

การศึกษาการตอบสนองเชิงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของคาร์บอนดอทจากกากถั่วเหลืองภายใต้
การรบกวนของไอออนโลหะหนักเพื่อประยุกต์เป็นเซนเซอร์กระดาษเรืองแสง
**Photoluminescence Response of Soybean Residue-Derived Carbon Dots under Heavy
Metal Ion Interference and Their Application as a Fluorescent Paper Sensor**

ตรีรัตน์ กัลยาณิพงศ์¹, ณัฐนิชา ศิริโกพัฒน์¹

ช่อรัก วงศ์สุวรรณ^{1*}, จิรศักดิ์ สุกันธา², วรณศย์ ทองพูล²

¹โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาราชวิทยาลัย ปทุมธานี ตำบลบ่อเงิน อำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี 12140 ประเทศไทย

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี ประเทศไทย

*E-mail: threerat.kan@pcshspt.ac.th

บทคัดย่อ

มลพิษจากไอออนโลหะหนักในแหล่งน้ำเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ เนื่องจากมีความคงตัวสูงและสามารถสะสมในห่วงโซ่อาหาร การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคมาตรฐาน เช่น Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) และ Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry (ICP-MS) มีความแม่นยำสูงแต่มีต้นทุนสูงและไม่เหมาะกับการใช้งานภาคสนาม งานวิจัยนี้จึงสังเคราะห์คาร์บอนดอท (Carbon dots) จากกากถั่วเหลือง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำเต้าหู้และนมถั่วเหลือง ด้วยวิธีไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 250, 380 และ 500 วัตต์ แล้วศึกษาสมบัติโครงสร้างและสมบัติการเรืองแสงเชิงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ตลอดจนการตอบสนองต่อไอออนโลหะหนัก Fe^{2+} และ Zn^{2+} ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ยืนยันการเกิดหมู่ฟังก์ชัน $-\text{OH}$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}-\text{O}$ และ $\text{C}-\text{N}$ บนพื้นผิวอนุภาค สเปกตรัม UV-Vis แสดงแถบการดูดกลืนหลักที่ 220–230 นาโนเมตร และคาร์บอนดอทแสดงค่า emission peak หลักที่ประมาณ 300 นาโนเมตร โดยตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วยกำลัง 500 วัตต์ให้ความเข้มการเรืองแสงสูงที่สุด เมื่อเติมไอออน Fe^{2+} และ Zn^{2+} ที่ความเข้มข้น 0.2–0.6 ไมโครโมลาร์ พบว่าความเข้มการเรืองแสงลดลงอย่างต่อเนื่องตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นโดยไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่งพีค ซึ่งสอดคล้องกับกลไก fluorescence quenching ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวอนุภาค โดย Fe^{2+} ให้ประสิทธิภาพการดับแสงสูงกว่า Zn^{2+} อย่างชัดเจน สามารถต่อยอดคาร์บอนดอทเป็นเซนเซอร์กระดาษเรืองแสงเบื้องต้น โดยเคลือบสารละลายคาร์บอนดอทลงบนกระดาษกรอง Whatman แล้วทดสอบภายใต้แสงยูวีร่วมกับการหยดสารละลายไอออนโลหะหนัก พบว่าความเข้มการเรืองแสงลดลงในทิศทางเดียวกับผลในสารละลาย และได้พัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับวิเคราะห์ค่าสี RGB เพื่อเป็นต้นแบบระบบตรวจวัดแบบพกพาที่มีต้นทุนต่ำ แสดงให้เห็นว่าคาร์บอนดอทจากกากถั่วเหลืองในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตรวจจับโลหะหนักในน้ำเสีย

คำสำคัญ: คาร์บอนดอท; กากถั่วเหลือง; การสังเคราะห์ด้วยวิธีไมโครเวฟ; การดับการเรืองแสง; เซนเซอร์กระดาษ; ไอออนโลหะหนัก



1. บทนำ

โลหะหนักที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ เช่น เหล็ก (Fe^{2+}) และสังกะสี (Zn^{2+}) เป็นสารพิษที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ สะสมในสิ่งมีชีวิตผ่านห่วงโซ่อาหาร และก่อผลกระทบต่อระบบประสาทและระบบไต เมื่อได้รับสะสมในระยะยาว การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคมาตรฐาน เช่น AAS และ ICP-MS แม้มีความแม่นยำสูงแต่ต้องใช้เครื่องมือราคาแพงและผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทาง ทำให้โรงงานขนาดเล็กหรือชุมชนไม่สามารถตรวจสอบคุณภาพน้ำเสียของตนเองได้ก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม การพัฒนาวิธีตรวจวัดที่รวดเร็วและต้นทุนต่ำจึงเป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจ

คาร์บอนดอท (carbon dots) เป็นวัสดุนาโนคาร์บอนขนาดเล็กกว่า 10 นาโนเมตร ที่มีสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ กลไกการเรืองแสงเกิดจากอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงแล้วคายพลังงานกลับผ่าน radiative recombination โดยตำแหน่งพลังงานของ surface defect states ที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชัน เช่น $-\text{OH}$ $-\text{COOH}$ และ $-\text{NH}_2$ เป็นตัวกำหนดความยาวคลื่นของการเรืองแสง เมื่อไอออนโลหะหนักเข้าจับกับหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ จะเปิดวิถี non-radiative recombination เพิ่มขึ้น ทำให้เกิด fluorescence quenching ซึ่งอธิบายเชิงปริมาณได้ด้วยสมการ Stern-Volmer

กากถั่วเหลือง ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากการผลิตน้ำเต้าหู้และนมถั่วเหลืองที่ยังไม่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ อุดมด้วยคาร์บอนและไนโตรเจน จึงเหมาะสมเป็นสารตั้งต้นสังเคราะห์คาร์บอนดอทตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน Wang และคณะ (2019) รายงานว่าคาร์บอนดอทจากกากถั่วเหลืองมีสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ดี และ Soni และคณะ (2024) ชี้ว่าหมู่ฟังก์ชัน $-\text{OH}$ $\text{C}=\text{O}$ และ $\text{C}-\text{N}$ จับยึดไอออนโลหะหนักได้อย่างจำเพาะ แต่การสังเคราะห์จากกากถั่วเหลืองและการต่อยอดเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดจริงยังมีการศึกษาจำกัด

คณะผู้จัดทำจึงสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากกากถั่วเหลืองด้วยวิธีไมโครเวฟ ศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าต่อสมบัติการเรืองแสง วิเคราะห์กลไก fluorescence quenching เมื่อสัมผัส Fe^{2+} และ Zn^{2+} และพัฒนาต่อเป็นเซนเซอร์กระดาษร่วมกับ

เว็บแอปพลิเคชันวิเคราะห์ค่าสี RGB เป็นต้นแบบระบบตรวจวัดที่ใช้งานง่าย ต้นทุนต่ำ และให้ผู้ประกอบการหรือชุมชนตรวจสอบคุณภาพน้ำได้ด้วยตนเอง

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 การเตรียมสารตั้งต้นและสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากกากถั่วเหลือง

ชั่งกากถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งแล้วประมาณ 50 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นปราศจากไอออน (deionized water) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร กวนสารด้วยเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน (hot plate magnetic stirrer) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นกรองแยกกากของแข็งออกด้วยผ้ากรองไนลอน เก็บเฉพาะสารละลายใส แบ่งสารละลายปริมาตร 40 มิลลิลิตร นำไปสังเคราะห์ด้วยเตาไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 250, 380 และ 500 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาทีต่อเงื่อนไข สารที่ได้จากการสังเคราะห์นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อแยกตะกอนออกจากนั้นกรองแยกตะกอนอีกครั้ง และเก็บสารละลายคาร์บอนดอทที่ได้ไว้ในภาชนะสีชาในที่มืด

2.2 การวิเคราะห์สมบัติของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้

2.2.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนดอทด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เพื่อระบุตำแหน่งฟังก์ชันการดูดกลืนที่สอดคล้องกับพันธะเคมีต่าง ๆ บนผิวนาโนภาค

2.2.2 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-Visible Spectroscopy

เจือจางสารละลายคาร์บอนดอทด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนในอัตราส่วน 120 ไมโครลิตรต่อน้ำ 10 มิลลิลิตร เทสารละลายปริมาตร 2.5 มิลลิลิตรลงในคิวเวตต์ (cuvette) แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200–400 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer เปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างแต่ละกำลังไฟฟ้ากับสารควบคุม

2.2.3 การวิเคราะห์สมบัติการเรืองแสงด้วยเทคนิค Photoluminescence Spectroscopy (PL)

วัดค่าการเรืองแสงของสารละลายคาร์บอนดอทด้วยเครื่อง Fluorescence Spectrophotometer โดยกำหนดความยาวคลื่นกระตุ้น (excitation wavelength) ในช่วง 265–365 นาโนเมตร เพื่อหาความยาวคลื่นกระตุ้นที่เหมาะสม จากนั้นบันทึกสเปกตรัมการเรืองแสง (emission spectrum) เพื่อระบุตำแหน่ง emission peak และเปรียบเทียบความเข้มการเรืองแสงระหว่างตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วยกำลังไฟฟ้าต่างกัน

2.3 การทดสอบการตอบสนองของคาร์บอนดอทต่อไอออนโลหะหนัก

2.3.1 การเตรียมสารละลายไอออนโลหะหนัก

เตรียมสารละลายมาตรฐานไอออนโลหะหนัก Fe^{2+} และ Zn^{2+} แล้วผสมกับสารละลายคาร์บอนดอทที่เจือจางแล้วในขั้นตอน 2.2.2 ในปริมาณที่กำหนด เพื่อให้ได้ความเข้มข้นสุดท้ายของไอออนโลหะหนักอยู่ในช่วง 0.2–0.6 ไมโครโมลาร์

2.3.2 การวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มการเรืองแสง

วัดค่าการเรืองแสงของสารละลายผสมด้วยเครื่อง PL ที่ความยาวคลื่นกระตุ้น 275 นาโนเมตร บันทึกความเข้มการเรืองแสงและตำแหน่ง emission peak ที่แต่ละความเข้มข้น แล้วเปรียบเทียบกับสารละลายคาร์บอนดอทที่ยังไม่เติมไอออนโลหะหนัก (control) เพื่อประเมินระดับการดับการเรืองแสง (fluorescence quenching) ของไอออนแต่ละชนิด

2.4 การพัฒนาเซนเซอร์กระดาษเรืองแสงและเว็บแอปพลิเคชันวิเคราะห์ค่าสี RGB

2.4.1 การเตรียมเซนเซอร์กระดาษ

คัดเลือกสารละลายคาร์บอนดอทที่ให้สมบัติการเรืองแสงดีที่สุดจากขั้นตอน 2.2.3 นำมาเคลือบลงบนกระดาษกรอง Whatman ด้วยวิธี drop-cast แล้วปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องในที่มืด

2.4.2 การทดสอบเซนเซอร์กระดาษภายใต้แสง UV

ส่องกระดาษที่เคลือบคาร์บอนดอทด้วยหลอดไฟ UV แล้วหยดสารละลายไอออนโลหะหนัก (Fe^{2+} และ Zn^{2+}) ลงบนพื้นที่ที่กำหนด บันทึกภาพก่อนและหลังหยดสารภายใต้สภาวะแสงเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของการเรืองแสงด้วยตาเปล่า

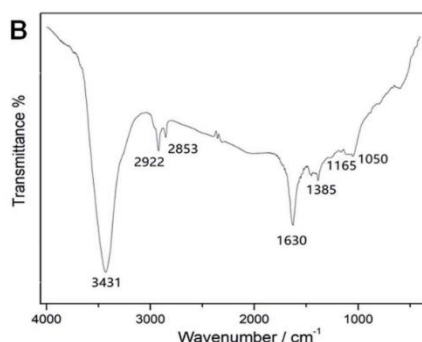
2.4.3 การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันวิเคราะห์ค่าสี RGB

พัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับอัปโหลดภาพถ่ายกระดาษเซนเซอร์ โดยระบบจะเลือกพื้นที่ตัวอย่าง (region of interest) บนภาพ แล้วคำนวณค่าเฉลี่ยของสัญญาณสี Red, Green, Blue (RGB) ในบริเวณดังกล่าว เพื่อแปลงการเปลี่ยนแปลงของการเรืองแสงที่สังเกตได้ด้วยตาให้เป็นค่าสีเชิงตัวเลข ใช้เปรียบเทียบภาพก่อนและหลังหยดสารละลายไอออนโลหะหนัก

3. ผลการทดลอง

3.1 การวิเคราะห์สมบัติหมู่ฟังก์ชัน

ผลการวิเคราะห์ FTIR (กราฟที่ 3.1) ของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากกากถั่วเหลือง พบพิกัดสำคัญที่ 3431 cm^{-1} (O–H stretching), 2922 และ 2853 cm^{-1} (C–H stretching), 1630 cm^{-1} (C=O/C=C บ่งชี้โครงสร้าง sp^2 domain), 1385 cm^{-1} (C–N) และ 1165 , 1050 cm^{-1} (C–O) ยืนยันว่าพื้นผิวคาร์บอนดอทมีหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมต่อการจับกับไอออนโลหะหนัก

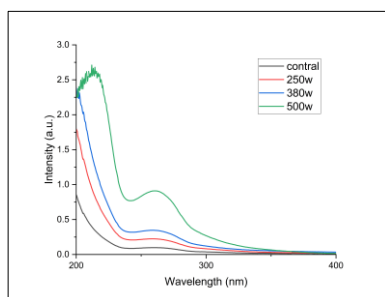


กราฟที่ 3.1 กราฟแสดงตำแหน่งพิกัด FTIR และหมู่ฟังก์ชันที่สอดคล้องกัน

3.2 สมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค

UV-Vis Spectroscopy

สเปกตรัม UV-Vis (กราฟที่ 3.2) แสดงแถบการดูดกลืนหลักที่ 220–230 นาโนเมตร ($\pi \rightarrow \pi^*$ transition ของพันธะ C=C) และ shoulder peak ที่ 270–280 นาโนเมตร ($n \rightarrow \pi^*$ transition ของหมู่ C=O) ตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วย กำลัง 500 วัตต์ ให้ค่าการดูดกลืนสูงสุด รองลงมาคือ 380 และ 250 วัตต์ ตามลำดับ

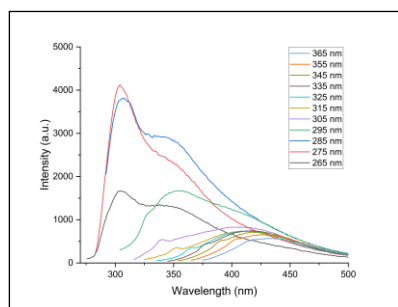


กราฟที่ 3.2 กราฟแสดงค่า λ_{max} และค่าความเข้มการดูดกลืนแสง (UV-Vis) ของตัวอย่างแต่ละกำลังไฟฟ้า

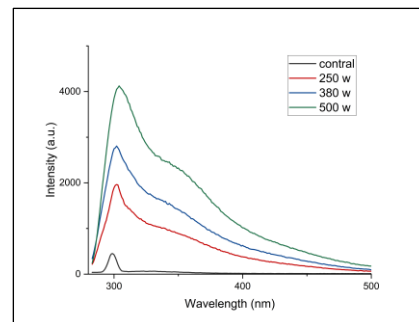
3.3 สมบัติการเรืองแสง

จากการศึกษาสมบัติการเรืองแสง เชิงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ที่ความยาวคลื่นกระตุ้น 265–365 นาโนเมตร (กราฟที่ 3.3.1) คาร์บอนดอททุกเงื่อนไขให้ emission peak หลักที่ประมาณ 300 นาโนเมตร เมื่อกระตุ้นที่ 275 นาโนเมตร โดยตำแหน่งพีคไม่เปลี่ยนแปลงตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้สังเคราะห์

เมื่อเปรียบเทียบผลของกำลังไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นกระตุ้น 275 นาโนเมตร (กราฟที่ 3.3.2) พบว่าความเข้มการเรืองแสงต่างกันชัดเจน ตามลำดับ



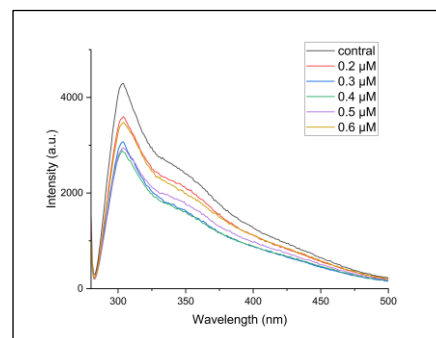
กราฟที่ 3.3.1 กราฟแสดงการเรืองแสงที่ความยาวคลื่นกระตุ้น 265–365 นาโนเมตร (PL excitation)



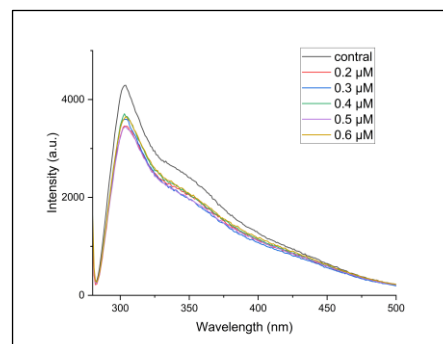
กราฟที่ 3.3.2 กราฟแสดงผลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์ต่อความเข้มการเรืองแสงของคาร์บอนดอท

3.4 การตอบสนองต่อไอออนโลหะหนัก

เมื่อเติม Fe^{2+} และ Zn^{2+} ที่ความเข้มข้น 0.2–0.6 ไมโครโมลาร์ ความเข้มการเรืองแสงลดลงต่อเนื่องตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น โดยตำแหน่ง emission peak ไม่เปลี่ยนแปลง สอดคล้องกับกลไก fluorescence quenching ที่ระดับพื้นผิวอนุภาค ทั้งนี้ Fe^{2+} ให้ประสิทธิภาพการดับแสงสูงกว่า Zn^{2+} อย่างชัดเจน



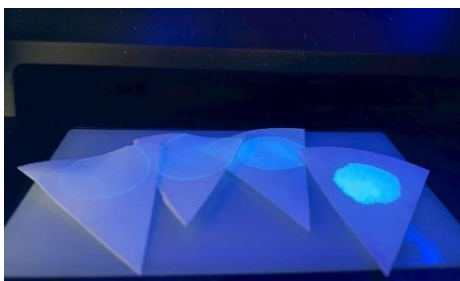
กราฟที่ 3.4.1 กราฟแสดงการตอบสนองของความเข้มการเรืองแสงต่อไอออน Fe^{2+}



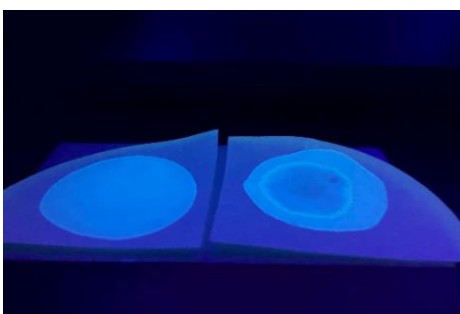
กราฟที่ 3.4.2 กราฟแสดงการตอบสนองของความเข้มการเรืองแสงต่อไอออน Zn^{2+}

3.5 ผลการพัฒนาและทดสอบเซนเซอร์กระดาษร่วมกับเว็บแอปพลิเคชันวิเคราะห์ค่าสี RGB

เมื่อนำคาร์บอนดอทมาเคลือบบนกระดาษกรอง Whatman พบว่า เซนเซอร์คงสภาพการเรืองแสงได้ดีภายหลังจากการอบแห้ง (ภาพที่ 1) สามารถแสดงผลการตรวจจับได้ภายใน 3–5 นาที หลังหยดสารตัวอย่าง และสามารถแยกแยะความแตกต่างของระดับการปนเปื้อนได้ด้วยตาเปล่าภายใต้แสง UV (ภาพที่ 2) ซึ่งเพียงพอสำหรับใช้เป็นเครื่องมือคัดกรอง (screening tool) เบื้องต้นในภาคสนาม นอกจากนี้ยังพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับวิเคราะห์ค่าสี RGB จากภาพถ่ายกระดาษเซนเซอร์ เพื่อแปลงการเปลี่ยนแปลงของการเรืองแสงให้เป็นค่าสีเชิงตัวเลข เป็นต้นแบบระบบตรวจวัดโลหะหนักแบบพกพาต้นทุนต่ำ



ภาพที่ 1 การเรืองแสงบนกระดาษในแต่ละความเข้มข้น



ภาพที่ 2 การเปรียบเทียบก่อนและหลังเติมโลหะหนัก

4. สรุปและอภิปรายผล

4.1 อภิปรายผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ FTIR (กราฟที่ 3.1) พบว่าคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากกากถั่วเหลืองมีหมู่ฟังก์ชัน OH , C=O , C-O และ C-N บนพื้นผิว ยืนยันว่ากากถั่วเหลืองใช้เป็นสารตั้งต้นสังเคราะห์คาร์บอนดอทได้สำเร็จ

จากการทดลองเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าในการสังเคราะห์ (กราฟที่ 3.2–3.4) พบว่าตัวอย่างที่ 500 วัตต์ ให้ค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มการเรืองแสงสูงสุด โดยตำแหน่ง emission peak คงที่ที่ประมาณ 300 นาโนเมตรในทุกเงื่อนไข แสดงว่ากำลังไฟฟ้ามีผลต่อความเข้มการเรืองแสงมากกว่าตำแหน่งพีค

จากการทดสอบกับไอออนโลหะหนัก (กราฟที่ 3.4.1 และ 3.4.2) พบว่า Fe^{2+} และ Zn^{2+} ทำให้ความเข้มการเรืองแสงลดลงต่อเนื่องตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น โดย Fe^{2+} ให้ประสิทธิภาพการดับแสงสูงกว่า Zn^{2+} อย่างชัดเจน

จากการทดสอบเซนเซอร์กระดาษ (ภาพที่ 1–2) พบว่าคาร์บอนดอทที่เคลือบบนกระดาษกรอง Whatman ยังคงตรวจจับการเปลี่ยนแปลงจากไอออนโลหะหนักได้ สอดคล้องกับผลในสารละลาย และเว็บแอปพลิเคชัน RGB ที่พัฒนาขึ้นสามารถแปลงผลนี้เป็นค่าเชิงตัวเลขได้

4.2 สรุปผลการทดลอง

คาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากกากถั่วเหลืองด้วยวิธีไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 250, 380 และ 500 วัตต์ มีหมู่ฟังก์ชัน OH , C=O , C-O และ C-N บนพื้นผิว โดยกำลัง 500 วัตต์ ให้สมบัติการเรืองแสงดีที่สุด คาร์บอนดอทตอบสนองต่อไอออนโลหะหนัก Fe^{2+} และ Zn^{2+} ผ่านกลไก fluorescence quenching โดย Fe^{2+} มีประสิทธิภาพการดับแสงสูงกว่า Zn^{2+} และสามารถต่อยอดเป็นเซนเซอร์กระดาษร่วมกับเว็บแอปพลิเคชันวิเคราะห์ค่าสี RGB ได้สำเร็จ แสดงศักยภาพในการพัฒนาเป็นระบบตรวจวัดโลหะหนักต้นทุนต่ำที่ใช้งานได้จริง

ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาค่าคงที่ Stern–Volmer และคำนวณค่าขีดจำกัดการตรวจวัดต่ำสุด (LOD) เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงปริมาณของระบบตรวจจับ ควรทดสอบการตอบสนองต่อไอออนโลหะหนักชนิดอื่น เช่น Pb^{2+} , Cd^{2+} และ Hg^{2+} เพื่อประเมินความจำเพาะของเซนเซอร์ ควรศึกษาผลของค่า pH และทดสอบกับ



ตัวอย่างน้ำเสียจริงเพื่อประเมินการใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง และควรพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันวิเคราะห์ค่าสี RGB ให้สามารถแปลงผลเป็นความเข้มข้นเชิงปริมาณได้ เพื่อยกระดับจากเครื่องมือคัดกรองเชิงคุณภาพสู่อุปกรณ์ตรวจวัดภาคสนามที่ใช้งานได้แบบครบวงจร

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือของอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขจุดบกพร่องต่าง ๆ มาโดยตลอด ขอขอบคุณผู้อำนวยการโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย ปทุมธานี ที่อนุญาตให้ใช้สถานที่และดำเนินโครงการ และขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาพิเศษจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เมตตาอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือวิเคราะห์ และคำแนะนำทางเทคนิคตลอดการทำโครงการ

เอกสารอ้างอิง

Baker, S. N., & Baker, G. A. (2010). Luminescent carbon nanodots: Emergent nanolights. *Angewandte Chemie International Edition*, 49(38), 6726–6744.

Dai, D., et al. (2022). Structure-dependent fluorescence properties of carbon dots. *Diamond and Related Materials*, 126, 109076.

Shibata, H., Abe, M., Sato, K., Uwai, K., Tokuraku, K., & Imori, T. (2022). Microwave-assisted synthesis and formation mechanism of fluorescent carbon dots from starch. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 3, 100218.

Soni, H., Jain, V., Ballal, S., Ariffin, I. A., Chahar, M., Saini, S., et al. (2024). From structure to sensing: Molecular mechanistic insights into plant-

derived carbon dots for heavy metal ion detection. *Nanomaterials*, 14, 1766.

Vyas, S. (2023). Recent advances in carbon dots for sustainable development applications. *Engineering and Technology for Sustainable Development*, 33(4), 49–55.

Wang, S., Sun, W., Yang, D. S., & Yang, F. (2019). Soybean-derived blue photoluminescent carbon dots. *Beilstein Archives*.

Wang, Y., & Hu, A. (2014). Carbon quantum dots: Synthesis, properties and applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 2, 6921–6939.

Zhu, S., Song, Y., Zhao, X., Shao, J., Zhang, J., & Yang, B. (2015). The photoluminescence mechanism in carbon dots. *Nano Research*, 8, 355–381.