลกุลของสาร และหากการกระตุ้นด้วยแสงอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการจะเรียกว่า โฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) โฟโตคะตะไลซิสนี้จะเกิดขึ้นได้จำเป็นต้องมีองค์ประกอบ 4 อย่างคือ 1) ตัวเร่งปฏิกิริยา 2) พลังงาน 3) น้ำ และ 4) ออกซิเจนหรือตัวออกซิแดนซ์อื่น ๆ นอกจากนี้โฟโตคะตะไลซิสจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อได้รับแสง หรือพลังงานโฟตอน (Photon energy) ที่มากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเกิดขึ้นได้ โดยจะเรียกพลังงานนี้ว่า พลังงานกระตุ้น (Activation energy)

ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสนั้นจะมีองค์ประกอบของโลหะทรานซิชันและสารกึ่งตัวนำ โดยจะประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ และแถบคอนดักชัน ซึ่งในโลหะทรานซิชันนั้นจะมีแถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชันที่ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำนั้นแถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชันจะไม่ติดกัน โดยจะถูกคั่นด้วยระดับชั้นพลังงาน เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานโดยการฉายแสงด้วยพลังงานแสงที่มีพลังงานมากกว่าแถบพลังงานของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำซึ่งจะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังแถบคอนดักชันจึงทำให้เกิดโฮล ในบริเวณแถบวาเลนซ์ โดยที่โฮลซึ่งมีประจุเป็นประจุบวกจะสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในแถบวาเลนซ์ส่วนแถบคอนดักชัน อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากแถบวาเลนซ์ก็จะเคลื่อนที่ได้้อย่างอิสระทั่วแถบคอนดักชันเช่นกัน

ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนกับโฮล ซึ่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำนี้สามารถเกิดขึ้นได้ 2 แบบคือ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบคอนดักชันไปยังตัวรับอิเล็กตรอนในสารละลาย เกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชัน และอีกวิธีหนึ่งคือ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากตัวให้อิเล็กตรอนในสารละลายไปยังแถบวาเลนซ์เกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยการกลับมารวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนกับ โฮลจะสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็วจนทำให้กลายเป็นตัวขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสต่ำลง ในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะทรานซิชันนั้นการกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮลจะสามารถเกิดได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะว่ามีแถบพลังงานและไม่มีช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานคั่นเหมือนกับสารกึ่งตัวนำส่งผล ให้คู่อิเล็กตรอน/โฮล แยกกันได้ไม่นาน ข้อแตกต่างของพลังงานช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนแยกได้ยากโดย จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับพลังงาน ช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงาน ระดับพลังงานในแถบคอนดักชัน และระดับพลังงานในแถบวาเลนซ์

เมื่อเกิดคู่อิเล็กตรอนกับโฮลขึ้น โดยโฮลจะเคลื่อนที่ไปอยู่บริเวณผิวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาและจะกลายเป็นตัวออกซิแดนต์คือสารประกอบที่มีฤทธิ์ในการออกซิไดซ์ หรือเติมออกซิเจนให้กับสารอินทรีย์ได้โดยตรงหรือทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออนจนเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical, $\cdot\text{OH}$) โดยไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ได้นี้จะไปทำการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์อีกครั้งซึ่งถือเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันอนุภาคนาโนได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติเฉพาะตัวและการใช้งานที่หลากหลายโดยในงานวิจัยส่วนใหญ่จะให้ความสนใจเกี่ยวกับการสังเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยจะลดการใช้สารเคมีจึงทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนจากพืชเช่น Nazar et al. (2017) ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของสารสกัดจากพืช มีการเตรียมสารประกอบนาโนทองแดง โดยใช้สารสกัดเมล็ดพันธุ์ทับทิมจากเกลือคลอไรด์ทองแดง โดยตรวจลักษณะอนุภาคนาโนทองแดงที่สังเคราะห์ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และสเปกโตรสโกปีอินฟราเรด (FTIR) พบว่าการเกิดอนุภาคนาโนทองแดงเกิดขึ้นจากการรีดักชันโลหะตามด้วยการเกิดนิวเคลียส ขนาดของอนุภาคนาโนอยู่ในช่วง 40-80 นาโนเมตร(ขนาดเฉลี่ย 43.9 นาโนเมตร) รูปร่างทรงกลม กระจายตัวสม่ำเสมอ จากนั้นนำมาทดสอบการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู (150 มิลลิกรัมต่อลิตร) ภายใต้การฉายรังสีจากแสงอาทิตย์ ทำให้มีความสามารถในการย่อยสลายได้ถึง 87.11 % ภายใต้การฉายรังสีแสงอาทิตย์นาน 3 ชั่วโมง

Suwatthanarak et al. (2016) ได้ทำการทดลองสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์จากหางน้ำยางธรรมชาติโดยกระบวนการสังเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและใช้พลังงานต่ำเพราะสามารถสังเคราะห์อนุภาคได้ที่อุณหภูมิห้องโดยการเติมซิลเวอร์ไนเตรตเป็นแหล่งซิลเวอร์ไอออนก่อนทำปฏิกิริยากับตัวรีดิวซ์ซึ่งเป็นน้ำตาลกลูโคสและสารอินทรีย์อื่นๆในหางน้ำยาง นอกจากนี้โปรตีนในหางน้ำยางยังสามารถควบคุมการโตของอนุภาคได้ด้วยการทำหน้าที่เป็นตัวสร้างความเสถียร ได้มีการศึกษาปัจจัยหลายอย่างซึ่งรวมถึงปริมาณแอมโมเนีย D-Glucoseและปริมาณโปรตีน BSA เพื่อศึกษาถึงผลกระทบในการสังเคราะห์ โดยทดสอบด้วยเครื่องวัดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เครื่องวัดการนำไฟฟ้าและศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสียูวีและค่าการนำไฟฟ้าของสารทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแอมโมเนียและ D-Glucose เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ABS และค่าการนำไฟฟ้าลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของโปรตีน BSA และในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์นี้สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของ *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus*

Bar (2009) ที่ทำการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้น้ำยางจากสับปาดและการวิเคราะห์คุณลักษณะจากภาพ TEM, X-ray diffraction และ UV – Vis absorption spectroscopy พบว่า อนุภาคนาโนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-20 นาโนเมตร ส่วน UV – Vis absorption spectroscopy แสดงให้เห็นถึงการกระจายขนาดของอนุภาคสองขนาด โดยอนุภาคขนาดเล็กจะมีความเสถียรมาก Lin et al.,พบว่ากลุ่มคาร์บอนิลจากสารตกค้างของกรดอะมิโน

และโปรตีนเปปไทด์มีความสัมพันธ์กับการรวมตัวกันของโลหะ ดังนั้นโปรตีนที่ทำหน้าที่ในการเป็น encapsulating จึงป้องกันการรวมตัวกันของโลหะด้วย

ต่อมาเมื่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนได้รับความนิยมจึงมีการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพได้สูงสุด เช่น Mohan et al. (2013) ทดสอบเรื่องความสำคัญของของเหลวไอออนิก (เกลือ) ที่จะสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงโดยอนุภาคนาโนทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 นาโนเมตร ที่ได้จากการเตรียมของเหลวไอออนิก (เกลือ) ของอนุภาคนาโนของคอปเปอร์ถูกนำมาใช้ในการเร่งปฏิกิริยาของเอไซด์กับเทอร์มินอล อัลคีน เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่มีผลผลิตที่ดีมีการปรับโครงสร้างของของเหลวไอออนิก ทำให้สามารถเตรียมอนุภาคนาโนทองแดงได้ในระยะเวลาอันสั้นและภายใต้สภาวะที่ไม่รุนแรงให้มีประสิทธิภาพที่ดีโดยใช้แหล่งกำเนิดนาโนคอปเปอร์ในของเหลวไอออนิกและสามารถลดการใช้สารเติมแต่งได้

Jain et al. (2015) ทำการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงในสารละลายน้ำ โดยใช้กรดแอสคอร์บิกเป็นตัวรีดิวซ์ อนุภาคนาโนทองแดงที่สังเคราะห์ได้มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันกับออกซิเจนในบรรยากาศเป็นเวลานาน 2 เดือน และเมื่อทำการตรวจสอบลักษณะด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบ UV-visible, FTIR spectroscopy, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าขนาดอนุภาคนาโนทองแดงเฉลี่ยอยู่ที่ 28, 16, 12 นาโนเมตรที่ความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิกที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ และขนาดของอนุภาคนาโนก็มีผลต่อกิจกรรมการเร่งปฏิกิริยาด้วยเช่นกัน

Kumar and Upadhyay (2016) ศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมขนาดของอนุภาคนาโนด้วย L-Cysteine ในสารละลายที่เป็นน้ำ โดยมีกลูโคสเป็นตัวรีดิวซ์ซึ่งเอเจนต์ L-Cysteine เป็นสารควบคุมขนาด โดยศึกษาความเข้มข้นของสารควบคุมขนาด พีเอช อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสารรีดิวซ์ซึ่งเอเจนต์ที่แตกต่างกัน พบว่าปฏิกิริยารีดักชันของคอปเปอร์อะซิเตตที่ความเข้มข้นของกลูโคส 1 โมลาร์ คอปเปอร์อะซิเตต 0.01 โมลาร์และ L-Cysteine 0.02 โมลาร์ และทำการปรับพีเอชโดยการเติม NaOH ขณะกวนสารจากนั้นนำไปให้ความร้อนจนกระทั่งมีการเปลี่ยนสี ซึ่งบ่งบอกว่าพบการเกิดของอนุภาคนาโนทองแดงแล้วเมื่อนำมาตรวจสอบลักษณะด้วย UV-vis spectroscopy พบว่า อนุภาคนาโนทองแดงที่สังเคราะห์ได้จะมีพีคของการดูดซับที่ 550 นาโนเมตร และภาพ TEM พบว่าอนุภาคนาโนมีลักษณะเป็นทรงกลมและมีการกระจายตัวที่ 35-50 นาโนเมตร และยังคงเสถียรที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลานานหนึ่งเดือน

Sinha and Ahmaruzzaman (2015) ได้ทดลองใช้เปลือกของส้มโอซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคอปเปอร์ซึ่งภายในเปลือกประกอบด้วยเพคติน น้ำตาล กรดแอสคอร์บิก ที่มีส่วนช่วยในการรักษาเสถียรภาพของอนุภาคนาโน

และเมื่อทำการวิเคราะห์ภาพ TEM แสดงถึงลักษณะทรงกลมของอนุภาคนาโนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 22-27 นาโนเมตร และข้อมูล XRD แสดงให้เห็นลักษณะผลึกเฉลี่ย 18 นาโนเมตรและผลการดำเนินงานในการเร่งปฏิกิริยาของอนุภาคนาโนของทองแดงที่สังเคราะห์ได้โดยการย่อยสลายสารละลายเมทิลเรดด้วย photocatalytic โดยเป็นตัว nanocatalyst ที่เหมาะสมดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกอนุภาคนาโนของทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการโดยใช้ในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลเรด

Narsrollahzadeh and Sajaidi (2015) ได้สังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงจากสารสกัดใบแปะก๊วย ที่เป็นสารรีดิวซ์ซึ่งเอเจนต์ โดยนำสารละลายคอปเปอร์ไดไฮดรอต ผสมกับสารสกัดใบแปะก๊วยพบว่าสีของสารละลายมีสีเข้มขึ้นแสดงว่ามีอนุภาคนาโนของทองแดงเกิดขึ้น เมื่อตรวจสอบด้วยเครื่อง UV-vis spectroscopy และจากการตรวจสอบด้วยTEM พบว่าอนุภาคนาโนมีลักษณะเป็นทรงกลมและมีการกระจายตัวของขนาดในช่วงแคบโดยขนาดอยู่ในช่วงขนาดระหว่าง 15-20 นาโนเมตรและอนุภาคนาโนทองแดงที่สังเคราะห์ยังสามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เพราะมีพื้นที่ผิวมากและสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่หลายครั้งโดยไม่เสียประสิทธิภาพของการเร่งปฏิกิริยาไม่ลดลง

Sreeju et al. (2016) ทำการทดลองเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนทองแดงในหลายๆ ด้าน อาทิเช่น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าอนุภาคนาโนทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากอนุภาคของนาโนทองแดงมีอัตราการรวมตัวกันน้อยทำให้ง่ายต่อการย่อยสลายตัวทางธรรมชาติ และเมื่อนำมาใช้ตรวจสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity) โดยการใช้ Agar-diffusion method กับเชื้อ E.coli และ S.aureus. พบว่าอนุภาคนาโนทองแดงสามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียเหล่านี้ได้โดยยับยั้งเอนไซม์ของเซลล์และยังสามารถผสมในสารเคลือบผิว พลาสติกและเส้นใยได้อีกด้วย

ชญานุช ชนะกิจการโชค และนภดา หริพัฒนกุล (2016) ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงโดยใช้หางน้ำยาง โดยใช้สารโพลีอะคริลาไมด์ (PAM) เป็นสารในการจับกอน้ำยางออกจะได้เซรัมที่มีโพลิเมอร์หลงเหลืออยู่ซึ่งสามารถช่วยในการคุมขนาดอนุภาคได้ โดยการสังเคราะห์เริ่มจากการผสมสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 1.2 mM กับเซรัมจากหางน้ำยางจะได้สารละลายปริมาตร 11 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิห้อง ทันทันทีที่ผสมสารละลายจะเปลี่ยนจากสีฟ้าเป็นสีน้ำตาลแดง ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่าเกิดอนุภาคนาโนทองแดงขึ้น จากนั้นทำการตรวจสอบคุณสมบัติของอนุภาคนาโนทองแดงที่สังเคราะห์ได้โดยเครื่องวัดค่ากรดเบส เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (visible spectrophotometer) และเครื่อง TEM จากการตรวจสอบพบพิคของค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 437 - 445 นาโนเมตรและจากการศึกษาปัจจัยอื่นๆพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเซรัมและเวลาในการเกิดปฏิกิริยา พิคของการดูดกลืนแสงจะเพิ่มขึ้นซึ่งบ่งบอกว่าเกิดอนุภาคนาโนทองแดงมากขึ้นแต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลูโคสพบว่า

ไม่ส่งผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแต่เมื่อเพิ่มปริมาณแอมโมเนีย พีคของการดูดกลืนแสงจะสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณเกินกว่า 0.3340% Alkalinity พีคของการดูดกลืนแสงจะลดลงบ่งบอกว่าอนุภาคนาโนน้อยลง จากงานวิจัยนี้ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงคือ การทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 1.2 mM และเข้มข้นจากหางน้ำยางที่มี% Alkalinity, กลูโคสและโปรตีน เท่ากับ 0.2429%, 0.0288 g/ml หรือ 3%BRIX และ 4 ไมโครกรัม/ลิตร ตามลำดับและเมื่อนำอนุภาคนาโนทองแดงที่สังเคราะห์ได้มาย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู พบว่าสามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ถึง 79.19% ในเวลา 3 ชั่วโมง

โดยการสังเคราะห์อนุภาคนาโนที่พบว่ายังมีปัญหาการประยุกต์ใช้งานบางประการ อาทิ เช่น การสลายตัวได้ง่ายในทางธรรมชาติและไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีกรวมถึงการเก็บอนุภาคนาโนให้พร้อมสำหรับการใช้งานให้สามารถใช้งานได้ง่าย จึงมีแนวทางแก้ไขโดยการนำอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้ทำการเคลือบบนอนุภาคของแข็งที่มีรูพรุนที่ต้องการเพื่อเพิ่มความทนทาน ง่ายต่อการใช้งานและการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานโดย Xu et al. (2016) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับโครงสร้างโดยการเคลือบอนุภาคนาโนทองคำบน Polystyrene (PS)/Polydopamine (PDA) การเคลือบผิวโดยมีการปรับพื้นผิววัสดุโดยใช้ Polydopamine (PDA) มาช่วยในเรื่องของคุณสมบัติการยึดเกาะเพิ่มขึ้น โดย PDA สามารถสร้างฟิล์มโพลิเมอร์ที่บางและพื้นผิวยึดติดกับพื้นผิววัสดุเกือบทุกชนิดและช่วยในการเชื่อมโครงสร้างที่มีขนาดสม่ำเสมอและกระจายตัวได้ดี โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการส่งผ่านในการตรวจสอบโครงสร้างนี้ด้วยแผ่นฟิล์ม PDA ultrathin ที่เชื่อมต่อระหว่าง Polystyrene กับอนุภาคนาโนทองคำ และผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าผลึกอนุภาคนาโนของทองคำช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนได้ดีขึ้นและได้มีการประยุกต์ใช้ในการเคลือบอนุภาคของแข็งอื่น อาทิเช่น ซิลิกาเจล โดยเบญจวรรณ (2007) เตรียมตัวดูดซับเพื่อใช้ในการกำจัดตะกั่วและทองแดงจากน้ำเสียโดยซิลิกาเจลที่ใช่แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ ผลการศึกษา พบว่า ซึ่งหลังจากเคลือบแล้วซิลิกาเจลที่ได้มีความสามารถในการจับกับโลหะหนักสูงขึ้น สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วและทองแดง คือ ใช้ระยะเวลาในการสัมผัสนาน 30 นาที และพีเอชของสารละลายโลหะเท่ากับ 5.5 โดยสามารถกำจัดตะกั่วและทองแดงได้มากที่สุดเท่ากับ 11.82 และ 3.55 มิลลิกรัมต่อตัวดูดซับหนึ่งกรัม ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพีเอชของสารละลายโลหะเท่ากับ 3 หรือต่ำกว่าเหล็กออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวของตัวดูดซับจะถูกชะละลายให้ปนเปื้อนออกมาในสารละลายได้ และการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ ในสารละลายโลหะจะส่งผลให้ตัวดูดซับสามารถกำจัดตะกั่วและทองแดงได้น้อยลง โดยการกำจัดโลหะหนักที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียจริงที่มีตะกั่วที่และทองแดงที่ได้เท่ากับ 89.48 และ 83.52 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการเคลือบอนุภาคนาโนยังคงพบปัญหาบางประการจึงต้องใช้สารโพลีโดพามีนช่วยในการเชื่อมประสานอนุภาคนาโนและอนุภาคของแข็งด้วยกันดังงานวิจัยของHyejinjeon et al. (2016) กล่าวถึงการทดลองที่ใช้ตัวทำละลายที่เป็นน้ำในการตรึงโมเลกุลของสารและไม่สามารถเคลือบบนพื้นผิวของโพลีเอสเตอร์ (Polyester) ได้ จึงใช้โพลีโดพามีน(PDA) ในตัวทำละลายอินทรีย์ การศึกษาจลนพลศาสตร์พบว่า การเคลือบมีเสถียรภาพมากที่สุดที่ระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง ส่งผลให้ความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 50 นาโนเมตร

Beckford and Zou (2013) การเติมโพลีโดพามีนเป็นสารชั้นแรกก่อนทำการเคลือบโพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene : PTFE) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความทนทานของฟิล์ม PTFE เนื่องจากการยึดติดของโพลีโดพามีนกับ PTFE ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ เพราะมีลักษณะบางมากจึงแยกได้ยากและแสดงให้เห็นถึงศักยภาพและความทนทานที่นำมาใช้ในการใช้งานของฟิล์ม PTFE

Xu et al.,(2017) มีการใช้โพลีโดพามีนเคลือบอนุภาคนาโนเงิน โดยอิเล็กโทรเคมีทำปฏิกิริยาของตัวโพลีโดพามีนและปฏิกิริยาการลดแรงดึงผิวระหว่างโพลีโดพามีนกับซิลเวอร์ไอออน โดยโพลีโดพามีนถูกใช้เป็นสารลดแรงดึงผิวและเป็นตัวเชื่อมประสานไปพร้อมๆกัน และสามารถตรวจสอบลักษณะทางสัญญาณวิทยาองค์ประกอบและความสามารถในการยึดจับของฟิล์มเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เมื่อทดสอบประสิทธิภาพของซิลเวอร์นาโนต่อการฆ่าเชื้อ E.coli ได้เป็นเวลานาน 14 วัน

Huang (2015) ทำการเตรียมเส้นใยสแตนเลสด้วยวัสดุคาร์บอนที่ได้จากโพลีโดพามีนพบว่า การเกิดพอลิเมอร์ของโพลีโดพามีน ในสารละลายต่างทำให้เกิดการโตของโพลีโดพามีนบนผิวของเส้นใย การยึดเกาะของโพลีโดพามีนกับโลหะออกไซด์ทำให้เสถียรภาพของพอลิเมอร์ดีขึ้น

Yingzhan et al.,(2017) ทำการทดลองเรื่องการเคลือบอนุภาคนาโนบนผ้าฝ้ายที่มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนและสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้โดยใช้การเกิดพอลิเมอร์เซชันของโพลีโดพามีนรวมถึงการควบคุมของไฮโดรไลติกและสารเคลือบด้วยซิลเวอร์ในเตรตบนโพลีโดพามีนสามารถป้องกันแบคทีเรียชนิด gram-Positive s.aureus และแบคทีเรีย gram-negativem E.coli และมีความสามารถในการทนไฟได้ดีมาก (99.99%) และสามารถนำมาใช้ซ้ำได้ถึง 30 ครั้ง

Gizem et al. (2016) สนใจศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของชั้นเคลือบโพลีโดพามีน บนอนุภาคของซิลิกอนนาโนไวท์ พบว่าความหนาของชั้นเคลือบมีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาและเมื่อนำไปทดสอบในที่ที่มีแสงความยาวคลื่นแตกต่างกันจะสังเกตเห็นว่าในกรณีที่มีแสงที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสมตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่า แบบไม่ใช้แสงถึง 12 เท่า

Molefi et al. (2009) ได้กล่าวถึงลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสมบัติทางความร้อนของวัสดุผสมของพอลิเอทิลีน (LDPE, LLDPE, HDPE) ของโพลีเอทิลีนกับอนุภาคของทองแดง ที่มีการยึดติดแบบไม่สมบูรณ์ พบช่องว่างที่พื้นผิวอนุภาคพอลิเอทิลีน อนุภาคนาโนทองแดงกระจายตัวไม่ดี เนื่องจากอนุภาคนาโนมีขนาดเล็กมีโอกาสจับตัวเป็นก้อน จึงทำการตรึงบนอนุภาคพอลิเอทิลีนเพื่อลดการตกผลึก และพบว่า LDPE บริสุทธิ์จะถูกย่อยสลายที่อุณหภูมิต่ำกว่า LLDPE และ HDPE พบว่าเมื่ออนุภาคพอลิเอทิลีนที่มีปริมาณทองแดงมาก ช่วยในการนำความร้อนและความเสถียรทางความร้อนยิ่งเพิ่มขึ้นด้วยและการตรึงอนุภาคทองแดงสามารถยับยั้งการแพร่กระจายของผลิตภัณฑ์การย่อยสลายที่ระเหยได้

Jin-Hong et al. (2010) ศึกษาวิธีการใหม่ในการทำ hydrophilization และ heparization ที่มีรูพรุนของ PE โดยในงานวิจัยนี้ได้ยืนยันว่าการใช้โดพามีนสามารถทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์และเชื่อมโยงกับพื้นผิวของ PE ที่มีรูพรุนในสารละลายโพลีโดพามีนสามารถสร้างชั้นปฏิกิริยาที่เสถียรซึ่งยึดติดกับเมมเบรนช่วยเพิ่มโอกาสในการปรับเปลี่ยนพื้นผิวและการปรับฟังก์ชันการทำงาน เช่น heparinization ในการศึกษากับ polydopamine heparin ถูกตรึงบนพื้นผิวเมมเบรนอย่างสมบูรณ์ หลังจากผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยโดพามีน โดยวิธีการดัดแปรพื้นผิวนี้อาจเป็นการเพิ่มความคงทนในระยะยาวและนอกจากนี้การเลือกใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายเพราะกระบวนการปรับเปลี่ยนไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณพื้นที่ผิวของเมมเบรนที่มีรูพรุนของ PE เท่านั้นแต่ยังสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ภายในอนุภาคโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายใดๆ ต่อโครงสร้างเมมเบรนอีกด้วย

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้

3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

- Cuvette
- ไมโครปิเปต
- เครื่องแก้ว
- เครื่อง pH meter ยี่ห้อ EUTECH INSTUMENTS รุ่น pH 510
- เครื่อง conductivity Meter ยี่ห้อ Horiba รุ่น com-100
- เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่งยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AY 220
- Magnetic stirrer with hot plate ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS7
- เครื่อง centrifuge ยี่ห้อ WiseSpin รุ่น AY 220
- ตู้อบยี่ห้อ GRIEVE รุ่น LW-201C
- Visible spectrophotometer ยี่ห้อ METASH รุ่น V-510
- UV-visible spectrophotometer ยี่ห้อ UNICO รุ่น 1200
- เครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน Transmission electron microscope (TEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JEM-2010
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscopy (SEM)

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- หางน้ำยางได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยอีสเทิร์นกรุ๊ป จำกัด
- คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper (II) Sulphate: CuSO_4) ยี่ห้อ Merck
- แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ (Cationic polyacrylamide: C-PAM)
- สารละลายเอทานอล (Absolute Ethanol) ยี่ห้อ EMSURE
- Methylene Blue ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{ClS} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- Dopamine hydrochloride ยี่ห้อ sigma-aldrich

- น้ำกลั่น
- อนุภาคพอลิเอทิลีน (PE)
- อนุภาคพอลิโพรไพลีน (PP)
- อนุภาคซิลิกาเจล

3.2 วิธีการดำเนินงาน

3.2.1 การหาปริมาณเนื้อยางแห้งในทางน้ำยาง (DRC)

ชั่งน้ำหนักจานแก้วกลม (Petri dish) พร้อมบันทึกค่า จากนั้นเติมน้ำยางปริมาณ 5 กรัม ลงในจานแก้ว และเติมกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 2 %W/V ปริมาตร 3 มิลลิลิตร เพื่อให้ยางจับก้อน ต่อมานำสารละลายที่ได้มากรองเพื่อแยกเนื้อยางออกแล้วทำการกรองซ้ำๆ หลายครั้ง นำก้อนยางที่ได้มาเข้าตู้อบเพื่ออบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักยางแห้งที่ได้พร้อมบันทึกค่า โดยปริมาณเนื้อยางแห้งในทางน้ำยางคำนวณได้จากสูตร

$$\%DRC = \frac{(\text{น้ำหนักของน้ำยางแห้งหลังจากการอบแห้ง})}{(\text{น้ำหนักทางน้ำยางตอนเริ่มต้น})} \times 100$$

3.2.2 การเตรียมสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต $CuSO_4$

ชั่งสารคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) ให้ได้น้ำหนัก 0.0191 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่น จะได้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตมีปริมาตร 15 มิลลิลิตร

3.2.3 การเตรียมเซรัมจากทางน้ำยางธรรมชาติ

เตรียมสารละลายแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ (Cationic polyacrylamide, C-PAM) ความเข้มข้น 0.5%W/V ปริมาตร 360 มิลลิลิตร ต่อมานำสารละลายที่ได้เติมลงใน ทางน้ำยางธรรมชาติปริมาตร 500 มิลลิลิตร กวนจนเนื้อยางจับก้อน จากนั้นนำมากรองด้วยผ้ากรองเพื่อแยกเนื้อยางออก

3.2.4 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Copper nanoparticles) ในเซรัมจากทางน้ำยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง

ผสมสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่เตรียมไว้ที่ความเข้มข้น 8 mM กับเซรัมจากทางน้ำยางที่ใช้เป็นรีดิวซิงเอเจนต์ จนได้สารละลายปริมาตร 11 mL ที่มีความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต เท่ากับ 0.1, 0.3, 1.2 และ 2.4 mM และความเข้มข้นของเซรัมจากทางน้ำยางเจือจางที่ไม่เจือจาง, 1:1, 1:2, 1:3 ในขณะที่กวนสารละลายด้วยแท่งแก้วที่อุณหภูมิห้อง โดยบันทึกที่ผสมสีของ

สารละลายจะเปลี่ยนจากสีฟ้าอ่อนเป็นสีน้ำตาลแดงที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ จากนั้นทั้งสารละลายไว้เป็นเวลา 0, 15, 30 และ 60 นาที และตรวจสอบอนุภาคนาโนทองแดงที่เกิดขึ้นโดย เครื่องวัดค่ากรดเบส (pH meters) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (conductivity meters) และเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Visible spectrophotometer) จากนั้นทำการเตรียมตัวอย่างในการตรวจสอบลักษณะ ทางสัญญาณวิทยาด้วยเครื่อง TEM

3.2.5 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบลักษณะทางสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)

ปิเปตสารละลายอนุภาคนาโนของทองแดงที่สังเคราะห์ได้ปริมาตร 1000 ไมโครลิตร ลงในหลอดเซนตริฟิวจ์ (Centrifuge tube) เติมน้ำกลั่นลงไปปริมาตร 500 ไมโครลิตร จากนั้นนำมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 13,500 รอบ/ นาที เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นทำการปิเปตของเหลวด้านบนออก ให้เหลือแค่ตะกอนของอนุภาคนาโนที่ต้องการเท่านั้น จากนั้นเติมเอทิลแอลกอฮอล์ปริมาตร 100 ไมโครลิตร แล้วเขย่าด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงอีกครั้งหนึ่ง ทำเช่นเดิมจนกระทั่งได้สารตัวอย่างเพื่อนำไปตรวจปริมาตร 200 ไมโครลิตร และนำมาเก็บในหลอดเซนตริฟิวจ์ที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อนำไปตรวจสอบลักษณะทาง สัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

3.2.6 การเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงบนผงพอลิเอทิลีน (PE), ผงพอลิโพรไพลีน (PP) และซิลิกาเจล

3.2.6.1 การเตรียมอนุภาคของแข็งผงพอลิเอทิลีน (PE), ผงพอลิโพรไพลีน (PP) และซิลิกาเจล

ชั่งอนุภาค PE, PP และซิลิกาหนัก 1 กรัมเติมน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร จากนั้นชั่ง สาร Dopamine hydrochloride 0.1 กรัมละลายในเอทานอล 10 มิลลิลิตรกวนให้เข้ากัน เติมน้ำ 3 มิลลิลิตร ทิ้งไว้นาน 24 ชั่วโมง ล้างด้วยเอทานอลและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง

3.2.6.2 การเคลือบอนุภาคผงพอลิเอทิลีน (PE), ผงพอลิโพรไพลีน (PP) และซิลิกาเจลแบบสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงขณะเคลือบและสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงก่อนเคลือบ

1) การเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงขณะเคลือบอนุภาคของแข็งโดยการนำเซรามิกจากทางน้ำยาปริมาตร 7.7 มิลลิลิตรเติมลงบนอนุภาค PE, PP และซิลิกาตามด้วยเติมสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตปริมาตร 3.3 มิลลิลิตร จากนั้นคนให้เข้ากันตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง, 6 ชั่วโมง, 12 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมงตามลำดับ

2) การเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงก่อนทำการเคลือบอนุภาคของแข็งโดยการนำเซรามิกจากทางน้ำยางปริมาตร 7.7 มิลลิลิตรตามด้วยเติมสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตปริมาตร 3.3 มิลลิลิตร จากนั้นเติมลงบนอนุภาค PE, PP และซิลิกา จากนั้นคนให้เข้ากันตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง 6 ชั่วโมง 12 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ

จากนั้นเมื่อครบกำหนดเวลาทำการกรองแยกกระหว่างสารละลายและอนุภาคของแข็ง แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำอนุภาคที่ผ่านการเคลือบส่งตรวจสอปลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscopy (SEM)

3.2.7 การทดสอบหาปริมาณของอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบติดอนุภาคของแข็ง PE, PP และซิลิกา

นำอนุภาคของแข็งที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทดสอบด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) จากนั้นวิเคราะห์เทียบหาปริมาณน้ำหนักของสารที่เคลือบโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุ อัตราความร้อน 20 องศาเซลเซียส/นาที จากอุณหภูมิ 100 - 1000 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศออกซิเจนและสังเกตน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไป

3.2.8 การทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

นำอนุภาคของแข็งที่ผ่านการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนทองแดงปริมาณ 0.5 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตรของสารละลายเมทิลีนบลูภายใต้การทดลองที่มีแสงอาทิตย์และแบบไม่มีแสงอาทิตย์ จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 30, 60, 120, และ 240 นาที ช่วงละ 100 ไมโครลิตร พร้อมกับการเติมน้ำกลั่น 900 ไมโครลิตร และ วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตรและเปรียบเทียบกับกราฟความเข้มข้นมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลู

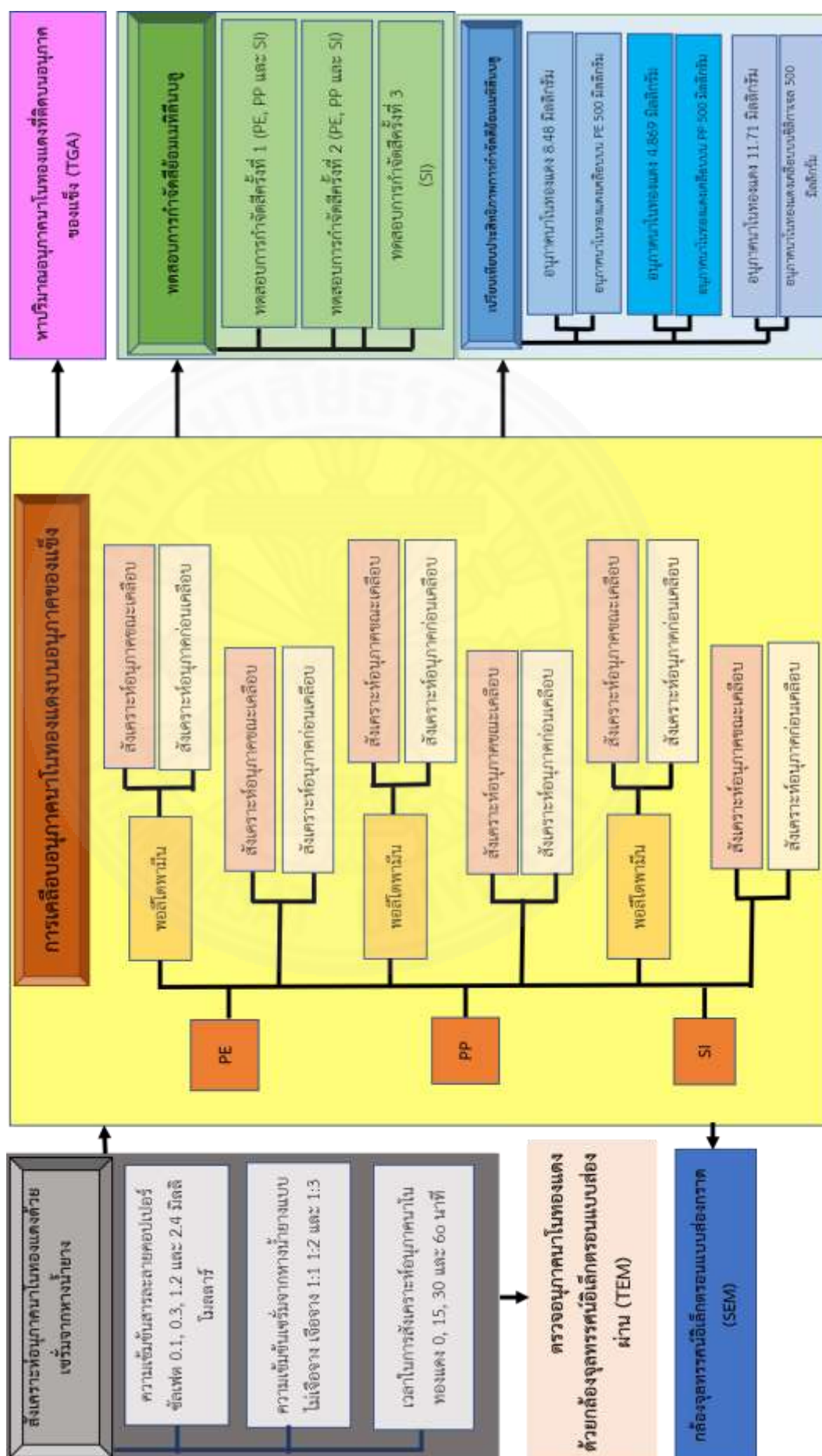
3.2.9 ทดสอบการนำอนุภาคนาโนทองแดงที่ผ่านการเคลือบบนอนุภาคของแข็ง PE, PP และซิลิกา ที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ซ้ำ

นำอนุภาคของแข็ง PE, PP และซิลิกาที่ผ่านการใช้งานแล้วทำการล้างน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตรจำนวน 2 ครั้งและนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง จากนั้นเติมสารละลายเมทิลีนบลู 10 มิลลิลิตร ภายใต้การทดลองที่มีแสงอาทิตย์ จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 30, 60, 120, และ 240 นาที ช่วงละ 100 ไมโครลิตร พร้อมกับการเติมน้ำกลั่น 900 ไมโครลิตร และ วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร

3.2.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูระหว่างอนุภาคนาโนทองแดงและอนุภาคนาโนทองแดงที่ผ่านการเคลือบอนุภาคของแข็ง PE, PP และ ซิลิกาเจล

ซังอนุภาค PE ที่ผ่านการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนทองแดงหนัก 500 มิลลิกรัม ซังอนุภาคนาโนทองแดงหนัก 8.48 มิลลิกรัม ซังอนุภาค PP ผ่านการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนทองแดงหนัก 500 มิลลิกรัม ซังอนุภาคนาโนทองแดงหนัก 4.869 มิลลิกรัม และซังซิลิกาหนัก 500 มิลลิกรัม ซังอนุภาคนาโนทองแดงหนัก 11.85 มิลลิกรัม จากนั้นเติมสารละลายเมทิลีนบลู 10 มิลลิลิตร ภายใต้การทดลองที่มีแสงอาทิตย์ จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 30, 60, 120, และ 240 นาที ช่วงละ 100 ไมโครลิตรพร้อมกับการเติมน้ำกลั่น 900 ไมโครลิตร และ วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร

3.2.11 ตารางสรุปรวมวิธีการ



บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้เซรามิกจากหางน้ำยางธรรมชาติเนื่องจากหางน้ำยางธรรมชาติมีสารอินทรีย์ต่างๆ ที่สามารถใช้ในการสังเคราะห์และควบคุมขนาดของอนุภาคได้ ซึ่งเป็นการลดการใช้สารเคมี และยังสามารถลดการใช้พลังงานได้เนื่อง จากการทำปฏิกิริยาสังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ยังมีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเซรามิกจากหางน้ำยาง จากนั้นยังสามารถนำอนุภาคนาโนทองแดงที่สังเคราะห์ได้มาทำการเคลือบติดบนอนุภาคของแข็งคือ ผงพอลิเอทิลีน (PE), ผงพอลิโพรไพลีน (PP) และซิลิกาเจล ที่ระยะเวลาต่างๆ จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู รวมถึงสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีก ทั้งยังเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอนุภาคนาโนทองแดงและการใช้อนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบบนอนุภาคของแข็ง PE, PP และซิลิกา

4.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง (Copper nanoparticles) ในเซรามิก หางน้ำยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง

ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต โดยใช้เซรามิก หางน้ำยาง (3.912 %DRC) ทำปฏิกิริยากับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 8 mM ที่เตรียมไว้นำมาเจือจางให้มีความเข้มข้นของ Cu^{2+} ในระบบเท่ากับ 0.1, 0.3, 1.2 และ 2.4 mM จนได้สารละลายปริมาตร 11 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง (27°C) ทันทีที่ผสม พบว่าสีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีฟ้าอ่อนเป็นสีน้ำตาลแดง ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่าเกิดอนุภาคนาโนทองแดงขึ้น (Kumar และ Upadhyay, 2016) จากนั้นทำการวัดความเป็นกรด – เบส (pH) และค่าการนำไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1

ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของเซรั่มจากหางน้ำยางธรรมชาติ ที่มีสัดส่วนการเจือจาง คือ ไม่เจือจาง, 1:1, 1:2 และ 1:3 เท่า

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

ตารางแสดงค่าการนำไฟฟ้าและค่าความเป็นกรด - เบส ของอนุภาคนาโนทองแดงจากเซรั่มของหางน้ำยางที่อัตราส่วนความเจือจางไม่เท่ากันคือ ไม่เจือจาง เจือจาง 1:1, 1:2 และ 1:3 เท่า ผลการวัดค่ากรด - เบสมีค่าลดลงเมื่อมีสัดส่วนการเจือจางมาก รวมถึงค่าการนำไฟฟ้าเป็นดัชนีวัดคุณภาพน้ำ โดยปกติสภาพน้ำไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ และคาดคะเนจำนวนสารประกอบไอออนิกที่ใช้ในการตกตะกอน (เขาวเลข ขยพัฒนางูรหทัยการ,2553) จากการวัดค่านำไฟฟ้าที่ได้ที่มีค่าลดลงตามสัดส่วนในการเจือจางที่มากขึ้น ที่มีค่าลดลงตามสัดส่วนในการเจือจางที่มากขึ้น

ตารางที่ 4.2

ค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของเซรั่มจากหางน้ำยางธรรมชาติ ที่มีที่ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตต่างกันคือ 0.1, 0.3, 1.2 และ 2.4 มิลลิโมลาร์

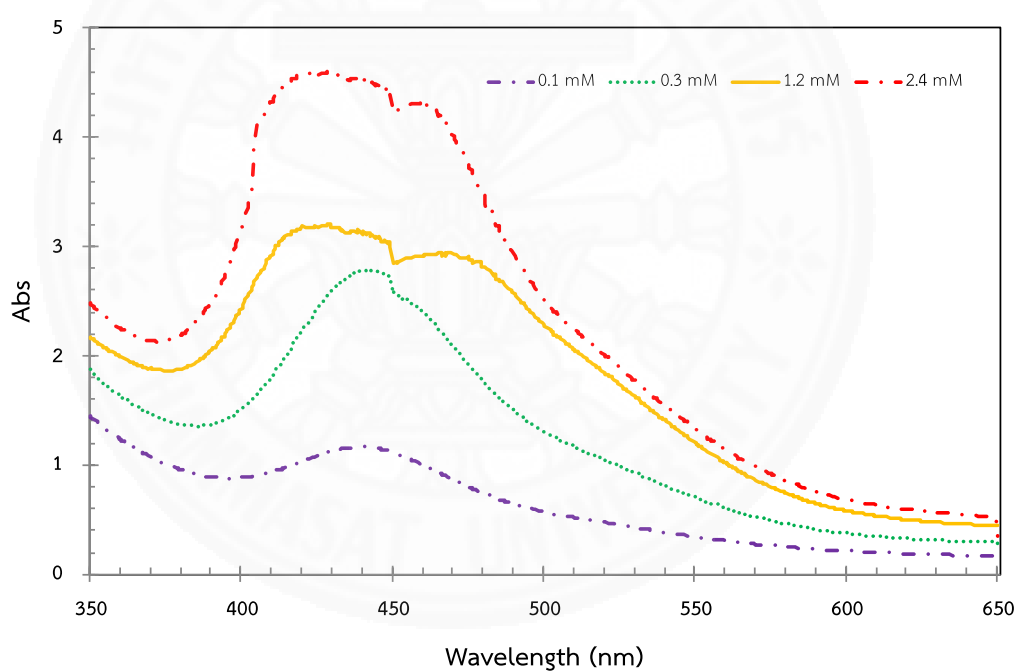
ความเข้มข้นของสารละลาย คอปเปอร์ซัลเฟต มิลลิโมลาร์)	ค่า pH	ค่าการนำไฟฟ้า (μS)
0.1	9.68	6890
0.3	9.67	6620
1.2	9.44	5500
2.4	9.41	5120

ตารางแสดงค่าการนำไฟฟ้าและค่าความเป็นกรด - เบส ของอนุภาคนาโนทองแดงจากเซรั่มของหางน้ำยางที่อัตราส่วนสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตปริมาณต่างกัน ผลการวัดค่ากรด - เบสมีค่าลดลงเมื่อสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเข้มข้นมาก รวมถึงค่าการนำไฟฟ้าที่มีค่าลดลงเมื่อสารละลายคอปเปอร์มีค่าความเข้มข้นที่มากขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงความเข้มข้นของ Cu^{2+} ใน ระบบเพิ่มขึ้นจะพบว่าสีของสารละลายหลังผสมที่ปริมาณความเข้มข้นของ Cu^{2+} ในระบบน้อย จะมีสีเหลืองใสแต่เมื่อความเข้มข้นของไอออนในระบบเพิ่มขึ้นสีของสารละลายจะมีสีน้ำตาลแดงมากขึ้น ดังภาพที่ 4.1(a)



(a)

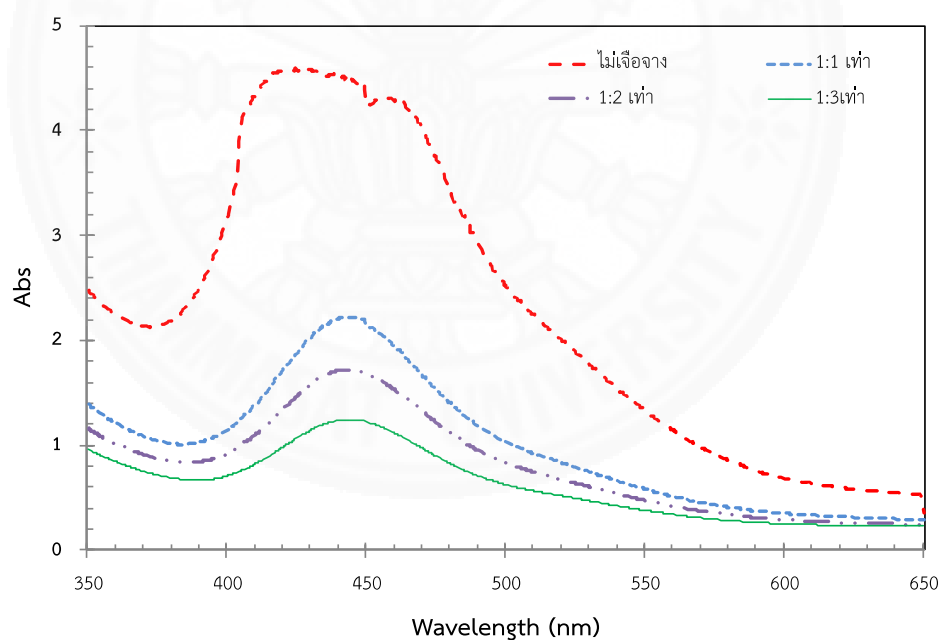


(b)

ภาพที่ 4.1 ผลการทดลองเมื่อความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่างกัน (a) การเทียบสีของสารละลายอนุภาคนาโนทองแดงที่ความเข้มข้นของสารละลายต่างกัน (b) พิกซ์ของค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองแดงที่ความเข้มข้นต่างกัน

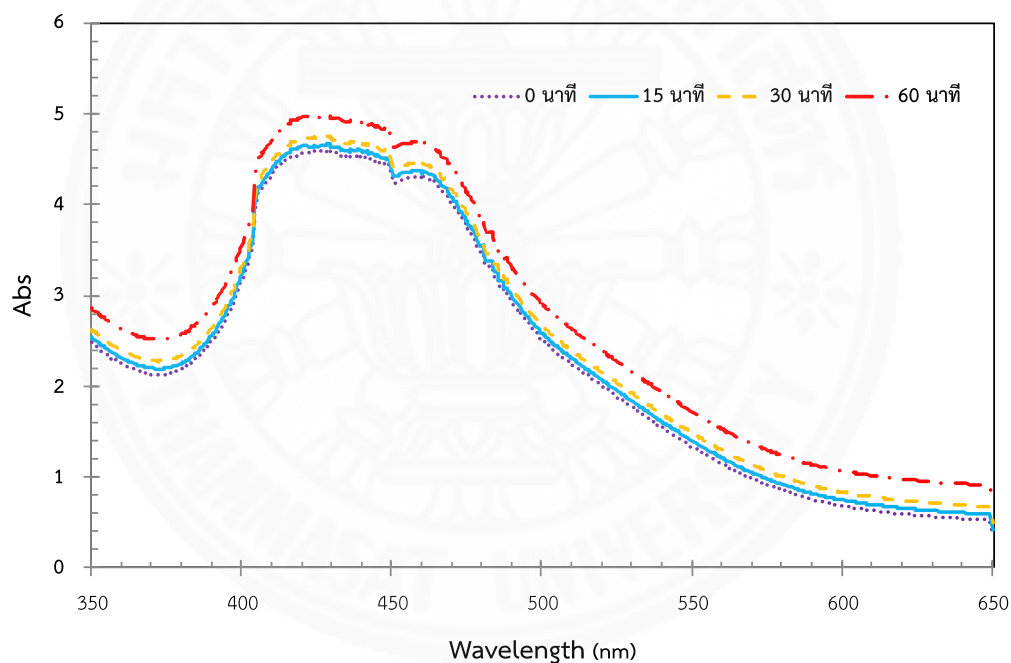
จากการตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง visible spectrophotometer ดังภาพที่ 4.1(b) พบว่ากราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองแดงจากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงจากเซรัมหางนํ้ายางผสมกับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.1, 0.3, 1.2 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ พบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตมากขึ้น โดยจากกราฟที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ มีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 420 - 450 นาโนเมตรมีแนวโน้มที่สูงที่สุดเป็นการบ่งชี้ว่าเกิดอนุภาคนาโนทองแดงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในระบบมีสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตมากขึ้นเพื่อที่จะไปเกิดปฏิกิริยาเป็นอนุภาคนาโนทองแดงมากขึ้น จะทำให้เกิดอนุภาคนาโนขนาดเล็กปริมาณมาก ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการดูดกลืนแสง

เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยเรื่องความเข้มข้นของเซรัมจากหางนํ้ายางที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยแบ่งเป็นเซรัมที่ไม่ผ่านการเจือจาง เซรัมที่ผ่านการเจือจาง 1:1 1:2 และ 1:3 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ผลการทดลองแสดงพีคของค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองแดงที่ความเข้มข้นของเซรัมจากหางนํ้ายางต่างกัน

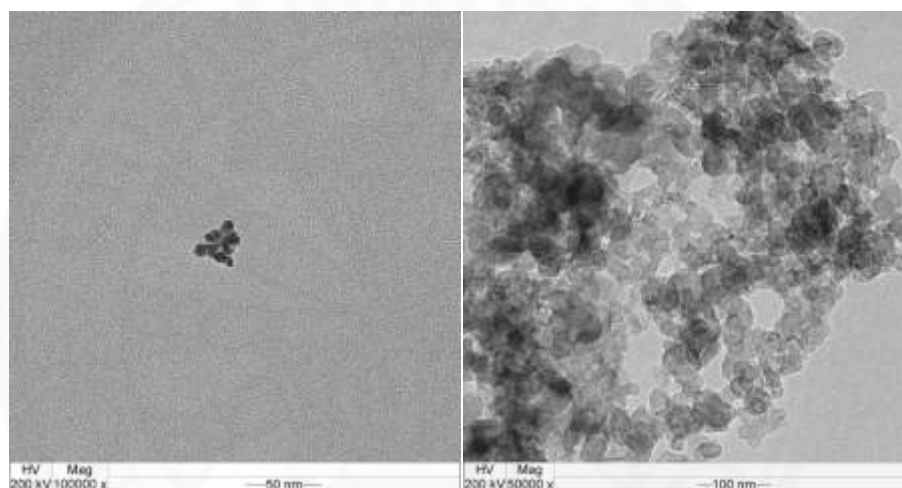
เมื่อใช้ความเข้มข้นของเซรัมจากหางน้ำยางไม่เท่ากัน โดยการเจือจางของเซรัมจากหางน้ำยางแบบไม่เจือจาง เจือจาง 1:1 1:2 และ 1:3 เท่า จากค่าการดูดกลืนแสงที่สัดส่วนการเจือจางเซรัมมาก พิกค่าการดูดกลืนแสงจะต่ำลงและมากขึ้นเมื่อสัดส่วนการเจือจางน้อยลง จากค่าการดูดกลืนแสงพิกของเซรัมที่ไม่เจือจางให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุดในช่วง 400-450 นาโนเมตร บ่งชี้ว่าเกิดอนุภาคนาโนทองแดงมากที่การเลือกใช้เซรัมแบบไม่เจือจาง เนื่องจากเซรัมของหางน้ำยางแบบไม่เจือจางมีสารอินทรีย์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาได้มากจึงเกิดอนุภาคนาโนทองแดงได้มาก เมื่อได้ค่าความเข้มข้นของเซรัมจากหางน้ำยางแบบไม่เจือจางและค่าความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตแล้วจึงทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงโดยพิจารณาเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันคือ 0, 15, 30 และ 60 นาที ผลการทดลองดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ผลการทดลองแสดงพิกของค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองแดงที่ความเข้มข้นของเซรัมจากหางน้ำยางต่างกัน

จากการตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง visible spectrophotometer ดังภาพที่ 4.3 พบว่ากราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองแดงจากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงจากเซรัมหางน้ำยางแบบไม่เจือจางผสมกับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ พบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยานานขึ้น โดยจากกราฟที่เวลา 60 นาที มีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 400 - 450 นาโนเมตร

จากการศึกษาปัจจัยดังกล่าวพบว่าความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ส่งผลต่อปริมาณและขนาดของอนุภาคนาโนทองแดงที่ได้ โดยการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดง ในเซรั่มจากหางน้ำยางที่อุณหภูมิห้อง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 2.4 mM เกิดอนุภาคนาโนทองแดงขนาด 5 – 10 นาโนเมตรในการสังเคราะห์ทำให้เกิดอนุภาคนาโนขนาดเล็กที่สุดและปริมาณมากที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 2.4 mM ในการทดสอบด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเพื่อตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคของนาโนทองแดงที่สังเคราะห์ได้และทดลองเคลือบอนุภาคของแข็ง ในตอนต่อไป



ภาพที่ 4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ CuNPs ที่ความเข้มข้น CuSO_4 2.4 mmol

4.2 การวัดขนาดอนุภาคของผงพอลิเอทิลีน (PE), ผงพอลิโพรไพลีน (PP) และซิลิกาเจล

เมื่อตรวจลักษณะอนุภาคของแข็งด้วยกล้องสเตอริโอไมโครสโคป เพื่อตรวจสอบลักษณะอนุภาคและทำการวัดขนาดอนุภาคของแข็ง จะได้ลักษณะผงพอลิเอทิลีนดังภาพที่ 4.5

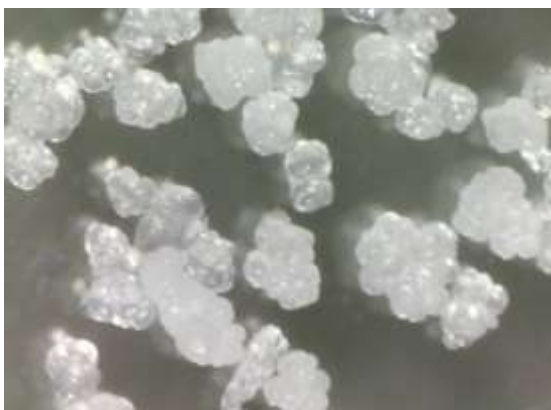


(a)



(b)

ภาพที่ 4.5 ลักษณะผงพอลิเอทิลีนโดย (a) ผงพอลิเอทิลีนก่อนทำการเคลือบอนุภาค (b) ผงพอลิเอทิลีนที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง (a) แสดงลักษณะผงพอลิเอทิลีนขนาดเล็กกระจายตัวผงมีสีใส ภาพ (b) แสดงลักษณะผงพอลิเอทิลีนที่ผ่านการเคลือบอนุภาคพอลิโดพามีนก่อนทำการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมงลักษณะผงจะมีสีน้ำตาลเข้มขึ้นแสดงว่ามีอนุภาคนาโนทองแดงติดอยู่ที่ผงพอลิเอทิลีน



(a)



(b)

ภาพที่ 4.6 ลักษณะผงพอลิโพรไพลีนโดย (a) ผงพอลิโพรไพลีนก่อนทำการเคลือบอนุภาค (b) ผงพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง (a) แสดงลักษณะผงพอลิโพรไพลีนขนาดเล็กกระจายตัวผงมีสีขาว ภาพ (b) แสดงลักษณะผงพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการเคลือบอนุภาคพอลิโดพามีนก่อนทำการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมงลักษณะผงจะมีสีน้ำตาลเข้มขึ้นแสดงว่ามีอนุภาคนาโนทองแดงติดอยู่ที่ผงพอลิโพรไพลีน



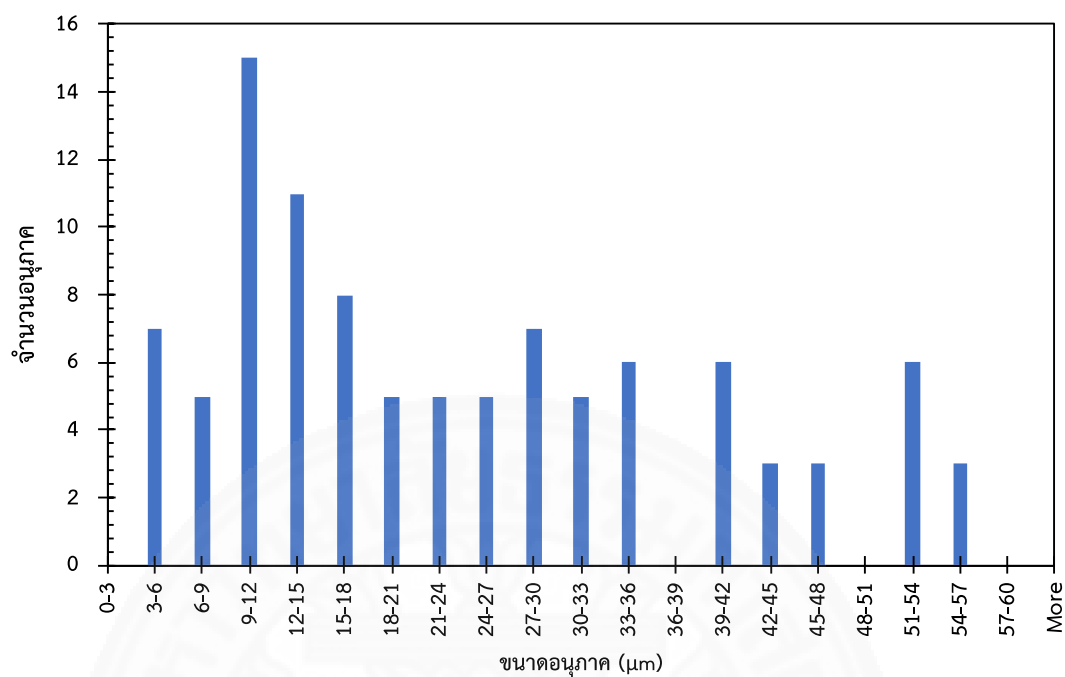
(a)



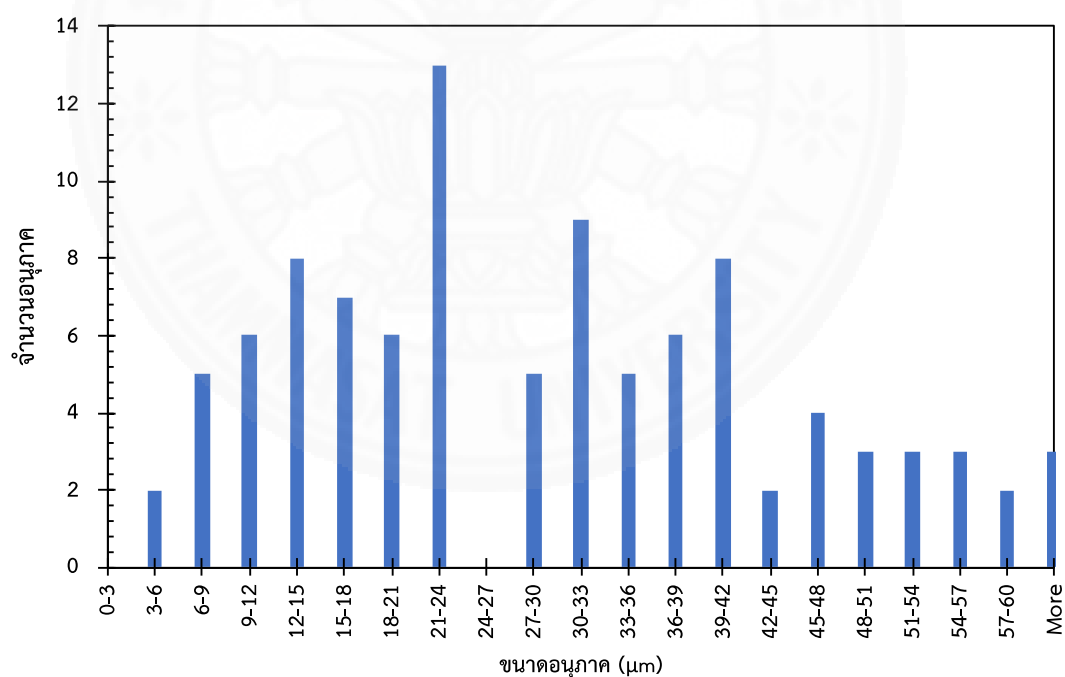
(b)

ภาพที่ 4.7 ลักษณะซิลิกาเจล (a) ซิลิกาเจลก่อนทำการเคลือบอนุภาค (b) ซิลิกาเจลที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง (a) แสดงลักษณะซิลิกาเจลขนาดเล็กมีลักษณะใส ภาพ (b) แสดงลักษณะซิลิกาเจลที่ผ่านการเคลือบอนุภาคพอลิโดพามีนก่อนทำการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมงลักษณะจะมีสีน้ำตาลเข้มขึ้นแสดงว่ามีอนุภาคนาโนทองแดงติดอยู่ที่อนุภาคซิลิกาเจล

มีการวัดขนาดอนุภาคของแข็งเมื่อทำการพล็อตกราฟเพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคพอลิเอทิลีน (PE) พบว่า ขนาดการกระจายตัวกันในด้านส่วนกว้าง ประมาณ 6-8 ไมโครเมตร ด้านยาวกระจายตัวอยู่ช่วงประมาณ 14-16 ไมโครเมตรดังภาพที่ 4.8 อนุภาคพอลิโพรไพลีน (PP) พบว่า ขนาดการกระจายตัวกันในช่วง ประมาณ 16-18 ไมโครเมตรดังภาพที่ 4.9 และอนุภาคซิลิกาเจล พบว่า ขนาดการกระจายตัวกันในด้านส่วนกว้าง ประมาณ 24-26 ไมโครเมตร ด้านยาวกระจายตัวอยู่ช่วงประมาณ 26-28 ไมโครเมตร ดังภาพที่ 4.10

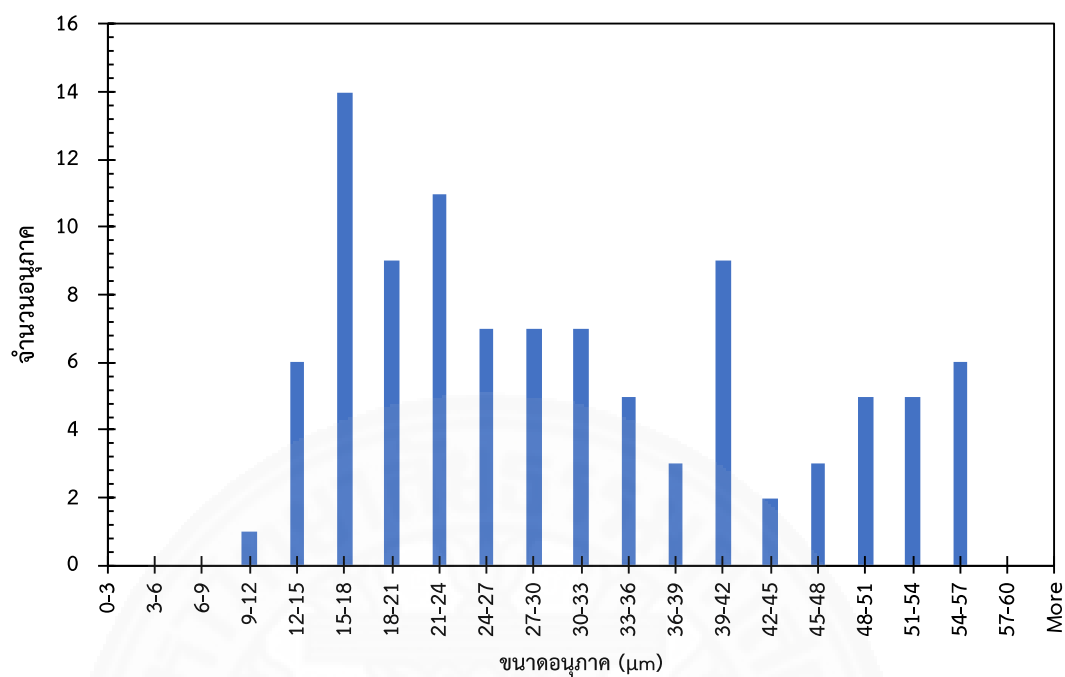


(a)

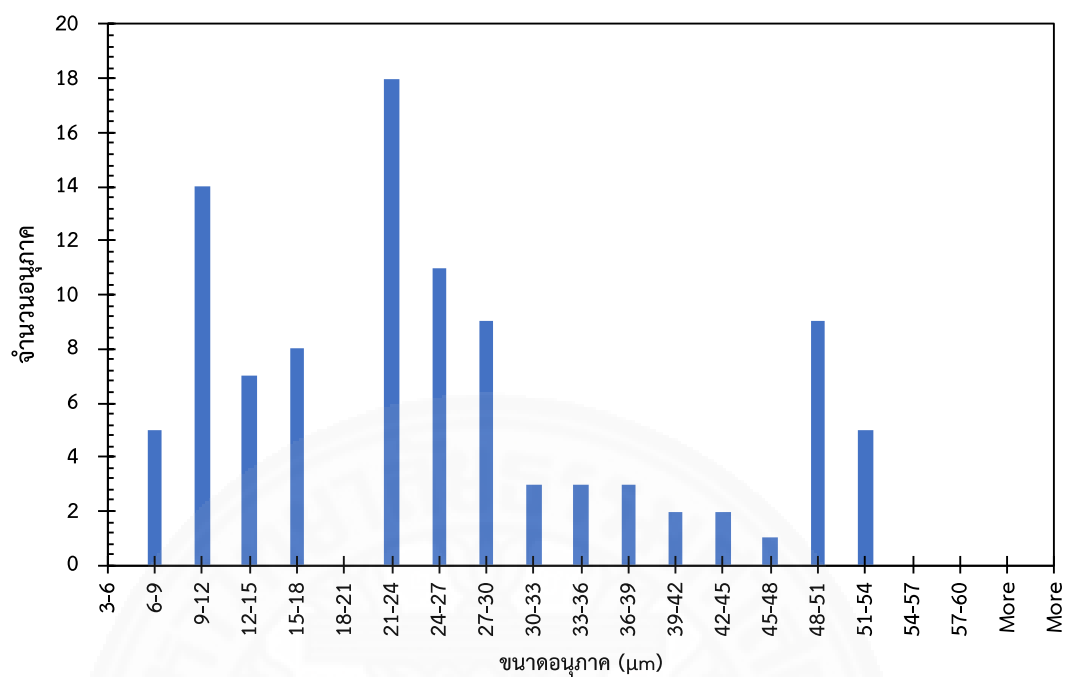


(b)

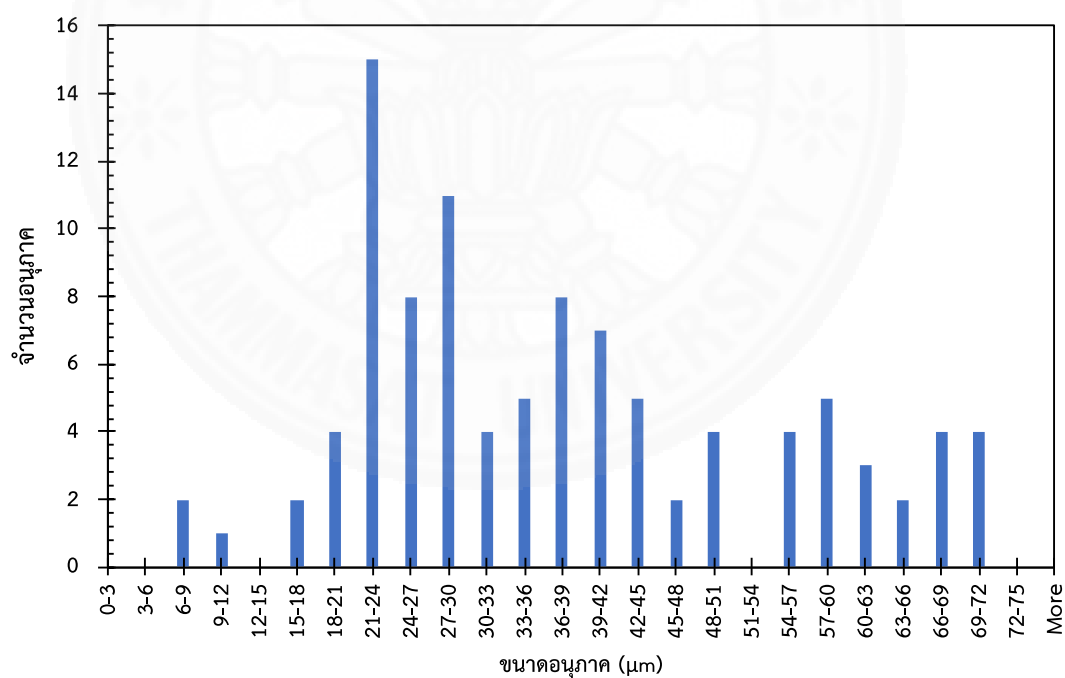
ภาพที่ 4.8 การกระจายตัวจากการสุ่ม 100 ตัวอย่างของผงพอลิเอทิลีน (PE) โดย (a) แสดงค่าด้านกว้างของอนุภาค (b) แสดงค่าด้านยาวของอนุภาค



ภาพที่ 4.9 การกระจายตัวจากการสุ่ม 100 ตัวอย่างของผงพอลิโพรไพลีน (PP) โดยการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผงพอลิโพรไพลีน (PP)



(a)

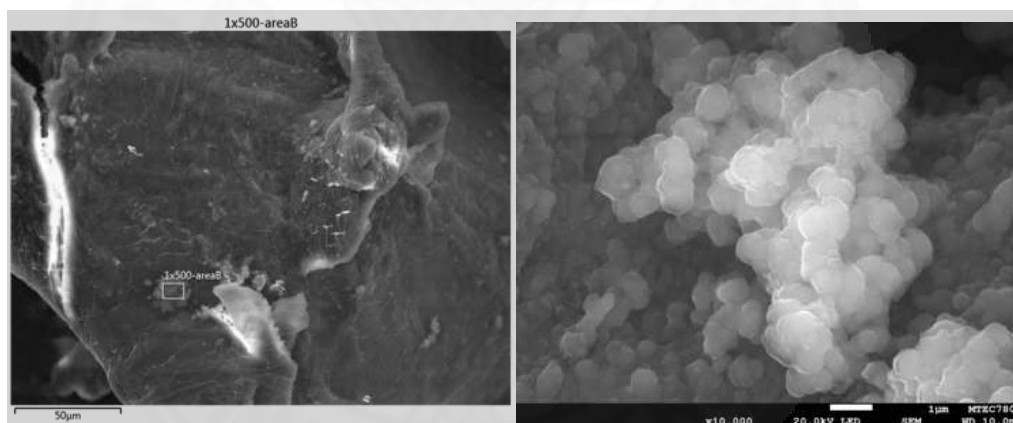


(b)

ภาพที่ 4.10 การกระจายตัวจากการสุ่ม 100 ตัวอย่างของอนุภาคซิลิกาเจล โดย (a) แสดงค่าด้านกว้างของอนุภาค (b) แสดงค่าด้านยาวของอนุภาค

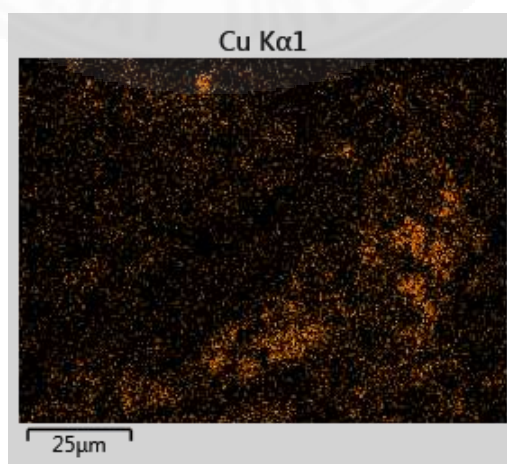
4.3 การเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงบนผงพอลิเอทิลีน (PE), ผงพอลิโพรไพลีน (PP) และซิลิกาเจล

ในการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงบนอนุภาคของแข็ง (PE), (PP) และซิลิกาเจล จากการทดลองเบื้องต้นเพื่อเลือกความเข้มข้นที่ดีที่สุดที่จะใช้ในการเคลือบอนุภาคคือความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ จึงมีการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาในการเคลือบอนุภาคว่ามีการยึดติดของอนุภาคที่ทำการเคลือบหรือไม่ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Scanning Electron Microscope:SEM) เพื่อสังเกตผิวอนุภาคตัวอย่าง และใช้เทคนิค Energy Dispersiv Spectrometry (EDS) เพื่อให้ข้อมูลด้านองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่าง (दनัย กิจชนกุล) และ EDS เพื่อตรวจสอบว่าอนุภาคนาโนที่ยึดติดกับอนุภาคของแข็งที่ทำการเคลือบคืออนุภาคนาโนทองแดงหรือไม่ ดังภาพที่ 4.8

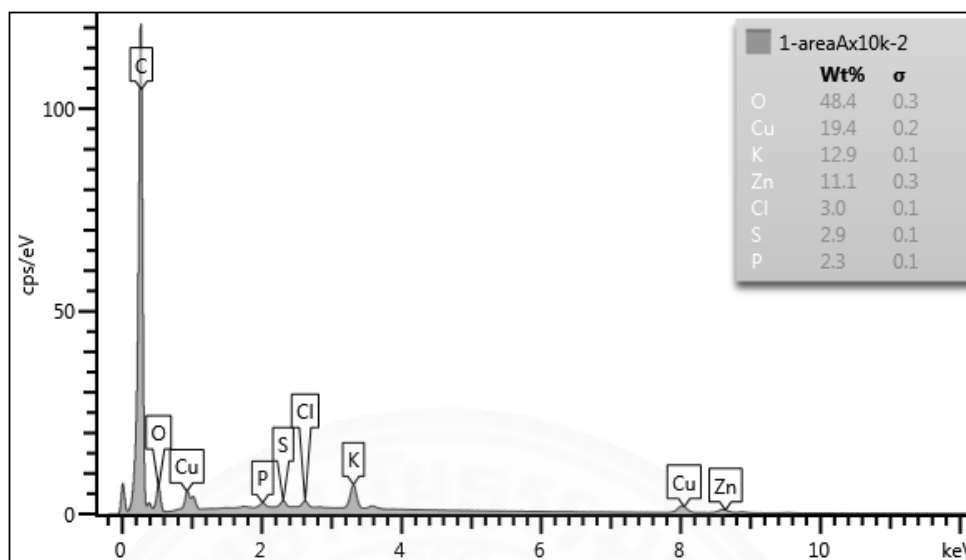


(a)

(b)



(c)

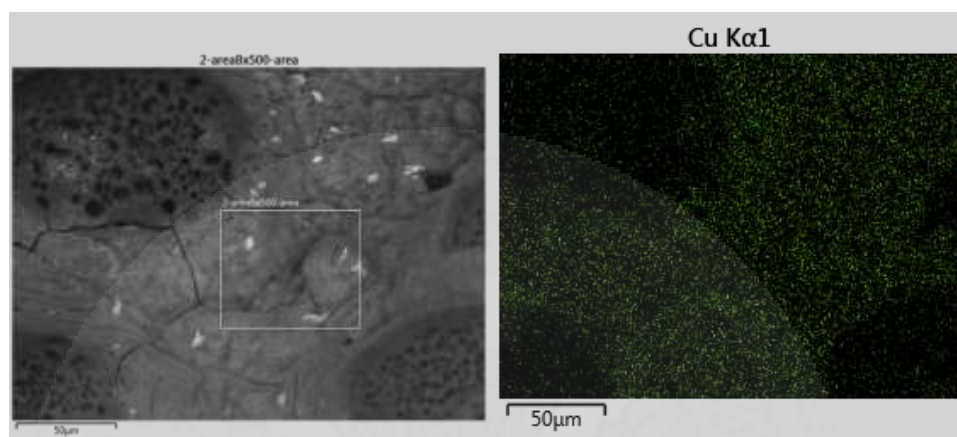


(d)

ภาพที่ 4.11 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบบนอนุภาคของ PE ที่ผ่านการเคลือบด้วยโพลีโดพามีนและอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง (a) แสดงลักษณะพื้นผิวของอนุภาค PE (b) แสดงอนุภาคนาโนทองแดงที่ติดบนพื้นผิว PE (c) การวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพแสดงถึงการพบ Cu ที่พื้นผิวอนุภาค PE (d) การทำ EDS แสดงปริมาณ Cu ที่พบบริเวณพื้นผิวของอนุภาค PE ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง

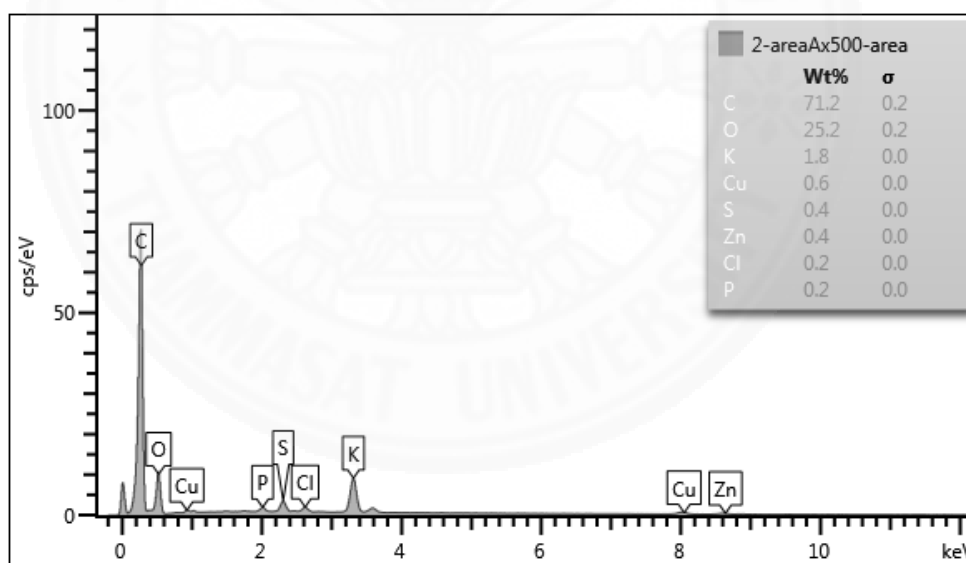
ภาพ (a) แสดงภาพการวิเคราะห์ด้วย SEM เห็นลักษณะพื้นผิวภายนอกของอนุภาค PE เป็นการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นที่กำลังขยาย 500 เท่า เพื่อตรวจสอบความเป็นเนื้อเดียวกันของอนุภาค PE พบว่ามีอนุภาคลีขาวเป็นกลุ่มกระจายตัวอยู่ดังภาพจึงทำการวิเคราะห์ต่อด้วย EDS เพื่อวิเคราะห์ปริมาณว่าบริเวณสีขาวที่พบคือธาตุอะไร (b) แสดงการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพแสดงถึงการพบ Cu ที่พื้นผิวอนุภาค PE โดยการทำการ mapping วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (เทคนิคการวิเคราะห์เฟสของวัสดุเชิงคุณภาพด้วยเครื่อง EDS, EDX, 2556) เป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพทำให้ทราบว่าธาตุทองแดงเป็นองค์ประกอบและวิเคราะห์ต่อด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ EDS/EDX เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุในอนุภาค PE พบว่าเป็นอนุภาคนาโนทองแดงติดอยู่ที่อนุภาคของ PE CuK 1 คือคอปเปอร์ K คือ K shell ส่วน 1 คือค่า Cps.(count per second) ซึ่งหมายถึง X-ray ของ Cu 1 ตัววิ่งมาชนหน้า EDS/EDX Detector จำนวนทั้งหมด 1 x-ray/วินาที ดังภาพ (C) มีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนทองแดงอยู่พื้นผิวของอนุภาค PE ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในเชิงปริมาณ

พบว่าอนุภาคประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน ออกซิเจน 48.4% และทองแดง 19.4% สันนิษฐานว่าในระหว่างการสังเคราะห์ทองแดงมีการสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ทำให้สังเคราะห์ได้ทองแดงออกไซด์ และพบธาตุคาร์บอนในปริมาณมากเนื่องจากไฮโดรคาร์บอนจากผงพลาสติก PE และในส่วนที่อาจหลงเหลือในเซิร์มจากทางน้ำยางธรรมชาติรวมถึงมาจากฟิล์มเคลือบบนแผ่นรองรับตัวอย่างด้วย



(a)

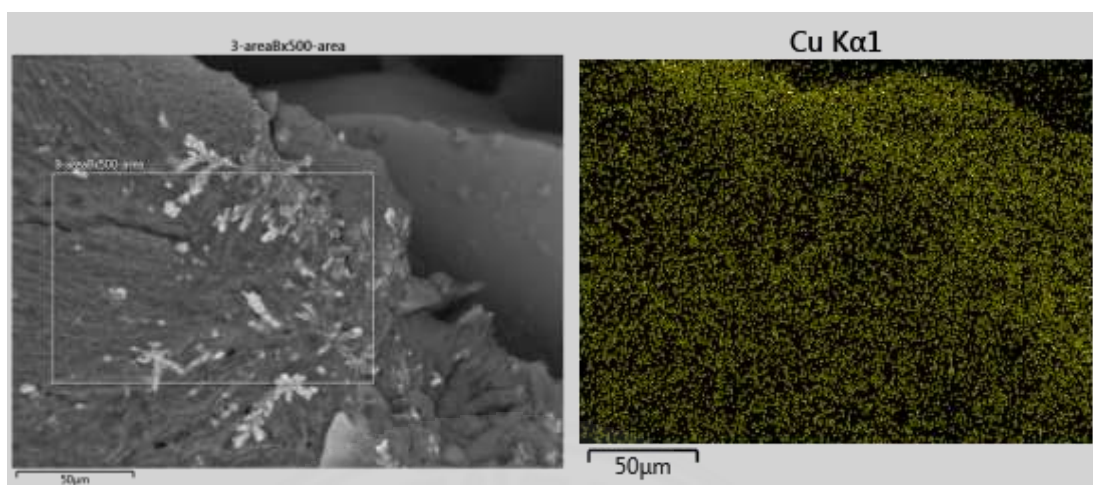
(b)



(c)

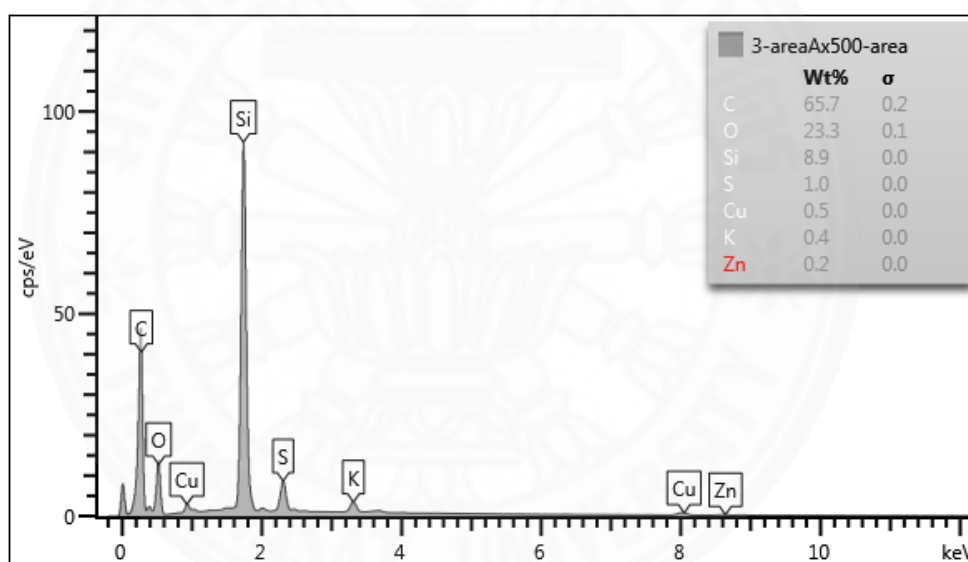
ภาพที่ 4.12 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบบนอนุภาคของ PP ที่ผ่านการเคลือบด้วยโพลีโดพามีนและอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง โดย (a) แสดงลักษณะพื้นผิวของอนุภาค PP (b) แสดงถึงการพบ Cu ที่พื้นผิวอนุภาค PP (c) มีการทำ EDS แสดงปริมาณ Cu ที่พบบริเวณพื้นผิวของอนุภาค PP ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง

ภาพ (a) แสดงภาพการวิเคราะห์ด้วย SEM เห็นลักษณะพื้นผิวภายนอกของอนุภาค PP เป็นการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นที่กำลังขยาย 500 เท่า เพื่อตรวจสอบความเป็นเนื้อเดียวกันของอนุภาค PP พบว่ามีอนุภาคสีขาวเป็นกลุ่มกระจายตัวแต่น้อยปริมาณน้อยกว่าที่พบบนอนุภาค PE ดังภาพ การวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพแสดงถึงการพบ Cu ที่พื้นผิวอนุภาค PP ทำให้ทราบว่ามีการเติมทองแดงเป็นองค์ประกอบและวิเคราะห์ต่อด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุในอนุภาค PE พบว่าเป็นอนุภาคนาโนทองแดงติดอยู่ที่อนุภาคของ PP ดังภาพ (b) มีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนทองแดงอยู่พื้นผิวของอนุภาค PP ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในเชิงปริมาณ พบว่าอนุภาคประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน 71.2 % ออกซิเจน 25 % และทองแดง 0.6 % พบปริมาณทองแดงบนอนุภาค PP น้อยกว่าที่พบบนอนุภาค PE



(a)

(b)



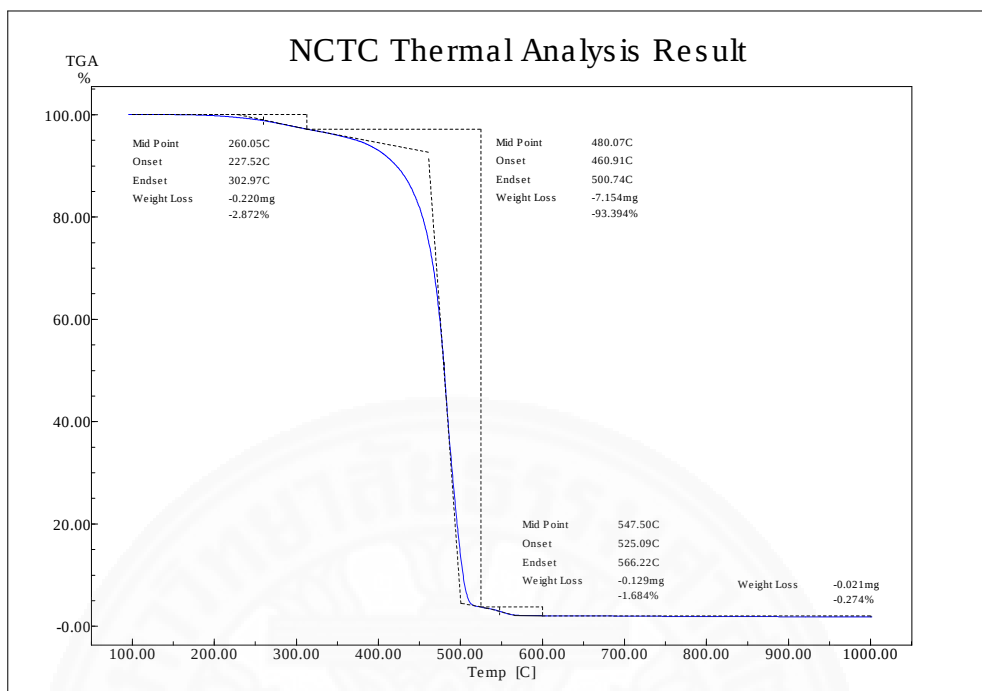
(c)

ภาพที่ 4.13 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบบนอนุภาคของซิลิกาที่ผ่านการเคลือบด้วยโพลีโดพามีนและอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง โดย (a) แสดงลักษณะพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา (b) แสดงถึงการพบ Cu ที่พื้นผิวอนุภาคซิลิกา (c) มีการทำ EDS แสดงปริมาณ Cu ที่พบบริเวณพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง

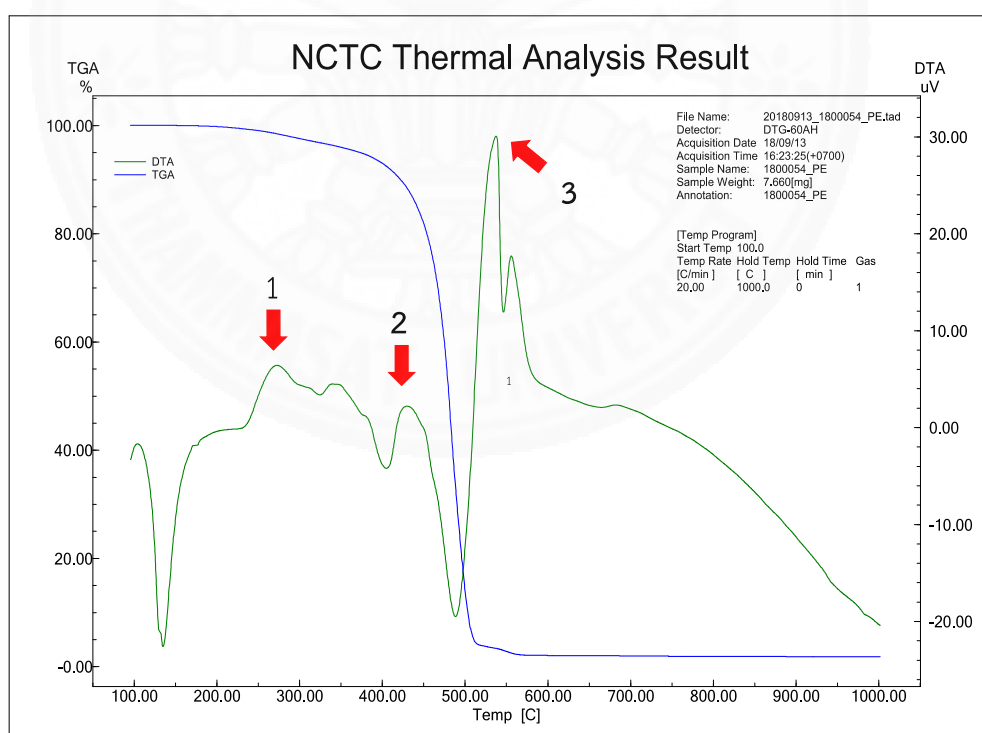
ภาพ (a) แสดงภาพการวิเคราะห์ด้วย SEM เห็นลักษณะพื้นผิวภายนอกของอนุภาคซิลิกาเจล เป็นการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นที่กำลังขยาย 500 เท่า เพื่อตรวจสอบลักษณะของอนุภาคซิลิกาเจล พบว่ามีอนุภาคสีขาวมีลักษณะเป็นเกล็ดผลึกใหญ่กว่าอนุภาค PE และ PP เนื่องจากอนุภาคของซิลิกาเจลเองมีคุณสมบัติเป็นรูพรุนจึงมีการกระจายตัวดังภาพ การวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพแสดงถึงการพบ Cu ที่พื้นผิวอนุภาคซิลิกาเจล ทำให้ทราบว่ามีการทอแดงเป็นองค์ประกอบและวิเคราะห์ต่อด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุในอนุภาคซิลิกาเจล พบว่าเป็นอนุภาคนาโนทอแดงติดอยู่ที่อนุภาคของซิลิกาเจล ดังภาพ (b) มีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนทอแดงอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาเจล ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทอแดงนาน 12 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในเชิงปริมาณ พบว่าอนุภาคประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน 65.7 % ออกซิเจน 23.3 % ทอแดง 0.5 % และ ซิลิกา 8.9 % จากอนุภาคของซิลิกาเจลเอง

4.4 การทดสอบหาปริมาณของอนุภาคนาโนทอแดงที่เคลือบติดอนุภาคของแข็ง PE, PP และซิลิกาเจล

จากผลการเคลือบอนุภาคนาโนทอแดงบนอนุภาคของผงพอลิเอทิลีน (PE), ผงพอลิโพรไพลีน (PP) และซิลิกาเจล จึงมีการทดสอบหาปริมาณอนุภาคนาโนทอแดงที่ติดบนอนุภาคของแข็งดังจึงทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียดสูง การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA เป็นผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงมวลระหว่างน้ำหนัก (mg) และอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ในการศึกษาที่เปลี่ยนแปลงมวลและเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวอย่างที่หายไป ดังกราฟที่แสดง



(a)



(b)

ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงค่าความเปลี่ยนแปลงของอนุภาค PE (a) แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่หายไป (b) DTA แสดงพีคที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง

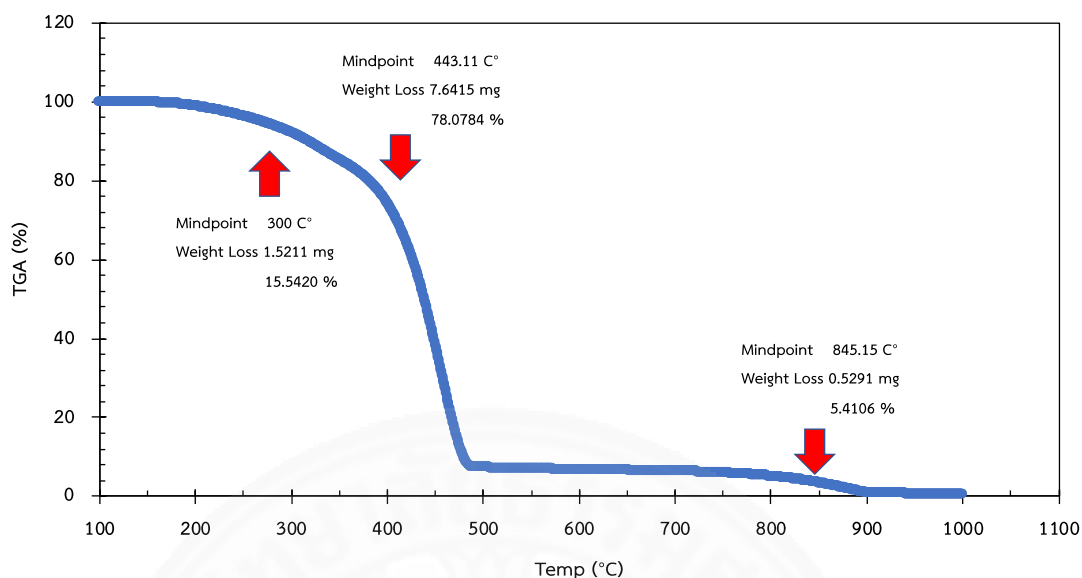
จากกราฟ (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวลที่เหลือจากการสลายตัวทางความร้อน (Residual weight, %) กับอุณหภูมิของสาร ที่อัตราการให้ความร้อน $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จะเห็นได้ว่าลักษณะเส้นกราฟมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากตัวอย่างได้รับความร้อนและมีการสลายตัวทางความร้อนทำให้สูญเสียมวลของชิ้นงาน ส่งผลให้มวลที่เหลือจากการสลายตัวทางความร้อนลดลง จากกราฟเมื่อพิจารณาอุณหภูมิ การสลายตัวทางความร้อนที่น้ำหนักของชิ้นงานหายไป 2.872% (0.220 mg) ของวัสดุโพลีโดพามีนประมาณ 260°C ลำดับถัดมาเป็นการสลายตัวของอนุภาค PE 93.39% (7.154 mg) ในช่วงอุณหภูมิที่ 480°C ลำดับสุดท้ายเป็นการสลายตัวของ PAM 0.274% (0.129 mg) ในช่วงอุณหภูมิที่ 550°C คิดเป็นน้ำหนักของนาโนทองแดงที่ติดอยู่ที่อนุภาค PE เท่ากับ 0.136 มิลลิกรัมจากน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นที่ 7.660 มิลลิกรัม

กราฟ (b) การทำ DTA (Differential Thermal Analysis) เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาปริมาณความร้อน และการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ โดยอนุภาคจะถูกให้ความร้อน จากนั้นสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในตัวอย่างจะถูกตรวจวัด และแปลผลเพื่อให้ทราบถึงขั้นตอนการสลายตัวทางความร้อนอย่างชัดเจนจึงได้ทำการแยกขั้นตอนการสลายตัวทางความร้อนที่ PE คือ Peak 1, Peak 2 และ Peak 3 มี อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนคือ 260 , 480 และ 550°C ตามลำดับ ดังนั้นจากข้อมูลอุณหภูมิตรงตำแหน่งพีคสามารถวิเคราะห์โครงสร้างการสลายตัวทางความร้อนของ PE โดยเมื่อพีคขึ้นสูงหมายถึงอุณหภูมิค่อยๆ เพิ่มขึ้นและคายพลังงานออกมาในเฟสนั้นๆ และเมื่อเกิดพีคใหม่ก็จะมีการดูดพลังงานความร้อนเพื่อไปสลายพันธะเพิ่มเป็นพีคใหม่อีกครั้ง ดังต่อไปนี้

Peak 1 การสลายตัวของ โพลีโดพามีน ที่อุณหภูมิประมาณ 260°C

Peak 2 การสลายตัวของ พอลิเอทิลีน ที่อุณหภูมิประมาณ 480°C

Peak 3 การสลายตัวของ PAM ที่อุณหภูมิ ประมาณ 550°C



ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงค่าความเปลี่ยนแปลงของอนุภาค PP (a) แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่หายไป

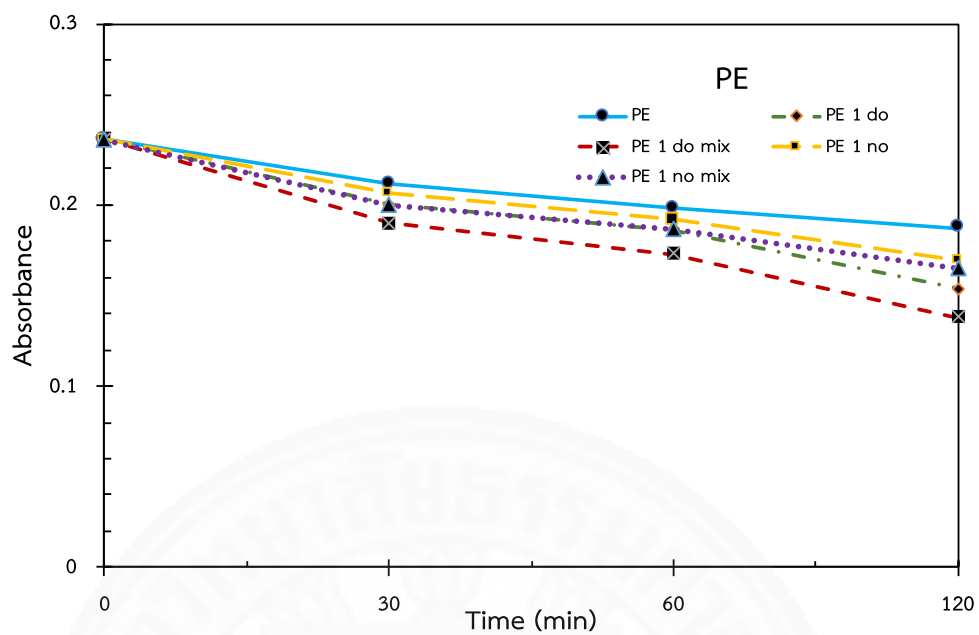
จากกราฟ (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวลที่เหลือจากการสลายตัวทางความร้อน (Residual weight, %) กับอุณหภูมิของสาร ที่อัตราการให้ความร้อน $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จะเห็นได้ว่าลักษณะเส้นกราฟมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากชิ้นงานได้รับความร้อนและมีการสลายตัวทางความร้อนทำให้สูญเสียมวลของชิ้นงาน ส่งผลให้มวลที่เหลือจากการสลายตัวทางความร้อนลดลง จากกราฟเมื่อพิจารณาอุณหภูมิ การสลายตัวทางความร้อนที่น้ำหนักของชิ้นงานหายไป 15.542 % (1.5211 mg) ของวัสดุโพลีโพรพีนประมาณ 300°C ลำดับถัดมาเป็นการสลายตัวของอนุภาค PP 78.08 % (7.6415 mg) ในช่วงอุณหภูมิที่ 443.11°C ลำดับสุดท้ายเป็นการสลายตัวของ PAM 5.406 % (0.5291 mg) ในช่วงอุณหภูมิที่ 845.15°C คิดเป็นน้ำหนักของนาโนทองแดงที่ติดอยู่ที่อนุภาค PP เท่ากับ 0.0953 มิลลิกรัมจากน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นคือ 9.7870 มิลลิกรัม

เนื่องจากอนุภาคของซิลิกาเจลมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่าอุณหภูมิ 1100°C องศาเซลเซียส จึงเป็นข้อจำกัด ทำให้ไม่สามารถหาปริมาณอนุภาคนาโนทองแดงที่ติดกับอนุภาคของซิลิกาด้วยเครื่อง TGA ได้ จึงทำการชั่งน้ำหนักของอนุภาคซิลิกาก่อนทำการเคลือบโดยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งคือ 1000.5 มิลลิกรัม จากนั้นชั่งน้ำหนักอนุภาคเป็นครั้งที่ 2 เมื่อซิลิกาผ่านการเคลือบด้วยอนุภาคโพรพีนแล้วคือ 1001.3 มิลลิกรัมและทำการชั่งครั้งสุดท้ายเมื่อนำอนุภาคนาโนทองแดงเคลือบบนอนุภาคของซิลิกาเจลคือ 1024.7 จากนั้นนำค่าที่ได้มาลบกันจึงจะสามารถหาค่าอนุภาคนาโนทองแดงที่ติดบนอนุภาคของซิลิกาเจลได้คือ 23.4 มิลลิกรัม เมื่อนำคิดที่ 0.5 mg เท่ากับอนุภาคนาโนทองแดงคือ 11.85 mg

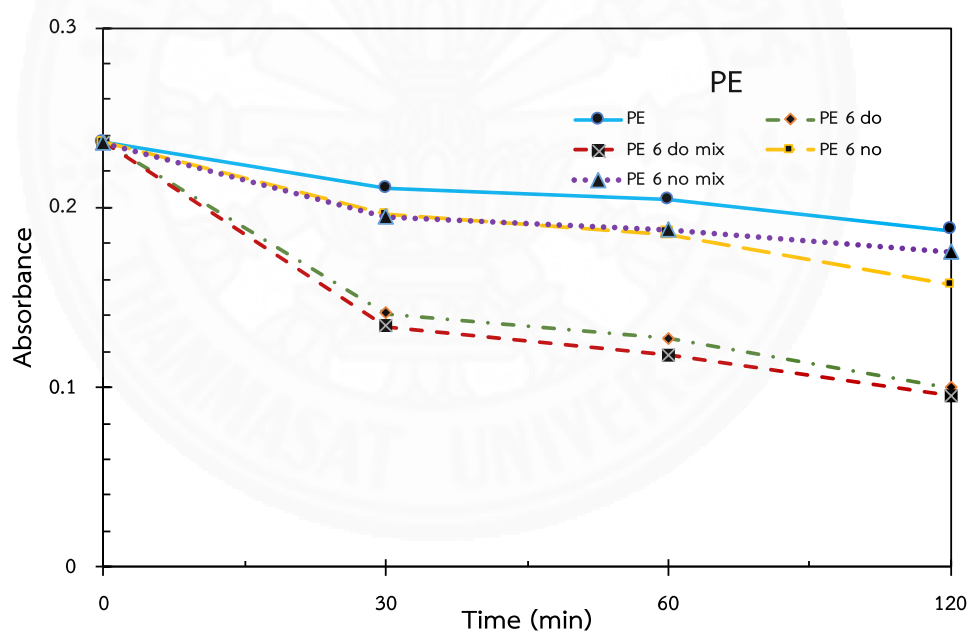
4.5 การทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

จากการเคลือบผงพอลิเอทิลีน (PE), ผงพอลิโพรไพลีน (PP) และซิลิกาเจลด้วยอนุภาคนาโนทองแดงด้วยวิธีและระยะเวลาที่ต่างกันคือวิธีการปรับสภาพพื้นผิวของผงพอลิเอทิลีน (PE) และผงพอลิโพรไพลีน (PP) ด้วยสารโพลีโดพามีนเปรียบเทียบกับผงพอลิเอทิลีน (PE) และ ผงพอลิโพรไพลีน (PP) ที่ไม่ผ่านการเคลือบด้วยอนุภาคโพลีโดพามีนก่อนทำการเคลือบอนุภาคและรูปแบบการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงก่อนทำการเคลือบและอนุภาคนาโนทองแดงขณะเคลือบอนุภาคที่ระยะเวลา 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง โดยความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้คือ หางน้ำยางแบบไม่เจือจางและสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์

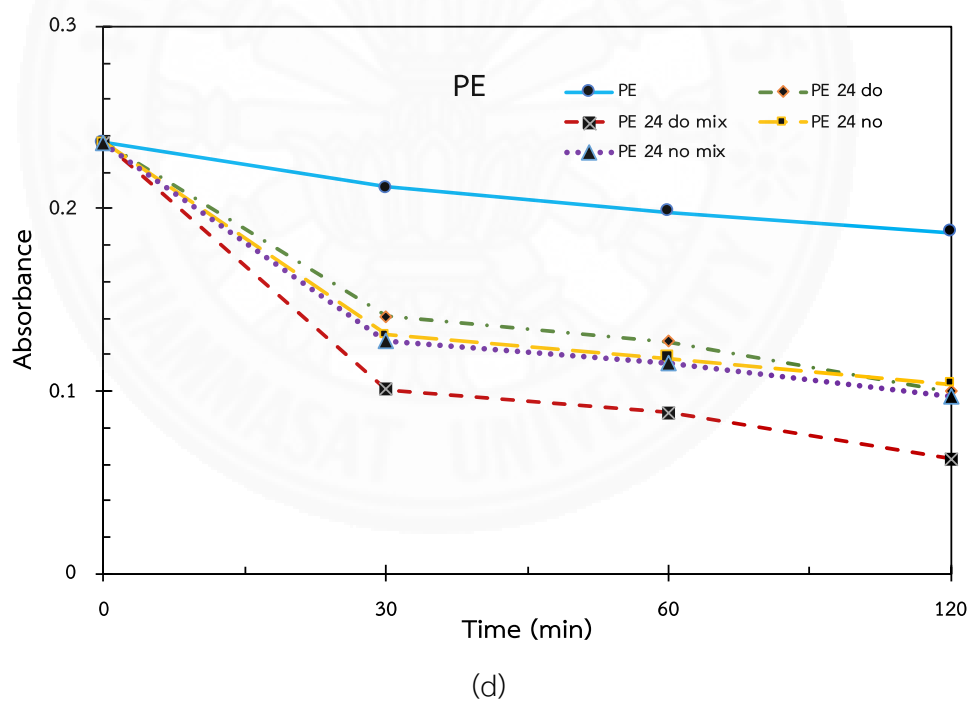
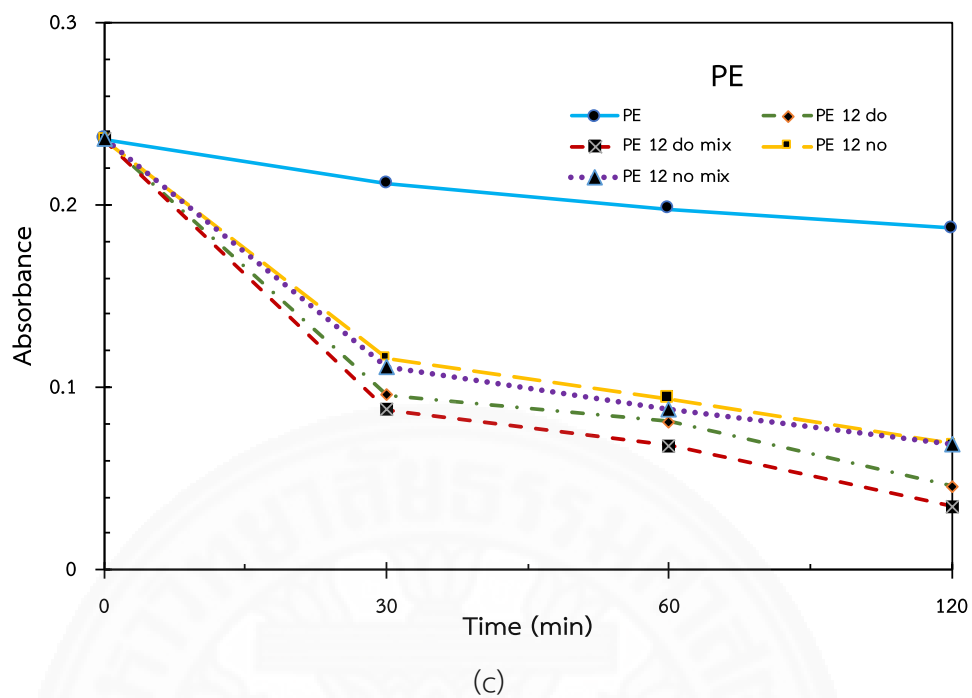
จากนั้นนำอนุภาคพอลิเอทิลีนที่ถูกเคลือบแล้ว 0.5 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตรของสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 10 ppm จากนั้นเก็บตัวอย่างที่เวลา 30, 60, 120 และ 240 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร โดยวัดเพื่อเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน (calibration curve) ของเมทิลีนบลู เพื่อทดสอบการย่อยสลายสีตามชนิดตัวอย่าง โดยค่าการดูดกลืนแสงจะลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป



(a)



(b)

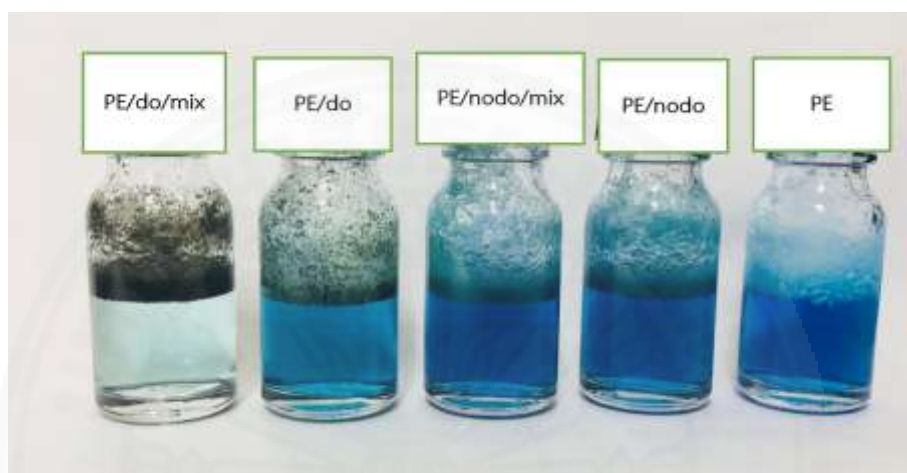


ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของอนุภาค PE ที่ผ่านการเคลือบด้วยเวลาต่างกัน (a) 1 ชั่วโมง, (b) 6 ชั่วโมง, (c) 12 ชั่วโมงและ(d) 24 ชั่วโมง

ภาพ (a) เปรียบเทียบการใช้อนุภาคพอลิเอทิลีนที่ไม่ได้เคลือบพอลิโดพามีนก่อนและเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงในขณะที่สังเคราะห์อนุภาค (PE 1 no) การเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงที่สังเคราะห์ไว้ก่อน (PE 1 no mix) การใช้อนุภาคพอลิเอทิลีนที่เคลือบพอลิโดพามีนก่อนจึงเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงในขณะที่สังเคราะห์เลย (PE 1 do) และเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงที่สังเคราะห์ไว้ก่อนเคลือบอนุภาคของแข็ง (PE 1 do mix) จะเห็นว่า การใช้พอลิโดพามีนเคลือบอนุภาค PE ก่อนและการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงในแบบที่สังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงไว้ก่อนจะให้ผลที่ดีกว่า ซึ่งในการทดลองที่ให้เวลาในการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 1 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่ดีที่สุดคือ 49.85 เปอร์เซ็นต์ กราฟ (b), (c) และ (d) แสดงผลการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาค PE ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของอนุภาค PE ที่ผ่านการเคลือบให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 51.41, 91.95 และ 83.62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

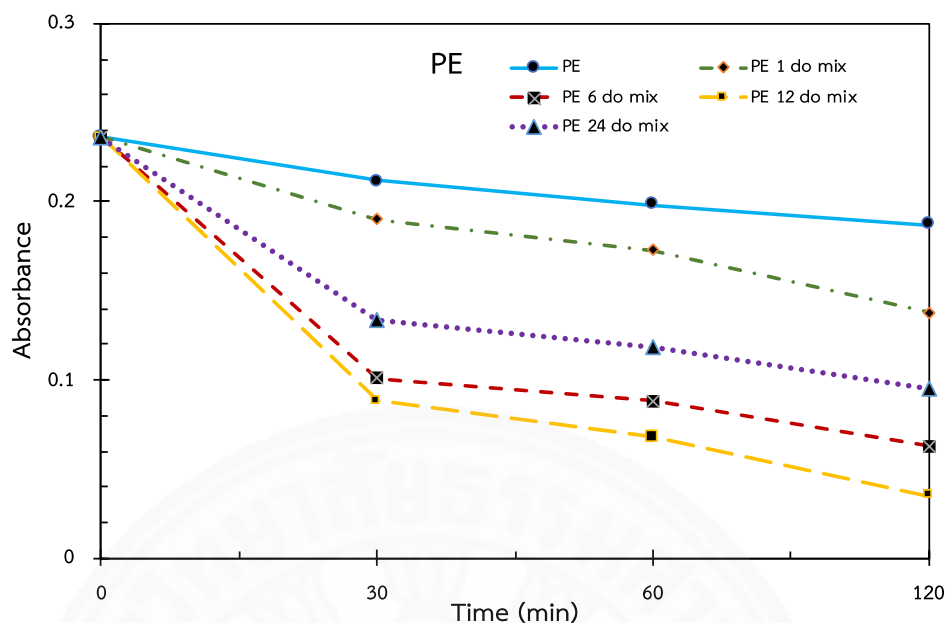
จากภาพที่ 4.16 กราฟที่ a-d แสดงให้เห็นว่าอนุภาค PE ที่ผ่านการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนทองแดงสามารถกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้โดยจะมีการทดลอง 2 ชุดคือชุดที่ 1 เป็นการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดย PE ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงภายใต้แสงอาทิตย์ ชุดที่ 2 เป็นการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูโดย PE ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงแบบไม่ใช้แสงอาทิตย์ (ทำในที่มืด) เพื่อยืนยันว่า PE ที่ผ่านการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนทองแดงสามารถกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้ด้วยกระบวนการ Photocatalysis กระบวนการโฟโตแคตตาไลซิส (Photo catalysis process) เป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวแคตตาไลสต์ ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยกระตุ้นด้วยแสง ตัวแคตตาไลสต์นี้จะทำหน้าที่ลดพลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยาหลักการทำงานของกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิสออกซิเดชัน (Photo catalysis oxidation) คือ การให้พลังงานแสงเข้าไปในระบบเพื่อเอาชนะค่าแถบพลังงาน (Energy band gap) ซึ่งเป็นค่าของความแตกต่างระหว่างการทำงานของแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) กับแถบพลังงานที่เต็มแล้ว (Valence band) ซึ่งเมื่อพลังงานแสงที่ให้แก่ระบบมากกว่าแถบพลังงาน (Energy band gap) แล้วมีการสร้างอิเล็กตรอนที่มีประจุ (Electron hole pairs) ที่ผิวของสาร กึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการโฟโตแคตตาไลซิสออกซิเดชัน สำหรับกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิสออกซิเดชัน แสงที่ให้แก่ระบบมักเป็นแสง อัลตราไวโอเลต พื้นฐานของกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิสประกอบด้วยการปล่อยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ (VB) ไปยังแถบไฟฟ้า (CB) ของสารกึ่งตัวนำ และการสร้างโฮลในแถบวาเลนซ์ (Valence Band) เพราะว่ารังสีอัลตราไวโอเลต มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าแถบพลังงาน (Band gap > 3.2 eV) กระบวนการนี้จึงสามารถถูกใช้ในการทำลายมลสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับปรากฏการณ์ของกระบวนการที่เกิดขึ้นจากการส่องแสงลงบนสารกึ่งตัวนำทำให้

เกิดตัวพาประจุอิสระอิเล็กตรอนและโฮล โดยประจุที่เกิดขึ้นนี้มีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันในสารละลาย (อดิศร จาตุรพิริย์, 2549) และพบว่าการกำจัดสีของเมทิลีนบลูด้วยอนุภาค PE ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงภายใต้แสงอาทิตย์ มีค่าการดูดกลืนแสงจะมีค่าลดลงตามเวลา โดยอนุภาค PE ที่ใช้ระยะเวลาในการเคลือบนาน 12 ชั่วโมงสามารถกำจัดสีได้ถึง 91.95 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลาเพียงแค่ 4 ชั่วโมงเท่านั้น



ภาพที่ 4.17 การกำจัดสีของอนุภาคพอลิเอทิลีนที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมง

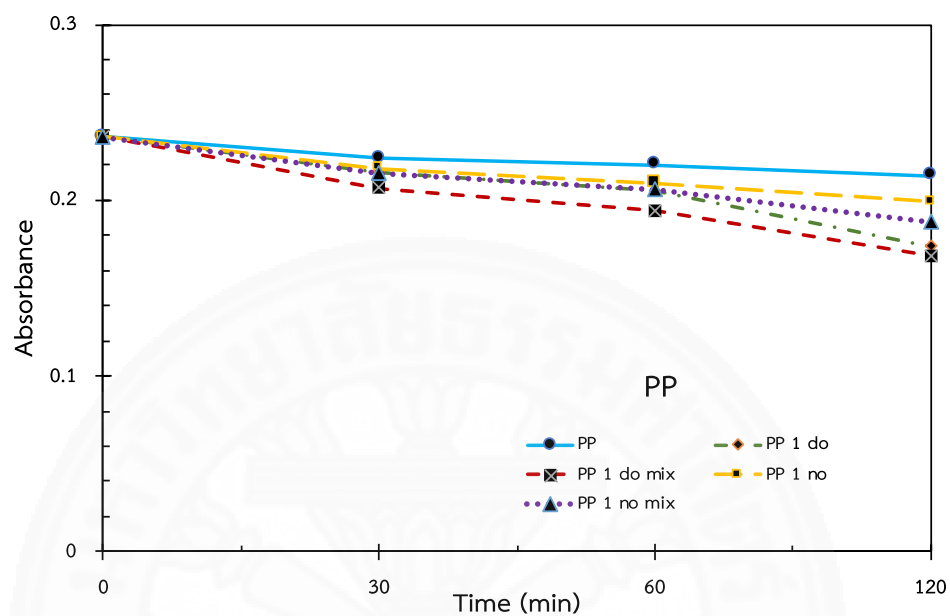
จากภาพที่ 4.17 แสดงการกำจัดสีของอนุภาคพอลิเอทิลีนที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมงโดย PE/do/mix แทนอนุภาคพอลิเอทิลีนที่ผ่านการเคลือบด้วยพอลิโดพามีนก่อนและเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงแบบสังเคราะห์ก่อนทำการเคลือบอนุภาคนาน 12 ชั่วโมง PE/do แทนการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงโดยการเคลือบอนุภาคพอลิโดพามีนก่อนแล้วสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงขณะเคลือบนาน 12 ชั่วโมง PE/nodo/mix แทนการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงที่ไม่ผ่านการเคลือบอนุภาคพอลิโดพามีนและเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงแบบสังเคราะห์ก่อนทำการเคลือบอนุภาคนาน 12 ชั่วโมง PE/nodo แทนการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงที่ไม่ผ่านการเคลือบอนุภาคพอลิโดพามีนและเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงแบบสังเคราะห์อนุภาคขณะทำการเคลือบอนุภาคนาน 12 ชั่วโมงและ PE คืออนุภาคพอลิเอทิลีนที่ไม่ผ่านการเคลือบอนุภาคเลย



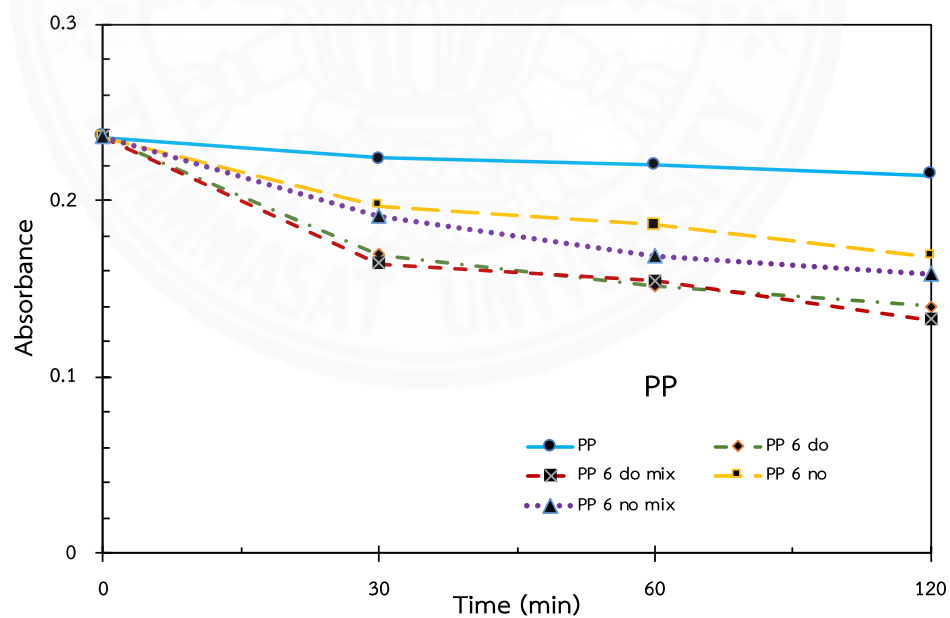
ภาพที่ 4.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของอนุภาค PE ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของอนุภาค PE ที่ผ่านการเคลือบนาน 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีของอนุภาค PE ที่ผ่านการเคลือบด้วยสารพอลิโดพามีนมีส่วนประกอบของหมู่เอมีโนมีคุณสมบัติเป็นโมเลกุลที่มีหมู่ที่เป็นกรด COOH และ NH_4^+ ที่เป็นเบส H-atom เคลื่อนที่ไปมาระหว่างหมู่ทั้งสองเป็น internal acid-base reaction เกิด dipolar ion (ไอออน 2 ขั้ว) สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายที่มีขั้วเช่น น้ำ กรด เบส เอทานอล ส่งผลให้อนุภาคของแข็งที่ผ่านการเคลือบด้วยสารพอลิโดพามีนสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติการชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของพื้นผิวอนุภาคของแข็งทำให้อนุภาคของแข็งสามารถสัมผัสกับสารละลายนาโนทองแดงได้มากขึ้น สารพอลิโดพามีนเกิดออกซิเดชันภายใต้สภาวะต่าง่อ่อนทำให้เกิดโดพามีนพอลิเมอร์ไรเซชัน (dopamine polymerization) ที่ช่วยในเพิ่มการยึดเกาะระหว่างรูพรุนของ PE และอนุภาคนาโนทองแดงจากนั้นเคลือบอนุภาคแบบการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงก่อนเคลือบที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 91.95 เปอร์เซ็นต์จากผลการทดลองที่ระยะเวลาในการเคลือบอนุภาคมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ย้อม ที่ระยะเวลาในการเคลือบอนุภาคนาน 24 ชั่วโมงประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ย้อมจะต่ำกว่าที่ระยะเวลาในการเคลือบอนุภาคนาน 12 ชั่วโมง เนื่องจากอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบบนอนุภาคของแข็งที่ระยะเวลานานทำให้อนุภาคมีการจับตัวกันมากขึ้นส่งผลให้เกิดอนุภาคขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวในการสัมผัสสีที่ย้อมเมทิ

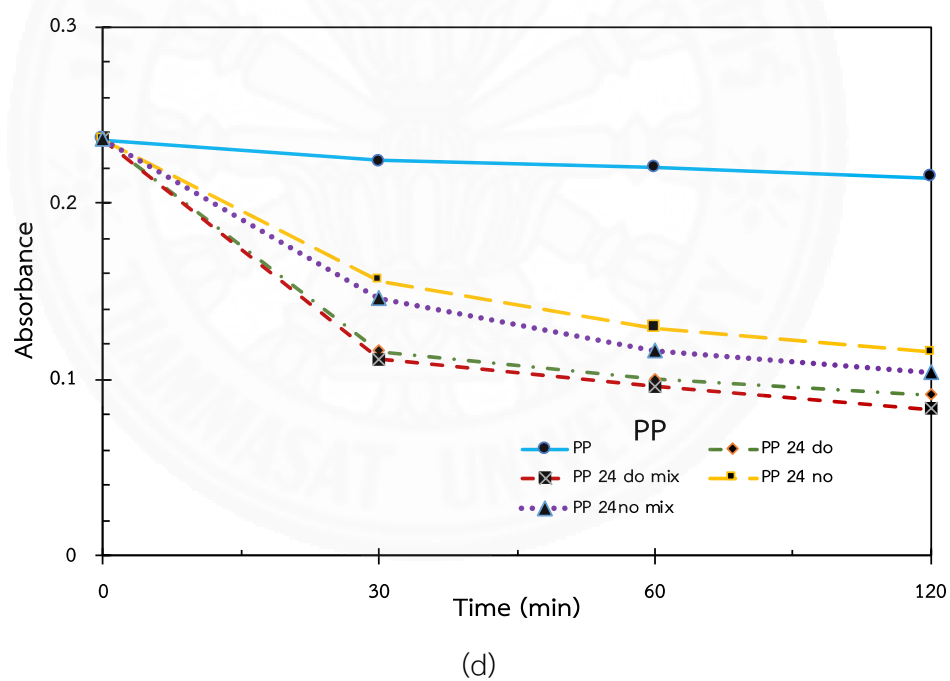
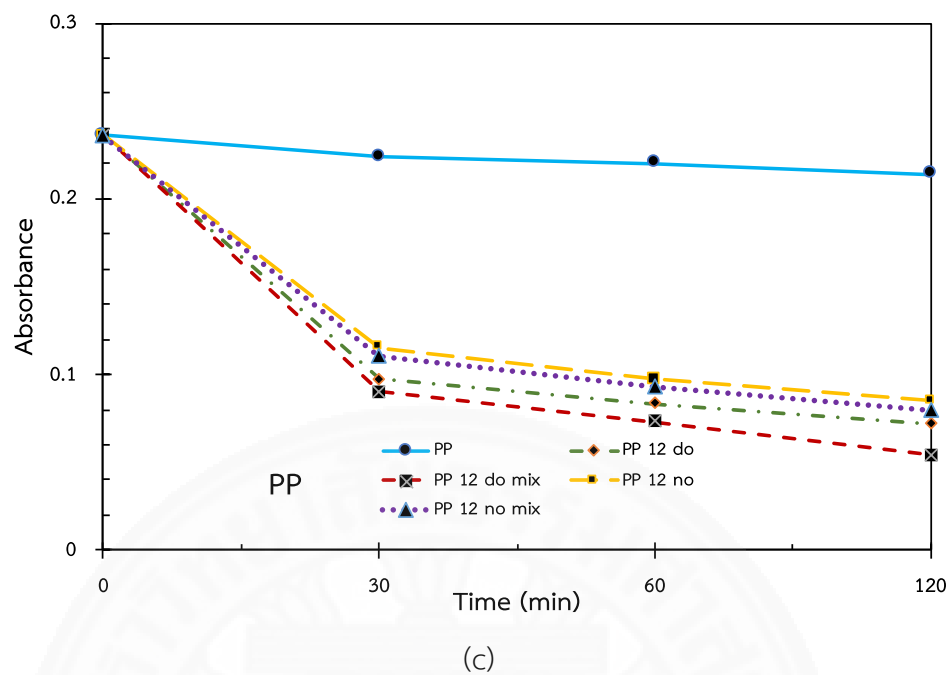
ลีนบลู๋น้อยลงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู๋ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมงจึงน้อยที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมง



(a)

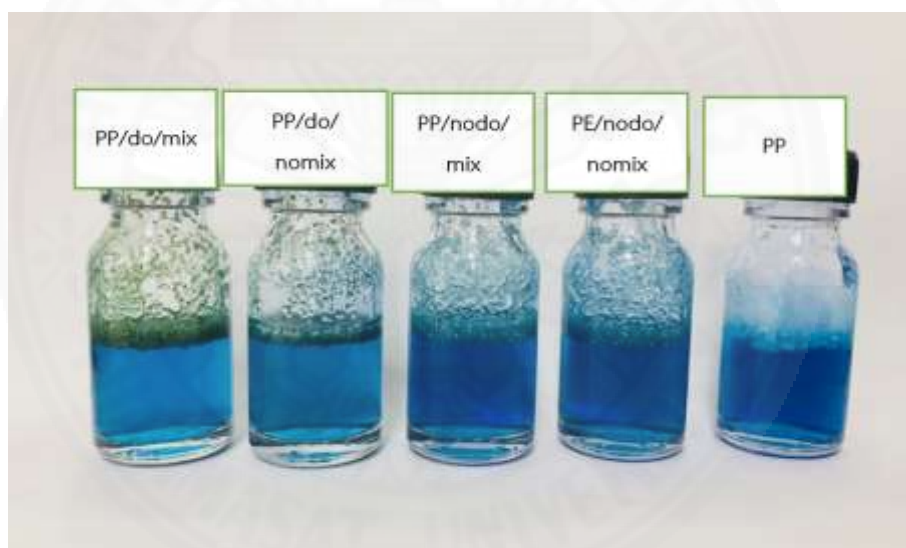


(b)



ภาพที่ 4.19 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีเมทิลีนบลูของอนุภาคพอลิพรไพลีน ที่ผ่านการเคลือบด้วยเวลาต่างกัน (a) 1 ชั่วโมง (b) 6 ชั่วโมง (c) 12 ชั่วโมงและ (d) 24 ชั่วโมง

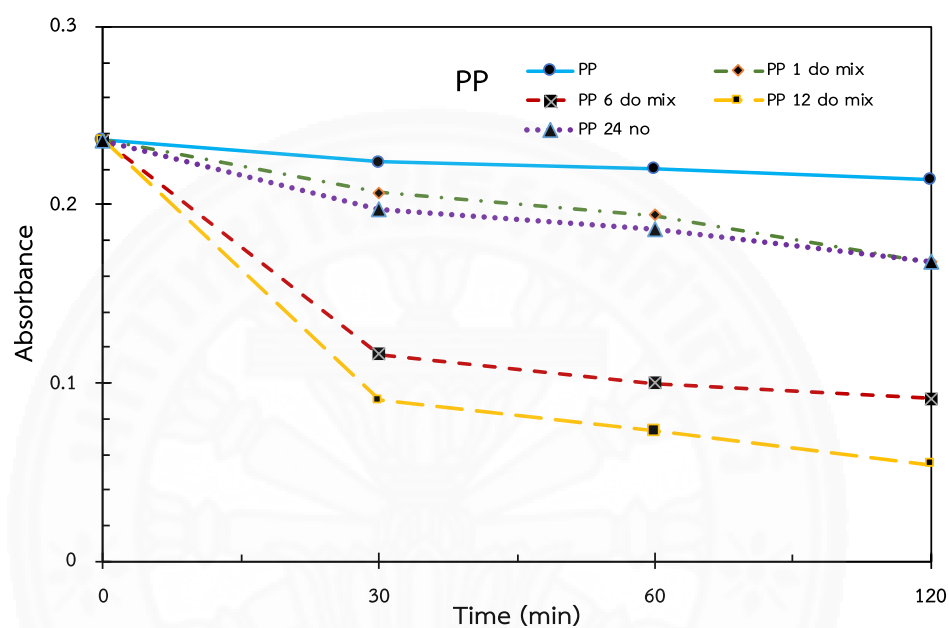
กราฟ (a) เปรียบเทียบการใช้อนุภาคพอลิโพรไพลีนที่ไม่ได้เคลือบพอลิโดพามีนก่อนแต่เคลือบอนุภาคนาโนทองแดงในขณะที่สังเคราะห์อนุภาค (PP 1 no) การเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงที่สังเคราะห์ไว้ก่อน (PP 1 no mix) การใช้อนุภาคพอลิโพรไพลีนที่เคลือบพอลิโดพามีนก่อนจึงเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงในขณะที่สังเคราะห์เลย (PP 1 do) และเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงที่สังเคราะห์ไว้ก่อน (PP 1 do mix) จะเห็นว่า การใช้พอลิโดพามีนเคลือบอนุภาค PP ก่อนและการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงในแบบที่สังเคราะห์อนุภาคไว้ก่อนจะให้ผลที่ดีกว่า ซึ่งในการทดลองที่ให้เวลาในการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 1 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ดีที่สุดคือ 36.86 เปอร์เซ็นต์ กราฟ (b) , (c) และ (d) แสดงผลการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาค PP ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของอนุภาค PP ที่ผ่านการเคลือบให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 51.41, 88.84 และ เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.20 การกำจัดสีย้อมของอนุภาคพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการเคลือบที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมง

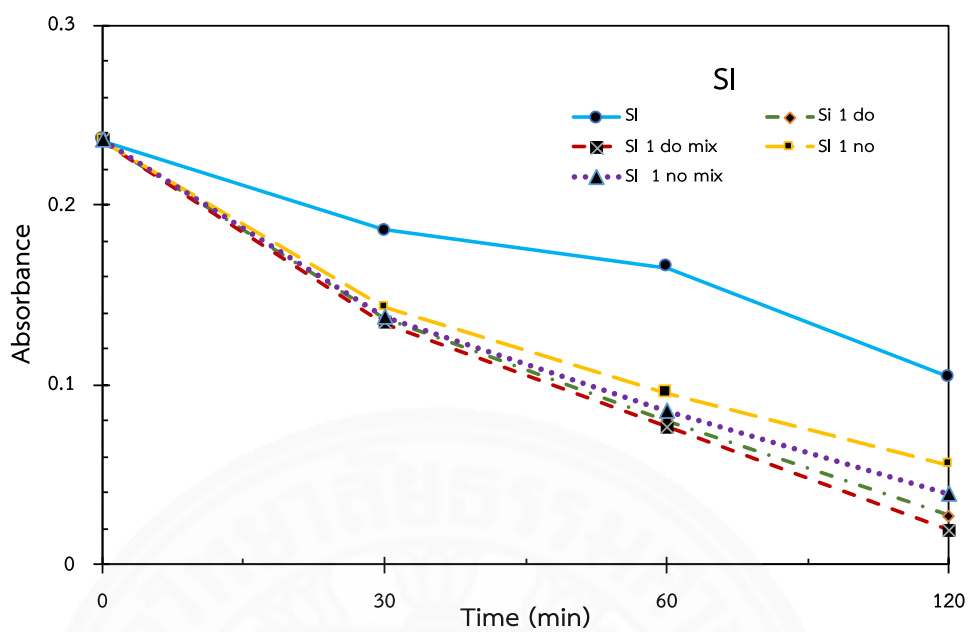
จากภาพที่ 4.20 แสดงผลการกำจัดสีย้อมของอนุภาคพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมงโดย PP/do/mix แทนอนุภาคพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการเคลือบด้วยพอลิโดพามีนและเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงแบบสังเคราะห์อนุภาคก่อนทำการเคลือบอนุภาคนาน 12 ชั่วโมง PP/do การเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงโดยการเคลือบอนุภาคพอลิโดพามีนก่อนแล้วสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงขณะเคลือบนาน 12 ชั่วโมง PP/nodo/mix แทนการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงที่ไม่ผ่านการเคลือบอนุภาคพอลิโดพามีนและเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงแบบ

สังเคราะห์อนุภาคก่อนทำการเคลือบอนุภาคนาน 12 ชั่วโมง PP/nodo แทนการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงที่ไม่ผ่านการเคลือบอนุภาคพอลิโดพามีนและเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงแบบสังเคราะห์อนุภาคขณะทำการเคลือบอนุภาคนาน 12 ชั่วโมงและ PP คืออนุภาคพอลิโพรไพลีนที่ไม่ผ่านการเคลือบอนุภาคเลย

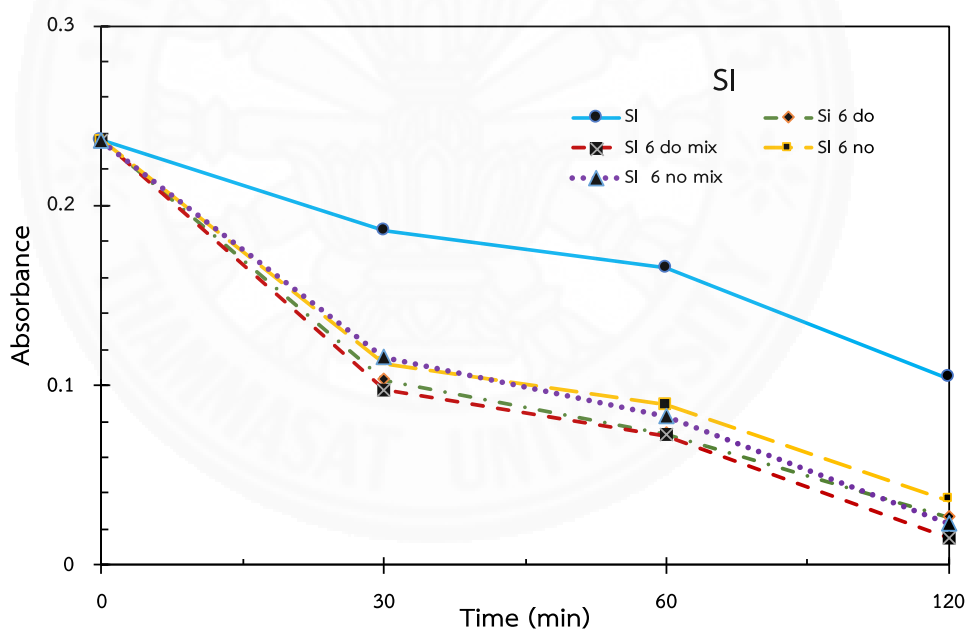


ภาพที่ 4.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีเมทิลีนบลูของอนุภาค PP ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

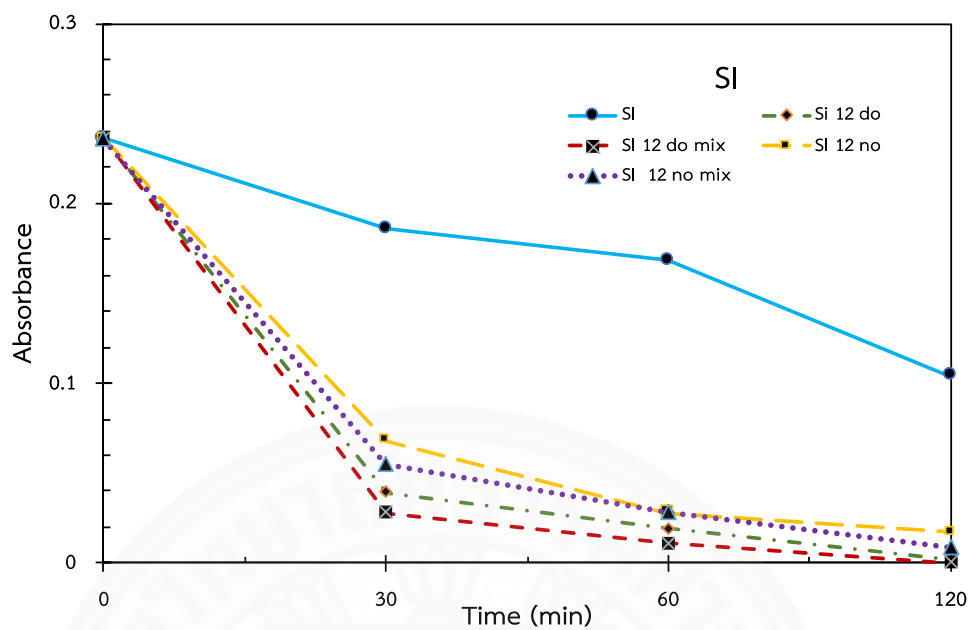
จากกราฟที่ 4.21แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของอนุภาค PP ที่ผ่านการเคลือบนาน 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายสีของอนุภาค PP เคลือบอนุภาคแบบการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงก่อนเคลือบที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 88.84 เปอร์เซ็นต์



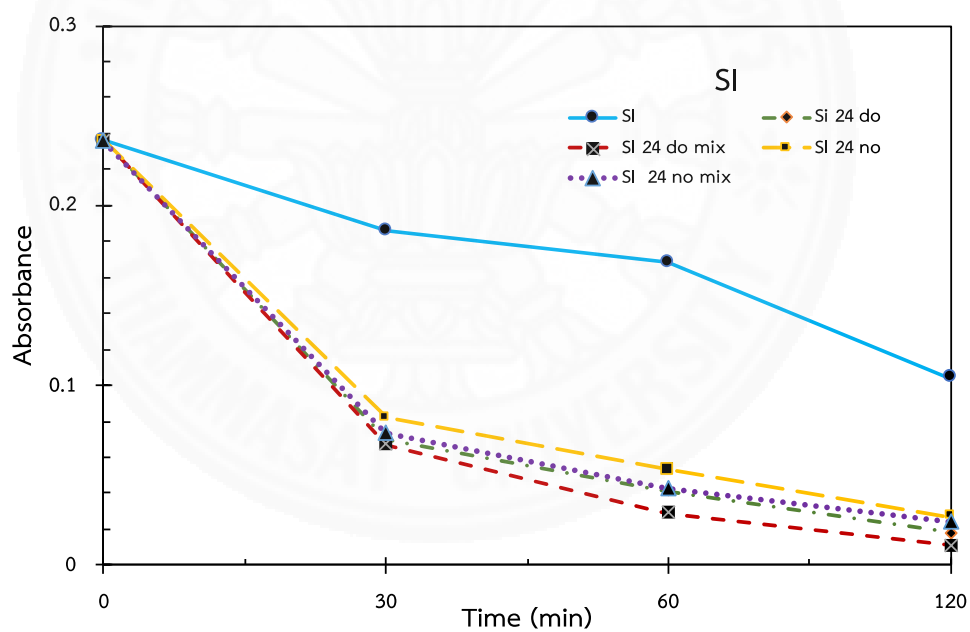
(a)



(b)



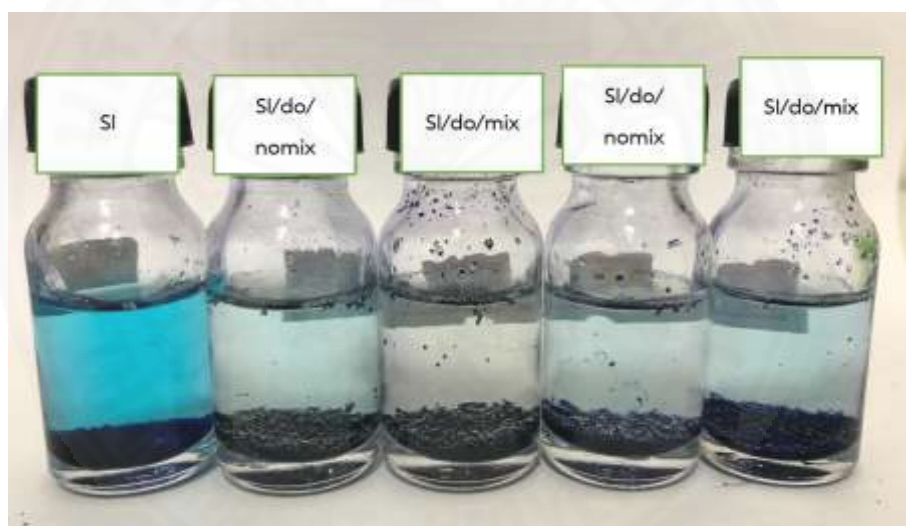
(c)



(d)

ภาพที่ 4.22 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีเมทิลีนบลูของอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการเคลือบด้วยเวลาต่างกัน (a) 1 ชั่วโมง (b) 6 ชั่วโมง (c) 12 ชั่วโมงและ (d) 24 ชั่วโมง

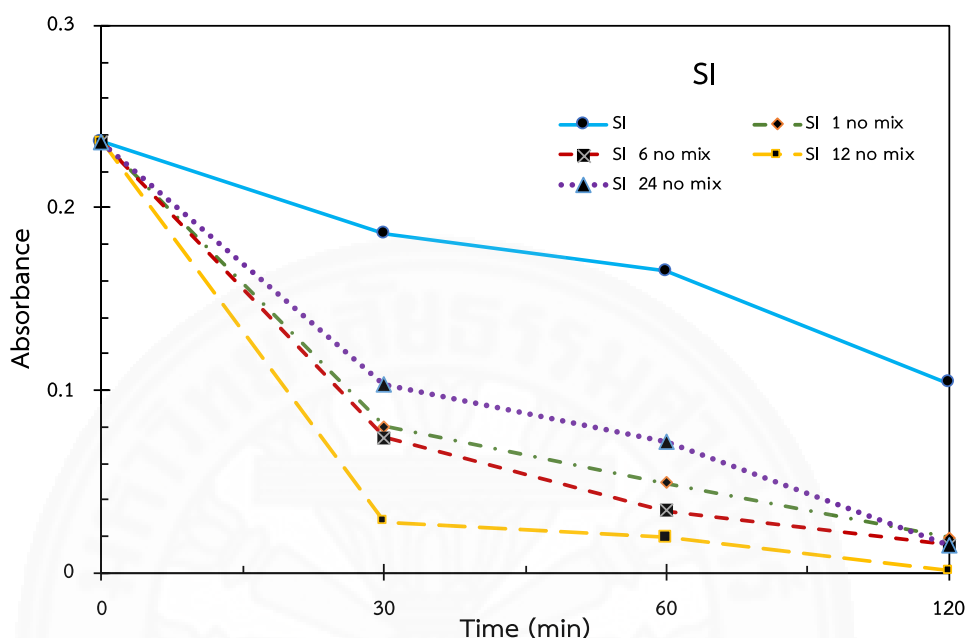
กราฟ (a) เปรียบเทียบการใช้อนุภาคซิลิกาที่ไม่ได้เคลือบพอลิโดพามีนก่อนแต่เคลือบอนุภาคนาโนทองแดงในขณะที่สังเคราะห์อนุภาค (si 1 no) การเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงที่สังเคราะห์ไว้ก่อน (si 1 no mix) การใช้อนุภาคซิลิกาที่เคลือบพอลิโดพามีนก่อนจึงเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงในขณะที่สังเคราะห์เลย (si 1 do) และเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงที่สังเคราะห์ไว้ก่อน (si 1 do mix) จะเห็นว่า การใช้พอลิโดพามีนเคลือบอนุภาค si ก่อนและการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงในแบบที่สังเคราะห์อนุภาคไว้ก่อนจะให้ผลที่ดีกว่า (a) ซึ่งในการทดลองที่ให้เวลาในการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 1 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำที่ต่ำที่สุดคือ 96.19 เปอร์เซ็นต์ กราฟ (b) (c) และ (d) แสดงผลการกำจัดสีของน้ำที่ลดลงของอนุภาค si ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดสีของอนุภาค si ที่ผ่านการเคลือบให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือ 99.58, 100 และ 99.58 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.23 การกำจัดสีของซิลิกาที่ผ่านการเคลือบที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4.23 แสดงผลการกำจัดสีของซิลิกาที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง โดย SI คืออนุภาคซิลิกาเจลที่ไม่ผ่านการเคลือบอนุภาคเลย SI/do/nomix แทนอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการเคลือบด้วยพอลิโดพามีนและเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงแบบสังเคราะห์อนุภาคขณะทำการเคลือบอนุภาคนาน 12 ชั่วโมง SI/do/mix การเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงโดยการเคลือบอนุภาคพอลิโดพามีนก่อนแล้วสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงก่อนเคลือบนาน 12 ชั่วโมง SI/nodo/nomix แทนการเคลือบซิลิกาที่ไม่ผ่านการเคลือบอนุภาคพอลิโดพามีนและเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงแบบสังเคราะห์อนุภาคขณะทำการเคลือบอนุภาคนาน 12 ชั่วโมง SI/nodo/mix แทน

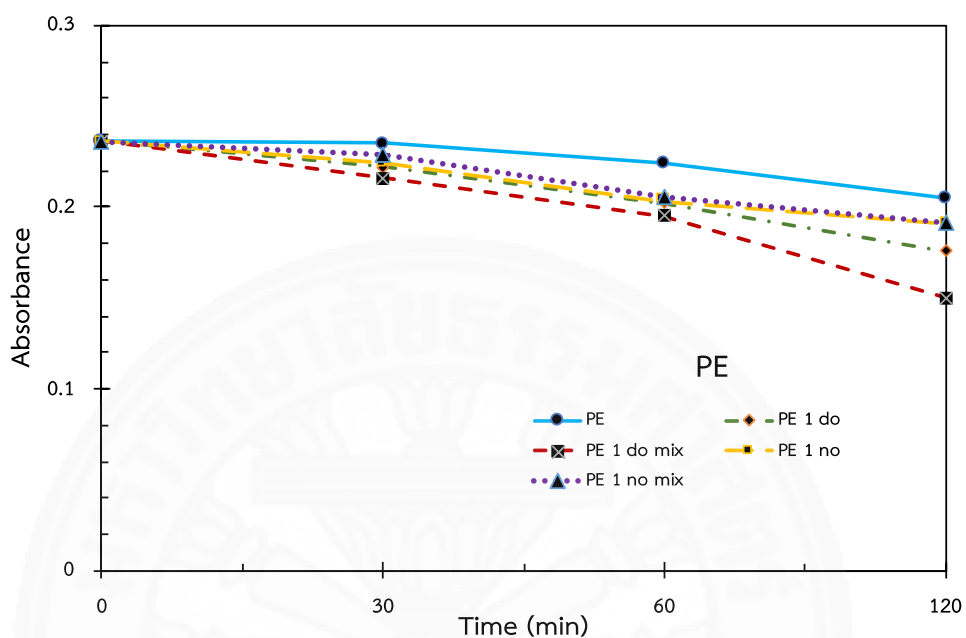
การเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงที่ไม่ผ่านการเคลือบอนุภาคพอลิโดพามีนและเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงแบบสังเคราะห์อนุภาคก่อนทำการเคลือบนาน 12 ชั่วโมง



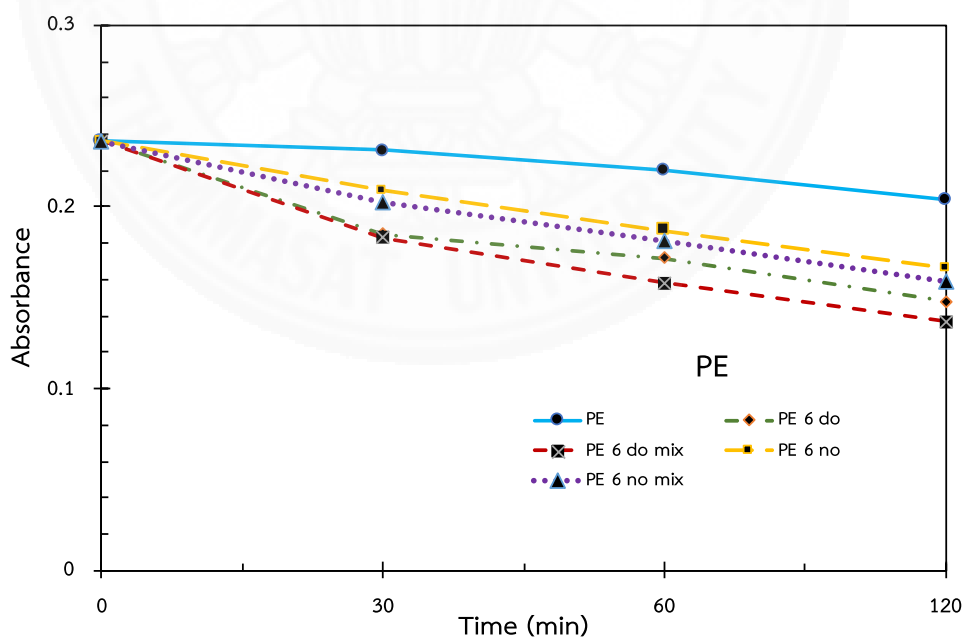
ภาพที่ 4.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีเมทิลีนบลูของอนุภาคซิลิกา ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

จากกราฟที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีเมทิลีนบลูของอนุภาคซิลิกา ที่ผ่านการเคลือบนาน 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีของอนุภาคซิลิกา ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคด้วยโพลิโดพามีนและเคลือบอนุภาคแบบการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงก่อนเคลือบที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 100 เปอร์เซ็นต์

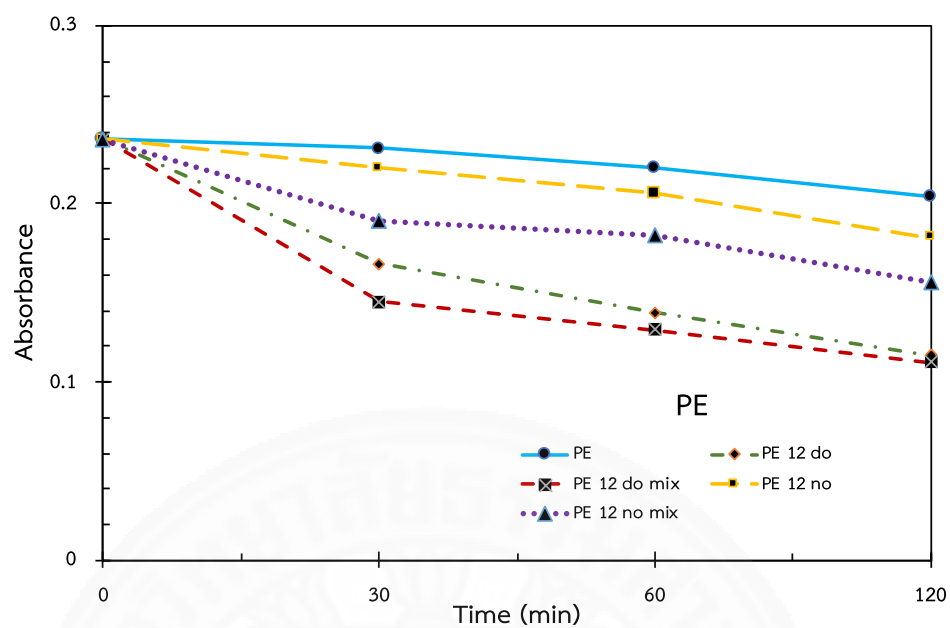
4.6 ทดสอบการนำอนุภาคนาโนทองแดงที่ผ่านการเคลือบบนอนุภาคของแข็ง PE, PP และซิลิกา เจล ที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้อีกครั้ง



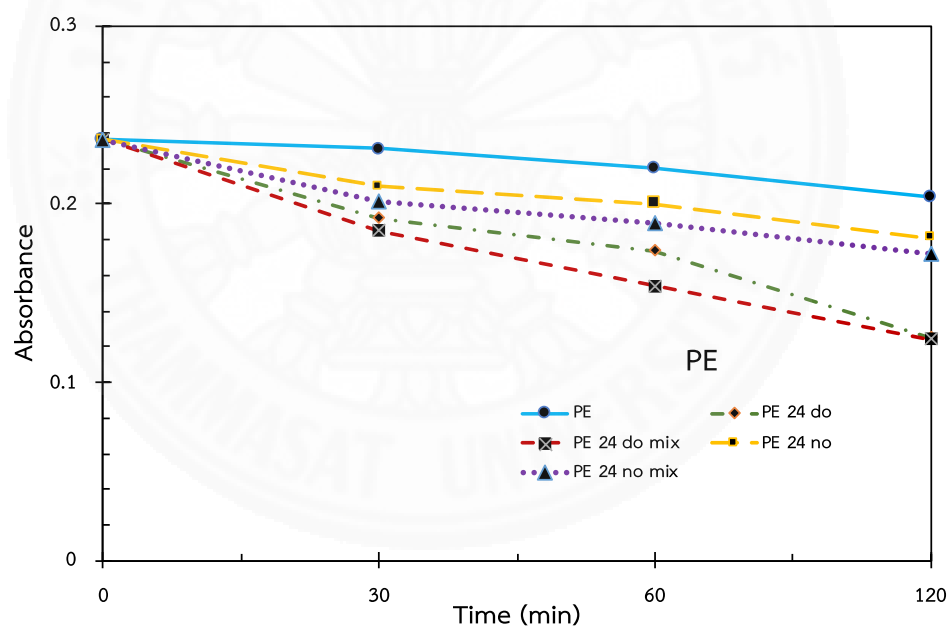
(a)



(b)



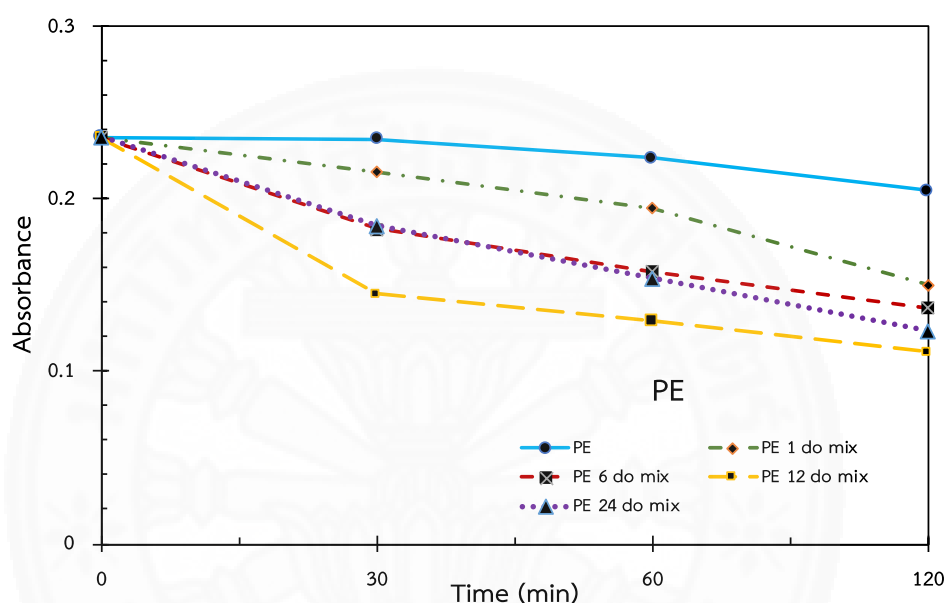
(c)



(d)

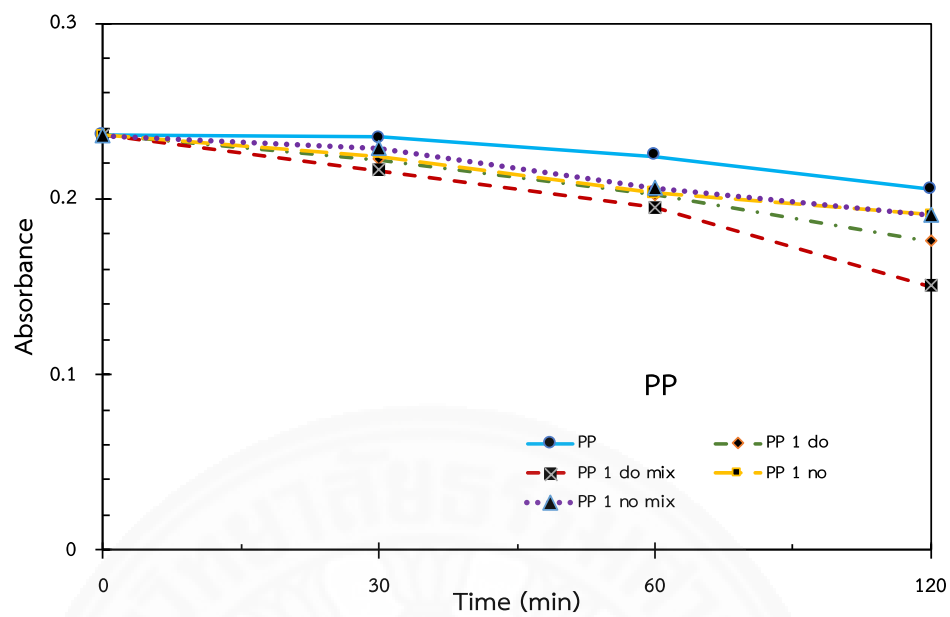
ภาพที่ 4.25 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของอนุภาค PE ที่ผ่านการใช้งานแล้วหนึ่งรอบที่เคลือบด้วยเวลาต่างกัน (a) 1 ชั่วโมง (b) 6 ชั่วโมง (c) 12 ชั่วโมงและ (d) 24 ชั่วโมง

ผลการทดลองที่ให้เวลาในการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 1 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำที่ต่ำที่สุดคือ 44.59 เปอร์เซ็นต์ กราฟ (b) (c) และ (d) แสดงผลการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของอนุภาค PE ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 6 ชั่วโมง, 12 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดสีของอนุภาค PE ที่ผ่านการเคลือบให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 57.58, 65.80 และ 61.47 เปอร์เซ็นต์

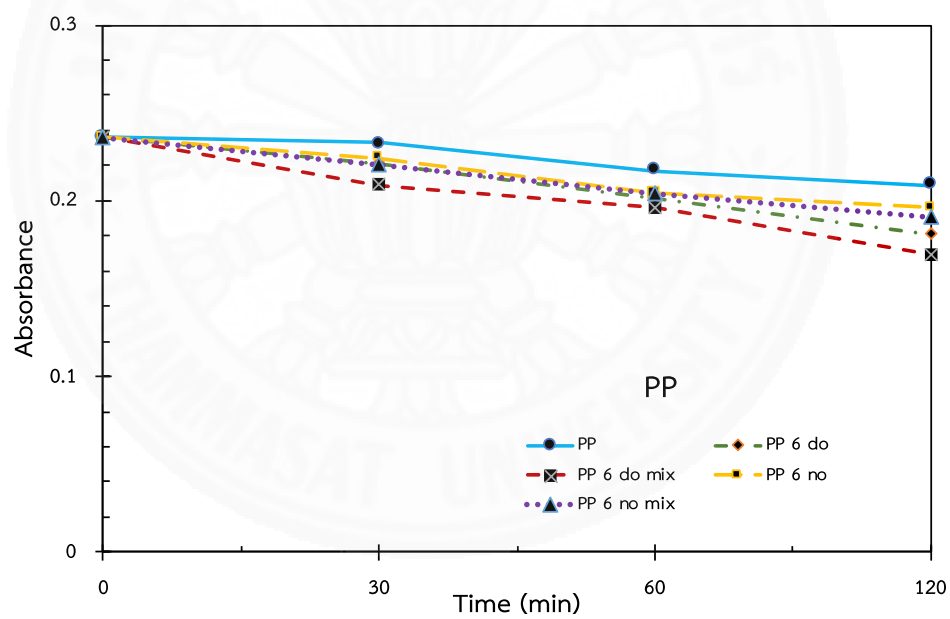


ภาพที่ 4.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีเมทิลีนบลูของอนุภาค PE ที่ผ่านการใช้งานแล้วหนึ่งรอบที่เคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

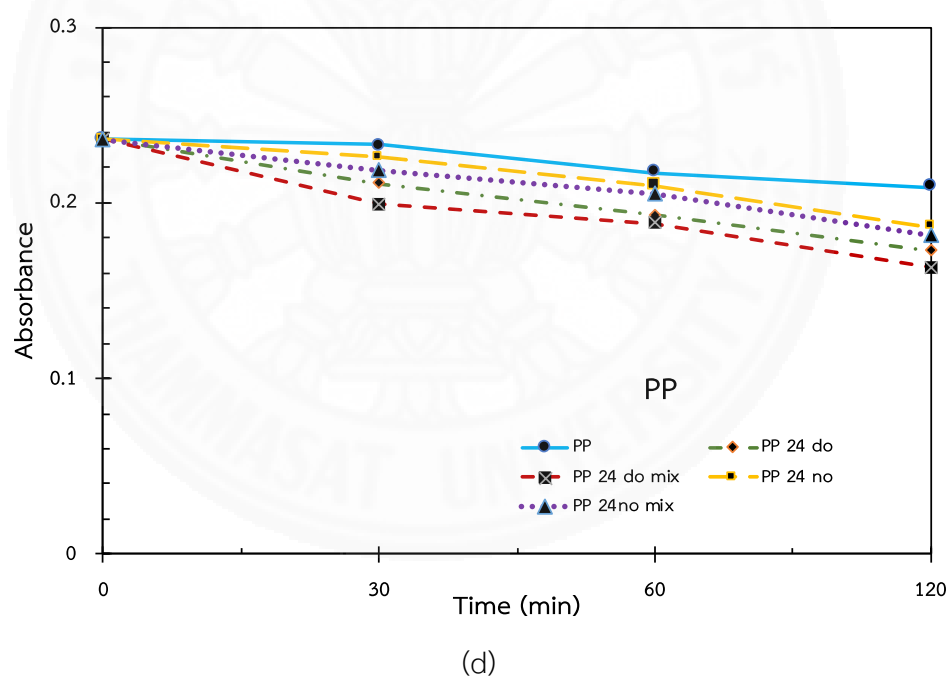
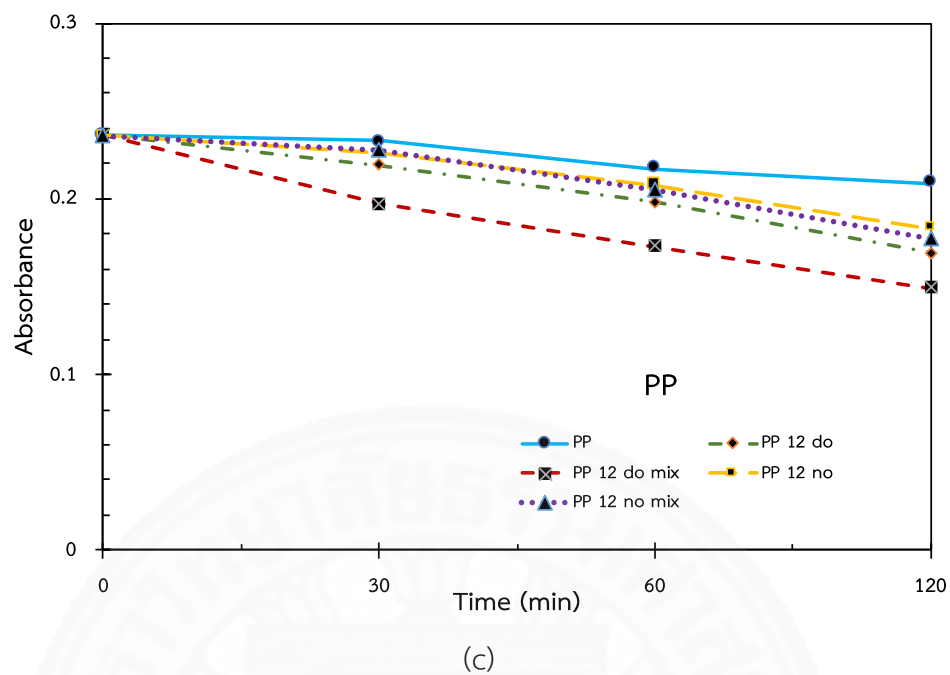
จากกราฟที่ 4.26 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของอนุภาค PE ที่ผ่านการใช้งานแล้ว 1 ครั้ง จากการเคลือบนาน 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีของอนุภาค PE ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคด้วยพอลิโดพามีนและเคลือบอนุภาคแบบการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงก่อนเคลือบที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 65.80 เปอร์เซ็นต์



(a)

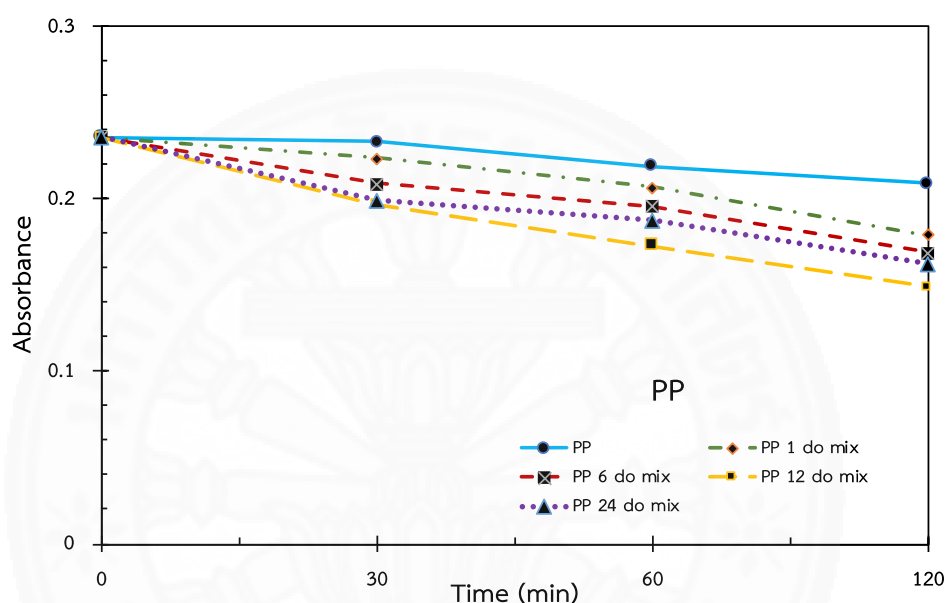


(b)



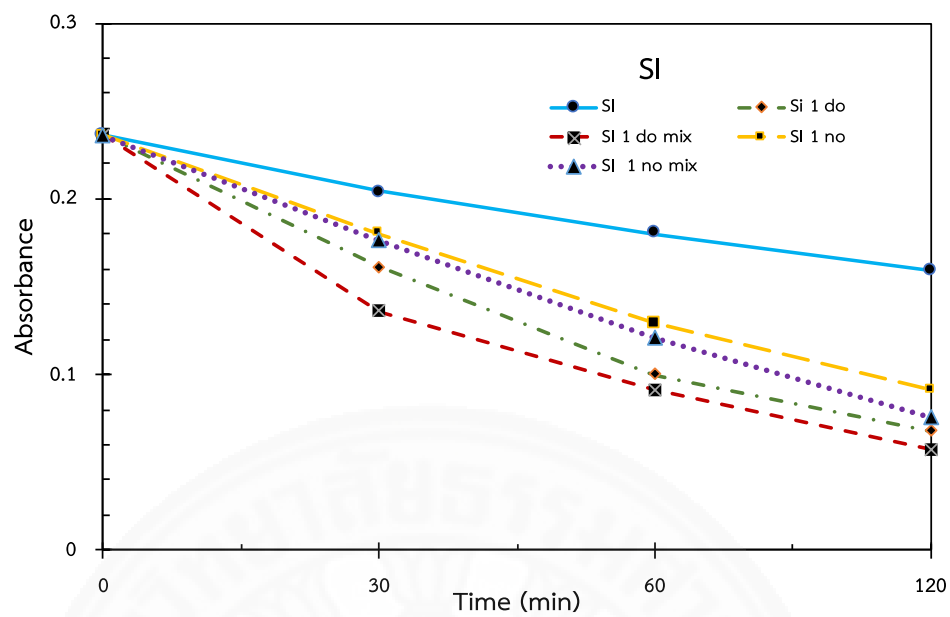
ภาพที่ 4.27 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีเมทิลีนบลูของอนุภาค PP ที่ผ่านการใช้งานแล้วหนึ่งรอบที่เคลือบด้วยเวลาต่างกัน (a) 1 ชั่วโมง, (b) 6 ชั่วโมง, (c) 12 ชั่วโมงและ(d) 24 ชั่วโมง

ผลการทดลองที่ให้เวลาในการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 1 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายที่ดีที่สุดคือ 41.53 เปอร์เซ็นต์ กราฟ (b) (c) และ (d) แสดงผลการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาค PP ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของอนุภาค PP ที่ผ่านการเคลือบให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 41.53, 61.86 และ 49.15 เปอร์เซ็นต์

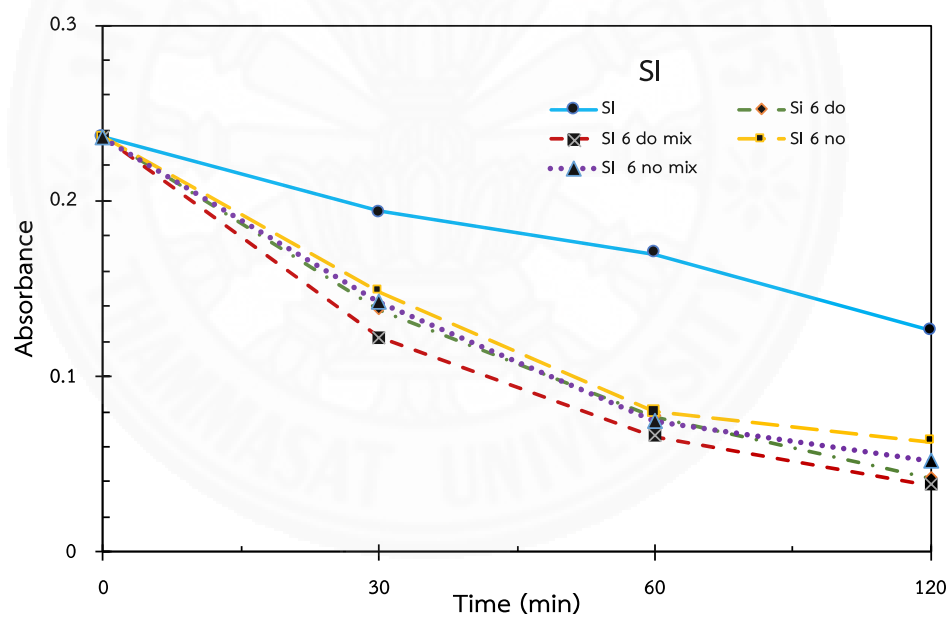


ภาพที่ 4.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาค PP ที่ผ่านการใช้งานแล้วหนึ่งรอบที่เคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

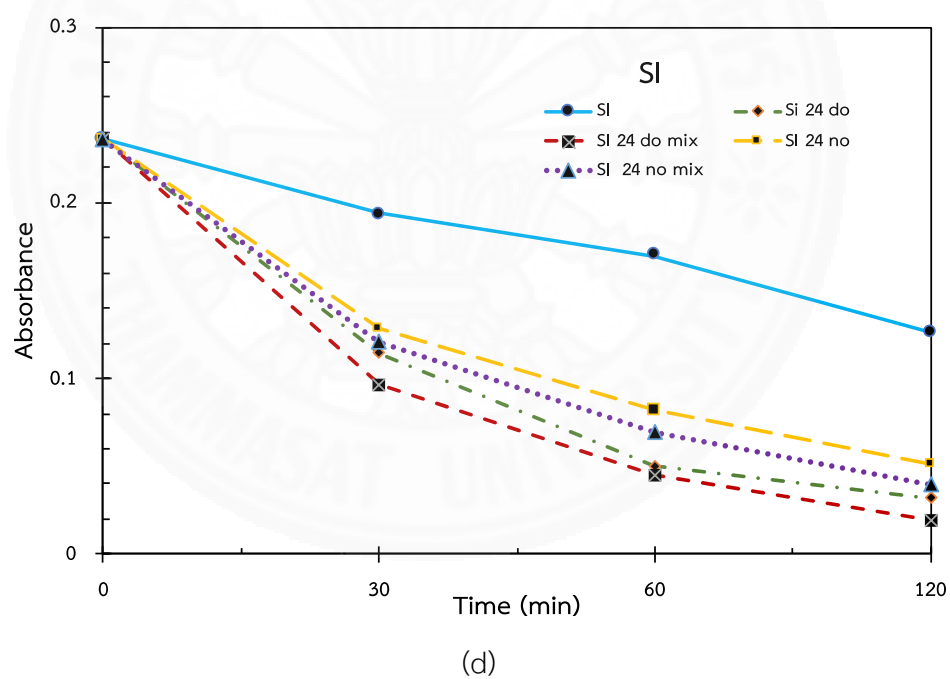
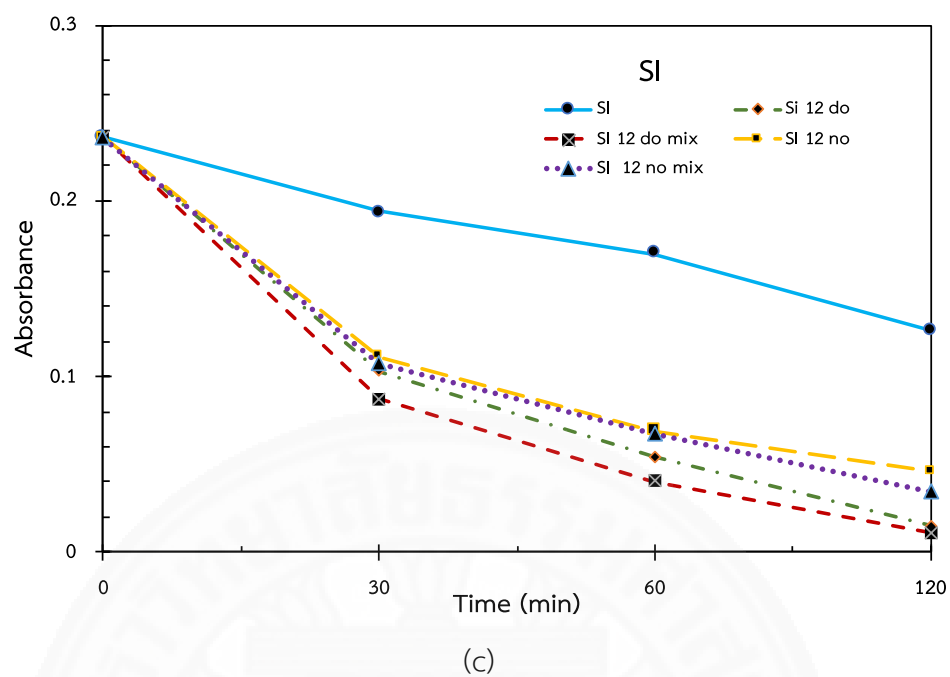
จากกราฟที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาค PP ที่ผ่านการใช้งานแล้ว 1 ครั้ง จากการเคลือบนาน 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของอนุภาค PP ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคด้วยพอลิโดพามีนและเคลือบอนุภาคแบบการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงก่อนเคลือบที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 61.86 เปอร์เซ็นต์



(a)

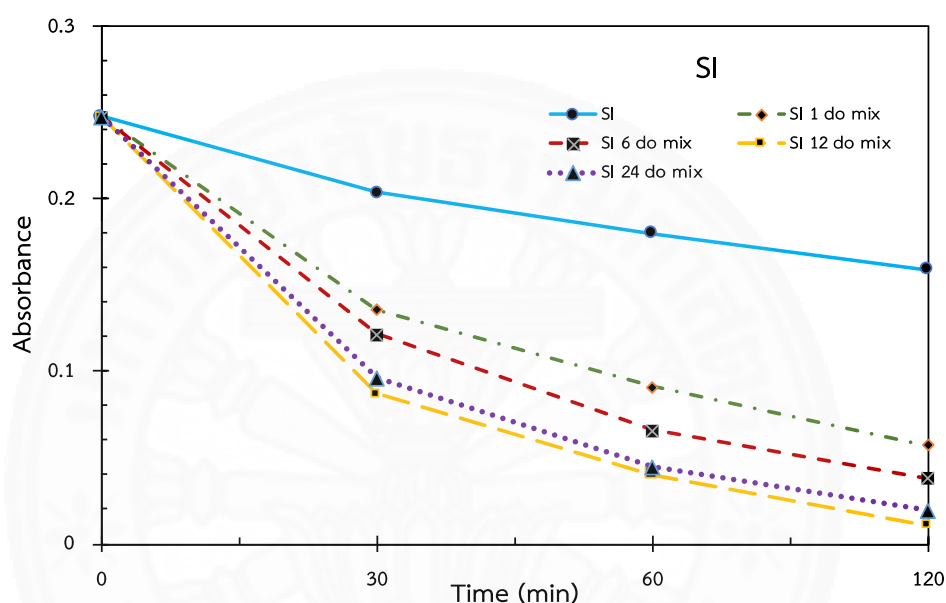


(b)



ภาพที่ 4.29 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีเมทิลีนบลูของอนุภาค SI ที่ผ่านการใช้งานแล้วหนึ่งรอบที่เคลือบด้วยเวลาต่างกัน (a) 1 ชั่วโมง, (b) 6 ชั่วโมง, (c) 12 ชั่วโมงและ(d) 24 ชั่วโมง

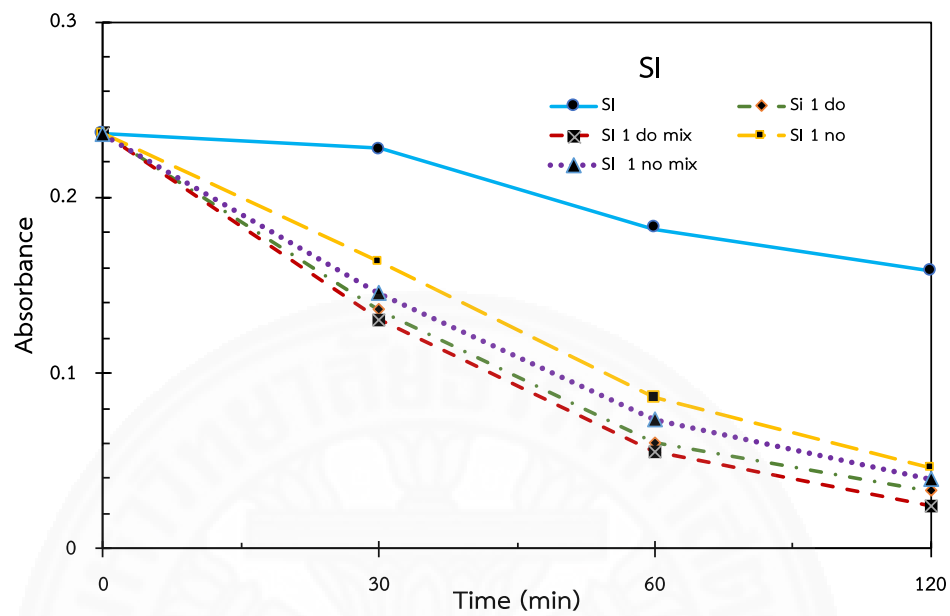
ผลการทดลองที่ให้เวลาในการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 1 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำที่ต่ำที่สุดคือ 88.98 เปอร์เซ็นต์ กราฟ (b) (c) และ (d) แสดงผลการกำจัดสีของเมทิลีนบลูของอนุภาค SI ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดสีของอนุภาค SI ที่ผ่านการเคลือบให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 91.95, 99.58 และ 98.31 เปอร์เซ็นต์



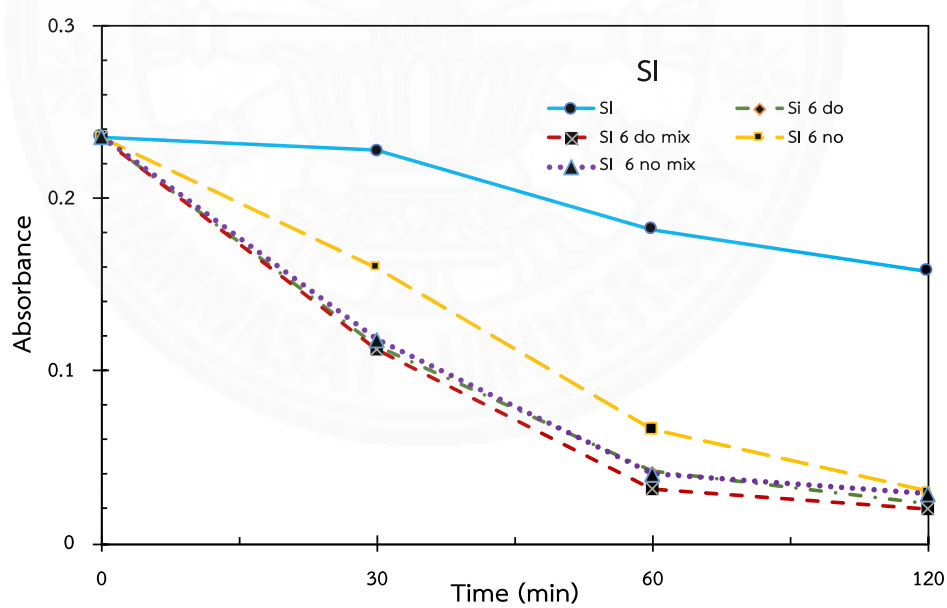
ภาพที่ 4.30 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีเมทิลีนบลูของอนุภาค SI ที่ผ่านการใช้งานแล้วหนึ่งรอบที่เคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

จากกราฟที่ 4.30 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีเมทิลีนบลูของอนุภาค SI ที่ผ่านการใช้งานแล้ว 1 ครั้ง จากการเคลือบนาน 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีของอนุภาค SI ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคด้วยพอลิโดพามีนและเคลือบอนุภาคแบบการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงก่อนเคลือบที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 99.58 เปอร์เซ็นต์

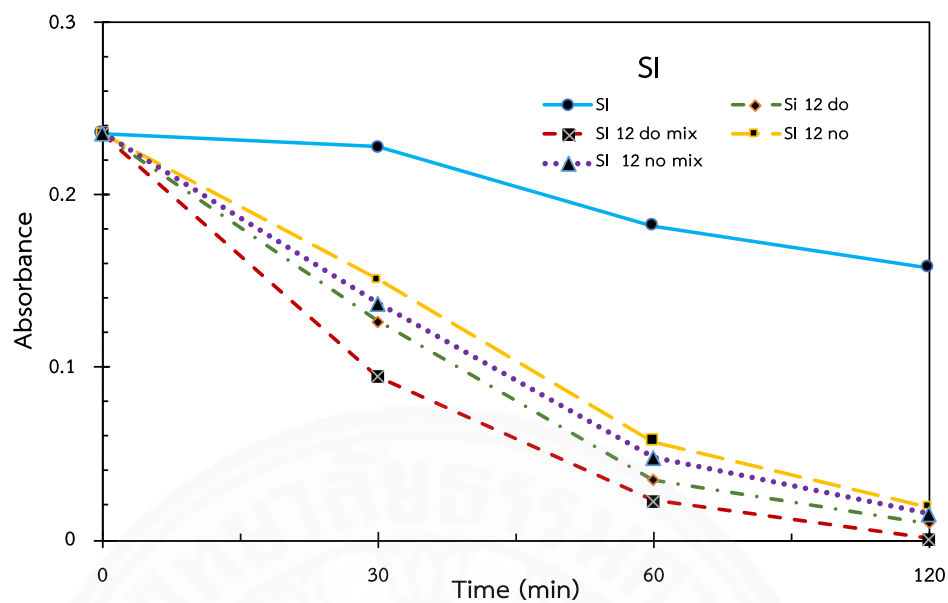
การนำซิลิกาเจลที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงแล้วใช้ซ้ำรอบที่ 3



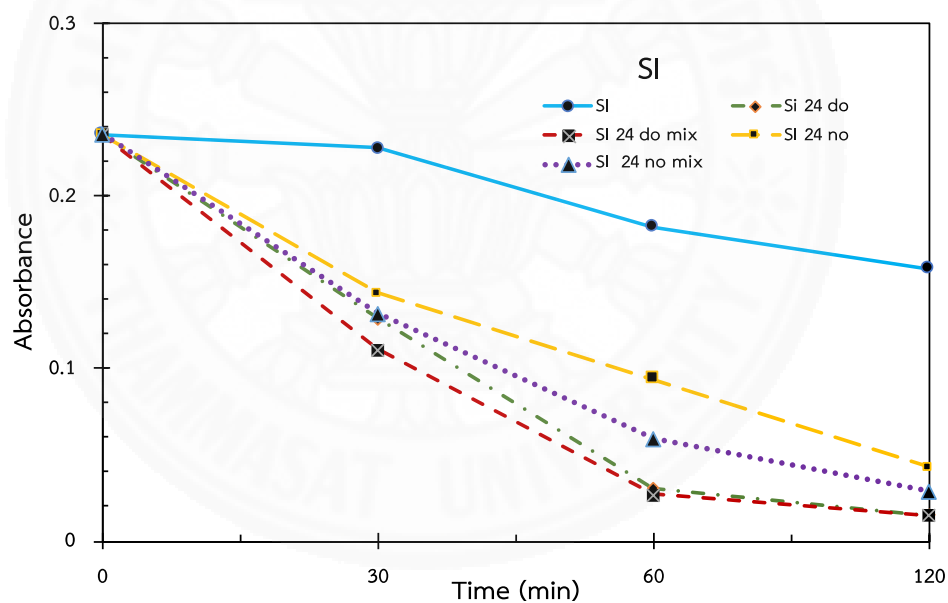
(a)



(b)



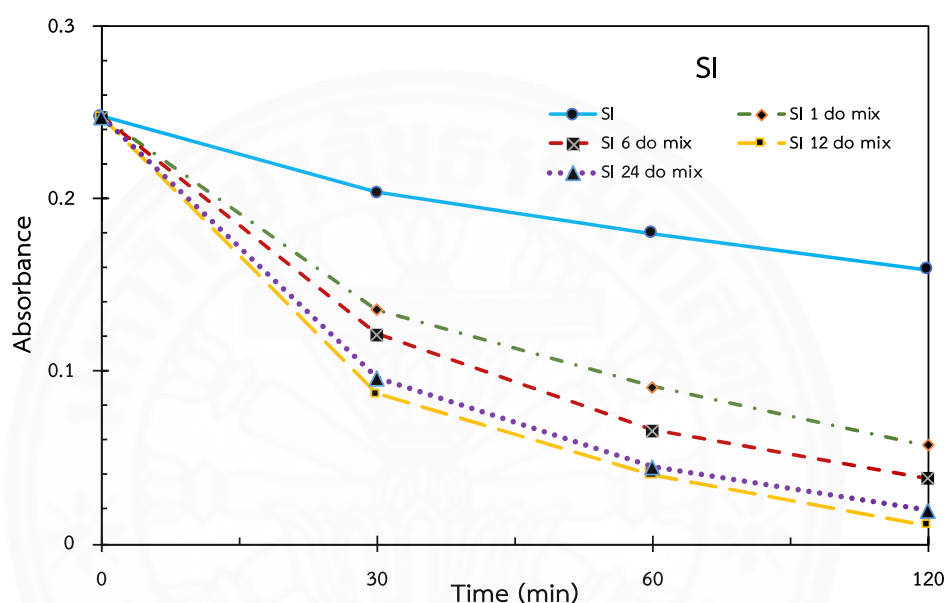
(c)



(d)

ภาพที่ 4.31 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีเมทิลีนบลูของอนุภาค SI ที่ผ่านการใช้งานแล้วสองรอบที่เคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

ผลการทดลองที่ให้เวลาในการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 1 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีดีที่สุดคือ 91.53 เปอร์เซ็นต์ กราฟ (b) (c) และ (d) แสดงผลการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาค SI ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดสีของอนุภาค SI ที่ผ่านการเคลือบให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 92.37, 99.58 และ 98.31 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีเมทิลีนบลูของอนุภาค SI ที่ผ่านการใช้งานแล้วสองรอบที่เคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

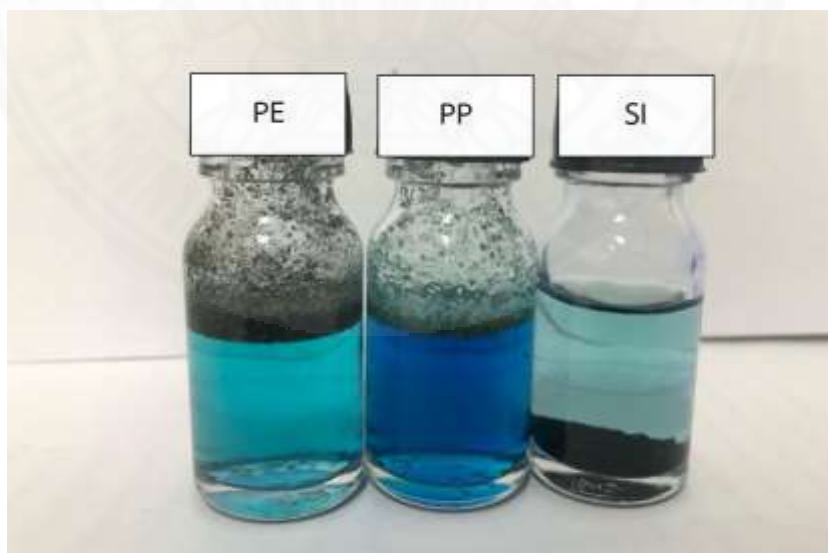
จากกราฟที่ 4.32 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีเมทิลีนบลูของอนุภาค SI ที่ผ่านการใช้งานแล้ว 2 ครั้ง จากการเคลือบนาน 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีของอนุภาค SI ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคด้วยพอลิโดพามีนและเคลือบอนุภาคแบบการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงก่อนเคลือบที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 99.58 เปอร์เซ็นต์

4.8 ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนทองแดงอย่างเดียวและอนุภาคนาโนทองแดงที่ผ่านการเคลือบบนอนุภาคของแข็ง

ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนทองแดงและอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบบนอนุภาคของแข็ง PE, PP และซิลิกาเจล



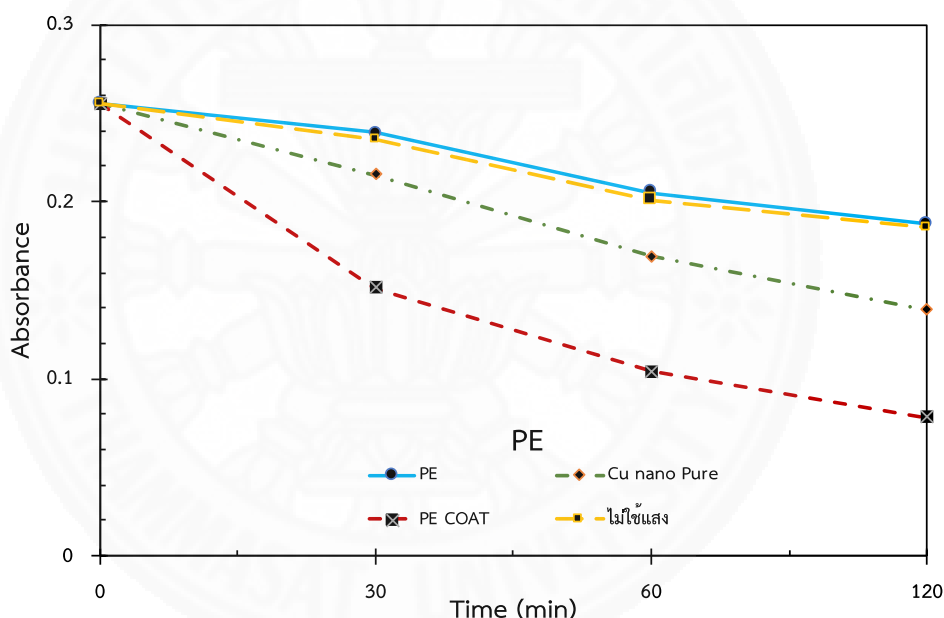
(a)



(b)

ภาพที่ 4.33 แสดงการเปรียบเทียบการกำจัดสีย้อม (a) การกำจัดสีย้อมด้วยอนุภาคนาโนเพียงอย่างเดียว (b) การกำจัดสีย้อมด้วยอนุภาคนาโนที่เคลือบบนอนุภาคของแข็ง

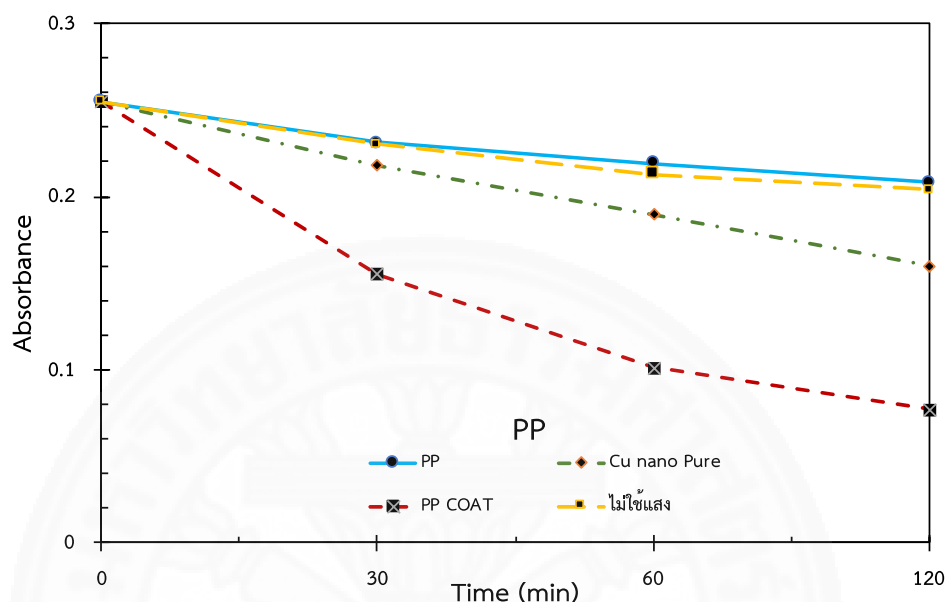
(a) การนำอนุภาคนาโนอย่างเดียวยใช้ในการกำจัดสีย้อมโดยเรียงจากปริมาณที่พบในอนุภาคพอลิเอทิลีนปริมาณ 8.48 มิลลิกรัม บนอนุภาคพอลิโพรไพลีน 6.95 มิลลิกรัมและซิลิกาเจล 11.85มิลลิกรัม พบว่าการใช้อนุภาคนาโนอย่างเดียวยในการกำจัดสีย้อมมีปัญหาบางประการคืออนุภาคนาโนมีขนาดเล็กมากจึงรวมตัวกันเป็นก้อนไม่แยกออกจากกันทำให้เกิดข้อจำกัดในการใช้งานพื้นผิวอนุภาคนาโนสัมผัสกับสีย้อมเมทิลีนบลูได้น้อยกว่าภาพ (b) เป็นอนุภาคนาโนทองแดงที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลลาร์เคลือบบนอนุภาคของแข็งนาน 12 ชั่วโมง โดยเรียงจากอนุภาคพอลิเอทิลีน พอลิโพรไพลีนและซิลิกาเจลตามลำดับจะเห็นได้ว่าสามารถกำจัดสีย้อมได้มากกว่าการใช้อนุภาคนาโนทองแดงเพียงอย่างเดียวเนื่องจากอนุภาคนาโนทองแดงกระจายตัวอยู่ที่อนุภาคของแข็งทำให้มีพื้นที่ผิวมากสามารถสัมผัสกับสีย้อมเมทิลีนบลูได้มากกว่าจึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ดีกว่า



ภาพที่ 4.34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีเมทิลีนบลูของผงพอลิเอทิลีน, อนุภาคนาโนทองแดงและผงพอลิเอทิลีนที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง

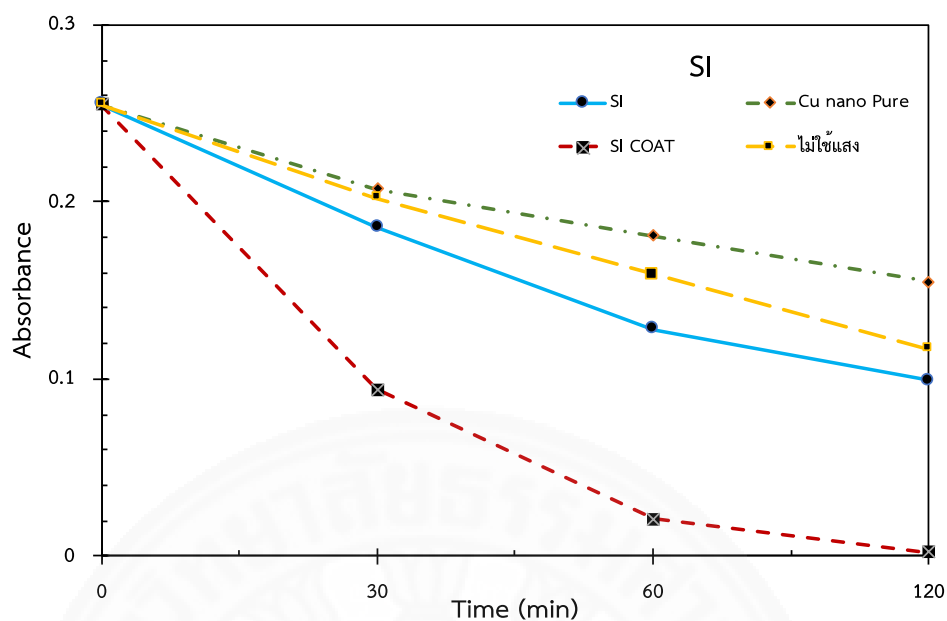
กราฟที่ 4.34 โดยการนำอนุภาค PE ที่ไม่ผ่านการเคลือบอนุภาค, อนุภาคนาโนทองแดงและอนุภาค PE ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง ทำการกำจัดสีเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ เป็นระยะเวลานาน 30, 60, 120 และ 240 นาทีพบว่าค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาค PE ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงมีประสิทธิภาพการกำจัดสีดีที่สุดคือ 86.27 เปอร์เซ็นต์ เมื่อสังเกตจากกราฟอนุภาคนาโนทองแดงแบบเคลือบอนุภาคพอลิเอทิลีน จะให้

ประสิทธิภาพดีกว่าการใช้อนุภาคนาโนทองแดงเพียงอย่างเดียวละสังเกตได้ว่าปฏิกิริยาแบบใช้แสงจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมดีกว่าแบบไม่ใช้แสงอาทิตย์



ภาพที่ 4.35 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีเมทิลีนบลูของผงพอลิโพรไพลีน, อนุภาคนาโนทองแดงและผงพอลิโพรไพลีน ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง

กราฟที่ 4.35 โดยการนำอนุภาค PP ที่ไม่ผ่านการเคลือบอนุภาค, อนุภาคนาโนทองแดง และอนุภาค PP ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง ทำการกำจัดสีเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ เป็นระยะเวลานาน 30, 60, 120 และ 240 นาทีพบว่าค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาค PP ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงมีประสิทธิภาพการย่อยสลายดีที่สุดคือ 81.18 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของการกำจัดสีเมทิลีนบลูของอนุภาค SI, อนุภาคนาโนทองแดงและอนุภาค SI ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง

กราฟที่ 4.36 โดยการนำอนุภาค SI ที่ไม่ผ่านการเคลือบอนุภาค, อนุภาคนาโนทองแดง และอนุภาค SI ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงนาน 12 ชั่วโมง ทำการกำจัดสีเมทิลีนบลู ภายใต้แสงอาทิตย์ เป็นระยะเวลานาน 30, 60, 120 และ 240 นาทีพบว่าค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาค SI ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงมีประสิทธิภาพการย่อยสลายดีที่สุดคือ 100 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงในเซรัมจากหางน้ำย่างที่อุณหภูมิห้อง

งานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงจากเซรัมของหางน้ำย่างจึงเป็นการสังเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อลดการใช้สารเคมี หางน้ำย่างเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการแปรรูปเหียงน้ำย่างขึ้นจึงเป็นการเพิ่มมูลค่าของหางน้ำย่างและสามารถลดการเกิดของเสียจากกระบวนการผลิตยางพารา ในการสังเคราะห์ที่ใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ที่อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส) พิกัดการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 420 - 450 นาโนเมตร มีแนวโน้มที่สูงที่สุดเป็นการบ่งชี้ว่าเกิดอนุภาคนาโนทองแดงเพิ่มมากขึ้น และขนาดอนุภาคนาโนทองแดงอยู่ในช่วง 5 - 10 นาโนเมตร เนื่องจากในระบบมีสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตมากขึ้นที่จะไปเกิดปฏิกิริยาเป็นอนุภาคนาโนทองแดงมากขึ้นและจากผลการทดลองสามารถสรุปปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1

ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงในเซรัมจากหางน้ำยางที่อุณหภูมิห้อง

ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์	ปริมาณของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้	เหตุผล
Cu^{2+}	ปริมาณ Cu^{2+} ที่เข้มข้นที่สุดคือ 2.4 มิลลิโมลาร์ สามารถเกิดอนุภาคนาโนทองแดงได้มากที่สุด	ในระบบมี Cu^{2+} ที่เป็นสารตั้งต้นมากขึ้น
เซรัม	ความเข้มข้นเซรัมแบบไม่เจือจางสามารถเกิดอนุภาคนาโนได้มากที่สุด	ในระบบมีสารอินทรีย์ต่างๆ ที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ มาก
เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	ปริมาณเพิ่มขึ้นและขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา	ในระบบมีสารตั้งต้นเหลืออยู่ ปฏิกิริยาจึงดำเนินต่อไปเรื่อยๆตามระยะเวลาที่มากขึ้น

5.1.2 การเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงบนพอลิเอทิลีน (PE) พอลิโพรไพลีน (PP)

และซิลิกาเจล

โดยการสังเคราะห์รูปแบบที่แตกต่างกันคือการเคลือบแบบอนุภาคของแข็งผ่านการเคลือบพอลิโดพามีนก่อนและแบบไม่ผ่านการเคลือบอนุภาคพอลิโดพามีน ต่อมาทำการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงแบบสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงก่อนเคลือบอนุภาคของแข็งและการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงขณะเคลือบ โดยตัวอย่างที่ดีที่สุดคือ จากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์เกิดอนุภาคนาโนทองแดงมากที่สุด จากนั้นจึงทำการเคลือบบนอนุภาคของแข็งคือ ผงพอลิเอทิลีน, ผงพอลิโพรไพลีนและซิลิกาเจล โดยนำอนุภาคที่ผ่านการเคลือบด้วยสารพอลิโดพามีนจากนั้นเคลือบอนุภาคแบบการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองแดงก่อนเคลือบที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมง

5.1.3 การทดสอบหาปริมาณอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบติดอนุภาคของแข็งพอลิเอทิลีน พอลิโพรไพลีนและซิลิกาเจล

ตารางที่ 5.2

การทดสอบหาปริมาณอนุภาคนาโนทองแดงที่ติดบนอนุภาคของแข็ง

ชนิดอนุภาคของแข็ง	วิธีการทดสอบ	ปริมาณอนุภาคนาโนที่ติดกับอนุภาคของแข็ง
ผงพอลิเอทิลีน (PE)	ทดสอบด้วยเครื่อง TGA	0.136 มิลลิกรัม จากน้ำหนักเริ่มต้น 7.660 มิลลิกรัม
ผงพอลิโพรไพลีน (PP)	ทดสอบด้วยเครื่อง TGA	0.0953 มิลลิกรัม จากน้ำหนักเริ่มต้น 9.7870 มิลลิกรัม
ซิลิกาเจล	ทดสอบโดยการชั่งอนุภาคของแข็งก่อนและหลังทำการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงเพื่อหาปริมาณน้ำหนักของนาโนทองแดงที่ติดกับอนุภาคของแข็ง	23.4 มิลลิกรัม จากน้ำหนักเริ่มต้น 1000 มิลลิกรัม

5.1.4 การทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลินบลู

ตารางที่ 5.3

แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูของอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบบนอนุภาคของแข็ง

ชนิดอนุภาคของแข็ง	ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลู
ผงพอลิเอทิลีน (PE)	91.95 %
ผงพอลิโพรไพลีน (PP)	88.84 %
ซิลิกาเจล	100 %
ผงพอลิเอทิลีน (PE)	65.80 %
ผงพอลิโพรไพลีน (PP)	61.86 %
ซิลิกาเจล	99.58 %
ซิลิกาเจล	98.31 %

จากตัวอย่างอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบบนอนุภาคของแข็งแบบสังเคราะห์ อนุภาคก่อนทำการเคลือบที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมงให้ผลการกำจัดสีย้อมที่ดีที่สุด เป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งอนุภาคพอลิเอทิลีน พอลิโพรไพลีนและซิลิกาเจล โดยทำการทดสอบหาปริมาณอนุภาคนาโนทองแดงที่ติดบนอนุภาคของแข็ง โดยตารางชุดสีเหลืองแทนการทดสอบอนุภาคนาโนทองแดงบนอนุภาคของแข็งครั้งแรก อนุภาคพอลิเอทิลีนจะให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 91.95 เปอร์เซ็นต์ อนุภาคพอลิโพรไพลีนจะให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 88.84 เปอร์เซ็นต์และซิลิกาเจลจะให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายเพียง 4 ชั่วโมง ด้วยกระบวนการแบบใช้แสง (Photocatalysis)

ตารางชุดสีเขียวแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูของอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบบนอนุภาคของแข็งที่ผ่านการใช้งานแล้ว 1 ครั้ง นำมาใช้งานซ้ำอีกครั้งโดยอนุภาคพอลิเอทิลีนจะให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 65.80 เปอร์เซ็นต์ อนุภาคพอลิโพรไพลีนจะให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 61.86 เปอร์เซ็นต์และซิลิกาเจลจะให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 99.58 เปอร์เซ็นต์

ตารางชุดสีฟ้าแสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบบนซิลิกาเจลที่ผ่านการใช้งานแล้ว 2 ครั้งเนื่องจากซิลิกาเจลยังให้ผลการบำบัดที่มีประสิทธิภาพที่ดีอยู่ จึงทำการนำซิลิกาเจลที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ซ้ำอีกเป็นครั้งที่สามซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือ 98.31 เปอร์เซ็นต์

5.1.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมระหว่างอนุภาคนาโนทองแดงและอนุภาคนาโนทองแดงที่ผ่านการเคลือบอนุภาคของแข็ง

ตารางที่ 5.4

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูระหว่างอนุภาคนาโนทองแดงและอนุภาคนาโนทองแดงที่ผ่านการเคลือบอนุภาคของแข็ง

ชนิดอนุภาค	ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู
ผงพอลิเอทิลีน (PE) ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดง	86.27 %
อนุภาคนาโนทองแดง 8.48 มิลลิกรัม	58.30 %
ผงพอลิโพรไพลีน (PP) ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดง	81.05 %
อนุภาคนาโนทองแดง 4.869 มิลลิกรัม	56.73 %
ซิลิกาเจลผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดง	100 %
อนุภาคนาโนทองแดง 11.85 มิลลิกรัม	60.65 %

จากนั้นทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้อนุภาคนาโนทองแดงอย่างเดียวและอนุภาคนาโนทองแดงที่ผ่านการเคลือบอนุภาค PE, PP และ ซิลิกาเจล พบว่าค่าประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนทองแดงที่เคลือบอนุภาคของแข็งมีประสิทธิภาพดีกว่าคือ PE ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงมีประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีที่สุดคือ 86.27

เปอร์เซ็นต์ อนุภาคPP ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงมีประสิทธิภาพการกำจัดดีที่สุดคือ 81.05 เปอร์เซ็นต์และอนุภาค SI ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคนาโนทองแดงมีประสิทธิภาพการย่อยสลายดีที่สุดคือ 100 เปอร์เซ็นต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) หางน้ำยางที่ใช้ควรเป็นน้ำยางลืตเดียวกันและไม่ควรเก็บเป็นระยะเวลานานเนื่องจากอาจส่งผลต่อคุณสมบัติเริ่มต้นของหางน้ำยาง
- 2) แม้ว่าจะทำการทดลองวันเดียวกันเพื่อให้ได้ความเข้มแสงที่เท่ากัน แต่ผลการทดลองอาจดีกว่านี้หากสามารถควบคุมแสงยูวีในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่ใช้แสง ดังนั้นอาจไม่ทราบความเข้มแสงที่แน่นอนหากไม่มีการควบคุม จะทำให้ผลการทดลองคาดเคลื่อนหรือประสิทธิภาพในการทดลองลดลง

รายการอ้างอิง

หนังสือและบทความในหนังสือ

- เซาวเลข ชยวัฒนางกูร หทัยการ มิละโฮ และ ผุสดี ช่วยแก้ว. (2553). *การนำไฟฟ้า ปริมาณของแข็ง ทั้งหมด สภาพต่าง และพีเอช*. กลุ่มวิจัยและพัฒนาชีวเคมีฯ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน).
- แม่น อมรสิทธิ์. (2534). *หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ*. ห้างหุ้นส่วน ชวนพิมพ์ จำกัด.

บทความวารสาร

- Balaji Mohan, Hyunje Woo, Seongwan Jang, Seungwan Lee, Sungkyun Park, Kang Hyun Park. (2013). Synthesis of monodisperse Cu nanoparticles in Ionic Liquids: A synthetic and catalytic approach of in situ nanoparticles
- Harekrishna Bar, Dipak Kr. Bhui, Gobinda P. Sahoo, Priyanka Sarkar, Sankar P De, Ajay Misra. (2009). Green synthesis of silver nanoparticles using latex of *Jatropha curcas*.
- Honglei Zhan, Tina Jagtiani, Jun F.Liang. (2017). A new targeted delivery approach by functionalizing drug nanocrystals through polydopamine coating.
- Inseong You, Hyejin Jeon, Kyueui Lee, Minjae Do, Young chang Seo, Haesung A. Lee, Haeshin Lee. (2016). Polydopamine coating in organic solvent for material-independent immobilization of water-insoluble molecules and avoidance of substrate hydrolysis.
- Jiang Xu, Na Xu, Ting Zhou, Xiang xiao, Biao Gao, Jijiang Fu, Tongcun Zhang. (2016). Polydopamine coatings embedded with silver nanoparticles on nanostructured titania for long-lasting antibacterial effect.
- Jin-Hong Jiang. Li-Ping Zhu, Xiao-lin Li, You-Yi Xu, Bao-Ku Zhu. (2010). Surface modification of PE porous membranes based on the strong adhesion of polydopamine and covalent immobilization of heparin.

- K.Rayapa Reddy. (2017) Green synthesis, morphological and optical studies of CuO nanoparticles.
- Nosheen Nazar, Ismat Bibi, Shagufta Kamal, Munawar Lqbal, Shazia Nouren, Kashif Jilani, Muhammad Umair, 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.
- Panu Danwanichakul, Thanawat Suwatthanarak, Chidchanok Suwanvisith, and Duangkamol Danwanichakul. (2016). The Role of Ammonia in Synthesis of Silver Nanoparticles in skim Natural Rubber Latex.
- Samuel Beckford, Min Zou. (2013). Wear resistant PTFE thin enabled by a polydopamine adhesive layer.
- Shikha Jain, Ankita Jain, Vijay Devra. (2015). Copper nanoparticles catalyzed oxidation of threonine by peroxomonosulfate.
- Thanawat Suwatthanarak, Bhumin Than-ardna, Duangkamol Danwanichakul, Panu Danwanichakul. (2016). Synthesis of silver nanoparticles in skim natural rubber latex at room temperature.
- Ting Xu, Yalong Qj, Xin Zhao, Qinghua Zhang. (2016). Controlled fabrication of nanostructures by assembling Au nanoparticles on functionalized polymeric spheres.
- YingZhan Li, Bijia Wang, Xiaofeng Sui, Ruyi Xie, Hong Xu, Linping Zhang, Yi Zhong, Zhiping Mao. (2017). Durable flame retardant and antibacterial finishing on cotton fabrics with cyclotriphosphazene/polydopamine/silver nanoparticles hybrid coatings.
- Zhenzhen Huang, Pey Ee Chua, Hian Kee Lee.(2015). Carbonized polydopamine as coating for solid-phase microextraction of organochlorine pesticides.

วิทยานิพนธ์

อดิสร จตุรพิริย์. (2549). การสลายตัวโฟโตแคตาไลติกของสารประกอบคลอโรฟีนอลโดยใช้ถึงปฏิกิริยาแบบเทที่มีการหมุนเวียน. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, คณะวิศวกรรม, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.

ชัยญานูช ชนะกิจการโชค และนภดาว หริพัฒน์กุล. (2559). การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดงโดยใช้ทางน้ำยางและการประยุกต์ใช้. (ปริญญานิพนธ์). มหาวิทยาลัย ธรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี.

สื่ออิเล็กทรอนิกส์

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. นวัตกรรมการนำกลับเนื้อยางและสารอินทรีย์จากการตะกอนของเสียในอุตสาหกรรมน้ำยางพารา. สืบค้นจาก <https://www.nstda.or.th/th/nstda-r-and-d/781-nstda-research-development-tlo-02>

สมคิด ชื่นอารมณ์. *Management of knowledge in rubber manufacturing*. สืบค้นจาก <http://rubber-digest.com/?p=110>

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณในงานวิจัย

ก.1 การคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ก.1.1 การคำนวณหาปริมาณเนื้อย่างแห้งในหางน้ำยาง (DRC)

เมื่อ น้ำหนักหางน้ำยางอบแห้งหลังจากจับยาง เท่ากับ 0.4127 กรัม

น้ำหนักหางน้ำยางเริ่มต้น เท่ากับ 10 กรัม

$$\text{จากสูตร ปริมาณเนื้อย่างแห้ง (DRC)} = \frac{\text{น.น.หางน้ำยางอบแห้งหลังจากจับยาง}}{\text{น.น.หางน้ำยางเริ่มต้น}} \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ ปริมาณเนื้อย่างแห้ง (DRC)} &= \frac{0.4127}{10} \times 100 \\ &= 3.912\% \end{aligned}$$

ก.1.2 การคำนวณหาปริมาณสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

เตรียมสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 8 มิลลิโมลาร์/ลิตร ปริมาตร 15 มิลลิลิตร จะต้องเตรียม CuSO_4 ปริมาณ

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

นั่นคือชั่งสาร CuSO_4 ปริมาณ 0.0191 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นจนมีปริมาตรรวมเท่ากับ 15 มิลลิลิตร จะได้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 8 มิลลิโมลาร์/ลิตร เนื่องจากต้องการให้ในสารแขวนลอยปริมาตร 11 มิลลิลิตร มีความเข้มข้นของ Cu^{2+} เท่ากับ 1.2 มิลลิโมลาร์/ลิตร จะต้องใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 8 มิลลิโมลาร์/ลิตร ปริมาตร

$$\begin{aligned} &= \frac{1.2 \text{ mmol}}{1 \text{ L}} \times 11 \text{ mL} \times \frac{1 \text{ L}}{8 \text{ mmol}} \\ &= 1.65 \text{ mL} \end{aligned}$$

ก.1.3 การคำนวณหาปริมาณเซรัมจากทางน้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

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

ก.1.4 การคำนวณหาปริมาณน้ำกลั่นที่ใช้ในการเจือจาง ในการทำปฏิกิริยา

จากข้อที่ ก.1.3 เนื่องจากต้องการให้ในสารแขวนลอยปริมาตร 11 มิลลิลิตร และใช้สัดส่วนการเจือจางเซรัมเป็น 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.1.5 การคำนวณเทียบปริมาณนาโนทองแดงที่ติดบนอนุภาคของแข็งที่ใช้ในการเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

ปริมาณอนุภาคนาโนทองแดงที่ติดที่อนุภาคพอลิเอทิลีนที่ได้จากการทำ TGA คือ 0.136 มิลลิกรัมจากน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น 7.660 มิลลิกรัมทำการเทียบคือ

น้ำหนักตัวอย่าง 7.660 มิลลิกรัมมีอนุภาคนาโนทองแดงอยู่ 0.136 มิลลิกรัม

ถ้าน้ำหนักตัวอย่าง 500 มิลลิกรัมจะมีอนุภาคนาโนทองแดงอยู่

$$= \frac{0.136 \times 500}{7.660} = 8.84 \text{ มิลลิกรัม}$$

สรุปจะใช้อนุภาคนาโนทองแดงที่ใช้ในการเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจำนวน 8.84 มิลลิกรัม

ปริมาณอนุภาคนาโนทองแดงที่ติดที่อนุภาคพอลิโพรไพลีนที่ได้จากการทำ TGA คือ 0.0953 มิลลิกรัมจากน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น 9.7870 มิลลิกรัมทำการเทียบคือ

น้ำหนักตัวอย่าง 9.7870 มิลลิกรัมมีอนุภาคนาโนทองแดงอยู่ 0.0953 มิลลิกรัม

ถ้าน้ำหนักตัวอย่าง 500 มิลลิกรัมจะมีอนุภาคนาโนทองแดงอยู่

$$= \frac{0.0953 \times 500}{9.7870} = 4.869 \text{ มิลลิกรัม}$$

สรุปจะใช้อนุภาคนาโนทองแดงที่ใช้ในการเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจำนวน
4.869 มิลลิกรัม

ปริมาณอนุภาคนาโนทองแดงที่ติดที่ซิลิกาเจลที่ได้จากการทำช่วงอนุภาค คือ 23.7
มิลลิกรัมจากน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น 1000 มิลลิกรัมทำการเทียบคือ

น้ำหนักตัวอย่าง 1000 มิลลิกรัมมีอนุภาคนาโนทองแดงอยู่ 23.7 มิลลิกรัม

ถ้าน้ำหนักตัวอย่าง 500 มิลลิกรัมจะมีอนุภาคนาโนทองแดงอยู่

$$= \frac{23.7 \times 500}{1000} = 11.85 \text{ มิลลิกรัม}$$

สรุปจะใช้อนุภาคนาโนทองแดงที่ใช้ในการเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจำนวน
11.85 มิลลิกรัม

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองอื่น ๆ

ตาราง ข.1

แสดงค่าความเป็นกรด-เบส และค่าการนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนทองแดงที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.1, 0.6, 1.2 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ (ของเซรัมแบบไม่เจือจาง)

ความ เข้มข้นของ CuSO ₄ (mM)	0 นาที		15 นาที		30 นาที		60 นาที	
	ค่า pH	ค่าการนำ ไฟฟ้า (μ S)	ค่า pH	ค่าการนำ ไฟฟ้า (μ S)	ค่า pH	ค่าการนำ ไฟฟ้า (μ S)	ค่า pH	ค่าการนำ ไฟฟ้า (μ S)
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
1.2	9.55	5960	9.52	5860	9.53	5130	9.38	3840
2.4	9.41	5120	9.42	4910	9.41	4380	9.35	4630

ตารางที่ ข.2

ขนาดความกว้างอนุภาคพอลิเอทิลีน (PE) ด้วยด้วยกล้องสเตรียโอไมโครสโคปจากการสุ่มตัวอย่าง
100 ตัวอย่าง

อนุภาคพอลิเอทิลีน (PE) ขนาดความกว้าง	จำนวน
0-3	0
3-6	7
6-9	5
9-12	15
12-15	11
15-18	8
18-21	5
21-24	5
24-27	5
27-30	7
30-33	5
33-36	6
36-39	0
39-42	6
42-45	3
45-48	3
48-51	0
51-54	6
54-57	3
57-60	0
More	0

ตารางที่ ข.3

ขนาดความยาวอนุภาคพอลิเอทิลีน (PE) ด้วยด้วยกล้องสเตรียโอไมโครสโคปจากการสุ่มตัวอย่าง 100 ตัวอย่าง

อนุภาคพอลิเอทิลีน (PE) ขนาดด้านยาว	จำนวน
0-3	0
3-6	2
6-9	5
9-12	6
12-15	8
15-18	7
18-21	6
21-24	13
24-27	0
27-30	5
30-33	9
33-36	5
36-39	6
39-42	8
42-45	2
45-48	4
48-51	3
51-54	3
54-57	3
57-60	2
More	3

ตารางที่ ข.4

ขนาดความยาวอนุภาคซิลิกาเจลด้วยด้วยกล้องสเตรียโอไมโครสโคปจากการสุ่มตัวอย่าง 100 ตัวอย่าง

ซิลิกาเจล			
ขนาดด้านยาว	จำนวน	ขนาดด้านยาว	จำนวน
0-3	0	39-42	7
3-6	0	42-45	5
6-9	2	45-48	2
9-12	1	48-51	4
12-15	0	51-54	0
15-18	2	54-57	4
18-21	4	57-60	5
21-24	15	60-63	3
24-27	8	63-66	2
27-30	11	66-69	4
30-33	4	69-72	4
33-36	5	72-75	0
36-39	8	More	0

ตารางที่ ข.5

ขนาดความกว้างอนุภาคซิลิกาเจลด้วยด้วยกล้องสเตรียโอไมโครสโคปจากการสุ่มตัวอย่าง 100 ตัวอย่าง

ซิลิกาเจล			
ขนาดด้านกว้าง	จำนวน	ขนาดด้านยาว	จำนวน
0-3	0	33-36	3
3-6	0	36-39	3
6-9	5	39-42	2
9-12	14	42-45	2
12-15	7	45-48	1
15-18	8	48-51	9
18-21	0	51-54	5
21-24	18	54-57	0
24-27	11	57-60	0
27-30	9	More	0
30-33	3	More	0

ตารางที่ ข.6

ขนาดความกว้างอนุภาคพอลิโพรพิลีนด้วยด้วยกล้องสเตรียโอไมโครสโคปจากการสุ่มตัวอย่าง 100 ตัวอย่าง

พอลิโพรพิลีน (pp) ขนาดความกว้าง	จำนวน
0-3	0
3-6	0
6-9	0
9-12	1
12-15	6
15-18	14
18-21	9
21-24	11
24-27	7
27-30	7
30-33	7
33-36	5
36-39	3
39-42	9
42-45	2
45-48	3
48-51	5
51-54	5
54-57	6
57-60	0
More	0

ตารางที่ ข.7

ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของอนุภาคนาโนทองแดงเคลือบบนอนุภาคพอลิเอทิลีน พอลิโพรไพลีน และซิลิกาเจล แบบไม่ใช้แสงแดด

เวลา (นาทีก)	PE	PE 12	PE 12 do mix	PE 12 no	PE 12 no mix
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	2.79	7.97	8.76	6.37	7.97
60	3.19	15.94	16.33	10.76	12.35
120	4.78	16.73	18.33	15.54	14.34
240	1.20	5.58	6.37	4.78	3.59

เวลา (นาทีก)	PP	PP 12 do	PP 12 do mix	PP 12 no	PP 12 no mix
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	1.59	8.76	15.14	9.16	11.95
60	3.19	11.95	18.73	10.36	13.15
120	5.18	13.55	25.50	13.55	14.34
240	0.00	5.98	8.37	4.78	5.98

เวลา (นาทีก)	SI	Si 12 do	SI 12 do mix	SI 12 no	SI 12 no mix
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
30	18.33	22.31	36.65	23.11	27.49
60	28.69	37.85	53.39	39.84	40.64
120	38.25	48.61	67.33	49.00	50.20
240	5.58	16.33	19.52	8.76	10.76

ตารางที่ ข.8

ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของอนุภาคนาโนทองแดงเคลือบบนอนุภาคพอลิเอทิลีน พอลิโพรไพลีน และซิลิกาเจล แบบใช้แสงแดดครั้งที่ 1

เวลา (นาทีก)	PE	PE 12	PE 12 do mix	PE 12 no	PE 12 no mix
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	14.29	64.94	70.56	59.31	61.90
60	19.05	80.09	84.85	70.13	70.13
120	33.33	87.01	91.77	80.52	83.55
240	8.23	58.44	61.90	49.78	51.95

เวลา (นาทีก)	PP	PP 12 do	PP 12 do mix	PP 12 no	PP 12 no mix
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	6.78	64.70	69.07	58.90	60.59
60	9.32	69.49	77.12	63.98	66.53
120	16.53	84.32	88.98	69.92	72.88
240	5.08	58.90	61.86	51.27	53.39

เวลา (นาทีก)	SI	Si 12 do	SI 12 do mix	SI 12 no	SI 12 no mix
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	21.19	83.47	88.14	71.19	76.69
60	28.81	91.95	95.34	88.14	88.14
120	55.93	99.15	100.00	92.80	96.19
240	75.42	100.00	100.00	97.46	98.73

ตารางที่ ข.9

ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของอนุภาคนาโนทองแดงเคลือบบนอนุภาคพอลิเอทิลีน พอลิโพรไพลีน และซิลิกาเจล แบบใช้แสงแดดครั้งที่ 2

เวลา (นาทีก)	PE	PE 12	PE 12 do mix	PE 12 no	PE 12 no mix
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	2.12	29.66	38.56	6.78	19.49
60	6.78	41.10	45.34	12.71	22.88
120	13.56	51.27	52.97	23.31	33.90
240	21.61	63.98	66.53	44.07	50.00

เวลา (นาทีก)	PP	PP 12 do	PP 12 do mix	PP 12 no	PP 12 no mix
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	1.27	7.20	16.53	4.24	3.39
60	8.05	16.10	26.69	11.86	13.14
120	11.44	28.39	36.86	22.46	25.00
240	20.34	56.78	61.86	37.29	41.10

เวลา (นาทีก)	SI	Si 12 do	SI 12 do mix	SI 12 no	SI 12 no mix
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	17.80	56.36	63.14	52.97	54.66
60	27.97	77.12	83.05	70.76	71.61
120	46.61	93.64	95.34	80.51	85.59
240	63.56	97.03	99.58	91.10	92.37

ตารางที่ ข.10

ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของอนุภาคนาโนทองแดงเคลือบซิลิกาเจล แบบใช้แสงแดดครั้งที่ 3

เวลา (นาทื)	SI	Si 12 do	SI 12 do mix	SI 12 no	SI 12 no mix
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	3.39	46.19	59.75	36.02	41.95
60	22.88	85.17	90.25	75.85	79.66
120	33.05	95.76	99.58	91.95	93.64
240	60.59	99.15	100.00	94.49	97.88

ตารางที่ ข.11

ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมทิลีนบลูจากการกำจัดสีย้อมของอนุภาคนาโนทองแดงเคลือบบน
อนุภาคพอลิเอทิลีน พอลิโพรไพลีนและซิลิกาเจล แบบใช้แสงแดดครั้งที่ 1

เวลา (นาทีก)	PE	PE 12 do	PE 12 do mix	PE 12 no	PE 12 no mix
0	0.236±0.0042	0.236±0.0042	0.236±0.0042	0.236±0.0042	0.236±0.0042
30	0.211±0.0085	0.096±0.0085	0.088±0.111	0.116±0.0015	0.111±0.0021
60	0.204±0.0070	0.081±0.0072	0.068±0.0052	0.094±0.0061	0.088±0.0066
120	0.187±0.0089	0.046±0.0031	0.035±0.0040	0.069±0.0153	0.069±0.0046
240	0.154±0.0062	0.030±0.0085	0.019±0.0044	0.045±0.0036	0.038±0.0031

เวลา (นาทีก)	PP	PP 12 do	PP 12 do mix	PP 12 no	PP 12 no mix
0	0.236±0.0042	0.236±0.0042	0.236±0.0042	0.236±0.0042	0.236±0.0042
30	0.224±0.0017	0.097±0.0072	0.090±0.0101	0.115±0.0036	0.110±0.0029
60	0.220±0.0031	0.083±0.0057	0.073±0.0032	0.0970.0035	0.093±0.0015
120	0.214±0.0046	0.072±0.0035	0.054±0.0110	0.0850.0038	0.079±0.0050
240	0.197±0.0040	0.037±0.0040	0.0260.0025	0.071±0.0069	0.064±0.0064

เวลา (นาทีก)	SI	Si 12 do	SI 12 do mix	SI 12 no	SI 12 no mix
0	0.236±0.0042	0.236±0.0042	0.236±0.0042	0.236±0.0042	0.236±0.0042
30	0.186±0.0072	0.039±0.0056	0.028±0.0093	0.068±0.0105	0.055±0.0076
60	0.168±0.0029	0.019±0.0108	0.011±0.0060	0.028±0.0167	0.028±0.0189
120	0.104±0.0055	0.002±0.0015	0.000±0.0000	0.017±0.0106	0.009±0.0057
240	0.058±0.0064	0.000±0.0000	0.000±0.0000	0.006±0.0036	0.003±0.0025

ตารางที่ ข.12

ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมทิลีนบลูจากการกำจัดสีย้อมของอนุภาคนาโนทองแดงเคลือบบน
อนุภาคพอลิเอทิลีน พอลิโพรไพลีนและซิลิกาเจล แบบใช้แสงแดดครั้งที่ 2

เวลา (นาทีก)	PE	PE 12 do	PE 12 do mix	PE 12 no	PE 12 no mix
0	0.248±0.0015	0.248±0.0015	0.248±0.0015	0.248±0.0015	0.248±0.0015
30	0.231±0.0071	0.166±0.0204	0.145±0.0120	0.220±0.0208	0.190±0.0346
60	0.220±0.0062	0.139±0.0126	0.129±0.0141	0.206±0.0159	0.182±0.0350
120	0.204±0.0035	0.115±0.0104	0.111±0.105	0.181±0.0261	0.156±0.0199
240	0.185±0.0081	0.085±0.0216	0.079±0.0236	0.132±0.0551	0.118±0.0424

เวลา (นาทีก)	PP	PP 12 do	PP 12 do mix	PP 12 no	PP 12 no mix
0	0.248±0.0015	0.248±0.0015	0.248±0.0015	0.248±0.0015	0.248±0.0015
30	0.233±0.0047	0.219±0.0087	0.197±0.0035	0.226±0.0093	0.228±0.0107
60	0.217±0.0156	0.198±0.0050	0.173±0.0090	0.208±0.0121	0.205±0.0154
120	0.209±0.0163	0.169±0.0053	0.149±0.0246	0.183±0.0040	0.177±0.0035
240	0.188±0.0038	0.102±0.0157	0.090±0.0148	0.148±0.0252	0.139±0.0081

เวลา (นาทีก)	SI	Si 12 do	SI 12 do mix	SI 12 no	SI 12 no mix
0	0.248±0.0015	0.248±0.0015	0.248±0.0015	0.248±0.0015	0.248±0.0015
30	0.194±0.0061	0.103±0.0369	0.087±0.0301	0.111±0.0354	0.107±0.0354
60	0.170±0.0171	0.054±0.0057	0.040±0.0026	0.069±0.0038	0.067±0.0044
120	0.126±0.0250	0.015±0.0035	0.011±0.0053	0.046±0.0117	0.034±0.0079
240	0.086±0.0172	0.007±0.0010	0.001±0.0010	0.021±0.0040	0.018±0.0036

ตารางที่ ข.13

ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมทิลีนบลูจากการกำจัดสีย้อมของอนุภาคนาโนทองแดงเคลือบบน
อนุภาคซิลิกาเจล แบบใช้แสงแดดครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	SI	Si 24 do	SI 24 do mix	SI 24 no	SI 24 no mix
0	0.260±0.0000	0.260±0.0000	0.260±0.0000	0.260±0.0000	0.260±0.0000
30	0.228±0.0000	0.130±0.0050	0.112±0.0036	0.144±0.0055	0.136±0.0051
60	0.182±0.0000	0.032±0.0046	0.027±0.0040	0.096±0.0082	0.065±0.0087
120	0.158±0.0000	0.017±0.0015	0.015±0.0015	0.045±0.0097	0.030±0.0061
240	0.093±0.0000	0.009±0.0020	0.004±0.0012	0.031±0.0035	0.018±0.0012

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวแพร แยม่วงค์
 วันเดือนปีเกิด 17 กรกฎาคม 2535
 วุฒิการศึกษา ปีการศึกษา 2557: วิทยาศาสตรบัณฑิต
 (เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม
 เกล้าพระนครเหนือ

ผลงานทางวิชาการ

แพร แยม่วงค์ และ ภาณุ ตำนวนิชกุล. (2561). การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองแดงโดยใช้เซรามิก
 จากหางน้ำยางเคลือบบนผิวอนุภาคพอลิเอทิลีน: การประชุมวิชาการระดับชาติด้าน
 เทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม ครั้งที่ 4 (น. 34). อุบลราชธานี.

แพร แยม่วงค์, สุธาสิน นุ่นลอย และ จันทิยา อิศณพงษ์. (2557). การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการ
 ตรึงเอนไซม์แลคเคสบนโครงสร้างนาโนไทเทเนียมไฮดรอกไซด์แบบรูพรุนและสามมิติ.
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์, สาขา
 เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม.