

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบสารสกัดเปลือกมังคุด
โดยวิธีสะอาดเพื่อใช้ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในสารละลายน้ำ

Green Synthesis of Mangosteen Peel Extract /
Zero-valent Iron Nanocomposites for the Removal of
Methylene Blue Dye from Aqueous Solution

พิชญ์สินี สมชัยดี^A และการะเกด เทศศรี*

ห้องปฏิบัติการตัวเร่งปฏิกิริยานาโน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

Pichsinee Somchaidee^A and Karaked Tedsree*

Nanocatalysis Laboratory, Department of Chemistry, Faculty of Science, Burapha University,

Saensook, Muang, Chon Buri, 20131

บทคัดย่อ

อนุภาคนาโนเหล็กสามารถสังเคราะห์สำเร็จที่อุณหภูมิห้องโดยใช้สารสกัดเปลือกมังคุดทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ และสารช่วยเสถียร การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดพบว่าเอทานอลร้อยละ 80 เป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการสกัดสารประกอบฟีนอลและฟลาโวนอยด์จากเปลือกมังคุด อนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบ สารสกัดเปลือกมังคุดสามารถเตรียมโดยวิธีสะอาดจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายเฟอร์ริกไอออนและสารสกัดหยาบ ในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ติดตามการเกิดอนุภาคนาโนโลหะโดยเทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนเหล็กที่เตรียมได้มีการกระจายตัวที่ดี โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 12 นาโนเมตร การวิเคราะห์โดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสามารถยืนยันแรงกระทำระหว่างหมู่ฟังก์ชันของสารสกัดและอะตอมเหล็กบนพื้นผิวอนุภาค อนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบ สารสกัดเปลือกมังคุดที่สังเคราะห์ได้มีความสามารถสูงในการดูดซับและการรีดักชันเมทิลีนบลู รวมทั้งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในสารละลายน้ำ

คำสำคัญ : อนุภาคนาโนเหล็ก; สารสกัดเปลือกมังคุด; การสังเคราะห์โดยวิธีสะอาด; สีย้อมเมทิลีนบลู

^ACenter of Excellent on Environmental Health and Toxicology (ETH), Burapha University, Saensook, Muang, Chon Buri, 20131

*ผู้รับผิดชอบบทความ : karaked@go.buu.ac.th

doi: 10.14456/tstj.2019.62

Abstract

Zero-valent iron nanoparticles were successfully synthesized at room temperature using mangosteen peel extract as both reducing agent and stabilizer. The optimum conditions for mangosteen peel extraction were studied and found that the most effective solvent for the extraction of phenolic compound and flavonoid from the mangosteen peel was 80 % ethanol. Mangosteen peel extract / zero-valent Iron nanocomposites were green synthesized in the presence of Fe^{3+} precursor and the crude extract in an aqueous medium at room temperature for 12 h. The formation of metallic nanoparticles was monitored by UV-Visible spectroscopy. Transmission electron microscopy images demonstrated that the obtained nanoparticles are high particle dispersion with an average particle sizes of 12 nm. Infrared spectroscopy reveals that there is an interaction between the functional group of the extract and iron atom on the surface of particles. The synthesized mangosteen peel extract / Fe^0 nanocomposites have high adsorption and reduction ability, including attributed as an effective catalyst for removing methylene blue in aqueous solution.

Keywords: zero-valent iron nanoparticle; mangosteen peel extract; green synthesis; methylene blue dye

1. บทนำ

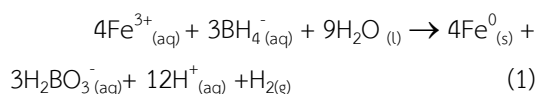
วัสดุนาโน (nanomaterial) หรือวัสดุที่มีขนาดระดับ 1-100 นาโนเมตร มีสมบัติต่าง ๆ เช่น สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติเชิงแสง สมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติเชิงกล แตกต่างจากวัสดุกลุ่มก้อนทั่วไป วัสดุนาโนมีพื้นที่ผิวสูง ทำให้มีผิวสัมผัสกับสารมลพิษสูง จึงได้รับความสนใจอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้บำบัดและฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม [1] อย่างไรก็ตาม วัสดุนาโนที่เหมาะสมกับการใช้งานด้านสิ่งแวดล้อมควรผลิตได้ง่ายและผลิตได้ในปริมาณมาก มีต้นทุนการผลิตต่ำและที่สำคัญต้องไม่ทำให้เกิดสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม [2] เหล็กเป็นโลหะที่พบมากบนเปลือกโลก ราคาถูก ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เหล็กมีค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์รีดักชันต่ำ มีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี สามารถย่อยสลายสารมลพิษโดยปฏิกิริยา

รีดักชัน [3] ปัจจุบันมีรายงานการนำอนุภาคนาโนเหล็ก (zero-valent iron nanoparticle, Fe^0 nanoparticle) มาใช้บำบัดมลพิษอย่างกว้างขวาง เช่น การย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ (chlorinated hydrocarbon) การดูดซับไอออนของโลหะหนักบางชนิด เช่น แคดเมียม ตะกั่ว และการย่อยสลายสีย้อม [4]

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำมากที่สุด กระบวนการฟอกย้อมต้องใช้วัตถุรีดิวซ์ที่เป็นสารเคมี ได้แก่ สีย้อม กรดต่าง และสารฟอกขาว รวมทั้งมีการใช้น้ำในปริมาณมาก ตัวอย่างสีย้อมสังเคราะห์ที่มีการใช้อย่างกว้างขวาง ได้แก่ เมทิลีนบลู ซึ่งเมื่อปนเปื้อนในแหล่งน้ำ ความเข้มของสีจะบดบังแสงอาทิตย์ที่ผ่านลงสู่ผิวน้ำ ส่งผลให้ปริมาณแก๊สออกซิเจนในน้ำลดลง ก่อให้เกิด

ภาวะน้ำเสียตามมา เมทิลีนบลูเป็นสีย้อมที่มีความเสถียรสูง ยากต่อการกำจัดโดยวิธีชีวภาพ วิธีที่นิยมใช้ได้แก่ การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ การสร้างและการรวมตะกอนทางเคมี และการเกิดออกซิเดชันโดยกระบวนการเฟนตัน (Fenton) เป็นต้น [5,6] มีรายงานการทดลองแสดงให้เห็นว่านาโนเหล็กมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู โดยอนุภาคนาโนเหล็กที่เตรียมได้ที่สภาวะต่าง ๆ กัน มีประสิทธิภาพในการทำลายเมทิลีนบลูที่แตกต่างกัน [7]

นาโนเหล็กสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิห้องจากปฏิกิริยารีดักชันทางเคมีโดยใช้เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เป็นพรีเคอร์เซอร์และโซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์ [8] ดังสมการที่ 1



ในกระบวนการเตรียมมีการเติมสารที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น พอลิเมอร์ เพื่อช่วยให้อนุภาคนาโนเกิดเสถียรภาพในรูปคอลลอยด์ ไม่รวมตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (aggregation)

โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์ที่แรง การใช้ในปริมาณมากอาจทำให้เกิดอันตรายได้ง่าย นอกจากนี้หลังการใช้งานยังพบสารเคมีตกค้างจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานด้านสิ่งแวดล้อม การใช้แนวทางเคมีสะอาด (green chemistry) โดยหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและใช้สารสกัดจากธรรมชาติที่มีสมบัติเช่นเดียวกันทดแทนในกระบวนการสังเคราะห์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ [9]

สารสกัดจากส่วนต่าง ๆ ของพืช ได้แก่ ใบ ดอก และผล มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและสามารถนำมาใช้เป็นสารให้อิเล็กตรอนในการสังเคราะห์อนุภาคนาโน มีรายงานการค้นคว้าจำนวนมากแสดงให้เห็นถึงความสำเร็จในการเตรียมอนุภาคนาโนเงินและทองคำโดยใช้สารสกัดจากธรรมชาติ [10,11] ในขณะที่

รายงานการเตรียมอนุภาคนาโนเหล็กยังไม่พบมากนัก [12,13] เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์รีดักชันของเหล็กมีค่าต่ำทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ยาก นอกจากนี้อนุภาคนาโนเหล็กมีแนวโน้มรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ เนื่องจากผลของแรงแวนเดอร์วาลส์ และสมบัติความเป็นแม่เหล็ก [14] มีรายงานการนำสารสกัดจากพืชม้าใช้เตรียมอนุภาคนาโนโลหะเหล็ก ได้แก่ สารสกัดจากใบชาเขียว [12] ใบมะม่วง [15] ใบสะเดา [16] ตะไคร้ [17] เป็นต้น โดยสมบัติการให้อิเล็กตรอนของสารสกัดขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณสารเคมีองค์ประกอบ องค์ประกอบเคมีในพืชที่มีสมบัติเป็นสารให้อิเล็กตรอน ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิก (polyphenolic compound) เช่น แทนนิน (tannin) ฟลาโวนอยด์ (flavonoid) [18] นอกจากสารในกลุ่มนี้จะทำหน้าที่เป็นสารให้อิเล็กตรอน ยังมีสมบัติเป็นสารช่วยเสถียร ช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชันและการรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่

เปลือกผลไม้เป็นแหล่งสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติและทั้งเป็นขยะจากการบริโภคหรือจากอุตสาหกรรมอาหารในปริมาณมาก งานวิจัยนี้สนใจสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็กโดยใช้สารสกัดจากเปลือกมังคุดเป็นทั้งตัวรีดิวซ์และสารช่วยเสถียร เนื่องจากเปลือกมังคุดมีปริมาณฟีนอลิกแซนโทน (xanthone) และแอนโทไซยานิน (anthocyanin) ปริมาณสูง ซึ่งเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระ [19,20] โดยเฉพาะอย่างยิ่งแซนโทนซึ่งพบปริมาณมากที่สุดเปลือกมังคุด จัดเป็นสารที่มีประสิทธิภาพด้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูง และยังไม่พบรายงานการวิจัยที่นำสารสกัดจากเปลือกมังคุดมาใช้สังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็ก นอกจากนี้งานวิจัยนี้สนใจทดสอบประสิทธิภาพอนุภาคนาโนเหล็กที่เตรียมได้ต่อปฏิกิริยากำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำ เพื่อเป็นข้อมูลในการนำไปใช้บำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่างเปลือกมังคุดและวิธีการสกัด

นำเปลือกมังคุดมาล้างน้ำให้สะอาด หั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ ตากให้แห้ง อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำไปบดให้เป็นผงละเอียดโดยใช้เครื่องบด การสกัดทำโดยชั่งผงเปลือกมังคุด 4.0 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำปริมาตร 100.0 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งกวนสารละลาย เป็นเวลา 15 นาที กรองสารสกัดผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ทำการสกัดซ้ำจนกระทั่งสารละลายใส นำสารสกัดที่ได้ไประเหยแห้งภายใต้เครื่องระเหยแบบหมุนภายใต้สุญญากาศ สารสกัดหยาบที่ได้มีลักษณะเป็นของแข็งสีน้ำตาล ศึกษาผลของตัวทำละลายต่อปริมาณสารสกัดหยาบ โดยเปลี่ยนจากตัวทำละลายน้ำเป็นเอทานอล (ร้อยละ 95) และสารละลายผสมเอทานอลและน้ำที่ร้อยละเอทานอลเท่ากับ 50 และ 80 โดยปริมาตร

2.2 การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบเคมี

เตรียมสารละลายเข้มข้น (stock solution) ของสารสกัดเปลือกมังคุด โดยชั่งสารสกัดหยาบ 0.25 กรัม ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเท่ากับ 25.00 มิลลิลิตร วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดโดยวิธี Folin-Ciocalteu โดยปิเปตสารละลายเข้มข้นของสารสกัดเปลือกมังคุดปริมาตร 0.20 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เจือจางด้วยน้ำกลั่น ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร เติม Folin-Ciocalteu's reagent ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 7 โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 90 นาที นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่า

การดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดในสารสกัดเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก (gallic acid) ในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมสารสกัด กราฟมาตรฐานสร้างจากความเข้มข้นของกรดแกลลิก ในช่วง 20-100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ผลการทดลองที่ได้แสดงเป็นค่าเฉลี่ย \pm ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

วิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดโดยวิธี aluminum chloride colorimetry ทำโดยปิเปตสารละลายเข้มข้นของสารสกัดเปลือกมังคุดปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร เติมสารละลายอะลูมิเนียมไตรคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวลต่อปริมาตร 1.7 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ได้ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 415 นาโนเมตร วิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดในสารสกัดโดยเทียบกับกราฟมาตรฐานเคอร์ซีติน (quercetin) ในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของเคอร์ซีตินต่อกรัมสารสกัด โดยใช้เคอร์ซีตินเป็นสารมาตรฐานที่ความเข้มข้น 20-100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ผลการทดลองแสดงในรูปค่าเฉลี่ย \pm ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2.3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะเหล็กจากสารสกัดเปลือกมังคุด

ชั่งสารสกัดหยาบเปลือกมังคุด 0.9 กรัม นำมาละลายในน้ำกลั่นปราศจากออกซิเจนปริมาตร 20.0 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 8 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ค่อย ๆ หยดสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ปริมาตร 20.0 มิลลิลิตร คนสารละลายผสมที่อุณหภูมิห้องภายใต้บรรยากาศ

ไนโตรเจน เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แยกสารแขวนลอยของอนุภาคนาโนโลหะเหล็กด้วยเครื่องเซนทริฟิวก์ ล้างตะกอนด้วยน้ำและเอทานอลหลาย ๆ ครั้ง จนกระทั่งน้ำล้างใส ไม่มีสี เก็บตะกอนที่ได้ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

2.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์

วิเคราะห์ ขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวของอนุภาคนาโนเหล็กที่สังเคราะห์ได้โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน บริษัท Philips รุ่น TECNAI ศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่เกิดแรงกระทำกับอนุภาคนาโนเหล็กด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี โดยใช้เครื่อง PerkinElmer Frontier และทดสอบประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนเหล็กในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ บริษัท Agilent รุ่น 8453

2.5 การทดสอบประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนเหล็กในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

ทดลองแบบกะ (bath experiment) โดยชั่งอนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบสารสกัดเปลือกมังคุดที่สังเคราะห์ได้ 0.3 กรัม เติมหั่นปริมาตร 150.0 มิลลิลิตร ทำให้กระจายตัวในรูปสารแขวนลอยในอ่างน้ำอัลตราโซนิค (ultrasonication bath) แบ่งสารแขวนลอยที่ได้ใส่ขวดแก้ว (vial) ขนาดบรรจุ 10 มิลลิลิตร ขวดละ 5.0 มิลลิลิตร จำนวน 14 ขวด เติมสารละลายเมทิลีนบลูในน้ำความเข้มข้น 20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร ลงในแต่ละขวด นำขวดตัวอย่างวางบนเครื่องหมุน (rolling machine) และเก็บมาวิเคราะห์ตามเวลาที่กำหนด แยกส่วนที่เป็นของแข็งออกโดยการเซนทริฟิวก์ (centrifugation) ที่ความเร็ว 8,500 รอบต่อนาที นำส่วนของสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ แล้วคำนวณร้อยละการกำจัดเมทิลีนบลู ตามสมการที่ 2

$$n = [(C_0 - C_t) \div C_0] \times 100 \quad (2)$$

เมื่อกำหนดให้ n คือ ร้อยละการกำจัดเมทิลีนบลู C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ C_t คือ ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่เวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร) คำนวณความสามารถในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (removal capacity) ตามสมการที่ 3

$$q_e = [(C_i - C_e) \times V] \div M \quad (3)$$

เมื่อกำหนดให้ q_e คือ ความสามารถในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม) C_i คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร) M คือ มวลของอนุภาคนาโนโลหะเหล็ก (กรัม) และ V คือ ปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลู (ลิตร)

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

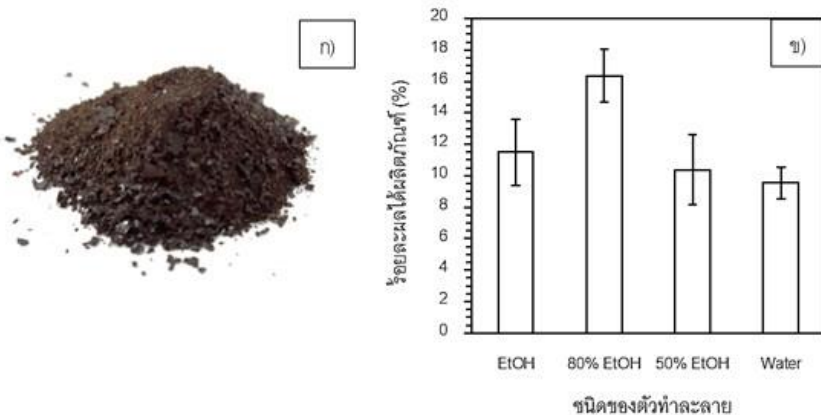
3.1 ผลของตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดสาร

การสกัดเปลือกมังคุดด้วยตัวทำละลายน้ำ เอทานอล และสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 และ 80 สารสกัดหยาบที่ได้มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลเข้ม (รูปที่ 1ก) ตัวทำละลายที่ให้ร้อยละโดยน้ำหนักสารสกัดหยาบสูงสุด ได้แก่ เอทานอลร้อยละ 80 ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์เท่ากับ 15.2 ในขณะที่การสกัดโดยใช้น้ำเอทานอล และเอทานอลร้อยละ 50 ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกันระหว่างร้อยละ 10-12 (รูปที่ 1ข)

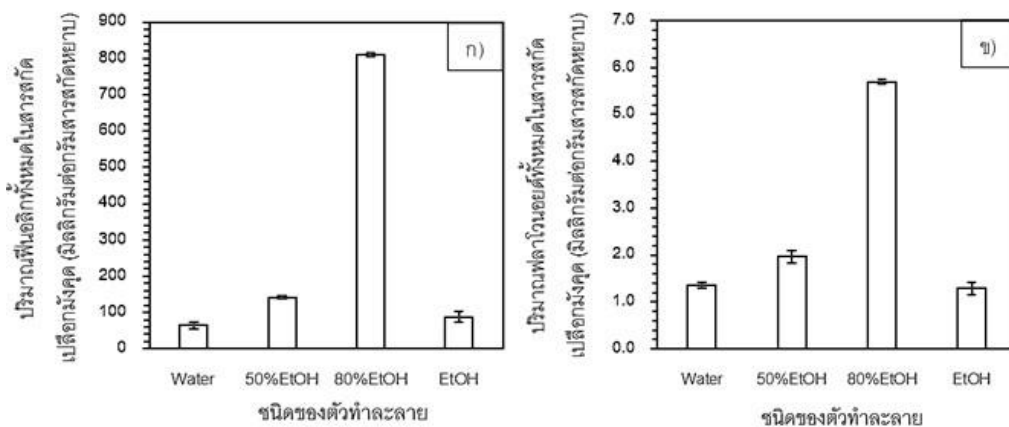
ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟอสฟีนอล และฟลาโวนอยด์ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าการสกัดด้วยสารละลายผสมเอทานอลและน้ำที่ร้อยละเอทานอลเท่ากับ 80 ได้ปริมาณสารประกอบฟอสฟีนอลทั้งหมดและปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดสูงที่สุดเท่ากับ 810 ± 6 และ 5.7 ± 0.1 มิลลิกรัมต่อกรัมสารสกัดหยาบ ตามลำดับ โดยการสกัดด้วยเอทานอลร้อยละ 80 ได้ปริมาณสารประกอบฟอสฟีนอลสูงกว่า

การใช้ตัวทำละลายอื่นมากกว่า 5 เท่า และได้ปริมาณฟลาโวนอยด์สูงกว่าประมาณ 3 เท่า ดังนั้นในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็กโดยใช้สารสกัดจาก

เปลือกมังคุด จึงเลือกใช้สารสกัดหยาบที่ได้จากการสกัดโดยใช้เอทานอลร้อยละ 80



รูปที่ 1 (ก) สารสกัดหยาบเปลือกมังคุด และ (ข) ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์สารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดเมื่อใช้ตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 2 องค์ประกอบเคมีจากสารสกัดเปลือกมังคุดเมื่อสกัดด้วยตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ (ก) ปริมาณสารประกอบพอลิฟีนอลทั้งหมด และ (ข) ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด

3.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็กโดยใช้สารสกัดเปลือกมังคุด

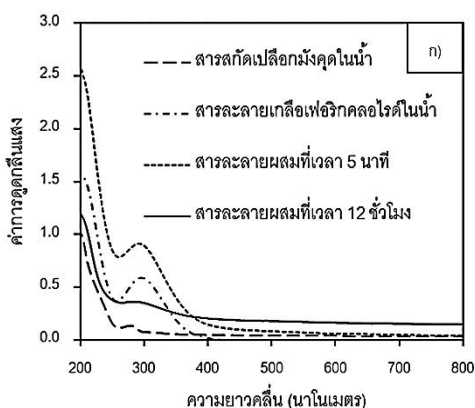
อนุภาคนาโนเหล็กสามารถสังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิห้องในด่างกลางน้ำโดยวิธีตกชั้นทางเคมี สารสกัดจากเปลือกมังคุดทำหน้าที่เป็นสารให้อิเล็กตรอน

และเป็นสารช่วยเสถียรป้องกันการรวมตัวเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังช่วยควบคุมขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนที่เตรียมได้ เมื่อผสมสารละลาย เฟอร์ริกคลอไรด์ (สีเหลือง) และสารสกัดเปลือกมังคุด (สีส้ม) สีของสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลดำ จากการเกิด

สารเชิงซ้อนระหว่าง Fe^{3+} ไอออนและหมู่ ไฮดรอกซิลของสารประกอบพอลิฟีนอล เมื่อปฏิกิริยา รีดักชันดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จะเกิดคอลลอยด์สีดำแพร่กระจายอยู่ในสารตัวกลางโดยไม่ตกตะกอน

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารสกัดเปลือกมังคุด สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ และสารละลายผสมทั้งสองที่เวลาต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3 สารสกัดเปลือกมังคุด (pH ประมาณ 7) แสดงพีคเนื่องจากการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 283 นาโนเมตร ซึ่งแสดงลักษณะเฉพาะของสารพอลิฟีนอล โดยทั่วไปพบในช่วง 270-280 นาโนเมตร การพบพีคที่ความยาวคลื่นสูงขึ้นอาจเนื่องการแตกตัวของฟีนอลิกโปรตอน (phenolic proton) และการเคลื่อนที่ (delocalization) ของไพออิเล็กทรอนิกส์ในโครงสร้าง (phenoxide ion) ของฟีนอล [21] สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ในน้ำ (pH ประมาณ 2) แสดงค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 297 นาโนเมตร ในขณะที่สเปกตรัมที่ได้จากการผสมระหว่าง Fe^{3+} และสารสกัดที่เวลา 5 นาที พบค่าการดูดกลืนแสงในช่วงยูวี (200-400 นาโนเมตร) และในช่วงวิสิเบิลที่ความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตรเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาในการทำ

ปฏิกิริยาเท่ากับ 12 ชั่วโมง สเปกตรัมที่ได้มีลักษณะคล้ายกราฟเอกโปเนนเชียล (exponential graph) ครอบคลุมในช่วงยูวีวิสิเบิล ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างแถบพลังงานของโลหะ (inter band d-d transition) โดยในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยา จะเริ่มมีการรวมตัวกันของอะตอมเหล็กเกิดเป็นคลัสเตอร์ เมื่อเวลาผ่านไปจึงเกิดนิวไคลด์ของอะตอมเหล็กและรวมกันเติบโตเป็นอนุภาค ความเข้มของสัญญาณการดูดกลืนแสงเนื่องจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างแถบพลังงานของโลหะขึ้นกับขนาดอนุภาคของโลหะโดยสัมพันธ์กับปริมาณพื้นที่ผิวที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง [22,23] ขนาดที่เล็กกว่าจึงให้สัญญาณที่สูงกว่า นอกจากนี้อนุภาคนาโนโลหะสามารถเกิดการดูดกลืนพลังงานเนื่องจากการเกิดเซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ (surface plasmon resonance) เช่น อนุภาคนาโนโลหะเงินและทองคำ มีรายงานการพบพีคเนื่องจากการเกิดเซอร์เฟซพลาสมอน เรโซแนนซ์ ในช่วง 400-450 และ 500-600 นาโนเมตร ตามลำดับ [20,24] ในขณะที่มีรายงานการพบพีคการดูดกลืนแสงเนื่องจากพลาสมอนเรโซแนนซ์ของอนุภาคนาโนเหล็กในช่วงความยาวคลื่น 190-202 นาโนเมตร [17]

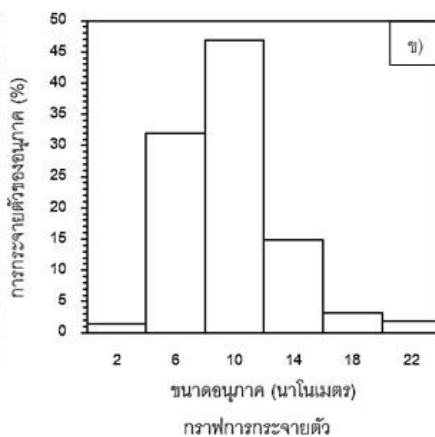
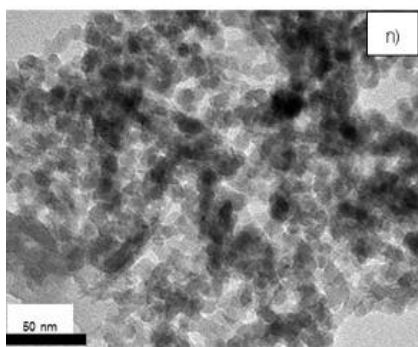


รูปที่ 3 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายเกลือเฟอร์ริกคลอไรด์ในน้ำ สารสกัดเปลือกมังคุดในน้ำ และสารละลายผสมที่เวลา 5 นาที และ 12 ชั่วโมง และ (ข) ภาพถ่ายสารสกัดเปลือกมังคุดในน้ำ (1) คอลลอยด์อนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบสารสกัดเปลือกมังคุด (2) และสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ในน้ำ (3)

อนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบสารสกัดเปลือกมังคุดที่เตรียมได้ในรูปคอลลอยด์ในตัวกลางน้ำสามารถนำไปใช้บำบัดมลพิษปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมทันทีโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการแยกหรือการทำให้บริสุทธิ์ อย่างไรก็ตาม คอลลอยด์ของนาโนเหล็กสามารถแยกออกจากตัวกลางโดยการเซนทริฟิวก์ ล้างด้วยเอทานอล เก็บภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ในขั้นตอนการล้าง องค์ประกอบทางเคมีของสารสกัดส่วนที่ไม่เกิดแรงกระทำที่พื้นผิวกับอะตอมของธาตุเหล็กจะถูกล้างออก เหลือเฉพาะของแข็งสีดำ ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคนาโนเหล็กและสารสกัดในเปลือกมังคุดที่เกิดแรงกระทำซึ่งกันและกัน สารสกัดเปลือกมังคุดซึ่งมีสมบัติในการต้านการเกิดอนุมูลอิสระจะทำหน้าที่ป้องกันการเกิดออกซิเดชัน ลดการเกิดสารประกอบไฮดรอกไซด์ และออกไซด์ที่พื้นผิวของอนุภาคนาโน

เหล็ก การประมาณปริมาณธาตุเหล็กองค์ประกอบในตัวอย่างอนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบสารสกัดเปลือกมังคุดที่เตรียมได้ คำนวณได้จากปริมาณ Fe^{3+} ไอออนพริโคเซอร์ที่ใช้ เปรียบเทียบกับน้ำหนักรวมของอนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบสารสกัดเปลือกมังคุดพบว่าประกอบด้วยธาตุเหล็กประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

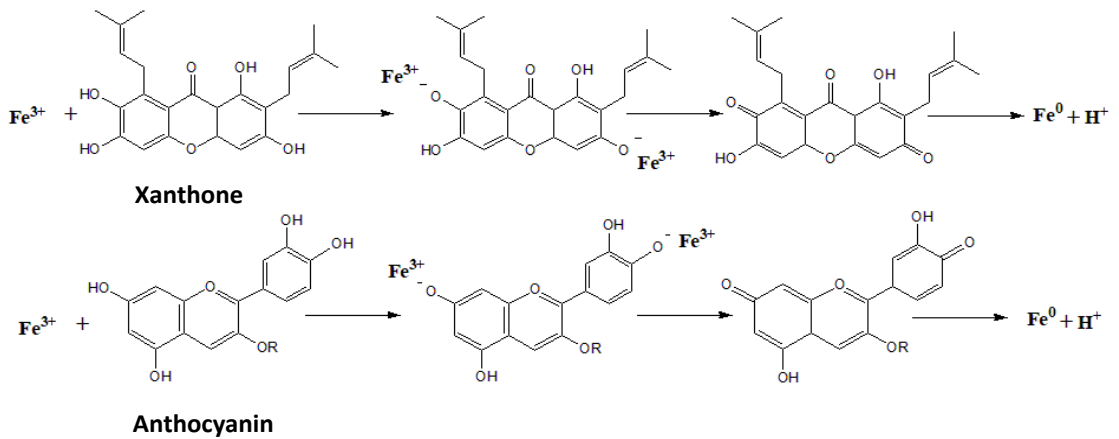
การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคนาโนที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (รูปที่ 4) ซึ่งเห็นได้ว่าอนุภาคที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 12 ± 3 นาโนเมตร อนุภาคส่วนมากมีการกระจายตัวที่ดี ในขณะที่บางส่วนเกิดการรวมตัวกันในลักษณะการต่อเชื่อมกันของอนุภาคเป็นกลุ่มก้อนมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน



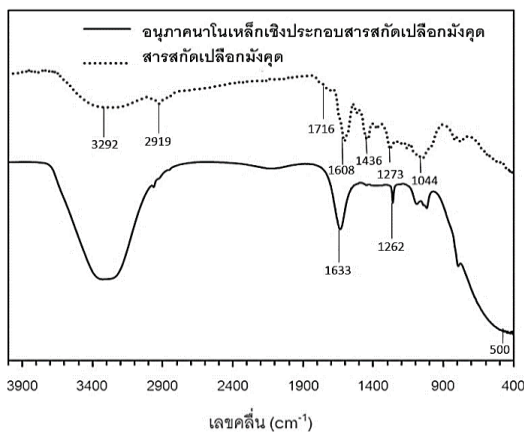
รูปที่ 4 (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบสารสกัดเปลือกมังคุด และ (ข) แผนภูมิแท่งแสดงขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค

การศึกษารายงานการวิเคราะห์สารสกัดเปลือกมังคุด พบว่าแทนนิน แอนโทไซยานิน และแซนโทนเป็นสารเคมีองค์ประกอบหลักที่พบในเปลือกมังคุด โดยพบแทนนินและแซนโทนมากที่สุด [25,26] แซนโทนและแอนโทไซยานินมีสมบัติต้านอนุมูลอิสระที่ดี จึง

น่าจะมียุทธศาสตร์สำคัญในการรีดิวซ์ Fe^{3+} เป็น Fe^0 โดยหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของแอนโทไซยานินและแซนโทนทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนไปยัง Fe^{3+} และเกิดปฏิกิริยารีดักชันในขณะที่หมู่ไฮดรอกซิลบนสารประกอบฟีนอลจะถูกออกซิไดซ์เป็นควิโนน ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การเกิดรีดักชันของ Fe^{3+} โดยใช้แซนโทนและแอนโทไซยานินเป็นสารให้อิเล็กตรอน



รูปที่ 6 อินฟราเรดสเปกตรัมของสารสกัดเปลือกมังคุดและอนุภาคนาโนเหล็กที่มีสารสกัดเปลือกมังคุดช่วยเสถียร

3.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์สารสกัดเปลือกมังคุดด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

การเกิดแรงกระทำระหว่างอะตอมของธาตุเหล็กและสารสกัดจากเปลือกมังคุด สามารถพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงความถี่การสั่นของหมู่ฟังก์ชัน รูปที่ 6 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของตัวอย่างสารสกัดเปลือกมังคุดและอนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบสารสกัดเปลือกมังคุด จะเห็นได้ว่าสเปกตรัมสารสกัดเปลือกมังคุดมีพิคลักษณะกว้างในช่วงเลขคลื่น 3,602-

3,000 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching) ในสารประกอบพอลีฟีนอล พิคที่เลขคลื่น 2,919 cm^{-1} จากการสั่นแบบยืดระหว่างพันธะคาร์บอนและไฮโดรเจน (C-H stretching) บนวงฟีนอลและอนุพันธ์ ไหล่พิคที่เลขคลื่น 1,716 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบยืดของ C=O บนหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ของแทนนิน พิคที่เลขคลื่น 1,608 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบยืดของ C-O (C-O stretching) ในวงอะโรมาติก (aromatic C-O) พิคที่เลขคลื่น 1,436 cm^{-1} จากการสั่นแบบยืดของหมู่ C-C (C-C stretching) บนวงฟีนอล พิคที่ความถี่การสั่น 1,273 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบงอ (bending) ของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H in-plane bending) และพิคในช่วงเลขคลื่น 1,100-1,000 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบยืดของหมู่ C=O บนวงอะโรมาติก (Arom-O-) เมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมอนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบสารสกัดเปลือกมังคุด พบพิคที่เลขคลื่น 1,633 cm^{-1} เนื่องจากการสั่นแบบยืดของ C=O ของหมู่ฟังก์ชันคีโตนบนวงอะโรมาติก แสดงให้เห็นว่าหมู่ไฮดรอกซิลของสารประกอบฟีนอลเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นควิโนน เมื่อ Fe^{3+} ไอออนเกิดปฏิกิริยารีดักชันเป็น Fe^0 และพบพิคเนื่องจากสั่นของหมู่ไฮดรอกซิลที่เลขคลื่น 1,269 cm^{-1} มีลักษณะคมชัด

(sharp) กว่า และความเข้มสัญญาณต่ำกว่าที่พบในสารสกัดเปลือกมังคุดมาก การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้แสดงว่ามีแรงกระทำระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลบนวงอะโรมาติก (phenolic-OH) และอะตอมของเหล็ก นอกจากนี้พีคลักษณะกว้างในช่วงเลขคลื่น 500-600 cm^{-1} แสดงการเกิดพันธะระหว่าง Fe-O เนื่องปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กที่พื้นผิวในรูป Fe-OH ส่งผลให้สัญญาณการสั่นของ O-H เพิ่มสูงขึ้น

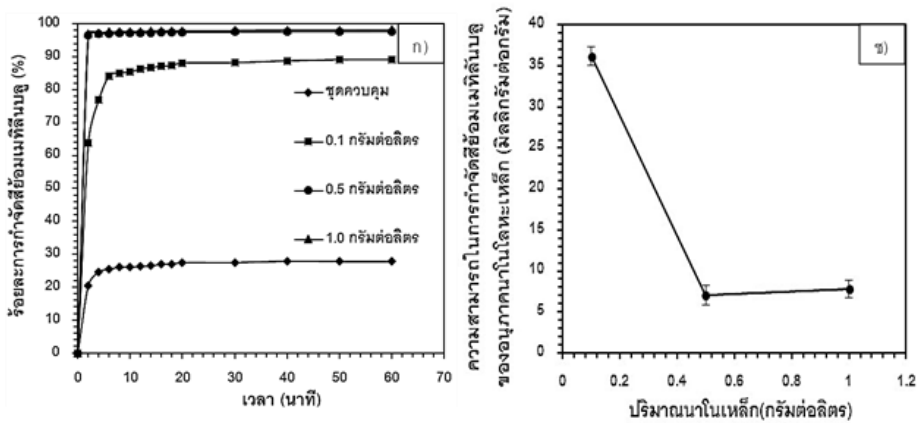
ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคนาโน คือ ความสามารถของสารช่วยเสถียรในการป้องกันการรวมตัวของอนุภาค ในการทดลองนั้นนอกจากสารสกัดเปลือกมังคุดจะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ ยังมีประสิทธิภาพที่ดีในการเป็นสารช่วยเสถียร อนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบสารสกัดเปลือกมังคุดมีความคงตัวได้ดีในตัวอย่างน้ำ สามารถตั้งทิ้งไว้นานกว่า 30 วัน โดยไม่เกิดการแยกชั้น โดยทั่วไปสารช่วยเสถียรที่นิยมใช้ ได้แก่ พอลิเมอร์ โดยอาจเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ หรือพอลิเมอร์จากธรรมชาติ เช่น เซลลูโลส แป้ง ซึ่งมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดแรงกระทำกับอะตอมของโลหะและการป้องกันการรวมตัวเนื่องจากผลความเกาะของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับสารสกัดเปลือกมังคุดซึ่งประกอบด้วยสารพอลิฟีนอลซึ่งมีขนาดใหญ่และมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก สามารถเกิดแรงกระทำกับอะตอมของเหล็กและช่วยป้องกันการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ซึ่งพบว่าหมู่ฟังก์ชันที่เกิดแรงกระทำกับอะตอมของเหล็ก ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิลบนโครงสร้างพอลิฟีนอล

3.4 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

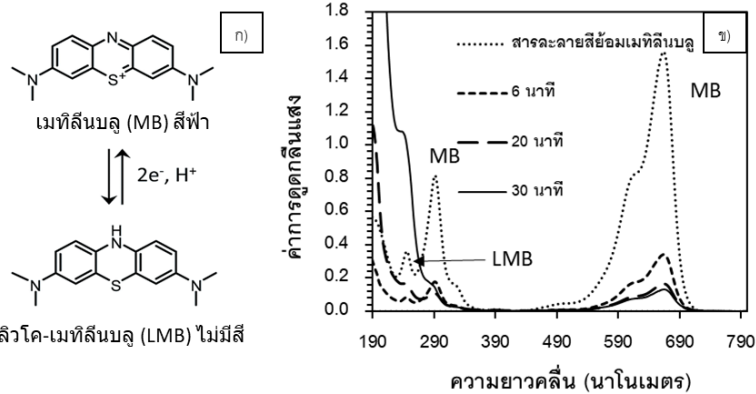
ผลของระยะเวลาสัมผัส (contact time) และปริมาณสารดูดซับ (อนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบ

สารสกัดเปลือกมังคุด) ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู แสดงดังรูปที่ 7ก จากสถานะที่ใช้ในการทดสอบพบว่าอนุภาคนาโนเหล็กที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพในการกำจัดเมทิลีนบลูสูงกว่าการใช้สารสกัดเปลือกมังคุดเพียงอย่างเดียวประมาณ 3 เท่า การใช้ปริมาณสารดูดซับ 0.1 กรัมต่อลิตร สามารถกำจัดเมทิลีนบลูได้เท่ากับร้อยละ 90 โดยสีของเมทิลีนบลูลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วง 60 นาที การเพิ่มปริมาณสารดูดซับเท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัดเมทิลีนบลูได้สูงถึงร้อยละ 98 โดยสีของเมทิลีนบลูลดลงอย่างรวดเร็วและคงที่ภายในระยะเวลาสัมผัส 2 นาที และเมื่อเพิ่มปริมาณสารดูดซับเท่ากับ 1.0 กรัมต่อลิตร พบว่าร้อยละการกำจัดเมทิลีนบลูที่เวลาต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกับการใช้ปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตร เมื่อพิจารณาความสามารถในการกำจัดสีเมทิลีนบลูต่อกรัมของอนุภาคนาโนเหล็ก การใช้อนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบสารสกัดเปลือกมังคุดปริมาณ 0.1 กรัมต่อลิตร สามารถกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้สูงสุดเท่ากับ 36.2 มิลลิกรัมต่อกรัม (รูปที่ 7ข)

นอกจากการกำจัดเมทิลีนบลูจะขึ้นผลจากการดูดซับแล้ว สีของสารละลายเมทิลีนบลูที่จางลงอย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับตัวอย่างอนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบสารสกัดเปลือกมังคุด อาจเกิดจากปฏิกิริยาการฟอกจางสี (decolorization) และการย่อยสลาย (degradation) การฟอกจางสีเมทิลีนบลูเกิดจากปฏิกิริยารีดักชัน โดยอนุภาคนาโนเหล็กทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน และเมทิลีนบลูทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน แล้วเปลี่ยนแปลงรูปเป็นลิโคเมทิลีนบลู (leuco-methylene blue) (รูปที่ 8ก) ซึ่งอยู่ในรูปที่ไม่มีสี ในขณะที่การเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลาย เป็นการทำลายพันธะในโครงสร้างของเมทิลีนบลูและทำให้เกิดสารตัวกลางต่าง ๆ หากการย่อยสลายเกิดสมบูรณ์จะได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ การลดลงของเมทิลีนบลู



รูปที่ 7 (ก) ร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู เมื่อใช้ปริมาณอนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบสารสกัดเปลือกมังคุด 0.1, 0.5 และ 1.0 กรัมต่อลิตร เปรียบเทียบกับชุดควบคุมซึ่งใช้ปริมาณสารสกัดอย่างเดียวในปริมาณเดียวกับที่เป็นองค์ประกอบในอนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบ และ (ข) ความสามารถของอนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบสารสกัดเปลือกมังคุดในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู



รูปที่ 8 (ก) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระหว่างเมทิลีนบลูและลิวโคเมทิลีนบลู และ (ข) ยูวีวิสิเบิลสเปกตรัมแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่เหลือจากปฏิกิริยาที่เวลาต่าง ๆ โดยควบคุมปริมาณนาโนเหล็กเชิงประกอบสารสกัดเปลือกมังคุด 0.1 กรัมต่อลิตร และความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

และการเกิดขึ้นของลิวโคเมทิลีนบลู สามารถติดตามจากค่าการดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ผลการเปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 8ข

รูปที่ 8 เมทิลีนบลูดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 และ 290 นาโนเมตร ในขณะที่ลิวโคเมทิลีนบลูดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 255 นาโนเมตร หลัง

การผสมอนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบสารสกัดเปลือกมังคุดและเมทิลีนบลู ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูและลิวโคเมทิลีนบลูในช่วงต้น (นาทีที่ 6) มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน แต่เมื่อปฏิกิริยาดำเนินต่อไปจนกระทั่งเริ่มเข้าสู่สมดุล (20 นาที) และที่เวลา 30 นาที พบว่าพีคการดูดกลืนแสงของลิวโคเมทิลีนบลูเพิ่ม

ได้ง่ายที่สุด $-CH_3$ จะกลายเป็น HCHO หรือ $RCOO^-$ ขึ้นต่อมา พันธะของโครโมฟอร์จะถูกทำลายที่ตำแหน่ง พันธะ C-S และ C-N เกิดเป็นสารอินทรีย์อื่น ๆ ที่ขนาดเล็กลง สุดท้ายโมเลกุลของสารอินทรีย์ต่าง ๆ จะถูกย่อยสลายกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

4. สรุปผลการวิจัย

อนุภาคนาโนเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 12 ± 3 นาโนเมตร และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่ดี สามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้สารสกัดเปลือกมังคุดทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์และเป็นสารช่วยเสถียร อนุภาคนาโนเหล็กเชิงประกอบสารสกัดเปลือกมังคุดมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเมทิลีนบลู โดยการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูเกิดจากกลไกการดูดซับ การรีดักชัน และการย่อยสลาย ด้วยอนุภาคนาโนเหล็กที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ในตัวกลางน้ำ สามารถนำไปใช้งานกับสิ่งแวดล้อมได้ทันทีโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการแยก มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.ชัชวิน เพชรเลิศภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีในการวิเคราะห์สารประกอบพอลิฟีนอลและฟลาโวนอยด์ทั้งหมด

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Khin, M.M., Nair, A.S., Babu, V.J., Murugan R. and Ramakrishna, S., 2012, A review on nanomaterials for environmental remediation, Energy Environ. Sci. 5: 8075-8109.
- [2] Naghdi, M., Taheran, M., Brar, S.K., Verma, M., Surampalli, R.Y. and Valero J.R., 2015,

Green and energy-efficient methods for the production of metallic nanoparticles, Beilstein J. Nanotechnol. 6: 2354-2376.

- [3] Zhao, X., Liu, W., Cai, Z., Han, B., Qian, T., and Zhao, D., 2016, An overview of preparation and applications of stabilized zero-valent iron nanoparticles for soil and groundwater remediation, Water Res. 100: 245-266.
- [4] Xiao-qin, L., Elliott, D.W. and Wei-xian, Z., 2006, Zero-valent iron nanoparticles for abatement of environmental pollutants: Materials and engineering aspects, Crit. Rev. Solid State Mater. 31: 111-122.
- [5] Rafatullah, M., Sulaiman, O., Hashim, R. and Ahmad, A., 2010, Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: A review, J. Hazard Mater. 177: 70-80.
- [6] Dutta, K., Mukhopadhyay, S., Bhattacharjee, S. and Chaudhuri, B., 2001, Chemical oxidation of methylene blue using a Fenton-like reaction, J. Hazard Mater. 84: 57-71.
- [7] Shahwan, T., Sirriah, S.A. Nairat, M., Boyaci, E., Eroglu, A.E., Scott, T.B. and Hallam, K.R., 2011, Green synthesis of Iron nanoparticles and their application as a Fenton-like catalyst for the degradation of aqueous cationic and anionic dyes, Chem. Eng. J. 172: 258-266.
- [8] Lien, H.L., Elliott, D.W., Sun, Y.P. and Zhang, W.X., 2006, Recent progress in zero-valent iron nanoparticles for

- groundwater remediation, Environ. Eng. Manag. J. 16: 371-380.
- [9] Duan, H., Wang, D. and Li, Y., 2015, Green chemistry for nanoparticle synthesis, Chem. Soc. Rev. 44: 5778-5792.
- [10] Srikar, S.K., Giri, D.D., Pal, D.B., Mishra, P.K. and Upadhyay, S.N., 2016, Green synthesis of silver nanoparticles: A review, Green Sustain. Chem. 6: 34-56.
- [11] Sett, A., Gadewar, M., Sharma, P., Deka, M. and Bora, U., 2016, Green synthesis of gold nanoparticles using aqueous extract of *Dillenia indica*, Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotech. 7: 1-8
- [12] Herlekar, M., Barve, S. and Kumar, R., 2014, Plant-mediated green synthesis of iron nanoparticles, J. Nanopart. 2014: 1-9.
- [13] Pattanayak, M. and Nayak, P.L., 2013, Ecofriendly green synthesis of iron nanoparticles and spiced extract, Int. J. Pl. An. Env. Sci. 3: 68-78.
- [14] Rosicka, D. and Sembera, J., 2011, Influence of structure of iron nanoparticles in aggregates on their magnetic properties, Nanoscale Res. Lett. 6: 527.
- [15] Dhuper, S., Panda, D. and Nayak, P.L., 2012, Green synthesis and characterization of zero valent iron nanoparticles from the leaf extract of *Mangifera indica*, Nano Trends J. Nanotechnol. Appl. 13: 16-22.
- [16] Karthikeyan, C., Ranjani, M., Kim, A.R., Yoo, D.J. and Kumar, G.G., 2016, Synthesis of iron nanoparticles using *Azadirachta indica* extract and its catalytic activity toward nitrophenol reduction, J. Nanosci. Nanotechnol. 16: 2527-2533.
- [17] Shah, S., Dasgupta, S., Chakraborty, M., Vadakkekara, R. and Hajoori, M., 2014, Green synthesis of iron nanoparticles using plant extracts, Int. J. Biol. Pharm. Res. 5: 549-552.
- [18] Kuppusamy, P., Yusoff, M.M., Maniam, G.P. and Govindan, N., 2016, Biosynthesis of metallic nanoparticles using plant derivatives and their new avenues in pharmacological applications: An updated report, Saudi. Pharm. J. 24: 473-484.
- [19] Chong, Y.M., Chang, S.K., Sia, W.C.M. and Yim, H.P., 2015, Antioxidant efficacy of mangosteen (*Garcinia mangostana* Linn.) peel extracts in sunflower oil during accelerated storage, Food Biosci. 12: 18-25.
- [20] Lee, K.X., Shameli, K., Miyake, M., Kuwano, N., Khairudin, N.B.A. and Mohamad, S.E., 2016, Green synthesis of gold nanoparticles using aqueous extract of *Garcinia mangostana* fruit peels, J. Nanomater. 2016: 1-7.
- [21] Nastasia, P., Babeş, A. and Bunea, C., 2007, The UV-Vis spectral fingerprints of polyphenols from several red grape varieties, Buletinul USAMV-CN 64: 1454-238.
- [22] Doak, J., Gupta, R.K., Manivannan, K., Ghosh, K. and Kahol, P.K., 2010, Effect of

- particle size distributions on absorbance spectra of gold nanoparticles, *Physica E* 42: 1605-1609.
- [23] He, F. and Zhao, D., 2005, Preparation and characterization of a new class of starch-stabilized bimetallic nanoparticles for degradation of chlorinated hydrocarbons in water, *Environ. Sci. Technol.* 39: 3314-3320.
- [24] Irvani, S. and Zolfaghari, B., 2013, Green synthesis of silver nanoparticles using *Pinus eldarica* bark extract, *BioMed Res. Int.* 2013: 1-5.
- [25] Suttirak, W. and Manurakchinakorn, S., 2014, *In vitro* antioxidant properties of mangosteen peel extract, *Food Sci. Technol. Int.* 51: 3546-3558.
- [26] Shan, T., Ma, Q., Guo, K., Liu, J., Li, W., Wang, F. and Wu, E., 2011, Xanthones from mangosteen extracts as natural chemopreventive agents: Potential anticancer drugs, *Curr. Mol. Med.* 11: 666-677.
- [27] Lin, J., Weng, X., Jin, X., Megharaj, M., Naidu, R. and Chen, Z., 2015, Reactivity of iron-based nanoparticles by green synthesis under various atmospheres and their removal mechanism of methylene blue, *RSC Adv.* 5: 70874-70882.