



Green Synthesis of Carbon Dots from Pineapple Starch via Microwave Irradiation for Iron Detection

Muzaffar Abbas^{1,2,3}, Kitima Sirivibulkovit^{1,2} and Phoonthawee Saetear^{1,2*}

¹Department of Chemistry and Center of Excellence for Innovation in Chemistry, Faculty of Science,
Mahidol University, Rama 6 Road, Ratchatewi, Bangkok 10400, Thailand

²Flow Innovation-Research for Science and Technology Laboratories (Firstlabs), Thailand

³Master of Science in Chemistry, Department of Chemistry, Faculty of Science, Mahidol University
Rama 6 Road, Ratchatewi, Bangkok 10400, Thailand

*Email: phoonthawee.sae@mahidol.ac.th

Received <15 Mar. 2026>; Revised <30 Jul. 2026>; Accepted <31 Jul. 2026>

Abstract

This study reports the synthesis of carbon dots (CDs) from pineapple starch, an agricultural biomass, using a rapid and environmentally friendly microwave-assisted method. The obtained CDs exhibited quasi-spherical nanoparticles in the nanometer range with relatively uniform size distribution. In addition, the CDs demonstrated notable fluorescence properties, showing an absorption peak at approximately 280 nm and a fluorescence emission peak at 440 nm when excited at 360 nm. The synthesized CDs were employed as a fluorescence probe in combination with hydrogen peroxide (CDs/H₂O₂) for the detection of iron (Fe²⁺) through a fluorescence quenching mechanism. The quenching process was attributed to the Fenton reaction, where Fe²⁺ catalyzes the decomposition of H₂O₂ to produce hydroxyl radicals (•OH). These reactive oxygen species (ROS) oxidize the surface of the CDs, leading to a significant decrease in fluorescence intensity. The fluorescence intensity decreased progressively with increasing Fe²⁺ concentration, exhibiting two linear ranges of 0.0186-0.186 ppm and 0.186-1.86 ppm. The limit of detection (LOD) was 0.0045 ppm, and the method exhibited good selectivity for Fe²⁺ over other metal ions. Furthermore, the developed probe was successfully applied to the determination of Fe²⁺ in real water samples. The recoveries ranged from 87 to 98%, with relative standard deviations (RSDs) below 5%. These results demonstrate that pineapple starch serves as an effective precursor for the synthesis of fluorescent CDs and provides a sustainable and cost-effective approach for fluorescence-based sensing applications.

Keywords: Carbon dots; Pineapple starch; Microwave-assisted synthesis; Fe²⁺ detection; Fluorescence sensor

การสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากแป้งสับปะรดด้วยวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้ไมโครเวฟเพื่อการตรวจวัดเหล็ก

Muzaffar Abbas^{1,2,3} กิติมา สิริวิบูลย์โกวิท^{1,2} และ พูนทวี แซ่เตีย^{1,2*}

¹ภาควิชาเคมีและศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ถนนพระราม 6 ราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400 ประเทศไทย

²ห้องปฏิบัติการนวัตกรรม-วิจัยการไหลเพื่อวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประเทศไทย

³หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ถนนพระราม 6 ราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400 ประเทศไทย

*Email: phoonthawee.sae@mahidol.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์คาร์บอนดอท (Carbon Dots; CDs) จากแป้งสับปะรดซึ่งเป็นชีวมวลทางการเกษตร โดยใช้เทคนิคการสังเคราะห์ด้วยไมโครเวฟที่มีความรวดเร็วและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และศึกษาศักยภาพของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้สำหรับการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดไอออนเหล็ก (Fe^{2+}) ด้วยวิธีฟลูออเรสเซนซ์ ผลการศึกษาพบว่าคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมกึ่งสมบูรณ์ในระดับนาโนเมตร มีการกระจายตัวของขนาดที่สม่ำเสมอ และมีหมู่ฟังก์ชันที่มีสมบัติชอบน้ำบนพื้นผิว ซึ่งช่วยให้สามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี นอกจากนี้คาร์บอนดอทยังแสดงสมบัติการเรืองแสงที่เด่นชัด โดยมีพีคการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 280 นาโนเมตร และมีพีคการเปล่งแสงที่ 440 นาโนเมตร เมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 360 นาโนเมตร คาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ถูกนำมาพัฒนาเป็นโพรบฟลูออเรสเซนซ์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ($\text{CDs}/\text{H}_2\text{O}_2$) สำหรับการตรวจวัด Fe^{2+} โดยอาศัยกลไกการดับการเรืองแสงที่เกิดจากปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton reaction) ซึ่งก่อให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ($\cdot\text{OH}$) ที่สามารถออกซิไดซ์พื้นผิวของคาร์บอนดอท ผลการทดลองพบว่าความเข้มฟลูออเรสเซนซ์ของระบบลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้น Fe^{2+} โดยมีช่วงความเป็นเส้นตรงที่ดี 2 ช่วง คือ 0.0186-0.186 ส่วนในล้านส่วน และ 0.186-1.86 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งจำกัดการตรวจวัดเท่ากับ 0.0045 ส่วนในล้านส่วน และแสดงความจำเพาะที่ดีต่อ Fe^{2+} เมื่อเปรียบเทียบกับไอออนโลหะชนิดอื่น นอกจากนี้ ระบบโพรบที่พัฒนาขึ้นยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัด Fe^{2+} ในตัวอย่างน้ำจริงได้ โดยให้ร้อยละการคืนกลับอยู่ในช่วง 87–98 และมีร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ต่ำกว่า 5 ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการใช้แป้งสับปะรดซึ่งเป็นชีวมวลจากของเหลือทางการเกษตรสามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตคาร์บอนดอทที่มีสมบัติเรืองแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังเป็นแนวทางที่ช่วยเพิ่มมูลค่าทรัพยากรชีวภาพและสอดคล้องกับแนวคิดเคมีสีเขียวและการพัฒนาเทคโนโลยีตรวจวัดที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: คาร์บอนดอท; แป้งสับปะรด; การสังเคราะห์ด้วยไมโครเวฟ; การตรวจวัดไอออนเหล็ก; เซนเซอร์ฟลูออเรสเซนซ์

บทนำ

วัสดุเหลือทิ้งจากสับประรดถือเป็นแหล่งชีวมวล (biomass) ที่อุดมด้วยคาร์โบไฮเดรต กลูโคส และสารประกอบอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก รวมถึงหมู่ฟังก์ชันสำคัญ เช่น ไฮดรอกซิล ($-OH$) และ คาร์บอนิล ($C=O$) (Roda and Lambri, 2019; Banerjee *et al.*, 2018) ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตวัสดุขั้นสูงได้ การนำชีวมวลจากภาคเกษตรมาใช้ในการพัฒนาวัสดุใหม่จึงเป็นแนวทางสำคัญของการเพิ่มมูลค่าชีวมวล (biomass valorization) และสอดคล้องกับแนวคิด เศรษฐกิจชีวภาพ (bioeconomy) ที่มุ่งใช้ทรัพยากรชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อลดการพึ่งพาทรัพยากรจากปิโตรเลียม แนวทางดังกล่าวยังสอดคล้องกับ เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (sustainable development goals; SDGs) ขององค์การสหประชาชาติ โดยเฉพาะ SDG 12: Responsible Consumption and Production ซึ่งมุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและการลดของเสียจากกระบวนการผลิต และ SDG 13: Climate Action ซึ่งส่งเสริมการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการใช้วัสดุจากแหล่งหมุนเวียน

สับประรด (*Ananas comosus*) เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีการเพาะปลูกอย่างแพร่หลายในเขตร้อน และเป็นวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรมอาหารทั่วโลก (Ali *et al.*, 2020) กระบวนการแปรรูปสับประรด เช่น การผลิตน้ำผลไม้หรือผลิตภัณฑ์กระป๋อง ก่อให้เกิดของเหลือทิ้งจากภาคเกษตรและอุตสาหกรรมอาหารในปริมาณมาก ได้แก่ เปลือก แก่น ใบ ลำต้น และเนื้อผลบางส่วนที่มีองค์ประกอบของแป้งสูง วัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้มักถูกนำไปกำจัดหรือใช้ประโยชน์ในระดับต่ำ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียทรัพยากรชีวภาพที่มีศักยภาพสูง

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา คาร์บอนดอท (carbon dots; CDs) ได้รับความสนใจอย่างมากในฐานะวัสดุนาโนเรืองแสงชนิดใหม่ เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่น ได้แก่ การละลายน้ำได้ดี ความเสถียรทางเคมีสูง ความเป็นพิษต่ำ และสมบัติการเรืองแสงที่สามารถปรับแต่งได้ คาร์บอนดอทเป็นวัสดุนาโนชนิดศูนย์มิติ (zero-dimensional nanomaterials) ที่มีขนาดโดยทั่วไปต่ำกว่า 10 นาโนเมตร และมีการนำไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ เช่น เซนเซอร์ชีวภาพ การถ่ายภาพทางชีวการแพทย์ อุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ และการตรวจวิเคราะห์ทางสิ่งแวดล้อม

โดยทั่วไป การสังเคราะห์คาร์บอนดอทมักใช้สารตั้งต้นจากสารเคมีอินทรีย์ขนาดเล็ก เช่น กรดซิตริก ยูเรีย หรือเอทิลีนไกลคอล ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ไพโรไลซิส หรือการออกซิเดชันทางเคมี (Jorns and Pappas, 2021) อย่างไรก็ตาม แนวโน้มการพัฒนาวัสดุนาโนในปัจจุบันได้ให้ความสำคัญกับการใช้สารตั้งต้นจากชีวมวลธรรมชาติซึ่งเป็นแนวทางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสอดคล้องกับหลักการของเคมีสีเขียว (green chemistry) แหล่งชีวมวลหลายชนิด เช่น เปลือกผลไม้ ใบพืช และแป้งจากพืช ได้ถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์คาร์บอนดอทผ่านกระบวนการสังเคราะห์แบบสีเขียว (green synthesis) ในบรรดาวิธีการสังเคราะห์ เทคนิคไมโครเวฟ (microwave-assisted synthesis) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ ลดระยะเวลาการสังเคราะห์จากหลายชั่วโมงเหลือเพียงไม่กี่นาที ใช้พลังงานต่ำ และให้ผลผลิตที่มีสมบัติสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับวิธีไฮโดรเทอร์มอลแบบดั้งเดิม ด้วยเหตุนี้ จึงมีรายงานการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากชีวมวลด้วยเทคนิคไมโครเวฟเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นชีวมวลประเภทเปลือกผลไม้ ใบพืช หรือเศษวัสดุทางการเกษตร ขณะที่การใช้ แป้งสับประรด (pineapple starch) เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการสังเคราะห์คาร์บอนดอทยังมีรายงานอยู่ค่อนข้างจำกัด

แม้ว่าจะมีรายงานการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากชีวมวลและการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัด Fe^{2+} เป็นจำนวนมาก แต่การศึกษาส่วนใหญ่ยังใช้สารตั้งต้นจากกรดซิตริกหรือชีวมวลชนิดอื่น ขณะที่การใช้แป้งสับประรดเป็นแหล่งคาร์บอนร่วมกับเทคนิคการสังเคราะห์ด้วยไมโครเวฟ และการประยุกต์ใช้ในระบบตรวจวัด Fe^{2+} ที่อาศัยกลไก Fenton reaction ยังไม่มีรายงานปรากฏ โดยธาตุเหล็กจัดเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิต เนื่องจากเป็นองค์ประกอบของฮีโมโกลบิน โปรตีน และเอนไซม์หลายชนิดที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมแทบอลิซึม อย่างไรก็ตาม การสะสมของเหล็กในปริมาณสูง โดยเฉพาะในรูปของ Fe^{2+} อาจก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ เนื่องจาก

Fe^{2+} สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยา Fenton ทำให้เกิด $\cdot\text{OH}$ ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่มีความว่องไวสูงและสามารถทำลายสารชีวโมเลกุลได้ ดังนั้น การตรวจวัด Fe^{2+} จึงมีความสำคัญทั้งในด้านการเฝ้าระวังคุณภาพสิ่งแวดล้อม การควบคุมคุณภาพน้ำ และการวิเคราะห์ทางชีวภาพ โดยองค์การอนามัยโลก (WHO) กำหนดค่าความเข้มข้นของเหล็กในน้ำดื่มไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อป้องกันปัญหาด้านคุณภาพน้ำและผลกระทบต่อผู้บริโภค

แม้ว่าจะมีรายงานการใช้คาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากวัสดุชีวมวลธรรมชาติสำหรับการตรวจวัดเหล็กอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีสมบัติการเรืองแสงที่ดี แต่งานวิจัยที่รายงานก่อนหน้านี้ยังมีข้อจำกัดหลายประการ ตัวอย่างเช่น Kumar, Shamsudin and Azian (2024) สังเคราะห์ไนโตรเจนโดปคาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งต้องใช้เวลาสังเคราะห์นานถึง 24 ชั่วโมง และให้ค่าขีดจำกัดการตรวจวัดเท่ากับ 10.6 ส่วนในล้านส่วน ขณะที่ Jiao *et al.* (2019) ใช้เปลือกมะม่วงเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ด้วยวิธีโฟโวลซิส แม้ว่าจะสามารถตรวจวัดได้ แต่กระบวนการสังเคราะห์ยังต้องอาศัยอุณหภูมิสูงและมีช่วงการวิเคราะห์ค่อนข้างแคบ

นอกจากนี้ Tian *et al.* (2024) ได้พัฒนาคาร์บอนดอทจากเปลือกลำไยโดยใช้ตัวทำละลายชนิด deep eutectic solvent ร่วมกับการโดปไนโตรเจนและคลอรีน ซึ่งให้ค่าขีดจำกัดการตรวจวัดที่ต่ำอยู่ที่ 0.0168 ส่วนในล้านส่วน แต่ยังคงใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอลที่ใช้เวลาสังเคราะห์ประมาณ 10 ชั่วโมง รวมทั้งต้องมีขั้นตอนการเตรียมสารตั้งต้นที่ซับซ้อนมากขึ้น ขณะที่ Zhang *et al.* (2023) รายงานคาร์บอนดอทโดปไนโตรเจนจากน้ำมันาวที่มีความไวสูง ($\text{LOD} = 0.063 \mu\text{M}$) อย่างไรก็ตาม งานดังกล่าวมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้ด้านการถ่ายภาพเซลล์มากกว่าการวิเคราะห์ตัวอย่างสิ่งแวดล้อม ส่วน Aka *et al.* (2024) ใช้คาร์บอนดอทจากเปลือกองุ่นสำหรับตรวจวัดไอออนของเหล็ก แม้ว่าจะให้ผลการตรวจวัดที่ดี แต่ยังคงต้องใช้ระยะเวลาการสังเคราะห์หลายชั่วโมงและมีช่วงการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างจำกัด

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ยังใช้กระบวนการสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มอลหรือโฟโวลซิส ซึ่งต้องใช้เวลาดังกล่าว 3–24 ชั่วโมง อีกทั้งหลายงานยังต้องอาศัยการโดปธาตุหรือการใช้ตัวทำละลายเฉพาะเพื่อเพิ่มสมรรถนะของคาร์บอนดอท นอกจากนี้ ยังมีรายงานการประยุกต์ใช้คาร์บอนดอทจากวัสดุชีวมวลในการตรวจวัด Fe^{2+} ในตัวอย่างน้ำจริงค่อนข้างจำกัด ดังนั้น จึงยังมีความต้องการพัฒนาวิธีการสังเคราะห์ที่รวดเร็ว เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ใช้วัสดุชีวมวลหมุนเวียน และยังคงให้สมรรถนะการตรวจวัดที่ดี

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแนวทางการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากแป้งสับปะรดซึ่งเป็นชีวมวลจากภาคเกษตรกรรม โดยใช้เทคนิคการสังเคราะห์ด้วยไมโครเวฟที่มีความรวดเร็ว ประหยัดพลังงาน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม พร้อมทั้งศึกษาสมบัติทางกายภาพ เคมี และสมบัติทางแสงของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ รวมถึงเปรียบเทียบคุณลักษณะของคาร์บอนดอทที่ได้จากชีวมวลกับคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากสารตั้งต้นทางเคมี เพื่อประเมินศักยภาพของชีวมวลในฐานะแหล่งคาร์บอนสำหรับการผลิตวัสดุนาโน นอกจากนี้ ยังมุ่งพัฒนาระบบโพรบฟลูออเรสเซนซ์จากคาร์บอนดอทสำหรับการตรวจวัด Fe^{2+} โดยอาศัยกลไกการดับการเรืองแสงร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผ่านกลไก Fenton reaction ซึ่ง Fe^{2+} ทำหน้าที่เร่งการสลายตัวของ H_2O_2 เพื่อสร้าง $\cdot\text{OH}$ ที่มีความไวต่อปฏิกิริยาสูง โดย $\cdot\text{OH}$ ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของคาร์บอนดอท ส่งผลให้สัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ลดลง ทำการประเมินประสิทธิภาพของระบบตรวจวัดดังกล่าวในด้านความไว ความจำเพาะ และการประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำจริง ทั้งนี้ การใช้แป้งสับปะรดซึ่งเป็นวัสดุชีวมวลเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์วัสดุนาโนยังเป็นแนวทางที่ช่วยเพิ่มมูลค่าทรัพยากรทางการเกษตร (biomass valorization) สนับสนุนแนวคิดเศรษฐกิจชีวภาพ และสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน โดยเฉพาะด้านการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

วิธีดำเนินการวิจัย

สารเคมี

สารเคมีทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองเป็น analytical grade และใช้น้ำปราศจากไอออน (deionized water; DI) สำหรับการเตรียมสารละลาย โดยน้ำปราศจากไอออนมีค่าความต้านทานไฟฟ้า $18.2\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ ซึ่งได้จากระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q® (Germany) ยูเรีย (NH_2CONH_2) จัดซื้อจากบริษัท Tokyo Chemical Industry (TCI, Japan) เพอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และกรดซิตริก (citric acid) จัดซื้อจากบริษัท Merck (Germany) ส่วนกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) จัดซื้อจากบริษัท Fluka™ (Switzerland) สำหรับการกรองสารละลายใช้แผ่นกรองเมมเบรนไนลอนสำหรับไซริงจ์ (nylon membrane syringe filter) ขนาดรูพรุน 0.22 ไมโครเมตร จากบริษัท Whatman® (UK)

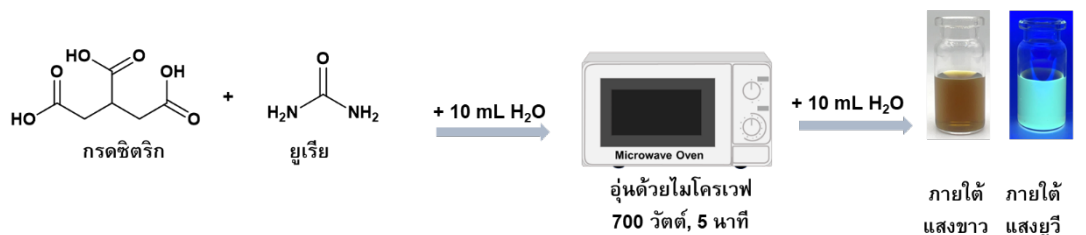
การสังเคราะห์คาร์บอนดอท

ในงานนี้ ผู้วิจัยได้สังเคราะห์คาร์บอนดอทจากส่วนผสมระหว่างกรดซิตริกและยูเรีย (ภาพที่ 1ก) ในอัตราส่วนโมล 1:1 เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ การสังเคราะห์คาร์บอนดอทเริ่มต้นด้วยการละลายส่วนผสมกรดซิตริกและยูเรียในน้ำปราศจากไอออนและนำไปให้พลังงานด้วยไมโครเวฟที่ กำลังไฟ 700 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็นและละลายผลิตภัณฑ์ในน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร ก่อนกรองผ่านเมมเบรนขนาด 0.22 ไมโครเมตร เพื่อให้ได้สารละลายคาร์บอนดอทสำหรับการศึกษาสมบัติและเปรียบเทียบกับคาร์บอนดอทที่ได้จากชีวมวล

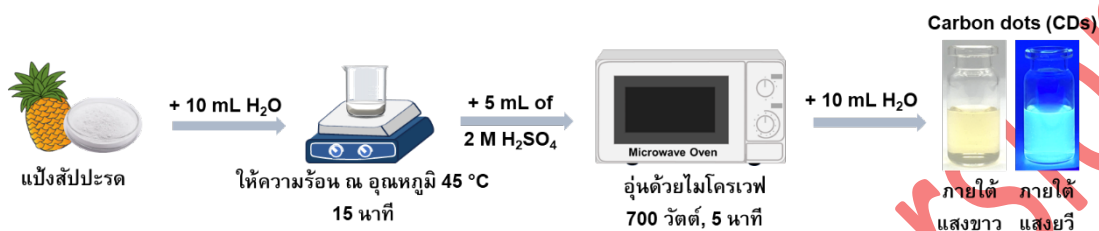
งานวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้แป้งสาลีปรีดที่ผลิตจากลำตันสาลีปรีด จังหวัดพิษณุโลก ประเทศไทย ซึ่งเป็นชีวมวลจากภาคเกษตรกรรมเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์คาร์บอนดอทเรืองแสงด้วยเทคนิคไมโครเวฟ โดยเริ่มจากการเตรียมแป้งสาลีปรีดจากผลสาลีปรีดสุกด้วยวิธีการสกัดแบบเปียก (wet extraction method) โดยนำเนื้อสาลีปรีดมาปั่นรวมกับน้ำกลั่น จากนั้นกรองผ่านผ้ากรองเพื่อแยกของแข็งออกจากสารละลาย และปล่อยให้สารละลายตกตะกอนเป็นเวลา 4–6 ชั่วโมงเพื่อให้เม็ดแป้งตกตะกอน ส่วนของเหลวส่วนบนถูกแยกออกและตะกอนแป้งถูกล้างด้วยน้ำกลั่นหลายครั้งเพื่อลดสิ่งเจือปน จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 50–60 °C ก่อนนำมาบดและร่อนเพื่อให้ได้ผงแป้งละเอียดสำหรับใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์คาร์บอนดอท

การสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากแป้งสาลีปรีด (ภาพที่ 1ข) ดำเนินการโดยกระจายผงแป้งสาลีปรีดปริมาณ 0.1 กรัมในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร และให้ความร้อนพร้อมกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่อุณหภูมิประมาณ 45 °C เป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้เกิดสารละลายลักษณะหนืด หลังจากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เพื่อช่วยในการย่อยสลายโครงสร้างของแป้ง จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปให้พลังงานด้วยไมโครเวฟ (ยี่ห้อซัมซุง รุ่น MS23K3513AK บริษัท ซัมซุง อิเลคโทรนิคส์ จำกัด ประเทศไทย) ด้วยกำลังไฟ 700 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้เกิดกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและเกิดการสังเคราะห์คาร์บอนดอท หลังจากปฏิกิริยาลิ้นสุดลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ถูกปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และเติมน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร เพื่อช่วยในการกระจายตัวของคาร์บอนดอท จากนั้นกรองผ่านเมมเบรนไนลอนขนาดรูพรุน 0.22 ไมโครเมตร เพื่อให้ได้สารละลายคาร์บอนดอทที่ใส ก่อนนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C สำหรับใช้ในการทดลองต่อไป

ก. การสังเคราะห์ Carbon Dots จากสารเคมี



ข. การสังเคราะห์ Carbon Dots จากแป้งสาลีประด



ภาพที่ 1 การสังเคราะห์คาร์บอนดอตอย่างง่ายโดยใช้เทคนิคการสังเคราะห์ด้วยไมโครเวฟจาก (ก) แป้งสาลีประด และ (ข) ส่วนผสมของกรดซิตริกและยูเรีย

การตรวจสอบคุณสมบัติของคาร์บอนดอต

คาร์บอนดอตที่สังเคราะห์ได้ถูกศึกษาด้วยเทคนิคการวิเคราะห์หลายชนิด โดยศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer (Lambda 25, PerkinElmer, USA) และ เครื่อง HORIBA spectrofluorometer (FluoroMax Plus, HORIBA Scientific, Japan) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการดูดกลืนแสงและการเรืองแสงของคาร์บอนดอต ตามลำดับ ขณะที่ลักษณะสัณฐานและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคถูกศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านชนิด field emission (FETEM, JEM-3100F, JEOL, Japan) นอกจากนี้ หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนดอตยังถูกตรวจสอบด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR, PerkinElmer, USA) และ Raman spectroscopy (XPlora PLUS, Japan) เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่สังเคราะห์ได้

การประยุกต์คาร์บอนดอตสำหรับการตรวจวัดปริมาณเหล็ก

ภายหลังจากการศึกษาสมบัติของคาร์บอนดอตแล้ว ได้มีการนำคาร์บอนดอตที่สังเคราะห์จากแป้งสาลีประดมาพัฒนาเป็นโพรบฟลูออเรสเซนซ์สำหรับการตรวจวัด Fe^{2+} โดยใช้ระบบคาร์บอนดอตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ($\text{CDs}/\text{H}_2\text{O}_2$) ในกระบวนการตรวจวัด ผลสมการละลายคาร์บอนดอต ปริมาตร 100 ไมโครลิตร กับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 3% ปริมาตร 20 ไมโครลิตร และเติมสารละลาย Fe^{2+} ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.0186 ถึง 1.86 ส่วนในล้านส่วน ปริมาตร 2,500 ไมโครลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวม 3,000 ไมโครลิตร โดยใช้ไมโครปิเปตในการถ่ายเทสารละลายและน้ำกลั่น จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที ก่อนทำการวัดสเปกตรัมการเรืองแสงโดยใช้ความยาวคลื่นกระตุ้นที่ 360 นาโนเมตร และวัดความเข้มการเรืองแสงที่ 440 นาโนเมตร นอกจากนี้ ได้ทำการศึกษาความสามารถในการประยุกต์ใช้ของระบบตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นในตัวอย่างจริง โดยนำไปวิเคราะห์ปริมาณ Fe^{2+} ในน้ำตัวอย่างจริง ได้แก่ น้ำดื่มบรรจุขวดหลายยี่ห้อและน้ำประปา พร้อมประเมินร้อยละการคืนกลับเพื่อประเมินความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น

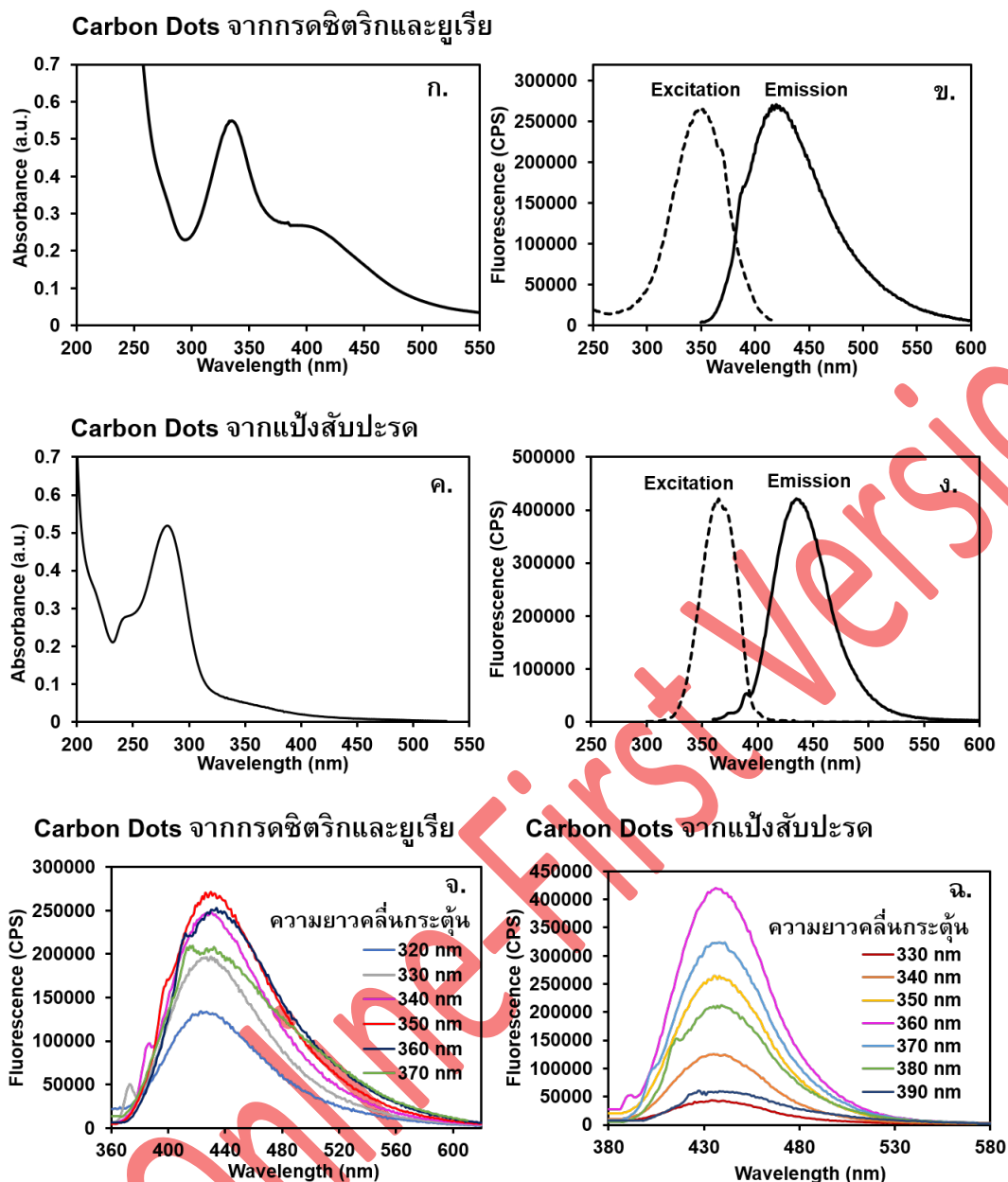
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

คุณสมบัติเชิงแสงของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์

คาร์บอนดอท (CDs) ที่สังเคราะห์จากสารตั้งต้นทั้งสองชนิดได้รับการศึกษาสมบัติทางแสง (optical properties) ซึ่งประกอบด้วยสมบัติการดูดกลืนแสงและพฤติกรรมการเรืองแสง โดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงยูวี-วิสิเบิลของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากสารส่วนผสมของกรดซิตริกและยูเรีย แสดงไว้ในภาพที่ 2ก สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของคาร์บอนดอทที่ได้จากสารตั้งต้นทางเคมีปรากฏพีคเด่นที่ความยาวคลื่น 330 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนชนิด $n-\pi^*$ ของพันธะ $C=O$ จากหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวและขอบของคาร์บอนดอท (Tadesse *et al.*, 2020) สารละลายคาร์บอนดอทมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลอมเหลืองภายใต้แสงปกติ และแสดงการเรืองแสงสีน้ำเงินอย่างชัดเจนเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ซึ่งสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า (ดูขดสารละลายคาร์บอนดอทในภาพที่ 1ก) ขณะที่สเปกตรัมฟลูออเรสเซนซ์ของคาร์บอนดอทแสดงค่าความยาวคลื่นกระตุ้น (excitation) และความยาวคลื่นการเปล่งแสง (emission) ที่ 350 และ 425 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 2ข

สำหรับคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากแป้งสาลีประดนั้น สเปกตรัมการดูดกลืนแสงแสดงพีคเด่นที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร (ภาพที่ 2ค) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนชนิด $\pi-\pi^*$ ของพันธะ $C=C$ หรือโดเมนคาร์บอนแบบ sp^2 มากกว่า โดยผล FTIR (ภาพที่ 3ข) ที่ไม่พบแถบ $C=O$ ที่เด่นชัด และผล Raman (ภาพที่ 3ค) ที่แสดง D band และ G band สนับสนุนว่าคาร์บอนดอทที่ได้มีโครงสร้างคาร์บอน sp^2 และตำแหน่งข้อบกพร่อง (defect sites) เป็นองค์ประกอบสำคัญ จึงทำให้พฤติกรรมการดูดกลืนแสงแตกต่างจาก CDs ที่สังเคราะห์จากกรดซิตริกและยูเรีย (Chopra and Parkesh, 2024; Kuchaiyaphum *et al.*, 2024) สารละลายคาร์บอนดอทมีลักษณะเป็นสีเหลืองอ่อนภายใต้แสงปกติ และแสดงการเรืองแสงสีน้ำเงินภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร (ดูขดสารละลายคาร์บอนดอทในภาพที่ 1ข) นอกจากนี้ สเปกตรัมฟลูออเรสเซนซ์ยังแสดงพีคการเปล่งแสงที่เด่นชัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร เมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 360 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2ง

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนดอทผ่านการทดลองชุดควบคุมที่ไม่เติมกรด พบว่าการสังเคราะห์สามารถเกิดขึ้นได้ แต่ให้คาร์บอนดอทที่มีความเข้มการเรืองแสงต่ำมาก แสดงว่าการเติมกรดเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดคาร์บอนในเซชันและการสร้างตำแหน่งกำเนิดการเรืองแสงบนผิวคาร์บอนดอท โดยเฉพาะกรดซิตริกที่มีสมบัติเป็นทั้งกรดแก๊สและสารตั้งต้น จึงสามารถเร่งการคายน้ำและการควบแน่นของสารตั้งต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ได้คาร์บอนดอทที่มีความเข้มการเรืองแสงสูงที่สุด



ภาพที่ 2 คุณสมบัติเชิงแสงของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้จากส่วนผสมของกรดซิตริกและยูเรีย และจากแป้งสับปะรด ประกอบด้วยสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (ก และ ค) และ สเปกตรัมฟลูออเรสเซนซ์ (ข และ ง) ของการกระตุ้นแสง (เส้นประ) และการเปล่งแสง (เส้นทึบ) และ การเปล่งแสงแบบไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นกระตุ้น (จ และ ฉ)

ผลการศึกษาสมบัติการเรืองแสงของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้พบว่า คาร์บอนดอทแสดงพีคการเปล่งแสง (emission peak) ในบริเวณช่วงความยาวคลื่นประมาณ 425–440 นาโนเมตร เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความยาวคลื่นในช่วงประมาณ 330–390 นาโนเมตร โดยตำแหน่งของพีคการเปล่งแสงไม่เปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นกระตุ้น แม้ว่าความเข้มของการเรืองแสงจะมีการเปลี่ยนแปลงก็ตาม พฤติกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเปล่งแสงแบบไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นกระตุ้น (excitation-independent emission) ดังแสดงในภาพที่ 2จ และ 2ฉ ซึ่งมักเกิดจากตำแหน่งขั้วออกพร่องหรือหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนดอทที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์กำเนิดการเรืองแสง (Chen *et al.*, 2017) ทั้งนี้ คาร์บอนดอทแสดงการเรืองแสงสีน้ำเงินอย่างเด่นชัดภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยพบว่าความยาวคลื่นกระตุ้นและการเปล่งแสงที่ให้ความเข้มสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 350–360 และ 425–440 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้

ถึงศักยภาพของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้สำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบตรวจวัดที่อาศัยสมบัติการเรืองแสงเป็นพื้นฐาน

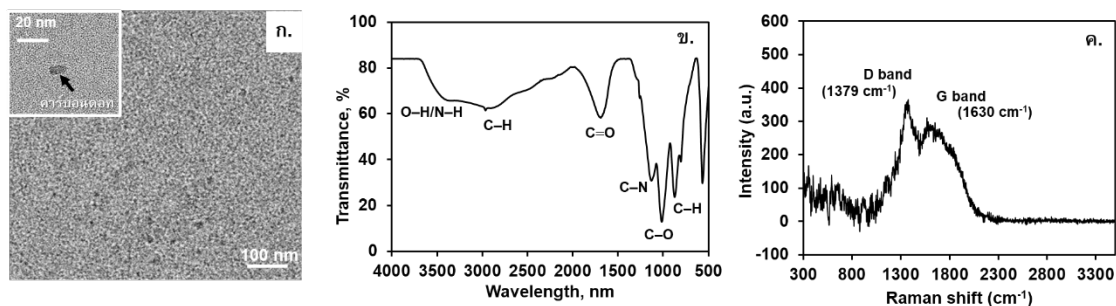
ลักษณะพื้นฐาน หมู่ฟังก์ชัน และโครงสร้างของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้จากแป้งสับปะรด

ลักษณะพื้นฐาน การกระจายตัวของขนาด หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว และโครงสร้างของคาร์บอนดอท (CDs) ที่สังเคราะห์ได้ ถูกศึกษาด้วยเทคนิค Field Emission Transmission Electron Microscopy (FETEM), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) และ Raman spectroscopy ตามลำดับ

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านชนิด FETEM ของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากแป้งสับปะรด (ภาพที่ 3ก) แสดงให้เห็นว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมกึ่งสมบูรณ์ (quasi-spherical nanoparticles) และมีการกระจายตัวของขนาดในช่วงแคบ ซึ่งบ่งชี้ถึงการกระจายตัวที่ดี (monodispersed sample) ของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 12.9 ± 2.4 นาโนเมตร จากการสังเคราะห์ซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ความสม่ำเสมอของขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนดอท สะท้อนถึงประสิทธิภาพของสภาวะการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากสารตั้งต้นอินทรีย์ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่รุนแรง นอกจากนี้ ความสม่ำเสมอของขนาดและลักษณะของอนุภาคยังแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเทคนิคการสังเคราะห์ด้วยไมโครเวฟในการเปลี่ยนชีวมวลให้กลายเป็นโครงสร้างนาโนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ จากภาพ FE-TEM ไม่สามารถสังเกตลายโครงสร้างได้อย่างชัดเจน การยืนยันการมีอยู่ของ lattice fringes จำเป็นต้องใช้ภาพ HRTEM ที่กำลังขยายสูงกว่าที่ใช้ในการศึกษานี้ (Hamed *et al.*, 2024; Usman and Cheng, 2024)

ผู้วิจัยอาศัยด้วยเทคนิค FTIR เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนดอท สเปกตรัม FTIR ของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากแป้งสับปะรด (ภาพที่ 3ข) แสดงพีกสำคัญที่ 3348 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดของ หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl, O-H)/หมู่เอมิโน (amino, N-H) ขณะที่แถบที่ 2962 cm^{-1} เป็นการสั่นของ พันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจนของหมู่แอลคิล (aliphatic C-H stretching) ส่วนแถบที่ 1127 cm^{-1} สามารถกำหนดได้ว่าเป็นการสั่นของ พันธะคาร์บอนิล (C=O stretching) และแถบที่ 1014 cm^{-1} เป็นการสั่นของ พันธะคาร์บอน-ไนโตรเจน (C-N stretching) นอกจากนี้ ยังพบแถบที่ 871 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบงอของพันธะพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจนของหมู่แอลคิล (aliphatic C-H bending) ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าคาร์บอนดอทมีหมู่ฟังก์ชันที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic moieties) อยู่บนพื้นผิว ซึ่งมีส่วนช่วยให้คาร์บอนดอทสามารถละลายน้ำได้ดี

สมบัติโครงสร้างของคาร์บอนดอทได้รับการยืนยันเพิ่มเติมด้วยการวิเคราะห์สเปกตรัมรามาน (Raman spectroscopy) ดังแสดงในภาพที่ 3ค โดยสเปกตรัมรามานของคาร์บอนดอทแสดงพีกที่ประมาณ 1379 และ 1630 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับแถบ D (D band) และแถบ G (G band) ของคาร์บอนในโครงสร้างกราฟิต ตามลำดับ อัตราส่วนของความเข้มระหว่างแถบ D และ G (I_D/I_G) สำหรับคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากแป้งสับปะรด 1.19 ค่าอัตราส่วนดังกล่าวนี้ บ่งชี้ว่าคาร์บอนดอทที่ได้จากชีวมวลมีระดับความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้างสูงและมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน ซึ่งมักสัมพันธ์กับสัดส่วนของคาร์บอนแบบ sp^3 ต่อ sp^2 ที่สูงขึ้น รวมถึงการมีตำแหน่งข้อบกพร่องในโครงสร้างมากขึ้น (Tadesse *et al.*, 2020; Mathew *et al.*, 2020)



ภาพที่ 3 (ก) ภาพถ่ายด้วยเทคนิค FETEM โดยลูกศรระบุตำแหน่งของคาร์บอนดอท, (ข) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรด และ (ค) สเปกตรัมรามานของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากแป้งสาลีประด

การตรวจวัดไอออนเหล็กจากคุณสมบัติเรืองแสงของคาร์บอนดอท

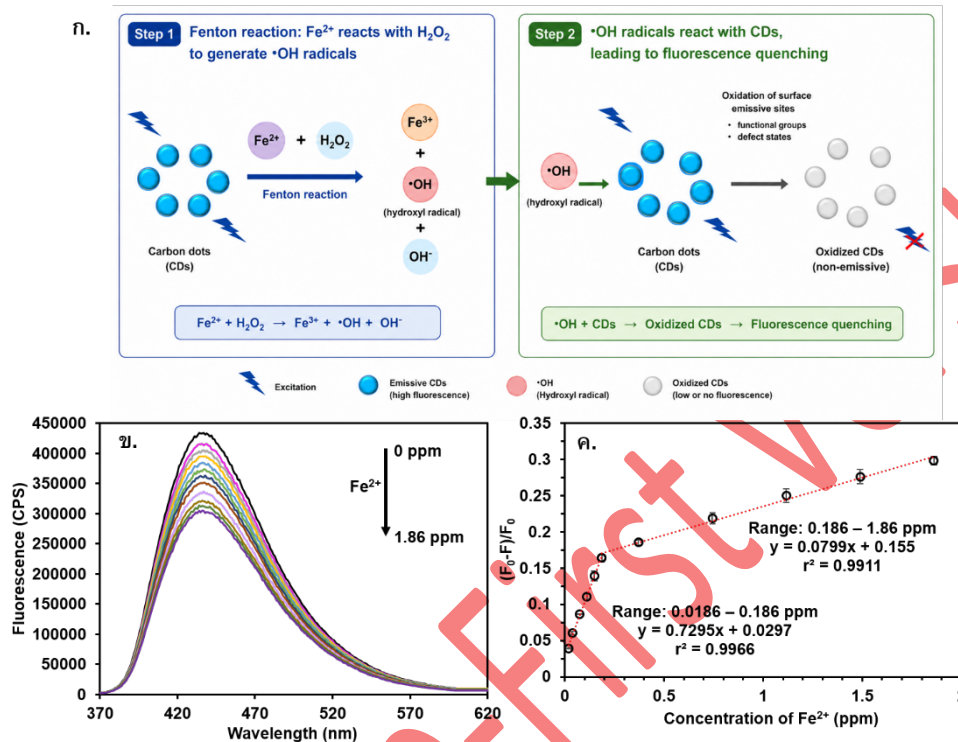
แผนภาพในภาพที่ 4ก แสดงกลไกการตรวจวัด Fe^{2+} โดยอาศัยสมบัติการเรืองแสงของคาร์บอนดอทที่ทำงานร่วมกับ H_2O_2 ในระบบโฟลวอโรเรสเซนซ์ เมื่อคาร์บอนดอทเพียงอย่างเดียวอยู่ในสารละลาย จะให้การเรืองแสงสีน้ำเงินที่มีความเข้มสูงภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการเติม Fe^{2+} ลงในระบบที่มี H_2O_2 จะเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน ส่งผลทำให้เกิด $\cdot\text{OH}$ ซึ่งเป็นอนุมูลออกซิเจนที่มีปฏิกิริยาสูง (reactive oxygen species; ROS) อนุมูลดังกล่าวมีความสามารถในการออกซิไดซ์พื้นผิวของคาร์บอนดอทหรือทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวของคาร์บอนดอท ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสถานะพื้นผิวและลดประสิทธิภาพในการเปล่งแสงของคาร์บอนดอท (Shah *et al.*, 2019; Dou *et al.*, 2019) นอกจากนี้ ยังพบว่าความเข้มฟลูออเรสเซนซ์ของ CDs ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเฉพาะในสถานะที่มีทั้ง Fe^{2+} และ H_2O_2 ร่วมกัน ขณะที่ในกรณีที่มี Fe^{2+} เพียงอย่างเดียว สัญญาณฟลูออเรสเซนซ์แทบไม่เปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่า Fe^{2+} ไม่ได้เป็นสาเหตุโดยตรงของการ quenching พฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับกลไก Fenton reaction ซึ่ง Fe^{2+} ทำหน้าที่เร่งการสลายตัวของ H_2O_2 เพื่อสร้าง $\cdot\text{OH}$ ที่มีความไวต่อปฏิกิริยาสูง โดย $\cdot\text{OH}$ ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของคาร์บอนดอท ส่งผลให้สัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ลดลง ดังนั้น การลดลงของฟลูออเรสเซนซ์ของ CDs ในระบบนี้จึงมีแนวโน้มเกิดจาก $\cdot\text{OH}$ ที่สร้างขึ้น มากกว่าการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์โดยตรงจาก Fe^{2+}

กระบวนการออกซิเดชันที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของคาร์บอนดอททำให้ความเข้มของการเรืองแสงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ หรือเกิดปรากฏการณ์การดับการเรืองแสง (fluorescence quenching) ดังนั้น เมื่อความเข้มของการเรืองแสงลดลงตามปริมาณของ Fe^{2+} ที่เพิ่มขึ้น จึงสามารถนำปรากฏการณ์ดังกล่าวมาใช้เป็นกลไกพื้นฐานในการตรวจวัด Fe^{2+} ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กลไกนี้สะท้อนให้เห็นถึงบทบาทของปฏิกิริยาเฟนตัน ที่เชื่อมโยงกับคาร์บอนดอทในการสร้างอนุมูลออกซิเจนที่มีปฏิกิริยาสูง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการดับการเรืองแสงของคาร์บอนดอท และทำให้ระบบโฟลว CDs/ H_2O_2 สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ฟลูออเรสเซนซ์สำหรับการตรวจวัด Fe^{2+} ที่มีความจำเพาะสูง

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อการตรวจวัด Fe^{2+} โดยใช้โฟลวอโรเรสเซนซ์ระบบ CDs/ H_2O_2 เพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัด พบว่าความเข้มการดับการเรืองแสงของระบบ CDs/ H_2O_2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น และมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 นาที หลังจากนั้น ได้บันทึกสเปกตรัมฟลูออเรสเซนซ์ของระบบ CDs/ H_2O_2 ที่ความเข้มข้นของ Fe^{2+} ต่าง ๆ โดยใช้ความยาวคลื่นกระตุ้นและความยาวคลื่นการเปล่งแสงที่ 360 และ 440 นาโนเมตร ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าความเข้มฟลูออเรสเซนซ์ของระบบ CDs/ H_2O_2 ลดลงอย่างชัดเจนเมื่อความเข้มข้นของ Fe^{2+} เพิ่มขึ้นในช่วง 0-1.86 ส่วนในล้านส่วน ดังแสดงในภาพที่ 4ข

จากนั้นได้สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ของความเข้มฟลูออเรสเซนซ์ $((F_0 - F)/F_0)$ กับความเข้มข้นของ Fe^{2+} (ภาพที่ 4ค) โดยพบความสัมพันธ์เชิงเส้นในสองช่วงความเข้มข้น ได้แก่ ช่วง 0.0186-0.186

ส่วนในล้านส่วน ซึ่งมีสมการเชิงเส้น $((F_0 - F)/F_0) = (0.7295 \pm 0.0213)[Fe^{2+}] + (0.0297 \pm 0.0024)$ และมีค่า $r^2 = 0.9966$ และช่วง 0.186–1.86 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งมีสมการ $((F_0 - F)/F_0) = (0.0799 \pm 0.0038)[Fe^{2+}] + (0.1550 \pm 0.0043)$ และมีค่า $r^2 = 0.9911$ โดยที่ F_0 และ F แทนค่าความเข้มฟลูออเรสเซนซ์ของสารละลาย CDs/H₂O₂ ที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร ในกรณีที่ไม่มีและมี Fe^{2+} ตามลำดับ



ภาพที่ 4 (ก) กลไกการตรวจวัดไอออนเหล็กจากคุณสมบัติเรืองแสงของคาร์บอนดอท และ (ข) สเปกตรัมการเปล่งของคาร์บอนดอทในสถานะที่มีไอออนเหล็กความเข้มข้นตั้งแต่ 0.186 ถึง 1.86 ส่วนในล้านส่วน และ (ค) กราฟมาตรฐานสำหรับการวัดปริมาณไอออนเหล็ก

ขีดจำกัดการตรวจวัดของวิธีการนี้คำนวณจากค่า 3SD ของสารละลายแบลนด์หารด้วยความชันของกราฟ ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 0.0045 ส่วนในล้านส่วน และค่าความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์มีค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เท่ากับ 1.6 ณ ความเข้มข้น 0.0558 ส่วนในล้านส่วน ($n = 10$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่พัฒนาขึ้นมีความไวและความเที่ยงที่ดีสำหรับการตรวจวัด Fe^{2+}

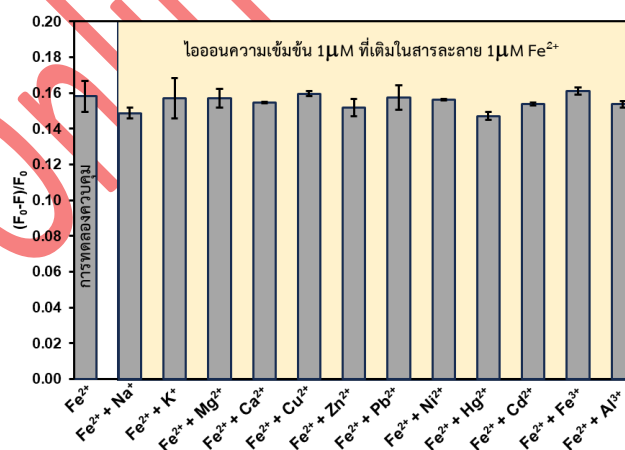
นอกจากนี้ เพื่อประเมินความสามารถในการผลิตซ้ำ (batch-to-batch reproducibility) ของ CDs ได้ทำการสังเคราะห์ CDs จำนวน 3 ชุดภายใต้สภาวะเดียวกัน และนำไปสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับการตรวจวัด Fe^{2+} ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า CDs จากแต่ละชุดให้ค่าความชันของกราฟมาตรฐาน (slope of calibration) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าขีดจำกัดการตรวจวัดที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่ากระบวนการสังเคราะห์มีความสามารถในการผลิตซ้ำได้ดี และ CDs ที่สังเคราะห์ในแต่ละชุดมีสมรรถนะในการตรวจวัด Fe^{2+} ที่สม่ำเสมอ

ตารางที่ 1 การประเมินความสามารถในการผลิตซ้ำของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ในแต่ละชุดสำหรับการตรวจวัด Fe^{2+}

ชุดการ สังเคราะห์	ช่วงความเข้มข้น	สมการเส้นตรง
ชุดที่ 1	0.0186 – 0.186	$(F_0 - F)/F_0 = (0.7295 \pm 0.0213)[Fe^{2+}] + (0.0297 \pm 0.0024), R^2 = 0.9966$
	0.186 – 1.86	$(F_0 - F)/F_0 = (0.0799 \pm 0.0038)[Fe^{2+}] + (0.1550 \pm 0.0043), R^2 = 0.9911$
ชุดที่ 2	0.0186 – 0.186	$(F_0 - F)/F_0 = (0.7100 \pm 0.0169)[Fe^{2+}] + (0.0310 \pm 0.0020), R^2 = 0.9985$
	0.186 – 1.86	$(F_0 - F)/F_0 = (0.0780 \pm 0.0021)[Fe^{2+}] + (0.1140 \pm 0.0040), R^2 = 0.9900$
ชุดที่ 3	0.0186 – 0.186	$(F_0 - F)/F_0 = (0.7285 \pm 0.0013)[Fe^{2+}] + (0.0190 \pm 0.0014), R^2 = 0.9991$
	0.186 – 1.86	$(F_0 - F)/F_0 = (0.0777 \pm 0.0011)[Fe^{2+}] + (0.1720 \pm 0.0031), R^2 = 0.9947$

การศึกษาความจำเพาะเจาะจงของคาร์บอนดอทต่อการตรวจวัดไอออนเหล็ก

เพื่อประเมินผลกระทบจากสารรบกวนที่อาจมีผลต่อประสิทธิภาพของโพรบฟลูออเรสเซนซ์ระบบ CDs/H₂O₂ สำหรับการตรวจวัด Fe²⁺ จึงได้ทำการศึกษาผลของสารรบกวนที่เป็นไปได้ โดยทำการวัดการตอบสนองของฟลูออเรสเซนซ์ของโพรบ CDs/H₂O₂ ในสภาวะที่มีไอออนโลหะอนินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 1 ไมโครโมลต่อลิตร ได้แก่ Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺, Pb²⁺, Ni²⁺, Hg²⁺, Cd²⁺, Fe³⁺ และ Al³⁺ ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 5 พบว่าการมีอยู่ของไอออนโลหะชนิดอื่น ๆ เหล่านี้ไม่ทำให้ความเข้มฟลูออเรสเซนซ์ของโพรบ CDs/H₂O₂ เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังไม่รบกวนต่อการตรวจวัด Fe²⁺ แต่อย่างใด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบโพรบที่พัฒนาขึ้นมีความจำเพาะที่ดีต่อการตรวจวัด Fe²⁺ แม้ในสภาวะที่มีไอออนโลหะอื่นร่วมอยู่ในสารละลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Fe³⁺ ซึ่งเป็นรูปแบบออกซิเดชันที่เกี่ยวข้องโดยตรงของเหล็ก ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์อย่างมีนัยสำคัญภายใต้สภาวะเดียวกัน สะท้อนให้เห็นว่าระบบ CDs/H₂O₂ มีการตอบสนองที่แตกต่างกันต่อ Fe²⁺ และ Fe³⁺ ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับสมบัติทางรีดอกซ์ที่ต่างกันของทั้งสองชนิด ส่งผลให้โพรบสามารถตรวจวัด Fe²⁺ ได้อย่างจำเพาะ



ภาพที่ 5 การตอบสนองของฟลูออเรสเซนซ์ของคาร์บอนดอทในสภาวะที่มีไอออน 1 ไมโครโมลต่อลิตร Fe²⁺ หรือ 0.0558 ส่วนในล้านส่วน (การทดลองควบคุม) และหลังการเติมไอออนโลหะชนิดต่าง ๆ ได้แก่ สารละลายไอออนความเข้มข้น 1 ไมโครโมลต่อลิตร สำหรับ Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺, Pb²⁺, Ni²⁺, Hg²⁺, Cd²⁺, Fe³⁺ และ Al³⁺

การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในตัวอย่าง

ในงานนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณ Fe^{2+} ในตัวอย่างน้ำจริงหลายชนิด ได้แก่ น้ำแร่ดื่มบรรจุขวดจำนวน 4 ยี่ห้อ และน้ำประปาจำนวน 2 ตัวอย่าง เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้คาร์บอนดอทเรืองแสงสำหรับการตรวจวัด Fe^{2+} ในตัวอย่างจริง ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าค่าร้อยละการคืนกลับ (recovery) ของ Fe^{2+} ในตัวอย่างน้ำจริงอยู่ในช่วง 84.4 – 96.2% ซึ่งมีแนวโน้มต่ำกว่าค่าจริงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ค่าดังกล่าวยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้สำหรับตัวอย่างจริง (ประมาณ 80–120%) สะท้อนถึงความถูกต้องของวิธีในระดับที่เหมาะสม แนวโน้มนี้อาจเกิดจากผลกระทบของเมทริกซ์ในตัวอย่างน้ำ การออกซิเดชันบางส่วนของ Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} และระดับความเข้มข้นของสารที่เติมซึ่งอยู่ในช่วงต่ำ (0.186 ส่วนในล้านส่วน) ทั้งนี้ วิธีการวิเคราะห์นี้มีความเที่ยงสูง จากร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 1.0–6.0% ดังนั้น วิธีที่พัฒนาขึ้นยังคงมีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้กับตัวอย่างน้ำจริง

ตารางที่ 2 ปริมาณเหล็กในตัวอย่างน้ำจากการใช้โฟลโรสเซนซ์ระบบ CDs/ H_2O_2 และร้อยละการคืนกลับ

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น Fe^{2+} ที่เติมลงในตัวอย่าง (ส่วนในล้านส่วน)	ความเข้มข้น Fe^{2+} ที่ตรวจวัดได้ (ส่วนในล้านส่วน)	ร้อยละการคืนกลับ
น้ำแร่ขวด ยี่ห้อที่ 1	0	0.0318 ± 0.0006	-
	0.0186	0.0497 ± 0.0011	96.2
น้ำแร่ขวด ยี่ห้อที่ 2	0	0.0190 ± 0.0004	-
	0.0186	0.0363 ± 0.0017	93.0
น้ำแร่ขวด ยี่ห้อที่ 3	0	0.0430 ± 0.0006	-
	0.0186	0.0609 ± 0.0006	96.2
น้ำแร่ขวด ยี่ห้อที่ 4	0	0.0413 ± 0.0011	-
	0.0186	0.0581 ± 0.0006	90.3
น้ำประปา แหล่งที่ 1	0	0.0212 ± 0.0012	-
	0.0186	0.0369 ± 0.0022	84.4
น้ำประปา แหล่งที่ 2	0	0.0318 ± 0.0017	-
	0.0186	0.0486 ± 0.0012	90.3

การเปรียบเทียบคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากสารตั้งต้นธรรมชาติสำหรับการตรวจวัดเหล็ก

จากตารางที่ 3 พบว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ใช้สารตั้งต้นจากธรรมชาติในการสังเคราะห์คาร์บอนดอทเพื่อการตรวจวัด Fe^{2+} ส่วนใหญ่ใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอลหรือไพโรไลซิส ซึ่งใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ตั้งแต่ 3–24 ชั่วโมง แม้ว่าบางงานจะให้ค่าขีดจำกัดการตรวจวัดต่ำ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านระยะเวลาการสังเคราะห์ ความซับซ้อนของกระบวนการหรือการประยุกต์ใช้เฉพาะกับตัวอย่างบางประเภท ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แป้งสาลีปรีดเป็นสารตั้งต้นซึ่งเป็นวัสดุชีวมวล

หมุนเวียน และสังเคราะห์คาร์บอนดอด้วยเทคนิคไมโครเวฟซึ่งใช้เวลาเพียง 5 นาที โดยยังคงให้ประสิทธิภาพการตรวจวัดที่ดีและสามารถประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำจริงได้

JSSE Online-First Version

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากสารตั้งต้นธรรมชาติสำหรับการตรวจวัด Fe^{2+}

สารตั้งต้นธรรมชาติ	วิธีการและระยะเวลาสังเคราะห์	Quantum Yield (%)	ช่วงความเข้มข้น*	ขีดจำกัดการตรวจวัด*	ตัวอย่างที่วิเคราะห์	ข้อจำกัดของงานวิจัย
เปลือกกล้วย (Kumar, Shamsudin and Azian, 2024)	ไฮโดรเทอร์มอล (24 ชั่วโมง)	13.4	16.8 - 223	10.6	—	ใช้เวลาสังเคราะห์นาน และมีความไวต่ำ
เปลือกมะม่วง (Jiao <i>et al.</i> , 2019)	โฟโรไลซิส (6 ชั่วโมง)	8.5	0.223 – 0.894	0.0670	ยา	ต้องเผาที่อุณหภูมิสูง
เปลือกลำไย (Tian <i>et al.</i> , 2024)	ไฮโดรเทอร์มอล (10 ชั่วโมง)	15.2	0.0558 – 55.8	0.0168	น้ำประปา	ใช้เวลาสังเคราะห์ค่อนข้างนาน
น้ำมะนาว (Zhang <i>et al.</i> , 2023)	ไฮโดรเทอร์มอล (3 ชั่วโมง)	58.7	0.112 – 34.9	0.0035	การถ่ายภาพชีวภาพ	มุ่งเน้นงานชีวภาพ ยังไม่ได้ประยุกต์ใช้กับตัวอย่างสิ่งแวดล้อม
เปลือกองุ่น (Aka <i>et al.</i> , 2024)	ไฮโดรเทอร์มอล (5 ชั่วโมง)	—	0.100 – 0.899	0.0324	—	ใช้เวลาสังเคราะห์นาน และช่วงเชิงเส้นค่อนข้างแคบ
แป้งสับปะรด (งานวิจัยนี้)	ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ (5 นาที)	11.3	0.0186-0.186 และ 0.186-1.86	0.0045	น้ำแร่และน้ำประปา	สังเคราะห์ได้รวดเร็ว ใช้วัตถุดิบหมุนเวียน และประยุกต์ใช้กับตัวอย่างน้ำจริงได้

*หน่วยส่วนในล้านส่วน

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากแป้งสับปะรดซึ่งเป็นชีวมวลทางการเกษตร โดยใช้เทคนิคการสังเคราะห์ด้วยไมโครเวฟที่มีความรวดเร็วและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ผลการศึกษาสมบัติของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้แสดงให้เห็นว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมกึ่งสมบูรณ์ในระดับนาโนเมตร มีการกระจายตัวของขนาดที่สม่ำเสมอ และมีหมู่ฟังก์ชันที่มีสมบัติชอบน้ำบนพื้นผิว ซึ่งส่งผลให้คาร์บอนดอทสามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี นอกจากนี้ คาร์บอนดอทยังแสดงสมบัติการเรืองแสงที่เด่นชัด โดยมีฟิสิกการดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตและการเปล่งแสงในบริเวณสีน้ำเงินภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลต คาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ถูกนำมาพัฒนาเป็นโพรบฟลูออเรสเซนซ์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (CDs/H_2O_2) สำหรับการตรวจวัด Fe^{2+} โดยอาศัยกลไกการดับการเรืองแสงที่เกิดจากการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิลผ่านปฏิกิริยาเฟนตัน ผลการทดลองพบว่าระบบโพรบดังกล่าวสามารถตรวจวัด Fe^{2+} โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงของความเข้มฟลูออเรสเซนซ์กับความเข้มข้นของ Fe^{2+} ในช่วง

ความเข้มข้นที่ศึกษาและมีขีดจำกัดการตรวจวัดต่ำรวมทั้งแสดงความจำเพาะที่ดีเมื่อมีไอออนหรือสารอื่นร่วมอยู่ในระบบ นอกจากนี้ ระบบโพรบที่พัฒนาขึ้นยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัด Fe^{2+} ในตัวอย่างน้ำจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยให้ค่าการคืนกลับอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้และมีค่าความเที่ยงที่ดี ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้แบงส์ประดซึ่งเป็นทรัพยากรชีวมวลที่มีอยู่มากเป็นสารตั้งต้นในการผลิตคาร์บอนดอทสำหรับการพัฒนาเซนเซอร์ฟลูออเรสเซนซ์ที่มีต้นทุนต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิเคราะห์ทางสิ่งแวดล้อมได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล สำหรับการให้ทุนเสริมสร้างนักวิทยาศาสตร์รุ่นใหม่ และทุนสนับสนุนการใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ของหน่วยเครื่องมือกลาง และขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัยและกลุ่มวิจัย สำหรับแบงส์ประดที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนดอท นอกจากนี้ ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี สำหรับสารเคมีและเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

References

- Aka, M. A., Meledje, J. C., Koutouan, M. L., Irie, W. I. B., Pomi, N. B. B., Koffi, S. K. K. and Konan, S. K. (2024). Designing a sensor based on carbon quantum dots for the detection of iron ions. **International Journal of Biological and Chemical Sciences**, 18(4), 1606–1614.
- Ali, M. M., Hashim, N., Abd Aziz, S. and Lasekan, O. (2020). Pineapple (*Ananas comosus*): A comprehensive review of nutritional values, volatile compounds, health benefits, and potential food products. **Food Research International**, 137, 109675.
- Banerjee, S., Ranganathan, V., Patti, A. and Arora, A. (2018). Valorisation of pineapple wastes for food and therapeutic applications. **Trends in Food Science & Technology**, 82, 60–70.
- Chen, D., Gao, H., Chen, X., Fang, G., Yuan, S. and Yuan, Y. (2017). Excitation-independent dual-color carbon dots: Surface-state controlling and solid-state lighting. **ACS Applied Materials & Interfaces**, 9, 2352–2358.
- Chopra, T. and Parkesh, R. (2024). Microwave-assisted synthesis of functionalized carbon nanospheres using banana peels: pH-dependent synthesis, characterization, and selective sensing applications. **ACS Omega**, 9(4), 4555–4571.
- Dou, X., Zhang, Q., Shah, S. N. A., Khan, M., Uchiyama, K. and Lin, J. M. (2019). MoS₂-quantum dot triggered reactive oxygen species generation and depletion: Responsible for enhanced chemiluminescence. **Chemical Science**, 10(2), 497–500.
- Hamed, M., Chinnam, S., Bedair, A., Emara, S. and Mansour, F. R. (2024). Carbon quantum dots from natural sources as sustainable probes for metal ion sensing: Preparation, characterizations and applications. **Talanta Open**, 10, 100348.
- Jiao, X. Y., Li, L. S., Qin, S., Zhang, Y., Huang, K. and Xu, L. (2019). The synthesis of fluorescent carbon dots from mango peel and their multiple applications. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 577, 306–314.
- Jorns, M. and Pappas, D. (2021). A review of fluorescent carbon dots, their synthesis, physical and chemical characteristics, and applications. **Nanomaterials**, 11(6), 1448.

- Kuchaiyaphum, P., Amornsakchai, T., Chotichayapong, C., Saengsuwan, N., Yordsri, V., Thanachayanont, C., Batpo, P. and Sotawong, P. (2024). Pineapple stem starch-based films incorporated with pineapple leaf carbon dots as functional filler for active food packaging applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, 282(Pt 1), 137224.
- Kumar, H. S., Shamsudin, S. A. and Azian, M. N. A. (2024). Optimized nitrogen-doping of carbon quantum dots from banana peel waste: A highly selective Fe^{2+} sensor probe. **Diamond and Related Materials**, 148, 111351.
- Mathew, S. A., Praveena, P., Dhanavel, S., Manikandan, R., Senthilkumar, S. and Stephen, A. (2020). Luminescent chitosan/carbon dots as an effective nano-drug carrier for neurodegenerative diseases. **RSC Advances**, 10(41), 24386–24396.
- Roda, A. and Lambri, M. (2019). Food uses of pineapple waste and by-products: A review. **International Journal of Food Science and Technology**, 54(4), 1009–1017.
- Shah, S. N. A., Dou, X., Khan, M., Uchiyama, K. and Lin, J. M. (2019). N-doped carbon dots/ H_2O_2 chemiluminescence system for selective detection of Fe^{2+} ion in environmental samples. **Talanta**, 196, 370–375.
- Tadesse, A., Hagos, M., RamaDevi, D., Basavaiah, K. and Belachew, N. (2020). Fluorescent nitrogen-doped carbon quantum dots derived from citrus lemon juice: Green synthesis, mercury(II) ion sensing, and live cell imaging. **ACS Omega**, 5(8), 3889–3898.
- Tian, M., Wang, D., Liu, Q., Wang, L., Tao, Y., Wang, J., Zou, Y., Yang, Y., Zhou, Q., Li, L., Wang, M., Li, X. and Gao, D. (2024). Deep eutectic solvent assisted synthesis of N,Cl co-doped carbon dots using longan shell waste: Applications in antioxidant, anti-inflammatory and Fe^{2+} detection. **Journal of Molecular Liquids**, 397, 124131.
- Usman, M. and Cheng, S. (2024). Recent trends and advancements in green synthesis of biomass derived carbon dots. **Eng**, 5(3), 2223–2263.
- Zhang, Y., Li, Z., Sheng, L. and Meng, A. (2023). Lemon juice-derived nitrogen-doped carbon quantum dots for highly sensitive and selective determination of ferrous ions and cell imaging. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 657, 130580.