

การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์คอมโพสิต
เพื่อการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสีย
Feasibility Study on The Use of Reduced Graphene Oxide-Iron Oxide
Composite For Removal of Hexavalent Chromium In Wastewater

พิรพัฒน์ คำเกิด¹ ดุษฎี คำบุญเรือง^{1*} และ นเรนทร บุญส่ง²

Peraphat Kamkird¹, Dusadee Khamboonrueang^{1*} and Naraintorn Boonsong²

¹ สาขาวิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

² สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและเทคโนโลยี คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

¹ Major Physics and General Science, Department of Science, Faculty of Science and Technology,
Nakhon Sawan Rajabhat University

² Department of Agricultural Engineering and Technology, Faculty of Agriculture and Natural Resources,
Rajamangala University of Technology Tawan-ok
E-mail: dusadee.k@nsru.ac.th Tel: 080-7049016

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสามารถของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์คอมโพสิต (Fe_2O_3 -x%RGO) ในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสีย โดยเตรียมสารตัวอย่างคอมโพสิตระหว่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์โดยวิธีโซลโวเทอร์มอล จากนั้นนำสารตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM ส่วนโครงสร้างสามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD สมบัติเชิงแสงและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงศึกษาด้วยเครื่อง UV-vis การตรวจสอบสมบัติทางแม่เหล็กโดยใช้เครื่อง VSM ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM แสดงให้เห็นอนุภาคของเหล็กออกไซด์กระจายตัวอยู่บนผิวของกราฟีนออกไซด์และแทรกตัวอยู่ระหว่างชั้นของกราฟีนออกไซด์ ในส่วนของ XRD พบว่า สารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์ แสดงโครงสร้างของเหล็กออกไซด์แบบฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) และผลของ VSM แสดงสมบัติแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติก ส่วนผลของ UV-vis สามารถนำค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างไปวิเคราะห์ได้ว่าสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์มีค่าแถบช่องว่างพลังงานอยู่ระหว่าง 2.50 - 2.80 อิเล็กตรอนโวลต์ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ - เหล็กออกไซด์ ในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสีย พบว่า สารคอมโพสิต Fe_2O_3 -20%RGO สามารถกำจัดสารละลายโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ได้ดีที่สุด และการลดลงของความเข้มข้นโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr(VI)) ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของสารตัวอย่าง

คำสำคัญ : รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เหล็กออกไซด์ การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โครเมียมเฮกซะวาเลนต์

Abstract

This research has studied the ability of the reducing graphene oxide-iron oxide composite (Fe_2O_3 -x%RGO) to get rid of hexavalent chromium in wastewater by preparing a composite sample between reducing graphene oxide-iron oxide by the solvothermal method Then take the sample substance that has been analyzed for morphology with SEM. The structure can be analyzed with XRD. The optical properties and the photocatalytic efficiency studied with UV-vis machines. Examining the magnetic properties using VSM. The SEM analysis results show that iron oxide particles spread on the surface of graphene oxide and insert between layers of graphene oxide. In the section XRD found that the reducing graphene oxide-iron oxide composite substances show the structure of the hematite iron

oxide (Fe_2O_3) and the effect of VSM showing the ferro-magnetic properties. The effect of UV-vis can bring the absorbance of the sample substance can be analyzed that the reducing graphene oxide-iron oxide composite substances has an energy gap between 2.50 - 2.80 electron volts. In addition, the analysis of the photocatalytic efficiency of the reducing graphene oxide-iron oxide composite substances in the removal of hexavalent chromium in wastewater found that the composite substance Fe_2O_3 -20%RGO is best able to get rid of hexavalent chromium solution. And the decrease in hexavalent chromium concentration (Cr(VI)) makes it known the efficiency of the photocatalytic of the sample.

Keywords : Reduce Graphene Oxide, Iron Oxide, Photocatalytic Activity, Hexavalent Chromium

1. บทนำ

แหล่งน้ำตามธรรมชาติหลายแห่งกำลังประสบปัญหามลภาวะทางน้ำกล่าวคือ เกิดการปนเปื้อนของสารเคมี ขยะ และสิ่งสกปรก ที่มาจากภาคครัวเรือน และภาคอุตสาหกรรม โดยอาจมีการปนเปื้อนสารพิษพวกยาฆ่าแมลงและยาปราบศัตรูพืช และ โลหะหนัก รวมถึงการที่แหล่งน้ำมีคราบน้ำมันปกคลุม และโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ปล่อยสารพิษ และความร้อนลงสู่แหล่งน้ำ (BBC Thai, 2017) โดยเฉพาะการปนเปื้อนโลหะหนักอย่างโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ หรือ เฮกซะวาเลนต์โครเมียม (hexavalent chromium, Cr(VI)) ซึ่งเป็นสารอันตรายที่จัดอยู่ในกลุ่มสารก่อมะเร็ง ผู้ที่ได้รับสารโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จะมีอาการระคายเคืองที่ผิวหนัง หอบหืด และเป็นโรคระบบทางเดินหายใจ (Danwittayakul and Thanaboonsombat, 2013) การปนเปื้อนของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์มีสาเหตุหลักมาจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ มีการนำโครเมียมมาใช้เป็นวัตถุดิบ เช่น การผลิตสี ย้อม อุตสาหกรรมพ่นสี การชุบโลหะ ฯลฯ โดยน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตมีโอกาสที่จะปนเปื้อนสารประกอบโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ เมื่อน้ำทิ้งที่มีการปนเปื้อนไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติและแหล่งน้ำใต้ดิน โครเมียมเฮกซะวาเลนต์จะถูกสะสมในสัตว์น้ำ พืช น้ำ รวมถึงผลิตผลทางการเกษตรที่ใช้แหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนในการเพาะปลูก (Changsuwan, 2019) โครเมียมเฮกซะวาเลนต์สามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ผ่านการดื่มน้ำจากแหล่งที่มีการปนเปื้อนโดยตรงหรือ ทางอ้อมโดยการบริโภคสัตว์น้ำ พืช น้ำ รวมถึงผลิตผลทางการเกษตรที่ปนเปื้อน การแก้ปัญหาทางน้ำแต่เดิมนิยมโดยใช้วัสดุที่มีความพรุนสูงเป็นตัวดูดซับสารเคมีในน้ำ (Chairat and Panya, 2019) แต่วิธีการดังกล่าวสารเคมีเป็นพิษเหล่านั้นไม่ได้ถูกกำจัดไปเพียงแต่เกาะตัวอยู่บนวัสดุที่มีความพรุนสูงนั้น และวัสดุดูดซับจะกลายเป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารพิษสูง (Narawong and Panya, 2017) ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดสารพิษบนวัสดุดูดซับเหล่านั้นอีกครั้ง ส่งผลทำให้ต้องมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเพิ่มมากขึ้น

ในปัจจุบันมีวิธีแก้ปัญหาที่น่าสนใจอีกวิธีหนึ่งคือกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยกระบวนการดังกล่าวจะเป็นการทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสกับสารพิษในน้ำเสีย สารพิษดังกล่าวจะเกิดการเปลี่ยนสภาพกลายเป็นสารที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งการทำให้เกิดโฟโตคะตะไลซิสเกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์ที่กระตุ้นด้วยแสงจากรังสียูวีหรือแสงขาวที่ได้จากรังสีของดวงอาทิตย์ กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมีความเหมาะสมอย่างมากต่อการนำมาประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียในประเทศไทย เนื่องจากเป็นประเทศในเขตร้อนที่มีแสงแดดตลอดทั้งปี ในบรรดาวัสดุที่ใช้ในงานด้านโฟโตคะตะไลซิสนั้นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (RGO) เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจเนื่องจากไม่เป็นพิษ สิ่งที่เราได้ไม่ยากและพื้นที่ผิวสัมผัสมากซึ่งมีผลในด้านโฟโตคะตะไลซิสมาก ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับสารมลพิษได้มาก สารเคมีพิษจึงกลายเป็นสารที่ไม่เป็นพิษได้มากขึ้นตามไปด้วย การเพิ่มความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ทำได้โดยเติมอนุภาคนาโนที่สามารถเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนได้ดีเข้าไปยังรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ อนุภาคของเหล็กออกไซด์เป็นหนึ่งในวัสดุนาโนเดิมแต่ที่เหมาะสมสำหรับงานนี้ เนื่องจากเหล็กออกไซด์มีสมบัติทางด้านแม่เหล็ก (Alice, 2018) ที่ดีต่อการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับสารมลพิษได้ (Board of Dartmouth College, 2004) จากการศึกษาของงานวิจัยของ Uma et al., 2020 นำเสนอว่านาโนคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์รองรับอนุภาค

นาโนเหล็กออกไซด์ (RGO@ α -Fe₂O₃NC) เตรียมโดยใช้วิธีโซล-เจล มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายของสีย้อมเมทิลีนบลู (MB) ภายใน 30 นาที และยังพบว่ามีประสิทธิภาพในการย่อยสลายได้ดีกว่า รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ (α -Fe₂O₃) และงานวิจัยของ Wang et al., 2016 ได้นำเสนอรายงานว่าอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ที่สังเคราะห์ในเอ็น-บิวทิลแอลกอฮอล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ภายใต้การฉายรังสีของแสงที่มองเห็นได้ ($\lambda > 400$ นาโนเมตร) ดังนั้นนำเอาสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์มากำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสีย จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจและน่าจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้มีความสนใจที่จะเติมอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ลงบนผิวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยใช้วิธีโซลโวเทอร์มอล (Sergey et al., 2010) เพื่อให้ได้สารคอมโพสิตระหว่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์ แล้วจะนำสารที่สังเคราะห์ไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ และศึกษาความเป็นไปได้ในการนำสารคอมโพสิตระหว่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์ ในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสีย

2. วิธีการศึกษา

2.1 อุปกรณ์และสารเคมี

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) รุ่น: Quanta 450 เนเธอร์แลนด์ เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometers: XRD) รุ่น: D8 Advance เยอรมัน เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Ultra violet - visible spectrophotometer: UV-vis) รุ่น Perkin Elmer Lambda 650 ผลิตโดยบริษัท Waltham สหรัฐอเมริกา เครื่องวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุนาโน ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และชุดอุปกรณ์ทดสอบสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic setup) สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ กราฟีนออกไซด์ (GO) ที่เตรียมด้วยวิธีการของฮัมเมอร์ที่ปรับปรุงแล้ว น้ำปราศจากไอออน (Deionized water) เพอริคคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต (Iron(III) chloride hexahydrate: FeCl₃·6H₂O) เกรด AR บริษัท MERCK เอทานอล (Ethanol: C₂H₆O) $\geq 99.97\%$ เกรด AR บริษัท MERCK และโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Chromium (VI) oxide) 99% เกรด AR บริษัท Qrec

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 การเตรียมสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์

การเตรียมสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃-x%RGO) ด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล โดยเริ่มจากละลายแผ่นกราฟีน (GO) ที่ความเข้มข้นต่างกันตามสัดส่วนต่าง ๆ ได้แก่ 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนักในเอทานอล 30 มิลลิลิตรในขวดเก็บสารเคมีขนาด 100 มิลลิลิตร ผสมแล้วนำไปจุ่มลงในเครื่องอัลตราโซนิกจนกระทั่งแผ่นกราฟีนกระจายตัวจนหมด เติมน้ำเพอริคคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตลงในสารผสมระหว่างกราฟีนออกไซด์กับเอทานอล จากนั้นเทสารผสมลงใน Teflon-lined stainless steel autoclave อบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนผ่านการกรองด้วยชุดกรองและปั๊ม และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (Khamboonrueang et al., 2018)

2.2.2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเครื่อง XRD เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างของสารตัวอย่าง นำสารตัวอย่างที่ได้จากการสังเคราะห์มาบดให้ละเอียดเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของสารตัวอย่างจะได้ผลของการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำมากขึ้น จากนั้นนำสารตัวอย่างบรรจุลงในช่องใส่สารตัวอย่าง (Sample holder) แล้วใช้กระจกสไลด์กดปิดฝาผิวหน้าให้เรียบแล้วนำไปเข้าเครื่อง XRD โดยทำการวิเคราะห์ที่ค่ามุม 2 θ ในช่วง 5 - 90 องศา

2.2.3 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นการศึกษาสัณฐานวิทยาของสารตัวอย่าง เริ่มจากนำสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้จำนวนเล็กน้อยละลายในเอทานอลแล้วสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเพื่อกระจายอนุภาค จากนั้นดูดสารตัวอย่างมาหยดลงบนอุปกรณ์รองรับสารตัวที่เรียกว่า สตับ ที่ได้ติดแผ่นอะลูมิเนียมที่ผิวของสตับก่อนหยดสารละลายตัวอย่างจำนวน 1 - 2 หยด ทิ้งให้แห้ง จากนั้นนำสตับเคลือบทองด้วยเครื่อง Gold Sputter เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สามารถนำไฟฟ้าได้จะได้ภาพที่คมชัดขึ้น นำสารตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบทองแล้วไปตรวจวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พร้อมทั้งเลือกภาพ จุดและบริเวณที่สนใจ

2.2.4 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

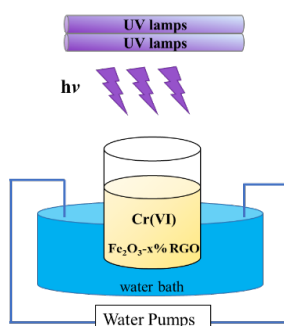
การวัดสารตัวอย่างด้วยเครื่อง UV-vis เป็นการศึกษาการดูดกลืนแสง นำสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้มาบดให้ละเอียดแล้วอบให้แห้งเพื่อไล่ความชื้น จากนั้นเทสารตัวอย่างลงบนแผ่นสก็อตเทปใสด้านที่มีกาว เคาะแผ่นสก็อตเทปเพื่อให้สารตัวอย่างที่ไม่ติดสก็อตเทปออก เทสารตัวอย่างเข้าบนสก็อตเทปอันเดิม แล้วเคาะแผ่นสก็อตเทปเพื่อให้สารตัวอย่างที่ไม่ติดสก็อตเทปออก ทำซ้ำจนกระทั่งสารตัวอย่างกระจายเต็มทั่วแผ่นสก็อตเทป โดยสารตัวอย่างที่ติดบนสก็อตเทปจะต้องไม่หนาจนเกินไปจนทำให้แสงทะลุผ่านไม่ได้ แล้วนำสก็อตเทปอีกแผ่นมาปิดทับแล้วนำสารตัวอย่างไปตรวจวัดด้วยเครื่อง UV-vis

2.2.5 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุนาโน

การตรวจสอบความเป็นแม่เหล็กของสารตัวอย่างด้วยเครื่องวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุนาโนจะใช้แมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั้น (VSM) เริ่มจากนำสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้มาบดให้ละเอียด แล้วอบให้แห้งเพื่อไล่ความชื้น ต่อมานำสารตัวอย่างใส่ในหลอดดูดยาว 2 เซนติเมตร พับหัวท้ายแล้วปิดด้วยสก็อตเทปให้สนิท จากนั้นนำไปชั่งและบันทึกค่า แล้วนำที่ก้านวัดตัวอย่างแบบสั้นให้แน่นและทำการวัดวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง VSM

2.2.6 การทดสอบสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

การทดสอบสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยชุดอุปกรณ์ทดสอบสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง เริ่มจากการใช้ผงสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์ตัวอย่าง ผสมกับสารละลายโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่เตรียมไว้ แล้วนำสารละลายผสมที่ได้เข้าไปเก็บในที่มีดเป็นเวลา 60 นาที เพื่อสร้างสมดุลการดูดซับและการละลายของสารละลายผสม จากนั้นดูดสารละลายผสมเก็บไว้บันทึกเป็นเวลาเริ่มต้นที่ 0 นาที แล้วนำสารละลายผสมมาทดสอบสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยชุดอุปกรณ์ทดสอบสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง และจะทำการดูดเก็บสารละลายผสมหลังจากได้รับแสงยูวีทุก ๆ 30 นาที จนครบ 240 นาที (0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที) จากนั้นนำสารละลายผสมที่ผ่านการทดสอบในแต่ละช่วงเวลาไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกเอาตะกอนแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-vis) แล้วนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาหาค่าความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่เหลืออยู่ โดยค่าความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่ลดลงจะทำให้ทราบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของสารตัวอย่าง (Perumal and Selvi, 2013)

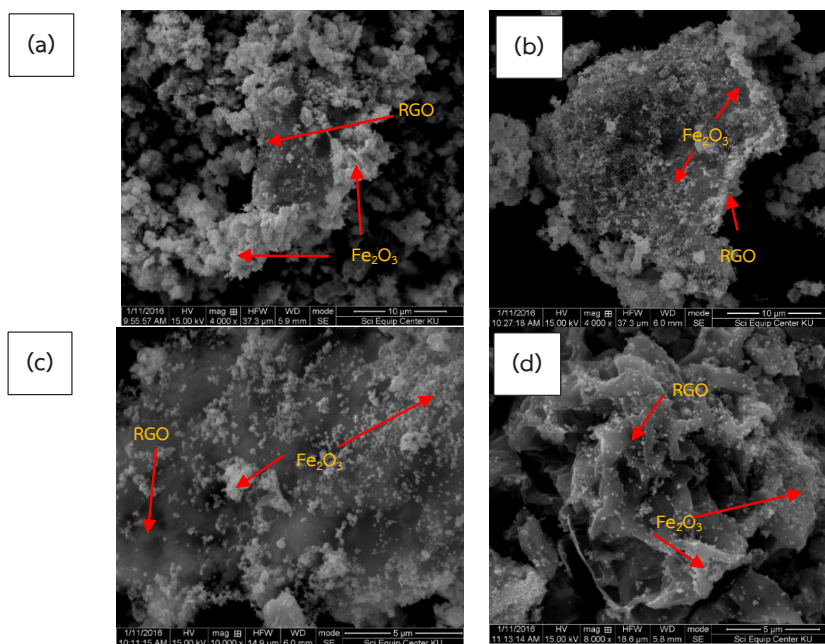


ภาพที่ 1 ชุดอุปกรณ์ทดสอบสมบัติทางด้านตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic Setup)

3. ผลการศึกษา

3.1 ผลการวิเคราะห์สารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์ ด้วยเครื่อง SEM

ผลการวิเคราะห์สารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์ ด้วยเครื่อง SEM สารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3 -x%RGO) โดยใช้ปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่แตกต่างกันตามปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนัก (โดยที่ x = 5, 10, 15 และ 20 wt%) ด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอลจะได้สารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์ ดังนี้ Fe_2O_3 -5%RGO, Fe_2O_3 -10%RGO, Fe_2O_3 -15%RGO และ Fe_2O_3 -20%RGO ตามลำดับ เมื่อนำสารคอมโพสิตดังกล่าวมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM จะได้ผลการวิเคราะห์ ดังภาพที่ 2

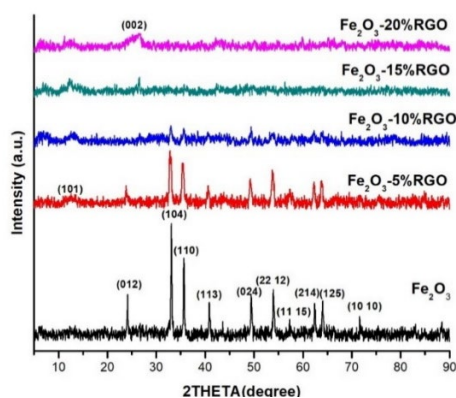


ภาพที่ 2 ภาพ SEM ของสารประกอบ Fe_2O_3 -x%RGO โดยภาพ (a) Fe_2O_3 -5%RGO, (b) Fe_2O_3 -10%RGO, (c) Fe_2O_3 -15%RGO และ (d) Fe_2O_3 -20%RGO

จากภาพที่ 2 พบว่า อนุภาคของเหล็กออกไซด์กระจายตัวเกาะอยู่ที่ผิวของแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ทั่วทั้งแผ่น และยังมีการแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ สอดคล้องกับรายงานของ Modafferi et al. (2019) และ Uma et al. (2020) โดยการกระจายตัวอนุภาคของเหล็กออกไซด์ของมากขึ้นตามปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น การกระจายตัวที่มากขึ้นของอนุภาคเหล็กออกไซด์บนผิวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จะทำให้พื้นที่ผิวให้การทำปฏิกิริยาเชิงแสงเพิ่มมากขึ้นการถ่ายโอนของอิเล็กตรอนจะทำได้ง่ายขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาเชิงแสงสูงขึ้นด้วย

3.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างของสารตัวอย่าง

การวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างของสารเหล็กออกไซด์และสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์ที่เจือ กราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกันคือ 5, 10, 15 และ 20 wt% ด้วยเครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ได้ผลดังภาพที่ 3

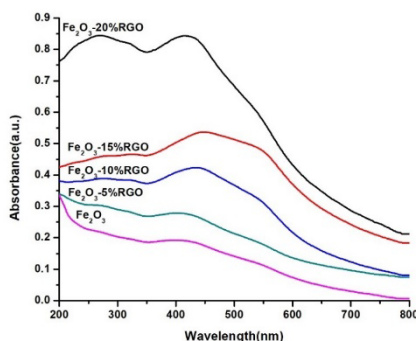


ภาพที่ 3 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์

ภาพที่ 3 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3 -x%RGO โดยที่ $x = 5, 10, 15$ และ 20 wt%) ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ พบว่า มีค่ามุมการเลี้ยวเบนที่ 2θ เท่ากับ $24.26^\circ, 33.11^\circ, 35.72^\circ, 40.83^\circ, 49.52^\circ, 53.98^\circ, 57.18^\circ, 62.35^\circ, 64.06^\circ, 71.63^\circ$, ตรงกับระนาบการสะท้อน (012), (104), (110), (113), (024), (22 12), (11 15), (214), (125) และ (10 10) ตามลำดับ ซึ่งเป็นสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แสดงระนาบการเลี้ยวเบนสอดคล้องกับรายงานของ Modafferi et al. (2019) และ Wang et al. (2016) และในส่วนของสารตัวอย่างของ Fe_2O_3 -15%RGO และ Fe_2O_3 -20%RGO จะไม่สังเกตเห็นสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของเหล็กออกไซด์แต่จะเห็นเพียงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เท่านั้น สาเหตุน่าจะมาจากการที่สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีความสูงของพีทที่สูงกว่าพีทของสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของเหล็กออกไซด์มาก ๆ จึงไม่สามารถสังเกตเห็นสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของเหล็กออกไซด์ในกราฟได้ ซึ่งสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ปรากฏจะแสดงที่ค่ามุมการเลี้ยวเบนที่ 2θ เท่ากับ 26.49° ตรงกับระนาบการสะท้อน (002) ระนาบการเลี้ยวเบนสอดคล้องกับรายงานผลของ Abasali Karaj Abad et al. (2020)

3.3 การวิเคราะห์ลักษณะการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่าง

การวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเหล็กออกไซด์และสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์ จะใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Ultra violet - visible spectrophotometer: UV-vis) ได้ผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ยูวีสเปกตรัมของเหล็กออกไซด์และสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์ สัดส่วนต่าง ๆ

จากภาพที่ 4 แสดงยูวีสเปกตรัมของเหล็กออกไซด์และสารคอมโพสิตเหล็กออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ พบว่า ที่ความยาวคลื่น 401.16 - 446.18 นาโนเมตร สอดคล้องกับการดูดกลืนแสงของเหล็กออกไซด์ นั้นแสดงให้เห็นว่าทุกสารตัวอย่างมีเหล็กออกไซด์เป็นองค์ประกอบสอดคล้องกับรายงานของ Rahman et al. (2011) อีกทั้งยังปรากฏ

พิชขนาดเล็ที่ความยาวคลื่นในช่วง 260 - 269 นาโนเมตร ซึ่งปรากฏในทุกตัวอย่าง ช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้นแสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในทุกสารตัวอย่าง และที่ความยาวคลื่นนี้เป็นการทรานซิชันของพันธะอะโรมาติกคาร์บอน (C=C) จาก π ไปยัง Plasmon เกิดจากวิธีการโซลโวเทอร์มอลทำให้เกิดการคอนจูเกตของพันธะ pi ใน กราฟีนออกไซด์ และการที่ปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นจะสังเกตเห็นพีคของเหล็กออกไซด์ชัดเจนมากขึ้น เนื่องมาจากพื้นที่ผิวในการดูดกลืนแสงมีมากขึ้นทำให้เหล็กออกไซด์สามารถดูดกลืนแสงได้มากขึ้นตามไปด้วย

จากผลการดูดกลืนแสงของเหล็กออกไซด์และสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์สามารถนำไปวิเคราะห์แถบช่องว่างพลังงานได้จากความสัมพันธ์

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{1/2}$$

โดยที่ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (optical absorption coefficient)

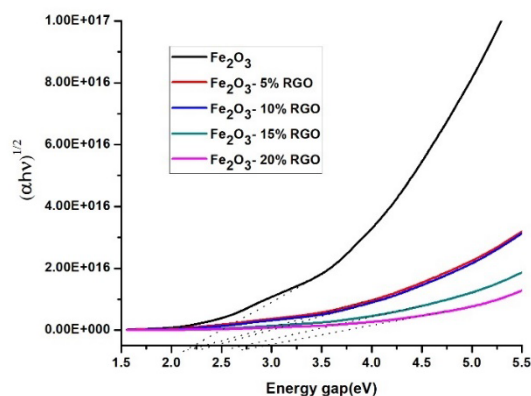
h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant)

ν คือ ความถี่ของโฟตอน (photon frequency)

A คือ ค่าคงที่ (constant)

E_g คือ ค่าแถบช่องว่างพลังงาน (direct band gap energy)

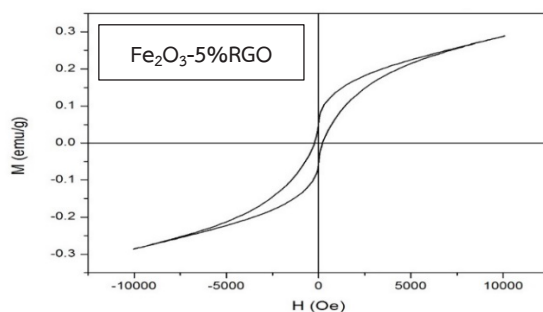
เมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ข้างต้น ไปเขียนกราฟได้ดังภาพที่ 5 โดยค่าแถบช่องว่างพลังงานสามารถพิจารณาได้จากส่วนของเส้นตรงที่ลากมาตัดกราฟที่ตำแหน่ง $(\alpha h\nu)^2 = 0$ ซึ่งค่าแถบช่องว่างพลังงานของสารเหล็กออกไซด์มีค่าอยู่ที่ 2.22 อิเล็กตรอนโวลต์ สอดคล้องกับรายงานของ Liang et al. (2021) และสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์มีค่าแถบช่องว่างพลังงานอยู่ระหว่าง 2.50 - 2.80 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยสารคอมโพสิตเหล็กออกไซด์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (Fe_2O_3 -5%RGO) ให้ค่าแถบช่องว่างพลังงานที่ต่ำที่สุด



ภาพที่ 5 แถบช่องว่างพลังงานของเหล็กออกไซด์และสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์

3.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น (Vibrating Sample Magnetometer: VSM) จะทำการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กต่อค่าแมกเนไทเซชันที่อุณหภูมิห้อง ค่าแม่เหล็กต่าง ๆ ได้แก่ Saturation magnetization (M_s), Remanence flux density (B_r) และค่า Coercivity (H_c) เมื่อถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งสารเฟอร์โรแมกเนติกก็จะแสดงอำนาจแม่เหล็กขึ้นมา โดยสารเฟอร์โรแมกเนติกจะยังสามารถรักษาสภาพความเป็นแม่เหล็กไว้ได้เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่มาเหนี่ยวนำเป็นศูนย์ จากการศึกษาดังกล่าวพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กต่อค่าแมกเนไทเซชันที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังภาพที่ 6

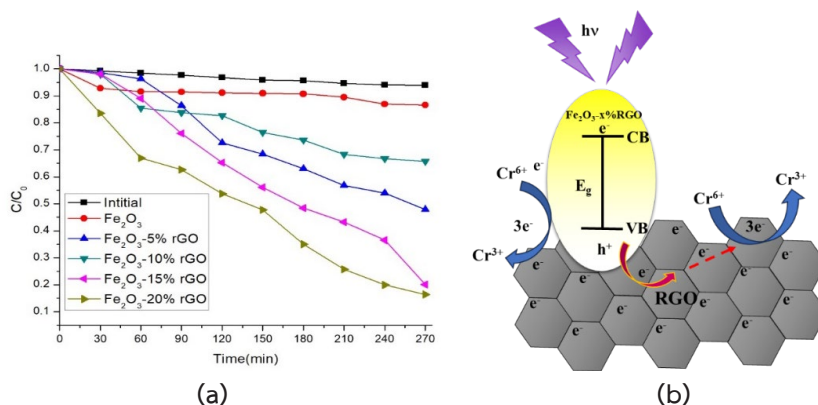


ภาพที่ 6 ฮิสเทอรีซิสลูปของสารคอมโพสิต Fe_2O_3 -5%RGO

จากภาพที่ 6 แสดงฮิสเทอรีซิสลูปของสารคอมโพสิต Fe_2O_3 -5%RGO แสดงให้เห็นว่าคอมโพสิตดังกล่าวมีสมบัติแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติก ส่วนสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์สัดส่วนอื่น ๆ ปริมาณ $x = 10, 15, 20$ มีลักษณะฮิสเทอรีซิสลูปคล้ายคลึงกับสารคอมโพสิต Fe_2O_3 -5%RGO และแสดงสมบัติแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติก รวมถึงอนุภาคเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ก็มีสมบัติแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติกเช่นเดียวกันสอดคล้องกับรายงานของ Chen et al. (2016) และ Ahmad et al. (2016) ส่วนรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์แสดงความเป็นแม่เหล็กแบบซูเปอร์พาราแมกเนติกเมื่อไม่เติม Fe_2O_3 และค่า M และ B มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยคอมโพสิต Fe_2O_3 -5%RGO มีค่าสูงสุด และจะเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กกลับล้ามีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้น

3.5 ผลการทดสอบความสามารถในการกำจัดสารละลายโครเมียมเฮกซะวาเลนต์

ผลการทดสอบ พบว่า เมื่อเวลาในการฉายรังสียูวีเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ต่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (C/C_0) จะลดลง แสดงว่าอัตราการรีดิวซ์สารละลายโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ก็มากขึ้น แสดงได้ดัง ภาพที่ 7 (a)



ภาพที่ 7 (a) กราฟค่าความเข้มข้นที่เหลืออยู่ต่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (C/C_0) กับเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย และ
(b) กลไกในการกำจัดสารละลายโครเมียมเฮกซะวาเลนต์

จากภาพที่ 7 (a) พบว่าสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์สามารถกำจัดสารละลายโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ได้ดีกว่าเหล็กออกไซด์ และเมื่อเวลาในการกำจัดเพิ่มมากขึ้นค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นความสามารถในการย่อยสลายสารละลายโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ก็มากขึ้น แต่ในสารประกอบ Fe_2O_3 -20%RGO พบว่า มีความสามารถย่อยสลายสารละลายโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ได้ดีที่สุด ดังนั้นแสดงว่าสารคอมโพสิต Fe_2O_3 -20%RGO เป็นสารคอมโพสิตที่มี

เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์มากที่สุด ผลการทดลองที่ได้มีความคล้ายกับการทดลองของ Uma et al. (2020) และ Khamboonrueang et al. (2018)

และจากภาพที่ 7 (b) จะแสดงกลไกในการกำจัดสารละลายโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ของสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์ เมื่อสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง ($h\nu$) โดยสารคอมโพสิตดังกล่าวจะดูดซับพลังงานจากแสงจนมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าแถบช่องว่างพลังงานของมัน ทำให้อิเล็กตรอน (e^-) ในแถบเวเลนซ์ (Valence band: VB) ถูกกระตุ้นให้กระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบการนำ (Conduction band: CB) อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะย้ายไปยังพื้นผิวของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะย้ายไปยังพื้นผิวของอนุภาคเหล็กออกไซด์ หรือไปยังพื้นผิวของ RGO เมื่ออิเล็กตรอนเหล่านั้นทำปฏิกิริยากับไอออนของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) โครเมียมเฮกซะวาเลนต์จะถูกเปลี่ยนให้เป็นไอออนไตรวาเลนต์โครเมียม (Cr^{3+})

4. สรุป

ในการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้คอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์ ในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสีย พบว่าลักษณะทางกายภาพของสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3 -x% RGO โดยที่ $x = 5, 10, 15$ และ 20 wt%) อนุภาคของเหล็กออกไซด์กระจายตัวเกาะอยู่ที่ผิวของแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ทั่วทั้งแผ่น และยังมีการแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยอนุภาคของเหล็กออกไซด์มีการกระจายตัวมากขึ้นตามปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น สมบัติเชิงโครงสร้างจะแสดงโครงสร้างเหล็กออกไซด์แบบฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) ซึ่งเมื่อปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในสารประกอบมากขึ้นโครงสร้างของเหล็กออกไซด์จะปรากฏให้เห็นน้อยลง ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงแสง พบว่า จะปรากฏสเปกตรัมการดูดกลืนแสง ในช่วงความยาวคลื่น $401 - 446$ นาโนเมตร และช่วง $260 - 269$ นาโนเมตร ผลการวิเคราะห์ช่องว่างแถบพลังงาน พบว่า ช่องว่างแถบพลังงานของเหล็กออกไซด์มีค่า 2.22 eV และช่องว่างแถบพลังงานของสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์มีค่าแถบช่องว่างพลังงานอยู่ระหว่าง $2.50 - 2.80$ อิเล็กตรอนโวลต์ การวิเคราะห์สมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น พบว่า สารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์มีสมบัติแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติก ผลการทดสอบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง พบว่า สารคอมโพสิต Fe_2O_3 -20%RGO มีความเหมาะสมในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์มากที่สุด เนื่องจากสามารถในการกำจัดสารละลายโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ได้ดีที่สุด และการรีดิวซ์โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ของสารคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เหล็กออกไซด์จะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในสารคอมโพสิตเพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ ที่สนับสนุนทุนวิจัยและสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- Abasali karaj abad, Z., Nemati, A., Khachatourian, A.M., & Golmohammad, M. (2020). Synthesis and characterization of rGO/ Fe_2O_3 nanocomposite as an efficient supercapacitor electrode material. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **31**: 14998-15005.
- Ahmad, W.R.W., Mamat, M.H., Zoolfakar, A.S., Khusaimi, Z., & Rusop, M. (2016). A Review on Hematite α - Fe_2O_3 Focusing on Nanostructures, Synthesis Methods, and Applications. *The 13th IEEE Student conference on Research and Development (SCoReD 2016)*. The IEEE Malaysia Section, and IEEE International Islamic University (IIUM) Student Branch. Kuala Lumpur, Malaysia.

- Alice bush. (2018). **Iron oxide nanoparticles, characteristics, and applications**. Retrieved 5 June 2023, from sigma-aldrich.com.
- BBC Thai. (2017). **Klity: An old story that made a new chapter in the history of community environmental cases**. Retrieved 5 June 2023, from <https://www.bbc.com/thai/thailand-41225292>. (in Thai)
- Board of Dartmouth College. (2004). **Iron oxide stoichiometry**. Retrieved 5 June 2023, from dartmouth.edu. (in Thai)
- Chairot, M. & Panya, P. (2019). Adsorption of hexavalent chromium using *Eichhornia crassipes*. **Proceeding of The 6th National conference KPRU Kamphaeng Phet Rajabhat University Proceeding (pp. 577-586)**. Kamphaeng Phet: Kamphaeng Phet Rajabhat University. 20 December 2019.
- Changsuwan, A. (2019). Hexavalent Chromium in Food. **Department of Science Service Ministry of Science and Technology, 68**(209), 26-28.
- Chen, K.-L., Yeh, Y.-W., Chen, J.-M., Hong, Y.-J., Huang, T.-L., Deng, Z.Y., Wu, C.-H., Liao, S.-H. & Wang, L.-M. (2016). **Influence of magnetoplasmonic γ -Fe₂O₃/Au core/shell nanoparticles on low-field nuclear magnetic resonance**. Scientific Reports 6: 35477.
- Danwittayakul, S. & Thanaboonsombat, A. (2013). Do you already know “hexavalent chromium”, a dangerous substance near you. **Materials Technology, 68**: 12-18: January - March 2013.
- Khamboonrueang D., Srirattanapibul S., Tang, I-M., & Thongmee, S. (2018). TiO₂·rGO nanocomposite as a photo catalyst for the reduction of Cr⁶⁺. **Materials Research Bulletin, 107**: 236-241.
- Liang, Y.C., & Hsu, Y.W. (2021). Enhanced Sensing Ability of Brush-Like Fe₂O₃-ZnO Nanostructures Towards NO₂ Gas via Manipulating Material Synergistic Effect. **International Journal of Molecular Sciences: 1-12**.
- Modafferi, V., Santangelo, S., Fiore, M., Fazio, E., Triolo, C., Patane, S., Ruffo, R., & Musolino, M.G. (2019). Transition Metal Oxides on Reduced Graphene Oxide Nanocomposites: Evaluation of Physicochemical Properties. **Journal of Nanomaterials Vol 2019**: 1-9.
- Narawong, W. & Panya, P. (2017). Preparation of Cellulose from Water Hyacinth Leave to Adsorb Cr (VI) Ion. **Proceeding of The 4th National conference KPRU Kamphaeng Phet Rajabhat University (pp. 957-966)**. Kamphaeng Phet: Kamphaeng Phet Rajabhat University. 22 December 2017.
- Perumal, S. & N. T. Selvi. (2013). Spectral Evidence for the One-Step Three - Electron Oxidation of Phenyl sulfonyl acetic Acid and Oxalic Acid by Cr (VI). **American Journal of Analytical Chemistry, 4**: 20-29.
- Rahman, M.M., Khan, S.B., Jamal, A., Faisal, M., & Aisiri, A.M. (2011). **Iron Oxide Nanoparticles**. Nanomaterials. 43-66. Retrieved 5 June 2023, from <https://www.intechopen.com/books/861>.
- Sergey, D., S. Gilje, K. Wang, V.C. Tung, K. Cha, A. S. Hall, J. Farrar, R. Varshneya, Y. Yang & R.B. Kaner. (2010). A One-Step, Solvothermal Reduction Method for Producing Reduced Graphene Oxide Dispersions in Organic Solvents. **ACS Nano, 4**(7): 3845-3852.

- Uma, K., Chong, S., Mohan, S.C., Jothi Venkatachalam, K., Yang, T.C.- K., & Lin, J.-H. (2020). Multi-functional RGO-supported α -Fe₂O₃ nanocomposites for high-performance pseudo capacitors and visible light-driven photocatalytic applications. **Ionics (2020) 26**: 3491-3500.
- Wang, J.-C., Ren, J., Yao, H.-C., Zhang, L., Wang, J.-S., Zang, S.-Q., Han, L.-F., & Li, Z.-J. (2016). Synergistic photocatalysis of Cr (VI) reduction and 4-Chlorophenol degradation over hydroxylated α -Fe₂O₃ under visible light irradiation. **Journal of Hazardous Materials 311**: 11-19.

(Received: 21/Aug/2023, Revised: 15/Dec/2023, Accepted: 22/Dec/2022)