

**การสังเคราะห์ การศึกษาโครงสร้าง การศึกษาสมบัติเชิงแสงและ
การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ของคาร์บอนดอทจากเปลือกมังคุดที่เจือด้วย
อะตอมของไนโตรเจนด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล**

**Hydrothermal Synthesis of Nitrogen-Doped Carbon Dots from Mangosteen Peel:
Structural, Optical and Antioxidant Properties**

ปองศิริ เรืองปราษฎ¹, สรายุทธ เวชสิทธิ์¹, อุทัยวรรณ ศิริอ่อน², จเร จรัสจรรณพงษ์², ธนิดา ตระกูลสุจริตโชค² และจอมใจ สุขใส^{2*}

Pongsiri Rueangprat¹, Sarayut Watchasit¹, Uthaiwan Sirion², Jaray Jaratjaroonphong²,

Thanida Trakulsujaritchok² and Chomchai Suksai^{2*}

¹ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ประเทศไทย

²ศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ประเทศไทย

¹Department of chemistry, Faculty of Science, Burapha University, Thailand

²Department of Chemistry and Center for Innovation in Chemistry, Faculty of Science, Burapha University, Thailand

Received: 8 March 2026, Received in revised form: 31 March 2026, Accepted: 1 April 2026

Available online: 10 April 2026

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์และที่มา: คาร์บอนดอทเป็นวัสดุนาโนขนาดเล็กที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก สามารถเตรียมได้ง่ายโดยใช้สารตั้งต้นที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากคาร์บอนดอทมีสมบัติเชิงแสงที่มีลักษณะเฉพาะตัว ปัจจุบันได้มีการนำสารจากธรรมชาติและชีวมวลมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์คาร์บอนดอทเนื่องจากหาง่ายและราคาถูก เนื่องจากภาคตะวันออกของประเทศไทยเป็นแหล่งปลูกมังคุดที่สำคัญของประเทศ ในแต่ละปีจึงมีขยะจากเปลือกมังคุดที่เหลือจากการบริโภคหรือการแปรรูปเป็นจำนวนมาก ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะเพิ่มมูลค่าของเปลือกผลเหล่านี้โดยการนำเปลือกมังคุดมาเตรียมเป็นอนุภาคคาร์บอนดอทที่เจือด้วยไนโตรเจนในอัตราส่วนที่ต่างกัน (MCN1 และ MCN2) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลโดยใช้ยูเรียเป็นสารตั้งต้นในการเติมอะตอมของไนโตรเจน พร้อมทั้งเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้าง สมบัติเชิงแสง และฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของอนุภาคทั้งสองที่เตรียมได้

วิธีดำเนินการวิจัย: คาร์บอนดอทจากเปลือกมังคุดที่เจือด้วยอะตอมของไนโตรเจนในอัตราส่วนที่ต่างกันเตรียมด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (อนุภาค MCN1 และ MCN2) โดยใช้ยูเรียเป็นแหล่งของไนโตรเจน การพิสูจน์เอกลักษณ์ของอนุภาคทั้งสองชนิดศึกษาโดยใช้เทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคด้วยเทคนิคอินฟราเรดแบบแทรกผ่านรวมทั้งหมด การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและองค์ประกอบเชิงธาตุศึกษาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพร้อมอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ การศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน การวิเคราะห์การเกิดข้อบกพร่องของอนุภาคศึกษาด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี การวิเคราะห์ค่าประจุบนพื้นผิวของอนุภาค

การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของสารด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลโฟโตเมทรีและการวิเคราะห์สัณฐานฟลูออเรสเซนซ์ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของอนุภาค MCN1 และ MCN2 ศึกษาด้วยวิธีมาตรฐานดังนี้ การทดสอบการกำจัดอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH การทดสอบ ABTS การวัดความสามารถในการรีดิวซ์ด้วยวิธี FRAP และการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลรวม

ผลการวิจัย: ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมอนุภาคของคาร์บอนดอทจากเปลือกมังคุด โดยมีการเจืออะตอมของไนโตรเจนในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน (MCN1 และ MCN2) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล เพื่อศึกษาผลของปริมาณไนโตรเจนต่อสมบัติของอนุภาคคาร์บอนดอทที่ได้ จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างและสมบัติของคาร์บอนดอทที่เตรียมได้ โดยอาศัยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีและเทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างที่เกี่ยวข้อง พบว่าการเพิ่มปริมาณอะตอมของไนโตรเจนที่ส่งผลให้เกิดตำแหน่งข้อบกพร่อง ภายในโครงสร้างคาร์บอนมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณไนโตรเจนยังส่งผลต่อสมบัติประจุของพื้นผิวอนุภาค โดยทำให้ค่าประจุพื้นผิวมีความเป็นลบน้อยลงเมื่อเทียบกับอนุภาคที่มีปริมาณไนโตรเจนต่ำกว่า การเปลี่ยนแปลงของประจุบนพื้นผิวดังกล่าวมีผลโดยตรงต่อฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ เมื่อทำการศึกษาฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระพบว่าอนุภาค MCN1 ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนในโครงสร้างต่ำกว่าอนุภาค MCN2 มีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระที่สูงกว่าอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของคาร์บอนดอทและองค์ประกอบของไนโตรเจนมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ

สรุปผลการวิจัย: ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมอนุภาคของคาร์บอนดอทจากเปลือกมังคุดที่เจือด้วยอะตอมของไนโตรเจนในอัตราส่วนที่ต่างกัน (MCN1 และ MCN2) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลได้เป็นผลสำเร็จ จากการศึกษาโครงสร้างของคาร์บอนดอทที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปียืนยันได้ว่าการมีอะตอมของไนโตรเจนมากทำให้เกิดข้อบกพร่องของโครงสร้างมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ประจุบนพื้นผิวของอนุภาคมีค่าเป็นลบน้อยลงด้วยเช่นกันซึ่งมีผลโดยตรงต่อฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระอย่างเห็นได้ชัด โดยที่อนุภาค MCN1 ที่มีปริมาณไนโตรเจนในโครงสร้างน้อยกว่าอนุภาค MCN2 มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระที่สูงกว่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอนุภาคคาร์บอนดอท MCN1 มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานด้านพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มความปลอดภัยของอาหารได้ในอนาคต ซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร พร้อมทั้งลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: คาร์บอนดอทจากเปลือกมังคุดที่เจือด้วยอะตอมของไนโตรเจน; ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ; ยูเรีย; ไฮโดรเทอร์มอล

Abstract

Background and Objectives: Carbon dots are nanoscale materials primarily composed of carbon atoms. They can be easily synthesized using carbon-rich precursors. In recent years, natural materials have increasingly been used as precursors for the synthesis of carbon dots due to their abundance, low cost, and environmental friendliness. The eastern region of Thailand is one of the major mangosteen cultivation areas in the country. Each year, a large

amount of mangosteen peel waste is generated from consumption and food processing activities. Therefore, this research aims to add value to this agricultural waste by utilizing mangosteen peel as a carbon source for the synthesis of nitrogen-doped carbon dots. In this study, nitrogen-doped carbon dots with different nitrogen ratios (MCN1 and MCN2) were synthesized from mangosteen peel using a hydrothermal method, with urea as the nitrogen precursor. The structural characteristics, optical properties, and antioxidant activities of the synthesized nanoparticles were systematically investigated and compared.

Methodology: Nitrogen-doped carbon dots derived from mangosteen peel with different nitrogen ratios (MCN1 and MCN2) were synthesized using a hydrothermal method, with urea employed as the nitrogen source. The characterization of both nanoparticles was carried out using various analytical techniques for example ATR-FTIR, Raman spectrometry, SEM-EDX, HR-TEM, zeta potential, UV-visible spectrophotometry and fluorescence spectrophotometry. The antioxidant activities of MCN1 and MCN2 nanoparticles were evaluated using several standard assays, including the DPPH radical scavenging assay, the ABTS radical cation decolorization assay, the ferric reducing antioxidant power (FRAP) assay, and total phenolic content analysis.

Main Results: In this study, carbon dot particles were synthesized from mangosteen peel via a hydrothermal method, with nitrogen atoms doped at different ratios (MCN1 and MCN2). The objective was to investigate the effect of nitrogen content on the properties of the resulting carbon dots. Structural characteristics and physicochemical properties of the prepared carbon dots were examined using spectroscopic techniques and related structural characterization methods. The results revealed that increasing the nitrogen content led to a higher number of defect sites within the carbon structure. In addition, a higher nitrogen concentration influenced the surface charge properties of the particles, resulting in a less negative surface charge compared with particles containing lower nitrogen content. This alteration in surface charge directly affected the antioxidant activity. The antioxidant evaluation demonstrated that MCN1 particles, which contained a lower nitrogen content than MCN2, exhibited significantly higher antioxidant activity. These findings indicate that the structural features of carbon dots and the nitrogen composition play a crucial role in determining their antioxidant performance.

Conclusions: In this study, nitrogen-doped carbon dot particles were successfully synthesized from mangosteen peel via a hydrothermal method using different nitrogen doping ratios (MCN1 and MCN2). Structural characterization of the synthesized carbon dots using spectroscopic techniques confirmed that a higher nitrogen content resulted in an increased number of structural defect sites. This structural modification also led to a decrease in the negative surface charge of the particles. The change in surface charge was found to have a direct effect on antioxidant activity. Notably, MCN1 particles, which contained a lower nitrogen content than MCN2, exhibited higher

antioxidant activity. Therefore, it can be concluded that MCN1 carbon dots possess properties suitable for applications in inhibiting oxidative reactions. Especially, MCN1 show strong potential for use in food packaging materials that require antioxidant functionality to reduce oxidative reactions during food storage. Such materials could contribute to extending the shelf life of food products, minimizing quality deterioration, and enhancing food safety for consumers. Furthermore, this approach represents a promising strategy for valorizing agricultural waste, such as mangosteen peel, by converting it into high-value functional materials with potential industrial and environmental benefits.

Keywords: nitrogen doped carbon dots; antioxidant activity; urea; hydrothermal

*Corresponding author. E-mail: jomjai@buu.ac.th

Introduction

คาร์บอนดอท (carbon dots; CDs) เป็นวัสดุนาโนคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยทั่วไปต่ำกว่า 10 นาโนเมตร มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น ความเป็นพิษต่ำ ความสามารถในการละลายน้ำได้ดี มีความเสถียรทางเคมีและแสง รวมถึงมีสมบัติการเรืองแสงที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามโครงสร้างและสภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ (Xu *et al.*, 2004) ด้วยเหตุนี้ คาร์บอนดอทจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในงานด้านเซนเซอร์ การถ่ายภาพทางชีวภาพ ตัวเร่งปฏิกิริยา วัสดุทางการแพทย์ และอื่น ๆ การพัฒนาคาร์บอนดอทในปัจจุบันให้ความสำคัญกับกระบวนการสังเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ใช้พลังงานต่ำ และอาศัยแหล่งวัตถุดิบจากธรรมชาติหรือของเหลือทิ้งทางการเกษตร (Zhu *et al.*, 2019) ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนและการพัฒนาที่ยั่งยืน วัสดุชีวมวลจากพืชและเศษเหลือทางการเกษตรจำนวนมากมีองค์ประกอบของคาร์บอนและหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์คาร์บอนดอท โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีอันตรายหรือขั้นตอนที่ซับซ้อน จากความต้องการในการเพิ่มมูลค่าสินค้าทางภาคการเกษตร จึงได้มีการนำผลผลิตจากภาคเกษตรกรรมมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์คาร์บอนดอท เช่น ถั่วแคนเบอร์รี่ (Zulfajri *et al.*, 2019), ส้ม (Prasannan & Imae, 2013) และ ถั่วเหลือง (Wang *et al.*, 2020) นอกจากนี้เพื่อลดปัญหาที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของขยะจากภาคเกษตรกรรมจึงได้มีการนำเปลือกผลไม้เหลือทิ้งมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ เช่น เปลือกทุเรียน (Jayaweera *et al.*, 2019) และ เมล็ดเงาะ (Zulfajri *et al.*, 2023) นอกจากนี้แหล่งคาร์บอนแล้ว การปรับแต่งโครงสร้างของคาร์บอนดอทผ่านการเจือด้วยธาตุชนิดอื่น ๆ เช่น ไนโตรเจน (Zhang *et al.*, 2017) ซัลเฟอร์ (Das *et al.*, 2018) และฟอสฟอรัส (Dong *et al.*, 2020) มาใช้ในการเตรียมคาร์บอนดอท ถือเป็นอีกวิธีหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติของวัสดุ เนื่องจากเฮเทอโรอะตอมเหล่านี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเรืองแสงของคาร์บอนดอทได้ (Redondo-Fernandez *et al.*, 2023) ทำให้คาร์บอนดอทที่เจือด้วยเฮเทอโรอะตอมนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Zhang *et al.*, 2019) การประยุกต์ใช้ทางชีวการแพทย์ (Redondo-Fernandez *et al.*, 2023) และใช้ในการรักษาโรคมะเร็ง (Sekar *et al.*, 2022) นอกจากนี้คุณสมบัติของคาร์บอนดอทที่ได้กล่าวมาแล้ว คาร์บอนดอทยังมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant activity) ผ่านกลไกการถ่ายโอน

อิเล็กตรอน (single electron transfer หรือ SET) หรือการถ่ายโอนไฮโดรเจน (hydrogen atom transfer หรือ HAT) จากหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาคคาร์บอนดอท อาทิเช่น หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) และหมู่เอมีน (-NH₂ หรือ NH) (Re *et al.*, 1999) ซึ่งได้มีรายงานการนำอนุภาคคาร์บอนดอทไปพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มความปลอดภัยของอาหาร ตัวอย่างเช่น บรรจุภัณฑ์ที่ยืดอายุในการเก็บรักษา สตรอเบอรี่ (Das *et al.*, 2022) เห็ด (Roy *et al.*, 2021) พุทรา (Zhao *et al.*, 2022) และเนื้อหมู (Khan *et al.*, 2023) ในปัจจุบันได้มีการเตรียมคาร์บอนดอทที่เจือด้วยไนโตรเจน โดยใช้แหล่งของอะตอมคาร์บอนและไนโตรเจนที่หลากหลาย (Yuan *et al.*, 2016) แหล่งของไนโตรเจนที่นิยมใช้ในการเจือคาร์บอนดอทได้แก่ เอทิลีนไดเอมีน (Huang *et al.*, 2025) และยูเรีย (Konar *et al.*, 2019) การเจือด้วยไนโตรเจนช่วยเพิ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวและยังช่วยให้กระบวนการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเกิดได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้คาร์บอนดอทที่เจือด้วยไนโตรเจนมีสมบัติเชิงแสงและสมบัติทางเคมีที่โดดเด่นกว่าคาร์บอนดอทที่ไม่ได้เจือธาตุใด ๆ (Chen *et al.*, 2025) การเจือด้วยไนโตรเจนยังทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบบนพื้นผิวของคาร์บอนดอท เช่น หมู่เอมีน (-NH₂) และหมู่เอไมด์ (-CONH-) ส่งผลให้เกิดตำแหน่งเชิงหน้าที่เพิ่มเติมบนผิวของคาร์บอนดอทเมื่อไนโตรเจนเข้าไปแทนที่อะตอมของคาร์บอนในโครงสร้างของแกรไฟต์ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของคาร์บอนดอทจะเกิดเป็นวงเฮเทอโรไซคลิกได้อย่างหลากหลาย เช่น วงไพริดีน และ วงไพโรล และยังทำให้เกิดข้อบกพร่อง (defect) ในโครงสร้างซึ่งส่งผลต่อสมบัติของคาร์บอนดอทได้ (Nguyen *et al.*, 2022)

ในงานวิจัยนี้ได้สนใจการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกมังคุดที่เจือด้วยไนโตรเจน (MCN) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเตรียมอนุภาค MCN โดยใช้เปลือกมังคุดเป็นแหล่งของคาร์บอนแต่ใช้แหล่งของไนโตรเจนต่างกัน Chen และคณะได้สังเคราะห์อนุภาค MCN โดยใช้เอทิลีนไดเอมีนเป็นแหล่งของไนโตรเจนอะตอมด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล และนำอนุภาคที่เตรียมได้มาใช้เป็นฟลูออเรสเซนต์เซนเซอร์ในการตรวจวัดไดโครเมตไอออน (dichromate, Cr₂O₇²⁻) และวานิลิน (Chen *et al.*, 2025) ในปีเดียวกัน Pham และคณะได้พัฒนาฟลูออเรสเซนต์เซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดสเตรปโตมัยซิน (streptomycin) โดยเตรียมเซนเซอร์จากวิธีรอยพิมพ์ประทับระดับโมเลกุล (molecular imprinted) โดยใช้อนุภาค MCN ที่สังเคราะห์ด้วยไมโครเวฟและใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนอะตอม (Pham *et al.*, 2025) แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังไม่พบการรายงานการศึกษาฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของอนุภาค MCN แต่อย่างใด ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงต้องการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกมังคุดที่เจือด้วยไนโตรเจนในอัตราส่วนที่ต่างกัน (MCN1 และ MCN2) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลโดยใช้ยูเรียเป็นสารตั้งต้นในการเติมอะตอมของไนโตรเจน พร้อมทั้งเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้าง สมบัติเชิงแสง และฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของอนุภาคทั้งสองที่เตรียมได้ ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการนำอนุภาคของ MCN ไปพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มความปลอดภัยของอาหารได้ในอนาคต ซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร พร้อมทั้งลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

Methodology

1. สารเคมี

มังกุดจากตลาดสดในตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี เกล็ดของแอนไอออน บัฟเฟอร์และสารเคมีชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ในการศึกษาจากบริษัท KEMAUS, MERCK, Finechem, LOBA CHEMIE, Sigma-Aldrich และ CARLO ERBA และ ไดคลอโรมีเทน (CH_2Cl_2 , dichloromethane) จากบริษัท RCI Labscan

2. การเตรียมผงมังกุด

นำเปลือกมังกุดมาตากแดดให้แห้ง จากนั้นหั่นเปลือกมังกุดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ นำไปบดในเครื่องบดและบดจนได้ผงละเอียด หลังจากนั้นนำไปร่อนบนตะแกรงเพื่อแยกส่วนที่เป็นกากออก และเก็บผงมังกุดในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3. การเตรียมคาร์บอนดอทจากเปลือกมังกุดที่เจือด้วยอะตอมของไนโตรเจน MCN1 และ MCN2

ในการเตรียมอนุภาค MCN1 ซึ่งผงมังกุด 0.5 กรัม และยูเรีย ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) 0.5 กรัม เติมน้ำลงไปยังของผสมดังกล่าว ปริมาตร 25 มิลลิลิตร จากนั้นเทสารใส่ขวดเทฟลอนและอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยเพิ่มความร้อนในอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที หลังจากครบเวลาและปล่อยให้สารละลายเย็นถึงอุณหภูมิห้อง นำของผสมไปเซนทริฟิวจ์ (centrifuge) ที่ความเร็ว 10,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นกรองด้วยตัวกรองแบบเข็มชนิดยาที่กรองอนุภาคขนาด 0.45 ไมครอน และตามด้วยตัวกรองแบบเข็มชนิดยาที่กรองอนุภาคขนาด 0.22 ไมครอน เมื่อกรองเสร็จแล้วนำสารผสมที่กรองได้มาสกัดด้วย CH_2Cl_2 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง จากนั้นนำชั้นน้ำที่ได้ไปผ่านกระบวนการไดอะไลซิสด้วยเยื่อไดอะไลซิส (dialysis membrane) ที่มีค่า molecular weight cut-off (MWCO) เท่ากับ 1,000 Da เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยทำการเปลี่ยนน้ำทุก ๆ 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาแล้วนำไปทำให้แห้งด้วยการแช่เยือกแข็ง (freeze dry) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จะได้ของแข็งสีน้ำตาลเข้ม สำหรับการเตรียมอนุภาค MCN2 ทำการทดลองด้วยวิธีเดียวกันกับการเตรียมอนุภาค MCN 1 แต่ใช้ยูเรีย 1 กรัม

4. การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ MCNs

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของอนุภาค MCNs ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้ การศึกษาโครงสร้างพื้นฐานวิทยาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope หรือ TEM) รุ่น JEM-2010 ของบริษัท JEOL การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพร้อมอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (Scanning Electron Microscope equipped with Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy หรือ SEM-EDX) รุ่น LEO 1450 VP ของบริษัท Zeiss การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างทำการศึกษาโดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์อินฟราเรดแบบแทรกผ่านรวมทั้งหมด (Attenuated Total Reflectance – Fourier Transform Infrared Spectrometer, ATR-FTIR) รุ่น Frontier ของบริษัท Perkin Elmer การวิเคราะห์การเกิดข้อบกพร่องของอนุภาคศึกษาด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี SENTERRA II Bruker Raman microscope รุ่น PHI-VersaProbe ของบริษัท Bruker การวิเคราะห์ค่าประจุบนพื้นผิวของอนุภาค (Zeta potential) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Zetasizer Nano series รุ่น Nano ZS ของบริษัท Malvern Panalytical การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของสารด้วยด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลโฟโตมิเตอร์รุ่น Agilent technology Cary 8454 ของบริษัท Agilent และ

การวิเคราะห์สัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ด้วยเทคนิคเครื่องฟลูออเรสเซนส์สเปคโตรมิเตอร์รุ่น Cary Eclipse ของบริษัท Agilent Technologies

5. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการรวบแสงฟลูออเรสเซนซ์ของอนุภาค MCNs

การศึกษาประสิทธิภาพในการรวบแสง (Quantum Yield, QY) ของอนุภาค MCNs ทำได้โดยใช้สารละลายควินินซัลเฟต (quinine sulfate) ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ ที่มีค่า QY เท่ากับ 54% เป็นสารมาตรฐาน ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาค MCNs และสารมาตรฐานควินินซัลเฟตที่ใช้ในการทดลองมีค่าต่ำกว่า 0.1 ที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร การคำนวณหาค่า QY แสดงได้ดังสมการ (1)

$$\phi_x = \phi_{st} \times \frac{Grad_x}{Grad_{st}} \times \frac{\eta_x^2}{\eta_{st}^2} \quad (1)$$

โดยที่ ϕ คือ ค่า QY, st และ x หมายถึง สารมาตรฐานและสารตัวอย่างตามลำดับ ค่า η หมายถึงดัชนีหักเหของตัวทำละลาย และ Grad คือค่าความชันจากกราฟความเข้มรวมของสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ (integrated PL intensity) เทียบกับค่าการดูดกลืนแสง

6. การศึกษาความยาวคลื่นกระตุ้นที่เหมาะสมของ MCNs

เตรียมสารละลาย MCN1 และ MCN2 ที่ความเข้มข้น 0.03 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ในสารละลาย 0.2 มิลลิโมลาร์ ทริสบัฟเฟอร์ (Tris-buffer) pH 10 ทำการศึกษาความยาวคลื่นกระตุ้นที่เหมาะสมด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนส์สเปคโตรโฟโตเมทรี โดยทำการสแกนความยาวคลื่นกระตุ้นในช่วง 340-400 นาโนเมตร เปรียบเทียบความเข้มของการคายแสงจากฟลูออเรสเซนส์สเปคตรัมที่ได้จากความยาวคลื่นกระตุ้นแต่ละค่า เพื่อให้ได้ความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการทดลองในขั้นถัดไป

7. การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของ MCN ด้วยเทคนิค DPPH assay

7.1 การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารมาตรฐานกรดแอสคอร์บิก

เตรียมสารละลาย DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) 2% ในเมทานอล และเตรียมสารมาตรฐานกรดแอสคอร์บิกความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร ในเมทานอล 80% จากนั้นเตรียมสารละลายกรดแอสคอร์บิกในเมทานอล 5 ความเข้มข้นเพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน จากนั้นเติมสารละลายปริมาตร DPPH 4 มิลลิลิตร ลงไปในสารมาตรฐานกรดแอสคอร์บิกปริมาตร 1 มิลลิลิตร นำสารผสมไปบ่มในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลานำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง คำนวณ %Scavenging และคำนวณหาค่า IC_{50} จากผลการทดลองที่ได้ ดังสมการ (2) โดยที่ %Scavenging คือ เปอร์เซ็นการยับยั้ง Ac คือ ค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH และ As คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารมาตรฐาน

$$\% Scavenging = \left(\frac{Ac-As}{Ac} \right) \times 100 \quad (2)$$

7.2 การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของคาร์บอนคอต MCNs

ทำการทดลองเหมือนข้อ 8.1 แต่เตรียม MCN1 และ MCN2 ความเข้มข้นอย่างละ 1 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ในน้ำกลั่น จากนั้นนำไปฉีดเป็นเวลา 1 นาที และนำไปทดสอบ โดยเปิดสารละลาย MCN1 และ MCN2 ปริมาตร 0-50 ไมโครลิตร ลงไปในสารละลาย DPPH ปริมาตร 4 มิลลิลิตร นำสารละลายไปบ่มในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลานำไปวัด ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ทำการคำนวณ %Scavenging และคำนวณหาค่า IC₅₀ จากผลการทดลองที่ได้ ดังสมการ (2)

8. การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของ MCNs ด้วยเทคนิค ABTS

ผสมสารละลาย ABTS (2,2'-azinobis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid ammonium salt): C₁₈H₂₄N₆O₆S₄) ความเข้มข้น 7 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร กับสารละลายโพแทสเซียมเพอร์ซัลเฟต (potassium persulfate: K₂S₂O₈) ความเข้มข้น 2.45 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เข้าด้วยกัน บ่มสารละลายในที่มืดเป็นเวลา 12-16 ชั่วโมง จากนั้น นำสารละลายที่เตรียมได้มาเจือจาง 50% ในเอทานอล 100% (ABTS2) จากนั้นนำสารละลาย ABTS ที่เจือจางในเอทานอล มาเจือจางอีก 4 เท่าในเอทานอล 80% (ABTS3) เพื่อเตรียมใช้ในการวิเคราะห์ (เตรียมทิ้งไว้ 30 นาที) ทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของอนุภาค MCNs ทำได้โดยผสมสารละลาย MCNs ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ในน้ำกลั่น ปริมาตร 0-50 ไมโครลิตร กับสารละลาย ABTS3 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและบ่มในที่มืดเป็นเวลา 40 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 734 nm คำนวณได้จากสมการ (2) และรายงานเป็นค่า %scavenging (Rajurkar & Hande, 2011)

9. การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของ MCNs ด้วยเทคนิค Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากิจกรรมต้านอนุมูลอิสระของอนุภาค MCNs ด้วยเทคนิค FRAP โดยดัดแปลงจากวิธีของ Kukongviriyapan และคณะ (Kukongviriyapan *et al.*, 2007) โดยเตรียมสารละลาย FRAP โดยละลาย TPTZ (2,4,6-Tris(2-pyridyl)-s-triazine (C₁₈H₁₂N₆) ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ และ Ferric chloride (FeCl₃) ความเข้มข้น 4 มิลลิโมลาร์ ในอะซิเตต บัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ (pH 3.6) ปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตร

ทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของอนุภาค MCNs โดยผสมสารละลาย MCN1 และ MCN2 ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัม/ มิลลิลิตร ปริมาตร 10 และ 30 ไมโครลิตร ตามลำดับ กับสารละลาย FRAP ปริมาตร 4.5 มิลลิลิตร และบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 nm เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ FeSO₄

10. การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของอนุภาค MCNs ด้วยเทคนิค Total Phenolic Content: TPC

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากิจกรรมต้านอนุมูลอิสระของอนุภาค MCNs โดยดัดแปลงวิธีการทดลองจากวิธีของ Yingngam และคณะ (Yingngam *et al.*, 2014) โดยเตรียมสารละลาย Folin reagent 10% ในน้ำกลั่นปริมาตร 500 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) 7.5% ในน้ำกลั่นปริมาตร 500 มิลลิลิตร การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระทำได้โดยผสมสารละลาย MCN1 และ MCN2 ที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ปริมาตร 100 และ 50 ไมโครลิตร ตามลำดับ กับ Foin reagent 5 มิลลิลิตร และ สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 4 มิลลิลิตร บ่มในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 756 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก

Results

1. การพิสูจน์เอกลักษณ์ของอนุภาค MCNs

การศึกษาลักษณะ ขนาด และการกระจายตัวของอนุภาค โดยใช้เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูง (HR-TEM) ได้ผลการทดลองดังแสดงใน Figure 1a และ 1b จากการศึกษาอนุภาค MCNs พบว่าอนุภาคทั้งสองมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและมีรูปร่างคล้ายทรงกลม ดังแสดงใน Figure 1a* และ 1b* โดยอนุภาค MCN1 มีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 5.0 – 11.0 นาโนเมตร มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 8.5 ± 2.30 นาโนเมตร และอนุภาค MCN2 มีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 10 - 20 นาโนเมตร มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 15 ± 3.95 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดที่ใหญ่กว่าอนุภาคของ MCN ที่ใช้ยูเรียเป็นสารตั้งต้น (Qi *et al.* 2023) อนุภาค MCN1 และ MCN2 มีระยะระนาบผลึก (lattice spacing) เท่ากับ 0.21 นาโนเมตร และ 0.24 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของระนาบผลึก (002) ของกราฟิติกคาร์บอน (Sun *et al.*, 2006)

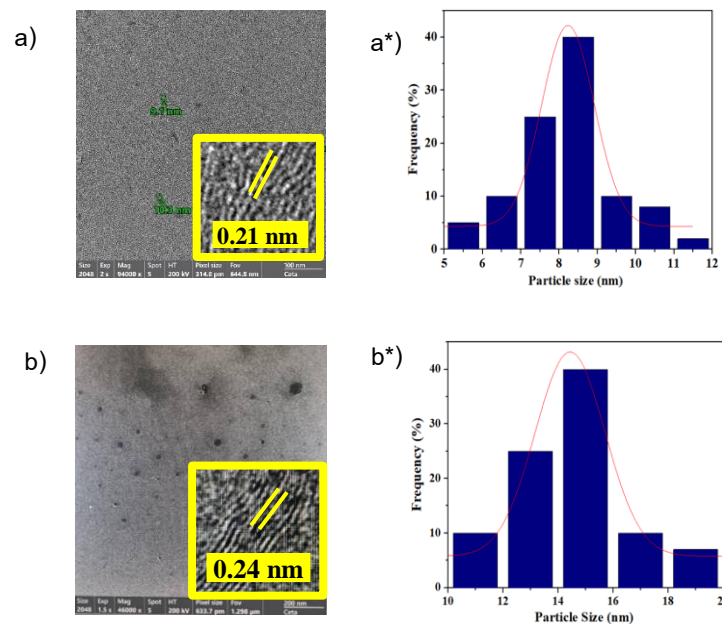


Figure 1 (a and b) HR-TEM image and (a* and b*) particles size distribution of MCN1 and MCN2 respectively

การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของธาตุในอนุภาค MCN1 และ MCN2 ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy หรือ EDX) แสดงได้ดัง Figure 2 พบสัญญาณหลักของธาตุคาร์บอนซึ่งมาจากโครงสร้างคาร์บอนดอต นอกจากนี้ยังตรวจพบสัญญาณของ O และ N ซึ่งมีแหล่งที่มาจากยูเรีย ((NH₂)₂CO) ที่ใช้เป็นสารตัวเติมในกระบวนการสังเคราะห์ ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าสามารถเติมไนโตรเจนเข้าสู่โครงสร้างของอนุภาค MCNs ได้ (Senel

et al., 2019) เปรอร์เซนต์ธาตุไนโตรเจนที่พบในตัวอย่างของ MCN1 และ MCN2 มีค่า 7.19% และ 9.16% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไนโตรเจนในขั้นตอนของการสังเคราะห์ส่งผลให้มีไนโตรเจนเพิ่มขึ้นในสารตัวอย่างด้วยเช่นกัน

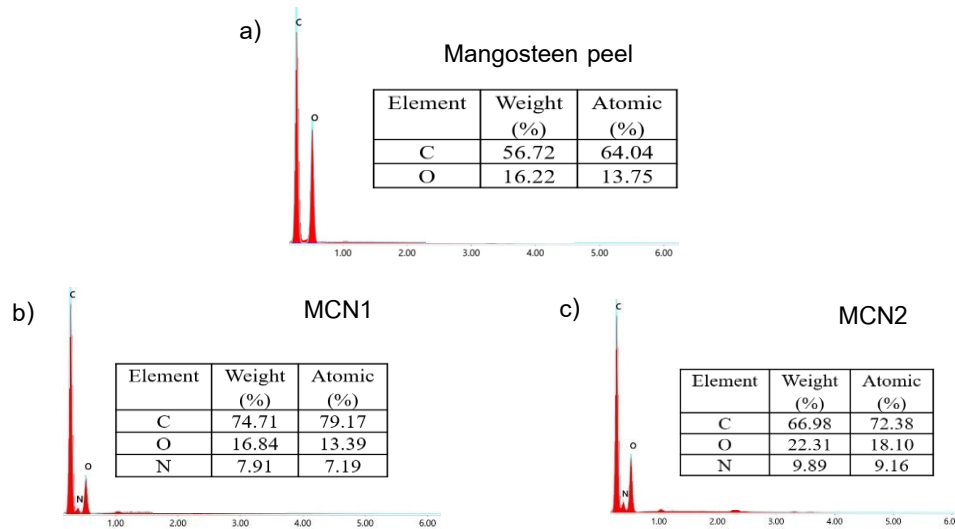


Figure 2 EDX spectrum of (a) mangosteen peel, (b) MCN1 and (c) MCN2

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาค MCN1 และ MCN2 ด้วยเทคนิค FT-IR แสดงได้ดัง Figure 3 พบเลขคลื่นที่สอดคล้องกับการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ดังนี้ ตำแหน่งเลขคลื่น 3196 cm^{-1} ที่มีลักษณะเป็นบรอดพีคเป็นการสั่นแบบยืดหดพันธะของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) และเอมีน (N-H) (Murru et al., 2020; Chen et al., 2025) พีคที่เป็นลักษณะเฉพาะของการสั่นแบบยืดหดและการสั่นแบบการงอของพันธะต่างระนาบ (out-of plane bending) ของพันธะ C-H ปรากฏที่เลขคลื่น 2850 และ 614 cm^{-1} ตามลำดับ (Chen et al., 2025) การสั่นของพันธะ C=O, C=N และ C=C ปรากฏที่เลขคลื่น $1560 - 1570\text{ cm}^{-1}$ (Rao et al., 2018) การสั่นของพันธะ C-N ปรากฏที่เลขคลื่น $1415-1411\text{ cm}^{-1}$ (Rao et al., 2018) การสั่นของพันธะ C-O-C ปรากฏ ที่ เลขคลื่น 1085 cm^{-1} (Yang et al., 2014) และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 614 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ C-H (Zhang et al., 2019) การพบการสั่นของพันธะ C=N และ C-N เป็นการยืนยันว่าสามารถเจืออะตอมของไนโตรเจนเข้าสู่โครงสร้างของคาร์บอนคอตได้

จากการศึกษาโครงสร้างของอนุภาคด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี ดังแสดงใน Figure 4 พบว่าอนุภาคทั้งสองแสดงถึงโครงสร้างหลักของแกรฟีน โดยพบแถบสัญญาณสองที่เลขคลื่น 1573 cm^{-1} (แถบ G หรือแถบแกรฟีน) และ 1413 cm^{-1} (แถบ D หรือแถบข้อบกพร่อง) ตามลำดับ แถบ G หรือแถบแกรฟีน (graphene band) บ่งบอกถึงการเกิดไฮบริดเซชันของคาร์บอนแบบ sp^2 โดยที่คาร์บอนมีการเรียงตัวแบบวงหกเหลี่ยมและมีความเป็นผลึก ในขณะที่แถบ D หรือแถบข้อบกพร่อง

(defect band) บ่งบอกถึงการเกิดข้อบกพร่องในโครงสร้างของวัสดุคาร์บอนส่งผลให้อะตอมของคาร์บอนมีการไฮบริดเซชันแบบ sp^3 (Fawaz *et al.*, 2023) และใช้อัตราส่วน I_D/I_G ในการบอกถึงปริมาณการเกิดข้อบกพร่องในโครงสร้างของวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายกับแกรไฟีน ในกรณีที่มีค่า I_D/I_G สูง แสดงว่าโครงสร้างดังกล่าวเกิดข้อบกพร่องมาก แต่ถ้าค่า I_D/I_G มีค่าต่ำแสดงว่าเกิดข้อบกพร่องน้อย เมื่อพิจารณาค่า I_D/I_G ของอนุภาค MCN1 และ MCN2 พบว่ามีค่า 0.70 และ 0.76 ตามลำดับ

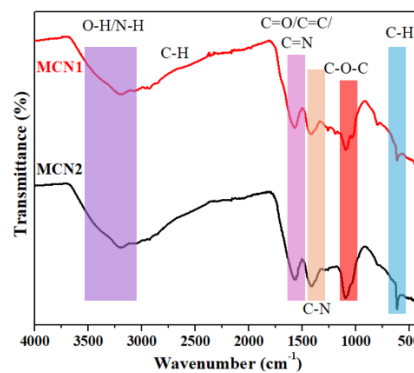


Figure 3 FT-IR spectra of MCN1 and MCN2

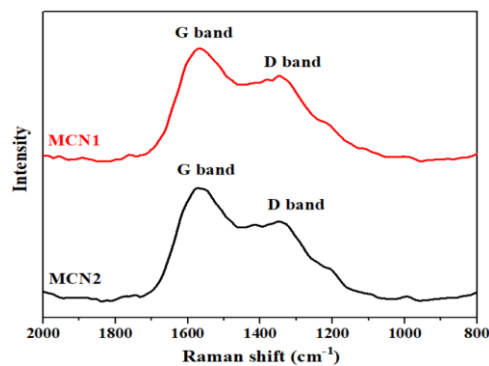


Figure 4 Raman spectra of MCN1 and MCN2

ในการศึกษาถึงเสถียรภาพของการกระจายตัวในสารละลายน้ำและลักษณะประจุบนพื้นผิว (zeta potential) ของอนุภาคของคาร์บอนดอท MCN1 และ MCN2 ได้ผลการทดลองดังแสดงใน Figure 5 จะเห็นได้ว่าอนุภาค MCN1 และ MCN2 มีค่า zeta potential มีค่า -34.96 mV และ -32.33 mV ตามลำดับ

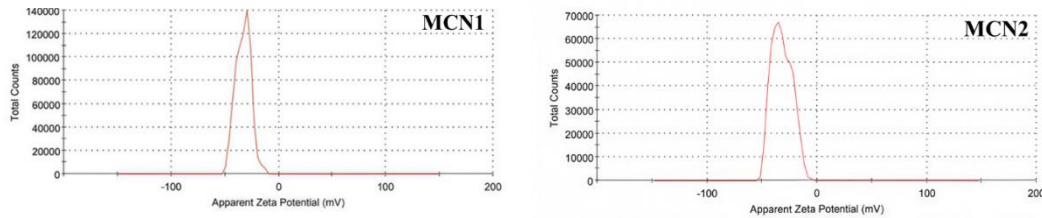


Figure 5 Zeta potential of MCNs

2. การศึกษาสมบัติเชิงแสงของอนุภาค MCNs

การศึกษาศสมบัติเชิงแสงของอนุภาคด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี แสดงได้ดัง Figure 6 สารละลาย MCNs ทั้ง 2 อนุภาคมีสีน้ำตาลอ่อนเมื่ออยู่ภายใต้แสงธรรมชาติและให้แสงฟลูออเรสเซนส์สีเหลืองอมเขียวเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงพบว่าทั้ง 2 อนุภาคมีการดูดกลืนแสงสูงสุดที่มีความยาวคลื่น 224 นาโนเมตร สอดคล้องกับการเปลี่ยนระดับพลังงานแบบ $\pi-\pi^*$ ของระบบคอนจูเกต sp^2 ของพันธะ C=C ในวงอะโรมาติก (Gedda *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2021) นอกจากนี้ยังพบการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 246 นาโนเมตร สอดคล้องกับการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิล็กตรอนแบบ $n-\pi^*$ ของพันธะ C=O และ C=N (Wang *et al.*, 2016; Praseetha *et al.*, 2024)

จากการศึกษาศสมบัติเชิงแสงของอนุภาค MCNs ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโคปี แสดงดัง Figure 6a* และ 6b* พบว่าเมื่อทำการกระตุ้นสารละลาย MCNs ด้วยความยาวคลื่น 340 - 400 นาโนเมตร ค่าความยาวคลื่นของการคายแสงฟลูออเรสเซนส์ที่มีความเข้มสูงสุดมีการเลื่อนไปยังความยาวคลื่นที่มากขึ้น พร้อมกับการลดลงของความเข้มสัญญาณเมื่อเพิ่มความยาวคลื่นกระตุ้น แสดงให้เห็นว่าอนุภาคทั้งสองแสดงสมบัติการเรืองแสงที่ขึ้นกับความยาวคลื่นกระตุ้น (excitation-dependent emission) (Mao *et al.*, 2010) อนุภาค MCN1 มีความเข้มของสัญญาณฟลูออเรสเซนส์สูงสุดที่มีความยาวคลื่น 470 นาโนเมตร เมื่อทำการกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 380 นาโนเมตร ในขณะที่ MCN2 มีค่าความเข้มของสัญญาณฟลูออเรสเซนส์สูงสุดที่มีความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร เมื่อทำการกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าการมีปริมาณอะตอมของไนโตรเจนในโครงสร้างที่ต่างกันส่งผลต่อโครงสร้างอิล็กตรอนิกส์และระดับพลังงานของสถานะผิว (surface states) ของคาร์บอนดอท (Nguyen *et al.*, 2022)

จากการศึกษาประสิทธิภาพการวาวแสงของโมเลกุล (quantum yield) ของอนุภาค MCN1 และ MCN2 โดยใช้ควินิน ซัลเฟต (quinine sulfate) เป็นสารมาตรฐาน พบว่าอนุภาค MCN1 และ MCN2 มีค่าประสิทธิภาพการวาวแสงของโมเลกุลเท่ากับ 3.25% และ 3.45% ตามลำดับ

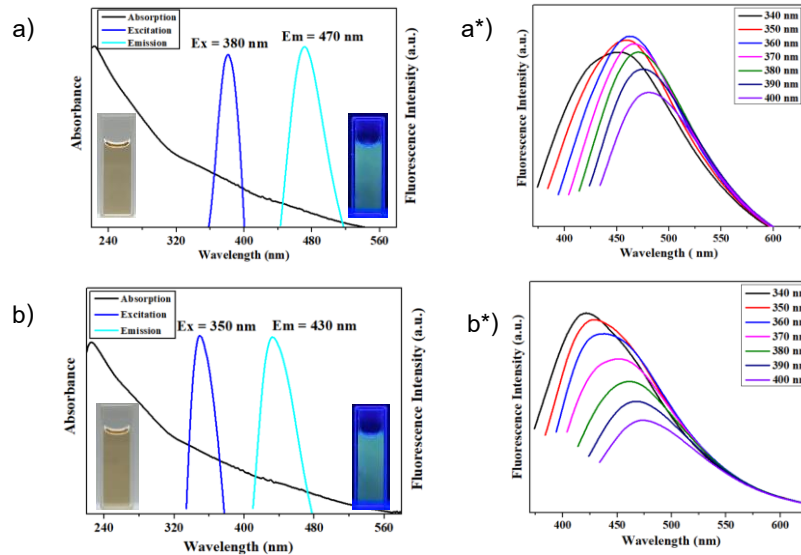


Figure 6 (a and b) UV and fluorescence spectra and (a* and b*) fluorescence emission spectra at excitation wavelength 340-400 nm of MCN1 and MCN2 respectively

จากการศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการเกิดสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ของอนุภาค MCNs ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH ต่าง ๆ ดังแสดงใน Figure 7 พบว่าค่าความยาวคลื่นของการคายแสงมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนค่า pH ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามความเข้มของสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น แนวโน้มดังกล่าวอาจเกิดจากการสูญเสียโปรตรอนของหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่ -COOH หรือ -OH บนพื้นผิวของ MCNs ส่งผลให้จำนวนอิเล็กตรอนที่พื้นผิวเพิ่มขึ้นจึงทำให้ความเข้มของสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์มีค่าสูงขึ้น

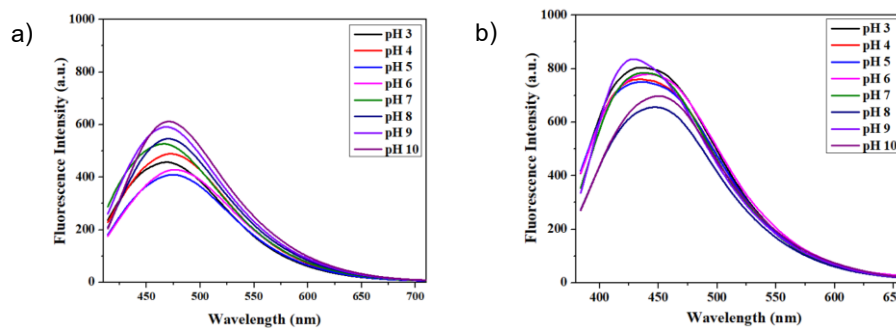
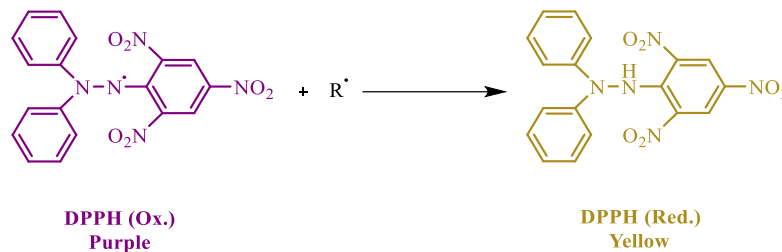


Figure 7 Effect of pH on the fluorescence properties of MCN1 and MCN2 in buffer solutions at different pH values: (a) and (b) fluorescence emission spectra of MCN1 and MCN2, respectively at pH 3-10

3. การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของอนุภาค MCNs

3.1 การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของอนุภาค MCNs ด้วยเทคนิค DPPH

การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH นั้น อาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลอิสระของ DPPH (DPPH· หรือ DPPH radical) กับสารต้านอนุมูลอิสระ โดย DPPH· จะรับโปรตอนได้ผลิตภัณฑ์เป็น DPPH-H ดังแสดงใน Scheme 1 ส่งผลให้สีของสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเหลืองสอดคล้องกับการลดลงของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร (Gedda *et al.*, 2023) จากผลการทดลองใน Figure 8 จะเห็นได้ว่าค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของ MCN1 และ MCN2 เพิ่มขึ้นจาก 0-50 ไมโครลิตร และ 0-100 ไมโครลิตร ตามลำดับ เมื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %scavenging กับความเข้มข้นของอนุภาค พบว่ากราฟที่ได้มีค่าเป็นเส้นตรงที่ความเข้มข้นของ MCN1 และ MCN2 มีค่า 0-11.1 และ 0-22.2 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ตามลำดับ และมีค่า IC₅₀ (inhibitory concentration) ของอนุภาค MCN1 และ MCN2 เท่ากับ 7.63 และ 14.74 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ตามลำดับ (IC₅₀ ของกรดแอสคอร์บิกมีค่าเท่ากับ 1.19 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร) จะเห็นได้ว่าอนุภาค MCN1 มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าอนุภาค MCN2 เนื่องจากมีค่า IC₅₀ ที่ต่ำกว่า



Scheme 1 DPPH reaction

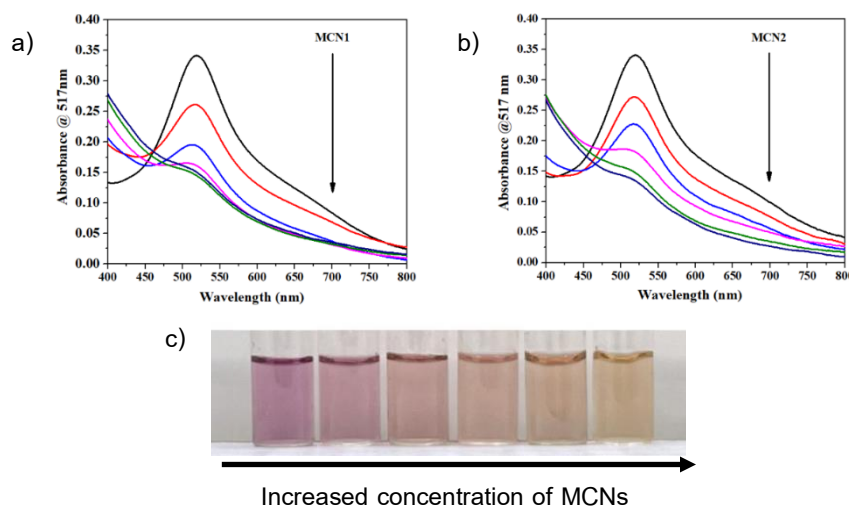
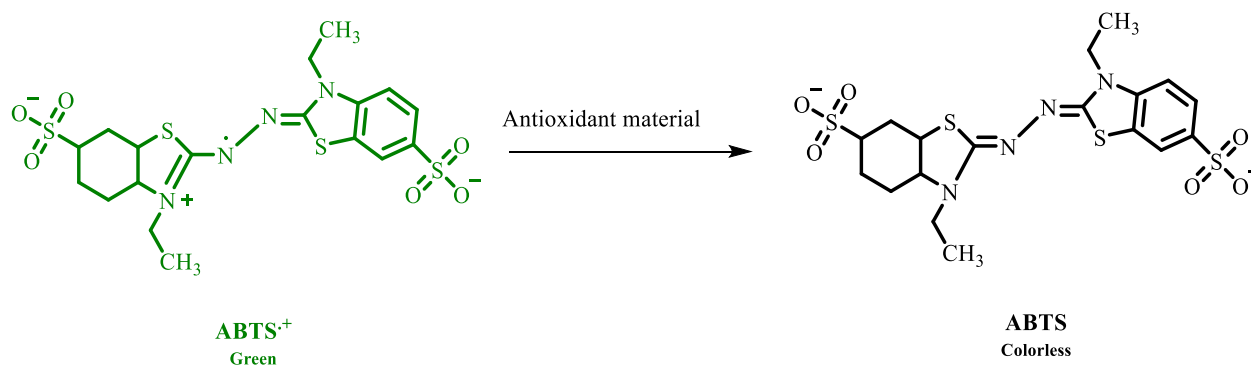


Figure 8 (a, b) UV-vis spectra of DPPH exhibiting a concentration-dependent decrease in absorbance at 517 nm and (c) visual color change of DPPH solution with increasing MCNs concentration

3.2 การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของอนุภาค MCNs ด้วยเทคนิค ABTS

การศึกษาสมบัติการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS assay โดยอาศัยการถูกกำจัดของอนุมูลอิสระ $ABTS^{\cdot+}$ ซึ่งมีความเสถียรสูง (Re *et al.*, 1999) โมเลกุล ABTS จะถูกออกซิไดซ์ด้วยสารออกซิไดซ์ที่เหมาะสม เช่น โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต เพื่อสร้างอนุมูลอิสระ $ABTS^{\cdot+}$ ที่มีสีเขียวแกมน้ำเงินเข้มและมีการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร อนุมูลอิสระดังกล่าวสามารถรับอิเล็กตรอนหรือไฮโดรเจนจากสารต้านอนุมูลอิสระได้ ดังนั้นเมื่อเติมสารต้านอนุมูลอิสระลงในสารละลาย $ABTS^{\cdot+}$ สารต้านอนุมูลอิสระจะถ่ายโอนอิเล็กตรอนหรือโปรตอนไปยังอนุมูลอิสระ $ABTS^{\cdot+}$ ส่งผลให้อนุมูลอิสระดังกล่าวถูกรีดิวซ์กลับไปเป็น ABTS ในรูปที่ไม่มีเสถียรภาพมากขึ้นและสีของสารละลายจึงลดลงสอดคล้องกับการลดลงของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร ดังแสดงใน Scheme 2 การลดลงของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารตัวอย่างได้



Scheme 2 ABTS reaction

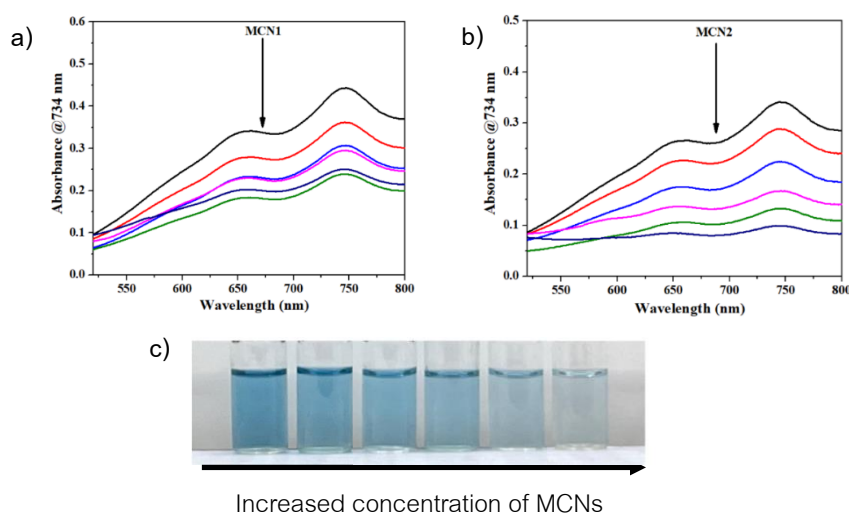
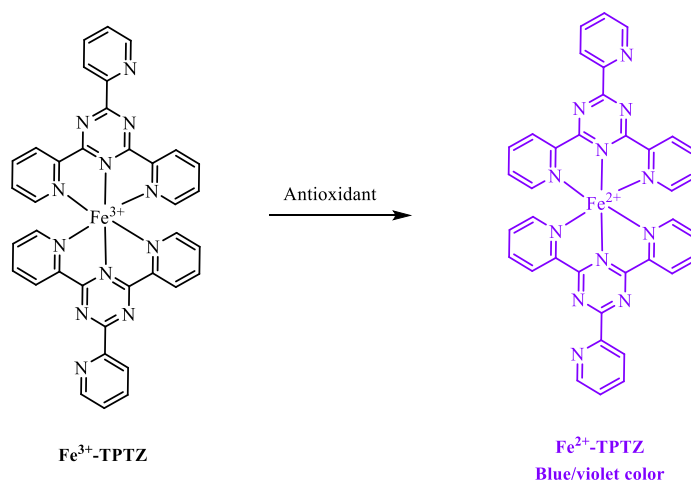


Figure 9 (a, b) UV-vis spectra of ABTS exhibiting a concentration-dependent decrease in absorbance at 734 nm and (c) visual color change of ABTS solution with increasing MCNs concentration

3.3 การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของอนุภาค MCNs ด้วยเทคนิค FRAP

การศึกษาศมบัติการต้านอนุมูลอิสระรวม (Total antioxidant capacity) ด้วยเทคนิค FRAP นั้นอาศัยความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระในการรีดิวซ์ไอออน Fe^{3+} ที่อยู่ในสารประกอบ Fe^{3+} -TPTZ ให้เป็นไอออน Fe^{2+} ในรูปของสารประกอบ Fe^{2+} -TPTZ การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวสังเกตได้จากการเปลี่ยนสีของสารละลายจากสีเทาไปเป็นสีม่วง สอดคล้องกับค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นที่ความยาวคลื่น 592 นาโนเมตร โดยสารต้านอนุมูลอิสระจะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ไปยังไอออน Fe^{3+} ดังแสดงใน Scheme 3 ดังนั้นประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระจึงแปรผันตรงกับการเพิ่มขึ้นของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 592 นาโนเมตร ในการรายงานค่า FRAP จะคำนวณจากกราฟมาตรฐานของสารละลาย $FeSO_4$ ซึ่งใช้เป็นสารอ้างอิง (Kukongviriyapan *et al.*, 2007). จากการศึกษพบว่าค่า FRAP ของอนุภาค MCN1 และ MCN2 มีค่า 3.24 และ 1.13 mM Fe^{2+} /1g MCNs.

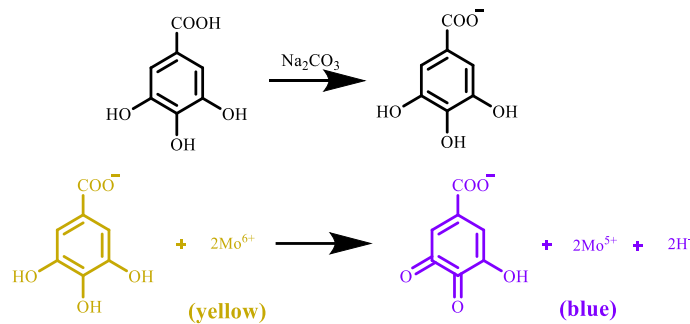


Scheme 3 FRAP reaction

3.4 การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลรวม (TPC)

การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลรวม (Total Phenolic Content หรือ TPC) เป็นวิธีที่ใช้ในการศึกษาฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของสารตัวอย่างกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสารประกอบฟีนอลเป็นกลุ่มสารที่มีหน้าที่สำคัญในการกำจัดอนุมูลอิสระผ่านกลไกการให้อิเล็กตรอนหรือไฮโดรเจน การวิเคราะห์ TPC อาศัยปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบฟีนอลกับรีเอเจนต์ Folin-Ciocalteu ซึ่งเป็นสารเชิงซ้อนของโพลีโมลิบเดต-โพลีฟอสเฟต (phosphomolybdate–phosphotungstate complexes) ซึ่งเป็นสารผสมระหว่างกรดโพลีโพลีโมลิบเดต (phosphomolybdic acid) และกรดโพลีฟอสเฟต (phosphotungstic acid) ภายใต้สภาวะเป็นด่าง สารประกอบฟีนอลจะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอน ไปยังไอออน Mo^{6+} ซึ่งมีสีเหลืองและจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไอออน Mo^{5+} ที่มีสีน้ำเงิน ที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร ดังแสดงใน

Scheme 4 โดยที่ความเข้มของสีที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของสารประกอบฟีนอลทั้งหมดในตัวอย่าง ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้สามารถนำมาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิกที่ใช้เป็นสารอ้างอิง จากการศึกษา ปริมาณฟีนอลรวมของตัวอย่างคาร์บอนดอท โดยพบว่า MCN1 และ MCN2 มีค่าปริมาณฟีนอลรวมคือ 142.61 และ 114.71 mg GAE/1g MCNs ตามลำดับ



Scheme 4 Total phenolic reaction

Discussion

จากการสังเคราะห์อนุภาคคาร์บอนดอทที่เตรียมจากเปลือกมังคุดที่เจือด้วยไนโตรเจนด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้ยูเรียเป็นสารตัวเติมอะตอมของไนโตรเจนในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยอัตราส่วนระหว่างเปลือกมังคุดต่อยูเรียที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาค MCN1 และ MCN2 มีค่าเท่ากับ 1:1 และ 1:2 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคพบว่าอนุภาค MCN1 มีขนาดเล็กกว่าอนุภาค MCN2 จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคศึกษาด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานพบว่าอนุภาค MCN2 มีร้อยละของไนโตรเจนสูงกว่าอนุภาค MCN1 เนื่องจากอนุภาค MCN2 ใช้ยูเรียในปริมาณที่มากกว่าอนุภาค MCN1 เป็นการยืนยันได้ว่าสามารถเจือไนโตรเจนเข้าไปในโครงสร้างของคาร์บอนดอทได้ จากการศึกษาหุ้ฟังก์ชันบนอนุภาคที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี พบหุ้ฟังก์ชันที่สอดคล้องกับอนุภาคคาร์บอนดอทที่เจือด้วยไนโตรเจนที่ได้มีการรายงานมาก่อนหน้านี้ จากการศึกษาการเกิดข้อบกพร่องของโครงสร้างของอนุภาคทั้งสองด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโกปีพบว่า อนุภาค MCN2 มีค่า I_D/I_G มากกว่าอนุภาค MCN1 แสดงว่าในโครงสร้างของอนุภาค MCN2 มีข้อบกพร่องเกิดขึ้นมากกว่าอนุภาค MCN1 เนื่องจากอนุภาค MCN2 มีอะตอมของไนโตรเจนที่มากกว่าอนุภาค MCN1 ส่งผลให้อะตอมของคาร์บอนมีการเปลี่ยนแปลงไฮบริดเซชันจาก sp^2 เป็น sp^3 มากขึ้น และยังเกิดข้อบกพร่องแบบช่องว่างมากขึ้น เนื่องจากการเกิดพันธะระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจนมากขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน

จากการวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิวของอนุภาคด้วยเทคนิค zeta potential ในน้ำ พบว่าอนุภาค MCN1 (-34.96 mV) มีค่าเป็นลบมากกว่า MCN2 (-32.33 mV) และยังมีค่าเป็นลบมากกว่าอนุภาคของคาร์บอนดอทที่เตรียมจากเปลือกมังคุด

ที่ไม่ได้เจือด้วยธาตุใด ๆ ที่มีค่าเท่ากับ -26.9 mV (Amloy *et al.*, 2024) บ่งชี้ได้ว่าบนพื้นผิวของอนุภาค MCN1 มีความเป็นประจุลบมากกว่า MCN2 หรือ MCN1 หมู่ฟังก์ชันสามารถแตกตัวให้โปรตอนได้ดีในน้ำ เช่นหมู่คาร์บอกซิลิก ($-\text{COO}^-$) และหมู่ไฮดรอกไซด์ ($-\text{OH}$) มากกว่าอนุภาค MCN2 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณของไนโตรเจนในโครงสร้างของคาร์บอนดอททำให้หมู่ฟังก์ชันดังกล่าวที่อยู่บนพื้นผิวมีจำนวนที่ลดลง หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าการมีอะตอมของไนโตรเจนในโครงสร้างมากทำให้หมู่ฟังก์ชันดังกล่าวแตกตัวได้น้อยลงหรืออาจเกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ อาทิเช่น หมู่เอมีน ($-\text{NH}_2$) และหมู่เอไมด์ ($-\text{CO}-\text{NH}$) บนพื้นผิวซึ่งหมู่ฟังก์ชันทั้งสองนี้มีความเป็นเบสที่แตกตัวได้น้อยในสภาวะที่เป็นกลาง นอกจากนี้การที่อนุภาค MCN1 มีประจุเป็นลบมากกว่าอนุภาค MCN2 ยังทำให้อนุภาค MCN1 มีเสถียรภาพในการกระจายตัวในน้ำได้ดีกว่า MCN2 เนื่องจากมีแรงผลักรวมตัวของประจุลบมากกว่าจึงลดการรวมตัว (aggregation) หรือการตกตะกอนของอนุภาคได้ จากการเปลี่ยนแปลงของค่าประจุบนพื้นผิวของอนุภาค MCN1 และ MCN2 แสดงให้เห็นว่าปริมาณการเจือไนโตรเจนมีผลโดยตรงต่อประจุที่พื้นผิวของคาร์บอนดอท

จากการศึกษาสมบัติเชิงแสงของอนุภาคทั้งสองด้วยเทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี และฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโคปี พบว่าอนุภาคทั้งสองมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่คล้ายกัน ประสิทธิภาพการวาวแสงของอนุภาค MCN2 (3.45%) มีค่าสูงกว่าอนุภาค MCN1 (3.25%) เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนโตรเจนในอนุภาค MCN2 ที่ทำให้มีจำนวนอิเล็กตรอนในโครงสร้างมากกว่า ซึ่งอนุภาคทั้งสองมีประสิทธิภาพของการวาวแสงของทั้งสองอนุภาคมีค่ามากกว่าคาร์บอนดอทจากเปลือกมังคุดที่ไม่ได้เจือด้วยธาตุใด ๆ ที่มีค่า 2% (Amloy *et al.*, 2024) จากการศึกษาสมบัติเชิงแสงด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโคปี พบว่าอนุภาค MCN2 มีค่าความยาวคลื่นกระตุ้นที่สูงกว่าอนุภาค MCN1 แสดงว่าอนุภาค MCN2 ต้องใช้พลังงานในการกระตุ้นมากกว่า เนื่องจากในโครงสร้างมีข้อบกพร่องแบบช่องว่างมากกว่าอนุภาค MCN1 จึงอาจทำให้การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นได้ยากซึ่งสอดคล้องจากผลการทดลองที่ได้จากเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี

เมื่อนำอนุภาคทั้งสองมาศึกษาสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระด้วยเทคนิค DPPH และ ABTS พบว่าอนุภาคทั้งสองมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดอนุมูลอิสระมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของไนโตรเจนที่ใช้ในการเจือ จาก Figure 10 จะเห็นได้ว่าอนุภาค MCN1 มีค่า IC_{50} ของทั้งสองเทคนิคที่ต่ำกว่าอนุภาค MCN2 แสดงว่าอนุภาค MCN1 มีสมบัติการต้านอนุมูลอิสระที่สูงกว่า เนื่องจากค่า IC_{50} ที่ต่ำกว่าบ่งชี้ถึงความสามารถในการให้โปรตอนหรืออิเล็กตรอนไปยังอนุมูลอิสระได้ดีกว่า (Brand-Williams *et al.*, 1995) ซึ่งสอดคล้องจากผลการทดลองที่ได้จากการหาประจุบนพื้นผิวของอนุภาคที่พบว่าอนุภาค MCN1 มีหมู่ฟังก์ชันที่ให้โปรตอนแก่อนุมูลอิสระได้มากกว่าอนุภาค MCN2

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระด้วยเทคนิค FRAP นั้นพบว่าค่า FRAP ของอนุภาค MCN1 มีค่าสูงกว่า MCN2 อย่างชัดเจน บ่งชี้ให้เห็นว่าอนุภาค MCN1 สามารถรีดิวซ์ Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} ได้ดีกว่าทั้งนี้เนื่องจากอนุภาค MCN1 มีประจุลบบนพื้นผิวมากกว่าจึงให้อิเล็กตรอนได้ดีกว่า นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Kadian และคณะได้รายงานว่ายังมีปริมาณของอะตอมที่ใช้ในการเจือโครงสร้างของคาร์บอนดอทมากจะเกิดข้อบกพร่องในโครงสร้างมากด้วยเช่นกัน (Kadian

et al., 2019) ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าอนุภาค MCN2 มีข้อบกพร่องทางโครงสร้างมากกว่าอนุภาค MCN1 จึงทำให้การถ่ายโอนอิเล็กตรอนในโครงสร้างของ MCN2 เกิดขึ้นได้ไม่ดี

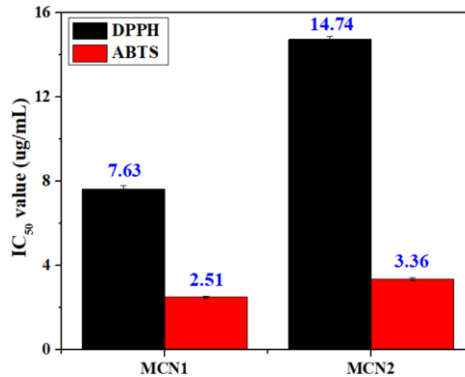


Figure 10 Comparison of antioxidant activity of MCN1 and MCN2 evaluated by DPPH and ABTS radical scavenging assays

จากการศึกษาปริมาณฟีนอลรวมของอนุภาค พบว่าอนุภาค MCN1 ให้ค่าปริมาณฟีนอลรวมสูงกว่า MCN2 เป็นการยืนยันได้ว่าอนุภาค MCN1 มีหมู่ฟังก์ชันฟีนอลมากกว่า MCN2 ทั้งนี้เนื่องจากการที่อนุภาค MCN1 มีปริมาณไนโตรเจนน้อยกว่า MCN2 ส่งผลให้อนุภาค MCN1 มีการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวน้อยกว่าจึงมีหมู่ฟีนอลที่มีบทบาทต่อสมบัติการต้านอนุมูลอิสระบนพื้นผิวของคาร์บอนดอทมาก

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระของอนุภาค ด้วยเทคนิค DPPH, ABTS, FRAP และ TPC เทียบกับอนุภาคคาร์บอนดอทที่ได้มีการรายงานมาก่อนหน้านี้ ดังแสดงใน Table 1 จะเห็นได้ว่าอนุภาค MCN1 มีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด เนื่องจากมีค่า IC_{50} ต่ำที่สุดจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DPPH และ ABTS โดยมีค่า FRAP และ TPC ที่สูงด้วยเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่พัฒนาขึ้นในงานนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุมูลอิสระสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นอาจเกี่ยวข้องกับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวและการเจือไนโตรเจน ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนหรือให้อะตอมไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระผ่านกลไกการถ่ายโอนอะตอมของไฮโดรเจน (hydrogen atom transfer หรือ HAT) หรือ single electron transfer (SET)

Conclusions

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมอนุภาคของคาร์บอนดอทจากเปลือกมังคุดที่เจือด้วยอะตอมของไนโตรเจนในอัตราส่วนที่ต่างกัน (MCN1 และ MCN2) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลได้เป็นผลสำเร็จ จากการพิสูจน์โครงสร้างของคาร์บอนดอทที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปียืนยันได้ว่าการมีอะตอมของไนโตรเจนมากทำให้เกิดข้อบกพร่องของโครงสร้างมากขึ้นตามไป

ด้วย นอกจากนี้แล้วยังทำให้ประจุบนพื้นผิวของอนุภาคมีค่าเป็นลบน้อยลงด้วยเช่นกันซึ่งส่งผลโดยตรงต่อฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระอย่างเห็นได้ชัด โดยที่อนุภาค MCN1 ที่มีปริมาณไนโตรเจนในโครงสร้างน้อยกว่าอนุภาค MCN2 มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระที่สูงกว่าซึ่งยืนยันได้จากการทดสอบฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยเทคนิค DPPH, ABTS, FRAP และการวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลรวม ดังนั้นอนุภาค MCN1 จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำไปพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มความปลอดภัยของอาหารได้ในอนาคต

Table 1 Comparison of antioxidant activity of MCN1 and MCN2.

Sample	DPPH (IC ₅₀ : ug/mL)	ABTS (IC ₅₀ : ug/mL)	FRAP value (mM Fe ²⁺ /1g MCD's)	TPC (mg GAE/1g MCD's)	Ref
M-CDs ¹	-	-	1.8	-	Shabbir <i>et al.</i> , 2022
P-CQDs ²	-	-	2.5	-	Mirseyed <i>et al.</i> , 2024
NS-CDs ³	960	-	-	21.1	Dechsri <i>et al.</i> , 2025
CDs ⁶	1000	-	-	19.1	Wechakorn <i>et al.</i> , 2025
MCN1	7.63	2.51	3.24	142.61	This work
MCN2	14.74	3.36	1.13	114.71	

¹M-CDs = Milk-derived carbon quantum dots; ²P-CQDs = Phosphorus-doped yeast cell wall carbon quantum dots;

³NS-CDs = Nitrogen and sulfur-doped citric acid and L-cysteine carbon dots; ⁶CDs = Sugar-derived carbon dots.

Acknowledgments

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund ปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 (ววน 49/2566) หน่วยบริการนวัตกรรมทางวิทยาศาสตร์ (SIF-IN-41100020), (SIF-IN-67910121), (SIF-IN-67300028) และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

References

Amloy, S., Lukprang, T., Lertworapreecha, M., & Preechaburana, P. (2024). Green synthesis of carbon dots from mangosteen peel for fluorescent cancer cells. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 34(2), 1-8.

- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. L. W. T. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Science and Technology*, 28(1), 25–30.
- Chen, X., Zhang, Z., Wu, J., Wang, J., & Gao, A. (2021). Synthesizing red fluorescent carbon dots from rigid polycyclic conjugated molecules: Dual-mode sensing and bioimaging in biochemical applications. *Particle & Particle Systems Characterization*, 38(7), 2100076.
- Chen, Y., Guo, Y., Xing, Z., Bai, L., Yang, W., Wu, Q., & Zhang, G. (2025). Nitrogen-doped carbon dots derived from mangosteen peel for the detection of $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ and vanillin. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 458, 115945.
- Chen, Y. X., Tang, Z., Feng, L. Y., Liang, L. L., Shang, D. H., Li, H. Q., & Chen, S. X. (2025). Highly sensitive and selective dual-signal ratiometric fluorescent sensor based on N,S co-doped carbon dots and rhodamine B for Pb^{2+} ions detection in industrial wastewater. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 127295.
- Das, P., Ganguly, S., Mondal, S., Bose, M., Das, A. K., Banerjee, S., & Das, N. C. (2018). Heteroatom doped photoluminescent carbon dots for sensitive detection of acetone in human fluids. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 266, 583-593.
- Das, P., Ganguly, S., Ahmed, S. R., Sherazee, M., Margel, S., Gedanken, A., & Rajabzadeh, A. R. (2022). Carbon dot biopolymer-based flexible functional films for antioxidant and food monitoring applications. *ACS Applied Polymer Materials*, 4(12), 9323–9340.
- Dechsri, K., Pengnam, S., Charoenying, T., Nattapulwat, N., Ngawhirunpat, T., Rojanarata, T., & Opanasopit, P. (2025). Fabrication of nitrogen and sulfur co-doped carbon dots for antioxidant applications. *Science, Engineering and Health Studies*.
- Dong, G., Lang, K., Ouyang, H., Zhang, W., Bai, L., Chen, S., & Zhao, X. (2020). Facile synthesis of N,P-doped carbon dots from maize starch via a solvothermal approach for the highly sensitive detection of Fe^{3+} . *RSC Advances*, 10(55), 33483–33489.

- Fawaz, W., Hasian, J., & Alghoraibi, I. (2023). Synthesis and physicochemical characterization of carbon quantum dots produced from folic acid. *Scientific Reports*, *13*(1), 18641.
- Gedda, G., Sankaranarayanan, S. A., Putta, C. L., Gudimella, K. K., Rengan, A. K., & Girma, W. M. (2023). Green synthesis of multifunctional carbon dots from medicinal plant leaves for antimicrobial, antioxidant, and bioimaging applications. *Scientific Reports*, *13*, 6371.
- Huang, Z., Li, J., & Li, L. S. (2025). Ethylenediamine-assisted preparation of carbon dots from biomass for highly sensitive detection of levodopa. *RSC Advances*, *15*(1), 420–427.
- Jayaweera, S., Yin, K., Hu, X., & Ng, W. J. (2019). Facile preparation of fluorescent carbon dots for label-free detection of Fe³⁺. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, *370*, 156–163.
- Kadian, S., Manik, G., Kalkal, A., Singh, M., & Chauhan, R. P. (2019). Effect of sulfur doping on fluorescence and quantum yield of graphene quantum dots. *Nanotechnology*, *30*(43), 435704.
- Khan, A., Ezati, P., & Rhim, J. W. (2023). Chitosan/starch-based active packaging film with N,P-doped carbon dots for meat packaging. *ACS Applied Biomaterials*, *6*(3), 1294–1305.
- Konar, S., Kumar, B. P., Mahto, M. K., Samanta, D., Shaik, M. A. S., Shaw, M., & Pathak, A. (2019). N-doped carbon dots as fluorescent probe for detection of cysteamine. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *286*, 77–85.
- Kukongviriyapan, U., Luangaram, S., Leekhaosong, K., Kukongviriyapan, V., & Preeprame, S. (2007). Antioxidant and vascular protective activities of *Cratoxylum formosum*, *Syzygium gratum* and *Limnophila aromatica*. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, *30*(4), 661–666.
- Mao, X. J., Zheng, H. Z., Long, Y. J., Du, J., Hao, J. Y., Wang, L. L., & Zhou, D. B. (2010). Study on fluorescence characteristics of carbon dots. *Spectrochimica Acta Part A*, *75*(2), 553–557.
- Mirseyed, P. S., Arjmand, S., Rahmandoust, M., Kheirabadi, S., & Anbarteh, R. (2024). Green synthesis of yeast cell wall-derived carbon quantum dots. *Heliyon*, *10*(9), e29440.

- Murru, C., Badía-Laiño, R., & Díaz-García, M. E. (2020). Synthesis and characterization of green carbon dots for scavenging radical oxygen species. *Antioxidants*, 9, 1147.
- Nguyen, K. G., Baragau, I. A., Gromicova, R., Nicolaev, A., Thomson, S. A., Rennie, A., & Kellici, S. (2022). Investigating the effect of N-doping on carbon quantum dots. *Scientific Reports*, 12, 13806.
- Pham, B., Tran, D. D., Nguyen, T. P. A., Nguyen, Q. K., Ung, T. D. T., Tran, N. B., & Pham, T. N. M. (2025). Detection of streptomycin using molecularly imprinted carbon dots. *Spectrochimica Acta Part A*, 343, 126622.
- Prasannan, A., & Imae, T. (2013). One-pot synthesis of fluorescent carbon dots from orange waste peels. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(44), 15673–15678.
- Praseetha, P. K., Litany, R. J., Alharbi, H. M., Khojah, A. A., Akash, S., Bourhia, M., & Shazly, G. A. (2024). Green synthesis of fluorescent carbon quantum dots from almond resin. *Scientific Reports*, 14(1), 24435.
- Qi, H., Qiu, L., Zhang, X., Yi, T., Jing, J., Sami, R., & Rahman, M. M. (2023). N-doped carbon dots from citric acid and urea for metronidazole detection. *RSC Advances*, 13(4), 2663–2671.
- Rao, L., Tang, Y., Lu, H., Yu, S., Ding, X., Xu, K., & Zhang, J. Z. (2018). Highly photoluminescent and stable N-doped carbon dots as nanoprobe for Hg²⁺ detection. *Nanomaterials*, 8(11), 900.
- Rajurkar, N. S., & Hande, S. M. (2011). Estimation of phytochemical content and antioxidant activity of medicinal plants. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 73(2), 146.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9-10), 1231–1237.
- Redondo-Fernandez, G., Canga, J. C., Soldado, A., Encinar, J. R., & Costa-Fernandez, J. M. (2023). Functionalized heteroatom-doped carbon dots for biomedical applications: A review. *Analytica Chimica Acta*, 1284, 341874.

- Roy, S., Ezati, P., & Rhim, J. W. (2021). Gelatin/carrageenan-based functional films with carbon dots. *ACS Applied Polymer Materials*, 3(12), 6437–6445.
- Sekar, R., Basavegowda, N., Jena, S., Jayakodi, S., Elumalai, P., Chaitanyakumar, A., & Baek, K. H. (2022). Carbon dot-based photodynamic therapy for cancer. *Pharmaceutics*, 14(9), 1869.
- Senel, B., Demir, N., Büyükköroğlu, G., & Yıldız, M. (2019). Graphene quantum dots: Synthesis, characterization, cell viability, genotoxicity for biomedical applications. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 27(6), 846–858.
- Shabbir, H., Wojtaszek, K., Rutkowski, B., Csapó, E., Bednarski, M., Adamiec, A., & Wojnicki, M. (2022). Milk-derived carbon quantum dots. *Molecules*, 27(24), 8728.
- Sun, Y. P., Zhou, B., Lin, Y., Wang, W., Fernando, K. S., Pathak, P., & Xie, S. Y. (2006). Quantum-sized carbon dots for photoluminescence. *Journal of the American Chemical Society*, 128(24), 7756–7757.
- Wang, H., Sun, P., Cong, S., Wu, J., Gao, L., Wang, Y., ... & Zou, G. (2016). Nitrogen-doped carbon dots for “green” quantum dot solar cells. *Nanoscale research letters*, 11(1), 27.
- Wang, S., Sun, W., Yang, D. S., & Yang, F. (2020). Soybean-derived photoluminescent carbon dots. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 11, 606–619.
- Wechakorn, K., Khaopueak, P., Chobpattana, V., Sapermsap, N., Sangtawesin, S., & Sangtawesin, T. (2025). Sugar-derived carbon dot-functionalized glutathione for Hg²⁺ detection. *ACS Omega*, 10(5), 4496–4504.
- Xu, X., Ray, R., Gu, Y., Ploehn, H. J., Gearheart, L., Raker, K., & Scrivens, W. A. (2004). Electrophoretic analysis of fluorescent carbon nanotube fragments. *Journal of the American Chemical Society*, 126(40), 12736–12737.
- Yang, Z., Xu, M., Liu, Y., He, F., Gao, F., Su, Y., & Zhang, Y. (2014). Nitrogen-doped highly photoluminescent carbon dots from ammonium citrate. *Nanoscale*, 6(3), 1890–1895.
- Yuan, F., Li, S., Fan, Z., Meng, X., Fan, L., & Yang, S. (2016). Shining carbon dots: synthesis and applications. *Nano Today*, 11(5), 565–586.

- Zhang, M., Yuan, P., Zhou, N., Su, Y., Shao, M., & Chi, C. (2017). pH-sensitive N-doped carbon dots–heparin drug delivery system. *RSC Advances*, 7(15), 9347–9356.
- Zhang, P., Wei, J. S., Chen, X. B., & Xiong, H. M. (2019). Heteroatom-doped carbon dots catalysts for oxygen reduction. *Journal of Colloid and Interface Science*, 537, 716–724.
- Zhang, Q., Zhang, X., Bao, L., Wu, Y., Jiang, L., Zheng, Y., & Chen, Y. (2019). Green synthesis carbon quantum dots for mercury detection. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2019, 8183134.
- Zhao, L., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Adhikari, B., & Wang, H. (2022). Carbon dot/polyvinyl alcohol composite film for food preservation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(33), 37528–37539.
- Zhu, Z., Li, Q., Li, P., Xun, X., Zheng, L., Ning, D., & Su, M. (2019). Surface charge controlled nucleoli selective staining with carbon dots. *PLOS ONE*, 14(5), e0216230.
- Zulfajri, M., Gedda, G., Chang, C. J., Chang, Y. P., & Huang, G. G. (2019). Carbon dots as fluorescence sensor for Fe³⁺. *ACS Omega*, 4(13), 15382–15392.
- Zulfajri, M., Sudewi, S., Rasool, A., Hsu, S. C., & Huang, G. G. (2023). Fluorescent ink and sensing of tartrazine using N-doped carbon dots. *Waste and Biomass Valorization*, 14(12), 3971–3986.